

Johdanto

Kiinnostus kvantti- ja ydinfysiikkaan Jyväskylän yliopistossa heräsi opiskeluaikanani fysiikan cumlaude töistä. Niissä tuli tutuksi mm. monikanava-analysaattori. Kvantti- ja ydinfysiikan luennoilla professorit Kantele ja Lipas saivat opiskelijat kiinnostumaan asiasta omalla tavallaan havainnollistaa käsitteitä.

Ajatus uudelleen opiskeluun heräsi 2022. Oli aika päivittää tietoni ajan tasalle. Vuoden 1986 Tsernobylin ydinvoimalaonnettomuus toi mieleeni ydinlaskeumat Suomessa ja niiden vaikutuksen ihmiseen luonnosta saatavan ravinnon mukana. Mitä luonnollinen maasta saatava säteily vaikuttaa ihmisiin. Otin esiin opiskelukirjat ja etsin kirjastosta uudempaa materiaalia. Internetistä löysin aiheesta linkkejä ja materiaalia aineistoni tueksi. Näistä loin tutkielman aiheesta ”Aineen radioaktiivinen hajoaminen”.

Olen pyrkinyt havainnollistamaan ilmiöitä lukijaläheisesti esimerkein.

Jämsä 23.1.2023

Hannu Koivisto, FM

Sisällysluettelo

3	Perusvuorovaikutukset
4	Standardimalli, säilymislait
5	Massakato ja sidosenergia, ydinreaktio
7	Ydinmallit
10	Ytimen hajoamistyyppit
10	Alfahajoaminen
12	Hajoamissarjat
13	Beetahajoaminen
14	β^- hajoaminen
15	β^+ hajoaminen
16	Elektronisieppaus
17	Fissioreaktio
19	Neutronien hidastus
20	Ytimen parillisuus
21	Luonnossa esiintyviä uraani-235:n fissiotuotteita
23	Radioaktiivisuuteen liittyviä suureita
25	Lähdeluettelo

Aineen radioaktiivinen hajoaminen

Perusvuorovaikutukset

1. Vahva vuorovaikutus tai ydinvoima pitää ytimen nukleonit ja ytimen koossa. Vahvalla vuorovaikutuksella on seuraavat ominaisuudet:

- Vahvan vuorovaikutuksen vaikutusala on lyhyt. Ne vaikuttavat etäisyyksillä 10^{-15} m = 1 fm (femtometri).
- Vahva vuorovaikutus on riippumaton varattujen hiukkasten sähkövarauksesta.
- Vahvalla vuorovaikutuksella on kova sydän. Voima on etäisyydestä riippuen hylkivä tai sitova.
- Vahva vuorovaikutus riippuu vuorovaikuttavien nukleonien spin suunnistuksesta, eli se liittyy spin-ratavuorovaikutukseen.

2. Sähkömagneettinen vuorovaikutus ilmenee varattujen hiukkasten välillä. Ydin on sähköisesti varautunut. Sähköiset voimat siellä vaikuttavat etäisyyksillä 10 fm. Kun sähköinen voima positiivisesti varattujen protonien välillä pyrkii hajottamaan muodostuvan ytimen, ydinvoima huomattavasti suurempana voimana pitää ytimen kasassa. Kun ytimen massaluku kasvaa ($Z > 83$), ydintä koossa pitävän voiman vaikutus heikkenee, minkä vuoksi nämä ytimet hajoavat spontaanisti. Vahva vuorovaikutus kohdistuu ensisijaisesti protonien ja neutronien koossa pysymiseen, ei niinkään ytimen koossa pitämiseen.

3. Heikko vuorovaikutus vaikuttaa ytimessä tapahtuviin hajoamisprosesseihin (ks. beetahajoaminen), mutta ei ole veto- tai poistovoima, eikä vaikuta jatkuvasti. Se on n. 100 000 kertaa ydinvoimaa heikompi ja sen kantama on erittäin lyhyt.

4. Gravitaatiovuorovaikutus vaikuttaa vain kosmisten massojen välillä.

Standardimalli

Hiukkasfysiikassa standardimalli on teoria, joka luokittelee kaikki tunnetut alkeishiukkaset ja kuvaa näiden hiukkasten välisiä vuorovaikutuksia. Fyysinen maailma koostuu erilaisten aliatomaaristen hiukkasten yhdistelmistä.

Atomiydin koostuu neutroneista ja protoneista, joiden sisältä löytyvät kvarkit. Ne rakentuvat ylös (u) ja alas (d) kvarkeista. Protonin koostumus on "uud", joten sen varaus on $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$. Neutronilla taas on "udd" rakenne, joten sen varaus on $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$. Vaikka neutronin onkin varaukseton, itse asiassa sen sisällä on heikko sähkövaraus kvarkkirakenteesta johtuen. Näin ollen se vuorovaikuttaa heikosti myös sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kautta.

Koska neutronin massa on energiana 939.565 MeV, kun taas kolmen kvarkin massa on vain 10 MeV, suurin osa neutronin massasta on ydinvoimaa välittävän gluonin muodossa. Kvarkkimassana voidaan paremmin pitää varsinaisen kvarkkimassan lisäksi sitä ympäröivän gluonihukkaskentän massaa, koska gluonit ovat luonnostaan massattomia, niillä on energiaa.

	FERMIONIT			BOSONIT	
massa varaus spin	$<1,0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$<18,2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 91,19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	$\approx 124,97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
	ν_e elektronin neutriino	ν_μ myonin neutriino	ν_τ taun neutriino	Z Z-bosoni	H Higgsin bosoni
LEPTONIT	$\approx 0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105,66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1,7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 80,39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	e elektroni	μ myoni	τ tau	W W-bosoni	
	$\approx 2,2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1,28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173,1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	
	u ylös	c lumo	t huippu	γ fotoni	
KVARKIT	$\approx 4,7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	
	d alas	s outo	b pohja	g gluoni	
				MITTABOSONIT	SKALAARIBOSONIT

Kuva. Standardimallin alkeishiukkaset

Säilymislait

Radioaktiiviset prosessit noudattavat säilymislakeja. Reaktiossa säilyviä suureita ovat massa-energia, liikemäärä, impulssimomentti, varaus, nukleoniluku eli massaluku ja leptoniluku (mm. elektroni ja neutriino).

Massakato ja sidosenergia

Ytimen massa on aina pienempi kuin protonien ja neutronien yhteenlaskettu massa. Osa ydinhiukkasten massan energiasta muuntuu ytimen sidosenergiaksi. Erotusta sanotaan massakadoksi. Ydin sijaitsee potentiaalienergiakuopassa. Massakadon suuruus

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{atomi}} + Zm_e ,$$

ja sitä vastaava sidosenergia

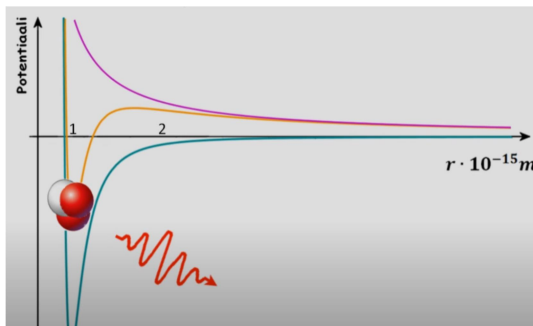
$$E_B = \Delta mc^2 ,$$

missä $c^2 = 931.478 \text{ MeV/amu}$, Z on protonien, N neutronien lukumäärä ja massojen yksikkönä on atomimassayksikkö $1 \text{ amu} = 931.478 \text{ MeV}/c^2$. Tässä muodossa esitettynä ei tarvitse ottaa valon nopeuden c arvoa huomioon.

Ydinreaktio

Kun kaksi ydintä pääsee hyvin lähelle ydinvoimien vaikutuspiiriin, nukleonien uudelleen järjestyminen on mahdollista. Tästä voi syntyä ydinreaktio. Ydinreaktiot tavallisesti tuotetaan pommittamalla kohdeydintä neutroneilla tai protoneilla, mutta myös alfahiukkasilla eli heliumin ytimillä. Raskaampia ytimiä ei juuri käytetä, koska Coulombin repulsion eli poistovoiman ylittäminen vaatisi ammuksilta suuria liike-energioita. Myös gammasäteitä käytetään ydinreaktioiden synnyttämiseen.

Jotta kuvassa alla oikealta vaaka-akselin suunnassa tuleva protoni pääsisi ytimen lähelle, sillä pitää olla liike-energiaa päästäkseen ytimen lähelle ja voittaakseen sähköisen poistovoiman (sininen käyrä). Vaaka-akselin yksikkönä on 1 fm. 1-1.5 fm etäisyydellä alkaa ytimen vahva voima vaikuttaa. Protonin vauhti hidastuu ja varattuna hiukkasena se säteilee energiaa. Oranssilla on piirretty sähköisen ja vahvan voiman kokonaispotentiaali. Jos hiukkanen pääsee sen korkeimman kohdan yli, tapahtuu ydinreaktio ja vapautuu gammasäteilyä. Jos hiukkasena olisi neutroni, sähköistä poistovoimaa ei ole ja hiukkanen pääsee ytimen vaikutuspiiriin helpommin. Siksi neutroneja käytetäänkin usein ammuksina.



Yleisesti ydinreaktio tapahtuu kahdessa vaiheessa:

1. Kohdeydin sieppaa tulevan ammuksen saaden lisää energiaa eli virittyy muodostaen väliytimen.
2. Virittynyt ydin purkaa saamansa energian emittoiden saman tai muun partikkelin.

