

## Úloha V.E ... nezbedné fotony

12 bodů; (chybí statistiky)

Spolu se zadáním úlohy vám přišly polarizační brýle. Máte tedy 2 polarizační filtry. Když je dáte za sebe tak, aby směry jejich polarizace byly na sebe kolmé, nebude skrz ně procházet téměř žádné světlo. Pokud ale mezi ně nyní vložíte třetí vhodně natočený filtr, můžete pozorovat, že bude procházet nemalé množství světla. Změřte závislost propustnosti na úhlu natočení prostředního filtru.

Poznámka: Jako první filtr a zároveň zdroj světla doporučujeme použít svítící displej.

*Matěj chtěl účastníkům vypálit sítnice.*

## Teorie

Každé příčné vlnění, tedy i paprsek světla, je nějakým způsobem polarizované. Polarizace je dána rovinou, ve které se vlna pohybuje. Světlo se jistě pohybuje po přímkce, tedy rovina polarizace musí obsahovat tuto přímkku a okolo ní může být natočena libovolným směrem. Většina světla, které vidíme, je nekoherentní (tzn. každý foton má jinou polarizaci, není zde žádná preferovaná rovina pohybu fotonů, světlo je nepolarizované), protože vzniká odrazem slunečního světla (které je také nekoherentní).

Téměř všechny displeje, monitory a televize však vyzařují polarizované světlo, které má pevně daný směr polarizace a všechny vycházející fotony tedy leží v rovnoběžných rovinách<sup>1</sup>.

Když polarizované světlo (foton) projde polarizačním filtrem, zachová si pouze složku amplitudy, která je rovnoběžná se směrem osy daného polarizátoru. Pokud je původní polarizace světla kolmá na filtr, pak skrz něj neprojde. V opačném případě (filtr je rovnoběžný se směrem polarizace) projde ideálně všechno světlo. Použité filtry ale nejsou ideální. Pokud jeho osu umístíte rovnoběžně s osou polarizovaného světla, přeci jen nějakou část světla pohltí. Při kolmém umístění kvůli těmto neideálnostem také projde určité (velmi malé) množství světla. Dále však uvažujme „ideální“ polarizační fólii.

Nechť máme zdroj koherentního světla (například monitor) o amplitudě  $A_0$ . Při průchodu polarizačním filtrem je zachována pouze složka amplitudy rovnoběžná s osou polarizačního filtru. Pokud je filtr vůči zdroji světla natočen o úhel  $\alpha$ , průchodem světla se amplituda zmenší na

$$A_1 = A_0 \cos \alpha .$$

Pro  $\alpha = 0^\circ$  (polarizace světla je před průchodem rovnoběžná s osou filtru) se amplituda nezmění, pro  $\alpha = 90^\circ$  (polarizace světla je kolmá na osu filtru) bude amplituda nulová (neprojde žádné světlo). Například ale pro  $\alpha = 45^\circ$  nebude amplituda poloviční, ale zmenší se na  $\frac{1}{\sqrt{2}} A_0$ .

Prošlé světlo si zachová pouze složku amplitudy<sup>2</sup> rovnoběžnou se směrem osy daného filtru. Nyní necháme světlo projít druhým polarizačním filtrem, který je natočen o úhel  $\beta$  oproti původnímu zdroji světla. Amplituda se zmenší na  $A_2$ . Musíme dávat pozor, který úhel dosazujeme, protože nyní už je polarizace světla otočena o úhel  $\alpha$  oproti původnímu směru, takže platí

$$A_2 = A_1 \cos(\beta - \alpha) .$$

<sup>1</sup>Pozor, některé fólie na monitory či mobilní telefony mohou světlo „odpolarizovat“.

<sup>2</sup>Mluvíme tady o amplitudě, ale ve skutečnosti jde o pravděpodobnost. Každý foton, který prochází polarizačním filtrem, má určitou pravděpodobnost, že celý projde skrz (přičemž změní polarizaci) nebo že bude celý pohlcen. Pokud fotonů prochází hodně (což v našem případě je rozhodně splněno), dostáváme stejné výsledky, jako když počítáme s tím, že se zachovává pouze daná složka amplitudy.

