



# TUUMAFÜÜSIKA

1989

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

Füüsikaosakond

---

# TUUMAFÜÜSIKA

Koostanud O.Mankin,  
toimetanud ja täiendanud J.Lembra

---

TARTU 1989

Kinnitatud füüsika-keemiateaduskonna nõukogus 16.detsembril 1987. a.

Väljaanne on mõeldud mittefüüsika eriala üliõpilastele.

## 1. Elementaarosakesed

### 1.1. Elementaarosakeste karakteristikud ja liigitus

Elementaarosakesteks nimetatakse mikroosakesi<sup>\*</sup>, mis võtavad kõigist tänapäeval tuntud füüsilistest protsessidest osa jagamatu tervikuna. Nende iseloomulikuks omaduseks on võime muunduda ühest teiseks, seega ei saa vaadelda neid püsivate "telistena", millest on ehitatud meile tuntud maailm. Elementaarosakeste peamisteks karakteristikuteks on mass, elektrilaeng, spinn ja keskmine eluiga.

Rääkides elementaarosakeste massist, mõeldakse nende seisumassi, s.o. massi tingimusel, et osakese kiirus  $v = 0$ . Kui  $v \neq 0$ , on osakese mass

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

kus  $m_0$  on seisumass ning  $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s on valguse levimise kiirus vaakumis.

Elementaarosakeste massi mõõtmisel kasutatakse sageli üldtuntud aatommassiühikut (a.m.ü.). 1 a.m.ü. on  $1/12$  süsiniku isotoobi  $^{12}_6\text{C}$  aatomi massist. 1 a.m.ü.  $= 1,661 \cdot 10^{-27}$  kg. Vahel kasutatakse elementaarosakeste massi avaldamiseks elektroni massi  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  kg. Nii avaldatuna on näiteks prootoni mass  $m_p = 1836 m_e$ .

Elementaarosakeste mõõtmed on suurusjärgus  $10^{-15}$  m. Seda suurust kasutatakse elementaarosakeste- ja tuumafüüsikas f e r m i nime all (SI-s 1 femtomeeter (fm)  $= 10^{-15}$  m).

---

\* Mikroosakeste all mõistetakse kvantmehaanikale alluvaid aineosakesi: molekule, ioone, aatomeid, aatomituumi või elementaarosakesi.

Elektrilaengu poolest võivad elementaarosakesed olla kas positiivset või negatiivset laengut kandvad või neutraalsed. Elementaarosakese elektrilaengu mõõtmisel tarvita-takse tavaliselt ühikuna elementaarlaengut  $e = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{C}^*$ . Nii näiteks on elektroni laeng  $-e$ , prootoni laeng  $+e$ . Enamasti on elementaarosakese laeng  $+e$  või  $-e$ , kuid mõne ele-mentaarosakese elektrilaeng on isegi  $e$  täiskorne. Siiski ei ole kaasaja teadmiste tasemel elektrilaeng  $e$  absoluut-väärtuse poolest väikseim laeng (vt. p. 1.8).

S p i n n i k s nimetatakse elementaarosakese impul-simomenti, mis pole seotud osakese kui terviku liikumisega. See on vektor, mille absoluutväärtus võrdub  $\frac{h}{2\pi} \sqrt{s(s+1)}$ , kus  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  on Plancki<sup>\*\*\*</sup> konstant ja  $s - s p i n n k v a n t a r v$ , mis võib omada väärtusi 0, 1/2, 1, 3/2, 2, ... Mõnedel spinni omavatel elementaarosakestel on ka spinnmagnetmoment. Niisugused osakesed käituvad väli-ses magnetväljas nagu väikesed magnetid, s.o. pöörduvad ja võtavad välja suhtes vastava asendi. Osakesed klassifitseeritakse nende spinni väärtuse järgi. Niisugune klassifikat-sioon on vajalik seepärast, et spinni väärtus määrab osa-keste käitumise enesesarnaste osakeste kogus, s.o. määrab osakeste statistika. On olemas kahte tüüpi statistikaid: need on Fermi-Diraci<sup>\*\*\*</sup> ja Bose-Einsteini statistika<sup>\*\*\*\*\*</sup>.

Kõik osakesed, millel on pooltäisarvuline spinnkvant-arv  $s$ , alluvad Fermi-Diraci statistikale ning neid nime-

\* Väikseima elektrilaengu olemasolu tõestas teoreetiliselt klassikalise füüsika järgi 1881.a. saksa teadlane Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz (1821-1894), eksperimentaalselt määras selle 1909.a. ameerika füüsik Robert Andrews Millikan (millikøn) (1868-1953).

\*\*\* Max Planck (1858-1947), saksa füüsik.

\*\*\*\* Enrico Fermi (1901-1954), itaalia füüsik; Paul Dirac (1902-1984), inglise füüsik.

\*\*\*\*\* Jagadis Chandra Bose (bo:s) (1898-1957), india füüsik; Albert Einstein (1879-1955), saksa füüsik.

tatakse fermionideks. Sellesse rühma kuuluvad näiteks elektron, prooton ja neutron. Fermionide puhul kehtib Pauli<sup>¶</sup> printsiip, mille järgi mingis süsteemis (aatomis, molekulis, kristallis) ühesuguseid osakesi ei saa ühes kvantolekus olla korraga rohkem kui üks. Võiks öelda, et fermionial ei okupeeri seda kohta, kus teine sarnane osake ees on.

Kõik osakesed, millel on täisarvuline spinkvantarv, alluvad Bose-Einsteini statistikale ning neid nimetatakse bosoniteks. Sellesse rühma kuuluvad näiteks fotonid. Bosonite arv antud olekus võib olla suvaline. Seejuures foton kiiratakse seda suurema tõenäosusega, mida rohkem fotoneid antud olekus juba on.

Elementaarosakeste liikumiskiirused on võrreldavad valguse levimise kiirusega. Seepärast kasutataksegi valguse kiirust vaakumis omamoodi mastaabiks nende kiiruste mõttmisel.

Elementaarosakeste energia mõttmisel kasutatakse sageli ühikuna elektronvolti (eV). 1 eV on energia, mille saavutab elektron, kui ta läbib elektriväljas potentsiaalide vahe üks volt. Seega  $1 \text{ eV} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Elementaarosakesi energiaga kuni  $10^9 \text{ eV}$  loetakse keskmise energiaga osakesteks, üle selle on juba suure energiaga osakesed.

Eluea poolest jagatakse elementaarosakesed stabiilseteks ja mittestabiilseteks. Stabiilsetest osakestest on üldtuntumad foton, elektron ja prooton. Enamus elementaarosakesi laguneb spontaanselt, teatud aja jooksul, mis võib olla väga erinev ( $10^3 \text{ s} - 10^{-24} \text{ s}$ ). Lagunemise tulemuseks on teised elementaarosakesed, nii mittestabiilsed kui ka stabiilsed. Kuid ei saa oletada, et mittestabiilsed osakesed koosnevad stabiilsetest osakestest ning seda kas või ainult sellepärast, et üks ja seesama osake võib laguneda erineval viisil.

Kui arvestada ka eriti lühikese elueaga ( $10^{-24} \text{ s}$ ) osakesi, nn. resonantsosakesi, siis on nüüdisajal tuntud elementaarosakeste arv väga suur (koos antiosakestega üle 350).

---

<sup>¶</sup> Wolfgang Pauli (1900 - 1958), Šveitsi füüsik.

Peaaegu kõikidele elementaarosakestele vastab antiosake, millel on samasugune mass, spinn ja eluiga nagu antud osakesel, kuid millel elektrilaeng ja teised laengutüüpi suurused on võrdvastupidised. Näiteks, kui elektroni elektrilaeng on  $-e$ , siis tema antiosakesel positronil on see  $+e$ .

Elementaarosakeste omavahelistel põrkumistel toimuvad nende muundumised, mille tulemusena tekib uusi osakesi. Kõik need muundumised toimuvad aga rangelt kõiki jäävusseadusi arvestades.

Vaatleme edasises mõningate elementaarosakeste omadusi.

### 1.2. Footon

Footon on elektromagnetvälja energiat kandev neutraalne elementaarosake, mille seisumass on null (ta eksiteerib vaid valguse kiirusega liikudes) ning spinnkvantarv  $s = 1$ . Footonit nimetatakse ka kvandiks (üldnimetuseks gammakvant, vahel kasutatakse nähtava valguse puhul ka nimetust valguskvant). Õigem oleks nimetuse kvant all mõista footoni energiat  $\varepsilon = h\nu$ , kus  $h$  on Plancki konstant ning  $\nu$  vastava monokromaatilise elektromagnetlaine sagedus. Footoni impulss  $p = mc = \frac{h\nu}{c}$ , kus  $m$  on tema liikumismass ning  $c$  valguse kiirus vaakumis. Footonid, mille energia ületab 1,02 MeV, võivad teatud tingimustes muunduda elektroni-positronipaariks. Selle nähtuse avastasid 1933.a. abielupaar Joliot-Curie<sup>32</sup> ja Anderson<sup>33</sup>. Samal ajal avastati ka vastupidine nähtus, milles kaks osakest - elektron ja positron - kohtudes hävivad (annihileeruvad) ning nende asemele tekib tavaliselt kaks (vahel ka kolm) footonit. Nähtuse avastasid F. Joliot-Curie ja J. Thibaud<sup>34</sup>.

### 1.3. Elektron

Elektron (tähis  $e^-$ ) on negatiivset elementaarlaengut

---

<sup>32</sup> Irène Joliot-Curie (1897-1956) ja Frédéric Joliot-Curie (1900-1958), prantsuse füüsikud.

<sup>33</sup> Carl David Anderson (s. 1905), ameerika füüsik.

<sup>34</sup> Jean Thibaud (1901-1961), prantsuse füüsik.

kandev stabiilne elementaarosake, mille mass  $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$  kg ning spinnkvantarv  $s = 1/2$ . Elektron on üks aine põhilisi struktuurielemente. Elektronid kuuluvad kõigi aatomite koosseisu, moodustades aatomituuma ümbritseva elektronkatte. Aatomite elektronkatted määravad aatomite ja molekulide optilised, elektrilised ja keemilised omadused ning samuti ka enamuse tahkete kehade omadustest. Vabad elektronid võivad tekkida fotoemissiooni, termoemissiooni, beetalagunemise (vt. p.3.2) või elektroni-positronipaari tekke tulemusena.

Loomulikes tingimustes (beetakiired) ning ka kunstlikes protsessides, kus elektronkimbud rakendamist leiavad, liiguvad elektronid valguse kiirusele lähedaste kiirustega. Elektroni energia beetakiirguses võib ulatuda kuni suurusjärguni 1 MeV.

Elementaarosakese nimetus "elektron" on kasutusel aastast 1891.

#### 1.4. Positron

Positron (tähis  $e^+$ ) on elektroni antiosake, ta on positiivse elementaarlaenguga stabiilne osake, millel on samaugune mass ja spinn kui elektronil. Positron tekib koos elektroniga footoni muundumisel elektroni-positronipaariks või raskemate elementaarosakeste lagunemisel ja tehisradioaktiivsete ainete beetakiirgusena. Positron on küll stabiilne osake, kuid tavalises aines tema eksisteerimisaeg on väike, ta hävib kohtudes elektroniga ning selle tagajärjel tekib kaks  $\gamma$ -footonit.

Positroni olemasolu ennustas 1928.aastal Dirac. Avastas positroni kosmilises kiirguses ameerika füüsik C.D. Anderson 1932.aastal.

#### 1.5. Prooton

Prooton (tähisega p) on positiivse elementaarlaenguga stabiilne elementaarosake, mille mass on 1836 korda suurem elektroni massist ning spinnkvantarv  $1/2$ . Ta on vesinikuatomi kerge isotoobi tuumaks ning koos neutroniga aatomituuma koostisosake. Prootonite arvu aatomituumas nimetatakse selle atomi (elemendi) laenguarvuks. Osake sai oma nimetuse 1908.a.



vesinikuaatomi tuumena. Protoni efektiivne raadius on  $0,8 \cdot 10^{-15}$  m ning tal on elektromagnetiline struktuur. Kaks viimast fakti tegi kindlaks 1958.a. Hofstadter.<sup>Ⓜ</sup>

### 1.6. Neutron

Neutron (tähis n) on neutraalne (elektrilaenguta) elementaarosake, mille mass on veidi (2,5 elektroni massi võrra) suurem protoni massist (1838,6 elektroni massi) ning spinnkvantarv  $1/2$ . Vaba neutron on ebastabiilne osake keskmise elueaga umbes  $10^3$  s. Ta laguneb spontaanselt protoniks ja elektroniks (peale selle tekib veel kolmas osake - antineutriino).

Koos protoniga moodustavad neutronid kõik aatomituumad. Protoneid ja neutroneid kui tuuma koostisosakesi nimetatakse ühisnimetusega nukleonideks. Tuumajõudude uurimisel avastati elementaarosakese intensiivne vastastikmõju, mida hakati nimetama tugevaks interaktsiooniks. Niisiis nukleon on tugevas interaktsioonis osaleva osakese näide.

Stabiilses tuumas on protonite ja neutronite vahel liikuv tasakaal (toimub pidevalt ühtede muundumine teisteks), seega neutronite arv tuumas ei muutu. Seepärast loetakse tuuma neutronit stabiilseks. See on näiv stabiilsus.

Neutroni avastas 1932.a. Chadwick<sup>ⓂⓂ</sup>. 1955.a. avastas Hofstadter neutroni elektromagnetilise struktuuri ja määras tema efektiivse raadiuse, mis osutus sama suureks kui protoni oma ( $0,8 \cdot 10^{-15}$  m). Tuntud on ka neutroni antiosake antineutron.

### 1.7. Neutriino

Neutriino (tähis  $\bar{\nu}$ ) on väikese massiga<sup>ⓂⓂⓂ</sup> elektriliselt neutraalne osake, mille spinnkvantarv on  $1/2$ . Neutriino omapära on selles, et tema vastastikmõju ülejäänud

---

<sup>Ⓜ</sup> Robert Hofstadter (s. 1915), ameerika füüsik.

<sup>ⓂⓂ</sup> James Chadwick (tšaduik) (1891-1974), inglise füüsik.

<sup>ⓂⓂⓂ</sup> Neutriino massi arvatakse olevat mitte üle  $1/10\ 000$  elektroni massist.

osakestega toimub väga väikese intensiivsusega. Sellist vastastikmõju nimetatakse  $n\bar{0}rgaks$   $interaktsioo$   $oniks$ <sup>\*</sup>. Siiski eristatakse neutriinot ja antineutriinot. On eksperimendiandmeid, mis vihjavad sellele, et neutraalne osake, mis kiirgub nõrgas interaktsioonis koos positronega, erineb neutraalsest osakesest, mis kiirgub koos elektroniga. Eristamise eesmärgil kasutatakse esimesel juhul terminit "neutriino" ( $\nu$ ), teisel - "antineutriino" ( $\bar{\nu}$ ).

Neutriino olemasolu hüpoteesi püstitas 1930. aastal Pauli seoses radioaktiivse beetalagunemise uurimisega. Nimetus "neutriino" pärineb Fermilt aastast 1932 ja tähendab piltlikult "väikest neutronit".

### 1.8. Kvargid

1964. a. püstitasid M. Gell-Mann<sup>\*\*\*</sup> ja G. Zweig<sup>\*\*\*</sup> hüpoteesi, mille järgi peaksid eksisteerima osakesed elektrilaengu väärtusega  $+e/3$  ja  $-e/3$  ning  $+2e/3$  ja  $-2e/3$ . Neid osakesi hakati nimetama  $kvarkideks$ . Teoreetilise seisukoha järgi peavad proton, neutron ja teised tugevas interaktsioonis osalevad osakesed koosnema kvarkidest. Seni kvarkide vabas olekus ei ole avastatud. Küll on aga kaalukaid eksperimentaalseid fakte, mis näitavad kvarkide eksisteerimist nukleoni sees. Piltliku ettekujutuse järgi meenutavad taolised eksperimendid mõneti Rutherfordi klassikalist katset, milles aatomeid  $\alpha$ -osakestega pommitades tehti kindlaks tuuma olemasolu. Kvarkide otsinguil uuriti suure energiaga elektronide hajumist protonitel. Elektronid olid selles katses samas rollis nagu  $\alpha$ -osakesed Rutherfordi katses. Eksperimendi tulemuste analüüs näitas kolme kvargi olemasolu protoni koosseisus.

