

DIÁLOGOS SOBRE FÍSICA CUÁNTICA. V. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD EN EL MUNDO SUBATÓMICO

Autor: José Antonio Montiel Tosso
Profesor de Enseñanza Secundaria

Alumno: Hemos resaltado mucho el cambio tan drástico que sacudió los cimientos de la física atómica con el desarrollo de la **teoría cuántica**, sin embargo, no fue menos importante el impacto que la **teoría de la relatividad** tuvo en la física clásica. ¿No es cierto?.

Profesor: Completamente de acuerdo. De hecho, la física es otra antes y después de la publicación de las ideas de Einstein. Incluso las distinguimos como *física clásica* (o newtoniana) y *física moderna* (o relativista).

Alumno: ¿Por qué la mayoría de las veces no tenemos en cuenta las ecuaciones de Einstein en los fenómenos físicos y continuamos usando las expresiones clásicas?.

Profesor: Porque solamente es aplicable la **mecánica relativista** en el tratamiento de supuestos donde intervengan grandes velocidades, cercanas a la de la luz.

Alumno: Entonces, no es muy aventurado pensar que las consideraciones relativistas afectarán a las partículas subatómicas, puesto que sus velocidades son muy elevadas. ¿Me equivoco?.

Profesor: En absoluto. Estás en lo cierto. Para realizar los cálculos con precisión en los experimentos con partículas subatómicas es imprescindible introducir las correspondientes correcciones relativistas. Si queremos, por ejemplo, hacer un balance energético en un proceso nuclear, debemos corregir los valores de las masas y energías de las partículas implicadas de acuerdo con sus velocidades.

ANTECEDENTES

Alumno: No obstante, en 1905, cuando Albert Einstein publicó su teoría de la relatividad, aún no existían datos sobre reacciones nucleares. ¿Bajo qué planteamientos o exigencias se pudo elaborar esta nueva teoría?.

Profesor: Estás en lo cierto cuando afirmas que en esa época no se conocían las reacciones nucleares, pues apenas se acababa de descubrir la radiactividad natural. Sin embargo, Einstein tenía noticia de dos hechos notables, que se encontraban estrechamente relacionados, aunque, hasta ese momento, nadie había reparado en ello.

Alumno: ¿A qué hechos se refiere?.

Profesor: Por un lado, Maxwell había demostrado definitivamente el *carácter ondulatorio* de la luz y, mediante sus ecuaciones del campo electromagnético había calculado teóricamente su velocidad, resultando ser

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

donde c es la *velocidad de la luz*, ε es la constante dieléctrica del medio y μ su permeabilidad magnética.

Para el vacío, esa expresión arroja un valor de c muy cercano a 300000 km/s, es decir, $3 \cdot 10^8$ m/s, una velocidad límite inalcanzable para cualquier cuerpo de nuestro universo.

Por aquel entonces, los físicos tenían una visión del mundo puramente *mecanicista*, y las ondas que se conocían eran *mecánicas*, similares al sonido. Estas

ondas requieren siempre un medio material para propagarse y se aferraron a la idea de que la luz necesitaba algo que le permitiera viajar por el vacío espacial y llegar hasta nosotros desde las estrellas y el sol.

Alumno: Recuerdo que ésa es la vieja teoría del **éter** de los filósofos griegos, defendida, entre otros, por el insigne Aristóteles.

Profesor: Lógicamente, el hipotético éter debía ser una "sustancia" sin masa, puesto que la luz se propaga en el vacío, pero, al mismo tiempo, había de poseer propiedades elásticas como las de un sólido para permitir las vibraciones transversales del movimiento ondulatorio.

Alumno: Es lo que llamaríamos un auténtico enigma. ¿Y el otro hecho notable al que antes se hacía referencia?.

EXPERIMENTO DE MICHELSON Y MORLEY

Profesor: Con el fin de acabar de una vez por todas con la polémica acerca de la existencia del éter, los físicos norteamericanos A. A. Michelson y E. W. Morley realizaron en 1887 un singular experimento, cuyo objetivo era medir la velocidad relativa del éter respecto a la Tierra, ya que, según las ideas imperantes, ésta se movía en su seno al describir su órbita alrededor del Sol. Ahora bien, tengo que decir que sus resultados fueron sorprendentes.

Alumno: ¿Cuál era el diseño del experimento?.

