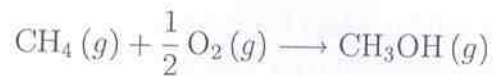


## Tentamen Statistische Thermodynamica MST – 1/7/11

### Vraag 1. Entropie en de productie van Methanol

a. Het begrip entropie is een van de kernbegrippen in de Statistische Thermodynamica. Onder welke omstandigheden geldt dat de entropie in ieder spontaan proces zal toenemen? Kies drie grootheden uit het volgende rijtje die dan constant moeten worden gehouden:  $p, V, U, S, T, \mu, N, F, \Omega, G, c_p, c_V$ .

Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) kan worden geproduceerd uit de oxidatie van methaan:



- b. Leg uit waarom je verwacht dat de entropie zal *afnemen* in deze reactie.
- c. Gebruikmakend van de bijgevoegde Tabel, bepaal  $\Delta H^\ominus$  en  $\Delta S^\ominus$  voor deze reactie.
- d. Bepaal  $\Delta G^\ominus$  bij 298 K. Verloopt de reactie spontaan bij deze temperatuur?
- e. Bereken de temperatuur waarbij deze reactie in evenwicht is (bij standaarddruk). Neem aan dat de producten stabiel blijven en dat  $\Delta H^\ominus$  en  $\Delta S^\ominus$  niet van  $T$  afhangen.

## Vraag 2. Boltzmann verdeling

Voor een systeem dat bestaat uit  $N$  moleculen in een volume  $V$  bij temperatuur  $T$  is de Boltzmann verdeling gegeven door de volgende formule

$$P_i = \text{constante} \cdot e^{-E_i/k_B T}.$$

- Leg uit waar het symbool  $i$  voor staat in bovenstaande formule.
- Geef een formule voor de evenredigheidsconstante en leg uit waarom deze evenredigheidsconstante zo belangrijk is voor de Statistische Thermodynamica.

We beschouwen nu een systeem van één enkel molecuul dat twee energieniveaus bezit. Het grondniveau met energie  $\varepsilon_0 = 0$  eV, en het eerste energieniveau met energie  $\varepsilon_1 = 0.0300$  eV. Met het grondniveau is één toestand gemoeid (de grondtoestand) maar met het eerste energieniveau corresponderen *twee* toestanden (spin 'up' en spin 'down').

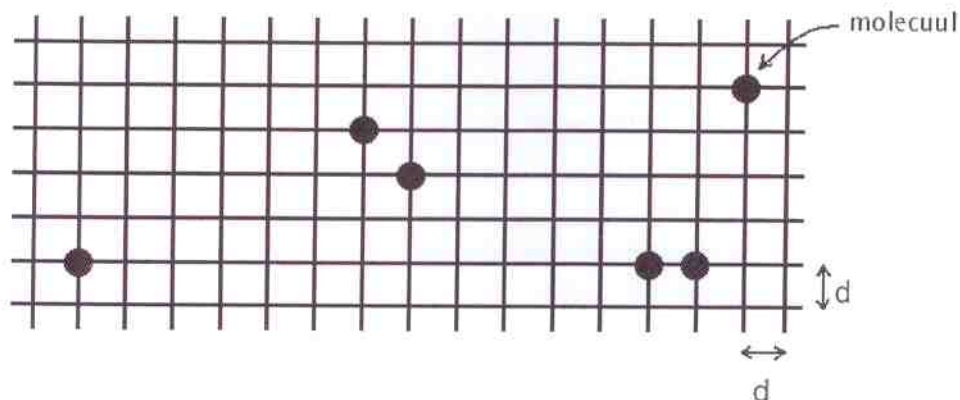
- Bereken in drie significante cijfers nauwkeurig de kans,  $P_1$ , dat een molecuul zich in het eerste energieniveau bevindt bij kamertemperatuur ( $T = 298$  K).  
[ $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $1$  eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  J].
- Bereken nu ook de gemiddelde energie,  $\bar{E}$ , bij kamertemperatuur in 3 significante cijfers nauwkeurig.
- Laat zien dat de temperatuur  $T^*$  waarbij de kans dat het molecuul zich in het grondniveau bevindt precies gelijk is aan de kans dat het molecuul zich in het eerste energieniveau bevindt, wordt gegeven door:

$$T^* = \frac{\varepsilon_1}{k_B \ln(2)}.$$

- Zonder de berekening expliciet uit te voeren, wat verwacht je dat de gemiddelde energie,  $\bar{E}$ , is bij
  - hele lage temperaturen
  - hele hoge temperaturen?Licht voor beide gevallen je antwoord toe.

