

**DE LA FÍSICA CLÁSICA A LA MODERNA: UN ANÁLISIS HISTÓRICO –
MATEMÁTICO SOBRE LA CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA POR MEDIO DEL
EFECTO FOTOELÉCTRICO**

CINDY NATALIA ARIZA ROMERO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

LICENCIATURA EN FÍSICA

BOGOTÁ D.C.

2020

**DE LA FÍSICA CLÁSICA A LA MODERNA: UN ANÁLISIS HISTÓRICO –
MATEMÁTICO SOBRE LA CUANTIZACIÓN DE LA ENERGÍA POR MEDIO DEL
EFECTO FOTOELÉCTRICO**

CINDY NATALIA ARIZA ROMERO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN FÍSICA

Asesor:

Profesor: VICTOR ANDRES HEREDIA

**LINEA DE INVESTIGACIÓN: LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN
FÍSICA MATEMÁTICA**

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN FÍSICA

BOGOTÁ D.C.

2020

Dedicado a:

En primera instancia, le dedico este logro a la mujer que me enseñó a luchar, resistir y jamás desfallecer ante las caídas. Gracias por ser mi apoyo incondicional, siempre confiando y bendiciendo mi camino en la oscuridad, pero sobre todo por su comprensión, para ti madre, este triunfo es más tuyo que mío. Te amo.

En segundo lugar, a mi padre Javier Ariza por sus lecciones y paciencia para orientar mi camino de manera personal y profesional.

Agradecimientos:

En este recuerdo quiero agradecer a la complicidad del destino por guiarme a esta profesión de ser docente y poder ayudar a las próximas generaciones.

*A mi hermano **Camilo Ariza**, por siempre brindarme conocimiento y orientación ante las dificultades, a él le debo parte de lo que sé.*

*A mi asesor **Víctor Heredia**, por su apoyo incondicional y estar presto para brindarme sus consejos y sabiduría que permitieron la culminación de este trabajo de grado.*

*A mi compañero de vida **Cristian Torres**, por su incondicional apoyo, amor, comprensión y palabras de aliento que no permitieron desistir, desfallecer y poder culminar esta etapa.*

*A mi amiga **Eliana Vargas**, por escucharme siempre, celebrar mis triunfos y darme palabras de aliento que me motivaron a cumplir uno de mis logros.*

Por último, a mí querida alma mater, por acogerme y brindarme la mejor formación profesional, social y política. Siempre combativa y rebelde.

Gracias totales.

Contenido

Tablas de figuras.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPITULO I.....	10
1.1 PROBLEMÁTICA:.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	11
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.3 ANTECEDENTES.....	12
1.3.1 Locales:.....	12
1.3.2 Internacionales:.....	13
1.4 Metodología.....	13
1. Antecedentes:.....	14
2. Trabajo de Einstein.....	14
3. Un antes y un después conceptual y formal.....	14
4. Reflexiones finales.....	14
CAPITULO II.....	15
<i>Concepto de energía desde la mirada clásica y moderna.....</i>	15
2.1 Mecánica.....	15
2.2 Termodinámica.....	17
2.3 Electromagnetismo.....	18
2.4 Experimentos que la física mecanicista no explico.....	21
2.4.1 Espectros atómicos.....	21
2.4.3 Radiación de cuerpo negro.....	24
<i>Concepto de cuánta a partir de Einstein.....</i>	31
3.1 Generalización del concepto de cuánta.....	31
3.2 Acerca de la generación y absorción de la luz.....	37
3.3 Fenómenos antes de Einstein.....	40
3.4 Reflexiones sobre los documentos de Einstein.....	40
<i>La formalización y concepto del cuanto de energía desde el efecto fotoeléctrico comparada con la continuidad de la energía clásica.....</i>	42
4.1 El efecto fotoeléctrico comprendido actualmente utilizando el cuánta de energía.....	42
4.2 Comparación con la teoría ondulatoria.....	49
CONCLUSIONES.....	52
Bibliografía.....	53
Anexo 1.....	55

Anexo 2	63
Anexo 3	79

Tablas de figuras

Figura 1, Romero, P; (2013), Tipos de espectros, Recuperado de https://vecinadelpicasso.wordpress.com/2013/09/23/espectros-de-absorcion-y-emision/ ,	23
Figura 2 Ilustración Braun, E. (1992) Hertz, Ondas electromagnéticas [Figura]. Recuperado de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_17.htm	23
Figura 3 Tomado de Introducción a la física moderna (pag 47), por Garcia, M y Ewert, Jeannine, 2003, Universidad Nacional de Colombia	25
Ilustración 4, Luz incidiendo en una placa metálica, (Elaboración propia)	43
Ilustración 5, el electrón se mueve en dirección horizontal (Elaboración propia)	44
Ilustración 6, cuando el electrón sufre un frenado, (elaboración propia).....	46

INTRODUCCIÓN

Generalmente en la formación de científicos los estudiantes conocen poco acerca de la construcción teórico – metodológica por lo cual se genera una brecha entre cómo se produce conocimiento y su enseñanza ya que, se presentan los conocimientos de una manera lineal y continua, es así que se olvidan del contexto y proceso por el cual se logra concluir esa formalización, de igual manera como en la educación tradicional se concentra en la enseñanza de los resultados y no se presenta el proceso por el cual los científicos llevan a cabo sus desarrollos de conocimiento y los errores por los que atraviesan para llegar a la explicación, construcción y experimentación de una hipótesis sobre fenómenos. (Hernandez, 1996)

Es así, como la historia sobre las ciencias puede ser utilizada como una herramienta para generar criterios y discusiones sobre lo que es conocer y cómo se conoce y así mismo poder presentar el proceso de las formalizaciones conceptuales y matemáticas, también esto puede ayudar al entendimiento de teorías actuales ya que se puede caracterizar el contexto en el cual surge nuevas teorías y formas de pensamiento. (Hernandez, 1996).

Así pues, una de las pretensiones de este trabajo es utilizar la historia y la formalización como herramienta de caracterización de contextos para poder explicar la transición del concepto de energía continua hacia la energía discreta, mostrando sus causas y así pretender evidenciar la ruptura de la mirada de la energía clásica hacia la moderna y revisar su formalización matemática antes y después.

De acuerdo a lo anterior, durante el siglo XIX se presentan tres fenómenos (espectros atómicos, radiación de cuerpo negro y efecto fotoeléctrico), los cuales cuando se explicaban desde la perspectiva clásica estos presentaban incongruencias con las conceptualizaciones y formalizaciones ya comprendidas para la época.

Por lo cual, nos centraremos en el efecto fotoeléctrico ya que en primera instancia, se logró solucionar cuando Einstein generaliza el concepto de cuanto desarrollado por Planck para la radiación de cuerpo negro y en segunda, representa la base teórica para la mecánica cuántica puesto que se preocupa por el estado en que se encuentra los átomos, moléculas y electrones. (Escudero, Jaime, & González, 2016)

De esta manera, se espera que con esta contribución para los estudiantes en formación de la licenciatura en física primeramente, sea más clara la transición de la física clásica a la moderna por medio de la cuantización de la energía utilizando el efecto fotoeléctrico y su formalización para mejorar la comprensión de la misma, y en segunda instancia, se puede lograr revisando los estudios de historia de las ciencias referidos al surgimiento de la física moderna.

Es así, como este trabajo lo desarrollamos por medio de cuatro capítulos descritos a continuación:

En el capítulo 1: *Contextualización del problema*, se presenta al lector la contextualización del problema donde se expone el concepto de energía el cual se mantiene transversal durante los avances y desarrollos de la física, así mismo cómo cambia su concepto de la física clásica hacia la moderna. Además, se presenta la pregunta problema, los objetivos, los antecedentes y la metodología que orientó este trabajo de grado.

En el capítulo 2: *Concepto de energía desde la mirada clásica*, se presenta el concepto de la energía desde la mecánica clásica pasando por la termodinámica y el electromagnetismo haciendo énfasis en su continuidad, así mismo, se nombra fenómenos que en el siglo XIX fueron controversiales para la concepción del concepto de energía continua y dieron paso a la nueva teoría de los cuantos (discreta) tanto conceptual como matemática.

En el capítulo 3: *Concepto de cuánto a partir de Einstein*, se presenta el análisis de dos documentos realizados por Einstein en 1905 y 1906 los cuales, en el primero encontramos su generalización del concepto de cuanto de manera conceptual y matemática para los experimentos anteriormente nombrados además, en el segundo se desarrolla una afirmación la cual expone que la hipótesis desarrollada por Planck es un caso específico de su trabajo, además relaciona la diferencia de potencial y los electrones.

En el capítulo 4: *La formalización y concepto del cuanto de energía desde el efecto fotoeléctrico comparada con la continuidad de la energía clásica*, se presenta la formalización matemática a partir del efecto fotoeléctrico desde el entendimiento actual nombrando a Millikan, quien logró demostrar la hipótesis de Einstein encontrando la carga del electrón, de igual manera, se realiza la comparación referente a la teoría de ondas electromagnéticas presentada por Maxwell y cómo ésta no es compatible con el experimento.

CAPITULO I

CONTEXTUALIZACIÓN

Para este capítulo se expone el contexto problema donde se nombra la causa y la motivación de centrar el trabajo de grado en un paso de la física clásica a la moderna desde una perspectiva historia y matemática, de igual manera se presenta la pregunta problema, la justificación de la misma y algunos trabajos que fueron orientadores para la construcción de este trabajo.

1.1 PROBLEMÁTICA:

La física se puede describir en dos momentos particulares, teniendo en cuenta sus desarrollos teóricos. Por un lado, se encuentra la física clásica que dominó el conocimiento científico hasta mediados del siglo XIX. Mientras que, la teoría moderna surge a partir de fenómenos físicos que no se pueden abordar desde la física clásica, complementando, y en algunos casos, replanteando conocimientos científicos que predominaron durante mucho tiempo (Camatón, Encalada, & Pavón, 2018). Estas teorías se encuentran en constante desarrollo, debido a los problemas que surgen a medida que se ahonda en el conocimiento del mundo a niveles micro y macro, a partir de la continua investigación, por ello, la ciencia ha logrado avanzar en grandes desarrollos, tanto para nuestro vivir, como, su fortalecimiento de nuevas teorías.

El concepto de energía particularmente se mantiene presente en el desarrollo de las distintas teorías, como la energía cinética para analizar un sistema en la mecánica clásica, o en relatividad sobre la equivalencia de masa y energía; de ahí que este concepto sea importante para la física porque en diferentes teorías se hace uso de este concepto. (Solber & Tarín, 2004).

Ahora bien, se pueden comparar distintas definiciones sobre la palabra energía; por un lado, las personas en su cotidianidad, la definen aludiendo a adjetivos tales como: una persona que se encuentra “energética” o que “tiene mucha energía” para realizar diferentes tareas durante su diario vivir, desconociendo el concepto físico de este término, sin salirse demasiado de su significado real. (Arias, 2006). Mientras que, en comunidades académicas que estudian ciencias, éste es más explicado desde formalismos construidos, que en algunas ocasiones, puede resultar fácil de entender y explicar desde una perspectiva clásica, de forma

cuantitativa y cualitativa, sin embargo, al momento de interpretar el carácter discreto de la energía, se encuentran dificultades en los estudiantes, como por ejemplo, relacionarlo con el concepto de energía de modo clásico, o el hecho de no entender y no saber explicar la naturaleza de la luz. (Mckagan, Handley, Perkins, & Wieman, 2009).

Habría que decir también, que el concepto de energía es introducido generalmente en cursos de mecánica y termodinámica, para abordar definiciones, como: trabajo, calor o interacciones en sistemas clásicos. Mientras que en teorías modernas estas relaciones entre la energía y fenómeno no es tan evidente como en las teorías clásicas, lo impide una mejor articulación en su enseñanza y por tanto no se logra entender que a partir del fenómeno se pueden explicar teorías que la física clásica no logra abarcar, por ejemplo: El efecto fotoeléctrico y la radiación de cuerpo negro. (Solber & Tarín, 2004)

De igual manera, los diferentes libros de texto de física, no toman en cuenta el contenido histórico sobre la cuantización de la energía, describiéndolo como una introducción resumida a los temas de la mecánica cuántica además, la descripción de cualquier fenómeno en libros de texto parte de un concepto y análisis matemáticos que permite encontrar una relación causal con la teoría planteada, la cual abarca no solo las teorías clásicas sino también las modernas. (Niaz, Klassen, McMillan, & Metz, 2010).

Finalmente, el experimento del efecto fotoeléctrico permite explicar la cuantización de la energía ya que, en este se evidencia que los átomos absorben energía en pequeñas cantidades, esto podría mejorar la comprensión de este concepto. Dado que, es un paso crucial para el aporte a la naturaleza corpuscular de la luz, uno de los fundamentos de la mecánica cuántica. Por lo cual, el efecto fotoeléctrico es una herramienta que puede ayudar a los estudiantes a construir un entendimiento del modelo de cuantos de luz. (Mckagan, Handley, Perkins, & Wieman, 2009). Sin embargo, teniendo en cuenta lo anterior me hace pensar: **¿De qué manera a través del estudio del efecto fotoeléctrico, se puede pasar de una explicación clásica a una moderna sobre el concepto de cuanto de energía en cursos introductorios de la física en la Universidad Nacional Pedagógica?**

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis histórico - matemático sobre la cuantización de la energía, destacando sus principales planteamientos desde la física clásica hasta la física moderna, y cómo esta contribuyen a la enseñanza en cursos introductorios de física.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.2.1 Realizar una reconstrucción histórica donde se nombre causas y consecuencias sobre el concepto de cuanto de energía.

1.2.2.2 Hacer una reconstrucción histórico – matemática, que permita dar cuenta de la teorización moderna sobre el concepto de cuanto de energía.

1.2.2.3 Organizar la reconstrucción de manera histórica y matemática sobre el concepto de cuanto de energía por medio del estudio del efecto fotoeléctrico a como se entiende actualmente.

1.3 ANTECEDENTES

Para el desarrollo de este trabajo se hace necesario indagar algunas investigaciones que aportan y ahondan en la misma preocupación, que den cuenta del análisis histórico y matemático sobre el efecto fotoeléctrico, se destacan algunos trabajos:

1.3.1 Locales:

En la Universidad Pedagógica Nacional se encontró un trabajo relacionado con la explicación sobre el efecto fotoeléctrico, para la comprensión del concepto de cuantización de la energía, se basa en el modelo de diseño, donde realizan un montaje experimental sobre el modelo de Lenard, para explicar el fenómeno. Muestran que los estudiantes de la Licenciatura en Física de quinto semestre, utilizando herramientas que sigan una secuencia pedagógica utilizando como base el experimento sobre el efecto fotoeléctrico, mejora las comprensiones y explicaciones sobre los modelos e ideas científicas, de manera diferenciada en los estudiantes. Esta investigación aporta al trabajo de grado, la importancia de la enseñanza del concepto de cuanto de la energía, para estudiantes en formación. (Barrios & Ramos, 2014)

1.3.2 Internacionales:

En la Universidad de Colorado realizaron una investigación demostrando que los estudiantes del departamento de física no comprendían el desarrollo y la composición del experimento del efecto fotoeléctrico, y los profesores afirman la importancia de este hecho en su formación. De igual manera, se encuentra una descripción del fenómeno de una forma matemática y propone un plan de estudios basado en una simulación del fenómeno. Concluyeron, que los estudiantes presentaron mejorías en los avances en el entendimiento, para predecir correctamente los resultados del experimento y una mejoría al momento de describirlo; por otro lado, creen que las dificultades de los estudiantes son sintomáticos de una deficiencia más extendida en la enseñanza de la física, para hacerle frente a este problema es generar un razonamiento a partir de observaciones a inferencias. De este se aporta una mirada más integral, tanto como su importancia y un análisis matemático. (Mckagan, Handley, Perkins, & Wieman, 2009).

Se encontró una investigación en la Revista Latinoamericana de Filosofía, sobre la explicación de Einstein para el efecto fotoeléctrico, desde la historia y epistemología, describiendo los diferentes momentos en el desarrollo de la teoría, así como los colaboradores y detractores de la misma, mostrando las causas que llevo a rupturas entre la explicación del concepto de energía clásica y moderna. Concluyendo que, la definición de *cuanto de luz* (propuesta de Einstein), ofrecía una explicación unificada sobre procesos de interacción entre la luz y la materia que en ese momento aún se encontraban siendo investigados. Esto, aporta al trabajo de grado en la importancia de los *cuantos de luz* en el concepto de energía desde una perspectiva moderna. (Cassini & Levinas, 2008).

1.4 Metodología

Es necesario nombrar la metodología que se utilizó para establecer este escrito y sus capítulos, existen propuestas pedagógicas para la enseña y mejora de la comprensión de conceptos en física, de tal manera se hace uso de la re contextualización definida así:

“Recontextualizar quiere decir situar, insertar, articular un conocimiento, de manera significativa, en un nuevo contexto. Este cambio de localización implica procesos regulados de selección, de jerarquización y de transformación de los conocimientos” (Granés & Caicedo, 1997, pág. 2)

La re-contextualización de saberes permitió hacer un encuentro histórico sobre el cambio del concepto de energía de manera continua a una discreta, estableciendo criterios de análisis para establecer la razón, momento, justificación y formalización de esto es así, que se establece un estudio sobre los principales autores sobre el concepto de cuanto de energía como lo fue Planck y Einstein, estableciendo sus propuestas teóricas y matemáticas y así mismo aplicarlo al efecto fotoeléctrico.

A continuación, desarrollamos las siguientes fases para la elaboración de este trabajo

1. Antecedentes:

En esta fase se pretende nombrar los antecedentes teóricos los cuales fueron nombrados por Max Planck para dar solución a la distribución de energía para la radiación de cuerpo negro, a pesar de que estos se obtuvieron por medio de una conceptualización y formalización por caminos diferentes, Einstein logra deducir que este bajo ciertas condiciones se puede obtener el mismo resultado y para ello propone que para los resonadores solo pueden tomar múltiplos enteros para la distribución de la energía.

2. Trabajo de Einstein

En esta fase se pretende realizar un análisis de dos documentos desarrollados por Einstein para la comprensión y formalización del cuanto de energía en experimentos de absorción y emisión de la luz, es así que en el primero establece las bases teóricas fundamentadas en otros científicos que les sirvieron para su desarrollo y generalizar este concepto a problemas que la energía continua no lograba explicar, en el segundo, establece los criterios para demostrar que la base teórica de Planck no es una contra parte de su trabajo si no que es una extensión de ella y establece la relación entre la diferencia de potencial y el cuanto de energía.

3. Un antes y un después conceptual y formal

En esta fase se construye el concepto de cuanto propuesto por Einstein para nuestro entendimiento actual sobre el efecto fotoeléctrico y su formalización, además se establece las causas conceptuales y formales de la no explicación de la energía clásica para este fenómeno y como el cuanto de energía se adapta de manera conceptual y formal.

4. Reflexiones finales

Para esta última fase se realizó unas reflexiones sobre el documento de Einstein y como este hace un cambio epistemológico de ver la radiación de la luz en transformación y producción

de ella, así mismo sobre nuestro entendimiento del concepto de efecto fotoeléctrico y como este aporta para la comprensión del cuanto de energía.

CAPITULO II

Concepto de energía desde la mirada clásica y moderna

Este capítulo desarrolla una mirada histórica sobre el concepto de energía en la física clásica desde los principales autores que aportaron para ello y el punto de vista conservativo, los cuales los podemos dividir entre: mecánica con Newton, Leibniz, Huygens; en termodinámica, Bernoulli, Helmholtz, por último, en electromagnetismo, Maxwell y Poynting. Además, de nombrar los experimentos como espectros atómicos, el efecto fotoeléctrico y la radiación de cuerpo negro para los cuales dieron inicio a la física moderna.

