

Ústav fyzikálního inženýrství  
Fakulta strojního inženýrství  
VUT v Brně

# GEOMETRICKÁ OPTIKA

*Přednáška 1*

# Vyučující

- Přednášky

Doc. Ing. Jozef **Kaiser**, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,

Ústav fyzikálního inženýrství

Technická 2, A2-2.NP, kancelář 204

Tel.: 5 4114 2846

E-mail: [kaiser@fme.vutbr.cz](mailto:kaiser@fme.vutbr.cz)

Konzultační hodiny: po předchozí domluvě

- Cvičení

Ing. Radomír **Malina**, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,

Ústav fyzikálního inženýrství

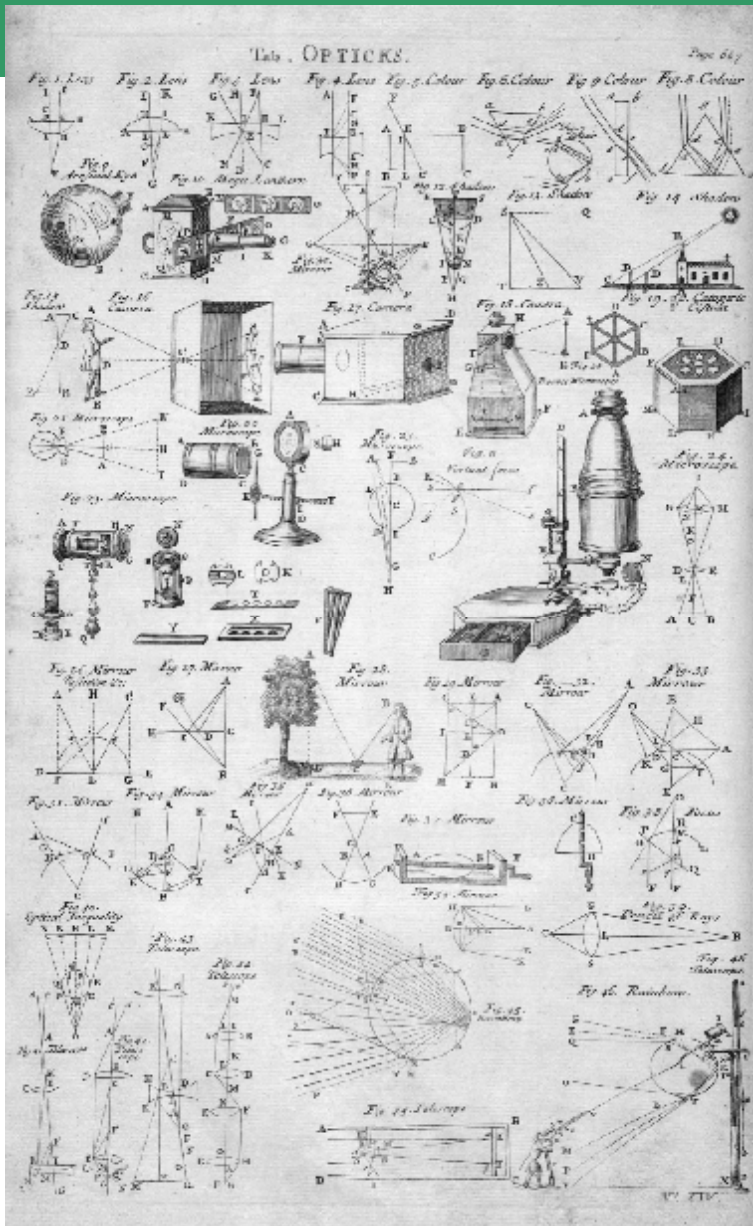
Technická 2, A2-2.NP, kancelář 219

Tel.: 5 4114 2766

E-mail: [malina@fme.vutbr.cz](mailto:malina@fme.vutbr.cz)

Konzultační hodiny: po předchozí domluvě

# Úvod



***Quidquid discis tibi discis.***  
Čemukoli se učiš, učiš se pro sebe.

***Cyclopaedia: or, An Universal Dictionary of Arts and Sciences***

was an encyclopedia published by Ephraim Chambers in London in 1728, and reprinted in numerous editions in the 18th Century. The Cyclopaedia was one of the first general encyclopedias to be produced in English.

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

# Obsah

- Informace o kurzu  
Cíl, osnova a hodnocení kurzu.  
Učební texty.  
Podmínky k získání zápočtu a ke zkoušce.
- Základy geometrické (paprskové) optiky  
Historie optiky

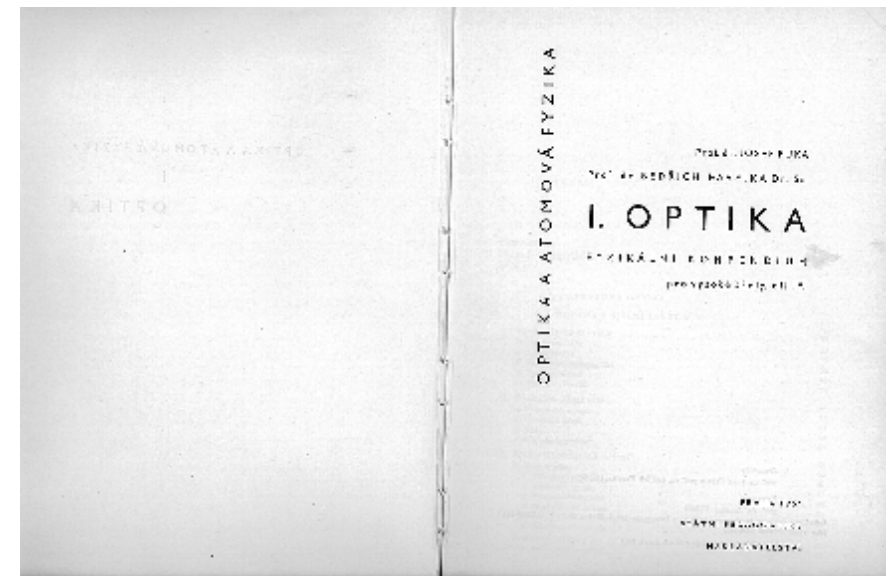
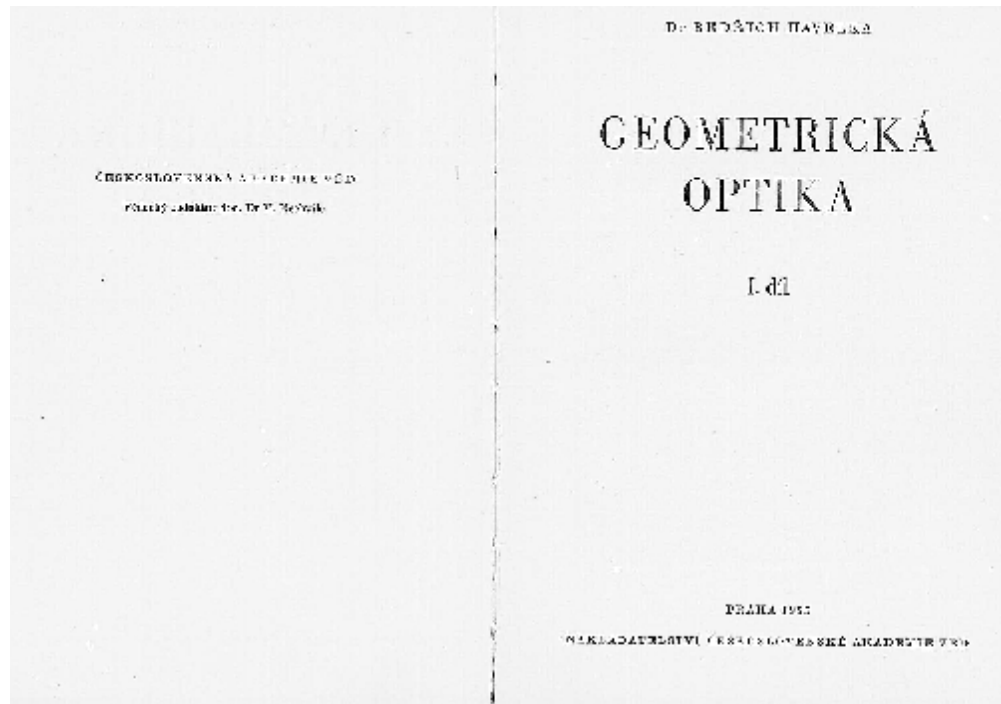


# Cíl kurzu

- Anotace

Výuka geometrické (paprskové) optiky vychází v podstatě ze základních principů geometrie. Řeší zákonitosti šíření světelného paprsku optickým prostředím a rozhraním optických prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi a geometrii plochy na jejich rozhraní. Rozsah předmětu je přizpůsoben bakalářskému studiu optometrie.

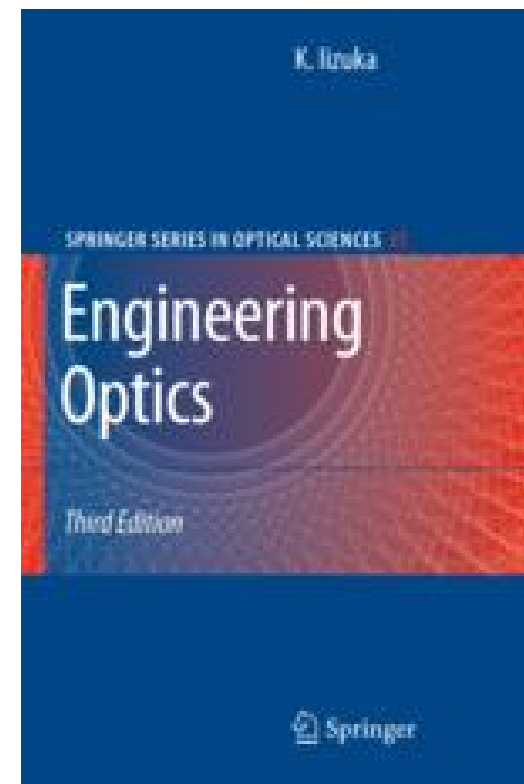
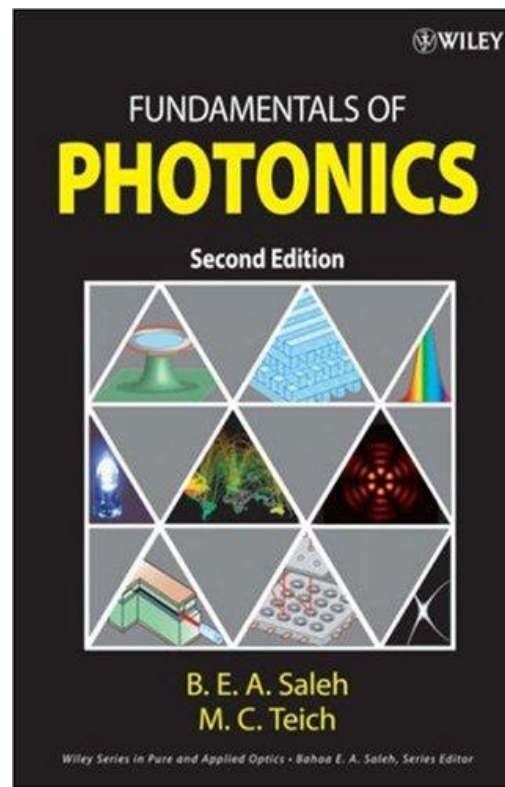
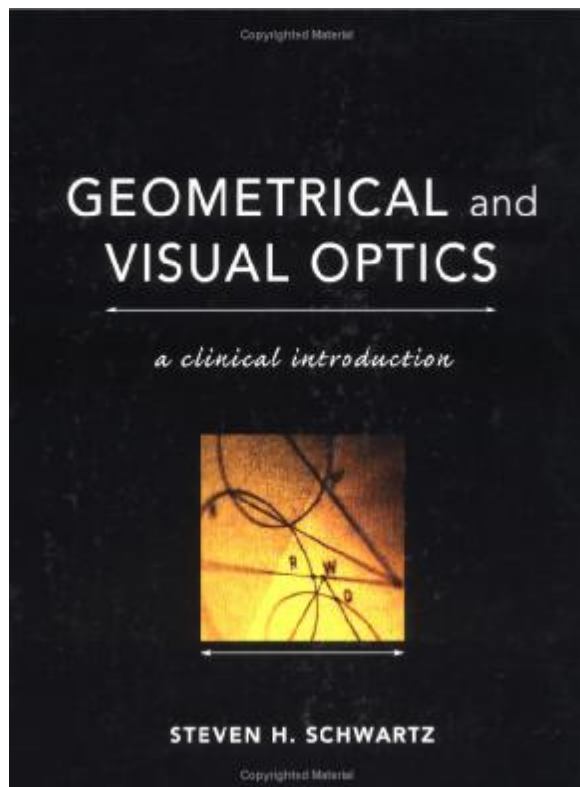
# Učební Text



<http://www.opto.cz/havelkal/index.html>

[http://www.opto.cz/fuka\\_havelka/index.html](http://www.opto.cz/fuka_havelka/index.html)

# Učební Text



# Hodnocení kurzu

- Podmínky k udělení zápočtu
  1. Aktivní účast na cvičeních. Tolerují se maximálně **2** absence (ve výjimečných případech náhrada možná při domluvě se cvičícím).
  2. Získání **60%** bodů ze dvou povinných písmenek (v odůvodněných případech možnost získat chybějící body na zápočet vypracováním speciálních úkolů po domluvě se cvičícím).
- Podmínky pro získání zkoušky ( 2. semestr)
  1. Písemný test s úlohami, sestavený z učiva probíraného na přednáškách a cvičeních.
  2. Při získání alespoň **60% bodů** z testu postup do druhého kola – **ústní zkouška**.
  3. Výsledné hodnocení se skládá z hodnocení ze **cvičení (20 %)** a **zkoušky (80 %)**.

