

se obtiene $\langle \lambda \rangle \approx 10^{-8}$ m, que supera en dos ordenes la distancia entre los nodos del metal (véase también (III.7.3.7°) y (VII.2.5.5°)).

§ III.11.3. Carga específica de las partículas.

Espectrometría de masas

1°. La característica de una partícula es su *carga específica*, es decir, la relación q/m entre la carga de la partícula y su masa. La determinación experimental de la carga específica se basa en el estudio de la desviación de las partículas bajo la acción conjunta de un campo eléctrico y un campo magnético. Conociendo la carga específica q/m y la carga q , se determina la masa de la partícula.

2°. Se denomina *espectro de masas* de las partículas el conjunto de valores de sus masas. En la *espectrometría de masas*, valiéndose de aparatos especiales (espectrógrafos y espectrómetros de masas), se mide con gran exactitud la concentración relativa de los isótopos de los elementos químicos (VIII.1.1.3°) y sus masas.

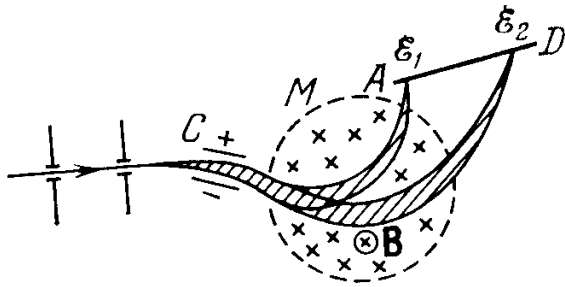


Fig. III.11.5.

3°. En el *espectrógrafo de masas de Aston* (fig. III.11.5), con el cual fue descubierta la existencia de isótopos de diversos elementos químicos, se efectúa la desviación de las partículas cargadas en el campo eléctrico uniforme del condensador C y en el campo magnético de la bobina M , ambos perpendiculares entre sí. En el campo eléctrico, las partículas se desvían hacia las placas del condensador tanto más cuanto menor es su velocidad y mayor es la carga específica. En el campo magnético uniforme B , dirigido hacia detrás de la figura, las partículas se mueven describiendo arcos de circunferencias (III.11.1.6°) de radio tanto mayor cuanto mayor es la velocidad de las partículas y menor es su carga específica. En el campo magnético, el haz de partículas se desdobra en varios haces, a cada uno de los cuales le corresponde un valor determinado de la carga específica. El campo magnético enfoca las partículas que tienen distintas velocidades, pero la misma magnitud q/m . la inducción B se elige de tal modo que las partículas cargadas se enfoquen sobre la placa fotográfica AD situada perpendicularmente al plano de la figura.

La serie de rayas paralelas estrechas que se obtienen en la placa fotográfica corresponden a distintos valores de las cargas específicas de las partículas. En la fig. III.11.5, la raya φ_1 corresponde a las partículas con cargas específicas mayores, y la φ_2 , a las partículas con cargas específicas menores, y la carga específica de las partículas en la raya φ_1 , la distancia entre φ_1 y φ_2 y los parámetros de la instalación, se puede hallar la carga

específica de las partículas correspondiente a la raya φ_2 .

Sustituyendo los condensadores planos por cilíndricos y utilizando electroimanes especiales, que proporcionan un haz de plano paralelo de partículas que irrumpen en el campo magnético, se efectúa el *doble enfoque* de éstas por energías y direcciones.

Con esto, si es suficiente la intensidad de las rayas en las placas fotográficas, se consigue una elevada exactitud en la medición de las masas. Por ejemplo, las masas de los iones de los elementos ligeros se miden con una exactitud de hasta el 10^{-4} %.

4°. Para determinar la concentración relativa de isótopos de elementos químicos en sus mezclas naturales, se utilizan *espectrómetros de masas*, aparatos que registran eléctricamente las corrientes iónicas. En los espectrómetros de masas se emplean haces de iones con energías cinéticas semejantes según su magnitud, o sea, haces monocromáticas (monoenergéticos) generados por fuentes iónicas de estructura especial. Estos haces, incluso si son muy divergentes y contienen gran cantidad de iones, se enfocan bien en el campo magnético transversal. Con esto se logra elevar la exactitud de medición de las concentraciones de distintos isótopos.

§ III.11.4. Aceleradores de partículas cargadas

1°. Las instalaciones especiales para obtener, en condiciones de laboratorio, haces dirigidos de partículas cargadas (electrones, protones, núcleos atómicos o iones de elementos químicos) con gran energía cinética, se llaman *aceleradoras*. Por la forma de la trayectoria y el mecanismo de aceleración de las partículas, los aceleradores se dividen en *lineales, cíclicos y de inducción*.

En los aceleradores lineales, las trayectorias de las partículas son casi líneas rectas; en los aceleradores cíclicos y de inducción, las trayectorias son circunferencias o espirales que se desencallan.

