

# Fázové heterogenní rovnováhy

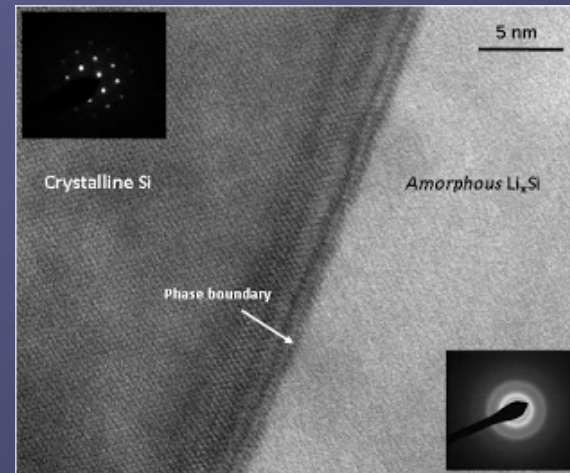
Fáze = homogenní část soustavy, jednoznačně oddělná **fyzickým rozhraním**, na rozhraní se vlastnosti mění skokem

## Rovnováha

- Tepelná -  $T$  všude stejná
- Mechanická -  $p$  všude stejný
- Chemická - látkové množství jednotlivých složek se nemění,  $dG = 0$ , chemický potenciál všech složek ve všech fázích je stejný

Podmínka **koexistence** fází:

mají stejnou  $G$ , přechod mezi fázemi  $\Delta G = 0$



# Chemický potenciál

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j}$$

Změna  $G$  se změnou složení  $n_i$

Pro popis soustav, u kterých se **mění složení**

Rozdíl v chemickém potenciálu vede k chemické reakci, difuzi, fázovému přechodu....

Chemický potenciál každé složky ve všech koexistujících fázích je stejný

# Gibbsův fázový zákon

**Fáze** (P) = homogenní část soustavy (vlastnosti, struktura), rozhraní, skoková změna vlastností, skupenství (s, l, g), modifikace (pevné - led I - XII, kapalné - He I a II)

P = 1: směs plynů, roztok

P = 2: kapalina + nasycená pára, nasycený roztok + pevná látka

P = 3: kapalina + nasycená pára + pevná látka

**Složka** (C) = čistá látka

Počet složek = minimální počet čistých látek

Méně, pokud jsou vázány chemickou reakcí:  $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$

**Stupeň volnosti** (V) = parametry soustavy p, T, c

Počet stupňů volnosti = lze měnit **aniž by se změnil počet fází**

## Gibbsův fázový zákon

- Každá fáze  $P$  potřebuje  $C - 1$  údajů o složení (molární zlomky  $x_i$ ) plus  $T$  a  $p$  k popsání stavu,  
celkově  **$P(C - 1) + 2$  stavových proměnných**
- Pro každou složku  $C$  platí  $P - 1$  rovnovážných podmínek  
 $\mu(\alpha) = \mu(\beta)$ ,  $\mu(\beta) = \mu(\gamma)$ ,  $\mu(\gamma) = \mu(\delta)$ , .....  
rovnost chemických potenciálů složky v  $P$  fázích ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ )  
celkem  **$C(P - 1)$  podmínek**
- Počet **stupňů volnosti  $V$**  = počet **proměnných** minus počet vazných **podmínek**
- $V = P(C - 1) + 2 - C(P - 1)$
- **$V = C - P + 2$**

# Gibbsův fázový zákon

$$P + V = C + 2$$

Fáze (P)

Stupně volnosti (V)

Složky (C)

Pro  $C = 1$

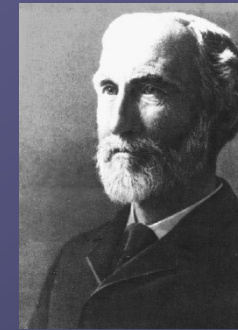
jednosložková soustava

**$P = 1$     $V = 2$    plocha**

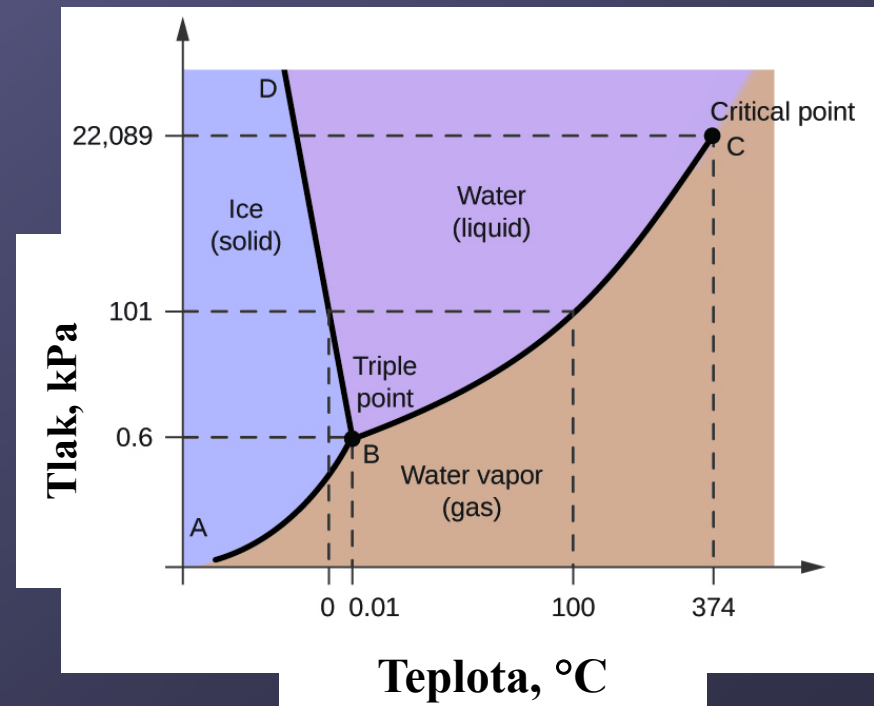
**$P = 2$     $V = 1$    křivka**

**$P = 3$     $V = 0$    trojný bod**

Více než 3 fáze nemohou koexistovat



J. Willard Gibbs  
(1839 - 1903)



# Fázový diagram

**Fázový diagram** = grafická informace o stavu soustavy

Proměnné – tlak, teplota,  $C - 1$  údajů o složení (molární zlomky)

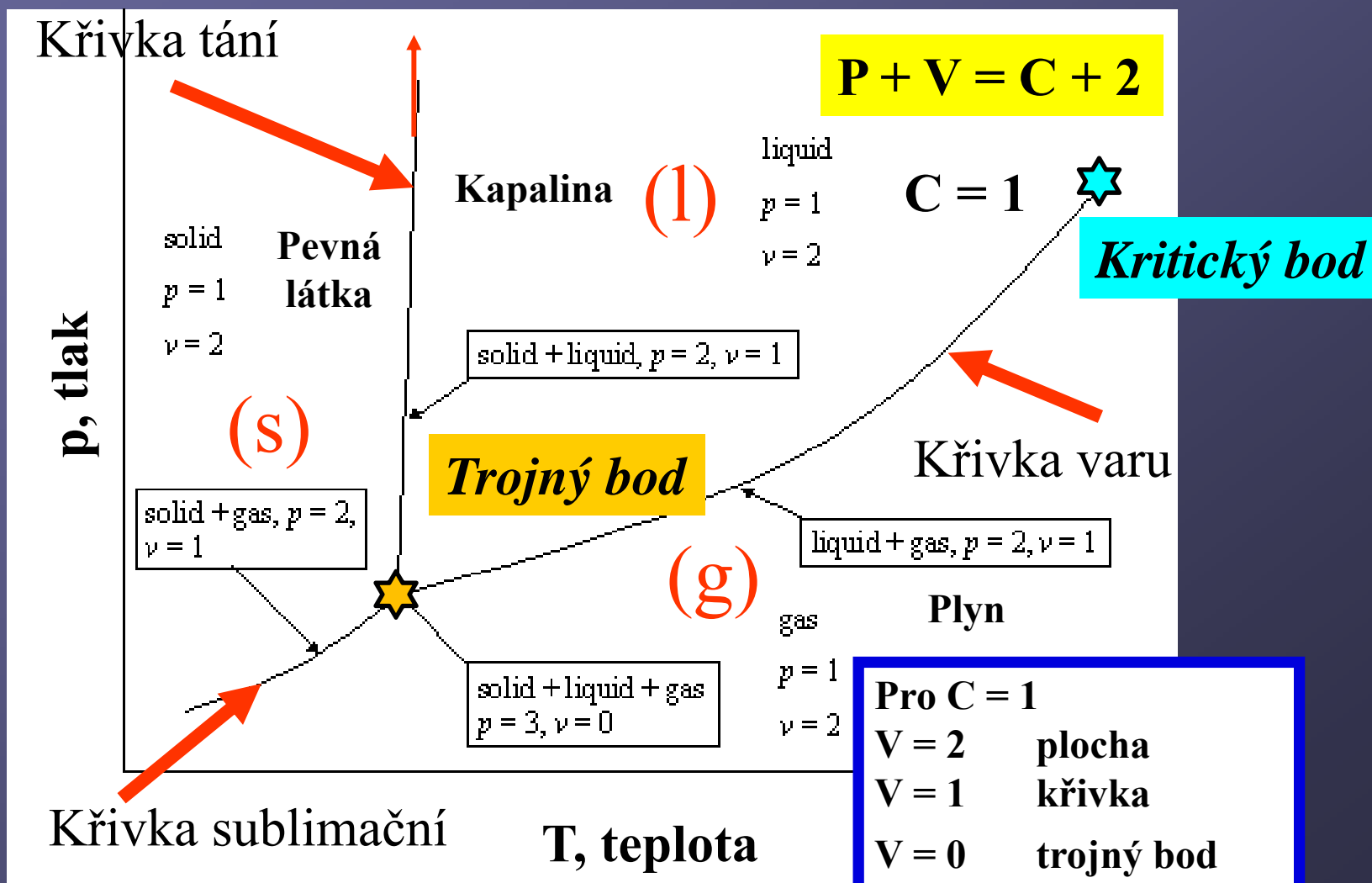
$$P + V = C + 2$$

Pro více než 1 složku v soustavě musí být fázový diagram 3 a vícerozměrný :  $C = 2$  ,  $P = 1 \rightarrow V = 3$  (p, T, c)

Řezy fázovým diagramem – některé proměnné držíme konstantní:

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| p = konst. | izobarický diagram      |
| T = konst. | izotermický diagram     |
| c = konst. | izokoncentrační diagram |

# Fázový (p-T) diagram pro jednosložkovou (C = 1) soustavu



# Fázový diagram jednosložkové soustavy

**Trojný bod** – Teplota a tlak při nichž jsou tři fáze v rovnováze

Je možný čtverný bod?

**Kritický bod** – zakončuje křivku vypařování, nad k. b. jsou kapalná a plynná fáze nerozlišitelné, zmizí meniskus

- **Kritická teplota** - minimální teplota pro zkapalnění plynu zvýšeným tlakem, plyn, který má teplotu vyšší než je k. t., nelze žádným stlačováním zkapalnit
- **Kritický tlak** - minimální tlak, který je při k. t. nutný pro zkapalnění plynu

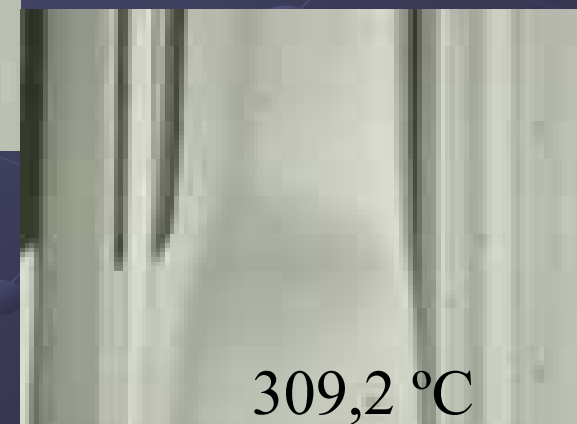
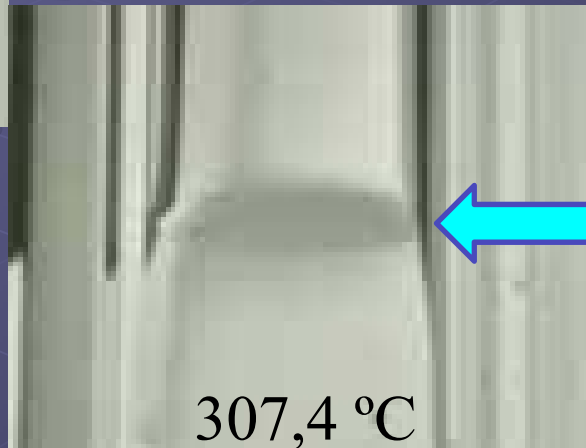


# Kritický bod benzenu

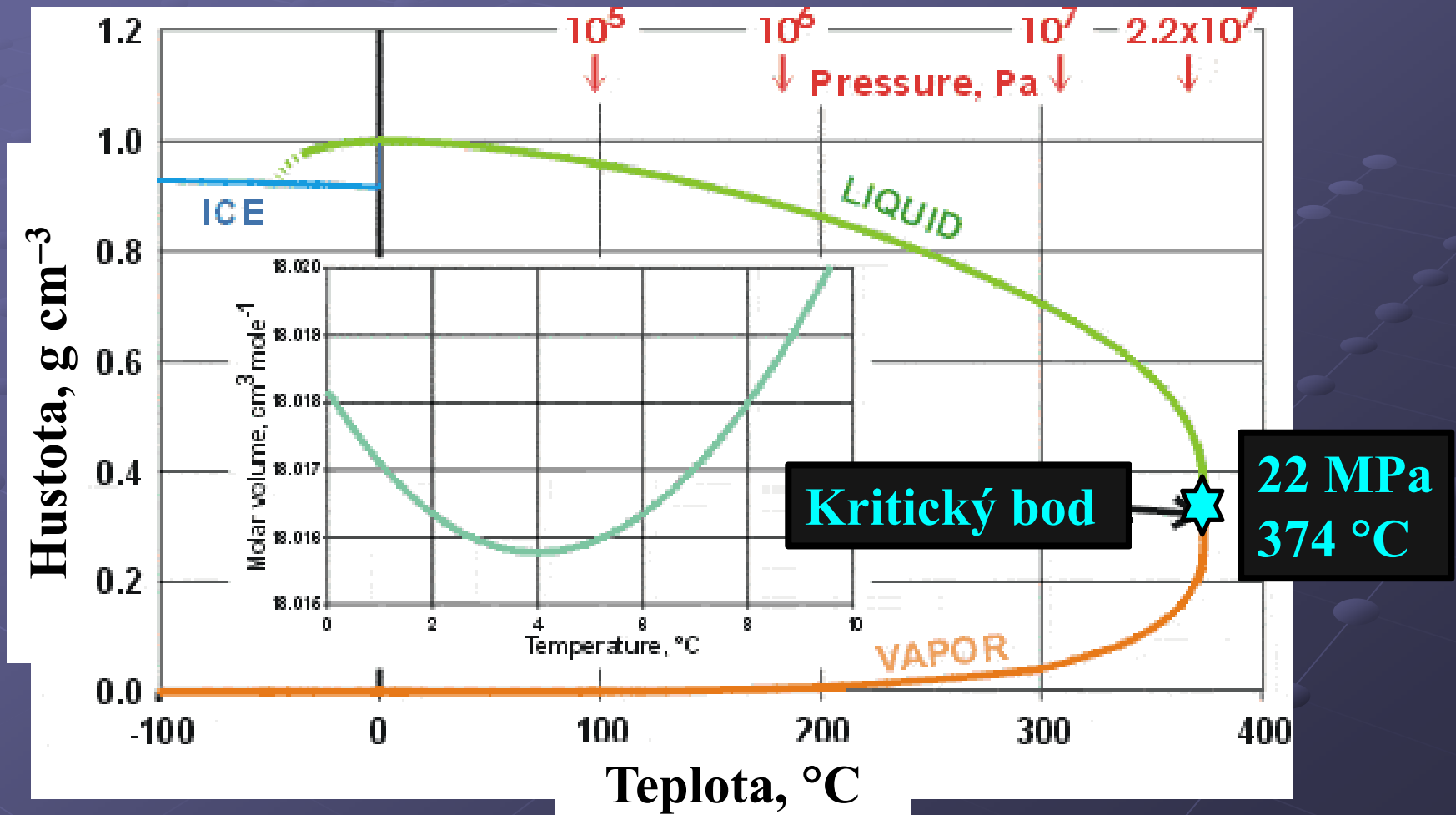


**Kritická teplota**

Zmizí fázové rozhraní  
mezi l a g (meniskus)



# Hustota vody (g, l, s) v kritickém bodě

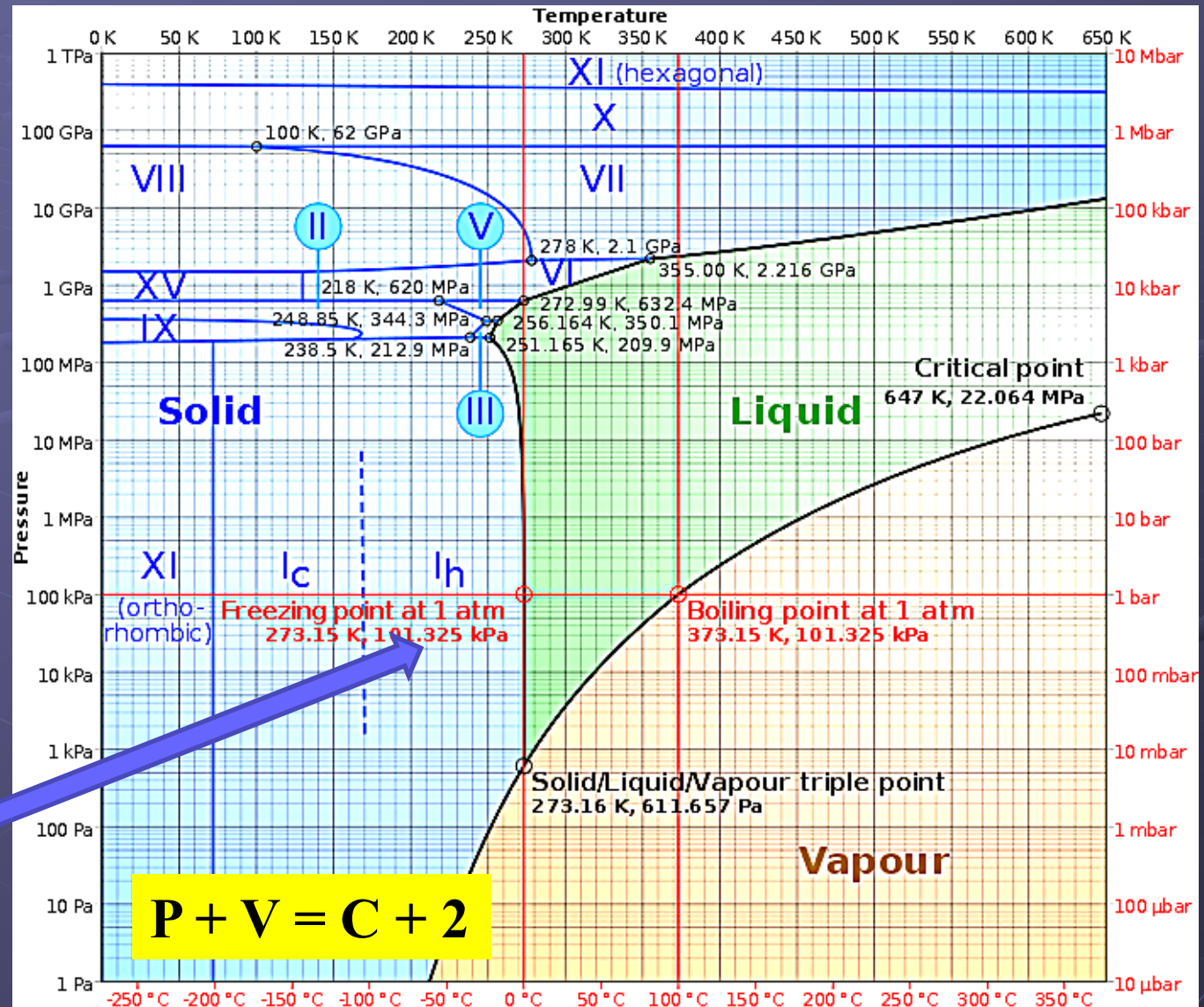


# Fázový diagram ledu - vody - páry

**C = 1**

17 polymorfních fází ledu

Normální led  
I<sub>h</sub>  
hexagonální



**P + V = C + 2**

# Clausius-Clapeyronova rovnice

Clapeyronova rovnice  
pro fázovou přeměnu:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_m}{T \Delta V_m}$$

Molární skupenské teplo

Změna molárního objemu

Pro l-g rovnováhu – křivka varu:

1)  $V_m(g) \gg V_m(l)$ , pak  $\Delta V_m = V_m(g) - V_m(l) = V_m(g)$

2)  $V_m(g)$  ze stavové rovnice id. plynu

Diferenciální Clausius-Clapeyronova rovnice

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta H_m}{RT^2}$$

Integrovaná Clausius-Clapeyronova rovnice

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{-\Delta H_{\text{výp}}^0}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$V_m(g) = \frac{RT}{p}$$

