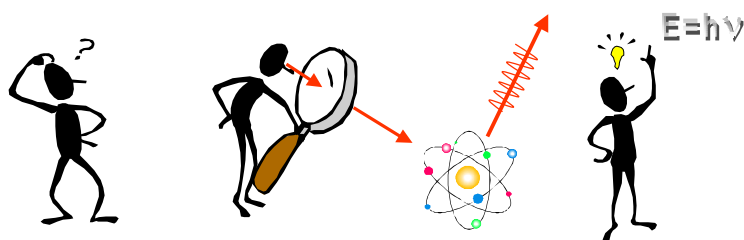


Dialog o optice

Dialog spolu vedou učitel *Praktik* a žák gymnasia *Všetečka*.

Všetečka velice pozorně sleduje učitelův výklad. Často do něho zasahuje zvědavými otázkami, poznámkami i přísně logickými úvahami.



Vidět, znamená vědět!

Poznat základní vlastnosti světla je pro nás velice důležité, protože člověk pomocí světla koná různá pozorování a k tomu používá velice citlivý detektor světla, jakým jsou naše oči.



To jsem zvědavý k čemu nám to bude dobré. V mechanice nás příklady o pohybu těles, při nichž aktivně vystupoval člověk, spíše mátlý a v nauce o elektřině jsme se mohli úplně obejít bez našich smyslů, a šlo to.

Budeme postupovat přibližně tak, že nejdříve si řekneme jak světlo vzniká, potom, jak se šíří prostorem, seznámíme např. s funkcí mikroskopu, spektroskopu, s principem vzniku světla v laserech a i jinými technickými aplikacemi důležitými pro praxi.

Na ta technická zařízení se těším. Jeden můj kamarád dostal na vánoce polarizační brýle, ale já jsem přes ně viděl úplně stejně, jako bez nich. Asi nefungovaly.

Moderní optické přístroje jsou velmi složitá zařízení. My se budeme držet jen objasnění základních optických principů. Na taková praktická zařízení, jako jsou třeba ty polarizační brýle, však zapomínat nebudeme.

2

Co je to světlo?

Světlo bylo po mnoho století pro vědce záhadou. Hledali nějakou hmotnou substanci, která by se dala světlu přisoudit, ale nenacházeli nic, co by obstálo při objasnění všech optických experimentů. Dlouho se mluvilo o látce zvané „ether“, jako nositeli světelných paprsků. Teprve necelých 100 let víme, že **taková otázka nemá smysl**.

Tomu mám rozumět tak, že **fyzikové doposud neumí odpovědět na otázku, co je to světlo?**

Ano, přesně tak, **fyzikové to nejen neumí, ale ani tu odpověď nehledají!**

No to tedy žasnu! Jak se dají konstruovat všechny ty moderní optické přístroje, když se neví co to světlo je? Tady něco nehraje! Já jsem měl o fyzicích lepší mínění!

Fyziky nezajímá, **co je to světlo**, ale zajímá je, **jak se světlo chová** v různých situacích, jaké má vlastnosti, jak se dají vlastnosti světla měřit, jak je využít pro praxi a podobně.

Nějaký rozdíl v to asi je, ale mně to připadá jako plané filozofování.

Nejde o filozofování, ale o přímý projev fyzikálních zákonů, jimiž se řídí **mikrosvět**, (to je svět atomů, elektronů, protonů a podobně). Tyto zákony jsou často cizí našim každodenním zkušenostem. I velkým fyzikům to trvalo skoro 50 let, než se po ostrých diskusích shodli na tom, že **zákony mikrosvěta se vyznačují zvláštním charakterem**.

3



Model atomu jako “elektrických garáží“

Vznik světla umí fyzika objasnit jako **proces mezi částicemi mikrosvěta**, při němž se mění jejich **potenciální energie**. Mikrosvět tvoří atomy složené z jádra a elektronového obalu.

To znamená, že jde o proces podobný tomu, jako když se mění **potenciální energie tělesa v gravitačním poli**? Já si to představuji jako mnohaposchodový dům. Čím je těleso ve vyšším poschodí, tím má větší potenciální energii a tím větší práci může vykonat, když padá dolů.

Podle mne by se atomu lépe podobaly mnohaposchodové podzemní garáže **v poli elektrickém**. Představte si, že někde hluboko pod nimi je kladně nabitá jádra a záporně nabitá elektrony jsou, jako auta, rozmístěny v jednotlivých poschodích. **V každém poschodí jen jeden elektron**.

A proč to? V mechanice mohou mít tělesa stejnou potenciální energii kolik chci.

To je jeden ze zákonů mikrosvěta. Na jedné úrovni potenciální energie (někdy říkáme na **energiové hladině**) může být jen jeden elektron a přitom **základní (stabilní) stav** obsazení těchto garáží je takový, kdy jsou obsazena jen nejhlubší patra, i když mnoho horních pater je prázdných.

A co je to tedy **nestabilní stav** obsazení těchto podivných elektrických garáží?

Atomy mají schopnost akumulovat na chvíli více energie, než kolik jí mají v základním stavu. Mluví se pak o **vybuzeném** nebo o **excitovaném stavu atomu**. Ten netrvá nikdy dlouho. Mluví se o **době života excitovaného stavu**. Bývají to nejčastěji jen milióntiny vteřiny.



Vybuzený atom pak může zazářit



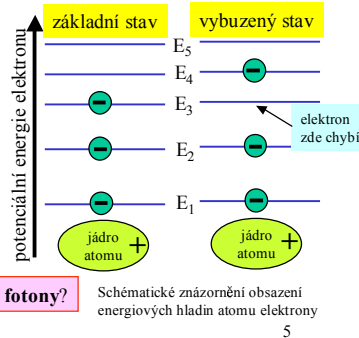
A jak si mám představit **vybuzený atom**? A jak k tomu dojde?

Když zůstaneme u představy podzemních garáží, tak vybuzený stav je takový, kdy některé nižší poschodí, které má být zaplněno, bylo uvolněno, nebo je o jeden elektron v garáži méně. K tomuto dochází při mnoha procesech, jako jsou např. **srážky atomů**, vysoká teplota, ozáření atomu světlem, srážka atomů s elektrony a podobně. Tím se ale zabývat nebudeme. To je látka pro vysokou školu.

Ale jak to všechno souvisí se vznikem světla?

Teď, když máme dobrou představu vybuzeného atomu, je to už jednoduché. Prázdné poschodí v elektrických garážích může zaplnit jen elektron z vyššího poschodí. Přitom ale ztratí část své energie, která by mu na nižším pochodí přebývala. Tuto energii elektron **vyzáří** ve formě světelné částice, které říkáme **foton**.

To znamená, že sluníčko k nám posílá **místo paprsků fotonů**?



5

Světlo jako tok fotonů (1)

Že sluníčko k nám **posílá fotony**, s tím souhlasím. Souhlasím i s tím, že k nám sluníčko **posílá paprsky**. Nesouhlasím však s tím slůvkem „**místo**“. To je divné, že? My jsme totiž zvyklí, zejména z matematiky, chápat pojmy jednoznačně. Tady jde ale o přiřazení pojmu konkrétní věci. Uvedu příklad: Víme co je to **stůl**, **tabule**, **křída**. Avšak, co je znakem tabule? Dá se na ni psát křídou. Dá se psát křídou i na stůl? Dá! Stůl se tedy za jistých okolností chová jako tabule. **Podobně fotony se za jistých okolností může chovat jako paprsek**.

To je zase to filozofování, hraní si se slovíčky. To přece nemůže mít žádný praktický význam!

Teď tě přesvědčovat o opaku nebudu. Vždyť ani nevíme, co nazýváme ve fyzice paprskem. Tvoje neověřivé poznámky svědčí o tom, **jak záhadné jsou pro laiky fyzikální zákony mikrosvěta**. Atomy, elektrony, fotony nikdo nikdy neviděl. Celé uspořádání mikrosvěta si fyzici vykonstruovali jen na základě toho, jak se ta která částice „chová“ v dané situaci.



Jak se vůbec pozná chování těchto částic, když vlastně nejsou vidět?

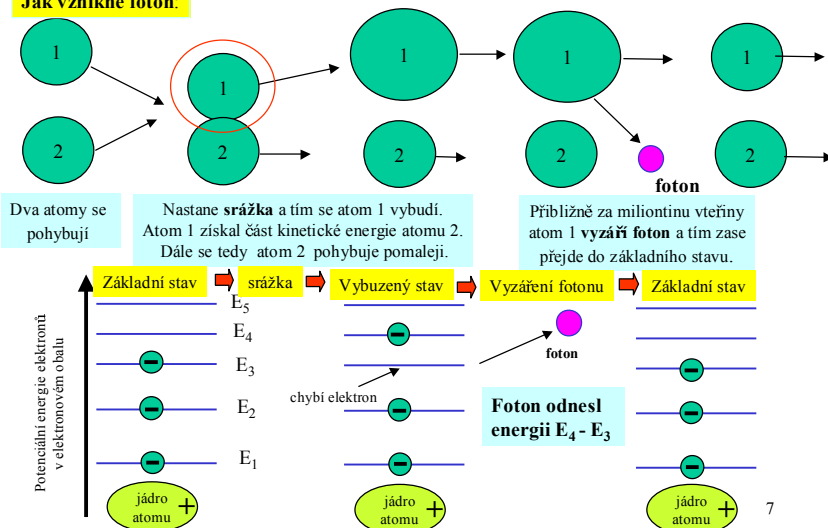
Jen podle toho, co ukazují měřicí přístroje - detektory. Významným **detektorem fotonů** je například lidské oko, ale také křemíková fotodioda nebo fotografický film.

Já už protestovat nebudu. Budu si pamatovat, že ze zdrojů světla se šíří jakési mikročástice, kterým se říká fotony i přes to, že je nikdo neviděl..

6

Světlo jako tok fotonů (2)

Jak vznikne foton:



Univerzální zákon fyziky



Přece jenom není ten mikrosvět tak záhadný. **Platí tam zákon zachování energie!** Foton si odnáší energii rovnou rozdílu potenciálních energií obou hladin! To je jako v mechanice těles. I tam je **stabilní taková situace**, kdy všechna tělesa už nemají kam padat a **součet jejich potenciálních energií je nejmenší.**

Ted' jsi formuloval **univerzální zákon fyziky** o stabilním stavu soustavy těles!

Ted' už vím, jak bych vypočítal **světelný výkon žárovky**. Je to jednoduše **součet energií, kterou za jednu vteřinu odnesou vyzářené fotony.**

Ta úvaha je správná. Problém je v tom, kolik fotonů se vyzáří za vteřinu a jakou energii mají vyzářené fotony, které jsou viditelné pro člověka. Máte doma přece **dálkový ovladač televize**. Ten vysílá také fotony, ale naše oči je nevidí. Polovodičová fotodioda na televizoru je však zaznamená, převede na elektrický signál a ten pak třeba zařídí přepnutí na jiný kanál. Tomuto neviditelnému světlu se říká **infračervené světlo**. Jinak má vlastnosti viditelného světla.

To já jsem už zkoušel. Přes noviny to infračervené světlo neprochází, ale přes sklo ano. Taky se odráží od skla i od stěn obýváku. Někdy televizor zareaguje, i když ovladač namířím na opačnou stranu, než je televize.

Je to jako bys svítil baterkou, jenže tyto infračervené fotony nevidíš. Musíme si ještě všimnout **detektorů světla**, které zaznamenají i fotony pro nás neviditelné.

8

Princip detektorů světla

Podobně jako při popisu činnosti zdrojů světla se neobejdeme bez zákonitostí mikrosvětla, tak je tomu i u detektorů světla. Detektory světla pracují v podstatě tak, že **dopadající foton excituje atomy detektoru tím, že vyrazí z atomu elektron a ten způsobí, že vzroste elektrický proud, který už umíme měřit.**

Jéé, to vypadá, jako bychom měli v oku ampérmetr!

No to jistě ne. Tak je tomu u atomů elektrických vodičů a polovodičů. U jiných látek **foton způsobí změny chemických vlastností**, které trvají dlouho, jako např. u fotografického filmu, anebo, které jsou jen krátkodobé, jako v našem oku, kde vyvolaná změna trvá jen asi 0,1 s. Přes **oční nervy** se informace o této chemické změně přenesou do mozku a my vidíme.

To opravdu se ta informace šíří po těch nervech, jako elektrický proud po drátě?

V podstatě ano. Jedná se o **elektrické signály**, které nervová soustava přenáší do mozku a z mozku zase zpět k našim smyslům nebo svalům. O tyto cesty a signály se teď lékaři velice zajímají. Je to **dosud neprobádaná oblast**.

To by mně velice bavilo zabývat se takovými neprobádanými věcmi!

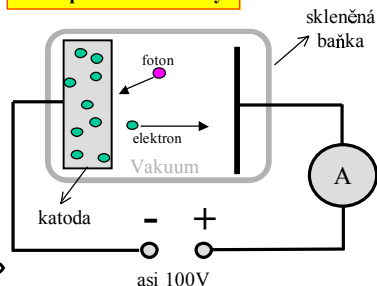
Takových oblastí je velice mnoho. Fyzika proniká do všech oborů vědy.



9

Detektor světla - fotonka

Princip činnosti fotonky:



Do skleněné baňky jsou zataveny dvě kovové elektrody (ty obsahují mnoho pohybujících se elektronů) a baňka je vyčerpána. K elektrodám je připojen ampérmetr a stejnosměrný zdroj elektrického napětí. Když na katodu nedopadne světlo (fotony), tak obvodem neprochází elektrický proud, protože elektrický obvod není uzavřen. **Když ale na katodu dopadne foton, vyrazí z ní elektron a ten je elektrickým polem přitážen ke kladně nabitě elektrodě. Svým elektrickým nábojem přispěje ke vzniku elektrického proudu.**

A proč ty elektrony samy nevyletí z elektrody, když se tam pohybují?

Můžeme si to představit tak, že jsou tam uzavřeny jako voda v hrnci. **Voda z hrnce taky nevyteče**, protože sama nepřekoná okraj hrnce. Když do vody vhodíme dosti rychle míček, tak voda vyšplouchne. Podobně je to s elektrony. Ty také vyletí až tehdy, až jim foton předá svou energii, s jejíž pomocí jsou teprve schopny překonat **okraj myšlené nádoby**.

A = energie, která chybí elektronům, aby vyletěly z kovu.



10

Podzemní garáže a hrnec elektronů



Mně není jasné, jak podzemní garáže a hrnec elektronů souvisí s elektrickým vodičem?

Je třeba říct, že tyto jednoduché modely nám jen **názorně připodobňují** některé vlastnosti atomů a látek, abychom si jednoduše představili jinak složitě abstraktní procesy.

Ale proč jste místo poschodového domu zvolil raději podzemní garáže?

Pokusím se tu mou volbu objasnit. Může se to zdát jako **fantastická pohádka**.

1) Když zvednu těleso o hmotnosti 1 kg do výšky 1 m, bude mít potenciální energii $E_p = 10 \text{ J}$. To jsem vypočítal podle vzorce $E_p = mgh$. Nezáleží na tom, kde se těleso nachází, zda na chodníku, nebo v 8. poschodí. Nulovou úroveň potenciální energie určuje to, **od jaké úrovně se měří výška h**.

