

Loeng 21. Tuumafüüsika

Radioaktiivsus

Avastamine. 1896. a. märkas prantsuse füüsik Antoine Becquerel, et valguskindlas pakendis fotoplaadid riknesid, kui nende lähedale asetati kolb uraanisooladega. Katsete seeria abil tegi ta kindlaks, et uraaniühendeist lähtub suure läbitungimisvõimega kiirgus, mis mõjub fotoplaadile analoogiliselt valgus- või röntgenikiirtega. Kuna uraani kiirguse intensiivsus ei sõltunud välistingimustest, vaid üksnes uraani kogusest, luges ta selle uraaniühendite **sisemiseks omaduseks - radioaktiivsuseks** (lad. *radio* + *activus* - kiirgustoime).

1897. a. märkasid Marie ja Pierre Curie'd, et uraaniühendite aktiivsus säilib ka pärast metallilise uraani eraldamist. Keemikutena alustasid nad kiirgusallika otsimist, viies maagijäätmetega läbi keemilisi reaktsioone ning mõõtes saaduste aktiivsust. Sel meetodil õnnestus neil 1898. a. eraldada maagijäätmetest kaks senitundmatut metalli - polooniumi ja raadiumi - millede aktiivsus tuhandeid kordi ületas uraani oma. Neist aktiivsema - polooniumi - omapäraks on aktiivsuse kiire vähenemine, mida hakati seostama polooniumi tuumade muundumisega mittekiirgavaks aineks - seatinaks.

Radioaktiivse lagunemise seadus. Radioaktiivsuse teooria on loodud põhiliselt inglise füüsiku E. Rutherfordi poolt. Asunud 1898. a. Montreali Ülikooli füüsikaprofessori kohale, ühendas ta prantsuse avastused inglise rahade ja tehnoloogiaga.

Üheks esimeseks tulemuseks oligi radioaktiivse lagunemise seaduse avastamine (1902, koos F. Soddy'ga):

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

Valemi olemus on lihtne: kuna kiirgus tekib tuumade lagunemisel, peab tema intensiivsus (ajaühikus lagunevate tuumade arv) olema võrdeline tuumade koguarvuga. Seetõttu väheneb tuumade koguarv **iseendaga võrdeliselt**:

$$dN = -\lambda N dt,$$

kus λ on võrdetegur (nimetatakse **radioaktiivse lagunemise konstandiks**), märk miinus aga näitab kahanemist ajas. Nagu mäletame, viib selline difvõrrand alati eksponentfunktsioonile.

Ainete omadust iseeneslikult (väliste energiallikate abita) kiirata elektromagnetkiirgust või suure energiaga osakesi nimetatakse radioaktiivsuseks.

Radioaktiivset ainet iseloomustavateks suurusteks on lagunemiskonstant ja pooliga

Nagu võngete sumbumisel, saab ka siin anda eksponentsiaalse konstandi asemel märksa arusaadavama suuruse - **poolustusaja** (ka **pooliga**) - ajavahemiku, mille jooksul radioaktiivse aine tuumade arv väheneb poole ni esialgselt:

$$N = \frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \implies T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}.$$

Radioaktiivne kiirgus ise koosneb vähemalt kolmest eri tüüpi kiirgusest. Magnet- või elektriväljas jaguneb kiir kolmeks: üks, positiivsele laengule vastav osakeste voog kannab α -kiirguse, teine (negatiivne laeng) β -kiirguse ning kolmas, väljade mõjule mitte alluv γ -kiirguse nime. Rutherfordil õnnestus kindlaks teha, et alfakiirte tekib heelium; beetaosakeste 10^4 korda väiksem mass (täpsemalt erilaeng) näitas, et tegu on elektronidega. Gammakiirte olemus jäi esialgu lahtiseks.

Heeliumi eraldumine uraani (või raadiumi) kiirgusel viib mõttele **aatomituuma lagunemisest**. Seega pole ka aatomituum "algosake", vaid koosneb väiksematest **elementaarosakestest**.

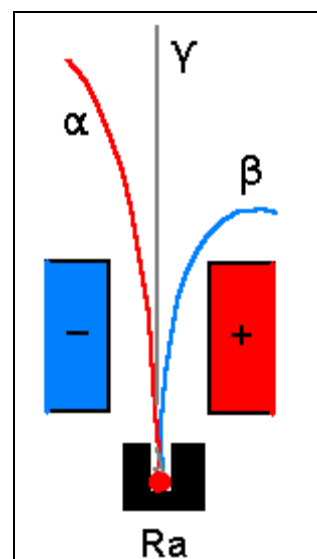
Aatomituuma komposiitmodel. 1919. a. tehti nüüd juba Inglismaale Cambridge'i ülikooli siirdunud Rutherfordi laboris pöördelise tähtsusega katse: raadiumi α -kiirgus suunati puhta lämmastikuga täidetud reservuaari. Reaktsiooni tulemusena eraldus kambrist kiirgus, mis koosnes osakestest laenguga $+e$ ning massiarvuga 1.

Rutherford pidas neid aatomituuma algosakesteks ning andis neile nimetuse **prooton** (kr. *prōtos*- esimene).

Rutherfordi järgi oli aatomituuma koostamiseks kaks võimalust: esimene, kus tuum koosneb prootonitest ja elektronidest, kusjuures prootonite arv määrab tuuma massi ning prootonite ja elektronide arvude vahe laengu. Teiseks, alternatiivseks tuumamudeliks oli komposiitmodel, kus lisaks prootonitele kuulusid tuuma koostisse hüpoteetilised neutraalsed osakesed - **neutronid**.

Otsustavaks katseks sai neutronite avastamine J. Chadwick'i poolt 1932. a.; kuid juba 1930. a. oli täheldatud neutroni (täpsemalt küll üliiraske vesiniku - tritiumi) iseeneslik lagunemine prootoniks ja elektroniks.

Muidugi pole ka "neutroni avastamine" mingi silmnähtav leid, vaid teatud katse tõlgendus komposiitmodeli keeles. Nimelt avastasid saksa füüsikud Bothe ja Becker, et berülliumi kiiritamisel α -osakestega tekib tugev kiirgus, mis ei allu magnet- ja elektrivälja mõjule.



Joonis 1. Raadiumi kiirgus jaguneb elektriväljas alfa-, beeta- ja gammakiirteks.

Positiivse elementaarlaenguga ning massiarvuga 1 osakest nimetatakse prootoniks

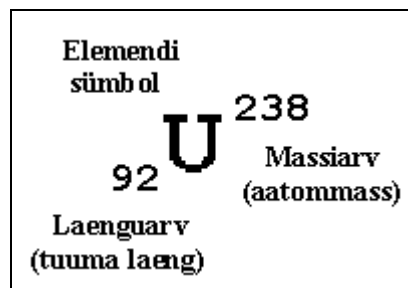
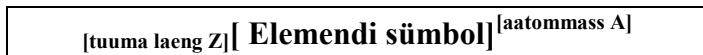
Prooton on tavalise vesinikuaatomi tuumaks.

Prootoniga ligikaudu sama massi omav laenguta (neutraalne) osake on neutron.

Chadwick'il õnnestus Rutherfordi aparatuuri abil määrata selle kiirguse osakeste mass, mis tõepoolest oli lähedane prootoni omale. Seega sobis sellegi katse seletuseks neutronihüpotees.

Tuumareaktsioonid. Komposiitmodeli keeles on lihtne kirja panna tuumareaktsioone. Kasutatakse sama tüüpi sümbolikat, nagu keemiliste reaktsioonide korral. Tuuma tähistatakse temale vastava keemilise elemendi sümboliga; selle juurde märgitakse indeksitena mass (asub sümbolist ülal paremal, mõnikord ka vasakul) ning laeng (alumine indeks). Nii kirjutame

- Vesinik - ${}_1H^1$
- Heelium - ${}_2He^4$ või $2\alpha^4$ (on ka alfaosakese tähis)
- Raud - ${}_{26}Fe^{56}$
- Üldvalem -



Joonis 2. Aatomituuma sümbol sisaldab elemendi nimetust, massiarvu ja laenguarvu.

