

Preinforme Rayos X

Sergio Laverde* and Samuel Hernandez**

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 27 de febrero de 2025)

I. OBJETIVOS

El análisis de propiedades interesantes de la materia siempre ha sido precursor para avances en la física. Uno de los recursos más útiles que tenemos a nuestro alcance para este fin es el uso de Rayos X. Así, en este experimento nos proponemos entender estos rayos por medio de diversas técnicas, y ver algunas aplicaciones útiles del análisis de los mismos. Para este fin, tenemos los siguientes objetivos: **1)** Medir el espectro característico de Rayos X para Cu. Esto se hará con la asistencia de cristales de LiF y KBr ; **2)** Corroborar la ley de corrimiento de Duane-Hunt y con ayuda de esta, estimar la constante de Planck ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} Js$ [2]) ; **3)** Obtener los coeficientes de absorción de cada material usado en la práctica. Esto se hará usando la medida de atenuación de los rayos X. ; **4)** Calcular el cambio en la longitud de onda de un fotón de Rayos X debido a la dispersión de Compton ; **5)** Obtener la variación de la intensidad del espectro característico en función del voltaje y corriente del ánodo.

II. CONTEXTO HISTÓRICO

En 1895, Wilhem Röntgen se encontraba estudiando radiación de rayos catódicos. Esto ocurre cuando una carga eléctrica se aplica a dos placas de metal dentro de un tubo de vidrio lleno de un gas a presión muy baja. Wilhem protegió el aparato y sin embargo notó una tenue luz gracias a la presencia de pantallas sensibles a la luz. Investigaciones futuras indicaron que esto era causado por un tipo de radiación penetrante, desconocida hasta entonces. Los Rayos X se convirtieron en una herramienta poderosa para experimentos físicos y en la ciencia médica [1]. Esto le valió para ser galardonado con el premio Nobel en física en 1901.

Posteriormente, Max von Laue descubrió un fenómeno de difracción a la hora de incidir Rayos X en un cristal se genera un fenómeno de difracción en los rayos. Posteriormente William Henry Bragg y su

hijo explicaron teóricamente este fenómeno y con él estudiaron las estructuras cristalinas. Tanto von Laue como los Bragg recibieron el premio Nobel en física en los años 1914 y 1915 respectivamente.

III. MARCO TEÓRICO

Introducción a los Rayos X: Cuando tenemos una partícula cargada eléctricamente con una gran energía cinética, y esta pierde parte de esta energía al encontrarse con un material metálico, entonces se generan Rayos X. Para este fin, calentamos una placa metálica (el cátodo) para liberar electrones por termo-ionización. Luego, estos son acelerados por una diferencia de potencial U_A entre el cátodo y el ánodo. Los Rayos X son generados a un voltaje específico que depende del material que se esté usando. En este proceso se generan dos 'clases' de Rayos X:

- **Rayos X característicos:** Cuando un electrón acelerado choca con un electrón de nuestro material a estudiar, si tiene la energía suficiente, desprenderá dicho electrón. Entonces, otro electrón rápidamente ocupará el espacio liberado, emitiendo así un fotón. La energía de este fotón va a estar dada por

$$E_\gamma = E_i - E_f. \quad (1)$$

Siendo E_f la energía del orbital final y E_i la del inicial. Como estas energías dependen de cada material, la radiación causada por este fenómeno es llamada *Radiación de Rayos X característica* [2].

- **Bremsstrahlung:** Si uno de los electrones acelerados no choca con ningún electrón y pasa de largo, este interactuará con el núcleo y se verá frenado, liberando así un fotón de Rayos X. Como realmente no hay un "límite" para esta interacción, el espectro que esperamos es continuo.

