



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

El Radiómetro de Crookes. ¿Cuál es
la teoría más aceptada sobre su
funcionamiento?

Tesis Presentada al

Colegio de Física

como requisito para la obtención del grado de

Licenciado en Física

por

Ceciibet Mendoza Rodríguez

asesorado por

Dra. Olga Leticia Fuchs Gómez

Dr. Carlos Ignacio Robledo Sánchez

Puebla, Pue.

Diciembre 2014

El Radiómetro de Crookes.

¿Cuál es la teoría más aceptada sobre su funcionamiento?

Tesis

Dra. Olga Leticia

Fuchs Gómez

Dr. Carlos Ignacio

Robledo Sánchez



Título: El Radiómetro de Crookes. ¿Cuál es la teoría mas aceptada sobre su funcionamiento?

Estudiante: CECIBET MENDOZA RODRÍGUEZ

COMITÉ

M.C. Cruz Reyes Gregorio
Rogelio
Presidente

Dr. Rojas Rodríguez
Fernando
Secretario

Dr. Guerrero Sánchez
Wuiyebaldo Fermín
Vocal

M.C Martínez Garcilazo
Pablo
Suplente

Dr. Robledo Sánchez
Carlos Ignacio
Coasesor

Dra. Fuchs Gómez Olga
Leticia
Asesor

A mi familia y amigos.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que han estado a mi lado en esta nada fácil pero satisfactoria trayectoria, tanto de mi vida como de mis años universitarios.

En particular a mis padres, *José Manuel Mendoza Rojas* y *Alma Victoria Rodríguez Castillo*, por darme siempre su apoyo incondicional en todos los aspectos. Por enseñarme buenos principios y ser mejor persona cada día, así como a mis hermanas *Alma Guadalupe* y *Adriana*, por apoyarme siempre a alcanzar mis metas y brindarme su amor y cariño en los ratos buenos y malos de mi vida.

También quiero agradecer a mis tios *María del Rosario* y *Luis Enrique* por el apoyo que me brindaron en mi carrera y a mis primos *Paola*, *Enrique* y *Daniela* por su cariño y amistad.

De la misma forma a la familia *De Lima Hernández* por todo el apoyo que me brindaron sin interés alguno, y demostrarme su cariño siempre.

Un agradecimiento singular a la *Dra. Olga Leticia Fuchs Gómez* por su amistad y al *Dr. Carlos Ignacio Robledo Sánchez* por su ayuda y tiempo, así como a la vez a ambos por su apoyo en la elaboración de esta tesis, también agradezco a *M.C. Cruz Reyes Gregorio Rogelio*, *Dr. Rojas Rodríguez Fernando*, *Dr. Guerrero Sánchez Wuiyebaldo Fermín*, *M.C Martínez Garcilazo Pablo* por sus observaciones y comentarios hechos en este trabajo de tesis, y a su vez por su amistad.

Gracias a todos mis amigos, ya que sin ellos esta trayectoria no hubiera tenido todos los momentos felices, que me ayudan a recordar esta increíble etapa de mi vida.

Por último me gustaría también agradecer en particular a *Roberto de Lima Hernández* mi mejor amigo, que estuvo cada día de esta etapa, siempre apoyandome, ayudandome a ser mejor cada día y nunca dejandome vencer ante los momentos difíciles. Gracias por siempre estar a mi lado y por tu paciencia.

CECIBET MENDOZA RODRIGUEZ
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Puebla, Pue, 12 de Diciembre de 2014

Índice general

	1
Objetivos	3
Introducción	5
1. Fundamentos Teóricos: Teorías relacionadas con el funcionamiento del Radiómetro de Crookes	7
1.1. Sir. William Crookes (Presión de radiación)	8
1.1.1. Presión de radiación	8
1.2. Arthur Schuster (Gas residual)	8
1.3. Osborne Reynolds y James Clerk Maxwell (Transpiración térmica)	9
1.3.1. Transpiración térmica	9
1.4. Pyotr Lébedev	9
1.5. Martin Knudsen	10
1.6. Wilhem Westphal	10
1.7. Albert Einstein	10
1.8. Draper	11
1.9. Straub, Brenner y Durst	11
2. Aplicaciones y experimentos cuyo objetivo es conocer el funcionamiento del radiómetro	13
3. Exploración sobre el funcionamiento del radiómetro a los alumnos y profesores de la FCFM de la BUAP	17
4. Experimento basado en el comportamiento del radiómetro en relación con sus placas.	23
4.1. Arreglo Experimental	23
4.2. Resultados	26
5. Conclusiones	29
5.1. Trabajo a Futuro	29

Resumen

La tesis recopila información acerca del Radiómetro de Crookes, un dispositivo inventado por el químico inglés Sir William Crookes en 1873. El objetivo fue realizar una investigación histórica acerca del dispositivo, desde como surgió hasta la controversia de su funcionamiento. Se muestra la explicación del funcionamiento del radiómetro en los siglos XVII, XIX, XX y hasta nuestros días por científicos reconocidos y se incluyeron las aportaciones de alumnos y profesores de la FCFM de la BUAP que dieron su opinión en base al conocimiento que han adquirido hasta la fecha.

Así mismo, se realizó un experimento con el radiómetro que nos ayudó a entender más acerca del funcionamiento del aparato, y el cual también fue importante para observar que su funcionamiento puede ser explicado con efectos termodinámicos.

La tesis pretende demostrar la importancia de que el alumno conozca las bases históricas de conceptos y dispositivos científicos de la física, para así poder comprender el surgimiento de muchas teorías y lograr un aprendizaje más significativo.

Objetivos

Objetivo general

Recopilar información acerca del conocimiento que tenían del *Radiómetro de Crookes* profesores y estudiantes en la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas (FCFM) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Recopilar las diferentes teorías en torno al funcionamiento del radiómetro, y mostrar experimentalmente que el movimiento dentro de éste se puede deber a un efecto termodinámico. Recalcar la importancia que tiene conocer el surgimiento de las distintas teorías a lo largo de la historia de la física, esto con el fin de que el alumno tenga un aprendizaje significativo.

Objetivos específicos

- Hacer una investigación histórica de la explicación y las diversas teorías que han existido del radiómetro durante los siglos XIX, XX y XXI.
- Conocer las aplicaciones que se le ha dado al Radiómetro de Crookes y los experimentos que se han llevado a cabo para explicar su funcionamiento.
- Hacer una exploración sobre el conocimiento que tienen los profesores y alumnos de la FCFM de la BUAP sobre el radiómetro.
- Obsevar que hasta ahora no se tiene una teoría completamente aprobada del funcionamiento del radiómetro, pero que sí existe una teoría aceptada para ello.
- Hacer un experimento el cual muestre que la rotación del radiómetro se debe a un efecto térmico.
- Mostrar que con didácticas, como lo es la realización de experimentos, nos ayuda a propiciar la reflexión y a su vez la adquisición de conocimiento teórico en los estudiantes de física y lo cual se puede extrapolar a estudiantes de otras áreas.

Introducción

Tradicionalmente, dentro de los cursos impartidos en la licenciatura de Física y Física aplicada, no se da la importancia a las bases históricas o filosóficas que han fundamentado los temas de física bajo estudio, dependiendo del curso en cuestión. Como consecuencia, los estudiantes desconocen las dificultades que conllevan el entendimiento y deducción de un concepto y la relevancia que estos aspectos tienen para reflexionar sobre ellos y aprender a pensar como científicos, es decir, como físicos.

La historia y la filosofía de la física, y de la ciencia en general, proporcionan la posibilidad de analizar la construcción y el desarrollo de los conceptos científicos desde la perspectiva más amplia y completa posible.

El análisis histórico y filosófico pone de manifiesto el complicado proceso de conformación, transformación y desarrollo de la ciencia. Así mismo, la historia y la filosofía representan un medio importante y de gran utilidad en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la física.

