

FOTÓN
A PARTIR DE LA TEORÍA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

William José Robayo

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA
Modalidad: MONOGRAFIA

Director:Paco H. Talero L.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Proyecto curricular en licenciatura en física
BOGOTÁ D.C.
SEPTIEMBRE de 2016

*Este trabajo está dedicado a la memoria de mi Madre y a los
hijos adultos ,
que cuando pequeños, soñaban con convertirse en científicos.*

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos son principalmente dirigidos a el profesor Paco Talero, mi abuela María Isabel que siempre ha estado apoyándome, mi novia Lizeth Suárez y mis compañeros de estudio Yamith Rodriguez, Cindy Montoya, Hector Cantor, Miguel Angel y otros compañeros más.¹ Y todos aquellos que contribuirán para que se produzcan trabajos académicos conforme las normas ABNT con L^AT_EX sea posible. Agradecimientos especiales son direccionados a la Universidad Central que me abrió las puertas para desarrollar este trabajo en algunas tardes bogotanas.

¹Los nombres de los dos integrantes del primer proyecto abnT_EX se encuentran referidos <http://codigolivre.org.br/projects/abntex/>

RESUMEN

Este trabajo muestra que el fotón tiene origen en la relatividad especial, la teoría electromagnética y en argumentos de simetría que surgen al contrastar el cuadrivector momentum-energía de una partícula de masa en reposo $m_o = 0$, con el cuadrivector de onda asociado al efecto Doppler. Esta didáctica permite introducir el concepto de fotón y su dualidad desde un punto de vista estrictamente teórico, y permite que el instructor presente los experimentos sobre el efecto fotoeléctrico desde la confrontación teoría-experimento, metodología que complementa la tradicional presentación estrictamente experimental que se efectúa en los cursos de física moderna. Se hace una propuesta basada en una investigación teórica sobre el alcance que tiene la teoría de la relatividad para llegar a tal concepto, tomando como base el efecto Doppler y las invariantes que se manifiestan en este fenómeno, teniendo presente que la física moderna se entiende muy poco y no hay suficiente material teórico y experimental para enseñar la luz propuesta como partícula.

Palabras clave: Cuadrivector onda, cuadrivector momento-energía, fotón, dualidad onda partícula.

Índice de figuras

4.1. Configuración inicial del sistema , $t = 0$ justo cuándo la ráfaga de radiación sale de A hacia B	14
4.2. La ráfaga de radiación con momentum $p = E/c$, denotada con \Rightarrow , ya salió del cuerpo A pero aún no ha llegado al cuerpo B	14
4.3. Configuración final del sistema, cuando ha transcurrido un tiempo $t > L/c$ y la ráfaga de radiación ha sido absorbida por el cuerpo B	14

Introducción

De acuerdo a la hipótesis de Einstein presentada en su artículo número 5 del año 1905 "Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz". En la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual la energía no está distribuida de una forma continua sobre volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse y solo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas. Einstein llega a una dependencia de la entropía de radiación monocromática respecto al volumen expresándola mediante el principio de Boltzmann. En diversos textos actuales de física moderna se introduce el concepto de fotón a través de una descripción experimental fundamentada por lo general en el desarrollo histórico [1]. Muchas instituciones universitarias han venido adoptando tal enfoque para sus cursos de ciencias e ingeniería y aunque esta estrategia didáctica es complementada con la reproducción de experimentos sobre el efecto fotoeléctrico deja de lado la posibilidad de realizar una primera aproximación a la interpretación puramente teórica del fotón y a la dualidad onda partícula que implica tal concepto.

Siguiendo la sugerencia propuesta en las referencias [2, 3] se comparó la formulación en cuadrivectores de momento-energía de $m_0 = 0$ con el cuadrivector de onda para desvelar la simetría presente entre ellos, con el fin de diseñar una didáctica del concepto de fotón aplicado a cursos de física moderna que permita formar en los estudiantes y docentes, una representación de tal concepto desde la teoría de la relatividad que es confrontado por los resultados arrojados con experimentos del efecto fotoeléctrico donde se muestra la interacción radiación electromagnética con la materia.

Este trabajo está organizado como sigue, en el capítulo 1 se hace una breve reseña sobre el efecto Doppler y las ondas transversales desde la teoría electromagnética de Maxwell llegando a la definición de potencia de radiación, relacionando la energía y el momento de una onda plana en el vacío $E = cp$, energía transportada por una onda electromagnética; en el capítulo 2 se expone la energía relativista y las partículas de $m_0 = 0$ efectuando un análisis para entender el caso cuando la velocidad de una partícula es la velocidad luz, en el capítulo 3 se presenta la formulación del cuadrivector momento-energía y el cuadrivector de onda donde se desvela y se presenta la simetría entre estos dos cuadrivectores. En el capítulo 4, se presenta de forma breve una didáctica que permite introducir el concepto de fotón desde una perspectiva teórica con base en la relatividad especial y argumentos de simetría; y por último se consideran las conclusiones de este trabajo.

Contenido

1. Electromagnetismo	3
1.1. Efecto Doppler	3
1.2. Energía y Momento electromagnético	4
2. Energía y Masa en reposo $m_0 = 0$	6
2.1. Partículas con masa en reposo m_0	6
2.2. Energía relativista	7
3. Cuadrivector Momento-Energía y Cuadrivector de Onda	9
3.1. Cuadrivector de Onda	9
3.2. Cuadrivector Momento-Energía	11
4. Propuesta didáctica del concepto de fotón	13
4.1. Experimento mental de la caja desquiciada de Einstein	13
4.1.1. La caja desquiciada de Einstein, evidencia de que la luz transporta masa . . .	13
4.2. Efecto Doppler Relativista	14
4.3. Discusión del Fotón: relatividad y simetría	17
BIBLIOGRAFÍA	20
Apéndices	21
A. Efecto Fotoeléctrico	22

Electromagnetismo

La electricidad y el magnetismo tienen muchas semejanzas, son, sin embargo distintas e independientes. Fue gracias al descubrimiento de Oersted (1820) que encontró que las agujas magnéticas son desviadas por corrientes galvánicas. En (1820) Biot y Savart hallaron la ley cuantitativa de este fenómeno que Laplace formuló como acción a distancia [9]. Es importante porque por primera vez el electromagnetismo nos muestra una constante física, que tiene dimensiones de velocidad y se ha comprobado desde entonces que su valor es $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$. Usando funciones espaciales continuas para determinar el estado electromagnético de un volumen de espacio, de este modo un numero finito de cantidades no se considera suficiente para la determinación completa del estado electromagnético del espacio. De acuerdo a la teoría de Maxwell, se considera que la energía es una función espacial continua para todos los fenómenos puramente electromagnéticos y también para la luz [10].