---

\* Seega tuleb elementaarosakeste juhul arvestada kolme vastastikmõju: tugev interaktsioon, elektromagnetinteraktsioon ja nõrk interaktsioon. Terminoloogia on koostatud põhimõttel, et interaktsiooni loetakse seda tugevamaks, mida kiiremini ta toimub.

\*\*\* Murray Gell-Mann (s.1929), ameerika füüsik.

\*\*\* Georg Zweig (s.1937), ameerika füüsik.

## 2. Aatomituum

### 2.1. Aatomituuma koosseis. Isotoobid

Aatomituumade koostise kindlakstegemine sai võimalikuks pärast neutroni avastamist 1932.aastal. Samal aastal püstitaski Ivanenko\* üheaegselt Heisenbergiga\*\*\* hüpoteesi, et aatomituumad koosnevad prootonitest ja neutronitest. Kui tähistada tähega  $Z$  mingi elemendi  $X$  järjenumbrit elementide perioodilisuse süsteemis ning tähega  $A$  elemendi massiarvu, s.o. prootonite arvu ja neutronite arvu summat (niisuguses tähistuses kirjutame elementi  $X$  järgmisel kujul  ${}^A_ZX$ ), siis sisaldab tuum  $Z$  prootonit ja  $A - Z$  neutronit.

Arv  $Z$  määrab seega tuuma positiivse elektrilaengu elementaarlaengutes. Massiarv  $A$  on aatommassile (avaldatud a.m.ü.-s) kõige lähedasem täisarv.

On selgunud, et ühe ja sama elemendi aatomite massid võivad olla erinevad. Neid erineva aatommassiga sama aine aatomeid hakati nimetama selle elemendi i s o t o o p i d e k s. Isotoopide aatomituumad erinevad neutronite arvu poolest. Isotoopide olemasolu seletab paljude elementide keskmise aatommassi tunduvat erinevust täisarvust.\*\*\* Nii näiteks on kloori (Cl) keskmine aatommass 35,46, mis seletubki sellega, et see element koosneb kahest isotoobist  ${}^{35}\text{Cl}$  ja  ${}^{37}\text{Cl}$ . Argoon (Ar) koosneb kolmest isotoobist: 17

---

\* Dmitri Ivanenko (s. 1904), vene nõukogude füüsik.

\*\*\* Werner Karl Heisenberg (1901-1976), saksa füüsik.

\*\*\* Elementide perioodilisuse süsteemis on aatommassid avaldatud aatommassi ühikutes ning prootoni ja neutroni massid on väga lähedased aatommassi ühikule, seega peaks aatommassid avalduma täisarvudega.

$^{36}_{18}\text{Ar}$ ,  $^{38}_{18}\text{Ar}$  ja  $^{40}_{18}\text{Ar}$ , tema keskmine aatommass on 39,9.

Huvitav on märkida, et kõikide elementide puhul, millel on mitu stabiilset isotoopi, on nende isotoopide protsentuaalne suhe kõikides seda elementi sisaldavates keemilistes ühendites ühesugune. Nii näiteks on kõikides ühendites magneesiumi  $^{24}_{12}\text{Mg}$  sisaldus 78,6 %,  $^{25}_{12}\text{Mg}$  - 10,1 % ja  $^{26}_{12}\text{Mg}$  - 11,3 %.

Tänapäeval tuntakse üle 2000 kõikide elementide isotoobi. Paljud nendest on ebastabiilsed ja neid looduses ei leidu. Kuid ka stabiilsete isotoopide arv on suur. Paarisnumbritega elementidel on isotoopide arv suurem kui paaritunumbriga elementidel, nii on  $^{42}\text{Mo}$ -,  $^{80}\text{Hg}$ - ja  $^{56}\text{Ba}$ -l 7 stabiilset isotoopi,  $^{48}\text{Cd}$ -l on neid 8,  $^{50}\text{Sn}$ -l - 10. Paaritunumbriga elementidel on tavaliselt ainult kaks ja mõnel isegi ainult üks stabiilne isotoop, niisugused on  $^{11}\text{Na}$ ,  $^{13}\text{Al}$ ,  $^{15}\text{P}$ ,  $^{27}\text{Co}$ .\*

Ühe ja sama elemendi isotoobid on ühesuguste keemiliste omadustega (erinevus on füüsikalistes omadustes), mistõttu nende eraldamine pole sugugi kerge ülesanne. Sageli kasutatakse isotoopide eraldamiseks difusioonil põhinevaid protsesse, sest erineva massiga osakesed difundeeruvad erineva kiirusega.

Sama elemendi isotoobid erinevad füüsikaliste omaduste poolest. Erinevad omadused on ka ainetel, mille koosseisu üks või teine antud elemendi isotoop kuulub. Eriti märgatavad on need erinevused kergete elementide puhul. Vaatleme näitena tavalist (kerget) ja rasket vesinikku ning vastavalt tavalist ja rasket vett.

Tavalise vesiniku (prootiumi) aatomi tuumaks on üksainus prooton, seega tema massiarv 1 ning tähiseks  $^1\text{H}$ . See on vesiniku stabiilne isotoop. Raske vesiniku (deuteeriumi)

---

\* Sageli omavad naaberelemendid perioodilisuse süsteemis ühesuguseid massiarve, näiteks tuntakse  $^{13}_6\text{C}$  ja  $^{13}_7\text{N}$ ,  $^{15}_7\text{N}$  ja  $^{16}_7\text{N}$  ning  $^{15}_8\text{O}$  ja  $^{16}_8\text{O}$ ,  $^{70}_{30}\text{Zn}$ ,  $^{70}_{31}\text{Ga}$  ja  $^{70}_{32}\text{Ge}$  ning veel teisigi. Niisuguseid sama massiarvuga, kuid erinevate elementide aatomeid nimetatakse i s o b a a r i d e k's.

tuum sisaldab lisaks ühele prootonile veel ühte neutronit (massiarv 2, tähis  ${}^2_1\text{H}$  ehk  ${}^2_1\text{D}$ ). Need on vesiniku stabiilsed isotoobid ja looduses on esimest nendest 99,986 % ning teist 0,014 %.

Peale nende kahe tuntakse veel üliharakat vesinikku (tritiumi), mille tuum koosneb ühest prootonist ja kahest neutronist ( ${}^3_1\text{H}$  ehk  ${}^3_1\text{T}$ ). See isotoop on ebastabiilne (poolestusajaga 12,62 aastat) ning looduses ei esine.

Looduslik vesi sisaldab 99,98 % kerget ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ning 0,02% rasket ( $\text{D}_2\text{O}$ ) vett. Raske vee omadused on tunduvalt erinevad kerge vee omadustest, milles võib veenduda alljärgnevat tabelit vaadeldes.

Tabel 2.1

Omadus	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{D}_2\text{O}$
Tihedus 20 °C juures ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,9982	1,1056
Suurim tihedus	3,98 °C juures	11,6 °C juures
Sulamistemperatuur normaalrõhul	0 °C	+3,82 °C
Keemistemperatuur normaalrõhul	100 °C	101,4 °C
Sisehõõrdetegur 20 °C juures (SI-ühikutes)	$1,006 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Pindpinevustegur 20 °C juures (SI-ühikutes)	$7,38 \cdot 10^{-2}$	$7,28 \cdot 10^{-2}$

Peale selle on teada veelgi mõned raske vee eriomadused. Nii näiteks hukuvad raske vee mikroorganismid kiiresti. Vee elektrolüütilisel lagundamisel laguneb kerge vesi, seega rikastub järelejäänud vesi tema raske komponendiga. Seda võtet võib kasutada raske vee saamiseks.

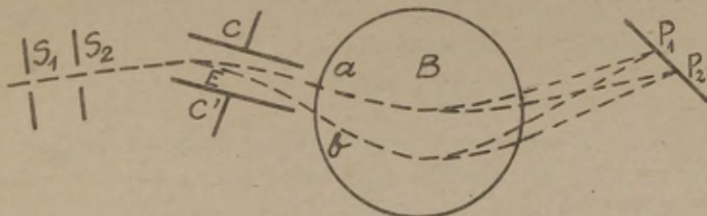
## 2.2. Isotoopide uurimine massispektrograafi abil

Massispektrograafia menetlus võimaldab eraldada ja võrrelda osakesi massi poolest, kui nad esinevad elektriliselt laetult, s.o. ioonide kujul.

Vaatleme siin 1919.a. Astoni<sup>\*</sup> poolt ehitatud massispekt-

<sup>\*</sup> Francis William Aston (1877-1945), inglise füüsik.

roograafi töö põhimõtet. Massispektrograafi töö on rajatud laetud osakeste kõrvalekaldumisele elektri- ja magnetväljas. Riista põhimõtteline skeem on kujutatud joonisel 2:1.



Joon. 2:1.

Joonise tasapinnaga risti olevate paralleelsete pilude  $S_1$  ja  $S_2$  abil tekitatakse laetud osakeste kimp. Selles kimpus on osakesi erinevate erilaengutega  $q/m$  ning ka erinevate kiirustega  $v_0$ . See kimp satub laetud kondensaatorisse  $CC'$ , milles on homogeenne elektriväli tugevusega  $E$ . Osakesed sisenevad elektrivälja, liikudes risti välja suunaga. Elektriväli mõjutab osakesi väljasihilise jõuga  $F_e = qE$ , mis annab nendele kiirenduse

$$a = \frac{F_e}{m} = \frac{qE}{m}.$$

Nii on osakeste kiirendus sõltuv ainult erilaengust  $q/m$ , seega kõikidel sama erilaenguga osakestel ühesugune. Küll aga on erinev osakeste elektriväljas viibimise aeg

$$t = \frac{l}{v_0},$$

kus  $l$  on kondensaatori plaatide ulatus osakeste liikumise sihis. Nii on eri kiirustega osakestele jõu  $F_e$  mõjumise aeg erinev ning seega kalduvad nad elektriväljas oma esialgsest suunast kõrvale erineval määral. Nende nihe elektrivälja sihis

$$s = \frac{at^2}{2} = \frac{qE}{2m} \cdot \frac{l^2}{v_0^2}. \quad (2.1)$$

Siit nähtub, et kõige enam kalduvad kõrvale kõige väiksema

kiirusega osakesed (joonisel 2:1 kimbu alumine serv b) ning kõige vähem kõige kiiremad osakesed (kimbu ülemine serv a). Nüüd satub see laienuenud osakestekimp magnetvälja induktsiooniga B, mis on risti joonise tasapinnaga punktiirjoonega piiratud alal ning niisuguse suunaga, et ta kallutab osakesi vastupidises suunas, võrreldes eelmise kallutusega elektriväljas. Magnetväli mõjutab osakesi jõuga

$$F_m = Bqv. \text{ *}$$

Selle jõu mõjul hakkavad osakesed liikuma mööda ringjooni raadiusega R, mille väärtuse saamiseks arvestame, et jõud  $F_m$  on kesktõmbejõuks, mis selle ringliikumise esile kutsub:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R},$$

millest

$$R = \frac{mv}{Bq}. \quad (2.2)$$

Siit näeme, et osakeste trajektoori raadius magnetväljas on jälle määratud nende kiirusega v ning kõige enam kallutab väli osakesi, mille kiirus on kõige väiksem.

Kõige ülalkirjeldatu tulemusena lõikuvad pärast magnetvälja läbimist kõikide ühesuguse erilaenguga osakeste trajektoorid ühes punktis. Et aga mõlemad väljad kallutavad osakesi sõltuvalt nende erilaengust vt. (2.1) ja (2.2), siis fokuseeruvad erineva erilaenguga osakesed eri kohtades ( $P_1, P_2, \dots$ , joonisel 2:1). Arvutused näitavad, et need punktid paiknevad ligiläudu ühel sirgel. Kui sellesse kohta asetada näiteks fotoplaat, tekib sellel rida jooni (pilu kujutisi), mis moodustavad omamoodi spektri, kus igale joonele vastab osakese erilaengu ( $q/m$ ) mingi üks väärtus. Kui osakesed on kõik ühesuguse laenguga q, (näiteks  $q = e$ ), siis vastavad spektri jooned osakeste erinevatele massidele. Nii saab määrata kimbus sisalduvate osakeste masse.

Kirjeldatud meetodit kasutatakse isotoopide määside uurimiseks.

\* Siin osakese kiirus v pole küll enam tema esialgne kiirus  $v_0$ , kuid ta erineb sellest vähe, sest elektriväljas juurde tulnud väljasihiline komponent on võrreldes  $v_0$ -ga väike.

### 2.3. Massidefekt. Seoseenergia. Tuumade stabiilsus

Aatomi  ${}^A_ZX$  tuum koosneb  $Z$  prootonist (massiga  $m_p$ ) ning  $A-Z$  neutronist (massiga  $m_n$ ), kuid tuuma kogumass  $m_x$  ei ole võrdne prootonite ja neutronite masside summaga, vaid on viimasest veidi väiksem:

$$Z m_p + (A-Z) m_n > m_x.$$

Masside vahet

$$\Delta m = Z m_p + (A-Z) m_n - m_x$$

nimetatakse **massidefektiks**. Nii on igale tuumale iseloomulik massidefekt  $\Delta m$ .

Relatiivsusteooria määrab massi ja energia vahelise seose valemiga

$$\Delta W = \Delta m \cdot c^2,$$

kus  $c$  on valguse kiirus vaakumis. Järelikult mõõdab massidefekt  $\Delta m$  energiahulka, mis tekib selle tuuma moodustumisel prootonitest ja neutronitest. Seda energiat nimetatakse tuuma **seoseenergiaks**.

Tuumade seoseenergiat ühe nukleoni kohta

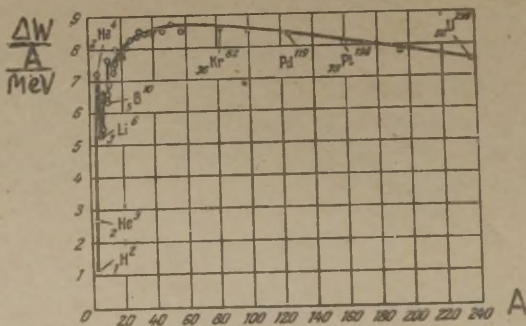
$$f = \frac{\Delta W}{A}$$

nimetatakse **tuuma eriseoseenergiaks**. Enamikul tuumadel on  $f \approx 8,5$  MeV. Kui võrrelda seda energiat keemilistes reaktsioonides vabaneva energiaga (2-3 eV ühe akti kohta), saab mõista, milliste energiahulkadega on tegemist tuuma muundumisel tuumareaktsioonides.

Tuumade stabiilsus on otseses seoses mitte seoseenergiaga, vaid eriseoseenergiaga. Mida suurem on eriseoseenergia, seda stabiilsem on aatomituum. Joonisel 2:2 on näidatud eriseoseenergia  $f$  sõltuvus tuuma massiarvust  $A$ .

Jooniselt näeme, et kõige stabiilsemad on keskmise raskusega tuumad. Kui toimub raskete tuumade muundumine keskmise raskusega tuumadeks (niisugust nähtust nimetatakse lõhustumiseks), siis protsess kulgeb eriseoseenergia kasvu





Joon. 2:2.

