

Alonso Sepúlveda

Los hechos

El Laboratorio Nacional Gran Sasso, bajo los Apeninos centrales, es el mayor laboratorio subterráneo de física de partículas del mundo. Está cubierto por cerca de 1400 m de roca que protegen los experimentos de los rayos cósmicos, produciendo lo que los físicos llaman un silencio cósmico.

El Centro Europeo de Investigación Nuclear (CERN) —lugar de nacimiento de la World Wide Web— alberga el mayor anillo acelerador de partículas del planeta; está ubicado en la frontera entre Francia y Suiza.

Desde agosto de 2006 el CERN ha enfocado haces de neutrinos hacia el Gran Sasso, donde son detectados por los equipos Ópera e Icarus. El 23 de septiembre de 2011 el CERN y el laboratorio del Gran Sasso anunciaron que habían observado neutrinos que comenzaron su viaje en Ginebra y llegaron al segundo laboratorio unos sesenta nanosegundos (0.00000006 segundos) menos de los 2.44 milisegundos que hubiese tardado la luz en



MÁS RÁPIDO QUE LA LUZ

... deben aventajar en ligereza,
y con mayor presteza ser movidos,
que los rayos del Sol, y en igual tiempo
deben correr mucho mayor espacio
que cuando el Sol se lanza por el cielo.

Tito Lucrecio Caro, *De Rerum Natura*,
Libro II, líneas 202-206

el vacío si hubiese viajado el mismo trayecto. En este experimento Ópera, el neutrino sacaría a la luz una ventaja de 20 metros en los 730 kilómetros que separa los dos laboratorios. Esta última distancia fue medida con un error de 20 cm.

Esto supone que los neutrinos viajaron a una velocidad de 300.006 km/s, seis kilómetros por segundo más que la velocidad de la luz en el vacío. El margen de error calculado para el tiempo de vuelo fue de 10 nanosegundos (ns), lo que es bajo respecto a la diferencia anotada de sesenta ns entre la luz y los neutrinos.

Este resultado fue bautizado como la anomalía Ópera de los neutrinos, *the Opera Neutrinos Anomaly*, puesto que se cree que velocidades mayores que la de la luz violan la relatividad especial, una teoría a la que se considera bien establecida. Muchos creen que si los experimentos se confirman podrían tener implicaciones de gran alcance en la física.

Los detalles

El experimento creó en el CERN haces de neutrinos μ , algunos de los cuales —en su viaje de Ginebra a Italia— se transmutaron en neutrinos e , que son los neutrinos ordinarios. En su anuncio de septiembre de 2011 los experimentadores presentaron 60.7 ns como el tiempo de adelanto de los neutrinos respecto a la luz, mientras en noviembre, después de refinar sus análisis y disminuir los márgenes de error, anunciaron un retraso de 57.8 ns. En el mismo anuncio de noviembre, el grupo Ópera publicó los resultados de un experimento realizado entre el 21 de octubre y el 7 de noviembre, en el que obtuvieron para el retraso 62.1 ns.

En el experimento Ópera, los pulsos de neutrinos enviados desde el CERN tuvieron una duración “larga”, unos 10 microsegundos cada uno, por lo que la medida del momento exacto de su llegada al Gran Sasso pudo tener errores relativamente grandes. Pero los haces enviados por el CERN en el segundo experimento fueron de unos tres nanosegundos y espaciados entre sí 524 nanosegundos, lo que significa que los neutrinos pudieron ser rastreados hasta su pulso generador, lo que permitió a los científicos del

Gran Sasso medir su salida y llegada con mayor precisión, a pesar de que la intensidad del haz de neutrinos fuera bastante menor. La segunda serie de experimentos, conocida como Icarus, confirmó los primeros resultados.

El experimento Ópera fue diseñado para detectar oscilaciones de neutrinos, pero un resultado tentativo de 2007, de un grupo del Fermilab en USA que revelaba neutrinos superluminales, sugirió a los investigadores intentar medir con precisión la velocidad de los neutrinos.

El CERN genera destellos de neutrinos haciendo chocar chorros cortos de protones de una duración de 10.5 ms contra un blanco de grafito para producir neutrinos μ que decaen en otros tipos de neutrinos mientras viajan. En el lado italiano los neutrinos se detectan por la carga que ellos inducen, no por la luz que generan, ya que esta no participa en interacciones con neutrinos.