Algunos aspectos importantes del estudio de la física con fundamentos histórico-filosóficos son:

- Que los estudiantes logren apreciar el estado actual del conocimiento en comparación de épocas pasadas, entendiendo que los modelos explicativos en la ciencia cambian de acuerdo al enfoque, al estado del conocimiento y también al enfoque social y filosófico del momento.
- Que el conocimiento de los hechos históricos incrementan nuestra cultura.
- Que los estudiantes tengan la posibilidad de adquirir una visión real y rigurosa de la evolución de nuestra imagen del mundo físico, el cual está en muchas ocasiones en contradicción con la imagen simplificada que se nos presenta en los libros de texto o cómo se nos es planteado en una clase.
- Y por último pero no menos importante, este enfoque ayuda a motivar al estudiante a que también esté interesado en los aspectos históricos y filosóficos de las ciencias.

El estudio de la física bajo estas condiciones propiciaría en el estudiante una comprensión más amplia sobre el desarrollo científico y la evolución de la ciencia poniendo una base sólida en las estructuras mentales que construye para lograr el entendimiento de esta ciencia.

Por estas razones nos propusimos hacer un estudio histórico sobre el Radiómetro de Crookes. En el primer capítulo se expone la creación y diseño del radiómetro, además de las explicaciones que se han dado de su funcionamiento y cómo éstas han cambiado dependiendo de la época y del desarrollo de las diferentes teorías físicas. Asimismo se observa que estas explicaciones cambian de acuerdo al enfoque y a la especialidad del físico que las desarrolla.

En el capítulo dos, se realizó una investigación acerca de las diversas aplicaciones que se le han dado al radiómetro para así determinar la importancia de éste. También se plantearon algunos

experimentos que se llevaron a cabo con el fin de saber cuál era el funcionamiento del radiómetro.

El capítulo tres, plantea las explicaciones que los profesores y alumnos de la facultad dan sobre el funcionamiento del aparato, así como también las dudas que surgieron entorno a 'el. En el último capítulo se realizó un experimento para entender más acerca del funcionamiento del radiómetro, el cual también ayudó para poder entender y reflexionar algunas de las dudas surgidas por los estudiantes de física de la facultad.

Capítulo 1

Fundamentos Teóricos: Teorías relacionadas con el funcionamiento del Radiómetro de Crookes

El radiómetro es un dispositivo diseñado por el químico inglés Sir. William Crookes en 1873, el cual fue construido cuando trataba de medir la masa molecular del talio (elemento descubierto por él mismo). Al momento de pesarlo en una balanza analítica, Crookes notó que la flotabilidad del aire reducía ligeramente el peso, por lo que se dio a la tarea de eliminar la fuente del error, construyendo una cámara de vacío para pesar sus muestras. Pero en lugar de estabilizar sus mediciones como esperaba, su arreglo en la cámara de vacío dio lugar a lecturas extrañas que fueron influenciadas por la temperatura del material que pesaba. Objetos calientes parecían ser repelidos por objetos fríos, ya que en algunos experimentos observó que un objeto ubicado en una balanza cambiaba su peso cuando se le colocaba un cuerpo caliente cerca de él. Cuando el cuerpo caliente se colocaba debajo del objeto el peso disminuía, mientras que si se colocaba por encima el peso aumentaba. Cuando estudiaba el aparato se dio cuenta que Fresnel ya había encontrado este mismo efecto en 1825. Pero cuando Crookes observó esto, alrededor de 1873, James Clerk Maxwell había postulado y predicho teóricamente la existencia de una presión ejercida por la radiación. [7]

Al observar estos cambios que estaban ligados con el vacío y los cambios de temperatura, Crookes fue que comenzó a construir el radiómetro, que típicamente consistía de cuatro brazos, los cuales sostenían en cada uno de sus extremos una placa que estaba pintada de blanco en una cara y de negro en la otra. Los cuatro brazos estaban suspendidos en una aguja y sostenidos por un eje de vidrio para disminuir lo más posible la fricción. Todo este dispositivo se encontraba en una esfera de vidrio sellada en un vacío no total. A este tipo de dispositivo le llamo *radiómetro*

Bajo ciertas incidencias de luz, existía una fuerza involucrada que era lo suficientemente grande como para mover las placas suspendidas en el eje de vidrio. Este efecto ya se conocía en Alemania y era llamado “Molino de luz”, ya que la fuerza parecía ser proporcional a la intensidad de incidencia de radiación en las placas del molino.

En 1875 Crookes publicó varios artículos al respecto en la *Royal Society*. En uno describía que su invento rotaba rápidamente alrededor de su propio eje cuando era expuesto a la luz del sol, mientras que en otros artículos detallaba las modificaciones que se realizaban en diferentes partes del radiómetro con la finalidad de estudiar su comportamiento. Es con estas modificaciones que se llega a la forma del radiómetro que actualmente se conoce, aunque cabe mencionar que Crookes finalizó esta serie de artículos sin tratar de dar una explicación congruente a sus hallazgos.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: TEORÍAS RELACIONADAS CON EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO DE CROOKES

1.1. SIR. WILLIAM CROOKES (PRESIÓN DE RADIACIÓN)



Figura 1.1: La Royal Society coleccionó los Radiómetros de Crookes.

Desde el siglo XIX, cuando se inventó el radiómetro, han habido varias teorías acerca de su funcionamiento, comenzando con la teoría un tanto errónea postulada por Crookes . A continuación se mencionarán las teorías que han sido propuestas a través del tiempo comenzando desde 1876 cuando este curioso artefacto despertó mucho interés en la comunidad científica debido a las controversias generadas sobre su funcionamiento.

1.1. Sir. William Crookes (Presión de radiación)

En 1873 cuando Crookes inventó el radiómetro, supuso que la luz ejerce una fuerza cuando choca en una superficie y pensó que ésta rebotaba en las caras blancas de las placas mientras que era absorbida en las caras negras. Sin embargo, si todo fuera pura transferencia de momento entre los fotones incidentes y las placas, se tendría que las placas girarían de manera que el lado negro fuese por delante, ya que al absorber ahí los fotones se tomaría menos cantidad de momento que en los lados blancos, donde los fotones son reflejados (rebotan). Pero Crookes se llevó una sorpresa al observar que su radiómetro giraba de manera contraria a lo previsto. El lado negro de las placas se alejaba de la luz.[17]

1.1.1. Presión de radiación

La presión de radiación esta definida de la siguiente manera: *“Es la fuerza ejercida por la onda electromagnética que incide sobre la unidad de área de una superficie.”*

La presión de radiación por la luz solar es muy pequeña (del orden de 5×10^{-6}) y por tanto difícil de detectar. La determinación experimental de la presión de radiación producida por la luz fue realizada por primera vez por Pyotr Levedev. Para ello utilizó precisamente un radiómetro. Más adelante se verán los resultados a los que llegó Levedev en cuanto al radiómetro se refiere. Las medidas tomadas se realizaron entre los años 1901 y 1903, treinta años después de que la presión de radiación fuera predicha por Maxwell.[16]

1.2. Arthur Schuster (Gas residual)

En 1876, Arthur Schuster, un joven colega de Reynolds, afirmaba que si este fenómeno fuera el efecto directo de la radiación, al suspender el radiómetro en un alambre fino, éste debía de rotar en la misma dirección en la que rotaban las placas, sin embargo, cuando llevo acabo su teoría observó que éste rotaba en dirección opuesta. De este experimento resultó fácil concluir que el gas residual en el vacío jugaba un rol crucial en el movimiento de las placas.[17]

**CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: TEORÍAS RELACIONADAS CON
EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO DE CROOKES**
1.3. OSBORNE REYNOLDS Y JAMES CLERK MAXWELL (TRANSPIRACIÓN TÉRMICA)

1.3. Osborne Reynolds y James Clerk Maxwell (Transpiración térmica)

En 1876, Osborne Reynolds sugirió que la explicación del funcionamiento del radiómetro se encontraba en los bordes de las placas en lugar de las superficies, ofreciendo una explicación cualitativa para la rotación del radiómetro basada en su teoría de la “*Transpiración Térmica*” en presencia de un gradiente térmico. Este manuscrito fue enviado a la Royal Society. [17]