Kasutades neid sümboleid, saame Rutherfordi reaktsiooni:



Chadwick'i reaktsiooni:



ja raadiumi lagunemine



Nagu keemilistel reaktsioonidel, peab ka siin olema võrrand tasakaalus - nii alumiste kui ülemiste indeksite summad peavad olema võrdsed mõlemal pool "noolt" või võrdusmärki.

Samal kombel võivad tuumareaktsioonid olla **eksotermilised** (soojuse eraldumisega) või **endotermilised** (soojus neeldub).

Et aga tuumareaktsioonidel on energiahulgad võrratult suuremad, ei räägita siin tavaliselt mitte soojuse, vaid energia vabanemisest/neeldumisest kas siis kiirete osakeste või kiirguskvantide kujul.

Viimase erijuhuks on ka uraani γ -kiirgus. (Käesoleval ajal loetakse gammakiirteks ükskõik millise tekkega elektromagnetlaineid lainepikkusega alla 0.01 nm.)

Tuumareaktsioonide valemities peab kehtima massi ja laengu (arvude) jäävuse seadus

Nihkereeglid sõnastati enne tuumareaktsioonide kirjapaneku reeglite loomist ja nad kirjeldavad elemendi "liikumist" Mendelejevi tabelis radioaktiivse lagunemise käigus:

- kui tuum kiirgab alfaosakese, nihkub ta Mendelejevi tabelis kaks kohta vasakule;
- kui tuum kiirgab beetaosakese, nihkub ta ühe koha võrra paremale;
- kui tuum kiirgab prootoni või positroni, nihkub ta ühe koha võrra vasakule;
- kui tuum kiirgab neutroni või gammakvandi, jääb ta tabelis paigale.

Kerge on näha, et reeglid vastavad alumiste indeksite võrdsuse nõudele. Positron on aga elektroni antiosake - sama massi, kuid positiivse laenguga. Antiosakesed on ka teistel osakestel.

Isotoobid. Komposiitmudel ei välista, et sama prootonite arvu juures võib tuum sisaldada erineva arvu neutroneid. See toob kaasa massiarvude erinevuse. Näiteks ülaloodud Chadwick'i reaktsioonis on süsiniku massiarv 11, mis erineb tavapärasest aatommassist (12 ühikut).

Termin "isotoop" seostub meie teadmistes tavaliselt tehiselementide ja kunstliku radioaktiivsusega. See, et paljude keemiliste elementide aatommassid on Mendelejevi tabelis murdarvudena, näitab, et looduslikud ained on tihtipeale erinevate isotoopide segud.

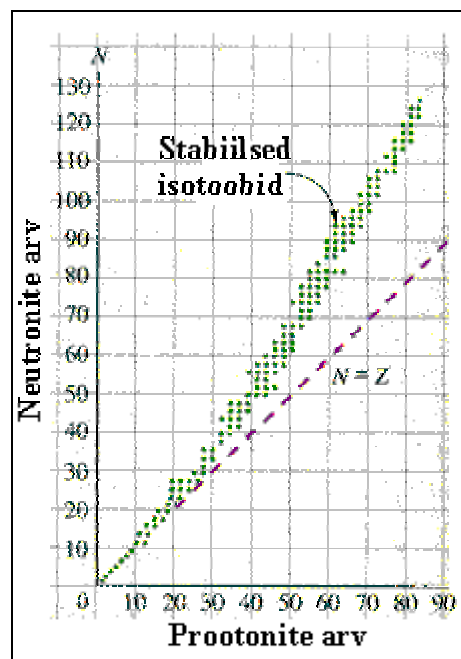
Tuntuim looduslik isotoop on nn. "raske vesinik" - deuteerium, mida looduslik (näiteks vee koostisse kuuluv) vesinik sisaldab 0.014%. Looduslikus klooris on seevastu kaht isotoopi (massiarvudega 35 ja 36) pea ühepalju.

Teoreetiliselt võib tuum sisaldada kuitahes palju neutroneid ja olla seega suvalise (laenguarvust suurema!) massiarvuga. Tegelikuses paneb isotoopide arvule piiri tuumade stabiilsus. "Täiesti stabiilseid" (lõpmatu elueaga) isotoope on kõige rohkem Mendelejevi tabeli keskosas. Näiteks tinal (**Sn**, laenguarv 50) on teada 10 stabiilset isotoopi massiarvude vahemikus 112 kuni 124.

Looduslik radioaktiivsus. Kõik siiani kirja pandu käib **looduslike** radioaktiivsete ainete kohta. Et nende eluiga on lõplik, tekib küsimus nende päritolust.

Uraanirida. Loodusliku radioaktiivsuse põhjuseid on kaks. Enamuse **raskete elementide** tekkes on süüdi nn. uraanirida. See on loodusliku uraani ${}_{88}^{238}\text{U}$ lagunemisel tekkivate ebastabiilsete

Isotoobid on sama elemendi (sama laenguga tuuma) erineva massiarvuga teisendid.



Mendelejevi tabeli elementide stabiilsete isotoopide piirkond

vaheastmete kogum. Uraan ise on samuti lõpliku, kuid **väga pika** elueaga (pooliga $4.5 \cdot 10^9$ aastat) element.

Tänapäeva (astro)füüsika järgi tekib uraan nagu teisedki rasked (raskemad rauast!) elemendid plahvatavate tähtede - **supernoovade** - sisemuses. Kuna Universumi vanus on vähem kui 20 miljardit aastat, peab küllalt suur osa kunagi tekkinud uraanist tänaseni alles olema; samuti koos temaga kõik lagunemise vahesaadused nende tekkehulgale ning lagunemiskiirusele vastavates vahekordades.

Uraanirida esineb mitmetes variatsioonides, mille esinemissageduse määravad kvantmehaanilised tõenäosused. Põhitrend on toodiud selle lehekülje serval (sümboli kõrval on lagunemise tüüp ning pooliga).

Viimane element - seatina ehk plii - on stabiilne; sellega uraanirida lõpebki. Tegelikult on kõik vismutist (Mendeleejevi tabelis pliile järgnev element) suurema massiarvuga tuumad ebastabiilsed, selle põhjustest aga edaspidi.

Radioaktiivne süsinik. Teiseks loodusliku radioaktiivsuse allikaks on **kosmiline kiirgus**. Maale kosmosest tulevad osakesed omavad piisavalt energiat, et kutsuda Maa atmosfääris esile tuumareaktsioone.

Kõige sagedasem neist on radioaktiivse süsiniku teke lämmastikust:



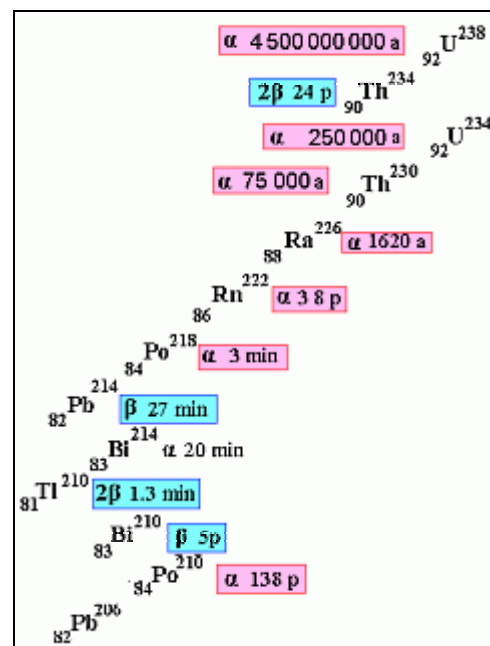
Viimane on beetaaktiivne, pooleaga 5600 aastat.

