

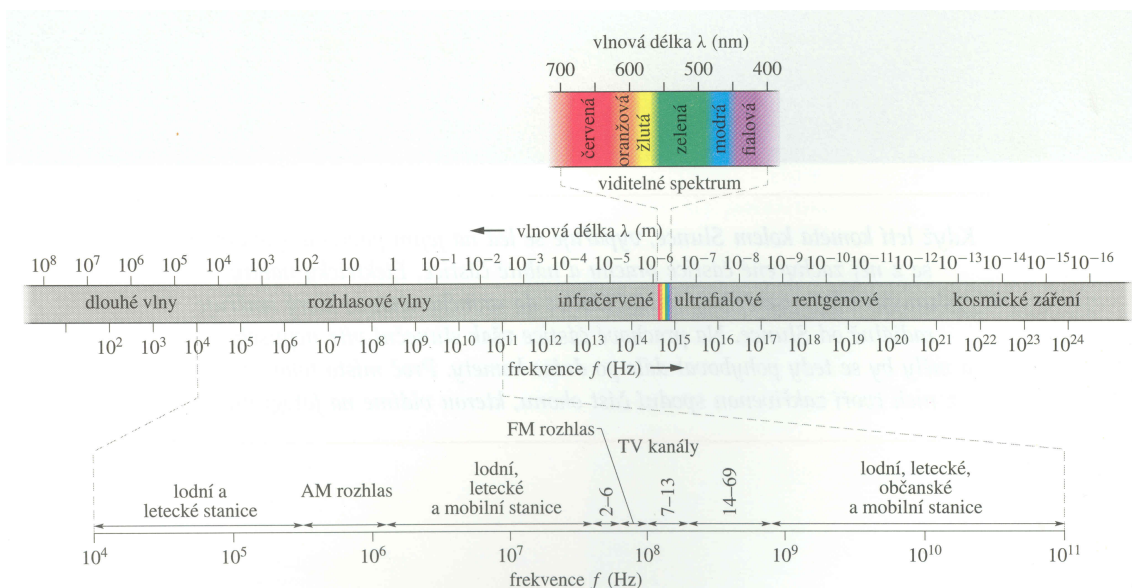
Úloha č. 7 Fyzikální praktikum pro nefyzikální obory

Proč vidíme „viditelné světlo“? (doplňkový materiál)

Co je světlo?

Již od sedmdesátých let 19. století víme, že světlo je elektromagnetické vlnění, respektive jeho část vymezená vlnovými délkami 390 – 760 nm. Z Maxwellových rovnic publikovaných v roce 1865 totiž vyplývá existence elektromagnetického vlnění, které bylo v roce 1888 Heinrichem Hertzem skutečně experimentálně prokázáno.

Přehled elektromagnetického vlnění je na obr. 1. Je zřejmé, že viditelné světlo je jen velmi malou částí celého elektromagnetického spektra, které zaujímá podivuhodných 25 řádů ve vlnových délkách (nebo ve frekvencích).



Obr. 1: Spektrum elektromagnetického vlnění.

Na konci 19. století se tedy zdálo, že odvěká otázka o povaze světla je jednou provždy a úplně vyřešena. Elektromagnetická teorie úspěšně vysvětlila všechny známé jevy související se šířením světla, včetně interference a difrakce. Zbýval je jediný „detail“: tepelné záření těles. A právě tento jev, nevysvětlitelný v rámci elektromagnetické teorie, se stal spouštěcím mechanismem při vzniku zcela nové teorie popisu mikrosvěta – kvantové mechaniky a dalších na ni navazujících teorií.

Pro vysvětlení tepelného záření těles musel M. Planck v roce 1900 předpokládat, že světlo může být emitováno (a také absorbováno) jen po určitých porcích, tzv. kvantech. Velikost této porce je úměrná frekvenci světla f a konstanta úměrnosti je jednou z fundamentálních fyzikálních konstant – Planckova konstanta h . Toto světlené kvantum bylo později Einsteinem nazváno *foton*.

$$E = hf \quad \text{energie fotonu}$$

Viditelná oblast odpovídá energiím fotonů od 1,6eV (červená) do 3,4 eV (fialová). Použili jsme zde jednotku energie elektronvolt eV, která je obvyklá při popisu energie v mikrosvětě a vyjádřena v joulech má hodnotu $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$.

