

# Espectrómetro de Masas

Alejandro Restrepo Giraldo y Juan Sebastián Ramírez Quintero

*Instituto de Física, Universidad de Antioquia*

Agosto, 2022

## 1. Introducción

Las cargas eléctricas son una propiedad fundamental de la materia la cual junto con la gravedad rigen nuestro día a día. La teoría del electromagnetismo se basa en la interacción de cargas con los campos eléctrico y magnético con lo cual describe fenómenos como la luz, el campo magnético terrestre, la estructura de los átomos, los instrumentos tecnológicos, etc. Las muchas aplicaciones que encontramos a nuestro alrededor como televisores, teléfonos y luz eléctrica funcionan con estos principios.

Una de las aplicaciones más importantes para la ciencia es el espectrómetro de masas, el cual mediante la interacción de cargas eléctricas con campos magnéticos permite la determinación de la relación carga/masa de partículas tan pequeñas que de otro modo sería imposible. Por ejemplo, los químicos lo utilizan para la determinar las masas de partículas y moléculas para así identificar las sustancias con las cuales están trabajando. Por otro lado, los físicos los utilizan para determinar masas de núcleos atómicos e identificar los isótopos presentes en una sustancia de interés.

Este instrumento es una motivadora introducción a la interacción de cargas eléctricas con campos magnéticos ya que a pesar de su simplicidad involucra los aspectos necesarios para desarrollar intuición acerca del concepto de la fuerza de Lorentz y su dependencia con las variables fundamentales del sistema.

## 2. Marco Teórico

La fuerza que rige la dinámica de cargas eléctricas puntuales en presencia de campos electromagnéticos es denominada la fuerza de Lorentz cuya expresión es

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})] \quad (1)$$

en donde  $\mathbf{F}$  es el vector de fuerza,  $q$  es el valor de la carga eléctrica,  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico y  $\mathbf{B}$  el campo magnético. Recordar que las unidades en el sistema internacional (S.I.) de la fuerza son Newtons (N), de carga eléctrica son Coulombs (C), las de campo eléctrico son Newtons por Coulomb (N/C), de velocidad son metros por segundo (m/s) y de campo magnético son Teslas ( $T = \text{Kg}/\text{A}/\text{s}^2$ ).

Otro concepto importante es el de vector. Los vectores se pueden definir en física como magnitudes con dirección, por ejemplo si una persona se desplaza 10 metros dirección norte se asocia a esta cantidad un vector de magnitud 10 metros y dirección norte. Los vectores se representan como flechas en los planos cartesianos con componentes como valores de los ejes coordenados tal como se muestra en la figura 1. En la fuerza de Lorentz están involucrados los vectores  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$ .

Cuando los vectores son perpendiculares al plano de vista, por ejemplo perpendiculares a esta pantalla, se denotan de manera diferente. Si son entrantes se denotan con cruces y si son salientes como circunferencias con un punto en el centro. Esta convención viene inspirada en la perspectiva

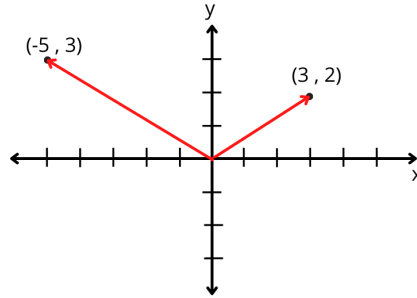


Figura 1: Representación de vectores en el plano cartesiano.

que se tendría de una flecha que se aleja de quién la observa (curces) y cuando se acerca (circunferencias con un punto en el centro). Esta convención se observa en la figura 2.

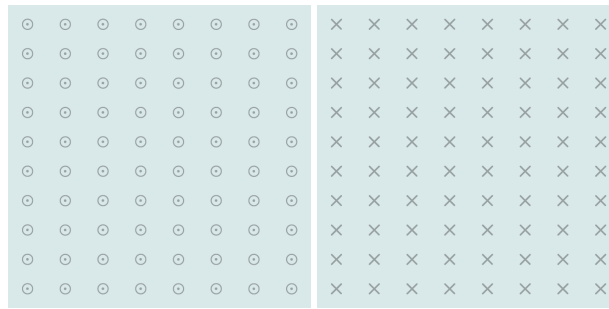


Figura 2: Izquierda: Vectores salientes. Derecha: Vectores entrantes.

