

# Experimento de Franck-Hertz: Comprobación de la Cuantización de los Niveles de Energía de los Electrones en el Átomo

Fabian Camilo Pastrana Cruz  
Santiago Ramirez Vallejo  
Luis Fernando Horta Camacho

23 de febrero de 2018

## Resumen

*Los diferentes experimentos hechos en el siglo XIX e inicios del siglo XX revelaban un comportamiento atómico imposible de explicar clásicamente, ya que la experiencia revelaba espectros de emisiones discretos y átomos estables, y de manera clásica no se encontraban los mismos resultados, así pues, se propuso un nuevo comportamiento con los postulados de Bohr donde se indica la cuantización de los estados energéticos de los electrones en el átomo, con esto, el objetivo del trabajo fue demostrar la existencia de estos estados de cuantización, mediante la utilización de un montaje de PHYWE que consiste en un triodo dentro de una cámara de mercurio gaseoso, la idea fue acelerar los electrones a través del gas de mercurio desde el cátodo hasta la rejilla y con un potencial de retroceso entre la rejilla y el ánodo para desacelerarlos, así pues, si los electrones no pierden energía, es decir, no colisionan inelásticamente con el mercurio como se se espera clásicamente, la energía de estos debería ser suficiente para llegar al ánodo y medir una corriente, pero cuando se llegó a los estados de excitación del mercurio, los electrones perdieron energía en los choques y esta no les fue suficiente para llegar al ánodo y por tanto se marcaron mínimos y máximos de corriente. Así pues, se concluyó la existencia de los estados energéticos cuantizados para el electrón en el átomo, se explicó el porqué del comportamiento inicial de las gráficas y en qué afecta a estas el cambio de temperatura y el cambio de voltaje de retroceso.*

## I. INTRODUCCIÓN

Debido a la dificultad de explicar la estabilidad atómica, se condujo a la formulación de una teoría simple de la estructura del átomo. Uno de los problemas para la resolución de la estructura atómica era el comportamiento de las líneas espectrales, la figura 1 muestra un dispositivo para medir estas líneas, los átomos

son excitados en la fuente, los electrones cambian de nivel atómico y emiten fotones, estos se hacen pasar por una rendija y después por un prisma separando sus componentes espectrales y quedando registrado en la placa fotográfica, al investigar estas líneas emitidas por distintos tipos de átomos se encontraba que cada uno de ellos tiene su propio espectro. Debido a que el espectro comprende centenares de líneas, y

a medida que disminuye la longitud de onda estas están cada vez más juntas y difíciles de distinguir, se vio necesario la formulación de un modelo atómico que las predijera, así pues se inició con el átomo más sencillo que es el de hidrogeno, entonces en 1885, Balmer halló una fórmula de manera empírica con buena precisión pero que solo resolvía la posición de las primeras nueve líneas ya conocidas, con este hallazgo se hicieron más esfuerzos en encontrar más formulas empíricas que predijeran el espectro, fórmulas como las de Lyman, Paschen entre otras.

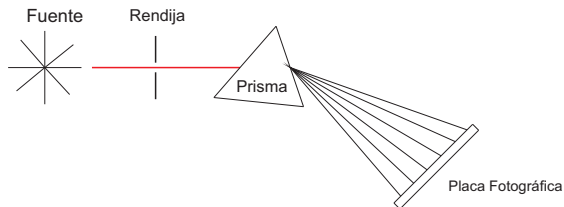


Figura 1: Aparato empleado en la medida del espectro eletromagnético

Esta característica del espectro atómico junto a otras no mencionadas, deben ser descritas por toda teoría atómica, al intentar hacer un esfuerzo de explicarlo clásicamente se llega a una ecuación de energía como

$$E = -\frac{ke^2}{2r} [8] \quad (1)$$

Donde  $e$  es la carga del electrón,  $r$  el radio de la órbita que describe este electrón, y  $k$  una constante; clásicamente este electrón acelerado debe irradiar energía, lo cual indica que en (1) el radio  $r$  debe disminuir, además la frecuencia de rotación debe coincidir con la frecuencia de irradiación lo cual clásicamente no es bien comportado, ya que describe un átomo inestable y de emisión de espectro continuo, lo cual contradice a todas luces a la experiencia.

