

# **Optické experimenty historického významu pro fyziku**

**(od starověku po počátky kvantové fyziky)**

- J.Franc
- Proseminář z Optiky
- 16.12.2021

? Co je světlo

? Jakým způsobem světlo vnímáme

? Jakou rychlostí se šíří

? Jaké fyzikální zákony popisují šíření světla a interakci s látkou

## Era of Ancient Greece



Socrates  
469-399 B.C.



Aristotle  
384-322 B.C.



Plato  
427-347 B.C.



Euclid  
330?-275? B.C.



Ibn al-Haytham  
965-1040?

1600

1700

1800

1900

2000



Newton  
1643-1727



A. J. Fresnel(1788-1827)



Maxwell  
1831-1879



Huygens  
1629-1695



Young  
1773-1829



Einstein  
1879-1955

Položení základů geometrické optiky. Diskuse o podstatě světla spíše filozofického rázu

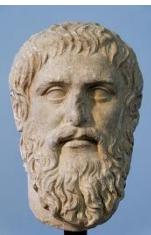
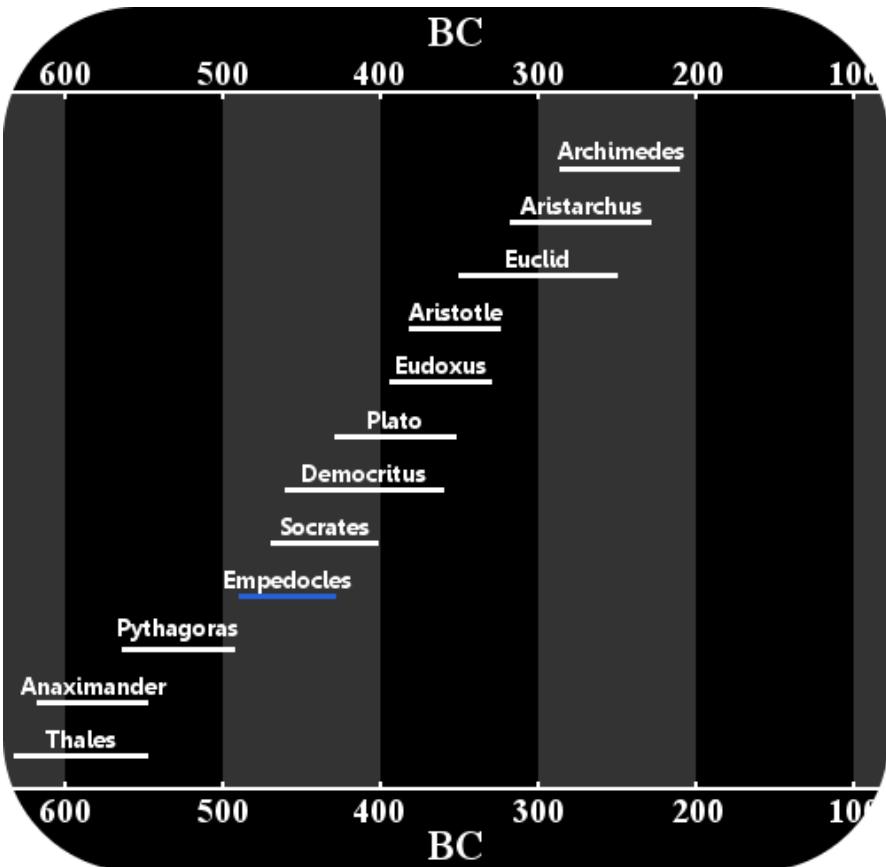
Další rozvoj geometrické optiky

Spor mezi vlnovým a nekvantovým částicovým modelem světla

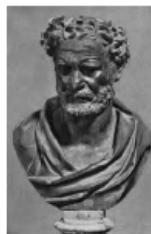
vlnová teorie

Přechod ke kvantové teorii,  
kvantová elektrodynamika

# Světlo a vidění – první doložené názory



~ 400 B.C **Plato** názor, že z oka vystupují paprsky (tzv. extramisní teorie, okulární paprsky). Tento názor v dalších stoletích převládal.



Democritus (460BC-370BC)



Aristotle (384BC-322BC)

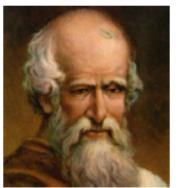
~ 400 B.C. **Demokritos** rozvinul koncept atomu. Předpokládal, že vjem v oku vzniká v důsledku stlačení vzduchu mezi objektem a okem

# Odraz a lom



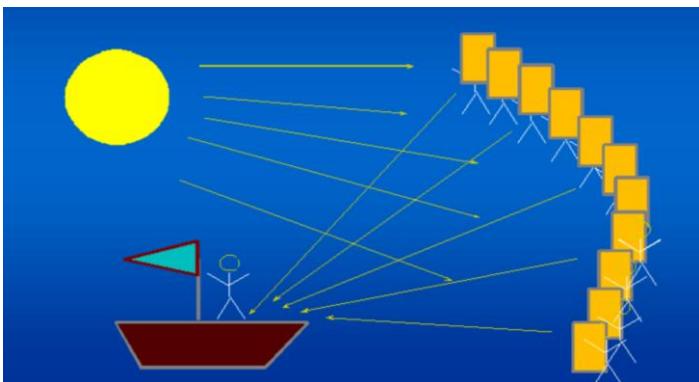
Euclid (325BC-265BC)

- ~ 300 B.C **Euclidus** ve spisu „Optica“ konstatoval, že se světlo šíří po přímé dráze a popsal **zákon odrazu**. Fyzikální podstatu světelných paprsků nedefinoval. Působil v Alexandrii.



Archimedes (287BC-212BC)

- ~ 250 B.C **Archimedes** ve spisu „Catoptrics“ popsal odraz světla na povrchu těles. Podle některých autorů byla při obraně Syracus před Římany použito Archimedovy zbraně – odrazu slunečního od zrcadel, což vedlo k zapálení římských lodí. Ověřovací pokusy z poslední doby tuto možnost zpochybňují,





Hero (10AD-70AD)



Ptolemy (90AD-168AD)

- ~ 60 A.D. **Herón Alexandrijský (Hero of Alexandria)** vyslovil princip, že světlo při odrazu od rovinných a sférických zrcadel putuje po nejkratší dráze a odvodil pomocí něj **zákon odrazu**.

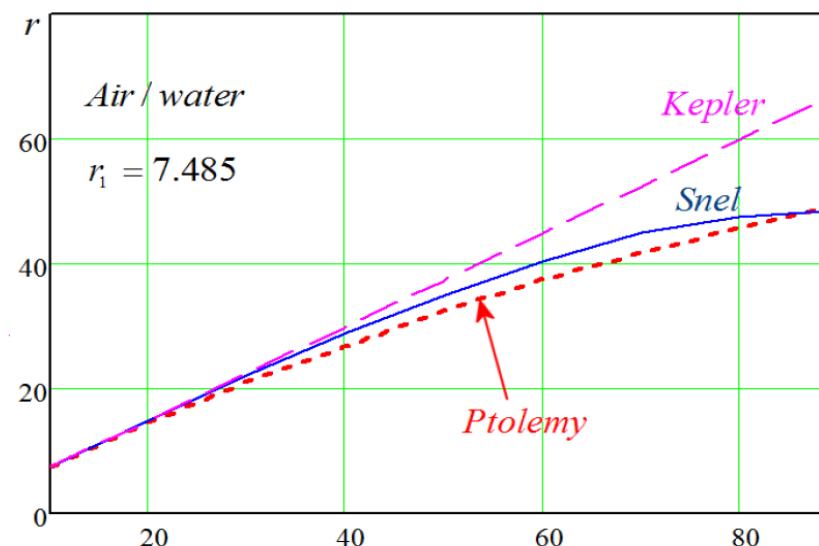
- ~ **Ptolemaios** vydal pětidílný spis o optice. Proměřil lom na několika rozhraních. Při vyhodnocení se snažil dokázat, že měřená data odpovídají algoritmu, používanému v astronomii. Prokázal, že dopadající, odražený a lomený paprsek leží v jedné rovině. Zastával extramisní teorii světla.

„We consider it a good principle to explain the phenomena by the simplest hypothesis possible.“

$$r_v = vr_1 - \frac{v(v-1)}{2} \times 0.5$$

Funkce sinus byla tehdy již 250 let tabelována, ale Ptolemaios ji nepoužil.

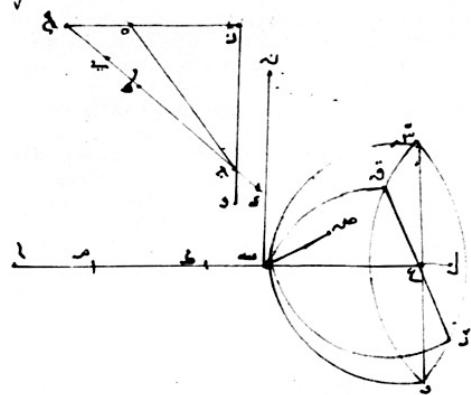
$v$	$i_v$	air/water	$r_v$ air/glass	water/glass
1	10	8	7	9.5
2	20	15.5	13.5	18.5
3	30	22.5	19.5	27
4	40	29	25	35
5	50	35	30	42.5
6	60	40.5	34.5	49.5
7	70	45.5	38.5	56
8	80	50	42	62





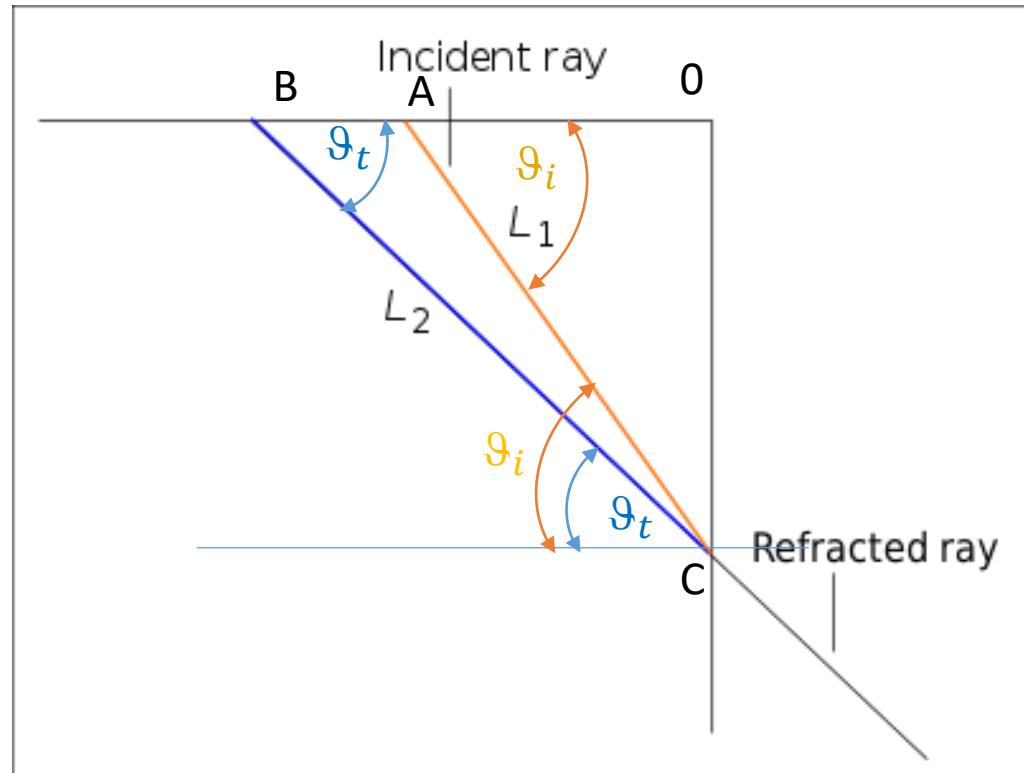
# **Ibn Sahl**

(940-1000 A.D.)



لأنه إنما هدفه على باطن مسوية غيره فلأنه هنا يقطع طبع زرير  
على نقطته بـنافذة من نوع احتلخلي بـبن بـبن بن بن بن  
الكتل المترتبة الفضلى المشتركة بين هذا الطبق وبين طبق قلم قار  
خط سبز فلأنه هنا يقطع طبق ينبع على نقطته بـنافذة بـن  
بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن بـن  
فلابد من مسح طبق قار على نقطته بـنافذة ولكن خط سبز وهذا الحال  
٥

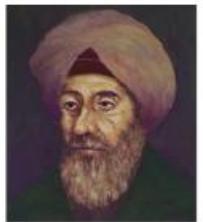
Používal **zákon lomu** včetně sinových členů



Interpretace Ibn Sahlovy konstrukce  
Pokud je poměr  $\frac{L_1}{L_2}$  udržován konstantní  
( v poměru  $\frac{n_1}{n_2}$ ), pak paprsky splňují  
zákon lomu se siny (později Snellův zákon).  
Pojem „index lomu“ se tehdy nepoužíval

$$\frac{CA}{CB} = \frac{\frac{CA}{OC}}{\frac{CB}{OC}} = \frac{\frac{1}{\sin \vartheta_i}}{\frac{1}{\sin t}} = \frac{\sin \vartheta_t}{\sin \vartheta_i} = konst$$

Text práce byl rekonstruován egyptským matematikem Rohdi Rashedem v roce 1993



~ 1000 A.D. **Alhazan (Abu Ali Hasan Ibn al-Haitham)** - otec moderní optiky

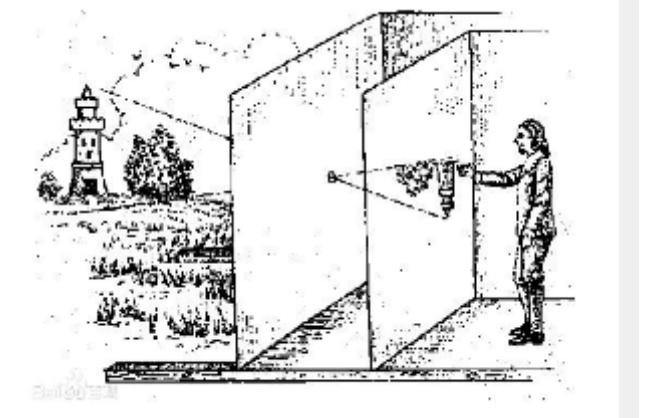
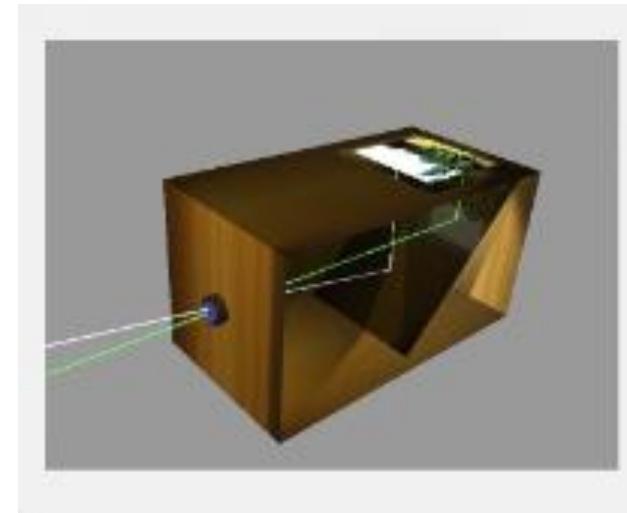
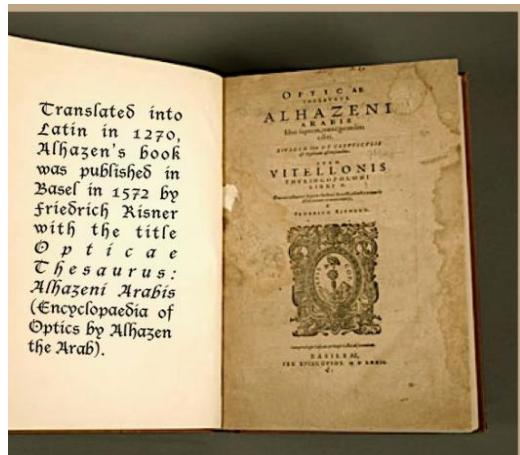
Studoval **odraz světla od sférických a parabolických zrcadel**

Alhazan (965AD-1040AD)

Vysvětlil zdánlivé zvětšení slunce nad horizontem.

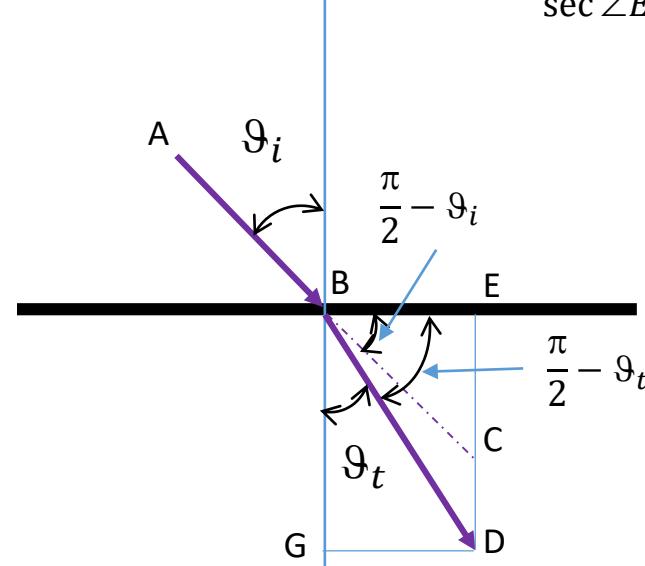
Správně formuloval teorii vnímání světla, tj. ukázal, že **světlo do oka vstupuje** a není okem emitováno, jak se předpokládalo dříve. Zavedl pojem **čočka** (podle zrn čočky, latinsky **lens**) a popsal správně její zvětšovací funkci jako důsledek lomu na rozhraní vzduch/sklo, nikoliv jako vlastnost jen skla, jak se do té doby předpokládalo.

Poprvé formuloval v úplnosti **zákon odrazu** tím, že konstatoval, že **dopadající a odražený paprsek leží v rovině kolmě k rovině rozhraní**. **Objevil cameru obscuru (pinhole camera)**





~ 1621 **van Snell** znovu objevil experimentálně zákon lomu. **Rene Descartes** jej pak matematicky zformuloval (včetně sinových členů)



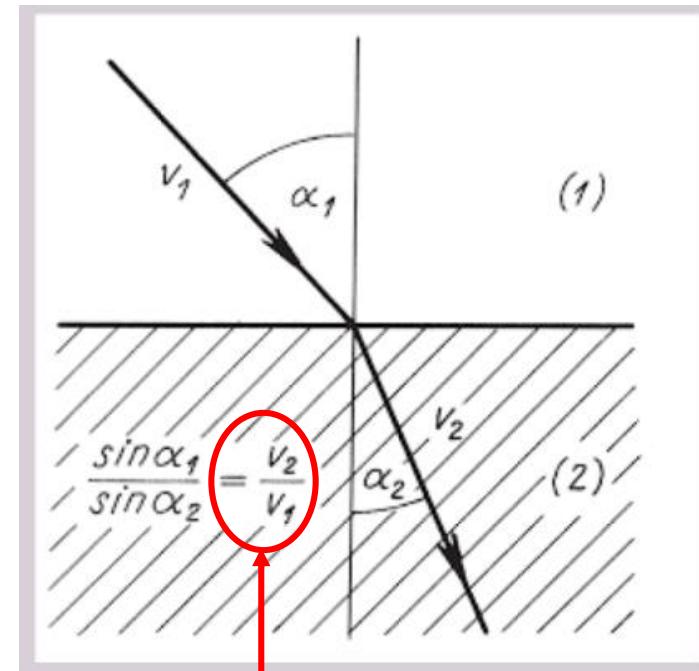
$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta_i\right) = \sin \vartheta_i = \frac{EB}{CB}$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta_t\right) = \sin \vartheta_t = \frac{EB}{DB}$$

Snellova formulace zákona lomu

$$\frac{\sec \angle EBC}{\sec \angle EBD} = \frac{\frac{CB}{EB}}{\frac{DB}{EB}} = \text{konst.}$$

$$\frac{\sec \angle EBC}{\sec \angle EBD} = \frac{\frac{CB}{EB}}{\frac{DB}{EB}} = \frac{\frac{1}{\sin \vartheta_i}}{\frac{1}{\sin \vartheta_t}} = \frac{\sin \vartheta_t}{\sin \vartheta_i} = \text{konst.}$$



Descartova formulace zákona lomu

- nesprávná. Založená na předpokladu, že na rozhraní se zachovává tečná složka rychlosti. Z toho plyne, že světlo by v opticky hustším médiu mělo zrychlit.

