

# Geometrická optika

## Přednášky

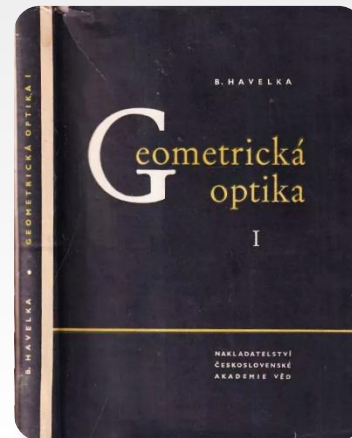
- Ing. Jan Novotný, Ph.D.

## Cvičení

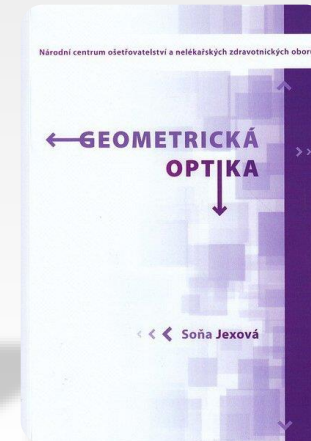
- Ing. Tomáš Drobil

## Literatura

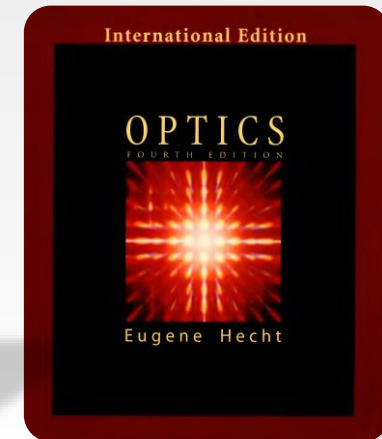
- Knihy o optice →
- Web: skripta UPOL



B. Fuka  
Geometrická optika



S. Jexová  
Geometrická optika



E. Hecht  
Optics

# Organizace výuky

## Přednášky

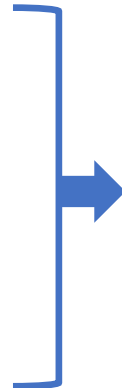
- Nepovinná účast

## Cvičení

- Povinná účast
- **2 zápočtové písemky**
- Nutno získat alespoň **50%** z každé



Možno opravit písemkou v závěru semestru.



## GO I – podzim 2024

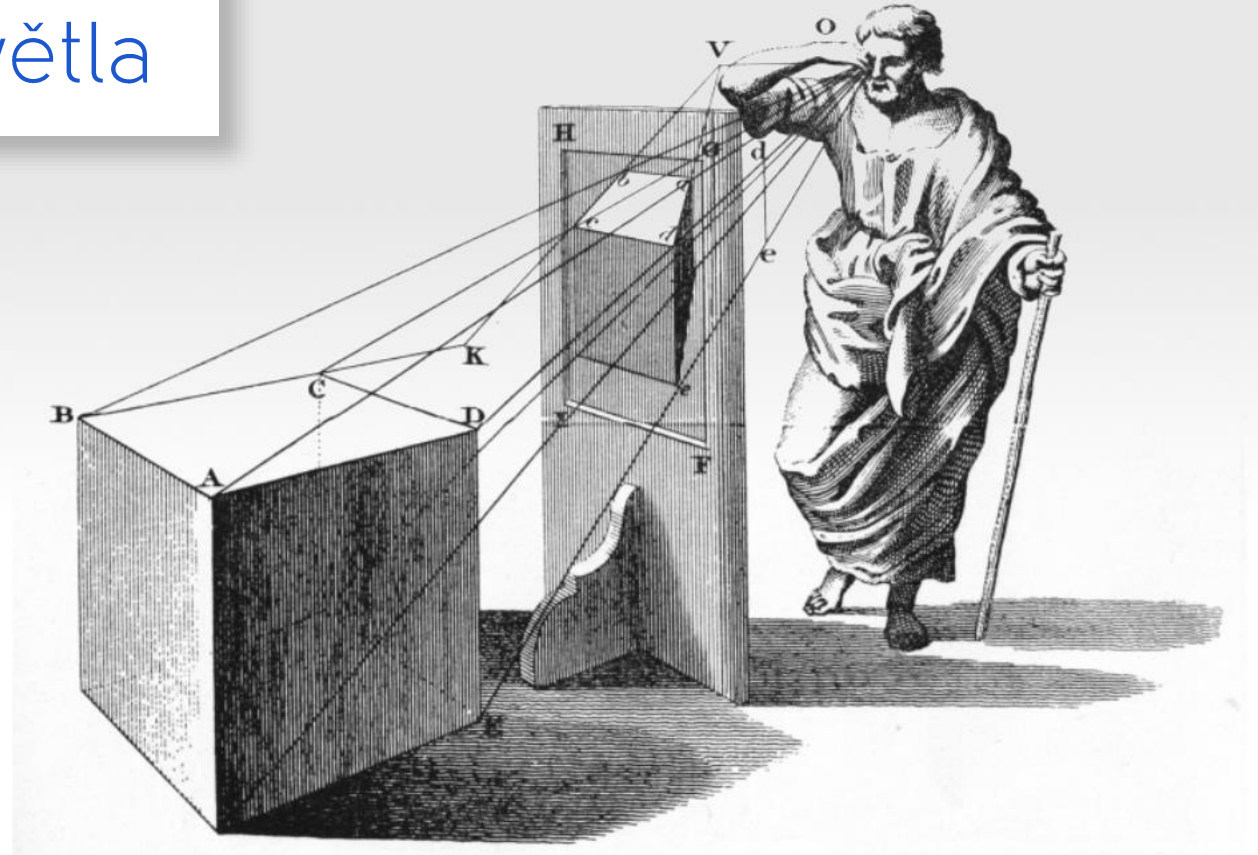
- Zápočet ze cvičení

## GO II – jaro 2025

- Zápočet ze cvičení
- Zkouška na FSI VUT
  - **Písemná část** – 90 min, příklady ze cvičení GO I+II
  - **Ústní část** – cca 20 min, témata z přednášek

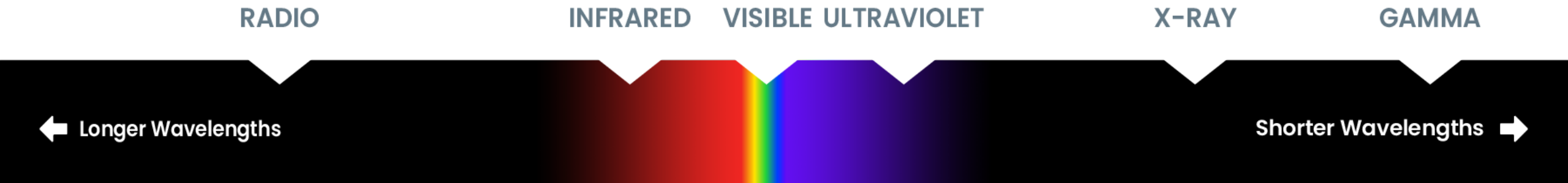
# Historie a základní vlastnosti světla

1. Optika - úvod
2. Starověk a středověk
3. Renesance
4. Vlnová teorie
5. Elmag. teorie
6. Kvantová teorie



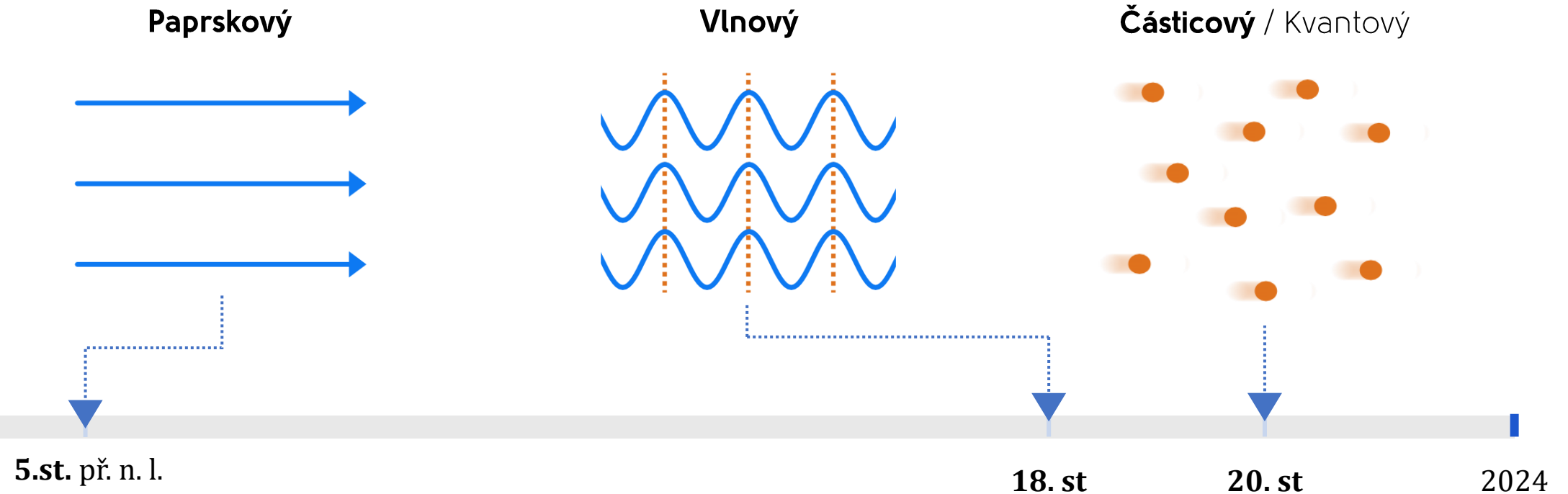
# Optika

- Výzkum vlastností světla a prvků světlo využívajících
- **Světlo:** Elektro-magnetické záření viditelné lidským okem, cca **390 – 760 nm** ( $3,9 \times 10^{14}$  –  $7,9 \times 10^{14}$  Hz)



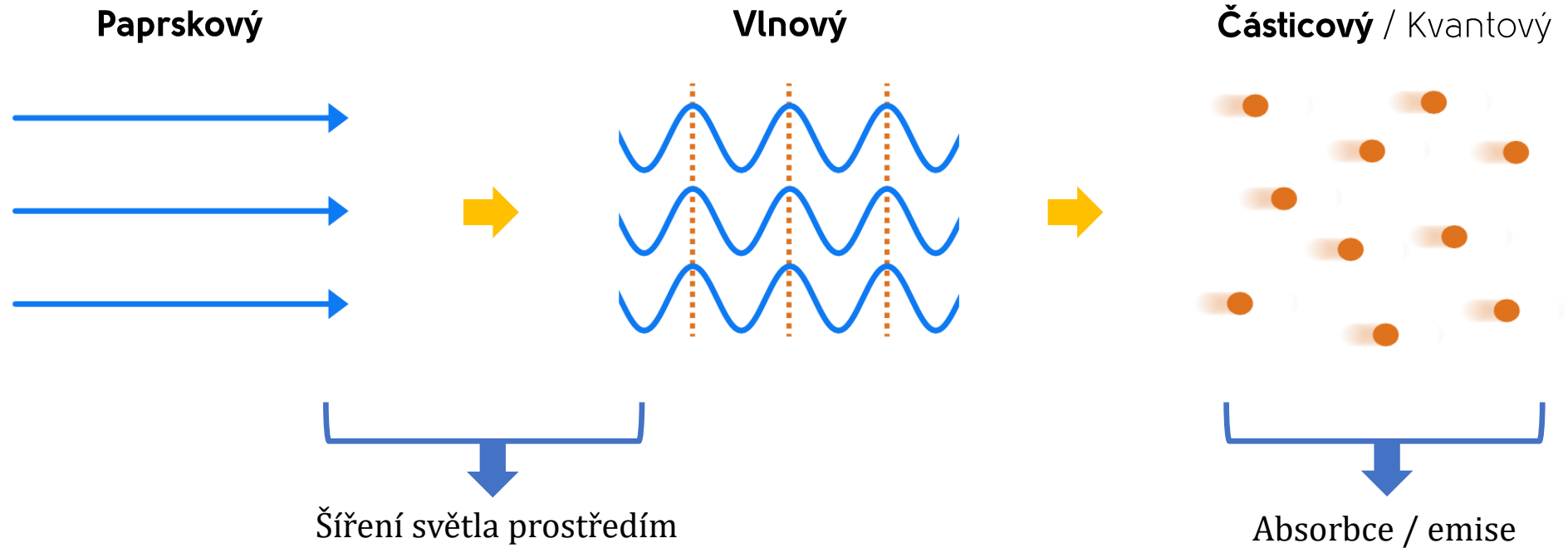
# Optika

Historicky vznikly 3 přístupy popisu optických jevů:



# Optika

Historicky vznikly 3 přístupy popisu optických jevů:



# Starověk

---

~ 3000 př. n. l. | **Asýrie**

- Nejstarší optický nález
- Část dalekohledu? Na zvětšení? Pouze dekorace?



> 1900 př. n. l. | **Egypt**

- Nejstarší běžně užívané optické prvky
- Vyleštěná měděná a bronzová zrcadla
- Převzato do Říma a Řecka.



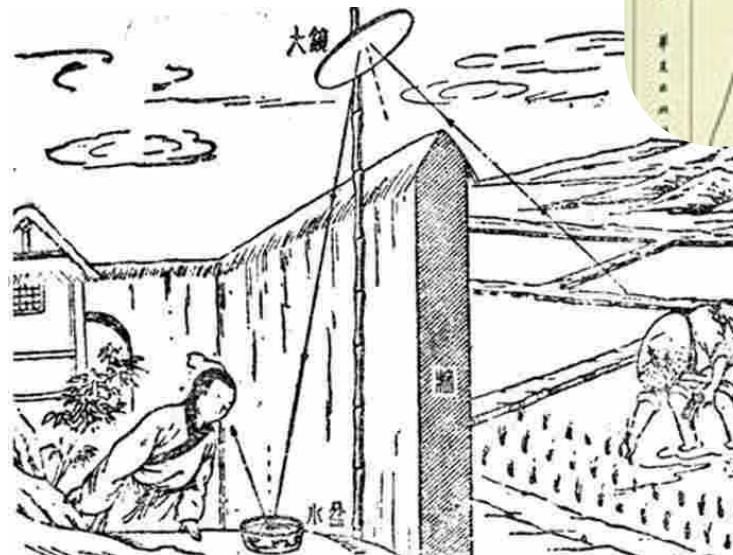
# Čína

## Filozof Mo Zi (5. st. př. n. l.)

- První známy spis o optice „Book of Mo Zi“.
- Přímočaré šíření světla.
- Odraz světla, *Camera obscura*.
- Ploché, konvexní/konkávní zrcadla.

## Král Liu An (2. st. př. n. l.)

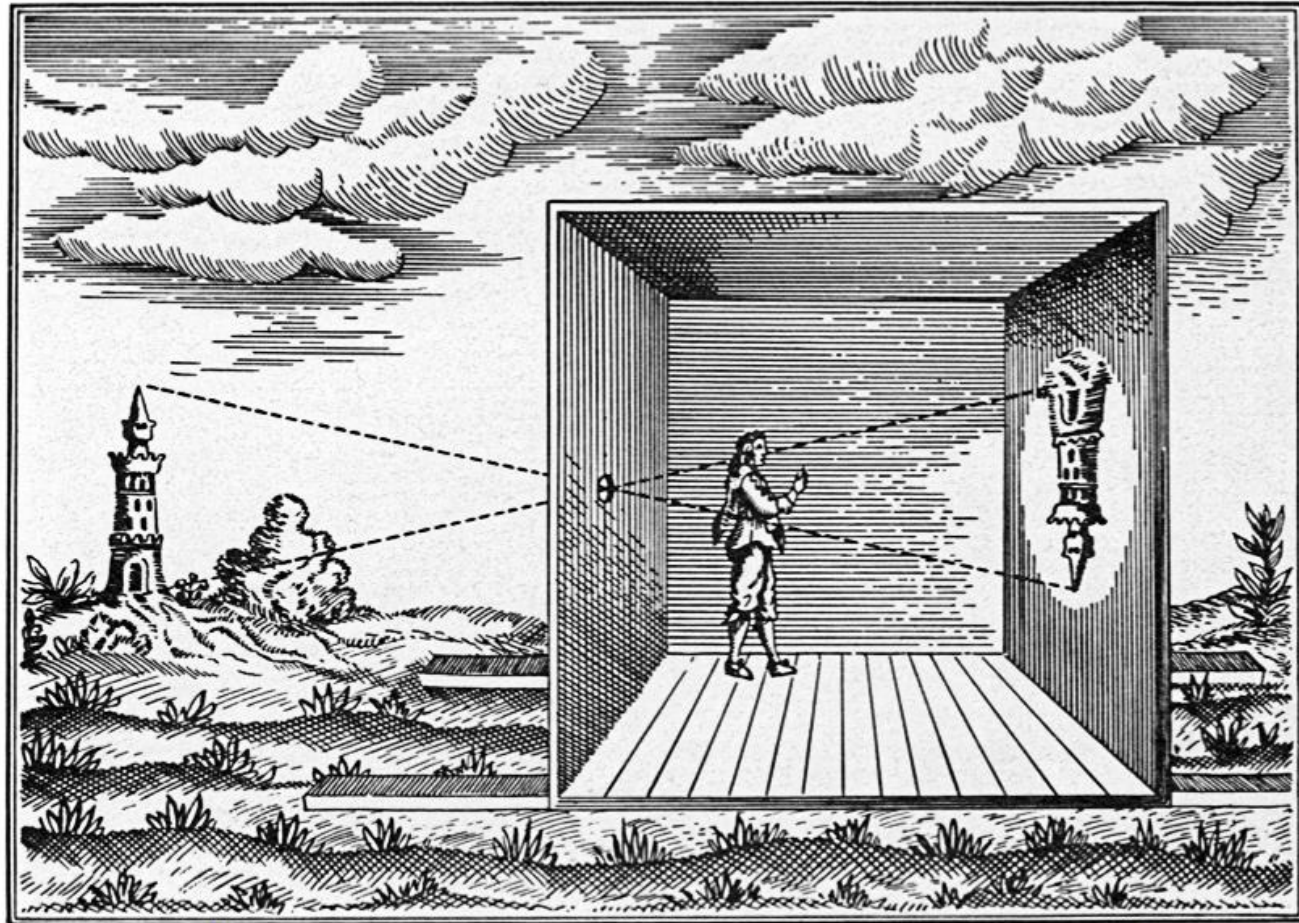
- Další spisy o fyzice a optice
- Popis prvního „periskopy“
- Zapalování konkávními zrcadly



Mo Zi



# Dírková komora



# Antika

---

## Řeční filozofové / matematici

- **Empedocles** (490-430 př.n.l.) – světlo je vysíláno z očí.
- **Democritos** (460-370 př.n.l.).
- **Platón** (472-347 př.n.l.) – deformace předmětu ponořeného do kapaliny (spis „Republika“).
- **Aristoteles** (384-322 př.n.l.) – camera obscura pozoroval funkci clony, odmítl teorii o vysílání paprsků z oka.
- **Euklides** (cca 325-260 př.n.l.) – spis „Optica“, zkoumal geometrii perspektivu, přímočaré šíření světla, lom světla



# Antika

---

**Archimedes** (287-212 př. n. l. )

- Významný matematik a vynálezce,
- Aplikace optiky při dobývání Syrakus Římany (212 př.n.l.).



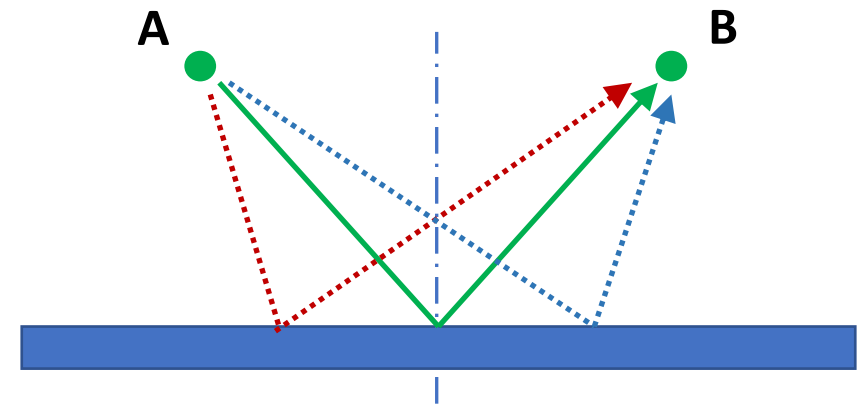
# Řím

## Hero z Alexandrie (10-70)

- Autor spisu „Catoptrica“.
- Formuloval zákon odrazu přes **princip nejkratší dráhy**.



*Paprsek se při odrazu šíří nejkratší dráhou...*



## Claudius Ptolemaeus (85-170)

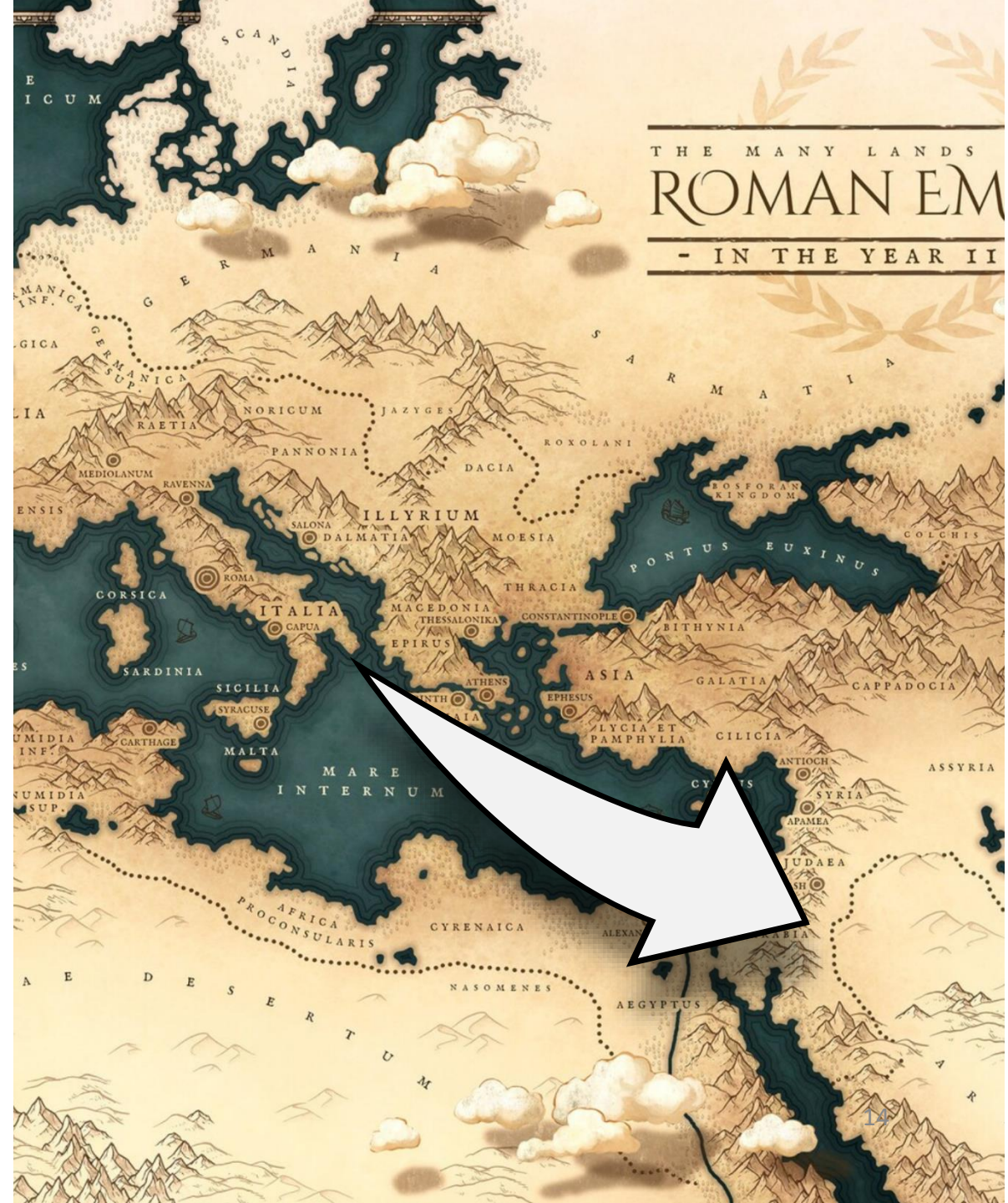
- Autor 5 knih o optice: „Optics“
- Experimentálně naměřil úhly lomů na různých rozhraních
- Empiricky popsal **zákon lomu** pro malé úhly („úhel lomu je úměrný úhlu dopadu“)

# Doba temna

---

## Zánik Římské říše (475 n. l.)

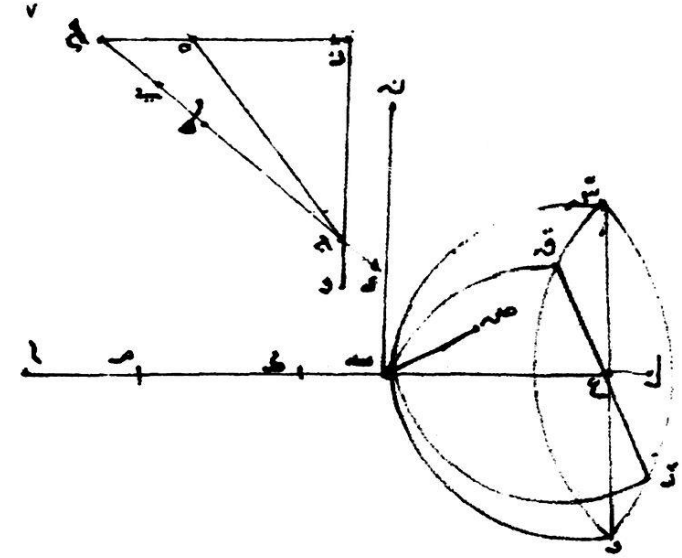
- Úpadek vědeckého pokroku
- Přesun vědění z **řecko-římské křesťanské kultury do arabských zemí**



# Blízký východ / 10.-11. století

## Ibn Sahl (940-1000)

- Navázal na závěry Ptolemaeua
- Fokuse paprsků zrcadly a čočkou  
“On Burning Mirrors and Lenses”.
- **Rovnice pro lom** (rok 984, 600 let před Snellem a Descartem).
- Počítal tvary čoček a konvexních zrcadel pro konkrétní ohniskové vzdálenosti.



