

Ústav fyzikálního inženýrství
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

GEOMETRICKÁ OPTIKA

Přednáška 3

Obsah

- Základy geometrické (papřskové) optiky

Zdroje (monochromatického) světla

Disperze

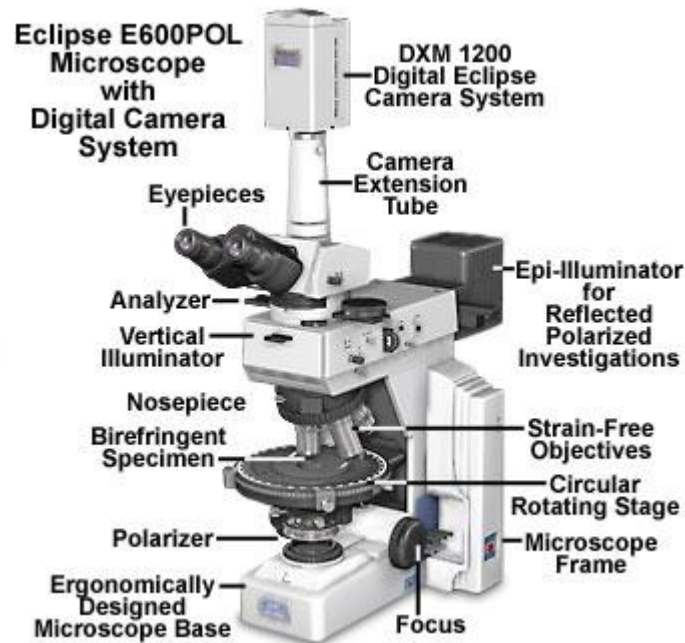
Abbéovo číslo

Katalogy optických prvků

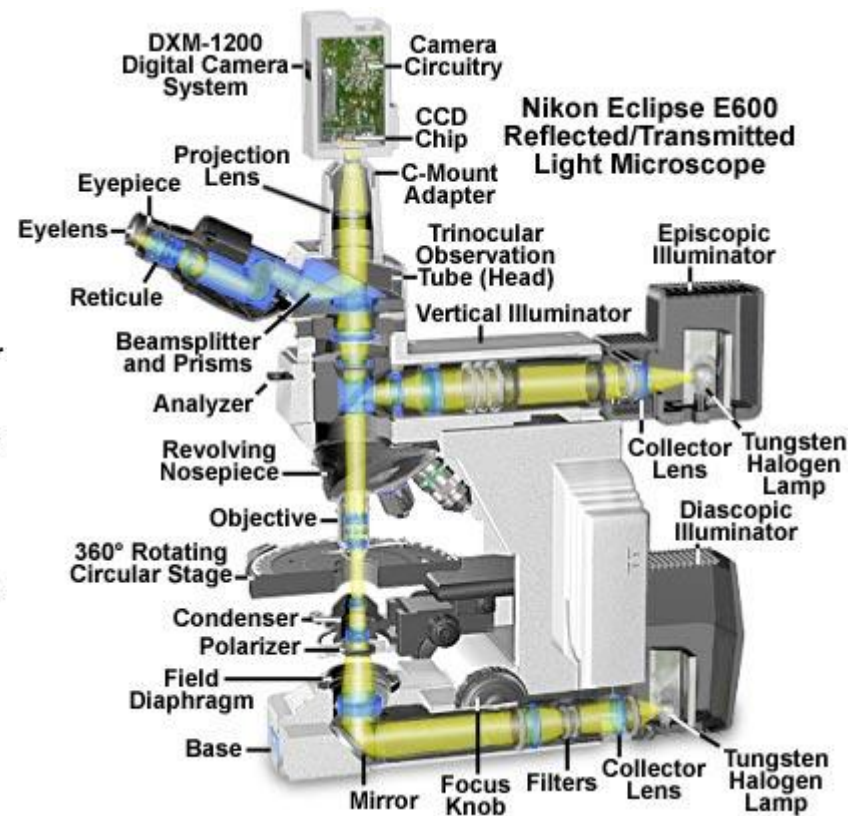
Úvod



Nikon's First Microscope (circa early 1900s)



Littera scripta manet.
Co je psáno, to je dáno.



Zdroj:
<http://www.microscopyu.com/>

Zdroje (monochromatického) záření

- Zdroje viditelného záření dělíme na:
 - zdroje tepelné (např. žárovky),
 - zdroje výbojové (průchod elektřiny v plynech)
 - luminiscenční
- Lasery

Zdroje tepelné



- Žárovky
 - přeměna elektrické energie na světlo
 - zahřívání tenkého vodiče elektrickým proudem, který jím protéká.
 - vlákno žárovky září především v IR oblasti, **zčásti** i ve viditelném světle.
 - přežhavené žárovky (projekční typy, halogeny apod.) najdeme ve spektru i UV, avšak baňka žárovky z obyčejného skla je pro ultrafialové záření prakticky nepropustná.
 - vlákno žárovky se nechová jako dokonale černé těleso*, ale jako by bylo o několik set kelvinů teplejší (wolfram je selektivní zářič).

* Dokonale černé těleso (absolutně černé těleso, ideální zářič) je tepelný zářič dokonale absorbující veškeré EM záření které dopadne na jeho povrch. Závislost intenzity záření I tohoto tělesa na frekvenci záření vyjadřuje Planckův vyzařovací zákon.