Estos dos fenómenos se dan simultáneamente. Intuitivamente, hay unos electrones que chocan con los del material y otros que no, por eso se dan al mismo tiempo. Además, la intensidad es cero hasta cierta longitud de onda mínima. Esta viene dada por la ley de Duane-Hunt:

* Correo institucional: s.laverdeg@uniandes.edu.co

** Correo institucional: sm.hernandezc1@uniandes.edu.co

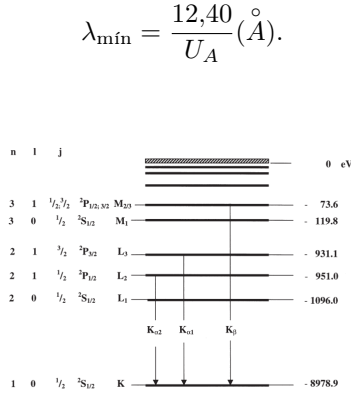


Figura 1. Diagrama de transiciones para un átomo de Cu. Fuente: *PHYWE, Characteristic X-Rays of Copper* [2]

Además, esperamos ver dos líneas estrechas correspondientes al espectro característico, $K_{\alpha} = 8,038$ keV y $K_{\beta} = 8,905$ keV, como podemos ver en la Figura 1.

Atenuación de Rayos X: Cuando los Rayos X interactúan con el blanco, se generan efectos Compton y fotoeléctrico. Esto genera una disminución en la intensidad. Así, podemos modelar la intensidad como:

$$I = I_0 e^{-\mu(\lambda, Z)d}.$$

Siendo μ el coeficiente de absorción del material y Z el número atómico. Además, μ se relaciona funcionalmente con Z y λ así:

$$\frac{\mu}{\rho} = k(\lambda Z)^3.$$

Donde ρ es la densidad del material y k es una constante que depende de la longitud de onda.

Por último, en el uso de los cristales de LiF y KBr es útil tener en cuenta la condición de Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad n \in \mathbb{N}^+. \quad (2)$$

Lo cual nos lleva a una expresión muy práctica para la energía de radiación, dada por:

$$E = \frac{nhc}{2d \sin \theta}.$$

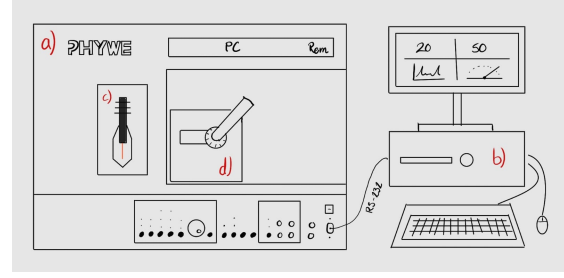


Figura 2. Montaje experimental.

Consiste de: a) Unidad de rayos X 35kV (Phywe), b) Computador, c) Tubo desmontable de rayos X de Cobre, d) Goniómetro rayos X (Phywe).

IV. MONTAJE EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

Además del montaje experimental mostrado en la figura 2, para el desarrollo del experimento también se hace uso de: cristales de LiF y KBr, tubo contador con cable BNC, láminas metálicas de diferentes materiales y grosores, y filtros.

La práctica se divide en 5 partes:

A. Calibración del equipo de Rayos X.

Primeramente, se debe instalar el tubo de rayos X con anodo de cobre e insertar el diafragma tubular con el mayor diámetro en el orificio de salida del haz. Luego, se instala el diafragma al contador GM, se monta el cristal de LiF sobre la base giratoria y se cierra la puerta con seguro.

Seguido de esto, se ajusta el voltaje a 35kV y la corriente a 1mA. Después, se selecciona el modo acoplado y se gira la rueda hasta 22.6° donde se obtiene el máximo de intensidad para la configuración establecida.

Posteriormente, se debe cambiar el modo acoplado al modo cristal o tubo Geiger-Muller. Para encontrar el máximo de intensidad alterne entre los 2 modos y muévalos cada 0.1° manteniendo la relación 2:1 entre el ángulo del tubo y del cristal.

A continuación, se debe volver al modo acoplado para observar el ángulo y la desviación con respecto al valor teórico. Para corregir dicha desviación, apague el alto voltaje y gire la rueda hacia donde sea pertinente.

Este proceso de calibración debe ser realizado y verificado cada que se cambie de cristal.

B. Actividad 1: Rayos X característicos del Cobre.

El objetivo de esta actividad es medir la intensidad de rayos difractados en función del ángulo de difracción y mediante la ley de Bragg (ec 2.) estudiar el espectro de rayos X.

Para ello, teniendo conectada la unidad de rayos X al computador, en el programa *Mesure* configuramos la toma de datos. Después, de estar la toma de datos realizada, exportamos los datos obtenidos para su posterior análisis. Repita el proceso para el cristal de KBr.

