

--	--	--	--	--	--	--	--

2023/24. õa keemiaolümpiaadi piirkonnavooru ülesanded

10. klass

Grand prix: 6. ülesanne

Selles ülesandes tuleb tasakaalustada nii mass, laeng kui ka energia. Tuumareaktsioonide kirjutamisel kasuta osakeste, keemiliste elementide ning nende isotoopide jaoks spetsiaalset tähistust. Elementide sümboli vasakul asuv ülaindeks näitab prootonite ja neutronite koguarvu, mida tuntakse massiarvuna ja mõõdetakse aatommassiühikutes. Elementide sümboli vasakul asuv alaindeks näitab laengute koguarvu, mida tuntakse laenguarvuna ja mõõdetakse elementaarlaengutes. See laenguarv kehtib subatomaarsete tuumaosakeste, nagu elektronide ja neutriinode puhul. Näiteks kahest prootonist ja kahest neutronist koosnev heelium-4 kirjutatakse kui ${}^4_2\text{He}$ ja elektron kui ${}_{-1}^0\text{e}$. Juhul, kui laenguarv on üheselt tuletatav osakese struktuurist, ei kirjutata seda tihti peale välja.

Tuumareaktsioonide võrrandite tasakaalustamisel veendu, et massiarvude summa mõlemal pool võrrandit oleks võrdne massi tasakaalu saavutamiseks. Laengu tasakaalu jaoks peab laenguarvude summa samuti mõlemal pool võrdne olema.

Energia tasakaalustamiseks tuleb kasutada kahte olulist seadust. Esiteks, Hessi seadus, mis ütleb, et summaarse reaktsiooni kogusoojus on võrdne nende üksikute reaktsioonide soojuste summaga, mille kombineerimisel summaarne reaktsioon saadakse, kusjuures reaktsioonide vastupidiseks pööramine muudab vaid energia märki aga mitte suurust. Teiseks, massi-energia jäävuse seadus, mis seob tuumareaktsioonis massi muutuse reaktsiooni energia muutusega. Seda suhet kirjeldab Einsteini kuulus võrrand $E = mc^2$. Ülesande lahendamisel on kasulik teada ka Planck-Einsteini võrrandit $E = hv$, kus E on footoni energia, h on Plancki konstant ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$) ja v on valguse sagedus. Valguse kiirus c on $3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ning ideaalgaasi olekuvõrrandit $pV = nRT$, kus p on rõhk, V on gaasi ruumala, n on gaasi molekulide hulk, T on absoluutne temperatuur ja R on ideaalgaasikonstant ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Kuum ja külm heelium (20 p)

Heelium on põnev element, mis on koos vesinikuga universumis olemas olnud selle tekkemomendist alates. Enamik heeliumist toodeti Suure Paugu nukleosünteesis. Heelium on ühtlasi peamine tähtede nukleosünteesis toodetav element. Heelium tekib ka siis, kui nukliidid lagunevad spontaanselt või kosmilise kiirguse tõttu, eraldades ${}^4\text{He}$.

a) Kirjuta alaindeksid ja lõpeta võrrandid, mis neid protsesse kirjeldavad. (2)

${}^1\text{H} + {}^1_0\text{n} \rightarrow \dots\dots\dots$	${}^6\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \dots\dots\dots$
${}^2\text{H} + \dots\dots\dots \rightarrow {}^3\text{He} + {}^1_0\text{n}$	${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \dots\dots\dots$
${}^2\text{H} + \dots\dots\dots \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H}$	${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^4\text{He} + \dots\dots\dots$
${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow \dots\dots\dots + \dots\dots\dots$	${}^3\text{H} \rightarrow {}_{-1}^0\text{e} + \dots\dots\dots$

--	--	--	--	--	--	--	--

Heeliumhüdriidioon oli esimene keemiline ühend, mis tekkis universumis pärast Suurt Pauku. Laboritingimustes tekib HeH^+ üliiraske vesiniku $^3\text{H}_2$ molekuli lagunemisel. Olles superhape, reageerib HeH^+ kokkupõrkel mis tahes molekuliga, mida juhtub tähtedevahelises ruumis harva, kuid Maal on sellised kokkupõrked sagedased.

