

# Spektrum záření. Kvantová optika

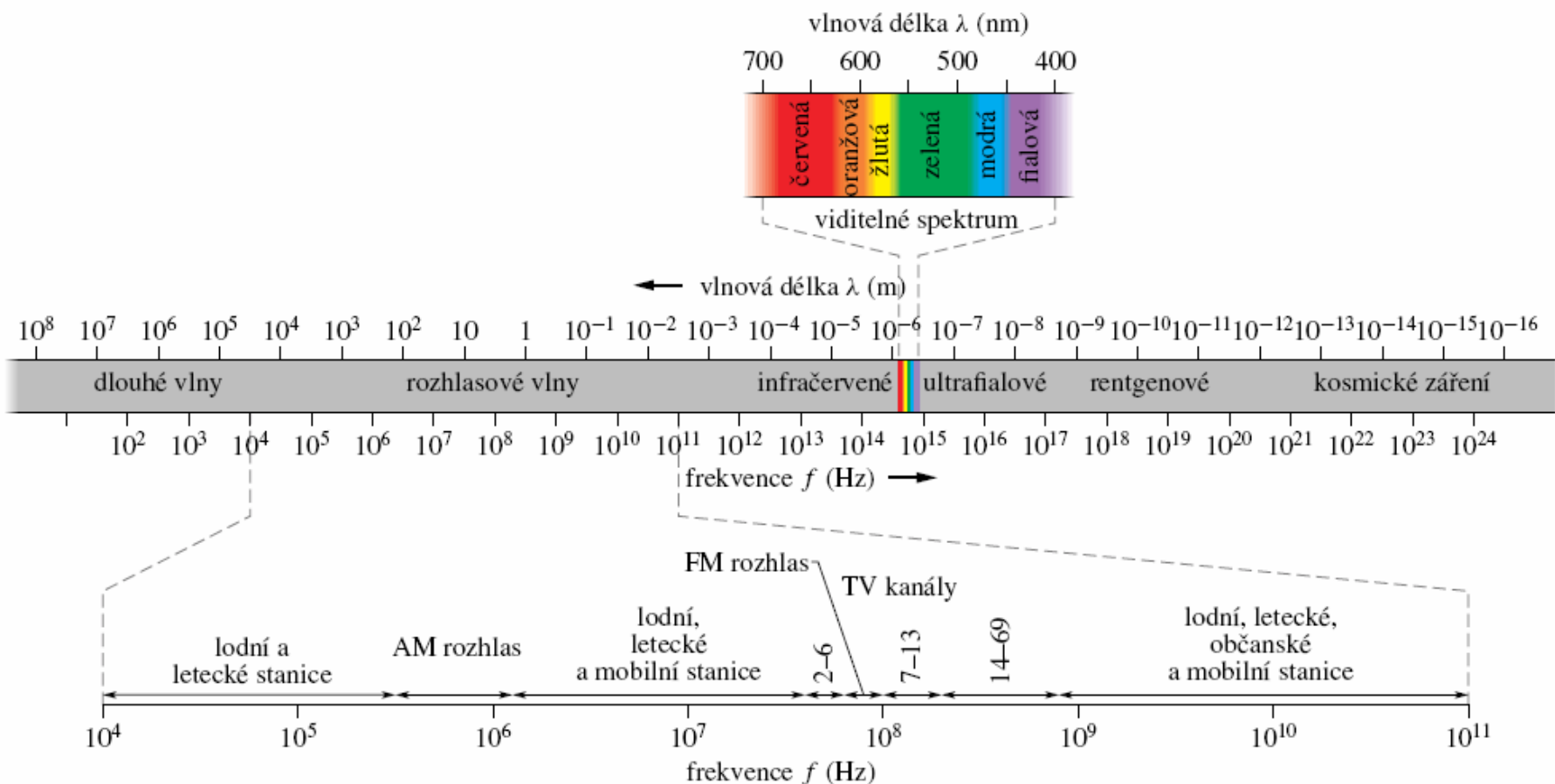
Spektrum elektromagnetického záření, absorpce záření, infračervené záření, světelné zdroje, ultrafialové záření, rentgenové záření, záření gama. Základy kvantové optiky. Planckův vyzařovací zákon, fotoelektrický jev, obrácený fotoelektrický jev.

# Fyzikální optika

Zabývá se energetickými poměry při šíření světla, procesy emise a absorpce záření, spektrálními charakteristikami záření

- Fotometrie
- absorpce a emise světla
- spektrální charakteristiky záření
- záření o různých vlnových délkách – UV, IČ, RTG, gama

# Spektrum elmg. záření



# Spektrum elmg. záření

	$f$ [Hz]	$\lambda$ [m]	$E$ [eV]
Rádiové vlny	3000- $3 \cdot 10^8$	$10^5$ -1	$10^{-11}$ - $10^{-6}$
Mikrovlny	$3 \cdot 10^{11}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$ - $10^{-3}$
Infrazářen	$4 \cdot 10^{14}$	$750 \cdot 10^{-9}$	$10^{-3}$ - 1.6
Světlo	$7.5 \cdot 10^{14}$	$400 \cdot 10^{-9}$	1.6 - 3
UV záření	$6 \cdot 10^{15}$	$50 \cdot 10^{-9}$	3 - 25
RTG záření	$10^{22}$	$10^{-14}$	50 - $10^8$
$\gamma$ -záření	$> 10^{18}$	$< 10^{-10}$	$> 10000$

# Kvantová optika

Zabývá se kvantovými vlastnostmi světla, jeho vyzařováním po fotonech atd.

