

MOLEKULOVÁ ABSORPČNÍ SPEKTROFOTOMETRIE

v UV a viditelné oblasti spektra

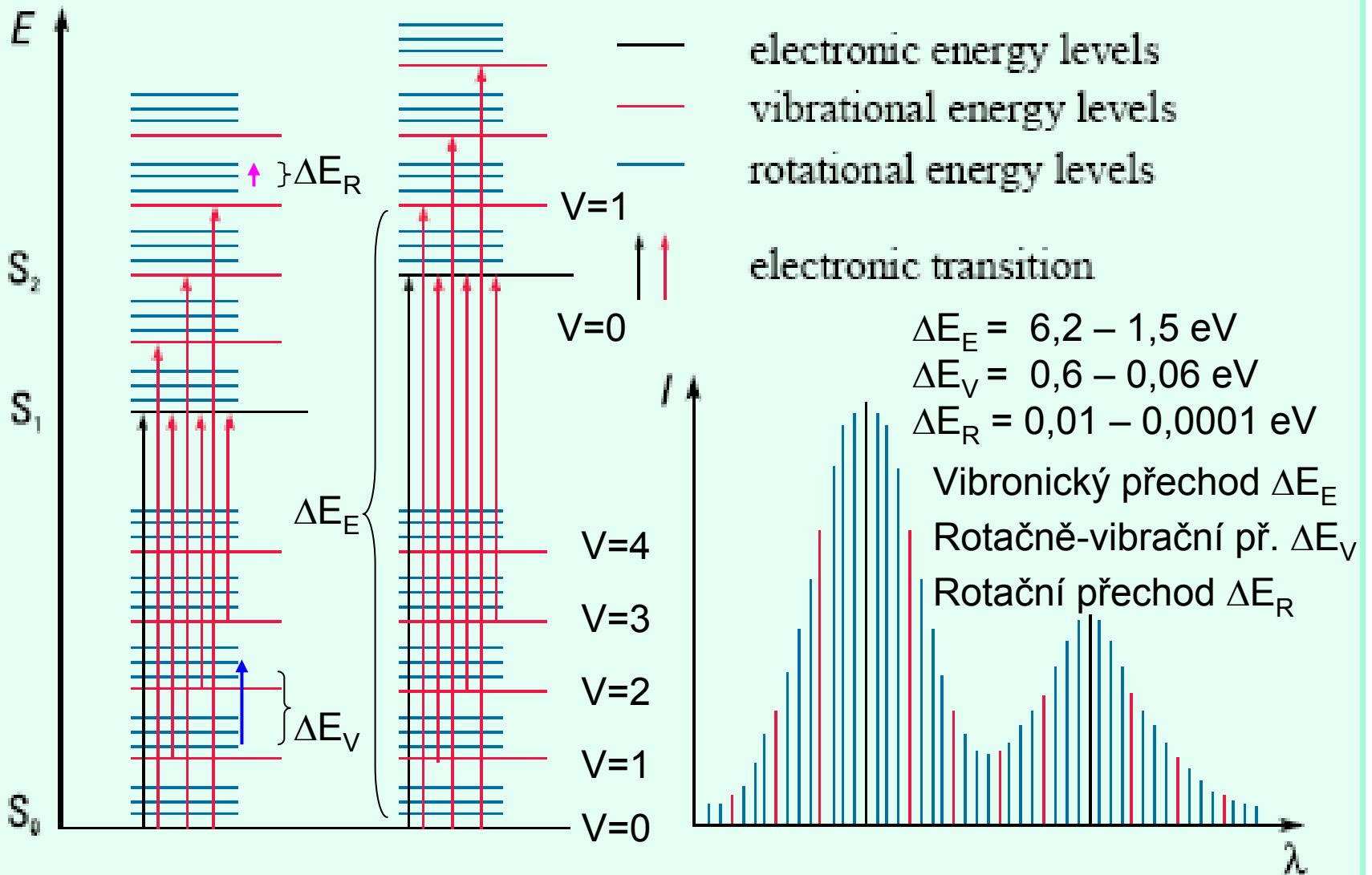
ENERGIE MOLEKULY

- $E_M = E_T + E_R + E_V + E_E$
- $E_E > E_V > E_R > E_T$

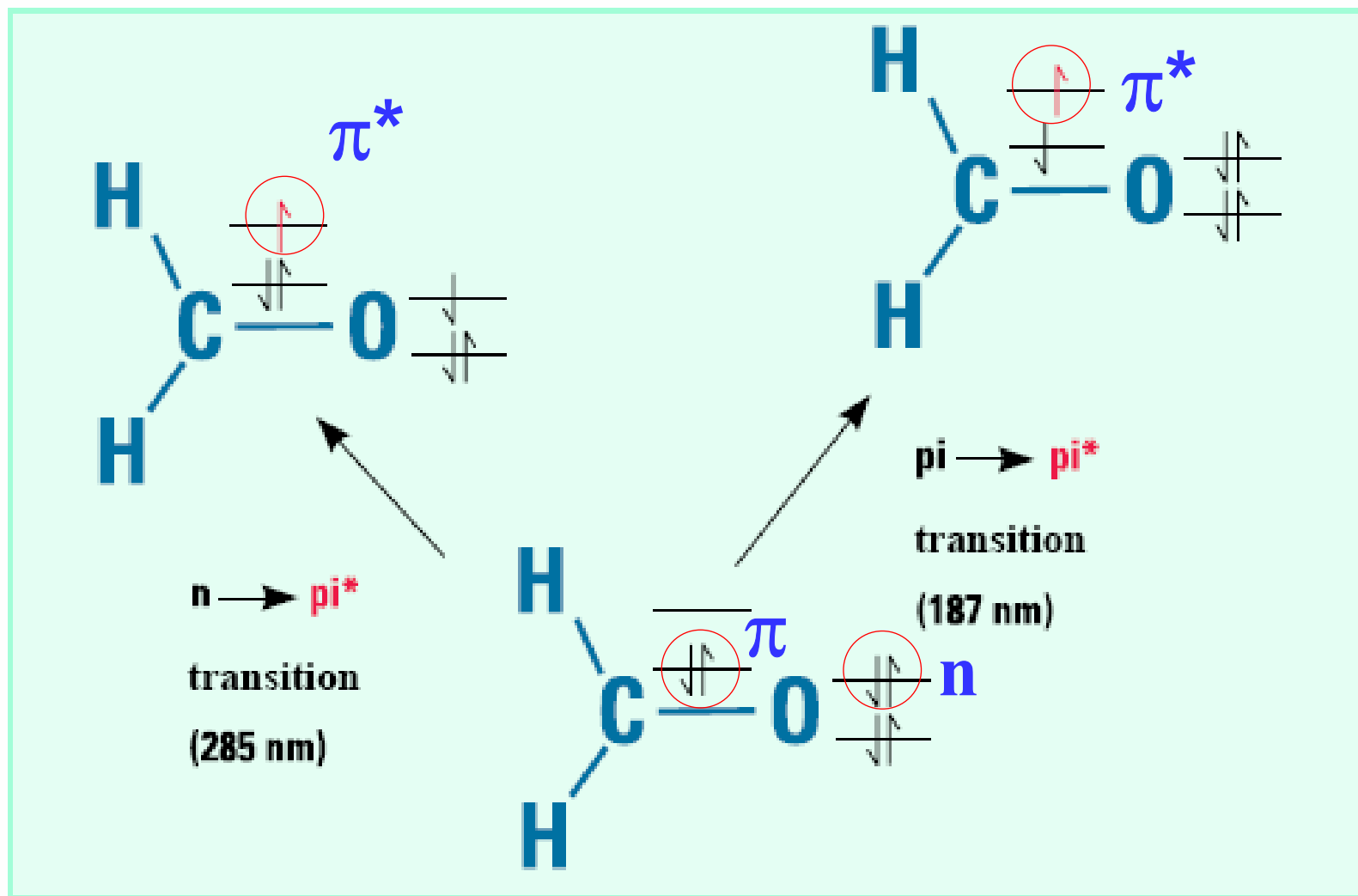
Kvantovaná energie \Rightarrow energetické hladiny:

- Rotační \Rightarrow přechody mezi rotačními stavy \Rightarrow
rotační spektra (MW)
- Vibrační \Rightarrow přechody mezi vibračními stavy \Rightarrow
vibrační spektra (IR) $\Delta E_V \approx X \cdot 10^4 \cdot \Delta E_R$
- Elektronové \Rightarrow přechody mezi elektronovými stavy \Rightarrow
elektronická spektra (UV-Vis) $\Delta E_E \approx X \cdot 10^2 \cdot \Delta E_V$

