

Limitaciones de la física clásica y nacimiento de la física cuántica. “La ley del efecto fotoeléctrico de Albert Einstein”

Gamel Martínez Pilonitis

Observatorio ALMA

pilonitis@gmail.com

Resumen

Este artículo nos habla de forma general sobre la historia del vidrio, la óptica, la visión y principalmente nos muestra la formulación matemática y la transición que ocurrió a finales del s. XIX y principios del s. XX, para que los científicos de la época pudieran cambiar su percepción clásica de la naturaleza y que aceptaran de forma teórica y experimental la validez de la hipótesis de los cuantos, en la interacción entre la luz y la materia. En este contexto, el efecto fotoeléctrico permitió consolidar el resurgimiento de la idea corpuscular de la luz y con esto dar inicio a una nueva forma de ver el microcosmos, la física cuántica.

Palabras clave: historia de la óptica, física clásica, física cuántica, dualidad onda partícula, efecto fotoeléctrico.

Introducción

La información histórica mas antigua que tenemos sobre el vidrio, la óptica y la visión, se basan fundamentalmente en investigaciones arqueológicas. Cabe señalar que estas investigaciones no tenían su enfoque en temas de óptica, por tanto, la información que existe es algo difusa. También es importante recordar que la destrucción y los incendios intencionales que realizaron los cristianos sobre la biblioteca de Alejandría nos hicieron perder un legado científico de gran importancia intelectual para la humanidad (Papp, 1996; Sagan, 1980).

Vidrio y óptica en la prehistoria y antigüedad

Respecto al vidrio existen evidencias arqueológicas que nos dan muestra de las utilidades de este material en diversas culturas antiguas, como egipcios, griegos, asirios, chinos, olmecas e incas, por nombrar algunas civilizaciones. En estas secciones solo nombraremos algunos hallazgos arqueológicos.

En óptica los primeros restos de fabricación de vidrio fueron hallados en Egipto y se remontan por lo menos de 4000 a 5000 años a.C. (Hamon, 2003). En cuanto a lentes de cristal de roca y de gran calidad óptica datan del año 2600 a.C. también encontrados en Egipto (Calvo et al. 2005). El término lente deriva de los hallazgos encontrados en Grecia (Creta) de lentes plano-convexas que datarían del 1930 a 1895 a.C. (Andrews, 1991). Y desde el siglo V a.C. griegos, romanos y árabes manejaban las propiedades y la construcción de espejos, las lentes convergentes y esferas de vidrio (Museo Egipcio, El Cairo).

En esta época prehistórica y antigua, los fenómenos naturales eran contestados en función de creencias religiosas y mágicas, basadas fundamentalmente en mitos y leyendas, que tenían

cada una de las civilizaciones del planeta Tierra. Aunque en la Época Contemporánea actual, la mayor parte de la humanidad, aun se contesta los fenómenos cósmicos y terrenales de la misma manera, ocupando creencias esotéricas, sectas, religiones variadas o simplemente por el sentido común (Sagan, 1980).

La luz y la óptica en la Grecia clásica

Sin embargo, los griegos fueron los primeros en romper con las ataduras del misticismo esotérico y religioso que invadía a las civilizaciones del medio oriente. Los griegos fueron los primeros en intentar buscar y dar explicaciones racionales al Cosmos que nos rodea. Los egipcios eran excelentes ingenieros y constructores, pero no lograban hacer relaciones matemáticas. Los griegos, se diferenciaron del resto de las civilizaciones del medio oriente, por ser creadores de teoremas, axiomas y principios geométricos, que han perdurado en el tiempo hasta nuestros días (Papp, 1996).

Podríamos partir con Tales de Mileto quien en el año 585 a.C. anticipó un eclipse de sol, indicando que se debía a la posición del Sol, la Luna y la Tierra. Como también profetizó la altura de las pirámides de Keops en Giza (Egipto), cuando los sacerdotes egipcios preguntaron a Tales como podría medir las pirámides que ya databan unos 2000 años, Tales contestó: "La mediré sin la ayuda de ningún instrumento, Tales se tira en la arena y mide el largo de su cuerpo. Los sacerdotes le preguntan ¿que es lo que estas pensando? Tales contesta; me colocale en un extremo de esta línea, frente al Sol y esperare que mi sombra sea igual de larga que la línea en la arena, en ese momento y a esa hora, la sombra de la pirámide de Keops medirá lo mismo que la altura de la pirámide, los sacerdotes quedaron maravillados por la sencillez de su razonamiento. Esto se conoce hoy en geometría como el Teorema de Tales (Gil del Rio, 1986).

