

El tiempo físico

FÉLIX CERNUSCHI

DOCTOR EN FÍSICA graduado en Cambridge (Inglaterra) en 1938. Ingeniero civil recibido en la Universidad de Buenos Aires en 1932. Realizó estudios de perfeccionamiento e investigación en las universidades de Princeton, Harvard e Instituto Tecnológico de Massachusetts. Ejerció el cargo de Asesor científico de la UNESCO, al que renunció en 1950. Organizó el departamento de física de la Universidad de Puerto Rico. Ejerció la docencia en la Universidad de Tucumán (1940-43). En 1944 se trasladó a Montevideo donde fue nombrado profesor e investigador en el Observatorio Astronómico. Catedrático de la Univ. de Montevideo (1950-55). En la actualidad es director del Dep. de Física y profesor de esta materia en la Univ. de Bs. As. Autor de más de 40 trabajos científicos y 60 publicaciones sobre temas de enseñanza, divulgación de la ciencia y estructuración universitaria.

I. INTRODUCCIÓN

EL material primario sobre el que se estructura la física está constituido por las percepciones sensoriales correspondientes al sector de la experiencia humana que llamamos universo físico; es decir, el constituido por los objetos inanimados y sus diversos fenómenos. Los conceptos de espacio y tiempo son básicos para la descripción de los procesos físicos. Estos conceptos son difíciles de definir en función de otros más elementales. Por este motivo, han sido y son tema de interminables discusiones filosóficas y metafísicas. Según Kant, el espacio y el tiempo son meras formas de nuestra intuición pura; es decir, que no son consecuencia de la experiencia. El concepto apriorístico kantiano de espacio es inadmisibles después del nacimiento de las geometrías no euclidianas; y, el del tiempo, a partir de la teoría de la relatividad de Einstein. Se puede definir el espacio, de acuerdo con Leibniz, como "el orden de las impresiones del mundo exterior, coexistentes". Es decir, que el concepto de espacio surge de la

interacción entre el sujeto y el mundo exterior. Mediante las impresiones sensoriales que el sujeto recibe de los objetos del mundo exterior al moverse con respecto a ellos, surge la idea de espacio. Algo análogo ocurre con el concepto de tiempo. Se pueden ordenar las diversas impresiones sensoriales espacialmente, como pertenecientes a objetos coexistentes y separados entre sí; y, también, ordenarlas sucesivamente, una después de otra. De este último procedimiento de ordenación surge el concepto de tiempo.

Los conceptos primeros de espacio y tiempo que el hombre adquiere como resultado de sus experiencias con el mundo exterior son, por lo dicho precedentemente, subjetivos, personales; pero no apriorísticos.

Sobre la base del espacio y del tiempo intuitivos no se puede construir la física. El conocimiento físico surge a medida que las apreciaciones cualitativas sobre el considerado mundo exterior, se convierten en determinaciones cuantitativas.

Hemos visto que de las experiencias individuales surge el concepto de espacio privado. Este concepto no es útil para la ciencia, que requiere conceptos intersubjetivos. El espacio físico e intersubjetivo es una abstracción del conjunto de espacios individuales. Mientras estos son anisótropos (es decir que sus propiedades dependen de la dirección), el espacio físico, el que usa el físico en la descripción de sus experimentos, es el resultado de una idealización de los distintos espacios privados; es homogéneo, continuo, isótropo y tridimensional. Las propiedades del espacio físico se determinan por las operaciones de medida y los instrumentos utilizados en ella. Estas operaciones implican algunas importantes hipótesis; por ejemplo, que el intervalo de distancia entre dos puntos de una barra rígida que se use para medir, no varía con la velocidad con que se traslade de un lugar a otro, ni con la dirección del movimiento. Además, deben darse definiciones precisas de las características que deben cumplir los cuerpos rígidos que se emplean como instrumento de medida, y de las operaciones que deben efectuarse para determinar el número que corresponde a cada medición.

Surge, por lo tanto, que las propiedades del espacio dependen de las propiedades de los cuerpos que usamos para medirlo. Vemos también, por lo expuesto, que solamente tiene sentido físico el espacio relativo: podemos sólo determinar distancias de unos cuerpos con respecto a otros que se toman como puntos de referencia. Además, como lo hiciera notar Poincaré, si todas las dimensiones de los objetos que se encuentran en el espacio que nos rodea (inclusive nosotros mismos) y, por supuesto, los

El tiempo físico

instrumentos de medida, redujeran o aumentaran el tamaño y sus distancias recíprocas en la misma proporción, no podríamos percibir el cambio. Análogamente, si el ritmo y velocidad de todos los movimientos, inclusive nuestro pulso, y los latidos del corazón, aumentaran o disminuyeran en un factor constante, no podríamos tampoco determinar científicamente la correspondiente alteración. Vemos claramente que tanto el espacio como el tiempo son, en física, relativos. Sobre este importante punto volveremos a insistir más adelante.

La geometría física, como toda teoría física, se basa en un conjunto de postulados —que relacionan diferentes símbolos— y de definiciones operacionales de los símbolos que representan entidades observables. Cuando las conclusiones lógicas de los postulados, referentes a figuras geométricas, pueden comprobarse empíricamente en las respectivas figuras geométricas construidas concretamente con elementos físicos, se dice que la correspondiente geometría es adecuada para describir el espacio físico. Durante siglos se creyó que la única geometría física era la de Euclides, debido a que sus conclusiones habían sido verificadas con gran aproximación en todos los experimentos pertinentes. De allí que Kant llegara a creer que dicha geometría era la única posible, por considerarla inherente al razonamiento humano. En la primera mitad del siglo pasado surgieron las primeras geometrías no euclidianas, demostrando que la geometría de Euclides no era la única posible. De acuerdo a la teoría general de la relatividad de Einstein, resulta más conveniente, para describir el espacio cósmico, la geometría de Riemann.

Con el concepto de tiempo que surge de la ordenación de las impresiones sensoriales en sucesión, se pueden hacer consideraciones en parte similares a las indicadas con respecto al del espacio.

Hemos considerado conveniente referirnos brevemente al concepto de espacio porque, como veremos más adelante, está íntimamente vinculado al del tiempo. La descripción de los sucesos físicos se efectúa, de acuerdo con la teoría de la relatividad, en el espacio-tiempo de Minkowski, en el que cada suceso está representado por las tres coordenadas espaciales correspondientes, siendo la cuarta coordenada i.c.t.; en la que $i = \sqrt{-1}$, $c =$ velocidad de la luz, y $t =$ tiempo. Por consiguiente, el espacio y el tiempo están íntimamente ensamblados.

II. TIEMPO PERSONAL Y TIEMPO FÍSICO

La ordenación de las impresiones sensoriales en sucesión, es decir, una después de otras, nos proporciona la primera noción de tiempo. Si todo el Universo y nosotros mismos fuéramos estáticos, tendríamos una única impresión sensorial de diversos objetos inmóviles ordenados espacialmente. En tal Universo nada podría acontecer. Sin movimiento y sin cambio no habría noción de tiempo.

No solamente para la ciencia, sino también para la vida en sociedad, no sería suficiente con la mera ordenación de los sucesos. Es indispensable poder valorar los distintos intervalos de tiempo. Para esto el hombre dispone de ciertos procesos vitales rítmicos, como por ejemplo los latidos del corazón; y de otros fenómenos externos como la sucesión de los días y las noches y los intervalos de la estaciones, que le permiten estimar la duración de intervalos de tiempo. Fue precisamente mediante el empleo de su pulso que Galileo pudo descubrir, al observar las oscilaciones de un candelabro que pendía de un techo, el isocronismo de las oscilaciones pendulares. Volveremos más adelante a referirnos a este importantísimo descubrimiento de Galileo.

Las estimaciones personales, sin instrumentos especiales, de la duración de intervalos de tiempo, como las primeras apreciaciones de distancias, están afectadas por diversos e imponderables factores individuales. De allí el dicho popular de que el tiempo es relativo (cuando estamos intensamente ocupados o cuando nos encontramos en agradable compañía, nos parece que el tiempo pasa mucho más rápidamente que cuando padecemos, por ejemplo, de un fuerte dolor de muelas). Como hemos visto, cada persona se forma, a través de sus experiencias, un concepto personal de espacio; análogamente, también adquiere una noción personal de tiempo.