ENERGETICKÉ PŘECHODY V MOLEKULE A MOLEKULOVÁ SPEKTRA

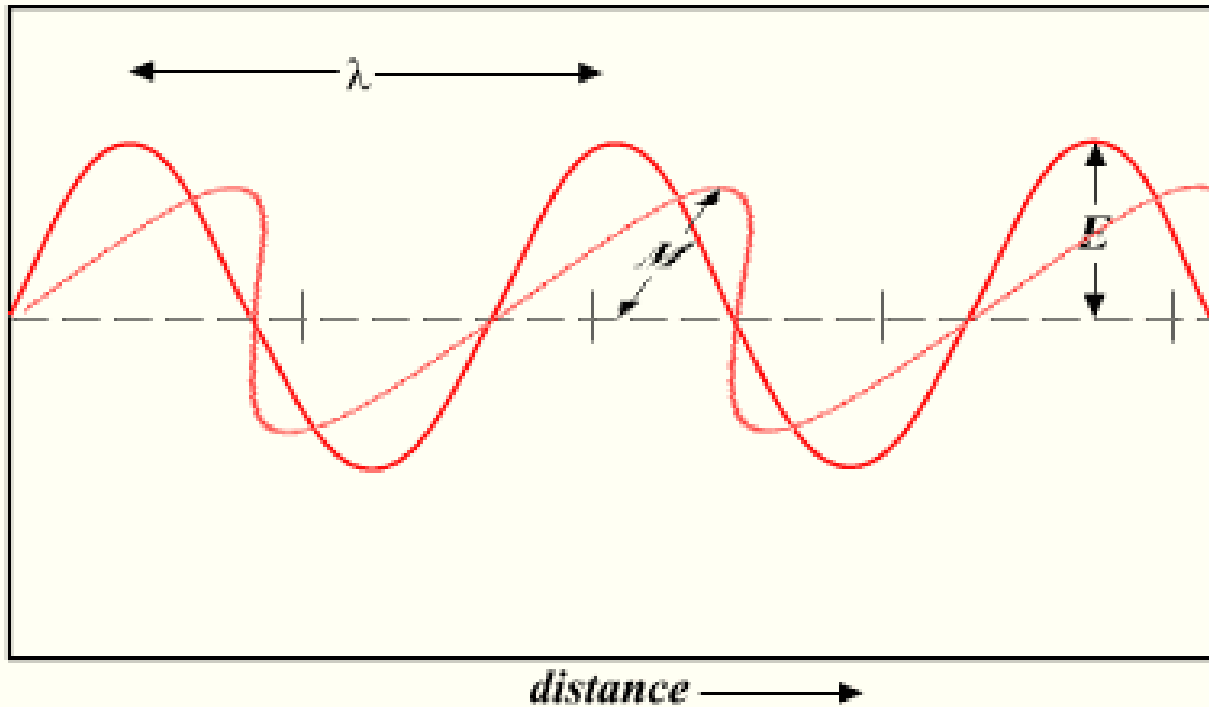


ELEKTRONICKÉ PŘECHODY VE FORMALDEHYDU



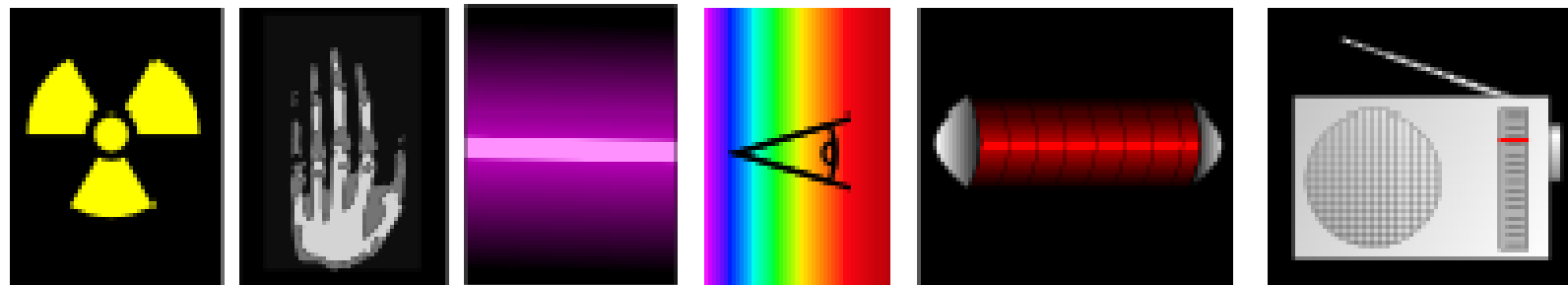
ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ

Light Wave



λ = wavelength
 E = amplitude of electric field
 M = amplitude of magnetic field

SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ



0.01nm

1nm

100nm

1mm

1cm

1m

1km

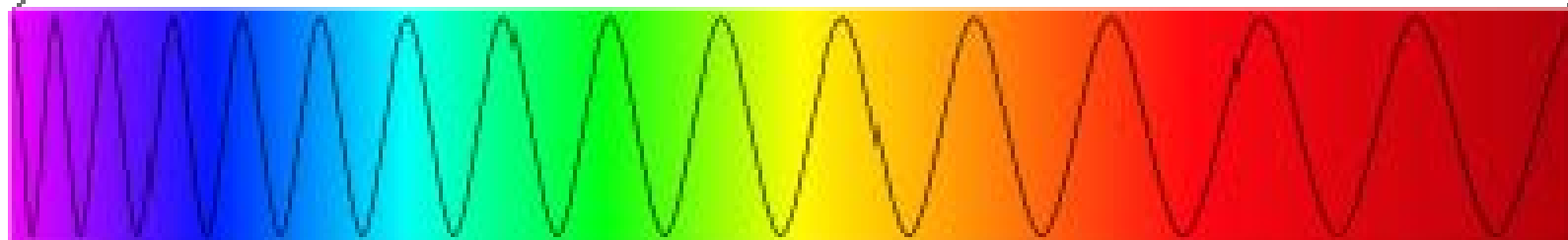
400nm

3 PHz
300 THz

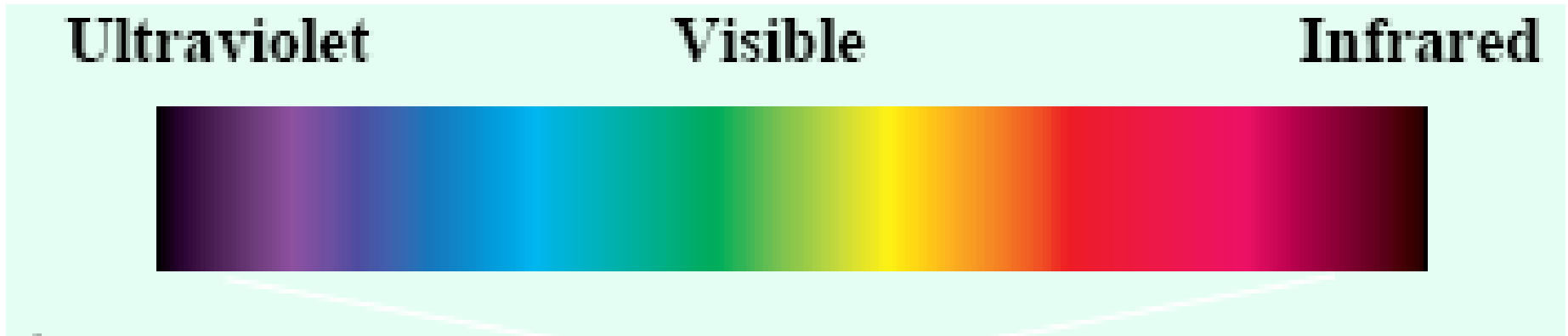
100 nm
1 μm

12.4 eV
1.24 eV

700nm



ZÁŘENÍ UV - Vis



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

c je rychlost světla (3×10^8 m/s)

h = 6.65×10^{-34} J·s = 4.1 μ eV/GHz

je Planckova konstanta

VIDITELNÉ SVĚTLO

Záření o vlnových délkách 400 - 800 nm je viditelné světlo, které je absorbováno a emitováno elektrony v atomech a molekulách, když přecházejí mezi energetickými hladinami.

| <u>Barva</u> | Vlnová délka | Frekvence |
|-----------------|-----------------|------------------|
| <u>červená</u> | ~ 625 až 740 nm | ~ 480 až 405 THz |
| <u>oranžová</u> | ~ 590 až 625 nm | ~ 510 až 480 THz |
| <u>žlutá</u> | ~ 565 až 590 nm | ~ 530 až 510 THz |
| <u>zelená</u> | ~ 520 až 565 nm | ~ 580 až 530 THz |
| <u>azurová</u> | ~ 500 až 520 nm | ~ 600 až 580 THz |
| <u>modrá</u> | ~ 430 až 500 nm | ~ 700 až 600 THz |
| <u>fialová</u> | ~ 380 až 430 nm | ~ 790 až 700 THz |