1.1. Efecto Doppler

Una onda se puede definir como la propagación de energía y momento mediante una oscilación de campos eléctricos y magnéticos por tres parámetros: Periodo: Tiempo que tarda la onda en llegar a un mismo punto, permite designar el intervalo de tiempo necesario para completar un ciclo repetitivo. Amplitud: Es la magnitud que tiene relación directa con la intensidad, dado que los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética oscilan con la frecuencia de la onda, la magnitud del vector de Poynting cambia en el tiempo. Longitud de onda λ (distancia entre dos máximos de la onda). Es la distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo de tiempo. Ese intervalo de tiempo es el transcurrido entre dos máximos consecutivos de alguna propiedad física de la onda. Las ondas electromagnéticas tienen una velocidad de propagación constante $\frac{\lambda}{f} = c$. El efecto Doppler es un cambio que se produce cuando una fuente de ondas (por ejemplo, luz o sonido) se acerca o aleja del observador. Entonces, la frecuencia de la onda producida por la fuente no es la misma que puede medir el observador, aparente frecuencia debido al movimiento relativo entre el emisor de la radiación y el receptor de la onda, llamado también efecto Doppler transversal, es una consecuencia de la dilatación del tiempo desde el punto de vista relativista [3, 4, 6]. Algunas características que se resaltan del efecto Doppler son:

- 1.) El efecto Doppler debe calcularse necesariamente por medio del principio de relatividad.
- 2.) Para un sistema de referencia inercial, una onda armónica y plana debe describirse por una función de la forma $\sin(kx - \omega t)$ multiplicada por un factor de amplitud apropiado.

1.2. Energía y Momento electromagnético

Las direcciones del campo eléctrico \vec{E} , el campo magnético \vec{B} y la velocidad de propagación de la onda son mutuamente ortogonales o perpendiculares obedeciendo a la regla de la mano derecha y se conoce que las acciones electrodinámicas están estrechamente unidas a la estructura del espacio euclídeo; ya que manifiestan un sistema natural de coordenadas rectangulares lo que implica $c = \frac{E}{B}$.

La densidad de energía asociada a una onda electromagnética es:

$$\rho_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot \vec{E}^2 \quad (1.1)$$

De igual manera usando $c = \frac{E}{B}$ y $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ usando esta relación para la densidad de energía magnética en (1.1).

$$\vec{E} \cdot \vec{B} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot \vec{B}^2 = \frac{1}{2\mu_0 c^2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2 \quad (1.2)$$

La intensidad media de la OEM es:

$$\bar{I} = \epsilon_0 \cdot \bar{\epsilon} \quad (1.3)$$

En el caso de una onda electromagnética, la ecuación de onda plana en el vacío es:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.5)$$

En el caso de una OEM plana armónica $\vec{E}^2 = E_0 \sin^2 k(x-ct) = \frac{1}{2} E_0^2$ de modo que la intensidad media es:

$$\bar{I} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \bar{E}^2 \quad (1.6)$$

Esto significa que el resultado para la densidad de energía de una OEM es $\epsilon = \epsilon_E + \epsilon_B = \epsilon_0 E^2$. Se denomina vector de Poynting al vector cuyo módulo representa la intensidad instantánea de energía electromagnética que fluye a través de una unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda electromagnética. Recibe su nombre del físico inglés John Henry Poynting. Se expresa mediante el símbolo \vec{S} .

$$|\vec{E} \times \vec{B}| = \frac{1}{2} \epsilon^2 \quad (1.7)$$

,

$$\int_S c^2 \epsilon_0 (\vec{E} \times \vec{B}) \cdot \hat{u} ds = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1.8)$$

Este resultado fundamental le dio a J.C Maxwell la idea que la luz constituye un fenómeno electromagnético. Conociendo que la energía electromagnética y el momento están íntimamente relacionados, se puede suponer entonces que una onda electromagnética transporta además de energía, momento, como la radiación EM se propaga con velocidad c , pero se quiere mostrar sin argumentos relativistas y de manera simple que una onda electromagnética monocromática y plana transporta momento lineal.

Para esto considere una partícula con carga q que puede moverse libremente dentro de algún material y es alcanzada por una onda electromagnética plana que tiene su campo eléctrico \vec{E} en dirección y , su campo magnético \vec{B} en dirección x y se propaga en dirección z .

Inicialmente se calcula la energía que la onda transmite a la partícula, la cual es de origen exclusivamente eléctrico ya que el campo magnético no produce trabajo; además, solo la componente de velocidad v en fase con el campo eléctrico es relevante para calcular dicho trabajo, así la energía por unidad de tiempo, potencia, que transmite la onda a la partícula es

$$\frac{dW}{dt} = qvE. \quad (1.9)$$

Por otro lado, la dirección de la fuerza magnética sobre q es la de propagación de la onda y su magnitud está dada por $F_m = \frac{qvE}{c}$ puesto que $B = E/c$, y por tanto de acuerdo con la segunda ley de Newton se tiene

$$\frac{dp}{dt} = \frac{qvE}{c}. \quad (1.10)$$

Combinando las Ecs.(1.9) y (1.10) y correspondiendo el trabajo W con la energía transmitida ε ($W \rightarrow \varepsilon$) se encuentra finalmente

$$p = \frac{\varepsilon}{c}. \quad (1.11)$$

Lo que demuestra que una onda electromagnética plana y monocromática transporta momento lineal y que este está íntimamente relacionado con la energía.

Las dimensiones de esta cantidad es de momento por unidad de volumen [$m^{-2} \cdot Kg \cdot s^{-1}$], pero se sabe que el momento debe tener la misma dirección que la propagación, reescribiendo la ecuación en forma vectorial

$$\vec{p} = \frac{\varepsilon}{c} \cdot \hat{u} = \epsilon_0 E \times B. \quad (1.12)$$

La interacción electromagnética entre dos cargas eléctricas implica un intercambio de energía y de momento entre si mismas. Esto se lleva a cabo por intermedio del campo electromagnético, que es vehículo de la energía y del momento intercambiado [2, 3, 5, 10].