Tanto para la vida en sociedad como para la ciencia, hemos visto que de los distintos espacios individuales fue preciso construir por abstracción un espacio intersubjetivo o físico. También es necesario, sobre las diversas apreciaciones personales de duración de intervalos de tiempo, establecer arbitrariamente un tiempo intersubjetivo, social o físico. Sin un tal tiempo no se podrían desarrollar y coordinar las distintas actividades sociales ni construir la ciencia. Sin el tiempo físico no podría vivir el hombre en sociedad.

El tiempo físico

¿Qué características tiene el tiempo físico? El tiempo físico depende de los instrumentos que se utilicen para medirlo; es decir, de las leyes que rigen el comportamiento de los relojes.

La determinación de la igualdad de duración de dos intervalos de tiempo parecería que es mucho más compleja que la determinación de la igualdad de la distancia entre dos pares de puntos distintos. En efecto: decimos que la distancia entre A y B es igual a la distancia entre C y D, cuando la lectura efectuada con una regla rígida de la distancia AB es igual a la lectura que se obtiene cuando la misma regla mide la distancia CD. Podemos repetir estas operaciones todas las veces que deseamos. En cambio, no es posible volver a medir un intervalo de tiempo pasado. Debemos tener presente que al trasladar la regla de la posición del segmento AB a la correspondiente al CD podría haber cambiado la dimensión de la misma (p. e. por diferencia de temperatura, campo gravitatorio, etc.). Se postula que las características métricas de la regla no cambian con las traslaciones. Análogamente, debemos admitir que la marcha del reloj que usamos no cambia con el tiempo y, de esta manera, podemos comparar duraciones de intervalos de tiempo en épocas diferentes.

III. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICIÓN DEL TIEMPO

La historia de la evolución de los instrumentos de medida del tiempo es sumamente interesante, tanto para la ciencia como para la filosofía. Los movimientos aparentes cíclicos de las estrellas y el Sol proporcionan medios para medir el tiempo, calcular las estaciones, determinar la duración del día, del año, etc. En esos movimientos cíclicos reside el origen del concepto de ley física.

La rotación de la Tierra constituye un magnífico reloj natural. De las observaciones astronómicas surgen tres clases principales de tiempo: solar aparente, solar medio, y sideral. El día solar aparente es el tiempo que separa dos tránsitos inferiores sucesivos del sol por el meridiano de un lugar. El tiempo solar aparente es igual al ángulo que forma el plano meridiano que contiene al sol con el meridiano del lugar, medido en tiempo, más doce horas. El día solar se divide por conveniencia en 24 horas, comenzando con la hora cero a medianoche. A mediodía el sol atraviesa la parte superior del meridiano del lugar, y la sombra que pro-

yecta sobre un gnomon, en ese instante, define la dirección norte-sur en el lugar considerado.

Los relojes de sol indican el tiempo solar aparente.

Al conocerse con más precisión el movimiento de nuestra Tierra en su órbita alrededor del sol, se vio que el movimiento aparente del sol no era un reloj muy exacto. Con el objeto de obtener un reloj mejor, se definió el tiempo solar medio. Para evitar la falta de uniformidad del recorrido aparente del sol real, se considera un sol ficticio que se mueve con movimiento uniforme sobre el ecuador. Los días del sol medio tienen igual duración durante todo el año, lo que no sucede con los días del sol verdadero. A mediodía medio, el sol medio pasa por la parte superior del meridiano, siendo en ese instante las doce horas medias.

Como tiempo civil se usa el tiempo solar medio.

Se llama ecuación del tiempo a la diferencia en ángulo horario, en cada instante, entre el sol real y el ficticio.

Si los relojes en cada país se regularan de acuerdo al tiempo civil local de cada lugar, habría gran variedad de tiempos diferentes, para el mismo instante, de acuerdo a los meridianos de los correspondientes lugares. Únicamente los relojes a lo largo del mismo meridiano marcarían el mismo tiempo. Para evitar este grave inconveniente se han creado las zonas temporales o husos horarios. Dentro de cada una de ellas se mantienen los relojes sincronizados indicando en cada instante la misma hora. La zona cero está limitada por dos meridianos a $7^{\circ} 30'$ al este y al oeste del meridiano de Greenwich, respectivamente. Los husos horarios se numeran, a partir del anterior, positivamente hacia el oeste y negativamente hacia el este del meridiano de Greenwich.

El tiempo sideral es el que más se usa en astronomía y para determinar el tiempo civil. El intervalo de tiempo entre dos pasos sucesivos de una estrella por el meridiano superior de un lugar mide el día sideral. Este lapso mide el tiempo de revolución de la tierra en torno de su eje. Su duración es 23hs., 56min., 4.099 seg. de tiempo solar medio.

De lo precedentemente expuesto surge que el tiempo se mide en base a un movimiento que se considera uniforme. Pero, ¿qué es movimiento uniforme?; aquel que recorre espacios iguales, o barre ángulos iguales, en tiempos iguales.

Estamos, pues, en un círculo vicioso. Para definir al tiempo necesitamos conocer qué es un movimiento uniforme; y para definir a éste necesitamos saber medir iguales intervalos de tiempo. Por lo dicho hasta aquí vemos que un reloj es un dispositivo que, por el conocimiento que

El tiempo físico

tenemos de las leyes que rigen su movimiento, suponemos que proporciona un movimiento uniforme circular. Por lo tanto, un movimiento es uniforme cuando es proporcional a otro que consideramos uniforme. Más adelante veremos cómo podemos salir del indicado círculo vicioso.

Creemos que por lo indicado hasta aquí, la noción de igualdad de intervalos de tiempo es función del desarrollo de la física. No se la puede dar de manera definitiva al comienzo, cuando se comienza a estructurar la física; en el progreso de ésta se descubren nuevas leyes, o se perfeccionan las conocidas que permiten definir de manera más satisfactoria la igualdad de dos intervalos de tiempo.

Como hemos visto, la rotación de la tierra constituyó durante mucho tiempo el reloj de más alta precisión. Determinado el día sideral, se lo divide, en la forma usual, en intervalos de horas, minutos y segundos. Cada uno de dichos intervalos se los mide por los correspondientes ángulos respecto a una determinada estrella. Los distintos intervalos de tiempo, por ejemplo, el segundo, se pueden determinar mediante distintos procesos físicos cuyas leyes se conocen: el período de oscilación de un péndulo de determinada longitud o de un resorte de definidas características; la cantidad de agua que escurre a través de un orificio de un recipiente, convenientemente especificado; por el número de oscilaciones de un diapasón de estipulada forma y material; el lapso empleado por la luz para recorrer una determinada distancia, etc. Hemos indicado algunos de los procesos que pueden servir de base para medir el tiempo. Las leyes que rigen a estos procesos se conocen con creciente aproximación a medida que progresa la física; es decir, por ejemplo, sus dependencias cuantitativas con respecto a la temperatura, la presión atmosférica, la aceleración de la gravedad, etc. Consecuentemente, la definición operacional de iguales intervalos de tiempo se perfecciona a medida que la estructura general de la física se hace más coherente y precisa: es decir, es necesario especificar, para cada proceso particular, la temperatura, presión, etc., que deberá existir para que la medición de iguales intervalos de tiempo sea lo más precisa posible.

Algo análogo sucede con las definiciones operacionales de las demás magnitudes físicas.

La noción de igualdad de intervalo de tiempo se afianzará al aumentar el número de definiciones operacionales del mismo, basada cada una de ellas en procesos físicos diferentes y siempre que permitan alcanzar valores numéricos comparables. Las interconexiones existentes entre los distintos compartimientos de las ciencias físicas, permiten determinar el valor de una determinada cantidad por distintos procedimientos. En esto

reside la creciente organicidad y coherencia de los mismos y su capacidad de verificabilidad. Cuando una determinada característica física se supone que es el resultado de una única ley y que ésta solamente se manifiesta por la primera, es fácil ver, por razones epistemológicas, que no podemos afirmar que la consignada ley quede verificada experimentalmente. Muchas pseudociencias, como el psicoanálisis, están basadas, exclusivamente, en círculos viciosos de este tipo. Cuanto mayor es el número de caminos diferentes para determinar el valor numérico de una cierta cantidad, en nuestro caso el de un intervalo de tiempo, tanto más significativo resulta, desde el punto de vista científico, el valor hallado, dado que está verificado por varios procedimientos distintos.

