

Historie VIII.

Optika

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



Časový přehled historie optiky

Starověk (3. stol. př. n. l.):

Počátky optiky – zrcadla z mědi a bronzu.
První teorie o původu světla a vidění
(řečtí filozofové-Pythagoras, Démokritos, Platón)
Studium lomu světla
(Eukleidos, Ptolemaios)

Raný středověk (1000 n. l.):

Přesun vzdělanosti do arabského světa.
Alhazen – Opticae thesaurus (Poklad optiky).
Správné objasnění vidění, základy optiky

17. stol.:

Objev zákona lomu (W. Snell)
Princip nejkratší dráhy světla (Pierre de Fermat)
První pozorování ohybu (F. M. Grimaldi)
Počátky vlnové teorie světla (Ch. Huygens)

18. stol.:

Střetávání vlnové a korpuskulární teorie
Experimenty s rozkladem světla (I. Newton)
Rozvoj paprskové a přístrojové optiky

19. stol.:

Experimenty s interferencí světla (T. Young)
Rozvinutí vlnové teorie (J. Fraunhofer, A. Fresnel)
Objevení souvislosti mezi elektromagnetismem
a světlem (M. Faraday)
Rovnice elektromagnetického pole (J.C. Maxwell)

20. stol.:

Počátky a rozvoj kvantové teorie světla
(M. Planck, A. Einstein)
Objevuje se pojem „foton“ (Gilbert Lewis, 1926)
Dualismus vln a částic (L. de Broglie)
Sestrojení LASERU (Theodore Maiman, 1960)

Rozdělení historie optiky

Rozlišení tří disciplín optiky

1. *Geometrická* (paprsková) optika
2. *Fyzikální* (**vlnová**) optika
3. *Kvantová* (**fotonová**) optika

hlavní protagonisté

1. **Fermat, Snell, Descartes, Kepler, Hooke, Newton**
2. **Huygens, Young, Fresnel, Maxwell**
3. **Einstein, Planck, de Broglie**

korpuskulární

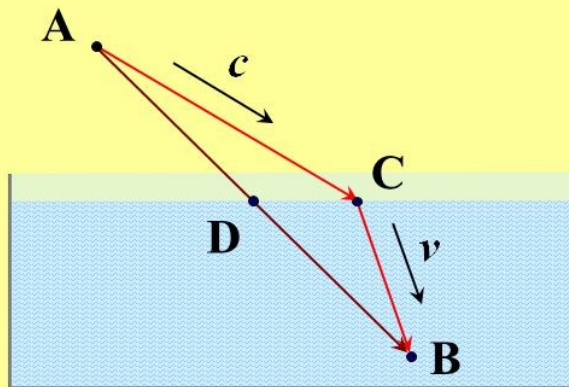
vlnová

Pierre de Fermat 1607 - 1665

francouzský matematik, právník, velká Fermatova věta r.1637, upřesnil Heronův princip - **Fermatův princip**, vyjadřující nejmenší čas namísto nejkratší dráhy při šíření světla z bodu v prvním prostředí do bodu v druhém

Základní principy šíření světla

5. Fermatův princip



$AD \rightarrow c$

$DB \rightarrow v$

$AC \rightarrow c$

$CB \rightarrow v$

Po trajektorii ACB jde světlo větší rychlostí po delším úseku.

Mezi dvěma body se světlo šíří po takové trajektorii, kterou projde za nejkratší čas.



Willebrord Snell 1580 - 1626

holandský matematik, astronom, **zákon lomu r. 1621**,

triangulační spis *Holandský Eratosthenes 1617*

matematický spis *Cyklometrika r.1621*,

Thomas Harriot kolem roku *1600* **objevil zákon lomu**, ale nepublikoval



WILLEBRORDI SNELLII R.F.
CYCLOMETRICVS.

De circuli dimehſione ſecundum Logitarum abacos, & ad Mechanicem accuratiſſima; atque omnium parabiſſima.

Eiuſdemque uſus in quarumlibet adſcriptarum inventione longe elegantiffimus, & quidem ex ratione diametri ad ſuam peripheriam data.



LVGDVNI BATAVORVM.
Ex Officinâ ELZEVIRIANA,
ANNO 1633.

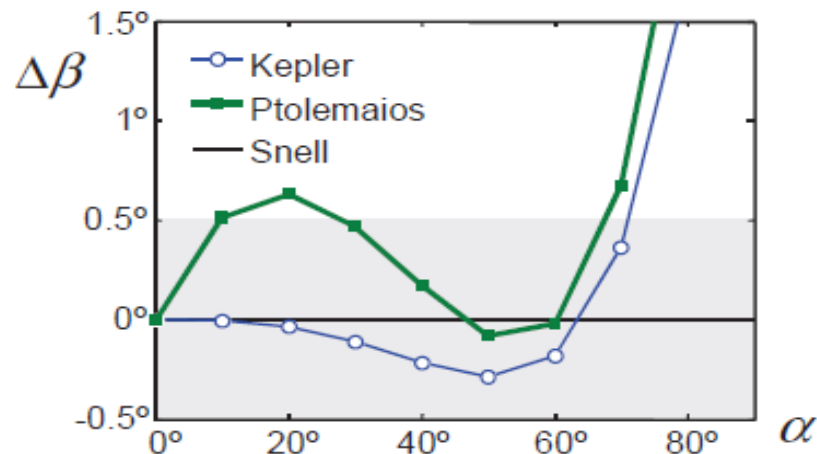
Johannes Kepler 1571 - 1630

zákon lomu, spis *Optická část astronomie*

Nalezení matematického zákona lomu bylo ztíženo dvěma málo známými skutečnostmi. Za prvé se obvykle hledal vztah mezi úhlem dopadu α a úhlem zalomení paprsku $\delta = \alpha - \beta$, a tedy ne mezi úhlem dopadu α a úhlem lomu β , jak je dnes zvykem, a za druhé se v antice nepracovalo s funkcí *sinus* (tj. $\sin x$), ale s funkcí *tětiva oblouku* (tj. $2 \sin \frac{x}{2}$). Ani JOHANNES KEPLER správný matematický tvar zákona lomu ještě nenalezl, za Keplerovo řešení se považuje vzorec

$$\delta = \alpha - \beta = \frac{n - 1}{n} \frac{\alpha}{\cos \beta}$$

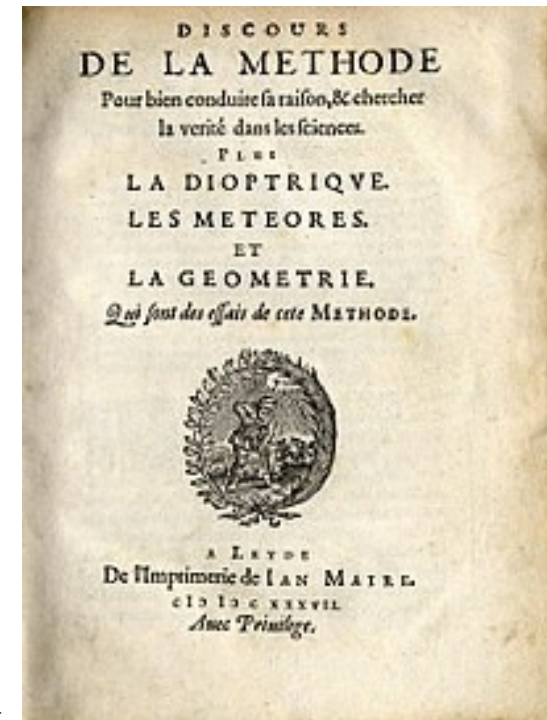
úhel dopadu α	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
β (Ptolemaios)	8°	15.5°	22.5°	29°	35°	40.5°	45.5°	50°
β (Snell)	7.5°	14.9°	22.0°	28.8°	35.1°	40.5°	44.8°	47.6°
β (Kepler)	7.5°	14.8°	21.9°	28.6°	34.8°	40.3°	45.2°	49.3°



Srovnání chyby $\Delta\beta$ Keplerova a Ptolemaiova zákona lomu oproti přesnému zákonu Snella pro $n = 4/3$. Podotkněme, že chyba půl stupně je pod hranicí přesnosti tehdejších měření.

René Descartes 1596 - 1650

francouzský filozof, matematik, fyzik, Descartes - latinsky Kartesius, žáci karteziánci, žil převážně v Holandsku, zakladatel racionalismu, *Cogito ergo sum - Myslím, tedy jsem*, spis *Rozprava o metodě r.1637*, abychom dobře směřovali svůj rozum a hledali pravdu ve vědách šest kapitol a přílohy *Dioptrika, Meteory, Geometrie*



1. Úvahy týkající se věd
2. Základní pravidla metody
3. Několik pravidel morálky, vyvozených z metody
4. Důkazy o jsoucnosti Boha a lidské duše neboli základy metafyziky
5. Řád otázek přírody
6. Věci žádoucí pro pokrok v přírodním bádání

René Descartes

Dioptrika

myšlenka korpuskulární teorie se objevila u Descarta při **odvození zákona odrazu a lomu**, které je založeno na analogii mezi drahou pružné kuličky a světelného paprsku, zákon přímočarého šíření světla je důsledkem zákon setrvačnosti. Směr pohybu částice v obou prostředích určil úvahou o rozkladu její hybnosti, odtud závěr, že při lomu ke kolmici se rychlost částice zvyšuje

Tečné složky při lomu jsou si rovny, tj.:

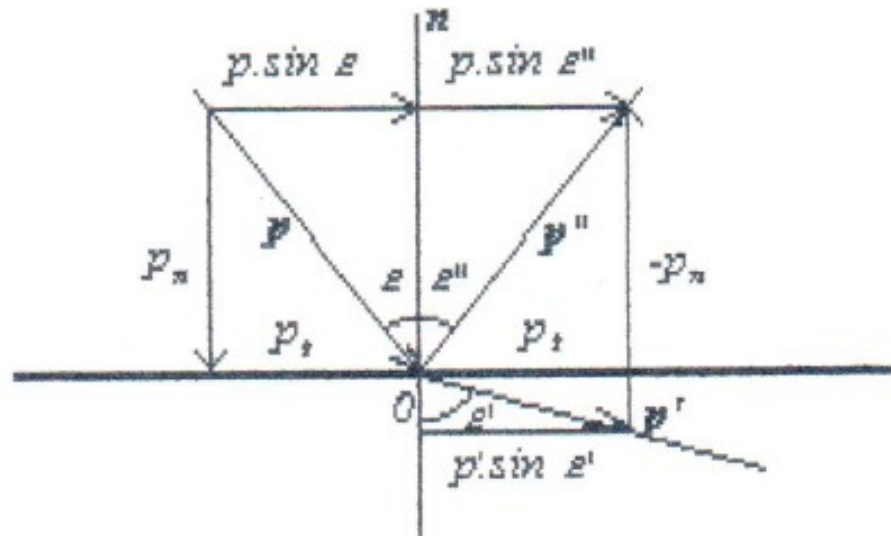
$$p_t = p \cdot \sin \varepsilon = p' \cdot \sin \varepsilon'$$

a platí

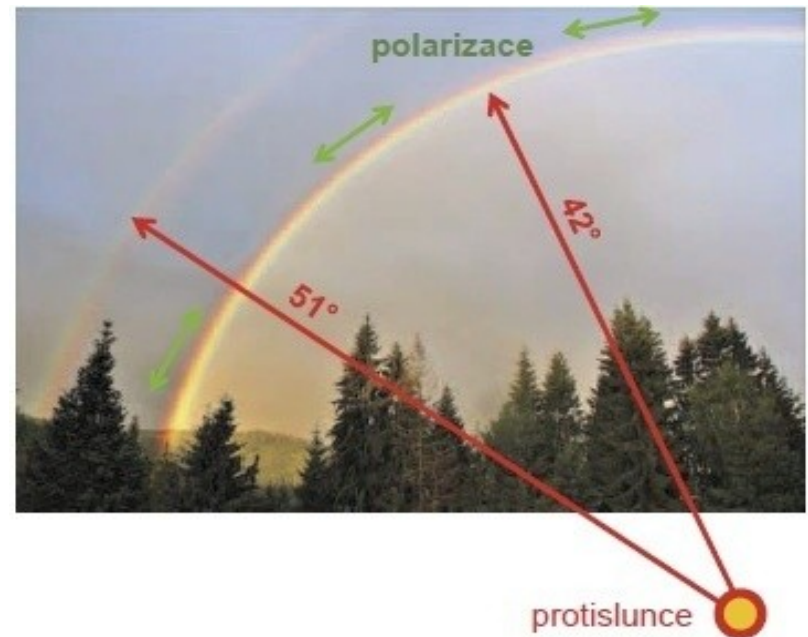
$$\sin \varepsilon / \sin \varepsilon' = p' / p = v' / v = \text{konst.}$$

