

# Radioaktiivsus

## Aatom ja aatomituum

Esimesed vaated mateeria diskreetse iseloomu kohta tekkisid Vana-India filosoofilistes ringkondades juba esimesel aastatuhandel enne meie ajaarvamist. Vana-Kreeka filosoofid – Epicuros, Democritos, Leucippos – väitsid, et maailm koosneb tühjuses pidevalt liikuvaat aatomitest. Filosoofid vaatlesid aatomeid kui vähimaid jagamatuid osakesi, mis on igavesed ja muutumatud ning erinevad üksteisest vormi ja suuruse poolest. XVII sajandil hakkas M. Lomonossov esimesena kasutama aatomite, elementide ja molekulide mõisteid tänapäevases tähenduses ning tegi järelduse, et ainete omadused sõltuvad vastavate ainete koostisest ja ehitusest. Lomonossoviga samal ajal elanud J. Dalton defineeris aatomi kui aine vähimat osakest, millel on kindel mass ja mõõtmed; Dalton määras esmakordselt ka mõningate elementide atommassid.

Ettekujutus aatomitest kui monoliitsetest muutumatutest kerakestest säilis XVIII sajandi keskpaigani. Elektroni avastamine 1897. aastal näitas, et aatomid peavad elektroneutraalsuse printsiibi säilitamiseks sisaldama ka positiivselt laetud substantse. 1898. aastal pakkus J. Thomson välja Daltoni monoliitsete kerakeste teooria asemel uut aatomiehituse teooriat. Selle kohaselt on kogu aatomi atmosfäär ühtlaselt täidetud mingisuguse positiivselt laetud substantsiga, milles kaootiliselt liiguvad – nagu kalad akvaariumis – pluss-laengut neutraliseerivad elektronid. Sellist aatomimudelit võrreldi keeksiga, milles rosinad on ühtlaselt jaotunud üle kogu vormi; teooria selgitas üsna hästi kõiki tol ajal tuntud elektromagnetilisi nähtusi, näiteks elektrolüüsi.

1911. aastal saadi aga kuulsates E. Rutherfordi katsetes ( $\alpha$ -osakeste hajumine kullalehel) tõestus sellele, et aatomi keskel asub kompaktne suure massiga aatomituum, mille ümber tiirlevad elektronid. Aatomituuma avastamisel oli kolossaalne tähtsus mateeria ehituse õpetuse evolutsioonis. Hiljem selgitas N. Bohr elektronide liikumist aatomis, D. Ivanenko ja W. Heisenberg püstitasid aga hüpoteesi, et aatomituum koosneb neutronitest ja prootonitest. Aatomituuma avastamine oli tegelikult lähtepunktiks aatomfüüsika arengule ja uute füüsikaliste ettekujutuste kujunemisele mateeria ehituse ning omaduste valdkonnas.

Kaasaegse aatomimudeli põhipostulaadid:

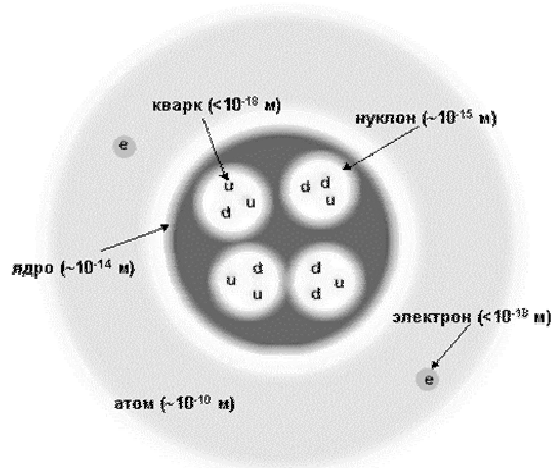
- Elektronid liiguvad ruumis tuuma ümber on tingitud realselt eksisteerivatest tõmbejõududest.
- Elektroni liikumist iseloomustab lainefunktsioon ja kindel potentsiaalne energia.

Tuumaks nimetatakse aatomi keskosa, kuhu on koondunud praktiliselt kogu aatomi mass ning positiivne laeng. Aatomituum koosneb elementaarosakestest – prootonitest ja neutronidest, mida peetakse ühe ja sama osakese (nukleoni) erinevalt laetud olekuteks. Ka nukleonid koosnevad osakestest – igas nukleonis on 3 kvarki, mis määravad vastava nukleoni omadusi. Prooton koosneb kahest u- ja ühest d-kvargist, neutron – kahest d- ja ühest u-kvargist; tähistused on vastavalt p(uud) ja n(udd).