Newton, al completar la obra iniciada por Galileo, crea los principios generales de la mecánica y concibe la ley de la gravitación universal, lo que permite desarrollar la mecánica celeste y, consecuentemente, calcular el movimiento de los astros. El éxito de las predicciones de la mecánica celeste ha sido sorprendente por su exactitud. Sin embargo, se han constatado algunas discrepancias entre las predicciones teóricas y las observaciones. Se hicieron todos los ajustes posibles, haciendo intervenir las perturbaciones provocadas por causas que en un principio no habían sido tenidas en cuenta; pero, a pesar de todo, ciertas discrepancias no pudieron anularse. Algunas de ellas, como, por ejemplo, el avance del perihelio de Mercurio, sirvieron de base a Einstein para verificar su teoría de la Relatividad General. Otra discrepancia importante constatada entre las predicciones de la mecánica celeste y la observación, es la siguiente: La Luna tiene en su órbita un movimiento uniformemente retardado con respecto a la posición que debería ocupar de acuerdo a la teoría. Para poder explicar este efecto hubo que admitir que la rotación de la Tierra no es exactamente uniforme; sino que, debido al frotamiento que las mareas producidas por la Luna ejercen en el fondo de los mares y las costas, se retarda, aunque muy lentamente, el movimiento de rotación terrestre. A su vez, esta acción de frenado modifica el movimiento de la Luna en su órbita. Un efecto similar, aunque más débil, se debe a las mareas producidas por el Sol. La Luna teórica (es decir, aquella cuyo movimiento corresponde exactamente a las leyes de la Mecánica Celeste en las que el parámetro tiempo se mide por la supuesta rotación uniforme de la Tierra) avanza con respecto a la Luna real debido a que el parámetro tiempo que aparece en las correspondientes ecuaciones se ha medido en tiempo sideral, es decir, el determinado por la rotación de la Tierra. Si hacemos que la posición de la Luna teórica coincida con la de la Luna real, se determina la correc-

ción que hay que introducir en la medida del tiempo sideral. Esta corrección es de 16,58 segundos por siglo. Como el movimiento de rotación de la Tierra es uniformemente retardado, al cabo de dos siglos el atraso es de un minuto con seis segundos y llegaría a ser de un día completo en 72 siglos. Este resultado es perfectamente compatible con el efecto combinado de las causas que hemos indicado. Vemos, pues, como con el progreso de las teorías físicas y el incremento de la precisión de las mediciones angulares se ha podido determinar el atraso que experimenta el reloj basado en la rotación de la Tierra y, consecuentemente, definir de una manera más exacta la noción de igualdad de intervalos de tiempo.

Se construyen relojes muy precisos utilizando la propiedad piezoeléctrica del cuarzo, descubierta por Pierre Curie y Paul Langevin. Si un cristal de cuarzo tallado convenientemente se somete a presiones, se engendra una diferencia de potencial eléctrico; recíprocamente, cuando se coloca una diferencia de potencial eléctrico en sus caras opuestas, se dilata o se contrae según el sentido de la diferencia. Cuando se excitan las caras opuestas de un tal cristal de cuarzo mediante una corriente alterna de igual frecuencia que una de las propias de vibración del cristal, se produce un estado de resonancia en el mismo. Para construir un reloj de cuarzo se conectan las caras metalizadas del mismo con un circuito eléctrico oscilante de igual frecuencia que una de las propias del cristal. Luego se pueden amplificar las oscilaciones y hacer funcionar una serie de agujas indicadoras del tiempo.

En la actualidad se está experimentando con los relojes atómicos. La marcha de estos relojes está regulada por una transición cuántica. Los relojes atómicos se usan especialmente para determinar las fluctuaciones en la marcha de los relojes controlados por cristales de cuarzo. Se considera que quizás la mejor transición cuántica para definir el segundo de tiempo sea la transición $(4,0) \rightarrow (3,0)$ del cesio con campo magnético cero; a la que le corresponde una frecuencia de 9.192.631.770 ciclos por segundo. De esta manera sería posible definir con alta precisión un intervalo de tiempo de 10^{-10} segundos.

El objeto de esta publicación es indicar conceptualmente qué es lo que se entiende por tiempo en Física. Por consiguiente, no entraremos en detalles constructivos de los diferentes tipos de relojes. Quizás, la forma más coherente de definir el tiempo físico sea mediante las ecuaciones de la mecánica celeste, de manera similar a la que hemos indicado para corregir la discrepancia entre teoría y observación en el caso de la Luna. Las coordenadas de las trayectorias de los cuerpos celestes se expresan

teóricamente en función de un parámetro t (tiempo). Podemos determinar el valor de este parámetro de manera tal que produzca coincidencia entre teoría y observación. De esa manera, podemos determinar el valor del parámetro t mediante diferentes y variados procesos. Si encontramos en todos los casos valores concordantes del parámetro t , implicaría: a) que las leyes de la mecánica son correctas y que han sido en cada caso adecuadamente aplicadas; b) que el tiempo queda definido cuantitativamente, libre de círculos viciosos como el indicado anteriormente.

Cuando no es posible obtener por el camino indicado la determinación, de una manera coherente, del parámetro t , significaría que la correspondiente teoría requiere ser reemplazada por otra o, en el mejor de los casos, modificada de manera adecuada.

IV. NOCIÓN DE TIEMPO EN FÍSICA RELATIVISTA

Un análisis crítico de los fundamentos de la física a través de su desarrollo, revela que los grandes jalones de su historia están caracterizados por reestructuraciones de sus principios básicos, reduciéndose en cada avance los presupuestos metafísicos. La física de Galileo presenta en sus fundamentos muchas menos hipótesis metafísicas que la de Aristóteles. Con Newton, la mecánica iniciada por Galileo adquiere una perfección que parecía insuperable. A pesar del celo de Newton por no admitir hipótesis innecesarias para la explicación de los fenómenos observables, en su obra genial "Principia Mathematica Philosophiae Naturalis" sostiene: "No defino tiempo, espacio, lugar y movimiento, como siendo conocidos por todos. Solamente debo observar que vulgarmente se conciben estas cantidades con relación a objetos sensibles. Y luego surgen ciertos prejuicios que, para quitarlos, será conveniente distinguirlos en absolutos y relativos, verdaderos y aparentes, matemáticos y comunes". Luego indica cuál es el concepto de tiempo que, según él, debe usarse en física: "Tiempo absoluto, verdadero y matemático es el que fluye igualmente de él mismo y de su propia naturaleza; independientemente de cualquier causa externa y que, con otro nombre, se llama duración". Más adelante define el espacio absoluto, con respecto al cual se aplicaban exactamente sus principios: "El espacio absoluto, en su propia naturaleza, independientemente de todo objeto exterior, permanece siempre similar e inmóvil".

Las definiciones de espacio y de tiempo absolutos dadas por Newton están desprovistas de toda posibilidad de definiciones operacionales y, por

El tiempo físico

consiguiente, no tienen significado físico. Las famosas leyes de Newton son válidas para cualquier sistema de ejes galileanos (fijos con respecto a las estrellas lejanas o en movimiento rectilíneo y uniforme con respecto a ellas). No es posible de acuerdo a las leyes de Newton individualizar el espacio absoluto newtoniano. La noción de tiempo que se emplea en física no es el tiempo absoluto que no se puede medir, sino el tiempo indicado por los relojes a los que nos hemos va referido. Resulta, pues, que los prejuicios que Newton consideraba debían ser reemplazados por conceptos verdaderos (espacios y tiempos absolutos) no eran tales; sino que los perjudiciales prejuicios metafísicos eran precisamente los conceptos que innecesariamente introdujo en su genial obra. Se necesitó otro genio, Einstein, para aclarar definitivamente el carácter relativo del tiempo, depurando así a la física de presupuestos metafísicos innecesarios.

Durante los siglos XVIII y XIX, los físicos en general consideraron que la mecánica newtoniana era un modelo de perfección científica y que, consecuentemente, había que mecanizar los demás compartimientos de la física; es decir, explicarlos en base a las leyes de la mecánica. (Este programa se basaba, implícitamente, en presupuestos metafísicos que no tardarían en entorpecer el adelanto de la física). La teoría del campo electromagnético se explicó utilizando la teoría mecánica de los medios continuos. Se supuso que las ondas electromagnéticas y, por lo tanto, la luz se propagaban en un hipotético medio, el éter, que debía poseer fantásticas propiedades: masa nula, elasticidad perfecta, no presentar resistencia de rozamiento. Se podría, por lo tanto, determinar la velocidad absoluta de un observador determinando la velocidad de propagación de la luz con respecto a un sistema de coordenadas en el que el considerado observador esté fijo.