1.3.1. Transpiración térmica

La teoría de la transpiración térmica está basada en un experimento en el cual Reynolds intentó observar las diferencias de presiones entre las partes del gas distintamente calentadas. Una placa porosa estaba sujeta entre dos anillos de ebonita y cerrados por discos metálicos. El gas a investigar (aire) estaba encerrado en el volumen entre estos discos metálicos y la placa porosa, un disco era refrigerado con agua corriente, y el otro disco se calentaba con vapor caliente. De este modo se creaba una diferencia de temperaturas entre los volúmenes de gas a ambos lados de la placa porosa. Con ayuda de manómetros (instrumento que mide la presión de fluidos, en recipientes cerrados) se midieron las presiones y estas mediciones mostraban que para presiones suficientemente pequeñas existía una condición de equilibrio mientras que para grandes presiones desaparecía la diferencia de presiones entre ambos volúmenes. [18]

Su explicación entonces fue que en superficies porosas, el gas fluye del lado frío al caliente, causado por una diferencia de temperatura en ambos lados de las placas. Pero las placas del radiómetro no tienen poros, entonces la explicación debe buscarse en los bordes de las placas. Si miramos las placas desde arriba, viendo solo una línea horizontal entenderemos mejor el choque de partículas. La parte inferior correspondería al lado negro y más caliente y la superior al lado blanco y más frío. Las moléculas que chocan en los bordes desde el lado caliente son en promedio más que las del lado frío (hay que entender que los conceptos de calor-frío no son más que una mayor o menor agitación de las partículas del gas, es decir, entre más caliente hay más choques) y por lo tanto el resultado final es que en los bordes tenemos una fuerza hacia el lado blanco (frío), que hace girar el molinillo. Este efecto es conocido como “*deslizamiento térmico*” ó “*Arrastre térmico*” porque arrastra las moléculas a lo largo de una superficie donde hay una variación gradual de temperatura. Reynolds detalló muy bien los reportes de estos experimentos en sus teorías de “*Impulsión*” y “*Transpiración Térmica*”, las cuales después fueron revisadas por Maxwell. [17]

Maxwell, por su lado, escribió un artículo llamado “*On stresses in rarified gases arising from inequalities in temperature*”, pero este no le llevo a una explicación razonable de las fuerzas que actúan en las placas del radiómetro. Después leyó el manuscrito de Reynolds, y Maxwell propuso así nuevas ideas en base a la variación gradual de la temperatura a lo largo de una superficie. En 1879 decidió publicar un artículo incluyendo las ideas aun inéditas de Reynolds. En este artículo, aunque mencionaba a Reynolds y le atribuía el mérito de haber descubierto el efecto, también criticaba su método y Reynolds se molestó.

1.4. Pyotr Lébedev

Piotr Lébedev como vimos fue el primero en calcular la presión de radiación y esto lo hizo por medio de un radiómetro. Él era un científico Ruso que hizo la deducción lógica de que si la presión de la luz era la responsable del giro del aparato, cuanto menos presión de aire tuviese giraría más rápido, ya que habría menos aire que lo frenase. Por lo que en 1901, con una bomba de mejor calidad extrajo más aire y notó que llegaba un punto en el que no giraba más. Al tomar las

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: TEORÍAS RELACIONADAS CON EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO DE CROOKES

1.5. MARTIN KNUDSEN

mediciones de la la presión de la luz, descubrió que era tan pequeña que era imposible que hiciese girar al molinillo de ese modo. Lo que descubrió entonces era que si en el radiómetro existía una cantidad considerable de gas éste no giraba, y por el contrario, si había poco gas sí giraba; pero si a éste se le lograba extraer casi todo el gas, el radiómetro no giraba. [18]

El interés en el radiómetro se perdió poco después y casi no hay documentos sobre este problema posterior a 1897.

1.5. Martin Knudsen

No fue sino hasta 30 años después que Martin Knudsen, un joven profesor de la universidad de Kopenhagen, comenzó a desarrollar una serie de investigaciones en gases enrarecidos: la relación entre el recorrido libre medio de las moléculas de gas, a una dimensión característica del paso del flujo, no era mas que lo que Reynolds había postulado 30 años antes. Knudsen en parte redescubrió lo que Reynolds había llamado transpiración térmica.[17]

1.6. Wilhem Westphal

Diez años más tarde el físico alemán Wilhelm Westphal realizó experimentos acerca de las fuerzas que actúan en las placas del radiómetro. Él descubrió que una gráfica de las fuerzas que actúan en las placas contra el logaritmo de una presión absoluta, usualmente muestra una curva simétrica a la línea vertical que pasa a través de la presión de una fuerza máxima. Lo cual fue interesante ya que los datos de la transpiración térmica de Reynolds muestran el mismo comportamiento.[17]

1.7. Albert Einstein

En 1924, Albert Einstein presentó una teoría simple que relacionaba la fuerza ejercida sobre las placas y su perímetro. Esta dependencia del borde de la fuerza de la placa ha encontrado una confirmación parcial en trabajos experimentales donde se halló que la fuerza depende de su perímetro, aunque no como lo predijo Einstein. La teoría del borde se ha convertido en una teoría ampliamente aceptada. La dependencia inversamente proporcional de la fuerza radiométrica de una placa en un gradiente de temperatura, derivada por Einstein, que combina ambos regímenes, es decir, alta y baja presión, y lo cual se puede expresar como:

$$F = 1/(a/p)(p/b) \tag{1.1}$$

Donde: p indica la presión
 a y b indican la baja y alta presión

Esta expresión refleja el hecho de que la fuerza radiométrica tiene un máximo a una cierta presión que depende del gas y de las propiedades geométricas. A bajas presiones, el área molecular libre de fuerzas es la dominante y la fuerza aumenta con la presión. En cambio, a altas presiones, la fuerza de choque en el borde llega a ser dominante y la fuerza disminuye a medida que la presión aumenta.

Existe un gradiente de temperatura en la superficie si llegan a surgir tensiones tangenciales. Estas tensiones son el resultado de la transpiración térmica, con el gas que se mueve sobre la superficie desde el lado frío hacia el lado caliente. Con esta explicación, la fuerza principal que contribuye a la rotación de las placas es la fuerza creada cerca de los bordes (Una zona con las dimensiones de recorrido libre medio λ de acuerdo con Einstein). [19]

1.8. Draper

En la década que abarca finales de 1960 y 1970, Draper presentó un resumen de las fuerzas que actúan en el movimiento de las placas y los mecanismos de aceptación en la producción de fuerzas. Su trabajo se resume de la siguiente manera: un gradiente de temperatura que existe en la superficie de la placas hace surgir fuerzas tangenciales que son el resultado de los gases de deslizamiento sobre la superficie más fría a la más caliente. Que es similar al de Einstein. [17]

1.9. Straub, Brenner y Durst

Algunos avances motivados por las observaciones del movimiento del radiómetro de Crookes comenzaron alrededor del siglo XXI, donde aparecen nuevas explicaciones al fenómeno del radiómetro, como lo fueron las llamadas “*Bombas de Knudsen*” en micro y submicro tecnologías que parecen haber dado lugar a una nueva ola de interés en este fenómeno olvidado. Es fascinante saber que actualmente algunos científicos han comenzado a desarrollar conjuntos más generalizados de ecuaciones de termofluidodinámica como aquellos conocidos como las ecuaciones de Navier-Stokes, Fourier y Fick, que fueron vistos como prácticamente sagrados durante siglos.

Howard Brenner, desde 2005, ha escrito un gran número de artículos interesantes relacionados con las ecuaciones de Navier-Stokes. Curiosamente él partió de fenómenos como la termoforesis, y trató de incluirlos en una teoría del continuo pero sin la condición de contorno de pared deslizante.

A pesar de que se ha ido avanzando en la explicación del funcionamiento del radiómetro, aún no hay una teoría la cual se considere como correcta. Sin embargo, la más acertada hasta el momento es la predicha por Einstein junto con lo dicho por Reynolds.

