

# 70 años de la teoría general de la relatividad (I)

Fidel Castro Díaz-Balart y Roberto Cabezas Solórzano

## RESUMEN

---

En los marcos del 70 aniversario de la aparición de la teoría general de la relatividad (TGR) se realiza un análisis de la teoría que sirvió de base a la TGR y que constituye un caso particular de la misma: la teoría especial de la relatividad (TER). Se hace un recuento de la situación existente en vísperas de la conformación final por Einstein de la TER y de la problemática existente en torno a la existencia del éter. Se presentan los postulados fundamentales de la TER, sus consecuencias en la formulación de la teoría y los principales resultados de la misma. Se plantean algunos aspectos relacionados con la comprobación experimental de la TER y sus aplicaciones. Se analiza la cuestión relacionada con las velocidades superiores a la de la luz.

## ABSTRACT

---

In view of the 70th anniversary of the discovery of the general theory of relativity, and analysis was made of the theory on which it was based, that constitutes a specific case of it; the special theory of relativity. A review is made of the situation prior to Einstein's final structuring of the special theory of relativity and of the problems related to Einstein's the existence of ether. The basic postulates of theory of relativity, their consequences in the formulation of the theory and the main results of the theory are presented some aspects related to the experimental verification of the special theory of relativity and its applications are described. An analysis is made of problems related to velocities greater that the speed of light.

Han pasado más de 70 años desde que la teoría de la gravitación de Einstein fuera concluida y plasmada en el memorable artículo clásico titulado "Fundamentos de la teoría general de la relatividad", recibido por la redacción de la revista "Annalen der Physik" el 20 de marzo de 1916.

A lo largo de estos años, numerosas predicciones de la teoría de la relatividad (TR) han sido objeto de comprobación experimental, verificándose cada vez con mayor exactitud y obteniéndose así nuevos elementos que la sustentan. No cabe duda de que la teoría de la relatividad, tanto la especial (TER) como la general (TGR), es una de las teorías físicas más sólidas y armónicas.

Son numerosas las aplicaciones de la TR en la física y la técnica nuclear y en la cosmología relativista. Sin ella no sería posible resolver numerosos problemas científicos-investigativos e ingenieriles. Los efectos relativistas se aplican en la física atómica y nuclear y en la física de las partículas elementales. La energética atómica y la técnica de aceleración de partículas elementales son simplemente imposibles sin la TR.

Pensamos que el 70 aniversario de tan memorable fecha es un momento propicio para hacer un recuento de los aspectos más significativos de la teoría y de la problemática actual en torno a ella. Regresar a las ideas originales de Einstein siempre constituye una fuente de inestimable valor científico.

Sin embargo, no se puede ver a la TGR desligada de la TER. Las dos constituyen una misma línea de pensamiento. Las intenciones de Einstein de extender la TER a los sistemas no inerciales de referencias fueron las premisas del surgimiento de la teoría del campo gravitacional.

Numerosos han sido los folletos y monografías publicados en todo este tiempo sobre la TR [1-7]. Un auge notable de trabajos relacionados con la teoría einsteniana se ha observado en las últimas dos décadas, especialmente a raíz del centenario de su nacimiento [8-10]. Esto está condicionado fundamentalmente a los recientes descubrimientos en la astrofísica y a los logros que se han alcanzado en la cosmología relativista. Sin embargo, en nuestro medio ha existido una divulgación esporádica de su obra, limitándose a círculos muy especializados o a los postulados básicos de la TER en el proceso docente. Es necesario señalar, por otra parte, que la energética nuclear, la física nuclear y la física de las partículas elementales, a las que tanta atención se les ha prestado en nuestro país, sobre todo en los últimos tiempos, es una de las esferas de mayor aplicación de la Teoría de la Relatividad. Por ello hemos querido realizar en el presente trabajo, un compendio que concentre de una forma coherente y accesible para una amplia gama de interesados en la temática, incluyendo los estudiantes de años su-

periores de la especialidad de física y profesionales no especializados en esta, los principales resultados de la teoría, las consecuencias más importantes que de ellos se derivan, así como el estado actual de la comprobación experimental de la TER. Se incluye además, el aparato matemático necesario para la ilustración de los objetivos. Los aspectos filosóficos relacionados con la teoría de la relatividad no se analizan, ya que estos son considerados en el ensayo [11] de uno de los autores.

## ANTECEDENTES DE LA TER, EL PROBLEMA DEL ÉTER

---

Cuando se hace el recuento de la lucha por el establecimiento de la validez de determinada teoría, siempre existe la posibilidad de hacerlo en forma cronológica. En ocasiones esto no se justifica, ya que es necesario introducir conceptos e ideas que pueden estar caducas. Sin embargo, pensamos que no se puede obviar la página del éter a la hora de hablar sobre la teoría especial de la relatividad, independientemente que sea aceptado hoy como un hecho su inexistencia. Precisamente el trabajo de Einstein, publicado en 1905, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" [12], puso las cosas en su lugar, al denegar la existencia del éter y confirmar que la nueva forma de interacción predicha por Maxwell, el campo electromagnético, no necesita ningún medio material para su existencia.

Recordemos pues el estado en que se encontraba la Física en vísperas del surgimiento de la teoría de la relatividad.

En aquellos momentos, los fenómenos macroscópicos de la mecánica clásica se enmarcaban perfectamente en las concepciones existentes de espacio y tiempo. Ellas consideraban al espacio como un gigantesco cajón vacío en el cual se colocaban los cuerpos materiales y se desarrollaban los fenómenos físicos. Esta tesis predominante desde la época de Newton, afirmaba que el espacio existe por sí mismo, independiente de la existencia y propiedades de los objetos materiales. Esto se conoce como la teoría absolutista del espacio. De esta forma se postula que el tiempo transcurre invariablemente en todos los sistemas de coordenadas.

