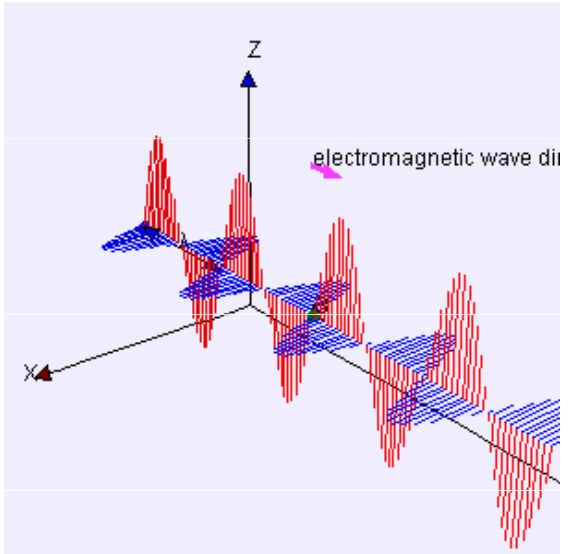
Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění

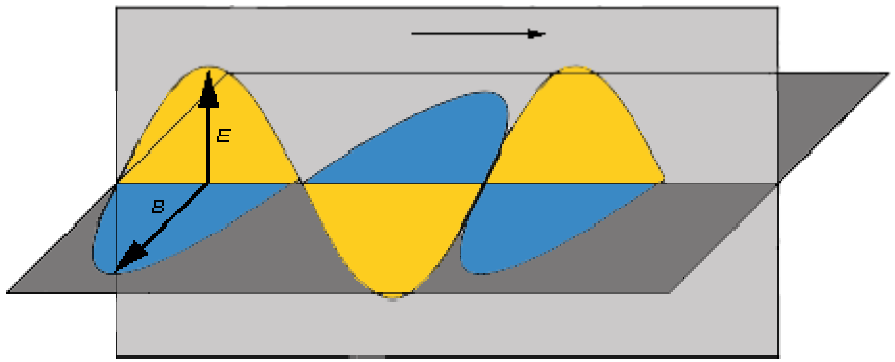
Elektromagnetické vlnění (též elektromagnetické záření) je děj, při němž se prostorem šíří příčné vlnění elektrického a magnetického pole. Popsáno je pomocí tzv. Maxwellových rovnic.

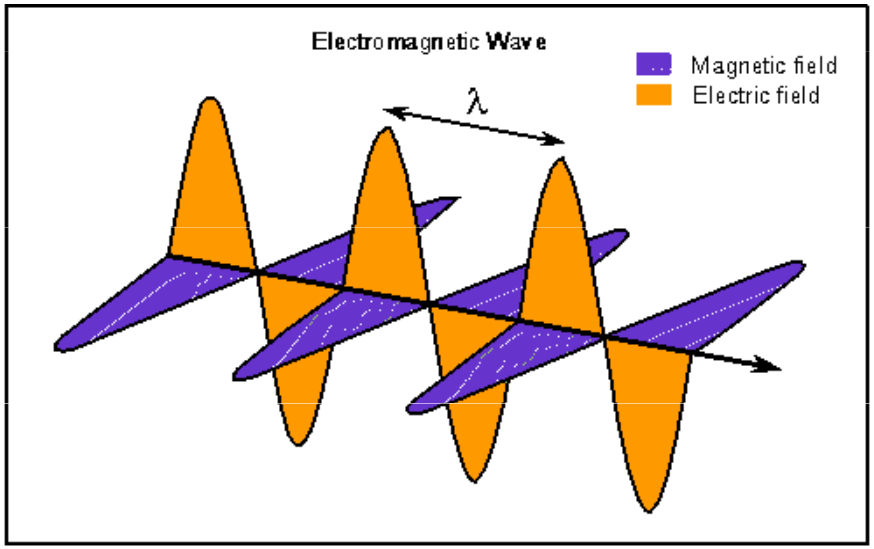
	Integrální tvar	Diferenciální tvar
1	$\oint_c Hdl = I + \frac{d\psi}{dt}$	$rotH = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
2	$\oint_c Edl = -\frac{d\phi}{dt}$	$rotE = -\frac{\partial B}{\partial t}$
3	$\oint_S DdS = Q$	$divD = \rho$
4	$\oint_S BdS = 0$	$divB = 0$



Zahrnuje dvě složky, které jsou na sebe kolmé:

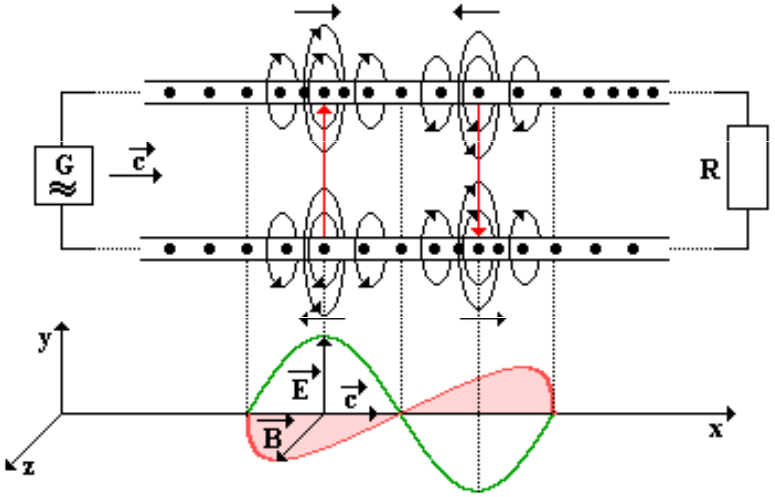
- Intenzita elektrického pole E
- Magnetická indukce B





Vznik elektromagnetického záření

Při přenosu elektromagnetické energie dvouvodičovým vedením vzniká v prostoru mezi vodiči **časově proměnné silové pole**, které má složku elektrickou a magnetickou (= **elektromagnetické pole**). Energie není přenášena samotnými vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi. Tento děj má charakter vlnění.



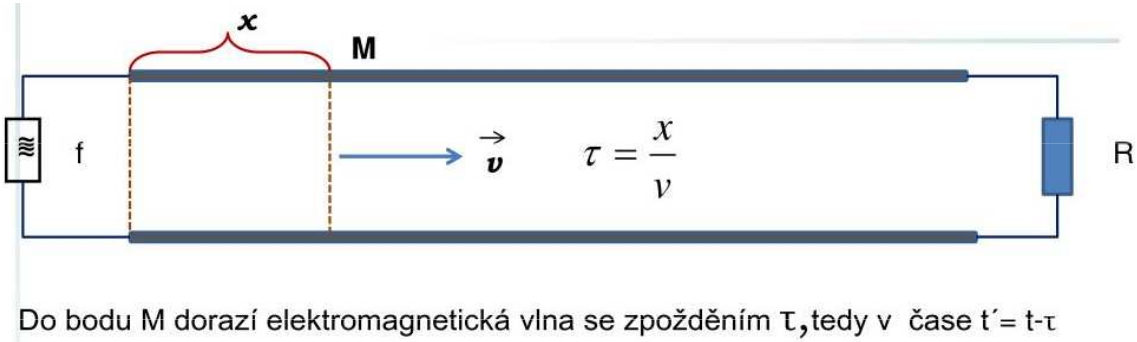
Za předpokladu, že veškerá elektromagnetická energie se na konci vedení pohltí dostáváme **postupné elektromagnetické vlnění**.

Pokud tomu tak není, nastává na konci vedení odraz vlnění a odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím a vzniká **vlnění stojaté**.

Elektromagnetické záření vzniká všude tam, kde se pohybuje náboj s nenulovým zrychlením, tzn. kde teče nekonstantní proud, např.

- Střídavý proud (např. anténa)
- Zpomalování nabité částice (např. rentgenka)
- Emise záření podle Planckova vyzařovacího zákona (např.žárovka)

Rovnice postupné elektromagnetické vlny



Do bodu M dorazí elektromagnetická vlna se zpožděním τ, tedy v čase t´= t-τ

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau)$$

$$u = U_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

Rychlost světla ve vakuu

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

c_0 = 299 792 458 m/s
c_0 = 1 079 252 848,8 km/h

c_0 je rychlost světla ve vakuu,
ε_0 je permitivita vakua (dielektrická konstanta)
μ_0 je permeabilita vakua (magnetická konstanta)

Rychlost šíření světla v jiných prostředích je vždy menší.

$v_{vzduch} \approx c$
$v_{voda} = 2.25 .10^8$ m.s^{-1}
$v_{sklo} = 2.10^8$ m.s^{-1} – 1,5 $.10^8$ m.s^{-1}

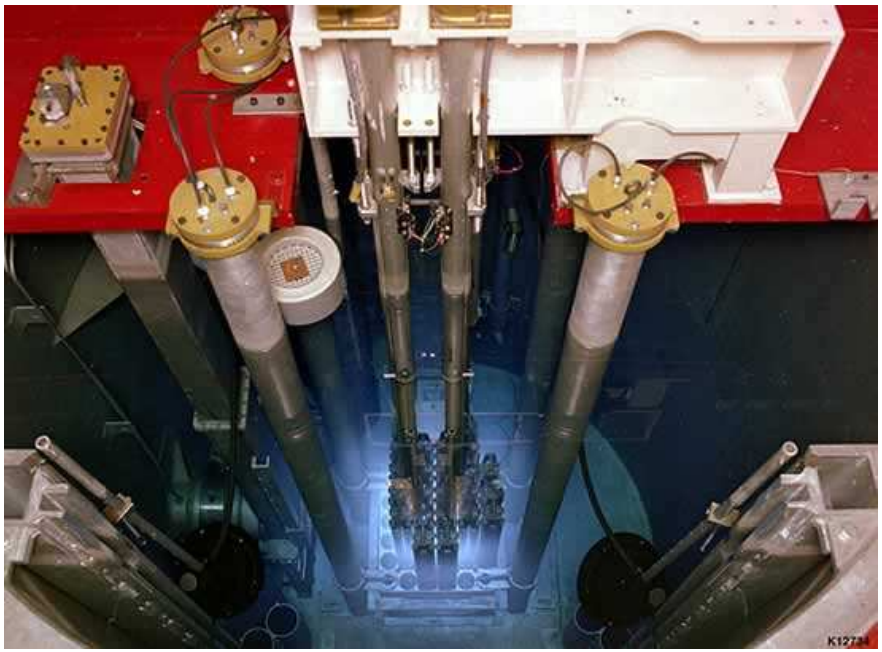
$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r . \mu_r}}$$

ε_r relativní permitivita
μ_r relativní permeabilita

Čerenkovovo záření

Čerenkovovo záření je elektromagnetická obdoba zvukové rázové vlny. Nabitá částice, která se pohybuje v optickém prostředí rychleji, než je fázová rychlost světla pro toto prostředí, vyvolává záření, které trvá po tu dobu, kdy je částice rychlejší než světlo.

Typicky lze Čerenkovův efekt pozorovat v nádržích jaderných reaktorů, kde se uranové palivo nachází v kapalině moderující neutrony, vlivem štěpení jsou produkovány částice záření beta (vysokoenergetické elektrony), které při pohybu kapalinou emitují fotony s energií několika málo eV a voda tak získává modravý nádech.

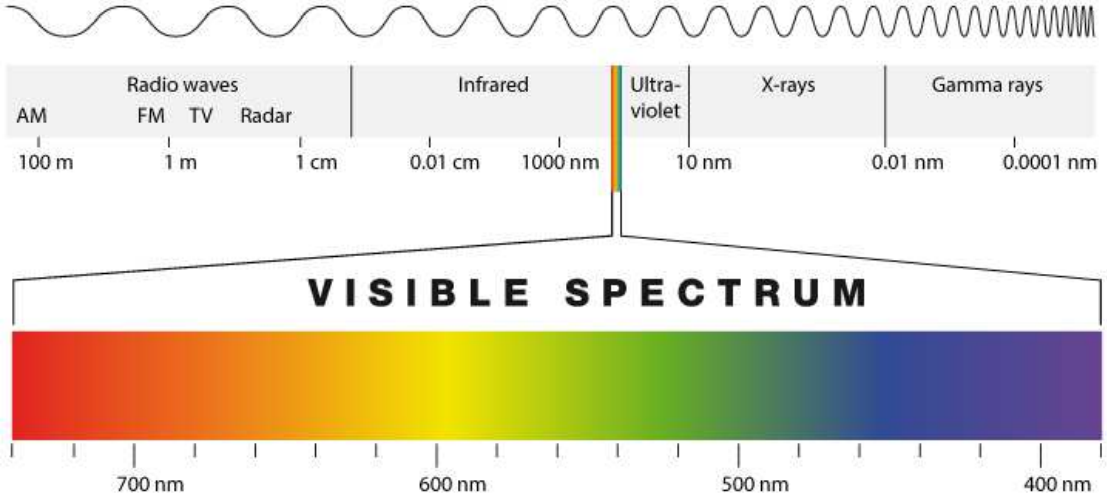


Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí

$$f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$

f – nezávisí na prostředí
λ – se mění podle rychlosti
c (v) – rychlost světla ve vakuu (v daném prostředí)

Vlnová délka



Elektromagnetické vlny se **odráží i lámou**. Jednotlivé druhy elektromagnetického záření se liší vlnovou délkou a tvoří **spektrum** elektromagnetického záření.

Elektromagnetické záření	Vlnová délka ve vzduchu	Frekvence (Hz)
rádiové záření	30 km – 1 m	$10^4 - 3 \cdot 10^8$
mikrovlny	1 m – 0,03 mm	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$
infračervené záření	0,3 mm – 790 nm	$10^{12} - 3{,}8 \cdot 10^{14}$
světlo	790 nm – 390 nm	$3{,}8 \cdot 10^{14} - 7{,}7 \cdot 10^{14}$
ultrafialové záření	400 nm – 10 nm	$7{,}7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
rentgenové záření	10 nm – 1 pm	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$
záření gama	< 300 pm	$>10^{18}$

Elektromagnetické záření, vlnění	Vlnová délka λ	Použití, výskyt	Pozn.
Radiové vlny Dlouhé (DV) Střední (SV) Krátké (KV) Velmi krátké (VKV) Ultra krátké (UKV)	 2 000 m – 1 000 m 600 m – 150 m 50 m – 15 m 15 m – 1 m 1 m – 0,1 m	Rozhlas, televize	Neionizující záření
Mikrovlny	0,1 m – 0,3 mm	mobilní telefony , GPS, WiMax, Wifi, mikrovlnné trouby, radar	
Infračervené záření	0,3mm – 750 nm	dálkové ovladače, noční vidění, tepelné záření	
Světlo červené oranžové žluté zelené modré fialové	760 nm – 390 nm	Viditelné světlo	
Ultrafialové záření	390 nm – 10 nm	Opalování, solária, sterilizace	
Rentgenové záření	10 nm – 1 pm	lékařská diagnostika, průmyslová diagnostika	Ionizující záření
Záření gama	< 300 pm	ozařování nádorů, kosmické záření, jaderné reaktory	

Vlnově-korpuskulární vlastnosti elektromagnetického záření

Vlnově-korpuskulární (vlnově-částicový) dualismus - některé jevy u týchž objektů mikrosvěta se daří lépe vysvětlit pokud na tyto objekty nahlížíme buď jako na vlny, nebo jako na částice (fotony).

Např. ***elektromagnetické záření*** může někdy vykazovat vlnový charakter (např. při ohybu světla), a jindy se chová jako částicové záření (např. u fotoelektrického jevu). Světlo lze tedy popsat vlnovou teorií, ale také teorií kvantovou. Částicová povaha elektromagnetického záření se projevuje především v krátkovlnných oblastech (tzn. při vysokých energiích fotonů), vlnová povaha v oblasti dlouhovlnné.

1. Elektromagnetické záření může být pohlcováno, resp. vyzařováno, jen v určitých kvantech (fotonech), jejichž energie E odpovídá násobkům frekvence záření f (Planck 1999):

$$E = h \cdot f$$ kde h je Planckova konstanta, h = 6,626075·10^{-34} Js.

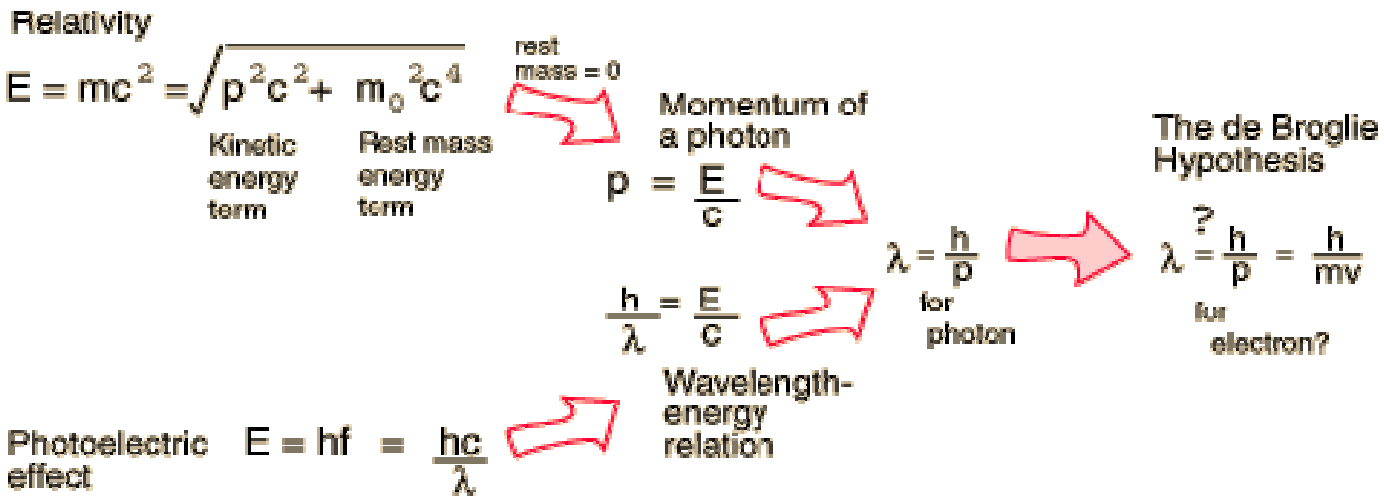
Elektromagnetická vlna o frekvenci f a vlnové délce λ je soubor světelných kvant (fotonů) o určité energii a hybnosti (Einstein 1905).

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h.f}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

2. Vlnové vlastnosti vykazují (v určitých situacích) všechny částice (de Broglie 1924). Částice lze popsat vlnovou délkou o velikosti

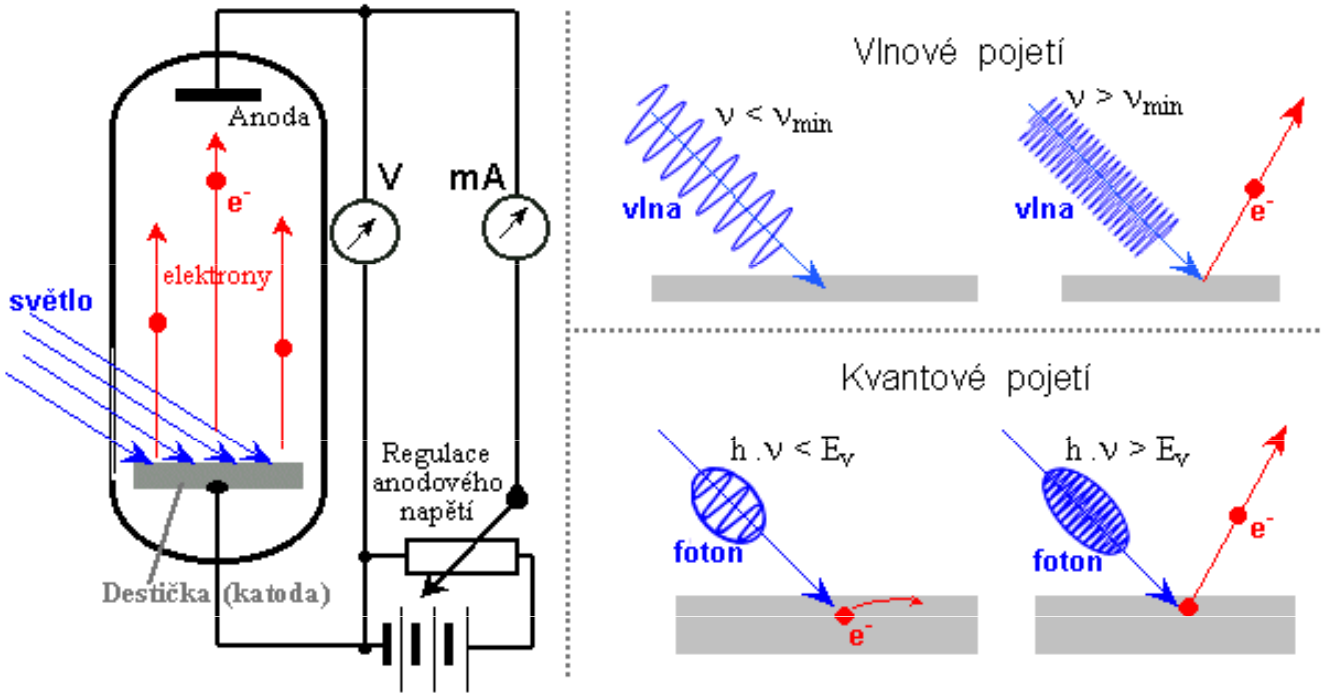
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

kde h je Planckova konstanta a p je hybnost částice.



Příklad

Rozlišení v elektronovém mikroskopu, závisí na kinetické energii elektronů - vyšší rychlost (i kinetická energie) odpovídá vyšší hybnosti, čímž se snižuje jejich vlnová délka a lze tedy dosáhnout vyššího rozlišení.

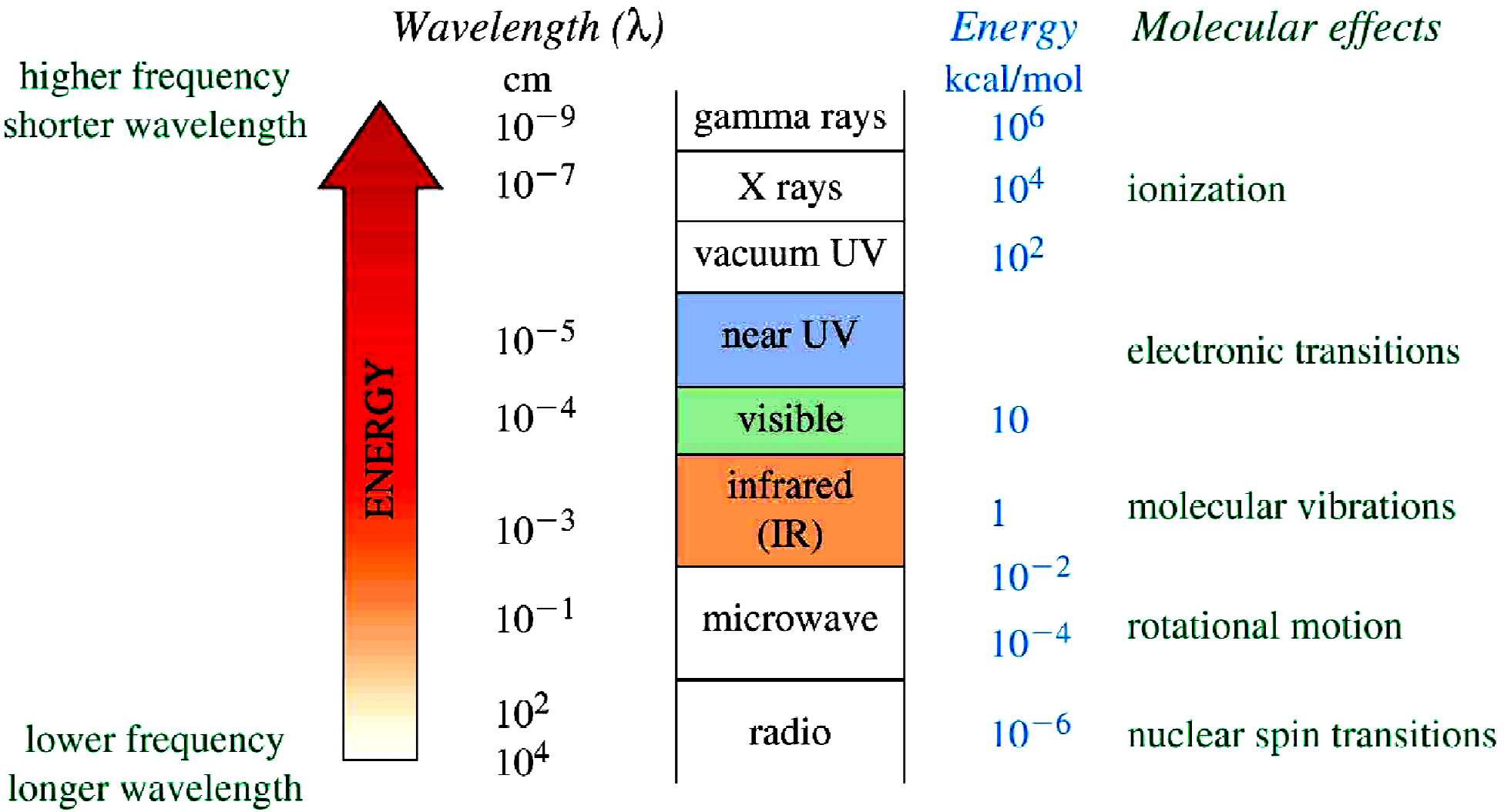


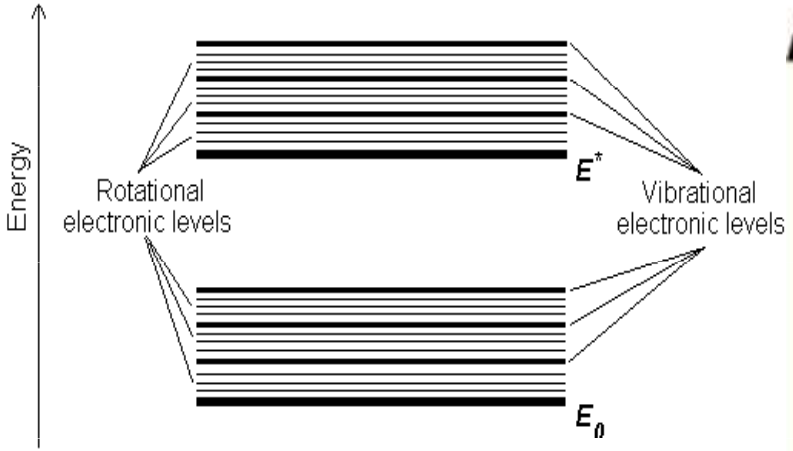
Každá mikročástice o hmotnosti m pohybující se rychlostí v, se může chovat jako vlna o vlnové délce

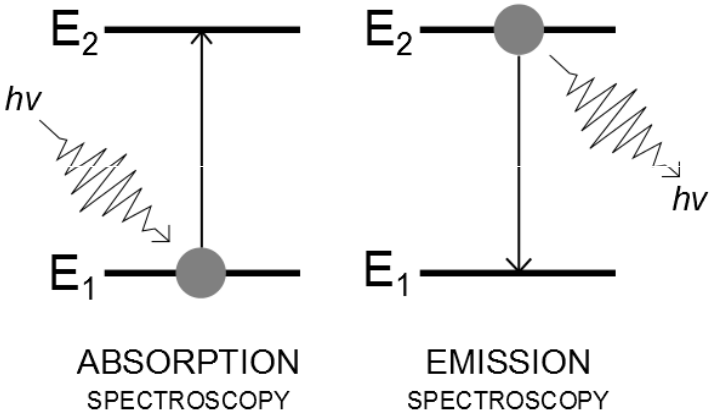
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m v} = \frac{h}{mv}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

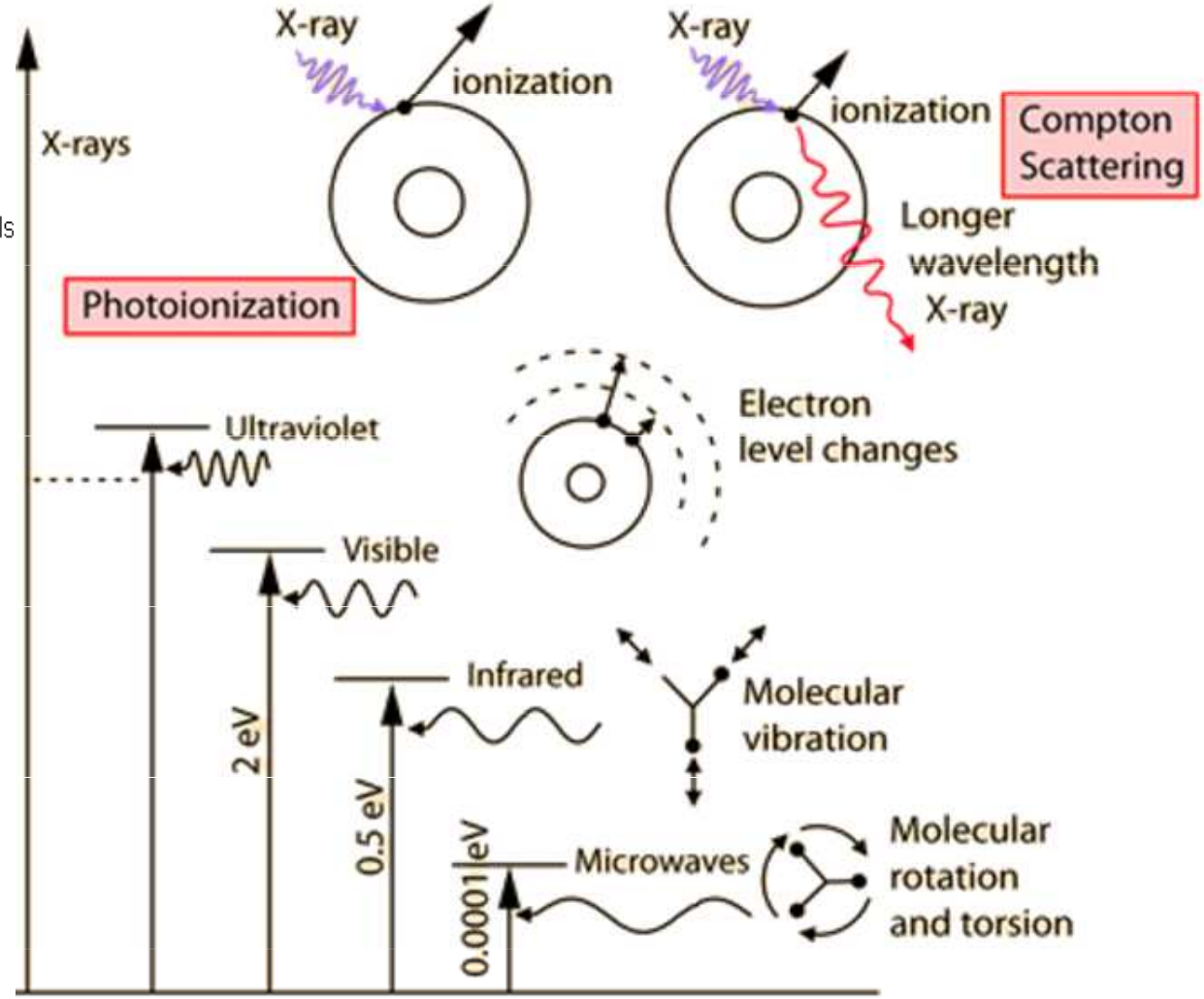
De Broglieova-Comptonova **vlnová délka**

Vliv elektromagnetického záření na molekuly

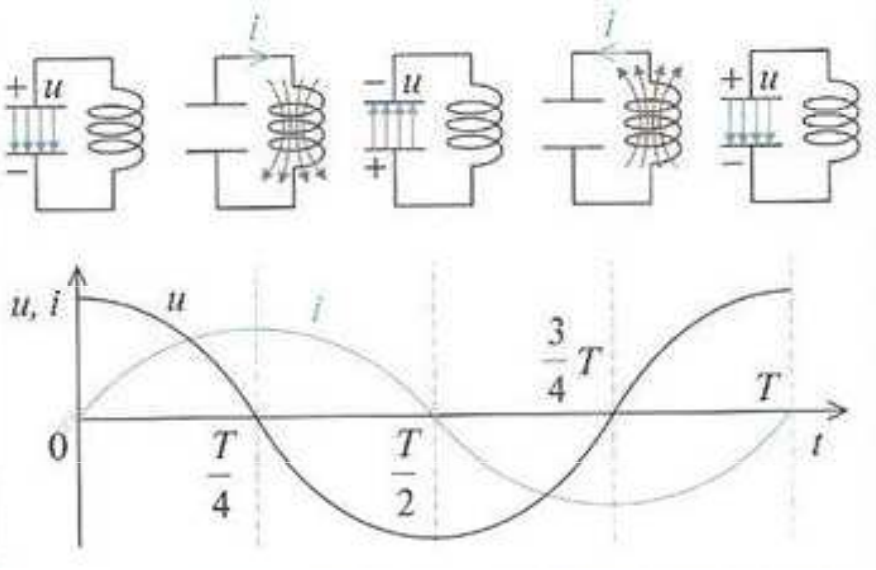



Energy
Rotational electronic levels
Vibrational electronic levels
E*
E0

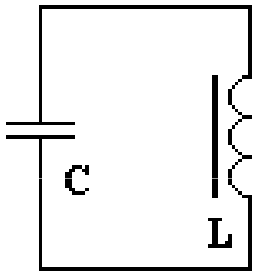

E2
hv
E1
ABSORPTION
SPECTROSCOPY
E2
hv
E1
EMISSION
SPECTROSCOPY


X-rays
X-ray
ionization
Photoionization
X-ray
ionization
Compton Scattering
Longer wavelength X-ray
Electron level changes
Ultraviolet
Visible
Infrared
Molecular vibration
2 eV
0.5 eV
0.0001 eV
Microwaves
Molecular rotation and torsion

Elektromagnetické kmitání, elektromagnetický oscilátor



Elektromagnetický oscilátor je obvod tvořený cívkou a kondenzátorem - obvod LC (oscilační obvod)

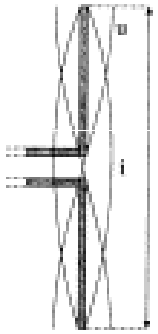


1. Po nabití kondenzátoru se mezi jeho deskami vytvoří elektrické pole, jehož energie představuje počáteční energii oscilátoru. Po připojení kondenzátoru k cívce začne oscilačním obvodem procházet proud, kondenzátor se vybíjí a energie elektrického pole se zmenšuje. Současně se zvětšuje proud procházející cívkou a kolem ní se vytváří magnetické pole. Energie elektrického pole kondenzátoru se tedy mění na energii magnetického pole cívky.
2. Kondenzátor se vybije za jednu čtvrtinu periody T kmitání obvodu LC. V tom okamžiku dosahuje proud maximální hodnoty a celková energie kmitání je dána energií magnetického pole. Kondenzátor je vybit a proud se začíná zmenšovat. To vede ke vzniku indukovaného napětí, obvodem prochází indukovaný proud a kondenzátor se opět nabíjí.
3. Polarita jeho napětí je ale opačná a v okamžiku t = T/2 je ukončena přeměna magnetické energie v energii elektrickou. Ve druhé polovině periody se popsaný děj opakuje - směry proudů a pořadí polarit napětí kondenzátoru jsou ale opačné.