# Změna tenze par vody s teplotou



$$K_p = P_{\text{H}_2\text{O}}$$

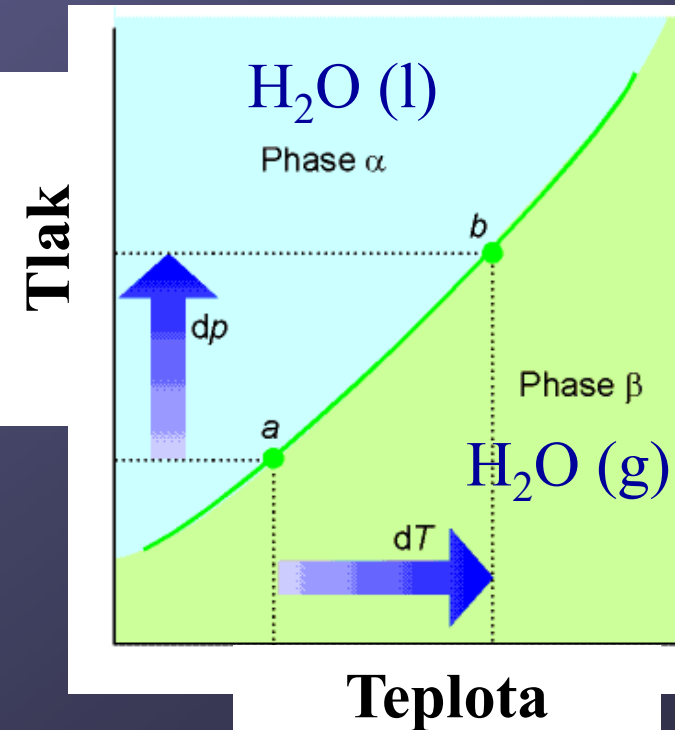
## van't Hoffova rovnice

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \ln \frac{p_T}{p_{\text{var}}} = \ln p_T = \frac{\Delta H^0_{\text{výp}}}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{var}}} - \frac{1}{T} \right)$$

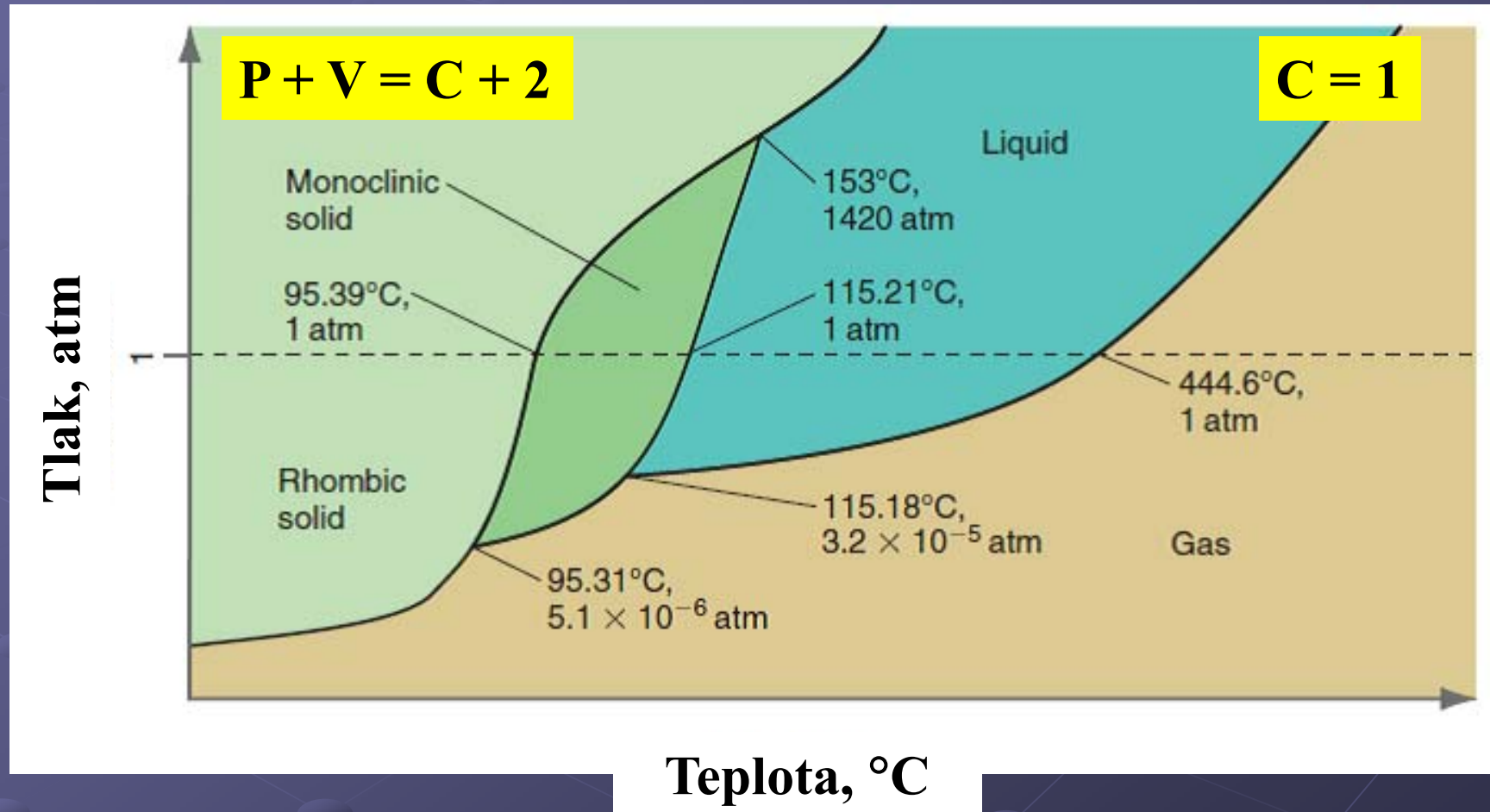
$$P_{\text{var}} = 1 \text{ atm}$$

## Clausius-Clapeyronova rovnice

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{-\Delta H^0_{\text{výp}}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$



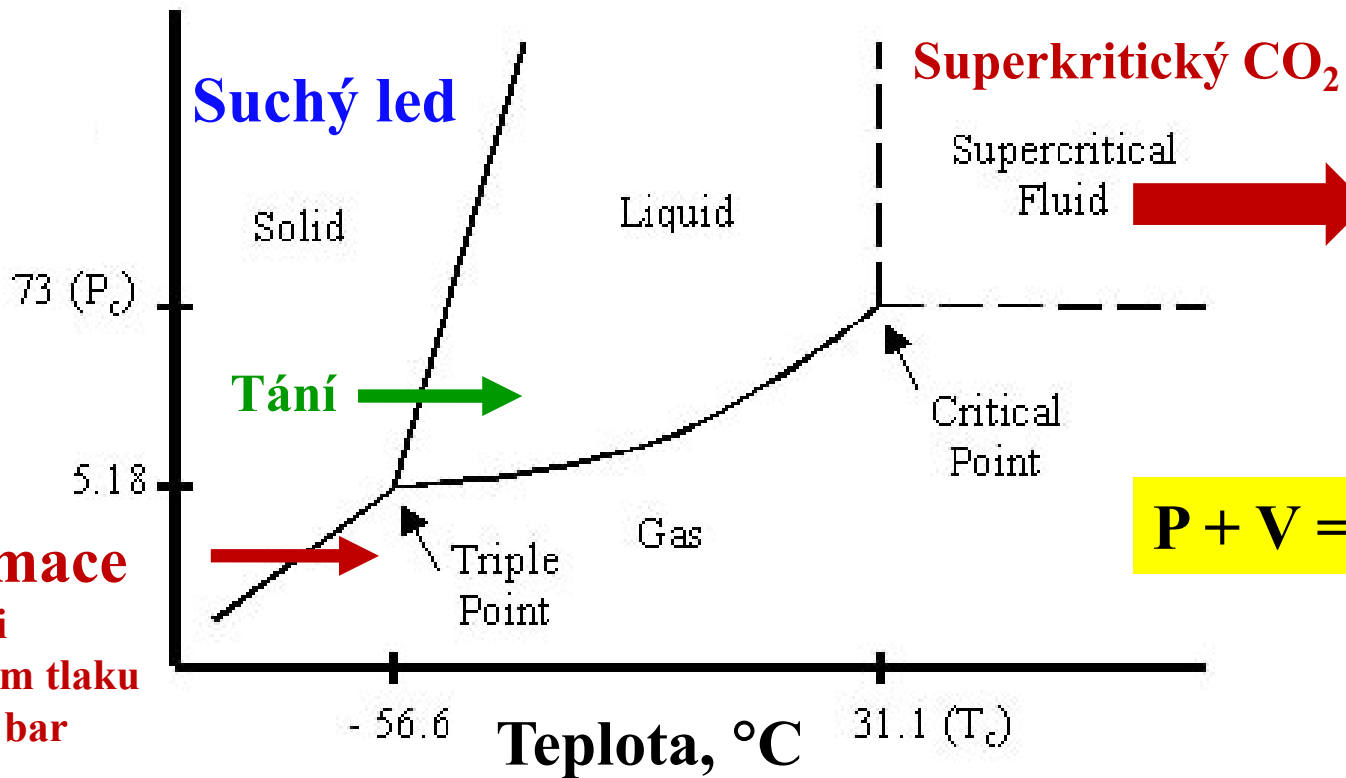
# Fázový diagram síry



# Fázový diagram CO<sub>2</sub>

**C = 1**

Tlak, bar



**P + V = C + 2**

**Sublimace**  
při  
normálním tlaku  
p = 1 bar

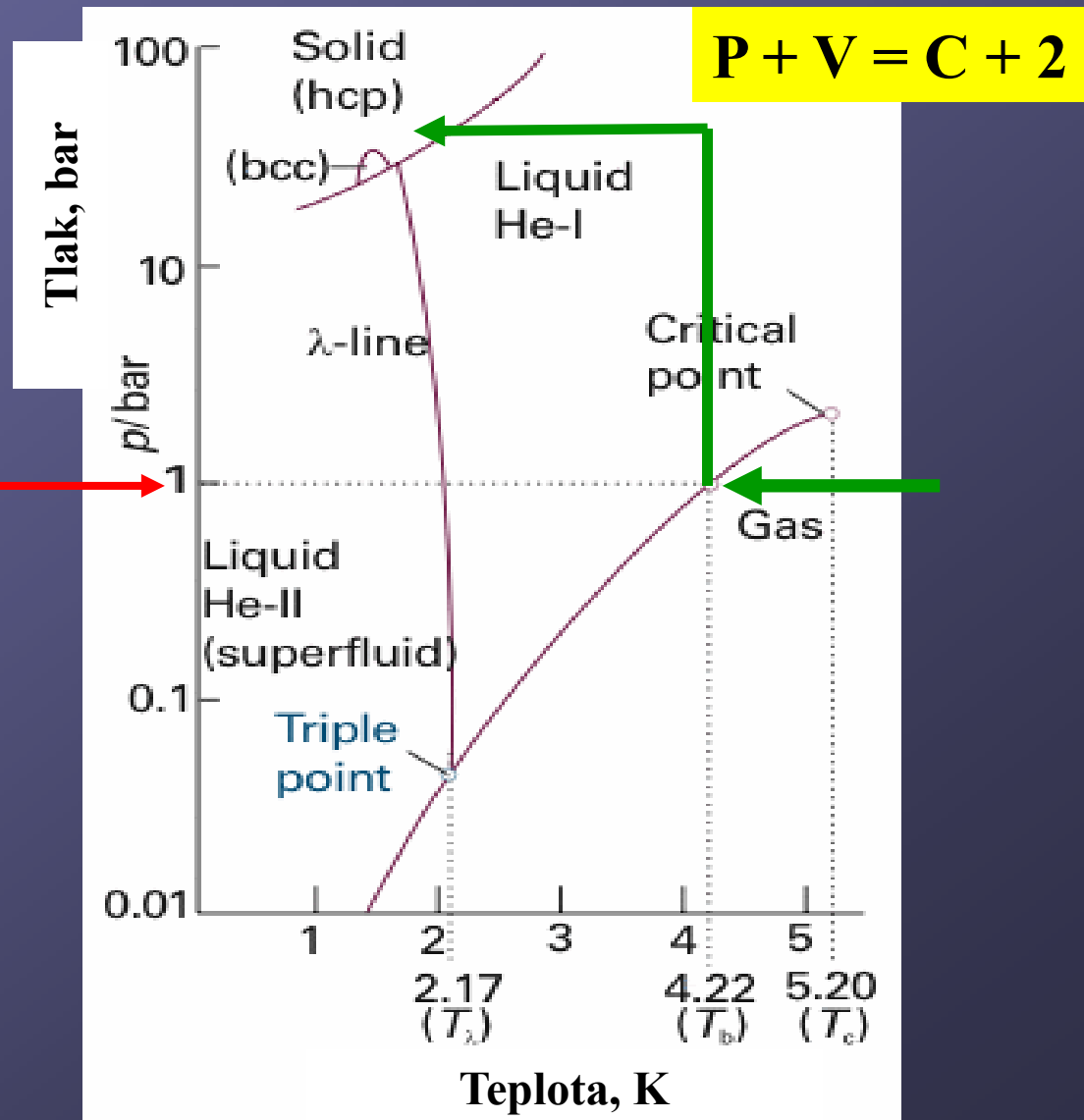
# Fázový diagram He

$$C = 1$$

He nelze převést do pevného stavu za normálního atmosferického tlaku

Trojný bod (lambda) koexistence l-l-s fází

He nemá trojný bod koexistence g-l-s fází





# Fázový diagram pro dvousložkovou soustavu

$$C = 2, P + V = 4$$

$$V = 4 - P$$

Minimálně jedna fáze  
musí být přítomna  $P = 1$

$$V_{\max} = 3 (T, p, x)$$

Tři parametry  
= třírozměrný fázový diagram

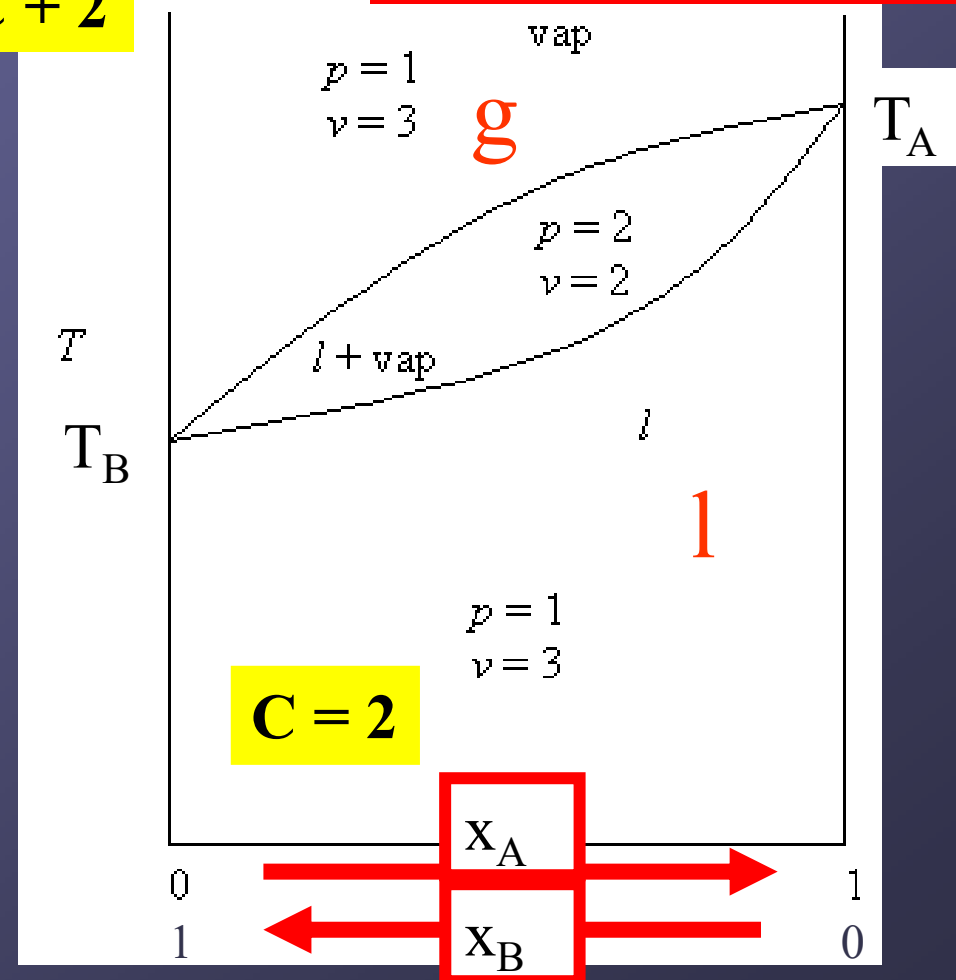
Na dvourozměrném diagramu:

$$V = 2$$

- **Izotermický**  $T = \text{konst.}$   
 $p$  jako funkce  $x$
- **Izobarický**  $p = \text{konst.}$   
 $T$  jako funkce  $x$

$$P + V = C + 2$$

Izobarický:  $p = \text{konst.}$



## Směs dvou kapalin

Ideální směs (chování) dvou kapalin:

vdW interakce **A-A**, **B-B** a **A-B**

jsou přibližně stejné  
hexan-heptan

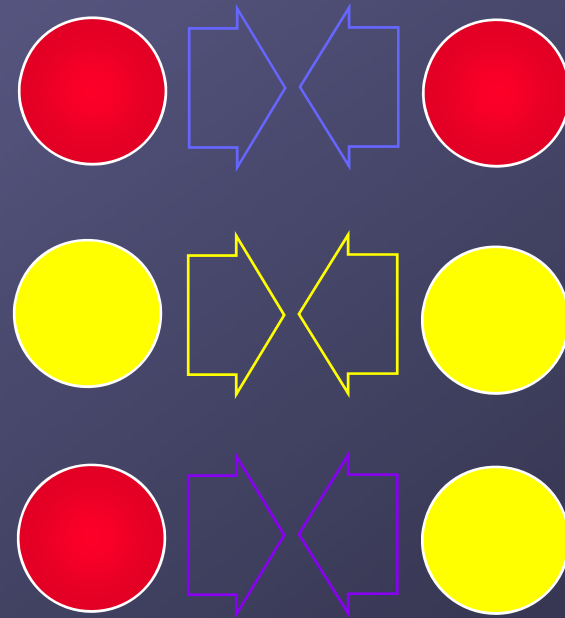
Chemicky podobné látky

$$\Delta H_{\text{rozp}} = 0 \quad \Delta V_{\text{rozp}} = 0$$

Neideální chování kapalin:

vdW interakce **A-A**, **B-B** jsou různé  
(větší nebo menší) než **A-B**

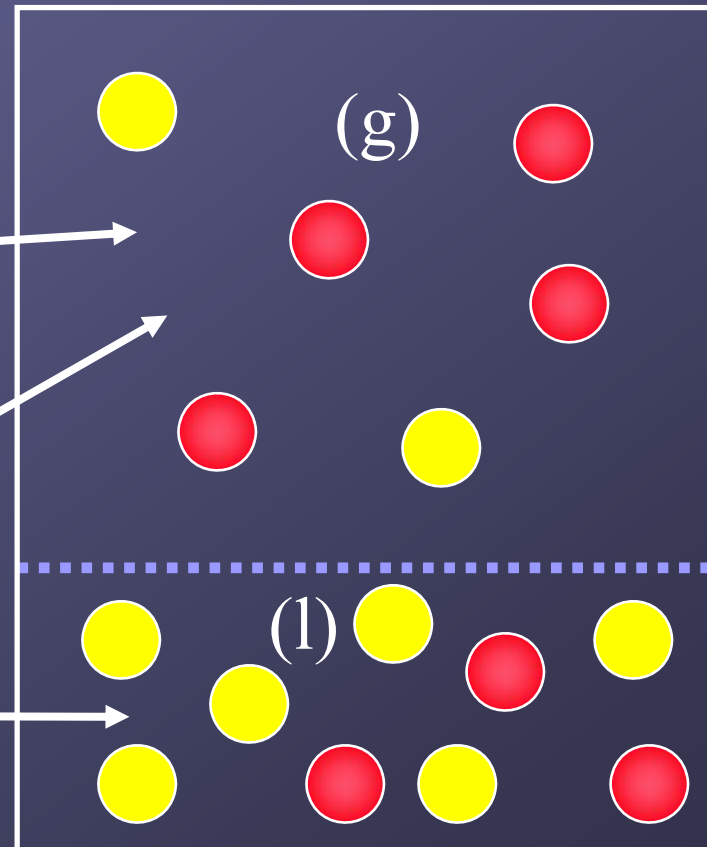
$$\Delta H_{\text{rozp}} \neq 0 \quad \Delta V_{\text{rozp}} \neq 0$$



# Rovnováha $l \rightleftharpoons g$ ve směsi dvou kapalin

Obě fáze jsou směsí **A** a **B**

- $p_A, p_B$  parciální tlaky v (g)
- $p_{\text{celk}} = p_A + p_B$
- $y_A, y_B$  molární zlomky v (g)
- $y_A + y_B = 1$
- $x_A, x_B$  molární zlomky v (l)
- $x_A + x_B = 1$