2) Představit si model atomu jako podzemní garáže, je docela funkční. Auto v nich zaujmou automaticky nejnižší poschodí. Aby se auto dostalo na povrch nebo aspoň do vyššího poschodí, musí to zařídit **vnější síla**. Jen díky ní může totiž získat potřebnou energii k této změně polohy. Na povrchu se auta mohou pohybovat vlivem tepelné energie, ale jen po cestách mezi garážemi, které jsou obklopeny ze všech stran **nevelkým valem**, který opět bez cizí pomoci nepřekonají. Když se auto dostane náhodou k neobsazené garáži, tak tam s **velkým rachotem spadne**, podobně jako cizí auto sjede do prostoru garáží, když se náhodou objeví na vrcholu valu.

Já to dokončím! Elektronů v kovu jsou **auta bez benzínu** a místo hrnce je val kolem garáží a rachot si mám představit jako foton. A bez cizí pomoci se auto nedostane ani do vyššího poschodí, ani přes val, nemá benzín. Zato dolů padá bez problémů! **A pohádky je konec!**

Nepochopitelný jev



Mě stále vrtá v hlavě, jak mohl někdo přijít na to, že elektrony jsou uvězněny v kovu, jako voda v hrnci, nebo auta uvnitř valu, když je přece nikdo neviděl.

To je právě ta **představa o chování částic mikrosvěta** na základě údajů měřících přístrojů. Za touto větou se skrývají tisíce nejrůznějších experimentů, které byly provedeny a které potvrzují, že proces detekce fotonu probíhá v podstatě tak, jak jsme jej popsali.

To se mně zdá skoro neuvěřitelné! Takhle to vymyslet!

Je třeba k tomu ovšem dodat, že náš výklad je značně zjednodušený a **zejména obrázky, kde elektron nebo foton malujeme jako kuličky, slouží pouze k našemu lepšímu zapamatování a nikoliv k zobrazení skutečnosti**. Podobně je tomu se schémata energiových hladin, na nichž se nacházejí elektrony.

Aspoň že ten zákon zachování energie zde platí!

Popsaný proces detekce fotonů se nazývá **fotefekt** a **Einstein** za jeho výklad dostal Nobelovu cenu. On totiž vysvětlil do té doby **nepochopitelný jev**, že k vyrazení jednoho elektronu z kovu nestačí ani miliony fotonů, které jednotlivě mají energii menší než A , ale stačí k tomu jeden foton, který nese energii větší než A .

Ty zákony mikrosvěta jsou podivné. V mechanice je tomu jinak. Když jeden člověk nezvedne pytel cementu na auto, tak dva nebo tři to určitě zvládnou! Ach ty fotony!

12

Zdroje světla (1)

Nyní, když známe jak vzniká světlo, můžeme si všimnout jednotlivých světelných zdrojů:

Žárovka

Svítil wolframové vlákno, které se ve skleněné baňce žhává elektrickým proudem. V baňce je vakuum nebo netečný plyn, aby vlákno neshořelo. Atomy vláknů jsou buzeny **vzájemnými srážkami**, které vyvolává vysoká teplota.

Zářivka

Svítil stěny trubice, na nichž je nanášena látka, jejíž atomy jsou buzeny jednak ionty plynu, jednak fotony, které vznikají při elektrickém výboji v plynové náplni uvnitř trubice. Tento proces vzniku světla se nazývá **fluorescence**.

Televizní obrazovka

Na vnitřní straně obrazovky je nanášena látka, jejíž atomy jsou buzeny dopadem elektronů s velkou kinetickou rychlostí. Tento proces vzniku světla se nazývá **luminiscence**.

Svíčka

Roztavený vosk vzlíná do knotu, kde se odpařuje a vzniklé páry se chemicky slučují s kyslíkem. Tento proces se nazývá hoření. Atomy jsou buzeny **chemickou reakcí**.

Horské sluníčko

V křemení baňce, kde je kapka rtuti, vznikne elektrický výboj a tím se odpaří i zbytek rtuti. Atomy rtuťových par jsou buzeny **vzájemnými srážkami při elektrickém výboji**. Takovým zařízením se říká výbojky.

13

Zdroje světla (2)

Výbojky

Světlo zde vzniká na stejném principu, jako u horského sluníčka (ve rtuťové výbojce). Náplň však tvoří buď sodíkové páry, nebo jiné plyny při snížení tlaku.

Ledky (LED)

Světlo vzniká v oblasti p-n přechodu polovodičového materiálu (často krystaly galium arsenidu). Atomy se vybudí průchodem elektrického proudu přes p-n přechod. Název ledka vznikl počestněm zkratky anglických slov Light Emitting Diode

Lasery

U polovodičových laserů tvoří základ ledky, u plynových výbojky, u eximerových chemické reakce, a dále optický rezonátor vyvolávající **stimulovanou** emisi fotonů. U všech výše uvedených zdrojů jde o **spontánní** (náhodnou) emisi fotonů. Název laser je zkratka slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.



A to si mám všechno pamatovat? Vždyť já některým slovům vůbec nerozumím!

To rozhodně není nutné, já jsem chtěl jenom na praktických příkladech ukázat, že všechny **zdroje světla mají společný princip**: foton je emitován při přechodu elektronu na nižší hladinu, při přechodu z vybuzeného atomu do základního stavu.

Mně se to líbí, když se to dá tak zjednodušit. Nemusím si toho tolik pamatovat!

K jednotlivým zdrojům světla se budeme stále vracet, když budeme poznávat vlastnosti světla, které vydávají. Pak aspoň částečně objasníme pojmy, kterým teď nerozumíš.

14

Částice bez hmotnosti

Abychom aspoň trochu porozuměli vzniku světla, museli jsme nahlédnout do podivných zákonů mikrosvěta. Podle nich si můžeme světlo představit jako tok fotonů, z nichž každý odnáší z vybuzeného atomu přebytek potenciální energie.

Já bych dodal, že jde o přebytek elektrické potenciální energie.

No, ještě přesnější by bylo: o přebytek elektromagnetické energie.

A jak rychle ty fotony vyletí ze zdroje?

Když si představujeme, že fotony jsou malé částice, tak je to docela rozumná otázka, na kterou však není snadné jednoduše odpovědět. Experimentálně bylo zjištěno, že fotony se šíří ve vakuu nejvyšší možnou rychlostí na světě, to je, rychlostí světla, ale z teorie relativity plyne, že žádná hmotná částice se touto rychlostí nemůže pohybovat. To plyne z teorie relativity a bylo to experimentálně mnohokrát ověřeno!

Tady se zase něco přičí zdravému rozumu! Jak se může tvrdit, že fotony mají rychlost světla, když v druhé větě se říká, že to není možné!

Mechanismus atomových procesů vedoucích ke vzniku světla (fotonů) i teorie relativity si však neodporují, když se připustí, že klidová hmotnost fotonů je nula.

To svět ještě neviděl! Částice, která nemá hmotnost!

Díky ní, ale vidíš!

15

$$E = mc^2$$

V hmotnosti m je totiž ukryta nesmírná energie E , jejíž množství se vypočte podle Einsteinova vztahu $E = mc^2$, kde c je rychlost světla ve vakuu ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Na správnosti tohoto vzorce fungují atomové bomby i atomové elektrárny.

K čemu nám to ale je, když foton žádnou hmotnost nemá!

On se ale pohybuje rychlostí c a víme, že z excitovaného atomu si odnáší přebytek potenciální energie, označme jej E_f . Z Einsteinova vztahu tedy můžeme bez problémů vypočítat hmotnost fotonu m_f .

Já to už mám! $m_f = E_f / c^2$, ale co mám dosadit za E_f ?

Foton, který se nám jeví jako zelené světlo, odnáší přibližně energii $E = 2$ eV = $2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ J. Jen se mne teď neptej, jak jsem na to přišel! Odpověď není jednoduchá. Časem se to ale dozvíš.

Tak tedy $m_f = 3,2 \cdot 10^{-19} / (9 \cdot 10^{16}) = 3,7 \cdot 10^{-36}$ kg. To opravdu nevím, jak si tak malou hmotnost představit! A navíc! Fotony jsou barevné!

Asi 300 tisíc „zelených fotonů“ by mělo stejnou hmotnost, jako jeden elektron v klidu.

Kdyby se elektron pohyboval, tak by jich muselo být ještě víc?!

Ano! Měl by větší energii!

16

Světlo se nešíří přímočaře!



Ten mikrosvět je ohromně zajímavý, ale mne stále napadají takové představy z mechaniky těles. Když má foton hmotnost, **pak by světlo, tedy fotony, mělo padat na zem** jako ostatní tělesa v gravitačním poli.

Ano, je to tak, **gravitační pole přitahuje fotony**. Protože mají ale tak malou hmotnost, tak se tato příležitost pozoruje, jen když světlo prochází silným gravitačním polem. V gravitačním poli Země se to nepozoruje. Tady na Zemi se světlo šíří po přímce.

A pozorovalo se to vůbec nějak?

To víš, že je to experimentálně potvrzeno. Pozorovalo se zakřivení paprsků světla, rozuměj dráhy fotonů, když se světlo z hvězdy šířilo těsně kolem Slunce. Byl to fundamentální experiment, který potvrdil **správnost teorie relativity**.



Já ani nedutám. Mě se to zdá jako pohádka. **Na světelné paprsky působí gravitace**, fotony nemají klidovou hmotnost (naštěstí se stále pohybují) takže to nevádí a mohou se pohybovat ve vakuu rychlostí, kterou žádné jiné těleso nebo částice nemůže dosáhnout.

To je pěkné shrnutí našeho povídání. Je zajímavé, že ty podivnosti vznikají jen tím, že jsme schopni pozorovat u nás, na Zemi, jak procesy mikrosvěta (jeho rozměry jsou řádově 10^{-10} m) tak i procesy megasvěta (vesmíru).

Už bychom se vrátili zase na Zem, kde můžeme všechno vidět!

17

Světlo, jako elektromagnetické vlnění

Nyní přijde **ještě jeden šok**. Představa, že světlo je vlastně tok fotonů, se **vůbec nehodí** pro studium vlastností světla, činnost optických přístrojů či pro zobrazování čočkami.



Já jsem si to myslel, světlo se přece šíří prostorem jako paprsky. To znám z praxe. Večer jsou ty paprsky vidět, jak se šíří ze vzdálených pouličních lamp a dokonce i v televizi jsou vidět, když kamera zabere žárovky třeba v hledišti divadla.

... a všiml sis, že ty tvoje paprsky viditelné v televizi se šíří jen do určitých směrů?

Ano, a nejčastěji se šíří jen do 6 směrů a zajímavé je, že ty směry jsou u všech snimaných žárovek stejné. **Nevím, čím to je!**

Ta tvoje představa světla je totiž tak nedokonalá, že ji opustíme a budeme si vytvářet novou, mnohem dokonalejší. **Světlo se při šíření prostorem chová jako elektromagnetické vlnění.**

To jako, že se chová jako rádiové nebo televizní vlny?

Ano, přesně tak. Liší se od sebe **jen vlnovou délkou**. Rádiové vlny mají vlnovou délku stovky metrů, televizní asi jeden metr a viditelné světlo jen asi 0,5 mikrometru.

18

Vlnová délka a frekvence



Já jsem už ale zapomněl, co to vlnová délka je. Jen si vzpomínám, že jsme to brali v souvislosti se zvukem. Ale u zvuku byla **důležitá frekvence**, protože ta určovala výšku tónu.

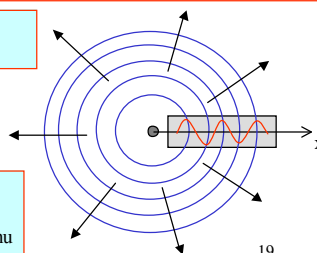
Tak si to trochu zopakujeme a to přirovnání elektromagnetických vln ke zvuku bude pro nás užitečné, protože **základní pojmy týkající se vlnění jsou stejné** jak pro zvuk, tak pro světlo či rádiové vlny i pro vlny na vodní hladině.

To si dovedu představit. To je jako těleso v mechanice, taky jeho pohyb nezáleží na tom, z čeho je, jestli ze železa, dřeva nebo kamene, ale jen na jeho hmotnosti.

Jistá podobnost zde je. Představte si teď, že pozorujeme **vlny na hladině vody**, do níž jsme hodili kámen.

To vidím zcela zřetelně. Na hladině jsou kružnice, které se šíří na všechny strany stále dál a dál od svého středu a jsou stále méně a méně zřetelné, až zaniknou.

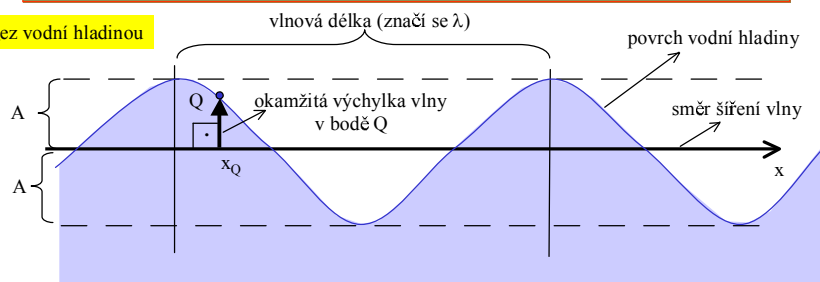
Když bychom kružnice shora vyfotografovali, tak při pečlivé prohlídce snímku zjistíme, že tam, kde vidíme kružnice se střídá vyduť a snížení hladiny oproti klidnému stavu. Řez hladinou je znázorněn v obdélníčku.



19

Vlny na vodní hladině

Řez vodní hladinou



A ... **amplituda vlny**: 1) na vodní hladině ji měříme v jednotkách délky (např. v *cm*)
 2) u zvuku nastává změna tlaku vzduchu (měří se v *Pa, pascal*)
 3) u **elektromagnetických vln** (elektrická složka) se amplituda měří v jednotkách *V/m (volt na metr)* - napěťový spád,



A když vlny na vodní hladině slábnou, tak amplituda je stále menší a menší, že?

Ano, to je i u zvuku. Čím dále jsi od zdroje zvuku, tím je zvuk slabší. Je to tím, že se šíří na všechny strany. Např. **energie**, kterou při písknutí vydá píšťalka, se dále od zdroje stále více a více **zředuje**. Ovšem frekvence, to je výška tónu, je stále stejná.

20

Rychlost šíření vlnění



To zní jako důsledek zákona zachování energie! A jak je to s tou vlnovou délkou?

Vlnová délka je délka nejmenšího úseku vlnění, který se stále opakuje. Na obrázku je naznačena např. jako úsek mezi dvěma vrcholy vodní hladiny. Ale i jiná vyznačení jsou možná.

To znamená, že vlnová délka závisí na tom, jak rychle se šíří vrchol vlny po hladině. Když bude rychlost malá, bude malá i vlnová délka a naopak. **To není dobrá charakteristika.**

Souhlasím. **Frekvence se nemění.** To je experimentální fakt.

