

Tartu Ülikool
Teaduskool

Täiendavaid teemasid koolifüüsikale III

Radioaktiivsus

Koostanud Urmo Visk

Õppevahend Teaduskooli õpilastele
Tartu 2007

Sisukord

Tähised.....	1
Sissejuhatus.....	3
Radioaktiivne lagunemine.....	4
Tuumade stabiilsus.....	10
α -lagunemine.....	15
β -lagunemine.....	20
Radioaktiivsed read.....	22
Radioaktiivsete lagunemisreaktsioonide kineetika.....	24
Süsinikdateerimine.....	28
Looduslik tuumareaktor.....	30
Kasutatud kirjandus.....	32
Nukliidide andmed.....	33
Ülesanded.....	40

Tähised

A	nukleonide arv
c	valguse kiirus, $c=3 \cdot 10^8$ m/s
Δ	muutus
E	energia
E^*	ergastatud seisundi energia
E_{seos}	seosenergia
ε	eriseosenergia
η	aktiivsus
h	Plancki konstant, $h=6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s
λ	lagunemiskonstant
M, m	mass
m_0	elektroni seisumass, $m_e = 5,488 \cdot 10^{-4}$ u
m_p	prootoni seisumass, $m_p = 1,007276$ u
m_n	neutroni seisumass, $m_n = 1,008665$ u
N	radioaktiivsete tuumade arv
\dot{N}	neutronite arv
$N(t)$	radioaktiivsete tuumade arv ajahetkel t
N_0	esialgne radioaktiivsete tuumade arv
N_1	radioaktiivse rea esimese liikme tuumade arv

N_2	radioaktiivse rea teise liikme tuumade arv
N_A	Avogadro arv, $N_A=6,02 \cdot 10^{23}$
N_{nud}	radioaktiivselt lagunenu tuumade arv
$N_{stabiilne}$	radioaktiivse rea stabiilse isotoobi tuumade arv
q	radioaktiivsete tuumade tekkimise kiirus
t	aeg
τ	poolestusaeg
W_α	α -osakese kineetiline energia
W_t	tütartuuma kineetiline energia
W_ν	neutriino kineetiline energia
Z	prootonite arv

Sissejuhatus

Radioaktiivsuse avastas 1896. aastal A. H. Becquerel. Teadlaste jaoks oli tegu väga šokeeriva avastusega, sest oli see ju aeg, kui arvati teadust kohe-kohe valmis saavat. Füüsikute jaoks oli ainus suur probleem veel eetri kiirus ja keemikud lootsid leida vaid mõne üksiku uue elemendi. Osutus aga, et radioaktiivseid elemente oli umbes sama palju kui tol ajal tuntud elemente kokku ja eetri asemel eksisteeris hoopis relatiivsusteooria ning kvantfüüsika. Radioaktiivsusega seotud avastused andsid tugeva ninanipsu teadlaste uhkuse pihta.

Radioaktiivsuse tuntuimad ja kurikuulsaimad rakendused on tuumareaktorid ja -pommid. Tundub, et need on ka ainsad rakendused radioaktiivsetele elementidele, kuid tegelikult mitte. Radioaktiivsete ainete kasutamist lihtsalt varjatakse väga hästi, sest nad on liiga kurikuulsad. Näiteks suitsudetektoreis kasutatakse radioaktiivset isotoopi ^{241}Am . Radioaktiivseid elemente tarvitatakse ka keemilises analüüsis (radiatsioon muudab uuritavad ained ioonideks, mida on lihtne elektriväljaga liigutada ja üksteisest eristada) ning meditsiinis (näiteks kilpnäärmevähi avastamiseks viiakse organismi radioaktiivset ^{131}I). Levisiiskasutusvaldkonnaks radioaktiivsetele ainetele on aga siiski ulme- ja õuduskirjandus.

Radioaktiivne lagunemine

Radioaktiivsus on aatomi tuuma võime iseenesest muunduda teise aatomi tuumaks. Tegu pole keemilise reaktsiooniga, kus üks aine muundub teiseks (näiteks roostetamisel muutub raud mitmesugusteks rauaoksiidideks), sest radioaktiivsel lagunemisel ei muutu aatomitevahelised sidemed, vaid aatomite tuumad ise.

Radioaktiivne lagunemine toimub iseeneslikult ning sellel ei pea olema välist põhjust. Kuna protsess toimub juhuslikult, siis pole võimalik ennustada, milline aatom järgmisena laguneb ja kõik radioaktiivsust kirjeldavad valemid kehtivad vaid statistiliselt, suure aatomite arvu korral. Katseliselt on väga keeruline kindlaks teha, kas radioaktiivne lagunemine on juhuslik või tundub see ainult juhuslik, sest lagunemise põhjust pole teada. Näiteks A. Einstein oli veendunud, et radioaktiivse lagunemise põhjus on lihtsalt teadmata, sest looduses ei saa ju olla täiesti juhuslikke sündmusi. Tänapäeval ollakse siiski vastupidisel seisukohal.

Isotoobid on aatomid, millel on ühesugune prootonite, kuid erinev neutronite arv. Ühel keemilisel elemendil on üldjuhul mitu isotoopi: näiteks vesiniku isotoobid on vesinik, deuterium ja tritium. Kõikidel elementidel on radioaktiivseid iso-

toope, kuid mitteradioaktiivseid isotoope kõikidel elementidel pole (näiteks Tc).

Radioaktiivsete ainete tähistamiseks ei piisa enam keemilise elemendi sümbolist, sest ühe tähise taga varjab end mitu isotoopi, millel on ka erinevad füüsikalised omadused. Isotoope tähistatakse kujul A_ZX , kus X on keemilise elemendi sümbol (näiteks Ar), A on nukleonide (ühine nimetus prootonite ja neutronite jaoks) arv tuumas ja Z on prootonite arv tuumas. Tihti kasutatakse ka tähistust AX , sest prootonite arvu saab leida keemilise elemendi sümboli järgi. Näiteks tähises ${}^{14}\text{C}$ pole prootonite arvu kirjutatud, kuid perioodilisussüsteemi tabelist saab leida, et süsinikul on kuus prootonit ja seega on täpne tähistus ${}^{14}_6\text{C}$. Ühesuguse neutronite ja prootonite arvuga tuumi nimetatakse nukliidideks.

Radioaktiivse lagunemise kiirust iseloomustatakse poolestusajaga. Poolestusaja jooksul väheneb radioaktiivsete tuumade arv kaks korda. Lühimad poolestusajad on alla nanosekundite ja pikimad miljardites aastates.

Katseliselt on leitud, et aja Δt jooksul radioaktiivselt lagunenu tuumade arv ΔN on võrdeline radioaktiivse aine tuumade koguarvuga N :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N. \quad (1)$$

Kui radioaktiivsete tuumade arv väheneb poolestusaja τ jooksul kaks korda, siis järgmise poolestusaja jooksul väheneb radioaktiivsete tuumade arv veel kaks korda. Radioaktiivsete tuumade arv on siis kokku vähenenud neli korda. Kui on möödunud aeg 3τ , siis on radioaktiivseid tuumi 8 korda vähem kui alguses jne. Lagunemisel radioaktiivsete tuumade arv küll väheneb, kuid ei muutu lõpliku aja jooksul nulliks. Seega ei saa radioaktiivsus ära kaduda ja radioaktiivselt saastunud materjalid jäävad alati radioaktiivseteks. Radiatsioon võib küll väheneda allapoole ohtlikku piiri, kuid ei muutu kunagi olematuks. Ajavahemikku, mis kulub radiatsiooni alanemiseks ohutu piirini, saab iseloomustada poolestusajaga. Kui radioaktiivse elemendi poolestusaeg on sekundi suurusjärgus, siis muutub selle elemendiga saastunud ese ohutuks mõne sekundiga.