Energía y Masa en reposo $m_0 = 0$

2.1. Partículas con masa en reposo m_0

Un planteamiento importante desde la teoría especial de la relatividad lo constituye el hecho de que la masa de los objetos en movimiento aumenta con la velocidad, y necesitaría una energía infinita cuando alcanza la velocidad de la luz, hecho demostrado por la transformación de Lorentz. Cuando se expande la expresión para la masa relativista como masa en función de la velocidad, se encuentra.

$$m(v) = \gamma m_0 = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.1)$$

De esta consecuencia se hace un análisis para entender el caso cuando la velocidad de una partícula es la velocidad de la luz. En primer lugar se hace la aclaración que la partícula que viaja a la velocidad de la luz se considera como una partícula que no está en reposo en ningún momento para ningún sistema de referencia inercial, o sea que no alcanza esa velocidad sino que siempre viaja a velocidad constante, significa que ninguna partícula puede acelerarse hasta llegar a esta velocidad sino que las partículas de m_0 ya viajan a esa velocidad desde que son emitidas por una fuente de radiación electromagnética y en el vacío mantienen su velocidad c . Este resultado comprueba teóricamente que la máxima velocidad posible es la velocidad luz, porque una masa mayor que infinito es un sin sentido, la situación matemática indica que al tender a cero el denominador los valores de la función se hacen asintóticos hacia el infinito, hay una indeterminación.

Cuando un cuerpo posee una velocidad pequeña y se le suministra energía mecánica esta la utiliza para aumentar su velocidad. A velocidades grandes parte de la energía se transforma en masa (de ahí el incremento que experimenta), si un cuerpo llegara a la velocidad de la luz toda su energía se transformaría en masa.

Ahora, por conservación del momento lineal y usando masas relativistas, extendiendo estas ideas a tres dimensiones. Donde $m_0 c$ es un invariante para cualquier sistema de referencia inercial [2, 3]. y el sistema de referencia S se expresa en la formulación de Minkowsky de la siguiente manera

$$(ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2 = S^2 \quad (2.2)$$

Multiplicando ambos lados de la ecuación (2.1) por c^2 entonces aparece, la constante $m_0 c^2$. Un primer resultado que se deriva de la formulación en cuatrivectores de la relatividad surge del hecho que el cuadrado de la norma de cualquier cuatrivector es un invariante relativista y por lo tanto las cuatro componentes del cuadrivector no son independientes, esto conduce a determinar una

restricción sobre las componentes del cuadrimomento de una partícula, por lo tanto hay una relación que existe entre la energía total E y el momento físico \vec{p} , medidos en un sistema de referencia S .

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (2.3)$$

Entonces se puede decir que una partícula $m_0 = 0$ por definición es un invariante relativista y además de eso se mueve en el cono de luz en el diagrama espacio-tiempo, significa que para ningún observador inercial es posible detectar o medir la masa en reposo cero ya que esta viaja a la velocidad de la luz, y esta es una velocidad imposible para cualquier partícula material, por lo tanto en la definición de masa en reposo m_0 se atiene a los postulados de la relatividad, porque todos los sistemas de referencia lo ven viajando a velocidad c .

2.2. Energía relativista

La conservación relativista de la masa da como resultado en forma general que a una partícula se la puede asociar una energía equivalente a:

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (2.4)$$

Por tanto el cambio de la energía se expresa como el cambio de la masa relativa teniendo en cuenta que la velocidad de la luz es constante, la dinámica relativista manifiesta que el término (m_0c) es invariante para cualquier sistema de referencia inercial. La partícula posee una energía $E = mc^2$ y por lo tanto el cambio de la energía es igual al cambio de la masa relativista [2, 3, 10].

A continuación se demuestra que una partícula de masa $m_0 = 0$ se mueve a velocidad c .

Se define el cuadrivector momento como:

$$p = \gamma m_0 U \quad (2.5)$$

Para la luz ó para las ondas electromagnéticas también existe un valor de momento asociado, la cantidad de movimiento es proporcional a la cantidad de radiación emitida por un cuerpo:

$$p = \frac{E_T}{c} \quad (2.6)$$

La masa relativista esta definida en la ecuación (2.1) junto con el factor de Lorentz.

La energía total es:

$$E_T = c\sqrt{m_0^2 c^2 + p^2} \quad (2.7)$$

Elevando al cuadrado para buscar las magnitudes invariantes:

$$E_T^2 = c^2 m_0^2 c^2 + p^2 \quad (2.8)$$

tomando la ecuación (2.1) y reemplazando en (2.9)

$$E_T^2 = \gamma m c^4 + c^2 p^2 \quad (2.9)$$

Por la definición de momento relativista se deja la energía en términos de la masa en movimiento tomando en consideración que la masa $m_0 = 0$. Sacando raíz cuadrada a ambos lados y cancelando raíz con potencia queda entonces:

$$E_T = cp \quad (2.10)$$

La energía total no es cero ya que hay una cantidad que transfiere momento y energía que es cp . La magnitud del momento clasico esta definido como $\vec{p} = m\vec{v}$, asi de este modo:

$$E_T = (m |\vec{v}|)c, \quad (2.11)$$

$$mc^2/mc = |\vec{v}| \quad (2.12)$$

cancelando el termino mc , queda solo la velocidad:

$$c = |\vec{v}| \quad (2.13)$$

Por lo tanto para las partículas de masa en reposo $m_0 = 0$ se deduce que viajan a velocidad c . La energía total tiene que ser interpretada desde tres puntos de vista.

- 1.)Clásico:(masa) Se toma en cuenta el Factor de Lorentz cuando $v \ll c$.
- 2.)Electromagnético:Mediante el vector de Poynting o potencia de radiación.
- 3.)Relativista: A partir de los postulados de Einstein.

Los experimentos demuestran que la velocidad de la luz se propaga en el vacío aproximadamente con un valor de $c = 3 \times 10^8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Cuadrivector Momento-Energía y Cuadrivector de Onda

A partir de la teoría de la relatividad de Einstein surge la formulación cuadrivectorial que se fundamenta en los principios algebraicos de la matemática matricial de Minkowsky que se basan en la transformación de Lorentz que establece que para toda transformación de coordenadas, existe la condición de una velocidad límite, además que elevando al cuadrado los términos de los cuadrivectores se mantienen inalterados sus magnitudes, por lo tanto las componentes de un cuadrivector no son independientes sino que debe existir una relación entre las cantidades invariantes, en este caso se estudia las cantidades invariantes para una onda electromagnética, del cuadrivector momento y el cuadrivector onda.

3.1. Cuadrivector de Onda

El efecto Doppler es un fenómeno asociado a las ondas que corresponde a un cambio de frecuencia medida por un observador respecto a la frecuencia medida por la fuente emisora de radiación, también se le llama en física efecto Doppler transversal, cuando se trata de ondas electromagnéticas planas.