En su reporte, los investigadores escribieron:

A pesar del gran significado de las medidas reportadas aquí y la estabilidad del análisis, el potencial gran impacto del resultado motiva la continuación de nuestros estudios con el fin de investigar posibles efectos sistemáticos aún no conocidos que podrían explicar la anomalía observada. Deliberadamente no intentamos interpretación teórica alguna de los resultados.

Para los interesados, muchos detalles sobre esos experimentos y una amplia lista de referencias se presentan en el enlace: en.wikipedia.org/wiki/OPERA_neutrino_anomaly.

Se espera que en los dos años siguientes el Fermilab, en Estados Unidos, y el Super-Kamiokande (Super-K), en Japón —que resultó averiado tras el terremoto de marzo de 2011— repitan los experimentos. El Super-K es un observatorio de neutrinos originalmente diseñado para estudiar los neutrinos solares y atmosféricos y detectar el decaimiento de los protones y neutrinos que nos llegan de las supernovas. Está localizado a 1000 m bajo tierra en la mina de Mozumi, en la ciudad de Hida, llamada antes Kamioka. El núcleo del laboratorio consiste en 50 000 toneladas de agua pura rodeadas por cerca de

11 000 tubos fotomultiplicadores que sirven de detectores. La estructura cilíndrica tiene 40 m de alto y 40 m de ancho.

El Laboratorio Nacional Fermi de partículas elementales, ubicado en Chicago, que cuenta con un generador y un detector de neutrinos, es el otro candidato para verificar la existencia de los neutrinos superluminales. Medidas más precisas se esperan para 2013, y los resultados serían presentados en 2014.

En 1977 y 1995, en Fermilab fueron descubiertos los quarks *b* y *t*; y en el 2000 el neutrino tau. Hasta septiembre de 2008, cuando se inauguró el acelerador LHC (Large Hadron Collider) en el CERN, fue el acelerador de partículas más potente del planeta.

El modelo estándar

La imagen del mundo forjada por la física de las partículas elementales concibe que la diversidad del mundo natural es explicable mediante un número reducido de fuerzas naturales y partículas sin estructura.

Después de un esfuerzo de siglos pudo entenderse que fenómenos tan dispares como la atracción de la magnetita, las chispas eléctricas, los rayos, la luz y el arco iris —entre muchos otros— se deben a la existencia de la *fuerza electromagnética*, descrita a mediados del siglo XIX por el escocés Maxwell. Estas fuerzas responden por la existencia de los átomos y las moléculas.

Las *fuerzas nucleares fuertes* son las responsables de la existencia y estructura de los núcleos atómicos y explican la diversidad de la materia exhibida en la tabla periódica de Mendeleev.

Los fenómenos de transmutación radiactiva descubiertos por Becquerel y Curie pueden describirse mediante las *fuerzas nucleares débiles*, que actúan con particular eficacia en el centro de las estrellas para producir la secuencia de los elementos químicos en las diversas fases de la evolución estelar, desde las estrellas de la secuencia principal pasando por las gigantes y supergigantes rojas hasta las supernovas, en cuyos fuegos internos se generan los elementos químicos que moldean nuestro cuerpo y nuestro entorno.

Finalmente, las *fuerzas gravitacionales* son responsables de la evolución del universo a gran escala, dominando la evolución de las galaxias, los sistemas planetarios y el universo como totalidad. La gravitación es la fuerza cósmica fundamental.

Un modelo llamado electrodébil unificó, en los años ochenta, las fuerzas débil y electromagnética.

La física de las partículas elementales desarrollada desde 1930 asegura que las tres fuerzas naturales surgen del intercambio de partículas mediadoras —los *bosones intermedarios*— entre las llamadas *interactuantes*.

Las partículas interactuantes se ubican en dos grupos bastante diferentes: *quarks* y *leptones*. Los quarks vienen en seis “sabores”: *u, d, c, s, t, b*, mientras que los seis leptones son *e, μ , τ* y tres tipos de neutrinos “hermanos” de los tres leptones anteriores. Son los neutrinos electrónico, muónico y tauónico, detectados en el CERN en 1987. A cada una de estas partículas se asocia su antipartícula, espécimen que posee carga opuesta.

Los quarks, leptones y bosones intermedarios son hasta ahora suficientes para describir la amplia diversidad del mundo observado y son el centro del modelo estándar de las partículas elementales.

