

## Tuumafüüsika

### Aatomimudelid

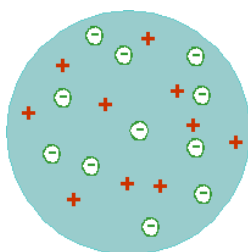
#### Daltoni piljardipallimudel



Esimese tänapäeva mõistes tõsisemalt võetava katse kirjeldada aatomit tegi John Dalton 1803.a. Daltoni mudeli kohaselt olid aatomid homogeensed ja kerakujulised (läbimõõduga ca 100 pm) nagu piljardipallid. Kõik lihtaine aatomid olid kõik ära vahetamiseni ühesugused. Liitained aatomid aga koosnevad erinevate elementide aatomitest.

Daltoni teooria kohaselt keemiliste reaktsioonide käigus aatomid ei muutu, nad paiknevad reaktsioonide käigus teineteise suhtes ümber, ainekoguse mass tervikuna ei muutu.

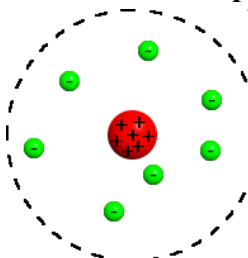
#### Thomsoni rosinasaiamudel



1870-del aastatel avastati katoodekiired – negatiivse elektrilaenguga „kiired“, mis tekivad vaakumisse asetatud metallitükil, mis on ühendatud vooluallika negatiivse poolusega. 1896 aastal avastas inglise füüsik Joseph John Thomson, et katoodekiired koosnevad väikestest negatiivse laenguga osakestest, mida ta hakkas nimetama elektronideks (Nobeli preemia 1906).

Thomsoni oletuse kohaselt pärinesid tema poolt avastatud elektronid aatomitest – järelikult ei saa aatomid olla homogeensed. Nii kirjeldas Thomson aatomit kui rosinasaiat (tuntud ka ploompudingi mudelina). Selle kohaselt on aatomid kerakujulised (läbimõõduga ca 100 pm) ning täidetud positiivse elektrilaengu massiga (nagu saias küpsetatud tainas), millesse on pikitud negatiivselt laetud osakesi – elektrone (nagu rosinaid saias), mis saavad teatud tingimustel aatomist lahkuda – saavad tekkida katoodekiired.

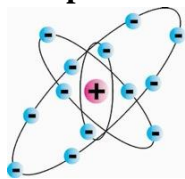
#### Rutherfordi õhupallimudel



Uus-Meremaa päritoluga Briti füüsik Ernest Rutherford, keda tema kaasaegsed pidasid parimaks eksperimenteerijaks pärast Michael Faraday aega, püüdis 1909. aastal kontrollida Thomsoni aatomimudeli paikapidavust. Tema hüpotees oli: pommitades ainet „raskete“ positiivsete aldaosakestega (heeliumi aatomi tuumadega), peaks enamik osakestest jääma ainesse kinni ja selle tulemusena peaks aine laaduma positiivselt.

Rutherford pommitas väga õhukest kuldlehte aldaosakestega ning tõdes, et enamik nendest läks sellest (peaaegu) suunda muutmata läbi, mingi hulk osakesi pörkas aga lehelt tagasi. Katse tulemusena esitas Rutherford uue niinimetatud õhupallimudeli, mille kohaselt: enamus aatomist läbimõõduga 100 pm on tühi; aatomi keskel asub väike (umbes aatomi mõõtudest 10 tuhat korda väiksem) massiivne tuum, millesse on koondunud positiivne elektrilaeng; tuuma mass on ligikaudu võrdne aatomi kogumassiga ning elektronid „hõljuvad“ tuumalähedases ruumis nagu õhupallid.

## Bohr planetaarmudel



Taani füüsikut Niels Bohr häiris Rutherfordi elektronide „õhupallikäsitus“ – negatiivse laenguga elektronid peaksid langema tuumale, mille tulemusena aatom häviks. Võrrelnud massijaotust aatomis mass jaotumisega Päikesesüsteemis, täiendas Bohr Rutherfordi mudelit, pannes elektronid tiirlema ümber tuuma nagu tiirlevad planeedid ümber Päiikese – sündis Rutherfordi-Bohr planetaarmudel. On teada, et kiirendusega liikuv elektrilaeng, aga ringjoonel liikuv elektron täidab seda tingimust, peab kiirgama elektromagnetlaineid – näiteks valgust. Enamik aatomeid enamuse ajast valgust ei kiirga.