لانه ان ماسه عليها سطح مستوي غيره فلان هذا السطح يقطع سطح بصر  
 على نقطة ب فلا بد من ان يقطع احد خطي ب ن بص فليكن ذلك  
 الخط مبصر والفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق ر  
 خط م ب ش فلان هذا السطح ياتر مسيط ب على نقطة ب فخط  
 ب ش يقطع ق ب ر على نقطة ب وكذلك خط مبصر وهذا حال  
 فلا ياتر مسيط ب على نقطة ب سطح مستوي غير سطح ب ن ص

# Blízký východ / 10.-11. století

---

## Ibn al-Haytham „Alhazen“ (965-1040)

- Spis „Book of Optics“, 14 knih
- Podrobná a systematická studie řeckých poznatků.
- Paprsek dopadu a odrazu leží ve shodné rovině, kolmé na povrch.
- Paprsky se šíří do oka.
- Základní princip funkce lidského oka.
- Rychlost paprsků je konečná .
- Formuloval zákon lomu přes **princip nejkratšího času**.

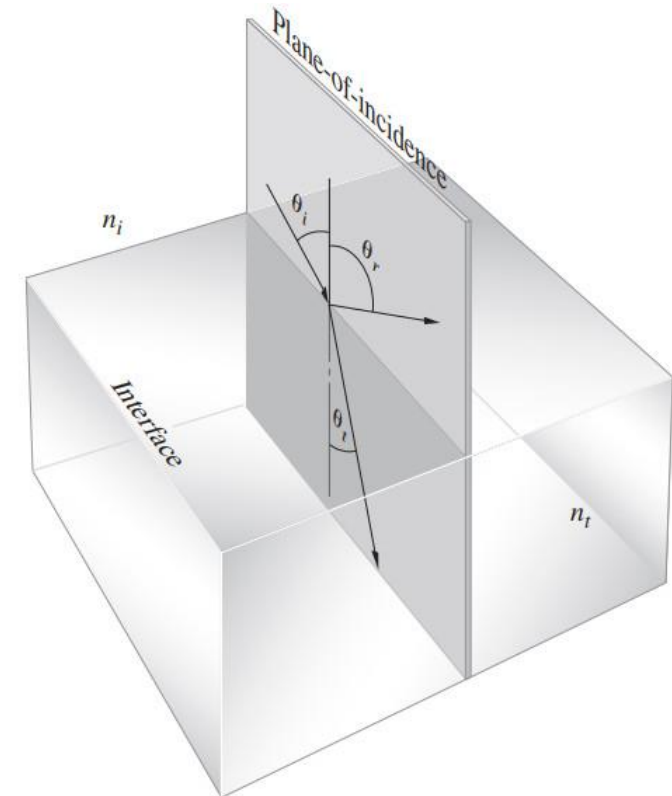


Otec moderní optiky a zakladatel experimentálních vědeckých metod.

# Blízký východ / 10.-11. století

## Ibn al-Haytham „Alhazen“ (965-1040)

- Spis „Book of Optics“, 14 knih
- Podrobná a systematická studie řeckých poznatků.
- Paprsek dopadu a odrazu leží ve shodné rovině, kolmé na povrch.
- Paprsky se šíří do oka.
- Základní princip funkce lidského oka.
- Rychlost paprsků je konečná .
- Formuloval zákon lomu přes **princip nejkratšího času**.



Otec moderní optiky a zakladatel experimentálních vědeckých metod.



# Evropa / 10.-16. století

---

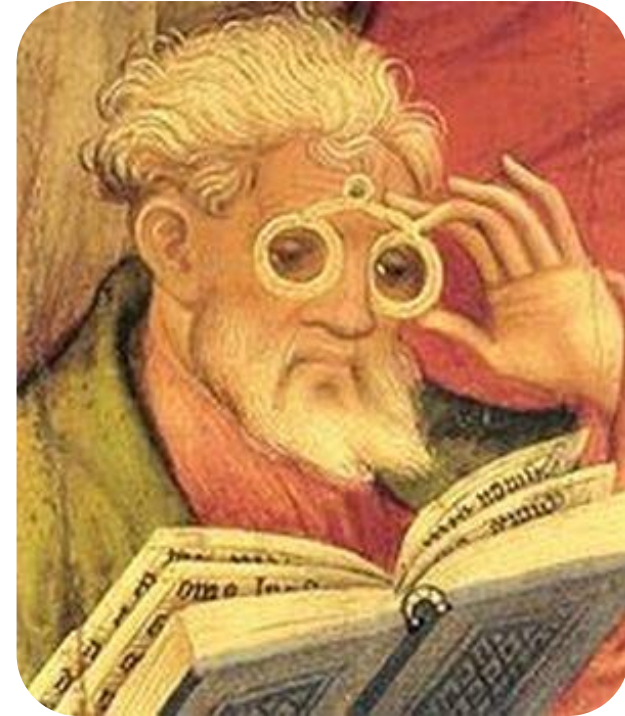
... překlady děl řeckých a arabských myslitelů, jinak však bez výrazných vědeckých pokroků...

## **Roger Bacon** (1214-1294)

- Užití čočky pro korekci zraku.
- Možnost kombinace čoček pro vytvoření teleskopu.

## **Salvino D'Armate**

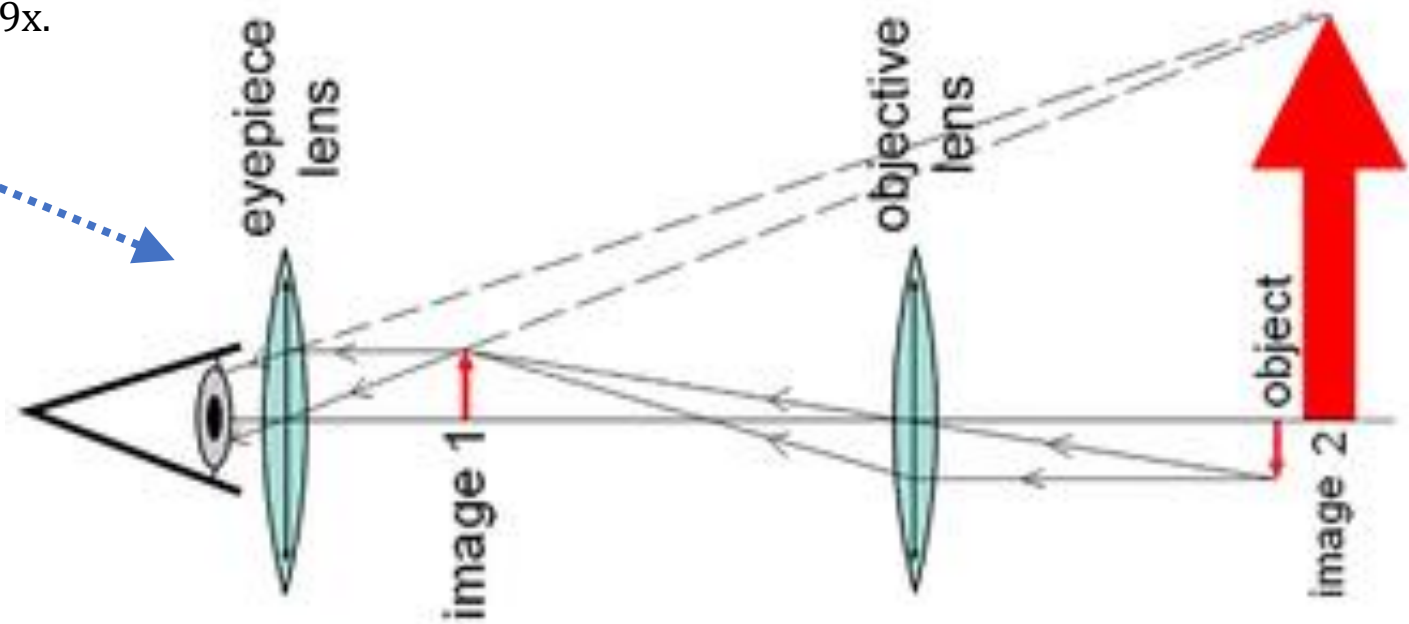
- Možný vynálezce nositelných brýlí
- Postupné rozšíření brýlí.



# První optické přístroje / 17.-18. století

**Zacharis Jansen** (1588-1632)

- Konstrukce **mikroskopu**, zvětšení 9x.
- Jednoduchý i složený typ.



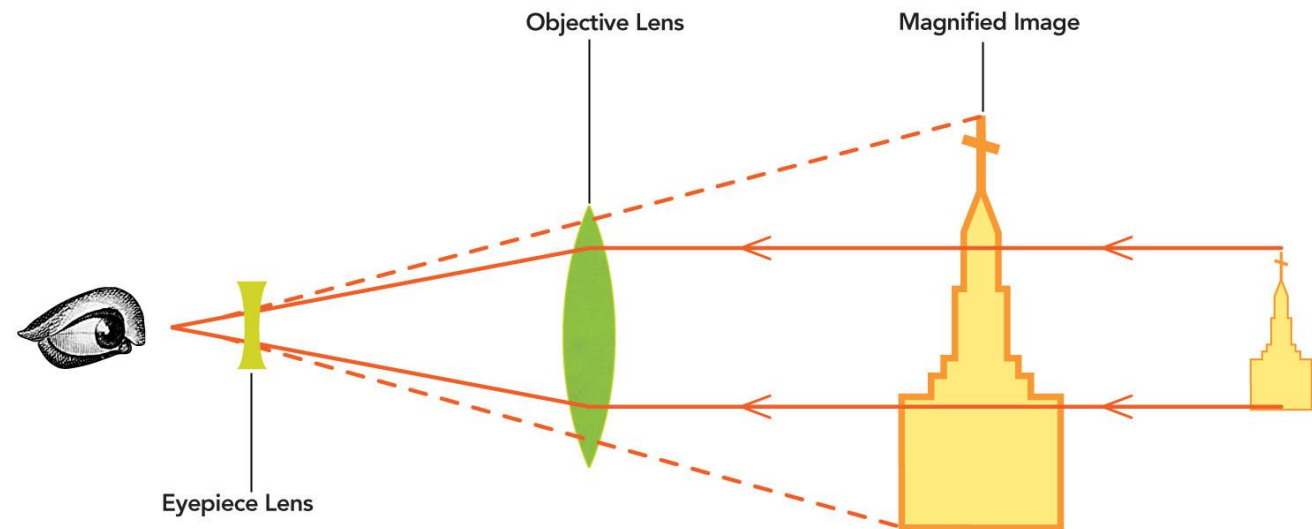
# První optické přístroje / 17.-18. století

## Zacharis Jansen (1588-1632)

- Konstrukce **mikroskopu**, zvětšení 9x.
- Jednoduchý i složený typ.

## Hans Lippershey (1587-1619)

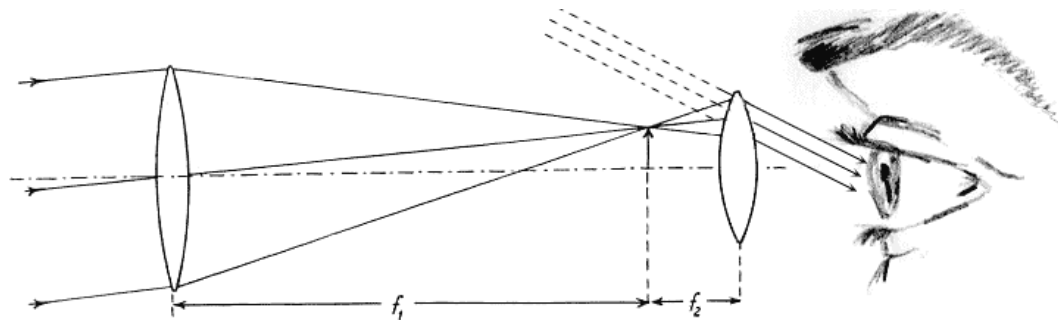
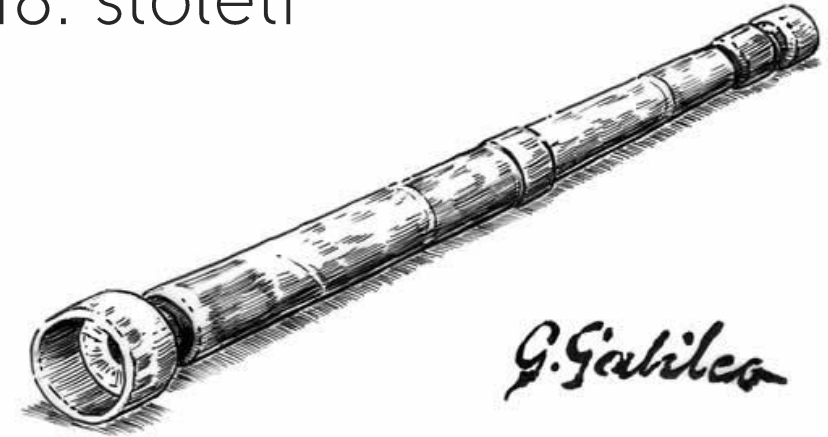
- 1608, patent na první **teleskop**.



# První optické přístroje / 17.-18. století

## Galileo Galilei (1564-1642)

- 1608, sestavil teleskop (rozptylka + spojka)  
- zvětšení 33x, špatný obraz.
- Objevil hory na Měsíci, Jupiterovy měsíce.



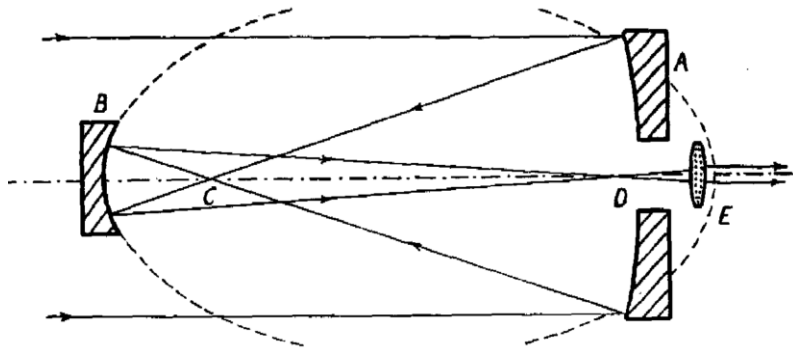
## Johannes Kepler (1564-1642)

- Spis *Dioptrika*.
- Úprava dalekohledu (s konvexní oční čočkou).
- Objevil totální odraz, zákon převrácených čtverců.

# První optické přístroje / 17.-18. století

## James Gregory (1638-1675)

- 1663: návrh reflexního teleskopu
- Vyřešení barevné vady
- Pokračovali Robert Hook, Isaac Newton, James Short



# Zákon lomu / 1621

## Willebrord Snell (1591-1626)

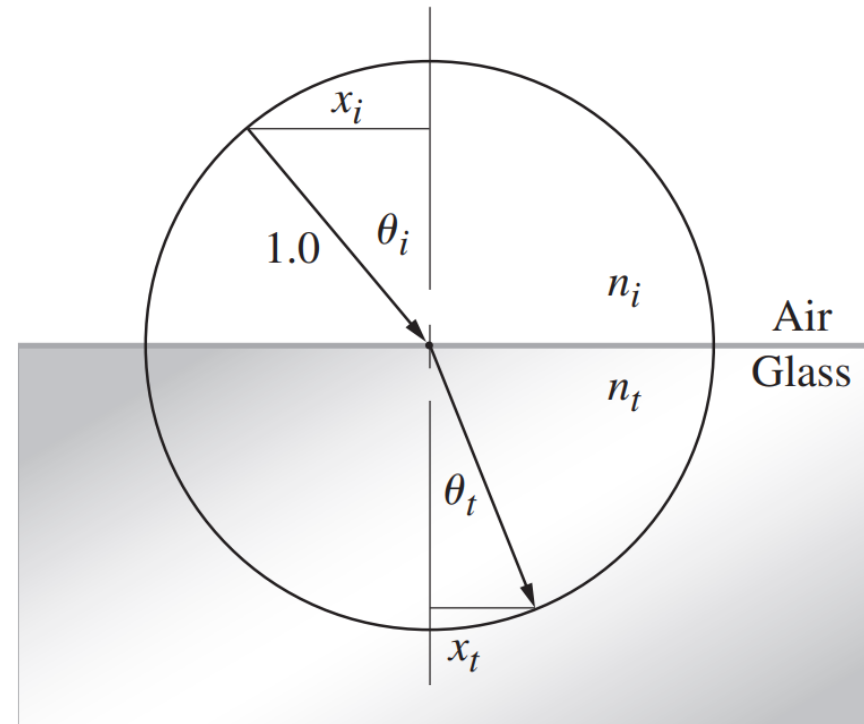
- Empiricky odvodil zákon lomu na rozhraní dvou prostředí (Obdobně jako *Ibn Sahl* a někteří další dříve...)



- Poměr  $x_i$  a  $x_t$  v jednotkové kružnici je pro všechny úhly dopadu konstantní:

$$(1.1) \quad \frac{x_i}{x_t} = n_{i \rightarrow t}$$

...kde konstanta  $n_{i \rightarrow t}$  reprezentuje **indexy lomu**.



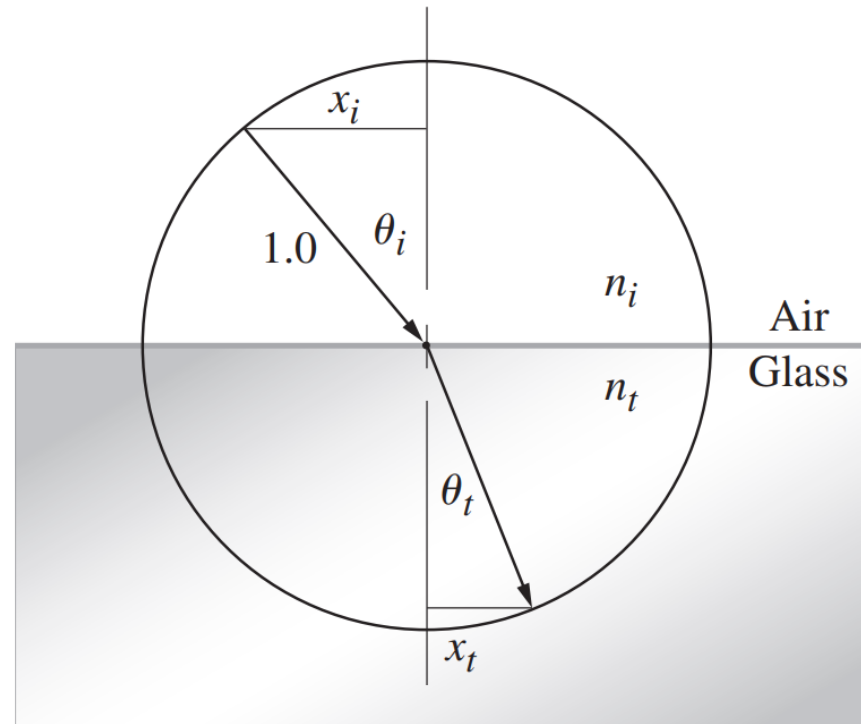
# Zákon lomu / 1621

**Rene Descartes** (1596-1650)

- Využitím geometrie vztah (1.1) publikoval v podobě dnes známe jako **Snellův zákon**:

(1.2)

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$



# Zákon lomu / 1621

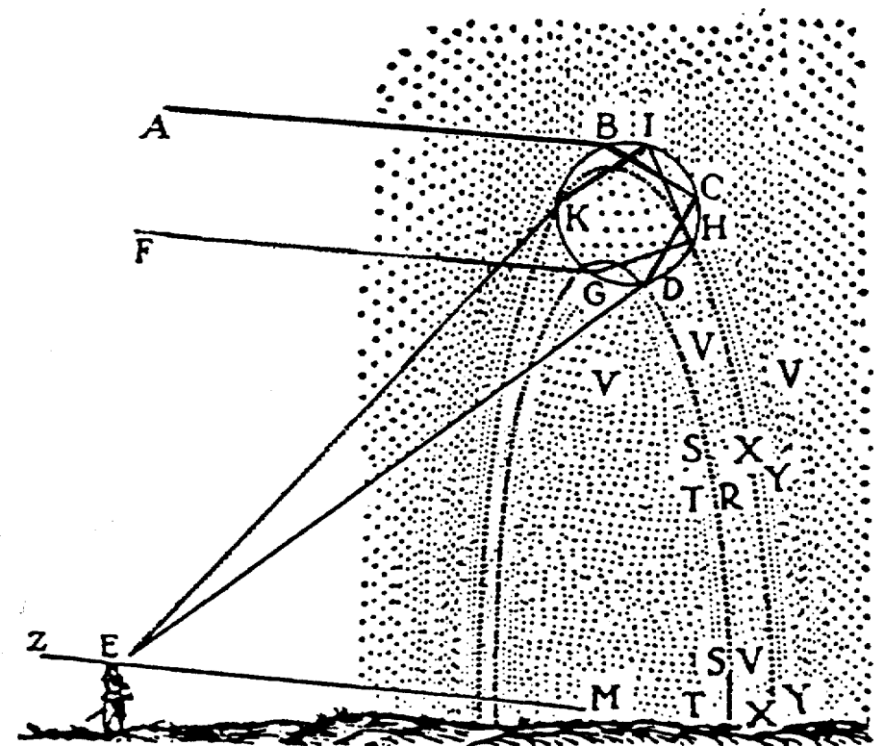
**Rene Descartes** (1596-1650)

- Využitím geometrie vztah (1.1) publikoval v podobě dnes známe jako **Snellův zákon**:

(1.2)

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

- Studoval duhu a zjistil pod jakým úhlem je viditelná
- Světlo se šíří jako tlakový pulz tzv. „éterem“ (La Dioptrique, 1637).
- Barva je způsobena rotací částic éteru.





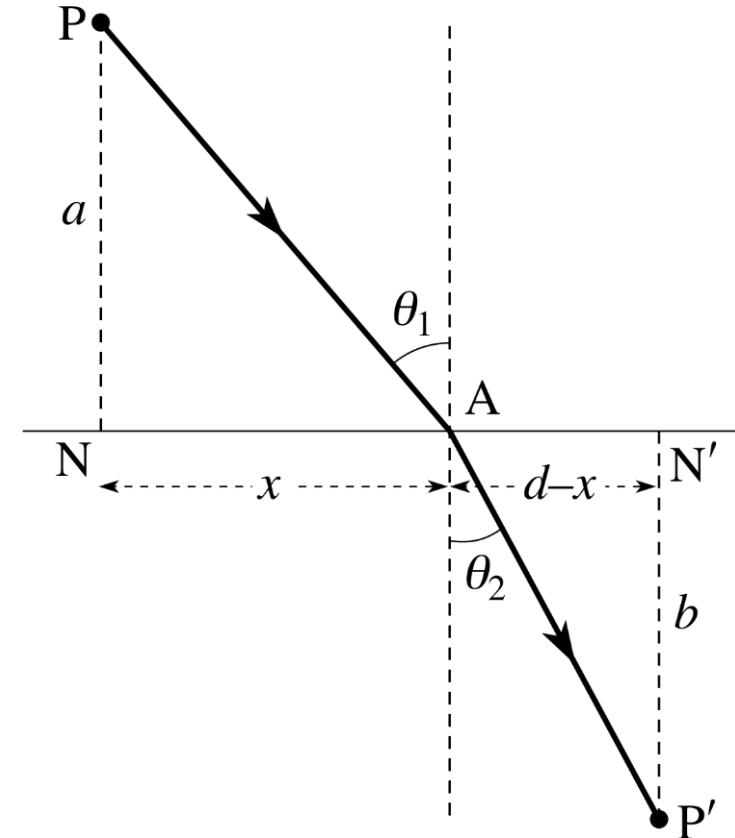
# Fermatův princip / 1657

**Pierre Fermat** (1601-1665)

- Formuloval obecný princip šíření světla mezi dvěma body
- Znovuzrození **principu nejmenšího času:**



Mezi dvěma body se paprsek šíří po dráze odpovídající **nejkratšímu času**.



