

Optické experimenty historického významu pro fyziku

(od starověku po počátky kvantové fyziky)

- J.Franc
- Proseminář z Optiky

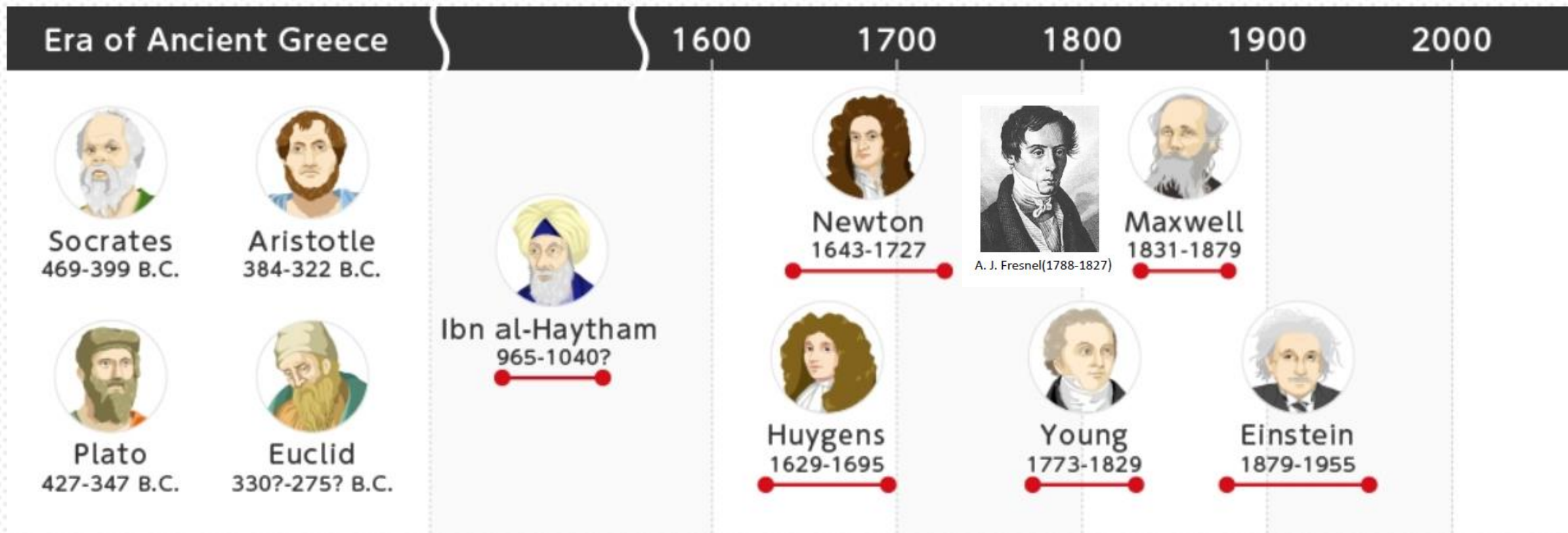
• 3.10.2019

? Co je světlo

? Jakým způsobem světlo vnímáme

? Jakou rychlostí se šíří

? Jaké fyzikální zákony popisují šíření světla a interakci s látkou



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

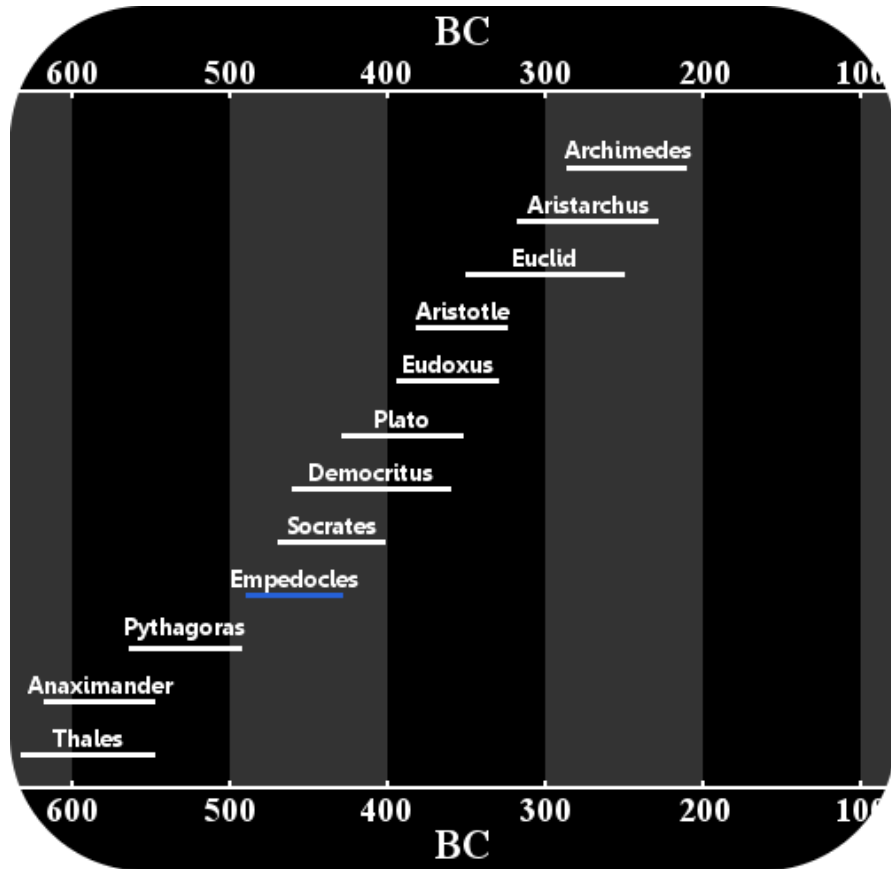
Další rozvoj geometrické optiky

Spor mezi vlnovým a nekvantovým částicovým modelem světla

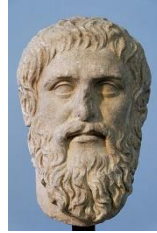
vlnová teorie

Přechod ke kvantové teorii, kvantová elektrodynamika

Světlo a vidění – první doložené názory



<https://www.famousscientists.org/empeocles/>

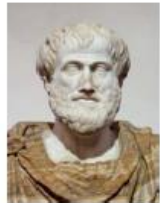


~ 400 B.C. **Plato** názor, že z oka vystupují paprsky (tzv. extramisní teorie, okulární paprsky). Tento názor v dalších stoletích převládal.



Democritus (460BC-370BC)

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



Aristotle (384BC-322BC)

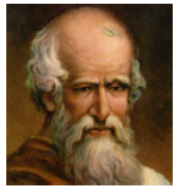
~ 350 B.C. **Aristoteles** vyslovil názor, že světlo je tvořeno částicemi vstupujícími do oka. Vysvětloval barvy duhy odrazem světla od vodních kapek.

Odraz a lom



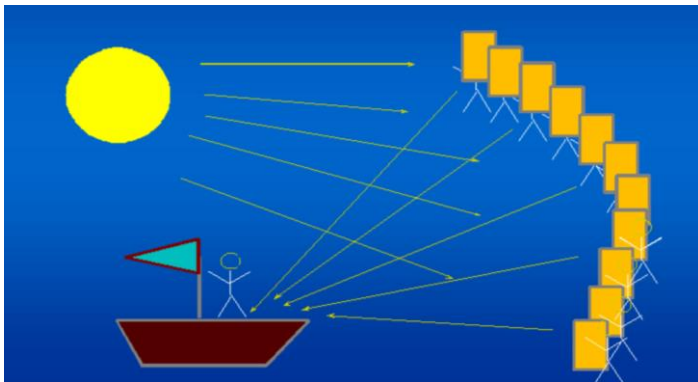
Euclid (325BC-265BC)

~ 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,





Ptolemy (90AD-168AD)

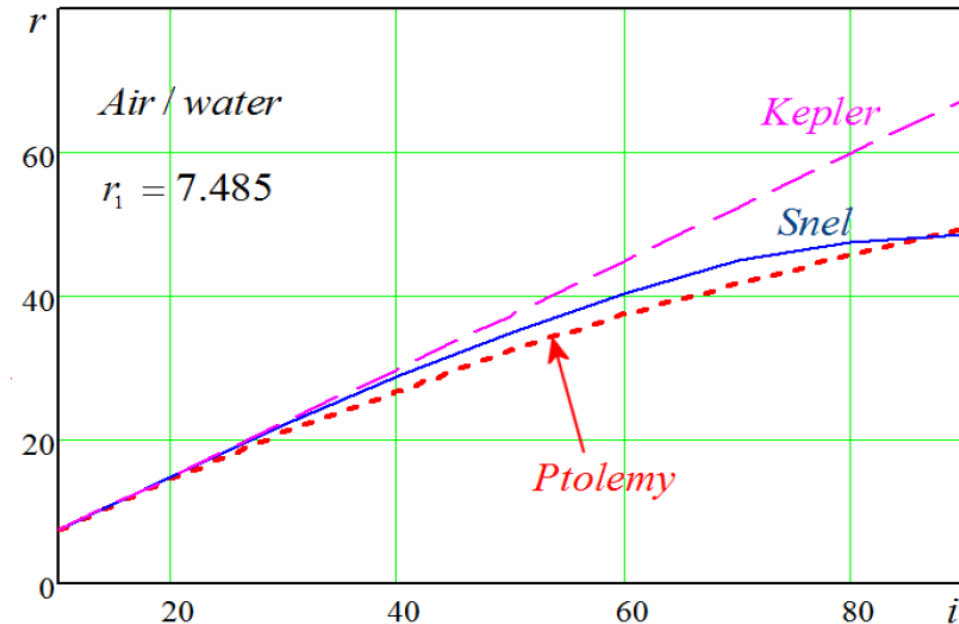
~ **Ptolemaios** vydal pětidílný spis o optice. Proměřil lom na několika rozhraních. Při vyhodnocení se snažil dokázat, že měřená data odpovídají algoritmu, používanému v astronomii. Prokázal, že **dopadající, odražený a lomený paprsek leží v jedné rovině**. Zastával extramisiní teorii světla.

„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.

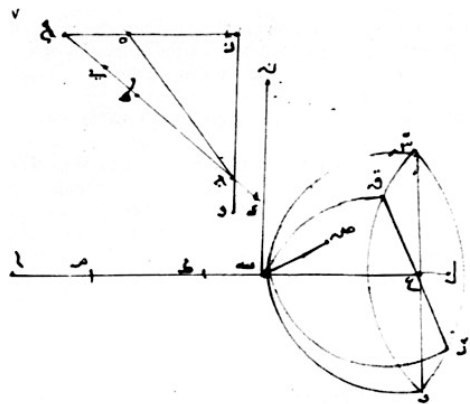
v	i_v	r_v		
		air/water	air/glass	water/glass
1	10	8	7	9.5
2	20	15.5	13.5	18.5
3	30	22.5	19.5	27
4	40	29	25	35
5	50	35	30	42.5
6	60	40.5	34.5	49.5
7	70	45.5	38.5	56
8	80	50	42	62





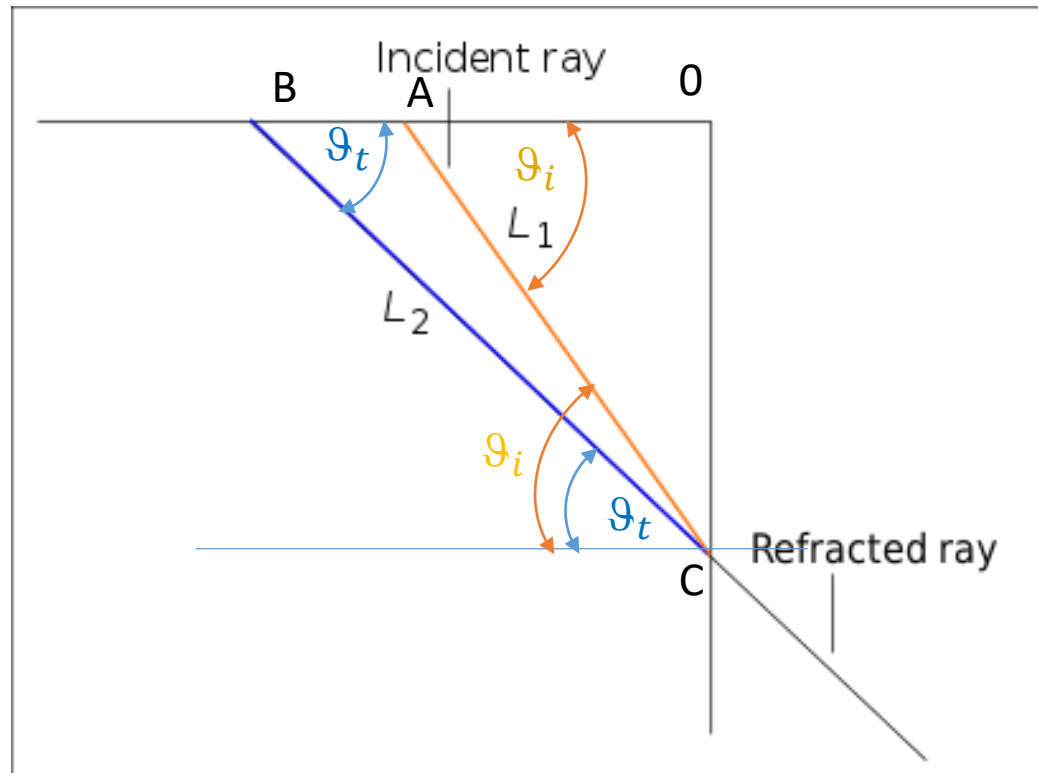
Ibn Sahl

(940-1000 A.D.)