Kuna tollaste teadmistega polnud võimalik kujunenud vastuolu lahendada, sõnastas Bohr postulaadid, mille kohaselt:

1. Võivad elektronid tiirelda vaid tuumast kindlatel kaugustel asuvatel orbiitidel, millest igaühele vastab kindel energia. Sellistel statsionaarsetel orbiitidel liikuvad elektronid elektromagnetlaineid ei kiirga.
2. Kiirgab aatom valgust (valgusosakese – footoni) kui elektron temas läheb suurema energiaga orbiidilt madalama energiaga orbiidile, kui elektron läheb madalama energiaga orbiidilist kõrgema energiaga orbiidile, toimub valguse (osakese – footoni) neeldumine.

## Aatomi tuum

Aatomi tuum on moodustatud kahte sorti osakestest - elektriliselt neutraalsetest neutronitest ja positiivse laenguga protonitest. Tuumalaebimõõt on suurusjärgus  $10^{-15}$  m. Kui aatomit mõtteliselt suurendada nii, et aatomituum saaks nõõpnõela suuruseks, siis terve aatom saaks suure staadioni suuruseks.

## Seoseenergia

Energiat, mis tuleb kulutada tuuma lõhkumiseks eraldiasuvateks nukleonideks, nimetatakse tuuma seoseenergiaks.

## Eriseoseenergia

Energiat, mis kulub tuuma lõhkumisel keskmiselt ühe nukleoni kohta, nimetatakse tuuma eriseoseenergiaks.

## Tuumareaktsioonid

Tuumareaktori töö aluseks on lõhustumisprotsess, mille käigus laguneb tuum kaheks peaaegu võrdseks tükiks mida nimetatakse kildtuumadeks või lõhustumissaaduseks. Mõned rasked tuumad on võimelised spontaanselt lõhustuma, teiste puhul on selleks vaja lisaenergiat. Lõhustumise käigus vabaneb energiat, peamiselt kildtuumade kineetilise energiana, mis muundatakse kiiresti termiliseks - seega tuumakütuse temperatuur tõuseb.

Üks tuntumaid isotoope, mis lõhustub energia lisamisel (ehk neutronitega pommitamisel) on looduslik uraan, mis koosneb 0,7%  $^{235}\text{U}$  ja 99,3%  $^{238}\text{U}$ . Lõhustumise juures on oluline fakt, et kildtuumad ei ole stabiilsed ning emiteerivad protsessi käigus 2 kuni 4 neutronit, mis on võimelised põhjustama uut lõhestumist.

Enamus vabanevatest neutronitest kiiratakse vahetult lõhustumise käigus, osad aga emiteeritakse hilinenult, mõni sekund kuni paar minutit hiljem. Viimaseid nimetatakse hilinenud neutroniteks. Neutronite vabanemine muudab võimalikuks ahelreaktsiooni tekkimise, tänu hilinenud neutronite olemasolule on võimalik aga reaktoris toimuvat kontrollida.

Keskmiselt vabaneb tuumareaktoris lõhustumise käigus 2,3 neutronit, samas aga haaravad neid reaktori aeglustid ning ka kütus. Kadude hulka kuulub ka hajumine või difusioon väljapoole süsteemi. Reaktorites püütakse luua olukord, kus neutronite kadu oleks minimaalne.

Kriitilisus saabub, kui lõhestumisel kiirgunud mitmest neutronist vähemalt üks tekitab järgmise tuuma lõhestumise.

Juhul kui uraan-238 tuum neelab hoopis kiire neutroni, muutub ta uraan-239, mille lõplik lagunemissaadus on plutoonium-239. Ka plutoonium lõhustub või seob neutroneid, moodustades täiendavalt aktiniidide isotoope nagu ameriitsium või kүүrium.

