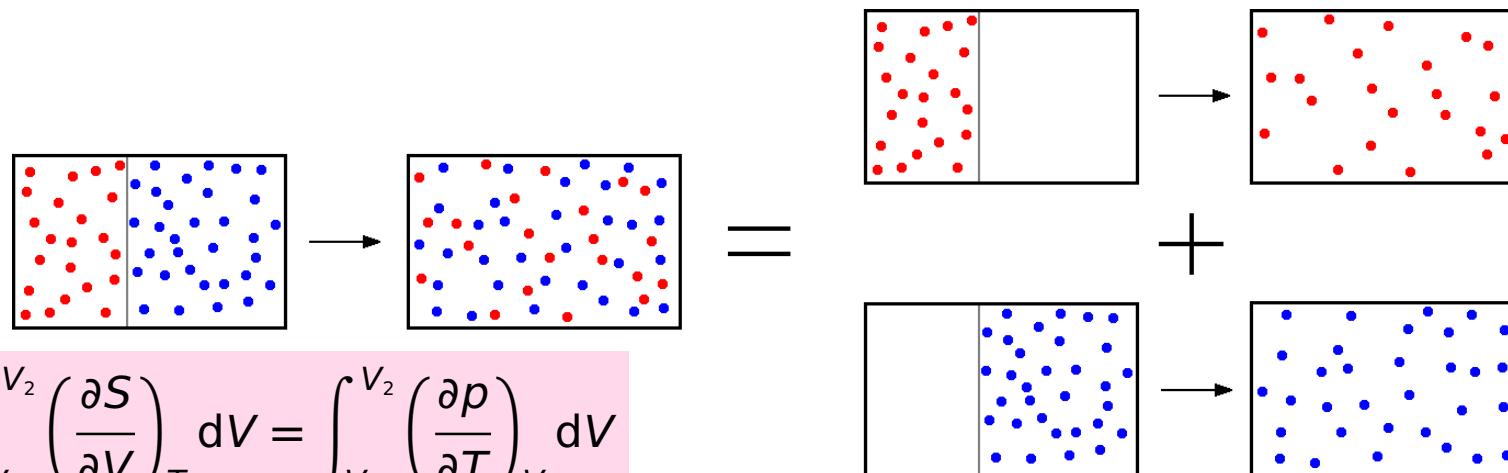


Míšení ideálních plynů: entropie

Ideální plyn = nezávisle se pohybující neinteragující částice



$$V = V_1 + V_2$$

$Q = W = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$
nevratně
adiabaticky
ideální plyn $\Rightarrow [T, p]$

$$\frac{V_1}{V} = \frac{n_1}{n} = x_1$$

$$\Delta S_1 = n_1 R \ln \frac{V}{V_1} = -n_1 R \ln \frac{V_1}{V}, \quad \Delta S_2 = n_2 R \ln \frac{V}{V_2} = -n_2 R \ln \frac{V_2}{V}$$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -n_1 R \ln x_1 - n_2 R \ln x_2 > 0 \quad (\text{nevratný děj})$$

Více složek (na mol, tj. dělíme $n = \sum_i n_i$): $\Delta S_m = -R \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i$

Case study: entropie

Porovnejte změnu entropie při následujících dějích:

- roztátí 1 molu ledu (při 0 °C)

22 J K⁻¹

- ohřátí 1 molu vody z 0 °C na 100 °C

24 J K⁻¹

- vypaření 1 molu vody při 100 °C a 101 325 Pa

110 J K⁻¹

- adiabatické smíchání 1/2 molu vody o teplotě 0 °C s 1/2 molu vody o teplotě 100 °C

0.92 J K⁻¹

- adiabatické smíchání 1/2 molu dusíku o teplotě 23 °C a tlaku 100 kPa s 1/2 molu kyslíku o téže teplotě a tlaku

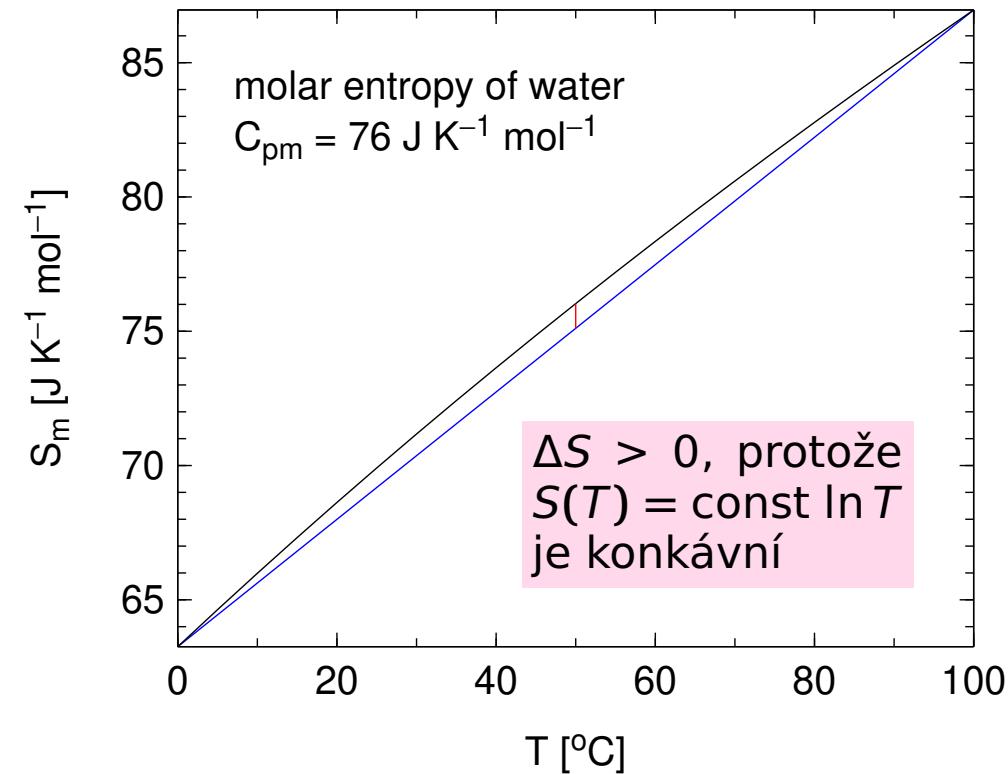
5.8 J K⁻¹

Data:

$$C_{pm}^\ominus(\text{voda}) = 76 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\Delta_{\text{tání}} H_m^\ominus(\text{led}) = 6.0 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\Delta_{\text{výp}} H_m^\ominus(\text{voda}) = 41 \text{ kJ mol}^{-1}$$



Nezávisle se pohybující neinteragující částice:

$$F = U - TS, \quad G = H - TS$$

$$\Delta U = 0, \quad \Delta T = 0, \quad \Delta p = 0 \quad [V] \quad \Delta H = 0, \quad \Delta T = 0, \quad \Delta V = 0 \quad [p]$$

$$\Delta F_m = \Delta U_m - T\Delta S_m = RT \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i < 0 \quad [T, V]$$

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m = RT \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i < 0 \quad [T, p]$$

