

# Problema experimental: Dispersión de Rutherford

Olimpiada Iberoamericana de Física

2022

## 1. Introducción

Hacia finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, se inicia el estudio de la composición de los átomos. Con el conocimiento de la existencia del electrón, descubierto por Sir Joseph John Thomson, como una partícula muy pequeña y liviana con carga negativa que estaba presente en toda la materia se propusieron modelos de cómo podrían estar conformados los átomos ya que, al ser eléctricamente neutros, debían también tener una carga positiva que igualara a la de los electrones.

Uno de los modelos principales a considerar fue el modelo de Thomson (1900), propuesto por William Thomson con el apoyo de J.J. Thomson, en el cual un átomo consistía en una masa uniforme, cargada positivamente en la cual los electrones estaban incrustados. A este modelo se le llamó el *puddín de pasas* por analogía de como en este postre las pequeñas pasas están dispersas dentro de una gran masa uniforme.

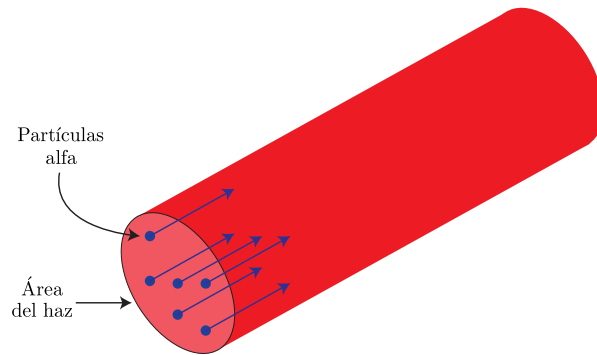
El *experimento de dispersión de Rutherford* fue concebido por Ernest Rutherford para determinar si el modelo de Thompson (u otros existentes) describía correctamente al átomo. Este experimento consiste en lanzar partículas cargadas eléctricamente hacia un objetivo y observar cómo es que estas partículas se dispersan al interactuar, por medio de la fuerza de Coulomb, con los átomos del material del que está hecho el objetivo.

El experimento de Rutherford finalmente se concretó como una serie de experimentos, que fueron realizados entre 1908 y 1910 por Ernest Marsden y Hans Geiger bajo la supervisión de Rutherford. En la versión final de estos experimentos, se lanzaron partículas alfa provenientes de la desintegración radiactiva de radón-222 en forma de un fino haz obtenido por medio de un colimador. El objetivo al que se lanzaba es haz fue una lámina de oro de 2  $\mu\text{m}$  de grosor. Para observar la dispersión, se colocaba una pantalla fluorescente que brillaba al ser impactada por una partícula alfa. Todos los elementos: emisor de partículas, objetivo y pantalla eran colocados dentro de un tubo sellado al que se le extraía el aire creando un vacío.

En base a los datos obtenidos de los experimentos, el mismo Rutherford propuso otro modelo, el modelo de Rutherford (1911), en el cual los electrones orbitan alrededor de un núcleo compacto y muy masivo de carga positiva, de la misma forma en que los planetas orbitan alrededor del sol, razón por la cual este modelo fue llamado *modelo planetario del átomo*.

## 2. Montaje experimental

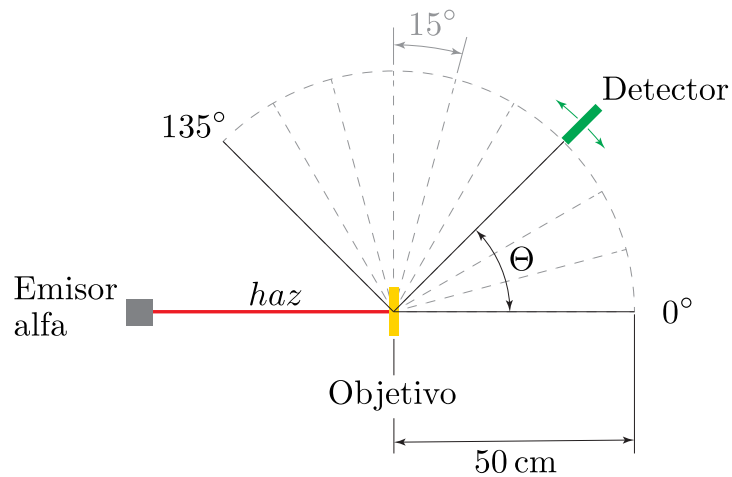
El experimento se basa en simular el lanzamiento de un haz de  $10^8$  partículas alfa hacia una lámina muy delgada de oro. El haz tiene 1  $\text{mm}^2$  de área y las trayectorias de las partículas dentro de este son perfectamente paralelas, pero la distancia a partir del centro es aleatoria (ver figura 1). Las partículas del haz, con energía de 5.5 MeV inciden perpendicularmente en la lámina de oro de un grosor de  $10^{-6}$  m.