Přitom jsme položili

$$p = mv, \quad p' = mv'$$



Jev - duha

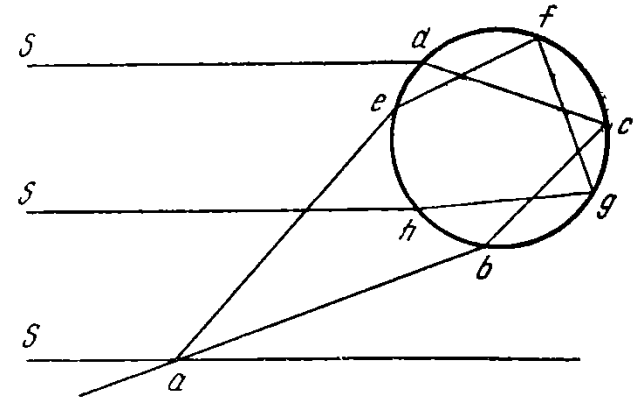


Obr. 1 Hlavní a vedlejší oblouk duhy mají poloměr 42° a 51° se středem v protislunci, místu opačném k aktuální poloze slunce na obloze. Všimněte si, že oba duhové oblouky jsou obráceny červeným koncem k sobě. Oboustranné zelené šipky ukazují převládající směr polarizace.

René Descartes

Dioptrika - výklad duhy

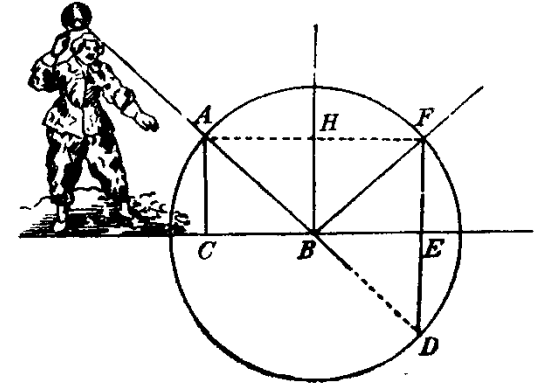
Descartes popsal experiment se skleněnou kulovou nádobou naplněnou vodou, zavěšenou tak, aby na ni dopadaly sluneční paprsky, postavil se zády ke Slunci a pohyboval kulovou nádobou nahoru a dolů, v spodní části objevil duhové barvy tehdy, jestliže přímka ab ve směru jeho pozorování svírala s přímkou sa úhel přibližně 42 stupňů



René Descartes

Dioptrika - výklad duhy, zákon odrazu a lomu světla

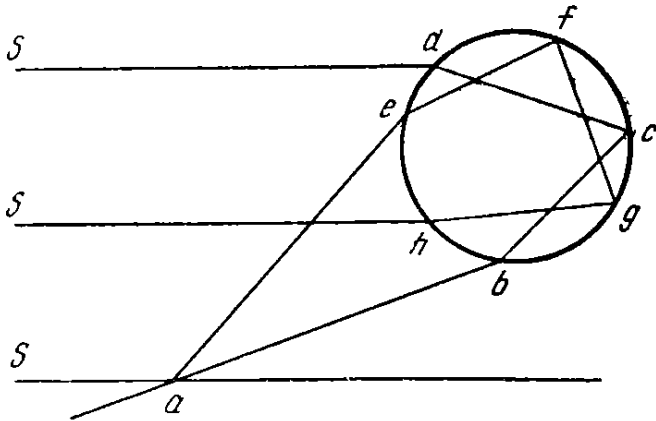
vycházel z mechanické představy o povaze světla, proto analogie mezi dopadem světla a dopadem kuličky na rozhraní dvou prostředí, šíření světla – šíření tlaku částic, které se předává okamžitě, tedy předpokládal nekonečnou rychlost světla -....jev duhy



René Descartes

Dioptrika - výklad duhy

ty stejné barvy, ale slabší a v opačném pořadí objevil v horní části kulové nádoby tehdy, jestliže přímky ac a sa svíraly úhel 52 stupňů, postupným zakrýváním míst, kde předpokládal chod světelných paprsků zjistil, že v prvním případě procházely paprsky drahou $sdcba$ a v druhém $shgea$. Pochopil, že **primární duha** vzniká v důsledku dvojnásobného lomu a jednom odrazu a **sekundární duha** při dvojnásobném lomu a dvojnásobném odrazu.



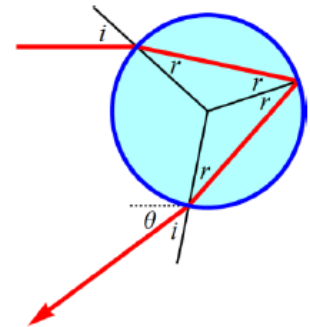
RENATUS DESCARTES NOBIL. GALL. PRISONI DUC. PRIMUS MATHEM. ET PHILOS.
SALUS ET VITA MORTUORUM FELICITATEM ALLEGORICIS FIGURIS MUSEO CONFES.
DUM. HANC IN. HANC REFLEXA PUNCTI PER. HANC. HANC. HANC. HANC. HANC. HANC.

René Descartes

Dioptrika – výklad duhy, podstata barev

Descartes si představoval si, že část vodních kapek má tvar hranolu, o kterém již bylo známo, že má schopnost převracet bílé světla v různobarevné spektrum, odlišné rozložení těchto hranolků vzhledem k oku pozorovatele je příčinou toho, že ve dvou obloucích duhy se barvy nacházejí v opačném pořadí, **nevyložil však, jakým způsobem hranol tvoří barvy**, při stupu do kapky platí zákon lomu, index lomu vody $\frac{4}{3}$

$$\sin i = \frac{4}{3} \sin r, \quad \text{při výstupu z kapky} \quad \frac{4}{3} \sin r = \sin i,$$



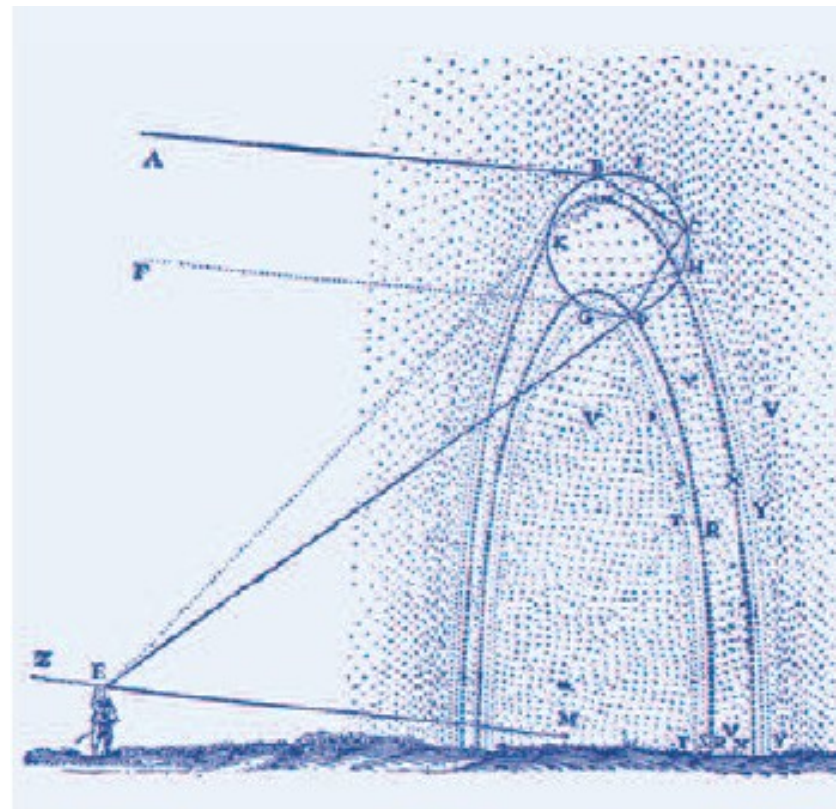
s výzkumem duhy souvisí **podstata barev**, Descartes uvedl:

„...podstata barev...tkví jen v tom, že tyto malé částice se neotáčejí tak rychle, jak je jim to vlastní, pokud neexistuje zvláštní příčina, která by jim v tom překážela, takže zelená barva vzniká tam, kde se neotáčejí příliš pomalu, a modrá tam, kde se otáčejí pomaleji...“

René Descartes

výklad duhy

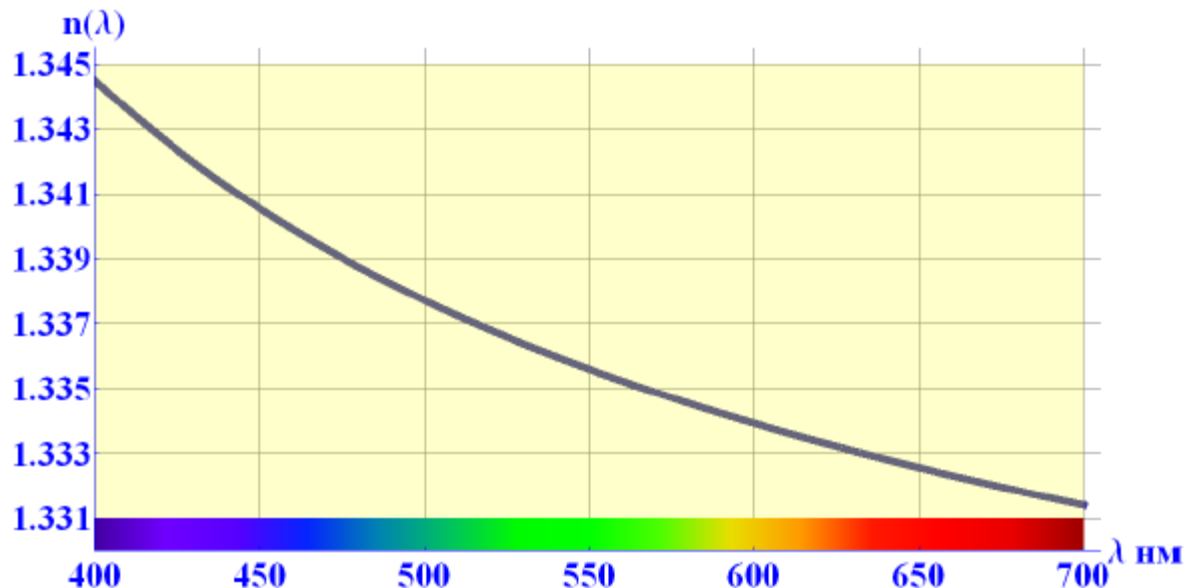
při každém odrazu se značná část světla ztrácí, z toho plyne, že sekundární oblouk je mnohem slabší než primární oblouk, paprsky, které se odrážejí nebo pouze lámou, ke vzniku duhy nepřispívají, Descartes 1637 vyložil poprvé kvantitativně vlastnosti duhy z hlediska geometrické optiky,