Pozn.: Od klasické ke kvantové fyzice

- Planckova hypotéza (1900, 1918) vyzařovací zákon - rozdělení spektrální hustoty H_λ záření černého tělesa

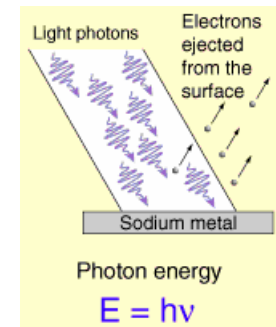
$$E = hn = \frac{h}{2p} w = hw$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

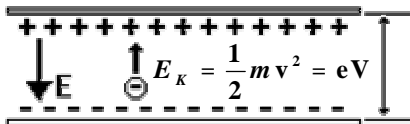
$$(k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K})$$

$$H_\lambda = \frac{2p \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1}$$

- Fotoelektrický efekt - Einstein (1905, 1921)
- Osvětlením některých prvků (sodíku) jsou z nich vypuzovány elektrony.
- Řada pozorovaných jevů nemohla být vysvětlena pomocí klasické fyziky.
- Světelná energie vychází ze zdroje světla po částech, světelných kvantech.
- Tato kvanta nazval fotony.



- Elektronvolt (eV) je množství energie, kterou potřebuje elektron na překonání elektrického potenciálu 1V.



$e = \text{electron charge} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
 $V = \text{voltage}$

$$E = qV = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \frac{\text{J}}{\text{C}})$$

$$1 \text{ electron volt} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Částicová fyzika – hmotnost v eV

$$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2}$$

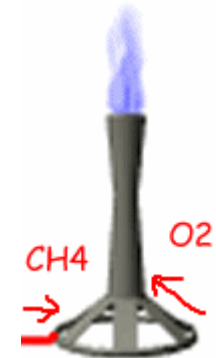
Zvolí se taková jednotka dráhy, aby rychlost šíření světla se rovnala 1.

Zdroje tepelné

- Žárovky – výhody:
 - vysoce automatizovaná výroba,
 - vynikající podání barev ($R_a = 100$),
 - možnost přímého napájení z elektrovedné sítě,
 - absence zdraví škodlivých látek.
- Žárovky – nevýhody:
 - nízká účinnost a měrný výkon (kolem 10-15 lm/W)
 - krátká životnost,
 - pokles světelného toku v průběhu života,
 - a závislost parametrů na napájecím napětím.



Robert Wilhelm Eberhard von Bunsen
1811 - 1899



Zdroj:
<http://www.jergym.hi.edu.cz/~canovm/objevite/objev2/bun.htm>

Pozn.:

Problém krátkého života žárovky se u halogenové žárovky řeší příměsí halogenu, (např. methylenbromid). V žárovce probíhá tzv. halogenový cyklus, kde se při vysoké teplotě vypařující wolfram slučuje a rozpadá např. s bromem. Díky tenzi wolframových par v blízkosti vlákna se omezuje jeho vypařování. Výsledkem je vyšší životnost a zvýšení světelného toku (měrný výkon až 20 lm/W). U halogenových žárovek je použito křemenné sklo kvůli značně vyšším teplotám (min. 250°C). Problém s UV zářením. Z **tepelných zdrojů monochromatického záření** se asi nejvíc využíval sodíkový (589,0 nm 589,6 nm) a draslíkový (766,5 nm a 769,9 nm) plamen (Bezbarvý Bunsenův plamen, asi 1800 °C, soli různých kovů do něho přidané jej zbarví). 7

Zdroje výbojové

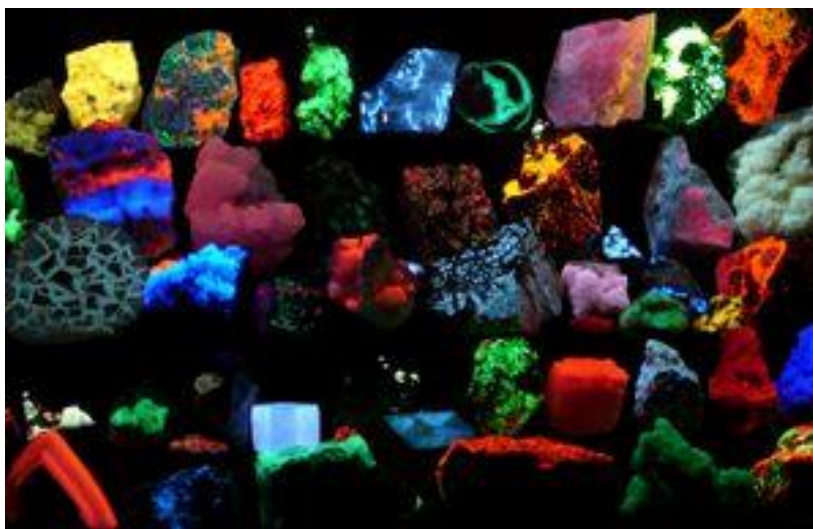
- Průchod elektriny v plynech
 - oblouk v atmosféře plynu nebo páry kovu,
 - využívají přeměny elektrické energie na kinetickou energii elektronů pohybujících se rychle mezi elektrodami,
 - při srážkách elektronů s atomy plynů kovových par se jejich energie mění na optické záření,
 - spektrum záření je čárové, rozložení spektrálních čar závisí na druhu výboje i na složení a tlaku plynné náplně.
 - nízkotlaké (např. zářivky, nízkotlaké sodíkové výbojky)
 - vysokotlaké (např. vysokotlaké rtuťové či sodíkové výbojky).