Et süsinik on elusaine tähtsaim koostisosa ja et taimed omastavad teda atmosfäärist, sisaldavad kõik elusorganismid kindla protsendi radioaktiivset süsinikku. Selle sisaldus väheneb aja jooksul ning sobiv pooliga (see määrab ajaskaala!) võimaldab kasutada radioaktiivse süsiniku meetodit orgaanilise aine vanuse kindlakstegemisel. Meetod on levinud eriti arheoloogias kirjajakunstielse kultuuride dateerimisel.

Tehnogeenne radioaktiivsus. Käesoleval ajal on lisaks uraanirea elementidele loodusesse sattunud küllaltki suurel hulgal ebastabiilsete tuumadega isotoope, mis pärinevad inimtegevusest.

Et nende mõju elusloodusele on kahjulik, on seda nähtust hakatud nimetama ka **radioaktiivseks e. kiirgusaasteks**.

Enamus nimetatud isotoonidest pärineb **tuumatehnoloogiast**



Uraanirida nihkeregilte ja pool-igadega.

Maa looduslik radioaktiivsus põhineb uraanireal

Radioaktiivne süsinik tekib atmosfääris kosmiliste kiirte toimele.

Radioaktiivse ja tavalise süsiniku vahekorra järgi saab hinnata orgaanilise aine vanust.

Suur hulk looduses olevast radioaktiivsest aineest on tehnoeense päritoluga (tekkinud inimtegevuse tagajärjel).

kasutamisest (tuumarelv, tuumaenergeetika ning nende jaoks vajalike materjalide tootmine), mistõttu probleem kuulub keskkonnakaitse valdkonda.

Radioaktiivsuse kahjulik mõju elusorganismidele seisneb tuumakiirguse ioniseerivas toimes. Aatomite ning molekulide ionisatsioonenergia (energia, mis on vajalik valentselektroni eemaldamiseks või keemilise sideme lõhkumiseks) on vahemikus mõnest mõnekümne elektronvoltini; seevastu on radioaktiivsel lagunemisel tekkivate osakeste (või kvantide) energia **megaelektronvolti** suurusjärgus.

Niisiis põhjustab tuumakiirguse hajumine või neeldumine aines suure hulga ionide tekke, mis omakorda võivad ioniseerida naabruses asuvaid molekule. Kui see juhtub tasakaalulises keskkonnas (eluta loodus), taastub esialgne tasakaal kiiresti. Mittetasakaalulises struktuuris (eluskude) tekivad aga pöördumatud muutused, mis parimal juhul toovad kaasa raku hukkumise.

Väljend "parimal juhul" polnud siin trükiviga. Rakke on koes miljoneid, ja hävinud raku asemele tekivad tavaliselt uued. "Halvim juht" leiab aset siis, kui kiirguse tagajärjel tekib muutus **pärilikkuse kandjas - genoomis**, rakk aga säilitab eluvõime. Selline **mutatsioon** tähendab reeglina vähkkasvaja teket; kui ta aga leiab aset sugurakkudes, siis geneetilise väärvormi - **mutandi** sündi.

Et mõõdukas looduslik kiirgusfoon on ümbritsenud Maa elanikke kogu nende olemasolu vältel, on see omamoodi kasulik: ühelt poolt on ta efektiivne surmamehhanism (mutatsioonid kuhjuvad aastate jooksul, kuni üks neist saab saatuslikuks), teiselt poolt garanteerib mutantide regulaarne sünni bioloogiliste liikide evolutsiooniks vajaliku muutlikkuse.

Tehnogeenne foon, mis võib loodusliku ületada miljoneid kordi, on äärmiselt ohtlik. Sõjajärgsetel aastatel, kui viidi läbi arvukalt lahtisi tuumaplahvatusi, kasvas keskmine kiirgusfoon Maa atmosfääris sadu kordi. See globaalne saastatus mõjustab meie põlvkonda veel aastakümnete vältel.

Veelgi hullemad on lokaalsed (kohalikud) saastekolled, nagu omal ajal Tšernobõli aatomielektrijaama avarii korral. Inimese meeleeelundid ei taju kiirguse olemasolu, seda saab kindlaks teha üksnes vastava radiomeetrilise aparatuuri abil.

Tuumakiirgus põhjustab eluskoe keemilisi muutusi, mis võivad viia organismi hukkumise või rikutud pärilikkusega olendi - mutandi - tekkele.

Tehnogeense reostuse komponendid võib jagada kolme gruppi:

- a. tuumakütuse lõhustumisproduktid tekivad ${}_{92}\text{U}^{235}$ või ${}_{94}\text{Pu}^{242}$ lagunemisel ahelreaktsiooni käigus.

Tähtsaimad:

- o ${}_{38}\text{Sr}^{90}$ (pooliga 27.7 aastat),
- o ${}_{55}\text{Cs}^{137}$ (pooliga 26.6 a.) ja
- o ${}_{53}\text{I}^{131}$ (8 päeva).

Kõik on β -aktiivsed; esimesed kaks annavad pikaajalise saastatuse, jood aga omab kalduvust ladestuda organismis (tekib seesmine kiiritus e. radioaktiivne mürgistus).

- b. tuumakütuse jääkproduktid tekivad kütuse tootmisel, aga ka kasutamisel nn. looduslikul uraanil põhinevates reaktorites. Need on Mendelejevi tabeli lõpuosa elemendid (radoon, polonium, toorium jt.), peamiselt α -aktiivsed, küllalt pika elueaga. Lagunemiste väike sagedus muudab nad raskesti avastatavateks - tavaline radiomeeter, mis näitab vaid lagunemiste arvu, alahindab kiirguse ohtlikkust (alfakiirte ionisatsioonivõime on kümme korda suurem beetakiirte omast, neeldumine aines õnneks suur). On sekundaarse radioaktiivsuse allikaks.
- c. sekundaarne radioaktiivsus tekib kahe esimese, aga ka näiteks atmosfääris või maapinnas olevate elementide muundumisel tuumaplahvatuse toimetel. Kerged (massiarv alla 30) lühiealised (pooliga mõnest sekundist mõne päevani) β -aktiivsed elemendid, ohtlikud vaid tuumaplahvatusele järgnevatel päevadel.

Kiirguse mõõtmine (dosimeetria) toimub nagu iga teinegi mõõtmisprotsess, mõõteriistade ja varem kokku lepitud ühikute kaudu. Suurusteks, mida mõõdetakse, on:

1. aktiivsus,
2. kiirgusdoos,
3. neeldumiskoos,
4. bioloogiline efektiivdoos.

Aktiivsus on kindla suurusega allika poolt ruumi kiiratava kiirguse mõõt. SI süsteemis on aktiivsuse ühikuks **bekrell (Bq)**, mis vastab ühele lagunemisaktile sekundis. See on väga väike ühik; varasemalt kasutatud **küri** ($1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$, võrdub ühe grammi raadiumi aktiivsusega) oli märksa mugavam.

Tuumakiirgust ja selle mõju iseloomustavateks suurusteks on

- aktiivsus (SI-ühik bekrell: Bq)
- kiirgusdoos (bekrellsekund: Bqs)
- neeldumiskoos (grei: Gy = J/kg)
- bioloogiline efektiivdoos (rem 0.01Gy korrutatud kahjuteguriga)

Kiirgusdoosi saame, kui korrutame aktiivsuse kiirguse toimeajaga.

Neeldumisdoos näitab mingis keskkonnas neeldunud kiirgusele vastavat energiahulka. Pole tähtis, kas kiirituse mõjul tekib vähem või rohkem ioone; oluline on neeldunud energia hulk.

Ühikuks on **grei (Gy)**, mis vastab ühe dzauli suuruse energiahulga neeldumisele ühes kilogrammis aines.

