5 Atomin ydin koostuu nukleoneista

5-6.

a) Kvarkeilla on niiden sähkömagneettisiin vuorovaikutuksiin liittyvän sähkövarauksen lisäksi myös toisenlainen varaus, jota kutsutaan värivaraukseksi tai väriksi. Vahva vuorovaikutus ilmenee värivarauksellisten hiukkasten välillä vaikuttavana voimana, ns. vahvana voimana, joka sitoo kvarkit toisiinsa.

b) Kvarkkien välinen vahva voima vaikuttaa hieman nukleonin ulkopuolellekin, ja tämä jäännösvoima sitoo nukleonit toisiinsa: ydin pysyy koossa. Ydinvoimaksi kutsutaan nukleonien välistä voimaa. Ydinvoima on vahvan vuorovaikutuksen aiheuttama.

c) Protoni on sitoutunut ytimeen löyhemmin kuin neutroni, koska siihen kohdistuu ydinvoiman lisäksi sähköisestä vuorovaikutuksesta aiheutuva hylkimisvoima. Koska neutronilla ei ole sähkövarausta, siihen kohdistuu ainoastaan ydinvoima, minkä takia se on sitoutunut vahvemmin ytimeen kuin protoni.

d) Ytimen koko ei voi olla kuinka suuri tahansa, koska vain tietyt protonien ja neutronien lukumäärät voivat muodostaa ytimiä. Lisäksi sähköinen hylkimisvoima kasvaa ytimen koon kasvaessa, ja vahva vuorovaikutus on lyhyen kantaman voima.

5-7.

a) Saman alkuaineen eri isotoopeilla on aina sama määrä protoneja, mutta neutronien määrä vaihtelee.

b) Kemiallisissa reaktioissa reaktioon osallistuvien aineiden ytimet säilyvät muuttumattomina ts. ytimissä ei tapahdu muutoksia, vaan kaikki muutokset tapahtuvat atomin elektronikuorilla. Saman aineen eri isotoopeilla on samanlaiset elektronikuoret, joten ne käyttäytyvät kemiallisesti samalla tavoin, minkä takia niitä ei voi erottaa toisistaan kemiallisin keinoin.

c) Pysymättömiä isotooppeja kutsutaan radioaktiivisiksi isotoopeiksi.

5-8.

a) Merkintä ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ tarkoittaa heliumydintä, joka koostuu 4 nukleonista, joista 2 on protoneja.

b) Merkinnän ${}^{226}_{86}\mathrm{Ra}$ kuvaama radiumydin koostuu 226 nukleonista, joista 86 on protoneja.

c) Merkintä C-12 tarkoittaa hiilen isotooppia ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$. Kyseessä on hiiliydin, jossa on 12 nukleonia.

d) Koska uraaniytimessä on 235 nukleonia ja 92 protonia, on $A = 235$ ja $Z = 92$. Ydin voidaan esittää muodossa ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$.

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

5 Atomin ydin koostuu nukleoneista

5-9.

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

b) Saman alkuaineen isotoopeilla on ytimessään yhtä monta protonia, mutta eri määrä neutroneja. Boorin isotooppeja ovat ${}^{11}_{5}\mathrm{B}$ ja ${}^{10}_{5}\mathrm{B}$ ja typen ${}^{18}_{7}\mathrm{N}$ ja ${}^{20}_{7}\mathrm{N}$.

c) 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 ${}^{11}_{5}\mathrm{B}$ ja ${}^{10}_{5}\mathrm{B}$ on samalaiset emissiospektrit, samoin isotoopeilla ${}^{18}_{7}\mathrm{N}$ ja ${}^{20}_{7}\mathrm{N}$.

d) Hiilellä on 5 isotooppia, joista 2 on pysyviä. Yleisin on isotooppi ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$.

5-10.