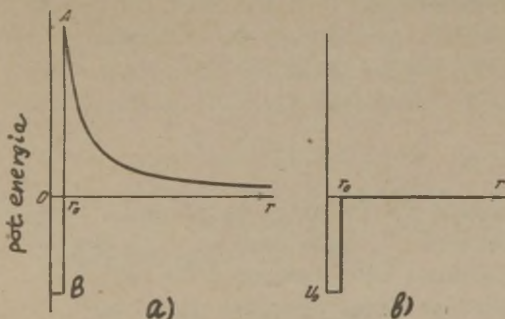
suunas, s.o. stabiilsuse suunas. Niisiis raskete tuumade lõhustumisel vabaneb energia. See asjaolu on tuumareaktori tööprintsibi teoreetiliseks aluseks (vt. p. 7). Kui uurida joonist 2:2 väikestest massiarvudest lähtudes, siis massiarvu suurenemisel ilmneb eriseoseenergia kasvu tendents. Niisiis sünteesireaktsioonidel peaks reeglina vabanema energia. Seda asjaolu kasutatakse termotuumareaktsioonide teostamisel (vt. p. 9).

#### 2.4. Tuumajõud

Kuna aatomituumad koosnevad positiivselt laetud prootonitest ja laenguta osakekestest - neutronitest, siis on arusaadav, et neid osakesi liitvateks jõududeks ei saa olla elektrostaatilised jõud. Vastupidi, prootonite vahel mõjuvad tõukejõud peaksid tuuma "ära lõhkuma". Tuuma liitvad nn. tuumajõud on hoopis teistsuguse iseloomuga. On tehtud kindlaks, et tuumaosakeste vahel mõjuvad jõud on esiteks väga tugevad, võrreldes elektrostaatiliste jõududega, teiseks on nad ühesugused nukleonipaarides prooton-prooton, prooton-neutron ja neutron-neutron. Summaarne jõud kahe prootoni vahel on muidugi nende elektrostaatilise tõukejõu võrra väiksem, kuid viimane on väike, võrreldes tuumajõududega.

Tuumajõudude eriomaduseks on see, et nad mõjuvad ainult väga väikestel kaugustel, mis ei ületa tuuma mõõtmeid. Joonisel 2:3 on kujutatud süsteemide prooton-prooton (a) ja prooton-neutron (b) potentsiaalne energia, mille määravad

nende vahel mõjuvad jõud. Juhul (a) hakkab mõjuma osakeste vahel elektrostaatiline tõukejõud juba küllalt suurte kaugustel  $r$  ning seetõttu on nende potentsiaalne energia positiivne, kuni osakesed lähenevad kauguseni  $r_0$ , kus järsult tekib suur tõmbejõud, mis tugevasti ületab elektrostaatilise tõukejõu sellel kaugusel. Seoses sellega muutub potentsiaalne energia ka järsult negatiivseks.



Joon. 2:3.

Süsteem tuum-prooton on analoogiline süsteemiga prooton-prooton, ainult elektrostaatilised jõud on nii mitu korda suuremad, kui mitu prootonit on tuumas ning tuumajõud (kui  $r < r_0$ ) nii mitu korda suuremad, kui palju on tuumas prootoneid ja neutroneid kokku. Seega on süsteemi tuum-prooton potentsiaalset energiat kujutav pilt analoogiline joon. 2:3 (a) kujutatuga. Niisiis on prootoni potentsiaalne energia tuumas negatiivne ning seetõttu prooton tuumaga väga tugevasti seotud. Joonisel 2:3,a on kujutatud potentsiaalse energia sõltuvus kaugusest. Selle kõvera osa, mis paikneb ülalpool abstsissitelge, on hakatud nimetama potentsiaali-barjääriks, sest ta näitab energia väärtust, mida prooton peab omama, et ületada barjäär tuuma sisenemiseks või sellest väljumiseks.

Prooton-neutroni korral tõukejõudusid ei ole, seega  $r_0$ -st suurematel kaugustel potentsiaalne energia puudub täielikult ning  $r_0$ -st väiksematel kaugustel, kus mõjuvad tuumajõud (tõmbejõud), on potentsiaalne energia negatiivne (joon. 2:3,b). Niisugust potentsiaalse energia sõltuvust

kaugusest nimetatakse potentsiaali auguks. Analoogiline on ka neutroni ja tuuma potentsiaalse energia sõltuvus kaugusest. Selleks et väljuda tuumast, peab neutron omama energiat, mille määrab potentsiaaliaugu sügavus. Tuuma sisse tungimiseks aga pole neutroni energia väärtusel mingit tähtsust.

Suurust  $r_0$  peetaksegi aatomituuma raadiuseks.

Aatomituuma mõõtmed ( $r_0$ ) on arvatatud prootonite ja  $\alpha$  -osakeste hajumisest ainetes. On arusaadav, et tuuma mõõtmed sõltuvad temas sisalduvate osakeste arvust  $A$ . Eksperimendiandmete analüüsist järeldub seaduspärasus:

$$r_0 = 1,5 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ m,}$$

s.o. tuuma raadius on võrdeline kuupjuurega massiarvust.

Kuna massiarvu  $A$  väärtused on 1 ja 240 vahel, siis on tuumade raadiused suurusjärgus 1 fm ( $10^{-15}$  m).

Tuuma tiheduse saame arvutada järgmiselt:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1,6 \cdot 10^{-24} A \text{ kg}}{\frac{4}{3} (1,5 \cdot 10^{-15})^3 A \text{ m}^3} \approx 1,3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3.$$

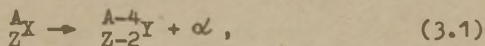
Nagu näeme, on kõikide tuumade tihedus ühesugune ning tohutult suur.

### 3. Looduslik radioaktiivsus

1896.aastal Becquerel<sup>☞</sup>, uurides uraani soolade luminesentsi avastas, et need soolad saadavad välja nähtamatut kiirgust, mis analoogiliselt valgusega mõjutab fotomaterjale. Hiljem uuris seda nähtust detailsemalt abielupaar Curie<sup>☞☞</sup>, kelle ettepanekul hakati nähtust nimetama radioaktiivsuseks. Kiirgust hakati nimetama radioaktiivseks kiirguseks. Hiljem selgus, et radioaktiivsus on omane ka mõnede teistele ainetele. Edasised uurimised näitasid, et radioaktiivseid kiiri on kolme liiki ning neid hakati tähistama kreeka tähtedega  $\alpha$ ,  $\beta$  ja  $\gamma$ .

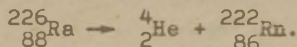
#### 3.1. $\alpha$ -kiirgus

$\alpha$ -kiirgus on oma olemuselt nn.  $\alpha$ -osakeste voog.  $\alpha$ -osake on heeliumi aatomituum  ${}^4_2\text{He}$ , mis koosneb kahest protonist ja kahest neutronist, olles seega massi poolest neli korda suurem niisugustest "massiivsetest" elementaarosakestest, nagu seda on proton  $p$  (ehk  ${}^1_1\text{H}$ ) või neutron  $n$ . Kuna niisugune osake paiskub välja aatomituumast, siis tuleb oletada järgmist tuuma  ${}^A_Z\text{X}$  lagunemise protsessi:



milles tekib uus tuum  ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ .

Konkreetselt toimub näiteks niisugune lagunemine:



---

<sup>☞</sup> Antoine Becquerel [bekrel] (1852-1908), prantsuse füüsik.  
<sup>☞☞</sup> Marie Curie [kürii] (1867-1934), poola päritoluga prantsuse füüsik. Pierre Curie (1859-1906), prantsuse füüsik ja keemik.

$\alpha$ -osakeste kiirused radioaktiivses kiirguses on väga erinevad, seega on erinevad ka nende energiad. Õhus liikudes põrkub  $\alpha$ -osake kokku gaasimolekulidega ning ioniseerib neid, kulutades igas ioniseerimise protsessis mingi hulga oma energiast (keskmiselt 34 eV ühe ioonipaari tekitamiseks). Kui energia on ära kulutatud, "leiab"  $\alpha$ -osake endale kaks elektroni ning muutub heeliumiaatomiks. Eksperimentaalselt on lihtne määrata  $\alpha$ -osakese teepikkust õhus ning kuna see on sõltuv õhu tihedusest, siis määratakse ta normaaltingimustes (temperatuur 0 °C, rõhk 760 mmHg). Tähistame selle teepikkuse tähega  $l$ . Eri ainete tuumadest pärinevatel  $\alpha$ -osakestel on  $l$  väärtused küllaltki erinevad (2,6 cm - 11,5 cm).

$\alpha$ -osakeste kiirused ( $v$ ) väljumisel tuumast (neid on võimalik peaaegu otseselt mõõta) on suurusjärgus  $10^7$  m/s ning sellele vastavad energiad ( $W$ ) suurusjärgus mõni mega-elektronvolt (vt. tabel 3.1).

Tabel 3.1

Aine	$l$ cm	$v \cdot 10^{-7}$ m/s	$W$ MeV
UI*	2,7	1,42	4,2
Ra	3,3	1,52	4,8
ThC'	8,5	2,05	8,8

Iga radioaktiivne aine kiirgab välja mitu rühma  $\alpha$ -osakesi. Ühte rühma kuuluvate osakeste energiad on väga lähedased (monoenergeetilised rühmad). Eri rühmade osakeste energiad võivad erineda tunduvalt. Üks rühmadest on tavaliselt kõige intensiivsem (põhirühm).

Vedelates ja tahketes ainetes on  $\alpha$ -osakeste teepikkus väga väike. Nad on väikese  $l$  a b i t u n g i m i s - v õ i m e g a. Nii näiteks pidurdab juba tavaline kirjutus-paber  $\alpha$ -kiirguse peaaegu täielikult.

\* UI on uraani isotoop  $^{238}_{92}\text{U}$  ning ThC' - polooniumi isotoop  $^{212}_{84}\text{Po}$ .

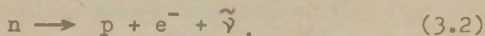
### 3.2. $\beta$ -kiirgus

$\beta$ -kiired on väga kiirete elektronide voog. Seega on  $\beta$ -osakese tähis  $e^-$ . Ka  $\beta$ -kiired väljuvad aatomituumadest. Et aga tuumas püsivate osakestena elektronid ei esine, siis tuleb tuuma lagunemist mõista alljärgnevalt. Algul muundub tuumas üks neutron prootoniks ja elektroniks, seejärel elektron väljub tuumast.

$\beta$ -osakeste kiirused võivad olla väga suured (kuni 0,999  $c$ , kus  $c$  on valguse kiirus), seega on nendel ka väga suur energia (kuni 10 MeV). Vastandina  $\alpha$ -kiirgusele on  $\beta$ -kiirte spekter pidev. See tähendab, et sama aine tuumad saavad välja igasuguse kiirusega (energiaga)  $\beta$ -osakesi, alates peaaegu nullist kuni mingi  $W_{\max}$ -ni, mis on iseloomulik antud ainele. Joonisel 3:1 on kujutatud  $\beta$ -osakeste jaotus energiatega järgi RaE (vismuti isotoop  ${}_{83}^{210}\text{Bi}$ ) puhul.

Kõikide  $\beta$ -aktiivsete ainete korral on see jaotus pidev, ühe maksimumiga ning terava piiriga suurte energiatega poolt.

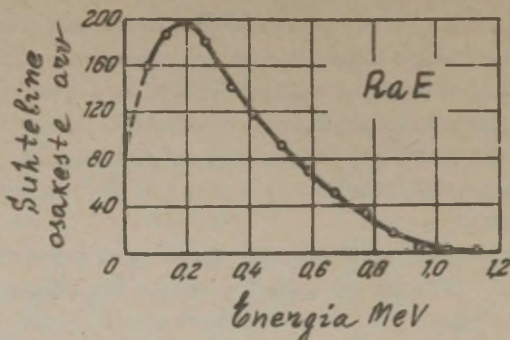
See eksperimentaalne fakt, et aine kiirgab kõikvõimalike energiatega  $\beta$ -osakesi, oli teadlastele mõistatuseks seni, kuni 1930. aastal Pauli püstitas hüpoteesi, et koos  $\beta$ -osakesega iga kord paiskab tuum välja veel ühe osakese - neutriino<sup>⊚</sup>, mis on elektriliselt neutraalne ja väga väikese massiga, mistõttu jääb märkamatuks. Need kaks osakest jagavad omavahel antud ainele iseloomuliku  $\beta$ -osakeste maksimaalse energia juhuslikus suhtes. Sellest seisukohast lähtudes tuleb tuumas toimuvat neutroni muundumist kirjutada nii:



Antineutriino vajalikkus on põhjendatud p. 1.7. Tuumajõud elektronile ja antineutriinole ei mõju, need osakesed väljuvad tuumast. Seega toimub  $\beta$ -lagunemine järgmise skee-

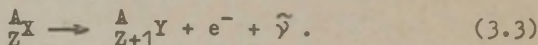
---

<sup>⊚</sup> Tänapäeval nimetatakse elektroniga koos eralduvat osakest antineutriinoks ( $\tilde{\nu}$ ).

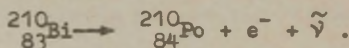


Joon. 3.1.

mi kohaselt:



Konkreetselt toimub lagunemine



Muide, seoses protsessiga (3.2) hakati rääkima neutroni radioaktiivsusest ning otsiti võimalust jälgida sellist neutroni muundumist ka väljaspool aatomituume. See õnnestus alles 1950.aastal, kui osutus võimalikuks uurida väga suure tihedusega neutronite voogusid. Neutroni spontaanse lagunemise poolestusaeg (vt. 3.4)  $T = 13$  min.

Tänu suurtele kiirustele ja osakeste suhteliselt väikesele massile on  $\beta$ -kiired märksa suurema läbitungimisvõimega kui  $\alpha$ -kiired. Kuid siiski, läbides ainet, põrkuvad nad kokku aine osakestega (peamiselt elektronidega) ja annavad nendele ära oma energia, s.o.  $\beta$ -kiirgus neeldub aines. Tulemuseks on aine ioniseerimine, kusjuures energia kulu ioniseerimisele kasvab elektroni kiiruse (energia) kaanedes: kui elektroni energia on 0,8 - 1 MeV, tekitab ta õhus normaaltingimustes 1 cm pikkusel teel 50 ioonipaari; kui aga energia on 0,2 MeV, on tekkinud ioonipaaride arv 100; energiaga 0,02 MeV elektron tekitab kuni 500 paari ioone.

$\beta$ -kiirte läbitungimisvõime iseloomustamiseks tooma järgmise näite. Kui  $\beta$ -osakeste energia on 2 MeV, siis see kiirgus neeldub täielikult õhukihis (normaaltingimustes) paksusega 8 m, vees - 1 cm, alumiiniumis - 3 mm, pliiis - 1 mm.

Matemaatiliselt kirjeldab  $\beta$ -kiirguse neeldumist aines eksponentseadus:

$$I = I_0 e^{-\mu a}, \quad (3.4)$$

kus  $I_0$  ja  $I$  on vastavalt aine kihile paksusega  $a$  langeva ja sellest väljuva kiirguse intensiivsus,  $\mu$  - neeldumistegur, mis on ainet iseloomustavaks suuruseks teatud energiaga  $\beta$ -osakeste puhul.