### Vraag 3. Van der Waals model op een rooster

In het van der Waals model op een rooster zijn de posities van de moleculen beperkt tot de roosterpunten van een (kubisch) rooster (zie het figuur).



De afstand tussen naburige roosterpunten noemen we  $d$ . Deze afstand is constant en hangt niet af van het aantal moleculen op het rooster ( $N$ ), temperatuur ( $T$ ) of volume ( $V$ ). Voor de vrije energie van het van der Waals model op een rooster geldt de volgende uitdrukking:

$$F = -N k_B T \ln \left( \frac{V - Nb}{N d^3} \right) - N k_B T - a \frac{N^2}{V} .$$

De differentiaalvorm voor de Helmholtz vrije energie  $F = U - TS$  wordt gegeven door:

$$dF = -S dT - p dV + \mu dN .$$

- Bepaal de druk voor het van der Waals model op een rooster (schrijf het antwoord in termen van de deeltjesdichtheid).
- Wat zijn de dimensies van de van der Waals constanten  $a$  en  $b$ ?
- Bepaal de entropie voor het van der Waals model op een rooster.
- Bepaal nu de energie  $U$  voor het van der Waals model op een rooster.
- Concludeer op grond van het resultaat voor  $U$  in d. of de kinetische energie in een van der Waals vloeistof goed wordt beschreven door het van der Waals model op een rooster.
- Wat betekent het als  $a = 0$  en  $b = 0$  en wat heeft dit voor gevolgen voor de toestandsvergelijking?
- Bepaal de chemische potentiaal voor een *ideaal gas* op een rooster.

#### Vraag 4. Tweede viriaalcoëfficiënt

Op het college is de volgende formule afgeleid voor de tweede viriaalcoëfficiënt in termen van de interactiepotentiaal:

$$B(T) = 2\pi \int_0^{\infty} dr r^2 [1 - e^{-U(r)/k_B T}] .$$

We zullen de interactiepotentiaal opsplitsen in een attractief en een repulsief gedeelte:  
 $U(r) = U_{\text{rep}}(r) + U_{\text{att}}(r)$ .

a. Laat zien dat als  $U_{\text{att}}(r) \ll k_B T$ , we de tweede viriaalcoëfficiënt kunnen schrijven als de som van twee termen  $B(T) = B_{\text{rep}}(T) + B_{\text{att}}(T)$  waarbij:

$$B_{\text{rep}}(T) = 2\pi \int_0^{\infty} dr r^2 [1 - e^{-U_{\text{rep}}(r)/k_B T}] ,$$

$$B_{\text{att}}(T) = 2\pi \int_0^{\infty} dr r^2 \frac{U_{\text{att}}(r)}{k_B T} e^{-U_{\text{rep}}(r)/k_B T} .$$

We beschouwen een model waarin het attractieve en repulsieve gedeelte van de interactiepotentiaal tussen de moleculen wordt gegeven door de volgende uitdrukking:

$$U_{\text{rep}}(r) = \begin{cases} \infty & 0 < r < d \\ 0 & r > d \end{cases}$$

$$U_{\text{att}}(r) = \begin{cases} -\varepsilon & 0 < r < d \\ -\varepsilon \left(\frac{d}{r}\right)^6 & r > d \end{cases}$$

b. Schets  $U(r)$  in een figuur (neem  $\varepsilon > 0$ ).

c. Kun je iets zeggen over de fysische reden om  $-\varepsilon (d/r)^6$  voor het attractieve gedeelte van de interactiepotentiaal te nemen? Kun je een voorbeeld van een andere interactiepotentiaal bedenken waarin dit ook het geval is?

d. Bepaal voor deze potentiaal de tweede viriaalcoëfficiënt  $B(T)$ .

e. Vergelijk de uitdrukking voor  $B(T)$  gevonden in d. met de uitdrukking voor de tweede viriaalcoëfficiënt in een van der Waals vloeistof:

$$B_{vdW}(T) = b - \frac{a}{k_B T} .$$

Druk voor dit model de van der Waals parameters  $a$  en  $b$  uit in  $d$  en  $\varepsilon$ .

