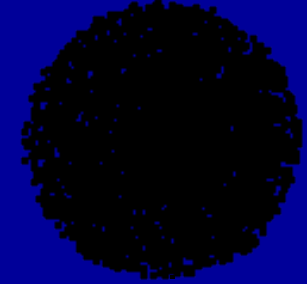


# Elektronový obal atomu



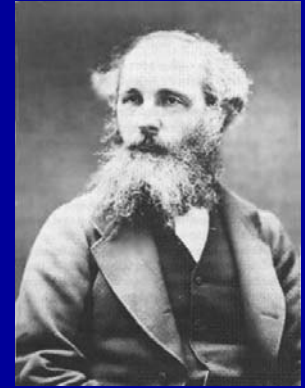
**Chemické vlastnosti** atomů (a molekul) jsou určeny vlastnostmi elektronového obalu.

Chceme znát **energii** a prostorové **rozložení** elektronů

Znalosti o **elektronovém obalu** byly získány studiem **záření** emitovaného excitovanými atomy (vybuzení ze základního stavu do stavu excitovaného dodáním energie – tepelné, elektrické - jiskra, oblouk)

# Elektromagnetické záření

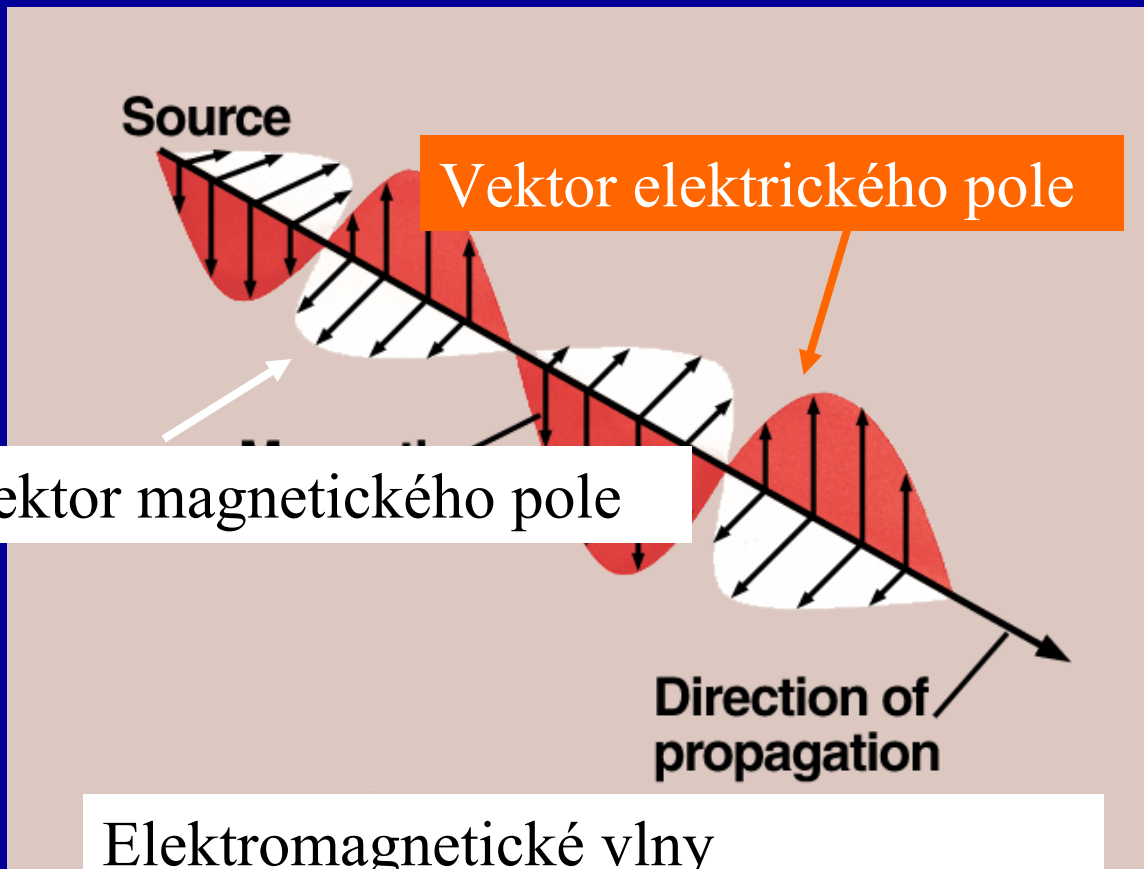
$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$  rychlost šíření světla ve vakuu



James C. Maxwell  
(1831-1879)



Heinrich Hertz  
(1857 - 1894)



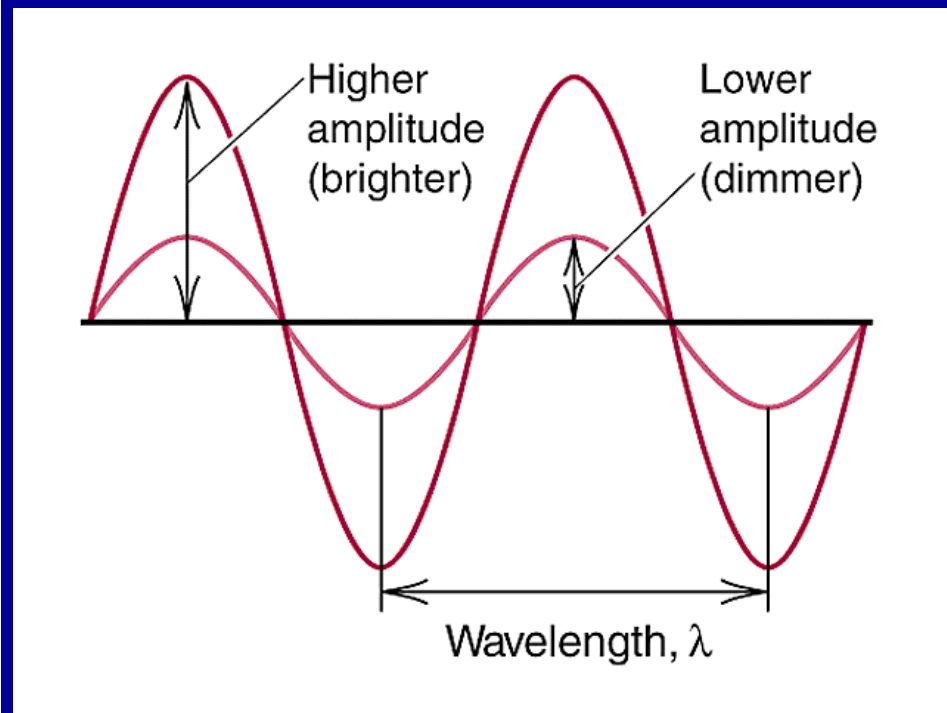
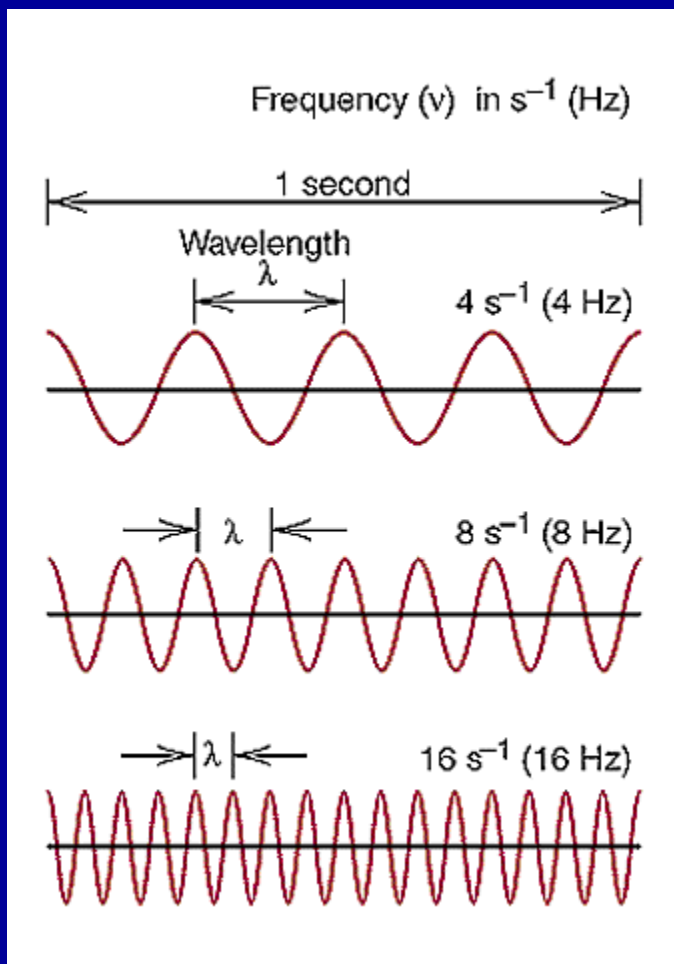
Elektromagnetické vlny  
oscilující elektrické a magnetické pole

# Vlnová délka $\lambda$ , frekvence $\nu$ , vlnočet $\tilde{\nu}$ amplituda

$$\nu \lambda = c$$

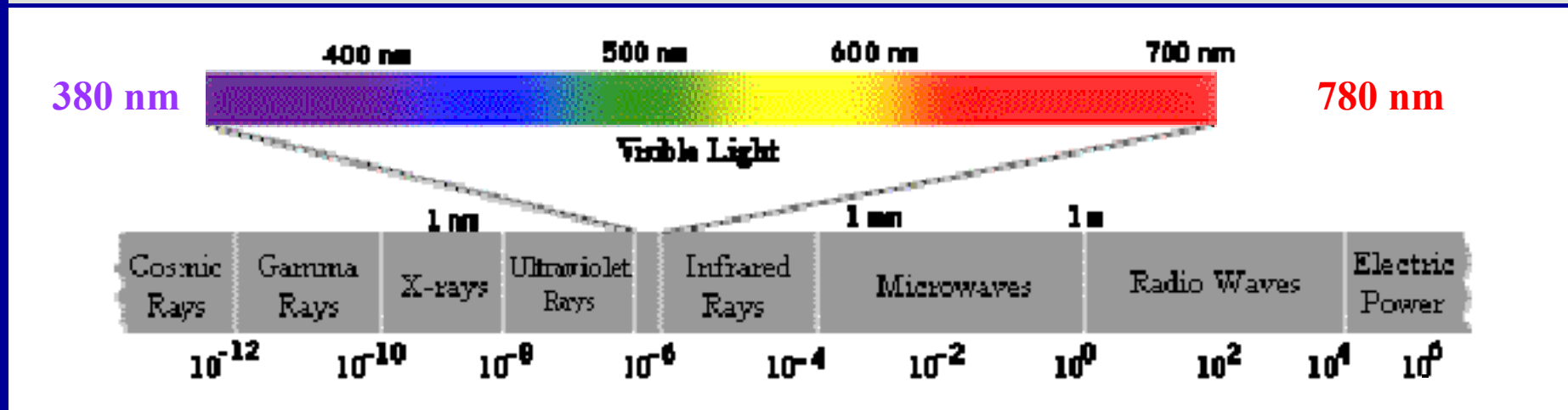
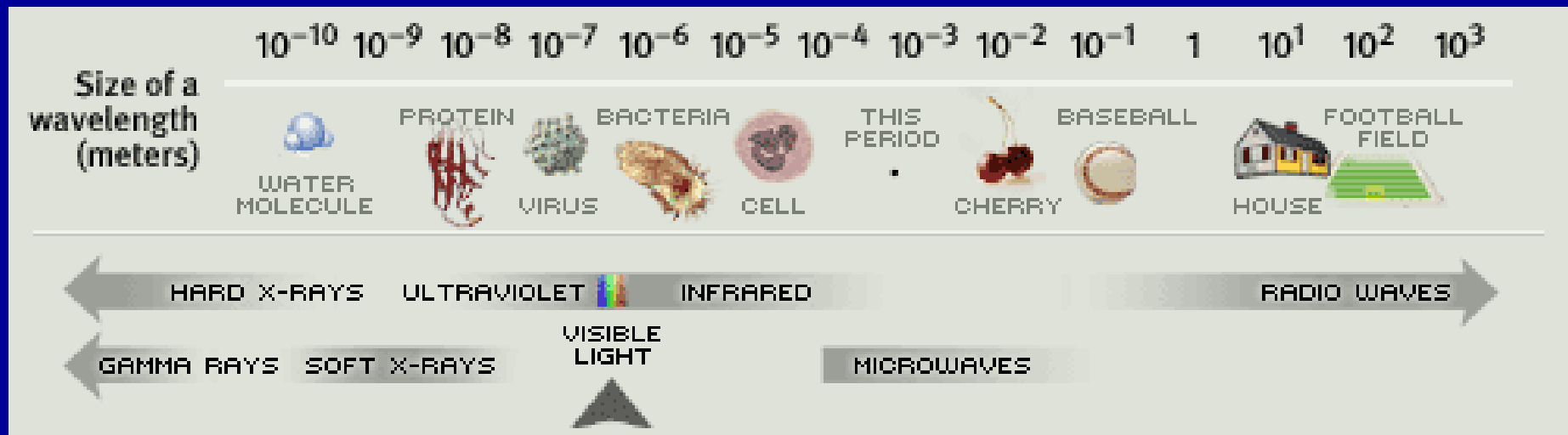
$$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$\tilde{\nu} = 1/\lambda \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

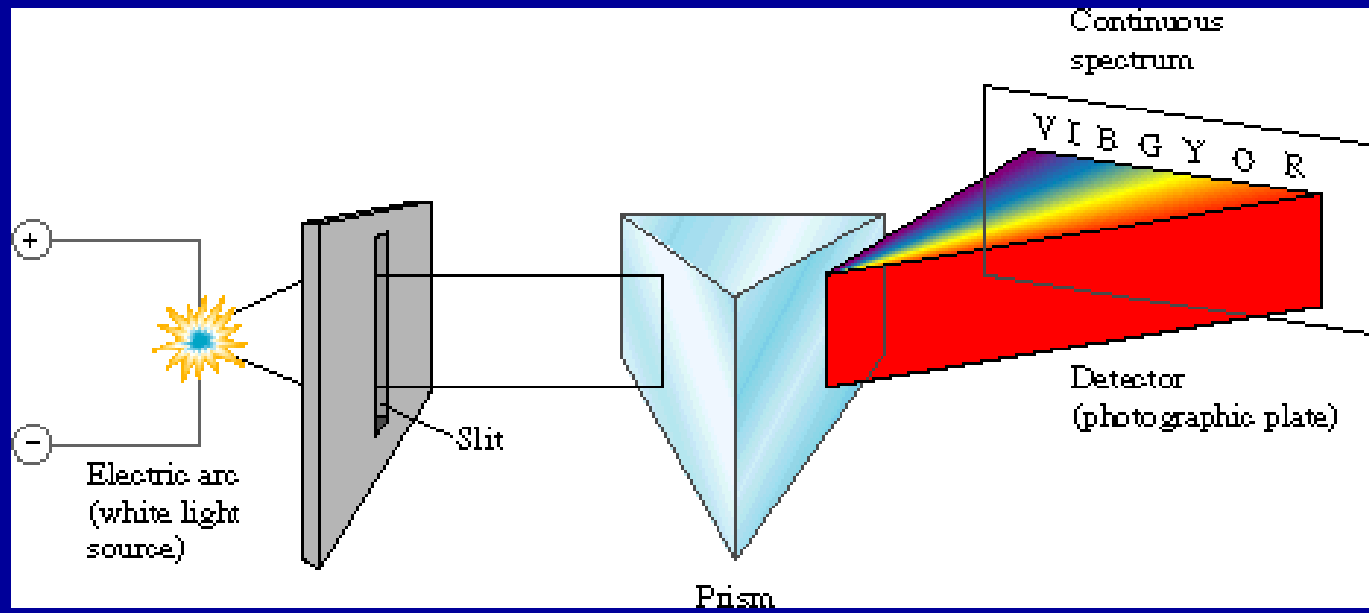


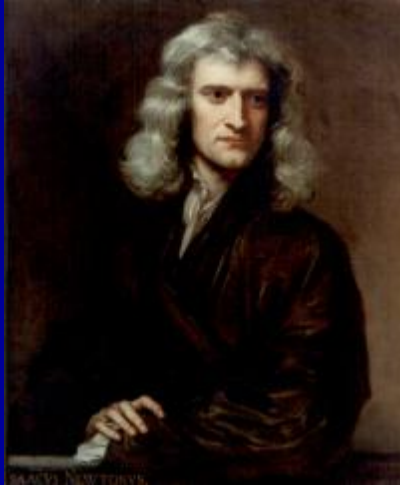
# Elektromagnetické záření

Vlnová délka,  $\lambda$  [m]