Důsledek: Minimální práce potřebná k separaci plynů je (na mol směsi)

$$-RT \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i > 0$$

Příklad: Kolik energie je minimálně potřeba na rozdělení 1 m³ vzduchu na kyslík a dusík za teploty 300 K a tlaku 1 bar? Vzduch = 20 % O₂ + 80 % N₂.

$$pV = nRT, \quad W = -nRT \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i = -pV(0.2 \ln 0.2 + 0.8 \ln 0.8) = \underline{50 \text{ kJ}}$$

Definice ideální směsi (ideálního roztoku)

$$\Delta H = 0, \Delta T = 0, \Delta V = 0 [p]$$

$$\Delta S_m = -R \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i$$

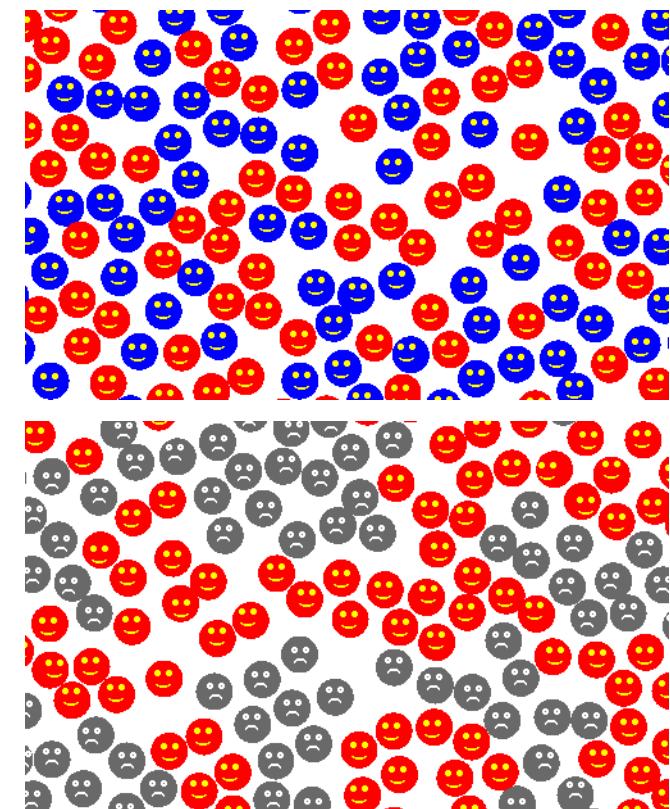
„Molekula nepozná, zda je obklopena kamarády stejné látky nebo jinými molekulami“

- Směsi chovající se přibližně ideálně:

- (g): nepříliš stlačené plyny
- (l): kapalný propan + butan, benzen+toluen, voda + glycerol
- (s): electrum, „bílé zlato“ (substituční slitina Au+Ag)

- Směsi a roztoky chovající se dosti neideálně:

- (g): stlačené chemicky nepodobné plyny
- (l): iontové roztoky, voda + ethanol
- (s): austenit (intersticiální roztok C v γ -Fe, fcc mřížka), Li v C



Budeme potřebovat **Stirlingův vzorec**^{*}: $\ln N! \approx N \ln N - N$

N	$\ln N!$	$N \ln N - N$
100	363.74	360.52
10000	82109	82103

Odvození:

$$\ln N! = \sum_{i=1}^N \ln i \approx \int_1^N x' \ln x \, dx \stackrel{\text{per partes}}{=} [x \ln x - x]_1^N = N \ln N - N + 1 \approx N \ln N - N$$

Přesněji: $\ln N! \stackrel{\text{asympt.}}{=} N \ln N - N + \ln \sqrt{2\pi N} + \frac{1}{12N} - \frac{1}{360N^3} + \frac{1}{1260N^5} - + \dots$

*James Stirling; motor: Robert Stirling

Ideální roztok ze statistické termodynamiky

Substituční slitina • a •

Stejná energie a velikost sousedů •—• = •—• = •—•

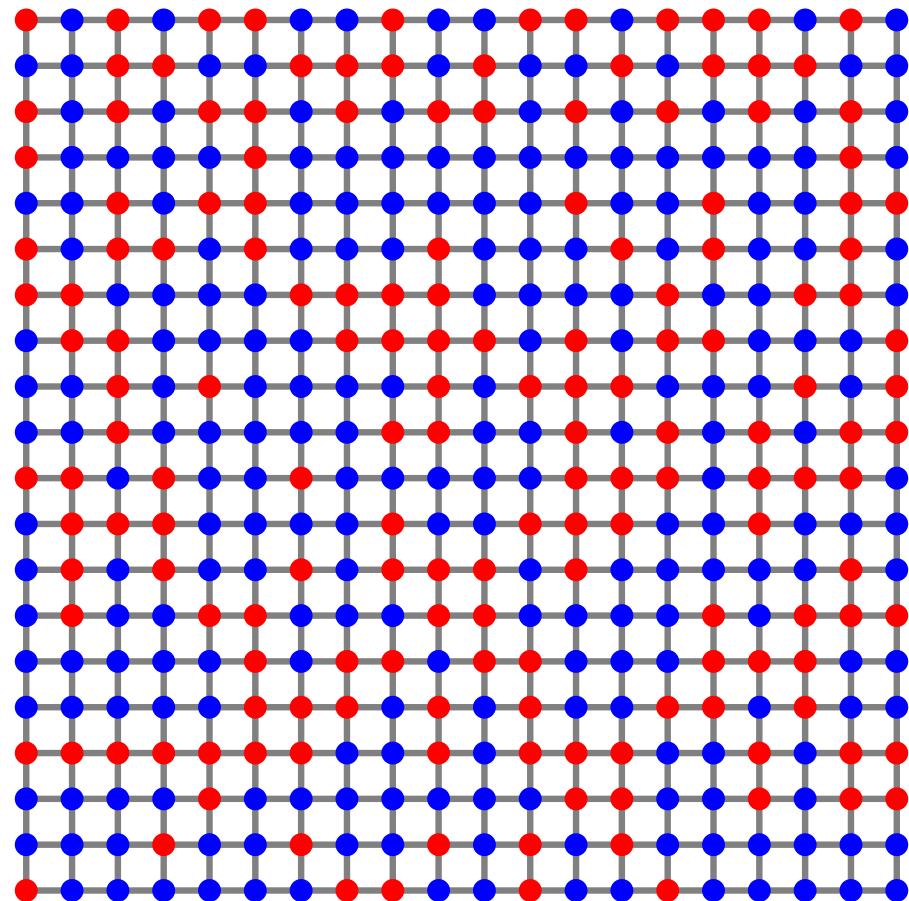
(energie všech uspořádání je stejná)

Smícháme N_1 molekul látky 1 a N_2 molekul látky 2:

$$W = \binom{N}{N_1} = \frac{N!}{N_1! N_2!} \quad N = N_1 + N_2$$

$$\begin{aligned} S &= k_B \ln W = k_B(\ln N! - \ln N_1! - \ln N_2!) \\ &\approx k_B(N \ln N - N - N_1 \ln N_1 + N_1 - N_2 \ln N_2 + N_2) \\ &= k_B((N_1 + N_2) \ln N - N_1 \ln N_1 - N_2 \ln N_2) \\ &= k_B(N_1 \ln N - N_1 \ln N_1 + N_2 \ln N - N_2 \ln N_2) \\ &= -k_B \left(N_1 \ln \frac{N_1}{N} + N_2 \ln \frac{N_2}{N} \right) \\ &= -k_B N(x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2) \end{aligned}$$

$$S_m = -R(x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2)$$



$$\text{Srov. s } S = -k_B \sum_{\psi} \pi(\psi) \ln \pi(\psi)$$

Standardní stav = jednoduchý dobře definovaný stav látky, pro který tabelujeme data a od něhož počítáme reálné chování – nějakou veličinu $Y(T, p)$.