Světlo je tedy současně elektromagnetické vlnění i proud částic – fotonů. Někdy těmto podivuhodným vlastnostem říkáme *duální charakter světla*.

Přestože toto podivné chování světla je jen ztěžší pochopitelné a konzistentní s našimi praktickými zkušenostmi ze světa kolem nás, fyzikální teorie světlo popisující dokáže vysvětlit všechny jeho vlastnosti a jevy. Při popisu šíření plně vystačíme s představou světla jako (elektromagnetického) vlnění, při řešení absorpce a emise světla musíme použít fotonový model světla.

Proč vidíme „viditelné světlo“?

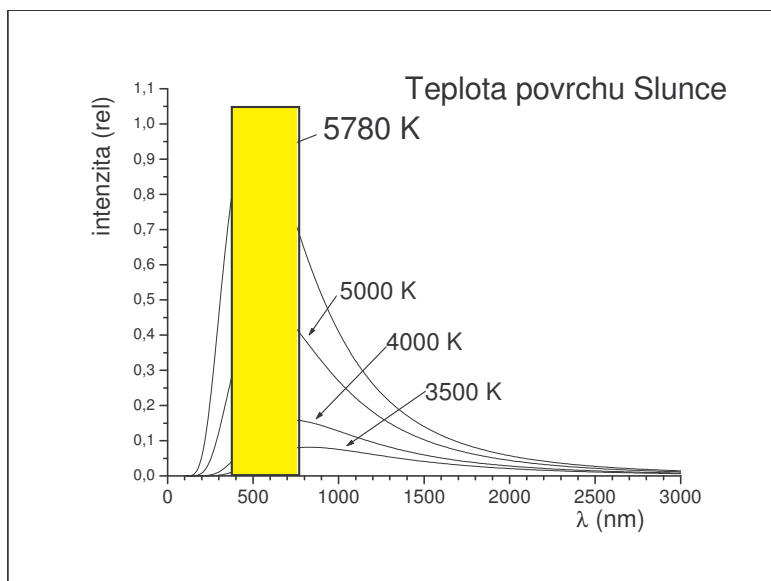
Z fyzikálního hlediska je viditelné světlo jen malou částí elektromagnetického vlnění. Pro život člověka má však význam zcela klíčový. Naskytá se tedy zásadní otázka: Proč právě tato část elektromagnetického spektra je tím, co lidské oko vidí? Jsou k tomu nějaké vážné fyzikální důvody, nebo se to stalo během evoluce pouze náhodou? Odpověď je nasnadě. Není to náhoda. Existuje několik vážných důvodů, proč právě na tuto oblast spektra jsou oči pozemských živočichů citlivé. Postupně si je probereme.

Spektrum slunečního záření.

Na otázku „Proč právě tato část spektra je viditelná?“ lze odpovědět velmi jednoduše a přesvědčivě: „Právě zde nejvíce svítí Slunce!“.

Všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula (a to jsou opravdu všechna), vyzařují elektromagnetické záření. Čím je jejich teplota vyšší, tím je celková vyzářená energie větší a tím se emitované záření posouvá více ke kratším vlnovým délkám. Kvantitativně záření popisuje tzv. Planckův vyzařovací zákon (právě ten zákon, při jehož odvození musel M. Planck předpokládat kvantový charakter světla), více informací najdete v návodu k úloze *Absorpce a emise světla*.