2.1 Mecánica

El concepto de energía es importante para la física ya que logra ser articuladora y utilizada para explicar fenómenos como: el cambio de estado de un móvil, los choques inelásticos y elásticos, entre otros. Su elaboración ha sido un proceso largo y complejo de conceptualizaciones desde diferentes campos como: mecánica, termodinámica, electromagnetismo y física moderna. Es así, que en este apartado hablaremos de la construcción del concepto de energía a partir de los fenómenos clásicos. (Solber & Tarín, 2004).

A partir de lo anterior, uno de los primeros en hablar sobre el cambio de estado fue Galileo Galilei en el siglo XV, con base de sus experimentos con el plano inclinado, que se relacionaba con la caída libre, con los cuales confirmó que la distancia recorrida en la caída del objeto es proporcional al tiempo al cuadrado (Arroyo, 2012). Además, él utilizaba el término ímpetu y momentum, el primero definía la causa del movimiento, es decir, el producto de la masa por la velocidad al cuadrado presente en caída de los cuerpos es así, que en ausencia de un medio resistente aquella es adquirida y deberá ser suficiente para devolver el objeto hasta su original altura, el segundo, delimita un sentido mecánico preciso en relación con la idea de gravedad, en otras palabras, es el producto de la fuerza por la velocidad, por lo tanto, existía un algo que era lo que causaba el movimiento y lo hacía regresar a su estado inicial (J. M. Rivera, Y, & E, 2019).

Así mismo, Rene Descartes describe la causa del movimiento como el producto de la fuerza y la velocidad, para él solo hay una manera de interactuar y es el de contacto y un medio de acción, el choque. Descartes basó su análisis en sus creencias y si Dios creó el universo con cierta cantidad de movimiento éste deberá continuar inalterado, se puede asumir que se mantiene sin alterar, y así mismo las interacciones se conservan constantes antes y después, es así que si la rigidez de un objeto se ve afectada es causa del contacto con otro cuerpo. (Smith, 2006).

Por otro lado, Cristian Huygens a pesar de ser de la línea de Galileo no logró seguir con sus mismas ideas para la época, aún no se tenía claridad con las definiciones dadas para los diferentes fenómenos de la dinámica, Huygens estando en la Royal Society, le solicitaron realizar un artículo sobre choques el cual muestra algunas conclusiones: dos cuerpos duros pueden aumentar o disminuir sus interacciones debido a la colisión, si es en dirección opuesta la cantidad del movimiento no se conserva, en cambio, si es en la misma dirección se conserva el estado de los cuerpos y el movimiento, por lo cual de manera formal cuando se suman los productos obtenidos al multiplicar la masa de cada cuerpo por las velocidades se mantiene constante (en la actualidad, esta se considera como el concepto de la “vis - viva” conocida hoy como energía cinética); si los cuerpos son duros sin importar la rigidez, el choque quedara reducido a la dirección del centro de sus masas a lo que se le llama colisión rígida. Su aporte se considera importante para la física ya que aparece la primera formulación y se da las primeras nociones y diferencias entre la conservación del momento lineal y el concepto de energía. (Smith, 2006).

Para concluir, Leibniz en 1686 propone como ley la conservación de las fuerzas vivas de manera conceptual y formal, afirmando que la causa y el efecto se conserva argumentado que un cuerpo que cae adquiere una fuerza y dicha fuerza debe permitirle de nuevo ascender hasta la misma altura con el mismo valor con la cual descendió, es así que dicha fuerza será proporcional al producto de la masa y la velocidad al cuadrado (energía cinética) por otro lado, cuando un cuerpo se coloca a cierta altura tiene una fuerza muerta (energía potencial) lo que conocemos como la relación entre la energía cinética y potencial y la conservación de la energía mecánica.

A diferencia de Descartes, Leibniz sostuvo que la *vis viva* se mantiene constante en el choque y no la cantidad de movimiento. Para el siglo XVIII algunos físicos como Bernoulli,

Carnot y Langrage entre otros, se centraron en desarrollar el problema de la *vis – viva* para encontrar una mejor definición matemática en choques elásticos. (Solbes & Tarin, 2002).

2.2 Termodinámica

En consecuencia al fenómeno de choques, en el siglo XVII se evidencia que en algunas interacciones los cuerpos aumentaban su temperatura a raíz de fricciones, es así que los científicos se interesaron en caracterizar la temperatura y uno de ellos fue Galileo, que reutilizó el termoscopio de Herón, el cual estaba hecho de un sistema que determinaba el estado de calor en un cuerpo. A pesar de que el instrumento tuviera una escala cuantitativa era poco fiable ya que su valor se veía afectado por la gravedad y la presión atmosférica, en consecuencia se le nombra temperatura al estado calorífico del cuerpo. En los años posteriores, físicos como Fahrenheit y Reamur mejoraron los instrumentos de medida utilizando el aire o mercurio y así establecer una nueva escala. (Solbes & Tarin, 2002)

En el siglo XVIII, Joseph Black realizó un experimento utilizando un cubo de hielo el cual, cuando lo introducía en diferentes líquidos de igual temperatura y masa, observa que el cubo de hielo no se derretía en la misma proporción, por lo tanto Black estableció una relación entre el calor necesario para que líquidos diferentes de iguales masas lleguen a la misma temperatura, en otras palabras, la energía necesaria para que un cuerpo aumente un grado Celsius en unidad de masa, a esto le llamo calor específico. También en los cambios de estado, se absorbe o se cede calor sin que la temperatura varíe y le llamó Calor latente. La explicación conceptual de Black para lo anterior, fue asumir que el calor es una sustancia sutil que está hecho por átomos indestructibles y este se introduce en las sustancias cuando se calienta y se va cuando se enfrían, además, esta se conserva porque cuando dos cuerpos interactúan el calor que perdía uno lo ganaba el otro en la misma proporción (Solbes & Tarin, 2002).

El fenómeno relacionado con el concepto de calorífico tuvo problemas conceptuales cuando en 1798, Rumford evidenció que cuando se perforaba un tubo para cañones el rozamiento con el taladro generaba aumento de la temperatura del taladro y el tubo, por lo cual, la cantidad de calor obtenida no puede ser superior a la que contiene el tubo, por lo tanto él afirmó que el calorífico no puede ser una sustancia por que no se mantiene constante en ciertos fenómenos. (Solbes & Tarin, 2002)

Un poco después, científicos como Coriolis y Helmholtz pensaron que, si hay una relación entre la causa del movimiento y calor presente en procesos de fricción y choques puede que haya una relación conceptual y matemática entre ellas, es así como establecen la conservación de las fuerzas vivas en términos del trabajo. (Solbes & Tarin, 2002).

Por lo tanto, la conservación de la energía mecánica nace de unificar transformaciones en procesos mecánicos y termodinámicos. Mayer en 1840, realiza un experimento donde se tiene un gas, al cual se mantiene constante su temperatura, se expande en el vacío pero se enfría cuando la dilatación se hace a presión constante, lo anterior se puede explicar si se asume que una parte del calor del gas se utilizó para realizar trabajo de expansión. Por otro lado, Prescott Joule, elabora un sistema el cual consiste en el análisis del funcionamiento de un instrumento que por medio de unas ruedas de paletas, sumergidas en líquido contenido en un recipiente, conectadas a pesas y poleas agitan dicho líquido (que no intercambia calor con su entorno), a medida que desciende las pesas, las paletas se mueven de tal forma que agitan el líquido cerrado haciendo que la temperatura cambie, en consecuencia Joule logró establecer la equivalencia entre calor y trabajo (Sánchez, 2016).

Para finalizar, Hermann Helmholtz en 1847, describe que todo sistema mecánico debe estar sometido a la conservación de la fuerza. Al referirse a fuerza, él concibe dos tipos: la fuerza viva y potencial, la cual concibe la diferencia en la distancia del sistema como: la fuerza de gravedad, eléctrica y elástica, por lo tanto, estos son manifestaciones de alguno de estos tipos de fenómenos como: el calor, la electricidad, el magnetismo, las reacciones químicas, en otras palabras los fenómenos habría que verlos a partir de las interacciones de las fuerzas. Más tarde, él llamaría la conservación de la fuerza como conservación de la energía mecánica (Solber & Tarín, 2004).

2.3 Electromagnetismo

A principio del siglo XIX, se tenía algunos conceptos consolidados desde la mecánica y la termodinámica como la energía cinética y potencial las cuales se conservan en interacciones cuerpo a cuerpo (excepto en choques inelásticos). Pero Coulomb, quien descubrió la fuerza entre cargas eléctricas evidenció que estas cuando interactuaban lo hacían por medio de la acción a distancia que se daba de manera instantánea, debido a lo cual, se suponía una velocidad rápida para la transmisión de la acción (Solbes & Tarin, 2002).

En el siglo XVIII, la única fuente de electricidad eran las maquinas electrostáticas de rotación, las cuales producían electricidad por medio de frotación y sólo eran capaces de

generar descargas transitorias, por lo tanto, que se hace necesario encontrar un instrumento capaz de generar un suministro estable y continuo de electricidad. Alessandro Volta hacia 1800 fue capaz de producir corriente eléctrica con una pila de discos de estaño o zinc y cobre separados por otros de cartón impregnados de una solución salina es así que de este experimento viene el nombre de la “pila de volta” (Beléndez, 2008).

De igual manera en el siglo XVIII, ya se conocía los fenómenos de atracción entre imanes los cuales se observaban que tenían un comportamiento similar al de las cargas eléctricas, ya que cuando los polos de dos imanes interactúan y estos eran el mismo sufrían de una fuerza repulsiva a diferencia que si eran diferentes se atraían, por ello las cargas eléctricas y los imanes tienen similitudes en efectos.

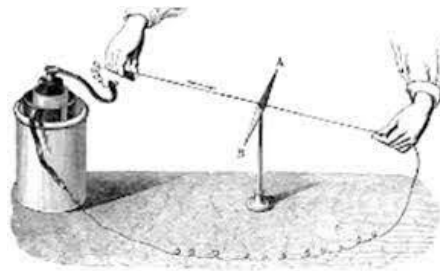


Figura 1, García, González, (2013) <http://fisica-quimica-2eso.blogspot.com/2019/05/fuerza-magnetica-entre-imanes.html>

Christian Oersted, en 1820 realiza un montaje experimental donde por un cable pasa una corriente eléctrica, al cual, acercó una aguja imantada y esta se reorienta (ver figura 1), por ello con este experimento se detecta una primera relación entre la carga eléctrica y magnética (Beléndez, 2008).

Por otro lado, Michael Faraday, implementó un experimento donde su intención era demostrar que un campo magnético produce corriente eléctrica, por ello, enrolló un trozo de alambre en media rosquilla de hierro y de igual manera para la otra mitad (ver figura 2), en la primera cruzaría una corriente eléctrica la cual formaría un campo magnético en todo el montaje y con un medidor de corriente eléctrica lograría detectarla, este fenómeno es conocido como inducción electromagnética y de este modo se relaciona el fenómeno magnético con el eléctrico, a partir de lo anterior surge el concepto de campo electromagnético, de tal forma que explica la acción entre dos cuerpos separados. Demostrada la realidad física del campo, se constataron sus propiedades y, entre ellas, la energía propia del campo electromagnético y su transmisión a través de la radiación. (Beléndez, 2008).

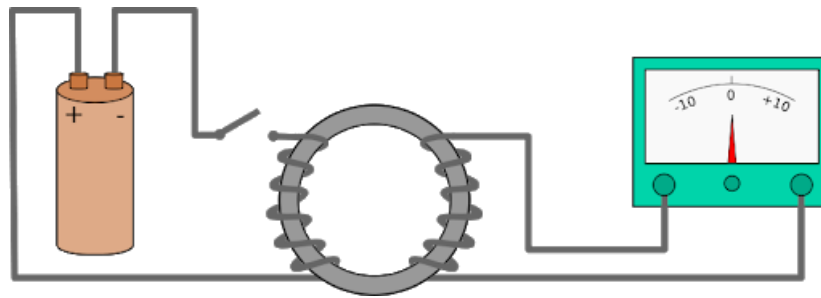


Figura 2, Universidad de Sevilla, (2011),
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ley_de_Faraday_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ley_de_Faraday_(GIE))

James Clerk Maxwell en su escrito *A dynamical theory of the electromagnetic Field* (Maxwell, 1865), unifica ambos fenómenos, el eléctrico y magnético en ocho ecuaciones, y con respecto al concepto de energía afirma lo siguiente:

“según las teorías antiguas, (la energía) reside en los cuerpos electrizados, circuitos conductores e imanes, en la forma de magnitud llamada energía potencial, o capacidad de producir ciertos efectos a distancia. En nuestra teoría reside el campo electromagnético, en el espacio que rodea a los cuerpos electrizados o magnéticos” (pág. 3).

Una de las hipótesis que genera Maxwell, es la existencia de ondas electromagnéticas de tal forma que, Poynting en 1884 logra deducir que la energía del campo electromagnético es proporcional al producto vectorial del campo eléctrico y magnético (la variación de la energía en un volumen dado, se le conoce como densidad de energía), ya que para Maxwell la energía es instantánea¹ debido a que está en función del tiempo y espacio, por cual, se calcula es un flujo de ella en unidad de tiempo y área determinada. (Fernandez, Tabares, & Jardon, 2017).

De acuerdo a lo anterior, se le llamo teorema de Poynting el cual es similar al concepto de conservación de la energía, ya que la medición está en una cierta región en el campo electromagnético debe de ser nula, de esta manera, dado un volumen V, fijo y arbitrario, la energía por unidad de tiempo que sale deber ser la misma cantidad que ingresa. (Fernandez, Tabares, & Jardon, 2017).

Lodge a partir de Poynting, establece dos principios, en el primero afirma que todo tipo de energía se transporta de forma continua, en la segunda determina que la energía se transforma cuando se transmite. (Solbes & Tarin, 2002).

¹ Se entiende instantáneo como la medición de la energía en un momento temporal.

Es así, como el concepto de energía en el electromagnetismo supuso la introducción de la energía propia del campo libre² y su transferencia por medio de la radiación, además se convierte en una magnitud articuladora en fenómenos presentes también en la mecánica y termodinámica la cual se mantiene constante para cualquier tipo de relación (Solbes & Tarin, 2002).

2.4 Experimentos que la física mecanicista no explico

Durante la mitad del siglo XIX a consecuencia de los avances realizados por James Clerk Maxwell sobre las ondas electromagnéticas algunos científicos desde la perspectiva térmica, electromagnética y algunas reacciones químicas realizan experimentos en los cuales se ve involucrada la radiación, donde el concepto de energía desde la teoría clásica (continua) no explicaba, algunos de ellos son: radiación de cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y espectros atómicos.

En el apartado siguiente se nombra de qué se tratan y por qué son controversiales para la época.

2.4.1 Espectros atómicos

El estudio de los fenómenos foto luminiscentes (como se conocía anteriormente) ha sido un tema de la física que se remonta desde el siglo XVII a razón de encontrar la naturaleza y descomposición de la luz. Uno en ser de los primeros en observar este fenómeno fue Isaac Newton, cuando un rayo de sol atraviesa por un lente, mostraba una gama de colores desde el rojo hasta el violeta en el lado opuesto del lugar, es así como él lo llamo espectro de la luz blanca además para ese entonces se tenía como fuente luminosa la luz del sol y artificiales como las velas. (Caracciolo & Letzen, 2007)

Por lo cual, este fenómeno hace parte de los intereses para los científicos durante dos siglos siguientes, es así que en 1802 William Wollaston observó que el espectro solar estaba cruzado por líneas negras utilizando un instrumento llamado espectrógrafo, pero él no le prestó atención y asumió que eran separaciones entre los colores o imperfecciones de su instrumento. (Castañeda & De-Geus, 2003)

Por otro lado, Joseph van Fraunhofer contó que eran 600 líneas y para comprenderlas situó un prisma en la focal de un telescopio con la pretensión de observar y encontró que las estrellas no generaban el mismo espectro y que las interrupciones se presentaban en lugares diferentes,

² Campo libre: Espacio homogéneo es decir, la permitividad, permeabilidad y conductibilidad son constantes. (Segura, 2015).

desafortunadamente fue incapaz de explicarlas pero actualmente se utiliza el nombre de él para ubicarlas en el espectro. (Castañeda & De-Geus, 2003)

Años después, en 1859 Gustav Kirchoff y Robert Wilhelm Bunsen comenzaron a mostrar interés por el espectro, es así que analizaron esto procedente de algunas reacciones químicas a través de un prisma, utilizando un mechero y un espectroscopio a raíz de esto se logró determinar que cada elemento producía líneas visibles y que estas eran únicas para cada sustancia, por lo tanto, se dio cuenta de que las líneas del sodio se hacían oscuras al anteponer espectro solar a esto se concluye que una sustancia es capaz de emitir y absorber energía por así se logró deducir que en la atmosfera hay presencia del sodio. (Castañeda & De-Geus, 2003)

Por lo tanto, se logra concluir que:

1. Una sustancia que emite radiación con una longitud de onda determinada, debería en la misma temperatura y longitud de onda absorberla.
2. Todo elemento químico que emite luz tiene su propio espectro.

Igualmente, para el siglo XIX James Clerk Maxwell predijo de la existencia de ondas electromagnéticas en las cuales la luz se clasifica también ahí, a consecuencia de esto se pensó que se puede analizar y descomponer el espectro emitido por diferentes fuentes de ondas electromagnéticas y poder descubrir su naturaleza, de esta manera se encuentra radiaciones no perceptibles al ojo humano como: Rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja y ondas electromagnéticas.

De acuerdo a lo anterior, lo que se esperaba observar con la descomposición de la radiación fuese la sustentación de la estructura de la materia (entendida de manera continua) pero, este fenómeno brindo lo contrario, que se demostrara el espectro de una manera discreta y así no concordar con la continuidad, para observar lo anterior tenemos dos procesos: espectro de emisión y de absorción (ver figura 3).

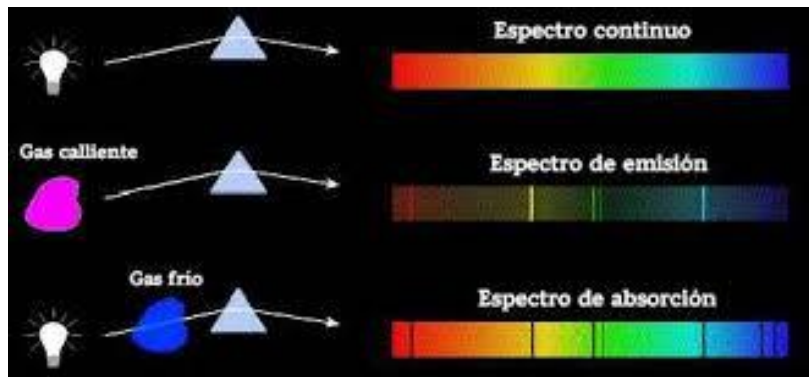


Figura 3, Romero, P; (2013), Tipos de espectros, Recuperado de <https://vecinadelpicasso.wordpress.com/2013/09/23/espectros-de-absorcion-y-emision/>.

Para concluir, existe una relación intrínseca entre el espectro por emisión y absorción la cual es los espacios negros que se observa en la emisión lo completa la absorción, por lo tanto, pasó un tiempo prudencial para encontrar una teoría que logrará explicar este fenómeno ya que la física clásica no lo hacía.