Sageli kasutatakse neeldumisteguri  $\mu$  asemel aine kihi paksust, milles kiirguse intensiivsus väheneb 2 või e korda. Tähistame neid paksusi vastavalt  $a_{1/2}$ ,  $a_{1/e}$ . Avaldame esmalt valemist (3.4) suuruse  $a$ :

$$a = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{\mu}.$$

Siit järeldub:

$$a_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad \text{ja} \quad a_{1/e} = \frac{1}{\mu}.$$

### 3.3. $\gamma$ -kiirgus

$\gamma$ -kiired on oma olemuselt väga väikese lainepikkusega (väga suure sagedusega) elektromagnetlained ( $\gamma$ -kvantide energia väärtused on suurusjärgus  $10^5$  eV). See kiirgus kaasneb  $\alpha$ - või  $\beta$ -lagunemisega. On tehtud kindlaks, et  $\gamma$ -kvandi kiirgab radioaktiivsel lagunemisel tekkinud uus tuum, kui see tuum tekke momendil on ergastatud olekus, s.o. omab tavalise normaalolekuga võrreldes lisaenergiat. Just  $\gamma$ -kvandi tekkimine räägib sellest, et aatomituumal võib olla mitu energetilist olekut. Kui ühele nendest vastaks tuuma energia  $W_1$  ning teisele (madalamale)  $W_2$ , siis üleminekul ühest teise kiirgab tuum välja kvandi, mille sagedus



$$\gamma = \frac{W_1 - W_2}{h}$$

Osutub, et  $\gamma$ -kvandi kiirgamine ei ole ainuke võimalus tuuma ergastusenergia äraandmiseks. On võimalik, et tuum annab oma ergastusenergia ära aatomi sisekihi elektronile, mistõttu viimane eemaldatakse aatomist. Niisugust nähtust nimetatakse s i s e k o n v e r s i o o n i k s ja kiirgunud elektroni k o n v e r s i o o n i e l e k t r o n i k s. Konversioonielektroni kineetiline energia võrdub tuuma ergastusenergia ja aatomi ionisatsioonenergia vahega. Kuna mõlemal nimetatud energial on diskreetsed väärtused, siis on konversioonielektronide kineetilisel energial ka diskreetne väärtus. Katses kajastub see asjaolus, et joonis 3:1 tüüpi pideva spektri foonil tekivad üksikud teravad jooned.

#### 3.4. Radioaktiivse lagunemise seadus

Eksperiment näitas, et isoleeritud radioaktiivse aine aatomite arv kahaneb ajas eksponentseaduse järgi. Seejuures mingid välismõjud (kõrge või madal rõhk, kõrge või madal temperatuur, elektri- või magnetväli jne.) ei kiirenda ega aeglusta aatomite lagunemisprotsessi. Niisiis aatomite lagunemine toimub spontaanselt (iseeneslikult). Samuti osutus, et lagunemise kiirus ei sõltu sellest, kas aine esineb puhta elemendi või keemilise ühendi kujul. Siit tuleneb, et radioaktiivsus on just aatomituumade omadus. Sellest lähtudes esitame definitsiooni: r a d i o a k t i i v u s on a a t o m i t u u m a d e s p o n t a a n n e l a g u n e m i n e.

Tuumade lagunemise tõenäosust ajaühikus nimetatakse r a d i o a k t i i v s e l a g u n e m i s e k o n s t a n d i k s (tavapärase tähis  $\lambda$ ). Lagunemiskonstandi mõõtühik on 1/s.

Olgu aja alghetkel ( $t = 0$ ) radioaktiivsete tuumade arv  $N_0$ . Tuumade arvu ajahetkedel  $t$  ja  $t + dt$  märgime vastavalt  $N$  ja  $N + dN$ . Kuna  $\lambda$  on tuuma lagunemise tõenäosus ajaühikus, siis ajavahemiku ( $t, t + dt$ ) vältel

laguneb  $\lambda \cdot N \cdot dt$  tuuma. Nii saame

$$dN = -\lambda N dt. \quad (3.5)$$

Miinusmärk selles valemis arvestab ajaolu, et  $dN < 0$ .

Kirjutame võrrandi (3.5) ümber kujul

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

ning integreerime selle mõlemat poolt vastavalt rajades  $N_0 - N$  ja  $0 - t$ :

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t dt.$$

Siit saame

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3.6)$$

Saadud valem väljendab kõikide radioaktiivsete ainete lagunemisseadust (igal ainel oma  $\lambda$ ).

Sageli kasutatakse aine radioaktiivsuse iseloomustamiseks mitte lagunemiskonstanti, vaid poolaastust  $T$ , s.o. ajavahemiku, mille jooksul lagunevad pooled preparaadis olevaist radioaktiivsetest aatomitest. Seega ajahetkel  $t = T$  peab  $N = \frac{N_0}{2}$  ja lagunemisseadusest (3.6) saame

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda T}.$$

Arvestades, et  $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}$  ning võtnud võrrandi mõlemast poolst naturaallogaritm, leiame seoses  $T$  ja  $\lambda$  vahel kujul:

$$\lambda T = \ln 2$$

ehk

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (3.7)$$

Asendades avaldise (3.7) abil lagunemiskonstandi  $\lambda$  poolaastusaja  $T$  kaudu, saab lagunemisseaduse (3.6) esitada uuel kujul

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{T} \ln 2}. \quad (3.6')$$

Teeme siit lähtudes lihtsad teisendused keskkooli matemaatika baasil:

$$-\ln 2 = \ln 1/2, \quad \frac{t}{T} \ln 1/2 = \ln(1/2)^{\frac{t}{T}}.$$

Seega  $N = N_0 e^{\ln(1/2)^{\frac{t}{T}}}$  Kuid  $e^{\ln x} = x$ , nii saame lagunemiseaduse piltlikul kujul

$$N = N_0 \left(1/2\right)^{\frac{t}{T}}. \quad (3.6'')$$

Tuntud radioaktiivsete ainete poolestusajad on väga erinevad. Nii on see Ra jaoks 1590 aastat, RaC' (polooniumi isotoop  ${}_{81}^{214}\text{Po}$ ) puhul  $10^{-6}$  s.

### 3.5. Radioaktiivne tasakaal

Sageli esineb olukordi, kus radioaktiivse aine lagunemisproduktid on omakorda radioaktiivsed. Seega on preparaadis mitu radioaktiivset ainet korraga. Nii esinevad Ra-preparaatides ka tema radioaktiivsed lagunemisproduktid Rn, RaA, RaB ja rida nendele järgnevaid elemente skeemi  $\text{Ra} \rightarrow \alpha + \text{Rn} \rightarrow \alpha + \alpha + \text{RaA} \rightarrow \alpha + \alpha + \alpha + \text{RaB}$  jne. järgi (vt.3.6). Vanades preparaatides, kus pikaealine lähteaine ja tema lagunemisproduktid on pikemat aega "koos eksisteerinud", tekitab nn. r a d i o a k t i i v n e t a s a k a a l. Tasakaal seisneb selles, et laguneva sekundaaraine aatomite arv on võrdne samas ajavahemikus primaarainest tekkivate sekundaaraine aatomite arvuga, s.o.

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2. \quad (3.8)$$

Radioaktiivse tasakaalu tingimustes on iga produkti hulk preparaadis püsiv seni, kuni ei muutu märgatavalt lähteaine hulk. Nii püsivad tasakaalus 1 g raadiumi (Ra) ja  $6,51 \cdot 10^{-6}$  g radooni (Rn).

1 g raadiumis laguneb 1 s kestel  $3,7 \cdot 10^{10}$  tuuma. See suurus ( $3,7 \cdot 10^{10}$  1/s) on olnud kasutusel radioaktiivsete preparaatide aktiivsuse (vt. p.3.7) ühikuna nimetuse all k ü r i i (Ci). Üldiselt mõistetakse nimetuse kürii all mistahes radioaktiivse aine aktiivsust, kui selles toimub  $3,7 \cdot 10^{10}$  lagunemist sekundis.

Õhu ja vee radioaktiivsus on tavaliselt põhjustatud radooni sisaldusest nendes. Radooni kontsentratsioon (vees ja õhus) ühikuks on kasutatud e m a n i. 1 eman on niisugune radooni kontsentratsioon, mille puhul ühe liitri keakkona (vee või õhu) aktiivsus on  $10^{-10}$  Ci, s.o. ühes liitris toimub 3,7 lagunemist sekundis.

### 3.6. Radioaktiivsed ained looduses

Peamised looduses esinevad radioaktiivsed elemendid moodustavad kolm rida (perekonda). Need on:

1. Uraanirida. Selle rea lähtelemendiks on  $^{238}_{92}\text{U}$ , mille poolustusae  $T = 4,51 \cdot 10^9$  aastat ning lõppelemendiks stabiilne plii  $^{206}_{82}\text{Pb}$ .

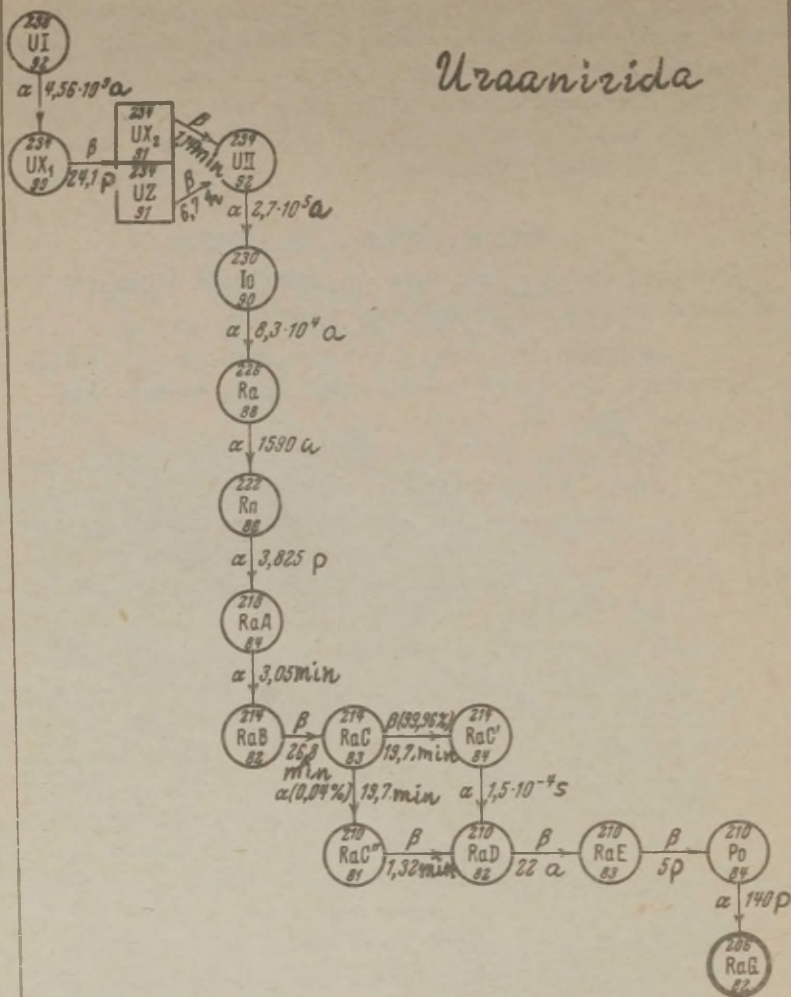
2. Tooriumirida, mis algab  $^{232}_{90}\text{Th}$ -st ( $T = 1,39 \cdot 10^{10}$  aastat) ning lõpeb  $^{208}_{82}\text{Pb}$ -ga, mis on samuti stabiilne.

3. Aktiiniumirida. See rida saab alguse uraani isotobist  $^{235}_{92}\text{U}$  ( $T = 7,13 \cdot 10^8$  aastat). Rea viimane liige on jälle stabiilne plii  $^{207}_{82}\text{Pb}$ . Rea nimetus on säilinud ajast, mil rea algelemendiks arvati olevat  $^{227}_{84}\text{Ac}$ .

Radioaktiivsete ridade skeemid on toodud joonisel 3:2. Nende ridade uurimisel selgub, et iga rea puhul on tema kõikide elementide massiarv väljendatav ühtse valemiga. Nii on see valem uraanirea jaoks  $A = 4n + 2$ , tooriumirea jaoks  $A = 4n$  ning aktiiniumirea jaoks  $A = 4n + 3$ , kus  $n$  on positiivne täisarv. Ridade skeemides esinevad sümbolid  $\text{RaA}$ ,  $\text{RaB}$  jne.,  $\text{ThA}$ ,  $\text{ThB}$  jne. ning  $\text{AcA}$ ,  $\text{AcB}$  jne. tähendavad isotopide vananenud nimetusi, mida mõningal määral traditsiooni järgi siiski veel kasutatakse. Korrektsed nimetused saab leida järjenumbriga järgi Mendelejevi tabeli abil. Näiteks uraanireas  $\text{RaA}$  on tegelikult polooniumi isotoop  $^{218}_{84}\text{Po}$ ,  $\text{RaB}$  on plii isotoop  $^{214}_{82}\text{Pb}$  jne.

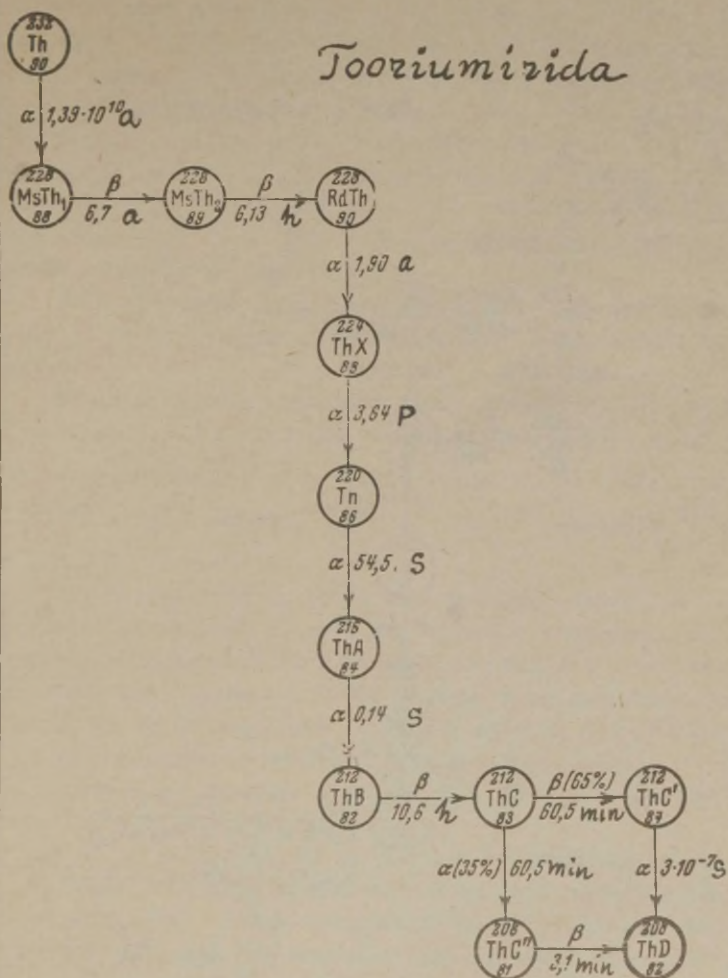
Peale selle paistavad kõikides skeemides silma veel hargnenud kohad. Nii on uraanireas  $^{214}_{83}\text{RaC}$  võimaline muunduma  $\alpha$ -lagunemise teel  $^{210}_{81}\text{RaC}'$ -ks ja ka  $\beta$ -lagunemise teel  $^{214}_{84}\text{RaC}'$ -ks. Ning edasi  $\text{RaC}'$   $\alpha$ -lagunemise teel ja  $\text{RaC}''$   $\beta$ -lagunemise teel muunduvad mõlemad üheks ja samaks elemendiks  $^{210}_{82}\text{RaD}$  (see on plii radioaktiivne isotoop).