**Figura 1:** Haz de partículas alfa: Para cada partícula en el haz, la energía cinética es la misma y las trayectorias son paralelas. La distancia a partir del centro del haz de cada trayectoria es aleatoria.

Para cada partícula en la simulación, se considerarán las interacciones que estas tienen con el material del objetivo para determinar la trayectoria que debe seguir al momento de alcanzarlo.

Se coloca un detector que cuenta el paso de partículas alfa con el fin de determinar cuántas de las partículas que inciden en el objetivo se dispersan a un ángulo  $\Theta$  respecto de la trayectoria original del haz. El detector tiene un área efectiva (circular) de  $4 \text{ cm}^2$  y puede moverse sobre un círculo centrado en el punto de impacto del haz con el material. El detector puede girarse a intervalos de  $15^\circ$  entre  $0^\circ$  y  $135^\circ$  (Ver figura 2).



**Figura 2:** Dispersión de Rutherford: Montaje experimental de la simulación.

Al simulador se accede desde un navegador web no siendo necesaria instalación alguna en la computadora. El enlace de acceso lo puede encontrar en la página de Moodle de la olimpiada o en haciendo click en el siguiente enlace: [Simulador de dispersión de Rutherford](#).<sup>1</sup>

En el simulador se puede escoger el ángulo al cual se coloca el detector por medio de dos botones etiquetados como  $-$  y  $+$ . El ángulo se muestra gráficamente y su valor aparece entre los botones ya mencionados. Ya que se tiene el ángulo deseado se presiona el botón con el símbolo  $\blacktriangleright$  para ejecutar (correr) la simulación y obtener un valor de conteos. Si desea correr otra simulación para el mismo valor de ángulo, solo hay que presionar  $\blacktriangleright$  nuevamente.

También se cuenta con botones de “borrar” y “reiniciar”. El botón borrar solo elimina el último conteo obtenido. Esto es útil en el caso de que exista confusión sobre si al presionar el botón  $\blacktriangleright$  esté dando un nuevo conteo. El botón de reinicio retorna todo el simulador a sus valores originales.

### 3. Procedimiento experimental

Con el simulador realice lo siguiente:

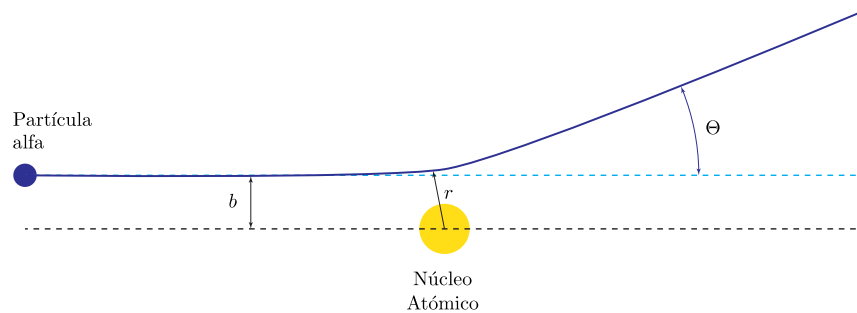
1. Mida el número de partículas dispersadas para cada ángulo posible del detector en el experimento.
2. Construya una gráfica con las mediciones utilizando escala semi-logarítmica para el conteo de partículas en el detector en función del ángulo. Desprecie la incertidumbre en el ángulo.