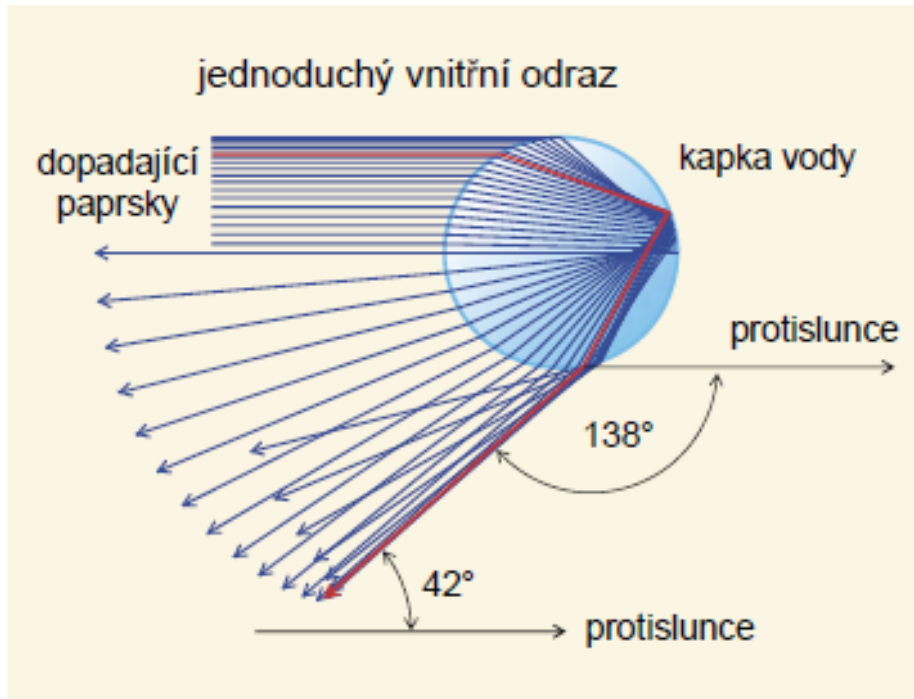
Obr. 5 Ilustrace z Descartovy knihy *Rozpravy o metodě* z roku 1637, ve spise *Dioptrika*, který byl součástí prvního vydání knihy, Descartes vysvětluje duhu..

Descartes - duha

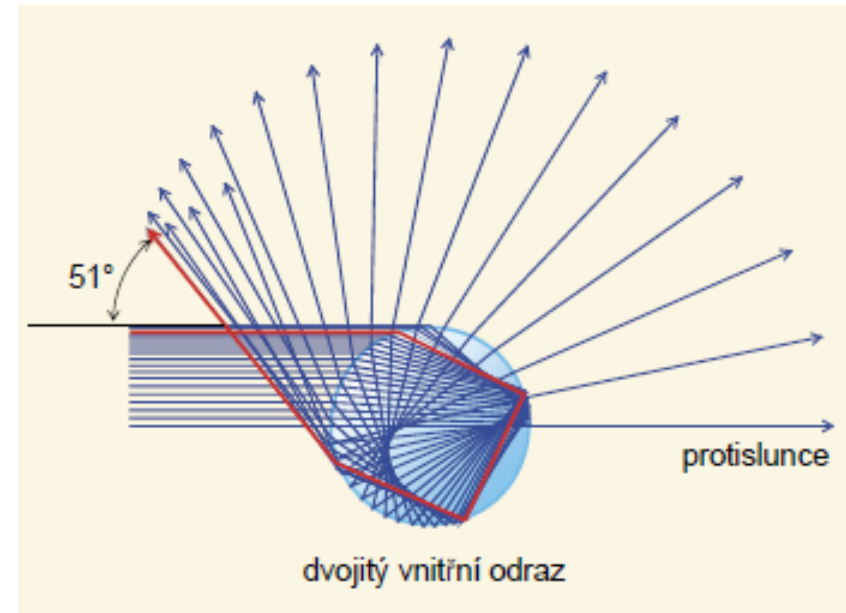
při každém odrazu se značná část světla ztrácí, z toho plyne, že sekundární oblouk je mnohem slabší než primární oblouk, paprsky, které se odrážejí nebo pouze lámou, ke vzniku duhy nepřispívají, Descartes 1637 vyložil poprvé kvantitativně vlastnost, výpočty pro $n = 1,3368$, což odpovídá *zelené části spektra, jeho duha tak tenká zelená...*



Výklad – duha v současnosti



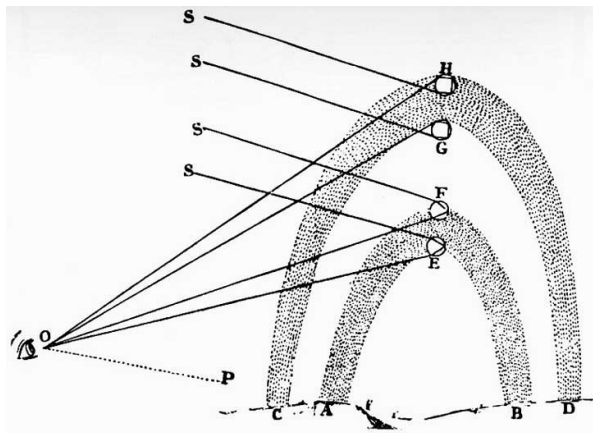
Obr. 2 Geometrický chod paprsků kapkou vody po jednom vnitřním odrazu a dvou lomech, vystupující paprsky tvoří kaustiku v místě vzdáleném 42° od protislunce, to je hlavní oblouk duhy. Červený paprsek značí tzv. *duhový paprsek*, který dopadá na povrch kapky pod úhlem 59° , má nejmenší deviaci a tvoří hranu hlavního oblouku duhy. Pro přehlednost je zobrazen pouze svazek paprsků dopadajících na horní polovinu kapky.



Obr. 3 Geometrický chod paprsků kapkou vody po dvou vnitřních odrazech a dvou lomech. Paprsky tvoří kaustiku v místě vzdáleném 51° od protislunce, to je vedlejší oblouk duhy. Červený paprsek opět tvoří hranu vedlejšího oblouku duhy. Pro přehlednost je opět zobrazen jen svazek paprsků dopadajících na horní polovinu kapky. Všimněte si, že do směrů mezi úhly 42° (viz obr. 2) a 51° se žádné paprsky nerozptýlí, a proto se zde pozoruje Alexandrův temný pás (viz také obr. 4).

Isaac Newton - duha

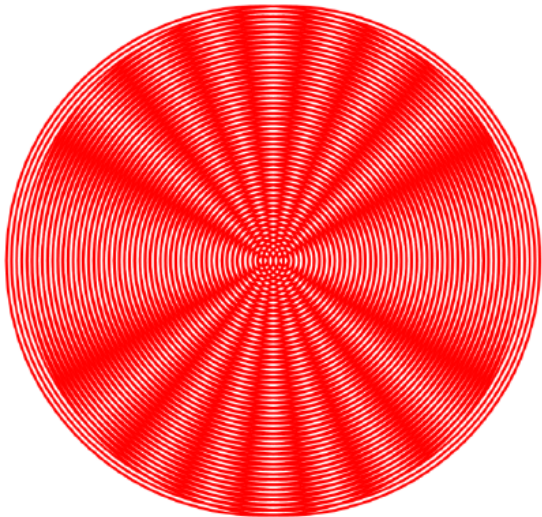
	цвет	угловой радиус	угловая ширина
первая дуга	фиолетовый	40°16'	1°46'
	красный	42°02'	
вторая дуга	красный	50°59'	3°11'
	фиолетовый	54°10'	



Ovšem vznik barev a jejich pořadí v duze správně vysvětlil až Isaac Newton roku 1670. Roku 1666 objevil disperzi, tj. závislost indexu lomu prostředí na barvě (vlnové délce) světla. Newton nejprve změřil index lomu vody červeného a fialového světla a pomocí těchto výsledků předpověděl, že poloměr červeného oblouku má být $137^{\circ}58'$, zatímco poloměr fialového oblouku má být $139^{\circ}43'$. Z toho je zřejmé, že červený oblouk primární (hlavní) duhy $42^{\circ}2'$ bude větší než fialový oblouk $40^{\circ}17'$, čímž je podle Newtona dáno pořadí barev hlavního oblouku duhy. Šířka primárního oblouku by tedy měla být $1^{\circ}45'$, protože však sluneční paprsky nejsou rovnoběžné, ale mají divergenci $30'$, která je dána úhlovým průměrem slunečního kotouče, dostal Newton pro šířku duhy odhad $2^{\circ}15'$, což bylo v dobrém souladu s jeho vlastním pozorováním duhy.

Thomas Young 1773 - 1829

Descartes a Newton nezkoumali jeden podstatný prvek jevu, **duhy vyšších řádů**, prostá geometrická optika tento jev přehlížela **Thomas Young** vyložil podružné duhové oblouky r. 1804, paprsky blízké duhovému, tj. paprsku tvořícímu hranu duhy, procházejí vždy po párech, které mají mírně odlišné optické dráhy, proto interferují někdy se zesilují a jindy zeslabují, dráhové rozdíly paprsků závisejí na rozměru kapky, jemná struktura duhy bude závislá na velikosti kapek
později **George Biddell Airy** r. 1838 vyložil, jak se zmenšováním kapek roste šířka duhy a klesá její barevná sytost, výklad vyšších řádů duhy



Francesco Maria Grimaldi 1618 - 1663

italský matematik, fyzik, optik, astronom,
působil v Boloni, na základě analýzy
experimentů formuloval první zákonitosti



spis *Fyzikálně-matematický traktát o světla, barvách a duze r. 1665*

optický spis, objev *difrakce* - latinské slovo *dis* (opak, negace) + *frangere* (lámat), první experimenty s průchodem světla přes malý otvor, přičemž do získaného světelného kuželu umístil tenký drát, objevil dva jevy:

1. Rozšíření stínu v porovnání se stínem, který by měl vzniknout podle zákonů geometrické optiky.
2. Na obě strany od centrálního stínu ležely tři barevné pásy (modré blížeji ke stínu a červené vzdáleněji).

Z experimentu Grimaldi učinil závěr, že světlo se šíří nejen přímočaře, ale také se může **odklánět - ohýbat na překážkách**.

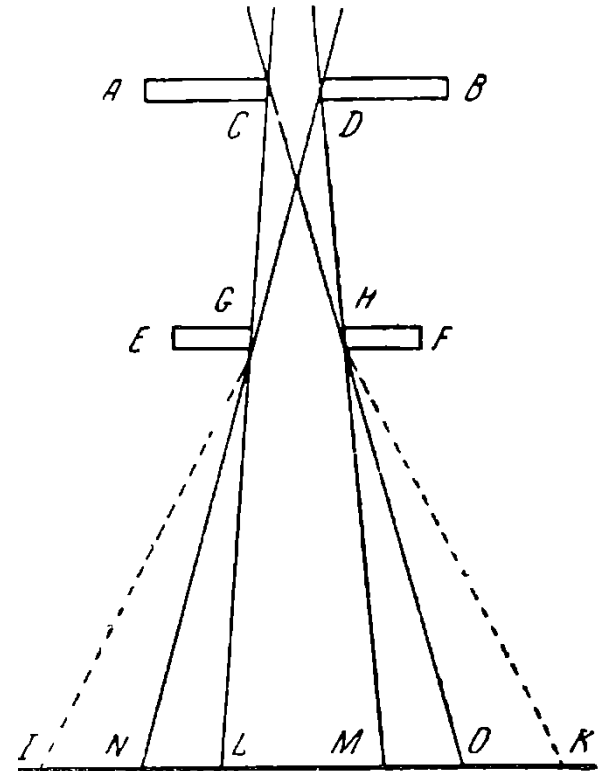
Francesco Maria Grimaldi

Grimaldi uvedl: „*Podobně jako okolo kamene hozeného do vody vznikají od středu kruhové vyvýšeniny vody, přesně tak okolo stínu neprůhledného předmětu vznikají lesklé pásy, které podle tvaru předmětu buď se šíří v délce, nebo se ohýbají za současného vzniku duhy.*

V dalším experimentu sledoval difrakci na štěrbině, přerušovanou čarou jsou zakreslené paprsky osvětlující stínidlo v oblasti geometrického stínu.