Seosest (1) järeldub, et radioaktiivsete tuumade arv kahaneb vastavalt eksponentfunktsioonile:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

(λ on radioaktiivset isotoopi iseloomustav lagunemiskonstant). Valemiga (2) saab leida aja t jooksul lagunemata jäänud tuumade arvu.

Radioaktiivse aine aktiivsus näitab, mitu lagunemist toimub sekundis ehk kui palju vähenes radioaktiivsete tuumade arv sekundis. Ajaühikus toimuv muutus on tuletis (näiteks kiiruse muutus ajas on kiirendus, mis on samas ka kiiruse tuletis üle aja). Seega saab aktiivsuse η leida valemi (2) tuletisena:

$$\eta = \left| \frac{dN(t)}{dt} \right| = \left| (N_0 e^{-\lambda t})' \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \quad (3)$$

Tuletisest on võetud absoluutväärtus, kuna tuletis radioaktiivsete aatomite arvust aja järgi on negatiivne (lagunemisel tuumade arv väheneb), aga aktiivsuse iseloomustamiseks sobib positiivne arv enam. Aktiivsus on ajahetkel t lagunemata radioaktiivsete tuumade arvu ja lagunemiskonstandi korrutis.

Lagunemiskonstant λ on tõenäosus, et järgmise ajaühiku jooksul laguneb üks tuum. Valemis (3) on seega tuumade koguarv $N(t)$ korrutatud ühe tuuma lagunemise tõenäosusega λ ning saadud ajaühikus lagunenud tuumade arv η . Kui näiteks $\lambda = 0,1 \text{ s}^{-1}$, siis laguneb üks tuum sekundi jooksul tõenäosusega 10 % ja sajast tuumast laguneb sekundi jooksul keskmiselt $100\lambda \cdot 1 \text{ s} = 10$ tuuma.

Kuna poolestusaeg τ ja lagunemise konstant λ iseloomustavad mõlemad radioaktiivse lagunemise kiirust, siis saab neid üksteise kaudu avaldada. Selleks leiame radioaktiivse

aine koguse poolestusaja τ möödudes, kui lagunemata on pooled tuumad.

$$\begin{aligned}
 0,5 N_0 &= N_0 e^{-\lambda \tau} & / \div N_0 \\
 0,5 &= e^{-\lambda \tau} & / \ln () \\
 \ln 0,5 &= -\lambda \tau & / \div (-\tau) \\
 \frac{\ln 2}{\tau} &= \lambda & (4)
 \end{aligned}$$

Kui asendada valemisse (2) lagunemise konstant λ valemist (4), siis on tulemuseks

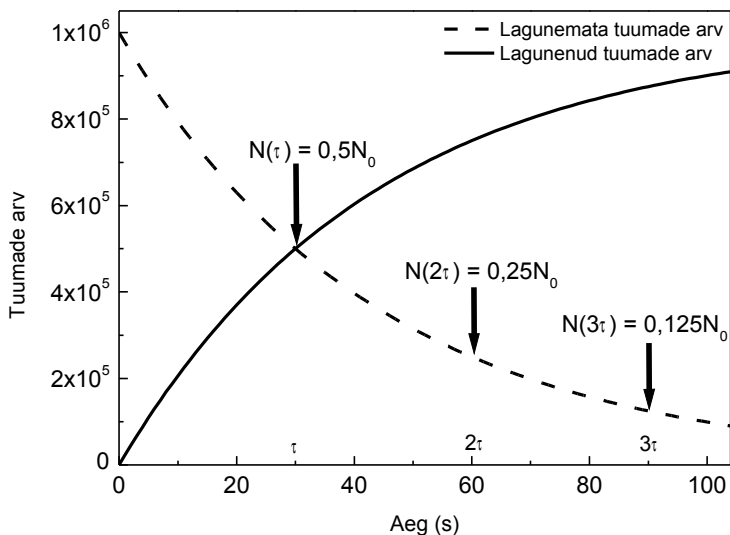
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\ln 2 \frac{t}{\tau}} = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

Ka selle valemiga saab leida radioaktiivsel lagunemisel veel lagunemata jäänud tuumade arvu. Mõnikord on lihtsam kasutada valemist (2), teinekord aga valemist (5).

Radioaktiivselt lagunenu tuumade kogus on algse tuumade arvu ja lagunemata tuumade arvu vahe. Kui on möödunud aeg t , siis on lagunenu tuumade arv

$$N_{nnd} = N_0 - N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{\tau}} = N_0 \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{\tau}} \right). \quad (6)$$

Aktiivsuse ühik on bekrell ja selle tähis on Bq. Tähis on oma nime saanud A. H. Becquere [bekrel] järgi. Üks bekrell on üks lagunemine sekundis ehk $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. Teiseks aktiiv-



Joonis 1: Radioaktiivselt lagunenud tuumade arvu (leitav valemist (5)) ja lagunenemata tuumade arvu (leitav valemist (6)) sõltuvus ajast. Poolestusaegaks on võetud 30 s ja tuumade algseks koguseks 10⁶ tuuma.

suse ühikuks on kürri (tähis on Cy). $1 \text{ Cy} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$. Kürri on vana ühik, mille kasutamist tänapäeval välditakse. Üks kürri on 1 g raadiumi aktiivsus.

Aines neeldunud kiirgusenergia doosi mõõdetakse greides (tähis Gy). Doos on üks grei, kui ühes kilogrammis aines on neeldunud üks džaul ioniseerivat kiirgust. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. Varem kasutati ühikut rad (tähis rd). $1 \text{ rd} = 0,01 \text{ Gy}$

Siivertites (tähis Sv) mõõdetakse biodoosi ehk kehas neeldunud ioniseeriva kiirguse doosi ühe kilogrammi kohta, ar-

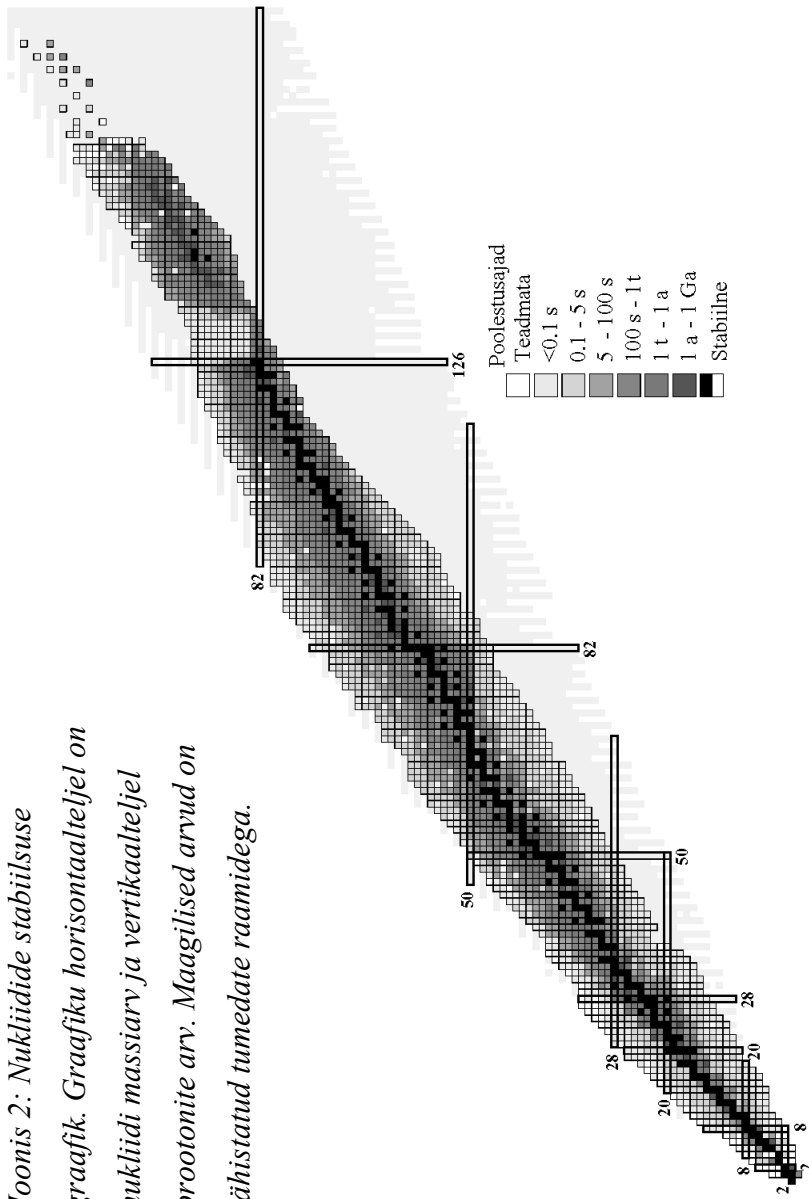
vestades eri kiirgusliikide erinevat bioloogilist mõju. Doosi mõõtmisel siivertites korrutatakse greides mõõdetud doos kiirguse ohuteguriga ja kude iseloomustava konstandiga. Gamma-kiirguse ohutegur on 1, aeglastel neutronitel $3 \div 5$ ja kehasisesel alfakiirgusel $10 \div 20$. Varasem ühik rem on 0,01 siivertit. Ühik on nime saanud rootsi füüsiku R. Sieverti järgi. Loodusliku taustkiirguse aastane doos inimese jaoks on $(0,4 \div 4)$ mSv, maksimaalne lubatud aastane doos on 50 mSv.