Rádiové vlnění

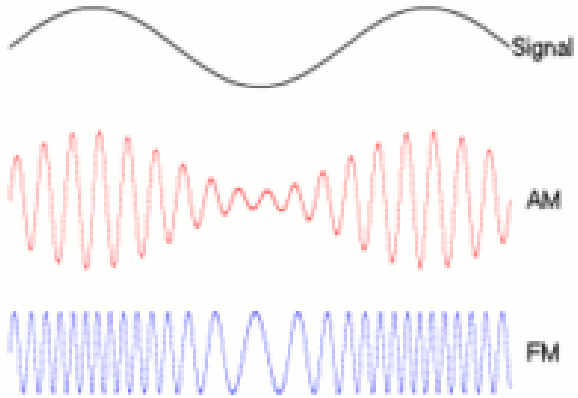
Vzniká mimo jiné v obvodu střídavého proudu, k němuž je připojena anténa. Rychlost šíření rádiových vln je v prostoru přibližně rovna rychlosti světla ve vakuu. V případě jiných prostředí závisí na indexu lomu. Podle frekvence se radiové vlny dělí na takzvaná **vlnová pásma**. Jednotlivá pásma se výrazně liší přenosovou kapacitou i dosahem.

Většina zdrojů zpráv generuje signály, které ve své původní podobě nejsou vhodné pro dálkový přenos. Proto vznikla modulace, která posílí signál (nesenou informaci), lze ho tak přenášet na delší vzdálenost.

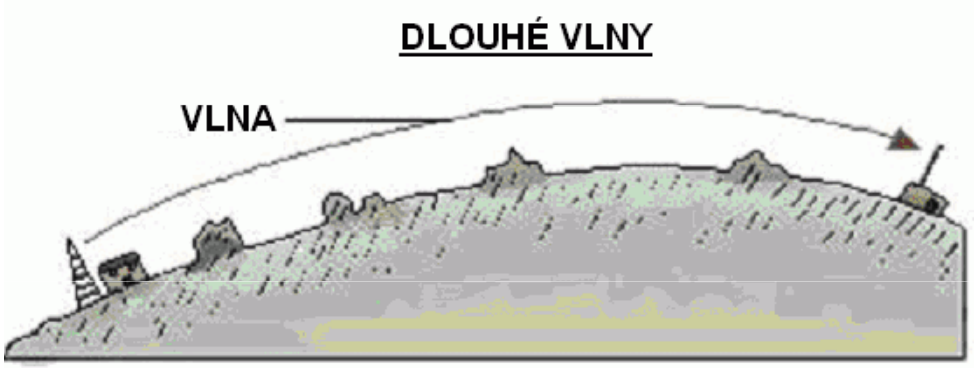


Modulace je nelineární proces, kterým se mění charakter vhodného nosného signálu pomocí modulujícího signálu.

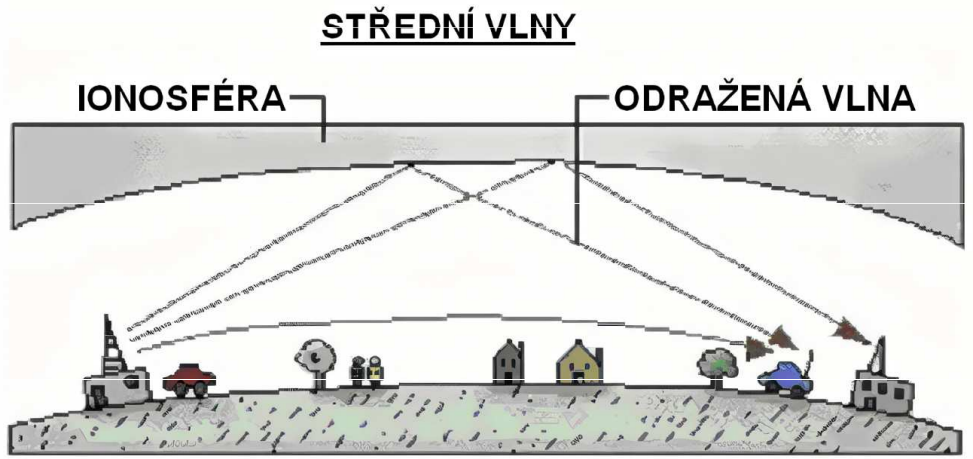
- Frekvenční modulace
- Amplitudová modulace
- Fázová modulace
- Pulzní modulace



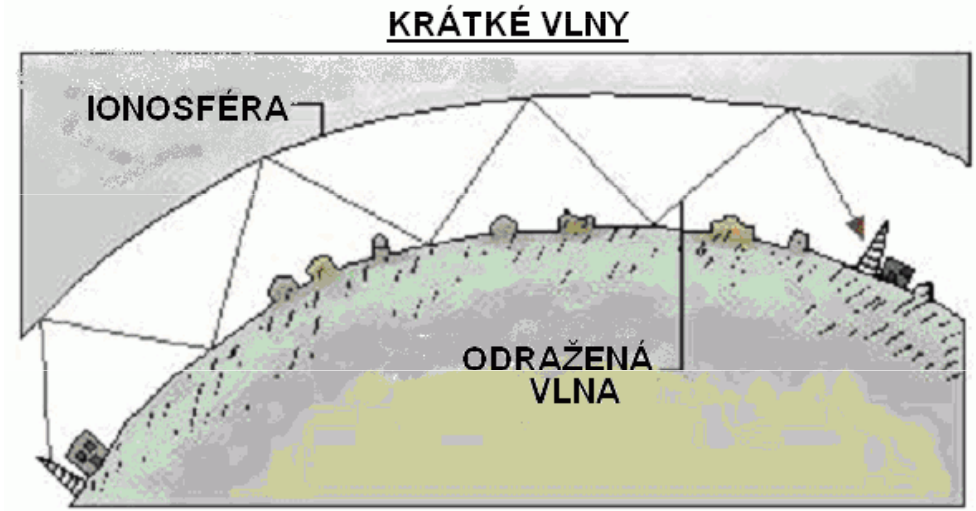
Modulace se používá při přenosu nebo záznamu elektrických nebo optických signálů. Nejběžnějšími příklady jsou například rozhlasový a televizní přijímač, mobilní telefon, různé typy modemů, satelitní přijímače atd.



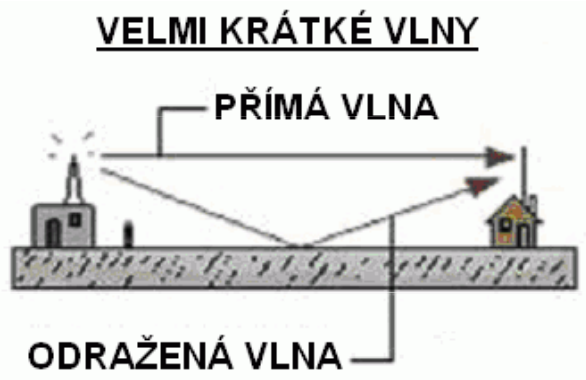
Kilometrové vlny, mají frekvence 30 až 300 kHz. Použití pro rozhlasové dlouhé vlny, radiokomunikace, meteorologické služby.



Hektometrové vlny, mají frekvence 0,3 – 3 MHz. Použití k přenosu rozhlasového vysílání (SV), radionavigaci a komunikaci na malé a střední vzdálenosti.



Dekametrové vlny, mají frekvence 3 – 30 MHz. Použití pro radiokomunikace na střední a velké vzdálenosti, rozhlasové krátké vlny, amatérská pásma. Krátké vlny se odrážejí od ionosféry (začíná ve výšce 60 – 80 km nad zemským povrchem, obsahuje určité množství molekul vzduchu rozštěpených na ionty a volné elektrony)



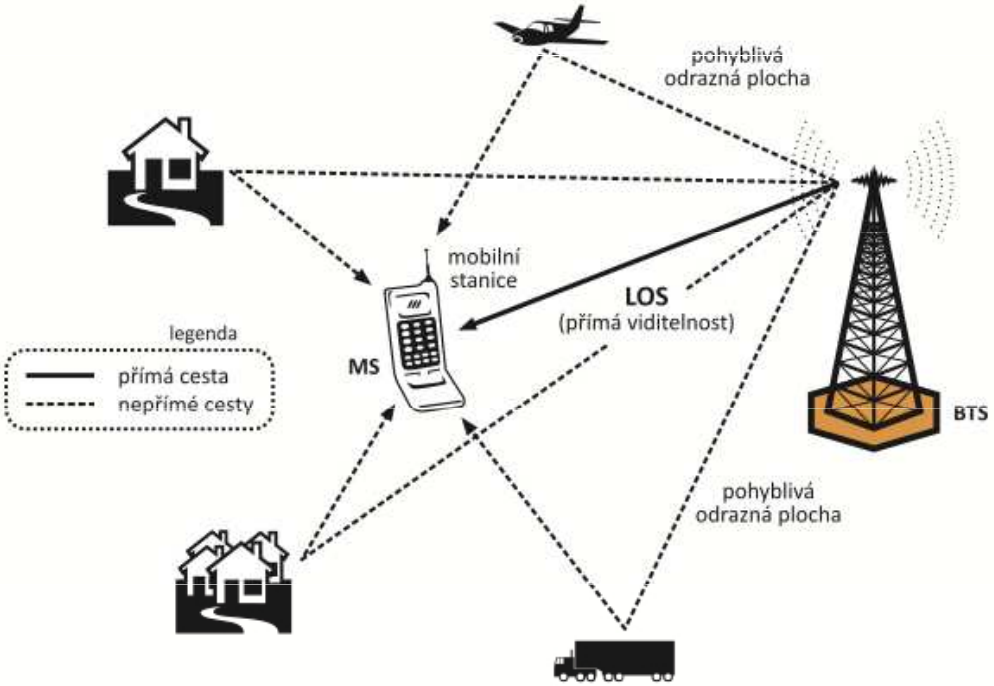
Metrové vlny, mají frekvence 30 – 300 MHz. Na těchto vlnách se vysílá frekvenčně modulované rozhlasové vysílání (FM) a některé televizní kanály (dnes již opouštěné I., II. a III. tel. pásmo), různé mobilní radiostanice včetně leteckých a lodních. Vysílač a přijímač musí být přibližně v přímce, na které není překážka (satelity

Ultra krátké vlny

decimetrové vlny, o frekvencích 0,3 – 3 GHz. Vysílají se na nich televizní kanály (IV. a V. pásmo), dnes především digitální televize. Pracují zde i další radiokomunikační služby jako mobilní telefony, Wi-Fi, GPS, vojenská komunikace. Vysoká frekvence umožňuje přenos velkého množství informací , mezi mobilem a vysílačem ale nesmí být silná překážka (stavby, kopec).

Super krátké vlny

centimetrové vlny, frekvence 3 až 30 GHz. Radiolokace, radioreléové spoje, telekomunikace, satelitní spojení, satelitní televize.



Extrémně krátké vlny

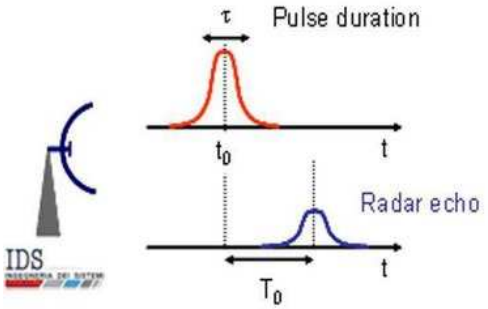
milimetrové vlny, frekvence 30 až 300 GHz. Přistávací a říční radiolokátory, letecké výškoměry, radary.

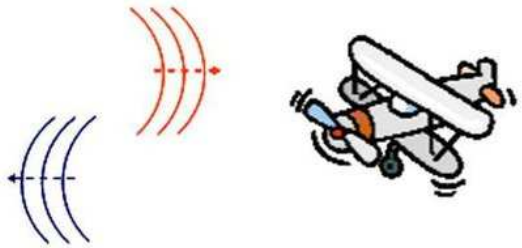
Mikrovlny

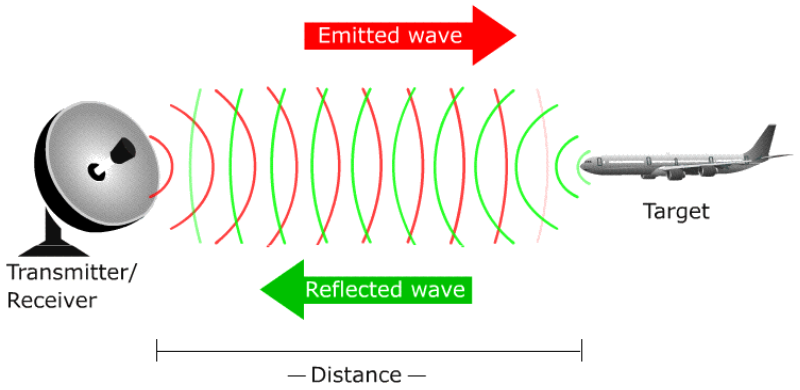
Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny o vlnové délce od 1 mm do 1 m, což odpovídá frekvenci 300 MHz (0,3 GHz) až 300 GHz.

Využívají se v mnoha odvětvích lidské činnosti: k ohřevu potravin, k vysoušení knih či tkanin, obrábění materiálů, přenosu informací (Wi-Fi, mobilní sítě), radiolokaci, restaurování uměleckých děl, tavení skla, navigaci a v mnoha dalších.

Radar je elektronické zařízení na detekci polohy pozemních a vzdušných objektů. Princip **radiolokace** je založen na přímočarém šíření mikrovln a jejich odrazu od vodivých překážek. Radary pracují v rozsahu decimetrových nebo centimetrových vln. Radary slouží k detekci kovových objektů (automobil, letadlo, loď, apod.) a též na předpovídání bouřek (meteorologický radar).

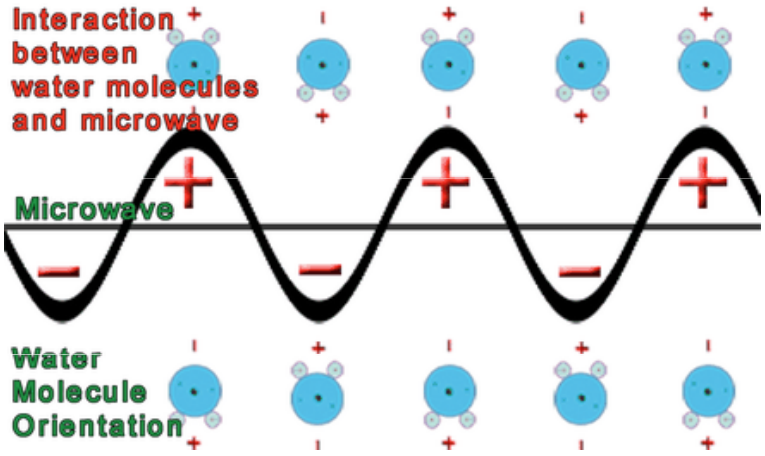


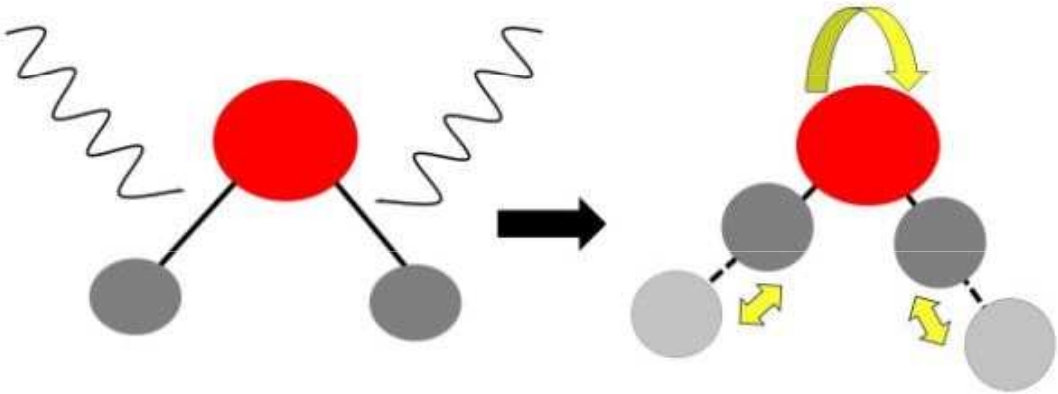




Maser (mikrovlnný laser) je kvantový paramagnetický zesilovač. Používá se na zesílení citlivosti radioteleskopů a spojovacích zařízení při kosmických letech a dálkových radiolokátorů, které majú zachytit tělesa na vzdálenost větší než 1 000 km.

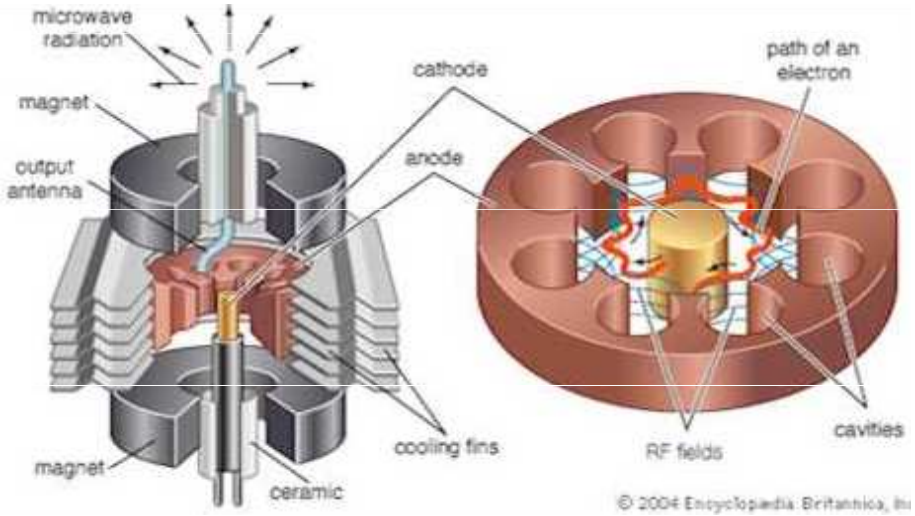
Mikrovlnná trouba. Zdrojem mikrovlnného záření je magnetron. Mikrovlny o vlnové délce kolem 12 cm mají frekvenci blízkou rezonanční frekvenci některých nesymetrických molekul, hlavně vody. Dipóly polárních molekul se nepřetržitě natáčejí dle okamžitého směru elektromagnetického pole a takto mění svoji orientaci až několik miliardkrát za sekundu. Přitom se využívá dvou procesů: mezimolekulárního tření, k němuž dochází při překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil, a hystereze, která vzniká mezi působícím polem a indukovanou elektrickou odezvou vlivem setrvačnosti, jež závisí na elektrickém náboji, hmotě a tvaru molekul.

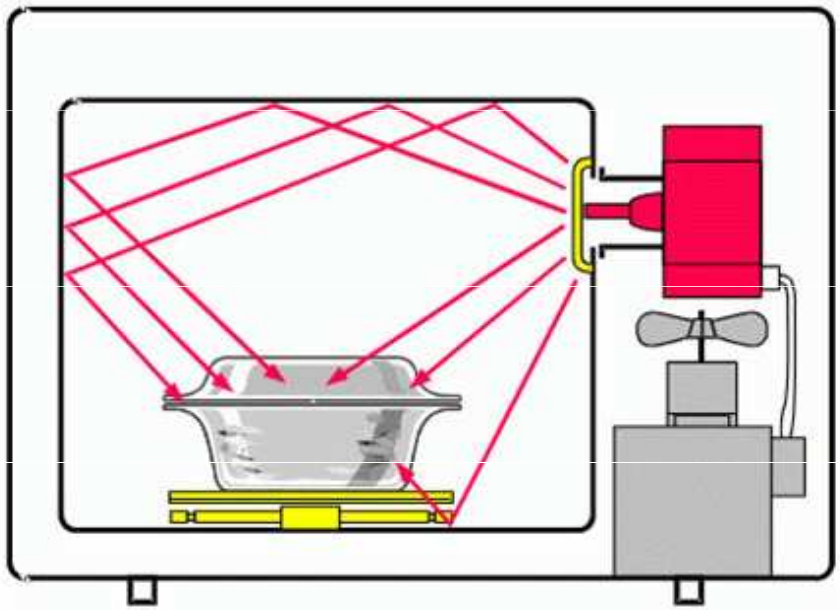




As microwaves hit the polar molecules (such as water) in food, the molecules begin to vibrate, twisting, turning, and stretching, rubbing against each other causing friction. This friction creates heat, which cooks the food.

Rozkmitané molekuly vody takto mění pohybovou energii na tepelnou. Díky těmto jevům je ohřev produktu velmi rychlý a probíhá v celém objemu, ve kterém působí elektromagnetické pole na polární materiál. Potraviny obvykle obsahují velké množství vody a navíc mikrovlny nádoby (sklenice, talíře, keramické hrníčky) neohřívají



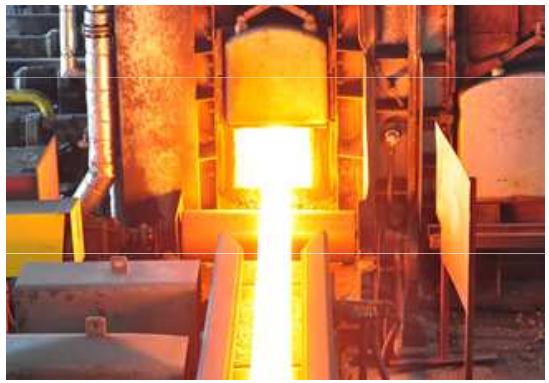


Mikrovlny procházejí některými materiály (papír, plast, bavlna, sklo). Propustnost závisí na materiálu a jeho tloušťce (výraznější útlum nastává, je-li tloušťka materiálu větší než 1/2 vlnové délky záření). Dipolárními materiály (voda, tuk) jsou mikrovlny pohlcovány. Kovy mikrovlny nepropouštějí, protože mají volné elektrony. Vzhledem k vlnové délce nemohou mikrovlny procházet ani malými otvory v kovech.

Elektromagnetické záření látek

Všechny předměty kolem nás vydávají elektromagnetické záření. To se v případě studených těles nachází v infračervené části spektra, která není pro lidské oko viditelná. S rostoucí teplotou tělesa se vyzařování tepelného záření přesouvá ke kratším vlnovým délkám (k vyšším frekvencím).
Nejnižší teplota, při které je záření daného tělesa pozorovatelné pouhým okem, se označuje jako **Draperův bod** – ten odpovídá zhruba **525 °C**. Při této teplotě vyzařují všechny objekty, bez ohledu na materiál, z něhož jsou vyrobeny, **červené světlo**.

Když předmět **dále zahříváme**, mění se postupně jeho barva z červené přes oranžovou a žlutou k bílé. Při ještě vyšších teplotách se záření posouvá směrem do ultrafialové oblasti. Naše oči ho pak vnímají jako namodralé.



Záření černého tělesa

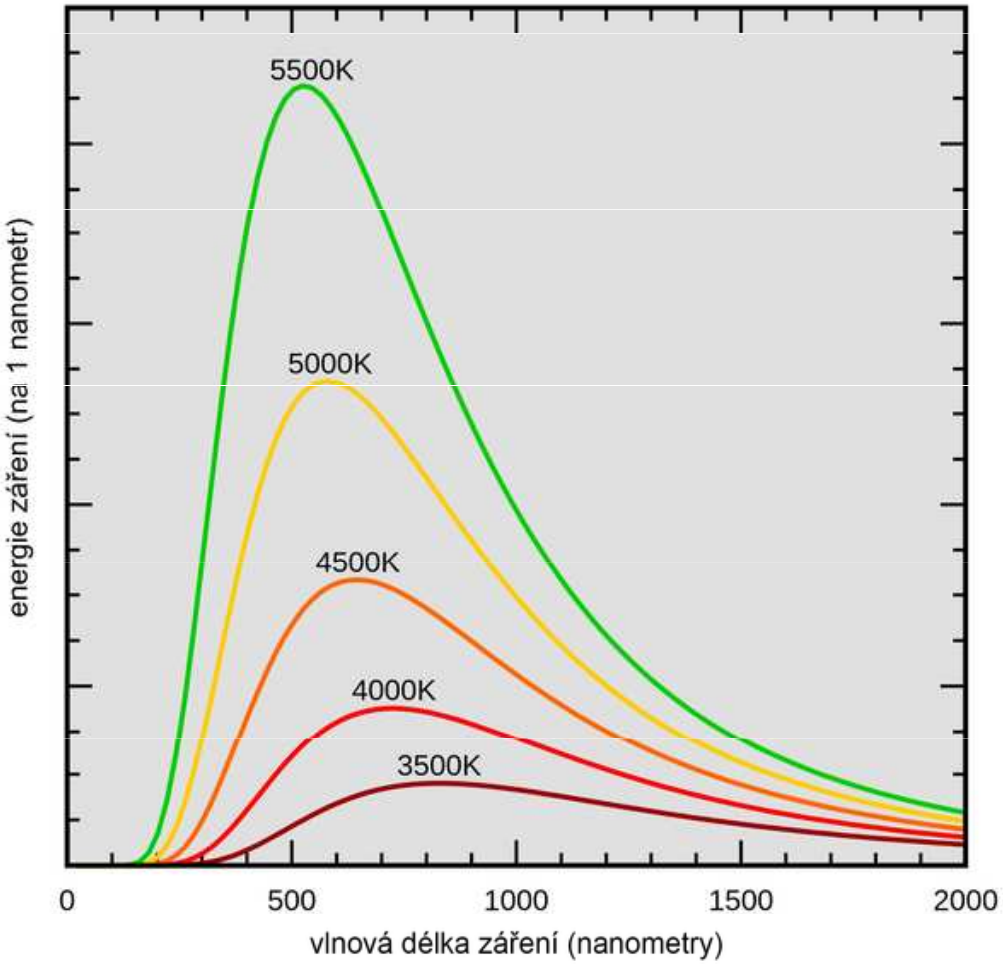
Černé těleso je fyzikální abstrakce tělesa, které dokonale pohlcuje veškerou energii dopadajícího záření. V absolutně černém tělese je v rovnováze vyzařování a pohlcování záření.

Wienův posunovací zákon

S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám.

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

b =2,9.10^{-3} m.K

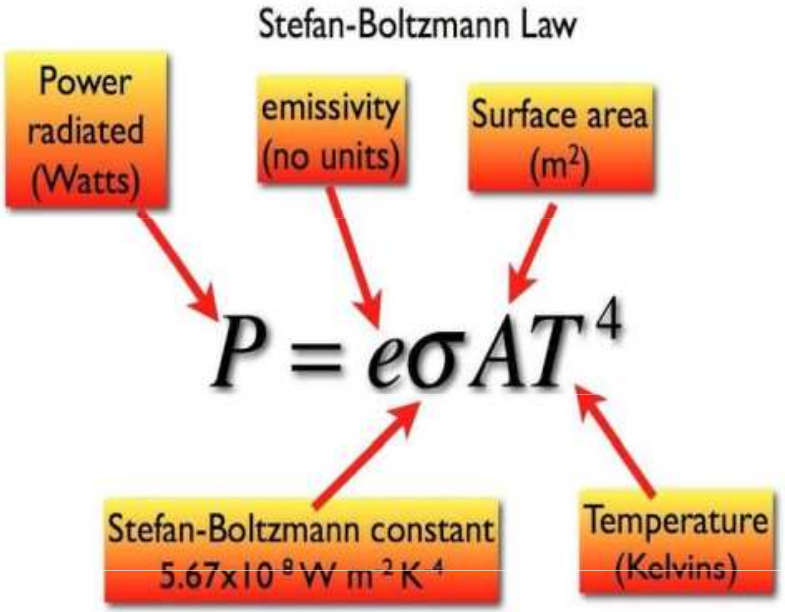


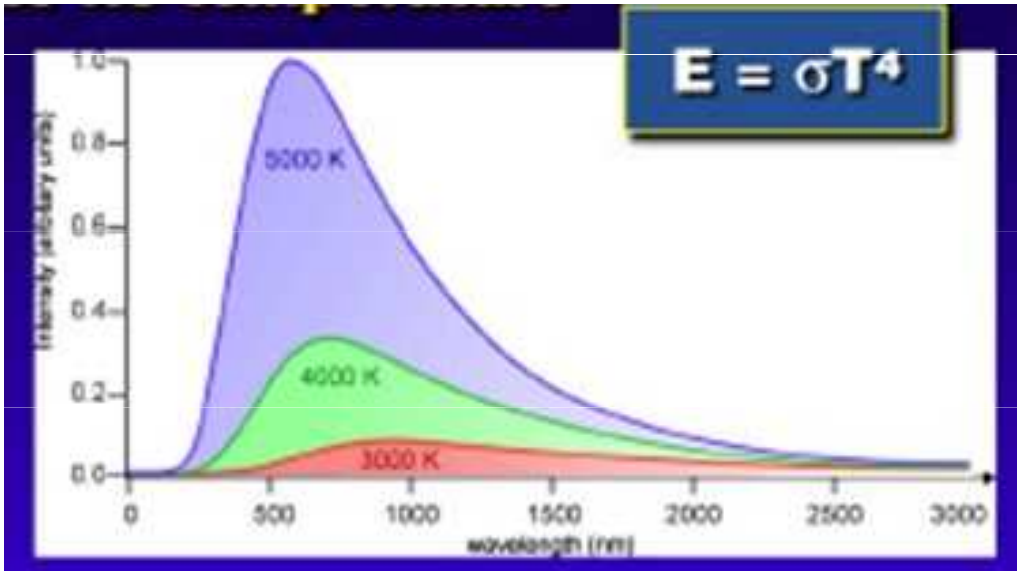
Stefanův-Boltzmannův zákon

Intenzita záření vyzařovaná absolutně černým tělesem roste úměrně čtvrté mocnině termodynamické teploty.