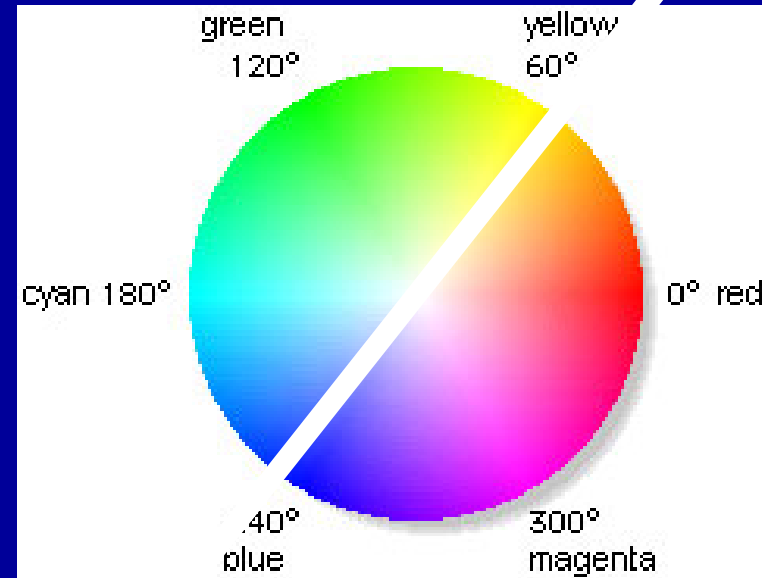


# Spektrum záření





## Newtonovo kolo



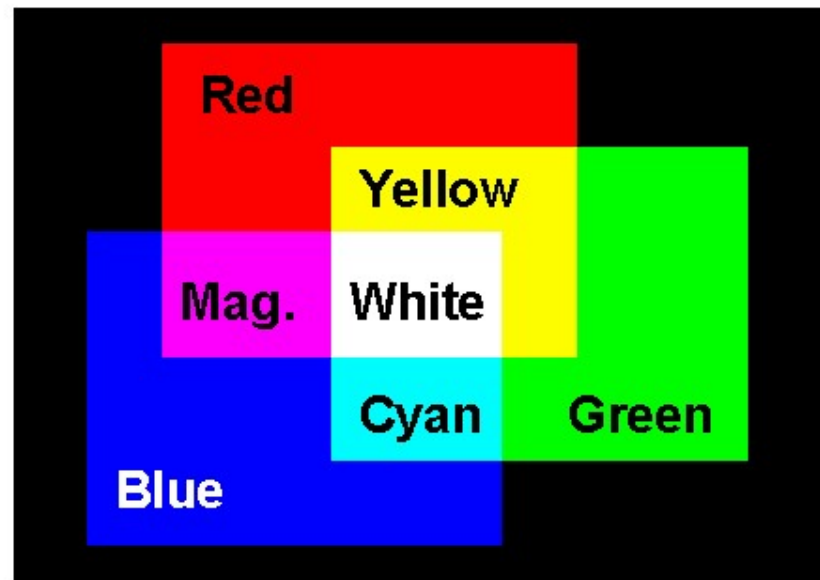
Světlo má charakter:

- vlnový (interference)  
Huygens, Young
- částicový (pohyb po přímce, odraz)  
Newton

Předmět absorbuje žlutou barvu z bílého světla a jeví se jako modrý

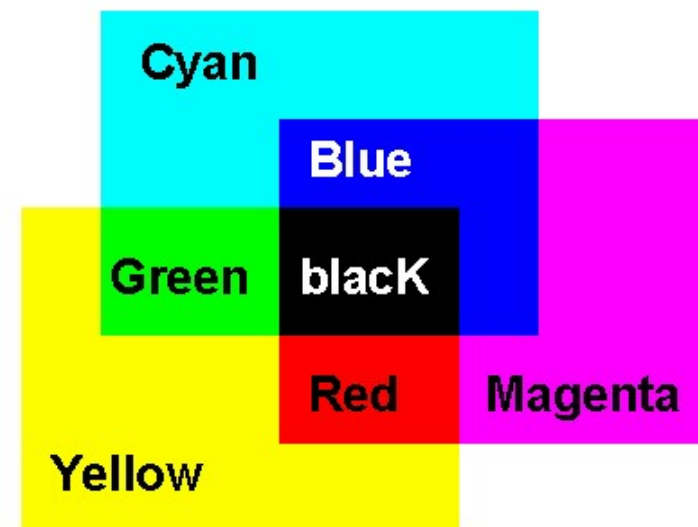
## Aditivní skládání barev (RGB)

---



## Subtraktivní skládání barev (CMY)

---

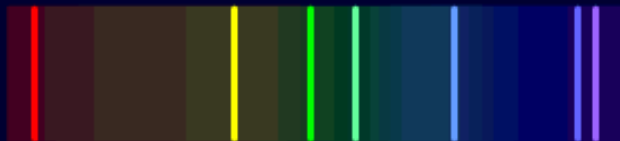


# Spektrum záření

**Spojité spektrum**



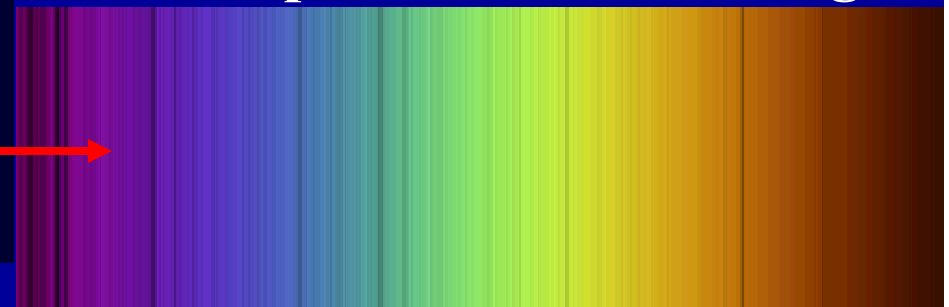
**Emisní spektrum**



**Absorpční spektrum**



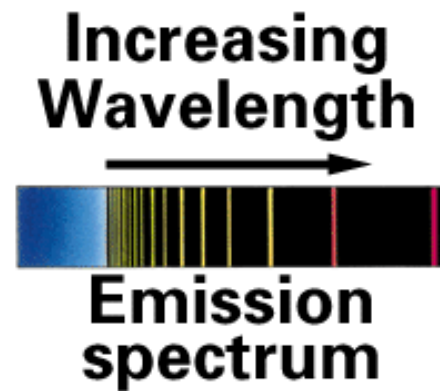
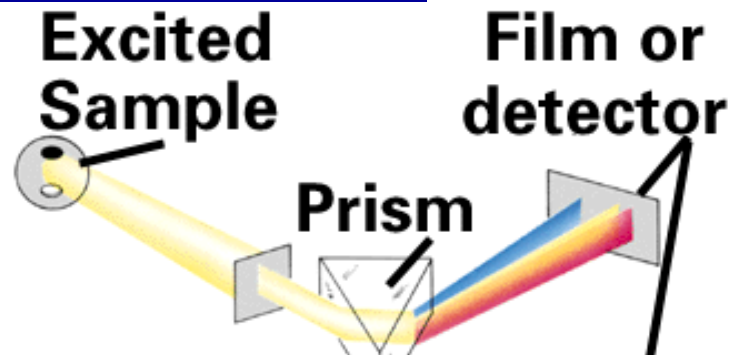
**Sluneční spektrum: He, Fe, Mg,...**



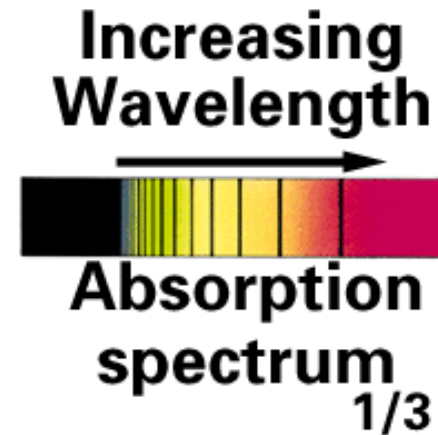
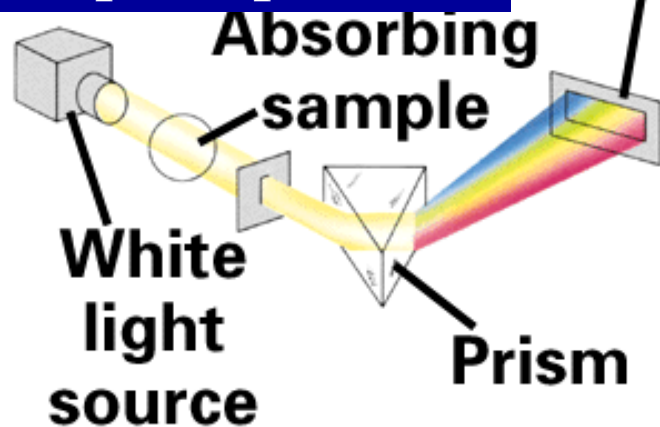


# Čárová spektra prvků

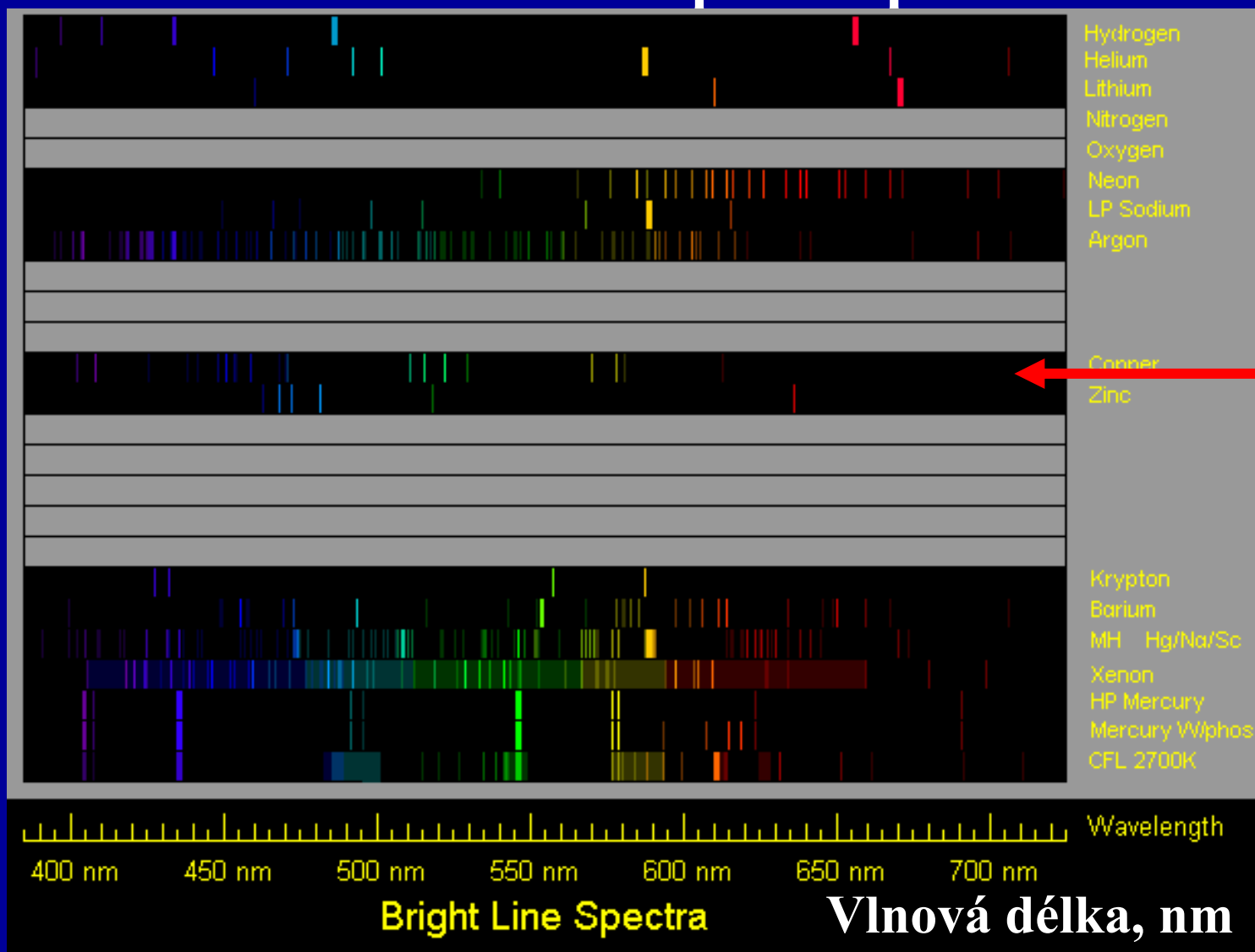
## Emisní spektrum



## Absorpční spektrum



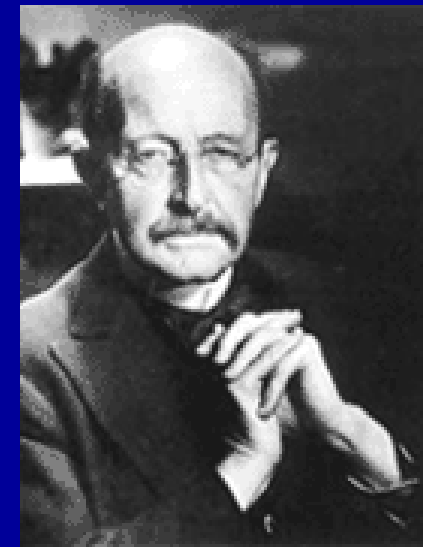
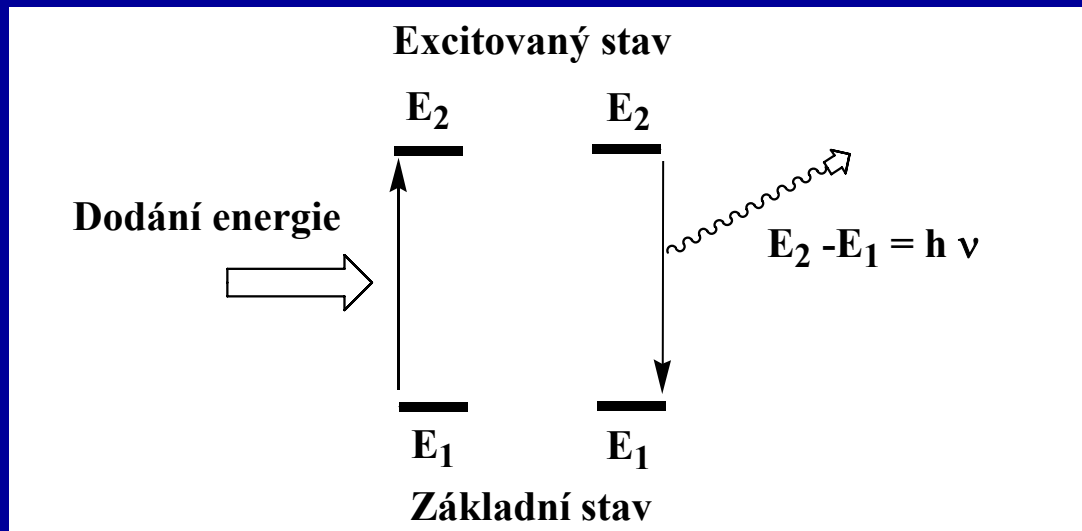
# Emisní čárová spektra prvků