لانه ان ماتة عليها سطح مستوي غير فلاق هذا السطح يتقطع سطح برص
على نقطة ب فلا بد من ان يتقطع احد خطي ب ن بص فليكن ذلك
الخط مبصر والفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر
خط ب ش فلاق هذا السطح ياتر مبسط م على نقطة ت فخط
ب ش ياتر سطح ق ر ب على نقطة ت وكذلك خط مبصر وهذا الحال
فلا ياتر مبسط م على نقطة ب سطح مستوي غير سطح ب ن ص

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

Původní obrázek (984)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ibn_Sahl_\(mathematician\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ibn_Sahl_(mathematician))



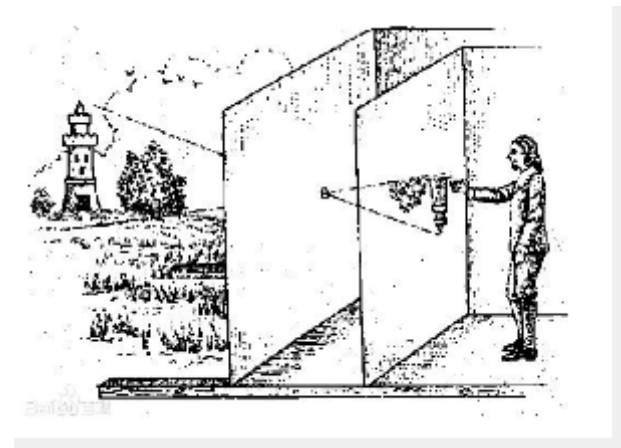
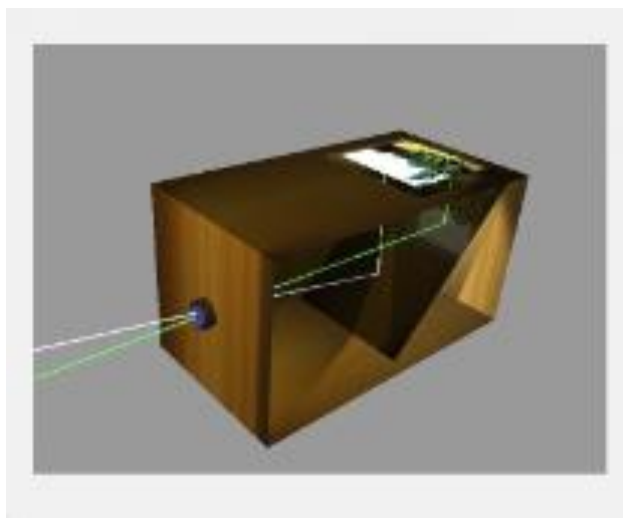
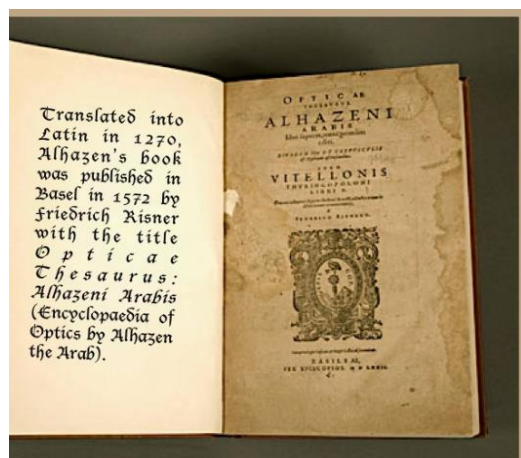
~ 1000 A.D. **Alhazan (Abu Ali Hasan Ibn al-Haitham) - otec moderní optiky**

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

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 kolmé k rovině rozhraní**. Objevil **cameru obscuru** (pinhole camera)





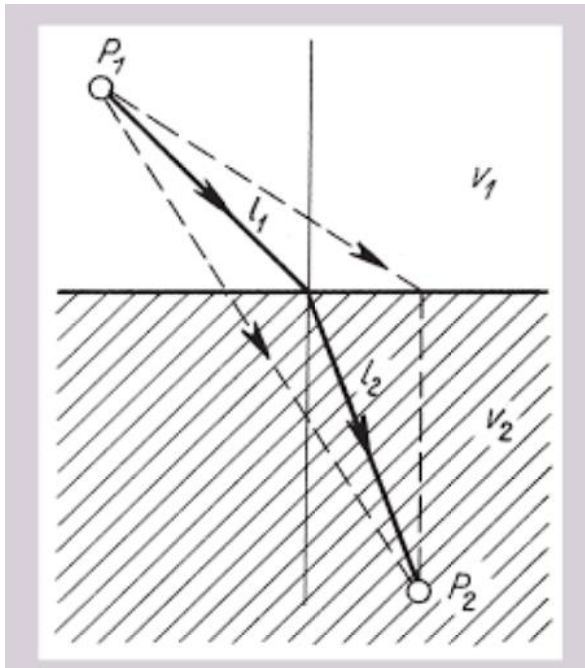
Hero (10AD-70AD)

~ 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.



P. Fermat (1601-1665)

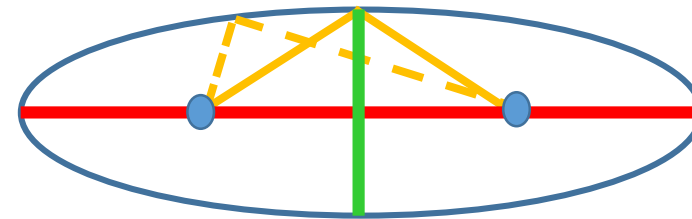
1657 A.D. **Pierre de Fermat** postuloval princip propagace světelného paprsku v nejkratším čase a odvodil pomocí něj zákon lomu.



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

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

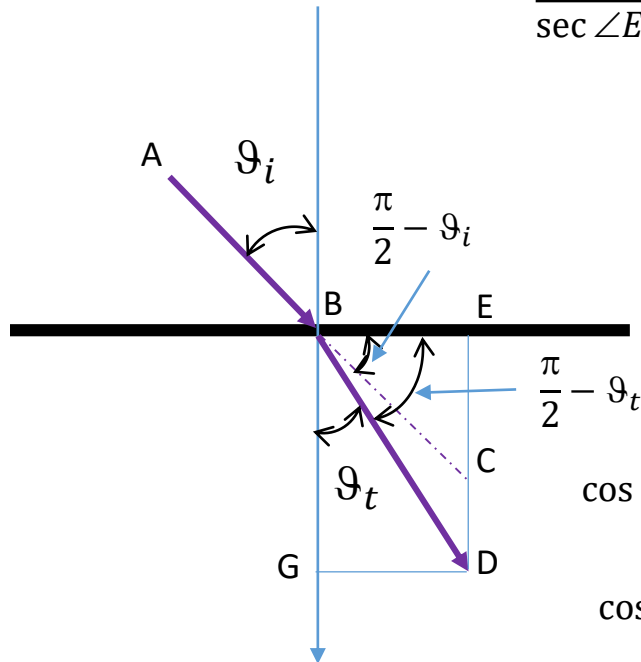
Dnešní formulace „Paprsek světla projde mezi dvěma body po takové dráze, která je stacionární vzhledem k variaci této dráhy“. Může to být minimum, maximum nebo jsou všechny dráhy stejné.





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

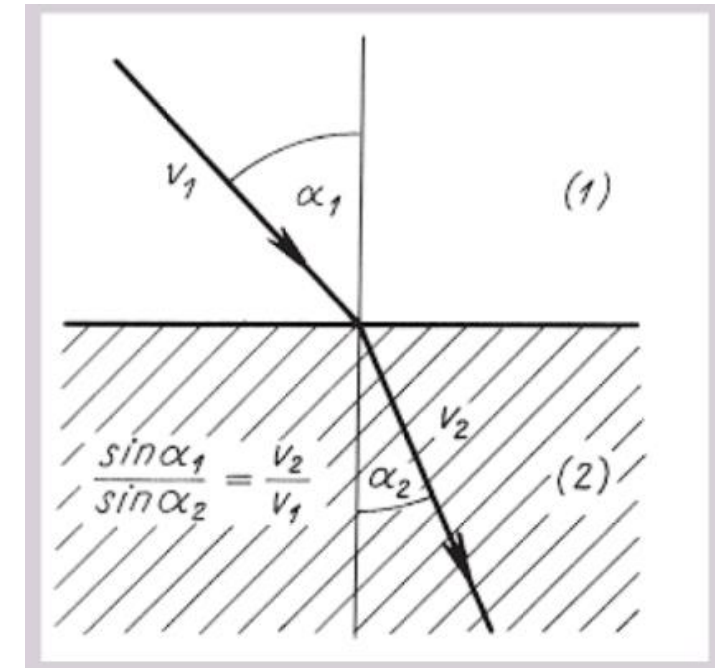
$$\frac{\sec \angle EBC}{\sec \angle EBD} = \frac{\frac{CB}{EB}}{\frac{DB}{EB}} = \text{konst.}$$



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

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

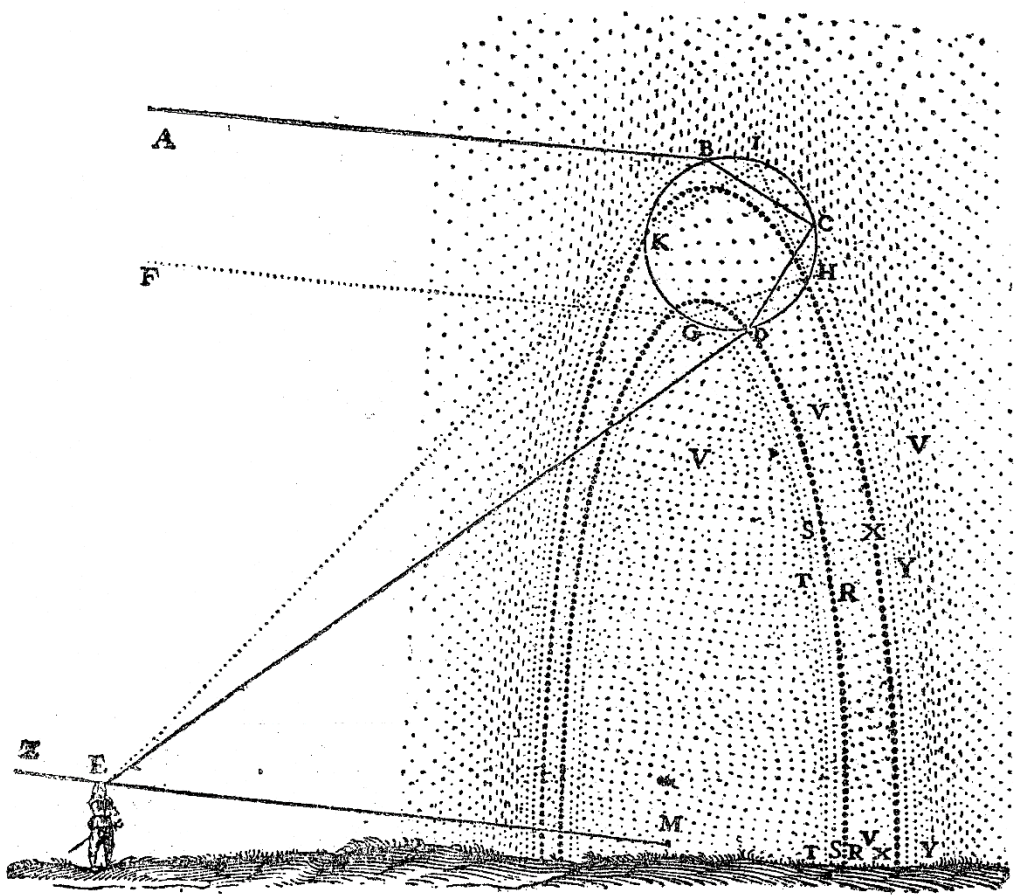
$$\frac{\sec \angle EBC}{\sec \angle EBD} = \frac{\frac{CB}{EB}}{\frac{DB}{EB}} = \frac{\frac{1}{\sin \vartheta_i}}{\frac{1}{\sin \vartheta_t}} = \frac{\sin \vartheta_t}{\sin \vartheta_i} = \text{konst.}$$



Snellova formulace zákona lomu

Descartova formulace zákona lomu

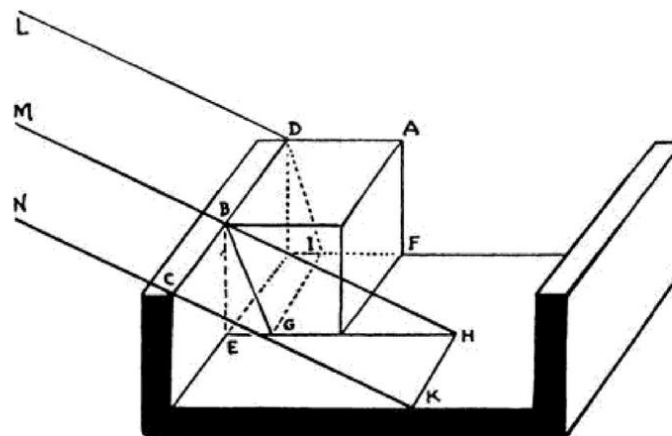
~ 1637 **Rene Decartes** vysvětlil a spočítal vznik duhy



J. Kepler(1571-1630)

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

Podrobně studoval odraz a lom světla a popsal totální odraz



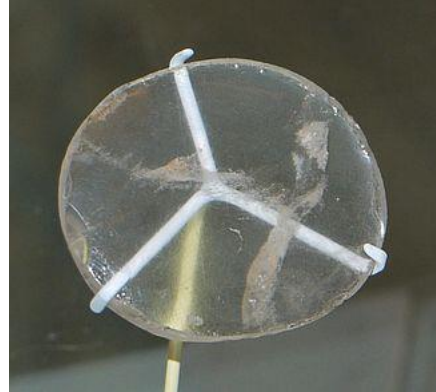
Formuloval optickou teorii dalekohledu (1610)

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

Studoval vliv velikosti vstupního otvoru (apertury) 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.