Considerando para este caso el cuadrivector de onda representa una onda electromagnética plana de frecuencia ω y el vector de onda \vec{k} , las componentes del cuadrivector de onda medido en dos sistemas S y \bar{S} que viajan uno respecto a otro con velocidad constante y se dirigen en direcciones paralelas, están relacionados por las ecuaciones de transformación

$$k = \left(\frac{\omega}{c}, \vec{k}_x \right) \quad (3.1)$$

$$\bar{k} = \left(\frac{\bar{\omega}}{c}, \vec{k}_x \right) \quad (3.2)$$

Aplicando la transformación de Lorentz en forma de cuadrivectores se tiene:

$$\bar{k} = Lk \quad (3.3)$$

El vector de Onda se puede representar como un múltiplo de la cuadrivelocidad que es una magnitud vectorial asociada al movimiento de una partícula, usada en el contexto de la teoría de

la relatividad, es tangente a la trayectoria de dicha partícula a través del espacio-tiempo cuatridimensional que generaliza el concepto de velocidad de la mecánica newtoniana.

$$\omega = \alpha U \quad (3.4)$$

si la frecuencia es mayor que cero entonces se mueve causal-mente hacia el futuro; si $\omega^2 > 0$ y esto significa $\omega^0 > 0$. Multiplicando la norma del número de onda por si mismo, la cantidad queda con un valor invariante.

$$k^2 = \left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) - \vec{k}^2 \quad (3.5)$$

Para describir una onda electromagnética en función de la posición $S = (ct, x, 0, 0)$ y de la velocidad o frecuencia se multiplica el vector de onda $k = (\frac{\omega}{c}, k_x, 0, 0)$ a esta cantidad se le llama fase de onda φ . La radiación electromagnética es un tipo de campo electromagnético variable, es decir, una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

$$\varphi = k \cdot x \quad (3.6)$$

al hacer el producto punto entre estos dos cuadriectores resulta:

$$\varphi = \omega t - kx \quad (3.7)$$

El cuadriector de onda cuenta con la relación frecuencia vs. número de onda en el vacío $c = \frac{\omega}{k}$.

Para un observador distinto a la fuente de onda electromagnética que tenga una velocidad constante o este en un movimiento uniforme \bar{S} .

$$\bar{\omega} = \gamma (\omega - vk) \quad (3.8)$$

Reemplazando la expresión $c = \frac{\omega}{k}$.

$$\bar{\omega} = \gamma \left(\omega - v \frac{\omega}{c} \right) \quad (3.9)$$

$$\bar{\omega} = \gamma \omega \left(1 - \frac{v}{c} \right), \quad (3.10)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{v}{c} \right) \quad (3.11)$$

La frecuencia angular se puede expresar en términos de la frecuencia relativa como $\bar{\omega} = 2\pi\bar{f}$ reemplazando en la ecuación (3.11) la frecuencia relativa.

$$2\pi\bar{f} = \frac{2\pi f \left(1 - \frac{v}{c} \right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.12)$$

De acuerdo con el segundo postulado de la Teoría Espacial de la Relatividad, dos observadores que están en movimiento relativo el uno con respecto al otro miden para un rayo de luz la misma velocidad, independientemente de quien haya disparado el rayo de luz hacia el otro, e independientemente de que se estén acercando o alejando, gracias a un fenómeno conocido como el efecto Doppler,

Por lo tanto, las fórmulas para el efecto Doppler serán distintas ya sea que la fuente esté estacionaria se este acercando o ya sea alejándose del receptor que tambien tiene posibilidad de movimiento, perp se tiene que la frecuencia permanece constante para todos los observadores inerciales $\bar{\omega} = \omega$, el observador externo que se esté moviendo o que la fuente se esté moviendo también. Esta es precisamente una muestra de las asimetrías a las que Einstein hacía referencia cuando se suponía que las ondas luminosas eran transportadas a través de un medio de referencia estacionario conocido como el éter.

Dentro del esquema de la Teoría Especial de la Relatividad, aunque una onda luminosa siempre tendrá la misma velocidad en marcos distintos de referencia, la frecuencia de la señal luminosa cuando salió disparada de su fuente tendrá también un desplazamiento Doppler.

3.2. Cuadrivector Momento-Energía

El cuadrivector momento energía esta asociado a una onda electromagnética plana que es la radiación emitida por un cuerpo hacia una dirección específica, en este caso se toma la dirección de propagación de la onda como el eje x . las coordenadas del espacio-tiempo y las de la energía/-momento de una partícula, se expresan a menudo en forma de vector de cuatro dimensiones [2, 5]. Se definen de manera que la longitud de un cuadrivector es invariante bajo una transformación de coordenadas. Esta invariancia se asocia con las ideas físicas, la invariancia del cuadrivector de espacio-tiempo, se asocia también con el hecho de que la velocidad de la luz es una constante. La invariancia del cuadrivector de la energía-momento, se asocia con el hecho de que la masa en reposo de una partícula es invariante bajo transformaciones de coordenadas.

El cuadrivector momento- Energía se expresa así:

$$\bar{P} = LP \quad (3.13)$$

Para empezar el momento clásico $m_0\vec{u}$ no es invariante relativista, tomando en cuenta que la velocidad física no es un cuadrivector sino que tiene tres componentes espaciales. Es necesario entonces expresar la velocidad en cuatro componentes para así trabajar con la cuadrivelocidad.

Se obtiene la expresión del momento relativista de una manera mas sencilla solo construyendo un cuadrivector momento-energía. Se comienza observando el momento clásico $m_0\vec{u}$ claro es que desde la física clásica la velocidad no es un cuadrivector [3, 7]. Se procede a construir la forma del cuadrivector velocidad. Por lo general tres dimensiones representan el espacio euclídeo, similarmente, se divide el cuadrivector por la transformación de Lorentz en un vector de cuatro componentes o cuadrivector. Considerando el desplazamiento cuadrivectorial:

$$ds = (dx, dy, dz, cdt) \quad (3.14)$$

Dividiendo por el tiempo propio transcurrido para quien experimenta un desplazamiento ds .

$$\frac{ds}{d\tau} = \left(\frac{dx}{d\tau}, \frac{dy}{d\tau}, \frac{dz}{d\tau}, c\frac{dt}{d\tau} \right) \quad (3.15)$$

Por analogía con la velocidad en tres dimensiones la cuadrivelocidad se define como $\frac{ds}{d\tau} = U$. En el estado de reposo para una partícula $dx = dy = dz = 0$ y $dt = d\tau$. O sea para una partícula en reposo se defien el cuadrivector velocidad como

$$U = (0, 0, 0, c) \quad (3.16)$$

La norma de U es $|U|^2 = c^2$ obviamente la cuadrivelocidad es muy diferente a su representación newtoniana donde \vec{v} representa la velocidad en las tres dimensiones que nos son familiares a todos. La velocidad en su forma reducida por componentes se escribe como $\vec{v} = \frac{dr}{dt}$ y $dt = \gamma d\tau$, esta es la fórmula de la dilatación del tiempo para un sistema que se mueve con velocidad relativa $-\vec{v}$ respecto al sistema en reposo dr [3]. Usando U al derivar el cuadrivector momento-energía se observa como se hace la transformación de un cuadrivector desde la estructura de otro. Desde que la masa en reposo m_0 sea un invariante entre las transformadas de Lorentz, el producto m_0U es un cuadrivector.

$$P = \gamma(m_0c, m_0U) \quad (3.17)$$

ó

$$P = (mc, \vec{p}) \quad (3.18)$$

Ahora la pregunta que sigue es... Y a que ley de conservación obedece el cuadrivector momento-Energía a la de cantidad de movimiento o a la de la conservación de la energía? Clásicamente hablando el cambio en el momento es igual a la fuerza aplicada, o también el momento en un sistema aislado se conserva. Similarmente para la cuadri-fuerza se deriva el cuadrimomento por el invariante de Lorentz $d\tau$ y entonces $F = (\frac{dp}{d\tau}, \frac{d}{d\tau}mc)$ se le conoce como fuerza de Minkowsky en honor al matemático Ruso.