C. Actividad 2: Absorción de Rayos X.

El objetivo de esta actividad es estudiar la absorción de rayos X como función del espesor del material.

Para lograr esto, instalamos el cristal de LiF sobre la base giratoria y configuramos la toma de datos en el programa. A continuación, se realizan mediciones para Al y Zn, primero sin material y luego incrementando progresivamente el espesor de este.

D. Actividad 3: Dependencia de la intensidad del voltaje y corriente del ánodo.

El objetivo de esta actividad es estudiar cómo cambia el espectro de rayos X cambiando el voltaje y manteniendo la corriente constante y viceversa.

En este caso se usan un tubo de Rayos X de Cu y el cristal de LiF. Primeramente, se configura la toma de datos con un rango de medición de 19° - 24° , tiempo de integración de 2s y resolución de 0.1° . Seguido de esto, se realizan dos tomas de datos: la primera con $I = 1mA$ y $V \in [11, 35]kV$ iniciando en 35kV y decreciendo a pasos de 2-3kV y la segunda con $V = 35kV$ y $I \in [0, 1]mA$ iniciando en 1mA y decreciendo a pasos de 0.1mA.

E. Actividad 4: Ley de Duane-Hund.

El objetivo de esta actividad es evidenciar empíricamente la Ley de Duane-Hund y mediante esta obtener experimentalmente el valor de la constante de Planck h .

Nuevamente se usan el tubo de Rayos X de Cu y el cristal de LiF y además se emplea el diafragma de 2mm. se configura la toma de datos con un rango de medición de 10° - 21° , tiempo de integración de 2s, resolución de 0.1° y corriente de 1mA. Después, se realizan tomas de datos variando el voltaje $V \in [13, 35]kV$ iniciando en 35kV y decreciendo a pasos de 2kV. Posteriormente, se encuentra la longitud de onda mínima donde empieza el Bremsstrahlung (λ_{min}) para cada medición y usando la Ley de Duane-Hund se determina h .

V. EJERCICIOS TEÓRICOS

Esta es la solución al ejercicio planteado en la guía de laboratorio.

Ejercicio 1:

1. Investigue sobre la ley de Moseley y téngala en cuenta cuando realice su análisis del espectro característico

La ley de Moseley es una ley que permite linealizar la raíz de la frecuencia f de los Rayos X característicos de una transición específica, en función del número atómico Z . Viene dada por:

$$\sqrt{f} = A(Z - \sigma).$$

Donde A y σ son constantes que dependen de la transición. Otra manera de enunciarla es:

$$E_\gamma = RhcZ_{eff}^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right).$$

Siendo R la constante de Rydberg, h la constante de Planck, c la velocidad de la luz, Z_{eff} la carga nuclear efectiva y n_i, n_f los niveles finales e iniciales.

2. Consulte el espectro del Cu en el rango de los rayos X. ¿Qué transiciones se esperan con más intensidad?

Como se mencionó en el marco teórico, esperamos ver las transiciones $L \rightarrow K$ y $M \rightarrow K$. Cada una tiene una energía asociada K_α para $L \rightarrow K$ y K_β para $M \rightarrow K$. Cabe resaltar que en realidad hay dos transiciones que se dan en $L \rightarrow K$, como se ve en la Figura 1. K_α es un promedio entre las dos. Por último, como $K_\alpha < K_\beta$, esperamos que K_α sea más intensa.

3. Investigue sobre el efecto Compton. ¿Qué cambio en longitud de onda sufre un fotón en función del ángulo de salida de este con respecto a su ángulo incidente? ¿Qué es la longitud de onda de Compton?

Cuando un fotón sufre una colisión con un electrón libre, este se dispersa con una longitud de onda mayor. Este fenómeno se conoce como Efecto Compton y está descrito por:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta).$$

Siendo θ el ángulo entre la dirección de salida y la de incidencia. Por último, la longitud de onda de Compton para una partícula con masa m es:

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}.$$

[1] Nobel Prize (1901). Wilhelm röntgen - facts. Accessed: 2025-01-29.

[2] PHYWE (2024). *Characteristic X-rays of Copper*. Göttingen, Germany. Accessed: 2025-01-29.