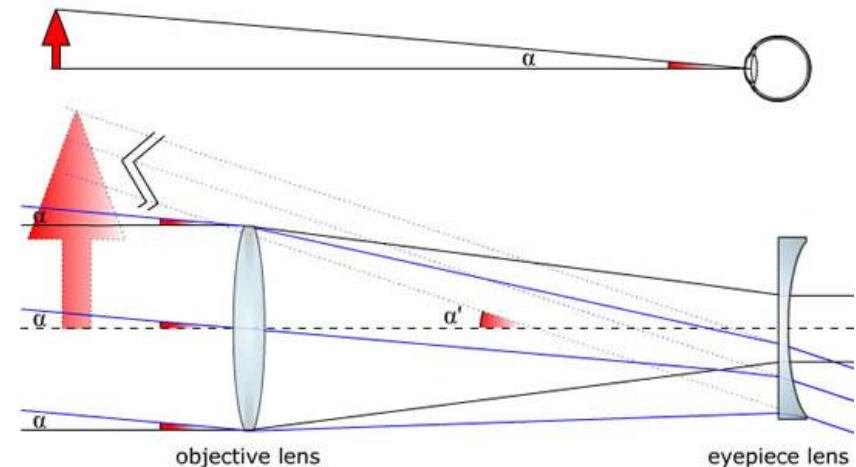
Základní optické přístroje využívající čočky

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



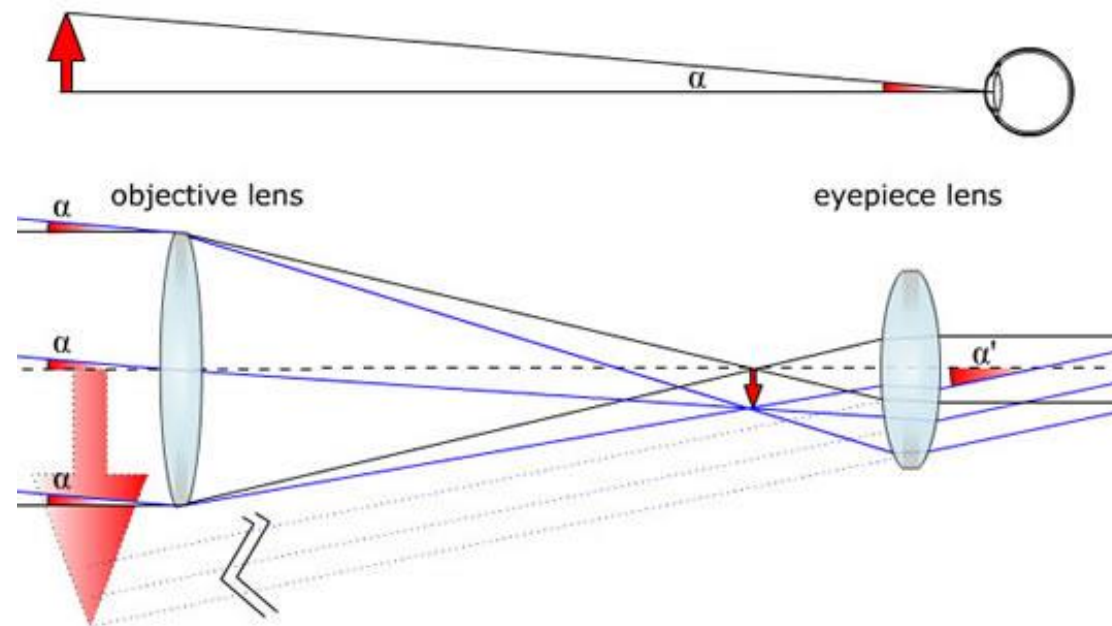
Nimrudská čočka,
Vystaveno v Britském muzeu

Dalekohled – 1608 Patentová žádost H.Lippershey (Holandsko)
patent neudělen. Na jejím základě sestrojil G.Galilei dalekohled
sestavající 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.



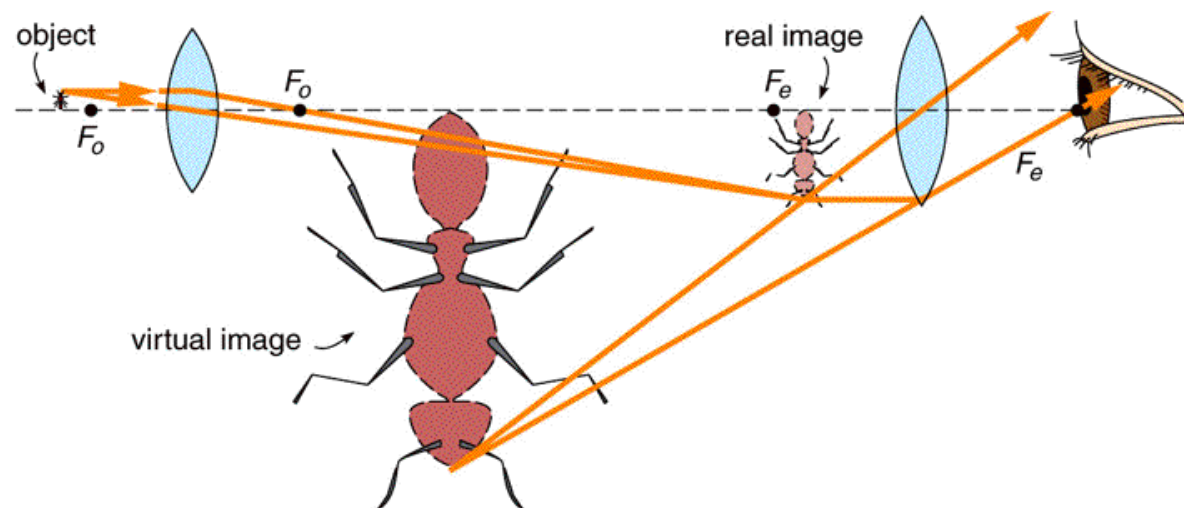
Dalekohled - Keplerovský (J.Kepler, 1611)

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

Příčné vlny

Éter

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

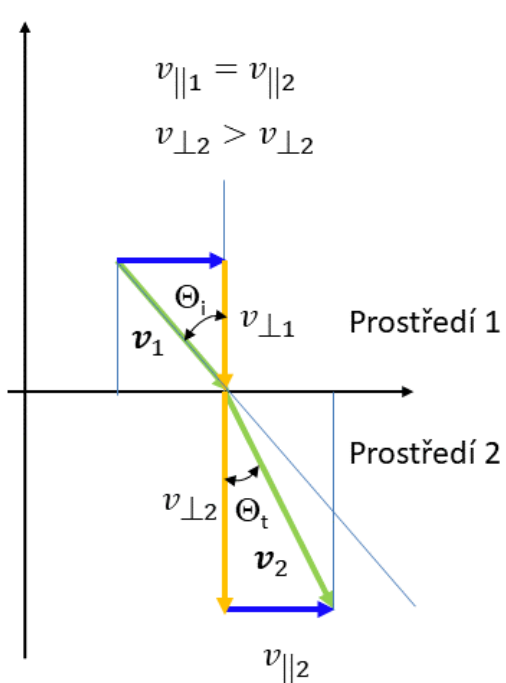
Newtonova částicová teorie světla (odraz a lom)

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.

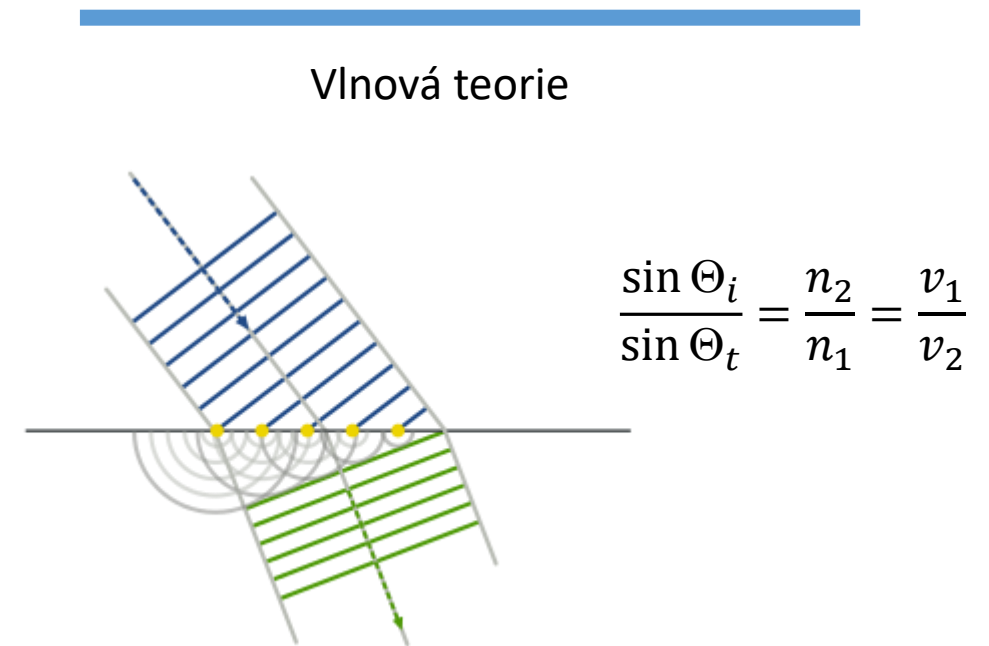
Na rozhraní dvou prostředí (např. vzduch/voda) je situace jiná. Voda obsahuje více hmotných částic než vzduch. Newton předpokládal, že hmotné částice vody na rozhraní částice světla přitahují a proto se zvýší složka rychlosti kolmá k rozhraní. Složka paralelní s rozhraním se nezmění.



$$\sin \Theta_i = \frac{v_{||1}}{v_1}$$

$$\sin \Theta_t = \frac{v_{||2}}{v_2} = \frac{v_{||1}}{v_2}$$

$$\frac{\sin \Theta_i}{\sin \Theta_t} = \frac{v_2}{v_1}$$



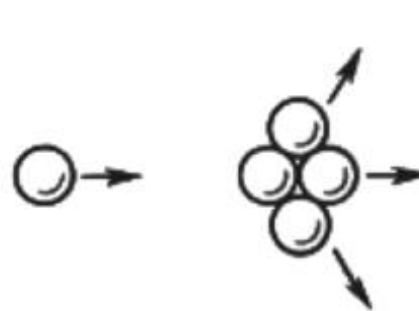
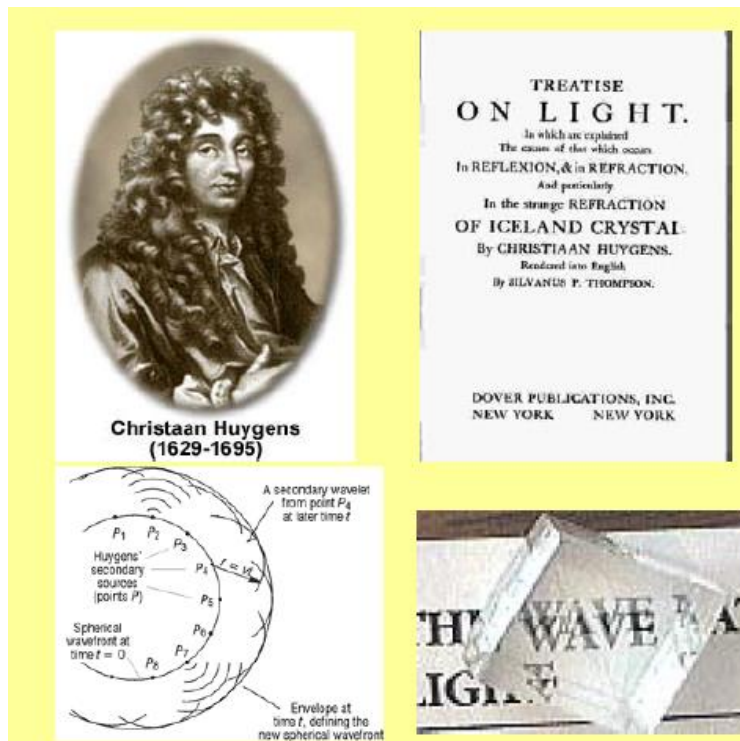
$$\frac{\sin \Theta_i}{\sin \Theta_t} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$



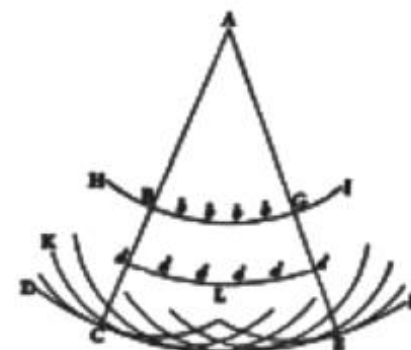
C. Huygens (1629-1695)

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

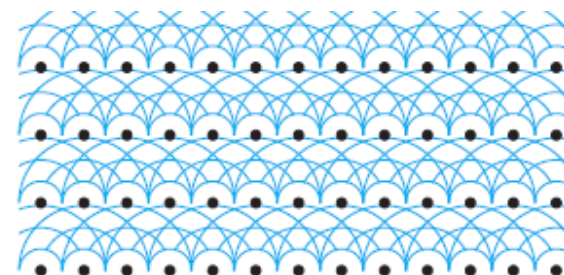
„The world is my country, to promote science is my religion.“



▲ Figure 4.2 Huygens' 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 jednak to, že neuměla vysvětlit dvojlom a dále fakt, 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 přímočarého šíření (ohyb) způsobené fyzickou překážkou. Z fyzikálního hlediska se jedná o jev interference.