Nombraremos a continuación algunos personajes del mundo griego clásico que hicieron sus aportes en esta temática: Alcmeon de Trotona, en el 500 a.C. aproximadamente, realizo disecciones del ojo y el nervio óptico, y los clasifico en 1. Luz exterior, 2. Fuego interior del ojo. 3. Liquido de las membranas oculares como medio de transporte. Empédocles, en el s. V a.C. fue el primero en decir que luz era emitida por los objetos, la visión se produce cuando las partículas "fuego externo" llegan a los ojos. Hipócrates en el s. V a.C. afirmaba que la visión se producía en el cerebro, y que este era el órgano de sensibilidad luminosa. Leucipo s. V y IV a.C. iniciador del atomismo, maestro de Demócrito, indico que son los objetos los que envían una imagen *eidola*, produciendo la percepción humana a través de los sentidos. Herón de Alejandría en el s. I d.C, estudio la reflexión de la luz, demostró la propiedad de que la luz sigue el camino mas corto y que el ángulo de incidencia de un rayo luminoso es igual al ángulo del rayo reflejado (Pérez, 2006).

Estas explicaciones del proceso de la visión desde un punto de vista filosófico data de la Grecia antigua desde el s. VI a.C. donde se pueden resumir en dos grandes teorías que pugnaban por dar una explicación del fenómeno. Estas teorías pre científicas basadas mas bien en la intuición, fueron la explicación de la visión hasta prácticamente el Renacimiento, en el mundo occidental. Las dos teorías son el *modelo activo de la visión* y el *modelo pasivo de la visión* (Alberich et al. 2014).

Modelo activo de la visión

Se asocia a Pitágoras y Euclides, quienes planteaban el proceso de la visión como emanaciones de rayos desde el ojo que viajan por el espacio y abarcan todos los objetos. La interacción entre este haz de luz y los objetos materiales, era lo que permitía que se produjera la sensación de visión. Teoría que también fue adoptada por Platón (Alberich et al. 2014).

Modelo pasivo de la visión

Este modelo defendido por Demócrito y Lucrecio, plantea un proceso inverso, donde existe una recepción pasiva de rayos desde los objetos materiales. Estas imágenes denominadas *eidola*, eran emitidas por los objetos hacia el espacio natural que los rodea, produciendo así la visión (Alberich et al. 2014).

Modelo científico de la luz

En el mundo moderno del s. XV-XVI d.C. se realizan algunas revisiones sobre las teorías antiguas de la visión, incluyendo aspectos fisiológicos y psicológicos. El modelo astronómico antiguo llamado *cámara oscura* formulado ya por Aristóteles se ocuparía como explicación del funcionamiento de la visión humana hasta el Renacimiento. Johannes Kepler, físico y astrónomo alemán, autor del tratado *Astronomía Pars Optic* (Kepler, 1604), realiza el primer estudio científico de la visión y de la luz, en el cual se eliminan los aspectos metafísicos y mitológicos del proceso de la visión humana, plantea una postura científica y fisiológica de la interacción y funcionamiento entre el ojo y el cerebro (Alberich et al. 2014).

A principios del s. XIX d.C. la luz, era considerada como un flujo de partículas emitidas por los objetos observados o por los ojos del observador. Newton, planteó que la luz eran partículas y que éstas eran emitidas por la fuente luminosa y que estimulaban la vista de los ojos del observador, explicando el fenómeno de la reflexión y la refracción. En 1678, el astrónomo Christian Huygens estudiando óptica, planteó que la luz es un tipo de movimiento vibratorio que se dispersa y produce la sensación de luz cuando incide sobre nuestros ojos y demostró que la teoría de ondas explicaba la reflexión y la refracción, de acuerdo al conocimiento en estos tiempos sobre la luz, esta tendría una propiedad fenoménica (Cassini & Levinas, 2008).

En 1801, Thomas Young, demostró que los rayos de luz podían interferirse unos con otros y que tal comportamiento no podía ser demostrado por una teoría de partículas, ya que no había una manera explicable de que dos o más partículas pudieran unirse y cancelarse entre sí. En 1873, Maxwell afirmó que la luz era una forma de onda electromagnética (*en adelante OEM*), posteriormente en 1887, Hertz experimentando con ondas de radio, logró producir y detectar el efecto fotoeléctrico (*en adelante EF*). Naciendo con esto una nueva propiedad transfenoménica de la luz. También podemos agregar que, con el nuevo conocimiento de la *OEM*, nacen nuevas propiedades transfenoménicas como: frecuencia, longitud, energía, amplitud y velocidad de las *OEM*, medidas por instrumentos. Sin embargo, el modelo ondulatorio y la teoría clásica de electricidad y magnetismo (electrodinámica clásica), eran incapaces de explicar ciertos experimentos. El más ejemplificador de éstos es el efecto fotoeléctrico, cuando se incide luz (visible o ultravioleta) sobre una superficie metálica, en

ocasiones salen expulsan electrones de la superficie (Reyes, 2006).