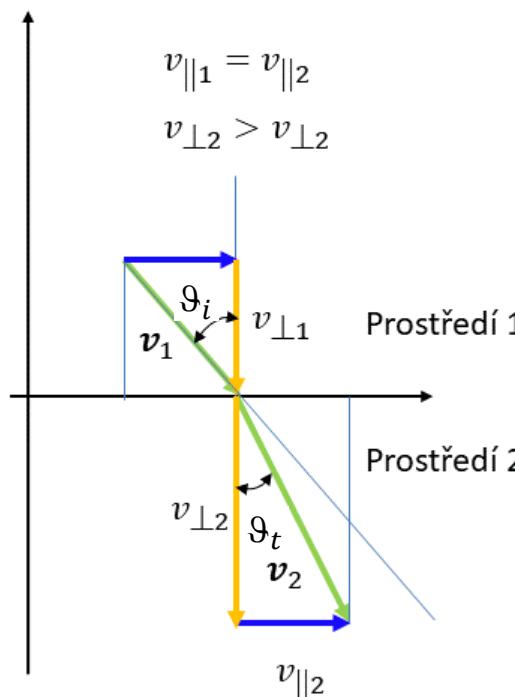
# Newtonova částicová teorie světla (odraz a lom)

Newton předpokládal, že světlo se skládá z malých hmotných částic. Horizontální paprsek světla nad Zemí by se proto měl v důsledku gravitace šířit po parabolické dráze. To nepozorujeme v důsledku velké rychlosti částic (malé zakřivení paraboly).

**Odraz světla** (zákon odrazu) je pomocí částicové teorie vysvětlen jednoduše v analogii s pružným odrazem kuličky

**Lom světla** Částice světla v homogenním médiu necítí žádnou sílu, protože silové působení okolních částic hmoty se vykompenzuje. Částice se tedy pohybuje podle zákona setrvačnosti rovnoměrným přímočarým pohybem.

Na rozhraní dvou prostředí (např. vzduch/voda) je situace jiná. Voda obsahuje více hmotných částic než vzduch. Newton předpokládal, že hmotné částice vody na rozhraní částice světla přitahují a proto se zvýší složka rychlosti kolmá k rozhraní. Složka paralelní s rozhraním se nezmění.



$$\sin \vartheta_i = \frac{v_{\parallel 1}}{v_1}$$

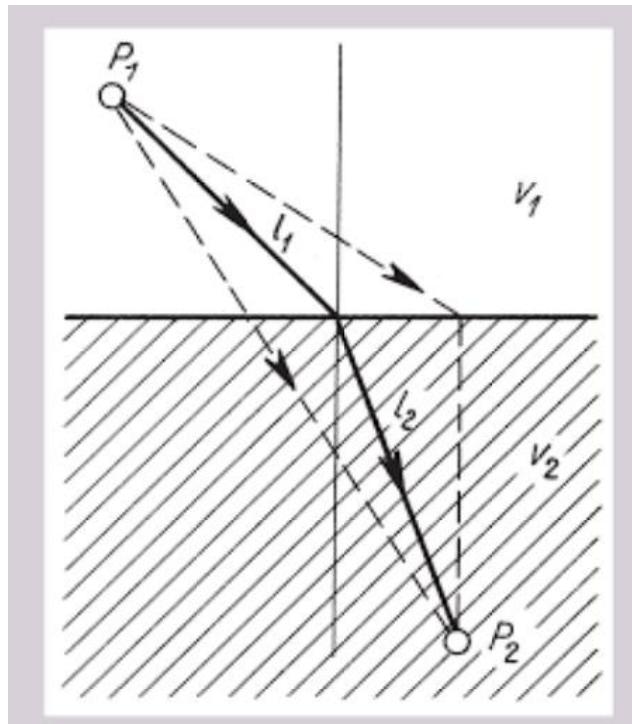
$$\sin \vartheta_t = \frac{v_{\parallel 2}}{v_2} = \frac{v_{\parallel 1}}{v_2}$$

$$\frac{\sin \vartheta_i}{\sin \vartheta_t} = \frac{v_2}{v_1}$$

1657 A.D. **Pierre de Fermat** postuloval **princip propagace** světelného paprsku **v nejkratším čase** a odvodil pomocí **něj zákon lomu**.



P. Fermat (1601-1665)



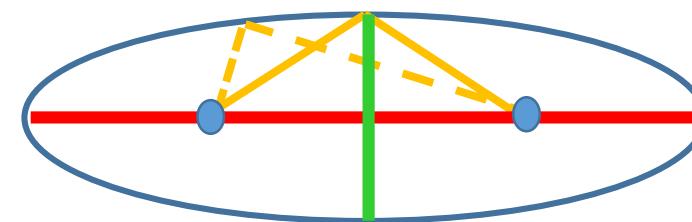
Fermat – původní formulace „Paprsek světla projde mezi dvěma body po takové dráze, která je časově nejkratší“.

$$\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} = c(n_1 l_1 + n_2 l_2) = \min$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

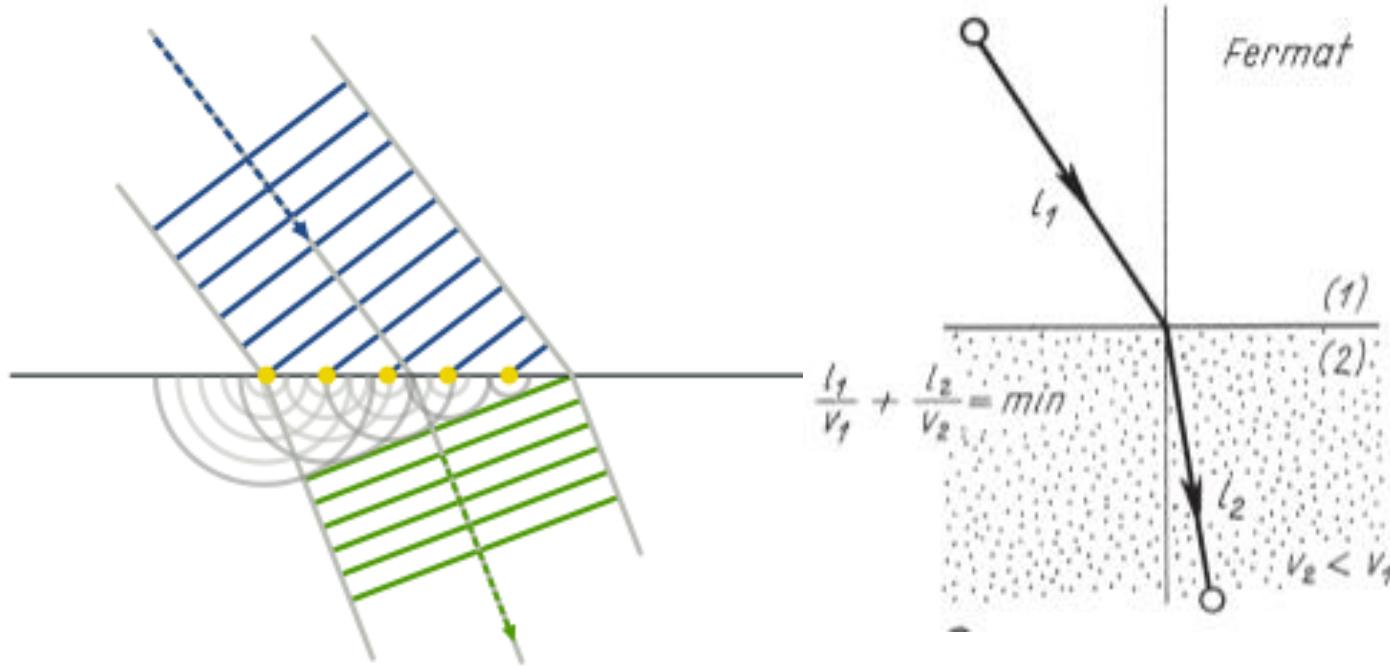
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Dnešní formulace „Paprsek světla projde mezi dvěma body po takové dráze, která je stacionární vzhledem k variaci této dráhy“. Může to být minimum, maximum nebo jsou všechny dráhy stejné.



Fermatova formulace zákona lomu potvrzena Ch. Huygensem (1678) z vlnové teorie

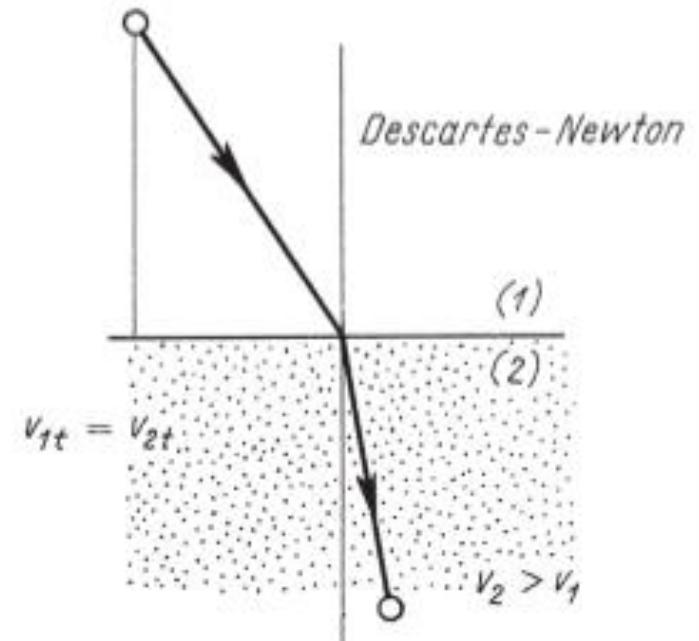
### Vlnová teorie



Fermat

(1)  
(2)

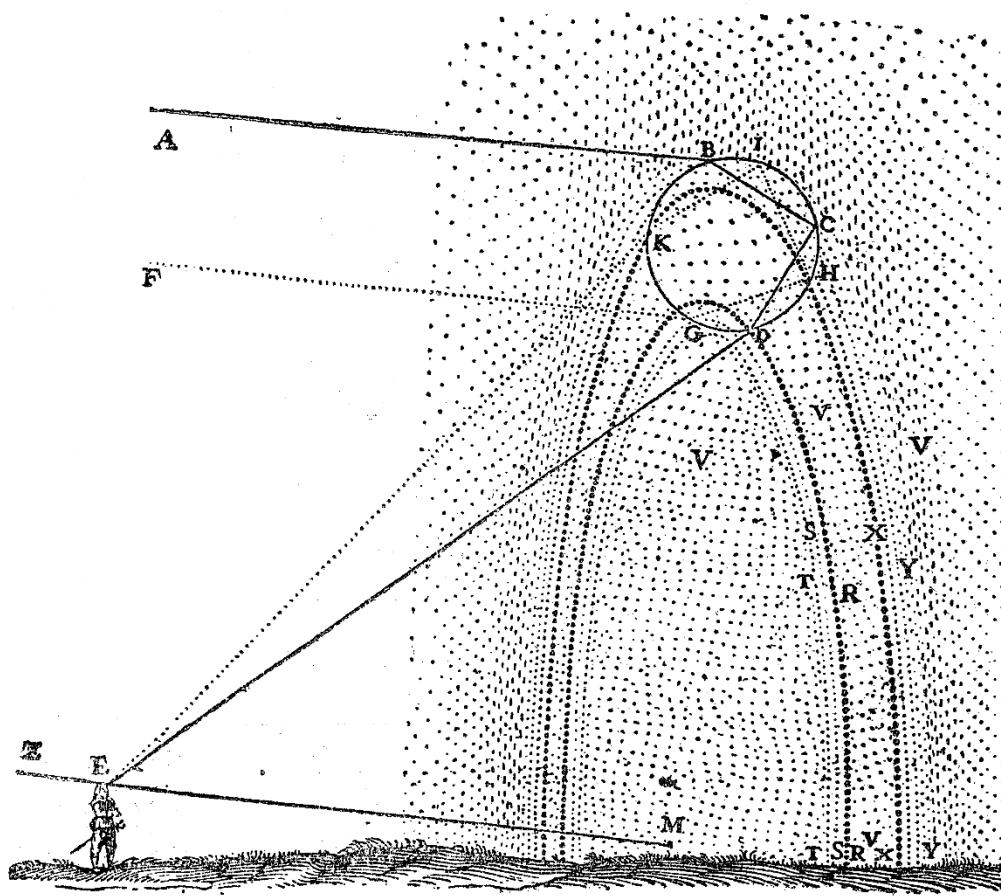
$v_2 < v_1$



Descartes - Newton

$$\frac{\sin \vartheta_i}{\sin \vartheta_t} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

~ 1637 **Rene Decartes** vysvětlil a spočítal vznik duhy

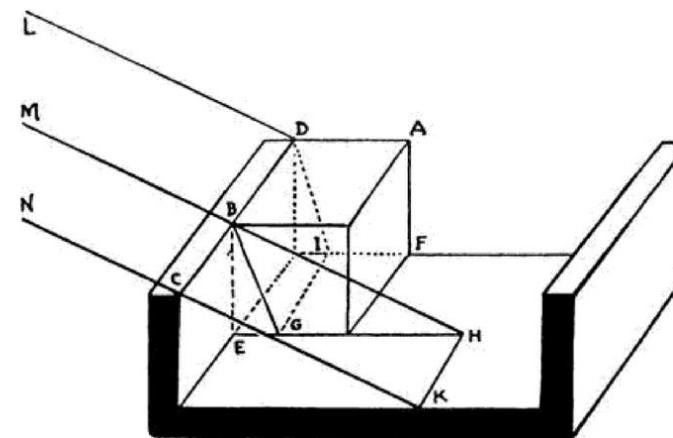


J. Kepler(1571-1630)

~ 1600 A.D. **Johannes Kepler** vysvětlil funkci čočky, oka, upravil Galileiho dalekohled pomocí spojních čoček

Podrobně studoval odraz a lom světla a popsal totální odraz

Formuloval optickou teorii dalekohledu (1610)



Objevil, že ozáření objektu klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje světla

Studioval vliv velikosti vstupního otvoru (aperture) v pinhole kameře (camera obscura) na zobrazení. Během studia tohoto problému zjistil, že i oko má vliv na výsledné zobrazení, tedy konstatoval, že i oko má vlastní aperturu.

# Základní optické přístroje využívající čočky

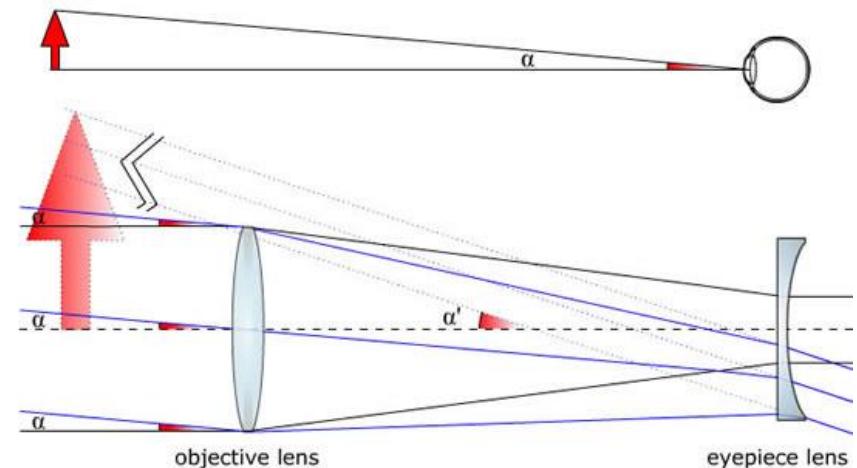
**Čočky** – leštěné krystaly (zpravidla křemen)

První doložený nález – 1850 (tzv. Nimrudská čočka z období 750-710 B.C, Asýrie)



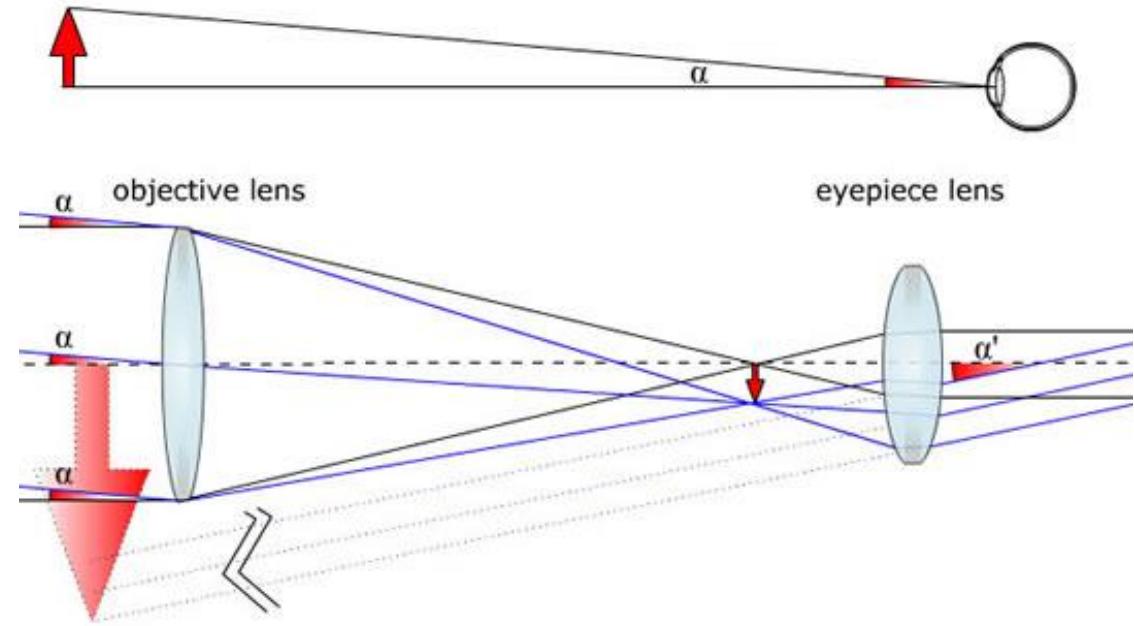
Nimrudská čočka,  
Vystaveno v Britském muzeu

**Dalekohled** – 1608 Patentová žádost H. Lippershey (Holandsko) patent neudělen. Na jejím základě sestrojil G. Galilei dalekohled sestávající z objektivu (spojná čočka) a okuláru (záporná čočka). Objektiv vytváří z obrazu ležícího v nekonečnu reálný převrácený obraz, který je předmětem pro okulár. Výsledný obraz je virtuální, leží v nekonečnu a je vzpřímený. Podstatné je, že oko vidí výsledný obraz pod větším úhlem než bez dalekohledu.



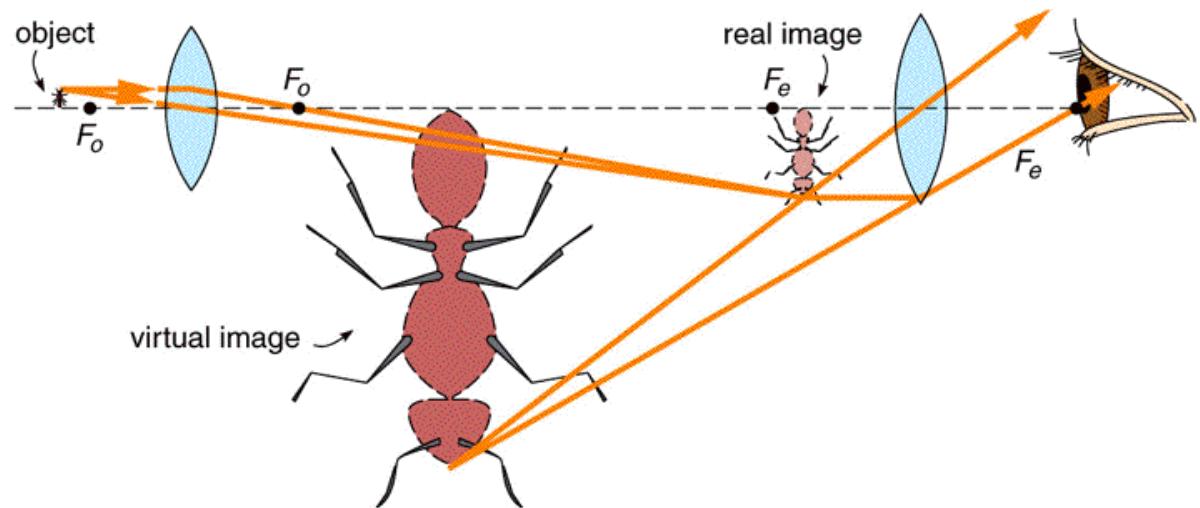
## Dalekohled - Keplerovský (J. Kepler, 1611)

Objektiv i okulár tvoří spojné čočky. Výsledný obraz leží rovněž v nekonečnu, je virtuální a invertovaný.



## Mikroskop - Není jasné kdo mikroskop objevil.

Nárok vyslovil syn Zachariase Janssena, který údajně mikroskop objevil mezi lety 1590-1618.