### Vraag 5. Grootte van de polymeerketen

De Flory-straal  $R_F$  van een polymeer wordt gegeven door

$$R_F = b N^{\nu_F}.$$

- Leg uit hoe de Flory-straal is gedefiniëerd en wat de verschillende symbolen in deze formule betekenen.
- Wat is de waarde van  $\nu_F$  voor (i) een *ideale* polymeerketen en voor (ii) een polymeerketen in een *goed* oplosmiddel?
- In het college hebben we de waarde voor  $\nu_F$  berekend in een goed oplosmiddel. Dat deden we uitgaande van de volgende uitdrukking voor de vrije energie  $F(R)$  van een polymeerketen wiens straal gelijk is aan  $R$ :

$$F(R) = \frac{3}{2} k_B T \frac{R^2}{b^2 N} + k_B T v \frac{N^2}{R^3}.$$

Wat is de fysische achtergrond van beide termen (afleiding is niet noodzakelijk)? Leg daarbij uit waarom de ene term toeneemt en de andere term afneemt als functie van  $R$ .

- Laat zien hoe het resultaat voor  $\nu_F$  zoals gebruikt in **b.** voor een goed oplosmiddel kan worden gevonden m.b.v. de uitdrukking voor de vrije energie in **c.** (neem  $v \simeq b^3$ ).
- In plaats van een goed oplosmiddel beschouwen we nu een  $\Theta$ -oplosmiddel. Geef aan wat dit voor consequenties heeft voor de vrije energie in **c.** en hoe je de vrije energie zou kunnen aanpassen.

Vraag 6. Osmotische druk  $\Pi$  in een semi-verdunde polymeeroplossing

- a. Geef de viriaalreeks voor de osmotische druk in een verdunde polymeeroplossing.
- b. Voor een zeer verdunde polymeeroplossing wordt de osmotische druk goed beschreven door de wet van van 't Hoff. Als men in een experiment de polymeerlengte twee maal zo groot maakt maar het aantal monomeren constant houdt, wat zal er dan met de osmotische druk gebeuren? Kies een van de volgende antwoorden: 4 keer zo klein, 2 keer zo klein,  $\sqrt{2}$  keer zo klein, blijft gelijk,  $\sqrt{2}$  keer zo groot, 2 keer zo groot, of 4 keer zo groot.
- c. De overlapconcentratie  $c^*$  is gedefiniëerd als de monomeerconcentratie waarboven de polymeren elkaar overlappen en wordt de polymeroplossing *semi-verdund* genoemd. Leidt op grond van deze definitie een formule af voor  $c^*$  in termen van  $b$ ,  $N$  en  $\nu_F$ .

De Franse natuurkundige de Gennes heeft laten zien dat voor monomeerconcentraties boven en beneden  $c^*$  de osmotische druk goed wordt beschreven door de volgende *schaalwet*:

$$\Pi = k_B T \frac{c}{N} f(c/c^*),$$

waarbij  $f(x)$  een *universele* functie is die niet afhangt van het soort polymeer, soort oplosmiddel of polymeerlengte.

- d. Wat is de waarde van  $f(x)$  als  $x \rightarrow 0$ ? Beargumenteer je antwoord.
- e. In een semi-verdunde polymeeroplossing ( $c > c^*$ ) zijn de polymeren verstrengeld zoals in een bord spaghetti. Als men in hetzelfde experiment als beschreven onder onderdeel **b.** weer de polymeerlengte twee maal zo groot maakt met het aantal monomeren constant, wat zal er dan nu met de osmotische druk gebeuren? Kies een van de volgende antwoorden: 4 keer zo klein, 2 keer zo klein,  $\sqrt{2}$  keer zo klein, blijft gelijk,  $\sqrt{2}$  keer zo groot, 2 keer zo groot, of 4 keer zo groot.
- f. In een semi-verdunde polymeeroplossing blijkt dat de universele functie  $f(x)$  kan worden beschreven door de volgende *machtswet*:

$$f(x) \propto x^m.$$

Bepaal de exponent  $m$  in een *goed* oplosmiddel gebruikmakend van het resultaat verkregen onder **e.**