Desarrollo

Biografía de Albert Einstein

Albert Einstein (1879-1955), cursó sus estudios primarios en una escuela católica, desde la infancia mostró excelencia para las ciencias naturales, pero no tanto para las áreas del lenguaje. Estudió posteriormente en el Gymnasium, Instituto de bachillerato, pero su rigidez militar le producía muchos problemas y polémicas con sus profesores, y no terminó el bachillerato. Su tío Jacob (un Ingeniero inventor) fue muy influyente en su vida, ya que con él conoció los libros de ciencia y nacería un cuestionamiento a las afirmaciones de la religión, del estado y la autoridad, en definitiva, un escéptico de libre pensamiento. En su juventud, - al no tener el título de bachiller- tuvo que rendir una prueba de acceso para ingresar a la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, donde fue rechazado por una calificación deficiente en una asignatura de letras. El director le sugirió que terminara el bachillerato para que ingresara directamente al Politécnico. Su familia lo envió a la escuela cantonal de Argovia, donde terminó el bachillerato en 1896 a los 16 años. A fines de 1896 ingresó finalmente a la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, Suiza para estudiar física, donde se graduó en 1890. Desde 1902 a 1909, trabajó en la Oficina Federal de la propiedad Intelectual de Suiza, en Berna y en 1904 finalizó su doctorado. En 1905 presentó cuatro trabajos sobre física de pequeña y gran escala. El primero explicaba “el movimiento browniano”, el segundo “el efecto fotoeléctrico”, el tercero “la relatividad especial” y el cuarto “la equivalencia masa-energía” (Reyes, 2006; Quiroz, 2016; Serway y Jewett, 2009).

Análisis epistemológico y ontológico del efecto fotoeléctrico (EF)

El 9 de noviembre de 1922 se le concedió a Einstein el Premio Nobel de Física correspondiente al año 1921. Se le comunicó de manera un tanto peculiar, que la decisión se había tomado “en consideración a su trabajo sobre física teórica, y en particular por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico, pero sin tomar en cuenta el valor que pueda ser acordado en el futuro a sus teorías de la relatividad y de la gravitación, después de que éstas fueran confirmadas en el futuro”. El aspecto más trascendental de ésta contribución, estaba en que la teoría acerca de la luz y quizás también de toda la radiación electromagnética (*en adelante REM*), es que estaría compuesta de cuantos discretos, siendo ésta idea muy poco aceptada por la mayoría de los físicos de la época por sus consecuencias ontológicas, además no disponía de evidencia decisiva a su favor. El alto poder explicativo de la hipótesis le dio el premio Nobel a Einstein, después de ser conocido por sus teorías de la relatividad. El artículo donde introdujo la teoría cuántica de la luz, no solo servía para explicar el *EF* sino para toda una gama de interacciones entre la radiación y la materia, para los cuales la electrodinámica clásica no podía explicar. La hipótesis de la ecuación de Einstein resolvía todas las dificultades ocupando una ecuación muy sencilla, que permitía además explicar los fenómenos de absorción y emisión de la luz por parte de la materia. Estos temas de inconsistencia y la validez del momento de la electrodinámica, cambiando de una antigua propiedad de “onda” a una nueva propiedad conocida posteriormente como “dualidad onda-partícula” que se evidenciaría en la interacción del nascente sistema, la relación entre la *REM* y la *materia* (Cassini y Levinas, 2008).

Concepciones previas del efecto fotoeléctrico

Cuando Heinrich Rudolf Hertz, descubrió por accidente el *EF* en 1887, advirtiendo que la luz ultravioleta (Propiedad Transfenoménica de la onda electromagnética incidente, del *EF*) provocaba una descarga, una chispa (Propiedad Fenoménica del *EF*), en el cátodo de sus instrumentos. En 1899 Thomson usando el *EF* determinó la relación m/e (masa / carga del electrón), (Propiedad Transfenoménica de la materia), identificando estas partículas con los electrones, llamándoles en adelante *fotoclectrones* a las partículas emitidas por el *EF*. En 1902 P. Lenard finalizó un experimento con el *EF* y concluyó que la energía de los *fotoclectrones* no dependía de la intensidad de luz incidente, no aumentaba cuando se incrementaba la intensidad de la luz (Reyes, 2006).

El efecto fotoeléctrico como sistema material de estudio

A finales del s. XIX, algunos experimentos demostraron que una *REM* (iluminación visible o ultravioleta) incidente sobre ciertas superficies metálicas generaba una chispa, descarga o emisión de partículas, llamadas *fotoclectrones*, este fenómeno se le conoce como Efecto Fotoeléctrico, y será en adelante nuestro sistema material de estudio (Reyes, 2006).