# Osnova kurzu

- Geometrická optika – 1. semestr, 1/2

1. Historie optiky.

2. Zákony geometrické optiky, index lomu prostředí, index lomu vzduchu, vzájemné vztahy. Fermatův princip, odvození zákona lomu a odrazu z tohoto principu.

3. Disperze, Abbéovo číslo, katalogy optických materiálů.

4. Planparalelní destička, hranol pro lom.

5. Minimální deviace, použití, optický klín.

6. Zobrazení kulovou plochou obecně a v paraxiálním prostoru.

7. Základní body jedné kulové plochy.

8. Zobrazení soustavou kulových ploch, polohy základních bodů soustavy, ohniskové vzdálenosti.

9. Zobrazovací rovnice (pro paraxiální prostor).

10. Zobrazení čočkou tenkou, reálné zobrazení čočkou tlustou.

11. Zobrazení soustavou čoček.

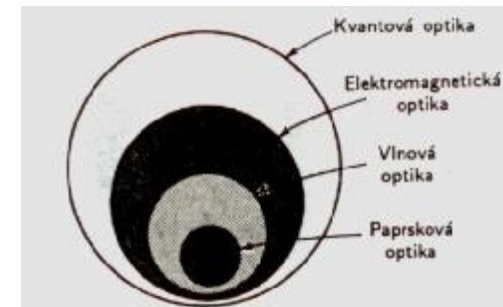
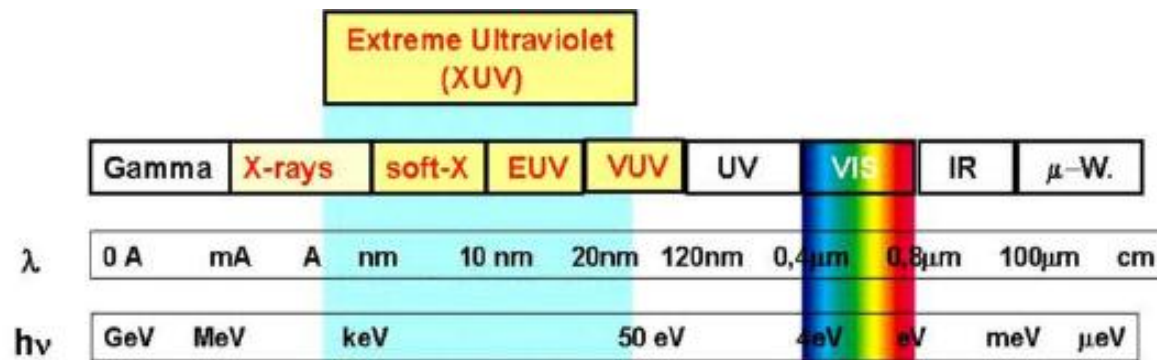
12. Stručné zopakování probrané látky.

13. Písemný test.

# Úvod

- **Světlo** je:

Elektromagnetické vlnění. Šíří se ve tvaru dvou navzájem spjatých vektorových vln, vlny elektrického pole a vlny pole magnetického.



- Mnohé optické jevy je možné popsat skalární teorií, ve které světlo lze popsat pomocí jediné skalární funkce – **vlnová optika**.
- Když se světelné vlny šíří skrze předměty, jejichž rozměry jsou mnohem větší než je vlnová délka a okolo nichž je vlnová podstata slabě rozeznatelná -> může být jeho chování popsáno pomocí paprsků splňujících geometrická pravidla – **paprsková (geometrická) optika**.

# Historie optiky - Mezopotámie

- Klínové písmo, Mezopotámie (dnešní Irak), 4 000 let před n.l.  
První, kdo použil tento způsob písma, byli Sumerové.  
Znaky byly otiskovány rákosovým pisátkem do hlíny, která mohla být následně vypálena.

Některé znaky jsou menší než několik mm.

Jak byly vytvořeny?



Čočka z křišťálu (nalezena při vykopávkách v 1885) – zvětšení 2x

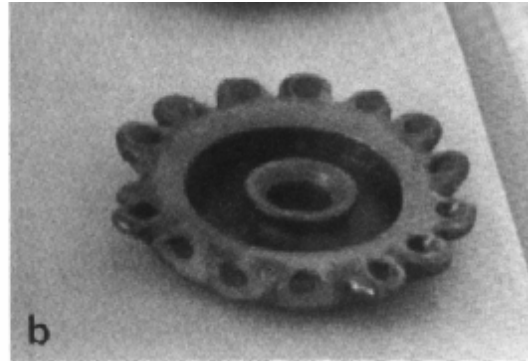
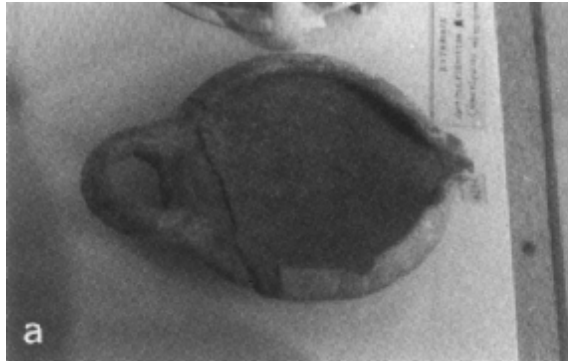
Krátkozrací zapisovatelé – krátkozraké (myopické) oko může promítat na sítnici (retina) větší obraz než oko zdravé. Když je vzdálenost  $b$  mezi oční čočkou a sítnici konstantní, pak zvětšení  $m$ , kterým je obraz zobrazován na sítnici, je  $m = b/f - 1$ , kde  $f$  je ohnisková vzdálenost oční čočky. Zvětšení myopického oka může dosáhnout 1,7 násobek oka zdravého.



# Historie optiky – Mezopotámie, Egypt, Řecko

- Další optické vynálezy

**Svítilny.**



1 svíčka -> 15 svíček  
(ze začátku a konce řecké říše,  
750 př. n.l. – 146 př. n.l.)

**Zrcadla** – kovová, nalezená v  
hrobkách mumií (Egypt, 2000 př. n. l.),

Zdroj:



The **mirror** (in Egyptian  $\text{ankh-t}$ , or  $\text{un-her}$ ,  $\text{maa-her}$ ,  $\text{ir}^1$  (or *il*), Copt.  $\epsilon\iota\lambda$ ) was usually made of sheets of copper or very highly refined bronze. Some mirrors are perfectly circular, others are oval, others pear-shaped, and others have shapes irregular and abnormal. The pear-shaped bronze mirror B.M. 37176, 10 inches long, has a wooden handle in the form of the god Bes. The massive oval bronze mirror B.M. 2732 is mounted in a wooden handle, which resembles the standard  $\text{Q}$ , on which the gods are represented as standing. At the top of the handle, close to the bronze, a figure of the Uchat,  $\text{U}$ , is cut on each side; these were inlaid, but the inlay has fallen out. The massive oval mirror B.M. 38150 is fixed by a peg into a solid bronze handle, which has the shape of a lotus column decorated on each side with the head of Hathor in relief, with the face of a woman and the ears of a cow. Another heavy oval mirror is pegged into a solid bronze lotus-shaped handle, and has a

<sup>1</sup> Var.  $\text{Q}$   $\text{U}$   $\text{Q}$ , Spiegelberg, *Kopt. Handwörterbuch*, p. 24.



# Historie optiky – antické Řecko

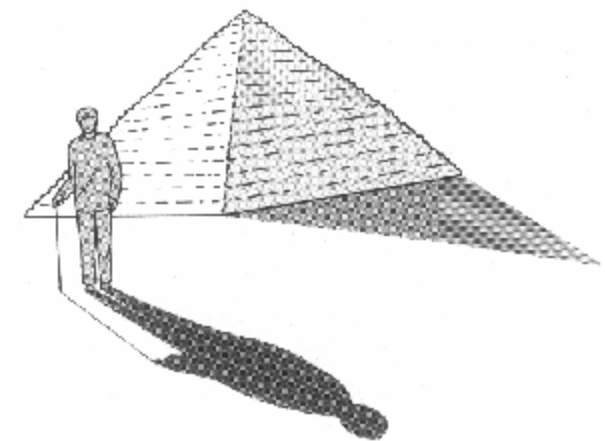
- Řecká říše – území dnešní Itálie, Sýrie, Egyptu, Iránu až severní Indie  
**Thales** (Thalés z Milétu 640 – 546 př. n.l.)



Jeho jméno je spojováno s pěti důležitými geometrickými větami:

- každý průměr dělí kružnici na dvě stejné části
- základové úhly rovnoramenného trojúhelníku jsou shodné
- úhly mezi dvěma protínajícími se přímkami jsou shodné
- dva trojúhelníky jsou shodné, pokud mají stejné dva úhly a jednu stranu
- trojúhelník vepsaný do oblouku nad průměrem kružnice je pravoúhlý (tzv. Thaletova věta).

Thalés změřil výšku pyramid v Gíze. Využil stínů, které pyramidy vrhaly. Postupoval takto: Nejprve změřil svůj stín a zjistil, že má délku  $\frac{4}{3}$  Thalétovy výšky. Neprodleně potom změřil stín nejvyšší, Chufovovy, pyramidy. Naměřil délku 183 m. Poté přešel k nejmenší, Menkaureově, pyramidě. Jelikož se za tu dobu Slunce posunulo, přeměřil svůj stín a zjistil, že jeho délka je  $\frac{11}{10}$  délky stínu, kterou zaznamenal při prvním měření. Neprodleně změřil délku stínu Menkaureovy pyramidy 97,5 m.



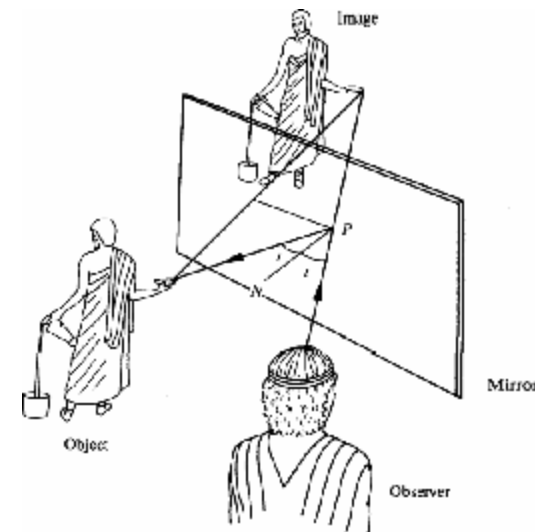
- a) Jak vysoká je Chufovova pyramida?
- b) Jak vysoká je Menkaureova pyramida?

# Historie optiky – antické Řecko

**Euclid** (Eukleidés též Euklides nebo Euklid z Alexandrie, 315 – 250 př. n.l.) a jeho student **Archimedes** (Archimédés ze Syrakus, 287 – 212 př. n.l.) dále **Democritus** (Démokritos z Abdér 460 – 347 př. n.l.) a **Plato** (Platón, Aristoklés 428 – 347 př. n.l.)

– vývoj geometrie spolu s optikou, základy geometrické optiky,  
– mylná představa o vidění - šíření paprsků z „oka“ a jejich odrazu na objektech (princip dnešních radarů) která přežila asi 1400 let, směr šíření paprsků „obrátil“ Alhazen v roce 1026.

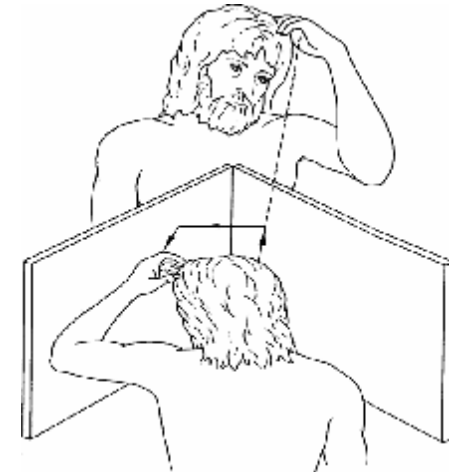
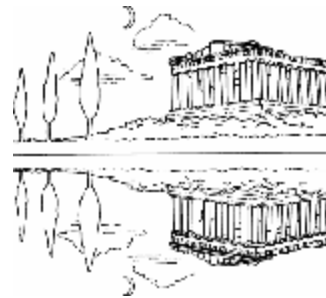
- Democritus – základy korpuskulární teorie světla: Světelné paprsky „odlupují“ extrémně malé částice z objektu, které vytvářejí malý obraz v „mlze“ před okem. (Aristotle - Aristotelés ze Stageiry, 384 -322 př. n.l., učeň Platóna: proč ale pak nevidíme ve tmě?)