Tuumade stabiilsus

Tuuma moodustavate prootonite ja neutronite vahel mõjub elektrostaatiline tõukejõud ja tugevast vastasmõjust tingitud tõmbejõud. Tuum on stabiilne, kui mõlemad jõud tasakaalustavad teineteist. Liigsete prootonite korral on elektrostaatiline tõukumine suurem tugeva vastasmõju tekitatud tõmbejõust ning tuum lendab laiali. Ka neutronite ülejääk muudab tuuma ebastabiilseks. Kerged tuumad on stabiilsed, kui neutroneid ja prootoneid on ligikaudu võrdselt. Raskete tuumade korral on neutronite ja prootonite suhe kuni 1,6.

Aatomi elektronkate on stabiilseim, kui väline elektronkiht on täidetud. Elektronkattes on siis 2, 8, 18 jne elektroni. Sarnaselt on tuum stabiilseim teatud nukleonide arvu korral.

Joonis 2: Nukliidide stabiilsuse graafik. Graafiku horisontaaltejel on nukliidi massiarv ja vertikaaltejel prootonite arv. Maagilised arvud on tähistatud tumedate raamidega.



Tuumad on eriti stabiilsed, kui neis on 2, 8, 20, 28, 50, 82 jne nukleoni. Selliseid nukleonide arve nimetatakse maagilisteks arvudeks. Maagiliste arvude olemasolu seletatakse tugeva vastasmõju küllastatavusega: nukleonid saavad moodustada vaid piiratud arvu sidemeid teiste nukleonidega. Sidemed nukleonide vahel on nagu keemilised sidemed, millel on ühe aatomi poolt moodustatavate sidemete arv piiratud (näiteks hapnik saab moodustada kaks ja süsinik neli sidet). Kui tuumas on maagiline arv nukleone, siis on kõik nukleonid seotud võimalikult paljude teiste nukleonidega.

Kui liita tuuma moodustavate neutronite ja prootonite massid, siis on saadud summa suurem tuuma massist: osa nukleonide massist on ära kadunud. See on muutunud nukleonide vaheliste sidemete seosenergiaks vastavalt valemile

$$E = mc^2 . \quad (7)$$

Seosenergia iseloomustab, kui palju tuleb teha tööd, eemaldamiseks tuumast nukleoni. Seosenergia on sarnane aatomi tuuma ja elektronkatte vahel mõjuva elektrostaatilise tõmbejõu tõttu tekkinud energiale, mis näitab, kui palju tuleb tööd teha elektroni eemaldamiseks aatomist. Seosenergia saab leida valemist:

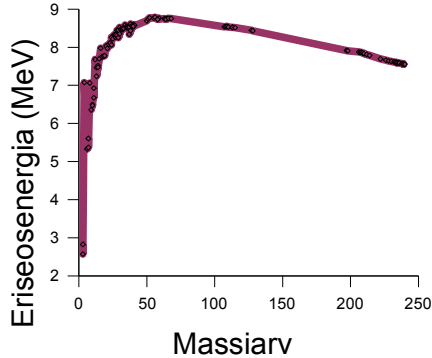
$$E_{seos} = \Delta M c^2 = (Z m_p + N m_n - M) c^2, \quad (8)$$

kus Z on prootonite arv tuumas, N on neutronite arv tuumas, $m_p = 1,007276u$ on prootoni mass, $m_n = 1,008665u$ on neutroni mass, M on tuuma mass ja c on valguse kiirus. Kuna prootoni ja neutroni massid erinevad ühest väga vähe, siis on isotoobi mass ligikaudu võrdne nukleonide arvuga tuumas. Täpsema massi arvutamiseks on tabelis „Nukliidide andmed“ (lk 33) esitatud isotoobi massi ja nukleonide arvu vahe. Tuuma massi leidmiseks tuleb nukleonide arvule liita vahe „ $M - A$ (tuuma jaoks)“. Kui liita vahe „ $M - A$ (aatomiga)“, siis on vastuseks tuuma ja elektronkatte summaarne mass. Reeglina on tuumareaktsioonides osalevad nukliidid ilma elektronkatteta, kuna tuumareaktsioonide toimumiseks peab aatomeil olema oluliselt rohkem energiat kui kulub elektronkatte ioniseerimiseks. Nii kaotavad tuumad esmalt elektronid ja alles seejärel reageerivad omavahel.

Aatomite masse mõõdetakse aatommassiühikutes u , mis on 1/12 süsiniku aatomi $^{12}_6\text{C}$ massist.

$$1 u = 1/12 M(^{12}_6\text{C}) = 1,6603 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV} \quad (9)$$

Kuna valemi (7) järgi on mass ja energia võrdelised, siis on võimalik massi mõõta ka energia ühikutes. Neist on kasutatavaim MeV: $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.



Joonis 3: Isotoopide eriseosenergia sõltuvus isotoobi massiarvust. Joonis on koostatud tabeli 2 põhjal. Tuumareaktsioonides eraldub energiat, kui saaduste eriseosenergia on suurem lähteainete omast, mistõttu eraldub energiat kergete tuumade ühinemisel ja raskete lagunemisel.

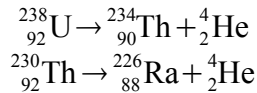
Seosenergiat ühe nukleoni kohta nimetatakse eriseosenergiaks. Mida suurem on isotoobi eriseosenergia, seda rohkem tööd tuleb teha nukleoni eraldamiseks tuumast ja seda stabiilsem on isotoop.