El producto escalar de dos cuadrivectores es un invariante relativista. Evaluando $F \cdot U$ para una partícula en reposo queda de esta manera $\frac{dP}{dt} \cdot U = 0$ donde $\vec{v} = 0$ queda, haciendo la equivalencia relativista $E = mc^2$ el cuadrimomento entonces:

$$F \cdot U - \frac{dmc^2}{dt} = 0 \quad (3.19)$$

El cuadrimomento queda:

$$P = (\vec{p}, mc) = (\vec{p}, \frac{E}{c}) \quad (3.20)$$

P es llamado cuadrivector momento-energía, se puede generalizar el cuadrimomento tomando la norma al cuadrado para tomar una cantidad invariante.

$$P \cdot P = |\vec{p}|^2 - \frac{E^2}{c^2} = m_0^2\gamma^2(u^2 - c^2) = -m_0^2c^2 \quad (3.21)$$

Entonces la norma al cuadrado de la energía total se representara de la siguiente manera:

$$E^2 = p^2c^2 + (m_0c^2)^2 \quad (3.22)$$

Aprovechar el camino de generalización para dejar invariantes los cuadrivectores y además es una ruta para para llegar a la expresión correcta relativista de momento y energía, además aparecen como una sola ley, la conservación del cuadrimomento. En relatividad momento y energía son elementos diferentes de una misma cosa. Los trabajos de H. A. Lorentz, H. Poincaré, A. Einstein y H. Minkowski sobre el electromagnetismo clásico llevaron a la idea de que no es posible definir un tiempo absoluto que transcurre de manera idéntica para todos los observadores con independencia de su estado de movimiento [10].

La no existencia de un tiempo absoluto, requería que existiera una medida de tiempo para cada observador. Así el conjunto de eventos (puntos del espacio-tiempo) llevaban de manera natural a definir vectores de cuatro dimensiones [2, 3].

Propuesta didáctica del concepto de fotón

Particularmente enigmática en el siglo XIX la existencia de espectros de líneas. La luz emitida por los átomos calentados en una llama o excitados eléctricamente en un tubo de descarga como las lámparas de neón, no contiene una propagación continua de longitudes de onda, sino solo ciertas longitudes de onda bien definidas.

El efecto fotoeléctrico descubierto por Hertz (1887) consiste en la liberación de electrones de la superficie de un conductor cuando incide luz sobre ella. Este fenómeno se explica partiendo del hecho de que la luz absorbida por la superficie metálica, transmite energía a los electrones próximos y adquieren la energía suficiente para remontar la barrera de potencial de la superficie y logran escapar del material al espacio.

4.1. Experimento mental de la caja desquiciada de Einstein

En esta sección se presentan de manera breve algunos conceptos teóricos concretos a cerca de las ondas monocromáticas planas y las partículas con $m_0 = 0$, las cuales son prerequisite para realizar una presentación coherente del fotón desde un punto de vista teórico.

4.1.1. La caja desquiciada de Einstein, evidencia de que la luz transporta masa

Se trata de un experimento mental propuesto por Einstein que tiene por objeto demostrar que la radiación transporta masa inercial, para lo cual usa la mecánica Newtoniana y la teoría electromagnética, así como la conservación de la masa, la energía y el momento lineal [10].

Considere dos cuerpos de masas m_A y m_B completamente aislados y en reposo para un sistema inercial O , en $t = 0$ del cuerpo A sale una ráfaga de radiación hacia el cuerpo B , la Fig.4.1 representa esta situación. En estas condiciones el centro de masa del sistema x_{cm} , es $x_{cm} = m_B L$ ya que A se encuentra en el origen.

De acuerdo con Newton, todo sistema aislado mantiene invariante su centro de masa, si se mantiene esta idea debe aceptarse la extraña idea de que la masa del cuerpo A varía, de manera que justo después de que la radiación sale de A la nueva masa de A es M_A , como se ilustra en la Fig.4.2.

De otro lado, en la configuración inicial Fig.4.1 el momentum del sistema es cero, $p = 0$, y por la validez general de este principio debe permanecer así, de manera que para el cuerpo A esto exige

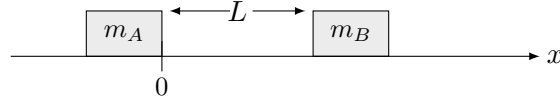


Fig 4.1: Configuración inicial del sistema , $t = 0$ justo cuándo la ráfaga de radiación sale de A hacia B .

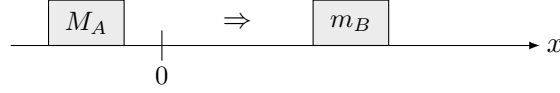


Fig 4.2: La ráfaga de radiación con momentum $p = E/c$, denotada con \Rightarrow , ya salió del cuerpo A pero aún no ha llegado al cuerpo B .

que $v_A = -E/M_A c$. Así mismo cuando la radiación alcanza el cuerpo B después de un tiempo L/c la conservación del momento lineal exige que $v_B = E/M_B c$, como muestra la Fig.4.3. De acuerdo



Fig 4.3: Configuración final del sistema, cuando ha transcurrido un tiempo $t > L/c$ y la ráfaga de radiación ha sido absorbida por el cuerpo B .

con lo anterior, las posiciones de los bloques son

$$x_A = -\frac{E}{M_A c} t, \quad (4.1)$$

y

$$x_B = L + \frac{E}{M_B c} \left(t - \frac{L}{c} \right). \quad (4.2)$$

Dado que el centro de masa y la masa total del sistema M_T deben conservarse se tiene

$$m_B L = M_A x_A + M_B x_B \quad (4.3)$$

y al reemplazar aquí la Eq.A.1 y la Eq.4.2 se encuentra

$$\Delta m_B = \frac{E}{c^2} = -\Delta m_A. \quad (4.4)$$

Lo que trae como consecuencia que al menos una onda electromagnética plana y monocromática transporta masa inercial dada por E/c^2 .