INTERAKCE ZÁŘENÍ S LÁTKOU

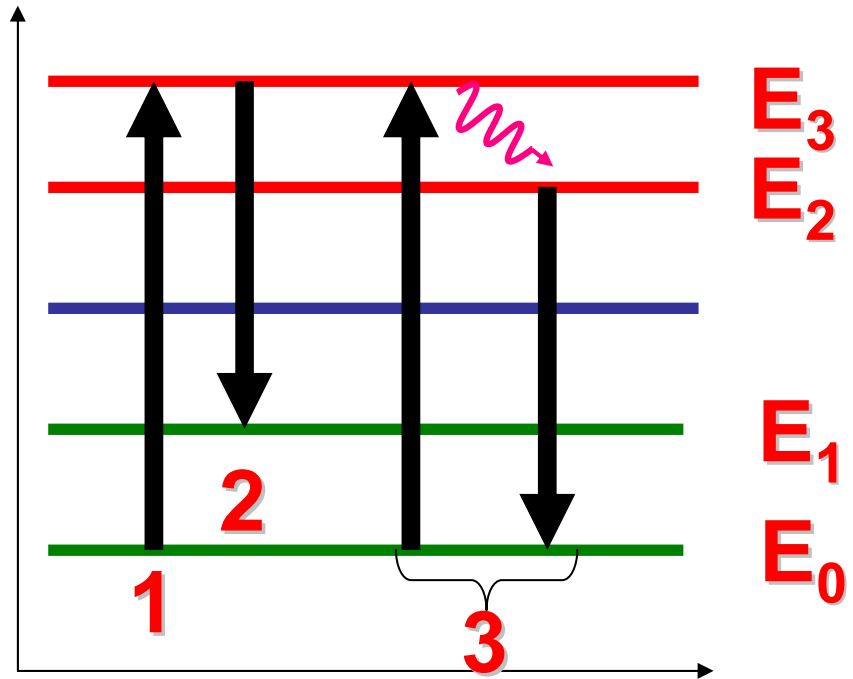
- Absorpce 1
- Emise 2
- Luminiscence 3

$$E_3 > E_2 > E_1 > E_0$$

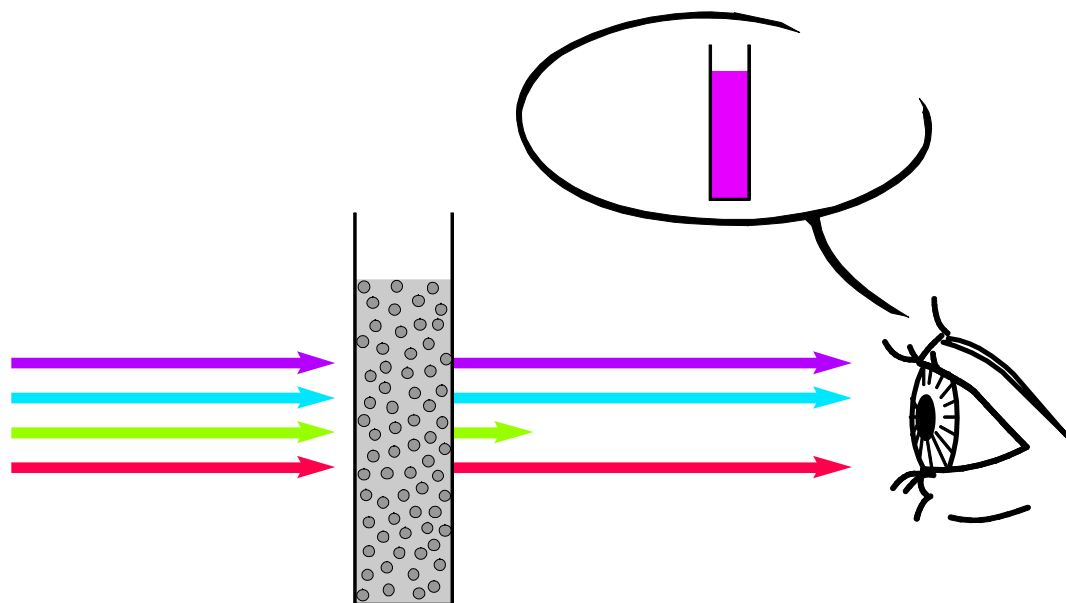
$$h\nu_{\text{abs}} = E_3 - E_0$$

$$h\nu_{\text{em}} = E_3 - E_1$$

$$h\nu_{\text{lum}} = E_2 - E_0$$

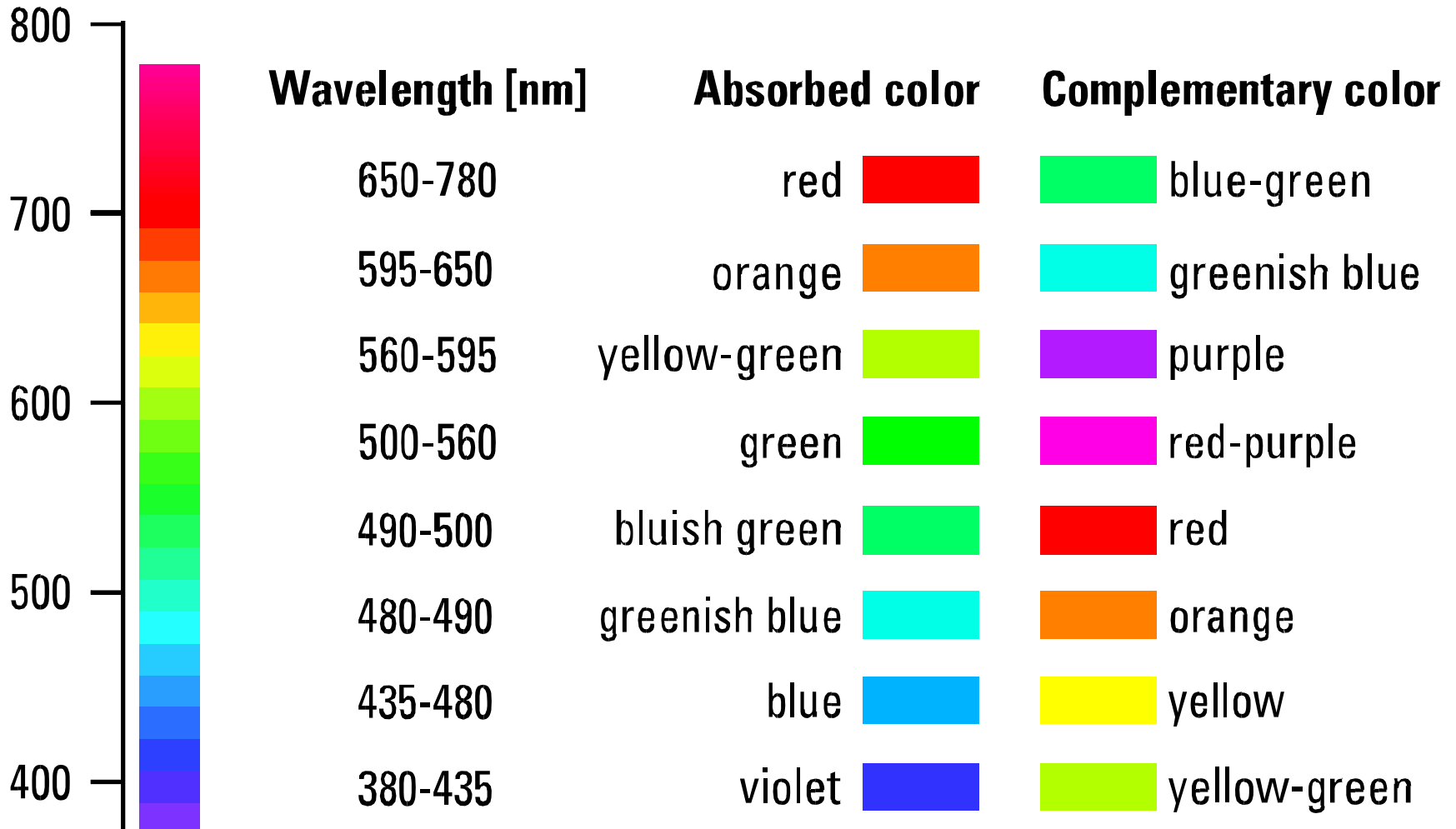


PROPUSTNOST A BARVA



Lidské oko vidí komplementární barvu, světlo vlnových délek, pro něž je látka propustná