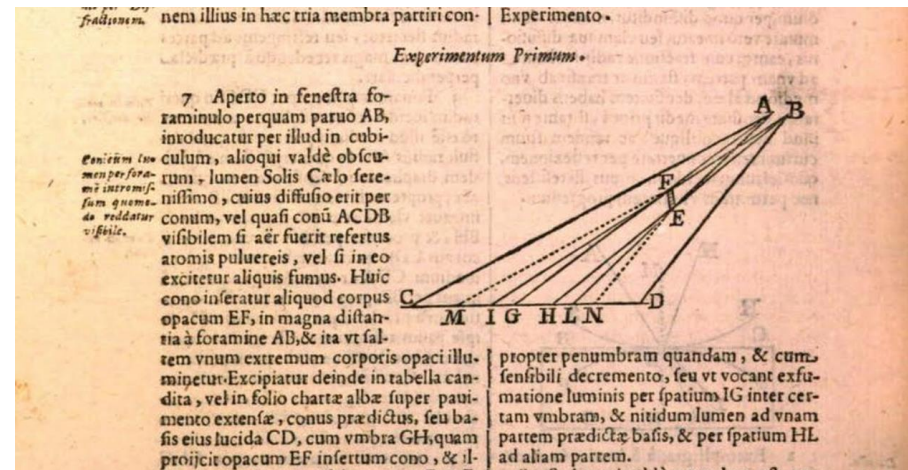
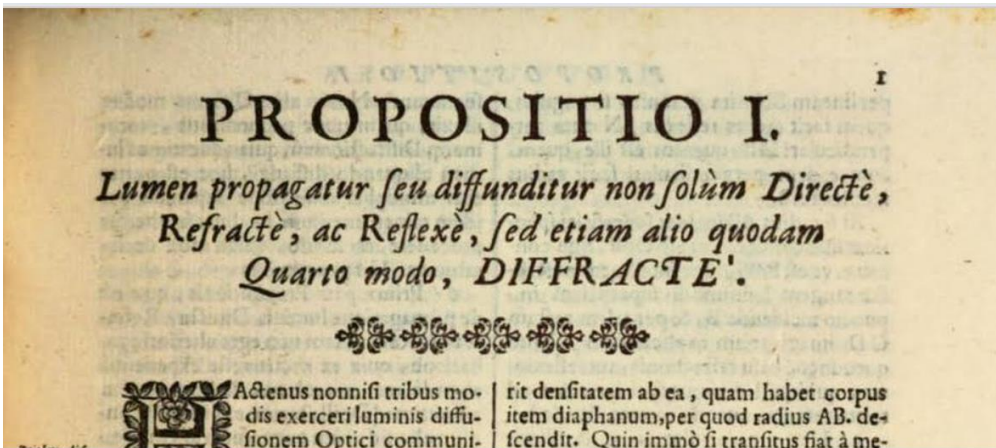


) F. M. Grimaldi (1618-1663)

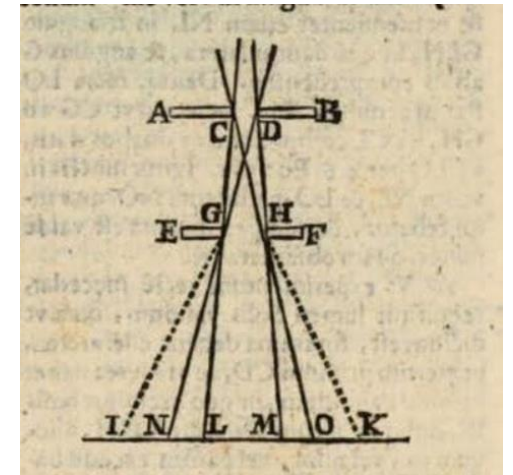
~ 1665 A.D **Francesco Maria Grimaldi** popsal **difrakci** světla. První indikace vlnové podstaty světla

~ „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/>

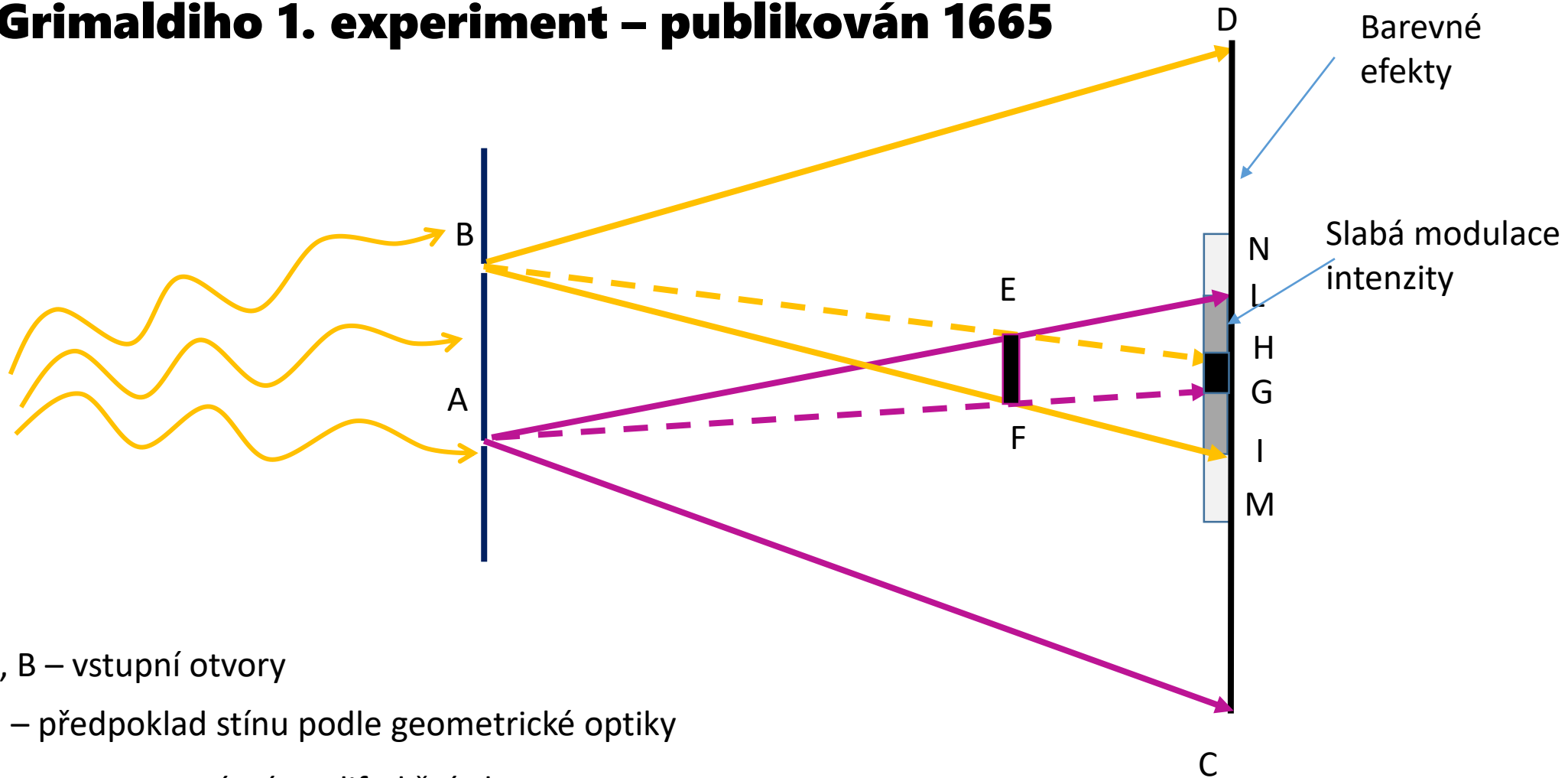
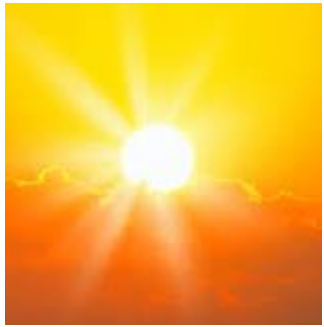


Grimaldiho 1. experiment



Grimaldiho 2. experiment

Grimaldiho 1. experiment – publikován 1665



A, B – vstupní otvory

LI – předpoklad stínu podle geometrické optiky

NM – pozorovaný stín – difrakční obraz

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.

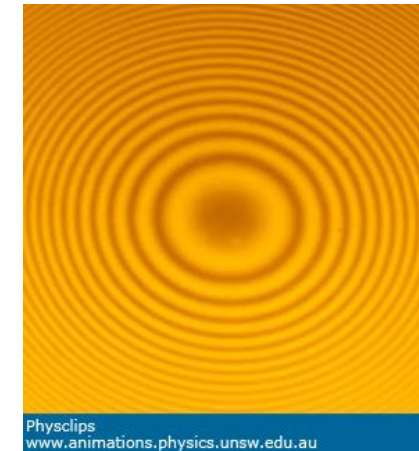
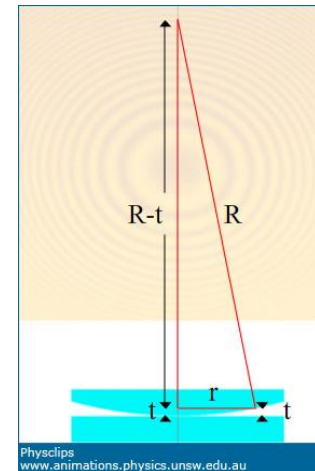


I. Newton (1642-1727)

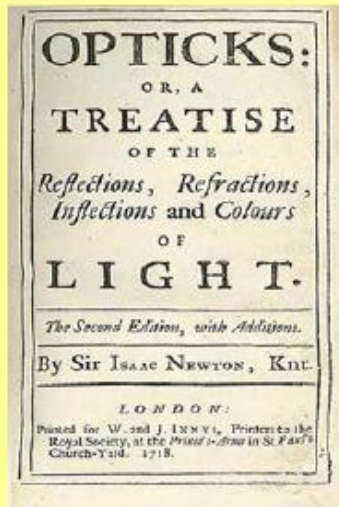
~ 1666 **Isaac Newton** studoval disperzi světla na hranolu a spektrum bílého světla. Rozvinul částicovou teorii světla. Zkonstruoval zrcadlový dalekohled. Jeho vědecká dráha byla poznamenána spory s R.Hookem (tajemník Royal Society), který napadal jeho částicovou teorii světla.

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

Newtonovy kroužky



Physclips
www.animations.physics.unsw.edu.au



Sir Isaac Newton
(1642-1727)

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 stavy světla (fits).

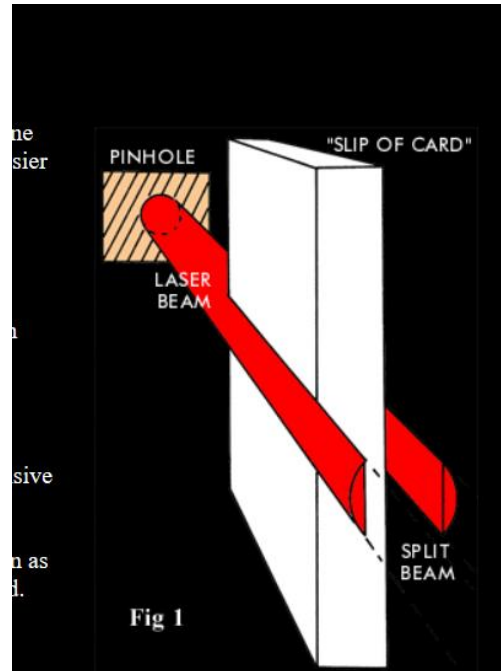
~ 1802

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“



T. Young (1773-1829)

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."

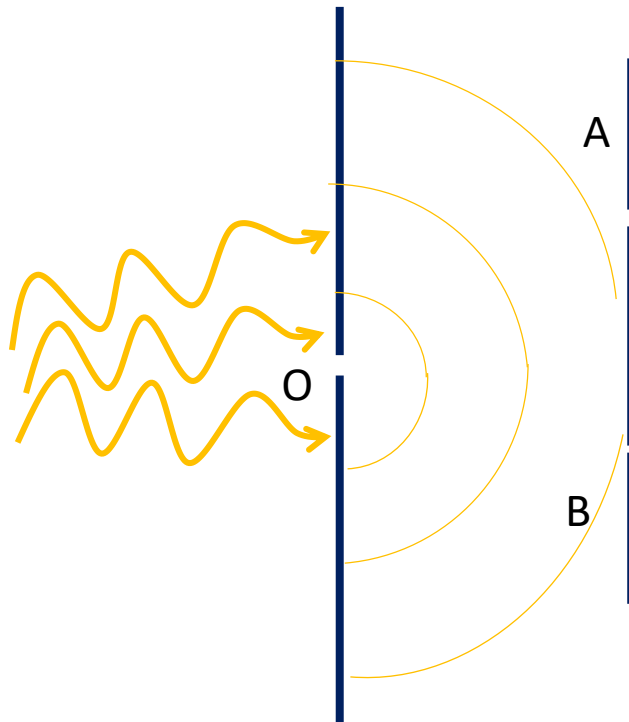
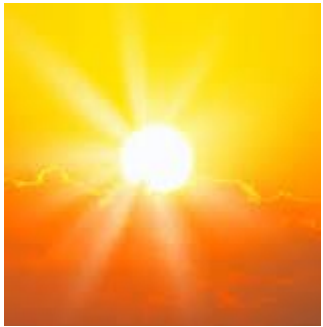
Klíčovým prvkem pokusu bylo to, že zakrytím jedné poloviny svazku v oblasti karty modulace intenzity zmizela