# Snížení tlaku par nad roztokem

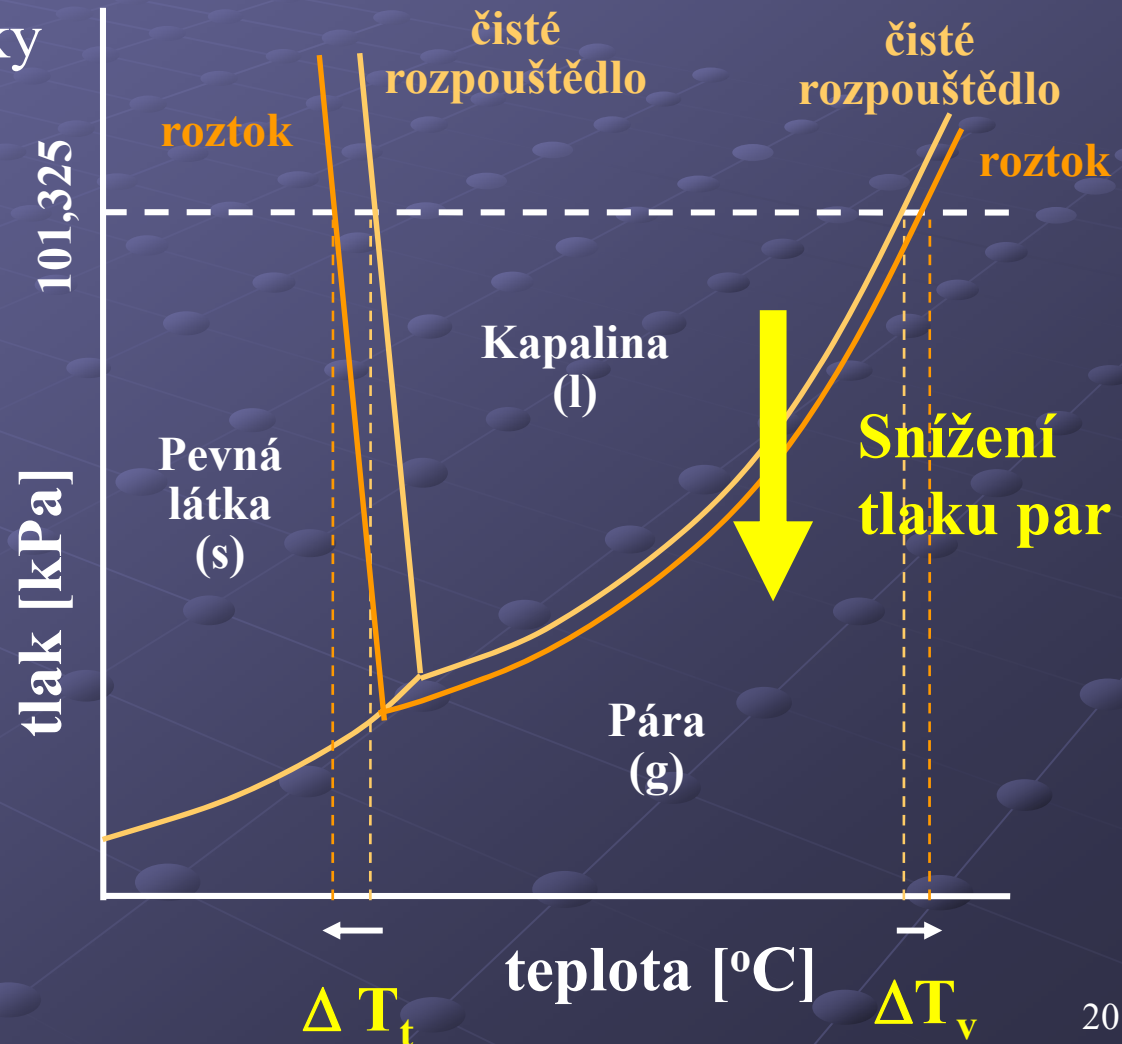
Přídavek rozpuštěné látky do rozpouštědla vede ke **snížení tlaku par**

$$P_1^\circ - P_1 = \Delta P_1 = x_2 P_1^\circ$$

součin tlaku par čistého rozpouštědla a molárního zlomku rozpuštěné látky

To má za následek

- **snížení teploty tání**
- **zvýšení teploty varu**



# Raoultův zákon

**Tlak par každé složky** nad roztokem je roven součinu tlaku par čistého složky  $P_i^\circ$  a molárního zlomku složky  $x_i$

Dvě těkavé látky, A a B (např. aceton a toluen)

$$P_A = x_A P_A^\circ$$

$$P_B = x_B P_B^\circ$$

$$C = 2$$

Celkový tlak par nad roztokem (Daltonův zákon)

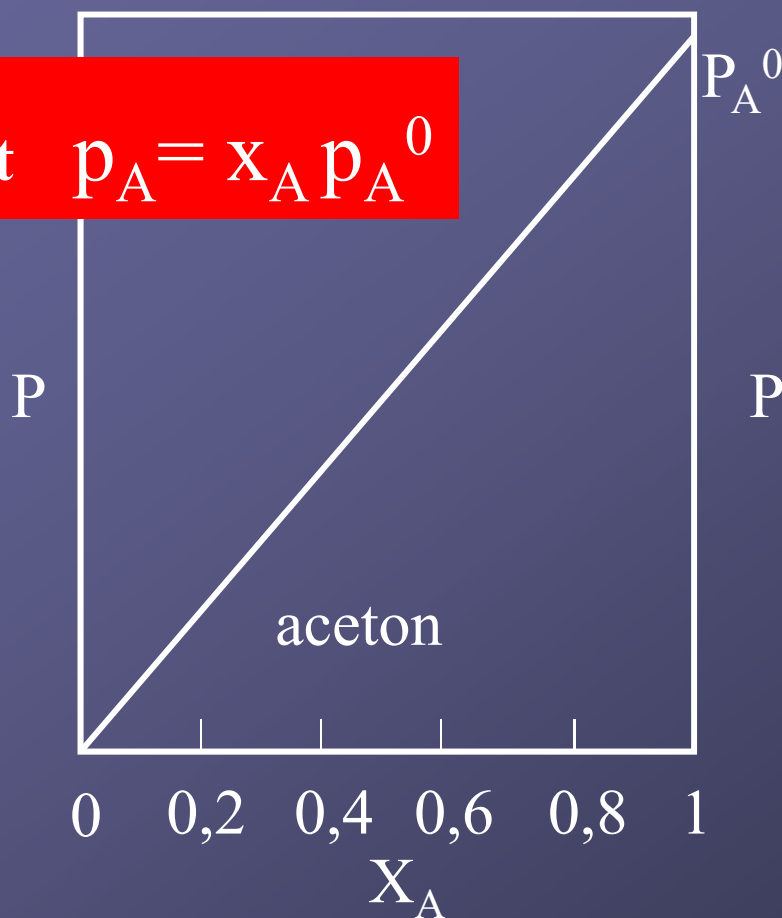
$$P_{\text{celk}} = P_A + P_B = x_A P_A^\circ + x_B P_B^\circ$$

# Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

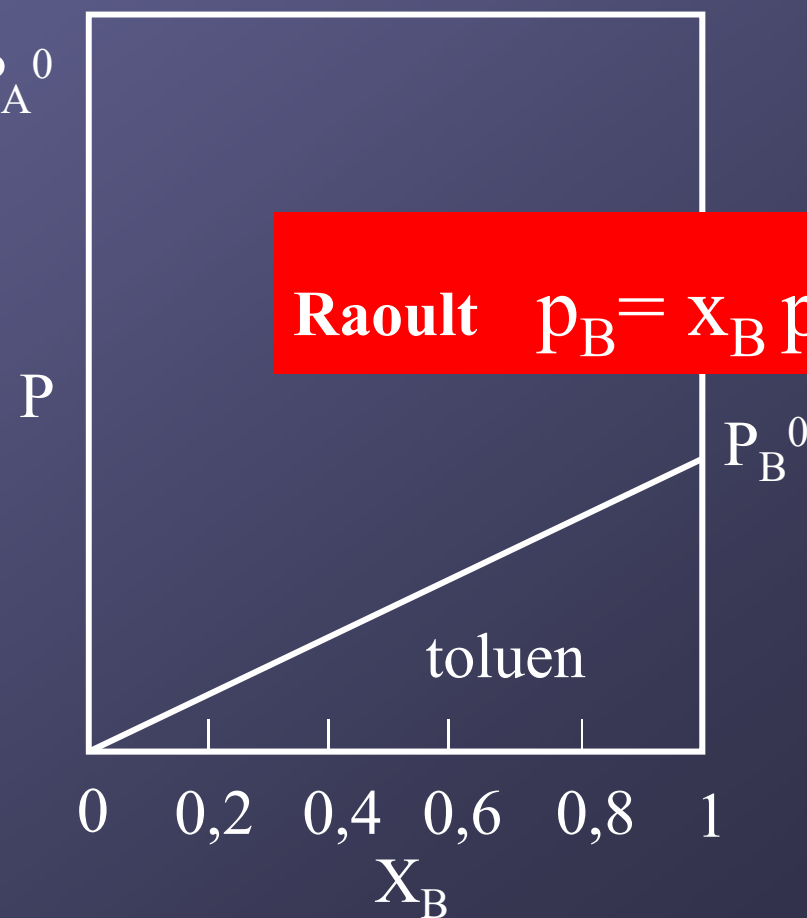
Izotermický:  $T = \text{konst.}$   
(např. 25 °C)

Těkavější složka = vyšší tenze par

**Raoult**  $p_A = x_A p_A^0$



**Raoult**  $p_B = x_B p_B^0$

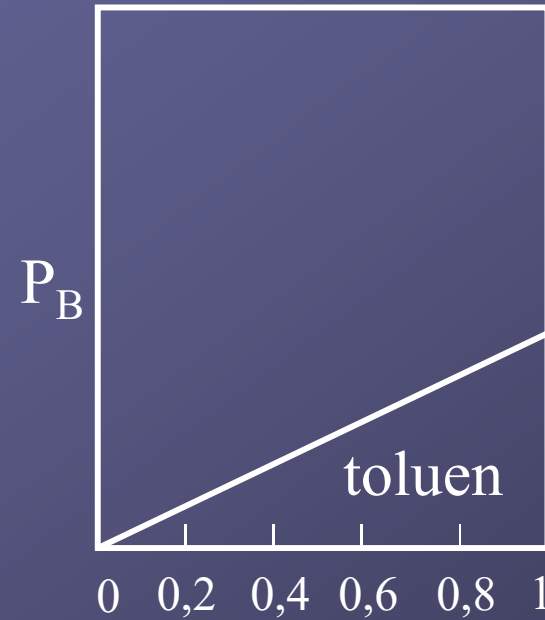
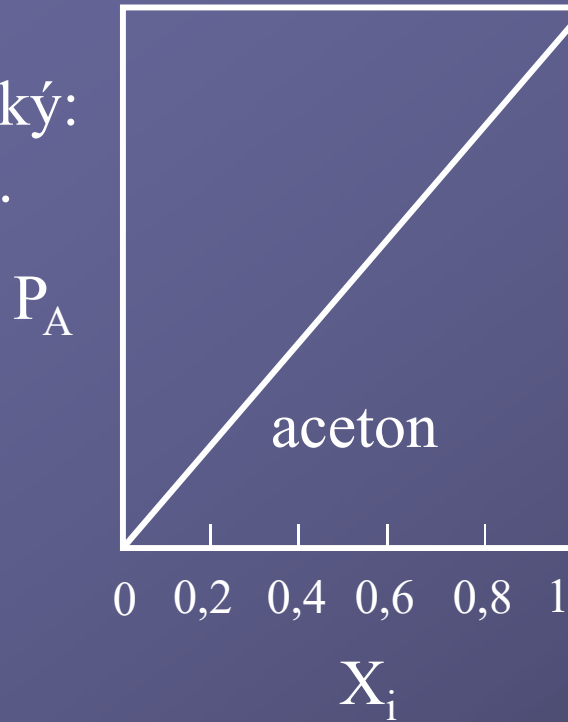


Směs dvou kapalin: aceton a toluen

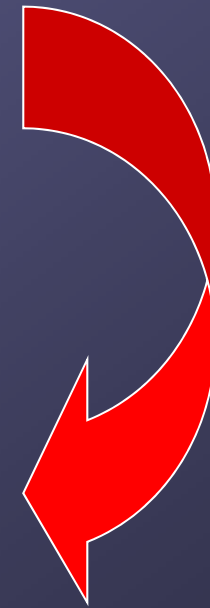
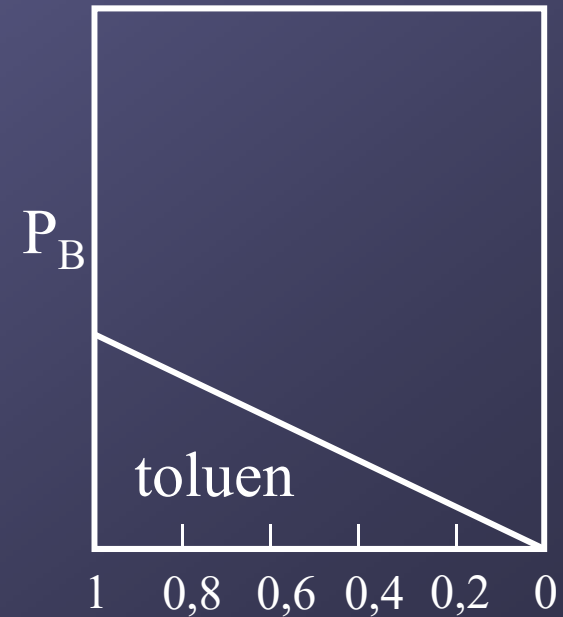
# Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

Izotermický:  
 $T = \text{konst.}$

**C = 2**

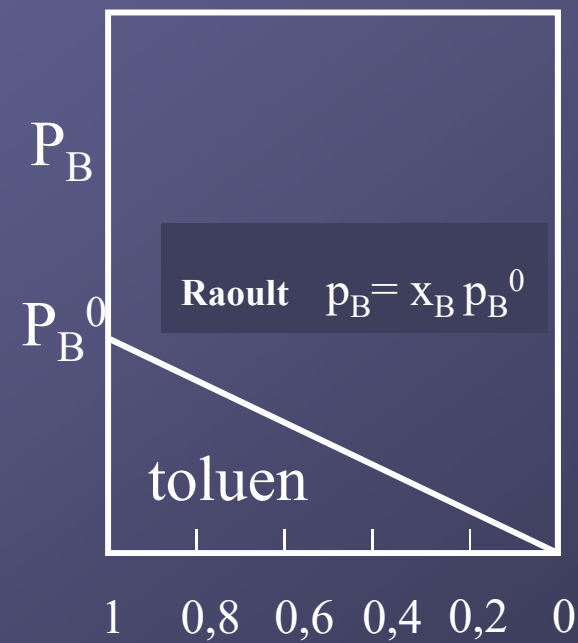
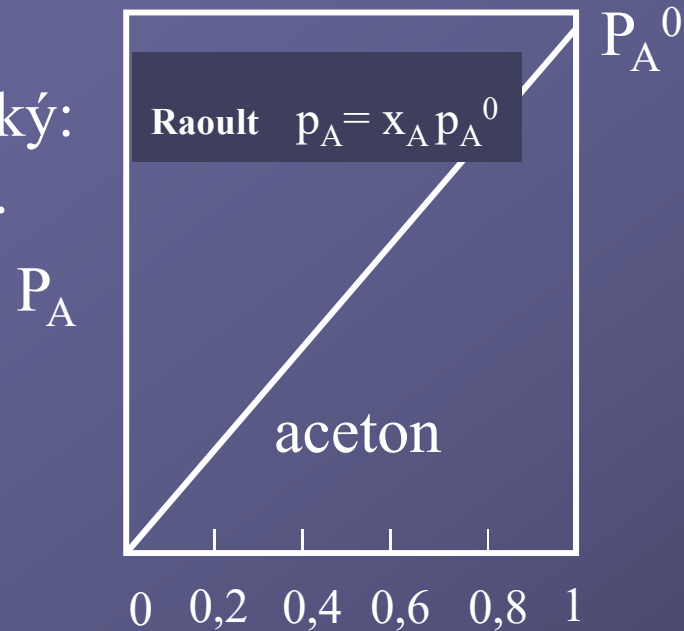


$$X_{\text{acetone}} + X_{\text{toluene}} = 1$$



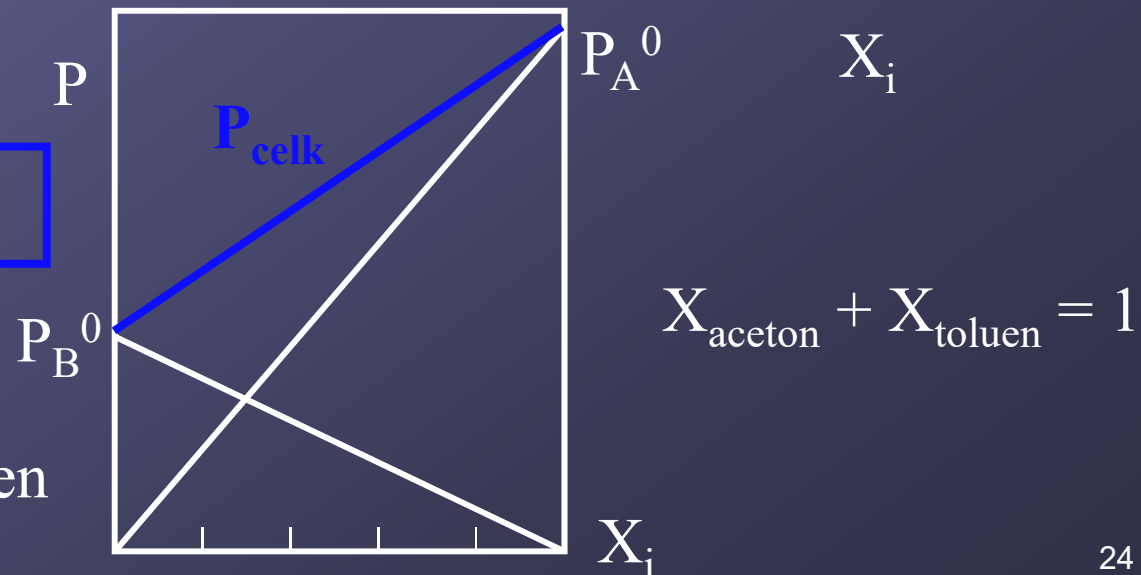
# Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

Izotermický:  
T = konst.



$$P_{\text{acetone}} + P_{\text{toluene}} = P_{\text{celk}}$$

Směs acetone a toluene





# Fázový diagram pro dvousložkovou soustavu

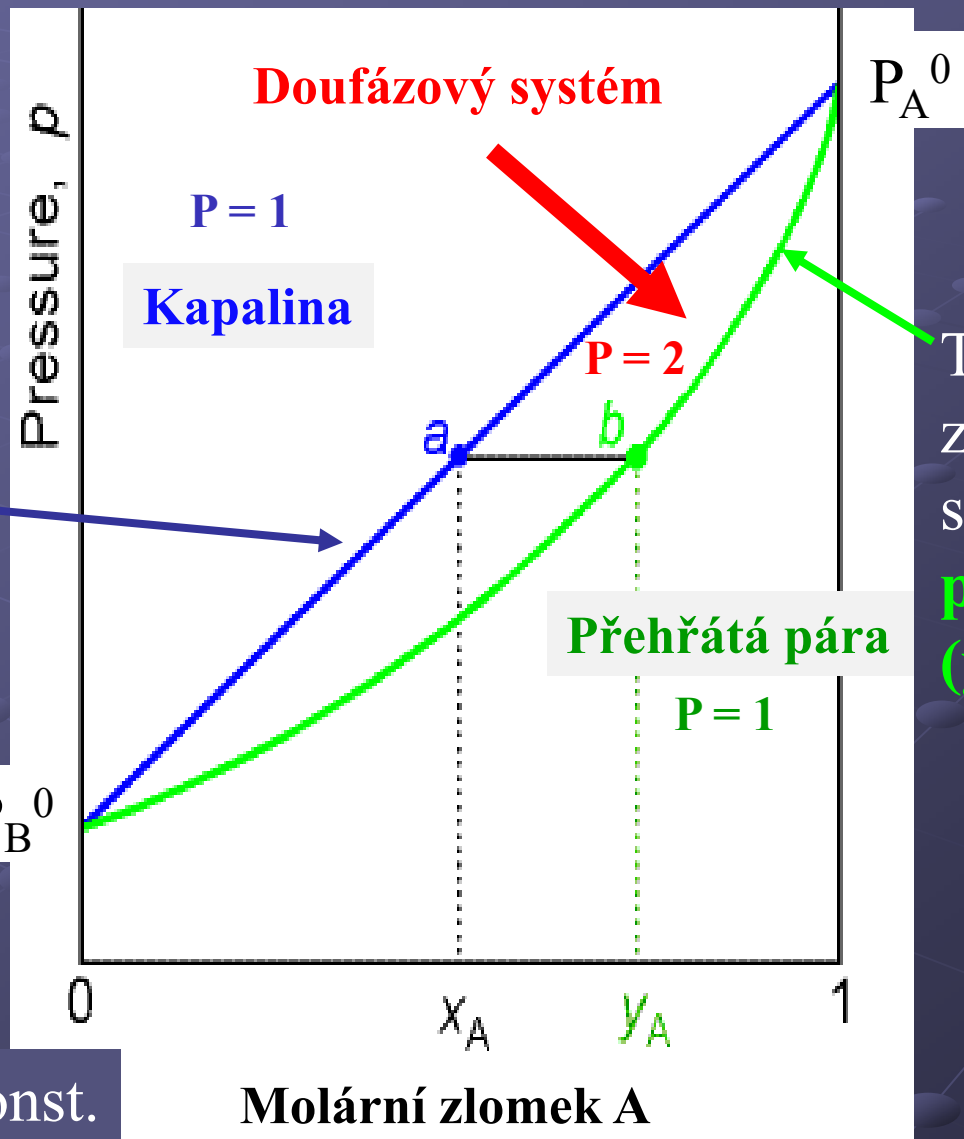
$$P + V = C + 2$$

$$C = 2$$

Tlak par v závislosti na složení **kapalné fáze** ( $x_A$ )

