TFY4165 Termisk fysikk. Institutt for fysikk, NTNU.

Øving 6

Oppgave 1.

---

a) Argon er en enatomig gass (dvs enkeltatomer) med atomdiameter ca 0.38 nm. Hvor stor andel av tilgjengelig volum okkuperer da argonatomene ved romtemperatur (300 K) og trykk 10^{-3} Pa (et ikke unormalt trykk i et elektronmikroskop, og blant folk som driver med overflatefysikk)? (Det oppgis at kuler har volum $4\pi r^3/3$.)

A) $7 \cdot 10^{-6}$ B) $3 \cdot 10^{-6}$
C) $7 \cdot 10^{-12}$ D) $3 \cdot 10^{-12}$

---

b) Argon har atomnummer 18, og i tillegg til de 18 protonene er det 22 nøytroner i atomkjernen. (Den mest vanlige isotopen, som utgjør ca 99.6%.) Hva blir da (omtrent) midlere partikkelhastighet $\langle v \rangle$ i en argongass ved termodynamiske betingelser som i oppgave a?

A) 4 m/s B) 400 m/s C) 40000 m/s D) 4000000 m/s

---

c) Hydrogenmolekylet, H_2, har mulige ("tillatte") rotasjonsenergier

$$K_{\mathrm{rot}}^{(l)} = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2I_0} \quad , \quad l = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Her er $\hbar = h/2\pi \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$ Js (h = Plancks konstant), og $I_0 = md^2/2$ er molekylets treghetsmoment med hensyn på akser som står normalt på molekylets sylindersymmetriakse, og som passerer gjennom molekylets massesenter. For hydrogenmolekylet er $\hbar^2/I_0 \simeq 15$ meV. Det oppgis dessuten at $k_B \simeq 0.086$ meV/K. La π_l være sannsynligheten for at et gitt molekyl er i "rotasjonstilstand" l, med rotasjonsenergi $K_{\mathrm{rot}}^{(l)}$. Hva er da forholdet π_1/π_0 ved temperatur 77 K (flytende nitrogen)?

A) ca 1.8 B) ca 0.1 C) ca 0.0001 D) ca 10^{-9}

Oppgave 2.

En kasserolle med 1.0 L vann skal varmes opp fra 20°C til 100°C ved ulike prosesser. Varmekapasiteten til vann er $c_p = 1.0\,\mathrm{cal/(g\,K)} = 4.184\,\mathrm{kJ/kg\,K}$. Du kan se bort fra varmekapasiteten til kasserollen.
a) Kasserollen plasseres på en varmeplate (varmereservoar) som holdes konstant på 100°C, og det hele kommer til likevekt.
i) Beregn entropiendringen til omgivelsene (varmeplata). (Ett av disse er riktig: -1.23 kJ/K; -0.90 kJ/K; +0.90 kJ/K.)
ii) Beregn entropiendringen i vannet. (Ett av disse er riktig: 1.01 kJ/K; 0.90 kJ/K; 0.11 kJ/K.)
iii) Beregn total entropiendring. (Ett av disse er riktig: 1.01 kJ/K; 0.90 kJ/K; 0.11 kJ/K.)

b) Oppvarmingen gjøres nå i to trinn: Først plasseres kasserollen på en varmeplate som holder 50°C, og vannet når denne temperaturen. Deretter plasseres kasserollen på plata som holder 100°C, og likevekt oppnås der. Beregn entropiendringer, som under punktene i), ii) og iii) ovenfor, for den totale prosessen. (På iii) er ett av disse riktig: 110 J/K; 60 J/K; 0 J/K.)

c) Oppvarmingen gjøres nå i uendelig mange infinitesimale trinn: Kasserollen plasseres på varmeplater som er trinnvis varmere, f.eks 20°C, 20.1°C, 20.2°C osv til 100°C, med stadig finere oppdeling.
Forklar hvorfor dette er en reversibel prosess.
Beregn også her, som under punktene i), ii) og iii) ovenfor, entropiendringer for den totale prosessen. (På ii) er ett av disse riktig: 1.01 kJ/K; 0.90 kJ/K; 0.11 kJ/K.)

Oppgave 3. Spontane reaksjoner eller ei?