Ydinreaktiot ovat törmäysprosesseja. Jos tulevat ja lähtevät hiukkaset ovat samoja, kyseessä on **sironta**. Jos ydin jää törmäyksen jälkeen samaan tilaan, törmäys on elastinen, muussa tapauksessa lähtevän hiukkasen liike-energia eroaa tulevan hiukkasen energiasta.

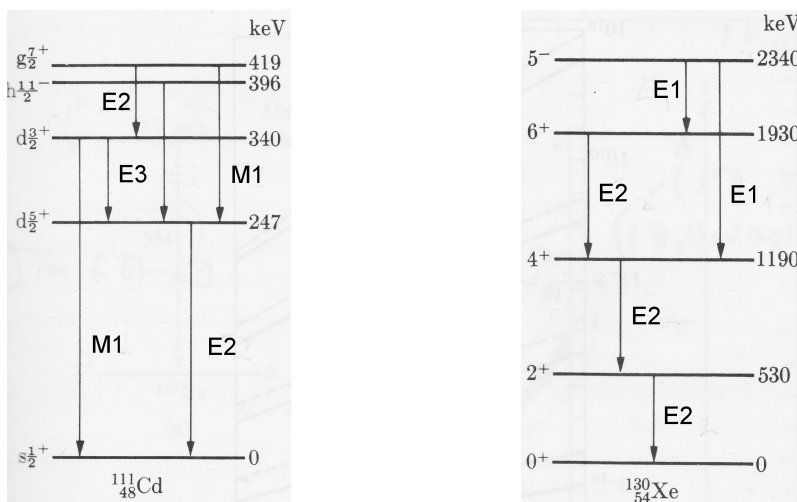
On tapauksia, joissa ydin **sieppaa** ammuksen, mutta uutta hiukkasta ei emittoitu. Sen sijaan ydin emittoi-kin gammasäteilyä. Gammasäteily aiheuttaa tytärytimeen pienen rekyyli-energian. Ytimen gammasäteily-spektri on vastaava kuin atomi- ja molekyyli-spektreissä.

Gammasiirtymät

Kun ydinreaktio tapahtuu, syntyvä tytärydin jää usein virittyneeseen tilaan. Viritys purkautuu alemmille viritystiloille gammakvantteina.

Gammasiirtymän todennäköisyydet riippuvat energiatasojen energioista, ytimen massaluvusta ja spinin muutoksesta. Siirtymän todennäköisyys lisääntyy, kun energian muutos kasvaa ja vähenee kun impulssimomenttien muutos lisääntyy. Ytimen energiamuutokselle pätee, mitä suurempi ero on viritystilan ja perustilan välisessä impulssimomentissa, sitä alempi gammasiirtymän todennäköisyys on ja sitä pidempi on viritystilan elinikä, ellei siinä ole siirtymämahdollisuutta toiselle alemman energian viritystilalle pienemmällä impulssimomentin muutoksella.

Esimerkki 1. Kuvan vasemmassa reunassa ovat energiatasojen impulssimomentit I ja pariteetit ja oikealla tasojen energiat. Ksenonin tapauksessa impulssimomentit ovat kokonaislukuja, koska ytimen massaluku on parillinen. E1 ... E4 ovat sähköisiä ja M1 ... M4 magneettisia siirtymiä, luvut 1 ... 4 niissä ovat spinin tai impulssimomentin muutoksia ΔI energiatasojen välillä vastaten dipoli-, kvadrupoli-, oktapoli- ... säteilyjä. Siirtymän tyyppi määräytyy siis ytimen impulssimomentin ja pariteetin muutoksista (taulukko).

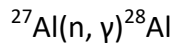


Kuva. Kadmium-111 ja ksenon-130 ytimien gammasiirtymät

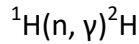
Spin muutos	ΔI	1	2	3	4
Pariteetin muutos	Kyllä	E1	M2	E3	M4
	Ei	M1	E2	M3	E4

Taulukko. Magneettisen ja sähköisen säteilysiirtymätyypin määräytyminen gammasiirtymissä

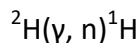
Esimerkki 2. Sieppausreaktiossa alumiini-27 sieppaa neutronin muuttuen alumiinin isotoopiksi Al-28 ja emittoiden gammasäteen. Siis



Esimerkki 3. Vety-ytimen neutronisieppaus, jossa syntyy vedyn isotooppi deuterium ja gammasäteilyä.



Edellä oleva reaktio voi tapahtua myös käänteisesti deuterium ytimen absorboidessa gammasäteen. Jos ytimen saama viritysendergia on riittävä, se purkautuu vapautuvana neutronina. Kyseessä on säteilysieppaus. Siis



Ilmiö on vastaava fotoneille valosähköisessä ilmiössä, jossa valoenergia irrottaa metallista (valokennosta) elektroneja.

Ydinmallit

Ytimen säde

Ytimen säde on tärkeimpiä suureita, joka ydinmalleissa on selitettävä. Se on likipitään verrannollinen ytimen massaluvun kuutiojuureen ja etenkin suurilla ytimillä, jotka ovat pallomaisia. Ytimen tiheys on miltei vakio, joten ytimen säteen R ja massaluvun A välillä pätee likimääräisesti seuraava yhtälö:

$$R = r_0 A^{1/3},$$

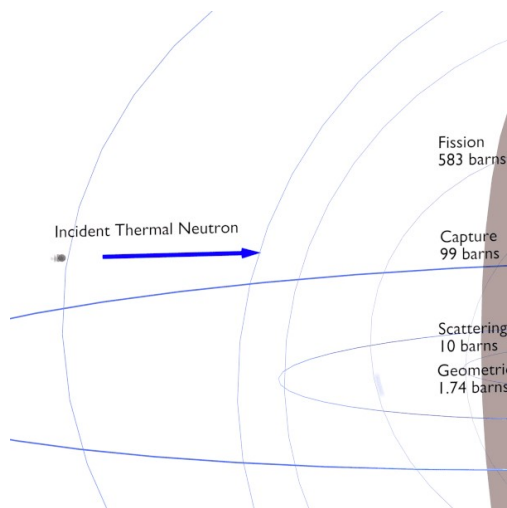
missä suuretta r_0 voidaan pitää käytännössä vakiona ja sen arvo on $1,25 \text{ fm} = 1.25 \cdot 10^{-15} \text{ m}$. Esimerkiksi vety-ytimen säde on 1.25 fm , kun taas uraaniytimen säde on 10 fm .

Vaikutusala

Ydinreaktiota voidaan kuvata vuorovaikutusalalla. Ydinfysiikassa vaikutusalalla tarkoitetaan tulevan hiukkasen aiheuttaman ydinreaktion todennäköisyyttä. Vaikka vaikutusala kuvaa vuorovaikutuksen todennäköisyyttä, se ilmaistaan kohteena olevien nuklidien pinta-alana. Vaikutusalan yksikkö on 1 barn ja sen suuruus on

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2.$$

Reaktion vaikutusala voi riippua useista tekijöistä, joista merkittävin on tulevan hiukkasen energia. Erityisesti U-235 fissioreaktiossa tulevien neutronien on oltava termisiä, jolloin niiden fissiovuorovaikutus ytimen kanssa on suurin.



Kuva. Uraani-235 ytimen vuorovaikutusten suuruus sironta-, sieppaus- ja fissioreaktioissa termisen neutronin kohdatessa ytimen

Monissa ydinreaktioissa esiintyy resonansseja vastaten energiatiloja, joissa reaktio on todennäköinen. Resonanssit liittyvät läheisesti virittyneiden ytimien energiatasoihin eli viritystiloihin.

Ytimen kuorimalli

Atomiydin on vahvasti vuorovaikutuksessa oleva kvanttimekaaninen systeemi, jolla on monia muotoja ja viritystiloja yksittäisten nukleonien virityksistä kollektiivisiin värähtelyihin ja koko ytimen pyörimiseen. Ydinrakenteen tutkimus yrittää selvittää niitä mekanismeja, joiden avulla käyttäytymismallit syntyvät vahvasta vuorovaikutuksesta.

Kuorimallissa nukleonit ovat järjestyneet useille sisäkkäisille kuorille samaan tapaan kuin elektronit ytimen ympärillä. Elektronit ovat fermioneja, eikä niitä voi olla useampia samassa kvantttilassa. Nukleonit voidaan käsittää hiukkasiksi potentiaaliukuopassa, tai niitä voidaan kuvata kvanttimekaanisilla todennäköisyyssaloilla, joiden käsittelyn tässä sivuutan.

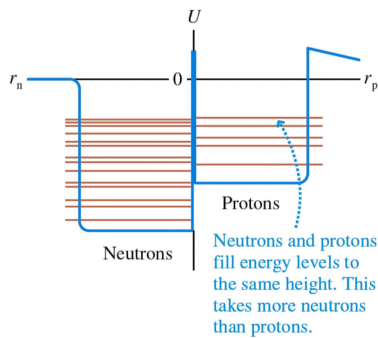
Kuorimallissa protonit ja neutronit ovat järjestyneet orbitaaleille tai kvantifioituille energiatasojen pareittain. Samalla orbitaalilla voi olla kaksi nukleonia edellyttäen, että niillä on vastakkaisuuntainen spin. Erityisesti kevyimmissä ytimissä orbitaalit ovat hyvin verrattavissa elektronien orbitaaleihin. Esimerkiksi helium-4 ytimessä kaksi protonia ja kaksi neutronia ovat järjestyneet 1s-orbitaalille samaan tapaan kuin elektronitkin, ja tämä ydin on stabiili vastaavasta syystä kuin heliumin täysi K-elektronikuorikin, johon mahtuu kaksi elektronia.