2.4.2 Efecto fotoeléctrico

Es importante nombrar que, con la teorización de las ondas electromagnéticas solo era demostrar su existencia, de tal manera que, Heinrich Hertz en 1887 experimentando con ondas de radio logro demostrar por primera vez las afirmaciones realizadas por Maxwell sobre la propagación del campo libre y su transferencia por medio de la radiación (Solbes & Tarin, 2002), pero al mismo tiempo, fueron un fenómeno que contradice aquella teoría. ¿De qué consta el experimento realizado por Hertz?, trató conectando una bobina de alta tensión oscilante a un circuito y en sus extremos dos esferas conductoras, las cuales se cargaban eléctricamente mediante una fuente de voltaje, cuando estas esferas se acercaban, se producía una chispa entre ellas, es decir, se producía una emisión de radiación electromagnética. (ver figura 4). (Castañeda & De-Geus, 2003)

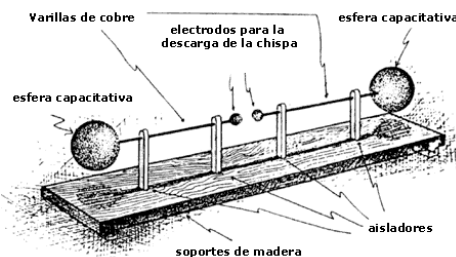


Figura 4 Ilustración Braun, E. (1992) Hertz, Ondas electromagnéticas [Figura]. Recuperado de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/sec_17.htm

Así mismo, al año siguiente Wilhelm Hallwachs propuso un montaje experimental donde una esfera de Zinc se encuentra colgada con un trípode aislante y está conectada a un electroscopio, además entrelazada a una hoja de oro mediante un conductor, la onda pasa por un aislante hecho de cartón, a partir de esto, él encontró que los cuerpos se cargaban negativamente pero, al ser descargados estos se cargaban positivamente a pesar de lo anterior, ejemplifico el montaje por Hertz pero no desarrollo una base teórica para explicar el fenómeno. (Cassini & Levinas, 2008)

Otro físico que indago sobre este efecto es Phillip Lenard en 1902 dejando sus memorias en su artículo “*Ueber die Lichtelektrische wirkung (sobre el efecto fotoeléctrico)*” (Lenard, 1902), Lenard fue discípulo de Hertz y ganador del premio nobel en 1905, mejorando el montaje experimental llevado a cabo por Hertz, el cual consiste en aplicar una diferencia de potencial a un tubo de rayos catódicos, que contiene dos electrodos uno de carga positiva y el otro negativa, donde en el primero incidía la onda electromagnética y el otro acumulaba los electrones saltantes.

En consecuencia, se logra deducir varias cosas: la primera, que con base a los resultados de los experimentos, los diferentes materiales aparentemente tiene un umbral donde la luz genera el efecto fotoeléctrico (o como se conocía, luz generada por rayos catódicos), sin importar la intensidad, la segunda que los cuantos aumentaban con la frecuencia de la luz incidente y la tercera era que la variación del número de electrones dependía de la intensidad. (Lenard, 1902).

Con respecto a lo anterior, estas conclusiones evidenciaron que la teoría electromagnética sustentada por Maxwell, se vio afectada conceptualmente ya que no concordaban con las bases teóricas respecto al concepto continuo, puesto que, la energía de las ondas electromagnéticas es proporcional a la intensidad de incidencia, además, el efecto se debería evidenciar después de un determinado tiempo.

2.4.3 Radiación de cuerpo negro

La termodinámica se encontraba con nuevos fenómenos relacionados con los metales cuando se les suministra calor por medio de una diferencia de potencial, este comienza a emitir radiación y aumenta su temperatura, ¿qué pasa si la diferencia de potencial se hace

más alta?, la sensación de calor aumenta y cambia de color en su superficie hasta ser visible su radiación, a esto se le llama radiación térmica.

Por ende, al graficar la intensidad de luz emitida en función de la frecuencia para cada temperatura dada se observa las siguientes curvas.

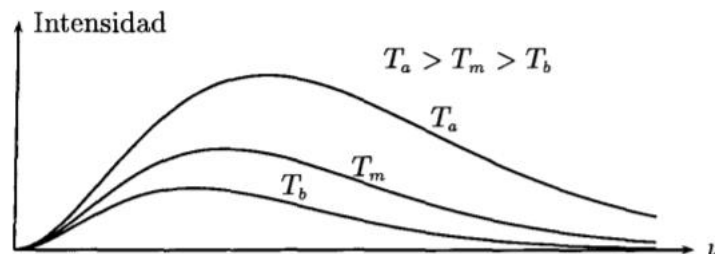


Figura 5 Tomado de *Introducción a la física moderna* (pag 47), por Garcia, M y Ewert, Jeannine, 2003, Universidad Nacional de Colombia

Observando la figura 5, se puede decir que a cada longitud de onda emitida le corresponde una temperatura específica, la cual tiende al equilibrio. A partir de lo anterior se concluye que, todos los cuerpos a altas temperaturas y bajas, emiten luz y son fuentes de radiación térmica, la única diferencia es que su intensidad de radiación es menor, por lo cual, no es perceptible por medio de sensación.

Ahora bien, este efecto fue controversial para algunos físicos como: Prevost, Kirchhoff, Stefan, Boltzmann Rayleigh, Jeans, Wien y Planck que profundizaron y lograron consolidar leyes para tratar de comprender y explicar esto, por ejemplo, Prevost afirma que un cuerpo que este en equilibrio térmico recibe la misma cantidad de radiación que emite la cual se conoce como ley de Prevost, con lo anterior, Kirchhoff construye su ley: “*Para rayos caloríficos y para una temperatura determinada, el cociente entre el poder emisivo y el absorbente es el mismo para todos los cuerpos. Dicho cociente sólo es función de la temperatura y de la longitud de onda*”. (Taton, 1972, pág. 86). En consecuencia, Kirchhoff logra deducir que el calor emitido por un cuerpo debido a la temperatura y la luz son ondas, por lo cual, se puede utilizar las leyes de ondas electromagnéticas.

Es importante decir que, con la afirmación realizada por Kirchhoff, se relaciona la radiación térmica con las ondas electromagnéticas, puesto que, representa el cambio de energía calorífica a electromagnética, de tal manera que, un cuerpo disminuye su energía cuando emite radiación y la aumenta cuando absorbe, para lo cual la radiación térmica cumple con la teoría electromagnética.

Más adelante, Kirchhoff propone un cuerpo y llamarlo “cuerpo negro” el cual, está compuesto por un recipiente con un pequeño orificio que cuando la radiación ingresa queda absorbida después de unas reflexiones en el interior y tiene la propiedad de emitirla, de tal manera que, el sistema se mantiene en equilibrio, además es fuente lumínica ideal, ya que presentan la propiedad de que, a igual temperatura, cualquiera que sea su naturaleza, todos presentan el mismo espectro de radiación térmica. Kirchhoff descubre que el cociente entre el poder emitido y absorbente de cualquier cuerpo coincide con el mismo coeficiente referido al cuerpo negro esto muestra una propiedad universal de la interacción de la energía con la materia. (Solbes & Tarin, 2002).

En 1879, Joseph Stefan, basados en los experimentos de John Tyndall, la radiación emitida de un alambre de platino calentado 1.473 K era 11,7 veces la correspondiente a 798 K. Como $(\frac{1473}{798})^4$, Stefan concluyo que la radiación total E es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta $E \propto T^4$. Boltzmann haciendo uso de la primera ley de la termodinámica, la cual, relaciona el trabajo para un sistema que se le suministra cierta cantidad de calor, ésta se produce un aumento en su energía interna, Boltzmann logra concluir de igual manera que Stefan. A lo anterior, se le conoce como la ley de Stefan – Boltzmann. (Arias & Angelo, ¿Quién propuso la fórmula de Rayleigh - Jeans?, 2006)

Wilhelm Wien en 1893, obtuvo una relación matemática entre la temperatura del cuerpo negro y la longitud de onda, la cual planteo con base de la segunda ley, de tal manera que, suponiendo una cavidad llena de radiación la cual en su exterior poseía un embolo móvil, que de tal forma no se ganara ni perdiera calor describiendo un proceso adiabático, encontrando que:

$$\lambda_{max}T = cte \tag{Ecuación 1}$$

La expresión anterior, indica que al aumentar la temperatura de un cuerpo negro, también incrementará el valor de la densidad de las energías hacia frecuencias mayores. (García & Ewert, 2003).

Wien, hace un intento por determinar la distribución de la energía aplicando métodos estadísticos a sus trabajos, considerando que el cuerpo emisor como un gas encerrado por una envoltura reflectora ideal, el cual, la densidad de radiación debería ser proporcional a la

cantidad de moléculas emisoras, cuyas velocidades estarían determinadas por la función de distribución de Maxwell. Wien encontró que, cuando la temperatura aumenta ocurre un desplazamiento del máximo de la curva de distribución hacia longitud más pequeña. (Arias, 2003)

En 1900 Lord Rayleigh, publicó un trabajo donde realiza un análisis de la radiación del cuerpo negro, basándose en ondas estacionarias en un cubo, las cuales se generan por medio de superposición de las ondas que inciden y se reflejan en sus paredes, y considerando que dependiendo de la naturaleza de la onda, la pared, las condiciones iniciales determinan si en las paredes se producirán nodos o antinodos, de modo que se planteó el problema de encontrar la cantidad de ondas que pueden hallarse en un volumen (V) determinado, empleando únicamente consideraciones de dimensión, supuso que la cantidad de ondas posibles en el intervalo de longitudes $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ debería ser proporcional a $\frac{\lambda}{V^4} d\lambda$, de tal forma que la ley de equipartición de energía entre los grados de libertad conduce a la función de distribución para el cuerpo negro.

Por otro lado, James Jeans plantea una interpretación diferente a la Rayleigh, que la equipartición entre la materia, el cuerpo y el éter que lo rodea, y debe de haber un estado de equilibrio, el cual, la equipartición de la energía nos permite conocer la energía total del éter y de cada longitud de onda. (Jeans, 1905).

Jeans (1905) referente a lo anterior comenta:

Por lo tanto, se nos lleva a suponer que no existe un estado de equilibrio entre las vibraciones internas de las moléculas y su energía de traslación; encontramos que la transferencia de energía desde los grados de libertad de traslación a los de vibración es tan lenta que los últimos grados nunca adquieren su parte total de energía, como se indica en las vibraciones del teorema de equipartición, la energía de estas vibraciones se disipa rápidamente a medida que se recibe de la energía de traslación de las moléculas. [...]La energía rudimentaria adquirida por el éter, ya sea de pequeña o gran longitud de onda, es reabsorbida por otros cuerpos o es irradiada al espacio, de tal manera que la partición de la energía realmente presente en el éter en cualquier instante es completamente diferente de la predicha por la ley de equipartición. [...] Desde esta visión, la verdadera ley

de radiación puede obtenerse sólo de un estudio del proceso de transferencia de energía de materia al éter. (Jeans, 1905, págs. 545 - 546).

Con respecto a lo anterior, es importante recalcar que para Jeans era muy evidente que la función para la equipartición de la energía no funcionaba y que la mecánica clásica no lograba explicar tal distribución para la radiación porque ese sistema no lograba llegar al equilibrio. (Arias & Angelo, 2006)

En otras palabras, el fracaso de esta formulación fue que para Rayleigh no era creyente en la equipartición de la energía fuera válida únicamente para grandes longitudes y Jeans creía que esta ley funcionaba para un cuerpo que llegase al equilibrio, cosa que no pasaba para la radiación de cuerpo negro por que no emitía energía en todos los rangos de frecuencia y por ello no podía satisfacerla. (Arias & Angelo, 2006)

A lo anterior, se le llamo catástrofe ultravioleta por que físicamente era imposible producir energías muy grandes a partir de un cuerpo negro y del ultravioleta porque la ley de Rayleigh – Jeans se equivoca en esa región del espectro.

Ahora bien, Max Planck, propone para encontrar la función que describa la distribución de la energía para la radiación de un cuerpo negro, la idea de observar más detalladamente el concepto de entropía, proponiendo un sistema de n resonadores lineales con entropía (S) el cual interactúa con la radiación de energía (U) y están separados de tal manera que uno no afecte a los otros. Él afirma que, hay que centrarse en encontrar una función donde se describa la relación de la energía no del sistema en total, si no de los resonadores individuales. (Planck, 1901).

Para llevar a cabo lo anterior, él utiliza la ley de desplazamiento de Wien que es un caso especial de la ley de Stefan – Boltzmann ya que si se encontrará la energía del resonador en un medio diatérmico³ lograría determinar la energía del resonador, entonces Planck generaliza la ley para la radiación en un sistema diatérmica. Entonces, como la entropía depende del desorden, la irregularidad con la que cambia constantemente la amplitud y fase de los resonadores, se considera intervalos de tiempo grandes a comparación con el tiempo de vibración. (Planck, 1901)

³ Diatérmico: Medio donde el paso del calor es más fácilmente.

A consecuencia, nombrando las condiciones del sistema de n resonadores y entropía S de frecuencia ν y energía media U de un solo resonador; se asume que la energía total del sistema es de:

$$U_N = NU \quad \text{Ecuación 2}$$

A cada resonador N le corresponde una entropía total:

$$S_N = NS \quad \text{Ecuación 3}$$

Por otro lado, el segundo principio de la termodinámica estadística, es:

$$S_N = k \ln W \quad \text{Ecuación 4}$$

donde W dependerá de todas las formas posibles de distribución de los P elementos de energía ε entre los N osciladores y k la constante de Boltzmann. Este número es:

$$W = \frac{(N + P - 1)}{(N - 1)! P!} \quad \text{Ecuación 5}$$

Sustituyendo W en S_N , obtenemos:

$$S_N = k[(N + P) \ln (N + P) - N \ln N - P \ln P] \quad \text{Ecuación 6}$$

Reemplazando (10) en (13), tenemos que:

$$S_N = kN \left[\left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Aplicando el concepto de temperatura para la ecuación (14), tenemos:

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{\varepsilon} \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{U}\right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Finalmente,

$$U = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1} \quad \text{Ecuación 9}$$

Pero la entropía por oscilador es de $S = S_N/N$, entonces:

$$S = k \left[\left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \ln \frac{U}{\varepsilon} \right] \quad \text{Ecuación 10}$$

Aplicando ley de Wien, para la dependencia de la entropía S de nuestro resonador de energía U , particularmente en el caso general donde el resonador es situado en un medio diatérmico arbitrario. No consideraremos el total de la radiación, solo la monocromática en la ecuación (15) para la entropía S , entonces encontramos si se asume que el elemento de energía ε debe de ser proporcional a la frecuencia ν , así:

$$\varepsilon = h\nu \quad \text{Ecuación 11}$$

y en consecuencia:

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) \ln \left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) - \frac{U}{h\nu} \ln \frac{U}{h\nu} \right\} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde h y k son constantes, reemplazando en (15), obtenemos:

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{h\nu} \ln \left(1 + \frac{h\nu}{U}\right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Entonces,

$$U = \frac{\varepsilon}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{Ecuación 14}$$

Reemplazando en la ecuación encontrada por Max Planck anteriormente para la distribución de la energía, encontramos que la densidad de la energía E en función de la frecuencia y la temperatura.

$$E(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}$$

Queda demostrado la densidad de la energía para la radiación de cuerpo negro.

Este aporte representa históricamente una revolución teórica donde el concepto de energía clásica (continuo) no se adaptaba a fenómenos relacionados entre interacción radiación - materia. Planck para poder encontrar una formalización para la radiación del cuerpo negro, tuvo que recurrir por interesarse en encontrar y definir el estado de entropía para cada resonador, de tal manera que se comienza a evidenciar la transición sobre el entendimiento del concepto de energía de manera continua a una discreta. (Planck, 1901).

CAPITULO III

Concepto de cuánto a partir de Einstein

En este capítulo se desarrolla un análisis de dos documentos realizados por Albert Einstein en 1905 y 1906, donde en el primero expresa una solución conceptual y matemática sobre los cuantos de energía refutando a la conclusión final de Max Planck sobre la radiación de cuerpo negro y generalizando el concepto de energía a otros fenómenos pero, en el segundo documento argumenta y demuestra que no es tan contraria la postura de Planck y determina una relación entre el potencial eléctrico y la frecuencia de la luz para el efecto fotoeléctrico.

3.1 Generalización del concepto de cuánto

Se escogió estos dos documentos desarrollados por Einstein ya que en el primero generaliza el concepto y su formalización de cuánto para experimentos controversiales y en el segundo documento, demuestra que lo desarrollado por Planck no es una contraparte de su trabajo presentado en el anterior documento y establece una relación entre el voltaje y la frecuencia de la luz.

El primer artículo se traduce como: “*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*” (*Sobre un punto de vista heurístico sobre la creación y transformación de la luz*) (Einstein, *Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, 1905). Para la época en la cual se ubica el documento, la comunidad física tenían un gran desafío con los fenómenos con rayos catódicos, radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico; hubo físicos como Stefan,

Boltzmann y Wien que realizaron propuestas teóricas para solucionarlos. Einstein desarrolla en nueve ítems su hipótesis sobre el concepto de cuanto que puede llegar a explicar los fenómenos aún no explicados para la época, relacionados a continuación:

Es necesario nombrar que la teoría ratificada en el momento para cuando Einstein desarrolla este documento, es la teoría ondulatoria de Maxwell y de gases por Boltzmann, en base a eso él comienza a definir un contexto el cual un gas interactúa con ondas electromagnéticas en un determinado espacio, entonces para encontrar el estado de éste se hace uso de funciones espaciales las cuales cada una logra describir las posiciones y velocidades para electrones y átomos, pero el interés de Einstein es conocer el estado electromagnético de estas partículas. (Einstein, 1905)

En consecuencia de lo anterior, Einstein propone enfocar su atención y el desarrollo teórico de la época como herramienta para definir los estados de partículas, moléculas y electrones. Einstein afirma que el error de la perspectiva ondulatoria es presentar los estados del mundo atómico como un promedio o valor medio de sus propiedades. Por ello, la teoría de ondas electromagnéticas propuesta de Maxwell, no logran describir los estados de cada partícula de un sistema.

Entonces, Einstein (1905) afirma lo siguiente:

Cuando un haz de luz que emana de un punto se dispersa, la energía no se distribuye continuamente en espacios cada vez más grandes, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía ubicados en puntos espaciales, que se mueven sin dividirse y solo se puede absorber y generar como un todo (Einstein, Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, 1905, pág. 132).

Es así, como Einstein presenta y afirma que los experimentos de radiación de cuerpo negro, espectros atómicos y el efecto fotoeléctrico o cualquier fenómeno donde se transforme y/o produzca la luz, se explican y comprende mejor si se asume que la energía se distribuye de manera discreta es decir por paquetes de cuantos. A continuación el desarrollo teórico y matemático sobre los cuantos de energía. (Einstein, 1905)

Einstein comienza a describir un sistema el cual se ubica en un espacio donde sus paredes son reflejantes y está compuesto de gas ideal de esta manera asumiremos que los electrones son pequeños resonadores, es decir que oscilan en determinadas frecuencias, de tal manera que

para determinar el estado de las partículas de gas Einstein descompone el movimiento en los tres ejes para describir el espacio y así encontrar que la energía media dependerá de la constante absoluta de los gases, el número de moléculas proporcionales y la temperatura absoluta además comparándolo con el valor medio de la energía potencial se obtiene que la energía \bar{E} es $2/3$ para una molécula monoatómica gaseosa, si se asume que a causa de un evento externo⁴ la energía media de cada sistema es diferente de cero y así no cumpliría lo predicho según la teoría ondulatoria. (Einstein, 1905)

Planck asume que en el anterior sistema, para determinar el equilibrio dinámico se puede considerar como un proceso con el desorden más concebible por lo cual la energía de radiación no puede ser aumentada o disminuída de manera continua, entonces:

$$\rho_\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi\nu^2}{L^3} T \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde, R es la constante absoluta de los gases, N el número de moléculas reales en un equivalente gramo, T la temperatura absoluta, ν la frecuencia, L la velocidad de la luz y ρ_ν la energía por unidad de volumen.