Los neutrinos

Tal vez a la más elusiva de las partículas elementales, el neutrino, lo caracteriza su presencia infaltable en todos los procesos de desintegración radiactiva, comandados por las interacciones débiles.

Su existencia —postulada en 1930 por Pauli para evitar la violación de las leyes de conservación de la energía y de los momentos lineal y angular— fue confirmada por Cowen y Reines en 1956. Lo que aparentemente se perdía era transportado por los neutrinos. El nombre fue acuñado por Fermi y significa literalmente, y en italiano, neutronicito. Más tarde se concluyó que deberían existir tres “sabores” de neutrinos.

En su viaje los neutrinos pueden pasar de un sabor a otro, un fenómeno conocido como *oscilación de neutrinos*; se cree que esta oscilación ocurre con mayor probabilidad dentro de la materia densa que en el espacio interestelar. La primera evidencia de la oscilación de neutrinos

fue lograda con el Super-K en 1998, resultando compatible con la teoría de que los neutrinos tienen una masa muy pequeña pero no nula.

Carecen de carga eléctrica y su masa es muy pequeña, cerca de unas diez mil veces menor que la del electrón, que a su vez es unas 1840 veces menor que un protón. Puesto que los neutrinos carecen de carga no experimentan fuerzas electromagnéticas; tampoco fuerzas fuertes, a las que solo son sensibles los quarks, no los leptones; responden, por tanto, solo a la gravitación y a la fuerza nuclear débil. Por esta razón los neutrinos tienen una muy débil interacción con la materia ordinaria, lo que los hace muy difíciles de detectar; pueden atravesar grandes masas sin dejar rastro. Nuestro cuerpo es traspasado por miles de millones cada segundo y de ello no queda secuela alguna que podamos reconocer, aunque tal vez sean capaces de alterar en mínima medida las cadenas genéticas.

Resulta entonces necesario instalar trampas eficientes y enormes para cazar neutrinos. El más notable de estos artilugios es el Super-K en Japón, uno de los laboratorios que asumirá el reto de confirmar los resultados de la colaboración CERN-Gran Sasso.

De otro lado, la más importante fuente natural de neutrinos es el Sol, que los genera como resultado de las reacciones nucleares que dan lugar a la aparición del helio; le siguen las supernovas; también pueden ser generados en las centrales nucleares y en los aceleradores de partículas, como en el ubicado en el CERN.

Se sabe que los neutrinos se encuentran en gran cantidad en todos los puntos del universo y se cree que a pesar de su pequeñez aportan al cosmos una inmensa cantidad de masa.

Los neutrinos son partículas de alta velocidad, cuya descripción requiere la singular fusión de la mecánica cuántica y la relatividad especial lograda por Dirac en 1928.

Relatividad

Desde los años siguientes a la formulación de la relatividad especial por Einstein en 1905, se difundió entre los físicos la convicción de que nada puede viajar más rápido que la luz, y que

esta es un tope insuperable para la propagación de señales y de efectos físicos. Esta creencia debe ser matizada teniendo en cuenta que:

Una partícula con masa puede ser acelerada hasta alcanzar una velocidad (c) cercana a la de la luz, *sin sobrepasarla jamás*.

La luz (una partícula de masa cero) nace con velocidad c , vale decir, que no la logra por aceleración.

Una partícula con masa, cuyo cambio de velocidad se logra por aceleración, aumenta su masa con la velocidad, de modo que esta tiende a infinito al acercarse a c . Al lograr esta velocidad su masa debería tornarse cero, para luego superar c recuperando su masa original. Esto es imposible, por lo que una partícula no puede lograr por aceleración una velocidad igual o más alta que la de la luz en el vacío.

Conviene recordar que el papel de la velocidad de la luz en la relatividad especial se debe a su carácter de *constante universal*, y no a que sea (o no) una velocidad máxima. De hecho, el segundo postulado requiere una velocidad invariante, no una velocidad máxima.

Resulta, sin embargo, que es posible, y no contradictorio con la relatividad especial, la existencia de partículas que nacen con velocidades superiores a c . Esto ha sido negado insistentemente a través de los años acudiendo a débiles argumentos; entre otros, a que en la zona superluminal abundarían los números imaginarios, no medibles en nuestro mundo ordinario, dominado por las cantidades reales.