Hemos indicado que no es posible, de acuerdo a la dinámica newtoniana, determinar la velocidad de un sistema de coordenadas que se mueve con velocidad rectilínea y uniforme con respecto a un sistema de coordenadas fijo con relación a las estrellas lejanas. Resultaría, por lo indicado, que mediante la mecanización de la óptica sería posible realizar experimentos ópticos que permitirían determinar la velocidad de un sistema inercial con respecto a un sistema de coordenadas fijo con respecto al éter. Esto implica, evidentemente, una grave contradicción: mientras la mecánica newtoniana era necesariamente relativista (a pesar de la hipótesis metafísica innecesaria de Newton del espacio absoluto), mediante la mecanización de la propagación de la luz era posible definir el espacio absoluto. Esta asimetría entre la mecánica y la óptica mecanizada, que resul-

taba además antiestética, fue uno de los problemas fundamentales que se planteó Einstein en su genial análisis crítico de los fundamentos de la física clásica.

El experimento famoso de Michelson y Morley tuvo por objeto determinar si efectivamente la velocidad de propagación de un rayo luminoso en la dirección del movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, era igual o distinta a la de propagación en dirección perpendicular a la anterior. La hipótesis del éter exigía que dichas velocidades fueran diferentes. Los resultados de los experimentos efectuados por Michelson-Morley y muchos otros investigadores, no indicaron la hipotética existencia de un viento etéreo producido por el movimiento de traslación de la Tierra. La interpretación del resultado negativo del experimento de Michelson-Morley, la proporciona Einstein.

V. POSTULADOS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

La teoría especial de la relatividad de Einstein se basa en los siguientes postulados:

I) La velocidad relativa entre dos sistemas inerciales o galileanos no puede ser determinada por ningún experimento físico que realice un observador fijo en uno de ellos; es decir, que las leyes físicas tienen igual forma en cualquier sistema de coordenadas galileano. II) La velocidad de la luz de cualquier fuente en el vacío es una constante independiente del sistema inercial con respecto al cual se la determina.

Es fácil ver que, en realidad, el postulado II) no es completamente independiente del postulado I). Por otra parte, el postulado II) puede ser verificado experimentalmente.

Consideremos el siguiente caso: a) dos sistemas de ejes inerciales S y S' que coinciden en el instante $t = 0$ y que uno de ellos, S' , se desplaza con respecto al otro, con velocidad uniforme v a lo largo del eje común x ; b) que en el instante $t = 0$ en que los orígenes O y O' de los sistemas coinciden, se emite desde O una señal luminosa. De acuerdo a los principios básicos de la Teoría de la Relatividad, tendríamos que dos observadores fijos respectivamente en los sistemas de coordenadas S y S' , verían que la señal luminosa se propaga en ondas esféricas. En caso contrario, habría un hecho físico que permitiría determinar una diferencia entre S y S' mediante una ley física, lo que estaría en contra del principio de la Relatividad Espacial.

El tiempo físico

De acuerdo a lo expresado, podríamos escribir la ecuación del frente de onda luminosa en ambos sistemas de coordenadas, S y S':

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 \quad (1)$$

x, y, z y t son respectivamente las coordenadas de un punto en el frente de onda en el instante t, para un observador fijo en el sistema S; x', y', z' y t' son las cantidades análogas del mismo punto, medidas por un observador fijo en el sistema S'; c representa la velocidad de la luz que tiene igual valor en ambos sistemas de coordenadas.

De acuerdo a como se han definido los sistemas S y S' tenemos que:

$$y = y' ; \quad z = z' \quad y \quad x \neq x'$$

La igualdad (1) solamente se puede satisfacer si: $t \neq t'$

Surge por lo tanto que, de acuerdo con la Teoría de la Relatividad no solamente el espacio es relativo, sino que la medida del tiempo también depende del sistema de coordenadas inerciales en que se lo mide.

Concretamente, las ecuaciones de transformación que permiten pasar de las coordenadas S a las S', satisfaciendo la igualdad (1), se llaman ecuaciones de Lorentz y son las siguientes:

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ; \quad y' = y \quad ; \quad z' = z \quad ; \quad t' = \frac{t - \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

De acuerdo a la Teoría de la Relatividad, toda ley física debe ser invariante, es decir, mantener la misma forma al pasar de las coordenadas de un sistema inercial a las de otro mediante las ecuaciones (2). Es fácil ver que las ecuaciones de Lorentz (2) se reducen a las de Galileo cuando se admite que la velocidad de la luz c es infinita. También se nota de inmediato, de las ecuaciones (2) que la velocidad máxima relativa y que puede existir entre dos sistemas inerciales es la velocidad de la luz c. En caso contrario se obtendrían valores imaginarios para las coordenadas x', t'; lo que no tiene significado físico.

VI. ESPACIO - TIEMPO DE MINKOWSKI

De las ecuaciones (2) aparece claramente que el espacio y el tiempo no pueden ser definidos independientemente uno del otro; es decir, que resulta absolutamente imposible separar la medida del espacio de la del tiempo. Por lo tanto, las medidas del tiempo a que nos hemos referido anteriormente (como, por ejemplo, la del tiempo sideral) son relativas, dado que se definen en base a observadores fijos en nuestra tierra.

La física clásica está caracterizada por la invariancia de las medidas de una determinada longitud y de un intervalo de tiempo con respecto a todos los sistemas galileanos de coordenadas y la independencia total entre las coordenadas espaciales y el tiempo. En física relativista, en cambio, el parámetro tiempo, en un sistema de coordenadas, depende de las coordenadas espaciales y del parámetro tiempo en otro sistema de coordenadas, siempre que los sistemas de coordenadas no estén en reposo relativo.

La relación fundamental (1) y las ecuaciones de Lorentz, sugieren la conveniencia de tratar al parámetro tiempo como una nueva coordenada y de considerar un espacio de cuatro dimensiones, cuyas coordenadas sean: $x, y, z, i c t$. En este espacio, que fue propuesto por Minkowski, debido a la distribución de signos en la ecuación (1) y para homogeneizar a las cuatro coordenadas, es necesario representar en el cuarto eje no simplemente al parámetro t , sino a $i c t$. Las transformaciones de Lorentz adquieren una interpretación sencilla en el espacio de Minkowski. En efecto, las transformaciones de coordenadas que satisfacen a la ecuación (1) corresponden a una rotación del espacio cuatridimensional, consistente, como hemos indicado, en las tres coordenadas del espacio ordinario, más una cuarta coordenada imaginaria proporcional al tiempo. Cada miembro de la ecuación (1) representa el cuadrado de un vector $(x, y, z, i c t)$ en el espacio de Minkowski; obviamente el módulo de un vector es un invariante con respecto a las rotaciones del sistema de coordenadas.

Se llama suceso en física a lo que acontece en un determinado punto espacial y en un cierto instante. Es decir, que un suceso queda definido por las coordenadas x, y, z, t . Por consiguiente, un suceso se representa por el extremo de un vector en el espacio de Minkowski. El

El tiempo físico

cuadrado del módulo de la diferencia de los vectores representantes de dos sucesos con signo cambiado es:

$$-(x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 + c^2 (t_2 - t_1)^2 = s^2 \quad (3)$$

s es el intervalo entre dos sucesos y es invariante a través de las rotaciones de los ejes en el espacio de Minkowski; es decir, a través de las transformaciones de Lorentz. Estas son equivalentes a las transformaciones ortogonales del espacio de Minkowski.

La importancia del concepto de intervalo se comprende de inmediato. Para observadores en distintos sistemas inerciales que observen dos sucesos determinados encontrarán que las distancias en el espacio común serán diferentes y las distancias en la coordenada temporal también serán distintas; pero, en cambio, el intervalo como se ha definido más arriba, es un invariante para todos los observadores en distintos sistemas galileanos. En la actualidad, resulta pues, cómodo y ventajoso utilizar, en física, fórmulas en que intervengan los intervalos y no separadamente las distancias en el tiempo y en el espacio tridimensional.