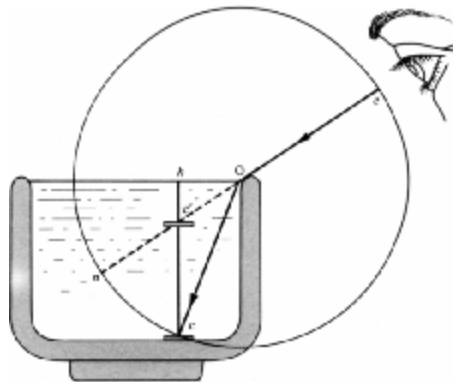
# Historie optiky – antické Řecko

**Hero** (Hérón z Alexandrie) – vysvětlení přímého šíření paprsků (paprsek se šíří vždy podél nejmenší vzdálenosti) – podobná myšlenka která vedla k Fermatově principu.

Zrcadlový obraz – intenzivně zkoumán řeckými filozofy, Platón jeho vznik nevysvětlil, Herón konstruoval rohové zrcadlo pro přímý obraz (směr šíření paprsků pořád špatně).



Kvantitativní studie – **Ptolemy** (Ptolemaios, 100-160) vysvětlení experimentu mince ponořené v hrnku.



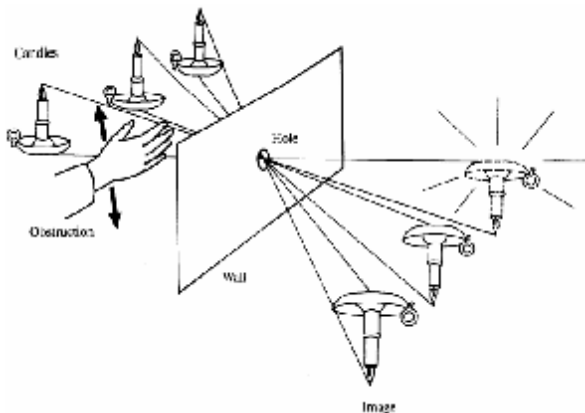
Lom paprsku na rozhraní voda- vzduch, odvodil (empiricky) vzorec pro lom asi 1500 let před formulováním Snellova zákona lomu (1620).

Kolem 500 n.l. konec Řecké říše a začátek doby temna, (alespoň z pohledu optiky), která trvala až do renesance, tj. do 14 – 16 století.

# Historie optiky – zářící hvězda v době temna

**Abu Ali Al-Hasen ibn Al-Hasan ibn Al-Haytham (Alhazen, 965 – 1039), arabský vědec, který se zabýval astronomií, optikou a matematikou.**

- Z měření délky trvání soumraku (soumrak je vlastně rozptyl slunečního záření v atmosféře) odhadl tloušťku atmosféry (na 80 km, dnes je akceptována hodnota 320 km).
- Z odrazu světla na nerovinných površích (konvexní, konkávní, sférické, cylindrické atd.) formuloval zákon odrazu, tj. dopadající paprsek, normála k ploše v bodě dopadu a odražený paprsek leží v jedné rovině.
- Vyvrátil některé chybné antické představy o vidění a ukázal, že se světlo odráží od povrchu předmětů a vstupuje do našeho oka (obrátil v tom čase zavedený směr šíření paprsků).
- Věřil, že světlo má konečnou rychlost.
- Intenzívně studoval mechanismus vidění propojením anatomických, fyzických a matematických hledisek – z dnešního pohledu s interdisciplinárním způsobem.



- Vytvořil jednoduchý model oka (*camera obscura* – temná komora) a dokázal přímočaré šíření světla.
- I když tvrdil, že obraz v oku se vytváří na první ploše (oční čočka), jeho anatomický obraz oka už správně obsahuje sítnici (s nervovou strukturou).

# Historie optiky – Renaissance

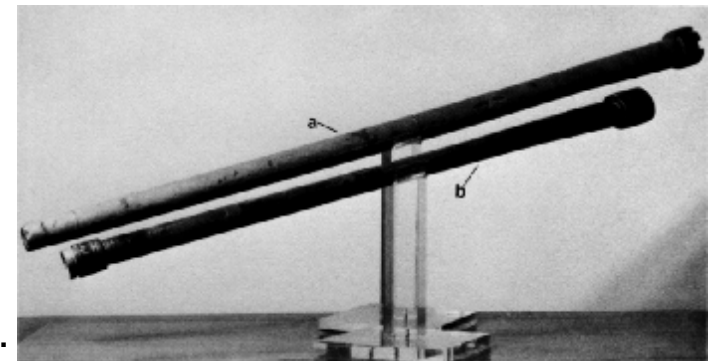
Renaissance (znovuzrození), která znamenala oživení vědeckých oborů včetně optiky začala v Itálii v 14. století a rychle se rozšířila do dalších krajin.

**Leonardo da Vinci** (1452 – 1519) významný malíř, sochař, architekt, přírodovědec, hudebník, spisovatel vynálezce a konstruktér navázal na práci Alhazena a zdokonaloval *cameru obscuru*.

- Poukázal na analogii mezi akustickými a světelnými vlnami. Věřil, že světlo je tvořeno z kmitajících částic a barva světla je determinována frekvencí těchto kmitů.

V době da Vinciho byla objevena technologie mechanického knihtisku (J. Guttenberg) pomocí pohyblivých liter. Důsledkem rozšíření jeho objevů byla masová produkce knih a zlom v možnostech šíření informací.

**Galileo Galilei** (1565 – 1642) na základě zprávy že v Nizozemsku vytvořili (buď H. Lippershey, nebo De Waard) nástroj na zobrazení vzdálených předmětů se značným zvětšením zkonstruoval astronomický dalekohled a provedl pozorování hvězd. Z pozorování Jupiteru a jeho měsíců dospěl k závěru, že právě tyto měsíce obíhají kolem Jupiteru. Jeho dalekohled ale měl značnou komu a další optické vady.



# Historie optiky – Renaissance

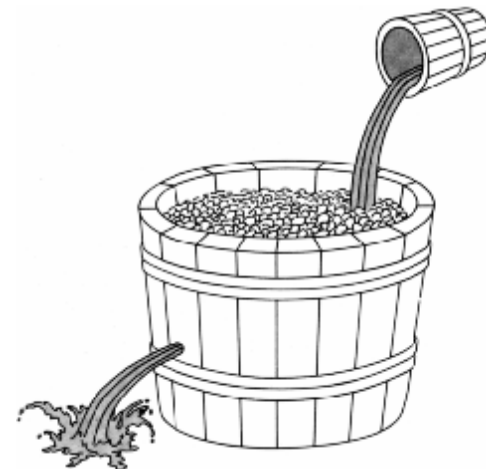
Galilei představil svůj teleskop slavnému astronomovi Keplerovy (**Johann Kepler**, 1571 – 1630) a přesvědčil ho o schopnostech tohoto přístroje.

(Kepler několik let působil v Praze na dvoře císaře Rudolfa. V Praze také formuloval dva ze tří Keplerových zákonů.)

- Kepler se kromě astronomie zabýval i jinými aspekty optiky. Navázal na předešlé práce Ptolemaiouse a Alhazena a s pomocí svých experimentů upravil některé jejich mylné závěry. Pozoroval například úhel totálního odrazu a identifikoval sítnici jako fotocitlivý povrch oka.

**René Descartes** (Renatus Cartesius, 1596 – 1650) vysvětloval chování světla pomocí světlonosného éteru – média, který může procházet průhledným prostředím bez toho, že by jej toto prostředí nějak ovlivňovalo (Descartův sud – tekutina přeteče přes bobule a vyteče ven spodkem sudu).

Později od tohoto vysvětlení opustil a chování světla (odraz a lom) vysvětloval pomocí kinematiky – pohybu částic světla (bobule).



# Historie optiky – Dlouhá cesta k Snellova zákonu

Zákon lomu byl formulován kolem 1620 nizozemským profesorem **Villebordem Snellem** (1591 – 1626). Snellův zákon je jedním ze základních a nejdůležitějších zákonů optiky.

Exaktní matematický důkaz byl poskytnut **Pierre de Fermatem** (1601 – 1665) (prosazoval koncept nejmenšího času namísto nejkratší dráhy při šíření světla z bodu v prvním prostředí do bodu v prostředí druhém)

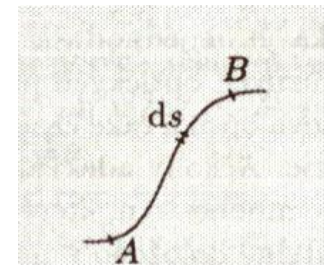


# Paprsková (geometrická) optika - POSTULÁTY

- Světlo se šíří ve formě paprsků. Paprsky jsou emitovány světelnými zdroji a mohou být pozorovány, když dosáhnou optického detektoru.
- Optické prostředí je charakterizováno veličinou  $n \geq 1$ , která se nazývá (absolutní) **index lomu**. Je **poměrem** rychlosti světla ve vakuu  $c_0$  a rychlosti světla v prostředí  $c$ . V důsledku toho **čas**, který světlo potřebuje, aby prošlo vzdálenost  $d$ , se rovná  $d/c = nd/c_0$ . Je tedy **úměrné** součinu  $nd$ , známému jako **délka optické dráhy**.
- V nehomogenním prostředí je index lomu  $n(\mathbf{r})$  funkcí polohy  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ .

Délka optické dráhy mezi dvěma body  $A$  a  $B$  je tedy

$$\text{délka optické dráhy} = \int_A^B n(\mathbf{r}) ds, \quad \text{kde}$$

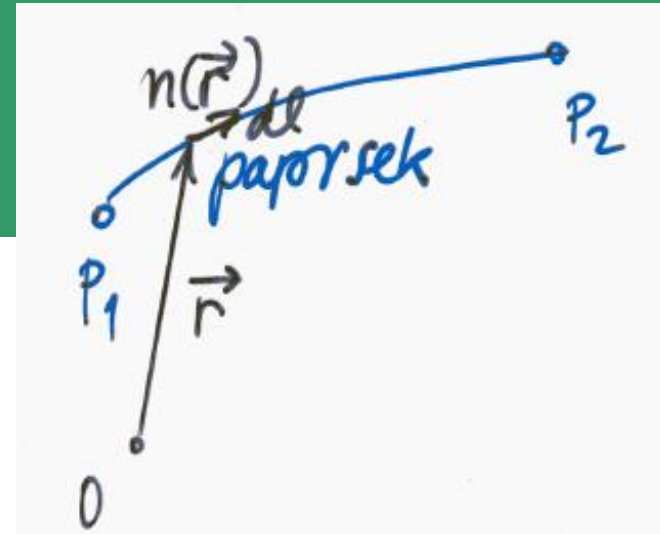


$ds$  je diferenční element délky podél dráhy. **Čas** potřebný k tomu, aby světlo prošlo z  $A$  do  $B$  je **úměrný délce optické dráhy**.



# Fermatův princip

- Délka optické dráhy  $L = \int_{P_1}^{P_2} n(\vec{r}) dl,$



kterou se šíří paprsek světla mezi dvěma body  $P_1$  a  $P_2$  je **stacionární**, tzn. že první variace  $dL$  vzhledem k sousedním délkám křivek je rovna

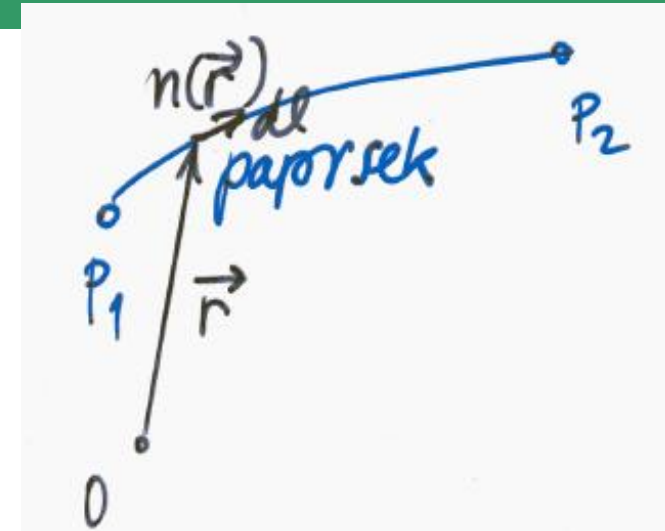
nule. Protože  $dL/c = dt$  je čas, který potřebuje světlo šířící se rychlostí  $c$

na uražení dráhy  $dl$ , a jelikož  $n(\vec{r}) = c_0 / c(\vec{r})$ , pak  $L = c_0 \int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{c} dl,$  kde integrál  $\int_{P_1}^{P_2} \frac{1}{c} dl$  je roven času který potřebuje světlo

k uražení dráhy mezi body  $P_1$  a  $P_2$ .

