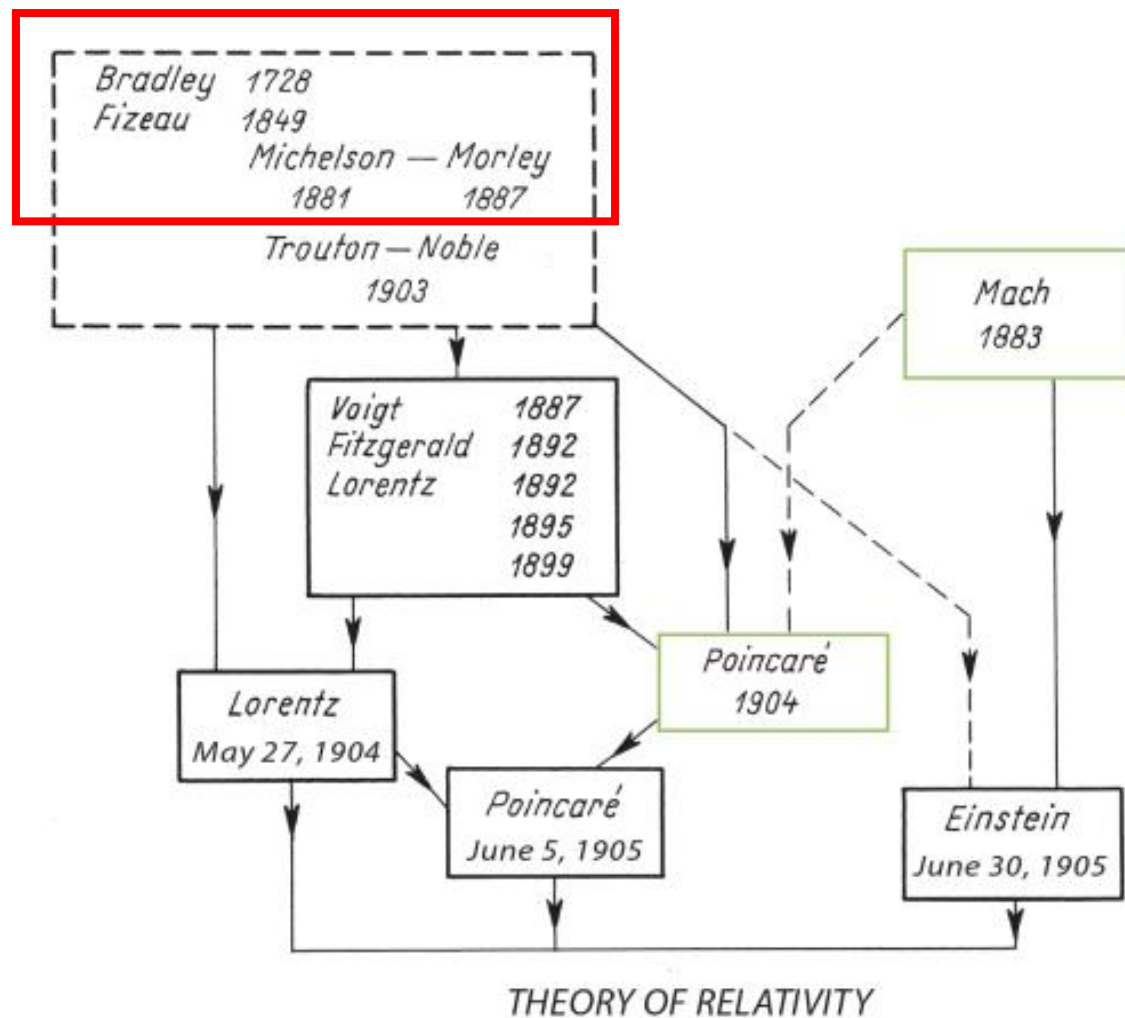


Optické experimenty historického významu pro fyziku

(od starověku po počátky kvantové fyziky)

- J.Franc
- Proseminář z Optiky
- 10.10.2019

Optické experimenty a cesta ke speciální teorii relativity



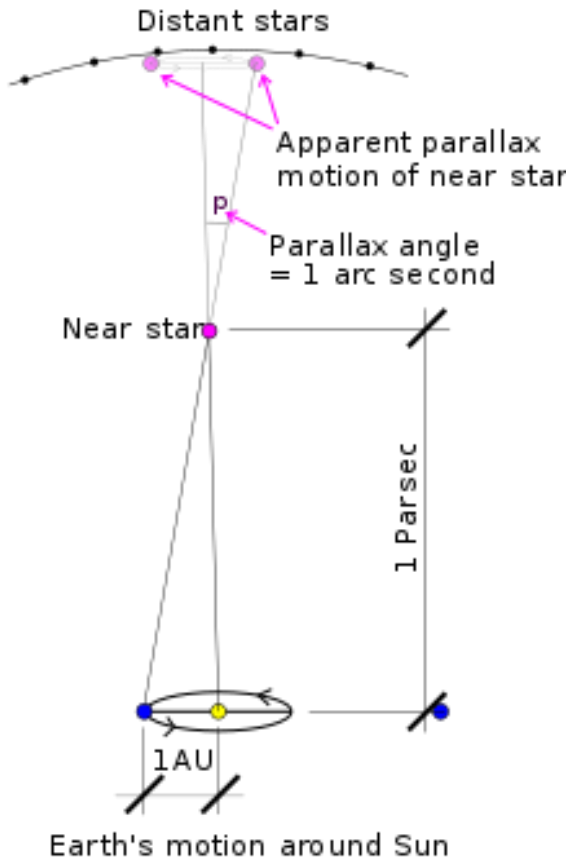


1693-1762

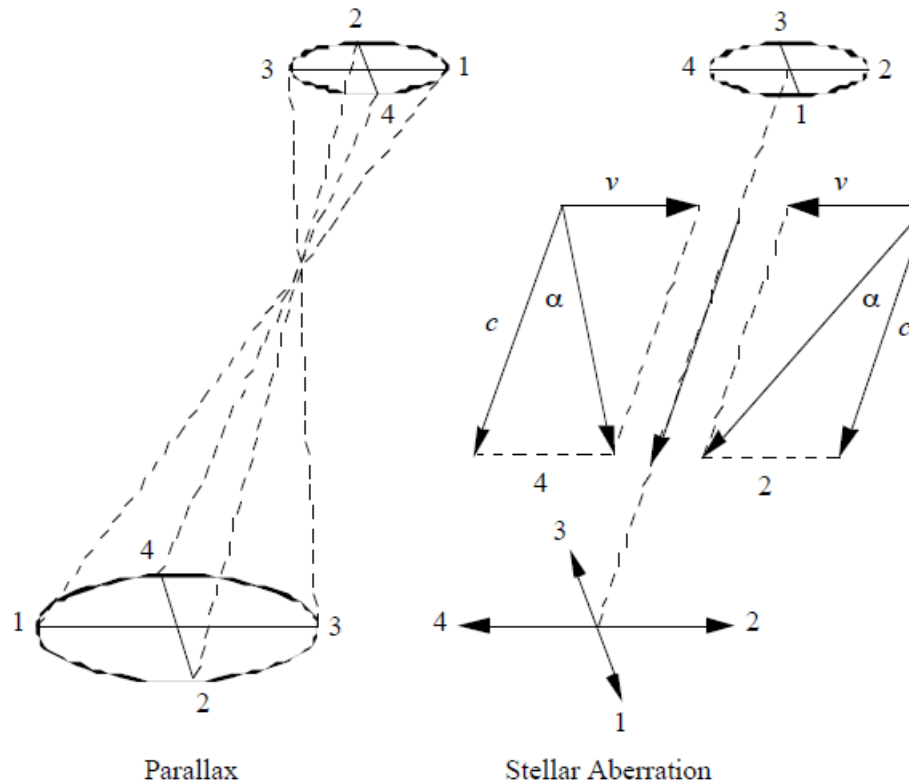
~ 1729 **James Bradley** vysvětlil aberaci světla klasickým skládáním rychlostí, změřil rychlost světla