Některé jeho názory byly protikladné, nedokázal vyjádřit podstatu jevů.

Vyslovil hypotézu o původu barev světla v důsledku různé rychlosti kmitání látky. Nelze ho považovat za zakladatele vlnové teorie světla.



Robert Hooke 1635 - 1703

r. 1665 vydal Hooke spis *Micrographia*, vedle mikroskopu a jeho použití je v něm podrobně popsán vznik barev na tenkých vrstvách, navazoval na spis *Experimenty a úvahy týkající se barev* irského chemika, fyziky, filozofa **Roberta Boyla 1627 - 1691**, v němž se hovořilo o zabarvení předmětů závisících na absorpční schopnosti těchto povrchů, ve stejném období r. 1669 dánský vědec **Erasmus Bartholinus 1625 - 1698**

publikoval spis *Pokusy s krystaly islandského vápence, které odhalují podivný a nezvyklý lom světla*

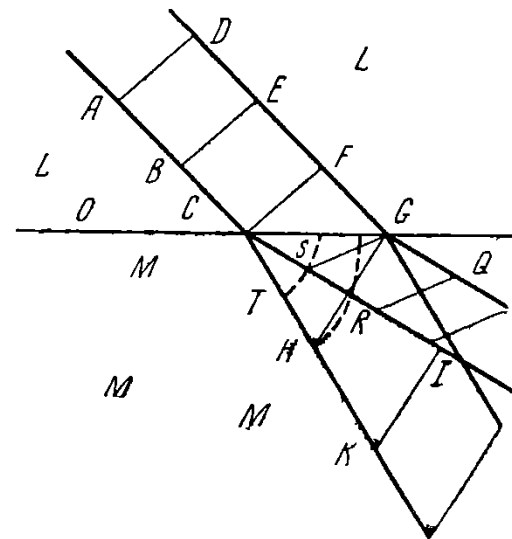
v kterém je popisován jev, rozdělení paprsku, pro jeden z nich určil Bartholinus index lomu $5/3$, pro druhý se mu nepodařilo stanovit index lomu, objevil existenci optické osy islandského vápence, směr, podél něhož se paprskem nerozdvojuje



Robert Hooke

Micrographia - tři optická pozorování, zkoumání dvou problémů - povahu světla a příčinu vzniku barev v tenkých vrstvách, což spolu souvisí, podle Hookea je světlo velmi rychlý kmitavý pohyb, odmítl Descartovu představu rotačního pohybu částic...

Hooke: „*Proto předpokládáme, že obrázek ACFD představuje fyzikální paprsek, a ABC a DEF - matematické paprsky, kterou jsou vedené ze vzdáleného bodu svítícího tělesa přes homogenní průzračné prostředí LLL; DA, EB a FC jsou malé části zaokrouhleného impulzu, které proto musí protínat paprsky pod pravým úhlem. Tyto paprsky se střetávají s rovinným povrchem prostředí OG, v kterém lépe propouští světlo a při šikmém dopadu na něho, bude se v prostředí MMM lámat ke kolmici k povrchu.*“



Robert Hooke - Isaac Newton

tradiční pohled na světlo vyjádřil **Hooke** slovy: „*světlo je jednoduchý a rovnoměrný pohyb, nebo chvění homogenní a susceptibilní (tj. vnímavé) substance, která se okamžitě šíří ve formě sférické vlny na libovolnou pomyslnou vzdálenost od svítícího tělesa...*“

Dále se obrátil na Newtona: „*Myslím, že pro pana Newtona nebude příliš obtížné dát vysvětlení všech jevů – nejen barevného odrazu, poskytovaného hranolem a barvy kapalných a pevných látek, ale i zabarvení tenkých vrstviček, což se jeví nejobtížnější problém.*“

Newton: „*Sehnal jsem trojúhelníkový skleněný hranol, abych s ním prováděl pokusy s jedinečným zjevem barev. Za tímto účelem, po zatemnění mého pokoje a...tímto způsobem byla objevena skutečná příčina délky obrazu, která spočívala v tom, že se světlo skládá z paprsků s odlišnou refrakcí, které nezávisle na rozdílnosti jejich dopadu procházejí k různým částem stěny v souladu s jejich stupněm refrakce.*“

Newton: Optika, tři knihy o odrazu, lomu a ohybu světla v barvách

Isaac Newton 1643 - 1727

spis *Nová teorie světla a barev* r. 1675 a jeho závěry:

1. Světelné paprsky se navzájem liší schopností projevovat tu nebo jinou zvláštní barvu, podobně jako se odlišují stupněm lámavosti.

2. K určitému stupni lámavosti patří jedna a ta stejná barva a naopak

3. Pokud se mi podařilo zjistit, barva a stupeň lámavosti jsou vlastní jakémukoliv druhu paprsků a nemohou se změnit ani lomem ani jiným žádným způsobem.

4. Změny barev mohou zdánlivě vznikat, jestliže máme libovolnou směs paprsků různých druhů

5. Proto musíme rozlišovat dva druhy barev: jedny jsou prvotní, jednoduché a druhé, které jsou z nich složené

6. Přesně takové stejné barvy, jako jsou barvy jednoduché, se mohou získat míšením

7. Nejpodivnější a nejnádhernější směsí barev je bílá barva

8. V tom je příčina toho, proč má světlo obyčejně bílou barvu; neboť světlo je složitou směsí paprsků všech druhů a barev vysílaných různými částmi svítících těles. “

Isaac Newton

- *Optika r. 1704*

- Newton dospěl k závěru, že **bílé světlo**, které bylo před ním považováno za čistou a stejnorodou substanci, představuje ve skutečnosti **směs paprsků různých barev**.

Uváděl:...,*nejvíce ohromující a zázračná je směs, dávající bělost. Neexistuje ani jeden druh paprsku, který by v jednotlivosti ji mohl vyvolat... Často jsem s nadšením pozoroval, jak všechny barvy hranolu, když jsem je nechával se sbíhat a znovu se směřovat tak, jak byly ve světle dopadajícím na hranol, reprodukovaly úplné a dokonale bílé světlo, vůbec se nelišící od přímého slunečního světla...*“



Isaac Newton

spis **Optika** začíná konstatováním: „*mojí snahou v této knize není vysvětlovat vlastnosti světla hypotézami, ale je objasnit a dokázat pomocí úvah a experimentů. Proto uvedeme dopředu tyto předpoklady a axiomy.*“ Následovalo osm definic a osm axiomů, pomocí kterých byly formulované teoremy (úlohy), příklady:

„*Postulát I. Teorém I.*

Paprsky, které se liší barvou, liší se i stupněm lámavosti.“

„*Postulát IV. Teorém III.*

Pomocí skládání paprsků můžeme získávat barvy zdánlivě podobné barvám homogenního světla, ale ne pokud jde o neměnitelnost barev a stavbu světla.“

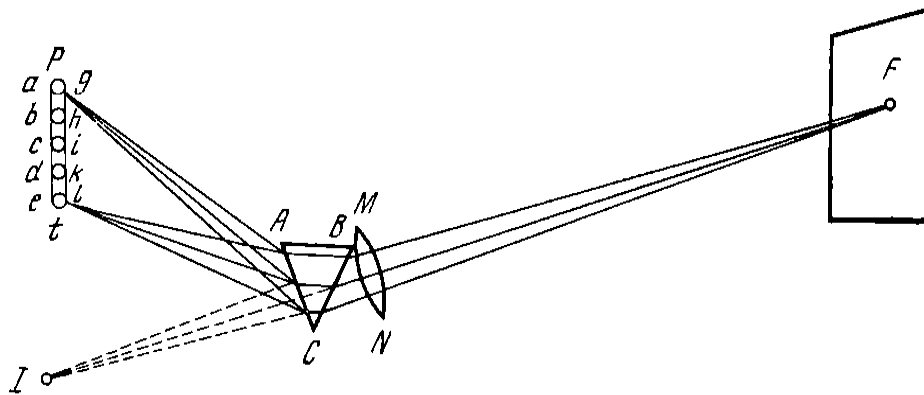
„*Postulát V. Teorém IV.*

Homogenní světlo se láme správně, bez jakéhokoliv rozšiřování, rozštěpování anebo rozptylování paprsků a nejasný obraz předmětů pozorovaných přes lámající látky za pomoci nehomogenního světla vzniká díky různé lámavosti různých druhů paprsků“

Isaac Newton

ze spisu *Optika* uvádíme experiment, kdy Newton *získal čisté barvy z bílého světla*, jehož zdrojem byl kruhový otvor F . V nepřítomnosti hranolu ABC by čočka MN vytvářela obraz otvoru I . Po umístění hranolu ABC hned za čočkou se obraz posunul a roztáhl na úsečku pt .

Použitím různých druhů čoček a hranolů Newton dosáhl toho, že délka obrazu pt byla v poměru k jeho šířce jako $72 : 1$. Z uvedeného vytvořil závěr, že světlo získaného obrazu je 71 krát méně smíšené jako sluneční světlo. Newtonovo zařízení obsahuje základní prvky přístrojů, v kterých se na získávání spekter používají hranoly - hranolový spektrograf.



Lom světla vyložil tak, že částice je do hustšího prostředí více přitahována, tedy i urychlena. Vzhledem k charakteristické vlastnosti světla - přímočarosti, Newton se přiklonil k **teorii korpuskulární.**

Leonhard Euler 1707 - 1783

spis *Nová teorie světla a barev* r. 1746, proti korpuskulární teorii světla, *světlo je podélné kmitání pružného éteru*, použil matematickou teorii šíření rozruchů v pružném prostředí, analytickou metodu, matematický aparát elementární vlnové optiky, což umožnilo řešení jednoduchých interferenčních úloh,

spis *Pokusy fyzikálního vysvětlení barev na nezvyklých tenkých površích* r. 1752 zkoumal jevy spojené s interferencí světla na tenkých vrstvách, mylně ji vysvětloval rezonancí částic éteru, která měla vznikat v úzké mezeře mezi skly při pokusech s Newtonovými kroužky, *barvy objasňoval prostřednictvím rezonance*

spis *Listy jedné německé princezně o některých otázkách fyziky a filozofie* r. 1768-72 obsahovaly námitky proti korpuskulární teorii světla, „*každá jednoduchá barva souvisí s určitým počtem kmitů vykonaných za určitý čas*“, vyslovil předpoklad, že **červené světlo** odpovídá delším vlnovým délkám a **fialové světlo** kratším vlnovým délkám

Thomas Young 1773 - 1829

angličan širokých zájmů, lékař, znalec mnoho jazyků, egyptolog, fyzik, *poslední muž, který věděl a uměl všechno*...zkoumal světlo → referáty před Královskou společností 1801-1803, výsledky experimentálních a teoretických výzkumů, později spis *Přednáškový kurs přírodní filozofie a mechaniky r.1807*

II. *The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colours.*
By Thomas Young, M. D. F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the Royal Institution.

Read November 12, 1801.

ALTHOUGH the invention of plausible hypotheses, independent of any connection with experimental observations, can be of very little use in the promotion of natural knowledge; yet the discovery of simple and uniform principles, by which a great number of apparently heterogeneous phenomena are reduced to coherent and universal laws, must ever be allowed to be of considerable importance towards the improvement of the human intellect.

A
COURSE OF LECTURES
ON
NATURAL PHILOSOPHY
AND THE
MECHANICAL ARTS.

BY THOMAS YOUNG, M.D.

FOR. SEC. R. S. F. L. S. MEMBER OF EMMANUEL COLLEGE, CAMBRIDGE,
AND LATE PROFESSOR OF NATURAL PHILOSOPHY IN THE
ROYAL INSTITUTION OF GREAT BRITAIN.

