

Fázové heterogenní rovnováhy

Fáze = homogenní část soustavy, 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,....

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 (led I - XII, He I a II)

P = 1: směs plynů, roztok

P = 2: kapalina + nasyc. g, nasycený roztok + pevná látka

P = 3: kapalina + nasyc. g + pevná látka

Složka (C) = čistá látka

Počet složek = minimální počet čistých látek, CaCO_3 , CO_2 , CaO

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

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

Gibbsův fázový zákon

- Každá fáze 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 platí $P-1$ rovnovážných podmínek $\mu(\alpha) = \mu(\beta)$ rovnost chemických potenciálů složky v P fázích
celkem $C(P-1)$ **podmínek**
- Počet stupňů volnosti je počet proměnných minus počet 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)

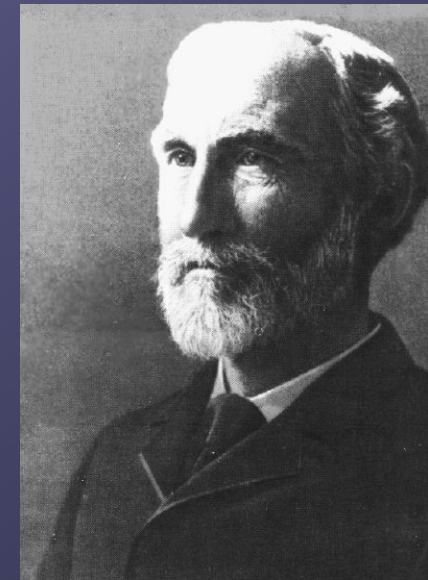
Složky (C)

Pro $C = 1$

$P = 1$ $V = 2$ plocha

$P = 2$ $V = 1$ křivka

$P = 3$ $V = 0$ trojný bod



J. Willard Gibbs
(1839-1903)

Fázový diagram

Fázový diagram = grafická informace o stavu soustavy

Proměnné – tlak, teplota, $C - 1$ údajů o složení
(pro více než 1 složku v soustavě musí být fázový diagram více než 3-rozměrný)

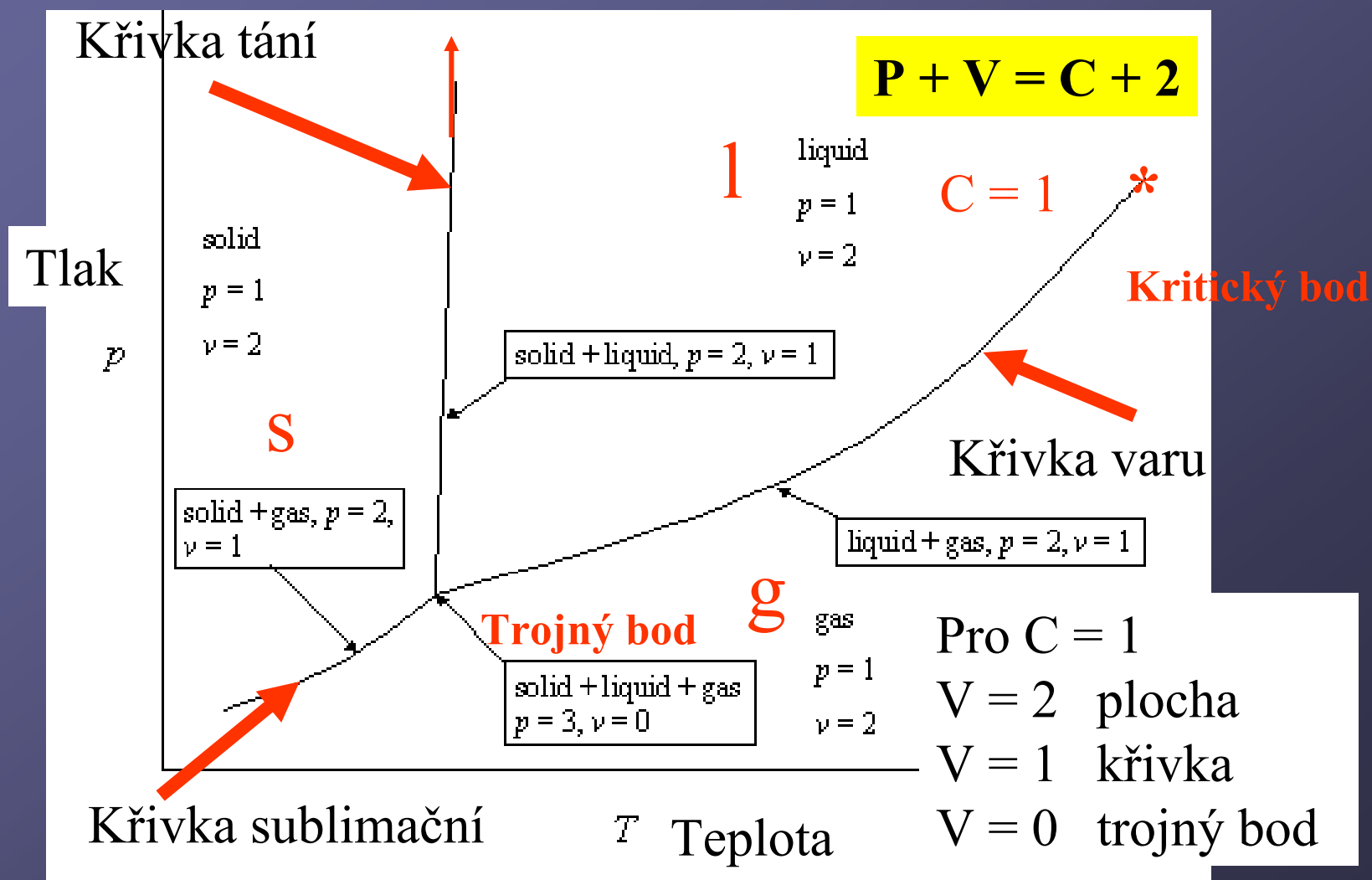
Řezy fázovým diagramem – některé proměnné držíme konstantní:

$p = \text{konst.}$ izobarický diagram

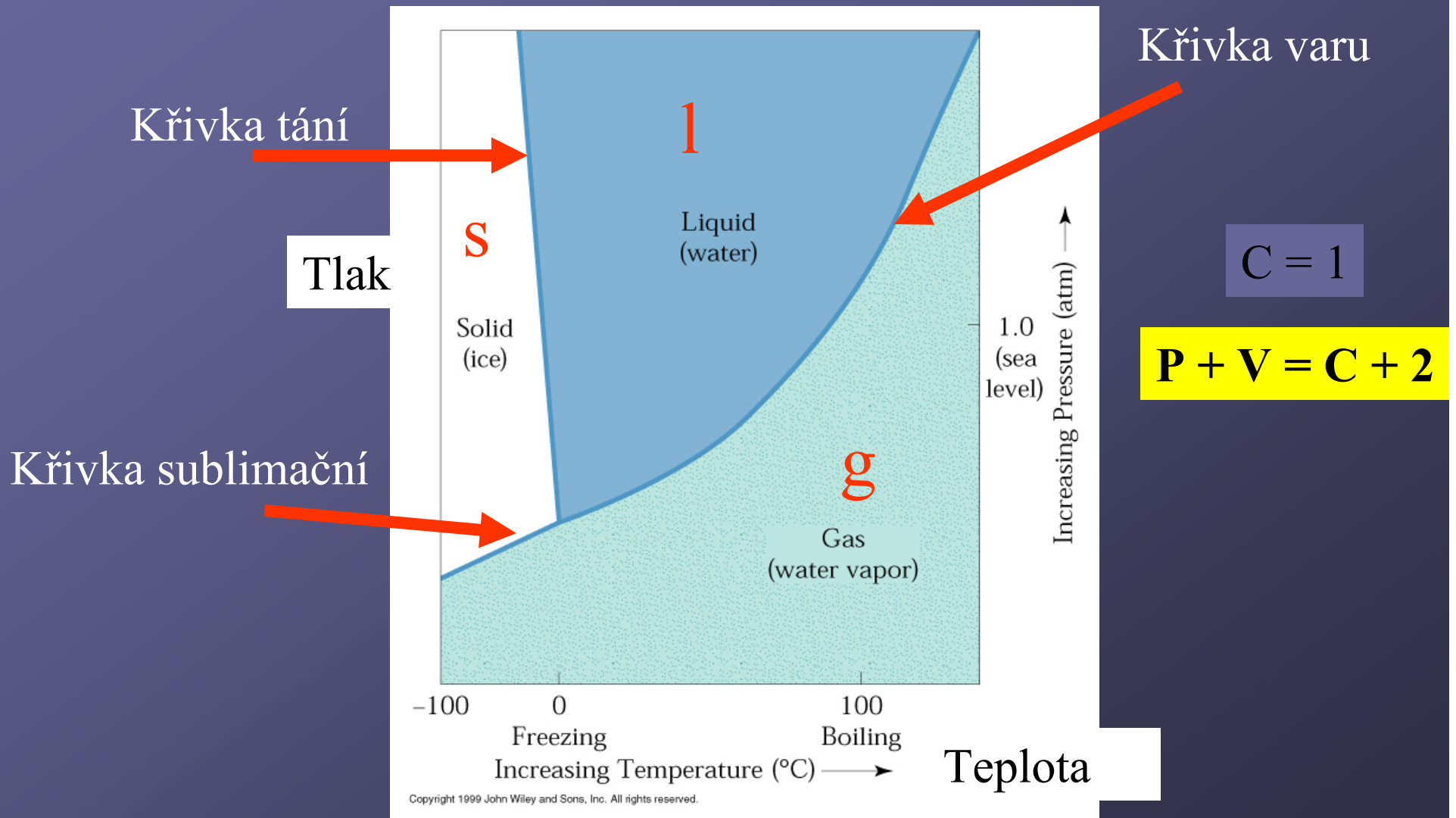
$T = \text{konst.}$ izotermický diagram

$c = \text{konst.}$ izokoncentrační diagram

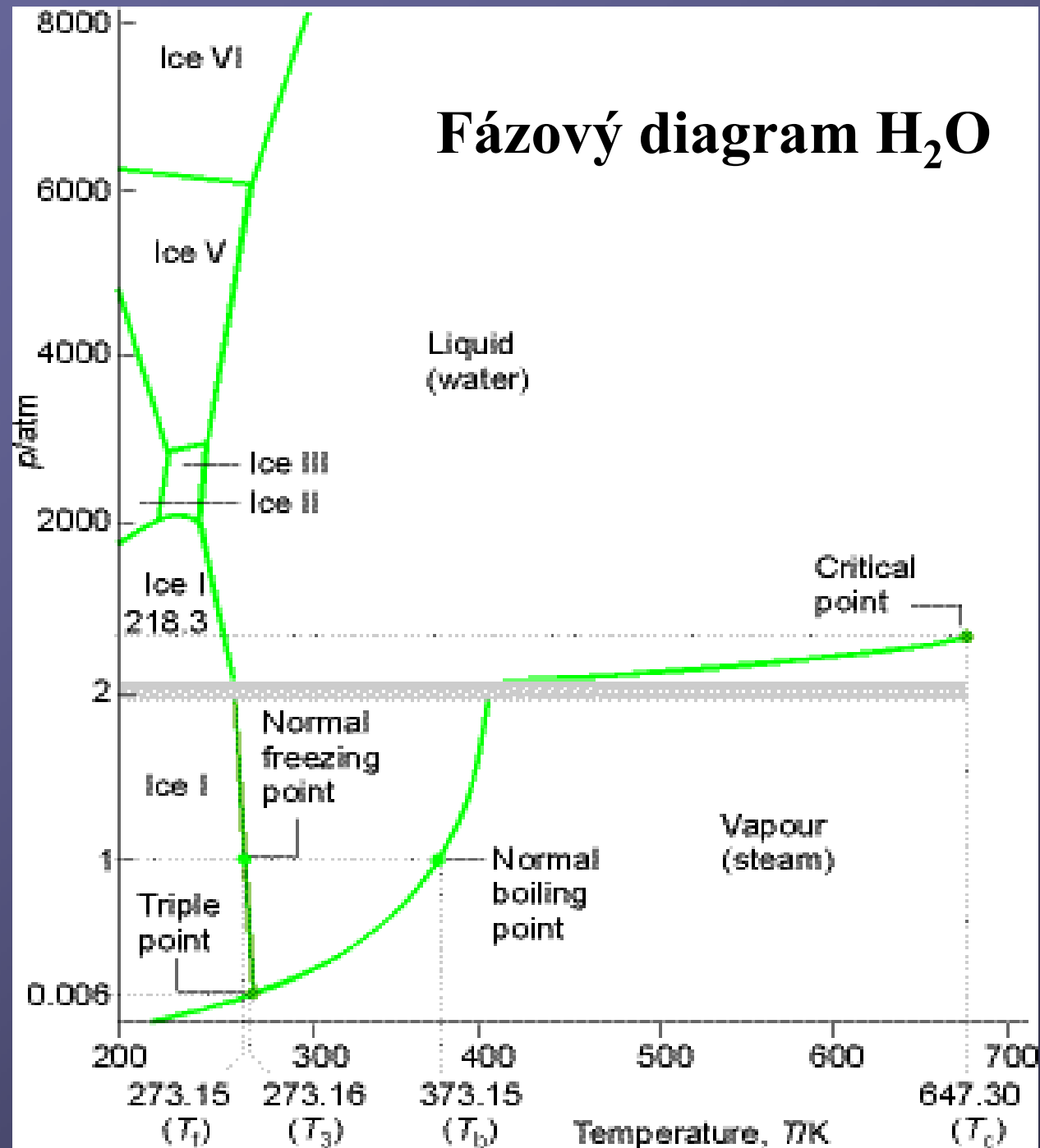
Fázový (p-T) diagram pro jednosložkovou soustavu



Fázový diagram pro jednosložkovou soustavu



Fázový diagram H₂O




Clausius-Clapeyronova rovnice

Clapeyronova rovnice pro fázovou přeměnu

Pro l-g rovnováhu – křivka varu:

- 1) $V_m(g) \gg V_m(l)$, pak $\Delta V_m = V_m(g)$
- 2) $V_m(g)$ ze stavové rovnice id. plynu

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


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

Diferenciální Clausius-Clapeyronova rovnice

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

Integrovaná Clausius-Clapeyronova rovnice

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

Změna tenze par vody s teplotou



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

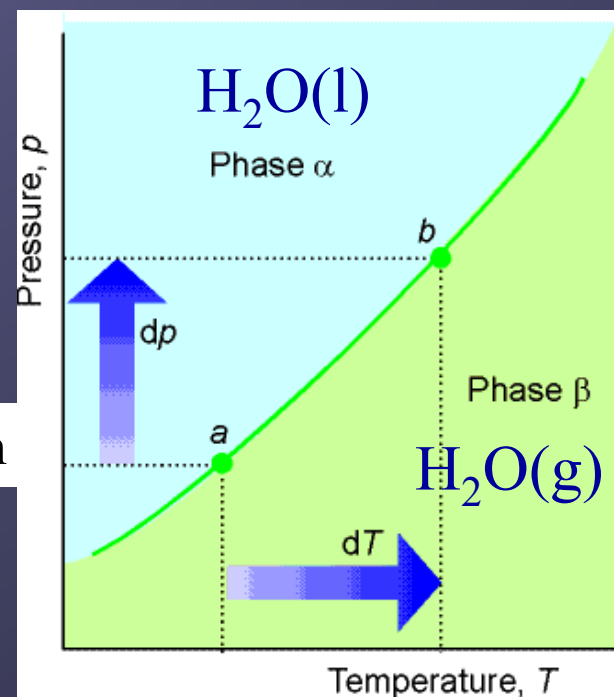
van't Hoffova rovnice

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

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

Clausius-Clapeyronova rovnice

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



Změna tenze par vody s teplotou

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

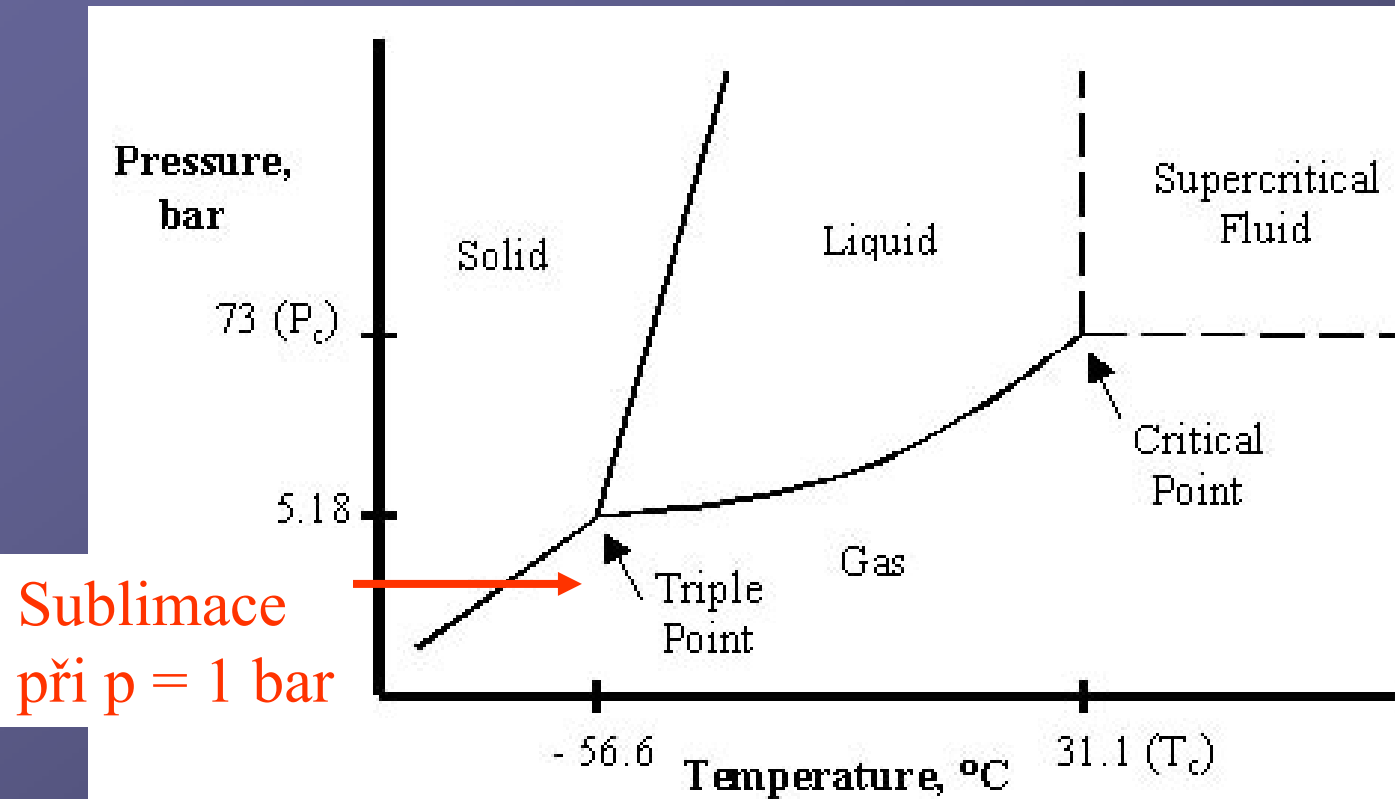
$$\ln P_T = \frac{40660 \text{ Jmol}^{-1}}{8.315 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}} \left(\frac{1}{373 \text{ K}} - \frac{1}{323 \text{ K}} \right) = -2.03$$