Einstein concluye:

Esta relación encontrada carece de coincidencia con el experimento y no se puede hablar entre la relación de la materia con el éter. Entre más amplio sea la frecuencia, mayor será la energía en el espacio. (Einstein, 1905, pág. 134).

Por lo cual, habla sobre la determinación de constantes elementales según Planck, realiza una comparación al respecto sobre la ecuación de energía que concibe él y la ecuación (14), concluyendo: *“mientras más grande la densidad de energía y la longitud de onda de una radiación, confirmase la propuesta por ellos, pero para bajas densidades fracasan a comparación del experimento”* (Einstein, Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, 1905, pág. 137).

Como lo enunciamos en el capítulo anterior, la base del desarrollo de Planck fue en función de encontrar la densidad de energía en función de la entropía por eso Einstein habla sobre está en relación con el trabajo de Wien, es así que plantea una condición donde le permita determinar dicha radiación, la cual, debe ocupar un espacio ν para todas las densidades de

⁴ En este caso la radiación. (Einstein, Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, 1905, pág. 133).

frecuencias las cuales están en función $\rho(\nu)$, las cuales, se encuentran tan separadas una de las otras que no se interfieren entre sí y así no realizan trabajo. Donde φ es una función que depende de la frecuencia y energía. Si se asume que se está en un proceso adiabático de tal manera que, la entropía no se modifica por compresión se obtiene la siguiente relación para la entropía:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} = \frac{1}{T} = S \quad \text{Ecuación 17}$$

Esta es la ley de radiación de cuerpo negro. De hecho, a esta relación Planck había llegado cuando realiza su planteamiento de los cuantos de luz.

Así mismo, utilizando la distribución por Wien (7) la cual se conoce que solo es útil para grandes frecuencias, pero bajo ciertos parámetros como determinar la entropía en función del volumen ocupado por la radiación permitirá generalizarla para todas las frecuencias a partir de estudiar solo la entropía en función del volumen ocupado por la radiación, es así con algunas deducciones matemáticas Einstein logra encontrar la entropía para un rayo monocromático el cual dependerá de la variación del volumen con densidad pequeña, por ello matemáticamente se describe:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta \nu} \left(\ln \frac{\nu}{\nu_0} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde S_0 es la entropía por la radiación y ν_0 es el volumen que ocupa la radiación, S la entropía del sistema, ν el volumen que ocupa el sistema y β es una constante.

Einstein analiza la anterior ecuación (22) pero desde una mirada estadística como la propone Boltzmann, es claro que para solucionarla se hace uso de la probabilidad por lo tanto a cada variación de entropía le corresponde un valor diferente, es así que para cada aumento de entropía se acerca hacia un estado más probable en el sistema S en función de la probabilidad W . Entonces, existen dos sistemas S_1 y S_2 los cuales no interactúan, de tal manera que cada uno está en función de W_1 y W_2 , si los dos sistemas hacen parte del sistema S , por lo cual,

Aplicando lo anterior, se considera un número n de puntos móviles en un volumen ν_0 y estos son tan pequeños que se puede despreciar la acción mutua, de este modo a este sistema le corresponde una entropía S_0 y si ahora trasladamos n moléculas hacia el volumen ν , el cual

pertenece a v_0 de igual forma le corresponde otro valor de la entropía S , y se establece la diferencia de estas, se deduce que:

$$S - S_0 = R \left(\frac{n}{N} \right) \ln \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad \text{Ecuación 19}$$

Asa mismo, se relaciona el volumen para la dependencia de la entropía de radiación monocromática reescribiendo la ecuación (24) y asumiendo que se encuentra en un espacio descrito anteriormente, entonces la probabilidad de encontrar energía en una parte del volumen está dada por:

$$W = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N E}{R \beta v}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Por medio de la ley de desplazamiento de Wien, la luz monocromática se comporta a bajas densidades como lo determina la teoría de calor es decir la energía se encuentra compuesta por cuántos independientes entre sí con una magnitud de $\frac{R \beta v}{N}$; comparando esto con la energía media de la radiación de cuerpo negro⁵ se obtiene que:

$$\frac{\int_0^{\infty} \alpha v^3 e^{-\frac{\beta v}{T}} dv}{\int_0^{\infty} \frac{N}{R \beta v} \alpha v^3 e^{-\frac{\beta v}{T}} dv} = 3 \frac{R}{N} T \quad \text{Ecuación 21}$$

Con esto, se demuestra que la radiación monocromática a densidades bajas se comporta como un medio discontinuo con respecto a la entropía y el volumen el cual tiene como tamaño $\frac{R \beta v}{N}$.

Para generalizar la anterior conclusión, Einstein habla sobre la ley de Stokes en base a una deducción muy sencilla, si en un sistema diferente a la radiación de cuerpo negro como en el fenómeno del efecto fotoeléctrico el cual tanto la energía producida como la absorbida está contenida por cuantos del tamaño $\left(\frac{R}{N} \beta v \right)$, es así que la luz incidente viaja con una frecuencia v_1 y el electrón emitido saldrá con una frecuencia v_2 , de igual manera se considera que la luz está compuesta como pequeños paquetes de cuántos debe cumplir con la conservación de la energía, por lo cual el cuanto emitido no puede ser mayor que el absorbido.

⁵ Ecuación 7 de este documento.

A lo anterior, Einstein realiza una afirmación la cual, relaciona la cantidad de luz emitida en función de la intensidad de la luz, cito:

Según nuestra interpretación, es de resaltar en particular que para bajas exposiciones, la cantidad de luz emitida de los estados excitados, cuyas otras condiciones permanecen constantes, debe ser proporcional a la intensidad de luz incidente, ya que cada cuanto de energía excitante causaría un proceso elemental del tipo de los antes mencionados, independiente de la acción de los otros cuantos de energía excitantes (Einstein, Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, 1905, pág. 144).

Por último, se nombra una condición especial para que se cumpla la ley de Stoke y es cuando la emisión o absorción de la luz es diferente al espectro de radiación de cuerpo negro ya no es consistente con el desplazamiento de Wien, esta suposición afirma que puede que en otros fenómenos no coincida el espectro con la ley de desplazamiento de Wien.

Para aplicarlo al fenómeno sobre la producción de la luz por medio de rayos catódicos donde la distribución de la energía continua no explica el efecto, entonces Einstein asume que la energía está compuesta de cuantos de tamaño $\frac{R}{N}\beta v$, cuando estos llegan a la superficie del metal se convierte en energía cinética y el electrón absorbe el paquete de cuánto (así no sea en su totalidad) para que este pueda salir de la placa perderá energía cinética y deberá de realizar un trabajo a partir de esto se obtiene una relación matemática:

$$hE = R\beta v - P'$$

Ecuación 22

hE Es el potencial positivo y *E* es la energía cinética del electrón y *P'* el trabajo necesario para que salga de la superficie es así como Einstein establece una relación lineal entre el potencial y la energía del cuánto.

Por otro lado, por medio de asignación de valores, Einstein encuentra la diferencia de potencial el cual coincide con las investigaciones de Lenard entonces Einstein asume que de esa manera la energía no contradice con los resultados además realiza la siguiente afirmación: “por otro lado el número de electrones que dejan el sólido será proporcional a la intensidad

de la luz excitante en condiciones por lo demás idénticas” (Einstein, *Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, 1905, pág. 147). Con lo anterior la emisión de electrones es causada por la frecuencia de la energía con la cual llega el al electrón y esta dependerá de la frecuencia y no de la intensidad como se pensaba anteriormente.

Por último, sobre la ionización de un gas por luz ultravioleta, se debe suponer que por cuanto de energía absorbido por molécula de gas no se puede superar a la cantidad de energía absorbida, pero Einstein encontró que el trabajo realizado es de $6,4 \times 10^{12} J$, valor que no coincide con lo encontrado por Lenard, pero haciendo la similitud con los trabajos sobre ionización a partir de voltajes, se encuentra un valor más cercano al encontrado $9,6 \times 10^{12}$. Aunque hay una condición más, si se asume cada cuanto de energía absorbida como molécula de gas, entonces el número de moléculas y cuanto de energía debe cumplir $j = \frac{L}{R\beta\nu}$ si esto es cierto se cumple para todos los gases.

3.2 Acerca de la generación y absorción de la luz

Para el segundo documento, llamado *“Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption”* (*Sobre la teoría de la generación de la luz y absorción de luz*) (Einstein, 1906), lo divide en dos partes, en la primera afirma que en el anterior documento la propuesta de Planck con su es contra parte de su trabajo pero en este afirma que es un aporte para la cuantización de la energía y logra demostrar la misma conclusión que Planck.

Primeramente, comienza a comparar su trabajo con el de Planck y nombra que su trabajo anterior está basado en la teoría de Maxwell, de electrones y calor, pero el de Planck esta en base teórica de los cuantos y esta es una razón por la cual matemáticamente no coinciden los resultados, es importante recordar que en el capítulo II de este trabajo se nombra que Planck le daba intereses en profundizar y encontrar una relación explicita para la entropía del sistema propuesto en relación con la energía.

Entonces, Einstein desarrolla en qué condiciones debe de estar el sistema propuesto por Planck (resonadores) el cual se considera como iones que puedan realizar oscilaciones con cierto grado de libertad, además se sobre entienden que estos son puntos de masa cuyo estado instantáneo está determinado por la velocidad es así que para encontrar la distribución de energía se acepta que hay moléculas que se mueven y pueden que choquen con los iones por lo cual transfieren energía de resonador a resonador.

Así mismo, utilizando la ley de distribución de Maxwell – Boltzmann se considera que $p_1 \dots p_n$ son variables de estado que determinan el sistema físico y en nuestro caso, la posición de todos los resonadores. La entropía S de este sistema a una temperatura absoluta T se define por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H}{T} + \frac{R}{N} \lg \int e^{-\frac{N}{RT}H} dp_1 \dots dp_n \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde H es la energía del sistema a temperatura T y H está en función de p . Si se asume que el sistema contiene un gran número de moléculas entonces solo los diferentes estados determinan la entropía para un rango de $H + \Delta H$, pero es ΔH pequeño pero grande a comparación de $(R \lg(\Delta H))/N$. Se evidencia que S no depende de ΔH .

Ahora si se sustituyen las variables de $dp_1 \dots dp_n$ por x_α y ξ_α obtenemos,

$$S = \int_{E_\alpha}^{E_\alpha + dE_\alpha} dx_\alpha d\xi_\alpha = \text{Constante } E_\alpha \quad \text{Ecuación 24}$$

Si se calcula la entropía de esta manera se llega a la conclusión de Planck pero si se asume que la energía de un resonador no puede ser cualquier valor perteneciente a los números reales si no múltiplos enteros de ε

$$\varepsilon = \frac{R}{N} \beta v \quad \text{Ecuación 25}$$

Entonces, lo anterior es la base teórica propuesta por Planck donde la energía del resonador sólo puede asumir valores enteros múltiplos para ε ; A consecuencia, tenemos que para la ecuación (21), si se asume que la energía de un resonador crece en intervalos grandes la teoría para la electricidad no es aplicable para este sistema por que no se conoce con exactitud la energía instantánea. Es así, como el valor de $e^{-\frac{\beta v}{T}}$ tiene un valor de $\frac{E_v}{\varepsilon}$ dentro del rango de validez para el espectro de Wien por lo cual cuando E es menor que ε entonces hay pocos valores cuya energía es diferente de cero.

Para concluir, se puede decir que la propuesta de Planck es hipotética pero que incluye una teoría acertada, la hipótesis cuántica de la luz.

En la segunda parte del documento, Einstein habla sobre la relación cuantitativa esperada entre la dispersión fotoeléctrica y el efecto fotovoltaico (conocido actualmente como efecto fotoeléctrico) y nombra la serie para ordenar los metales según su sensibilidad fotoeléctrica, para que esto se cumpla, el sistema debe ser tomado entre la interacción del gas y el metal no de metal a metal, es así como Einstein plantea que esas dos placas metálicas generan una diferencia de potencial V entre la placa y el gas y si esta es mayor entonces debe ser de signo positivo.

Por lo cual, se tiene V_1 y V_2 , las diferencia de potencial entre los metales M_1 y M_2 , se considera que la interacción es exclusiva entre el metal y el gas como el medio de interacción es el vacío, se tiene que Vl_1 o Vl_2 los potenciales respectivamente en puntos del espacio del gas están inmediatamente sujetos a los metales en contacto y V' es el potencial entre los dos metales, entonces:

$$\begin{aligned}V' - Vl_1 &= V_1 \\V' - Vl_2 &= V_2\end{aligned}\tag{Ecuación 26}$$

Es decir,

$$Vl_2 - Vl_1 = V_1 - V_2\tag{Ecuación 27}$$

Si el gas esta ionizado, se produce intercambio de iones, provocada por el campo eléctrico que está en el gas la cual esa interacción se da desde el potencial negativo hacia el más positivo.

Vamos a ver ahora, tenemos un metal M aislado en un gas, la diferencia de potencial entre los dos es de V , para que estos interactúen deben de realizar un trabajo que numéricamente es igual a V . Cuanto menos sea el metal para ceder electrones, más energía se requiere para observar el efecto fotoeléctrico. Si introducimos el concepto de cuanto de luz la cual proporciona una relación matemática para ello; La energía V_ϵ debe suministrarle a los electrones para poder trasladarlo del gas hacia el metal. Entonces

$$V_{\varepsilon} \leq \frac{R}{N} \beta v$$

Ecuación 28

$$V \leq \frac{R}{A} \beta v$$

Donde A es la carga en una molécula grammo de un ion monovalente.

Si ahora se asume que algunos electrones absorbentes tienen la capacidad de desprenderse del metal, se afirma que el cuanto excede a V_{ε} , por lo cual

$$V = \frac{R}{A} \beta v$$

Ecuación 29

Donde v es la frecuencia de la luz. Si v_1 y v_2 son las frecuencias más pequeñas que interactúan con el metal M_1 y M_2 siendo así que la diferencia de potencial V_{12} de los dos metales se aplica para la ecuación (32)

$$-V_{12} = V_1 - V_2 = \frac{R}{A} \beta (v_1 - v_2)$$

Ecuación 30

Es así como concluye Einstein en establecer la energía que requiere el metal para emitir un electrón el deberá de tener menor frecuencia de luz para ese metal.

Para establecer el análisis de estos documentos es necesario hablar sobre el contexto de la física para ese año.

3.3 Fenómenos antes de Einstein

Para 1905, se tenía la idea de un cuerpo, el cual, emite y absorbe energía a ciertas temperaturas (radiación de cuerpo negro) además, espectros atómicos, que describe la estructura de la materia y había encontrado la relación entre la masa y carga del electrón, la teoría cinética de los gases, las ondas electromagnéticas y así, el efecto fotoeléctrico; Es importante nombrar lo que se tenía para el contexto científico porque impulsar a la comunidad científica a explicar lo no explicable.

3.4 Reflexiones sobre los documentos de Einstein

Para la época cuando Einstein publica este artículo se tenía ratificada la teoría de ondas electromagnéticas de Maxwell la cual explica de manera coherente los fenómenos ópticos

como reflexión, refracción, difracción y dispersión pero esta falla cuando se trata de explicar transformaciones y producciones de la luz. Según la teoría electromagnética la energía se define como una función temporal y espacial continua para todos los fenómenos electromagnéticos incluida la luz, por lo tanto, la radiación emitida por una fuente se puede distribuir de manera continua y su magnitud como un promedio de esta distribución en un espacio dado.

Durante el capítulo II se expresaron algunos fenómenos en relación con la producción y transformación de la luz entre los cuales la energía continua no lograba dar explicación es así que Einstein en el artículo "*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*" (Einstein, 1905) propone un nuevo concepto para la energía llamado cuanto (discreta), el cual desarrolla en nueve ítems sobre la conceptualización y formalización de ella.

Einstein durante el desarrollo conceptual sobre la cuantización de la energía va quebrando la visión continua de la teoría ondulatoria para los fenómenos de transformación y producción de la luz cuando expone que es incoherente ponderar la energía de la radiación electromagnética como una función la cual define el promedio de esta distribución y no de su estado energético instantáneo.

Es así como Einstein desarrolla el documento en función de su propuesta sobre cuantos de energía los cuales son pequeños paquetes que están distribuidos en el espacio y se propagan de manera discreta y estos pueden ser absorbidos o emitidos como un todo. El objetivo de Einstein es establecer el estado electromagnético de estos cuantos en el espacio de una manera instantánea porque él creía que ahí estaba la solución para la energía en casos donde se transforma y produzca luz.

Así mismo, Einstein utiliza teorías de algunos científicos como: Bernoulli, Boltzmann, Stoke y Wien para determinar el estado de los cuantos para ello emplea el concepto de entropía aplicada primero a un gas ideal y después comprenderla utilizando el principio de Boltzmann, cabe resaltar que este principio se determina en base a la mecánica estadística y es fundamental para el desarrollo del estado electromagnético instantáneo de la partícula.

De igual manera, Einstein consigue determinar el estado electromagnético para los cuantos como $\frac{R}{N}\beta\nu$ donde R es la constante absoluta de los gases, N el número de moléculas reales y

ν es la frecuencia de la onda y generalizar el cuanto utilizando la regla de Stokes donde se cumple que el cuanto generado no puede ser mayor que el excitado.

CAPITULO IV

La formalización y concepto del cuanto de energía desde el efecto fotoeléctrico comparada con la continuidad de la energía clásica

En los anteriores capítulos de este trabajo se intentó explicar la distribución de la energía para la luz de manera clásica, un intento asociado a Rayleigh – Jeans con su catástrofe ultravioleta, Wien con su distribución para las altas frecuencias el cual fue modificado por Planck para el espectro de la radiación de cuerpo negro. Además, se realiza unas reflexiones sobre la propuesta de Einstein sobre el cuanto de energía y sus aplicaciones a los rayos catódicos.

A partir de lo anterior, se pretende realizar una sistematización sobre la historia y los desarrollos matemáticos a como lo conocemos en la actualidad en base del artículo de Einstein.

Para el entendimiento del efecto fotoeléctrico en la actualidad tenemos que nombrar a Andrews Millikan que en 1909 había logrado descubrir la carga del electrón con un montaje experimental que consta de una cámara formada por un par de placas metálicas, un aspersor y un microscopio con graduación interior, es así como en 1915 logró encontrar de manera experimental la propuesta realizada por Einstein, el cual la energía dependía solamente de la frecuencia y la razón entre la diferencia de voltaje y la frecuencia coincidió con la constante h de Planck. (Millikan, 1915).

4.1 El efecto fotoeléctrico comprendido actualmente utilizando el cuánto de energía

Entonces, para realizar nuestra relación entre el efecto fotoeléctrico y el concepto de cuanto energía por medio del efecto fotoeléctrico, vamos a colocar el siguiente caso, tenemos una serie de electrones en una placa metálica y sobre ella una luz monocromática incide en la superficie e interactúa con el electrón y le otorga una energía mínima para que salga desprendido de la superficie el cual se sitúa en un entorno vacío. (Cassini & Levinas, 2008) (Ver ilustración 2).