# Optická dráha

Optická dráha  $\Delta$  mezi body A a B:

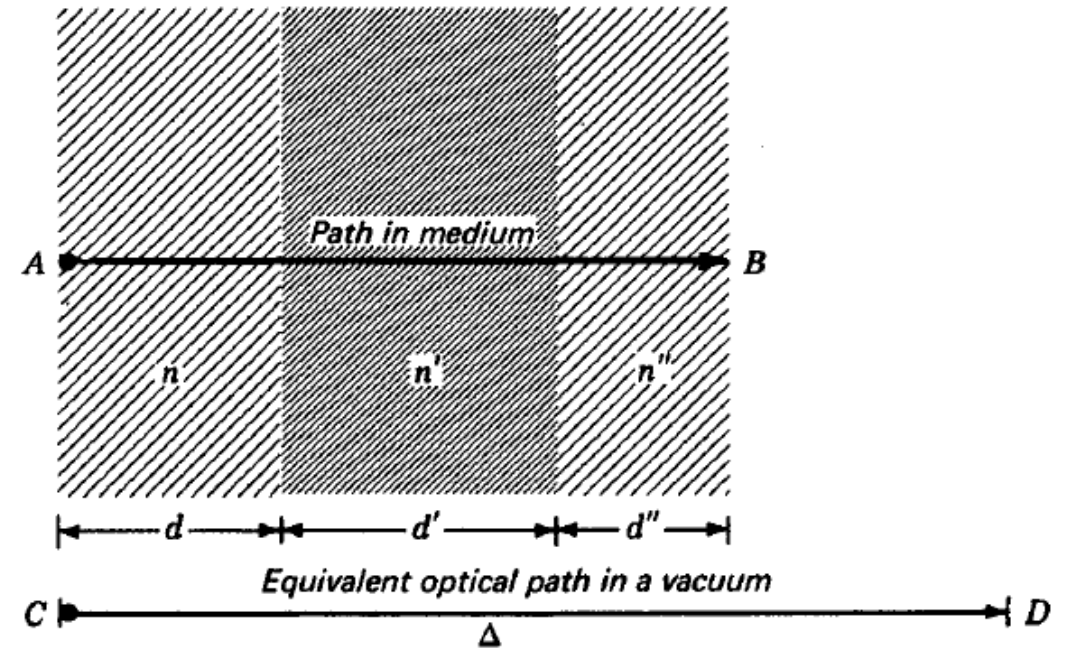
$$(1.3) \quad \Delta = [AB] = \int_A^B n(s) \cdot ds$$

Neboť platí, že

$$(1.4) \quad n \cdot ds = \frac{c}{v} \cdot ds = c \cdot dt$$

... lze optickou vzdálenost formulovat také jako vzdálenost, kterou za stejný čas paprsek urazí rychlostí  $c$  ve vakuu:

$$(1.5) \quad \Delta = c \int_A^B dt$$



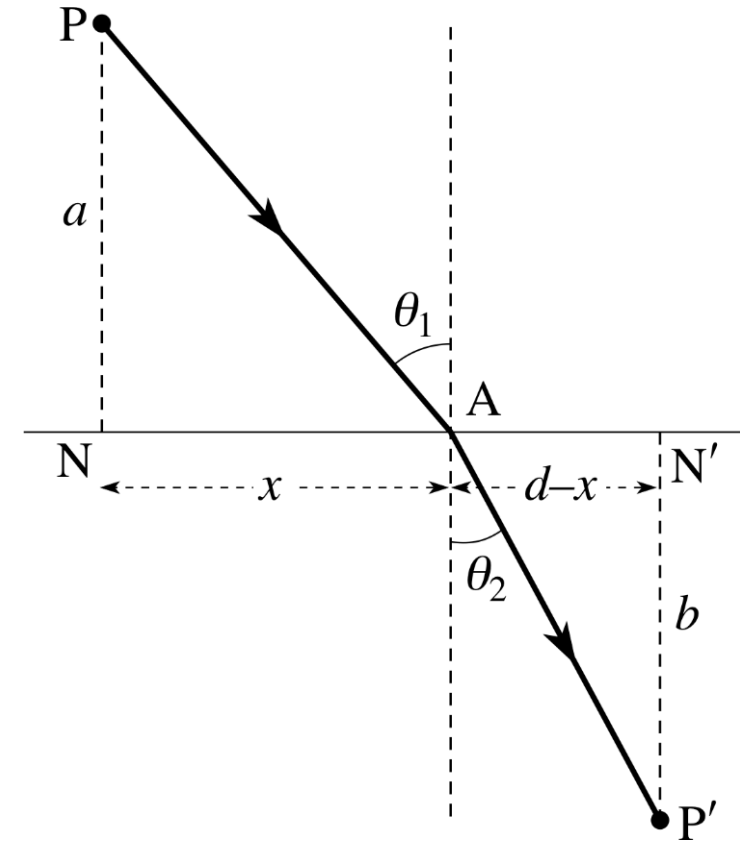
**Př.:** Nalezení trajektorie mezi body  $P$  a  $P'$  v různých prostředích:

- Vyjádříme optickou dráhu mezi body  $P$  a  $P'$ :

$$(1.6) \quad \Delta = |PA| \cdot n + |AP'| \cdot n'$$

- Hledáme minimum optické dráhy v závislosti na souřadnici  $x$  bodu  $A$ :

$$(1.7) \quad \frac{d\Delta}{dx} = 0$$



**Př.:** Nalezení trajektorie mezi body  $P$  a  $P'$  v různých prostředích:

- Vyjádříme optickou dráhu mezi body  $P$  a  $P'$ :

$$(1.6) \quad \Delta = |PA| \cdot n + |AP'| \cdot n'$$

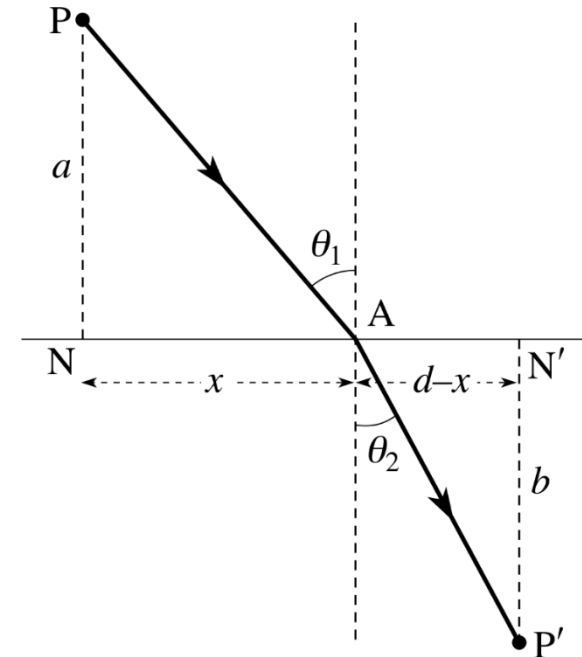
- Hledáme minimum optické dráhy v závislosti na souřadnici  $x$  bodu  $A$ :

$$(1.7) \quad \frac{d\Delta}{dx} = 0$$

- Úpravou, dosazením a vyjádřením dostáváme:

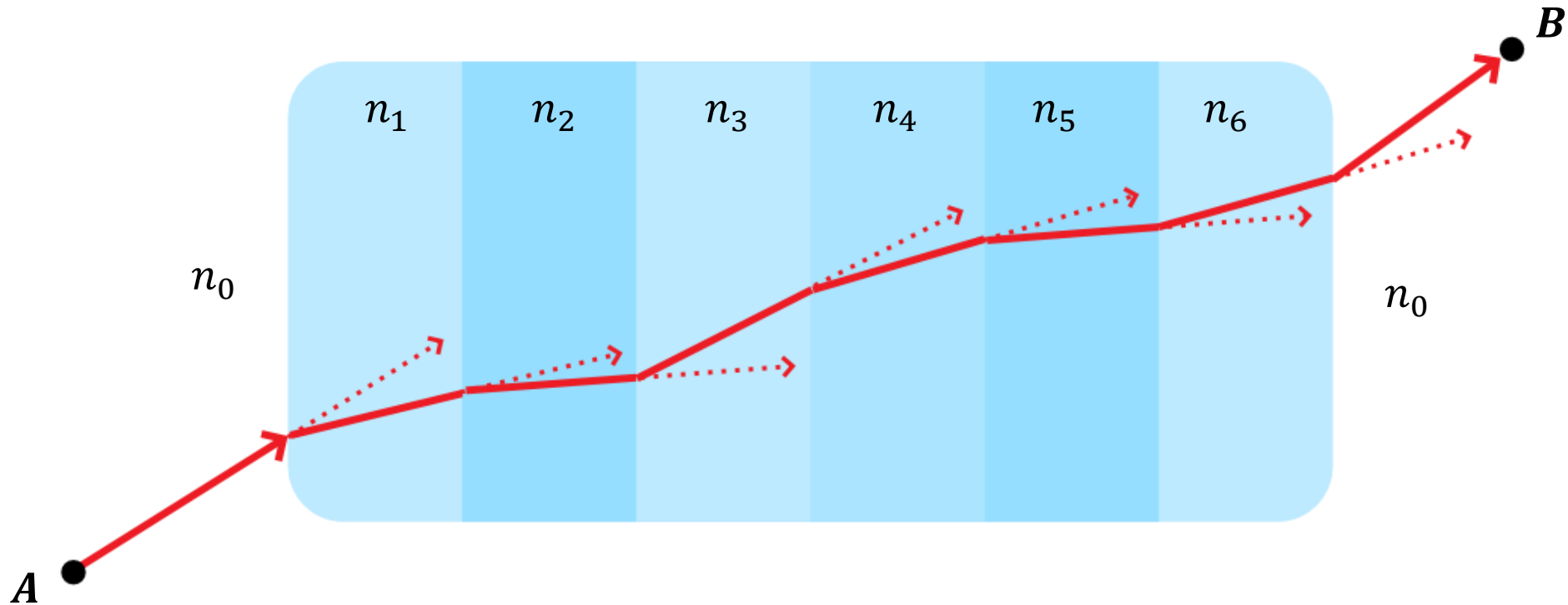
$$(1.8) \quad n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

**Snellův zákon je důsledek Fermatova principu.**



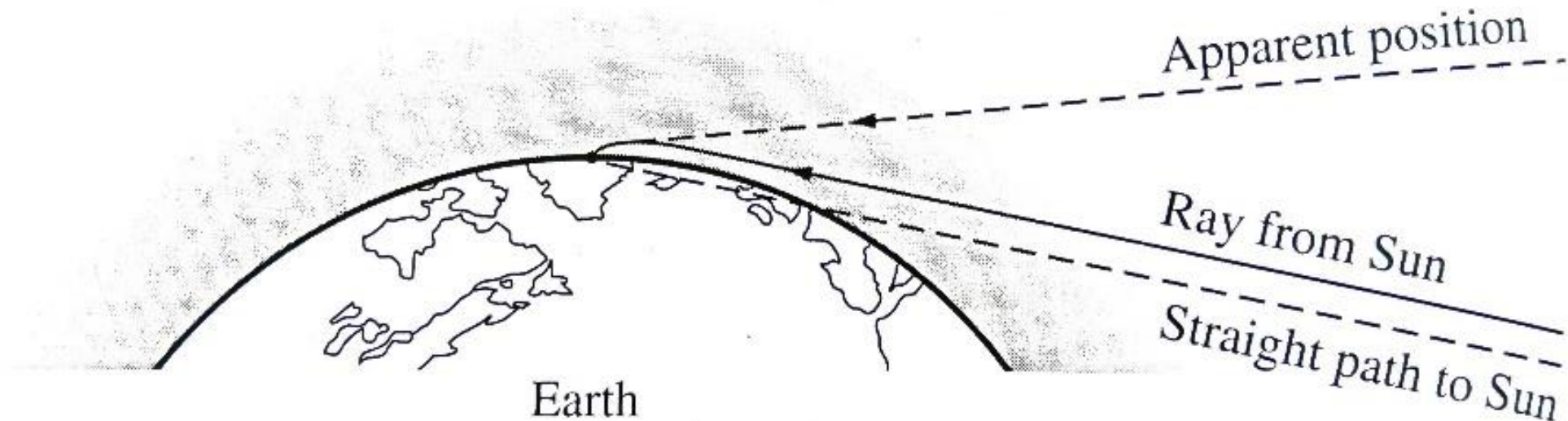
# Série rozhraní

Skutečná trajektorie mezi body **A** a **B** odpovídá nejkratší možné optické dráze.



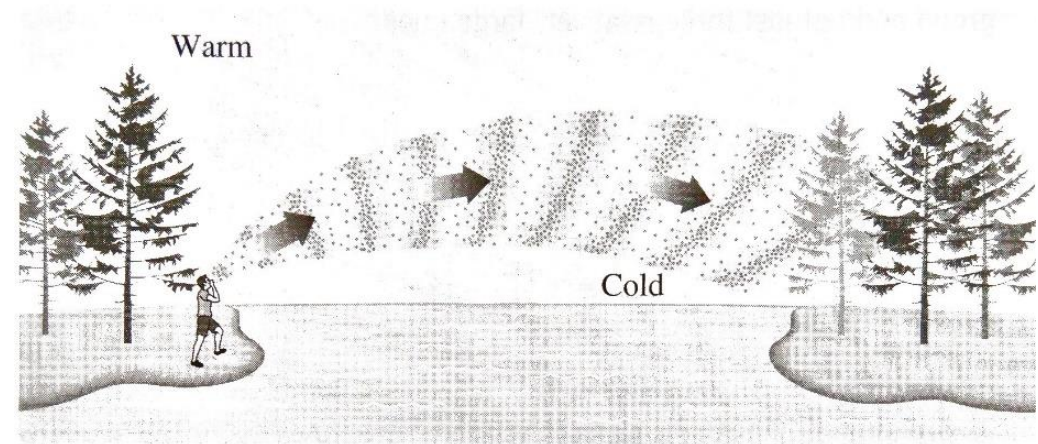
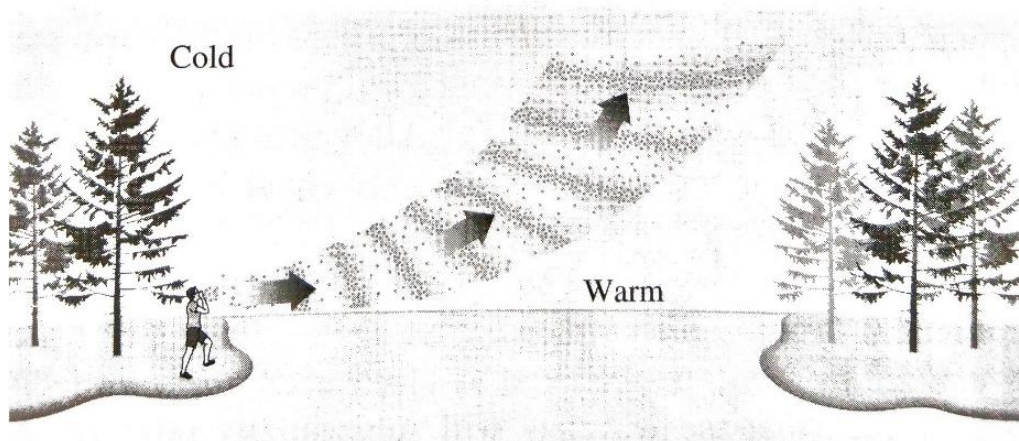
# Slunce za obzorem

Gradientní index lomu v atmosféře vytváří iluzi, že je slunce ještě nad obzorem.

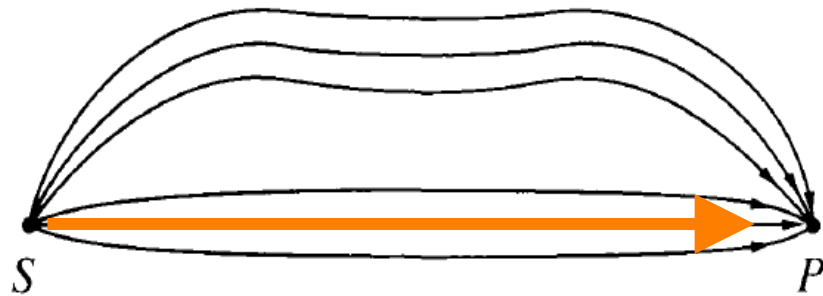


# Paralela v akustice

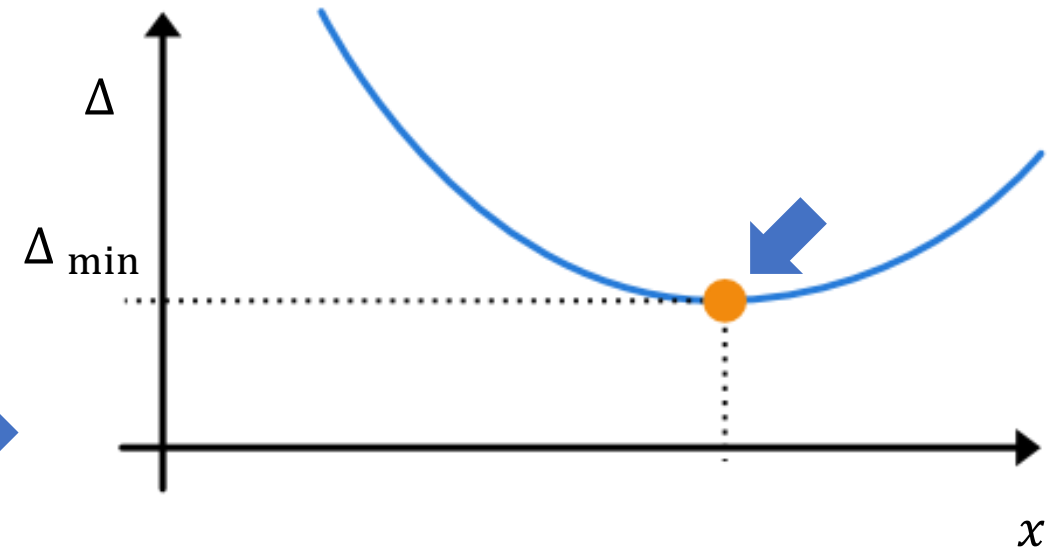
Gradientní teplota vzduchu způsobí zakřivenou trajektorii zvukových vln.



# Fermatův princip – přesnější formulace



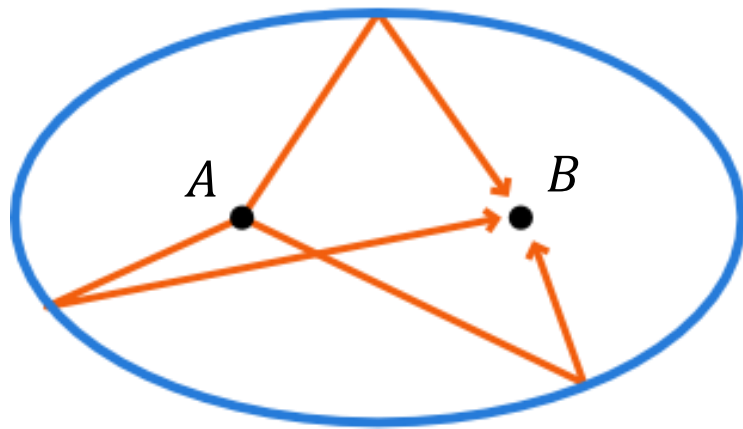
Potenciální trajektorie mezi body S a P



Optické dráhy různých trajektorií  $x$



# Fermatův princip – eliptické zrcadlo

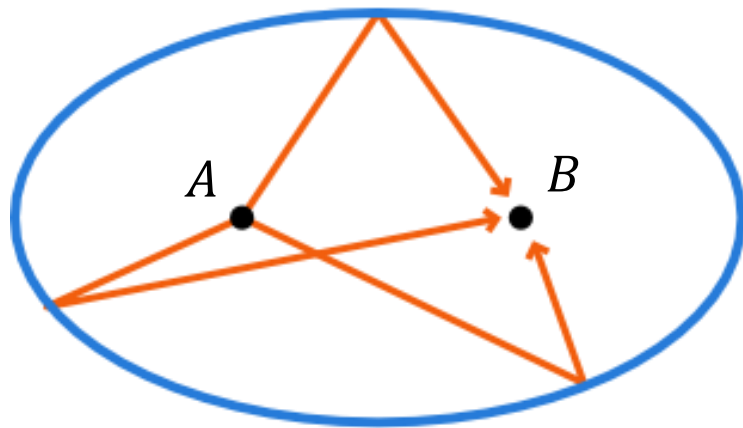


Potenciální trajektorie mezi body A a B  
v eliptickém zrcadle

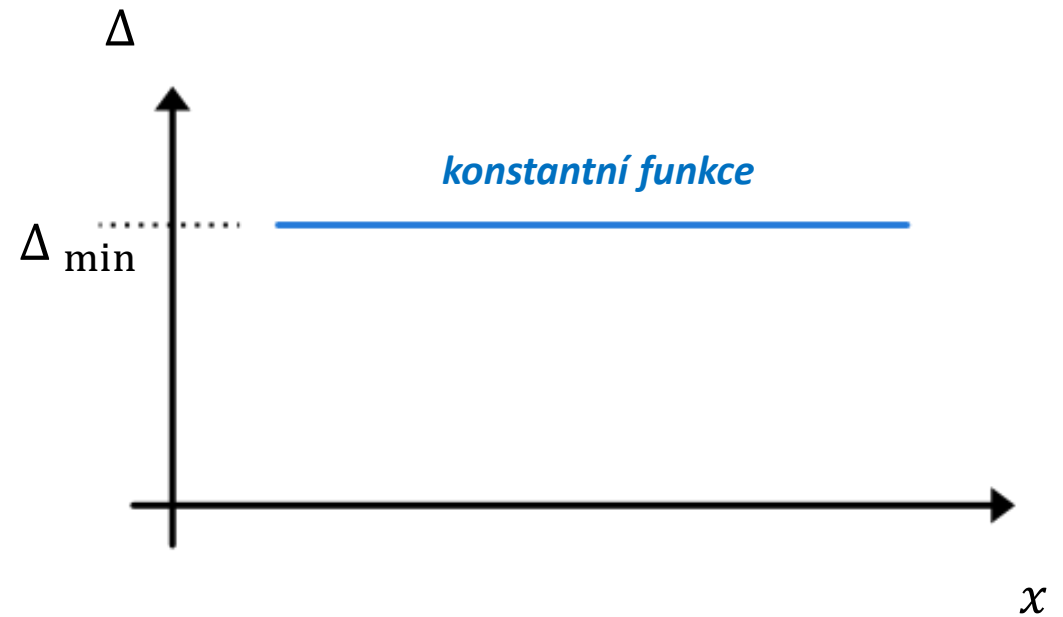


Optické dráhy různých trajektorií  $x$

# Fermatův princip – eliptické zrcadlo

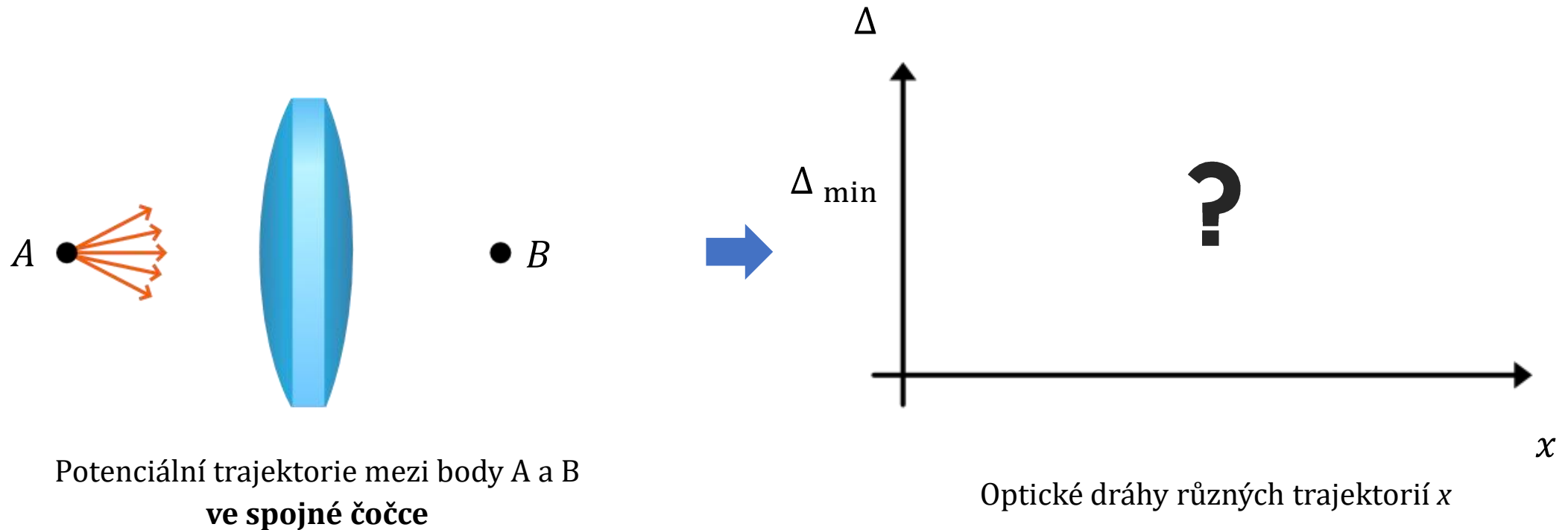


Potenciální trajektorie mezi body A a B  
v eliptickém zrcadle



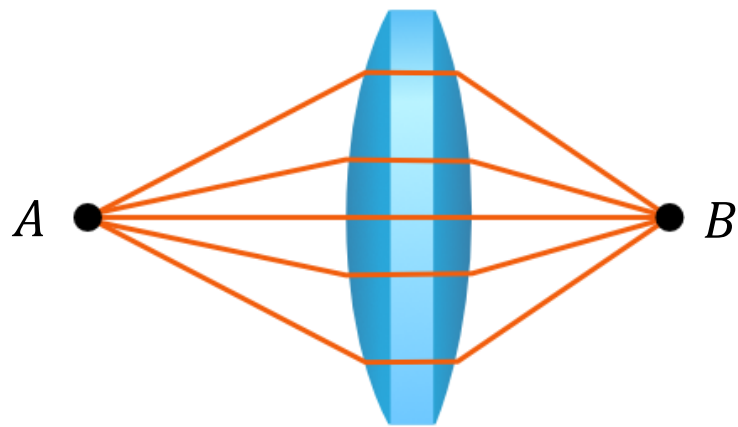
Optické dráhy různých trajektorií  $x$

# Fermatův princip – čočka

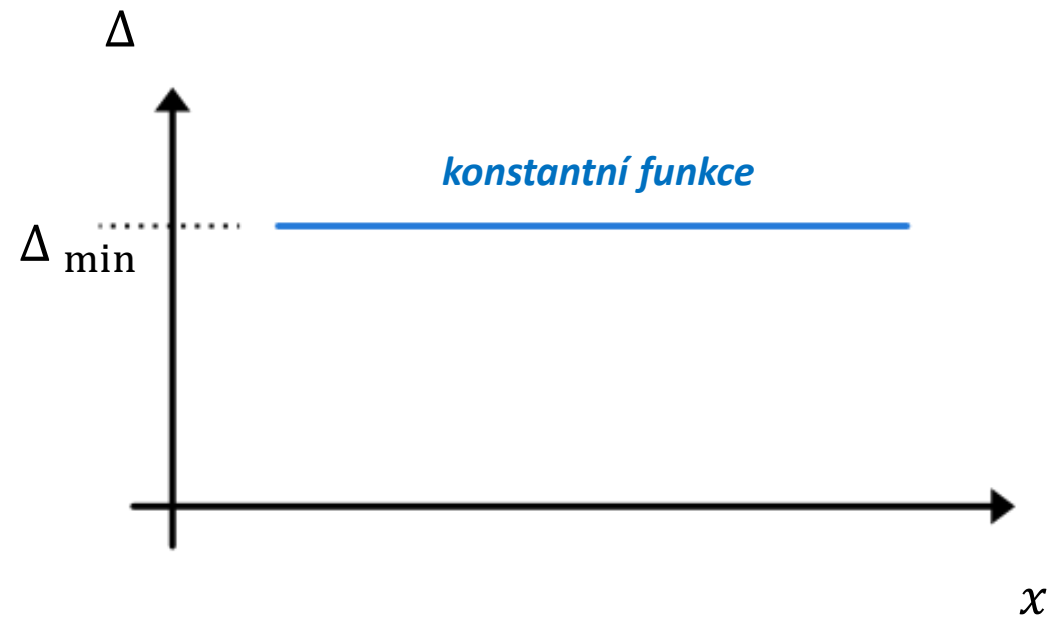


# Fermatův princip – čočka

Nejen nejkratší optická dráha je povolena...