# Co je světlo? Vlnový vs částicový model

Podélné vlny

Éter

Příčné vlny

## Vlnový model

- 1665 F.M.Grimaldi - difrakce
- 1690 Ch.Huyghens
- T. Young
- 1802 Vysvětlení interference
- A.J. Fresnel  
1821 Důkaz příčnosti světla  
1820-1827 Matematická formulace  
Huygensova principu , matem. popis  
vln, popis difrakce, odrazu a lomu
- 1865 J. C. Maxwell – EM podstata světla
- 1905 A .Einstein – speciální teorie relativity

## Částicový model

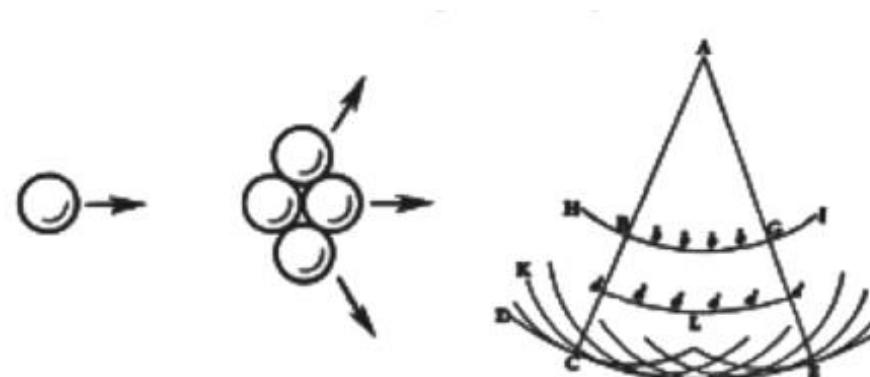
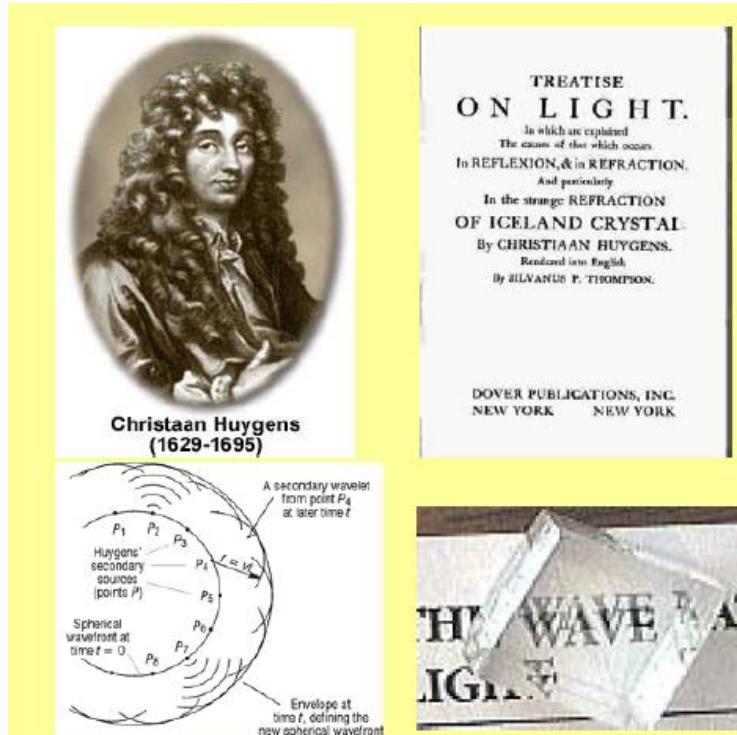
- 1704 I. Newton
- 1729 J. Bradley, stelární aberace
- 1809 E. L. Malus – polarizace odrazem
- 1815 D. Brewster – Brewsterův úhel
- 1900 M. Planck – formulace kvanta
- 1902 P. Lenard – fotoelektrický jev (měření)
- 1905 A. Einstein – fotoelektrický jev (vysvětlení)  
foton-=kvantum



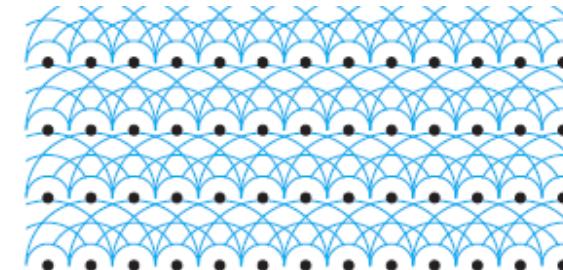
~ 1678 **Christiaan Huygens** vypracoval vlnovou teorii světla a aplikoval ji na vysvětlení nižší rychlosti světla v hustém médiu, k vysvětlení lomu a dvojlamu. Objevil **polarizaci** - pozoroval polarizaci světla dvojlamem. Huygens předpokládal, že světlo je **podélné** vlnění.

C. Huygens (1629-1695)

„The world is my country, to promote science is my religion.“



▲ Figure 4.2 Huygen's explanation of the propagation of light.



▲ Figure 4.3 Explanation for why light travels in a straight line.

Hyugensova vlnová teorie ve své době nedosáhla velkého uznání. Důvodem bylo i to, že Isaac Newton, který byl uznávanou vědeckou autoritou, zastával částicovou teorii.

# Difrakce a interference

Jako interferenční jevy lze označit **odchylky od sčítání výkonových intenzit záření**.

Tyto odchylky se za určitých podmínek projevují v prostorové modulaci intenzity záření.

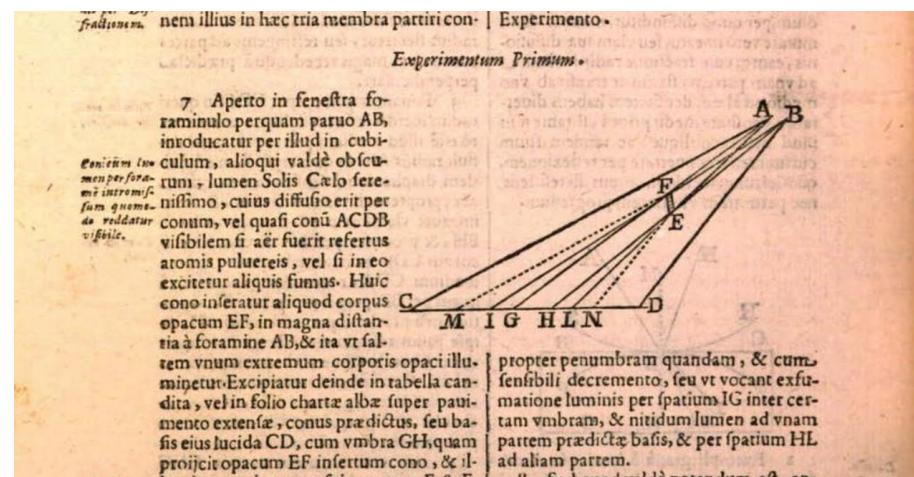
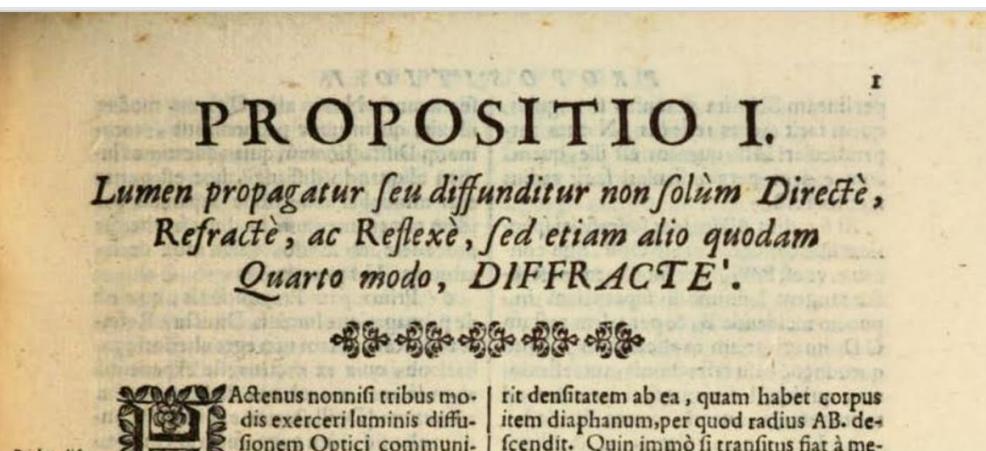
Difrakcí se nazývá odchýlení světla od přímočaráho šíření (ohyb) způsobené fyzickou překážkou.  
Z fyzikálního hlediska se jedná o jev interference.



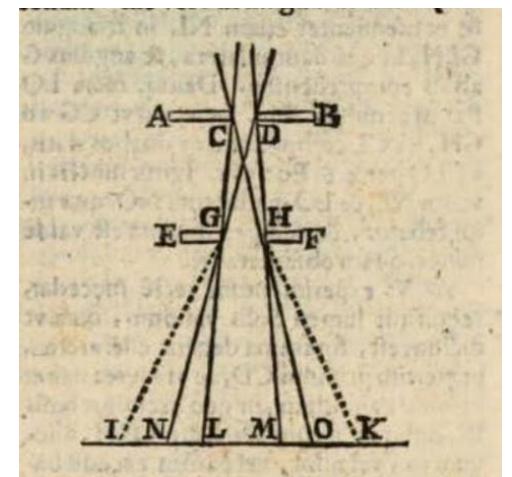
F. M. Grimaldi (1618-1663)

- ~ 1665 A.D **Francesco Maria Grimaldi** popsal **difrakci** světla. První indikace vlnové podstaty světla
- ~ „Light propagates and spreads not only directly, through refraction, and reflection, but also by a fourth mode, diffraction.“

Zdroj: <https://citaty.net/citaty/1822932-francesco-maria-grimaldi-light-propagates-and-spreads-not-only-directly-th/>

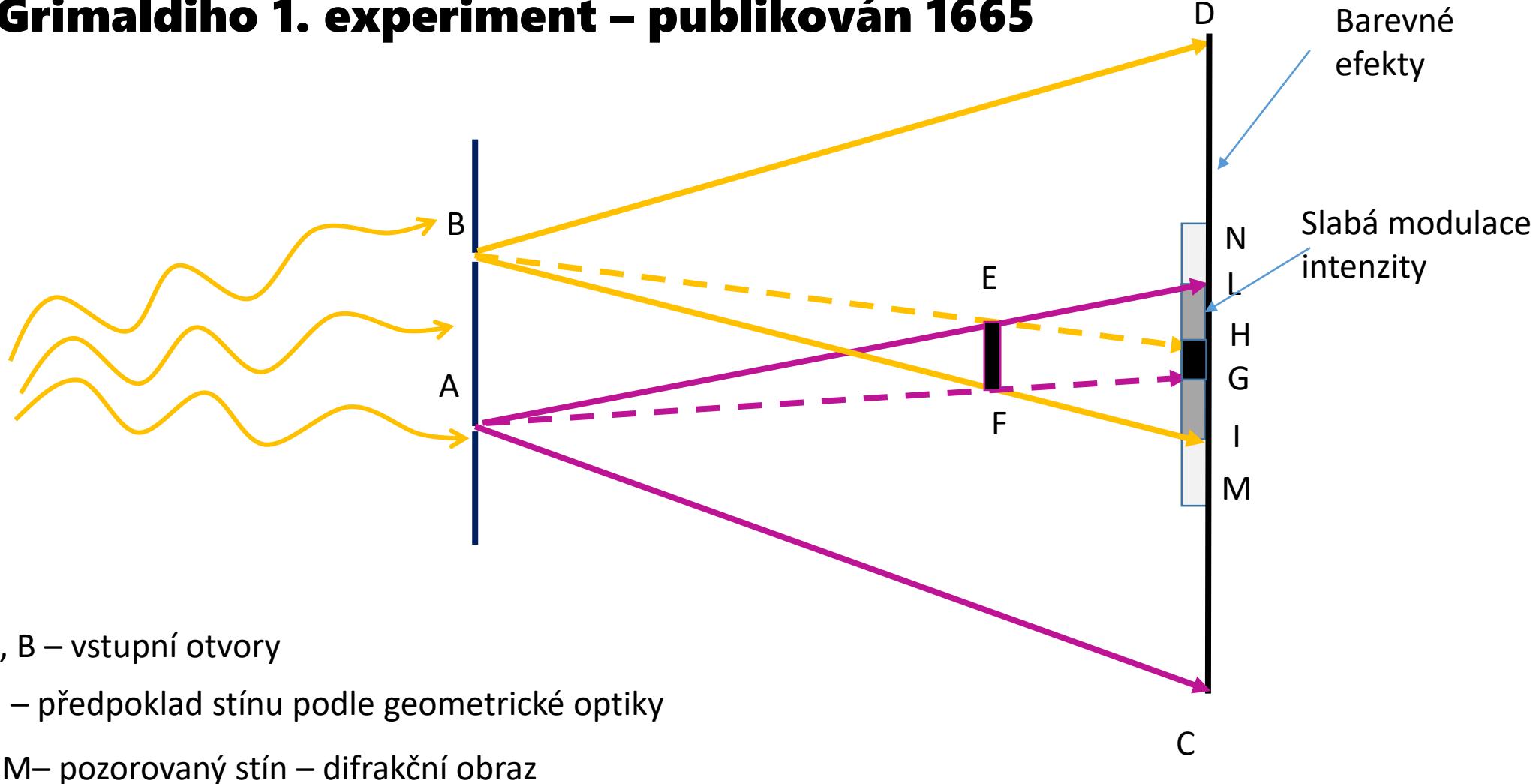


Grimaldiho 1. experiment



Grimaldiho 2. experiment

# Grimaldiho 1. experiment – publikován 1665

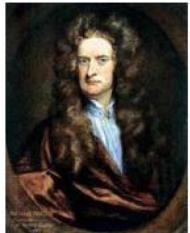


Grimaldi popisuje nový způsob šíření světla, kdy se světlo nešíří přímočaře a za překážkami vytváří stín, který nedopovídá zákonům geometrické optiky. Tento způsob nazývá **difrakcí**.



R. Hooke (1635-1703)

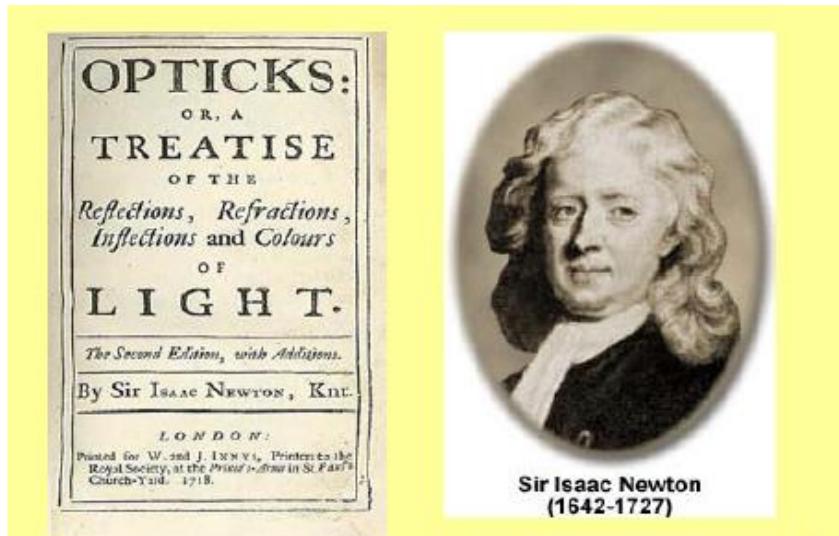
~ 1665 **Robert Hooke** studoval interferenční jevy na tenkých filmech. Jeho výzkum výrazně podpořil vlnovou teorii světla. Považoval světlo za krátké příčné vlnění. Je mu připisováno zavedení biologického pojmu buňka.



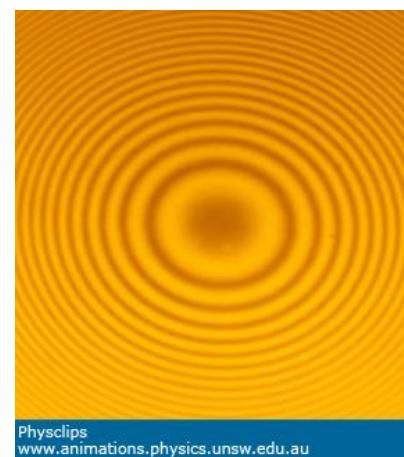
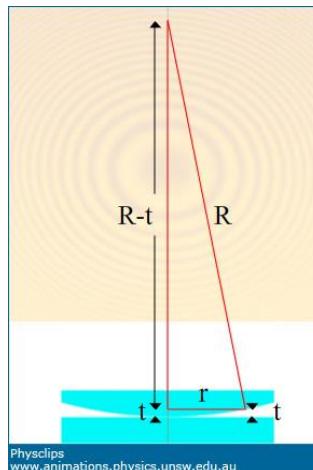
I. Newton (1642-1727)

~ 1666 **Isaac Newton** studoval disperzi světla na hranolu a spektrum bílého světla. Rozvinul částicovou teorii světla. Zkonstruoval zrcadlový dalekohled. Jeho vědecká dráha byla poznamenána spory s R. Hookem (tajemník Royal Society), který napadal jeho částicovou teorii světla.

**„Hypotézy vytvářím, avšak hypotézám - ani svým vlastním - nevěřím do posledního písmene.“**



Newton nejprve předpokládal, že světlé a tmavé kruhy vznikají tím, že zhuštěný éter reflektuje částice světla a zředěný je propouští. Pak teorii éteru opustil a přešel k částicové teorii. Kroužky vysvětloval různými stavů světla (fits).



### Newtonovy kroužky

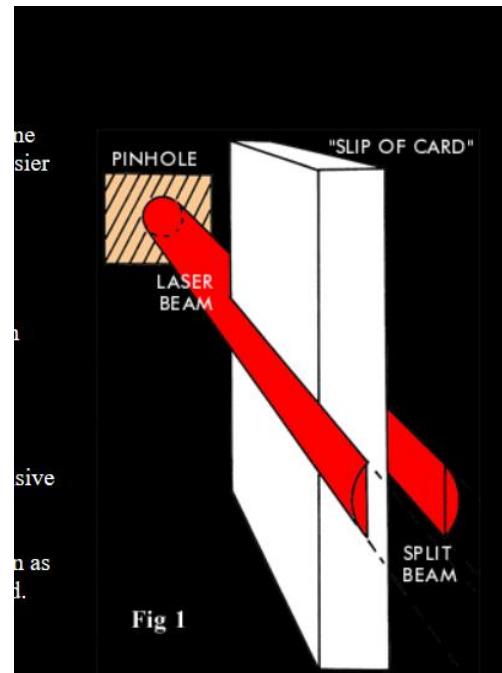
~ 1802



T. Young (1773-1829)

**Thomas Young** podpořil vlnovou teorii světla, realizoval Youngův pokus, postuloval princip interference, vyjádřil názor, že světlo je **příčné vlnění** (do té doby se předpokládalo, že se jedná o podélné vlnění). Byl zřejmě první, kdo použil pojem „index lomu“

### Youngův pokus 1802



Thomas Young, November 24, 1803, Royal Society of London

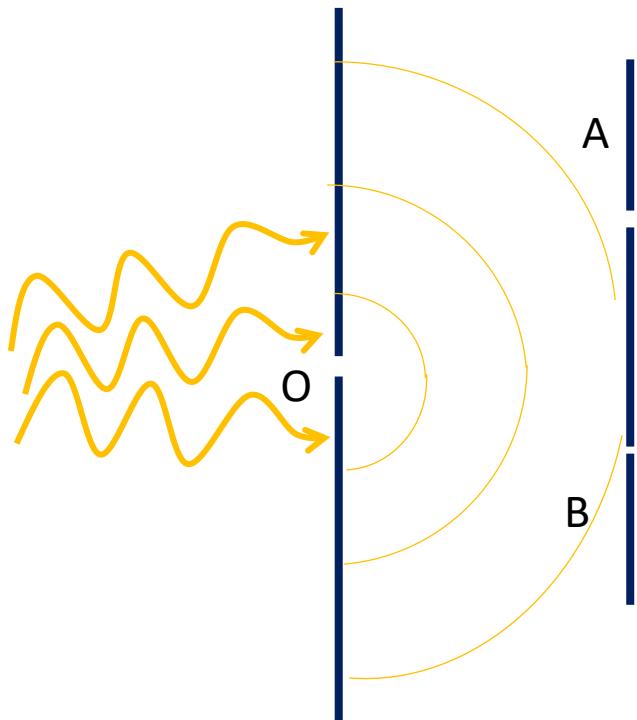
The experiments I am about to relate ... may be repeated with great ease, whenever the sun shines, and without any other apparatus than is at hand to every one."