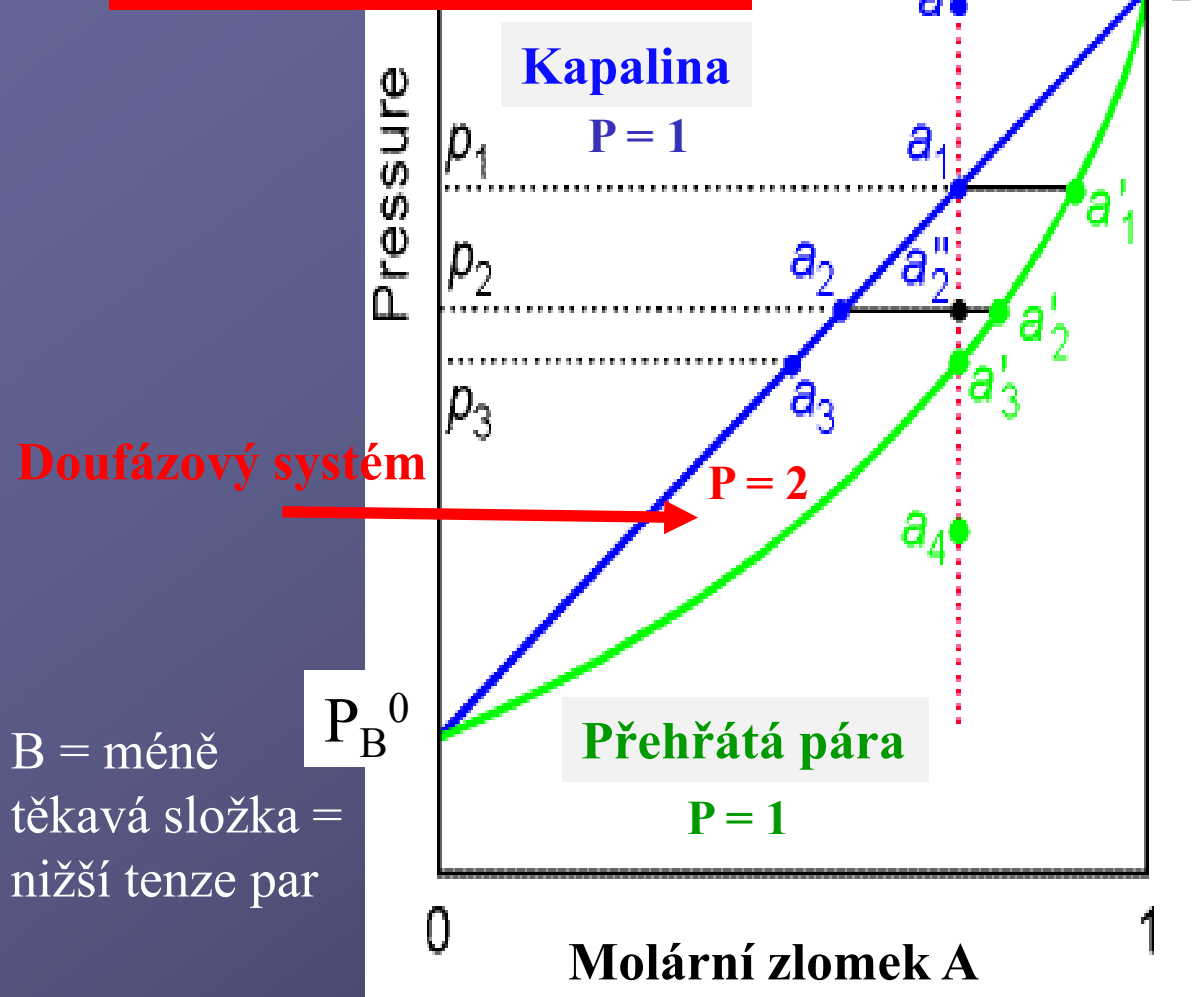
$$P_{\text{aceton}} + P_{\text{toluen}} = P_{\text{celk}}$$

Izotermický:  $T = \text{konst.}$



# Destilace za konstantní $T$ snižováním tlaku $p$

Izotermický:  $T = \text{konst.}$



$P_A^0$

A = těkavější složka  
= vyšší tenze par

Destilace:

$a \rightarrow a_1 \rightarrow a''_2 \rightarrow a'_3$

Pára je obohacena těkavější složkou  $a'_1$

$a_1 \rightarrow a''_2$

V kapalně fázi ubývá těkavější složka/roste podíl méně těkavé složky,  $\rightarrow a_2$

V bodě  $a'_3$

Vymizela kapalina, přítomna pouze pára

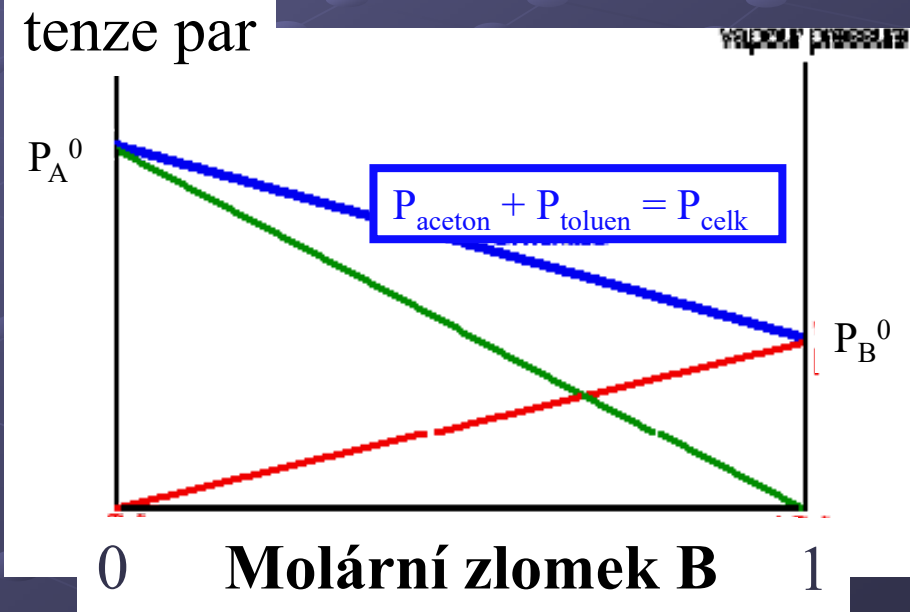
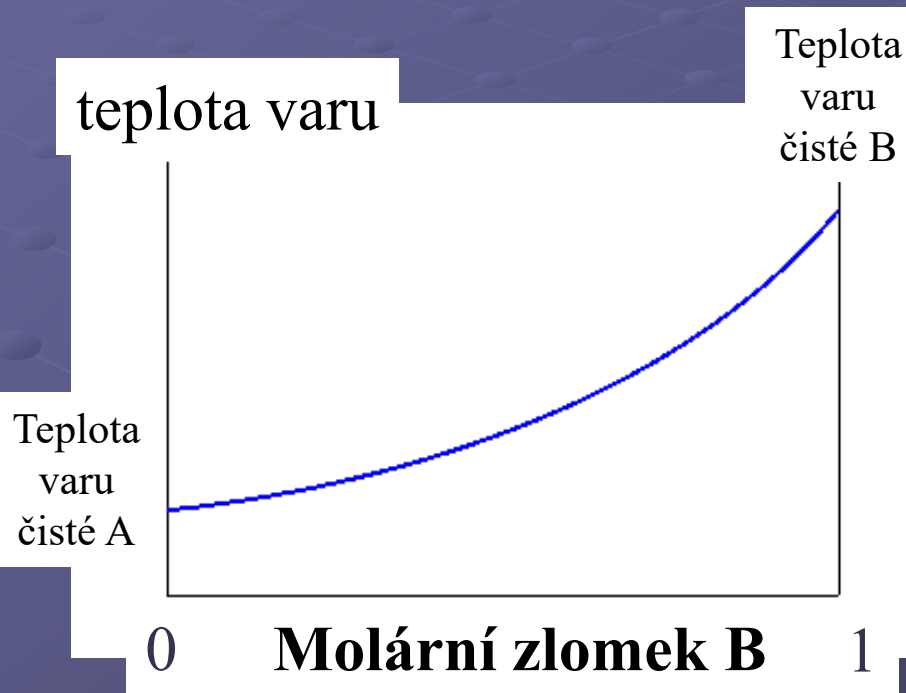
B = méně těkavá složka = nižší tenze par

$P_B^0$

# Fázové diagramy

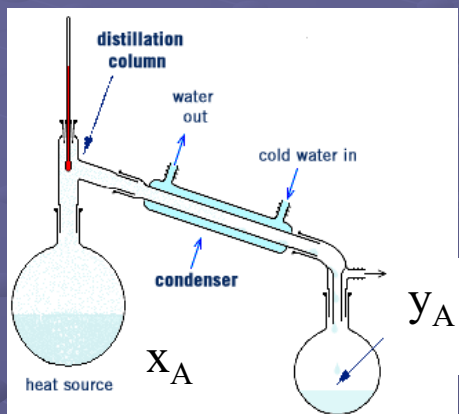
Izobarický:  $p = \text{konst.}$

Izotermický:  $T = \text{konst.}$



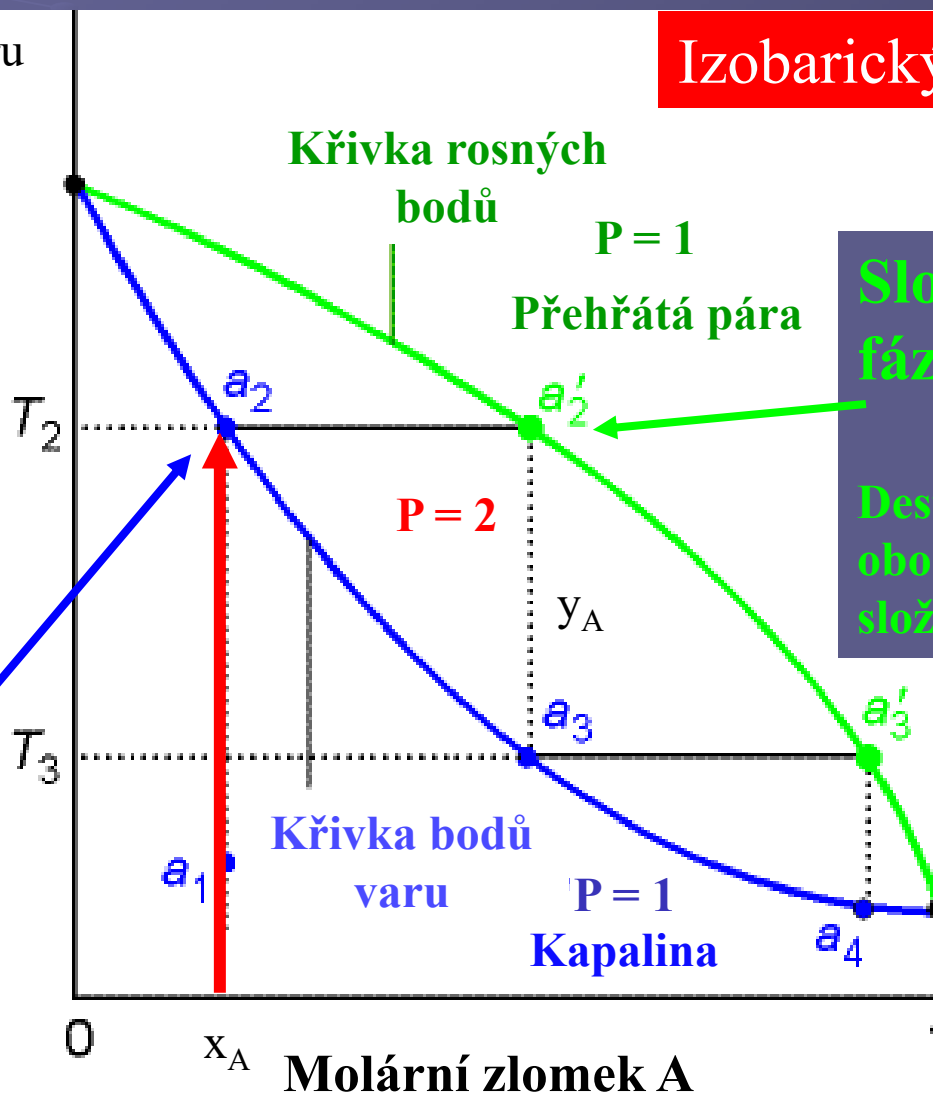
Těkavější složka A = vyšší tenze par = nižší teplota varu

# Destilace za konstantního $p$ zvyšováním $T$



Teplota varu  
čisté B

Izobarický:  $p = \text{konst.}$



Složení plynné  
fáze  $y_A$

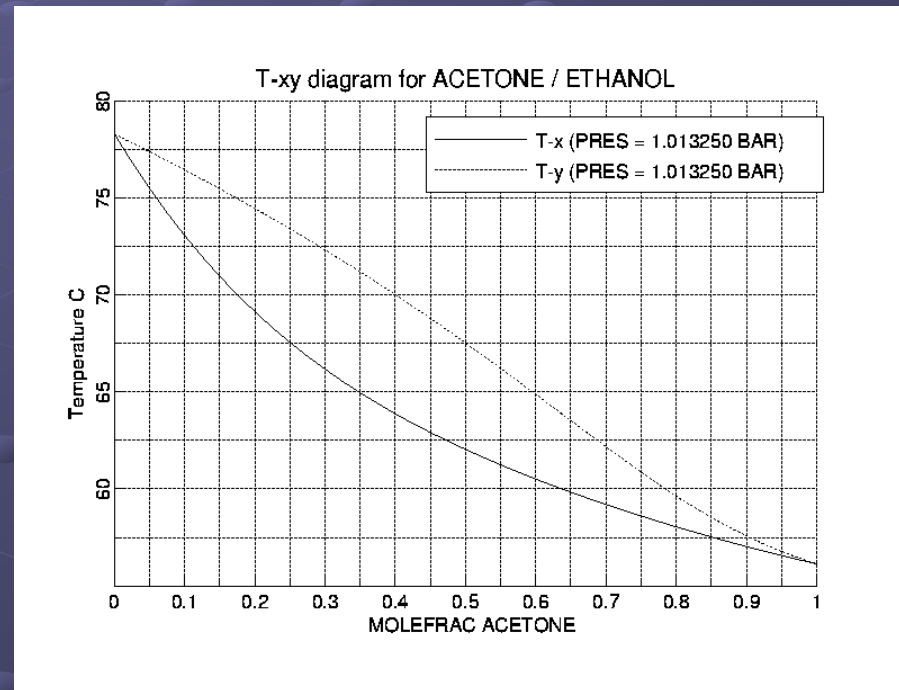
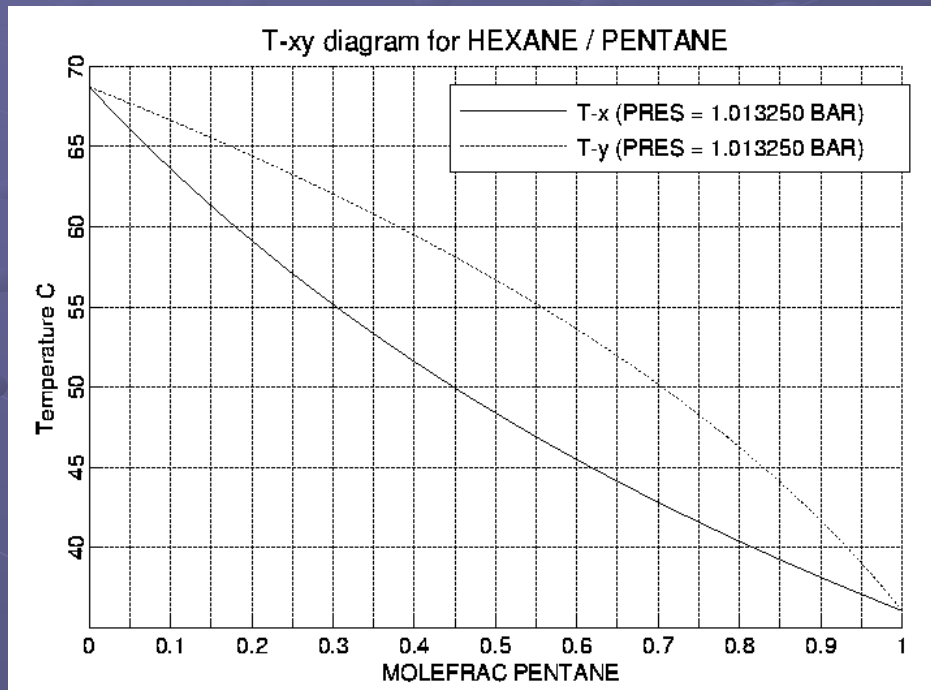
Destilát je  
obohacen těkavější  
složkou