Protonien välisen sähköisen hylkimisvoiman suuruus on

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{Q_1\cdot Q_2}{r^2} = 8{,}98755\cdot 10^9\,\frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{C^2}}\cdot\frac{\left(1{,}60218\cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}\right)^2}{\left(2{,}0\cdot 10^{-15}\,\mathrm{m}\right)^2} \approx 57{,}6772\ \mathrm{N}.$$

Protonien välisen gravitaatiovoiman suuruus on

$$F = \gamma\frac{m_1\cdot m_2}{r^2} = 6{,}67430\cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{Nm^2}}{\mathrm{kg^2}}\cdot\frac{\left(1{,}67262\cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}\right)^2}{\left(2{,}0\cdot 10^{-15}\,\mathrm{m}\right)^2} \approx 4{,}66810\cdot 10^{-35}\,\mathrm{N}.$$

Sähköisen voiman suuruus on noin $\dfrac{57{,}6772\ \mathrm{N}}{4{,}66810\cdot 10^{-35}\,\mathrm{N}} \approx 10^{36}$-kertainen gravitaatiovoiman suuruuteen verrattuna.

5-11.

$m = 46\ \mathrm{g}$, $P = 13\ \mathrm{kW}$

Kun sijoitetaan massan ja energian vastaavuuden yhtälö $E = mc^2$ tehon yhtälöön $P = E/t$, saadaan yhtälö $P = \dfrac{mc^2}{t}$. Jos golfpallon koko massa voitaisiin muuntaa energiaksi, rakennusta voitaisiin lämmittää

$$t = \frac{mc^2}{P} = \frac{0{,}046\ \mathrm{kg}\cdot\left(2{,}99792\cdot 10^8\ \mathrm{m/s}\right)^2}{13\cdot 10^3\ \mathrm{W}} = 3{,}18020\cdot 10^{11}\ \mathrm{s} \approx 10000\ \mathrm{a}.$$

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

5 Atomin ydin koostuu nukleoneista

5-12.

a) Atomiytimen muodostuessa protoneista neutroneista, syntyneen ytimen massa on pienempi kuin osasten yhteinen massa. Ytimen massavaje Δm on ytimen rakenneosien yhteismassan ja ytimen massan erotus.
Sidosenergia on massavajetta vastaava energia.
Sidososuus eli sidosenergia nukleonia kohti on atomiytimen pysyvyyden eli stabiliteetin mitta.
Sidososuus on keskimääräinen energia, jolla yksi nukleoni on sitoutunut ytimeen.

b) Sidososuuskäyrän maksimikohta on massalukujen 58–60 kohdalla. Suurimmat sidososuudet ovat nikkelillä ja raudalla.

c) Keskiraskaiden ytimien sidosenergiat nuklidia kohden eli sidososuudet ovat suuria, siksi ne eivät hajoa helposti. Keskiraskaat ytimet, kuten rauta ja nikkeli, ovat pysyvimpiä ytimiä. Niissä nukleonit ovat voimakkaammin toisiinsa sitoutuneita kuin kevyemmissä ja raskaammissa ytimissä. Ydin on sitä pysyvämpi, mitä enemmän sidosenergiaa vapautuu nukleonia kohden ytimen muodostuessa.

d) Keveiden ja raskaiden ytimien sidososuudet ovat pienempiä kuin keskiraskaita ytimien sidososuudet. Näin ollen kevyet ja raskaat ytimet hajoavat helpommin kuin keskiraskaat.

e) Järjestys suurimmasta pienimpään on ${}^{60}_{28}\mathrm{Ni}$, ${}^{120}_{50}\mathrm{Sn}$, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ ja ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

f) ${}^{62}_{28}\mathrm{Ni}$-nuklidin sidososuus on $b = \frac{E_\mathrm{B}}{A} = \frac{545{,}3\ \mathrm{MeV}}{62} \approx 8{,}795\ \mathrm{MeV}$.