ABSORPCE A KOMPLEMENTÁRNÍ BARVY



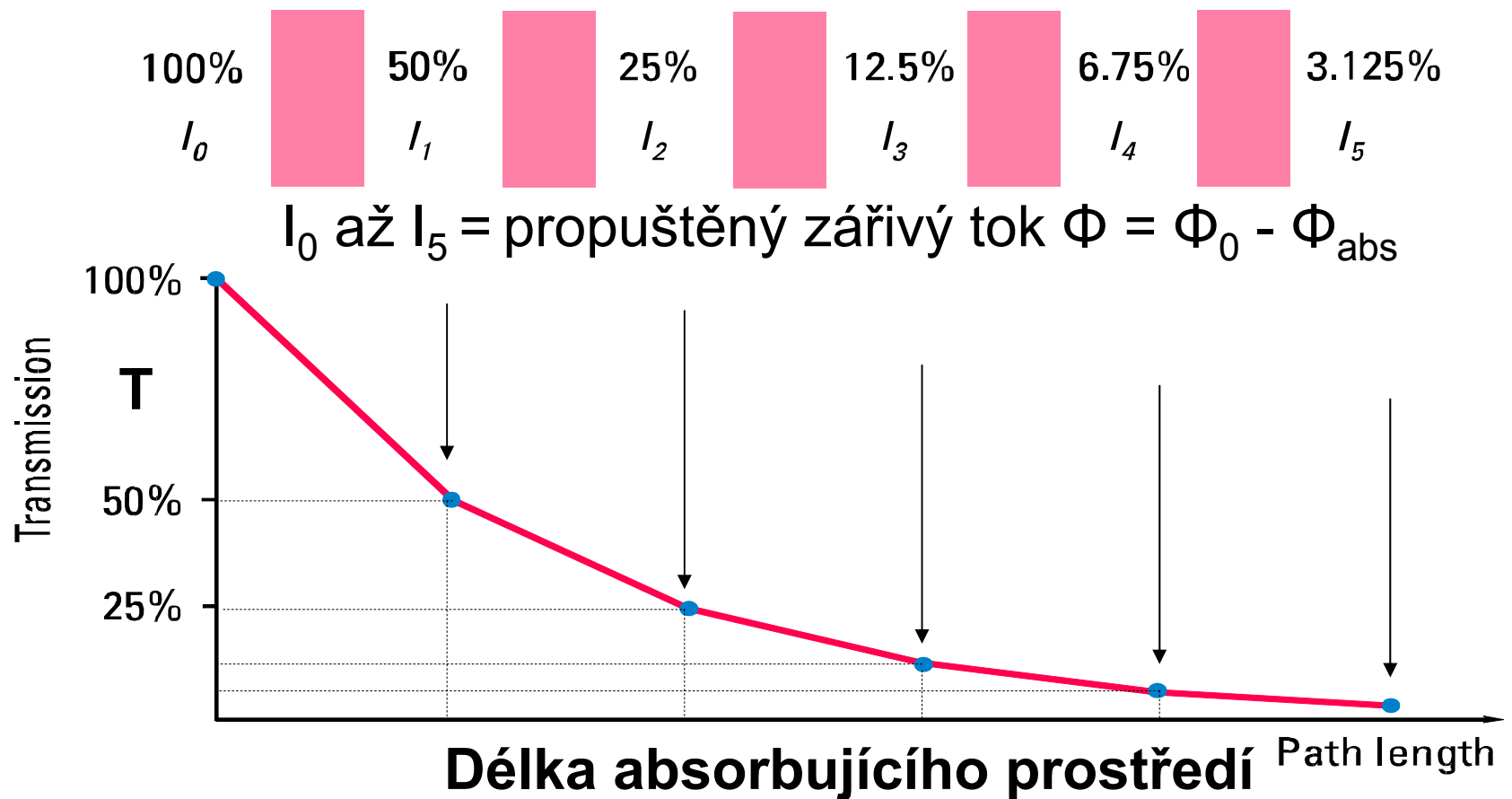
UV-Vis spektroskopie

Fotometrie

- Signál: zářivý tok Φ (W), dopadající Φ_0
 - Emisní
 - Absorpční
 - Luminiscenční (fluorescenční, fosforescenční)
- Transmittance $T = (\Phi/\Phi_0)$; $(\Phi/\Phi_0) \times 100$ (%)
- Absorbance $A = \log(\Phi_0/\Phi) = -\log T$; $0 \leq A \leq \infty$

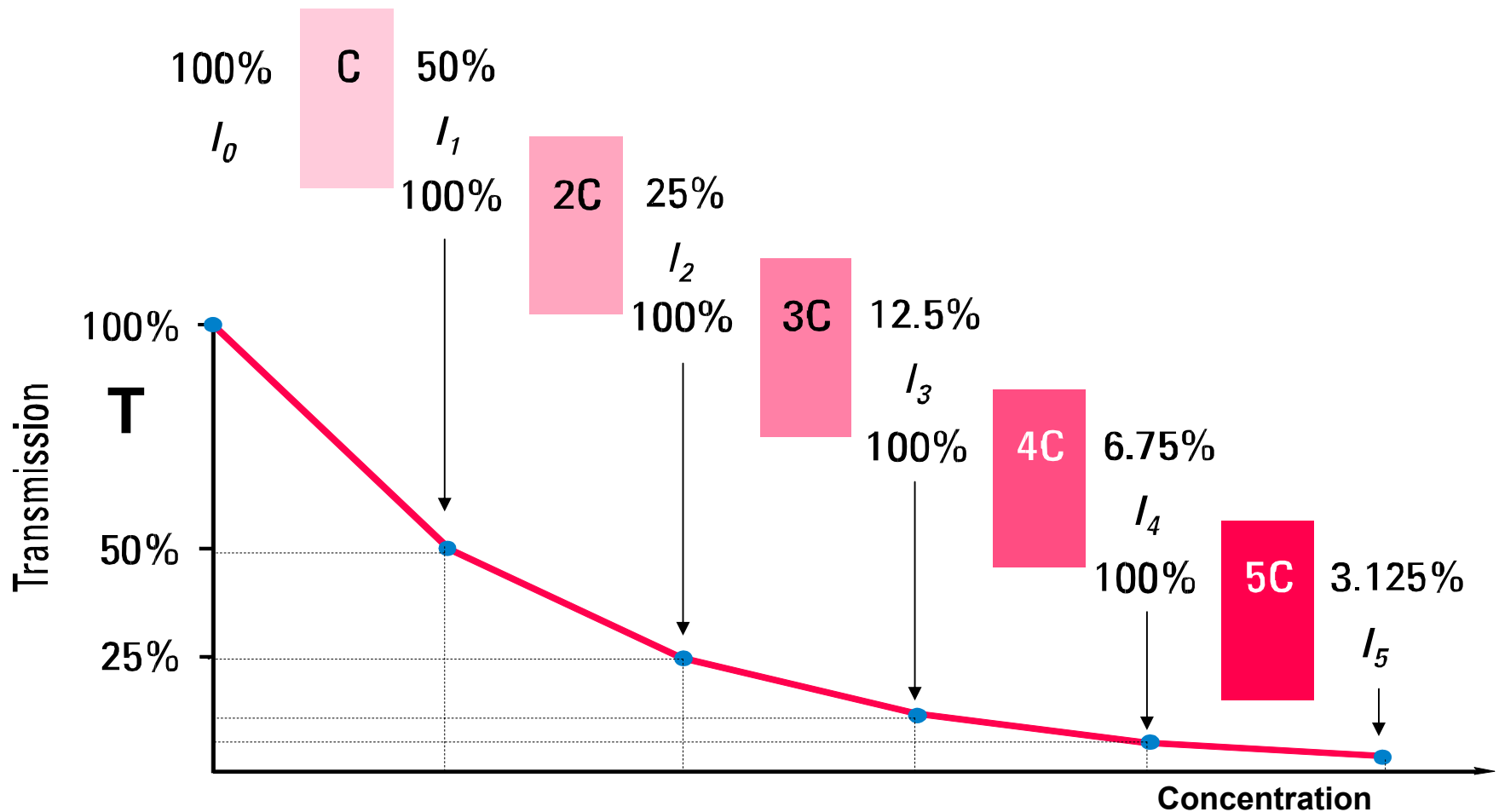
Transmittance a délka absorbujícího prostředí: zákon Bouguer-Lambert

$$T = \Phi / \Phi_0 = e^{-\text{konst} \times \text{délka absorb prostředí}}$$



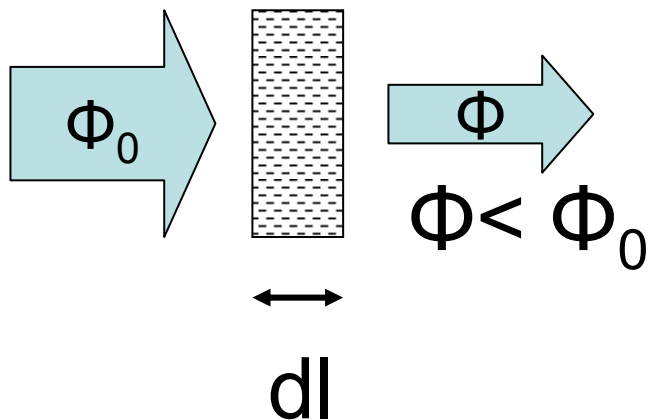
Transmittance a koncentrace zákon Beerův

$$T = \Phi / \Phi_0 = e^{-\text{konst} \times \text{koncentrace}}$$



UV-Vis spektroskopie

Bouguert-Lambert-Beerův zákon



$$\begin{aligned}d\Phi &= \Phi - \Phi_0 \\-d\Phi &= k \cdot \Phi \cdot dl \\-d\Phi/\Phi &= k \cdot dl\end{aligned}$$

$$\int_{\Phi_0}^{\Phi} -\frac{d\Phi}{\Phi} = k \int_0^l dl \quad \int \frac{dx}{x} = \ln x \quad \int -\frac{dx}{x} = -\ln x = \ln \frac{1}{x}$$