- Standardní stav „°“ = čistá složka ve stavu ideálního plynu za teploty soustavy T a standardního tlaku ($p^{\text{st}} = 1 \text{ bar}$, dříve $1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$).
 - volné neinteragující molekuly (lze snadno počítat kvantovým softwarem)
 - látka nemusí ve stavu plynu za tlaku p^{st} existovat
 - „za nulového tlaku“ je entropie ∞ , proto volíme p^{st}
- Standardní stav „•“ = čistá složka za teploty a tlaku soustavy
 - vhodné pro kapaliny a pevné látky (krystaly)
 - obvykle za tlaku p^{st} (jiné tlaky zde nebudeme uvažovat, za běžných tlaků je vliv tlaku malý)
- Vhodný nespecifikovaný standardní stav „⊕“
(další standardní stavy příště...)

Směšovací a dodatkové veličiny

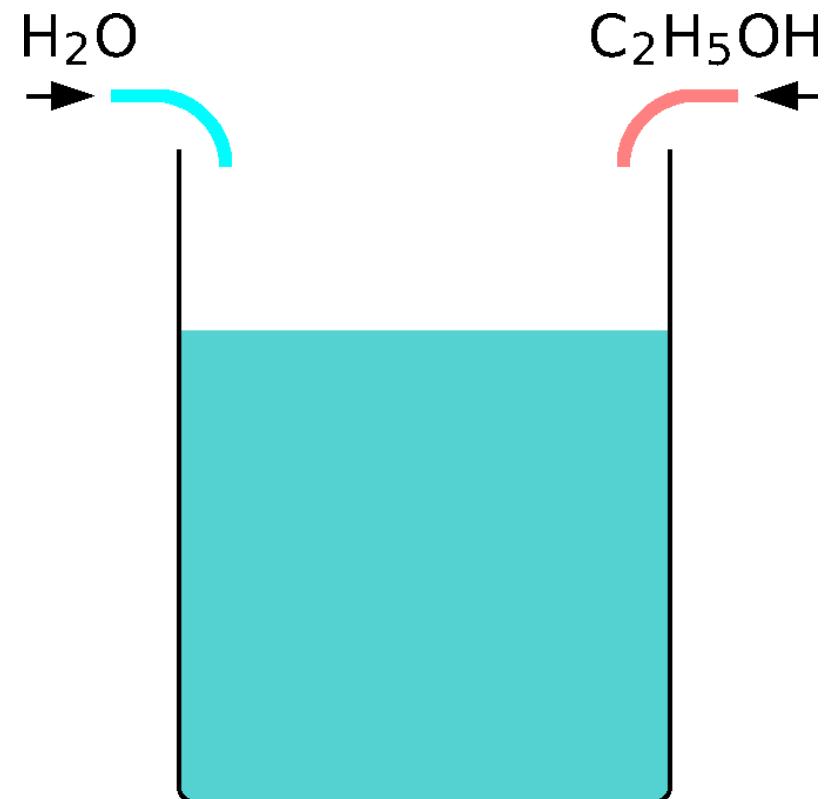
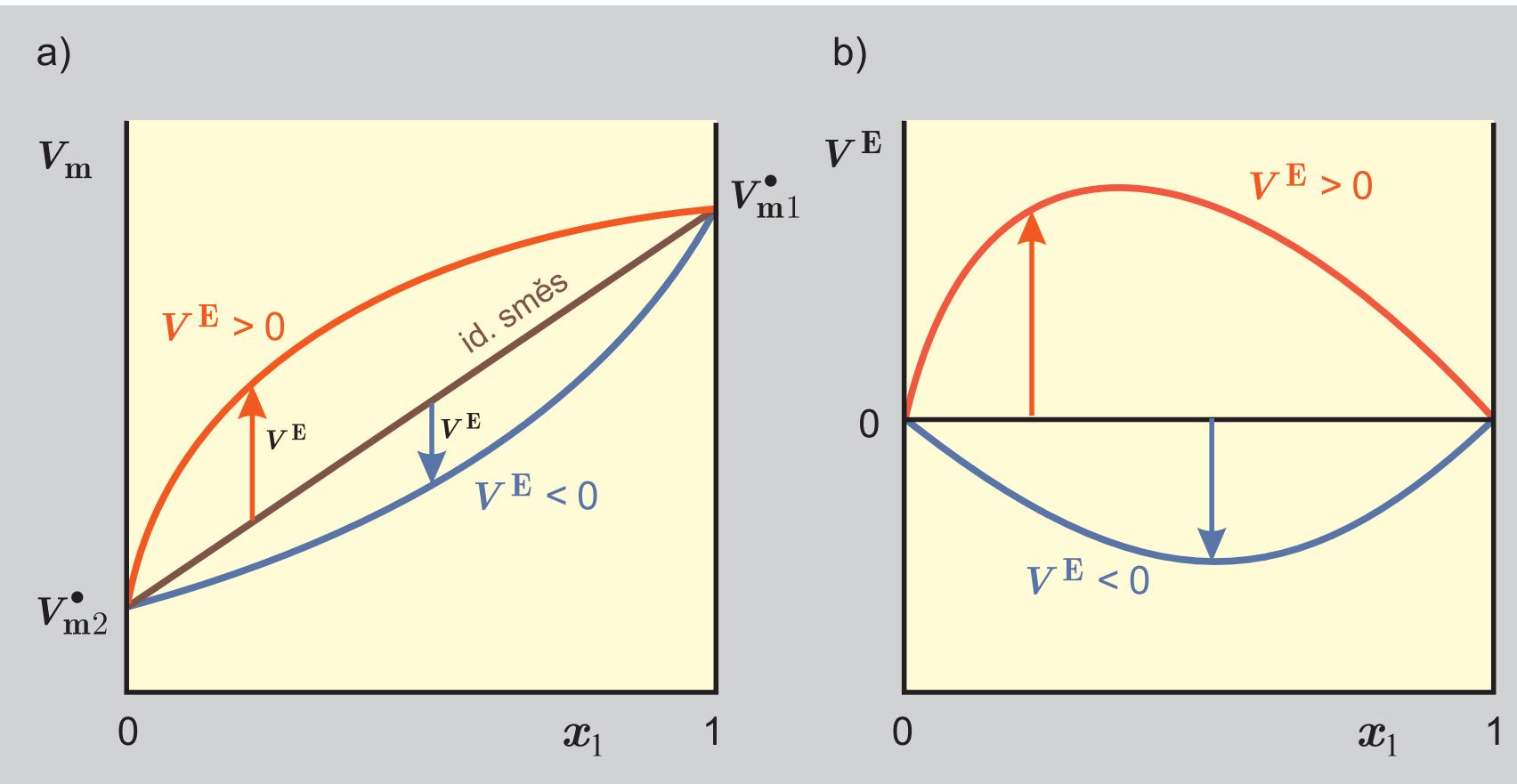
Definice (dle definice jsou vždy molární):