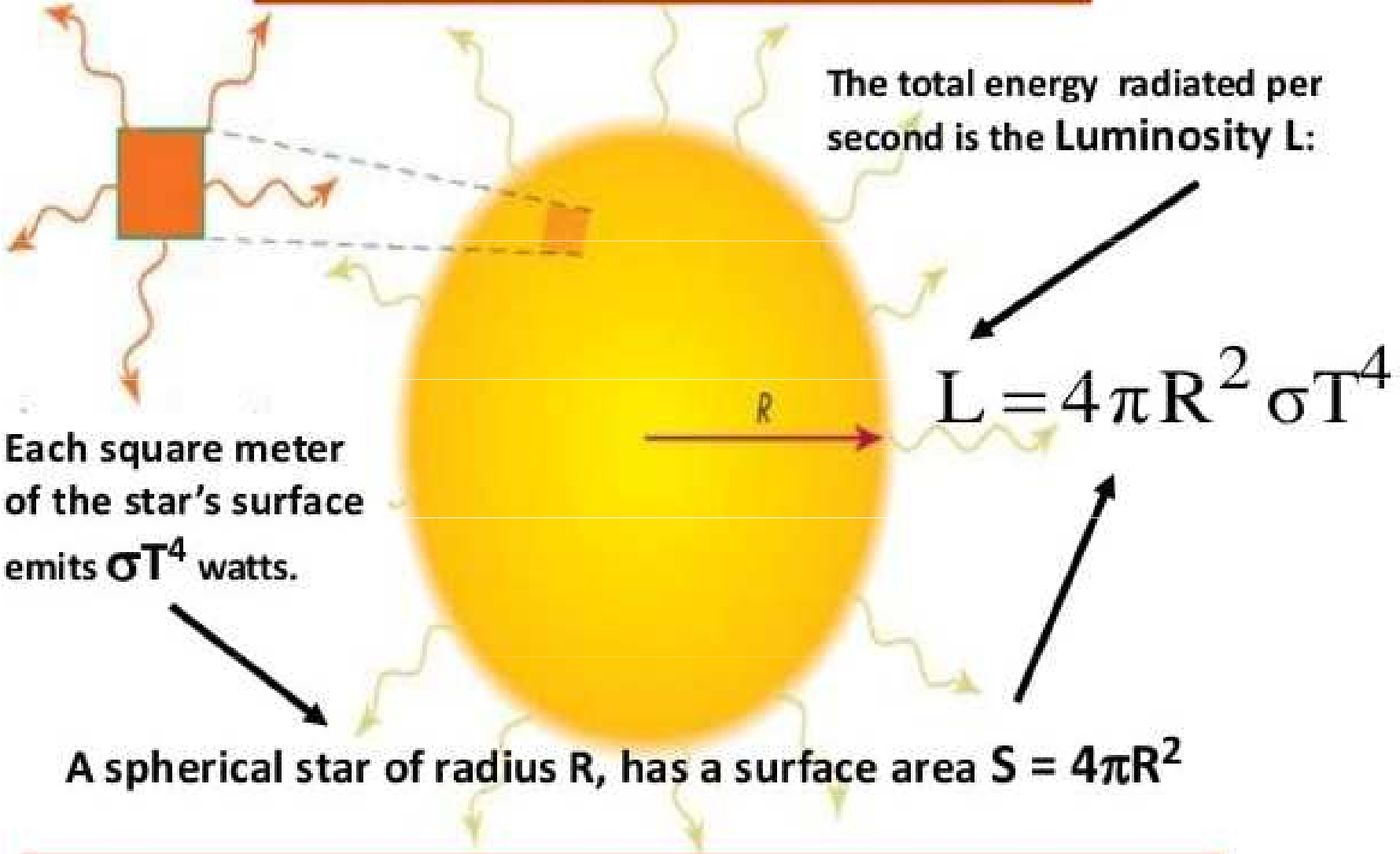
$$I = \sigma T^4$$

I – celková intenzita záření (podíl výkonu a plochy) [$W \cdot m^{-2}$]
σ - Stefan-Boltzmannova konstanta σ = $5{,}67.10^{-8}$ $W.m^{-2}.K^{-4}$
T - termodynamická teplota





The Stefan-Boltzmann Law



The total energy radiated per second is the **Luminosity L:**

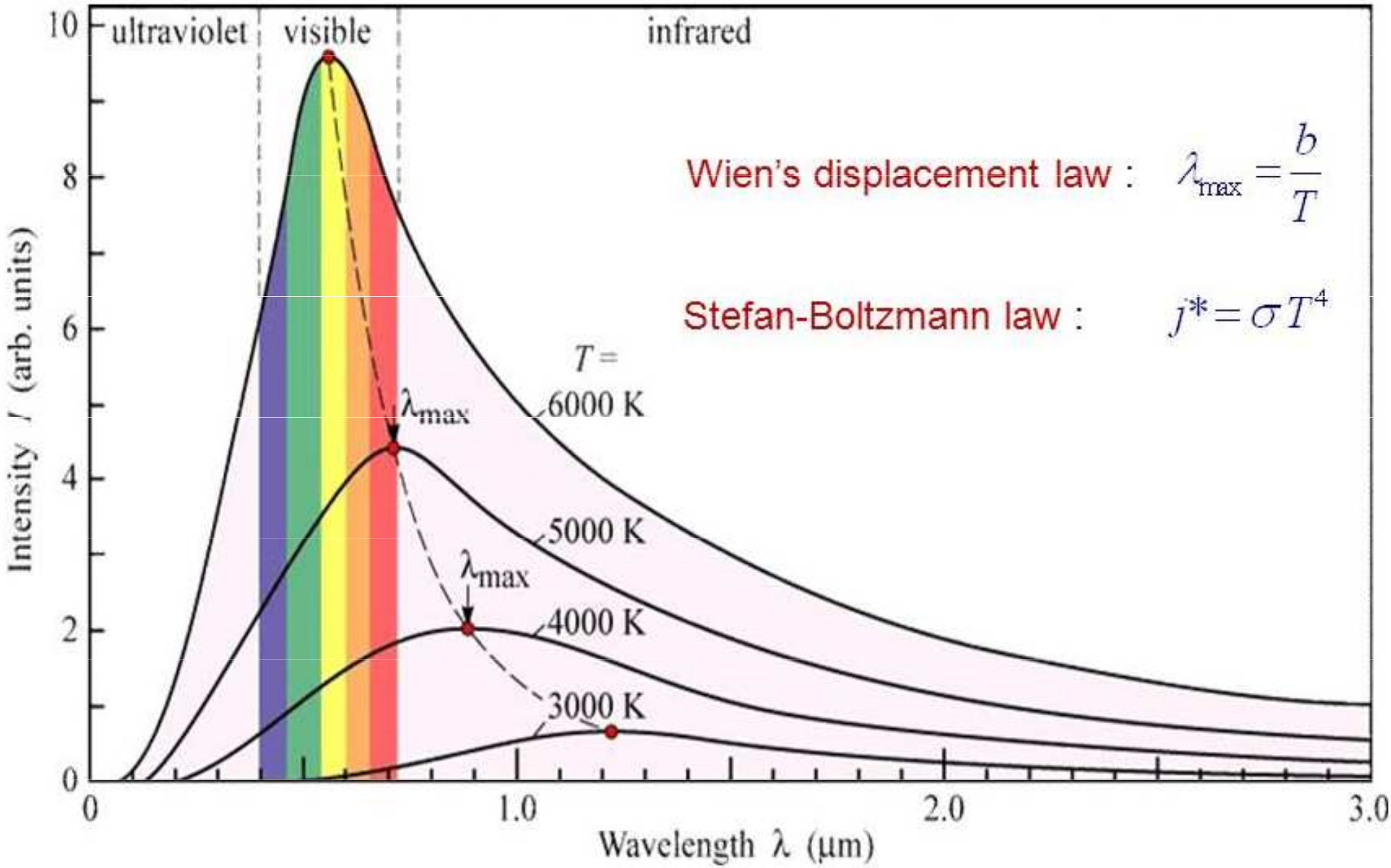
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Each square meter of the star's surface emits σT^4 watts.

A spherical star of radius R, has a surface area $S = 4\pi R^2$

A star's luminosity is related to both a star's size and temperature:
(a) Hotter stars emit more. (b) Larger stars emit more.

Blackbody Radiation



Rayleighův-Jeansův zákon

= přibližný zákon pro záření černého tělesa platný pro dlouhé vlnové délky (rádiové vlny a mikrovlny), tj. pro energii fotonu $h.\nu^4 << k.T$.

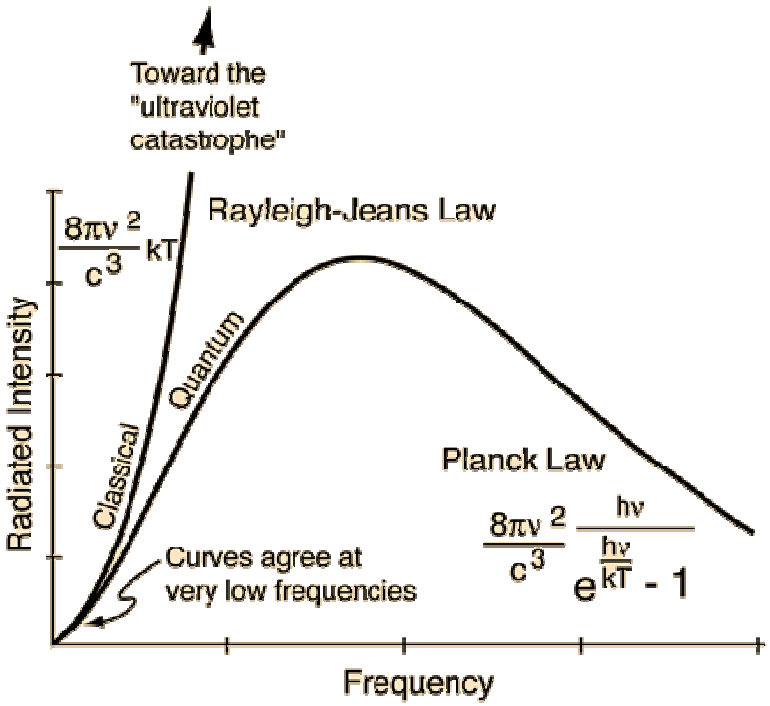
Zářivý výkon připadající na 1 m^2 povrchu černého tělesa a na jednotkový interval vlnové délky, resp. frekvence, je

$$I_\lambda = 2\pi\, c\, k\, T / \lambda^4$$

$$I_\nu = 2\pi\, c\, k\, T\, \nu^2 / c^2$$

λ ... vlnová délka záření,
T ... absolutní teplota zářiče
c ... rychlost světla
k ... Boltzmannova konstanta

Zásadní nesoulad s experimentem se objevuje u Rayleighova-Jeansova zákona od oblasti ultrafialového záření. S klesající vlnovou délkou by spektrální intenzita vyzařování měla růst do nekonečna a absolutně černé těleso by vydávalo tepelné záření o nekonečném výkonu (tzv. **ultrafialová katastrofa**).



Planckův vyzařovací zákon

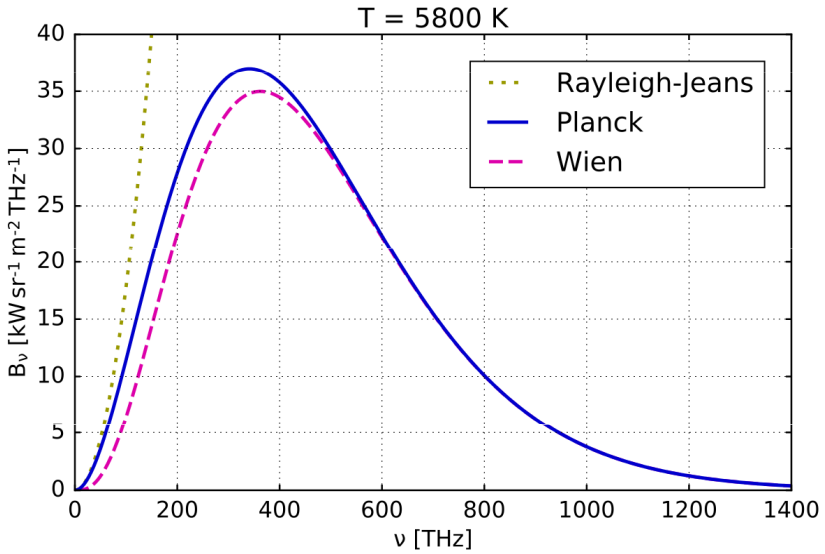
Planckův vyzařovací zákon vyjadřuje závislost intenzity záření absolutně černého tělesa na frekvenci ω.

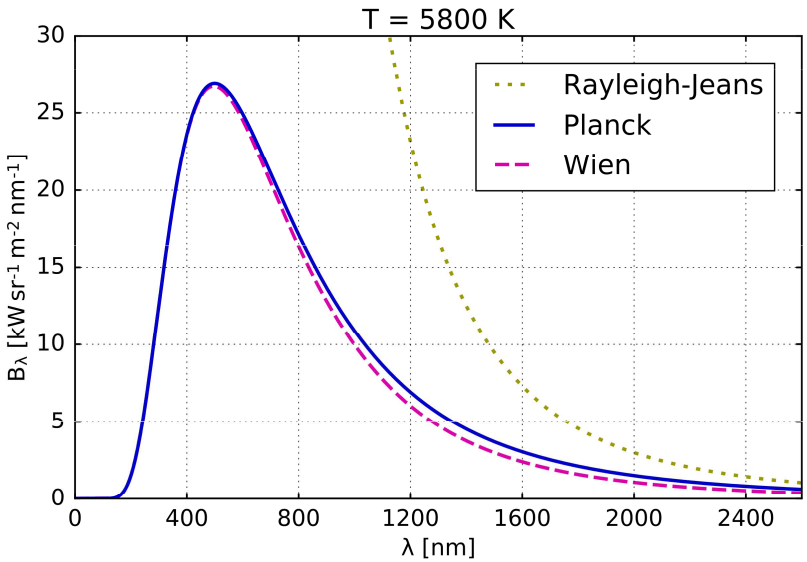
$$u(\nu)\,d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{\left(e^{\frac{h\nu}{kT}}-1\right)}\,d\nu$$

Záření o frekvenci f může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti e = h . ν

$$B_\nu(\nu,T) = \frac{2h\nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_BT}}-1}$$

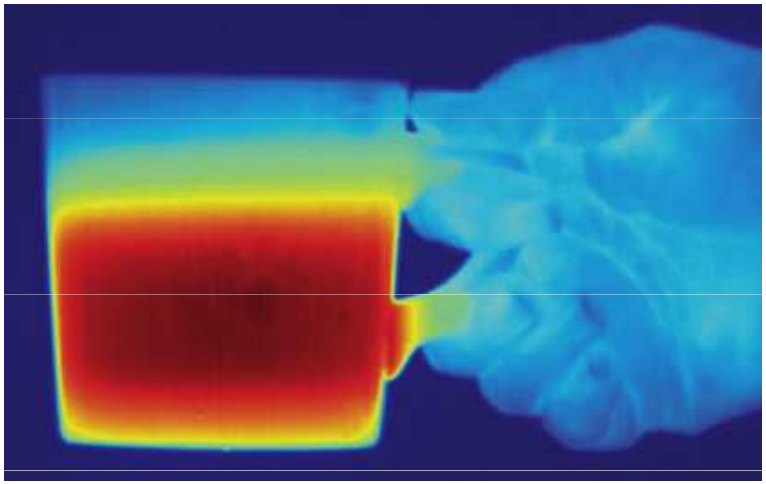
$$B_\lambda(\lambda,T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{\lambda k_BT}}-1}$$

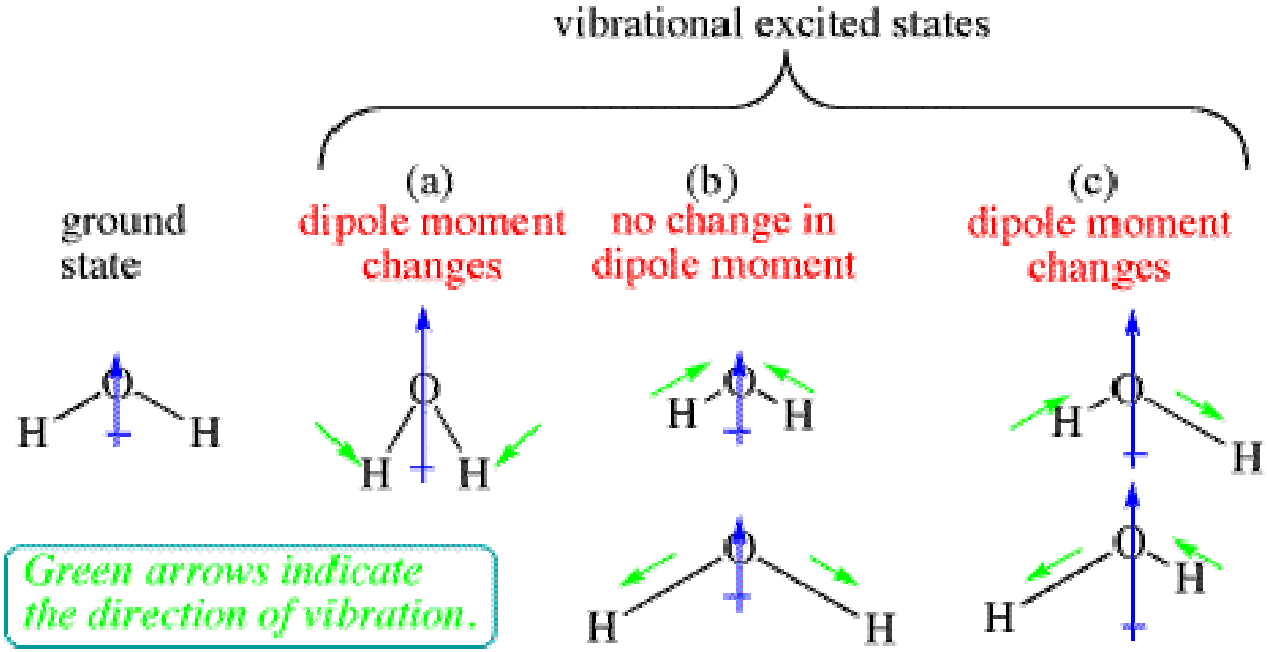


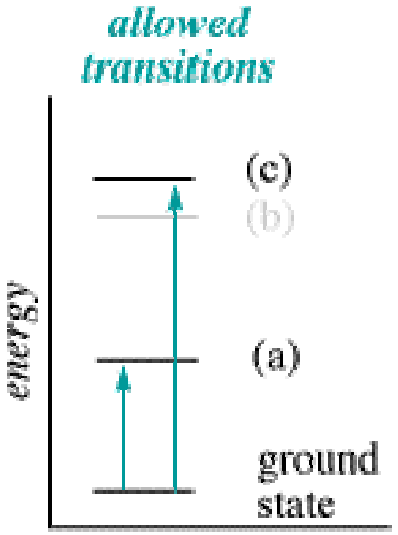


Infračervené záření (IR)

= tepelné záření, neviditelné okem, jeho zdrojem je každé těleso které má teplotu vyšší než je absolutní nula. Při pohlcování se IR záření mění na vnitřní energii pohlcujícího tělesa (těleso se ohřívá).



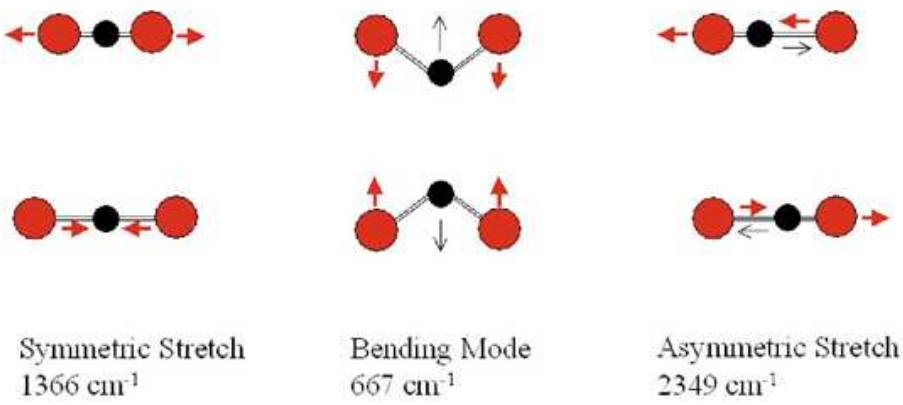


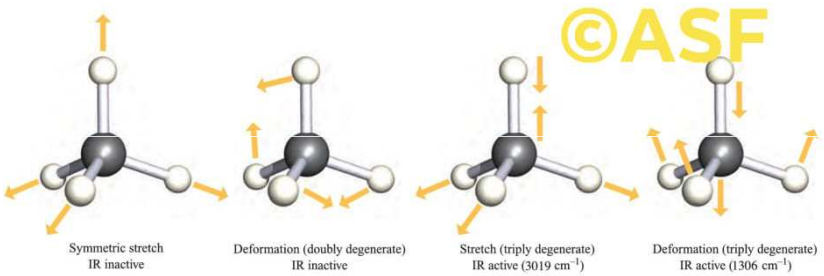


Příklad

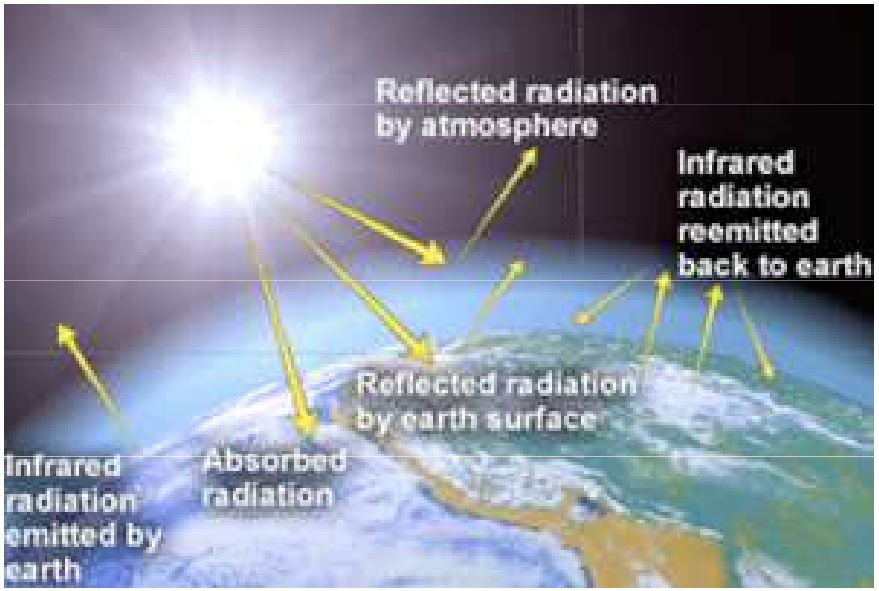
Oxid uhličitý nemá v základním stavu molekulový dipól. Některé vibrace molekul CO_2 vytvářejí struktury s molekulovým dipólem. Z tohoto důvodu CO_2 silně absorbuje infračervené záření. Podobně se chová i *methan, vodní pára* a další **skleníkové plyny**. Tyto plyny absorbují infračervené záření ze zemského povrchu a emitovat je zpět ve všech směrech.

U hlavních plynů atmosféry, N_2 a O_2, k absorpci nedochází a záření prochází atmosférou do vesmíru.

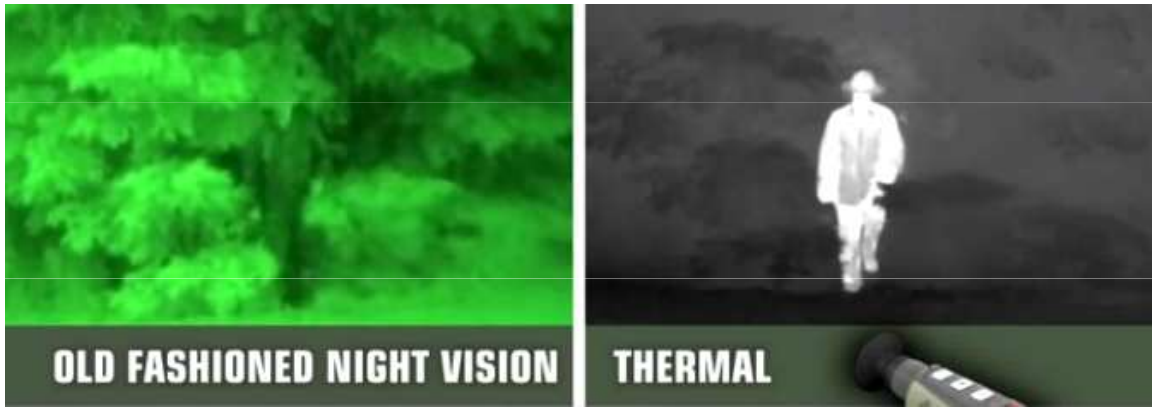




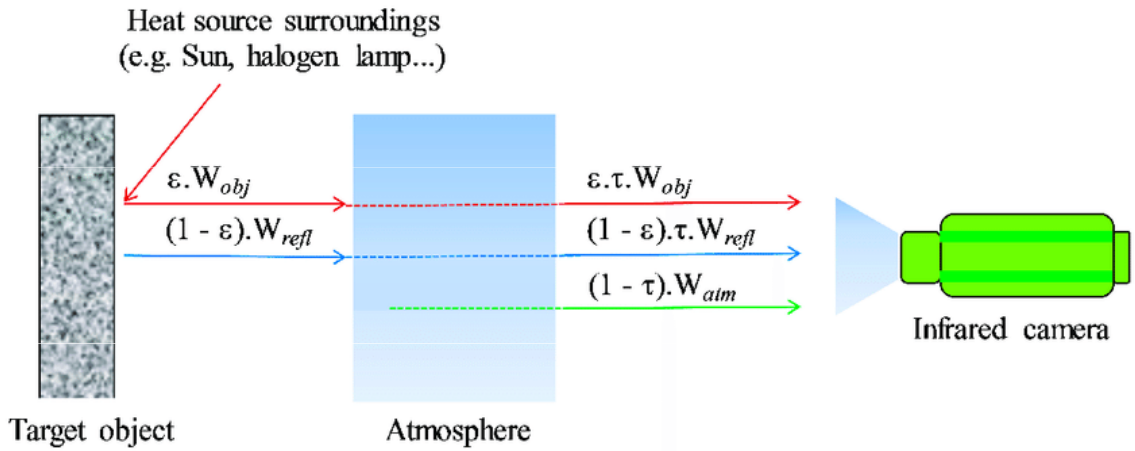
Gas	Current concentration	Residence time, in years	Relative global warming efficiency, 100-year horizon
CO_2	373 ppm	50–200	1
CH_4	1.77 ppm	12	23
N_2O	316 ppb	120	296
CFC-11	0.26 ppb	45	4600
HCFC-22	0.15 ppb	12	1700
HFC-134a	0.01 ppb	14	1300
Halon-1301	0.003 ppb	65	6900



Noční vidění a termokamery

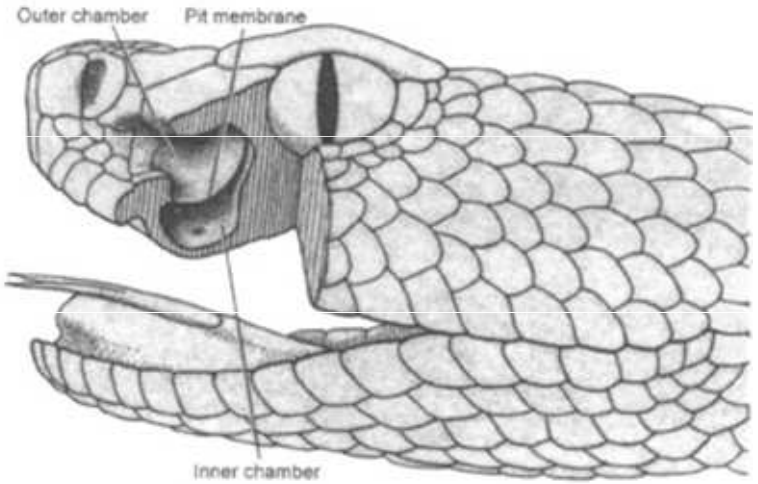


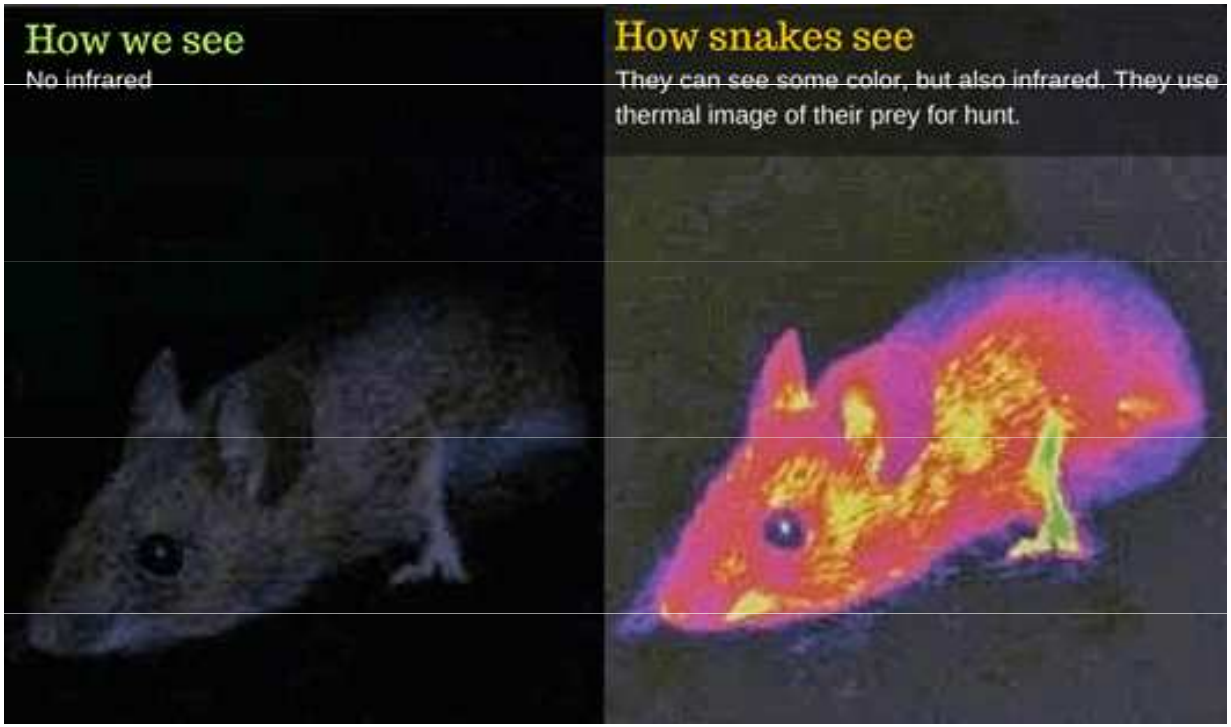
Termografie = analýza infračervené energie vyzařované tělesem. Termografickým měřicím systémem lze zobrazit teplotní pole na povrchu sledovaného objektu. Infračervené záření je pro lidské oko neviditelné, proto se termovizní snímky vizualizují za použití okem viditelných palet, které přiřazují barvu různým teplotám (různému množství tepelného toku).

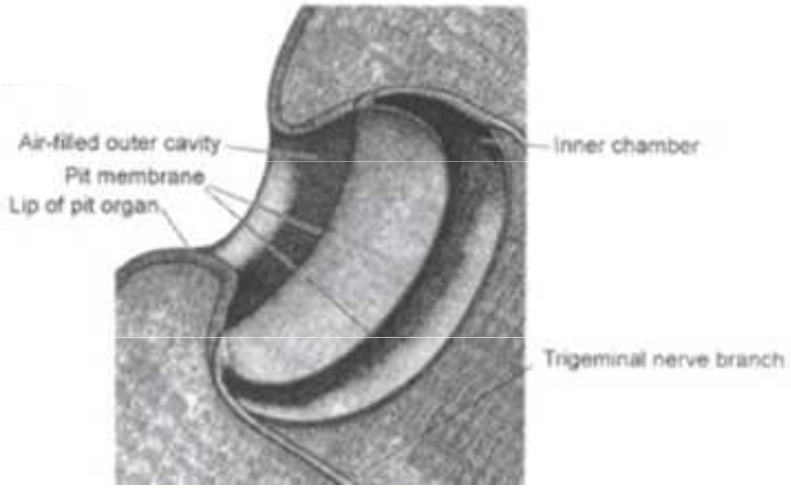


Detekce infračerveného záření u hadů

Zmije, krajty a hroznýši mají na tváři otvory, tzv. jamkové orgány, které obsahují membránu schopnou detekovat infračervené záření až do vzdálenosti jednoho metru. V noci umožňují hadům "vidět" obraz predátora nebo kořisti (podobně jako infračervená kamera).





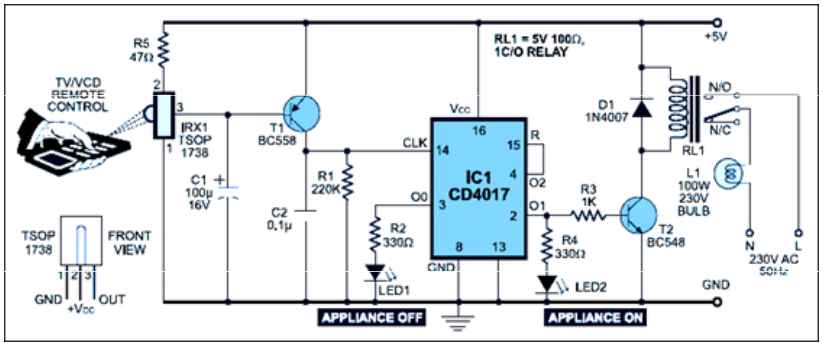


Upír obecný *(Desmodus rotundus)*

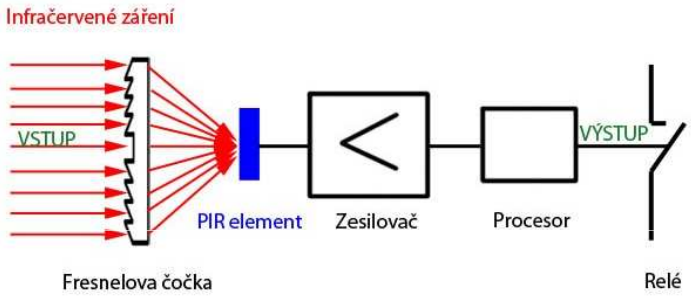
- čidlo tepelného záření se nachází v čumáku upíra, anatomicky je podobné obdobnému orgánu hadů.

Dálkové ovladače

IR ovladač vysílá do přijímacího zařízení neviditelný světelný paprsek v infračerveném spektru (např. TV ovladač).

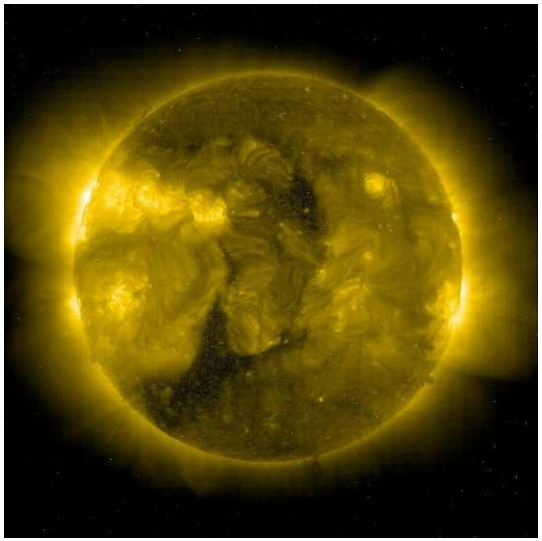


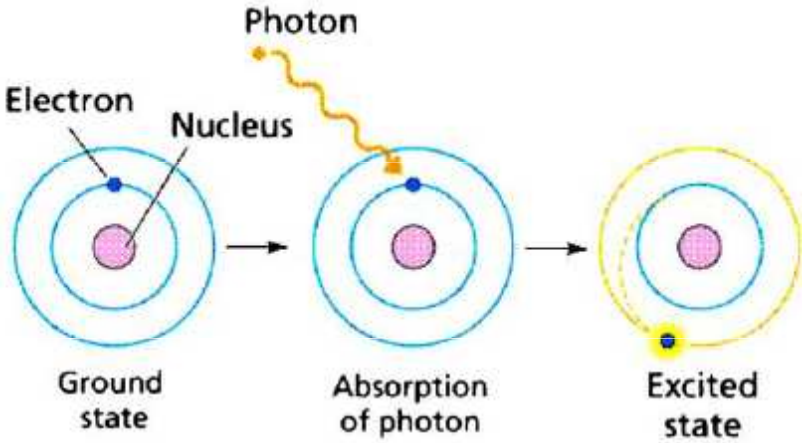
Pasivní pohybové čidlo (PIR) detekuje pohyb lidí, zvířat a dalších objektů. Běžně se používají pro alarmy proti zlodějům a automaticky aktivovatelné světelné systémy.

