

**Úloha VI.E ... želatinová rychlost světla** 8 bodů; průměr 5,81; řešilo 32 studentů

Urcete rychlost světla v průhledném želatinovém dortu, který sami připravíte. Nezapomeňte popsat jeho složení.

Nápověda Sežeňte si na to třeba laser nebo mikrovlnku.

Karel

si prohlížel různé fyzikální stránky na internetu a narazil na <http://www.sciencebuddies.org>

**Teorie**

Nejprve si řekněme něco ke dvěma možným metodám pro určování rychlosti světla v prostředí pevné látky. Obě tyto metody jsou proveditelné v domácích podmínkách.

Snad nejelegantnějším řešením je změření indexu lomu  $n$ , který lze chápat jako poměr rychlosti světla ve vakuu (vzduchu – v našich podmínkách nerozlišitelné)  $c$  ku rychlosti světla v daném prostředí  $v$ ,  $n = c/v$ . To je sice užitečná formule, kterou skutečně použijeme pro vyčíslení rychlosti světla v našem experimentu, ale je nutno mít na paměti, že tato představa je fyzikálně chybná, protože index lomu je obecně závislý na vlnové délce.

O původu indexu lomu pojednává R. P. Feynman v prvním díle svých přednášek v kapitole 31. Převyprávět zde tuto kapitolu by bylo poněkud zbytečné, vřele doporučujeme prostudovat alespoň oddíly 31.1 a 31.2 (jsou to 3 listy, které vám možná změň život :)). Zmiňme ale alespoň stěžejní myšlenky. Vše vychází ze dvou předpokladů, které jsou poměrně intuitivní a „stojí někde poblíž základů celé fyziky“: celkové elektrické pole lze vyjádřit jako součet polí vytvořených všemi náboji ve vesmíru; radiační pole vytvořené jedním nábojem je dáno jeho zrychlením vypočteným se zpožděním při rychlosti  $c$ . Pole procházející látkou je tedy tvořeno polem ze zdroje  $E_s$  a polem, které vzniká rozkmitáním atomů látky  $E_a$ . Příspěvek od atomů je fázově posunutý, což my pozorováním součtu  $E_s + E_a$  vnímáme jako zpomalení světla v daném prostředí.

Druhou metodou, která připadala v úvahu, bylo měření rychlosti světla pomocí mikrovlnné trouby. Rychlost šíření elektromagnetické vlny o vlnové délce  $\lambda$  a frekvenci  $f$  lze zapsat jako  $v = \lambda f$ . V mikrovlnné troubě vzniká stojaté vlnění. Vydáme-li otočný táč a položíme materiál do trouby, bude se látka v místech kmíten zahřívat rychleji než v místech uzlů. Provedeme-li tento experiment na čokoládě, vytaví se na ní pravidelný vzorek. Rozestupy uzlů odpovídají polovině vlnové délky a s užitím údaje o frekvenci, kterou nám poskytne výrobce, již snadno dopočteme rychlost světla.

S želé ale nastal problém. Frekvence, která je užívaná v mikrovlnných troubách, je  $f = 2,45$  GHz a odpovídá rezonanční frekvenci molekuly vody. To má své opodstatnění – voda má velkou tepelnou kapacitu a tepelnou vodivost. Potraviny zpravidla vodu obsahují a jejím rychlým zahřátím se tak dostane do ohřívání věci dostatek tepla za krátkou dobu, proto jsou mikrovlnky tak rychlé. Zároveň to s sebou ale nese mnohá omezení a nevýhody. Pokud jste zkusili někdy rozmrazovat něco v mikrovlnce, možná jste si všimli, že to není tak úplně ono. Zatímco potraviny obsahující kapalnou vodu se ohřívají v celém objemu z výše uvedeného důvodu, zmrzlé věci se ohřívají jen od povrchu. Led má totiž rezonanční frekvenci už trochu jinde, a proto neabsorbuje přítomné záření o nic lépe než zbylé složky potravin. Na povrchu, kde dochází k tání vlivem vyšší okolní teploty, je pak už zase absorpce, a tedy ohřívání, velké. To je tedy případ, kdy nám vadí příliš pomalé předávání energie. V případě želé, které je skoro samá voda v kapalném skupenství, naopak dochází k tak rychlému zahřátí, že se vzorek rozteče dřív, než jsme schopni určit polohy uzlů.

Navíc, i kdybychom nějakým způsobem polohy uzlů odečetli a rychlost světla určili (některým řešitelům se to skutečně alespoň trochu povedlo), odpovídalo by to pravděpodobně rychlosti světla dané vlnové délkou ve vodě.

Měření bylo tedy provedeno pouze metodou určení indexu lomu pro vlnovou délku  $\lambda = 650 \text{ nm}$  (to je nutno uvést, neboť pro jiné vlnové délky se budou výsledky lišit kvůli disperzi).

### Experiment

Index lomu jsme měřili následujícím způsobem: Půlkruhový kus želé jsme podložili papírem s úhlovou stupnicí po  $10^\circ$  tak, že její střed splýval se středem původního kruhu želé. Laserem jsme pak svítili do tohoto středu tak, aby se paprsek zlomil na celé desítky stupňů ( $10\text{--}50$ ) a odečetli jsme vstupní úhel na podloženém úhloměru.