Con respecto a la naturaleza de la luz, la autoridad de Newton en gran medida influyó en que la teoría corpuscular, con la cual se explicaban algunos de los fenómenos luminosos, venciera a las ideas ondulatorias de Huygens, las cuales se mantuvieron opacadas durante más de cien años.

Sin embargo, las explicaciones dadas por Young y Fresnell a los fenómenos de interferencia y difracción, a principios del siglo XIX, sobre la base de la teoría ondulatoria, hicieron que esta ocupara el lugar central. Fue entonces cuando la hipótesis del éter recibió un nuevo apoyo. Era evidente que la luz podía representarse como un proceso oscilatorio en un medio elástico, que posee una masa inercial y llena el universo uniformemente.

En el estudio de la relatividad un papel fundamental lo jugó la teoría de Maxwell de las ondas electromagnéticas, que fue la primera teoría del campo donde las interacciones se propagan con velocidad finita. No obstante, había un problema que consistía en generalizar los resultados a los cuerpos en movimiento. Como se comprobó posteriormente, las ecuaciones de Galileo no eran invariantes ante las transformaciones de Lorentz al sustituir  $c$  por  $c \pm v$ , donde  $v$  es la velocidad del campo a estudiar.

Hertz, tratando de explicar la independencia de los fenómenos electromagnéticos del movimiento del sistema, consideró al éter completamente arrasado, él logró la independencia de los fenómenos del movimiento de todo el sistema; pero su teoría no explicaba los experimentos con el movimiento relativo de los cuerpos, para los cuales se había creado propiamente la teoría de Maxwell. Las dificultades que aparecían con el vacío y en los fenómenos con cuerpos de baja densidad trajo como consecuencia que se dejara a un lado la teoría de Hertz.

Por otro lado, era evidente la contradicción en que estaba el éter al tratar de explicar la aberración de la luz, el experimento de Fizeau y el efecto Doppler simultáneamente.

Entonces entró en escena Lorentz, quien definitivamente abogó por la existencia del éter inmóvil. De esta forma, él renunció al principio de la relatividad, ya que en los sistemas que se mueven a través del éter, los fenómenos transcurren de manera distinta a los cuerpos ligados al éter. En la teoría de Lorentz, se aceptaba la existencia de un sistema absolutamente privilegiado. Moverse significaba hacerlo con respecto al éter.

Lorentz mostró que en todos los experimentos de primer orden [13], en los cuales se observan efectos que dependen de  $v/c$ , medir la velocidad del viento etéreo es imposible, afirmando que el movimiento común del sistema no influye en los fenómenos (en el primer orden de la velocidad  $v$ ).

Sin embargo, un experimento más fino (de segundo orden) realizado en 1881 y 1887 por Michelson y Morley, en el cual no se observaba una diferencia de marcha al propagarse la luz en uno u otro sentido, descartó definitivamente la teoría de Lorentz. Posteriormente han existido numerosos experimentos con una elevada exactitud que han demostrado la invariabilidad de la velocidad de la luz, una reseña de estos puede encontrarse en la bibliografía señalada al final de este trabajo [14].

Lorentz y Fitzgerald, para dar explicación al experimento de Michelson, propusieron una hipótesis audaz, que consistía en considerar que los cuerpos disminuyen su longitud en la dirección del movimiento.

A la par de la investigación del acortamiento en el movimiento del electrón, Lorentz hizo un descubrimiento matemático. Él mostró que las ecuaciones de Maxwell en el vacío, las cuales con el paso a ejes móviles, no cambian su forma (y de esta manera muestran su independencia del movimiento),

se conservan invariables ante un tipo especial de transformación de coordenadas del tiempo y de los campos, conocida como transformación de Lorentz.

Posteriormente, en junio de 1905, el célebre matemático Poincaré publicó un artículo donde demostraba que las transformaciones de Lorentz, respecto a las cuales las ecuaciones de Maxwell son invariantes, tienen carácter de grupo.

El programa Lorentz-Poincaré, que pretendía llegar a la obtención del grupo de Lorentz como el grupo invariante de la ecuación de la dinámica del electrón, naturalmente no podía ser realizado hasta el final. Para Lorentz, el acortamiento era un fenómeno físico provocado por la presión del viento etéreo. Poincaré se vio forzado a introducir condiciones complementarias, al entender el principio de la relatividad como resultados de una compensación. Esto era producto de su conocido convencionalismo filosófico, el cual lo llevó a adoptar posiciones pragmáticas y a explicar la física desde posiciones de comodidad.

Hacia falta entonces, un cambio radical en la forma de ver y enfocar el problema. A ello estaba destinado el tercer trabajo y el más importante para la teoría especial de la relatividad, el cual fue escrito por Albert Einstein, joven de 26 años, modesto empleado de una oficina de patentes de Suiza, donde con lógica y sencillez aplastantes, partiendo de dos postulados aparentemente contradictorios, explicó los fenómenos y resolvió el problema fundamental que se planteaba la electrodinámica en los años de transición del siglo XIX al XX. Este consistía en determinar experimentalmente una velocidad absoluta y obtener pruebas directas de la existencia del éter.

Él, sencillamente negó la posibilidad de su existencia. Según sus propias palabras, lo único que hizo la TER fue quitarle la última propiedad que le quedaba al éter, su inmovilidad.

Referente a esto Einstein plantea: "el campo electromagnético es primario, no puede ser reducido a nada y por eso está de más postular la existencia de un éter isotrópico y homogéneo y representar el campo como el estado de este éter" |15|.

Desde entonces, se han realizado numerosas experiencias para la detección del viento etéreo |16-18|, sin embargo, actualmente es reconocido que todos los intentos de descubrir el éter han concluido en fracaso.

Einstein, aún teniendo el mérito principal en la conformación de la TER, dio una alta valoración de los descubrimientos de Lorentz: "Lorentz construyó una teoría completa de todos los fenómenos electromagnéticos, el único fenómeno que no pudo explicar completamente fue el conocido experimento de Michelson y Morley". En otras ocasiones expresó que el camino estaba listo para la aparición de la TER.