### 4. Modelo de Rutherford

Ernest Rutherford propuso un modelo en que toda la carga positiva está concentrada en núcleos muy pequeños y pesados. Al ser los electrones muy pequeños, la mayoría del volumen de un átomo está vacío, por lo que las partículas en su mayoría pueden pasar sin interactuar. Las partículas que pasan muy cerca de los núcleos son las que se dispersan al ser repelidas por la fuerza de Coulomb. En la figura 3 se muestra la trayectoria que tomaría una partícula alfa al ser dispersada por un núcleo. La línea que describe la trayectoria inicial de la partícula alfa se encuentra a una distancia  $b$  de una paralela que pasa por el centro del núcleo. La partícula se aproxima hasta una distancia mínima  $r$  del núcleo describiendo una trayectoria *hiperbólica* y continúa alejándose. La trayectoria final es tal que forma un ángulo  $\Theta$  con la trayectoria original. Rutherford, tomando en cuenta las consideraciones ya mencionadas así como la carga eléctrica que debe tener el núcleo atómico y que la cantidad de partículas dispersadas a un ángulo  $\Theta$  debe ser proporcional a la cantidad de partículas originales en el haz, dedujo una expresión para la cantidad de partículas  $I$  que se esperaba tener a un ángulo  $\Theta$ :

---

<sup>1</sup> El enlace completo es: [https://oibf-2022.gofisica.org/U2FsdGVkX19tLoU3wB4bwMEQzQZH3HhQVzpN0pcjTZJfNUAX8q3Fb4TUZyHQ-qZx/main\\_es.html](https://oibf-2022.gofisica.org/U2FsdGVkX19tLoU3wB4bwMEQzQZH3HhQVzpN0pcjTZJfNUAX8q3Fb4TUZyHQ-qZx/main_es.html)



**Figura 3:** Modelo de Rutherford: Trayectoria hiperbólica descrita por una partícula alfa al experimentar una fuerza de repulsión eléctrica al pasar cerca de un núcleo atómico.

$$I = I_0 N_x \left[ \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{4E} \right]^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \Delta\Omega. \quad (1)$$

donde:

- $Z_1$ : Número  $Z$  de las partículas alfa (núcleos de helio).  $Z_1 = 2$ .
- $Z_2$ : Número  $Z$  del oro.  $Z_2 = 79$ .
- $e$ : Carga fundamental.  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C.
- $\epsilon_0$ : Permitividad del vacío.  $\epsilon_0 = 8.8 \times 10^{-12}$  F/m.
- $E$ : Energía de las partículas del haz incidente.
- $\Delta\Omega$ : Ángulo sólido subtendido por el detector.
- $N_x$ : Densidad de núcleos dispersores por unidad de área.
- $I_0$ : Número de partículas incidentes.

#### 4.1. Ajuste a la función propuesta por Rutherford

La ecuación (1) es de la forma:

$$I = \frac{k}{\sin^n(\theta/2)}$$

Ajuste los datos tomados del simulador a esta función. Desprecie las incertezas en los ángulos.

1. Determine el valor de  $k$
2. Determine el valor de  $n$

3. ¿Puede el modelo de Rutherford explicar el comportamiento de las partículas dispersadas? Discuta brevemente su respuesta

#### 4.2 Estimación del radio del núcleo atómico

A partir de los datos tomados en el simulador, encuentre una cota superior mínima para el radio del núcleo atómico considerando las siguientes expresiones que se obtienen de la trayectoria hiperbólica:

$$b = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{2E} \sqrt{\frac{1 + \cos \Theta}{1 - \cos \Theta}}$$

$$r = \frac{b \cos(\Theta/2)}{1 - \sin(\Theta/2)}$$

A la cantidad  $b$  se le conoce como *parámetro de impacto*. No desprecie la incertidumbre del ángulo.