Raskaammilla ytimillä kuoret tai orbitaaliryhmät poikkeavat elektronikuorista K, L, M... selvästi enemmän. Kuitenkin ydinmallien avulla voidaan johtaa ydinfysiikan maagiset luvut 2, 8, 20, 28, 50, 82 ja 126. Ytimet, joissa protonien, neutronien tai molempien lukumäärä on jokin näistä, ovat erityisen stabiileja ja muodoltaan pallomaisia.

Niillä on uloin kuori täysi samaan tapaan kuin jalokaasuilla on uloimmalla elektronikuorella täysi miehitys. Maagiset luvut ilmenevät esimerkiksi siitä, että tina-50:llä on 10 stabiilia isotooppia, eli enemmän kuin millään muulla alkuaineella. Muita erityisen stabiileja ytimiä ovat lyijy-208, kalsium-40 ja happi-16.

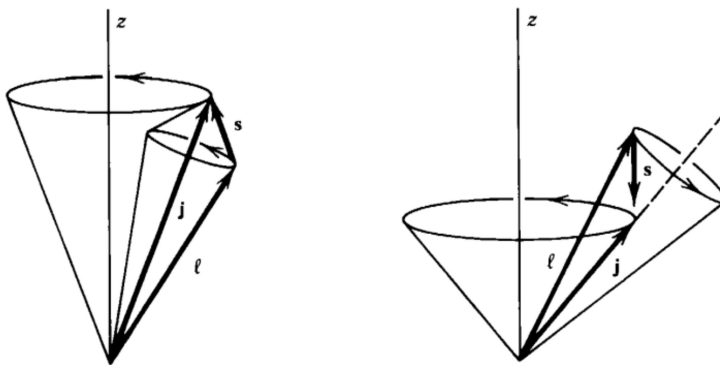
Ytimet, joissa protonien tai neutronien lukumäärä on kaukana maagisista luvuista, ovat usein erityisen epävakaita, mikä ilmenee mm. siitä, ettei teknetiumilla $Z = 43$ ja prometiumilla $Z = 59$ ole yhtään stabiilia isotooppia.

Kun ydin muodostuu, protonien ja neutronien energiatasot täyttyvät suunnilleen samalle tasolle (kuva). Siksi varsinkin raskaissa ytimissä on yleensä enemmän neutroneja kuin protoneja. Kuvasta voi myös huomata, että protonien potentiaalienergiakuoppa on matalampi johtuen niiden sähköisestä hylkimisvoimasta.



Kuva. Protonien ja neutronien energiatasot potentiaalienergiakuopassa

Kuorimallissa (kuva) maagisten lukujen kohdalla on nähtävissä selvä energiaväli. Nukleonien energiatiloja luonnehtivat pääkvanttiluku n , rataimpulssimomentin kvanttiluku l ja kokonaisimpulssimomenttivektorin $\mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s}$ kvanttiluku $j = l \pm \frac{1}{2}$, $n = 1, 2, 3 \dots$ ja $l = 0, 1, 2 \dots$ niitä vastaavat s, p, d, f, g ... Merkintä nl_j kertoo kyseisen tilan kulmaliikemäärän.



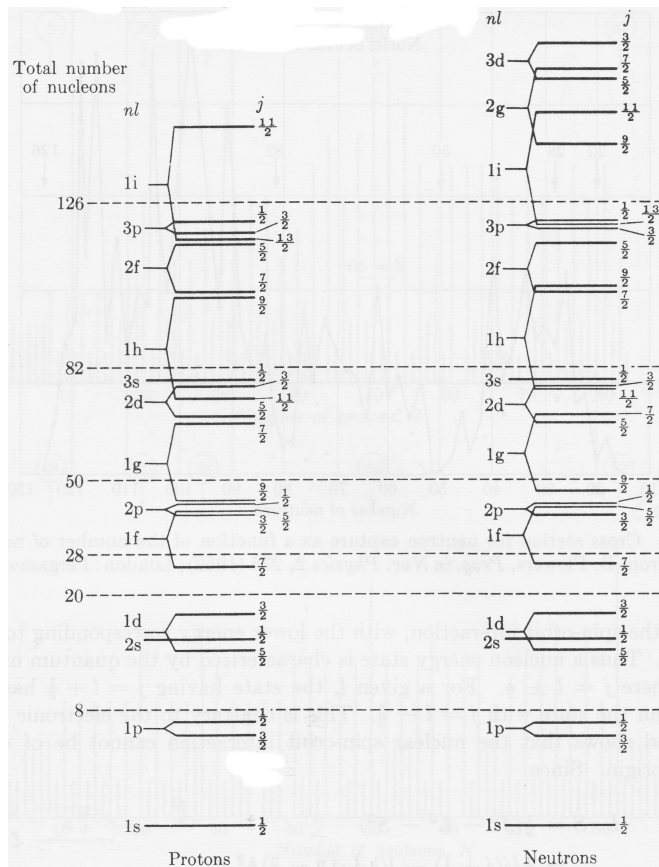
Kuva. Kokonaisimpulssimomenttivektori $\mathbf{j}$ tekee preessioliikettä z-akselin suunnassa.

On huomattava, että alemmassa kuvassa maagiseen lukuun liittyvän aukon alapuolella on lähekkäin ison ja pienen impulssimomentin j omaavia tiloja. Edelleen kuvasta voi havaita, että tilalla $j = l + \frac{1}{2}$ on alempi energia kuin tilalla $j = l - \frac{1}{2}$.

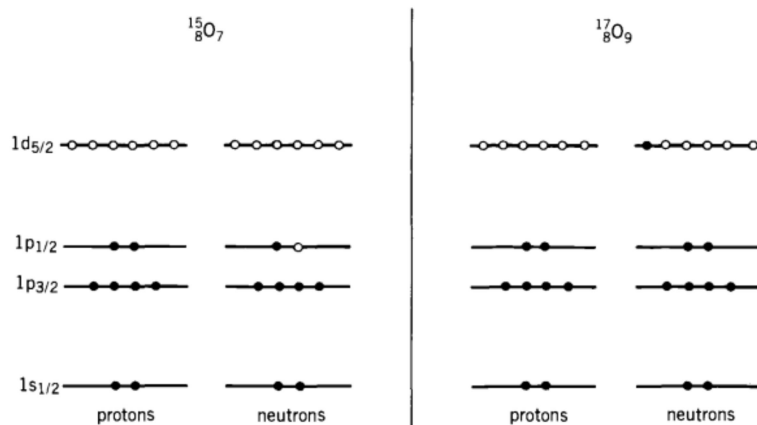
Suurin nukleonien määrä annetulla (n, l, j) energiatasolla on $2j + 1$.

Esimerkki 1. Alimmalla 1s orbitaalilla voi olla kaksi nukleonia, joilla on vastakkaiset spinit $\pm \frac{1}{2}$. Seuraavalla 1p orbitaalilla voi olla neljä nukleonia, joiden tilat ovat $\pm \frac{1}{2}$ tai $\pm \frac{3}{2}$.

Esimerkki 2. Otetaan alin taso $n = 1$. Kun $l = 0$ ja $j = \frac{1}{2}$, niin saadaan $1s_{1/2}$ ja sille mahtuu kaksi nukleonia. Kun $l = 1$ ja $j = 1 \pm \frac{1}{2}$, eli saadaan $1p_{1/2}$ ja $1p_{3/2}$ ja niille mahtuu $2 \cdot \frac{1}{2} + 1 = 2$ ja $2 \cdot \frac{3}{2} + 1 = 4$ nukleonia. Kun $l = 2$, saadaan $1d_{3/2}$ ja $1d_{5/2}$ ja niille mahtuu vastaavasti 4 ja 6 nukleonia.



Kuva. Protonien ja neutronien sijoittuminen ytimen kuorimallissa



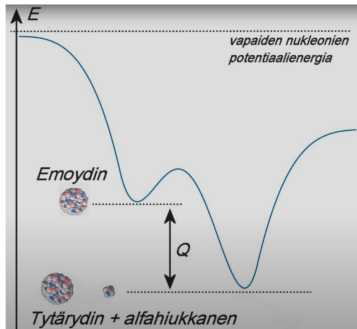
Kuva. Protonien ja neutronien sijoittuminen kuorille happi-15 ja happi-17 ytimissä. Valkeat pallot ovat tyhjiä paikkoja. Yksittäinen pariton nukleoni määrittää ytimen ominaisuudet. Koska pariteetti määrittää $(-1)^l$, $l = 0, 1, \dots$ ja happi-15:llä pariton neutroni on $p_{1/2}$ kuorella, neutronin spin on $\frac{1}{2}$ ja pariton pariteetti. Happi-17:llä puolestaan neutronin spin on $\frac{5}{2}$ ja parillinen pariteetti.

Ytimen hajoamistyytit

1. Alfahajoaminen

Alfahajoaminen on yleinen hajoamistapa raskaille ($Z > 83$) ytimille. Syy hajoamiseen on ytimen liian suuri massa ja sen myötä ytimen säde. Tällöin sähköinen hylkimisvoima tulee merkitseväksi tekijäksi. Emittoituva

alfahiukkanen on rakenteeltaan heliumytimen kaltainen. Näin ollen hajoamisen jälkeen jäljelle jääneessä tytärtytimessä on kaksi protonia ja kaksi neutronia vähemmän. Prosessi muuttaa siis sekä atomimassan että järjestysluvun. Alfahajoamisessa vapautuva potentiaalienergia Q on n. 5 MeV, josta suurin osa on alfahiukkasen liike-energiaa ja loput tytärtyimen rekyylienergiaa. Saamansa energian turvin alfahiukkanen etenee ilmassa vain muutamia senttimetrejä törmäten ilmamolekyyleihin. Koska liikemäärä hajoamisessa säilyy, alfahiukkasen ja tytärtyimen liikemäärien summa on nolla. Siis $p_\alpha - p_D = 0$.