Si el cuadrado del intervalo (3) es positivo, y se elige un sistema de coordenadas galileano S , de tal manera que los dos sucesos acontezcan en el eje x se tendrá, de acuerdo a (3):

$$s^2 = c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 \quad \text{y como} \quad s^2 > 0$$

resulta:
$$c^2 (t_2 - t_1)^2 > (x_2 - x_1)^2 \quad (4)$$

En otro sistema galileano S' , definido anteriormente, por la primera de las ecuaciones (2) es:

$$x'_2 - x'_1 = \frac{(x_2 - x_1) - v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5)$$

Para que los sucesos se produzcan en el mismo punto en S' , debemos tener $x'_2 - x'_1 = 0$; lo que implica, de acuerdo a (5):

$$x_2 - x_1 = v(t_2 - t_1) \quad (6)$$

Como, según (4):

$$x_2 - x_1 < c(t_2 - t_1) \quad (7)$$

de (6) y (7) tenemos que, $v < c$. Como el límite superior de las velocidades físicas es c , se comprueba que, en el caso que estamos considerando ($s^2 > 0$) es posible determinar una terna galileana S' que se mueve relativamente con una velocidad v respecto de la terna S , en la cual los sucesos se producen en el mismo punto del espacio. En síntesis, es posible, mediante una transformación adecuada de Lorentz (es decir, una determinada rotación de los ejes en el espacio de Minkowski) hacer nula la componente espacial del intervalo y reducir a éste a la componente temporal $c(t'_2 - t'_1)$. Vemos, pues, que la coincidencia espacial es un concepto relativo que depende del sistema inercial en que se encuentra el observador.

VII. SIMULTANEIDAD

Cuando el cuadrado del intervalo (3) es negativo en un sistema de coordenadas inerciales, mantendrá el mismo signo y el mismo valor absoluto en cualquier otro sistema inercial, dado que el intervalo es un invariante. En este caso, mediante las ecuaciones de transformación (2) y razonando en forma análoga a la anterior ($s^2 > 0$) es fácil ver que, mediante rotaciones de los ejes en el espacio de Minkowski se pueden encontrar sistemas inerciales cuyos observadores tengan para el considerado intervalo, entre dos sucesos A y B , una componente temporal positiva, nula o negativa. Para el sistema inercial en el que ésta componente temporal es nula, los dos sucesos, A y B , serán simultáneos. Si la componente temporal es positiva, indicará que el suceso A es anterior al B . En los sistemas inerciales, en los que sus correspondientes observadores obtienen para el intervalo de los sucesos A y B una componente temporal negativa, el suceso B será anterior al A .

Por lo expresado vemos que, cuando el intervalo (3) es negativo, la ordenación en el tiempo de los sucesos A y B depende de la velocidad relativa del sistema inercial, pudiendo invertirse la ordenación temporal o hacer que ambos sucesos sean simultáneos, si elegimos convenientemente la velocidad relativa del sistema inercial.

VIII. DILATACIÓN RELATIVISTA DEL TIEMPO

Sean (x, y, z, t) y (x', y', z', t') respectivamente las coordenadas de un suceso, en dos sistemas de coordenadas (S y S') tales que

El tiempo físico

los ejes x y x' coincidan; S' se desplaza en la dirección positiva del eje x con velocidad v ; los ejes y y z son respectivamente paralelos a los y' y z' . Como hemos visto, las relaciones (2) expresan las coordenadas (x', y', z', t') , en función de las coordenadas (x, y, z, t) . Análogamente, a partir de las ecuaciones (2) podemos expresar (x, y, z, t) en función de (x', y', z', t') , obteniéndose las ecuaciones:

$$x = \frac{x' + v \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \frac{t' + \frac{v \cdot x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8)$$

Un observador fijo en el sistema S , vería que el sistema S' se desplaza, a lo largo del eje x con una velocidad positiva ($+v$); mientras que un observador fijo en el sistema S' vería que el sistema S se mueve sobre el eje x' con una velocidad negativa ($-v$). Por lo tanto, por razones de simetría, resulta claro que se pase del conjunto de ecuaciones (2) al (8) cambiando el signo de la velocidad relativa v .

Consideremos una barra rígida inmóvil en el sistema S' y paralela al eje x' cuya longitud para un observador en este sistema es L' . Mediante las relaciones (8) podemos determinar cuál sería la longitud que a la misma barra le atribuiría quien la midiera desde el sistema S . Siendo x'_1 y x'_2 los extremos de la barra en S' podemos de (2) escribir:

$$x'_1 = \frac{x_1 - v \cdot t_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad x'_2 = \frac{x_2 - v \cdot t_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

El observador fijo en el sistema S debe determinar los correspondientes valores de los extremos de la barra en el mismo instante, para $t_1 = t_2$; por lo tanto, tenemos

$$L = x_2 - x_1 = (x'_2 - x'_1) \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = L' \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Es decir que, la longitud de la barra que se desplaza longitudinalmente con una velocidad v en la dirección del eje x , resulta contraída por

un factor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, cuando es medida desde el sistema de coordenadas

S . A este acortamiento relativístico se le llama la contracción de Lorentz.

Veamos ahora qué es lo que pasa con la medida del tiempo en los sistemas S y S' . Admitamos que a lo largo del eje x existe una serie de relojes que marchan al unísono, indicando, por lo tanto, la misma medida del tiempo en cada instante para un observador fijo en S ; sean estos relojes A_1, A_2, A_3, \dots . Supongamos que colocamos un reloj B en el origen de coordenadas del sistema S' , de igual marcha que los relojes A cuando el sistema S' no se mueve con respecto al S . Si en el instante $t = t_0$ el reloj móvil B se encuentra frente al A , e indican ambos el mismo tiempo, es decir que $t'_0 = t_0$, un intervalo de tiempo $\Delta t' = t'_1 - t'_0$ más tarde, cuando el reloj móvil B se encuentra frente al fijo, por ejemplo: A_5 , concordarán o no las lecturas de estos dos relojes?

De la última de las ecuaciones (8), teniendo en cuenta que las coordenadas del reloj B en el sistema S' son las mismas en los instantes t'_0 y t'_1 ; en nuestro caso $x'_0 = x'_1 = 0$, podemos escribir:

$$t_1 - t_0 = \frac{t'_1 - t'_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \Delta t \quad (10)$$

De la precedente relación surge que Δt , la diferencia en los tiempos indicados por los relojes A_5 y A_1 es mayor que la diferencia $\Delta t'$, entre las indicaciones del reloj B cuando se encuentre respectivamente frente a los relojes A_5 y A_1 . Vale decir, que el intervalo de tiempo $\Delta t'$, medido por el reloj B que viaja con la velocidad v con respecto a los relojes A ,

resulta multiplicado por el factor $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$, cuando es medido

El tiempo físico

por un observador fijo en el sistema S. Esta expansión del tiempo es lo que se llama dilatación relativista del tiempo. Por ejemplo, de acuerdo a la ecuación (6), si un reloj B pudiera moverse con respecto a los relojes A con la velocidad de la luz, para estos relojes el reloj B indicaría siempre el mismo tiempo. Es interesante notar que, si alguien pudiera partir de la Tierra en dirección a una determinada estrella en un cohete a la velocidad de la luz, la correspondiente distancia se movería con respecto al astronauta en sentido contrario con la velocidad de la luz, y de acuerdo a la contracción de Lorentz, sintetizada por la ecuación (5), dicha distancia se reduciría a cero y, como para un tal astronauta, por lo dicho anteriormente, el tiempo no transcurriría, tardaría un tiempo nulo en recorrerla. En Teoría de la Relatividad se prueba si una masa m_0 se mueve con una velocidad rectilínea y uniforme v con respecto a un observador en un sistema galileano, éste determinará que el valor de la masa no es m_0 , sino:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (11)$$

Por lo tanto, un objeto de masa pequeñísima que se moviera con velocidad igual a la de la luz con respecto al referido observador, adquiriría para él una masa infinita. Esto indica que la velocidad de la luz es un límite superior inalcanzable para los cuerpos con masa no nula. El hipotético cosmonauta que hemos considerado tendría que reducir su masa y la de su vehículo a cero para poder alcanzar la velocidad de la luz; es decir, deberían convertirse él y su vehículo en un fotón, o sea, un quantum de radiación. Sin llegar al caso extremo indicado, recomendamos hacer consideraciones análogas para vehículos espaciales que viajen con velocidades, por ejemplo, iguales a la mitad o tres cuartas partes de la velocidad de la luz.