Teplota varu v  
závislosti na  
složení kapalně  
fáze  $x_A$

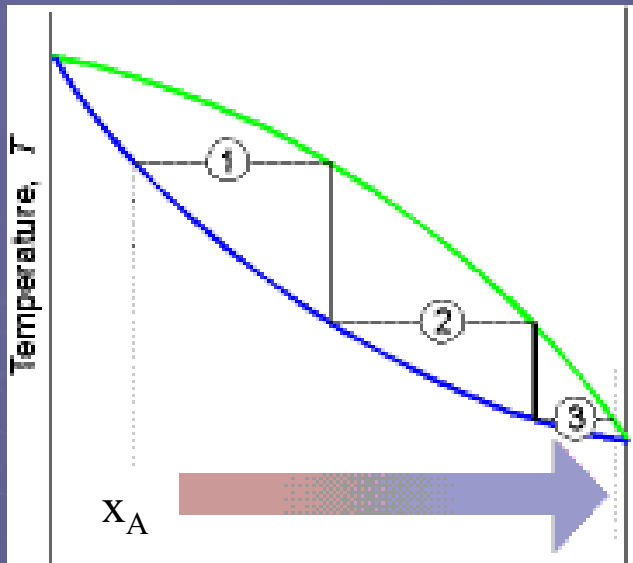
Teplota varu  
čisté A

# Izobarické fázové diagramy

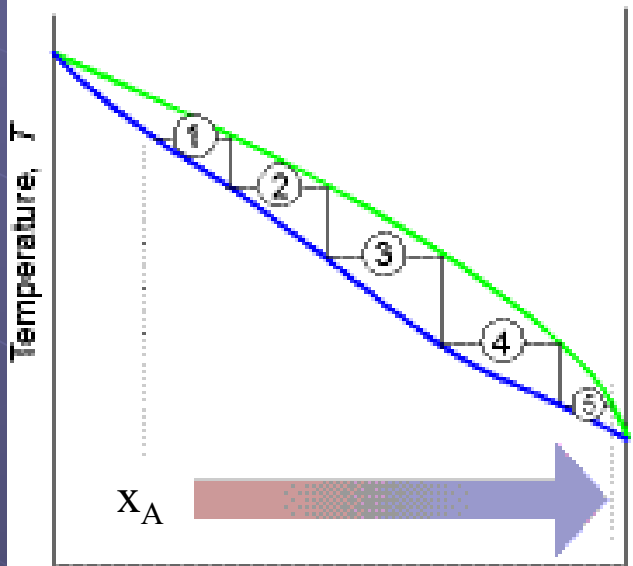
Izobarický:  $p = \text{konst.}$



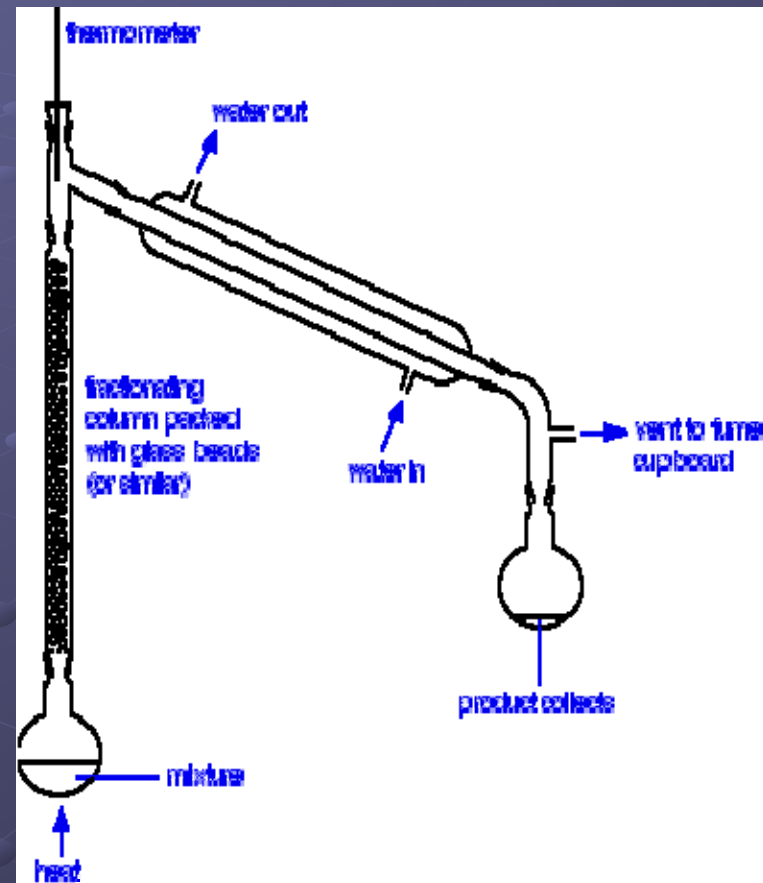
# Frakční destilace



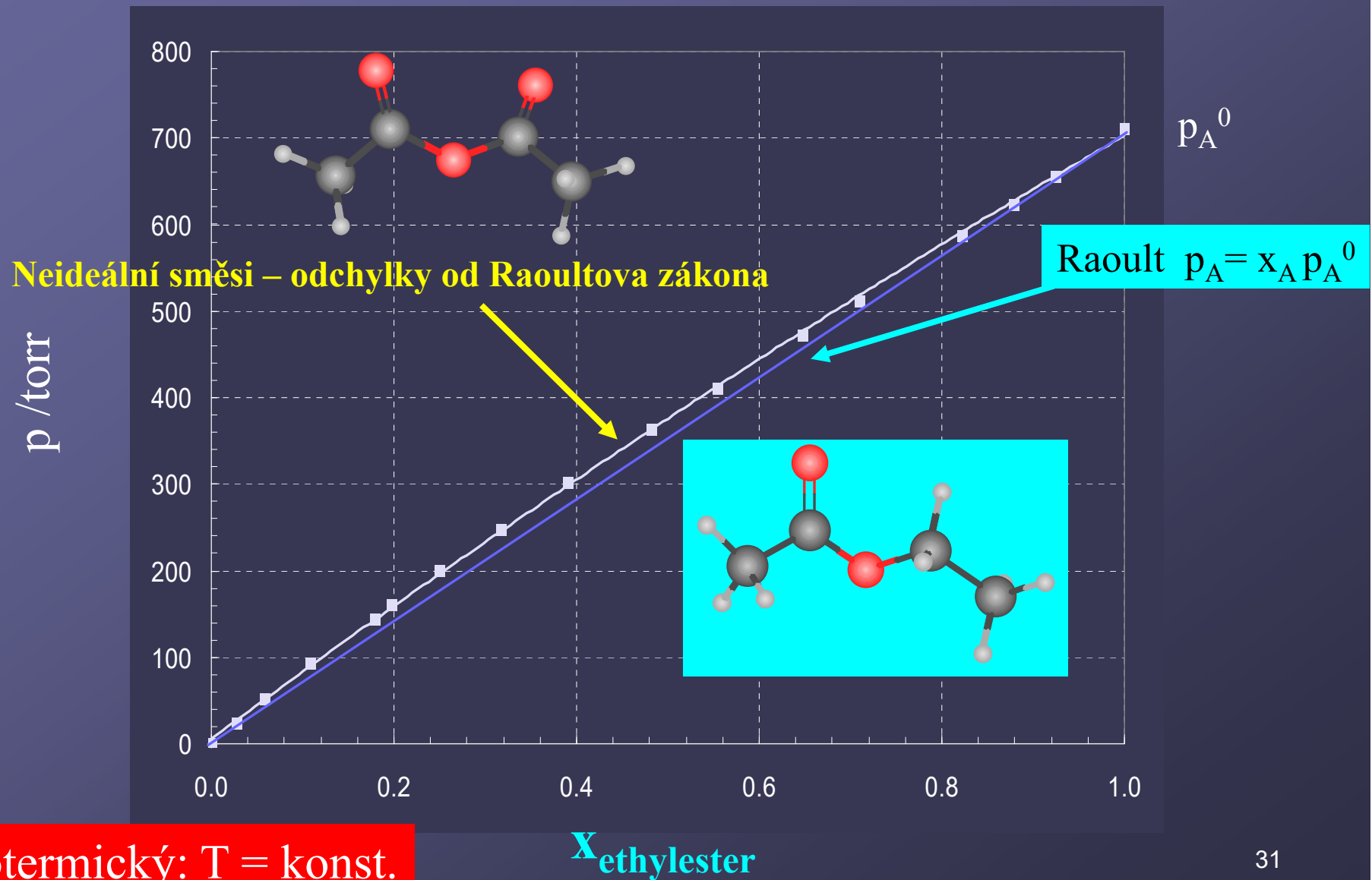
**B** Molární zlomek **A**



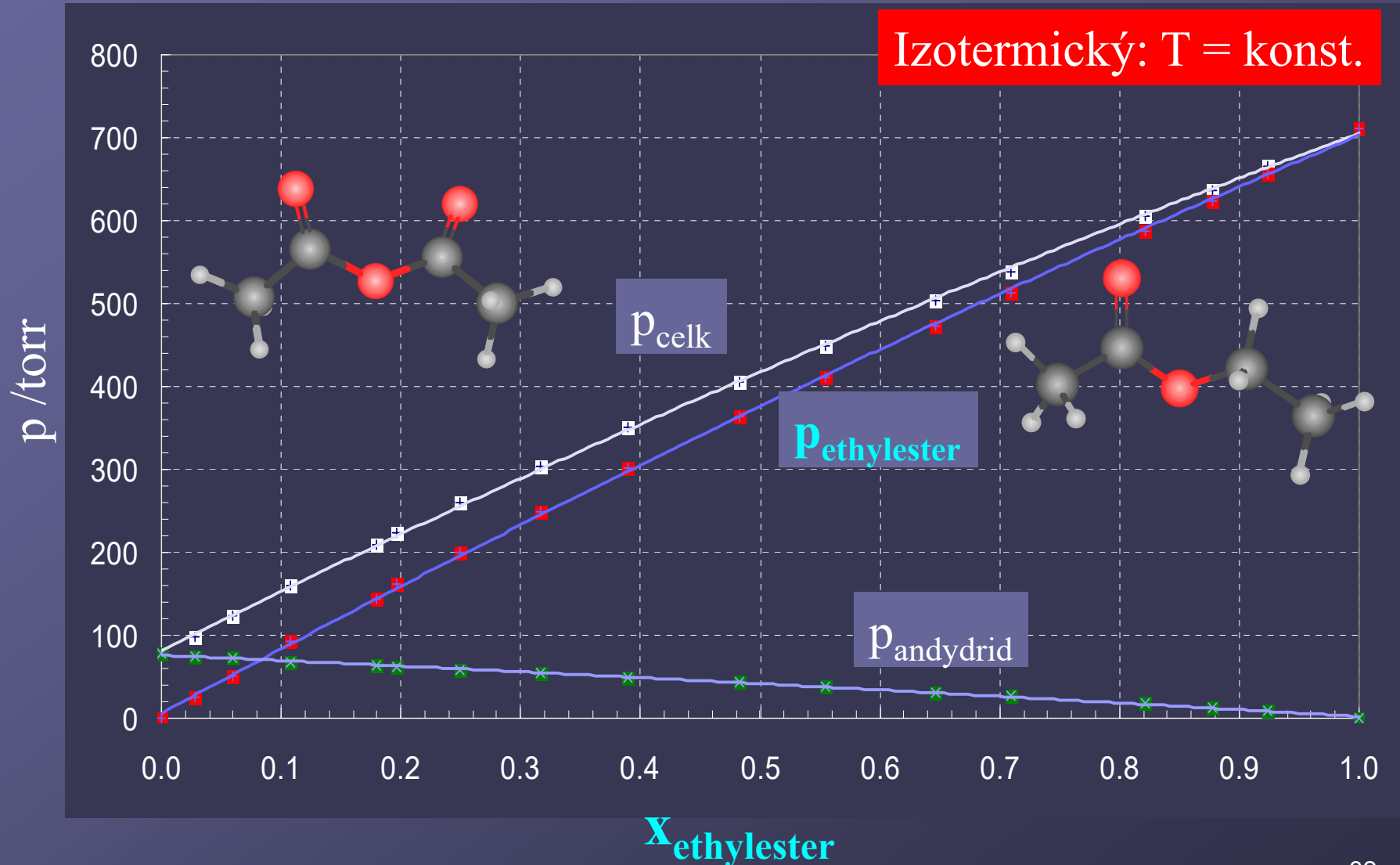
**B** Molární zlomek **A**



# Tenze par ethylesteru kys. octové v anhydridu kys. octové

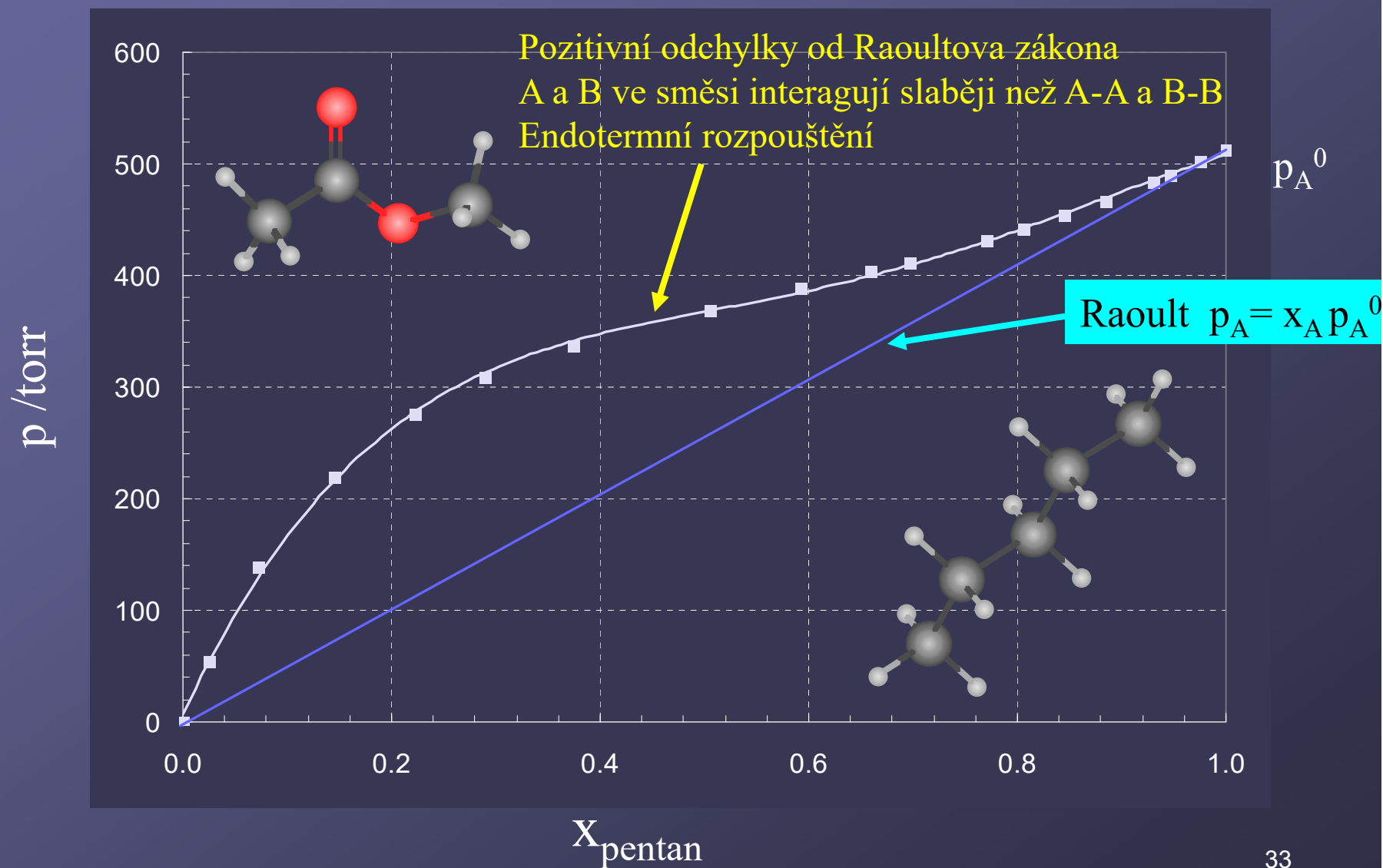


# Celkový tlak ethylesteru a anhydridu kys. octové





# n-Pentan v methylesteru kys. octové



# Raoultův a Henryho zákon

## Raoultův zákon

Tlak nasycené páry složky nad roztokem se mění lineárně s molárním zlomkem

$$\text{látky v roztoku } p_A = x_A p_A^0$$

Raoultův zákon platí nejpřesněji pro  $x_A \rightarrow 1$

Největší odchylky pro  $x_A \rightarrow 0$

## Henryho zákon

Molární rozpustnost je úměrná parciálnímu tlaku složky nad roztokem

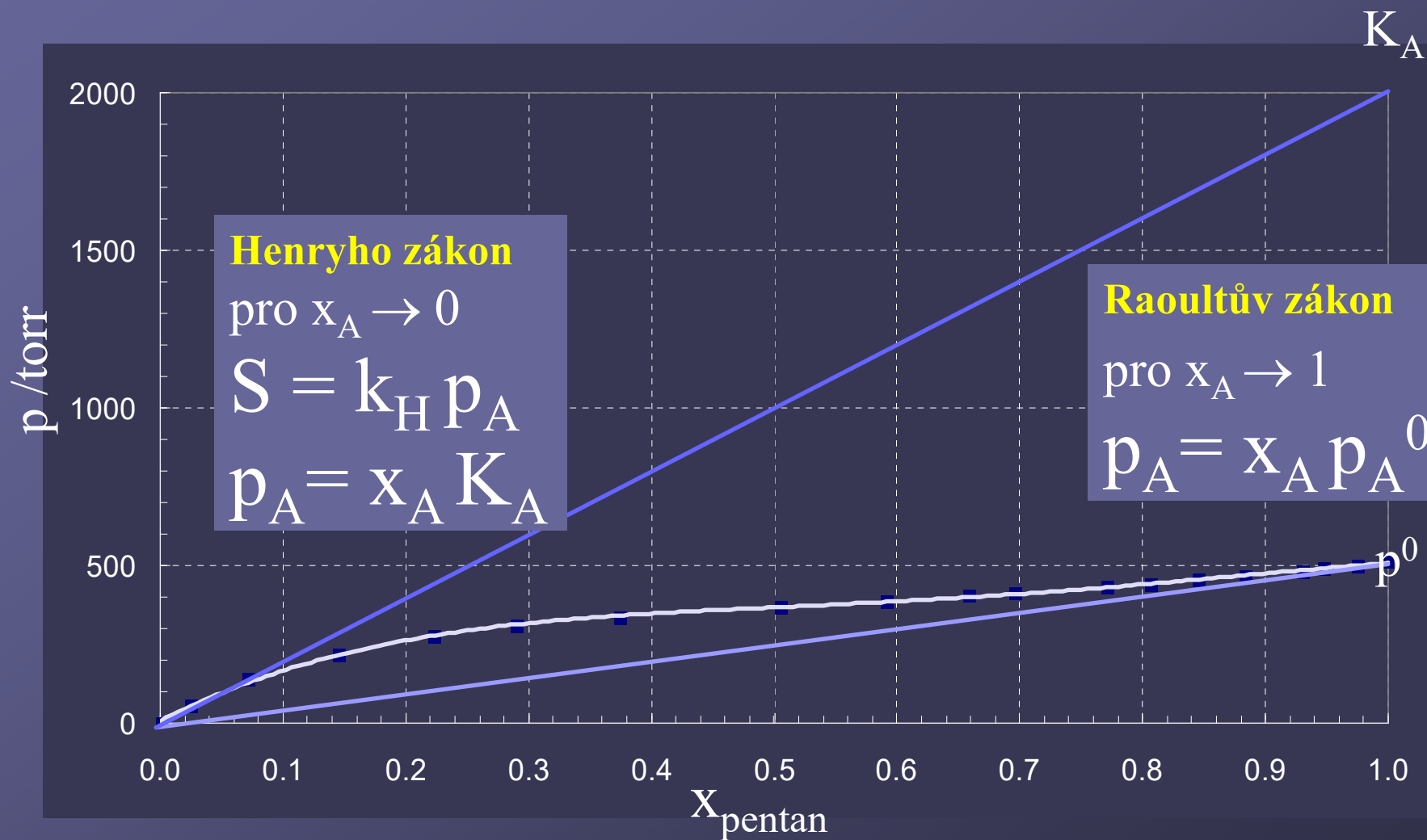
= tlak páry složky je úměrný molárnímu zlomku v roztoku

$$S = k_H p_A \quad \longrightarrow \quad p_A = x_A K_A$$

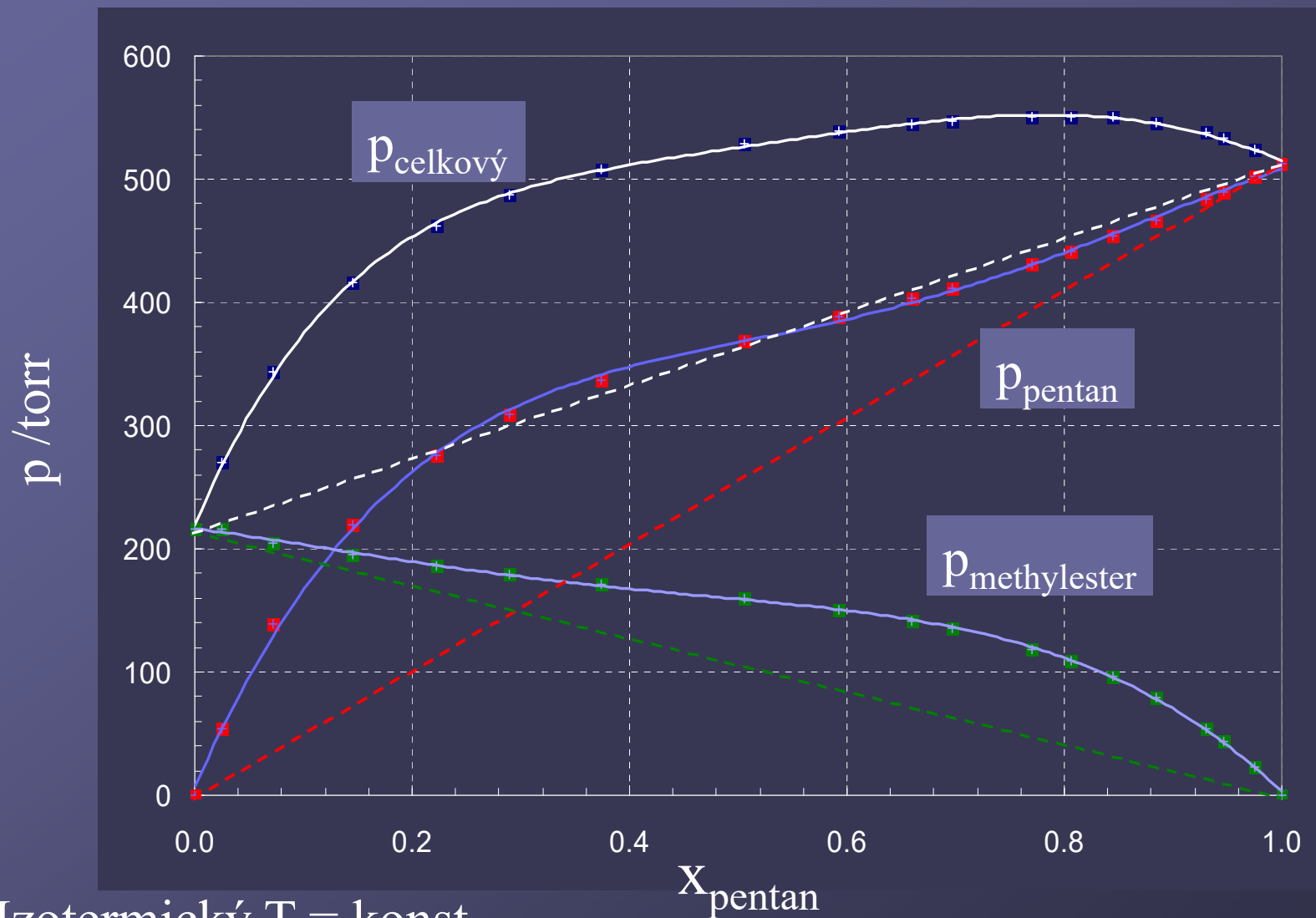
Henryho zákon platí nejpřesněji pro  $x_A \rightarrow 0$

$K_A$  hypotetický tlak par čisté A, kdyby se chovala v čistém stavu stejně jako v nekonečně zředěném roztoku

# Raoultův a Henryho zákon



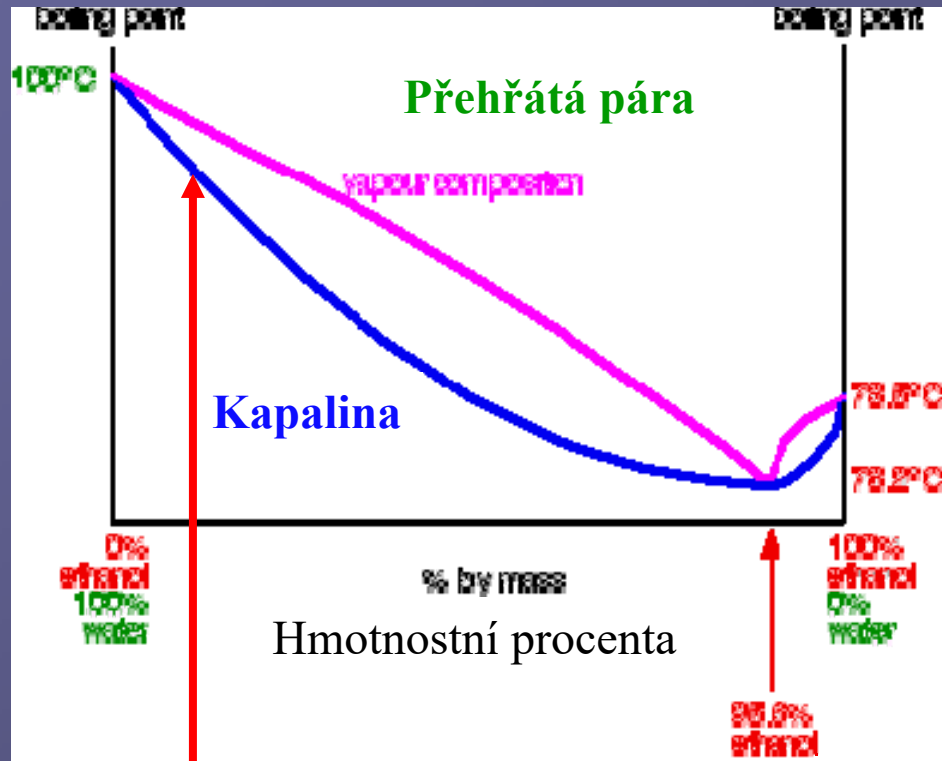
# n-Pentan a methylester kys. octové



Izotermický  $T = \text{konst.}$

# Azeotropická směs s min. $T_v$ (max. p)

teplota varu



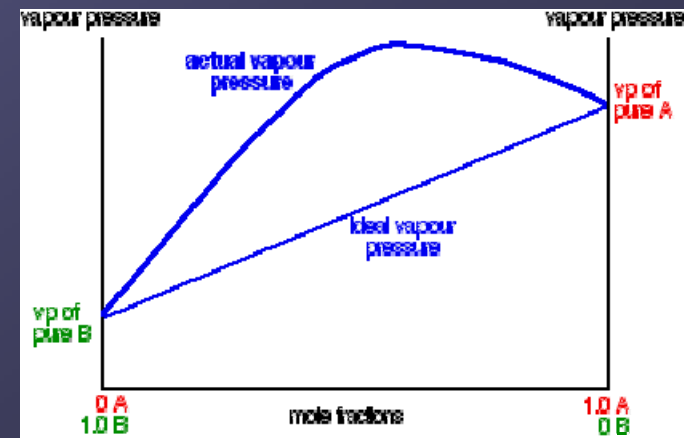
Frakční destilací lze získat ethanol max. 95,6% v destilátu a čistou vodu v destilačním zbytku