Astronomové se od 16. století snažili změřit tzv. paralaxu, tj. zdánlivou změnu polohy blízké hvězdy na pozadí vzdálených hvězd (absolutní vztažná soustava) Z Bradleyho měření vyplynulo, že zdánlivá poloha hvězdy Gamma Draconis se mění v závislosti na vzájemné rychlosti obou těles

Stelární paralaxa



Aberace světla

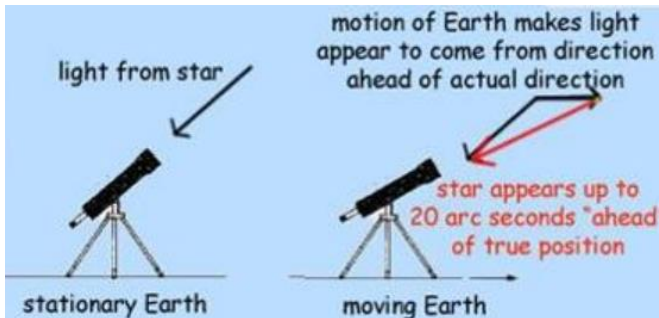


Bradley při hledání paralaxy předpokládal nutnost natočit dalekohled v rovině 13 po 6 měsících mezi pozorováními, ve skutečnosti musel dalekohled natočit v rovině kolmé

Bradleyho klasické vysvětlení aberace světla

Částicový model

Světlo popisováno korpuskulární teorií



Slunce



c



Země

Země v klidu

Slunce



$-v$



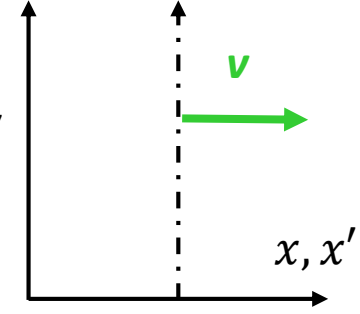
c'



$c'_x = -v$



$y = y'$



Galileiho transformace

Soustava Slunce x, y, t

Soustava Země x', y', t

Země se pohybuje rychlostí v vůči Slunci. Zobrazeno ve vztažné soustavě Země.

$$\text{tg}(\Phi) = \frac{c}{v} \quad \text{Aberační konstanta}$$

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ \frac{dx'}{dt} &= \frac{dx}{dt} - v, \quad c' = c - v \\ c &= (0, c), \quad c'_x = -v \end{aligned}$$

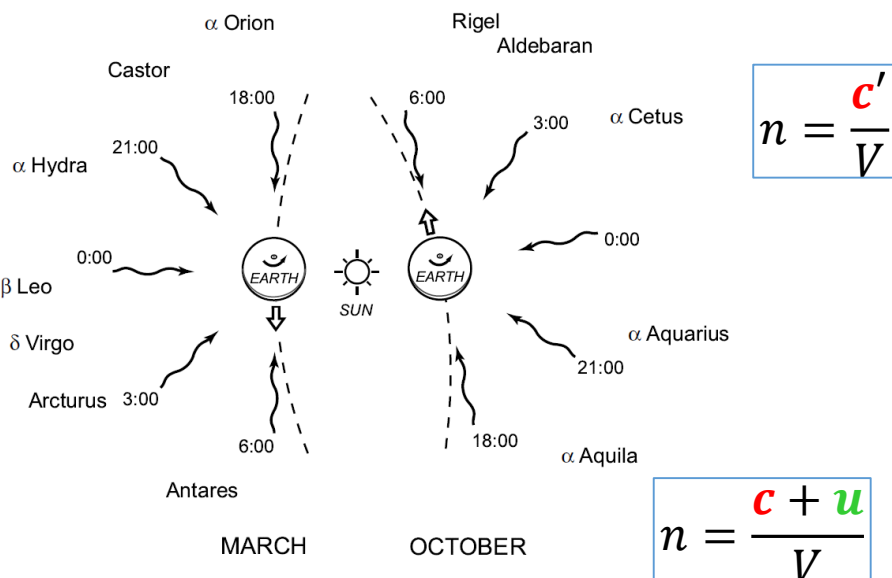
$$\begin{aligned} y' &= y \\ \frac{dy'}{dt} &= \frac{dy}{dt} \end{aligned}$$

Závěr – rychlost světla ze Slunce dopadající na Zemi závisí na okamžité vzájemné rychlosti Země a Slunce

$$\begin{aligned} c'_y &= c \\ t' &= t \end{aligned}$$

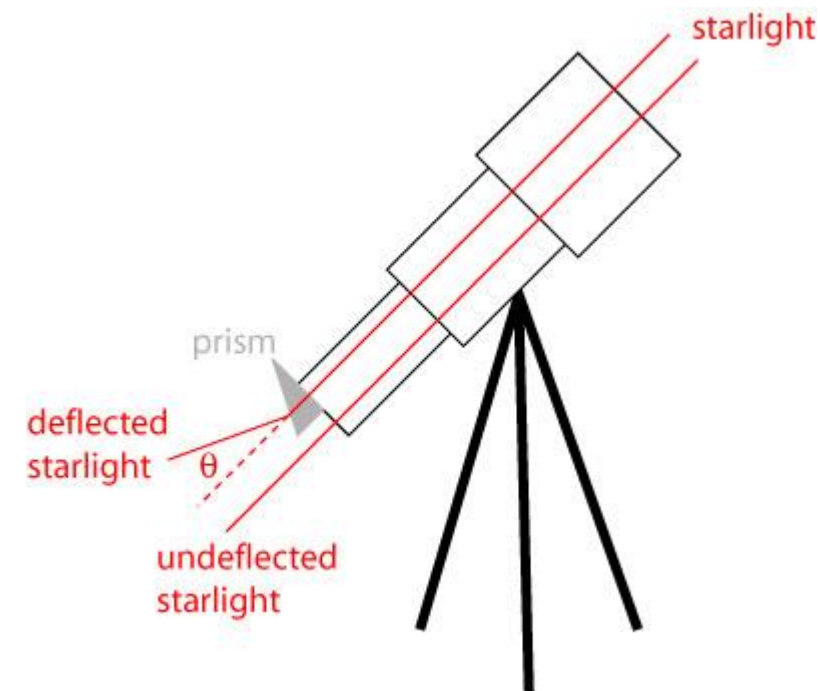
Arago – experiment k určení k rychlosti světla vylétavajícího z hvězd, resp. k určení rychlosti světla vůči absolutní vztahné soustavě

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



Emisní teorie –
Předpoklad o různé rychlosti světla emitovaného různými hvězdami

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

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.

