

Účinný prierez, určujúci pravdepodobnosť jednotlivej reakcie, je veľmi malý

$$\sigma = \frac{\sigma_M}{N} = \frac{1}{2,7 \cdot 10^{25} \cdot 5,185 \cdot 10^4} = 0,74 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2 \quad (1.62)$$

V rovnici (1.50) musí byť exponent  $N\alpha x$  bezrozmerné číslo. Pri rozmeroch  $N [\text{m}^{-3}]$ ,  $x [\text{m}]$  je rozmer účinného prierezu  $[\sigma] = \text{m}^2$ . Hlavnou jednotkou účinného prierezu je  $1 \text{ m}^2$  a vedľajšou jednotkou 1 barn (1 b). Je definovaný vzťahom

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 \quad (1.63)$$

Každú jadrovú reakciu charakterizujeme nielen rovnicou typu (1.61), ale musíme udať aj účinný prierez. Tento je funkciou energie bombardujúcich častíc (vo vzťahu (1.61) sú to  $\alpha$  častice)

$$\sigma = \sigma(W_\alpha) \quad (1.64)$$

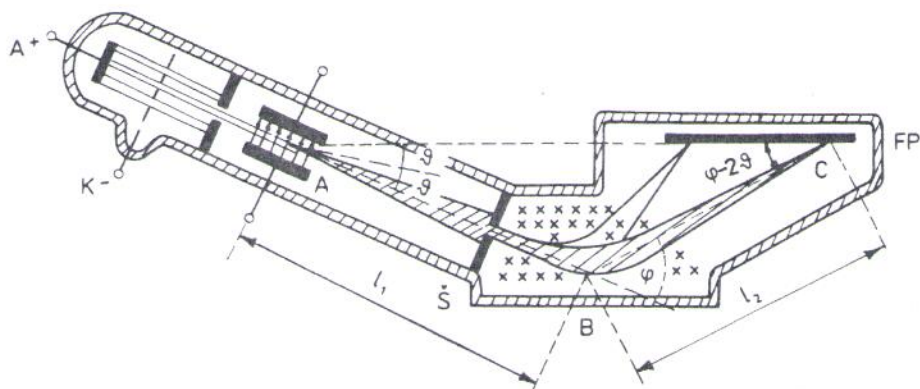
## 1.10. HMOTNOSTNÁ SPEKTROSKOPIA

Ako vieme, odtrhnutím elektrónu alebo viacerých elektrónov vznikne z atómu kladný ión. Už pri analýze kanálového žiarenia sa ukázalo, že možnosť rozlišovať ióny rôznych prvkov, ba aj izotopy podľa ich merného náboja  $e/m$ , respektíve pri danom  $e$  podľa hmotnosti  $m$ , má základný význam pre určenie ich identity. Na tento účel bolo treba vyvinúť presné zariadenia s vysokou rozlišovacou schopnosťou, ktoré dostali názov hmotnostné spektrografy. Bolo vyvinutých niekoľko typov. Všetky sa zakladajú na definovanom pohybe nabitých častíc v známom elektrickom (prípadne aj vysokofrekvenčnom) a magnetickom poli. Podrobná analýza pohybu iónov v týchto poliach patrí skôr do iónovej optiky a bližšie sa ňou zaoberať nebudeme. Oboznámime sa len s princípom niektorých z týchto zariadení.

Prvý hmotnostný spektrograf skonštruoval Aston [70]. Pracuje na nasledujúcom princípe (obr. 1.52):

Kladné častice zo zdroja iónov, napríklad z kanálového žiarenia, podľa miesta svojho vzniku medzi anódou  $A^+$  a katódou  $K^-$  prejdú rôzne potenciálové rozdiely a majú preto rôzne rýchlosti, ktoré sú okrem toho ešte závislé od merného náboja  $e/m$ . Preletom priečnym elektrickým poľom kondenzátora sa ich úzky zväzok rozšíri na vejár, z ktorého sa štrbinou  $S$  vymedzí taká časť, ktorá bola urýchlená rovnakým potenciálovým rozdielom a líši sa v rýchlostiach len následkom rozličných merných nábojov. Tento zväzok vstupuje do segmentu homogénneho magnetického poľa s indukciou  $B$ , orientovaného tak, aby v ňom vznikla odchýlka orientovaná opačne ako v elektrickom poli. Častice sa pritom pohybujú po kruhových oblúkoch s polomeri  $r = mv/eB$ , ktoré sú pre najpomalšie častice (s najväčším  $e/m$ ) najmenšie a so stúpajúcim  $m$  vzrastajú. Častice s rovnakým merným nábojom dopadajú do rovnakej polohy na fotografickej platni  $FP$ , kde sa

pri zabrzdzení indikujú vznikajúcim fotoefektom. Na fotografickej platni vznikne tak po časticiach s rôznym  $e/m$  systém dopadových bodov, respektíve prúžkov, ktoré po vyvolaní označujeme ako spektrálne čiary hmotnostného spektra.