Prvek	Vlnové délky emitovaného světla v nm (nejintenzivnější čáry)				
Rtuť (Hg)	404,7	435,8	546,1		
Vodík (H)	434,6	486,1	656,3		
Helium (He)	438,8	492,2	587,6	657,8	706,5
Kadmium (Cd)	480,0	508,6	643,8		

Zdroje luminiscenční

- Co to je luminescence?

Luminescence vzniká excitací atomu působením jiného záření, elektronů apod., a následným návratem atomu do základního stavu, čímž dojde k vyzáření fotonu. Luminescenci látky lze tedy pozorovat po jejím ozáření jiným zdrojem záření. Pokud po odstranění zdroje ozařování látky luminescence (rychle) vymizí, hovoříme o **fluorescenci**. Pokud luminescence (určitou dobu) přetrvává i po odstranění zdroje ozařování, jedná se o **fosforescenci**.



Fluorescence/fosforescence různých krystalů

Zdroj: <http://en.wikipedia.org/>

Zdroje luminiscenční

- Příklad využití

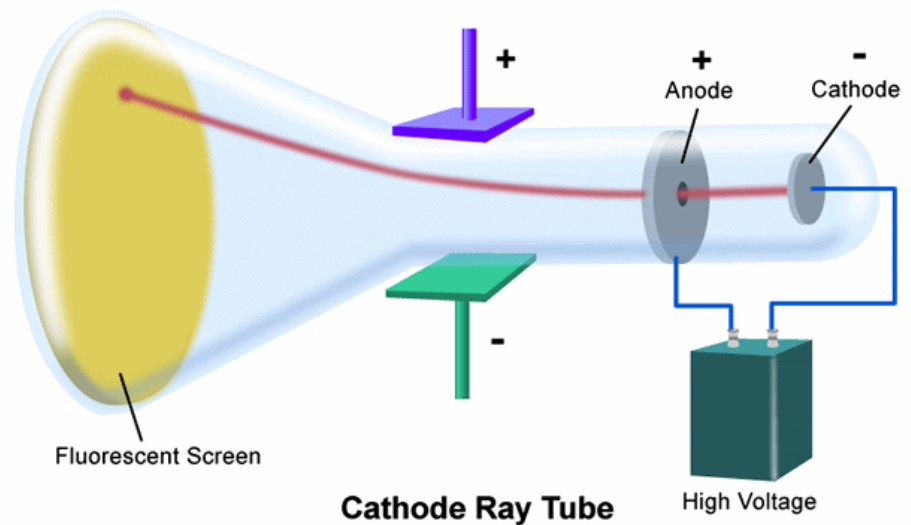
S luminiscencí se setkáváme například u zářivek, které vyzařují světlo, ale jejich povrch je chladný. Zářivka je tvořena trubicí, v níž probíhá výboj v plynu. Zdrojem světla zářivky však není samotný výboj, jehož UV záření je pro lidské oko neviditelné. UV záření dopadá na vrstvu látky, kterou je pokryta vnitřní plocha trubice, a způsobuje její luminiscenci, tj. látka vyzařuje viditelné záření.



Luminofory, druhy luminescence

- Látky, u nichž nastává luminescence se, označují jako luminofory. Jsou to převážně pevné látky s příměsmi vytvářejícími tzv. luminescenční centra (např. ZnS, CdS příměsí Ag, Cu, Mg aj.).
- Existuje více druhů luminescence, např.
- Fotoluminescence - je vyvolána EM zářením (např. v případě zářivky)
- Elektroluminescence - je vyvolána elektrickým polem (např. luminescenční dioda, reklamní panely, nouzové osvětlení)
- Katodoluminescence - je vyvolána dopadajícími elektrony (např. stínítka televizní obrazovky)
- Chemoluminescence - je vyvolána chemickou reakcí (patří sem i bioluminiscence, kdy je emise světelného záření vytvořena živými organismy)
- Termoluminescence - je vyvolána vzrůstem teploty po předchozím dodání energie
- Radioluminescence - je vyvolána působením jaderného záření
- Triboluminescence - je vyvolána působením tlaku

Luminescence



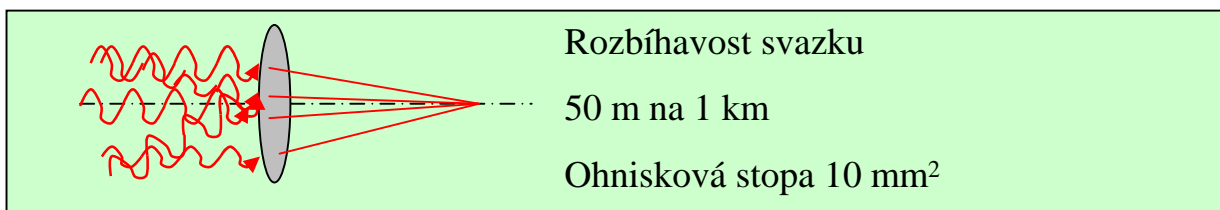
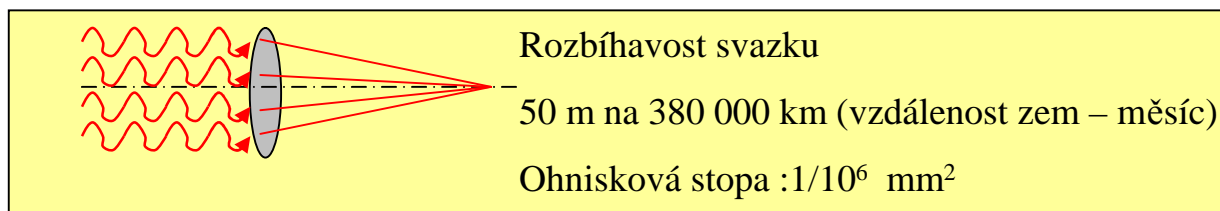
©NCSSM 2002

Lasery



Theodore H. Maiman
(1927 – 2007)

- Laser patří mezi mladší vynálezy 20. století (1960, Maiman).
- Slovo samo je zkratkou výrazu anglického výrazu "**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation", tj. "zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření". Český výraz pro laser je "*kvantový generátor světla*". Od běžného světla (např. světla žárovky) se laserové světlo liší zejména tím, že je *monochromatické* (jednobarevné), *koherentní* (uspořádané) a má malou *divergenci* (rozbíhavost). Koherentní světlo má jedinou frekvenci a fázi .