Kasutusel on ka vähendatud ühik **raad** (1rad=0.01 Gy) ja ionisatsioonistmest tuletatud ühik **röntgen** = $1.6 \cdot 10^{12}$ ioonipaari ühes grammis kuivas õhus normaaltingimustes (= $0.878 \cdot 10^{-2}$ Gy, samuti õhu korral)

Bioloogiline efektiivdoos näitab kiirguse kahjustavat toimet inimesele; tema ühik **rem** ongi lühend ingliskeelsest väljendist *rad equivalent man* (raadi inimekvivalent). Tavaliselt saadakse efektiivdoosi väärtus, kui korrutatakse füüsikaline doos (rad) kahjuteguriga, mille väärtus ulatub ühest kahekümneni, sõltuvalt osakeste tüübist ning energiast.

Kõige ohutumad on gamma-kvandid ja elektronid (tegur 1), ohtlikumaks loetakse α -osakesi ja raskeid ioone. Viimaste ohtlikkus seisneb just sekundaarse radioaktiivsuse tekitamises organismis olevate normaalsete stabiilsete elementide muundamise teel radioaktiivseteks isotoopideks.

Mõõteriistadeks on **radiomeetrid** (mõõdavad kiirguse intensiivsust) ja **dosimeetrid** (mõõdavad neeldumisdoosi). Radiomeetri abil määratakse keskkonna kiirgustase - see näitab, kas antud kohas viibimine on ohutu, lubatav või ohtlik.

Et tuumaseadmetega töötamisel kaasneb paratamatult ka kiirgusoht, peavad sealsed inimesed olema pideva järelvalve all. Järelvalvet ongi kõige parem teha kaasaskantavate dosimeetrite abil, mille näitu regulaarselt võrreldakse kehtivate kiiritusnormidega.

Loodusliku kiirgusfooni keskmine intensiivsus vastab umbes 0.13 rem/aastas; piirkonniti on see väga erinev. Eesti asub suhteliselt kõrge aktiivsuse piirkonnas; Skandinaavia, eriti Soome, on üks radioaktiivsemaid piirkondi kogu maakeral. Normaalseks loetakse taset kuni 0.5 rem/aastas.

Töödel radioaktiivsete ainetega ning tuumajõuseadmete hooldamisel on maksimaalne aastadoos kuni 5 rem; sõjaolukorras ja päästetöödel tuleb kõne alla ühekordne doos kuni 50 rem (pärast seda tuleb kiiritust saanud isik viia ohutusse niirkonda kus ta iääh

Kiirguse intensiivsust mõõdetakse radiomeetriga, neeldumisdoosi ja bioloogilist efektiivdoosi dosimeetriga. Mõlemad riistad põhinevad õhu elektrijuhtivusel (vt. loeng 11, gaaslahendus).

mitmeks aastaks arstliku kontrolli alla).

Surmavaks loetakse üle 400 rem lühiajalist doosi (suremus 50%), 1000 rem doos on surmav 90% juhtudest. Raske kiiritushaiguse võib põhjustada ka tunduvalt väiksem doos. Mõned loomaliigid, näiteks kilpkonnad, on kiirguse suhtes üsna tundetud.

Kiirguskaitse. Radioaktiivse kiirguse eest kaitsmiseks on kolm võimalust:

1. Kiirguse ekraaneerimine: inimene eraldatakse kiirgusallikast kiirgust tugevasti neelava kaitsekihiga. Jämedas joones võib öelda, et kiirgust nõrgendav toime on võrdeline kaitsekihi kogutihedusega: kergemat ainet tuleb võtta paksem kiht, kui raskema aine korral.

Heaks kaitsekihiks on rasketest metallidest (tavaliselt pliiist) ekraanid; läbipaistvad aknad tehakse kuni 50% pliioksiide sisaldavast flintklaasist.

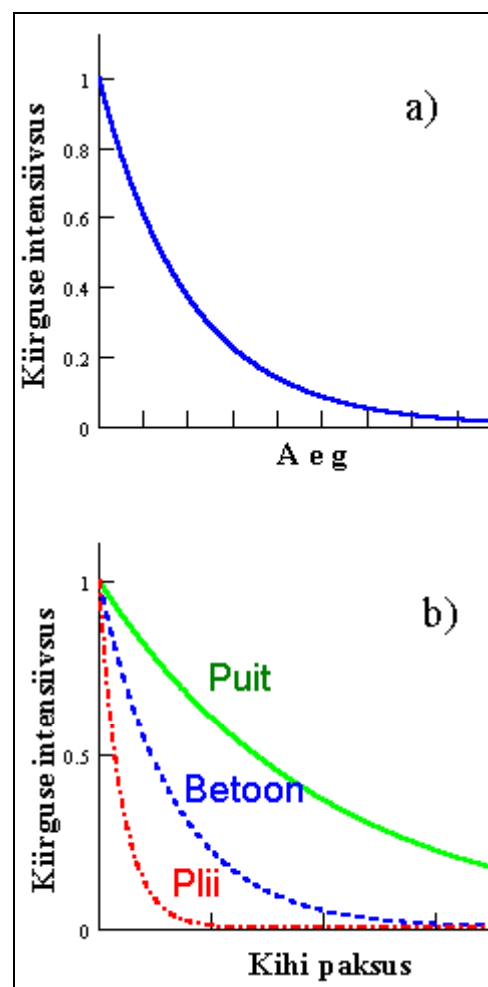
2. Kaitse radioaktiivsete ainete organismi tungimise eest. Sel otstarbel kasutatakse kaitseülikondi, gaasimaske, vee- ja õhufiltreid. Kiirguskahtluse korral tuleb läbi viia vee ja toiduainete radioaktiivsuse kontroll.

3. Ravimid. Kui kiirgusoht on reaalne või on tekkinud kahtlus ohtliku doosi saamise võimaluse suhtes, tuleb tarvitada kiiritustõve arengut pärssivaid medikamente.

Levinuimaks kiiritusravimiks on joodi sisaldavad tabletid; nende toime seisneb organismi koguneva radioaktiivse joodi väljaviimises tavalise ainevahetuse teel. Kui joodi on ülehulgas, algab selle eritumine, mille käigus radioaktiivne jood asendub tablettidest saadava ohutu isotoobiga.

Üldiselt tuleb meeles pidada, et inimese meeleeelundid ja organismi kaitsesüsteem on tundetu - seega ka kaitsetu - radioaktiivse kiirguse suhtes. Et tänapäeva tehnoloogilise progressiga kaasneb ka kiirgusoht, tuleb kõikjal jälgida keskkonna radioaktiivse fooni taset ning olla valmis tegutsema reaalse ohu olukorras. Õnneks on kiirgust registreeriv aparatuur suhteliselt lihtne ja odav; seda enam tuleb asjaga tegelda ning vastavaid teadmisi levitada.

Ohtlikus olukorras ei tohi lubada vähimatki viivitust: kiirguse suhtes on kõige ohtlikumad just avariile järgnevad esimesed tunnid ja päevad.



Kiirguskaitse põhigraafikud:

- a. kiirguse kahanemine ajas (istu keldris ja ole kuss!);
- b. kiirguse nõrgenemine ekraaneerivas kaitsekihis (mida sügavamal, seda parem!)

Mõlemal juhul on tegu eksponentfunktsiooniga.

Aatomituuma mudel ja tuumajõud

Aatomituuma modelleerimisel lähtutakse komposiitmudelist ning Rutherfordi katsest. Esimene väidab, et tuum koosneb prootoneist ja neutroneist; teine annab tuuma ligikaudsed mõõtmed ($d = 10^{-14}$ m).

Selle läbimõõduga määratud ruumalasse peavad ära mahtuma Z prootonit positiivsete laengutega $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C ning $A - Z$ laenguta neutronit. Viimastega pole probleeme, kuid prootonite vahel peaks mõjuma elektrostaatiline tõukejõud $F = 10^9 \frac{Ze^2}{r^2}$, mis atomaarsetes mastaapides on koletu suur jõud.