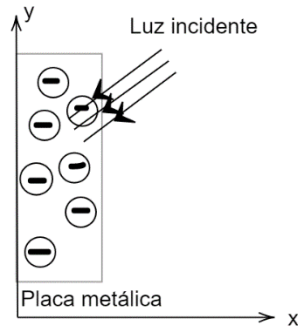


Ilustración 6, Luz incidiendo en una placa metálica, (Elaboración propia)

Siendo así que,

$$E_i = \frac{1}{2}mv^2 + W \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde E_i sería la energía inicial, para que el electrón se desprenda de la placa metálica necesita de una energía cinética y un trabajo W para poder realizar esa acción. (Cassini & Levinas, 2008), Entonces, la energía cinética estaría dada por:

$$\frac{1}{2}mv^2 = E_i - W \quad \text{Ecuación 32}$$

Además, vamos a suponer que la luz incidente choca con un solo electrón, además esta se compone de una sola frecuencia, y el electrón absorbe toda la E_i como pequeños paquetes y se considera el electrón como una carga puntual. En la actualidad, sabemos que la energía incidente es igual a la constante de Planck h multiplicada por la frecuencia ν , por lo cual reemplazando en (31)

$$\frac{1}{2}mv^2 = hf - W \quad \text{Ecuación 33}$$

Por otro lado, después que el electrón absorbe toda la radiación y este se desprende de la placa metálica, sabemos que se puede mover en cualquier dirección pero vamos asumir que se desplaza de manera horizontal para simplificar la formalización (ver ilustración 3), ocurre que: el electrón es una carga por lo cual para que esta se mueva se debe someter a una fuerza de un campo eléctrico, expresada en la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_x = q\vec{E}_x \quad \text{Ecuación 34}$$

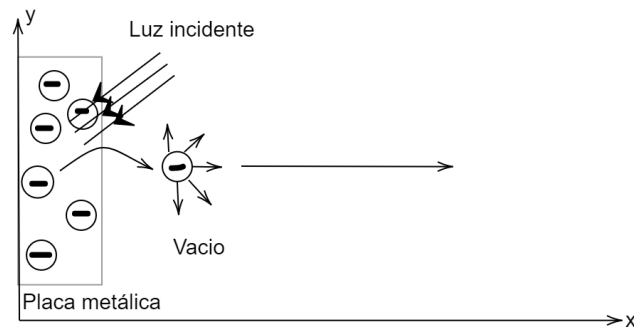


Ilustración 7, el electrón se mueve en dirección horizontal (Elaboración propia)

\vec{F}_x Sería la fuerza en dirección horizontal así mismo, q es la carga y \vec{E}_x el campo eléctrico, como asumimos que el electrón se mueve hacia el eje positivo de x , entonces, sabemos que la naturaleza del electrón su carga es negativa, por lo cual, la fuerza que experimenta debe ser positiva, para ello el campo debe ser de signo negativo, donde \vec{E}_x es igual a:

$$\vec{E}_x = -\frac{dV}{dx} \quad \text{Ecuación 35}$$

V Es el potencial.

De tal manera, para encontrar el potencial V se compara dos puntos A y B, como se aplica sobre una carga puntual, el potencial se define por medio de expresión lineal (Castañeda & De-Geus, 2003), por lo tanto tenemos:

$$V(x) = ax + b \quad \text{Ecuación 36}$$

Cuando V este en el punto A, entonces:

$$V_A(x_A) = ax_A + b \quad \text{Ecuación 37}$$

y para cuando este en el punto B

$$V_B(x_B) = ax_B + b \quad \text{Ecuación 38}$$

Ahora bien, si tenemos las diferencias de potencial sería:

$$V_B - V_A = a (x_B - x_A) \quad \text{Ecuación 39}$$

Despejando a

$$a = \frac{(V_B - V_A)}{(x_B - x_A)} \quad \text{Ecuación 40}$$

Y ahora b de (38)

$$b = V_B - ax_B \quad \text{Ecuación 41}$$

Reemplazando (41) en (40)

$$b = V_B - \frac{(V_B - V_A)}{(x_B - x_A)} x_B \quad \text{Ecuación 42}$$

Por lo tanto $V(x)$ será:

$$V(x) = \frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} x + V_B - \frac{(V_B - V_A)}{(x_B - x_A)} x_B \quad \text{Ecuación 43}$$

Factorizando

$$V(x) = V_B + \frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} (x - x_B) \quad \text{Ecuación 44}$$

Derivando el voltaje, obtenemos:

$$\vec{E}_x = -\frac{dV}{dx} = -\frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} \quad \text{Ecuación 45}$$

Por lo cual, si tenemos que en nuestro contexto tenemos que la \vec{F}_x será si tenemos que q es el electrón desprendido, entonces:

$$\vec{F}_x = (-e) \left(- \frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} \right) \quad \text{Ecuación 46}$$

$$\vec{F}_x = (e) \left(\frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} \right)$$

Tenemos que la \vec{F}_x es una fuerza constante, si se asume que desde donde se ubica la placa metálica se considera el punto A un potencial V_A y hasta el punto B sera V_B , en una distancia d , por lo tanto, la ecuación (50), quedaría:

$$\vec{F}_x = e \frac{V}{d} \quad \text{Ecuación 47}$$

Ahora suponemos que el electrón no llegue al punto x_B , es decir

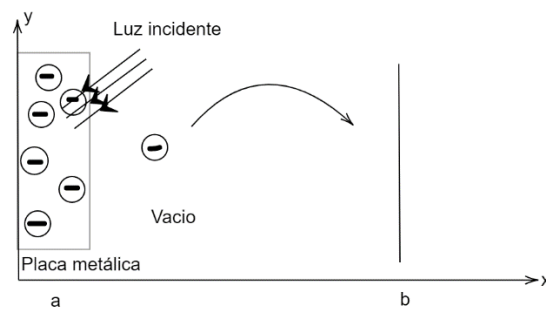


Ilustración 8, cuando el electrón sufre un frenado, (elaboración propia).

Para que esto ocurra se debe pensar que el campo eléctrico debe tener signo contrario para que el electrón sufra una especie de frenado, entonces sabemos que:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{Ecuación 48}$$

Despejando la aceleración y reemplazando la fuerza en (52)

$$\vec{a}_x = \frac{eV}{md} \quad \text{Ecuación 49}$$

Ahora bien, para que el electrón sufra un frenado se debe de suponer que el potencial en el punto A es mayor que en el punto B:

$$V_{x_A} > V_{x_B} \quad \text{Ecuación 50}$$

A consecuencia, cambia el signo de la aceleración

$$\vec{a}_x = -\frac{eV}{md} \quad \text{Ecuación 51}$$

Utilizando las ecuaciones para un movimiento acelerado, tenemos que el tiempo (t) es

$$t = \frac{v - v_0}{a} \quad \text{Ecuación 52}$$

Reemplazarlo en:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad \text{Ecuación 53}$$

Obtenemos

$$x = x_0 + v_0 \left(\frac{v - v_0}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{v - v_0}{a} \right)^2 \quad \text{Ecuación 54}$$

Contextualizando a lo que tenemos entonces, x es la distancia d , v es igual a cero, ya que, el electrón frena antes de llegar al punto B, tenemos que a distancia es igual a:

$$d = -\frac{1}{2} \frac{v^2}{a} \quad \text{Ecuación 55}$$

Reemplazando a , tenemos

$$d = \frac{1}{2} v^2 \frac{md}{eV} \quad \text{Ecuación 56}$$

Despejando eV

$$eV = \frac{mv^2}{2} \quad \text{Ecuación 57}$$

A esto se le llama potencial de frenado.

Para concluir,

$$E = \begin{cases} f & f < f_0 \\ f_0 & hf_0 = W \\ f & f > f_0 \end{cases}$$

Ecuación 58

De lo anterior, se puede deducir varias cosas:

1. La energía cinética máxima del electrón desprendido va depender de la energía del cuanto incidente y el potencial eléctrico, a consecuencia no tendremos potencial de frenado y tampoco ocurre el efecto fotoeléctrico. (Cassini & Levinas, 2008)
2. El efecto no ocurre cuando la energía incidente es igual al trabajo necesario para desprender el electrón ya que, el electrón logra desprenderse de la superficie pero queda en reposo (energía cinética nula). Además, la anterior hipótesis explica la no existencia de un lapso de tiempo entre el cuanto incidente y la emisión de la radiación. (Castañeda & De-Geus, 2003).
3. Si se invierte la orientación del potencial, la corriente no se convierte a cero de manera inmediata, algunos electrones desprendidos del metal lograrán llegar al punto B. A pesar, si la diferencia de potencial se hace mayor para lo cual la corriente eléctrica se hace igual a cero, de manera formal se describe como:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2$$

Ecuación 59

Es decir, el potencial de frenado se determina cuando la energía cinética máxima es igual a la carga del electrón y el potencial.

4. Todas las sustancias tienen un umbral de frecuencia del cuanto de luz incidente (Castañeda & De-Geus, 2003), se define a continuación:

$$f_0 = \frac{W}{h} ; hf > W$$

Ecuación 60

De tal manera, cuando la frecuencia de la luz incidente es igual a la razón entre el trabajo y la constante h de Planck el efecto fotoeléctrico no sucede, en cambio cuando la energía del cuanto es mayor que el trabajo de extracción del metal. (Cassini & Levinas, 2008)

De acuerdo a lo anterior, el aporte que realiza Einstein con el concepto de cuanto para la explicación de fenómenos en interacción de la radiación con la materia, es asertiva ya que explica los resultados de los experimentos y logra describir que en el efecto fotoeléctrico, el

electrón absorbe la luz como un todo por pequeños paquetes de cuantos y es así como el concepto discreto y el comportamiento corpuscular de la luz se ratifica.

4.2 Comparación con la teoría ondulatoria

Ahora bien, logramos deducir la formalización para el efecto fotoeléctrico pero, para lograr la transición sobre el concepto de energía clásica hacia la moderna, debemos de comparar estos resultados con la teoría clásica.

Es así que, el experimento contradice en tres aspectos fundamentales a comparación de la teoría clásica, demostrados a continuación:

1. Para cualquier onda electromagnética que sea plana o que esté constituida de una sola frecuencia (como en nuestro caso), según lo desarrollado por Poynting, la intensidad de una onda electromagnética, será determinada por:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E^2 \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del espacio libre y E es la energía, concluimos que para una onda electromagnética la energía dependerá de la intensidad, de la siguiente manera:

$$I = E^2 \quad \text{Ecuación 62}$$

La energía a la cual se le asocia el movimiento es la energía cinética, si una onda electromagnética se está transportando en el vacío su energía aumentará a medida que la intensidad o la amplitud aumente ya que el frente de onda se hace mayor, así como lo afirmó Lenard (1902)

¿Si la distribución de tamaño de las velocidades estaba relacionada con la intensidad de la luz excitante, en particular si la mayor intensidad de luz no representaría las velocidades iniciales más altas en proporciones crecientes?, era una pregunta a la que parecía esperarse una respuesta afirmativa. (pág. 166)

2. La concepción de energía desde la perspectiva clásica se entiende como continua, si se aplica al efecto fotoeléctrico, se entiende a partir de las definiciones realizadas para las ondas electromagnéticas, entonces, la energía cinética que necesita el electrón para abandonar la superficie metálica, será proporcionado por la intensidad con la que los frentes de ondas

chocan con el electrón hasta obtener la necesaria para que el electrón realice el salto, en consecuencia habría un tiempo notable para evidenciar el efecto fotoeléctrico pero, esto no sucede, según Lenard (1902) la cantidad de electricidad que se escapó por 1 segundo a razón de la intensidad se mantiene constante es decir que no hay diferencia de tiempo.

3. Según la teoría ondulatoria, el fenómeno debería suceder para cualquier frecuencia de la luz afirmando que está depende solamente de la intensidad, de tal manera para que el electrón abandone la superficie del metal será suficiente con la intensidad pero, el experimento lo contradice y respecto a esto Lenard (1992) dice:

Se ha aprendido a entender la fuerte absorción de luz como un fenómeno de resonancia, cuya sede son las moléculas o átomos del cuerpo absorbente. En nuestros experimentos, la luz de todas las longitudes no es efectiva (pág. 171)

Con respecto a lo anterior, se puede afirmar que el efecto fotoeléctrico sucede solamente para frecuencias específicas.

De esta manera, se logra comparar de manera conceptual y formal sobre como comprendemos el concepto de cuanto de energía actualmente y aplicarlo al efecto fotoeléctrico y demostrar lo propuesto por Einstein además, concluir que a principios del siglo XIX la física clásica sufre un declive para la explicación en donde la luz participa en procesos de transformación y producción, a consecuencia se observa una nueva concepción sobre el entendimiento del mundo físico, interesándose por definir los estados de átomos, partículas y electrones.

Reflexiones finales

Como sabemos el efecto fotoeléctrico fue la demostración experimental sobre las ondas electromagnéticas donde se tiene una placa metálica y a esta se le aplica una diferencia de potencial y si una onda de luz con una frecuencia determinada interactúa con esta se evidencia el salto del electrón generando una chispa.

Pues bien, si se estudia el efecto fotoeléctrico desde una perspectiva continúa esta debe cumplir con las propiedades asociadas a una onda como lo son: Amplitud, longitud de onda, frecuencia e intensidad y así mismo con el concepto de distribución de la energía continua, es decir, depender de la intensidad o de la amplitud lo cual en el experimento no sucede según lo observado.

Imaginemos un momento que tenemos una placa metálica con una diferencia de potencial la cual en su superficie contiene a los electrones, si varios frentes de onda inciden en la placa la distribución de la energía será continua y de igual manera para todos los electrones, por lo cual la energía adquirida por ellos será acumulada hasta obtener la necesaria para salir de la placa y la cantidad de electrones dependerá de la intensidad de la onda incidente, pero en el experimento observado esto no ocurre porque sin importar la intensidad de la onda incidente el efecto dependerá de la frecuencia de la radiación incidente.

Cuando se aumenta la intensidad de la corriente aplicada a la placa metálica y esta interactúa con un haz de luz de frecuencia determinada, se observa que cambia la cantidad de electrones expulsados de la superficie de la placa más no altera la intensidad de la expulsión.

Es así, que es imposible adecuar el concepto de energía de manera continua para la explicación del efecto fotoeléctrico ya que esta no se adecua conceptualmente y matemáticamente a lo evidenciado por el experimento y esto permite una nueva visión para el estudio de la transformación y producción de la luz.

Por eso, la visión epistemológica de ver la composición de la materia y la energía de una manera discreta y no como lo veían algunos científicos como continua, por ello fue acertada y adaptable a los experimentos de espectros atómicos, radiación de cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico porque logró explicar de manera satisfactoria tanto conceptual y matemáticamente.

La propuesta realizada por Einstein sobre los cuantos de energía se adapta a la explicación del efecto fotoeléctrico teórica y formal puesto que, conceptualmente se entiende que la luz está compuesta por pequeños paquetes de energía que tiene como propiedad ser absorbidos o emitidos como un todo, cuando estos interactúan con la superficie de la placa metálica el electrón absorbe uno o varios cuantos que le permiten adquirir energía para su expulsión.

Por último, el papel de la matemática para expresar la conceptualización de la energía discreta brinda una comprensión de esta, ya que, permite ser comparado con los planteamientos de antes propuestos por Planck, por lo tanto evidenciar el proceso de avance y ser un criterio para el establecimiento de teorías según el contexto en el que se desarrollan los nuevos pensamientos.

CONCLUSIONES

1. Este trabajo permite a los estudiantes de física en etapa inicial acercarse a un momento de ruptura entre el tipo de pensamiento clásico y el moderno ya que, en el pensamiento clásico se tenía una visión de los fenómenos de una manera continua y conservativa en su distribución de energía, en cambio en física moderna determina la distribución de energía de forma discreta.
2. Es claro que, concebir la caracterización del comportamiento de la luz de una forma discreta, permitió la explicación del fenómeno que involucran interacciones de la radiación con la materia desde un desarrollo conceptual y formal como el efecto fotoeléctrico, y evidenciar los alcances de la teoría clásica desde el comportamiento continuo de la luz.
3. Podemos ver, que el efecto fotoeléctrico como herramienta para aplicar la teoría de mecánica clásica, comparándolo con el concepto de cuanto, es útil porque éste muestra evidentemente la apropiación de la distribución de energía de manera discreta y así verificar sus incongruencias.
4. Abordar un fenómeno desde la historia y la formalización, permite la visualización del proceso que conlleva su explicación y adaptación teórica fundamentada para la época, ya que el cambio sobre cómo se concibe los fenómenos nace a partir de una visualización diferente a como se lleva comúnmente.
5. Ciertamente, la formalización matemática permite describir de una manera paralela junto con las concepciones y conceptos sobre fenómenos físicos y aporta para la comprensión de los mismos.
6. Al re – contextualizar se logra establecer una alternativa para la enseñanza donde se muestra que el desarrollo de conceptos y formalizaciones responde problemáticas conceptuales dadas para la época.
5. Por último, es importante recalcar que el desarrollo llevado a cabo por Einstein no hubiera sido posible sin el trabajo de otros científicos como Planck, Wien, Boltzmann, Stefan y Stoke, los cuales fueron útiles para el establecimiento de pensamiento propuesto por Einstein, y así evidenciar que cualquier proceso de teorización nace desde unos antecedentes conceptuales y formales, solo que se cambie su perspectiva de verlos y aplicarlos.

Bibliografía

- Arias, N. (2003). Planck y la catástrofe del ultravioleta . *Universidad Francisco José de Caldas*, 1-5.
- Arias, N., & Angelo, B. (2006). ¿Quién propuso la fórmula de Rayleigh - Jeans? *Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 29, 5-18.
- Arroyo, L. (2012). Diseño de una unidad didáctica para enseñar los conceptos de trabajo y energía mecánica a partir de la cinemática del movimiento uniformemente acelerado. *Universidad Nacional de Colombia* , 1-147.
- Barrios, S. Y., & Ramos, B. M. (2014). El experimento del efecto fotoeléctrico para la comprensión del concepto de cuantización de la energía: Un estudio basado en diseño con profesores de física en formación inicial. *Universidad Pedagógica Nacional*, 1-65.
- Beléndez, A. (2008). La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la "síntesis electromagnética" de Maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30, 1 - 20.
- Bolaños, J. (2017). Análisis histórico del principio de la conservación de la energía, algunas pautas en la enseñanza de una ley. *Universidad del Valle*, 1-89.
- Bunsen, R., & Kirchhoff, G. (2008). Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen. *Biliteca universitaria Heidelberg*, 161 - 189.
- Camatón, S., Encalada, J., & Pavón, C. (2018). Breve recuento histórico del desarrollo de la mecánica cuántica. *Espirales Revista multidisciplinaria de investigación*, 2(14), 1-13.
- Caracciolo, R., & Letzen, D. (2007). Epistemología e historia de la ciencia. *Universidad Nacional de Córdoba*, VII, 1-10.
- Cassini, A., & Levinas, M. (2008). La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico: Un análisis histórico - epistemológico. *Revista latinoamericana de Filosofía* , 5 - 38.
- Castañeda, M., & De-Geus, J. (2003). *Introducción a la física moderna*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Einstein, A. (1905). Über einen die erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322, 132 - 148.
- Einstein, A. (1906). Zur theorie der Lichtezeugung und Lichtabsorption. *Annalen der Physik*, 20, 199 - 206.
- Escudero, C., Jaime, E., & González, S. (2016). Hacia la conciencia cuántica a partir del efecto fotoeléctrico. *Enseñanza de las ciencias*, 33.3, 183 - 200.
- Fernandez, P., Tabares, I., & Jardon, A. (2017). La energía y su conservación como eje estructurante para la comprensión de fenómenos electromagnéticos. *Revista de enseñanza de la física*, 29, 441 - 450.
- García, M., & Ewert, J. (2003). *Introducción a la física moderna*. Centro Editorial de la U. N. C. .
- Gil, P. D., Senent, P. F., & Solbes, M. J. (1985). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 73 - 81.