### Vraag 7. Electrostatistische interactie

De electrostatistische potentiaal  $\phi(z)$  als functie van de afstand  $z$  voor een vlakke geladen plaat in een waterige zout-oplossing met dielectrische constante  $\varepsilon$ , wordt gegeven door:

$$\phi(z) = \phi_0 e^{-\kappa z}.$$

Hierbij is de Debye-lengte gegeven door de volgende uitdrukking:

$$\frac{1}{\kappa} = \kappa^{-1} = \left( \frac{\varepsilon k_B T}{4\pi \sum_i \rho_i (z_i e)^2} \right)^{1/2}.$$

De sommatie is over alle zoutionen met valentie  $z_i$  en bulk concentratie  $\rho_i$ .

a. Bereken de waarde van  $\kappa^{-1}$  voor 0.01 M *driewaardig* zout.

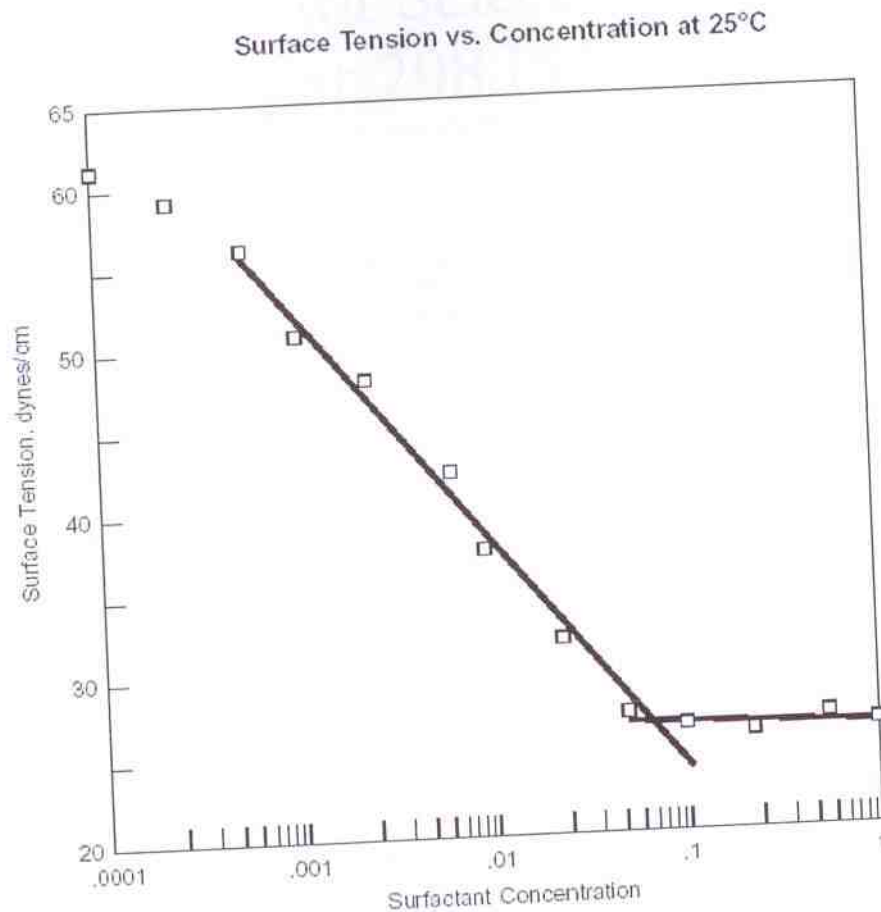
[ $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T = 298$  K;  $\varepsilon = 8.9 \times 10^{-9}$  C<sup>2</sup>/(J m);  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C;  $N_A = 6.02 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>].

b. Ga na dat bovenstaande  $\phi(z)$  een oplossing is van de Debye-Hückel vergelijking,  $\phi''(z) = \kappa^2 \phi(z)$ .

