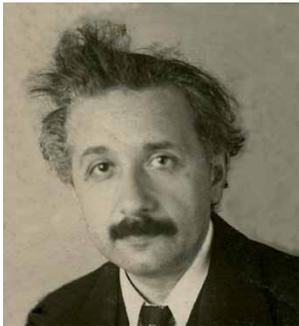


La teoría de la relatividad y su impacto en la ciencia moderna

J. Rubén Morones Ibarra

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL

rmorones@fcfm.uanl.mx



Albert Einstein 1879-1955

RESUMEN

La teoría especial de la relatividad es una de las teorías fundamentales de la física moderna. Su hipótesis fundamental de que el movimiento absoluto no existe y solo tiene sentido el movimiento relativo tuvo un impacto profundo en los conceptos de la física, cambiando nuestras ideas sobre el espacio el tiempo y la materia. Por otra parte, la teoría general de la relatividad es la moderna teoría de la gravitación. En ella el campo gravitacional deja de interpretarse a través de la fuerza que ejerce sobre las masas y es considerado desde el punto de vista de la deformación que produce en la estructura del espacio-tiempo.

PALABRAS CLAVE

Relatividad especial, Relatividad general, transformaciones de Lorentz.

ABSTRACT

The special theory of relativity is one of the fundamental theories of the modern physics. The basic assumption of special relativity is that only the relative motion has physical meaning; this assumption had deep consequences in our concepts of space, time and matter. On the other hand, the general theory of relativity is the modern theory of gravity. The gravitational field is not considered as a source of a force in this theory, but as something that deforms the space-time continuum.

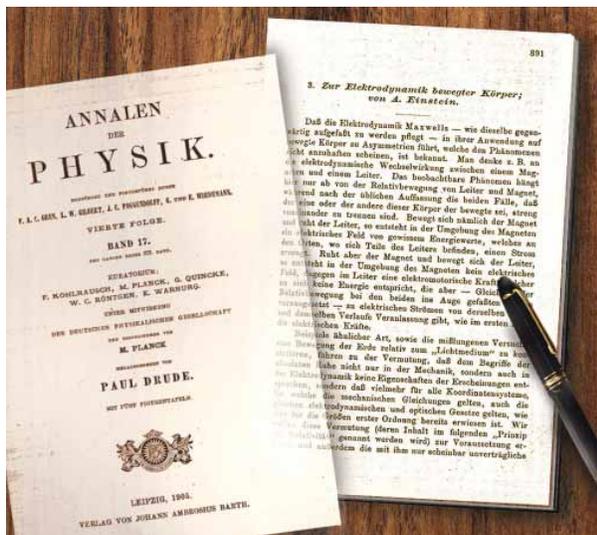
KEYWORDS

Special relativity, General relativity, Lorentz transformations.

INTRODUCCIÓN

Lo que actualmente se conoce como Teoría de la Relatividad de Einstein, es realmente una teoría dividida en dos partes. Una de ellas es la Teoría Especial de la Relatividad (TER) y la otra es la Teoría General de la Relatividad. La TER fue dada a conocer en el año de 1905 en la publicación científica sobre temas de física más importante de Alemania en esa época, la revista *Annalen der Physik*. La TER se originó del conflicto que se presentaba entre las dos teorías fundamentales de esa época: la mecánica y el electromagnetismo. El conflicto lo vino a resolver Einstein con la relatividad especial introduciendo conceptos nuevos, lo que condujo al derrocamiento de muchos otros supuestos que los físicos de la época no se atrevían a poner en duda.

El impacto de la TER estremeció las bases de la física Newtoniana, modificando los conceptos de espacio, tiempo, materia y energía establecidos



en la teoría de Newton. El concepto de tiempo para Newton es algo absoluto, que fluye permanentemente sin cambio y sin relación alguna con ninguna otra cosa. Similarmente, el espacio Newtoniano es un ente absoluto que permanece inmutable sin relación a nada externo. En la TER el espacio y el tiempo dejaron de ser absolutos y pasaron a ser cantidades físicas variables que dependen del marco de referencia utilizado para medirlas; se convirtieron, en este sentido, en cantidades relativas. Además el espacio y el tiempo pierden en la teoría de la relatividad su identidad individual para formar juntos una unidad conceptual: el espacio-tiempo. Las propiedades del espacio-tiempo están descritas por una nueva geometría, donde la regla para medir distancias no es la de Euclides sino la métrica de Minkowski.¹

La TER es uno de los pilares de la física moderna. Aún cuando se atribuye a Einstein la formulación de esta teoría, hubo contribuciones importantes de otros científicos, como Galileo, H. Lorentz y Henry Poincaré que establecieron algunos de los conceptos básicos en los que se apoya.² Galileo e Isaac Newton habían supuesto que las leyes del movimiento deberían satisfacer un principio de relatividad, es decir, que deberían ser las mismas para un observador en reposo y uno en movimiento. Las ideas de Einstein se basan en la hipótesis de que el movimiento absoluto no existe y que solo el movimiento relativo tiene sentido físico. En realidad, esta suposición, que es el fundamento del principio de relatividad, ya estaba implícita en los conceptos de observador en reposo y de observador en movimiento

que Galileo y después Newton habían establecido.

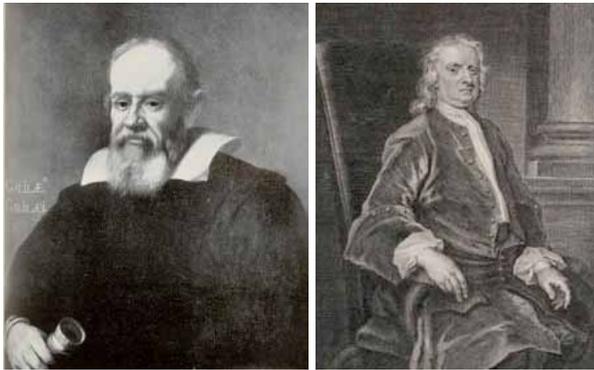
Einstein generalizó las ideas de Galileo y Newton, incluyendo no solo las leyes del movimiento sino todas las leyes de la física, en un principio de relatividad. Posteriormente Einstein buscó una generalización de su teoría logrando incluir sistemas de referencia no inerciales en un principio general de relatividad.