Obr. 1.52. Astonov hmotnostný spektrograf

Aby hmotnostné spektrum vzniklo, musia sa splniť isté podmienky. Nech sa odchýlka osi vejára od zväzku vstupujúceho do kondenzátora rovná  $\vartheta$  a odchýlka v magnetickom poli nech je  $\varphi$  (obr. 1.52). Vrchol zbiehavého zväzku vytvoreného magnetickým poľom, nech je v bode  $C$ . Potom podľa obr. 1.52 v trojuholníku  $ABC$  platí podľa sínusovej vety

$$\overline{AB} : \overline{BC} = \sin(\varphi - 2\vartheta) : \sin 2\vartheta$$

respektíve pre malé uhly  $\vartheta$  a  $\varphi$

$$l_1 \cdot 2\vartheta = l_2(\varphi - 2\vartheta) \quad (1.65)$$

kde  $\overline{AB} = l_1$ ,  $\overline{BC} = l_2$ .

Túto podmienku dostaneme na základe pohybu častíc v elektrickom a magnetickom poli. Nech sa uhlová šírka zväzku prepusteného štrbinou  $\check{S}$  rovná  $d\vartheta$ . V strede magnetického poľa (v bode  $B$ ) by sa rozšírila na hodnotu  $l_1 d\vartheta$  ale v bode  $C$  (pretočenom do smeru  $AB$ ) by narástla na  $(l_1 + l_2) d\vartheta$ . Aby sa častice sústredili v bode  $C$  na fotografickej platni, musí sa ich šírka rozptýlenia  $(l_1 + l_2) d\vartheta$  kompenzovať magnetickým poľom. Keď má zväzok častíc konvergujúci do bodu  $C$  uhlovú šírku  $d\varphi$ , potom sa jeho šírka v bode  $B$  rovná  $l_2 d\varphi$  a musí platiť

$$(l_1 + l_2) d\vartheta = l_2 d\varphi \quad (1.66)$$

Pre výchylku  $\vartheta$  v elektrickom poli platí

$$\vartheta \doteq \operatorname{tg} \vartheta = \frac{\dot{x}^3}{\dot{x}^2} = \frac{e}{m} \frac{a}{v^2} E$$

odkiaľ

$$\vartheta \cdot v^2 = \frac{e}{m} aE \quad (1.67)$$

zatiaľ čo pre výchylku v magnetickom poli platí

$$\varphi \doteq \operatorname{tg} \varphi = \frac{e}{m} \frac{a}{v} B$$

odkiaľ

$$\varphi v = \frac{e}{m} aB \quad (1.68)$$

Diferencovaním rovníc (1.67 a 1.68) dostaneme

$$v^2 d\vartheta + 2v dv \cdot \vartheta = 0 \quad \frac{d\vartheta}{\vartheta} = -2 \frac{dv}{v}$$

$$\varphi dv + v d\varphi = 0 \quad \frac{d\varphi}{\varphi} = -\frac{dv}{v}$$

Dosadením do (1.66), keď  $dv/v \neq 0$ , máme

$$[-(l_1 + l_2) \cdot 2\vartheta + l_2\varphi] \frac{dv}{v} = 0$$

a po malej úprave vychádza podmienka (1.65).

Astonov hmotnostný spektrograf má malú svetelnosť, lebo má úzku vstupnú štrbinu (0,03 mm) a aj preto, že vstupné lúče nie sú rozbiehavé, teda nefokusujú sa. Má však dobrú rozlišovaciu schopnosť. Spektrálne čiary častíc odlišných o jednotku pomernej atómovej hmotnosti vychádzajú vo vzdialenostiach od 1,5 do 3 mm.

Merania pomerných atómových hmotností Astonovým spektrografom sú relatívne. Preto treba najprv skonštruovať škálu atómových hmotností. Analýza ukazuje, že závislosť pomernej atómovej hmotnosti ako funkcie vzdialenosti od pevnej značky je lineárna.