c. Schets in één figuur de ionverdelingen  $\rho_+(z)$ ,  $\rho_-(z)$  in een zoutoplossing rond een negatief geladen vlakke plaat als functie van de afstand,  $z$ , tot de plaat. Gegeven is dat het toegevoegd zout éénwaardig is met een bulkconcentratie  $\rho_0$ . Geef in het figuur de rol van  $\kappa^{-1}$  weer en let bij het maken van de figuur in het bijzonder op het gedrag van  $\rho_+(z)$  en  $\rho_-(z)$  als  $z \rightarrow 0$  en  $z \rightarrow \infty$ .

### Vraag 8. Surfactantadsorptie

Onderstaand figuur geeft de oppervlaktespanning weer voor de dodecyl ether van hexaethyleen oxide ( $C_{12}E_6$ ) gemeten als functie van de surfactant concentratie.



De oppervlaktespanning is gegeven in dynes/cm ( $1 \text{ dyn} = 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{m}}$ ) en de surfactant concentratie is gegeven in  $10^{-3}$  mol / liter op een logarithmische ( $^{10}\log$ ) schaal. Belangrijk in de beschrijving van de oppervlaktespanning is de volgende formule:

$$\left( \frac{\partial \sigma}{\partial \ln(\rho_s)} \right)_T = -k_B T \Gamma.$$

- Bepaal zo nauwkeurig mogelijk (2 significante cijfers) uit de figuur de surfactant-adsorptie van het verzadigde oppervlak. Geef aan hoe je aan je antwoord komt.  
 $[\ln(x) = \ln(10) \cdot {}^{10}\log(x)].$
- Bepaal uit het antwoord gevonden onder a. de gemiddelde afstand tussen twee naburige surfactantmoleculen op het oppervlak.
- Bepaal zo nauwkeurig mogelijk (1 á 2 significante cijfers) uit de figuur de cmc.
- Bij hoge surfactant concentraties lijkt de oppervlaktespanning nauwelijks af te nemen. Leg uit hoe dit komt.
- Wat is (ongeveer) de waarde van de surfactantadsorptie bij deze hoge surfactant concentraties? Licht je antwoord toe en bespreek de rol van bovenstaande formule.