5-13.

a) Väärin sillä 238,050784 u on ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$:n atomimassa, jossa elektronien massat ovat mukana.

b) Oikein: $238{,}050784\ \mathrm{u} - 92 \cdot 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} = 238{,}000314648\ \mathrm{u} \approx 238{,}000315\ \mathrm{u}$

c) Oikein: $238{,}000314648\ \mathrm{u} = 238{,}000314648 \cdot 1{,}66053906660 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} \approx 395{,}208820 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg}$

d) Oikein: $238{,}000314648\ \mathrm{u} = 238{,}000314648 \cdot 931{,}49\ \mathrm{MeV}/c^2 \approx 0{,}22170 \cdot 10^{12}\ \mathrm{eV}/c^2$.

5-14.

a) Ytimen ${}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$ massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= Z \cdot m_\mathrm{p} + N \cdot m_\mathrm{n} + Z \cdot m_\mathrm{e} - m_\mathrm{Pb} \\ &= 82 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 126 \cdot 1{,}0086649\ \mathrm{u} + 82 \cdot 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} - 207{,}976627\ \mathrm{u} \\ &\approx 1{,}76\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

b) ja c) Energiaa ei vapaudu kummassakaan tapauksessa, koska tulosytimissä sidososuudet ovat pienemmät kuin lähtöytimillä, joten reaktioissa sitoutuu energiaa. Yksittäisen nukleonin sidos ei vahvistu kummassakaan tapauksessa, vaan molemmissa tapauksissa heikkenee.

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

5 Atomin ydin koostuu nukleoneista

5-15.

a) ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ -ytimen massavaje on

$$\begin{aligned}\Delta m &= Z \cdot m_\mathrm{p} + N \cdot m_\mathrm{n} + Z \cdot m_\mathrm{e} - m_\mathrm{H} \\ &= 1 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 1 \cdot 1{,}0086649\ \mathrm{u} + 1 \cdot 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} - 2{,}0141018\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}0023882\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Sidosenergia on

$$E_\mathrm{B} = \Delta m c^2 = 0{,}0023882\ \mathrm{u} \cdot c^2 = 0{,}0023882 \cdot 931{,}49\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2} \cdot c^2$$

$$\approx 2{,}2246\ \mathrm{MeV}.$$

b) Lasketaan ensin ytimen ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ massavaje:

$$\begin{aligned}\Delta m &= Z \cdot m_\mathrm{p} + N \cdot m_\mathrm{n} + Z \cdot m_\mathrm{e} - m_\mathrm{C} \\ &= 6 \cdot 1{,}0072765\ \mathrm{u} + 6 \cdot 1{,}0086649\ \mathrm{u} + 6 \cdot 5{,}4857991 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{u} - 12{,}000000\ \mathrm{u} \\ &= 0{,}0989399\ \mathrm{u}.\end{aligned}$$

Sidososuus on

$$b = \frac{E_\mathrm{B}}{A} = \frac{\Delta m c^2}{A} = \frac{0{,}0989399\ \mathrm{u} \cdot c^2}{12} = \frac{0{,}0989399 \cdot 931{,}49\ \frac{\mathrm{MeV}}{c^2} \cdot c^2}{12}$$

$$\approx 7{,}6801\ \mathrm{MeV}.$$

5-16.

a) Hajoamiskaavio mukaan ${}^{212}\mathrm{Bi}$-isotooppi hajoaa alfahajoamisen kautta ${}^{208}\mathrm{Tl}$-isotoopiksi. Hajoaminen tapahtuu

- joko suoraan, jolloin ${}^{212}\mathrm{Bi}$-isotooppi emittoi 6,023 MeV:n alfahiukkasen
- tai siten, että tytärydin ${}^{208}\mathrm{Tl}$ jää ensin viritystilaan, joka purkautuu 0,329 MeV:n gammasäteilyllä ja tytärydin päätyy perustilaan. Jos ${}^{212}\mathrm{Bi}$-isotooppi hajoaa viritystilan kantta, silloin ${}^{212}\mathrm{Bi}$-isotooppi emittoi 5,694 MeV:n alfahiukkasen.