$$P_{323} = e^{-2.03} = 0.131 \text{ atm}$$

Tlak nasycené vodní páry při 50 °C = 323 K

Fázový diagram CO₂

Suchý led



Sublimace
při $p = 1$ bar

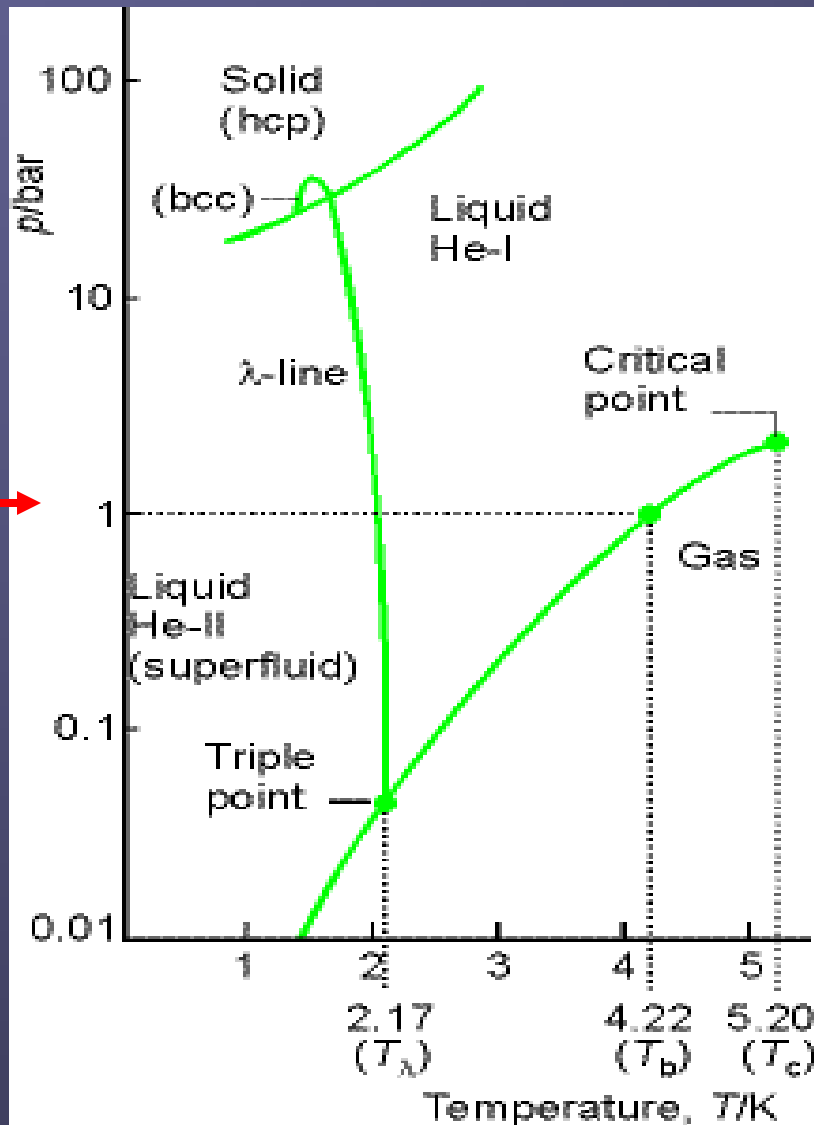
Phase Diagram for carbon dioxide.

Fázový diagram He

He nelze převést do pevného stavu za normálního atmosferického tlaku



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

$$P = 1$$

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

Třírozměrný diagram

$$V = 2$$

Izotermický $T = \text{konst.}$

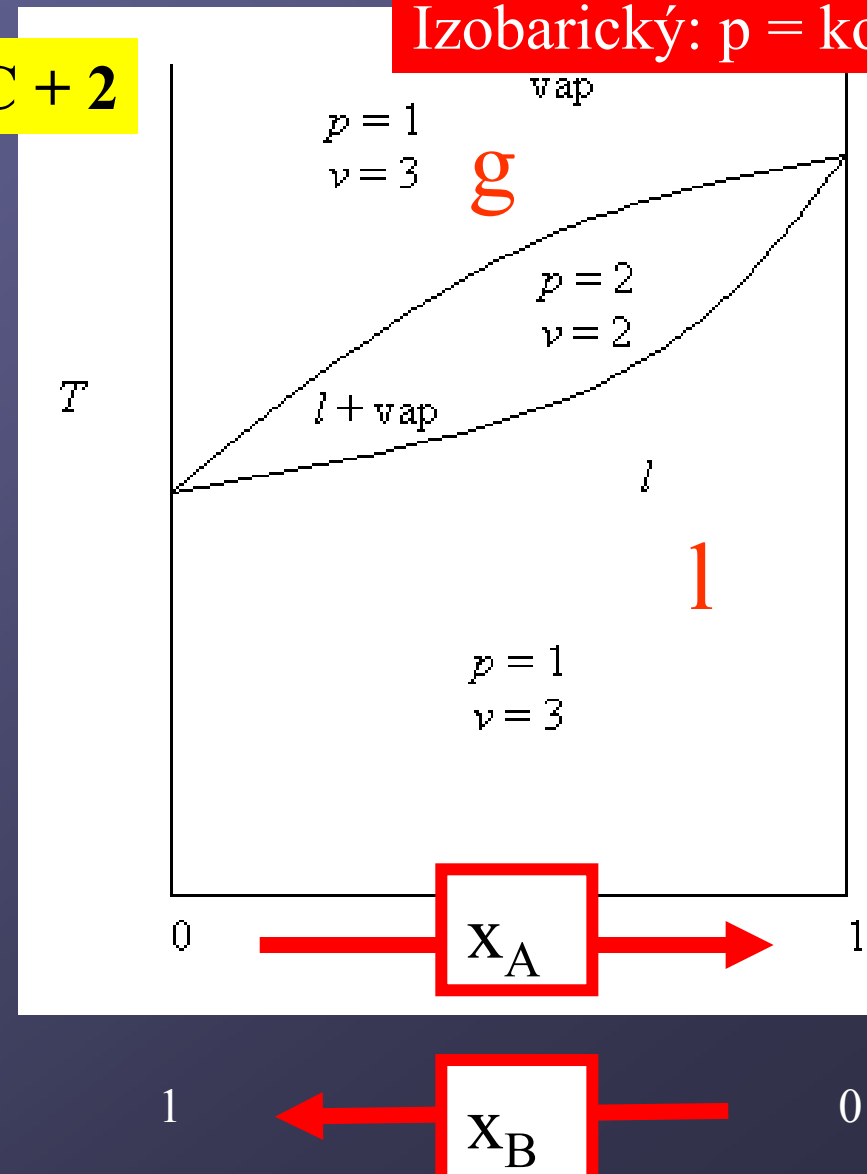
p jako funkce x

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

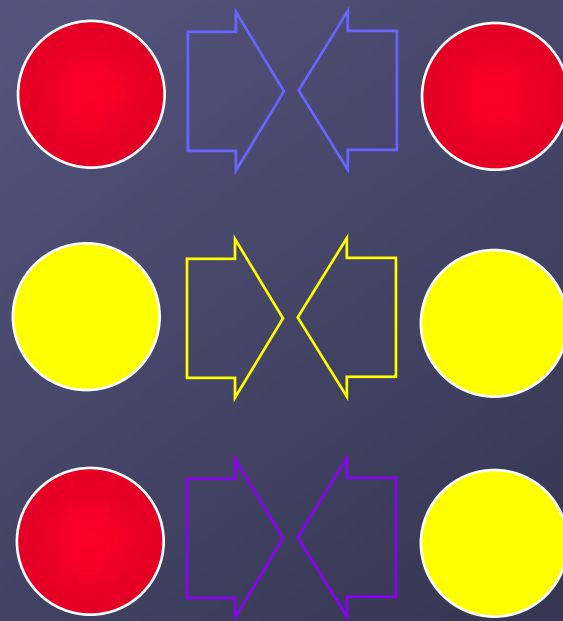
$$\Delta H_{\text{rozp}} = 0 \quad \Delta V_{\text{rozp}} = 0$$

Neideální chování kapalin:

vdW interakce **A-A**, **B-B** jsou různé

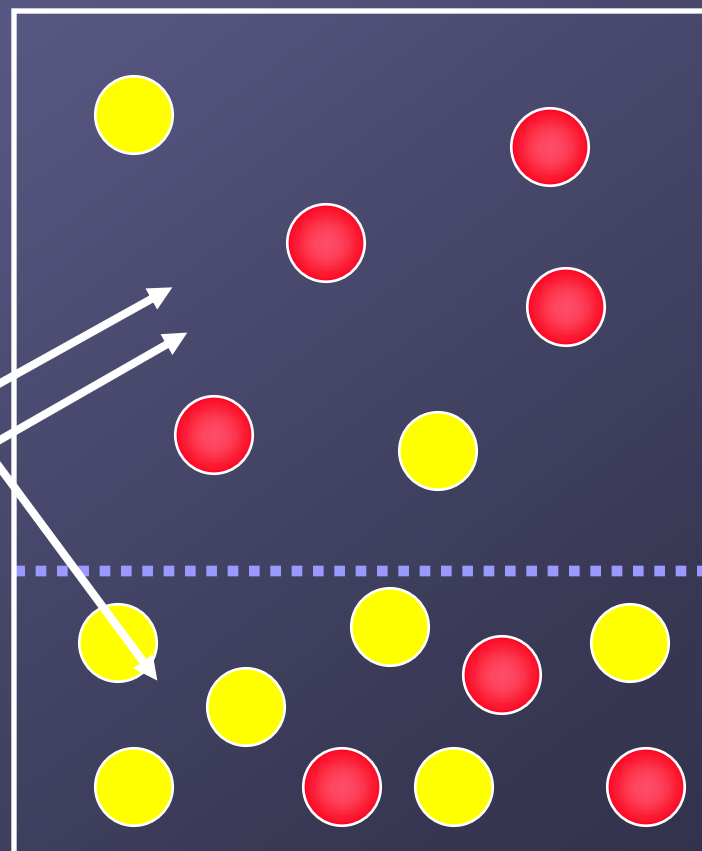
(větší nebo menší) než **A-B**

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



Rovnováha $l \leftrightarrow g$ ve směsi dvou kapalin

- Obě fáze jsou směsí **A** a **B**.
- x_A, x_B molární zlomky v l.
- y_A, y_B molární zlomky v g.
- p_A, p_B parciální tlaky v g.