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

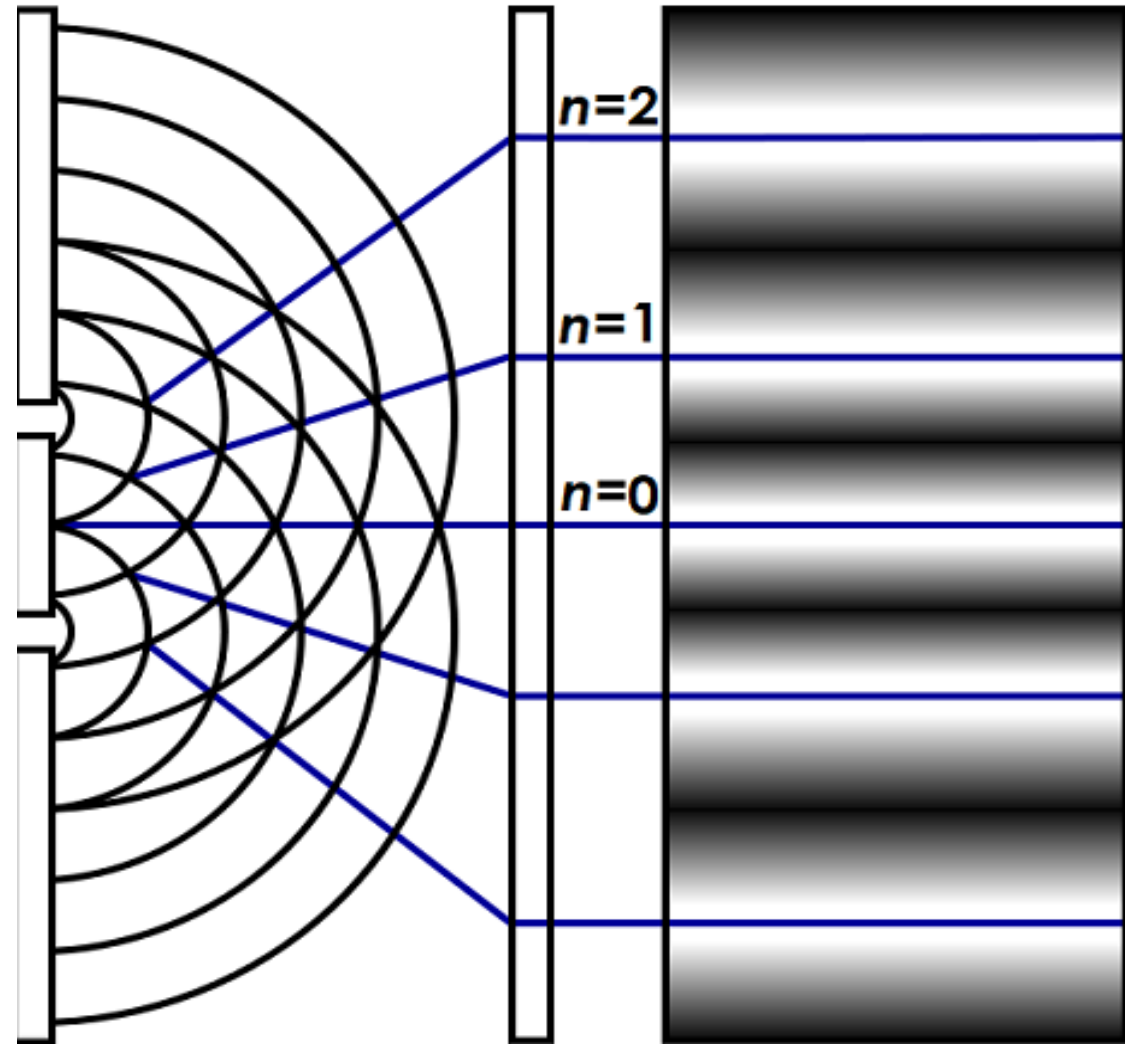
Původní varianta Youngova pokusu. Sluneční světlo prochází malým otvorem – koherentní zdroj, vlnoplochy se dělí na kartě a vlny odražené z obou stran v prostoru za ní interferují.

Youngův pokus – 1807

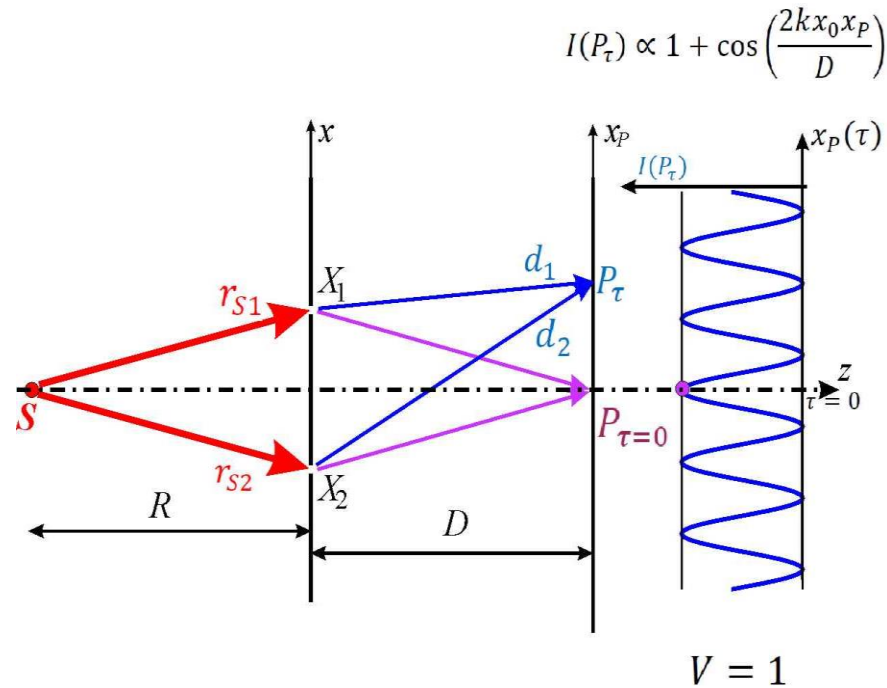
Jedná se o upravený Grimaldiho pokus - před Grimaldiho dva otvory je vloženo další stínítko, které zvýší prostorovou koherenci záření v otvorech A,B



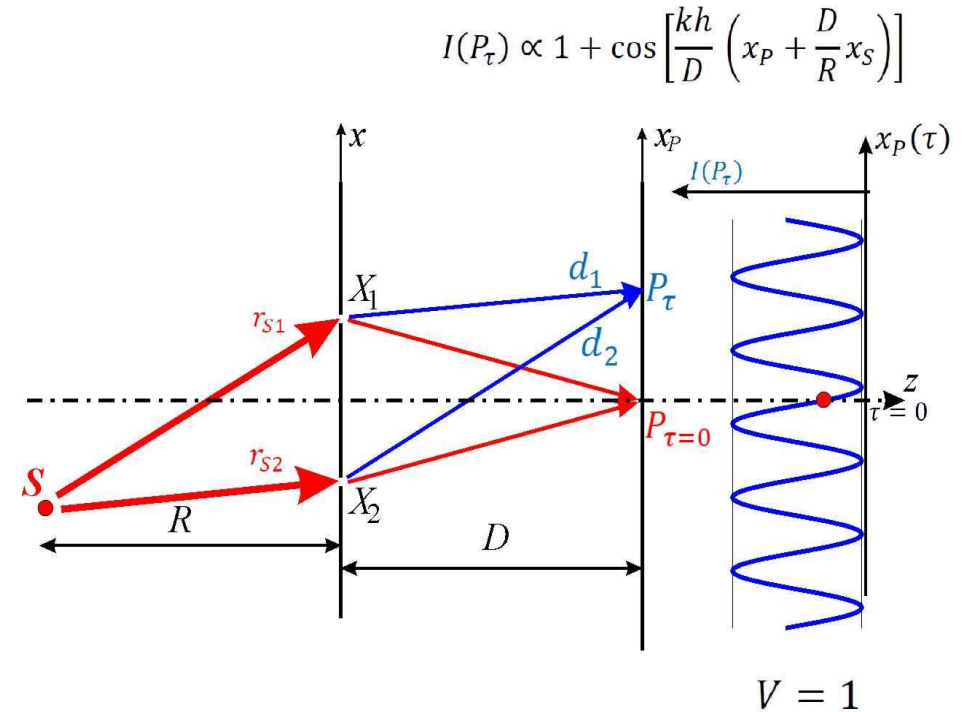
O – štěrbina zužující svazek světla
A zvyšující prostorovou koherenci
A, B – vstupní otvory



Grimaldiho a Youngův pokus a koherence zdroje (I)

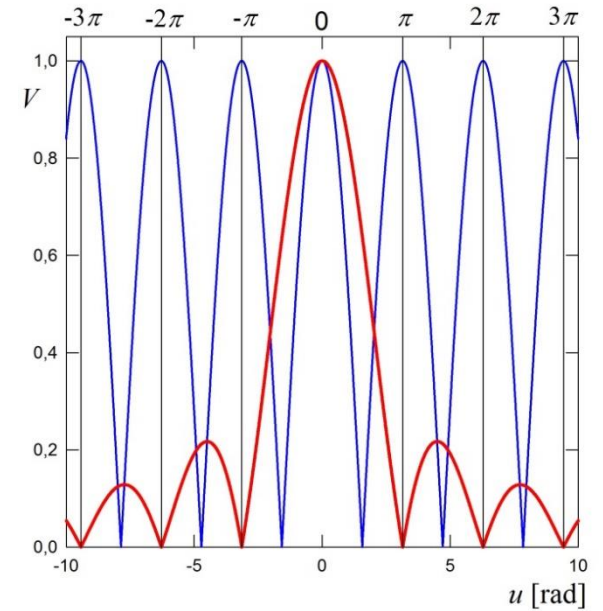
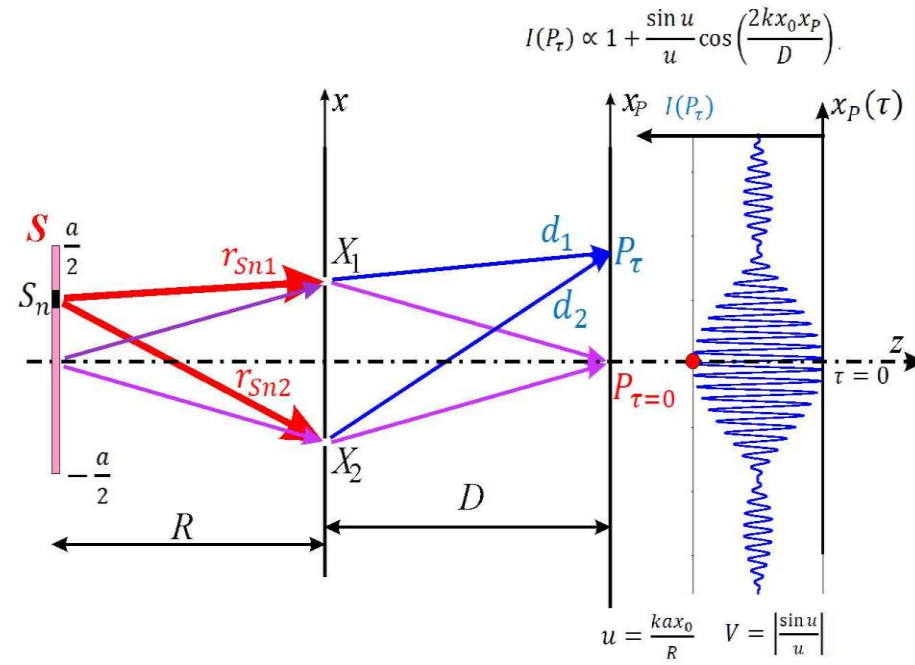
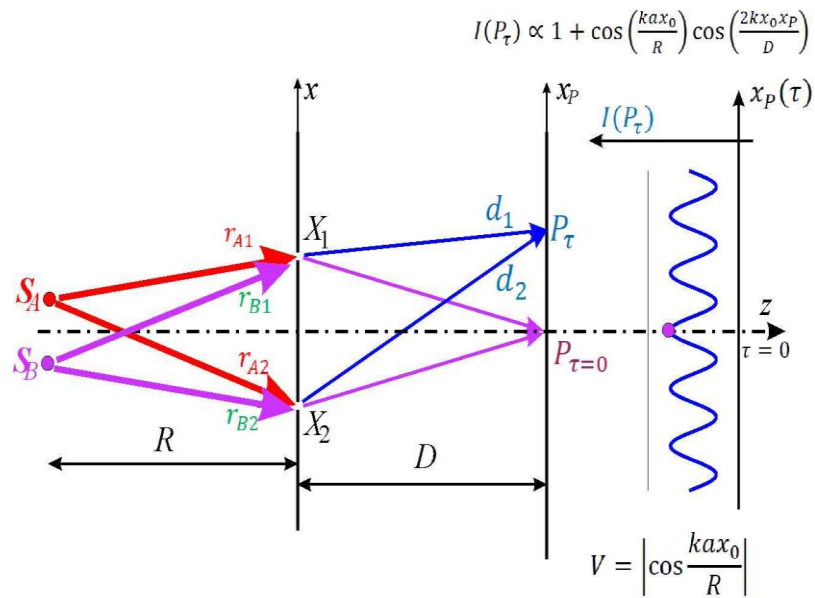


Youngův pokus s bodovým zdrojem světla ležícím na ose osvětlených difrakčních apertur. V rovině pozorování (matnice) vznikají interferenční proužky s maximální kontrastem (tzv. viditelnost $V=1$)



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)



