

Úloha č. 2: Optika 3B – Odraz a polarizace světla

jarní semestr 2020

Obsah

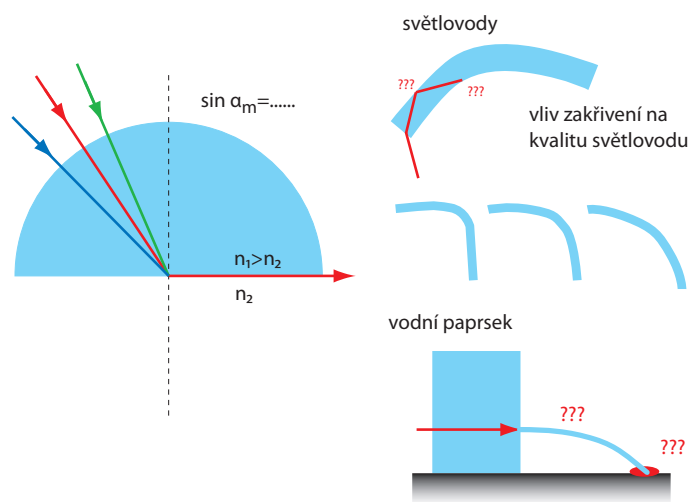
1	Experimenty	2
1.1	Úplný odraz světla	2
	E1 Totální odraz	2
	E2 Odrazné hranoly, optický kontakt	2
1.2	Závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu	3
	E3 Závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu	3
1.3	Různé metody měření indexu lomu	3
	E4 Různé metody měření indexu lomu	3
1.4	Polarizace světla – rozptyl a polaroidy	4
	E5 Polarizace světla rozptylem	4
	E6 Tři polarizační filtry	4
1.5	Polarizace světla odrazem	5
	E7 Polarizace světla odrazem	5
1.6	Dvojlom světla	5
	E8 Dvojlom v krystalu	5
	E9 Polarizační interference, LCD displaye	5
A	Odraz a lom světla	7
A.1	Úplný odraz světla	7
A.2	Závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu	8
A.3	Různé metody měření indexu lomu	9
B	Polarizace světla	10
B.1	Polaroidy	10
B.2	Rozptyl světla	11
B.3	Polarizace světla odrazem	11
B.4	Dvojlom světla	13

1 Experimenty

1.1 Úplný odraz světla

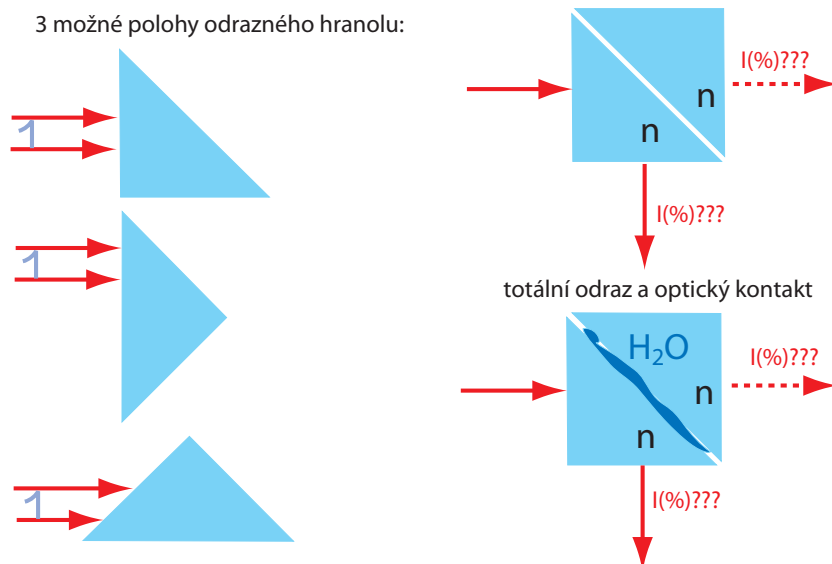
E 1 – Totální odraz

1. Pomocí optické desky vysvětlíte podmínky vzniku totálního odrazu.
2. Demonstrujte totální odraz pomocí akvária naplněného vodou (?zvýraznění procházejícího svazku?).
3. Vysvětlíte princip světlovodu, vyzkoušejte funkci profesionálního světlovodu a světlovodu vytvořeného amatérsky (skleněná trubička, vodní paprsek...). V které části amatérského světlovodu se světlo šíří totálními odrazy?



E 2 – Odravné hranoly, optický kontakt

1. Vyzkoušejte na optické desce všechny způsoby, jimiž může paprsek světla procházet odrazným hranolem beze ztráty intenzity. Prozkoumejte, zda při tom dochází k stranovému či výškovému převrácení. Kde se takové hranoly používají?
2. Popište rozdíl mezi situací, kdy dva hranoly odděluje vzduchová mezera, a mezi situací, kdy jsou jejich povrchy zkontaktovány kapkou vody. Vysvětlíte, spočítejte chod paprsků v obou případech. Uveďte, kde se tento jev využívá.