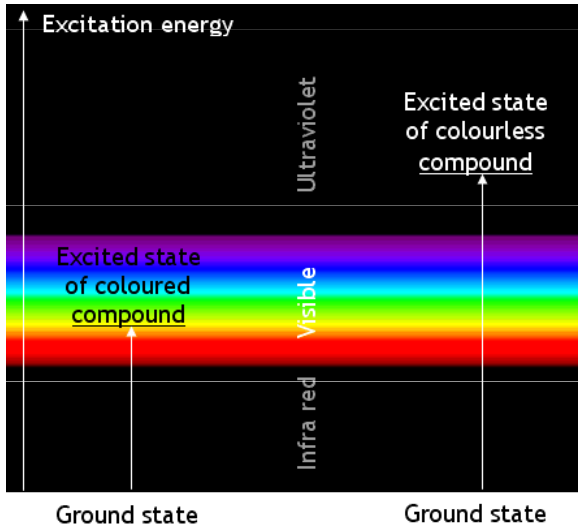


Ultrafialové záření (UV)

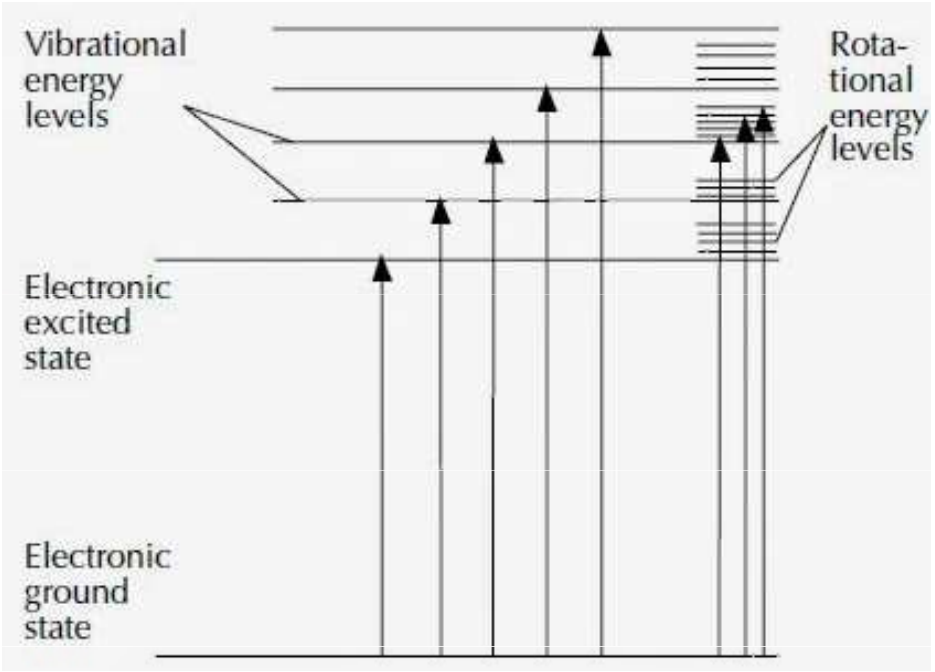
= elektromagnetické záření o vlnové délce kratší, než má světlo fialové barvy (λ = 390 nm). Zdrojem UV záření jsou tělesa zahřátá na velmi vysokou teplotu (hvězdy), rtuťové výbojky (horské slunce), elektrický oblouk (sváření).



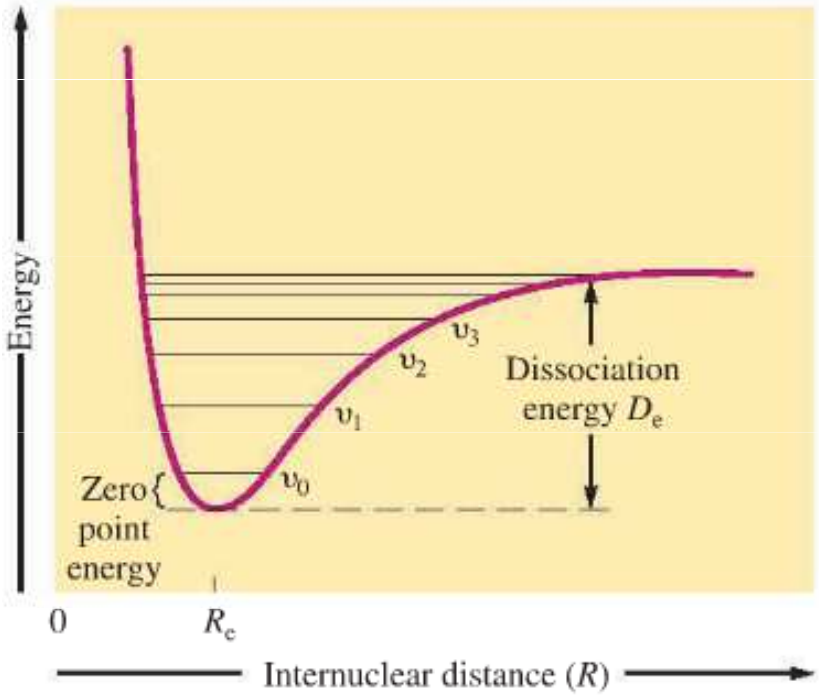




Ultrafialové záření (UV)



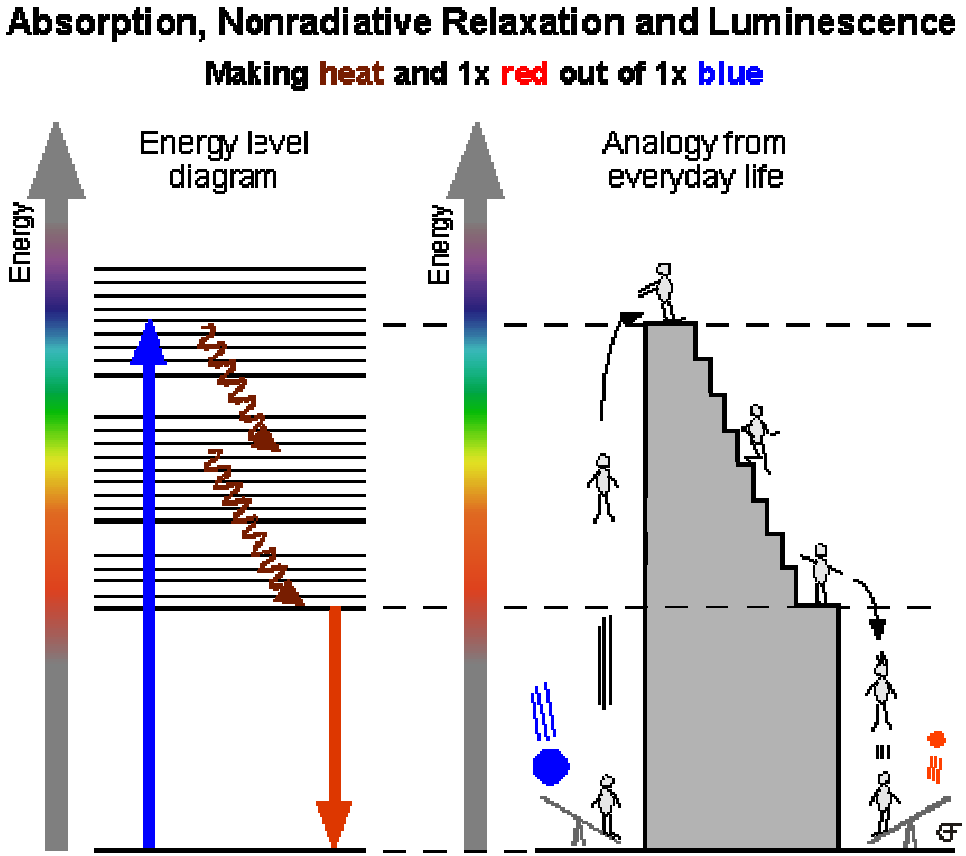
Type of bond	Dissociation energy (eV)
C=O	7.1
C=C	6.4
O–H	4.8
N–H	4.1
C–O	3.6
C–C	3.6
S–H	3.5
C–N	3.0
C–S	2.7



= je pohlcováno obyčejným sklem

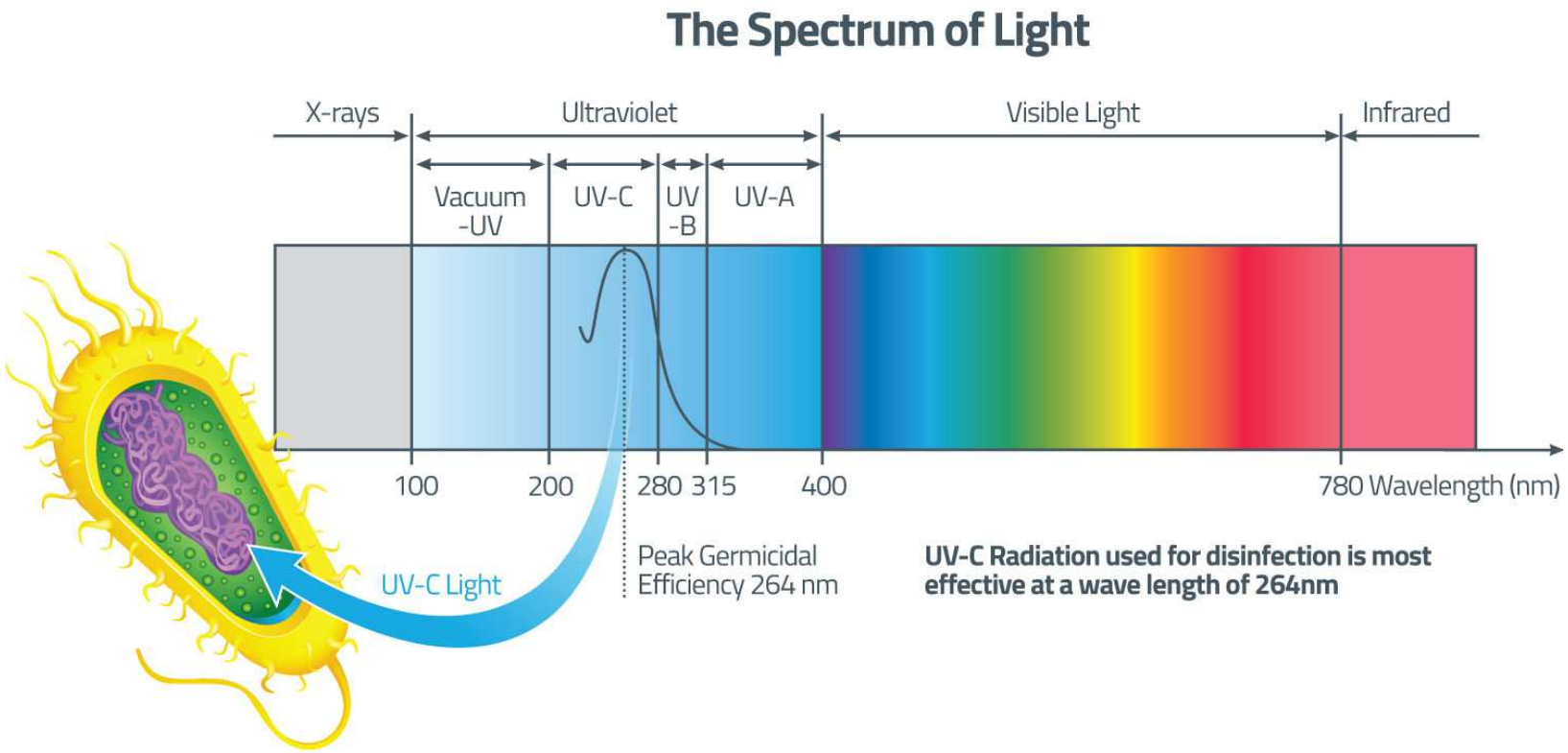
Luminiscence

Záření o kratší vlnové délce λ vyvolává v látce určitého složení vznik záření o delší vlnové délce λ´.



Luminofor = látka, u které se projevuje luminiscence (v zářivkách se s jejich pomocí UV záření rtuťové výbojky mění na viditelné).

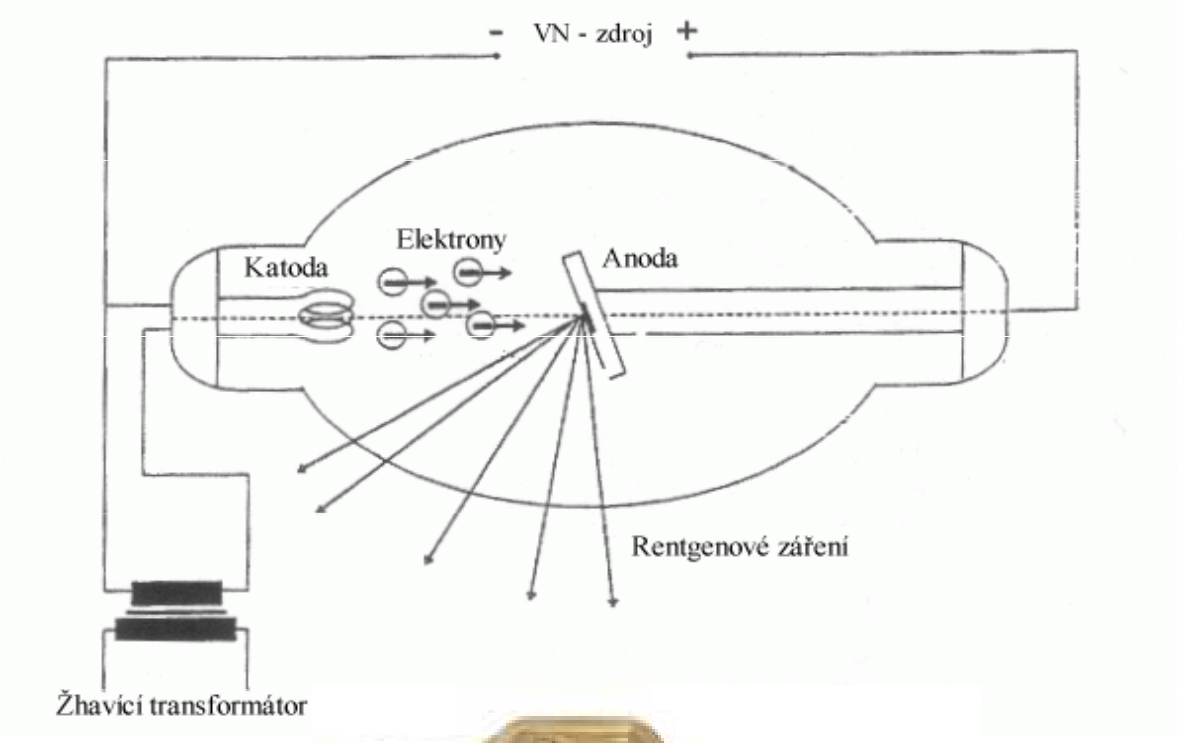
působí jako desinfekce – ničí mikroorganismy
způsobuje zánět spojivek, v menších dávkách zhnědnutí kůže a produkci vitamínu D, ve vyšších dávkách rakovinu kůže
jako přirozená ochrana proti UV záření slouží ozónová vrstva



Rentgenové záření

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění, jehož vlnové délky leží v intervalu 10^{-8} m až 10^{-12} m. Vzniká v rentgenové lampě (rentgence) při přeměně energie rychle se pohybujících elektronů na energii elektromagnetického záření

Rentgenové záření vzniká změnami elektromagnetického pole v atomovém obalu (rozměry atomu 10^{-8} – 10^{-10} m)



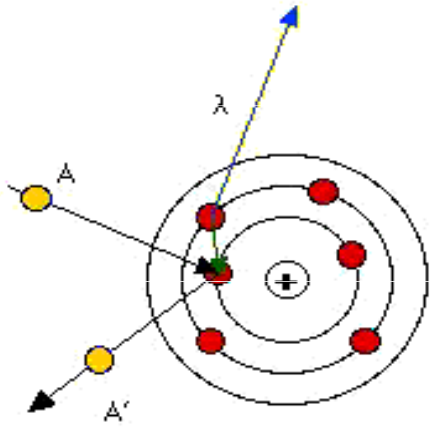
Druhy rentgenového záření:

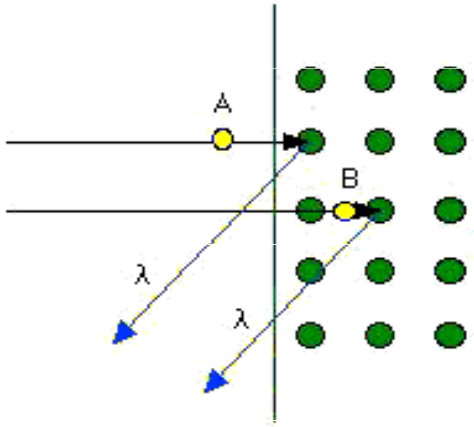
charakteristické (čárové)

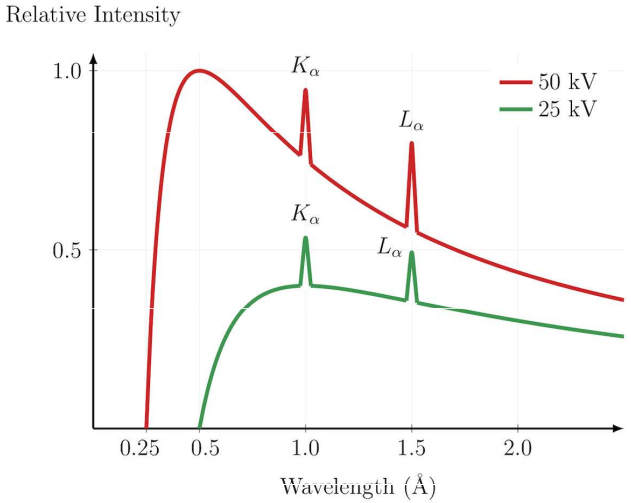
brzdné (spojité)

Charakteristické rentgenové záření

vzniká v důsledku přeměn energie ve vnitřních slupkách elektronového obalu atomu. Spektrum má čárové a poloha spektrálních čar je pro daný prvek charakteristická







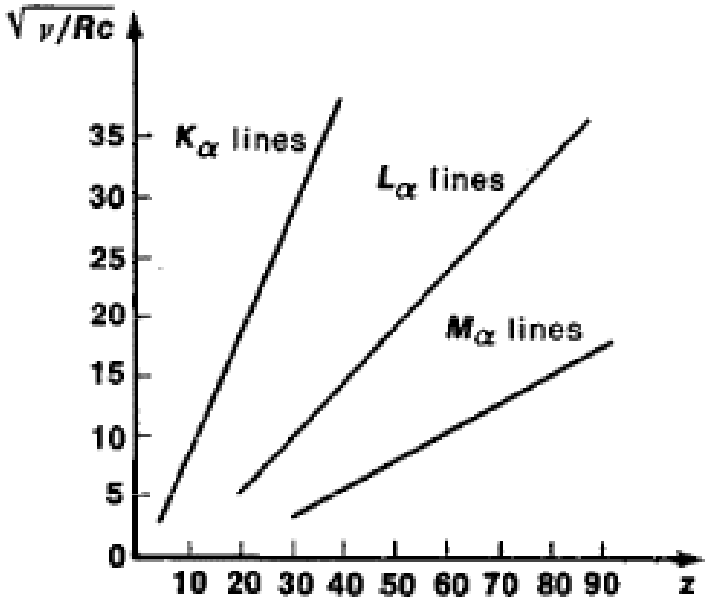
Moseleyho zákon

Vztah mezi vlnovou délkou (frekvencí) rentgenového záření produkovaného chemickými prvky a jejich atomovým číslem.

$$\sqrt{\nu} = a(Z - b)$$

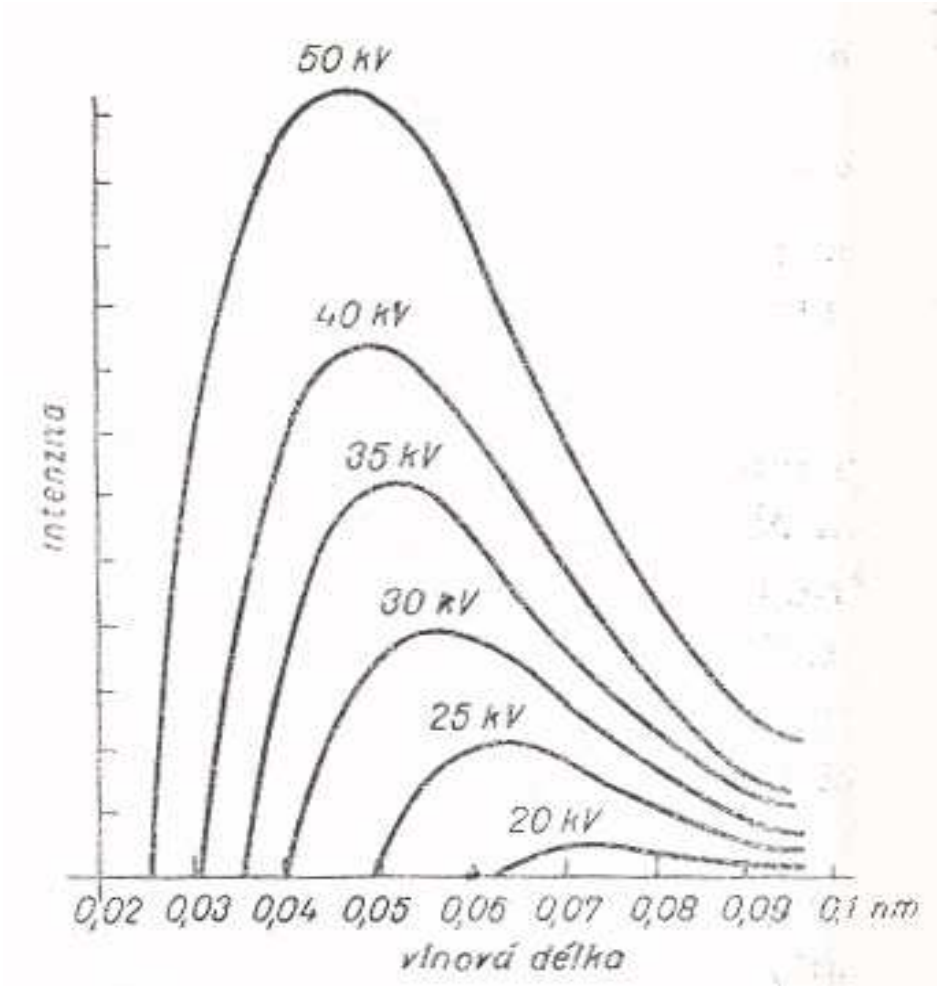
a, b jsou charakteristické (materiálové) konstanty

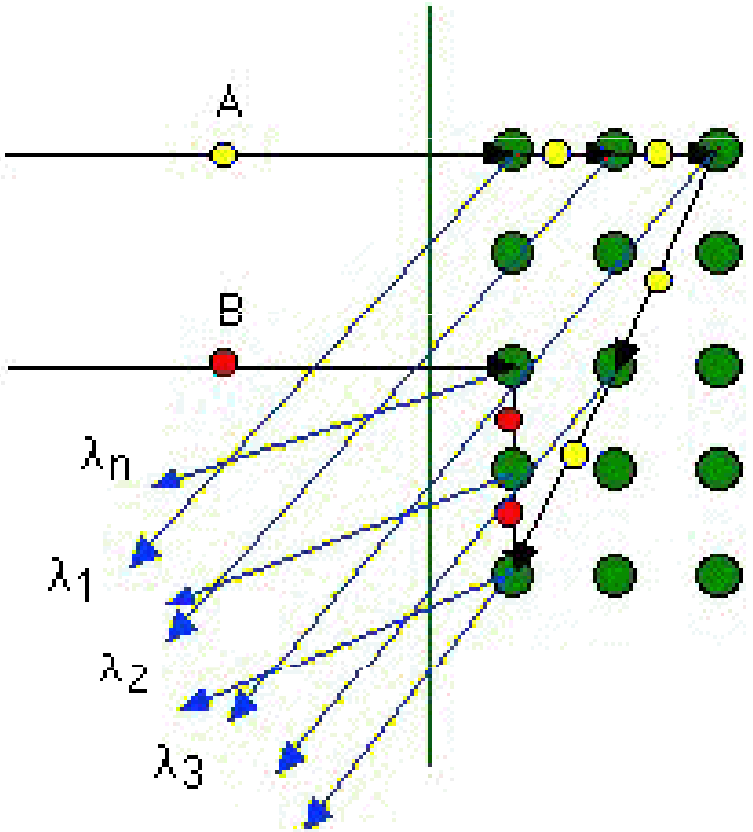
Z je atomové číslo prvku



Brzdné rentgenové záření

vzniká jako důsledek náhlé změny rychlosti elektronů dopadajících na povrch kovu (anodu rentgenky). Spektrum je spojité.



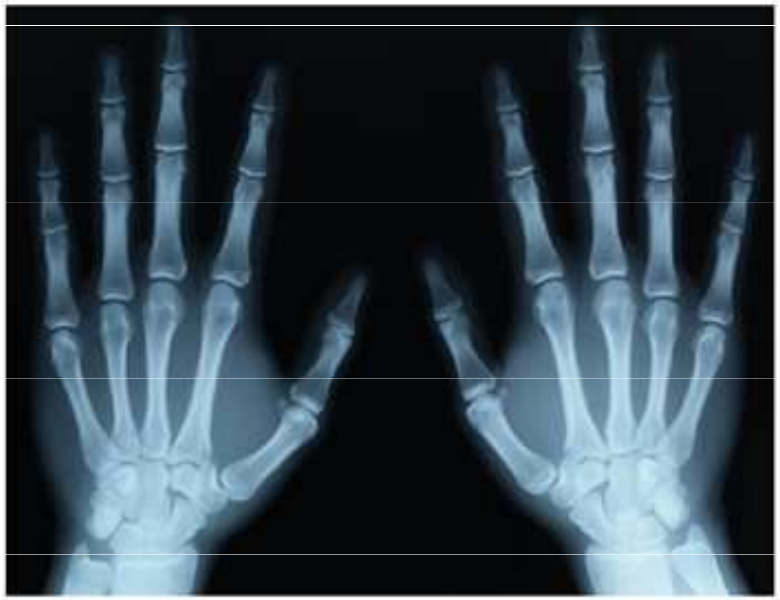


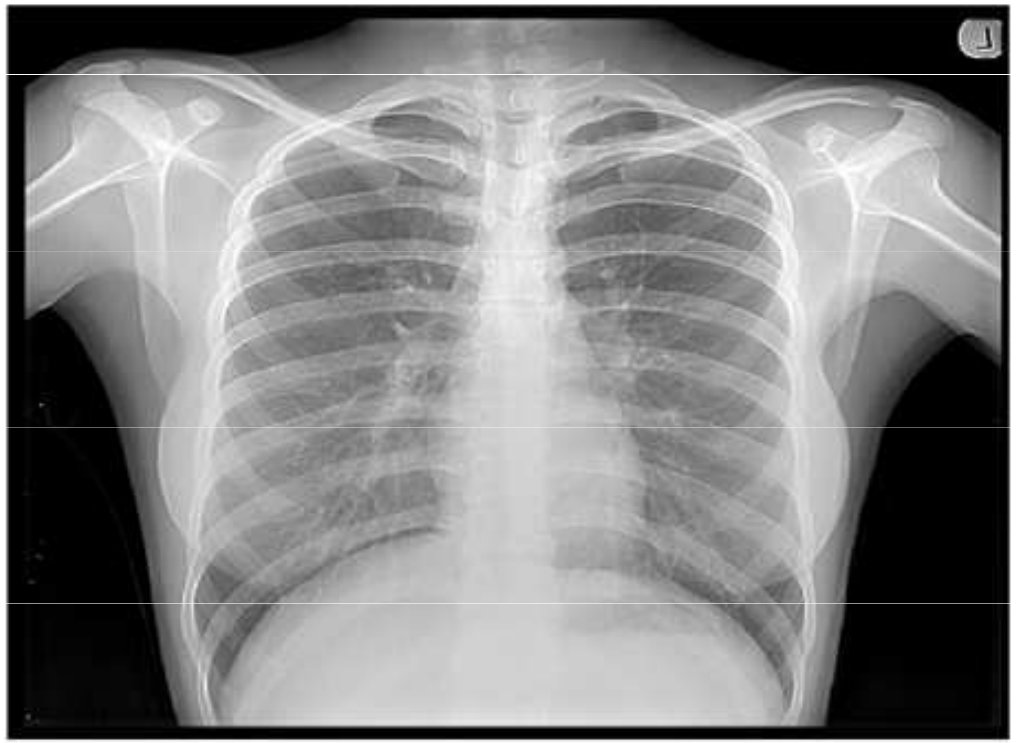
Vlastnosti RTG záření:

ionizuje vzduch

při dopadu na vhodnou látku vyvolá fluorescenci

využívá se v lékařství, rentgenové defektoskopii, astronomii (zbytky supernov, neutronové hvězdy, černé díry)





Gama záření

zdrojem záření γ jsou tělesa, v jejichž atomových jádrech probíhají radioaktivní přeměny, doprovází záření β nebo α

Vlastnosti γ záření:

nejpronikavější jaderné záření

lze jej zeslabit silnou vrstvou železobetonu nebo materiálem obsahujícím jádra těžkých prvků (Pb)

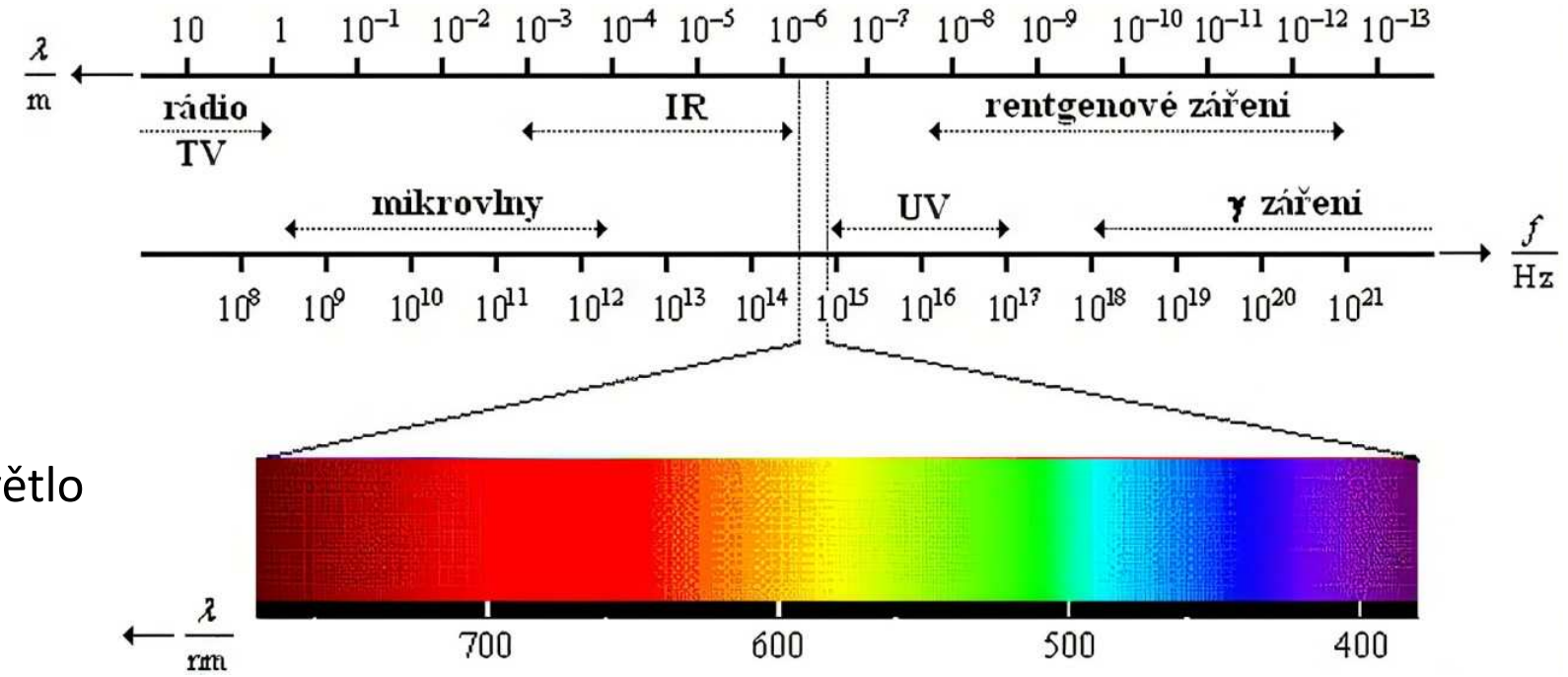
má silné ionizační účinky a v důsledku fotoefektu uvolňuje z látek nabité částice

používá se v defektoskopii (zjišťování vad v součástkách)

způsobuje genetické změny, nemoc z ozáření

Světlo

Světlo (viditelné záření) je součástí spektra elektromagnetického záření, lidské oko vnímá elektromagnetické vlnění o frekvencích $7{,}6 \cdot 10^{14}$ Hz – $3{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz.



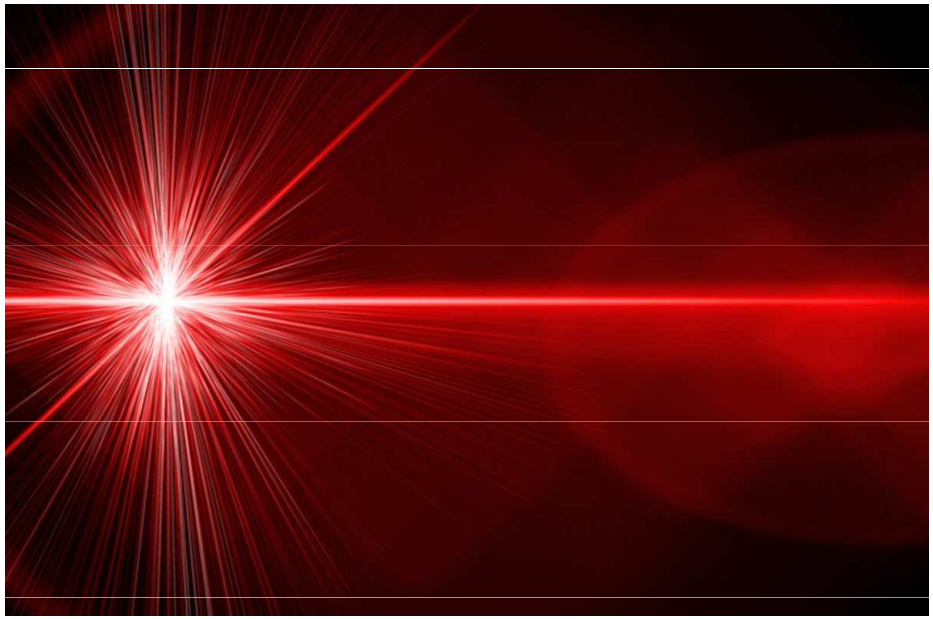
Bílé světlo

Rychlost světla ve vakuu je $c = 3 \cdot 10^5$ km·s^{-1}, rychlost ve vzduchu je přibližně stejná jako ve vakuu. Ve vodě rychlost světla dosahuje hodnoty přibližně 225 000 km·s^{-1} a ve skle 200 000 – 150 000 km·s^{-1}.