- Vyzařovací zákon pro černé těleso
- Fotoelektrický jev
- Obrácený fotoelektrický jev – vznik RTG záření

# Absolutně černé těleso

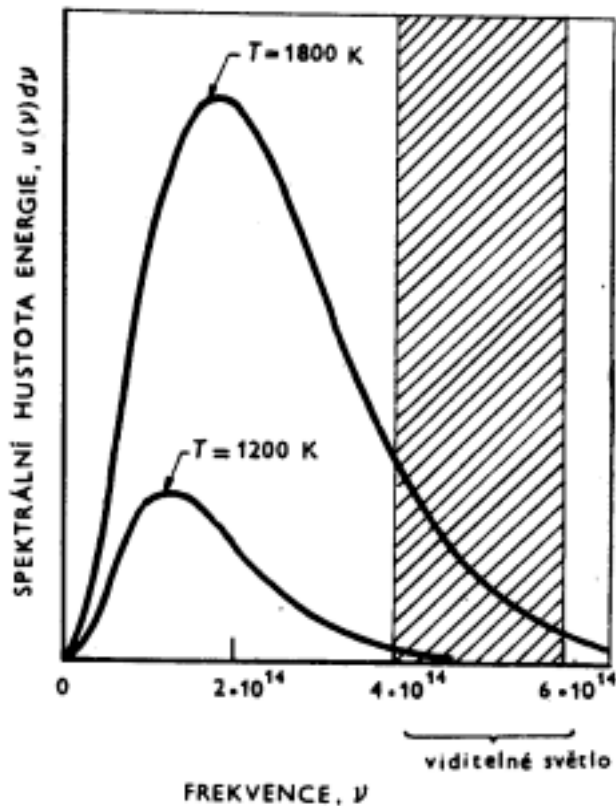
Těleso všechnu dodanou tepelnou energii mění na vyzařované záření

Slunce je takové těleso (6000K)– nemusí mít ČERNOU barvu!

AČT je charakterizováno rovnováhou v příjmu a výdaji energie, avšak nemusí to být se stejným spektrálním rozdělením!

# Vyzařování absolutně černého tělesa

Planck – předpoklad o vyzařování energie ve formě kvant o energiích  $hf$ ,  $2hf$ ,  $3hf$ , ... fotony



Klasický Rayleigh-Jeansův zákon

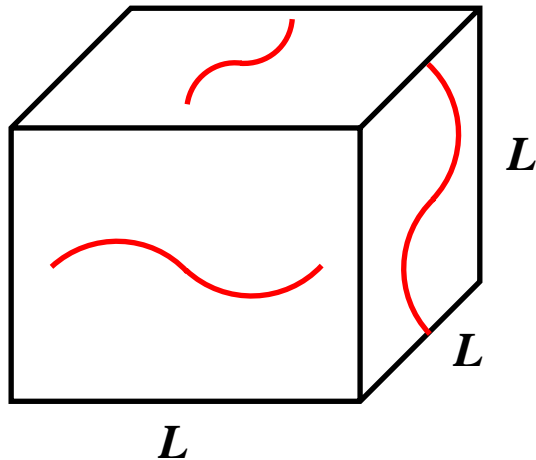
$$u(f)df = \frac{8\pi k_B T}{c^3} f^2 df$$

dával „ultrafialovou katastrofu“

$$u(f)df \rightarrow \infty \text{ pro } f \rightarrow \infty$$

# Rayleigh-Jeansův zákon

Klasický vlnový výpočet hustoty energie



V dutině se vytvoří stojaté vlny

$$L = n_x \frac{\lambda_x}{2}, L = n_y \frac{\lambda_y}{2}, L = n_z \frac{\lambda_z}{2}$$

Stojatá vlna v libovolném směru

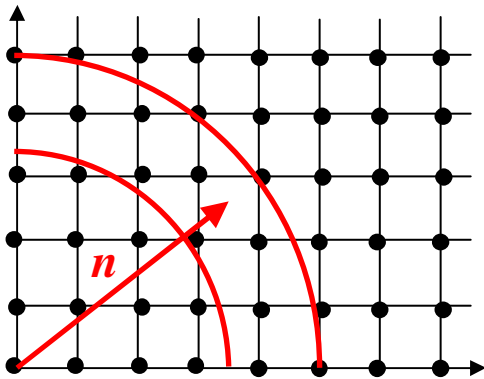
$$n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = \left(\frac{2L}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{2L}{\lambda_y}\right)^2 + \left(\frac{2L}{\lambda_z}\right)^2 = \left(\frac{2L}{\lambda}\right)^2$$

Určíme počet vln vyhovujících podmínce

= počet bodů uvnitř kulové slupky

$$n = \frac{2L}{\lambda}, dn = -\frac{2L}{\lambda^2} d\lambda$$

$$-n(\lambda)d\lambda = -\frac{1}{8} 4\pi n^2 dn = \frac{4\pi L^3}{\lambda^4} d\lambda$$





# Rayleigh – Jeansův zákon

Uvážíme-li dvě možné polarizace příčného elmg. záření (fotonu) je počet stavů v rozsahu vlnových délek

$$n(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi L^3}{\lambda^4} d\lambda$$

Hustota energie  $u(\lambda)d\lambda = 2 \frac{1}{2} k_B T \frac{1}{L^3} n(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi k_B T}{\lambda^4} d\lambda$

Přepočteno na frekvenci  $\lambda = c/f$

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi k_B T}{c^3} f^2 df$$

# Planckův vyzařovací zákon

UV katastrofu odstranil M. Planck – předpoklad o vyzařování energie ve formě kvant o energiích  $hf$ ,  $2hf$ ,  $3hf$ , ... fotony