# Uraanirida



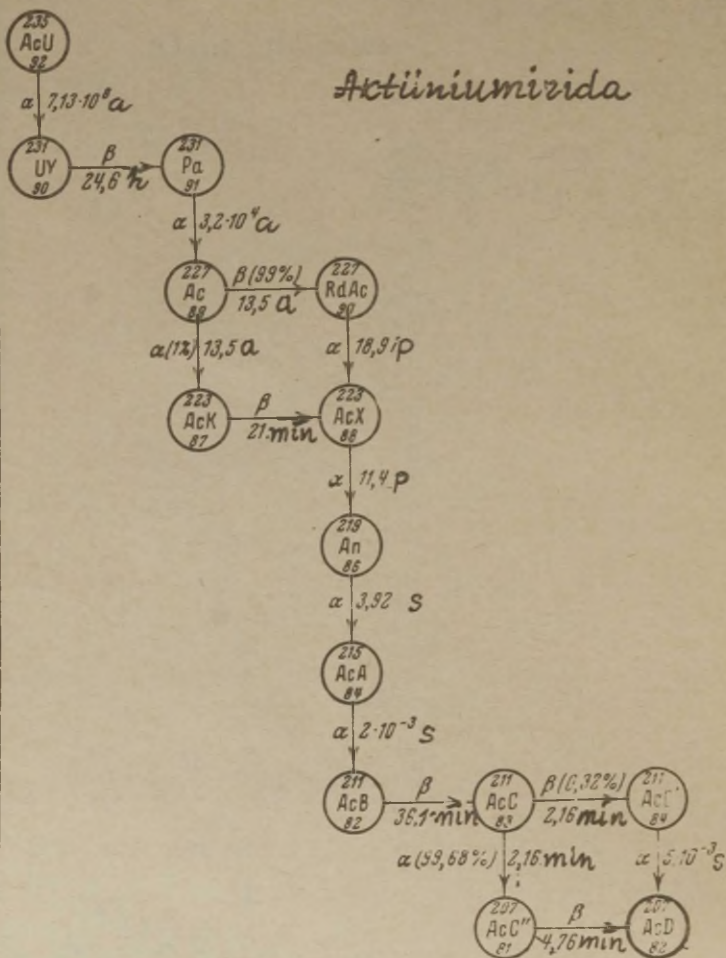
Joon. 3:2,  $\alpha$

# Thoriumirida



Joon. 3:2, b

# Actiniumirida



Joon. 3:2, c

Kõik kolm rida algavad elementidest, millel on väga pikk poolestusaeg. See fakt seletabki nende olemasolu maakoores. Kauges minevikus peavad olema toimunud nende tekkimise protsessid kergematest elementidest. Sattunud maakoore sisse, hakkasid nad lagunema ning said kõikide teiste radioaktiivsete elementide allikateks. Kõik kolm rida lõpevad plii mingi stabiilse isotoobiga. Tooriumi maagid sisaldavad plii puhast isotoopi  $^{208}_{82}\text{Pb}$ . Uraanimaagid aga kahte plii isotoopi  $^{206}_{82}\text{Pb}$  ja  $^{207}_{82}\text{Pb}$ , sest uraan ise esineb peamiselt kahe isotoobina  $^{238}_{92}\text{U}$  ja  $^{235}_{92}\text{U}$ , mis annavad alguse ülejäänud (peale tooriumirea) kahele reale.

Plii sisalduse järgi on võimalik määrata maakoorest võetud radioaktiivsete proovide vanust, seega ka maakoore vanust.

Peale nimetatud radioaktiivsete elementide on looduses väga nõrgalt radioaktiivsed veel kaalium  $^{40}_{19}\text{K}$  ( $T=1,4 \cdot 10^9$  aastat), rubiidium  $^{87}_{37}\text{Rb}$  ( $T = 4,8 \cdot 10^{10}$  aastat) ja samaarium  $^{147}_{62}\text{Sm}$  ( $T = 10^{11}$  aastat),  $^{148}_{62}\text{Sm}$  ( $T = 2 \cdot 10^{14}$  aastat),  $^{152}_{62}\text{Sm}$  ( $T = 1,7 \cdot 10^{11}$  aastat).

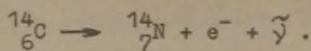
Käesoleval ajal on teada veel paljude elementide radioaktiivsed isotoobid, kuid nad ei esine maakoores, neid saadakse vaid kunstlikult. Nende poolestusajad on väikesed võrreldes Maa vanusega ( $\sim 10^9$  aastat) ning seepärast, kui nad kunagi eksisteerisidki looduses, siis on nad jõudnud täiesti ära laguneda. Näiteks radioaktiivset rida  $A = 4n+1$ , mis algab neptuuniumi isotoobiga  $^{237}_{93}\text{Np}$  ( $T = 2,1 \cdot 10^6$  aastat), looduslikes tingimustes ei leidu.

Bioloogia seisukohalt on huvitav süsiniku radioaktiivne isotoop  $^{14}_6\text{C}$ , mida taimed saavad süsiahappegaasiga atmosfäärist lisaks nendele radioaktiivsetele ainetele, mis on maakoores ja vees. See süsiniku isotoop tekib atmosfääris lämmastikust kosmilise kiirguse neutronite mõjul:



Süsinik  $^{14}_6\text{C}$  on  $\beta^-$ -aktiivne ( $T = 5600$  aastat) ning lagunedes muundub uuesti lämmastikuks:





Loomad saavad seda radioaktiivset süsinikku taimede kaudu. Süsiniku ringkäigu tõttu looduses jääb elusorganismides püsima  ${}^{14}_6\text{C}$  mingi kindel kontsentratsioon. Kui elusorganism sureb ning süsinikku enam juurde ei saa, hakkab selle isotoobi kontsentratsioon vähenema, mille järgi on võimalik määrata organismide kivistunud jäänuste geoloogilist vanust.

### 3.7. Dosimeetria põhimõisted

Dosimeetria on rakendusfüüsika haru, mis tegeleb radioaktiivsete kehade aktiivsuse ja mitmesuguste kiirguste dooside mõõtmise ning arvutamisega. Mõistet "kiirgus" käsitletakse seejuures laiemas tähenduses. Peale radioaktiivse  $\alpha$ -,  $\beta$ - ja  $\gamma$ -kiirguse arvestatakse röntgenikiirgust, aga ka suure energiaga neutronite, prootonite ja teiste osakeste vooge. Dosimeetriariista põhiosadeks on detektor (näit. Geiger-Mülleri loendur, fotoemulsioon jm.) vt. p. 4 ja mõõteseaded.

Radioaktiivse keha aktiivsuseks nimetakse selles kehas ajaühiku vältel lagunenu tuumade arvu. Aktiivsuse SI-ühik on ühe tuuma lagunemine sekundis. Seda ühikut nimetatakse radioaktiivsuse avastaja auks bekerelliiks (Bq). Megabekerelli nimetatakse raderfordiks (Rd):

$$1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ Bq}.$$

Kasutatakse ka süsteemivälisest aktiivsuse ühikut küriid (Ci), millest oli juttu p. 3.5:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}.$$

Esitame valemi radioaktiivse keha aktiivsuse  $Q$  arvutamiseks.\* Kui kehas on  $N$  radioaktiivset tuuma, siis

---

\* Aktiivsust tähistatakse ka sümboliga  $A$ . Meie eelistame sümbolit  $Q$ , sest  $A$  on meil massiarvu tähiseks.

lagunemiskonstandi  $\lambda$  definitsiooni alusel (vt. p. 3.4) on ajaühikus lagunevate tuumade arv  $\lambda N$ . See ongi aktiivsus. Nii saame arvutusjuhise:

$$Q = \lambda N. \quad (3.9)$$

Tuumade arvu  $N$  muutumine ajas allub valemile (3.6). Paigutades selle tulemuse valemisse (3.9), saame

$$Q = Q_0 e^{-\lambda t}, \quad (3.10)$$

kus  $Q_0 = \lambda N_0$  on algaktiivsus. Valemi (3.10) näitab, et aktiivsus kahaneb ajas samuti eksponentseaduse järgi.

Kiirgusdoosid on füüsikalised suurused, mis iseloomustavad kiirguse mõju ainele. Ajaühikus toimivat doosi nimetatakse doosi võimsuseks. Eristatakse järgmisi doose: neeldumisdoos, kiiritusdoos ja ekvivalentdoos.

Neeldumiskoostis nimetatakse aine massiühikus neeldunud kiirgusenergia hulka. SI järgi on neeldumisdoosi ühik J/kg, mida nimetatakse greiks (Gy):

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

Kasutusel on ka süsteemiväline neeldumisdoosi ühik rad (tähis: rad)<sup>36</sup>:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}.$$

Kiiritusdoosi (ehk ekspositsioonidoosi) mõistet rakendatakse ainult röntgēni- ja  $\gamma$ -kiirguse juhul. Kiiritusdoosi nimetatakse röntgēni- või  $\gamma$ -kiirguse poolt kuivas õhus ionisatsiooni toimet tekitatud ühemärgiliste ionide laengut, arvestatuna massiühiku kohta. SI järgi on kiiritusdoosi ühik C/kg. Kasutatakse ka süsteemivälise kiiritusdoosi ühikut röntgenit (R):

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}.$$

Katse näitab, et elusorganismide (kaasa arvatud inimese) kiiritamisel tekkinud bioloogiline kahjustus on ühe- ja

<sup>36</sup> Raadi tähis langeb ühte tasanurga SI-ühiku radiaani tähi-  
sega.

samasuguse neeldumisdoosi korral erinevate kiirgusliikide juhul erinev. Suurust, mis näitab mitu korda on meelevaldse kiirguse poolt tekitatud bioloogiline toime tugevam kui röntgeni- või  $\gamma$ -kiirguse tekitatud bioloogiline toime samasuguse neeldumisdoosi eeldusel, nimetatakse k i i r - g u s e k v a l i t e e d i t e g u r i k s (tähis K). Mida ohtlikum on kiirgus, seda suurem on K. Definitsiooni kohaselt on röntgeni- ja  $\gamma$ -kiirgusel  $K = 1$ . Katse näitab, et ka elektronide juhul on  $K = 1$ . Neutronite ja prootonitega kiirritamisel on  $K \approx 10$ ,  $\alpha$ -osakestega kiirritamisel  $K \approx 20$ .

Kiirguse mõju elusorganismile iseloomustatakse ekvivalentdoosi abil. E k v i v a l e n t d o o s i k s (tähis H) nimetatakse neeldumisdoosi ja kiirguse kvaliteediteguri korrutist. Valemina väljendub see definitsioon nii:

$$H = KD, \quad (3.11)$$

kus D on neeldumisdoos.

Ekvivalentdoosi ühiku saame valemist (3.11), kui võtame  $K = 1$  ja kasutame ühikulist neeldumisdoosi. Ekvivalentdoosi SI-ühikut nimetatakse siivertiks (Sv). S i i v e r t on ekvivalentdoos, mille tekitab röntgeni- või  $\gamma$ -kiirgus neeldumisdoosiga 1 Gy. Kuid näiteks neutronkiirgus neeldumisdoosiga 1 Gy tekitab hoopis ekvivalentdoosi 10 Sv. Inimorganismile maksimaalselt lubatavaks aastaseks doosiks, mis ei tekita tervisehäireid, on  $5 \cdot 10^{-2}$  Sv.

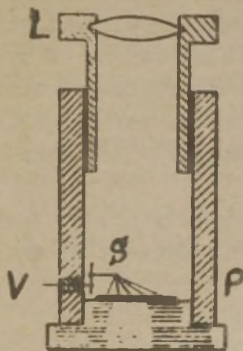
Kasutusel on ka ekvivalentdoosi vananenud ühik remm (tähis: rem). See on ekvivalentdoos, mille tekitab röntgeni- või  $\gamma$ -kiirguse neeldumisdoos 1 rad. Et  $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$ , siis valemist (3.11) järgneb:

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}.$$

#### 4. Radioaktiivse kiirguse registreerimise meetodeid

##### 4.1. Spintariskoop

Spintariskoop oli ajalooliselt esimene riist, mille abil sai registreerida üksikuid  $\alpha$ -osakesi. Spintariskoop on läbipaistmatu silinder, mille põhi P on kaetud lumineseeriva aine kihiga (näiteks tsinksulfiidiga - ZnS) ja mille "kaaneks" on luup L (joon. 4:1). Kui varu V abil viia silindrisse  $\alpha$ -osakeste allikas S, siis need  $\alpha$ -osakesed, mis satuvad ZnS-kihile, kutsuvad selles esile valgussähvatusi (stsintillatsioone), mida saab jälgida läbi luubi. Et igale  $\alpha$ -osakesele vastab üks sähvatus, on spintariskoobi abil võimalik loendada  $\alpha$ -osakesi. Just nii tehti kindlaks, et ühes grammis raadiumis laguneb ühe sekundi jooksul  $3,7 \cdot 10^{10}$  aatomit.

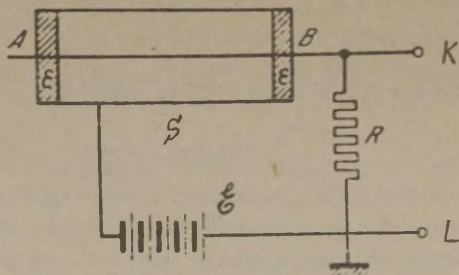


Joon. 4:1.

Spintariskoobi abil on võimalik registreerida ka  $\beta$ -osakesi.

##### 4.2. Gaaslahendusloendur

Gaaslahendusloenduri põhimõtteline skeem on toodud joonisel 4:2, kus metallsilinder S on loenduri korpuseks, mille telge mööda kulgeb silindrist elektriliselt isoleeritud metallniit AB. Silinder täidetakse hõrendatud gaasiga (rõhul 100 - 200 mmHg). Silinder ühendatakse alalispinge allika  $\mathcal{E}$  negatiivse ning niit positiivse klemmiga. Rakendatud pinge on veidi madalam läbilöögipingest gaasi antud hõrenduse puhul, seega on vooluahel katkestatud. Kui mingi osake tungib läbi silindri seina loendurisse, siis tekitab ta oma teel pörkeionisatsiooni kaudu hulga vabu elektrone



Joon. 4:2.

ja ioone. Elektronid tõmbuvad niidile, positiivsed ioonid paiskuvad silindri seinalle. See kutsub esile vooluimpulsi (lühiajalise voolu). Takistil R (klemmidel K ja L) seejuures tekkinud pinge võimendatakse ning registreeritakse kas elektromeetri või mõne mehaanilise numeraatori abil.

Meetodi algvariandi autoriteks on Geiger<sup>32</sup> ja Rutherford<sup>33</sup>.

Gaaslahendusloendurid võivad olla kohandatud  $\alpha$ -osa-keste,  $\beta$ -osa-keste ja ka  $\gamma$ -fotonite registreerimiseks.

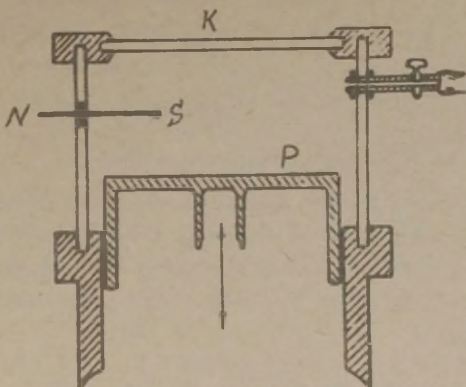
#### 4.3. Wilsoni<sup>33</sup> kambri

Wilsoni kambri koosneb silindrist, mille põhjaks on liikuv kolb P ja kaaneks läbipaistev, tavaliselt klaasist ketas K (joon. 4:3). Niisugusesse kambris ulatub nõel N radioaktiivse preparaadiga S. Kambris olev õhk või mõni teine gaas küllastatakse mingi vedeliku (näiteks vee) auruga. Kui kolbi järsult väljapoole (allapoole) nihutada, siis kambris olev gaas paisub adiabaatilisel ning tema temperatuur langeb ja aur läheb küllastatud olekust üleküllastatud olekusse. Kui nüüd kambrit läbib mõni laetud osake, tekitades oma teel rea ioone, saavad need ioonid kondensat-

<sup>32</sup> Hans Geiger (1882-1945), saksa füüsik.

<sup>33</sup> Ernest Rutherford [radertord] (Nelson) (1871-1937), inglise füüsik.

<sup>33</sup> Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), inglise füüsik.