H  
He  
Li  
Cu  
Zn

# Kvantování energie

1900 Energie záření o vlnové délce  $\lambda$  se může absorbovat nebo emitovat po diskretních množstvích = kvantech



Světelná kvanta = fotony

$$\Delta E = n h \nu = n h c / \lambda$$

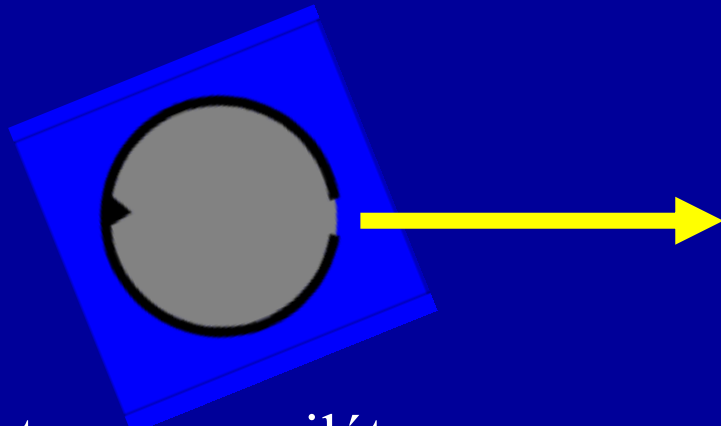
Planckova konstanta  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

Max Planck  
(1858 - 1947)

NP za fyziku 1918

## Záření černého tělesa

Černé těleso = dokonale absorbuje veškeré dopadající záření,  
dokonale emituje všechny vlnové délky

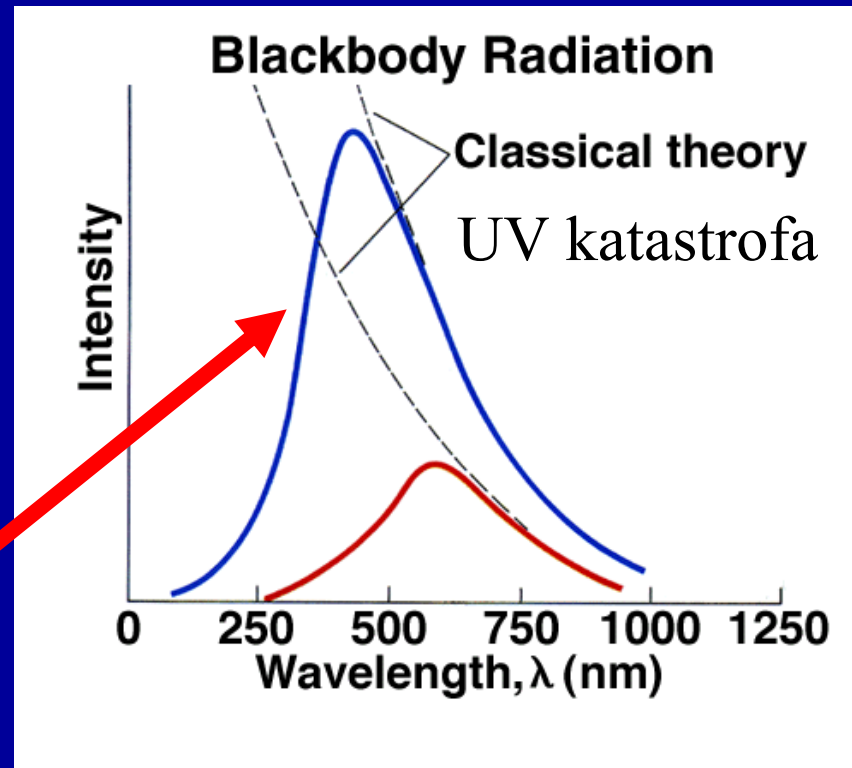


Atomy = oscilátory

Kvantování energie  $E = h \nu$

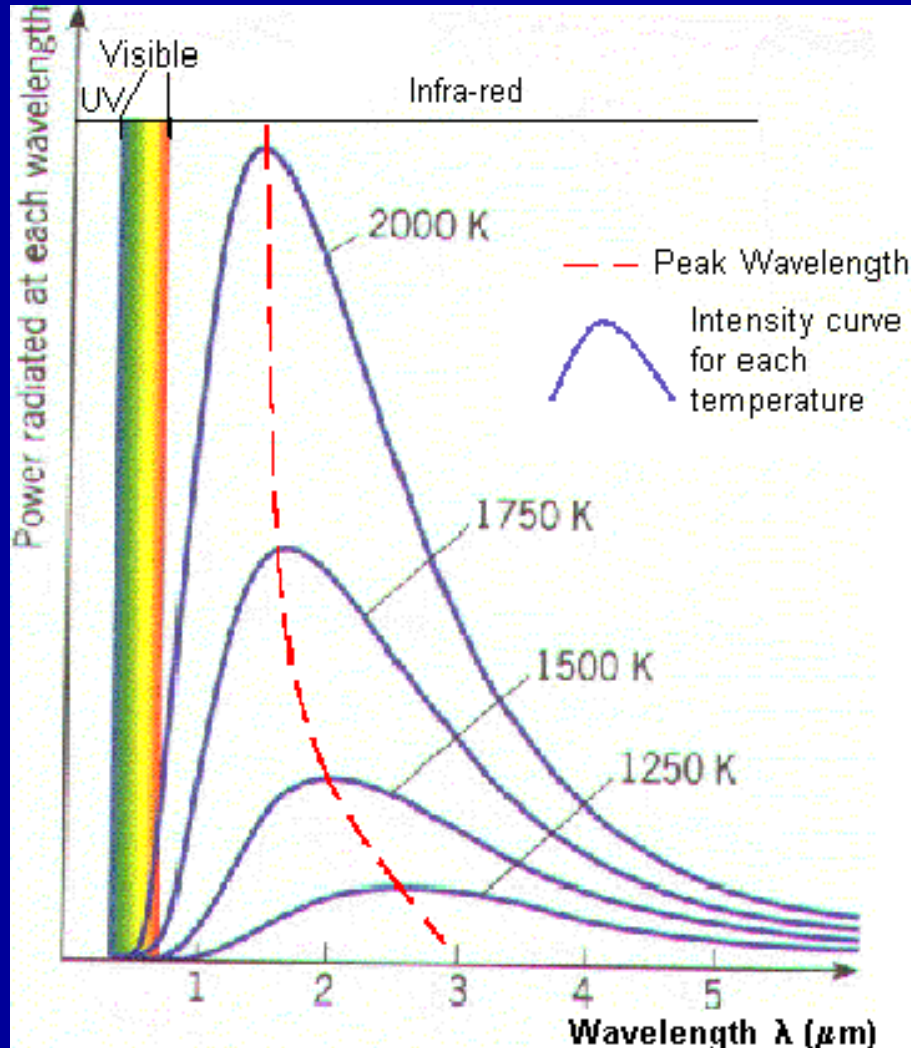
Max Planck odvodil

$$P_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$



Vyzářená energie při vlnové délce  $\lambda$   
je funkcí pouze teploty

# Záření černého tělesa



Wienův zákon

$$\lambda_{\max} = \frac{\textit{konst}}{T}$$

Stefan-Boltzmannův zákon  
Energie vyzářená z  
jednotkové plochy za čas

$$P = \sigma \times T^4$$

# Záření černého tělesa

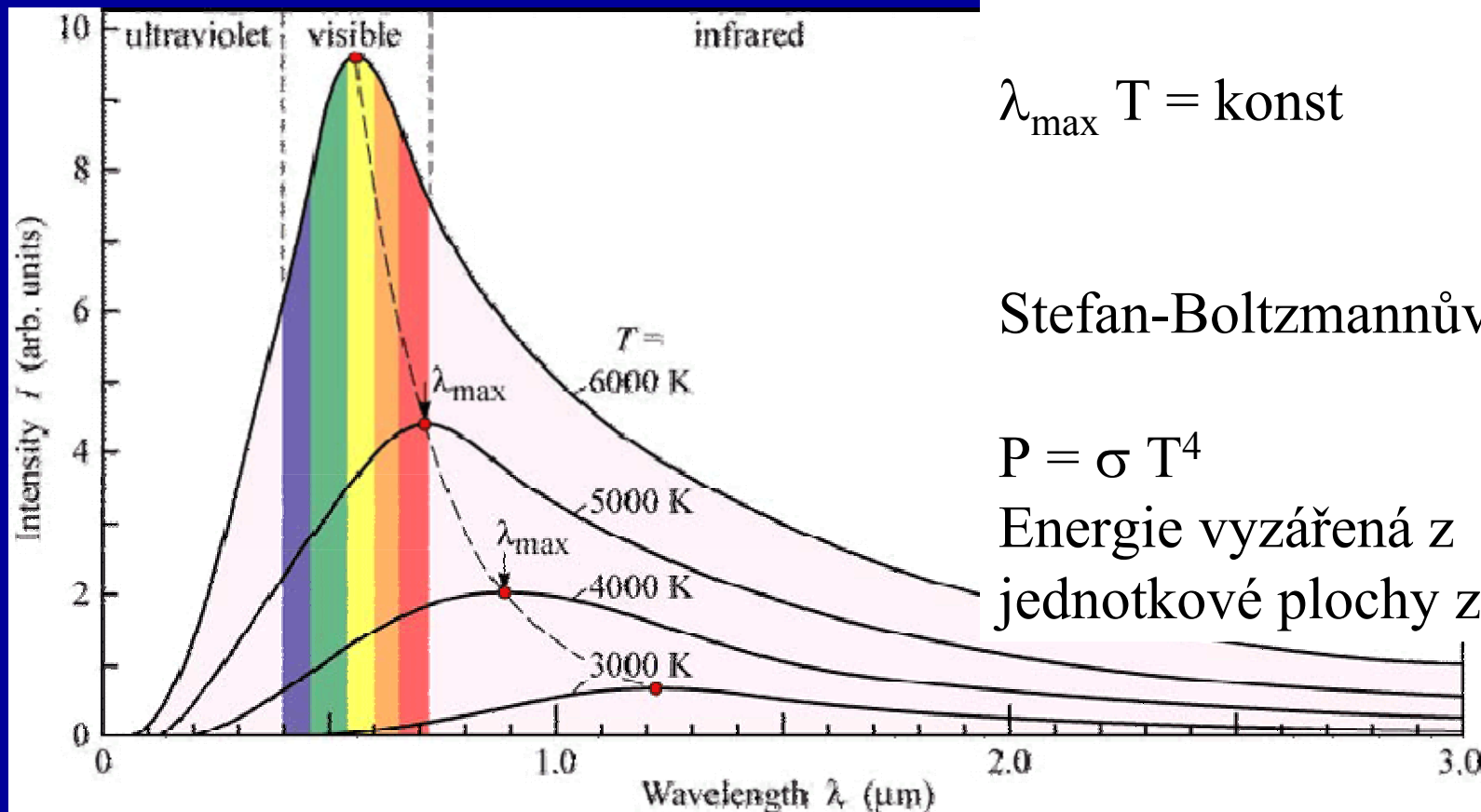
Wienův zákon

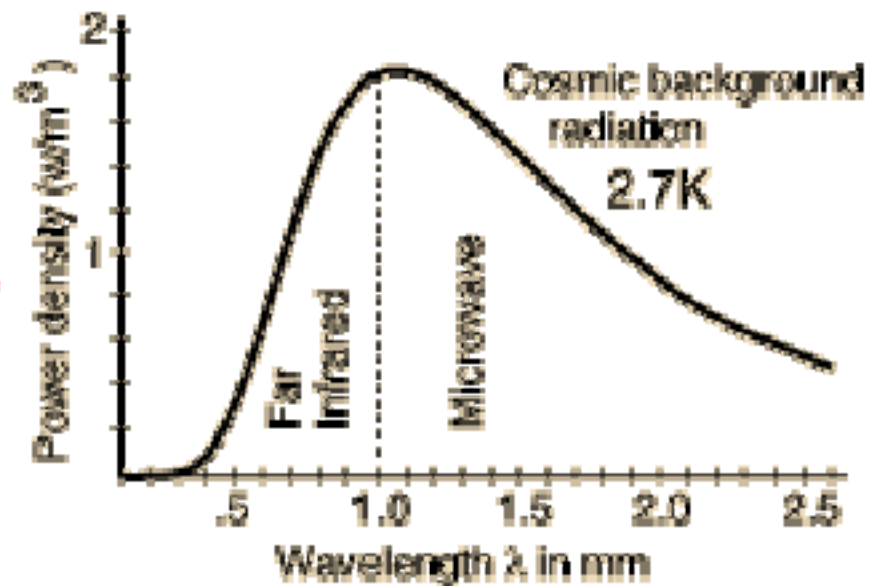
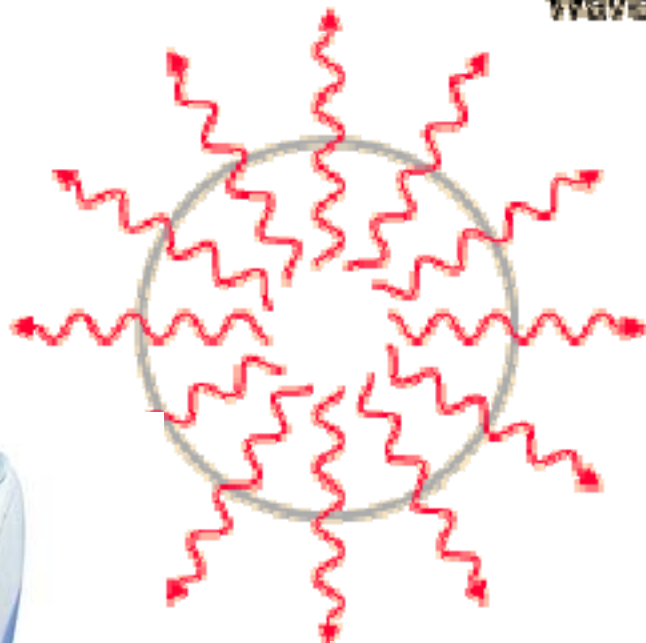
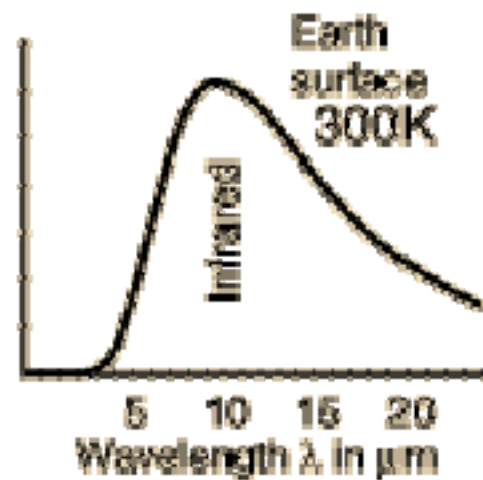
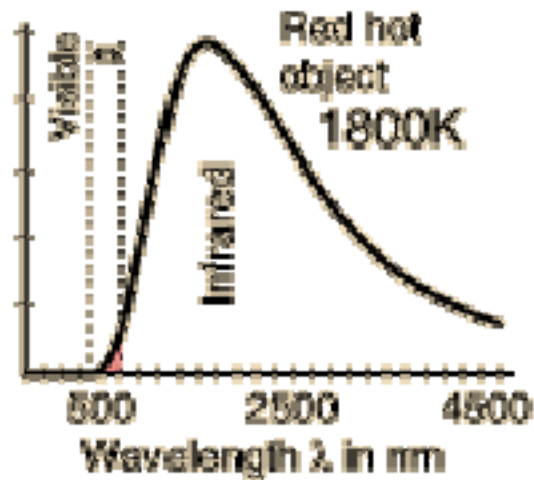
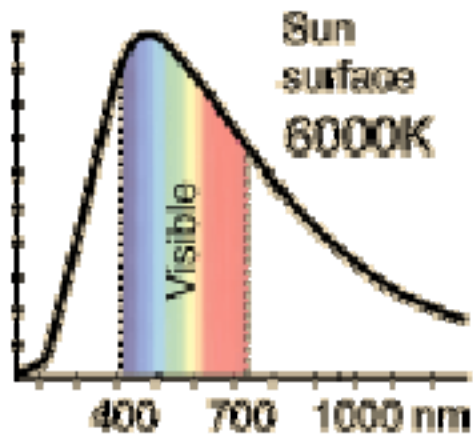
$$\lambda_{\max} T = \text{konst}$$