Klíčovým prvkem pokusu bylo to, že zakrytím jedné poloviny svazku v oblasti karty modulace intenzity zmizela

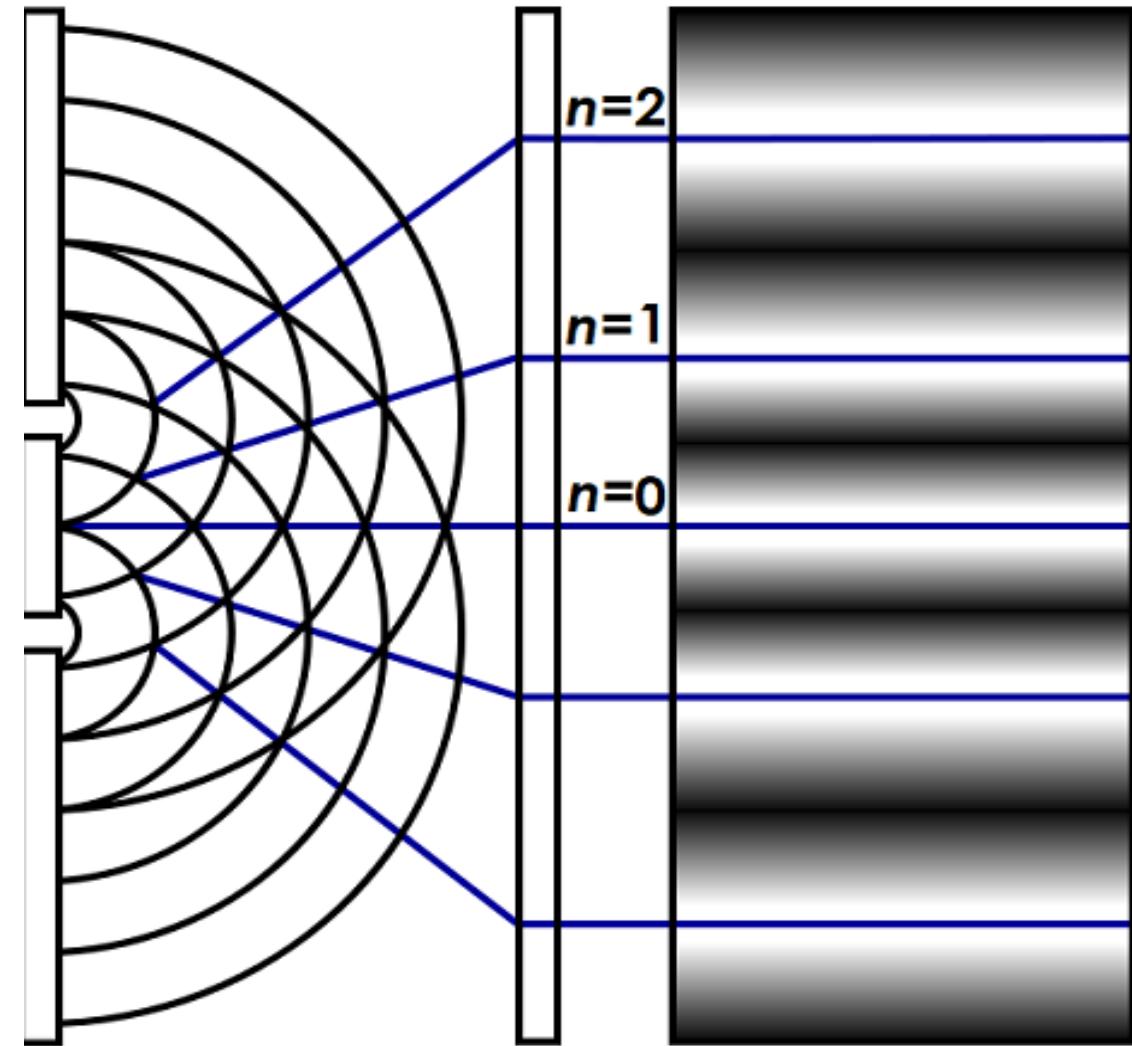
Henry Brougham, člen Královské společnosti nauk, později lordkancléř, o jedné z prací Thomase Younga: Nyní, prozatím, odkládáme slabé výplody tohoto autora, v nichž jsme marně pátrali po nějakých stopách vědění, ostrov tipu a důmyslu, které by vykompenzovaly zřejmý nedostatek solidního myšlení, klidného a trpělivého bádání apod.

# Youngův pokus – 1807

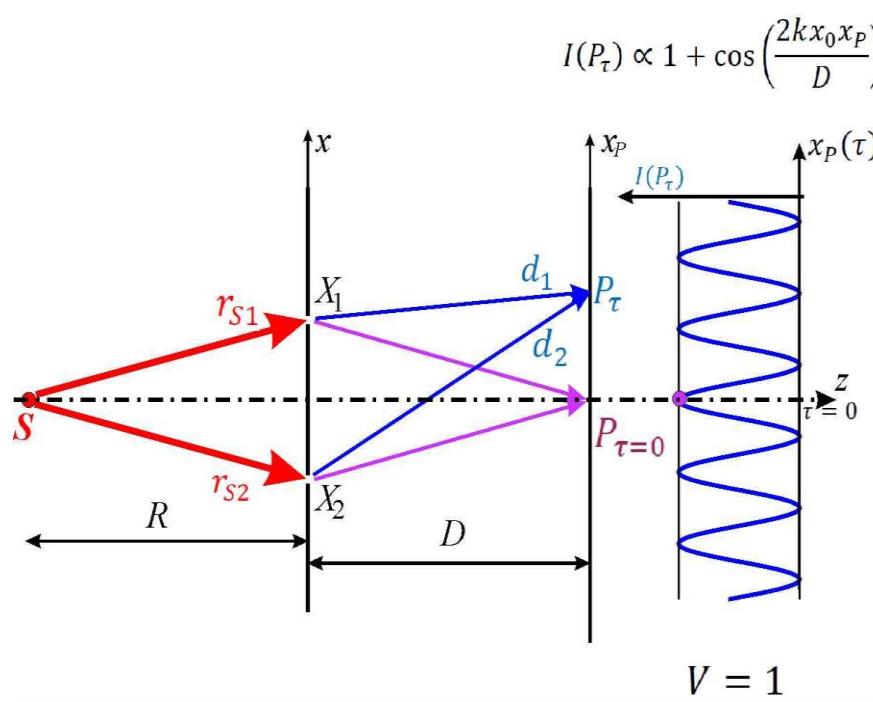
Jedná se o upravený Grimaldiho pokus - před Grimaldiho dva otvory je vloženo další stínítko, které zvýší prostorovou koherenci záření v otvorech A,B



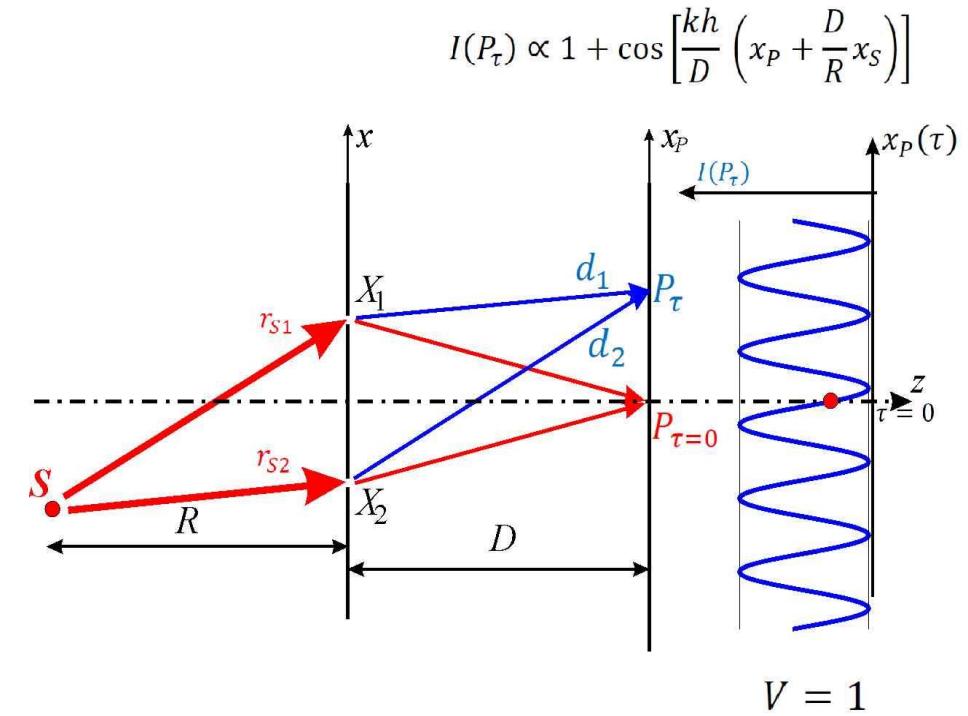
O – štěrbina zužující svazek světla  
A zvyšující prostorovou koherenci  
A, B – vstupní otvory



# Grimaldiho a Youngův pokus a koherence zdroje (I)

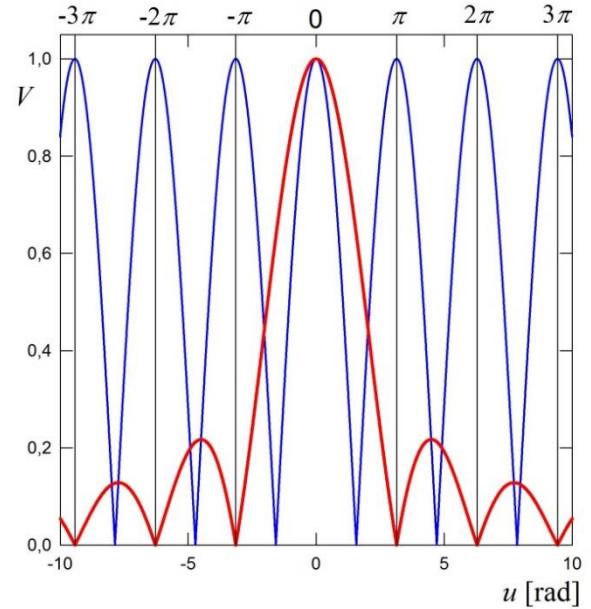
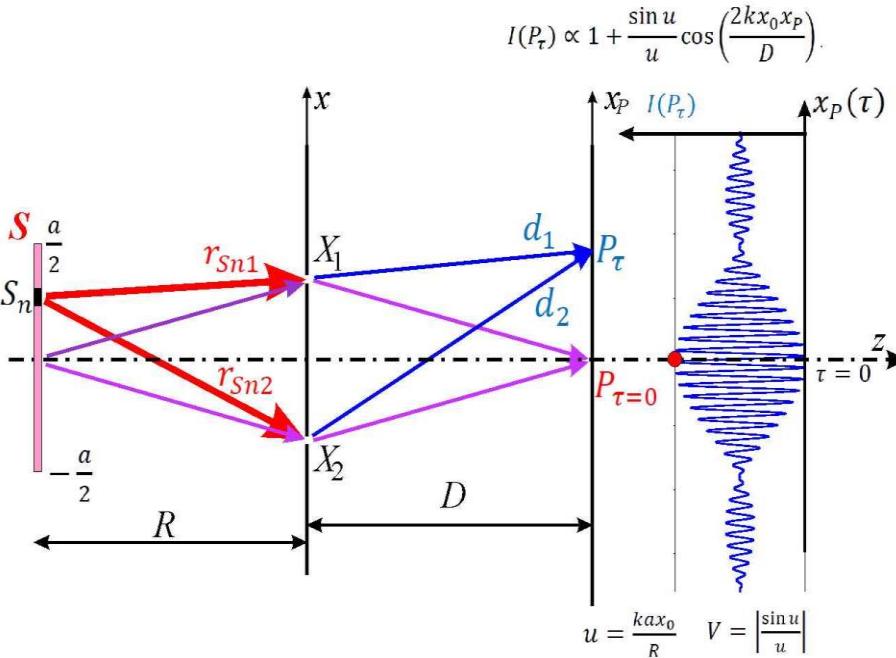
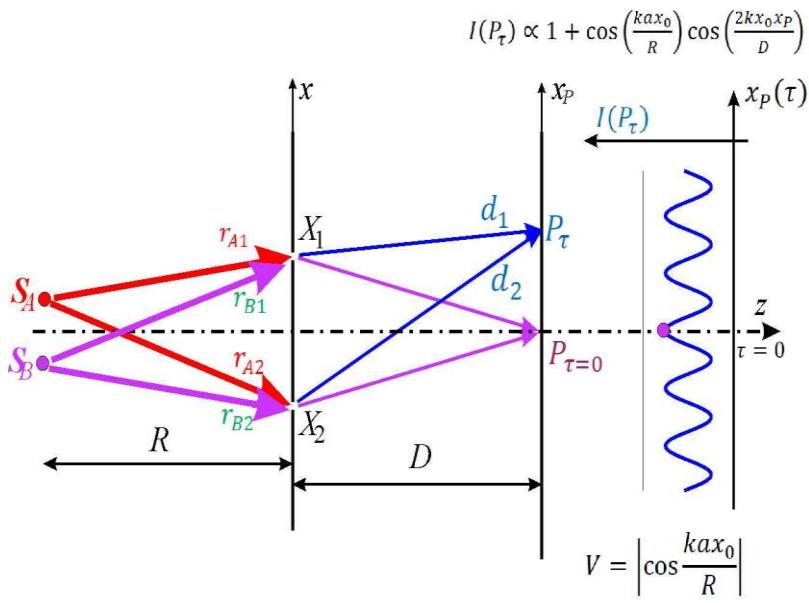


Youngův pokus s bodovým zdrojem světla ležícím na ose osvětlených difrakčních apertur. V rovině pozorování (matnice) vznikají interferenční proužky s maximální kontrastem (tzv. viditelnost  $V=1$ )



Youngův pokus s bodovým zdrojem světla ležícím mimo osu apertur. Maximální kontrast interferenčních proužků zůstává zachován, interferenční obrazec se posouvá vůči obrazci, kdy bodový zdroj ležel na ose apertur.

# Grimaldiho a Youngův pokus a koherence zdroje (II)



$$u = \frac{akh}{2R}$$

2 bodové zdroje mimo osu. IF obrazce se sčítají, kontrast IF proužků klesá

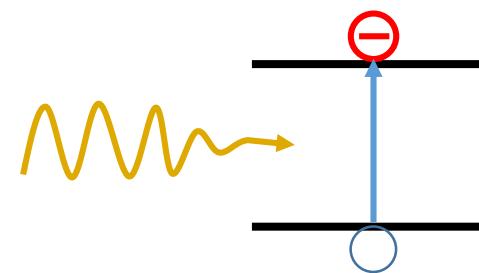
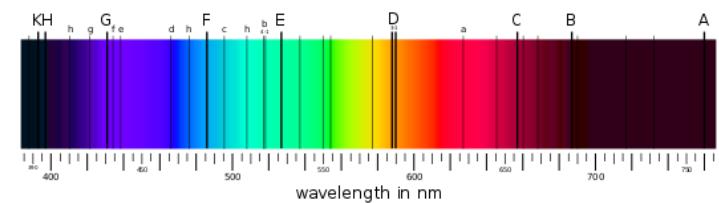
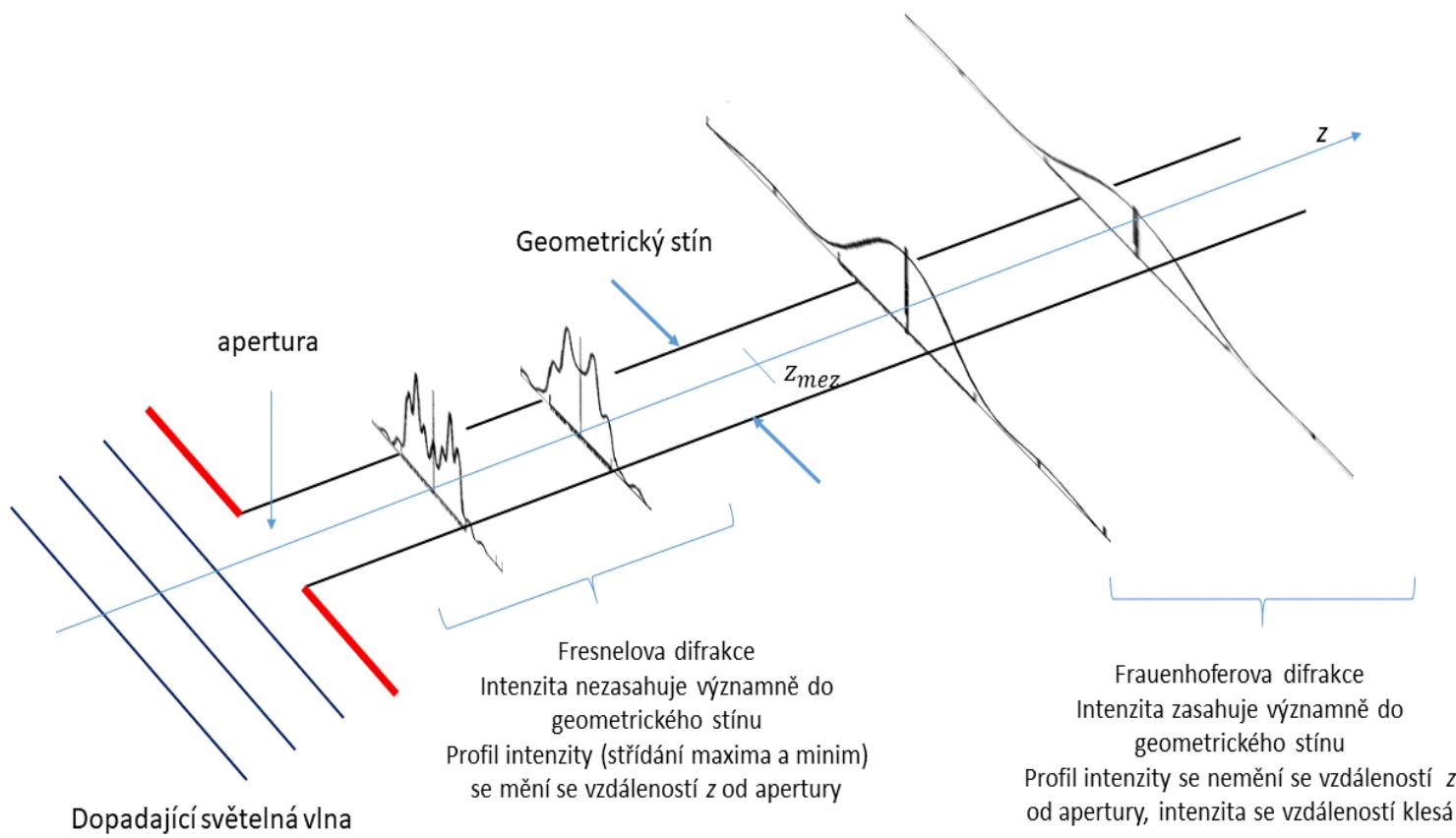
Úsečka nekoherentních bodových zdrojů. Viditelnost IF proužků závisí na rozměrech (délce) zdroje  $a$ , vlnovém vektoru, vzdálenosti difrakčních otvorů  $h = X_1 X_2$  a vzdálenosti  $R$  zdroje světla od stínítka s difrakčními otvory. Ke zvýšení viditelnosti IF proužků je tedy třeba prostorově omezit zdroj světla. To udělal T. Young ve srovnání s M. Grimaldim.



~ 1814

**Joseph von Fraunhofer** studoval difrakci ve vzdálených polích,  
(Frauenhoferova difrakce), detekoval absorpční linie slunečního spektra  
(Frauenhoferovy linie)

J. van Fraunhofer (1787-1826)



K absorpci slunečního světla dochází na přechodech mezi energetickými stavami elementů sluneční atmosféry



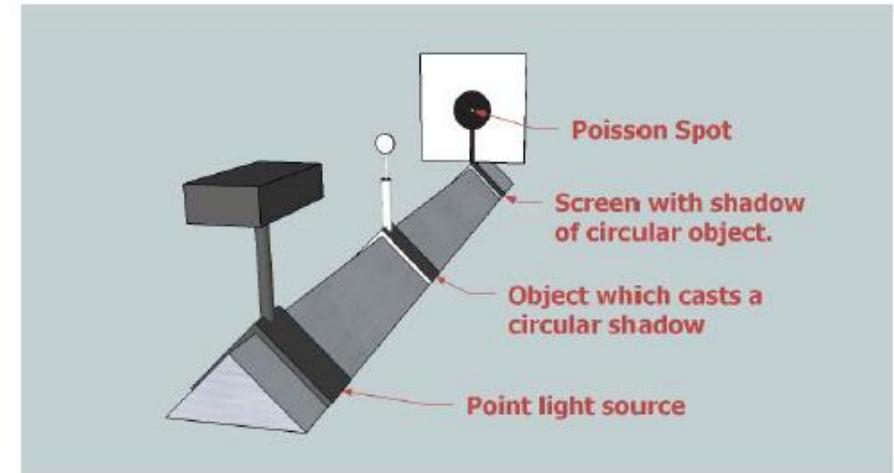
# Siemeon D. Poisson - Poissonova skvrna

„The only two good things in life are doing mathematics and teaching it.“

Zdroj: <https://citaty.net/citaty/1823069-simeon-denis-poisson-the-only-two-good-things-in-life-are-doing-mathema/>

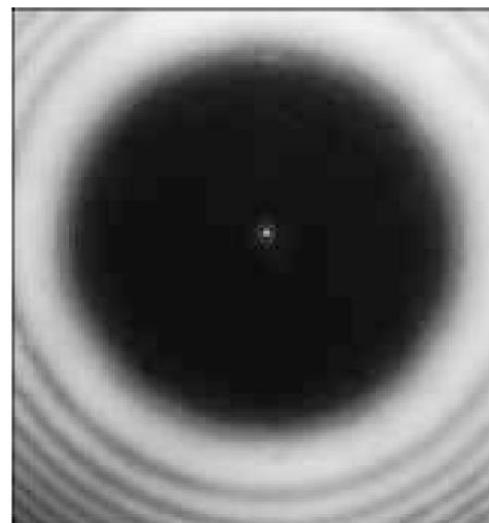
V roce publikoval **Augustin Fresnel** článek o teorii difrakce na základě soutěže vyhlášené francouzskou Akademií věd. Člen komise. **Simeon D. Poisson**, byl jako zastánce částicové teorie k závěrům Fresnela velmi kritický. Na základě Fresnelovy vlnové teorie dedukoval zdánlivě absurdní předpoklad, že za kruhovou překážkou by se na ose měla objevit jasná skvrna. Tím považoval za hřebíček do rakve vlnové teorie.