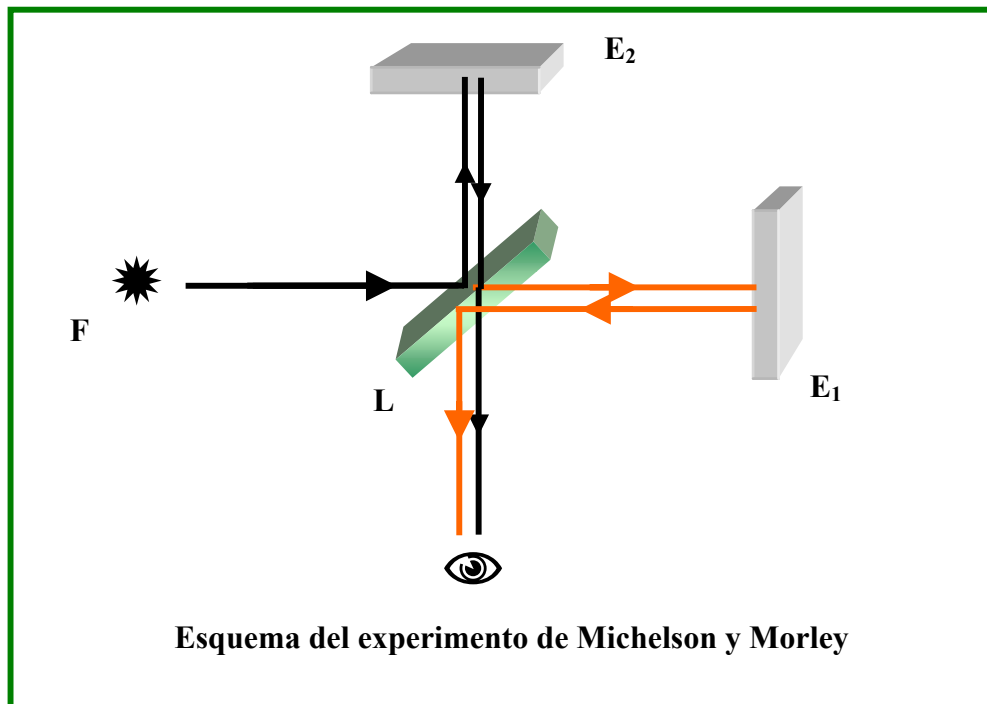
Profesor: Ciertamente, la idea no era muy complicada. Básicamente, Michelson y Morley utilizaron un foco luminoso (F), dos espejos (E_1 y E_2) y una lámina semiplataada (L).

Alumno: ¿Una lámina semiplataada?.

Profesor: Es aquélla que refleja una parte del rayo luminoso que incide sobre ella y deja pasar sin desviarse otra parte del mismo.

Alumno: ¿Y cómo se disponían estos componentes?.

Profesor: Formaban un dispositivo que denominaron interferómetro.



Del foco F parte un rayo de luz que llega a la lámina L, la cual es atravesada por la mitad del mismo sin desviación, dirigiéndose hacia el espejo E_1 , mientras que la otra

mitad el rayo se refleja en el espejo E_2 . A continuación, los rayos vuelven a L desde direcciones perpendiculares y, gracias a las propiedades de dicha lámina, son dirigidos hacia el observador. Como la distancia entre L y E_1 es igual a la que separa L y E_2 , ambos rayos llegarán en fase al observador si no hay "viento del éter". Por el contrario, en el supuesto de que exista velocidad relativa Tierra-éter, el rayo que se mueve en la dirección paralela al movimiento de la Tierra se retardaría algo, no viéndose afectado el rayo perpendicular. Entonces, dichos rayos llegarán con un cierto desfase temporal, lo que nos permitiría medir la velocidad relativa del éter.

Alumno: Ya supongo el resultado del experimento. Ambos rayos llegaron en fase.

Profesor: Efectivamente. Eso era lo que se comprobaba cada vez que se repitió el experimento.

Alumno: Así pues, el experimento de Michelson y Morley demostró la inexistencia del famoso éter.