El radiómetro actualmente es visto como una curiosidad científica que hace despertar la curiosidad a cualquier persona que se le describa su funcionamiento del aparato. Y resulta interesante que un aparato a simple vista trivial, aun no tenga una explicación clara acerca de cómo es que funciona. Existen muchas aplicaciones del radiómetro que se verán en el capítulo 2. Varias de ellas asumen como cierta alguna teoría, pero eso no implica que dicha teoría sea la correcta respecto al funcionamiento del radiómetro.

Capítulo 2

Aplicaciones y experimentos cuyo objetivo es conocer el funcionamiento del radiómetro

En éste capítulo mostramos algunas de las aplicaciones del radiómetro a lo largo de los años hasta nuestros tiempos, además de los diversos experimentos que se han llevado a cabo para saber la causa de su rotación.

- En 1876, E. Frankland realizó algunos experimentos en los cuales exponía al radiómetro a diversas fuentes de luz, entre ellas la Luna. Lo que hizo fue colocar una lente muy potente de lado de la placa negra, pero nada ocurría. Explicó que con la luna el radiómetro no giraba debido a que ésta emitía muy poca potencia térmica. Después lo expuso al sol, y notó que con éste el radiómetro rotaba continuamente. Así que de estos hechos demostró que la luz no era necesaria para el movimiento del radiómetro y que éste era debido al calentamiento desigual de los lados de las placas. Él decía que las placas claras precedían a las negras y cuando las negras se enfriaban el movimiento se invertía, lo cual observando el radiómetro vemos que no sucede tal cosa.[12]
- En 1907, James Dewar conectó un condensador de carbón que hacía enfriar con hidrógeno líquido un radiómetro de Crookes lleno de gas de hidrógeno, el cual comenzaba a disminuir su intensidad y podía llevarse tan lejos que cesaba el movimiento de las placas; esto era imposible si el radiómetro estaba lleno de helio, incluso si el hidrógeno sólido estaba a 15°C , el cual se utilizaba como un baño para el condensador. Si las placas del radiómetro estaban hechas de médula, el punto de agotamiento en el que no había movimiento nunca se podía alcanzar, incluso si el hidrógeno líquido rodeaba el condensador, ya que el vapor concentrado de la luz producía hidrógeno.[3]

Para determinar la presión a la que el movimiento cesaba, puso un tubo pequeño que contenía Hg, lo selló y sumergió en el alcohol líquido a -80°C . El radiómetro lo detuvo previamente, mientras que el condensador lo mantenía en el aire líquido, permitiendo que la temperatura del alcohol se elevara a -23°C y provocando que el movimiento se reanudara.

Cuando lo probó después de 15 hrs, el movimiento se reanudó y no sufrió ninguna disminución, incluso cuando el condensador de carbón se unió con el hidrógeno líquido. Por lo tanto, el movimiento debía haber sido causado por el helio y las partículas alfas generadas a partir

CAPÍTULO 2. APLICACIONES Y EXPERIMENTOS CUYO OBJETIVO ES CONOCER EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO

de la preparación radiactiva.

- En 1917, se midieron valores de corrientes eléctricas utilizando el calor generado por el paso de la corriente por una resistencia de Nicrome, lo cual causa la desviación de las placas del radiómetro. El radiómetro se asemejaba a un electrómetro.[4]
- Para 1979, R. Coisson y E. Rancan, profesores del Instituto de Física en la Universidad de Parma, Italia, realizaron experimentos con los estudiantes para hacer estudios cuantitativos del radiómetro, haciendo mediciones para identificar la potencia de la luz. Éstos consistieron en ocupar un radiómetro, una fuente de luz y un cronómetro, y la pregunta planteada era acerca de cuál era la relación entre la velocidad angular y la intensidad de la luz. Este tipo de mediciones se reprodujeron en la tesis y se darán a conocer nuestros resultados mas adelante. Los profesores junto con los estudiantes lograron observar que la relación entre la velocidad angular y la intensidad era lineal.[10]

También concluyeron que el radiómetro tenía una desventaja, ya que era muy sensible a cualquier movimiento y debía ser calibrado un gran número de veces para realizar el experimento.

- El radiómetro también fue utilizado con un fin práctico el cual consistió en medir el tiempo de exposiciones fotográficas. Olivier L. empleó un radiómetro donde exponía las placas de modo que la luz sólo incidiera en el instrumento durante el tiempo en que la placa fotográfica estaba siendo expuesta. Al mismo tiempo registraba el número de rotaciones realizadas por el radiómetro durante la exposición fotográfica hasta que diera un buen negativo, y teniendo así el número de rotaciones, posteriormente solo contaba las rotaciones que el radiómetro hacía y cuando llegaba al número predicho, el negativo ya estaba listo. En días nublados el movimiento del radiómetro era más lento y por lo tanto el tiempo de exposición era proporcionalmente más largo; cuando el clima era soleado el movimiento era más rápido y así el tiempo de exposición era proporcionalmente más corto, así que no era muy eficaz la utilización del radiómetro.
- Smith describió un sistema basado en el radiómetro de Crookes para determinar diámetros moleculares. Suponiendo que el coeficiente de acomodación entre la molécula de gas y las placas del radiómetro es el mismo para todos los gases estudiados, los diámetros moleculares de los diferentes gases se determinan por la búsqueda de la velocidad máxima de rotación de las placas como una función de la presión. Suponiendo que la fuerza máxima se produce por la velocidad de rotación máxima, en una ecuación empírica se ha encontrado que la relación de los parámetros experimentales es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro molecular.
- Algunos investigadores continuaron buscando maneras de aprovechar el impulso de los fotones, lo que se había predicho al principio de la creación del radiómetro como lo que hacía rotar las placas, y esto lo utilizaron para generar fuerzas de rotación. La capacidad para proporcionar la fuerza rotatoria a nanoescala podría abrir una gama de aplicaciones en la física, la biología y la química, incluyendo el despliegue del ADN y ordenar sistemas nanos electromecánicos.

Liu Ming entre otros científicos demostraron que una estructura plasmónica a nanoescala, cuando se iluminaba con luz linealmente polarizada, podía generar una fuerza de rotación que era capaz de girar un microdisco de silicio que era 4,000 veces más grande en volumen. Además, podían controlar la velocidad de rotación y la dirección mediante la variación de la longitud de onda de la luz incidente para excitar diferentes modos plasmónicos.

CAPÍTULO 2. APLICACIONES Y EXPERIMENTOS CUYO OBJETIVO ES CONOCER EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO

En la tesis también se realizó un experimento, para poder así entender un poco más acerca de como es que funciona el Radiómetro de Crookes. Para poder entender el experimento realizado en la tesis, hablaremos acerca de dos conceptos importantes, ya que debido a que el radiómetro de Crookes esta estrechamente ligado con la radiación térmica, podemos lograr entender un poco más su funcionamiento hablando acerca de los experimentos realizados por John Leslie y las leyes de Kirchhoff.

Primero fue necesario conocer el dispositivo nombrado “*Cubo de Leslie*” llamado así debido a su inventor John Leslie en 1804. Éste consistía en un cubo metálico lleno de agua cuya temperatura se podía aumentar calentandolo con un mechero de alcohol. Cada una de las caras laterales del cubo estaban pintadas o tenía una textura diferente: una pintada de negro humo, otra pintada de blanco, una de aluminio bruñido y otra de aluminio mate.

Con un detector de radiación conectado a un galvanómetro, Leslie midió la intensidad de radiación emitida por cada superficie. En otros montajes se utilizaba un espejo parabólico para concentrar el flujo de calor y se empleaba un termómetro diferencial para medir la cantidad radiante de cada superficie.[14]

Lo que se encuentra experimentalmente con el cubo de Leslie calentado hasta los 90° C es que la radiación producida por la superficie pintada de negro es aproximadamente igual a la radiación emitida por la superficie pintada de blanco, bastante mayor que la emitida por la superficie metálica mate, y mucho mayor que la superficie metálica bruñida.