Ale jiný člen komise, **Dominique Arago** nechal Poissonem navržený experiment provést a skvrnu se podařilo změřit. Fresnel vyhrál cenu. Skvrnu, která by měla plné právo se nazývat Aragova, vešla do historie jako **Poissonova skvrna**

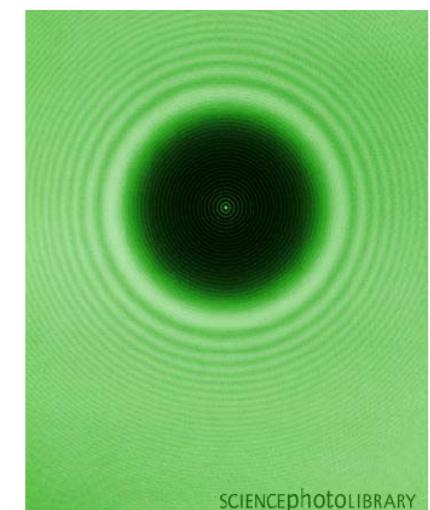


[http://en.wikipedia.org/wiki/Arago\\_spot](http://en.wikipedia.org/wiki/Arago_spot)

$$I(0,0,z) \propto E(0,0,z) E^*(0,0,z) = |E_0|^2 e^{ik\sqrt{(D/2)^2+z^2}} e^{-ik\sqrt{(D/2)^2+z^2}} = |E_0|^2$$



P.M. Rinard, Am. J. Phys. 44:70, 1976

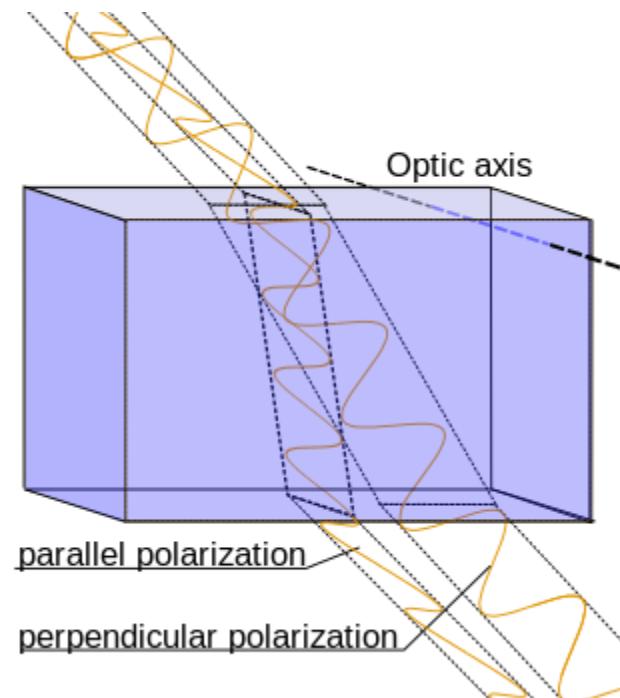
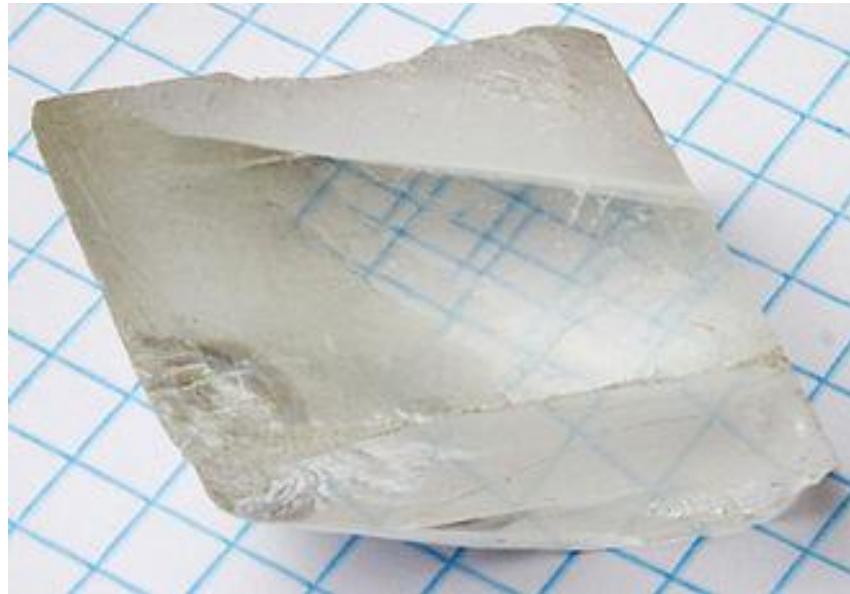


SCIENCEphotOLIBRARY

# Dvojlom a polarizace světla



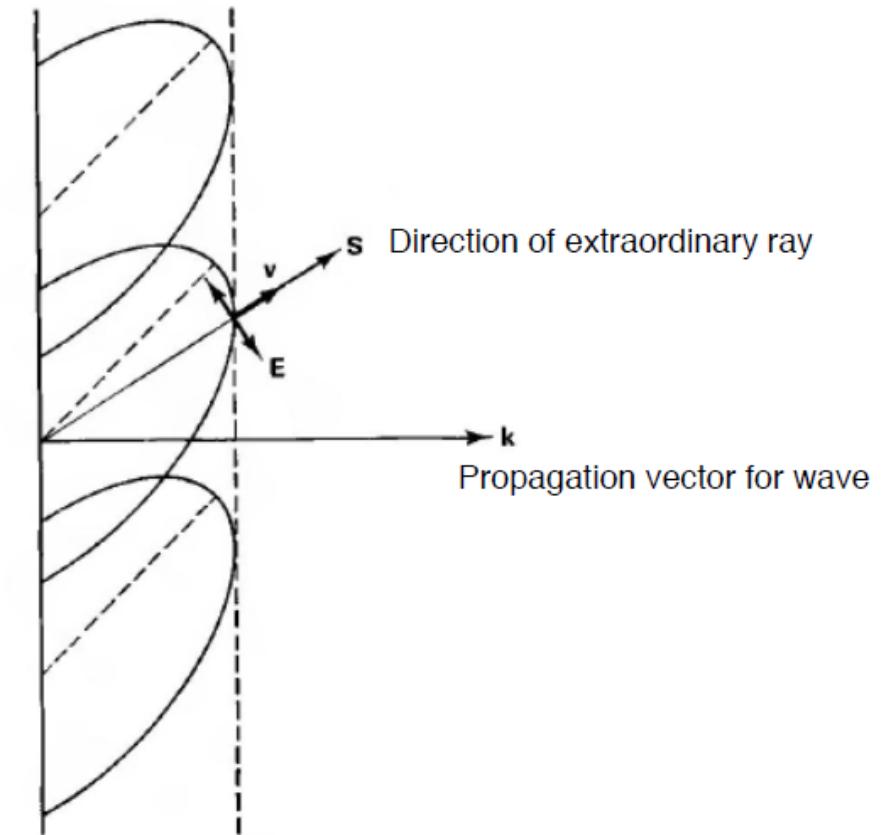
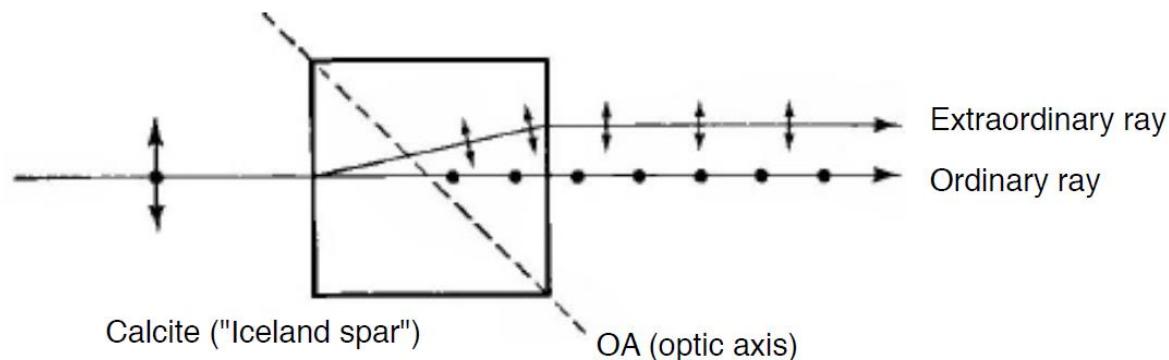
- ~ 1659 **Erasmus Bartolin** – popsal **dvojlom** v islandském vápenci ( $CaCO_3$ ). Tento jev byl vysvětlen až v 19. století Fresnelem na základě vlnového modelu světla



Bartolin pozoroval vznik dvou obrazů při dvojlomu. Nevěděl, že oba svazky jsou lineárně polarizovány s navzájem kolmými polarizacemi

# Huygensova analýza dvojlomu

1690- objevil polarizaci světla při použití dvou dvojlomných krystalů a jejich vzájemným natáčením“ „každý z paprsků vzniklých při lomu na kalcitu může být vyrušen průchodem druhým krystalem ze stejného materiálu, pokud je druhý krystal natočen“ ,

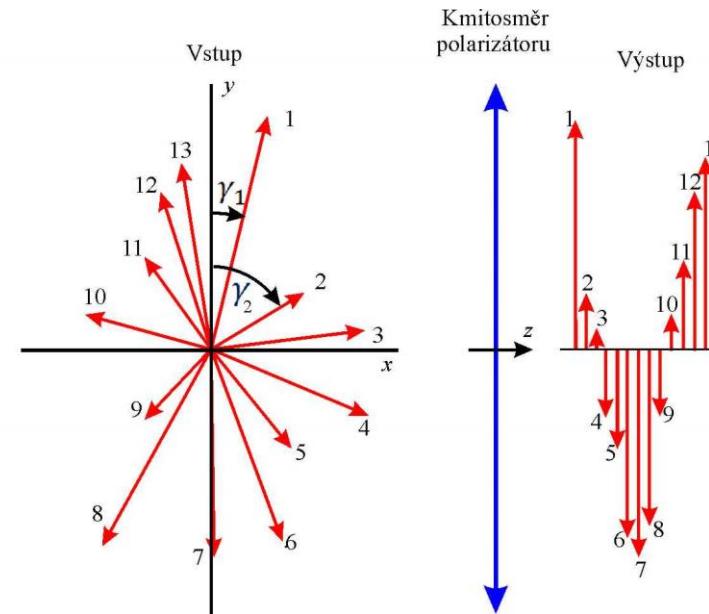
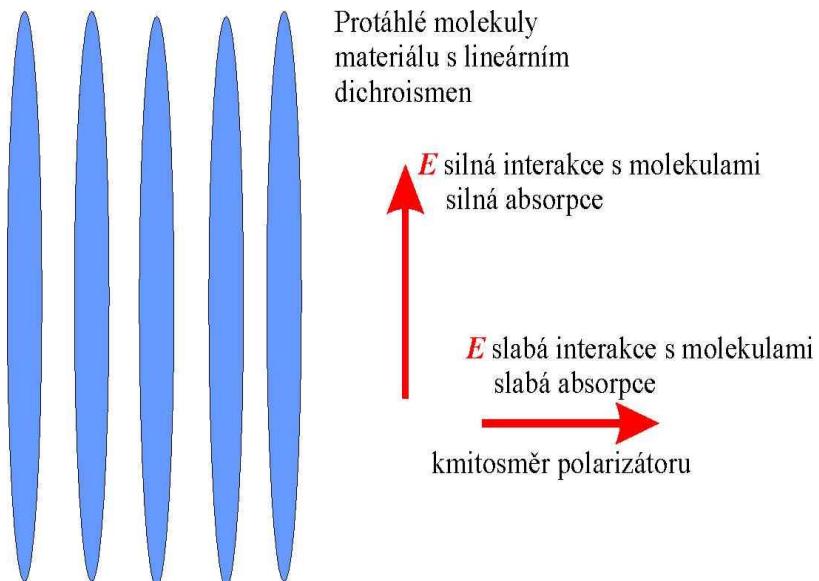


Řádný paprsek – vlnoplochy jsou kulové, vzruch se šíří všemi směry stejně rychle

Mimořádný paprsek – vlnoplochy jsou elipsoidální, mimořádná vlna má různé směry šíření v kolmých směrech



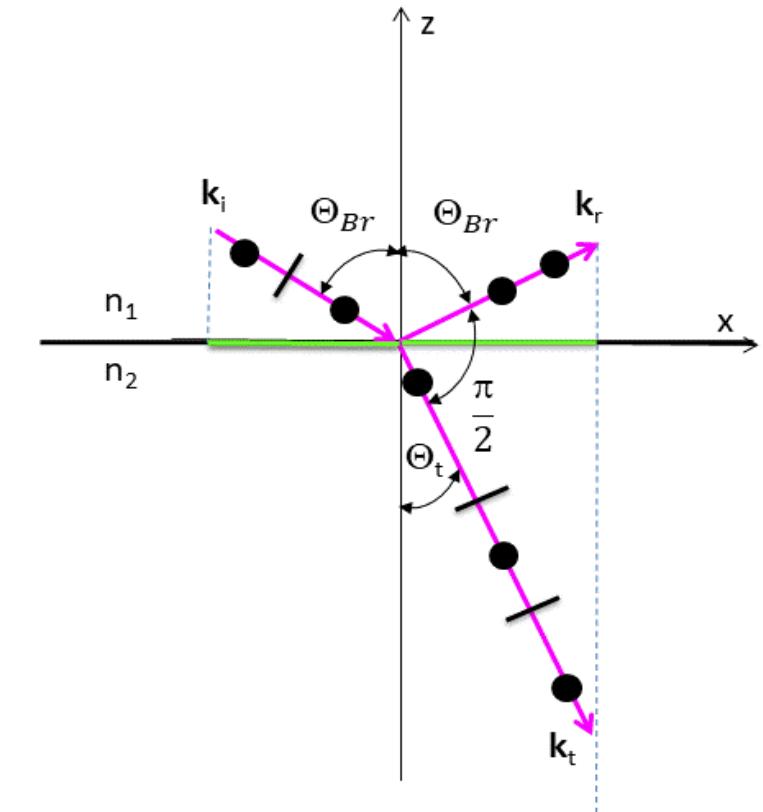
~1809 **Ettiene Louis Malus** Roku 1809 pozoroval ze svého bytu světlo odražené okny protějšího Luxemburského paláce. Všiml si, že světlo potemní, když pootočí krystalem dvojlomného vápence skrz který se díval. Objevil tak **polarizaci světla odrazem**. Formuloval vztah mezi polarizačním úhlem odraženého světla a indexem lomu vody (později zobecněný Brewsterem pro všechny materiály). Formuloval **Malusův zákon** (intenzita světla procházejícího polarizátorem, pokud na něj dopadá světlo nepolarizované). Jeho jméno je mezi 72 jmény uvedenými na Eiffelově věži.



$$I(\gamma) = \frac{1}{4} \gamma_0 E_0^2 \cos^2 \gamma = I_0 \cos^2 \gamma,$$



~1815 **Sir David Brewster** studoval polarizaci světla a objevil Brewsterův úhel. Studoval dvojlot a objevil fotoelasticitu. Zkonstruoval první 3D zobrazovací zařízení – stereoskop.





A. J. Fresnel(1788-1827)

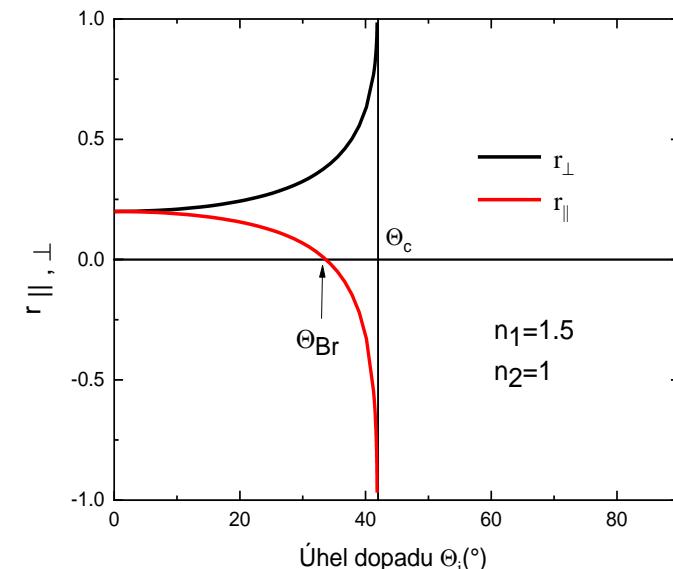
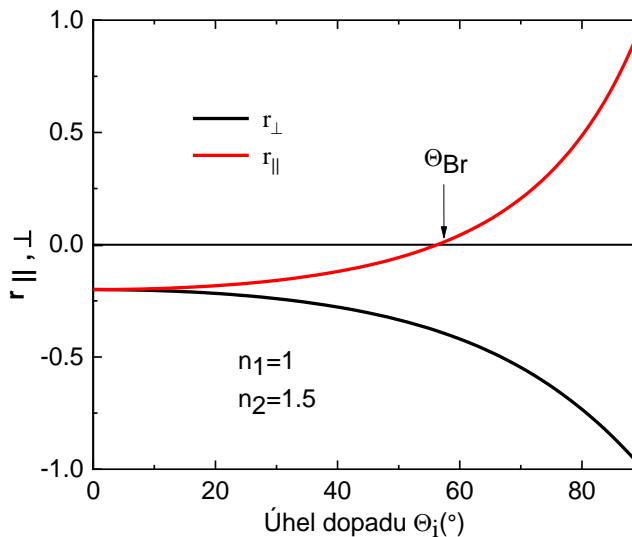
~ 1815

**Augustin Jean Fresnel** podpořil vlnovou teorii světla, dokázal, že se jedná o příčné vlnění odvodil rovnice pro amplitudové koeficienty světla na rozhraní dvou dielektrik, vypočetl difrakční obrazy apertur. Jeho jméno je mezi 72 jmény uvedenými na Eiffelově věži.