směšovací (*mixing*): $Y^M = Y_m - \sum_{i=1}^k x_i Y_{mi}^\ominus$ [p, T]

dodatková (excess): $Y^E = Y_m - Y_m^{\text{id. směs}}$ [p, T] id. směs pro S, F, G obsahuje člen $\sum_{i=1}^k x_i \ln x_i$

$$Y^M = Y^E \text{ pro } V, U, H$$

$$Y^M \neq Y^E \text{ pro } S, F, G$$



Příklady

Příklad: Při 20 °C je dodatkový objem 20 mol.% roztoku ethanolu roven $-0.90 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$. Vyčtěte molární objem této směsi, víte-li, že molární objem vody je $18.05 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ a alkoholu $58.36 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$.

$$V_m = \sum_{i=1}^k x_i V_{mi}^\ominus + V^E \quad [p, T]$$

$$0.8 \times 18.05 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} + 0.2 \times 58.36 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} - 0.90 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} = \underline{\underline{25.21 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}}}$$

Příklad: Při smíšení 6 mol vody a 4 mol ethanolu se uvolnilo 5020 J tepla. $H^E = ?$

$$x_{\text{voda}} = 0.6$$

$$H^E = \frac{-5020 \text{ J}}{10 \text{ mol}} = \underline{\underline{-502 \text{ J mol}^{-1}}}$$

Příklady

Příklad: Při 20 °C je hustota čistého ethylalkoholu 789.32 kg m⁻³, čisté vody 998.21 kg m⁻³ a směsi (50 hm.%) 913.81 kg m⁻³. Jaký je dodatkový objem?

$$x_{\text{EtOH}} = \frac{0.5/M(\text{EtOH})}{0.5/M(\text{EtOH}) + 0.5/M(\text{H}_2\text{O})} = \frac{0.5/46.06844}{0.5/46.06844 + 0.5/18.01528} = 0.28112$$

$$x_{\text{H}_2\text{O}} = 1 - x_{\text{EtOH}} = 0.71888$$

$$V_m(\text{EtOH}) = \frac{M(\text{EtOH})}{\varrho(\text{EtOH})} = 58.3647 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$V_m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{M(\text{H}_2\text{O})}{\varrho(\text{H}_2\text{O})} = 18.0476 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$V_m(\odot) = \frac{\overline{M}(\odot)}{\varrho(\odot)} = \frac{x_{\text{EtOH}}M(\text{EtOH}) + (1 - x_{\text{EtOH}})M(\text{H}_2\text{O})}{\varrho(\odot)} = 28.3446 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$V_m^E = V_m(\odot) - x_{\text{EtOH}}V_m(\text{EtOH}) - x_{\text{H}_2\text{O}}V_m(\text{H}_2\text{O}) = \underline{-1.037 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}}$$

Parciální molární veličiny

Necht' $Y = Y(p, T, n_1, \dots, n_k)$ je extenzivní veličina.

Definice parciální molární veličiny (neplést s parciálním tlakem!):

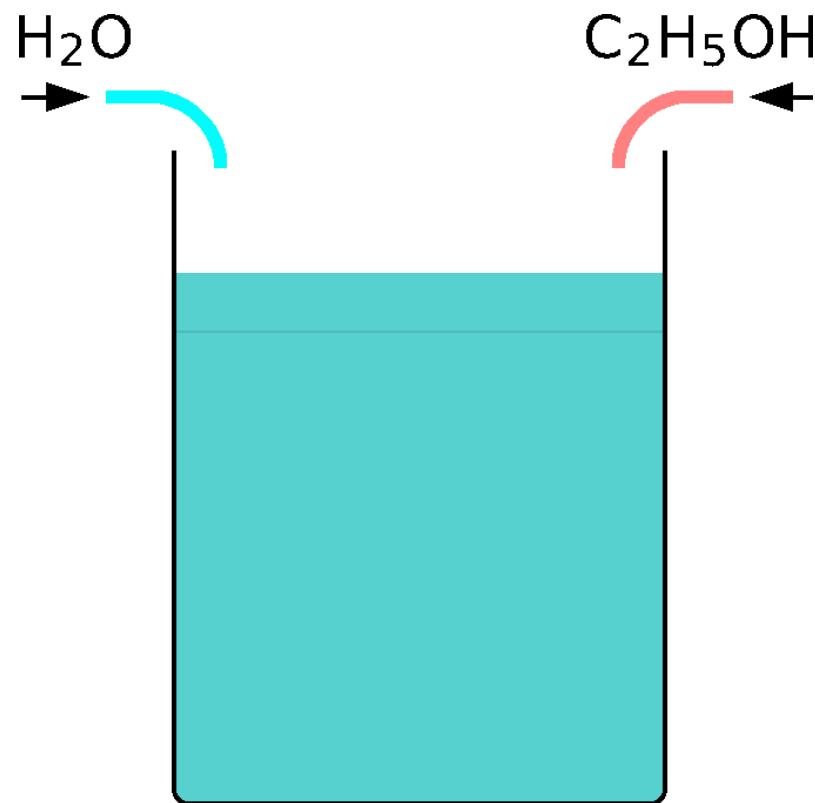
$$\bar{Y}_i = \left(\frac{\partial Y}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j \neq i}$$

Příklad. K 1 L roztoku ethanolu ve vodě ($x_{\text{EtOH}} = 0.4$) jsme přilili $V_+ = 10 \text{ mL}$ absolutního ethanolu. Výsledný objem byl 1009.8 mL. Vypočtěte parciální molární objem.

Data: $\rho_{\text{EtOH}} = 789 \text{ kg m}^{-3}$, $M_{\text{EtOH}} = 46 \text{ g mol}^{-1}$

$$\Delta n = \frac{\rho_{\text{EtOH}} V_+}{M(\text{EtOH})} = 0.1715 \text{ mol}$$

$$\bar{V}_{\text{EtOH}} \approx \frac{\Delta V}{\Delta n} = \frac{9.8 \text{ cm}^3}{0.1715 \text{ mol}} = 57.1 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \approx \underline{\underline{57 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}}}$$