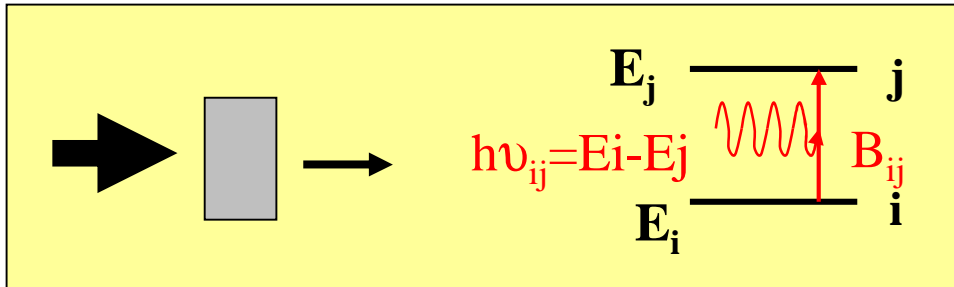


Laser – krátká historie

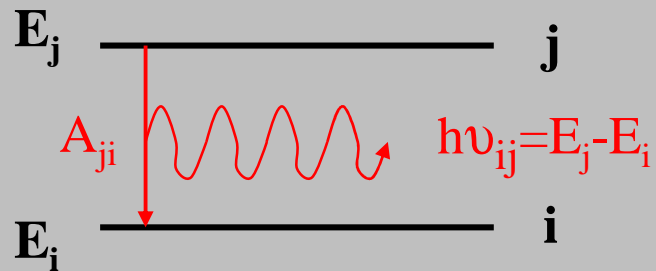
- Činnost laseru je založena na principu **indukované emise**, který Albert Einstein předpověděl již v roce 1917.
- Anglický fyzik Paul Adrien Maurice Dirac provedl koncem 20. let ještě detailnější matematickou analýzu kvantové teorie záření a dále rozvinul Einsteinovy myšlenky.
- V roce 1958 provedl Charles Hard Townes (pozdější nositel Nobelovy ceny za fyziku) se svými spolupracovníky správné výpočty, které umožnily tuto myšlenku realizovat.
- Koncem roku 1959 se začala pozornost vědců obracet k rubínu, jednomu z nejušlechtlejších drahých kamenů. Vědce však zajímalo to, že rubín jeví fotoluminiscenci.
- V létě roku 1960 americký fyzik T. Maiman vyleštil koncové stěny krystalu umělého rubínu a opatřil je vrstvičkou stříbra (ve funkci zrcadla). Po ozáření krystalu zeleným světlem pronikl jedním ze zrcadel červený paprsek laserového světla. Maiman se tak stal tvůrcem prvního - byť nedokonalého - laseru.