Joon. 4:3.

sioonituumadeks, mille ümber tekivad vedelikupiisakesed. Nii moodustub peenike, kuid ka palja silmaga nähtav udu-riba (trekk), mis püsib lühikest aega ( $\sim 0,2$  s) ning mida paremaks uurimiseks on otstarbekas fotografeerida. Wilsoni kambrit saab kasutada  $\alpha$ -osakeste, prootonite, elektronide ja tuumakildude (vt. p. 7) jälgimiseks. Tekitades kambri magnetvälja, saab osakese trajektoori kõverusraadiuse järgi määrata osakese impulssi (vt. valemit (2.2)). Lugesdes ära kondensatsioonituumade arvu, saab teada osakese esialgse kineetilise energia. Kineetilist energiat ja impulssi teades saab lõppkokkuvõttes leida osakese massi.

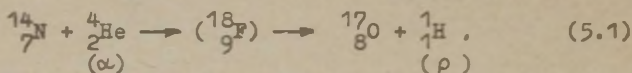
#### 4.4. Fotoemulsioonimeetod

Paksu ( $50 - 300 \mu\text{m}$ ) emulsioonikihiga fotoplaate kasutatakse laetud osakeste registreerimiseks. Laetud osake, tungides emulsioonikihti, kutsub selles esile AgBr lagunemise nendes kristallides, millised ta läbib. Nii jääb emulsiooni sisse osakese trajektoori jälg. Pärast ilmutamist seda jälge uuritakse mikroskoobi abil. Selle meetodi eeliseks on tema summeeriv toime. Kuna osakese mõju fotoemulsioonile säilib kaua aega, saab plaati kasutada paljude osakeste registreerimiseks, mis võivad järgneda üksteisele pikemate vaheaegadega. Meetodi väljatöötamisel osales nõukogude füüsik L. Mõssovski (1888 - 1939).

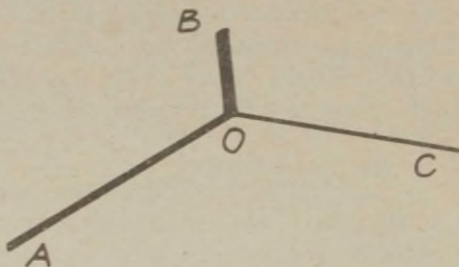
## 5. Tuumade muundamine

### 5.1. Esimesed tuumareaktsioonid

Tuumareaktsioone saab kutsuda esile kasutades osakesi, mille energia on küllaldane tuuma sisse tungimiseks. Esimese tuumareaktsiooni teostas Rutherford 1919. aastal. Tema pommitas lämmastikutuumi  $\alpha$ -osakestega ning reaktsioon kulges alljärgnevalt:



Joonisel 5:1 on kujutatud selle reaktsiooni pilt Wilsoni kambris. Pildil on AO  $\alpha$ -osakese jälg ning BO ja CO vastavalt hapniku tuuma  ${}_{8}^{17}\text{O}$  ja prootoni jäljed. Reaktsioon toimus punktis O. Reaktsiooni vahepeelses staadiumis tekkis tuum  ${}_{9}^{18}\text{F}$ , mille eluiga on väga väike. Seetõttu ei ole võimalik tema jälge Wilsoni kambris avastada.



Joon. 5:1.

Hiljem avastati palju reaktsioone, mis on analoogilised reaktsiooniga (5.1). Tuumareaktsiooni üldskeemi esitame kujul



kus A tähistab märklaatuuma, a - pealelangevat osakest (elementaerosakest või teist tuuma). Tavaliselt on pommitava

osakese mass väiksem märklauatuuma massist (sellele vastab tähtede kirjapilt reaktsiooni skeemi vasakul poolel). Reaktsiooni tulemusena tekib tavaliselt üks suure massiga, teine aga väikese massiga osake (neid tähistatakse eelpoolmainitud põhimõtte järgi vastavalt B ja b). Suure massiga osakese teepikkus on märklauas väike, väikese massiga osake tavaliselt väljub märklauast.

Tuumareaktsiooni (5.2) tüüpi märgitakse lühendatult sümboliga (a, b). Piltlikult ütleb see sümbol, et pommitatakse osakestega a, saadakse aga osakesi b. Konkreetselt (5.1) on ( $\alpha$ , p)-reaktsioon.

Kirjutame välja energia jäävuse seaduse reaktsioonile (5.2):

$$m_A c^2 + m_a c^2 + W_a = m_B c^2 + m_b c^2 + W_B + W_b, \quad (5.3)$$

kus m ja W tähistavad vastavalt seisumassi ja kineetilist energiat. Indeksid vihjavad tuumadele. Võrdus on üles kirjutatud nn. laboratoorses taustsüsteemis, kus tuum A on paigal.

Defineerime tuumareaktsiooni soojuse efektiivsuse  $Q$  järgmiselt:

$$Q = W_B + W_b - W_a.$$

Kui  $Q > 0$ , siis energia vabaneb tuumareaktsioonis; kui  $Q < 0$ , siis energia neeldub. Analoogiliselt keemias nimetatakse positiivse soojusefektiivsusega reaktsioone eksotermilisteks, negatiivse soojusefektiivsusega reaktsioone endotermilisteks.

Kui arvestada  $Q$  definitsiooni valemis (5.3), saame järgmise tähtsa arvutusjuhise:

$$Q = (m_A + m_a - m_B - m_b) c^2. \quad (5.4)$$

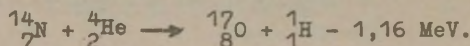
---

<sup>x</sup>  $Q$  on energiadimensiooniga füüsikaline suurus. Selle nimetus ei ole eriti õnnestunud, kuid on siiski üldtunnustatud. Siin võib tuua teatud analoogia terminiga "elektromotoorjõud", mis ei ole jõud mehaanika mõistes.



Valem (5.4) näitab et reaktsiooni soojustefekt on määratud osalevate tuumade seisumasside poolt. Tuumade masside mõõtmistulemused on koondatud vastavatesse tabelitesse. Neid tabelleid kasutades on võimalik meelevaldse tuumareaktsiooni (5.2) soojustefekti arvutada valemi (5.4) alusel.

Teostanud arvutuse konkreetse reaktsiooni (5.1) jaoks leiame,  $Q = -1,16$  MeV, s.o. energia selles reaktsioonis neeldub. Selle energia arvel suureneb osakeste kogumass. Reaktsiooni (5.1) võib detailsemalt kirjutada nüüd nii:

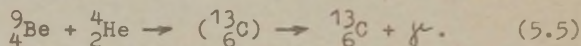


Tuntakse ka selliseid ( $\alpha$ , p)-reaktsioone, milles energia eraldub, näiteks



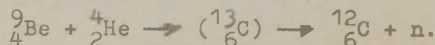
## 5.2. Neutroni avastamine

Neutroni avastamise lugu on järgmine. 1930.aastal avastati, et berülliumi ( ${}^9_4\text{Be}$ ) pommitamisel  $\alpha$ -osakestega tekib väga suure läbitungimisvõimega kiirgus, mida esialgu arvati olevat  $\gamma$ -kiirgus ning oletatav reaktsioon selline:

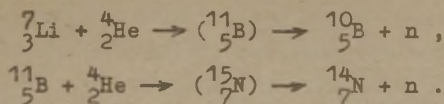


1932.aastal uurisid Irène ja Frédéric Joliot-Curie väga põhjalikult seda läbitungivat kiirgust ja kogusid tema kohta palju eksperimentaalseid andmeid. Nende andmete teoreetiliseks seletamiseks oletas Chadwick, et tegemist on väga suure energiaga elektriliselt neutraalsete osakeste voo-ga. Neid osakesi hakati nimetama *n e u t r o n i t e k s* (n). Neutroni mass on väga lähedane prootoni massile, kuid veidi suurem sellest.

Kõne all olnud reaktsioon (5.5) toimub tegelikult järgmiselt:

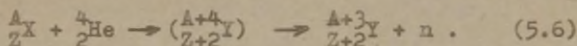


Hiljem on avastatud ka teisi reaktsioone, mille tulemusena tekib neutron. Näiteks



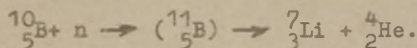
Need kõik on nn. ( $\alpha$ , n)-tüüpi reaktsioonid. Sageli juhtub, et tekkinud tuum on ergastatud olekus ning kiirgab välja veel  $\gamma$ -kvandi.

( $\alpha$ , n)-reaktsiooni üldskeem on niisiis järgmine:

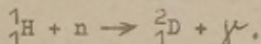


Nendes reaktsioonides tekkivad neutronid on väga suure energiaga. Kuna neil puudub elektrilaeng, mis põhjustaks takistava tõukejõu nende lähenemisel aatomituumadele, siis tungivad nad kergesti tuuma sisse ning kutsuvad esile selle muundumise.

Tuumareaktsioone võivad kutsuda esile mitte ainult kiired neutronid, vaid ka aeglased, mille kiirused on võrreldavad aatomite soojusliikumise kiirustega. Kiirete neutronite aeglustamiseks juhitakse neid läbi vesinikku sisaldavate ainete (parafiin, vesi), kus nad elastselt põrkudes prootonitega kaotavad oma energiat seni, kuni neile jääb antud temperatuurile kohane soojusenergia. Sellisel viisil saadud neutroneid nimetatakse s o o j u s l i k e k s n e u t r o n i t e k s. Need võivad esile kutsuda (n, $\alpha$ )-tüüpi reaktsioone. Näiteks



Kuid nad võivad ka lihtsalt neelduda tuumas ja selle tagajärjena võib tekkida massiivsem stabiilne tuum. Näiteks



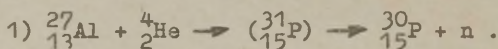
### 5.3. Tehisradioaktiivsus

Pommitades mitmesuguseid aineid  $\alpha$ -osakestega avastasid I. ja F. Joliot-Curie huvitava nähtuse - mõned ained kiirgasid veel tükk aega pärast pommitamise lõpetamist.

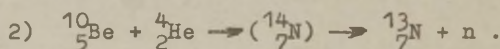
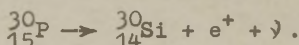
Uurimised näitavad, et selle "järelkiirguse" intensiivsus kahaneb ajas eksponentsiaalselt samuti kui radioaktiivsetel ainetel. Siit tekkiski arvamine, et  $\alpha$ -osakestega esile kutsutud tuumareaktsioonides tekivad seni stabiilsetena tuntud elementide radioaktiivsed isotoobid. Hiljem selgus, et radioaktiivsed isotoobid tekivad ka neutronite poolt esile kutsutud tuumareaktsioonides.

Resümeena esitame definitsiooni: t e h i s r a d i o - a k t i i v s u s on tuumareaktsioonide vahendusel tekitatud radioaktiivsus. Rõhutame, et põhimõtteliselt erinevust loodusliku ja tehiseradioaktiivsuse vahel ei ole. Kui mingi tuum on radioaktiivne, siis laguneb ta ikkagi spontaanselt, sõltumata oma tekke viisist.

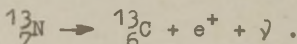
Toome näitena mõned ajalooliselt varasemad reaktsioonid, milles tekivad radioaktiivsed elemendid:



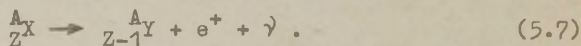
Tekkinud  ${}_{15}^{30}\text{P}$  on positronaktiivne ehk  $\beta^+$ -aktiivne ( $T \approx 3$  min) ja laguneb alljärgnevalt:



Selles reaktsioonis tekkinud  ${}_{7}^{13}\text{N}$  on samuti positronaktiivne ( $T \approx 11$  min) ja laguneb alljärgnevalt:



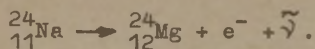
Kirjeldatud näidete abil jätame meelde  $\beta^+$ -lagunemise skeemi:



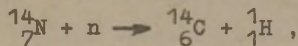
Täpsustamiseks nimetatakse skeemi (3.3) järgi toimuvat muundumist  $\beta^-$ -lagunemiseks.



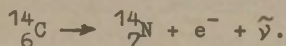
Tekkinud  ${}_{11}^{24}\text{Na}$  on elektronaktiivne ( $T = 14,8$  h) ja laguneb alljärgnevalt:



Radioaktiivsed isotoobid võivad tekkida ka (n,p)-tüüpi reaktsioonides. Näiteks



kus  ${}_{6}^{14}\text{C}$  on elektronaktiivne ( $T \approx 5600$  aastat) ja laguneb järgmiselt:



Nagu nägime, võib  $\beta$ -aktiivsus olla kahesugune (vt. skeeme (3.3) ja (5.7), s.o. tuum võib paisata välja kas elektroni või positroni. Looduslikult esinevad ainult elektronaktiivsed ehk  $\beta^{-}$ -aktiivsed ained.

## 6. Laetud osakeste kiirendamine

Tuumareaktsioone saab esile kutsuda mitte ainult  $\alpha$  - osakeste ja neutronitega, seda saaks teha ka näiteks prootonite või mõnede teiste osakestega, kui nende energia (kiirus) oleks küllaldane selle osakese tungimiseks aatomituuma. Nii tekkis osakeste kiirendamise vajadus. Tänapäeval tuntakse mitmeid seadmeid ja meetodeid laetud osakeste kiirendamiseks.

### 6.1. Van de Graaffi<sup>\*</sup> elektrostaatiline generaator

Kui elektrivälja mõjul osake massiga  $m$  ja laenguga  $q$  liigub punktist potentsiaaliga  $\varphi_1$  punkti potentsiaaliga  $\varphi_2$ , teeb elektrivälja tööd

$$A = q (\varphi_1 - \varphi_2) = qU.$$

See elektrivälja töö saab osakese kinetiliseks energiaks

$$W_k = \frac{mv^2}{2},$$

s.o.

$$\frac{mv^2}{2} = qU.$$

Osake on saanud kiiruse

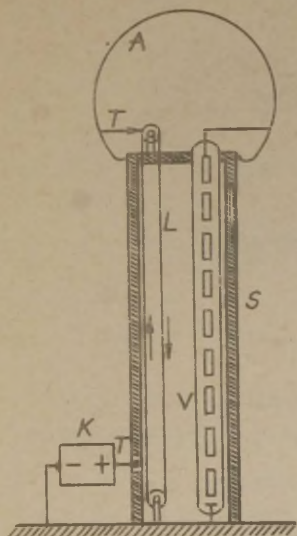
$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Sega saab osake vajaliku kiiruse  $v$ , kui on tekitatud küllalt suur pinge  $U$ .

Van de Graaffi generaatoris tekitatakse kõrge pinge isoleermaterjalist sambale  $S$  toetuva õõnsa metallkera (konduktori)  $A$  ja Maa vahel (joon. 6:1). Kerale kantakse

---

\* R. van de Graaff (1901-1967), ameerika füüsik.



Joon. 6:1.

rilahendus gaasis kõrgematel pingetel (elektrivälja suurema tugevuse juures).

laengu isoleermaterjalist lindi L abil, mis saab laengu alalispinge allikalt K (pinge suurusjärgus 10 kV). Laengu ülekanne lindile ja sellelt metallkerale toimub teraviksüsteemide T kaudu. Osakeste kiirendamine toimub vaakumtorus V, mille üks elektrood on ühendatud keraga, teine maandatud.

Niisugustes generaatorites võib pinge konduktori A ja Maa vahel viia kuni 10 MV-ni. Samba kõrgus peab seejuures olema kuni 15 m ja konduktori läbimõõt mõni meeter. Sageli paigutatakse generaator kokkusurutud gaasiga ( $\sim 10^6$  Pa) täidetud kambrisse, sest suure rõhu all algab elekt-

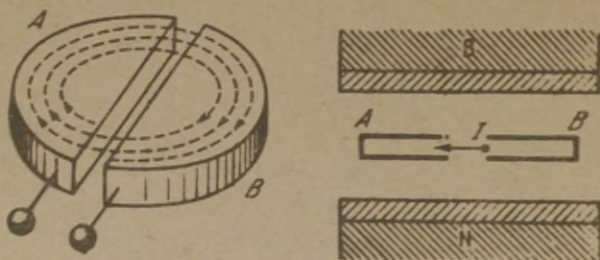
rilahendus gaasis kõrgematel pingetel (elektrivälja suure-

ma tugevuse juures).