IN TWO VOLUMES.

VOLUME II.

LONDON:

PRINTED FOR JOSEPH JOHNSON, ST. PAUL'S CHURCH YARD,
BY WILLIAM SAVAGE, BEDFORD BURY.

1807.

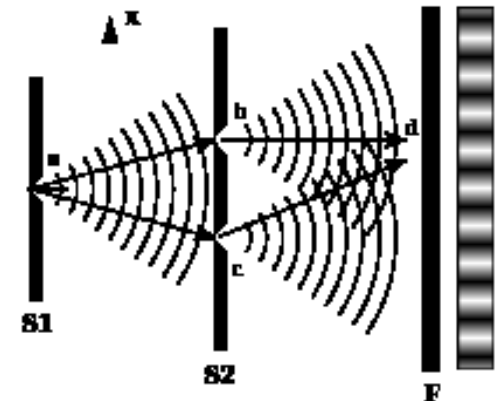
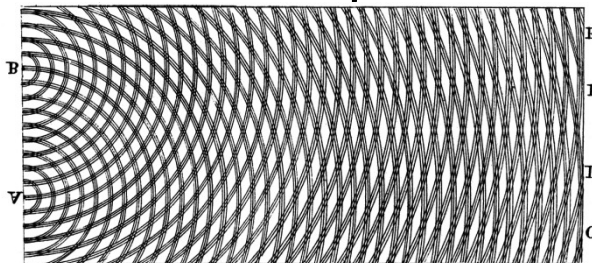
Thomas Young

formuloval **princip interference r. 1803**, vycházel z podobnosti akustických a optických jevů, „*k podobným jevům dochází, kdykoliv se směšují dva podíly světla; a to je co nazývám všeobecným zákonem interference světla.*“, hypotéza - světlo představuje podélné pravidelné vlnění.

Přednáškový kurs přírodní filozofie a mechaniky r. 1807 :

„K tomu, aby se mohly účinky dvou světelných paprsků skládat, je nevyhnutelné, aby vycházely z jednoho zdroje a aby přicházely do jednoho bodu různými drahami, co se týká směru, které se navzájem příliš neliší. Tento rozdíl v drahách můžeme získat pomocí difrakce, odrazu, lomu anebo pomocí libovolné kombinace těchto jevů.“

Vycházel z experimentu difrakce světla na dvou štěrbinách – r. 1802, vznik interference předpokládal dva koherentní zdroje.



Thomas Young

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

I. *The Bakerian Lecture. Experiments and Calculations relative to physical Optics.* By Thomas Young, M. D. F. R. S.

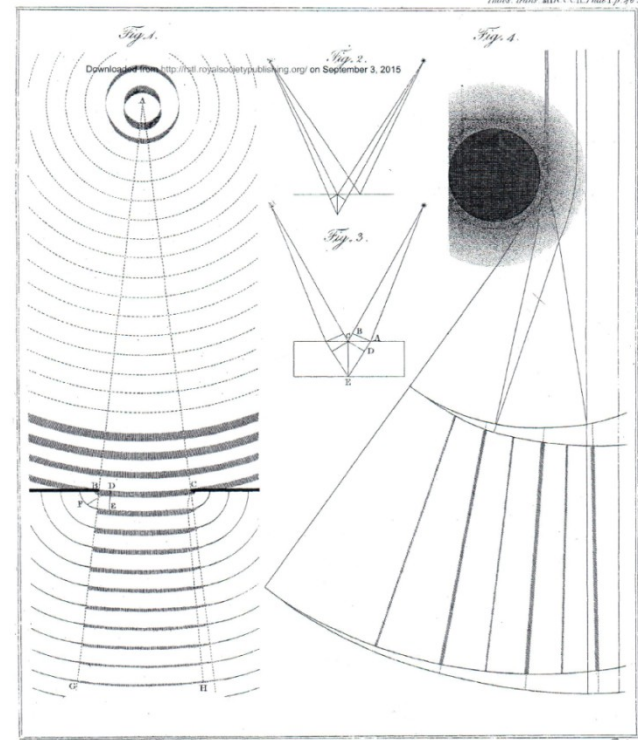
Read November 24, 1803.

I. EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF THE GENERAL LAW OF THE INTERFERENCE OF LIGHT.

IN making some experiments on the fringes of colours accompanying shadows, I have found so simple and so demonstrative a proof of the general law of the interference of two portions of light, which I have already endeavoured to establish, that I think it right to lay before the Royal Society, a short statement of the facts which appear to me so decisive. The proposition on which I mean to insist at present, is simply this, that fringes of colours are produced by the interference of two portions of light; and I think it will not be denied by the most prejudiced, that the assertion is proved by the experiments I am about to relate, which may be repeated with great ease, whenever

MDCCCIV.

B



Thomas Young

z popsaného experimentu na dvou štěrbinách jako první vypočítal **přesné hodnoty vlnových délky různých barev** v optickém spektru

z **principu interference** odvodil řadu důsledků (zhušťování kruhů v Newtonově experimentu, zmenšování rychlosti světla v opticky hustším prostředí)

zavedl termín **fyzikální optika** - zdroje světla, rychlost jeho šíření, rozklad světla, vliv hustoty prostředí na šíření světla ...

studoval pružnost materiálů, jejich odolnost vůči nárazu, zkoumal lomovou mechaniku, viz **Youngův modul pružnosti**

přestože se opíral o experimenty, jeho krédem bylo: „*vyhnout se nutnosti experimentovat, zvláště jsou-li nákladné...bystrý nápad byl spíše cílem mé ctížádosti než experimentální ilustrace...*“

Augustin Jean Fresnel 1788 - 1827

francouzský stavební inženýr, první práce se týkaly ohybových a chromatických jevů při průchodu světla kolem tenkého drátku, výklad vycházel z Huygensova principu a principu interference světla, který sám nezávisle objevil 1815, psal články, korespondoval s Youngem: „*Mně se zdá, že to, co jste mi přenechal k dořešení v různých partiích optiky, bylo stejně obtížné jako to, co jste již vytvořil. Posbíral jste květy a já pak pracně obnažoval kořeny.*“

rozvoj vlnové teorie světla vycházel z předpokladu, že světelné vlny postupující éterem jsou **příčné vlnění**, Fresnelův mechanický model světla, rychlost šíření vlnění v prostředí závisí na vlnové délce, při jejím zadání je tím menší, čím více lámající je prostředí

Fresnel: „*Teorie světelných kmitů má takové vlastnosti a požadované cenné přednosti. Díky této teorii se nám podařilo objevit nejsložitější zákony optiky, předpovědět které bylo velmi obtížné.*“

Výsledky optických výzkumů shrnul do spisu ***Pojednání o difrakci světla r.1819***

Augustin Jean Fresnel

spis *Pojednání o difrakci světla r. 1819*

MÉMOIRE

SUR

LA DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE;

PAR M. A. FRESNEL.*

INTRODUCTION.

AVANT de m'occuper spécialement des phénomènes nombreux et variés compris sous la dénomination commune de *diffraction*, je crois devoir présenter quelques considérations générales sur les deux systèmes qui ont partagé jusqu'à présent les savans relativement à la nature de la lumière. Newton a supposé que les molécules lumineuses lancées des corps qui nous éclairent arrivent directement jusqu'à nos yeux, où elles produisent par leur choc la sensation de la vision. Descartes, Hook, Huygens, Euler, ont pensé que

* En publiant ce Mémoire, qui a été couronné par l'Académie en 1819, on a fait quelques changemens à la rédaction du manuscrit déposé à l'Institut le 29 juillet 1818, mais sans apporter aucune modification à la théorie et aux expériences qu'il contient. Desirant y ajouter quelques expériences nouvelles et quelques développemens théoriques, on les a placés dans des notes à la suite du Mémoire.

DE LA LUMIÈRE.

61

variations seront surtout sensibles dans le voisinage des rayons tangents.

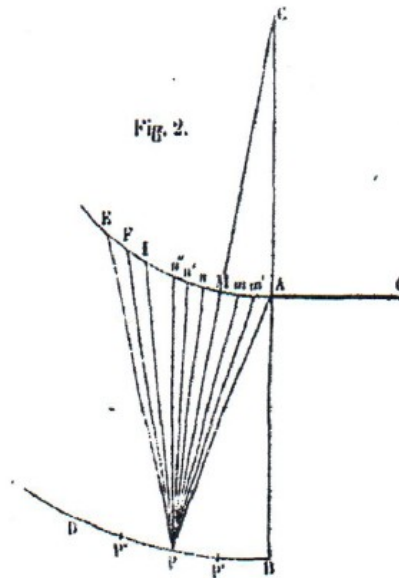
Soit C le point lumineux, AG l'écran, AME l'onde arrivée en A et

interceptée en partie par le corps opaque. Je la suppose divisée en une infinité de petits arcs Am' , $m'm$, mM , Ma , na' , $n'n''$, etc. Pour avoir son intensité au point P, dans l'une quelconque de ses positions suivantes BPD, il faut chercher la résultante de toutes les ondes élémentaires que chacune de ces portions de l'onde primitive y enverrait en agissant isolément.

L'impulsion qui a été communiquée à toutes les parties de l'onde primitive étant dirigée suivant la normale, les mouvements qu'elles

tendent à imprimer à l'éther doivent être plus intenses dans cette direction que dans toute autre; et les rayons qui en émaneraient, si elles agissaient isolément, seraient d'autant plus faibles qu'ils s'écarteraient davantage de cette direction.

Fig. 2.

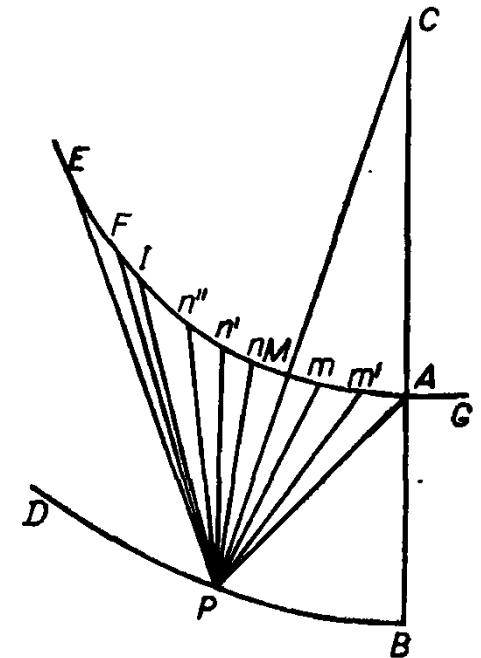


Augustin Jean Fresnel

Pojednání o difrakci světla r. 1819

„Nechť C je světelný bod, AG neprůzračné těleso, AME vlna, která přišla do A a částečně je zadržována tělesem. Předpokládám, že se rozděluje na nekonečně mnoho malých oblouků Am' , $m'm$, nM , Mn , nn' , $n'n''$. Proto, abychom získali intenzitu světla v bodě P , v jakémkoliv z následujících poloh vlny BPD je nezbytné hledat výslednici všech elementárních vln, které tam byly poslány každou z částí prvopočáteční vlny, jestliže by tato část působili izolovaně.