Conociendo estos problemas, en 1913, Bohr postuló entonces:

1. En el átomo, un electrón se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo bajo la influencia de la atracción de Coulomb entre el electrón y el núcleo.
2. Solo son permitidas las órbitas para las cuales la cantidad de movimiento angular es un múltiplo entero de  $\frac{h}{2\pi}$ , siendo  $h$  la constante de Planck.
3. Mientras el electrón ocupa una de las órbitas permitidas, no irradia energía. Pero al pasar de una órbita de mayor energía a una de menor, emite un cuanto.

Adicionalmente, de la hipótesis de De Broglie acerca de la naturaleza ondulatoria del electrón en donde se describe la relación del momentum  $p$  de una partícula con un numero de onda así:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que un electrón en órbita puede ser considerado como una onda estacionaria, así, para una órbita de radio  $r$  se tiene que

$$2\pi r = n\lambda$$

y reemplazando el  $\lambda$  de (2) tenemos que

$$mvr = n\hbar \quad (3)$$

(donde  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ) que es idéntica a la ecuación de la cuantización del segundo postulado de Bohr.

Por otro lado se puede llegar al resultado anterior a partir de la ley de coulomb ( considerando el átomo de hidrogeno por simplicidad de cálculos ), esta nos proporciona la fuerza eléctrica del electrón:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (4)$$

Manipulando esta ecuación podemos obtener la energía cinética del electrón, asumiendo que el núcleo más masivo permanece en reposo

$$K = \frac{1}{4} \cdot mv^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (3) se puede escribir la energía cinética de la siguiente manera, e igualando con la ecuación (4) se obtiene:

$$\frac{1}{2} \cdot mv^2 = \frac{1}{2} \cdot m \left( \frac{n\hbar}{mr} \right)^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} \quad (6)$$

Despejando r de la ecuación (6) se obtiene:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} \cdot n^2 \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en (5) se obtiene.

$$E_k = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{-13.60eV}{n^2} \quad (8)$$

Donde n son los niveles de energía del átomo (n=1,2, 3,...), de aquí que los niveles de energía estén cuantizados.

Para 1914 los alemanes James Frank y Gustav Ludwig Hertz realizaron un experimento en el cual se comprobaba la cuantización de los niveles de energía de los electrones en los átomos. El experimento confirmó el modelo cuántico del átomo de Bohr demostrando que los átomos solamente podían absorber cantidades específicas de energía (cuantos), y se comprobó que, al excitarse el mercurio, este emitía a frecuencias del ultravioleta llegando a concluir que la hipótesis de De Broglie y el modelo atómico de Bohr eran correctos. Con el fin de poner en evidencia la cuantización de los niveles de energía, utilizaron un triodo, compuesto de un cátodo, de una rejilla polarizada y de un ánodo, que creaba un haz de electrones en un tubo de vacío que contiene mercurio gaseoso.

Así, se realiza un experimento similar al hecho por Franck y Hertz para constatar la cuantización de los estados de la energía de los

electrones en los átomos, con un equipo de PYWHE, acelerando electrones en un triodo, dentro de un horno que permite tener mercurio gaseoso, se coloca un voltaje de retroceso entre la rejilla y el ánodo  $V_0$ , y se aceleran los electrones desde el cátodo con un diferencia  $V$  de potencial que aumenta con el tiempo. Se toman las medidas de la intensidad de corriente de los electrones que llegan al ánodo y se grafica con respecto al voltaje  $V$ , se procesan los datos para varias temperaturas del horno y varios voltajes de retroceso, se analizan, con esto se espera confirmar el modelo atómico de Bohr, por ende, los estados de cuantización energético del átomo y analizar en qué afecta el cambio de temperatura del horno y el cambio del voltaje de retroceso  $V_0$ .