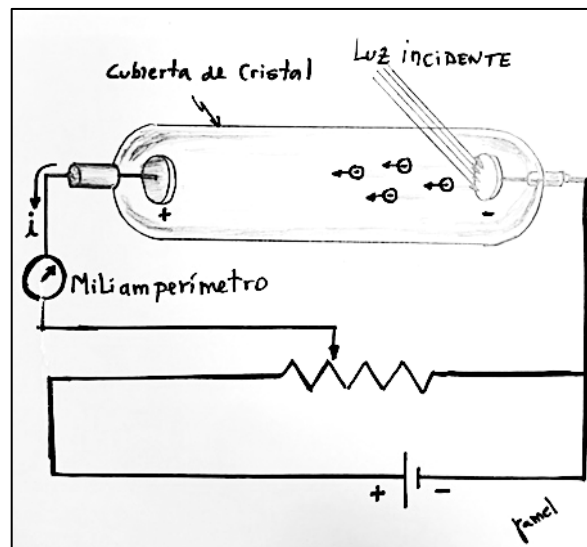


Figura 1. Esquema

En la Figura 1 tenemos dos placas metálicas separadas, una positiva (+) cátodo y otra negativa (-) ánodo, sometidas a una diferencia de potencial ΔV (que puede ser cambiada su polaridad con un interruptor, haciéndola negativa) y se coloca un amperímetro para medir el paso de la corriente fotoeléctrica (i). En la oscuridad el amperímetro lee cero, lo que indica que no hay corriente en el circuito. Sin embargo, cuando se ilumina el ánodo el amperímetro detecta una corriente, indicando que existe un flujo de cargas. Esta corriente aparece por los *fotoclectrones* emitidos por el ánodo y almacenados por el cátodo (Reyes, 2006).

Consideremos un electrón en un campo eléctrico

Revisemos el siguiente caso, como por ejemplo entre dos electrodos, al interior de un tubo,

como es la situación descrita en la figura 1.

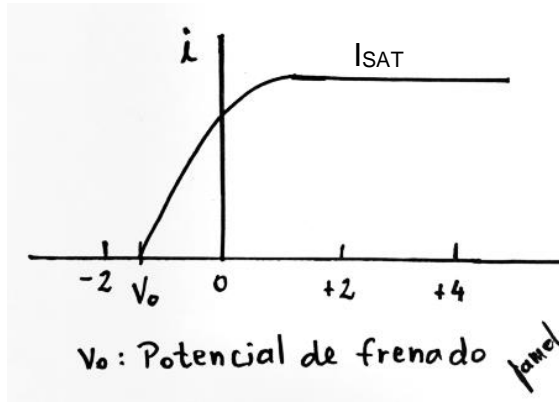


Figura 2. Potencial de corte

Ahora, en la Figura 2, se puede analizar que dependiendo si la diferencia de potencial ΔV es positiva tenemos una corriente (i) que finalmente tiene un valor de saturación y luego se mantiene constante. Para este caso, son los *fotodectrones* que emitió el metal y que tienen un movimiento acelerado a favor del Campo Eléctrico (*en adelante* (E)). En cambio, si el E, está en contra del movimiento de los *fotodectrones*, igual se detecta una corriente (i) en caída hasta llegar a cero, denominado potencial de corte o frenado, V_0 .

Conexión directa

Revisemos un nuevo caso, donde el voltaje ánodo es mayor que, el voltaje cátodo: $V_A > V_C \Rightarrow V > 0$ (Figura 3).

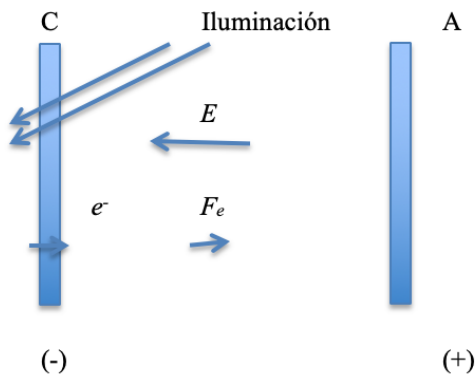


Figura 3. Conexión directa

- 1) Todos los *fotodectrones* que salen del cátodo (C) llegarán al ánodo (A). El E aceleró a los *fotodectrones* al ánodo.
- 2) Si se aumenta (V) aumentará (i), hasta un valor constante, ya que no podrán llegar más *fotodectrones* a (A) que los que salieron de (C).
- 3) Si la corriente $i = i_{SAT} \Rightarrow$ Que al ánodo están llegando todos los *fotodectrones* que salieron del cátodo en forma proporcional.
- 4) Movimiento del e^- es acelerado por E, produciendo una Fuerza eléctrica, F_e a favor del movimiento de los e^- .