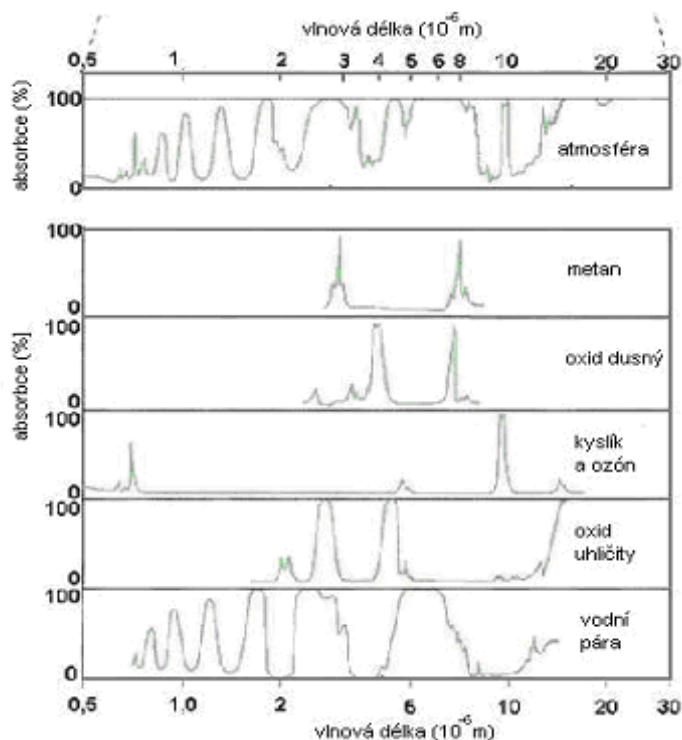
Na obr. 2 je spektrum tepelného záření pro tělesa s různou povrchovou teplotou. Vidíme, že maximum záření Slunce spadá právě do viditelné oblasti elektromagnetického spektra.



Obr. 2: Spektrum tepelného záření těles, přesněji spektrální hustota vyzařování jako funkce vlnové délky, pro několik povrchových teplot těles. Maximum záření Slunce spadá právě do viditelné oblasti (žlutý obdélník).

Absorpce světla v atmosféře

Nestačí jen, aby Slunce hodně svítilo, světlo musí ještě dorazit k zemskému povrchu. Zemská atmosféra tedy musí být pro viditelné světlo průhledná. A skutečně je! Na obr. 3 je absorpce části elektromagnetického záření v atmosféře spolu s absorpčním spektrem některých plynů.



Obr. 3: Absorpce elektromagnetického záření v atmosféře a příspěvek některých plynů.

V infračervené oblasti se záření absorbuje na kmitech některých molekul. Mediálně je v současnosti velmi známá absorpce infračerveného záření molekulou kyslíčnicku uhličitého a s ní související příspěvek ke skleníkovému jevu a riziko globálních změn klimatu.

Ultrafialové záření je absorbováno převážně v molekule ozónu. I s tímto jevem je spojen známý environmentální problém. Rozkladem ozónu klesá schopnost atmosféry UV záření absorbovat a k zemskému povrchu tak může více pronikat nebezpečné ionizující záření.

Vraťme se však k původní otázce vymezení viditelné oblasti. Nyní je již zcela jasné, proč právě na „viditelné světlo“ jsou naše oči citlivé. Tohoto záření je zde nejvíce.

Tím bychom mohli považovat problém za uzavřený. Zkusme se přesto zamyslet, jestli neexistují i nějaké další fyzikální důvody pro výběr viditelného světla.

Proč nemůžeme vidět ve vzdálenější ultrafialové oblasti?

Pro to existují alespoň dva vážné důvody:

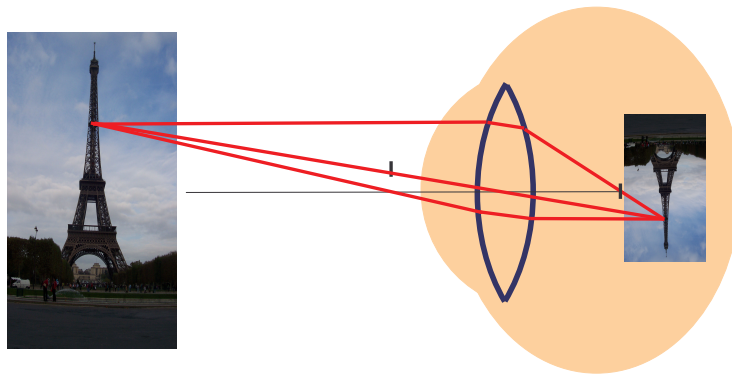
1) Nelze bez poškození detekovat vysokoenergiový foton.