Kuva. Alfahajoamisessa vapautuva potentiaalienergia

Alfahajonnan reaktioenergia Q on

$$Q = (M_Z - M_{Z-2} - M_{\text{He}}) 931.47 \text{ MeV/amu}$$

Esimerkki 1. Kun uraani-238 hajoaa alfa-emissiolla thorium-234:ksi, hajoamisenergia on

$$Q = (238.050784 \text{ amu} - 234.043594 \text{ amu} - 4.0026033 \text{ amu}) 931.47 \text{ MeV/amu} = 4.272 \text{ MeV}.$$

Siis hajoamisessa 0.0045867 amu:n massa muuttuu 4.272 MeV:n energiaksi, joka jakautuu α -hiukkasen ja thorium-234 ytimen liike-energioiksi, eli hajoamisenergia voidaan kirjoittaa

$$Q = E_\alpha + E_{Z-2}.$$

Koska hajoamisessa liikemäärä ja energia säilyvät, merkitsemällä $E = p^2 / 2m$, saadaan alfa-hiukkasen liike-energiaksi

$$E_\alpha = Q / (1 + m_\alpha / m_{Z-2}).$$

Kokonaisenergia Q jakautuu massojen E_α ja E_{Z-2} suhteessa:

$$E_\alpha = Q (M_{Z-2} / M_Z) = 0.0045867 \text{ amu} \cdot 234.043594 \text{ amu} / 238.050784 \text{ amu} \cdot 931.47 \text{ MeV/amu} =$$

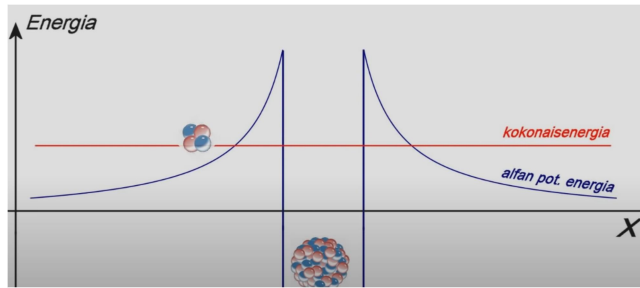
$$0.004509 \text{ amu} \cdot 931.47 \text{ MeV/amu} = 4.201 \text{ MeV}$$

$$E_{Z-2} = Q (M_\alpha / M_Z) = 0.0045867 \cdot 4.0026033 / 238.050784 \text{ amu} \cdot 931.47 \text{ MeV/amu} =$$

$$0.000077 \text{ amu} \cdot 931.47 \text{ MeV/amu} = 0.071 \text{ MeV}.$$

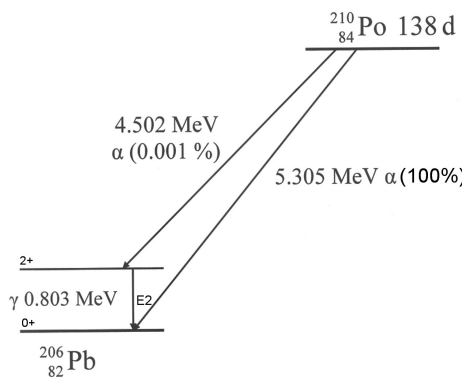
Suurimman osan hajoamisenergiasta siis α -hiukkanen vie liike-energiana.

Vaikka uraani-238:lla potentiaalivallin korkeus on 9 MeV, 4,2 MeV alfahiukkanen voi tunneloitua potentiaalivallin läpi (kuva).



Kuva. Alfahiukkasen tunneloituminen potentiaalivallin läpi

Esimerkki 2. Polonium-210 on tullut tunnetuksi myrkyllisyydestään. Se hajoaa emittoiden 5.3 MeV:n alfa-hiukkasia, joiden vaikutus kudoksissa on 20-kertainen ekvivalenttiansiintymiseen gammasäteilyä verrattuna (ks. säteilyannos).



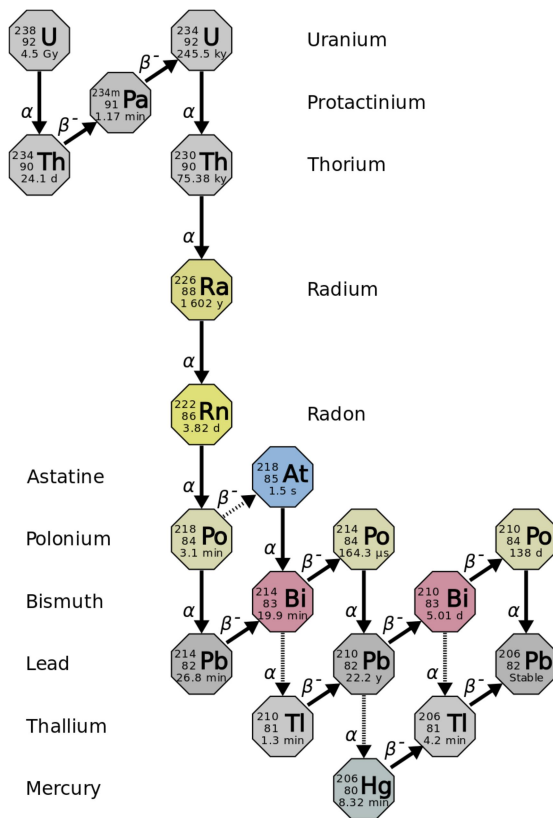
Kuva. Polonium-210 hajoamiskaavio

Hajoamissarjat

Alfaemissiossa protonien ja neutronien muutos on -2 ja massaluvun A muutos -4 . Kukin sarja alkaa pitkäikäisestä, maan syntymisestä asti säilyneestä isotoopista. Näin saadaan kolme hajoamissarjaa: thorium-, uraani- ja aktiniumsarja. Neljäs neptuniumsarja on maapallolta jo hävinnyt neptuniumin lyhyen puoliintumisaian $2.1 \cdot 10^6$ a vuoksi. Thoriumsarjassa kaikkien jäsenten massaluvut ovat muotoa $4n$ ja vastaavasti on muissakin sarjoissa. Suurin osa luonnossa esiintyvistä radioaktiivisista aineista kuuluu johonkin näistä sarjoista.

Massaluku	pitkäikäisin	$t_{1/2}$	stabiili	
$A = 4n$	$n = 58$	^{232}Th	1.4×10^{10} a	^{208}Pb
$A = 4n+1$	$n = 59$	^{237}Np	2.1×10^6 a	^{205}Tl
$A = 4n+2$	$n = 59$	^{238}U	4.5×10^9 a	^{206}Pb
$A = 4n+3$	$n = 58$	^{235}U	7.0×10^8 a	^{207}Pb

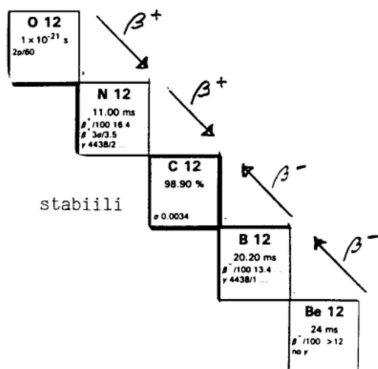
Taulukko. Radioaktiiviset hajoamissarjat



Kuva. Uraanisarja $4n + 2$.

2. Beetahajoaminen

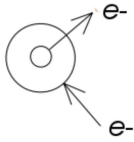
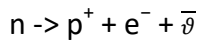
Ytimen rakenteen perusteella voidaan ajatella, että neutronit pitävät ytimen yhdessä, kun protonit hylkivät toisiaan. Ytimet, joissa on tarpeeksi neutroneja, ovat vakaita isotooppeja. Beetahajonnat tapahtuvat iso-baarilinjoja (massaluku pysyy samana) myöten kohti stabiilia ydintä (kuva) hajontaprosessin tapahtuessa heikon vuorovaikutuksen ohjaamana.



Kuva. Hiili-12 isobaari

a. β^- hajoaminen

Jos neutroneja on ytimessä suhteellisesti enemmän kuin protoneja, neutroni voi hajota spontaanisti protoniksi samalla emittoiden elektronin.



Hiukkasfysiikan kannalta β^- -hajoaminen tapahtuu, kun neutronin kolmesta kvarkista d-kvarkki muuttuu u-kvarkiksi, jolloin heikon vuorovaikutuksen välittämänä emittoituu ensin välittäjähiukkanen väli-bosoni W^- , joka hajoaa elektroniksi e^- ja antineutriinoksi $\bar{\nu}$.