La TER es una teoría restringida que limita o circunscribe el estudio de los fenómenos físicos en marcos de referencia inerciales dejando fuera los marcos no inerciales y el fenómeno de la gravitación. No satisfecho con estas restricciones de su teoría, Einstein trabajó durante los años posteriores a 1905 en una teoría más amplia sobre la relatividad, a la que llamó Teoría General de la Relatividad. Esta teoría fue publicada en el año 1916 y constituye en la actualidad uno de los grandes logros del intelecto humano. En esta teoría general, el espacio-tiempo de la relatividad especial, quedará fundido, en una unidad indisoluble a la materia y la energía, configurando un nuevo ente, el Tejido Espacio-Tiempo-Materia. Ambas teorías de la relatividad, la especial y la general, serán descritas en sus aspectos más elementales en este artículo.

NECESIDAD DE UN MARCO DE REFERENCIA PARA DESCRIBIR LOS FENÓMENOS FÍSICOS

Consideremos el movimiento de una pelota que se lanza verticalmente hacia arriba dentro de un tren en movimiento con velocidad constante. Para un observador en el tren, la pelota se mueve sobre la línea vertical, primero hacia arriba y luego hacia abajo, pero sobre la misma línea. Sin embargo la descripción del movimiento de la pelota, dada por un observador en Tierra, que ve que el tren está en movimiento, es que esta sigue una trayectoria parabólica. Ambos observadores tienen razón en sus respectivas descripciones y lo que este experimento ilustra es que es necesario especificar cuál es el marco de referencia que estamos usando para describir un fenómeno.

Un marco de referencia inercial es aquel donde se cumplen las leyes de Newton, es decir, aquel en el cual una partícula sobre la que no actúa ninguna fuerza se mueve con velocidad constante. La TER es básicamente una teoría para relacionar las



Galileo Galilei
1574-1642

Isaac Newton
1642-1727

mediciones y observaciones entre dos marcos de referencia inerciales que se mueven con velocidad relativa constante.

El problema fundamental de relacionar observaciones entre dos marcos de referencia distintos ya se lo había planteado Galileo respecto a la mecánica. La pregunta que se hizo Galileo fue la siguiente: ¿Qué pasa si desde lo alto del mástil de un barco en movimiento sueltas una piedra? ¿Caerá la piedra en la base del mástil o se habrá desplazado respecto a la base?. Galileo realizó el experimento y encontró que la piedra caía verticalmente con respecto al barco, es decir, pegaba en el suelo en la base del mástil. Este resultado llevó a Galileo a establecer el principio de relatividad que lleva su nombre. El principio de relatividad de Galileo establece que las leyes del movimiento son las mismas para dos observadores inerciales que se mueven uno con respecto al otro. Una hipótesis implícita en este principio es que el tiempo es absoluto, lo que significa que todos los observadores medirán el

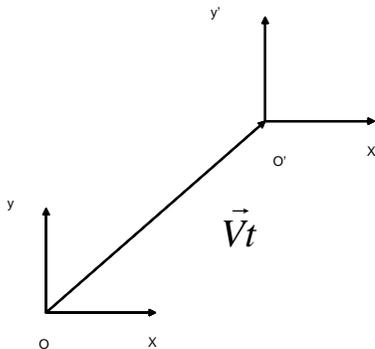


Fig. 1. Marcos de referencia inerciales en movimiento relativo. O' se mueve con velocidad constante \vec{V} respecto al marco de referencia O .

mismo intervalo de tiempo para cualesquiera de los dos sucesos.³

En sus trabajos sobre la mecánica, Newton enunció el principio de relatividad de Galileo de la siguiente forma: Las leyes de la mecánica son las mismas para todos los observadores en marcos de referencia inerciales, quedando las leyes de transformación de las coordenadas determinadas por las relaciones.

$$\begin{aligned} \vec{r}' &= \vec{r} - \vec{V}t \\ t' &= t \end{aligned} \tag{1}$$

Donde \vec{r} y \vec{r}' son las coordenadas de un mismo punto referidas a los marcos de referencia O y O' respectivamente y \vec{V} la velocidad del marco de referencia primado respecto al no primado, como lo muestra la figura 1. Además hemos supuesto que al tiempo $t = 0$ los orígenes de ambos sistemas de coordenadas, coinciden, ver figura 1.

Las ecuaciones dadas en (1), se conocen como Transformaciones de Galileo. Con estas reglas de transformación ocurre que las ecuaciones de la mecánica, permanecen invariantes de forma al pasar de un marco inercial a otro. Una hipótesis adicional es que la masa de la partícula es también, como el tiempo, un invariante absoluto. La invariancia de las leyes de la mecánica Newtoniana se puede probar de manera directa con la ley fundamental de la dinámica para una partícula: $\vec{F} = m\vec{a}$ en el marco de referencia sin primar. Por otra parte, de las ecuaciones (1),

$$\vec{a}' = \frac{d^2\vec{r}'}{dt'^2} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{a} \tag{2}$$

Puesto que ambas aceleraciones son las mismas, y la masa es invariante, entonces

$$m\vec{a} = m\vec{a}'$$

Lo que significa que la segunda ley de Newton no cambia de forma: $F = ma$ en el sistema no primado y $F' = ma'$ en el marco de referencia O' . La segunda ley de Newton puede entonces aplicarse igualmente a ambos observadores; este es el significado que se le da en física al concepto de invariancia de una ley frente a un tipo particular de transformación.

La generalización teórica de estas ideas las realizó Einstein estableciendo que todas las leyes

de la mecánica tienen la misma forma matemática en los marcos de referencia que se mueven unos con respecto a otros con velocidad constante. Einstein dio el nombre de Principio de Relatividad de Galileo, que ya hemos venido usando, a este postulado. El significado físico de este principio es que no es posible, mediante ningún experimento de mecánica, como dejar caer objetos, usar péndulos o resortes, etc. saber si alguien está en un marco de referencia en movimiento con velocidad constante o no. Otra manera de enunciar este principio es: todos los observadores en movimiento uniforme son equivalentes para la mecánica. Como un ejemplo particular, establecemos que se puede jugar billar dentro de un tren en movimiento con velocidad constante sin percatarnos de que se está moviendo. Posteriormente Einstein generalizó el principio de relatividad a todas las leyes de la física.