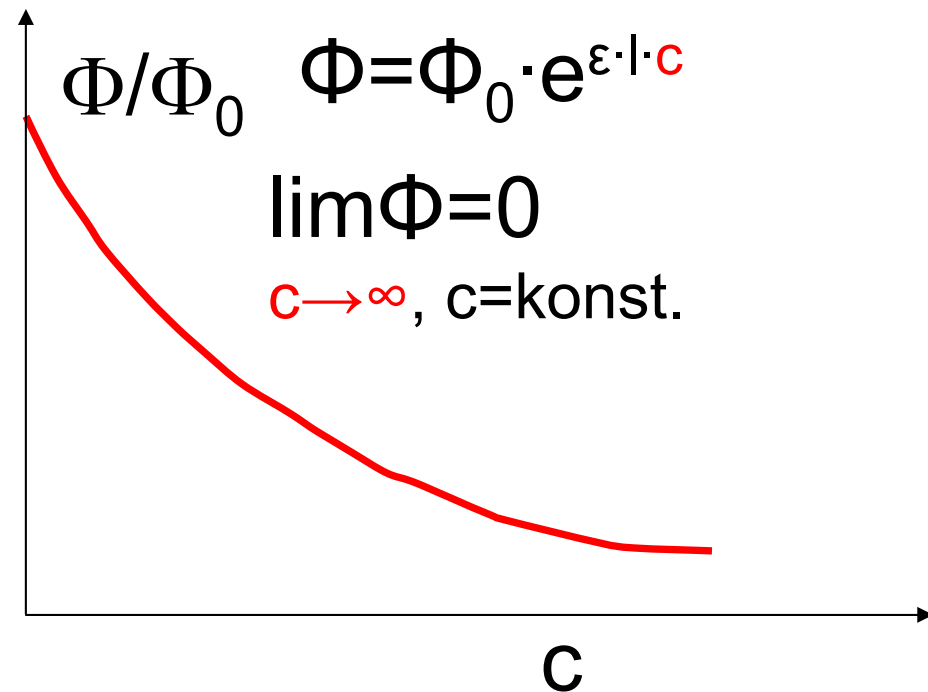
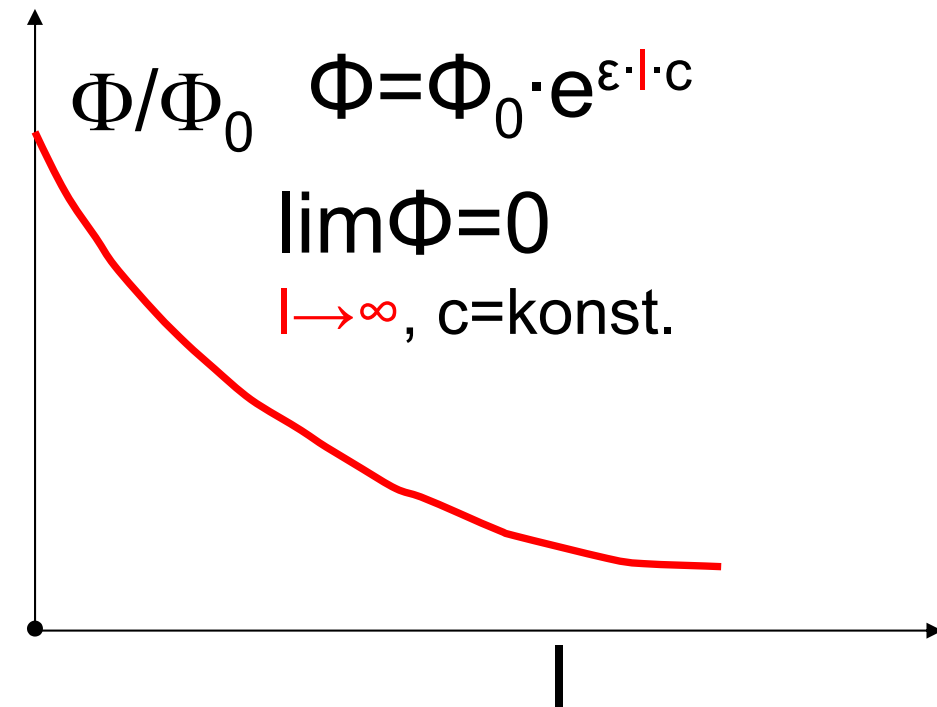
$$\ln(\Phi_0/\Phi) = k \cdot l \quad k = \varepsilon_{\lambda} \cdot c$$

ε_{λ} je molární absorpční koeficient při λ
 c je koncentrace

UV-Vis spektroskopie

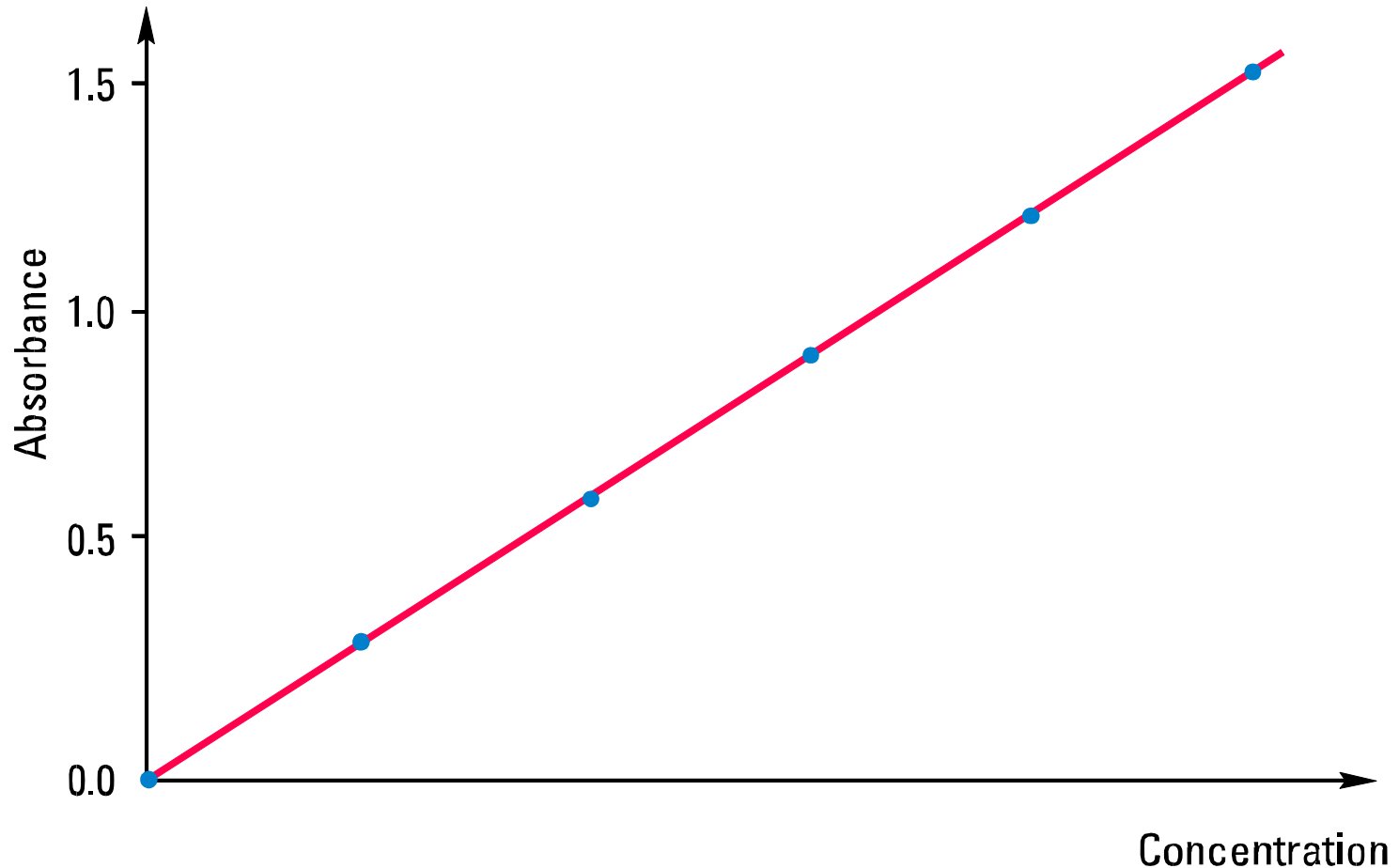
Bouguert-Lambert-Beerův zákon

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \exp(\varepsilon_\lambda \cdot l \cdot c) \Rightarrow \Phi = \Phi_0 \exp(-\varepsilon_\lambda \cdot l \cdot c)$$