Nukleonide arvu tuumas nimetatakse massiarvuks, tähistatakse  $A = N + Z$ . N on neutronite arv, Z – keemilise elemendi järjekorranumber perioodilisussüsteemis (see on võrdne prootonite arvuga tuumas). Nukleonide (neutron ja prooton) on massiarv võrdne ühega, elektronil on A võrdne nulliga.

Tuumad võrdsete Z, kuid erinevate A väärtustega on isotoobid. Tuumad, millel on sama Z, kuid erinev A, on isobaarid. Keemilise elemendi  $\mathcal{E}$  tuuma tähistatakse  ${}^A_Z\mathcal{E}$ ; joonisel on kujutatud heeliumi  ${}^4_2\text{He}$  aatomituum. Aatomeid, millel on konkreetne A ja Z väärtus, ni-

metatakse nukliidideks. Kokku on teada (2000.a andmed) 2975 loomulikke ja kunstilisel teel saadud nukliidi, millest on 300 püsivat.



## Tuumade radioaktiivsus

1898.aastal avastas Antoine Henri Becquerel uraanisoolade fosforesentsi uurimisel, et valguskindlalt paberisse mähitud fotoplaadid tumenenevad uraanisoolade läheduses. Täiendavas katses näitas Becquerel, et selline efekt esineb ka metallilise uraani puhul, seega on elemendi enda (mitte selle soolade) omadus. Senitundmatu kiirguse iseenesliku kiirgumise nähtust hakati nimetama radioaktiivsuseks.

Elemendi radioaktiivsus on ühe keemilise elemendi ebapüsivate isotoopide muundumine teise keemilise elemendi isotoopideks. Selle protsessiga kaasneb teatud osakeste kiirgumine ja energia eraldumine.

Mitme aasta möödumisel pärast Antoine Bequereli katseid avastasid abikaasad Pierre ja Marie Curie kaks uut radioaktiivset elementi – poloonium  ${}_{84}\text{Po}$  ja radium  ${}_{88}\text{Ra}$ , mille kiirgumisaktiivsus osutus  $10^7$  korda kõrgemaks kui uraani oma. Radioaktiivse kiirguse omaduste uurimisel avastas Marie Curie selle kiirguse raske komponendi. Ernest Rutherford, kes uuris kiirgavate osakeste kõrvalekaldumist otsesuunalisest teekonnast elektri- ja magnetvälja mõjul, tõestas, et radioaktiivne kiirgus koosneb kolmest komponendist, mida hakati nimetama  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  - kiirteks.

Hiljem tehti kindlaks, et  $\gamma$ -kiired on suure läbistuvõimega elektromagnetkiirgus.  $\alpha$ -kiired on heeliumi  ${}^4_2\text{He}$  tuumad, mis liiguvad kiirusega umbes 0.1 valguse kiirusest vaakumis ja mida suudab peatada isegi mitme mikroni paksune alumiiniumikiht.  $\beta$ -kiired on elektronid, mis liiguvad valguskiirusele lähedase kiirusega ( $c = 10^8$  m/s) ja mida suudab peatada ligi 1 mm paksune alumiiniumikiht. 1904.aastal jõudsid Ernest Rutherford ja Frederick Soddy järeldusele, et kõik kolm radioaktiivse kiirguse liiki on aatomi tuuma lagunemise tulemuseks. Tuuma radioaktiivsed omadused sõltuvad vastava tuuma karakteristikutest, näiteks seoseenergiast.

## Tuuma seoseenergia

Nukleonide olek tuumades erineb tunduvalt vabast olekust. Kõikides aatomituumades (välja arvatud vesiniku aatomituum) on vähemalt kaks nukleoni, mille vahel on eriline tuumasisene vastastikmõju – tõmbumine, mis tagab tuumade koospüsimumist, vaatamata samanimeliselt laetud prootonite tõukumisele.

Tuum  ${}^3_2\text{He}$  (heelium-kolm) koosneb kahest prootonist ja neutronist. Kahe prootoni gravitatsioonilise ja elektromagnetilise vastastikmõju suhe  ${}^3_2\text{He}$  tuumas on järgmine:

$$\frac{F_E}{F_G} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \right) / \left( G \frac{m_1 m_2}{r^2} \right) = \frac{1}{G \cdot 4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{m_1 m_2},$$

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{1}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг})^2} \approx 10^{36}.$$

On täiesti ilmne, et elektromagnetilise tõukumise jõud on gravitatsioonilisest tõmbumisest palju suurem; seega peab eksisteerima kolmas fundamentaaljõud, mis hoiab nukleonid koos.