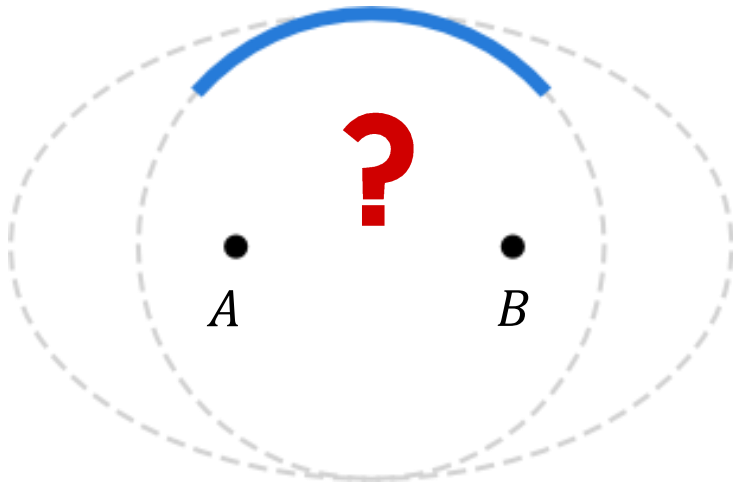


Potenciální trajektorie mezi body A a B  
ve spojné čočce



Optické dráhy různých trajektorií  $x$

# Fermatův princip – sférické zrcadlo

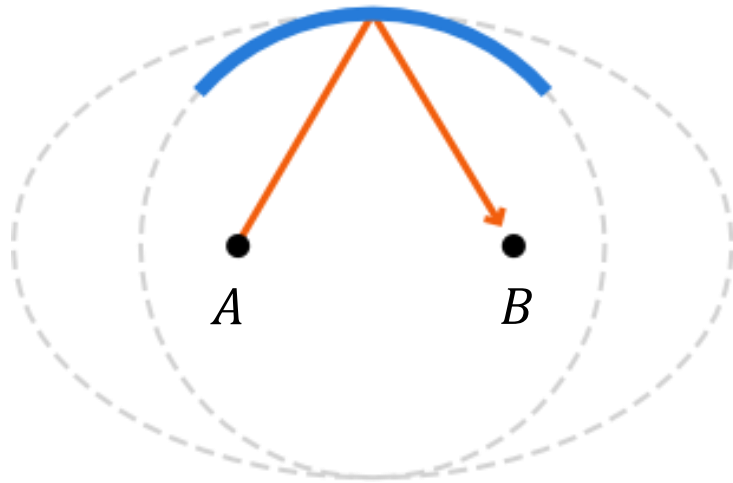


Trajektorie mezi body A a B  
ve **sférickém zrcadle**



Optické dráhy různých trajektorií  $x$

# Fermatův princip – sférické zrcadlo

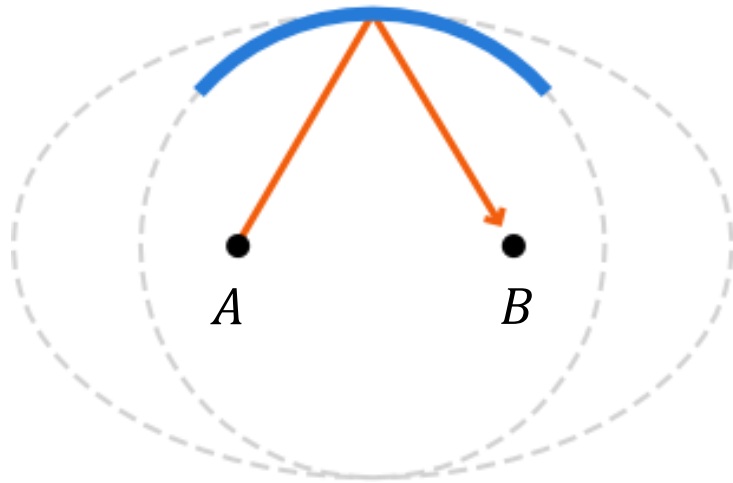


Trajektorie mezi body A a B  
ve **sférickém zrcadle**

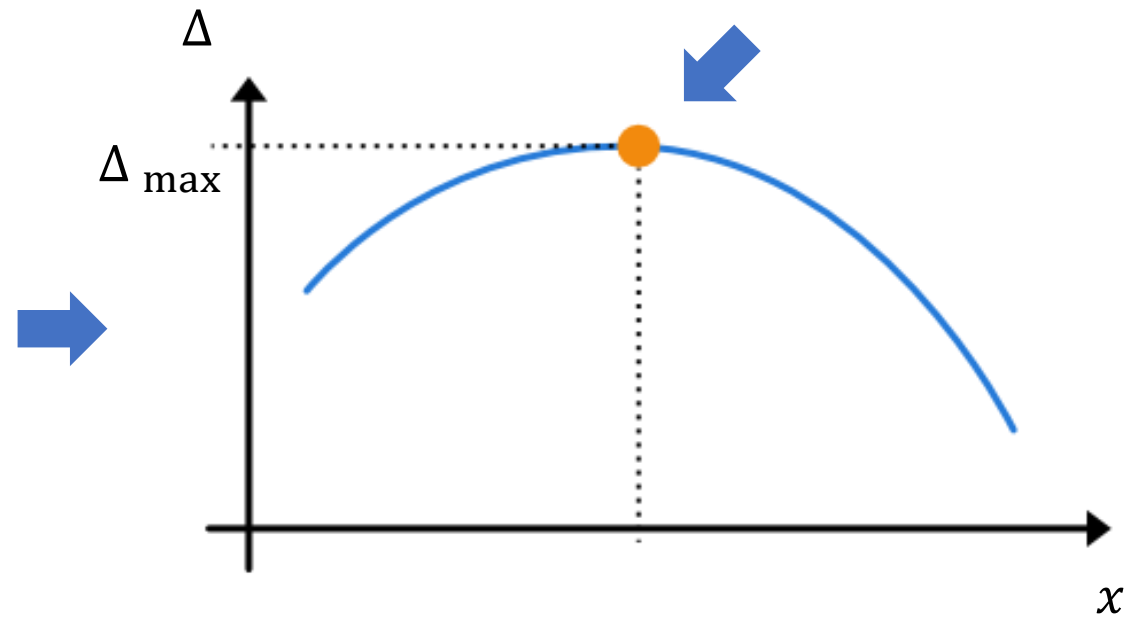


Optické dráhy různých trajektorií  $x$

# Fermatův princip – sférické zrcadlo



Trajektorie mezi body A a B  
ve **sférickém zrcadle**



Optické dráhy různých trajektorií  $x$

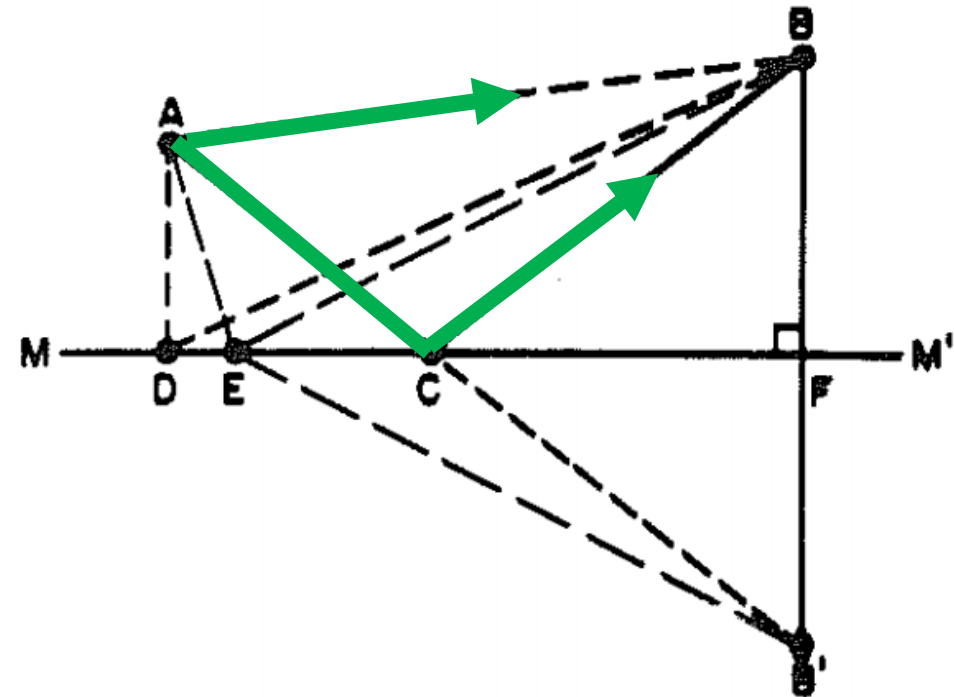
# Fermatův princip – přesnější formulace

## Možné trajektorie paprsku

- Nejkratší dráha
- Nejdelší dráha
- Shodné dráhy

## Více stacionárních drah

- Dráha **AB**
- Dráha **ACB**





# Fermatův princip – přesnější formulace


---

## Možné trajektorie paprsku

- Nejkratší dráha
- Nejdelší dráha
- Shodné dráhy

## Více stacionárních drah

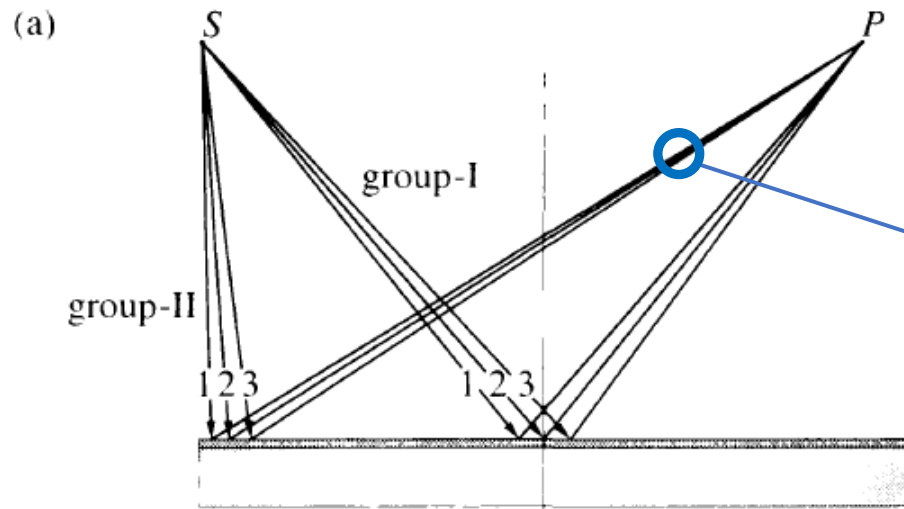
- Dráha **AB**
- Dráha **ACB**



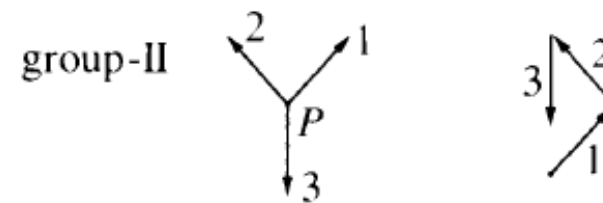
Optická dráha trajektorie paprsku je **stacionární**.  
vzhledem k malým změnám této trajektorie.

# Výběr dráhy?

Důsledek vlnové podstaty světla a **interference**.



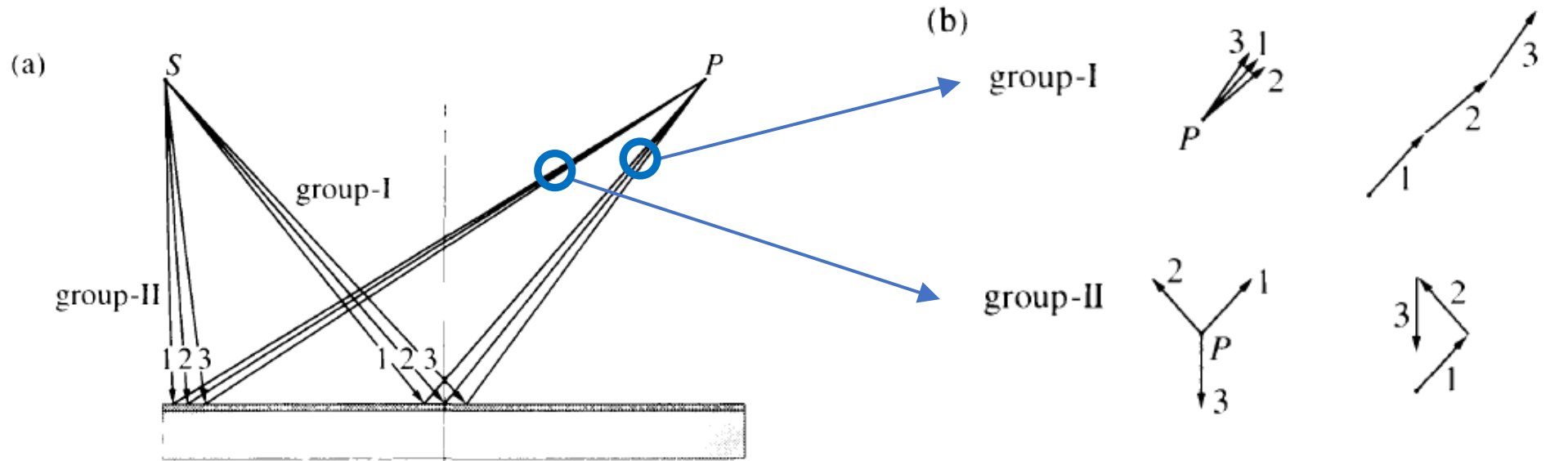
2 ukázkové skupiny paprsků



Fázory skládajících se vln v bodě P

# Výběr dráhy?

Důsledek vlnové podstaty světla a **interference**



2 ukázkové skupiny paprsků

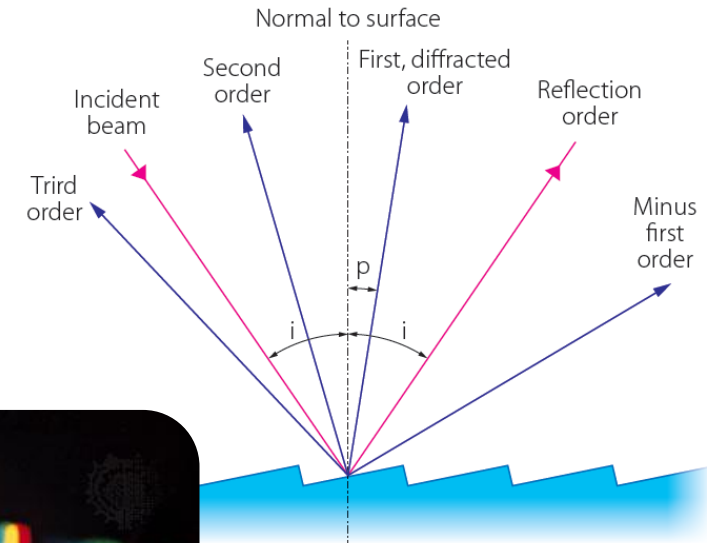
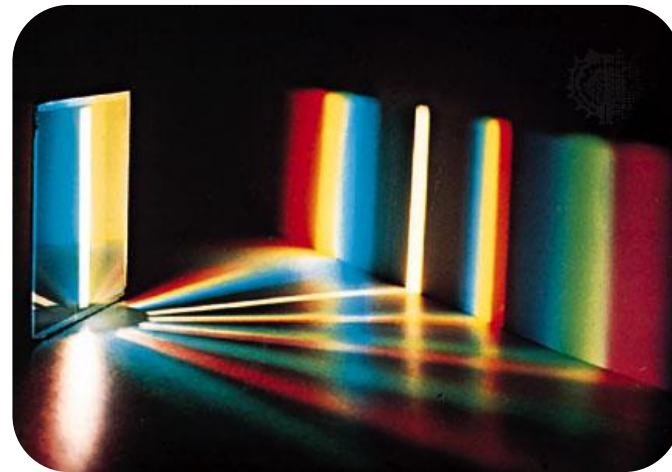
Fázory skládajících se vln v bodě P

# Difrakční mřížka

- Periodické narušení odrazného povrchu umožní **konstruktivní interferenci z více směrů.**

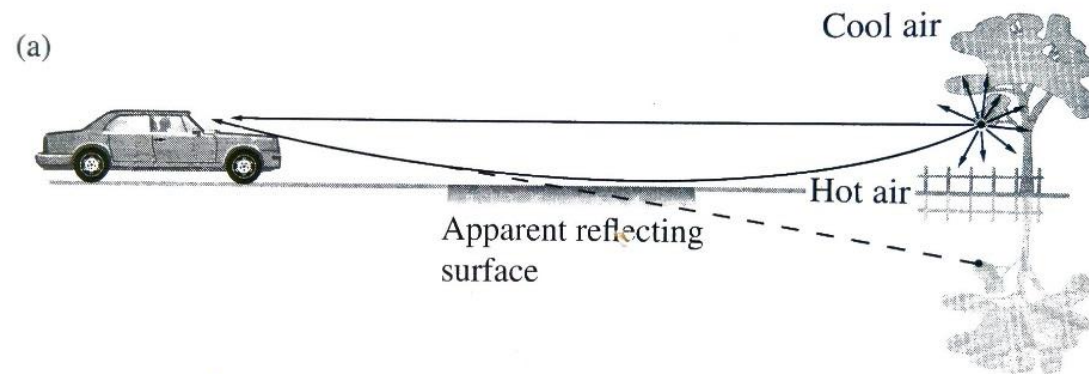


- Šíření světla do směrů odporujícím zákonu odrazu a lomu.



# Fata morgana

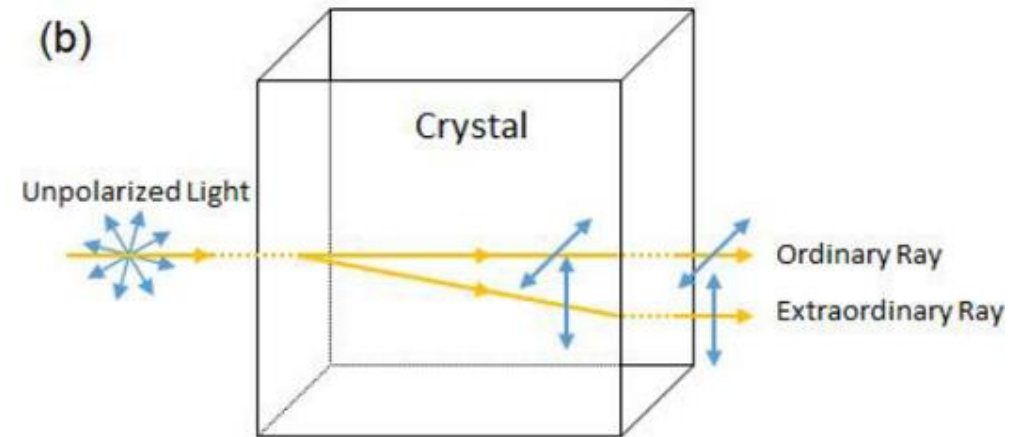
Zakřivení trajektorie paprsku vlivem gradientního indexu lomu



# Dvojlom / 1669

**Rasmus Bartholin** (1625-1698)

- Pozorování **dvojlomu** na krystalu kalcitu ( $\text{CaCO}_3$ ).
- Důsledek **polarizace** světla a **anizotropního** prostředí v krystalu.



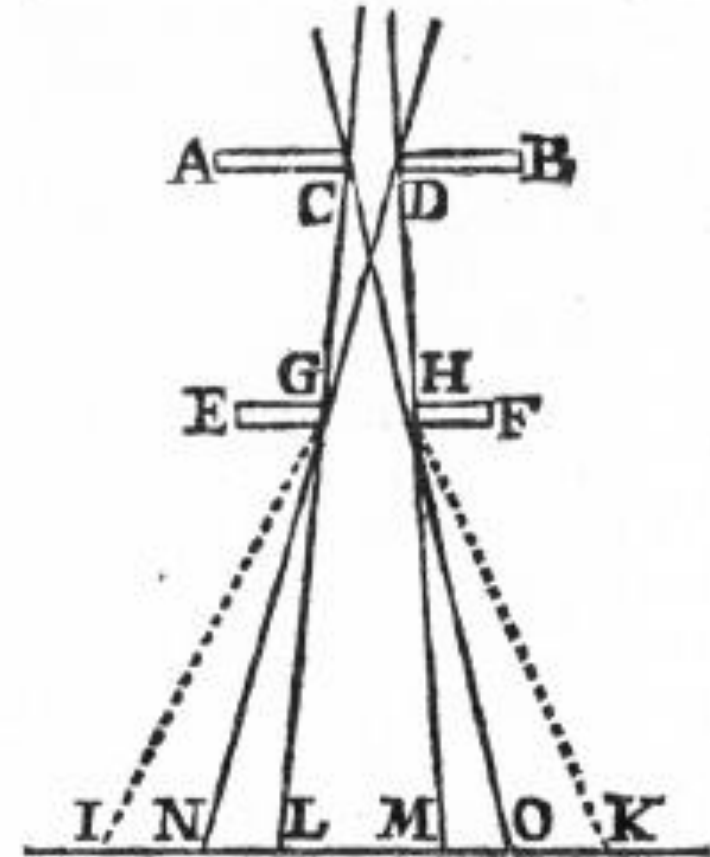
# Paprsky ve stínu / 1657

**Francesco Maria Grimaldi** (1618-1663)

- Pozoroval odklon od přímočarého šíření světla
- Pásky světla ve stínu tyče osvětlené malým zdrojem světla.