1.2 Závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu

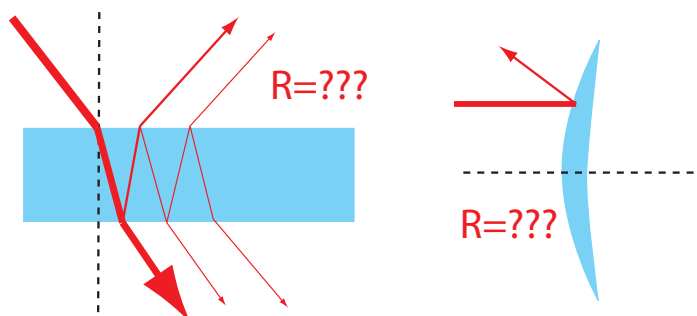
E3 – Závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu

Demonstrujte na optickém panelu:

1. vícenásobný odraz na planparalelní vrstvě,
2. rušivé odrazy na čočkách,
3. ztráty světla při průchodu optickými soustavami či okem...

$$r_{\perp} = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad r_{\parallel} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$t_{\perp} = \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)} \quad t_{\parallel} = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$



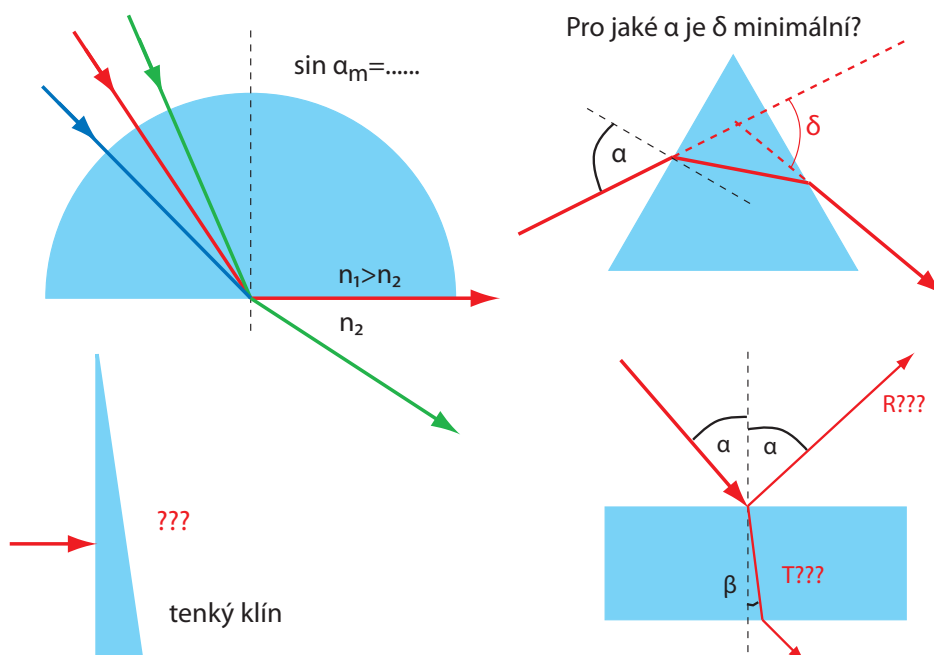
$$R = r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2 \quad T = 1 - R$$

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \text{pro } \alpha = 0.$$

1.3 Různé metody měření indexu lomu

E4 – Různé metody měření indexu lomu

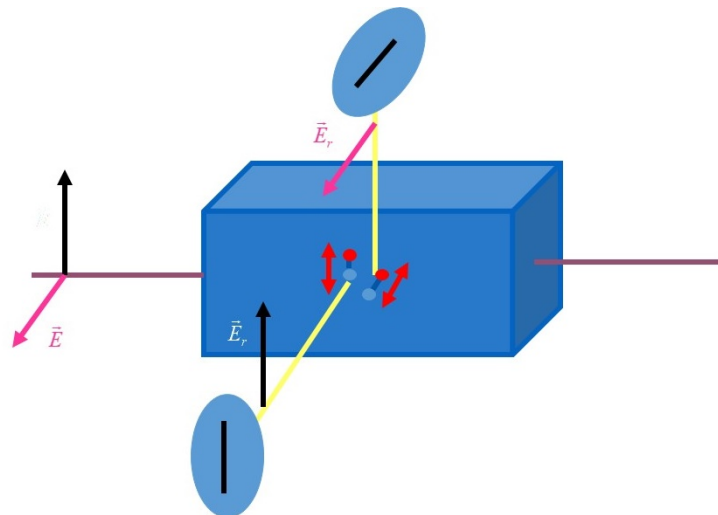
1. Demonstrujte na optickém panelu: metoda minimální deviace, totální odraz, lom, klín, měření odrazivosti...