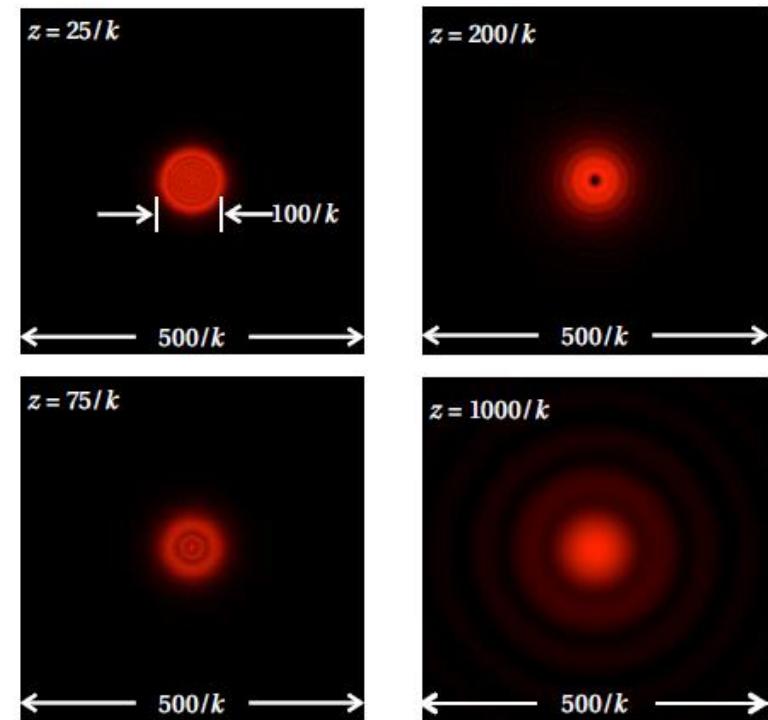
„I find nothing so painful as having to lead men.“ — Augustin-Jean Fresnel, in his December 29 1816 letter to his uncle Léonor Mérimée

## 1816 – dva navzájem kolmo polarizované paprsky nikdy neinterferují

Fresnelovy amplitudové koeficienty odrazu



Odvozeny na základě dynamického modelu oscilací éteru



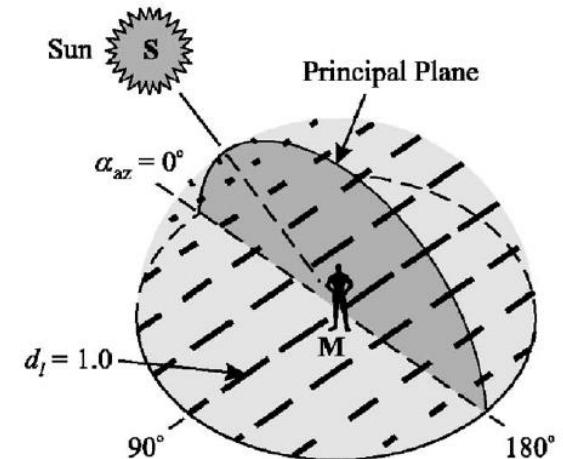
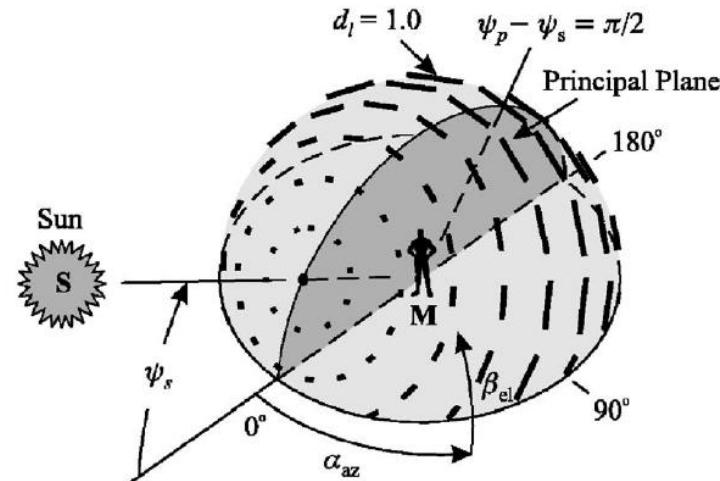
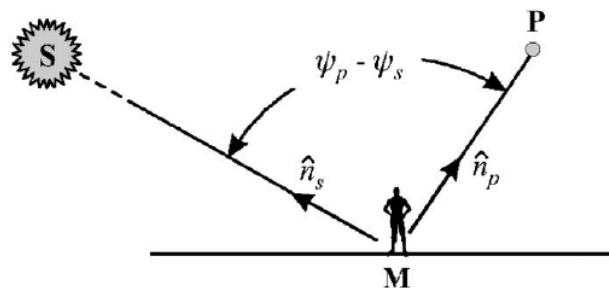


## Francois Arago – francouzský matematik, fyzik a politik

1786-1853

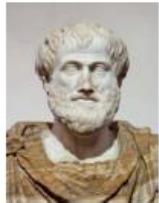
„In the experimental sciences, the epochs of the most brilliant progress are almost always separated by long intervals of almost absolute repose.“

Dokázal, že světlo procházející atmosférou je částečně polarizováno rozptylem a že stupeň polarizace je závislý na výšce atmosférické vrstvy a na úhlu dopadu paprsků. Na základě experimentů s polarizovaným světlem mohl prohlásit, že sluneční světlo vychází z plynné atmosféry Slunce. Arago je také vynálezcem optických přístrojů – fotometru, polarimetru.



# Disperze

Disperzí světla nazýváme jevy, které vznikají v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce



Aristotle (384BC-322BC)

**“The essence of light is white light. Colors are made up of a mixture of lightness and darkness.”**

R. Descartes

Světlo = puls éteru vyzařovaný ze svítícího tělesa . Barva – spojená s rotací částic éteru, která se mění při kontaktu s tělesy

R. Hooke

Světlo = Vibrace svítícího tělesa, se šíří do okolního éteru ve formě pulzů. Barva je narušení pulzu při lomu. Modrá = počátek pulzu je slabší, konec silnější. Červená naopak.

# Newtonova částicová teorie – barva světla

## I. Newton

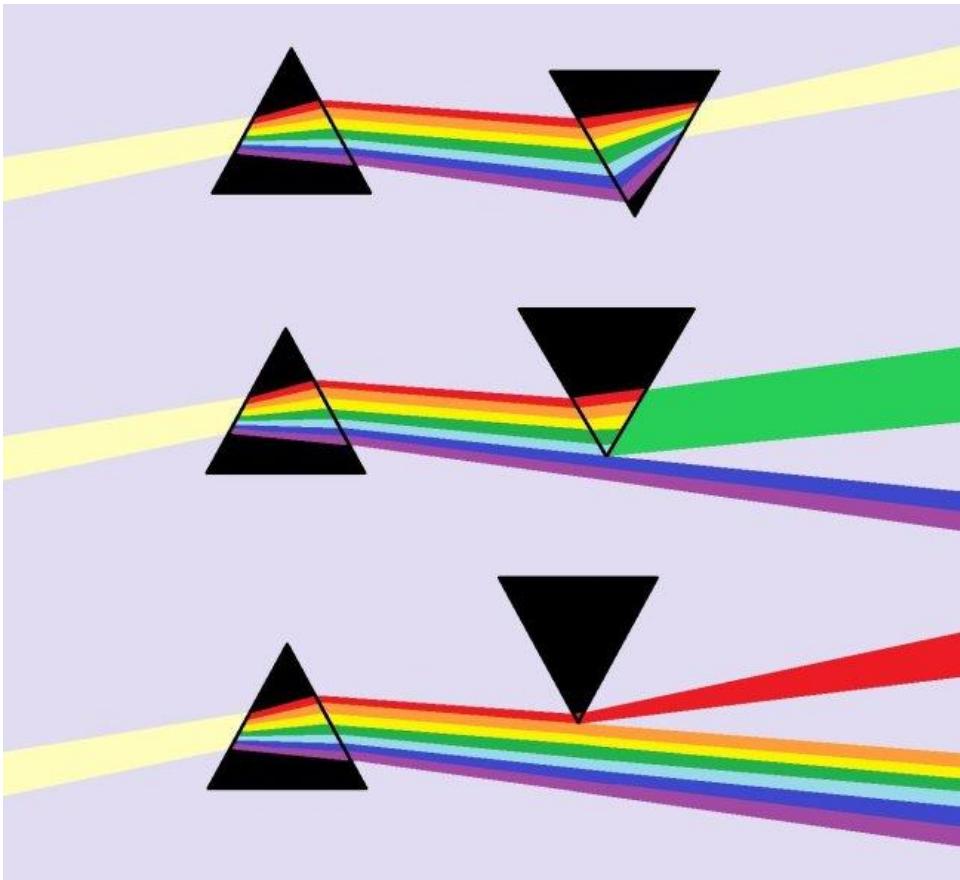
Přímočarost šíření světla znamená, že světlo je tvořené hmotnými částicemi.



- $m_{red}$
- $m_{green}$
- $m_{violet}$

Podle Newtona závisí hmotnost částice světla na barvě. Červené částice mají nejmenší hmotnost, fialové největší. Podle předpokladu o přitahování častic světla hmotou a zvýšení jejich rychlosti, mají v látce fialové částice větší rychlosť než červené, proto se více lámou. Celkově tedy mělo dojít v rozkladu světla v důsledku různých hmotností častic světla.

# **Newtonův klíčový experiment** **(„experimentum crucis“)**



V roce 1672 Newton provedl experiment, kterým chtěl vyvrátit vlnovou teorii světla. Zastánci vlnové teorie tvrdili, že k rozkladu bílého světla hranolem dochází v důsledku poškození světla látkou, které je tím větší, čím větší je tloušťka skla, kterým prochází. Newton kombinací dvou hranolů složil světlo po rozkladu opět zpět. Tím ukázal, že k žádnému poškození světla nedochází. To pokládal za klíčový důkaz toho, že **vlnová teorie je nesprávná**.

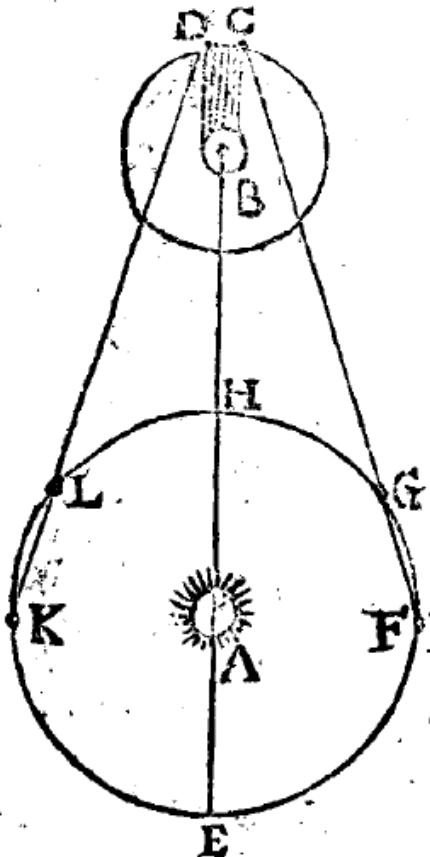
# Rychlosť svetla

Date	Experimentor	Country	Experimental Method	Speed ( $10^8 \text{m/s}$ )	Uncertainty (m/true c)	Error from
1600	Galileo	Italy	Lanterns and shutters	"Fast"	?	
1676	Roemer	France	Moons of Jupiter	2.14	?	28%
1729	Bradley	England	Aberration of Light	3.08	?	2.70%
1849	Fizeau	France	Cog Wheel	3.14	?	4.70%
1879	Michelson	United States	Rotating mirror	2.9991	75000.0	400 in $10^6$
	Michelson	United States	Rotating mirror	2.99798	22000.0	18 in $10^6$
1950	Essen	England	Microwave cavity	2.997925	1000.0	0.1 in $10^6$
1958	Froome	England	Interferometer	2.997925	100.0	0.1 in $10^6$
1972	Evenson et al.	United States	Laser Method	2.99792457	1.1	2 in $10^9$
1974	Blaney et. al	England	Laser Method	2.99792459	0.6	3 in $10^9$
1976	Woods et al.	England	Laser Method	2.99792459	0.2	3 in $10^9$
1983		International		2.99792458	0.0	Exact

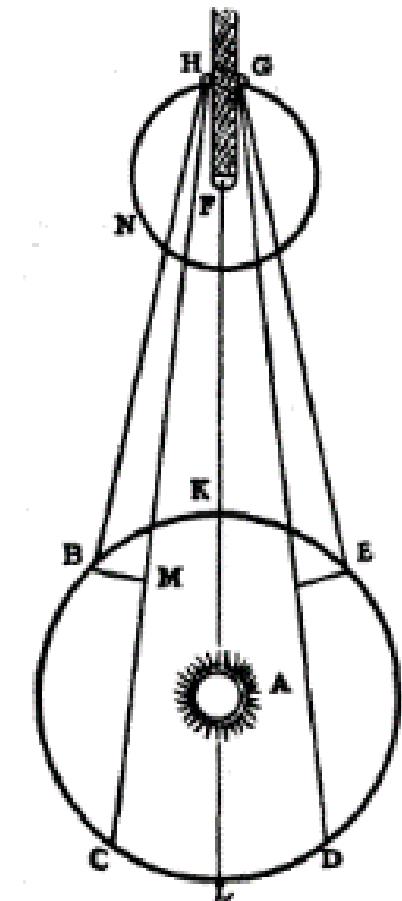


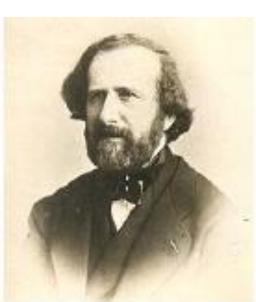
~ 1676

**Ole Christian Römer** navrhl experiment k důkazu konečné rychlosti světla a k jejímu změření pomocí astronomických pozorování zatmění měsíce Jupitera Io



- Olaf Roemer pozoroval variace v době mezi dvěma zatměními Jupiterova měsíce Io.
  - Když se země vzdalovala od Jupitera nastalo další zatmění později než když se Jupiterovi přiblížovala.
  - ..
- Z rozdílu druh a měřených časů určil Huygens  $c = 2.1 \times 10^8$  m/s.
- Chyba způsobena nepřesnou znalostí orbity země



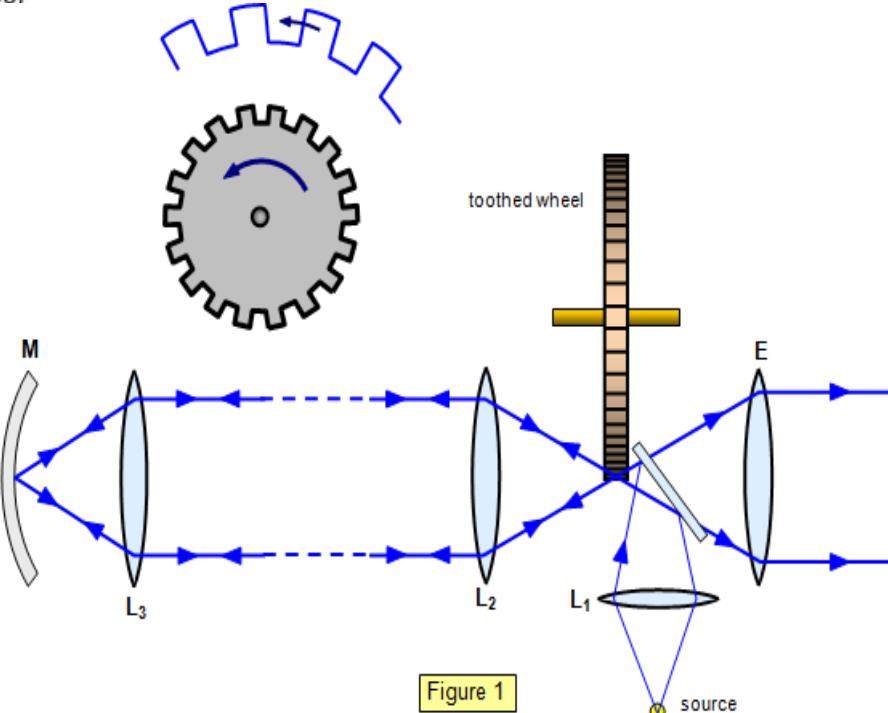


~ 1849

**Hippolyte Fizeau** - změřil rychlosť světla experimentem na Zemi.

## Fizeauův experiment s ozubeným kolem

H. Fizeau (1819-1896)



720 zubů, 12.6 ot/min,  
vzdálenost zrcadla 5 mil

- Hlavní rysy experimentu:
  - štěrbina vytvoří úzký svazek světla
  - světlo prochází mezerami ozubeného kola
  - odráží se na zrcadle
  - v závislosti na rychlosti otáčení kola se svazek odrazí od zuba a nedojde k pozorovateli nebo projde další mezerou
- c lze spočítat jako:

$$c = (2D * v)/d$$

- D = vzdálenost zrcadla a kolečka
- v = rychlosť kolečka
- d = vzdálenost mezi zuby

- Fizeau určil  $c = 3.15 \times 10^8$  m/s.



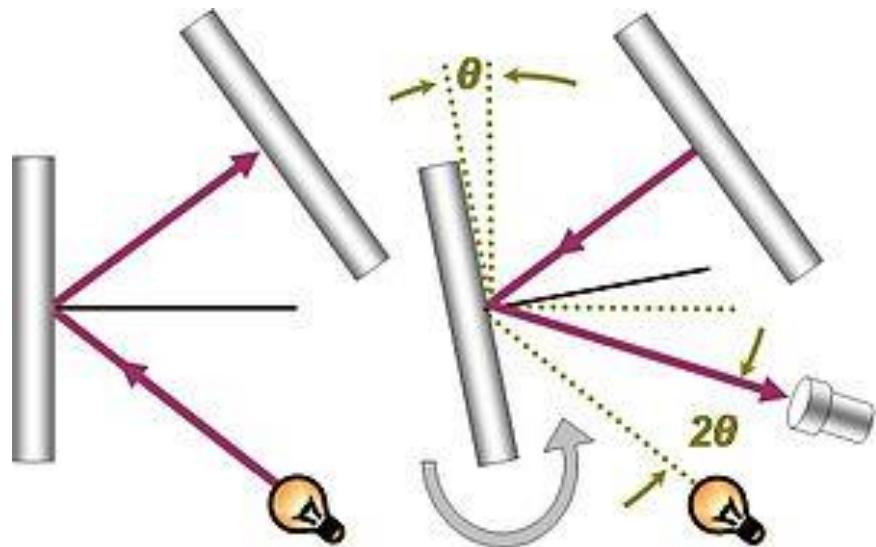
~ 1849

**Leon Foucault** – změřil rychlosť svetla experimentom na Zemi.

„Above all, we must be accurate, and it is an obligation which we intend to fulfil scrupulously.“

L. Foucault (1819-1868)

- Leon Foucault použil odraz svetla od rotujúceho zrcátka k pevnému zrcátku, od ktorého sa svetlo odrazí zpäť k rotujúcemu zrcátku, ktoré sa mezitím posunulo o nějaký úhel.
- Od rotujúceho zrcátka sa svetlo odrazí na detektor

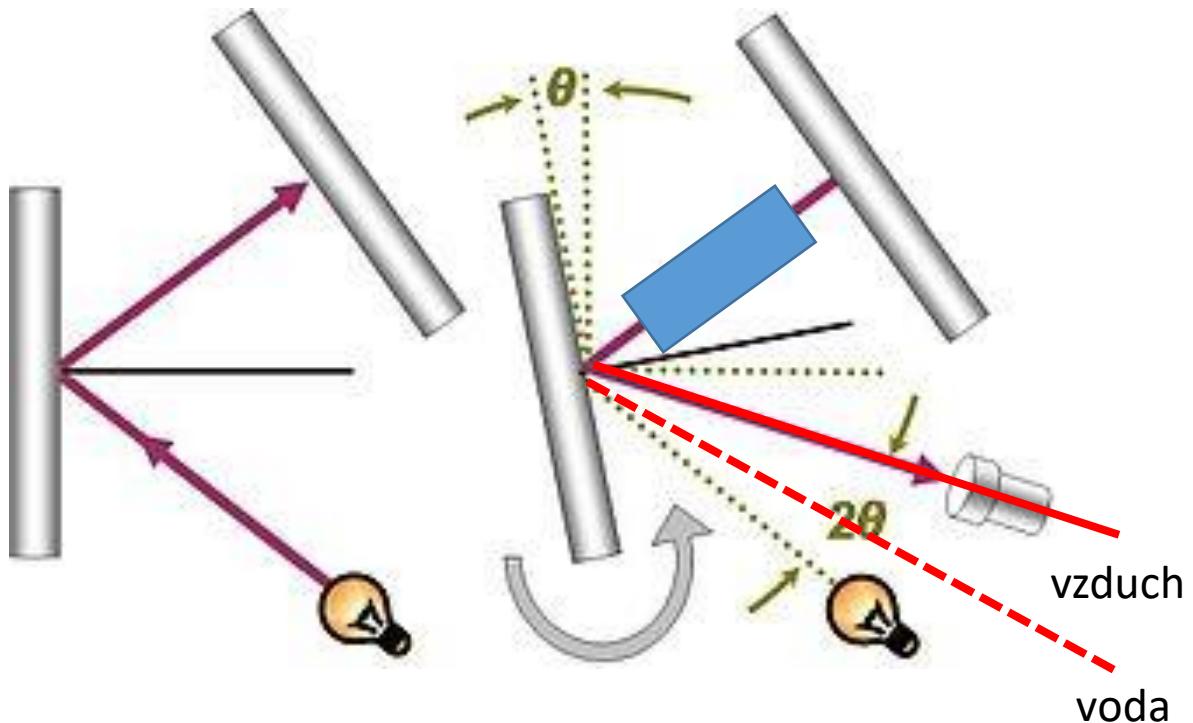


$$t = \frac{2h}{c} = \theta/\omega$$

$t$  je doba medzi 1. a 2. odrazom paprsku  
na rotujúcim zrcátku,  $h$  je vzdálosť zrcátek.  
 $\theta$  je úhel odrazu,  $\omega$  je úhlová rýchlosť  
otáčení zrcátka.