## II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO

Para realizar el experimento de Frank-Hertz se utiliza el siguiente equipo:

1. Tubo de mercurio.
2. Horno.
3. Unidad de control.
4. Termometro.
5. Voltímetro con rangos de 0-3 V.
6. Amperímetro

El tubo Franck-Hertz (Hg) es un tubo de tres electrodos con un cátodo recubierto de óxido calentado indirectamente, una rejilla y un ánodo. La distancia entre la rejilla y el ánodo es pequeña, para minimizar las colisiones entre los electrones y el gas más allá de la red. El tubo contiene una gota de mercurio altamente purificado, este está montado en una placa que se monta, a su vez, sobre una pared del horno

Franck-Hertz. El horno es controlado por termostatos utilizados para vaporizar el mercurio del tubo.

Para este montaje los electrones son acelerados gracias a una diferencia de potencial presente entre el cátodo y la rejilla  $V$ , luego, justo después de la rejilla se encuentra un ánodo el cual tiene una cierta diferencia de potencial con respecto a la rejilla  $v_0$ . Si los electrones acelerados tienen la suficiente energía para pasar la rejilla, algunos llegarán al ánodo, el cual está conectado a un amperímetro, quien medirá la corriente de estos; si no tienen la suficiente energía, estos serán desacelerados por la diferencia de potencial del ánodo y volverán a la rejilla.

El hecho de que los electrones lleguen al ánodo depende de tres factores, el potencial de aceleración, el potencial que se opone, y la colisión natural entre los electrones y los átomos de mercurio. Siempre y cuando las colisiones entre los electrones y los átomos sean elásticas, estos no perderán energía, pero si se induce un potencial de  $4,9V$ , coincidirá con el primer estado excitado del mercurio, el cual da la mínima cantidad de energía para que los átomos desaceleren a los electrones.

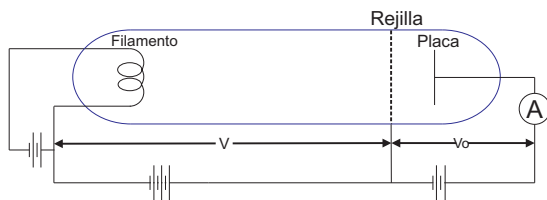


Figura 2: Esquema del aparato empleado por Franck y Hertz

En este trabajo se toman medidas de la siguiente manera: Primero se ajusta la temperatura del horno, la cual oscilaba entre los 160 y 180 grados centígrados, en donde la temperatura tiende a ser estable en estos puntos para tomar una buena medida. Se fijaba un voltaje de retardo  $V_0$  y al final se mide la corriente que

pasa a través del ánodo con un amperímetro que seguidamente es conectado a un tablero de control que traduce la información al computador. Este proceso se repitió para voltajes de retardo entre  $1,5 V$  y  $2,25 V$  cada  $0,25 V$ , de igual manera se repitió con un voltaje de retardo de  $1,5 V$  en temperaturas de 160, 170, 180 y 190 grados centígrados.

A pesar que todo el estudio realizado por Bohr hacia la cuantización de los niveles de energía se desarrolló en torno al átomo de hidrógeno, el experimento de Franck-Hertz no se puede desarrollar con éste, ya que en su forma natural se encuentra en forma molecular  $H_2$  y no en su forma atómica.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como se puede ver en la figura (3), el cambio del voltaje de retardo inducido tiene una clara influencia sobre el comportamiento de la corriente observada. A medida que esta diferencia de potencial era aumentada la intensidad de la corriente disminuía. Este fenómeno se da porque, al aumentar el voltaje de retardo, los electrones que viajan por el gas de mercurio, sea el caso, van a necesitar más energía para poder sobrepasar este, en consecuencia, menos corriente superara la rejilla y esto llevara a que se obtengan corrientes más bajas.