1.4 Polarizace světla – rozptyl a polaroidy

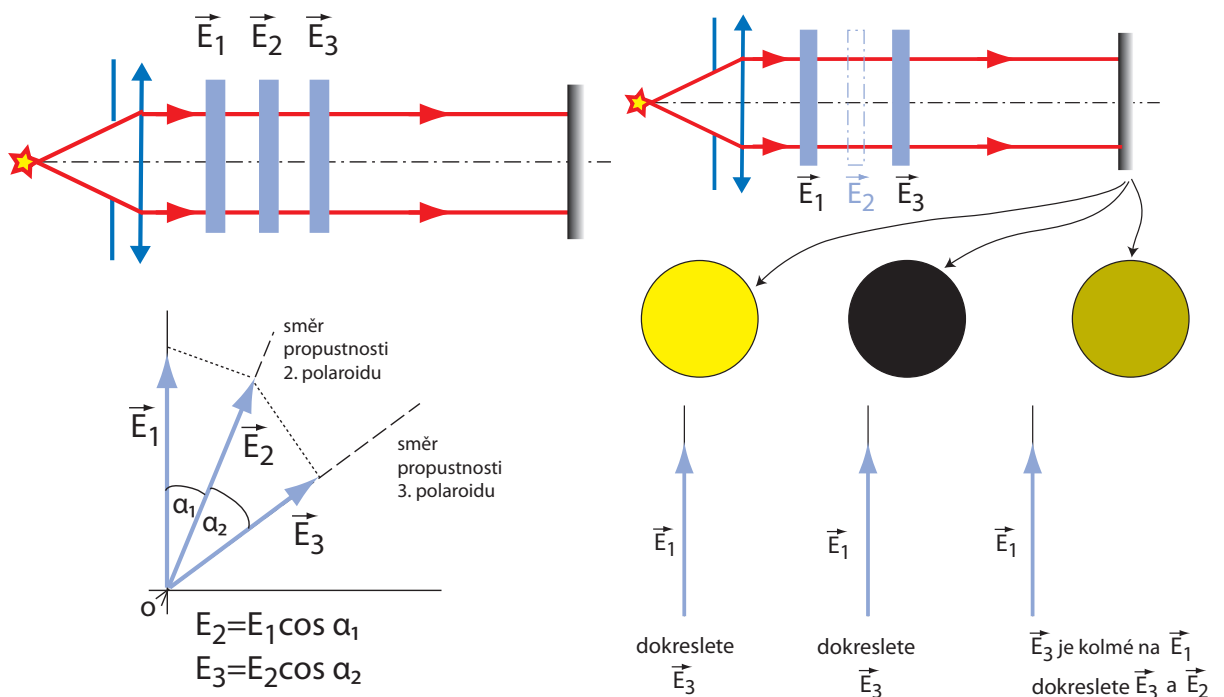
E 5 – Polarizace světla rozptylem

1. Pozorujte rovnoběžný svazek procházející vaničkou s rozptylující látkou.
2. Pozorujte rozptýlené světlo ve směru kolmém ke svazku.
3. Jak lze pomocí rozptýleného světla určit absolutně směr propustnosti polaroidu?
4. Dokážete odlišit fluorescenci od rozptylu?
5. Kdy je světlo oblohy nejvíce polarizované?
6. Jak závisí rozptyl na vlnové délce, je tento jev demonstrovatelný?



E 6 – Tři polarizační filtry

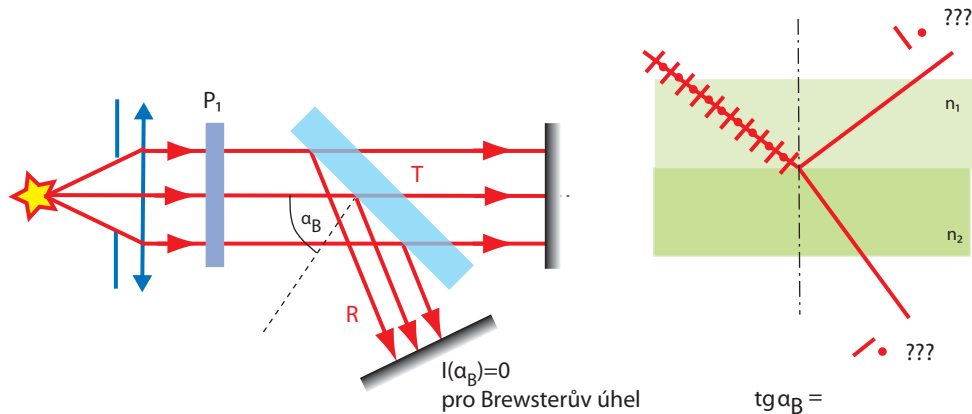
1. Do svazku vkládejte jeden, dva a tři polaroidy a objasněte změny intenzity světla na stínítku.



1.5 Polarizace světla odrazem

E 7 – Polarizace světla odrazem

1. Do svazku vložte vhodně orientovaný polaroid a skleněnou desku tak, aby intenzita odraženého svazku byla nulová.

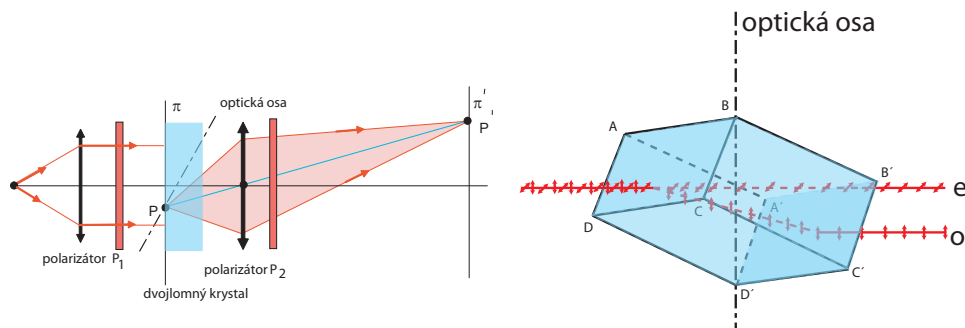


2. Popište, jak vytvořit polarizovaný svazek odražený i prošlý.
3. Objašněte, co se změní, použijete-li místo skleněné desky kovové zrcadlo.

1.6 Dvojlom světla

E 8 – Dvojlom v krystalu

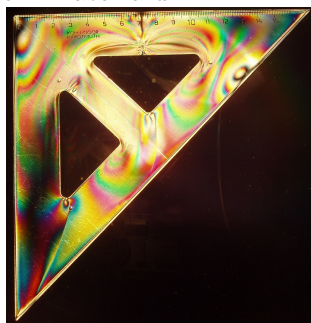
1. Jak poznáte při průchodu krystalem islandského vápence paprsek řádný a paprsek mimořádný? Jakou mají tyto paprsky polarizaci?