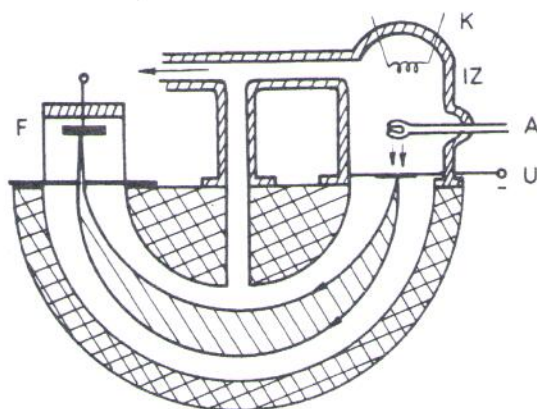
Pri vyhodnocovaní spektier treba pamätať na to, že okrem základných čiar príslušných merným nábojom  $e/m$ , vznikajú aj čiary zodpovedajúce merným nábojom

$$\frac{2e}{m}, \quad \frac{3e}{m}, \dots$$

ktoré nazývame spektrami vyšších rádov. Okrem toho v spektrách sú aj čiary prislúchajúce molekulám.

Z optiky vieme, aká je z hľadiska svetelnosti dôležitá fokusácia v optických spektrografoch. Spôsoby využitia fokusácie sa preto hľadali aj v hmotnostnej

spektrografii. Prvý hmotnostný spektrograf s fokusáciou iónov skonštruoval J. A. Dempster [71] (*obr. 1.53*). Ióny sa vyrábajú bombardovaním príslušného plynu alebo zmesi plynov v iónovom zdroji *IZ* elektrónmi emitovanými z katódy *K*. Ióny vznikajúce v okolí anódy *A* sú urýchlené smerom k vstupnej štrbine spektrografu záporným urýchľovacím napätím *U* a časť z nich vnikne do spektrografu. V homogénnom magnetickom poli spektrografu *B* majú ióny s daným  $e/m$  rovnaký polomer dráhy *R* a sfokusujú sa po prejení uhla  $\pi$  radiánov do výstupnej štrbiny a Faradayovho valca *F* spojeného s elektrometrom. Urýchľovacie napätie *U* sa nastaví tak, aby do Faradayovho valca dopadli práve ióny s požadovaným  $e/m$ .



Obr. 1.53. Dempsterov hmotnostný spektrograf

Pohyb iónov možno opísať rovnicami

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU \qquad \frac{mv^2}{R} = evB$$

odkiaľ

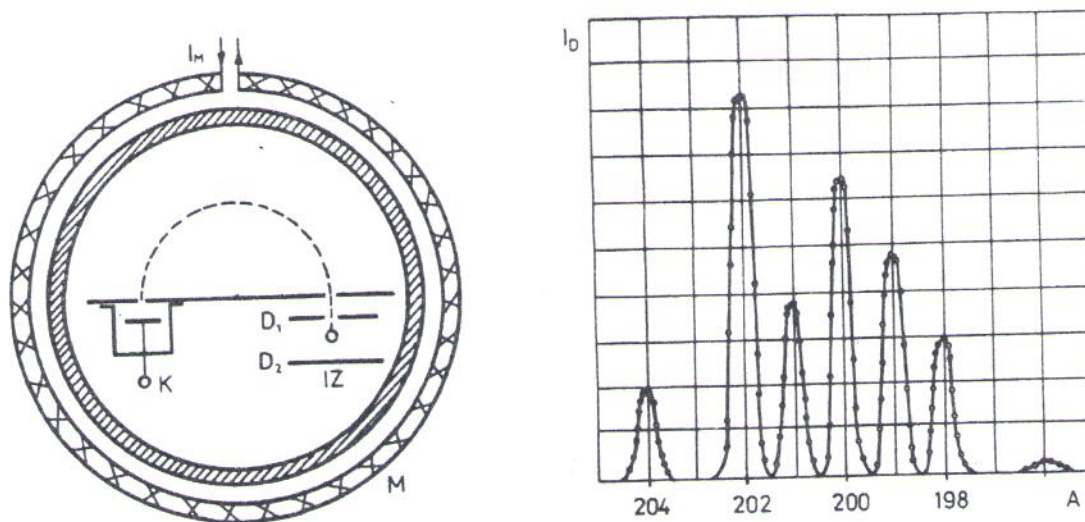
$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(RB)^2}$$

Na analogickom princípe je skonštruovaný Blackneyov spektrometer (*obr. 1.54 a*). Používa sa najmä na určovanie pomerného zastúpenia izotopov prvkov.

Ióny sa vytvárajú v iónovom zdroji *IZ* medzi elektródami  $D_1, D_2$  ostreľovaním pár plynu elektrónovým zväzkom. Urýchľovacie napätie sa nastaví tak, že na kolektor *K* sa fokusuje vždy určitý izotop. Graf prúdu detektora  $I_D$  svojimi maximami udáva pomerné zastúpenie izotopov prvku (na *obr. 1.54 b* je to Hg).

Spektrometrickými metódami sa dokázalo, že prirodzené prvky bez zreteľa na ich pôvod majú rovnaké izotopické zloženie.