La conclusión que se obtiene a partir de las experiencias de Leslie era que las superficies que son buenas emisoras de la radiación térmica también la absorben bien, y las superficies que son malas emisoras también absorben poco la radiación térmica. Esta conclusión concuerda con la ley de Kirchhof relativo a estos fenómenos, la cual nos dice:

Ley de Kirchhoff:

“Cuando un conjunto de cuerpos se encuentra en equilibrio térmico los cuerpos que absorben intensamente ciertos rayos también los emitirán intensamente, y viceversa”.

Lo que nos dice es que dos cuerpos cuyas temperaturas son distintas, llegan a equilibrarse aunque se encuentren en el vacío. Lo cual se explica debido al intercambio de energía que se produce por medio de las ondas electromagnéticas. Cuando dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico, es decir, cuando cada uno de ellos tiene la misma temperatura, no significa que la radiación electromagnética se interrumpa, y así cada cuerpo absorberá en cada instante la misma cantidad de energía que él otro emita.[15]

Capítulo 3

Exploración sobre el funcionamiento del radiómetro a los alumnos y profesores de la FCFM de la BUAP

En este capítulo se describirá parte del trabajo que se realizó en la tesis y el cual consistió en la realización de entrevistas dirigidas a alumnos de la Licenciatura en Física y profesores de la Facultad de Ciencias Fisico-Matemáticas (FCFM) de la BUAP con el objetivo de saber su conocimiento sobre el Radiómetro de Crookes. La primera pregunta de cada entrevista fue: **¿Conoces el Radiómetro de Crookes?**; si la respuesta era “sí”, entonces se les realizaba una segunda pregunta la cual era: **¿Cómo crees que funcione el radiómetro?**; si en cambio, la respuesta a la primer pregunta era “no”, entonces se les describía el diseño y funcionamiento del aparato mostrando además una figura del mismo, para así posteriormente hacerles la segunda pregunta: **¿Porqué crees que gira el radiómetro?**.

La entrevista fue hecha a 200 alumnos que estudian la Licenciatura en Física, de las generaciones 2007 hasta 2013. Fueron aproximadamente el 70% del total de los alumnos que nos ayudaron dandonos sus respuestas. Como podemos observar en la Gráfica 3.1, solo alrededor de un 8% de ellos respondió que sí conocía el radiómetro, comentando además que algún maestro lo había mencionado en alguna clase.

La siguiente gráfica nos muestra el porcentaje de alumnos que conocían el radiómetro.

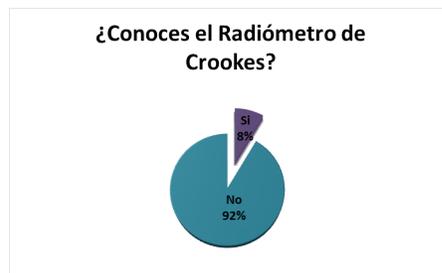


Figura 3.1: La gráfica nos muestra el porcentaje de alumnos que conocen el Radiómetro de Crookes.

CAPÍTULO 3. EXPLORACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO A LOS ALUMNOS Y PROFESORES DE LA FCFM DE LA BUAP

Una tercer pregunta era: **¿Hacia dónde crees que gira el radiómetro, la placa blanca girá precediendo a la negra o viceversa?.** En la Tabla 3.1 sólo ponemos las respuestas de quien dijo cómo es que realmente gira el radiómetro.

Las entrevistas se realizaron personalmente y las respuestas dadas eran grabadas, para así tener un registro de todas las respuestas que los alumnos nos dieron. En la Tabla 3.1 sólo se dan a conocer aquellas respuestas que con mas frecuencia comentaron los alumnos, para así no ser redundante, ya que la mayoría contestaba de manera parecida pero con algunas palabras diferentes.

Comportamiento dual de la luz	Radiación electromagnética	Termodinámica	Otros
(No) Los fotones tienen masa, y cuando golpean las placas del radiómetro, éstos hacen que gire primero golpeando las placas negras.	(No) El movimiento es causado por la radiación solar, porque ya sea que éste en la sombra o en el sol, sigue percibiendo ondas de luz.	(Si) Absorbe radiación o calor, ya que el negro siempre absorbe y por eso es que gira.	(Si) Se mueve porque las caras negras absorben la energía del sol y cuando se pasa a la sombra se detiene porque no hay nada que lo mueva.
(No) El sol emite ondas que son las que hacen girar al Radiómetro.	(No) Depende de la radiación y de la teoría del cuerpo negro, ya que el lado de la placa oscura absorberá toda la radiación.	(No) Como está en el sol comenzará a calentarse y una energía (desconocida) es lo que hace que gire, esto está encaminado a la Termodinámica.	(No) Cuando las placas están expuestas al sol se cargan y cuando están en la sombra se descargan y así se produce el movimiento.
(Si) Al poner el radiómetro en la luz, ésta incide en las placas negras y la luz es absorbida y comienzan a girar, mientras las blancas realizarán una reflexión.	(No) Funciona con la radiación solar, ya que se mueve con el sol y en la sombra se detiene, debido a que no se interpone ninguna radiación.	(No) La energía que llega al radiómetro es energía térmica y la suma total de las energías es un sistema conservativo, si hay energía térmica, entonces debe haber energía cinética, debe haber un intercambio de energías.	(No) La luz que llega a la parte negra es absorbida y se convierte en energía en movimiento, los fotones llevan algún tipo de momento y lo transmiten al material y por esto gira. Lo blanco gira por delante.
(No) Los fotones mueven al radiómetro, la energía solar al ser precisamente energía, se debe transformar y es por esto que se provoca el movimiento.	(No) La causa es la radiación que va a absorber la parte oscura.	(No) Como el radiómetro está en un vidrio, éste absorbe el calor y comienza a dilatarse y a vibrar, y esto provoca el movimiento de las placas y en la sombra se contrae y ya no hay vibraciones y por lo tanto no se mueve.	(No) Ocurre por la radiación de cuerpo negro, a la placa negra y clara les tocará cierto porcentaje de sol, como la luz blanca es la superposición de todas las ondas electromagnéticas entonces en las placas blancas se estará expulsando energía y en la negra absorbiéndola, y así se generará un empuje.
(Si) Ya que son de dos colores las placas en uno inciden los fotones (placa negra) y por esta razón se mueve.	(No) Funciona porque absorbe la radiación del sol del lado negro, ya que éste siempre absorbe las ondas de luz y por eso se mueve. OBSERVACION: Si los dos lados de las placas fueran del mismo color el aparato no giraría.	(No) El calor excita a los electrones, entonces se empieza a crear movimiento dentro del vacío.	
	Radiómetro suena a radiación por lo tanto éste gira debido a la radiación del sol, la placa oscura absorbe los fotones y libera energía, la cual hará que gire.		

Tabla 3.1: Respuestas acerca del funcionamiento del Radiómetro de Crookes hechas a los alumnos de la FCFM.

CAPÍTULO 3. EXPLORACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO A LOS ALUMNOS Y PROFESORES DE LA FCFM DE LA BUAP

Como podemos ver en la Tabla 3.1 dividimos en cuatro categorías las respuestas de los alumnos. En primer lugar, ponemos los que opinan que el radiómetro funciona debido al comportamiento dual de la luz; esto lo decían ya que la luz llega a las placas del radiómetro en forma de fotón, pero también había alumnos que comentaban que era en forma de onda, y una vez en la placas ésto(a)s chocaban y ejercían una fuerza que hacía mover a las placas debido a la diferencia de color que hay entre ellas. La segunda respuesta fue que estaba involucrada la radiación electromagnética, la mayoría asociaba radiómetro con radiación y por este motivo creían que ésta era la causa del movimiento; muchos otros asociaban la radiación solar y el hecho de que una de las placas fuera de color negro, la cual absorbía más calor que la blanca y después la negra liberaba el calor absorbido y esto generaba el movimiento del radiómetro. La tercera respuesta fue acerca de la Termodinámica, en donde los alumnos planteaban su hipótesis acerca del funcionamiento del radiómetro respecto a que las placas al ser de un color oscuro y claro, y al no haber un vacío total, esto hacía que las placas negras absorbieran el calor y las blancas lo reflejaran; también había respuestas que decían que lo que se calentaba era el envase de vidrio y éste comenzaba a vibrar haciendo así que el radiómetro girara. La parte de “otros” es donde se colocaron las respuestas que, aunque iban relacionadas con las anteriores, agregaban algo distinto, como por ejemplo, que la causa era a radiación de cuerpo negro o que las placas se cargaban y descargaban.