Conexión Inversa

Revisemos ahora el caso inverso, donde el voltaje del cátodo es mayor que el voltaje ánodo: $V_C > V_A \Rightarrow V < 0$ (Figura 4)

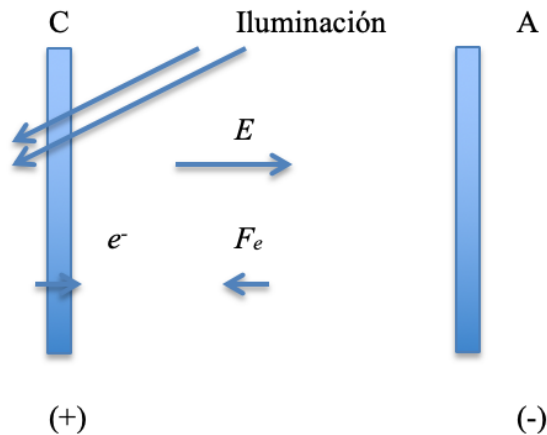


Figura 4. Conexión inversa

- 1) Solo llegarán al ánodo (A) los *fotodectrones* que salen del cátodo (C) con energía cinética $E_C \geq$ que el trabajo que deben realizar contra el E .
- 2) Donde trabajo (W) tenemos:
- 3) $W = q\Delta V \Rightarrow W = eV_0$
- 4) Donde V_0 : Potencial de frenado o potencial de corte.
- 5) Si $E_C < eV_0 \Rightarrow$ Los *fotodectrones* NO llegarán a (A), por tanto no hay corriente: $i=0 \Rightarrow E_C = eV_0$
- 6) Movimiento del e^- es retardado por E , produciendo una Fuerza eléctrica, F_e en contra del movimiento de los e^- .

Donde:

- $E_C = T$: Energía cinética máxima con que los *fotodectrones* abandonan al cátodo.
- $T_{\max} = eV_0$
- V_0 : Potencial de frenado o Potencial de corte, nos da una medida de la energía cinética con que son emitidos los *fotodectrones*.

Estudio fenomenológico

Ahora con los resultados anteriores hacemos un estudio fenomenológico y caracterizamos los *fotodectrones* que salen.

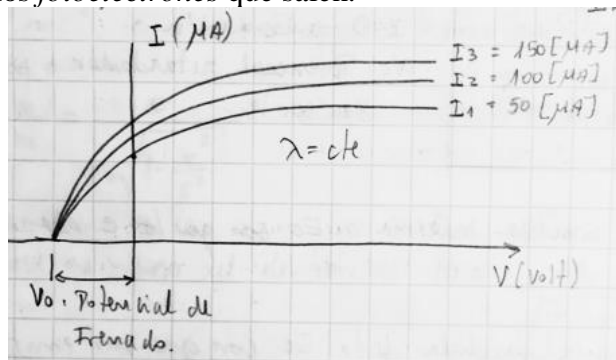


Figura 5. Características de los fotodectrones de salida.

La energía cinética T_{\max} del *fotodectrón* desprendido más rápido, es totalmente independiente de la intensidad de la luz (I), como lo muestra la Figura 5, donde se aplican distintas intensidades de luz con longitud de onda constante (λ).

La Figura 6, muestra el potencial de corte en función de la frecuencia de la luz incidente para el sodio. Datos experimentales obtenidos por R. Millikan, cuyo trabajo sobre el EF, le galardonó con el Premio Nobel en 1923.

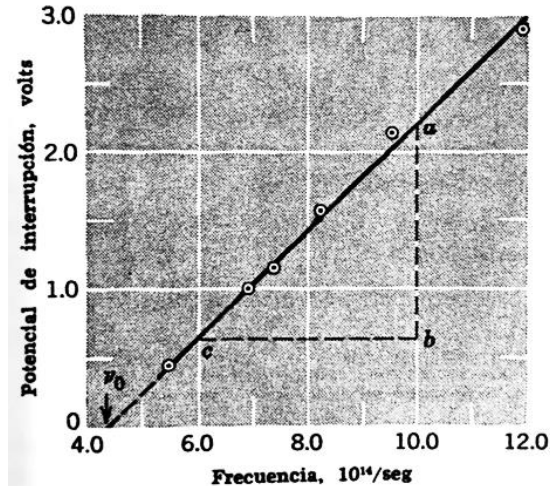


Figura 6. Potencial de interrupción

Debido a que el *EF* tiene propiedades fenoménicas, por ser una interacción con una superficie, es necesario evitar contaminación superficial, por tanto, Millikan inventó un “taller de máquinas al vacío”. En la Figura 6, las medidas hechas por Millikan del potencial de corte, para diversas frecuencias para el sodio. La frecuencia de corte:

$$\nu_0 = 4,39 \times 10^{14} \text{ [Hertz]}.$$

Limitaciones de la física clásica

Hay cuatro características fundamentales del *EF* que no pueden ser explicadas mediante las propiedades ondulatorias de la luz:

- 1) La teoría ondulatoria indica que la energía cinética de los *fotodectrones* aumenta si aumenta la intensidad del rayo de luz incidente. Pero la Figura 5 deja en evidencia que $T_{max} = eV_0$ es independiente de la intensidad.
- 2) La teoría ondulatoria dice que el *EF* debería ocurrir para cualquier frecuencia de la luz, mientras ésta sea suficientemente intensa. La Figura 6 deja en evidencia que existe, para cada superficie o metal, una frecuencia de corte característica de cada metal, ν_0 . Si incide una frecuencia menor que ésta, desaparece el *EF*, por intensa que sea la iluminación.
- 3) La teoría ondulatoria plantea que, a bajas intensidades de luz, se debe esperar un tiempo medible desde que se enciende la luz y el *fotodectrón* es expulsado del metal. En los experimentos, los *fotodectrones* son emitidos prácticamente de manera instantánea (10^{-9} [s]) incluso con intensidades de luz muy bajas.
- 4) La teoría ondulatoria indicaba que no había ninguna relación entre la frecuencia de la luz incidente y la energía cinética del *fotodectrón*, mas bien que la energía cinética dependía de la intensidad luminosa. Experimentalmente se podía observar que la energía cinética máxima de los *fotodectrones* aumenta al incrementarse la frecuencia de la luz.

En resumen

El *EF* no se puede explicar con la Electrodinámica Clásica, tampoco se puede explicar la Termodinámica y la Radiación del cuerpo negro. La física clásica predice hechos que contradicen la realidad del mundo material, realidad evidenciada mediante procesos experimentales. Cuando se estudia el proceso de interacción REM \Leftrightarrow materia, la Física clásica falla, esto es, falla la concepción de sistema ondulatorio de la luz (Reyes, 2006).

© 2018 Revista Electrónica de Innovación en Enseñanza de las Ciencias (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso) <http://www.reinnec.cl>

Nacimiento de la física cuántica

Einstein muy atento a las contradicciones que estaban acaeciendo en el campo de la Física, estudia teóricamente el EF y plantea una explicación causal, siendo éste, nuestro nuevo sistema material de estudio. Einstein ve un cierto parecido al “fenómeno de la distribución de energía para la radiación de cuerpo negro” y justamente toma algunas de las ideas de Planck ($E = h\nu$), para formular su hipótesis, que luego de variados experimentos se transformó en la “Ley del Efecto Fotoeléctrico”. Einstein propuso en 1905 una teoría que resolvía las dificultades conocidas del EF, propuso que la luz no estaba distribuida de manera continua, como una onda, sino de manera discreta denominados “cuantos”.

Esta teoría no solo contiene la hipótesis de la composición granular de la luz, también incluye la hipótesis de la interacción entre los mismos cuantos y entre los cuantos y los electrones. Estos cuantos no interactúan entre si cuando viajan, ya que están separados unos de otros, de modo que la interacción entre ellos es despreciable. También asumió que los electrones absorben un único cuanto de luz y que este cuanto le transfiere la totalidad de su energía cinética. La explicación que plantea del EF, es la siguiente. Supongamos que sobre una sustancia metálica incide una cantidad finita de cuantos, de luz, cuya energía es ($h\nu$), estos cuantos ingresan al metal, interactuando con los electrones (Reyes, 2006).

Los electrones se mueven por la sustancia y salen a la superficie con una determinada energía cinética, para esto deben realizar un determinado trabajo, perdiendo algo de energía. Si ($h\nu$) es la energía del cuanto absorbido y (Φ) el trabajo de extracción propio del metal, necesario para escapar de la superficie del metal, la energía cinética máxima del *fotoelectrón* liberado será:

$$E_{max} = \frac{1}{2} m v^2 = h\nu - \Phi \quad [1]$$

Esta es la fórmula original del EF de Einstein, asumiendo siempre que el cuanto de luz transfiere la totalidad de su energía a un solo electrón. Se entiende que esta energía se alcanza cuando los *fotoelectrones* están en la superficie del metal y salen de él de forma perpendicular. Einstein no excluye, que el electrón absorba solo una parte de la energía del cuanto de luz (pérdidas), siendo la energía del *fotoelectrón* menor de la indicada.

De la ecuación [1] se deduce que un *fotoelectrón* se emite solo si el cuanto de luz tiene una energía:

$$h\nu > \Phi \quad [2]$$

De [1] también se deduce que cada metal tiene una frecuencia umbral de la luz incidente, que es:

$$\nu_0 = \Phi / h \quad [3]$$

La frecuencia umbral, Einstein la explicó suponiendo que cada electrón absorbe un solo
© 2018 Revista Electrónica de Innovación en Enseñanza de las Ciencias (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso) <http://www.reinnec.cl>

cuanto de luz, y ésta es proporcional a la frecuencia mínima de cada sustancia, dada en la ecuación [3], de lo contrario no tendría la energía necesaria para sacar el electrón de su átomo. Con ésta misma hipótesis dedujo que los *fotoelectrones* son proporcionales a la frecuencia de la luz incidente, determinada por la ecuación de energía de Planck ($E = h\nu$). Si se aumenta la intensidad de luz sobre la superficie iluminada llegan más cuantos de luz y éstos excitan mayor número de electrones, pero no aumenta la energía de cada cuanto.