Světelné spektrum je část elektromagnetického spektra, ve kterém je zobrazena závislost barev světla na vlnových délkách.

Chromatické světlo: složené ze světla více vlnových délek, např. bílé světlo (složené ze sedmi barev)

Monochromatické světlo: pouze jedna vlnová délka, např. laser



Emisní spektrum

Soubor frekvencí elektromagnetického záření vyzařovaného látkou.

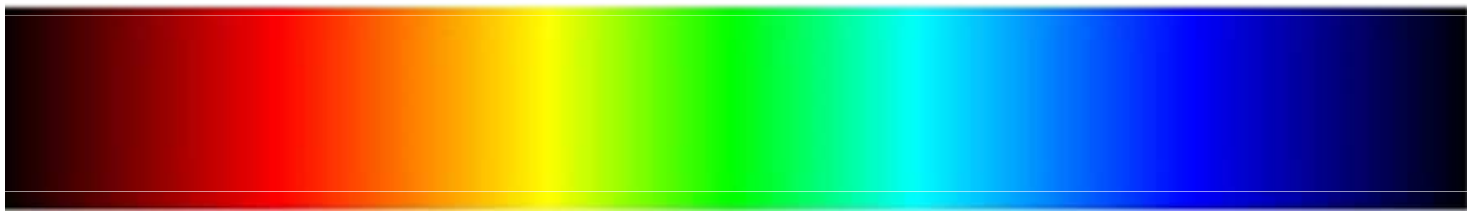
a) Spojité spektrum

b) Čárové spektrum

c) Pásové spektrum

Spojité spektrum

obsahuje elektromagnetické vlny všech vlnových délek v určitém intervalu, zdroj: rozžhavené pevné a kapalné látky(např. vlákno žárovky, roztavené kovy, …)



Čárové spektrum

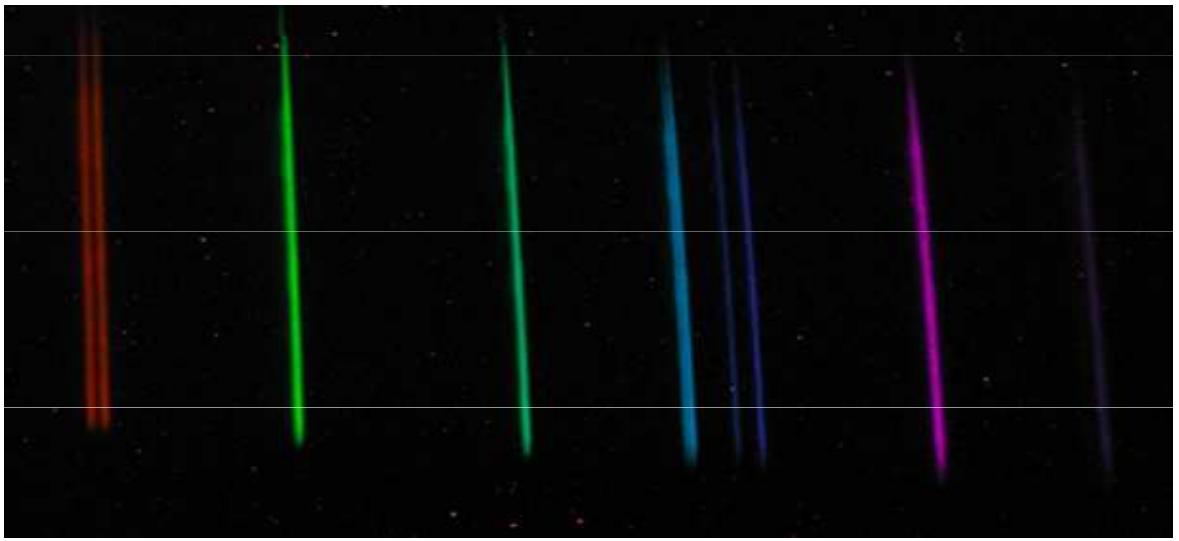
tvořené úzkými, navzájem oddělenými spektrálními čárami o různé intenzitě, zdroj: výboj v plynu za sníženého tlaku jiskrový výboj.

emisní spektrum sodíku

Pásové spektrum

tvořené pásy s množstvím spektrálních čar těsné blízkosti, mezi nimiž jsou temné úseky, zdroj: zářící molekuly látek.

emisní spektrum směsi par kadmia, rtuti a zinku



Absorpční spektrum

Soubor temných čar (pásů ve spojitém spektru světla), které vznikají při pohlcování záření látkou.

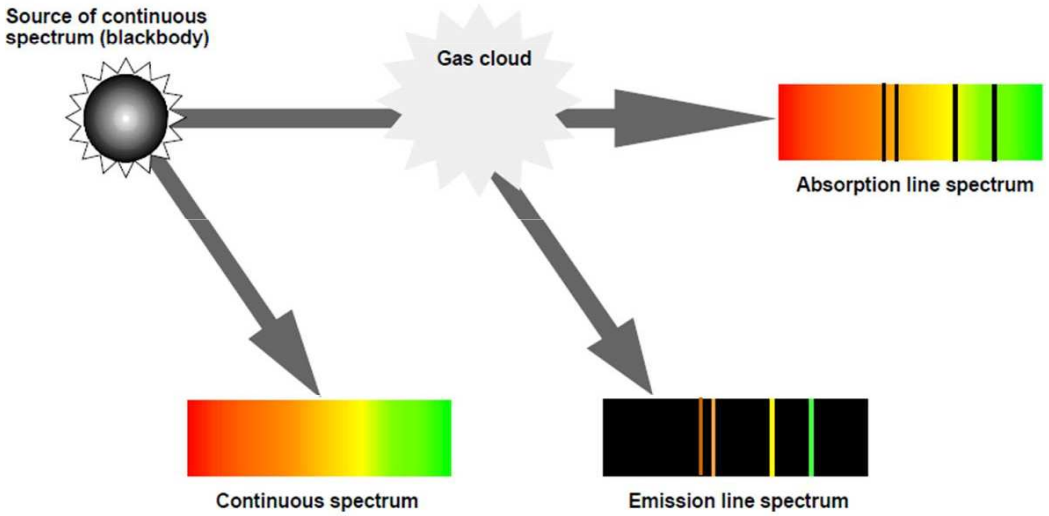
a) Čárové spektrum

b) Pásové spektrum

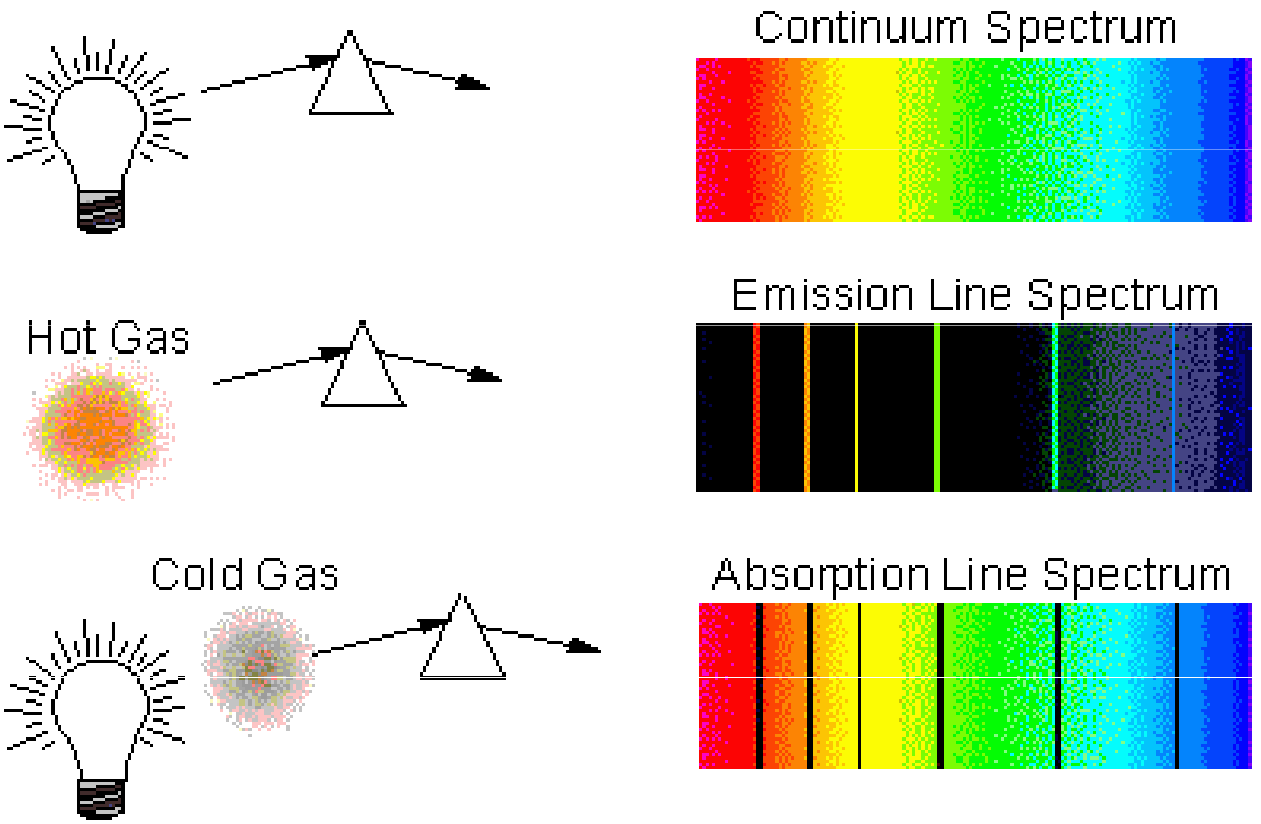
Na rozdíl od emisních spekter nemusíme vzorek látky rozžhavit na velmi vysokou teplotu.

Kirchhoffův zákon

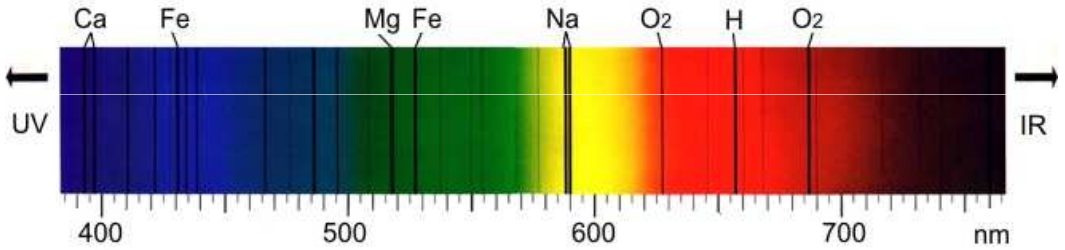
Sloučíme-li emisní a absorpční spektrum stejné látky, získáme spektrum spojité.



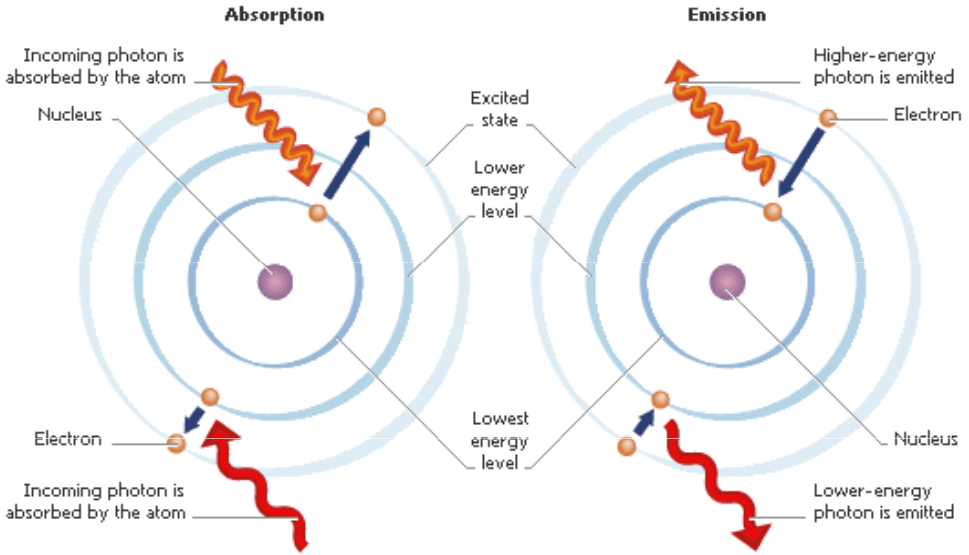
Emisní a absorpční spektra

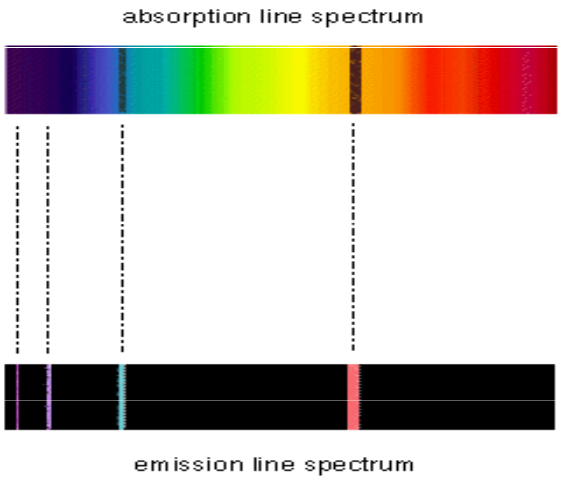


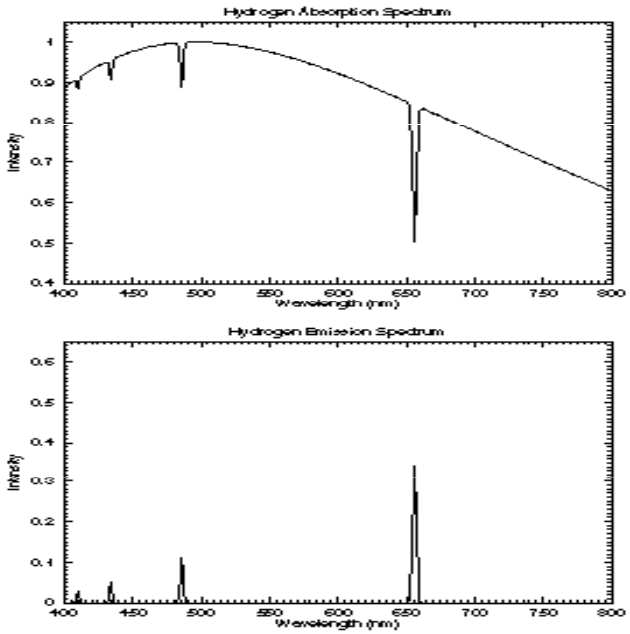
Fraunhoferovy čáry ve slunečním spektru jsou důsledkem absorpce světla atomy různých prvků ve sluneční atmosféře.



Zdroj záření, spektrum
(čárové, pásové, spojité)







Two ways of showing the same spectra: on the **left** are pictures of the dispersed light and on the **right** are plots of the intensity vs. wavelength. Notice that the pattern of spectral lines in the absorption and emission line spectra are the **same** since the gas is the same.

Míchání barev

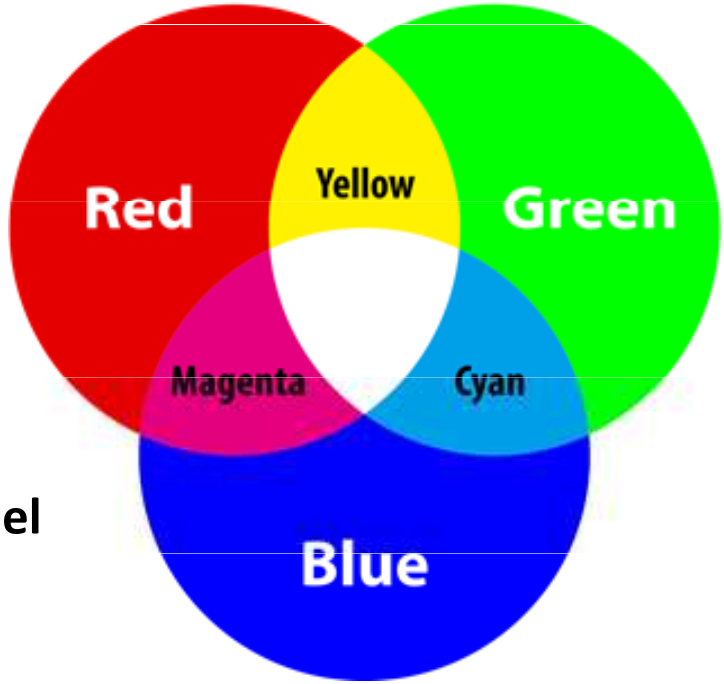
Aditivní (součtové) - RGB

Jednotlivé složky barev se sčítají a vytváří světlo větší intenzity. Smícháním dvou základních barev vznikne **komplementární** (**doplňková**) barva k třetí základní barvě. Princip aditivního míchání barev se uplatňuje na počítačových monitorech a TV obrazovkách.

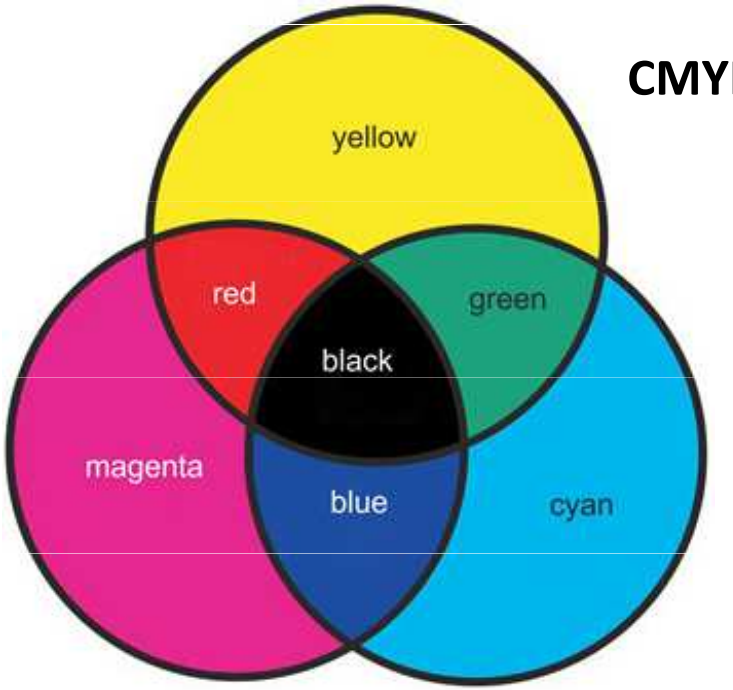
Subtraktivní (odčítací) CMYK

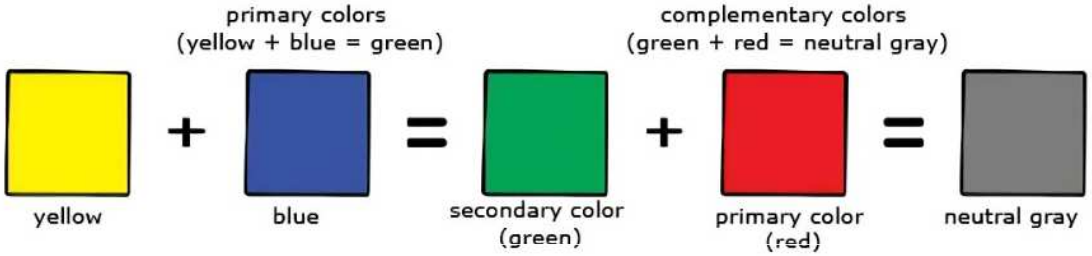
S každou další přidanou barvou se ubírá část původního světla. Využití v barevných tiskárnách.

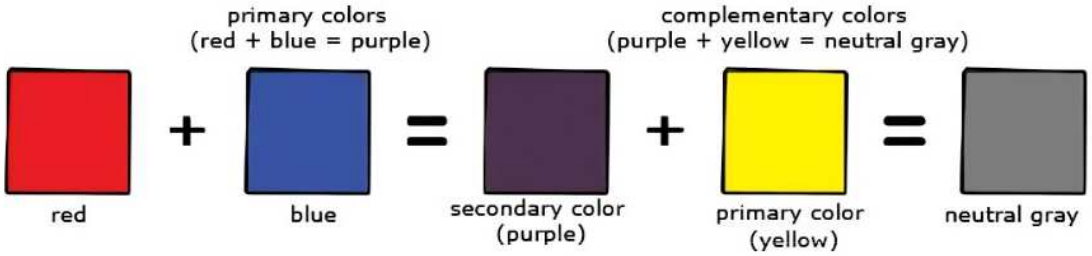
RGB model

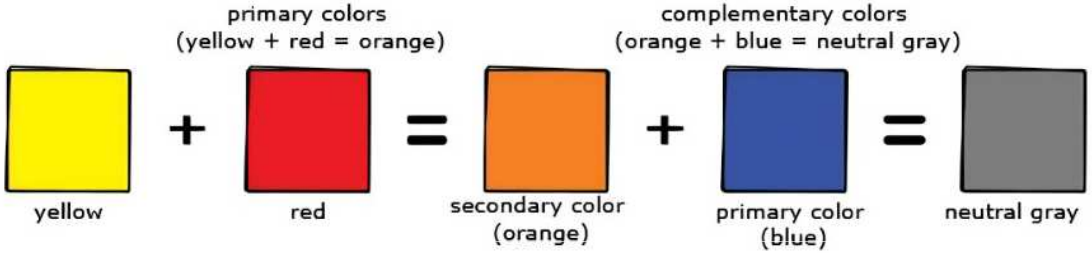


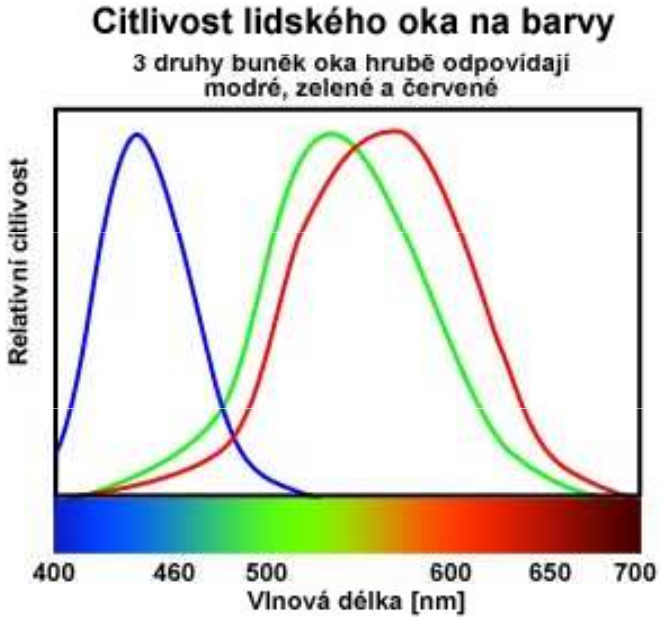
CMYK model

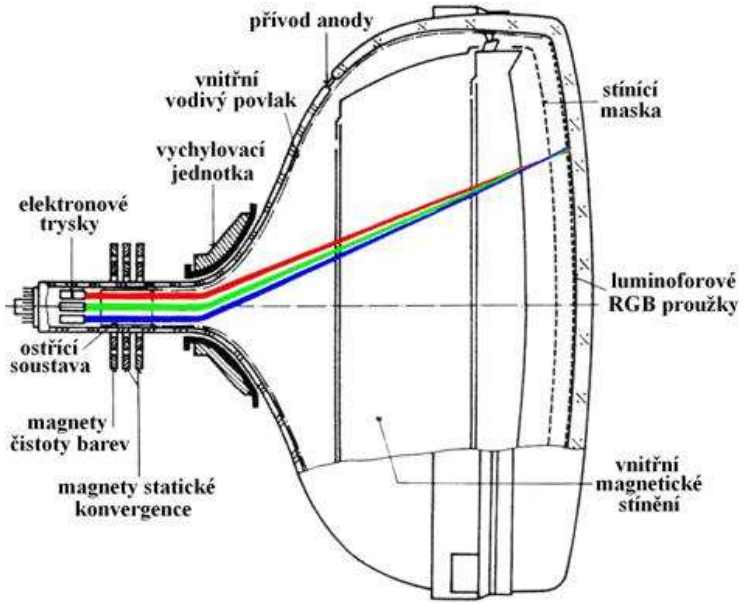



primary colors
(yellow + blue = green)
complementary colors
(green + red = neutral gray)
yellow
blue
secondary color
(green)
primary color
(red)
neutral gray


primary colors
(red + blue = purple)
complementary colors
(purple + yellow = neutral gray)
red
blue
secondary color
(purple)
primary color
(yellow)
neutral gray

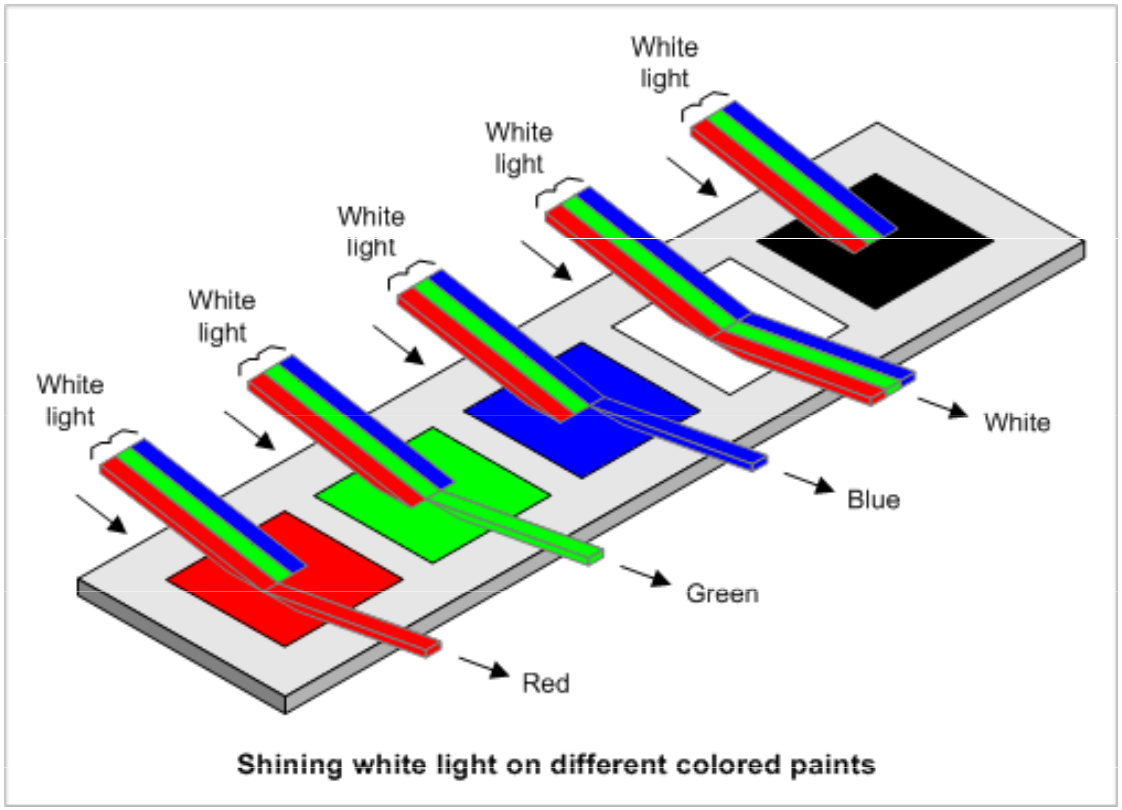

primary colors
(yellow + red = orange)
complementary colors
(orange + blue = neutral gray)
yellow
red
secondary color
(orange)
primary color
(blue)
neutral gray


Citlivost lidského oka na barvy
3 druhy buněk oka hrubě odpovídají
modré, zelené a červené
Relativní citlivost
400
460
500
600
650
700
Vlnová délka [nm]

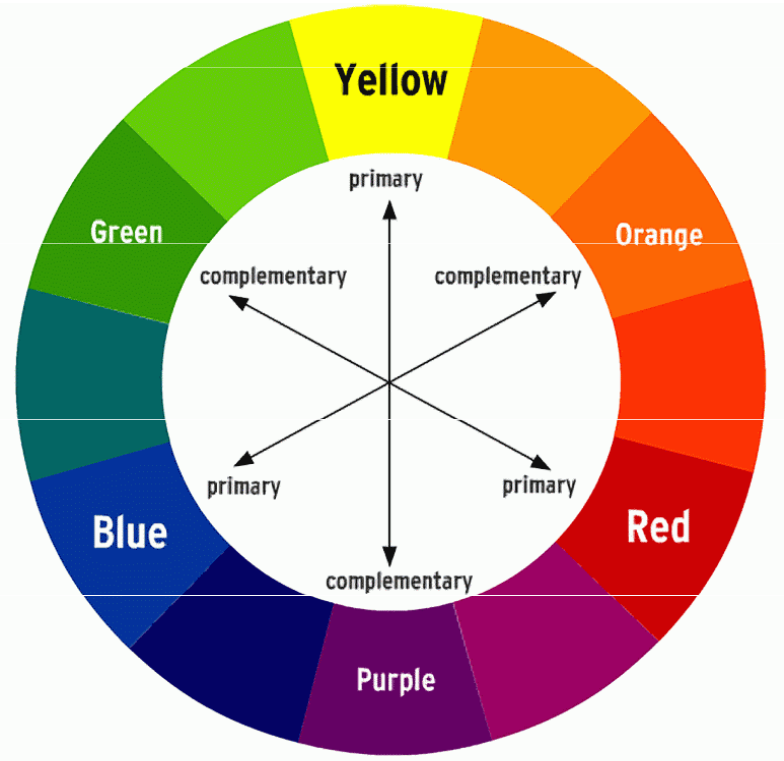

přívod anody
vnitřní
vodivý povlak
stínící
maska
vychylovací
jednotka
elektronové
trysky
luminoforové
RGB proužky
ostřící
soustava
magnety
čistoty barev
magnety statické
konvergence
vnitřní
magnetické
stínění

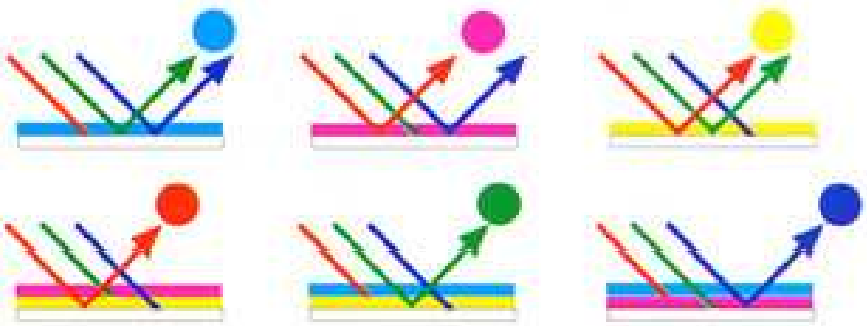
Absorpce záření

- odražené světlo = barva předmětu
- černé těleso vše pohlcuje, bílé vše odráží

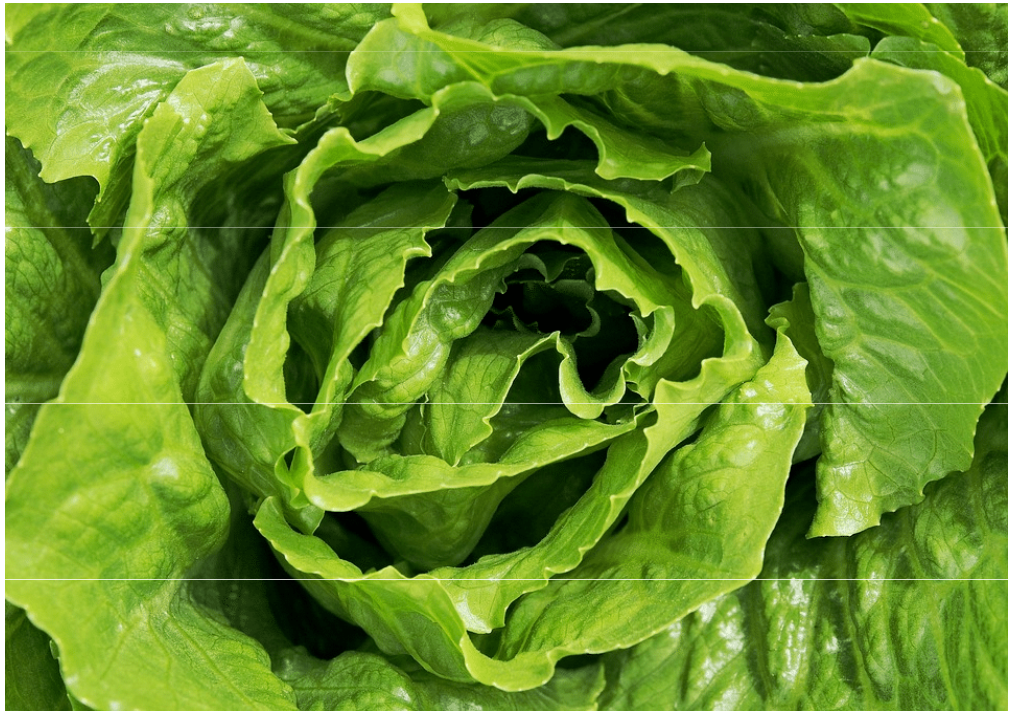


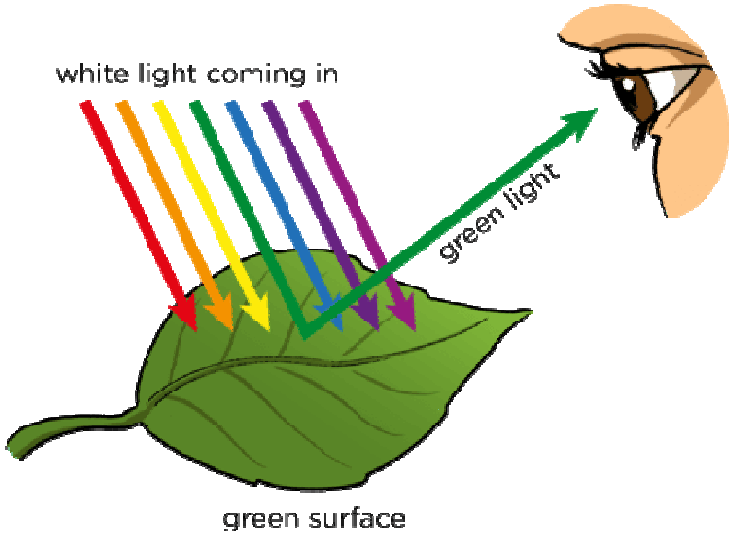
Shining white light on different colored paints