**Fermatův princip: Světelné paprsky spojují dva body podél takových čar, které odpovídají stacionárnímu času, potřebnému k uražení potřebné optické dráhy.**

# Fermatův princip

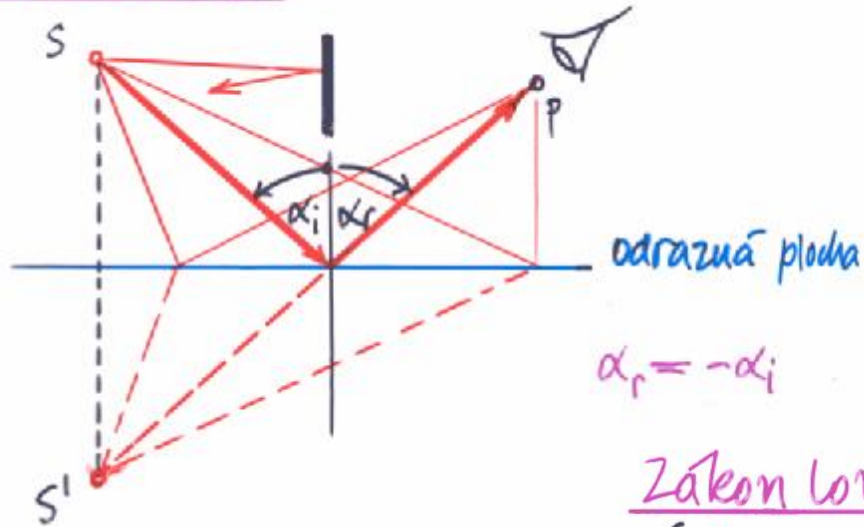


***Světelné paprsky spojují dva body podél takových čar, které odpovídají stacionárnímu času, potřebnému k uražení potřebné optické dráhy.***

Toto vyjadřuje extrémální charakter času (maximum nebo minimum) a nevylučuje možnost existence několika cest, spojující dva body během stejného času, tedy cest, majících **stejnou optickou délku**.

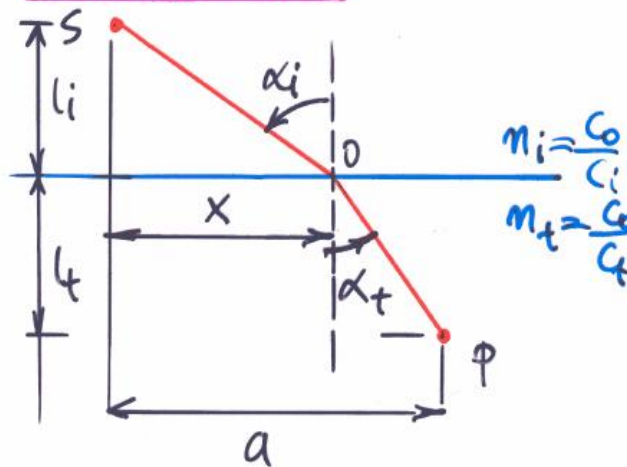
# Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí

## Zákon odrazu



Pozn.: úhly  $\alpha_i$  a  $\alpha_r$  měříme od kolmice k paprsku ve směru (proti směru) hodinových ručiček. Příslušný úhel je kladný (záporný). V obrázku  $\alpha_i$  je záporný a  $\alpha_r$  kladný.

## Zákon lomu



$$n_i = \frac{c_0}{c_i}$$

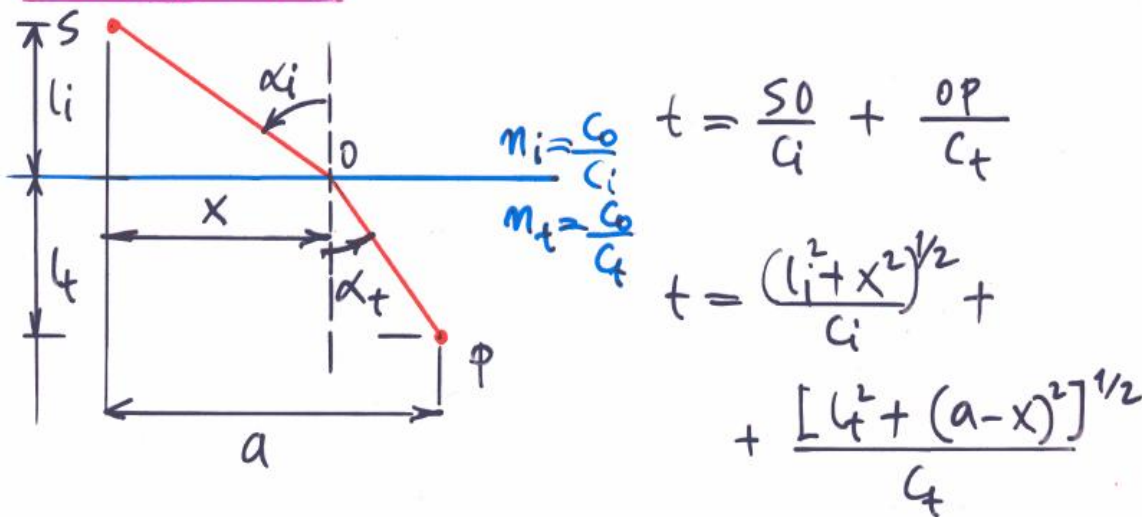
$$n_t = \frac{c_0}{c_t}$$

$$t = \frac{SO}{c_i} + \frac{OP}{c_t}$$

$$t = \frac{(l_i^2 + x^2)^{1/2}}{c_i} + \frac{[l_t^2 + (a-x)^2]^{1/2}}{c_t}$$

# Lom na rozhraní dvou prostředí

## Zákon lomu



Matematickou formulaci zákona lomu podal první nizozemský fyzik Willebrord Snell (1591 – 1626); k uveřejnění došlo až r. 1662.  
Zdroj: <http://en.wikipedia.org/>

Fermatův princip: Extremální hodnota  $t(x)$  vzhledem k změně  $x$  vede k podmínce  $dt/dx = 0$ , tzn.:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{x}{c_i (l_i^2 + x^2)^{1/2}} + \frac{-(a-x)}{c_t [l_t^2 + (a-x)^2]^{1/2}} = 0;$$

$$\frac{1}{c_i} \sin \alpha_i = \frac{1}{c_t} \sin \alpha_t, \text{ takže } n_i \sin \alpha_i = n_t \sin \alpha_t.$$

# Historie optiky – Časovaná bomba moderní optiky

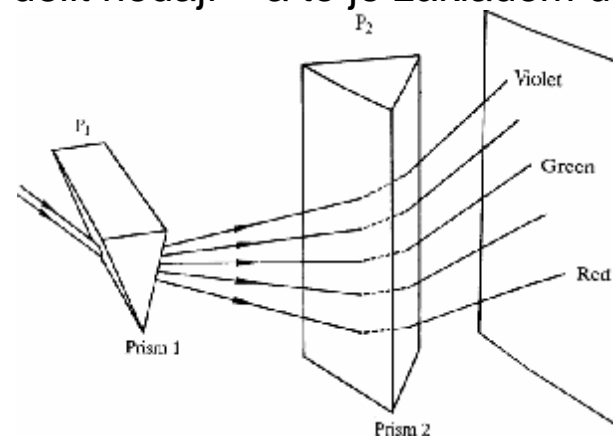
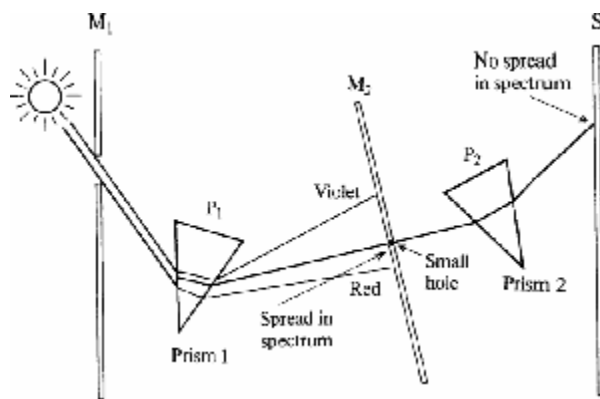
**Francesco Maria Grimaldi** (1618 – 1663) ve své knize „*Physico – Mathesis de Lumine coloribus et iride, aliisque annexis libri* (Fyzika světla, barev a duhy)“ píše: „... úpřimně řečeno, nevíme nic o vlastnostech světla a je neupřímné používat v této souvislosti veliká slova, která jsou bezvýznamná.“ Toto tvrzení vyslovil na základě svých pozorování, a to zejména při popisu jevu difrakce.

Poprvé se o difrakci zmínil Leonardo da Vinci. První přesnější pozorování difrakce světla na tyčince a mřížce provedl kolem roku 1660 Francesco Maria Grimaldi, učitel matematiky na jezuitské koleji v Bologni. Od něj pochází název difrakce. Do zatemněné místnosti pouštěl malým kruhovým otvorem sluneční světlo, do světelného kužele stavěl různé předměty a na protější stěně pozoroval jejich stíny. Zjistil, že jsou neostré, ohraničené barevnými proužky. Jemné proužky se objevovaly i uvnitř stínu.

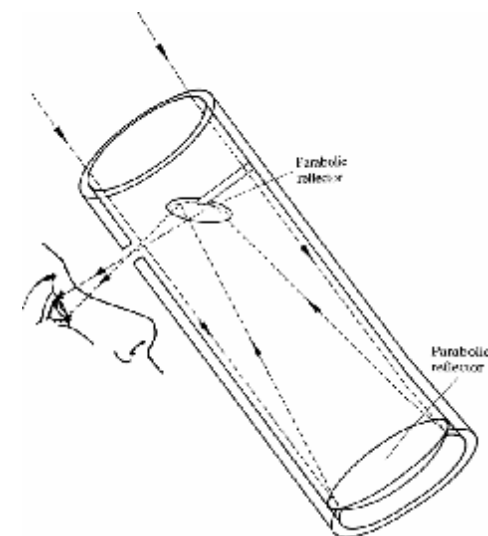
Až v roce 1818 se Augustinu Jean Fresnelovi podařilo ukázat, že vznik difrakce je možné popsat pomocí Huygensova principu vlnění a Youngova principu interference. Proto se tento princip platný pro jakékoli vlnění označuje Huygensův-Fresnelův princip. Jím popsané difrakční jevy se dnes označují jako Fresnelovy ohybové jevy. Jestliže do předchozího pokusu přidáme čočky, pak získáme tzv. Fraunhoferovy ohybové jevy pojmenované podle německého fyzika Josepha von Fraunhofera. Zjednodušeně můžeme říct, že Fraunhoferova difrakce vzniká ze vzdáleného zdroje – tedy z rovinných vlnoploch, kdežto Fresnelova difrakce vzniká z blízkého zdroje – tedy z kulových vlnoploch. Díky Fraunhoferově difrakci na dvou obdélníkových otvorech byla poprvé změřena vlnová délka světla.

# Historie optiky – Newtonovy proužky a jeho korpuskulární teorie

**Sir Isaac Newton** (1642 – 1726) byl zručným experimentátorem a zastáncem korpuskulární teorie světla. Pomocí experimentů a aplikací částicové teorie světla dospěl např. k názoru, že monochromatické složky světla se dále dělit nedají – a to je základem dnešní spektroskopie.

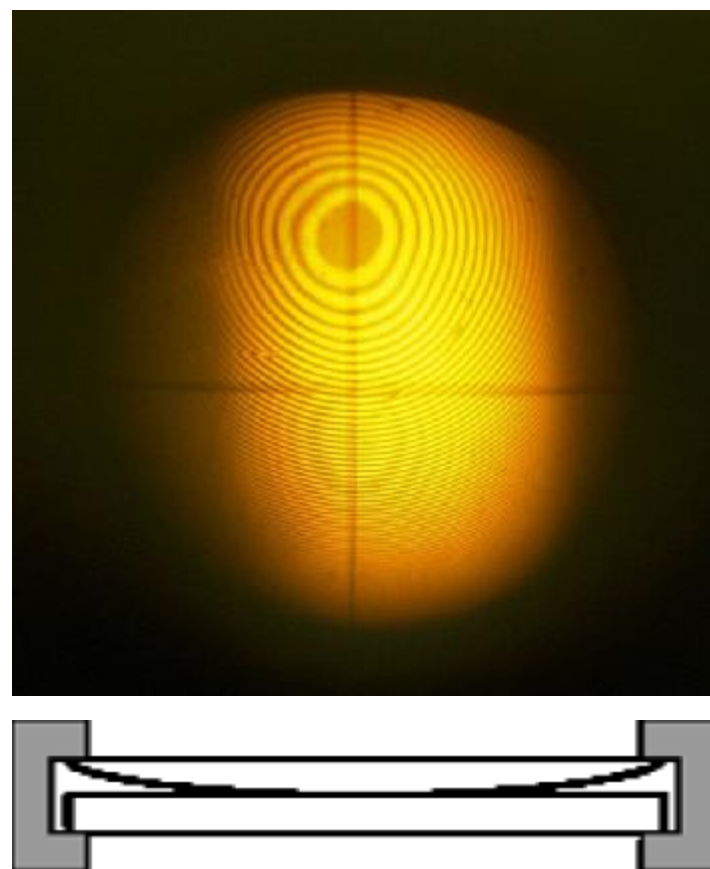
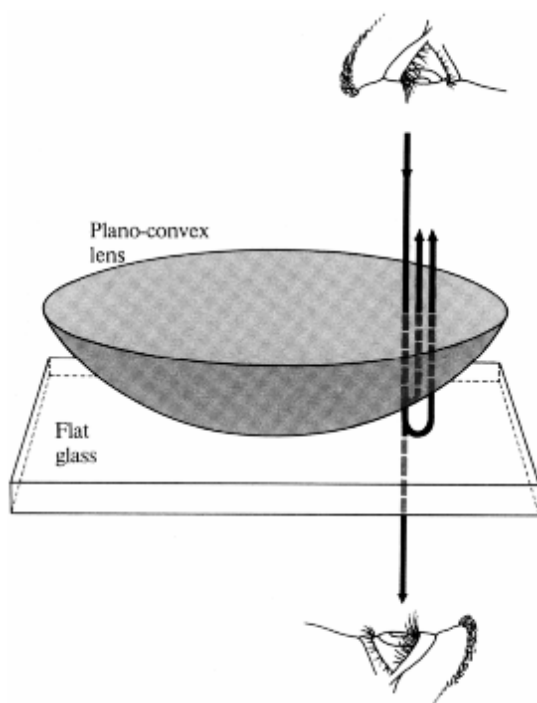


I brilantní Newton ale dělal seriózní chyby, např. když tvrdil (nesprávně), že je nemožné vytvořit prakticky použitelný astronomický čočkový teleskop kvůli značné barevné vadě čoček. Na druhou stranu tato jeho chyba vedla k tomu, že konstruoval astronomický dalekohled pomocí zrcadel.