## 6.2. Tsüklotron<sup>3\*</sup>

Tsüklotroni põhiosadeks on kaks õõnsat poolsilindrilist elektroodi (duanti), mis asetsevad elektromagneti pooluste vahel (joon. 6:2) ja on ühendatud vahelduvpinge allikaga. Kogu süsteem paikneb kõrgvaakumis. Laetud osake, sattunud duantidevahelisse pilusse kusagil selle keskpaiga lähedal, saab seal valitsevas elektriväljas mingi kiiruse ja liigub selle duandi õõnsusse, kus magnetvälja mõjul teeb poolringi ning tuleb tagasi elektrivälja, mis selleks ajaks on vastupidise suunaga, ja uuesti kiirendab osakest, jne.

<sup>3\*</sup> Tsüklotroni idee kuulub ameerika füüsikule Ernest Orlando Lawrence'ile (1901-1958), kes ehitas ka esimese tsüklotroni 1932.aastal.



Joon. 6:2.

Tsüklotroni pideva tegutsemise tagamiseks peab osakese tiirlemisperiood  $T$  võrduma kiirendava elektrivälja perioodiga  $T_{\sim}$ . Seda tingimust

$$T = T_{\sim} \quad (6.1)$$

nimetatakse resonantstingimuseks.

Osakese tiirlemisperioodi saab leida valemist

$$T = \frac{2\pi R}{v}, \quad (6.2)$$

kus  $v$  on osakese kiirus ja  $R$  trajektoori raadius.

Võttes  $R$  valemist (2.2) saame valemist (6.2)

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (6.3)$$

Relatiivsusteooria järgi sõltub osakese mass kiirusest

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (6.4)$$

Seega toob osakese massi relativistlik kasv kaasa osakese tiirlemisperioodi suurenemise etteantud magnetväljas.

Valemite (6.1) ja (6.3) abil saab resonantstingimuse viia kujule

$$T_{\sim} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (6.5)$$

Kuna tsüklotroni konstruktsiooni järgi  $T_{\sim} = \text{const}$  ja  $B = \text{const}$ , siis resonantstingimus (6.5) võib täituda vaid

siis, kui osakese massi relativistlik kasv on veel väike, s.o.

$$\frac{m - m_0}{m_0} \ll 1. \quad (6.6)$$

Tingimusele (6.6) saab anda praktiliste rakenduste tarbeks lihtsamini interpreteeritava kuju, kui kasutame relativistlikku koguenergiat

$$E = mc^2 = m_0c^2 + W_k, \quad (6.7)$$

kus  $W_k$  on kineetiline energia.

Valemitest (6.6) ja (6.7) saame tingimuse

$$W_{kin} \ll m_0c^2. \quad (6.8)$$

Valem (6.8) näitab, et tsüklotron sobib ainult suure seisumassiga osakeste (näit. prootonid, deutronid,  $\alpha$ -osakesed) kiirendamiseks. Tsüklotroniga on saadud prootoneid energiaga kuni 20 MeV.

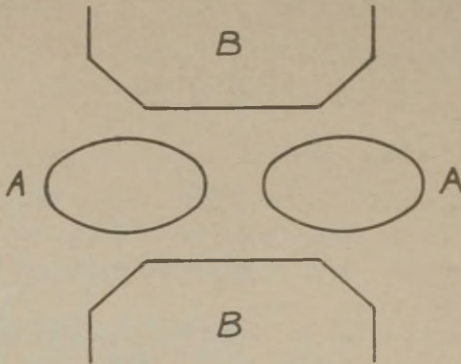
Ülal me selgitasime, et tsüklotronis paneb saavutata-vale kiirusele piiri massi muutumine kiiruse kasvades. Kui osakese mass suure kiiruse juures hakkab märgatavalt suure-nema, muutub osakese tiirlemise periood, mis nõuab duanti-dele rakendatud vahelduvpinge sageduse muutumist. On selli-seid seadmeid (kiirendeid), milles vastavalt massi suurene-misele vähendatakse vahelduvpinge sagedust või hoitakse tiirlemise periood (vahelduvpinge sagedus) muutumatuna mag-netvälja induktiooni suurendamisega. Selliseid kiirendeid nimetatakse vastavalt *f a s o t r o n i k s* ja *s ü n k - r o t r o n i k s*. Kiirendit, milles muutub nii vahelduv-pinge sagedus kui ka magnetvälja induktioon, nimetatakse *s ü n k r o f a s o t r o n i k s*.

Fasotroniga on saadud prootoneid energiaga kuni  $\sim 1$  GeV, sünkrotroniga elektrone energiaga kuni  $\sim 10$  GeV ja sünkro-fasotroniga prootoneid energiaga kuni  $\sim 500$  GeV.



### 6.3. Beetatron\*

Beetatron on elektronide kiirendi. Kiirendamine toimub keeriselises elektriväljas, mis tekitatakse magnetvälja muutmisega. Beetatroni põhiosadeks on elektromagnet, mille pooluste (B) vahel asetseb toroidaalne (ringtorukujuline) vaakumkamber A (joon. 6:3 on kujutatud seadme telglõige).



Joon. 6:3.

Magnetvälja induksiooni kasvades või kahanedes tekib toroidis keeriseline elektriväli, mille ringjoonekujulised jõujooned on risti joonise tasandiga.

Toroidisse juhitud elektronid, liikudes mööda elektrivälja jõujooni, saavad pidevalt kiirust juurde ning võivad põhimõtteliselt saavutada suure energia, sest nende massi muutumine suurtel kiirustel ei ole kiirendusele takistuseks, nagu see on tsüklotronis. Kui magnetvälja pidev muutumine (selle induksiooni kasv või kahanemine) kestab  $10^{-3}$  s, jõuavad elektronid teha selle aja sees mitusada tuhat tiiru ja saavutada energia kuni 100 MeV. Kui nii kiirendatud elektronidega pommitada tahkeid kehi, tekib väga kalk  $\gamma$ -kiirgus, mida saab kasutada mitmel otstarbel (tuu-

\* Esimese beetatroni konstrueeris ameerika füüsik D. Kerst (sünd. 1911).

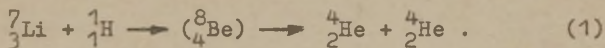
mareaktsioonide tekitamine, detailide kontroll tehnikas jms.).

Põhimõtteliselt võiks beetatroni kasutada ka prootonite kiirendamiseks. Kuid arvutus näitab, et magnetvälja samade parameetrite puhul on prootonite ja teiste raskete osakeste poolt beetatronis omandatav energia tunduvalt väiksem kui elektronidel. Seetõttu leiab beetatron praktilikas rakendamist ainult elektronide kiirendina.

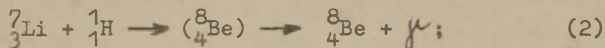
#### 6.4. Tuumade muundamine kiirendatud osakeste abil

Kiirendite abiga osutus võimalikuks kutsuda esile veel mitmeid tuumareaktsioone lisaks nendele ( $\alpha$ , p)-, ( $\alpha$ , n)- ja (n,  $\alpha$ )-tüüpi reaktsioonidele, mis varem mainitud.

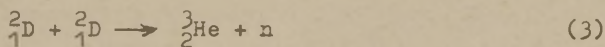
Kiirendatud prootonid ja deutronid osutusid küllalt võimsateks pommideks kergete elementide tuumade jaoks. On teostatud näiteks selliseid reaktsioone:



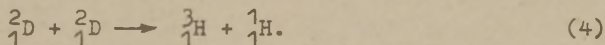
Mõnikord kulgeb see reaktsioon ka nii:



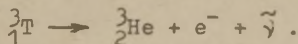
s.o. et tekkinud  ${}^8_4\text{Be}$  tuum on ergastatud olekus ja hiljem kiirgab ülearuse energia välja  $\mu$ -kvandina ( $h\nu = 17,2 \text{ MeV}$ ).



või



Tekkinud  ${}^3_1\text{H} = {}^3_1\text{T}$  (tritium ehk üliraske vesinik) on radioaktiivne ( $T \approx 12$  aastat) ning laguneb:

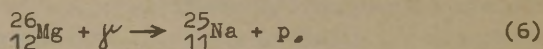
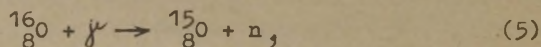


Reaktsiooni (3) kasutatakse neutronite saamiseks.

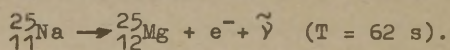
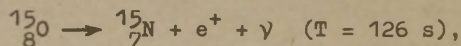
Raskemate tuumade sisse kiirendatud prootonid ja deutronid tungida ei suuda (suurte elektrostaatiliste tõukejõudude tõttu) ning neid saab muundada vaid neutronite abil

(tõukejõud puuduvad).

Beetatronis kiirendatud väga suurte energiatega elektronide abil tekitatud kalk  $\mu$ -kiirgus võib ka kutsuda esile tuumareaktsioone. Näiteks



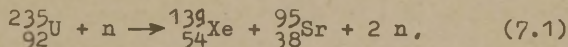
Mõlemas reaktsioonis tekkinud uued tuumad on radioaktiivsed:



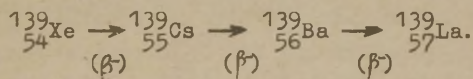
## 7. Raskete tuumade lõhustumine. Ahelreaktsioonid

Kuni 1939. aastani tunti niisuguseid tuumade muundumisi, kus tuum eraldab ühe või haruldastel juhtudel mitu osakest ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n$  jne.) ning muundub ise kas naaberelemendi tuumaks või isegi ainult sama elemendi teiseks isotoobiks.

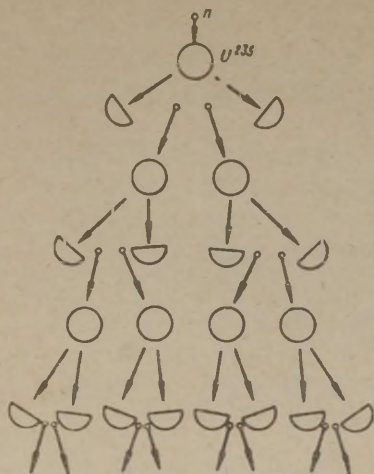
1939. aastal avastati põhimõtteliselt uus muundumise protsess, kus raske aatomi tuum jaguneb kaheks killuks, mille massid on võrreldavad suurused. Sellist muundumist nimetatakse lõhustumiseks. Protsess avastati uraani kiiritamisel neutronitega. Näiteks:



Mõlemad tekkinud tuumad  ${}_{54}^{139}\text{Xe}$  ja  ${}_{38}^{95}\text{Sr}$  sisaldavad liialt palju neutroneid (kõige raskemad stabiilsed isotoobid on  ${}_{54}^{136}\text{Xe}$  ja  ${}_{38}^{88}\text{Sr}$ ), seepärast on nad ebastabiilsed ning teevad läbi rea  $\beta^-$ -lagunemisi:



See pole sugugi ainus võimalik reaktsioon. Iga kord, kui neutron tungib  ${}_{92}^{235}\text{U}$  tuuma, lõhustub see kaheks killuks, mis kuuluvad elementide perioodilisuse süsteemi keskmisesse kolmandikku. Niisugusel lõhustumisel vabaneb suur hulk energiat ( $\sim 200$  MeV ühe tuuma kohta). Uraani isotoopidest on kuitahes väikese kineetilise energiaga neutronite toimel võimalised lõhustuma ainult  ${}_{92}^{235}\text{U}$  tuumad. Need 2 - 3 neutronit, mis vabanevad ühe tuuma lõhustumisel, võivad sattuda teistesse  ${}_{92}^{235}\text{U}$  tuumadesse ja kutsuda esile nende lõhustumise (joon. 7:1). Nii saab alguse ja areneb ahelreaktsioon. Seadet, milles tekitatakse juhitud aatomituumade lõhustumise ahelreaktsioon, nimetatakse tuumareaktoriaks.



Joon. 7:1.

mass olema väiksem nn. kriitilisest massist, mille väärtus sõltub ka veel ainetüki kujust.  ${}_{92}^{235}\text{U}$  jaoks on Heisenbergi hinnangu järgi see umbes 9 kg.

Looduslikus uraanis on isotoopi  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ainult 0,7 %, 99,3 % on raskemat isotoopi  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ja ääretult vähe ka  ${}_{92}^{235}\text{U}$ -ga analoogilise lõhustumisvõimega  ${}_{92}^{233}\text{U}$ , millel tema vähesuse tõttu pole mingit tähtsust. Seetõttu looduslikus uraanis ahelreaktsioon toimuda ei saa, kuna lõhustumisvõimelised tuumad, olles hajutatud aines ühtlaselt, paiknevad üks ühest nii kaugel, et lõhustumisel vabanevad neutronid ei taba teisi sarnaseid tuumi. Ei ole küll vajalik puhas  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , kuid mõneprotsendiline selle komponendi sisaldus on vajalik, et lõhustumiste ahel saaks tekkida. Nii tekkis ja on ka lahendatud uraani rikastamise probleem (isotoobi  ${}_{92}^{235}\text{U}$  sisaldus viiakse kuni ~ 5 %-ni). Ka niisuguse rikastatud uraani puhul esineb tema säilitamise probleem ning on kindlaks määratud kriitiline mass.

Ahelreaktsioon on võimalik looduslikest elementidest  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ja peale selle veel mõnede uraanist raskemate elementidega, mis looduses ei esine (näiteks  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ).

Ahelreaktsiooni arengu määrab n e u t r o n i t e

Ahelreaktsiooni käimapane-  
miseks pole vaja uraani spetsiaalselt kiiritada neutronitega, sest Maa atmosfääris leidub alati mõni kosmiliste kiirte mõjul tekkinud neutron, mis kutsub esile esimese tuuma lõhustumise ja annab alguse lõhustumiste ahelale. Siit järeldeb, et pole võimalik säilitada lõhustumisvõimelist uraani küllalt suurtes kogustes. Säilitatav kogus peab olema nii väike, et lõhustumisel tekkivad neutronid lendaksid enamuses ainst välja. Seega peab säilitatava aine

paljunemistegur  $k$ , s.o. neutronite arv, mis tekivad ühe lõhustumise esile kutsunud neutroni asemele ja kutsuvad esile uued lõhustumised. Kui  $k = 1$ , on protsess stabiilne, kui  $k > 1$ , areneb ahelreaktsioon edasi. Kui  $k < 1$ , siis ahelreaktsioon kustub.

Tuumaenergia tööstuslikuks tootmiseks on vaja juhtida ahelreaktsiooni nii, et  $k = 1$ . Selleks kasutatakse reguleerivaid vardaid, mille üheks koostisosaks on kas kadmium või boor, mis tugevasti neelavad neutroneid. Esialgu, reaktsiooni käivitamisel, on vardad reaktori aktiivtsoonist väljas ja  $k > 1$ . Teatud aja möödudes, kui neutroneid on tekkinud küllalt palju, viiakse vardad sisse ja reaktsioon aeglustub ning jääb stabiilseks ( $k = 1$ ). Reaktsiooni edasises käigus tagatakse selle stabiilsus varraste sügavuse automaatse reguleerimisega.

Tööstuslikes reaktorites toimub ahelreaktsioon aeglaste, nn. soojuslike neutronite (vt. 5.2) toimel<sup>\*</sup>, mis vähem neelduvad tuumades  ${}_{92}^{238}\text{U}$  (vt. 8) ning seega ei lähe kaotsi vajaliku protsessi seisukohalt. Neutronite aeglustamiseks kasutatakse kõige sagedamini grafiiti, rasket vett või berülliumi. Neutronite energia väheneb nende elastsel põrkumisel nimetatud ainete aatomituumadega.