4.2. Efecto Doppler Relativista

Considerando una onda electromagnética plana de frecuencia ω y número de onda \vec{k} , que se propaga respecto al sistema S en lo largo del eje x .

$$\vec{k} = (k_x, 0, 0) \quad (4.5)$$

Entonces para un observador \bar{S} que se mueve respecto a S con velocidad \vec{v} a lo largo de los ejes paralelos $X\bar{X}$, tenemos:

$$\bar{\omega} = \gamma(v)(\omega - vk_x) \quad (4.6)$$

$$\bar{k} = \gamma(v)(k - \frac{v}{c^2}\omega) \quad (4.7)$$

$$\bar{k}_y = k_y \quad (4.8)$$

$$\bar{k}_z = k_z \quad (4.9)$$

El cuadvivector de onda cuenta con la relación para las ondas electromagnéticas en el vacío $c = \frac{\omega}{k}$ por consiguiente reemplazando en las transformaciones de Lorentz para la frecuencia queda.

$$\bar{\omega} = \frac{\omega(1 - \frac{v}{c})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.10)$$

$$\bar{k} = \frac{k - \omega \frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.11)$$

Reemplazando la misma correspondencia en la ecuación del efecto Doppler relativista,

$$\bar{k}(k) = \frac{\frac{\omega}{c} - \omega \frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.12)$$

$$\bar{k}(k) = \frac{k(1 - \frac{v}{c})}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.13)$$

Por tanto $\frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} = c$. Y se llega al resultado que $\frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} = \frac{\omega}{k}$ que resulta un valor invariante. Si este resultado de la relación de dispersión para las ondas planas resulta ser invariante y además existe una simetría o razón de proporcionalidad evidente con las ecuaciones que relacionan el momento y la energía, significa que:

$$\frac{\bar{E}}{\bar{p}} = \frac{E}{p} \quad (4.14)$$

Por consiguiente para dos sistemas de referencia S y \bar{S} la relación entre energía y momento permanece invariante. Las componentes del C-V Onda $(\frac{\omega}{c}, k_x, 0, 0)$ teniendo en cuenta que $\frac{\omega}{c}$ cuenta como valor para \bar{S} se tiene:

$$\bar{\omega} = \gamma(v)(\omega \pm vk_x) = \omega\gamma(v)(1 \pm \frac{v}{c}) \quad (4.15)$$

El efecto Doppler relativista relaciona el número de onda y la frecuencia angular de dos observadores, permanecen unas ecuaciones invariantes ante la transformación de Lorentz del momento y la energía, así de este modo:

Se compara las simetrías que se presentan en las ecuaciones resultantes de momento y número de onda:

$$\bar{P} = \frac{p_x - v \frac{E}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \bar{k} = \frac{k_x - \omega \frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.16)$$

Ahora se comparan los resultados de las ecuaciones de energía y frecuencia angular confrontando su semejanza.

$$\bar{E} = \frac{E - vP}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \bar{\omega} = \frac{\omega - kv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.17)$$

De estas ecuaciones se analiza que es posible llegar a una relación entre energía y frecuencia y momento y número de onda con una constante de proporcionalidad, se conjetura que hay una razón de proporcionalidad ó debería existir una cantidad que relacione estas cantidades físicas para las ondas electromagnéticas y para las partículas de masa en reposo $m_0 = 0$. En las ecuaciones (4.12) y (4.13) descansa en esencia la base teórica donde se apoya esta averiguación y pesquisa que se fundamenta en la teoría especial de la relatividad llamándose "ecuaciones de simetría para c" en éste trabajo.

$$\frac{E}{p} = c \Rightarrow E = cp \quad (4.18)$$

$$\frac{\omega}{k} = c \Rightarrow \omega = ck \quad (4.19)$$

Por lo que desde la teoría especial de la relatividad se induce a revisar esta situación particular, para el caso del efecto fotoeléctrico se pone como condición que la radiación electromagnética transfiere energía en proporción directa con la frecuencia. O sea que de las ecuaciones (4.14) y (4.15) queda una relación de semejanza:

$$\frac{E}{\omega} = \frac{p}{k} \quad (4.20)$$

La energía que transfiere la radiación ya sea como onda o como partícula de $m_0 = 0$, el momento también cumple con la misma condición. Pero la frecuencia y el número de onda son características propias de las ondas, o sea que hace falta algo para que se manifieste la característica dual de la luz desde este enfoque. Este resultado (4.16) se interpreta de acuerdo con la TER como una partícula de masa en reposo $m_0 = 0$ a la cual le corresponde una cantidad de radiación electromagnética con una longitud de onda λ y una frecuencia que posee un cuanto de energía, esto tomando en cuenta los resultados experimentales que confirman la hipótesis de Planck y sus implicaciones:

Postulado:

"Cualquier ente físico cuya coordenada es una función senoidal del tiempo o que realiza oscilaciones armónico-simples, solo puede poseer energías totales E que satisfacen la relación $E = nh\nu \rightarrow n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ν es la frecuencia y $h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$ ".

Sabiendo que $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ se introduce esta constante fundamental en el argumento de simetría.

$$\hbar k = p \leftrightarrow E = \hbar \omega \quad (4.21)$$

Donde $c = \frac{\omega}{k}$

$$\bar{p} = \frac{\hbar\frac{\omega}{c} - v\hbar\omega c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \bar{E} = \frac{\hbar\omega - v\hbar\frac{\omega}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.22)$$

$$\bar{p} = \hbar\frac{\omega}{c} \quad (4.23)$$

$$\bar{E} = \hbar\omega \quad (4.24)$$

De aquí se deduce por inspección

$$\bar{E} = c\bar{p} \Leftrightarrow E = cp \quad (4.25)$$

o sea que $\frac{\bar{E}}{\bar{p}} = \frac{E}{p}$. La cuestión es que el momento de la onda debe ser proporcional al número de onda por lo que es necesario analizar la ecuación de la frecuencia que da el siguiente resultado $\omega = ck \Leftrightarrow \bar{\omega} = c\bar{k}$. Por argumentos de simetría desde la TER se predice que existe un valor constante que relaciona la energía con la frecuencia, de hecho es la constante de Planck que ya está demostrado su valor mediante diversos experimentos. En el argumento de simetría se introduce esta constante para determinar la consistencia matemática con los postulados de la relatividad.

No solo desde la TER sino que desde argumentos de simetría y la hipótesis de Planck, se puede desarrollar el concepto de fotón sin recurrir a experimentos. Permite realizar una didáctica para introducir este concepto desde un dominio básico en la teoría de la relatividad especial, se puede implementar en clases como tema introductorio al efecto fotoeléctrico en los cursos de física moderna.