Sin embargo, aunque existían las condiciones para el surgimiento de la TER, Einstein fue el que le dio a la teoría de la relatividad su fundamentación, interpretación, coherencia y encontró sus consecuencias fundamentales. Su papel no se redujo a colocar el último ladrillo en el edificio construido por sus antecesores. El edificio de la teoría de la relatividad fue levantado por él desde sus fundamentos, partiendo de la precisión de los enfoques existentes en la electrodinámica de Maxwell y de la revelación de su profundo contenido físico.

## POSTULADOS Y RESULTADOS DE LA TER

---

Los fundamentos de la TER descansan en dos postulados fundamentales:

1) el principio de la relatividad, según el cual en todos los sistemas galileanos (sistemas que se mueven entre sí con movimiento rectilíneo uniforme), los fenómenos ópticos y electromagnéticos deben transcurrir de igual forma; 2) independencia de la velocidad de la luz con respecto al movimiento de la fuente.

A primera vista, entre ambos postulados existe una aparente contradicción. ¿Cómo puede la velocidad de la luz ser siempre la misma, independientemente del movimiento de la fuente emisora? En la solución de esta aparente contradicción jugó un importante papel el talento de Einstein. Además de los conceptos tradicionales de espacio y tiempo, Einstein plantea la necesidad de definir un tercer concepto: la simultaneidad.

Este concepto lo define de la siguiente forma: si tenemos relojes en dos puntos diferentes, enviemos una señal luminosa puntual (es decir, notablemente corta) por el vacío en línea recta. Supongamos que los relojes en el punto A en el momento de emisión de la señal marcan el tiempo  $t_1$ . Sea el tiempo en los relojes de B, cuando la señal llega a B y se refleja en sentido contrario, igual a  $t'$ .

Finalmente, cuando la señal regresa al punto A, los relojes en este punto indican el tiempo  $t_2$ . Por definición, los relojes A y B marchan sincronizadamente, si  $t' = (t_1 + t_2) / 2$ .

Como se observa, la velocidad de la luz representa el proceso físico que determina la simultaneidad. De esta forma, según Einstein, el concepto de simultaneidad está estrechamente relacionado con la velocidad de la luz en el vacío, de la misma forma que el concepto de longitud está ligado al cuerpo rígido.

Por otra parte, la simultaneidad debe poseer las propiedades de transitividad y reversibilidad y además ser unívoca y satisfacer la ley de la causalidad. Para el cumplimiento de estas condiciones es suficiente suponer que no existen en la naturaleza señales más rápidas que las luminosas.

La definición einsteniana de simultaneidad implica que dos sucesos no sean siempre simultáneos, sino en determinado sistema, es decir, que la simultaneidad sea un concepto relativo.

Es precisamente el concepto de simultaneidad y su esencia relativa la que resuelve la aparente contradicción entre los dos postulados de la TER. Estos dos postulados fueron los que permitieron sobre la base de la teoría de Maxwell para los cuerpos en reposo, construir una nueva electrodinámica de los cuerpos en movimiento libre de contradicciones. La presencia del éter como portador de la luz de la teoría maxwelliana resulta innecesaria en la teoría de Einstein debido a la ausencia en esta misma de un "espacio en reposo absoluto".

De esta forma, a cada suceso puede asignársele determinadas coordenadas y determinado tiempo en nuestro sistema, quedando así el espacio metrizado.

El problema inmediato consiste en hallar la ley de transformación de las coordenadas de un punto de un sistema de coordenadas  $K$  a otro sistema de coordenadas  $K'$  que se mueve con respecto a  $K$  con movimiento rectilíneo uniforme en la dirección del eje  $X$ . Esta tiene la forma

$$x' = \lambda \frac{(X - vt)}{\sqrt{1-v^2/c^2}}, \quad y' = \lambda y, \quad z' = \lambda z, \quad t' = \frac{\lambda(t - vX/c^2)}{\sqrt{1-v^2/c^2}}. \quad (1)$$

La constante  $\lambda$  es una magnitud arbitraria y la misma depende de la elección del patrón en uno y en otro sistema.

Se acepta tomar  $\lambda = 1$  [19].

En forma matricial la ley de transformación se expresa:

$$\begin{pmatrix} X_1' \\ X_2' \\ X_3' \\ X_4' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & i\gamma\beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -i\gamma\beta & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix}, \quad (1a)$$

donde  $X_\mu$ ,  $\mu = 1, 2, 3$  son las coordenadas espaciales y  $X_4$  la coordenada temporal en el conocido espacio de Minkowski.

La fórmula (1a) se conoce con el nombre de transformaciones de Lorentz. Estas transformaciones fueron inicialmente deducidas por Lorentz para obtener la invarianza de las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo, Einstein obtuvo estas ecuaciones desde representaciones completamente diferentes, sin utilizar las ecuaciones de Maxwell.

En la TER se parte del postulado de que todas las ecuaciones de la física se pueden escribir en forma invariante. Esto está profundamente relacionado con la representación acerca de la homogeneidad e isotropía del espacio y la homogeneidad del tiempo. Según estas propiedades del espacio un mismo experimento puede ser realizado en diferentes sistemas de coordenadas,

es decir, no existe un sistema privilegiado, ni la traslación del origen de coordenadas, ni el giro de los ejes, influyen en la elección del punto de observación.

La fórmula (1) muestra que la velocidad de la luz en el vacío, (en ausencia de la gravitación) es la velocidad límite\*. Si esto no fuera así, bajo el signo de la raíz cuadrada aparecería una magnitud negativa y por consiguiente  $x'$  y  $t'$  fueran imaginarios, lo cual carece de sentido físico.