# Solución problema experimental

Olimpiada iberoamericana de física 2022

## 3. Procedimiento experimental (6 puntos)

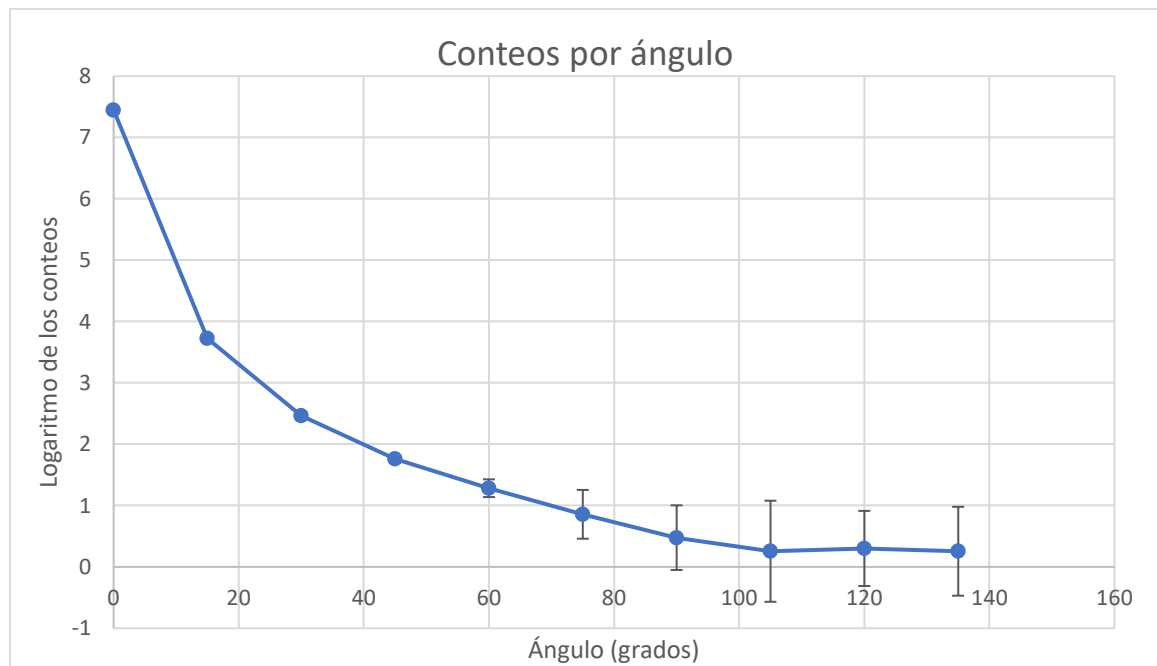
1. *Mida el número de partículas dispersadas para cada ángulo posible del detector en el experimento. (3 puntos)*

Se debe tomar al menos 5 mediciones para cada ángulo para poder obtener un valor medio, por medio de un promedio y una incerteza. Para la incertezas se puede utilizar ya sea la desviación estándar como tal o la desviación de la media, que es la desviación estándar dividida el número de mediciones.

2. *Construya una gráfica con las mediciones utilizando escala semi-logarítmica para el conteo de partículas en el detector en función del ángulo. Desprecie la incertidumbre en el ángulo. (3 puntos)*

La gráfica de estos datos, tomando el logaritmo natural del promedio de los conteos,  $Z = \ln I$  y propagando el error por medio de la fórmula

$$\Delta Z = \frac{\Delta I}{I}$$



#### 4.1 Ajuste a la función propuesta por Rutherford (11 puntos)

1. **Determine el valor de  $k$  (4 puntos)**

Se puede optar por varios métodos para el ajuste. A manera de ejemplo se utiliza:

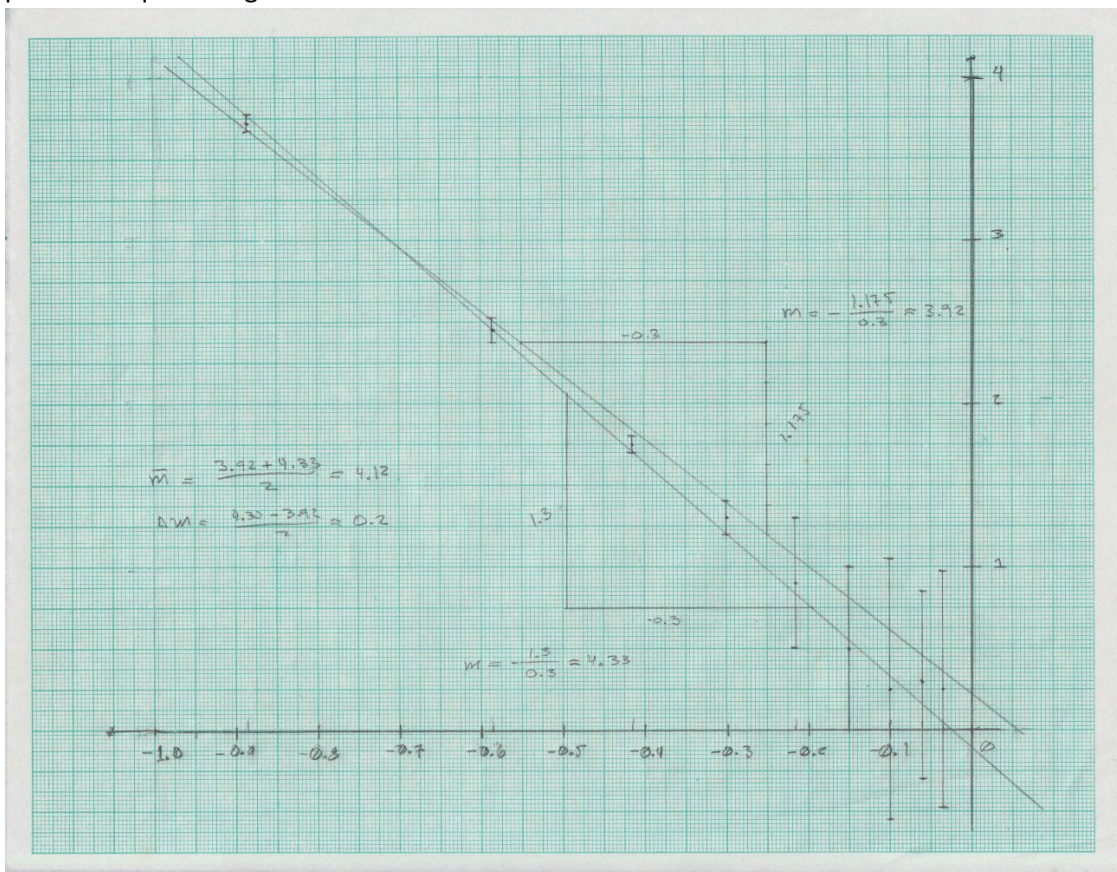
$$\ln I = \ln k - n \ln[\sin(\theta/2)]$$

Graficando en papel milimétrico y utilizando la técnica de las dos rectas que puedan pasar por la mayoría de puntos dentro del rango de incerteza, se obtiene un valor para  $k \approx 1.1$  con incertidumbre  $\Delta k \approx 0.2$ . Las unidades de  $k$  son conteos o adimensional.

2. **Determine el valor de  $n$  (5 puntos)**

En la misma línea del inciso anterior, se obtiene  $n \approx 4.1$  y  $\Delta n \approx 0.2$

Esta es una gráfica de ejemplo. En este caso en el eje de las  $x$  se grafica el  $\sin(\theta/2)$  por lo que la pendiente queda negativa.



3. ¿Puede el modelo de Rutherford explicar el comportamiento de las partículas dispersadas? Discuta brevemente su respuesta **(2 puntos)**

El valor del exponente  $n = 4.1 \pm 0.2$  obtenido en el inciso anterior concuerda con el propuesto por el modelo de Rutherford con lo cual se puede concluir que este modelo si describe el comportamiento de la dispersión de partículas.

#### 4. 2 Estimación del radio del núcleo atómico (3 puntos)

Para calcular la cota superior mínima para el radio del núcleo atómico a partir de las expresiones:

$$b = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{2E} \sqrt{\frac{1 + \cos \Theta}{1 - \cos \Theta}}$$

$$r = \frac{b \cos(\Theta/2)}{1 - \sin(\Theta/2)}$$

estas se evalúan con los datos proporcionados en el documento y para el mayor ángulo en el cual se encontraron conteos, en este caso  $\Theta=135^\circ$ .

Para la incerteza en el ángulo se toma en cuenta que el detector tiene un área efectiva de  $4 \text{ cm}^2$  ( circular ) y que está a  $50 \text{ cm}$  del centro de dispersión. Con esto, se calcula que la apertura angular es de  $2.58^\circ$ . El ángulo, entonces varía de  $133.71^\circ$  a  $136.29^\circ$ .

Calculando los valores de  $r$  para estos valores se tiene:

$$b(133.71^\circ) \approx 8.8882 \times 10^{-15} \text{ m}, \quad r(133.71^\circ) \approx 4.3405 \times 10^{-14} \text{ m}$$

$$b(136.29^\circ) \approx 8.3397 \times 10^{-15} \text{ m}, \quad r(136.29^\circ) \approx 4.3196 \times 10^{-14} \text{ m}$$

El valor medio y la incertidumbre para  $r$  es:

$$\bar{r} \approx 4.33 \times 10^{-14} \text{ m}, \quad \Delta r \approx 0.01 \times 10^{-14} \text{ m}$$