Et tuum koos püsib, tuleb oletada elektrostaatilistest veelgi suuremate jõudude olemasolu tuumas. Neid üliväikese mõjuraadiusega hüpoteetilisi jõude nim. **tuumajõududeks**.

Klassikalise füüsika seisukohalt oleks tuumajõudude kirjeldamine lihtne: tuleks analoogiliselt van der Waalsi jõududega defineerida tuumajõud, mille tugevus kahaneks kiiremini r^{-2} seadusest.

Paraku tuli 1930-tel aastatel arvestada ka kvantefekte, kaasa arvatud määramatuse relatsioon. Esimene asi, mis siit järeldub, on **tuumajõudude küllastatus**. Kuna me osakesele enam kuitahes ligi ei pääse, ei saa ka osakeste vaheline jõud olla "kuitahes suur". Seetõttu ei suudagi kaks prootonit teineteist koos hoida, nende "sidumiseks" tuleb appi võtta vähemalt kaks laenguta osakest - neutronit.

Tuumajõud. Et tuuma koos hoida, oli vaja veel tugevamaid jõude, kui seda on tuumaosakeste vahelised elektrilised tõukejõud. Ainult, et need ei tohtinud ulatuda tuumast kaugemale - muidu oleks tiirlevad elektronid otsekohe "alla neelatud". Rääkimata Rutherfordi katsest tagasi peegeldatud α -osakestest, mis üsna tuuma juures ära käisid ja ikkagi taganema sunniti.

Universaalne, Newtoni ajast pärit r^{-2} -seadus siin ei aita - tuli midagi sootuks uut välja mõelda. Ja nüüd tuli füüsikas esimest korda arenile mitte-euroopa kultuuri esindaja - Jaapani füüsik Hideaki Yukawa.

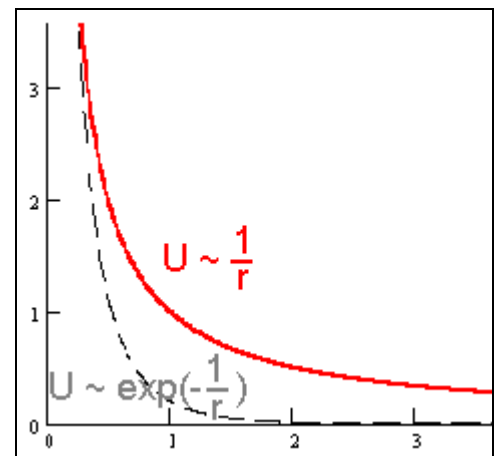
Yukawa potentsiaal. Kui ei aita astmefunktsioon, tuleb appi võtta eksponent, on füüsikute vana tõde. 1935. a. esitas Yukawa tuumajõudude valem tsentraalsümmeetrilise potentsiaali kujul:

$$U(r) = -\frac{U_0}{vr} e^{-vr}.$$

On näha, et kui $r > \frac{1}{v}$, hakkab eksponentliige kiiresti kahanema ja nii on võimalik konstandi v "timmimisega" panna valem kooskõlla katseandmetega.

Tuumajõud on vajalikud selleks, et tasakaalustada positiivselt laetud prootonite vaheline tõukejõud ning hoida tuuma koos.

Tuumajõud ei tohi ulatuda mõjutama elektronide liikumist - see piirab nende mõjuraadiust.



Yukawa potentsiaal.

Võrdluseks on antud pöördvõrdeline sõltuvus - potentsiaal, millele vastab klassikaliste jõuväljade pöördruutsõltuvus.

Väljade kvantteooria. Nii oleks pilt klassikalisest mehaanikast lähtudes. Ei tohi aga unustada, et 1935. a. füüsika oli sunnitud arvestama nii kvantmehaanika kui relatiivsusteooriaga.

Prootoni (või neutroni) minekul välja mõjupiirkonnast ($r < \frac{1}{\nu}$) välisesse ruumiossa, kus tuumajõud ei mõju, kujutab endast kvantüleminekut energiaga U_0 , millele peaks vastama energiakvant sagedusega $\frac{U_0}{h}$. Kui see on tavaline, elektromagnetkiirguse kvant, saaksime tavalise, pöördruutsõltuvuses jõuvälja. Aga meil on vaja eksponentsiaalselt kahanevat välja...

Siin leidiski lahenduse Yukawa Tuleb oletada, et tuumajõudusid vahendaval osakesel on nullist erinev seisumass.

Kvantmehaanika algaastail, kui osakeste laineomadustele püüti leida üldarusaadavaid selgitusi, oli üheks suureks vaidlusallikaks nn Heisenbergi **määramatuse relatsioon** (lad. *relatio* - suhe, seos). See põhines väitel, et osakese asukoht ei saa olla määratud täpsemini, kui tema lainepikkus. Kuna lainepikkus sõltub omakorda impulsist ($p = mv$, seega kiirusest), kiirus aga on nihke tuletis, tulebki de Broglie valem kujul

$$\Delta x \Delta p_x \geq h.$$

Nagu mäletame, kehtis samasugune võrratus ka aja ja energia kohta:

$$\Delta E \Delta t \geq h.$$

Ja mis siis? Paneme energiaks Einsteini erirelatiivsusteooriast tuntud $E = mc^2$. Loeme selle (määramatu) energia hulka ka osakese **seisumassi** m_0 , millele vastab energia $E = m_0 c^2$. Ja...

Virtuaalsed mesonid. Tuleb välja, et sellise osakese olemasolu kindlakstegemiseks on vaja mitte vähem aega, kui $\Delta t = h/(m_0 c^2)$. Ehk, kui rääkida tema **ruumilisest ulatusest**, ei saa teda kuidagi avastada ruumiosas, mille mõõtmed on väiksemad, kui $c \Delta t$.

Selliseid "võimalikke" osakesi nimetatakse **virtuaalseteks** (lad. *virtualis* - võimalik); Yukawa teooria väidab, et kõik jõuväljad põhinevad just virtuaalsete osakeste vahetusel.

Osakesed, mille seisumass on null (näiteks foton) võivad vahendada jõudusid kuitahes kaugele (väheneb ainult footoni energia, koos sellega jõuvälja tugevus), nullist erineva seisumassi korral **määrab seisumass mõjuraadiuse piiri**. Välja tugevuse sõltuvus allika omadustest tähendab, et vahendajaid võib olla suvalisel hulgal - seega peab tegemist olema **bosonitega**.

Teades tuumajõudude mõjuulatust on lihtne leida hüpoteetilise

Ekspponentsiaalset potentsiaali saab põhjendada väitega, et vaadeldavat jõuvälja vahendavate osakeste seisumass erineb nullist

Tuumajõudusid vahendava osakese seisumass on 10 korda väiksem prootoni massist.

vahebosoni massi. Kaugusele 10^{-14} m vastab mass, mis umbes 200 korda ületab elektroni oma, kuid jääb 10-kordselt alla prootoni-neutroni massile. Sellisele vahepealsele osakesele leiti sobiv nimi - **meson** (kr. *mesos*- vahepealne). Pole vist ülearune öelda, et katsed sellise osakese leidmiseks õnnestusid sajaprotsendiliselt.

Nii oli sündinud veel üks kaasaegse füüsika haru - **kvantväljateooria** (nimetatud ka kvantelektrodünaamikaks, mis on aga selgelt ebaõnnestunud termin).

Neutroni ebastabiilsus. Selles, et liig väikese neutronite arvuga tuumad iseeneslikult lagunevad, on süüdi tuumajõudude küllastatus. Miks aga lagunevad tuumad, mille massiarv ületab laengu rohkem kui kahekordelt? Näiteks on kergetest tuumadest ebastabiilsed nii tritium (${}^3_1\text{H}$) kui heelium-5 (${}^5_2\text{He}$); mõlematel esineb beetalagunemine.