4.3. Discusión del Fotón: relatividad y simetría

Aquí se expone la simetría entre los sistemas de referencia para las ecuaciones con las que se compara es la de frecuencia y número de onda, induce una relación entre su forma y su relación directa respecto a la velocidad de la luz, por lo que se tiene que $\frac{\omega}{k} = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}}$ es un invariante. Por lo que desde la teoría especial se puede analizar esta situación, para experimentos como el efecto fotoeléctrico en el que se pone como condición que la luz no solo viaja como onda electromagnética y transfiere momento y energía sino que puede comportarse como partícula frente a algunos casos concretos. Aquí el enfoque es considerablemente distinto al modelo heurístico encontrado por Albert Einstein [9], la discusión de los conceptos y como afectan la relación entre el cuadrivector y el cuadrivector de onda desde un enfoque puramente matemático para encontrar la simetría que debe existir entre estas dos cantidades relativistas. Se manifiesta una relación directa entre la constante de Planck y las implicaciones relativistas al introducir la constante al cuadrivector onda.

A partir de los conceptos presentados con anterioridad se propone una estrategia didáctica que permita al instructor desarrollar el concepto de fotón desde un punto de vista teórico. Tal estrategia puede fundamentarse en los cinco escenarios siguientes.

1. Resaltar, desde la relatividad especial, las propiedades de las partículas con $m_o = 0$, así como las consecuencias del cuadrivector momentum-energía y en especial resaltar que la masa de tales partículas está íntimamente relacionada con energía mediante $E = mc^2$.
2. Poner en discusión las propiedades de una onda electromagnética plana y monocromática, en particular destacar que el cuadrivector onda da origen al efecto Doppler junto con el hecho de que estas ondas transportan momentum, energía y masa inercial, para esto último se

puede acudir a una deducción no relativista usando por ejemplo los argumentos de Einstein al respecto y encontrar $E = \Delta mc^2$, a través de una deducción llamada la caja desquiciada.

3. Reflexionar en tres aspectos sobre el ineludible parecido entre de partículas con $m_o = 0$ y las ondas electromagnéticas monocromáticas y planas: primero, insistir en que estas partículas están restringidas a moverse con la velocidad c para todo observador inercial y que esto, de acuerdo con el postulado de la relatividad especial, también lo hace la luz; segundo, estas partículas transporta masa $E = mc^2$ y la luz también transporta $E = \Delta mc^2$; y por último, que tanto en la onda plana, luz, como estas partículas relacionan su momentum y energía mediante $E = cp$.
4. Comparar el cuadrivector momentum-energía y el cuadrivector onda para evidenciar las correspondencias $E \rightarrow \omega$ y $p \rightarrow k$ que finalmente permitirán conjeturar y $E = \hbar\omega$ y $p = \hbar k$, es decir la esencia del fotón y de la dualidad onda partícula.
5. Buscar conclusiones encaminadas a dilucidar la doble naturaleza de la luz, de onda y de partícula, así como evidenciar la correspondiente doble naturaleza de las partículas con $m_o = 0$, de partícula y onda; es decir, intuir el concepto de dualidad onda partícula.

El anterior planteamiento es tan solo una posibilidad de desarrollo, con seguridad el instructor tendrá otras alternativas para desarrollar desde lo teórico el concepto de fotón, pero se sugiere tener en cuenta la argumentación física planteada aquí. El concepto de fotón o quantum de energía esta estrechamente relacionado con la teoría cuántica. No se pretende discutir el fotón como partícula portadora de interacción electromagnética, ni mucho menos su formulación desde la teoría cuántica de campos, mas bien al introducir el concepto masa en reposo m_0 se puede llegar a una aproximación satisfactoria para el fotón desde la relatividad y los argumentos de simetría que surgen al comparar las ecuaciones del efecto Doppler ademas de introducir en esas ecuaciones la constante de Planck. Introduciendo la constante de Planck a la relación de simetría encontrada para las ondas electromagnéticas se obtiene la cuantización de la energía y del momento para una partícula de $m_0 = 0$ se muestra la simetría que existe en la naturaleza, que revela una dualidad onda-partícula. Las partículas de masa en reposo nula, tienen otras características que las diferencian, para este caso se hace la claridad de que es el fotón la partícula que es objeto de estudio. Solo se tiene en cuenta el carácter dual de las ondas electromagnéticas, para cierto tipo de fenómenos, como el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, para los cuales la luz interacciona como partículas, contrastando así con otros fenómenos mas conocidos como la reflexión y la interferencia que se describen de acuerdo a el modelo propuesto por Maxwell.

¿Cual es el significado físico del concepto de fotón y las relaciones que lo definen? Se interpreta la energía y el momento absorbido por el electrón libre, de la onda electromagnética incidente, como una cantidad independiente de los observadores mediante la relación $\bar{E} = h\bar{\nu}$ y el momento $\bar{P} = \frac{h}{k}$ que corresponde a los mismos valores medidos desde un sistema de referencia no primado para un fotón difundido, se representa entonces la energía y el momento como radiación difundida, ya que el concepto de fotón solo se aplica a interacciones entre radiación electromagnética y partículas cargadas, e interviene en todos los procesos en que la radiación interactúa con la materia y no solamente con electrones libres. Así de la definición de fotón desde la relatividad da forma a el siguiente principio: "Cuando una onda electromagnética interactúa con un electrón o con cualquier otra partícula cargada, las cantidades de energía y de momento que pueden intercambiarse en el proceso son las correspondientes a un fotón". Este principio es importante para la comprensión de la emisión y absorción de la radiación electromagnética, en átomos , moléculas y núcleos [2,3,9].

Conclusiones

1.) La dualidad onda-partícula que manifiesta la luz, es tal vez uno de los aspectos mas interesantes que presenta la naturaleza y su interpretación. y para el caso el comportamiento dual no se presenta como problema en el contexto de la teoría de la relatividad, ya que tanto las ondas electromagnéticas, como las partículas en masa en reposo m_0 son conceptos relativistas y se puede mostrar se relación física se establece solo a través del postulado de cuantización de la energía de Planck, el cual no entra en contradicción alguna con los postulados de la relatividad. Con lo que se muestra con las características de la partícula m_0 que desde la relatividad se puede hacer una aproximación plausible al concepto de fotón.

2.) La relación momento energía es la misma para una partícula de m_0 que para una onda electromagnética $E = cP \Leftrightarrow \vec{E} = c\vec{P}$.

