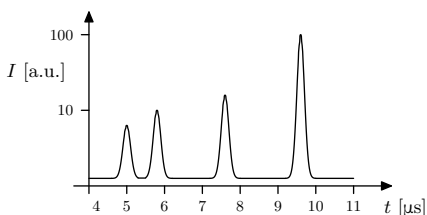


Úloha VI.2 ... spektrometr doby letu

3 body; (chybí statistiky)

Jedním ze způsobů, jak zjistit složení vzorku, je hmotnostní spektroskopie. Uvažujme spektrometr doby letu, ve kterém jsou částice (atomy a molekuly) na začátku ionizovány odebráním elektronu, a poté urychleny napětím $U = 10 \text{ kV}$. Konstantní rychlostí pak putují tělem spektrometru o délce $d = 2,0 \text{ m}$ až do detektoru částic, kde se zaznamenává jejich počet I v závislosti na čase letu tělem spektrometru t . Při ionizaci může dojít i k rozpadu molekuly na několik částí, které pak do detektoru putují také. Na grafu vidíte právě takovou naměřenou závislost pro jednu známou tříatomovou dvouprvkovou molekulu. Odhadněte, jakým atomům nebo molekulám jednotlivé detekované shluky částic náleží a jakou molekulu tvořily původně. Uvažujte, že všechny nabitě částice vstoupily do těla detektoru ve stejný okamžik.



Bonus: S přesnějším detektorem byly detekovány další částice v časech $9,7 \mu\text{s}$ a $6,8 \mu\text{s}$. Jak vysvětlíte přítomnost těchto částic, pokud jediným původním zdrojem je stále ta samá molekula jako v první části?

Jarda se učí na státnice.

Rozdílný čas doby letu částic je způsobený rozdílnou hmotností částic. Všechny totiž mají stejnou energii $E_k = Ue$, kde náboj e vznikl ionizací částic, ale jejich hmotnost (tedy i rychlost) je rozdílná. Různé částice pozorujeme ve spektru kvůli tomu, že při jejich ionizaci dochází s nějakou pravděpodobností k rozpadu původní molekuly na menší části. Elektron, který se v místě ionizace pohybuje, totiž nemusí molekulu zbavit pouze jednoho z jejích elektronů, ale mohou z ní dokonce některé atomy vytrhnout. Ionizovaným částem menším než celá mateřská molekula pak říkáme fragmenty.

Rychlost jednotlivých fragmentů původní molekuly vypočítáme z kinetické energie

$$v = \sqrt{\frac{2Ue}{m}},$$

kde m je jejich hmotnost. Čas doby letu ve spektrometru pak bude

$$t = \frac{d}{v} = d\sqrt{\frac{m}{2Ue}},$$

odkud vyjádříme hmotnost částic v základních atomových jednotkách ($m_u = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) jako

$$m_m = \frac{2Ue}{d^2 m_u} t^2.$$

Postupně pro časy $5,0 \mu\text{s}$, $5,8 \mu\text{s}$, $7,6 \mu\text{s}$ a $9,6 \mu\text{s}$ dostáváme hmotnosti 12, 16, 28 a 44.

Interpretace hmotnostních spekter může být složitá, ale ze zadání víme, že původní molekula měla tři atomy a byla složena ze dvou prvků. Aby bylo možné tyto podmínky splnit, musí být fragmenty s hmotnostmi 12 a 16 atomů původní molekuly. Známými atomy s takovou hmotností jsou uhlík $^{12}_6\text{C}$ a kyslík $^{16}_8\text{O}$. Fragment s hmotností 28 tak odpovídá CO^+ a s hmotností 44 přímo jedenkrát ionizované molekule CO_2^+ . Původní molekula je tedy CO_2 .

Řešení bonusu

Fragmenty detekované v čase $9,7\ \mu\text{s}$ mají hmotnost 45, tedy o jedna vyšší než klasická molekula $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$. Víme, že se jedná o čistý plyn, nejsou zde tedy přítomny žádné další prvky krom uhlíku a kyslíku. Jiná hmotnost tak musí být dána odlišným izotopickým složením těchto prvků. Izotop kyslíku ^{17}O , který má o jeden neutron v jádře více než standardní atom kyslíku, se sice v přírodě vyskytuje, mnohem častější je ale zastoupení těžšího uhlíku ^{13}C . Signál detekovaný v čase $9,7\ \mu\text{s}$ tak odpovídá molekule $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$.

Částice zaznamenané v čase $6,8\ \mu\text{s}$ odpovídají hmotnosti 22, což je kombinace, kterou nemůžeme dostat žádnou kombinací přirozených izotopů těchto prvků. Je ale nápadné, že je to polovina z hmotnosti celé molekuly $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$. Číslo 22 tedy neodpovídá reálné hmotnosti těchto fragmentů, ale jedná se o celé molekuly $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, akorát s dvojnásobným nábojem: $(^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2)^{2+}$. Tyto molekuly získají dvojnásobnou kinetickou energii, takže se ve spektru jeví jako dvakrát lehčí. Samozřejmě, násobná ionizace je výrazně méně pravděpodobnější než jednonásobná, proto je signál vzniklý tímto jevem ve spektrech obvykle slabší.

Jaroslav Herman
jardah@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.