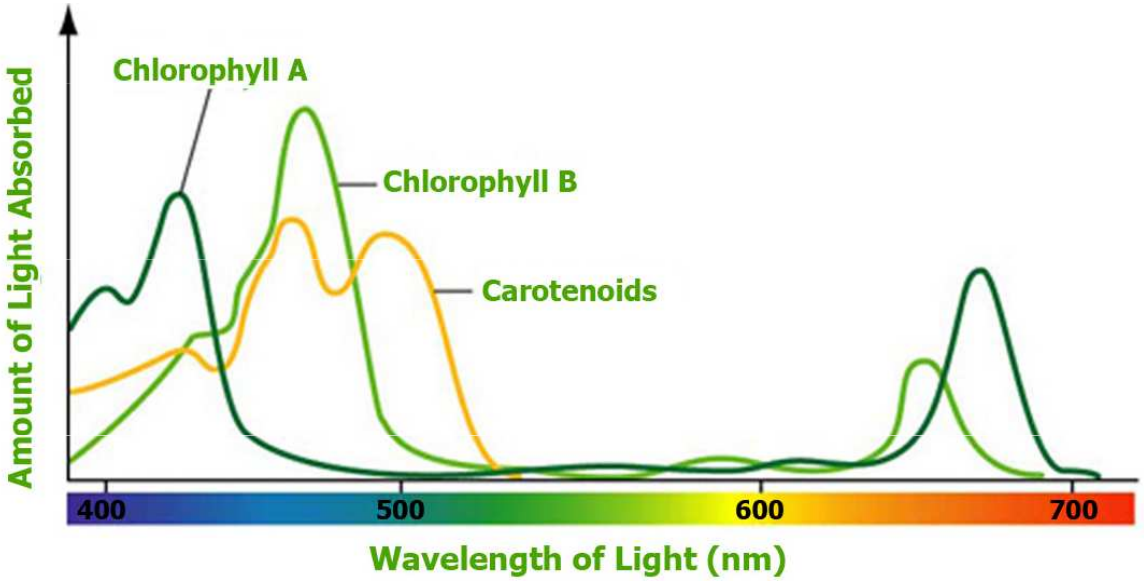




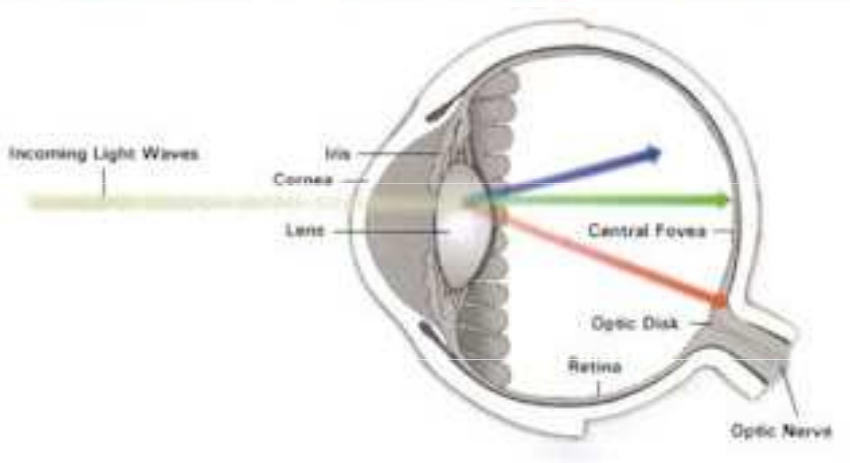
Příklad

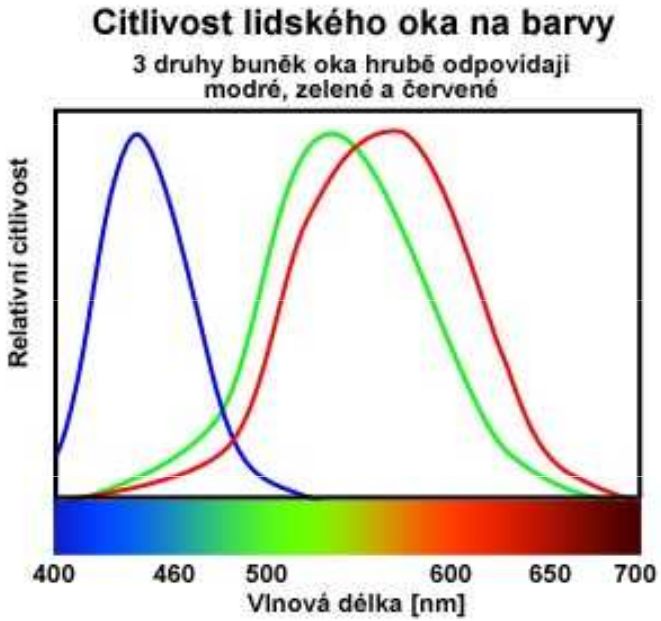


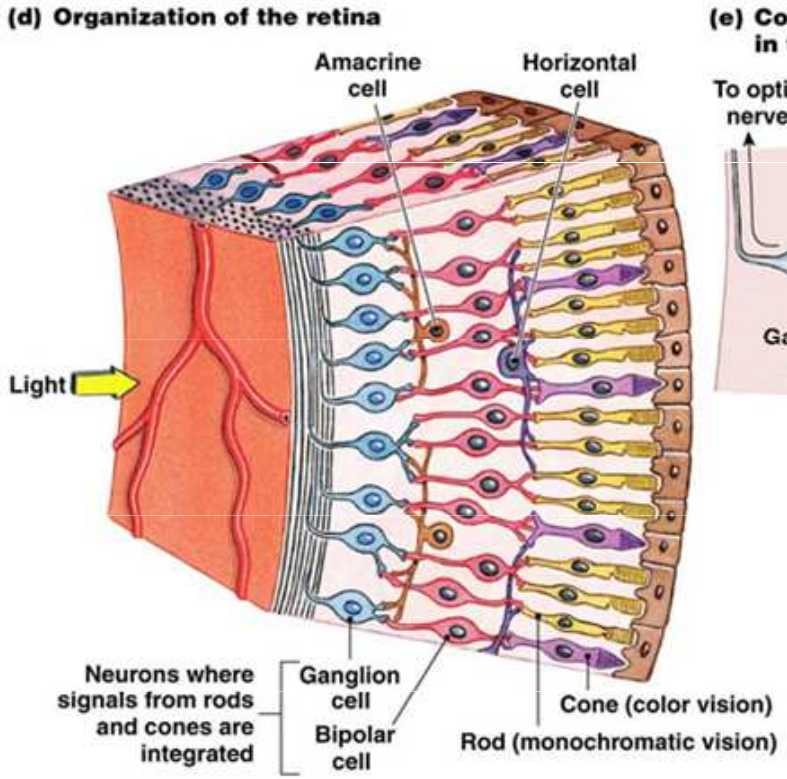

white light coming in
green light
green surface

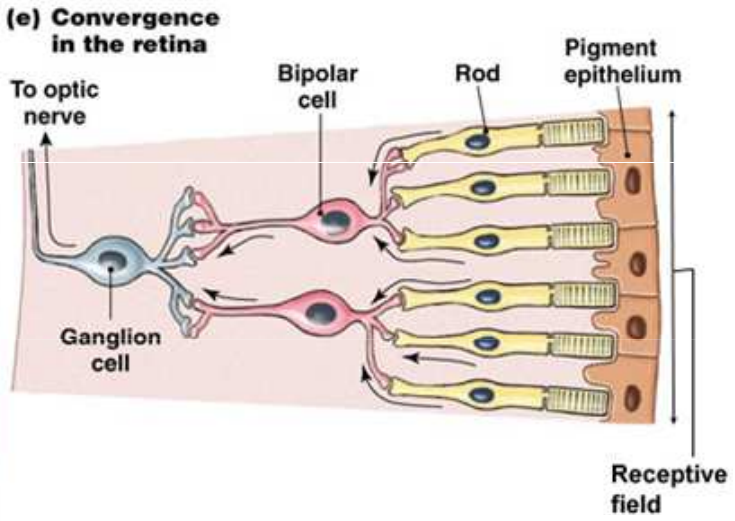

Chlorophyll A
Chlorophyll B
Carotenoids
Amount of Light Absorbed
400
500
600
700
Wavelength of Light (nm)

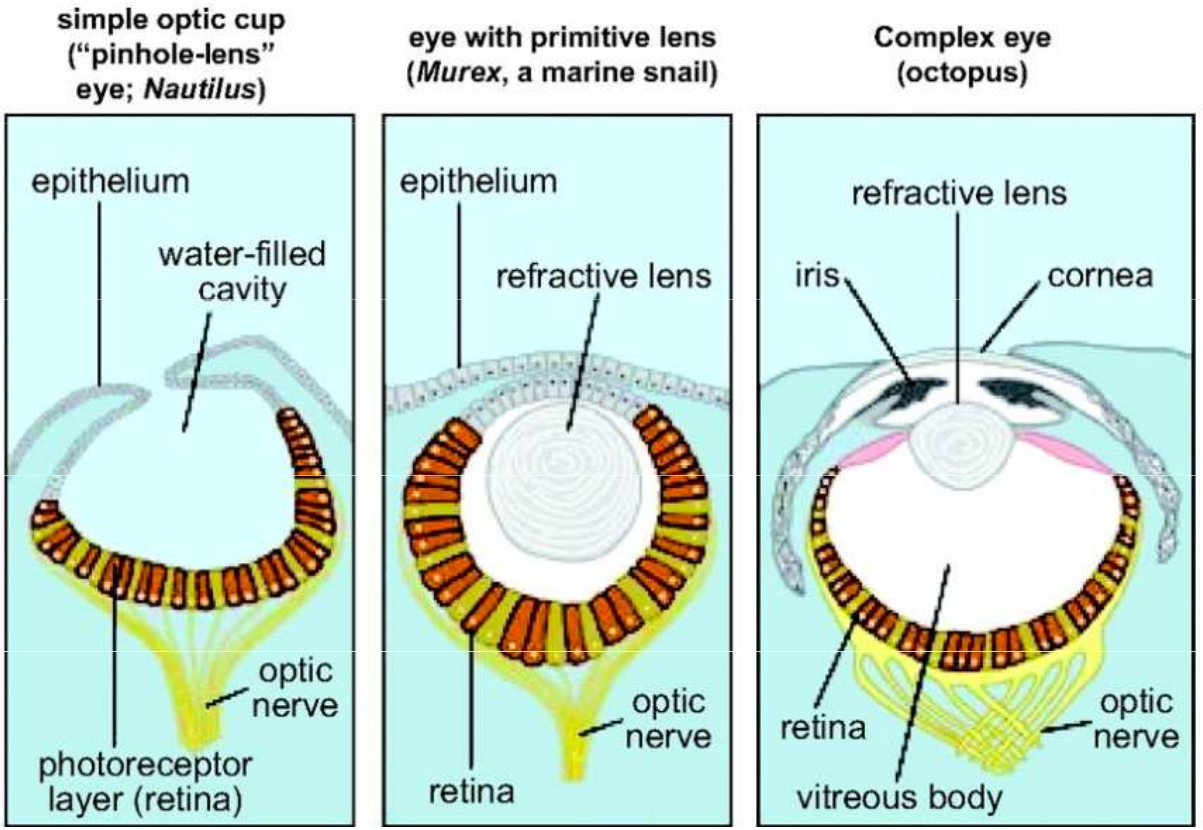
Lidské oko

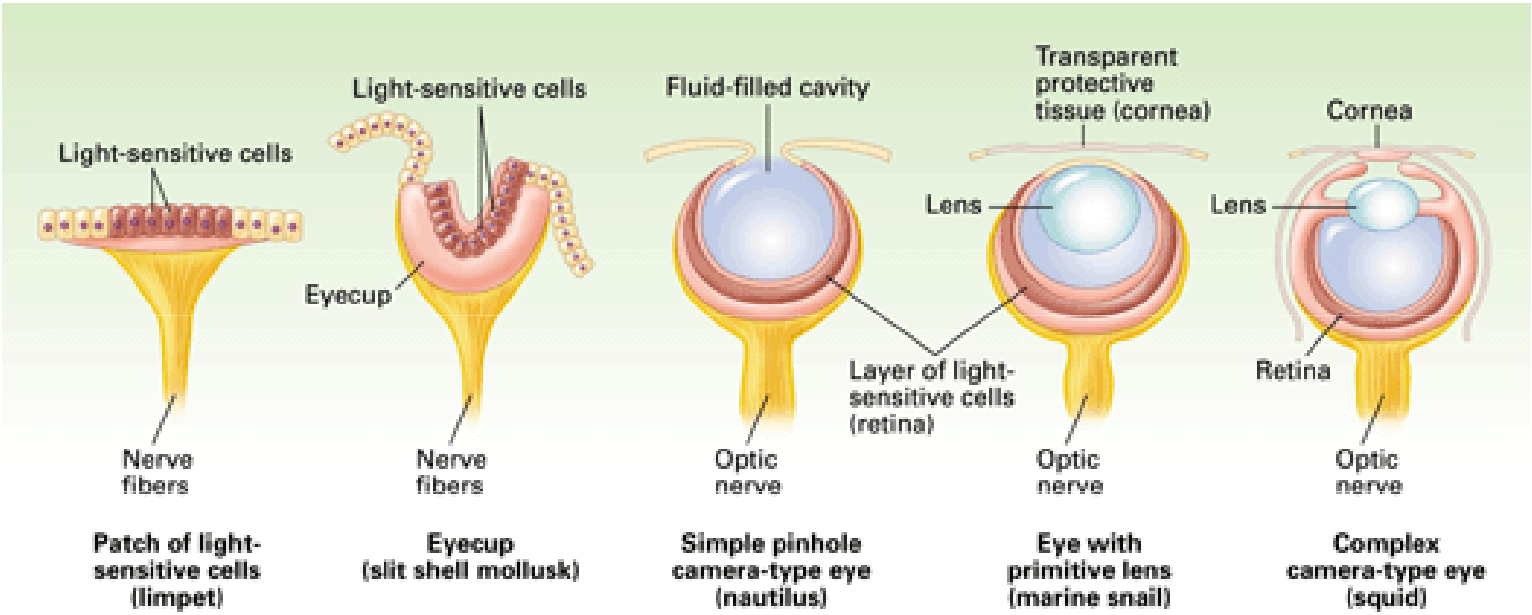

Incoming Light Waves
Iris
Cornea
Lens
Central Fovea
Optic Disk
Retina
Optic Nerve


Citlivost lidského oka na barvy
3 druhy buněk oka hrubě odpovídají modré, zelené a červené
Relativní citlivost
400
460
500
600
650
700
Vlnová délka [nm]

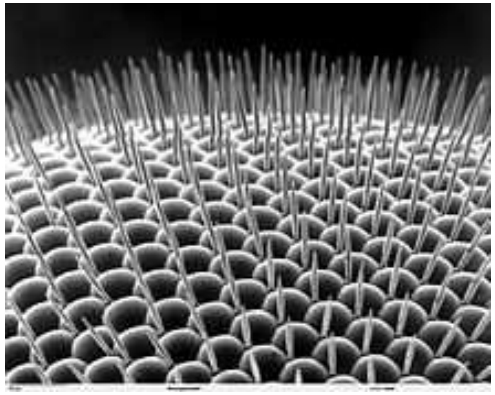

(d) Organization of the retina
Amacrine cell
Horizontal cell
Light
Neurons where signals from rods and cones are integrated
Ganglion cell
Bipolar cell
Cone (color vision)
Rod (monochromatic vision)

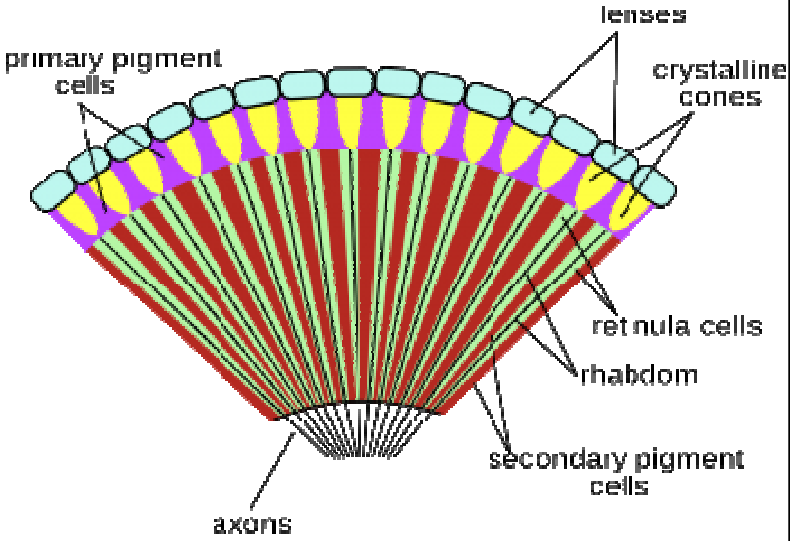

(e) Convergence in the retina
To optic nerve
Bipolar cell
Rod
Pigment epithelium
Ganglion cell
Receptive field

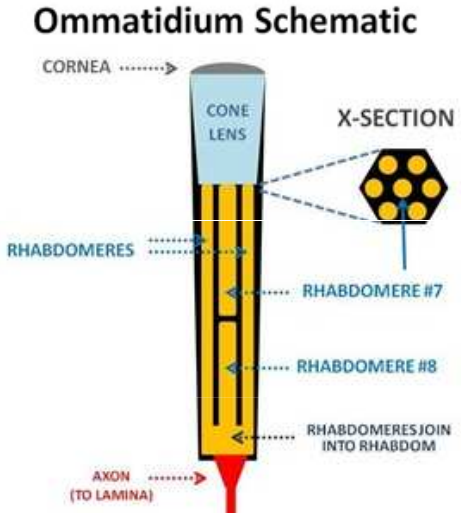

simple optic cup ("pinhole-lens" eye; *Nautilus*)
eye with primitive lens (*Murex*, a marine snail)
Complex eye (octopus)
epithelium
water-filled cavity
optic nerve
photoreceptor layer (retina)
epithelium
refractive lens
optic nerve
retina
refractive lens
iris
cornea
retina
optic nerve
vitreous body


Light-sensitive cells
Nerve fibers
Patch of light-sensitive cells (limpet)
Light-sensitive cells
Eyecup
Nerve fibers
Eyecup (slit shell mollusk)
Fluid-filled cavity
Optic nerve
Simple pinhole camera-type eye (nautilus)
Transparent protective tissue (cornea)
Lens
Layer of light-sensitive cells (retina)
Optic nerve
Eye with primitive lens (marine snail)
Cornea
Lens
Retina
Optic nerve
Complex camera-type eye (squid)

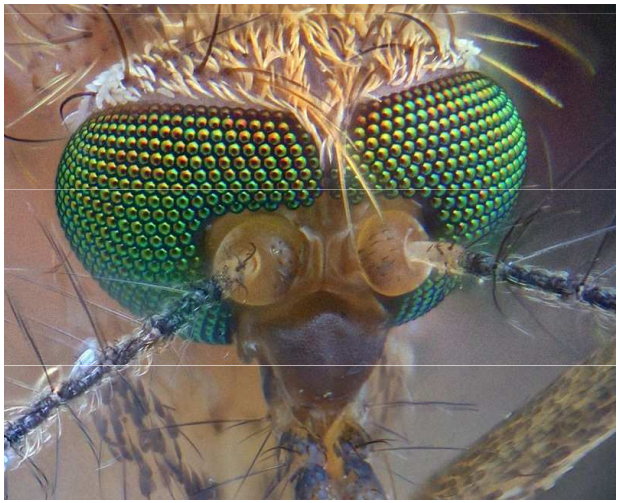
Složené (fasetové) oči jsou typy očí, které jsou hlavním zrakovým orgánem u korýšů a hmyzu. Výhodou složených očí je schopnost lépe vnímat pohyb, velký zorný úhel a možnost fungování i při mikroskopické velikosti, kdy by efektivní funkci jednoduchých očí znemožnil ohyb světla na otvoru panenky. Nevýhodou složených očí je značná neostrost a mozaikovitost pohledu.





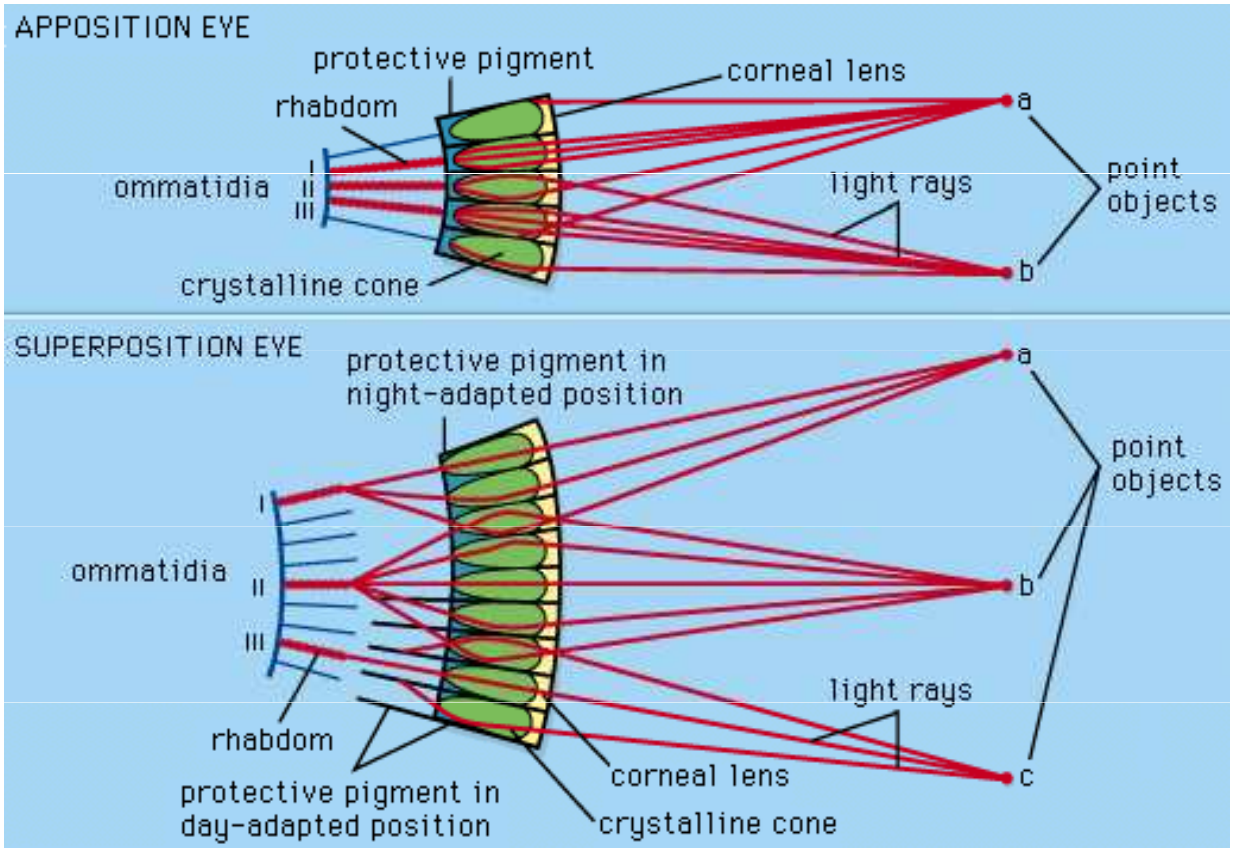


Složené oči jsou složeny z ommatidií, která samostatně vnímají obraz. Každé z nich je trvale zaměřeno nepatrně jiným směrem (jedinec nemůže ovlivnit jeho zaměření). Z těchto jednotlivých obrazů pak živočich poskládá celkový obraz.

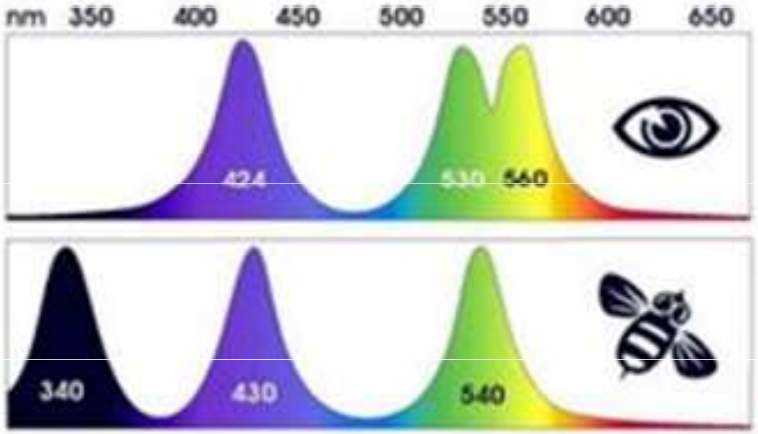


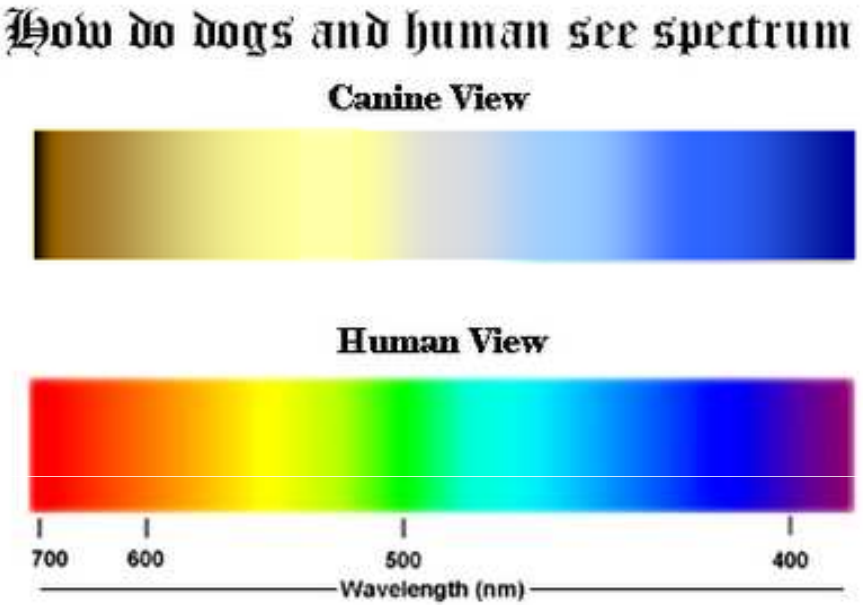
Apoziční složené oko má v plášti jednotlivých ommatidiích pigmentové buňky pohlcující světlo. To znamená, že při osvětlení jednoho ommatidia nedochází k přechodu světla do sousedních ommatidií. Tento typ očí nalezneme zpravidla u denních živočichů, kteří jsou aktivní při dostatku světla.

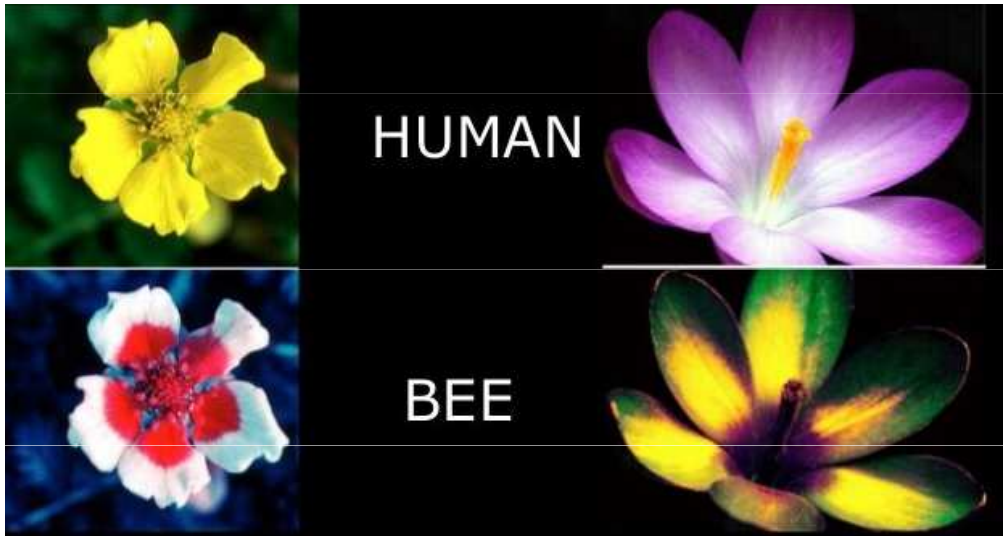
Superpoziční složené oko má pigmentu pohlcující světlo méně a při osvětlení jednoho ommatidia proniká světlo i do sousedních ommatidií, čímž dochází k zesílení světla. Pokud intenzita světla dosáhne určité (druhově rozdílné) meze, chová se superpoziční oko jako apoziční oko.



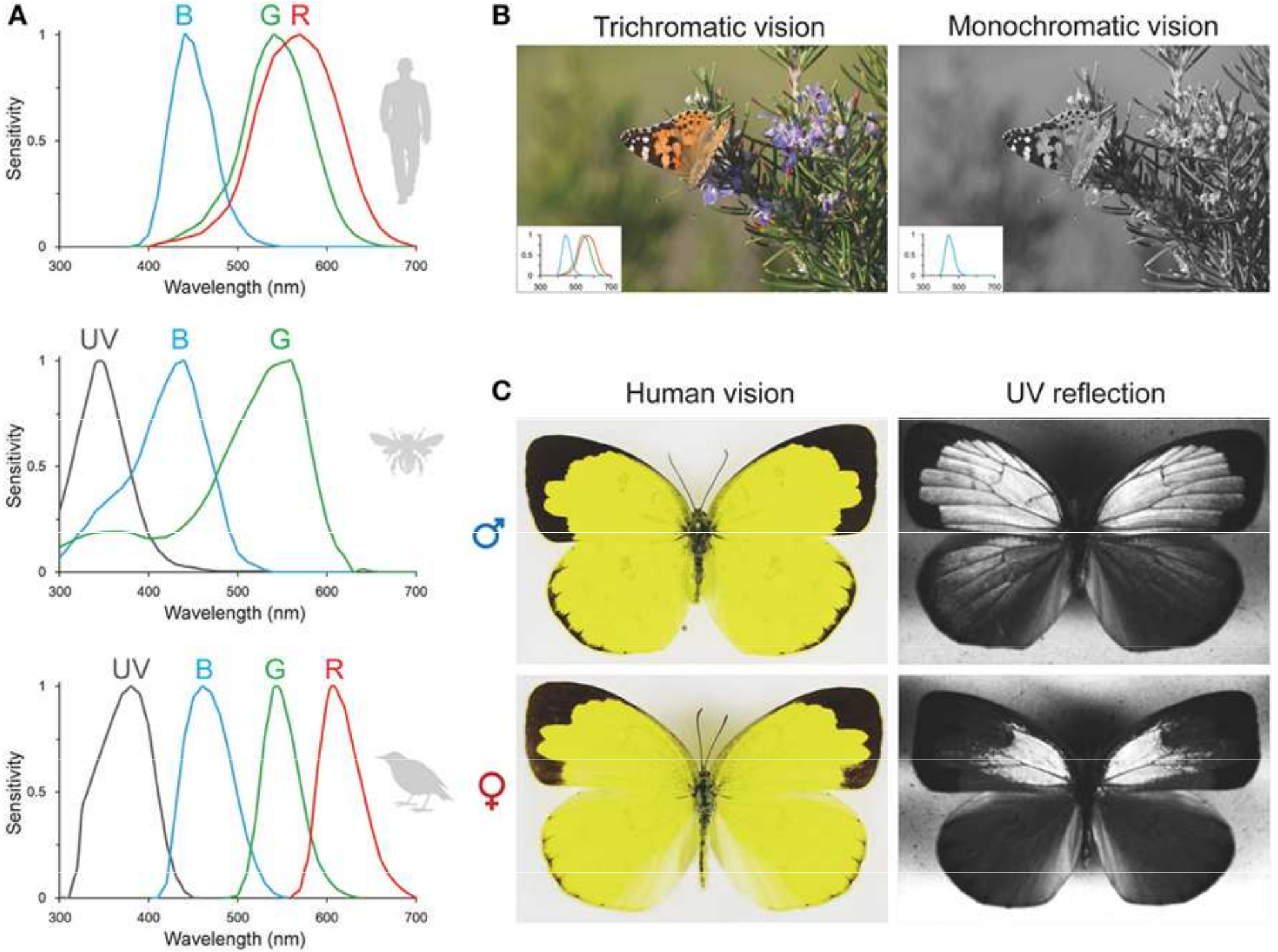
Rozdíl v chování superpozičního a apozičního oka způsobuje, že u **apozičního oka** dopadá na jednotlivé ommatidium světlo z výrazně menšího zorného úhlu a jejich obraz je tedy výrazněji neostřejší a více mozaikovitý. **Superpoziční oko** poskytuje méně mozaikovitý a ostřejší obraz, což je vykoupeno větším zkreslením a zpravidla i menším počtem ommatidií. Superpoziční oko se zpravidla vyskytuje u nočních živočichů.