Střední energie fotonů

$$E = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nhfe^{-nhf/k_B T}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nhf/k_B T}}$$

Vypočteme

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nhf/k_B T} = \frac{1}{1 - e^{-hf/k_B T}}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} nhfe^{-nhf/k_B T} = -hf \frac{d}{dx} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx} \right] = -hf \frac{d}{dx} \left[ \frac{e^{-x}}{1 - e^{-x}} \right]$$

$$x = hf/k_B T$$

# Planckův vyzařovací zákon

Střední energie

$$\bar{E} = \frac{hf}{e^{hf/k_B T} - 1}$$

Hustota energie

$$u(f)df = \frac{8\pi f^2}{c^3} \frac{hf}{e^{hf/k_B T} - 1} df$$

$$u(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k_B T \lambda} - 1} d\lambda$$

# Absolutně černé těleso

Wienův posunovací zákon

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2,896 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

Maximum vyzařovaného výkonu se posunuje ke kratším vlnovým délkám

$$\frac{du(\lambda)}{d\lambda} = 0 \rightarrow \frac{hc}{k_B T \lambda_{\max}} = 4.965$$

Př.:  $\lambda_{\max} = 800 \text{ nm}, \quad T = 3620 \text{ K}$

# Absolutně černé těleso

Těleso všechnu dodanou tepelnou energii mění na vyzařované záření

Slunce je takové těleso (6000K) – nemusí mít ČERNOU barvu!

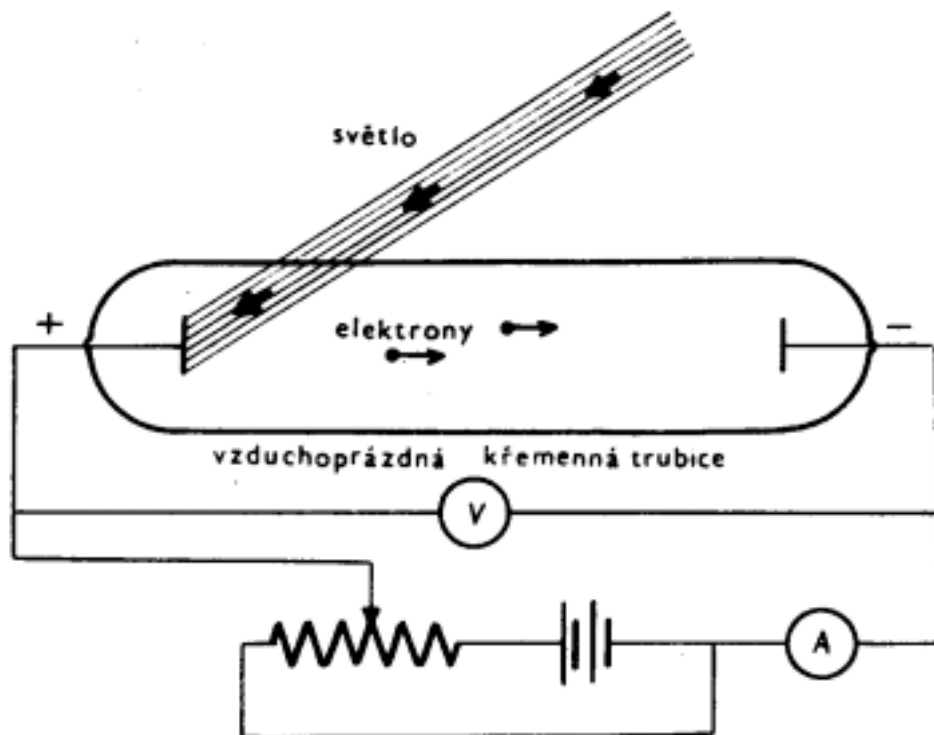
Stefan-Boltzmannův zákon – plošná hustota zářivého výkonu v celém frekvenčním oboru

$$u = \int_0^{+\infty} u(f) df = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 h^2} T^4$$

$$M_e = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

# Fotoelektrický jev

Dopad světla na povrch alkalických kovů vede k emisi elektronů



urychlené  
elektrony  
překonají  
potenciálový  
rozdíl a tvoří  
proud obvodem

# Fotoelektrický jev

## Očekávání

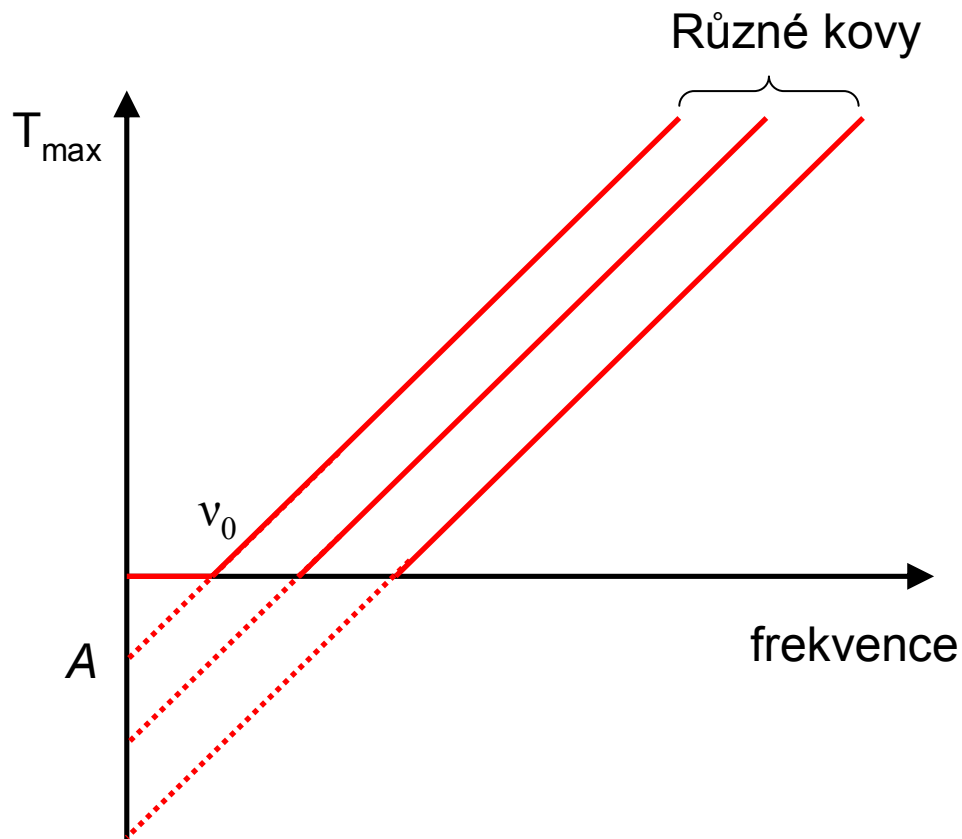
- Elektronby by měly být emitovány při jakékoliv intenzitě světla, nezávisle na vlnové délce světla
- Energie emitovaných elektronů závisí na intenzitě světla