Para el caso en el que la temperatura se varia, en la figura (4) se observa un aumento en la corriente obtenida, a medida que la temperatura del gas de mercurio disminuye, este efecto se debe a que, como el mercurio está más excitado a medida que la temperatura aumenta, las probabilidades de colisión entre electrones y átomos crece y por ende, la pérdida de energía de la corriente.

Un aspecto bastante notable en todas las gráficas presentes en este trabajo es, la presencia de decaimientos de energía a medida que el voltaje de aceleración aumenta. Teniendo en cuenta la figura (4) es notable que, para los va-

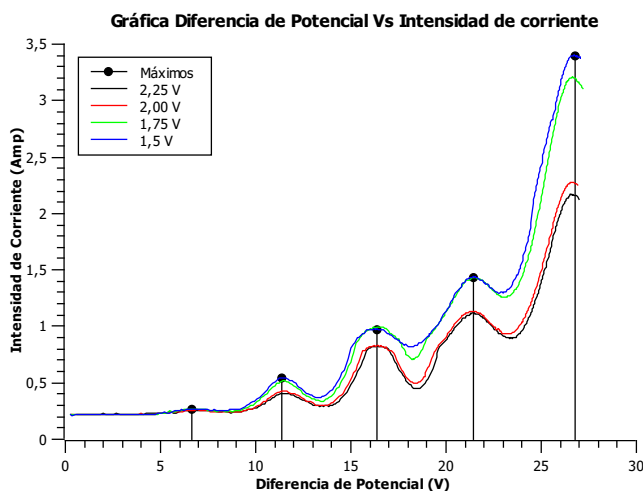


Figura 3: Gráfica realizada con los datos arrojados por el montaje para distintas diferencias de potencial entre el ánodo y la rejilla a una temperatura de 160°C, el eje  $x$  representa la variación de la diferencia de potencial entre el cátodo y la rejilla, el eje  $y$  es la intensidad de corriente de los electrones que alcanzan el ánodo, junto con los máximos ubicados para 1,5 V.

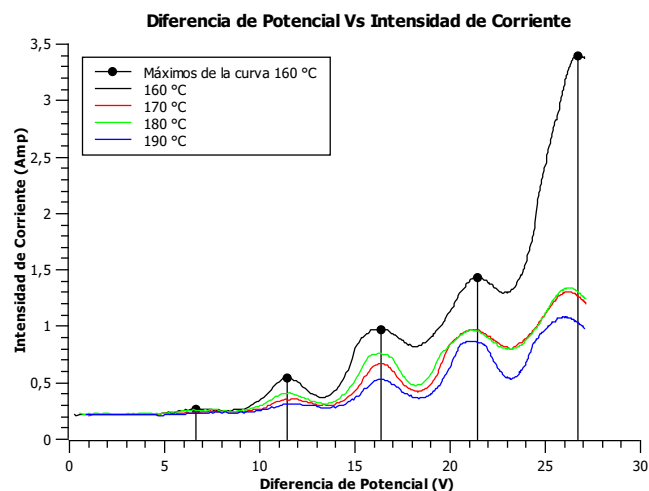


Figura 4: Gráfica realizada con los datos arrojados por el experimento para distintas temperaturas con una diferencia de potencial fija de 1,5 V entre el cátodo y la rejilla, el eje  $x$  muestra la diferencia de potencial entre la rejilla y el ánodo, el eje  $y$  es la intensidad de corriente de los electrones que alcanzan el ánodo, además se ubican los máximos locales para la curva de 160 °C

lores del voltaje de aceleración más pequeños, los puntos máximos en los cuales la corriente comienza a decrecer, coinciden para todas las diferentes temperaturas, pero a medida que la corriente aumenta, estos puntos no coinciden, para mayores temperaturas los máximos se dan a un menor voltaje de aceleración. Este fenómeno se da porque, al estar el gas de mercurio a "bajas" temperaturas los electrones necesitan mas energía para así poder excitar a los átomos, ya que en estas condiciones estos están menos energéticos.