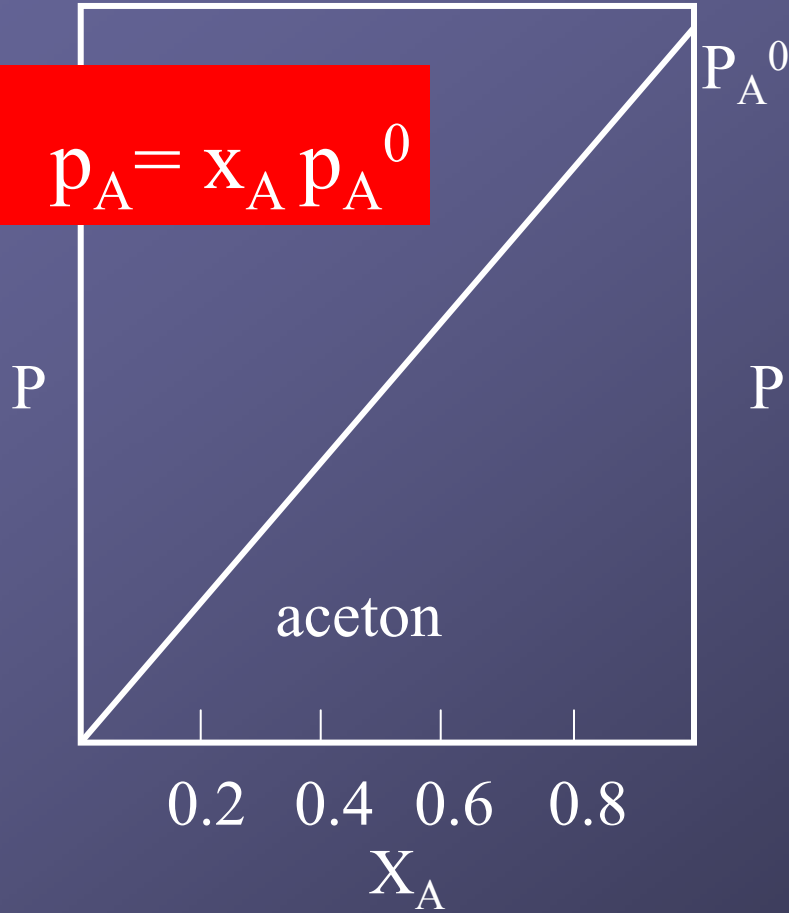


Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

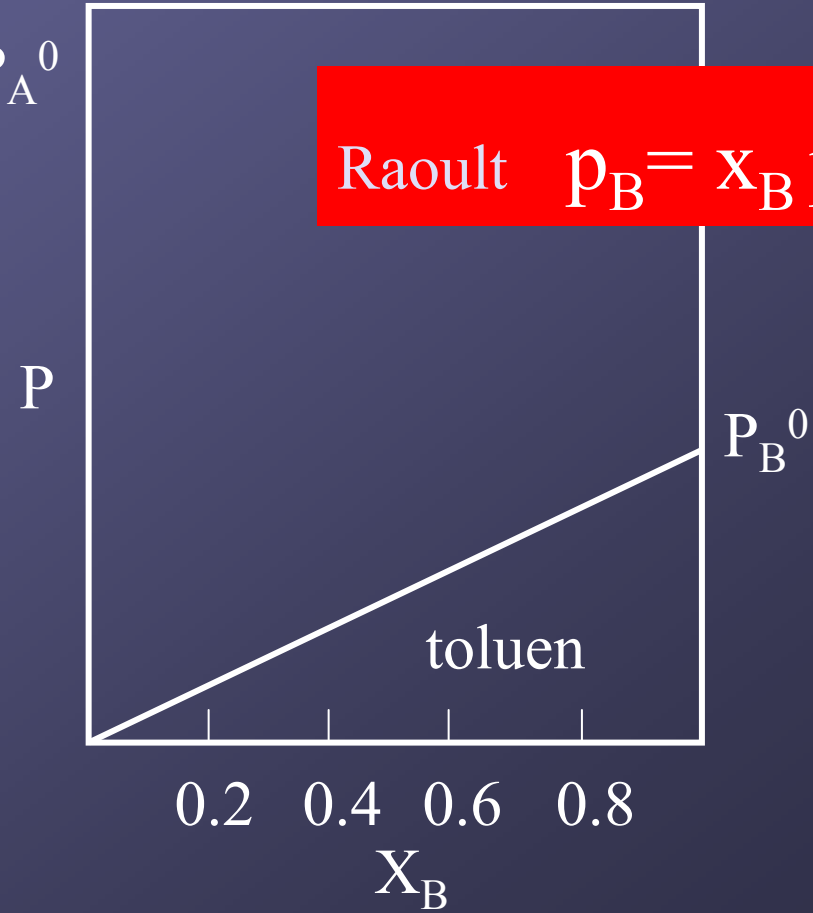
Těkavější složka = vyšší tenze par

Izotermický: $T = \text{konst.}$

Raoult $p_A = x_A p_A^0$



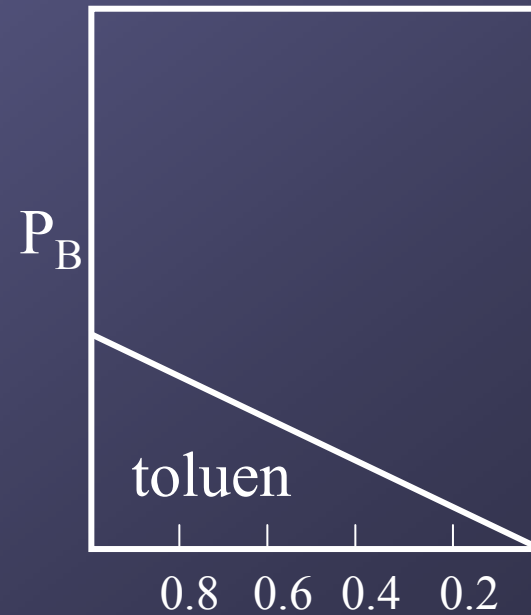
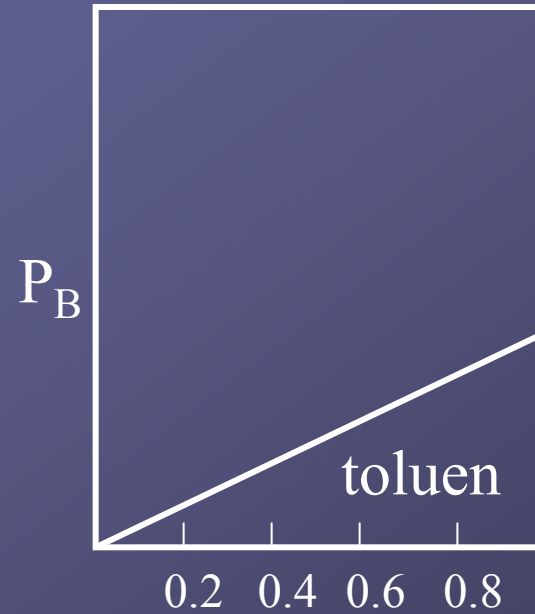
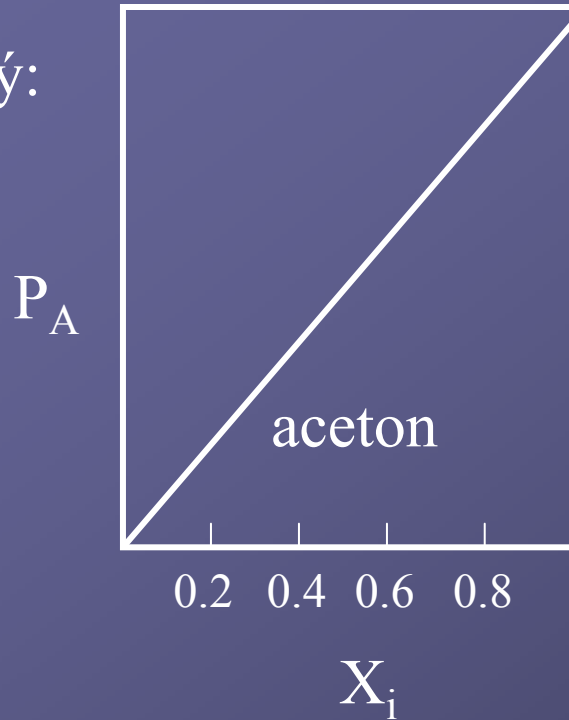
Raoult $p_B = x_B p_B^0$



směs dvou kapalin: aceton a toluen

Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

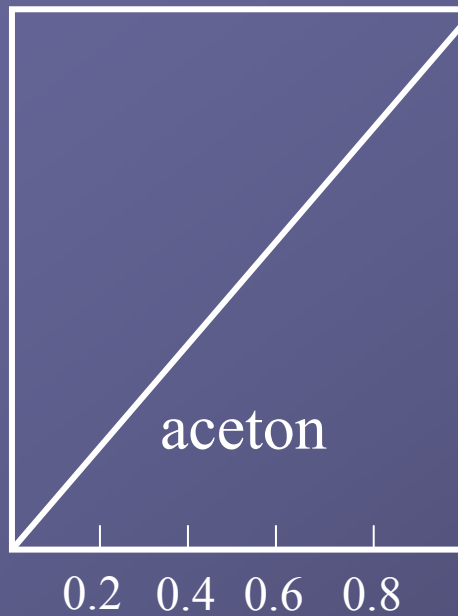
Izotermický:
 $T = \text{konst.}$



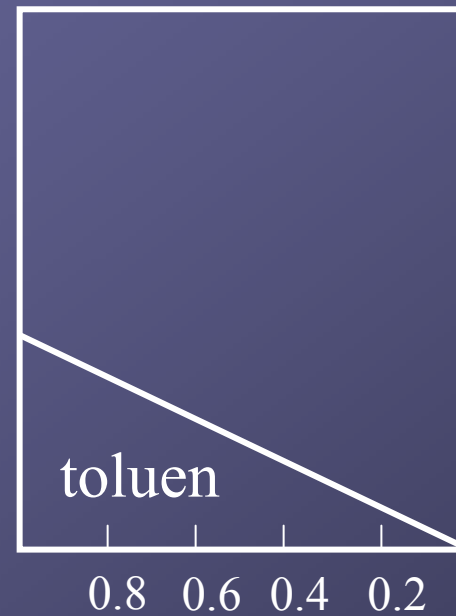
$$X_{\text{acetone}} + X_{\text{toluene}} = 1$$

Izotermický:
 $T = \text{konst.}$

P_A



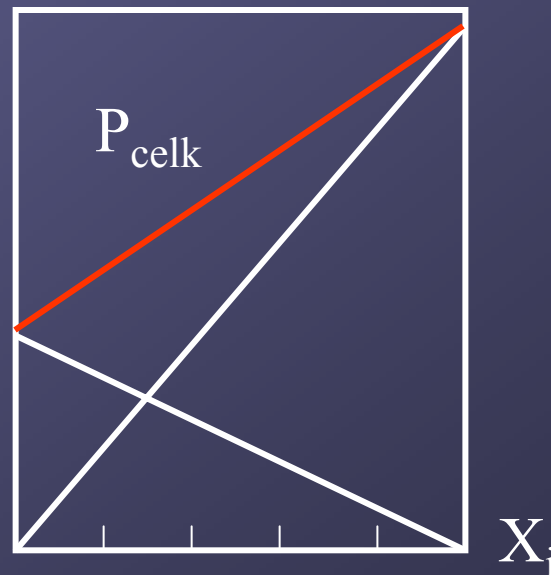
P_B



X_i

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

P

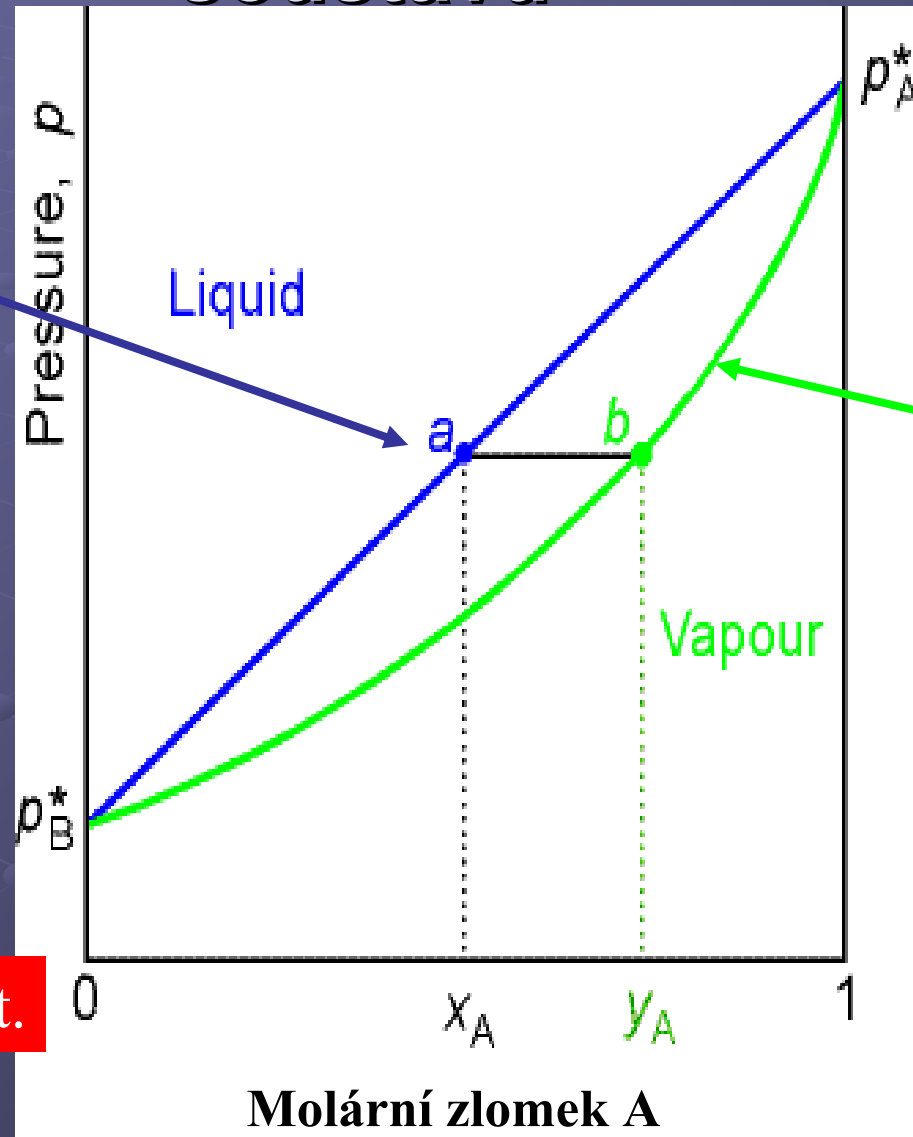


X_i

Fázový diagram pro dvousložkovou soustavu

Tlak par v závislosti na složení kapalné fáze

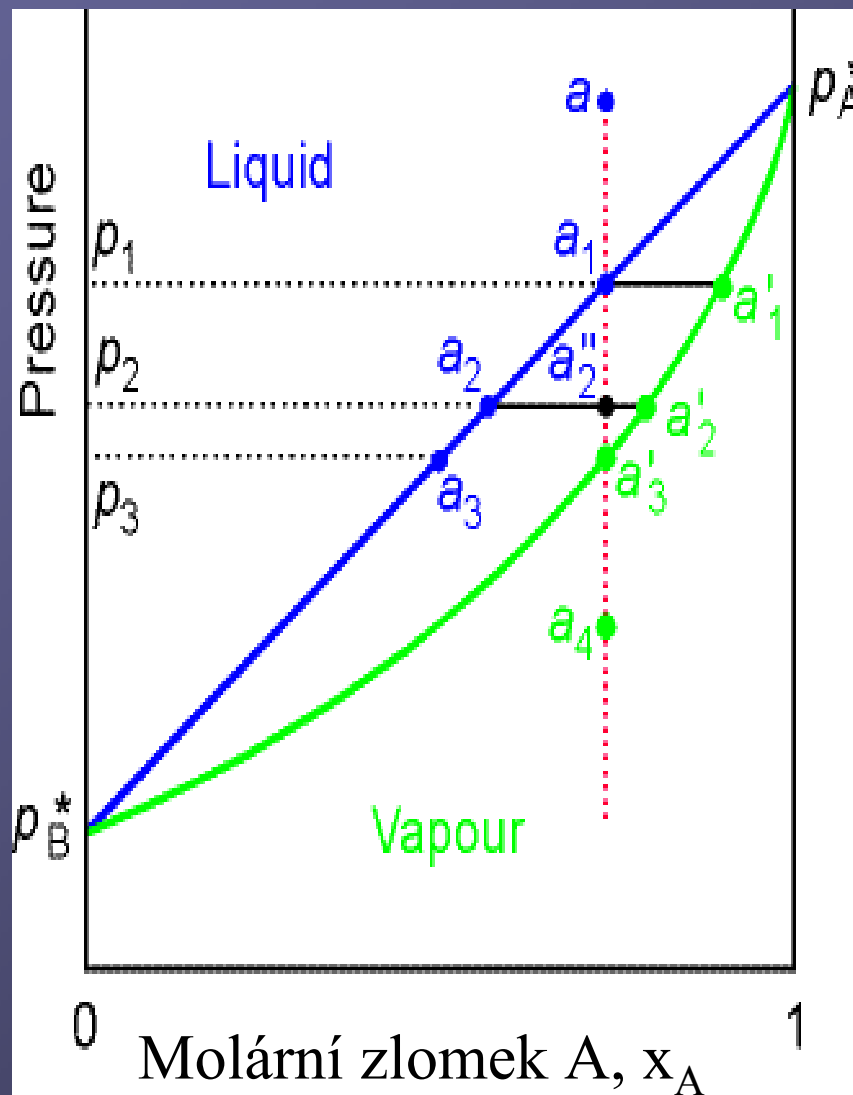
$$P_{\text{aceton}} + P_{\text{toluen}} = P_{\text{celk}}$$