Stefan-Boltzmannův zákon

$$P = \sigma T^4$$

Energie vyzářená z  
jednotkové plochy za čas



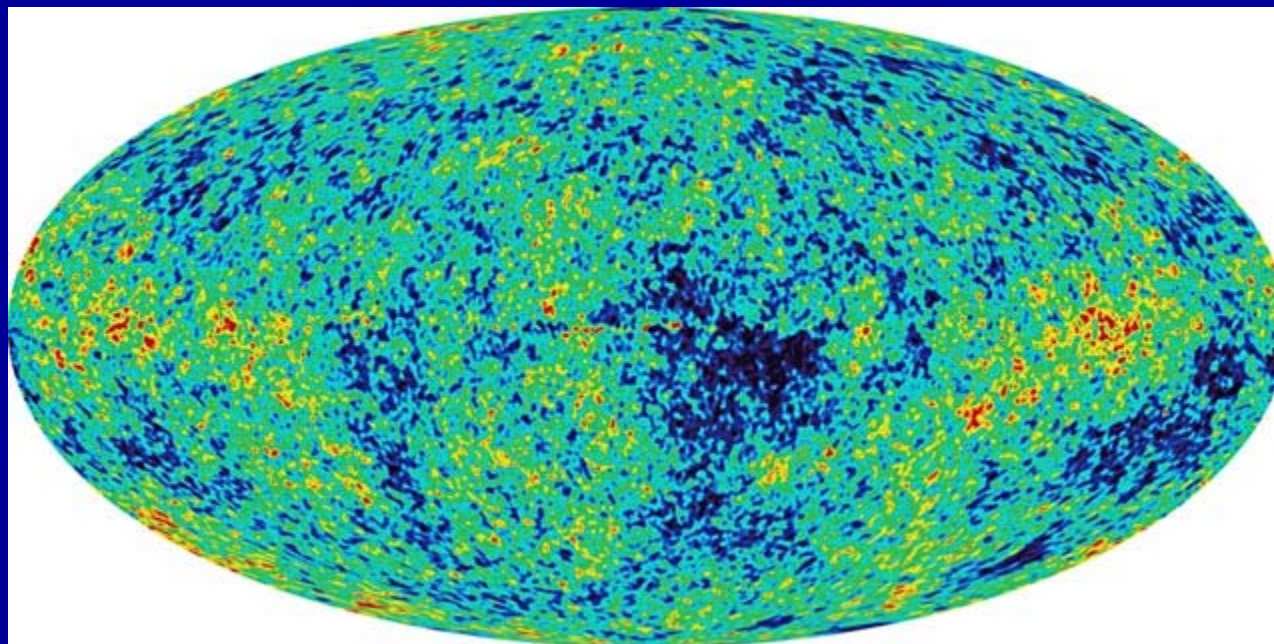


Teplota záření vesmíru  
2.73 K

# Kosmické záření

1964 Penzias a Wilson

Reliktní záření po Velkém třesku



Teplota záření vesmíru 2.728 K



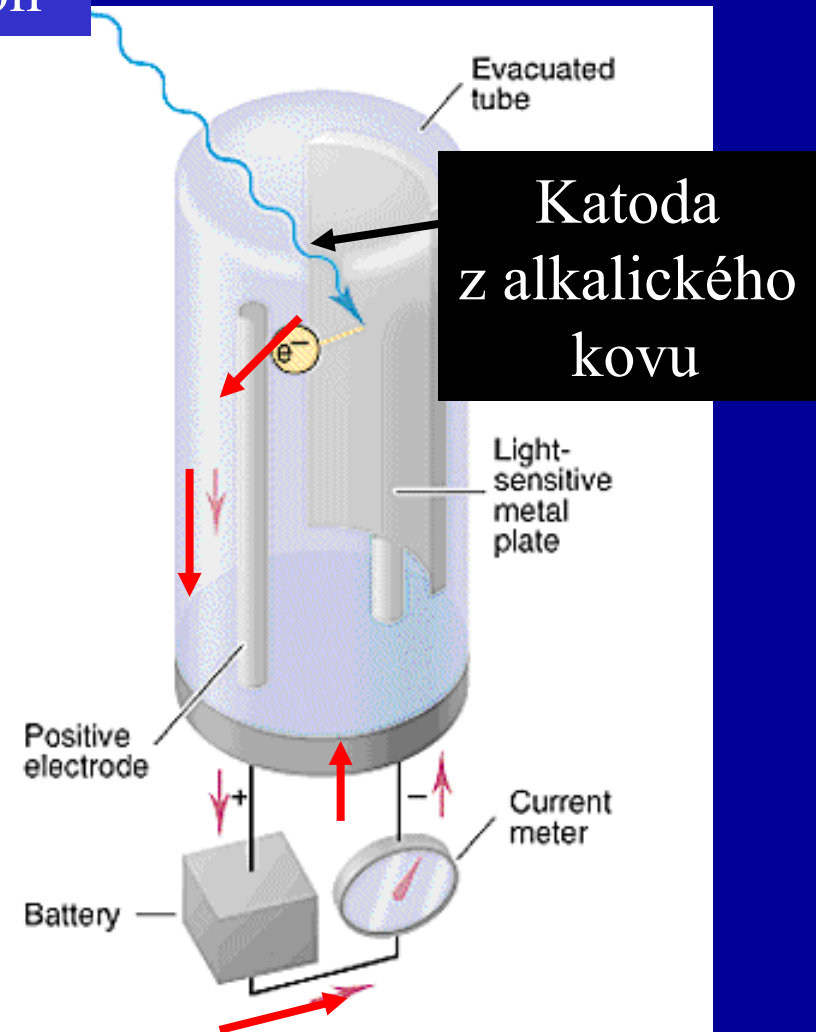
# Fotoelektrický jev

1887 Heinrich Hertz

1898 J. J. Thomson

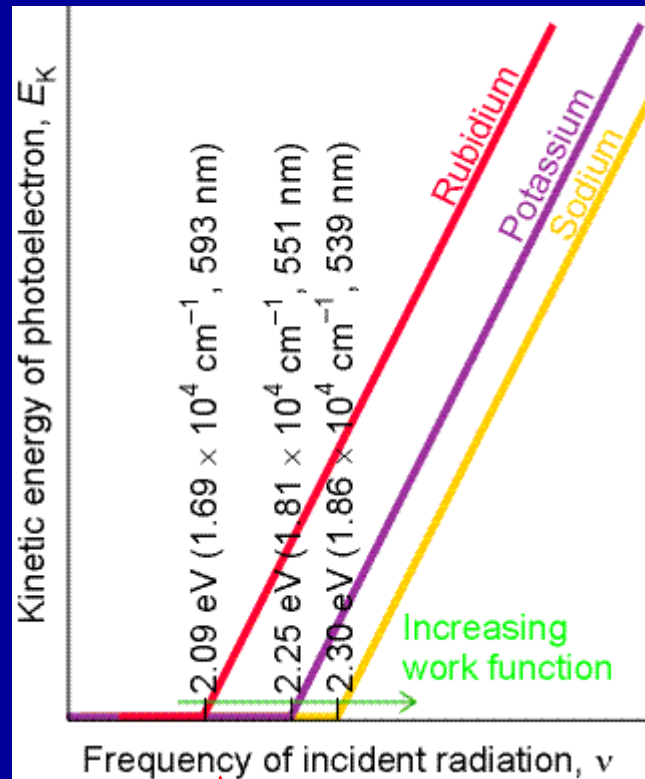
- elektrony jsou emitovány z povrchu kovu při ozařování (UV zářením, alkalické kovy viditelným světlem)
- existuje minimální  $\nu$ , fotony s nižší energií už nevyrazí elektrony
- kinetická energie fotoelektronů závisí na  $\nu$ , roste s vyšší energií světla, ale nezávisí na jeho intenzitě

foton



# Fotoelektrický jev

Kinetická energie fotoelektronů



kinetická energie fotoelektronů závisí na  $\nu$ , roste s vyšší energií světla, ale nezávisí na jeho intenzitě

Pod  $\nu_0$  žádná emise bez ohledu na intenzitu světla!

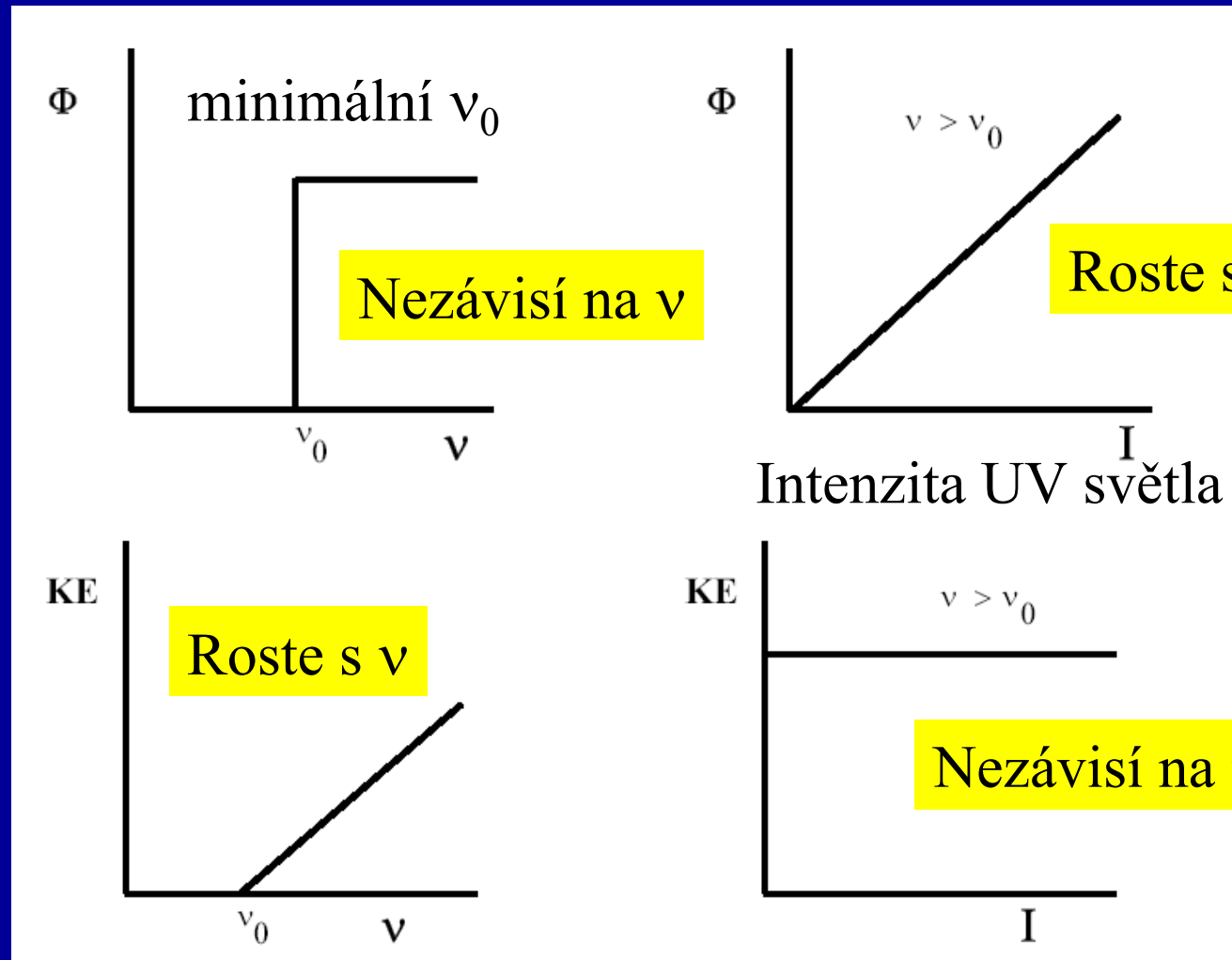
# Fotoelektrický jev

$\Phi$  = Tok fotoelektronů

$h\nu_0$  = výstupní práce

$I$  =  
Intenzita  
UV světla

$KE$  =  
Kinetická  
energie



1905

## Fotoelektrický jev

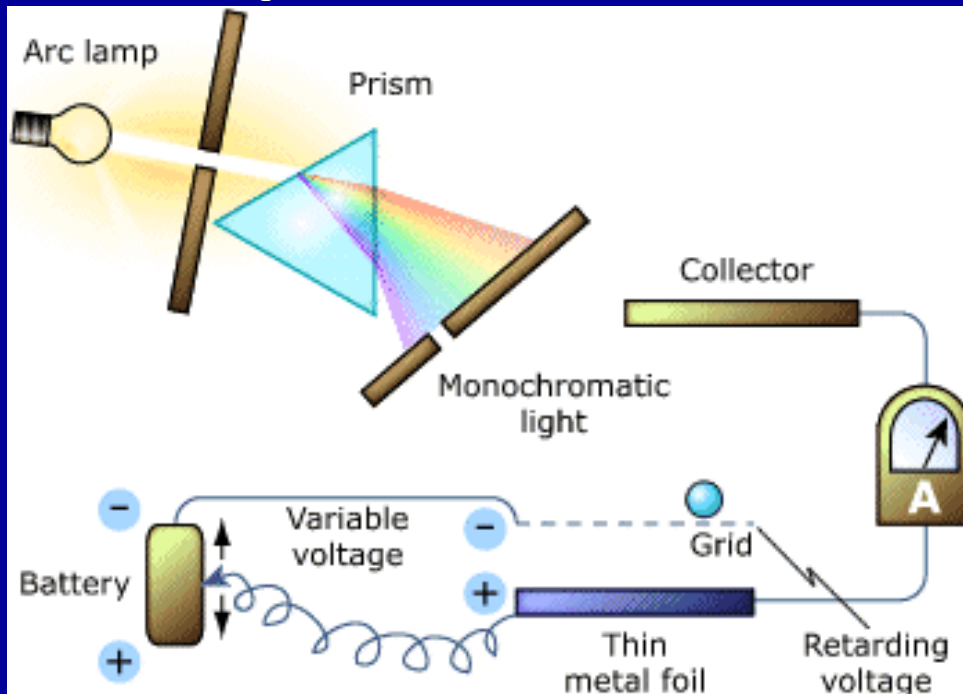
Částicový charakter elektromagnetického záření

Světlo = fotony

energie fotonu  $E = h \nu$

energie vyletujícího elektronu  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$

$$h \nu = E_i + \frac{1}{2} m v^2$$



Albert Einstein  
(1879-1955)