Světlo v oku detekuje sítnice, konkrétně molekula rodopsinu, ve které při absorpci fotonu dochází ke změně geometrické izomerie z trans na cis. Změny ve struktuře chemických molekul doprovází změny energie chemických vazeb. Foton světla se absorbuje jen jako celek, může jej tedy přijmout jen ten systém, který je schopen cílené změny energie stejné velikosti, jako je energie dopadajícího fotonu. Vazebné energie chemických vazeb jsou rozsahu od 0,01 eV (van der Waalsova vazba) do 5 eV (vazba kovalentní). Jak bylo již dříve řečeno, viditelné světlo je tvořeno fotony s energiemi od 1,6 eV do 3,4 eV, což je právě v intervalu energií chemických vazeb. Foton s vyšší energií se nemůže řízeně absorbovat chemickými změnami a způsobí v tkáni nedefinované větší poškození. Záření s vyšší energií, tzv. ionizující, je pro živý organismus nebezpečné a může vážně poškodit zdraví.

To, jaké úsilí musí naše tělo vynaložit, aby opravilo poškození způsobené běžným slunečním světlem, si uvědomíme teprve tehdy, když tyto mechanismy nefungují. Existuje vzácná vrozená nemoc tzv. xeroderma pigmentosum (viz např. <http://www.xps.org>), při níž tělo nedokáže poškození ionizujícím zářením rekonstruovat. Takto postižení lidé, tzv. měsíční děti, (protože lidé s tímto poškozením se jen zřídka dožívají vyššího věku) nemohou přijít vůbec do kontaktu s denním světlem, a to dokonce ani s nepřímým rozptýleným zářením uvnitř místností budov, za průhlednými skleněnými okny. Ven mohou chodit pouze v noci, za měsíčního světla anebo umělého osvětlení, v jehož záření nejsou krátkovlnné složky obsaženy.

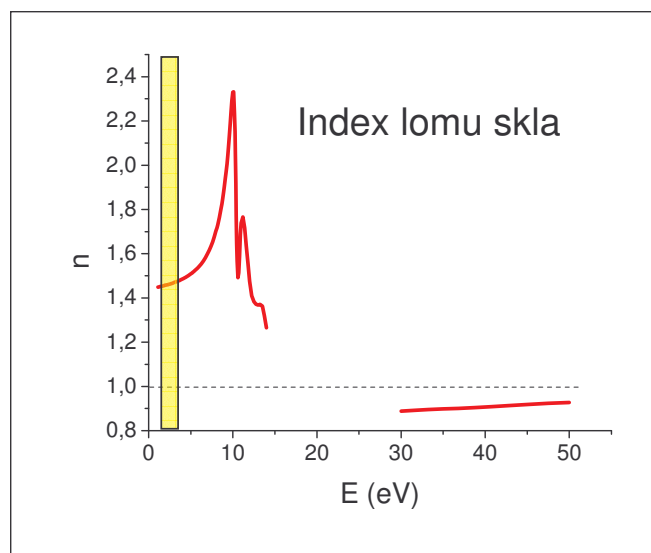
2) Nelze dosáhnout zobrazení okolní scény na sítnici.

Lidské oko je spojná zobrazovací soustava, ve které zakřivení rohovky a oční čočka zobrazí okolní scénu na sítnici, podobně jako objektiv fotografického aparátu vytvoří obraz na políčko filmu.



Obr. 4: Oko jako spojná zobrazovací soustava.