De la fórmula 1 también se deduce otra importante consecuencia de la TER: la relatividad de la simultaneidad. Supongamos que en los puntos  $X_1$  y  $X_2$  del sistema  $K$  ocurren dos sucesos simultáneos, correspondientes al tiempo  $t$ . ¿Cuál sería el tiempo que indica el reloj en el sistema  $K'$  para éstos sucesos? Si sustituimos en la fórmula

$$t = \frac{t' + vX'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$t$  y  $X_1$  para calcular el tiempo  $t'_1$  y  $t$  y  $X_2$  para hallar  $t'_2$  para el segundo suceso, vemos que  $t'_1$  y  $t'_2$  son diferentes, es decir en el sistema  $K$  ambos sucesos no ocurrieron simultáneamente.

De las transformaciones de Lorentz se deduce también el acortamiento de las escalas y el retraso de los relojes en los sistemas en movimiento a través de las conocidas fórmulas

$$L = L' \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad ; \quad \Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

donde  $L' = x'_2 - x'_1$  y  $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ .

Del resultado obtenido surge frecuentemente la siguiente interrogante ¿cuál es la longitud "verdadera" de la escala? A esto es preciso responder que no existe una longitud "verdadera", esta depende del sistema de referencias donde se encuentre el observador. Lo mismo ocurre con el retraso de los relojes.

En la literatura alrededor de este problema se plantea la siguiente interrogante. ¿Puede considerarse el acortamiento relativista de las escalas y el retraso de los relojes como resultado de un proceso dinámico, es decir como resultado de la acción de fuerzas? Existen diferentes puntos de vista con relación a esto. Uno de los enfoques más acertados es en el que se acepta que, aunque la interpretación dinámica es posible, ella no es necesaria ya que el enfoque cinemático relativista es no sólo más sencillo,

---

\* Esto no excluye la existencia de procesos donde se puede definir formalmente el concepto de velocidad, en las cuales esta pueda superar el valor  $c$ . Sin embargo, estos procesos no tienen carácter de señal. Este problema se tratará con más detalle posteriormente.



sino también más adecuado, pues la introducción de fuerzas en la estructura atómica y en las ecuaciones de movimiento puede afectar el carácter universal del efecto y su condicionalidad de las propiedades del espacio-tiempo |20|.

De las transformaciones de Lorentz se deduce otro importante resultado relacionado con el principio de la causalidad: la sucesión de la causa y la consecuencia se conserva en cualquier sistema de referencias, solamente en el caso en que la velocidad de propagación del punto material no supere la velocidad de la luz. Ilustremos esto con el siguiente ejemplo. Supongamos que en un sistema S ocurren dos sucesos A (lanzamiento de una flecha) y B (arribo de la flecha al blanco). Está claro que A es la causa y B la consecuencia. Los momentos de tiempo en que ocurren los sucesos A y B en el sistema S son  $t_1$  y  $t_2$  correspondientemente. Es evidente que  $t_2 - t_1 > 0$ . Podemos definir por  $u = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1)$  la velocidad media de la flecha en el sistema S. Calculemos ahora el intervalo del tiempo con respecto a un sistema S' que se mueve con respecto a S a una velocidad v. Utilizando las transformaciones de Lorentz, los tiempos  $t'_1$  y  $t'_2$  de los sucesos A y B en el sistema S serán:

$$t'_1 = \frac{t_1 - vx_1/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad ; \quad t'_2 = \frac{t_2 - vx_2/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

de donde el intervalo de tiempo entre A y B en el sistema S será:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) - v(x_2 - x_1)/c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

Considerando que  $x_2 - x_1 = u(t_2 - t_1)$  obtenemos después de algunas transformaciones elementales:

$$\frac{t'_2 - t'_1}{t_2 - t_1} = 1 - \frac{vu}{c^2}$$

de aquí se deduce que la relación  $(t'_2 - t'_1)/(t_2 - t_1)$  conserva el signo solamente en el caso en que  $vu/c^2 < 1$  lo cual es posible solamente cuando la velocidad relativa del sistema S y la velocidad media del movimiento de la flecha no superen la velocidad de la luz c.

Por consiguiente, de la afirmación de que en todos los sistemas inerciales de referencia la sucesión temporal de la causa y la consecuencia se conserva, se deduce que la velocidad de un punto material no puede superar la velocidad de la luz.

De las transformaciones de Lorentz finalmente puede obtenerse el importante teorema de Einstein sobre la suma de velocidades

$$u_x = \frac{u'_x + u}{1 + vu'_x/c^2}, \quad u_y = \frac{u'_y \sqrt{1-\beta^2}}{1 + vu'_x/c^2}$$

$$u_z = \frac{u'_z \sqrt{1-\beta^2}}{1 + vu'_x/c^2}$$

Estas fórmulas expresan con qué velocidad se mueve un cuerpo con respecto a un sistema K si el cuerpo se encuentra en un sistema K' que se mueve con respecto a K a una velocidad c.

Una de las consecuencias de este teorema es que la suma de dos velocidades menores que la de la luz da siempre como resultado una velocidad menor a la de la luz. ¿Y qué sucede si una de las velocidades es igual a la de la luz? Resulta, que en este caso, si a la velocidad de la luz c le añadimos una velocidad menor que c obtenemos como resultado una velocidad igual a c. Este teorema es aplicable incluso cuando  $u' > c$ .

## CUADRIVECTORES Y TENSORES. COVARIANCIA DE LAS LEYES FÍSICAS

Todos los procesos físicos siempre tienen lugar en determinado punto del espacio y en cierto momento del tiempo. Por ello, el elemento lo constituye no el punto del espacio ni el tiempo en sí, sino, el suceso, el cual está determinado por cuatro magnitudes: tres coordenadas espaciales y el tiempo. El conjunto de estas cuatro coordenadas constituyen las coordenadas de un punto en el espacio cuatridimensional conocido con el nombre de espacio cuatridimensional de Minkowski, en honor al matemático que en 1907 introdujo el importante concepto de continuo espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Así pues, la TER transfirió el concepto de absoluto a una nueva expresión denominada intervalo.