La cruz en el producto  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  no es una multiplicación convencional; se refiere al producto cruz entre vectores. Este está definido como un vector  $\mathbf{A}$  cuya magnitud es  $|\mathbf{A}| = |\mathbf{v}||\mathbf{B}|\sin(\theta)$  (siendo  $\theta$  el ángulo formado entre los vectores  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{v}$ ) y dirección está dada por la regla de la mano derecha. Esta regla se define como se muestra en la figura 3: con la mano derecha orientar los dedos índice y corazón en dirección de los vectores que se multiplican, luego el pulgar dará la dirección del vector producto.

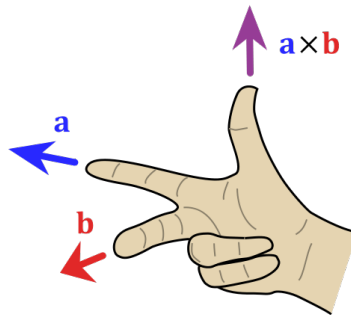


Figura 3: Regla de la mano derecha aplicada al producto cruz  $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ . Tomada de Wikimedia Commons.

Con estos conceptos se puede comprender la información expresada en la ecuación 1. Una partícula con carga  $q$  y vector de velocidad asociado  $\mathbf{v}$  en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza dada por el producto  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Si además se añade un campo eléctrico aparece una fuerza

adicional  $q\mathbf{E}$ . La fuerza total entonces será  $\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})]$ . Notar que la dirección de la fuerza depende del signo de las cargas eléctricas, las cargas positivas seguirán una trayectoria en un sentido mientras que las cargas negativas lo seguirán en el contrario.

En un caso más simple se tiene  $\mathbf{E} = 0$  y los vectores perpendiculares  $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ . Por tanto la fuerza de Lorentz tiene la forma

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

Con estas condiciones se obtiene que la partícula sigue una trayectoria circular el cual es el fundamento del espectrómetro de masas.

En la figura 4 se observan trayectorias de partículas subatómicas cargadas en un campo magnético uniforme entrante. Se evidencian las trayectorias circulares y la dependencia de la dirección de rotación con el signo de la carga eléctrica.

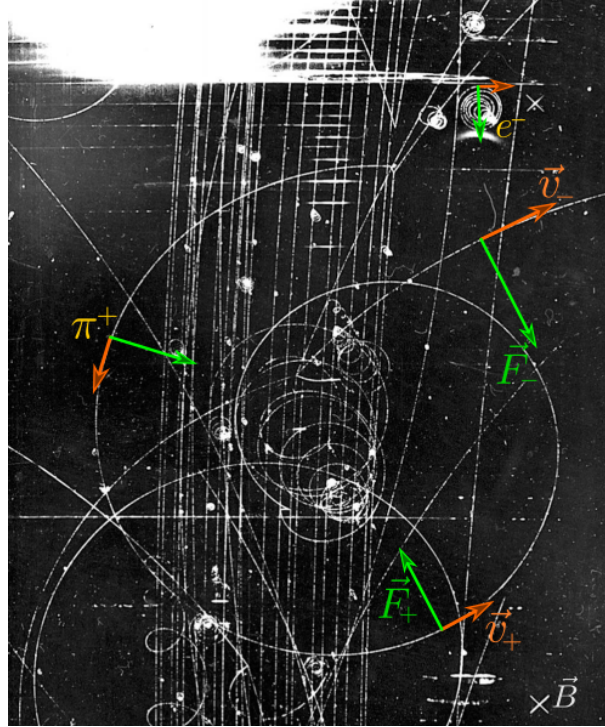


Figura 4: Trayectorias de partículas cargadas. Tomada de Wikimedia Commons.

