

**20. ročník, úloha V. P ... co je to za okna? (3 body; průměr 1,63; řešilo 19 studentů)**

Nedávno si nechal jeden z organizátorů doma vyměnit okna. Místo starých dřevěných přišla nová plastová s dvojitými skly. Okna se dodávají v několika variantách podle toho, jestli je prostor mezi skly evakuován anebo naplněn některým ze vzácných plynů. Navrhněte způsob, jak zjistit, kterou variantu organizátorovi dodali, ovšem bez trvalých následků na oknech.

*Problém ze života Michaela Komma.*

Hned na začátku bychom rádi uvedli, že vakuová okna se pravděpodobně průmyslově vůbec nevyrábějí, protože samotné sklo rozumné tloušťky by nemohlo odolat atmosférickému tlaku (101 kPa odpovídá zatížení 10 t na 1 m<sup>2</sup> skla). Evakuovaná okna by musela mít zesílené sklo a nějaké vyztužení mezi skly. Místo toho se prostor mezi skly vyplňuje vzácným plynem (příp. trochu zředěným, nejčastěji argonem) pro jeho dobré tepelně-izolační vlastnosti.

Kostru následujícího řešení sestavili organizátoři FYKOSu na jedné ze svých schůzek. Víc hlav víc ví. Vymysleli jsme celkem šest metod, jak identifikovat plyn mezi skly v oknech. Postupy uvádíme v pořadí podle jednoduchosti a reprodukovatelnosti získaných výsledků.

Povězme, že myšlenka plyn mezi skly nejdříve zkapalnit (ba dokonce nechat ztuhnout) není rozhodně skvělá. Vzácné plyny mají velice nízké teploty varu. Tento fakt je umocněn tím, že plyn mezi skly může být zředěný, což působí další pokles teploty varu. Tím pádem nápad plyn zkapalňovat hodnotíme jako technicky neproveditelný (nemluvě o tom, že okno by pravděpodobně utrpělo trvalé následky).

### *Vysokofrekvenční elektrický výboj*

Nadějný nápad se zdá být umístit okno do vysokofrekvenčního elektrického pole – napětí aspoň kilovolt, frekvence řádově 10 MHz. Vysokofrekvenční generátor se dá vymontovat z mikrovláknové trouby. Pokud je mezi okny zředěný plyn, mohl by za příznivých podmínek zažehnout doutnavý výboj. Je potřeba vyzkoušet různé polohy elektrod a ladit napětí, dokud nedojde k průrazu. Výhoda vysokofrekvenčního výboje je ta, že na rozdíl od stejnosměrného výboje nevyžaduje vodivé elektrody, může tedy vzniknout v plynu uvnitř uzavřené nádoby s elektrodami vně.

Zapálí-li se doutnavý výboj, můžeme jásat. Po změření emisního spektra výboje by identifikace prvku neměla být problém.

### *Identifikace radioizotopu*

Další z možností je zjistit přítomnost nějakého radioizotopu. Nejvíce výhodná by byla existence izotopu, který by při rozpadu emitoval gama kvantum. Alfa a beta částice se absorbují ve skle, jejich emisi v plynu mezi skly tedy není možné evidovat. Energii gama kvanta lze změřit dost přesně (scintilační detektor a fotonásobič) a následná identifikace izotopu je snadná. Situace mezi přírodními izotopy však není růžová. Helium a neon mají pouze stabilní izotopy. Trojice argon, krypton, xenon sice radioaktivní izotopy má, avšak jediný <sup>81</sup>Kr podléhá gama rozpadu (0,281 MeV) s poločasem rozpadu 229 tisíc let. Tento izotop se navíc vyskytuje ve stopových množstvích, neboť není přírodní, nýbrž vzniká v atmosférických sprškách.

Musíme si proto pomoci sami. Patříčné okno s sebou vezmeme na návštěvu reaktoru či synchrotronu a necháme ho vystavit neutronovému či synchrotronovému záření. Nestabilních izotopů si takto vyrobíme podle libosti. Pak již stačí zaznamenat gama foton vzniklý přechodem některého jádra vzácného plynu z excitovaného stavu a jsme v cíli.

### Měření rychlosti zvuku

Spíše diskutabilní metodou je měření rychlosti zvuku v plynu v závislosti na teplotě. Nejdříve zodpovíme otázku, jak měřit rychlost zvuku. Okno položíme a skleněnou desku posypeme nějakým práškem (pilinami). Reproduktořem budeme vydávat zvuk o známé frekvenci  $f$ , kterou budeme měnit, dokud nezačnou skleněné desky rezonovat. Z uspořádání pilin na skle odečteme vlnovou délku  $\lambda$  a ze vztahu  $v = f\lambda$  určíme rychlost zvuku. Rozlišit, kdy rezonuje pouze sklo a kdy vzduch mezi skly, by neměl být velký problém, neb rychlost zvuku ve skle je o řád vyšší, než bychom čekali v plynu. Zásadní je ovšem otázka, zda je možné, aby zvuk v řídkém plynu rezonoval tak silně, aby rozkmital i skla.