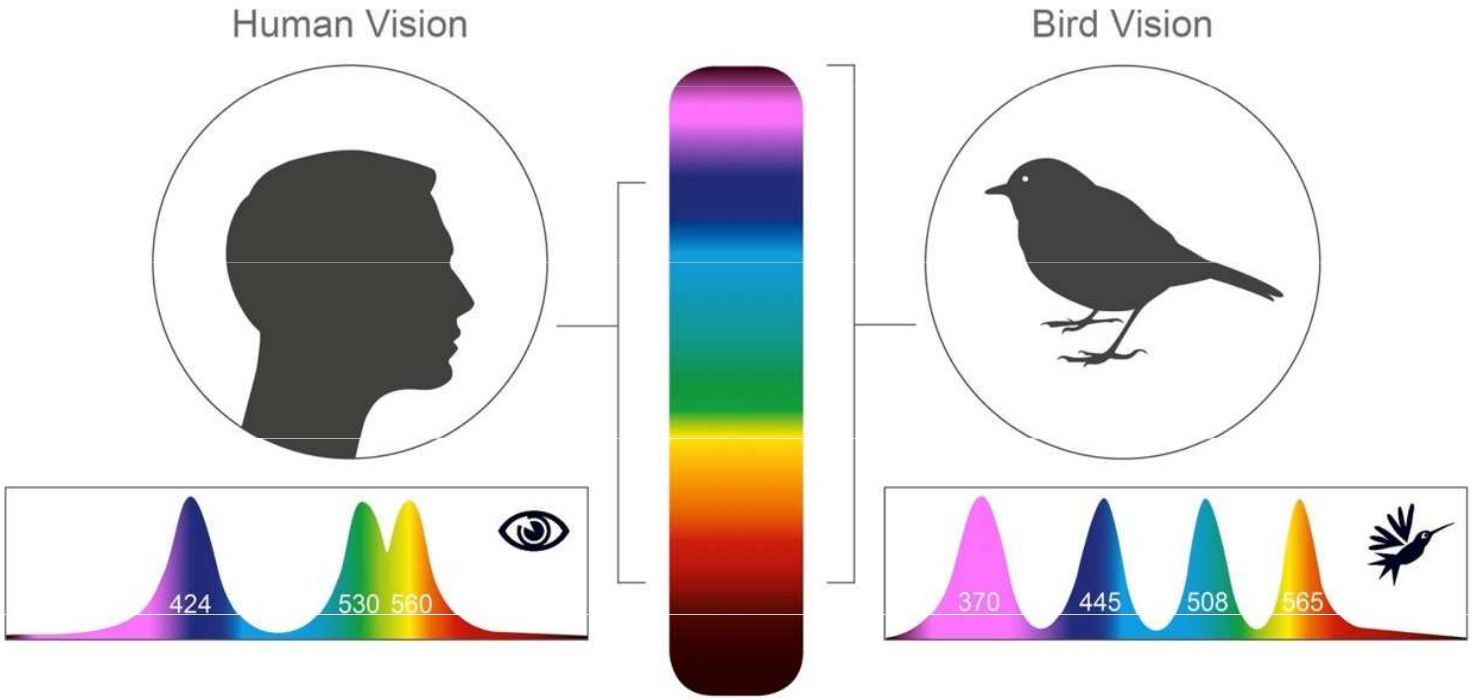

nm 350 400 450 500 550 600 650
424
530 560
340
430
540


How do dogs and human see spectrum
Canine View
Human View
700
600
500
400
Wavelength (nm)


HUMAN
BEE

How we see
Colours: Red, Green & Blue
We see all other colours in combination of these 3 colours
How dogs see
Colours: Blue & Yellow (can be compared to the vision of a colour-blind human)
Have a wider peripheral vision

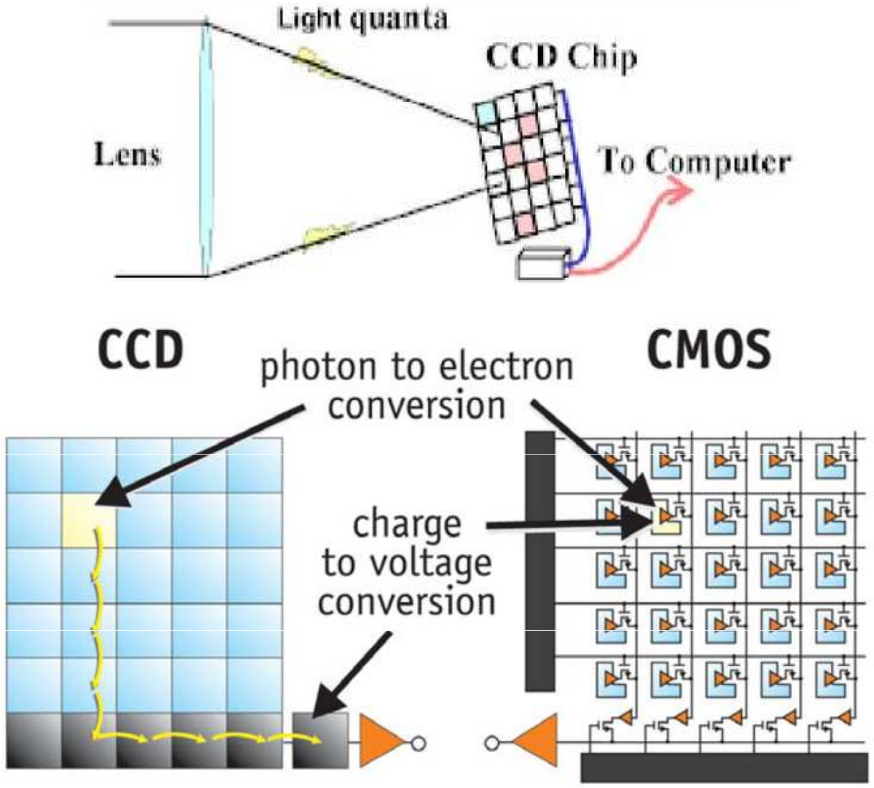

A
B
G
R
Sensitivity
Wavelength (nm)
UV
B
G
UV
B
G
R
B
Trichromatic vision
Monochromatic vision
C
Human vision
UV reflection
♂
♀


Human Vision
Bird Vision
424
530
560
370
445
508
565

Human vision
Bird vision

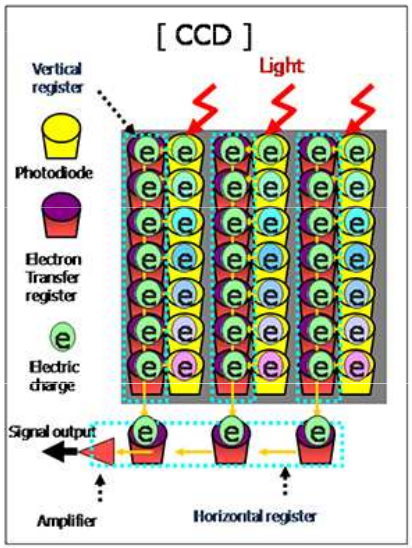
CCD a CMOS detektory

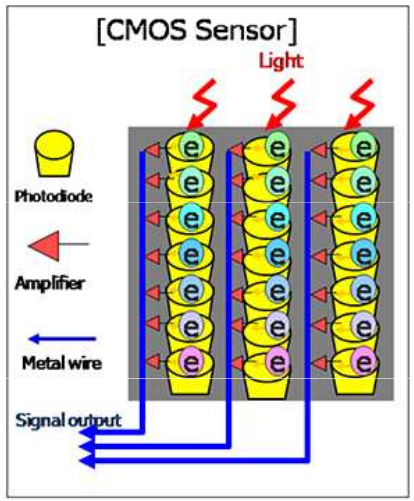
U **CCD** je nakumulovaný náboj přesouván přes matici Schottkyho fotodiod. Elektrony reprezentující jednotlivé pixely jsou posouvány do výstupního zesilovače, kde je elektrický náboj převeden na napětí. Výhodami tohoto detektoru oproti typu CMOS je lepší světelná citlivost, což se projeví v lepší kvalitě obrazu při špatném osvětlení. CCD senzory také dosahují vyšší rychlosti převodu signálu a výsledný obraz vykazuje relativně nízký šum. Nevýhodou těchto detektorů je vyšší cena a je složitější instalace do kamery.



CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node. CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

CMOS využívá integrovaných obvodů vysoké hustoty, umožňující umístit na čip velké množství MOS tranzistorů. Produkce těchto detektorů je sériová a levnější než u CCD prvků. Výhodou CMOS senzorů je také nízká spotřeba energie, nižší napájecí napětí a obecně jednodušší elektronika, umožňující návrh kamer s menšími rozměry.

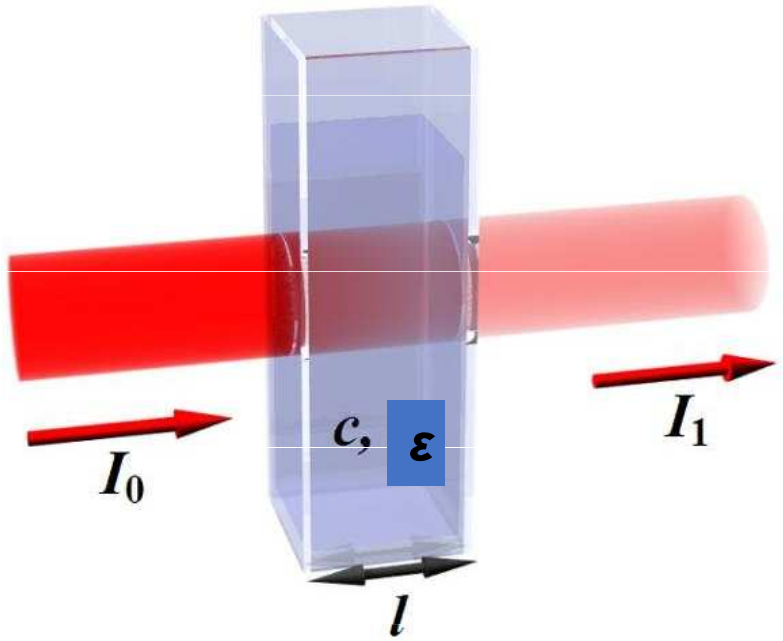




Lambert – Beerův zákon

$$A = \log_{10} \frac{I_o}{I} = \varepsilon l c$$

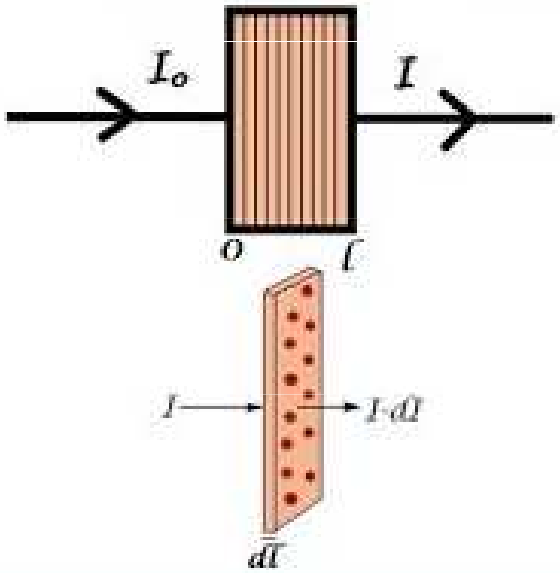
Zákon platí pro monochromatické světlo



l = tloušťka kyvety

c = koncentrace roztoku

ε = absorpční koeficient, ε = f(λ)



$$-\frac{dI}{dl} \propto cI$$

$$-\frac{dI}{I} = kcdl$$

$$\boxed{A = \epsilon c l}$$

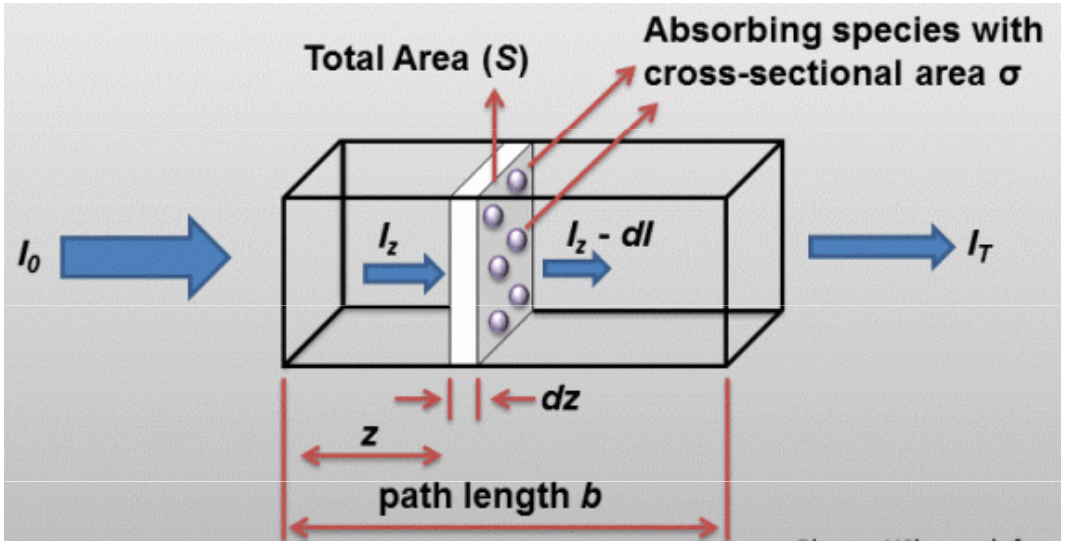
$$T(\%) = 100\frac{I}{I_0}$$

T = transmitance

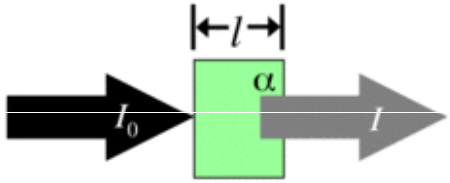
$$A = \log_{10}\frac{I_0}{I}$$

$$A = -\log_{10} T$$

A = absorbance

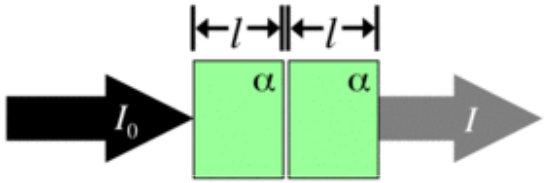


If *one slab* of absorbing material of thickness *l* reduces the intensity of a beam of light to *half*.



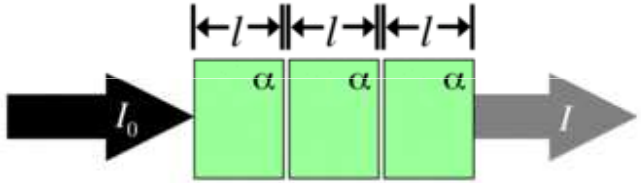
$$\frac{I}{I_0} = 10^{-kl} = \frac{1}{2}$$

Then *two slabs* of the same absorbing material will then reduce the intensity of a beam of light to *one quarter*.

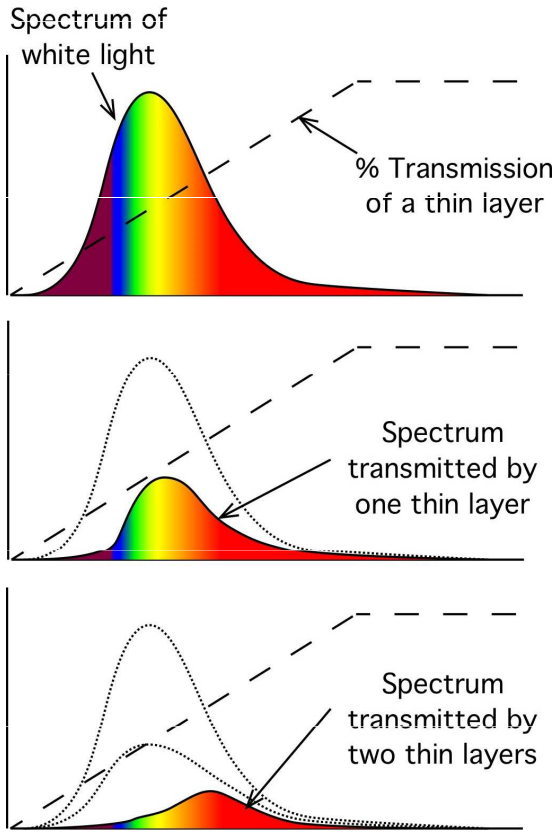


$$\frac{I}{I_0} = 10^{-k2l} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$$

And *three slabs* will reduce the intensity of a beam of light to *one eight*.



$$\frac{I}{I_0} = 10^{-k3l} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{8}$$



Příklad

Jak hluboko pod mořskou hladinu je vidět? Molární absorpční koeficient mořské vody pro žluté světlo je 2.10^{-5} $dm^3.mol^{-1}.cm^{-1}$. Člověk je schopen rozlišit objekt, pokud je poměr I/I_0 větší než 0,02.

$I/I_0 = 0,02$
$\varepsilon = 2.10^{-5}$ $dm^3.mol^{-1}.cm^{-1}$
$d = ?$

$c = n/V = m/(M.V) = \rho.V/(M.V) = \rho/M =$
$= 1000/18 = 55,6$ $mol.dm^{-3}$

$\log(I/I_0) = - \varepsilon.d.c$

$\log(0,02) = - 2.10^{-5}.d.55,6$

$d = \underline{15\ m}$

Příklad

Jaká je viditelnost v čisté atmosféře při 27 °C? Molární absorpční koeficient čistého suchého vzduchu je asi 2.10^{-6} $dm^3.mol^{-1}.cm^{-1}$. Člověk je schopen rozlišit objekt, pokud je poměr I/I_0 větší než 0,02.

$I/I_0 = 0,02$
$\varepsilon = 2.10^{-6}$ $dm^3.mol^{-1}.cm^{-1}$
$d = ?$
$p = 101\ 325$ Pa
$T = 27$ °C $= 300$ K

$c = n/V = p/(R.T) = 101325/(8,314.300) = 0,0406$ $mol.dm^{-3}$

$\log(I/I_0) = - \varepsilon.d.c$

$\log(0,02) = - 2.10^{-6}.d.\ 0,040$

$d = \underline{209\ km}$

Radiometrické veličiny

charakterizují energii přenášenou zářením

Zářivá energie E_e je celková energie přenášená elektromagnetickým zářením

Zářivý tok Φ_e je energie, kterou zdroj vyzáří za 1 sekundu

$$\Phi_e = \frac{\Delta E_e}{\Delta t} \qquad [\Phi_e] = J \cdot s^{-1} = W$$

Zářivost I_e je rovna zářivé energii, kterou zdroj vyzáří za 1 sekundu do jednotkového prostorového úhlu

$$I_e = \frac{\Delta \Phi_e}{\Delta \Omega} \qquad [I_e] = W \cdot sr^{-1}$$

Intenzita vyzařování M_e je rovna zářivému toku vysílaného z plochy zdroje o obsahu 1 m^2

$$M_e = \frac{\Delta \Phi_e}{\Delta S} \qquad [M_e] = W \cdot m^{-2}$$

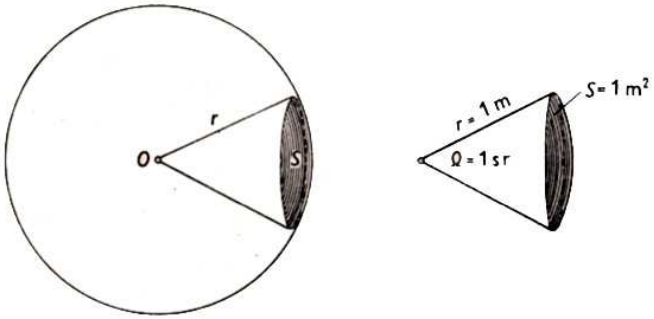
Fotometrické veličiny

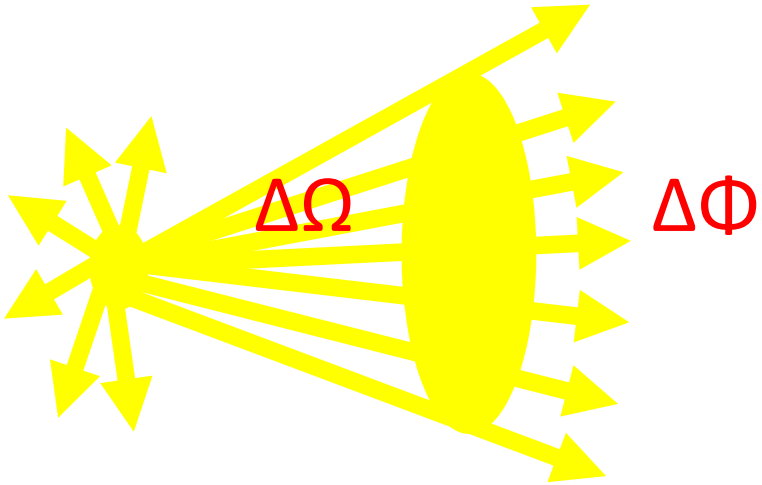
charakterizují přenos energie optického záření a jeho účinek na zrak

Světelný tok Φ je intenzita zrakového vjemu normálního oka, vyvolaného energií světelné ho záření, která projde za jednotku času určitou plochou prostoru, kterým se světlo šíří

$$[\Phi] = 1\,\mathrm{lm}(\mathit{lumen})$$

Prostorový úhel Ω je vrcholový úhel, který odpovídá kuželové ploše vytínající na kulové ploše o poloměru 1m kulový vrchlík o obsahu $1m^2$



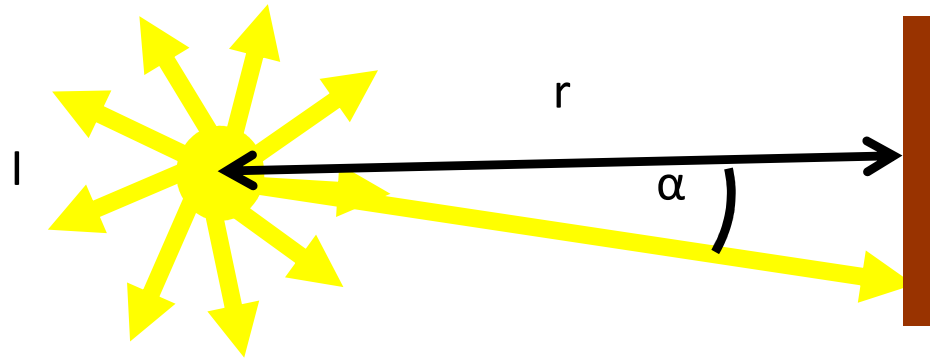


Svítivost zdroje I je podíl části světelného toku ΔΦ, který vyzařuje bodový všesměrový zdroj do prostorového úhlu ΔΩ, a velikosti tohoto úhlu

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \qquad [I] = 1\,\mathrm{cd}(\mathit{kandela})$$

Osvětlení (intenzita osvětlení) E je podíl světelného toku ΔΦ dopadajícího na ozařovanou plochu ΔS a obsahu této plochy

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \qquad [E] = 1\,\mathrm{lx}(lux)$$



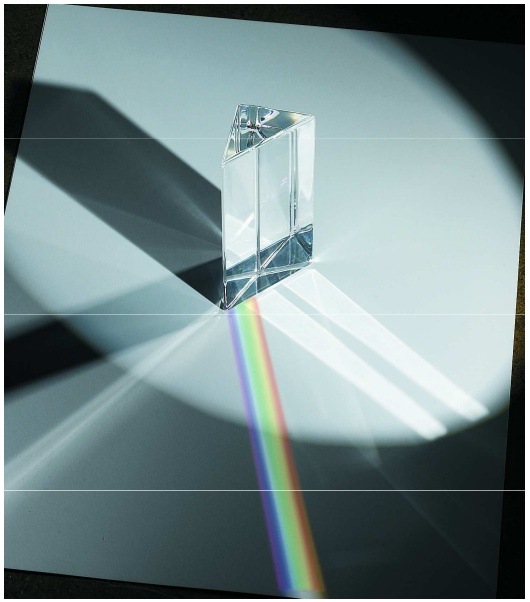
závisí na:

svítivosti zdroje I
vzdálenosti od světelného zdroje r,
úhlu dopadu světla na osvětlovanou plochu α

$$E = \frac{I.\cos\alpha}{r^2}$$

Prostor	E [lx]	Prostor	E [lx]
rtg. ošetřovny	1	Sklep, půda, schodiště	30
promítání diapozitivů, filmů	10	předsíň, prádelna, toaleta	60
toalety, kina	60	ložnice, koupelna	120
hlediště divadel, šatny, umývárny	120	dětský pokoj, obývací pokoj	150
Tělocvičny	200	kuchyň, jídelna	250
konferenční místnosti, knihovny	250	místo pro zrakově náročné práce	500
posluchárny, studovny, účtárny	500	operační stoly	5000
rýsovny, výzkumné laboratoře	1000	operační pole	25000
přímé sluneční osvětlení v poledne v létě	10^5	přímé sluneční osvětlení v poledne v zimě	10^4

Disperze světla na hranolu

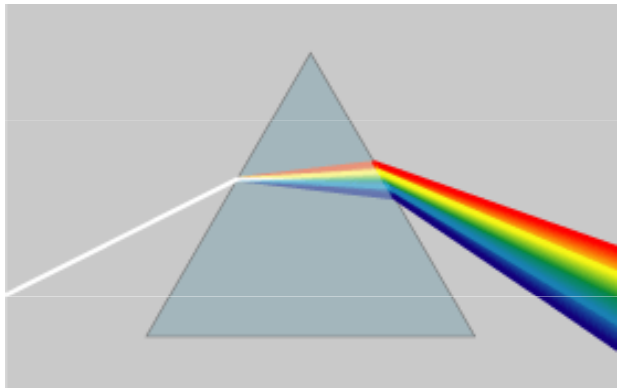


Index lomu prostředí závisí na frekvenci světla.

Při tzv. **normální disperzi** se
- index lomu s rostoucí frekvencí zvětšuje**. (s↑f se n↑)**
- rychlost světla se s rostoucí frekvencí zmenšuje **(s↑f se v↓)**

Frekvence se nemění, mění se rychlost:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \qquad f = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{v}{\lambda}$$

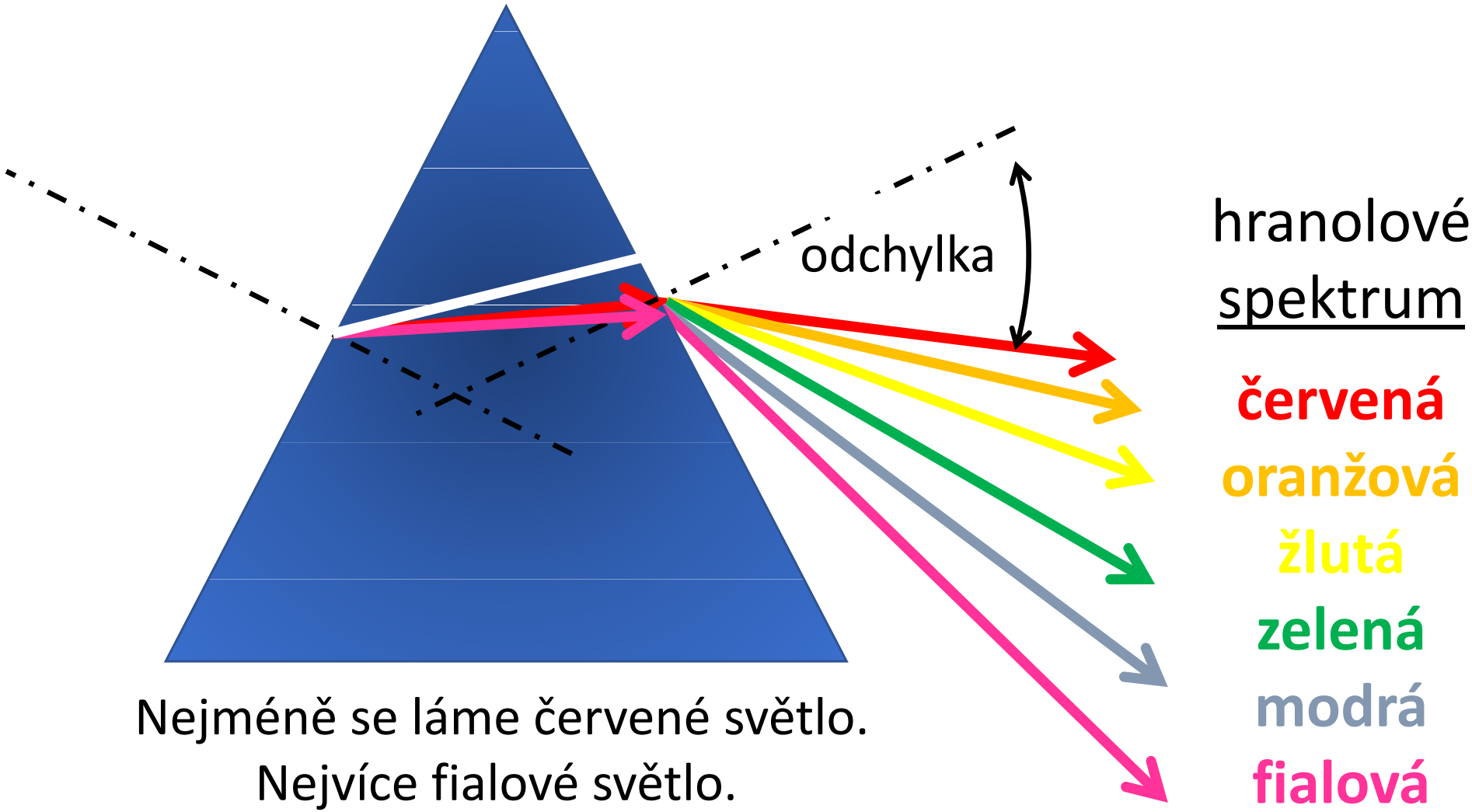


λ_0 – vlnová délka světla ve vakuu
λ – vlnová délka světla v prostředí s indexem lomu n (λ je n-krát menší než λ_0)

DISPERZE SVĚTLA

je závislost rychlosti světla v látkách na jejich frekvenci, tedy rozklad světla na barevné složky.

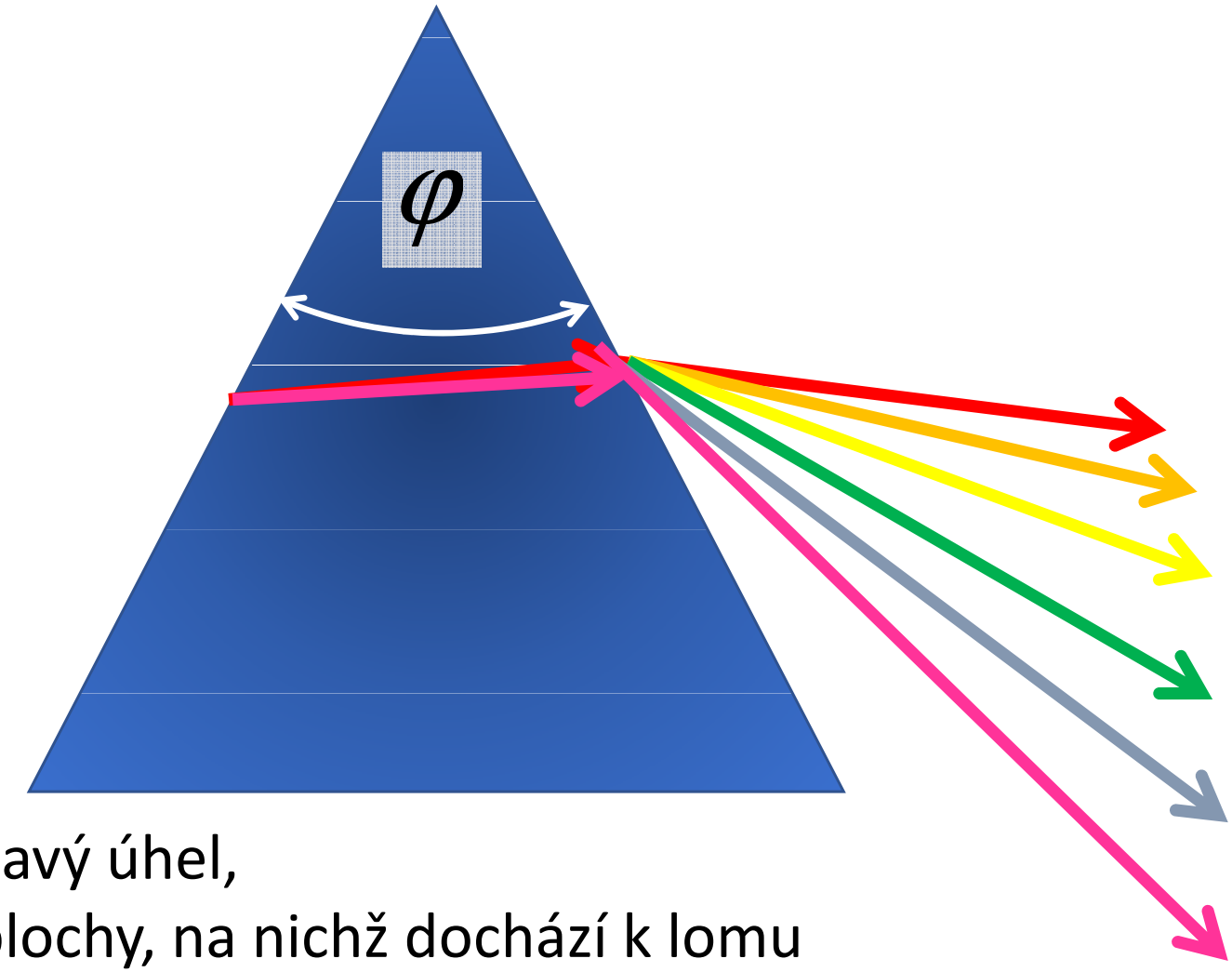
Rozložení bílého světla na optickém hranolu:



Nejméně se láme červené světlo.
Nejvíce fialové světlo.

1. 5. DISPERZE SVĚTLA

Světla různých frekvencí (různých barev) se v daném prostředí šíří různou rychlostí, proto mají i jiné indexy lomů. Monofrekvenční světla nelze dále rozložit.