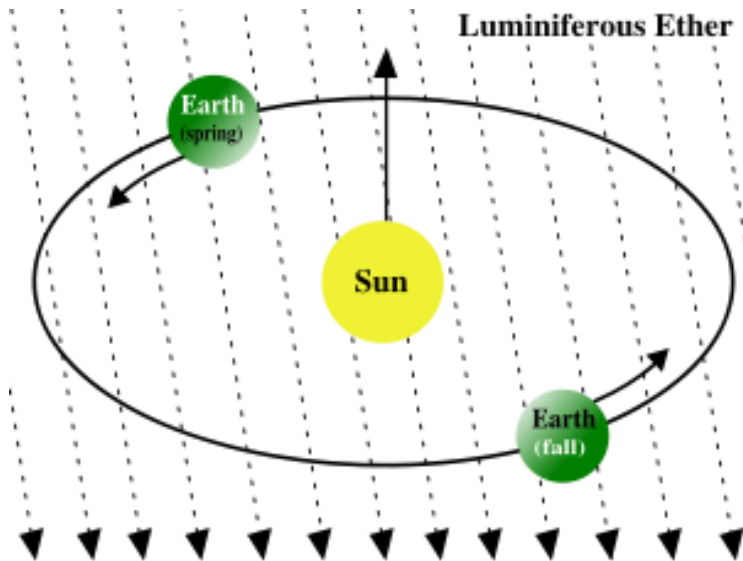
<https://skullsinthestars.com/2008/07/05/what-a-drag-aragos-experiment-1810/>

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.

Významní fyzici o éteru

Johann II Bernoulli, „all space is permeated by aether containing "excessively small whirlpools". These whirlpools allow for aether to have a certain elasticity, transmitting vibrations from the corpuscular packets of light as they travel through

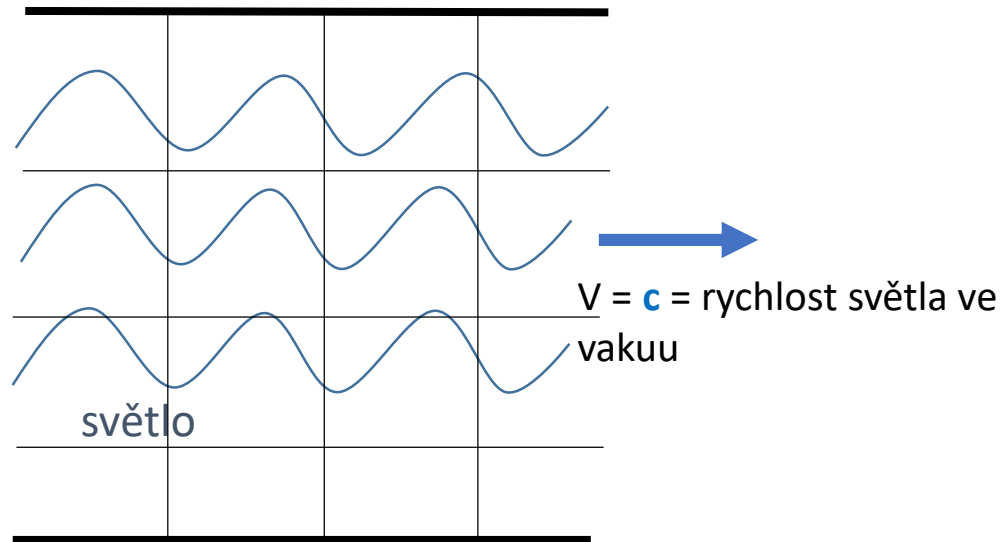
Christian Huygens, developed wave theory in which light traveled in the form of longitudinal waves via an "omnipresent, perfectly elastic medium having zero density, called aether".

J. C. Maxwell, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1865 **155**, 459-512, published 1 January “It appears therefore that certain phenomena in electricity and magnetism lead to the same conclusion as those of optics, namely, that there is an ethereal medium pervading all bodies, and modified only in degree by their presence; that the parts of this medium are capable of being set in motion by electric currents and magnets; that this motion is communicated from one part of the medium to another by forces arising from the connections of those parts; that under the action of these forces there is a certain yielding depending on the elasticity of these connections; and that therefore energy in two different forms may exist in the medium, the one form being the actual energy of motion of its parts, and the other being the potential energy stored up in the connections, in virtue of their elasticity.”

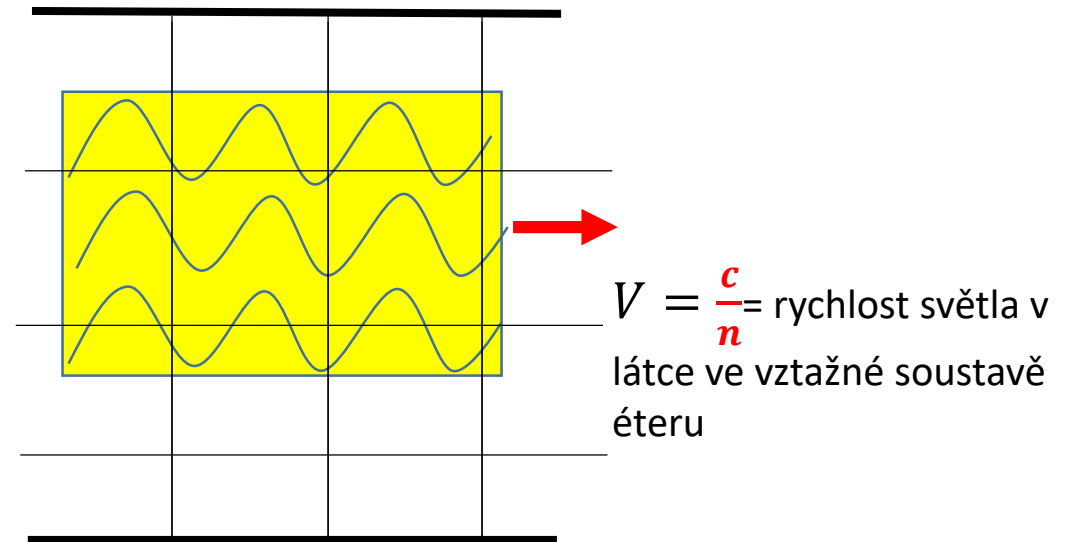
A. Einstein, 1895 "The velocity of a wave is proportional to the square root of the elastic forces which cause [its] propagation, and inversely proportional to the mass of the aether moved by these forces“.