Põhjuseks on neutroni enda ebastabiilsus - vabas olekus laguneb see osake poolestusega umbes 12 minutit:



Viimast osakest nimetatakse **neutriinoks** ("väike neutron", W. Pauli, 1930).

Kummalisel kombel tuuma koostises olev neutron ei lagune - ilmselt mõjub talle prootonite elektriväli. Siiski, iga prooton suudab hoida lagunemast mitte üle 1.6 neutroni - nii näitavad stabiilsete tuumade massiarvud.

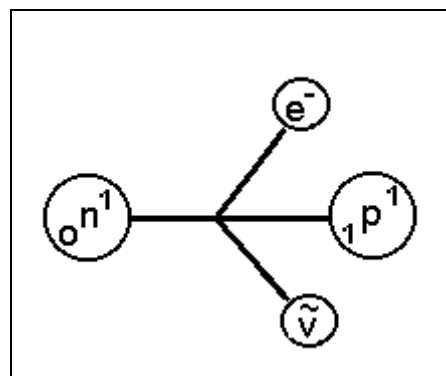
Nagu näeme, on füüsikud suutnud luua teooria, mis seletab kaunis hästi nii tuumade koostist kui ka radioaktiivsust.

Tuum muutub ebastabiilseks, kui temas on liig palju prootoneid - elektrijõud osutuvad siis tugevamaks tuumajõududeks ning ülearused prootonid heidetakse välja. Kergetel tuumadel toimub see otseselt (prootonkiirgus), raskematel kaudselt (α -kiirgus). Kui aga prootoneid on vähe, toimub neutroni lagunemine ja tuum kiirgab välja elektroni (β -kiirgus) ning nähtamatu neutriino. Kui selle käigus jääb tuumal energiat üle, kiiratakse see γ -kvandina, mõnikord vabaneb ka neutroneid.

Tuumaenergeetika

Tuuma seoseenergia. Kujutame ette, et tahame teineteisest lahutada kaht tuumajõududega seotud prootonit-neutronit. Selleks tuleb ületada Yukawa potentsiaal, st. teha sellele vastav hulk tööd (või kulutada sellele vastav hulk energiat). Nimetame seda **seoseenergiaks**.

Tuumade beetalagunemist põhjustab neutroni ebastabiilsus.



Neutroni lagunemine.

Tekib prooton, elektron ja neutriino. Viimane on vajalik nn. leptonlaengu tasakaalustamiseks.

Seoseenergia on töö, mida on vaja teha tuuma lõhkumisel algosakesteks. Täpselt sama suur energiahulk vabaneb algosakeste tuumaks liitumisel.

Kuidas mõõta seoseenergiat? Pole ju võimalik laboris aatomituumasid lõhkuda ja selleks kulutatud tööd mõõta. Võimaluse annab juba mainitud Einsteini energiavalem. Et energia on seotud massiga, peab seotud prooton-neutronpaar **olema kergem, kui selle komponendid eraldi võetuna**.

Massidefekt. Miks? Aga selle pärast, et paari lõhkumiseks tehtud töö **salvestub energiana nendes osakestes, mida me lahutame**. Et energial on mass, kaaluvadki lahutatud osakesed rohkem. Kui nad uuesti liituvad, see energia vabaneb - ja osakesed kaotavad vastava osa oma kaalust. Sellist kaalutud energiat nim. ka **massidefektiks**.

Massi mõõtmine pole probleem: kaalume teatud koguse ainet ja määrame termodünaamiliselt sellele vastava ainehulga. Jagades selle Avogadro arvuga, saame ühe aatomi massi. Et leida tuuma massi, tuleb veel lahutada elektronide kogumass. Kui katsed on piisavalt täpsed, saame erinevuse kätte.

Massidefekti sõltuvus massiarvust. Aatommasside täpne määramine tõi välja huvitava fakti: kõige suurem on massidefekt tuumadel massiarvudega 50 - 60. Nii raskematel kui kergematel tuumadel on see väiksem.

Seletus on kui mitte lihtne, siis lainefüüsika mõistetes vähemalt loogiline:

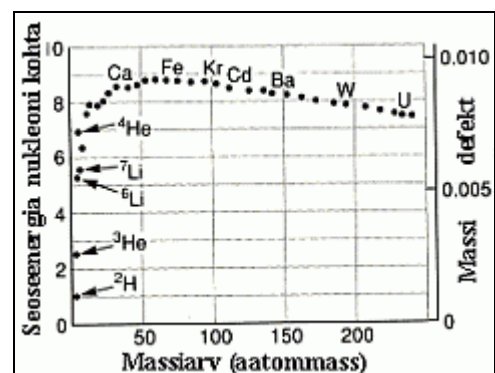
Tuumajõudude mõjuvälja ei mahu ükskõik kui palju osakesi, kuna need võtavad ruumi, vähemalt oma lainepikkuse jagu. Seega vastab kindlale tuumajõudude raadiusele ka optimaalne hulk osakesi, mille jaoks on seosejõud kõige tugevam.

Kui osakesi on vähem, väheneb jõud jõuallika (aga selleks on osakesed ise!) nõrgenemise tõttu, kui aga rohkem, siis välimiste osakeste väljajäämise tõttu naaberosakeste jõuvaljast.

Kui kõikumised välja jätta, kasvab seoseenergia graafik väikeste masside osas tõepoolest võrdeliselt aatommassiga (osakeste arvuga), teiselpool maksimumi aga langeb märksa aeglasemalt (võrdeliselt kuupjuurega osakeste arvust).

Selline kükuruga kõver viib patusele mõttele tuumaenergia tootmise võimalusest. Kui õnnestuks käima panna reaktsioon, mille käigus saadakse "keskmised", suure seoseenergiaga tuumad (ükskõik, kas siis kergemate liitmise või raskemate lõhkumise teel), vabaneks energia ülejääk soojusena. Üsna lihtne arvutus näitab, et sellise "kütuse" energiatootlikkus (massiühiku kohta) ületaks miljardeid kordi tavaliste kütuste oma.

Seoseenergiate ekvivalentset massi (tavaliselt **seisumassi!**), mille võrra on tuum kergem tema koostisosade masside summast, nimetatakse massidefektiks.



Massidefekti sõltuvus tuuma massiarvust.

Kõige stabiilsemad (maksimaalse massidefektiga) on tuumad aatommassiga 50 - 60 ühikut. Pöörake tähelepanu heeliumituumade stabiilsusele: tema seoseenergia on suurem kui raskemal liitiumil.

Tuumaeenergiat võib saada kergete tuumade liitumisel või raskete tuumade lagunemisel.

Tuumarelv. 30-datel aastatel arvati, et see võimalus ongi rohkem teoreetilist laadi. Tehislikke tuumareaktsioone osati küll läbi viia, aga need nõudsid spetsaparatuuri ning üksikute liitumiste-lõhustumiste energiatoodang polnud ligilähedanegi kiirendites kulutatud energiale.

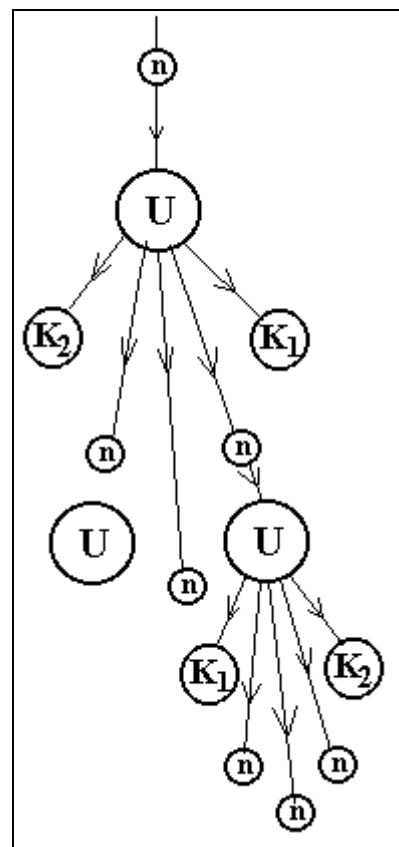
Appi tuli juhus: kiiritades neutronitega uraani (eesmärk oli kunstlikult tekitada uraanist raskemaid elemente) märkas E. Fermi, et tekkinud tuumad lagunevad iseenesest, kiirates välja uusi neutroneid. See andis idee: kui uraanitükk on küllalt suur (et neutron leiaks enne uraanist väljumist mõne teise tuuma), võis tekkida **ahelreaktsioon**. Asja asuti uurima, kuid vahele tuli jällegi sõda.