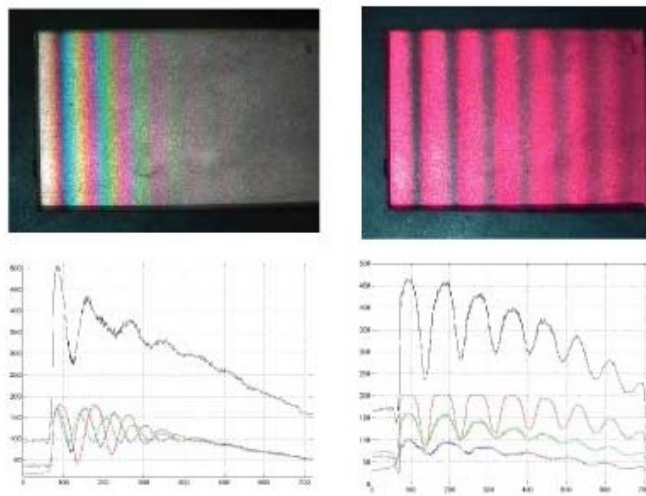
2. Jak funguje fázový kompenzátor? (Nejjednodušší provedení - dvě lepící pásy nalepené kolmo na sebe.)

E 9 – Polarizační interference, LCD displaye

1. Proč vznikají na dvojlomných materiálech barevné efekty? Ukažte dvojlom na izolepě, výbrusech ze sádrovce, namáhaném materiálu ...



2. Vysvětlete následující jevy (k vysvětlení je potřeba mít teoretické znalosti z 3A - Interference a difrakce).



3. Jak fungují displeje mobilních telefonů a LCD televizory?

Teorie

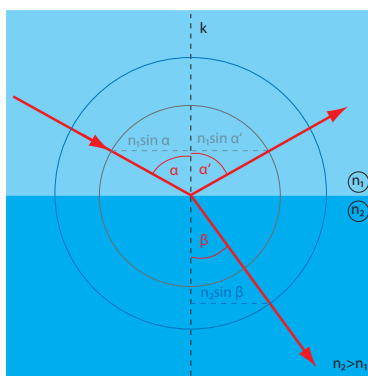
A Odraz a lom světla

Fermatův princip Světelný paprsek se šíří prostorem po minimální optické dráze. Optickou drahou L světelného paprsku (v homogenním prostředí) rozumíme součin délky jeho geometrické dráhy s a indexu lomu n :

$$L = ns.$$

Zákon odrazu Při dopadu paprsku na rozhraní dvou optických prostředí se světelný paprsek odráží tak, že odražený paprsek leží v rovině dopadu (tj. v rovině určené dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu k - obr. 1) a úhel dopadu α se rovná úhlu odrazu α' :

$$\alpha = \alpha'.$$



Obrázek 1: Odraz a lom světla na rozhraní dvou optických prostředí (kružnice mají poloměry n_1 a n_2 , $n_1 < n_2$).

Zákon lomu Při dopadu paprsku na rozhraní dvou průhledných izotropních dielektrik se světelný paprsek láme tak, že lomený paprsek leží v rovině dopadu a platí Snelliův zákon

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta,$$

kde α je úhel dopadu, β úhel lomu (obr. 1) a n_1, n_2 jsou indexy lomů prostředí 1 a 2. Je-li $n_1 < n_2$, nazýváme prostředí 1 opticky řidším, prostředí 2 opticky hustším.

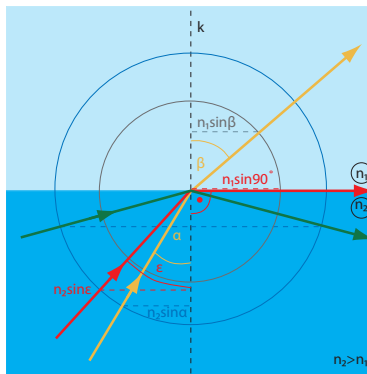
A.1 Úplný odraz světla

Totální odraz Při dopadu světelného paprsku z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího pro jistý úhel dopadu, tzv. mezní úhel ϵ , je úhel lomu $\frac{\pi}{2}$, tj. paprsek lomený leží v rovině rozhraní obou optických prostředí (obr. 2). Pro mezní úhel ϵ platí

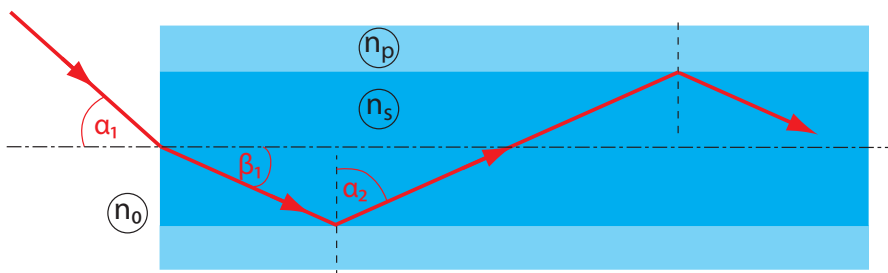
$$\sin \epsilon = \frac{n_1}{n_2}.$$

Pro všechny úhly dopadu $\alpha > \epsilon$ se světelný paprsek neláme do druhého prostředí, nastává úplný (totální) odraz.