Takový pokus jsem jednou dělal. Tranzistorák jsem zavázal do dvou igelitových sáčků a ponořil do vody. Hrál slaběji, ale jinak normálně.

Označme písmenem T dobu, za níž se vrch vlny posune právě o jednu vlnovou délku. **Velikost rychlosti šíření vlny u** , pak podle definice je $u = \lambda/T$. Veličina T se nazývá **perioda** a veličina $f = 1/T$ se nazývá **frekvence vlnění**. Ta se udává se v jednotkách Hz (hertz).

Rychlost vlnění závisí na prostředí, kterým se šíří. Zvukové vlny se šíří pomaleji než světlo. To znám z praxe. **Když je bouřka**, tak nejdříve vidím blesk a teprve až potom, za několik vteřin uslyším burácení hromu. A přitom blesk i hrom vznikají současně.



A umíš vypočítat, jak je bouřka daleko?

...sím ano. Počet vteřin dělím třemi a vyjde mi vzdálenost bouřky v kilometrech

21

Index lomu světla



...a jaká je tedy rychlost zvukových vln ve vzduchu?

No, když mezi bleskem a hromobitím uběhnou tři vteřiny, tak je bouřka právě jeden kilometr daleko. To znamená, že velikost rychlosti je $u = 1\text{ km}/3\text{ s} = 1000\text{ m}/3\text{ s} = 333\text{ m/s}$.

Správně! To je rychlost zvukových vln ve vzduchu. Ve vodě se šíří zvuk rychlostí asi 1500 m/s, v železných kolejnicích to je asi 5000 m/s.

Ale jak je to s rychlostí světla? Ta je také v různých látkách různá?

Ano, v různých látkách je různá, ale není zvykem ji udávat v m/s, ale číslem, které udává, kolikrát je rychlost světla ve vakuu větší, než látce. Tomu číslu se říká **index lomu světla**.

Index lomu světla je definován vztahem: $n = c/u$, kde c je rychlost světla ve vakuu a u je rychlost světla v dané látce. Například index lomu vody je 1,3 ; skla 1,5 .

A proč ten název ?

Ten název plyne ze způsobu jeho měření. Měří se nejčastěji lom světla na rozhraní dvou prostředí, třeba mezi vzduchem a vodou, nebo vzduchem a sklem. Ale o tom až později. Teď musíme ještě zopakovat další pojmy týkající se vlnění obecně.



22

Kmity a vlnění

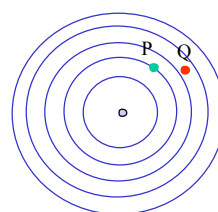
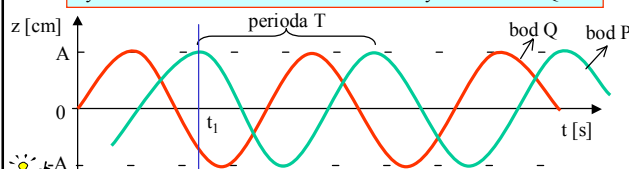
Vyberme si na vodní hladině jeden bod, označme ho P a sledujme, co se s ním děje, když přes něj prochází vlna.

...sím, to si dovedu živě představit. On se pohybuje nahoru a dolů.

A jak se bude pohybovat druhý bod na hladině kousek od bodu P, označme si ho třeba Q?

No úplně stejně, **to dá rozum**. Bude taky kmitat nahoru a dolů, jako bod P!

Jistý rozdíl v pohybu obou bodů tady je! Pozorně si prohlédni následující dva grafy, které znázorňují, jak se s časem t mění výška nad klidnou hladinou obou uvažovaných bodů P a Q.



Ten rozdíl je **velice malý**, mají stejnou amplitudu i periodu, jenom se liší tím že vrcholů nabývají v různých časových okamžicích.

23

Fáze vlnění - vlnoplocha

Tato odlišnost je pro vlnění možná podstatnější než hmotnost pro pohyb tělesa! Za chvíli si to objasníme! Nejdříve si musíme objasnit příslušnou fyzikální terminologii.

Zatímco bod P se v časovém okamžiku t_1 nachází v maximu výchylky z rovnovážné polohy, tak bod Q nedosáhl ještě svého minima. **Stav kmitů obou bodů je tedy různý.** V souvislosti s kmity a tedy i s vlněním, nemluvíme ve fyzice o stavu, ale o **fázi vlny**.

A proč se to tak přísně rozlišuje?

O stavu se obvykle mluví tehdy, když trvá aspoň nějaký zlomek vteřiny, byť je to třeba jen miliontina vteřiny. Zatímco fáze se neustále s časem mění, tak jako poloha auta na silnici.

Tak já si to budu pamatovat. **Kmity v bodě P a Q se tedy liší svou fází.**

Správně! A další termín, který budeme potřebovat k tomu, abychom se později snadno domluvili o vlastnostech vlnění, je vlnoplocha.

Vlnoplocha je geometrické místo bodů, v němž má vlnění stejnou stejnou fázi.

To jako třeba ty modré soustředné kružnice na těch minulých obrázcích představují vlnoplochy, protože bylo řečeno, že označují místa, kde je výchylka největší nebo nejmenší?

Ano, to jsou vlnoplochy!



24

Kulová vlna



Jenže ty kružnice vznikly proto, že ty vlny se šíří na všechny strany stejnou rychlostí! To je vždycky tak?

Vždycky to tak není. Ani u zvuku, ani u světla. Jde především o některé krystaly, jako je křemen, vápenc, skalice modrá a podobně, kde se světlo šíří do různých směrů různou rychlostí. Jde o **látky anisotropní**, nebo-li **dvojlomné**. Ale těmi se teď zabývat nebudeme!

Já jsem na takové věci hrozně zvědavý. Ale napřed bych měl asi porozumět tomu, jak se šíří světlo v **látkách jednolomných**, jako je voda nebo sklo atd...

Ten název jsi utvořil logicky správně, ale neuvádá se, protože by zbytečně komplikoval vyjadřování. Možná, že více než 99% látek používaných v optice **není** dvojlomných.

Když se vlnění šíří na všechny strany stejně rychle, vlnoplocha má tvar koule a mluvíme o **kulové vlně**.



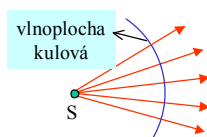
A jak je to s těmi paprsky? Já pořád ještě nevím, **co to je paprsek**?

Teď přišel ten pravý čas, objasnit si, co rozumíme paprskem. i když v souvislosti se zvukem se pojmu paprsek neuvádá, zato v optice je to pojem velice užitečný.

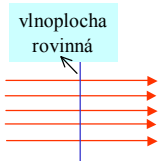
25

Vlnoplochy a svazky paprsků

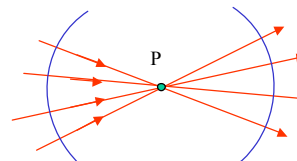
Všechny možné **kolmice k vlnoploše se nazývají paprsky**.
Paprsky vytvářejí **rozbíhavé, rovnoběžné nebo sbíhavé svazky paprsků**.



rozbíhavý svazek



rovnoběžný svazek



sbíhavý a rozbíhavý svazek



Ty rozbíhavé svazky si dovedu představit, ale jak si představit světelný zdroj, když ty paprsky jsou navzájem rovnoběžné? Ty přece nemohou vycházet ze žádného zdroje světla.

Přísně geometricky vzato máš pravdu, ale pro jednodušší uvažování je v optice takový svazek paprsků, jak uvidíš, **velice užitečné zjednodušení**. Připodobnit by se to zjednodušení dalo situaci v mechanice, kdy jsme místo skutečných těles uvažovali jen o hmotných bodech.



Tak v této souvislosti mě napadá, že když bude **zdroj velmi daleko**, tak vlnoplocha bude skoro rovinná a paprsky k ní příslušné, pak budou skoro rovnoběžné.

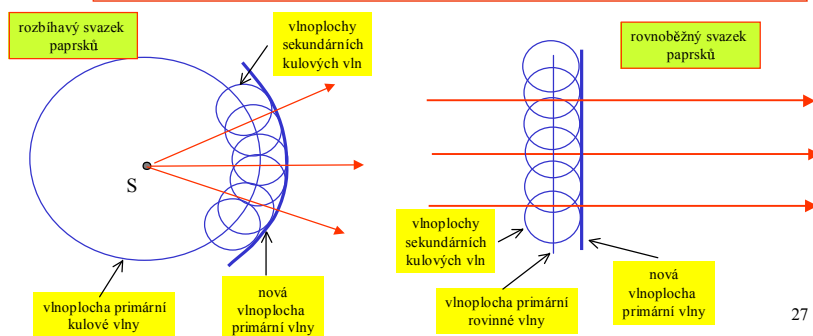
Ano, světlo z hvězdy je skoro rovnoběžný svazek paprsků.

26

Šíření vlnění - Huygensův princip

Popsat matematicky šíření zvukových vln, vln na vodní hladině či elektromagnetických vln, je velmi komplikované a je k tomu nutná vyšší matematika. My se ale seznámíme s **geometrickou představou šíření vln**, která platí pro každý druh vlnění. Tato představa se nazývá **Huygensův princip** (Ch. Huygens 1629 - 1695).

Huygensův princip říká, že každý bod vlnoplochy primárního vlnění je možné považovat za zdroj sekundárních kulových vln o stejné frekvenci a obálka z vlnoploch těchto sekundárních vln odpovídá vlnoploše primární vlny.



27

Směr šíření sekundárních vln



Tady ale něco nehraje. Ty sekundární vlny se přece šíří i proti směru šíření paprsků!

To je správný postřeh! Nemůžeme od názorných konstrukcí požadovat, aby přesně odpovídaly praxi. Trochu přesnější to bude, **když dodáme**, že se to týká jen obálky vlnoploch, která se šíří ve směru paprsků



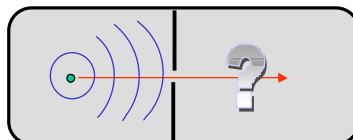
Ale proč jenom **trochu přesnější**, když mně se zdá, že ten dodatek je úplně dobrý!

To si objasníme později. Doporučuji ti, aby sis zatím podrobněji všiml šíření vln na vodní hladině. Nemusíš dělat experimenty na rybníku, bude ti k tomu stačit vana! Napuť tam asi 5 cm vody a asi uprostřed vany přeruš hladinu například dvěma plechy tak, že mezi nimi necháš mezeru asi jen 5 mm.



To já už vím jak to udělat. Já použiji plastelínu a tou upevním do vany různá pravítka, nebo najdu i nějaký plech.

No a pozoruj, jak se budou šířit vlny za tou malou mezerou. Vlnu uděláš, když prstem ůkneš do hladiny



28

Už se na ten pokus těším!

Rychlost sekundárních vln

Naši formulaci Huygensova principu bychom měli ještě doplnit o tom, že frekvence sekundárních vln je stejná, jako má vlna primární a rychlost jejich šíření závisí na prostředí, v němž se šíří.

A jaká je amplituda sekundárních vln?

O amplitudě Huygensův princip neříká nic. Teorie elektromagnetických vln, na tuto otázku umí přesně odpovědět, ale to se učí v optice až na vysoké škole.

K čemu je tedy Huygensův princip tedy užitečný?

Jeho užitečnost je zejména v tom, že nám názorně objasní, proč se vlnění na rozhraní dvou prostředí lomí, to je, proč se mění směr jeho šíření a jak souvisí tato změna směru s rychlostí šíření vln.

Aha, proto ten podíl rychlosti šíření vln se nazývá indexem lomu!

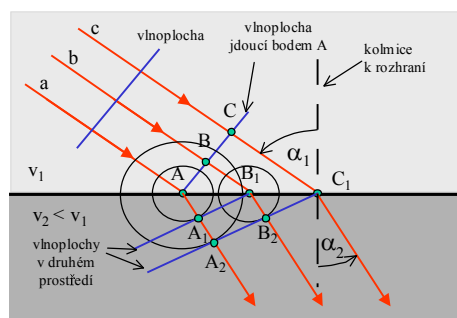
Ano, ta souvislost je taková, jak uvádíš. Měřit přímo rychlost zvuku v různých prostředích je mnohonásobně jednodušší, než totéž udělat pro světlo.

Já si vzpomínám, o tom jsme už mluvili. Teď jsem zvědavý, jak ta rychlost souvisí s lomem.

29

Lom světla na rozhraní dvou prostředí

Sledujme, jak se změni směr rovnoběžných paprsků po průchodu rovinným rozhraním z prvního prostředí do druhého. Vybereme si z celého svazku jen tři paprsky a, b, c, a to tak, že paprsek b leží uprostřed paprsků a, c.



- 1) Body A, B₁, C₁ leží na rozhraní.
- 2) Zatím co paprsek b proběhne úsečkou BB₁, sekundární kulová vlna šířící se menší rychlostí má jen poloměr AA₁, který je menší než BB₁.
- 3) Zatím co paprsek c proběhne úsečkou CC₁, sekundární vlna šířící se v druhém prostředí z bodu B₁, má poloměr BB₁, šířící se z bodu A, má poloměr AA₂.

- 4) Když podobně sestrojíme sekundární vlny v druhém prostředí ke všem bodům na povrchu ležícím mezi body A a C₁, vytvoří jejich obálka rovinnou vlnoplochu v druhém prostředí.
- 5) Úhel α_1 se nazývá **úhel dopadu** a α_2 **úhel lomu**. Oba se měří od kolmice k rozhraní.

Je to dost složité, ale nepostrádá to logiku. Asi to chápu

30

Vlnový vektor

Vlastnostem paprsků budeme lépe rozumět, když k jejich popisu budeme používat **vlnový vektor** a budeme jej značit **k** (tučně, bez šipky) a jeho velikost jen **k**.



To je docela rozumné, aby vektor ukazoval směr paprsků. Ale jakou bude mít velikost? Paprsky mohou být různě dlouhé!

Jak se ukáže později, je užitečné, aby měl **velikost** $k = 1/\lambda$, tedy **převrácenou hodnotu vlnové délky**.

Ale to je přece nesmysl, délka vektoru se musí měřit v metrech a ne v jednotkách 1/metr!

Ale proč tak protestuješ? Jen si vzpomeň, v jakých jednotkách se měří v mechanice například velikost vektoru rychlosti nebo síly! Vždyť přece víš, že je to jen otázka definice veličiny a její užitečnosti pro matematický popis.

Uznávám, že to moje tvrzení o měření velikosti vektorů je nesmysl.

Užitečnost takové definice vlnového vektoru se ukáže hned při jeho aplikaci na lom vlnění na rozhraní a později u typicky vlnového jevu, kterému se říká interference. Jak asi tušíš, **velikost vlnového vektoru bude souviset s rychlostí šíření vln** v daném prostředí.

31

Vlnový vektor ve vakuu a v prostředí

Z experimentů víme, že frekvence vlnění f je v prvním i druhém prostředí stejná, ale velikosti rychlosti šíření jsou různé. Označme je u_1 a u_2 . Index lomu rozhraní těchto dvou prostředí tedy je $n_1 = c/u_1$ a $n_2 = c/u_2$, kde c je rychlost světla ve vakuu. Mezi rychlostí, frekvencí a vlnovou délkou platí vztah: $u = \lambda / f$. Jaká bude vlnová délka a velikost vlnového vektoru v prvním a druhém prostředí?