Ethanol – voda

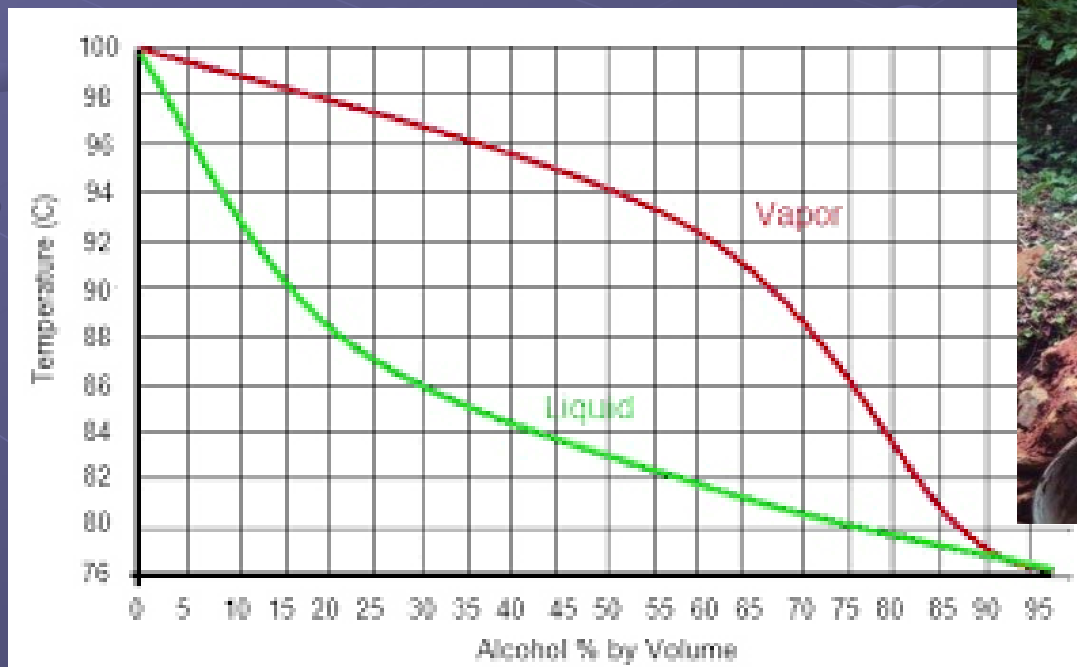
$$w = 95,6\% \quad x = 0,895$$

Pozitivní odchylky od Raoultova zákona, A a B ve směsi interagují slaběji než A-A a B-B, směs se vypařuje snadněji než čisté látky

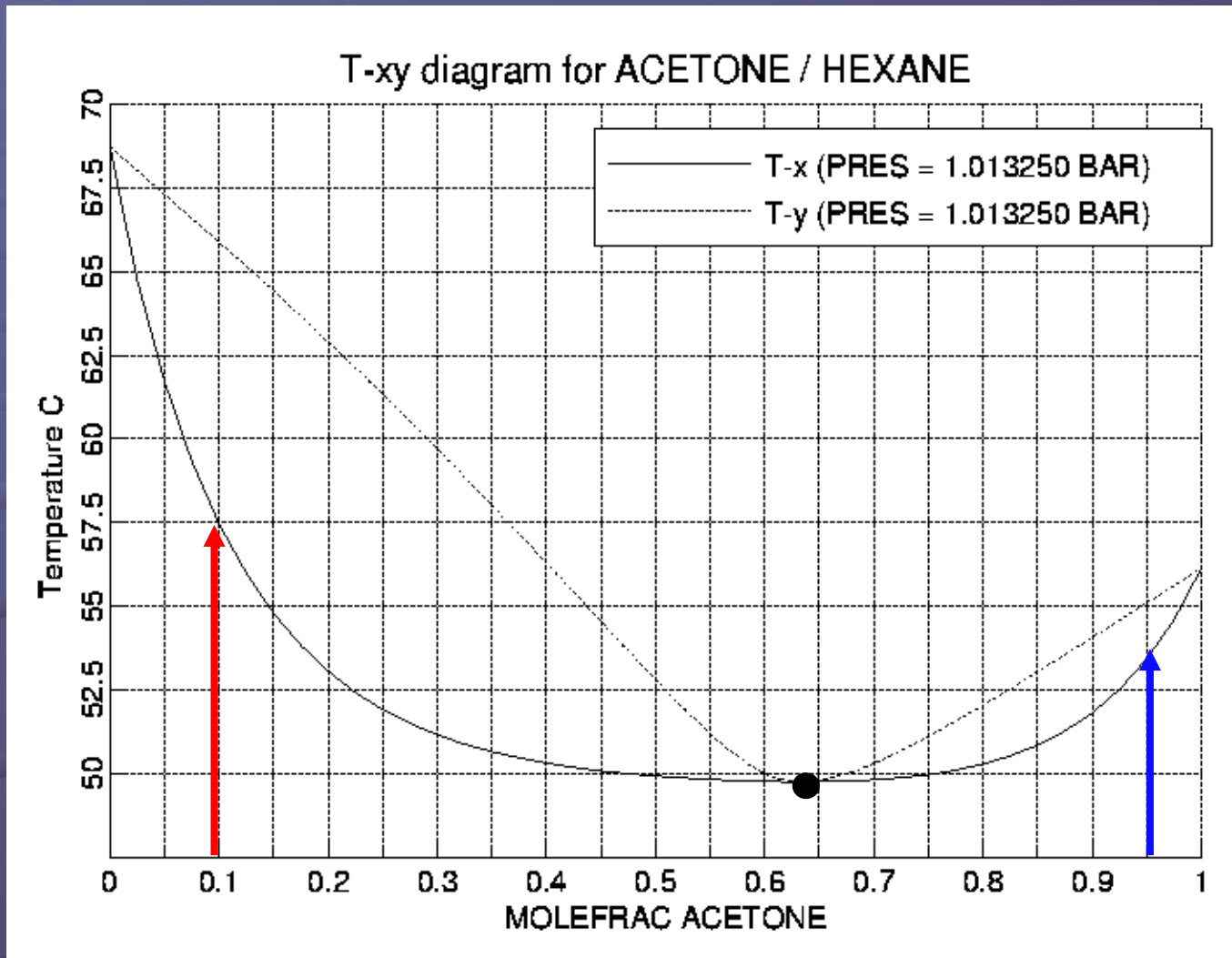
Endotermní rozpouštění



# Frakční destilace azeotropické směsi ethanol – voda



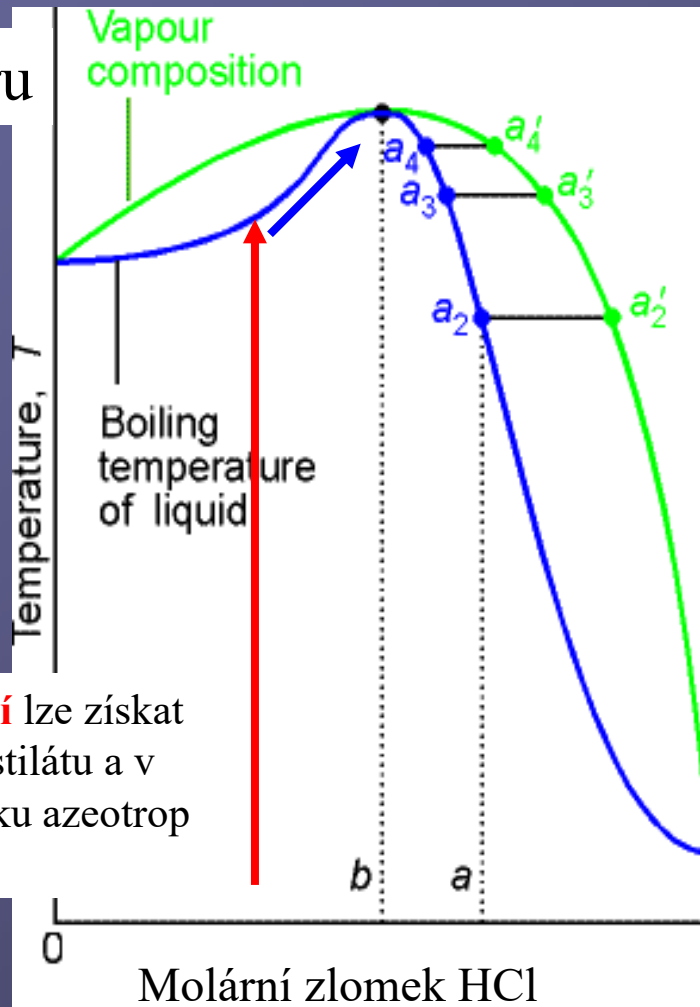
# Azeotropická směs s min. $T_v$ (max. p)





# Azeotropická směs s max. $T_v$ (min. $p$ )

teplota varu

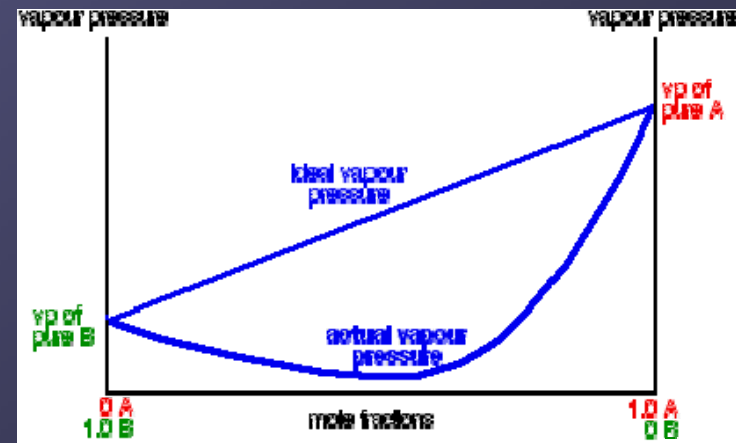


**Frakční destilací** lze získat čistou vodu v destilátu a v destilačním zbytku azeotrop HCl 20,2%

HCl – voda  
108,584 °C  
20,222 % HCl

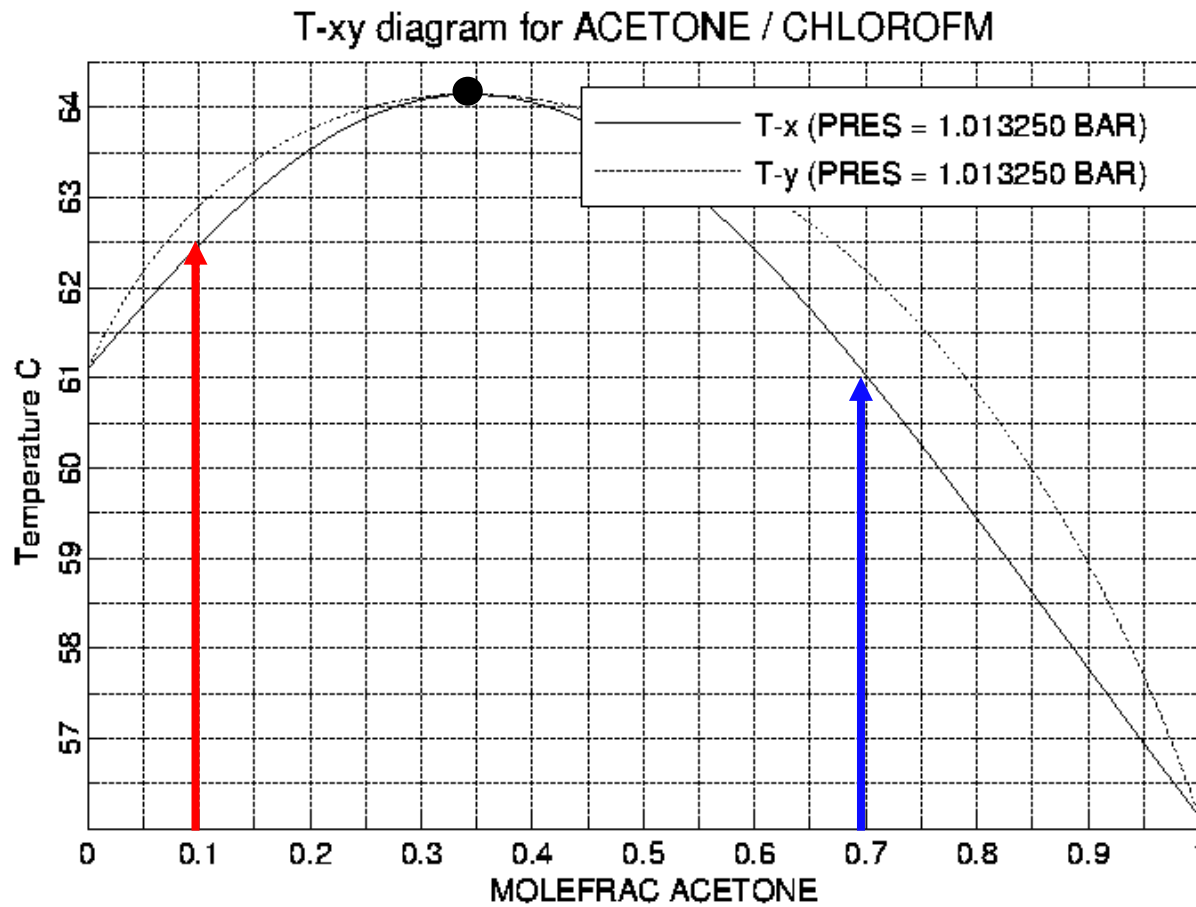
Negativní odchylky od Raoultova zákona, A a B ve směsi interagují silněji než A-A a B-B

Exotermní rozpouštění



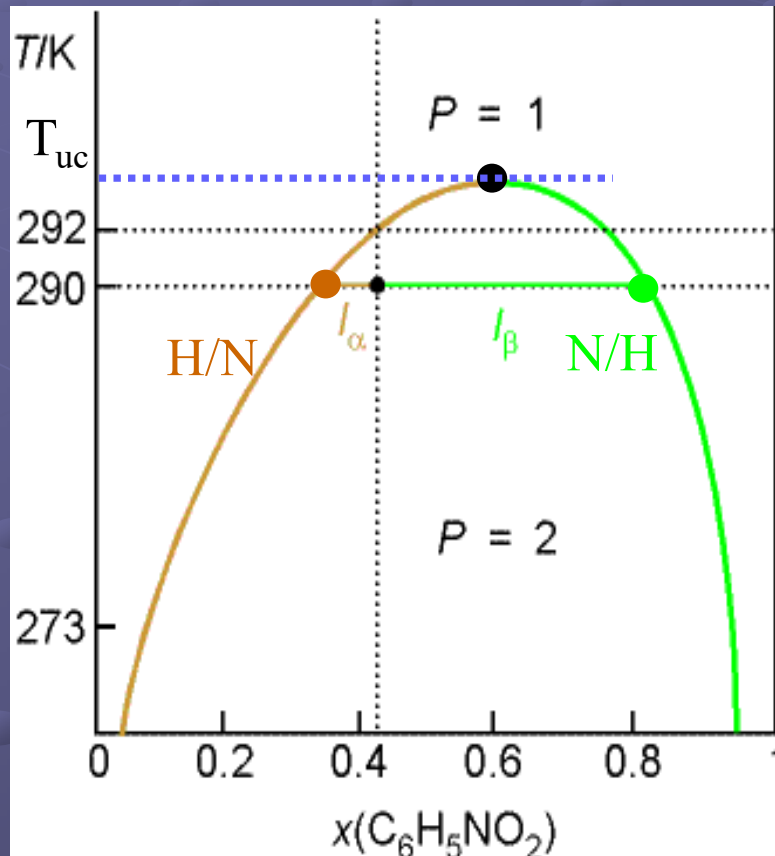


# Azeotropická směs s max. $T_v$ (min. p)

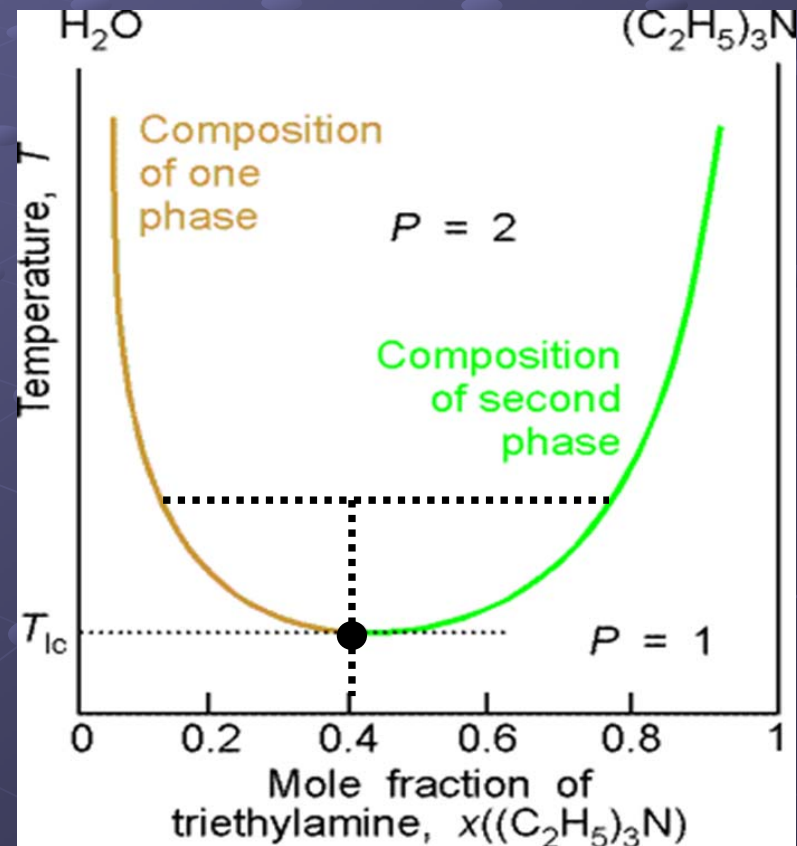


# Omezeně mísitelné kapaliny

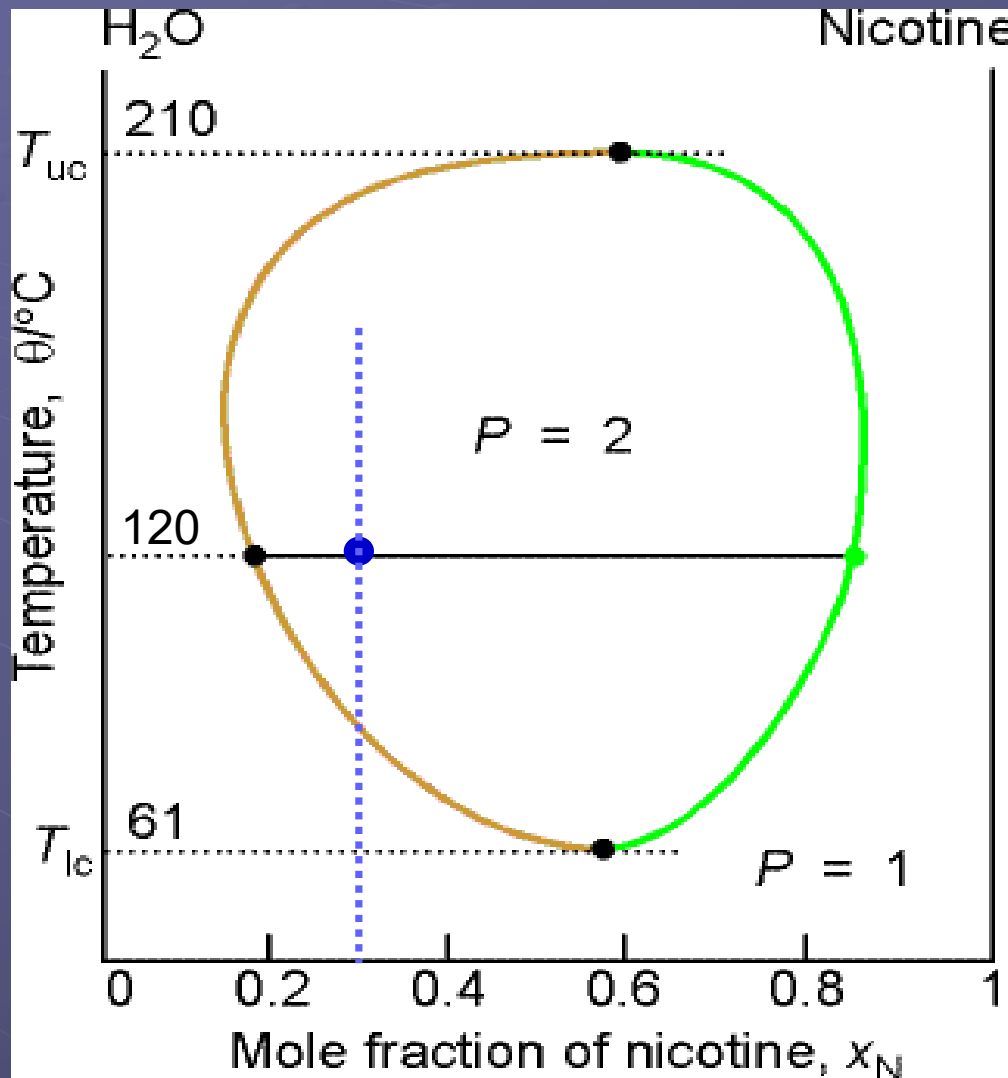
Hexan - nitrobenzen  
Horní kritická teplota,  $T_{uc}$