La Figura 3.2 nos muestra el porcentaje de las respuestas que dieron los alumnos entrevistados.

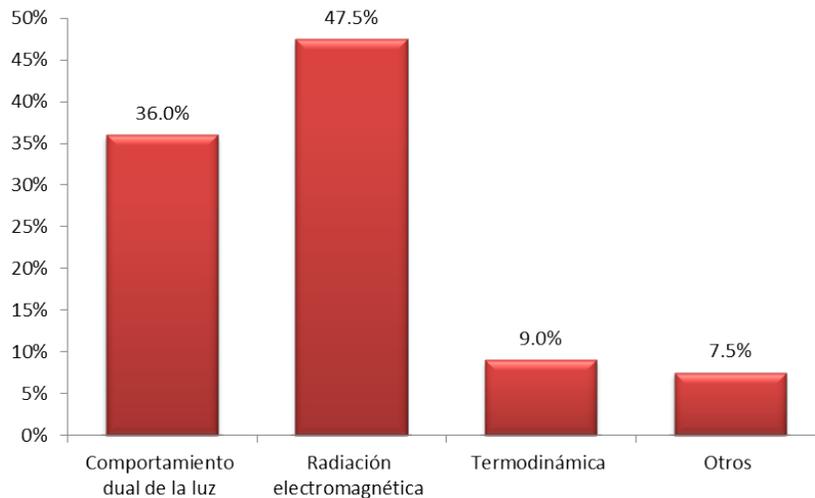


Figura 3.2: La gráfica nos muestra el porcentaje de alumnos y sus respuestas en base a la clasificación otorgada.

Algo interesante es que a los alumnos les despertó curiosidad por conocerlo y a su vez les generó dudas acerca de su funcionamiento, incluso aquéllos que contestaron que sí lo conocían, ya que solo se los habían mencionado en alguna clase, pero los estudiantes no habían visto antes el radiómetro.

CAPÍTULO 3. EXPLORACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO A LOS ALUMNOS Y PROFESORES DE LA FCFM DE LA BUAP

Varios de ellos plantearon sus dudas surgidas al conocer la existencia del aparato; algunas de ellas fueron las siguientes:

- ¿Qué pasaría si las placas fueran todas del mismo color, el radiómetro giraría?
- Si no estuviera al vacío, ¿ocurriría el mismo efecto?
- ¿Funciona para toda clase de luz: velas, focos, cerillos,?

Las preguntas eran muy interesantes y ellos mismos, o entre sus amigos, comenzaban a plantearse varias hipótesis para poder responder sus propias dudas.

Esto demuestra que cuando al alumno primero se le plantea un problema y se le pide resolverlo sin darle ningún argumento para su realización, entonces, comienzan a surgirle dudas y en base a lo que el conoce intenta resolver el problema planteado; cuando se le introduce entonces la teoría, entonces él comprenderá y tendrá un aprendizaje significativo. El cual es de vital importancia, ya que el ser humano aprende de verdad cuando le encuentra sentido o lógica a cualquier tema, y tiende a rechazar todo aquello a lo que no le encuentra sentido.

El hecho de que el Radiómetro de Crookes haya despertado su curiosidad a querer saber más acerca de su funcionamiento, demuestra que es algo que recordarán porque de ellos surgieron dudas y a su vez hipótesis para darle una explicación. Si sólo se hubiera llegado y se les hubiera comentado las teorías que existen acerca del radiómetro tal vez no hubieran prestado interés alguno por saber más.

El método de llegar con una pregunta y que de sus conocimientos previos nos dieran una respuesta, el alumno sin darse cuenta construyó un aprendizaje. Así es como deberían ser los cursos impartidos en el área de física, dejando atrás la vieja escuela, donde el alumno solamente escucha y copia. Una estrategia es la que mostramos con el radiómetro, primero buscamos que el alumno se interese por el tema, le surgan dudas y exponga sus puntos de vista, después de esto se le encamina al resultado correcto. Es importante para los físicos saber como es que surgieron todas las teorías que existen. Por eso es importante recalcar que las bases históricas deben de ser sólidas para el alumno. Y esto mismo se puede utilizar para otras áreas de la ciencia. [20]

CAPÍTULO 3. EXPLORACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO A LOS ALUMNOS Y PROFESORES DE LA FCFM DE LA BUAP

En la Tabla 3.2 se muestran las respuestas dadas por los profesores de la FCFM, los cuales solo fueron del área de física. La mecánica de la entrevista fue la misma que la de los alumnos.

Comportamiento dual de la luz	Radiación electromagnética	Termodinámica	Otros
Del efecto fotoeléctrico desde 1905 Albert Einstein dijo que la dualidad de la partícula en algunos experimentos se presentaba de una manera y en otros de otra. Y en el radiómetro se comporta como partícula y entonces la radiación golpea sus paredes e inciden en todas partes de las placas, en la negra se absorbe y en la blanca se emite, es como si la empujara.	Funciona debido a la radiación solar, y como está en forma de torca dentro del bulbo, por eso es que se mueve.	Es colocado en el vacío para evitar la intervención con el aire. Al ponerla al sol debe haber una diferencia de calor, una placa absorbe más luz y la otra lo refleja, entonces debe estar absorbiendo más energía y se debe de estar calentando por lo tanto la causa es la absorción de energía.	Como una parte es negra y la otra blanca, una parte debe absorber mayor energía y entonces debe haber una variación de calor e incluso una variación de carga por eso es que genera una fuerza, una fuerza muy pequeña.
Los fotones no solo son ondas, sino también partículas, existe un vacío para que choquen esas partículas y no se sienta la fuerza en las placas. Por eso es que las personas no sentimos esos golpes que nos dan las partículas del sol.	El radiómetro se mueve debido a la radiación, aunque pienso que la radiación no sería suficientemente fuerte como para cuasar el movimiento de las placas.	Hay una variación de temperatura donde la parte negra esta más caliente y la parte blanca más fría, entonces debe de haber una diferencia de temperatura y si va de la más caliente a la más fría. El aire caliente tendería que ir al lado más frío entonces se formaría un flujo y debería girar de la parte negra hacia la parte blanca.	El radiómetro funciona porque es como un rehilete y algunas caras son oscuras y otras son reflejantes y entonces existe una diferencia de presión, porque los fotones que rebotan tienen mayor cambio de momento que los que son absorbidos, por lo tanto esa diferencia de presión obliga a que gire.
		Está en el vacío pero como no existe un vacío total entonces sí debería de haber partículas dentro y entonces si debería de haber movimiento, pensando así que lo que hará girar el radiómetro serían variaciones de temperatura.	Por radiación y por el efecto fotoeléctrico.
		Cuando llegan los rayos de luz a la placa negra se calienta y ese calentamiento hace que giren las placas, ya que genera una pequeña perturbación.	Es el efecto del cuerpo negro, donde el lado oscuro de las placas absorbe más luz y el blanco lo refleja.
		El radiómetro funciona por el calor que hay dentro de él.	Debido a la presión de radiación, existe un cierto momento que mueve a las placas, pero se tendría que ver cuantitativamente cuánta radiación es la que impulsa a las placas, ya que el vidrio donde están introducidas, tiene que ver con cuánta radiación llegará a las placas.

Tabla 3.2: Respuestas acerca del funcionamiento del Radiómetro de Crookes de los Profesores del área de física de la FCFM.

CAPÍTULO 3. EXPLORACIÓN SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL RADIÓMETRO A LOS ALUMNOS Y PROFESORES DE LA FCFM DE LA BUAP

Las respuestas se dividieron de la misma manera que las de los alumnos, como se puede observar fueron mas los profesores que se fueron por el camino de decir que el radiómetro rotaba debido a un efecto termodinámico, y aunque se incluyeron las diversas respuestas en las demas filas, la mayoría tiene que ver con una absorción de calor en las placas negras del radiómetro.