Protože impuls, který byl udělen všem částem prvopočáteční vlny, měl směr normály, pak pohyb, který se tyto části snaží předat éteru, musí být více intenzivní v tom směru...“



Augustin Jean Fresnel

Huygensův-Frenelův princip: *„Kmity světelné vlny v každém z jejich bodů můžeme zkoumat jako součet elementárních pohybů, které byly zaslány v tomto okamžiku všemi působícími izolovanými částmi této vlny zkoumané v jakémkoliv ze svých předchozích poloh. “*

Výpočet difrakce dvěma metodami:

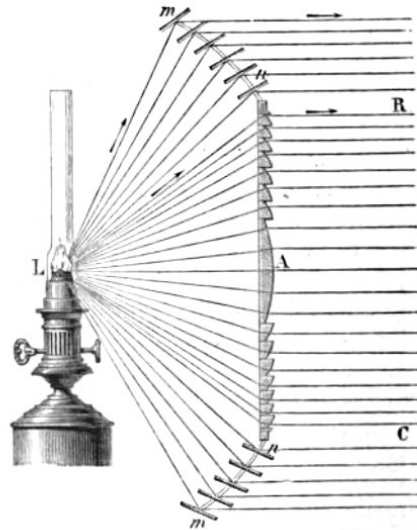
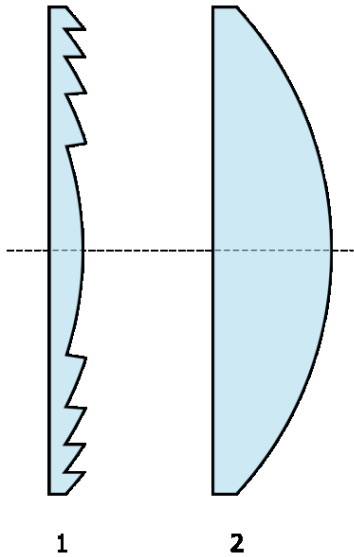
- a) Fresnelovy zóny - stanovení poloh difrakčních pásů (maxim, minim)
- b) Fresnelovy integrály - určení poloh pásů a intenzity světla

Další rozvoj „**budovy vlnové optiky**“ je spojován se jménem astronoma **Johna Fredericka Herschela 1791 - 1871**, konstrukce zrcadlových dalekohledů, pozorování, tvorba katalogů

...„i kdyby teorie interference nebyla pravdivou - zasloužila by si, aby pravdivou byla. “

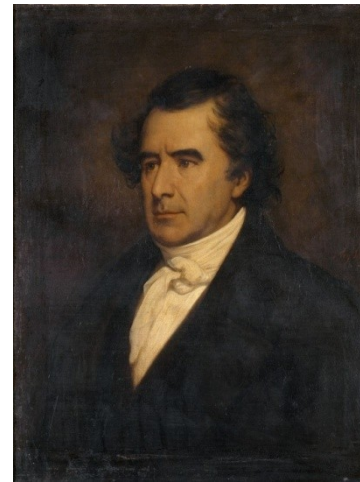
Augustin Jean Fresnel

dioptrická úprava čoček světelných majáků soustavou segmentizovaných čoček používaných dosud



Étienne-Louis Malus 1775 - 1812

francouzský inženýr, fyzik, matematik, zabýval se převážně světlem, objevil polarizaci světla odrazem r. 1809 a dvojlom světla v krystalech r. 1810, spis *Teorie dvojlomu světla v krystalických látkách*, zavedl pojem *polarizace světla*, formuloval *Malusův zákon o změně intenzity polarizovaného světla*, spolupracoval s dalšími

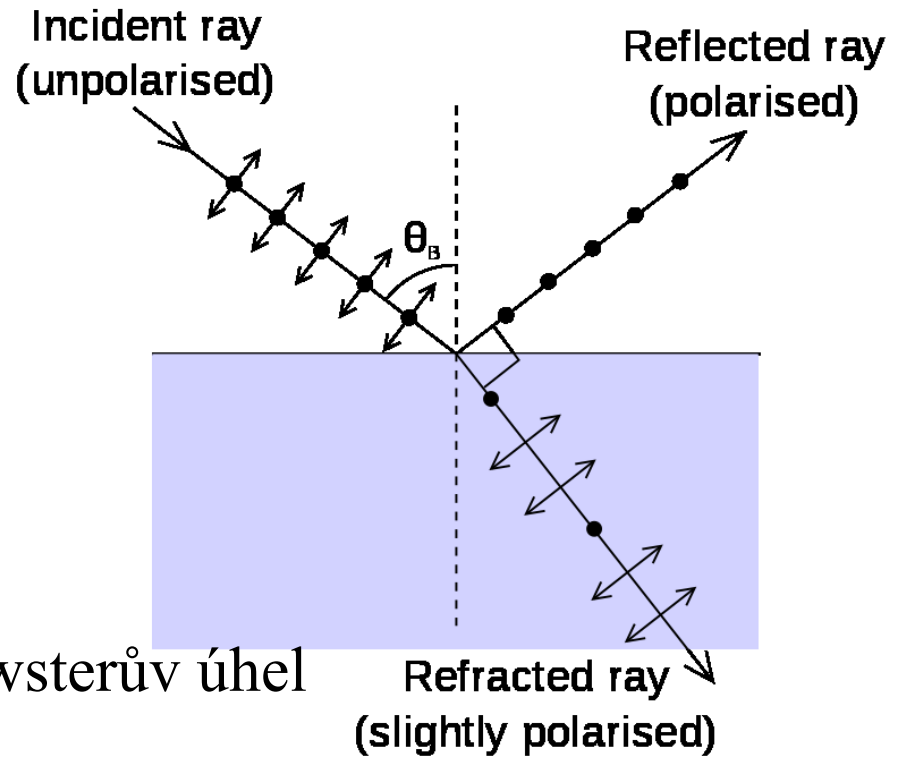


Francois Dominique Arago 1786 - 1853

francouzský fyzik, matematik, astronom, zabýval se elektřinou, optikou, zkoumal *polarizaci světla*, Měsíce, komet, potvrdil, že jde o odražené světlo

David Brewster 1781 - 1868

anglický fyzik, matematik, objevil r. 1811, že odražený paprsek je také částečně polarizován, později objevil **základní zákon**, že je plně polarizován, jestliže svírá s lomeným paprskem pravý úhel



BREWSTER'S LAW

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Study.com


Θ_B

Brewsterův úhel

George Biddell Airy 1801 - 1892

královský astronom, anglický matematik, fyzik, rozvíjel vlnovou optiku, difrakci

ON THE



UNDULATORY THEORY OF OPTICS,

Designed for the Use of Students in the University,

BY

GEORGE BIDDELL AIRY, M.A.

ASTRONOMER ROYAL,
FORMERLY FELLOW OF TRINITY COLLEGE, AND LATE PLUMIAN PROFESSOR OF
ASTRONOMY AND EXPERIMENTAL PHILOSOPHY IN THE
UNIVERSITY OF CAMBRIDGE.

A NEW EDITION.

London and Cambridge:
MACMILLAN AND CO.

1866.

XII. *On the Diffraction of an Object-glass with Circular Aperture.* By
GEORGE BIDDELL AIRY, A.M. late Fellow of Trinity College,
and Plumian Professor of Astronomy and Experimental Philosophy
in the University of Cambridge.

[Read Nov. 24, 1834.]

THE investigation of the form and brightness of the rings or rays surrounding the image of a star as seen in a good telescope, when a diaphragm bounded by a rectilinear contour is placed upon the object-glass, though sometimes tedious is never difficult. The expressions which it is necessary to integrate are always sines and cosines of multiples of the independent variable, and the only trouble consists in taking properly the limits of integration. Several cases of this problem have been completely worked out, and the result, in every instance, has been entirely in accordance with observation. These experiments, I need scarcely remark, have seldom been made except by those whose immediate object was to illustrate the undulatory theory of light. There is however a case of a somewhat different kind; which in practice recurs perpetually, and which in theory requires for its complete investigation the value of a more difficult integral; I mean the usual case of an object-glass with a circular aperture. The desire of submitting to mathematical investigation every optical phenomenon of frequent occurrence has induced me to procure the computation of the numerical values of the integral that presents itself in this inquiry; and I now beg leave to lay before the Society the calculated table, with a few remarks upon its application.

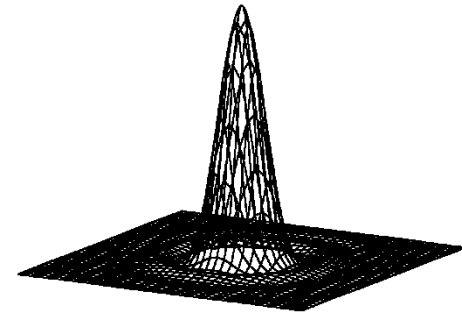
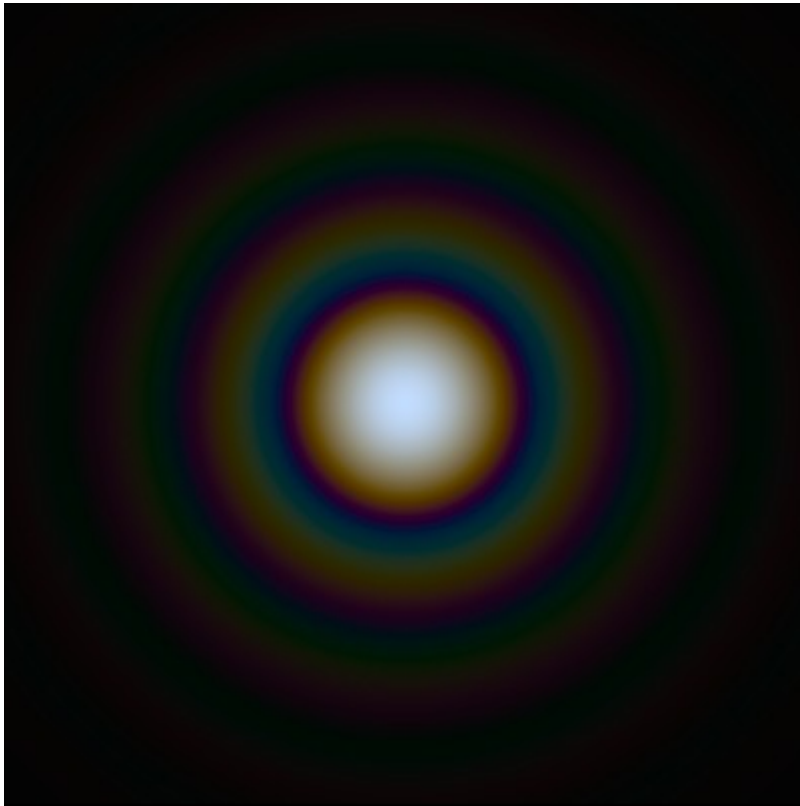
Let a be the radius of the aperture of the object-glass, f the focal length, b the lateral distance of a point (in the plane which is normal

VOL. V. PART III.