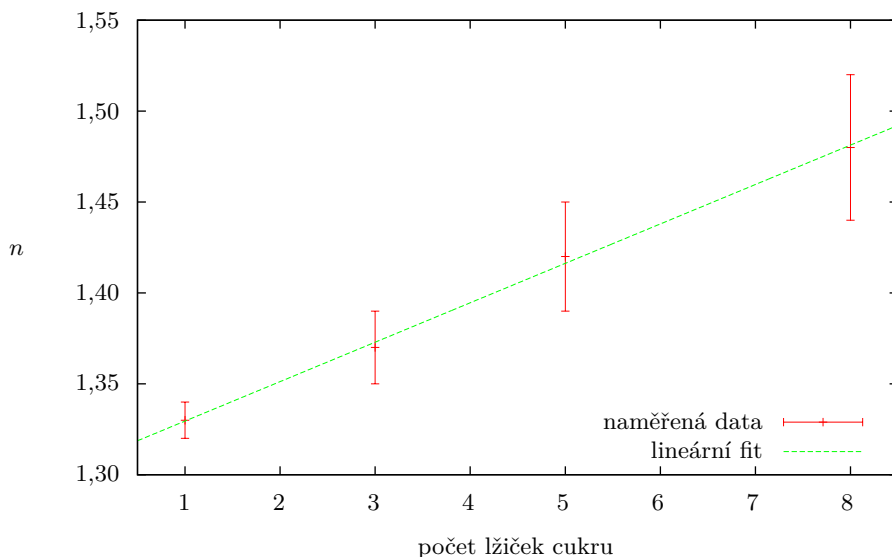
Nejprve jsme měření provedli pro červené neslazené želé. Koncentrace cukru v celé várce byla konstantní. Zajímavým efektem byla změna indexu lomu po roztavení a opětovném zatuhnutí. Pro primárně zatuhlé želé vyšel index lomu  $n = (1,25 \pm 0,03)$ , pro roztavené a znovu zatuhlé  $n = (1,45 \pm 0,04)$ . Tento efekt je komentován níže. V tomto druhu želé byla poměrně velká absorpce, což značně komplikovalo měření (paprsek neprošel až ven z půlkruhu), ale naštěstí rozptýl pro tuto vlnovou délku byl optimální – bylo možno dobře pozorovat dráhu laseru uvnitř materiálu.

Hodnoty byly určeny fitem naměřených dat závislostí danou Snellovým zákonem  $\vartheta_i = \arcsin(n \sin \vartheta_t)$ , kde  $\vartheta_i$  je vstupní úhel,  $\vartheta_t$  je úhel, pod kterým se paprsek zlomí, a  $n$  je index lomu coby fitovací parametr. Udávané chyby jsou chyby fitu.

Druhý typ želé, průhledný, měl absorpci mnohem menší, a tak bylo možno měřit na „kulatém úhloměru“, tedy s větší přesností, jak vstupní, tak výstupní úhel. Toto želé bylo připraveno nejprve bez cukru a pak ve 4 hrnčících do něj bylo přidáno 1, 3, 5 a 8 lžiček cukru. Jedna lžička odpovídá přibližně 2,2 g a hrníčky měly objem 250 ml – tyto údaje slouží pro orientaci, v jakém rozsahu koncentrací jsou námi naměřené a vyvozené výsledky platné. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 1 a vyneseny do grafu na obrázku 1. Zjišťujeme, že index lomu želé s rostoucí koncentrací cukru v námi měřeném rozsahu lineárně roste. Z lineárního fitu závislosti je možné získat extrapolovanou hodnotu neslazeného želé (konstantní člen lineární závislosti). Tato extrapolovaná hodnota vyšla  $n_{\text{neslazené}} = (1,31 \pm 0,04)$ .

Nyní se vraťme k pozorované změně indexu lomu po roztavení a opětovném ztuhnutí červeného želé. Nabízejí se dvě možná vysvětlení a pravděpodobně budou oba efekty přítomny. Těžko však určíme v jaké míře, diskuse bude tedy kvalitativní. Index lomu závisí, jak se dozvíte ve zmiňované kapitole ve Feynmanovi, na hustotě (přesněji řečeno na počtu nábojů na jednotkový objem). Po přetavení patrně tato hustota vzrostla, a to jednak tím, že látka dostala možnost se lépe, více nahusto, uspořádat. To je možné přirovnat k jevu, který pozorujeme i nízkomolekulárních látek, jako je například voda. Ta nám mnohem lépe zmrzne po převaření. Druhý možný důvod je, že při roztavení (roztátí) želé se samozřejmě zvýšila teplota a tím se zrychlilo odpařování vody. Změnila se tedy koncentrace, složení. Celá směs zhoustla. Zvýšení indexu lomu může být také synergickým efektem těchto dvou jevů – želé se lépe uspořádá nejen proto, že k tomu dostane možnost tepelným rozvolněním, ale také proto, že se s menším obsahem vody uspořádává snáze (to pozorujeme i mechanicky – přidáme-li méně vody, je tužší).

Závěrem uvedme v tabulce 1 hodnoty rychlosti světla v želé spočtené z naměřených indexů lomu, bereme-li rychlost světla ve vakuu  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 1: Závislost indexu lomu na množství cukru.

Tabulka 1: shrnutí výsledků

typ a počet lžiček	$n$	$\frac{v}{10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$
červená želatina	1,25±0,03	2,40±0,06
č. žel. přetavená	1,45±0,04	2,07±0,06
bílá s 1 lž. cukru	1,33±0,01	2,26±0,02
bílá s 3 lž. cukru	1,37±0,02	2,19±0,03
bílá s 5 lž. cukru	1,42±0,03	2,11±0,04
bílá s 8 lž. cukru	1,48±0,04	2,03±0,05

*Tereza Steinhartová*  
terkas@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

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