Näide: Isotoobis ${}^7_3\text{Li}$ on kolm prootonit ja neli neutronit, mille masside summa on $M_1 = 4 \cdot 1,008665u + 3 \cdot 1,007276u = 7,056488u$. Tabelist 2 leiame, et isotoobi ${}^7_3\text{Li}$ tuuma jaoks on vahe $M - A = 0,01436u$. Isotoobi ${}^7_3\text{Li}$ mass on $M_2 = 7u + 0,01436u = 7,01436u$. Seosenergia on $E_{seos} = M_1 - M_2 = 0,042128u = 39,24 \text{ MeV}$. Nukleonide eriseosenergia ε on

$$\varepsilon = E_{seos} / A = (39,24 \text{ MeV}) / 7 = 5,61 \text{ MeV}$$

α -lagunemine

α -lagunemine on radioaktiivse lagunemise liik, mille korral eraldub tuumast α -osake ehk aatomi ${}^4_2\text{He}$ tuum. Allpool on toodud kaks näidet α -lagunemisest:



Radioaktiivsel lagunemisel peavad olema täidetud kaks jäävusseadust: elektrilaengu jäävuse seadus ja barüonlaengu jäävuse seadus (keelab nukleonide arvu muutumise lagunemisel). Järelikult ei muutu α -lagunemisel prootonite ega neutronite arv. Kuna tuumast eraldub ${}^4_2\text{He}$ tuum, siis kahaneb prootonite arv tuumas kahe võrra ja nukleonide arv kokku nelja võrra. Muutust kirjeldab võrrand:



(X on algse tuuma ja Y on lagunemisel tekkinud tütaruuma keemilise elemendi tähis). Nukleonide ja prootonite arv lagunenud tuumas vähenes, kuid summaarselt jäi muutumatuks.

Radioaktiivsel lagunemisel tekkinud tuumad võivad olla ergastatud seisundis. Analoogselt elektronkatte elektroni-

dega on ka tuumadel olemas ergastatud seisundid ja põhiseisund. Elektron, mis läheb ergastatud seisundist üle põhiseisundisse, kiirgab valguskvanti. Samamoodi kiirgab ka ergastatud seisundist põhiseisundisse minev tuum „valguskvanti“. Tuuma korral on selleks γ -kiirguse kvant (nähtav valgus ja γ -kiirgus on „sugulased“, olles mõlemad elektromagnetlained). Kuna tuuma ergastatud seisundite energiad on palju suuremad elektronkattes olevate elektronide ergastamiseks vajalikest energiatest, siis on γ -kvanti energia ja sagedus palju suuremad nähtava valguse omadest.

Ergastatud tuum võib põhiseisundisse minnes harvadel juhtudel tekitada γ -kiirguse asemel hoopis konversioonelektroni. Viimase loomiseks annab tuum oma energia üle elektronkatile, kust seejärel eraldub elektron. Konversioonelektronide teket nimetatakse sisekonversiooniks. Tegu pole tuumareaktsiooniga, vaid elektronkatte ioniseerimisega tuumareaktsiooni käigus.

Loomulikult peab α -lagunemisel kehtima ka energia jäävuse seadus. Vaatleme lagunemist sellises taustsüsteemis, kus algne tuum on paigal ja teiste tuumade kiirused on esitatud algse tuuma suhtes. Esialgsel tuumal on vaid valemist (7) leitav seisenergia $M_{A,Z}c^2$. Lagunemisel tekkinud α -osakesel ja

tütartuomal on nii kineetiline energia (vastavalt W_α ja W_t) kui ka seisenergia (vastavalt $M_{4,2}c^2$ ja $M_{A-4,Z-2}c^2$). Lisaks võib uus tuum tekkida ergastatud seisundis energiaga E^* . Panes kõik loetletud energiad kirja energia jäävuse seadusse, saame:

$$M_{A,Z}c^2 = M_{A-4,Z-2}c^2 + M_{4,2}c^2 + E^* + W_t + W_\alpha. \quad (11)$$

Valemi (11) kolm viimast liiget muunduvad lõpuks kõik soojuseks, mistõttu võrdub nende summa lagunemisreaktsioonil eraldunud energiaga. Lagunemisel eraldunud energia ΔE avaldub kui:

$$\Delta E = M_{A,Z}c^2 - M_{A-4,Z-2}c^2 - M_{4,2}c^2. \quad (12)$$

Valemist (12) tuleneb, et tuumareaktsioonil eraldub energiat vaid siis, kui esialgse tuuma mass on suurem lagunemisel tekkinud tuumade masside summast. Kui tuum ei saa väljastpoolt energiat (seda saab anda näiteks γ -kiirgusega kiiritades), siis on α -lagunemine võimalik vaid $\Delta E > 0$ korral.

Tuumast väljuvate α -osakeste kiirus on suurusjärgus 10^7 m/s ja kineetiline energia on umbes 1 MeV. Kuna α -osakesed on küllaltki suured (sama suured kui aatomite tuumad), siis põrkuvad α -osakesed tihti teiste aatomitega ja annavad oma

energia kiiresti ära. α -osakesed liiguvad enne seiskumist õhus mõne sentimeetri ja tahketes ainetes, milles on aatomeid palju tihedamalt kui gaasides, paarkümmend mikromeetrit. α -osakeste põrkumisel aatomitega ioniseerivad α -osakesed aatomeid. Keskmiselt tekitab üks α -osake oma teel 10^5 iooni.

Väljaspool inimorganismi asuvad α -osakesed on küllaltki ohutud, sest need ei suuda läbi naha inimese sisse tungida ega seal kahju tekitada. Kui aga α -kiirguse allikas asub inimese sees (näiteks sissehingatud radioaktiivne tolm), siis on α -kiirgus ohtlikum β - ja γ -kiirgusest.

Klassikalise füüsika järgi on α -lagunemine võimatu isegi siis, kui $\Delta E > 0$. Nimelt peab α -osake tegema tuumast väljumiseks rohkem tööd, kui on α -osakesel energiat. Tuues analoogia klassikalise füüsikaga, on tuumast eralduv α -osake nagu mäest üles veerev ratas, mille kineetiline energia pole piisav mäe tippu jõudmiseks. Ometi jõuab ratas mingil viisil teisele poole mäe. Kvantfüüsika väidab, et väga väikesed osakesed saavad liikuda teisele poole „mäge“ seda ületamata, tunneleerudes läbi „mäe“. α -osake nagu kaevaks endale tunneli läbi mäe, mille ületamiseks pole osakesel piisavalt energiat.

Näidisülesanne: Nukliid ${}_{88}^{239}\text{Pu}$ on α -radioaktiivne. Arvuta radioaktiivsel lagunemisel tekkinud α -osakese kineeti-

line energia, kui tütartuum kiirgab γ -kvandi, mille energia on 0,09 MeV. Tütartuuma kineetiline energia on nii väike, et selle võib lugeda nulliks.

Lahendus: Toimub reaktsioon ${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He} + h\gamma$. Kasutame valemis (11) esitatud energia jäävuse seadust α -lagunemise jaoks (masse mõõdame energia ühikutes MeV, sest siis on energia jäävuse seaduses masse lihtsam kasutada, kuna neid pole vaja teguriga c^2 läbi korrutada):

$$M_{Pu} = M_U + M_\alpha + h\gamma + W_t + W_\alpha$$

Avaldame energia jäävuse seadusest α -osakese kineetilise energia, kui tütartuuma kineetiline energia $W_t = 0$.

$$W_\alpha = M_{Pu} - M_U - M_\alpha - h\gamma$$

Tuumade massid leiame tabelis 2 esitatud vahe $M - A$ põhjal.

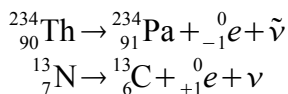
Pluooniumi ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ korral on $M - A = 0,0060$ u ja tuuma mass on $239 \text{ u} + 0,0060 \text{ u} = 239,0060 \text{ u}$. Sarnaselt leiame, et ${}_{92}^{235}\text{U}$ tuuma mass on $234,9935$ u ja ${}_2^4\text{He}$ tuuma mass $4,0015$ u.

$$\begin{aligned} W_\alpha &= (931,5 \text{ MeV/u}) \cdot \\ &\cdot (239,00060 \text{ u} - 234,9935 \text{ u} - 4,0015 \text{ u}) - 0,09 \text{ MeV} = \\ &= 5,13 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Vastus: α -osakese kineetiline energia on 5,13 MeV.