## Pozorování

- Energetické spektrum fotoelektronů nezávisí na intenzitě světla
- Průměrná energie fotoelektronů nezávisí na intenzitě světla
- Energie fotoelektronu závisí na frekvenci záření
- Maximální energie fotoelektronu roste lineárně s frekvencí

# Fotoelektrický jev

Planckova konstanta  $h$



$$T_{\max} = eV^0$$

$$T_{\max} = h\nu - h\nu_0$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



# Fotoelektrický jev

Vysvětlení A.Einstein – Nobelova cena 1921

$$h\nu = T_{\max} + h\nu_0$$

Výstupní práce fotoelektronu z kovu  $A = h\nu_0$

M.Planck (1900) – emise záření probíhá po kvantech o energii  $h\nu$  a jejich násobcích (není v rozporu s vlnovou teorií)

A.Einstein – záření je také absorbováno po kvantech (je v rozporu s vlnovou teorií)

# Termoemise

Elektrony jsou z povrchu kovu emitovány díky jejich tepelným pohybům

Emise nastává pokud elektron má energii větší než je výstupní práce

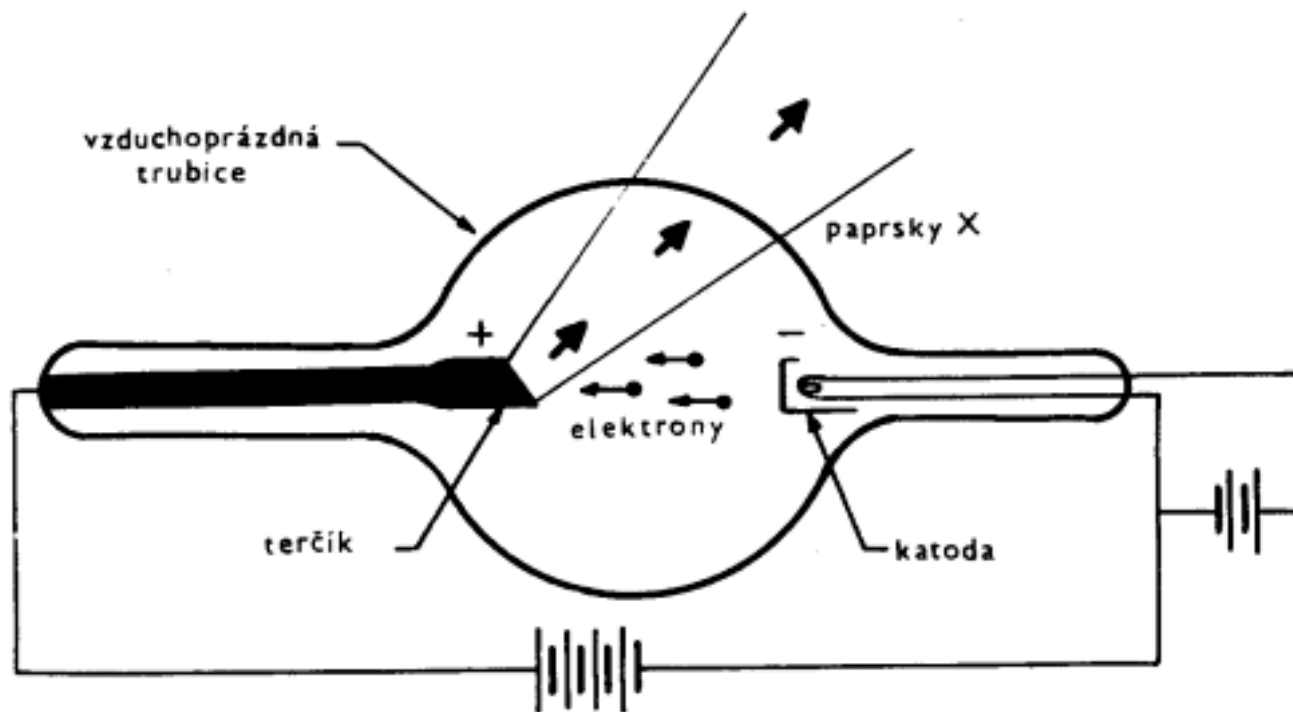
Žhavení elektronek a dalších elektronických zařízení