Vo všeobecnosti majú chemické prvky zmesi izotopov rôzne hmotnosti, pričom sa rozdiely hmotností často rovnajú jednotke pomerných atómových hmotností. Tým sa dokazuje, že častica s takou pomernou atómovou hmotnosťou je súčasťou jadra.



Obr. 1.54. a) Blackneyov hmotnostný spektrometer. Okolo kruhového krytu je naznačená cievka  $M$  pre budenie magnetického poľa. b) Hmotnostné spektrum pár ortuti. Na spektre vidno čiary príslušné jednotlivým izotopom

Existuje len málo prvkov, pri ktorých sa dokázal len jeden stabilný izotop (F, Na, P, As, Au). Kyslík je napríklad zmesou izotopov

$$^{16}\text{O} (99,757 \%); \quad ^{17}\text{O} (0,039 \%); \quad ^{18}\text{O} (0,204 \%) \quad (1.69)$$

Na základe tejto skutočnosti bola zavedená fyzikálna jednotka pomerných atómových hmotností vzhľadom k izotopu kyslíka  $^{16}\text{O}$ .

V Bainbridgeovom hmotnostnom spektrografe (obr. 1.55), sa používa monochromatizačný filter s navzájom kolmým elektrickým a magnetickým poľom a pomerné hmotnosti sa určujú magnetickým spektrografom podľa polomerov dráh.

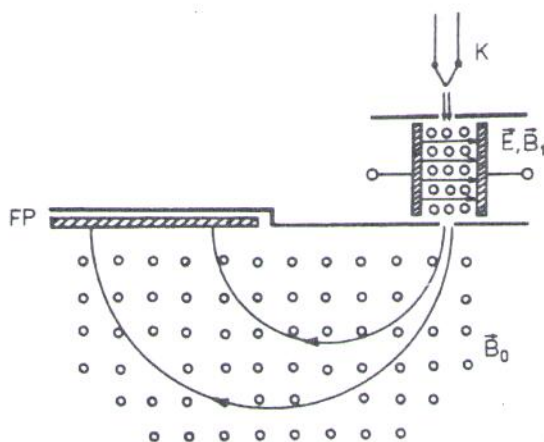
Z rýchlosti monochromatizovaných iónov  $v = E/B_1$  a polomeru ich dráh

$$r = \frac{mv}{eB_0}$$

vychádza

$$m = \frac{erB_0B_1}{E}$$

Prístroj má lineárnu stupnicu. Jeho nevýhodou je ťažká realizácia homogénneho magnetického poľa vo veľkom objeme.



Obr. 1.55. Bainbridgeov hmotnostný spektrograf

Špeciálne úlohy sa riešia ďalšími spektrografmi, ktoré uvedieme na príslušnom mieste. Spektrálne hmotnostné čiary sa identifikujú tak, že do iónového zdroja sa pridá predpokladaná látka. Ak sa tým zintenzívni pozorovaná čiara, je identifikácia kladná.

V súčasnosti sa hmotnostná spektroskopia využíva najmä pri kvalitatívnej a kvantitatívnej chemickej analýze materiálov a pri štúdiu iónových procesov v plazme.

### ÚLOHY K PRVEJ KAPITOLE

1. Vyhľadajte v tabuľkách pomernú atómovú hmotnosť  $\alpha$  a vypočítajte hmotnosť atómu ľahkého izotopu vodíka  ${}^1_1\text{H}$ , uhlíka  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ , uránu  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , prípadne ďalších prvkov (izotopov)! Z údajov  $\alpha$  v Mendelejevovej tabuľke určte priemernú hmotnosť atómov týchto prvkov (v prirodzenom izotopickom zložení)!

2. Akú kinetickú energiu majú  $\beta$  elektróny pri rýchlosti  $0,99c$ ? Pri akom urýchľovacom napätí sa hmotnosť elektrónu zväčší o 10 %?

3.  $\alpha$  častica rozptýlená striebornou fóliou (jadrom Ag,  $Z = 47$ ) má rýchlosť  $v_0 = 1,59 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Aká je vzdialenosť zámernej  $p$ , ak odchýlka dráhy  $\vartheta = 90^\circ$ ? Použitím energetickej bilancie určte najmenšiu vzdialenosť  $\alpha$  častice od jadra a odhadnite polomer jadra Ag.

4. Akú energiu získa protón odrazený od  $\alpha$  častice s energiou  $W_\alpha = 4,7 \text{ MeV}$  pod uhlom  $\varphi = 45^\circ$ ?

5. O koľko klesne hmotnosť 1 gramu Rn  $\alpha$  rozpadom za polčas, ak rozpadu jeho produktov zanedbáme?