LOS FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS

Si ahora consideramos el caso del electromagnetismo, nos damos cuenta que la situación es diferente a la de la mecánica. Las ecuaciones básicas del electromagnetismo, conocidas como ecuaciones de Maxwell, contienen las constantes físicas μ_0 y ϵ_0 que, combinadas como

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c$$

dan la velocidad de la luz c . Esta cantidad debería ser constante, sin embargo, en un marco de referencia distinto, que se mueva con velocidad constante respecto al anterior, donde se mide la velocidad c para la velocidad de la luz, esta cantidad será diferente, como lo podemos ver de las ecuaciones (1). Si derivamos la primera ecuación en (1) respecto al tiempo, obtenemos la relación

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{V} \quad (3)$$

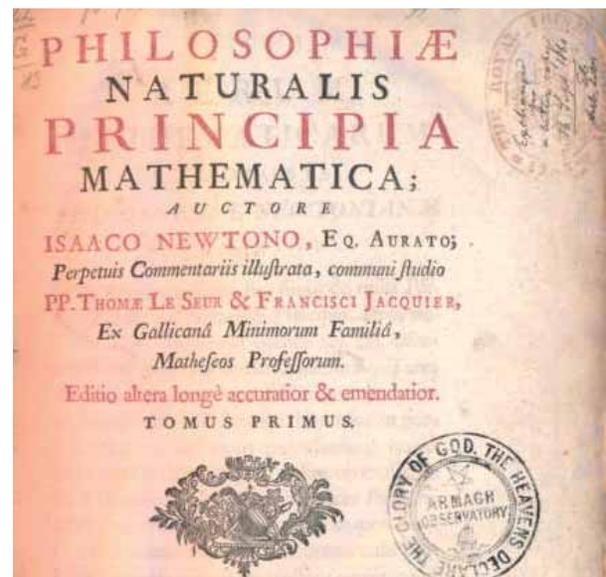
que es la ley galileana de suma de velocidades. Si consideramos un marco de referencia que se mueva con velocidad V respecto al “éter” (donde la velocidad de la luz se toma como c), la velocidad de la luz en este nuevo marco será $c' = c \pm V$.

Esto indica que la forma de las ecuaciones del electromagnetismo cambia al pasar de un marco de referencia a otro. En otros términos, el principio

de relatividad de Galileo se aplica a la mecánica pero no al electromagnetismo. Este hecho indica que un observador en reposo puede ser distinguido de un observador en movimiento con solo medir la velocidad de la luz, lo que equivale a aceptar que existe un sistema de referencia privilegiado donde la velocidad de la luz es c y donde las ecuaciones de Maxwell tienen una forma más simple; este marco de referencia fue llamado el sistema del “éter”. La conclusión de esto es que deberá entonces poder realizarse un experimento que permita detectar el éter. Entre los años 1881-1887 los físicos norteamericanos Michelson y Morley realizaron una serie de experimentos tratando de detectar la velocidad de la Tierra respecto al éter pero sus resultados fueron negativos: parecía que no existía tal éter.

La conclusión fue que el principio de relatividad de Galileo no podía ser válido para el electromagnetismo debido a que la velocidad de la luz tiene un valor fijo en las ecuaciones de Maxwell. Esto planteaba una especie de inconsistencia entre las dos teorías, lo cual, desde el punto de vista estético-científico, debería resolverse.

Una opción para buscar resolver la controversia entre la mecánica y el electromagnetismo es que aceptemos que el principio de relatividad tiene validez para ambas teorías, la mecánica y el electromagnetismo, pero las ecuaciones de Maxwell requieren ser modificadas. Esta última alternativa es muy drástica, porque el electromagnetismo es



una teoría muy bien establecida con resultados satisfactorios para prácticamente todos los fenómenos electromagnéticos observados.

El conflicto entre la mecánica Newtoniana y el electromagnetismo (las dos teorías fundamentales a principios del siglo XX), se puede mostrar también al considerar que la mecánica Newtoniana no establece ningún límite para la velocidad de ningún sistema u objeto. Es por lo tanto posible encontrar un marco de referencia donde cualquier objeto puede estar en reposo, incluyendo la luz. Pero las ecuaciones de Maxwell establecen que no es posible “ver” la luz en reposo, o en forma estacionaria. Este conflicto indica que una de las dos teorías es incorrecta.

Otra alternativa para resolver la incompatibilidad mencionada era suponer que la mecánica y el electromagnetismo obedecen un principio de relatividad pero que las ecuaciones de la mecánica Newtoniana requieren modificación y por lo tanto las ecuaciones de transformación que conectan los diferentes marcos de referencia en movimiento relativo con velocidad constante, las transformaciones de Galileo, no son correctas. Esta última opción es la que adoptó Einstein, estableciendo como guía para el desarrollo de su teoría los siguientes postulados:⁴

1. Todas las leyes de la física tienen la misma forma matemática en todos los sistemas de referencia inerciales.
2. La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores inerciales, independientemente del movimiento de la fuente.

Partiendo de estos postulados Einstein desarrolló una teoría cuyo impacto modificó nuestros conceptos de espacio, tiempo y masa. El primer postulado lo podemos llamar principio de relatividad de Einstein. Este nuevo principio de relatividad difiere en su forma matemática del de Galileo, ya que se apoya en un nuevo tipo de transformaciones, las transformaciones de Lorentz, pero ambos son idénticos desde el punto de vista conceptual y filosófico: la física debe ser la misma para todos los observadores inerciales. La expresión matemática de las transformaciones de Lorentz se puede encontrar en la referencia.¹

Después de estas ideas introducidas en la ciencia por Einstein, el concepto de invariancia de las leyes de la naturaleza ante ciertas transformaciones ha penetrado

en los fundamentos de la física, constituyendo una parte esencial de todos los desarrollos modernos en la física teórica. Todas las teorías físicas buscan apoyarse en los conceptos de simetría, es decir, en relaciones que permanezcan invariantes ante cierto tipo de cambios o transformaciones. Una teoría física que se desarrolle teniendo como principios básicos ciertas simetrías, se dice que es una teoría bella y se considera que posee una base sólida, siendo confiable desde sus orígenes, aunque, por supuesto, el experimento será quien diga la última palabra ya que este es el único criterio en la física para juzgar la validez de una teoría.

En las teorías clásicas (no relativistas) el tiempo es, como lo escribió Newton en su obra monumental Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, una especie de fluido que corre uniformemente sin conexión con nada externo. Similarmente, el espacio es un ente absoluto que permanece siempre inmutable sin relación a nada externo. La masa, por otra parte, es también un invariante absoluto, una cantidad que tiene el mismo valor para todos los observadores. En la TER, el espacio y el tiempo dejaron de ser absolutos y pasaron a ser cantidades físicas variables que dependen del marco de referencia utilizado para medirlas. El espacio y el tiempo se convierten en cantidades relativas en la teoría de la relatividad. Entre las consecuencias de esta teoría están las siguientes:

- a) Los relojes en movimiento marchan más lentamente.
- b) Los objetos en movimiento se contraen en la dirección de la velocidad.