Kaasaegses kvantprintsiipeidel põhinevas füüsikas kasutatakse jõu mõiste asemel vastastikmõju potentsiaalse energia mõistet, kuna just vastastikmõju potentsiaalne energia kuulub Schrödingeri võrrandi või selle üldistuse koosseisu. See lubab leida süsteemi (aatomituum) olekud ja karakteristikud. Kahest prootonist ja neutronist koosnevat süsteemi võib kirjeldada graafiku kaudu, mis illustreerib süsteemi potentsiaalse energia sõltuvust nukleonidevahelisest kaugusest. Graafikult näeme, et vahekaugusel umbes  $1,9 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  on minimaalsele potentsiaalsele koguenergiale vastava potentsiaaliaugu sügavus suurem kahe prootoni elektrostaatilisest tõukumise potentsiaalsest energiast.  ${}^3_2\text{He}$  tuumas on prootonite ja neutronite seoseenergia 7,72 MeV; seda väärtust võib saada, lähtudes prootoni, neutroni ja heelium-3 tuumade masside väärtustest (vastavalt 1,007276; 1,008665 ja 3,014931 a.m.ü; ühele aatommassiühikule vastab energia 931,5 meV). Valem, mis seob nukleonide seoseenergiat osakeste massidega, on järgmine:



$$E_{\text{сб}} = \Delta m c^2 = [Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_a] \cdot c^2$$

$E_{\text{сб}}$  on tuumanukleonide seoseenergia; see on võrdne tööga, mida tuleb teha tuuma lagunemisel selle koostisse kuuluvateks nukleonideks.  $\Delta m$  – massidefekt, mis iseloomustab summaarse massi vähenemist tuuma moodustumisel vastavatest nukleonidest.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_a,$$

või

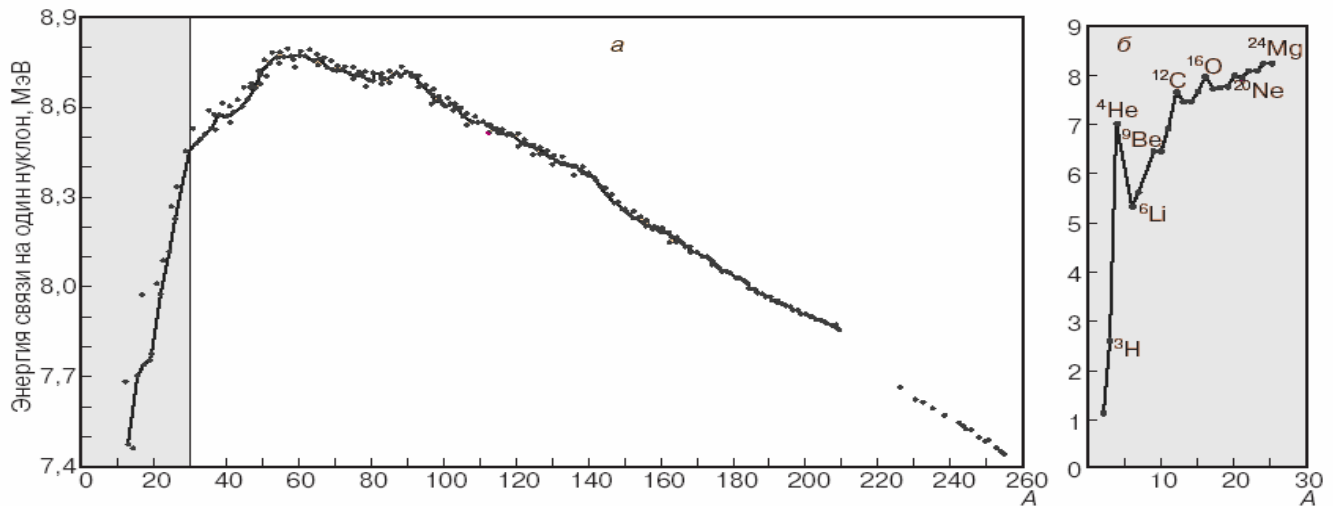
$$\Delta m = Z \cdot m_H + N \cdot m_n - M_a,$$

$M_a$  on aatomituumade mass,  $M_a$  – aatomi mass.

${}^3_2\text{He}$  tuuma jaoks on seoseenergia järgmine:

$$E_{\text{CB}} = [2 \cdot 1,007276 + 0,008665 - 3,014931] \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 7,718 \text{ МэВ}^*$$

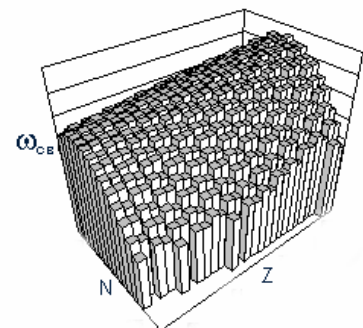
Tuuma eriseoseenergiaks  $\varpi_{\text{CB}}$  nimetatakse seoseenergiat ühe nukleoni kohta:  $\varpi_{\text{CB}} = E_{\text{CB}}/A$ . Joonisel on kujutatud eriseoseenergia sõltuvus massiarvust  $A$ ; see kõver iseloomustab nukleonide seose erinevat tugevust stabiilsete nukliidide tuumades.