- Granés, J., & Caicedo, M. (1997). Del contexto de la producción de conocimientos al contexto de enseñanza. *Universidad Pedagógica Nacional*, 34, 1 - 11.
- Hernandez, R. M. (1996). La historia de la ciencia y la formación de científicos. *Perfiles educativos*, XVIII, 1-11.
- J. M. Rivera, J., Y, R. V., & E, C. M. (2019). Evolución histórica del concepto cantidad de movimiento. *Latin American Journal of Physics Education*, 13(2), 1-5.
- Jeans, J. (1905). On the laws of radiation. *The Royal Society*, 76, 545 - 552.
- Lenard, P. (1902). Ueber die lichtelektrische Wirkung. *Annalen der Physik*, 149 - 198.
- Maxwell, J. (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field . *Theory of the Electromagnetic Field*, 155, 459 - 512.
- Mckagan, S., Handley, W., Perkins, K., & Wieman, C. (2009). A research - Based curriculum por teaching the photoelectric effect. *American Journal physics* , 1- 9 .
- Millikan, R. A. (1915). Einstein's photoelectric equation and contact electromotive force. . *Ryerson Physical Laboratory*, University of chicago.
- Niaz, M., Klassen, S., McMillan, B., & Metz, D. (2010). Reconstruction of the history of the photo electric effect and its implications for general physics textbooks. . *Science Education* , 1- 29.
- Planck, M. (1901). On the law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum. *Annalen der Physik*, 4, 553 - 664.
- Sánchez, J. (2016). Una reflexión sobre el principio de equivalencia de las transformaciones para la enseñanza de la termodinámica. . *Universidad Pedagógica Nacional*, 1-74.
- Segura, A. (2015). El concepto de onda electromagnética y su medio de propagación a partir de la teoría de maxwell y los trabajos de Hertz. . *Universidad Pedagógica Nacional*, 1-77.
- Smith, G. (2006). The vis viva dispute: A controversy at the dawn of dynamics. *Physics Today*, 30-37.
- Solber, J., & Tarín, F. (2004). La conservación de la energía: Un principio de toda la física. Una propuesta y unos resultados. *Revista de investigación y experiencias didácticas*, 22(2), 185 - 194.
- Solbes, J., & Tarin, F. (2002). Generalizando el concepto de energía y su conservación. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*(22), 155-180.
- Taton, R. (1972). *Historia general de las ciencias* (1972 ed., Vol. 2). Barcelona: Orbis S.A. .
- Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física Universitaria Sears Zemansky* (Decimosegunda ed.). México: Pearson Educación.

Anexo 1

En el siguiente anexo encontrara la traducción libre sobre el artículo presentado por Planck titulado “Sobre la Ley de Distribución de Energía en el Espectro normal” (Planck, 1901), esta traducción se realizó con el fin de acercar la investigación con base en no alterar la historia.

Traducción del alemán por Cindy Natalia Ariza Romero, estudiante de licenciatura en física. Universidad Pedagógica Nacional.

Sobre la Ley de Distribución de Energía en el Espectro normal

Las recientes mediciones espectrales realizadas por O. Lummer y E. Pringsheim, y aún más notables los de H. Rubens y F. Kurlbaum, que juntos confirmó un resultado anterior obtenido por H. Beckmann, muestra que la ley de distribución de energía en el espectro normal, derivada por primera vez por W. Wien de consideraciones cinéticas moleculares y más tarde por mí de la teoría de Radiación electromagnética, generalmente no es válida. En cualquier caso, la teoría requiere una corrección, y lo intentaré en el siguiente para lograr esto sobre la base de la teoría de electromagnética radiación que desarrollé. Para ello será necesario primero encontrar en el conjunto de condiciones que conducen a la ley de distribución de energía de Wien, ese término que se puede cambiar; a partir de entonces será cuestión de eliminar este término del conjunto y hacer una sustitución adecuada por él. En mi último artículo, mostré que los fundamentos físicos de la teoría de la radiación electromagnética, incluida la hipótesis de "natural radiación," resistir las críticas más severas; y desde que yo sé No hay errores en los cálculos, persiste el principio de que la ley de La distribución de energía en el espectro normal está completamente determinada cuando se tiene éxito en calcular la entropía S de un irradiado, monocromático, resonador vibratorio en función de su energía vibratoria U . Desde entonces obtiene, de la relación $dS / dU = 1 / q$, la dependencia de la energía U dela temperatura q , y dado que la energía también está relacionada con la densidad de radiación a la frecuencia correspondiente por una relación simple, uno también obtiene la dependencia de esta densidad de radiación de la temperatura. La distribución normal de energía es entonces aquella en la que las densidades de radiación de todas las frecuencias diferentes tienen la misma temperatura.

En consecuencia, todo el problema se reduce a determinar S en función de U , y es para esta tarea que la parte más esencial del siguiente análisis es devoto. En mi primer tratamiento de

este tema había expresado S , por definición, como una función simple de U sin más fundamento, y estaba satisfecho de demostrar que esta forma de entropía cumple con todos los requisitos impuestos por termodinámica. En ese momento creí que este era única posible expresión y que, en consecuencia, la ley de Wien, que se sigue de ella, necesariamente tenía validez general. En un análisis posterior y más detallado, sin embargo, me pareció que debe haber otras expresiones que den el mismo resultado, y que en cualquier caso, se necesita otra condición para poder calcular S de forma única. Creí haber encontrado tal condición en el principio, que al principio el tiempo me parecía perfectamente plausible, que en un infinitamente pequeño e irreversible cambio en un sistema, cerca del equilibrio térmico, de N resonadores idénticos en el mismo campo de radiación estacionario, el aumento de la entropía total $S_N = NS$ con que está asociado depende sólo de su energía total $U_N = NU$ y la cambios en esta cantidad, pero no en la energía U de los resonadores individuales. Esto El teorema conduce de nuevo a la ley de distribución de energía de Wien. Pero dado que este último es no confirmado por la experiencia, uno se ve obligado a concluir que incluso este principio no puede ser válido en general y, por tanto, debe eliminarse de la teoría.

Por tanto, ahora debe introducirse otra condición que permita el cálculo de S , y para lograr esto es necesario mirar más profundamente en el significado del concepto de entropía. Consideración de la insostenibilidad de la hipótesis formulada anteriormente ayudará a orientar nuestros pensamientos en la dirección indicada por la discusión anterior. A continuación se describirá un método que produce una expresión nueva y más simple para la entropía y, por lo tanto, también proporciona una nueva ecuación de radiación que no parece entrar en conflicto con ningún hecho hasta ahora determinado.

CÁLCULOS DE LA ENTROPÍA DE UN RESONADOR COMO FUNCIÓN DE SU ENERGÍA

La entropía depende del desorden y este desorden, según la teoría electromagnética de la radiación para las vibraciones monocromáticas de un resonador cuando está situado en un campo de radiación estacionario permanente, depende de la irregularidad con la que cambia constantemente su amplitud y fase, siempre que se consideren los intervalos de tiempo grandes en comparación con el tiempo de una vibración pero pequeña en comparación con la duración de una medición. Si amplitud y fase ambos permanecieron absolutamente constantes, lo que significa completamente vibraciones homogéneas, no podría existir

entropía y la energía vibratoria, tendría que ser completamente libre para convertirse en trabajo. La energía U de un solo resonador vibratorio estacionario, en consecuencia, debe tomarse como promedio de tiempo, o lo que es lo mismo, como promedio simultáneo de la energías de un gran número N de resonadores idénticos, situados en el mismo campo de radiación estacionario, y que estén suficientemente separados para no influir entre sí directamente. En este sentido nos referiremos a la energía media U de un solo resonador. Luego a la energía total:

$$U_N = NU \quad \text{Ecuación 63}$$

de tal sistema de N resonadores corresponde una cierta entropía total

$$S_N = NS \quad \text{Ecuación 64}$$

del mismo sistema, donde S representa la entropía promedio de un solo resonador y la entropía S_N depende del desorden con el que el total la energía U_N se distribuye entre los resonadores individuales.

Ahora establecemos la entropía S_N del sistema proporcional al logaritmo de su probabilidad W , dentro de una constante aditiva arbitraria, de modo que el N los resonadores juntos tienen la energía U_N :

$$S_N = k \log W + \text{const} \quad \text{Ecuación 65}$$

En mi opinión, esto realmente sirve como una definición de la probabilidad W , ya que en los supuestos básicos de la teoría electromagnética no hay evidencia definitiva para tal probabilidad. La idoneidad de esta expresión es evidente a partir de la principio, en vista de su simplicidad y estrecha conexión con un teorema de teoría cinética de los gases.

Ahora es cuestión de encontrar la probabilidad W para que los N resonadores junto poseer la energía de vibración U_N . Además, es necesario interpretar U_N no como una cantidad continua, infinitamente divisible, sino como una discreta cantidad compuesta por un número

entero de partes iguales finitas. Llamemos a cada uno tal parte el elemento de energía e; en consecuencia debemos establecer

$$U_N = P\varepsilon \quad \text{Ecuación 66}$$

donde P representa un entero grande generalmente, mientras que el valor de e es todavía incierto.

Ahora es evidente que cualquier distribución de los elementos de energía P entre los N resonadores pueden resultar sólo en un número definido, integral y finito. Cada tal forma de distribución que llamamos, después de una expresión utilizada por L.Boltzmann para una idea similar, un "complejo". Si uno denota los resonadores por los números 1, 2, 3,... N, y escribe estos uno al lado del otro, y si uno coloca debajo de cada resonador el número de elementos de energía asignados por alguna distribución arbitraria, entonces se obtiene para cada complejo un patrón.

Aquí asumimos $N = 10$, $P = 100$. El número R de todos los complejos posibles es obviamente igual al número de arreglos que se pueden obtener en este modo para la fila inferior, para una N y P. dadas En aras de la claridad, deberíamos tener en cuenta que dos complejos deben considerarse diferentes si el correspondiente los patrones numéricos contienen los mismos números pero en un orden diferente. De la teoría de combinaciones se obtiene el número de todos los complejos posibles como:

$$R = \frac{N(N+1)(N+2) \dots (N+P-1)}{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots P} = \frac{(N+P-1)!}{(N-1)! P!} \quad \text{Ecuación 67}$$

Ahora, de acuerdo con el teorema de Stirling, tenemos en la primera aproximación:

$$N! = N^N \quad \text{Ecuación 68}$$

En consecuencia, la aproximación correspondiente es:

$$R = \frac{(N+P)^{N+P}}{N^N P^P} \quad \text{Ecuación 69}$$

La hipótesis que queremos establecer como base para más el cálculo procede de la siguiente manera: para que los N resonadores posean colectivamente la energía vibratoria U_N , la probabilidad W debe ser proporcional al número R de todos los posibles complejos formados por la distribución de la energía U_N entre los N resonadores; o en otras palabras, cualquier complejo dado es tan probable como cualquier otro. Si esto ocurre realmente en la naturaleza, uno puede, en el último análisis, prueba solo por experiencia. Pero si la experiencia finalmente decidiera su favor, será posible sacar más conclusiones de la validez de este hipótesis sobre la naturaleza particular de las vibraciones del resonador; es decir, en el interpretación presentada por actual, un mayor desarrollo a lo largo de estas líneas parecería ser prematuro.

Según la hipótesis introducida en relación con la ecuación (69) la entropía del sistema de resonadores en consideración es, después de adecuado determinación de la constante aditiva:

$$\begin{cases} S_N = k \log R \\ = k (N + P) \log(N + P) - N \log(N - P \log P) \end{cases} \quad \text{Ecuación 70}$$

y considerando (63) y (66):

$$S_N = kN \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \log \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \log \frac{U}{\varepsilon} \right\} \quad \text{Ecuación 71}$$

Así, según la ecuación (64) la entropía S de un resonador en función de la energía U viene dada por:

$$S = k \left\{ \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) \log \left(1 + \frac{U}{\varepsilon}\right) - \frac{U}{\varepsilon} \log \frac{U}{\varepsilon} \right\} \quad \text{Ecuación 72}$$

Junto al teorema de Kirchoff de la proporcionalidad de emisivo y poder de absorción, la llamada ley de desplazamiento, descubierta y denominada después de W. Wien, que incluye como caso especial la ley de Stefan-Boltzmann de dependencia de la radiación total de la temperatura, proporciona el más valioso contribución a la base firmemente establecida de la teoría del calor y radiación, dice lo siguiente:

$$Ed\lambda = \vartheta^5 \psi(\lambda, \vartheta) d\lambda \quad \text{Ecuación 73}$$

donde λ es la longitud de onda, $Ed\lambda$ representa la densidad de volumen de radiación de cuerpo negro dentro de la región espectral λ a $\lambda + d\lambda$, ϑ representa temperatura $\psi(x)$ representa una determinada función del argumento x solamente.

Ahora queremos examinar lo que establece la ley de desplazamiento de Wien sobre la dependencia de la entropía S de nuestro resonador de su energía U y su período característico, particularmente en el caso general donde el resonador es situado en un medio diatérmico arbitrario. Para este propósito seguimos generalizar la forma de Thiesen de la ley para la radiación en una diatérmica arbitraria medio con la velocidad de la luz c . Dado que no tenemos que considerar la total radiación, pero sólo la radiación monocromática, se vuelve necesaria para comparar diferentes medios diatérmicos para introducir la frecuencia ν en lugar de la longitud de onda λ .

Por tanto, denotemos por ν la densidad de volumen de la energía de radiación perteneciente a la región espectral $\nu + d\nu$; luego escribimos: $u d\nu$ en lugar de $Ed\lambda$, c/ν en lugar de $cd\nu/\nu^2$ en lugar de $d\lambda$.

$$u = \vartheta^5 \frac{c}{\nu^2} \psi\left(\frac{c\vartheta}{\nu}\right) \quad \text{Ecuación 74}$$

De donde obtenemos ahora, de acuerdo con la conocida ley de Kirchoff-Clausius, la energía emitida por unidad de tiempo a la frecuencia ν y temperatura ϑ de una superficie negra en un medio diatérmico es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad de propagación c ; por tanto, la densidad de energía U es inversamente proporcional c^3 , y tenemos:

$$u = \frac{\vartheta^5}{\nu^2 c^3} f\left(\frac{\vartheta}{\nu}\right) \quad \text{Ecuación 75}$$

donde las constantes asociadas con la función f son independientes de c .

En lugar de esto, si f representa una nueva función de un solo argumento, podemos escribir:

$$u = \frac{\nu^3}{c^3} f\left(\frac{\vartheta}{\nu}\right) \quad \text{Ecuación 76}$$

y de esto vemos, entre otras cosas, que como es bien sabido, el radiante energía $u\lambda^3$ a una temperatura y frecuencia determinadas es la misma para todos medios diatérmicos.

Para pasar de la densidad de energía u a la energía U de un estacionario resonador situado en el campo de radiación y vibrando con la misma frecuencia ν , usamos la relación sobre irreversibles procesos de radiación

$$R = \frac{\nu^2}{c^2} U \quad \text{Ecuación 77}$$

(R es la intensidad de un rayo polarizado linealmente monocromático), que juntos con la conocida ecuación:

$$u = \frac{8\pi R}{c} \quad \text{Ecuación 78}$$

Produce la relación:

$$u = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U \quad \text{Ecuación 79}$$

De esto y de la ecuación (69) se sigue:

$$U = \nu f\left(\frac{\vartheta}{\nu}\right) \quad \text{Ecuación 80}$$

donde ahora c no aparece en absoluto. En lugar de esto, también podemos escribir:

$$\vartheta = \nu f\left(\frac{U}{\nu}\right)$$

Finalmente, introducimos la entropía S del resonador configurando entonces obtenemos:

$$\frac{1}{\vartheta} = \frac{dS}{dU} \quad \text{Ecuación 81}$$

Entonces, resulta:

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{\nu} f\left(\frac{U}{\nu}\right) \quad \text{Ecuación 82}$$

e integrando

$$S = f\left(\frac{U}{\nu}\right) \quad \text{Ecuación 83}$$

es decir, la entropía de un resonador que vibra en un medio diatérmico arbitrario depende sólo de la variable U/v , que contiene además de este único universal constantes. Esta es la forma más simple de la ley de desplazamiento de Wien que conozco.

Si aplicamos la ley de desplazamiento de Wien en la última forma a la ecuación (72) para la entropía S , entonces encontramos que el elemento de energía ε debe ser proporcional a la frecuencia ν , así:

$$\varepsilon = h\nu \quad \text{Ecuación 84}$$

y consecuentemente:

$$S = k\left\{\left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) \log\left(1 + \frac{U}{h\nu}\right) - \frac{U}{h\nu} \log \frac{U}{h\nu}\right\} \quad \text{Ecuación 85}$$

aquí h y k son constantes universales.

Por sustitución en la ecuación (81) se obtiene:

$$\frac{1}{\vartheta} = \frac{k}{h\nu} \log\left(1 + \frac{h\nu}{U}\right) \quad \text{Ecuación 86}$$

$$U = \frac{h\nu}{e^{\frac{k\vartheta}{h\nu}} - 1}$$

y de la ecuación (79) se sigue la ley de distribución de energía buscada por:

$$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{k\vartheta}{h\nu}} - 1} \quad \text{Ecuación 87}$$

o introduciendo las sustituciones, en términos de longitud de onda ν en lugar de la frecuencia:

$$E = \frac{8\pi ch}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{ck\vartheta}{h\lambda}} - 1} \quad \text{Ecuación 88}$$

Planeo derivar en otra parte las expresiones para la intensidad y entropía de radiación progresando en un medio diatérmico, así como el teorema de la aumento de la entropía total en procesos de radiación no estacionarios.

Anexo 2

Para este anexo se realiza la traducción original de documento hecho por Albert Einstein titulado “*Sobre un punto de vista heurístico sobre la creación y transformación de la luz*” (Einstein, 1905), el cual determina el concepto y formalización sobre el cuanto de energía.

Sobre un punto de vista heurístico sobre la creación y transformación de la luz

Existe una profunda diferencia formal entre las ideas teóricas que los físicos se han formado sobre los gases y otros cuerpos ponderables y la teoría de Maxwell de los procesos electromagnéticos en el llamado espacio vacío, es decir, para considerar el estado de un cuerpo como completamente determinado por las posiciones y velocidades de un número muy grande pero finito de átomos y electrones, usamos funciones espaciales continuas para el estado determinativo de un espacio, de modo que un número finito de tamaños no se debe considerarse suficiente para definir completamente el estado electromagnético de una habitación. Según la teoría de Maxwell, en todos los fenómenos puramente electromagnéticos, incluida la luz, la energía debe entenderse como una función espacial continua, mientras que la energía de un cuerpo ponderable, según la visión actual de los físicos, debe representarse como una suma que se extiende sobre los átomos y electrones. La energía de un cuerpo ponderable no puede descomponerse en cualquier número de partes pequeñas, mientras que la energía de un haz de luz emitida por una fuente de luz puntual, de acuerdo con la teoría de Maxwell (o más generalmente de acuerdo con cualquier teoría de la ondulación) de la luz, se extiende sobre un volumen cada vez mayor -continuamente-distribuido.

La teoría de la ondulación de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, ha demostrado ser excelente para la representación de fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las observaciones ópticas se refieren a valores medios a lo largo del tiempo, pero no a valores instantáneos, y a pesar de la completa confirmación de la teoría de difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc.

Es concebible que la teoría de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, lleve a contradicciones con la experiencia si se aplica a los fenómenos de producción y transformación de la luz.