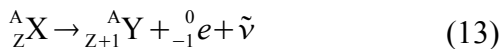
β -lagunemine

β -lagunemine on radioaktiivse lagunemise liik, mille korral eraldub tuumast elektron (β^- -osake) või positron (β^+ -osake). Positron on elektroni antiosake, millel on elektroniga võrdne mass, kuid positiivne laeng. Kui räägitakse lihtsalt β -kiirgusest, siis mõeldakse selle all nii β^+ - kui ka β^- -kiirgust. Vaatleme näidet β^- -lagunemisest (ülemine) ja β^+ -lagunemisest.

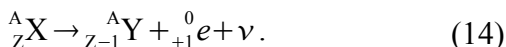


Reaktsioonivõrrandites tähistab sümbol ν neutriinot ja $\tilde{\nu}$ neutriino antiosakest antineutriinot. β^+ -lagunemisel eraldub alati neutriino ja β^- -lagunemisel eraldub antineutriino.

Kuna tuumas elektrone ega positrone pole, siis muutub β^- -lagunemisel üks neutron prootoniks ja elektroniks ning β^+ -lagunemisel muutub prooton positroniks ja neutroniks. Nukleonide koguarv sealjuures ei muutu ja jääv on ka lähteainete ja saaduste elektrilaeng. Skemaatiliselt kirjeldab β^- -lagunemist võrrand



ja β^+ -lagunemist võrrand



Leiame tingimused, mille korral energia jäävuse seadus lubab β -lagunemist. Energia jäävuse seadus β^+ -lagunemise jaoks on:

$$M_{A,Z}c^2 = M_{A,Z-1}c^2 + m_0c^2 + E^* + W_t + W_e + W_\nu \quad (15)$$

(m_0 on elektroni seisumass, W_e on elektroni kineetiline energia, W_ν on neutriino kineetiline energia, neutriino seisumass on null). Avaldame lagunemisel eraldunud energia ΔE :

$$\Delta E = E^* + W_t + W_e + W_\nu = M_{A,Z}c^2 - M_{A,Z-1}c^2 - m_0c^2. \quad (16)$$

Sarnaselt α -lagunemisele on ka β^+ -lagunemine võimalik vaid siis, kui $\Delta E > 0$ ehk algse tuuma mass on suurem lagunemisel tekkinud uue tuuma ja positroni masside summast.

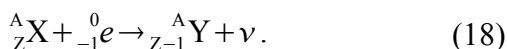
Ka β^- -lagunemine on võimalik vaid siis, kui $\Delta E > 0$. Sealjuures leitakse ΔE analoogiliselt β^+ -lagunemisega:

$$\Delta E = M_{A,Z}c^2 - M_{A,Z+1}c^2 - m_0c^2. \quad (17)$$

Nii β^+ - kui ka β^- -kiirguse tekke tingimused on väga sarnased. Osakeste ja antiosakeste omadused ongi väga sarnased, kuigi nime järgi peaksid need osakesed olema vastandlikud.

Elektronid väljuvad β -lagunemisel tuumast valguse kiirusele lähedaste kiirustega. Tahkeid aineid läbib β -kiirgus veidi paremini kui α -kiirgus: β -kiirguse peatamiseks piisab sentimeetri paksusest paberipakist või mõne millimeetrisest tinalehest. Kasulikum on kasutada esimest, sest β -kiirguse sumbumisel rasketes elementides tekib röntgenkiirgus, mis on ka kahjulik. Samuti on β -kiirgus ohtlikem organismi sees tekkinuna.

β -kiirguse eriliigiks on elektronhaare, mille korral tuum haarab elektronkattest ühe elektroni enda sisse. Kõige tihedamini haaratakse elektron tuumale lähimast kihist, mille nimetus on K – kiht. Seepärast nimetataksegi protsessi K – haardeks. Elektronhaardel toimuvat tuumareaktsiooni kirjeldab võrrand:



Radioaktiivsed read

Tihti on radioaktiivse elemendi lagunemisel tekkinud uued elemendid omakorda radioaktiivsed. Nii tekivad radioaktiivsed read, milles iga lagunemisreaktsioon tekitab uusi radioaktiivseid elemente ja uusi lagunemisreaktsioone. Rea viimane liige pole radioaktiivne ega lagune uuteks isotoopi-

deks, mistõttu peatuvad selle isotoobi juures radioaktiivsed lagunemised. Radioaktiivsete ridade analoog keemias on ahelreaktsioon, kus üks reaktsioon põhjustab palju uusi reaktsioone.

Elemendi massiarv ehk nukleonide arv tuumas muutub α -lagunemisel nelja võrra väiksemaks ja jääb β -lagunemisel muutumatuks. Järelikult ei saa radioaktiivsel lagunemisel muutada massiarvu A jääk neljaga jagamisel. Arvuga neli jagamisel on neli erinevat jääki, mistõttu on olemas ka neli radioaktiivset rida.

Tabel 1: Radioaktiivsete ridade mõningad andmed

<i>Rea nimi</i>	<i>A / 4 jääk</i>	<i>Esimene liige</i>	<i>Esimese liikme poolestusaeg</i>	<i>Viimane liige</i>
Tooriumirida	0	${}_{90}^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ a	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
Neptuuniumirida	1	${}_{93}^{237}\text{Np}$	$2,1 \cdot 10^6$ a	${}_{83}^{209}\text{Bi}$
Uraanirida	2	${}_{92}^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ a	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
Aktiiniumirida	3	${}_{92}^{235}\text{U}$	$7,0 \cdot 10^8$ a	${}_{82}^{207}\text{Pb}$

Neptuuniumirida looduses ei leidu, sest selle liikmed on kõik lagunened stabiilseteks, mitteradioaktiivseteks elementideks. Küll aga on neptuuniumirea elemente tekkinud kunstli-

kult tuumareaktorites ja tuumapommide plahvatustes. Neptuuniumirida avastatigi alles siis, kui tuumareaktorites toodeti esmakordselt ${}^{237}_{93}\text{Np}$.

Kui radioaktiivse lagunemise algusest on möödunud palju aega, siis tekib radioaktiivses reas sekulaarne tasakaal ehk kõigi radioaktiivse rea liikmete aktiivsused on võrdsed:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_m N_m \quad (19)$$

(m on radioaktiivsete elementide arv radioaktiivses reas). Erandiks on rea viimane mitteradioaktiivne liige, mille aktiivsus on alati null.

Radioaktiivsete lagunemisreaktsioonide kineetika

Selles peatükis pole toodud valemite tõestusi, kuna tuletuskäigud hõlmavad diferentsiaalvõrrandeid, mida gümnaasiumis ei käsitleta.

Radioaktiivse rea teise elemendi aatomite arvu $N_2(t)$ saab leida valemist

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (20)$$

(N_1 on radioaktiivse rea esimese liikme aatomite arv hetkel

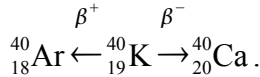
$t = 0$ s, λ_1 on rea esimese liikme lagunemiskonstant ja λ_2 on rea teise liikme lagunemiskonstant). Valemi tuletamisel on arvestatud, et rea teise liikme aatomite arv ühelt poolt suureneb pidevalt, sest rea esimene liige laguneb radioaktiivselt, ja samaaegselt ka väheneb, sest rea teine liige ise laguneb.