Př: Výstupní práce pro draslík je 2eV, při ozáření povrchu zářením s vlnovou délkou 350nm je energie emitovaných fotoelektronů

$$T_{\max} = h\nu - A = 1.6eV$$

# RTG záření (X-Ray, Brehmsstrahlung)

Obrácený fotoelektrický jev, W.C.Röntgen (1895),  
1.Nobelova cena 1901



# RTG záření

Paprsky nejsou vychylovány elektrickým ani magnetickým polem → nenabité částice, tj, mohly by to být fotony elektromagnetického záření

Nebyl pozorován lom paprsků

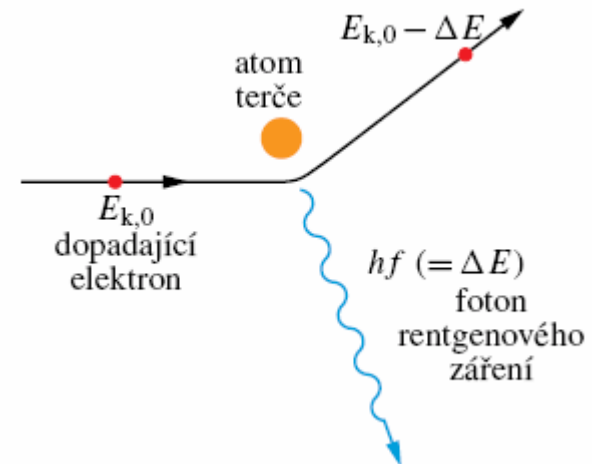
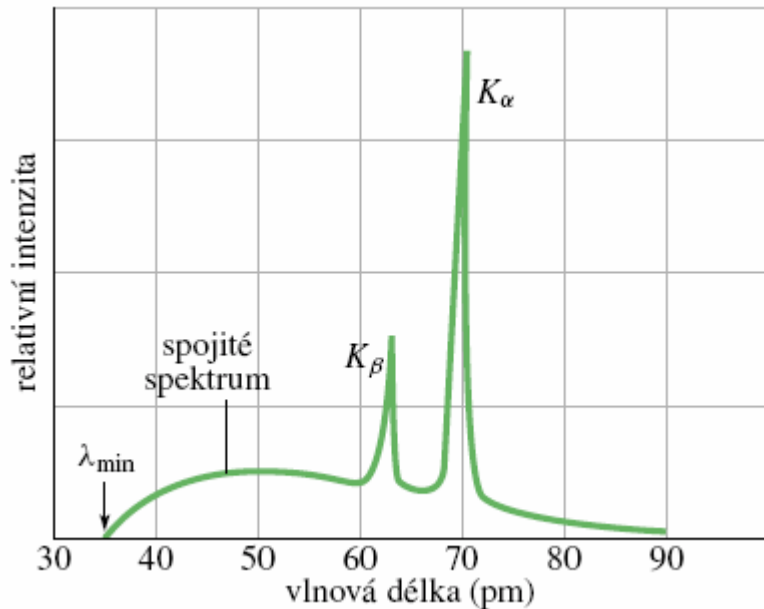
S počtem elektronů se zvyšuje intenzita záření, s rychlostí elektronů (urychlovací napětí) se zvyšuje pronikavost záření