El fenómeno anteriormente descrito también se ve en la figura (3), pero, a diferencia del caso en el que la temperatura varía, los puntos máximos coinciden casi perfectamente para todos los voltajes de retardo, lo cual se da porque, en este caso el vapor de mercurio, al presentar una temperatura constante para todas las diferencias de potencial, hace que los átomos presenten siempre una energía constante y por

ende, los electrones no requieren variar su voltaje de aceleración para poder excitar a los átomos.

Para terminar el análisis de la presencia de estos máximos, se observa en la figura (1 ref5), la distancia que separa los máximos, la cual indica la diferencia de la energía para los diferentes estados de excitación del átomo de mercurio. Según la teoría descrita, estas diferencias de energía deben tener un valor de 4,9 V. La razón por la cual se da este valor viene de la existencia de una línea espectral del mercurio relevante, la cual tiene una longitud de onda de 2537 Å, usando este valor tenemos la siguiente relación  $\frac{12378}{2537} = 4,9 eV$ , lo cual es una relación entre la longitud de onda y la energía. Como lo vemos en las medidas realizadas, se obtuvo un valor promedio de separación entre máximos de 5,12 V lo cual nos da un error experimental de 4,4 %, para estos resultados no se tiene en cuenta el primer máximo o "knee",



posteriormente se dará una explicación a este fenómeno. En base a este error relativamente bueno se puede decir que la presencia de estos decaimientos de la corriente coinciden con el postulado de Bohr en el cual los átomos se excitan en valores de energía cuantizados.

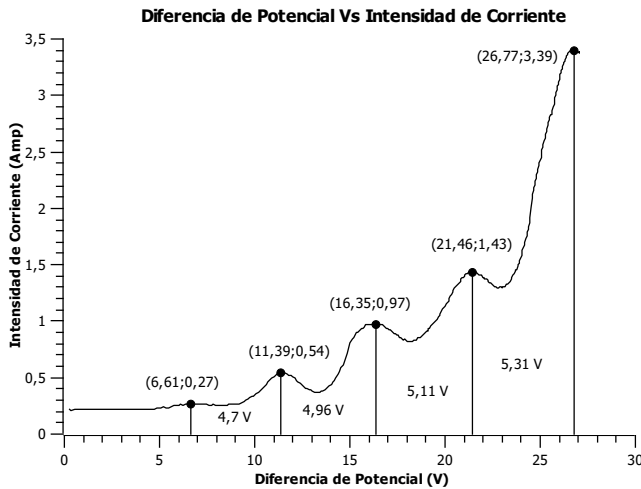


Figura 5: Gráfica realizada con los datos arrojados por el experimento para 160 °C y una diferencia de potencial de 1,5 V entre el cátodo y la rejilla, con máximos locales ubicados e indicando la diferencia de potencial entre ellos, el eje  $x$  muestra la diferencia de potencial entre la rejilla y el ánodo y el eje  $y$  cómo varía la intensidad de corriente de los electrones que alcanzan el ánodo

Adicionalmente a toda la discusión ya realizada, se observa que el primer "máximo" de la figura (4), (en seguida se explica el porqué está escrito en comillas), se comporta muy similar para todas las variaciones de voltaje de retroceso, es decir, que su inicio en voltaje e intensidad es similar para todas las muestras, sin embargo, en la figura 3 se evidencia una "disfonía" de estos "máximos", en *Experiments in Modern Physics*[4], a estos máximos los referencian como 'Knee' o rodilla en inglés, este comportamiento no es debido realmente al proceso principal antes descrito, esta prominencia o rodilla está fuertemente ligada a las condiciones de temperatura y densidad de corriente,