NP za fyziku 1921

$$E_{\text{kin}} = h (\nu - \nu_0)$$

$\nu_0$  = konstanta kovu

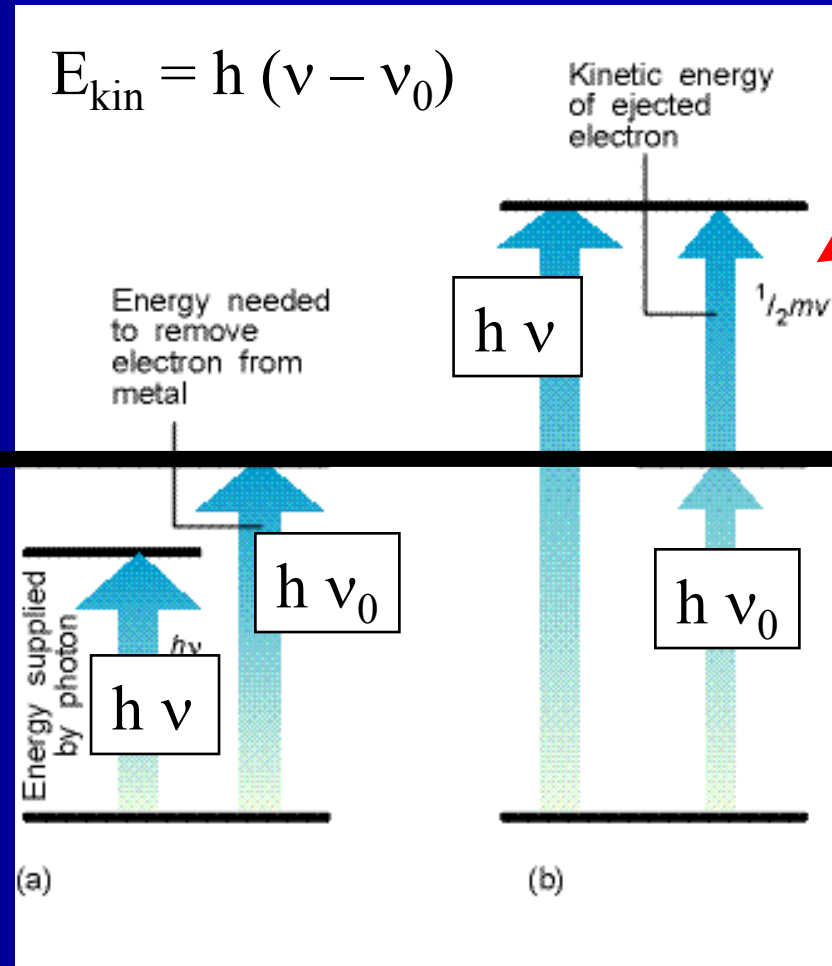
$h$  = Planckova konstanta

$E_i = h \nu_0$  = výstupní práce

$$h \nu = E_i + \frac{1}{2} m v^2$$

## Fotoelektrický jev

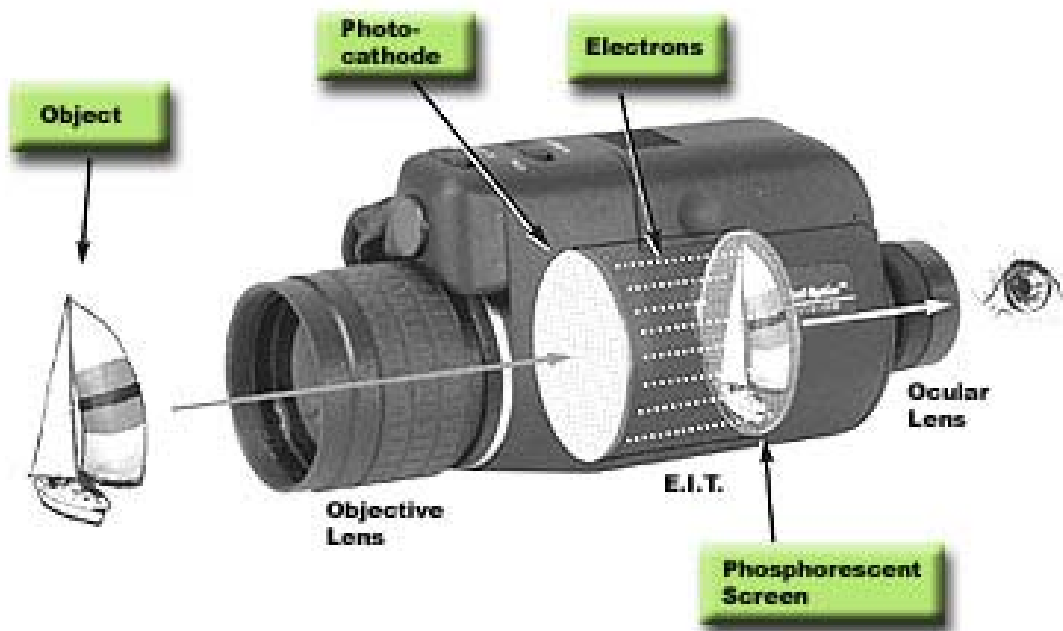
Energie vyletujícího elektronu  $E_{kin}$



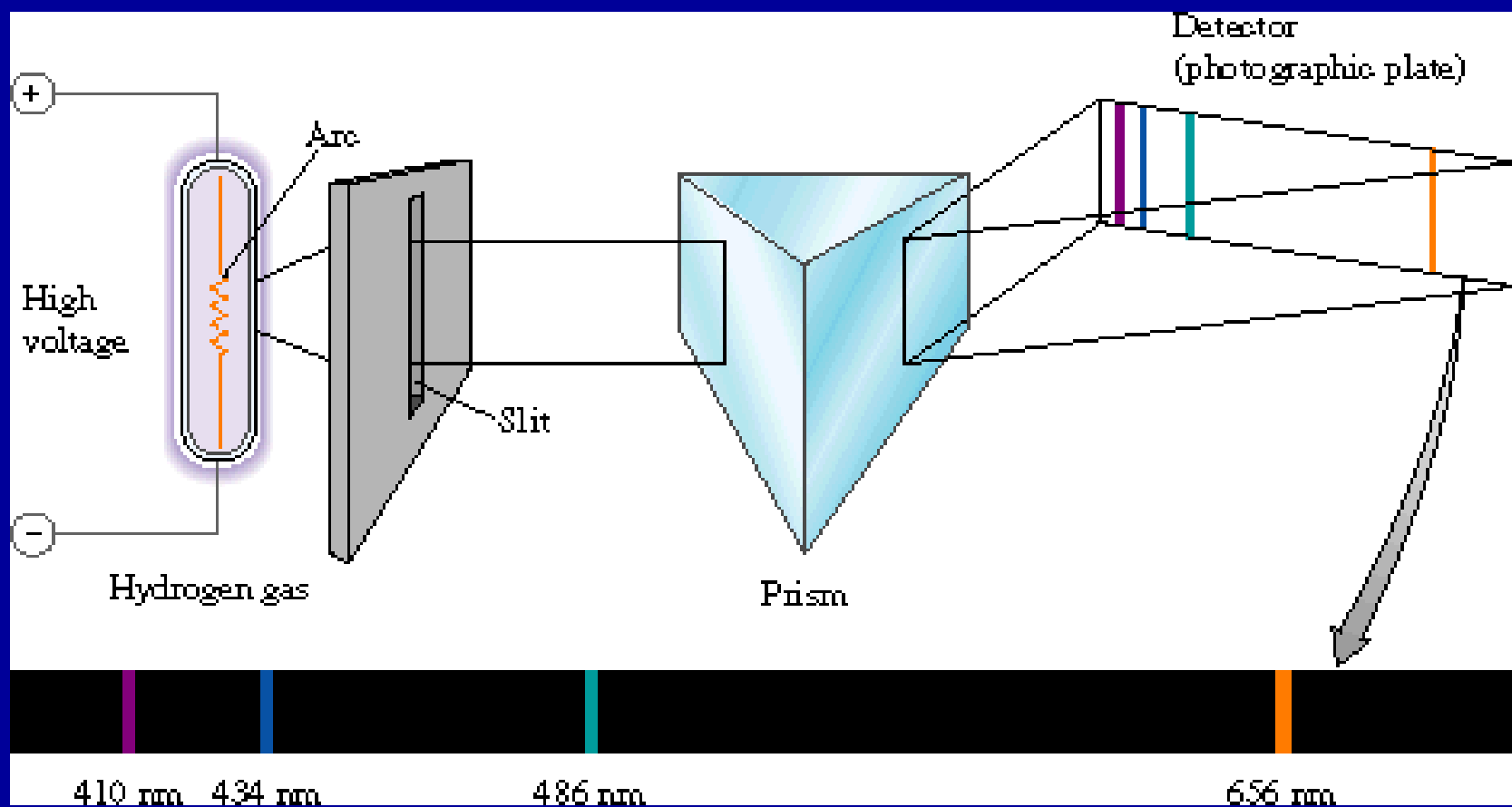
Energie fotonu  
 $E = h \nu$

$E_i = h\nu_0$   
výstupní práce

# Aplikace fotoelektrického jevu - Night Vision



## Emisní spektrum vodíku



Spektrum světla emitovaného H atomy = čárové spektrum  
čáry mají vždy stejnou vlnovou délku

## Rydbergova rovnice

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Experimentálně získaná rovnice z výsledků spektrálních měření (viditelná, infračervená, ultrafialová oblast)

Rydbergova konstanta,  $R_{\infty} = 109678 \text{ cm}^{-1}$

$n, m$  celá čísla,

$n = 2, m = 3, 4, 5, 6, \dots$  Balmerova série ve viditelné oblasti

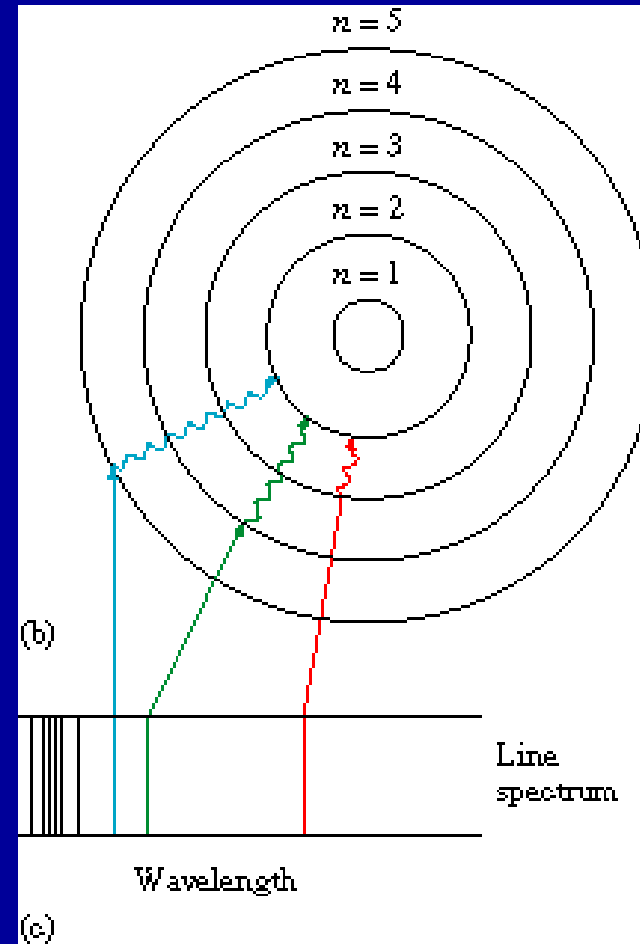
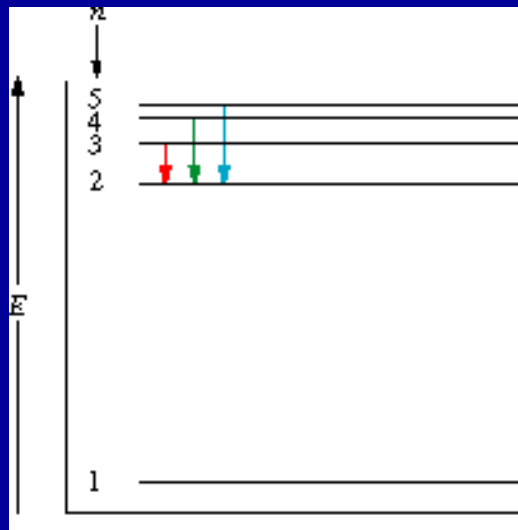
**Rydbergova rovnice platí pouze pro spektrum H**



# Spektrum atomu vodíku

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

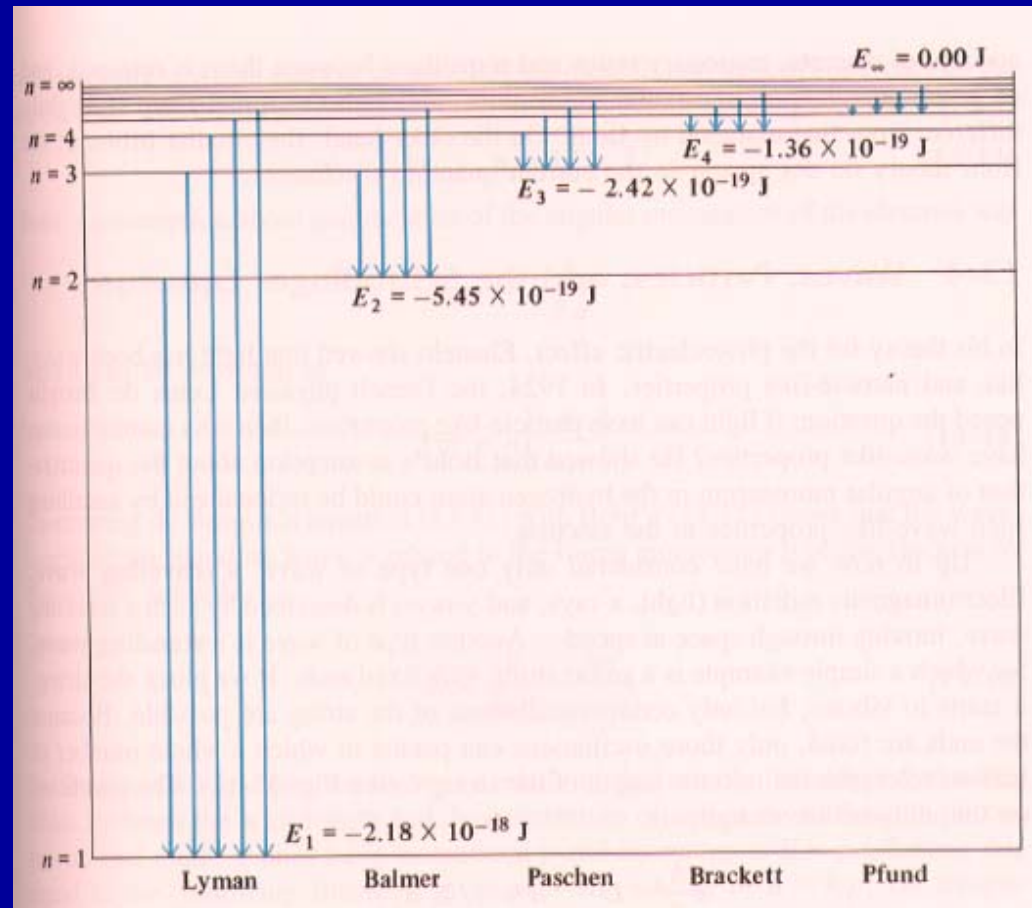
$m \rightarrow n$



# Spektrální série

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

- $n = 1, m = 2, 3, \dots$  Lymanova
- $n = 2, m = 3, 4, \dots$  Balmerova
- $n = 3, m = 4, 5, \dots$  Paschenova
- $n = 4, m = 5, 6, \dots$  Bracketova
- $n = 5, m = 6, 7, \dots$  Pfundova



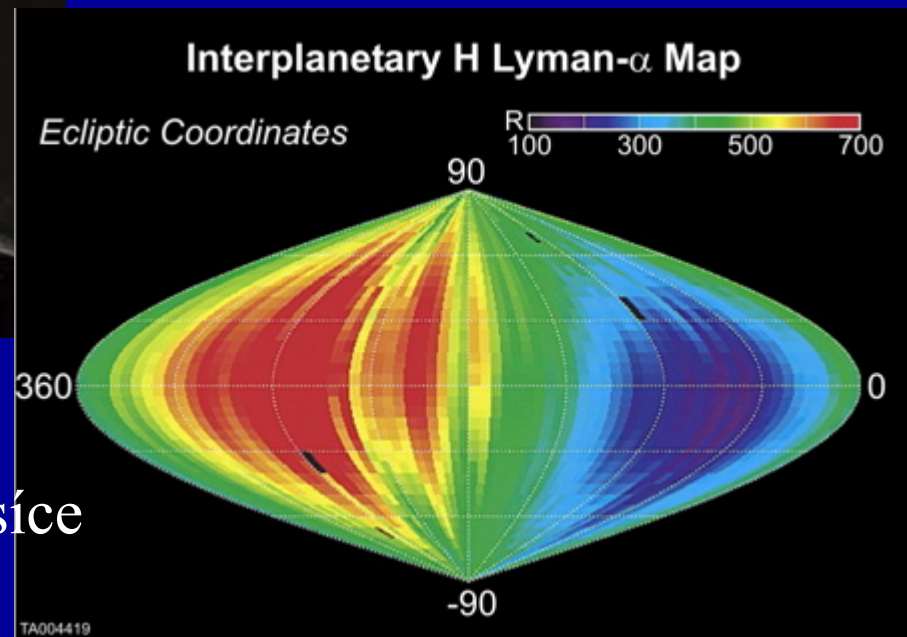
# The Lyman-Alpha Mapping Project (LAMP)