Hendrik A. Lorentz 1853-1928.

- c) La masa de un objeto es función de la velocidad, aumentando con ésta.
- d) La materia se puede transformar en energía y viceversa.
- e) Ninguna señal puede viajar más rápido que la luz; la velocidad de la luz resulta ser la velocidad límite en el universo.

El postulado de la relatividad sobre la covarianza, o invarianza de forma de las leyes de la física (primer postulado) es un principio que impone restricciones sobre cómo deben ser las leyes de la física. Es una especie de meta-ley que nos exige que se respete la objetividad de los fenómenos naturales ya que estos no deben depender del sujeto que los observa. Este principio fundamental guió el pensamiento de Einstein; su firme creencia en el orden del universo, en la validez de la objetividad, la causalidad y el determinismo está reflejada en este principio. Cuando surge la mecánica cuántica, cuya interpretación filosófica conduce a la negación de estas características de las teorías clásicas, Einstein no la aceptó y esta fue una de las razones por las cuales su producción científica no tuvo el formidable desempeño que en su época juvenil.

Con los postulados de Einstein mencionados arriba, se encontró que las leyes del electromagnetismo son invariantes ante un nuevo tipo de transformaciones, las cuales llevan el nombre de Transformaciones de Lorentz. La mecánica Newtoniana dejó de tener validez, dando paso a una nueva descripción del movimiento y sus causas: la mecánica relativista, cuya formulación contiene nuevas ecuaciones de movimiento.

CONSECUENCIAS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

De las leyes de transformaciones de Lorentz pueden obtenerse formalmente los resultados que aparecen en esta sección. Aquí los obtendremos de una forma más intuitiva apoyándonos en el segundo postulado de la TER: la constancia de la velocidad de la luz.

Definimos un evento o suceso como un fenómeno cualquiera que ocurre en un lugar del espacio en un tiempo determinado.

Un resultado interesante que se puede obtener de manera sencilla de la hipótesis de la constancia de la velocidad de la luz, es la dilatación del



Fig. 2. De acuerdo con un observador en el tren la trayectoria seguida por la luz es la que indican las flechas dentro del vagón. El tiempo τ que tarda la luz en hacer el recorrido al techo y reflejarse es $\tau = \frac{2L}{c}$

tiempo. Consideremos un observador en un tren en movimiento, como se muestra en la figura 2.

Supongamos que de un reloj fijo en el tren sale un rayo de luz verticalmente hacia arriba y se refleja en un espejo en el techo, regresando al punto de partida en el reloj. El intervalo que registra el reloj para estos dos eventos es

$$\tau = \frac{2L}{C}$$

donde L es la distancia del reloj al espejo.

Para un observador en Tierra la trayectoria del rayo de luz es la que se muestra en la figura 3.

El intervalo de tiempo tiempo T para el observador en tierra es de acuerdo con la figura 3:

$$T = \frac{2\sqrt{L^2 + \left(V\frac{T}{2}\right)^2}}{C}$$

de donde se obtiene que

$$T = \frac{\frac{2L}{C}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

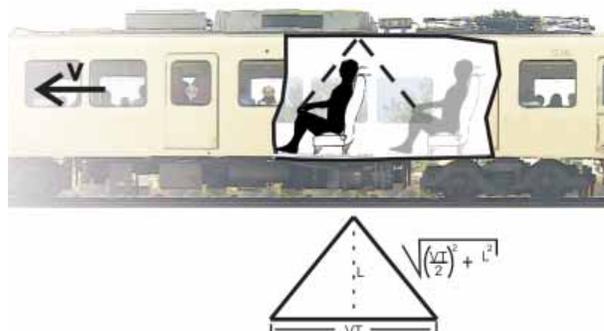


Fig. 3. Trayectoria que sigue el rayo de luz en el marco de referencia de un observador en Tierra.

Este resultado muestra la relatividad del tiempo, obteniéndose que el tiempo T medido por un observador, fijo en la Tierra, para dos eventos que ocurren en diferente lugar (la salida y la llegada del rayo de luz del reloj) es mayor que el intervalo de tiempo τ para estos dos eventos medidos en el mismo reloj (el observador en el tren). Como podemos ver $T > \tau$. El tiempo que se mide en el mismo reloj (en el mismo punto del marco de referencia) se conoce como tiempo propio. Notemos que la salida de la luz del reloj y la llegada de la luz después de reflejarse en el espejo del techo del tren, ocurren en el mismo lugar para el observador en el tren, pero no para el observador en Tierra.

Usando estos resultados se puede probar también que la simultaneidad es un concepto relativo. Consideremos dos observadores, O' y O , uno en Tierra y otro en el tren que se mueve con velocidad V hacia la derecha, como se muestra en la figura 4. Supongamos que se emiten dos señales, una por el observador A y la otra por B, ambos fijos dentro del tren, que llegan simultáneamente a O . De acuerdo con lo que O observa, ambas señales fueron emitidas simultáneamente, pero según O' , la fuente en A emitió la señal primero que B, ya que la velocidad de la luz es constante y el tren, al moverse a la derecha ocasiona que la distancia que recorre la luz de A a O sea mayor que la que recorre de B a O . Esto indica que lo que para el observador en el tren son eventos simultáneos, para el observador en Tierra no lo son.

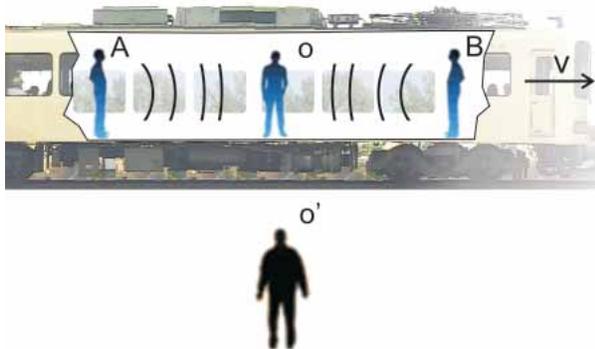


Fig. 4. La relatividad de la simultaneidad. Sea O' un observador fijo en la Tierra y O un observador en un tren moviéndose con velocidad V como se muestra en la figura. Al observador O le llegan ambas señales al mismo tiempo lo cual le permite concluir que ambas señales se produjeron simultáneamente. De acuerdo con O' primero se produjo la señal en A y después en B.