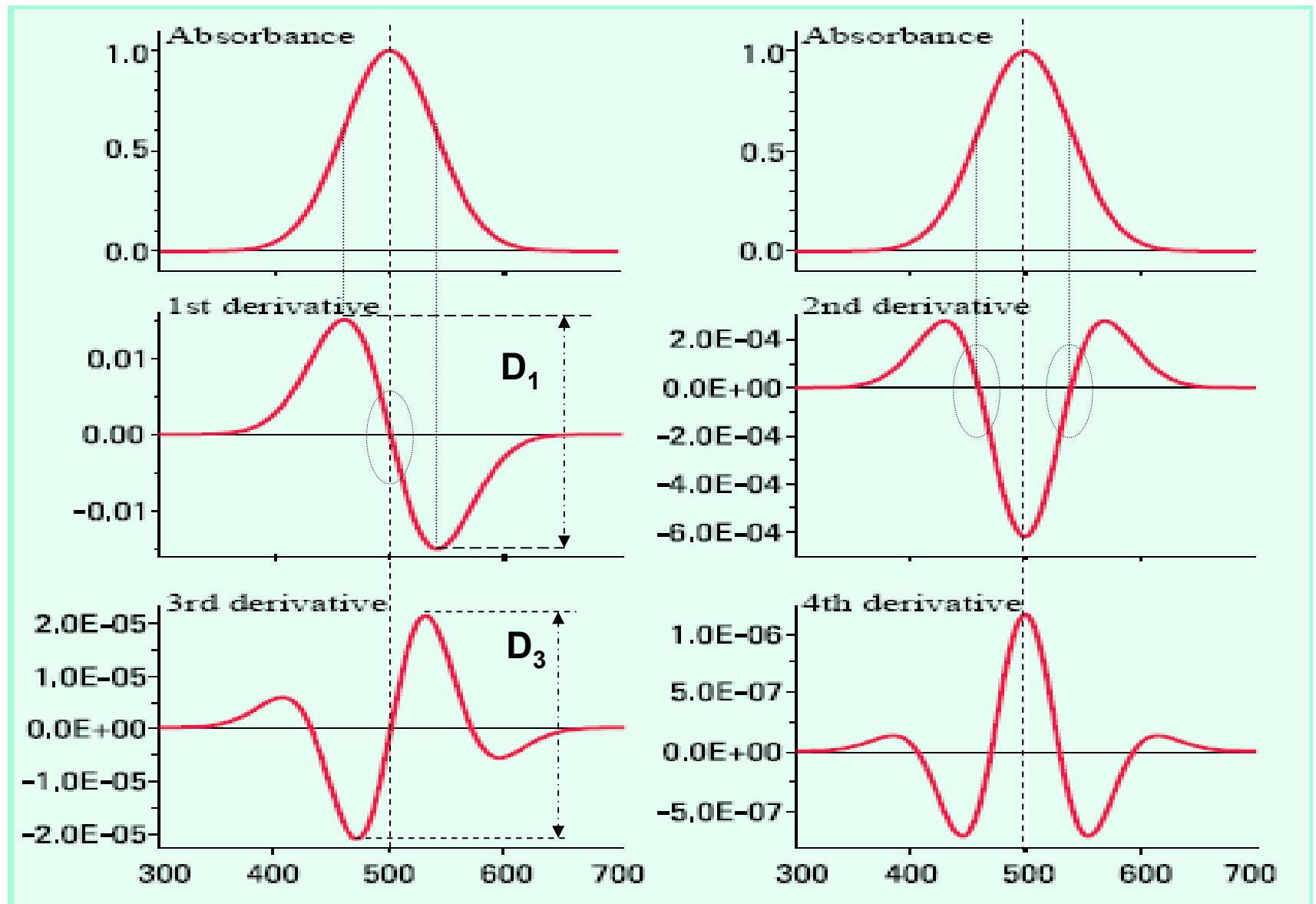


Bouguert-Lambert-Beerův zákon

$$A = -\log T = -\log(I / I_0) = \log(I_0 / I) = \varepsilon \cdot b \cdot c$$



Derivační spektrofotometrie



Derivační spektrofotometrie

1. derivace

$$\frac{dA}{d\lambda} = f'(\lambda); \quad 1.\text{derivace} = 0; \quad \lambda_{\max}; \lambda_{\min}$$

$$\frac{dA}{d\lambda} = \max; \text{ inflex. bod na rostoucí funkci}$$

$$\frac{dA}{d\lambda} = \min; \text{ inflex. bod na klesající funkci}$$

Přesné určení polohy maxim λ_{\max} širokých absorpčních pásů a inflexních bodů

Derivační spektrofotometrie

2. derivace

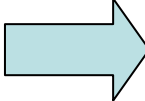
$$\frac{d^2 A}{d\lambda^2} = f''(\lambda) = 0; \approx \text{inflexní body}$$

$$\frac{d^2 A}{d\lambda^2} < 0; \text{min}; \approx \text{max } A = f(\lambda)$$

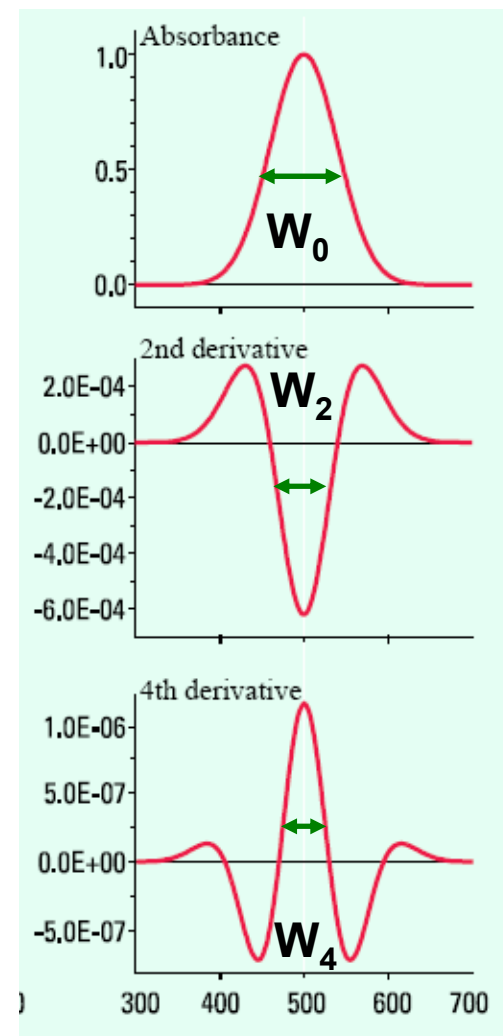
$$\frac{d^2 A}{d\lambda^2} > 0; \text{max}; \approx \text{min } A = f(\lambda)$$

Přesné určení polohy maxim a minim λ_{\max} a λ_{\min} širokých absorpčních pásů a inflexních bodů

Derivační spektrofotometrie

- S rostoucím n sudé derivace klesá šířka centrálního Gaussova píku
- Sudé derivace mají vždy centrální pík s alternujícím znaménkem, který  koinciduje s původním píkem (λ_{\max})

| Derivace n | Pološířka FWHM | W (%) | Orientace ústředního píku |
|-----------------|-------------------|----------|---------------------------------|
| 0 | W_0 | 100 | + |
| 2 | W_2 | 53 | - |
| 4 | W_4 | 41 | + |
| 6 | W_6 | 34 | - |

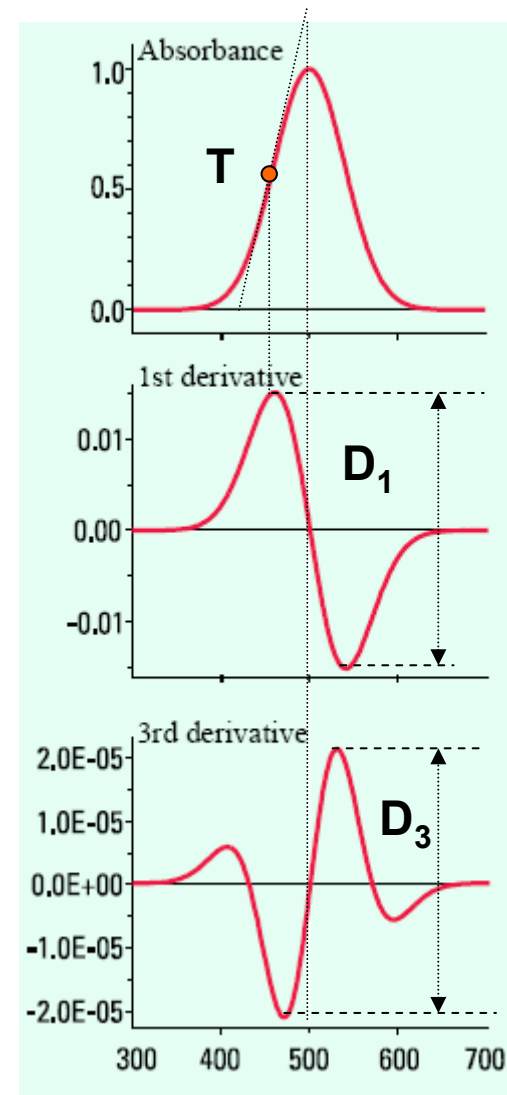


Derivační spektrofotometrie

- Lichá derivace ($n+1$) stupně jakožto derivace n -té derivace obsahuje maximum a minimum.
- Velikosti maxima a minima jsou rovny směrnici tečen v inflexních bodech n -té derivace.
- Užší = strmější profil tedy poskytuje větší amplitudu jako rozdíl y-souřadnic mezi max. a min. liché derivace D_1, D_3 .
- Čím užší pík, tím strmější křídla Gaussova profilu, tj. větší absolutní hodnota směrnice v inflexním bodě.

$$D_n = \left(\frac{1}{W} \right)^n$$

Amplituda D_n n -té derivace je nepřímo úměrná n -té mocnině šířky píku W .