Vakuum

éter (absolutní vztažná soustava)



Průhledné těleso v klidu vůči éteru

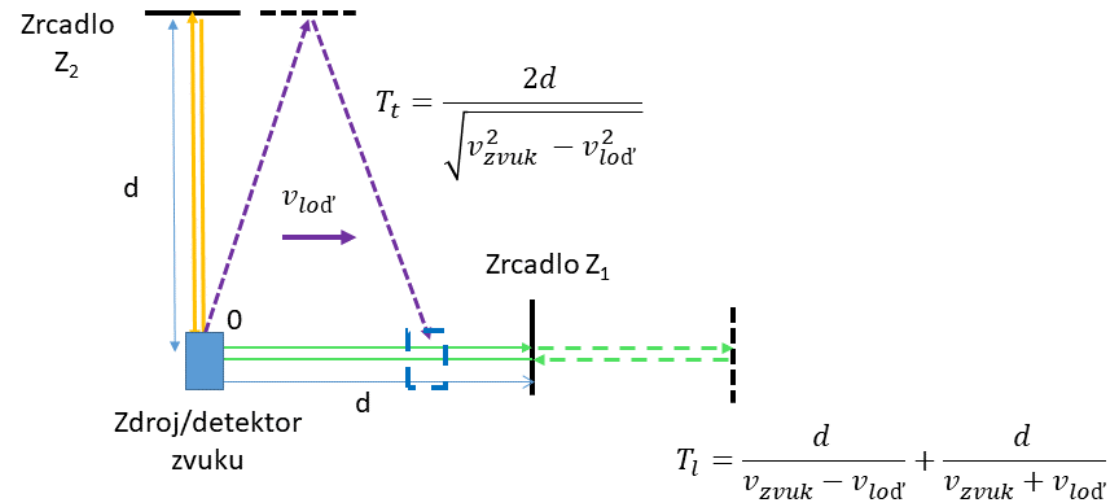
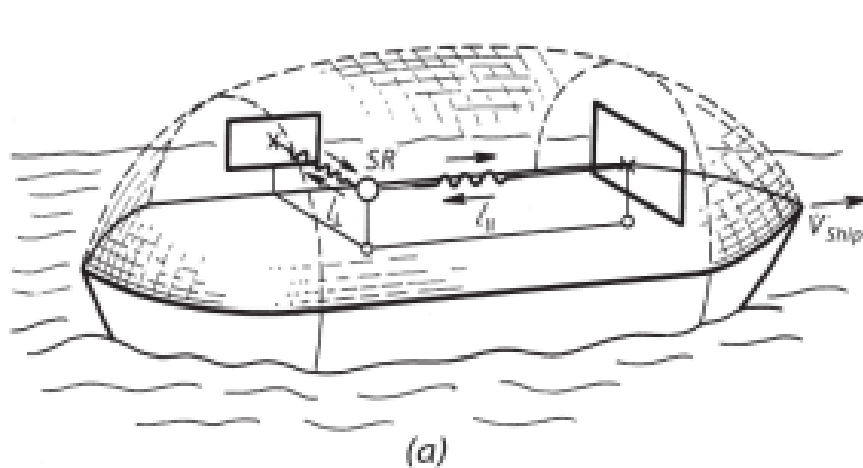


Předpokládalo se, že éter průhlednými tělesy prostupuje.

Neprůhlednými tělesy éter neprostupuje, předpokládalo se vyrušení Huyghensových elementárních vlnoploch interferencí.

Strhávání éteru

Analog s měřením šíření vzduchu na lodi plovoucí nehybným vzduchem, éter ↔ vzduch, Země ↔ loď



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. $T_l = T_t = \frac{2d}{n}$

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 hranolem. Na rozdíl od Araga byl zastáncem vlnové teorie. Vyslovil teorii částečného strhávání éteru

Předpoklad – éter je průhledným tělesem částečně strháván

Hustota éteru v tělese ρ_B

Hustota éteru v okolí tělesa ρ

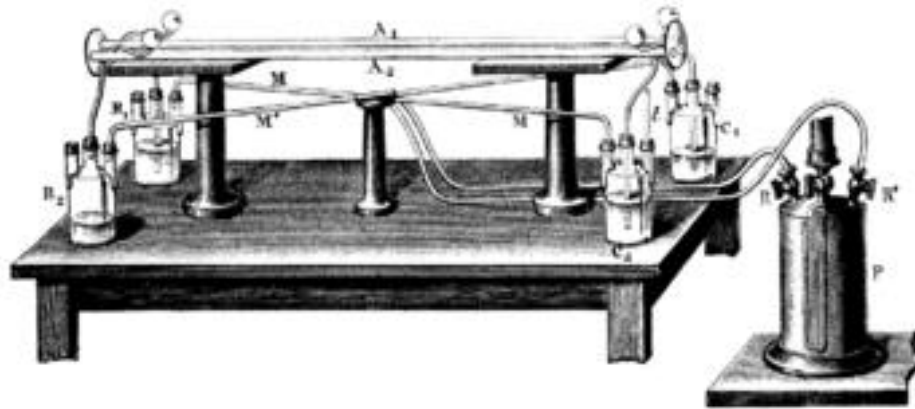
$$\left(\frac{\rho_B - \rho}{\rho_B} \right) \quad \rho_B > \rho$$

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

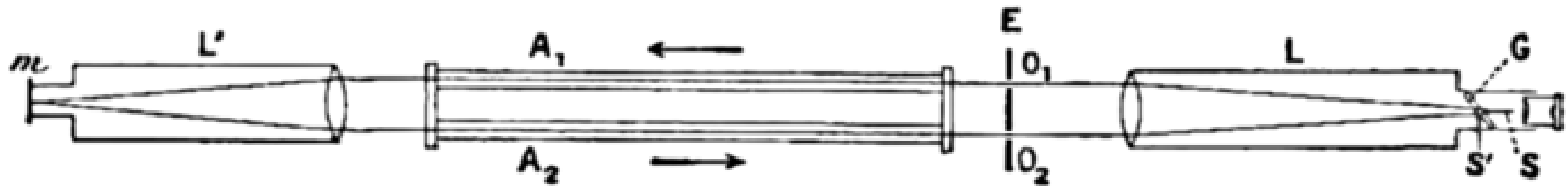
Relativní přebytek éteru v tělese vůči okolí

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.