Un resultado interesante de la relatividad de la simultaneidad es que los objetos se contraen en la dirección del movimiento, que en realidad se debe a la relatividad del tiempo que ya encontramos. La manera de verlo es considerando una regla en movimiento paralelo a su longitud. Si un observador que ve que la regla se mueve quiere medir su longitud, deberá hacer marcas simultáneamente en los extremos de la regla, las cuales quedaran fijas en su marco de referencia. Pero debido a la relatividad de la simultaneidad, un observador fijo en la regla se dará cuenta que el observador que ve que la regla se mueve marcó primero el extremo que está en la dirección del movimiento y después el extremo de atrás, por lo cual medirá una longitud más pequeña que la de la regla en reposo. Esto es lo que se conoce como la relatividad del espacio; todas las mediciones de longitud, área y volumen se verán afectadas por esta contracción, conocida como contracción de Lorentz.

Otra de las predicciones de la relatividad especial, es que la masa de una partícula varía con la velocidad de ésta de acuerdo con la fórmula

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde m_0 , v , c y m son: la masa en reposo de la partícula, su velocidad, la velocidad de la luz y la masa relativista de la partícula, respectivamente.

Todos estos resultados son comprobados diariamente en los laboratorios de partículas elementales, en los aceleradores. Cuando se van a diseñar estos aceleradores tienen que tomarse en cuenta los efectos relativistas.

Otra de las consecuencias de la relatividad especial es la fórmula que relaciona la energía y la masa $E = MC^2$, la cual es sin duda una de las más famosas fórmulas de la física. Esta fórmula nos dice que si calentamos un cuerpo, este aumenta su masa. De hecho, el trabajo de Einstein, publicado también en 1905, donde obtiene esta fórmula, lo tituló en forma de pregunta: ¿Depende la inercia de un cuerpo de la energía que contiene? La validez de esta ecuación fue confirmada dramáticamente en las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki, y desde entonces su comprobación es un asunto cotidiano en las reacciones nucleares y entre partículas elementales.

LA PARADOJA DE LOS GEMELOS

Después de publicados los resultados de la dilatación del tiempo, se planteó el experimento pensado de que dos hermanos gemelos se encontraran después de que uno de ellos viajara por el espacio durante un año a velocidades relativistas, cercanas a la de la luz. Si solo el movimiento relativo tiene sentido y ambos marcos de referencia son equivalentes, ¿cuál de los gemelos envejecerá más lentamente, el que permanece en Tierra o el que realiza el viaje?

A este problema se le conoció como paradoja de los gemelos y tiene en realidad una solución simple. El viajero de la nave tendría que regresar a la Tierra para hacer la comparación de los tiempos transcurridos para cada uno de ellos. El regreso a Tierra implicaría un cambio en la dirección de la velocidad, lo que significa que el marco de referencia del viajero deja de ser un marco inercial. Esto es precisamente lo que hace la diferencia entre ambos marcos de referencia, el del observador en Tierra y el del viajero, es decir se destruirá la simetría entre ambos sistemas de referencia, que según la relatividad especial, deben ser equivalentes.⁵ La predicción teórica es que el viajero de la nave será más joven que el que se quedó en Tierra.

Es difícil comprobar la dilatación del tiempo recurriendo a cuerpos macroscópicos porque el efecto es muy pequeño a las velocidades a que estamos acostumbrados a observar estos objetos. Sin embargo ya se ha logrado comprobar la dilatación del tiempo llevando relojes en aviones supersónicos y comparando sus mediciones con relojes que se mantuvieron fijos en la Tierra.⁶ Por otra parte, la relatividad del tiempo se demuestra contundentemente en los fenómenos observados en las partículas subatómicas. Un caso muy común es el de los muones, unas partículas inestables que se producen en las capas superiores de la atmósfera debido a los choques de los rayos cósmicos con los núcleos de nitrógeno y oxígeno del aire. Aún cuando la vida media de estas partículas, medida en un marco de referencia donde estas se encuentran en reposo, es muy corta, alcanzan a llegar a la superficie del mar o de la Tierra debido al fenómeno relativista de la dilatación del tiempo.

LA RELATIVIDAD GENERAL

La relatividad general es la teoría moderna de la gravitación universal. La teoría de la gravitación se inicia con el descubrimiento de Newton de que todos los cuerpos se atraen con una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias. Matemáticamente la ley de la gravitación universal se expresa como

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Esta fórmula implica una interacción instantánea, es decir, por más alejados que estén los dos cuerpos, la fuerza entre ellos está dada por esta fórmula y si su posición relativa cambia, la fórmula supone que el otro cuerpo se entera inmediatamente de este cambio, mostrándolo en la fuerza que siente, la cual dependerá de la nueva distancia. Evidentemente este resultado es incompatible con la relatividad especial, la cual establece un límite para la velocidad de propagación de cualquier señal o interacción, siendo este límite la velocidad de la luz. Esta incompatibilidad llevó a Einstein a buscar una teoría de la gravitación que fuera consistente con la relatividad especial desarrollando la relatividad general, que es una teoría de la gravedad. En esta teoría relativista de la gravitación, la gravedad deja de considerarse como una fuerza y pasa a ser una manifestación de la geometría de un espacio de cuatro dimensiones, el espacio-tiempo, manifestándose la gravedad como una curvatura de este espacio-tiempo.

En la segunda ley de Newton, que para una partícula se expresa matemáticamente como

$F = m_i a$, la masa que interviene en esta fórmula es la masa inercial (lo que se indica con el subíndice *i* en la masa), mientras que las masas que intervienen en la ley de la gravitación universal se conocen como masas gravitacionales. Experimentalmente se ha encontrado que estas dos masas son iguales.⁷

Dado que la teoría de la relatividad especial conecta marcos de referencia inerciales, Einstein buscó evitar esta limitación y consideró que lo deseable sería desarrollar una teoría que conectara también marcos de referencia acelerados, o generalizados. Fue aquí donde se le ocurrió la idea fundamental

del elevador en caída libre y lo llevó a la hipótesis de identificar marcos de referencia acelerados con campos gravitacionales.