To je přece jednoduché: $\lambda_1 = u_1/f$, $\lambda_2 = u_2/f$ velikost vlnových vektorů bude: $k_1 = 1/\lambda_1 = f/u_1$, podobně pro k_2 . **Nepochopil jsem ale, kam směřujeme!**

Je totiž užitečné, vědět, jak souvisí velikost vlnového vektoru v prostředí s velikostí ve vakuu. Použitím indexu lomu dostaneme: $k_1 = f/u_1 = f/c * n_1 = n_1 * 1/\lambda_0 = n_1 * k_0$, kde indexem 0 jsme označili veličiny vztahující se k vakuu.

Konečným cílem těchto úvah je, umět **aspoň geometricky najít směr paprsků po lomu** na rozhraní dvou prostředí, třeba vzduchu a skla, když známe index lomu.

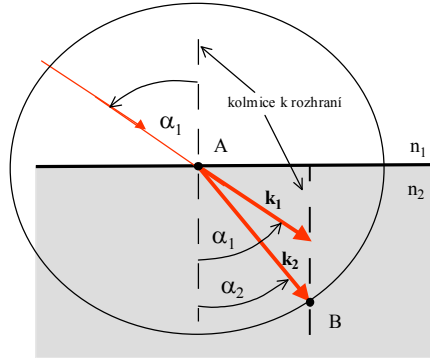
Uznávám, že to je užitečné. Vektory jsme se také učili geometricky skládat nebo rozkládat.

Takže do dalších úvah si pamatujeme: $k = n * k_0$
... k je velikost vlnového vektoru v prostředí o indexu lomu n
... k_0 je velikost vlnového vektoru ve vakuu

Index lomu vakua = 1!

32

Vlnové vektory a lom na rozhraní



Postup konstrukce lomeného paprsku:

- 1) Najdeme bod A, kde paprsek dopadá na povrch rozhraní a z tohoto bodu nakreslíme vektor \mathbf{k}_1 .
- 2) Velikost \mathbf{k}_2 je dána vztahem $k_2 = n_{12} \cdot k_1$ kde $n_{12} = n_1/n_2$ je **relativní index lomu** daného rozhraní.
- 3) Narýsují kružnici se středem v A o poloměru k_2 . Koncovým bodem \mathbf{k}_1 vedu kolmici na rozhraní. Ta protne kružnici v bodě B. Spojnice AB je pak hledaný směr vektoru \mathbf{k}_2 .

Já bych k tomu ještě dodal, že lomený paprsek leží vždy v rovině, která je určena dopadajícím paprskem a kolmicí k rozhraní. Této rovině se říká **rovina dopadu**

A já dodám, že když první prostředí je vakuum, tak $n_1 = 1$ a $n_{12} = n$. Je to tak?

Ano, přesně tak!



33

Snelliův zákon lomu

Všimněme si ještě jednou geometrické konstrukce lomeného paprsku. Každý vlnový vektor lze **rozložit na dva**: jeden leží v rovině rozhraní a druhý je na něj kolmý. Viz obrázek!

Z toho obrázku je tož asi vidět. Ten světelný paprsek se lomí tak, aby ta **složka rovnoběžná s povrchem byla stále stejná, před lomem i po lomem**.

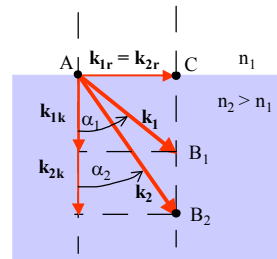
Aby to pravidlo bylo úplné, je třeba ještě dodat, že vlnové vektory mají délku $k_1 = n_1 k_0$ a $k_2 = n_2 k_0$

Ty geometrické konstrukce jsou zajímavé. Já si to pomocí nich snadněji zapamatuji!

Výsledkem této konstrukce jsou dva pravoúhlé trojúhelníky AB_1C a AB_2C , které mají společnou odvěsnu AC jejíž velikost můžeme vypočítat pomocí goniometrických funkcí. $AC = k_1 \sin(\alpha_1)$, $AC = k_2 \sin(\alpha_2)$. Když se rovnají levé stany obou rovnic, tak se také musejí rovnat pravé strany:

$$\begin{aligned} k_1 \sin(\alpha_1) &= k_2 \sin(\alpha_2) \\ n_1 k_0 \sin(\alpha_1) &= n_2 k_0 \sin(\alpha_2) \end{aligned}$$

$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2)$ je algebraické vyjádření Snelliova zákona lomu



34

Odraz paprsků na rozhraní

Ten lom paprsků na rozhraní je zajímavý. Když jsem nad tím přemýšlel, tak ty geometrické konstrukce vlastně vyplynuly z Huygensova principu, že je to tak?

Ano, to je obecný princip, který **platí pro všechna vlnění**. Pro světlo, pro zvuk, pro rádiové vlny a podobně. Pomocí něho určíme i směr odraženého paprsku od rozhraní.

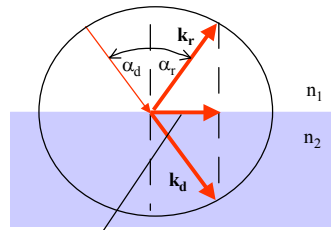


To si dovedu představit. Zase ty tři paprsky a hledat obálku sekundárních vln. **Matematik by však použil přímého důsledku Huygensova principu** a řekl by, že složky vlnových vektorů dopadajícího a odraženého paprsku musejí být stejné.

Je to tak! Dodejme zase, že dopadající a odražená vlna se pohybují ve stelném prostředí, tudíž se stejnou rychlostí, stejným indexem lomu, a proto vlnové vektory \mathbf{k}_d a \mathbf{k}_r mají stejnou velikost.

Proto platí $\alpha_r = \alpha_d$

To je přece jasné, jak se paprsek odráží.
To už není třeba dále rozpitvávat.



průměty vlnových vektorů do rozhraní 35

Amplituda odraženého světla

Teď už vím, že se vlna odráží a lomí na rozhraní dvou prostředí, že je to způsobeno různou rychlostí šíření vlnění v těch prostředích a že frekvence je v obou prostředích stejná. Jak je to ale s **amplitudou odražené a lomené vlny**?

Tady už nemůžeme mluvit o vlnění obecně, ale protože nám jde o světlo, budeme mluvit jen o **elektromagnetickém vlnění**.

Na to si vzpomínám z elektřiny. Elektromagnetickou vlnu tvoří jak **pole elektrické**, tak i **pole magnetické**. Když jsou ta pole časově proměnná, tak existují vždy jen společně. Samostatně taková pole existovat nemohou. **Proč to tak je, ale nevím.**

Objasnění této záhady může podat až elektromagnetická teorie, kterou v druhé polovině 19. století zformuloval Maxwell. V té době ještě o existenci elektromagnetických vln neměl nikdo ani potuchy.

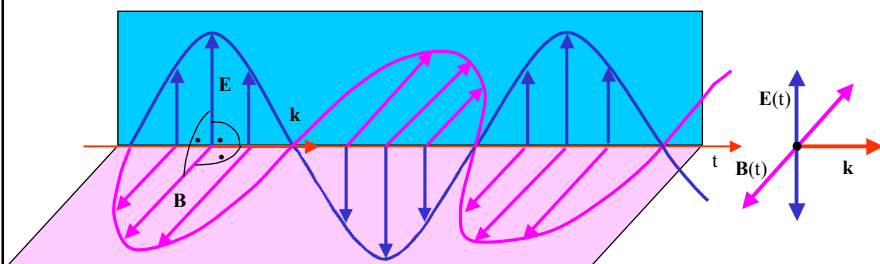
Tomu mám rozumět tak, že byly **dříve objeveny teoreticky a pak teprve experimentálně**?

Ano, přesně tak. Experimentálně je objevil až kolem roku 1890 německý fyzik H. Hertz. Teprve až pak nastoupil bezdrátový telegraf, rádio a televize. Že se elektromagnetická teorie hodí i pro šíření světla, na to se přišlo někdy kolem roku 1900.

36

Amplituda elektromagnetické vlny

Z elektromagnetické (EM) teorie plyne, že EM vlna je tvořena dvěma složkami. Elektrickou a magnetickou, a ty jsou popisovány vektorem elektrické intenzity E a vektorem magnetické indukce B . Oba tyto vektory jsou kolmé na směr šíření určený vektorem k i navzájem.



Představit si takovou EM vlnu není vůbec jednoduché!

To s tebou souhlasím. Naštěstí se ukazuje, že stačí všimnout si jen vektoru elektrické intenzity E nebo amplitudy E_0 elektrické složky.

S tím bych nesouhlasil!

37

Hranice technických možností

U tranzistorových rádií bývá tzv. feritová anténa, kde na feritovém jádře, v němž se zesiluje magnetické pole rádiové vlny, je navinuta cívka, v níž se pak indukuje napětí pro ladící obvody rádia. Já mám doma minivěž a ta má zase rámovou anténu. Princip příjmu EM vlny oběma anténami je však úplně stejný. Důležitá je právě magnetická složka EM vlny!

S tím příjmem rádiových vln máš naprostou pravdu. Nezapomeň však, čím jsme naše povídání o světle začali. Neřekli jsme, že světlo je elektromagnetické vlnění, ale že se při šíření ze zdroje do detektoru chová jako elektromagnetické vlnění. A v tom je rozdíl!

Já si vzpomínám! Fotony! Ale nedalo by se to objasnit ještě nějak jinak?

Ten zásadní rozdíl je v tom, že neumíme vyrobit tak malý oscilační obvod složený z kondenzátoru a cívky, který by šel naladit na frekvenci světla a pak dále zesilovat.

Ale vždyť já jsem někde četl, že lze vyrobit dokonce i tranzistory jen o málo větší než jeden mikrometr a to jsou asi jen dvě vlnové délky světla!

Možná se jednou něco objeví, ale dnes je to pro současnou techniku hranice vstupu do mikrosvětla a tam platí jiné zákony. O některých jsme již mluvili a činnost detektorů světla umíme dnes popsat jen jejich prostřednictvím.

38

Amplituda a intenzita světla

Proč tedy všechny ty úvahy o vlnění, když nemůžeme změřit amplitudu světelného vlnění?

To proto, že se světlo při šíření prostorem chová jako vlnění. A vlněním se dají jednoduše vysvětlit takové jevy, **jako je interference a difrakce světla**. Budeme o těchto jevech i o jejich zajímavých aplikacích podrobněji mluvit později.

Činnost fotonky jsme si vysvětlovali v rámci představ a zákonů mikrosvětla. Ale jak souvisí činnost fotonky s představou, že světlo je elektromagnetická vlna?

Tady se musíme opřít o **experimentální fakta**. Nesčíslné množství experimentů ukazuje, že fotonka a i jiné **detektory světla, dávají elektrický signál, který je úměrný E_0^2** , to je kvadrátu amplitudy EM vlny, když to trochu zjednoduším.

Dá se nějak jednoduše objasnit, proč je to právě kvadrát amplitudy?

Já bych k tomu uvedl například toto: Podle zákonů mikrosvětla reagují detektory na tok fotonů. Každý foton přináší energii podle své frekvence. Reagují tedy na **tok energie**. Z mechaniky víme, že kinetická energie tělesa kmitajícího na pružině je také úměrná kvadrátu amplitudy kmitů.

To je docela dobré vysvětlení a ty souvislosti jsou zajímavé.

Je užitečné si pamatovat, že taková úměra mezi energií a výchylkou platí pro každé kmitání a každé vlnění, když už ses dotkl těch souvislostí.

39

Interakce světla s látkou

Je ještě nějaký důvod, proč si všimnout jen elektrické složky elektromagnetické vlny?

Je zde ještě jeden významný důvod. Látka se skládá z atomů a atomy z kladně nabitého jádra a elektronového obalu. **Elektrické pole světelné vlny tedy rozkmitá tyto elektrické náboje**. Kmitající elektrické náboje zase podle Maxwellovy teorie jsou zdrojem nové elektromagnetické vlny o stejné frekvenci.

To zní docela rozumě, ale dá se to nějak experimentálně prokázat? Vždyť ty nové vlny se musí vlastně vyrušit, protože celkový elektrický náboj jádra je stejný jako všech elektronů.

To máš pravdu, elektrická síla působící na jádro je stejná jako na elektrony, ale z mechaniky si přece pamatuješ, že amplituda vynucených kmitů závisí i na hmotnosti. Čím je hmotnost větší, tím je amplituda menší. No a **jádra mají hmotnost více než 1000 x větší než elektrony**.

No jasně, to je fakt. Já si vždycky představím nějakou praktickou situaci, když si nepamatuji vzorec. Například, jak snadno rozkmitám kočárek na pérech, zatímco s nákladem, taky na pérech, ani nehnu, protože má velkou hmotnost.

Jádra atomů jsou tedy prakticky v klidu a se světlem reagují jen elektronové obaly atomů. Magnetické síly spojené s pohybem elektronů jsou úplně zanedbatelné.

40

Rozptyl světla

Denně jsme svědky reálnosti této představy o interakci světla s látkou. Přímým důsledkem této interakce elektrické složky světla s elektrony je totiž rozptyl světla.

Neví, **co se tím rozptylem světla přesně myslí?**

Rozptyl světla nastává například na kapičkách vody tvořící mlhu, na nečistotách ve vodě, apod. Jde o to, že vidíme např. svazek světla reflektorů auta, jak si v mlze svítí před sebe.

No jó, tak to znám. To bývá dobře vidět i na jevišti, když tam dělají kouřové efekty. Krásně se pozná odkud svítí reflektory. Tohoto se také využívá i **laserových show**.

Pro nás je důležité, si uvědomit, že světelné paprsky vycházející z tohoto zakouřeného prostředí jsou přímým důsledkem kmitajících elektronů. Světlo vycházející např. z mraků, vzniklo naprosto jiným fyzikálním procesem, než světlo vycházející ze žárovky nebo ze Slunce.

O tom jsme již mluvili, že světlem můžeme excitovat atomy a ty pak září. Šlo o fluorescence.

Rozptyl světla je ale jiný fyzikální proces, než fluorescence.

Čím se liší světlo produkované rozptylem od světla vzniklého fluorescencí?

Liší se především polarizací světelných vln, které oba procesy produkují. Podrobněji se k tomuto jevu vrátíme později. Bude to velice zajímavé.

41

Odrazivost rozhraní

Vraťme se ale k našemu původnímu problému a to je k odrazu světla na rozhraní. Směr odraženého paprsku známe, ale nevíme, jak určit jeho amplitudu.

Pro praxi má pro odraz světla význam veličina zvaná **odrazivost**

Odrazivost rozhraní R je dána vztahem **$R = \text{tok energie odražené} / \text{tok energie dopadající}$** . Z Maxwellovy teorie plyne, že když paprsek dopadá kolmo na rozhraní, pak jeho odrazivost je dána vztahem

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

kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu rozhraní.

To je tak jednoduchý vzoreček, to je prima.