b) Lõpeta ja tasakaalusta võrrandid. (1)

$\text{He} + \text{H}^+ \rightarrow \dots\dots\dots$	$\text{HeH}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \dots\dots\dots$
$^3\text{H}_2 \rightarrow \text{He}^3\text{H} + \dots\dots\dots$	$\text{HeH}^+ + \text{NH}_3 \rightarrow \dots\dots\dots + \dots\dots\dots$

Heelium on kõige väiksema molaarmassiga väärisgaas. Isegi kui tegu on ühe inertsema ainega, mida keemias tuntakse, on gaasi omadused ja rakendused unikaalsed. Heelium on Maal üks haruldasemaid elemente, ent universumis on see levikult teine element pärast vesinikku. Kuna heeliumit leidub palju tähtede koosseisus, leiti heeliumit esmalt Päikeselt ning nimetati see tähe kreekaakeelse nime *Helios* järgi.

Elektronid saavad aatomites ja ioonides olla erinevatel orbitaalidel, millel on ka erinev energia. Elektroni liikumiseks kõrgema energiaga orbitaalile võib osake neelata footoni, mille energia peab vastama täpselt orbitaalide energiatega erinevusele. Elemendi orbitaalidevahelise ülemineku energiat saab arvutada Rydbergi võrrandiga:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

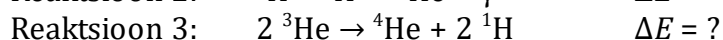
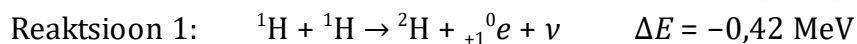
kus $R = 1,10 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$, Z on elemendi tuumalaeng ning n_1 ja n_2 on kvantarvud, mis vastavad energiatasemetele, mille vahel toimub üleminek.

c) Tuvasta arvutustega Päikese emissioonspektrist kolmele elementidele vastavad spektri-jooned. Igale spektrijoonele vastab üks element (kas H, He^+ või Li^{2+}) ja igale elemendile on toodud ainult üks toodud joontest: $\lambda_1 = 164,117 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 121,568 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 54,030 \text{ nm}$. (3)

1.
λ_1 vastab
2.
λ_2 vastab
3.
λ_3 vastab

Peaaegu kogu Päiksest vabanev energia tekib termotuumareaktsioonide abil:

--	--	--	--	--	--	--	--



${}^1\text{H}$ mass on 1,00782 amü ja ${}^4\text{He}$ mass on 4,00260 amü, positroni ${}^0_{+1}\text{e}$ mass on võrdne elektroni massiga 0,0005486 amu ja neutriino (ν) mass on tühine. Hessi seadus kehtib ka termotuumareaktsioonide kirjeldamisel. $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

d) Arvuta, kui palju energiat vabaneb kahe ${}^3\text{He}$ liitumisel (**reaktsioon 3**). (3)

$\Delta E = \dots\dots\dots \text{ MeV}$

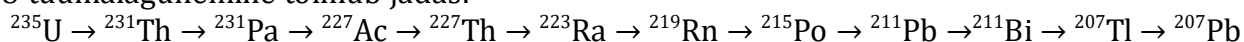
Maal leidub heeliumit maagaasimaardlates, kuhu see koguneb radioaktiivsete elementide α -lagunemiste tulemusel. Gaasimaardlas oleva gaasi koostis on järgmine: 89,0% CH_4 , 5,0% C_2H_6 , 1,0% He , 0,5% C_3H_8 , 2,0% CO_2 ning 2,5% N_2 .

e) Arvuta, mitu kJ energiat vabaneb, kui põletada kogu 10^5 m^3 suuruses maa-aluses gaasimaardlas sisalduv gaas, kui see gaasimaardla on 5 km sügavusel rõhu all rõhul 300 bar. Maa termiline gradient on $25 \text{ }^\circ\text{C/km}$. Atmosfääri keskmine temperatuur on $15 \text{ }^\circ\text{C}$. C–H sideme energiaks võib lugeda on 413 kJ/mol, C–C sideme energiaks 347 kJ/mol, H–O sideme energia vees on 461 kJ/mol, C=O sideme energia CO_2 -s on 745 kJ/mol ning O_2 sideme energia on 498 kJ/mol. (4)