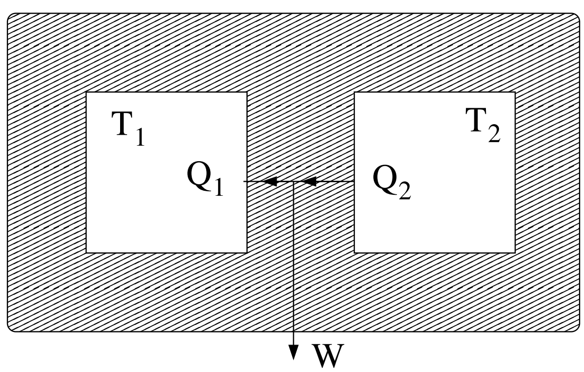
Finn ut om de kjemiske reaksjonene nedenfor kan forløpe spontant (fra venstre mot høyre) ved normale betingelser (25 °C og 1 atm). Bruk *SI Chemical Data* (Aylward og Findlay), Wikipedia eller nettstedene webbook.nist.gov (*National Institute of Standards and Technology*) eller chemeo.com til å bestemme Gibbs fri energi til reaktanter og produkter. ($G = H - TS$)

a) $\frac{3}{2}\ O_2 \rightarrow O_3$

b) $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$

Oppgave 4

To like store metallklosser har (hver for seg) varmekapasitet C, som antas å være konstant, uavhengig av temperaturen. Klossenes volumutvidelseskoeffisient er praktisk talt lik null. Temperaturen til de to klossene er i utgangspunktet T_1 og $T_2 > T_1$, og klossene er termisk isolert fra omgivelsene:



Dersom vi lar klossene utveksle varme med hverandre irreversibelt, og uten at vi tar ut noe nyttig arbeid, vil den totale entropien til systemet øke, felles slutt-temperatur blir $T_0 = (T_1 + T_2)/2$, og like mye varme $|Q_2|$ forlater den varmeste klossen som det som tilføres den kaldeste klossen (Q_1), $Q_1 = -Q_2 = C(T_0 - T_1) = C(T_2 - T_1)/2$. (Se forelesningene, om irreversible prosesser.)

Alternativt kan vi tenke oss at vi lar de to klossene drive en varmekraftmaskin, slik at vi kan ta ut et nyttig arbeid W, som antydet i figuren. Vis at det maksimale arbeidet (eksergien) som kan tas ut i en tenkt reversibel prosess er

$$W_{\text{max}} = C\left(\sqrt{T_2} - \sqrt{T_1}\right)^2,$$

og at likevektstemperaturen i dette tilfellet blir

$$T_0 = \sqrt{T_1 T_2}.$$

Vis at denne likevektstemperaturen alltid er mindre enn for den irreversible temperaturutjevningen (der vi ikke tar ut nyttig arbeid).

Tips: Bestem T_0 ved å se på entropiendringen til hver av klossene, samt at du utnytter at $\Delta S = 0$ for reversible prosesser i et termisk isolert system. Videre er $W_{\max} = -\Delta G = -\Delta(U + p_0 V - T_0 S)$.

Oppgave 5

a) En ideell gass kjøles fra temperaturen T til T_0. Omgivelsenes temperatur er hele tiden T_0. Start- og slutt-tilstanden har samme volum ($\Delta V = 0$). Vis at det maksimale arbeid som er mulig å få ut av gassen er

$$W_{\max} = C_V(T - T_0) - C_V T_0 \ln \frac{T}{T_0}.$$

Tips: Entropi for ideell gass er $S = C_V \ln T + nR \ln V + \text{konst}$.

b) Hvor mye varme avgis, og hva er det maksimale arbeidet når gassen er ett mol toatomig gass, og avkjølingen er fra 100°C til 20°C? (Svar: $W_{\max} = 193$ J.)

c) En måte å ta ut det maksimale arbeidet på er å la en Carnot-maskin virke mellom den øvre avtagende temperaturen og den faste T_0. Vis at dette gir det samme arbeidet $W_{\max}$.

Tips: La den ideelle gassen representere høytemperaturreservoaret, med varierende (avtagende) temperatur, fra T til T_0. Virkningsgraden til Carnot-maskinen vil dermed også variere (avta), fra verdien $1 - T_0/T$ til verdien $1 - T_0/T_0 = 0$.

d) En annen måte å ta ut det maksimale arbeidet på er først å ekspandere gassen adiabatisk slik at temperaturen synker til T_0. Deretter komprimeres den isotermt tilbake til opprinnelig volum. Vis at dette også gir samme arbeid $W_{\max}$.

Tips: For adiabat med ideell gass gjelder $pV^\gamma = \text{konstant}$ og $TV^{\gamma-1} = \text{konstant}$ (med $\gamma = C_p/C_V$).