2°. El aumento de la energía de las partículas que se realiza mediante la acción del campo eléctrico del acelerador. En dependencia del tipo de este último, en el campo puede ser electrostático (III.2.1.2°), inducido (III.12.1.2°) o alternativo de alta frecuencia. La estructura de un betatrón, cuya acción se basa en el campo magnético inducido, se expone en III.14.2.3°. En el *acelerador electrostático lineal*, la partícula cargada pasa una sola vez por el campo eléctrico acelerador de diferencia de potencial $(\varphi_1 - \varphi_2)$. Si q es la carga de la partícula, la energía que ésta adquiere en el acelerador (III.3.2.7°) constituirá

$$W = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

En este caso el campo eléctrico es engendrado, por ejemplo, por un *generador electrostático de Van de Graff* de alta tensión, en el que se efectúa la reiterada comunicación de cargas a un conductor hueco (III.3.4.3°), debido a lo cual su potencial crece hasta magnitudes limitadas por la fuga de cargas del conductor.

3°. En los *aceleradores de resonancia lineales*, el aumento de la energía de las partículas cargadas se efectúa por la acción de un campo eléctrico alternativo, de frecuencia ultraalta, que varía sincronizadamente con el moviendo de las partículas. Valiéndose de un acelerador de ese tipo, los electrones, después de recorrer varios kilómetros de distancia, se pueden acelerar hasta energías del orden de decenas de GeV.

4°. Para acelerar protones, deuterones y otras partículas cargadas, de mayor peso, se utilizan *aceleradores cíclicos de resonancia*, en los cuales la partícula pasa muchas veces

El periodo de revolución T (I.1.5.5°) de una partícula cargada en un campo magnético uniforme (III.10.1.2°) no depende de su velocidad (para $v \gg c$):

$$T = \frac{2\pi m}{B |q|} \quad (\text{en el SI})$$

$$T = \frac{2\pi mc}{B |q|} \quad (\text{en el sistema de Gauss}).$$

Esto sirve de base para crear los aceleradores cíclicos de partículas cargadas (III.11.4.6°).

7°. Si el vector velocidad v de la partícula cargada forma un ángulo α con la dirección del vector B del campo magnético uniforme, la partícula se moverá siguiendo una línea helicoidal (fig. III.11.3). El radio r de la espira y el paso h de la hélice constituirán

$$r = \frac{m v \text{sen } \alpha}{q B}, \quad h = \frac{2\pi m}{B |q|} v \cos \alpha \quad (\text{en el SI})$$

$$r = \frac{mc v \text{sen } \alpha}{|q| B}, \quad h = \frac{2\pi mc}{B |q|} v \cos \alpha \quad (\text{en el sistema de Gauss}).$$

Si el movimiento considerado tiene lugar en un campo no uniforme (III.10.1.2°) cuya inducción aumenta en dirección del movimiento de la partícula, r y h disminuirán al crecer B .

En esto se basa el enfoque de las partículas cargadas en el campo magnético.

§ III.11.2. Efecto Hall

1°. El efecto Hall (fenómeno de Hall) consiste en que en un metal o semiconductor con corriente, situado en un campo magnético perpendicular al vector densidad de la corriente (III.7.2.3°), surge un campo eléctrico transversal y una diferencia de potencial. La causa del efecto Hall es la desviación que experimentan los electrones que se mueven en el campo magnético bajo la acción de la fuerza de Lorentz (III.11.1.1°).

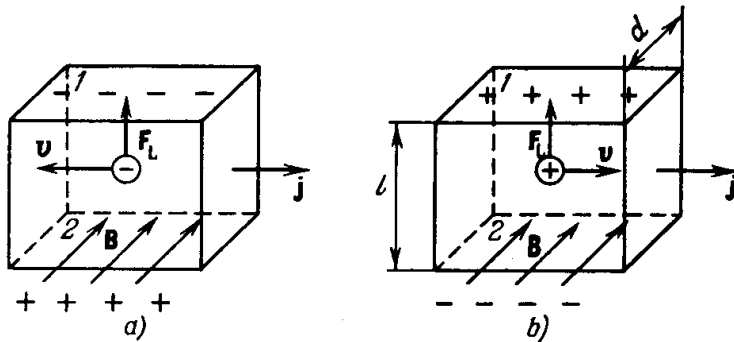


Fig. III.11.4.

En la fig. III.11.4, a se indican las direcciones de la inducción magnética B , de la densidad

$$T_0 \approx T = \frac{2\pi m}{B |q|} = \frac{2\pi W}{B |q|c^2},$$

donde $W = mc^2$ (I.5.7.2°); $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ (I.5.6.1°); m_0 es la masa en reposo de la partícula (I.5.6.1°); y c , la velocidad de la luz en el vacío. Las demás notaciones se indicaron en III.11.1.6°.

Por ejemplo, si como resultado del crecimiento de la masa m y del periodo T , la partícula se encontrara en el hueco entre las *des* (fig. III.11.6) bajo la acción de un campo eléctrico no acelerador, sino retardador, la disminución de su velocidad ocasionaría la disminución del periodo T y volvería a establecerse la igualdad $T = T_0$.