La dilatación relativista del tiempo se ha verificado observacionalmente mediante experimentos sumamente precisos en partículas que se mueven transversalmente a altísima velocidad. De acuerdo a la Teoría de la Relatividad estas partículas, al emitir una onda, deberían presentar el llamado efecto Doppler transversal, el que sería motivado exclusivamente por la dilatación del tiempo. Los indicados experimentos han confirmado la predicción relativista.

Otra importante constatación que comprueba experimentalmente la dilatación relativista del tiempo, es la siguiente: en la actualidad, una partícula cargada o un grupo de tales partículas proveen el único reloj que puede moverse en el laboratorio con velocidades comparables a la de la luz. Se sabe que los mesones μ , cuya vida media medida en el sistema de coordenadas fijo al laboratorio, es $\Delta t = (2,15 \pm 0,07) \cdot 10^{-6}$ seg., pueden alcanzar la superficie de la Tierra desde alturas superiores a los 10 Km. a pesar de que su recorrido, en nuestro sistema de referencia, requiere alrededor de 3×10^{-5} seg. La explicación es que el tiempo transcurrido en el sistema de coordenadas que se mueve con el mesón (o sea aquel en el cual el mesón está en reposo) es, de acuerdo con (10):

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (12)$$

y para valores de v próximos al de la velocidad de la luz, Δt puede ser

menor que $\frac{1}{10} \Delta t$ (para $\frac{v}{c} > 0,995$, resulta de acuerdo con (12):

$$\Delta t' < \frac{1}{10} \Delta t).$$

IX. LA PARADOJA DEL RELOJ

Volvamos a considerar los sistemas inerciales S y S' que hemos definido precedentemente. Supongamos que en el sistema S tenemos dos relojes A y B perfectamente sincronizados. El primero en el origen de coordenadas y el segundo sobre el eje de las x a la distancia x_1 del origen. Admitamos que en el origen del sistema inercial S' haya un reloj C , de idéntica construcción que A y B , y que para $t = 0$, los relojes A y C coincidan y marquen el mismo tiempo; es decir que $t = t' = 0$. Después

de un tiempo $t_1 = \frac{x_1}{v}$ medido en S , el reloj B indicará, por supuesto,

el tiempo t_1 , y el reloj C estará pasando justamente por la posición de B .

El tiempo físico

En el momento de esta coincidencia, el reloj C indicará por ecuación (2) el tiempo

$$t'_1 = \frac{t_1 - \frac{v \cdot x_1}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (13)$$

y como $x_1 = v \cdot t_1$ tenemos:

$$t'_1 = t_1 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (14)$$

Por lo tanto, cuando se encuentran los relojes C y B, el primero indicará un atraso respecto al segundo de:

$$t_1 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right] \approx \frac{1}{2} t_1 \frac{v^2}{c^2} \quad (15)$$

Es decir, que un reloj en movimiento tiene una marcha más lenta.

Para un observador fijo en el sistema inercial S' , verá que los relojes fijos en S se mueven con respecto a su sistema con una velocidad $-v$. Mediante un razonamiento en un todo similar al que acabamos de efectuar y utilizando las relaciones (8) encontraríamos que los relojes fijos en S atrasarían, con relación a los que están fijos en S' , de la misma cantidad indicada en (15). Esta reciprocidad es una consecuencia inmediata del postulado fundamental de la Teoría de la Relatividad.

Einstein en su famosa publicación de 1905, expresa: "...si al reloj A se lo pone en movimiento con velocidad v a lo largo de la línea A B hacia B, al llegar a la posición del reloj B, los dos relojes no estarán

sincronizados, sino que el reloj A atrasa con respecto al B de $\frac{1}{2} t \cdot \frac{v^2}{c^2}$

(despreciando términos de orden superior), siendo t , el tiempo empleado en el viaje del reloj A hasta coincidir con el B. Surge de inmediato

que el mismo resultado se obtendría si el reloj A sigue en su viaje hasta coincidir con B una línea poligonal. Si asumimos que el resultado probado para una línea poligonal es también válido para una trayectoria curva, llegamos al resultado: "Si uno de los dos relojes sincronizados, en el origen de coordenadas, se mueve en una curva cerrada con velocidad constante y regresa al punto de partida después de un tiempo de t segundos, medido en el reloj que ha permanecido fijo, el reloj viajante

acusará un atraso de $\frac{1}{2} t \frac{v^2}{c^2}$ segundos".

Si aceptamos que todo movimiento es relativo, podríamos suponer que el reloj A ha permanecido fijo y que ha sido el reloj B el que efectuó el viaje y, al final del mismo, es decir, cuando A y B vuelven a coincidir, sería el reloj B el que atrasaría con respecto al A de la misma cantidad indicada. Vemos, pues, que en un caso A atrasaría con respecto a B y que también podríamos inferir que B atrasaría con relación a A.

En esto consiste la llamada paradoja del reloj. El razonamiento efectuado sería correcto si todo el contenido del universo fueran los relojes A y B, es decir, que no hubiera otros sistemas de referencia física. Pero existen las estrellas lejanas y con respecto a ellas podemos definir observacionalmente los sistemas inerciales y, por lo tanto, determinar si un reloj está fijo o no con respecto a un sistema inercial particular. Obviamente, que si el reloj A se encuentra fijo en un sistema inercial y si el B viaja según una trayectoria cerrada con respecto al A, el B no podrá estar inmóvil en ningún sistema inercial. Por consiguiente, no existe una simetría en la relatividad de los movimientos de B con respecto a A y de A con relación a B. La paradoja del reloj resulta, pues, de no distinguir, en el caso del experimento mental de los relojes A y B a que nos hemos referido, la diferencia físicamente observable a que son sometidos los relojes A y B. Al puntualizar la correspondiente diferencia observable, se resuelve, por lo menos cualitativamente, la paradoja.

Pasaremos a estudiar cuantitativamente en la medida del tiempo que surgirá de un viaje espacial de formulación sencilla. Supongamos que los relojes A y B se encuentran sincronizados en el origen de coordenadas de un sistema inercial S, y fuera de todo campo gravita-

El tiempo físico

cional; y que el reloj A, a partir del instante $t = t' = 0$, realiza el siguiente viaje a lo largo del eje x : de $t = 0$ a t_1 , se acelera con aceleración constante a hasta alcanzar la velocidad v_1 ; de t_1 a t_2 se decelera con aceleración $-a$ hasta anular su velocidad con relación a B; de t_2 a t_3 se acelera con aceleración $-a$ hacia B, hasta alcanzar la velocidad $-v_1$; de t_3 a t_4 se decelera con aceleración a hasta llegar a B, con velocidad nula. De lo expuesto vemos que debemos tener:

$$t_1 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3.$$

¿Qué mediciones de tiempo indicarán los relojes A y B cuando vuelvan a encontrarse?

Suponemos, además, que las marchas de los relojes A y B en un mismo sistema inercial son idénticas.

Para resolver este problema que está tan de moda en esta época de viajes espaciales y de novelas de ficción científica, tenemos que referirnos al postulado básico de Einstein de su Teoría General de la Relatividad, formulado en 1912.

Einstein aclaró que todos los procesos en cuerpos en movimiento en el campo gravitacional homogéneo de un laboratorio, podrían ser descritos de dos maneras diferentes: una, de acuerdo con Newton; se admite que un campo gravitacional uniforme y dirigido hacia abajo, produce una fuerza sobre una masa m igual a mg ; otra, del propio Einstein, según la cual se puede suponer que no existe el campo gravitacional: pero, en cambio, el laboratorio se encuentra en un sistema no inercial que se mueve hacia arriba con aceleración constante σ , con respecto a un sistema inercial. Es fácil ver que con ambos procedimientos se pueden describir con precisión los movimientos de los cuerpos en el considerado laboratorio. Así Einstein formuló su famoso principio de equivalencia: un campo homogéneo de gravitación es "equivalente" a un movimiento acelerado del laboratorio con respecto a un sistema inercial. Einstein emitió la hipótesis que en cualquier experimento que se realizara en el laboratorio, el efecto del campo gravitacional uniforme es equivalente siempre al que se produciría si el laboratorio se moviera hacia arriba con aceleración constante, igual a la de la gravedad, relativamente a un sistema inercial sin campo gravitacional.