## Seeing in the Dark



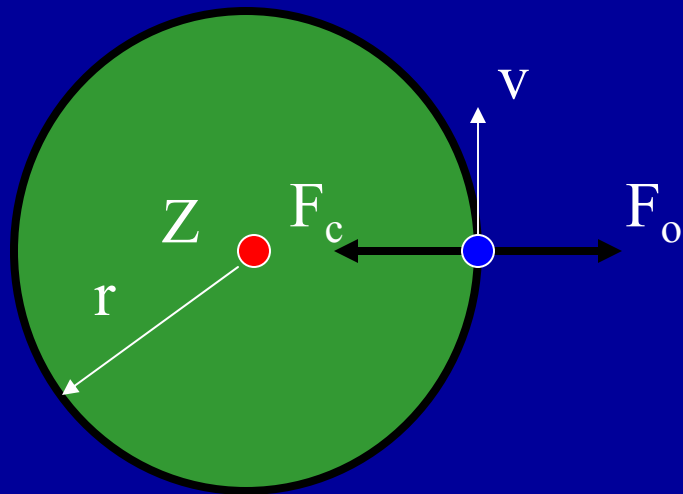
$$\lambda = 121.6 \text{ nm}$$

Světlo z hvězd

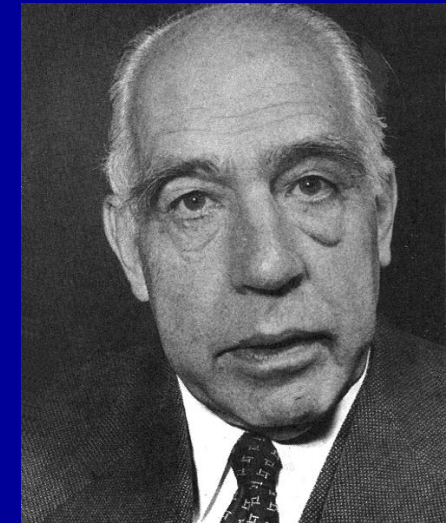


Mapování odvrácené strany Měsíce

# Bohrův model atomu



1913



Elektrony obíhají kolem jádra po kruhových drahách, rovnováha odstředivé a Coulombovské přitažlivé síly

$$F_o = F_c$$

Niels Bohr  
(1885 - 1962)  
NP za fyziku 1922

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

## Bohrův model atomu

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$



$$r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mv^2}$$

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} m v^2 - Z e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r = - Z e^2 / 8 \pi \epsilon_0 r$$

Pokud je  $r$  libovolné, obíhající  $e$  ztrácí (vyzařuje) energii,  $r$  se snižuje,  $e$  se srazí s jádrem. Není to ve skutečnosti pravda.

Elektron tedy musí obíhat jen po určitých drahách s danou  $E$  a  $r$ , na kterých nevyzařuje energii = dovolené stacionární stavy.

Nejnižší energetický stav = nejstabilnější = základní stav

Vyšší stavy = excitované stavy

Změna energetického stavu kvantována  $E_2 - E_1 = h\nu$

Vznik čáry ve spektru

## Bohrův model atomu

Bohrův postulát: moment hybnosti elektronu je celočíselným násobkem Planckova kvanta  $h/2\pi$

$n$  = kvantové číslo

Poloměr dráhy

$$r = n^2 \frac{a_0}{Z}$$

Rychlost elektronu

$$v = \frac{Ze^2}{2\varepsilon_0 nh}$$

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

dosadíme z  $m v^2 = Z e^2 / 4 \pi \varepsilon_0 r$

pro  $n = 1$  a  $Z = 1$

$$a_0 = \varepsilon_0 h^2 / \pi m e^2$$

$a_0 = 0.529 \text{ \AA}$  Bohrův poloměr atomu H

## Bohrův model atomu

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \frac{1}{2} m v^2 - Z e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r$$

Energie  
elektronu  
na hladině  $n$

$$E_n = -E_0 \frac{Z^2}{n^2}$$

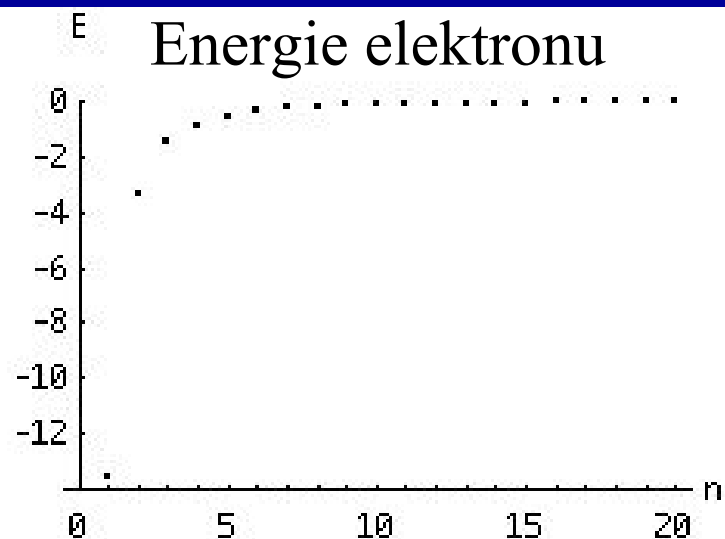
zavedením kvantování

$$E_0 (= m e^4 / 8 \epsilon_0^2 h^2) = 2.18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$(1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

$$E_0 = 13.6 \text{ eV}$$

Ionizační potenciál  
H atomu

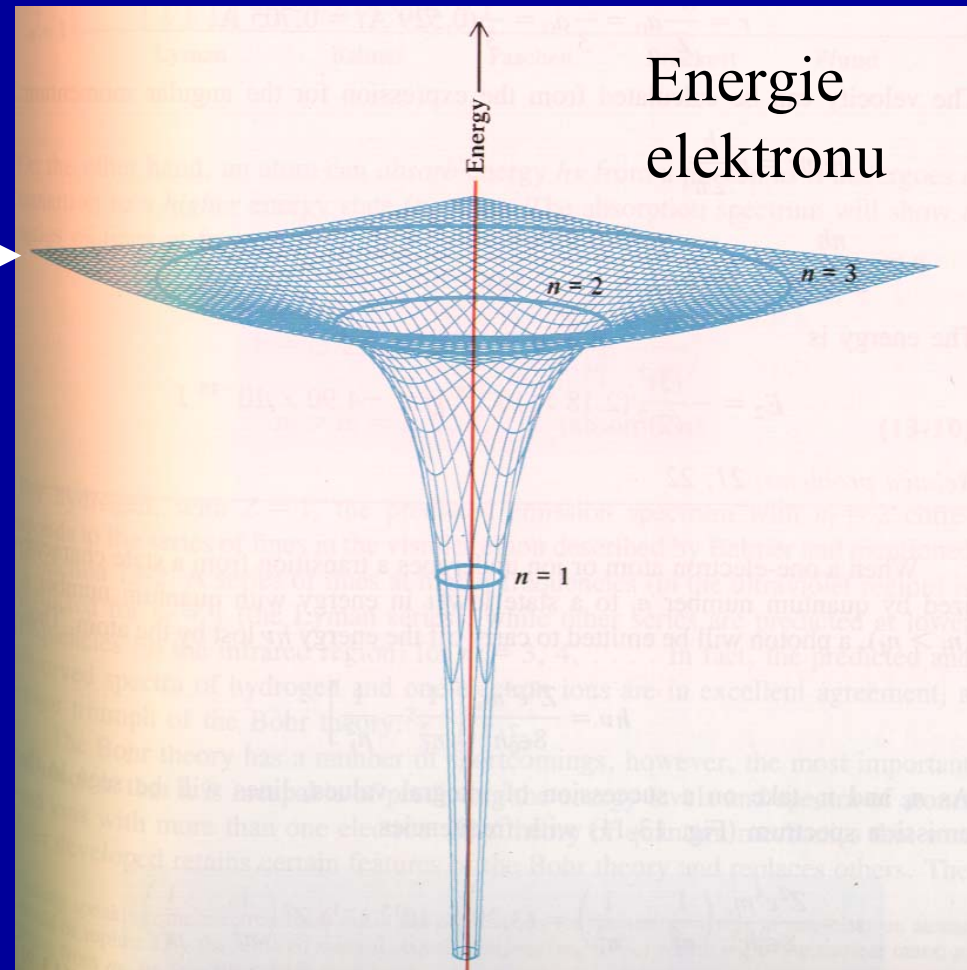


## Bohrův model atomu

$$E = 0$$



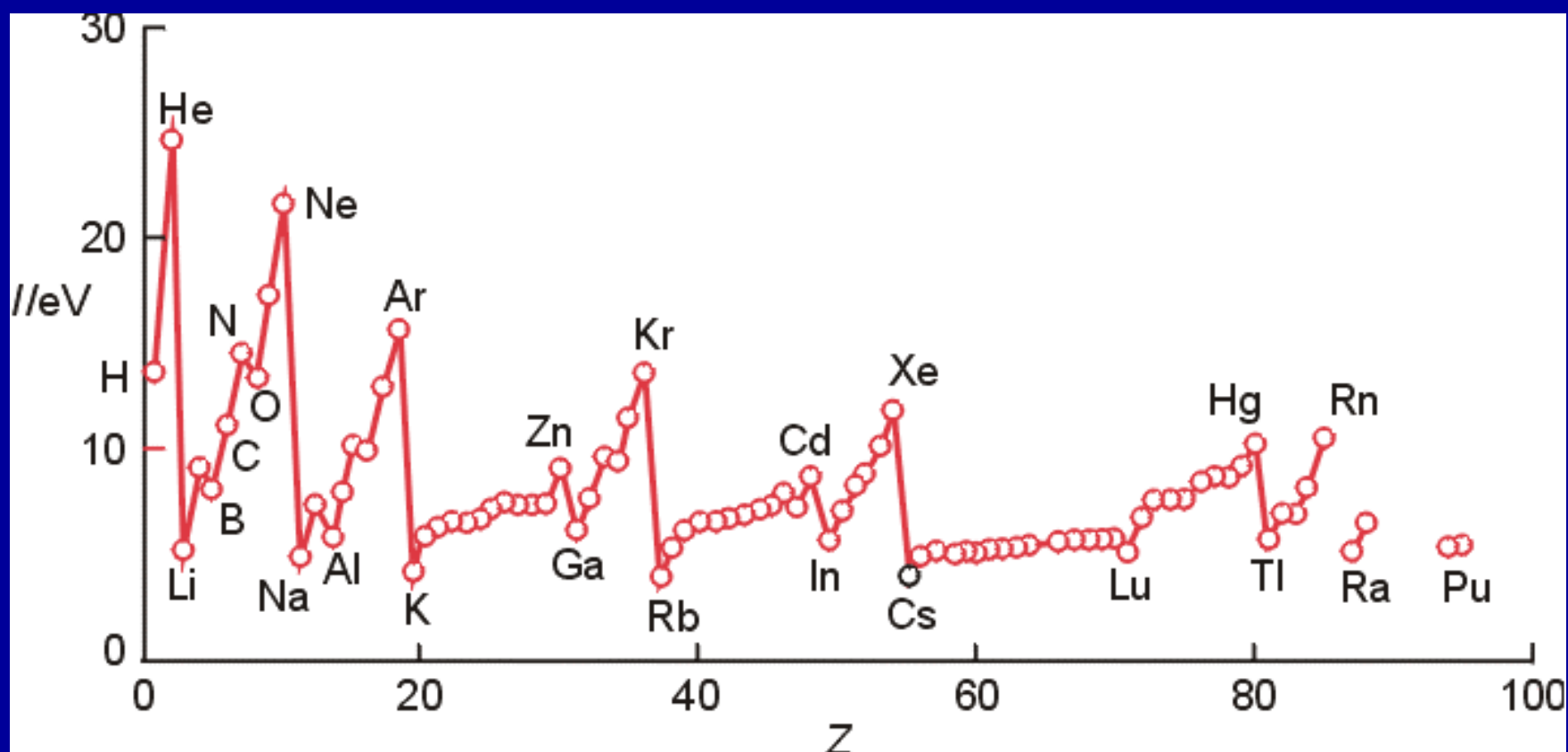
Čím je elektron pevněji  
vázán k jádru, tím je jeho  
energie negativnější, více  
energie se uvolní.





# Ionizační energie

Energie potřebná na odtržení vázaného elektronu



Atomové číslo, Z

## Bohrův model atomu

Energie  
elektronu  
na hladině  $n$

$$E_n = -E_0 \frac{Z^2}{n^2} = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \frac{Z^2}{n^2}$$

Rozdíl energií mezi dvěma hladinami

$$E_2 - E_1 = (-E_0 Z^2 / n_2^2) - (-E_0 Z^2 / n_1^2)$$

$$\Delta E = h \nu = h c / \lambda$$

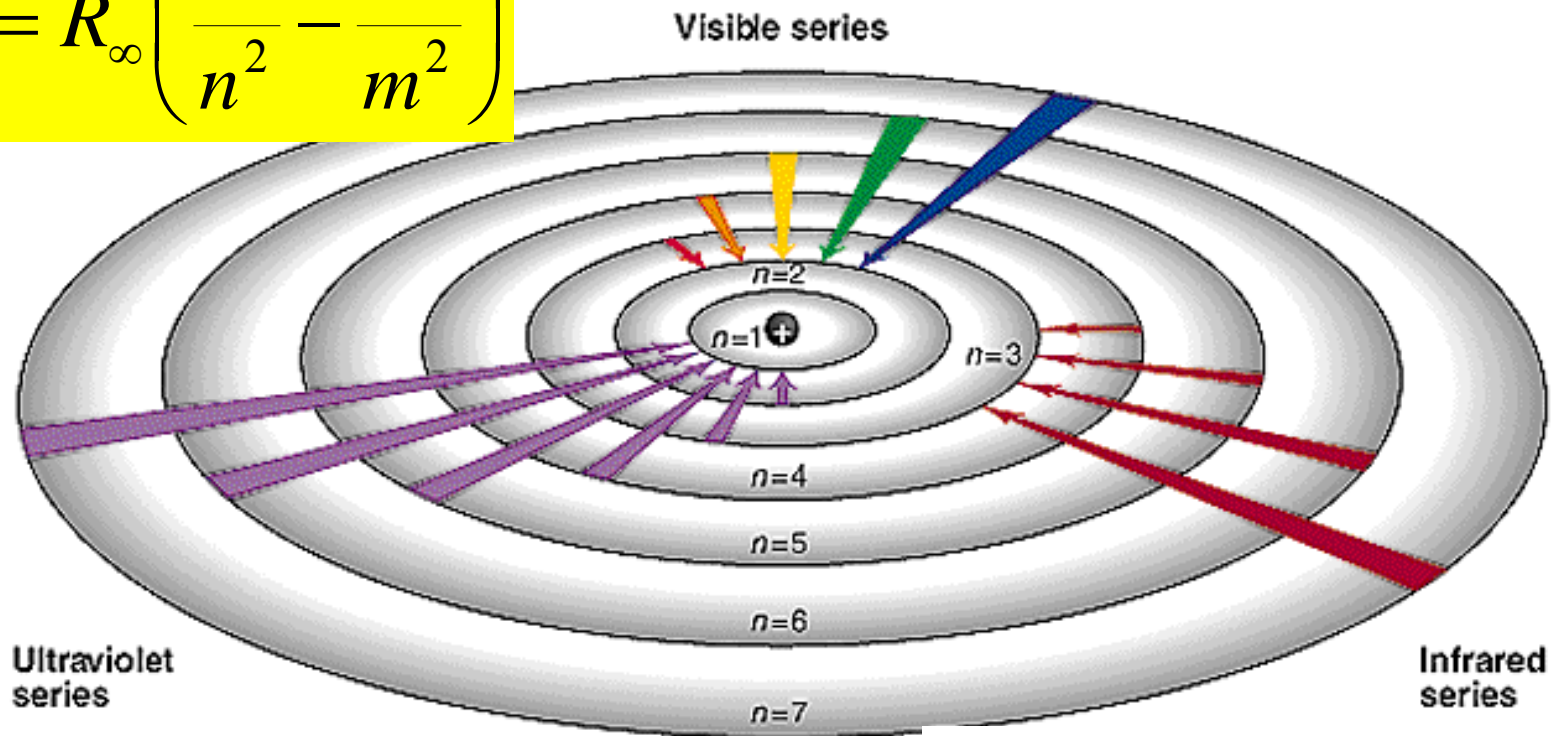
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Identická rovnice s Rydbergovou !!!