Derivační spektrofotometrie

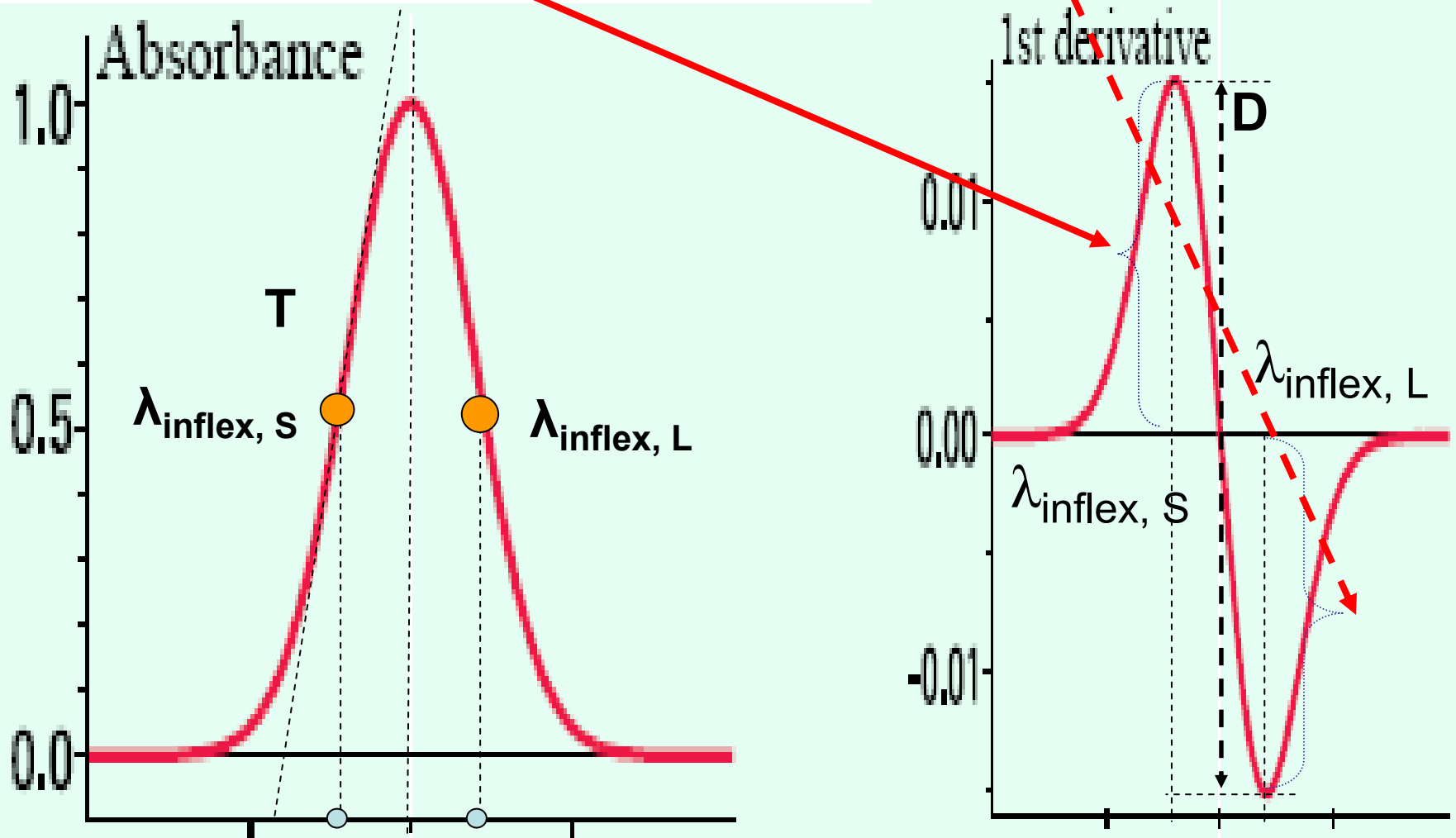
- Derivace Lambert-Beer-Bouguer zákona =
zvýšení citlivosti: $A = \varepsilon \cdot l \cdot c$

$$D = \left(\frac{dA}{d\lambda} \right)_{\lambda_{\text{inflex},S}} - \left(\frac{dA}{d\lambda} \right)_{\lambda_{\text{inflex},L}} = k \cdot c$$

- $\lambda_{\text{inflex}, S, L}$ je vlnová délka inflexního bodu při kratší (S) a delší (L) části spektra

- Amplituda n -té derivace D_n je úměrná koncentraci
- S rostoucím stupněm derivace roste citlivost jakožto směrnice k kalibrační přímky

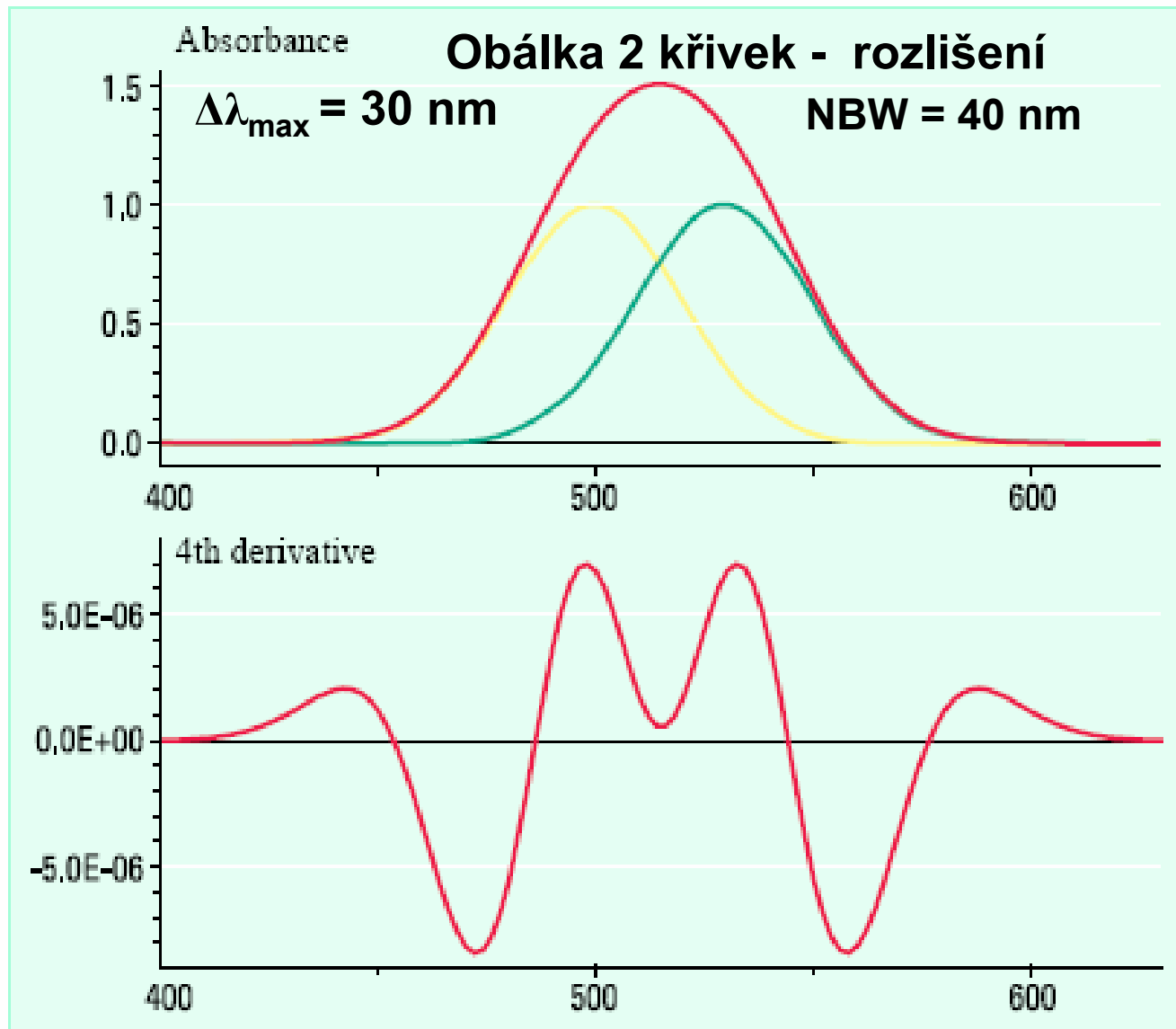
$$D = \left(\frac{dA}{d\lambda} \right)_{\lambda_{\text{inflex},S}} - \left(\frac{dA}{d\lambda} \right)_{\lambda_{\text{inflex},L}} = k \cdot c$$



