9 Hajoamisenergia ydinreaktiossa

9-9.

a) Kuvassa annetut tasojen väliset energiat kuvaavat hajoamisenergioita. Alfahajoamisessa hajoamisenergia jakautuu alfahiukkasen ja tytärytimen kesken. Tämän takia alfahiukkasten energiat ovat pienemmät kuin energiatasojen energioiden erotukset.

b) Alfahiukkanen, jolla on pienempi liike-energia, on hitaampi. Hitaamman alfahiukkasen energia on $4{,}602\ \text{MeV} = 4{,}602 \cdot 10^6 \cdot 1{,}60218 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 7{,}37323 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$.

Koska liike-energia on $E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$, alfahiukkasen nopeus hajoamisen jälkeen on

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_\text{k}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7{,}37323 \cdot 10^{-13}\ \text{J}}{6{,}64466 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}} = 1{,}48973 \cdot 10^7\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 1{,}5 \cdot 10^7\ \text{m/s}.$$

c) Kun radon jää hajoamisessa hetkeksi viritystilaan, radonin liike-energia saadaan vähentämällä energiatason ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ja viritystilan erotuksesta 4,685 MeV alfahiukkasten energia 4,602 eV.
Liike-energia on 4,685 MeV – 4,602 MeV = 0,083 MeV.
Radonin liike-energia on jouleina
$E_\text{k}(\text{Rn}) = 0{,}083\ \text{MeV} = 0{,}083 \cdot 10^6 \cdot 1{,}60218 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = 1{,}32981 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$.

Koska liike-energia on $E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$, radonin nopeus on

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_\text{k}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}329\,81 \cdot 10^{-14}\ \text{J}}{222{,}018 \cdot 1{,}66054 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}} \approx 2{,}7 \cdot 10^5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

$E_{K,Rn} = Q - E_{K,\alpha}$
Energiatasojen erotus
4,602

9-10.

Reaktioyhtälö elektronisieppauksessa on ${}^{A}_{Z}\text{X} + {}^{0}_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\text{Y} + \nu$.
Vetyisotoopille ${}^{1}_{1}\text{H}$ yhtälö on ${}^{1}_{1}\text{H} + {}^{0}_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{1}_{0}\text{n} + \nu$.

Reaktion massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m\left({}^{1}_{1}\text{H}\right) + m\left({}^{0}_{-1}\text{e}\right) - m(\text{n}) \\ &= 1{,}0078250\ \text{u} + 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}\ \text{u} - 1{,}0086649\ \text{u} \\ &\approx -291{,}420 \cdot 10^{-6}\ \text{u}.\end{aligned}$$

Vetyisotooppi ${}^{1}_{1}\text{H}$ ei voi hajota elektronisieppauksella, koska tuloshiukkasen eli neutronin massa on suurempi kuin lähtöhiukkasten yhteenlaskettu massa.

9-11.

a) Gammakvantin energia on $E = hf$. Kuvion mukaan pienin energia vapautuu gammakvantin energiana, kun ydin siirtyy tilalta E_2 tilalle E_1. Pienin vapautuva energia on
$E = E_2 - E_1 = 2{,}158\ \text{MeV} - 1{,}332\ \text{MeV} = 0{,}826\ \text{MeV}$.

b) Pienin gammakvantin taajuus on
$f = E/h = 0{,}826 \cdot 10^6\ \text{eV}/(4{,}135\,67 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs}) \approx 200 \cdot 10^{18}\ 1/\text{s} = 200 \cdot 10^{18}\ \text{Hz} = 200\ \text{EHz}$.

c) Gammakvantin aallonpituus on sitä pidempi, mitä pienempi kvantin energia on. Kohdan a mukaan pienin gammakvantin energia on 0,826 MeV, joten kvantin pisin aallonpituus on
$\lambda = hc/E = 4{,}135\,67 \cdot 10^{-15}\ \text{eVs} \cdot 2{,}997\,92 \cdot 10^8\ (\text{m/s})/(0{,}826 \cdot 10^6\ \text{eV}) \approx 1{,}50 \cdot 10^{-12}\ \text{m} = 1{,}50\ \text{pm}$.

© Jenni Andersin, Pentti Frondelius,
Jari Latva-Teikari, Heikki Lehto ja Sanoma Pro 2023

9 Hajoamisenergia ydinreaktiossa

9-12.

a) Reaktioyhtälö on ${}^{225}_{89}\mathrm{Ac} \rightarrow {}^{221}_{87}\mathrm{Fr} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

b) Massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= m\left({}^{225}_{89}\mathrm{Ac}\right) - m\left({}^{221}_{87}\mathrm{Fr}\right) - m\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right)\\ &= 225{,}023205\ \mathrm{u} - 221{,}014230\ \mathrm{u} - 4{,}0026033\ \mathrm{u}\\ &= 0{,}0063717\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Huomaa, laskussa ei ole otettu huomioon elektronien massoja, koska ne kumoutuvat alfahajoamisen massavajetta laskettaessa.
Hajoamisenergia on

$$Q = \Delta m c^2 = 0{,}0063717\ \mathrm{u} \cdot c^2 = 0{,}0063717 \cdot 931{,}494\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{c}^2} \cdot \mathrm{c}^2 \approx 5{,}935\ \mathrm{MeV}.$$

9-13.

a) Taulukkokirjan mukaan ${}^{18}_{9}\mathrm{F}$-isotooppi on β^+-aktiivinen.

b) Koska fluoriydin emittoi positronin ja neutriinon, taulukkokirjan mukaan syntyy happiydin.
Hajoamisyhtälö on ${}^{18}_{9}\mathrm{F} \rightarrow {}^{18}_{8}\mathrm{O} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$.

c) $m_\mathrm{F} = 18{,}000937$ u, $m_\mathrm{O} = 17{,}9991594$ u, $m_\mathrm{e} = 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}$ u, 1 u = 931,494 MeV/c^2
Neutriinon massa oletetaan nollaksi.

Massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= \left[m\left({}^{18}_{9}\mathrm{F}\right) - 9m_\mathrm{e}\right] - \left[m\left({}^{18}_{8}\mathrm{O}\right) - 8m_\mathrm{e} + m_\mathrm{e}\right]\\ &= m\left({}^{18}_{9}\mathrm{F}\right) - 9m_\mathrm{e} - m\left({}^{18}_{8}\mathrm{O}\right) + 8m_\mathrm{e} - m_\mathrm{e}\\ &= m\left({}^{18}_{9}\mathrm{F}\right) - m\left({}^{18}_{8}\mathrm{O}\right) - 2m_\mathrm{e}\\ &= 18{,}000937\ \mathrm{u} - 17{,}9991594\ \mathrm{u} - 2 \cdot 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u}\\ &= 0{,}00068044018\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Hajoamisenergia on

$$\begin{aligned}Q &= \Delta m c^2\\ &= 0{,}00068044018\ \mathrm{u} \cdot c^2 = 0{,}00068044018 \cdot 931{,}494\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2} \cdot c^2\\ &\approx 0{,}634\ \mathrm{MeV}.\end{aligned}$$

9-14.

$m_\mathrm{Cs} = 131{,}906431$ u, $m_\mathrm{Xe} = 131{,}904144$ u, 1 u = 931,494 MeV/c^2

a) Cesiumydin sieppaa elektroniverhosta elektronin, jolloin ytimessä protoni muuttuu neutroniksi. Reaktiossa vapautuu neutriino. Hajoamisyhtälö on ${}^{132}_{55}\mathrm{Cs} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{132}_{54}\mathrm{Xe} + \nu$.

© Jenni Andersin, Pentti Frondelius,
Jari Latva-Teikari, Heikki Lehto ja Sanoma Pro 2023

9 Hajoamisenergia ydinreaktiossa

7.3 β^+-aktiivisten aineiden säteilyspektrit ovat jatkuvia, koska vapautuva hajoamisenergia jakaantuu kolmen hiukkasen eli tytärytimen, positronin ja neutriinon kesken. Valtaosa liike-energiasta jakaantuu positronille ja neutriinolle, ja tämä jakosuhde vaihtelee hajoamisissa. Positronin liike-energia voi olla mitä tahansa nollan ja havaitun maksimiarvon välillä.

9-18.

a)

i) Hapen isotooppeja ovat ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ ja ${}^{18}_{8}\mathrm{O}$ ja typen ${}^{18}_{7}\mathrm{N}$ ja ${}^{20}_{7}\mathrm{N}$; saman alkuaineen isotoopeilla on ytimessään yhtä monta protonia, mutta eri määrä neutroneja.

ii) Millään atomeista ei ole keskenään samanlaiset ytimet, koska jokaisen atomin ytimen protoni- ja neutronilukujen yhdistelmä on erilainen.

iii) Emissiospektri syntyy elektroniverhon viritystilojen purkautuessa. Koska viritystilat määräytyvät protonien ja elektronien välisestä sähköisestä vuorovaikutuksesta ja koska saman atomin eri isotoopeilla on ytimessä sama määrä protoneja, atomin eri isotooppien emissiospektrit ovat samanlaiset. Täten isotoopeilla ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ ja ${}^{18}_{8}\mathrm{O}$ on samalaiset emissiospektrit, samoin isotoopeilla ${}^{18}_{7}\mathrm{N}$ ja ${}^{20}_{7}\mathrm{N}$.

b)

i) Reaktio ${}^{234}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{238}_{92}\mathrm{U} + \alpha$ ei ole mahdollinen, koska yhtälön vasemmalla puolella on 234 nukleonia ja oikealla puolella 238 + 4 = 242 nukleonia. Nukleonien määrä pitää pysyä samana, joten reaktio ei ole mahdollinen.

ii) β^+-hajoamisessa ytimessä protoni muuttuu neutroniksi ja samalla positroni ja neutriino emittoituvat.
Hajoamisreaktio on ${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e} + \nu$.
Kysytty yhtälö ${}^{52}_{25}\mathrm{Mn} \rightarrow {}^{52}_{24}\mathrm{Cr} + \beta^+ + \nu$ on muodoltaan samanlainen kuin β^+-hajoamisen reaktioyhtälö. Isotooppi ${}^{52}_{25}\mathrm{Mn}$ on β^+-aktiivinen. Reaktio on mahdollinen.

iii) Reaktio ${}^{23}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{19}_{9}\mathrm{F} + \alpha$ ei ole mahdollinen, koska ${}^{23}_{11}\mathrm{Na}$ -isotooppi on pysyvä.

c) Elektronisieppauksessa kobolttiydin sieppaa elektronin elektroniverhon alimmilta kuorilta. Elektronisieppauksessa ytimeen siepattu elektroni reagoi protonin kanssa ja syntyy neutroni ja neutriino:
${}^{57}_{27}\mathrm{Co} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{57}_{26}\mathrm{Fe} + \nu$.

© Jenni Andersin, Pentti Frondelius,
Jari Latva-Teikari, Heikki Lehto ja Sanoma Pro 2023