On to není obecně platný vzorec, celý ten proces odrazu je podstatně složitější. Odrazivost závisí na úhlu dopadu α_1 a na orientaci vektoru elektrické intenzity \mathbf{E} vzhledem k rozhraní. Tyto přesné výpočty odrazivosti se učí až na vysoké škole.

A v jakých jednotkách se udává odrazivost?

Z definice přece plyne, že je to veličina bezrozměrná. Často se však v praxi udává v %.

42

Propustnost rozhraní

Analogicky, jako odrazivost, je definována veličina propustnost T. **Vzorec pro propustnost však už snadno dostaneme z ze zákona zachování energie.**

To znám: **Energie dopadající = energie odražená + energie prošlá**

Je to správně, ale já bych to upřesnil dodatkem, že se jedná o energie např. za 1 sekundu. Když tuto rovnici dělíme energií dopadající, dostaneme

$$1 = R + T$$

A já ten **výpočet propustnosti dokončím:**

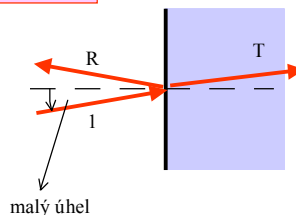
$$T = 1 - R = 1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \frac{4n_1 n_2}{(n_2 + n_1)^2}$$

Já bych k tomu dodal, že tyto dva vzorce pro odrazivost a propustnost platí dostatečně přesně, jen když paprsek dopadá na rozhraní téměř kolmo, kdy je úhel dopadu přibližně jednotky stupňů. Při větších úhlech odrazivost roste a tím propustnost klesá.

Já jsem si vypočetl, že pro rozhraní sklo - vzduch (indexu lomu skla $n = 1.5$) je odrazivost $R = 0.04$, tj.. 4% a propustnost $T = 0.96$, tj.. 96%.

Správně!

43



Propustnost skleněné desky (1)

Teprve až nyní mně došlo, že ten výpočet propustnosti nemá žádný praktický význam. Kdybych se chtěl o tom experimentálně přesvědčit, že ten vzorec je v pořádku, tak bych musel detektor strčit do skla! **A to je nesmysl!**

Ten postup ověření je opravdu nesmyslný! Dá se přece postupovat tak, že nechám světlo procházet přes celou skleněnou desku.

To je pravda, ale bude to složitější, protože světlo bude procházet přes dvě rozhraní!

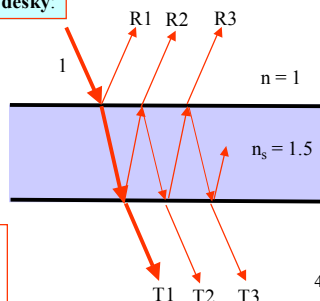
Tak se pusťme do **výpočtu propustnosti skleněné desky:**

Musíme vzít v úvahu, že světlo se odráží na obou rozhraních a do odražené i prošlé energie přispívá více paprsků, jak plyne z obrázku.

Ze vzorců plyne, že odrazivost a propustnost horního i dolního rozhraní jsou **stejně**.

$$\begin{aligned} R_1 &= 1 * R \\ R_2 &= 1 * T * R * T \\ R_3 &= 1 * T * R * R * R * T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_1 &= 1 * T * T \\ T_2 &= 1 * T * R * R * T \\ T_3 &= 1 * T * R * R * R * R * T \end{aligned}$$



44

Propustnost skleněné desky (2)

Když do těch vzorců dosadím $R = 0.040$ a $T = 0.96$, dostanu

$$R1 = 1 * R = 0.040$$

$$T1 = 1 * T * T = 0.92$$

$$R2 = 1 * T * R * T = 0.0367$$

$$T2 = 1 * T * R * R * T = 0.002$$

$$R3 = 1 * T * R * R * R * T = 0.00005$$

$$T3 = 1 * T * R * R * R * R * T = 0.000002$$

Teď se podívej na příspěvky jednotlivých paprsků k odrazivosti a propustnosti skleněné desky.

To je zajímavé. Pro celkovou odrazivost jsou důležité paprsky $R1$ i $R2$, tak pro propustnost stačí jen $T1$. Ostatní mají už zanedbatelně malé hodnoty.

K tomuto výpočtu se později vrátíme, až se budeme zabývat vysvětlením krásných duhových barev pozorovatelných třeba na mýdlových bublinách, nebo olejových skvrnách na vodě. Ty vznikají totiž interferencí dvou paprsků bílého světla, které jsme zde značili $R1$ a $R2$.

Na to se už těším!

Zřetelný **interferenční jev dávají totiž jen paprsky, které mají přibližně stejnou intenzitu.**

Já bych jenom upozornil, že o **intenzitě paprsků jsme doposud nemluvili.** Přitom si myslím, že pro paprsek je aspoň tak důležitá, jako jeho směr.

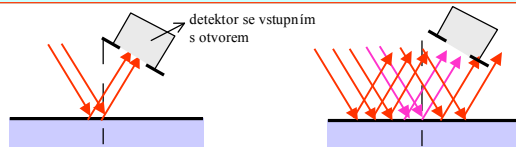
45

Intenzita paprsku

Řekli jsme, že **elektrický signál z detektorů světla je úměrný E_0^2** . Do detektoru vstupuje světlo kolmo na otvor o ploše S a platí tedy: **el.signál = $C(\lambda)E_0^2 S$** , kde C je konstanta úměrnosti závislá na citlivosti detektoru a na vlnové délce světla. **Intenzita světla I** definovaná jako tok energie jednotkovou plochou (jednotka W/m^2) je úměrná E_0^2 .

Ale o **intenzitě paprsku** se tedy nedá mluvit, protože to by detektor musel mít **nekonečně malý otvor** pro vstup světla. Měříme tedy vždy aspoň uzoučký svazek paprsků.

Ano. Jde samozřejmě o **přiblížení** podobné pojmu hmotný bod v mechanice, ale velice užitečné pro popis optických jevů. Ostatně v optice se naprostá většina měření provádí jen **relativně** detektorem stejné citlivosti a se stejným otvorem. Ukážeme si to na příkladu měření odrazivosti.



Otvor detektoru je mnohem větší než průřez svazku. Celý svazek paprsků pak vždy dopadá do detektoru.

$$R = \frac{C(\lambda)S_v E_r^2}{C(\lambda)S_v E_d^2} = \frac{E_r^2}{E_d^2}$$

E_r a E_d jsou amplitudy

Otvor detektoru S_d je mnohem menší než průřez svazku, jak při měření dopadajícího, tak odraženého svazku. Údaj se vztahuje vždy jen k úzkému svazku paprsků

$$R = \frac{C(\lambda)S_d E_r^2}{C(\lambda)S_d E_d^2} = \frac{E_r^2}{E_d^2}$$

Výsledek měření R je v obou případech stejný. Otvor je kolmý na paprsky.

46

Totální odraz světla na rozhraní

Řekli jsme, že ten úplné vztahy pro odrazivost světla na rozhraní jsou mnohem složitější a proto si je ani neuvádíme. Vyplývá z nich však jeden velmi zajímavý optický jev, který má **veliké uplatnění v praxi**. Jde o tzv. **totální odraz** a o **vláknové světlovody**

O **optických vláknech** jsem četl v souvislosti s internetovou sítí, ale vůbec tomu nerozumím, o co vlastně jde. Víím jen, že se používají místo elektrických kabelů.

Je to téměř neuvěřitelné, že existuje rozhraní dvou prostředí, kdy se **veškerá energie paprsku od rozhraní odrazí a vůbec žádná jím neprojde!**

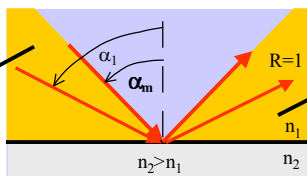
Tomu mám rozumět tak, že $R = 1$ a tedy $T = 0$? To budou asi nějaké **vzácné materiály**.

Ale kdepak! Tento jev nastane vždy, když světlo dopadá na rozhraní z prostředí o větším indexu lomu, než má druhé prostředí tvořící rozhraní a úhel dopadu je větší než tzv. **mezní úhel** α_m .

Pro mezní úhel platí

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}$$

Obor dopadajících paprsků pro něž je $\alpha_1 > \alpha_m$ a nastane tedy **totální odraz**



Obor paprsků, kde je odrazivost $R=1$

47

Princip světlovodu

Já ž asi tuším na jakém principu je ten optický kabel založen. Světlo z něho nemůže utéci ven, protože jeho paprsky dopadají na jeho stěny pod hodně tečně a proto se úplně odrazí.

Je to skutečně tak. Já bych to jenom vyjádřil opticky přesněji. Paprsky na jeho stěny dopadají pod větším úhlem než je úhel mezní pro sklo a vzduch, a proto se **totálně odrazí**

To znamená, že kdybych takový kabel ponořil do vody, tak by světlo **přestalo procházet**

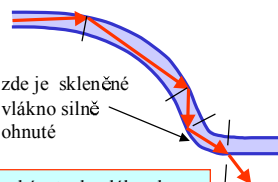
Ano mezní úhel by byl rozhraní sklo - voda větší.

Já si ho raději vypočtu: $n(\text{vzduch}) = 1$, $n(\text{voda}) = 1.33$, $n(\text{sklo}) = 1.54$. Tedy
pro sklo - vzduch: $\sin(\alpha_m) = 1/1.54$ a $\alpha_m = 40.5^\circ$
pro sklo - voda: $\sin(\alpha_m) = 1.331/1.54$ a $\alpha_m = 59.7^\circ$

Světlo by i skleněným vláknem ponořeným ve vodě mohlo procházet, ale vlákna by se **nesměla prudce ohýbat**. V takových ohybech by pak paprsek mohl opustit vlákno.

Že se to skleněné vlákno nezlomí! Vždyť přece sklo je křehké!

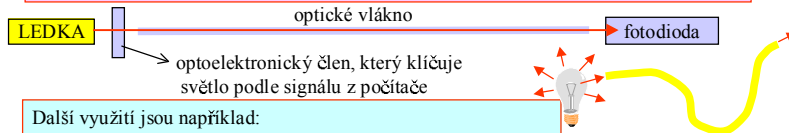
Tato vlákna jsou tenčí než lidský vlas. Ta nejtenčí mají průměr jen 10 mikrometrů! Taková vlákna se při ohybu nelámou, protože jejich deformace na povrchu je velice malá.



48

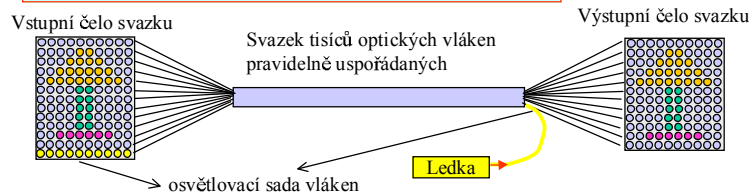
Optická vlákna

Jak fungují taková optická vlákna pro Internet, to si dovedu představit. Je to na principu přenosu nul a jedniček, svítí nesvítí, ale jiná využití si představit neumím.



Další využití jsou například:

- osvětlování nepřístupných míst svazkem optických vláken
- přenos obrazu z nepřístupných míst. Obě tyto techniky se využívají zejména v lékařství (např. kontrola vnitřku žaludku)



Na čelo svazku se promítne obraz a tím do každého vlákna vstoupí paprsek různé barvy a intenzity. Tak se obraz přenes z jednoho konce svazku na druhý.

49

Svítilí fontána

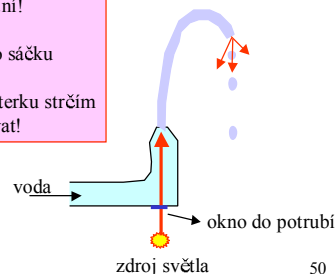
Totální odraz světla, přesněji vedení světla v úzkých svazcích skla nebo vody se využívá u různých světelných atrakcí. Nejznámější jsou světelné fontány nebo svítilí trsy vláken.

Ty svítilí fontány byly v Praze na výstavě. Hrála hudba, fontány stříkaly do různých výšek jakoby v rytmu hudby a když se proud vody rozprskl, tak ty kapičky zářily.

Popsal jsi to přesně! Dokud je proud vody nepřeruší, tak světelný paprsek jej nemůže opustit. Proto světlo vystupuje z vody, až se proud rozpadne na kapičky.

To já vyzkouším! Udělám **svítilí konev** na zalévání!
To budou naši koukat!
Kulatou baterku dám do dobrého polyetylenového sáčku a dobře jej zavážu, aby mně do ní nenatekla voda.
Naberu do plechové konve vodu a rozsvícenou baterku strčím do roury a budu večer zalévat. To by mělo fungovat!

Já s tebou souhlasím!



50

Absorpce světla v prostředí

Paprsky světla při průchodu prostředím slábnou, přesněji řečeno, klesá jejich intenzita. **Absorpce se nemůžeme zbavit**, jen některá prostředí jí mají zanedbatelně malou, jako na příklad právě optická vlákna, naproti tomu v kovech je velmi vysoká.

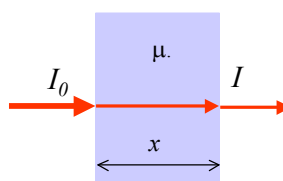
To je asi **jako v mechanice tření**, toho se nemůžeme zbavit. Pro vznik pohybu je ale důležité!

I absorpce světla je užitečná například pro výrobu barevných filtrů. Před žárovku se dá barevné sklo, říkáme barevný filtr, a reflektor svítí hned červeně nebo zeleně, podle filtru.

Intenzita paprsku při průchodu absorbujícím prostředím se mění podle vzorce:

$$I = I_0 \exp(-\mu x),$$

kde I_0 a I je intenzita paprsku na začátku a na konci dráhy délky x v prostředí, jemuž přísluší koeficient lineární absorpce μ .



Koeficient lineární absorpce je pro každé prostředí jiný a jeho hodnota závisí na vlnové délce světla. Protože exponent musí být jako celek bezrozměrný, udává se v m^{-1} .

To pravidlo o rozměru μ znám, to je stejné jako třeba u funkce sinus nebo cosinus.

51

Absorpce světla a elektrická vodivost

Musím se přiznat k tomu, že jsem ještě nevěděl, že by přes nějaký plech procházelo i velmi zeslabené světlo. Podle mne jsou kovy pro světlo naprosto neprůhledné!

Tady nezbývá, než nahlédnout do specializovaných optických tabulek a uvést alespoň orientační hodnoty koeficientu absorpce μ pro viditelné světlo některých látek užívaných v optice. Nebudeme jej uvádět v m^{-1} , ale v μm^{-1} , to přibližně ve (vlnové délce světla) $^{-1}$:

optická vlákna $10^{-9} \mu m^{-1}$
 sklo okenní $10^{-4} \mu m^{-1}$
 křemík (Si) $1 \mu m^{-1}$

hliník (Al) $140 \mu m^{-1}$
 stříbro (Ag) $100 \mu m^{-1}$
 zlato (Au) $70 \mu m^{-1}$

To bych nikdy neřekl, že ty hodnoty mohou být tak rozdílné!

Kromě těch numerických hodnot, stojí zato si všimnout elektrických vlastností látek v první a v druhé tabulce. Čím se ty látky vyznačují?

