

**DEMO 89**

**Acelerador magnético o de Gauss**



<b>Autor de la ficha</b>	Chantal Ferrer, Ana Cros
<b>Palabras clave</b>	Interacción magnética, estados ligados y no ligados, energía cinética, acelerador lineal
<b>Objetivo</b>	Entender un fenómeno de <b>aparente</b> no conservación de la energía y momento lineal. Profundizar en el concepto de energía de ligadura y energía interna y su relación con la energía cinética.
<b>Material</b>	Perfil curvo, esferas de acero e imán esférico del mismo tamaño
<b>Tiempo de Montaje</b>	Nulo

**Descripción**

Una bola de acero se deja caer desde un extremo y colisiona con las demás bolas de acero. La bola del extremo opuesto sale despedida con una velocidad que es prácticamente la misma con la que colisionó la bola inicialmente (en la medida en que podemos considerar la colisión quasielástica).



Se repite la experiencia pero sustituyendo ahora la primera de las tres bolas que están estacionarias por un imán esférico (destacado en amarillo). Al realizar el experimento resulta evidente que en este caso la bola de acero del extremo opuesto sale disparada a mucha mayor velocidad que la bola entrante. ¿De dónde provienen la energía y el momento extra?



Configuración A

Configuración B

Esta aparente violación de la conservación del momento lineal y la energía se explica teniendo en cuenta que existe una interacción magnética entre el imán esférico y las bolas de acero. La energía cinética de la última bola es igual a la variación de energía magnética al pasar de la configuración A a la configuración B. Para analizar la energía magnética de ambas configuraciones despreciaremos la interacción magnética debida a la bola en movimiento, puesto que en ambas configuraciones esta bola se encuentra inicialmente muy lejos de las otras tres. En el esquema se ve claramente que en la configuración A el imán se encuentra en la posición inicial, con dos bolas de acero a su derecha. En la configuración B, en cambio, el imán se encuentra en el centro, a igual distancia de ambas bolas de acero. La energía magnética en cualquier configuración será la debida a la interacción del imán con cada una de las bolas de acero ( $U_{i-b1}$  y  $U_{i-b2}$ ), más la interacción de las dos bolas de acero entre sí ( $U_{b1-b2}$ ).

$$U = U_{i-b1} + U_{i-b2} + U_{b1-b2}$$

Dado que la interacción entre las distintas bolas es atractiva, cada uno de los términos de energía será negativo, dando lugar a dos configuraciones estables, A y B, que, sin embargo, no tienen la misma energía total. Como todos los términos son negativos, analizaremos su magnitud en valor absoluto.

La interacción entre imanes es una interacción de tipo dipolar, por lo que es de esperar que la energía de interacción dependa de la imanación de las bolas, así como de la distancia  $d$  entre ellas (disminuirá con la distancia aproximadamente como  $1/d^3$ ). Para analizar la magnitud de los tres términos de energía en mayor detalle consideraremos de forma razonable que la imanación del imán es mucho mayor que la de las bolas de acero, y que las bolas de acero tienen, en primera aproximación, la misma imanación en las dos configuraciones.

Es razonable considerar entonces que la mayor contribución a la energía provenga de la interacción del imán con las bolas de acero, siempre que éstas no estén demasiado alejadas. Centrémonos pues en los términos  $U_{i-b1}$  y  $U_{i-b2}$ . El término  $U_{i-b1}$  tendrá el mismo valor en las configuraciones A y B, puesto que la distancia entre la primera bola de acero y el imán es la misma y las imanaciones son iguales. Sin embargo, podemos afirmar que el término  $U_{i-b2}$  es mucho menor (en valor absoluto) en la configuración A que en la B, puesto que en este segundo caso la distancia imán-bola es el doble. Suponiendo, como hemos indicado antes, que la interacción es dipolar, podemos estimar que  $|U_{i-b2}^B| \approx 8|U_{i-b2}^A| = 8|U_{id}|$ , donde  $U_{id}$  es la energía magnética entre el imán y una bola situada a una distancia  $d$ .

Por supuesto, el término  $U_{b1-b2}$  cambiará en un factor similar, aunque en este caso será mayor, en valor absoluto, en la configuración A:  $|U_{b1-b2}^A| = |U_{bd}| \approx 8|U_{1-2}^B|$ , donde  $U_{bd}$  es la energía magnética de dos bolas de acero separadas una distancia  $d$ . Sin embargo, como la imanación de las bolas de acero es mucho menor, este cambio será muy inferior. Por lo tanto, la energía magnética en A es menor que en B en módulo.

Finalmente, la energía magnética de cada estado puede estimarse como:

$$\begin{array}{l} \text{A:} \quad U_A \approx U_{id} + \frac{1}{8}U_{id} + U_{bd} \\ \text{B:} \quad U_B \approx U_{id} + U_{id} + \frac{1}{8}U_{bd} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{-----} \quad U=0 \\ \text{-----} \quad U_A \\ \text{-----} \quad U_B \end{array}$$

Hemos eliminado los valores absolutos puesto que todos los términos son negativos (podemos verla como una energía de ligadura).

Restando ambas energías obtenemos  $U_A - U_B \approx -\frac{7}{8}U_{id} + \frac{7}{8}U_{bd} = \frac{7}{8}|U_{id}| - \frac{7}{8}|U_{bd}| > 0$ , puesto que  $U_{bd}$  es mucho menor, en valor absoluto, que  $U_{id}$ , y ambas energías son negativas. Esta diferencia de energía es por tanto la que se transforma en energía cinética en la configuración B. Podemos concluir que la configuración B corresponde a un estado de menor energía magnética (mayor energía de ligadura y por lo tanto más estable).

Teniendo en cuenta en el balance energético las energías cinéticas de ambas configuraciones tendríamos:

$$T_B = T_A + (U_A - U_B) > T_A$$

Esta demostración puede usarse también como símil o ejemplo de sistema ligado en el que, teniendo que conservarse la energía del sistema, un aumento de la energía potencial interna se traduce en un aumento de la energía cinética cuando ésta se libera (como sucede, por ejemplo en el proceso de fisión de los núcleos atómicos).

PARA INFORMACIÓN MÁS DETALLADA: [http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/lin\\_accel.pdf](http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/lin_accel.pdf)

Es posible configurar una serie de lanzadores secuenciales, sobre una guía horizontal, de forma que la bola acelerada por un primer lanzador impacta un segundo lanzador, y una segunda bola sale disparada a mayor velocidad aún, etc. Se tendría, en definitiva, un sistema análogo al acelerador lineal o Linac que se utiliza en las grandes instalaciones para acelerar los haces de iones o de partículas elementales que se emplean en colisiones. Ver, por ejemplo: <http://scitoys.com/scitoys/scitoys/magnets/gauss.html>

### Sugerencia

- Se recomienda presentar el fenómeno con la bola de acero y el imán esférico y dirigir progresivamente la discusión sobre cómo explicar lo que sucede.
- Se puede cuestionar de dónde sale la energía magnética necesaria para incrementar la energía cinética. Para ello hay que tener en cuenta qué sucede una vez la bola sale disparada. ¿Podemos reutilizar el lanzador en la configuración en la que se ha quedado? ¿qué hay que hacer? ¿qué energía se requiere?
- Y relacionado con lo anterior ¿Podría funcionar indefinidamente un lanzador con forma circular (tipo móvil perpetuo)?

### Advertencias

SE RECOMIENDA EXTREMO CUIDADO PARA NO PERDER LAS BOLAS