

## Lo spettrografo di massa

Lo spettrografo di massa, realizzato da Francis William Aston nel 1919 e poi perfezionato da Kenneth Bainbridge e da altri, fu progettato per misurare le masse degli isotopi. La misura delle masse degli isotopi ha un ruolo importante nella determinazione della loro esistenza e della loro abbondanza in natura. Per esempio, il magnesio naturale è costituito per il 78,7% da  $^{24}\text{Mg}$ , per il 10,1% da  $^{25}\text{Mg}$  e per l'11,2% da  $^{26}\text{Mg}$ : questi isotopi hanno le masse nel rapporto approssimato 24:25:26.

Lo spettrografo di massa misura il rapporto massa/carica degli ioni dei vari isotopi, determinando la velocità degli ioni e misurando poi il raggio della loro orbita circolare in un campo magnetico uniforme. La figura 25.19 mostra un semplice disegno schematico di uno spettrografo di massa: gli ioni provenienti da una sorgente vengono accelerati da una differenza di potenziale ed entrano nel campo magnetico uniforme prodotto da un elettromagnete. Si può realizzare una semplice sorgente di ioni rivestendo un filamento con una soluzione che contenga il materiale di cui si vuol misurare la massa, ad esempio, magnesio naturale. Quando si riscalda il filamento, gli ioni  $^{24}\text{Mg}^+$ ,  $^{25}\text{Mg}^+$  e  $^{26}\text{Mg}^+$  vengono emessi e accelerati dalla differenza di potenziale  $\Delta V$ . L'energia cinetica degli ioni quando entrano nel campo magnetico è uguale alla perdita di energia potenziale  $q \Delta V$ :

$$\frac{1}{2}mv^2 = q \Delta V \quad 25.20$$

Gli ioni percorrono una semicirconferenza di raggio  $r$  dato dall'equazione 25.16:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Essi colpiscono la pellicola fotografica nel punto  $P_2$  posto a distanza  $2r$  dal punto in cui sono entrati nel campo magnetico. Tra le equazioni 25.16 e 25.20 si può eliminare la velocità  $v$ , ottenendo  $m/q$  in funzione delle grandezze note,  $V$ ,  $B$  e  $r$ . Risolviamo prima l'equazione 25.16 rispetto a  $v$  ed eleviamo al quadrato ciascun membro:

$$v^2 = \frac{r^2 q^2 B^2}{m^2}$$

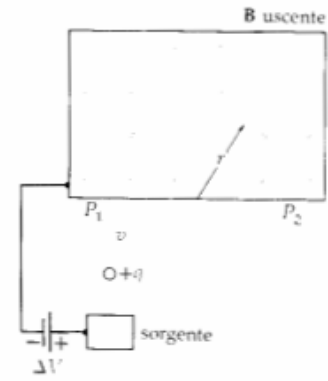
Sostituendo questa espressione al posto di  $v^2$  nell'equazione 25.20, si ottiene

$$\frac{1}{2} m \left( \frac{r^2 q^2 B^2}{m^2} \right) = q \Delta V$$

Semplificando e risolvendo rispetto a  $m/q$  si ha

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 r^2}{2 \Delta V} \quad 25.21$$

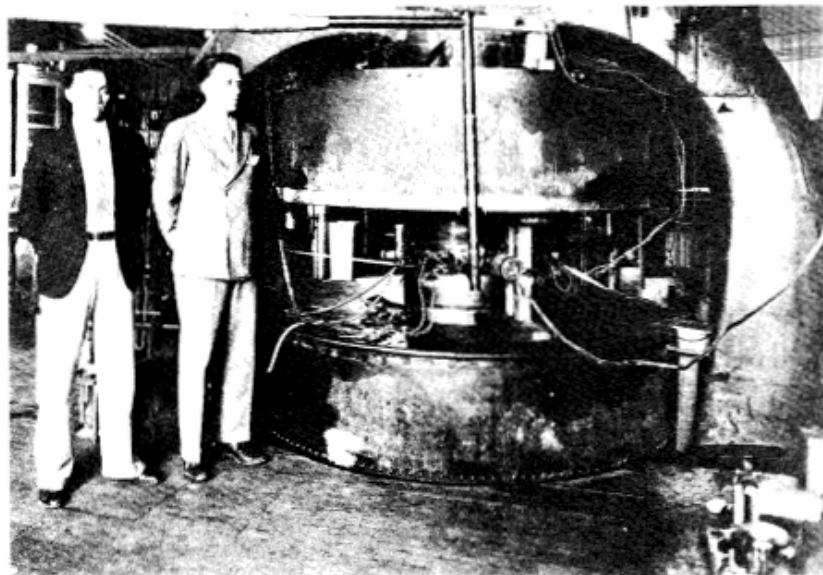
Nello spettrografo originale di Aston era possibile misurare differenze di massa con una precisione fino a 1 parte su 10 000. Si migliora la precisione introducendo un selettore di velocità tra la sorgente di ioni e il magnete, il che limita l'intervallo delle velocità degli ioni che entrano e ne determina con precisione la velocità.



**Figura 25.19.** Disegno schematico di uno spettrografo di massa. Gli ioni provenienti da una sorgente sono accelerati da una differenza di potenziale  $\Delta V$  ed entrano nel campo magnetico uniforme indicato dai punti. Essi vengono deflessi in una traiettoria a forma di arco circolare ed escono in  $P_2$ . Il raggio della circonferenza è inversamente proporzionale alla massa dello ione.