Sekulaarse tasakaalu korral saab radioaktiivse rea viimase (mitteradioaktiivse) elemendi aatomite arvu leida valemist

$$N_{\text{stabiilne}}(t) = N_1(1 - e^{-\lambda_1 t}). \quad (21)$$

Valemis (21) on kasutatud radioaktiivse rea esimese liikme lagunemiskonstanti, kuna radioaktiivsete ridade esimeste liikmete poolestusajad on palju suuremad järgmiste liikmete poolestusaegadest ja ka nende summast (erandiks on loomulikult rea viimane, stabiilne liige). Nii piirab radioaktiivse lagunemise kiirust eelkõige radioaktiivse rea esimese liikme lagunemine. Kui radioaktiivses reas on mõnel isotoobil palju suurem poolestusaeg kui rea esimesel elemendil, siis piirab lagunemise kiirust hoopis see aeglaselt lagunev isotoop. Nüüd ei tule valemis (21) kasutada mitte radioaktiivse rea esimese liikme, vaid aeglaseimalt laguneva isotoobi lagunemiskonstanti.

Radioaktiivne element võib samaaegselt laguneda ka mitmeks elemendiks korraga. Näiteks on olemas reaktsioon



Kahe lagunemisreaktsiooni samaaegsel toimumisel suhtuvad lagunenud ainete kogused nagu lagunemiskonstantide jagatis:

$$\frac{N_{Ar}}{N_{Ca}} = \frac{\lambda_{Ar}}{\lambda_{Ca}} \quad (22)$$

(valem kehtib kõikide lagunemissaaduste korral, arusaadavuse huvides on aga kasutatud näite tähistusi). Lagunemissaaduste aatomite arvu suhe sellises reaktsioonis on kogu lagunemise vältel ühesugune.

Kui mingis tehislikus protsessis (näiteks tuumareaktoris) tekib ajaühikus konstantselt q uut radioaktiivset tuuma, mille lagunemiskonstant on λ , siis saab radioaktiivsete tuumade arvu leida valemist

$$N(t) = \frac{q}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}). \quad (23)$$

Valemit (23) nimetatakse tehisradioaktiivsete tuumade kogunemiseaduseks. Protsessi tehislikkusele viitab see, et igas ajaühikus lisandub alati võrdne arv radioaktiivseid tuumi. Kui tuumasid lisanduks tavalise radioaktiivse lagunemise tõttu, siis peaks lisanduvate tuumade arv aja jooksul vähenema, sest algne radioaktiivne isotoop laguneb ja selle aktiivsus väheneb.

Näidisülesanne: Nukliid ${}^{218}_{84}\text{Po}$ ($\tau_1 = 3.05$ min) laguneb isotoobiks ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ ($\tau_2 = 26,8$ min). Kui algselt eksisteeris proovis massiga 1 mg üksnes esimest nukliidi, siis milline on proovis plii mass 53,6 min möödumisel.

Lahendus: Kuna proovis oli algselt vaid üks radioaktiivne isotoop, siis saab ${}^{218}_{84}\text{Po}$ vaadelda radioaktiivse rea esimese liikmena ja tekkinud ${}^{214}_{82}\text{Pb}$ rea teise liikmena. Plii aatomite arvu saab leida valemist (20). Teades, et $\lambda = \ln 2/\tau$, teisendame valemis (20) esimest tegurit.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{1/\tau_1}{1/\tau_2 - 1/\tau_1} = \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}$$

Edasi leiame radioaktiivse rea teise liikme aatomite arvu.

$$N = N_0 \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(\left(\frac{1}{2} \right)^{t/\tau_1} - \left(\frac{1}{2} \right)^{t/\tau_2} \right)$$

Aatomite arv N võrdub moolide arvu n ja Avogadro arvu N_A korrutisega: $N = N_A n = N_A \cdot m_a / M_{mol}$ (M_{mol} on molaarmass ja m_a on aine mass). Asendame saadud tulemuse eelmisse valemisse.

$$N_A \frac{m_{\text{Pb}}}{M_{\text{Pb}}} = N_A \frac{m_{\text{Po}}}{M_{\text{Po}}} \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left(\left(\frac{1}{2} \right)^{t/\tau_1} - \left(\frac{1}{2} \right)^{t/\tau_2} \right) \Rightarrow$$

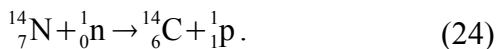
$$m_{\text{Pb}} = m_{\text{Po}} \frac{M_{\text{Pb}}}{M_{\text{Po}}} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left(\left(\frac{1}{2} \right)^{t/\tau_1} - \left(\frac{1}{2} \right)^{t/\tau_2} \right) = 0,28 \text{ mg}$$

Vastus: tekkinud plii mass on 0,28 mg.

Süsinikdateerimine

Süsinikdateerimisega saab määrata esemete vanust, mõõtes neis leiduva radioaktiivse $^{14}_6\text{C}$ kontsentratsiooni. Mida vanem on ese, seda rohkem $^{14}_6\text{C}$ tuumi on lagunenu ja seda väiksem on selle isotoobi kontsentratsioon.

Süsiniku isotoop $^{14}_6\text{C}$ tekib atmosfääri ülakihtides, kus kosmilisest kiirgusest pärinevad neutronid pommitavad lämmastiku aatomeid:



Tekkinud süsinik langeb maapeale ja satub elusorganismidesse, kuna need tarbivad elamiseks süsinikku sisaldavaid aineid nagu süsivesikuid. Oma eluea vältel tarbivad organismid teiste süsiniku isotoopide seas ka $^{14}_6\text{C}$ ja selle kontsentratsioon organismis ühtib $^{14}_6\text{C}$ kontsentratsiooniga ümbritsevas keskkonnas. Kui elusolend sureb, siis tema kehasse ei satu enam radioaktiivset süsinikku ja ka olemasolev $^{14}_6\text{C}$ laguneb:



Vanuse määramisel leitakse esmalt, kui palju on $^{14}_6\text{C}$ kontsentratsioon organismis selle surma järel muutunud, ning seejärel määratakse organismi vanus valemi (2) järgi. Arvutusi lihtsustab see, et $^{14}_6\text{C}$ kontsentratsioon on Maal läbi aegade olnud peaaegu muutumatu.

Kuna pole võimalik määrata kuitahes väikest $^{14}_6\text{C}$ kontsentratsiooni, siis saab süsinikdateerimisega määrata maksimaalselt 60 000 aasta vanuste esemete iga. $^{14}_6\text{C}$ poolestusaeg on 5568 aastat, mistõttu on $^{14}_6\text{C}$ kontsentratsioon selle ajaga langenud $2^{10} \approx 1000$ korda. Süsinikdateerimise väljatöötamise eest sai 1960. aastal Willard F. Libby Nobeli preemia keemias.

Sarnaselt süsinikdateerimisele töötab ka kaaliumdateerimine, millega määratakse kivimite vanuseid. Kasutatakse reaktsioonis



tekkinud argooni. Kui kivim oli veel vedel, siis pääses argoon kivimist välja, kuid selle tahkumise järel enam mitte. Kivimi ea leidmiseks määratakse $^{40}_{18}\text{Ar}$ kontsentratsioon kivimis. Reaktsioonis (26) on $^{40}_{19}\text{K}$ poolestusaeg $1,25 \cdot 10^9$ aastat.

Looduslik tuumareaktor

1972. aastal avastati Aafrikas Gabonis Oklo uraani-maardlas, et seal on kunagi tegutsenud looduslik tuumareaktor. Nimelt on uraani isotoopide ^{235}U ja ^{238}U kontsentratsioonide suhe kõikjal maailmas peaaegu ühesugune, väljaarvatud Oklo maardlas. Ka oli maardlas kõrge tuumareaktoris tekkivate elementide nagu lantaan ja tseerium kontsentratsioon.