# Thermodynamic Quantities for Selected Substances at 298.15 K (25°C)

A P P E N D I X

C

Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol-K)	Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol-K)
Aluminum				$C_2H_6(g)$	-84.68	-32.89	229.5
Al(s)	0	0	28.32	$C_3H_8(g)$	-103.85	-23.47	269.9
$AlCl_3(s)$	-705.6	-630.0	109.3	$C_4H_{10}(g)$	-124.73	-15.71	310.0
$Al_2O_3(s)$	-1669.8	-1576.5	51.00	$C_4H_{10}(l)$	-147.6	-15.0	231.0
Barium				$C_6H_6(g)$	82.9	129.7	269.2
Ba(s)	0	0	63.2	$C_6H_6(l)$	49.0	124.5	172.8
$BaCO_3(s)$	-1216.3	-1137.6	112.1	$CH_3OH(g)$	-201.2	-161.9	237.6
$BaO(s)$	-553.5	-525.1	70.42	$CH_3OH(l)$	-238.6	-166.23	126.8
Beryllium				$C_2H_5OH(g)$	-235.1	-168.5	282.7
Be(s)	0	0	9.44	$C_2H_5OH(l)$	-277.7	-174.76	160.7
$BeO(s)$	-608.4	-579.1	13.77	$C_6H_{12}O_6(s)$	-1273.02	-910.4	212.1
$Be(OH)_2(s)$	-905.8	-817.9	50.21	$CO(g)$	-110.5	-137.2	197.9
Bromine				$CO_2(g)$	-393.5	-394.4	213.6
Br(g)	111.8	82.38	174.9	$HC_2H_3O_2(l)$	-487.0	-392.4	159.8
$Br^-(aq)$	-120.9	-102.8	80.71	Cesium			
$Br_2(g)$	30.71	3.14	245.3	Cs(g)	76.50	49.53	175.6
$Br_2(l)$	0	0	152.3	Cs(l)	2.09	0.03	92.07
HBr(g)	-36.23	-53.22	198.49	Cs(s)	0	0	85.15
Calcium				CsCl(s)	-442.8	-414.4	101.2
Ca(g)	179.3	145.5	154.8	Chlorine			
Ca(s)	0	0	41.4	Cl(g)	121.7	105.7	165.2
$CaCO_3(s, \text{calcite})$	-1207.1	-1128.76	92.88	$Cl^-(aq)$	-167.2	-131.2	56.5
$CaCl_2(s)$	-795.8	-748.1	104.6	$Cl_2(g)$	0	0	222.96
$CaF_2(s)$	-1219.6	-1167.3	68.87	$HCl(aq)$	-167.2	-131.2	56.5
CaO(s)	-635.5	-604.17	39.75	$HCl(g)$	-92.30	-95.27	186.69
$Ca(OH)_2(s)$	-986.2	-898.5	83.4	Chromium			
$CaSO_4(s)$	-1434.0	-1321.8	106.7	Cr(g)	397.5	352.6	174.2
Carbon				Cr(s)	0	0	23.6
C(g)	718.4	672.9	158.0	$Cr_2O_3(s)$	-1139.7	-1058.1	81.2
C(s, diamond)	1.88	2.84	2.43	Cobalt			
C(s, graphite)	0	0	5.69	Co(g)	439	393	179
$CCl_4(g)$	-106.7	-64.0	309.4	Co(s)	0	0	28.4
$CCl_4(l)$	-139.3	-68.6	214.4	Copper			
$CF_4(g)$	-679.9	-635.1	262.3	Cu(g)	338.4	298.6	166.3
$CH_4(g)$	-74.8	-50.8	186.3	Cu(s)	0	0	33.30
$C_2H_2(g)$	226.77	209.2	200.8	$CuCl_2(s)$	-205.9	-161.7	108.1
$C_2H_4(g)$	52.30	68.11	219.4	$CuO(s)$	-156.1	-128.3	42.59
				$Cu_2O(s)$	-170.7	-147.9	92.36