El físico indio Sudarshan imagina a un demógrafo de su país quien asegura, sin dudar, que al norte de los Himalayas no puede haber personas, puesto que es imposible sobrepasar tan altas montañas. Pero es obvio que tales personas pueden haber nacido al norte sin haber tenido que migrar. Igual ocurre con las partículas supraluminales: nacen con velocidad mayor que c a partir de ciertas reacciones nucleares, y no tuvieron que ser aceleradas.

Taquiones y causalidad

Hasta los años sesenta no se presentó una teoría consistente y completa de las partículas supraluminales a las que ahora se conoce como

taquiones; los *bradiones* viajan a velocidades subluminales y los *luxones* viajan a la velocidad de la luz. La relatividad especial estándar se refirió siempre a bradiones y luxones.

Ahora bien, una predicción sorprendente de la relatividad especial es la existencia de la antimateria (Dirac, 1928), lo que significa que si hay electrones también habrán positrones, partículas con carga opuesta; así, para cada partícula habrá otra con cargas opuestas.

De esta predicción —que bien pudo hacerse en 1905— surgió la posibilidad de la existencia de partículas con energías positivas y negativas y del viaje de unas y otras hacia el futuro o el pasado.

Resulta, por ejemplo, que si desde algún sistema de referencia (SR) se estudia el movimiento de un taquión hacia el futuro, algunos observadores en movimiento respecto a SR podrán encontrar que tal partícula viaja *hacia el pasado*, lo que en principio introduce paradojas y fenómenos no causales. Hace posible, por ejemplo, que un observador viaje hacia el pasado y lo modifique hasta tal punto que no permita su propia existencia (por ejemplo, ahogando a su abuela cuando era una recién nacida).

Sería posible enviar una señal que, después de viajar un cierto trecho y retornar, alcance su lugar de partida antes de haber sido enviada.

Estas violaciones del ordenamiento temporal, que traen paradojas y distorsión de las relaciones

causales, no fueron superadas antes de los años sesenta y dieron pie a creer que la relatividad especial aseguraba la inexistencia de los taquiones.

Sin embargo, nuevas y cuidadosas consideraciones no ortodoxas, que fueron propuestas en los años sesenta por Arzelies, Tanaka, Terletski y Sudarshan, permitieron escribir la relatividad especial en una forma ampliada, consistente con los dos postulados y que a la vez permite la existencia de los taquiones; se llama *relatividad extendida*. Tal teoría propone la introducción de un tercer principio de la relatividad especial, conocido también como Principio de reinterpretación:

Todas las partículas tienen energía positiva y viajan hacia el futuro.

La estructura matemática de la teoría no permite partículas de energía negativa que viajen al futuro, ni partículas de energía positiva que viajen al pasado. Pero puesto que los dos primeros principios permiten la existencia de partículas de energía negativa que viajan hacia el pasado, estas han de reinterpretarse como *antipartículas* de energía positiva que viajan hacia el futuro.

Como es sabido, la teoría de Einstein relativiza las longitudes y duraciones, haciéndolas depender del movimiento de los observadores. La eliminación de violaciones en la causalidad se consigue al precio de relativizar las nociones de causa y efecto: si para un observador la causa es la salida de un taquión de un punto *A*, y el efecto

LOS NEUTRINOS SON PARTÍCULAS DE ALTA VELOCIDAD, CUYA DESCRIPCIÓN REQUIERE LA SINGULAR FUSIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA Y LA RELATIVIDAD ESPECIAL LOGRADA POR DIRAC EN 1928.

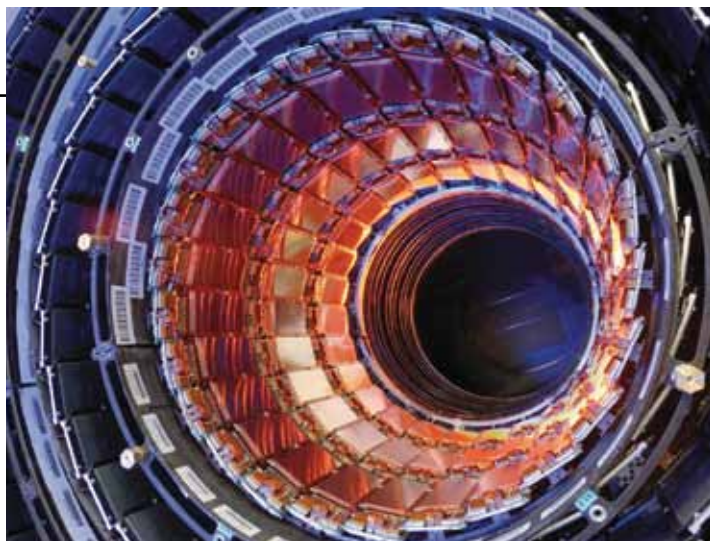


Foto tomada de Taringa.net

su llegada al punto B , para otro observador, con otro movimiento, la causa es la salida de un antitaquión de B y el efecto su llegada a A .