Já bych řekl, látky ve druhé tabulce jsou **kovy a ty vedou elektrický proud**. V první tabulce je sklo a to je velice dobrý izolátor a křemík je polovodič.

No a to je jeden z dalších názorných příkladů, které naznačují, že **světlo musí mít něco společného s elektřinou**, konkrétně s elektrickým polem E , protože vedení elektrického proudu v kovech zprostředkovávají volné elektrony.

52

Absorpce světla a tepelná energie

Kam se poděje ta **absorbovaná energie světla**?

V naprosté většině případů se tato **energie přemění v tepelnou energii**. Jen u některých látek se opět vyzáří jako světlo. Jedná se o jev, kterému říkáme fluorescence. Ale o tom jsme už mluvili.

To znám z praxe. V černé košili je v létě daleko tepleji, než v bílé. A dá se to i změřit teploměrem. Máme doma dva teploměry do 100° C, které užíváme při zavařování. Zabalil jsem jeden do černého papíru a druhý do bílého a nechal ležet vedle sebe na sluníčku. Asi za deset minut už ten v černém papíře ukazoval o 20° větší teplotu. Z toho plyne, že černý papír absorbuje více, než bílý.

To tvoje pozorování je správné, **ale závěr z něho není úplně v pořádku**. Zkus tento experiment! Máte doma alobal. Přes něj světlo určitě neprojde. Jeden teploměr zabal do alobalu a druhý do černého papíru a sleduj teplotu!

Já ten experiment udělám, ale už tuším, jak dopadne. Alobal je lesklý, a světlo se od něho odráží, místo aby se v něm absorbovalo! Takže větší teplotu bude ukazovat teploměr v černém papíře.

Já bych výsledek toho experimentu také tak předpověděl! Lineární absorpční koeficient není tou podstatnou veličinou. **Nejvíce absorbují světlo takové předměty, které světlo vůbec neodrážejí!**

Už rozumím, to jsou takové, které jsou černé i když na ně svítí třeba slunko! Ty se potom zahřívají!

Všimni si! Černá se ti jeví okna domů, protože sklo propustí více než 90% světla do místnosti a tím ji ohřívá. Podobně je to v létě s auty, je tam horko, ať jsou bílá nebo černá.

53

Polotloušťka prostředí

Pro praxi je užitečné, mít představu o takových tloušťkách x_p optického prostředí, na nichž se **intenzita světla zeslabí přibližně na polovinu** (někdy se nazývá polotloušťka).

To by se mělo vypočítat z toho vzorce! Když tam dosadím : $I_0 = 1$, $I = 0.5$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$
$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$
$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu x$$
$$x = \frac{1}{\mu} \ln \frac{I_0}{I}$$
$$x_p = \frac{1}{\mu} \ln \frac{1}{0.5} = \frac{0.7}{\mu}$$

Pro jednotlivé látky pak dostaneme tyto **polotloušťky x_p** :

optické vlákno	.....	$0.7 \cdot 10^9 \mu\text{m} = 0.7 \text{ km}$
sklo	.....	$0.7 \cdot 10^4 \mu\text{m} = 7 \text{ mm}$
Si	.....	$0.7 \cdot 1 \mu\text{m} = 0.7 \mu\text{m}$
Al	.....	$0.005 \mu\text{m} = 5 \text{ nm}$
Ag	.....	$0.007 \mu\text{m} = 7 \text{ nm}$
Au	.....	$0.01 \mu\text{m} = 10 \text{ nm}$

Copak jde vyrobit takovou tenkou hliníkovou folii? 30 vrstev alobalu dá asi 1mm. to znamená, že má tloušťku asi 30 μm . Ale polotloušťka Al je ještě 10000 x tenčí.

Plech tak tenký vyrobit nejde, ale lze vyrobit kovové vrstvičky na skleněné podložce (např. napařováním) libovolně tenké. Přes ně pak může světlo i procházet.

54

Odráživost na absorbujícím prostředí

Kovové vrstvy, když jsou pěkně hladké, tak se **silně lesknou**, mnohem více než sklo!
Čím to je? To mají také tak velký index lomu?

S indexem lomu kovů je to trochu složitější, protože lomená vlna se tak silně absorbuje. Praktický význam má v optice tenkých vrstev, ale to je látka pro vysokou školu. Z teorie tohoto speciálního oboru optiky plyne následující **vzorec pro odrazivost na rozhraní absorbujícího prostředí** s indexem lomu n_2 a koeficientem lineární absorpce μ :

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2 + \left(\frac{\lambda\mu_2}{4\pi}\right)^2}{(n_2 + n_1)^2 + \left(\frac{\lambda\mu_2}{4\pi}\right)^2}$$

To znamená, že **tento vzorec je přesnější**.

Ano, platí pro všechna prostředí, ať absorbují silně nebo slabě.

Do toho vzorce bych uměl dosadit třeba pro rozhraní vzduch - alobal. Ale nevím stále jakou hodnotu dosadit za n_2 , to je index lomu hliníku.

Ve specializovaných optických tabulkách se najde, že třeba $n_{Al} = 1.4$, $n_{Au} = 0.47$, $n_{Si} = 3.9$

Já jsem zvědavý, kolik vyjde pro ten alobal. Já tam dosadím:

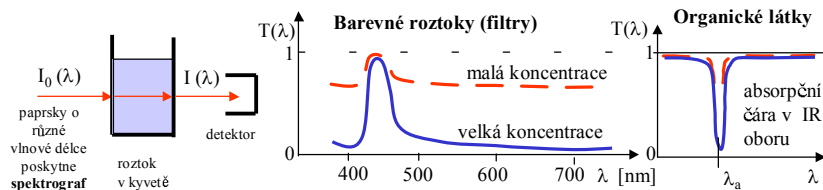
$$R = \frac{(1.4 - 1)^2 + \left(\frac{0.59130}{4 \cdot 3.14}\right)^2}{(1.4 + 1)^2 + \left(\frac{0.59130}{4 \cdot 3.14}\right)^2} = \frac{0.4^2 + 26.7}{2.4^2 + 26.7} = 0.83$$

Je to dobré, vyšlo, že **odrazivost alobalu je 83%!**
To odpovídá praxi! Je mnohem větší než pro sklo.

55

Absorpční spektra

Absorpce světla v prostředí má ještě jeden velký praktický význam. Souvisí s tím, že **koeficient lineární absorpce závisí u některých látek silně na vlnové délce**. Např. modrá skalice zbarví vodu modře, hypermangan fialově apod. Sytost zbarvení závisí na množství rozpuštěné látky. Fyzikálně bychom řekli na koncentraci. A tu lze tedy opticky měřit!



Necháme přes kyvetu procházet paprsky o různých vlnových délkách, naměříme $I_0(\lambda)$ a $I(\lambda)$ a z těchto hodnot vypočteme **propustnost roztoku** $T(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$

Ale jak se určí koncentrace rozpuštěné látky, to z toho jasně není!

Nejdříve se musí takové zařízení **ocejchovat**. Dělá se to tak, že se připraví roztoky o známé koncentraci a změní se jejich propustnosti. Podle nich se pak určí koncentrace v neznámém roztoku.

To by mne bavilo pracovat s takovým optickým přístrojem!

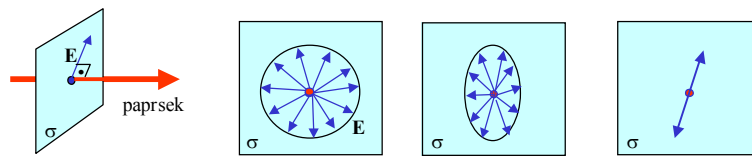
56

Lineárně polarizované světlo

Elektromagnetické vlny, tedy i světlo, mají velice významnou a podivuhodnou vlastnost, která se nazývá polarizace. Zjednodušeně můžeme o světle říci, že je **nepolarizované** (přírodní), **částečně polarizované** a **lineárně polarizované**. Co to znamená?

To si neumím představit. U zvukových vln nic takového nebylo.

Stav polarizace je nejlépe sledovat a představovat si ho v myšlené rovině, která je kolmá na paprsek. Tuto rovinu budeme označovat řeckým písmenem σ .



Matematicky se charakterizuje stupněm polarizace P

$$P = \frac{E_{\max}^2 - E_{\min}^2}{E_{\max}^2 + E_{\min}^2}$$

nepolarizované

$$E_{\max} = E_{\min}$$

$$P = 0$$

částečně polarizované

$$E_{\max} \neq E_{\min}$$

$$0 > P < 1$$

lineárně polarizované

$$E_{\min} = 0$$

$$P = 1$$

To jsem zvědavý k čemu to bude dobré!

57

Polarisátor

Vektor elektrické intenzity **E nepolarizovaného světla** kmitá ve všech směrech se stejnou amplitudou. Takové světlo vzniká ve všech zdrojích světla, kromě některých laserů.

Částečně polarizované světlo vzniká nejčastěji odrazem nepolarizovaného světla na optickém rozhraní dvou prostředí.

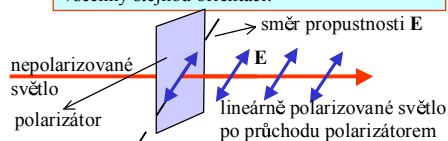
Lineárně polarizované světlo produkují některé lasery, nebo vzniká z nepolarizovaného světla nejčastěji těmito způsoby:

- průchodem přes **polarizátor**
- **odrazem** na rozhraní, když dopadá pod Brewsterovým úhlem
- průchodem přes **dvojlozmnou látku**

Mě z těch nových pojmů brní hlava! Co je to ten polarizátor?

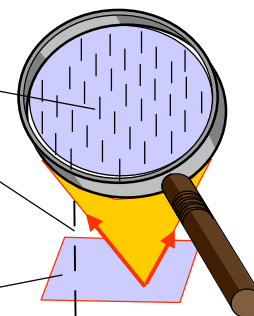
Polarizátor je taková folie podobná umělohmotné folii. Jsou v ní však zalisovány mikroskopicky malé tyčinky krystalků např. látky zvané herapatit, ale tak šikovně, že mají všechny stejnou orientaci.

Orientace krystalků určuje **směr propustnosti vektoru E**



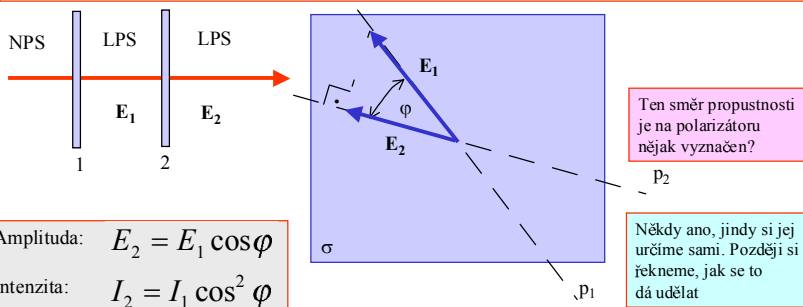
To je zajímavé, ale k čemu to je?

polarizátor



Dva polarizátory

Polarizace světla se zdá být málo užitečná, protože naše **oči nejsou na stav polarizace citlivé**. Zajímavé a prakticky užitečné efekty však již dostaneme, když necháme procházet nepolarizované světlo (NPS) přes dva polarizátory.



Změnou úhlu mezi směry propustnosti obou polarizátorů, lze definovaně měnit intenzitu světla od maxima do nuly. To je důležitá vlastnost dvou polarizátorů.

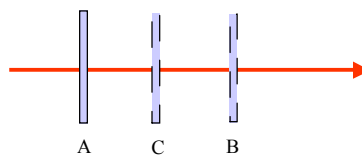
To funguje jako reostat v elektřině. To se mně líbí!

59

Kouzla se s polarizátory

S těmi polarizátory by se dala dělat všelijaká kouzla. Teď mne napadá třeba toto: **Začarované sklo!** Nešlo by o sklo, ale o polarizátor. Oba polarizátory bych dal prohlédnout publiku, že je přes ně vidět. Pak bych je vkládal do svazku paprsků asi v tomto pořadí:

1. polarizátor A světlo prochází
2. polarizátor B světlo prochází
2. polarizátor A i B světlo neprochází, B je začarovaný, vezmu B, dám na stůl a říkám ABRAKA DABRAKA a dám B zpátky, ale tak šikově, aby teď světlo procházelo!



Vidím, že by ti to kouzlení šlo! Další variantu bys mohl takto vylepšit **třetím polarizátorem C**:

1. Kouzelné zařikávadlo nepomáhá! Světlo pořád neprochází! Vracíš polarizátor B tak, že směry propustnosti jsou stále na sebe kolmé.
2. Zavoláš pomocníka C, přidáš ABRAKA DABRAKA, dáš C mezi oba dva a světlo bude zase procházet. Polarizátor C tam může vložit i kdokoliv z publika a světlo se vždy objeví.

Moment, tomu nerozumím! Vždyť přes A a B neprochází! Jak může procházet přes A, C a B? A může jej tam dát každý z publika? Vždyť ten o nějaké značce na obvodu nic neví!

Polarizátor C je totiž mocný čaroděj!

Dnes asi neusnu!

60

Odraz lineárně polarizovaného světla

Toto je optický jev náročný na prostorovou představivost, ale je důležitý pro praxi protože na jeho principu fungují třeba horské **polarizační brýle**, nebo **jednobarevné displeje** mobilních telefonů.

Já myslím, že to pochopím. Mně pomáhají v takových případech názorné obrázky.

Důležité je vědět, co je to rovina rozhraní a rovina dopadu.

Rovina rozhraní je jasná a rovina a rovina dopadu je určena kolmicí k rozhraní a dopadajícím paprskem. V té rovině leží totiž i odražený paprsek. To jsme brali.

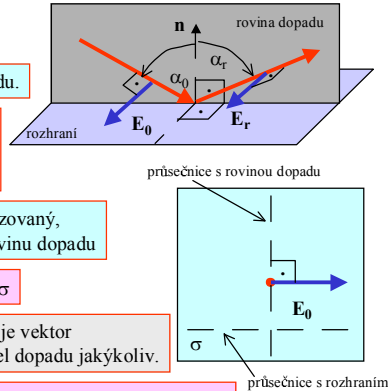
Teď si představ, že dopadající paprsek je lineárně polarizovaný, a to tak, že vektor elektrické intenzity \mathbf{E}_0 je kolmý na rovinu dopadu

Ten obrázek je dostatečně názorný, i ta situace v rovině σ

Tak tedy: Z Maxwellových rovnic plyne, že i po odrazu je vektor elektrické intenzity \mathbf{E}_r kolmý k rovině dopadu, ať je úhel dopadu jakýkoliv.

Nechápu k čemu je toto pro praxi dobré. Je to přece samozřejmost! Odražené světlo je zase lineárně polarizované, ani směr polarizace se nezmění!

No a to je právě důležité pro funkci displejů!



61

Světlo se neodráží od skla!

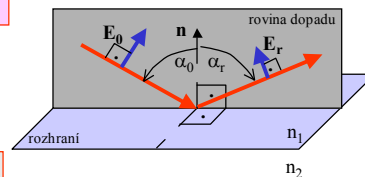
Ten nadpis není v pořádku. Od skla se světlo přece vždycky odráží !