Reaktiossa kokonaisvaraus ja nukleonien määrä säilyvät. Koska energia ja liikemäärä säilyvät, reaktiossa vapautuu varaukseton ja lähes massaton antineutriino $\bar{\nu}$, jonka spin on oltava $\frac{1}{2}$, sillä neutronin, protonin ja elektronin spin on $\frac{1}{2}$. Koska ytimen varaus kasvaa yhdellä, atomi nappaa ympäristöstä elektronin elektronikuorelleen. Reaktion hajoamisenergia Q on

$$Q = (M_z - M_{z+1})c^2, \text{ missä } M_z = m_z + Zm_e \text{ on kohtioatomin massa (amu).}$$

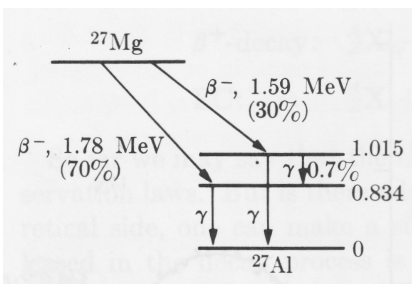
Esimerkki 1. Fluori-20 on beetamiinus emitteri, jonka hajoamisenergia $Q = E_{e^-} + E_{\bar{\nu}} = 5.41 \text{ MeV}$. Syntyvän neon-20 ytimen viritystilalla purkautuu 1.63 MeV gammakvanttina.



$$Q = (19.999981 \text{ amu} - 19.992435 \text{ amu}) 931.47 \text{ MeV/amu} = 7.02 \text{ MeV}.$$

Esimerkki 2. Magnesium-27 beetamiinus hajoaa alumiini-27 ytimeksi. Siinä hajoaminen tapahtuu kahdelle alumiiniytimen viritystilalle, joiden energiat purkautuvat 0.181 , 1.015 ja 0.834 MeV :n gammakvantteina. Reaktion Q arvo on

$$Q = (26.984349 \text{ amu} - 26.981541 \text{ amu}) 931.47 \text{ MeV/amu} = 2.62 \text{ MeV}.$$



Esimerkki 3. Vapaa neutroni hajoaa beetamiinushajoamisella protoniksi ja elektroniksi puoliintumisajan ollessa 10.8 min . Energiaa vapautuu

$$m_n - (m_p + m_e) =$$

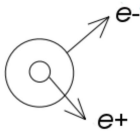
$$1.008665 \text{ amu} - (1.0072765 \text{ amu} + 0.000548579 \text{ amu}) =$$

$$939.57 \text{ MeV/amu} - (938.28 \text{ MeV/amu} + 0.511 \text{ MeV/amu}) = 0.78 \text{ MeV/amu}.$$

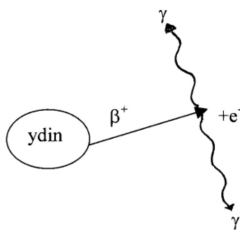
b. β^+ hajoaminen

Jos neutroneja on ytimessä suhteellisesti vähemmän kuin protoneja, protoni voi muuttua neutroniksi samalla emittoiden positronin e^+ ja neutriinon ν .

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu.$$



Positronin havaittavuus perustuu sen annihiloituessa saman massan omaavan elektronin (spinit vastakkaiset) kanssa, jolloin niiden lepomassoista syntyy kaksi vastakkaisiin suuntiin etenevää 511 keV:n gamma-kvanttia.



Kuva. Positronin annihilaatio elektronin kanssa

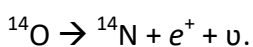
Hiukkasfysiikan kannalta protonin kolmesta kvarkista u-kvarkki muuttuu d-kvarkiksi, syntyy välibosoni W^+ , joka hajoaa positroniksi e^+ ja neutriinoksi ν .

Positronilla on sama spin ja massa kuin elektronilla. Koska ytimen varaus pienenee yhdellä, elektronikuorelta irtoaa elektroni. Reaktion Q-arvo on

$$Q = (M_Z - M_{Z-1} - 2m_e)c^2.$$

Koska syntyvän neutronin massa on suurempi kuin protonin, reaktio ei ole aina spontaani. Jos hajoamisenergia on pienempi kuin $2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$, β^+ ei ole mahdollinen. Positroniemissio on vallitseva kevyillä alkuaineilla ($Z < 30$) tai jos äiti–tytär ytimien massaero on suurempi kuin 1.022 MeV. Energiaero menee protonin muuttamiseen neutroniksi, positroniksi ja neutriinoksi ja niiden liike-energiaksi.

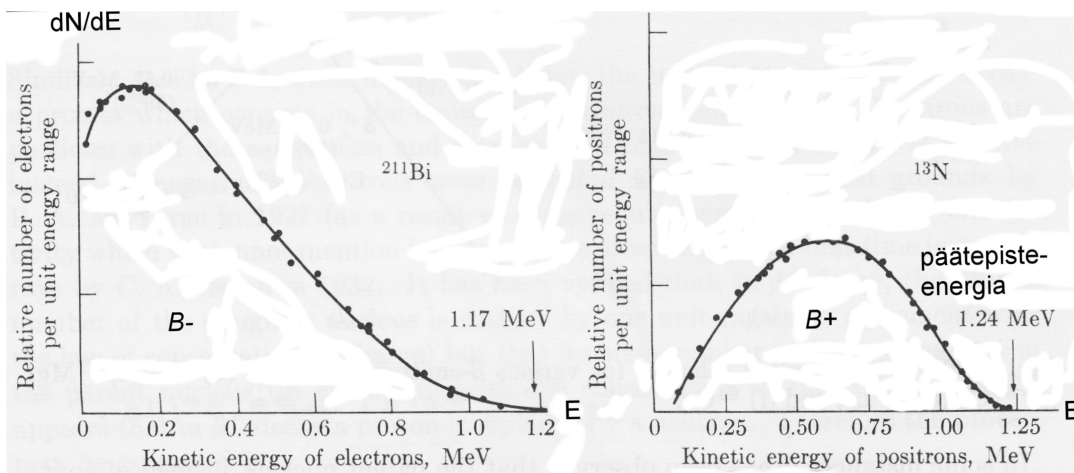
Esimerkki 1. Happi-14 on β^+ emitteri, jonka hajoamisenergia on 1.84 MeV (99%). Syntyvän typpi-14 ytimen viritystila purkautuu 2.3 MeV:n gammasäteilynä.



$$Q = (14.008596 \text{ amu} - 14.003074 \text{ amu} - 2 \cdot 0.000548579 \text{ amu}) 931.47 \text{ MeV/amu} = 4.12 \text{ MeV}.$$

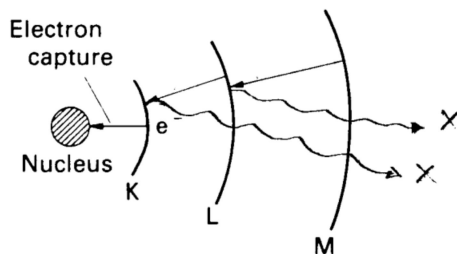
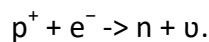
β^+ ja β^- hajoamisten energiaspektrit ovat jatkuvia. Niissä hajoamisenergia vaihtelee nollan ja $E_{\max}$:n välillä. Itse asiassa maksimienergia $E_{\max}$ on hajoamishiukkasten yhteinen liike-energia ja sen suhteellinen osuus vaihtelee välillä $[0, E_{\max}]$.

Esimerkki 2. Kuvassa on β^- hajoavan vismutti-211 ytimen elektronien ja β^+ hajoavan typpi-13 ytimen positronien liike-energiajakauma. Käyrien erilaista muotoa selittää positroneihin vaikuttava Coulombin valli. Positronilla on keskimääräistä suurempi liike-energia β^- hajonnan elektroneihin verrattuna.



c. Elektronisieppaus (electron capture, EC)

Positroniemission kanssa voi syntyä kilpailua, jos neutronimäärän lisäämiseksi neutronivajaan ytimen protoni sieppaakin elektronin sitä lähimmän K-elektronikuoren s-orbitaalilta. Tämä on vallitseva beetahajonnan muoto raskaille alkuaineilla ($Z > 80$).



Kuva. Ytimen elektronisieppaus ja karakteristiset röntgenkvantit

Syntynyt aukko täyttyy ylemmiltä kuorilta putoavista elektroneista, jolloin energiaa vapautuu karakteristisina röntgenkvantteina. Syntyneet röntgenkvantit voivat irrottaa atomin ylemmiltä kuorilta Auger-elektroneja.

Esimerkki 1. Beryllium-7 atomi hajoaa litium-7 atomiksi. Atomien massaero

$$M_z(^7\text{Be}) - M_{z-1}(^7\text{Li}) = 7.01915 \text{ amu} - 7.01822 \text{ amu} = 0.00093 \text{ amu, joka on energiana}$$

$$0.00093 \text{ amu} \cdot 931.47 \text{ MeV/amu} = 0.866 \text{ MeV,}$$

mutta se on pienempi kuin 1.022 MeV. Koska positroniemissio ei ole mahdollinen, ydin hajoaakin elektronisieppauksella, jonka hajoamisenergia on edellä laskettu 0.866 MeV.

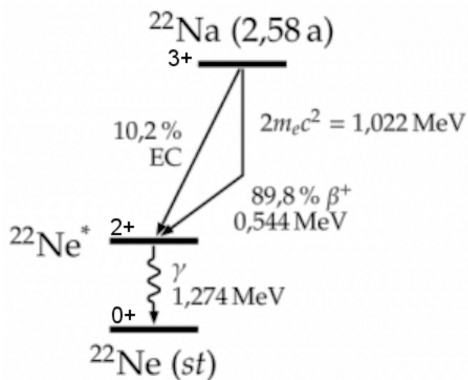
Esimerkki 2. Natrium-22 hajoaa elektronisieppauksella neon-22 ytimen viritystilalle. Hajoamisenergia

$$Q = (21.994435 \text{ amu} - 21.991384 \text{ amu}) 931.47 \text{ MeV/amu} = 2.842 \text{ MeV}.$$

Koska

$$Q_{EC} = 2.842 \text{ MeV} - 1.274 \text{ MeV} = 1.568 \text{ MeV} > 1.022 \text{ MeV},$$

natrium-22 voi hajota myös positroniemissiolla, jolloin positronin ja elektronin annihiloituessa syntyy kaksi 0.511 MeV gammakvanttia. Neon-ytimen viritystila purkautuu 1.2746 MeV:n gammasäteilynä. Elektronisieppauksessa neonin sisempien elektronikuorien täytyessä syntyy karakteristista röntgensäteilyä.