La mayoría conocía el radiómetro, pero no todos quisieron dar una respuesta del como pensaban que funcionaba algunos por temor a equivocarse, y en otros casos fue interesante observar que de igual manera que le pasaba a los estudiantes a los profesores también les surgían dudas y comentaban sus hipótesis, aunque siempre llegaban a una teoría final, y algunas son las planteadas en la Tabla 3.2.

De las entrevistas hechas a los alumnos y profesores, y a la búsqueda de información en la cual se observo que existen muchas teorías acerca del funcionamiento del radiómetro y que hay una gran curiosidad por este sencillo, pero no trivial aparato, se puede decir que Einstein en conjunto con lo ya planteado por Reynolds es la teoría más completa para plantear el funcionamiento del radiómetro, pero sin embargo, no hay una teorá definitiva y solo existien especulaciones.

Capítulo 4

Experimento basado en el comportamiento del radiómetro en relación con sus placas

Debido a que existían muchas dudas del comportamiento del radiómetro, entorno a sus placas, nos dimos a la tarea de comprobar experimentalmente cómo se comporta el radiómetro si la luz incide solo en la placa de color claro, (en el caso de nuestro radiómetro era verde fluorescente) y posteriormente mostrar el comportamiento del radiómetro cuando solo se incide luz en la placa de color negro, analizando así el comportamiento del radiómetro. E intentamos comprobar cual era la relación de la velocidad angular vs la intensidad de la luz.

4.1. Arreglo Experimental

Se ocupó un foco incandescente de 150 Watts, el cual fue enrollado en un cartoncillo negro para que solo alumbrara el área que se deseaba; y se iba midiendo la intensidad del foco con ayuda de un fotómetro. El foco se encontraba a 2.5 cm de la orilla del cartoncillo negro. Como se muestra en las Figuras.

En medio de un cartón se realizó un agujero de 1cm^2 de área, esto para lograr que el fotómetro sólo se restringiera a medir la intensidad que aplicaríamos a la placa verde o negra según estuvieramos midiendo.

La máxima intensidad que el fotómetro puede medir es de 20mWatts. Para obtener un rango de intensidades de radiación el foco se alejó del radiómetro. El punto de origen de las mediciones se tomó a partir de 4 cm, que fue donde el fotómetro inició su rango de medición.

La Figura 4.3 muestra el arreglo experimental donde se observa la caja, el lugar donde se colocó el foco y el fotómetro para medir la intensidad de la radiación.

**CAPÍTULO 4. EXPERIMENTO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DEL
RADIÓMETRO EN RELACIÓN CON SUS PLACAS.
4.1. ARREGLO EXPERIMENTAL**

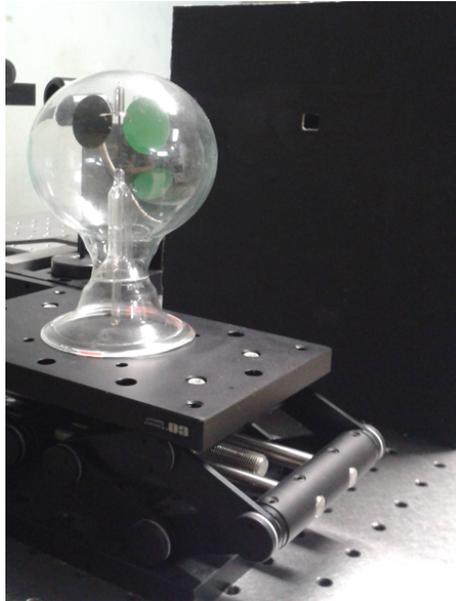


Figura 4.1: Vista de perfil: Radiómetro - Agujero.

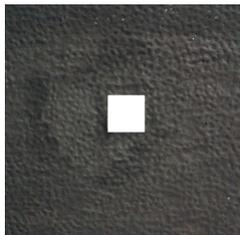


Figura 4.2: Agujero de 1 cm².

**CAPÍTULO 4. EXPERIMENTO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DEL
RADIÓMETRO EN RELACIÓN CON SUS PLACAS.**
4.1. ARREGLO EXPERIMENTAL

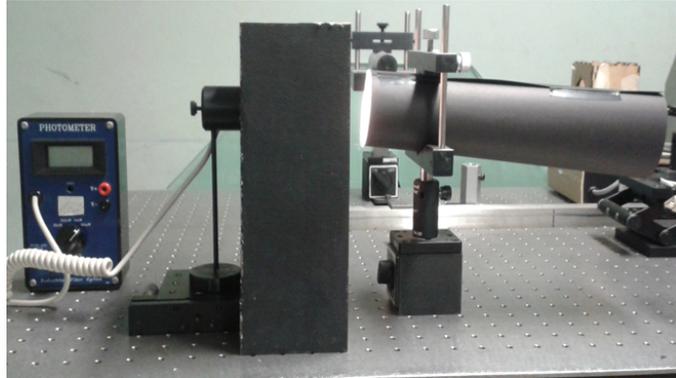


Figura 4.3: (a) Arreglo experimental mediante el cual se midió la intensidad de la luz con un fotómetro.

La Figura 4.4 muestra la colocación del radiómetro para medir la velocidad angular de las placas del radiómetro, dependiendo de la intensidad que se le proporcionaba, está se variaba alejando el radiómetro cada un centímetro.

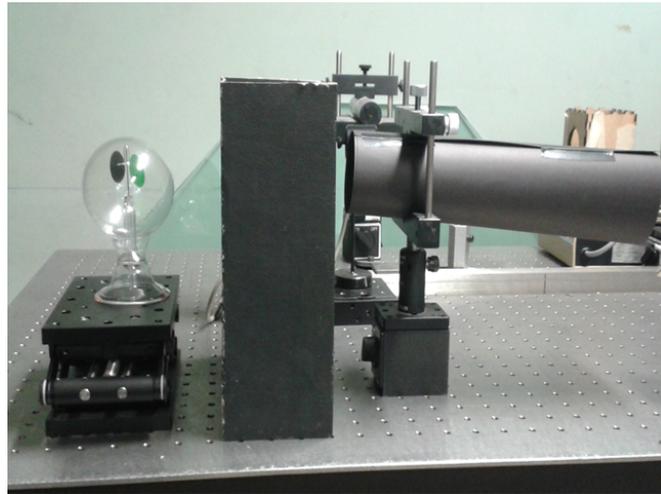


Figura 4.4: Así fue calculada la velocidad angular dependiendo la intensidad proporcionada, tomada de la placa negra o verde según estuvieramos tomando la medición.

La posición inicial del fotómetro fue a 4 cm de separación del foco, que era nuestro punto de origen para que el fotómetro midiera la intensidad de la luz que incidía en él. Posteriormente, se aumento la separación un centímetro y se volvió hacer la medición, y así sucesivamente hasta alcanzar una distancia final de 10 cm. así como a su vez se fue registrando el número de rotaciones que hacían las placas (la negra y la verde) en esa determinada distancia, cuando se les hacia incidir la luz en ellas.

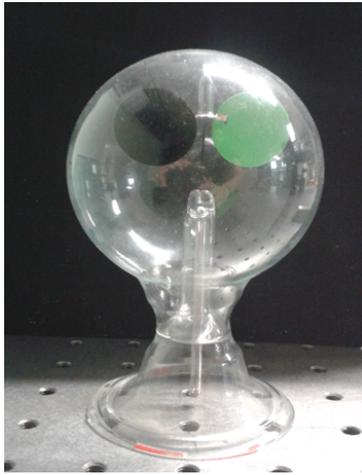


Figura 4.5: La Figura nos muestra el Radiómetro que utilizamos.

4.2. Resultados

Para la placa de color verde, cuando se le hizo incidir la luz solo sobre ella, el radiómetro giro tan poco que únicamente se observó un lento giro de 45° , cuando en la placa se le aplicó una intensidad de más de 20mW.

Sin embargo, cuando en la placa negra se le hacia incidir la luz del foco, el radiómetro sí giraba, A continuación se muestran los datos obtenidos.