## Il ciclotrone

Il *ciclotrone* fu inventato da E.O. Lawrence e da M.S. Livingstone nel 1934 per accelerare particelle come i protoni e i deutoni ad alte energie cineti-



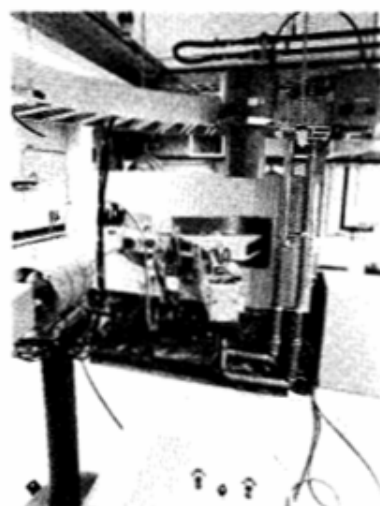
M.S. Livingstone e E.O. Lawrence in piedi vicino al loro ciclotrone da 27 in nel 1934. A Lawrence fu assegnato il premio Nobel (1939) per l'invenzione del ciclotrone.

che. (Un deutone è il nucleo del deuterio, l'idrogeno pesante,  $^2\text{H}$ , costituito da un protone e da un neutrone strettamente legati insieme.) Le particelle ad alta energia vengono poi usate per bombardare nuclei, provocando reazioni nucleari che si studiano per ottenere informazioni sul nucleo. I protoni e i deutoni di alta energia sono usati anche per produrre materiali radioattivi per scopi medici e non. Il funzionamento del ciclotrone si basa sul fatto che il periodo del moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme è indipendente dalla velocità della particella, com'è indicato dall'equazione 25.17:

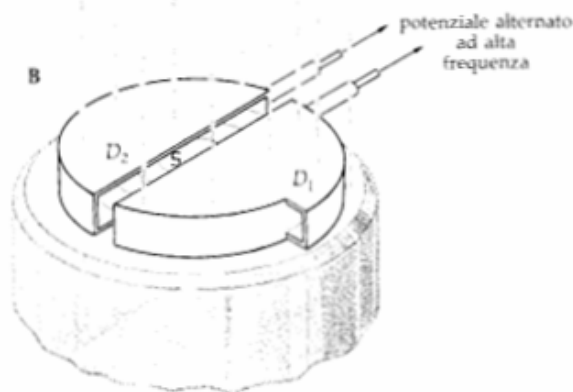
$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

La figura 25.20 è un disegno schematico di un ciclotrone. Le particelle si muovono in due contenitori metallici semicircolari chiamati «D» (a causa della loro forma). La regione all'interno di ciascuna D è schermata dal metallo da campi elettrici. Le D sono in un ambiente sotto vuoto immerso in un campo magnetico uniforme prodotto da un elettromagnete. (La regione in cui si muovono le particelle dev'essere sotto vuoto in modo che esse non perdano energia e non vengano deviate negli urti contro le molecole dell'aria.) Tra le D viene applicata una differenza di potenziale  $\Delta V$ , che varia sinusoidalmente nel tempo con il periodo  $T$ , scelto in modo che sia uguale al periodo di ciclotrone dato dall'equazione 25.17.

La particella carica viene iniettata inizialmente con una piccola velocità da una sorgente di ioni  $S$  vicina al centro del campo magnetico. Essa si muove percorrendo una semicirconfenza in una delle D e arriva all'intercapedine tra le due D dopo un tempo  $\frac{1}{2}T$ , dove  $T$  è il periodo di ciclotrone ed è anche il periodo del potenziale alternato applicato tra le D. Chiamiamo  $D_1$  la D in cui la particella percorre questa prima semicirconfenza. Il potenziale alternato è regolato in modo tale che, quando la particella arriva all'intercapedine,  $D_1$  è a un potenziale maggiore di  $D_2$ . La particella viene quindi accelerata nell'intercapedine dal campo elettrico ivi generato e aumenta di  $q \Delta V$  la propria energia cinetica. Quindi, la particella percorre nella  $D_2$  una semicirconfenza di raggio maggiore e arriva di nuovo all'intercapedine dopo un tempo  $\frac{1}{2}T$ . Nel frattempo, il potenziale tra le D si è invertito, e adesso  $D_2$  ha un potenziale maggiore. Ancora una volta la particella viene accelerata attraverso l'intercapedine e acquista l'energia cinetica addizionale  $q \Delta V$ . In ogni mezzo giro la particella acquista l'energia cinetica  $q \Delta V$  e si sposta su un'orbita semi-



Ciclotrone compatto usato per produrre nuclidi radioattivi di breve vita media, che emettono positroni, per la sintesi di traccianti radioattivi, usati nello studio delle funzioni cerebrali presso la University of Michigan; il dispositivo è chiamato Cyclotron/Positron Emission Tomography Facility.



**Figura 25.20.** Disegno schematico di un ciclotrone. È stato ommesso il polo superiore del magnete. Particelle cariche, ad esempio protoni, provenienti da una sorgente posta nel centro, vengono accelerate dalla differenza di potenziale applicata tra le due D; quando arrivano di nuovo all'intercapedine, la differenza di potenziale ha cambiato segno, e quindi esse vengono di nuovo accelerate attraverso l'intercapedine e percorrono una circonferenza di raggio maggiore. La differenza di potenziale alternata tra le D ha la frequenza di risonanza della particella, che è indipendente dal raggio della circonferenza.

circolare di raggio maggiore, finché alla fine esce dal campo magnetico. L'energia della particella che esce dal ciclotrone può essere espressa in funzione del raggio massimo usando l'equazione 25.16:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$v^2 = \frac{q^2 B^2 r^2}{m^2}$$

25.22

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{q^2 B^2}{m} \right) r^2$$

In un ciclotrone tipico una particella può compiere da 50 a 100 giri e può uscire con un'energia di parecchie centinaia di megaelettronvolt (MeV).