Mõnedes reaktorites üritatakse kasutada kütusena oksiidkütusesegu, mis sisaldab rikastatud uraani, kuhu on segatud kasutatud kütuse töötlemisel saadud plutoonium. Seda käsitatakse kütuse taaskasutusena ja tuumarelvade valmistamiseks sobiva plutooniumi varude kontrolli all hoidmisena.

## **Tuumaenergeetika**

### **Reaktor**

Seade, milles toimub tuumareaktsioon, kus seda kontrollitakse ja kust vabanenud soojus viiakse soojuskandjaga välja. Reaktori konstruktsioon, materjalid, kaitsekest ja turvasüsteemid võivad neil harvadel juhtudel, kui midagi valesti läheb, tuumaõnnetuse tagajärgi leevendada või isegi päris ära hoida.

### **Tuumakütus**

Enamikus reaktorites on kütuseks tsirkooniumisulamist torudesse paigutatud keraamilise uraanoksiidi UO<sub>2</sub> tabletid. Olenevalt reaktoritüübist kasutatakse kas rikastatud (tavaliselt 3,5-5% U-235) või looduslikku (ainult 0,7% U-235) uraani. Mitmest sellisest 3,5 kuni 4 m pikkusest kütusevardast koostatakse reaktori südamikku asetamiseks kütusekomplektid. Mitmetes riikides kasutatakse tuumkütusena ka uraani ja plutooniumioksiidide segu – nn MOX-kütust.

### **Aeglusti**

Aine, mis aeglustab kütusetuumade lõhustumises tekkivaid kiireid neutroneid ja muudab nad sellega efektiivsemateks ahelreaktsiooni tekitajateks. Kõige rohkem kasutatakse tavalist vett, kuid ka rasket vett (D<sub>2</sub>O) ja grafiiti. Tavaline vesi, mis lisaks aeglustamisele ka neelab neutroneid, ei ole aeglustina nii efektiivne kui eeltoodud.

### **Jahutusvedelikust (või -gaasist)**

Soojuse ära juhtimiseks - vesi ja raske vesi täidavad tihti ka aeglusti rolli. Veel on variantideks vedel naatrium, heelium jm.

### **Juhtvardad, kontrollvardad**

Neutroneid neelavat ainet sisaldavad vardad, mille väljatõmbamisega reaktorisüdamikust või sellesse sisse lükkamisega saab ahelreaktsiooni kiirust muuta või lõhustumisprotsessi üldse seisata. Neelavateks aineteks on tavaliselt boor, hafnium või kaadmium. Peaaegu kõikides reaktorites on ahelreaktsiooni kiireks summutamiseks ka lisasüsteem, mis vajaduse korral juhib reaktoris neutroneid neelavat vedelikku või gaasi.

### **Avariivarrastest**

Kriitilisuse kiireks minimaliseerimiseks avariide puhul.

**Poolestusaeg**

Aeg, mille jooksul antud isotoobi kogus väheneb radioaktiivse lagunemise tõttu kahekordselt. Järgmise poolestusajaga laguneb pool allesjäänutest, mitte allesjäänud pool. Radioaktiivse lagunemise tõttu muutub isotoop teiseks radioaktiivseks isotoobiks.

**Ülesanne**

Mitme poolestusaja jooksul laguneb 100 grammi ainet 6,25 grammiseks kui selle aine poolestusaeg on 2 tundi? Mitu tundi see aine laguneb, et jõuda soovitud kaaluni?

Lahendus

1	100,00	2,00	50,00
2	50,00	2,00	25,00
3	25,00	2,00	12,50
4	12,50	2,00	6,25

Et saada 100 grammist 6,25 grammi kulus  $4 \times 2 = 8$  tundi.

**Ülesanne**

Algselt on 200 grammi ainet. Peale 20 minutit on järel 12,5 grammi ainet. Mis on aine poolestusaeg?

Lahendus

Algselt jagame algset kogust 200 grammi nii kaua kahega kuni saame otsitava suuruse ehk 12,5 grammi.