Eulerův vztah

$$Y = \sum_{i=1}^k n_i \bar{Y}_i \quad [T, p, x_1, x_2, \dots]$$

$$Y_m = \sum_{i=1}^k x_i \bar{Y}_i \quad [T, p, x_1, x_2, \dots]$$

Čistá složka: $\bar{Y}_i(x_i = 1) = Y_{mi}^\bullet$

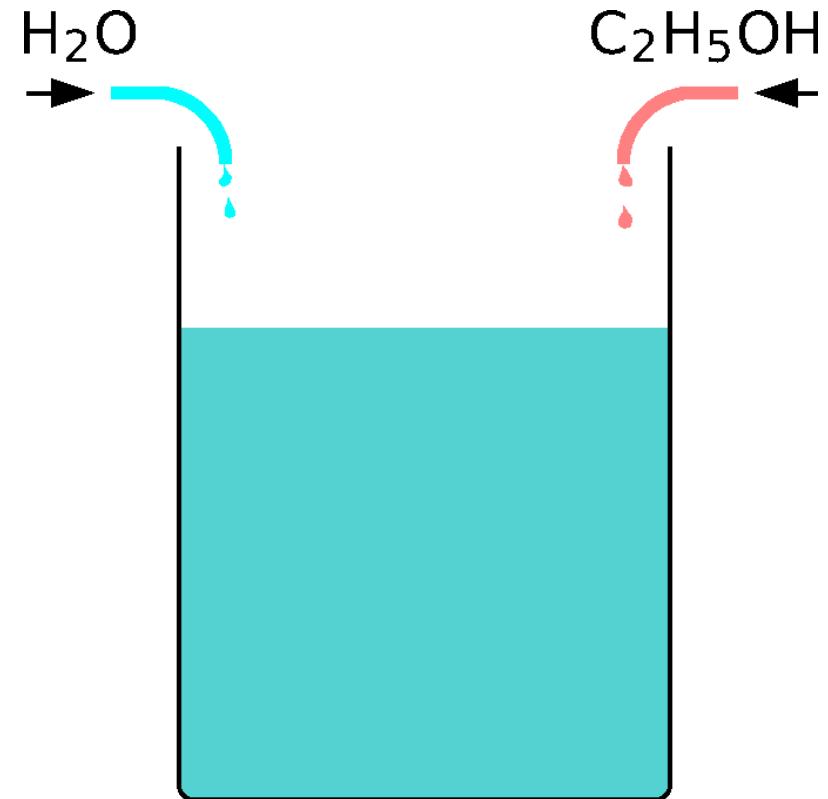
Ideální směs: $V = \sum_{i=1}^k n_i \bar{V}_i = \sum_{i=1}^k n_i V_{mi}^\bullet \Rightarrow \bar{V}_i = V_{mi}^\bullet$

(podobně U, H , avšak ne S, F, G)

Platí obvyklé vztahy: $\bar{H}_i = \bar{U}_i + p \bar{V}_i, \quad \bar{G}_i = \bar{H}_i - T \bar{S}_i, \quad \left(\frac{\partial \bar{G}_i}{\partial p} \right) = \bar{V}_i, \quad \dots$

Změna Y v otevřeném systému:

$$dY = \left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right)_{p, n_1, n_2, \dots} dT + \left(\frac{\partial Y}{\partial p} \right)_{T, n_1, n_2, \dots} dp + \sum_{i=1}^k \bar{Y}_i dn_i$$



Výpočet \bar{Y}_i z $Y_m(x_1)$ u binární směsi (úseková metoda)

$$\begin{aligned}\bar{Y}_1 &= \left(\frac{\partial Y}{\partial n_1} \right)_{T,p,n_2} = \frac{\partial(nY_m)}{\partial n_1} \quad \text{nebudu psát } T,p,n_2 \\ &= \frac{\partial([n_1 + n_2]Y_m)}{\partial n_1} = 1 \cdot Y_m + [n_1 + n_2] \frac{\partial Y_m}{\partial n_1} = Y_m + n \frac{\partial Y_m}{\partial x_1} \times \frac{\partial x_1}{\partial n_1}\end{aligned}$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial n_1} = \frac{\partial[n_1/(n_1 + n_2)]}{\partial n_1} = \frac{1 \times (n_1 + n_2) - n_1 \times 1}{(n_1 + n_2)^2} = \frac{n_2}{n^2}$$

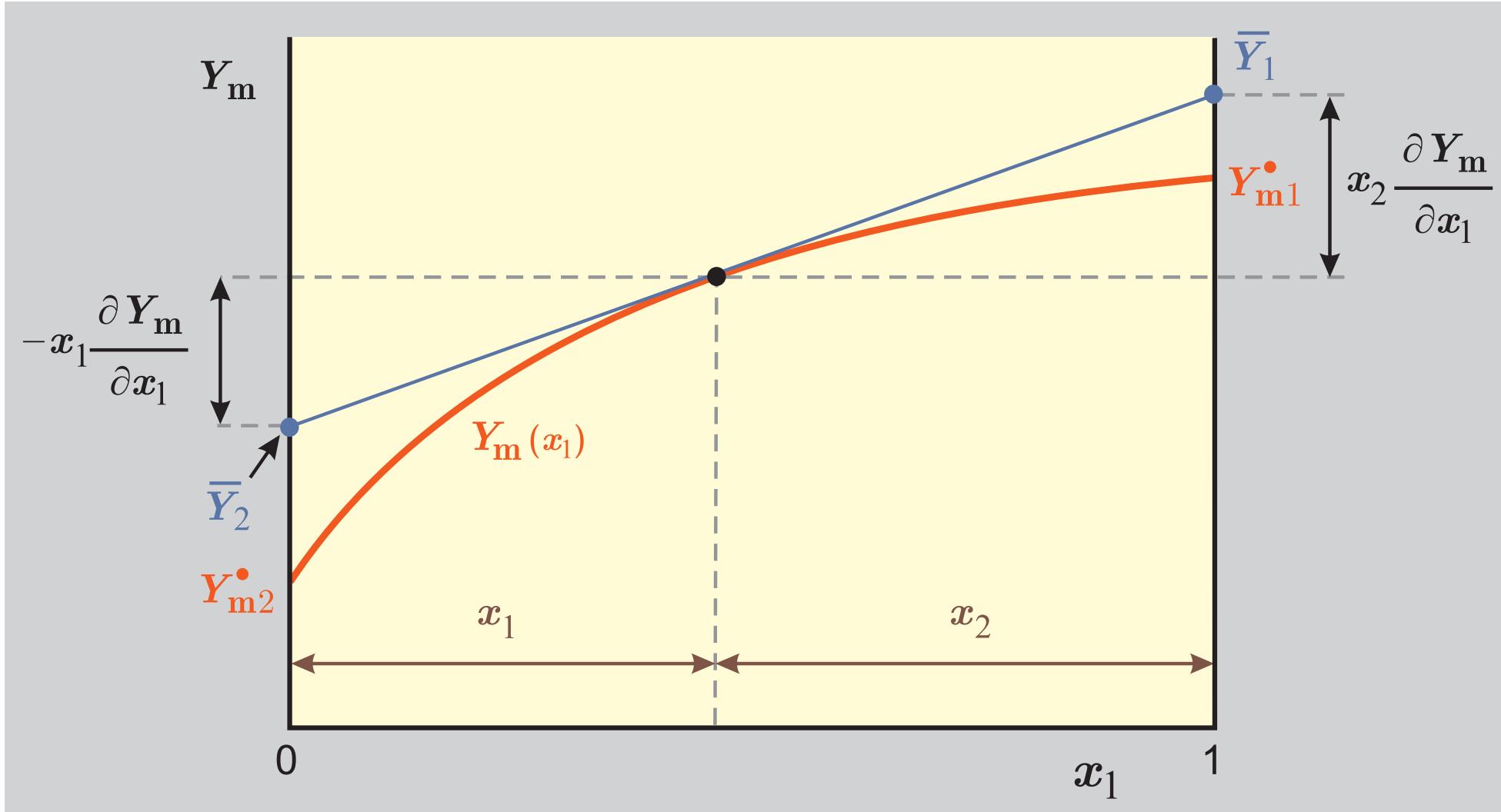
$$\begin{aligned}\bar{Y}_1 &= Y_m + n \frac{\partial Y_m}{\partial x_1} \frac{n_2}{n^2} \\ &= Y_m + x_2 \left(\frac{\partial Y_m}{\partial x_1} \right)_{T,p}\end{aligned}$$