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

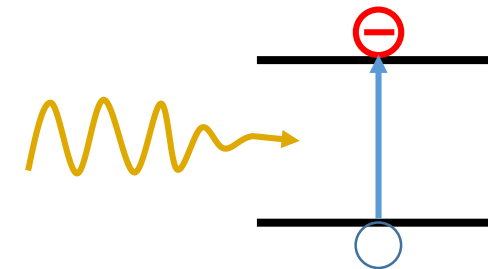
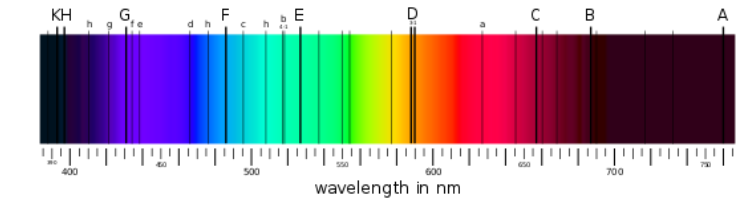
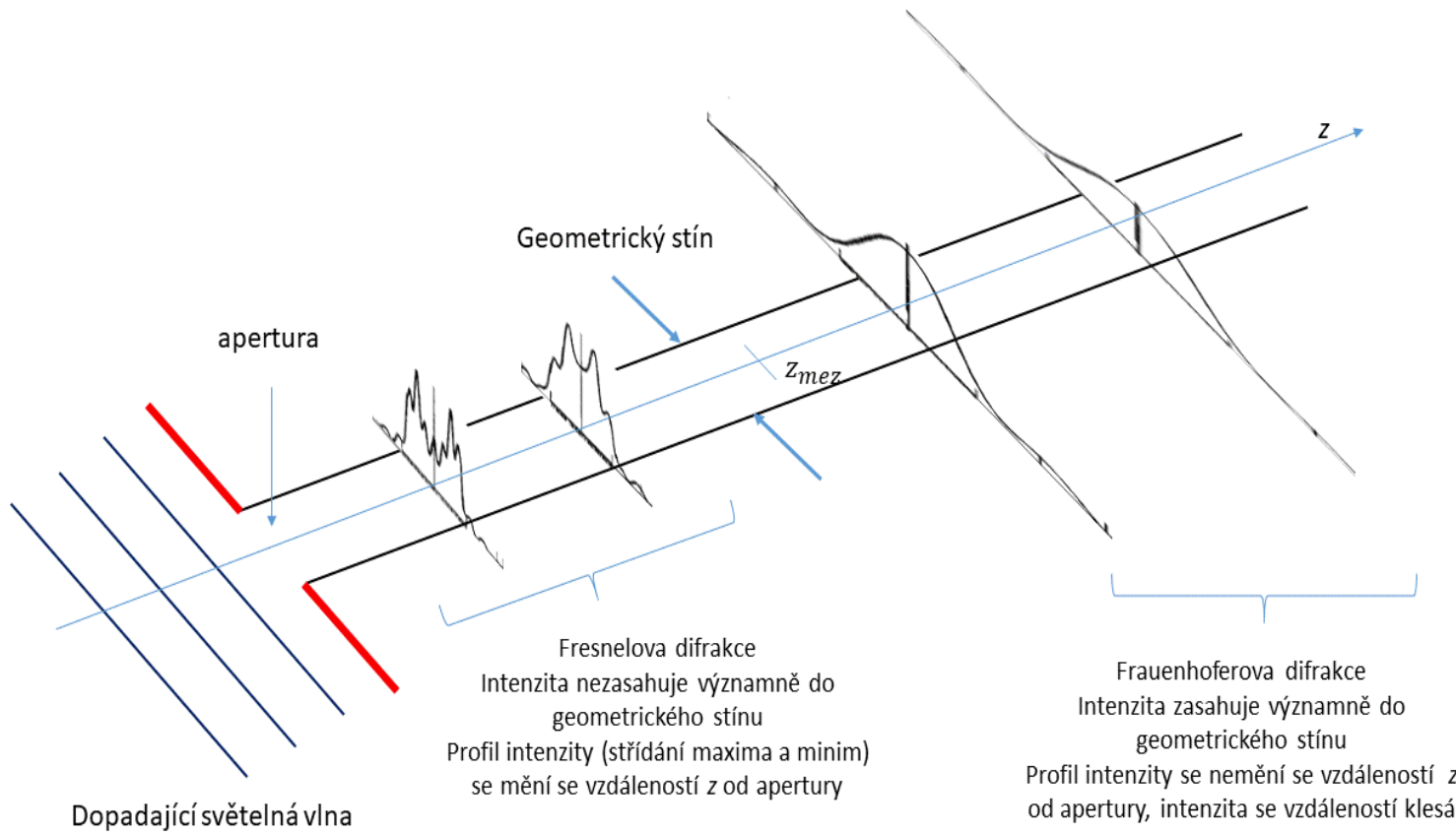
Úsečka nekoherentních bodových
zdrojů. Viditelnost IF proužků závisí na rozměrech (délce) zdroje
 a , vlnovém vektoru, vzdálenosti difrakčních otvorů $h = X_1X_2$ a vzdálenosti
 R zdroje světla od stínítka s difrakčními otvory. Ke zvýšení viditelnosti IF
proužků je tedy třeba prostorově omezit zdroj světla. To udělal T. Young ve
srovnání s M. Grimaldim.



J. van Fraunhofer (1787-1826)

~ 1814

Joseph von Fraunhofer studoval difrakci ve vzdálených polích, (Fraunhoferova difrakce), detekoval absorpční linie slunečního spektra (Fraunhoferovy linie)



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



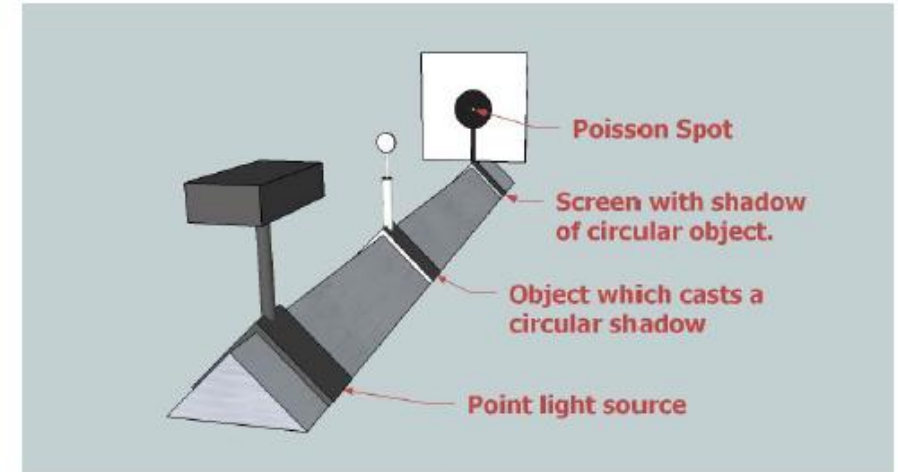
Siemeon D. Poisson - Poissonova skvrna

„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/>

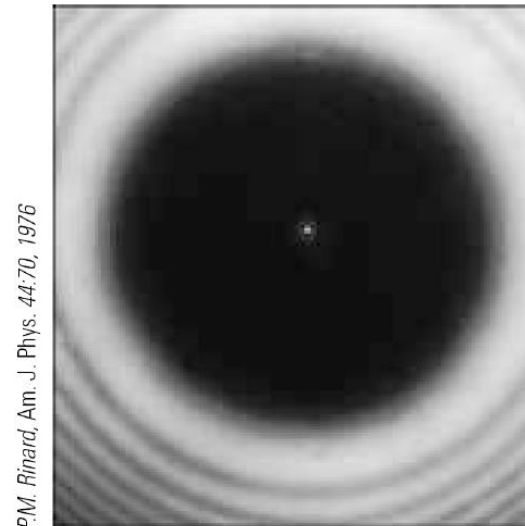
V roce publikoval **Augustin Fresnel** článek o teorii difrakce na základě soutěže vyhlášené francouzskou Akademií věd. Člen komise, **Simeon D. Poisson**, byl jako zastánce částicové teorie k závěrům Fresnela velmi kritický. Na základě Fresnelovy vlnové teorie dedukoval zdánlivě absurdní předpoklad, 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**

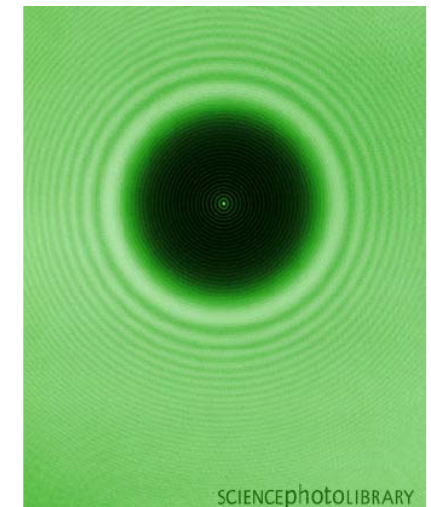


http://en.wikipedia.org/wiki/Arago_spot

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



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

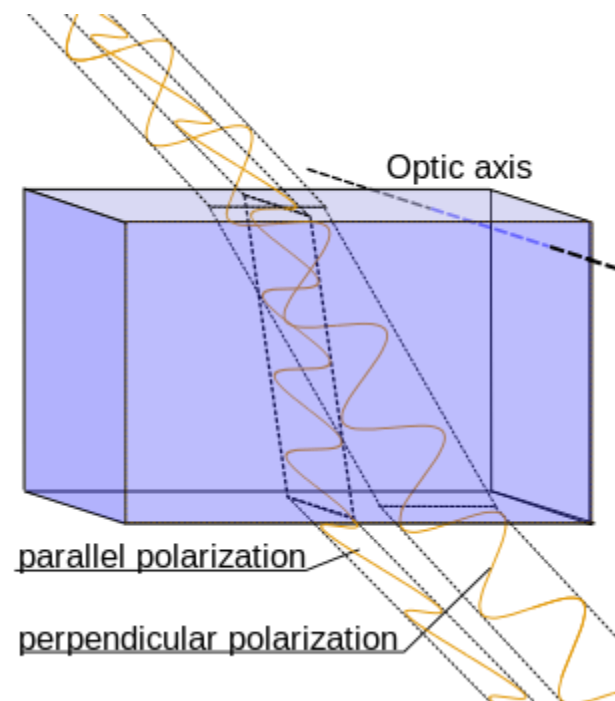
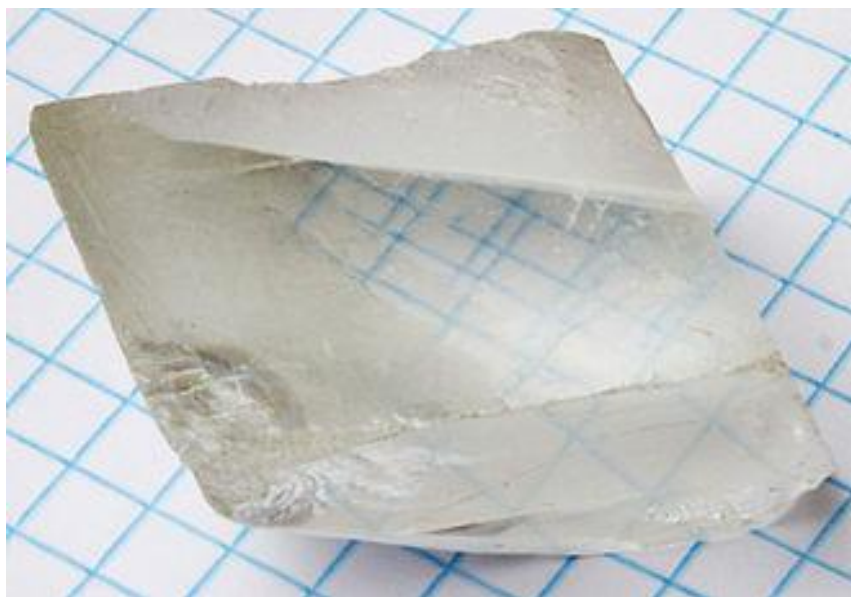


SCIENCEPHOTOLIBRARY

Dvojlom a polarizace světla



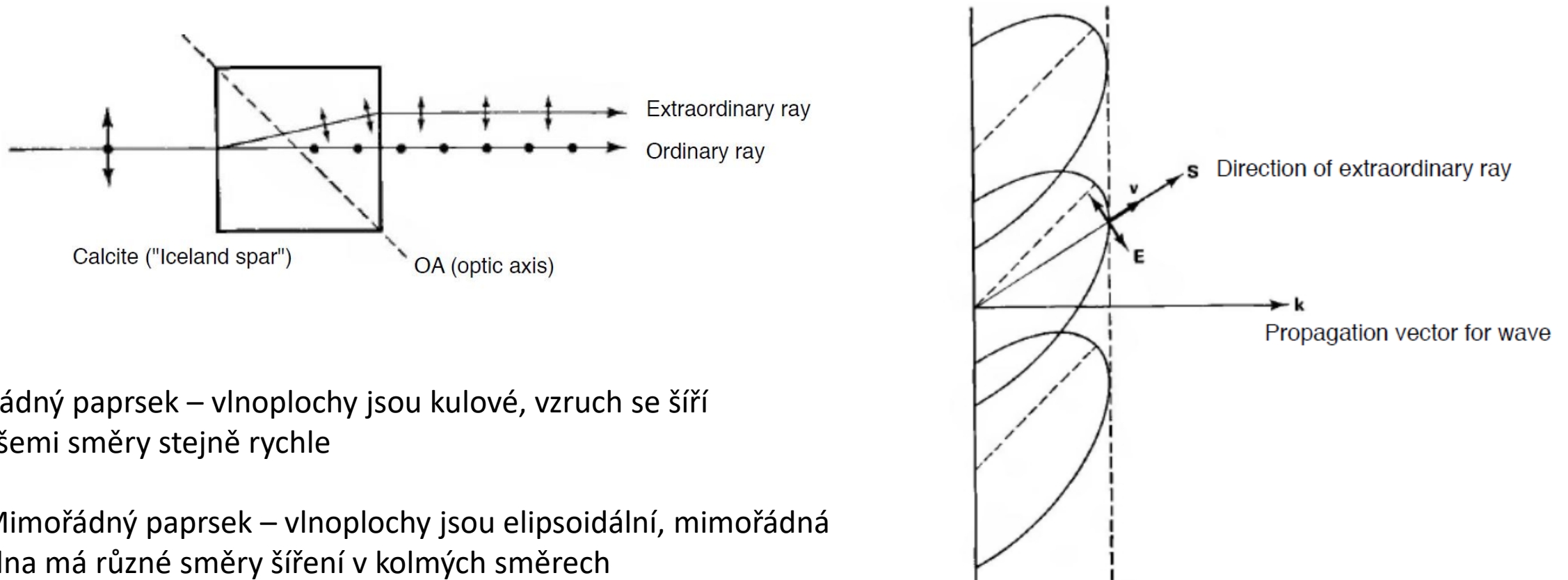
~ **1659 Erasmus Bartolin** – popsal **dvojlom** v islandském vápenci (CaCO_3). Tento jev byl vysvětlen až v 19. století Fresnelem na základě vlnového modelu světla