	Algne	Lõpus
1	200	100
2	100	50
3	50	25
4	25	12,5

Saime teada, et selleks kulub 4 poolestusaega. Kuna meil on 20 minutit siis jagame selle 4-ga ja saame et ühe poolestusaeg on 5 minutit.

**Ülesanne**

Algselt on 500 grammi ainet. Aine poolestusaeg on 11 päeva. Kui palju ainet on alles peale 33 päeva? Mitu protsenti ainet on peale 33 päeva alles?

Lahendus

Jagame 33 päeva poolestusajaga 11 päevaga. Saame 3 poolestusaega.

Teeme kolm poolestusjagamist ja saame, et ainet on siis alles 62,5 grammi.

	Algne	Lõpp
1	500	250
2	250	125
3	125	62,5

Mitu protsenti ainet on alles saame teada siis kui teeme protsentidega 3 poolestus aega. Ning vastus on 12,5% ainet.

	Algne	Lõpp
1	100	50
2	50	25
3	25	12,5

**Isotoobid**

Isotoobid on aatomid, millel on ühesugune prootonite, kuid erinev neutronite arv. Isotoobid on elemendi teisendid, mis erinevad aatommassi poolest. Aatommassi erinevuse põhjus on neutronite erinev arv tuumas. Tuumade tähistamiseks kasutatakse perioodtabeli sümboleid, mille juurde märgitakse tuuma laenguarv  $Z$  (ühtlasi järjekorranumber) ja massiarv  $A$  kujul  ${}^A_ZX$ , kus element  $X$  on tabelis järjekohal  $Z$  (st tuumas on  $Z$  prootonit) ja tuumaosakeste koguarv ehk massiarv on  $A$  (st neutroneid on  $A-Z$ ).

Näiteks looduslik uraan koosneb 3 isotoobist:

${}^{238}_{92}U$ , uraan – 238, tuumas on 92 prootonit ja 146 neutronit ( $Z = 92, A = 238$ )

${}^{235}_{92}U$ , uraan – 235, tuumas on 92 prootonit ja 143 neutronit ( $Z = 92, A = 235$ )

${}^{234}_{92}U$ , uraan – 234, tuumas on 92 prootonit ja 142 neutronit ( $Z = 92, A = 234$ )

**Radioaktiivne dateerimine**

Süsinikdateerimisega saab määrata esemete vanust, mõõtes neis leiduva radioaktiivse  ${}^{14}_6C$  kontsentratsiooni. Mida vanem on ese, seda rohkem  ${}^{14}_6C$  tuumi on lagunened ja seda väiksem on selle isotoobi kontsentratsioon. Pole võimalik määrata kuitahes väikest  ${}^{14}_6C$  kontsentratsiooni, siis saab süsinikdateerimisega määrata maksimaalselt 60 000 aasta vanuste esemete iga.  ${}^{14}_6C$  poolestusaeg on 5568 aastat, mistõttu on  ${}^{14}_6C$  kontsentratsioon selle ajaga langenud  $2^{10} = 1000$  korda.

${}^{14}_6C = C-14 =$  süsinik-14 = radiosüsinik

Põhiline radiosüsiniku allikas on kosmiline kiirgus. Ülisuure energiaga prootonid ja muud aatomituumad tungivad kosmosest atmosfääri ja kohtudes õhu molekulidega, tekitavad laviinina uusi osakesi. Muu hulgas tekib neutroneid, mis võivad lämmastiku  ${}^{14}_7N$  muuta radioaktiivseks süsiniku isotoobiks (C-14). Tekkinud süsinik reageerib kiiresti õhuhapnikuga. Kõigi süsinikuringes osalevate organismide rakkude süsinik koosneb neist samadest isotoopidest, millest õhu süsihappegaas, sest sellest algab kogu toiduahel. Nii saab ka C-14 rakkude koostisse. Surnud orgaaniline aine keskkonnaga enam süsinikku ei vaheta. Radioaktiivne süsinikuisotoop laguneb tasapisi ja selle sisaldus väheneb järjest. Teades radioaktiivse lagunemise seadust, on võimalik allesjäänud C-14 hulga järgi arvutada, kui ammu on uuritav orgaaniline aine lõpetanud süsiniku omastamise. Mida vähem on proovi jäänud radioaktiivset süsinikku, seda vähem kiirgub sellest beeta osakesi ja seda vanema orgaanilise ainega on tegu.