El simple y genial juicio de "Equivalencia" de Einstein permite no solamente determinar todos los procesos mecánicos que podía explicar la teoría de Newton, sino también estudiar el efecto de la gravitación

en otros fenómenos como los ópticos, sobre los que se consideraba antes de Einstein que no eran influenciados por la gravedad.

De acuerdo al principio de Doppler, tenemos que, si una fuente luminosa emite luz de frecuencia f y se acerca a nosotros (o nosotros a ella) con una velocidad v nuestros instrumentos reciben una frecuencia f' dada por

$$f' = f \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (16)$$

Veamos ahora el efecto que produce la gravitación de una estrella, por ejemplo, en la frecuencia de la luz que emite. Supongamos que nos encontramos a una distancia L suficientemente grande de la superficie de una estrella. De acuerdo al principio de "equivalencia" podemos reemplazar el campo gravitacional de la estrella por un sistema de coordenadas E que se acelera hacia nosotros, que suponemos estar en un sistema inercial. En este sistema E , que suponemos, en el momento de emisión luminosa de la superficie estelar tiene velocidad nula, es donde debemos suponer colocados los instrumentos que determinan la frecuencia de la luz. Por lo tanto, tenemos que, cuando la luz es captada por nosotros después de recorrer la distancia L en un

tiempo $T = \frac{L}{c}$, el sistema E habrá adquirido la velocidad $v = \frac{a \cdot L}{c}$

Si reemplazamos este valor de v en (16) tenemos:

$$f' = f \left(1 + \frac{v}{c} \right) = f \left(1 - \frac{a \cdot L}{c^2} \right) \quad (17)$$

La diferencia del potencial gravitacional entre la superficie de la estrella y nuestra posición es $\Delta \varphi = a \cdot L$. Este potencial a la distancia L de la estrella, si esta distancia es suficientemente grande, puede

considerarse nula y, en la superficie de la estrella es: $\varphi = \frac{G \cdot M}{R}$; siendo

El tiempo físico

G la constante de gravitación universal, M la masa de la estrella y R su radio. De acuerdo con lo precedentemente expresado y (17) tenemos

$$f' = f \left(1 - \frac{G.M}{c^2 \cdot R} \right) \quad (18)$$

Recordando que $\lambda \cdot f = c$; donde $\lambda =$ longitud de onda, $f =$ frecuencia y $c =$ velocidad de la luz, de (18), se obtiene:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{G.M}{C^2 R} \quad (19)$$

Esta fórmula nos da el incremento de longitud de onda producido por la gravitación. Análogamente, podemos determinar el atraso producido por la gravedad en la marcha de un reloj.

Hemos indicado que el mejor reloj que podemos concebir es aquel cuya marcha es regulada por determinados saltos cuánticos; por lo tanto, la misma ley que regula la variación de frecuencia de un fotón será la que regirá la variación de marcha de un reloj.

Para resolver el problema que nos habíamos propuesto, referente a la diferencia de tiempo indicado por los relojes A y B, cuando A realiza el viaje descrito precedentemente, podemos aplicar el Principio de Equivalencia. Cuando el reloj A se acelera con respecto del sistema inercial con aceleración a , por el citado Principio de Equivalencia, podemos suponerlo en reposo en un campo gravitacional uniforme de aceleración $-a$, y al reloj B, fijo en el sistema inercial, debemos, en este caso, considerarlo cavendo libremente en el citado campo gravitacional. Así, resulta una diferencia de potencial gravitatorio variable entre la posición de A y la de B; el potencial gravitatorio decrece monótonamente con el tiempo con respecto al de A.

En el instante en que la diferencia de potencial gravitacional es $a \cdot x$, la relación entre la marcha del reloj B (dt') con respecto a la del A (dt) será, de acuerdo con la ecuación (17), y para $v \ll c$:

$$\frac{dt'}{dt} = \left(1 - \frac{a \cdot x}{c^2} \right) \quad (20)$$

Como la diferencia del potencial gravitacional es función del tiempo y : $x = \frac{1}{2} a t^2$, cuando el reloj A indique un tiempo t_1 , el reloj B indicará un tiempo:

$$t'_1 = \int dt' = \int_0^{t_1} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{a^2}{c^2} t^2 \right) dt = t_1 - \frac{1}{6} \frac{a^2}{c^2} t_1^3$$

$$\therefore \Delta t = t'_1 - t_1 = - \frac{1}{6} \frac{a^2}{c^2} t_1^3 \quad (21)$$

Para los otros tramos del viaje puede hacerse un razonamiento análogo al anterior, obteniéndose al encontrarse nuevamente los relojes A y B la siguiente diferencia temporal:

$$\Delta t = t' - t = - \frac{1}{3} \frac{a^2}{c^2} t_1^3 = - \frac{1}{3} \frac{v_1^2}{c^2} t_1$$

y como $t_1 = \frac{T}{4}$ siendo T el tiempo total medido en el reloj A, se tendrá:

$$\Delta t = - \frac{1}{3} \frac{v_1^2}{c^2} T \quad (22)^*$$

X. CONSIDERACIONES FINALES

Hemos indicado ya que los relojes más precisos serán aquellos que funcionen sobre la base de frecuencias bien determinadas para saltos cuánticos. Con el progreso de los lasers, que producen luz de una determinada frecuencia con un ancho de banda sumamente pequeño, se considera que

* Este resultado es válido solamente para el problema planteado y para $v \ll c$. Para el análisis de otros casos, el lector puede recurrir a las obras citadas en las referencias bibliográficas 3 y 7.

El tiempo físico

por este camino podrá llegarse a medir intervalos de tiempo del orden de 10^{-12} segundos.

Ultimamente, se han llegado a apreciar intervalos de tiempo de 10^{-16} segundos mediante el siguiente procedimiento: Se han podido medir las distancias recorridas en una emulsión fotográfica por un cierto tipo de mesones (π^0) desde su nacimiento hasta su muerte. Dicha distancia resultó ser del orden de 10^{-7} metros. Considerando que el mesón recorriera esta distancia con una velocidad cercana a la de la luz, resultaría que el tiempo empleado sería del orden de 10^{-16} segundos. La distancia con significado físico más pequeño es el diámetro de un núcleo de átomo, el que es del orden de 10^{-13} cms. La luz emplearía para recorrer esta distancia un tiempo de 10^{-24} segundos.

Vemos que no es posible dar una definición operacional para intervalos de tiempo tan pequeños como se desee. Aun es difícil poder imaginar cómo podría construirse un reloj sobre la base de la desintegración de mesones π^0 . ¿Será el tiempo una magnitud cuantificable, como lo son la carga eléctrica o la energía? Aunque se han hecho algunos intentos sobre la cuantificación del tiempo, este punto no ha sido aclarado todavía. Si supusiéramos que el límite superior de las frecuencias de ondas electromagnéticas fuera del orden de 10^{24} ciclos por segundo; es decir, que el período mínimo fuera de alrededor de 10^{-24} segundos, tendríamos que, aplicando la relación de Planck, energía = $h \cdot f$ (h = constante de Planck; f = frecuencia), un quantum de la frecuencia indicada poseería energía suficiente para crear un par, constituido por un protón y un antiprotón. Quizás la existencia de partículas elementales tenga conexión con la posible cuantificación del tiempo.

Para determinar la precisión con que se pueden medir pequeñísimos intervalos de tiempo, es necesario tener en cuenta el principio de incertidumbre de Heisenberg que expresa la imprecisión en la determinación del tiempo por la indeterminación en la energía que es, en el mejor de los casos, igual a la constante de Planck ($h = 6,6237 \times 10^{-27}$ ergio \times segundo). Es decir, $\Delta t \cdot \Delta E \cong h$. En procesos como los indicados de desintegración del mesón π^0 , existe un error inevitable en la determinación de la energía de desintegración y consecuentemente, en el período de vida del indicado mesón.

Pasaremos ahora a referirnos a otro aspecto fundamental del tiempo: la similitud que presenta con la entropía.

El contraste más tajante, tanto para el científico y el filósofo, como para cualquier persona normal, es el de pasado y futuro. El tiempo tiene una dimensión y un sentido.