Periodilisussüsteemi keskmise osa elementide ( ${}^{28}\text{Si}$  kuni  ${}^{138}\text{Ba}$ ) tuumad on kõige püsivamad; nendes tuumades on eriseoseenergia ligikaudu 8,7 MeV nukleoni kohta. Tuumanukleonide arvu suurenemisel eriseoseenergia väheneb; väikeste massiarvude alas esinevad eriseoseenergia teravad piigid. Maksimumid on iseloomulikud paarisarvulise protonite ja neutronite arvuga tuumadele ( ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ); miinimumid – paarituuravulise protonite ja neutronite arvuga tuumadele ( ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ). Selline seaduspärasus on seletatav tuumajõudude küllastatavusega – iga tuumanukleon interakteerub piiratud lähimate naabernukleonide arvuga; seetõttu on eriseoseenergia sõltuvus nukleonide arvust lineaarne. Praktiliselt täielik tuumajõudude küllastatus saavutatakse  $\alpha$ -osakese ( ${}^4\text{He}$ ) puhul, mis on väga püsiv moodustis.

Tuuma püsivuse määrabki nukleoni seoseenergia. Mida küllastatum on seos ja mida suurem on  $\varpi_{\text{CB}}$  väärtus, seda püsivam on tuum. Vaatleme  $\varpi_{\text{CB}}$  sõltuvust  $N$  ja  $Z$  väärtustest perioodilisussüsteemi keskmise osa elementide jaoks:

Diagrammil on kujutatud eriseoseenergia väärtused tseesiumi (Cs), baariumi (Ba) jne kuni elavhõbeda (Hg) isotoopide jaoks. Suuremate  $\varpi_{\text{CB}}$  väärtustega nukliidid on stabiilsed, nendele on iseloomulik konkreetne neutronite ja protonite arv (vastavalt  $N_{\text{yct}}$  ja  $Z_{\text{yct}}$ ). Mida rohkem erinevad nukliidi  $N$  ja  $Z$  väärtused  $N_{\text{yct}}$  ja  $Z_{\text{yct}}$  väärtustest, seda väiksem on nukliidi eriseoseenergia.

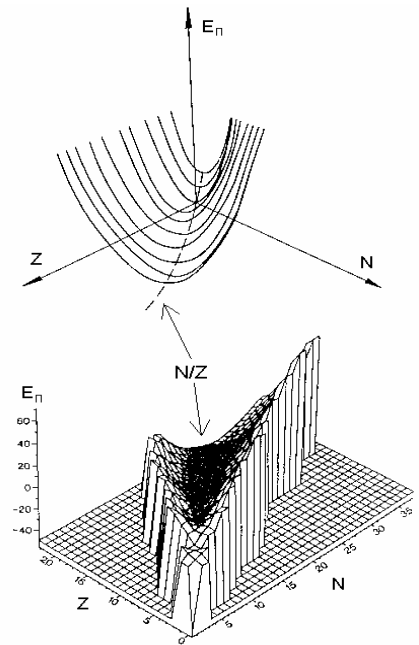


\* Mikrofüsikas kasutatakse energia mõõtühikuna megaelektronvolte, MeV. Kui kasutada massi väärtust kilogrammides ja korrutada see läbi valguse kiiruse ruuduga, saame energia väärtust džaulides (J).  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  ja  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ .

Seoseenergia maksimaalsele väärtusele vastab tuuma potentsiaalse energia ( $E_n$ ) minimaalne väärtus. Tuuma kogueenergia on tingitud nukleonidevahelistest vastastikmõjudest, millest olulisemad on tuumajõud ja elektromagnetilised jõud. Nende jõudude summa panebki paika tuumade stabiilsust või ebastabiilsust – näiteks on aatomituumade stabiilsuse kriteeriumiks prootonite ja neutronite arvu suhe. Tuuma potentsiaalse energia miinimumi tingimus annab meile  $Z_{yct}$  ja  $A$  siduva võrrandi:

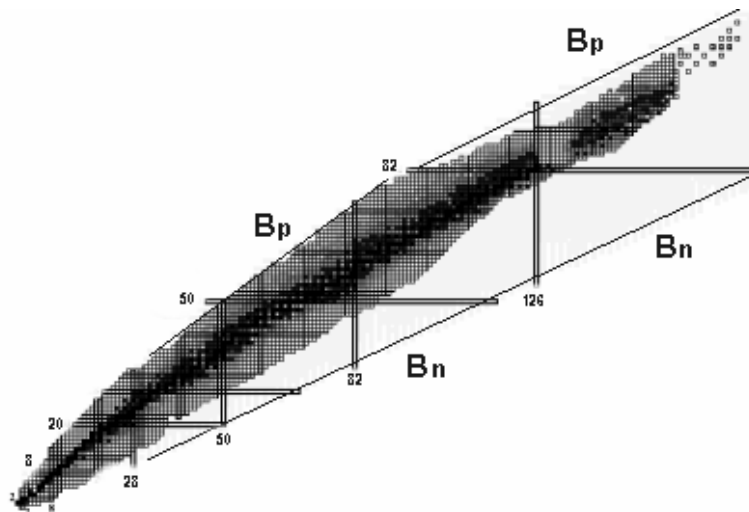
$$Z_{yct} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}$$

Sellest järeldub, et kõikide stabiilsete nukliidide puhul on  $N_{yct} \geq Z_{yct}$ . Suuruse  $N_{yct} / Z_{yct}$  väärtus on kergete tuumade jaoks ligikaudu 1, raskete tuumade jaoks aga umbes 1,6. Väiksema seoseenergiaga nukliidid võivad üle minna püsivamateks, suurema seoseenergiaga nukliidideks. Sellist tuumade muundumist nimetatakse lagunemiseks. Radioaktiivne lagunemine on iseloomulik elementidele, millel on neutronite liig või ülejääk faktori  $N_{yct}/Z_{yct}$  suhtes; Kuna lagunemisprotsessi käigus eraldub energiat, toimub see iseeneslikult. Diagrammilt on näha, kui järsult väheneb seoseenergia eemaldumisel väärtusest  $N_{yct}/Z_{yct}$  (antud isobaari jaoks).



## Nukliidid tuumas

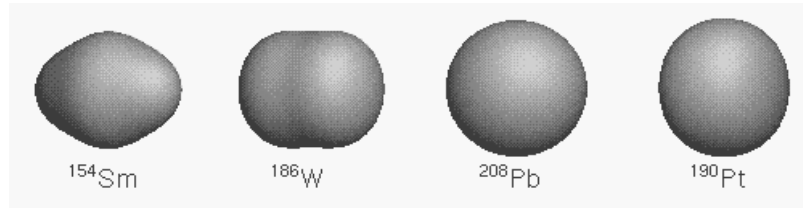
Nukliidide maailmas kehtib veel üks seaduspärasus – kõige püsivamad on paariarvulise prootonite ja neutronite arvuga tuumad. Tõepoolest on deuteerium  $^2\text{H}$  ainuke stabiilne nukliid, milles on paaritu arvu prootoneid ja neutroneid. Seetõttu kujutatakse nukliide tihti diagrammil  $Z/N$ :



Mustade täppidega on tähistatud stabiilsed tuumad; stabiilsete tuumade alast vasakul asuvad prootonite liiaga tuumad, paremal – neutronite liiaga tuumad. Tumedama värviga on tähistatud tänapäeval avastatud aatomituumad. Prootonliiaga tuumad on radioaktiivsed ja muunduvad stabiilseteks tavaliselt  $\beta^+$ -lagunemise teel: tuuma koostisse kuuluv prooton muundub seejuures neutroniks. Neutronliiaga tuumad on samuti radioaktiivsed ja muunduvad stabiilseteks  $\beta^-$ -lagunemise teel: tuumaneutron muutub seejuures prootoniks. Kõik diagrammil kujutatud isotoobid on suuremal või väiksemal määral stabiilsed – tuuma summaarsed jõud hoiavad nukleone koos. Pidev joon piirab ala, milles tuumade eksisteerimine on või-

malik. Joon  $B_p = 0$  ( $B_p$  – prootoni eraldumise energia) piirab vasakpoolset aatomtuumade eksisteerimisala (proton drip-line), joon  $B_n = 0$  ( $B_n$  – neutroni eraldumise energia) piirab sama ala paremalt poolt (neutron drip-line). Väljaspool neid piire ei saa aatomituumad eksisteerida, kuna tuumajõud ei ole võimelised tuumanukleone koos hoidma ja tuum laguneb iseloomuliku tuumaaja jooksul ( $10^{-23}$  s) prootoniteks ja neutroniteks.