Na obr. 3 je tenké skleněné vlákno (index lomu n_s) s ochranným povlakem z umělé hmoty (index lomu $n_p < n_s$). Existuje jistý maximální úhel dopadu α na vybroušenou čelní plošku, kolmou k ose vlákna, takový, že vškeré světlo dopadající pod úhly dopadu $\alpha_1 < \alpha$ se totálně



Obrázek 2: Totální odraz světla (zeleně), mezní úhel červeně



Obrázek 3: Optické vlákno

odráží na stěnách vlákna a prakticky se beze ztrát šíří vláknem v libovolném směru (na tom je založena tzv. vláknová optika). Dokažte, že platí

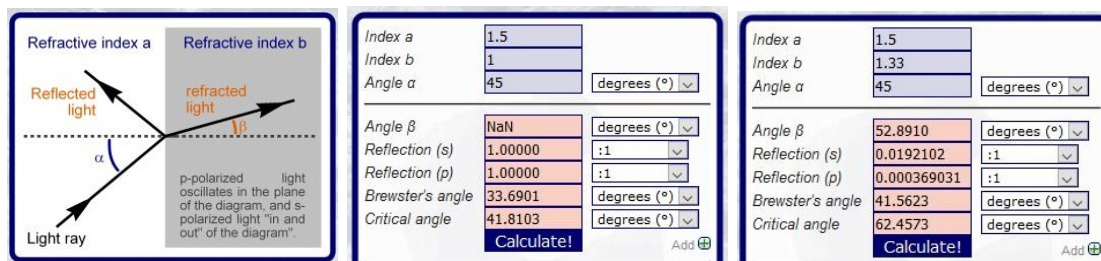
$$\sin \alpha = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_s^2 - n_p^2}.$$

A.2 Závislost intenzity odraženého světla na úhlu dopadu

Teorie bude podrobně popsána v dodatku B.3 - Fresnelovy koeficienty. Pokud je úhel dopadu nulový, pak z Fresnelových koeficientů plyne

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

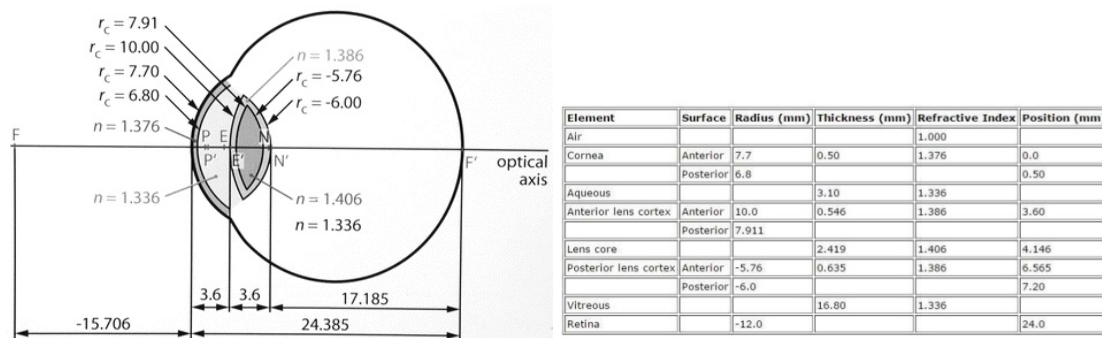
1. Pomocí stránek http://www.calctool.org/CALC/phys/optics/reflec_refrac určete odrazivost R rozhraní sklo - vzduch a sklo - voda.



Obrázek 4: Odrazivost, Brewsterův a mezní úhel pro sklo - vzduch a sklo - voda.

2. Spočítejte odrazivost těchto rozhraní, jde-li paprsek v opačném směru.
3. Získaných výsledků využijte k určení toho, jak intenzivní jsou vícenásobné odrazy ve srovnání s prvním odrazem.

4. Rozmyslete si, kolik procent světla se ztrácí při průchodu okem, než dorazí na sítnici. Kde dochází v tomto systému k maximální změně směru chodu paprsků?



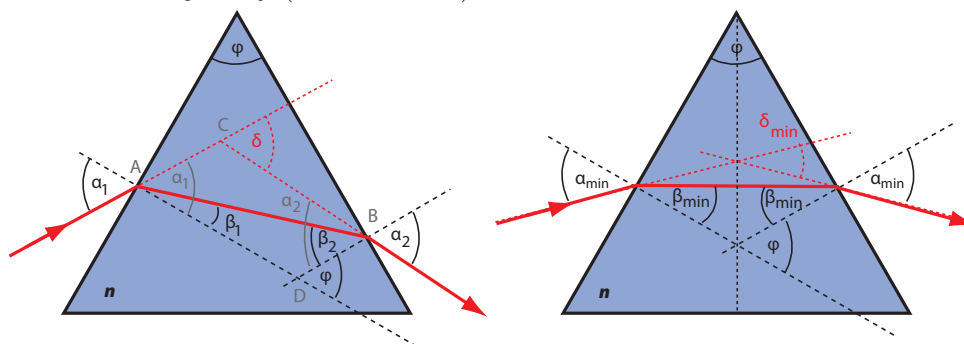
Obrázek 5: Gullstrandovo schématické oko

A.3 Různé metody měření indexu lomu

Minimální deviace hranolu Nejprve určíme deviaci hranolu (odchylku paprsku po průchodu hranolem od paprsku dopadajícího). Situace je zakreslena na obrázku 6. Pro deviaci δ platí

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi.$$

Pro minimální deviaci je tedy (viz obrázek 6)



Obrázek 6: Chod paprsků hranolem a minimální deviace

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{min} \quad \beta_1 = \beta_2 = \beta_{min}$$