Como veremos en lo adelante, el concepto de intervalo es de suma importancia en la TER al ser una magnitud que no varía al pasar de un sistema inercial a otro. De su definición se deriva también la estrecha relación que existe entre las coordenadas y el tiempo sin llegar a ser equivalentes.

El intervalo se representa frecuentemente en forma tensorial:

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx_\alpha dx_\beta, \quad (2)$$

donde  $g_{\alpha\beta}$  son las componentes del tensor métrico que se pueden representar en forma matricial como

$$g_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

de esta manera, la relación que define la invariancia de la velocidad de la luz y que debe ser covariante con respecto a las transformaciones de Lorentz se expresa en la forma:

$$ds^2 = 0,$$

de la misma manera, se pueden definir las velocidades y el impulso en el espacio de Minkowski:

$$u_\mu = (\gamma v, i c \gamma) \text{ y } p_\mu = (p, i m_0 c \gamma),$$

donde  $p = m_0 \gamma v$ ,  $m_0$  es la masa en reposo.

De la ecuación de movimiento en la mecánica relativista se obtiene la relación de la TER, o sea, que la energía de la partícula puede ser definida como

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

en el caso en que  $v/c \ll 1$  podemos escribir en forma aproximada:

$$E \cong m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2.$$

Es decir, que en primera aproximación la energía total de la partícula es la suma de la llamada energía de reposo  $E = m_0 c^2$  y de la energía cinética de la partícula en su interpretación clásica. En el caso en que  $v = 0$ , obtenemos la ecuación fundamental  $E = m_0 c^2$ .

Esta fórmula indica que a la partícula en reposo le corresponde una energía interna o propia igual a  $E$ . Esta relación no sólo juega un importante papel en la dinámica relativista, sino que la misma descansa en los principios físicos del funcionamiento de los reactores nucleares.

Otra de las imputaciones importantes de la TER es que en el espacio cuadridimensional de Minkowski, las ecuaciones del campo electromagnético toman una forma covariante. Efectivamente, si definimos el potencial  $A$  de la siguiente forma:

$$A_\mu = (A, i\phi)$$

donde  $\phi$  es el potencial escalar, ( $A$  y  $\phi$  pueden siempre elegirse de tal manera que los mismos satisfagan la condición de Lorentz en cualquier sistema inercial), y definimos el tensor del campo electromagnético  $F_{\mu\nu}$  por la expresión

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & H_z & -H_y & -iE_x \\ -H_z & 0 & H_x & -iE_y \\ H_y & -H_x & 0 & -iE_z \\ iE_x & iE_y & iE_z & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

entonces el primer par de las ecuaciones de Maxwell puede representarse en la forma

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial X_\lambda} + \frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial X_\mu} + \frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial X_\nu} = 0 .$$

Definiendo la distribución de carga  $\rho$  y de corriente en forma cuadi-dimensional podemos escribir, utilizando la ecuación (3), el segundo par de ecuaciones de Maxwell en forma covariante

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial X_\nu} = s_\mu \text{ donde } s_\mu = (\rho v/c, i\rho) .$$

De las ecuaciones del campo electromagnético puede obtenerse el tensor energía-impulso de este campo

$$T^{\mu\nu} = \frac{1}{4}\pi (-F^{\mu\lambda} F_\lambda^\nu + \frac{1}{2} g^{\mu\nu} F_{\lambda\rho} F^{\lambda\rho}) . \quad (4)$$

Observemos que el mismo está formado por tensores covariantes, contravariantes y mezclados del campo electromagnético y por el tensor métrico  $g^{\mu\nu}$ . Como veremos en la segunda parte de este trabajo este tensor juega un importante papel en la TGR.

De la definición de tensor de energía-impulso y del segundo par de ecuaciones de Maxwell en forma covariante puede obtenerse finalmente

$$\frac{\partial T_\mu^\nu}{\partial X^\nu} = \frac{1}{c} F_{\mu\nu} s^\nu .$$

De esta fórmula se observa que el tensor de energía-impulso del campo electromagnético permite escribir las ecuaciones del movimiento de las cargas en el campo, expresadas en la forma cuadridimensional, lo cual constituye el objetivo de la teoría especial de la relatividad.

## COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TER

Por muchos especialistas se considera que, en la actualidad, el problema de la comprobación experimental de la TER está completamente resuelto. Existen innumerables ejemplos de aplicación concreta en la ciencia y en la técnica.

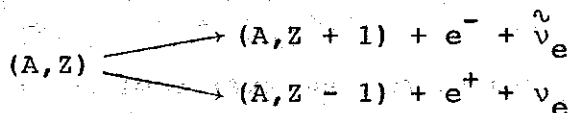
Uno de los problemas clásicos que corroboran la validez de la TER es el problema de los mesones, el cual constituye una de las demostraciones más evidentes de la dilatación del tiempo. A escala de laboratorio se ha podido observar que el tiempo de vida media de los muones que se forman en las altas capas de la atmósfera es de  $2 \cdot 10^{-6}$  seg .

Teniendo en cuenta este tiempo y su velocidad (cercana a la de la luz) estos elementos deberían desintegrarse antes de llegar a la tierra, sin embargo, ellos son detectados en la superficie terrestre. Este hecho es

completamente explicable si se tiene en cuenta que en el sistema de coordenadas propio de los muones para un observador situado en la tierra, el tiempo de vida medio de estos es mayor, al considerar el efecto relativista de la dilatación del tiempo, logrando de esta forma recorrer la distancia que los separa de la tierra, y ser detectados así en la superficie terrestre.