Snad lepší postup by byl digitálně zaznamenat zvuk vzniknuvší klepnutím na okenní tabuli a následně ve Fourierově transformaci identifikovat pik odpovídající stojatému zvukovému vlnění v plynu. Příčný rozměr okna udává vlnovou délku a poloha píku frekvenci.

Předpokládejme, že se nám podaří naměřit závislost rychlosti zvuku na teplotě  $v(T)$ . Pro ideální plyn platí, že rychlost zvuku je úměrná odmocnině poměru tlaku a hustoty, přesněji  $v = \sqrt{\gamma p/\rho}$ , kde  $\gamma$  je Poissonova konstanta. Stejný poměr vystupuje ve stavové rovnici ideálního plynu  $p/\rho = RT/M_m$ , kde  $M_m$  je molární hmotnost plynu. Závislost  $v^2$  na  $T$  je tedy lineární a směrnice této přímký je rovna  $\gamma R/M_m$ . Určíme-li tuto hodnotu, budeme již schopni vydedukovat, jaký plyn máme v okně.

### Nukleární magnetická rezonance

Pokud by součástí dodávky oken bylo i okénko menších rozměrů (třeba na záchod), mohli bychom jej vzít do nemocnice na nukleární magnetickou rezonanci. Zkrátka to okno se musí vejít do mašiny, kde měří NMR na pacientech.

Okno umístíme do statického magnetického pole a frekvenci budícího radiofrekvenčního pole naladíme tak, aby rezonoval precesní pohyb jader některého ze vzácných prvků. Potíž spočívá v tom, že jádra, na kterých chceme měřit, musí mít nenulový magnetický moment (jinak by na ně magnetické pole nemělo žádný vliv). Ze vzácných plynů nemá pouze argon žádný přírodní izotop s nenulovým jaderným magnetickým momentem. Ostatní jsou uvedeny v následující tabulce, kde pro srovnání najdete i izotopy využívané pro NMR v medicíně (H, C, N).

Magnetické momenty jader izotopů vzácných plynů, jejich zastoupení v přírodě a citlivost při měření NMR. Srovnání s izotopy používanými v medicíně.

Izotop	Spin	Magnetický moment [ $\mu_N$ ]	Rel. zastoupení v přírodě [%]	Rel. citlivost
$^1\text{H}$	1/2	2,79	99,98	1
$^{13}\text{C}$	1/2	0,70	1,11	$0,18 \cdot 10^{-3}$
$^{14}\text{N}$	1	0,40	99,63	$2,94 \cdot 10^{-3}$
$^3\text{He}$	1/2	2,13	0,00014	$0,0006 \cdot 10^{-3}$
$^{21}\text{Ne}$	3/2	-0,66	0,27	$0,036 \cdot 10^{-3}$
$^{83}\text{Kr}$	9/2	-0,97	11,5	$4,8 \cdot 10^{-3}$
$^{129}\text{Xe}$	1/2	0,78	26,4	$5,8 \cdot 10^{-3}$
$^{131}\text{Xe}$	3/2	0,69	21,2	$3,2 \cdot 10^{-3}$

V posledním sloupci tabulky je citlivost NMR při měření na daném izotopu. Suverénně nejcitlivější je měření na vodíku (má velký magnetický moment), měřitelná spektra bude mít i krypton, xenon a snad i neon. Silně pochybujeme, že NMR půjde naměřit na jádrech hélia,

zastoupení izotopu  $^3\text{He}$  je příliš nepatrné. Vyhodnocením spekter NMR pro všechny rezonanční frekvence jader vzácných plynů tedy identifikujeme všechny vzácné plyny krom hélia a argonu.

### *Optické (UV) absorpční spektrum*

Fotony s frekvencí optického a UV záření jsou atomy absorbovány při přechodech elektronů v atomových obalech. Na první pohled snadné by mělo být změření optického (a případně UV) absorpčního spektra plynu. Otázkou ovšem zůstává, zda by absorpce na zředěném plynu byla měřitelná.

### *Infračervené absorpční spektrum*

Jako slibná metoda se nabízí infračervená spektroskopie. Rotační a vibrační pohyb molekul je kvantován a energetická škála takových pohybů odpovídá infračervené části spektra. V případě vzácných plynů však narazíme na podstatný zádrhel. Atomy vzácných plynů jak známo netvoří molekuly, plyn je tvořen jen samotnými atomy. Atom sám o sobě nemůže kmitat ani rotovat, a tak nenaměříme ani žádné spektrum.

Řešitelé se většinou zaměřovali na rozlišení mezi evakuovaným oknem a oknem vyplněným vzácným plynem, a to pomocí nějakých experimentů se zvukem (ten se jak známo nešíří vakuem). Často se objevovaly pravděpodobně neúčinné experimenty založené na měření indexu lomu, tepelné vodivosti. Jen dvě *řešitelky* (obě Terezy) trefně podotkly, že okno s evakuovaným prostorem mezi skly je blbost.

**Honza Prachař**

[honzik@fykos.mff.cuni.cz](mailto:honzik@fykos.mff.cuni.cz)