Kuva. Natrium-22 hajoamiskaavio

Elektronisieppauksessa ei tarvitse ottaa huomioon siepatun elektronin massaa hajoamisenergiaa laskettaessa, koska tytärytimen Z on yhtä alhaisempi, eli tarvitseekin yhden elektronin vähemmän. Reaktion hajoamisenergia Q on siten

$$Q = (M_Z - M_{Z-1})c^2.$$

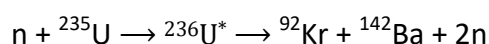
EC voi tapahtua, jos Q on positiivinen. Myös EC:ssä lähtee neutriino, jonka energia on $E_0 = Q_{EC} - B_i$, missä B_i on rataelektronin sidosenergia $i = K, L \dots$ Neutriino siis emittoi lähes koko hajoamisenergian.

Fissioreaktio

Kun alkuaineen ydin hajoaa kahdeksi kevyemmäksi ytimeksi, kyse on fissiosta. Luonnon prosessina fissio on hyvin harvinainen. Fissiokelpoisia aineita ovat uraani-235 ja plutonium-239, jotka halkeavat termisillä neutroneilla. Koska plutonium-239:a ei esiinny luonnossa, sitä valmistetaan pommittamalla uraani-238 ytimiä 1–2 MeV neutroneilla.

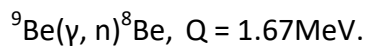
Käytännön sovellusten kannalta fissio on merkittävä prosessi, koska se tuottaa neutroneja, jotka mahdollistavat uusien fissioreaktioiden aikaan saannin ja koska uraani-235 ytimen massa nukleonia kohti on suurempi kuin fissiotuotteissa, tämä massakato muuttuu hajoamisessa energiaksi.

Esimerkki 1. Tyypillinen uraani-235 fissioreaktio tuottaa 179 MeV energiaa hajoamista kohden.

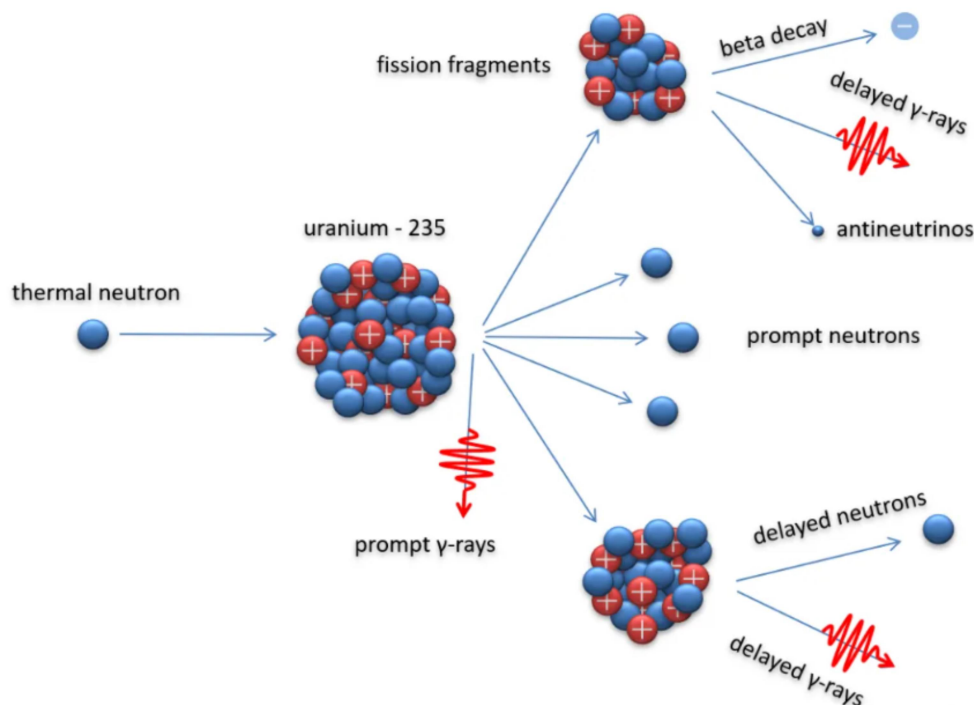
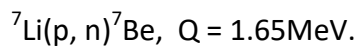


Siepatessaan termisen neutronin uraani-235 virittyy uraani-236:ksi, joka hajoaa edelleen kahdeksi ytimeksi, joiden neutronimäärät ovat 50 ja 82 välillä. Raskailla ytimillä on pyrkimys hajota kahtia siten, että neutronikuoret maagisten lukujen 50 ja 82 läheisyydessä ovat täydet. Fission tuotteet ovat tyypillisesti viritystilassa ja neutronirikkaita, eli niiden neutronien määrä on suuri suhteessa protonien määrään. Tämän takia ne β^- hajoavat spontaanisti useita kertoja ennen stabiilia ydintä.

Neutroneja voidaan tuottaa muillakin reaktioilla. Gammasieppausreaktiot tuottavat monoenergeettisiä neutroneja. Usein käytetty neutronilähde on beryllium-9:



Neutroneja voidaan myös tuottaa pommittamalla litium-7 ytimiä protoneilla:



Kuva. Uraani-235 fissioreaktion tapahtumaketju

Kuvassa termisen 0.025 MeV:n neutroni, jonka fissiovuorovaikutusala on 585 barn, vuorovaikuttaa uraani-235 ytimen kanssa. Uraaniydin virittyy uraani-236:ksi. Viritysendergia

$$Q = 931.47 (M_A + m_n - M_{A+1}) \text{ MeV} = 931.47 (235.043925 + 1.008665 - 236.045562) \text{ MeV} = 6.54 \text{ MeV}.$$

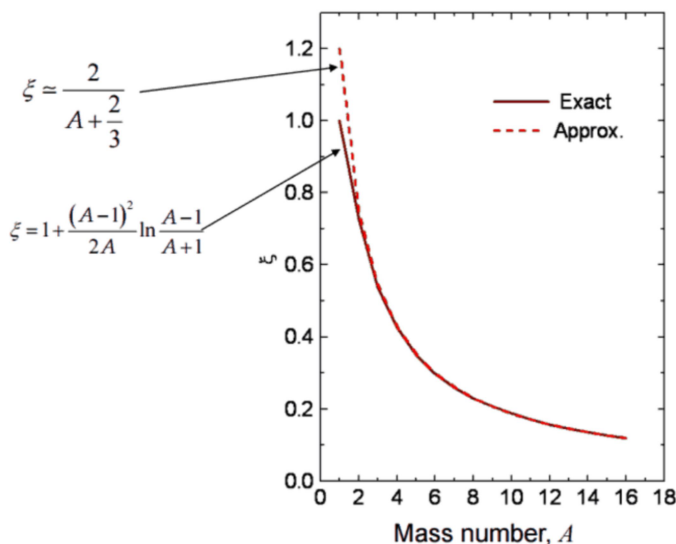
Koska U-236:n fissiokynnys on $5.4 \text{ MeV} < Q$, tapahtuu ytimen halkeaminen kahteen osaan, joiden energia on 170 MeV. Samalla vapautuu 7 MeV gammasäteilyä ja keskimäärin 2.4 kpl 2 MeV nopeita neutroneja uusien fissioiden tuottamiseen. Tämä on tärkeää fission jatkuvuuden kannalta. Neutronirikkaat fragmentit β^- hajoavat spontaanisti tuottaen fissiota kohden antineutriinon liike-energiaa 12 MeV ja 7 MeV gammasäteilyä. Kaikkiaan energiaa yhtä fissiota kohden vapautuu n. 200 MeV.

Neutronien hidastus

Koska fissiossa vapautuneiden 2 MeV:n neutronien energia on liian suuri uusien fissioiden aikaansaamiseen, niitä hidastetaan antamalla niiden elastisesti törmätä ytimiin, joilla on pieni massaluku ja pieni neutronisieppauksen vaikutusala. Elastinen sironta on tärkein prosessi hidastaa neutroneja. Jos tulevan neutronin energia on alle 1 MeV:n, kohdeytimen neutroniemissio palauttaa ytimen perustilaan. Jos taas neutronin liike-energia saa kohdeytimen resonanssiin, muodostuu väliydin, joka purkautuu neutroniemissiona, mutta kohdeytimessä ei tapahdu muutosta. Jokaisessa törmäyksessä pieni osa neutronin liike-energiasta siirtyy kohdeyttimeen. Systeemin kokonaisenergia säilyy elastisessa törmäyksessä. Lähes kaikilla ydinreakto-reissa käytetyillä hidastimilla vuorovaikutusalat neutroneille ovat 2-20 barn. Tällaisia hidastimia ovat yleisesti käytetyt vesi, raskas vesi D₂O ja grafiitti.