A přece tomu tak není! Nezapomeň, že vzorce pro odrazivost, které jsme si uváděli platí jen přibližně, když paprsek dopadá na rozhraní přibližně kolmo. Při šikmém dopadu je tomu jinak. Tam záleží na polarizaci dopadajícího paprsku.

Ale my už víme, že se stav polarizace odrazem nemění.

To ano, ale odrazem se mění amplituda, to je velikost vektoru \mathbf{E}_r . Předpokládejme teď, že na rozhraní dopadá lineárně polarizovaný paprsek tak, že vektor \mathbf{E}_0 leží v rovině dopadu.

Při této polarizaci nastává velice zajímavý jev: existuje úhel dopadu $\alpha = \alpha_B$, při němž je amplituda odraženého paprsku nulová ($E_r = 0$). Pro úhel α_B platí $\tan(\alpha_B) = n_2/n_1$. Tento úhel se nazývá Brewsterův.



Pro rozhraní vzduch - sklo ($n_2 = 1.5$) je $\alpha_B = 56,3^\circ$. Přesvědčete se!

To skutečně se nic neodráží, ať je intenzita jak chce velká? **Skutečně!**

Už mně napadají další kouzelné triky s polarizovaným světlem!

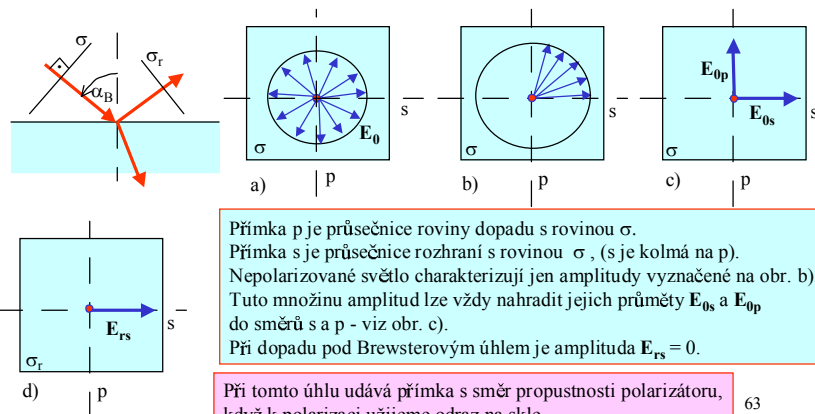
Ale pozor při kouzlení! To neplatí při odrazu na kovovém rozhraní (zrcadle).

62

Odraz na skle jako polarizátor

Tato vlastnost skla asi nějak souvisí s Brewsterovým úhlem, ale nedovedu si to představit, jak?

Není to tak obtížné, když si to jednoduše nakreslíme. Stav polarizace sledujeme v rovině σ kolmé na paprsek. Předpokládejme, že nepolarizovaný paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem α_B .



63

Polarizační brýle

Tak si vzpomínám, že sis prohlížel polarizační brýle svého kamaráda, a zdálo se ti, že nefungují!

Ano, připadaly mi jako normální protisluneční brýle.

Takové polarizační brýle jsou vlastně polarizátory. Samy o sobě polarizátor propustí jen polovinu dopadající intenzity světla. Projdou jen ty složky vektoru E které jsou rovnoběžné se směrem propustnosti polarizátoru. Protože oko nepozná stav polarizace, jeví se nám jako tmavé brýle.

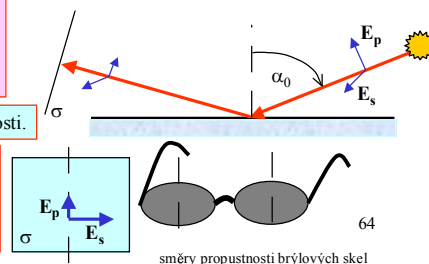
Nechápu, proč se tedy vlastně prodávají?

Jejich úkolem je potlačit sluneční paprsky, které se odrážejí na vodě nebo na sněhu a mohou způsobit oslnění lyžaře nebo jachtaře.

Už asi chápu! Paprsky s vektory E_s odrážejí vždy. Ty nesmí brýle propustit. Proto směr propustnosti skel musí být rovnoběžný s rovinou dopadu. V tomto případě tedy je tedy svisle.

Ano tak se u brýlí volí orientace směru propustnosti.

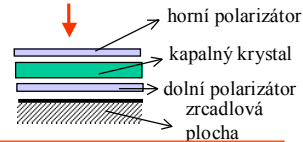
Já ty brýle ale raději vyzkouším, jestli fungují jako polarizátory. Dám sklo vodorovně, abych viděl odraz žárovky, pak si nasadím brýle, a budu zkoušet, jestli odraz při nějakém úhlu odrazu zmizí!



64

Optický princip funkce displejů (1)

Displejové panely jsou v podstatě tvořeny třemi vrstvami: **polarizátorem, kapalným krystalem a zrcadlem.**

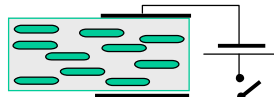


Co to je **kapalný krystal**? To si nedovedu představit?

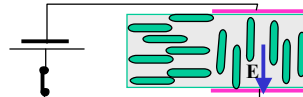
Existují některé látky, jejichž molekuly mají tvar tyčinek a za pokojové teploty jsou už částečně uspořádané do jakýchsi vrstviček, ale v každé vrstvičce jsou různě natočeny.



Neuspořádané molekuly obyčejné kapaliny



Částečné uspořádání molekul kapalného krystalu do vrstev



Při zapnutí klíče se mezi elektrodami vytvoří elektrické pole. Tím se molekuly natočí do jeho směru a vrstevnatá struktura kapalného krystalu zcela zmizí

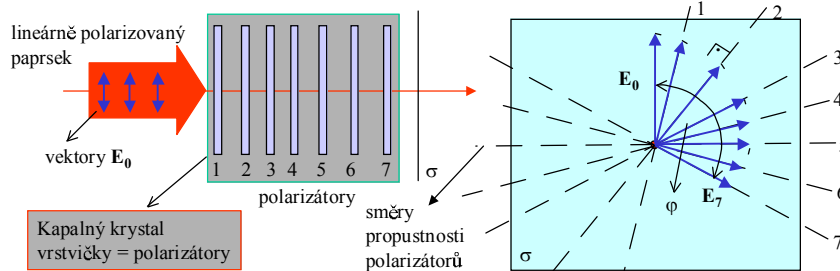
Ty molekuly jsou poskládány jako krystalky u polarizátoru

Přesně tak! Zjednodušeně se dá říct, že **každá vrstvička funguje jako velice tenký polarizátor.** Mnoho vrstviček molekul způsobí **stáčení polarizační roviny** procházejícího světla.

To si vůbec nedovedu představit, jak něco takového může nastat!

65

Stáčení polarizační roviny



Do série 7 polarizátorů s vyznačenými směry propustnosti v rovině σ vstupuje lineárně polarizované světlo s amplitudou E_0 . Každý polarizátor propustí jen průmět amplitudy do svého směru.

To je zajímavé! Kdyby tam byl totiž jen polarizátor 5., tak by paprsek vůbec neprošel, protože má směr propustnosti kolmý na vektor E_0 .

Všimněme si konečného efektu! Polarizační rovina se průchodem světla **stočila o úhel ϕ** a paprsek je neustále lineárně polarizovaný.

Já už chápu! Co **vrstvička kapalného krystalu, to polarizátor** s trochu pootočeným směrem. Celkové otočení polarizační roviny závisí na počtu vrstviček, to je na tloušťce kapalného krystalu.

Optický princip funkce displejů (2)

Přiložením elektrického pole se zruší vrstvičky v kapalném krystalu a tím i jeho stáčívost. Představme si jednoduchý displej jen ze dvou polí A a B. Na elektrody v oblasti B je připojeno elektrické napětí (asi 1 V) a tím se **zruší stáčívost kapalného krystalu**.

Světelný paprsek se průchodem přes polarizátor lineárně polarizuje, projde přes průhledné elektrody i **kapalným krystal otočí jeho polarizační rovinu o 90°** (tak je zvolena jeho tloušťka) a dolní polarizátor jej nepropustí. Tak je tomu v oblasti A.

Na zrcadle se nic neodrazí a pole A je tmavé!

Nad oblastí B je to jinak. Elektrické pole zruší stáčívost kapalného krystalu a světlo projde i spodním polarizátorem, odrazí se na zrcadlové ploše.

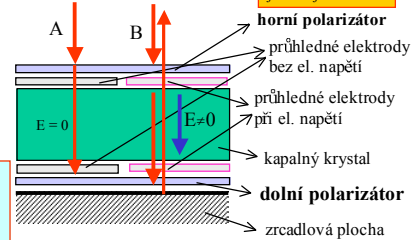
A protože se směr polarizace odrazem nezmění, projde zase bez problémů zpět nahoru. Už mi svítá!

Oblast A paprsek pohltí a jeví se tedy tmavá. Oblast B paprsek odráží a jeví se proto světlá.

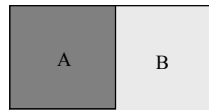
To praktické využití polarizace je úžasné!

Později si vysvětlíme, i barevné displeje!

Příčný řez displejem:



Pohled na displej shora



67

Interference světla

Typickým projevem interference světla jsou **duhově zbarvené mýdlové bubliny**, nebo podobně zbarvené olejové skvrny na vodní hladině. S aplikacemi tohoto jevu se potkáme u moderních obráběcích strojů při měření délek, u laserových rezonátorů i při měření tloušťky tenkých vrstev (asi do 10 μm), při vyvolání umělého kontrastu v mikroskopii a jinde.

Těm aplikacím nerozumím, ale snad se mi to aspoň trochu objasní, když pochopím v čem je podstata interference světla.

Interference světla je velmi složitý jev. Jeho objasnění si musíme rozložit na několik etap. Začneme tou nejjednodušší situací. Budeme sledovat interferenci **dvou monochromatických paprsků**. Zde budou hrát nejdůležitější roli **amplitudy** těchto paprsků a **jejich fázový rozdíl**.

Vzpomínám si, že někde v úvodu jste se zmiňoval o důležitosti fáze vlnění, ale doposud jsme ji nebrali v úvahu. Ani u odrazu, ani u polarizace jsme o ní nemluvili.

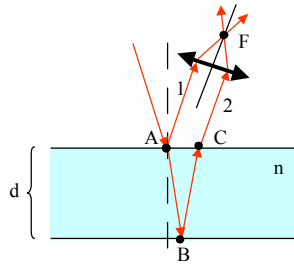
Tedy pro jednoduchost, si nebudeme všimnout polarizace. Budeme pro jednoduchost předpokládat, že stav polarizace se při interferenčních jevech nemění.

Místo těchto obecných poznámek, bych uvítal nějaké vysvětlení interference na konkrétním příkladu. Já si to lépe představím.

Tím konkrétním příkladem bude interference světla na tenké vrstvě, například na mýdlové bublině.

68

Interference na tenké vrstvě



Paprsek dopadá téměř kolmo na rozhraní do bodu A. Zde se jednak odráží jako paprsek 1 s amplitudou E_1 , jednak prochází do vrstvy o indexu lomu n , odráží se na druhém rozhraní, vrací se k prvnímu a prochází jím jako paprsek 2 s amplitudou E_2 .

Výpočtem těchto amplitud jsme se zabývali. Vyšlo nám, že jsou skoro stejné. **Ale nač je tam ta čočka?**

Ta je tam podstatná, protože paprsky 1 a 2 jsou **rovnoběžné** a bez ní by se nikdy nepotkali. Tak se potkají v jejím ohnisku F.

Při pozorování bublin je to **čočka v našem oku!** Teprve ve společném bodě obou paprsků můžeme totiž uplatnit pravidlo o superpozici dvou elektrických polí E_1 a E_2 .

Co to znamená **superpozice**?

Jde vlastně o vektorové **sečítání intenzit elektrických polí**. Protože se ale stav polarizace nemění, jde i prostě sečítání velikostí, ovšem u elektromagnetických vln **s ohledem na jejich fázi**.

V ohnisku F totiž **neplatí**, že výsledná amplituda $E = E_1 + E_2$, ale $E(t) = E_1(t) + E_2(t + \tau)$, kde τ je doba, kterou potřeboval paprsek na proběhnutí úseku dráhy ABC, o který je jeho dráha delší. Elektrická intenzita E se totiž mění svou velikostí s frekvencí ν .

69

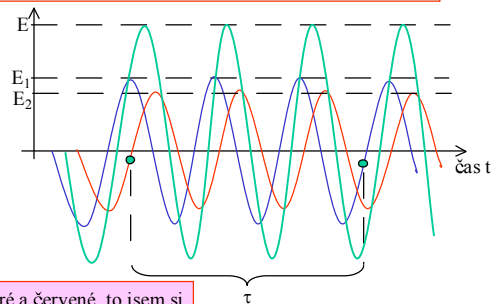
Superpozice interferujících paprsků

Já si stále tu superpozici neumím představit. Je to na mně moc abstraktní.

Ukážeme si to názorně obrázkem, který znázorňuje kmity elektrické intenzity v ohnisku F.

Elektrické pole paprsku 1 se mění podle vztahu: $e_1 = E_1 \cos(2\pi\nu t)$, paprsku 2: $e_2 = E_2 \cos(2\pi\nu(t - \tau))$. Výsledné el. pole je $e = e_1 + e_2$.

Ke sčítání intenzit el. pole dochází v každém okamžiku (zelená křivka) Výsledné pole v ohnisku F čochky tedy zase kmitá s frekvencí ν a jeho amplituda je E .

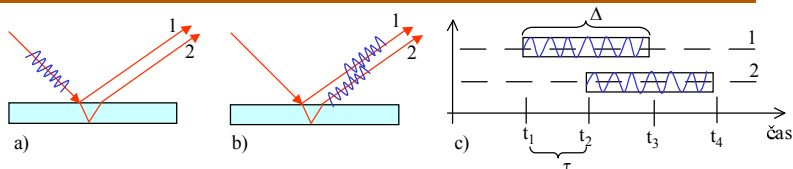


Že ta zelená křivka je součtem té modré a červené, to jsem si zkontroloval, ale to vyznačení zpoždění τ nechápu.

Jedním obrázkem se dost obtížně vše znázorní. Význam zpoždění τ si lépe pochopíme, když si představíme, že zdroj vyslal po dráze paprsku jen krátký světelný impuls, obrazně řečeno, jen několik sinusovek.

70

Světelné impulsy



Na obr. a) a b) jsou na paprscích znázorněny polohy světelných impulsů a na obr. c) je znázorněna situace v ohnisku, jak by ji mohl zaznamenat jem myšlený detektor elektrického pole.

Myslím, že tomu záznamu z detektoru rozumím. Do okamžiku t_1 v ohnisku žádný impuls nebyl, od t_1 do t_2 tam byl jen první impuls, od t_2 do t_3 oba dva a pak zas jen druhý.

Komentuješ to celkem správně. Já bych jen upřesnil stav v od t_2 do t_3 . Jen v tomto časovém intervalu nastává superpozice elektrických polí obou paprsků obou paprsků.