# Rentgenové záření

Spojité a čarové spektrum – brzdné záření

Př. Molybden

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{E_{k,0}}$$

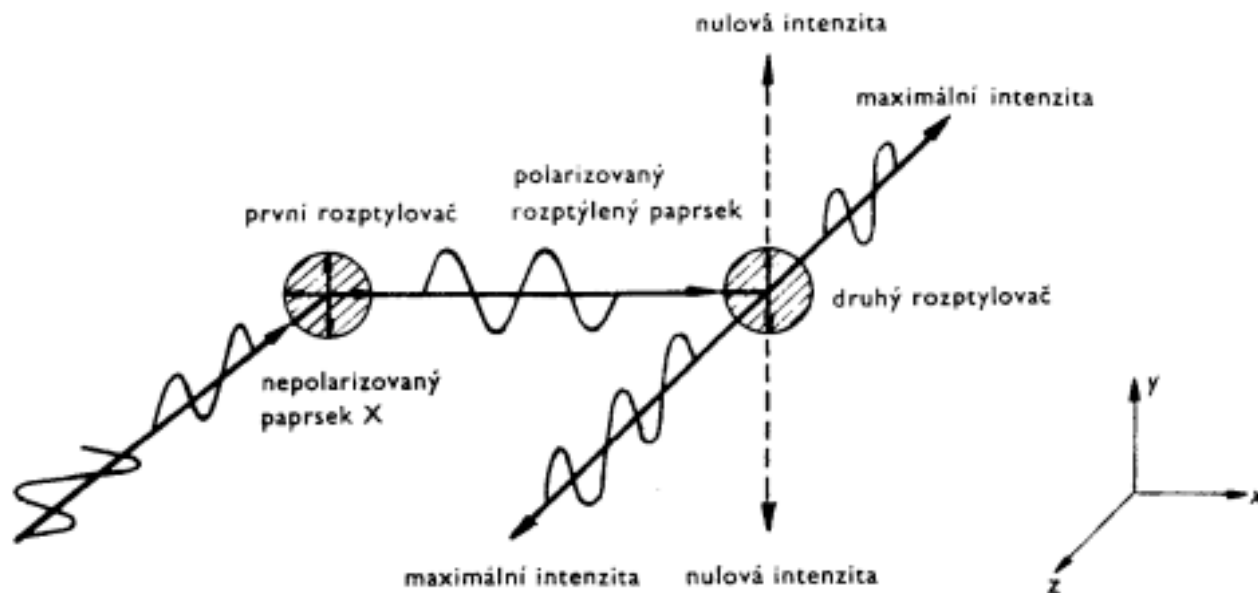


# Barklův experiment

Důkaz polarizace RTG záření, tj. elektromagnetické povahy RTG záření

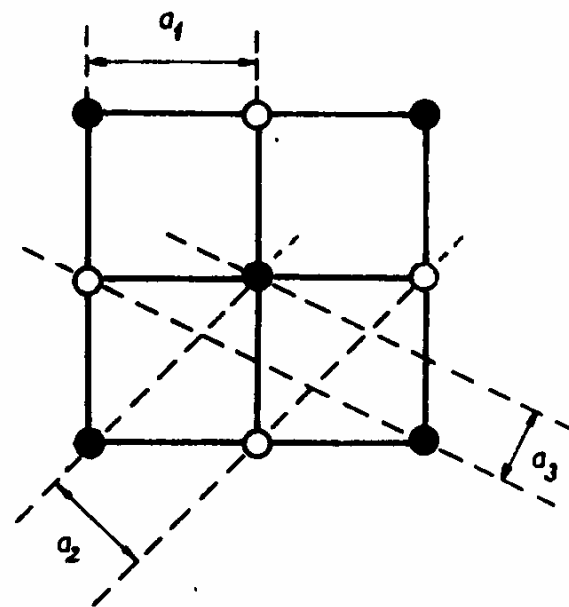
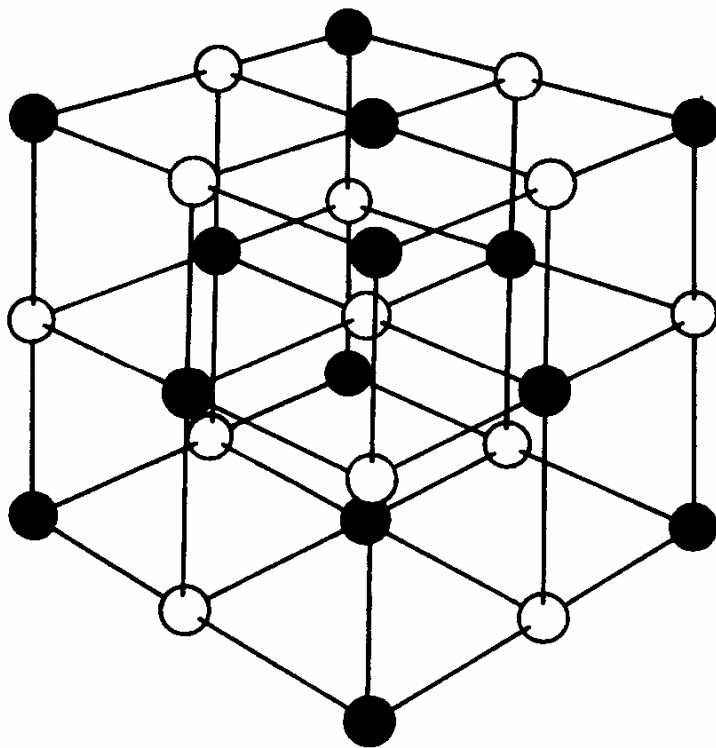
Experiment – Ch.G.Barkla 1906, dvojitý rozptyl RTG záření

Nobelova cena 1917



# Difrakce RTG záření

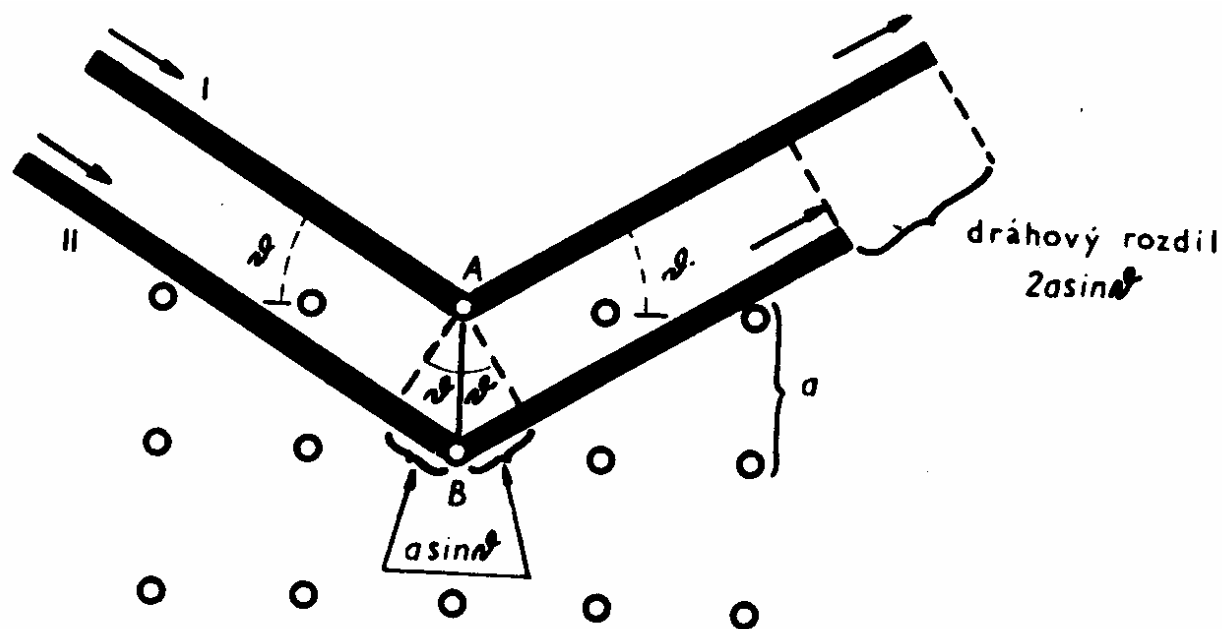
Max von Laue, 1912 – difrakce na krystalové mřížce, mezirovinné vzdálenosti odpovídají vlnovým délkám RTG záření