El espectrómetro de masas aprovecha esta dinámica de las partículas para determinar la relación carga/masa de átomos y moléculas presentes en una sustancia que se somete a estudio. Al ingresar estas con una velocidad  $\mathbf{v}$  en la región del campo magnético  $\mathbf{B}$  se deflexan en una trayectoria circular y colisionan con una pantalla en donde este radio puede ser medido. La masa  $m$ , carga  $q$ , magnitud de la velocidad  $v$  y magnitud del campo magnético  $B$  se relacionan con el radio de la trayectoria como:

$$r = \frac{mv}{|q|B} \quad (3)$$

por tanto la relación carga/masa es

$$\frac{|q|}{m} = \frac{v}{rB} \quad (4)$$

Este fenómeno se evidencia en imagen 5 de la simulación.

Posteriormente a este proceso, se registran las distancias de los impactos y se obtiene un espectro de relación carga-masa  $m/Z$  contra intensidad. Este se muestra en la figura 6 junto con un modelo de espectrometro de masas comercial.

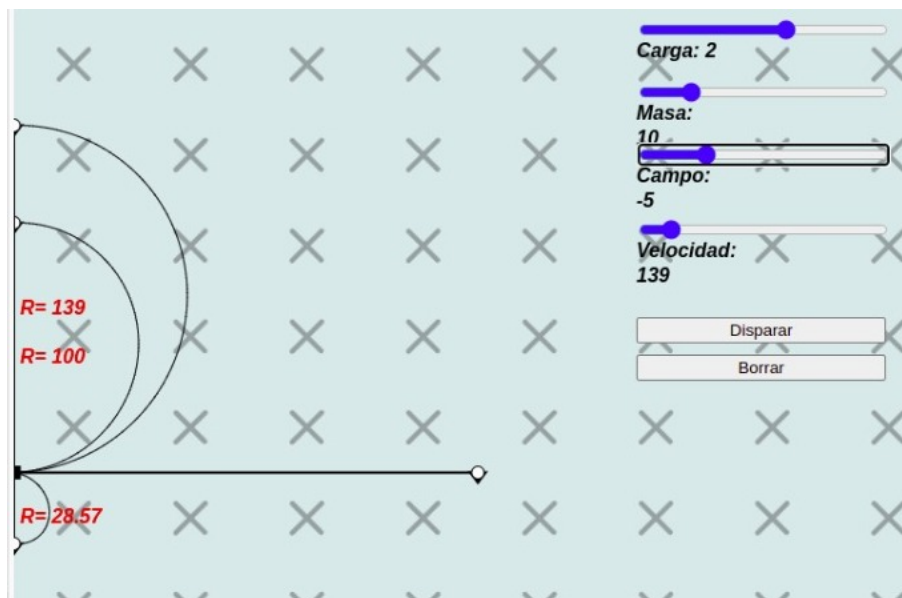


Figura 5: Espectrómetro de masas.

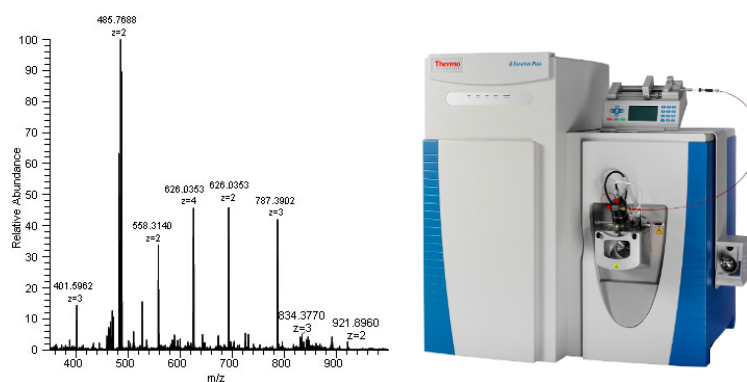


Figura 6: *Izquierda*: Espectro de masas. Tomado de Broad Institute. *Derecha*: Espectrómetro de masas comercial. Tomado de Creative Proteomics.

## Referencias

- [1] D. L. Eggleston, "Basic Electronics for Scientists and Engineers", Cambridge University Press, (2011).
- [2] Young, Hugh D. "Sears y Zemansky física universitaria." (2013).
- [3] Beynon, John Herbert and Brown, Louis. "mass spectrometry". Encyclopedia Britannica, 24 Mar. 2020, <https://www.britannica.com/science/mass-spectrometry>. Accessed 4 August 2022.
- [4] Franco García, A. (2000). El espectrómetro de masas. Física con ordenador. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/espectrometro/espectro.html>