Bartolin pozoroval vznik dvou obrazů při dvojlomu. Nevěděl, že oba svazky jsou lineárně polarizovane 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“ „

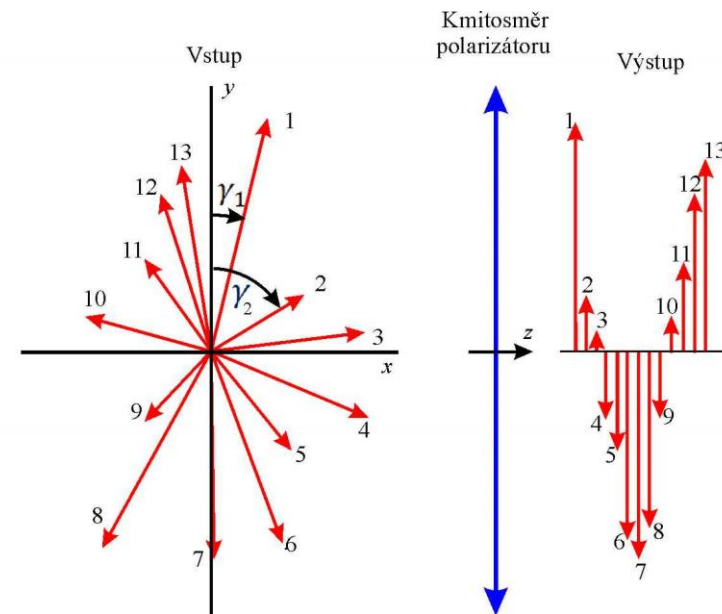
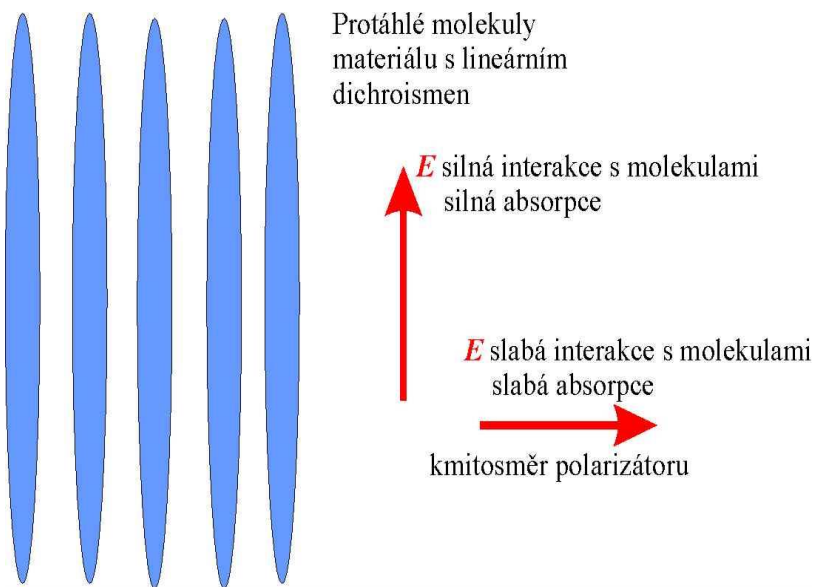


Řádný paprsek – vlnoplochy jsou kulové, vzruch se šíří všemi směry stejně rychle

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



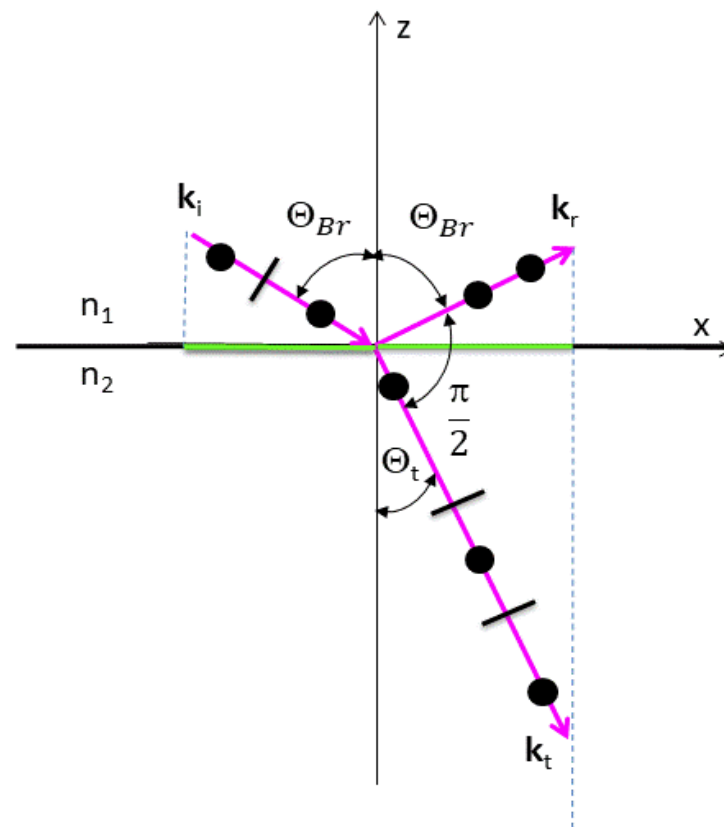
~1809 Etienne Louis Malus Roku 1809 pozoroval ze svého bytu světlo odražené okny protějšího Luxemburského paláce. Všiml si, že světlo potemní, když pootočí krystalem dvojlomného vápence skrz který se díval. Objevil tak **polarizaci světla odrazem**. Formuloval vztah mezi polarizačním úhlem odraženého 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 dvojlom a objevil fotoelasticitu. Zkonstruoval první 3D zobrazovací zařízení – stereoskop.





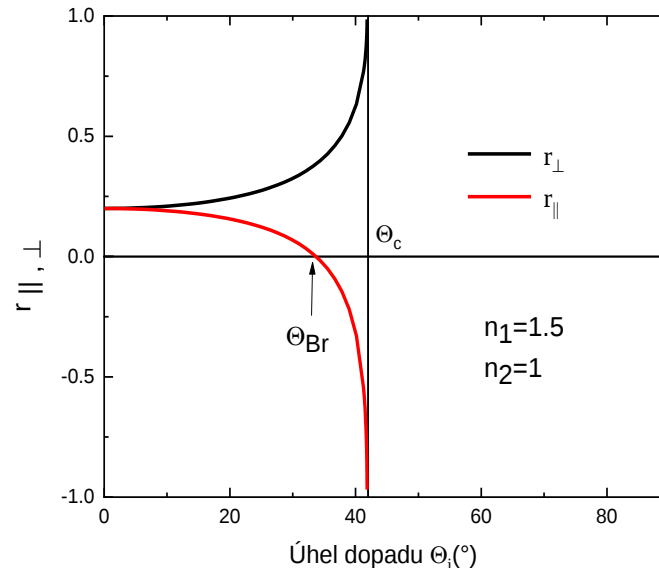
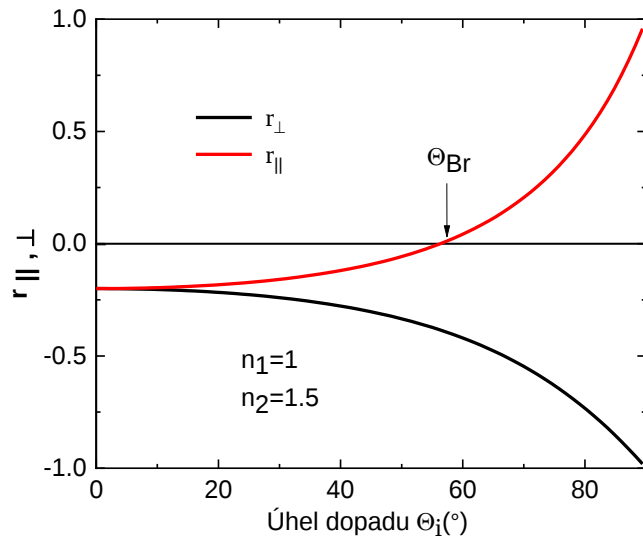
A. J. Fresnel(1788-1827)

~ 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.

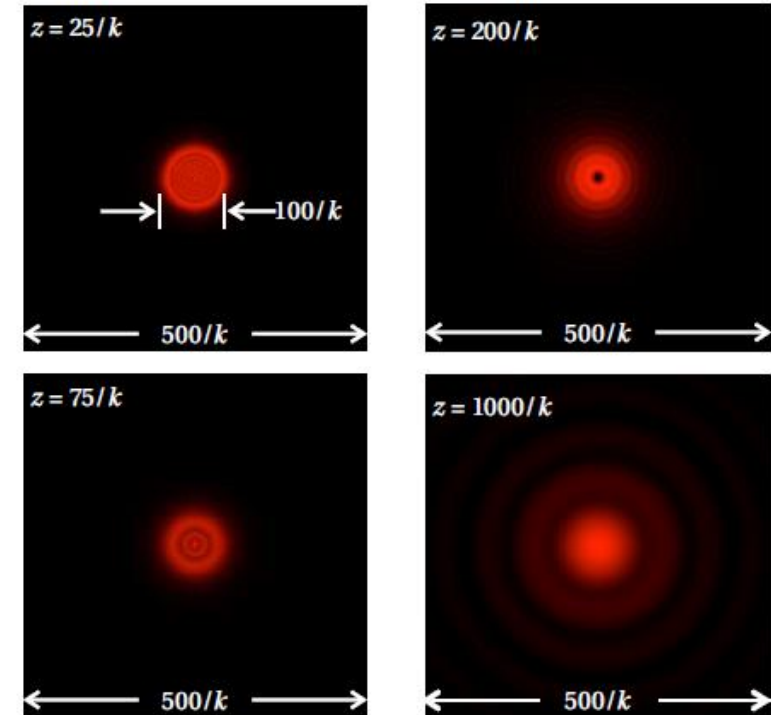
„I find nothing so painful as having to lead men.“ — Augustin-Jean Fresnel, in his December 29 1816 letter to his uncle Léonor Mérimée

1816 – dva navzájem kolmo polarizované paprsky nikdy neinterferují

Fresnelovy amplitudové koeficienty odrazu



Odvozeny na základě dynamického modelu oscilací éteru



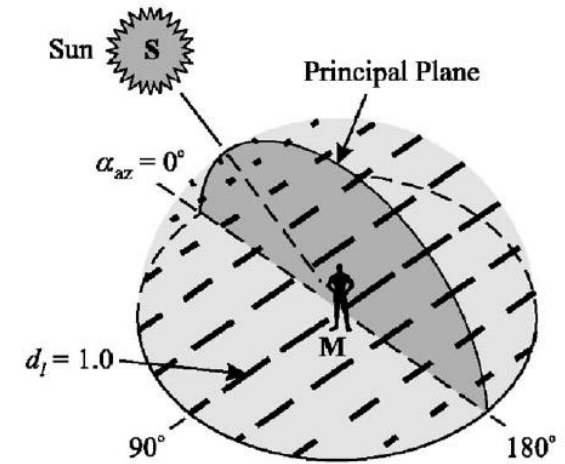
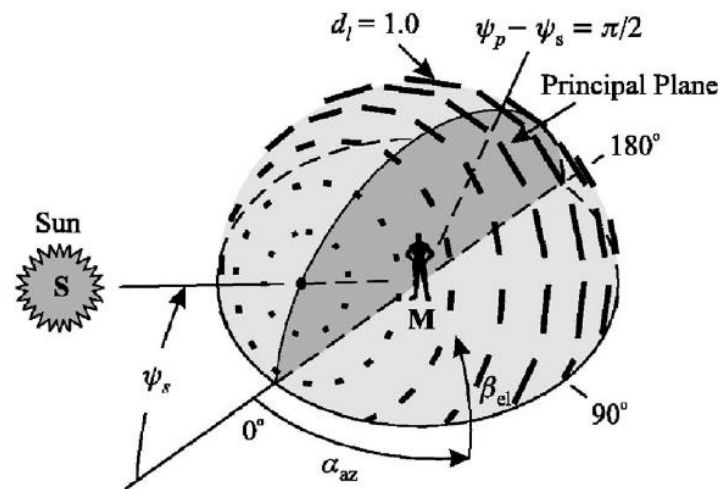
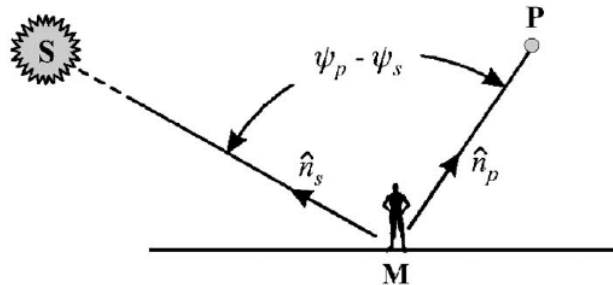
Francois Arago – francouzský matematik, fyzik a politik



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

1786-1853

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.