Los principios de la dinámica han sido especialmente formulados para describir los movimientos de sistemas conservativos en los cuales las fuerzas son funciones de la posición y son derivables de una energía potencial que es, a su vez, función de las coordenadas espaciales y no del tiempo. Las ecuaciones del correspondiente sistema son ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden, en las que aparece el tiempo como variable independiente. Sus soluciones describen movimientos reversibles; es decir, si el tiempo cambia de sentido, la solución sigue satisfaciendo a las referidas ecuaciones diferenciales. Las ecuaciones de la dinámica son relaciones funcionales entre la masa, la distancia, la fuerza y el tiempo.

En el rítmico movimiento de los planetas tenemos uno de los más notables ejemplos de procesos reversibles, en los que las causas perturbadoras son prácticamente despreciables, sin llegar a ser nunca nulas. El parámetro tiempo que aparece en las fórmulas de la dinámica clásica puede asumir, como hemos dicho, valores positivos o negativos. Si viviéramos en un universo reversible, solamente nuestra conciencia podría permitirnos distinguir entre el pasado y el futuro. Pero el mundo físico no es reversible. La reversibilidad es un límite abstracto al que se acercan algunos fenómenos naturales, como los que hemos indicado, sin llegar a alcanzarlo con todo rigor.

La dirección que siguen en general los procesos del mundo inanimado, cuando se los deja libres a ellos mismos, es indicada por la segunda ley de la Termodinámica.

De acuerdo a la primera ley de la Termodinámica, es posible que en un proceso se transforme energía mecánica en calor y viceversa. La característica fundamental de los procesos irreversibles es que un sistema no puede volver a las condiciones iniciales sin que se produzcan algunos cambios en el medio que lo rodea. Para ser más explícitos indicaremos algunos casos concretos de procesos irreversibles. Dados, por ejemplo, dos cuerpos metálicos a distintas temperaturas, cuando se los pone en contacto, pasa calor del cuerpo más caliente al más frío; el proceso termina cuando las temperaturas se igualan. Para hacer pasar calor de un cuerpo frío a otro más caliente, se necesita el trabajo de una máquina determinada, como sucede en las heladeras eléctricas. Otro proceso irreversible se

El tiempo físico

obtiene cuando se mezcla, por ejemplo, pintura blanca con negra para obtener pintura gris; aunque ambas pinturas se encuentren a la misma temperatura. En síntesis, podemos decir que los procesos naturales inanimados tienden a la uniformidad, es decir, al desorden. El grado de desorden se mide por una función de estado que se llama entropía. Consecuentemente, se puede enunciar el siguiente principio: Todo proceso natural que se produzca entre los integrantes de un conjunto de sistemas físicos, aislado del resto del universo, tenderá a aumentar el desorden del indicado conjunto; o sea, su entropía. Por lo tanto la entropía, en los procesos naturales aislados crece siempre; y solamente permanece constante cuando se ha alcanzado el más completo desorden. La entropía tiende pues, hacia el caos que es su meta.

Eddington puntualizó que existe una gran similitud en las características esenciales del tiempo y de la entropía. En efecto, ambas magnitudes son escalares y tienen un único sentido de cambio. El estado de desorden alcanzado en un cierto proceso, podría ser considerado como una medida del tiempo. La propia expansión del universo podría constituir un gigantesco reloj cósmico. Por lo tanto vemos que en el mundo físico hay un criterio para distinguir entre el pasado y el futuro. Alguien llegó a sugerir que quizás los procesos irreversibles que se realizan en nuestros cerebros, son los que producen en nuestra mente el sentido del correr del tiempo.

Hemos indicado las semejanzas entre el tiempo y la entropía; para terminar, haremos algunas observaciones con respecto a las disimilitudes que existen entre ambas nociones.

Los seres vivos están caracterizados por un alto nivel de orden y de organización. La vida está caracterizada por la capacidad para resistir el crecimiento de la entropía. No solamente los seres vivos tienen capacidad para crear entropía negativa. Cuando el agua cristalizada en hielo, disminuye su entropía, pero cede al medio ambiente calor, que contribuye a aumentarla. Aunque la entropía del agua disminuya al constituirse en cristales, la entropía total (del agua cristalizada, más la del medio ambiente) tiende a aumentar. Un organismo vivo crece a partir del huevo fertilizado, aumentando el orden y la organicidad; es decir, reduciendo la entropía. Se podría medir la inteligencia humana por su capacidad para crear orden, es decir, reducir la entropía. La ciencia es un proceso de entropía decreciente. A medida que avanza aumenta el orden. Una ley científica condensa una cantidad infinita de información. Podríamos afirmar que,

entre dos teorías científicas, la mejor es a la que corresponde la menor entropía.

Por lo indicado precedentemente, vemos que existen procesos naturales que pueden producir incrementos negativos de entropía. ¿Cuáles son los procesos análogos con respecto al tiempo? No existe el proceso análogo que permita a un sistema rejuvenecerse aumentando la edad del medio que lo rodea. El tiempo inexorablemente sigue siempre una misma dirección: mientras que la entropía puede, por suerte, en algunos procesos importantísimos, seguir un camino opuesto. En caso contrario, no existirían la vida ni el progreso en las organizaciones humanas.

Además existe otra diferencia fundamental entre el tiempo y la entropía. Modernamente se expresa la entropía en función de la probabilidad del correspondiente estado; pudiendo, por consiguiente, presentarse el caso que un determinado estado de un sistema inanimado sea seguido por otro de menor entropía, aunque su probabilidad sea pequeñísima. La marcha del tiempo, es decir, la aceleración sucesiva de acontecimientos, no admite un tratamiento estadístico similar.

Hemos descrito las características fundamentales del concepto "tiempo físico" a través del tiempo. Dicha noción es una de las más importantes, no sólo para las Ciencias Físicas, sino también para la Epistemología y la Ciencia en general. De lo expuesto surge que el referido concepto depende, en cada etapa del desarrollo de la Física, no solamente de los correspondientes procedimientos de medida, sino también de la estructura de las teorías físicas. Como estas cambian, aumentando las interconexiones y la organicidad, a medida que avanzan hacia una unificación, también se modifican sus conceptos básicos. Éstos están necesaria e íntimamente relacionados con la estructura lógica de la teoría de la Física y las definiciones operacionales de los símbolos que representan cantidades observables y medibles. Es por eso que, para aclarar qué es lo que se entiende por tiempo en Física, hemos tenido que referirnos a algunas de las más importantes teorías físicas. *

* Deseo expresar mi agradecimiento a mi colaborador el Ing. Luis Bassani, por haber leído cuidadosamente las pruebas de imprenta y sugerido algunas importantes correcciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ BOREL, EMILE: *L'Espace et le temps*. París, Librairie Félix Alcan, (1922).
- ² BORN, MAX: *Einstein's theory of relativity*. Nueva York, Dover Publi., (1962).
- ³ COCHRAN, W.: *The clock paradox*. En: "Vistas in astronomy". London, etc., Pergamon, (1960), vol. 3, p. 78-87.
- ⁴ EDDINGTON, A.: *Space, time and gravitation*. Nueva York, Harper and Brother, (1959).
- ⁵ EINSTEIN, ALBERT: *Annalen der physik*. Leipzig, 17, 891. (1905).
- ⁶ EINSTEIN, ALBERT: *Annalen der physik*. Leipzig, 35, 898, (1911).
- ⁷ FOCK, VLADIMIR: *On the clock paradox*. En: "Vistas in astronomy". London, etc., Pergamon, (1960), vol. 3, p. 88-91.
- ⁸ FRANK, PHILIPP: *Relativity and its astronomical implications*. Massachusetts, Sky publ. corp., (c. 1943).
- ⁹ LENZEN, V.: *The nature of physical theory*. Nueva York, John Wiley and sons, (1931), p. 75-84 y 195-206.
- ¹⁰ LOEDEL, ENRIQUE: *Física relativista*. Buenos Aires, Ed. Kapelusz, (1955).
- ¹¹ MAGIE, WILLIAM FRANCIS: *A source book in physics*. Nueva York, McGraw-Hill book co., (1935), p. 33-34.
- ¹² MARKOWITZ, W.: *The atomic time scale*. En: "Ire transactions on instrumentation". I-11, n^o 3 y 4, p. 239, (1962).
- ¹³ MINEUR, H.: *Etude d'un concept fondamental de la science. Le temps*. Contribution Institut D'Astrophysique de París, S. A. N^o 106. (Fevrier-Marx, 1952).
- ¹⁴ WEYL, HERMAN: *Philosophy of mathematics and natural science*. Princeton, Princeton University press, (1949), p. 95-137.