Profesor: No sólo eso. Al reproducir las experiencias en distintos lugares y posiciones y no observar desfase alguno entre los rayos luminosos se gestó la idea de que la velocidad de la luz es constante e independiente del movimiento del observador y del foco luminoso, postulándose la falsedad de la teoría del éter. Como consecuencia de ello, no puede existir el movimiento absoluto, pues no hay nada fijo en el universo que sirva como referencia absoluta. De ahí que Einstein eligiese el nombre de **relatividad** para su asombrosa teoría.

POSTULADOS DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Alumno: ¿Cuáles son los principios básicos de la **Teoría de la Relatividad**?

Profesor: Einstein propuso dos **postulados** en su Teoría Especial de la Relatividad, publicada en 1905, que aplicó a todos los sistemas físicos, tanto mecánicos como electromagnéticos.

El primero dice que "un observador inercial no puede distinguir el estado de reposo del movimiento rectilíneo y uniforme" y es una generalización del *Principio de la Relatividad de Galileo* para la cinemática.

Alumno: ¿Qué es un observador *inercial*?

Profesor: Los observadores inerciales o los *sistemas inerciales* son los que no se mueven uno respecto del otro o bien lo hacen con movimiento rectilíneo y uniforme. Carecen, por tanto, de aceleración.

Alumno: ¿Cuál es el enunciado del segundo postulado?

Profesor: "En todos los sistemas inerciales, la velocidad de la luz es una constante, y no depende ni del movimiento del foco luminoso ni del observador".

De estos dos postulados, en apariencia sencillos, se derivan unas consecuencias muy importantes que cambiaron la física del siglo XX.

CONSECUENCIAS

Alumno: ¿Y cómo afectan las consideraciones relativistas a las partículas fundamentales?

Profesor: Para responder a esa pregunta es necesario profundizar un poco más en las consecuencias de la teoría.

En primer lugar, para que la velocidad de la luz (c) sea una constante universal debemos asumir que cada observador mide o "siente" un **tiempo propio**, de modo que si se mueve en la misma dirección del rayo luminoso el tiempo se "dilata" y cuando se mueve en dirección opuesta, su tiempo propio se "acorta" proporcionalmente a su velocidad, de manera que, al calcular c , cada observador obtiene el mismo resultado.

Alumno: Según ello, ¿cada uno de nosotros tenemos un tiempo propio?

Profesor: Teóricamente sí. Pero, como las velocidades con que nos desplazamos son muy pequeñas, comparadas con c , nuestro tiempo propio es el mismo. De ahí que la física clásica tuviese el tiempo como una magnitud absoluta.

Alumno: Ya empiezo a ver algunas peculiaridades en el mundo subatómico, pues las partículas elementales se mueven a gran velocidad y sus tiempos propios habrán de ser diferentes. ¿Verdad?

Profesor: Por supuesto. Además, la verificación de este hecho constituye una de las pruebas más sólidas de la validez de la Teoría de la Relatividad.

Alumno: ¿Cómo puede verificarse?

Profesor: Por ejemplo, cuando se determina la **vida media** de un mesón pi (o pión) en experimentos de laboratorio de altas energías se obtienen valores en torno a los microsegundos (millonésimas de segundo). Sin embargo, sabemos que su vida media es una cien veces inferior, es decir, poco más de 10^{-8} s.

Alumno: Existe una cierta contradicción.

Profesor: Pero solo en apariencia, ya que la velocidad de los mesones en los experimentos es muy elevada, cercana a la de la luz. Si se aplican las ecuaciones relativistas, deducidas de los postulados, y se calcula el tiempo propio de dichas partículas, los resultados coinciden con los experimentales.

Alumno: Por consiguiente, nosotros detectamos que los mesones *alargan su vida* cuando viajan a altas velocidades en el acelerador.

Profesor: Pero sólo nos lo parece así a nosotros. El mesón "no advierte" que su vida se alarga. Para él, su tiempo no ha cambiado. Parece una paradoja, pero los datos la confirman.

Alumno: Entonces, serán capaces de recorrer mucha mayor distancia en los aceleradores sin desintegrarse.

Profesor: Claro. Si el tiempo fuera absoluto y no dependiera de la velocidad del mesón, éste siempre recorrería unos pocos centímetros antes de desaparecer. Sin embargo, a altas energías, los mesones pueden recorrer más de un kilómetro. Asombroso ¿no?

Alumno: Me gustaría saber qué tipo de cálculos propuso Einstein para modificar las coordenadas de las partículas relativistas.