Tlak par v závislosti na složení plynné fáze

Izotermický: $T = \text{konst.}$

Destilace za konst. T snižováním tlaku

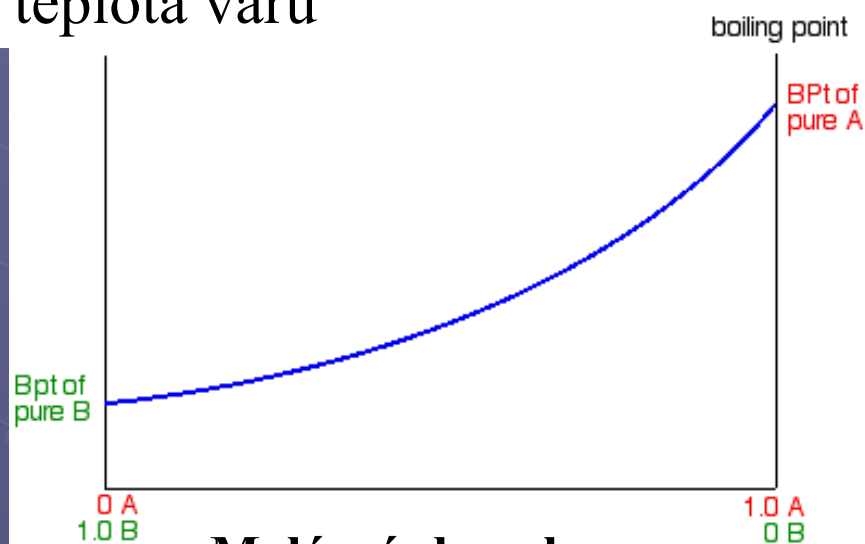


Fázové diagramy

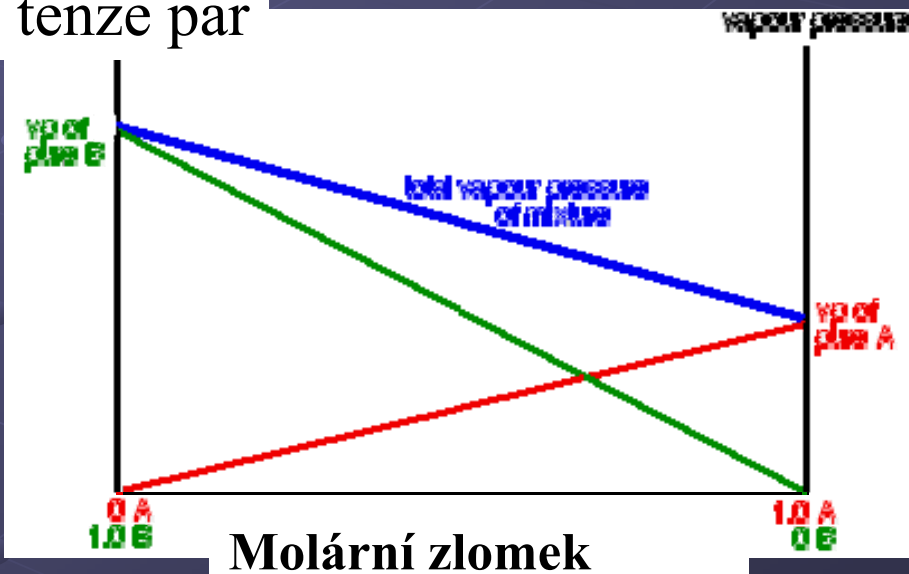
Izobarický: $p = \text{konst.}$

Izotermický: $T = \text{konst.}$

teplota varu



tenze par



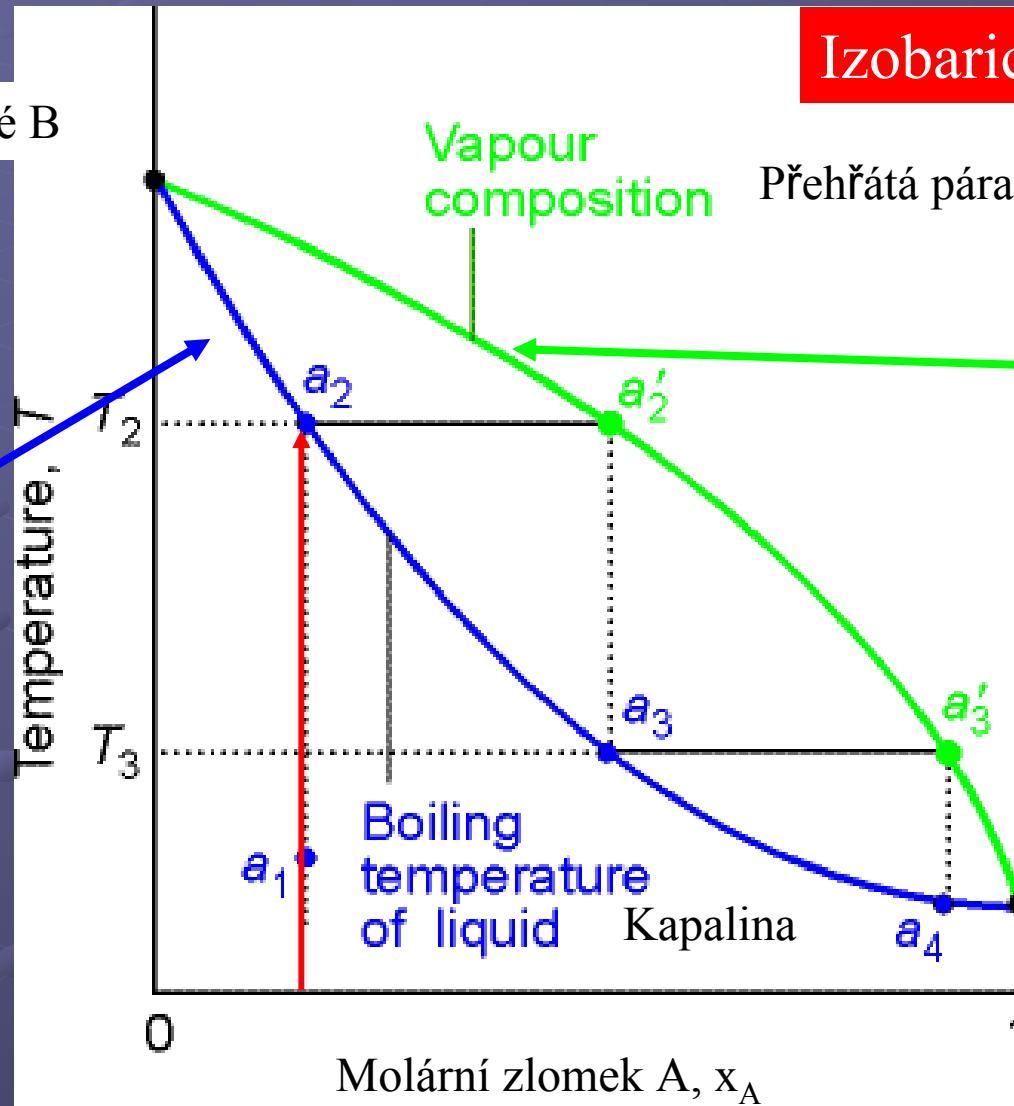
Těkavější složka = vyšší tenze par = nižší teplota varu

Destilace za konst. p zvyšováním T

Izobarický: $p = \text{konst.}$

Teplota varu čisté B

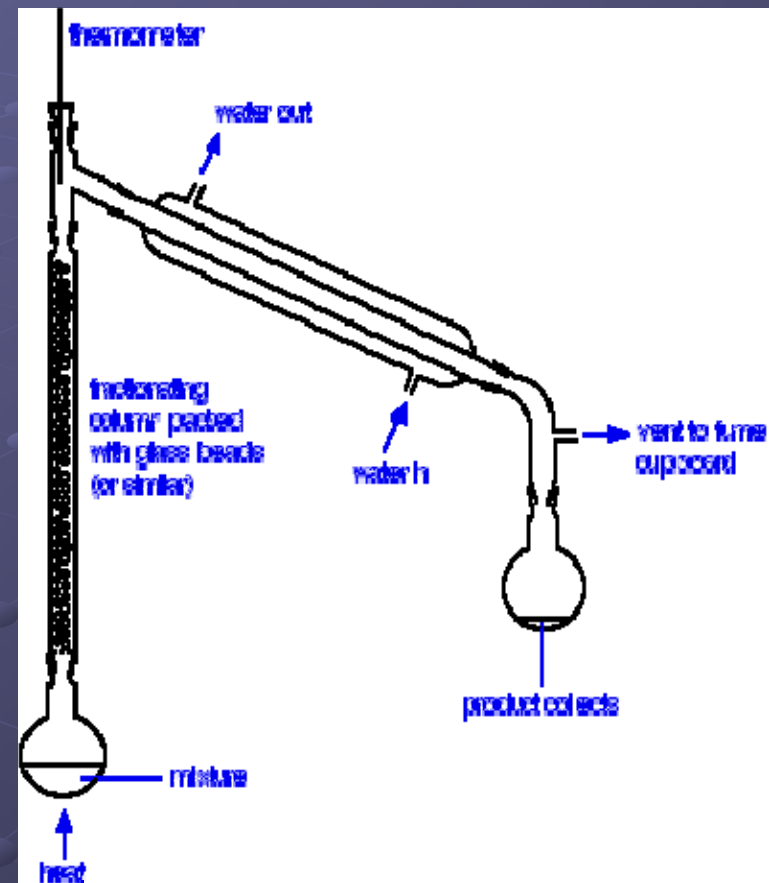
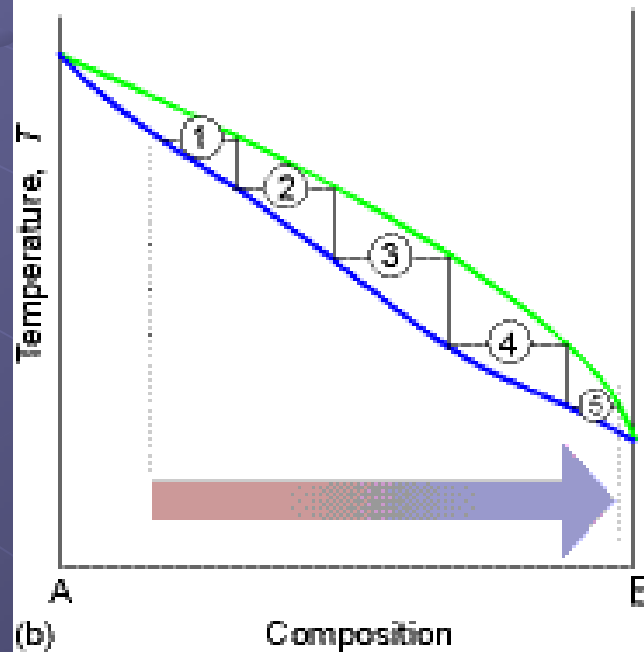
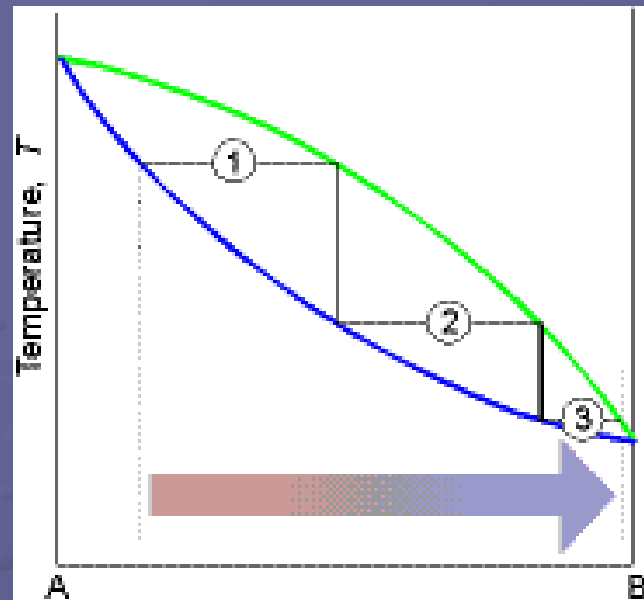
Teplota varu v závislosti na složení kapalné fáze