Ze vztahu pro deviaci pak získáme

$$\varphi = 2\beta_{min} \quad \delta_{min} = 2\alpha_{min} - \varphi.$$

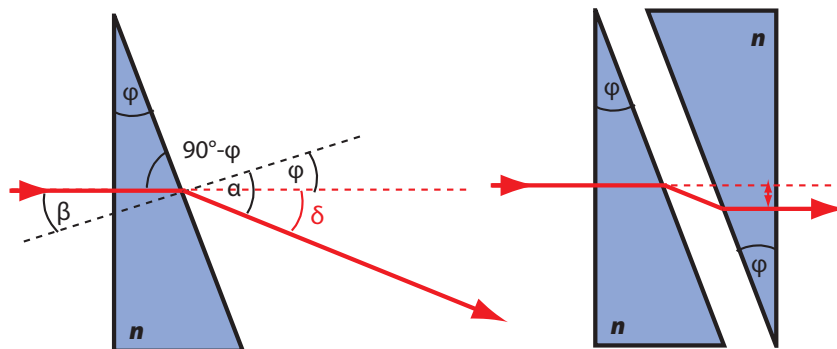
Z lomu na prvním rozhraní odvodíme vztah pro index lomu

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\delta_{min} + \varphi}{2}\right)}{\sin\frac{\varphi}{2}}.$$

a výpočet úhlu dopadu, při němž minimální deviace nastává.

$$\alpha_{min} = \arcsin\left(n \cdot \sin\frac{\varphi}{2}\right).$$

Z posledního vztahu rozvažte, jak volit vrcholový úhel, aby pro hranoly z běžných materiálů deviace nastala.



Obrázek 7: Optický klín

Tenký klín Pro optický klín je úhel φ je velmi malý. Můžeme použít aproximaci $\sin \alpha \doteq \alpha$ a dostaneme z předchozích vzorců:

$$\frac{\delta_{min} + \varphi}{2} = n \cdot \frac{\varphi}{2} \quad \delta_{min} = \varphi(n - 1) \quad \alpha_{min} = n \cdot \frac{\varphi}{2}.$$

Pokud má klínový hranol jeden úhel pravý, je výpočet deviace velmi jednoduchý. Zřejmě je $\beta = \varphi$ a deviace $\delta = \alpha - \varphi$. Protože platí zákon lomu v aproximaci pro velmi malé úhly, je $\alpha = n\varphi$, a tedy

$$\delta = (n - 1)\varphi.$$

Klínové hranoly se používají ke korekci šilhání anebo k měření indexu lomu. Dva klínové hranoly položené na sebe dokážou posunout paprsek o libovolnou vzdálenost beze změny směru šíření (viz obrázek 7).

B Polarizace světla

Zopakujte si pojmy světlo nepolarizované, světlo lineárně polarizované a světlo kruhově (elipticky) polarizované. Jakými rovnicemi popíšeme vektor elektrické intenzity v těchto případech?

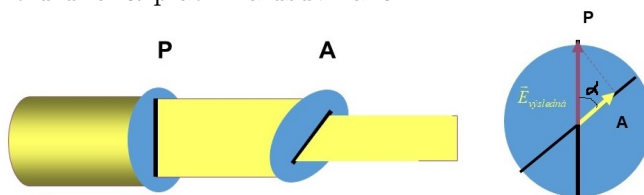
B.1 Polaroidy

Polarizační filtry fungují na principu dichroizmu, tj. propouštění jen určitým způsobem orientovaného vektoru elektrické intenzity filtrem.



Při průchodu nepolarizovaného světla jedním polarizačním filtrem se intenzita svazku zeslabí na polovinu.

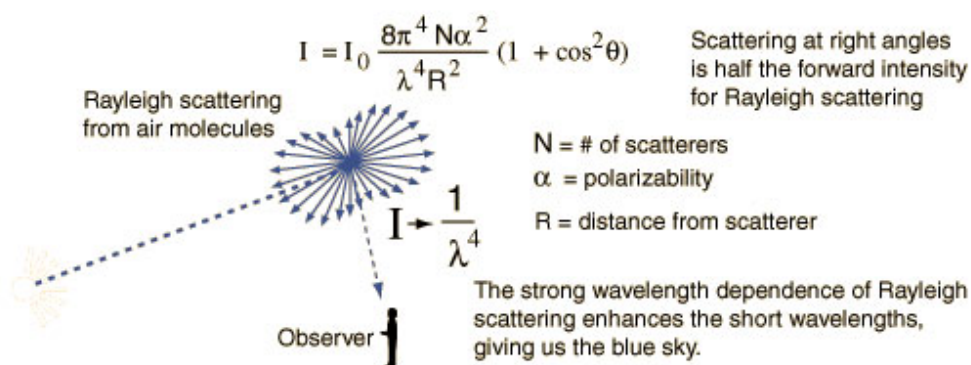
Při průchodu lineárně polarizovaného světla dalším polarizačním filtrem svírajícím se směrem propustnosti prvního filtru úhel α platí Malusův zákon:



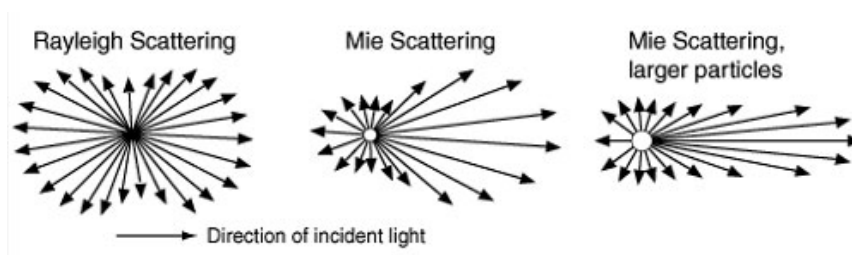
$$E_A = E_P \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad I_A = I_P \cos^2 \alpha$$