Profesor: El tratamiento matemático exige una especial transformación, desarrollada previamente por Lorente, en las coordenadas de un observador que se mueva a una cierta velocidad con respecto a otro en reposo.

Ecuaciones de transformación de Lorentz

Si (x, y, z, t) son las coordenadas espaciotemporales de un observador inercial y (x', y', z', t') las de otro que se mueve con velocidad v respecto al primero, se pueden expresar las coordenadas del observador en movimiento de la siguiente manera:

$$x' = (x - vt)\gamma$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \left(t - \frac{v}{c^2} x\right)\gamma$$

donde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Para simplificar hemos supuesto que el observador móvil se desplaza únicamente en la dirección x' , paralela a x .

Alumno: Mediante dichas ecuaciones de Lorentz, si hacemos la velocidad del observador muy pequeña con respecto a c , pueden deducirse las leyes de la física newtoniana sobre adición de velocidades. ¿No es cierto?

Profesor: Evidentemente. La mecánica newtoniana es un caso límite y, por tanto, se halla contenida en la mecánica relativista. Además, recuerda que dichas transformaciones tienen importantes consecuencias. Por ejemplo, los sucesos simultáneos para un observador no lo son para otro que se mueva respecto al primero, puesto que el tiempo de un sistema en movimiento aparentemente se dilata si lo comparamos con el tiempo propio de un sistema en reposo.

Alumno: ¿Sólo repercuten en el tiempo los efectos relativistas?

Profesor: Evidentemente, no. El planteamiento matemático comienza por definir un espacio de cuatro dimensiones, el denominado "**espacio de Minkowski**", añadiendo el tiempo a las tres dimensiones espaciales clásicas. Por ello, las longitudes de los objetos en la dirección del movimiento parecen disminuir respecto a sus longitudes en reposo. Esto se conoce como "**contracción de Lorentz-Fitzgerald**", porque fue este último quien primero lo propuso como hipótesis a raíz del experimento de Michelson y Morley.

Alumno: Verdaderamente, el cambio teórico fue grande.

Profesor: Sin embargo, con ser muy importante todo lo anteriormente dicho, en mi opinión aún no hemos comentado el asunto que más afecta al mundo subatómico. Me refiero al aumento de masa al crecer la velocidad de la partícula.

Alumno: Es decir, otra consecuencia directa de la teoría de la relatividad.

Profesor: Aplicando el **principio de conservación de la cantidad de movimiento**, que, como sabes, es una ley inquebrantable de la física, Einstein dedujo que la masa de una partícula en movimiento depende de su velocidad de acuerdo con la expresión

$$m = m_0 \gamma$$

donde m_0 es la masa de la partícula en reposo y γ es el factor que aparecía en las transformaciones de Lorentz y cuyo valor es siempre mayor o igual a 1. Es decir, se acerca a la unidad conforme la velocidad se hace menor. En los objetos macroscópicos, $\gamma = 1$, por lo que su masa en movimiento coincide con la masa en reposo, como estamos acostumbrados a observar.

EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA

Alumno: Según la ecuación anterior, cuando una partícula gana velocidad γ , en consecuencia, aumenta su masa, debería ser cada vez más grande. No lo entiendo.

Profesor: Lo que sucede, como puede derivarse de dicha fórmula y de la expresión clásica de la energía cinética, es que el incremento de masa que experimenta la partícula se acumula en forma de energía cinética relativista, cuya expresión es

$$E_C = \Delta m c^2$$

siendo Δm el aumento de masa debido a la velocidad.

Alumno: Esa fórmula relaciona la masa y la energía cinética de una partícula relativista. Pero, ¿podemos hallar otra relación similar entre la energía total de dicha partícula y su masa?.

Profesor: Claro que sí. Es la consecuencia más conocida de la teoría de Einstein, la **equivalencia masa-energía**. Es sencillo deducir, desde la fórmula de la energía cinética, la siguiente ecuación

$$E = m c^2$$

donde E es la energía total relativista y m es la masa de la partícula en movimiento.

Alumno: Quizá sea la fórmula más popular de la física. ¿Cómo se deduce dicha ecuación?.