Po záměně $x_1 \leftrightarrow x_2$:

$$\bar{Y}_2 = Y_m + x_1 \left(\frac{\partial Y_m}{\partial x_2} \right)_{T,p} = Y_m - x_1 \left(\frac{\partial Y_m}{\partial x_1} \right)_{T,p}$$

Výpočet \bar{Y}_i z $Y_m(x_1)$ u binární směsi (úseková metoda)

$$\bar{Y}_1 = Y_m + x_2 \left(\frac{\partial Y_m}{\partial x_1} \right)_{T,p}, \quad \bar{Y}_2 = Y_m - x_1 \left(\frac{\partial Y_m}{\partial x_1} \right)_{T,p}$$



Příklad

Stanovte \bar{V}_1 a \bar{V}_2 pro roztok ethanolu (1) ve vodě (2) graficky metodou úseků pro $x_1 = 0.4$.

- zobrazíme $V_m(x_1)$ (van Laarova rovnice)

$$\Rightarrow \bar{V}_1 = 57.2 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}, \bar{V}_2 = 17.0 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

- přesněji: zobrazíme $V^E = V_m - x_1 V_{m,1}^\bullet - x_2 V_{m,2}^\bullet$

$$\Rightarrow \bar{V}_1^E = -1.151 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}, \bar{V}_2^E = -1.067 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$\bar{V}_1 = V_{m,1}^\bullet + \bar{V}_1^E = (58.364 - 1.151) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} = 57.21 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

$$\bar{V}_2 = V_{m,2}^\bullet + \bar{V}_2^E = (18.047 - 1.067) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} = 16.98 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$$

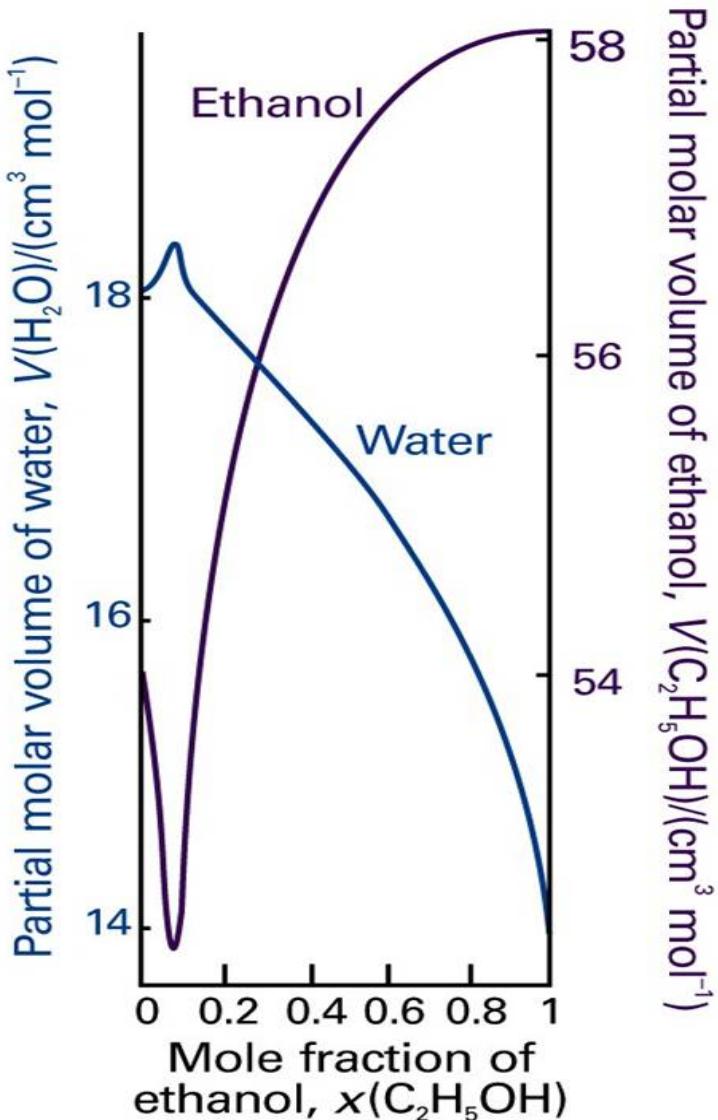
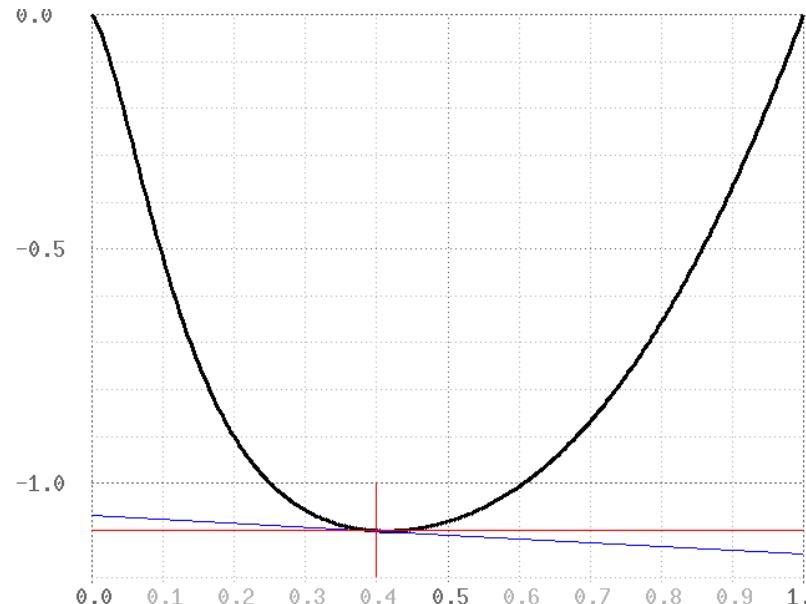
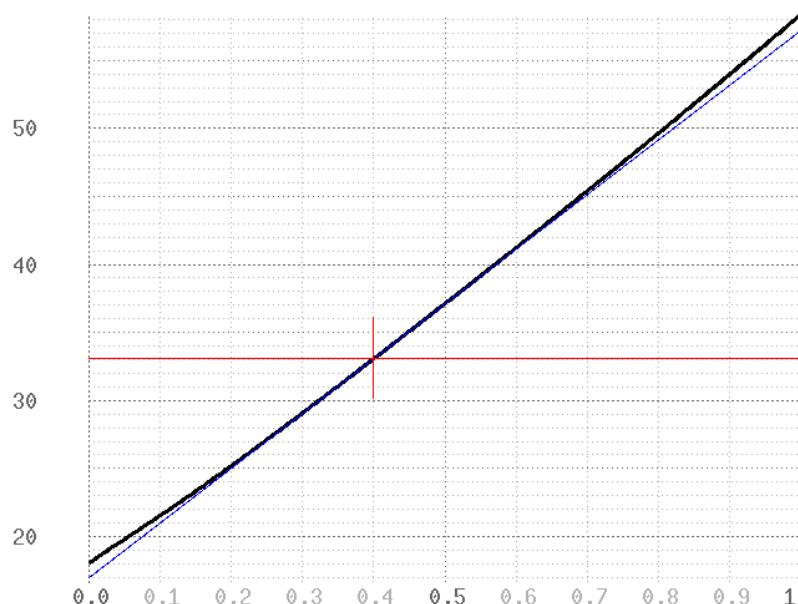