Difrakce

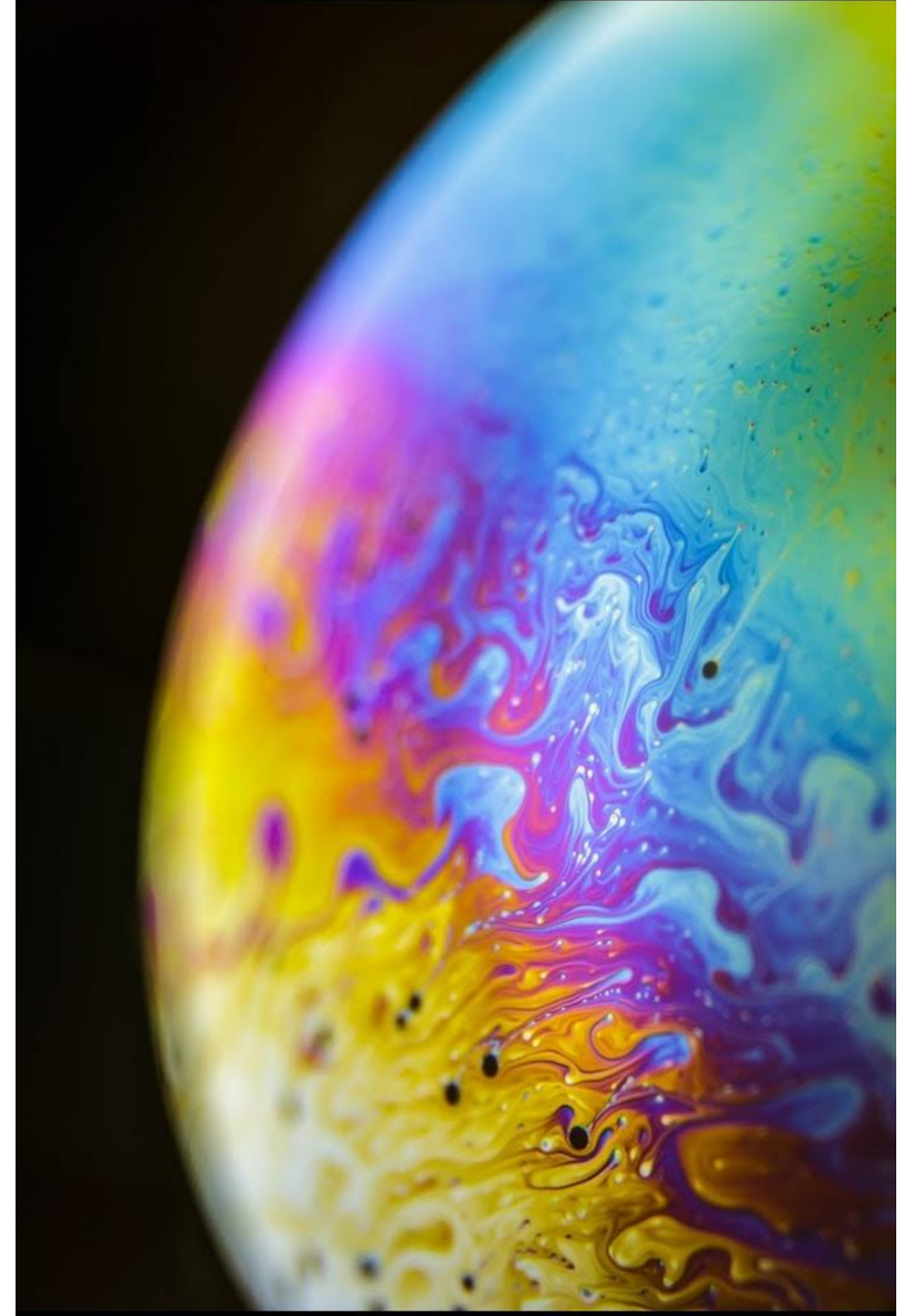


# Počátky vlnové teorie / 1657

---

## Robert Hook (1635-1703)

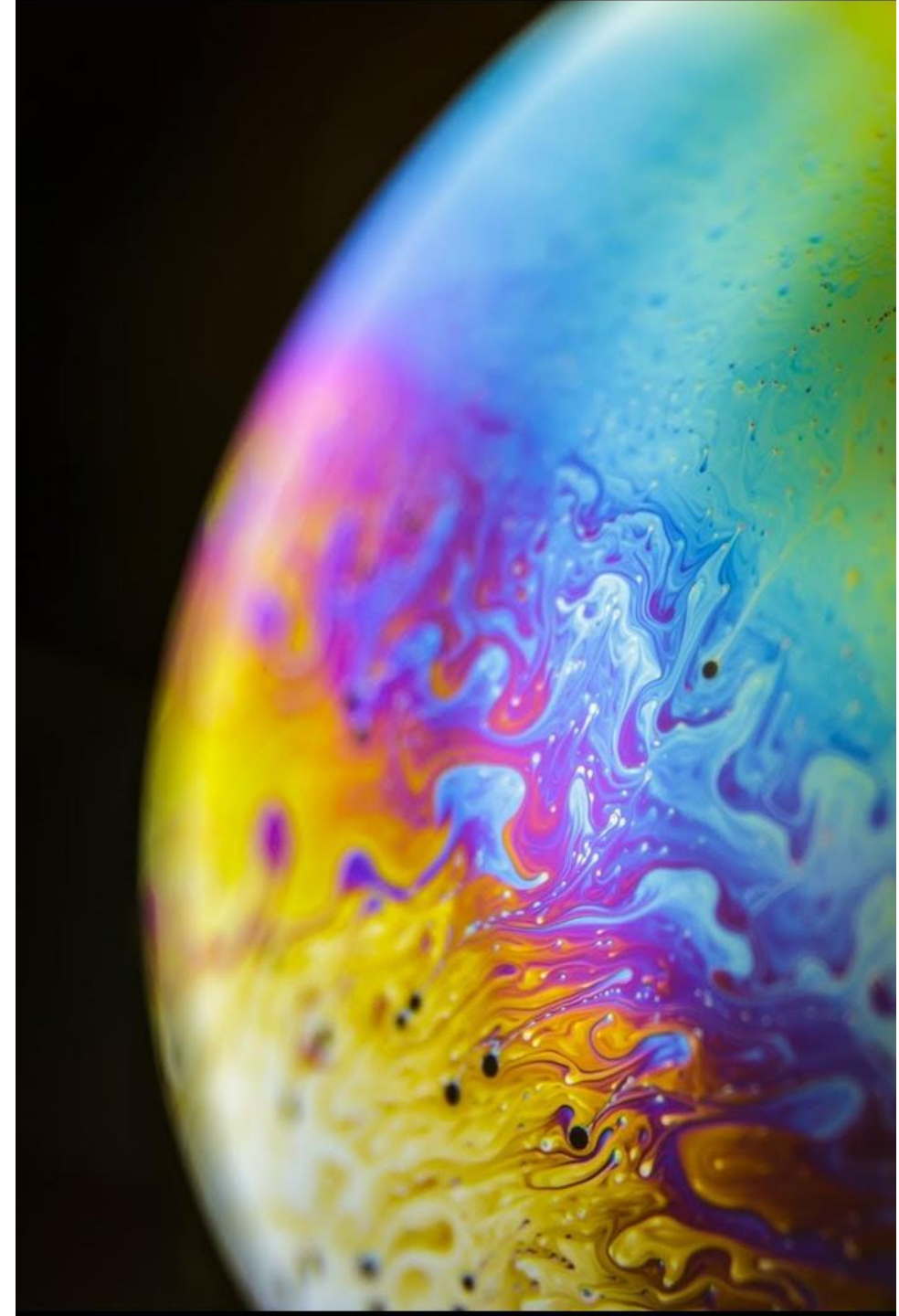
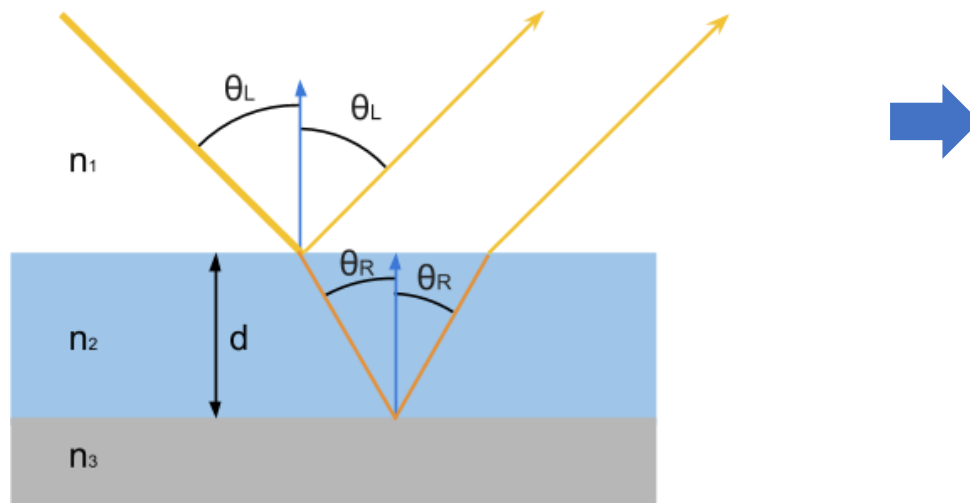
- Pozoroval barevnou **interferenci** na ..... tenkých vrstvách.
- Světlo je vibrace o velmi vysoké frekvenci s rychlosti šířící se prostorem **éteru**.
- Každý pulz/vibrující bod generuje něco jako kulovou vlnu - **počátek vlnové teorie**.





# Interference na tenké vrstvě

- Interference vln odražených zpět od různých rozhraní více vrstevných materiálů (mýdlová bublina ve vzduchu)



# Švětlo - proud částic

---

**Isaac Newton** (1642-1727)

- Pozoroval **disperze** slunečního světla v hranolu (1665).\*
- Barvy jsou způsobeny vibracemi **světelných částic** v éteru
- Zastánce (spíše) částicové teorie



“*Jak vysvětlit přímočaré šíření  
pomocí vln?*”

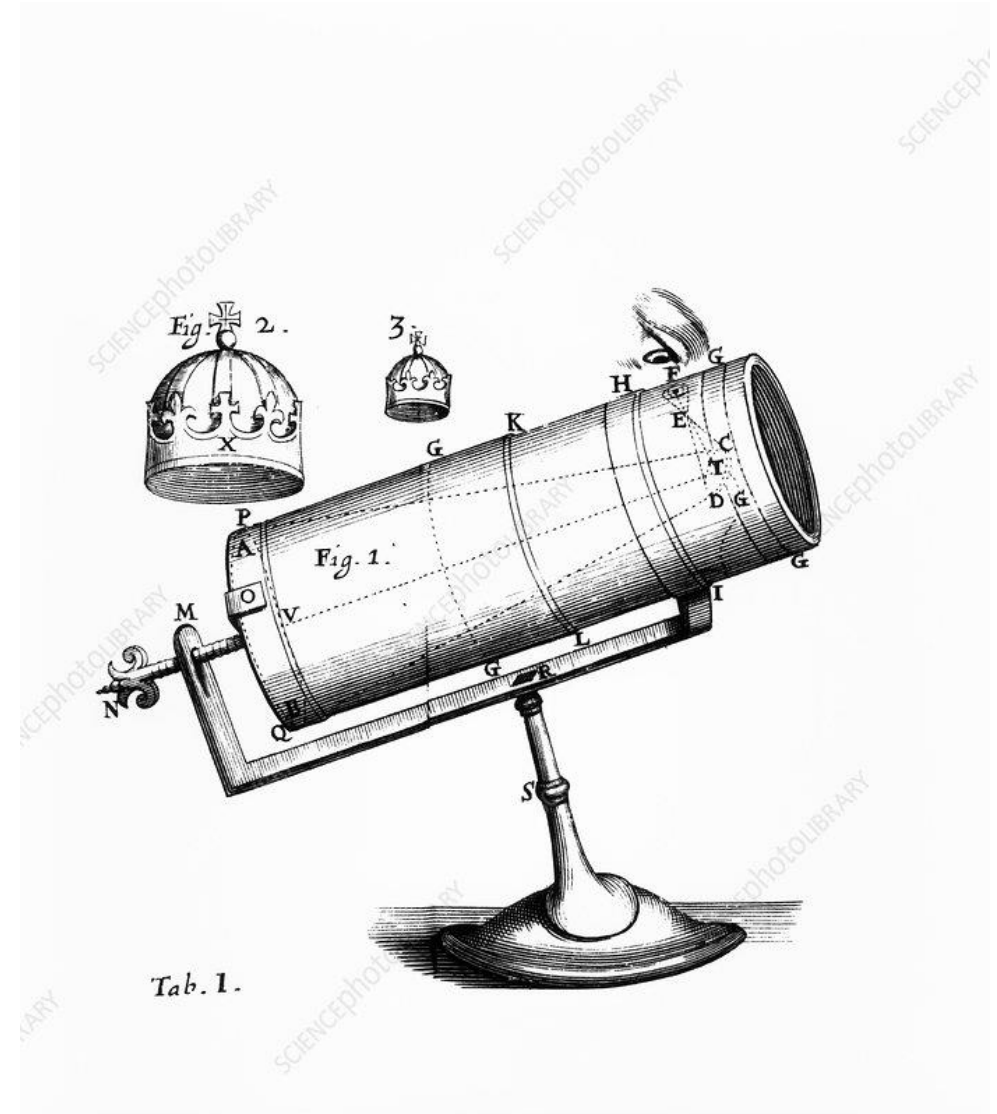
\*dispersi však zkoumal už Jan Marcus Marci o 24 let dříve.



# Švětlo - proud částic

**Isaac Newton** (1642-1727)

Z důvodu eliminace barevné vady navrhl reflexní teleskop s dvěma zrcadly (1668).\*

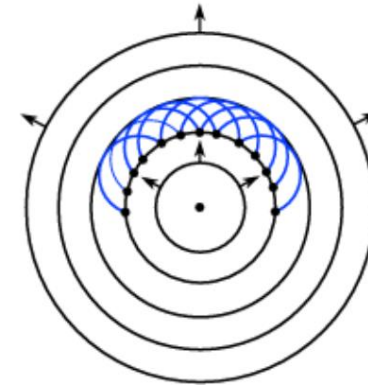


\* První reflexní teleskope navrhl D. Gregory, (1663)

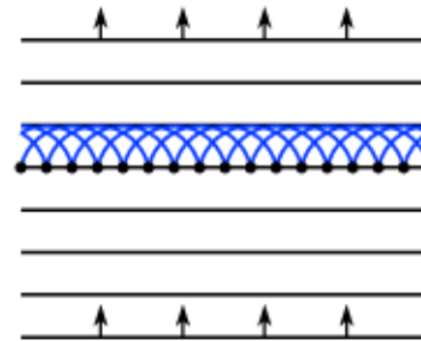
# Huygensův princip

**Christian Huygens** (1629-1695)

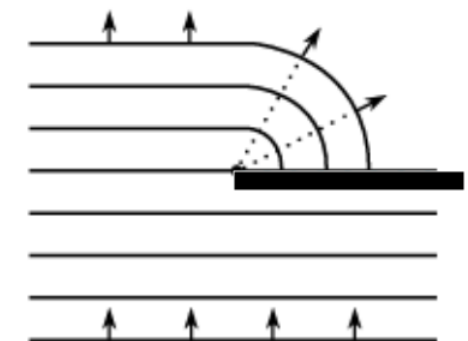
- Rozpracoval vlnovou teorii: Každé místo, kam vlnění dospěje se stává zdrojem nové elementární kulové vlny\*.
- Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch.



**Kulová vlna**



**Rovinná vlna**



**Ohyb světla**

\* Dříve zmíněno také Janem Marcuse Marci z Kronlandu.

# Huygensův princip

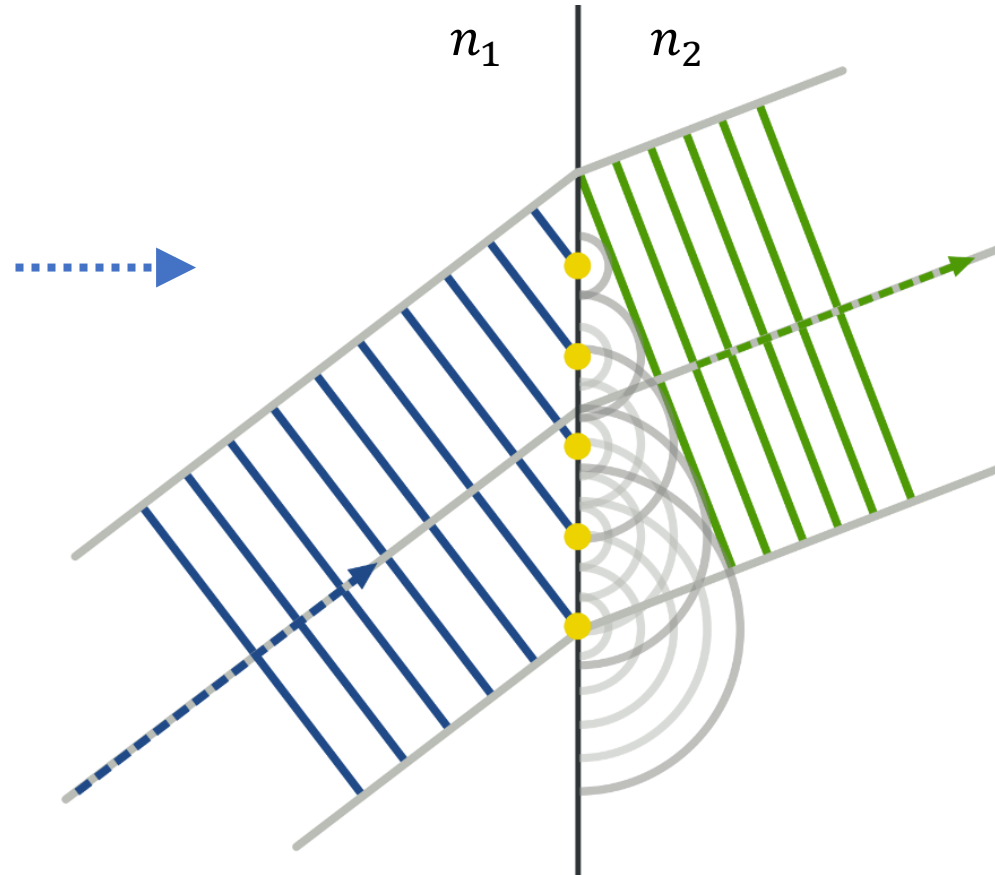
**Christian Huygens** (1629-1695)

- Pomocí vlnové teorie popsal odraz i lom světla.
- Navrhl okulár („Huygensův“).
- Pozoroval polarizaci (na kalcitu)



“

*Dvojí povahu světla?*



# Povaha světla?

Rozpor na konci 18. století...

## Proud částic

Podpořeno silnou autoritou  
**Isaca Newtona.**

**VS**

## Vlnění v éteru

Pozvolna převládající  
hypotéza

**Éter** – všude-přítomný velice lehký, či ne hmotný materiál



# Rychlost světla – první experimenty / 1638

---

## Galileo Galilei (1564-1642)

- První pozemský test s lampami (1638)
- ... skončil nezdarem ...☹

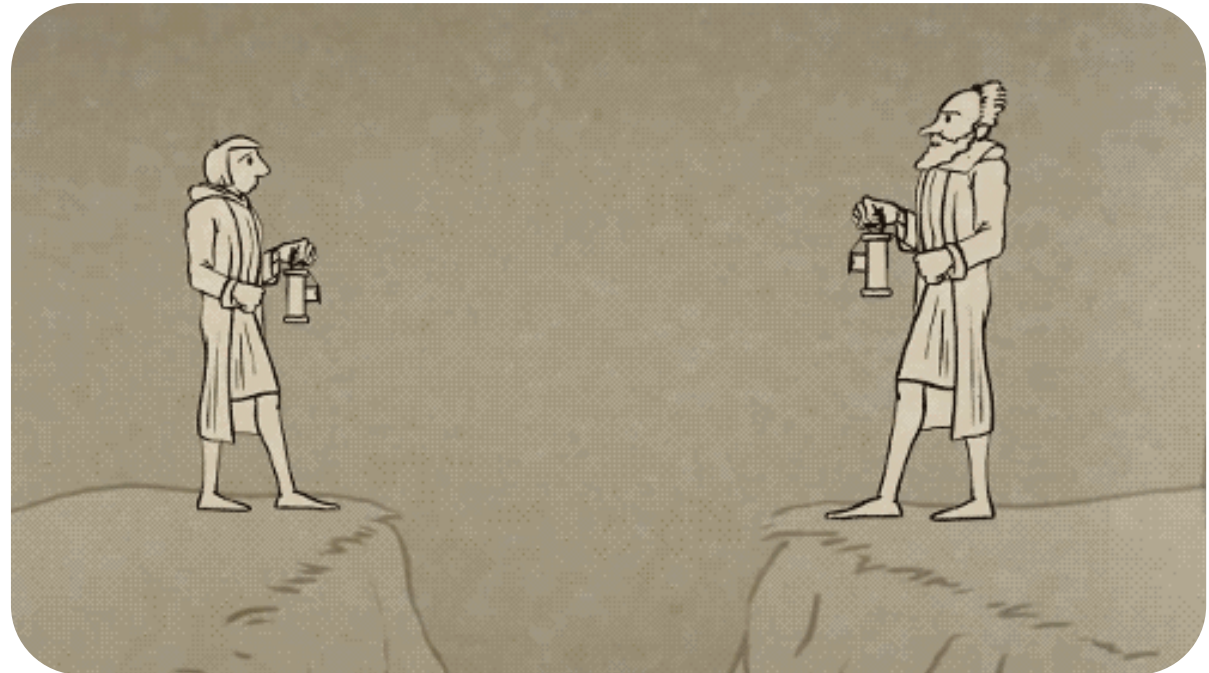


Image credit: <https://akrimiblog.wordpress.com/2017/02/12/absolute-speed/>

# Rychlost světla / 1676

---

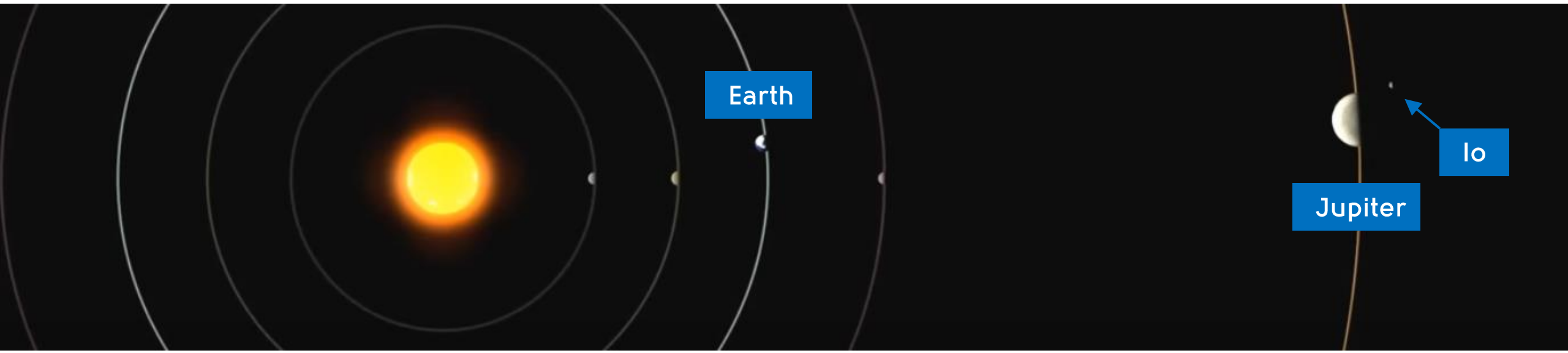
## Ole Christensen Romer (1644-1710)

- Experimentálně ověřil, že rychlost světla má konečnou hodnotu (1676).
- Pozorováním několik dob zatmění měsíce Io Jupiterem během roku.
- Rychlost byla vypočtena jako cca  $2,4 \times 10^8$  m/s (Newton, Huygens).



“

*Jednotlivá zatmění  
trvala různou dobu!*

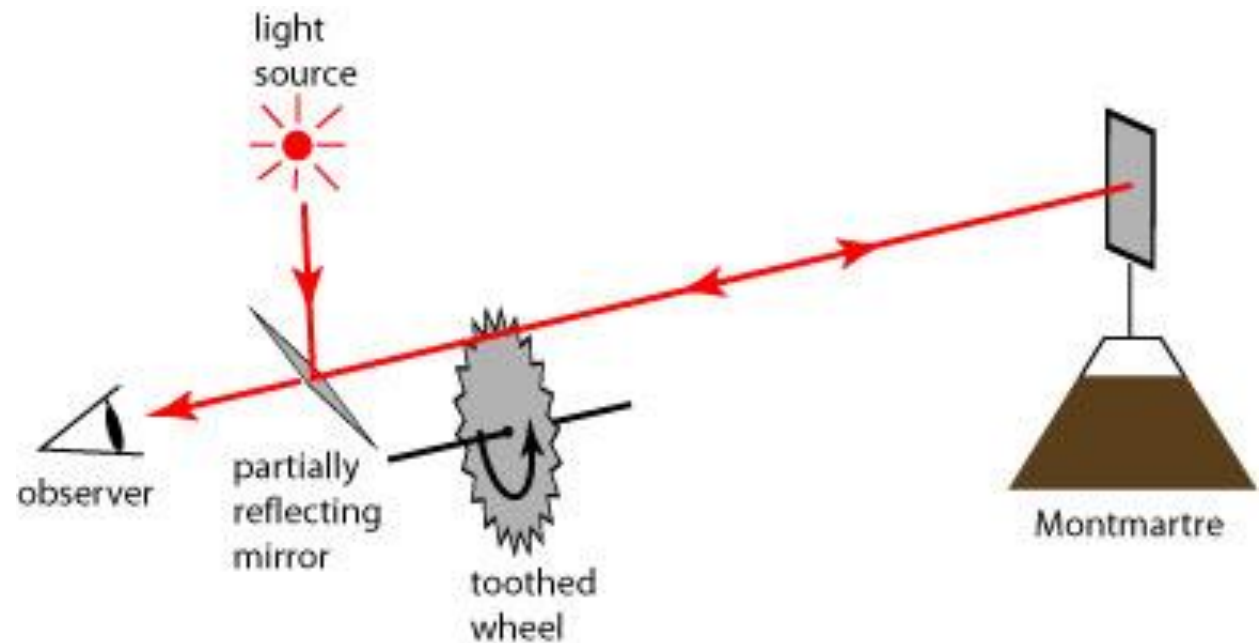




# Rychlost světla / 1849

**Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896)**

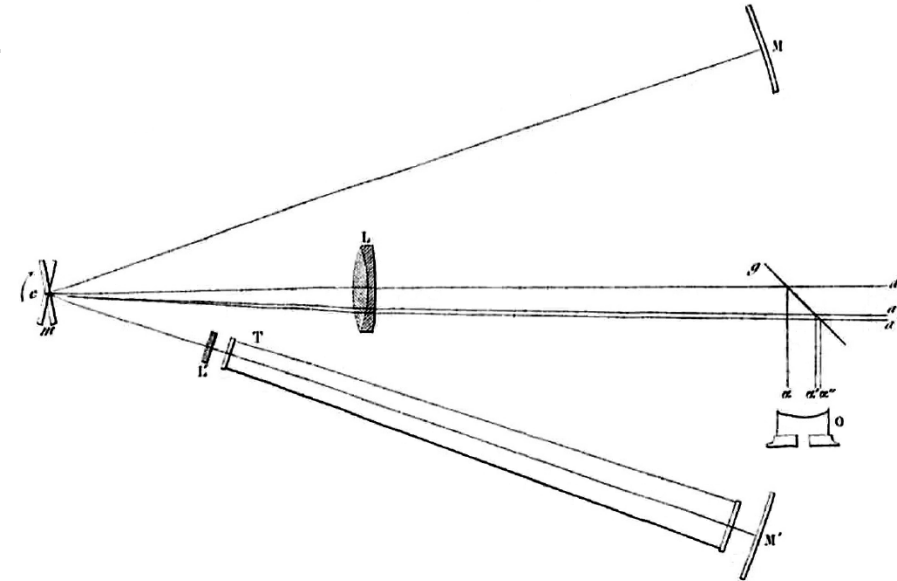
- První pozemní měření
- Použitím rotujícího děrového disku a 8,5 km vzdáleného zrcadla.
- Rychlosti určena jako  $3,153 \times 10^8$  m/s.



# Rychlost světla / 1850, 1872

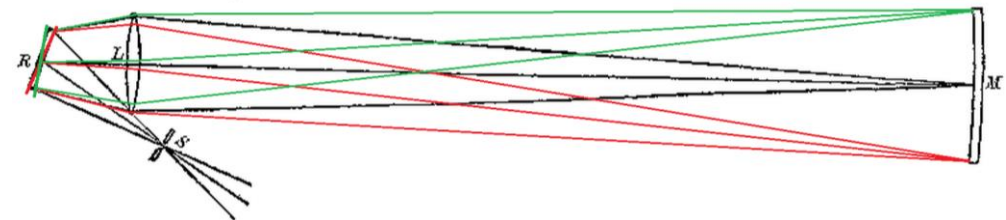
## J. L. Foucault (1819-1868)

- Disk nahrazen rotujícím zrcadlem (1850)
- Rychlosti určena jako  $2,988 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- Zjistil, že v hustším prostředí se světlo šíří pomaleji  
– **důkaz, že světlo jsou vlny v eteru.**



## Marie Alfred Cornu (1841-1902)

- Zpřesnil experiment v letech 1872-76
- Rychlosti určena jako  $3,004 \times 10^8 \text{ m/s}$ .