# Spektrum atomu vodíku

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$n = 2, m = 3, 4, \dots$  Balmerova



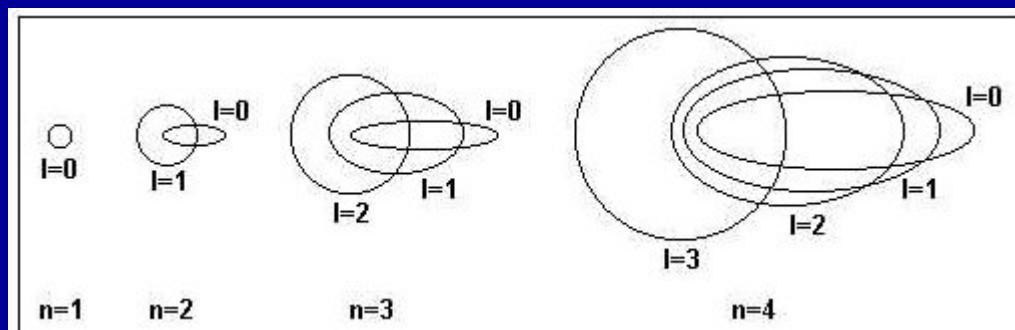
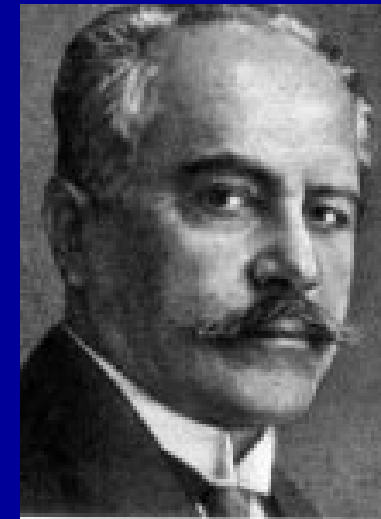
$n = 1, m = 2, 3, \dots$  Lymanova

$n = 3, m = 4, 5, \dots$  Paschenova

# Sommerfeldův model atomu

Vylepšení Bohrova modelu

- Eliptické dráhy
- Dvě kvantová čísla
- Výběrová pravidla
- Vysvětlení jemné struktury čar H spektra



Arnold Sommerfeld  
(1868-1951)

## Vzestup a pád Bohrova modelu atomu

Bohrův (planetární) model atomu:

- Jednoduchý a snadno srozumitelný
- Vysvětlil dokonale linie ve vodíkovém spektru
- Vysvětlil kvantování energie v atomu
- Nevysvětloval spektra víceelektronových atomů
- Použitelný jen pro atomy “vodíkového typu”  
(jádro =  $Z^+$ , jediný elektron)

Fundamentálně nesprávný model  
byl překonán kvantově-mechanickým modelem

# Vlnový charakter světla

Rozptyl na mřížce, interference, difrakce, lom, polarizace

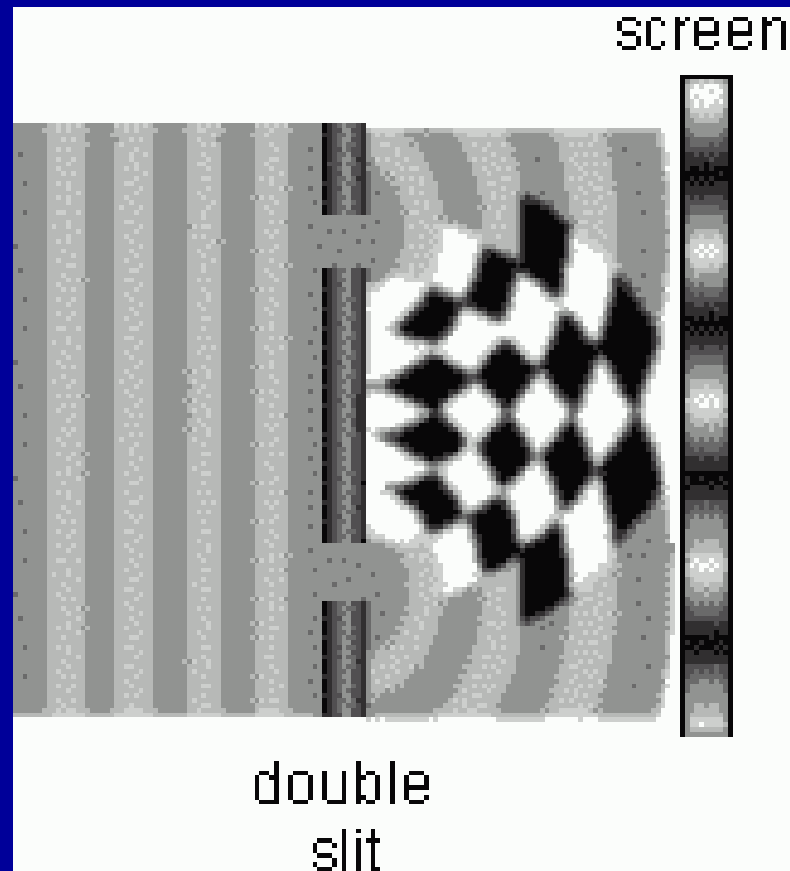
Christian Huygens

Augustin J. Fresnel

Thomas Young

James C. Maxwell

Heinrich Hertz



# Částicový charakter světla

Záření černého tělesa, fotoelektrický jev, čárová spektra,  
maximální vlnová délka rentgenova záření, Comptonův jev

Albert Einstein

Max Planck

Wilhelm K. Roentgen

Henry Moseley

Niels Bohr

Arthur Compton

# Částicový charakter světla

Elektromagnetické záření = vlnění

$$E = h \nu$$

Elektromagnetické záření = částice – fotony

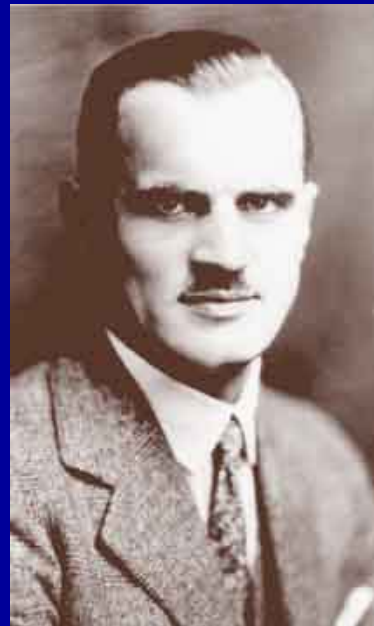
Comptonův jev 1922

Foton má hmotnost  $m_f$

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

$$E = m_f c^2$$

$$m_f = \frac{h}{\lambda c}$$



Arthur H. Compton  
(1892 - 1962)

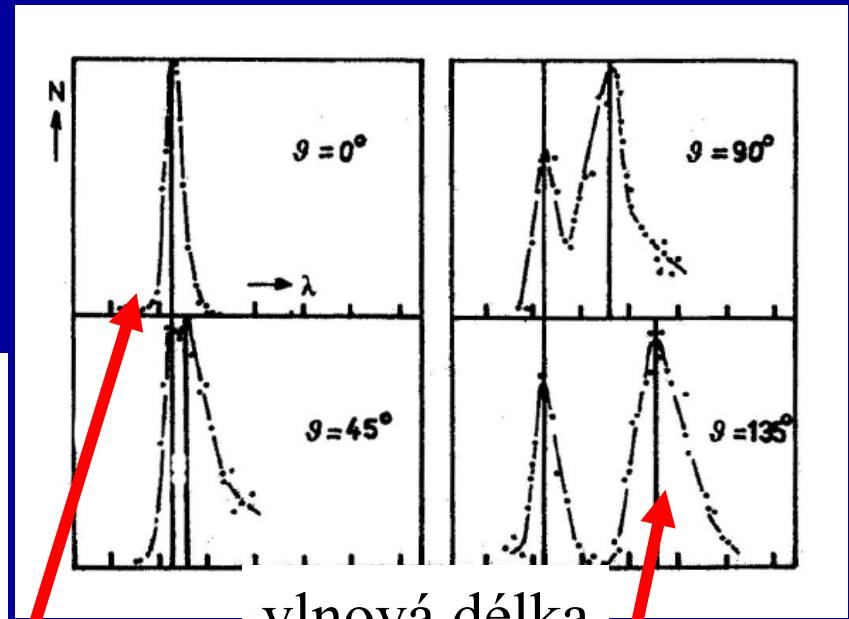
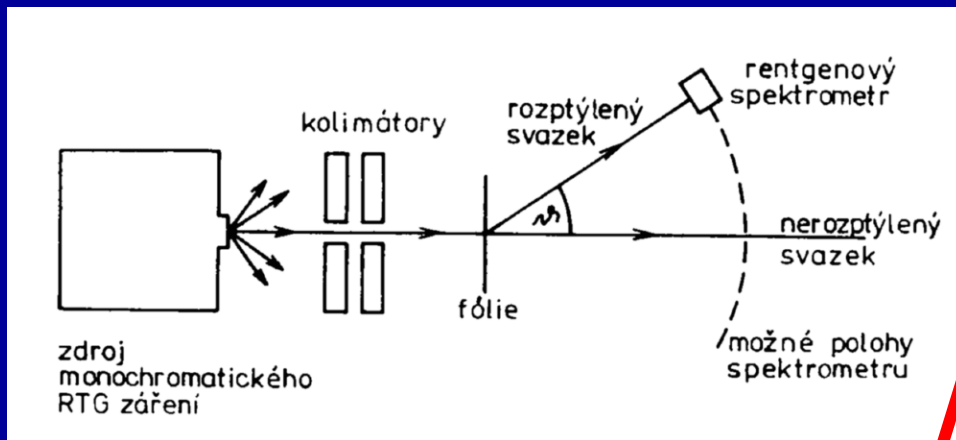
NP za fyziku 1927



# Comptonův experiment

Rozptyl monochromatického RTG na uhlíku.

$N$  = počet detekovaných fotonů v závislosti na vlnové délce



vlnová délka

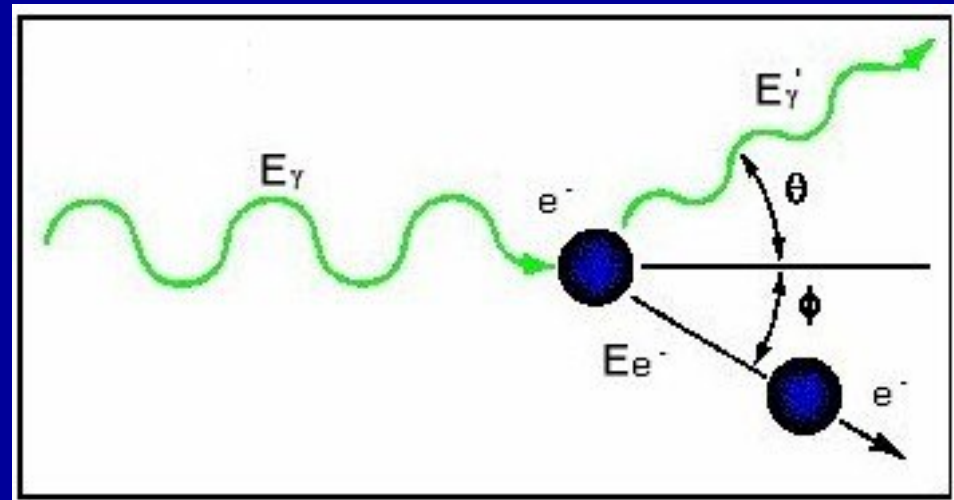
Fotony rozptýlené na jádrech (velmi hmotná, nedojde ke změně vlnové délky).

Fotony rozptýlené na statických elektronech, vzrůst vlnové délky. Část energie předána.

## Duální charakter světla

Vlnová délka fotonu se prodlužuje po kolizi s elektronem = předání energie  
Čím větší úhel  $\theta$ , tím předal foton více energie elektronu, vlnová délka klesla

Fotony elektromagnetického záření = **částice**



$$E'_\gamma = \frac{E_r}{1 + (1 - \cos \theta) \frac{E_r}{mc^2}}$$

# Vlnový charakter elektronu

1923 de Broglieho rovnice

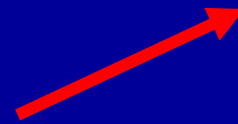
Elektronu přísluší vlnová délka

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Planck  
 $E = hf = h \nu / \lambda$

+

Einstein  
 $E = mv^2$



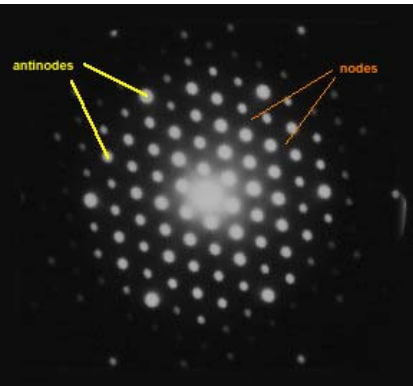
Louis de Broglie  
(1892 - 1987)  
NP za fyziku 1929



částice



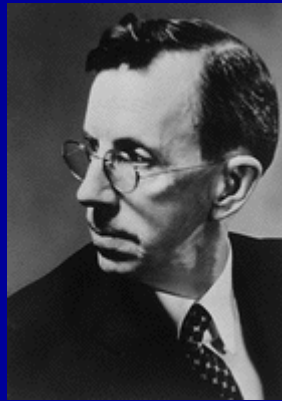
$v$  = rychlost elektronu  
 $mv = p$  = hybnost elektronu