V našem případě uvažujme  $\beta = 90^\circ$ , což vede na

$$A_2 = A_1 \cos(90^\circ - \alpha) = A_1 \sin \alpha = A_0 \sin \alpha \cos \alpha.$$

Nyní je potřeba si uvědomit, že se zajímáme o intenzitu prošlého světla a ne o jeho amplitudu. Intenzita světla je přímo úměrná jeho energii (resp. výkonu dopadajícímu na jednotkovou plochu) a energie je úměrná druhé mocnině amplitudy (stejně jako u mechanických harmonických kmitů). Intenzitu značíme  $I$  a pro vztah počáteční a konečné intenzity platí

$$I_2 = I_0 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha = \frac{1}{4} I_0 \sin^2 2\alpha.$$

Bude se nám hodit, že závislost  $I_2$  na  $\alpha$ , tedy  $I_2(\alpha)$ , je  $\frac{\pi}{2}$ -periodická a navíc je každá perioda symetrická. Ideálně by tedy měl stačit proměřit rozpětí od  $0^\circ$  do  $45^\circ$ .

Problém je, že nepracujeme s dokonalými filtry (nikdy neprojde 100% ani 0%), proto bude potřeba zavést nějakou korekci. Toho můžeme docílit například přeškálováním naší funkce

$$I_2(\alpha) = \frac{b}{4} I_0 \sin^2 2\alpha,$$

kde  $b$  je zatím neznámá konstanta, která určuje maximální propustnost filtru.

Uvážíme-li ještě korekci na to, že nenajdeme dokonale kolmý směr (tj. vůči tomuto směru bude filtr posunut o  $\alpha_0$ ), máme

$$I_2(\alpha) = \frac{b}{4} I_0 \sin^2(2\alpha + 2\alpha_0). \quad (1)$$

## Postup

V dostatečně zatemněné místnosti (abychom eliminovali vliv vnějšího světla, které odráží horní polarizační filtr) si zapneme monitor, na kterém zobrazíme čisté bílé pozadí s úhломěrem, který nám bude ukazovat úhel náklonu, a podle toho budeme otáčet prostřední filtr. Nejprve je potřeba umístit vrchní (druhý) polarizátor tak, aby jeho osa byla kolmá na směr polarizace světla svítícího z monitoru. Toho docílíme pomalým otáčením filtru a sledováním „od oka“, kdy nastane minimum propustnosti světla. V tomto minimu daný filtr upevníme lepicí páskou.

Poté vložíme prostřední filtr, kterým budeme postupně otáčet. Úhel natočení zvolíme pomocí úhломěru, podle kterého zarovnáme rovnou stranici poloviny brýlí.

Jako zařízení na měření intenzity světla použijeme mobilní fotoaparát, který je důležité mít během celého měření pevně ukotvený na stojanu a neměnit jeho nastavení (popř. si dát pozor, aby si neměnil nastavení sám podle potřeby).

Fotografie posléze analyzujeme v nějakém programu, který dokáže určit jas. Konkrétně my jsme použili GIMP, který dokonce umožňuje vybrat určitou oblast a spočítat si její průměrný jas.

## Gamma korekce

Jelikož citlivost lidského oka není lineární (snadno rozlišíme změnu malé intenzity světla, ale těžko bychom od sebe rozlišovali dvě vysoké intenzity), používá se při ukládání a zobrazování fotografií tzv. gamma korekce. Proto intenzita, kterou ukazuje program, nemusí být její skutečná

hodnota. Naměříme-li intenzitu  $I_n$  (tj. hodnotu, kterou má uloženou počítač), pak její skutečnou hodnotu  $I_s$  můžeme vypočítat jako