# Barevná vada

---

- Vývoj taktéž na poli optických přístrojů a jejich **optických vad**.

## Leonhard Euler (1707-1783)

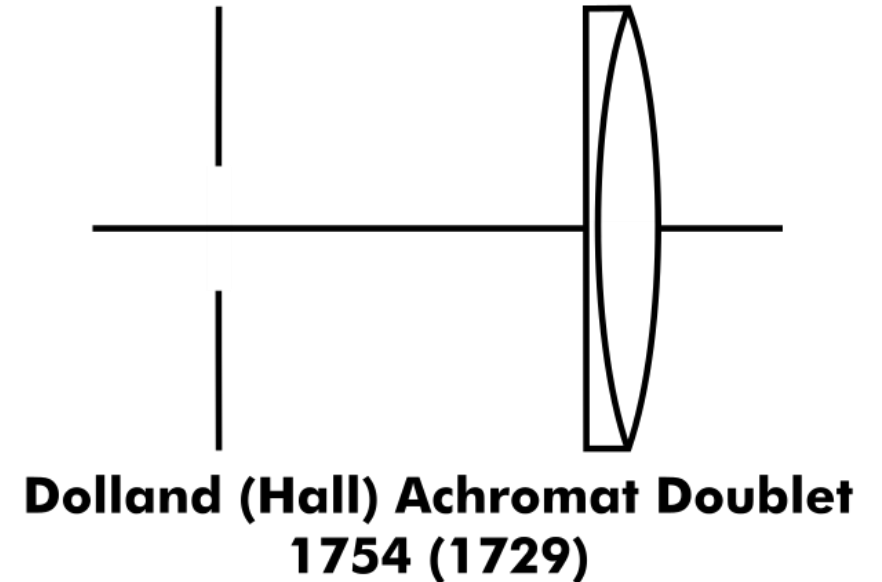
- Objevil princip, jak lidské oko minimalizuje barevnou vadu - kombinaci optických členů s různou disperzí.



## John Dollond (1706-1761)

- První achromatický dublet (1754) \*
- Kombinace korunového a flintového skla.

\* Dříve navrhl (ale nepublikoval) Chester Moor Hall



# 19. století – vlnová teorie

---

## Thomas Young (1773-1829)

- Přidal do vlnové teorie koncept **interference**
- Vysvětlil interferenční proužky na tenkých vrstvách.
- **Youngův experiment** – interference na dvoj-štěrbině
- Stanovil vlnové délky jednotlivých barev (z Newtonových dat i disperzi).



“

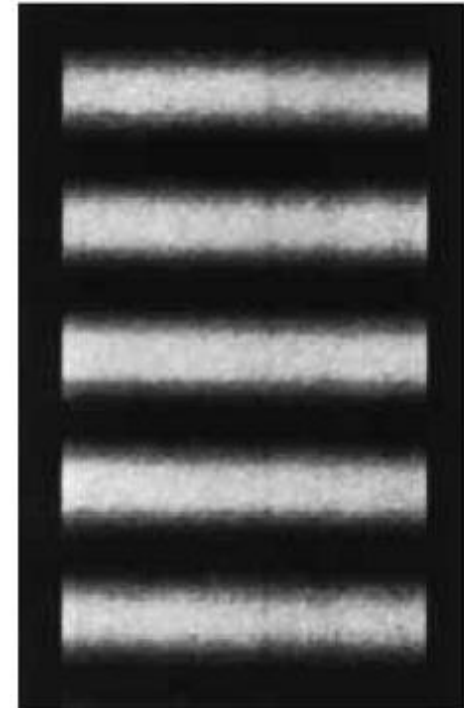
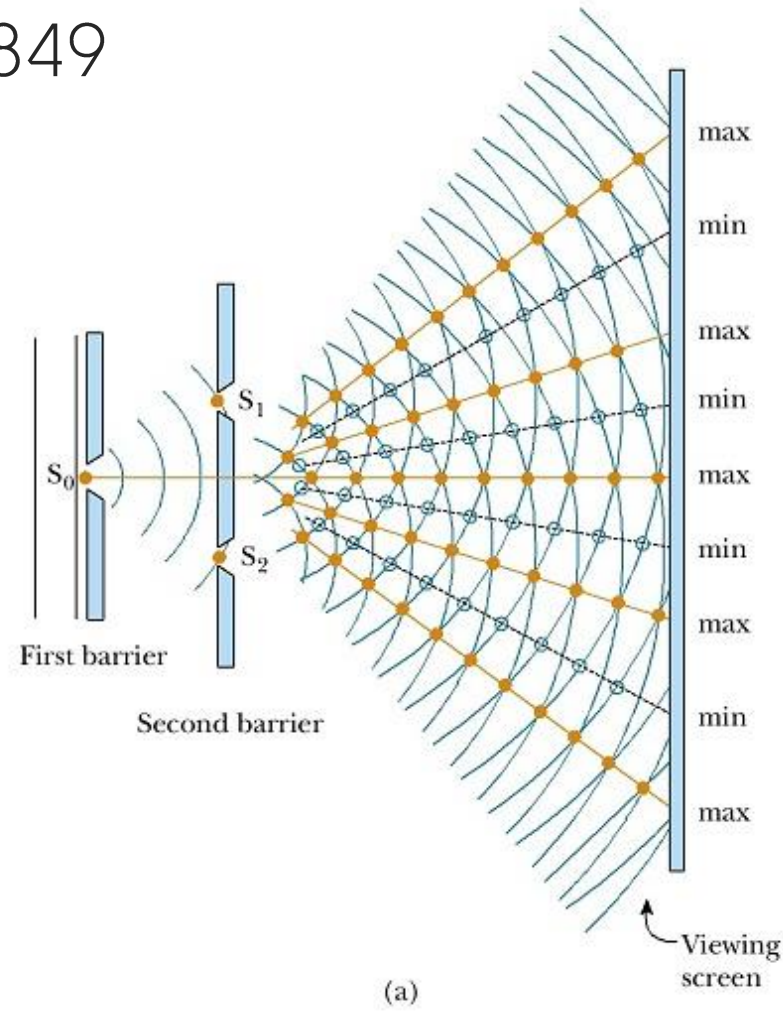
*Pokud se setkají vlnění z různých zdrojů, výsledný efekt je kombinací pohybu obou vln.*

# Youngův pokus / 1849

2-štěrbínový experiment demonstrující vlnovou podstatu světla



**Silný impuls pro úspěch vlnové teorie**



(a)

(b)

# 19. století – vlnová teorie

---

**Augustin Jean Fresnel (1788-1827)**

- Spojil Huygensův vlnový koncept a princip interference,



- Objasnění jak přímočaré šíření světla, tak difrakci (**Huygensův-Fresnelův princip**).
- Počítal difrakční obrazce na různých překážkách a aperturách.



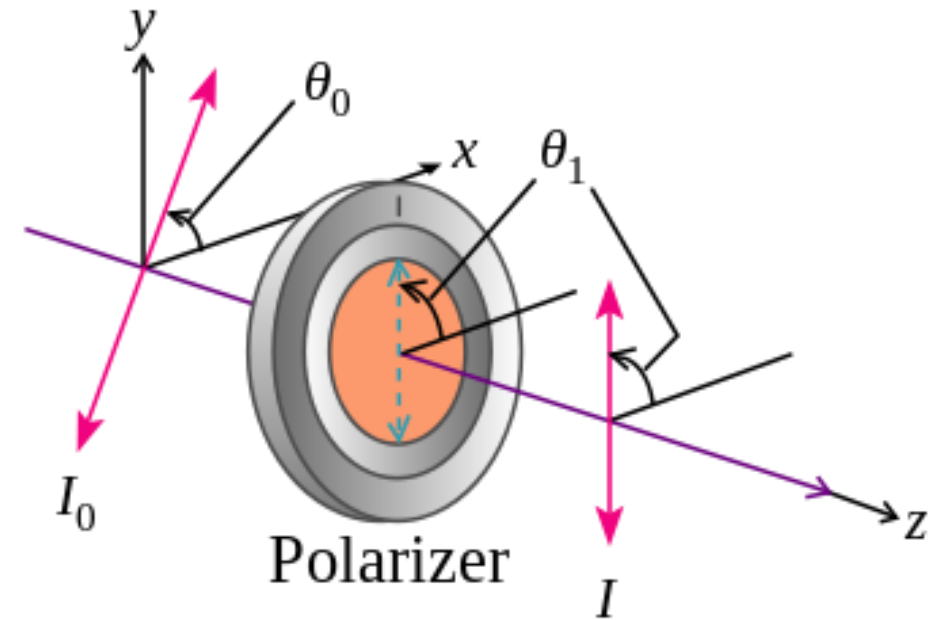
# Polarizace

## Etiene Louis Malus (1775-1812)

- Objevil polarizaci při odrazu (doposud byla známa jen při dvojlomu v kalcitu)
- Odvodil vztah pro intenzitu světla v závislosti na natočení polarizátorů, tzv. **Malusův zákon**:

$$(1.9) \quad I = I_0 \cdot \cos^2(\theta_0 - \theta_1)$$

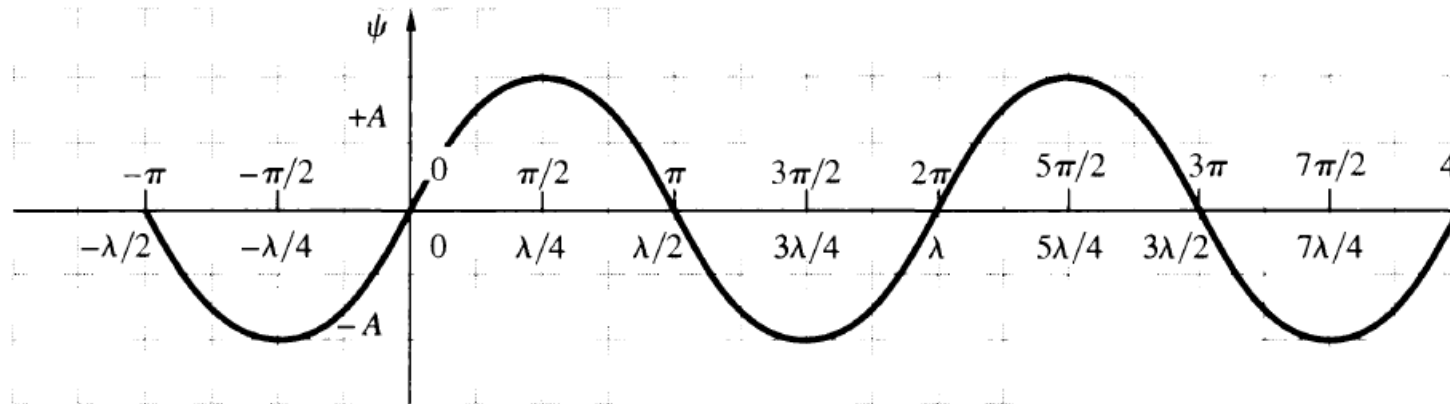
... kde  $I_0$  je vstupní intenzita,  $\theta_0$  úhel natočení polarizátoru,  $\theta_1$  úhel natočení analyzátoru.



# Polarizace – příčné vlnění

**Dominique Francois Arago** (1786-1853)

- Spolu s Fresnelem a Youngem objevil, že světlo je **vlnění příčné**.
- Objevil kruhovou polarizaci a vyrobil polarizační filtr.





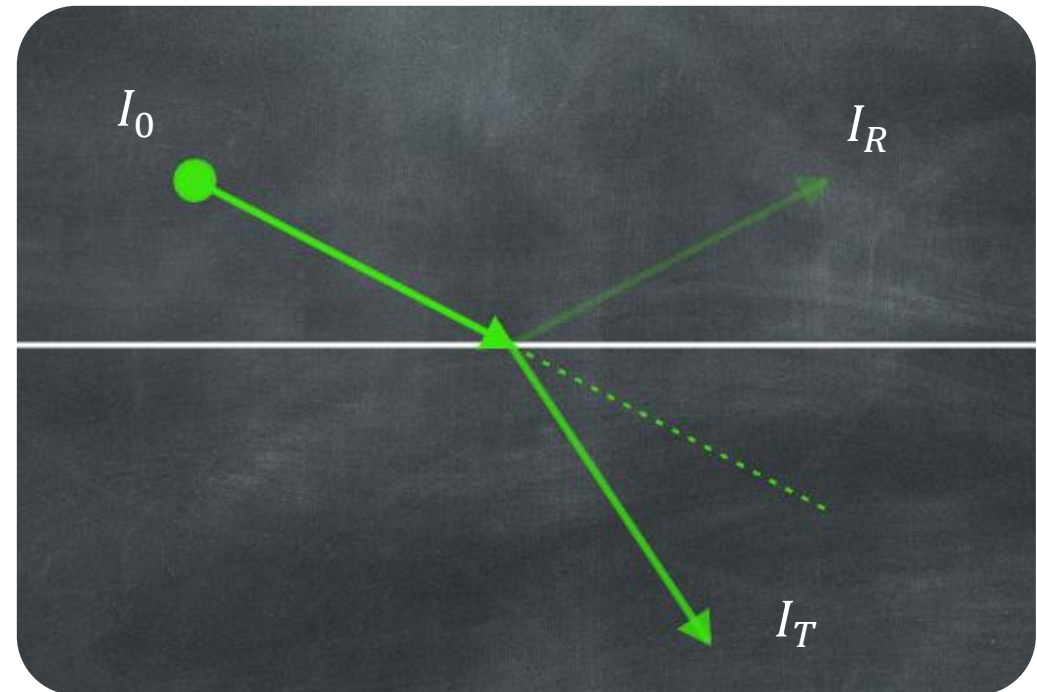
# Polarizace – příčné vlnění

**Augustin Jean Fresnel** (1788-1827)

- Odvodil vztahy pro relativní intenzitu odraženého a lomeného paprsku na rozhraní.
- Odlišné vztahy koeficientu odrazu  $R$  pro 2 kolmé polarizační směry ( $P$  a  $S$ ):

$$(1.10) \quad R_s = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right|^2$$

$$R_p = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \right|^2$$



# Polarizace – napěťový dvojlom

**David Brewster** (1781-1868)

- Popsal napěťový dvojlom – změna polarizace působením tlaku v materiálu.



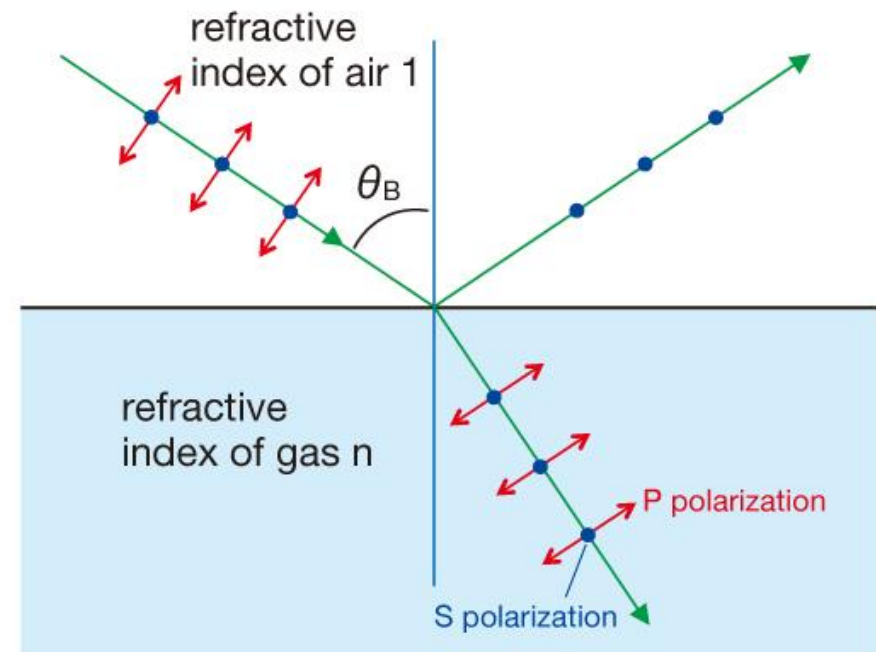
„Umělá anizotropie“



# Polarizace – Brewsterův úhel

**David Brewster** (1781-1868)

- Popsal napěťový dvojlom – změna polarizace působením tlaku v materiálu
- Nalezl **Brewsterův úhel** (1816),  
kdy pouze polarizace **typu S** je odražena.



# Elektromagnetické vlny

**Michael Faraday** (1791-1867)

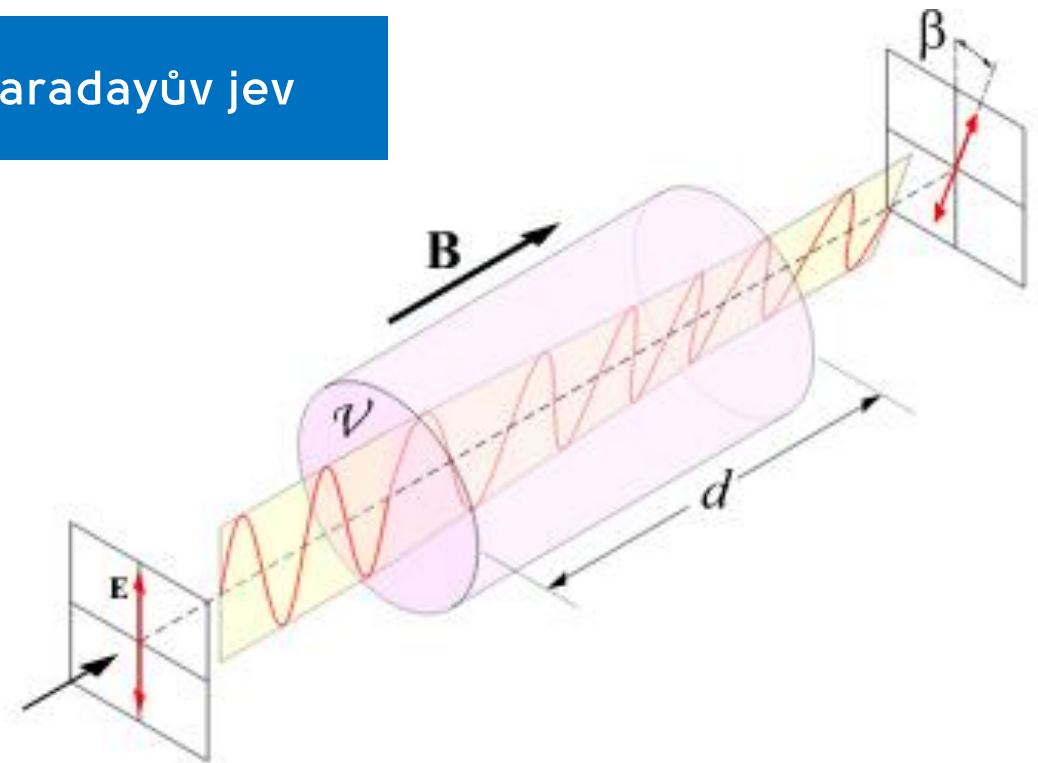
“*Polarizace světla může být stočena silným magnetickým polem.*”



**Faradayův jev**



První důkaz vazby mezi elmag. polem a světlem.

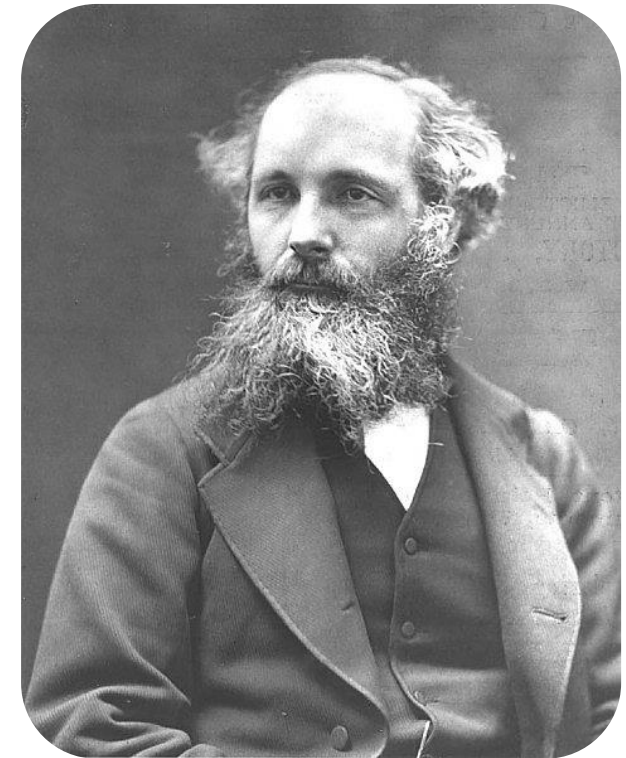


# Elektromagnetické vlny

**James Clark Maxwell (1831-1879)**

- Komplexně shrnul empirické vědomosti o elektřině a magnetismu do 4 **Maxwellových rovnic**:

$$(1.11) \quad \begin{aligned} \oiint_A \vec{E} \cdot d\vec{S} &= 0 & \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} &= - \iint_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ \oiint_A \vec{B} \cdot d\vec{S} &= 0 & \oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \varepsilon_0 \mu_0 \iint_A \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \end{aligned}$$



# Elektromagnetické vlny

---

## James Clark Maxwell (1831-1879)

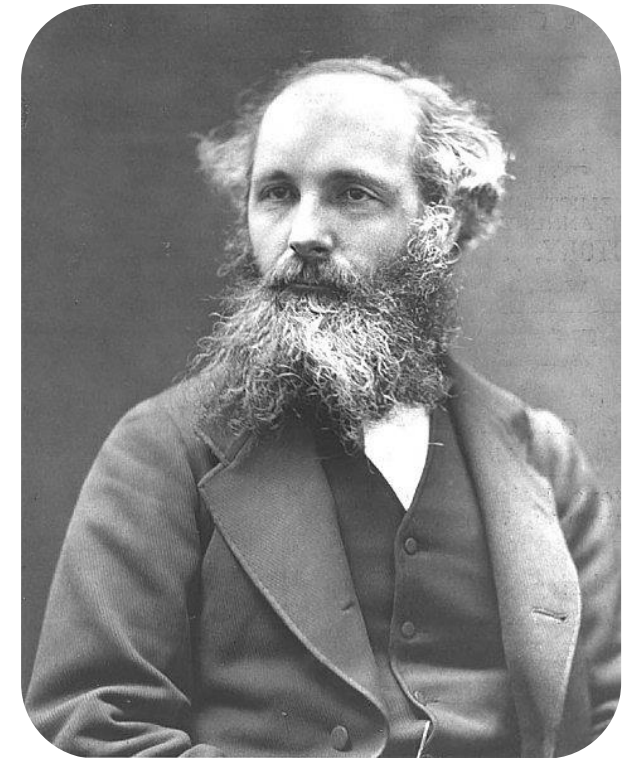
- Teoreticky prokázal, že elmag. pole se může šířit éterem jako příčná vlna.
- Vypočítal fázovou rychlost vlny z materiálových konstant:

$$(1.12) \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

... dosazením elektrické permitivity  $\epsilon_0$  a magnetické permeability  $\mu_0$  vakua dostáváme:

$$c = 3,107 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

- Výsledek ve velmi dobře shodě s naměřenou s rychlostí světla ...



# Elektromagnetické vlny

---

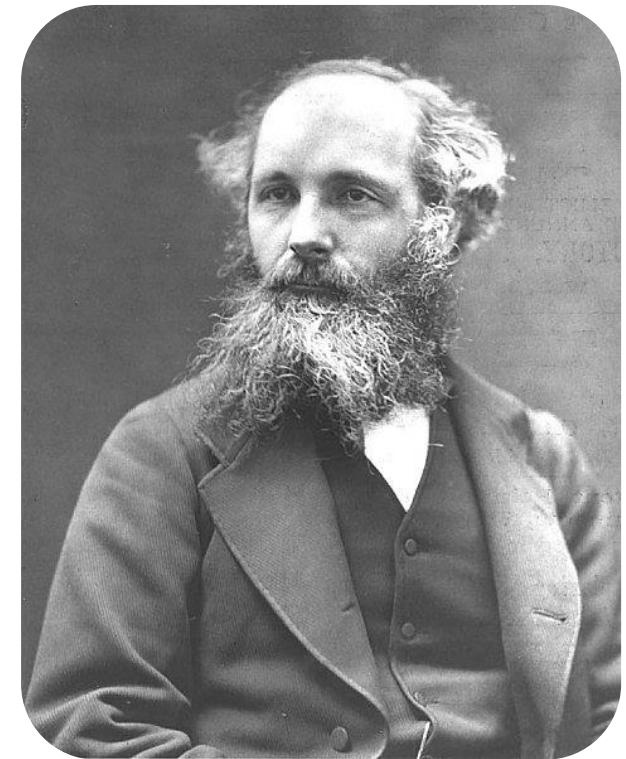
**James Clark Maxwell (1831-1879)**

- Závěr byl neodvratný...



Světlo je „vzruch“ v elektromagnetickém poli, šířící se ve formě vln éterem.

- Maxwellovy závěry byly experimentálně prokázány až po jeho smrti **Heinrichem Hertzem (1857-1894)** v 1886-88.