Figure 5-1
Atkins Physical Chemistry, Eighth Edition
© 2006 Peter Atkins and Julio de Paula

Gibbsova–Duhemova rovnice

Eulerův vztah pro binární směs:

$$Y = n_1 \bar{Y}_1 + n_2 \bar{Y}_2$$

Změna způsobená malou změnou složení za $[T, p]$ (dle Eulerova vztahu):

$$dY = \bar{Y}_1 dn_1 + \bar{Y}_2 dn_2$$

Změna způsobená malou změnou složení za $[T, p]$ obecně:

$$dY = \bar{Y}_1 dn_1 + n_1 d\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 dn_2 + n_2 d\bar{Y}_2$$

Důsledek:

$$n_1 d\bar{Y}_1 + n_2 d\bar{Y}_2 = 0 \quad [T, p]$$

Když (po změně složení) \bar{Y}_1 vzroste, \bar{Y}_2 se musí zmenšit.

Po „dělení“ dx_1 :

$$x_1 \left(\frac{\partial \bar{Y}_1}{\partial x_1} \right)_{T,p} + x_2 \left(\frac{\partial \bar{Y}_2}{\partial x_1} \right)_{T,p} = 0$$

případně $x_1 \left(\frac{\partial \bar{Y}_1}{\partial x_1} \right)_{T,p} = x_2 \left(\frac{\partial \bar{Y}_2}{\partial x_2} \right)_{T,p}$

Použití: z \bar{Y}_1 získáme \bar{Y}_2 (užitečné hlavně pro chemický potenciál)

Gibbsova–Duhemova rovnice

Obecně pro libovolnou směs za $[T, p]$:

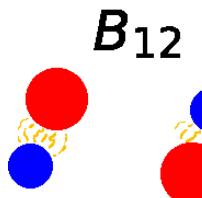
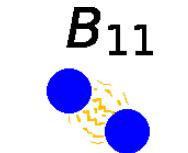
$$\sum_i n_i d\bar{Y}_i = 0$$

nebo po dělení n : $\sum_i x_i d\bar{Y}_i = 0$

$$V_m = \frac{RT}{p} + B = \frac{RT}{p} + x_1^2 B_{11} + 2x_1 x_2 B_{12} + x_2^2 B_{22}$$

$$V_{m1} = \frac{RT}{p} + B_{11}, \quad V_{m2} = \frac{RT}{p} + B_{22}$$

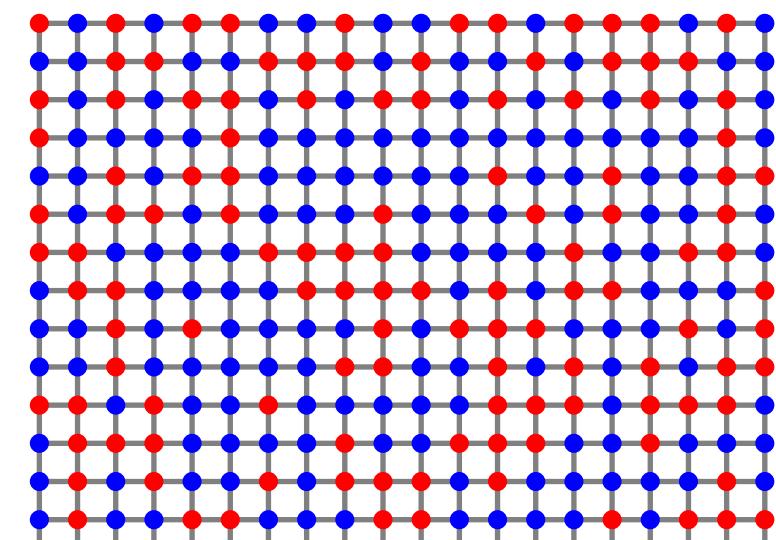
$$\begin{aligned} V^E = V^M &= V_m - x_1 V_{m1} - x_2 V_{m2} \\ &= (x_1^2 - x_1) B_{11} + 2x_1 x_2 B_{12} + (x_2^2 - x_2) B_{22} \\ &= -x_1 x_2 B_{11} + 2x_1 x_2 B_{12} - x_1 x_2 B_{22} \\ &= x_1 x_2 (2B_{12} - B_{11} - B_{22}) \equiv x_1 x_2 B_V \end{aligned}$$



Jiný mechanismus stejného vztahu

Neideální substituční krystal: $|\bullet - \bullet| \neq |\bullet - \bullet| \neq |\bullet - \bullet|$

... a podobně kapalná směs, je-li neidealita malá

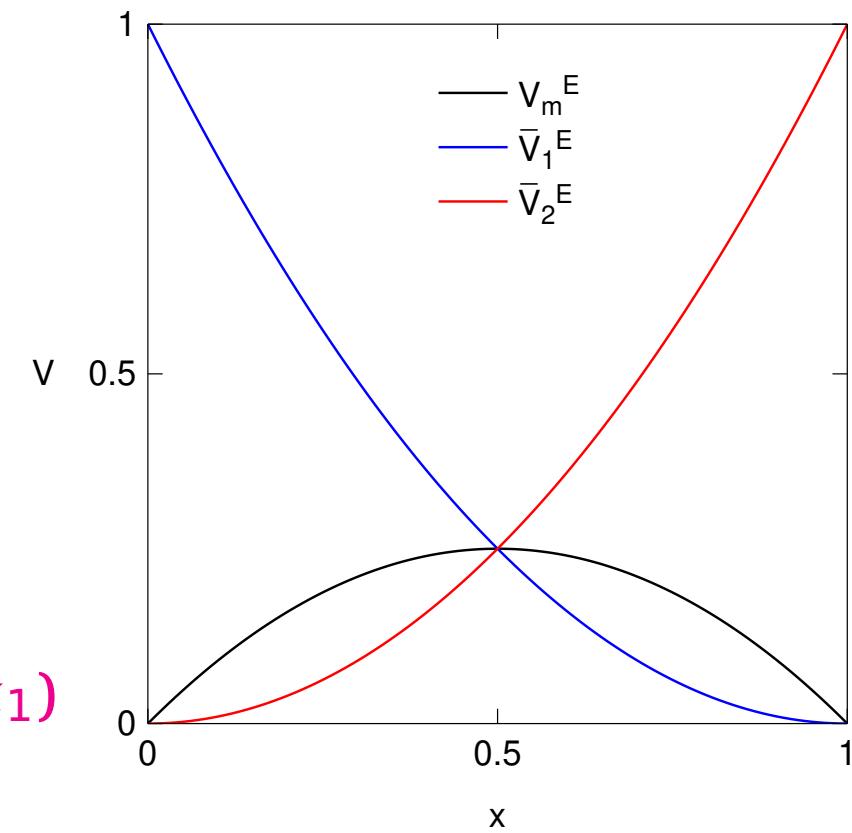


Příklad

Vypočtěte parciální molární objemy \bar{V}_1 a \bar{V}_2
a ověřte Gibbsovou–Duhemovu rovnici pro