Teisest Maailmasõjast oleme kõik palju lugenud. Teame, et Hitleril oli pärast Stalingradi kaotust kombeks aeg-ajalt kuulutada uue imerelva loomisest. Kuna üks aatomiurijaist, Otto Hahn, oli jäänud Saksamaale, tekkis füüsikutes kahtlus, et Hitler mõtleb aatomipommist. Soov maailma päästa viis vastupidisele tulemusele: kogu maailma füüsikute surve all asus USA looma tuumapommi, mida 1945. a. ka Jaapani vastu kasutati.

Pärast seda algas kogu maailmas võidurelvastumise periood. Sõjas võidu saavutanud liitlased USA, Suurbritannia ja Nõukogude Liit arendasid intensiivselt tuumatehnoloogiat, suunates selleks kolossaalseid rahalisi ja majanduslikke vahendeid. Vähem kui 20 aastaga loodi lisaks olemasolevale aatomipommile (võimsus 20 - 100 kilotonni trootüüliekvivalendis) nii vesinikupomm (1 - 10 megatonni) kui kolmekihiline termotuumapomm (kuni gigatonni ulatuva võimsusega). Tuumarelva tootmiseks vajaliku plutooniumi valmistamiseks loodi hulganisti nn. paljundavaid reaktoreid, kus lisaks uraan-235 lagunemisele toimub uraan-238 muundumine plutooniumiks. Et viimaste jahutamisel vabaneb energia, on need enamikus arvel "elektrijaamadena".

Tuumatehnoloogia kujutab endast ulatuslikku kompleksi alates maagi kaevandamisest ja rikastamisest (Sillamäe!) kuni jäätmete utiliseerimiseni. Praegu kasutatakse tuumakütust ka puht-energeetilistel eesmärkidel (tuumaallveelaevad, -jälõhkujad, elektrijaamad tugeva reostuskoormusega tööstusrajoonides).

Põhimõtteliselt on tuumajaam täiesti puhas, tema töötamisel ei eraldu mingeid jäätmeid ja tema kütusega varustamine on tunduvalt lihtsam kui näiteks soojusjaamades. Keskkonnaohtlikkus on seotud põhiliselt avariiohuga, mida tavaliselt alahinnatakse. Kui täpselt jälgida eksploatatsiooninõudeid, on tuumajaam (mitte aga plutooniumivabrik!) suhteliselt ohutu ja keskkonnasõbralik ettevõtte.



Ahelreaktsioon.

Uraanituuma lagunemisel vabanevad neutronid, mis võivad põhjustada uute tuumade lõhustumise.

Termotuumaprobleem. Kuna uraan on maakooses üks haruldasemaid elemente, termotuumakütusena kasutatav vesinik aga üks odavamaid, on juba 50 aastat füüsikute ees ülesanne käivitada energiaallikana ka juhitud termotuumareaktsioon .

Probleem osutus oodatust keerukamaks: kümne miljoni kraadini kuumutatud plasmad ei õnnestu kuidagi "koos hoida". Kui see lahendatakse, on inimkonna energiaprobleemid ilmselt igaveseks lahendatud.

Mitte aga kasutatud energiast vabanemise probleem - vaata temodünaamika II seadus.

Probleem: Nimetus "termotuumareaktsioon" viitab soojuse tähtsusele reaktsiooni läbiviimisel. Kas oskate leida kahe prootoni (vesinikutuumade) liitumiseks vajalikku temperatuuri eeldusel, et tuumade kokkuvõtmiseks tehtav töö tehakse soojusliikumise kineetilise energia arvel?

Elementaarosakesed.

Aatomituumade komposiitmudeli loomisega kujunes uus füüsikaliste objektide klass - **elementaarosakesed**. Nagu Vana-Kreeka *aatom* (jagamatu) viitab seegi termin ühele antiikfilosoofia lähte-eeldusele, et kõik siin ilmas koosneb mingitest alg- või lähteobjektidest.

Tuumade koostisosi nimetatakse elementaarosakesteks.

Nüüd viidi see "madalaim tase" veel ühe astme võrra sissepoole, väites:

Aatomituumad koosnevad elementaarosakestest

Targu jäeti fikseerimata elementaarosakeste enda jagamatuse probleem. See, et jagunev osake pole enam elementaarne, on pigem keeleline või filosoofiline kui füüsikaline probleem.

Meie kursuses on olnud juttu viiest elementaarosakesest:

- elektron (avastas J. Thomson 1897),
- prooton (E. Rutherford, 1919),
- neutron (J. Chadwick, 1932),
- meson, mis pidi vahendama tuumajõudusi ning
- neutroni β -lagunemisel eralduv neutriino.

Tingimisi võiksime lisada veel kiirguskvandi -- footoni, mida saab samuti tinglikult osakeseks lugeda.

Kiirendid Nagu mäletame, oli 1930.-date aastate füüsikas suurmoeks kunstlike tuumareaktsioonide esilekutsumine. Et looduslike kiirgusallikate valik oli piiratud, tuldi mõttele hakata osakesi **kiirendama** spetsiaalselt konstrueeritud seadmete -- kiirendite abil.

Lihtsaimaks kiirendiks on tavaline vaakumdiodood või elektronkiirtetoru, kus kiirendatud osakese kineetiline energia elektronvoltides võrdub kiirendava pingega. Laboratoorsetes tingimustes on suhteliselt lihtne tekitada potentsiaalide vahet kuni 10 miljonit volti (näiteks Van der Graafi generaatori abil), suuremate pingete saamist takistab laengute äravool elektroodi kõverustelt. Seega annab lihtne kiirendi energiad kuni 10 MeV (mega-elektronvolti).

Et energiad veelgi suurendada, tuldi kavalale mõttele: selle asemel, et kogu väli korraga tekitada, võib lõpp-energia saada ka järkjärgulisel kiirendamisel

Selleks tuleb osakese jõudmisel anoodile A_1 pinge välja lülitada ning see uuesti peale anda hetkel, kui osake on jõudnud mööduda katoodist K_2 . Loomulikult ei saa selline kiirendi töötada pidevalt; temas ei liigu mitte osakeste juga (nagu elektronkiirtetorus), vaid osakeste pilv.

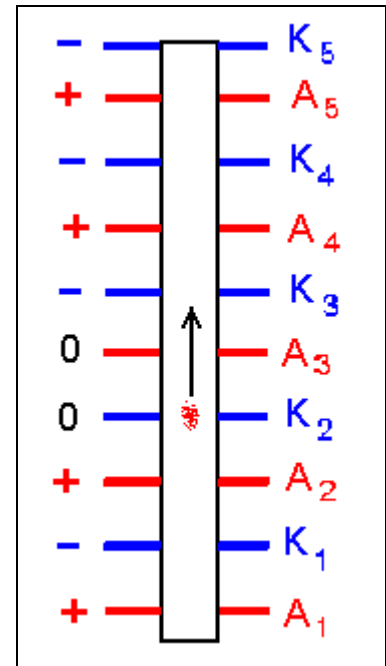
Kui aga eelmisel joonisel toodud kiirendite ahel rõngasse keerata, saame seadme, mida kutsutakse **tsüklotroniks**.