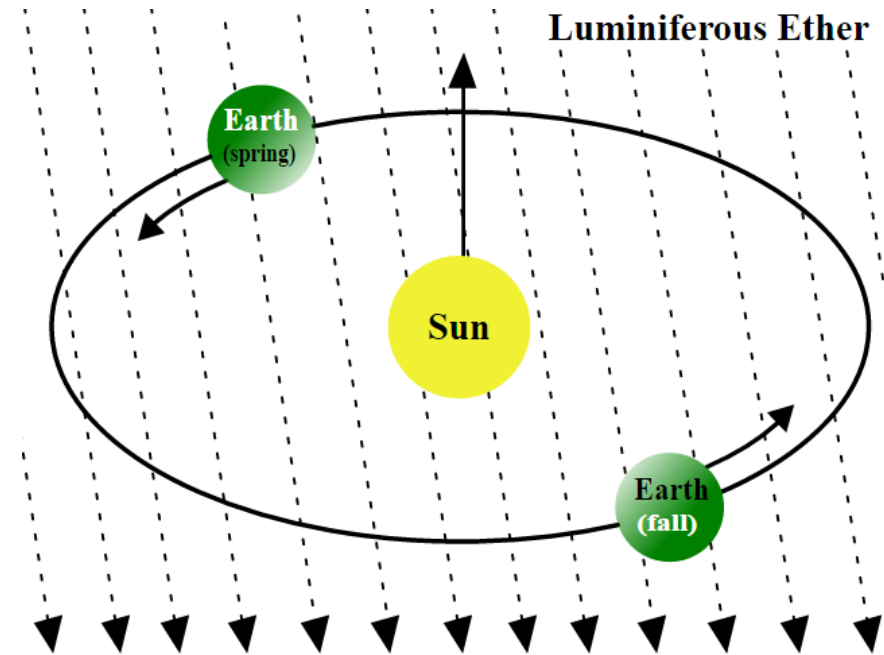


# Světelný éter

*Pakliže se šíří vlna, musí se mít čím šířit – všude-přítomným Světelným éterem*

## Nutné vlastnosti éteru:

- Absolutně tuhý, aby rychlost světla mohla být vysoká
- Řídký, protože musel pronikat vším a neklást odpor
- Absolutní vztažnou soustavou pro stanovení rychlosti světla





# Světelný éter – test / 1887

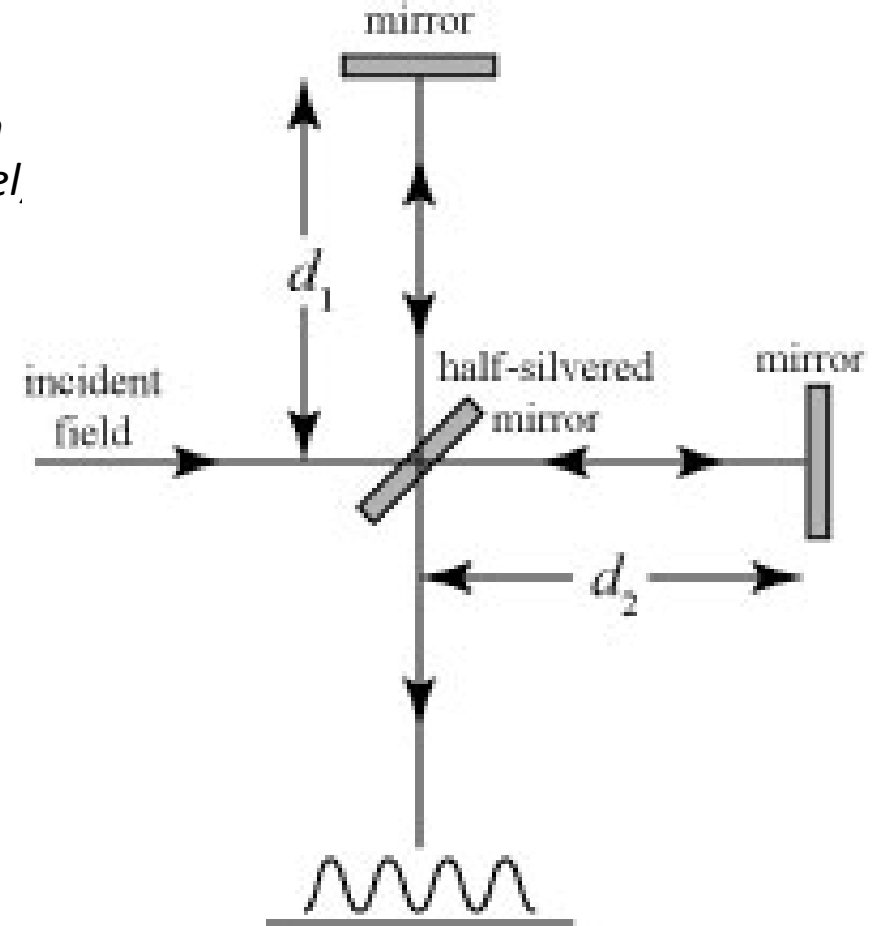
*Země éterem proplová – tedy v její vztažené soustavě se v různých směrech musí rychlost světla lišit – díky „éterovému větru“ (Fresnel,*

**A. A. Michelson (1852-1931) + E. W. Morley (1838-1923)**

- 1887, experimentální pokus s interferometrem.
- Nepodařilo se však naměřit žádný fázový posun světla mezi obou větví.



**Země je vůči éteru v klidu**



# Světelný éter – test / 1887

---

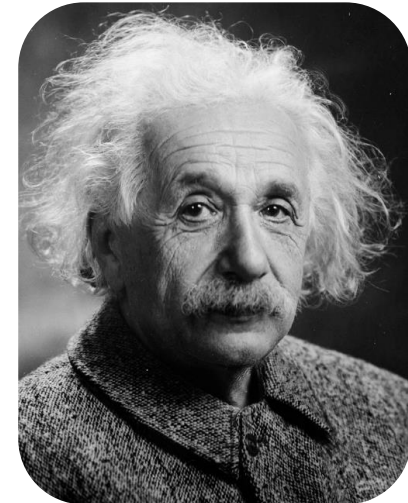


**Jules Henri Poincaré / 1889**

*„Our aether, does it really exists?“*

**Albert Einstein / 1905**

*„Light is always propagated in free space with defined velocity  $c$  which is independent of the state of motion of emitting body“*



Einstein zcela odmítl existenci éteru v rámci **Speciální teorie relativity**.

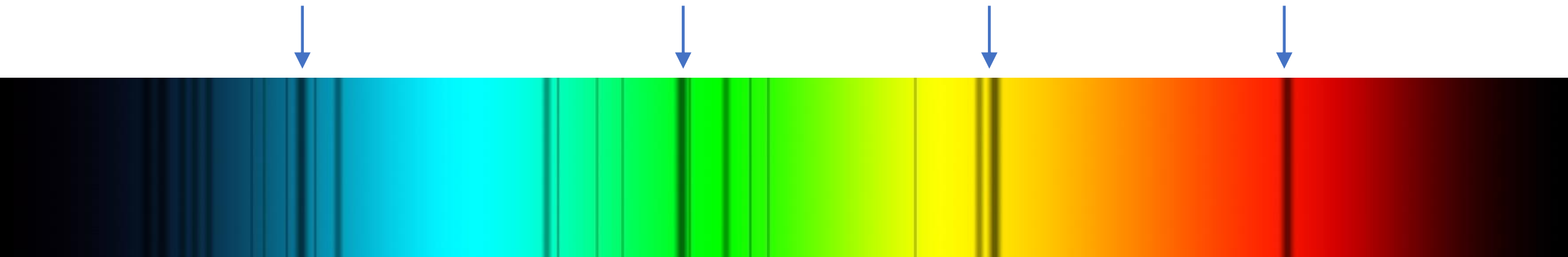
# Emise / absorpce

---

*Stále zůstávala nevysvětlena řada jevů se světlem souvisejících, a to zejména z oblasti **absorpce a emise světla**.*

**William Hyde Wollaston** (1766-1828)

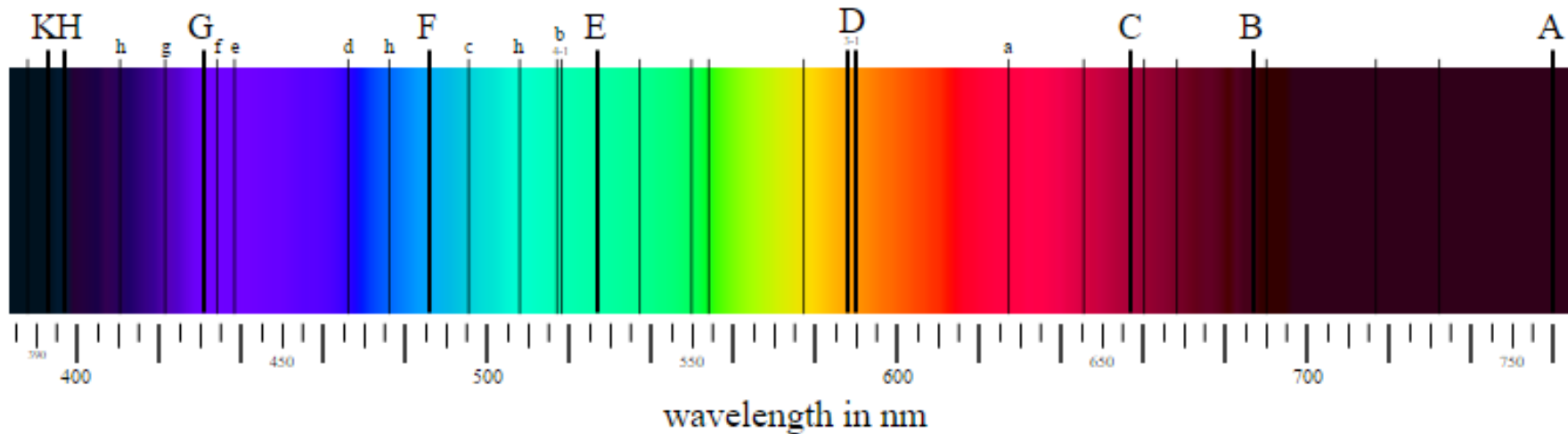
- Pozoroval temné čáry ve slunečním spektru (1802).



# Emise / absorbce

**Joseph Fraunhofer** (1787-1826)

- Věnoval se difrakci, vyráběl **difrakční mřížky**
- Vyráběl objektivy na základě výpočtů skel a lámavých ploch.
- Stanovil vlnové délky temných tzv. *Fraunhoferových čar* ve slunečním spektru

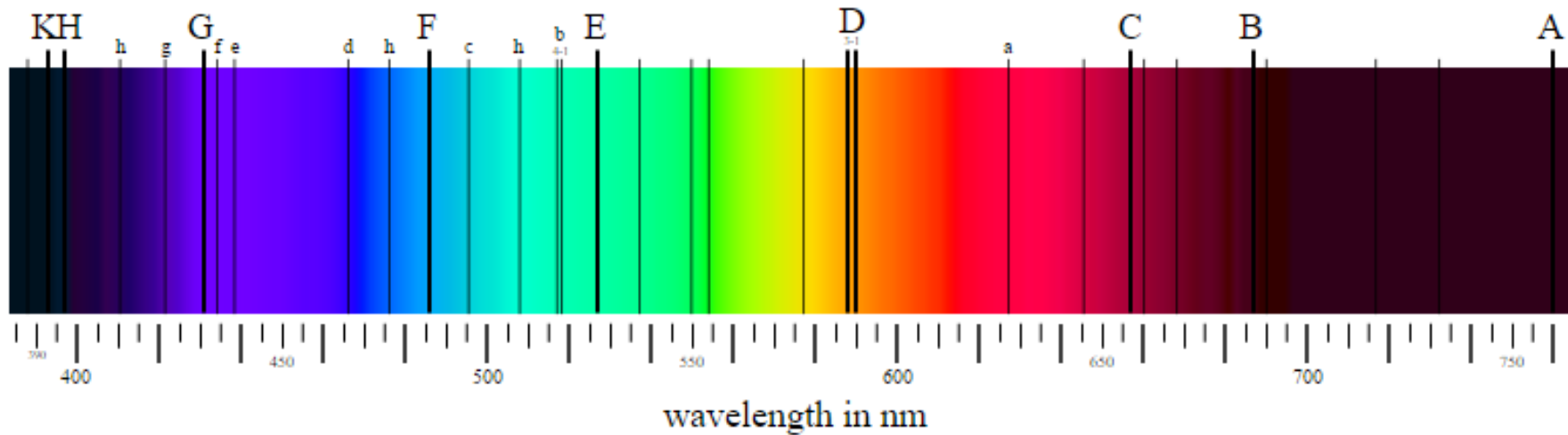


# Fraunhoferovy čáry

Absorpční čáry chladných plynů ve sluneční fotosféře



- A, B - kyslík
- C, F, G - vodík
- D1, D2 – sodík
- E- železo
- K, H - vápník
- horčík, rtuť..



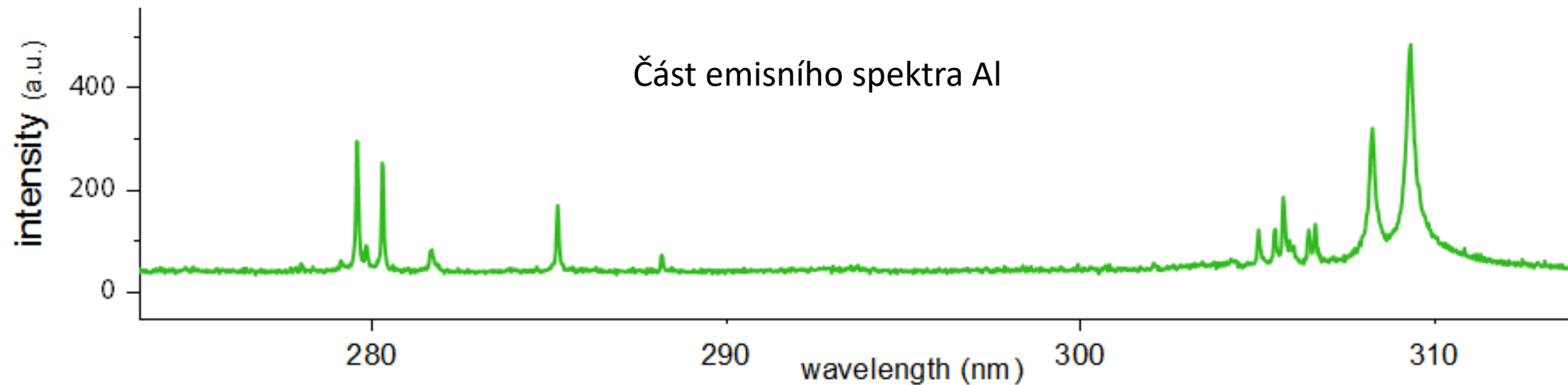
# Emisní spektra

**Gustav R. Kirchhoff** (1824-1887) a **Robert W. Bunsen** (1811-1899)

- Každý atom má charakteristické emisní/absorpční spektrum.



Základ pro **absorbční a emisní spektroskopii**



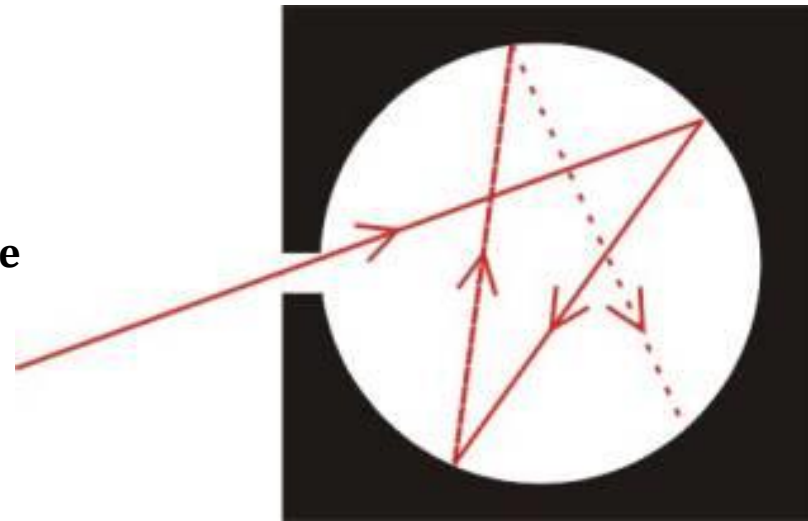
# Záření černého tělesa

*Zkoumány princip a zákonitosti absorpce/emise*



## Model absolutně černého tělesa

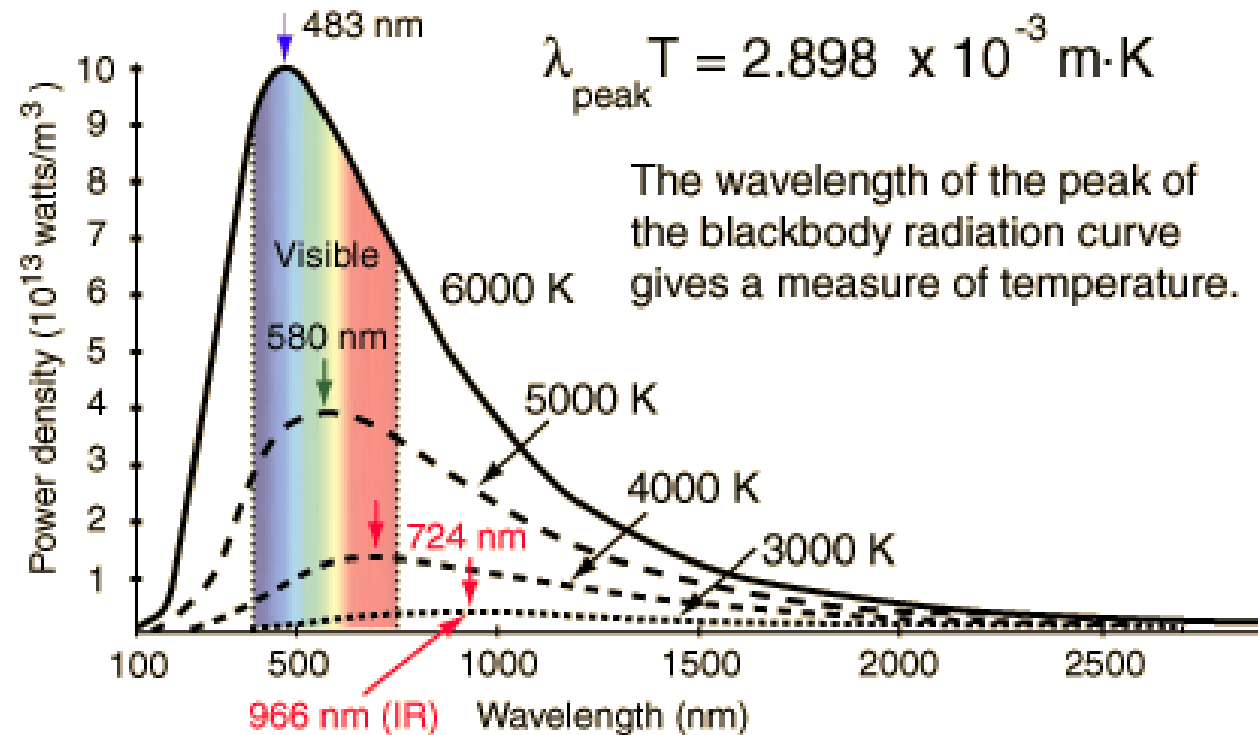
- Malý otvor + dutina s černými matnými stěnami
- Dopadající energii neodráží, nerozptyluje – **jen absorbuje**
- Absorpce i emise na všech vlnových délkách



# Záření černého tělesa

## Vyzařovací charakteristika

- Zjištěna experimentálně





# Záření černého tělesa

**L. Boltzmann** (1844-1906) a **Jozef Stefan** (1835-1893)

- Stefanův-Boltzmannův zákon o intenzitě záření (1879):

$$(1.25) \quad I = \sigma T^4$$

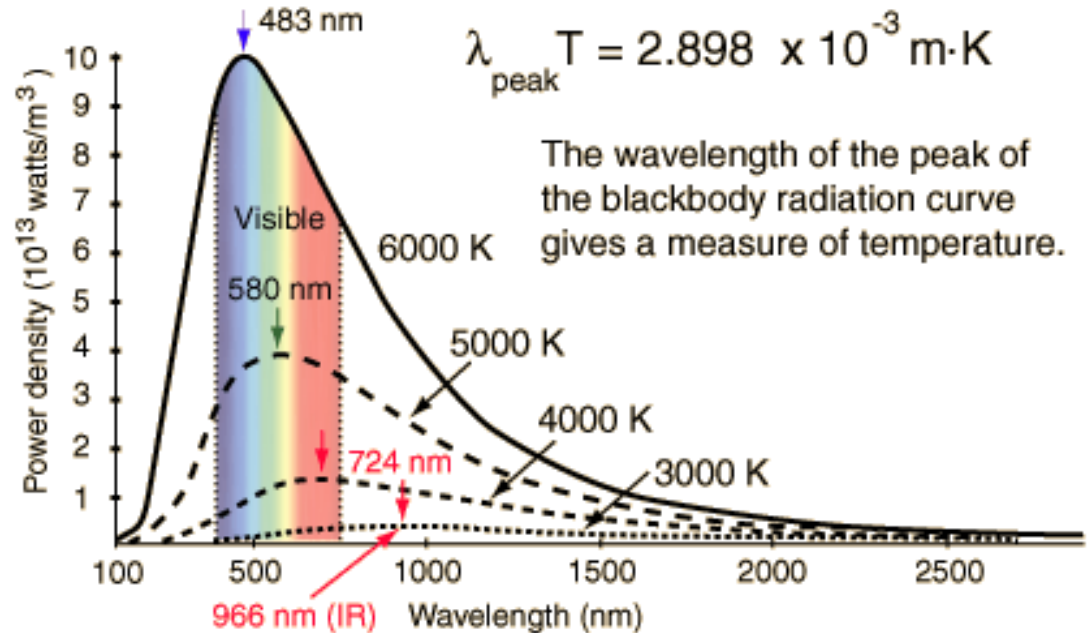
... kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta

**Wilhelm Wien** (1864-1928)

- Wienův posunovací zákon (1893):

$$(1.26) \quad \lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

... kde  $b$  je Wienova konstanta.



# Záření černého tělesa

*Stále chyběl zákon pro výpočet vyzařovací charakteristiky*

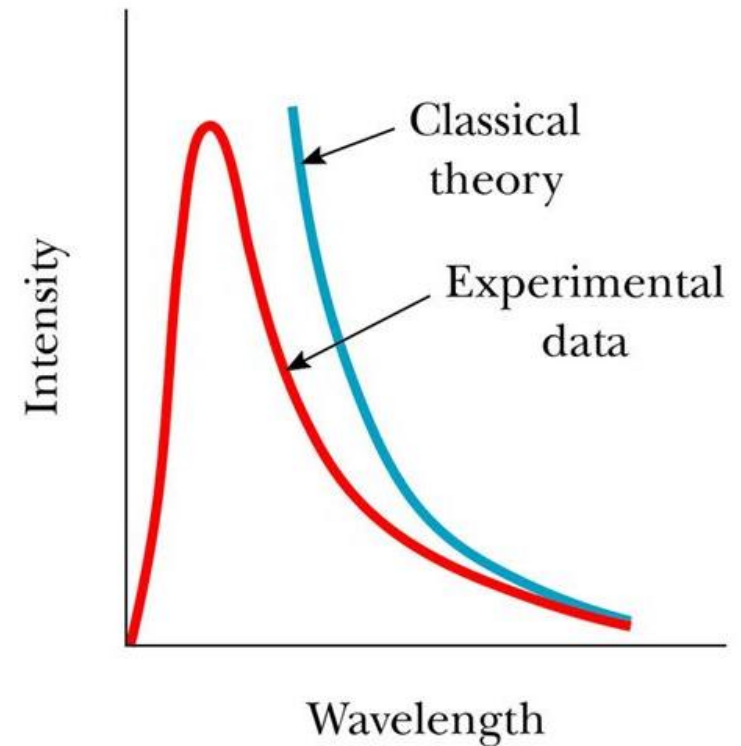
$$H = f(\lambda, T) = ?$$

**L. Boltzmann, J. Stefan, Lord Raleigh, James Jeans**

- Dle klasické mechaniky – čím kratší vlnová délka tím více vyzářené energie.



**„Ultrafialová katastrofa“**



# Kvantová teorie

---

**Max K. E. L. Planck** (1858-1947)

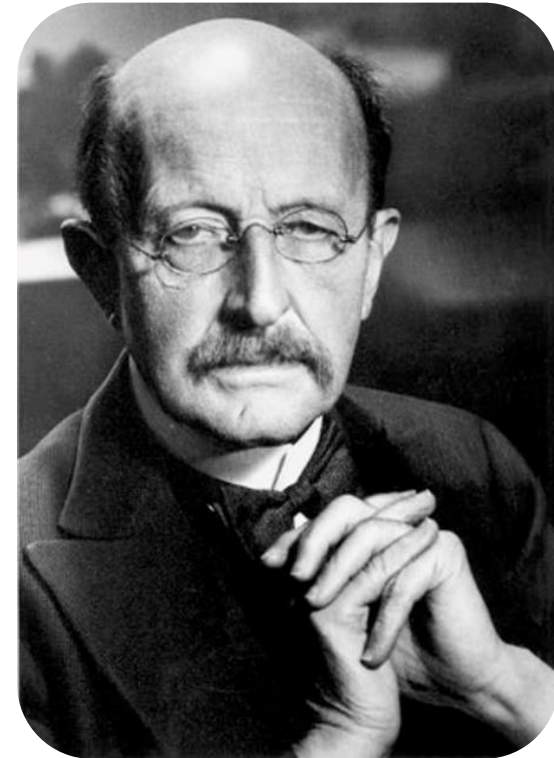
- Hypotéza kvantování energie oscilátorů (1901)



*Energie není předávána spojitě, ale ve formě kvant.*

- Záření absolutně černého tělesa:

$$(1.27) \quad H_{0\lambda} = \frac{2\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/k\lambda T} - 1)}$$



# Kvantová teorie

---

- Energie kvanta \*:

(1.28)

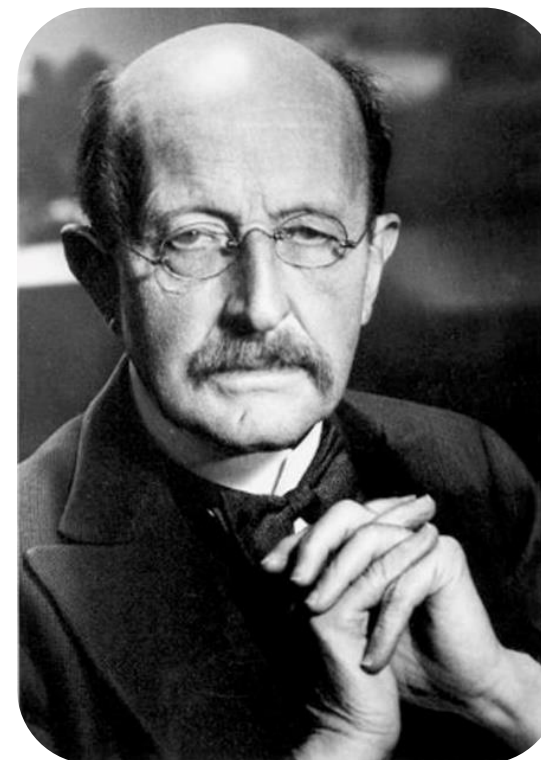
$$E = hf$$

... kde  $h$  je Planckova konstanta,  $f$  je frekvence oscilátoru.