P F

George Biddell Airy

centrální skvrna při difrakci na kruhovém otvoru (dalekohledu) - Airyho skvrna

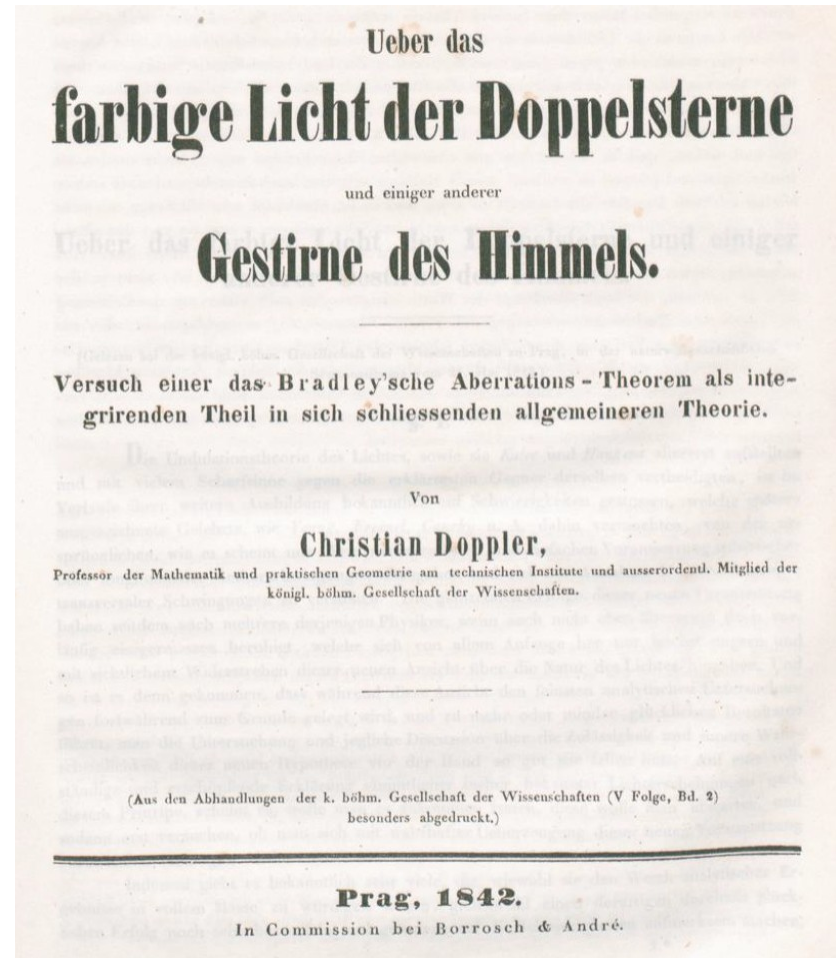


$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}.$$

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2$$

Christian Doppler 1803 - 1853

rakouský fyzik a matematik, působil v Praze, *životopis*,
spis *O barevném světle dvojhvězd r.1842*



Christian Doppler

Karolinum v Praze 25. května r. 1842, zasedání přírodovědné sekce České královské společnosti nauk, pojednání *O barevném světle dvojhvězd*, pět posluchačů, mezi nimi matematik *Bernard Bolzano 1781-1848*, který pochopil význam Dopplerova objevu, téhož roku článek v Pojednání královské české společnosti nauk, Dopplerův výklad obsahoval chyby:

1. přecenění velikosti radiálních rychlostí složek dvojhvězdy
2. nedocenění intenzity ultrafialové a infračervené části spektra
3. připsání hvězdám libovolnou vlastní barvu

Shrnuto neměl správné o spektrálním složení světla hvězd, o jejich hodnotách rychlosti.

V závěru článku prorocká slova: „*S přesvědčením očekávám, že jím (Dopplerovým principem) bude určována barva nebeských těles, otázka, zda se pohybují, kam a s jakou rychlostí, jaké vzdálenosti nás dělí jeden od druhého, stejně jako i rozřešení mnohých druhých otázek.*“

Christian Doppler

ve spisu *O barevném světle dvojhvězd* diskutoval, zda světlo je příčná vlna, s éterovými částicemi oscilujícími kolmo ke směru šíření, barva světla je projevem frekvence světelné vlny v oku pozorovatele, pro frekvenční posuv odvodil rovnice, nevycházející z žádného experimentu, v Dopplerově době neměl k dispozici tak rychle se pohybující zdroje světla či zvuku, proto jeho matematické spekulativní odvození vycházelo z dvojhvězd v astronomii tehdy již známých, domníval se, že přirozená barva hvězd je bílá a že při svém pohybu hvězd směrem k nám či od nás se posouvá celé jejich spektrum, barva složek dvojhvězdy by se tak měly periodicky měnit.

Matematicky zdůvodnil, proč se mění kmitočet záření, tedy barva světla, jestliže se zdroj záření pohybuje.

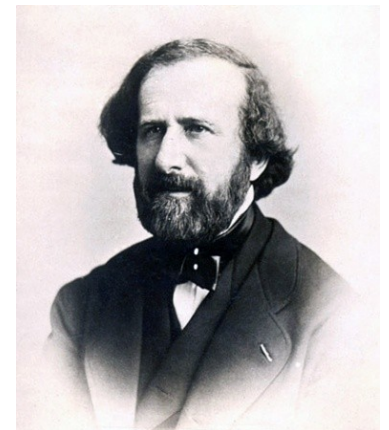
Doppler mlčky předpokládal, že rychlost světla nezávisí na rychlosti zdroje, tedy éter je nepohyblivý...

Armand Hyppolyte Fizeau 1819 - 1896

francouzský fyzik, astronom, přednáška *Akustika a optika r.1848*, věnovaná šíření vln v případě, že se zdroj a pozorovatel pohybují příklad zvukových vln, předpokládal, že pohybující se zdroj spojitě vysílá tón o konstantní frekvenci, přijatá frekvence bude rozdílná od vysílané, protože zvukové vlny se šíří jako kulové slupky ve všech směrech stejnou rychlostí, ale z různých středů, experimenty hudba – vlak, analogie mezi tóny a barvami, objasnění posuvu čar ve spektrech nebeských těles,

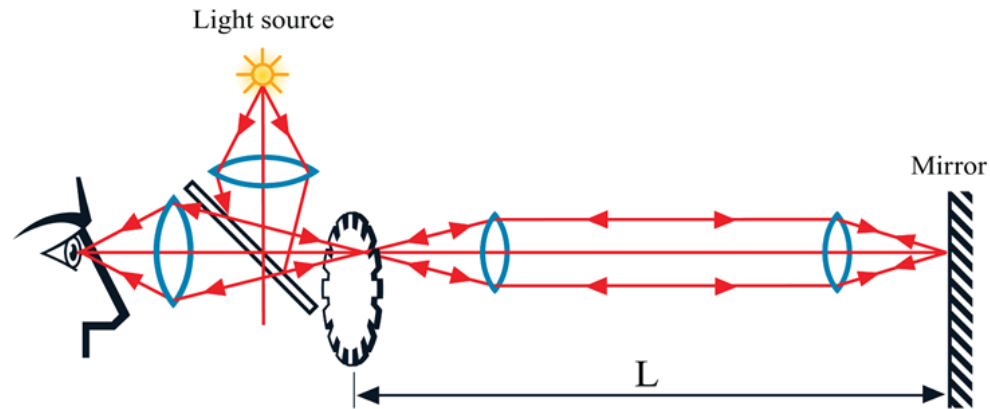
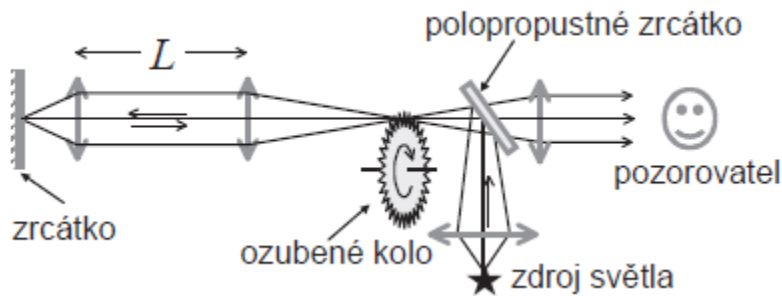
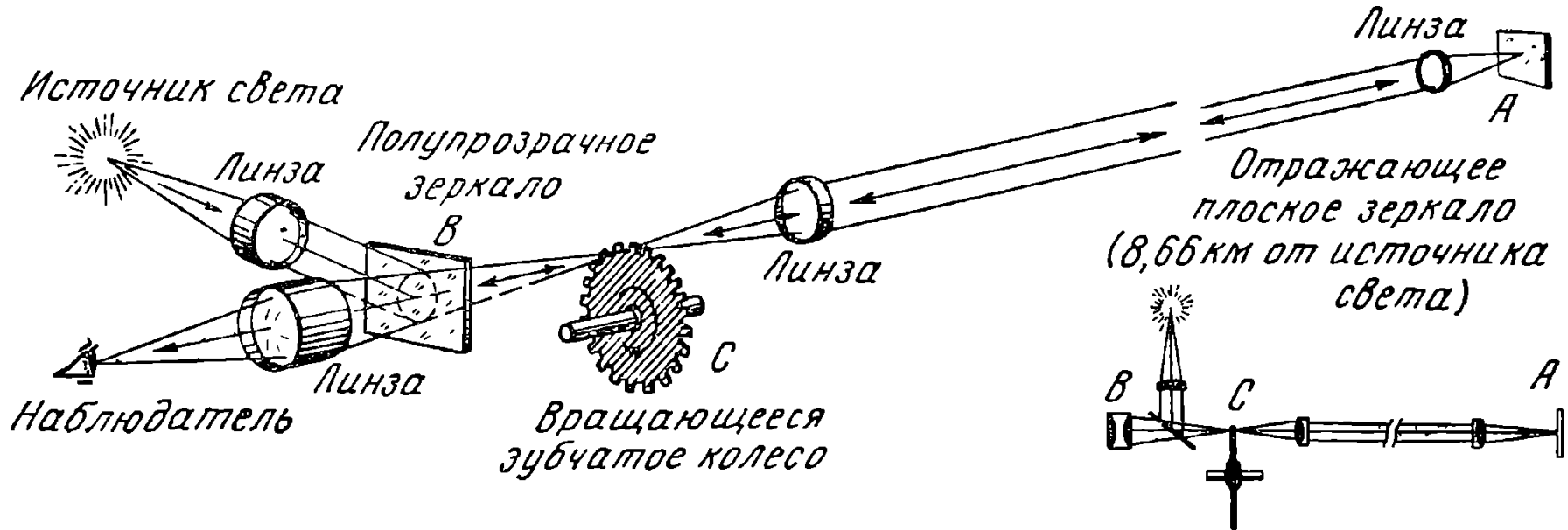
Fizeau šest let po Dopplerovi potvrdil, že **když se zdroj a pozorovatel přibližují, pozorovaná frekvence roste úměrně relativní rychlosti, a když se vzdalují, pozorovaná frekvence klesá**

experimenty na určení rychlosti světla



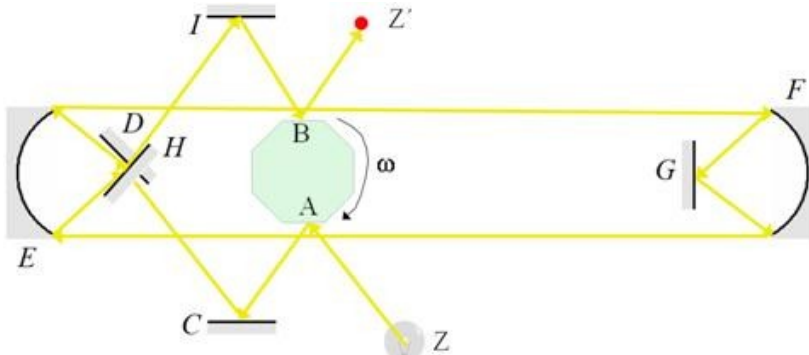
Armand Hippolyte Fizeau

První přímé měření rychlosti světla metodou rotujícího ozubeného kola,
 N zubů a N mezer, v experimentu $N = 720$, $f = 12,6$ Hz, $D = 8\,633$ m.



Albert Abraham Michelson 1852 - 1931

americký fyzik, měření rychlosti světla metodou rotujícího zrcadla, N. c. r. 1907 - přesné optické přístroje, spektroskopie a metrologie



Světlo ze zdroje Z se odráží od stěny A ocelového osmibokého hranolu. Pomocí [rovinných zrcadel](#) C a D je světelný paprsek přeměřován na duté zrcadlo E, odkud pokračuje ke vzdáleným zrcadlům F a G. Po odraze od těchto zrcadel se vrací zpět k zrcadlu E a pomocí rovinných zrcadel H a I je veden znovu na rotující hranol. Po odraze od stěny B už vzniká obraz Z' zdroje Z. Kdyby byl hranol v klidu, byla by stěna B protilehlá ke stěně A. Jestli se hranol otočí o 45° za čas, který potřebuje světelný paprsek k překonání vzdálenosti mezi body A a B (po lomené čáře vedoucí přes zrcadla C, D, E, F, G, H a I), zůstane obraz Z' na svém místě. Je-li tento čas jiný, obraz Z' zdroje Z se posune.