Voda - triethylamin  
Dolní kritická teplota,  $T_{lc}$



# Omezeně mísitelné kapaliny



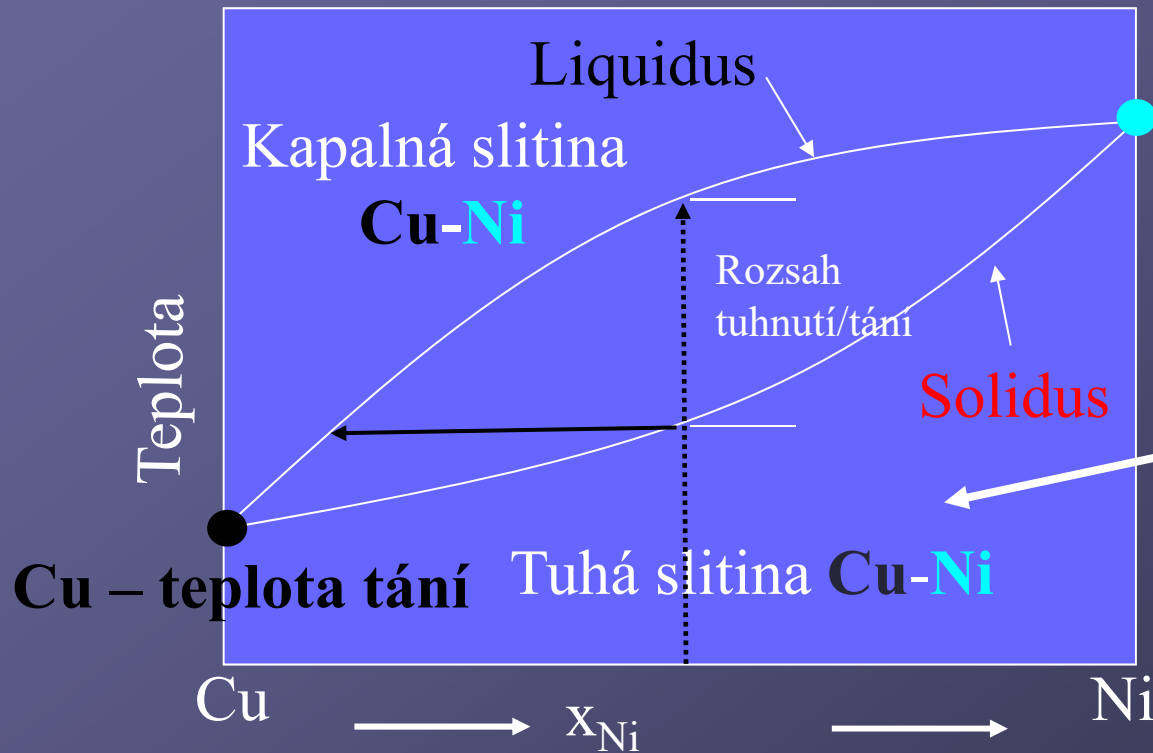
Voda - nikotin

Dolní a horní  
kritická teplota

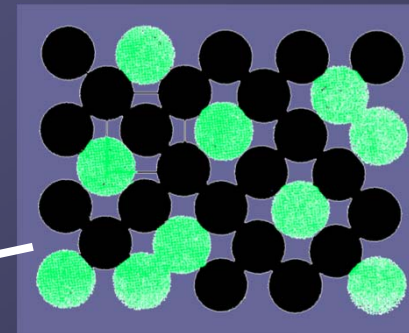
# Dvě složky dokonale mísitelné v (l) i (s)

Izobarický fázový diagram:  $p = \text{konst.}$

Substituční slitina Cu-Ni  
Pevný roztok

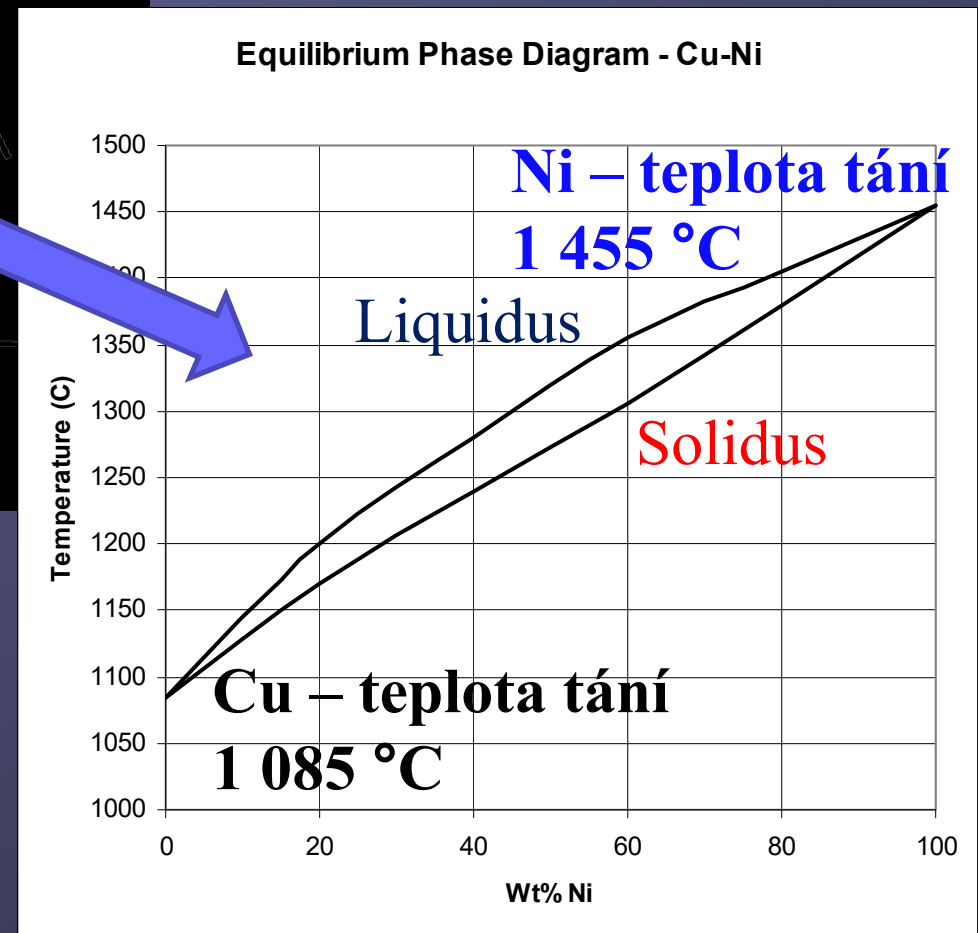
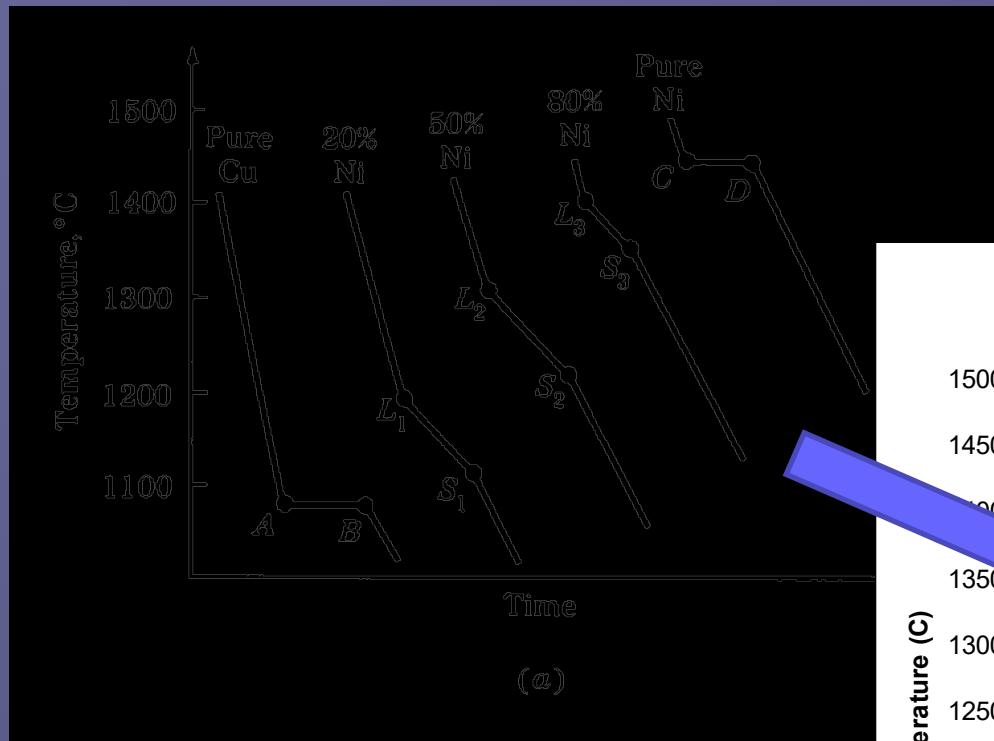


Ni – teplota tání



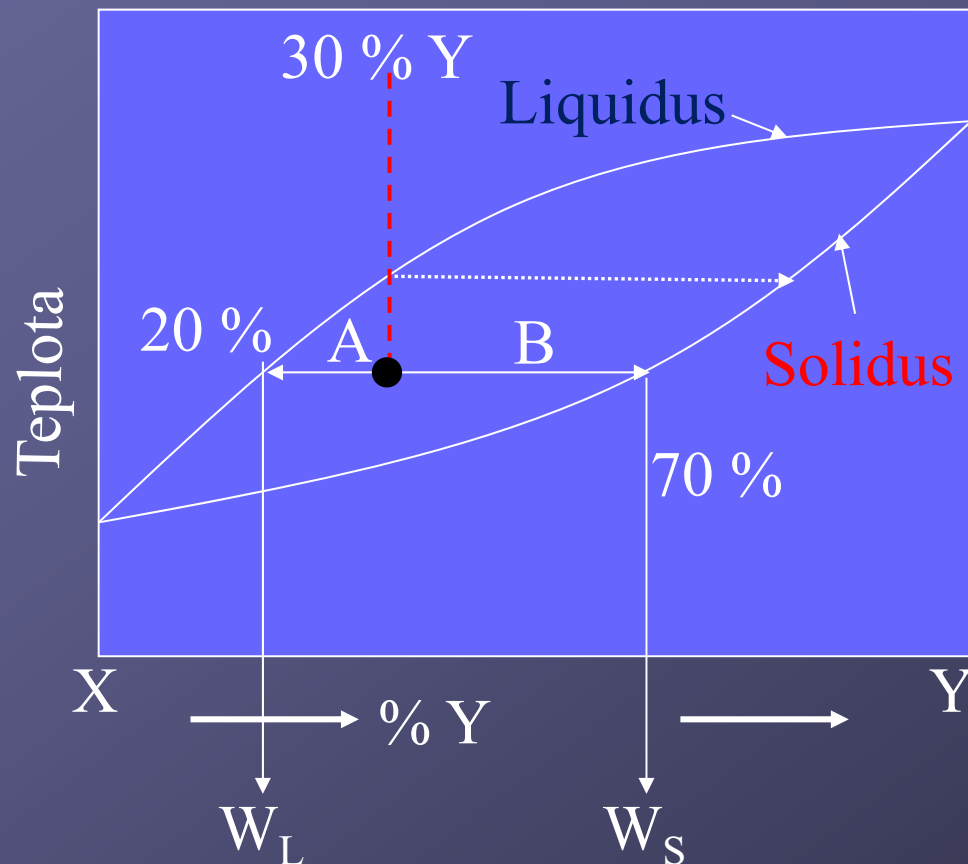
- Poloměry  $\pm 15\%$
- Podobné elektronegativity
- Podobné mocenství
- Stejná krystalová struktura

# Křivky tuhnutí slitiny Cu-Ni



# Pákové pravidlo

Hmotnostní poměr kapalné  $W_L$  a pevné fáze  $W_S$



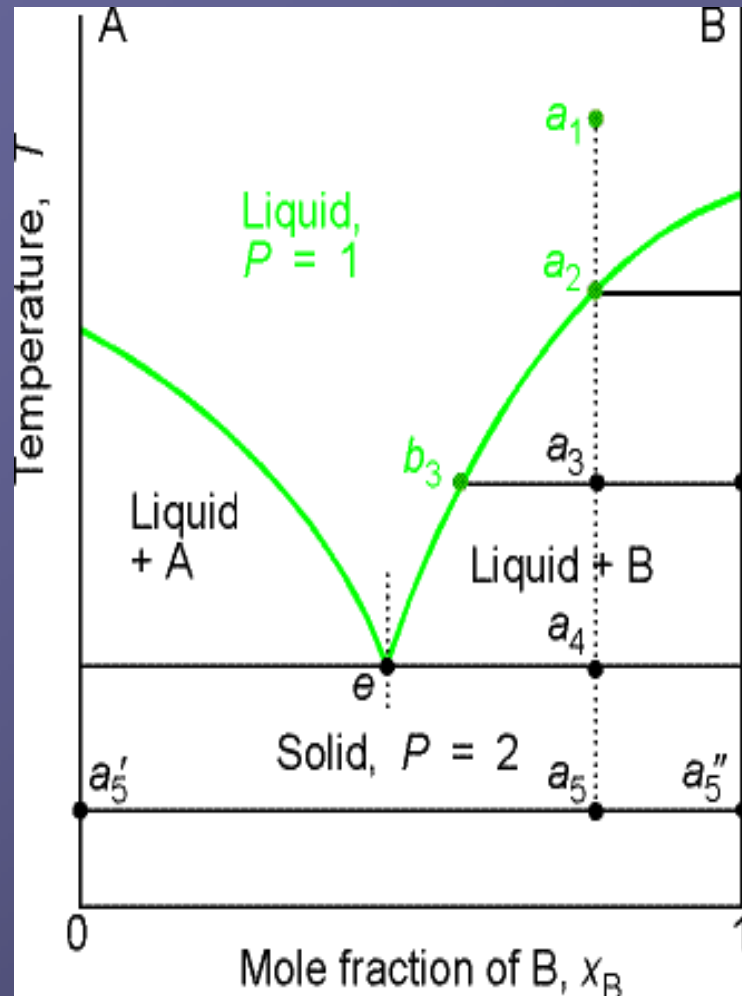
$$W_S = A / (A + B)$$

$$\%W_S = \frac{30 - 20}{70 - 20} * 100$$

$$W_L = B / (A + B)$$

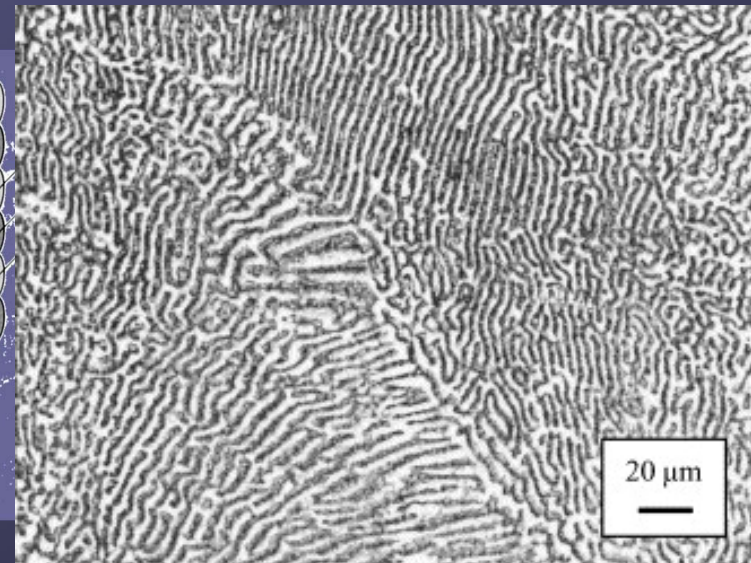
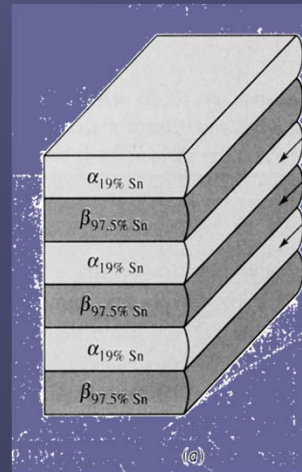
$$\%W_L = \frac{70 - 30}{70 - 20} * 100$$