$$V_m = \underbrace{x_1 V_{m1}^\bullet + x_2 V_{m2}^\bullet}_{\text{ideální část}} + \underbrace{B_V x_1 x_2}_{V^E = V^M}$$

$$\begin{aligned}\bar{V}_1 &= V_m + x_2 \left(\frac{\partial V_m}{\partial x_1} \right)_{T,p} \\ &= x_1 V_{m1}^\bullet + x_2 V_{m2}^\bullet + B_V x_1 x_2 + x_2 (V_{m1}^\bullet - V_{m2}^\bullet + B_V x_2 - B_V x_1) \\ &= V_{m1}^\bullet + B_V (1 - x_1)^2 \\ \bar{V}_2 &= V_{m2}^\bullet + B_V x_1^2\end{aligned}$$



Ověření platnosti Gibbsovy–Duhemovy rovnice:

$$x_1 \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_1} + x_2 \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial x_1} = x_1 [-2B_V(1-x_1)] + x_2 [2B_Vx_1] = 0$$

Chemický potenciál

Chemický potenciál = parciální molární Gibbsova energie

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

$$\Rightarrow G = \sum_{i=1}^k n_i \mu_i$$

v otevřeném systému: $dG = -SdT + Vdp + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i$

Podobně $\bar{G}_{mi}^\circ = \mu_i^\circ$ atd.

Interpretace:

Chemický potenciál μ_i složky i (vzhledem ke standardnímu stavu) = vratná práce k přenesení 1 mol látky (ze standardního stavu) do daného stavu = „schopnost vykonat tuto práci“

Chemický potenciál (a odvozené veličiny jako fugacita a aktivita) má zásadní úlohu pro výpočet chemických a fázových rovnováh

Směs ideálních plynů: přehled

Chceme $p^{\text{st}} \rightarrow p$

$$\Delta S_m(p_1 \rightarrow p_2) = -R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$H_m^{\text{směs id. pl.}}(p, T) = H_m^{\text{směs id. pl.}}(p^{\text{st}}, T) = \sum_{i=1}^k x_i H_{mi}^\circ$$

$$S_m^{\text{směs id. pl.}}(p, T) = \sum_{i=1}^k x_i S_{mi}^\circ - R \sum_{i=1}^k x_i \ln \frac{px_i}{p^{\text{st}}}$$

$$\begin{aligned} G_m^{\text{směs id. pl.}}(p, T) &= H_m^{\text{směs id. pl.}}(p, T) - TS_m^{\text{směs id. pl.}}(p, T) \\ &= \sum_{i=1}^k x_i G_{mi}^\circ + RT \sum_{i=1}^k x_i \ln \frac{px_i}{p^{\text{st}}} \end{aligned}$$

kde $G_{mi}^\circ = H_{mi}^\circ - TS_{mi}^\circ$

$$V_m^{\text{směs id. pl.}}(T, p) = \frac{RT}{p} = \sum_{i=1}^k x_i V_{mi}^\circ \frac{p^{\text{st}}}{p}$$

Chemický potenciál v ideální plynné směsi

$$\begin{aligned} G_m^{\text{směs id. pl.}}(p, T) &= \sum_{i=1}^k x_i \mu_i^\circ + RT \sum_{i=1}^k x_i \ln \frac{px_i}{p^{\text{st}}} \\ &= \sum_{i=1}^k x_i \left(\mu_i^\circ + RT \ln \frac{px_i}{p^{\text{st}}} \right) = \sum_{i=1}^k x_i \mu_i \end{aligned}$$



$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln \frac{px_i}{p^{\text{st}}} = \mu_i^\circ + RT \ln \frac{p_i}{p^{\text{st}}}$$

Příklad. Kolik energie je minimálně potřeba na

- a) rozdělení 5 m^3 vzduchu na dusík (4 m^3) a kyslík (1 m^3)
- b) výrobu 1 m^3 kyslíku ze vzduchu

Tlak = 1 bar, teplota = 300 K. Uvažujte školní vzduch $20\% \text{O}_2 + 80\% \text{N}_2$.

a) $W = -\Delta G = T\Delta S = -nRT[0.2 \ln 0.2 + 0.8 \ln 0.8] = -pV[0.2 \ln 0.2 + 0.8 \ln 0.8] = \underline{250 \text{ kJ}}$

b) $W = -n\Delta\mu_{\text{O}_2} = -nRT \ln \frac{px_i}{p^{\text{st}}} = -pV \ln 0.2 = \underline{161 \text{ kJ}}$

Chemický potenciál v ideální kondenzované směsi

$$V_m^{\text{id. směs}}(p, T) = \sum_{i=1}^k x_i V_{mi}^\bullet$$

$$H_m^{\text{id. směs}}(p, T) = \sum_{i=1}^k x_i H_{mi}^\bullet$$

$$S_m^{\text{id. směs}}(p, T) = \sum_{i=1}^k x_i S_{mi}^\bullet - R \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i$$

$$G_m^{\text{id. směs}}(p, T) = \sum_{i=1}^k x_i \mu_i^\bullet + RT \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i = \sum_{i=1}^k x_i \mu_i$$

↓

$$\mu_i = \mu_i^\bullet + RT \ln x_i$$

Příklad. Kolik energie je minimálně potřeba k získání 1 m³ sladké vody z mořské vody (3.5 hm.% NaCl, 300 K)? $M(\text{NaCl}) = 58.4 \text{ g mol}^{-1}$.

100 g mořské vody:

3.5 g NaCl: $n = 3.5 \text{ g}/M(\text{NaCl}) = 0.06 \text{ mol } (\text{NaCl}) = \textcolor{red}{0.12 \text{ mol iontů}}$

96.5 g H₂O: $n = 96.5 \text{ g}/M(\text{H}_2\text{O}) = 5.36 \text{ mol}$

$$x_{\text{voda}} = \frac{5.36}{5.36 + \textcolor{red}{0.12}} = 0.978, \quad n = \frac{1000000 \text{ g}}{18 \text{ g mol}^{-1}} = 55556 \text{ mol}$$

$$W = -n\Delta\mu = -nRT \ln x_{\text{voda}} = 3064000 \text{ J} = \underline{0.85 \text{ kWh}}$$