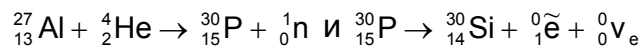
Numbritega on diagrammil tähistatud kõige püsivamatele tuumadele iseloomulikud neutronite ja prootonite arvud. Selliseid numbreid nimetatakse maagilisteks; kõrgendatud aatomtuumade püsivusega teatud “maagiliste” alade olemasolu näitab, et tuumal on keeruline sisestruktuur. Sarnaselt elektronidega aatomis, täidavad ka nukleonid tuumas teatud järjestusega kihte; numbrid 2, 8, 20, 28, 50, 82 ja 126 on maagilised ja määravad tuumades suletud kihte. Maagilist arvu prootoneid ja neutroneid sisaldavad nukliidid alluvad radioaktiivsele lagunemisele kõige halvemini; nendele on iseloomulik tuuma sümmeetriline kuju ( $^{208}_{82}\text{Pb}$ ):



Looduses teadaolevatest on  $^{208}_{82}\text{Pb}$  ja  $^{209}_{83}\text{Bi}$  kõige raskemad stabiilsed nukliidid, need sisaldavad maagilist arvu (126) neutroneid. Plii-208 on seejuures “kahekordselt maagiline”, kuna sisaldab 82 prootoni. Kõik perioodilisustabelis vismutist tagapool asuvad elementide isotoo- bid on ebastabiilsed ja lagunevad, moodustades stabiilseid tuumasid.

## Tuumareaktsioonid ja tuumalagunemiste tüübid

Aatomtuumade muundumisreaktsioonide kirjapilt sarneneb tavaliste keemiliste reaktsioonide võrranditega; elementide sümbolite asemel kirjutatakse reaktsioonis osalevate nukliidide ja elementaarosakeste sümbolid, kusjuures peavad olema täpsustatud tuumalaengud ja massiarvud, näiteks:



Aatomituumade osalusega reaktsioonid alluvad elektrilise laengu jäävuse ja massiarvude jäävuse seadusele, s.t. lähteosakeste ja nukleonide laengute ja massiarvude summa peab olema võrdne reaktsiooni produktide laengute ja massiarvude summaga.

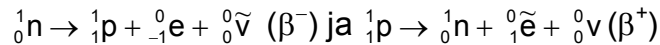
Tuumareaktsioonidesse astuvatest osakekestest tuleb mainida fundamentaalosakeste paari – elektron  ${}_{-1}^0\text{e}$  ja neutriino  ${}^0_0\nu$  –, samas ka antielektroni ehk positroni  ${}^0_1\tilde{\text{e}}$  ja antineutriinot  ${}^0_0\tilde{\nu}$ . Need osakesed tekivad aatomituumade  $\beta$ -lagunemise käigus.

## Beeta-lagunemine ( $\beta$ )

Selle terminiga tähistatakse 3 tuumamuundumistüüpi:

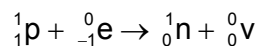
- elektroonne lagunemine ( $\beta^-$ )
- positroonne lagunemine ( $\beta^+$ )
- elektroni haare e. absorptsioon (K-haare)

Esimesed kaks tüüpi seisnevad selles, et tuumast lahkuvad elektron/positron ja elektronantineutriino/elektronneutriino. Need protsessid seisnevad ühe nukleoni muundumises teiseks: neutron muutub prootoniks või vastupidi, vastavalt järgmisele skeemile –



Vaba neutron laguneb sama skeemi kohaselt, poolestusaeg on 898 s. Protoni lagunemiseks on vaja täiendavat energiat, mis on aatomituumas olemas.

K-haarde korral toimub protoni üleminek neutroniks järgmiselt:



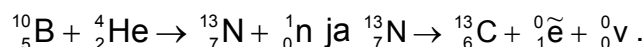
Nimelt võtab reaktsioonist osa üks tuumale lähimal kihil K asuvatest elektronidest. Selle beeta-lagunemise tüüpi iseärasuseks on ainult ühe osakese (neutriino) lahkumine tuumast (neutron jääb tuuma!).

Beeta-lagunemisele alluvad tuumad, mis asuvad v'ljaspool stabiilsuse ala, s.t. neil on prootonite (sel juhul  $\beta^+$ -lagunemine) või neutronite (sel juhul  $\beta^-$ -lagunemine) liig.  $\beta^-$ -radioaktiivselt laguneb näiteks süsinikisotoop  ${}_{6}^{14}\text{C}$ , mis moodustub atmosfääris neutronite (kosmilise kiirguse) mõjul:



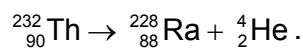
Süsiniku stabiilseteks isotoopideks on  ${}_{6}^{13}\text{C}$  ja  ${}_{6}^{12}\text{C}$ .

$\beta^+$ -radioaktiivne on isotoop  ${}_{7}^{13}\text{N}$ , mis moodustub ühes Päikesel toimuvatest tuumareaktsioonidest:



## Alfa-lagunemine ( $\alpha$ )

Alfa-lagunemine seisneb  $\alpha$ -osakeste ( ${}_{2}^4\text{He}$  tuumade) tekkes mõningate keemiliste elementide tuumade lagunemisel. Alfa-lagunemine on iseloomulik rasketele tuumadele massiarvudega üle 200 ja laengu arvudega üle 82. Nende tuumade sees toimub tuumajõudude küllastatuse saavutamise eesmärgil iseseisvate  $\alpha$ -osakeste teke, iga osake koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist. Moodustunud  $\alpha$ -osake allub tugevatele Culoni jõududele (protonite tõukumine tuumast), samas on tuumajõududest tingitud tuumanukleonide poole tõmbumine väiksem.