De hecho, me parece que las observaciones sobre la "radiación negra", la fotoluminiscencia, la generación de rayos catódicos por la luz ultravioleta y otros grupos de fenómenos relacionados con la generación o transformación de la luz parecen más comprensibles si se asume que la energía de la luz se distribuye discontinuamente en el espacio. De acuerdo con el supuesto que se considerará aquí, cuando un haz de luz que emana de un punto se dispersa, la energía no se distribuye continuamente en espacios cada vez más grandes, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía ubicados en puntos espaciales, que se mueven sin dividirse y solo se puede absorber y generar como un todo.

A continuación quiero transmitir la línea de pensamiento y citar los hechos que me han conducido por este camino, con la esperanza de que el punto de vista que se presente pueda resultar útil a algunos investigadores en sus investigaciones.

Sobre una dificultad relativa a la teoría de la "radiación negra".

Tomemos primero el punto de vista de la teoría de Maxwell y la teoría de los electrones y consideremos el siguiente caso: en un espacio encerrado por paredes completamente reflectantes hay varias moléculas de gas y electrones, que se mueven libremente y ejercen fuerzas conservadoras entre sí cuando se acercan mucho entre sí, es decir, pueden chocar entre sí como moléculas de gas de acuerdo con la teoría cinética de los gases.) Un número de electrones, estos están encadenados a puntos en el espacio que están muy separados unos de otros por fuerzas proporcionales a estos puntos, dirigidas hacia estos puntos. Estos electrones también deberían interactuar de forma conservadora con las moléculas libres y los electrones cuando estos últimos se acercan mucho a ellos. A los electrones enlazados a puntos espaciales los llamamos "resonadores"; emiten y absorben ondas electromagnéticas de un período determinado.

Según la visión actual del origen de la luz, la radiación en el espacio considerado, que se encuentra sobre la base de la teoría de Maxwell para el caso del equilibrio dinámico, debería ser idéntica a la "radiación negra", al menos de los resonadores sin tener en cuenta la frecuencia.

Por el momento ignoramos la radiación emitida y absorbida por los resonadores y preguntamos por la condición para el equilibrio dinámico correspondiente a la interacción (las colisiones) de moléculas y electrones, la fuerza media viva de un electrón resonador debe ser igual a la energía cinética media del movimiento de avance de una molécula de gas. Si descomponemos el movimiento del electrón resonador en tres movimientos vibratoriales mutuamente perpendiculares, encontramos el valor medio E de la energía de uno de estos movimientos de oscilación lineal.

$$E = \frac{R}{N} T \quad \text{Ecuación 89}$$

donde R es la constante absoluta del gas, N es el número de "moléculas reales" en un gramo equivalente y T es la temperatura absoluta. Debido a la igualdad de los valores medios temporales de la energía cinética y potencial del resonador, la energía E es $2/3$ veces tan grande como la fuerza viva de una molécula de gas monoatómica libre. Si los procesos de radiación fueran provocados por alguna causa que la energía de un resonador tuviera un valor medio temporal mayor o menor que E , las colisiones con los libres serían en nuestro caso a través de

Electrones y moléculas que conducen a una liberación de energía al gas, que difiere de cero en promedio, o una absorción de energía del gas. En el caso que estamos considerando, el equilibrio dinámico solo es posible si cada resonador tiene la energía media E .

Ahora estamos haciendo una consideración similar con respecto a la interacción de los resonadores y la radiación presente en el espacio. Para este caso, Planck derivó la condición de equilibrio dinámico 1) bajo el supuesto de que la radiación puede considerarse como el proceso más desordenado 2) imaginable. Encontró:

$$E_v = \frac{L^3}{8\pi v^2} Q_v \quad \text{Ecuación 90}$$

E_v es la energía media de un resonador con la frecuencia natural v (por componente de vibración), L la velocidad de la luz, v la frecuencia y $Q_v dv$ la energía por unidad de volumen de esa parte de la radiación cuyo número de las vibraciones se encuentran entre v y $v + dv$ mentiras.

Si la energía de radiación de la frecuencia ν no se va a reducir o aumentar continuamente como un todo, se debe aplicar

$$\frac{R}{N}T = E = E_r = \frac{L^3}{8\pi\nu^2} Q_\nu$$

Ecuación 91

$$Q_\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi\nu^2}{L^3} T$$

Esta fue la condición de la relación de equilibrio dinámico no sólo carece de concordancia con la experiencia, sino que también significa que en nuestro caso cuando no se puede hablar de una distribución específica de energía entre el éter y la materia. Cuanto más amplio sea el rango de números de oscilación de los resonadores que se elija, mayor será la energía radiante de la habitación, y obtenemos:

$$\int_0^\infty Q_\nu d\nu = \frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} T \int_0^\infty \nu^2 d\nu = \infty$$

Ecuación 92

Acerca de la determinación de Planck de los cuantos elementales.

A continuación queremos mostrar que la determinación de los cuantos elementales dada por el Sr. Planck es hasta cierto punto independiente de su teoría de la "radiación negra" es independiente hasta cierto punto.

$$Q_\nu = \frac{\alpha\nu^3}{e^{\frac{\beta\nu}{T}} - 1}$$

Ecuación 93

Donde $\alpha = 6,10 \times 10^{-56}$ y $\beta = 4,866 \times 10^{-11}$

Para valores grandes de T/ν , es decir, para longitudes de onda y densidades de radiación grandes, esta fórmula cambia al siguiente límite:

$$Q_\nu = \frac{\alpha}{\beta} \nu^2 T$$

Ecuación 94

Se puede ver que esta fórmula concuerda con la desarrollada en § 1 a partir de la teoría de Maxwell y de los electrones. Al igualar los coeficientes de ambas fórmulas se obtiene:

$$\frac{R}{N} \frac{8\pi}{L^3} = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{Ecuación 95}$$

es decir

$$N = \frac{\beta}{\alpha} \frac{8\pi R}{L^3} = 6,17 \times 10^{23} \quad \text{Ecuación 96}$$

Un átomo de hidrógeno pesa $1 / N$ gramo = $1,62 \cdot 10^{-24}$ g. Este es exactamente el valor encontrado por el Sr. Planck, que concuerda satisfactoriamente con los valores encontrados de otras formas para esta cantidad.

Por tanto, llegamos a la conclusión: cuanto mayor es la densidad de energía y la longitud de onda de una radiación, más útiles resultan los fundamentos teóricos que hemos utilizado; para longitudes de onda pequeñas y densidades de radiación pequeñas, sin embargo, fallan por completo.

A continuación, se considerará la "radiación negra" en relación con la experiencia sin tomar como base una imagen de la generación y propagación de la radiación.

Acerca de la entropía de la radiación.

La siguiente consideración se encuentra en una obra famosa de Sr. W. Wien y sólo debería encontrar un lugar aquí para completar.

Hay radiación que ocupa el volumen v . Suponemos que las propiedades perceptibles de la radiación presente están completamente determinadas si se da la densidad de radiación Q_ν para todas las frecuencias. Dado que las radiaciones de diferentes frecuencias deben considerarse separables entre sí sin ningún trabajo o suministro de calor, la entropía de la radiación se puede representar en la forma

$$S = v \int_0^{\infty} \varphi(Q, \nu) d\nu \quad \text{Ecuación 97}$$

donde φ es una función de las variables Q y v

Esta suposición es arbitraria y, por supuesto, uno se aferrará a esta suposición más simple siempre que el experimento no obligue a uno a abandonarla. φ puede reducirse a una función de una sola variable formulando la afirmación de que la compresión adiabática de la radiación entre paredes reflectantes no cambia su entropía. Sin embargo, no queremos entrar en esto, sino investigar de inmediato cómo se puede determinar la función φ a partir de la ley de radiación del cuerpo negro.

Para la "radiación negra" Q es una función de v tal que la entropía es un máximo a una energía dada,

$$\delta \int_0^{\infty} \varphi(Q, v) dv = 0 \quad \text{Ecuación 98}$$

Se deduce

$$\delta \int_0^{\infty} Q dv = 0 \quad \text{Ecuación 99}$$

que para cada elección de hacer en función de donde dQ es independiente de v .

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial Q} - \lambda \right) \delta Q dv = 0 \quad \text{Ecuación 100}$$

En el cual λ y v son independientes. En el caso de la radiación negra, $\partial \varphi / \partial Q$ es independiente de v .

La siguiente ecuación se aplica al aumento de temperatura de la radiación negra de volumen $v = 1$ por dT :

$$dS = \int_{v=0}^{v=\infty} \frac{\partial \varphi}{\partial Q} dQ dv \quad \text{Ecuación 101}$$

O, allí $\partial \varphi / \partial Q$ desde v y es independiente de

$$dS = \frac{\partial \varphi}{\partial Q} dE$$

Ecuación 102

dE igual al calor suministrado y al proceso es reversible, entonces también se aplica lo siguiente:

$$dS = \frac{1}{T} dE$$

Ecuación 103

En comparación, obtenemos:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial Q} = \frac{1}{T}$$

Ecuación 104

Esta es la ley de la radiación negra. Así que puedes determinar la ley de la radiación negra a partir de la función φ y viceversa a partir de esta última la función por integración, teniendo en cuenta que φ desaparece para $Q = 0$.

Ley límite para la entropía de la radiación monocromática a baja densidad de radiación.

De las observaciones realizadas hasta ahora sobre la "radiación negra", queda claro que la ley establecida originalmente por el Sr. W. Wien para la "radiación negra" no es exactamente válida.

$$Q = \alpha v^3 e^{-\beta v/T}$$

Ecuación 105

Pero la misma se volvió muy perfecta para valores grandes. v/T . confirmado por el experimento. Basamos nuestros cálculos en esta fórmula, pero lo mantenemos en el sentido de que nuestros resultados solo son válidos dentro de ciertos límites.

De esta fórmula primero obtenemos:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\beta v} \lg \frac{Q}{\alpha v^3}$$

Ecuación 106

y luego usando la relación encontrada en el párrafo anterior:

$$\varphi(Q, v) = -\frac{Q}{\beta v} \left\{ \lg \frac{E}{v\alpha v^3 dv} - 1 \right\}$$

Ecuación
107

Sea radiación de energía E, cuya frecuencia se encuentra entre v y $v + dv$. La radiación ocupa el volumen v . La entropía de esta radiación es:

$$S = v\varphi(Q, v)dv = -\frac{E}{\beta v} \left\{ \lg \frac{E}{v\alpha v^3 dv} - 1 \right\}$$

Ecuación
108

Si nos limitamos a examinar la dependencia de la entropía del volumen ocupado por la radiación, y denotamos la entropía de la radiación por S . Entonces, si tiene el volumen v , obtenemos:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \lg\left(\frac{v_0}{v}\right)$$

Ecuación
109

esta ecuación muestra que la entropía de radiación monocromática de densidad suficientemente pequeña varía con el volumen de acuerdo con la misma ley que la entropía de un gas ideal o la de una solución diluida.

La ecuación recién encontrada será interpretada a continuación sobre la base del principio introducido en física por el Sr. Boltzmann, según el cual la entropía de un sistema es función de la probabilidad de su estado.

Investigación teórica molecular de la dependencia de la entropía de gases y soluciones diluidas del volumen.

Cuando se calcula la entropía de una manera teórica molecular, la palabra "probabilidad" se usa a menudo en un significado que no coincide con la definición de probabilidad dada en los cálculos de probabilidad. Igual probabilidad "a menudo hipotéticamente establecida en los casos en que las imágenes teóricas aplicadas son lo suficientemente definidas para dar una deducción en lugar de esa determinación hipotética" Y espero eliminar una dificultad lógica que todavía se interpone en el camino de la implementación del principio de Boltzmann, sólo se dará su formulación general y su aplicación a casos muy especiales.

Si tiene sentido, hablar de la probabilidad de un estado de un sistema, si además todo aumento de entropía puede considerarse como una transición a un estado más estado

probable, entonces la entropía S_1 de un sistema es una función de la probabilidad W_1 de sus sistemas de interacción de estado actual S_1 y S_2 al frente, entonces se pueden configurar los casos:

$$\begin{aligned} S_1 &= \varphi_1(W_1) \\ S_2 &= \varphi_2(W_2) \end{aligned} \qquad \text{Ecuación 110}$$

Si se consideran estos dos sistemas como un solo sistema de entropía S y probabilidad W , entonces:

$$S = S_1 + S_2 = \varphi(W) \qquad \text{Ecuación 111}$$

y

$$W = W_1 \cdot W_2$$

La última relación dice que los estados de los dos sistemas son eventos que son independientes entre sí. De estas ecuaciones se sigue:

$$\varphi(W_1 \cdot W_2) = \varphi_1(W_1) + \varphi_2(W_2) \qquad \text{Ecuación 112}$$

y de esto finalmente

$$\begin{aligned} \varphi_1(W_1) &= C \lg(W_1) + kons \\ \varphi_2(W_2) &= C \lg(W_2) + kons \\ \varphi_3(W) &= C \lg(W) + kons \end{aligned} \qquad \text{Ecuación 113}$$

Por lo tanto, la cantidad C es una constante universal; tiene, como se deduce de la teoría cinética de los gases, el valor R/N , donde las constantes R y N tienen el mismo significado que el anterior para sí. Si S_0 significa la entropía para un cierto estado inicial de un sistema en consideración y W la probabilidad relativa de un estado de la entropía S , entonces generalmente obtenemos:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \lg W \qquad \text{Ecuación 114}$$

Primero trate el siguiente caso especial: En un volumen v_0 , hay un número (n) de puntos móviles (por ejemplo, moléculas) a los que deben referirse nuestras consideraciones. Además de estos, puede haber cualquier número de otros puntos móviles de cualquier tipo en el espacio. Nada se presupone acerca de la ley según la cual los puntos en consideración se mueven en el espacio, excepto que en relación con este movimiento no es parte del espacio (y ninguna dirección) se distingue del otro. El número de los puntos móviles (mencionados en primer lugar) en consideración es además tan pequeño que puede ignorarse el efecto de los puntos entre sí.

El sistema considerado, que z. B. puede ser un gas ideal o una solución diluida, hay una cierta entropía S_0 , a. Del tamaño v_0 todos los n puntos móviles se mueven al volumen v sin cambiar nada más en el sistema. Este estado obviamente tiene un valor diferente de entropía (S), y ahora queremos determinar la diferencia de entropía con la ayuda del principio de Boltzmann. Pensamos en una parte del volumen v , correcto.

Preguntamos: ¿Qué tan grande es la probabilidad del estado mencionado en último lugar en relación con el original? O bien: ¿Cuál es la probabilidad de que en un momento seleccionado aleatoriamente todos los n en un volumen dado v_0 , los puntos móviles independientemente estén (coincidentemente) en el volumen v ?

Para esta probabilidad, que es una "probabilidad estadística. Obviamente se obtiene el valor:

$$W = \left(\frac{v}{v_0}\right)^n \quad \text{Ecuación 115}$$

de esto se obtiene aplicando el principio de Boltzmann:

$$S - S_0 = R \left(\frac{n}{N}\right) \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad \text{Ecuación 116}$$

Es notable que uno tenga que derivar esta ecuación, de la cual la ley de Boyle-Gay-Lussac y la ley idéntica del osmótico. Puede derivar fácilmente la presión termodinámicamente; no necesita hacer un prerrequisito sobre la ley "después de que las moléculas se muevan.

Interpretación de la expresión para la dependencia de la entropía de la radiación monocromática del volumen según el principio de Boltzmann.

Para la dependencia de la entropía de la radiación monocromática del volumen encontró la expresión:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \lg\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad \text{Ecuación 117}$$

Si se escribe esta fórmula en la forma:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \lg\left[\left(\frac{v}{v_0}\right)^{\frac{N E}{R \beta v}}\right] \quad \text{Ecuación 118}$$

Si E es la energía del sistema, se obtiene:

$$-d(E - TS) = p dv = T ds = R \frac{n}{N} \frac{dv}{v} \quad \text{Ecuación 119}$$

Entonces

$$p v = R \frac{n}{N} T \quad \text{Ecuación 120}$$

y compárelo con el general. la fórmula

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \lg W \quad \text{Ecuación 121}$$

que expresa el principio de Boltzmann, se llega a la siguiente conclusión:

Si la radiación monocromática de la frecuencia ν y la energía E está encerrada en el volumen v_0 , (por paredes reflectantes), la probabilidad es que en cualquier momento, toda la energía de radiación está en el volumen parcial v del volumen v_0 :

$$W = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{\frac{N E}{R \beta v}} \quad \text{Ecuación 122}$$

De esto concluimos más adelante: La radiación monocromática de baja densidad (dentro del rango de validez de la fórmula de radiación de Wien) se comporta en una relación termo teórica tal como si consistiera en cuantos de energía independientes del tamaño $R\beta\nu/N$.

Queremos comparar el tamaño medio de los cuantos de energía de la "radiación negra" con la fuerza viva media del movimiento del centro de gravedad de una molécula en el mismo la temperatura. Este último es $3/2 (R / N) T$, mientras que el tamaño medio del cuanto de energía se obtiene sobre la base de la fórmula de Wien:

$$\int_0^{\infty} \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}} d\nu \quad \text{Ecuación 123}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{N}{R\beta\nu} \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}} d\nu = 3 \frac{R}{N} T$$

Si ahora hay radiación monocromática (de densidad suficientemente baja) con respecto a la dependencia de la entropía del volumen se comporta como un medio discontinuo, que consiste en cuantos de energía del tamaño $R\beta\nu/N$ tiene sentido investigar si las leyes de

La creación y transformación de la luz es como si la luz consistiera en tales cuantos de energía. Trataremos esta cuestión a continuación.

Sobre la regla de Stokes.

La luz monocromática se convierte en luz de diferente frecuencia por fotoluminiscencia y, según el resultado recién obtenido, se supone que tanto la luz generadora como la generada consisten en cuantos de energía del tamaño $(R / N)\beta\nu$, donde ν es la relevante frecuencia.

Entonces, el proceso de cambio deberá interpretarse de la siguiente manera. Cada cuanto de energía generadora de frecuencia ν_1 se absorbe y da, al menos con una densidad de distribución suficientemente pequeña de los cuantos de energía generadora, por sí mismo una causa para la creación de un cuanto de luz de frecuencia ν_2 ; posiblemente con la absorción de los cuantos de luz generadores, pueden surgir al mismo tiempo cuantos de luz de las frecuencias ν_3, ν_4 , etc., así como energía de otro tipo (por ejemplo, calor). Mediar en qué tipo de procesos intermedios se produce este resultado final es irrelevante. Si la sustancia foto luminiscente no debe considerarse como una fuente constante de energía, entonces, según el principio de energía, la energía de un cuanto de energía generado no puede ser mayor que la de un cuanto de luz generadora; por lo tanto, debe aplicarse la designación:

$$\frac{R}{N}\beta\nu_2 \leq \frac{R}{N}\beta\nu_1$$

Ecuación
124

Ésta es la conocida regla de Stokes.

Debe enfatizarse que con una exposición débil, la cantidad de luz producida debe ser proporcional a la intensidad de la luz excitante bajo las mismas circunstancias, en nuestra opinión, ya que cada cuanto de energía excitante provocará un proceso elemental del tipo indicado anteriormente, independientemente de la intensidad de la luz. efecto de los otros cuantos de energía excitantes. En particular, no habrá un límite inferior para la intensidad de la luz de excitación, por debajo del cual la luz sería incapaz de tener un efecto de excitación de la luz.

Las desviaciones de la regla de Stokes son concebibles en los siguientes casos, de acuerdo con la comprensión esbozada de los fenómenos:

1. Cuando el número de cuantos de energía por unidad de volumen que se están convirtiendo al mismo tiempo es tan grande que un cuanto de energía del generado la luz recibe su energía de varios cuantos de energía generadora;
2. si la luz generadora (o generada) no tiene la misma calidad energética que la "radiación negra" del alcance de la ley de Wien, si z. B. la luz excitante es generada por un cuerpo a una temperatura tan alta que la ley de Wien ya no se aplica a la longitud de onda en cuestión.