# Historie optiky – Newtonovy proužky a jeho korpuskulární teorie

Newton byl takovým zastáncem korpuskulární teorie, že se její pomocí snažil vysvětlit i vznik interferenční struktury - Newtonových kroužků.

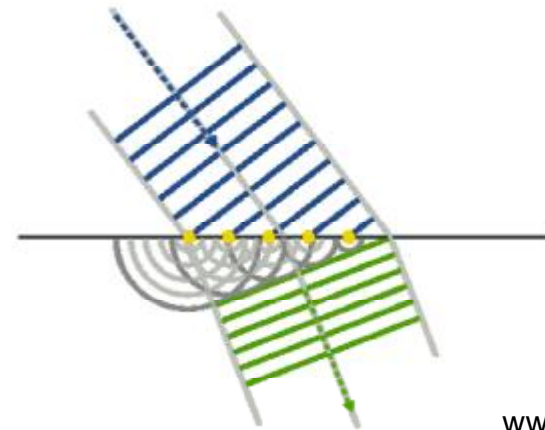
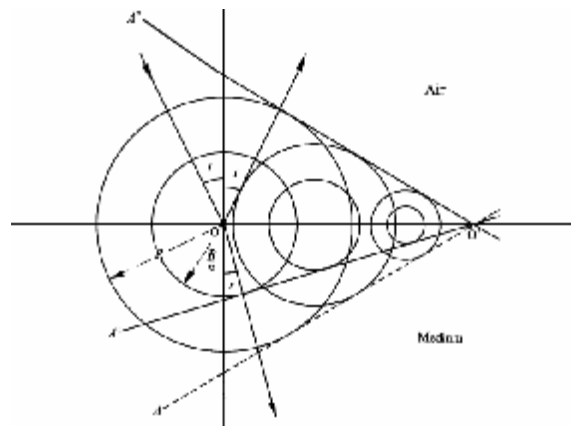




# Historie optiky – úpadek částic a povýšení vln

Newton získal tak silnou reputaci, že bylo těžké prosadit teorii, která by byla proti Newtonem preferované korpuskulární. Poprvé se to povedlo jemu dobrému příteli, **Christiaan Huygensovy** (1629 – 1695) .

Huygens předpokládal, že světlo se šíří jako vlna a v každém okamžiku lze každý bod na čele této šířící se vlny chápat jako nový zdroj vlnění (sekundárních vln). Nový tvar čela vlny v čase o malý okamžik pozdějším lze pak určit jako vnější obálku vln, šířících se z těchto zdrojů.



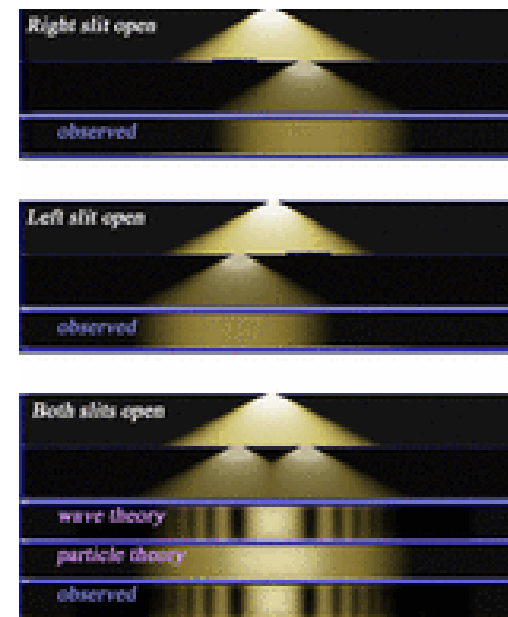
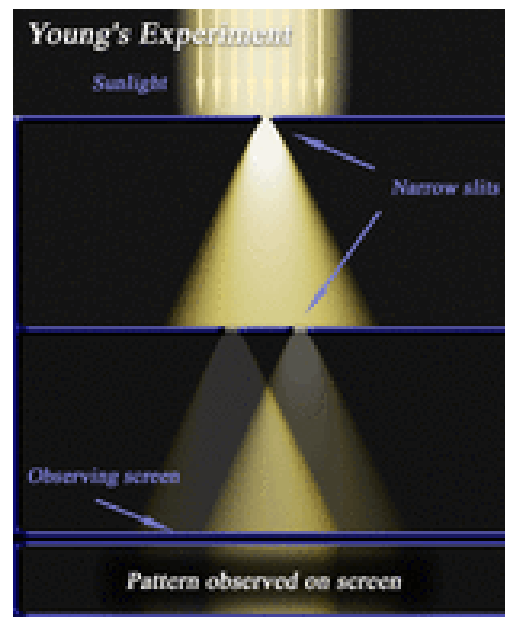
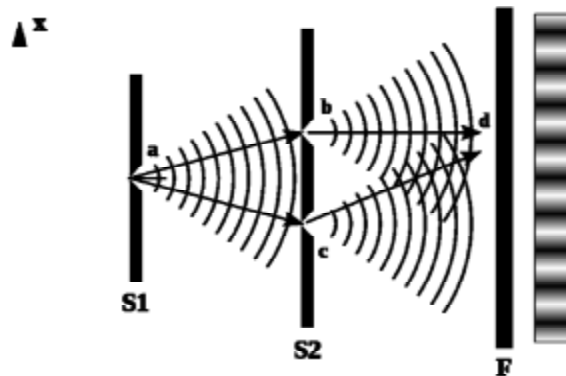
Huygensův princip není zcela správný, neboť podle něj by se například vlna procházející vzduchem či vodou ze všech bodů vracela zpět do zdroje, aniž by se odrazila od nějaké překážky. Huygensovy představy doplnil francouzský fyzik Augustin-Jean Fresnel. Upřesněný Huygensův-Fresnelův princip doplňuje původní představu o interferenci sekundárních vln.



# Historie optiky – úpadek částic a povýšení vln

**Thomas Young** (1773 – 1892) byl dalším úspěšným následovatelem Newtona a Huygense. Původně se zajímal o optiku jako doktor medicíny. Zavedl princip tří základních barev a dospěl k závěru, že pro každou barevnou složku existuje na sítnici oka samostatný senzor.

Největších úspěchů ale dosáhl při vysvětlení interference. Jeho slavný experiment se dvěma štěrbinami provedl v roce 1801, když nechal procházet svazek světla dvěma rovnoběžnými štěrbinami za které umístil stínítko.



# Historie optiky – bloky moderní optiky

**James Clerk Maxwell** (1831 – 1879) jeho nejvýznamnějším objevem je obecný matematický popis elektromagnetického pole dnes známý jako Maxwellovy rovnice. Zjistil existenci elektromagnetických vln i to, že světlo je také elektromagnetické vlnění.

Položil fyzikální základy teorie barevné fotografie v Londýně 17. května 1861. Promítl na plátno současně tři černobílé snímky barevné řádové stuhy přes červený, zelený a modrý filtr, které byly předtím exponovány přes filtry stejných barev. Prokázal tak princip aditivního míchání barev.



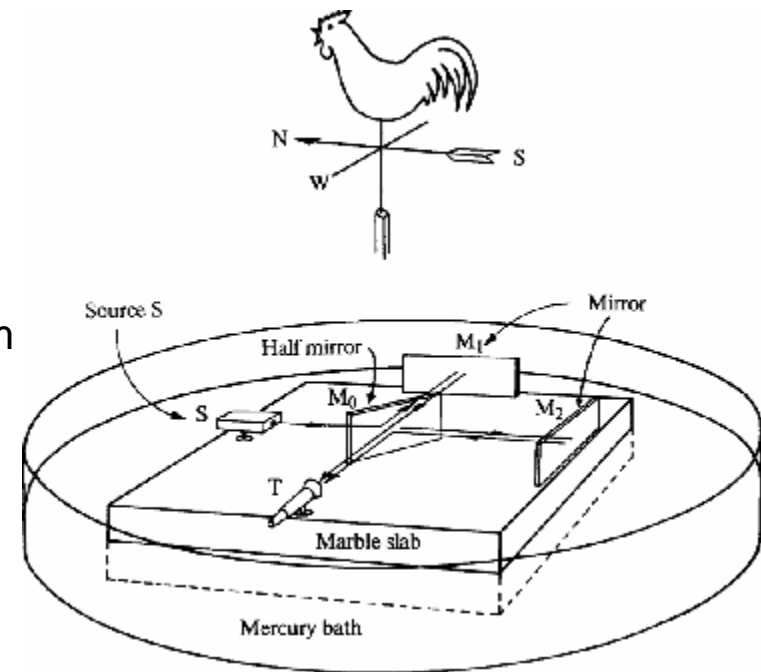
# Historie optiky – bloky moderní optiky

**Albert Abraham Michelson** (1852 – 1931) a **Edward Williams Morley** (1838 – 1923) vyvrátili experimentálně existenci éteru. Výsledky jejich experimentů položili základy vytvoření teorie relativity Albertem Einsteinem.

- předpoklad: když existuje éter, musí existovat i éterový vítr na zemi, poněvadž zeměkoule se pohybuje rychlostí asi 30 km/s. Když tento vítr existuje, musí ovlivnit rychlost světla.

- experiment: měřili rychlost světla otočným Michelsonovým interferometrem. Jeden směr šíření paprsků byl rovnoběžný směrem otáčení zeměkoule.

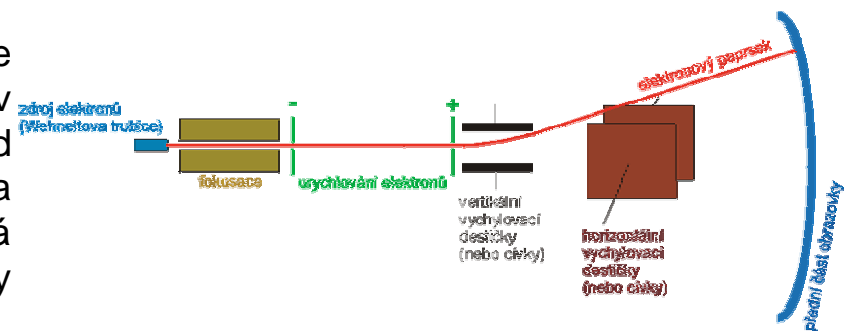
- závěr: interferenční struktury pozorovány v původním uspořádání a o 180° otočeným interferometrem byly stejné, z toho vyplývá, že neexistuje éterový vítr.



# Historie optiky – Kvanta a fotony

- V období mezi 16. a 19. století se zdálo, že všechny přírodní jevy se dají vysvětlit pomocí „klasických“ fyzikálních zákonů (např. Newtonových pohybových zákonů a s nimi souvisejících pohybových rovnic nebo Maxwellových rovnic v elektrodynamice).
- Na přelomu 19. a 20. století tato doba skončila. Začaly se objevovat situace a jevy, které klasická fyzika řešila jen s největším vypětím. Za všechny zde uvedu objev katodového, či rentgenového záření.

Při doutnavém výboji v plynu se elektrony pohybují směrem ke katodě a kladné ionty k anodě. Pokud uděláme v katodě i v anodě otvor, elektrony i ionty se šíří za elektrody. Proud elektronů se nazývá **katodové záření**, proud kladných iontů za anodou se nazývá kanálové záření. Katodové záření se využívá v obrazovkách - dopadá na luminofor na přední stěně obrazovky a ten pak září.



- Nakonec se objevil problém, se kterým si klasická fyzika neporadila vůbec. Jednalo se o záření absolutně černého tělesa.

# Záření černého tělesa

- V podstatě platí, že látky všech skupenství vyzařují elektromagnetické vlnění, jehož vznik souvisí s neuspořádaným pohybem elektricky nabitých částic v elektronových obalech jejich atomů. Takové záření označujeme jako tepelné záření. Je-li teplota látky nižší než  $525\text{ °C}$  ( $798\text{ K}$ ), není toto záření viditelné a leží v infračervené oblasti.
- Kromě vyzařování záření může každé těleso záření také odrážet, propouštět a pohlcovat. Pohlcené záření se zejména mění na tepelnou energii. Množství pohlceného záření závisí na vlastnostech tělesa, zejména na barvě (černá tělesa pohltní více záření než bílá) a na povrchové úpravě (od lesklých těles se záření odráží, kdežto matná tělesa více pohlcují záření).