## Spontaanne jagunemine (SF)

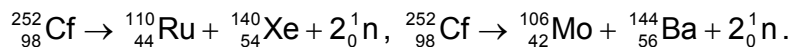
1939.aastal tegid Otto Hahn ja Fritz Strassmann epohhaalse tähtsusega avastuse – uraanituumade lagunemine neutronite mõjul. Just selle avastuse praktilised rakendused on põhjuseks, miks nimetatakse meie ajastut tuumaajastuks.

Neutronite mõjul uraanituumade jagunemise hüpoteesi esitasid O.Frisch ja L.Meitner. Teadlased arvasid, et jagunemisreaktsioonil peaksid olema järgmised omadused:

- 1) Väga suure energiahulga eraldumine (järeljub uraanituumade nukleonide seoseenergia ja kildtuumade energiatega vahet)
- 2) Kildtuumad peavad olema  $\beta$ -radioaktiivsed, lagunemisel võivad tekkida neutronid. See järeljub neutronite ja prootonite arvude suhtest uraanituumas ja kildtuumades:  $(N/Z)_U = 1,6$  ja  $(N/Z)_{kild} = 1,45$ .
- 3) Tuumade kohustusliku jagunemise kõrval (toimub neutronite mõjul, mis toovad tuuma ergastusenergiat) võib uraanil ja teistel tuumadel esineda ka iseeneslik lagunemine.

Üsna varsti tõestati kõik need reaktsiooniomadused eksperimentaalselt O.Hahni, F.Stassmanni, H.Halbani, R.Roberts'i jt töödes, hüpotees ise on teoreetiliselt põhjendatud J.Frenkeli, N.Bohri ja J.Willeri töödes.

Spontaanse jagunemise nähtust avastasid 1940.aastal K.Petrzhak ja G.Flerov. See on raskete nukliidide omadus; näiteks moodustuvad  $^{252}_{98}\text{Cf}$  spontaanse lagunemise tulemusena perioodilisussüsteemi keskmise osa aatomid:



Üldjuhul moodustuvad aatomi spontaansel lagunemisel väiksemate massiarvudega aatomid.

## Ebastabiilsete tuumade lagunemine

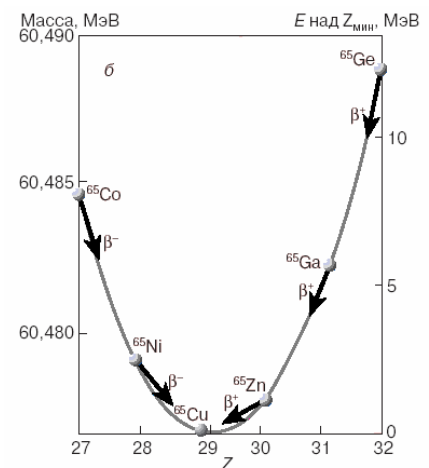
Tuumade seoseenergia määramisel tehti kindlaks, et tuumade vastupidavus radioaktiivse lagunemise suhtes sõltub tuumanukleonide seoseenergiast: tuum on energeetiliselt stabiilne teatud lagunemisliigi suhtes, kui tuuma mass on väiksem antud tuumamuundumisel tekkivate produktide masside summast. Seejuures arvestatakse ka asjaolu, et tuum on keeruline nukleonidest koosnev süsteem, kusjuures nukleonid painuvad teatud järjekorras ja moodustavad suletud kihte.

Radioaktiivse aatomi massi ja lagunemisproduktide summaarse massi vahe on võrdne reaktsiooni energeetilise efektiga  $Q$ :

$$Q = [\sum M_{\text{исх}} - \sum M_{\text{прод}}]c^2, *$$

Kui  $Q < 0$ , toimub reaktsiooni käigus energia neeldumine ja reaktsiooni nimetatakse endotermiliseks; kui  $Q > 0$ , toimub reaktsiooni käigus energia eraldumine ja reaktsiooni nimetatakse eksotermiliseks (NB! reaktsiooni energeetiline efekt on märgilt vastupidine reaktsiooni entalpiamuuduga  $\Delta H$ ). Kõik tuumade lagunemisreaktsioonid on eksotermilised.