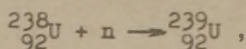
---

\* Toatemperatuuri lähedastel temperatuuridel on soojuslike neutronite kineetiline energia  $\sim 0,025$  eV.

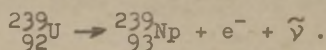
## 8. Transuraanid

Transuraanideks nimetatakse uraanist suurema järjenumbriga looduses mitteesinevaid elemente.

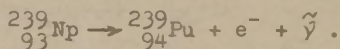
Kui uraani isotoopi  $^{238}_{92}\text{U}$  kiiritada neutronitega, neelab uraani tuum neutroni ja muutub uraani radioaktiivseks isotoobiks  $^{239}_{92}\text{U}$  ( $T = 23$  min):



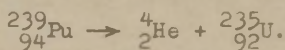
mille  $\beta^-$ -lagunemisel tekib esimene transuraan - neptuunium (Np):



Neptuunium on samuti  $\beta^-$ -aktiivne ( $T = 2,3$  päeva). Selle lagunemisel tekib teine transuraan - plutoonium (Pu):

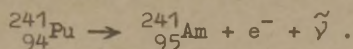


Plutooniumi see isotoop on  $\alpha$ -aktiivne ( $T = 24110$  aastat) ja tema lagunemisel tekib uraani isotoop  $^{235}_{92}\text{U}$ :

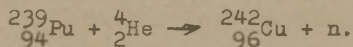


Nii plutoonium ise kui ka tema lagunemisel tekivad  $^{235}_{92}\text{U}$  on lõhustumisvõimelised aeglase neutronite toimel. Seega toimub ahelreaktsiooni käigus segu rikastumine lõhustuvate elementidega.

Järgmised transuraanid tekivad analoogiliselt Np ja Pu tekkimisega. Vaatleme veel kahe järgmise transuraani saamist. Kui pommitada uraani isotoopi  $^{238}_{92}\text{U}$  väga kiirete  $\alpha$ -osakestega, tekib plutooniumi  $\beta^-$ -aktiivne isotoop ja selle lagunemisel - ameriitsium (Am):



Kui pommitada plutooniumi väga kiirete  $\alpha$  -osakestega, tekib järgmine transuraan - kuurium (Cu):



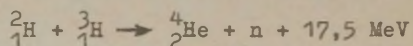
Ameriitsium ja kuurium on mõlemad  $\alpha$  -aktiivsed väga suure poolestusega (ameriitsiumil  $T = 458$  aastat, kuuriumil  $T \simeq 10^7$  aastat).

Tänapäeva viimaseks transuraaniks on element numbriga 109.

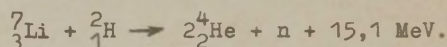
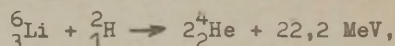
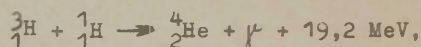


## 9. Termotuumareaktsioonid

Mitte ainult kõige raskemad, vaid ka kõige kergemad elemendid on võimelised muunduma nii, et seejuures vabanevad suured energiahulgad. Raskete elementide korral vabaneb energia tuumade lõhustumisel, kergete elementide puhul aga vastupidi, tuumade liitumisel (vt. 2.3). Nii toimub see näiteks raske ja üliiraske vesiniku muundumisel heeliumiks:



ning ka paljudel teistel juhtudel, nagu



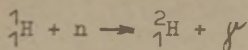
Kõikides nendes reaktsioonides on vaja ületada positiivsete laengute vahel mõjuvaid kulonilisi tõukejõudusid, mis nii väikestel kaugustel on väga suured. Potentsiaalbarjäär on  $\sim 0,1$  MeV.

Soojusliku liikumise keskmisele energiale  $0,1$  MeV vastab temperatuur  $\sim 10^9$  K. Kuid tuumade liitumine võib toimuda ka madalamatel temperatuuridel. Tuleb arvestada, et leidub tuumi, mille energia ületab märgatavalt soojusliikumise keskmise energia. Teatud osa mängib ka potentsiaalbarjääri läbimine kvantmehaanilise tunneliefekti abil juhul, kui osakese energia on väiksem barjääri kõrgusest. Arvutus näitab, et liitumisreaktsioonid võivad märgatava intensiivsusega toimuda juba temperatuuril  $\sim 10^7$  K.

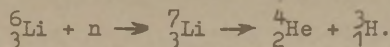
Kui reaktsioon on alanud, siis energia vabanemise tõttu temperatuur tõuseb ja reaktsioon areneb kiirenevalt. Nii-suguseid reaktsioone, mis ei kulge tavalistel temperatuuridel, kuid kulgevad soojuse eraldumisega ja intensiivistuvad

temperatuuri tõustes, nimetatakse termotuumareaktsioonideks.

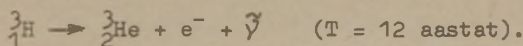
Rasket ja ülrasket vesinikku  ${}^2_1\text{H}$  ja  ${}^3_1\text{H}$  saadakse tuuma-reaktorites, milles tekitatakse aeglasi neutroneid, järgmistes reaktsioonides:



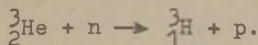
või



Tritium  ${}^3_1\text{H}$  on radioaktiivne:



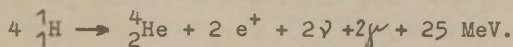
Kuid lagunemisel tekkinud  ${}^3_2\text{He}$  reageerib jälle n mõjul, andes uuesti tritiumi tuuma:



Vesiniku raskete isotoopide tootmine on väga palju aega ja kulu nõudev protsess.

Tänapäeva füüsikud otsivad võimalusi juhtida termotuumareaktsioone nii, et nad kulgeksid stabiilselt vajaliku intensiivsusega, et ehitada termotuumareaktoreid elektrienergia saamiseks.

Päikese kiirguse allikaks on tõenäoliselt tema sisemuses toimuvad termotuumareaktsioonid, sest seal on enam kui 50 % ainest vesinik ja temperatuur  $\sim 10^7$  K, seega on olemas kõik tingimused termotuumareaktsiooniks. Üks niisugune reaktsioon on nn. prooton-prooton-tsükkel, mis koosneb mitmest järjestikusest reaktsioonist ja lõpptulemusena annab:



Selle reaktsiooni põhjal saab välja arvutada, et 1 g vesinikku annab  $628 \cdot 10^9$  J energiat.

Päikese vesinikuvarud on nii suured, et kindlustavad selle kiirguse paljudeks miljarditeks aastateks.

## 10. Kosmiline kiirgus

Maailmaruumist langeb Maale pidevalt ülisuure energia-ga osakeste voog. Need osakesed on peamiselt protonid - 90 % ja  $\alpha$ -osakesed - 6 % ning peale selle veel perioodilisuse süsteemi algusesse kuuluvate elementide aatomituumad. Nende osakeste energia on suurusjärgus  $1 \text{ GeV}^*$ , üksikutel osakestel aga veel mitme järgu võrra suurem. See on k o s - m i l i n e p r i m a a r k i i r g u s .

Jõudnud Maa atmosfääri, tekitavad need osakesed k o s - m i l i s e s e k u n d a a r k i i r g u s e , milles esi-neb enamik tänapäeval tuntud elementaarosakestest.

Kosmilise primaarkiirguse intensiivsus on Maa atmo-sfääri ülemisel piiril  $10^4$  osakest/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ). Merepinnal on laetud osakeste voog 200 osakest/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ), kusjuures see muu-tub Maa magnetvälja mõjul geograafilise laiusega.

Primaarkiirguse ülisuure energiaga osakesed põrkuvad mitteelastselt aatomite tuumadega atmosfääri ülemistes kih-tides, mistõttu tekib sekundaarkiirgus. Kõrgusel kuni 20 km maapinnast ongi valdavalt sekundaarkiirgus, mis koosneb ka-hest komponendist. Üks nendest on suhteliselt väikese läbi-tungimisvõimega, ta neeldub umbes 10 cm paksuses pliikihis - see on nn. p e h m e k o m p o n e n t . Ülejäänud osa läbitungimisvõime on tohutult suur, ta võib läbida ka meet-rist ja paksematki pliikihti - see on k a l k k o m p o - n e n t , mis moodustab umbes 70 % merepinnani jõudvast kos-milisest kiirgusest.

Pehme komponendi moodustavad elektroni-positroni paa-ride laviinid. Protsess on järgmine. Suure kiirusega liikuv

---

\* Juhime tähelepanu asjaolule, et varemalt meie kursuses radioaktiivsuse ja tuumareaktsioonide kirjeldamisel oli tüüpiline energiamastaap megaelektronvolt. Nüüd kosmili-se kiirguse puhul on tüüpiliseks gigaelektronvolt.

laetud osake pidurdub möödudes aatomituumast ja kiirgab vä-  
ga suure energiaga  $\gamma$ -kvandi. See omakorda, sattudes mõne  
tuuma lähedusse, muundub elektroni-positronipaariks. Nende  
osakeste pidurdumisel tekib uuesti  $\gamma$ -kvant jne. (vt.  
joon. 10:1). Selline muundumiste rida lõpeb siis, kui elek-  
troni ja positroni pidurdumisel tekkiva  $\gamma$ -kvandi energia on  
nii väike ( $\leq 1$  MeV), et ta ei saa enam tekitada elektroni-  
positronipaari.

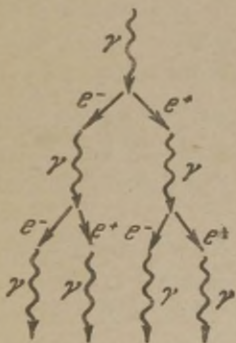
$\gamma$ -kvandi minimaalne väärtus elektroni-positronipaari  
tekitamiseks

$$(h\nu)_{\min} = 2 mc^2,$$

kus  $m$  on elektroni (ka positroni) mass. Arvutades saame

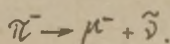
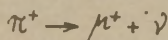
$$(h\nu)_{\min} = 1,02 \text{ MeV}.$$

Kosmilise kiirguse kalgi komponen-  
di moodustavad atmosfääri maapinna-  
lähedastes kihtides peamiselt müö-  
nid (sümbol  $\mu$ ), mis tekitavad kõrge-  
mates kihtides laetud  $\pi$ -mesonite  
ja osaliselt ka K-mesonite lagunemisel.



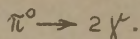
Joon. 10:1.

Laetud  $\pi$ -mesonite seisumass on 273 elektroni-  
massi, nende keskmine eluiga  $\sim 10^{-8}$  s ja nad lagunevad müüoniteks  
ning neutriinodeks, täpsemalt:



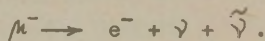
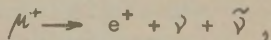
Neutraalsete  $\pi$ -mesonite seisumass on 264 elektroni-  
massi ja nende keskmine eluiga  $\sim 10^{-16}$  s ning nad lagunevad

peamiselt kaheks footoniks



Koos ülraskete osakeste - hüperonidega (seisumass suurem kui prootonil või neutronil) tekivad primaarsete kosmiliste osakeste mõjul veel K-mesonid (kaaonid). K - m e s o n i d võivad samuti kui  $\pi$ -mesonid olla kas positiivse või negatiivse elementaarlaenguga või neutraalsed ( $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ). Nende osakeste seisumass on  $\sim 970$  elektronimassi ja keskmine eluiga  $\sim 10^{-8}$  s ning nad lagunevad  $\pi$ -mesoniteks.

Müüonid on negatiivse või positiivse elementaarlaenguga metastabiilsed osakesed, mille seisumass on 207 elektronimassi ja keskmine eluiga  $\sim 10^{-6}$  s. Nad lagunevad järgmiselt:



Primaarse kosmilise kiirguse allikad asuvad galaktikates. Oletatakse, et see kiirgus tekib kvasarites, supernoovades, galaktikatuumades ja teistes plahvatuslikes objektides.

K v a s a r i d ehk ülitähed on intensiivse kosmilise raadiokiirguse allikad, mis on nähtavad tähetaoliste objektidena ja asuvad meist seni tuntud kosmoseobjektidest kõige kaugemal (kaugus miljardeid valgusaastaid). Arvatakse, et kvasarid tekivad galaktikate varasel arenemiseta-pil galaktikatuuma gravitatsioonilise kollapsiga (kokkuvarisemisega) kaasneva plahvatuse tagajärjel.

S u p e r n o o v a d on termotuumareaktsioonide tagajärjel katastroofiliselt mittestabiilsesse evolutsiooni lõppfaasi jõudnud tähed, mis ootamatult süttivad üliheledate nn. uute tähtedena. Nende tähtede plahvatuse võimsus ja kulg sõltuvad tähe massist. Suurte (massiga kümnekond Päikese massi või enam) supernoovade plahvatus algab tuuma gravitatsioonilise kollapsiga (kokkuvarisemisega), mis põhjustab osa väliskihtide eemalepaiskumise. Väljapaiskuva aine kiiruse suurusjärg on 1000 km/s.

## Sisukord

1. Elementaariosakesed .....	3
1.1. Elementaariosakeste karakteristikud ja liigitus .....	3
1.2. Footon .....	6
1.3. Elektron .....	6
1.4. Positron .....	7
1.5. Prooton .....	7
1.6. Neutron .....	8
1.7. Neutriino .....	8
1.8. Kvargid .....	9
2. Aatomituum .....	10
2.1. Aatomituuma koosseis. Isotoobid .....	10
2.2. Isotoopide uurimine massispektrograafi abil .....	12
2.3. Massidefekt. Seoseenergia. Tuumade stabiilsus .....	15
2.4. Tuumajõud .....	16
3. Looduslik radioaktiivsus .....	19
3.1. $\alpha$ -kiirgus .....	19
3.2. $\beta$ -kiirgus .....	21
3.3. $\gamma$ -kiirgus .....	23
3.4. Radioaktiivse lagunemise seadus .....	24
3.5. Radioaktiivne tasakaal .....	26
3.6. Radioaktiivsed ained looduses .....	27
3.7. Dosimeetria põhimõisted .....	32
4. Radioaktiivse kiirguse registreerimise meetodid .....	35
4.1. Spintariskoop .....	35
4.2. Gaaslahendusloendur .....	35
4.3. Wilsoni kamber .....	36
4.4. Fotoemulsioonimeetod .....	37

5. Tuumade muundamine .....	38
5.1. Esimesed tuumareaktsioonid .....	38
5.2. Neutroni avastamine .....	40
5.3. Tehisradioaktiivsus .....	41
6. Laetud osakeste kiirendamine .....	44
6.1. Van de Graaffi elektrostaatiline gene- raator .....	44
6.2. Tsüklotron .....	45
6.3. Beetatron .....	48
6.4. Tuumade muundamine kiirendatud osakes- te abil .....	49
7. Raskete tuumade lõhustumine. Ahelreaktsioon	51
8. Transuraanid .....	54
9. Termotuumareaktsioonid .....	56
10. Kosmiline kiirgus .....	58

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.  
Составитель Ольга Манкин.  
На эстонском языке.  
Тартуский государственный университет.  
ЭССР, 202400, г.Тарту, ул.Вликобли, 18.  
Vastutav toimetaja J. Lembra.  
Paljundamisele antud 30.03.1989.  
MB 01437.  
Formaat 60x84/16.  
Potaatoripaber.  
Masinakiri. Rotaprint.  
Tingtrükipoogmaid 3,72.  
Arvestuspoogmaid 3,52. Trükipoogmaid 4,0.  
Trükiarv 500.  
Tell. nr. 155.  
Hind 10 kop.  
TRÜ trükikoda. ENSV, 202400 Tartu, Tiigi.t. 7B.