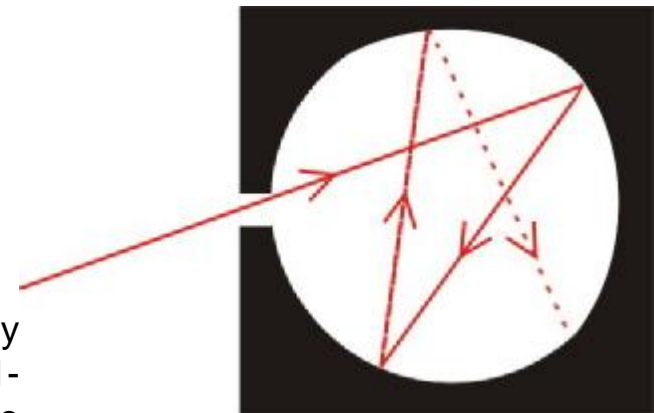


# Záření černého tělesa

- Pro popis těchto vlastností těles byl zaveden model tělesa – **absolutně černé těleso**. Je to takové myšlené těleso, které *pohlty veškeré dopadající záření*. Můžeme si jej představit jako dutou kostku s velmi malým otvorem – Jestliže záření projde malým otvorem do dutiny, jejíž vnitřní povrch je černý a matný, pak se po několika odrazech pohlty – tzn., malý otvor se navenek jeví jako absolutně černé těleso – veškeré záření projde otvorem dovnitř, ale žádné záření otvorem nevyjde ven.



První zmínky o tzv. tepelném záření se objevují ve druhé polovině 18. století ([Karl Scheele](#) (1742-86), první pokusy prováděl [Marcus Pictet](#) (1752-1825) a [Pierre Prévost](#) (1751-1839) na jejich základě vyslovil domněnku, že každé těleso vyzařuje nezávisle na svém okolí). Další posun přinesly práce německého fyzika [Gustava Kirchhoffa](#), který dokázal vztah mezi emisí a absorpcí záření a založil spektrální analýzu látek a definoval pojem černého tělesa.



# Záření černého tělesa – Wienův posunovací zákon

- Čím více záření černé těleso pohltí, tím více se zvětší jeho teplota – tzn., že černé těleso bude vyzařovat tepelné záření. Čím bude vyšší teplota, tím se bude *zkracovat vlnová délka vyzařovaného záření*. Této závislosti si povšiml v roce 1893 německý fyzik Wilhelm Wien, který ji zformuloval do tzv. **Wienova posunovacího zákona**.



**Součin vlnové délky, na kterou připadá maximální intenzita vyzařování černého tělesa při termodynamické teplotě  $T$ , a této teploty je konstantní.**

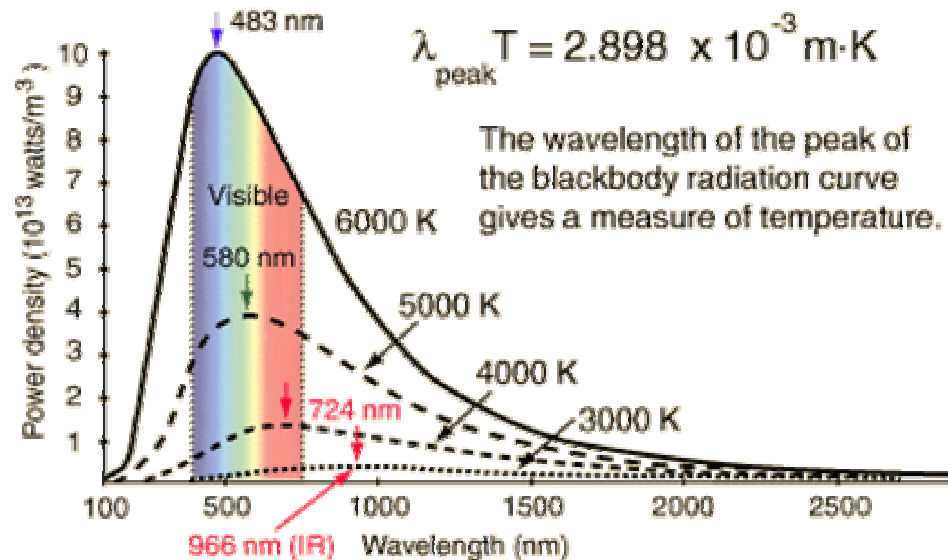
$$I_m T = b,$$

kde  $T$  je termodynamická teplota černého tělesa,  $I_m$  vlnová délka, na kterou připadá maximální intenzita vyzařování při dané teplotě, a  $b$  je konstanta, jejíž hodnota je  $b = 2,9 \times 10^{-3} \text{ m.K}$ .



# Záření černého tělesa

- Při nižších teplotách připadá maximální intenzita vyzařování na delší vlnové délky, při zvyšování teploty se  $I_m$  posunuje ke kratkovlnnému konci spektra.
- Je třeba si uvědomit, že černé těleso vždy vyzařuje na všech vlnových délkách, pouze se liší intenzita záření.





# Záření černého tělesa



Další vlastnost zdokumentoval roku 1879 Josef Stefan. Ten vyjádřil **celkovou energii záření**. Energie záření uvnitř dutiny s rostoucí teplotou roste podle vztahu:  $E = sT^4$ .

Tento vztah se nazývá Stefanův-Boltzmannův zákon a konstanta  $\sigma$  ( $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) Stefan-Boltzmannova konstanta,  $T$  je termodynamická teplota. Jméno Ludwiga Boltzmannova je s tímto zákonem spojeno teoretickým potvrzením.



Stále však nebyla nalezena **funkce  $\rho(\nu, t)$  pro distribuci energie**. Z klasického pohledu toto studoval lord Rayleigh. Ten uvažoval stěny nádoby, jako soubor oscilátorů se všemi různými frekvencemi. Oscilátorům přiřadil, podle ekvipartičního teorému, stejnou energii  $kT$  ( $k$  je Boltzmannova konstanta  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ ).



# Záření černého tělesa

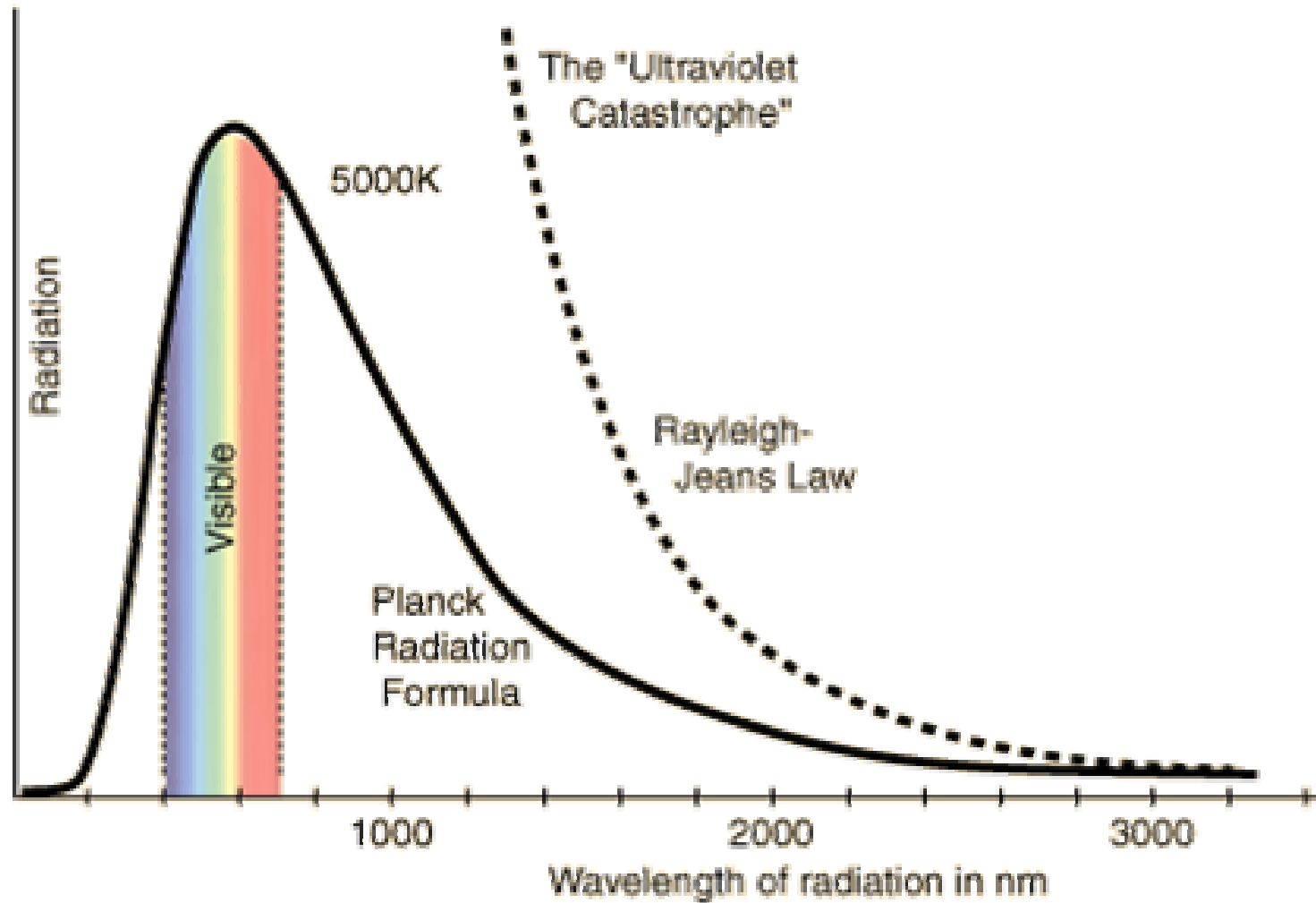
- Ekvipartiční teorém je nástroj klasické fyziky, podle kterého mají všechny stupně volnosti v rovnovážném systému stejnou energii  $E=1/2kT$ . Lord Rayleigh s pomocí Jamese Jeanse dospěl ke vztahu:

$$r(\nu, T) = \frac{8\nu^2 kT}{c^3},$$

Kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $\nu$  je frekvence záření,  $k$  Boltzmanova konstanta a  $T$  termodynamická teplota.

- Tento zákon byl úspěšný pro nízké frekvence, ale naprosto zklamal pro vyšší frekvence. Jak roste frekvence, tak by se podle něj měla energie zvyšovat a někde okolo frekvence odpovídající ultrafialovému záření by měla být nekonečná. Tento výsledek se nazývá **ultrafialová katastrofa**.
- Podle klasické fyziky by měla i studená tělesa vyzařovat ve viditelné a ultrafialové oblasti: podle klasické fyziky by tělesa měla sálat i ve tmě; ve skutečnosti by neměla žádná tma existovat.

# Záření černého tělesa



# Zrod kvantové teorie



Německý fyzik Max Planck studoval záření absolutně černého tělesa z pohledu termodynamiky. Nahradil stěny tělesa **souborem harmonických oscilátorů**.

Uvědomil si, že **stěny i záření jsou v tepelné rovnováze** a proto musejí mít stejnou hustotu energie, což je hledaná funkce  $\rho(\nu, T)$ . Hledal tedy rovnovážné rozdělení energie podle frekvence  $\nu$ .  
Rovnovážné, protože je nejvíce pravděpodobné.

- Dále zjistil, že pokud by se energie měnila **spojitě**, byl by tento postup nepoužitelný. Proto vyslovil kvantovou hypotézu. Energie každého oscilátoru je omezená na určité diskrétní hodnoty a nemůže se libovolně měnit, je **kvantována**. Zjistil, že energie oscilátorů jsou celočíselné násobky  $h\nu$ :

$$E = nh\nu,$$

kde  $h$  je základní přírodní konstanta později známá jako Planckova ( $h = 6,656 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ ),  $\nu$  je frekvence oscilátoru a  $n$  je celé číslo. Tento výsledek posléze ověřil trochu jinou cestou i Albert Einstein.

# Zrod kvantové teorie – Planckův vyzařovací zákon

- Planckovi umožnila jeho hypotéza odvodit Planckův vyzařovací zákon:

$$r(n, T) = \frac{8\pi n^2}{c^3} \frac{hn}{\exp\left(\frac{hn}{kT}\right) - 1}$$

- Planckův zákon se velmi podobá Rayleigh-Jeansovu zákonu, vyjma důležitého exponenciálního členu ve jmenovateli. Pro nízké frekvence je člen v argumentu exponenciální funkce mnohem menší než jednička a proto lze čítec nahradit:  $\exp\left(\frac{hn}{kT}\right) - 1 \rightarrow \frac{hn}{kT}$
- Pokud takto dosadíme, zjistíme, že Planckův zákon přešel v Rayleigh-Jeansův. Rayleigh-Jeansův zákon platí dobře právě pro nízké frekvence, čímž jsme určitým způsobem dokázali správnost našich úvah. Naopak pro vysoké frekvence  $\nu \rightarrow \infty$ , jde exponenciální člen k nekonečnu, ale celá hustota energie k nule  $\rho(\nu, T) \rightarrow 0$ . Takže zde nedochází k ultrafialové katastrofě.