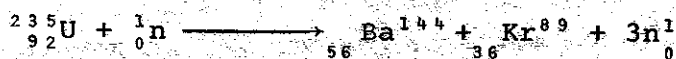
Otro efecto que ratifica la validez de la TER y en particular de la relación  $E = mc^2$  es el defecto de masa que sirvió de base para el balance de las reacciones nucleares:

La hipótesis acerca de la existencia del neutrino, predicha por Pauli en 1931, permitió definitivamente explicar el balance energético del proceso de desintegración  $\beta$  en las reacciones nucleares. Resultaba que para el cumplimiento de la ley de conservación de la energía en dicho proceso era necesario suponer que en el proceso de desintegración junto al positrón  $e^+$  (electrón  $e^-$ ), era emitido además un neutrino  $\nu_e$  (antineutrino  $\bar{\nu}_e$ ):



Dicho neutrino, el cual constituye el portador energético principal del proceso, posee masa en reposo igual a cero\*, y se mueve a la velocidad de la luz. A esta conclusión fue posible arribar gracias a la ley de equivalencia que relaciona la masa y la energía predicha por Einstein.

Consideremos el siguiente ejemplo para ilustrar el defecto relativista de masa. Veamos la reacción nuclear de fisión del uranio, la cual constituye el principio de funcionamiento de los reactores nucleares.



La masa del núcleo U-235 es de 235,043 uma, la masa del neutrón es de 1,0086 uma, la masa del Ba-144,00 uma y la masa del Kr-89 es de 88,9178 uma. En esta reacción ocurre la siguiente variación de masa:

$$\Delta m = -0,168 \text{ uma}$$

---

\* En los últimos años se han hecho predicciones acerca de una masa diferente de cero para el neutrino. En el instituto de Física Teórica y Experimental de Moscú se acotó experimentalmente la masa del neutrino en el rango

$$28 \leq m_{\nu_e} \leq 41 \text{ eV}$$

con un nivel de confiabilidad del 99 %. No obstante, este resultado no ha sido aún confirmado por otro experimento por lo que el problema sobre la existencia de masa en el neutrino aún no se considera resuelto.

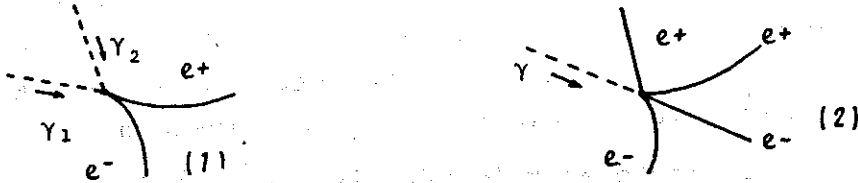
Esto último es el llamado defecto de masa y mediante la fórmula de Einstein puede ser calculada la energía que se desprende en un acto de fisión

$$\Delta E = \Delta mc^2 \approx 200 \text{ Mev} \approx 10^{-17} \text{ Kwh} .$$

Sobre la base de este principio en el mundo trabajan actualmente 374 reactores nucleares energéticos que generan una potencia total eléctrica de 248 000 MWe.

Otro ejemplo donde la TER encontró su confirmación fue el descubrimiento de las antipartículas. En 1931, el físico inglés P. Dirac, mediante la consideración de la invariabilidad relativista en la ecuación del electrón, predijo la existencia de una nueva partícula semejante al electrón, pero de carga positiva, la cual fue detectada experimentalmente en 1932 por Anderson en los rayos cósmicos y denominada positrón. Los procesos de aniquilación y creación del par electrón-positrón fueron las primeras manifestaciones convincentes acerca de la transformación de las partículas elementales.

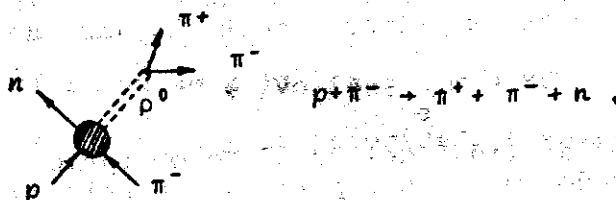
Dicho proceso puede representarse esquemáticamente de la siguiente forma:



En el primer caso el par aparece como resultado de la acción de dos cuantos gamma como energías  $E_{\gamma_1}$  y  $E_{\gamma_2}$ .

El par puede formarse a partir de un cuanto gamma (segundo caso) donde se observa además del par electrón-positrónico, un electrón de rechazo.

Con ayuda de las fórmulas de la TER es posible medir las masas de las partículas elementales si son conocidos su impulso y energía. Por este método pudo determinarse, por ejemplo, la masa de la partícula neutral  $\rho^0$ , partícula elemental con tiempo de vida notablemente pequeño ( $6 \cdot 10^{-24}$  seg) que se forma en el proceso intermedio de interacción de un protón con un  $\pi^-$ -mesón descomponiéndose en dos piones:



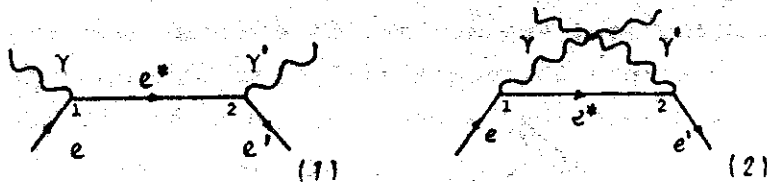
mediante la fórmula  $m_{\rho^0} = (E^2 - p^2c^2)^{1/2}/c^2$ ,

donde  $m_{\rho^0}$ ,  $E$  y  $p$  son respectivamente la masa, energía e impulso de la partícula  $\rho^0$ .

Se obtuvo con una alta exactitud que  $m_{\rho^0} = 765 \text{ Mev}/c^2$ .

Otro efecto en que la teoría relativista jugó un importante papel para su descripción es el efecto Compton. Este consiste en la dispersión elástica de la radiación electromagnética en los electrones libres (o débilmente enlazados) acompañados de un aumento de la longitud de onda. Dicho efecto fue descubierto en 1922 durante la investigación de la dispersión de los rayos X en la parafina.