$$I_s = I_n^\gamma, \quad (2)$$

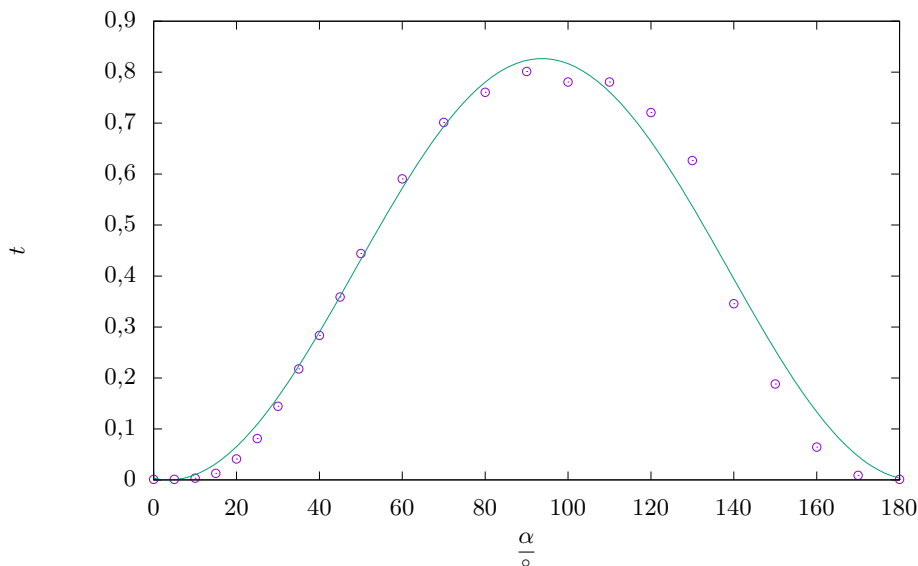
kde  $\gamma$  je gamma faktor. Pro většinu dnes používaných zařízení se užívá hodnota  $\gamma = 2,2$ .

Fotoaparát má za určitého nastavení danou maximální světelnou intenzitu, kterou dokáže zaznamenat.  $I_n$  má nějakou maximální hodnotu (typicky buď 255 nebo 100%). V případě, že se na fotografii takováto hodnota vyskytuje, je fotografie přexponovaná a je potřeba provést jednu nebo více z následujících úprav. Snížit expoziční čas (dobu, po který je snímána jedna fotografie), přivřít clonu (omezit množství světla, které se dostane do snímáče) nebo snížit citlivost snímáče (to najdete pod zkratkou ISO). Je tedy důležité dbát na to, aby naše fotografie nebyly přexponované. Vztahem 2 pak dokážeme naměřené intenzity linearizovat.

### Naměřená data

Naměřená intenzita bílého pozadí byla 94%. Po gamma korekci (2) to odpovídá  $I_0 \doteq 87\%$ . Propustnost  $t$  je definována jako podíl propuštěné intenzity  $I_s$  a počáteční intenzity  $I_0$

$$t = \frac{I_s}{I_0}.$$



Obr. 1: Naměřená data, proložená závislostí 1.

Tab. 1: Naměřené hodnoty intenzity a propustnosti  $t$  v závislosti na úhlu natočení.

$\frac{\alpha}{^\circ}$	$\frac{I_n}{\%}$	$\frac{I_s}{\%}$	$t$
0	4	0,1	0,001
5	4	0,1	0,001
10	7	0,3	0,003
15	13	1,1	0,013
20	22	3,6	0,041
25	30	7,1	0,081
30	39	12,6	0,144
35	47	19,0	0,218
40	53	24,7	0,283
45	59	31,3	0,359
50	65	38,8	0,444
60	74	51,6	0,591
70	80	61,2	0,701
80	83	66,4	0,760
90	85	69,9	0,801
100	84	68,1	0,781
110	84	68,1	0,781
120	81	62,9	0,721
130	76	54,7	0,626
140	58	30,2	0,346
150	44	16,4	0,188
160	27	5,6	0,064
170	11	0,8	0,009
180	4	0,1	0,001

V grafu 1 jsou tato data vynesena a proložena závislostí (1). Koefficienty  $\alpha_0$  a  $b$  byly určeny pomocí fitu

$$\alpha_0 = (-3,7 \pm 0,8)^\circ,$$

$$b = 3,80 \pm 0,06.$$

## Závěr

Změřili jsme závislost propustnosti  $t$  na úhlu natočení prostředního filtru. Naměřené hodnoty odpovídají teoretické předpovědi. Celkově nám vychází

$$I_2(\alpha) = \frac{3,80 \pm 0,06}{4} I_0 \sin^2(2\alpha - (7,4 \pm 1,6)^\circ).$$

---

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/>.