Reaktor tegutses umbes kahe miljardi aasta eest jõesängis, kuhu oli ladestunud rohkesti uraaniühendeid. Jõe ülemjooksult oli voolav vesi kaasa haaranud uraanirikast pinnast, mis keskjooksul välja sadenes. Nii suurendas jõgi uraani kontsentratsiooni jõe keskjooksul.

Tuumareaktori tööks on uraani isotoopidest sobivaim ^{235}U , mis peab lagunemiseks neelama neutroni. ^{235}U neelab vaid aeglaseid, mitte aga kiireid neutroneid, kuid ^{235}U lõhustumisel tekivad just kiired neutronid. Nende aeglustajana toimis reaktori juures pinnases olnud vesi. Kui reaktor muutus liiga võimsaks ja eraldas palju soojust, siis aurustus pinnasest osa vett ning neutroneid aeglustati vähem. Ühtlasi kahanes siis ka reaktori võimsus. Kui reaktor töötas väikese võimsusega, siis oli reaktori ümbruses vett rohkem ning ka aeglaseid neutroneid tekkis enam ja reaktori võimsus kasvas. Nii tasakaalustas vesi

reaktori tööd ja ei lasknud reaktoril üle kuumeneda ega seiskuda.

Oklo maardlast leiti kuus 1,7 kuni 1,9 miljardi aasta eest tegutsenud väikest reaktorit, mis olid mõnekümnemeetrise läbimõõduga. Nende koguvõimsus oli mõnikümmend kilovatti (koduse elektriboileri võimsus on 1 – 2 kilovatti). Reaktorid töötasid kuni 150 000 aasta vältel ja kulutasid oma elu jooksul kuus tonni uraani. Sealjuures vabanes 15 gigavatt-aastat energiat, mis on kaasaegse tuumareaktori nelja aasta toodang.

Tänapäeval on reaktori tööks vajaliku uraani koguse saamine keeruline: looduslikku uraanimaaki rikastatakse isotoobiga ^{235}U ja reaktorid ehitatakse kujuga, mis laseks võimalikult vähestel neutronitel reaktorist väljuda. Tundub uskumatu, et looduses võiks tuumareaktor iseenesest tekkida. Kuid Oklo reaktori eluajal oli uraanimaaki praegusest rohkem, sest uraan laguneb radioaktiivselt. Ka oli tol ajal uraanimaagis tuumareaktori tööks sobiva ^{235}U kontsentratsioon palju kõrgem kui tänapäeval, sest ^{235}U poolestusaeg on kümme korda väiksem ^{238}U poolestusajast.

Loodusliku tuumareaktori töötamist on kahtlustatud ka Kanada ja Austraalia uraanimaardlates, kuid tõestatud on vaid Oklo reaktori olemasolu.

Kasutatud kirjandus

Health Physics Society <http://hps.org/publicinformation/ate/q1094.html>

<http://www.c14dating.com/int.html>

<http://ie.lbl.gov/systematics/chart2000g.pdf>

<http://atom.kaeri.re.kr/ton/>

Matemaatiikka Fysiikka Kemia Taulukot, Keuruu, Otava, 1990

Lembra, J., Täiendavaid teemasid koolifüüsikale, Tartu, TÜ Teaduskool, 2004

Ivaništšev, V., Radioaktiivsus, Tartu, TÜ Teaduskool, 2005

Saveljev, I., Füüsika üldkursus III, Tallinn, Valgus, 1979

Isaacs, A. (editor), Dictionary of Physics, 4th ed, Oxford, Oxford University Press, 2003

Nukliidide andmed

Tabel 2: Nukliidide andmed

Z on prootonite arv, A on nukleonide arv. Nukliidide massid on esitatud massi ja nukleonide arvu vahena ($M - A$) nii tuuma kui ka aatomi jaoks (tuuma korral vahest $M - A$ lahutatud elektronide seisumassid). Õppematerjalis toodud valemid on mõeldud kasutamiseks tuuma jaoks arvutatud $M - A$ korral. See-eest teatmikes on $M - A$ toodud tihti aatomi jaoks (tuuma ja elektronkate seisumasside summa). Kui isotoobi $^{12}_6\text{C}$ jaoks on $M - A = 0 \text{ u}$, siis on vahe esitatud aatomi jaoks. Tabelis on toodud vaid tähtsamate lagunemisreaktsioonide andmed.

Ühikute tähised: s – sekund; min – minut; t – tund; p – päev; a – aasta

Z	Elemendi tähis	A	$M - A$ (aatomi jaoks)	$M - A$ (tuuma jaoks)	Poolestusaeg, lagunemisiik	Osakaal sama elemendi isotoopide seas
0	n	1	0,00867	0,00867	β^- ; 12 min	
1	H	1	0,00783	0,00728		99,985 %
	H	2	0,01410	0,01355		0,02 %
	H	3	0,01605	0,01550	β^- ; 12,3 a	
2	He	3	0,01603	0,01493		0,00014 %
	He	4	0,00260	0,00150		100 %
3	Li	6	0,01513	0,01348		7,4 %
	Li	7	0,01601	0,01436		92,6 %
4	Be	7	0,01693	0,01474	e_K ; 53 p	
	Be	8	0,00531	0,00312	α ; 1 s	

	Be	9	0,01319	0,01100		100 %
	Be	10	0,00000	0,00000	β^- ; $2,5 \cdot 10^6$ a	
5	B	10	0,01294	0,01020		19,6 %
	B	11	0,00930	0,00656		80,4 %
6	C	11	0,01143	0,00814	β^+ ; 20 min	
	C	12	0,00000	-0,00329		98,89 %
	C	13	0,00335	0,00006		1,11 %
	C	14	0,00324	-0,00005	β^- ; 5568 a	
7	N	13	0,00574	0,00190	β^+ ; 10 min	
	N	14	0,00307	-0,00077		99,64 %
	N	15	0,00011	-0,00373		0,36 %
8	O	16	-0,00509	-0,00948		99,76 %
	O	17	-0,00087	-0,00526		0,04 %
	O	18	-0,00084	-0,00523		0,20 %
9	F	19	-0,00160	-0,00654		100 %
10	Ne	20	-0,00756	-0,01305		90,51 %
	Ne	21	-0,00615	-0,01164		0,27 %
	Ne	22	-0,00862	-0,01411		9,22 %
11	Na	23	-0,01023	-0,01626		100 %
	Na	24	-0,00903	-0,01506	β^- ; 15 t	
12	Mg	24	-0,01496	-0,02154		78,99 %
	Mg	25	-0,01416	-0,02074		10,00 %
	Mg	26	-0,01741	-0,02399		11,01 %

	Mg	27	-0,01565	-0,02223	β^- ; 9,5 min	
13	Al	27	-0,01847	-0,02560		100 %
	Al	28	-0,01809	-0,02522	β^- ; 2,3 min	
14	Si	28	-0,02307	-0,03075		92,33 %
	Si	29	-0,02351	-0,03119		4,67 %
	Si	30	-0,02624	-0,03392		3,10 %
	Si	31	-0,02465	-0,03233	β^- ; 2,65 t	
15	P	29	-0,01818	-0,02641	β^+ ; 4,6 s	
	P	30	-0,02168	-0,02991	β^+ ; 2,5 min	
	P	31	-0,02624	-0,03447		100 %
	P	32	-0,02609	-0,03432	β^- ; 14,3 d	
16	S	32	-0,02793	-0,03671		95,02 %
	S	33	-0,02854	-0,03732		0,75 %
	S	34	-0,03214	-0,04092		4,21 %
	S	35	-0,03097	-0,03975	β^- ; 87 p	
17	Cl	35	-0,03115	-0,04047		75,55 %
	Cl	36	-0,03169	-0,04101	β^- , e_K ; $3,1 \cdot 10^5$ a	
	Cl	37	-0,03410	-0,04342		24,23 %
18	Ar	36	-0,03245	-0,04232		0,337 %
	Ar	37	-0,03323	-0,04310	e_K ; 32 p	
	Ar	38	-0,03728	-0,04715		0,063 %
	Ar	39	-0,03568	-0,04555	β^- ; 265 s	
	Ar	40	-0,03762	-0,04749		99,60 %