FIG. 1.—Arrangement of apparatus

Albert Abraham Michelson r.1927

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME LXV

JANUARY 1927

NUMBER 1

MEASUREMENT OF THE VELOCITY OF LIGHT BETWEEN MOUNT WILSON AND MOUNT SAN ANTONIO¹

By A. A. MICHELSON
Research Associate of the Carnegie Institution
ASSISTED BY F. PEARSON

ABSTRACT

The following is a continuation of the experiments described in the *Astrophysical Journal*, 60, 256, 1924. The arrangement of apparatus differs slightly from that of the former investigation, allowing a more nearly normal incidence on the facets of the revolving mirror, and providing greater symmetry as well as increase in illumination.

Five independent series of measurements made with different revolving mirrors (one of steel having the form of a prism with eight facets, and another with twelve, and three of glass with eight, twelve, and sixteen facets) gave results showing a remarkable agreement.

The final result for the velocity of light *in vac*

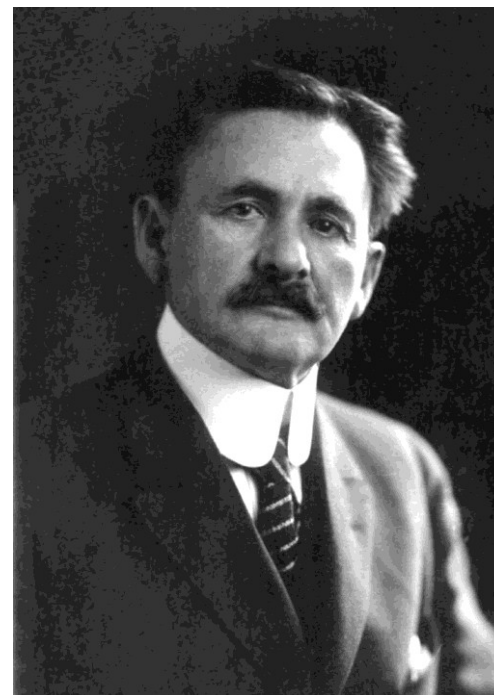


TABLE VIII

Mirror	Year	<i>N</i>	<i>n</i>	<i>V</i>	Wt.
Glass 8	1925	528	150	299,802	1
Glass 8	1925	528	200	299,756	1
Glass 8	1926	528	216	299,813	3
Steel 8	1926	528	195	299,795	5
Glass 12	1926	352	270	299,796	3
Steel 12	1926	352	218	299,796	5
Glass 16	1926	264	270	299,803	5
Glass 16	1926	264	234	299,789	5
Weighted mean.....	299,796 ± 4

James Clerk Maxwell 1831 - 1879

článek *Dynamická teorie pole* r.1865

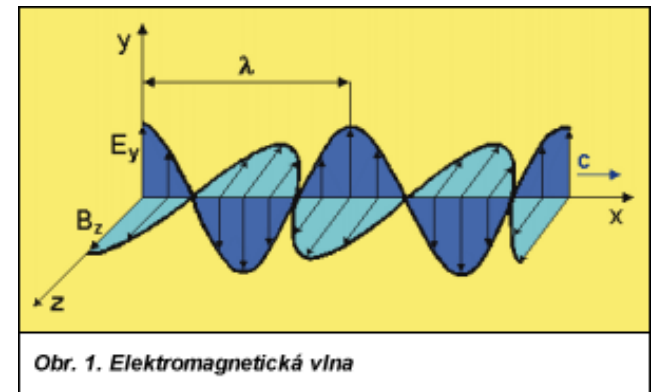
kapitola *Elektromagnetická teorie světla*

Maxwell se vzdal **mechanických modelů** popisující elektromagnetické jevy, z jeho rovnic vyplývalo, že směr vektoru magnetické síly je kolmý na směr šíření elektromagnetické vlny, tedy *elektromagnetické vlny jsou příčné, rychlost jejich šíření je dána elektrickými a magnetickými vlastnostmi prostředí*, myšlenka souvislosti elektromagnetických a optických jevů

totožnost podstaty světla a elektromagnetických vln

závislost indexu lomu na magnetických a elektrických charakteristikách prostředí

$$n^2 = \varepsilon(\omega)\mu(\omega) .$$



Albert Einstein 1879 - 1955

Einstein vyšetřoval vlastnosti elektromagnetického vlnění bez odkazu na klasické oscilátory, *formuloval kvantovou teorii světla*

Vlnová teorie světla pracující se spojitými funkcemi prostorových souřadnic se skvěle osvědčila při popisu čistě optických jevů a v tom ji žádná jiná teorie určitě nenahradí. Je ovšem třeba mít na paměti, že optická pozorování se týkají časových středních hodnot, nikoliv okamžitých hodnot fyzikálních veličin. Navzdory experimentálnímu potvrzení vlnové teorie světla při jevech ohybu, odrazu a lomu lze si docela dobře představit, že teorie světla pracující se spojitými prostorovými veličinami povede k rozporu s experimentem v případech popisu produkce a přeměny světla.

z vlastností záření absolutně černého tělesa, fotoefekt, fotoluminiscence Einstein dodal, že tyto jevy lze lépe pochopit za předpokladu, že

při šíření z jednoho bodu se energie světelného paprsku nerozděluje na stále rostoucí prostorový objem, ale sestává se z konečného počtu prostorově lokalizovaných kvant energie, které se pohybují, aniž se dále dělí a mohou být také jen jako celky pohlceny.

„musíme předpokládat, že stejnorodé světlo se skládá ze zrn energie... světelných kvant, nevelkých porcí energie, které se šíří ve vakuu rychlostí světla.“

Albert Einstein - fotoelektrický jev

článek *O jednom heuristickém aspektu týkajícím se vzniku a přeměny světla* - výklad fotoelektrického jevu

„Tradiční názor, že energie světla je rozložena spojitě v oblasti tímto světlem ozářené, působí při snaze o objasnění fotoelektrických jevů popsaných v Lenardově průkopnickém článku velké potíže.“

*6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen

Fotoelektrický jev

Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu

$E_k = h \cdot f - W_v$ *vyložila* všechny *pozorované zákonitosti*, ale nebyla hned přijata všemi

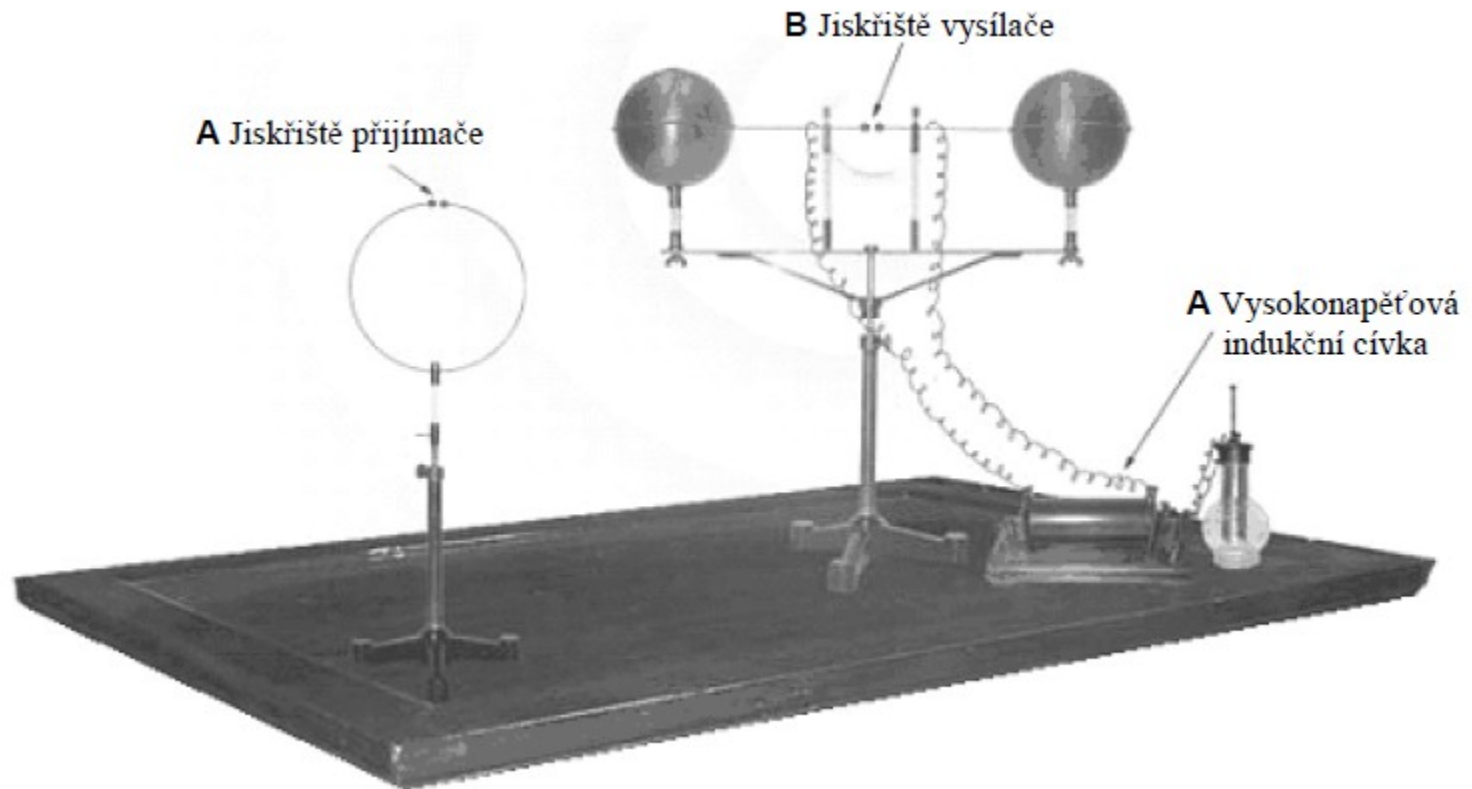
americký fyzik **Robert Millikan 1868 - 1953** prováděl experimenty na vyvrácení Einsteinovy interpretace fotoelektrického jevu. Bez úspěchu, konstatoval: *„Strávil jsem deset let svého života testováním Einsteinovy rovnice a navzdory všem svým očekáváním - jsem byl v roce 1915 přinucen konstatovat její nepochybné experimentální potvrzení, nehledě na veškerou její nerozumnost, která se zdála být v rozporu se vším, co jsme věděli o interferenci světla.“*

Max Planck r. 1913 uvedl: *„Skutečnost, že možná někdy ve svých spekulacích (Einstein) přestřelili, jako například ve své hypotéze světelných kvant, by mu neměla být vyčítána*

Niels Bohr r. 1921 napsal: *...„Na druhou stranu záření musí být popsáno klasickou elektromagnetickou teorií.“*

Fotoelektrický jev

fotoelektrický jev popsal německý fyzik **Heinrich Hertz 1857 - 1894** r. 1887, pozoroval přeskok elektrické jiskry mezi zinkovými koulemi při osvětlení ultrafialovým zářením při zkoumání vlastností elektromagnetických vln, jev dále nezkoumal...



Fotoelektrický jev

ruský fyzik **Alexander Stoletov 1839 - 1896** v letech **1888 - 1890**

osvětloval kondenzátor tvořený kovovou deskou a kovovou sít'kou, který byl připojen na potenciálový rozdíl z baterie, zjistil

1. ozařování vodiče z něj uvolňuje záporný náboj
2. pro každý ozařovaný materiál existuje minimální frekvence, od které dochází k uvolňování záporného náboje
3. k uvolňování náboje dochází okamžitě po dopadu záření

Následné experimenty podle schématu **Philippa Lenarda 1862 - 1947**

po roce 1898 upřesnily a doplnily představy o jevu,

- a. kinetická energie elektronů roste s frekvencí dopadajícího záření
- b. na jeho intenzitě (při konst. frekvenci) nezávisí

Lenard **nesouhlasil**
s **Einsteinovým výkladem**
fotoelektrického jevu