8°. Del principio de autoestabilización en fase (p. 7°) se deduce que si el aumento del periodo T_0 del campo eléctrico es bastante lento, aumentara respectivamente el periodo T de revolución de la partícula en el campo magnético del acelerador. Además crecerá la energía media (W) de todas las partículas, ya que, siendo constante la inducción del campo magnético, el aumento de T sólo será posible a expensas del aumento de la masa, que se produce al crecer la velocidad de las partículas.

Tal principio se ha realizado en el acelerador denominado *fasotrón* o *sincrociclotrón*. En este, el campo magnético es continuo y la frecuencia $\nu_0 = \frac{1}{T_0}$ (IV.1.1.2°) del campo

eléctrico alternativo varia lentamente con el periodo $\tau \gg T_0$. A medida que crece la velocidad de las partículas, aumenta el radio de sus orbitas en el fasotrón (III.11.1.6°). Esto hace que sea necesario aumentar las dimensiones del fasotrón para poder alcanzar la máxima energía de las partículas cargadas. Así, el fasotrón acelerador de protones hasta energías de 680 MeV (que funciona en la URSS), tiene un electroimán cuya masa constituye $7 \cdot 10^3$ toneladas, y el diámetro de sus polos es de 6 m.

9°. El *sincrotón* es un acelerador en el cual la frecuencia del campo magnético varia con el tiempo de sincrotón (p. 6°) es

$$T = \frac{2\pi W}{|e|c^2 B},$$

Donde e es la carga del electrón, y W , su energía. La condición de sincronismo (p. 6°) en el sincrotón se cumple $T_0 = \text{const.}$ y cuando la inducción del campo magnético crece proporcionalmente a la energía de la partícula:

$$B = \frac{2\pi W}{|e|c^2 T_0},$$

donde T_0 es el periodo del campo eléctrico acelerador de alta frecuencia.

En el sincrotrón se cumple la condición

$$\frac{m}{B} = \frac{eT_0}{2\pi} = \text{const.}$$

Las partículas se mueven por órbitas aproximadamente circulares (III.11.1.6°), por lo que en el sincrotrón se utilizan electroimanes anulares que generan campos magnéticos en una zona relativamente estrecha, próxima a la órbita circular.

10°. En el *sincrofasotrón*, que es el acelerador de protones más potentes, se combinan los principios utilizados en el fasotrón (p. 8°) y en el sincrotón (p. 9°). En este acelerador, simultáneamente y en concordancia, disminuye la frecuencia ν_0 del campo eléctrico del

$$B = \frac{F_{L \max}}{qv}$$

$F_L = F_{L \max}$ a condición de que $\text{sen} \alpha = \pi/2$ (p. 2°). Véase también (III.10.1.2°) y (III.10.4.2°).

4°. La fuerza que ejerce sobre una carga móvil q_0 otra carga móvil q_1 , se llama *fuerza de interacción magnética* entre ellas (*fuerzas magnéticas*). Para el caso particular de dos cargas positivas q_1 y q_2 que se mueven en el vacío con velocidades $v_1 = v_2 = v \ll c$ iguales y dirigidas a lo largo del eje OX , la fuerza F_m de interacción magnética entre ellas es de atracción y numéricamente constituye

$$F_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2}{r^2} v^2 \quad (\text{en el SI}),$$

siendo r la distancia entre las cargas, y μ_0 , la constante magnética (III.10.2.2°).

La fuerza F_m de la interacción magnética se puede representar de la forma

$$F_m = q_2 v \frac{\mu_0 q_1 v}{4\pi r^2} = q_2 v B$$

donde

$$B = \frac{\mu_0 q_1 v}{4\pi r^2}$$

En esta forma, la fuerza F_m coincide con la de Lorentz cuando $\text{sen} \alpha = 1$ (p. 1°), si se considera que B es la inducción del campo magnético (III.10.1.2°) generado por la carga móvil q_1 .

Este campo actúa, a su vez, sobre la carga móvil q_2 . La causa de aparición de fuerzas magnéticas y de campo magnético es el carácter que se deduce de las formulas de la teoría especial de la relatividad (I.5.1.1°), de la transformación de las fuerzas al pasar de un sistema inercial de referencia en reposo a un sistema en movimiento.

Comparando la fuerza F_m con la fuerza de repulsión estática entre dos cargas q_1 y q_2 recíprocamente en reposo, que se hallan en el vacío ($\epsilon = 1$) a la misma distancia r (III.1.2.6°),

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (\text{en el SI})$$

(ϵ_0 es la constante eléctrica en el SI), es fácil encontrar que

$$\frac{F_m}{F_e} = \frac{v^2}{c^2}$$

donde c es la constante electrodinámica (III.10.2.2°) relacionada con ϵ_0 y μ_0 por la formula

$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ (IX). Cuando la velocidad de las cargas es pequeña en comparación de la