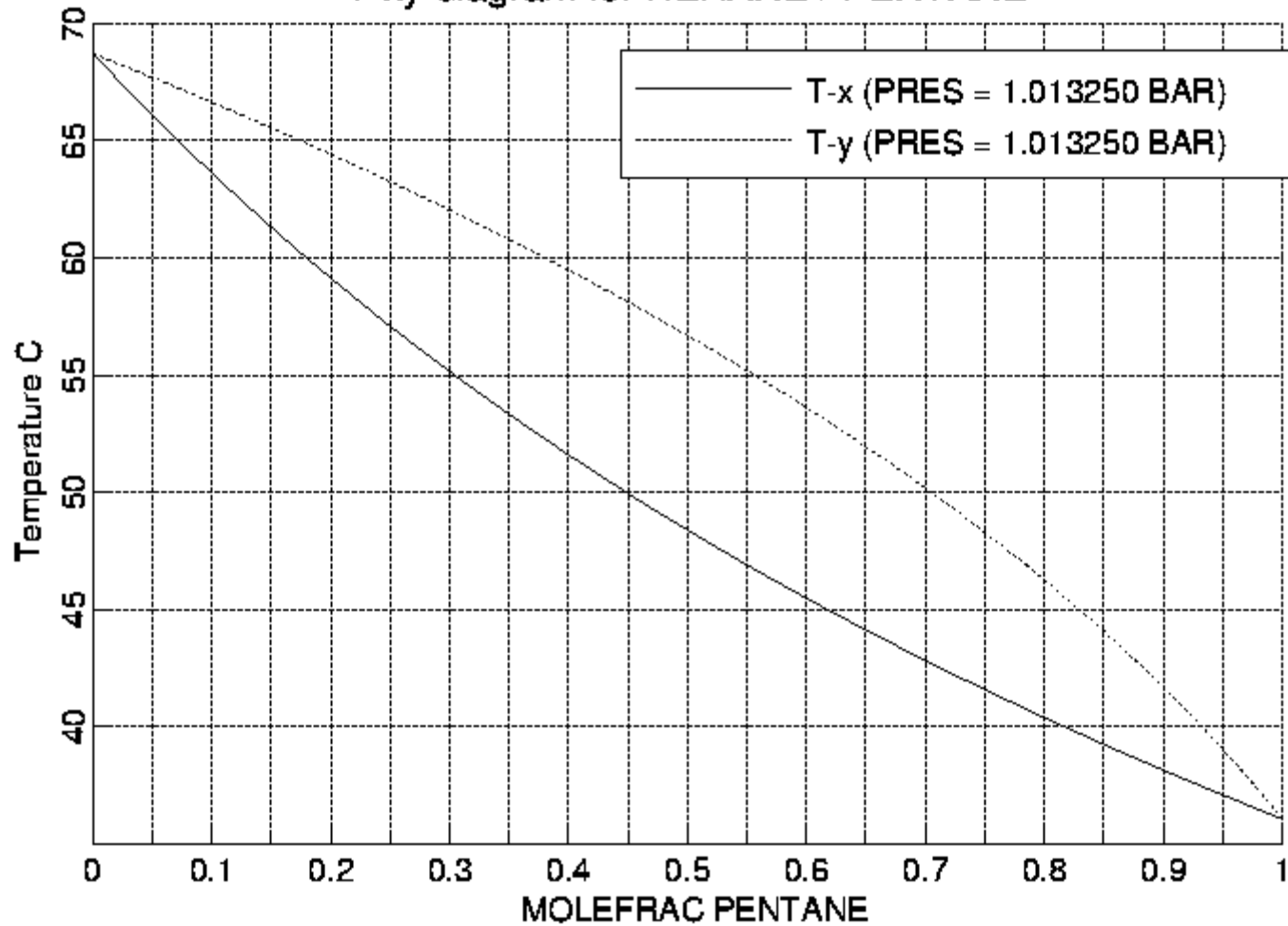
Složení plynné fáze

Teplota varu čisté A

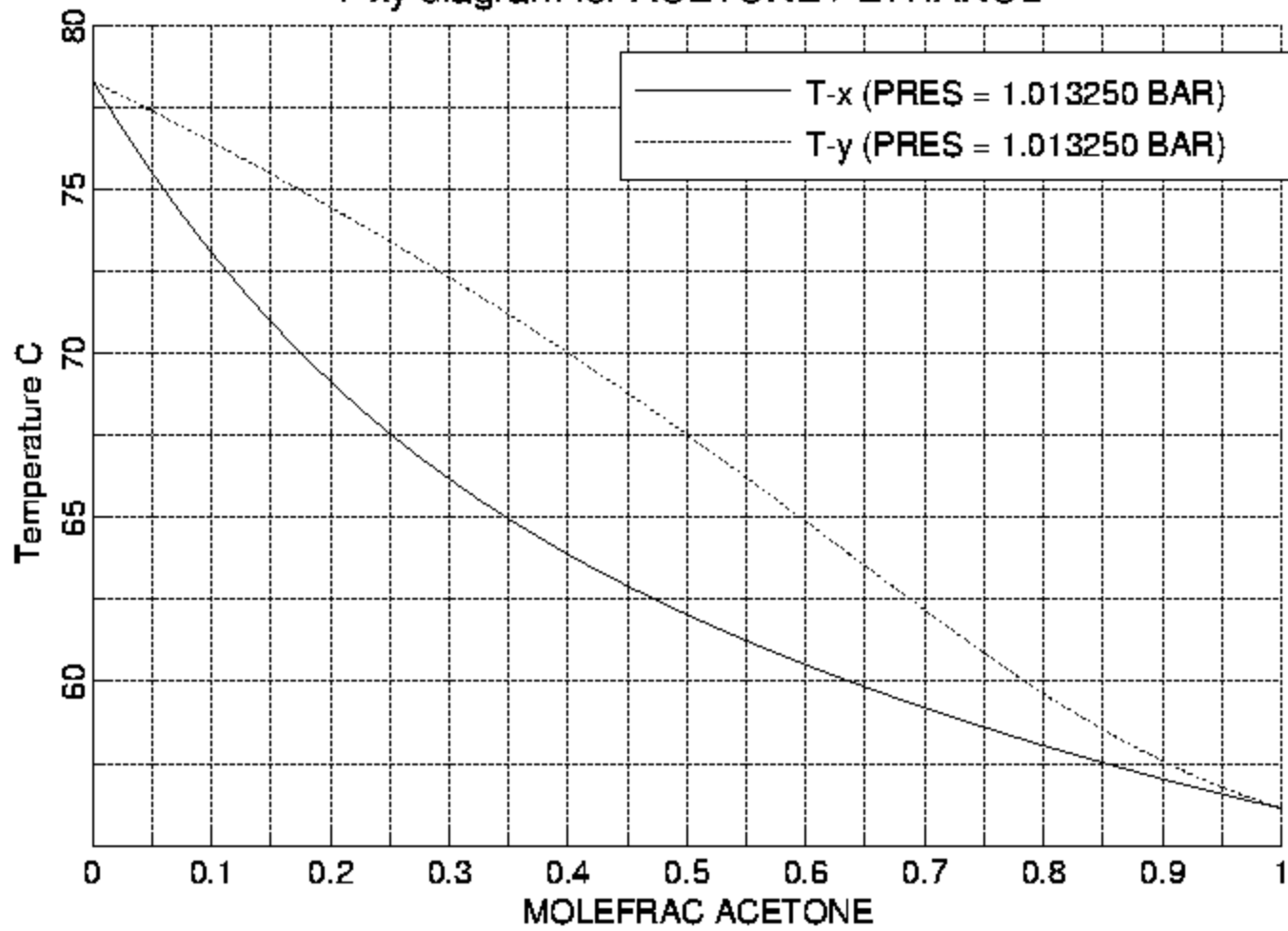
Frakční destilace



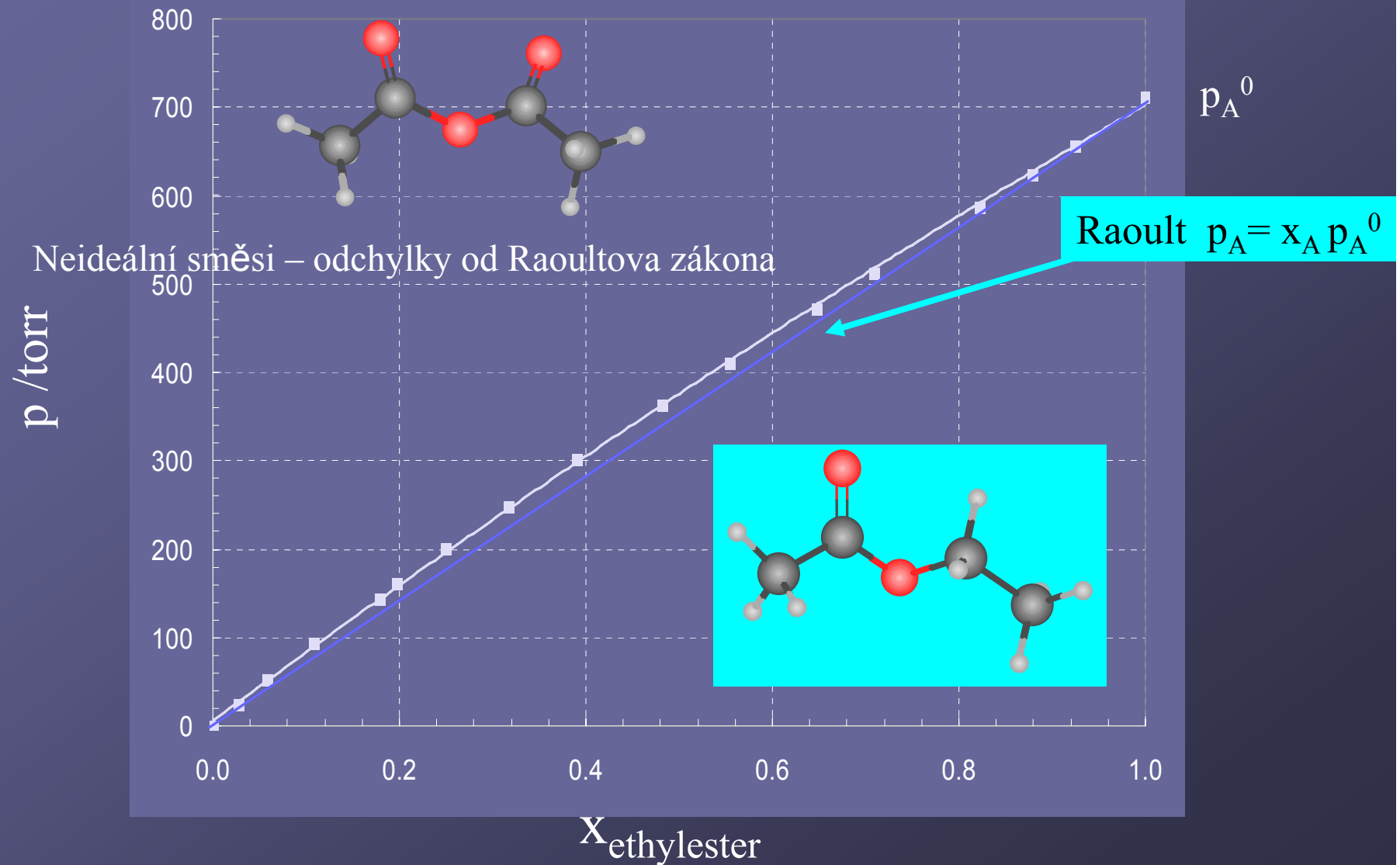
T-xy diagram for HEXANE / PENTANE



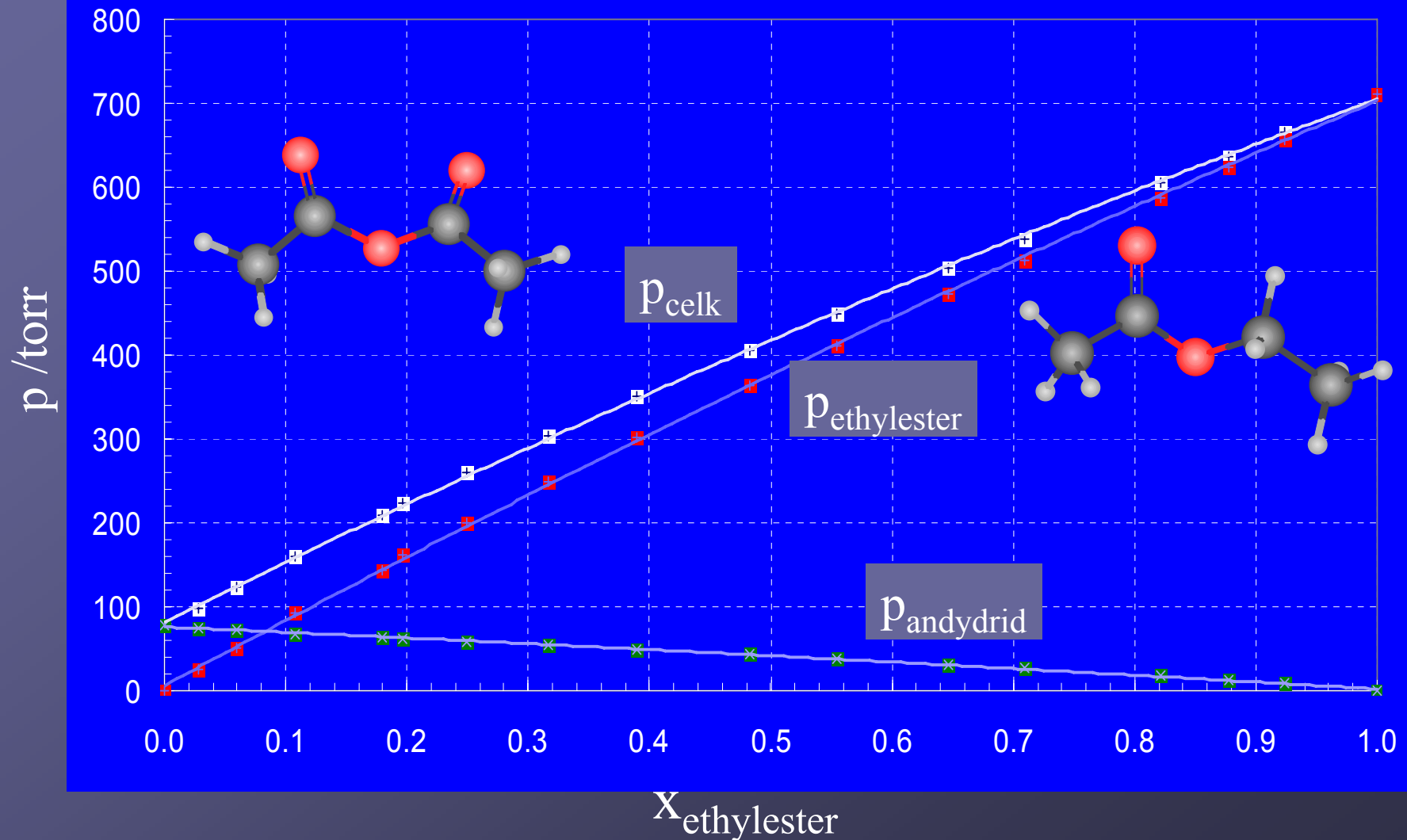
T-xy diagram for ACETONE / ETHANOL



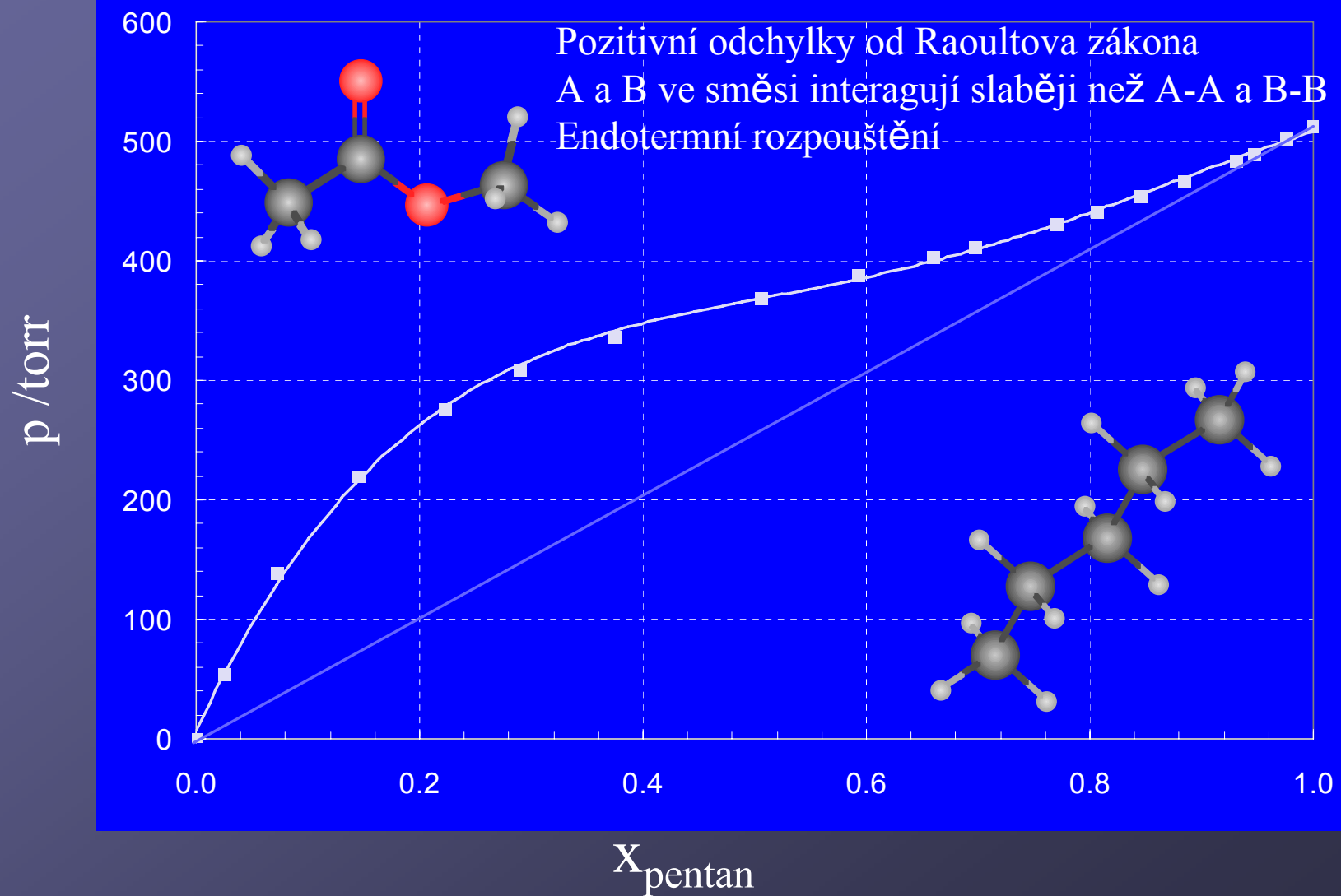
Tenze par ethylesteru kys. octové v anhydridu kys. octové



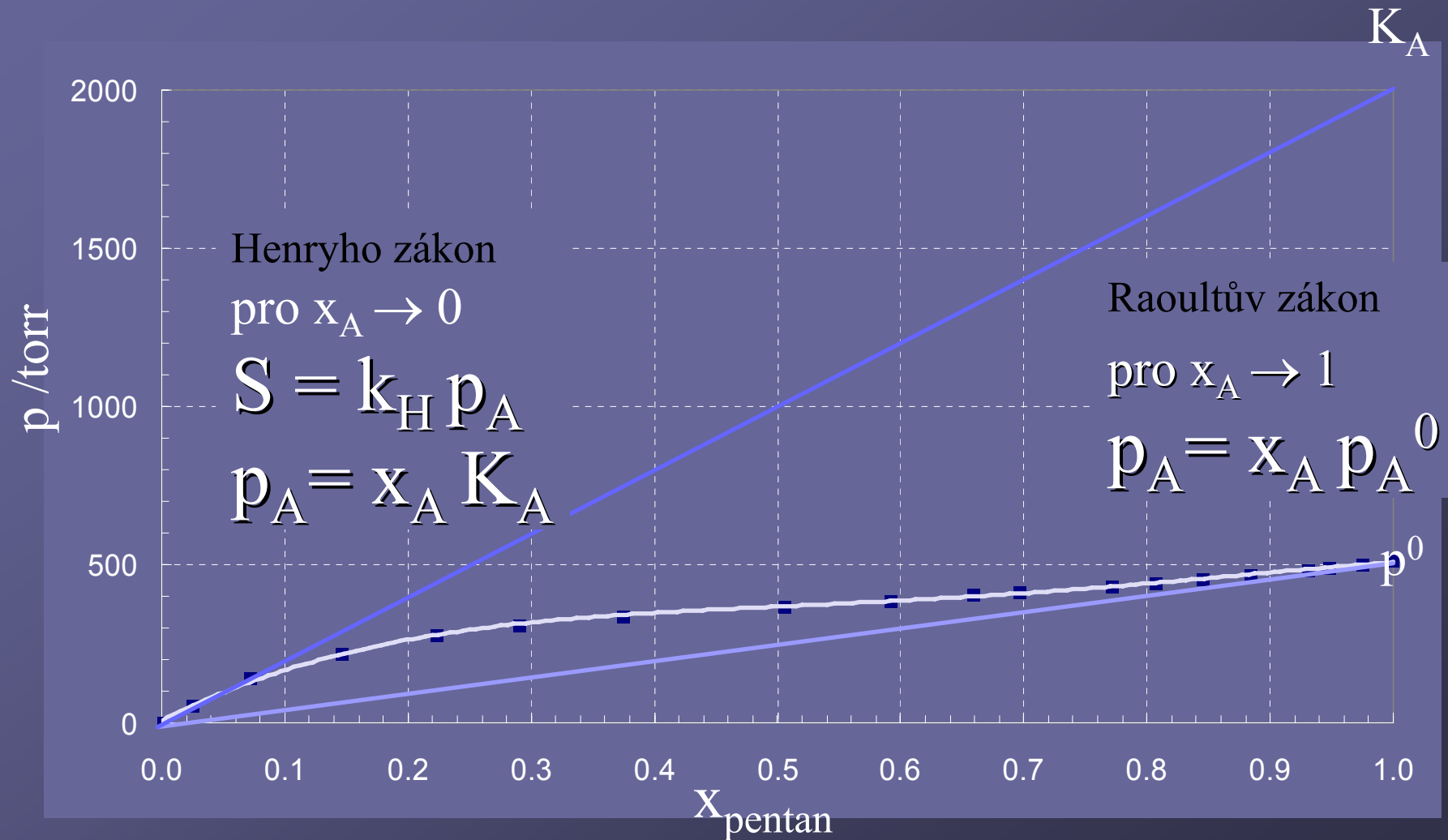
Celkový tlak ethylesteru a anhydridu kys. octové



n-Pentan v methylesteru kys. octové



Raoultův a Henryho zákon



Raoultův zákon

Tlak nasycené páry složky nad roztokem se mění lineárně s molárním zlomkem látky v roztoku.

$$p_A = x_A p_A^0$$

Raoultův zákon platí nejpřesněji pro $x_A \rightarrow 1$

Platí pro chemicky podobné látky

Henryho zákon

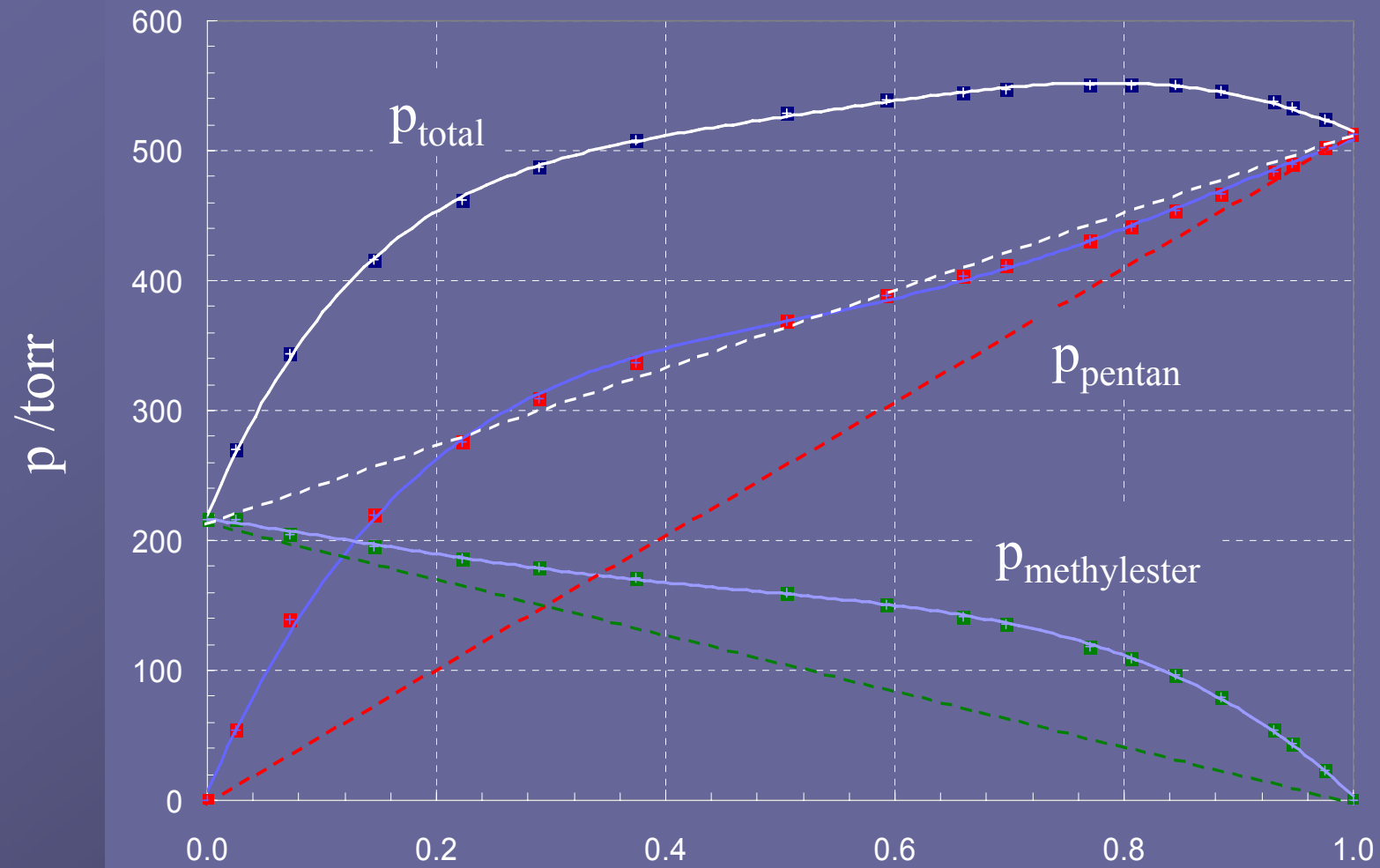
Molární rozpustnost je úměrná parciálnímu tlaku složky nad roztokem. Tlak páry složky je úměrný molárnímu zlomku v roztoku.