# Rozptyl elektronů na krystalu Ni

1927

C. J. Davisson  
(1881-1958)

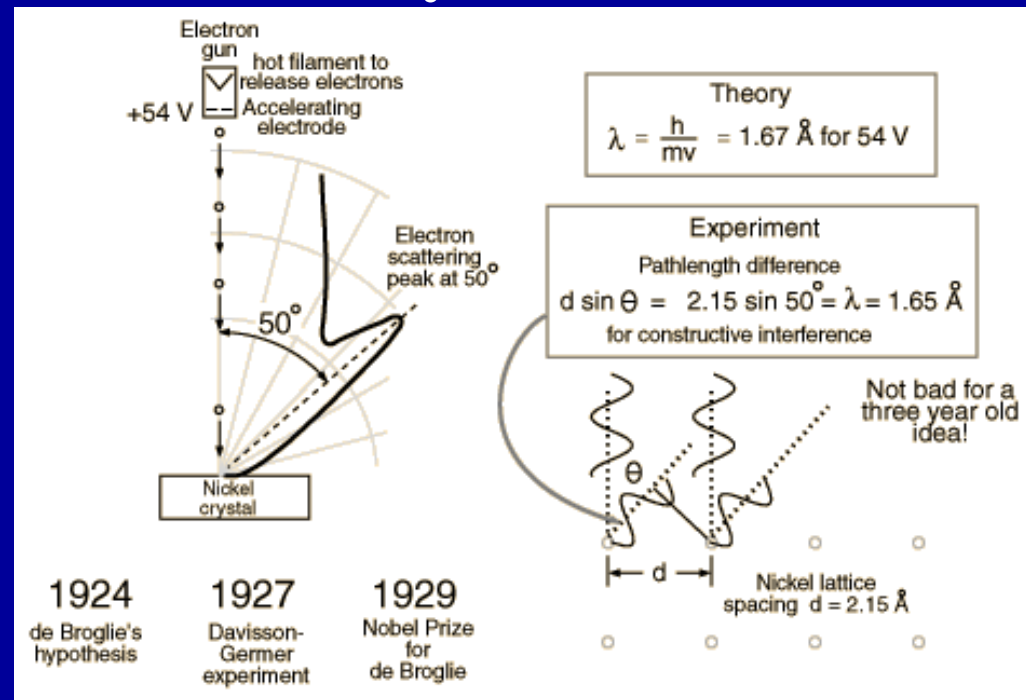


L. Germer

G. P. Thomson  
(1892-1975)



NP za fyziku 1937

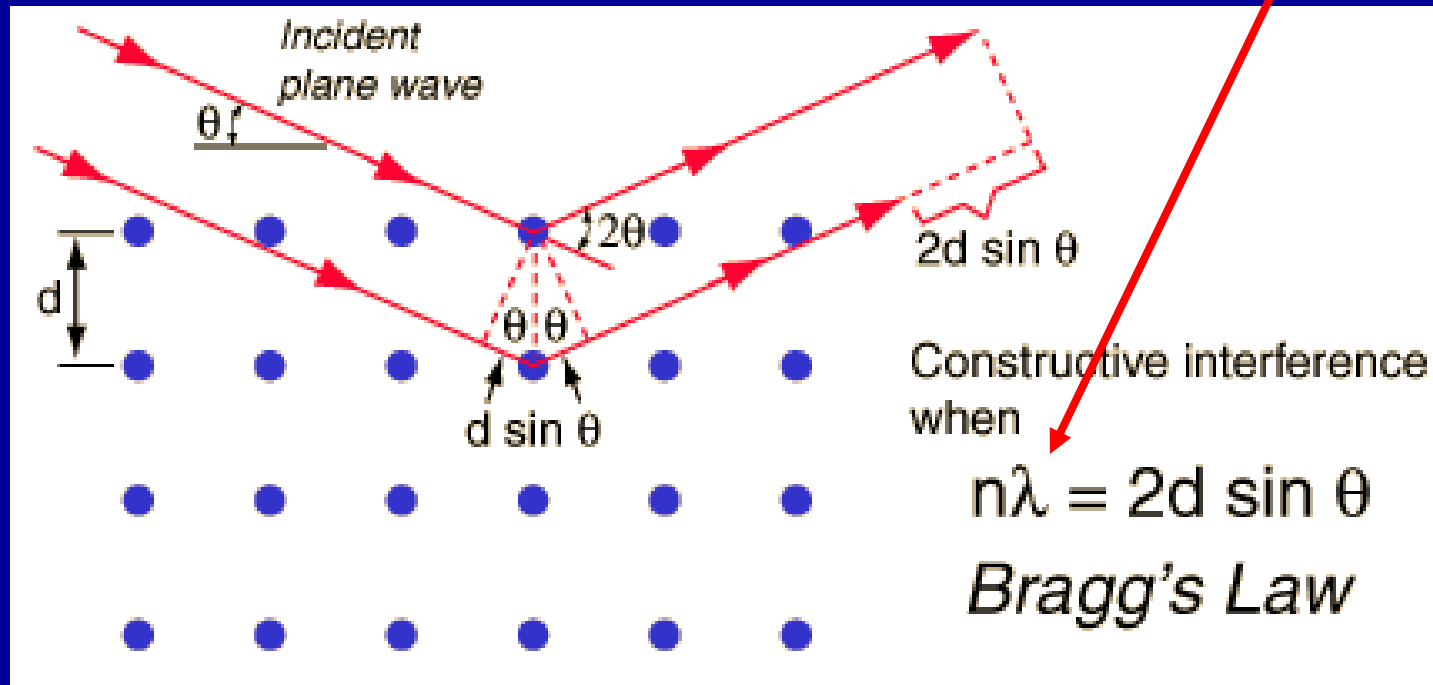


$$E = e V = \frac{1}{2} m v^2$$

Experimentální důkaz vlnového charakteru elektronu. Částice by se rozptylovaly do všech směrů stejně. <sup>44</sup>

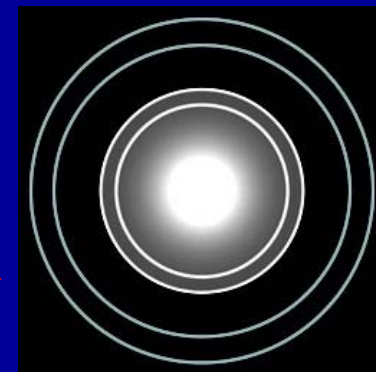
# Braggova rovnice

de Broglieho  
vlnová délka  
elektronu  $\lambda$



← Rentgenovo záření

Elektrony →



# Elektron jako stojaté vlnění

Elektron = vlna  
de Broglieho rovnice

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

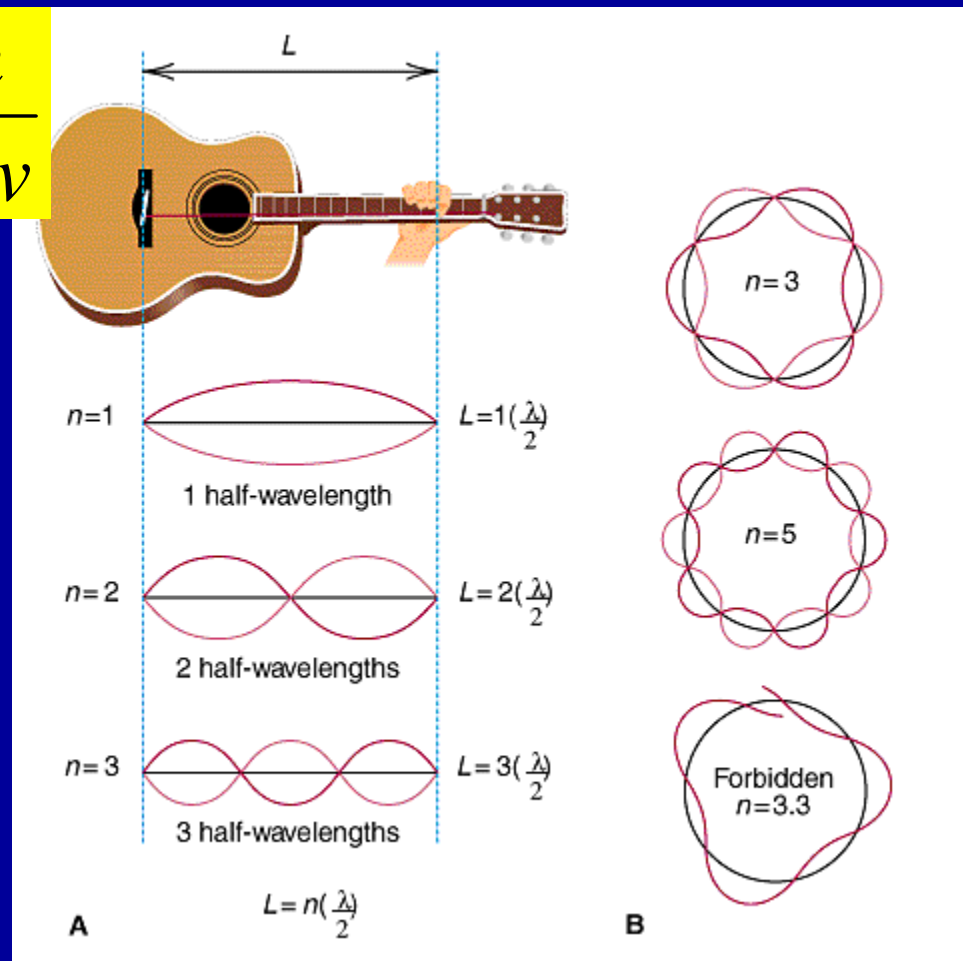
Stojaté vlnění na kružnici  
o poloměru  $r$

$$n \lambda = 2 \pi r$$

spojením rovnic dostaneme

$$n \frac{h}{2\pi} = mvr$$

Toto je ale Bohrův postulát !



## Vlnový charakter částic

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$\lambda = h/(3kTm)^{1/2}$$

S klesající teplotou roste vlnová délka částice

Ochlazení plynu – malá rychlost, překryv vlnových funkcí

Kvantový plyn – Bose-Einsteinův kondenzát

$^4\text{He}$  pod 2.17 K kvantová kapalina = ztráta viskozity, superfluidita

## **Klasická teorie:**

Hmota je částicová, má hmotnost

Energie je kontinuální, vlnový charakter

Černé těleso, Planck, energie záření kvantována

Fotoelektrický jev, Einstein, světlo je částicové, fotony

Atomová spektra, Bohr, energie atomů kvantována

Difrakce elektronů na krystalu Ni, Davisson

de Broglie, hmota má vlnový charakter, energie atomů je kvantována, protože elektrony se chovají jako vlny

Vlnová délka fotonu se prodlužuje po kolizi s elektronem, Compton

## **Kvantová teorie:**

Hmota a energie jsou ekvivalentní, mají hmotnost, jsou částicové, mají vlnový charakter



# Heisenbergův princip neurčitosti

1927

Není možné určit zároveň přesně polohu ( $x$ ) a hybnost ( $p = m v$ ) elektronu

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

**Elektron** v atomu H v základním stavu

$$v = 2.18 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

přesnost 1%,  $\Delta v = 10^4 \text{ m s}^{-1}$

$$\Delta x = 0.7 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 70 \text{ nm}$$

$$a_0 = 0.053 \text{ nm}$$

Nelze určit přesnou polohu elektronu v atomu



Werner Heisenberg  
(1901 - 1976)  
NP za fyziku 1932

# Heisenbergův princip neurčitosti

Není možné určit zároveň přesně energii elektronu v daném časovém intervalu ( $\Delta t$  doba měření)

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

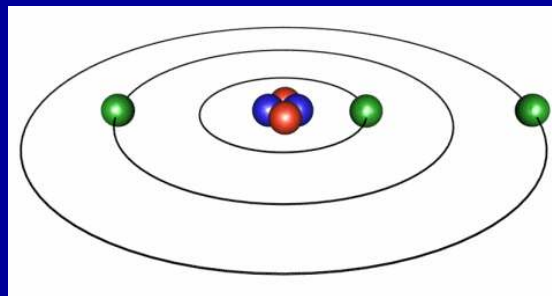
$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

## Důsledek Heisenbergova principu neurčitosti

Energie elektronu je známa velmi přesně (emisní spektra)

Poloha elektronu tedy nemůže být určena přesně ( $a_0 = 0.053 \text{ nm}$ )

Kruhové dráhy elektronů kolem jádra s určitým poloměrem jsou nesmysl



Stav elektronu je nutno popsat pomocí kvantové mechaniky  
 $a_0 = 0.053 \text{ nm}$  je nejpravděpodobnější poloměr dráhy elektronu

# Schrödingerova rovnice

1926 Schrödingerova rovnice = postulát

$$\hat{H} \Psi = E \Psi$$



Erwin Schrödinger  
(1887 - 1961)  
NP za fyziku 1933

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \Psi = 0$$

$\hat{H}$  = Hamiltonův operátor celkové energie (E),  
kinetická a potenciální (V) energie



## Schrödingerova rovnice

$$\hat{H} \Psi = E \Psi$$

Parciální diferenciální rovnice druhého řádu

exaktní řešení jen pro H a jednoelektronové systémy ( $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{2+}$ ,....)

přibližná řešení pro víceelektronové **atomy** ( $\text{He}, \dots$ ) a **molekuly**

řešením diferenciální rovnice jsou dvojice ( $E, \Psi$ ):

- Vlastní **vlnové funkce**,  $\Psi$  - orbitaly  $|\Psi|^2$  - prostorové rozložení e
- Vlastní hodnoty **energie** elektronu v orbitalech,  $E$ , jedné vlastní hodnotě  $E$  může příslušet více vlnových funkcí (degenerované)

## Vlastní vlnové funkce

$\Psi(x,y,z)$  je řešením stacionární Schrödingerovy rovnice

**Jen některé stavy elektronu jsou povoleny -  $\Psi(x,y,z)$**

$\Psi$  je komplexní funkce souřadnic  $x, y, z$ , nemá fyzikální význam, může nabývat kladných i záporných hodnot

$|\Psi|^2$  má význam **hustoty pravděpodobnosti** výskytu e

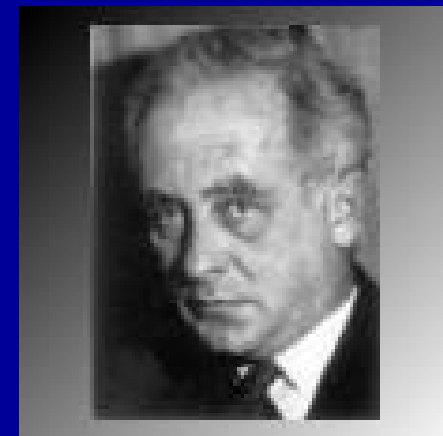
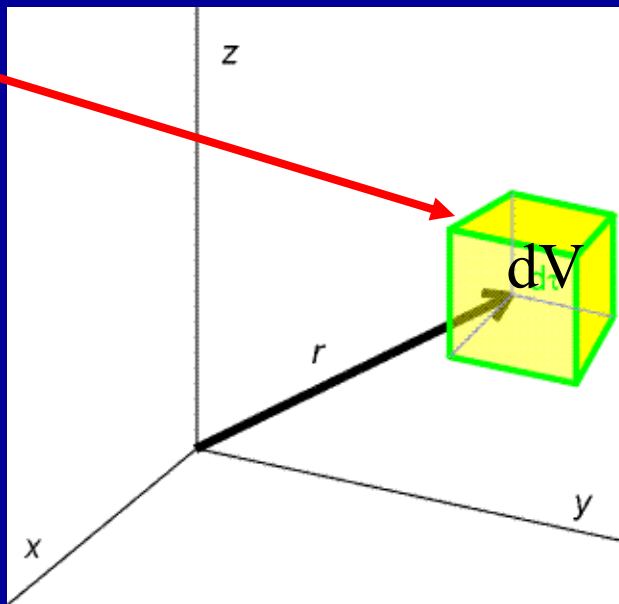
$\Psi$  závisí na kvantových číslech (celá čísla)

## Bornova interpretace vlnové funkce

$\Psi(x,y,z)$  je řešením stacionární Schrödingerovy rovnice,  
( $\Psi$  nemá fyzikální význam)

$|\Psi|^2 dV$  pravděpodobnost výskytu elektronu v objemu  $dV$   
v místě  $r$

( $dV = dx dy dz$ )



Max Born  
(1882 - 1970)  
NP za fyziku 1954



- **Heisenbergův princip neurčitosti** - dvojice konjugovaných proměnných (poloha a hybnost nebo energie a čas) nelze měřit se stejnou přesností ve stejný okamžik, neboť nemají v daný okamžik stejně definované hodnoty.
- **Bornův zákon pravděpodobnosti** - druhá mocnina absolutní hodnoty vlnové funkce odpovídá pravděpodobnosti toho, že se systém nachází ve stavu popsaném danou vlnovou funkcí.
- **Bohrův princip komplementarity** - Heisenbergův princip neurčitosti je vnitřní vlastnost přírody a nikoliv problém měření. Pozorovatel, jeho měřicí přístroj a měřený systém tvoří celek, který nelze rozdělit.
- **Heisenbergova interpretace znalosti** - vlnová funkce není fyzickou vlnou, která se pohybuje prostorem ani není přímým popisem fyzikálního systému, ale matematickým popisem znalosti pozorovatele, kterou získal měřením systému.
- **Heisenbergův pozitivismus** - nemá smysl diskuse o aspektech reality, které leží za formalismem kvantové mechaniky, neboť diskutované veličiny nebo fyzikální entity lze měřit experimentálně.

“I think I can safely say that nobody understands Quantum Mechanics”