Neutronienergian vähenemiseen törmäystä kohden on kehitetty vakioita, jotka kuvaavat energian siirtoa hidastumisen aikana. ξ ei riipu energiasta vaan massaluvusta A ja se määritellään:

$$\xi = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha, \text{ missä } \alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \text{ kuvaa energian vähenemistä törmäystä kohden.}$$



Kuva. Neutronin energian väheneminen törmäystä kohden pienillä massaluvuilla. Katkoviivalla piirretty kuvaaja on approksimaatio massaluvuille $A > 10$.

Esimerkki 1. Määritä törmäysten lukumäärä, kun 2 MeV neutroni hidastuu termiseksi hiili-12:ssa.

$$\xi = 1 + \frac{(12-1)^2}{2 \cdot 12} \ln \frac{12-1}{12+1} = 0.1578$$

$$N = \frac{\ln(2 \cdot 10^6)}{\xi} = 14.5/0.1578 = 92 \text{ törmäystä.}$$

Esimerkki 2. Tyypillisesti neutroni menettää liike-energiasta 28 % törmäystä kohden, kun hidastimena on grafiitti.

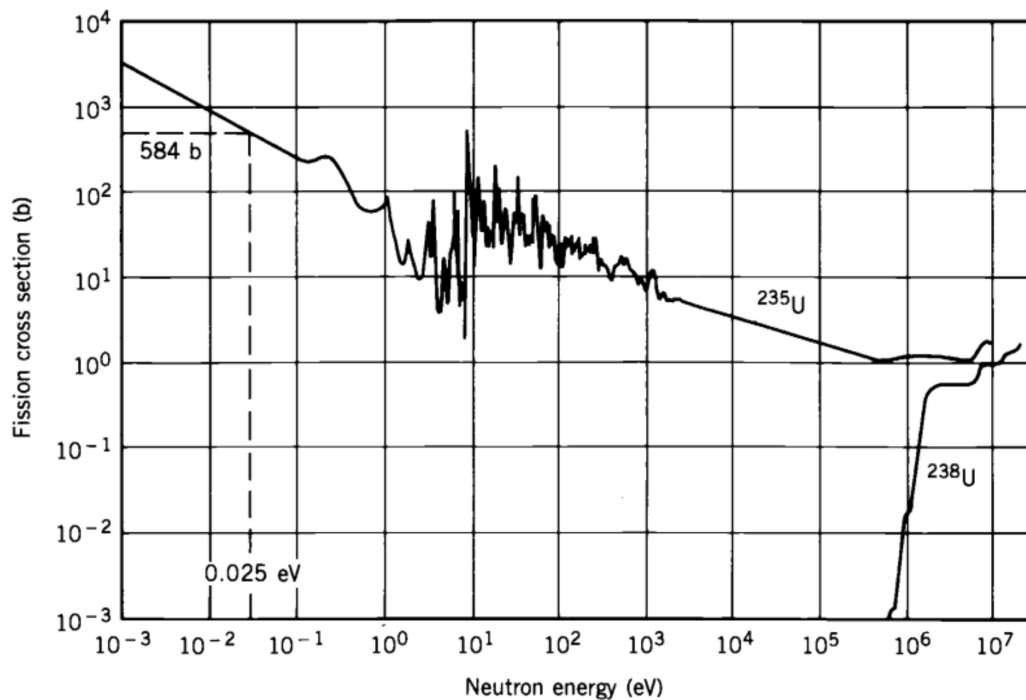
Koska $A = 12$,

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 = \left(\frac{12-1}{12+1}\right)^2 = 0.72,$$

eli jäljelle jäävä energia on 72 % törmäystä kohden.

Neutronisieppaus fissiossa ei välttämättä johda reaktioon, koska ydin voi lähettää viritysenergian gammasäteilynä ennen hajoamista, eli fission kynnyksenergia ei ylitä. Syntyy kilpailua (n,f) ja (n,γ) välillä. Kummallakin tapahtumalla on omat vuorovaikutuksensa. Uraani-235:lla fissiovuorovaikutus on 584 barn ja sieppausvuorovaikutus 101 barn, kun ammuksina ovat termiset neutronit.

Ydinreaktorissa on polttoaineena myös luonnon uraani-238 isotooppia, jonka vuorovaikutusala on suuri nopeille 1–2 MeV neutroneille (kuva).



Kuva. Vuorovaikutus neutronin indusoimassa fissiossa U-235 ja U-238 ytimillä.

Uraaniydin voi myös virittyä absorboimalla gammakvantin, jonka energia on vähintään fissiokynnyksen suuruinen. Tyypillisesti kynnyksenergia on 5 MeV per fissio.

Ytimien parillisuus

Ytimet lajitellaan sen perusteella, onko niiden protonien ja neutronien määrä parillinen vai pariton. Esimerkiksi uraani isotooppi U-235 on parillinen-pariton ydin, mutta isotooppi U-238 on parillinen-parillinen ydin. Thorium-232:lla on vain yksi vakaa isotooppi, joka on parillinen-parillinen. Bohrin kehittämän teorian mukaan parillinen-pariton isotooppi fissioituu hitailla neutroneilla pommitettaessa, joten näin ollen thoriumilla sitä ei tapahdu. Yleisesti ottaen ytimet, joissa jokaisella nukleonilla on pari, ovat tiukemmin sitoutuneet. Jos ydin on ensin muodoltaan parillinen-parillinen tai parillinen-pariton ja muuttuu pariton-parittomaksi tai pariton-parilliseksi, energiaa vapautuu 1.5 MeV enemmän kuin päinvastaisessa reaktiossa. Esimerkiksi U-235:n tapauksessa energiaa vapautuu enemmän. Tämä 1.5 MeV energia on tarpeeksi aiheuttaakseen U-235:n fissioitumisen, kun taas U-238:n tapauksessa ydin vain kaappaa neutronin ja beeta-miinus-hajoaa. Vakaan ytimen hajoamiseen tarvittava energia saadaan joko pommittavan neutronin kiineettisestä energiasta tai sidosenergiasta, jota vapautuu, kun pommittava partikkeli kaapataan. Verratessa isotoopin sisäistä energiaa ja fissiokynnystä saadaan selville, kuinka paljon energiaa tarvitaan fissioitumiseen.

Luonnossa esiintyviä uraani-235:n fissiotuotteita

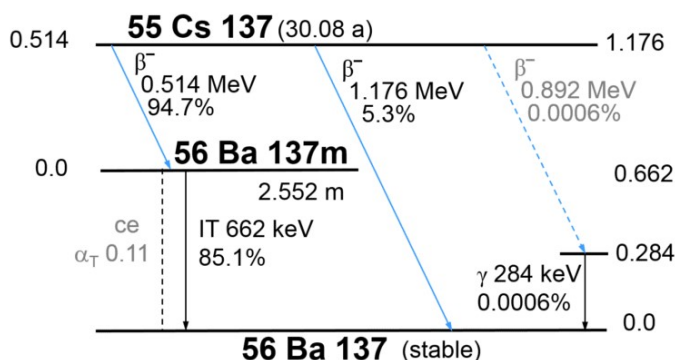
Nuklidi	Puoliintumis- aika vuosia	Osuus hajoamis- tuotteista %	Hajoamis- energia keV	Hajoamis- tapa
^{155}Eu	4,76	0,0803	252	$\beta\gamma$
^{85}Kr	10,76	0,2180	687	$\beta\gamma$
$^{113\text{m}}\text{Cd}$	14,1	0,0008	316	β
^{90}Sr	28,9	4,505	546	β
^{137}Cs	30,23	6,337	546	$\beta\gamma$
$^{121\text{m}}\text{Sn}$	43,9	0,00005	390	$\beta\gamma$
^{151}Sm	96,6	0,5314	77	β

Taulukko. Keski-ikäiset uraani-235 fissiotuotteet ja niiden runsaus

Cesium-137

Cesium on määrällisesti suurin ydinlaskeumissa tavattava radioaktiivinen aine sen suuren haihtuvuuden vuoksi. Sen puoliintumisaika on 30 vuotta. Noin 95 % cesiumista hajoaa β^- -emissiolla metastabiilille tilalle barium-137m, joka purkautuu sisäisellä siirtymällä (inner transition, IT) pysyvään tilaan. Loput 5 % hajoamisenergiasta purkautuu sisäisen konversion kautta (conversion electron, CE) virittämällä bariumin rätäelektroneja pääasiassa K- elektronikuorelta, jolloin syntyy 32 keV:n K_α röntgensäteilyä. Cesium voi hajota viiden prosentin osuudella suoraan barium-137 ytimeksi β^- säteilyn viedessä kaiken hajoamisenergian.

Cesium-137:a syntyy uraanin ja plutoniumin fissioreaktioissa. Cesium kuuluu kemiallisesti alkalimetalleihin, eli se reagoi kiivaasti mm. veden kanssa vetyä vapauttaen. Cesium ei ole ihmiselle pieninä määrinä myrkyllistä, mutta radioaktiivisena laskeumana se sitoutuu mm. villieläinten lihaan, marjoihin, sieniin ja jäkäliin lähettäen ensin 514 keV β^- säteilyä ja syntyvä barium-137m lähettää 662 keV gammasäteilyä. Koska cesium on kemiallisilta ominaisuuksiltaan kaliumin kaltainen, luonnossa se joutuu biologiseen kiertoon korvaten kaliumin.