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

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.

n-Pentan a methylester kys. octové

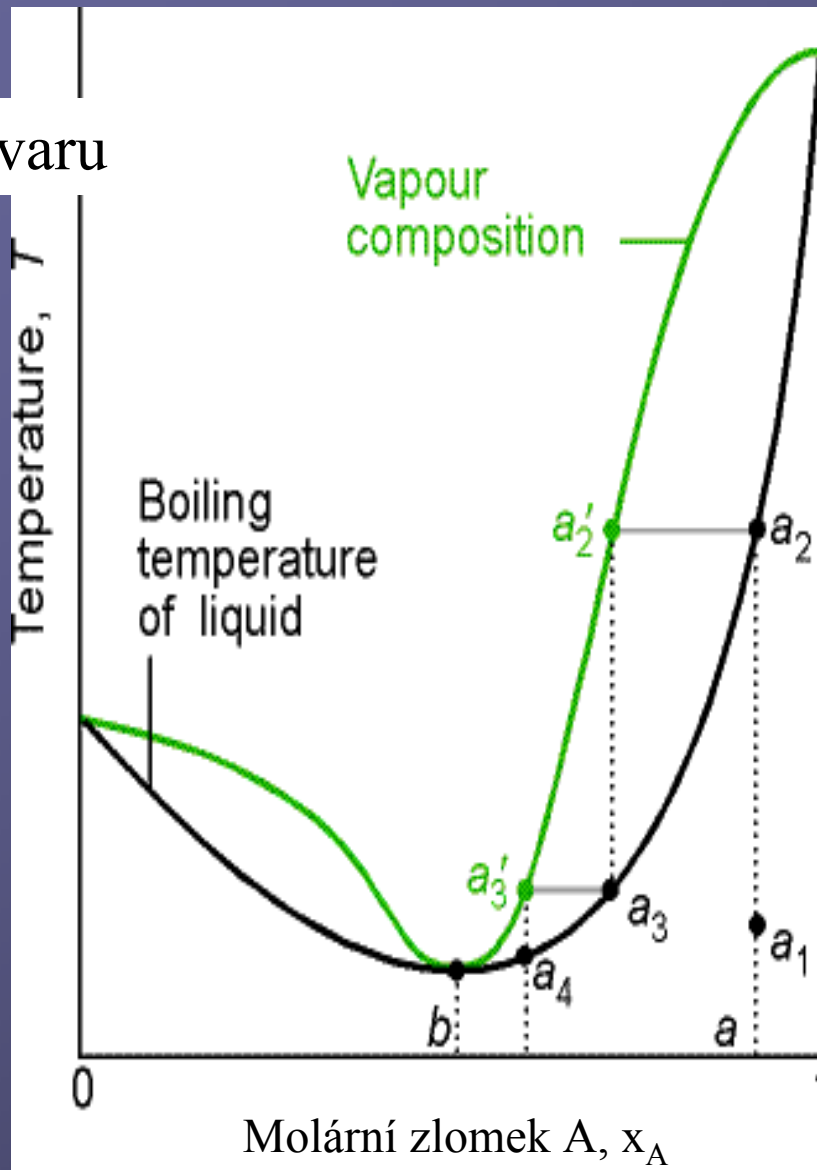


Izotermický $T = \text{konst.}$

X_{pentan}

Azeotropická směs s min. T_v (max. p)

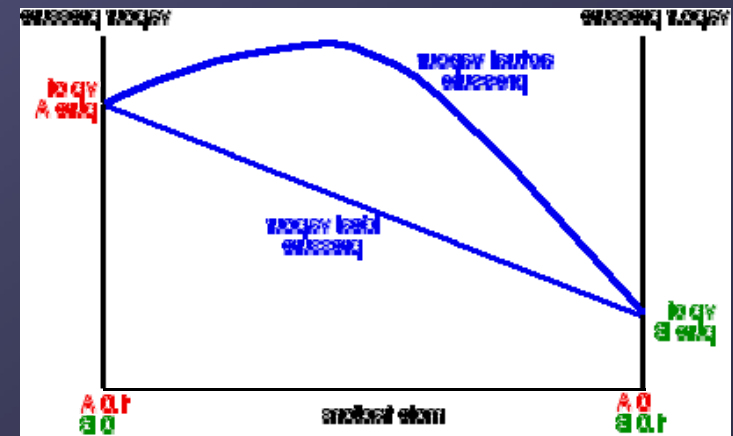
teplota varu



Ethanol – voda

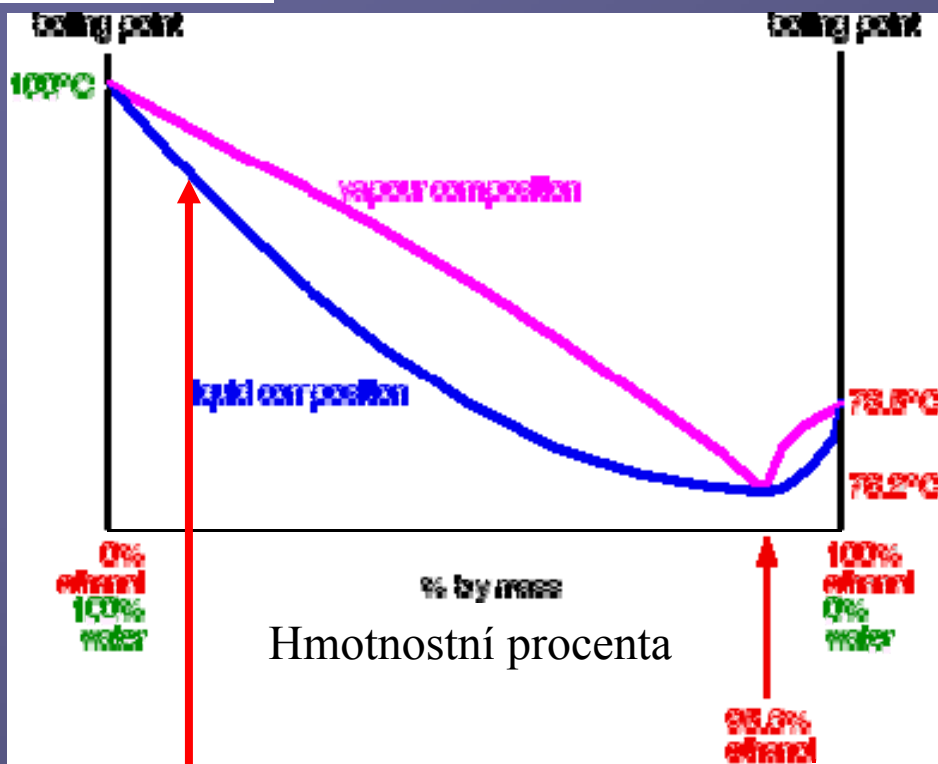
Pozitivní odchylky od Raoultova zákona, A a B ve směsi interagují slaběji než A-A a B-B, směs se vypařuje snadněji než čisté látky

Endotermní rozpouštění



Azeotropická směs s min. T_v (max. p)

teplota varu



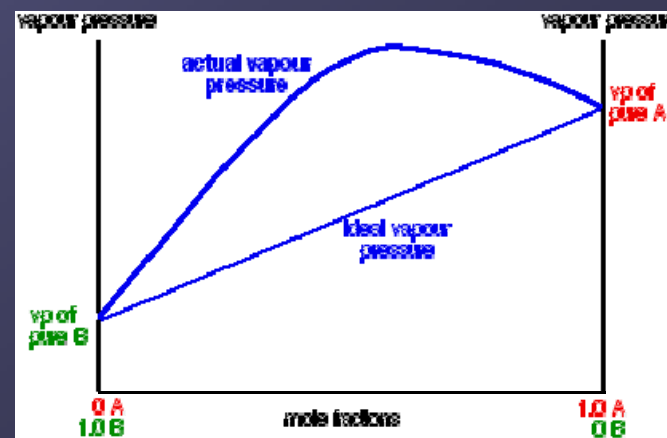
Frakční destilací lze získat ethanol max. 95.6% v destilátu a čistou vodu v destilačním zbytku

Ethanol – voda

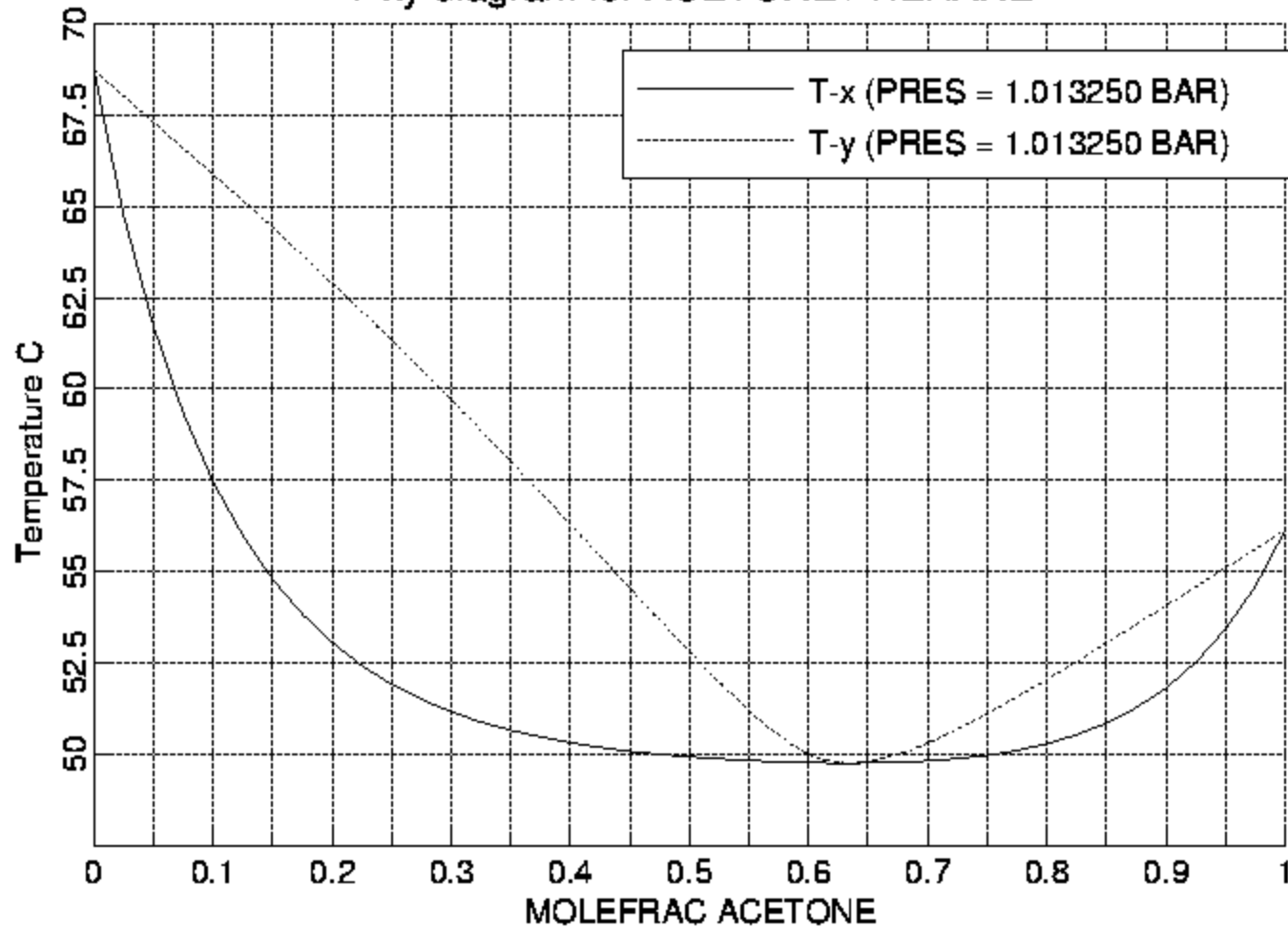
$$w = 95.6\% \quad x = 0.895$$

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



T-xy diagram for ACETONE / HEXANE

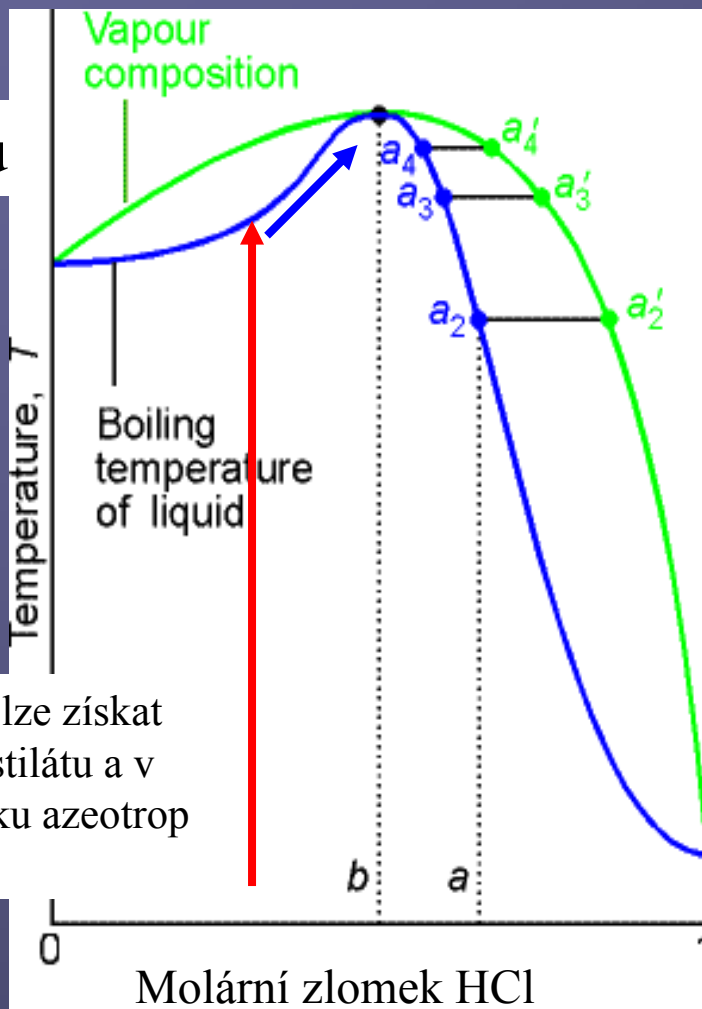


Azeotropická směs s max. T_v (min. p)

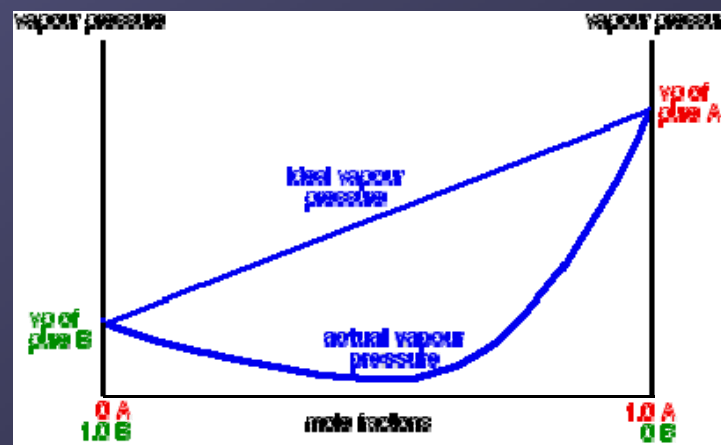
HCl – voda
 108.584 °C
 20.222 % HCl

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

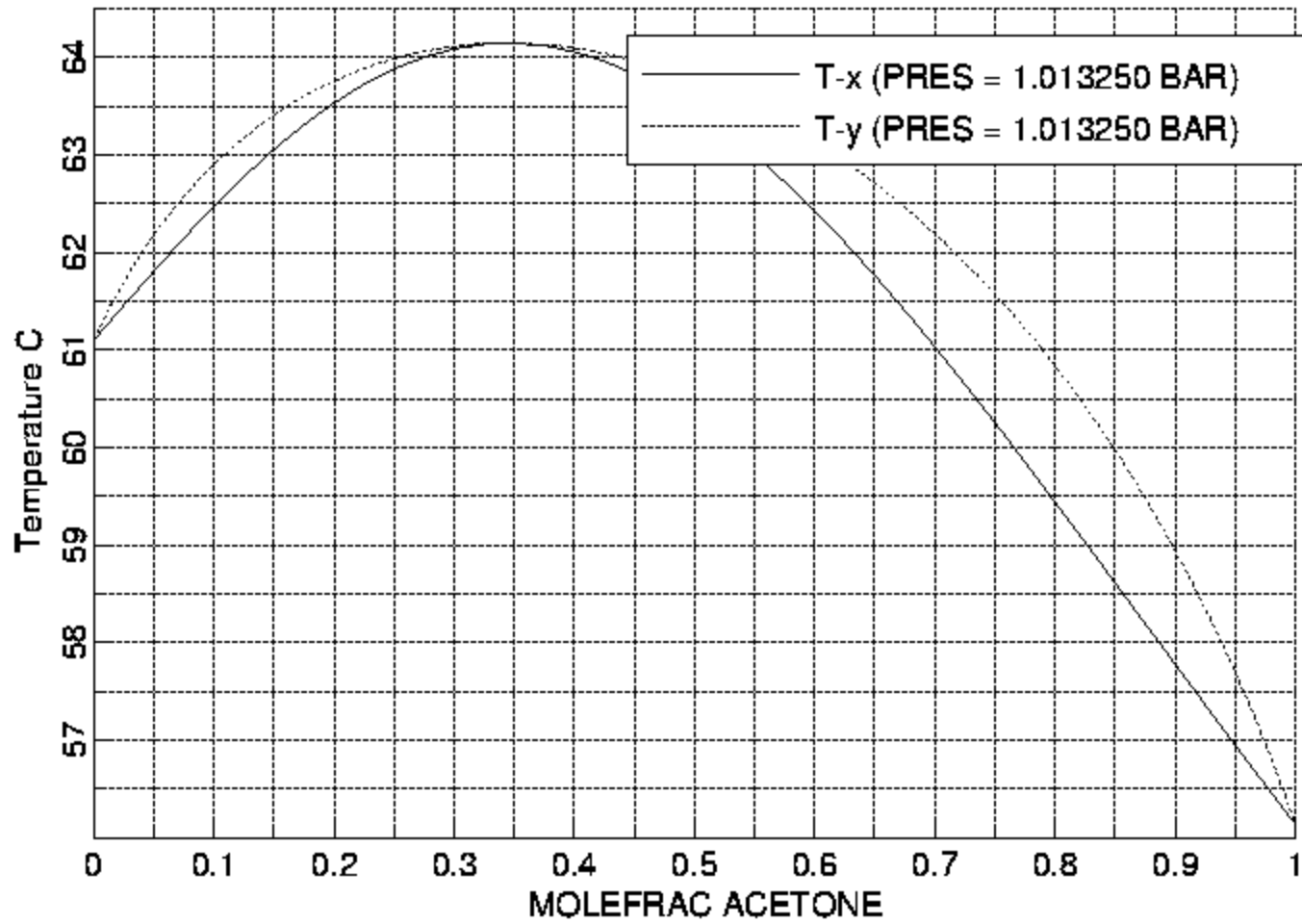
teplota varu



Frakční destilací lze získat čistou vodu v destilátu a v destilačním zbytku azeotrop HCl 20.2%