de ahí que no varía considerablemente en la figura (4), realmente esto es debido al efecto foto eléctrico producido en el ánodo por cuantos de luz de pequeña longitud de onda, es decir, la prominencia debería presentarse en aproximadamente 8 voltios, (en las gráficas se evidencia un corrimiento hacia el 6,5 V, esto puede ser debido a que al equipo le falta un filamento emisor de electrones o a la fluctuación de la temperatura en el horno ya que esta varía entre 160 °C y 180 °C), así pues, cuando el haz de electrones alcanza los 8V, se excita el nivel  $6^1P_1$  y con esto, cuando los átomos de mercurio vuelven a su estado fundamental irradian a 184,9nm, longitud de onda del ultravioleta, así que al incidir esta radiación electromagnética, (luz ultravioleta) se produce una corriente, como lo describe el efecto fotoeléctrico, y es justo esto lo que crea la prominencia.

#### IV. CONCLUSIONES

- Se comprobó experimentalmente que la caída de corriente ocurre en voltajes cercanos a los múltiplos de 4.9V que son justamente los valores para los cuales los átomos adquieren la energía suficiente para colisionar inelásticamente con los átomos de mercurio y excitarlos, de donde se concluye que los niveles de energía del átomo están cuantizados, cosa que da razón al modelo atómico de Bohr.
- Se evidenció que el aumento del potencial de retroceso entre la rejilla y el ánodo afecta el número de electrones que llegan, ya que los electrones necesitan cada vez más energía para superar esta barrera, así, la intensidad de corriente es menor a medida que este voltaje aumenta.
- Se constató que el aumento de la temperatura afecta la intensidad de corriente inversamente proporcional y anticipa la

llegada de los máximos, esto puede ser debido a que en altas temperatura los átomos de mercurio están más energéticos, es decir, más excitados, así, la energía con la que debe incidir el electrón para excitar el mercurio debe ser menor, en cuanto al descenso de la corriente puede ser debido a la mayor probabilidad de que los electrones choquen con los átomos excitados de mercurio.

- Se encontró que el primer máximo de las gráficas no es debido directamente al experimento en sí, es decir, no es por estricta llegada de los electrones emitidos, esta primera prominencia o "knee", es debido al efecto fotoeléctrico que ocurre en el ánodo, debido a la incidencia de fotones del ultravioleta emitido por los átomos de mercurio al decaer a su estado fundamental.

- [7] Paul A. Tipler, Ralph A. Llewellyn, *MODERN PHYSICS. SIXTH EDITION*. U.S.A.: W. H. Freeman and Company.(2012)
- [8] Guillermo Castillo Torres, *Curso de Física Moderna*. Departamento de Física Universidad Nacional de Colombia.(1969)
- [9] PASCO Scientific, *Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Frack-Hertz Experiment*. Pasco. (1989)
- [10] PYWHE, *Franck-Hertz experiment with Hg-tube*.(2017)

## REFERENCIAS

- [1] R. Eisberg, *Fundamentos de Física Moderna*. Limusa, México D.F (1983).
- [2] Arthur Beiser, *Concepts Of Modern Physics*. Sixth Edition. McGraw-Hill.
- [3] Kenneth S. Krane, *Modern Physics*. Third edition. United States es of America:: JOHNJOHN WILEY & SONS, INCWILEY & SONS, INC.
- [4] A. C. M. Jim Napolita, *Experiments in Modern Physics*. Second Edition. USA: ACADEMIC PRESS.
- [5] H. Haken,H. C. Wolf, *Atomic and Quantum Physics: An Introduction to the Fundamentals of Experiment and Theory* Second Enlarged Edition.Springer.
- [6] H. S. JOHN R. ALBRIGHT, *Introduction to Atomic and Nuclear Physics* FIFTH EDITION. U.S.A.: Fletcher & Son Ltd, Norwich.