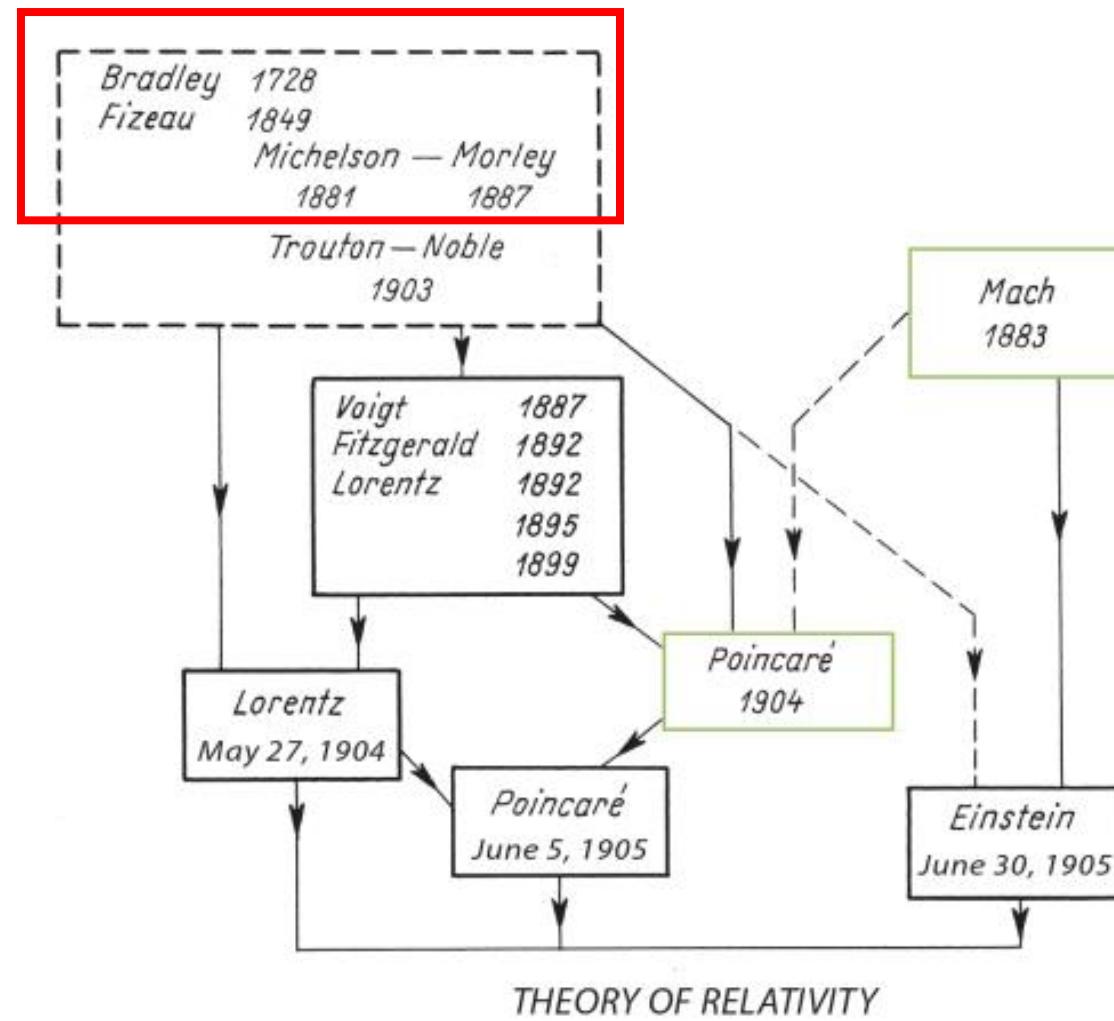
$$c = 2\omega h / \theta$$

# Foucaltův důkaz nesprávnosti Newtonovy částicové teorie světla



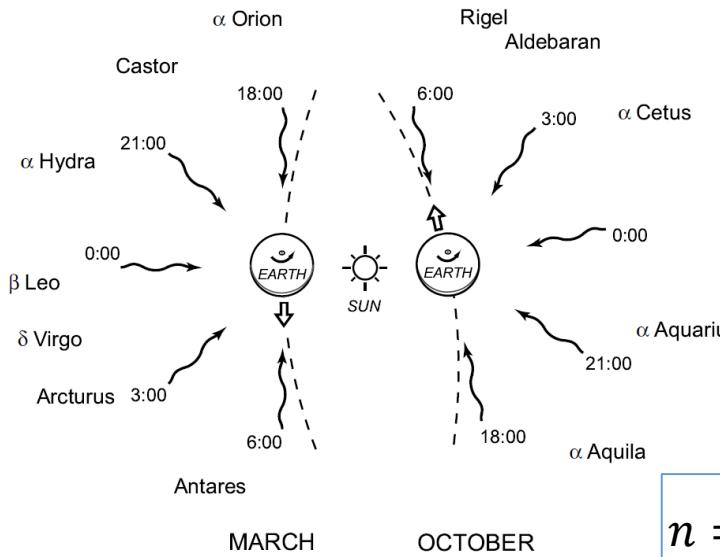
Malá parní turbína rotovala se zrcátkem **800ot/s**. Paprsek odražený od rotujícího zrcadla se odrazil k pevnému zrcadlu vzdálenému o **9m**. Od něj se opět odrazil a vrátil se k rotujícímu zrcadlu o **60ns** později. To se mezitím mírně otočilo a paprsek se odrazil. Foucault pak umístil do dráhy **3m dlouhou vodní trubici**. Pokud by platila Newtonova teorie, musel by se paprsek ve vodě zrychlit a odrazit se od rotujícího zrcátka o menší úhel, než bez trubice. Ve skutečnosti se však odrazil o úhel větší, tedy došlo při průchodu trubicí ke **zpomalení**. Tím byla **Newtonova částicová teorie vyvrácena** (resp. její základní předpoklad, že lom světla na rozhraní nastává v důsledku zrychlení částic světa)

# Optické experimenty a cesta ke speciální teorii relativity



# Arago – experiment k určení k rychlosti světla vylétavajícího z hvězd, resp. k určení rychlosti světla vůči absolutní vztažné soustavě

Předpoklad – pouze relativní rychlosť světla vůči hranolu vstupuje do zákona lomu

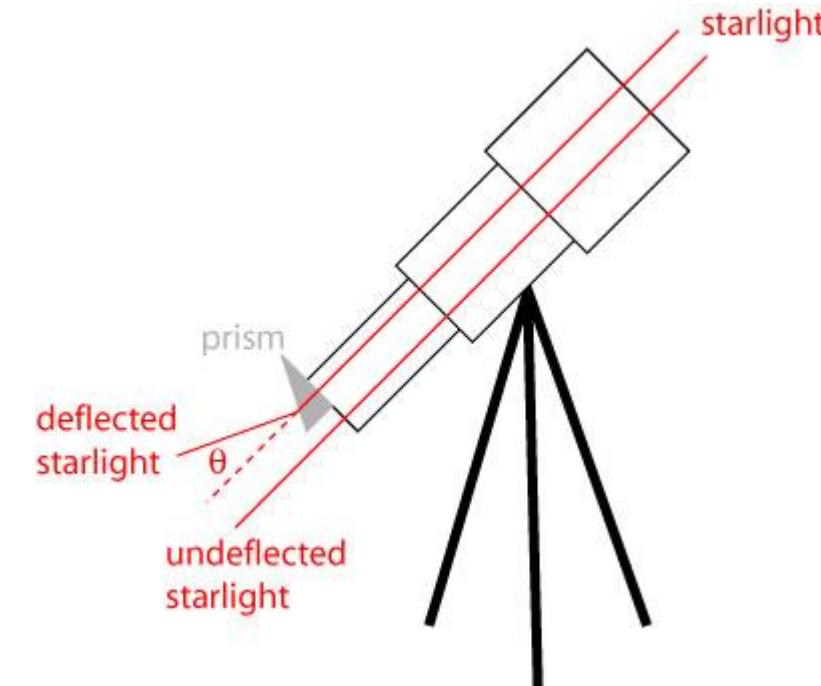


$$n = \frac{c'}{V}$$

Emisní teorie –  
Předpoklad o různé  
rychlosti světla emitovaného  
různými hvězdami

$$n = \frac{c + u}{V}$$

Galielovské skládání rychlostí  
Předpoklad o změně indexu lomu  
V důsledku změny vzájemné rychlosti  
Země a částic světla z hvězd



Výsledek – žádné změny indexu lomu nebyly pozorovány

[https://skullsinthestars.com/2008/07/05/  
what-a-drag-aragos-experiment-1810/](https://skullsinthestars.com/2008/07/05/what-a-drag-aragos-experiment-1810/)

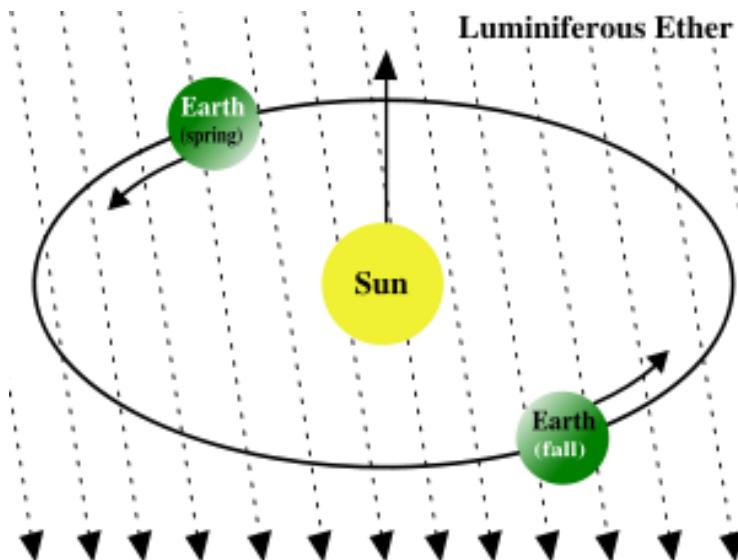
Negativní výsledek tohoto pokusu vedl Fresnela k formulaci teorie částečného strhávání éteru, která  
V rámci vlnového modelu nezávislost indexu lomu na rychlosti pohybu Země vysvětlila.

# Teorie světelného éteru

Základní představy o éteru

Teorii éteru formuloval v 17. století R. Boyle k vysvětlení mechanického působení mezi tělesy. Mělo se jednat o **hmotné médium** složené z malých částic.

Huygens předpokládal se, že **světlo se šíří světelným éterem**. Toto médium mělo umožnit šíření světelných vln analogicky k šíření zvuku.

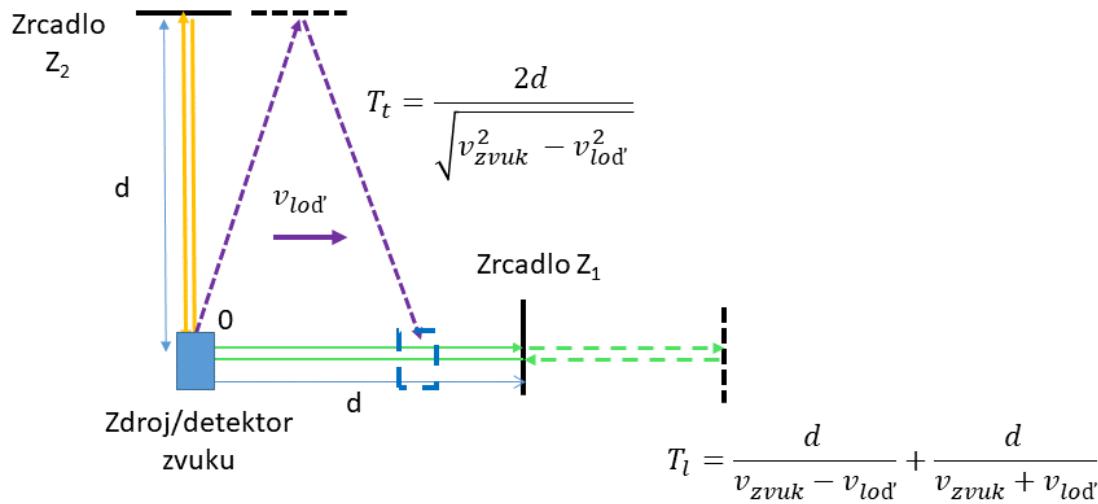
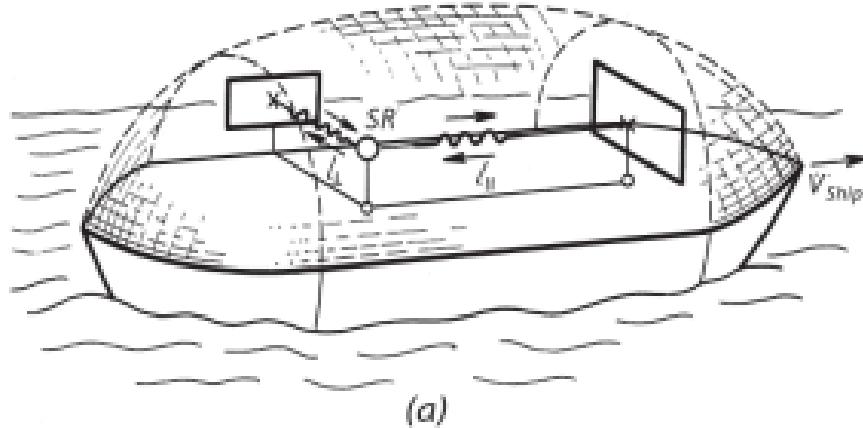


1. Představa o éteru vedla k formulacím elastických fyzikálních modelů šíření a interakce světla. Ačkoliv tato představa správná nebyla, nemělo to zásadní negativní vliv na dobrou použitelnost těchto modelů – např. Fresnelovy vztahy pro odraz a lom, Maxwellovy rovnice apod.
2. Éter byl však zároveň považován za absolutní vztažnou soustavu, ve které se světlo šíří. Na základě Galileiho rovnic o skládání rychlostí se očekávala řada efektů spojených se skládáním rychlosti světla a rychlosti Země vůči éteru. Negativní výsledek těchto experimentů nakonec vedl k formulaci speciální teorie relativity.

# Strhávání éteru

Vlnový model

Analog s měřením šíření vzduchu na lodi plovoucí  
nehybným vzduchem, éter  $\leftrightarrow$  vzduch, Země  $\leftrightarrow$  lod'



Lod' bez plachty = očekával se výsledek jako na obrázku (standardní, nestržený éter)

Lod' s neprodyšnou plachtou (vzduch ve kterém se šíří zvuk je unášen spolu s lodí)= zcela stržený éter

Výsledek měření  $T_l = T_t = \frac{2d}{v_{zvuk}}$ , tj. v modelu šíření světla éterem  $T_l = T_t = \frac{2d}{c}$ , resp.  $T_l = T_t = \frac{2d}{\frac{c}{n}}$

Lod' s částečně propustnou plachtou (vzduch je částečně stržen pohybem lodi) = částečné strhávání éteru

Očekávaný výsledek  $T_l = \frac{d}{v_{zvuk} - f \cdot v_{lod'}} + \frac{d}{v_{zvuk} + f \cdot v_{lod'}}$ , f je koeficient stržení éteru.

# Fresnelova teorie částečného strhávání éteru průhlednými tělesy

Fresnel se pokoušel vysvětlit nulový výsledek pokusu Araga s hranalem. Na rozdíl od Araga byl zastáncem vlnové teorie. Vyslovil teorii částečného strhávání éteru

Předpoklad – éter je průhledným tělesem částečně strháván

Hustota éteru v tělese  $\rho_B$

Hustota éteru v okolí tělesa  $\rho$

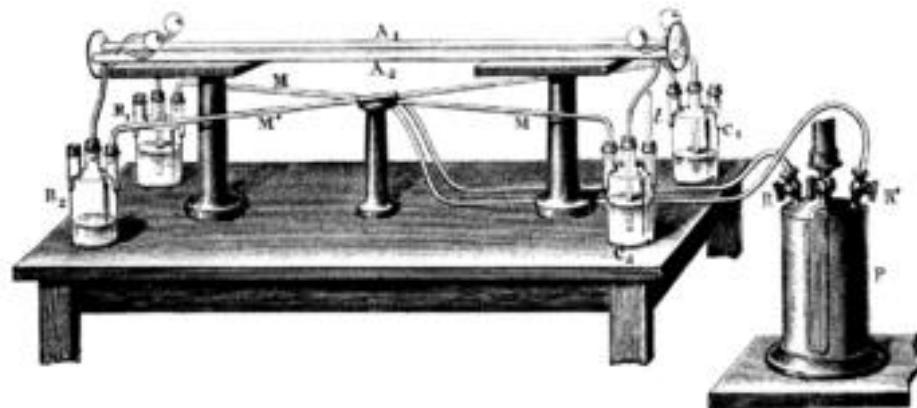
$$\left( \frac{\rho_B - \rho}{\rho_B} \right) \quad \rho_B > \rho$$

$$\left( \frac{\rho_B - \rho}{\rho_B} \right) = \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) = f = \text{Fresnelův koeficient stržení}$$

Relativní přebytek éteru v tělese vůči okolí

Fresnel předpokládal, že éter uvnitř tělesa má větší hustotu než v okolí. To způsobí změnu rychlosti šíření světla v tělese, rozhodující je relativní rozdíl hustoty éteru v tělese a okolí daný indexem lomu tělesa.

# Fizeauův vodní experiment 1851



- Svazek ze zdroje se rozdělí na dva. Na cestě jsou dvě trubice s tekoucí vodou
- Jeden z paprsků celou dobu prochází proti směru proudění, jeden po směru.
- Rychlosť proudění vody 7m/s



Výsledek měření (z posunu interferenčního obrazce) souhlasil s Fresnelovou teorií částečného strhávání éteru.

Tím se tato teorie pokládala za potvrzenou. Předpokládalo se, že experimenty, jejichž výsledky měly být úměrné  $\frac{u}{c}$ , kde  $u$  je rychlosť lab. soustavy vůči éteru dají nulový výsledek kvůli částečnému strhávání éteru

$$V = \frac{c}{n} \pm fu = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)u$$

## **Relativistický výpočet Fizeauova pokusu**

Vypočetl Max von Laue (1907) na základě Einsteinovy speciální teorie relativity

$$V = \frac{\frac{c}{n} + u}{1 + \frac{n}{c^2} u} = \frac{\frac{c}{n} + u}{1 + \frac{u}{cn}}$$

$V$  – rychlosť svetla v laboratórnej sústave pri prudkosti vody rychlosťi  $u$  v smere šírenia svetla

$$V - \frac{c}{n} = \frac{\frac{c}{n} + u}{1 + \frac{u}{cn}} - \frac{c}{n} = \frac{\frac{c}{n} + u - \frac{c}{n} \left(1 + \frac{u}{cn}\right)}{1 + \frac{u}{cn}} = \frac{u \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}{1 + \frac{u}{cn}} \sim u \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \text{ pre } u \ll c$$

Výsledek Fizeauova vodného pokusu lze tedy vysvětlit ako důsledek relativistického skládání rychlosťi svetla a tekoucí vody.

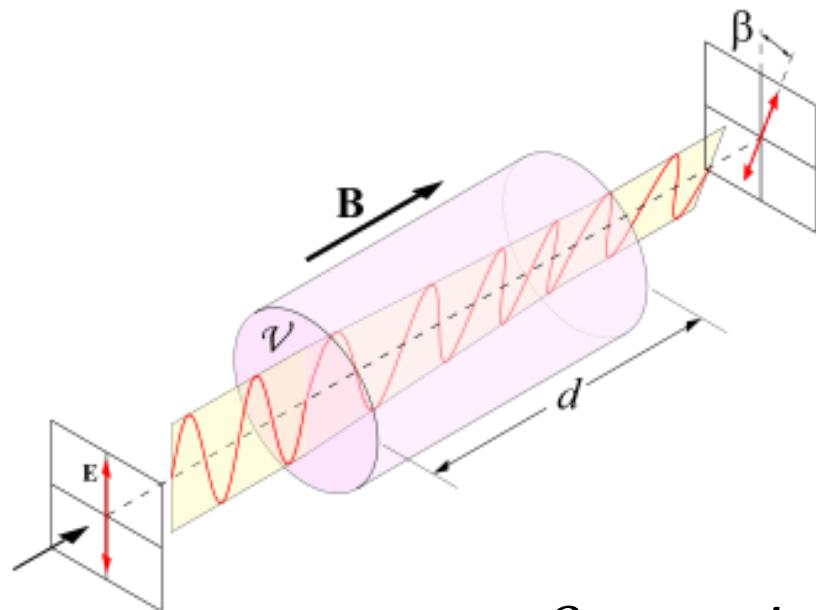


M. Faraday(1791-1867)

~ 1849

**Michael Faraday** demonstroval rotaci polarizace lineárně polarizované vlny v látce při působení podélného magnetického pole (Faradayův jev).

„A man who is certain he is right is almost sure to be wrong.“



$$\beta = \nu B d$$

V době objevu Faradayova jevu nebylo jasné, že světlo je elektromagnetické vlnění. Tento jev však **souvislost světla s elektrinou a magnetismem** jasně indikoval.

Faradayův jev je důsledkem tzv. kruhového dvojlomu, tedy různé rychlosti šíření levotočivého a pravotočivého kruhově polarizovaného světla. Tento jev je v některých látkách přítomen bez magnetického pole, v některých je indukován magnetickým polem orientovaným ve směru šíření světla.



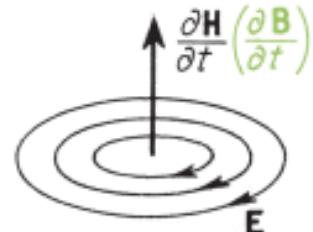
~ 1864

**James Clerk Maxwell** – vypracoval klasickou vlnovou elektromagnetickou teorii světla. Odvodil příčný charakter světla a rychlosť světla. Teorie formulovaná v prostředí éteru.