Fizeův 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.
- Rychlost 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 rychlost 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

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

V – rychlost světla v laboratorní soustavě při proudění vody rychlostí u ve směru šíření světla

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

Výsledek Fizeauova vodního pokusu lze tedy vysvětlit jako důsledek relativistického skládání rychlostí světla a tekoucí vody.



A. A. Michelson (1852-1931)

~ 1881

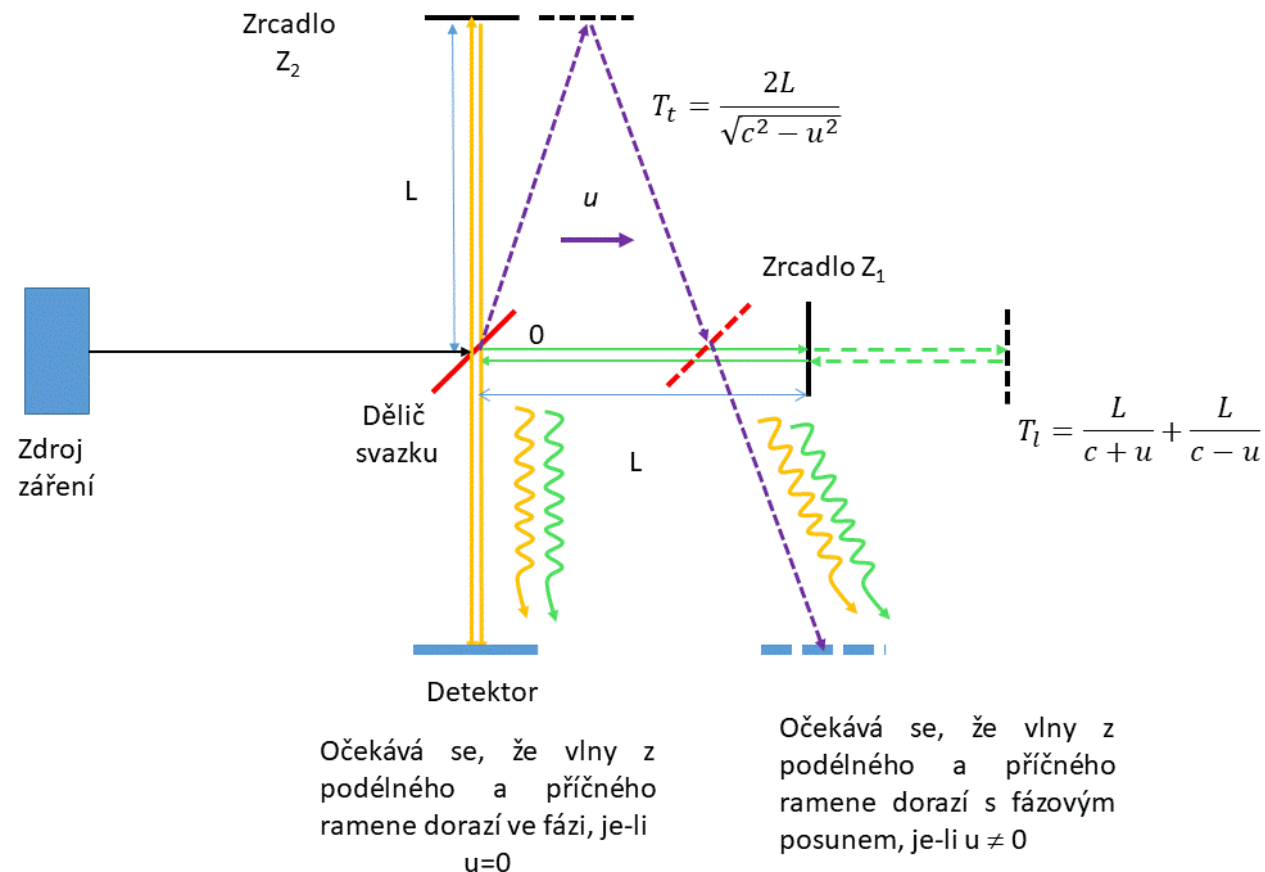
Albert Abraham Michelson – Vynalezl Michelsonův interferometr. Změřil rychlost světla s velkou přesností. Nositel Nobelovy ceny, 1907.

„The more important fundamental laws and facts of physical science have all been discovered, and these are so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote.“

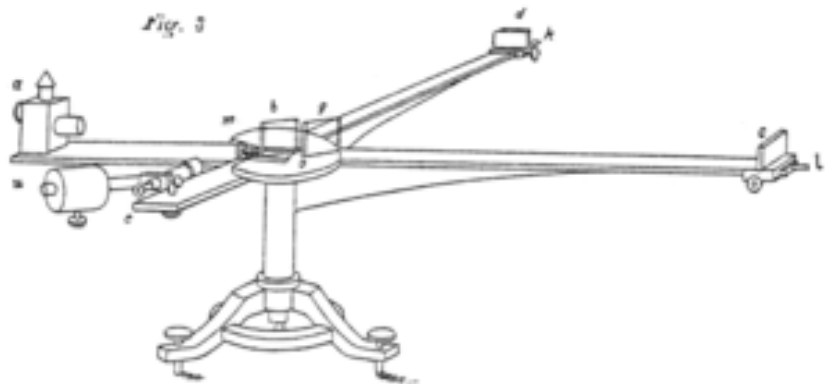
Michelsonův-Morleyho experiment

A. Michelson jako první provedl v letech 1880 až 1881 názorný pokus na existenci tzv. éterového větru. V roce 1887 ho společně s Edwardem Morleyem zopakoval.

Zjistil, že se světlo šíří všemi směry stejnou rychlostí nezávisle na pohybu jeho zdroje. Tento objev znamenal počátek konce teorie éteru a měl velký význam pro formulaci základního postulátu speciální teorie relativity – principu konstantní rychlosti světla nezávislé na rychlosti zdroje světla vůči pozorovateli.