# Difrakce RTG záření

RTG záření vychyluje ionty v krystalové mřížce, atomy vyzařují elmg. záření a to interferuje od pravidelně rozmístěných atomů v krystalické mřížce

1913, W.L.Bragg



Braggova podmínka

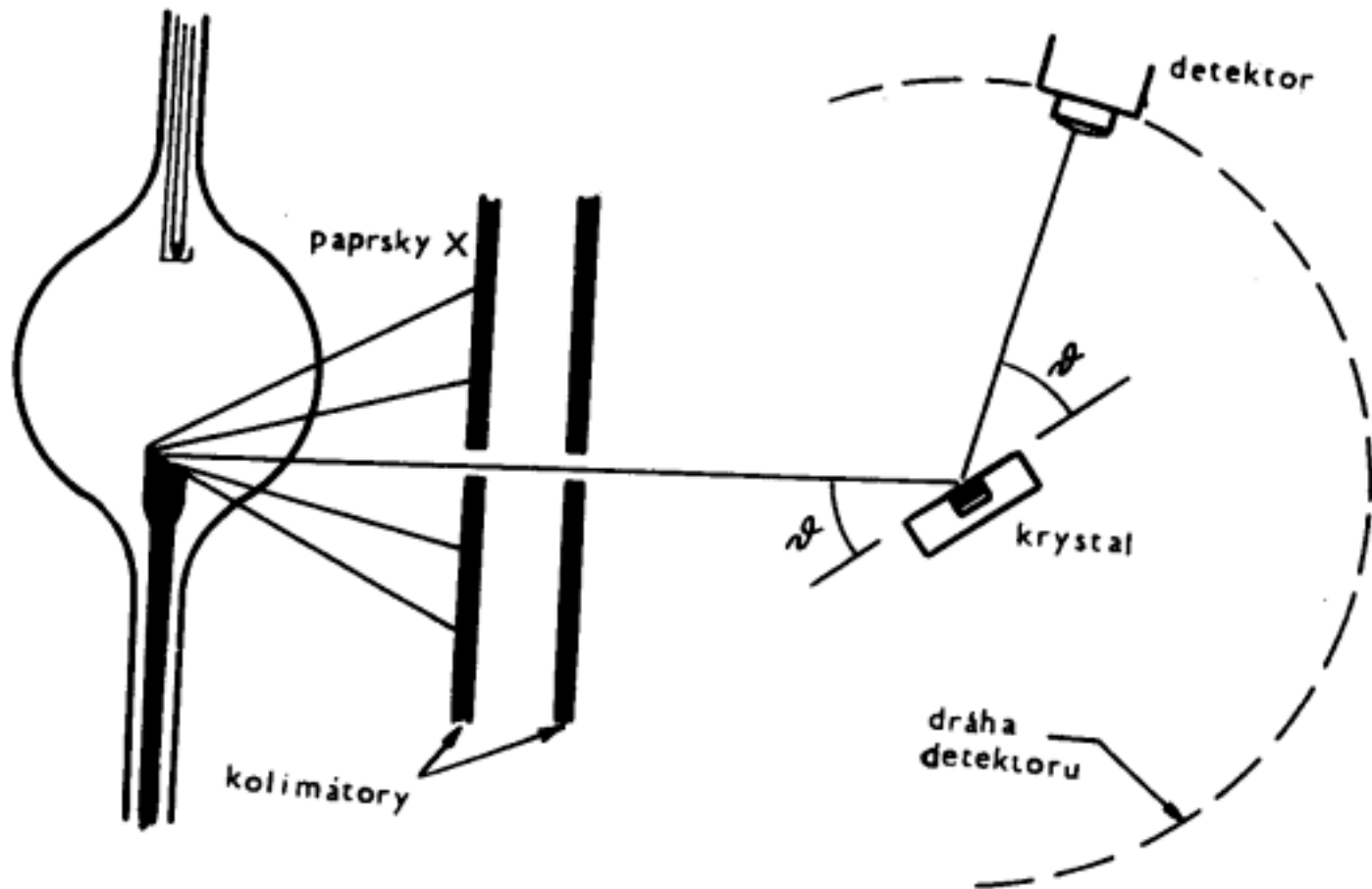
$$2a \sin \theta = n\lambda,$$
$$n = 1, 2, 3, \dots$$



# RTG difrakce

- Monochromatické záření, natáčení krystalu do pozice popsané Braggovou podmínkou, např. pro práškové vzorky
- „bílé“ RTG záření, pevná poloha krystalu, Braggova podmínka se nastavuje v různých směrech pro různé vlnové délky RTG záření - Lauegram