J. C. Maxwell (1831-1879)

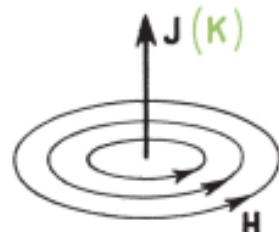
„It is of great advantage to the student of any subject to read the original memoirs on that subject, for science is always most completely assimilated when it is in the nascent state“

Zdroj: <https://citaty.net/citaty/1937025-james-clerk-maxwell-it-is-of-great-advantage-to-the-student-of-any-sub/>



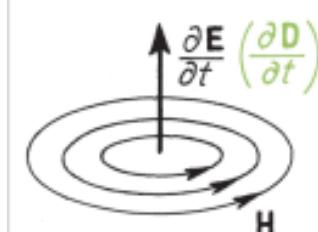
$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Maxwell-Faradayova rovnice  
Vyjadřuje Faradayův zákon  
el-mag indukce,  
který Faraday formuloval  
matematicky



$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

Ampérův zákon  
formulovaný matematicky  
Maxwellem



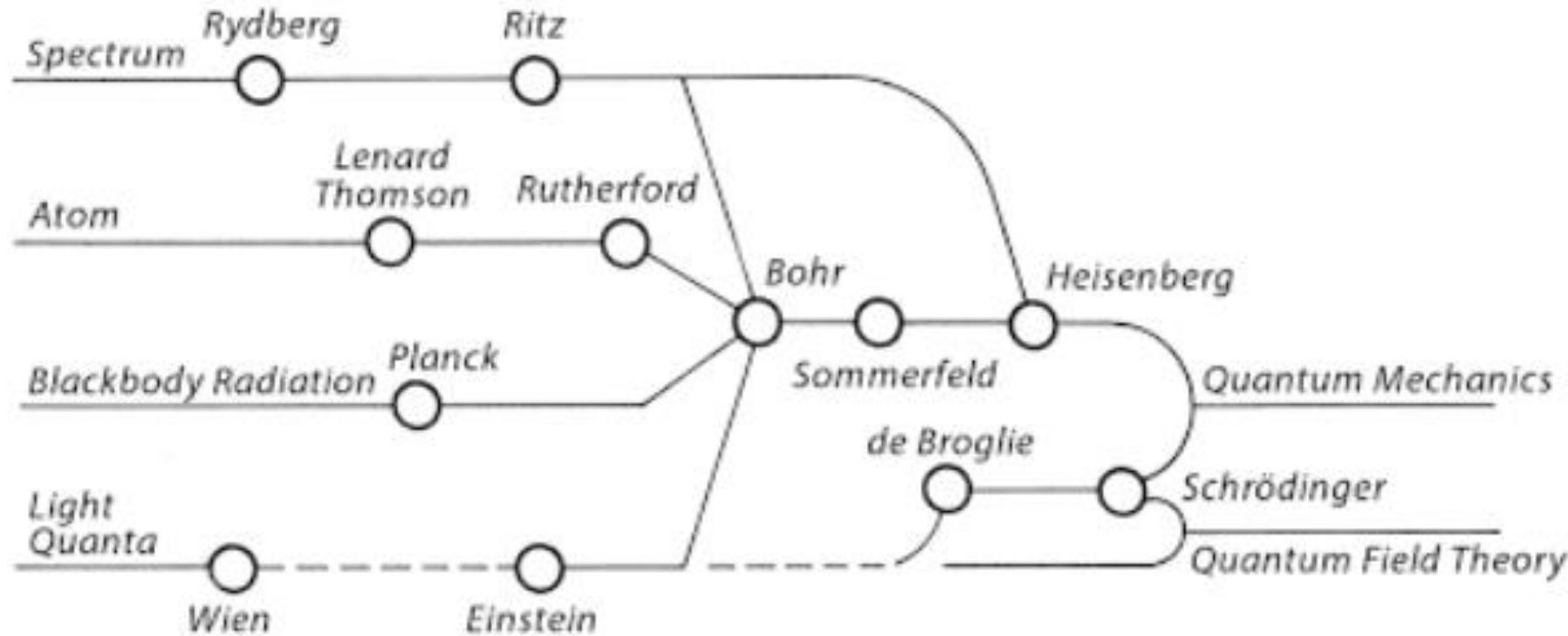
$$\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Maxwellův posuvný  
proud

Nová fyzika

Maxwellova el-mag teorie  
nadále formulována v  
prostředí  
elastického éteru

# Optické experimenty a cesta ke kvantové teorii



# Spektrum záření černého tělesa

Černé těleso = těleso, které absorbuje veškeré záření, které na něj dopadá

Sem zadejte rovnici.

Nezdařené pokusy o vysvětlení spektra záření černého tělesa pomocí zákonů klasické fyziky měly zásadní význam pro formulaci kvantové mechaniky



Klasická fyzika

1873 Stefan-Boltzmann

$$E = \sigma T^4$$

1894 Wien

$$u_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$$

1899 Planck

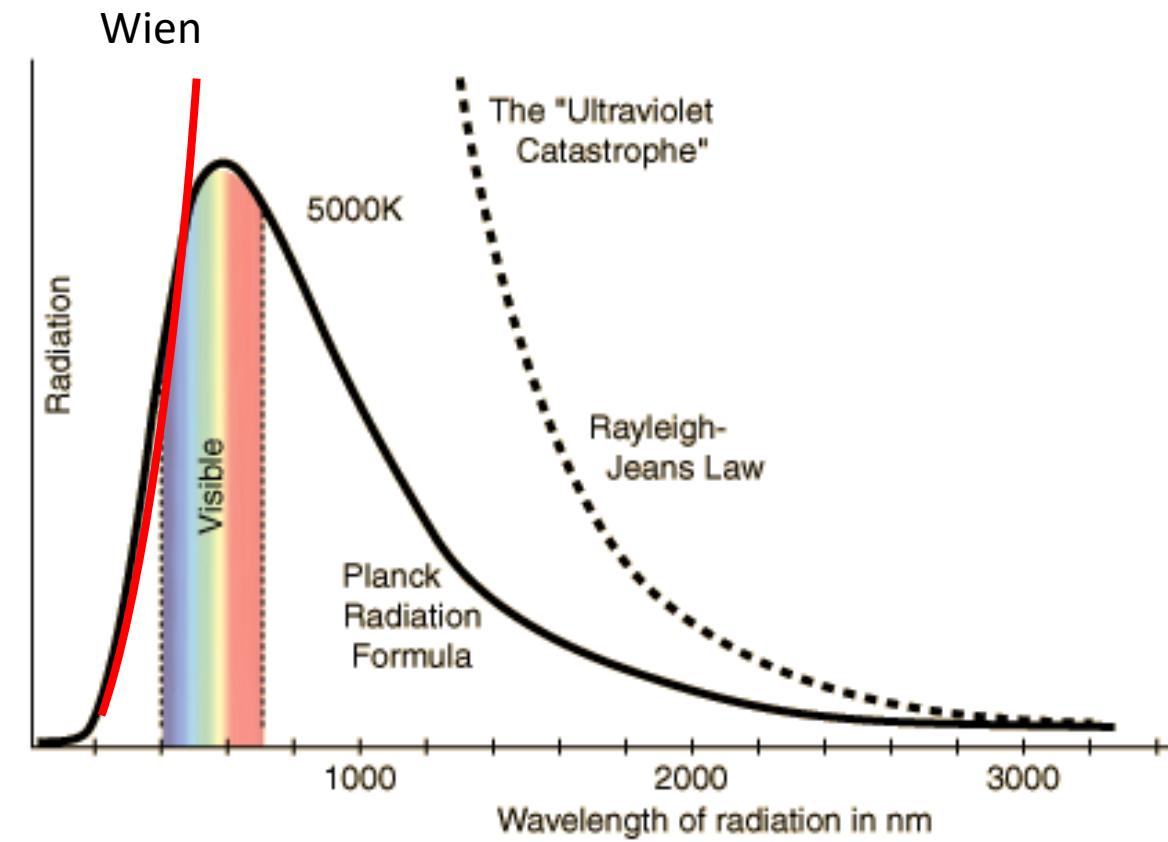
$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\sigma, T)$$

1900 Rayleigh-Jeans

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

$E$  Celková energie záření černého tělesa

$U(\sigma, T)$  Hustota energie oscilátoru ve stěně dutiny



$\sigma$  Stefan-Boltzmannova konstanta

$u_\nu$  Hustota energie záření

**Wien** (neplatí v IČ)

$$u_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$$

**Rayleigh-Jeans** (neplatí v UV)

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\sigma, T)$$



1900 Planck

$$u_\nu = A \frac{\nu^3}{e^{\frac{\beta \nu}{T}} - 1}$$

Planck oba zákony sjednotil odvozením s pomocí fenomenologické termodynamiky

Platí v celém spektrálním oboru. Nebyl ale k dispozici mikroskopický model, který by popisoval fyzikální podstatu dějů, které za vztahem stojí. Planck proto pokračoval v práci a místo fenomenologické termodynamiky aplikoval Boltzmannovu statistiku, publikovanou 1868. Aby to mohl udělat, potřeboval celkovou energii záření rozdělit na konečný počet jednotek. Předpokládal, že každý oscilátor v dutině může mít energii složenou z celistvého násobku energetických jednotek – kvant.

1900 Planck

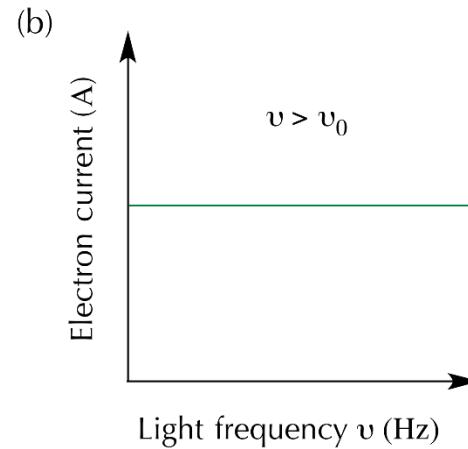
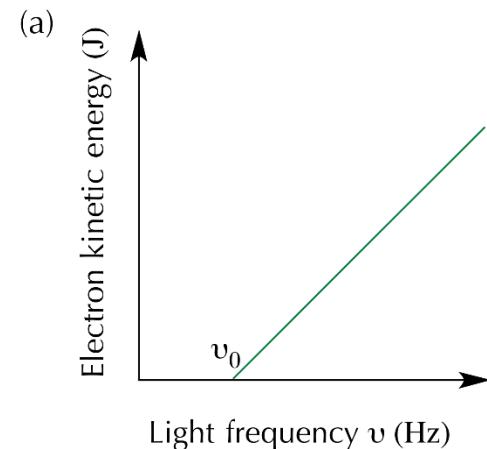
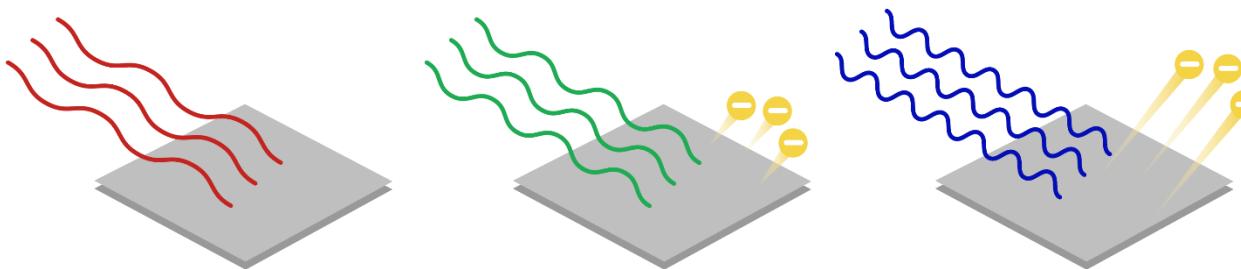
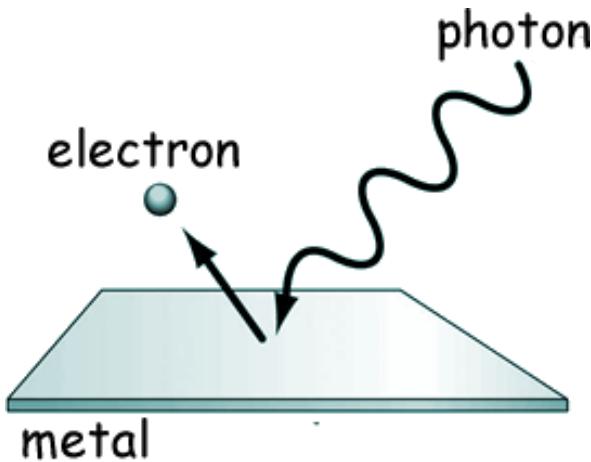
$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Planck tedy zavedl pojem kvanta, ale nepovažoval jej za vlastnost záření, ale za stav oscilátoru, tedy hmoty (v tomto případě stěny dutiny z níž vychází záření černého tělesa)

# Fotoelektrický jev



~ 1902 **Philipp Lenard** objevil, že energie elektronu emitovaného z povrchu kovu při osvětlení nezávisí na intenzitě světla, jak předpokládala klasická (Maxwellova) teorie, ale na frekvenci (barvě) světla.

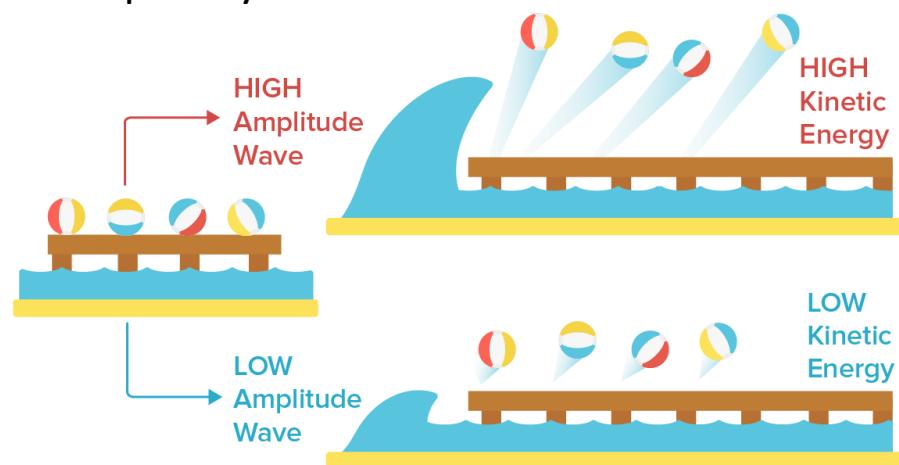


## Vlnová teorie

Energie postupné, harmonické, lineárně polarizované vlny

$$U = \langle u \rangle_T = \langle u_E \rangle_T + \langle u_B \rangle_T = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E_0^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 n^2 E_0^2$$

Podle vlnové teorie je energie záření úměrná amplitudě, nikoliv frekvenci. Nelze tedy vysvětlit existenci energetického (frekvenčního prahu) pozorovaného při fotoelektrickém jevu, protože při libovolně malé frekvenci by mělo být možné dodat energii potřebnou k uvolnění elektronu zvýšením energie záření, tedy zvýšením amplitudy.



## A. Einstein

A. Einstein (1905) vysvětlil existenci prahu při fotoelektrickém jevu aplikací Planckovy ideje kvanta, které nazval fotonem a které definoval jako vlastnost záření. Fotonu rovněž přiřadil hybnost.

$$\varepsilon = h\nu$$

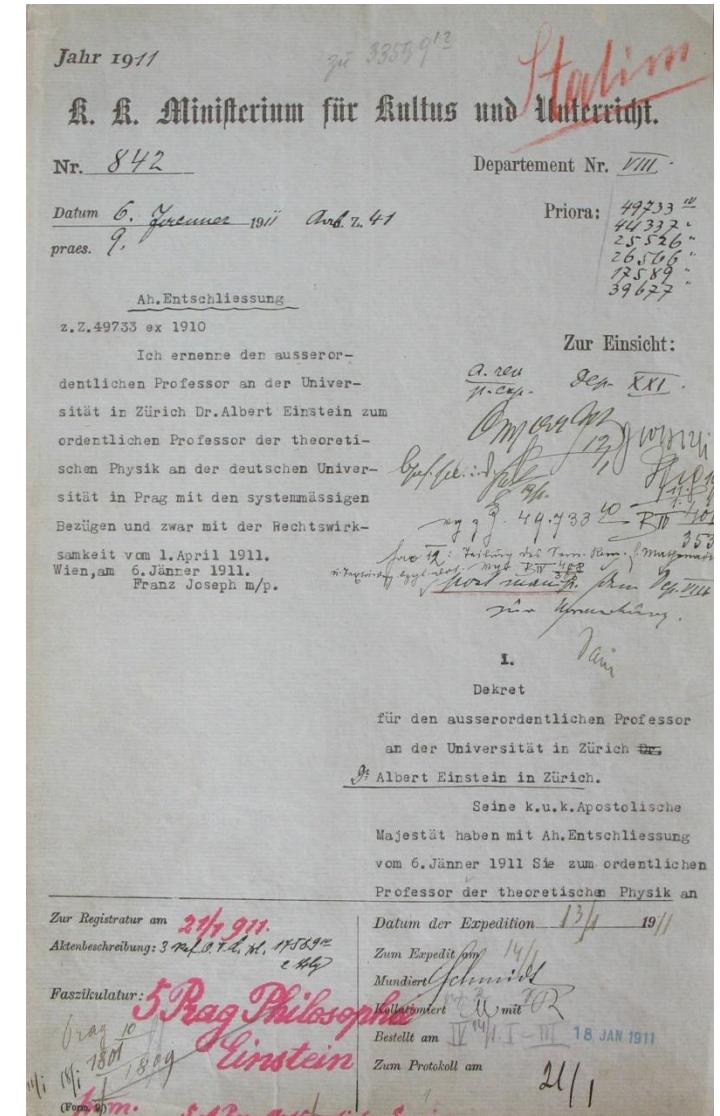
$$p = \frac{h\nu}{c}$$

Pokud je frekvence záření, tedy frekvence fotonu menší než prahová, nestačí energie fotonu na uvolnění elektronu z látky.

# A. Einstein a Praha

Einstein byl jmenován řádným profesorem teoretické fyziky na německé univerzitě v Praze výnosem císaře Františka Josefa I ze dne 6.1.1911 s platností od 1.4.1911. Do té doby působil jako mimořádný profesor na Univerzitě v Curychu.

Působil v budově dnešní Přírodovědecké fakulty UK ve Viničné ulici č.3 v letech 1911-1912. S Einsteinovým příchodem byl dřívější kabinet přejmenován na Ústav pro teoretickou fyziku (min. výnosem z 13. 1. 1911) a Einstein jmenován jeho ředitelem. Pracovna, knihovna a seminární místnosti se nacházely v nejvyšším patře. Budova a její okolí si dodnes zachovaly svou podobu.



# A. Einstein a Praha

## A. Einstein v předmluvě ke českému vydání své knihy o speciální a obecné teorii relativity

*Těší mne, že tato malá knížka vychází nyní v národní řeči oné země, v níž jsem našel soustředění nutné k tomu, abych základní myšlenku obecné teorie relativity, kterou jsem pojal již r. 1908, ponenáhlu přiodíval určitější formou. V tichých místnostech ústavu pro teoretickou fyziku pražské německé univerzity ve Viničné ulici jsem objevil, že z ekvivalenčního principu vyplývá odchylka světelných paprsků v blízkosti Slunce v míře pozorovatelné, aniž jsem tehdy věděl, že před více než sto lety podobný důsledek byl odvozen z Newtonovy mechaniky a z jeho emisní teorie světla. V Praze jsem také objevil důsledek o posunu spektrálních čar k červenému konci, který dosud není bezvadně potvrzen.“*

A. Einstein navštívil tehdejší Fyzikální ústav české univerzity (Ke Karlovu 5) v roce 1921 během své návštěvy Prahy.



# Nobel Laureates in the field of Optics

- O. Shinomura, M. Chalfie, R. Y. Tsien – Chemistry 2008
- Roy J. Glauber, John L. Hall, Theodor W. Hänsch – Physics 2005
- W. Ketterle (**MIT**), E. Cornell, C. Wieman – Physics **2001**
- Z. Alferov, H. Kroemer, J. Kilby – Physics 2000
- A. Zewail – Chemistry 1999
- S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. Phillips – Physics 1997
- E. Ruska – Physics 1986
- N. Bloembergen, A. Schawlaw, K. Siegbahn – Physics 1981
- A. Cormack, G. Housefield – Biology or Medicine 1979
- M. Ryle, A. Hewish – Physics 1974
- D. Gabor – Physics 1971
- A. Kastler – Physics 1966 C. Townes (**MIT**), N. Basov, A. Prokhorov – Physics 1964
- F. Zernicke – Physics 1953
- C. Raman – Physics 1930
- W. H. Bragg, W. L. Bragg – Physics 1915
- G. Lippman – Physics 1908
- A. Michelson – Physics 1907
- J. W. Strutt (Lord Rayleigh) – Physics 1904
- H. Lorentz, P. Zeeman – Physics 1902
- W. Röntgen – Physics 1901