Zrod kvantové mechaniky

\* Nobelova cena, 1918



# Foton

---

**Albert Einstein** (1879-1955)

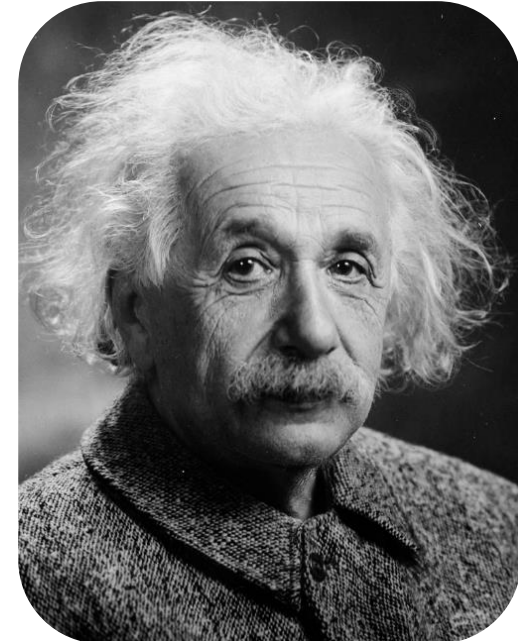
*„Kvantum energie (1.14) je zároveň elementární částicí samotných elmag. vln, tzv. **fotonem**\* “*

**Vysvětlení fotoelektrického jevu \*\***

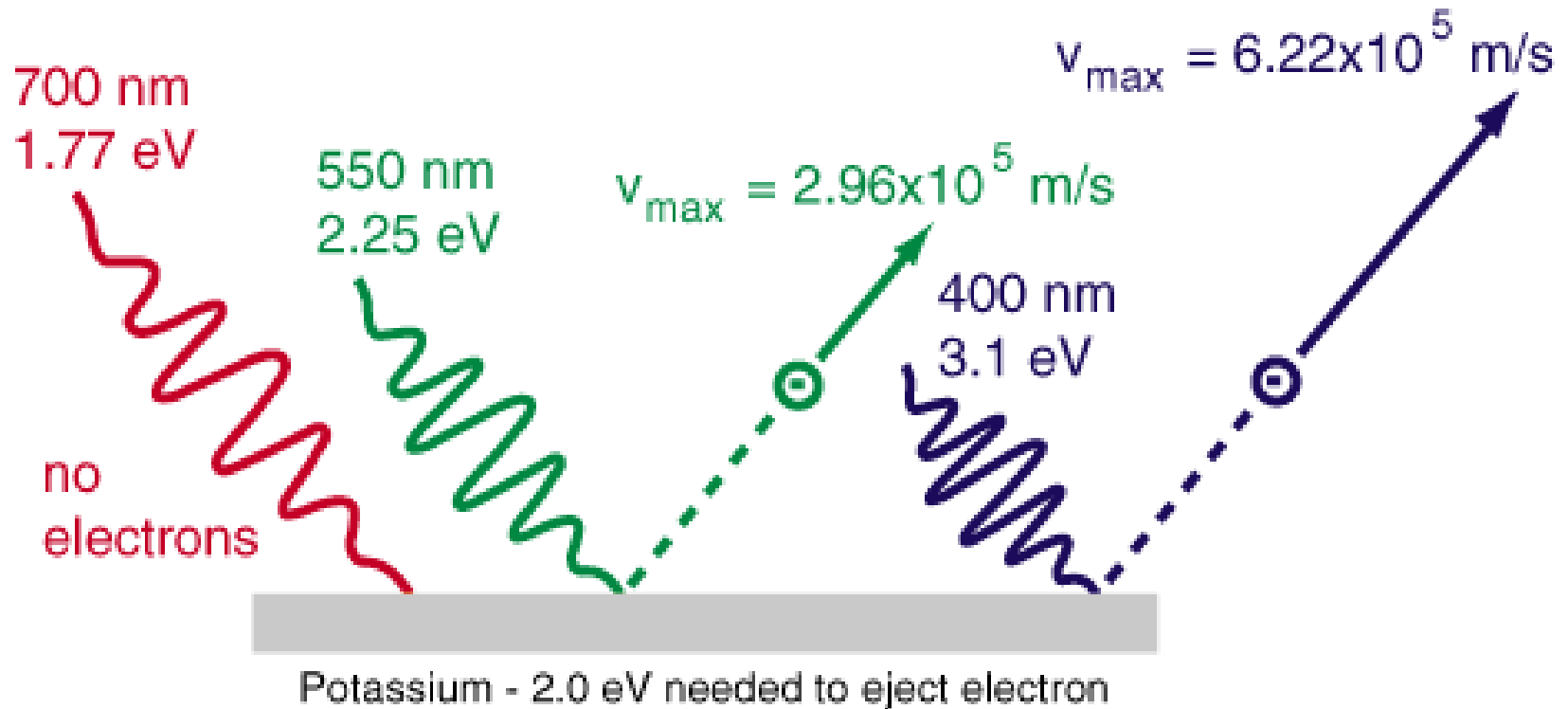
- Nastává při frekvencí fotonů vyšších než určitá mez.
- Energie uvolněných elektronů závisí pouze na frekvenci elektronů.
- Počet uvolněných elektronů je úměrný počtu dopadajících fotonů.

\* Gilbert N. Lewis (1926)

\*\* Nobelova cena, 1921



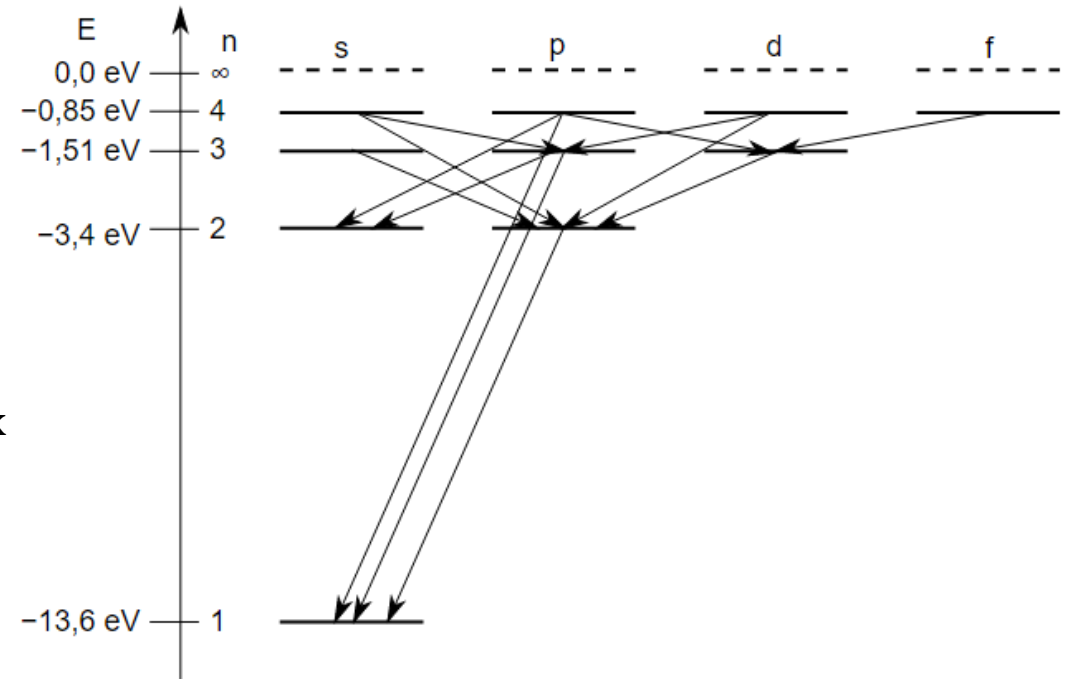
# Fotoelektrický jev



# Bohrův model atomu

## Niels Henrik David Bohr (1885-1962)

- Model atomu vodíku
  - Výpočet energiových hladin vodíku
- ↓
- Predikce absorbovaných / emitovaných vlnových délek



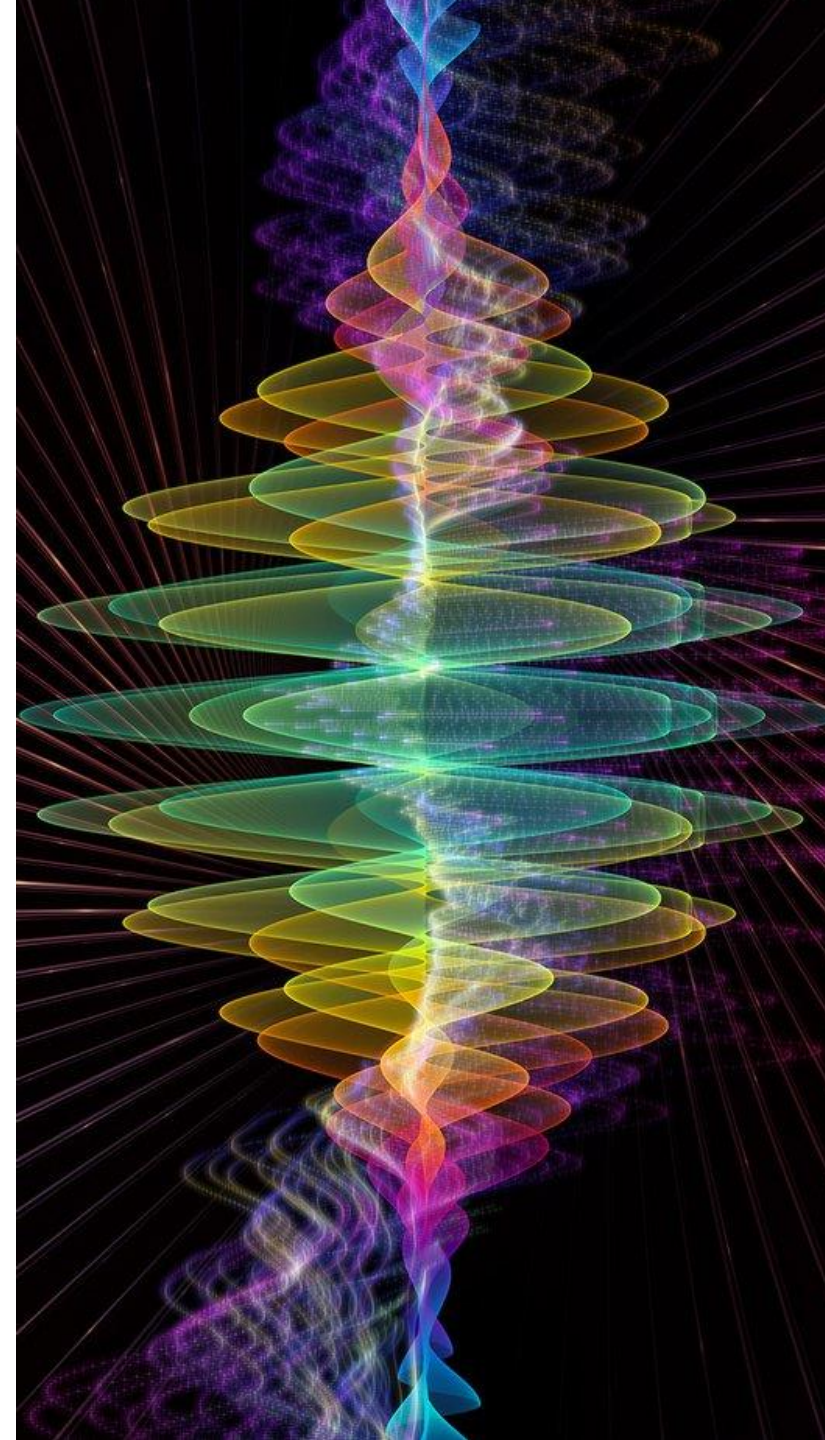
# Kvantová mechanika

---

- Kvantová mechanika se stala do konce 20. let 20. st velmi dobře popsanou a prozkoumanou teorií o principech mikrosvěta.
- Umožnila a definovala další směřování základního výzkumu optiky

## Klíčoví vědci

- Niels Bohr
- Max Born
- Werner Heisenberg
- Erwin Schrodinger
- Louis De-Broglie
- Wolfgang Pauli
- Paul Dirac
- aj.

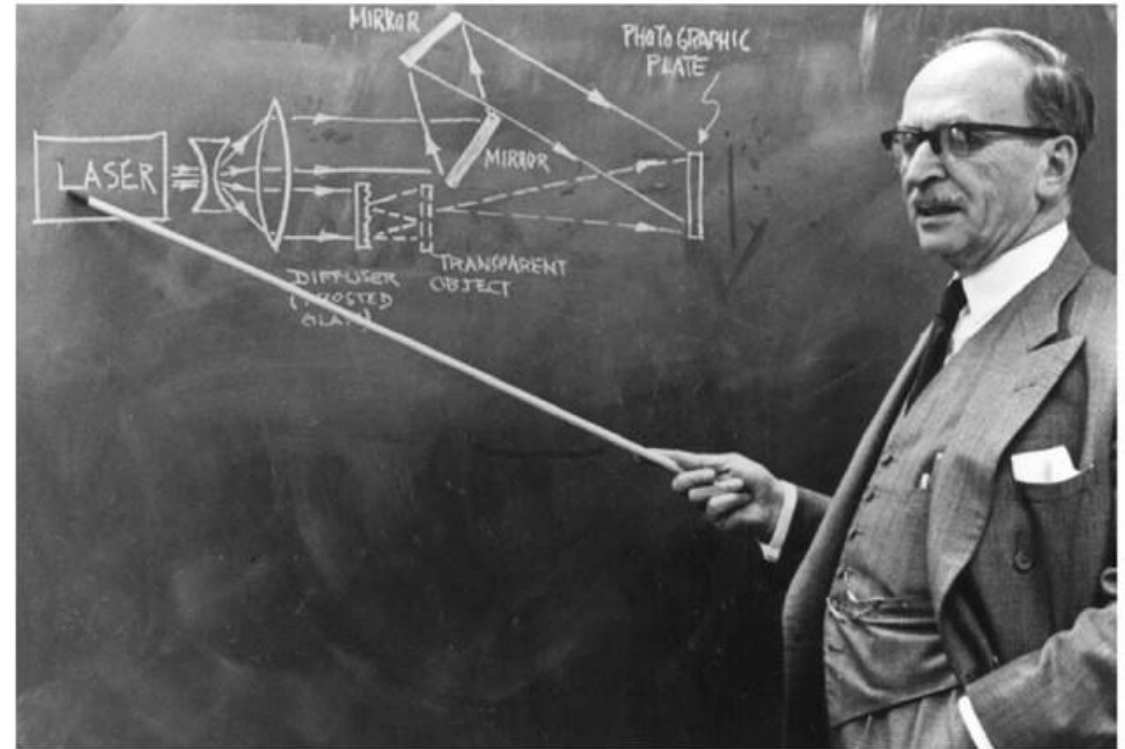




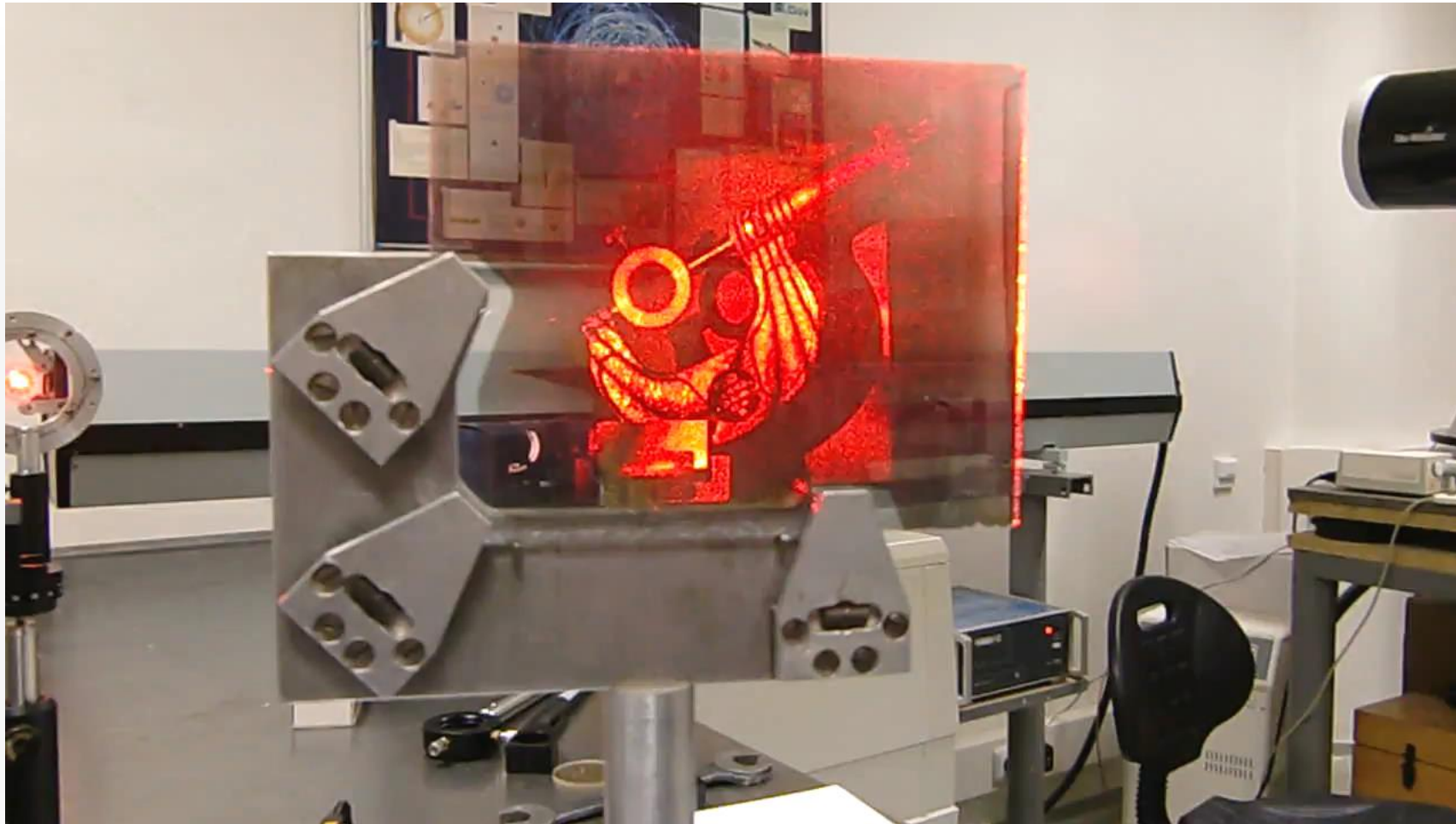
# Holografie

**Dennis Gábor** (1927-2007)

- První hologram pomocí *Hg* lampy (1947)
- Záznam amplitudy i fáze pomocí difrakčního obrazce
- Aplikace rozšířeny až po vzniku laseru



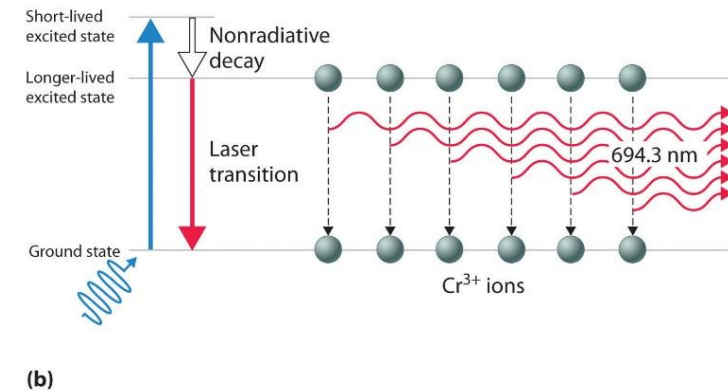
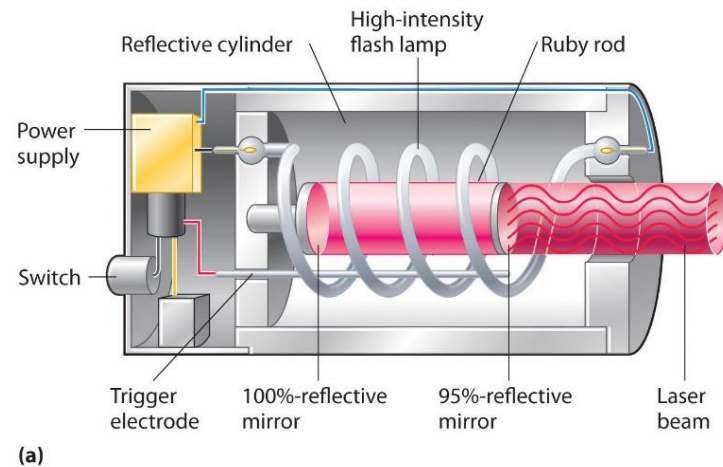
\* Nobelova cena (1971)



# Laser

## Theodore Harold Maiman (1927-2007)

- Sestavení prvního LASERu (rubínový), 1960
- Koherentní záření pomocí jevu stimulované emise \*



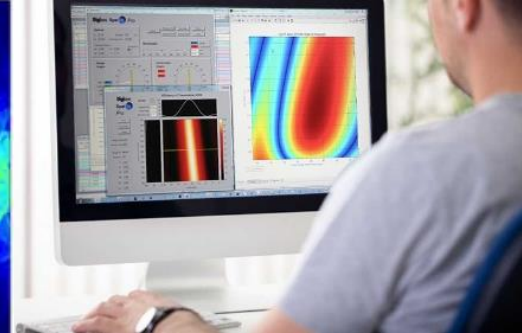
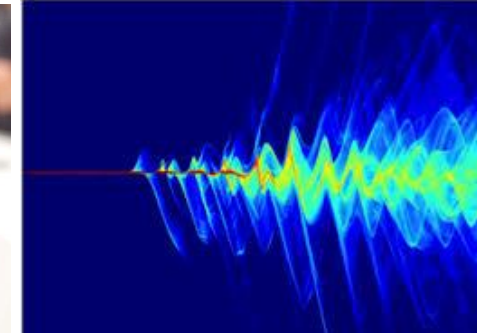
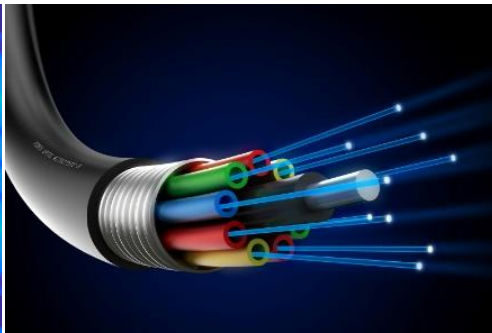
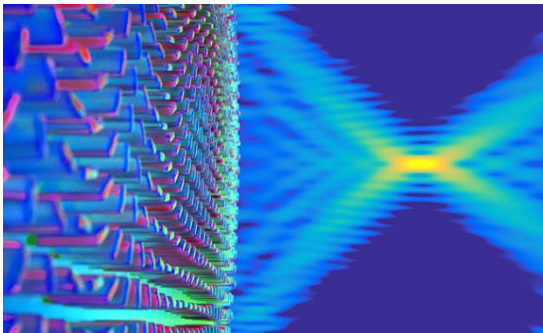
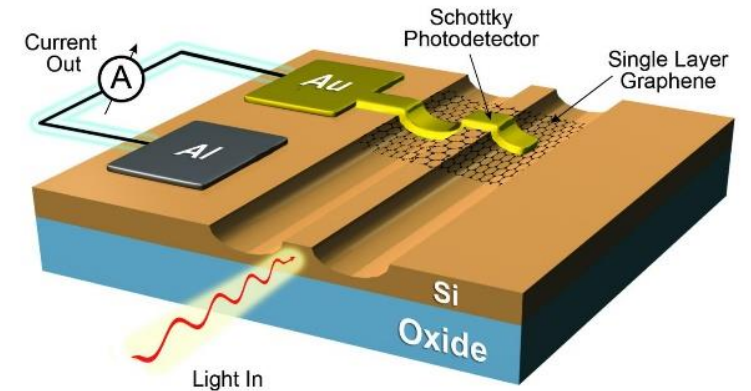
\* Teoreticky předpovězen Einsteinem (1917)

# Optika 20. století

---

**Masivní rozvoj v oblasti aplikované optiky, vznik nových oborů**

- Od výzkumu přes medicínské, průmyslové po armádní aplikace.
- Lasery, holografie, adaptivní optika
- Nelineární optika, vláknová optika
- Difrakční optika
- Integrovaná optika, optoelektronika
- Metamateriály, aj...



# Dvojí povaha světla

---

## Částicově-vlnový dualismus

Světlo je vzruch v elmag. poli s projevy částicovými i vlnovými

### Vlnové jevy

- Interference
- Difrakce
- Polarizace

Huygens, Maxwell, Hertz, ...



### Částicové jevy

- Absorbce / emise
- Fotoelektrický jev
- Comptonův rozptyl

Newton, Planck, Einstein, ...

# Částicově-vlnový dualismus

**Louis de Broglie** (1892-1987)

- Nejen elmag. záření, ale i další částice vykazují dualitu (1924)
- Vlnová délka částice o hybnosti  $p$  je dána vztahem:

(1.28) 
$$\lambda = \frac{h}{p}$$



De Broglieova vlnová délka

- Roku 1927 potvrzeno pro elektrony (Davisson, Germer)\*
- Později i pro atomy, protony, neutrony a molekuly

\*Nobelovy ceny, 1937