19	K	37	-0,02664	-0,03706	β^+ ; 1,2 s	
	K	38	-0,03091	-0,04133	β^+ ; 0,94 s	
	K	39	-0,03629	-0,04671		93,258 %
	K	40	-0,03599	-0,04641	e_K, β^+ ; $1,28 \cdot 10^9$ a	
	K	41	-0,03816	-0,04858		6,730 %
20	Ca	40	-0,03741	-0,04838		96,941 %
23	V	50	-0,05284	-0,06546		0,25 %
	V	51	-0,05602	-0,06864		99,75 %
24	Cr	52	-0,05949	-0,07265		83,79 %
25	Mn	55	-0,06195	-0,07566		100 %
26	Fe	56	-0,06507	-0,07933		91,7 %
27	Co	58	-0,06427	-0,07908	e_K, β^+ ; 71,3 p	
	Co	59	-0,06681	-0,08162		100 %
28	Ni	58	-0,06466	-0,08002		68,27 %
29	Cu	63	-0,07041	-0,08632		69,17 %
	Cu	64	-0,07024	-0,08615	e_K, β^-, β^+ ; 12,8 t	
	Cu	65	-0,07221	-0,08812		30,83 %
30	Zn	64	-0,07086	-0,08732		48,6 %
	Zn	66	-0,07395	-0,09041		27,9 %
	Zn	68	-0,07514	-0,09160		18,8 %
47	Ag	107	-0,09303	-0,11881		51,84 %
	Ag	108	-0,09411	-0,11989	β^- ; 2,3 min	
	Ag	109	-0,09530	-0,12108		48,16 %

	Ag	110	-0,09395	-0,11973	β^- ; 24 s	
48	Cd	113	-0,09534	-0,12167		12,22 %
49	In	113	-0,09572	-0,12260		4,16 %
	In	115	-0,09615	-0,12303		95,84 %
53	J	127	-0,09565	-0,12472		100 %
	J	128	-0,09418	-0,12325	β^- , e_k ; 25 min	
79	Au	197	-0,03345	-0,07678		100 %
	Au	198	-0,03176	-0,07509	β^- ; 2,7 p	
82	Pb	206	-0,02554	-0,07052		24,1 %
	Pb	207	-0,02410	-0,06908		22,1 %
	Pb	208	-0,02336	-0,06834		58,4 %
	Pb	210	-0,01584	-0,06082	β^- ; 22,3 a	
83	Bi	209	-0,01958	-0,06511		100 %
84	Po	210	-0,01713	-0,06320	α ; 138 p	
	Po	212	-0,01114	-0,05721	α ; $2,1 \cdot 10^{-7}$ s	
	Po	214	-0,00481	-0,05088	α ; $1,6 \cdot 10^{-4}$ s	
86	Rn	222	0,01753	-0,02964	α ; 3,8 p	
88	Ra	226	0,02536	-0,02291	α ; 1620 a	
	Ra	228	0,03106	-0,01721	β^- ; 5,75 a	
90	Th	230	0,03313	-0,01624	α ; 7540 a	
	Th	232	0,03821	-0,01116	α ; $1,4 \cdot 10^{10}$ a	
	Th	233	0,04143	-0,00793	β^- ; 25,5 min	
	Th	234	0,04359	-0,00577	β^- ; 24,1 p	

91	Pa	233	0,04024	-0,00967	β^- ; 27,0 p	
92	U	234	0,04090	-0,00956	α ; $2,5 \cdot 10^5$ a	
	U	235	0,04393	-0,00653	α ; $7,1 \cdot 10^8$ a	
	U	236	0,04573	-0,00473	α ; $2,4 \cdot 10^7$ a	
	U	238	0,05076	0,00030	α ; $4,5 \cdot 10^9$ a	
	U	239	0,05432	0,00386	β^- ; 23,5 min	
94	Pu	238	0,04952	-0,00204	α ; 89,6 a	
	Pu	239	0,05216	0,00060	α ; $2,4 \cdot 10^4$ a	
	Pu	240	0,05397	0,00241	α ; 6600 a	

Ülesanded

Kontrolltöoks F – lahenda ___ variant. Töö esitamise tähtaeg on _____.

I variant

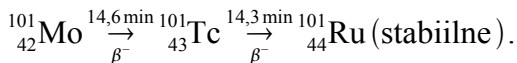
1. ^{238}U radioaktiivse lagunemise lõppsaaduseks on üks plii isotoop. Milline?

2. Tuumaenergeetikas on oluliseks materjaliks ^{232}Th . Tuum neelab soojuslike neutronitega kiiritamisel ühe neutroni ja muutub seejärel pärast β^- -lagunemist isotoobiks ^{233}U . Kirjuta toimuvate reaktsioonide võrrandid.

3. $^{40}_{19}\text{K}$ tuum võib laguneda, kasutades β^+ -lagunemist või K-haaret. Mitu korda suurem energia eraldub reaktsioonis viimasel juhul? Eeldage, et lagunemisel tekkinud neutriino ja selle antiosakese energiad võrduvad.

4. Kui vana on arheoloogide leitud laevavrakk, kui selles oleva ^{14}C aktiivsus moodustab 85 % sama nukliidi aktiivsusest elusorganismides?

5. Algselt sisaldab puhas ^{101}Mo proov 10^6 aatomit. Toimuvad järgmised lagunemisreaktsioonid:



Mitu ^{101}Mo , ^{101}Tc ja ^{101}Ru on proovis 14,3 min pärast?

6. Tänapäeval on ^{235}U ja ^{238}U aatomite suhe 0,7202. Milline oli see suhe Oklo loodusliku tuumareaktori töötamise ajal (reaktori vanuseks võta $1,8 \cdot 10^9$ aastat)?

II variant

1. Millisest radioaktiivsest reast pärineb ^{226}Ra ? Millisest isotoobist algavad selle radioaktiivse rea lagunemised?

2. Isotoop X tekkis isotoobist $^{222}_{86}\text{Rn}$ kahe järjestikuse α -ja neile järgnenud β^- -lagunemise järel. Leia X.

3. $^{233}_{90}\text{Th}$ on β^- -radioaktiivne. Kui suur peab olema $^{233}_{90}\text{Th}$ mass, et radioaktiivsel lagunemisel eralduks sekundis 1 kJ soojust?

4. Kui palju aega peab mööduma, et algselt puhtast ^{236}U koosnevas ainetükis oleks 90 % mitteradioaktiivset pliid? Milline plii isotoop tekib lagunemisel?

5. Radioaktiivset nukliidi $^{198}_{79}\text{Au}$ lisandub konstantse kiirusega 10^{10} tuuma sekundis. Kui alghetkel kulla tuumasid polnud, siis mitu $^{198}_{79}\text{Au}$ tuuma on 3 päeva pärast? Minge aja pärast ei suurene enam $^{198}_{79}\text{Au}$ tuumade arv, sest tuumi laguneb sama palju kui uusi lisandub. Mitu $^{198}_{79}\text{Au}$ tuuma on siis?

6. Inimese vere ruumala leidmiseks süstiti verre nukliidi ^{113}In ($\tau = 100$ min), mille aktiivsus oli $4 \cdot 10^6$ Bq. Poole tunni pärast võetud 1 ml proovi aktiivsus oli 400 Bq. Kui suur on inimese vere ruumala, kui ^{113}In jaotus veres ühtlaselt?