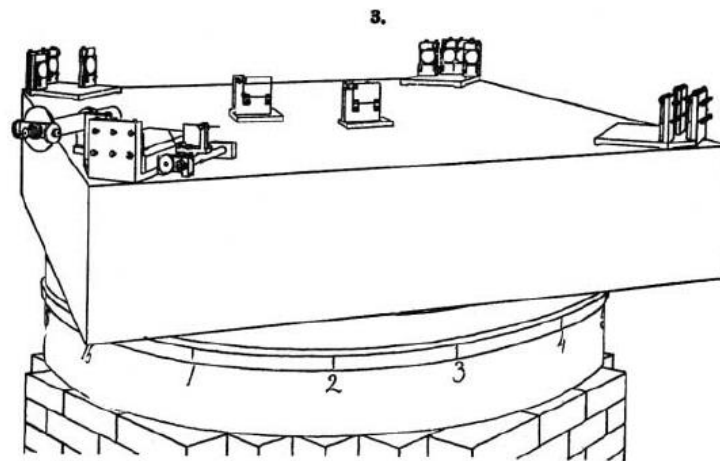


Michelsonův interferometr



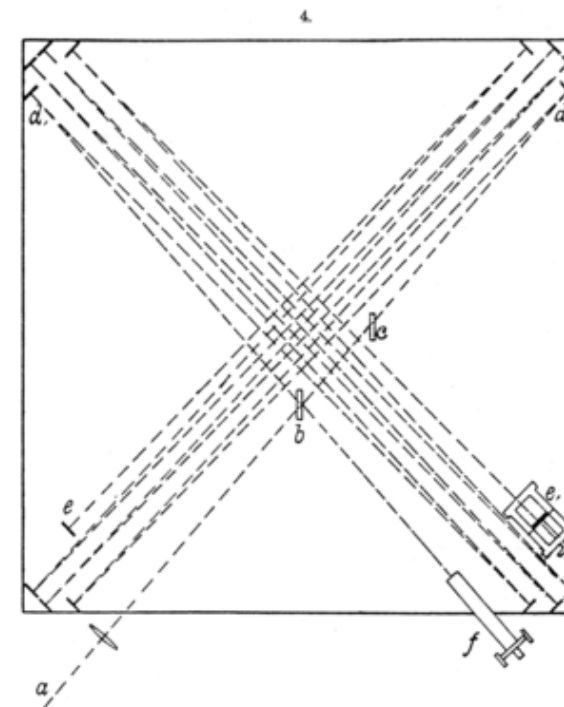
1. Verze 1881

Negativní výsledek Michelsonova pokusu o změření rychlosti éterového větru z roku 1881 se vysvětloval nepřesností měření – příliš krátká ramena interferometru a otřesy znemožnily změřit očekávaný posun interferenčních proužků



2. Verze 1887

Délka dráhy v rameni 11m
Interferometr umístěn na Hg lázni s cílem tlumit otřesy



Doba průletu světla v podélném směru

$$T_l = \frac{L}{c-u} + \frac{L}{c+u} = \frac{2L}{c(1-\frac{u^2}{c^2})} \approx \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{u^2}{c^2}\right)$$

$$T_l - T_t \approx L \frac{u^2}{2c^3}$$

Dráhový rozdíl před natočením interferometru

$$T_l - T_t \approx -L \frac{u^2}{2c^3}$$

$$\Delta_1 \approx c(T_t - T_l) = L \frac{u^2}{c^2}$$

Doba průletu světla v příčném směru

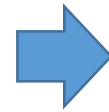
$$T_t = \frac{2L}{\sqrt{c^2-u^2}} = \frac{2L}{c\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \sim \frac{2L}{c} \left(1 + \frac{u^2}{2c^2}\right)$$

Dráhový rozdíl po natočení interferometru o 90°

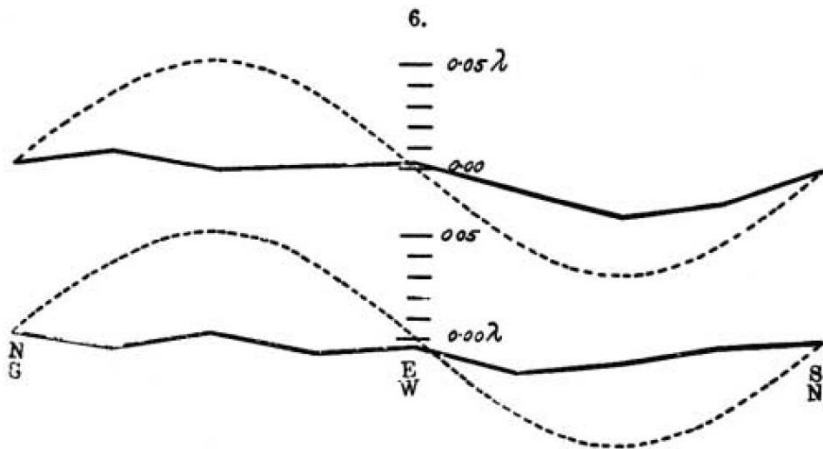
$$\Delta_2 \approx c(T_l - T_t) = -L \frac{u^2}{c^2}$$

Předpokládaný posun interferenčního kroužku

$$m = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\lambda} = \frac{2Lu^2}{\lambda c^2}$$



Experiment typu $\sim \left(\frac{u}{c}\right)^2$



$L=11\text{m}$, $\lambda=500\text{nm}$, $v=30\text{km/s}$ je $m=0.44$

Výsledek měření $m < 0.01$

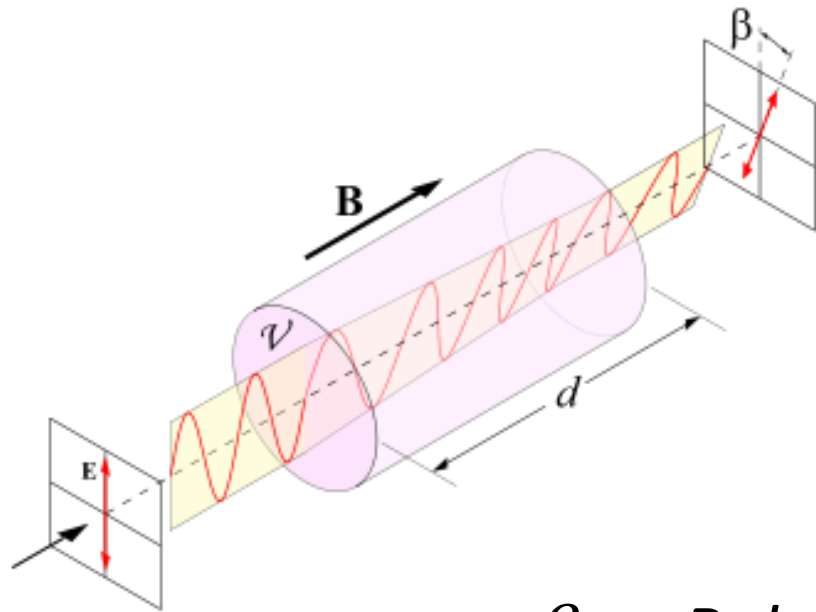


M. Faraday(1791-1867)

~ 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.



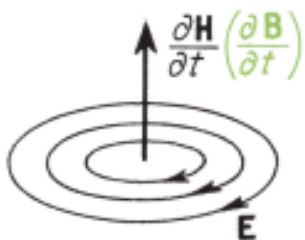
J. C. Maxwell (1831-1879)

~ 1864

James Clerk Maxwell – vypracoval klasickou vlnovou elektromagnetickou teorii světla. Odvodil příčný charakter světla a rychlost světla. Teorie formulována v prostředí éteru.