Pozn.: Interakce záření s látkou

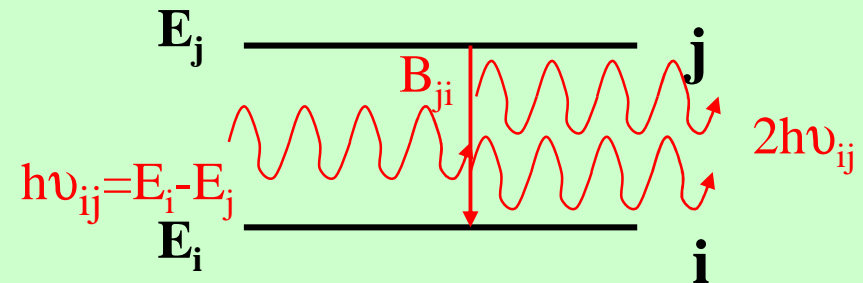
Indukovaná (Stimulovaná) Absorpce



Spontánní Emise



Indukovaná (Stimulovaná) Emise



Einstein, 1917

Lasery

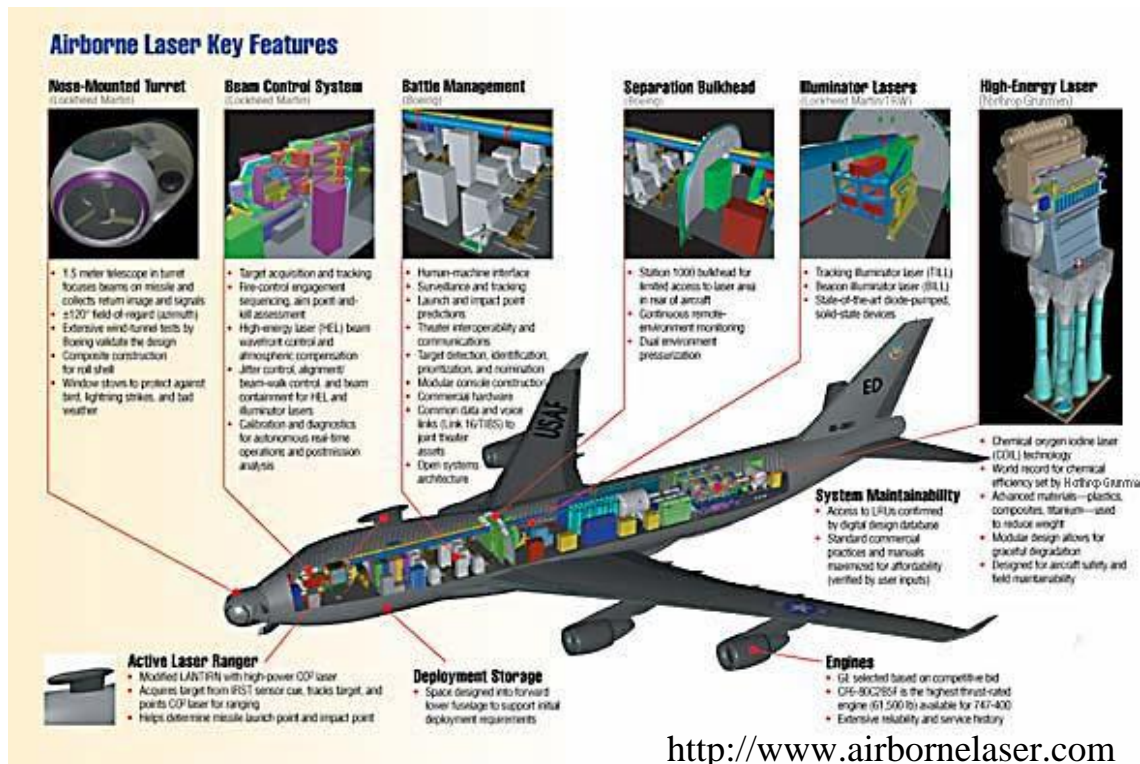
- Od 1960 procházel laser neustálým vývojem. Jednotlivé typy se také postupem času zdokonalovaly a vylepšovaly se jejich parametry.
- Dnes můžeme lasery rozdělit do různých kategorií. Podle materiálů, ze kterých může být získán laserový efekt, jsou to především lasery pevnolátkové, kapalinové a plynové.
- Čerpat energii mohou lasery zejména opticky, elektricky, chemicky nebo termodynamicky.
- Lasery můžeme dělit také podle vyzařované vlnové délky na infračervené, v oblasti viditelného světla, ultrafialové a rentgenové.
- Konečně můžeme lasery dělit podle použití na lasery výzkumné, měřicí, lékařské, technologické, energetické a vojenské.

Lasery

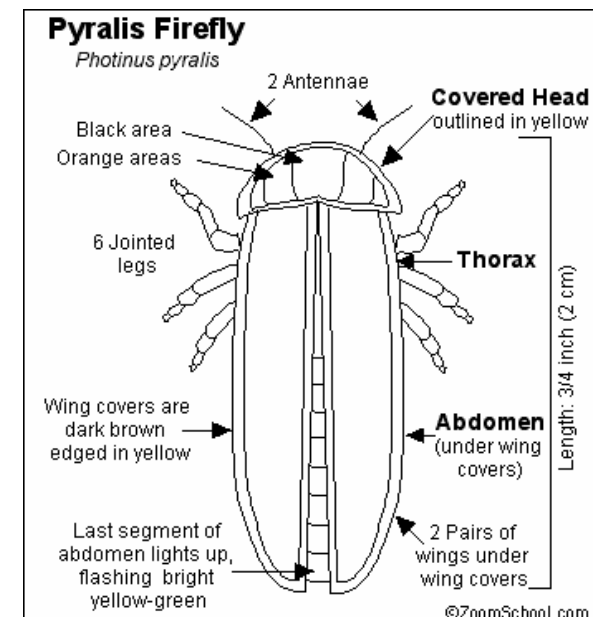
- Většina laserů s kterými se běžně setkáváme, jsou lasery malého výkonu pracující kontinuálně (spojitě, nepřetržitě). Od běžných laserových ukazovátek, přes laserové tiskárny, kopírky nebo CD-ROM mechaniky až k laserovým efektům známým z rockových koncertů. Také při přenosu informací se používají lasery pracující v nepřetržitém režimu.
- Dále se lasery používají při měření délek, při operaci očí (odstranění či zmenšení krátkozrakosti) apod.
- Při sváření, řezání, vrtání či chirurgii je určující charakteristikou výkon laseru, proto se zde uplatňují impulsní lasery. Výkon laseru totiž také závisí na délce laserového pulsu, a tak čím bude puls kratší, tím větší bude výkon. Zkracování délky pulsu došlo až k několika femtosekundám, čímž se docílilo výkonu srovnatelného s atomovými elektrárnami.

Lasery - účinnost

- Přesto, že člověk při konstrukci laseru zvládl mnohé, co se týče energetické účinnosti, přírodu - podobně jako v jiných oblastech - se mu překonat nepovedlo, neboť zatímco v žárovce se mění jen necelá 3% elektrické energie ve světlo, u zářivek něco kolem 10 - 15% a u laseru kolem 20%, "obyčejná" světluška dokáže přeměnit svou biochemickou energii na světlo téměř na 100%.