--	--	--	--	--	--	--	--

E = ... kJ

^{235}U tuumalagunemine toimub jadas:

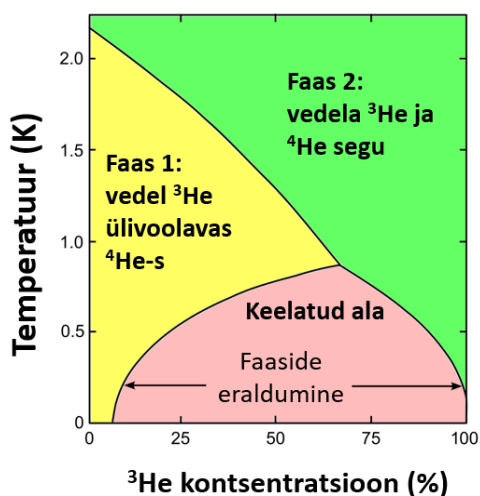


^{235}U mass on 235,04393 amü, ^{207}Pb mass on 206,97590 amü ja ^4He mass on 4,00260 amü.

- f) Arvuta, kui palju energiat (kJ) vabanes tuumalagunemistes, mille tulemusena tekkis kogu gaasimaardlas leidunud heelium (punktis e). (3)

E = ... kJ

Heelium on kõige madalama keemistemperatuuriga element, kuid siinkohal käituvad ^3He ja ^4He erinevalt. ^3He on fermion, ^4He aga boson, mis annab mõlemale erilised omadused, sealhulgas erineva keemistemperatuuri. Erinevate omaduste tõttu ei segune vedel ^4He ja ^3He omavahel alla 0,9 K ükskõik millises vahekorras vaid tekitavad kaks eraldi faasi. Tavalise $^3\text{He}/^4\text{He}$ segu ja ^3He , mis on lahustunud ülivoolavas ^4He -s.



--	--	--	--	--	--	--	--

- g) Millises vahekorras moodustuvad Faas 1 ja Faas 2, kui 1:1 koostisega $^3\text{He}:$ ^4He segu jahutatakse temperatuurini $T = 0,5 \text{ K}$? (2)

Faas 1:Faas 2 = ...

Kvantarvutid vajavad tööks ülimalt madalaid temperatuure ja selleks kasutatakse lahjendusjahutit, mille töövedelikuks on ^3He ja ^4He segu. Selleks segatakse omavahel puhta ^3He ning $^3\text{He} : ^4\text{He}$ 6,6 : 93,4 segu faasid. Kui kambri temperatuur on kõrgem absoluutsest nullist, hakkab ^3He liikuma puhtast ^3He faasist (Faas 2) segufaasi (Faas 1) ning seal ^4He lahjendama. Protsessi iseenesliku toimumise tingimuseks on negatiivne Gibbsi energia muutus ($\Delta G < 0$) ning $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, kus ΔH on reaktsiooni entalpia ehk soojuse muut ja ΔS on entroopia muut.

- h) Määra antud kirjelduse põhjal lahjendusprotsessi ΔH ja ΔS märgid. (1)

ΔH	ΔS
------------	------------

Lahjendusjahuti efektiivsust kirjeldab võrrand

$$P = v(95T_m^2 - 11T_i^2)$$

kus P on jahutusvõimsus (W), v on ^3He molaarne ringluskiiirus (mol s^{-1}), T_m on jahutuskambri temperatuur (K) ning T_i on sissevoolava ^3He temperatuur (K).

- i) Arvuta, mitu korda külmemat temperatuuri on lahjendusjahuti võimeline maksimaalselt saavutama võrreldes sissevoolava ^3He temperatuuriga. (1)

$N = \dots\dots\dots$