Fyzikálním základem funkce čočky – lidské i skleněné – je lom světla na rozhraní dvou různých optických prostředí. K lomu však dojde jen tehdy, jsou-li k dispozici různá optická prostředí s dostatečně odlišným indexem lomu. Ve viditelné oblasti má běžný materiál pro výrobu čoček – sklo – index lomu asi 1,5, index lomu lidské čočky je asi 1,4. Pro vzdálenější UV záření je však index lomu v podstatě pro všechny materiály velmi blízký jedné a fungující čočku nelze vytvořit, viz obr. 5.



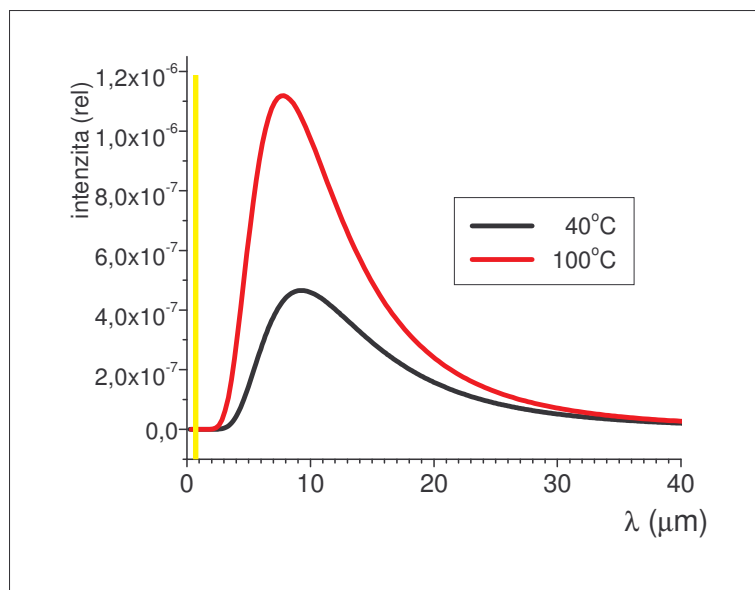
Obr. 5: Závislost indexu lomu amorfního SiO_2 na energii fotonu elektromagnetického záření. Žlutý pás vyznačuje viditelnou oblast.

Proč nemůžeme vidět ve vzdálenější infračervené oblasti?

I zde lze nalézt dva vážné fyzikální důvody:

1) V IR oblasti záříme my sami.

Již dříve jsme se zmínili o tepelném záření všech těles. I naše tělo září, v porovnání se Sluncem ovšem na větších vlnových délkách, tj. s nižšími energiemi fotonů, viz. obr. 6.



Obr. 6. Záření těles za běžných teplot. Žlutý pás vyznačuje viditelnou oblast.

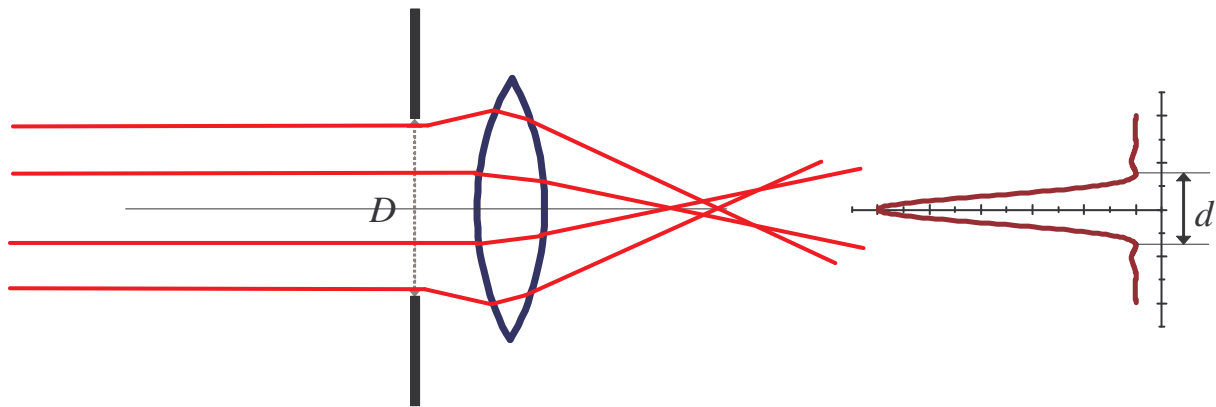
Vidíme, že maximum vyzařování lidského těla je pro vlnové délky cca 10 μm , tj. asi desetkrát delší než pro viditelné světlo. Není možné, aby lidské oko bylo citlivým detektorem záření těchto vlnových délek. Samo lidské tělo, tedy i nitro oka, zde září a oko by bylo oslepeno svým vlastním světlem.