B.2 Rozptyl světla

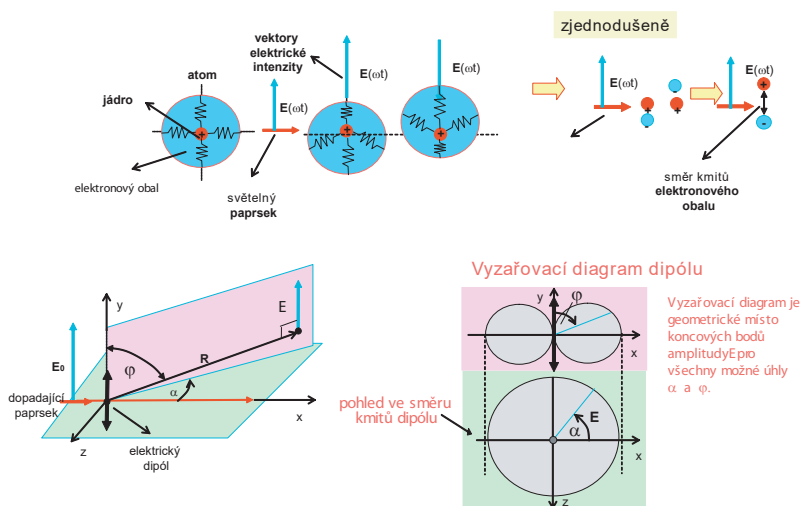
Rozptyl světla může probíhat jako Mieův či Rayleighův.



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c3>



Pro jednodušší vysvětlení polarizace rozptýleného světla doporučuji nahlédnout do popisu vyzářování dipólu u textu Elektromagnetické vlny.



B.3 Polarizace světla odrazem

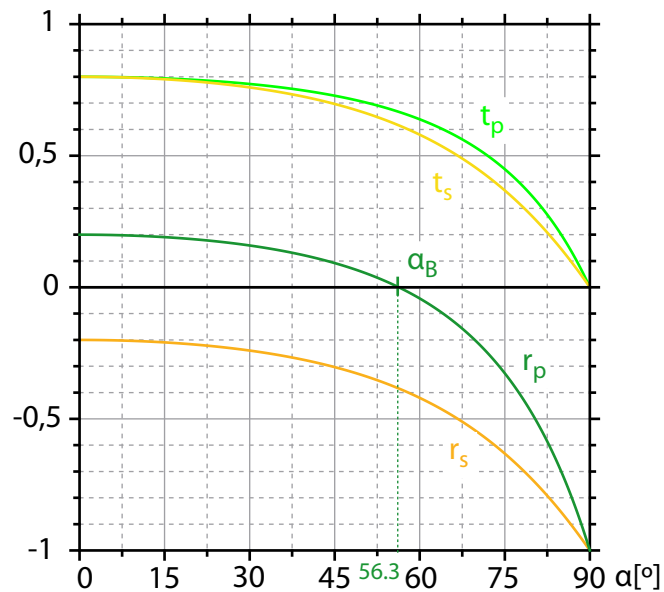
Intezitu svazků odražených a prošlých udávají Fresnelovy vztahy pro koeficienty odrazivosti:

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad r_{\perp} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$t_{\parallel} = \frac{2 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta)} \quad t_{\perp} = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

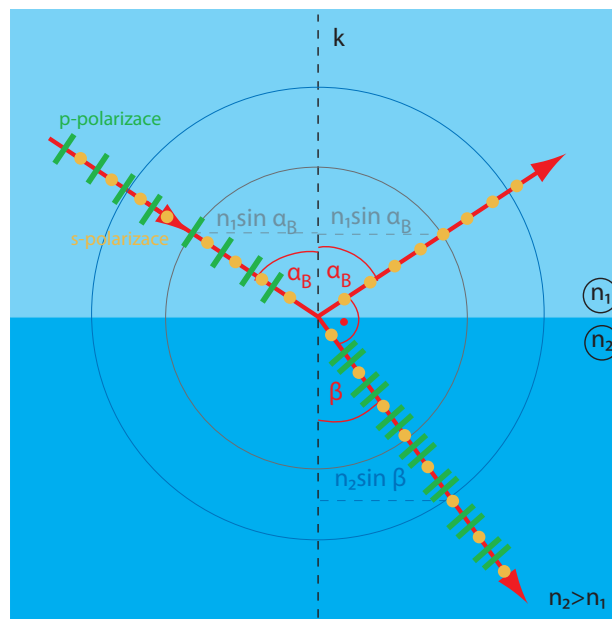
kde symbol \parallel značí složku elektrické intenzity rovnoběžnou s rovinou dopadu a symbol \perp složku elektrické intenzity kolmou k rovině dopadu. Druhé mocniny koeficientů r_{\parallel} a r_{\perp} udávají odrazivost

R_{\parallel} a R_{\perp} dané polarizace světla. Propustnost dané polarizace světla je doplňkem odrazivosti do jedničky.



Obrázek 8: Fresnelovy koeficienty pro vzduch-sklo (index lomu 1.5)

Pro vhodný úhel dopadu může být | polarizace odraženého svazku nulová. Hovoříme o Brewstrově úhlu.