Este efecto puede representarse en forma de diagrama de Feynmann



En el primer diagrama el electrón absorbe el fotón que incide sobre él, pasando del estado inicial a cierto estado virtual  $e^*$ , después del cual el electrón virtual emite un nuevo fotón  $\gamma'$ , pasando al estado final  $e^-$ . Es posible también el proceso del diagrama 2, en el cual el electrón inicial primeramente emite un fotón y pasa al estado virtual y después, absorbiendo el fotón inicial pasa al electrón final  $e^-$ . La emisión y absorción del fotón por el electrón ocurre como resultado de la interacción del electrón con el campo electromagnético. Para la explicación de este efecto es necesario en la teoría cuántica considerar el efecto relativista en la dependencia de la energía y del impulso del electrón con respecto a su velocidad, ya que durante la dispersión de los fotones de altas energías, el electrón de rechazo puede adquirir velocidades significativas.

Como se ha podido observar, la energía nuclear es una rama donde se han podido verificar extensivamente los principales resultados de la teoría especial de la relatividad.

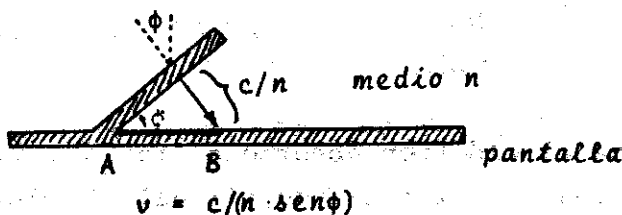
## VELOCIDAD LÍMITE

Los efectos relacionados con las velocidades superiores a la de la luz, en los últimos tiempos han experimentado un interés creciente. Los trabajos en esta dirección pueden dividirse en dos grupos:

1. El estudio de efectos relacionados con fuentes reales con velocidades de emisión superiores a la de la luz.
2. Análisis teórico de la posibilidad de existencia de los taquiones y de las conclusiones que de la misma se derivan.

Durante el movimiento rectilíneo uniforme de cierta "fuente" en un medio homogéneo, la emisión aparece sólo en el caso en que la velocidad de la fuente sea mayor que la velocidad de fase  $c_f = c/n$  de las ondas consideradas en el medio dado, con coeficiente de refracción  $n$ . En electrodinámica el movimiento mencionado de una carga se conoce con el nombre de efecto de Vavilov-Cherenkov, el cual fue descubierto en 1934 y la teoría de este efecto fue elaborado en 1937 por Tamm y Frank.

Es indudable que las fuentes de emisión de ondas electromagnéticas pueden moverse a velocidades  $v > c/n$  (21). Nos referimos no a partículas aisladas (fotones, electrones, etcétera), sino a conjuntos o agrupaciones. La condición de obtención de velocidades superiores a la luz en el efecto de Vavilov-Cherenkov puede de forma esquemática plantearse de la siguiente manera. Supongamos que un frente de onda incide sobre una pantalla con ángulo  $\phi$ :



el impulso luminoso de A a B se moverá por la pantalla con una velocidad  $v = c / (n \cdot \text{sen} \phi)$ . Evidentemente, al disminuir el ángulo de incidencia  $\phi$ , puede obtenerse  $v > c$ .

Aunque hasta el momento se planteaba que la emisión de Vavilov-Cherenkov puede ocurrir solamente en medios con coeficientes de refracción  $n > 1$ , lo cual está limitado por la condición de que la velocidad de emisión sea  $c/n < v < c$  actualmente existen evidencias [22] de que dicho efecto pueda observarse en cualquier medio (incluyendo el vacío), atendiendo a la existencia de fuentes con  $v > c$ .

Es conocido el llamado modelo del "Faro"; en el cual un faro giratorio con velocidad angular  $\omega$  crea una mancha luminosa (rayo) sobre una pantalla que se encuentra a la distancia  $R$  del faro. La velocidad del rayo será igual a  $\omega R$  pudiendo sobrepasar la velocidad de la luz. Este modelo actualmente es aceptado para los pulsares [21], en este caso, la velocidad del rayo en la tierra para todos los pulsares conocidos es superior a  $c$ . Por ejemplo, para el pulsar NP 0532,  $\omega = 200 \text{ seg}^{-1}$ ,  $R \approx 6 \cdot 10^{21} \text{ cm}$ , de donde  $v = 1,2 \cdot 10^{22} \text{ m/seg}$ , lo que supera en más de dos veces la velocidad de la luz en el vacío. Está claro que la aparición de velocidades  $v > c$  para los rayos no contradice la teoría de la relatividad. Cuando se habla en la TER de velocidad de la luz en el vacío como la máxima posible, se refiere a la velocidad de propagación de excitaciones, interacciones o "señales", para



las cuales esta afirmación es válida. Los rayos mencionados anteriormente aunque se mueven con  $v > c$  no violan este principio ya que no pueden ser utilizados como fuentes de emisión secundaria [22,23].

Actualmente son ampliamente utilizados los contadores de Cherenkov, que constituyen detectores de partículas cargadas en los cuales se utiliza la emisión de Vavilov-Cherenkov. Los mismos permiten en los experimentos con aceleradores de partículas cargadas, separar las partículas que se propagan a velocidades relativistas.

Consideremos seguidamente el segundo problema relativo a las velocidades superiores a la de la luz. Del análisis de la expresión relativista para la masa

$$m = m_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

se deduce que ningún cuerpo puede ser acelerado hasta velocidades  $v \geq c$ ; sin embargo, pudiera considerarse el caso en que  $v > c$ , entonces obtendríamos una masa imaginaria y de aquí surgió la hipótesis acerca de la posible existencia de partículas hipotéticas denominadas taquiones que se muevan siempre con velocidades  $v > c$  y que posean masas imaginarias  $m^* = im$ . La posibilidad de considerar al taquión como una partícula relativista con masa imaginaria en reposo fue planteada por primera vez en [24]. Se han realizado intentos de detección de los mismos en experimentos en aceleradores [25] y en los fenómenos astrofísicos [26].