# Zrod kvantové teorie – Planckův vyzařovací zákon

- Z Planckova vyzařovacího zákona:

$$r(n, T) = \frac{8pn^2}{c^3} \frac{hn}{\exp\left(\frac{hn}{kT}\right) - 1},$$

Ize získat Stefan-Boltzmannův a Wienův posunovací zákon. První z nich se získá integrací přes všechny frekvence

$$E = \int_0^{\infty} r dn = aT^4,$$

kde  $a = \frac{4s}{c}$ , přičemž  $s = \frac{2p^2 k^4}{15c^2 h^3}$ .

což je odvození teoretické hodnoty Stefan-Boltzmannovy konstanty.

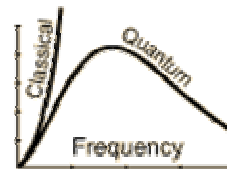
- Wienův posunovací zákon spočítáme pokud najdeme frekvenci, při které je  $dp/dv = 0$ , což je matematická podmínka pro maximum funkce.

# Planckův vyzařovací zákon

Z uvedeného je zřejmé, proč byl Planckův přístup úspěšný a klasický nikoliv.

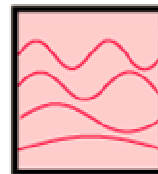
Tepelný pohyb atomů ve stěnách excituje oscilátory elektromagnetického pole.

Podle klasické představy (ekvipartiční teorém) sdílejí všechny oscilátory energii dodávanou stěnami stejným dílem. Z toho plyne, že se stejně „lehce“ excitují oscilátory s frekvencí tepelného záření jako ty s frekvencí mnohem vyšší (důsledek → ultrafialová katastrofa).



Naopak Planck říká, že oscilátor se excituje pouze tehdy, pokud získá energii alespoň  $E = h\nu$ . Tato energie je pro vysoké frekvence příliš velká na to, aby ji mohly stěny zářiče dodávat a proto se oscilátory s vysokými frekvencemi skoro neexcitují.

Radiation modes in a hot cavity provide a test of quantum theory

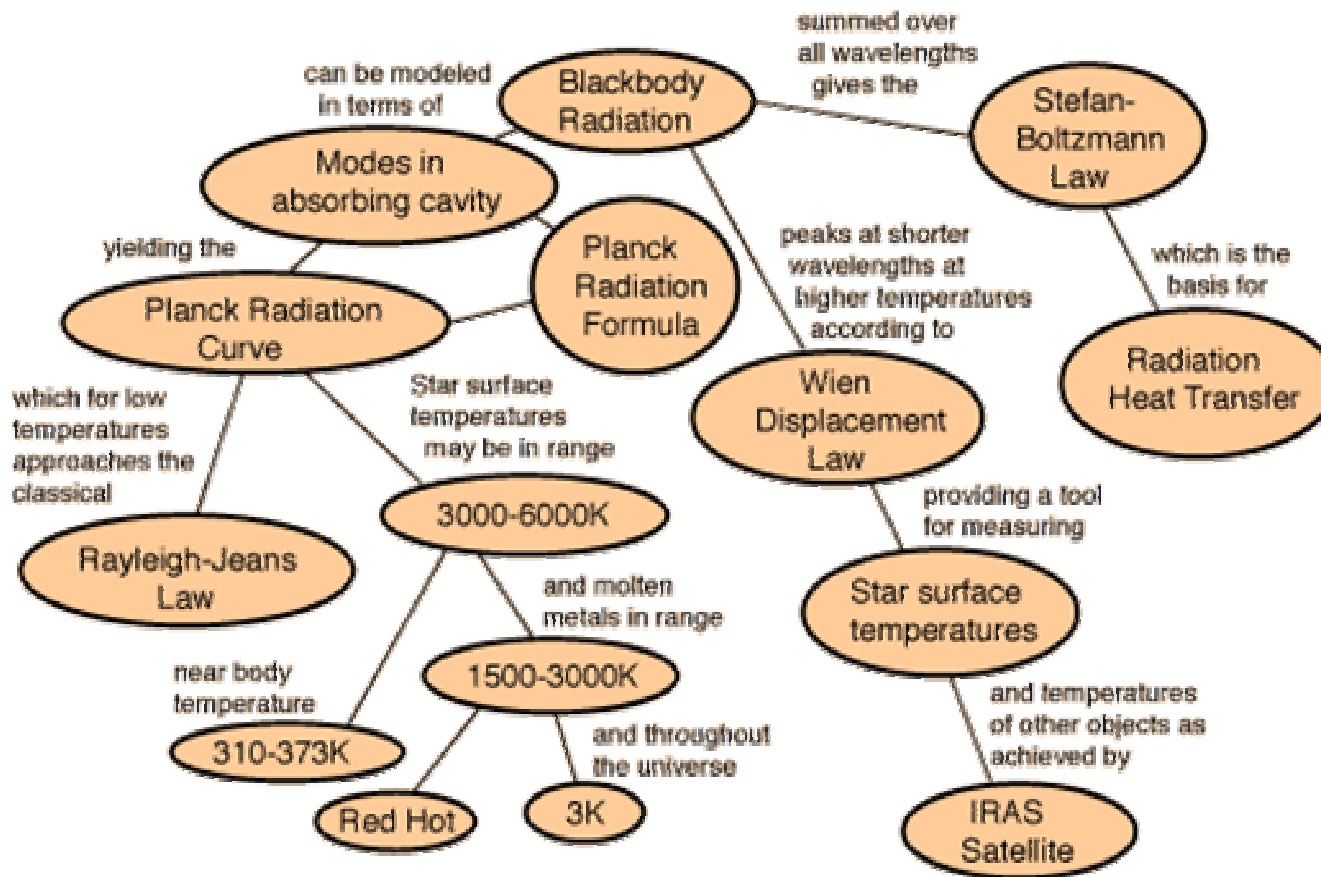


|           | #Modes per unit frequency per unit volume | Probability of occupying modes  | Average energy per mode   |
|-----------|---|---|---------------------------|
| CLASSICAL | $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$                   | Equal for all modes   | $kT$                      |
| QUANTUM   | $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$                   | Quantized modes: require $h\nu$ energy to excite upper modes, less probable | $\frac{h\nu}{e^{kT} - 1}$ |

Planckova hypotéza nastartovala novou oblast fyziky.

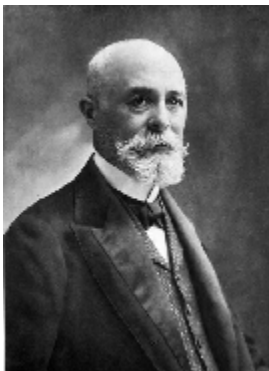


# Záření černého tělesa



# Vlnově – částicový dualismus/Fotoefekt

- Ukázali jsme, že energie elektromagnetického záření s frekvencí  $\nu$  nabývá pouze celočíselných násobků hodnot  $h\nu$ . Je to podobné jako s nábojem atomu, ten může nabývat pouze celočíselné násobky elementárního náboje. Z toho lze usoudit kolik elektronů atomu vlastně chybí.
- Můžeme tedy říci, že elektromagnetické záření se skládá z 0, 1, 2, ... částic podle toho jaký násobek energie naměříme. Každá částice má energii  $h\nu$ . Pokud je přítomna jedna částice je energie  $h\nu$ , pokud dvě tak  $2h\nu$  atd. Částice elektromagnetického záření se nazývají **fotony**.
- Jedním z důkazů o částicové povaze EM záření je existence **fotoelektrického jevu - fotoefektu**.



Alexandre Edmond Becquerel  
1839 – pozorování fotoelektrického jevu pomocí elektrody ponořené do světlem ozářeného vodivého roztoku.



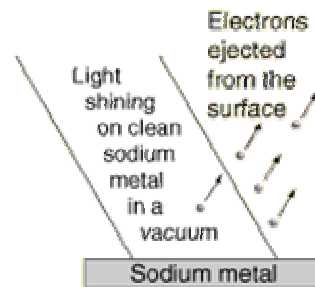
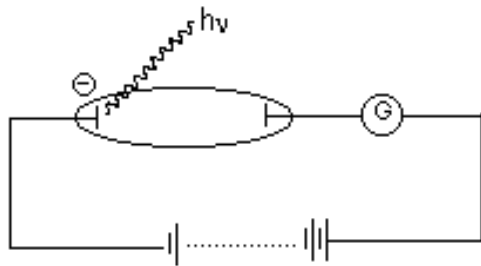
Willoughby Smith  
1873 – pozoroval, že selen (Se) vykazuje fotoelektrickou vodivost.



Heinrich Hertz  
1887 – pracoval na buzení EM vln. Po pozorování dospěl k názoru, že izolovaný ozářený vodič se nabíjí kladně, což znamená, že se zbavuje elektronů. 45

# Fotoefekt

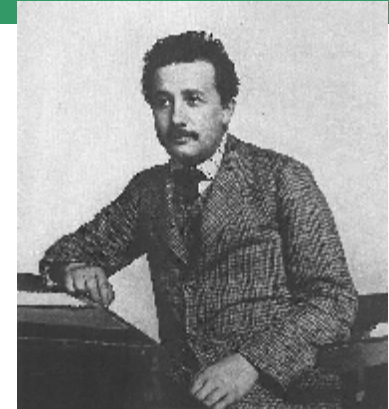
- Důkladně se studiu jevu věnoval Alexander G. Stoletov  
Jeho zařízení se dá schematicky nakreslit jako



Po vykonání experimentu byl schopen napsat tři pravidla pro tento nový jev:

1. zvýšení intenzity záření vede ke zvýšení elektrického proudu .
2. elektrický proud teče okamžitě po ozáření.
3. pro každý materiál existuje frekvence  $\nu_0$  záření, při které se jev projeví, jedná se o tzv. **červený práh**.

# Fotoefekt

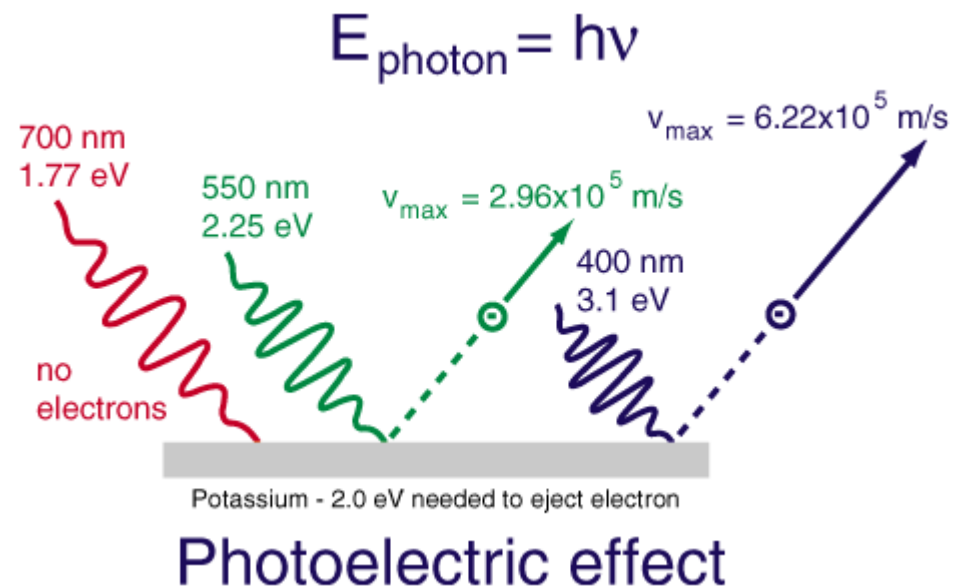
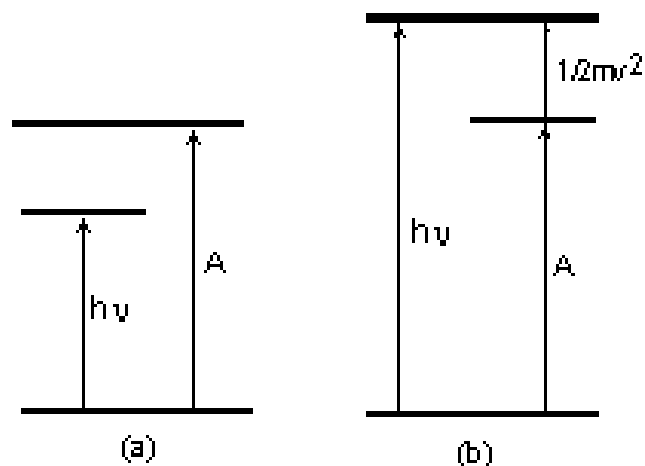


- Klasická fyzika jev opět nevyřešila a tak tento zůstal pár let neobjasněn. V roce 1905 se do něj „pustil“ Albert Einstein.
- Podle něj foton předá celou svou energii jednomu elektronu v látce. Mohou nastat dvě situace.
  1. V první měl foton energii menší než jaká stačí elektronu k překonání přitažlivých sil jádra a elektron zůstane v látce, odtud existence červeného prahu.
  2. Druhá situace nastane pokud foton nese energii postačující elektronu k překonání sil. Část energie se spotřebuje na výstupní práci, to je ta část energie, která elektron „vytrhává“ z obalu. Část energie, která se nespotřebuje si elektron odnáší ve formě kinetické energie. Toto lze napsat:  $\frac{1}{2}mv^2 = hn - A$ , kde na levé straně rovnice je kinetická energie ( $m$  je hmotnost elektronu,  $v$  je jeho rychlost) elektronu a na pravé rozdíl energie fotonu a výstupní práce  $A$ . Výstupní práce se spočítá  $A = hv_0$ .