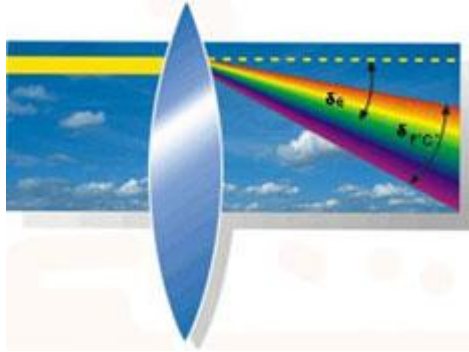


<http://www.airbornelaser.com>



Zdroj: <http://www.quido.cz/objevy/laser.htm>

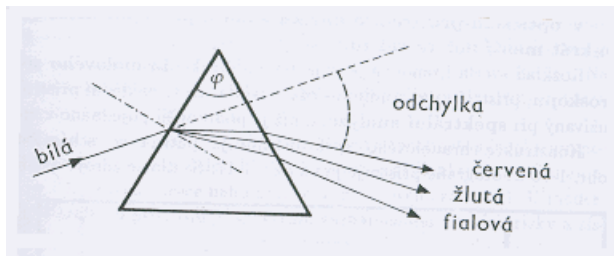
Disperze



Jestliže optickými prvky jako jsou čočka nebo hranol prochází bílé světlo, rozkládá se do různých barevných odstínů, protože každá barva se lomí jinak. Tento fenomén je znám jako disperze.



- Disperze vzniká důsledkem závislosti rychlosti světla v látkách na frekvenci světla (rychlost světla se zpravidla s rostoucí frekvencí zmenšuje → ve vakuu k disperzi světla nedochází),
- index lomu optického prostředí závisí na frekvenci světla a při (normální) disperzi se s rostoucí frekvencí zvětšuje,
- disperze dokazuje, že bílé světlo je světlo složené z jednoduchých (barevných) světel.

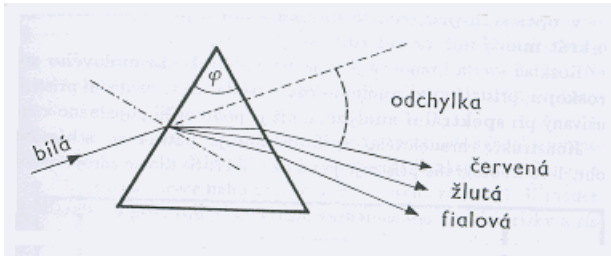


φ ... lámavý úhel

na lámavých plochách optického hranolu se světlo láme dvakrát → hranolové spektrum (řada na sebe navazujících barevných proužků)

Bílé světlo se hranolem rozloží na spektrum, v němž jsou zastoupeny všechny barvy odpovídající paprskům monofrekvenčního světla v posloupnosti : červená (nejmenší hodnota indexu lomu), oranžová, žlutá, zelená, modrá, fialová (největší hodnota indexu lomu).

Disperze – index lomu



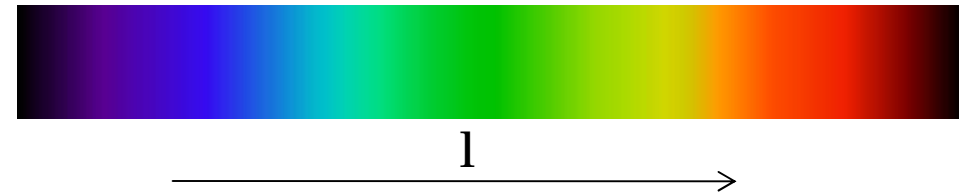
$$f = c / \lambda = c_0 / \lambda_0$$

λ ... vlnová délka světla v daném prostředí, λ_0 ... vlnová délka světla ve vakuu,

c_0 ... rychlost světla ve vakuu

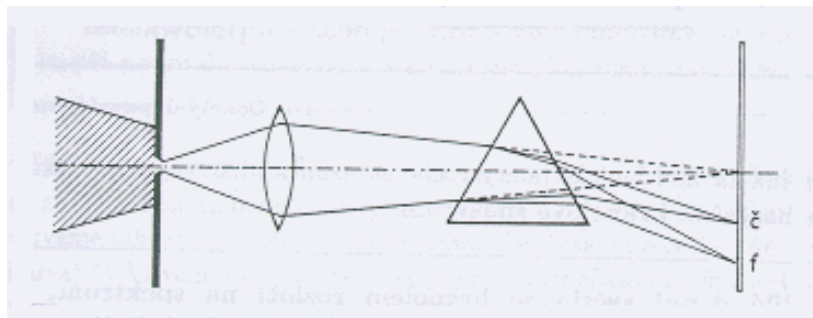
$$n = c_0 / c$$

$$\lambda = \lambda_0 / n$$



V optickém prostředí o indexu lomu n je vlnová délka světla n -krát menší než ve vakuu (frekvence se nemění). Hranolový spektroskop

- přístroj na studium složení světla,
- základní přístroj používaný ve spektrální analýze