La Tabla 4.1 muestra del lado izquierdo las intensidades radiométricas en mW y del lado derecho las rotaciones de las placas por minuto.

Intensidad Radiométrica mW	Velocidad angular Rot/min
6.05	0
7.1	0.2
7.6	0.1
8.5	0.35
8.8	0
9.4	0.25
10.4	0.5
12.5	1.5
13	2
13.8	11
15	17
16.4	23
19.8	26
22	37

Tabla 4.1: Datos experimentales para obtener la gráfica de *velocidad angular vs la intensidad radiométrica*.

CAPÍTULO 4. EXPERIMENTO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DEL RADIÓMETRO EN RELACIÓN CON SUS PLACAS.

4.2. RESULTADOS

La Figura 4.6 muestra cómo se comportó el radiómetro cuando la luz incidió sobre la placa negra a distintas intensidades; esto se logró al ir colocando el radiómetro cada vez más alejado de la fuente de luz.

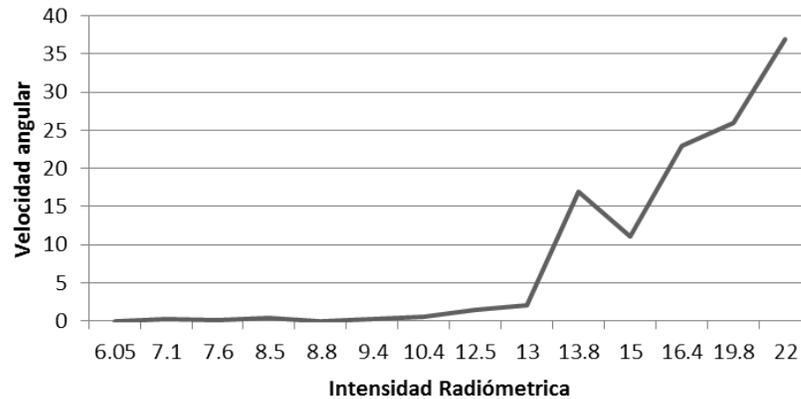


Figura 4.6: Análisis de la velocidad angular vs la intensidad de la radiación.

Como se puede observar por la figura, cuando en la placa negra del radiómetro se hace incidir luz con poca intensidad, la velocidad angular del radiómetro es mínima, y si la intensidad aumenta, también aumentará la velocidad angular. Así, el radiómetro gira más veces entre mayor sea la intensidad.

De la experiencia práctica realizada se puede concluir lo siguiente: cuando se hace incidir la luz del foco de unos 20 mW sobre la placa brillante verde, no se observa que el radiómetro gire a una velocidad apreciable, solo se detecta un giro en contra de la dirección de incidencia de la luz. Quizás a mayor intensidad de luz se pueda observar y medir el efecto de la rotación.

Con 20 mW de radiación y menor que los 20 mW, la velocidad de rotación es claramente medible si esta incide en la placa negra.

En este caso la dirección de rotación se da en la misma dirección de incidencia de la luz. El efecto observado a mayor velocidad de rotación cuando se ilumina en la placa negra, está en contradicción con la explicación de la teoría de la presión de la radiación, ya que tendríamos mayor cantidad de movimiento (el doble) transmitido a las placas cuando la luz incide en la placa brillante, lo cual no se observa. Al contrario, se observa mayor velocidad de rotación cuando se ilumina la placa negra, siendo el fotón absorbido en este caso, entregando su momento a la placa pero solo una vez.

Estos experimentos llevan a plantear que el efecto es más bien térmico o termodinámico, ya que se relaciona con el calentamiento en la vecindad de la placas las cuales están a distintas temperaturas. La absorción de la radiación está basada en la ley de Kirchhoff, la cual fue mencionada en el Capítulo 2.

Capítulo 5

Conclusiones

Del estudio histórico sobre las investigaciones y teorías que han existido durante los siglos XVIII, XIX y XX, observamos que las explicaciones científicas de algunos fenómenos se van refinando y modelando para obtener una teoría racional aceptada por la comunidad de científicos.

Aunque al funcionamiento del radiómetro se le ha tratado de explicar con muy diferentes teorías, ya existe una mucho más completa pero asimismo más compleja. La teoría más aceptable para demostrar el porqué gira la torca existente dentro del radiómetro nos habla acerca de la transpiración térmica, mencionada por Reynolds la cual la encontramos en el capítulo 1. Sin embargo, en muchos libros aun se siguen planteando las teorías que ahora sabemos son erróneas.

De la exploración en la comunidad de Físico Matemáticas de la BUAP sobre el conocimiento del radiómetro podemos observar la necesidad de conocer las bases históricas de los conceptos de la física para lograr un aprendizaje significativo y para comprender el objeto de estudio de la física.

Del experimento realizado con el radiómetro podemos concluir, que el radiómetro es un aparato que puede ser explicado con efectos termodinámicos y que tiene que ver con la absorción de la radiación

Con todo esto se logra propiciar la reflexión y el análisis de los conceptos involucrados en el funcionamiento del radiómetro, y por otro lado siguiendo esta metodología para la enseñanza de la física obtendremos aprendizajes significativos de parte de los estudiantes y sobre todo una gran motivación para el estudio de la física.

5.1. Trabajo a Futuro

Se desea construir un Radiómetro de Crookes, para lograr entender correctamente su funcionamiento. Incorporando como análisis algunas técnicas ópticas en tiempo real.

Bibliografía

- [1] Chen Sungze and Xu Kun and Lee Cumbiao. The dynamic mechanism of a moving Crookes radiometer. *Phys Fluids*, American Institute of Physics (2012).
- [2] Ketsdever Andrew. Radiometric phenomena: From the 19th to the 21st century. University of Colorado and Southern California. (2012).
- [3] Dewar James and M.A. and LL. D. and F.R.S. Note on the Use the Radiometer in Observing Small Gas Pressures; Application to the Detection of the Gaseous Products produced by Radio active Bodies. The Royal Society of London. (1907).
- [4] MR. I. Williams. A new method of measuring Alternating Currents and Electric Oscillations. (1917).
- [5] Bansal Rajeer. Radiometer. *Antennas and Propagation Magazine*. (2012)
- [6] M. Goldman. The Radiometer revisited. *Phys Educ*. (1978)
- [7] M.C. Gilbert and D. West. A modified theory of the Crookes Radiometer. *Phys. Soc. London*. (1919)
- [8] Stephan. D. Karl. Radiometry Before World War II: Measuring Infrared and Milimeter wave radiation. *Depart of Engineering Tecnhnology*. (2005)
- [9] West D. Gilbert. On a method of measuring the pressure of light by Means of thin Metal Foil. *Phys. Soc. London*. (1916)
- [10] Coisson. Quantitative use of a Crookes radiometer. *Instituto de Física Universita de Parma, Italia*. (1979)
- [11] Wess Jane. Crookes's radiometers: a train of thought manifest. *The Royal Society*. (2010)
- [12] E. Frankland. Crookes's Radiometer. *La nature*. (1876)
- [13] Rayleigh. Rayleigh the Theory of Crookes's Radiometer. *La nature*. (1909)
- [14] J. Güemez. Técnicas experimentales II. Guía del experimento. *Universidad de Cantabria* (2003)
- [15] J. Güemez. Termodinámica. *Seminario Radiómetros*. (2004)
- [16] Burbano García Enrique. *Física General*. Tébar. (2003)
- [17] Martin Holger. Reynolds, Maxwell and the Radiometer, revisited. *Thermische Verfahrenstechnik, Karlsruhe Institute of Technology*. (2010)
- [18] Kikoin, A. K. *Física Molecular*. Editorial Mir. (1979)

- [19] N. Selden and C. Ngalande and S. Gimelshein. Experimental and computational Observation of Radiometric Forces on a Plate. University of Southern, California (2007)
- [20] Veglia Silvia. Ciencias Naturales y aprendizaje significativo. Novedades Educativas. (2007)
- [21] Albert Einstein. Zur Theorie der Radiometerkrafte. Zeitschrift fur Physik. Vol. 27 (1924)