Já jsem na tomto myšleném příkladu pochopil, jak si představit to zpoždění paprsku 2 oproti 1. Z obrázku c) vlastně plyne, že $\tau = t_2 - t_1$.

Ano, správně. V této souvislosti stojí zato uvážit, jak může existenci superpozice ovlivnit **délka světelného impulsu Δ** . Takovým impulsům se v teoretické fyzice říká **vlnová klubka**.

To je jasné, **ta délka musí být větší, než to zpoždění druhého paprsku: $\Delta > \tau$** . Jinak by superpozice nenastala. Byl by tam stále jen jeden z paprsků, nikdy dva současně.

71

Intenzita světla při superpozici

Rád bych připomněl, že všechny ty obrázky časově proměnného elektrického pole, které si kreslíme, jsou vymyšlené jen pro to, abychom snadněji pochopili světelné jevy a dovedli je předpovídat a využívat v praxi. **Nikdo a žádný detektor neumí u světla naměřit časovou závislost intenzity elektrického pole.**

Já vím, fotony, atomy jako detektory. Točí se mi z toho hlava.

Nebudeme teď filozofovat, jak někdy poznamenáváš, ale další výklad o interferenci opřeme o přísně experimentální fakta. Ta říkají, že detektory měří intenzitu světla I , která je úměrná E^2 . Označme tedy intenzitu našich dvou paprsků: $I_1 = E_1^2$ a $I_2 = E_2^2$.

Intenzita světla při interferenci dvou paprsků je dána vztahem

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\nu\tau)$$

Tomuto sčítanci ve vzorci pro intenzitu se říká **interferenční člen**

Tento vzorec jde samozřejmě odvodit z představy o superpozici dvou monochromatických vln o frekvenci ν o amplitudách E_1 a E_2 , ale jsou k tomu potřeba hlubší matematické znalosti. Vyjde:

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(2\pi\nu\tau)$$

Ta interference je opravdu složitá, ale ten vzorec tak složitý není.

Jednoduché odvození je uvedeno na dvou následujících stránkách.

72

Interference dvou vln

$$e_1 = E_1 \sin(2\pi(vt - \frac{x}{\lambda})) = E_1 \sin \alpha_1$$

$$e_2 = E_2 \sin(2\pi(vt - \frac{x}{\lambda}) + \varphi) = E_2 \sin \alpha_2$$

Předpoklady:

1. Vektory elektrické intenzity E_1 a E_2 leží v jedné rovině.
2. Obě vlny mají stejnou frekvenci ν a tedy λ .
3. Fázi vlny 1 jsme označili α_1 , vlny 2 α_2 .
4. Mezi vlnami je fázový posuv φ .

Hledáme výraz pro výslednou intenzitu $I \sim E^2$, kde E je amplituda výsledné vlny, která vznikla superpozicí elektrických polí e_1 a e_2 . Stačí tedy najít výslednou amplitudu E .

Označme intenzity:

$$I_1 \sim E_1^2 \quad \text{a} \quad I_2 \sim E_2^2$$

73

Výpočet pomocí fázorů

Vycházejte z definice funkce *sinus* lze stav vlnění znázornit jako fázory. Ty se pak sečítají jako vektory.

$$E_x = E \cos \alpha = E_1 \cos \alpha_1 + E_2 \cos \alpha_2$$

$$E_y = E \sin \alpha = E_1 \sin \alpha_1 + E_2 \sin \alpha_2$$

Pro velikost fázoru E platí

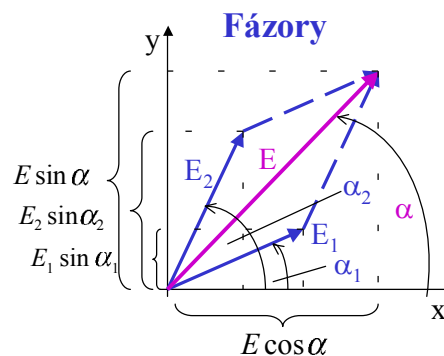
$$E^2 = E_x^2 + E_y^2$$

Po dosazení a úpravě dostaneme

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Po dosazení původního označení je pak interferenční intenzita dána vztahem

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$$



74

Záznam myšleného detektoru (1)

Představme si, že máme v ohnisku F skutečný detektor světla a sledujeme, co v jednotlivých okamžicích zaznamená.

Přemýšlím nad tou zelenou křivkou představující záznam detektoru světla. Chápu signál detektoru v mezi t_1 a t_2 i mezi t_3 a t_4 , ale proč je mezi t_2 a t_3 signál menší, tomu nerozumím! Vždyť v tu dobu jsou v bodě F oba paprsky!

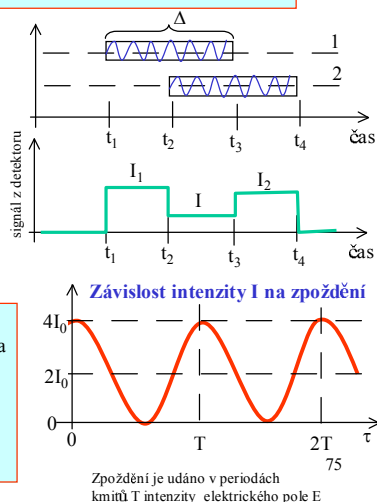
To je typický projev interference dvou paprsků! Plyne to přece ze vzorce, který jsme si uvedli.

Já jsem se nehal unést představou, že na detektor svítí dvě baterky! Na náš vzorec jsem zapomněl!

Budeme ten vzorec podrobně analyzovat. Pro začátek předpokládáme, že $I_2 = I_1 = I_0$ a sledujeme, jak intenzita při interferenci závisí na zpoždění τ . Matematickou úpravou dostaneme

$$I = I_0 + I_0 + 2I_0 \cos(2\pi\nu\tau)$$

$$I = 2I_0(1 + \cos(2\pi\nu\tau))$$



Záznam myšleného detektoru (2)

Je to opravdu překvapující, že interferencí dvou paprsků o stejných amplitudách může vzniknout intenzita tak rozdílných hodnot, od nuly do čtyřnásobku intenzity jednoho paprsku.

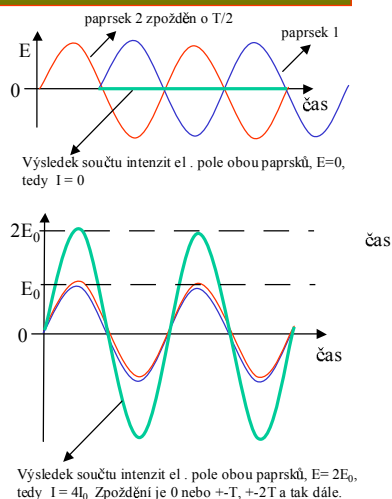
Ano, a to vše závisí jen hodnotě zpoždění!

Jenže ten efekt interference vysvětluje jen tu část záznamu myšleného detektoru, která leží mezi okamžiky t_2 a t_3 . Ale začátek a konec toho záznamu je jiný!

To je správný a velice důležitý postřeh! Jeho důležitost se vyjeví teprve když myšlený detektor nahradíme skutečným detektorem světla, který ukazuje jen střední hodnotu intenzity za jistý časový interval, který nazýváme **integrační doba**.

To je tedy další charakteristika detektoru. O té jsme dosud nemluvili!

Ano a velice podstatná! Pro lidské oko je integrační doba asi 0,1 s.



76

Integrační doba detektorů světla

O integrační době oka slyším poprvé. Já jsem si ji nikdy neuvědomoval. Mohu se o ní nějak sám přesvědčit?

Samozřejmě! Například normální žárovka v bytě je napájena střídavým proudem s frekvencí 50 Hz, to znamená, že 50 x za vteřinu se mění směr průchodu proudu a tedy 100 x za vteřinu prochází žárovkou největší proud, žárovka nejvíce svítí a 100x za vteřinu ji žádný proud neprochází. V těchto okamžicích žárovka úplně nezhasne, protože vlákno nestačí úplně vychladnout, ale 100x za vteřinu její svítivost poklesne. Oko však nic nepozoruje! Polovodičová fotodioda spojená s osciloskopem však tyto změny zaznamená. Když její signál přivedeme do obyčejného ručkového mikroampérmetru, tak změny také nezaznamenáme, protože se ručička přístroje není schopna tak rychle pohybovat tam a zpět.

A i kdyby se mohla tak rychle pohybovat, tak my to stejně nevidíme!

Výborně, vidím, že jsi integrační dobu lidského oka pochopil dokonale. Uvedu však ještě jeden zajímavý příklad z praxe. Televizor kreslí obrázky na obrazovku 25x za vteřinu a večer touto frekvencí osvětluje pokoj. Když před obrazovkou mávneme rukou, uvidí oko několik poloh ruky a ne její plynulý pohyb jako ve dne.

Toho jsem si už všiml. Ta ruka je tedy osvětlena jen 25x za vteřinu a že tomu tak ve skutečnosti je, poznám jednoduše při jejím pohybu. Budu zkoumat, co vlastně budou moje oči vidět!

77

Důsledek integrační doby detektorů

Vrátíme se teď k našemu příkladu interference světelného impulsu na planoparalelní desce. Aby skutečný detektor světla zaznamenal intenzitu vzniklou interferencí, nesmí být příliš velké zpoždění mezi paprsky 1 a 2.

To chápu, to je proto, aby ty časové intervaly, kdy je tak jen jeden paprsek byly malé a nezkreslovaly hodnotu intenzity, která vznikla jejich interferencí. Ale něco mi tady nehraje! Ty světelné impulsy jsme si vymysleli, abychom si lépe znázornili zpoždění mezi paprsky!

To máš pravdu! Já ještě připomenu, že jiný důsledek, který nám umožňuje jejich a sice, že čím budou delší, tím přesněji bude detektor ukazovat hodnotu interferenční intenzity.

Já souhlasím, když dodám že to platí při stejném zpoždění.

Naopak, když bude to zpoždění větší než délka světelného impulsu, k žádné interferenci vůbec nedojde!

To je myslím nad slunce jasné! Detektor zaznamená nejdříve intenzitu paprsku 1, pak nic, a pak zase intenzitu paprsku 2.! A ukáže její průměrnou hodnotu.

Ta představa světelných impulsů, která nám tak pomáhá při pochopení procesu interference není úplně vymyšlená. Opírá se o reálný teoretický základ, a sice o vlnová klubka.

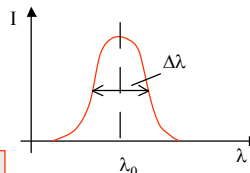
78

Vlnová klubka

Představa existence vlnových klubek souvisí s tím, že světlo se nechová jako monochromatické vlnění. Žádné monochromatické světlo neexistuje! Takové světlo charakterizujeme střední vlnovou délkou λ_0 a příslušným oborem $\Delta\lambda$. Význam těchto veličin je zřejmý z obrázku.

Já nevím, co si mám pod tím oborem $\Delta\lambda$ představit?

Například $\Delta\lambda$ může odpovídat jedné spektrální čáře. Pro ni najdeme v tabulkách hodnotu např. $\Delta\lambda = 0,5$ nm. Barevnému filtru, který propouští např. jen červenou barvu přísluší $\Delta\lambda = 100$ nm a $\lambda_0 = 650$ nm.



Délka vlnového klubka δ příslušná tomuto vlnovému oboru je

$$\delta = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

Detektory světla budou tím lépe ukazovat hodnotu interferenční intenzity, čím lépe bude splněna nerovnost

$$s_2 - s_1 < \delta$$

kde $s_2 - s_1$ je rozdíl optických drah obou paprsků, který zapříčinil zpoždění.

To je zajímavá souvislost. To bych chtěl nějak experimentálně ověřit.

79

Délky vlnových klubek

Výpočet délky vlnových klubek:

	λ_0 (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	δ (μm)
spektrální čára	500	0,1	2500
interferenční filtr	500	10	25
červený filtr	650	100	4,2
bílé světlo	550	200	1,5

Já jsem někde ale četl, že světlo z laseru je dokonale monochromatické.

Není tomu tak. Délka vlnového klubka u laserů je však často 100x větší než délka jeho optického rezonátoru.

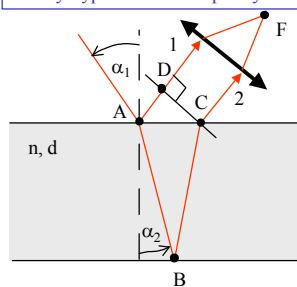
U plynového laseru je $\delta \sim 100$ m, u polovodičového laseru (světelné ukazovátka) $\delta \sim 10$ cm.

Proto se píše, že světlo z laserů je monochromatické! Protože délka jeho vlnového klubka je mnohonásobně větší než jedné jediné spektrální čáry!

Vždyť $\Delta\lambda$ mohu pak už vypočítat!

To můžeš, ale světlo laseru obsahuje několik takových vlnových oborů. To se ale učí až na vysoké škole!

Přesný výpočet rozdílu optických drah:



K rozdělení na paprsky 1 a 2 došlo v bodě A. Od vlnoplochy CD jsou zase dráhy obou paprsků stejné. Čočka nezpůsobí žádný dodatečný rozdíl dráhový rozdíl.

Dráha paprsku 1: $s_1 = AD$
Dráha paprsku 2: $s_2 = n(AB + BC)$

Vyjde: $s_2 - s_1 = 2nd \cos \alpha_2$
Tomu odpovídá zpoždění $\tau = \frac{s_2 - s_1}{c}$

a součin $v\tau = v \frac{s_2 - s_1}{c} = \frac{s_2 - s_1}{\lambda}$ 80

Měření délky laserem

Měření délek laserem je vlastně založeno na principu interference světla u něhož známe přesně jeho střední vlnovou délku λ_0 .

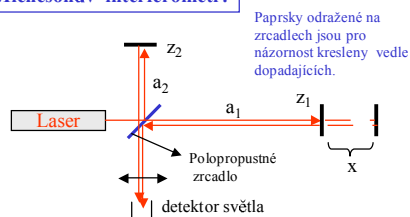
Dokud nebyly lasery, tak se vlastně světla k měření délek nedalo používat, protože jiné zdroje světla nemají dostatečné dlouhé vlnové klubko.

Ano, přesně tak, lasery jsou známy teprve od roku 1960. Nobelova cena za jejich objev byla udělena v roce 1964.

Někdy bych chtěl porozumět tomu, jak lasery fungují. Četl jsem, že se laserem dají řezat i nejtvrďší materiály jako je ocel, a že jich užívají i chirurgové místo skalpelu.

Těch aplikací je velmi mnoho, ale pouze měření délek souvisí s jejich obrovskou délkou vlnového klubka.

Michelsonův interferometr:



Michelsonův interferometr tvoří polopropustné zrcadlo a zrcadla z_2 a z_1 , které je pohyblivé. Podle nákresu se v detektoru potkají dva paprsky odražené na obou zrcadlech s dráhovým rozdílem $s_2 - s_1 = 2(a_2 - a_1)$. Při posuvu zrcadla o x , změní se dráhový rozdíl o $2x$ a během posuvu zaznamená detektor $N=2x/\lambda_0$ maxim intenzity interferujících paprsků. Tedy $x = \lambda_0 N/2$.

81