kolimátor (štěrbina umístěná v ohnisku spojné čočky), optický hranol, stínítko

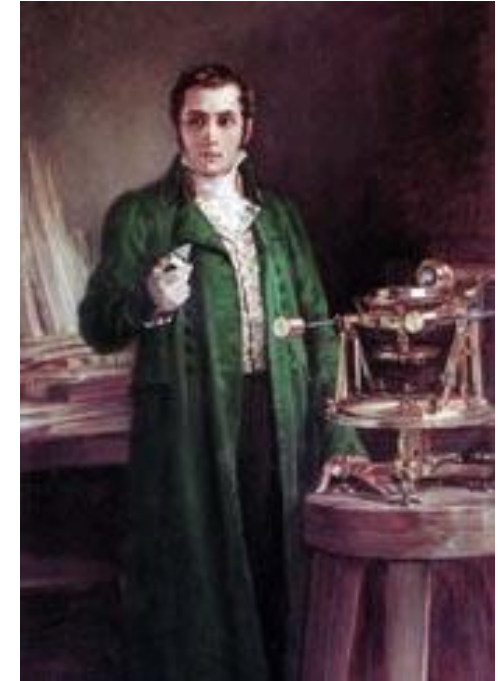
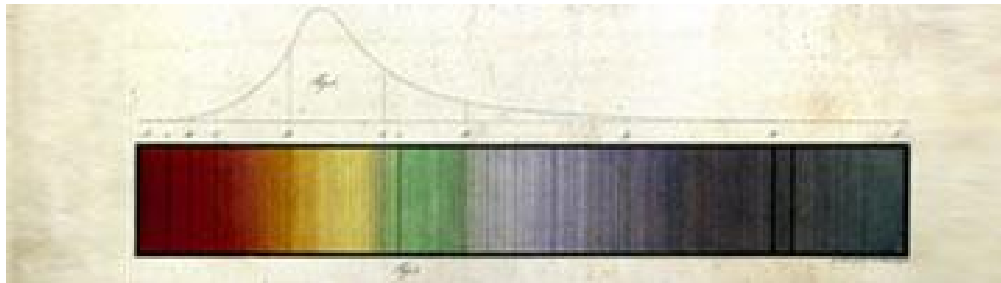
Pozn.: **spektroskop** (spektrum pozorujeme okem pomocí dalekohledu)

spektrograf (spektrum je zaznamenáno na fotografické desce nebo pomocí záznamového zařízení)

Index lomu prostředí – Disperze, Fraunhoferovy čáry

- Fraunhoferovy čáry

Absorpční čáry vzniklé ve slunečním spektru při průchodu světla vrstvou plynného obalu Slunce a zemským ovzduším. Odpovídají emisním čárám některých známých prvků.

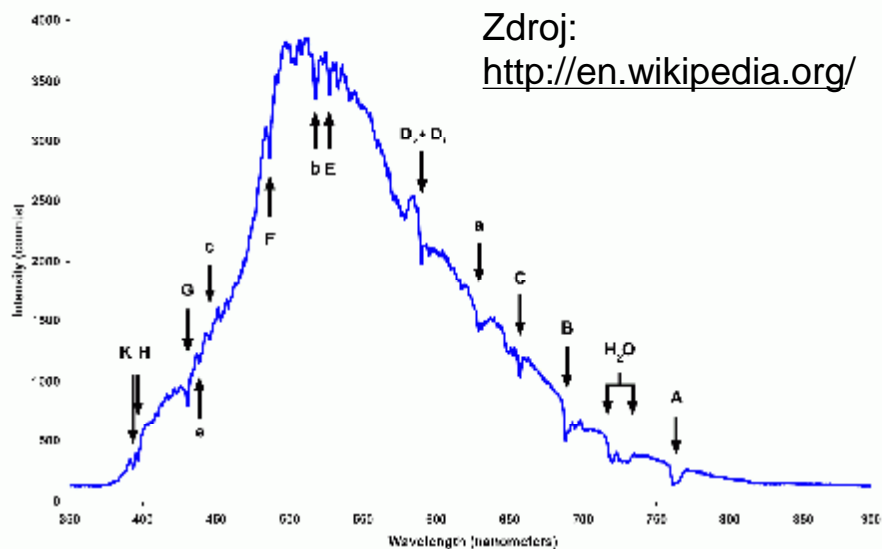


Joseph von Fraunhofer, (1787-1826) německý sklář, fyzik a vynálezce. Přestože se matematice a fyzice naučil sám, stal se nejvýznamnějším optikem první čtvrtiny devatenáctého století. Podařilo se mu sestavit schéma čar slunečního spektra, které v současnosti nese jeho jméno a položit tak základy budoucího správného propočtu achromatických čoček. Rozklad světelného paprsku do jednotlivých barev spektra s použitím zařízení vlastní konstrukce mu umožnilo propočítat přesnou vlnovou délku jednotlivých barevných sektorů. Prvním významnějším objevům v astronomii výrazně pomohla i kvalita optiky, kterou vyráběl.

Zdroj:

<http://www.zeiss.cz/>

Fraunhoferovy čáry



Značka	Vlnová délka v nm	Prvek
A	759,4	O
B	686,7	O
C	656,3	H
D	589,3	Na
E	526,9	Fe, Ca
F	486,1	H
G	430,8	Fe, Ca
H	396,9	Ca

Chladné páry určitých látek pohlcují ze světla které nimi prochází světelné složky těch vlnových délek, které by (v excitovaném stavu) samy vysílaly. **Fraunhoferovy čáry** jsou absorpční čáry relativně chladných plynů buď v sluneční nebo v zemské atmosféře.

Barva	Červená		Žlutá		Zelená	Modrá			Fialová
Značka	A´	C	D	d	e	F	g	G´	h
Prvek	K	H	Na	He	Hg	H	Hg	H	Hg
Vln. délka (nm)	768,2	656,3	589,3	587,6	546,1	486,1	435,8	434,1	404,7

Obecně, kde není úplného souhlasu s vlnovou délkou Fraunhoferovy čáry, zavádí se označení s čárkou, nebo malé písmeno.