Profesor: Si partimos de la fórmula de la energía cinética relativista de una partícula de masa en reposo m_0 , tenemos que

$$\begin{aligned} E_C &= \Delta m c^2 \\ E_C &= (m - m_0) c^2 \\ E_C &= m c^2 - m_0 c^2 \end{aligned}$$

El término $m_0 c^2$ es la energía en reposo de la partícula, la que se asocia con su masa en reposo, que designaremos por E_0 .

Por lo tanto,

$$E_C = m c^2 - E_0$$

De donde

$$m c^2 = E_C + E_0 .$$

El término $m c^2$ representa la suma de la energía cinética relativista de una partícula y su energía en reposo, por lo tanto constituirá justamente la energía relativista total que buscamos y que designaremos por E . O sea,

$$E = E_C + E_0 = m c^2$$

que constituye la famosa ecuación de Einstein tantas veces utilizada en la física de partículas y en las reacciones nucleares.

ANTIMATERIA

Alumno: Junto a la equivalencia masa-energía, ¿hay alguna otra consecuencia relevante de la teoría de la relatividad sobre las partículas fundamentales?.

Profesor: En 1928, Paul Dirac introdujo los efectos relativistas en la ecuación de ondas de Schrödinger que describe el comportamiento del electrón en el átomo y, al calcular las soluciones de la energía, obtuvo la expresión

$$E^2 = m^2 c^4,$$

de la que se deriva

$$E = \pm m c^2$$

Alumno: Es la energía cinética relativista cuando se toma con signo positivo, pero no tiene sentido real con el signo negativo.

Profesor: Eso fue, precisamente, lo que pensaron los físicos de finales de los años 20. Bueno, todos excepto el propio Dirac, quien intentó afanosamente hallar una explicación a los valores negativos de la energía.

Alumno: ¿Y la encontró?.

Profesor: Muy pronto, Dirac propuso que el **vacío** estaba constituido por un *mar de electrones de energía negativa*, con todos los niveles ocupados. De este modo, no los podemos observar, puesto que no se pueden producir transiciones entre dichos niveles completamente llenos. Sin embargo, en un momento dado, un fotón de alta energía es posible que colisione con uno de dichos electrones y en ese instante lo hace "visible" al comunicarle la suficiente energía como para que el electrón pase a un nivel de energía positivo. Al mismo tiempo que detectamos el electrón en el "mundo real", éste habrá dejado un "hueco" en los niveles de energía negativos que lo interpretaremos como la aparición de otra partícula, de masa igual a la del electrón, pero con carga positiva.

Alumno: Tengo entendido que a dicha partícula se le llamó **positrón**, como abreviatura de *electrón positivo*.

Profesor: Así es. La hipótesis de Dirac fue confirmada muy pocos años más tarde, en 1932, cuando Carl Anderson y Robert Millikan, del Instituto de Tecnología de California, detectaron al positrón en los rayos cósmicos.

Alumno: Me imagino que el nuevo positrón tendría todas las características predichas por Dirac.

Profesor: En efecto. No sólo el electrón tiene su antipartícula, sino que ese mismo concepto acerca de la estructura del vacío cabe extenderse al resto de las partículas. De tal manera que hablamos así de la existencia de la **antimateria**, constituida por las partículas simétricas. Podemos crear una pareja partícula-antipartícula en experimentos con fotones de alta energía y, lógicamente, cuando se encuentre una partícula con su correspondiente antipartícula, se aniquilarán mutuamente, transformándose en energía.

La antipartícula del protón es el **antiprotón**, que tiene sus mismas propiedades y una carga eléctrica igual en valor numérico, aunque negativa.

Alumno: ¿Por qué, entonces, no existe la antimateria en el universo?.

Profesor: Es muy probable que en los primeros *estadios* del universo, poco después del Big Bang, se creara tanto materia ordinaria como antimateria y que, debido a la asimetría introducida en la rápida etapa inflacionaria, en cada región del espacio predominaran las cantidades de una sobre las de la otra. De este modo, una vez concluida la aniquilación, el resultado final fuera o bien una zona de materia, como la nuestra, o una de antimateria.

Alumno: Por lo tanto, puede ser que la luz de alguna de las galaxias lejanas que observamos corresponda a regiones de antimateria.

Profesor: Y también es muy posible que algunas de las radiaciones procedentes de las zonas remotas del espacio sean debidas a los fotones originados en la destrucción mutua de la materia y la antimateria que ocasionalmente se hayan acercado lo bastante en esas regiones del universo.