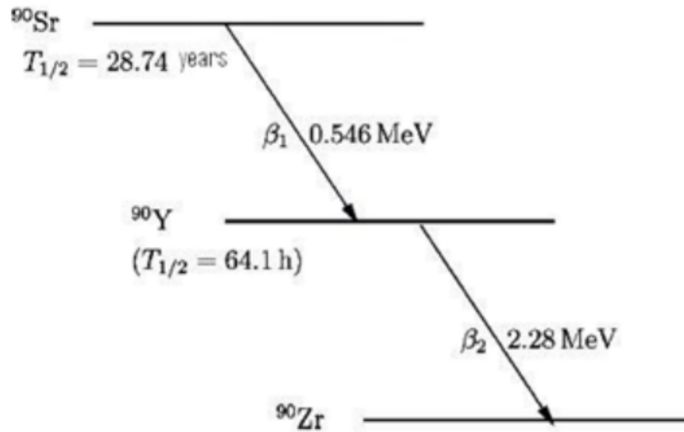
Kuva. Cesium-137 hajoamiskaavio

Strontium-90

Strontium kuuluu maa-alkalimetalleihin, samaan kuin kalsium. Sen puoliintumisaika on 28.7a, eli se säteilee luonnossa vuosisatoja. Strontium-90 beetamiinus hajoaa ensin yttrium-90 ytimeksi vapauttaen

$$(89.907738 \text{ amu} - 89.905849 \text{ amu}) 931.47 \text{ MeV/amu} = 0.546 \text{ MeV}$$

energiaa ja edelleen stabiiliksi zirkonium-90 isotoopiksi reaktioenergian ollessa 2.28 MeV. Kalsium on luuston tärkein raaka-aine, sinne myös strontium-90 pyrkii kerääntymään kemiallisilta ominaisuuksiltaan samankaltaisena.

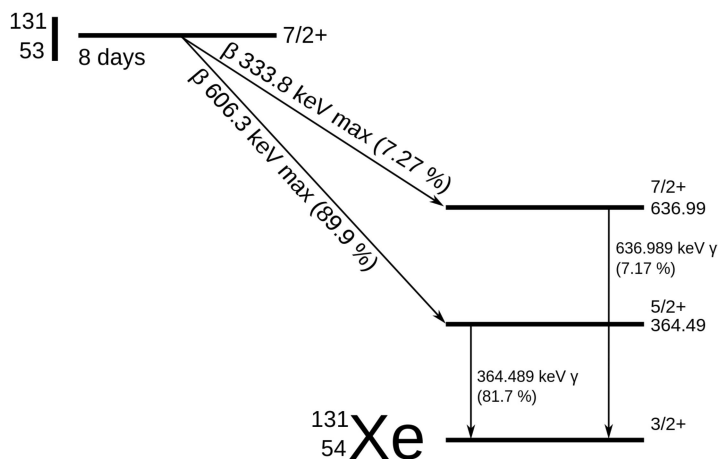


Kuva. Strontium-90 hajoamiskaavio

Jodi-131

Jodi-131:a syntyy uraani-235 fissiossa 2.8 % kaikista fissiotuotteista. Jodin puoliintumisaika on 8 vrk, eli se häviää luonnosta varsin nopeasti. Hajotessaan se muuttuu stabiiliksi ksenon-131 isotoopiksi. Hajoamisessa vapautuu β^- säteilyä ja ksenonin viritystilan purkautuessa syntyy 364 keV gammakvantteja.

Radioaktiivisen jodin ongelmana on sen hakeutuminen elimistössä kilpirauhaseen, jossa säteily aiheuttaa kilpirauhassyövän.



Kuva. Jodi-131 hajoamiskaavio

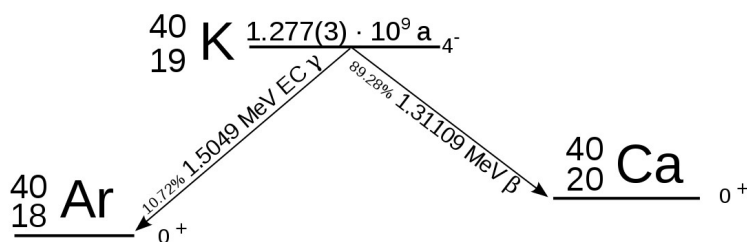
Luonnossa luonnostaan esiintyviä radioaktiivisia isotooppeja

Radon-222

Uraanisarjan kuuluvan pitkäikäisimmän radon isotoopin radon-222 puoliintumisaika on 3.8 d. Muut radon-isotoopit kuuluvat aktinium- ja thorium- sarjoihin. Pääosa radonista on siis lähtöisin maankuoren uraani-238:sta. Radonin haitta ihmiselle on sen kerääntyminen maasta rakennusten alusrakenteisiin ja sieltä sisätiloihin hengitysilmaan. Tyypillinen aktiivisuus EU-maiden asuntojen sisäilmassa on 30–140 hajoamista sekunnissailmakuutiossa. Kaikki luonnon radon-isotoopit hajoavat alfa-säteilyllä ja kaasuna esiintyessään aiheuttavat keuhkosityöpää. Rn-222 hajoamisenergia on 5.59 MeV.

Kalium-40

Koska kalium-40:n puoliintumisaika on $1.3 \cdot 10^9$ vuotta, sitä on ollut luonnossa maan syntymän alkua ajoista. Pääosa K-40:stä β^- hajoaa kalsium-40 ytimeksi lähettämällä max. 1.33 MeV elektronin. 10 prosenttia hajoamisista tapahtuu EC:llä, jolloin syntyy 1.5 MeV:n gammakvantteja. Ihmiselle kalium on elintärkeä alkuaine. Se on siis luonnollisen radioaktiivisuuden lähde. Ihmisen kehossa kaliumin aktiivisuus on n. 4200 hajoamista sekunnissa. Keskimääräinen siitä saatu säteilyannos on 0.3 mSv/vuosi.



Kuva. Kalium-40 hajoamiskaavio

Radioaktiivisuuteen liittyviä suureita

Säteilyannos

Absorboitunut annos D on kudokseen absorboituneen ionisoivan säteilyn energia E massayksikköä kohti

$$D = \frac{E}{m}, \text{ ja sen yksikkö on } 1 \text{ gray} = 1 \text{ Gy}.$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}.$$

Koska sama annos eri säteilylajeilla vaikuttaa biologisesti kehoon erilailla, käytetään suuretta ekvivalenttiansos H_T , joka saadaan kertomalla säteilylajin R kudokseen T absorboitunut annos $D_{T,R}$ säteilykohtaisella painokertoimella w_R ja sen yksikkö on 1 sievert = 1 Sv = 1 J/kg.

$$H_T = w_R \cdot D_{T,R}.$$

Gamma- ja röntgensäteilylle sekä elektroneille $w_R = 1$, alfahiukkasille $w_R = 20$ ja 10–100 keV:n neutroneille $w_R = 10$. Jos säteilylajeja on useita, kokonaisannos saadaan ottamalla painotettu summa eri ekvivalenttiansoksista. On syytä huomata, että ihmiselle aiheutetun haitan todennäköisyys riippuu myös siitä, mihin ke-

hon osaan säteily kohdistuu. Ihmisen kehossa on luonnostaan sisäistä radioaktiivisuutta aiheuttavia aineita, merkittävien niistä on kalium-40.

Aktiivisuus

Radioaktiivisen näytteen aktiivisuus R on hajoamisten määrä N sekunneissa.

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = rN = rN_0 e^{-t/\tau} = R_0 e^{-t/\tau} = R_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}}$$

missä $R_0 = r$, N_0 on aktiivisuus hetkellä $t = 0$. Aktiivisuuden SI-yksikkö on 1 becquerel = 1 Bq.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ hajoaminen/s.}$$

Vanha aktiivisuuden yksikkö on 1 curie = 1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq. Yksikön suuruus juontaa Curien pariskunnan 1900-luvun alussa radium-226:lla tekemiin kokeisiin. Yhdessä grammassa radium-226:a tapahtuu $3.7 \cdot 10^{10}$ hajoamista sekunnissa.

Puoliintumisaika

Jos ytimiä hetkellä $t = 0$ on N_0 kappaletta, niin hetkellä t niitä on jäljellä

$$N = N_0 e^{-t/\tau}, \text{ missä } \tau = 1/r \text{ on hajoamisen aikavakio ja } r \text{ on hajoamisnopeus [s}^{-1}\text{]}$$

Jos $N = N_0/2$ ja puoliintumisaika $t = t_{1/2}$,

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{t/t_{1/2}}$$

Puoliintumisajalle $t_{1/2}$ saadaan ottamalla logaritmi:

$$t_{1/2} = \tau / \ln 2 .$$

Lähdeluettelo:

Alonso-Finn: Fundamental University Physics III, Addison-Wesley 1973

Irwing Kaplan: Nuclear Physics, Addison-Wesley 1963

Kenneth S. Krane: Introductory Nuclear Physics, Oregon State University 1988

www.courses.physics.helsinki.fi/teor/kvaper

www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/

[766334A Ydin- ja hiukkasfysiikka - PDF Ilmainen lataus \(docplayer.fi\)](#)

[RADIOAKTIIVISUUS JA SÄTEILY - PDF Ilmainen lataus \(docplayer.fi\)](#)

[Ydinfysiikka. Luento. Jyväskylän synklotroni. Copyright 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley. - PDF Ilmainen lataus \(docplayer.fi\)](#)

[Hajoamiskaaviot ja niiden tulkinta \(PHYS-C0360\) - PDF Ilmainen lataus \(docplayer.fi\)](#)

[Luento Ydinfysiikka. Ytimien ominaisuudet Ydinvoimat ja ytimien spektri Radioaktiivinen hajoaminen Ydinreaktiot - PDF Ilmainen lataus \(docplayer.fi\)](#)

www.taulukot.com/fysiikka/isotooppeja