Esta última posibilidad merece un interés particular.

Según la opinión desarrollada, no se excluye que una "radiación que no sea de Wien", incluso en gran dilución, se comporte de manera diferente desde un punto de vista energético que una "radiación negra" en el ámbito de la ley de Wien.

Sobre la producción de rayos catódicos al exponer cuerpos sólidos a la luz.

La opinión habitual de que la energía de la luz se distribuye continuamente por la habitación irradiada encuentra dificultades particularmente grandes en el intento de explicar los fenómenos fotoeléctricos, que se presentan en un trabajo pionero del Sr. Lenard.

La luz está formada por cuantos de energía con la energía $(R / N) \beta v$, la producción de rayos catódicos por la luz se puede entender de la siguiente manera. Los cuantos de energía penetran en la capa superficial del cuerpo y su energía se convierte, al menos parcialmente, en energía cinética de electrones. La idea más simple es que un cuanto de luz cede toda su energía a un solo electrón; supongamos que esto ocurre. Sin embargo, no debe descartarse que los electrones solo absorban parcialmente la energía de los cuantos de luz. Un interior del cuerpo con energía cinética

Cuando el electrón haya llegado a la superficie, habrá perdido parte de su energía cinética. También se puede suponer que todo electrón al salir del cuerpo tiene que hacer un trabajo P (característico del cuerpo) cuando sale del cuerpo. Con la mayor velocidad normal, los electrones excitados directamente en la superficie se vuelven normales para que este salga del cuerpo. .

La energía cinética de tales electrones es

$$\frac{R}{N} \beta - P \quad \text{Ecuación 125}$$

Si el cuerpo está cargado al potencial positivo Π y rodeado por conductores con potencial cero y Π es capaz de evitar que el cuerpo pierda electricidad, entonces:

$$\Pi_{\epsilon} = \frac{R}{N} \beta v - P \quad \text{Ecuación 126}$$

donde ϵ es la masa eléctrica del electrón, entonces

Ecuación
127

$$\Pi E = R\beta v - P'$$

donde E es la carga de un gramo equivalente de un ion monovalente y P' es el potencial de esta cantidad de electricidad negativa en relación con el cuerpo)1 .

Si $E = 9,6 \cdot 10^3$, entonces $\Pi \cdot 10^{-8}$ es el potencial en voltios que el cuerpo asume cuando se irradia en el vacío.

Para ver primero si la relación derivada corresponde en magnitud a la experiencia, establecemos $P' = 0$, $v = 1,03 \cdot 10^{15}$ (correspondiente al límite del espectro solar hacia el ultravioleta) y $B = 4,866 \cdot 10^{-11}$, obtenemos $\Pi \cdot 10^7 = 4,3$ voltios, que es el orden de magnitud con los resultados von Lenard está de acuerdo.

Si la fórmula derivada Correcto, entonces Π , representado en función de la frecuencia de la luz excitante en coordenadas cartesianas, debe ser una línea recta, cuya inclinación es independiente de la naturaleza de la sustancia que se examina.

Por lo que puedo ver, nuestra opinión no contradice las propiedades del efecto fotoeléctrico observado por el Sr. Lenard. Si cada cuanto de energía de la luz excitante libera su energía a los electrones independientemente de todos los demás, entonces la distribución de velocidad de los electrones, es decir. dh. la calidad de la radiación catódica generada sea independiente de la intensidad de la luz excitante; por otro lado, el número de electrones que abandonan el cuerpo será proporcional a la intensidad de la luz excitante, en igualdad de condiciones.

Deberían hacerse comentarios similares sobre los límites de validez supuestos de las regularidades antes mencionadas, como por ejemplo con respecto a las supuestas desviaciones de la regla de Stokes.

En lo anterior se supone que la energía de al menos una parte de los cuantos de energía de la luz generadora se emite siempre completamente a un solo electrón. Si (si no se hace esta suposición obvia, se obtiene la siguiente ecuación en lugar de la ecuación anterior:

$$\Pi E + P' \leq R\beta v$$

Para la luminiscencia del cátodo, que forma el proceso inverso al que se acaba de considerar, se obtiene por una consideración análoga que se llevó a cabo:

$$\Pi E + P' \geq R\beta v$$

En las sustancias examinadas por el Sr. Lenard, PE es siempre significativamente mayor que $R\beta v$, ya que el voltaje por el que deben haber pasado los rayos catódicos para poder producir luz visible en algunos casos es de varios cientos, en otros de miles de voltios). Por lo tanto, se puede suponer que la energía cinética de un electrón se usa para generar muchos cuantos de energía luminosa.

Sobre la ionización de gases por luz ultravioleta

Tendremos que asumir que cuando un gas es ionizado por luz ultravioleta, se absorbe una luz cada vez que la energía cuántica se utiliza para ionizar una molécula de gas cada una. De esto se deduce, en primer lugar, que el trabajo de ionización (es decir, el trabajo teóricamente necesario para la ionización) de una molécula no puede ser mayor que la energía de un cuanto de energía luminosa efectiva absorbida. Si J denota el trabajo de ionización (teórico) por equivalente de gramo, por lo tanto debe ser:

$$R\beta v \geq J$$

Según las mediciones de Lenard, sin embargo, la longitud de onda efectiva más grande para el aire es aproximadamente $1.9 \cdot 10^{-5}$ cm, es decir,

$$R\beta v = 6,4 \cdot 10^{12} \text{ Erg} \geq J$$

También se puede obtener un límite superior para el trabajo de ionización a partir de los voltajes de ionización en gases diluidos. Según J. Stark 1') el voltaje de ionización más bajo

medido (en ánodos de platino) para el aire es de aproximadamente 10 voltios). El límite superior para J es $9,6 \cdot 10^{12}$, que es casi idéntico al que se acaba de encontrar. También hay otra consecuencia, cuyo examen experimental me parece de gran importancia. Si cada cuanto de energía luminosa absorbida ioniza una molécula, debe existir la relación entre la cantidad de luz L absorbida y el número j de moléculas de gramo ionizadas por la misma:

Ecuación
132

$$j = \frac{L}{R\beta v}$$

Esta relación, si nuestra concepción corresponde a la realidad, debe aplicarse a todo gas que (a la frecuencia relevante) no tiene una absorción notable que no esté acompañada de ionización.

Anexo 3

Se realiza la traducción de este documento escrito por Albert Einstein titulado “Absorción de la luz” (Einstein, 1906), ya que en el Einstein documenta sobre la solución de Max Planck sobre un caso específico a su solución de cuanto.

Absorción de la Luz

En un artículo publicado el año pasado, mostré que la teoría de la electricidad de Maxwell junto con la teoría de los electrones conduce a resultados que contradicen la experiencia de la radiación del cuerpo negro. En una de las formas descritas allí, me llevaron a la opinión de que la luz de la frecuencia ν solo puede ser absorbida y emitida en cuantos de energía $(R / N) B\nu$, donde R es la constante absoluta de la ecuación del gas aplicada a la molécula de gramo, N el número de moléculas reales en una molécula de gramo, B el coeficiente exponencial de la fórmula de radiación de Wien (o Planck) y ν la frecuencia de la luz en cuestión. Esta relación se desarrolló para un rango que corresponde al rango de validez de la fórmula de radiación de Wien. En ese momento me pareció que la teoría de la radiación de Planck era en cierto modo una contraparte de mi trabajo. Sin embargo, nuevas consideraciones, que se dan en el

§ 1 de este trabajo, me mostraron que la base teórica sobre la que descansa la teoría de la radiación del Sr. Planck difiere de la base que resultaría de la teoría de Maxwell y la teoría de

los electrones, y precisamente porque la teoría de Planck implícitamente hace uso de la hipótesis cuántica de luz que acabamos de mencionar. En el

§ 2 del presente trabajo, se deriva una relación entre el efecto voltaico y la dispersión luz-eléctrica utilizando la hipótesis cuántica de la luz.

Teoría de la radiación de Planck y los cuantos de luz.

En el § 1 de mi trabajo citado anteriormente, he demostrado que la teoría molecular del calor junto con la teoría de la electricidad de Maxwell y la teoría de los electrones conducen a la fórmula para una radiación del cuerpo negro, que contradice la experiencia: (1)

$$Q_v = \frac{R}{N} \frac{8\pi v^2}{L^3} T$$

*Ecuación
133*

Aquí, Q significa la densidad de radiación a temperatura T, cuya frecuencia está entre v y v+1. ¿De dónde viene que el Sr. Planck no llegó a la misma fórmula sino a la expresión (2)

$$Q_v = \frac{\alpha v^3}{e^{\frac{\beta v}{T}} - 1}$$

*Ecuación
134*

Señor. Planck dedujo ') que la energía media E, de un resonador de frecuencia natural v, que se encuentra en un espacio lleno de radiación desordenada, viene dada por la ecuación (3)

$$E = \frac{L^3}{8\pi v^2} Q_v$$

*Ecuación
135*

El problema de la radiación del cuerpo negro se redujo así a la tarea de determinar E en función de la temperatura. Resuelto, si es posible calcular la entropía de un gran número de resonadores de la misma naturaleza, que se encuentran en equilibrio dinámico, interactúan entre sí y tienen la frecuencia natural v.

Pensamos en los resonadores como iones que pueden realizar oscilaciones sinusoidales rectas alrededor de una posición de equilibrio. Al calcular esta entropía, el hecho de que los iones

tengan cargas eléctricas es irrelevante; tenemos que entender estos iones simplemente como puntos de masa (átomos) cuyo estado instantáneo está determinado por su desviación instantánea r . La última tarea, sin embargo, depende de la posición de equilibrio y

Teoría de generación y absorción de luz.

Está determinado por su velocidad instantánea $dx/dt = \xi$.

Para que la distribución de los estados de estos resonadores se determine de manera única en el equilibrio termodinámico, se debe suponer que, además de los resonadores, hay moléculas que se mueven libremente en un número pequeño, que, debido a que chocan con los iones, transfieren energía desde resonador a resonador puede transferir; no tendremos en cuenta estas últimas moléculas al calcular la entropía.

Podríamos determinar E , en función de la temperatura a partir de la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann y así llegaríamos a la fórmula de radiación inválida (1). Uno es conducido al camino tomado por el Sr. Planck de la siguiente manera.

Sean p_1, \dots, p_n . variables de estado apropiadamente elegidas) que determinan completamente el estado de un sistema físico (por ejemplo, en nuestro caso las cantidades r y todos los resonadores). La entropía S de este sistema a la temperatura absoluta T está representada por la ecuación:

$$(4) S = \frac{H}{T} + \frac{R}{N} \lg \int e^{-\frac{N}{RT} H} dp_1 \dots dp_n \quad \text{Ecuación 136}$$

donde H es la energía del sistema a la temperatura T , H es la energía en función de $p_1 \dots p_n$, ., pag. medias, y la integral sobre todas las combinaciones posibles de valores de $p_1 \dots p_n$. Se ampliará.

Si el sistema consta de un gran número de estructuras moleculares, y solo en este caso la fórmula tiene significado y validez, entonces solo esas combinaciones de valores de p_1, \dots, p_n contribuyen notablemente al valor de la integral que ocurre en S , el H de los cuales tiene muy pocas desviaciones de H .)

Si se tiene esto en cuenta, se puede ver fácilmente que lo siguiente puede reducirse a lo insignificante:

$$S = \frac{R}{N} \lg \int_H^{H+\Delta H} dp_1 \dots dp_n$$

Ecuación
137

donde ΔH se elige por ser muy pequeño, pero tan grande que $R \lg(\Delta H) / N$ es una cantidad insignificante. Entonces, S es independiente del tamaño de ΔH .

Si ahora insertamos las variables x_α y ξ_α de los resonadores en lugar de $dp, \dots dp$, en la ecuación y tenemos en cuenta que la ecuación se cumple para el resonador

$$\int_{E_\alpha}^{E_\alpha+dE_\alpha} dx_\alpha d\xi_\alpha = \text{Constante } dE_\alpha$$

Ecuación
138

Tiene (dado que E es una función cuadrática y homogénea de x_α y ξ_α), se obtiene la expresión para

$$(5) S = \frac{R}{N} \lg W$$

Ecuación
139

Donde se establece

$$(5a) W = \int_H^{H+\Delta H} dE_1 \dots dE_n$$

Ecuación
140

Si calculara S de acuerdo con esta fórmula, volvería a la fórmula de radiación no válida (1).

Pero se llega a la fórmula de Planck; asumiendo que la energía E_α de un resonador no puede asumir ningún valor arbitrario, sino sólo valores que son múltiplos integrales de e , donde

$$\varepsilon = \frac{R}{N} \beta v$$

Ecuación
141

Si coloca $\Delta H = \varepsilon$, puede ver inmediatamente en la ecuación (5 a) que W, excepto por un factor sin importancia, pasa a la cantidad que Hr. Planck, número de iones complejos.

Por lo tanto, debemos considerar el siguiente teorema como la base de la teoría de la radiación de Planck.

La energía de un resonador elemental sólo puede asumir valores que son múltiplos integrales de $(\frac{R}{N})\beta v$; la energía de un resonador cambia abruptamente por absorción y emisión, es decir, por un múltiplo integral de $(\frac{R}{N})\beta v$.

Teoría de la generación y absorción de luz.

Este supuesto también involucra un segundo, en el sentido de que contradice la base teórica a partir de la cual se desarrolló la ecuación (3). Si la energía de un resonador solo puede cambiar a pasos agigantados, la teoría habitual de la electricidad no se puede utilizar para determinar la energía promedio de un resonador ubicado en una sala de radiación, ya que no conoce ningún valor de energía excelente para un resonador. .

La teoría de Planck se basa en el supuesto: aunque la teoría de Maxwell no se puede aplicar a resonadores elementales, la energía media de un resonador elemental ubicado en un espacio de radiación es igual a la calculada utilizando la teoría de la electricidad de Maxwell.

El último teorema sería plausible sin más preámbulos si $\varepsilon = (\frac{R}{N})\beta v$ fuera pequeño en comparación con la energía media E, de un resonador en todas las partes del espectro que se consideran para la observación; pero este no es de ninguna manera el caso. La fórmula de radiación es $e^{\frac{\beta v}{T}}$ mayor que 1. Ahora es fácil demostrar que, según la teoría de la radiación de Planck, $\frac{E v}{\varepsilon}$ tiene el valor $e^{-\beta v/T}$ dentro del rango de validez de la fórmula de radiación de Wien; Por tanto, E, es mucho más pequeño que e. Entonces, solo hay unos pocos resonadores con un valor de energía distinto de cero. Dentro del rango de validez de Wien Las consideraciones anteriores, en mi opinión, de ninguna manera refutan la teoría de la radiación de Planck; más bien, parecen mostrarme que el Sr. Planck introdujo un nuevo elemento hipotético, la hipótesis cuántica de luz, en la física en su teoría de la radiación.

Una relación cuantitativa esperada entre la dispersión fotoeléctrica y el efecto voltaico.

Si se ordenan los metales en fila según su sensibilidad fotoeléctrica, se obtiene, como es bien sabido, la serie voltaica, por lo que los metales son más sensibles a la luz cuanto más cerca están del extremo electropositivo de la serie.

Se comprende este hecho hasta cierto punto únicamente sobre la base del supuesto de que las fuerzas que producen las capas dobles efectivas, que no se investigan aquí, no se encuentran en la superficie de contacto entre metal y metal, sino en la superficie de contacto entre metal y gas.

Esas fuerzas pueden crear una doble capa eléctrica en la superficie de una pieza de metal M adyacente a un gas, que corresponde a una diferencia de potencial V entre el metal y el gas, calculada positivamente si el metal tiene el potencial más alto.

Sean, V_1 y V_2 , las diferencias de voltaje entre dos metales M_1 y M_2 , en el caso de equilibrio electrostático, si los metales están aislados entre sí. Si los dos metales se ponen en contacto, se altera el equilibrio eléctrico y se produce una equalización de voltaje completa entre los metales. Se superponen capas simples sobre las capas dobles mencionadas anteriormente en las interfaces metal-gas; esto corresponde a un campo electrostático en el espacio aéreo, cuya integral de línea es igual a la diferencia de volta.

Si llamamos V_{11} o V_{12} los potenciales eléctricos en puntos del espacio de gas, que están inmediatamente adyacentes a los metales en contacto, y V' es el potencial dentro de los metales, entonces

$$\begin{aligned} V' - V_{11} &= V_1 && \text{Ecuación} \\ & && 142 \\ V' - V_{12} &= V_2 \end{aligned}$$

Es decir

$$V_{12} - V_{11} = V_1 - V_2 \quad \text{Ecuación 143}$$

La electrostática y la diferencia de voltaje medible es numéricamente igual a la diferencia en los potenciales que asumen los metales en el gas si están aislados unos de otros. Si el gas está

ionizado, se produce una migración de los iones, provocada por las fuerzas eléctricas allí presentes, en el espacio del gas, a la cual la migración en los metales corresponde a una corriente que en el punto de contacto de los metales

Teoría de la generación y absorción de luz.

Se dirige desde el metal con un V más grande (electropositivo más débil) al metal con una V más pequeña (más electropositivo).

Ahora hay un metal M aislado en un gas, su diferencia de potencial con el gas, correspondiente a la doble capa, es V . Para transportar la unidad de electricidad negativa del metal al gas, se debe realizar un trabajo numéricamente igual al potencial V . El mayor V , es decir dh . Cuanto menos electropositivo es el metal, más energía se requiere para la dispersión fotoeléctrica, menos fotoeléctricamente sensible será el metal.

Hasta ahora uno pasa por alto los hechos sin hacer suposiciones sobre la naturaleza de la dispersión fotoeléctrica. La hipótesis cuántica de luz también proporciona una relación cuantitativa entre el efecto voltaico y la dispersión fotoeléctrica. Esto se debe a que al menos la energía V_e debe suministrarse a un cuanto elemental negativo (cargas) para moverlo del metal al gas. Un tipo de luz solo podrá eliminar la electricidad negativa del metal si el "cuanto de luz" del tipo de luz en cuestión tiene al menos el valor V_e . Entonces obtenemos:

$$V_e \leq \frac{R}{N} \beta v$$

Ecuación 144

$$V \leq \frac{R}{A} \beta v$$

donde A es la carga en una molécula gramo de un ion monovalente.

Si ahora asumimos que algunos de los electrones absorbentes son capaces de dejar el metal tan pronto como la energía de los cuantos de luz excede V_e) es muy plausible - obtenemos - qué suposición

$$V = \frac{R}{A} \beta v$$

Ecuación 145

donde v es la frecuencia fotoeléctricamente efectiva más pequeña indicada. Si v_1 y v_2 , son las frecuencias de luz más pequeñas que actúan sobre los metales M1 y M2, entonces para la pila voltaica

Teoría de la generación y absorción de luz.

Diferencia de voltaje V_{12} , de los dos metales se aplica la ecuación:

$$-V_{12} = V_1 - V_2 = \frac{R}{A} \beta (v_1 - v_2) \quad \text{Ecuación 146}$$

o, si V , se mide en voltios:

$$V_{12} = 4,2 \cdot 10^{-15} (v_2 - v_1) \quad \text{Ecuación 147}$$

Esta fórmula contiene la siguiente frase, que generalmente es válida en cualquier caso: cuanto más electropositivo es un metal, menor es la frecuencia de luz efectiva más baja para el metal en cuestión. Sería de gran interés saber si la fórmula también debe considerarse como una expresión de los hechos en una relación cuantitativa.