Según Einstein la idea más maravillosa de su vida fue la de pensar en un elevador que cae libremente en un campo gravitacional como el de la Tierra. En este experimento mental o pensado, como se les llama, si hubiera personas dentro del elevador estas sentirían que no pesan. Si una de estas personas soltara un objeto vería que este se queda suspendido, pero lo que realmente ocurre es que ambos, la persona y el objeto, caen juntos, como lo describiría un observador externo. Este resultado es consecuencia de que todos los cuerpos caen en el vacío con la misma aceleración, lo que hace que, dentro de un elevador que cae libremente, no sintamos nuestro peso. Si el elevador estuviera cerrado y no pudiéramos ver hacia fuera para notar nuestro movimiento, pensaríamos que ha desaparecido la gravedad. Pensemos ahora en una nave espacial que se encuentra en el espacio con los motores apagados, si estamos dentro de ella nos sentiremos como si no hubiera gravedad. Si la nave enciende los motores y empieza a acelerar, sentiremos los mismos efectos que los de un campo gravitacional dirigido en sentido opuesto al de la aceleración de la nave.

Una de las características de una buena teoría o de un buen modelo matemático en física es que además de que explique los hechos conocidos, también sea capaz de hacer nuevas predicciones que puedan ser verificadas por medio del experimento. Una de las predicciones que surgió del principio de equivalencia, en la forma de que un sistema acelerado es equivalente, localmente, a la presencia de un campo gravitacional, fue la de que la luz se desvía al pasar por un campo gravitacional.

La idea de que un marco de referencia acelerado es equivalente a la presencia de un campo gravitacional llevó a Einstein a la conclusión de que un rayo de luz se desvía al pasar cerca de una estrella. Consideremos un rayo de luz que se dirige perpendicularmente a la dirección de la aceleración en un elevador como muestra la figura 5c.

La trayectoria que seguirá la luz será la de una parábola. Puesto que los observadores en el interior del elevador asocian los efectos de la aceleración con los de un campo gravitacional, concluimos

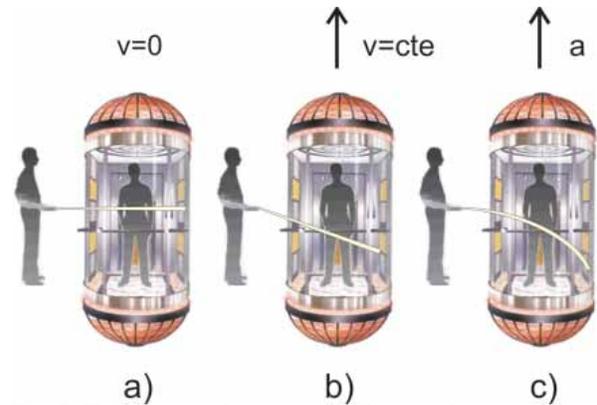


Fig. 5. Trayectoria de un rayo de luz en el interior de un elevador, en los casos: a) $V=0$, b) $V=cte$ y c) acelerando uniformemente.

que un campo gravitacional desvía la propagación de un rayo de luz. Este efecto fue confirmado en el año 1919 por una expedición de científicos ingleses en África durante un eclipse total de Sol y desde entonces el experimento ha sido repetido y corroborado múltiples veces.⁶ La confirmación de esta predicción de la teoría general de la relatividad, convirtió a Einstein en el científico más famoso del mundo.

Para entender el principio de equivalencia hagamos la comparación del movimiento de una partícula de masa m y carga q en un campo eléctrico uniforme \vec{E} con el movimiento en un campo gravitacional uniforme \vec{g} . En el campo eléctrico la aceleración de la partícula está dada por:

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$

como vemos, depende de la masa y de la carga de la partícula. En cambio en el caso de la partícula moviéndose en un campo gravitacional producido por una masa esférica M , como la Tierra, por ejemplo, obtenemos: $F = m_g \vec{g} = m_i \vec{a}$. La aceleración \vec{a} de la partícula está dada por $\vec{a} = \frac{m_g}{m_i} \vec{g}$.

Como las masas gravitacional e inercial son iguales, resulta que la aceleración de la partícula depende solamente del campo gravitacional y no de las propiedades de la partícula, $\vec{a} = \vec{g}$. Concluimos entonces que todas las partículas u objetos se mueven con la misma aceleración en un campo gravitacional; su trayectoria no depende de las propiedades de la

partícula, sino solamente del campo gravitacional.⁷ Este hecho sorprendente es la base del principio de equivalencia.

Una partícula sujeta solo a la influencia de un campo gravitacional dentro del elevador que cae libremente, se comporta como una partícula libre. El principio de equivalencia puede entonces enunciarse de la siguiente manera: En un laboratorio cayendo libremente en un campo gravitacional, siendo este localmente uniforme, y donde el laboratorio no gire, las leyes de la física son las leyes de la relatividad especial. Cualquier objeto que se suelte quedará “flotando” dentro del elevador. Si se lanza un proyectil, este seguirá una trayectoria rectilínea, como si no existiera gravedad, lo mismo que los cuerpos en el interior, que no experimentan ningún peso. Este marco de referencia será un marco inercial (hemos supuesto que el elevador no gira y que localmente el campo gravitacional es uniforme). De una manera equivalente, decimos que las leyes de la física en un campo gravitacional uniforme \vec{g} , son las mismas que las obtenidas por un observador en un marco de referencia uniformemente acelerado, con aceleración $-\vec{g}$ en ausencia de campos gravitacionales.

La gravedad deja entonces de ser considerada como una fuerza y pasa a ser una manifestación de la geometría (curvatura) del espacio-tiempo. Debido a esta curvatura del espacio-tiempo, la relatividad general no puede ser formulada en términos de sistemas de coordenadas rectangulares u ortogonales, como la relatividad especial.⁸ La relatividad general requiere sistemas de coordenadas más generales para poder manejar la curvatura del espacio-tiempo.

CURVATURA DEL ESPACIO

Decimos que un espacio es curvo cuando en ese espacio no vale la geometría euclidiana. Por ejemplo, es fácil ver que el espacio definido por la superficie de una esfera no es euclidiano, como se muestra en la figura 6. La suma de los ángulos internos de un triángulo es mayor que 180° .