1921 – Nobelova cena za Fyziku "for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"

# Fotoefekt

- Rovnice  $\frac{1}{2}mv^2 = hn - A$ , odpovídá všem třem pravidlům vyřčeným Stoletovem.
  1. Čím víc fotonů, tím víc elektronů a tím větší elektrický proud.
  2. Foton předá svou energii okamžitě, není tedy pozorováno žádné zpoždění proudu.
  3. Pokud má foton nižší energii (záření s nižší frekvencí) než odpovídá výstupní práci, žádný elektron se neuvolní.



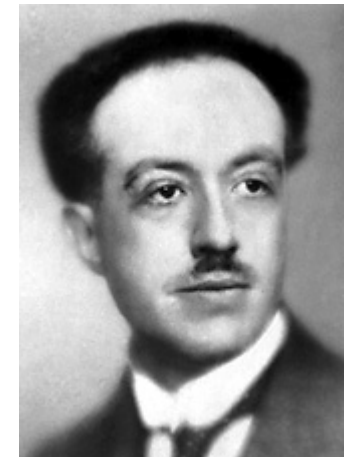
# Fotoefekt – výstupní práce některých prvků

| prvek        | Výstupní práce (eV) | $\lambda_0$ (nm) |
|--------------|---------------------|------------------|
| draslík (K)  | 2,24                | 554              |
| mangan (Mn)  | 3,95                | 314              |
| olovo (Pb)   | 4,02                | 308              |
| měď (Cu)     | 4,48                | 277              |
| zlato (Au)   | 4,76                | 260              |
| železo (Fe)  | 4,77                | 260              |
| platina (Pt) | 5,36                | 231              |

# Vlnový charakter částic

- Názor, že světlo není pouze vlnění už padl v 19. století. Žádný vědec ze začátku 20. století si však nemyslel, že by částice mohly být vlněním. Pouze Francouz Louis de Broglie byl v roce 1924 tak troufalý, že si dovolil vyslovit později velmi slavnou hypotézu. Předpokládal totiž, že **každé částici s hybností  $p$  náleží vlnová délka  $\lambda$**  podle vztahu:
- Experimentální potvrzení hypotézy bylo uskutečněno roku 1925 Američany Clintonem Davissonem\* a Lesterem Germerem.

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



Těm tento jev nastal víceméně náhodou při práci na jiném problému. Tehdy pozorovali difrakci elektronů na krystalu niklu. Přitom difrakce je jak víme záležitost vlastní pouze vlnám.

\*1937 – Nobelova cena za Fyziku s G.P. Thomsonem "for their experimental discovery of the diffraction of electrons by crystals"



# Vlnový charakter částic

Relativity

$$E = mc^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

Kinetic energy term  
Rest mass energy term

rest mass = 0

Momentum of a photon

$$p = \frac{E}{c}$$

The de Broglie Hypothesis

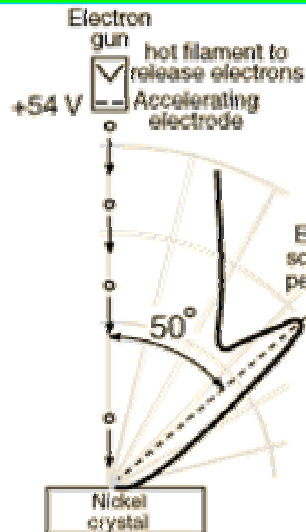
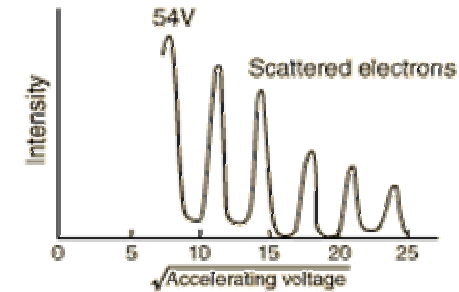
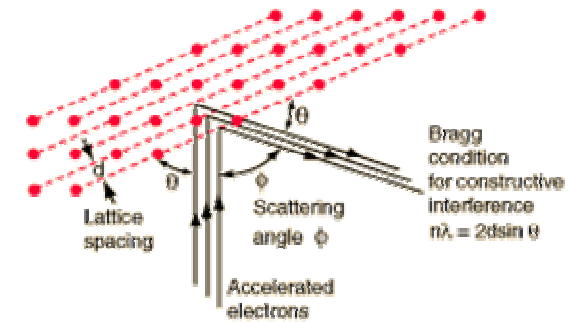
$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{for photon}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad \text{for electron?}$$

Wavelength-energy relation

Photoelectric effect

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$



Theory

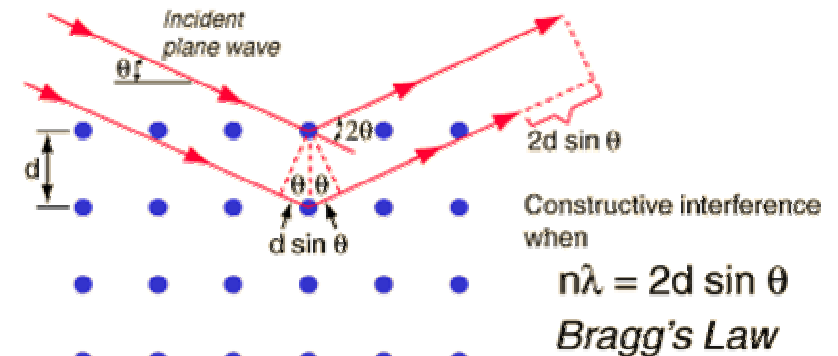
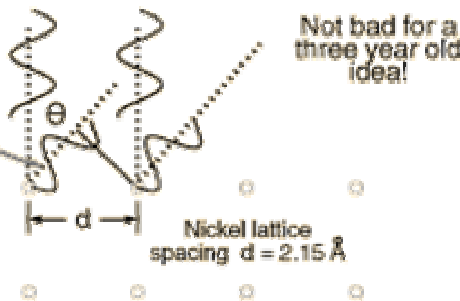
$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.67 \text{ \AA} \text{ for } 54 \text{ V}$$

Experiment

Pathlength difference

$$d \sin \theta = 2.15 \sin 50^\circ = \lambda = 1.65 \text{ \AA}$$

for constructive interference



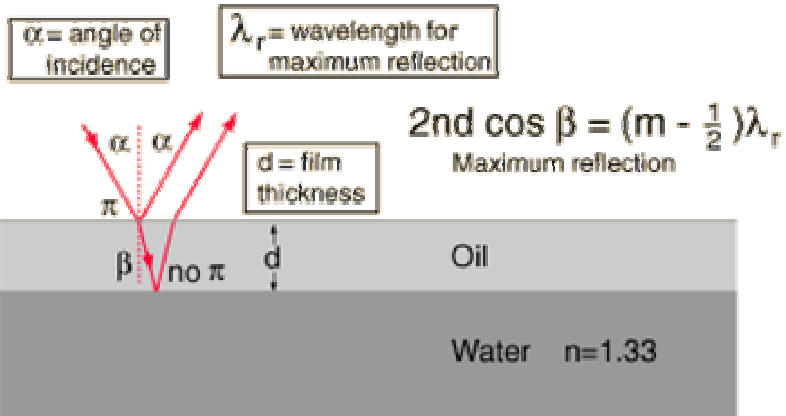
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \text{Bragg's Law}$$

1924 de Broglie's hypothesis  
1927 Davisson-Germer experiment  
1929 Nobel Prize for de Broglie

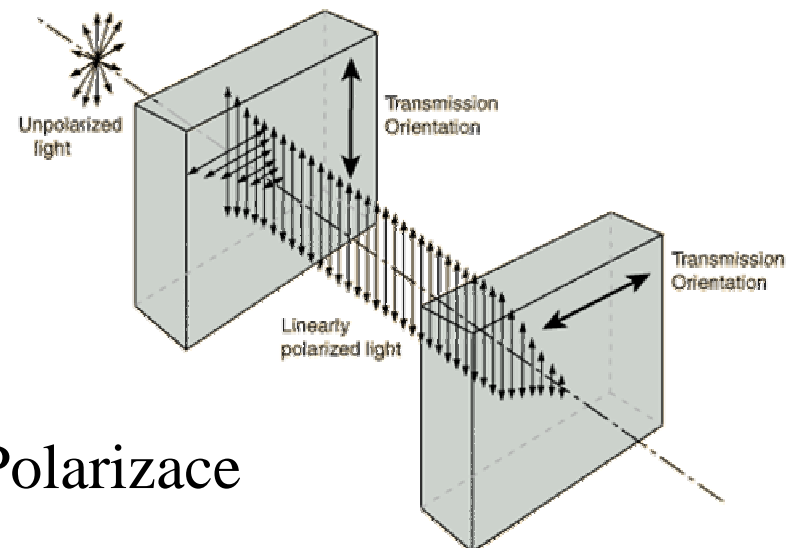
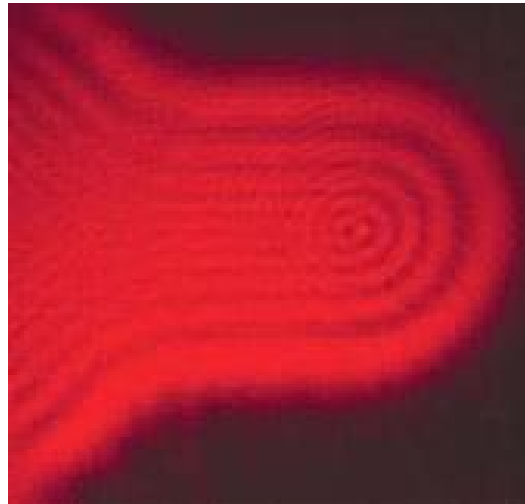
# Vlnově-částicový dualismus

Světlo jako vlnění

Interference






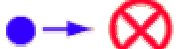

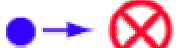

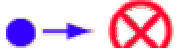




Difrakce

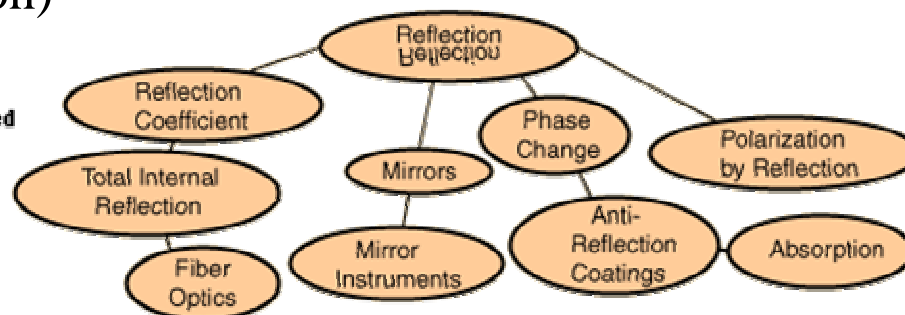
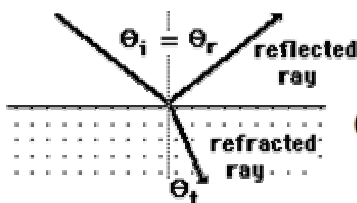


Polarizace

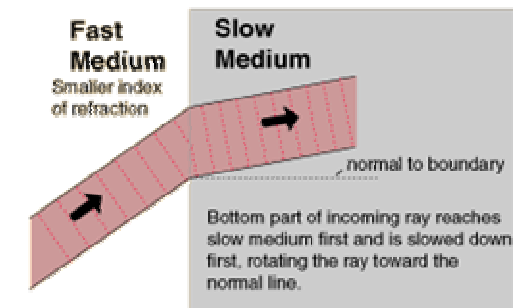
# Vlnově-částicový dualismus

| Phenomenon           | Can be explained in terms of waves.  | Can be explained in terms of particles.  |
|----------------------|--|--|
| <u>Reflection</u>    |   |   |
| <u>Refraction</u>    |   |   |
| <u>Interference</u>  |   |   |
| <u>Diffraction</u>   |   |   |
| <u>Polarization</u>  |   |   |
| Photoelectric effect |  |  |

## Odraz (reflection)



## Lom (refraction)



## Na závěr...

- Je tu otázka: jak to, že nepozorujeme vlnové vlastnosti u pohybujících se objektů našeho světa, když každé těleso s hybností má určitou vlnovou délku?
- Odpověď najdeme ve velikosti Planckovy konstanty. Makroskopické objekty mají ve srovnání s ní obrovské hybnosti ( $p = mv$ ), i když se pohybují velmi pomalu. Výsledné vlnové délky jsou tedy velmi malé a vlnové vlastnosti jsou nepozorovatelné.

$$E = h\nu$$

frequency of radiation, sometimes written as  $f$   
giving expression  $E = hf$ .

Quantum energy  
of a photon.

$h = \text{Planck's constant} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule}\cdot\text{sec} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad h = 6,656 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

## Na závěr...

A při přehledu historie optiky by jsme neměli zapomenout, že rok 2010 znamená 50. výročí objevení laseru...