1124 Appendix C | Thermodynamic Quantities for Selected Substances at 298.15 K (25°C)

Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol-K)	Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol-K)
<b>Fluorine</b>				<b>Manganese</b>			
F(g)	80.0	61.9	158.7	MnO <sub>2</sub> (s)	-519.6	-464.8	53.14
F <sup>-</sup> (aq)	-332.6	-278.8	-13.8	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq)	-541.4	-447.2	191.2
F <sub>2</sub> (g)	0	0	202.7	<b>Mercury</b>			
HF(g)	-268.61	-270.70	173.51	Hg(g)	60.83	31.76	174.89
<b>Hydrogen</b>				Hg(l)	0	0	77.40
H(g)	217.94	203.26	114.60	HgCl <sub>2</sub> (s)	-230.1	-184.0	144.5
H <sup>+</sup> (aq)	0	0	0	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (s)	-264.9	-210.5	192.5
H <sup>+</sup> (g)	1536.2	1517.0	108.9	<b>Nickel</b>			
H <sub>2</sub> (g)	0	0	130.58	Ni(g)	429.7	384.5	182.1
<b>Iodine</b>				Ni(s)	0	0	29.9
I(g)	106.60	70.16	180.66	NiCl <sub>2</sub> (s)	-305.3	-259.0	97.65
I <sup>-</sup> (aq)	-55.19	-51.57	111.3	NiO(s)	-239.7	-211.7	37.99
I <sub>2</sub> (g)	62.25	19.37	260.57	<b>Nitrogen</b>			
I <sub>2</sub> (s)	0	0	116.73	N(g)	472.7	455.5	153.3
HI(g)	25.94	1.30	206.3	N <sub>2</sub> (g)	0	0	191.50
<b>Iron</b>				NH <sub>3</sub> (aq)	-80.29	-26.50	111.3
Fe(g)	415.5	369.8	180.5	NH <sub>3</sub> (g)	-46.19	-16.66	192.5
Fe(s)	0	0	27.15	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (aq)	-132.5	-79.31	113.4
Fe <sup>2+</sup> (aq)	-87.86	-84.93	113.4	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	95.40	159.4	238.5
Fe <sup>3+</sup> (aq)	-47.69	-10.54	293.3	NH <sub>4</sub> CN(s)	0.0	—	—
FeCl <sub>2</sub> (s)	-341.8	-302.3	117.9	NH <sub>4</sub> Cl(s)	-314.4	-203.0	94.6
FeCl <sub>3</sub> (s)	-400	-334	142.3	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (s)	-365.6	-184.0	151
FeO(s)	-271.9	-255.2	60.75	NO(g)	90.37	86.71	210.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-822.16	-740.98	89.96	NO <sub>2</sub> (g)	33.84	51.84	240.45
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	-1117.1	-1014.2	146.4	N <sub>2</sub> O(g)	81.6	103.59	220.0
FeS <sub>2</sub> (s)	-171.5	-160.1	52.92	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (g)	9.66	98.28	304.3
<b>Lead</b>				NOCl(g)	52.6	66.3	264
Pb(s)	0	0	68.85	HNO <sub>3</sub> (aq)	-206.6	-110.5	146
PbBr <sub>2</sub> (s)	-277.4	-260.7	161	HNO <sub>3</sub> (g)	-134.3	-73.94	266.4
PbCO <sub>3</sub> (s)	-699.1	-625.5	131.0	<b>Oxygen</b>			
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (aq)	-421.3	-246.9	303.3	O(g)	247.5	230.1	161.0
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-451.9	—	—	O <sub>2</sub> (g)	0	0	205.0
PbO(s)	-217.3	-187.9	68.70	O <sub>3</sub> (g)	142.3	163.4	237.6
<b>Lithium</b>				OH <sup>-</sup> (aq)	-230.0	-157.3	-10.7
Li(g)	159.3	126.6	138.8	H <sub>2</sub> O(g)	-241.82	-228.57	188.83
Li(s)	0	0	29.09	H <sub>2</sub> O(l)	-285.83	-237.13	69.91
Li <sup>+</sup> (aq)	-278.5	-273.4	12.2	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	-136.10	-105.48	232.9
Li <sup>+</sup> (g)	685.7	648.5	133.0	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (l)	-187.8	-120.4	109.6
LiCl(s)	-408.3	-384.0	59.30	<b>Phosphorus</b>			
<b>Magnesium</b>				P(g)	316.4	280.0	163.2
Mg(g)	147.1	112.5	148.6	P <sub>2</sub> (g)	144.3	103.7	218.1
Mg(s)	0	0	32.51	P <sub>4</sub> (g)	58.9	24.4	280
MgCl <sub>2</sub> (s)	-641.6	-592.1	89.6	P <sub>4</sub> (s, red)	-17.46	-12.03	22.85
MgO(s)	-601.8	-569.6	26.8	P <sub>4</sub> (s, white)	0	0	41.08
Mg(OH) <sub>2</sub> (s)	-924.7	-833.7	63.24	PCl <sub>3</sub> (g)	-288.07	-269.6	311.7
<b>Manganese</b>				PCl <sub>3</sub> (l)	-319.6	-272.4	217
Mn(g)	280.7	238.5	173.6	PF <sub>5</sub> (g)	-1594.4	-1520.7	300.8
Mn(s)	0	0	32.0	PH <sub>3</sub> (g)	5.4	13.4	210.2
MnO(s)	-385.2	-362.9	59.7	P <sub>4</sub> O <sub>6</sub> (s)	-1640.1	—	—
				P <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (s)	-2940.1	-2675.2	228.9
				POCl <sub>3</sub> (g)	-542.2	-502.5	325
				POCl <sub>3</sub> (l)	-597.0	-520.9	222
				H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (aq)	-1288.3	-1142.6	158.2

Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol-K)	Substance	$\Delta H_f^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta G_f^\circ$ (kJ/mol)	$S^\circ$ (J/mol-K)
Potassium				$\text{Na}^+(aq)$	-240.1	-261.9	59.0
K(g)	89.99	61.17	160.2	$\text{Na}^+(g)$	609.3	574.3	148.0
K(s)	0	0	64.67	$\text{NaBr}(aq)$	-360.6	-364.7	141.00
KCl(s)	-435.9	-408.3	82.7	$\text{NaBr}(s)$	-361.4	-349.3	86.82
$\text{KClO}_3(s)$	-391.2	-289.9	143.0	$\text{Na}_2\text{CO}_3(s)$	-1130.9	-1047.7	136.0
$\text{KClO}_3(aq)$	-349.5	-284.9	265.7	$\text{NaCl}(aq)$	-407.1	-393.0	115.5
$\text{K}_2\text{CO}_3(s)$	-1150.18	-1064.58	155.44	$\text{NaCl}(g)$	-181.4	-201.3	229.8
$\text{KNO}_3(s)$	-492.70	-393.13	132.9	$\text{NaCl}(s)$	-410.9	-384.0	72.33
$\text{K}_2\text{O}(s)$	-363.2	-322.1	94.14	$\text{NaHCO}_3(s)$	-947.7	-851.8	102.1
$\text{KO}_2(s)$	-284.5	-240.6	122.5	$\text{NaNO}_3(aq)$	-446.2	-372.4	207
$\text{K}_2\text{O}_2(s)$	-495.8	-429.8	113.0	$\text{NaNO}_3(s)$	-467.9	-367.0	116.5
KOH(s)	-424.7	-378.9	78.91	$\text{NaOH}(aq)$	-469.6	-419.2	49.8
$\text{KOH}(aq)$	-482.4	-440.5	91.6	$\text{NaOH}(s)$	-425.6	-379.5	64.46
Rubidium				Strontium			
Rb(g)	85.8	55.8	170.0	$\text{SrO}(s)$	-592.0	-561.9	54.9
Rb(s)	0	0	76.78	$\text{Sr}(g)$	164.4	110.0	164.6
$\text{RbCl}(s)$	-430.5	-412.0	92	Sulfur			
$\text{RbClO}_3(s)$	-392.4	-292.0	152	$\text{S}(s, \text{rhombic})$	0	0	31.88
Scandium				$\text{S}_8(g)$	102.3	49.7	430.9
Sc(g)	377.8	336.1	174.7	$\text{SO}_2(g)$	-296.9	-300.4	248.5
Sc(s)	0	0	34.6	$\text{SO}_3(g)$	-395.2	-370.4	256.2
Selenium				$\text{SO}_4^{2-}(aq)$	-909.3	-744.5	20.1
$\text{H}_2\text{Se}(g)$	29.7	15.9	219.0	$\text{SOCl}_2(l)$	-245.6	—	—
Silicon				$\text{H}_2\text{S}(g)$	-20.17	-33.01	205.6
Si(g)	368.2	323.9	167.8	$\text{H}_2\text{SO}_4(aq)$	-909.3	-744.5	20.1
Si(s)	0	0	18.7	$\text{H}_2\text{SO}_4(l)$	-814.0	-689.9	156.1
SiC(s)	-73.22	-70.85	16.61	Titanium			
$\text{SiCl}_4(l)$	-640.1	-572.8	239.3	Ti(g)	468	422	180.3
$\text{SiO}_2(s, \text{quartz})$	-910.9	-856.5	41.84	Ti(s)	0	0	30.76
Silver				$\text{TiCl}_4(g)$	-763.2	-726.8	354.9
Ag(s)	0	0	42.55	$\text{TiCl}_4(l)$	-804.2	-728.1	221.9
$\text{Ag}^+(aq)$	105.90	77.11	73.93	$\text{TiO}_2(s)$	-944.7	-889.4	50.29
$\text{AgCl}(s)$	-127.0	-109.70	96.11	Vanadium			
$\text{Ag}_2\text{O}(s)$	-31.05	-11.20	121.3	V(g)	514.2	453.1	182.2
$\text{AgNO}_3(s)$	-124.4	-33.41	140.9	V(s)	0	0	28.9
Sodium				Zinc			
Na(g)	107.7	77.3	153.7	Zn(g)	130.7	95.2	160.9
Na(s)	0	0	51.45	Zn(s)	0	0	41.63
				$\text{ZnCl}_2(s)$	-415.1	-369.4	111.5
				$\text{ZnO}(s)$	-348.0	-318.2	43.9