La dificultad que presentan los taquiones para su existencia está relacionada con la ley de la causalidad. El problema de los taquiones está aún abierto y como los mismos no han sido detectados, hasta el momento la condición  $v \leq c$  para todas las partículas conocidas es la que responde a la realidad.

## SUMARIO (TER)

---

En la primera parte de este artículo hemos visto los diferentes trabajos que antecedieron a la TER, fundamentalmente los de Lorentz y Poincaré los cuales dieron pasos significativos en el establecimiento de la teoría, aunque Einstein fue el que dio el paso decisivo al postular el principio de la relatividad y la constancia de la velocidad de la luz en el vacío, e introducir el concepto de simultaneidad, el cual haría posible la sincronización de los relojes y la resolución de la contradicción aparente entre ambos postulados.

Seguidamente se expone cómo, a partir de estos principios se obtienen las transformaciones de Lorentz y se analizan las diferentes consecuencias que se derivan de ellas: la relatividad de la simultaneidad, la contracción de las escalas y el atraso de los relojes de los cuerpos en movimiento y la ley de suma de velocidades.

A continuación se presenta cómo, sobre la base de la representación covariante de los cuadvectores y los tensores en el espacio de Minkowski, se obtienen las ecuaciones de Maxwell y la ecuación del movimiento de las cargas en el campo electromagnético a través del tensor energía-impulso en forma de covariancia general, haciéndolas así extensibles a cualquier sistema inercial de referencia.

Se analizan igualmente varios fenómenos en los cuales refleja su aplicación la teoría, y que, al mismo tiempo, sirven como verificación experimental de esta, estos son: el efecto de Compton, el defecto de masa, el balance de las reacciones nucleares y el problema de los mesones.

Se analiza la problemática existente alrededor del valor límite de la velocidad de la luz en el vacío, la existencia de fuentes de emisión con velocidades superiores a la de la luz entre las que se encuentra la emisión de Vavilov-Cherenkov y la posibilidad de existencia de partículas que se muevan con velocidades superiores a la de la luz denominadas taquiones.

Todo ello nos ha dado una idea de la tremenda importancia que representa esta teoría en la ciencia en general y su interés actual en la explicación de numerosos fenómenos del micromundo donde tratamos con velocidades relativistas.

A lo largo de estos años han existido numerosos intentos de demostrar la inconsistencia de los principios de la teoría de la relatividad, sin embargo, todos ellos han concluido en fracaso [27]. Sin lugar a dudas la TR constituye una de las partes de la física moderna más coherente y elegante, tanto por su fundamentación matemática, como por sus confirmaciones experimentales e implicaciones filosóficas.

En tal sentido es necesario destacar que Einstein no sólo dio una fundamentación física de la TER y de sus principales consecuencias, sino que también la concibió como el eslabón intermedio hacia una teoría generalizada, que permitiera considerar el movimiento en sistemas no inerciales y los problemas de orden cosmológico.

Fue precisamente la creación de la teoría general de la relatividad la que ilustró el sentido y valor de la TER.

Pensamos que con el análisis realizado de los aspectos fundamentales de la TER, estamos en condiciones de pasar a analizar lo que constituyó la base de la cosmología relativista moderna y una de las teorías más completas, armónicas y profundas elaboradas por el genio humano, la teoría general de la relatividad, la cual será el objetivo de la segunda parte del presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Moller, C.  
Teoría de la relatividad. Atomizdat, 1975.
2. Pauli, W.  
Teoría de la relatividad, Nauka, 1983.
3. Synge, J.  
Teoría general de la relatividad. Izd. Inostrannoj literatury,  
1963.
4. Born, M.  
Teoría de la relatividad. Mir, 1972.
5. MacVitie, G.K.  
Teoría general de la relatividad y cosmología, Izd. Inostrannoj  
literatury, 1961.
6. Taylor, E.F.; y J.A. Wheeler  
Física del espacio-tiempo, Mir, 1971.
7. Ugarov, A.  
Teoría especial de la relatividad, Nauka, 1977.
8. A. Einstein y la teoría de la gravitación. Compendio de artículos por  
el centenario del nacimiento de Einstein, Mir, 1979.
9. Proceedings of the second Marcel Grossmann meeting on general relativity,  
ICTP Trieste, 5-11 July 1979, Part A and B.
10. Einstein, A.  
The Centennial Symposium in Jerusalem, 14-23 march 1979.
11. Castro Díaz-Balart, Fidel  
El espacio y el tiempo como atributos de la materia.  
En vías de publicación.
12. Einstein, A.  
Obras completas. Tomo I, Nauka, 1965.
13. Lorentz, G.A.  
Teoría de los electrones, M. 1977.
14. Lorentz, G.A.  
Viejos y nuevos problemas de la física, M. 1970.
15. Einstein, A.  
Obras completas. Tomo I, p. 686, 1967.
16. Champeney, D.C. and col.  
Phys Lett, 7 (1963) 241,
17. Bilgen, I.R.  
Phys Rev, A5 (1972) 591.

18. Parks, W.F. and col.  
Phys Rev. A9 (1974) 505.
19. Mandeshtam, L.I.  
Lecciones sobre óptica y teoría de la relatividad en mecánica cuántica, 1972. p. 208.
20. Feinberg, E.L.  
Uspekhi fiz nauk 116 (1975) 709.
21. Ginzburg, V.L.  
Zh. E.T.F. 62 (1972) 173.
22. Ginzburg, V.L.  
Uspekhi fiz.nauk 103 (1971) 393.
23. Ginzburg, V.L.  
Uspekhi Fizicheskij nauk 106 (1972) 577.
24. Terletsy J., Ya.P.  
Phys et Radium 21 (1960) 681; 23 (1962) 910.
25. Baltay, C. y otros  
Phys. Rev. D1 (1970) 759.
26. Danburg, J.S. and G.R. Kalbfleisch  
Phys Rev. D5 (1972) 1575
27. Cabezas, R. and J.L. López  
Preprint CEAC, 1986.