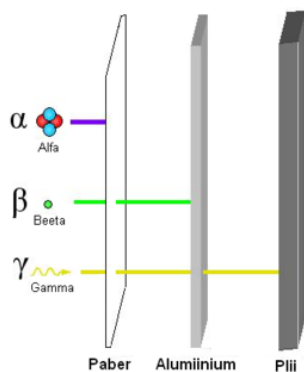
**Kiirgus**

Kiirgus on energiavoog, olenemata energiakandjast (lained või osakesed). Kiirguskaitsest rääkides on aga eriti oluline selle termini derivaat – ioniseeriv kiirgus. Viimane on radioaktiivne kiirgus, mis kannab endas piisavalt energiat, et aatomitelt elektrone eemaldada. Tähendab, kiirguse osakesed on niivõrd suure energiaga, et võivad pörkel aatomiga viimaselt elektroni minema lüüa. Selle tulemusel muutub pihta saanud aatom ioniseerituks.

Ohtlikke kiirgusliike, mis võivad otseselt surmata rakke, tekitada neis kahjustusi või muuta DNA-d, nimetatakse ioniseerivateks kiirgusteks. Ioniseeriva kiirguse dooside mõõtmiseks kasutatakse spetsiaalseid SI kiirgusühikuid.

Materjalides või kudedes neeldunud kiirgusdoosi ühik on grei (Gy). Doos on üks grei, kui ühes kilogrammis neeldub üks džaul kiirgusenergiat  $1Gy = \frac{1J}{1kg}$

Kiirguse mõju organismile kirjeldab paremini ekvivalentdoos, mille ühik on siivert (Sv). Ka siivert väljendab ühes kilogrammis neeldunud energiat džaulides, aga seda korrigeeritakse faktoriga  $W_r$ , mis arvestab kiirguse liikide eripära ja muid üksikasju.



### Alfa

Alfa lagunemine on radioaktiivse lagunemise liik, mille korral eraldub tuumast  $\alpha$ -osake ehk aatomi  ${}^4_2\text{He}$  tuum. Alfa osake on heeliumi aatomi tuum. Alfakiirgus on ioniseeriv radioaktiivne kiirgus, mille läbimisvõime on kõigist ioniseeriva kiirguse tüüpidest kõige väiksem. Käitub magnetväljas nagu positiivselt laetud osakeste voog.

### Beeta

Beeta lagunemine on radioaktiivse lagunemise liik, mille korral eraldub tuumast elektron ( $\beta^-$  - osake) või positron ( $\beta^+$  - osake). Beeta osake on elektron. Beetakiirgus koosneb beetaosakestest (suure energiaga elektronidest ja/või positronidest). Beetakiirgus on ioniseeriv radioaktiivne kiirgus, mille läbimisvõime on alfakiirgusest suurem, kuid gammakiirgusest oluliselt väiksem.

### Gamma

Gamma kiirgus on suure energiaga footonite voog. Gammakiirgus on kõige ohtlikum ja kõige suurema läbimisvõimega radioaktiivne kiirgus. Reeglina mõõdetakse erinevate materjalide gammakiirguse varjestamisvõimet materjali paksusega, mis on vajalik kiirguse intensiivsuse vähendamiseks poole võrra. Näiteks kui 1 cm paksune pliiplaat vähendab gammakiirgust poole võrra, siis sama efekti saamiseks peab betoon olema 6 cm paksune ja tihendatud pinnas 9 cm paksune.

### Radioaktiivsus

Radioaktiivsus on mõnede aatomituumade iseenesliku lagunemise protsess. Lagunemisel eralduvad alfa osakesed (heeliumi aatomituumas) ja beeta osakesed (kiired elektronid) ja algne tuum muutub teise elemendi tuumaks. Radioaktiivne lagunemine on tõenäosusliku iseloomuga, ühe tuuma lagunemist ei ole võimalik ennustada.