Platí pro něj

$$\tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$

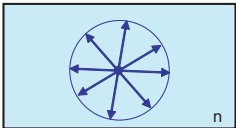
a paprsek odražený svírá v tomto případě s paprskem lomeným pravý úhel (odvoďte si ze zákona lomu a podmínky $r_{\parallel} = 0$).

Kalkulátor tohoto úhlu je na http://www.calctool.org/CALC/phys/optics/reflec_refrac anebo pro konkrétní materiály vyhledejte na <https://refractiveindex.info/>.

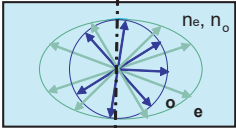
B.4 Dvojlom světla

Směr, ve kterém se obě polarizace světla šíří stejnou rychlostí, nazýváme optická osa. Paprsek řádný (ordinarius) má polarizaci rovnoběžnou s touto osou, paprsek mimořádný (extraordinarius) má polarizaci na tuto osu kolmou.

Izotropní látka



Anizotropní látka



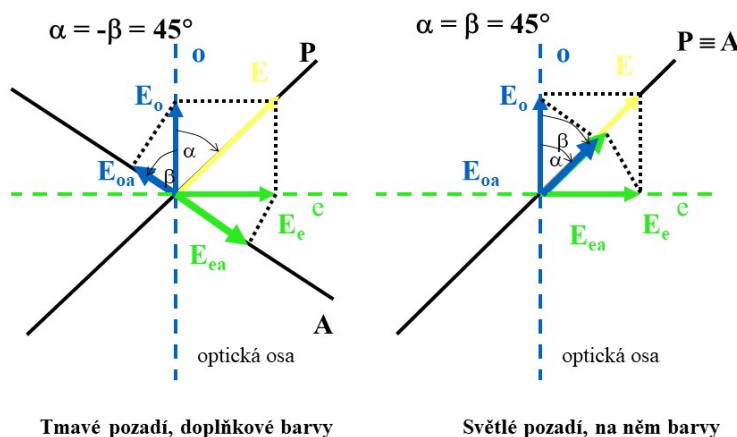
Indexy lomu pro $\lambda=0,63 \mu\text{m}$:				
	n_o	n_e	$n_o - n_e$	
TiO ₂	2,583	2,865	- 0,282	hexagon.
CaCO ₃	1,656	1,485	+0,171	rhomb.
SiO ₂	1,543	1,552	- 0,009	hexagon.

Dráhový rozdíl řádného a mimořádného paprsku je roven

$$\Delta x = (n_o - n_e)d,$$

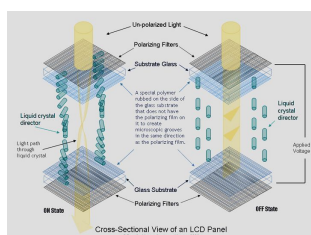
kde d je tloušťka vzorku, n_o a n_e indexy lomu řádného a mimořádného paprsku. Protože rozdíl indexů lomu je malý, může být vzorek poměrně tlustý (milimetry až centimetr), aniž by byly porušeny podmínky časové koherence (viz úloha 3A - Interference a difrakce). Oba paprsky pak interferují. Při zkřížených filtrech nastává vůči rovnoběžným filtrům ještě dodatečný fázový posuv, který mění barvy interference na doplňkové.

Případy nejlepší viditelnosti interferenčních barev

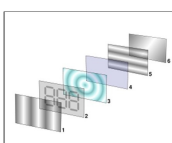


Další informace najdete na <https://www.microscopyu.com/techniques/polarized-light/principles-of-birefringence>.

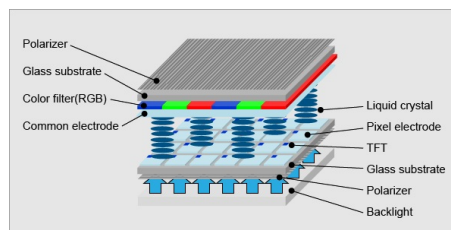
Pro funkci LCD displejů se používají tekuté krystaly - látky, které mění své uspořádání v elektrickém poli, a tedy dokáží stočit rovinu polarizovaného světla v závislosti na tloušťce vrstvy krystalů (<https://www.practical-home-theater-guide.com/lcd-display.html>).



Konstrukce displeje (ČB)



1. Polarizační filtr, polarizuje vstupující světlo svate
2. Skleněný substrát s ITO elektrodami (vzorovými díly požadovaného zobrazení).
3. Tekuté krystaly.
4. Skleněný substrát s ITO plošnou elektrodovou vrstvou.
5. Polarizační filtr polarizující světlo vodorovně (blokuje/propuští) světlo
6. Ořízná plocha vrasající světlo k pozorovateli (v prosvětlených (aktivních) LCD je tato vrstva nahrazena světelným zdrojem).



Literatura ke studiu

- J. Kuběna: Úvod do optiky, MU Brno 1994, skriptum. (též <http://physics.muni.cz/~kubena/PDF/ao1v55.pdf>)
- P. Malý, Optika, Karolinum 2008.
- J. Fuka, B. Havelka: Optika, SPN 1961, přístupné na: <http://www.opto.cz/knihy/>
- F5412 Základní kurz fyziky v příkladech a aplikacích 2
<http://is.muni.cz/predmet/sci/podzim2014/F5412>
- Hyperphysics (anglicky) - server určený pro dlouhé procházky všemi oblastmi fyziky: HyperPhysics - Light and Vision
- Nikon MicroscopyU (anglicky) - studijní texty o optice, jejíž znalost je potřebná pro mikroskopii, mnoho animací: Nikon - MicroscopyU - Popular articles