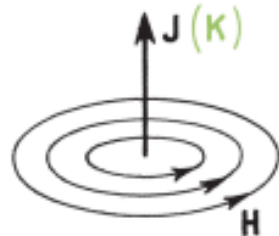
„It is of great advantage to the student of any subject to read the original memoirs on that subject, for science is always most completely assimilated when it is in the nascent state“

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



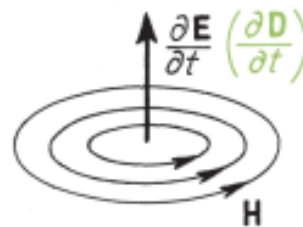
$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t}$$

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



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

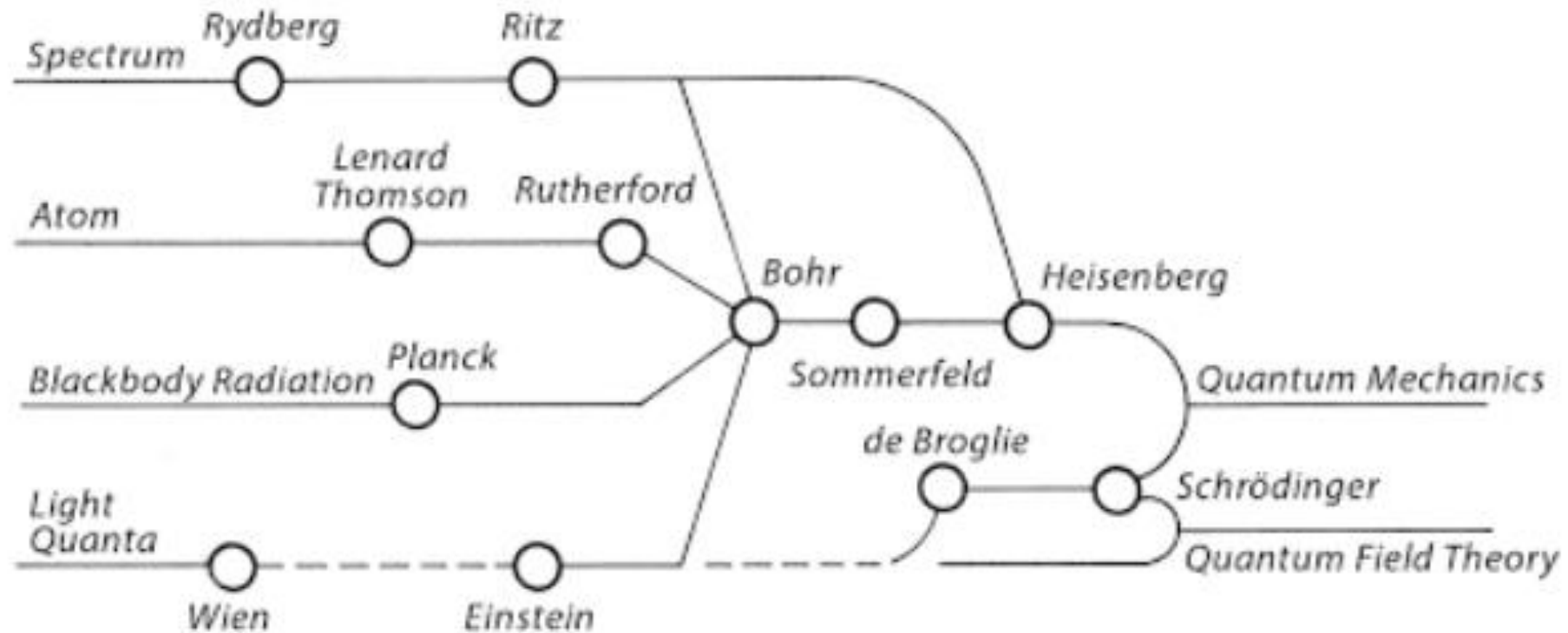
Maxwellův posuvný
proud

Nová fyzika

Maxwellova el-mag teorie
nadále formulována v
prostředí
elastického éteru



Optické experimenty a cesta ke kvantové teorii

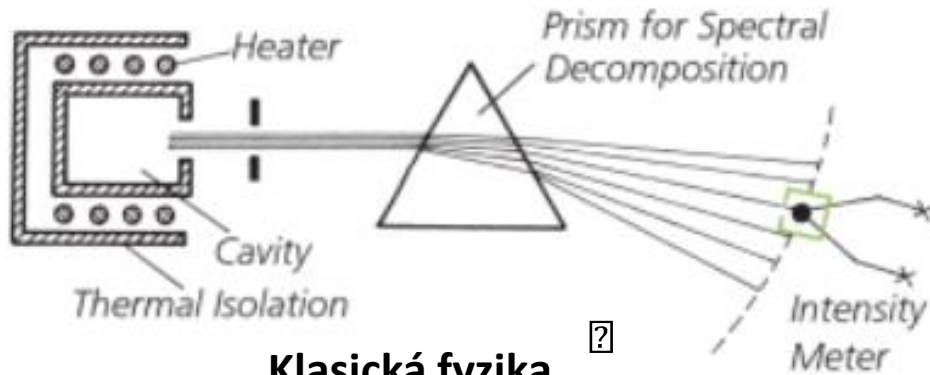


Spektrum záření černého tělesa

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



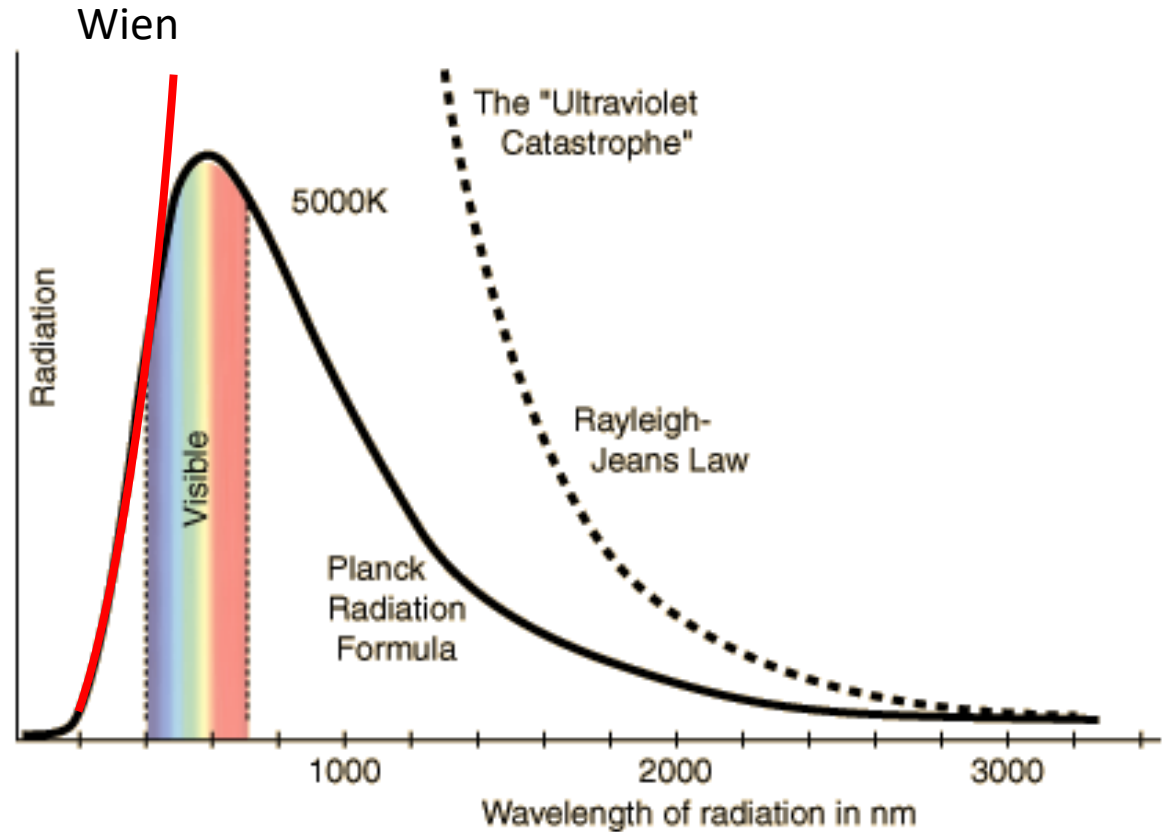
Klasická fyzika

1873 Stefan-Boltzmann $E = T^4$

1894 Wien $u_\nu = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$

1899 Planck $u_\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} U(\nu, T)$