<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/vedec/1047/arago>

G.Smith, Am.J.Phys. 75(1), 2007

Disperze

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

$$n = f(\lambda)$$



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

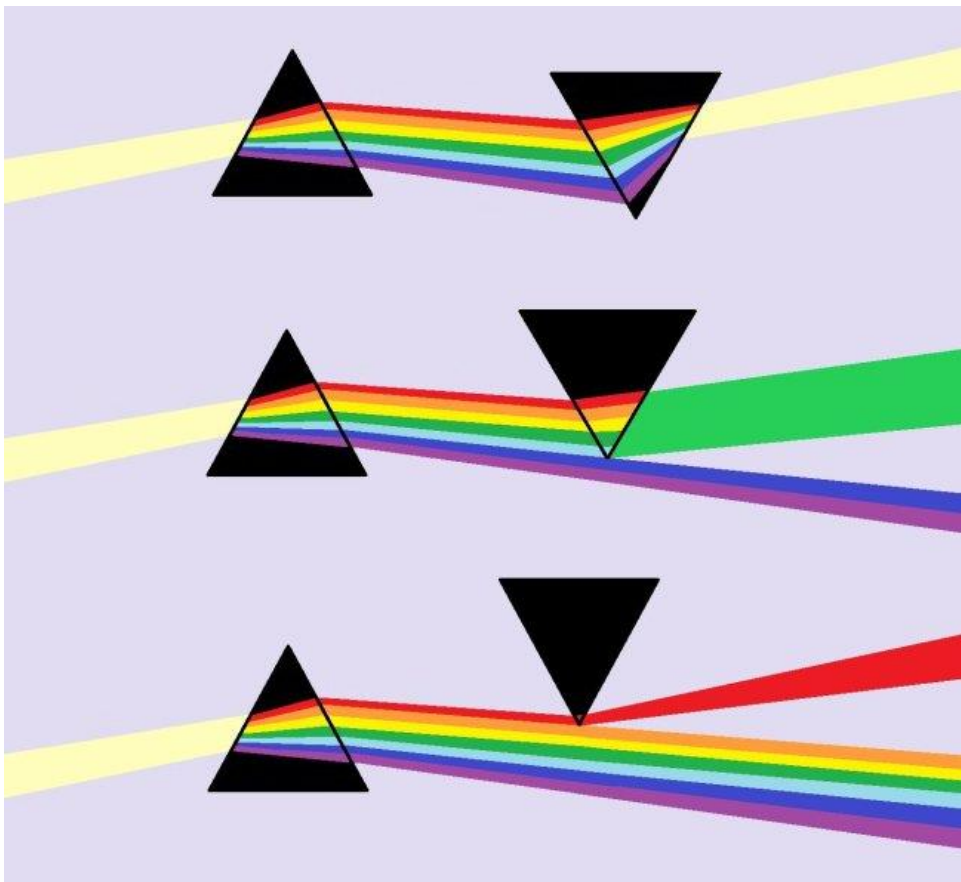
Přímočarost šíření světla znamená, že světlo je tvořené hmotnými částicemi.



- 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 částic světla hmotou a zvýšení jejich rychlosti, mají v látce fialové částice větší rychlost než červené, proto se více lámou. Celkově tedy mělo dojít v rozkladu světla v důsledku různých hmotností částic 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**.

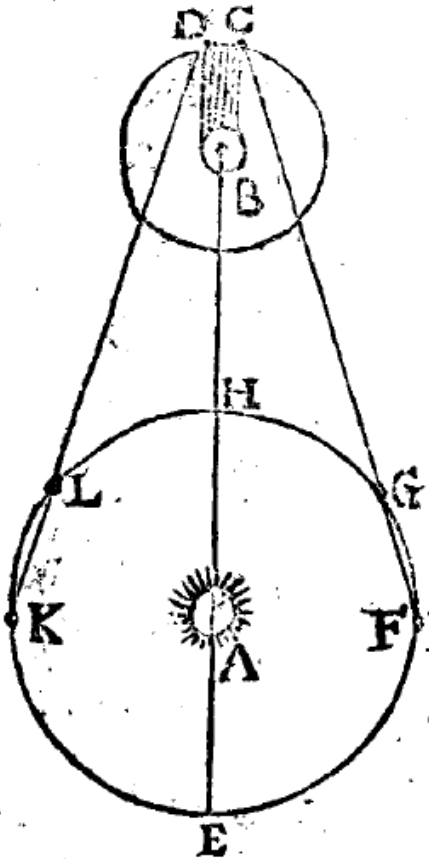
Rychlost světla

Date	Experimentor	Country	Experimental Method	Speed (10^8m/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.



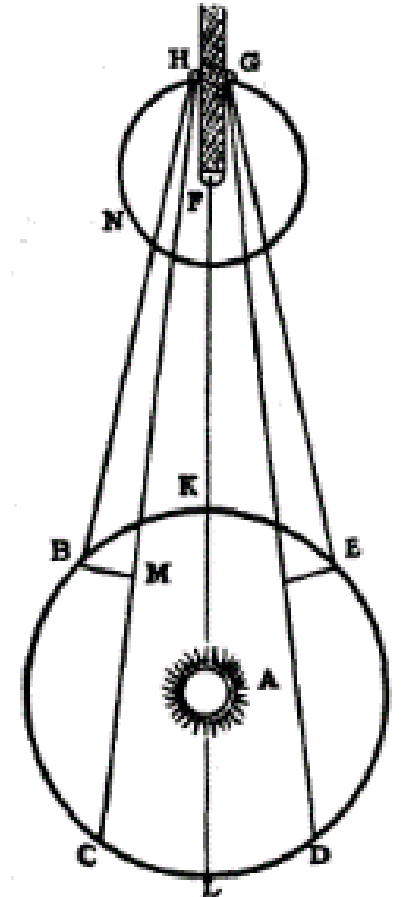
- Olaf Roemer pozoroval variace v době mezi dvěma zatměními Jupiterova měsíce Io.

- Když se země vzdalovala od Jupitera nastalo další zatmění později než když se Jupiterovi přibližovala.

- ..

Z rozdílu drah a měřených časů určil Huygens $c = 2.1 \times 10^8 \text{ m/s}$.

- Chyba způsobena nepřesnou znalostí orbity země



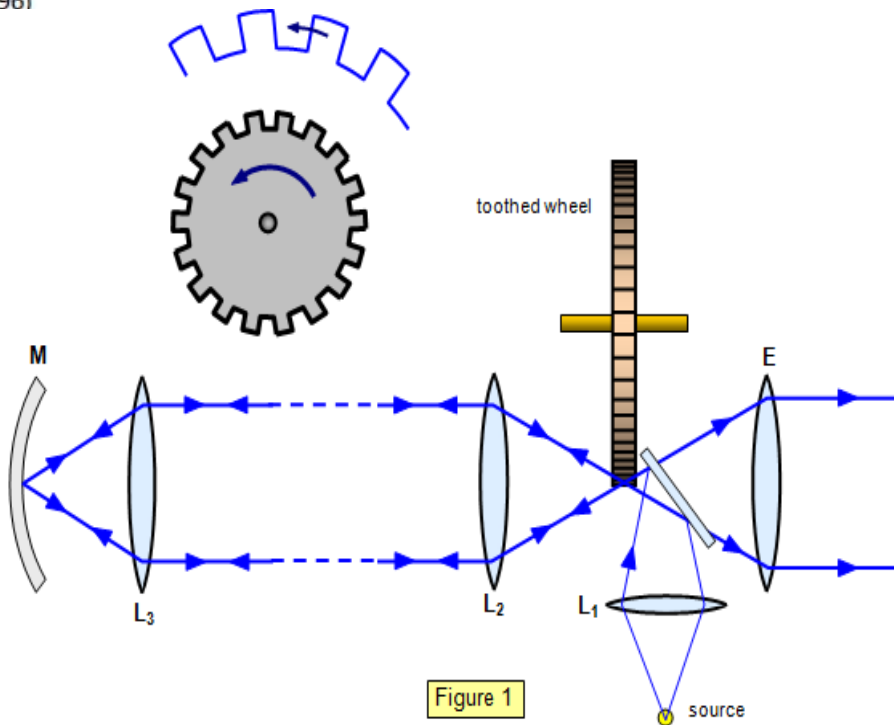


~ 1849

Hippolyte Fizeau - změřil rychlost světla experimentem na Zemi.

Fizeauv experiment s ozubeným kolem

H. Fizeau (1819-1896)



Hlavní rysy experimentu:

- štěrba vytvoří úzký svazek světla
- světlo prochází mezerami ozubeného kola
- odráží se na zrcadle
- v závislosti na rychlosti otáčení kola se svazek odrazí od zubu a nedojde k pozorovateli nebo projde další mezerou

c lze spočítat jako:

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

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



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

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

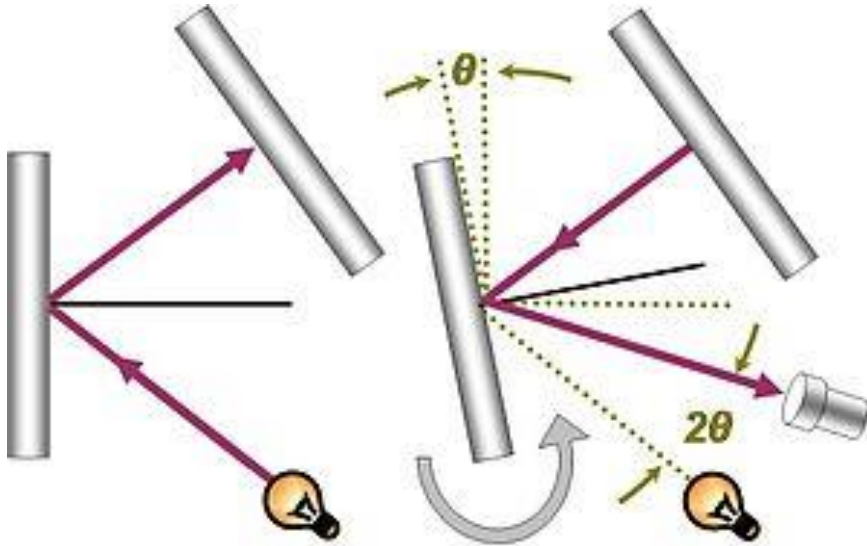


L. Foucault (1819-1868)

~ 1849 **Leon Foucault** – změřil rychlost světla experimentem na Zemi.

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

- Leon Foucault použil odraz světla od rotujícího zrcátka k pevnému zrcátku, od kterého se světlo odrazí zpět k rotujícímu zrcátku, které se mezitím posunulo o nějaký úhel.
- Od rotujícího zrcátka se světlo odrazí na detektor

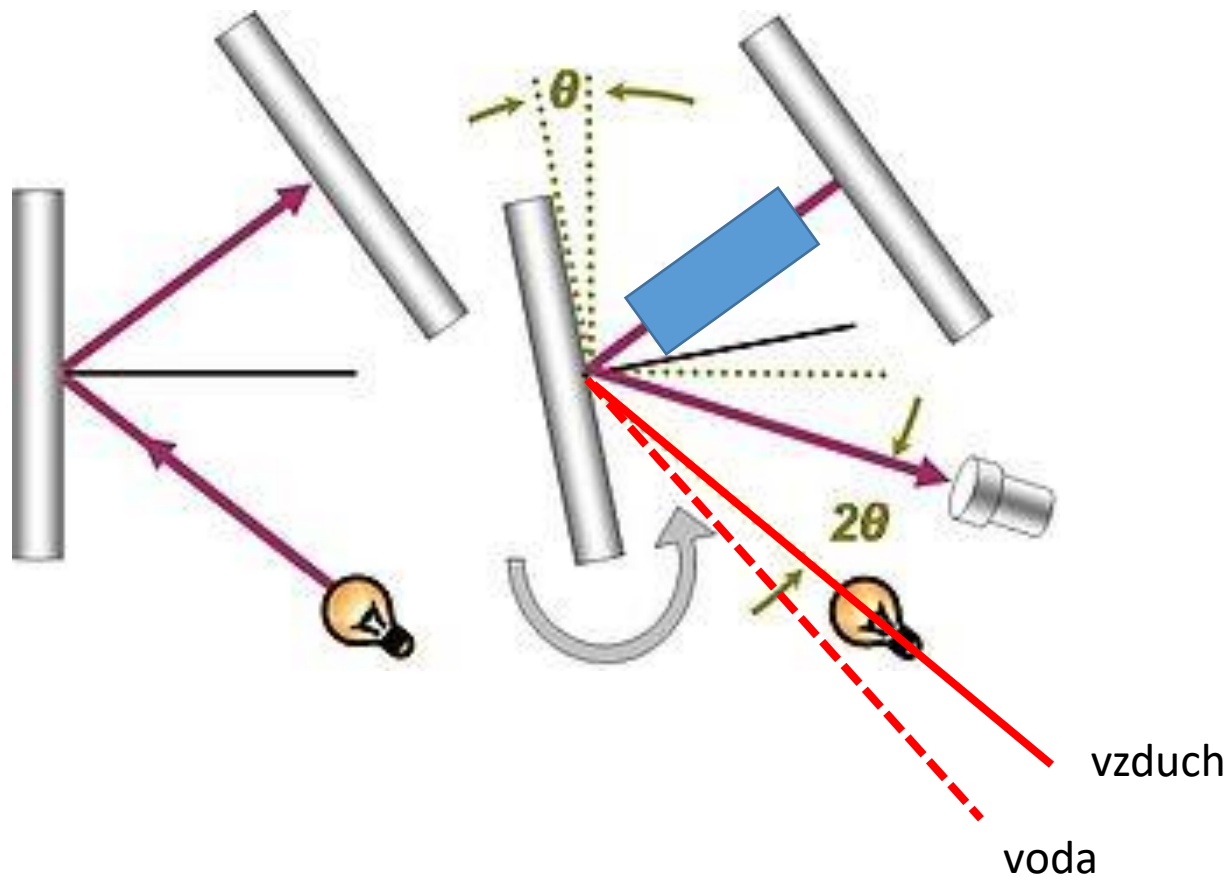


$$t = \frac{2h}{c} = \theta/\omega$$

t je doba mezi 1. a 2. odrazem paprsku na rotujícím zrcátku, h je vzdálenost zrcátek. θ je úhel odrazu, ω je úhlová rychlost otáčení zrcátka.

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

Foucaultův 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