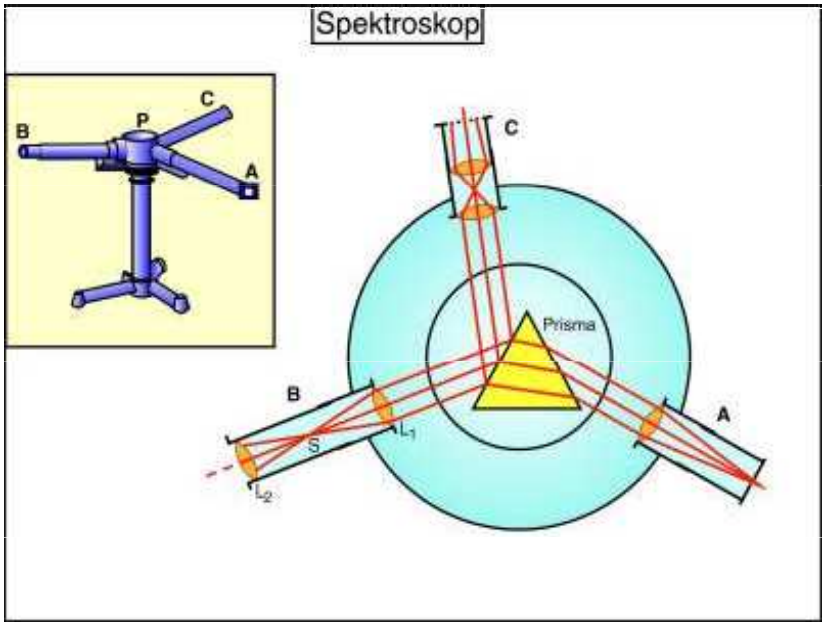
Barvy nejsou rozloženy rovnoměrně. (červená dlouhovlnná část je nahuštěná…)

φ – lámavý úhel,
svírají plochy, na nichž dochází k lomu

SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA metoda studia chemického složení látek, která je založena na poznatku, že poloha čar ve spektru umožňuje přesně určit obsah chemických prvků ve zkoumané látce

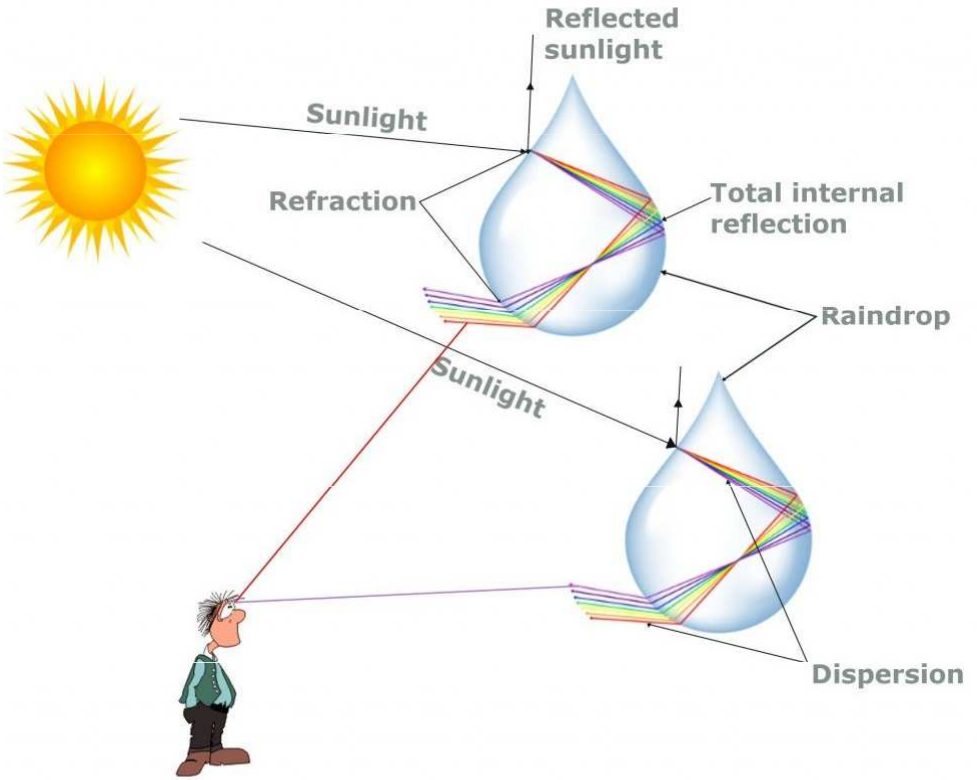
- zjišťuje vlnové délky světla, které vyzařuje určitý zdroj.
- používá:

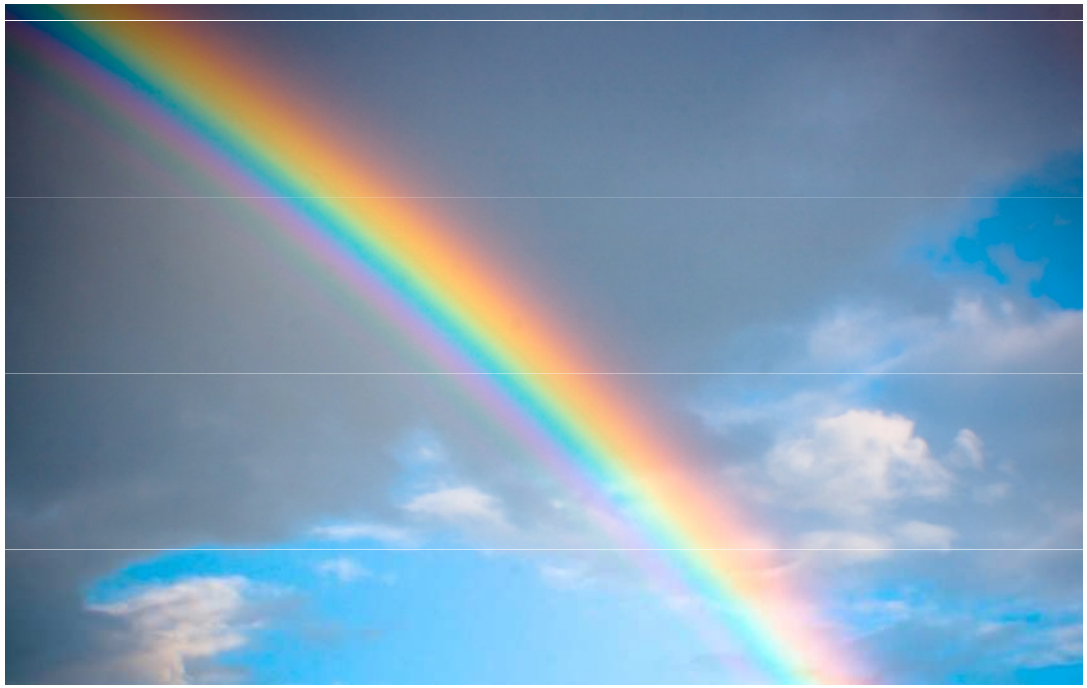
spektroskop rozloží složené světlo na jednotlivé barvy

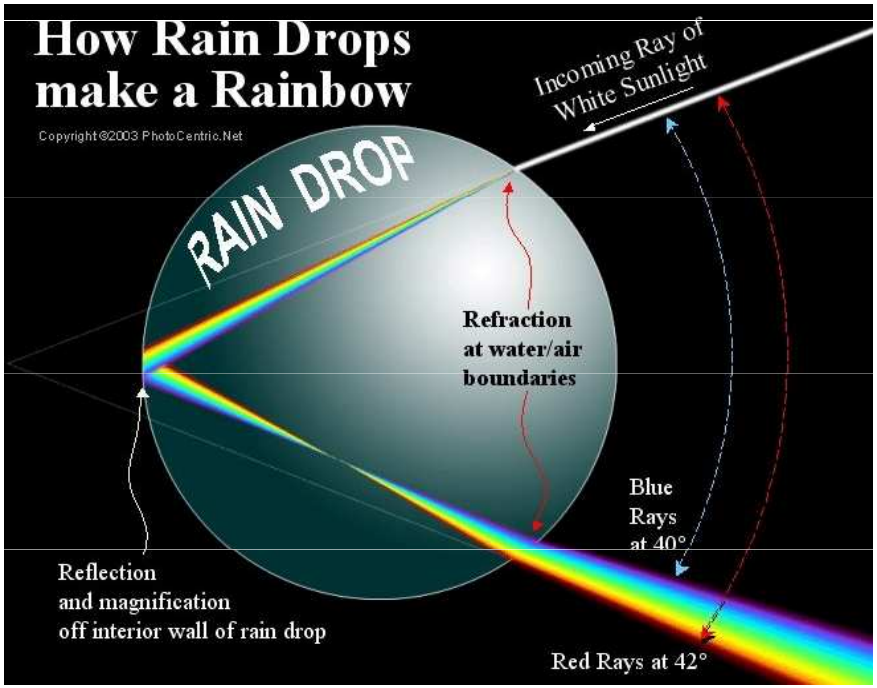


Duha

Vzniká rozkladem bílého slunečního světla na vodních kapkách. Je-li kapek mnoho, a jsou ve stejné úhlové vzdálenosti od slunce, jeví se duha jako kruhový útvar.

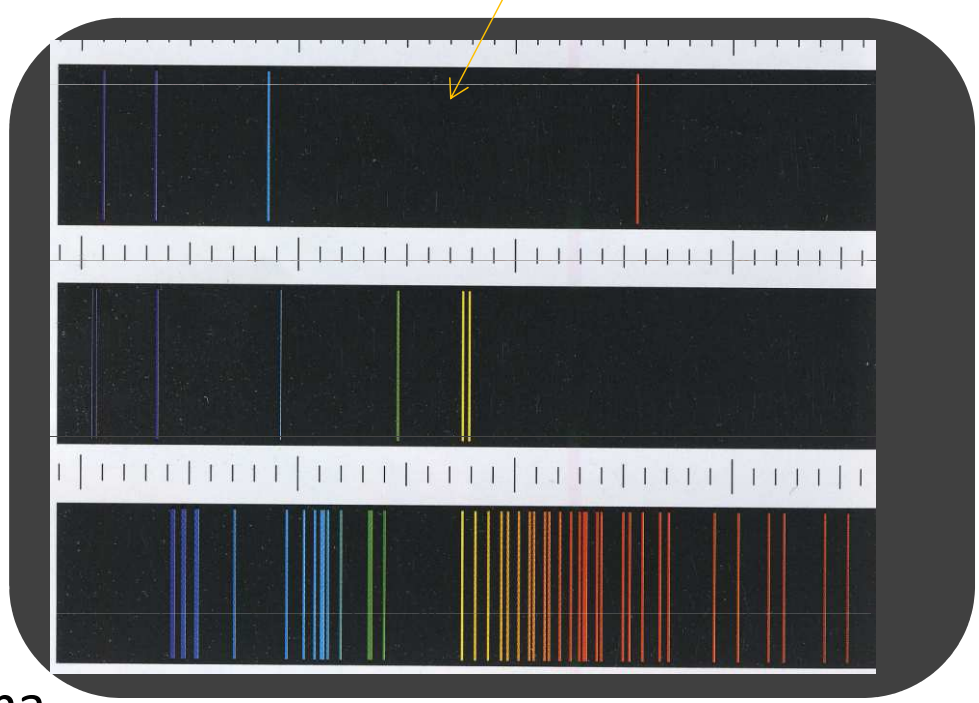






Ohyb na mřížce

- mnoho pravidelně se opakujících štěrbin.
- d (b) ... perioda mřížky (mřížková konstanta) - vzdálenost dvou sousedních štěrbin



Maximum na mřížce:

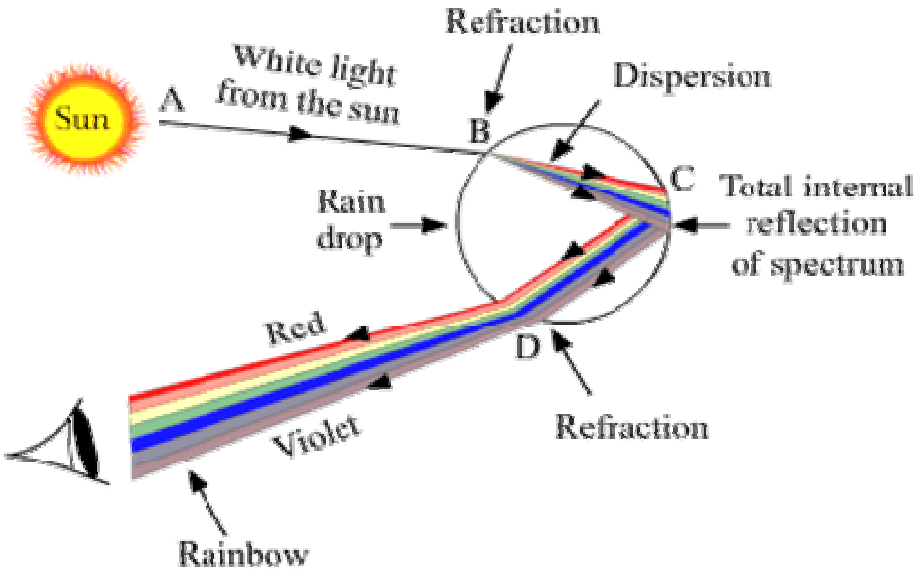
$$d \cdot sin\varphi = k\lambda;\ k = 0, 1, 2, \ldots$$

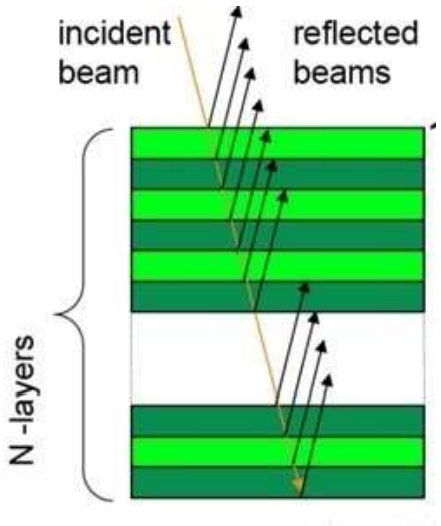
Minimum na mřížce:

$$d \cdot sin\varphi = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$$

- více štěrbin => užší intenzivnější maxima
- větší λ => větší ohyb = větší úhel pro dané maximum ... opačně než u lomu
- bílé světlo se rozloží - nejmíň se ohne fialová, nejvíc červená
- užití ... mřížkový spektroskop

Interference na tenké vrstvě



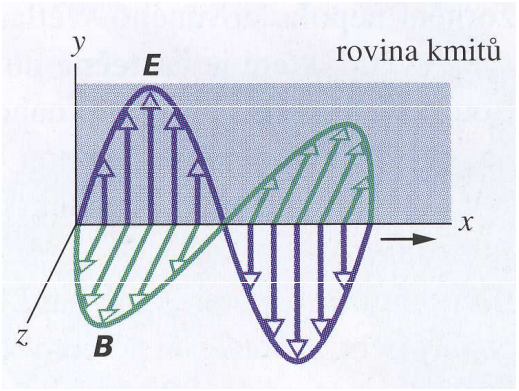


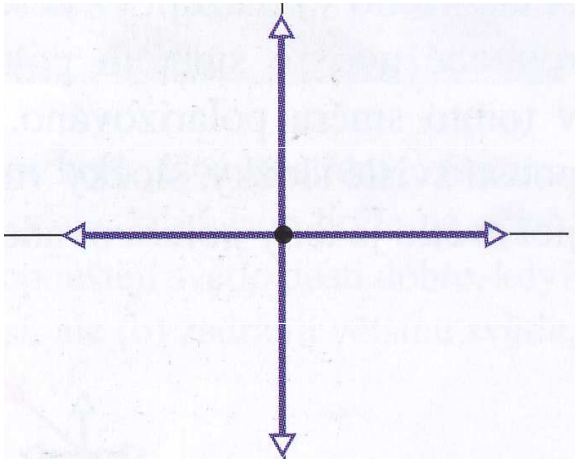
Polarizace světla

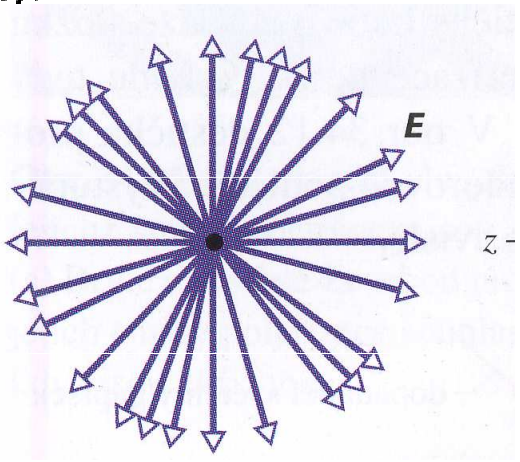
Světlo je příčné EM vlnění. Kmitají vektory $\vec{E}$ *a* $\vec{B}$. Ty jsou na sebe vždy kolmé, ale nemusí pořád ležet v jedné rovině. Nemusí být polarizované.

Lineárně polarizované světlo ... $\vec{E}$ $(\vec{B})$ leží stále v jedné rovině.

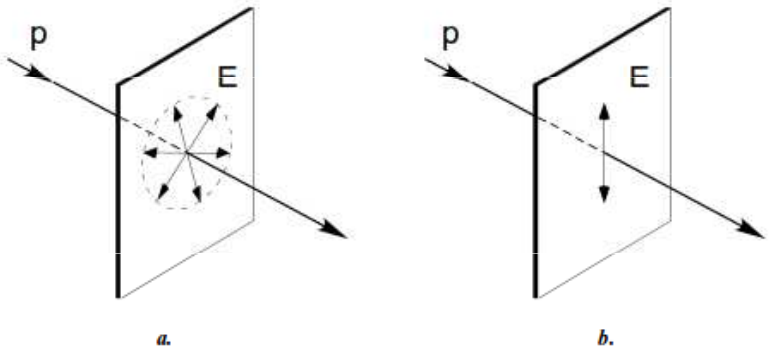
Přirozené zdroje - *nepolarizované* (slunce, plamen, žárovka).





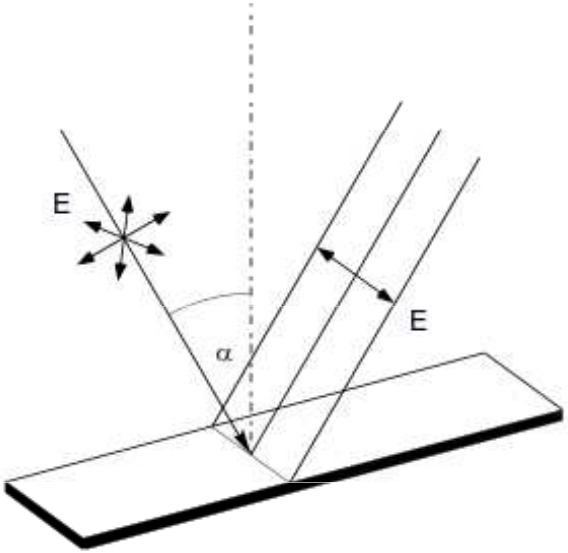


Naše oko nerozliší polarizované světlo od nepolarizovaného. Někteří živočichové ano (včely).



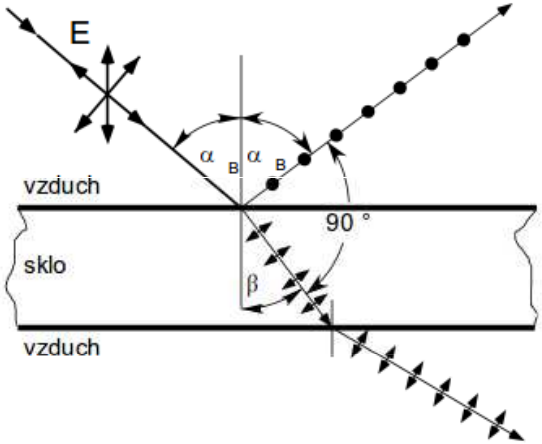
Polarizace odrazem a lomem

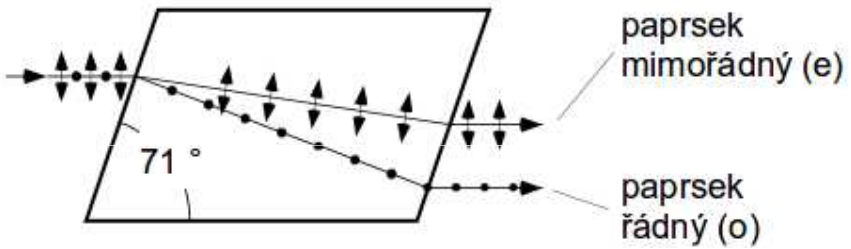
Jestliže nepolarizované světlo dopadá pod určitým úhlem na skleněnou desku, polarizuje se tak, že v odraženém světle vektor E kmitá převážně kolmo k rovině dopadu (v přímce rovnoběžné s rovinou rozhraní)



Polarizace dvojlomem

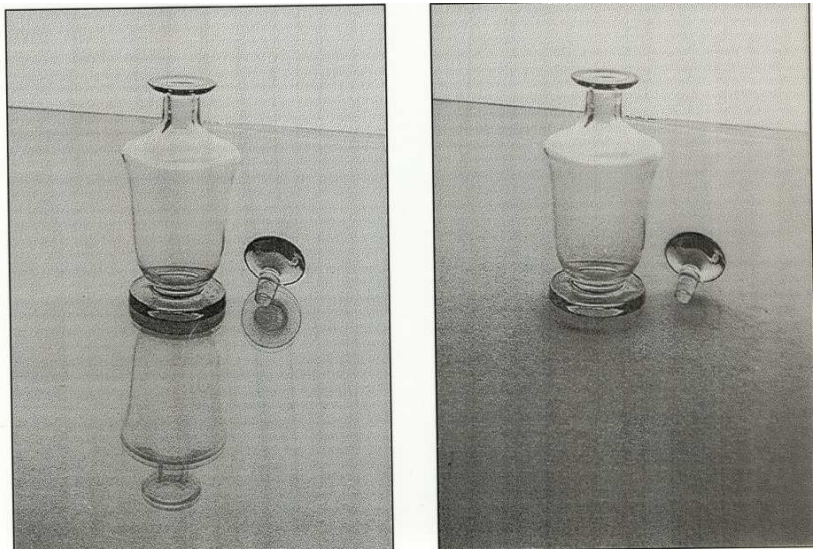
Některé látky (islandský vápenec) jsou z hlediska šíření světla anizotropní (světlo se v nich nešíří v různých směrech stejnou rychlostí). V látkách dochází k dvojlomu: paprsek se na rozhraní s krystalem dělí na dva: řádný a mimořádný, které jsou oba lineárně polarizované, ale jejich vektory E kmitají v rovinách navzájem kolmých.





Polarizační filtry a brýle

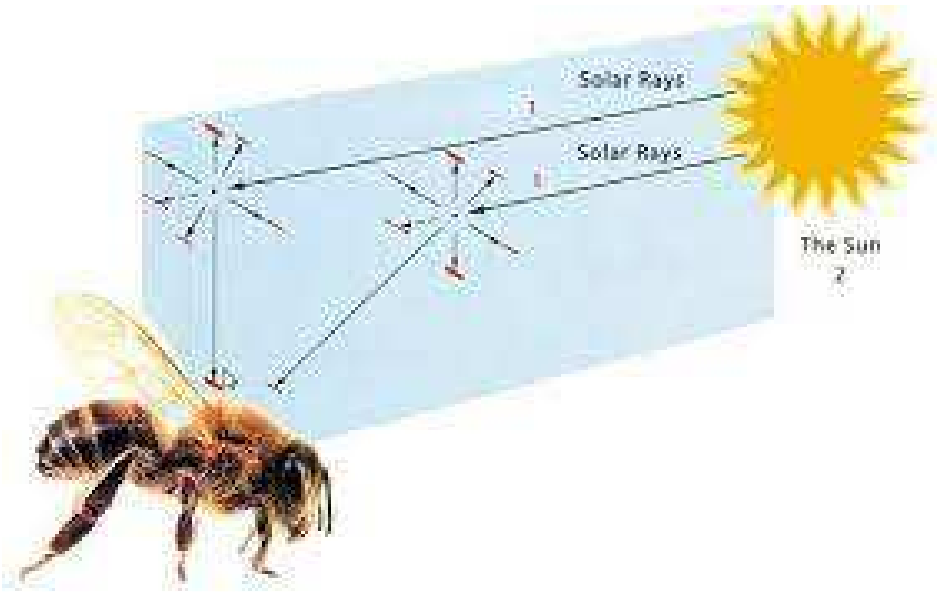
Odstraňují odražené polarizované světlo. Jsou ideální pro zvýraznění barev, kontrastu a odstranění odlesků od nekovových předmětů.



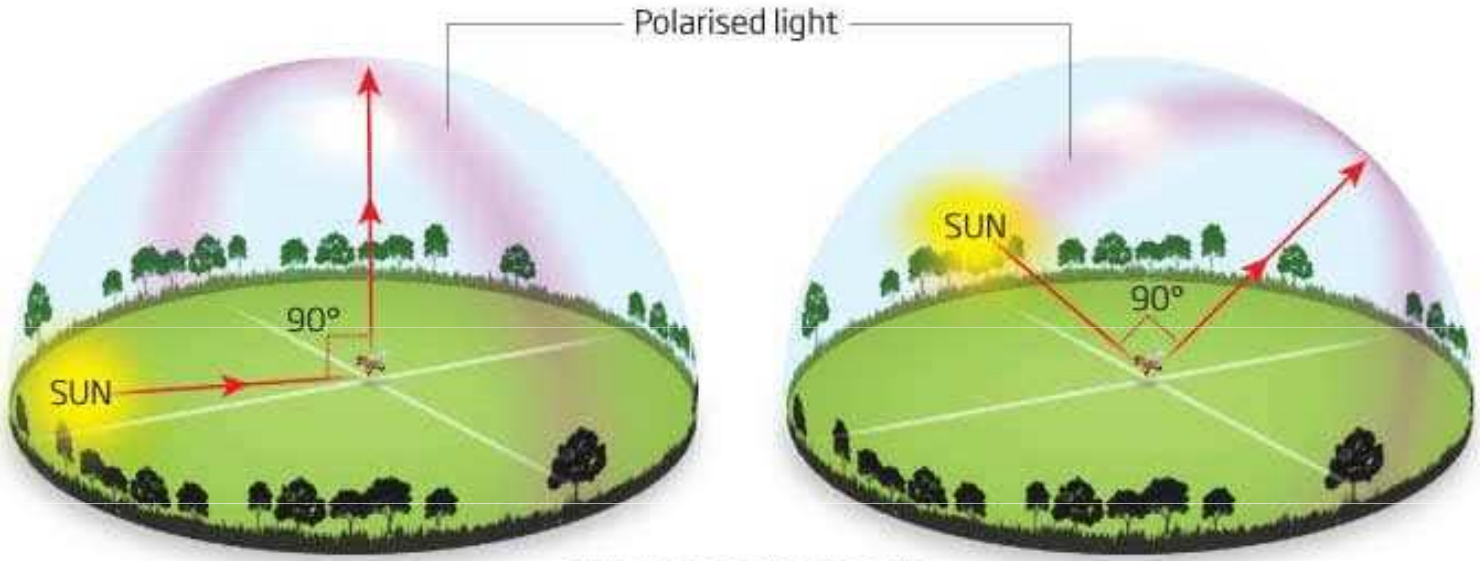
Fotoelasticimetrie

mechanické napětí ovlivňuje uspořádání atomů a tím i (an)izotropii látky. Řádný a mimořádný paprsek se skládají a vzniká interferenční obrazec (místa stejné barvy = stejné napětí).

Molekuly ve vzduchu způsobují rozptyl slunečního záření za vzniku polarizovaného světla. To včelám umožňuje navigaci i když je zataženo.



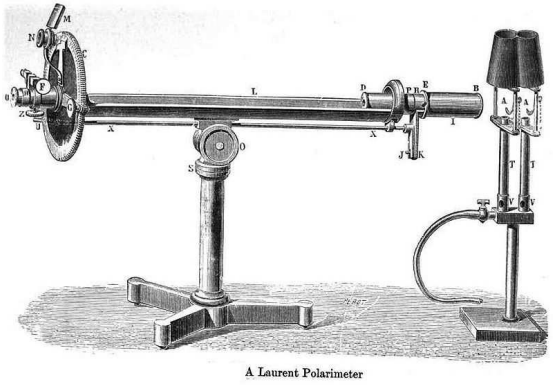
Air molecules in the atmosphere scatter photons to create a circle of strongly polarised light at 90° to the sun. This band moves with the sun throughout the day, allowing bees to use this information to navigate, even when the sun is obscured



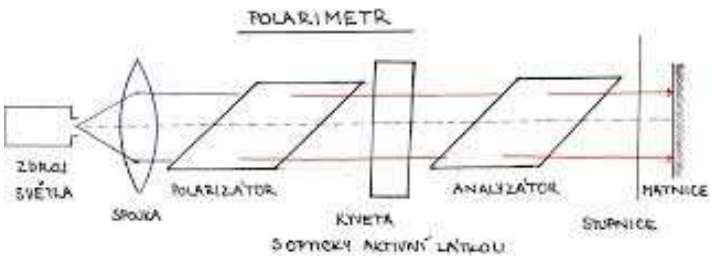
THE HORIZON FROM THE BEE'S PERSPECTIVE

Polarimetr

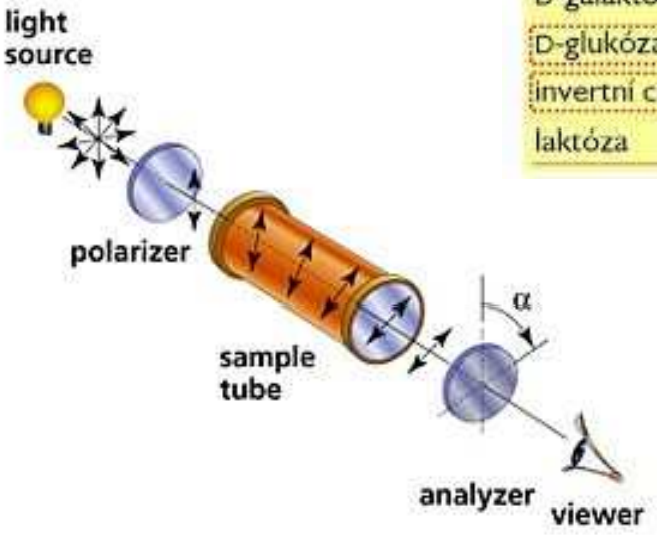
Polarimetr je přístroj určený k měření úhlu otočení roviny polarizovaného světla při průchodu opticky aktivní látkou. Slouží k měření optické otáčivosti látek nebo jejich roztoků.



A Laurent Polarimeter



$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot \ell \cdot c_w$$

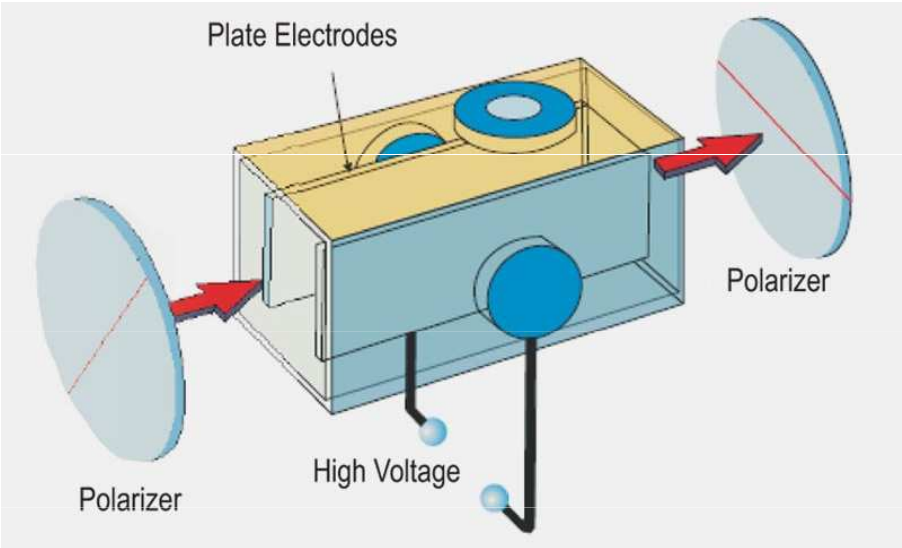


Látka	$[\alpha]_D^{20}$	Látka	$[\alpha]_D^{20}$
dextrin	+194,8	maltóza	–137,5
D-fruktóza	–93,78	rafinóza	+123,01
D-galaktóza	+80,47	sacharóza	+66,53
D-glukóza	+52,74	škrob	+196,4
invertní cukr	–20,59	xylóza	+196,4
laktóza	+55,3		

Opticky aktivní látka	$[\alpha]_D^{20}$
Kyselina glutamová	+31
Kyselina askorbová	+21
Kodein monohydrát	-144
Fruktóza	- 92
Sacharóza	+67
Glukóza	+53

Pockelsův a Kerrův jev

Pockelsův jev = vznik dvojlomu vlivem elektrického pole v původně opticky izotropních látkách. Indukovaný dvojlom je úměrný vlnové délce a čtverci intenzity elektrického pole. V případě lineární závislosti hovoříme o lineárním elektrooptickém jevu a v případě kvadratické závislosti hovoříme o kvadratickém elektrooptickém jevu též **Kerrově jevu**. Pockelsova jevu se využívá v elektrooptických modulátorech, závěrkách i při konstrukci fázových destiček. Kerrova jevu v rychlé elektrooptické uzávěrce (tzv. Kerrově článku).



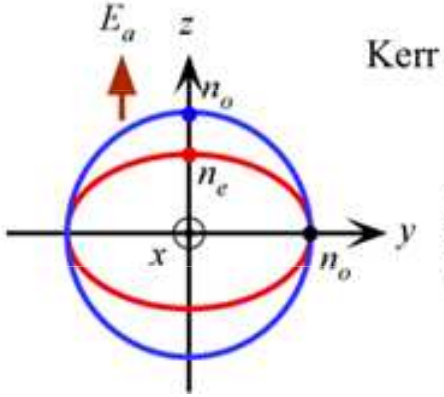
$$n' = n + a_1 E + a_2 E^2 + \ldots$$

$$\Delta n = \lambda K E_a^{\,2}$$

Kerr effect term

Kerr coefficient

Applied field



An applied electric field, via the Kerr effect, induces birefringences in an otherwise optically isotropic material