Zajímavé je, že infračervené vidění v přírodě skutečně existuje. Některé druhy hadů mají vedle „obyčejných“ očí i detektory infračerveného záření. Uvádí se, že tyto detektory jsou citlivější než jakékoliv jiné detektory IR záření vyrobené člověkem. Citlivost zasahuje až do vlnové délky 10 μm a princip jejich činnosti není dosud zcela jasný. V žádném případě se však tyto druhé oči ani nepřibližují schopnostem očí pracujících ve viditelném světle. Infračervené oči hada nevytváří obraz na sítnici jako komorové oko, ale poskytují omezené prostorové rozlišení podobným způsobem jako složené oko hmyzu. Infračervených detektorů je na hlavě hada několik a každé vidí jen omezeného prostorového úhlu. Tak had získá velmi přibližnou představu o zdrojích IR záření v jeho blízkosti. Těmito zdroji mohou být teplokrevní živočichové – hadem lovená kořist. Had je schopen odlišit živé (tj. teplé) tělo od mrtvého na vzdálenost 5 – 10 cm. Vidíme, že schopnosti infračervených očí jsou velmi omezené.

2) Dlouhé vlny se více ohýbají.

Světlo je vlnění a stejně jako všechna vlnění se při šíření kolem překážek ohýbá. Ohyb vlnění, často nazýván difrakce, je tím výraznější, čím jsou rozměry difrakčních objektů bližší vlnové délce.

Před vstupem do oka musí světlo projít zorničkou – otvorem, na němž se světlo ohýbá. Pokud do oka opadá rovnoběžný svazek paprsků, za zorničkou se změní na rozbíhavý, který již čočka, i kdyby byla dokonalá, nedokáže soustředit do jediného bodu v ohnisku, viz obr. 7.



Obr. 7: Ohyb světla na vstupní pupile. Ohybem se rovnoběžný svazek změní na rozbíhavý a ten již čočka nezobrazí do jednoho bodu (levý obrázek). Na stínítku v ohniskové rovině se místo bodu objeví skvrna, v níž je rozložení intenzity světla takové, jak je znázorněno na pravém obrázku.

Místo bodu je na stínítku světlá skvrna, pro jejíž průměr přibližně platí:

$$d = 1,22 \frac{\lambda f}{D}$$

kde λ je vlnová délka světla, f ohnisková délka čočky a D průměr pupily. Po dosazení obvyklých hodnot dostaneme pro lidské oko $d = 5 \mu\text{m}$. Každá hvězda z oblohy se tedy na sítnici zobrazí jako skvrnka s průměrem přibližně $5 \mu\text{m}$. Větší vlnové délky světla by se více ohýbaly a s tím by úměrně klesala schopnost ostrého vidění.

Na závěr vše shrňme.

1. V oblasti viditelného světla nejvíce svítí Slunce.
2. V této oblasti je zemská atmosféra dobře průhledná.
3. Chemické vazby mají obdobnou energii jako fotony viditelného světla. Proto lze chemickými změnami světlo detekovat.
4. Látky mají index lomu dostatečně odlišný od jedné a tím je umožněna konstrukce zobrazovacího systému komorového oka.
5. Lidské tělo „viditelné světlo“ nevyzařuje.
6. Světlo má dostatečně krátkou vlnovou délku, aby ohyb neznemožnil ostré vidění.

Jen díky současnému splnění všech těchto podmínek můžeme dobře vidět. Jistě nás hned napadne: „Je to všechno jen náhoda?“ Na tuto otázku však fyzika ani žádná jiná přírodní věda odpovědět nedokáže.