Consideremos un sistema acelerado, como el de una plataforma en rotación que se muestra en la figura 7. Tracemos una circunferencia sobre la plataforma con centro en el eje de rotación. Al medir la circunferencia con una regla, encontramos que esta se contrae ya que está en movimiento en la

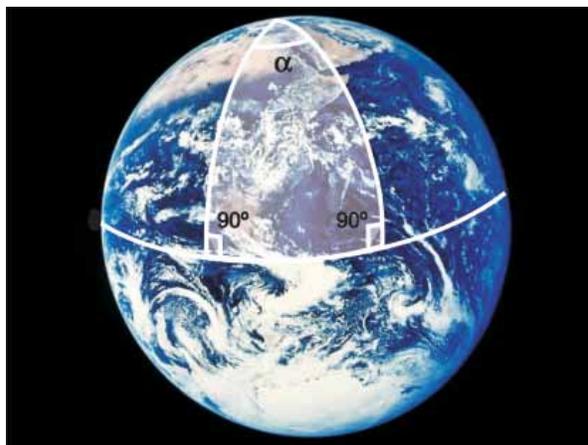


Fig. 6. Triángulo esférico. La suma de sus ángulos se relacionan como; $90^\circ + 90^\circ + \alpha > 180^\circ$.

dirección longitudinal. Por otra parte la longitud en la dirección radial no cambia, así que la relación de la geometría euclidiana $C = 2\pi r$ no se cumple en esta plataforma giratoria; el resultado que obtendremos es que $C > 2\pi r$. En esta misma plataforma, si tratamos de encontrar la curva de menor longitud que une dos puntos como A y B en la figura 6, encontraremos que esta línea es la que se muestra en la figura, lo que prueba que el espacio es curvo. Por otra parte, debido a que los puntos sobre la plataforma a diferentes distancias del eje de giro se moverán con diferentes velocidades, los relojes marcharán de forma diferente según el lugar donde se coloquen en la plataforma, dependiendo de la distancia a la que se encuentren del eje de rotación. Esta última conclusión indica que el tiempo se “deforma”, que el tic tac del reloj depende de la posición de este. El espacio y el tiempo se distorsionan, este es el significado de la expresión espacio-tiempo curvo.⁹

No es posible construir un sistema de coordenadas cartesianas, una cuadrícula, sobre la superficie de una plataforma giratoria ya que no podremos formar cuadrados con una regla debido a que esta cambia de longitud en los diferentes lugares. Decimos entonces que la rotación deforma el espacio, o que el espacio es curvo. De una manera parecida los intervalos de tiempo medidos por un reloj atómico, por ejemplo, serán distintos en los diferentes puntos. Este significa que la rotación distorsiona el tiempo. La combinación de ambos resultados se expresa en el concepto de espacio-tiempo curvo. Debido al principio de equivalencia, llegamos a la conclusión

de que un campo gravitacional distorsiona el espacio-tiempo. Se habla entonces de la curvatura del espacio-tiempo ocasionada por la presencia de un campo gravitacional. La gravitación en la teoría de Einstein resulta ser una deformación del espacio-tiempo y puede explicarse como una propiedad del espacio-tiempo donde los cuerpos en movimiento siguen las trayectorias de menor longitud, es decir las líneas geodésicas. Decimos entonces que la gravedad queda geometrizada. En la teoría de Einstein los planetas se mueven siguiendo las geodésicas del espacio-tiempo, mientras que en la teoría de Newton se mueven de acuerdo con la fuerza que actúa sobre ellos. Parafraseando a Hermann weyl, un físico alemán, decimos que la materia produce la curvatura del espacio-tiempo y esta curvatura determina la trayectoria de los planetas.¹⁰

Un ejemplo de una línea geodésica en un espacio curvo se puede construir fácilmente sobre un marco de referencia no inercial. Consideremos nuevamente la plataforma giratoria de la figura 7. Tomemos dos puntos sobre la circunferencia con centro en el eje de rotación y midamos la longitud de la recta que une estos puntos; encontraremos que esta longitud es mayor que para el caso en que midamos la longitud entre ellos cuando la plataforma no está girando. La razón es que, debido al efecto relativista de la contracción de la longitud en la dirección del movimiento, la regla se contrae y obtendremos que

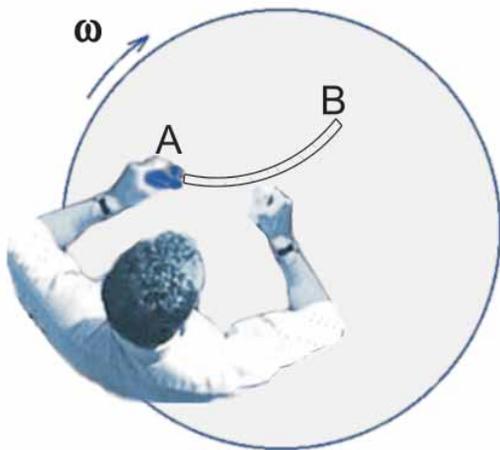


Fig. 7. La línea de menor longitud que une los puntos A y B sobre la plataforma giratoria no es una recta, sino una curva que tiene la forma que se indica en la figura.

esta regla “cabe” un número mayor de veces en el segmento rectilíneo que une A y B. De hecho, la línea de menor longitud que conecta ambos puntos, es una línea curva que tiene el aspecto que se muestra en la figura 7. La geodésica, la línea de longitud más corta que une los puntos A y B, no será la línea recta, sino una curva, ya que la regla debe orientarse con alguna componente radial pues esta no se contrae en la dirección perpendicular al movimiento, en este caso, una dirección radial.

Una de las características de las ecuaciones de Einstein de la relatividad general es la gran dificultad para resolverlas. La primera solución de estas ecuaciones las obtuvo el físico alemán Karl Schwarzschild para el caso de una masa esférica sin rotación. Calculando las trayectorias geodésicas para el espacio-tiempo de Schwarzschild se obtienen las órbitas planetarias.

Las predicciones más importantes de las soluciones de Schwarzschild son: El avance del perihelio del planeta Mercurio, la desviación de la luz al pasar por una estrella y el corrimiento hacia el rojo de la luz emitida por una estrella. Todos estos resultados han sido confirmados experimentalmente.¹¹

El movimiento del perihelio de una órbita planetaria se observa en la rotación del eje de la elipse sobre su mismo plano. Este efecto es muy pequeño y con la precisión de los instrumentos actuales, en nuestro sistema solar se puede medir solamente para el caso del planeta Mercurio, pues



Karl Schwarzschild 1873-1916.

este es el más cercano al Sol y es el que siente el campo gravitacional más intenso.

Existe una singularidad en las ecuaciones de Einstein para un cierto valor de la variable radial r , que define una superficie esférica en la solución de Schwarzschild. En esta superficie, conocida como horizonte de eventos o superficie Schwarzschild, el intervalo de tiempo entre dos eventos cualesquiera se vuelve infinito para un observador exterior. Si se cruza el horizonte de eventos, ya no se puede salir de él, lo que hace que cualquier suceso que pueda ocurrir dentro del volumen limitado por la superficie de Schwarzschild no tenga influencia sobre el exterior y solo se percibe los efectos de la presencia de la masa. Un observador externo al horizonte de eventos no puede detectar nada de lo que ocurra dentro de este; esto es lo que sucede con los hoyos negros.