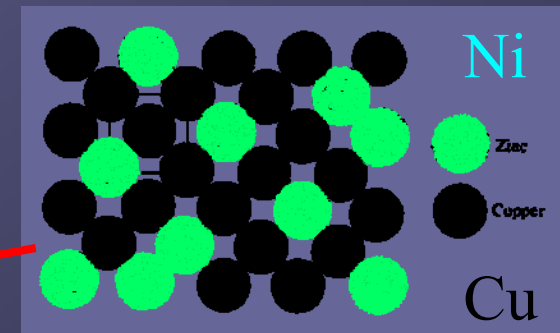
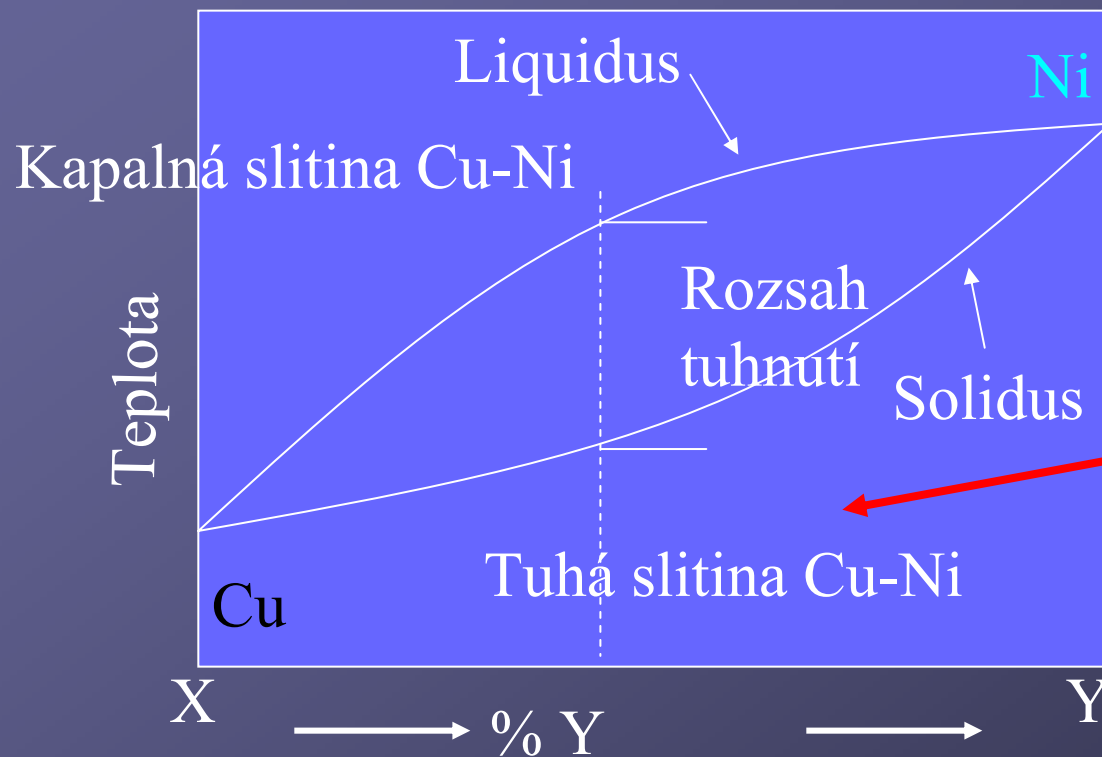
T-xy diagram for ACETONE / CHLOROFORM



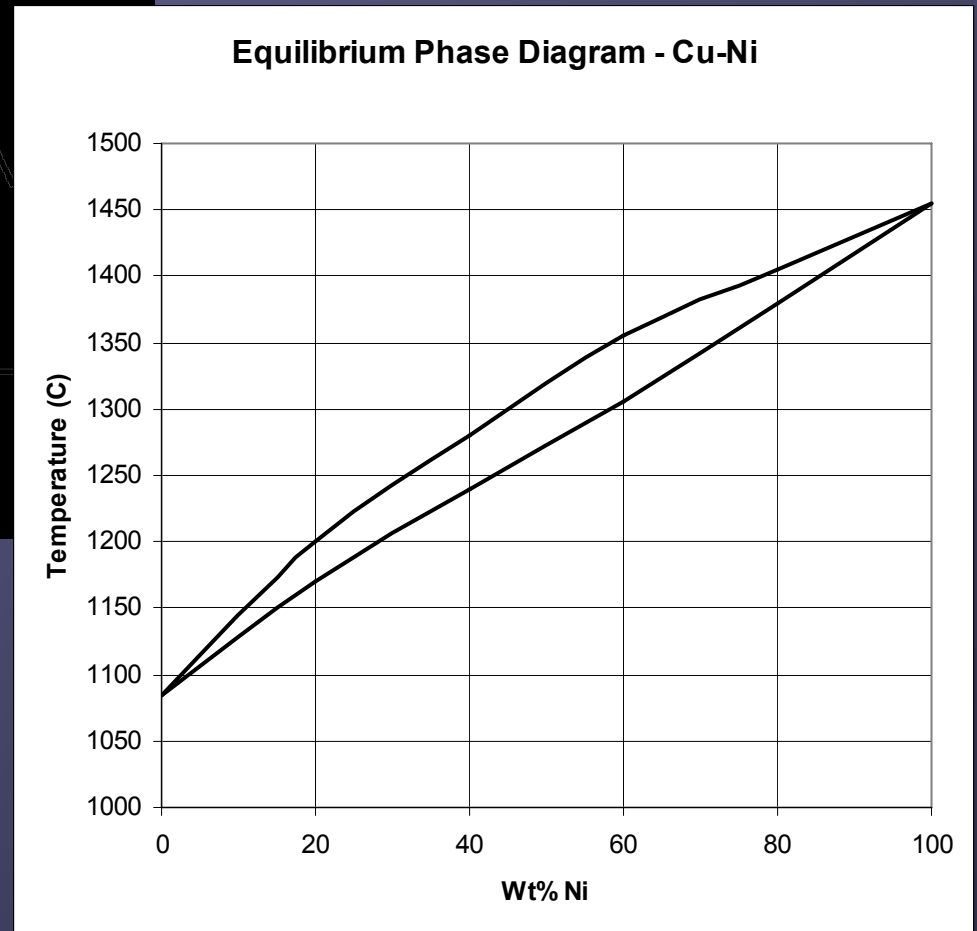
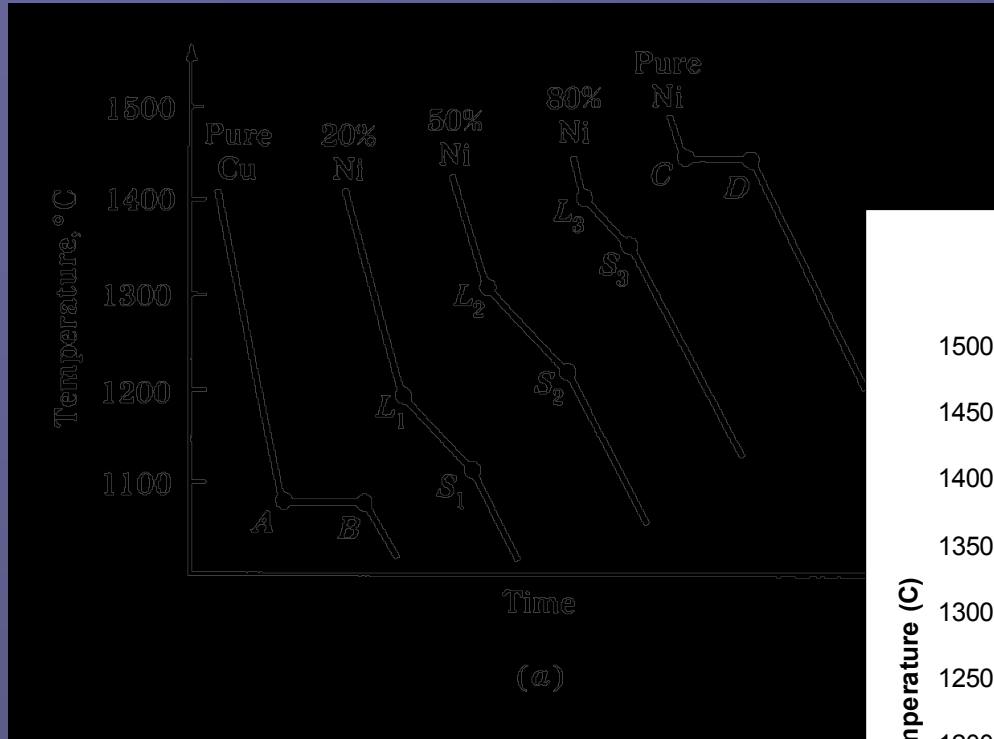
Dvě složky dokonale mísitelní v (l) i (s)

Izobarický: $p = \text{konst.}$

Substituční slitina Cu-Ni

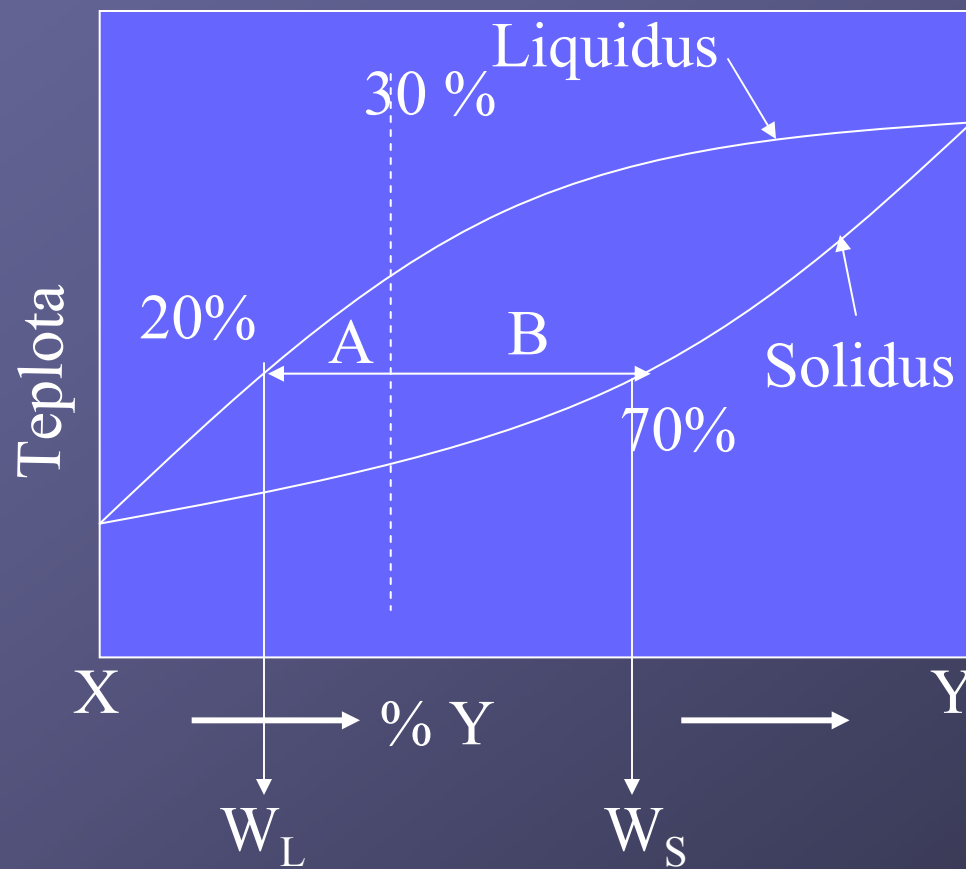


Křivky tuhnutí slitiny Cu-Ni



Pákové pravidlo

Hmotnostní poměr kapalné a pevné fáze



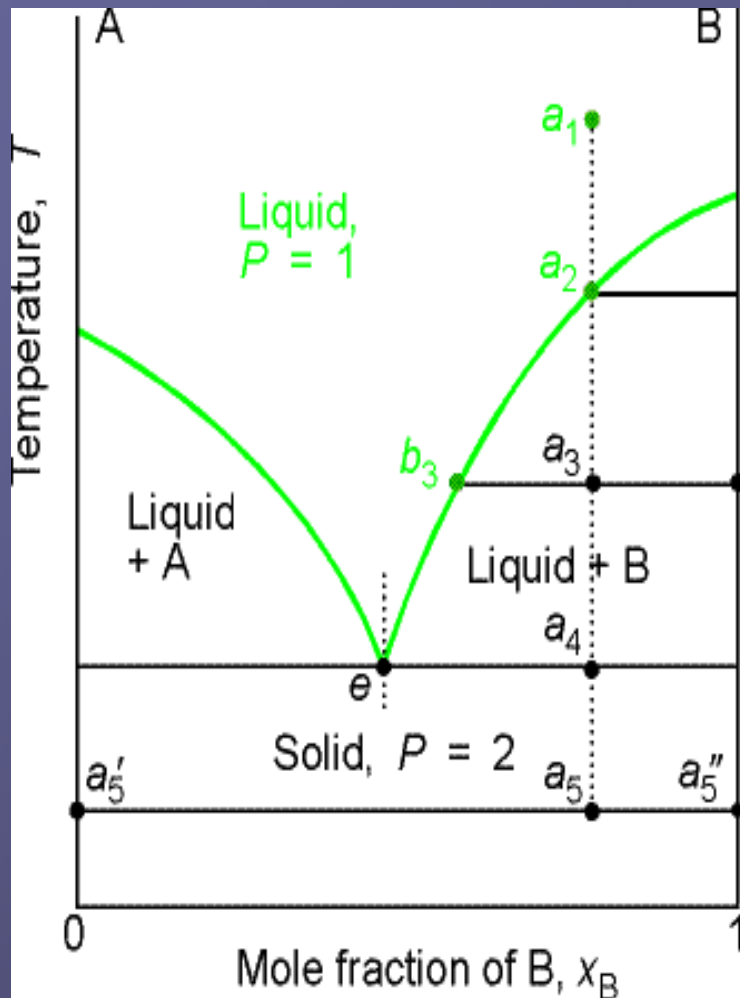
$$W_S = A / (A + B)$$

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

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

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

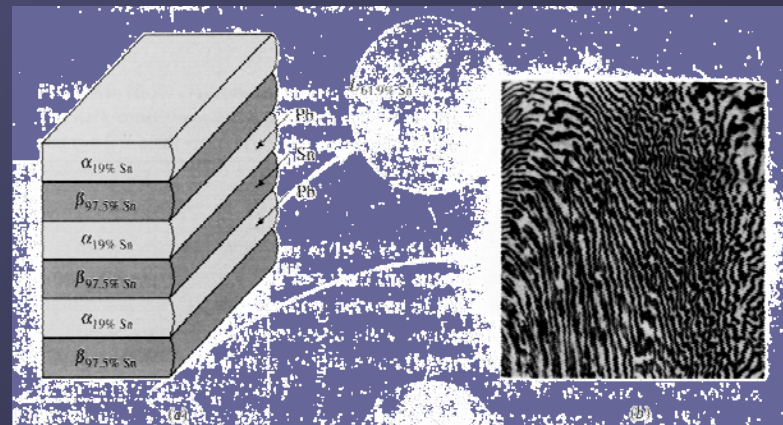
Dvě složky dokonale mísitelné v (l) a dokonale nemísitelné v (s)