1900 Rayleigh-Jeans $u_\nu = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$



E Celková energie záření černého tělesa

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

σ Stefan-Boltzmannova konstanta

u_ν Hustota energie záření

Wien (neplatí v IČ)

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

Rayleigh-Jeans (neplatí v UV)
?

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



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

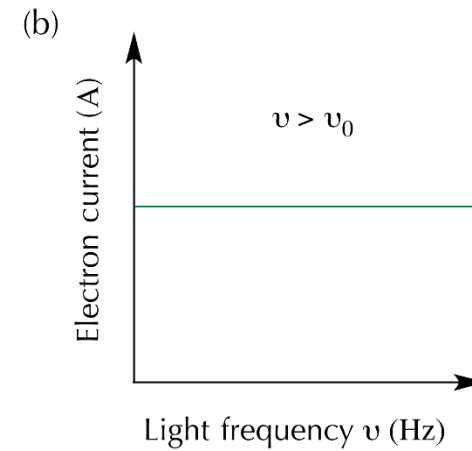
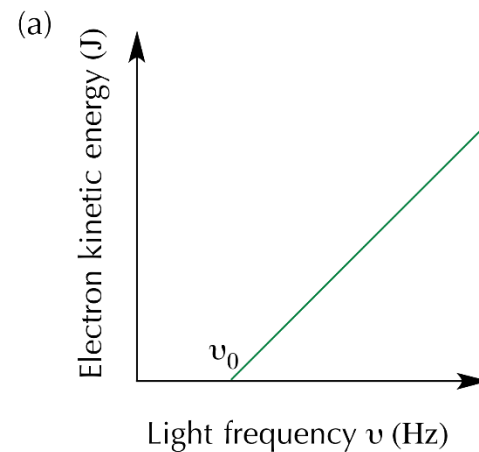
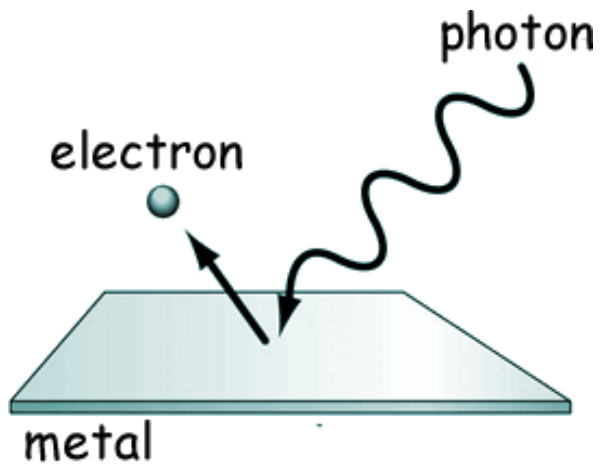
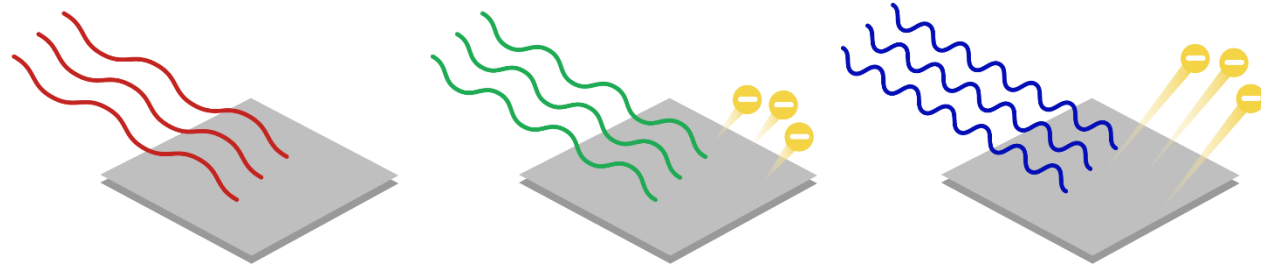
$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

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.

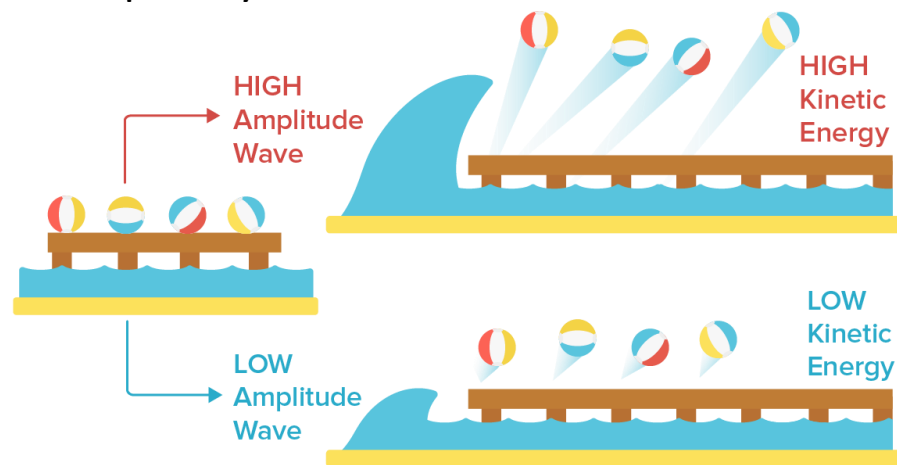


Vlnová teorie

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

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, poněmáhlu 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. Schawlow, 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