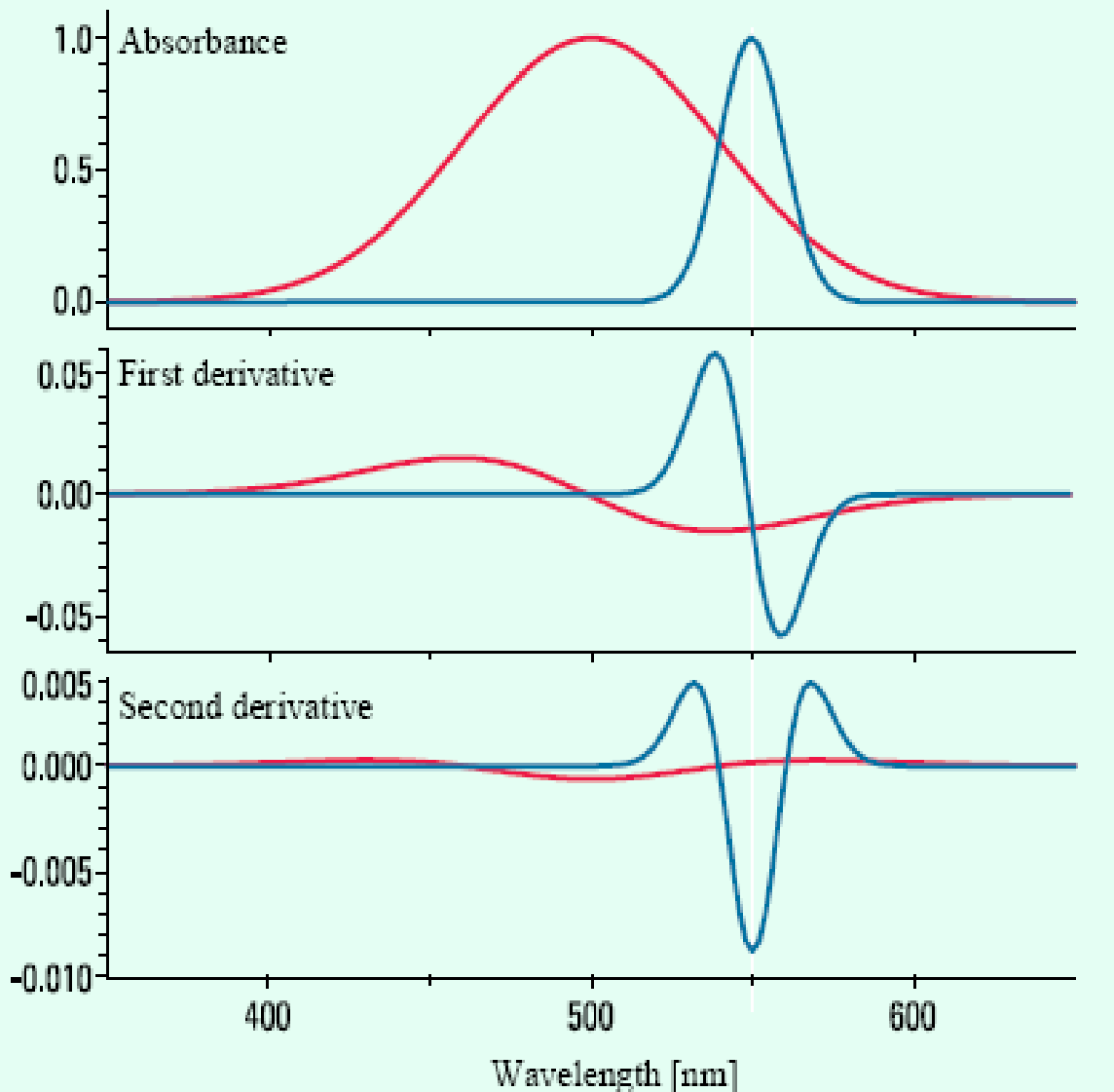
Derivační spektrofotometrie

- Velikost derivace v inflexních bodech profilu píku je nezávislá na velikosti pozadí, pokud je v rozsahu $\Delta\lambda$ šířky absorpčního pásu přibližně konstantní.
- Derivováním spekter superponovaných na zvýšeném pozadí korigujeme pozadí a zvyšujeme poměr **S/B**, podstatný pro určení meze detekce
- Derivace absorpčních pásů na šikmém pozadí (rozptyl záření) umožňuje určit přesnou vlnovou délku λ_{\max} .

Derivační spektrofotometrie



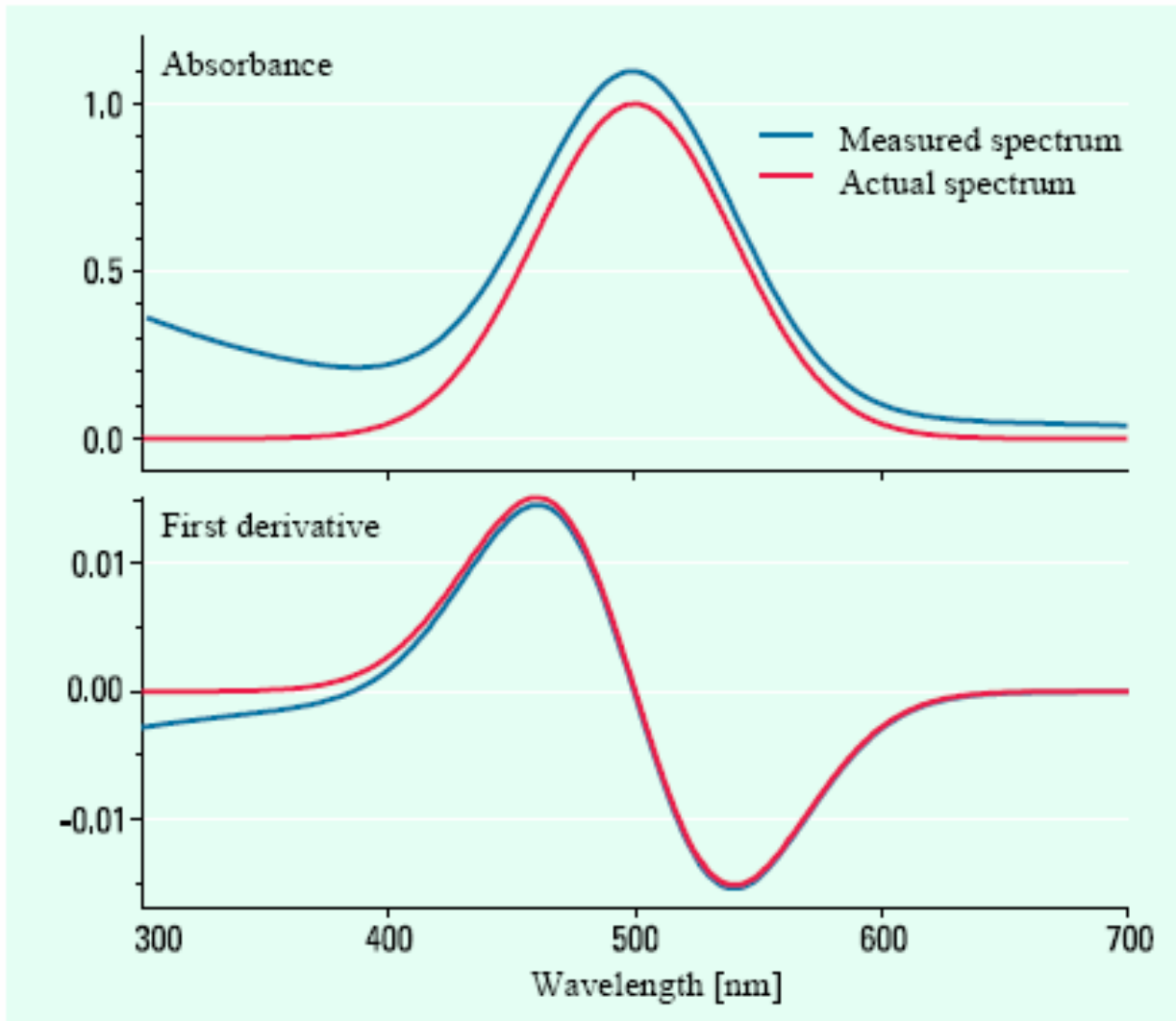
Derivační spektrofotometrie



$$\frac{D_{A,n}}{D_{B,n}} = \left(\frac{W_B}{W_A} \right)^n$$

Při stejné absorbanci (výška píku) dává užší pás větší amplitudu $D = \Delta(dA/d\lambda) \Rightarrow$ lepší citlivost \Rightarrow odlišení od širšího pásu.

Derivační spektrofotometrie



Korekce vlivu
rozptýleného
záření

Derivační spektrofotometrie

- Zlepšení rozlišení překrývajících se absorpčních pásů ⇒
 - Odhalení pásů příslušejících nečistotám
 - Přesné určení λ_{\max} širokých absorpčních pásů
- Zvýšení citlivosti měření
- Eliminace pozadí
 - Rayleighova rozptylu
 - Konstantního pozadí (v závislosti na λ)
 - Neselektivní absorpce matrice
- Zlepšení poměru signál/pozadí

Derivační spektrofotometrie

Tvorba derivačních spekter

1) Elektronicky: výstupní napětí proporcionální absorbanci je diferencováno vzhledem k času – vhodné pro skenující monochromátory:

– **Analogové derivační obvody**:

- Zesilovač
- Derivační členy RC
- Pásové filtry pro redukci šumů určitých frekvencí
- Kombinace derivačních členů pro vyšší derivace

Analogová derivační spektrofotometrie –

zvýšení citlivosti ve srovnání s „klasickou fotometrií“ 5^n – násobné, kde n = řád derivace **x každý RC-člen snižuje poměr S/N faktorem 2.**

Derivační spektrofotometrie

Elektronická tvorba derivačních spekter –
diferencování vzhledem k času:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dA}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{dt} \quad \frac{d\lambda}{dt} = \textit{konst.} (nm \cdot mm^{-1}) = S$$

$$\frac{dA}{d\lambda} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dA}{dt}$$

$$\frac{d^2 A}{d\lambda^2} = \frac{1}{S^2} \frac{d^2 A}{dt^2}$$

Derivační spektrofotometrie

Tvorba derivačních spekter

2) Opticky: rychlá modulace λ záření \Rightarrow do kyvety;

Modulace λ = rychlé změny λ , periodické skenování $\pm\lambda$ v malém intervalu $\Delta\lambda$; $\Delta\lambda \ll$ FWHM absorpčního pásu. Derivační spektrum – jako funkce času (konstatní rychlost skenu $d\lambda/dt$)

$$\frac{d\Phi}{d\lambda} = \frac{d\Phi}{dt} \frac{dt}{d\lambda}$$

$\frac{d\Phi}{dt}$ se měří elektronickým
diferenciačním členem

Derivační spektrofotometrie

Tvorba derivačních spekter – opticky

a) Modulace λ : provedení modulace vlnové délky:

- i. rychlým periodickým skenem monochromátoru $\pm\lambda$
- ii. kmitající planparalelní destičkou (posun paprsku)
- iii. oscilací vstupní nebo výstupní štěrbiny (změna úhlu dopadu paprsku na mřížku)

střídavý fotoproud \sim změně Φ v úzkém intervalu $\Delta\lambda$:

1.derivace spektra \sim 1. harmonická fotoproudu (AC)

2.derivace spektra \sim 2. harmonická fotoproudu (AC)

Derivační spektrofotometrie

Tvorba derivačních spekter – opticky

b) Dvouvlňová spektrofotometrie: spektrometr se dvěma monochromátory, které skenují simultánně s rozdílem $\Delta\lambda = 1$ až 5 nm. Dva monochromatické paprsky procházejí střídavě kyvetou (rotující sektor, zrcadlo).

Derivační spektrofotometrie

Tvorba derivačních spekter

3) Matematicky: v současné době nejvíce používáno

Aproximace 1. derivace: polynom, Savitzky-Golay

$$\frac{dA}{d\lambda} = \frac{A(\lambda + \Delta\lambda) - A(\lambda - \Delta\lambda)}{2\Delta\lambda}$$