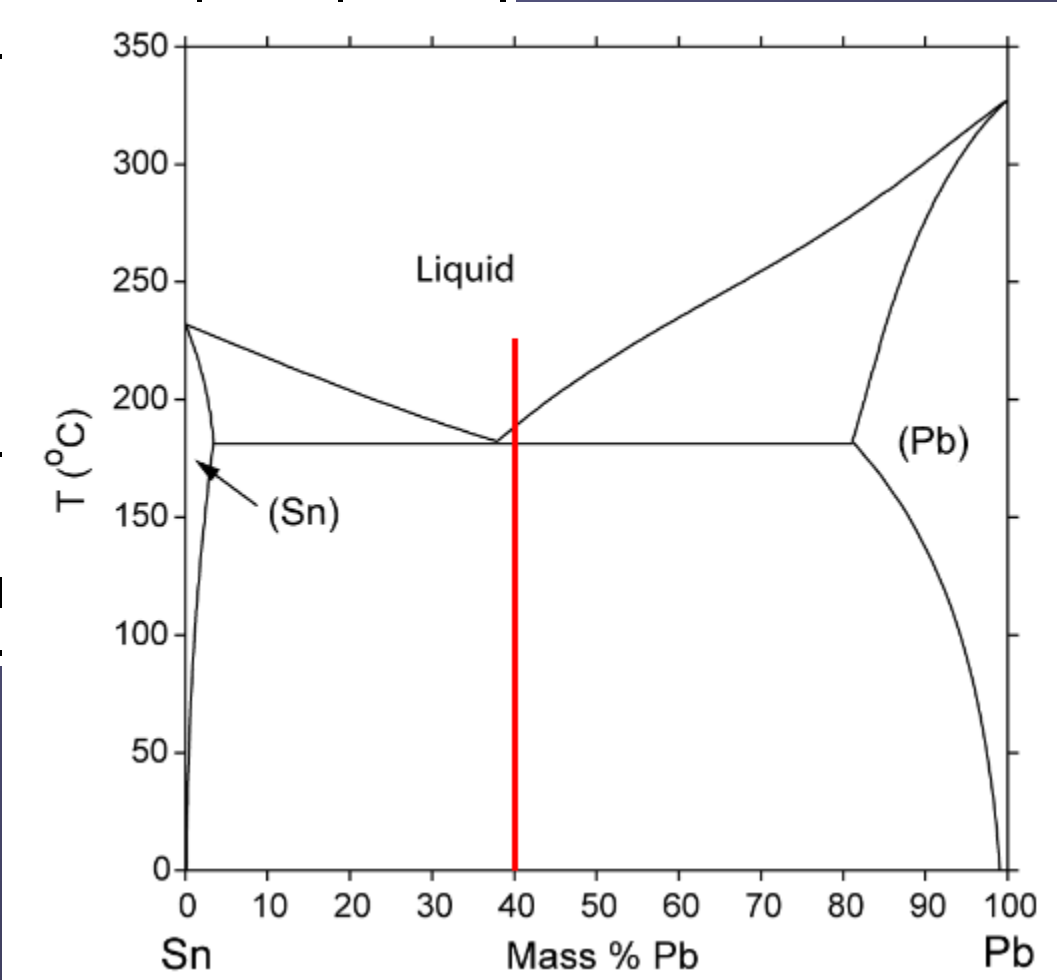
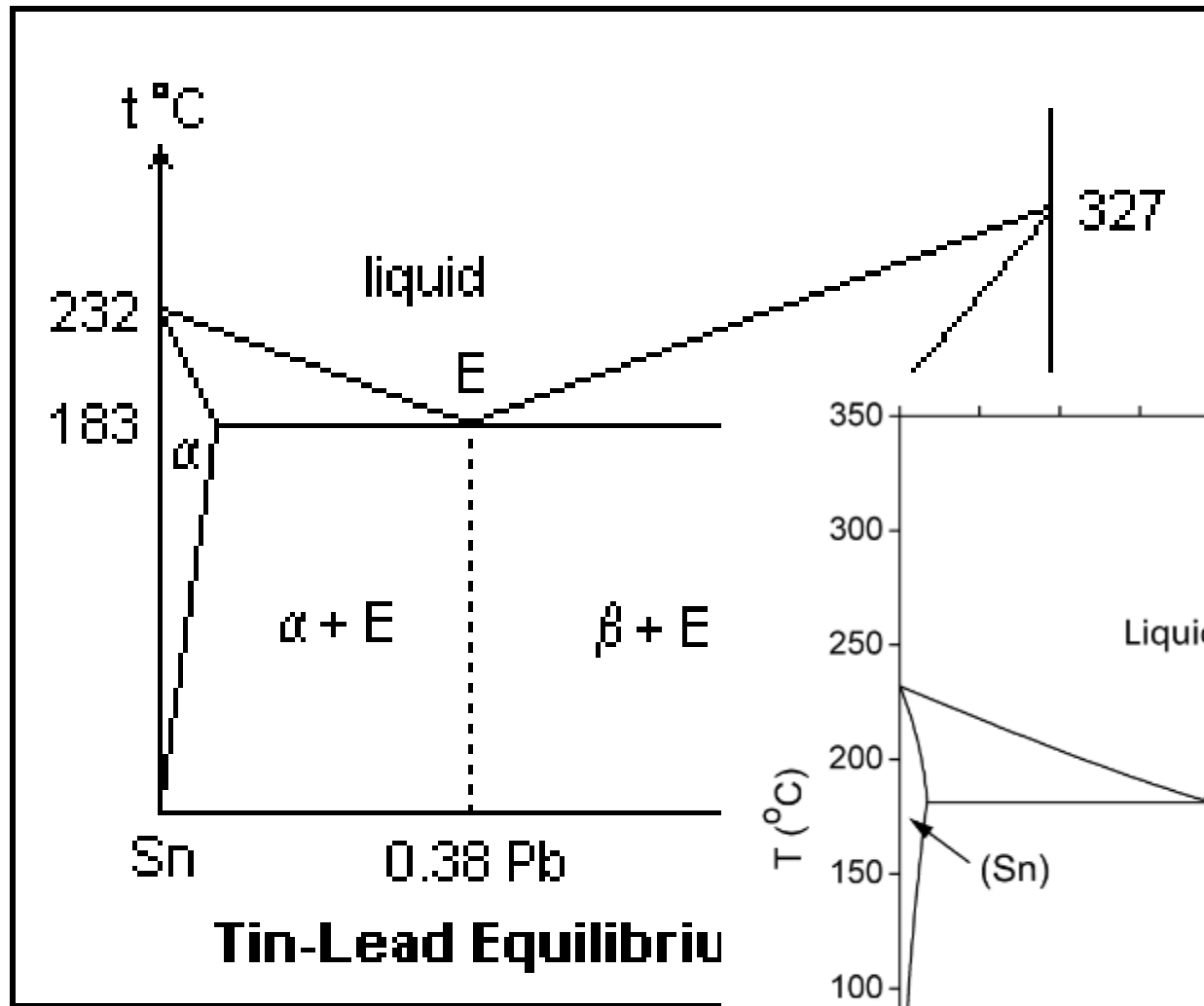


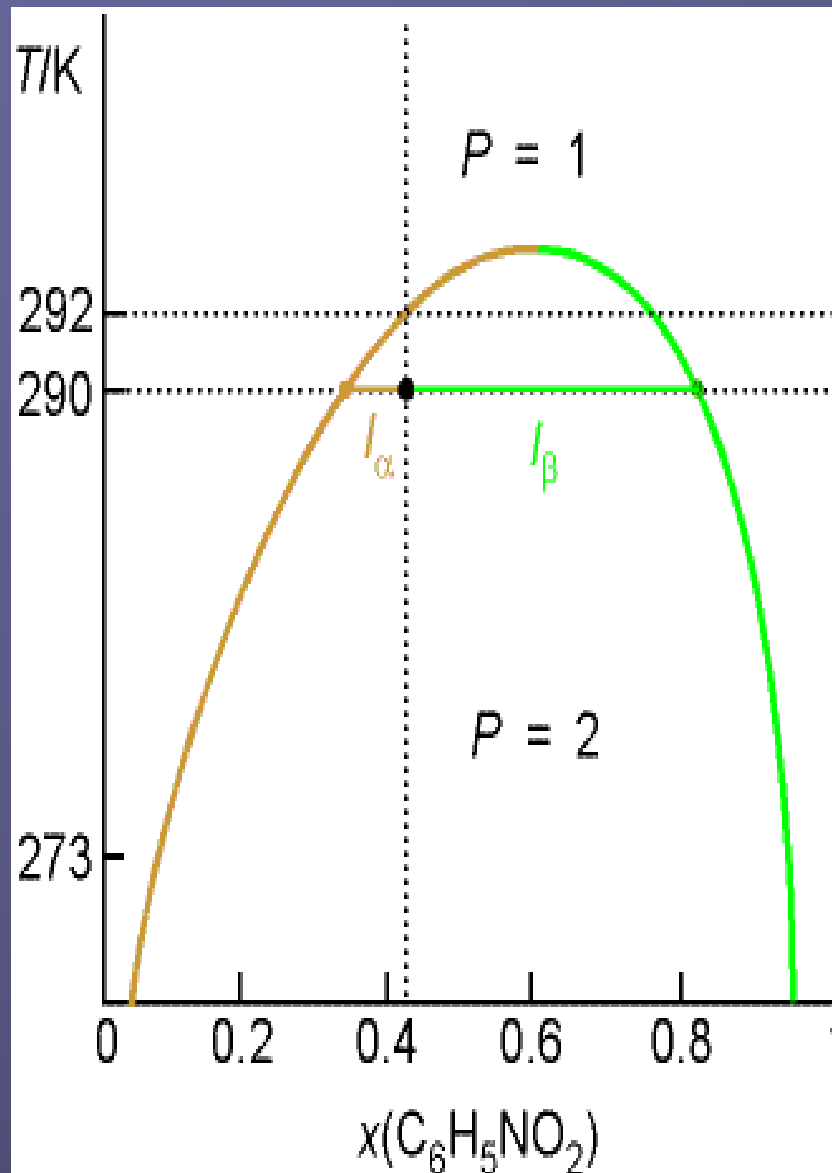
Eutektikum

Při eutektickém složení taje směs při nejnižší teplotě přímo na kapalinu

Pb-Sn pájka (Pb 38%) taje při 183 °C
cín 232 °C a olovo 327 °C

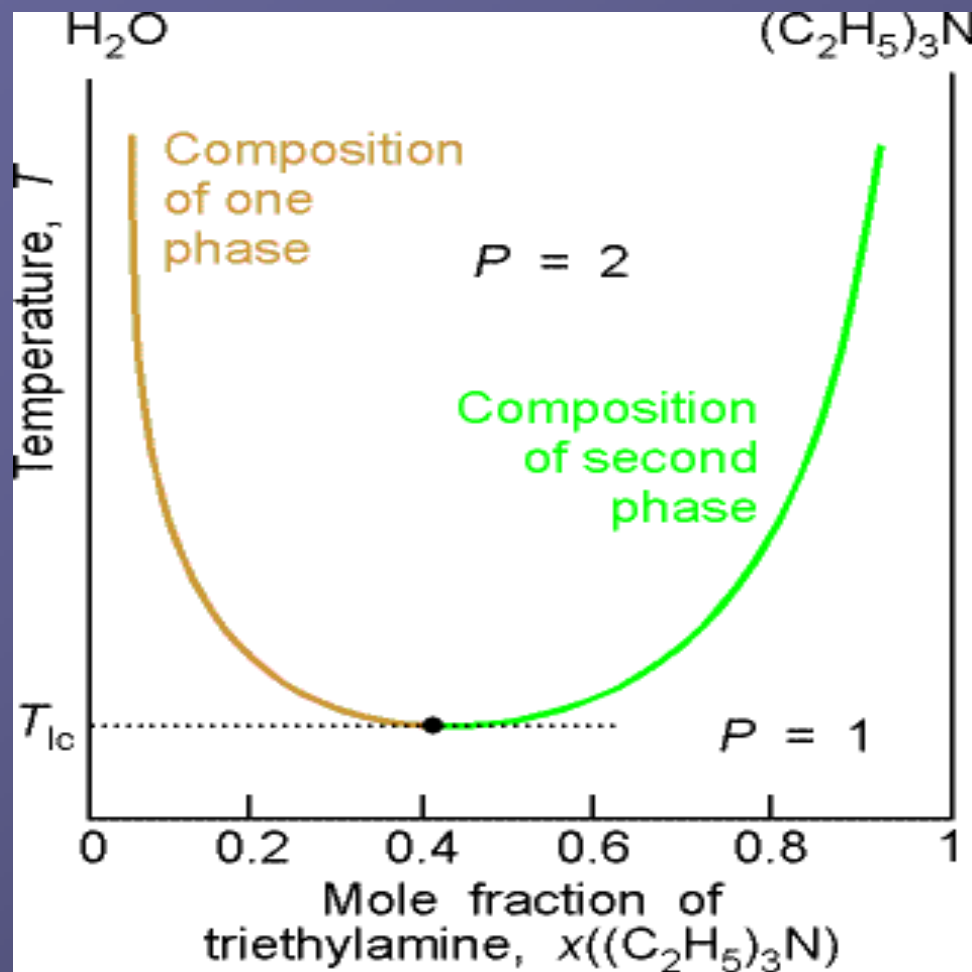






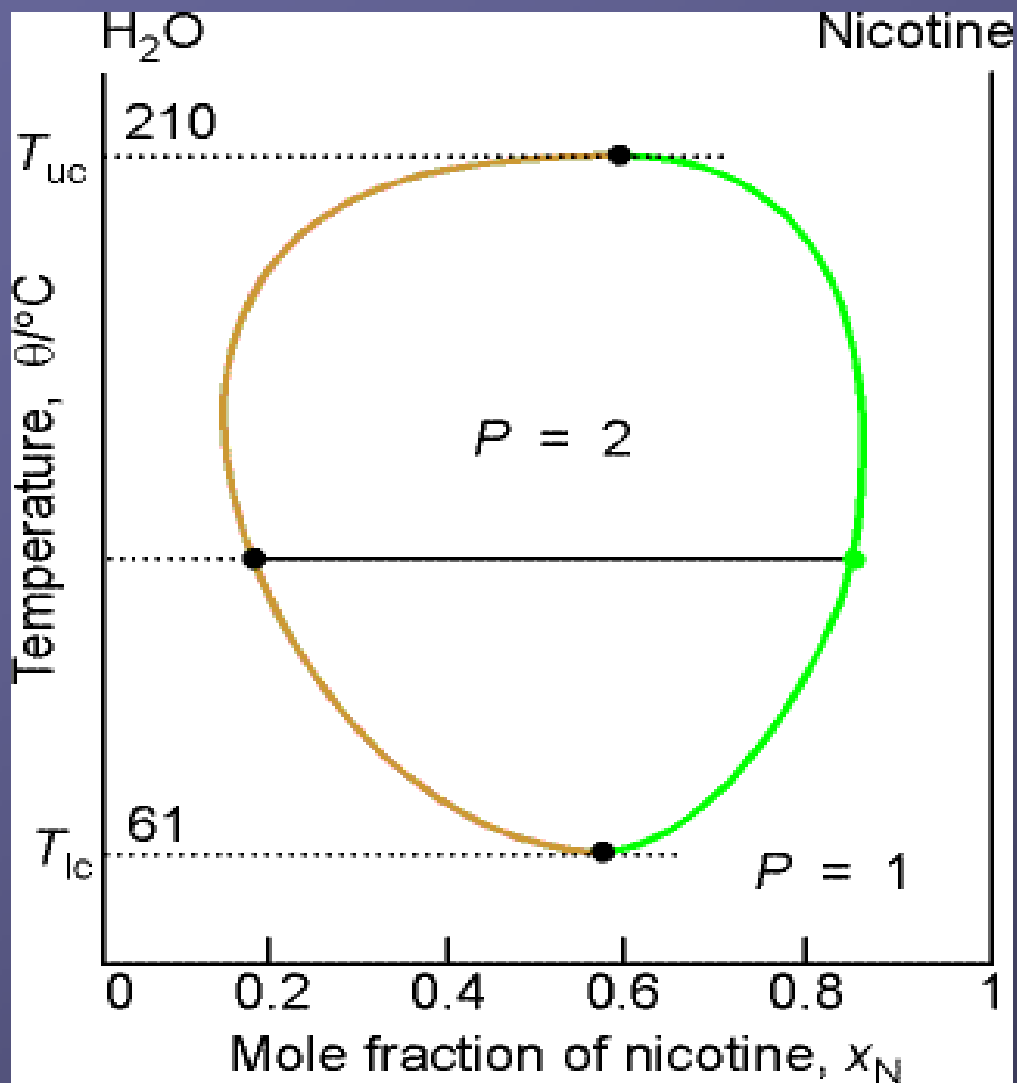
Omezeně mísitelné kapaliny
Hexan- nitrobenzen

Horní kritická teplota



Omezeně mísitelné kapaliny
Voda - triethylamin

Dolní kritická teplota



Omezeně mísitelné kapaliny
Voda - nikotin

Dolní a horní kritická teplota