# Dvě složky dokonale mísitelné v (l) a dokonale nemísitelné v (s)



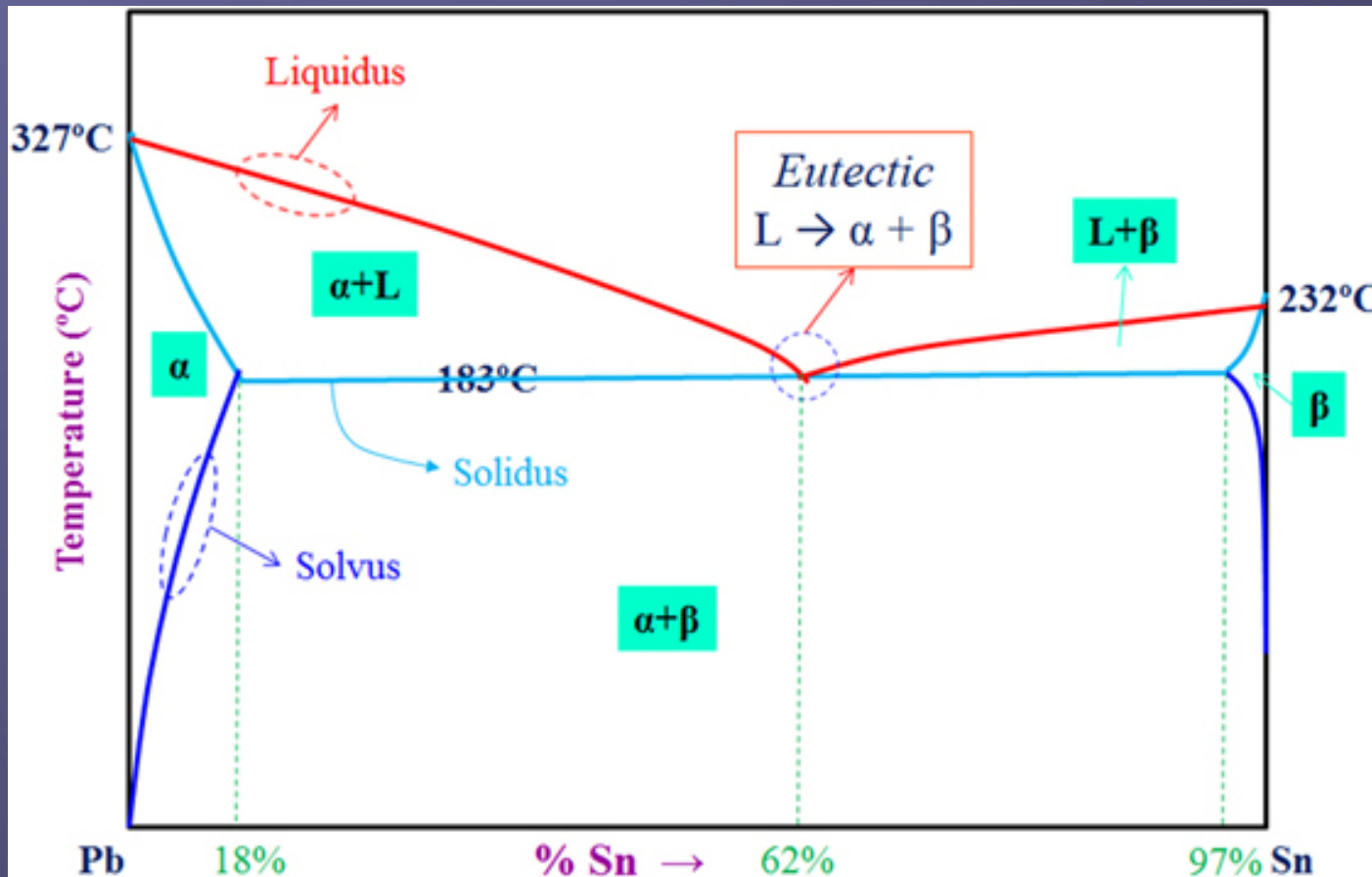
## Eutektikum

Při eutektickém složení taje směs při nejnižší teplotě přímo na kapalinu



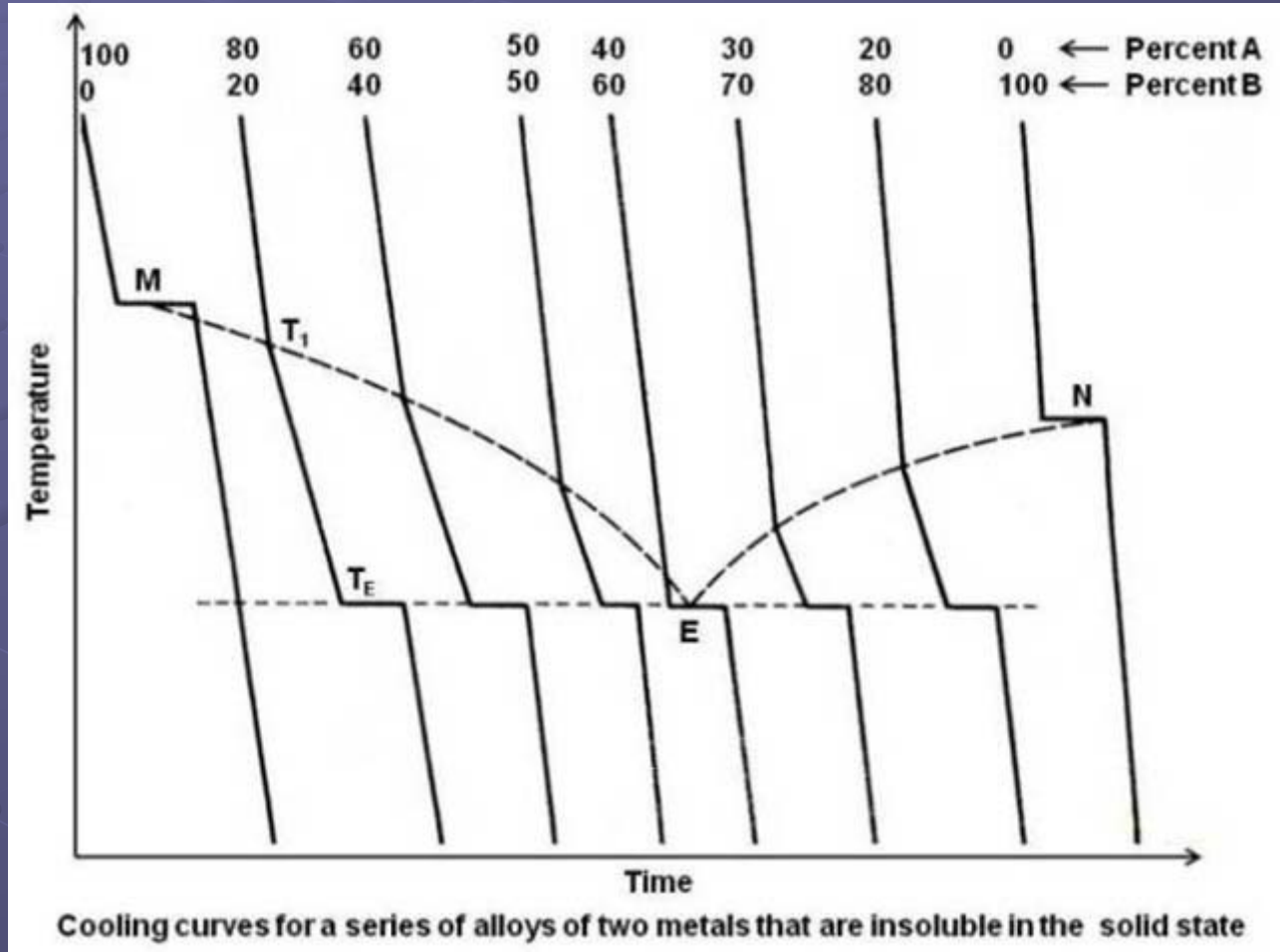
# Pb-Sn pájka

Pájka (Pb 38%) taje při 183 °C  
cín 232 °C a olovo 327 °C

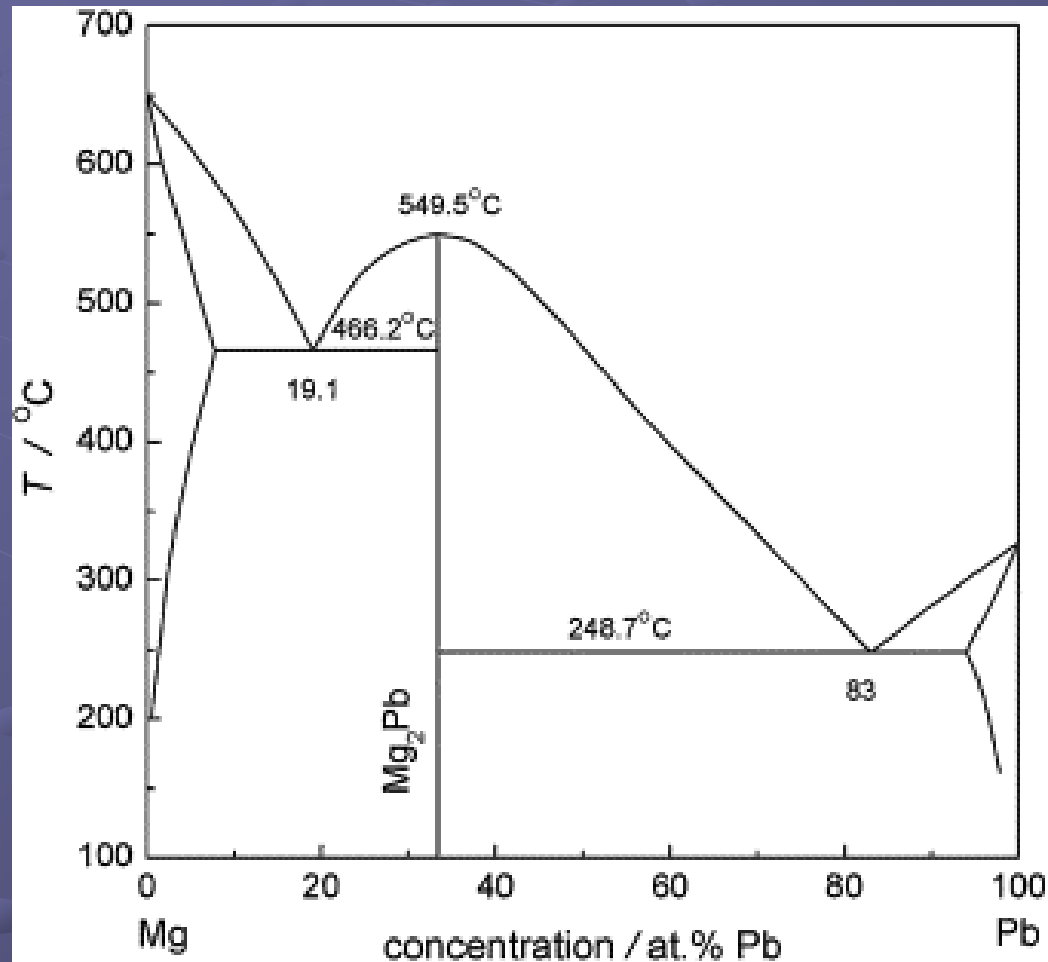




# Termická analýza eutektika



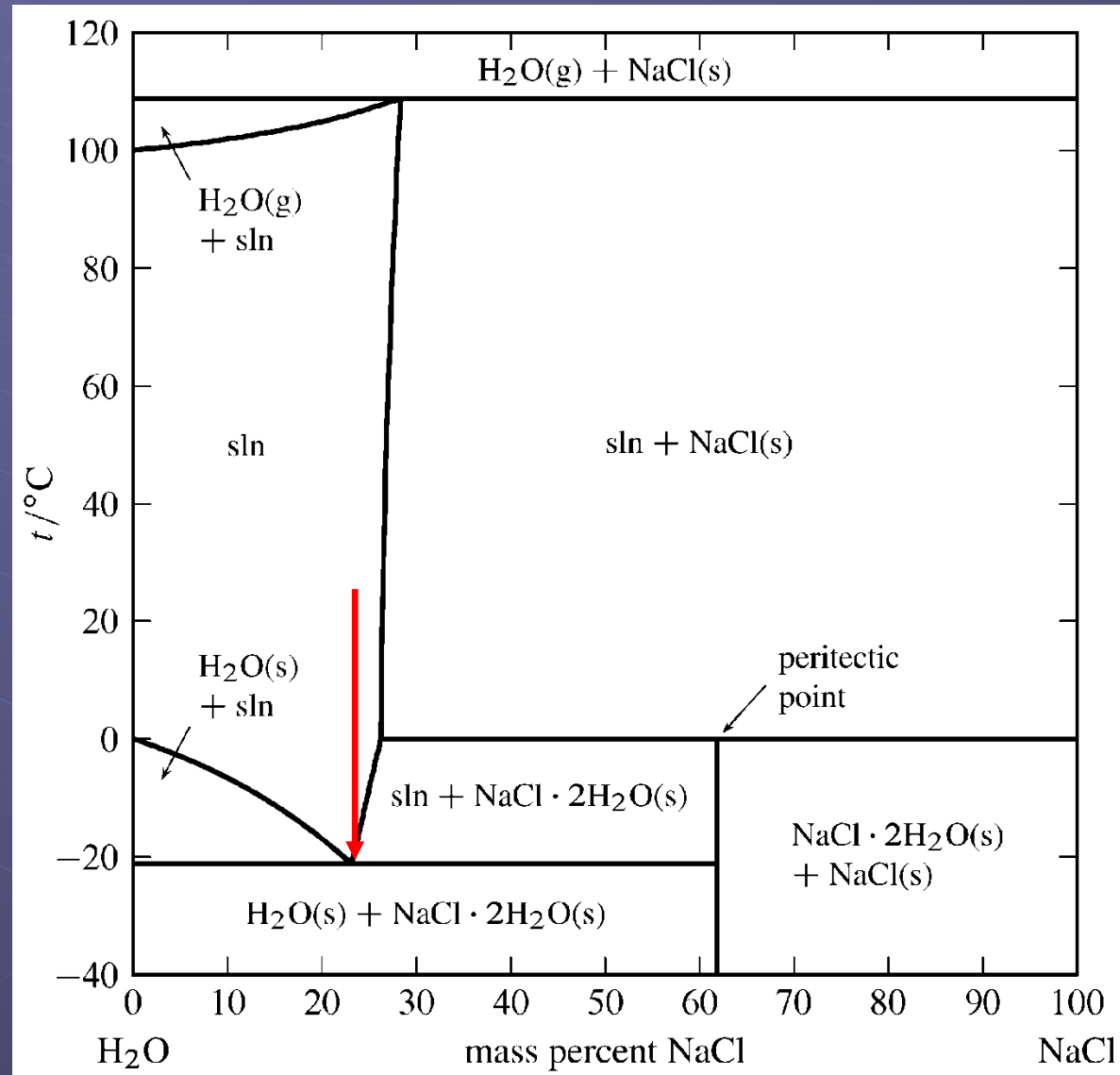
# Fázový diagram intermetalické sloučeniny



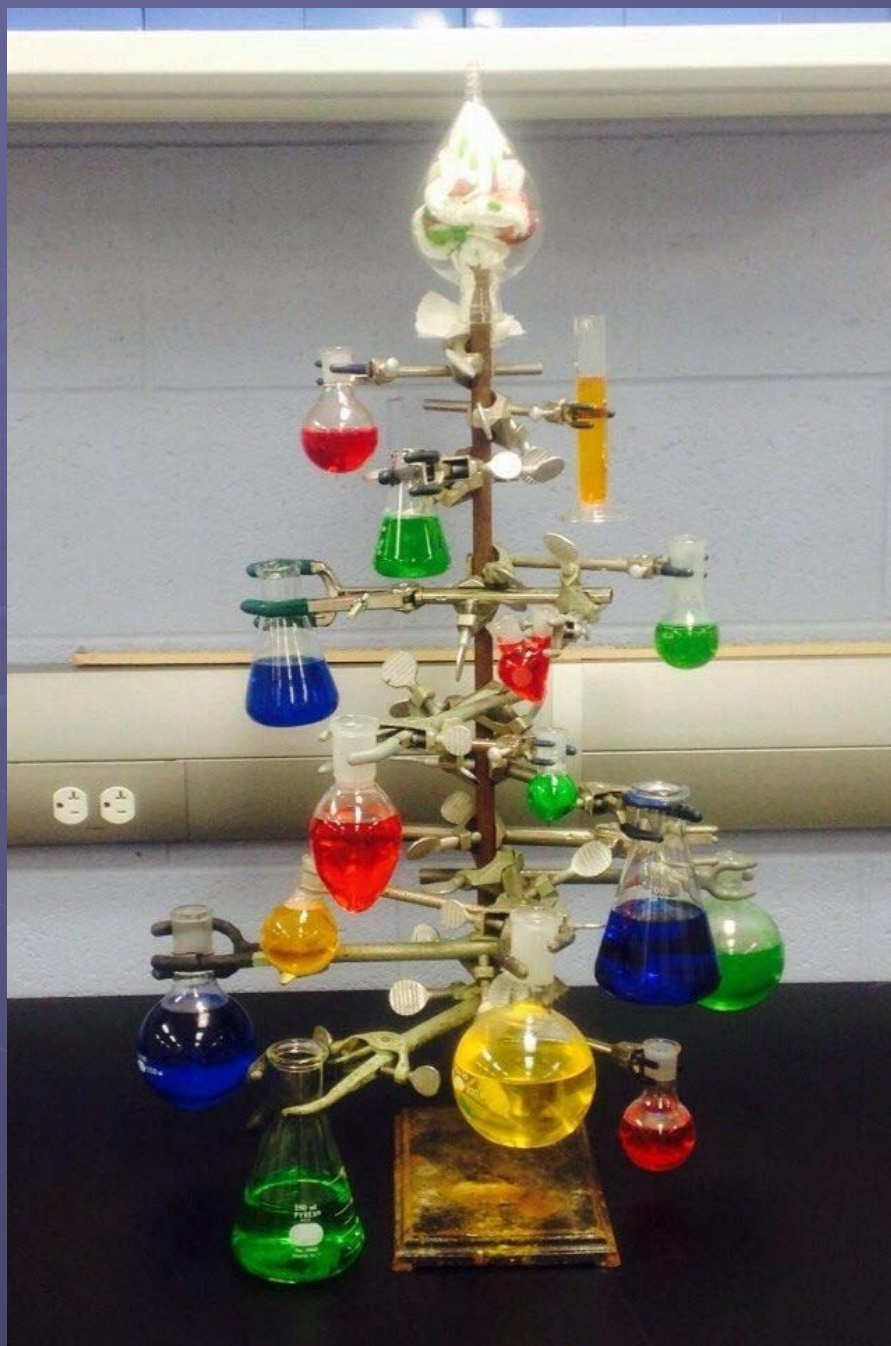
## Intermetalické sloučeniny

- pevně daný stechiometrický poměr
- struktura odlišná od komponent
- vysoký bod tání
- křehké

# Fázový diagram sůl - voda



sln = solanka



|     |                            |     |                             |                             |                            |                            |                               |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
|-----|----------------------------|-----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----|----------------------------|-----|-------------------------------|-----|------------------------------|----|----------------------------|-----|----------------------------|-----|----------------------------|-----|----------------------------|-----|---------------------------|-----|-------------------------------|-----|------------------------|
| 1   | H<br>Hydrogen<br>1.008     |     |                             |                             |                            |                            |                               |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 2   | He<br>Helium<br>4.003      | 3   | Li<br>Lithium<br>6.941      |                             |                            |                            |                               |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 4   | Be<br>Beryllium<br>9.012   | 5   | B<br>Boron<br>10.811        | 6                           | C<br>Carbon<br>12.011      |                            |                               |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 7   | N<br>Nitrogen<br>14.007    | 8   | O<br>Oxygen<br>15.999       | 9                           | F<br>Fluorine<br>18.998    | 10                         | Ne<br>Neon<br>20.180          |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 11  | Na<br>Sodium<br>22.990     | 12  | Mg<br>Magnesium<br>24.305   | 13                          | Al<br>Aluminum<br>26.982   | 14                         | Si<br>Silicon<br>28.086       | 15  | P<br>Phosphorus<br>30.974  |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 16  | S<br>Sulfur<br>32.066      | 17  | Cl<br>Chlorine<br>35.453    | 18                          | Ar<br>Argon<br>39.948      | 19                         | K<br>Potassium<br>39.098      | 20  | Ca<br>Calcium<br>40.078    | 21  | Sc<br>Scandium<br>44.956      |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 22  | Ti<br>Titanium<br>47.88    | 23  | V<br>Vanadium<br>50.942     | 24                          | Cr<br>Chromium<br>51.996   | 25                         | Mn<br>Manganese<br>54.938     | 26  | Fe<br>Iron<br>55.847       | 27  | Co<br>Cobalt<br>58.933        | 28  | Ni<br>Nickel<br>58.693       |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 29  | Cu<br>Copper<br>63.546     | 30  | Zn<br>Zinc<br>65.38         | 31                          | Ga<br>Gallium<br>69.723    | 32                         | Ge<br>Germanium<br>72.61      | 33  | As<br>Arsenic<br>74.922    | 34  | Se<br>Selenium<br>78.09       | 35  | Br<br>Bromine<br>79.904      | 36 | Kr<br>Krypton<br>84.80     |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 37  | Rb<br>Rubidium<br>84.468   | 38  | Sr<br>Strontium<br>87.62    | 39                          | Y<br>Yttrium<br>88.906     | 40                         | Zr<br>Zirconium<br>91.224     | 41  | Nb<br>Niobium<br>92.906    | 42  | Mo<br>Molybdenum<br>95.94     | 43  | Tc<br>Technetium<br>98.907   | 44 | Ru<br>Ruthenium<br>101.07  | 45  | Rh<br>Rhodium<br>102.906   |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 46  | Pd<br>Palladium<br>106.42  | 47  | Ag<br>Silver<br>107.868     | 48                          | Cd<br>Cadmium<br>112.411   | 49                         | In<br>Indium<br>114.818       | 50  | Sn<br>Tin<br>118.71        | 51  | Sb<br>Antimony<br>121.760     | 52  | Te<br>Tellurium<br>127.5     | 53 | I<br>Iodine<br>126.904     | 54  | Xe<br>Xenon<br>131.29      | 55  | Cs<br>Cesium<br>132.905    |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 56  | Ba<br>Barium<br>137.327    | 57  | La<br>Lanthanum<br>138.905  | 58                          | Ce<br>Cerium<br>140.115    | 59                         | Pr<br>Praseodymium<br>140.908 | 60  | Nd<br>Neodymium<br>144.24  | 61  | Pm<br>Promethium<br>144.913   | 62  | Sm<br>Samarium<br>150.36     | 63 | Eu<br>Europium<br>151.965  | 64  | Gd<br>Gadolinium<br>157.25 | 65  | Tb<br>Terbium<br>158.925   | 66  | Dy<br>Dysprosium<br>162.50 |     |                           |     |                               |     |                        |
| 67  | Ho<br>Holmium<br>164.930   | 68  | Er<br>Erbium<br>167.26      | 69                          | Tm<br>Thulium<br>168.934   | 70                         | Yb<br>Ytterbium<br>173.04     | 71  | Lu<br>Lutetium<br>174.967  | 72  | Hf<br>Hafnium<br>178.49       | 73  | Ta<br>Tantalum<br>180.948    | 74 | W<br>Tungsten<br>183.85    | 75  | Re<br>Rhenium<br>186.207   | 76  | Os<br>Osmium<br>190.23     | 77  | Ir<br>Iridium<br>192.22    | 78  | Pt<br>Platinum<br>195.08  |     |                               |     |                        |
| 79  | Au<br>Gold<br>196.967      | 80  | Hg<br>Mercury<br>200.59     | 81                          | Tl<br>Thallium<br>204.383  | 82                         | Pb<br>Lead<br>207.2           | 83  | Bi<br>Bismuth<br>208.980   | 84  | Po<br>Polonium<br>[209]       | 85  | At<br>Astatine<br>[210]      | 86 | Rn<br>Radon<br>[222]       | 87  | Fr<br>Francium<br>[223]    | 88  | Ra<br>Radium<br>[226]      | 89  | Ac<br>Actinium<br>[227]    | 90  | Th<br>Thorium<br>232.038  | 91  | Pa<br>Protactinium<br>231.036 |     |                        |
| 92  | U<br>Uranium<br>238.029    | 93  | Np<br>Neptunium<br>237.048  | 94                          | Pu<br>Plutonium<br>244.064 | 95                         | Am<br>Americium<br>243.061    | 96  | Cm<br>Curium<br>247.070    | 97  | Bk<br>Berkelium<br>247.070    | 98  | Cf<br>Californium<br>[251]   | 99 | Es<br>Einsteinium<br>[252] | 100 | Fm<br>Fermium<br>[257]     | 101 | Md<br>Mendelevium<br>[258] | 102 | No<br>Nobelium<br>[259]    | 103 | Lr<br>Lawrencium<br>[261] | 104 | Rf<br>Rutherfordium<br>[261]  | 105 | Db<br>Dubnium<br>[262] |
| 106 | Sg<br>Seaborgium<br>[266]  |     | 107                         | Bh<br>Bohrium<br>[264]      | 108                        | Hs<br>Hassium<br>[269]     |                               |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 109 | Mt<br>Meitnerium<br>[268]  |     | 110                         | Ds<br>Darmstadtium<br>[269] | 111                        | Rg<br>Roentgenium<br>[272] |                               |     |                            |     |                               |     |                              |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |
| 112 | Cn<br>Copernicium<br>[277] | 113 | Uut<br>Ununtrium<br>unknown | 114                         | Fl<br>Flerovium<br>[288]   | 115                        | Uup<br>Ununpentium<br>unknown | 116 | Lv<br>Livermorium<br>[293] | 117 | Uus<br>Ununseptium<br>unknown | 118 | Uuo<br>Ununoctium<br>unknown |    |                            |     |                            |     |                            |     |                            |     |                           |     |                               |     |                        |