LA RELATIVIDAD GENERAL Y LA COSMOLOGÍA

El legado de Einstein tiene actualmente una profunda influencia sobre el conocimiento que tenemos de nuestro universo. La cosmología, que es el estudio del universo como un todo, tiene entre sus principales objetivos proponer modelos sobre la estructura del universo y su evolución. Estos modelos se obtienen de las soluciones de las ecuaciones de Einstein del campo gravitacional, sobre las que se imponen algunas restricciones, como la hipótesis del principio cosmológico que establece que el universo es espacialmente homogéneo e isótropo a gran escala.¹¹ Al aplicar las ecuaciones de Einstein al universo en conjunto, y obtener las soluciones sujetas a que satisfagan el principio cosmológico, se obtienen solamente tres posibles modelos del universo que corresponden a tres diferentes geometrías¹². Dependiendo de la densidad de materia en el universo, obtendremos que la geometría del espacio puede ser:

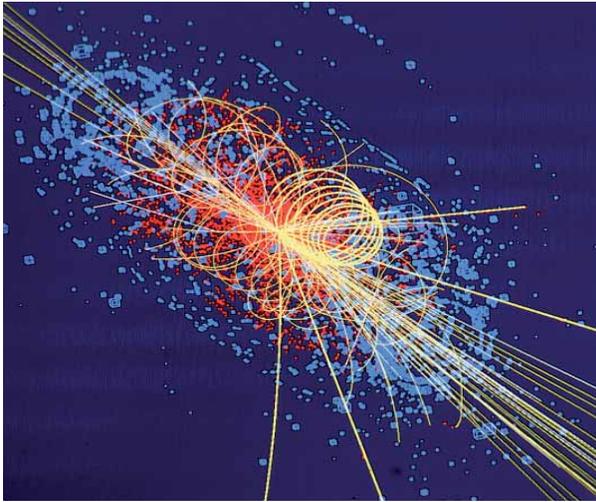
- a) La geometría euclidiana, con un espacio abierto, infinito que se seguirá expandiendo eternamente.
- b) Un espacio con geometría esférica, finito en volumen pero ilimitado, es decir, no hay bordes o fronteras, como cuando nos movemos sobre una esfera.
- c) La geometría del universo es hiperbólica correspondiendo a un universo abierto y que continuará expandiéndose indefinidamente.

El caso b) ocurre cuando la densidad de masa en el universo supera cierto valor, conocido como densidad crítica. En este universo se detendrá la expansión actual e iniciará un proceso de contracción que terminará en un Gran Colapso para reiniciar nuevamente un Gran Estallido (Big Bang). Este modelo de universo no solamente es espacialmente cerrado sino que lo es también temporalmente, esto es, tiene una vida finita para cada ciclo, y se conoce, por obvias razones, reflejadas en su comportamiento evolutivo, como universo cíclico.

COMENTARIOS FINALES

La relatividad especial es en la actualidad la guía para construir nuevas teorías donde no tiene relevancia la gravitación, estableciéndose su primer postulado como un requisito que toda teoría física debe satisfacer. Por otra parte, las características de la fuerza de gravedad han impedido que esta interacción forme parte de una teoría unificada, que abarque a todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Lograr una teoría de la gravedad que sea compatible con la mecánica cuántica, es uno de los mayores retos de la física teórica contemporánea.

Actualmente la física vive una situación parecida a la de los inicios del siglo XX, cuando las observaciones experimentales eran tales que las teorías vigentes en ese tiempo no podían explicarlas. Por otra parte, se presentaban también conflictos conceptuales entre las teorías. Estas fueron las condiciones que dieron origen a la mecánica cuántica y a la relatividad especial. El momento actual de la física presenta una situación semejante: la teoría de la gravitación de Einstein y la mecánica cuántica, por una parte, presentan algunas incompatibilidades. Por otra parte, existen otros problemas como el de la existencia de un nuevo tipo de materia, conocido como materia oscura, cuya naturaleza se desconoce completamente, pero que se revela como un hecho experimental para explicar la dinámica de las galaxias, o como el del mecanismo mediante el cual las partículas adquieren masa, el cual supone la existencia de una partícula no detectada hasta ahora. La existencia de esta partícula, conocida como bosón de Higgs, es algo que permea todo el universo, un campo, algo así como un mar en el que se mueven las partículas adquiriendo su masa de la interacción



Bosón de Higgs

con este campo. La suposición sobre la existencia de este campo se parece a la hipótesis del éter, nadie lo ha detectado, pero se supone que está ahí.

De las soluciones a estos problemas se espera que surja una nueva revolución científica, que, como las anteriores, traerá nuevos e interesantes desarrollos para la física y el conocimiento del universo. Puede ser que estemos en los albores de un nuevo año milagroso o de varios años milagrosos y que entre nosotros se encuentre algún joven que participará en la solución de estos problemas. El reto para las nuevas generaciones de físicos es tan grande como apasionante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Wolfgang Rindler, Introduction to Special Relativity, Clarendon Press, 1982.
2. W. S. C. Williams, Introducing Special Relativity, Ed. Taylor and Francis, 2002.
3. Domenico Giulini, Special Relativity, 100 Years Since Einstein, Oxford University Press, 2005.
4. Mohammad Saleem and Muhammad Rafique, Special Relativity, Ed. Ellis Horwood, 1992.
5. Patricia M. Schwartz and John H. Schwartz, Special Relativity, From Einstein to Strings, Cambridge University Press, 2004.
6. E. G. Peter Rowe, Geometrical Physics in Minkowski Spacetime, Springer, 2000.
7. Clifford M. Will, Was Einstein Right?, BasicBook, Harper Collins Publishers, 1993.
8. W. D. McComb, Dynamics and Relativity, Oxford University Press, 1999.
9. A. A. Logunov, The Theory of Gravity, Moskow Nauka, 2001.
10. Herman Weyl, Space-Time-Matter, Dover, 1952.
11. J. Foster and J. D. Nightingale, General Relativity, Springer-Verlag, 1998.
12. Richard A. Mould, Basic Relativity, Springer-Verlag, 2002.

Ingenierías
en línea

A TEXTO COMPLETO
DESDE EL NÚMERO 1

CONSULTA EN:
<http://ingenierias.uanl.mx>