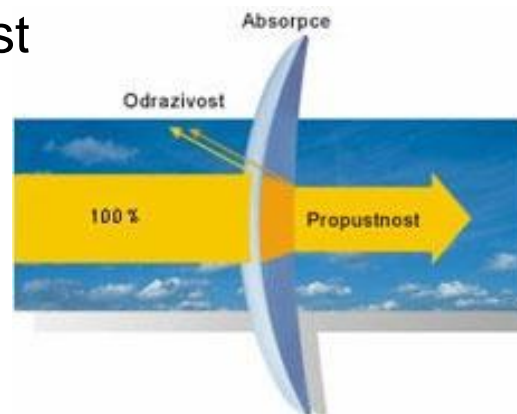
Charakteristiky optických skel

- Základní materiál prvků optických přístrojů – optické sklo.
- V seznamech optických skel bývají udány indexy lomu pro světla A', C, D e, F, G', h.
- Základní charakteristiky každého optického skla: index lomu n_D pro sodíkové světlo D (nebo též pro heliové světlo d) a rozdíl indexů lomu:

$$\Delta n = n_F - n_C,$$

tzv. **střední disperze**.

- Odrazivost, absorpce a propustnost



Zdroj:
<http://www.zeiss.cz/>

Index lomu prostředí – Abbeovo číslo

- Mimo to udává důležitou charakteristiku skla tzv.

Abbeovo číslo

$$u = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C},$$

kde n_D , n_F a n_C je index lomu příslušného materiálu na vlnových délkách odpovídajících Fraunhoferovým čárám D, F a C (tj. 589,2 nm, 486,1 nm a 656,3 nm). Čím je hodnota u vyšší, tím menší má materiál disperzi a je tedy vhodnější pro použití především pro konstrukci čoček.

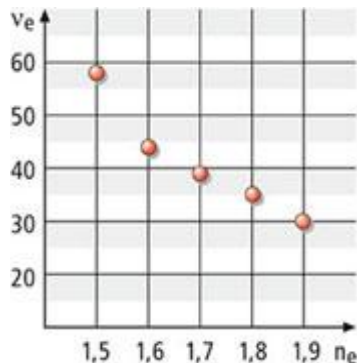


Ernst Karl Abbe, 1840 – 1905, německý fyzik a astronom. Významně přispěl k vzniku teorie optických přístrojů. Konstruoval přístroj Abbeho komparátor.

Zdroj:
<http://en.wikipedia.org/>

- Poznámka: Abbeovo číslo může být

$$u_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C} = \frac{d_e}{d_{FC}}.$$



Čím větší index lomu n :

- tím vyšší odrazivost,
- tím větší střední disperze,
- tím menší Abbeovo číslo,
- tím nižší propustnost.

Zdroj:
<http://www.zeiss.cz/>

Index lomu prostředí – Optická skla

- Rozsah indexů lomu optických skel n_D je od 1,45 do 1,90 a rozsah Abbeova čísla u od 70 do 21. Podle hodnot těchto veličin dělíme optická skla na 4 základní druhy:

	Druh skla	n_D	u
1	Korunová skla obyčejná	malý	velké
2	Flintová skla obyčejná	velký	malé
3	Korunová skla těžká	velký	velké
4	Flintová skla lehká	malý	malé

	Značka skla	n_D	u	$n_F - n_C$
1	BK 7	1,51 625	64,0	0,00 806
	Ba K 2	1,53 988	59,6	0,00 905
2	F 2	1,61 992	36,3	0,01 706
	SF 11	1,78 446	25,7	0,03 052
3	SK 16	1,62 031	60,3	0,01 029
	SSK 5	1,65 832	50,8	0,01 295
4	LLF 1	1,54 803	45,9	0,01 195
	LF 6	1,56721	42,8	0,01 325

SCHOTT AG (Jena, Germany) is a manufacturer of high-quality industrial glass products, such as fiber-optics and components used in flat panel displays.

They also publish the [Schott Glass Catalog](http://www.schott.com/optics_devices/english/download/) (http://www.schott.com/optics_devices/english/download/), which is a standard reference for the properties of the many optical glasses produced by them and other companies.

Zdroj: <http://en.wikipedia.org/>

Index lomu prostředí – Optická skla

- Kromě optických skel se používá v optické praxi řada jiných průhledných materiálů:

Materiál	n_D	n	$n_F - n_C$
Fluorit (CaF ₂)	1,43 385	95,0	0,00454
Kamenná sůl (NaCl)	1,54 432	42,9	0,01273
Sylvin (K Cl)	1,49 038	43,9	0,01113
Fluorid lithný (LiF)	1,39 210	98,5	0,00395
Bromid draselný (KBr)	1,56 010	33,6	0,01368
Jodid draselný (KJ)	1,66 640	23,5	0,02840
Tavený křemen	1,45 843	67,0	0,00677
Krystalický křemen - řádný	1,54 424	72,0	0,00778
- mimořádný	1,55 335	68,5	0,00806
Vápenec - řádný	1,65 835	49,0	0,01347
- mimořádný	1,48 640	79,0	0,00616
Voda	1,33 300	55,5	0,00601
Monobromnaftal inl	, 6 802	0, 3	, 0247i
Sirouhlík	1,62 772	18,4	0,03420
Cedrový olej	1,51 405	49,0	0,01049
Kanadský balsám	1,54 000	42,0	0,01300

Materiál	Mez propustnosti λ a τ	
	ultrafialové (m) u	infračervené (mm)
Korunové sklo	350	2,0
Flintové sklo	380	2,5
Křemen, krystal i tavený	185	3,5
Fluorit	120	9,0
Kamenná sůl	200	17,0
Sylvin	200	21,0
Fluorid lithný	120	7,0
Bromid draselný	210	28,0
Jodid draselný	250	31,0

- Mez propustnosti vybraných optických materiálů uvádí další tabulka.