3.) No hay sistema de referencia inercial que pueda constatar la presencia de m_0 , ya que viaja sobre la línea de luz en el espacio de Minkowsky. A esta partícula se la denomina fotón o cuanto de energía. El efecto Doppler en las ondas electromagnéticas debe calcularse necesariamente por medio del principio de relatividad, ya que $m_0 = 0$ no implica movimiento de la materia, la velocidad de propagación es c con respecto a todos los observadores inerciales además que se puede afirmar que el efecto Doppler es una consecuencia de la dilatación del tiempo.

4.) Se llega a una conjetura que existe una partícula $m_0 = 0$ que viaja sobre el cono de luz. Sin embargo con argumentos de simetría matemática e introduciendo $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ como constante de simetría se llega a proponer una partícula con energía y frecuencia $E = h\nu$ donde las ondas electromagnéticas no son continuas, si no que funcionan como pequeños osciladores. Einstein le llamo fotones a los paquetes de energía.

5.) Aprovechar un camino de generalización para trabajar en lo invariante de los cuadvectores como una ruta natural para llegar a la expresión correcta de momento-energía y se mantienen como una ley "la conservación del cuadrimento" pudiendo tener claro que en relatividad momento y energía son diferentes aspectos de una sola entidad.

6.) Se puede desarrollar el concepto de fotón, sin recurrir a la técnica experimental. Este trabajo se desarrollo con el fin de proponer una didáctica paralela a modo de introducir el concepto de fotón como partícula de masa $m_0 = 0$ teniendo un dominio básico en relatividad especial, correspondiendo a un tema introductorio a los cursos de física moderna.

Bibliografía

- [1] F. S. Alemany, J. L. Domenech, J. Martinez, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 2, 2404 (2013), La introducción del concepto del fotón en bachillerato
- [2] M. Alonso, E. Finn, *Campos y Ondas Vol. II*, Universidad de Georgetown. Washington, D. C.. **Cap 19**, 1000 (1998).
- [3] J. M. Tejeiro, Sobre la teoría especial de la relatividad, *Universidad Nacional* **81-96**, 169 (2004).
- [4] R.M. Eisberg, *Física cuántica*, Universidad de California, Santa Barbara, **39-41.**, (2000).
- [5] R.A Serway, *Física para ciencias e ingeniería con física moderna Vol II*, Instituto politécnico internacional (2009).
- [6] D. E. Trowbridge, L. C. McDermott, *Am. J. Phys.* **49**, 242 (1981).
- [7] R. Beichner, *Am. J. Phys.* **62**, 750 (1994). *Ensino de Física* **35**, 2 (2013).
- [8] J. Stewart *Calculus Septima Edición* (Brooks Cole, México, D.F., 2012).
- [9] J. Stachel *Einstein 1905: Miraculous Year* (CRÍTICA, Barcelona 2011).
- [10] A. P. French *Relatividad especial MIT* (Reverte, 1974 - 341 páginas).

Apéndices

Efecto Fotoeléctrico

Fue descubierto por Hertz en 1887, cuando observó que una descarga eléctrica entre dos electrodos se produce más fácilmente si sobre uno de ellos incide luz ultravioleta (UV) que posibilita la descarga de manera más eficiente porque provoca la emisión de electrones desde la superficie del cátodo, denominado efecto fotoeléctrico, el dispositivo va en una ampolla de vidrio que tiene un semivacío en su interior. Lenard señaló que la teoría ondulatoria de Maxwell no correspondía a una explicación coherente de acuerdo a los resultados arrojados en los experimentos del efecto fotoeléctrico. El genio de Einstein y por el cual ganó el premio nobel (1921) fue en asumir que la cuantización de la emisión de la energía es una característica universal de la luz introduciendo en la ecuación para explicar el efecto fotoeléctrico, la cuantización de la emisión de la energía usada por el físico alemán Max Planck para explicar el espectro de la radiación de cuerpo negro en (1900).

De acuerdo a la ecuación de Einstein:

$$h\nu = \phi + E_{kmax} \quad (\text{A.1})$$

En la ecuación de Einstein, $eV_o = h\nu - \phi$, la pendiente de la recta V_o vs. ν sería igual a $\frac{e}{h}$. En el tiempo que Einstein hizo esta predicción, no había ninguna evidencia de que la constante de Planck tuviera nada que ver con el efecto fotoeléctrico. Tampoco había ninguna evidencia de la dependencia del potencial de parada V_o con la frecuencia ν . Los experimentos del físico norteamericano Robert Andrews Millikan (1868 -1953) mostraron que la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico era correcta y el valor de h estaba de acuerdo con el que había obtenido Planck. Lo que se ve desde la interpretación de Einstein es que pone en debate y discute que la energía se propaga en forma continua sobre el espacio cada vez mayor, señaló además la falta de simetría y consistencia conceptual en las teorías existentes, enfatizo que para fenómenos como el efecto fotoeléctrico, es mejor entendido en su análisis si se considera la energía distribuida a través del espacio de manera discontinua, por lo que se enfatiza que la energía de un haz de luz no está distribuida continuamente sobre el espacio cada vez mayor, sino que consiste en un número finito de paquetes de energía, localizados en puntos del espacio. Lo que revela que la energía de las ondas electromagnéticas que llegan a desprender electrones de metales esta cuantizada, es que el electrón absorbe solo cantidades proporcionales a $E = h\nu$ para emitir fotoelectrones hacia el vacío. Se puede considerar al fenómeno que ocurre en el efecto fotoeléctrico como un choque entre dos partículas, claro eso como una aproximación para ir comprendiendo que es lo que ocurre en realidad. Si es una colisión donde se interpreta del siguiente modo; El fotón será una partícula de masa en reposo nula $m_0 = 0$ que transmite toda su energía a un electrón y este la utiliza para aumentar su energía cinética y realizar

un trabajo adicional para poder desprenderse del metal, este proceso en varios electrones produce una fotocorriente.

La luz ultravioleta tiene una longitud de onda que permite arrancar electrones con más facilidad de los metales. El efecto fotoeléctrico y el arreglo experimental con redes cristalinas para determinar la longitud de onda de los rayos X, fueron experimentos que marcaron un punto de partida para lo que se conocería como la revolución cuántica”, que tuvo como consecuencia el abandono de concepciones y paradigmas arraigados provenientes de la física clásica sobre todo por lo referente a la luz como onda o como partícula y se resolvería este dilema interpretando la luz como un fenómeno electromagnético de naturaleza dual onda-corpúsculo. Porque en el efecto fotoeléctrico se manifiesta la doble naturaleza de la luz ya que al interactuar con los electrones de un metal, solo con una cantidad de energía proporcional a la suma de la energía cinética y el trabajo que tiene que realizar el electrón para salir disparado del átomo de metal por medio de una relación de cuantización conocida como la constante de Planck.