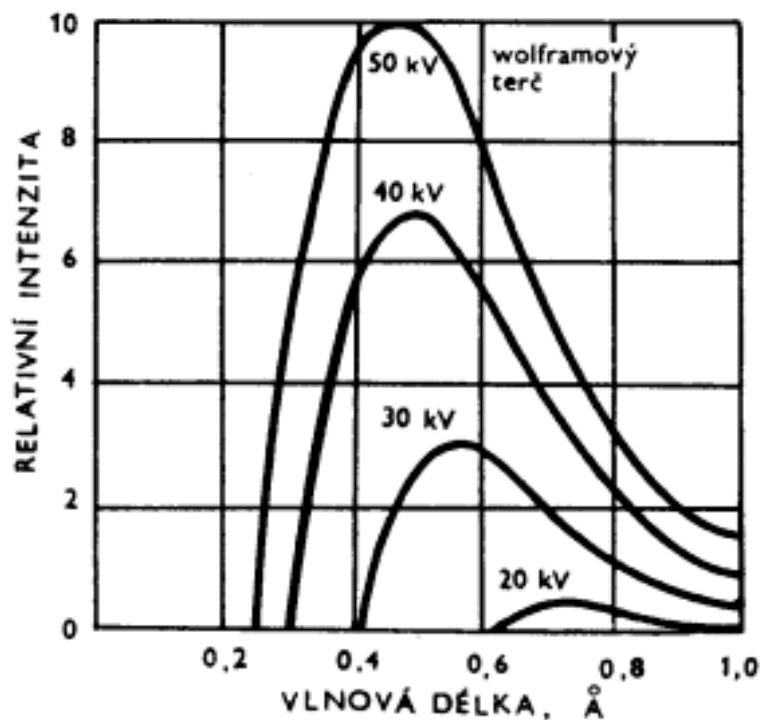
# RTG spektrometr



# Spektrum RTG záření - spojitě

Zpomalené elektrony vyzařují elmg. záření – spojitě spektrum

Se vzrůstajícím urychlovacím napětím vzrůstá intenzita, maximum se posunuje ke kratším vlnovým délkám



existuje minimální vlnová

která se mění s urychlovacím napětím

$$eU = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = h\nu_{\max}$$

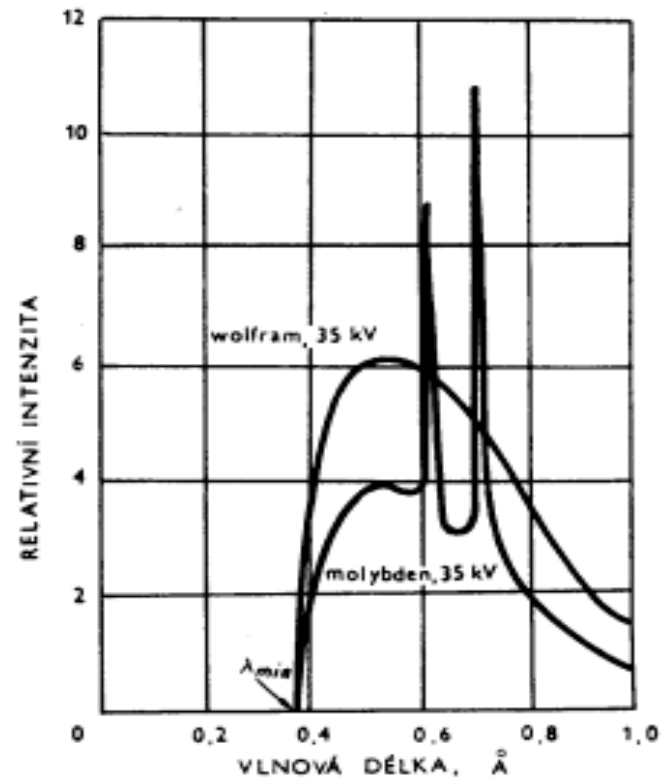
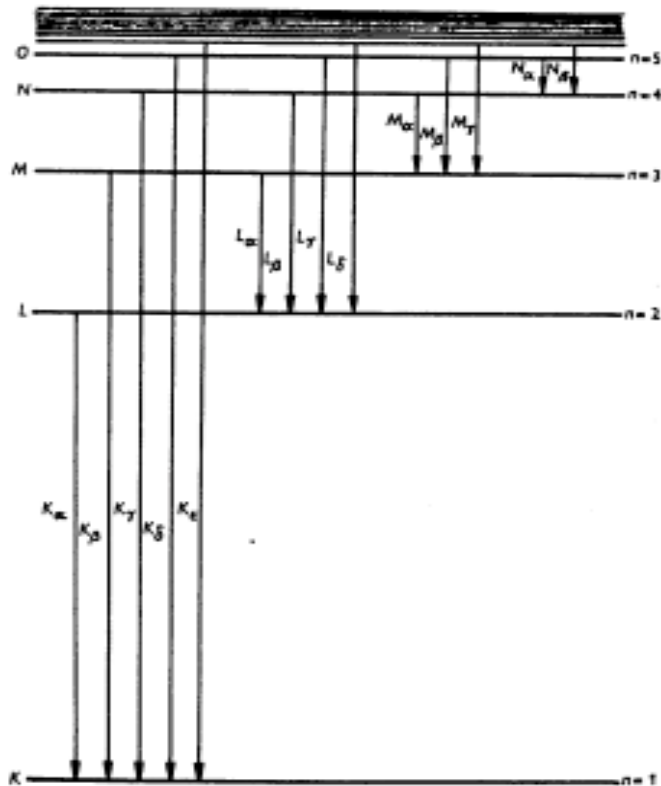
Duane – Huntův zákon

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU} = \frac{1.24 \cdot 10^{-6} \text{ Vm}}{U}$$

Př.  $U=50\text{kV}$ ,  $\lambda_{\min}=0.25 \cdot 10^{-10}\text{m}$

# Spektrum RTG záření - charakteristické

Energie dopadajících elektronů je vhodná k „vyražení“ elektronů z atomových obalů terčiku (např. molybden, wolfram)



# Literatura

V prezentaci byly použity obrázky z knihy:

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: Fyzika (část 4 – Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita, část 5 – Moderní fyzika), Vutium, Brno 2000

A.Beiser: Úvod do moderní fyziky, Academia Praha 1975