Respecto al retardo temporal en la emisión de *fotoelectrones*, Einstein, supuso que la absorción y emisión de los cuantos de luz por parte de la sustancia, se produce de manera instantánea o tiempos a escala atómica, concepto coherente con que la energía de los cuantos de luz está ubicada de manera puntual, como ocurre en partículas materiales y no distribuidas en el espacio, como las ondas.

En definitiva, la explicación de Einstein es un modelo mecánico-causal, donde el autor ofrece una historia causal de los hechos, explicando los mecanismos que lo producen.

Resumen de los postulados y ecuaciones de Einstein para el efecto fotoeléctrico

- 1) La luz (*REM*) es absorbida en las mismas porciones (cuantos, $E = h\nu$) que según Planck era emitida.
- 2) La luz (*REM*) no solo al interactuar con la materia tiene comportamiento discreto, sino incluso al propagarse. Por lo tanto, al llegar la luz al cátodo, estarían llegando paquetes de energía o fotones.

Donde:

$h\nu$: Energía del fotón incidente = 1 cuanto

T_e : Energía cinética con que el electrón abandona el cátodo

Φ : Función trabajo del metal

ν_0 : Frecuencia umbral, mínima frecuencia capaz de producir fotoemisión (característica del metal)

λ_0 : Longitud de onda umbral, máxima longitud de onda capaz de producir fotoemisión (característica del metal)

V_0 : Potencial de frenado o potencial de corte, bajo este valor no se produce *EF*

Un fotón al llegar al cátodo tiene una energía:

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

Parte de esta energía la gasta en arrancar el electrón del metal, denominada también como función trabajo del metal.

$$\Phi = h\nu_0 = hc / \lambda_0$$

El resto de la energía la gasta en comunicarle a dicho electrón cierta energía cinética.

$$T_e = eV_0$$

Por tanto, la energía incidente es igual a la función trabajo más la energía cinética:

$$h\nu = \Phi + T_e$$

$$h\nu = h\nu_0 + eV_0$$

De la ecuación anterior podemos determinar el voltaje de corte (V_0), que fuera posteriormente comprobada en diversos experimentos por Robert Millikan quien tenía serias dudas de las conclusiones corpusculares y de los cuantos de Einstein.

Finalmente reconoció que todos los resultados concordaban con las hipótesis de Einstein y que además había confirmado también la constante de Planck (h), obteniendo un resultado con una alta precisión.

$$h\nu = h\nu_0 + eV_0 \Rightarrow eV_0 = h\nu - h\nu_0 \Rightarrow$$

$$V_0 = (h/e)\nu - (h/e)\nu_0$$

Para que los electrones puedan ser arrancados de un cátodo por otra luz incidente, ésta debe satisfacer la relación:

$$T_e \geq 0$$

$$h\nu \geq h\nu_0 \Rightarrow \nu \geq \nu_0$$

Esto se llama frecuencia umbral, y dependerá de la naturaleza del cátodo o metal.

Evidencias y base experimental del fotón

La ecuación de Einstein para el EF hacía predicciones nuevas y bien concretas, que nada de eso se sabía hasta entonces, y que ni siquiera fueron confirmadas sino hasta una década después:

1. La ecuación ($E = h\nu - \Phi$) [1], decía que E debía variar linealmente con ν
2. La pendiente de la Figura 6 es una constante universal, independiente del material irradiado.
3. El valor de la pendiente debía ser la constante de Planck determinada a partir de la ley de radiación.

Entre 1912 y 1915 R. Millikan realizó una serie de experimentos de alta precisión con el fin de refutar todas las ecuaciones y predicciones de Einstein para el EF .

Los resultados, publicados en 1916, fue una confirmación total y absoluta de todas las predicciones ya citadas. Los datos mostraban la energía de los *fotoselectrones* (E) como función de la luz incidente, caían todos sobre una línea recta cuya pendiente era (h/e) , tal como se deducía de la ecuación de Einstein (Figura 6) (Reyes, 2006).

Volvamos a escribir la ecuación:

$$V_0 = (h/e)\nu - (h/e)\nu_0 \Rightarrow V_0 = (h/e)\nu - \Phi/e$$

Matemáticamente hablando es:

$$Y = mX + b$$

Donde (m) es la pendiente de la recta, y representa para nuestro ejemplo:

$$m = h/e$$

Entonces, si ocupamos la teoría de Einstein que predice una relación lineal entre V_0 y ν podríamos determinar la pendiente de la curva ocupando la Figura 6.

$$h/e = ab/bc = (2,2 - 0,65) / (10 \times 10^{14} - 6 \times 10^{14}) = 3,9 \times 10^{-15} [\text{Volt seg}]$$

$$h/e = 3,9 \times 10^{-15} [\text{Volt seg}] \Rightarrow h = 3,9 \times 10^{-15} [\text{Volt seg}] \times 1,6 \times 10^{-19} [c]$$

$$h = 6,2 \times 10^{-34} [\text{Joule seg}]$$

Mediante un análisis posterior mucho más detallado y cuidadoso de los datos y de otras implicancias, incluyendo distintos materiales como también el Litio, Millikan encontró el valor de:

$$h = 6,57 \times 10^{-34} \text{ [Joule seg]} \text{ con una precisión del orden del } 99,25\%$$

Esta concordancia con el valor de (h) derivado de la ecuación de Planck fue un notable hallazgo del concepto de los fotones de Einstein, por tanto, la comunidad de físicos aceptó que la ecuación estaba confirmada más allá de toda duda razonable.