b) Yhtälöstä $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ saadaan syntyvän gammasäteilyn aallonpituudeksi

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{4{,}13567 \cdot 10^{-15}\ \mathrm{eVs} \cdot 2{,}99792 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s}}{0{,}329 \cdot 10^{6}\ \mathrm{eV}}$$

$$\approx 3{,}77 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{m} = 3{,}77\ \mathrm{pm}.$$

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

5 Atomin ydin koostuu nukleoneista

5-17.

a) Yhtälöstä $r = 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{A}$ fm saadaan heliumatomin ($A = 4$) ytimen säteeksi

$r_{He} = 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{A_{He}}$ fm $= 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{4}$ fm $\approx 2{,}222$ fm.

b) Rauta-atomin ytimen säde on

$r_{Fe} = 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{A_{Fe}}$ fm $= 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{56}$ fm $\approx 5{,}356$ fm.

c) Uraaniatomin ytimen säde on

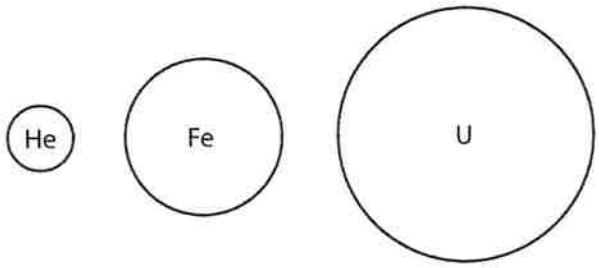
$r_U = 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{A_U}$ fm $= 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{238}$ fm $\approx 8{,}676$ fm.

Valitaan heliumytimen säde yksikkösäteeksi, jolloin rautaytimen ja uraaniytimien suhteellisiksi säteiksi saadaan

$$\frac{r_{Fe}}{r_{He}} = \frac{1{,}4 \cdot \sqrt[3]{56}\ \text{fm}}{1{,}4 \cdot \sqrt[3]{4}\ \text{fm}} \approx 2{,}4 \text{ ja}$$

$$\frac{r_U}{r_{He}} = \frac{1{,}4 \cdot \sqrt[3]{238}\ \text{fm}}{1{,}4 \cdot \sqrt[3]{4}\ \text{fm}} \approx 3{,}9.$$

Näin ollen heliumytimen säteeseen verrattuna rautaytimen säde on 2,4-kertainen ja uraaniytimen säde 3,9- kertainen.



5-18.

a) Koska ytimen säde on $r = 1{,}4 \cdot \sqrt[3]{A}$ fm ja tilavuus $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ (kun ydin oletetaan pallomaiseksi), ytimen tiheydeksi saadaan

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{A \cdot 1{,}660539 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (1{,}4 \cdot \sqrt[3]{A}\ \text{fm})^3} = \frac{3 \cancel{A} \cdot 1{,}660539 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}{4\pi \cdot (1{,}4 \cdot 10^{-15}\ \text{m})^3 \cdot \cancel{A}}$$

$$\approx 1{,}4 \cdot 10^{17}\ \text{kg/m}^3.$$

b) Koska massaluku A supistuu tiheyttä laskettaessa, ytimen massaluvulla ei ole vaikutusta ytimen tiheyteen, joten kaikilla ytimillä on sama tiheys. Huomaa, että kysymys on likimääräisestä mallista.

c) Tiheyden yhtälöstä $\rho = \frac{m}{V}$ saadaan maapallon tilavuudeksi

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{5{,}974 \cdot 10^{24}\ \text{kg}}{1{,}44470 \cdot 10^{17}\ \text{kg/m}^3} \approx 4{,}13511 \cdot 10^7\ \text{m}^3.$$

Oletetaan maapallo pallon muotoiseksi. Koska pallon tilavuus on $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, maapallon säde olisi

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 4{,}13511 \cdot 10^7\ \text{m}^3}{4\pi}} \approx 210\ \text{m}.$$

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