Igasuguse energeetiliselt ebapüsiva süsteemi vaatlemisel peab arvestama ka eri protsesside toimumiskiirusi, kuna termodünaamiliselt ebastabiilne süsteem võib üsna kergesti osutada üldiselt stabiilseks. Reaktsiooni energeetilise efekti (soojusefekti) väärtus näitab vaid reaktsiooni kulgemise võimalikkust. Reaktsioonikiirust iseloomustab lagunemiskonstant  $\lambda$ , mis sõltub tuuma kvantmehhaanilistest karakteristikutest (näiteks tuuma potentsiaalse barjääri läbitavusest).



\* tuleb meeles pidada, et 1 a.m.ü = 931,5 MeV

## Radioaktiivse lagunemise kineetika

Aatomituumade lagunemisreaktsioonid on esimest järku reaktsioonid, st radioaktiivsete tuumade arv  $N$  muutub aja jooksul vastavalt radioaktiivse lagunemise seadusele (eksponentsiaalselt):

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

$N_t$  ja  $N_0$  on tuumade arv vastavalt ajahetkel  $T = t$  ja  $T = 0$  соответственно;  $\lambda$  - lagunemise konstant, mis on ekvivalentne radioaktiivse lagunemise ühikkiirusega (ja ka lagunemise tõenäosusega ühikulise aja jooksul):

$$-\frac{dN}{N} \cdot \frac{1}{dt} = \lambda,$$

miinusmärk näitab, et radioaktiivsete tuumade arv  $N$  väheneb ajas. Lagunemiskonstandi ja antud hetkel olemasolevate radioaktiivsete tuumade arvu korrutis on võrdne lagunemise kiirusega ( $a$ ):

$$a = -\frac{dN}{dt} = \lambda N,$$

Lagunemise kiirust nimetatakse aktiivsuseks. Radioaktiivse aine aktiivsus muutub ajas sarnaselt radioaktiivse aine hulgaga:

$$a_t = a_0 e^{-\lambda t}.$$

Graafikul on kujutatud radioaktiivse  ${}^{242}_{95}\text{Am}$  massi muutumine. On näha, et teatud aja jooksul ( $T_{1/2} = 16,02$  h) väheneb  ${}^{242}_{95}\text{Am}$  mass täpselt poole võrra; seda aega nimetatakse poolestusajaks. Radioaktiivse lagunemise seaduse põhjal leiame poolestusaja seost lagunemiskonstandiga:

$$N_{T_{1/2}} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \ln \frac{N_{T_{1/2}}}{N_0} = -\lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow \ln \frac{N_0}{N_{T_{1/2}}} = \lambda \cdot T_{1/2},$$

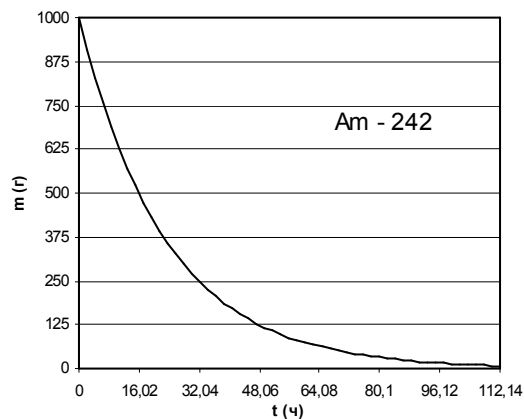
Kuna poolestusaeg on defineeritud kui aeg, mille jooksul radioaktiivse aine hulk (mass, aktiivsus) väheneb täpselt poole võrra, siis:

$$\ln 2 = \lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \approx \frac{0,693}{T_{1/2}},$$

Poolestusaja kõrval eksisteerib veel üks suurus -  $\tau$ , mis iseloomustab radioaktiivse nukliidi keskmist eksisteerimisaega (eluaega):

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \approx 1,44 T_{1/2}.$$

Teades poolestusaja, keskmise eluaja või lagunemiskonstandi väärtust, võime hinnata tuuma püsivust lagunemise suhtes. Stabiilseteks võib nimetada näiteks looduses levinud nukliide - need on säilunud meie planeedi tekkemomendist ning nende poolestusajad on suuremad kui  $1,5 \cdot 10^{16}$  s. Ka need nukliidid on loomulikult radioaktiivsed – näiteks  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{87}\text{Rb}$ ,  ${}^{115}\text{In}$ ,  ${}^{138}\text{La}$ ,  ${}^{147}\text{Sm}$ ,  ${}^{175}\text{Lu}$ ,  ${}^{187}\text{Re}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$  ja mõned muud. Teised nukliidid, mis on saadud tuumasünteeside käigus, on kunstlikult radioaktiivsed.



## Soovitatavad allikad Internetis:

<http://www.lbl.gov/abc/wallchart/index.html>

<http://www.lbl.gov/abc/Contents.html#experiment>

<http://ie.lbl.gov/toi.htm>

<http://nuclphys.npi.msu.su/np/>