Aplicaciones del efecto fotoeléctrico a la ciencia y tecnología

Uno de los primeros usos prácticos del EF fue ocupándolo como detector en el medidor de luz de una cámara fotográfica. La luz reflejada por un objeto que se desea fotografiar incide sobre una superficie fotoeléctrica en un medidor, generando los *fotoelectrones* que luego son medidos por un miliamperímetro, cuya magnitud de corriente dependerá de la intensidad de la luz, dando como resultado la medición requerida.

El fototubo, otra aplicación del EF , actúa de manera parecida a un interruptor de luz. Se produce una corriente cuando incide luz de alta frecuencia sobre un metal del fototubo, pero cuando se corta esta luz incidente, se corta la corriente, siendo este principio ocupado para alarmas contra robos. También se ocupa el EF para fotomultiplicadores, esto funciona al hacer incidir un fotón en un fotocátodo expulsa un electrón. Este electrón es acelerado por una diferencia de potencial que existe entre el fotocátodo y el primer dínodo, el proceso se repite continuamente con los siguientes dínodos, cada uno con un potencial cada vez mayor, dando como salida millones de electrones. En la actualidad en las observaciones astronómicas el tubo multiplicador está siendo reemplazado por un *dispositivo acoplado por cargas (CCD, charged-coupled device)*, mismo dispositivo de las cámaras digitales. En un CCD se construye una matriz de píxeles sobre una superficie de silicio en un circuito integrado. Cuando esta superficie se expone a la luz de un objeto astronómico a través de un telescopio, los fotoelectrones quedan atrapados en “trampas” debajo de la superficie. Luego un procesador mide la cantidad de electrones asociados con cada píxel convirtiéndolo en un código digital para luego generar la imagen computacional. Actualmente se ocupa *la cámara CCD de bombardeo de electrones* que es más sensible que la CCD convencional (Serway y Jewet, 2009).

Conclusión

La hipótesis de los cuantos de luz tenía evidencias experimentales concluyentes, lo que cambia las propiedades de la luz y la REM , de ser solo una onda a también ser considerada como partícula, que finalmente dio origen al concepto moderno de dualidad onda-partícula. Los procesos causales microscópicos, que daban el argumento epistemológico eran muy superiores a todas las teorías rivales de la época y hasta nuestros días. Además, esta teoría no solo explicaba el EF sino también otros fenómenos luminosos, donde la luz interactuaba con la materia, de esta forma era una teoría más unificada, que incorporaba evidencias

experimentales que se podían extrapolar también para la fotoluminiscencia, la radiación del cuerpo negro y para el Efecto Compton (teoría posterior). En resumen, una Ley elegante, simple, unificada y transparente.

Bibliografía

- Andrews, G. (1991). *Ancient Egyptian Jewelry*. New York: Harry N. Abrams.
- Alberich et al. (2014). *Diseño Grafico*. España: Oberta UOC Publishing, SL.
- Calvo, M et al. (2005). *Óptica Avanzada*. España: Ariel.
- Cassini, A. & Levinas, M. (2008). La Explicación de Einstein del Efecto Fotoeléctrico: Un Análisis Histórico-Epistemológico [Versión electrónica]. *Revista Latinoamericana de Filosofía*, 34, 5-38.
- Gil del Rio, E. (1966). *Óptica Fisiológica, 1467-1473*. México: Compañía Editorial Continental.
- Hamon, M. (2003). The Origins of Glass. *Points De Vue* 48, 42-49.
- Papp, D. (1996). *Historia de las ciencias*. Santiago: Andres Bello
- Pérez, J. (2006). Una visión histórica de la óptica. *Revista de Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*, 6, 71-78.
- Quiroz, W. (2016). Naturaleza de la Ciencia para todos, *La Estructura de la Naturaleza*, 10-47. Chile: Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- Reyes, M. (2006). *Física Moderna e Introducción a la Mecánica Cuántica*. Material digital y apuntes personales de la asignatura del Plan de Regularización en Licenciatura de Educación en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile, Julio – Octubre, Santiago, Chile.
- Sagan, C. (1980), *Cosmos*. Barcelona: Planeta.
- Serway, R. & Jewett, J. (2009). *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna, Naturaleza de la Luz y Leyes de Óptica Geométrica*, 978-979. México: Cengage Learning Editores, S.A.
- Serway, R. & Jewett, J. (2009). *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna, Efecto Fotoeléctrico*, 1160-1165. México: Cengage Learning Editores, S.A.