Esto no debería causar inquietud a quien entienda que en relatividad solo las *leyes*, y no la *descripción* de los detalles, son las mismas para todos los observadores, como lo asevera el primer postulado. En ambos casos los observadores ven la causa preceder a su propio efecto; solo que *para eventos asociados con taquiones* cuál es la causa y cuál el efecto depende del movimiento del observador.

Conviene indicar que para eventos asociados a bradiones las causas y los efectos mantienen su identidad y su orden temporal: si para un observador A es causa y B es efecto, con A antes de B , así lo será para todos los observadores subluminales.

El tercer postulado es equivalente al establecimiento explícito del Principio de causalidad: *para todos los observadores las causas preceden cronológicamente a sus propios efectos, aun en presencia de taquiones.*

Como consecuencia, la relatividad extendida no admite viajes al pasado.

El carácter de partícula y antipartícula permanece invariable para bradiones; pero si se trata de partículas superluminales, que la misma partícula sea taquión o antitaquión depende del observador, como lo asevera el tercer postulado.

La relativización incluye por tanto a bradiones y taquiones. Un bradión observado desde cualquier sistema de referencia subluminal (SRSI) es un bradión, pero observado desde un sistema de referencia superluminal (SRSr) es un taquión. Un taquión observado desde cualquier SRSI es un taquión, pero es un bradión observado desde un SRSr. La velocidad relativa entre dos SRSI cualquiera es siempre menor que c , igual que la velocidad relativa entre dos SRSr. La velocidad relativa entre un sistema SRSr y otro SRSI es siempre mayor que c .

Ningún taquión puede atravesar la barrera c para convertirse en un bradión, como tampoco un bradión podrá atravesarla y convertirse en un taquión.

El tercer principio restringe opciones permitidas por los dos principios, al reconocer desde el inicio la existencia de las antipartículas, y es suficiente para impedir viajes al pasado y resolver las paradojas causales asociadas.

La masa de los taquiones y bradiones es un número real. Pero a diferencia de los bradiones —que aumentan su velocidad al aumentar su energía—, los taquiones tienen propiedades curiosas: se vuelven más lentos cuando su energía aumenta; por esto se necesita cada vez más energía para lograr que desaceleren y se acerquen a la velocidad de la luz (así como se necesitan ingentes cantidades de energía para que un bradión se acerque a la velocidad de la luz). Por el contrario, cuando la velocidad de un taquión aumenta sin límite, su energía se reduce a cero.

Son diversos los costos en que debe incurrir la imaginación científica para hacer factibles las velocidades superluminales sin traer violaciones en el principio de causalidad.

De acuerdo con todo lo dicho, la relatividad de Einstein en su forma extendida se adapta sin contradicción a la existencia de velocidades superluminales. Resulta que es suficiente incluir en la estructura de la teoría de Einstein, y en forma explícita, el principio de causalidad que estuvo incluido en los trabajos de Dirac de 1928 y de Feynman en 1948.

Y bien podría ser que los neutrinos —a los que nunca se les había medido su velocidad— sean el primer tipo detectado de taquiones. ■

Alonso Sepúlveda (Colombia)

Físico de la Universidad de Antioquia, con estudios de posgrado en el Hunter College de la Universidad de Nueva York. Ha publicado: *Los conceptos de la física, Electromagnetismo, Física matemática y Estética y simetrías*. Ha participado en proyectos de investigación sobre dinámica de galaxias con el grupo de astrofísica de la Universidad de Roma.

Bibliografía

Recami Erasmo (ed.). *Tachyons, Monopoles, and Related Topics*. Netherlands: North Holland Publishing Company, 1978.

Ugarov Vladimir Aleksandrovic. *Teoria della relatività ristretta*. Mosca: Edizioni Mir, 1982.