Tsüklotroni mõte on see, et kui lasta osakestel lennata magnetväljas, liiguvad nad ringjoonelisel trajektoorigil ning katood-anoodpaaride asemel piisab kahest poolringist. Et konstantse magnetvälja puhul on osakese poolt ühe ringi läbimise aeg konstantne, kõljab kiirendamiseks tavaline vahelduvvool. Nii saame eespool mainitud 10 MeV kätte vaid 100 ringiga täiesti tavalise 100 000 V vahelduvpinge abil

Tsüklotronidel saadud energiad ulatuvad 1000 MeV=1 GeV suurusjärku. Sealt edasi muutub takistuseks vajaliku magneti suurus. Magnet ise poleks probleemiks, kuid pooluste vahele jääv ruumala tuleb ju õhust tühjaks pumbata (et osakesed saaks takistuseta liikuda).

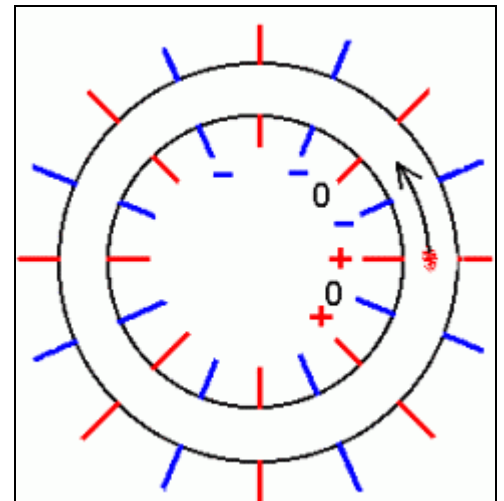
Sellistel energiatel tuleb odavam märksa keerulisem seade - **sünkrotron**. Piltlikult tähendaks see ringikujulist suhteliselt väikese ristlõikega kanalit, milles nii kiirendav elektriväli kui osakesi "orbiidil" hoidev magnetväli genereeritakse **sünkroonselt**, st. samas taktis kanalisis kihutava osakeste pilve liikumisega.

Sünkrotroni (nim. ka sünkrofasotroniks, rõhutades elektromagnetvälja *faasi* sünkroniseerimist osakeste liikumise järgi) piirvõimsus oleneb osakeste liigist ja seadme ehitusest ning ulatub praegu mõnesaja gigaelektronvoldini.



Linearkiirendi skeem.

Hetkel, kui osakeste pilv on anoodi A_3 ja katoodi K_2 vahel, lülitatakse seal kiirendav pinge hetkeks välja.



Sünkrofasotroni skeem.

Osakesed hoitakse vaakumkanalis muutuva (tugevneva!) magnetvälja abil; kiirendav pinge lülitub piki elektroode vastavalt pilve asukohale (faasinurgale).

Kui mingi protsessi uurimiseks on vaja veel suuremat energiat, kasutatakse **kollaid** (ingl *collide* - põrkuma), kus kaks, tavaliselt sama kiirendiga kiirendatud osakeste pilve, sunnitakse omavahel põrkuma.

Kui klassikalise mehaanika järgi tõstaks see põrke energia kahekordseks, siis relativistliku dünaamika rakendamine näitab märksa suuremat võitu.

Lugedes paigalseisva osakese energiaks Einsteini $E = mc^2$, saame põrkuvate pilvede korral ekvivalentseks energiaks

$$E' = \frac{2E^2}{mc^2},$$

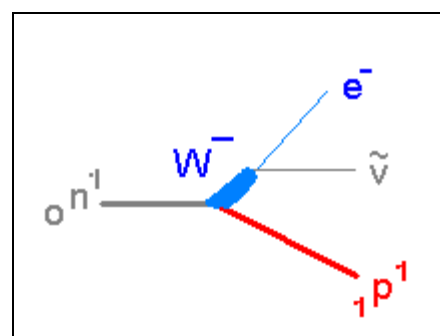
mis näiteks 30 GeV prootonite korral vastaks 1900 GeV-le.

Küsimus: Mitmele dzaulile vastab üks giga-elektronvolt?

Osakeste registreerimine, st nähtavaks muutmine on sama keeruline probleem. On selge, et pärast põrget lendavad reaktsiooni produktiks olevad objektid laiali ettearvamatus suunas. Seetõttu on vaja põrkepiirkonda jälgida mingi liikuvatele osakestele reageeriva seadme abil.

Teades suure energiaga osakese võimet keskkonda ioniseerida saame rea meetodeid, mis kõik on ka kasutusel

1. Ionisatsioonikambrite pakett koosneb suurest hulgast laetud õhkkondensaatoritest, mis on laetud sama pingeni. Kui sellest paketist lendab läbi osake, väheneb laeng neis kambrites, mida osake läbis.
2. Sädekamber on sama mõtte edasiarendus. Kambreid on nüüd vaid üks, kuid selles on tihedalt pakitud traatvõrede pakk. Niipea, kui selles kambris tekib vool (kusagil liigub laetud osake), antakse võredele paarikaupa kõrgepinge. Võrede vahel tekkiv elektrilahendus markerib sellisest kambrist läbi lennanud osakese jälge; seda saab pildistada tavalise fotoaparaadiga.
3. Udukamber (leiutas C. Wilson 1912.a., kõige "teenekam" registraator) kujutab endast veeauruga täidetud ruumi. Kui kambris rõhku vähendada, tekib seal üleküllastunud aur, mille kondenseerumiseks piisab tühisest välismõjutusest. Selles kambris lendavast osakesest jääb umbes samasugune udujalg, nagu kõrgel lendavast lennukist. Neidki jälgi saab pildistada.
4. Mullikamber (D. Glaser, 1952) on sama põhimõttega. Üleküllastatud auru asemel täidab kambrit ülekuumendatud vesi. Eeliseks on see, et vesi on samaaegselt ka märklaud; aurust olid otsepõrked väikese tiheduse tõttu haruldased.



Neutroni lagunemisreaktsiooni Feynmann'i diagramm. Kuna nelikpunkt on keelatud, peab eksisteerima vaheosake W^- .

5. Fotoemulsioonmeetod oli põhiline 1970-tel aastatel; temaga on tehtud enamus suuri avastusi. Kambrit täidab kiirgustundlikke hõbedaühendeid (AgCl, AgJ jt.) sisaldavate plaatide pakk. Pärast eksperimendi lõppu ilmutatakse-kinnitatakse neid plaate nagu tavalisi fotosid; osakestest jäävad tumedad jäljed, mida saab mikroskoobi all vaadelda ja mõõta.
6. Elektroonsed mõõtesüsteemid (nn. Tsherenkovi detektor) on tänapäevatehnika. Et kambrit täitvas keskkonnas on valguse (faasi)kiirus väiksem osakeste liikumiskiirusest, tekib osakese taga laeva vöörilainet meenutav laine front, mis seinani jõudes tekitab seal asuvates detektorites elektriimpulsi. Osakeste trajektooriid taastatakse numbriliste arvutuste abil.

Osakeste omaduste kindlakstegemiseks on vaatluskamber tavaliselt magnet- ja elektriväljas. Et trajektoori kõverust on kerge mõõta, saame sellistel tingimustel kohe teada osakeste erilaengud; massi hinnatakse energia jäävuse seaduse kaudu ning erilaengu jagamise massi-laengu vahel teeb lihtsaks elektrilaengu diskreetsus ($q = ne$). Seega on tänaste füüsikute võimalused aatomisisese maailma uurimiseks üllatavalt suured.

Osakeste "tabel". Mis aga kõigile üllatuseks, elementaariosakeste hulk, mida selleste seadmete abil nähakse, on suur ning ei kavatsegi lõppeda. Algul peeti "avastamise võidujooksu", seejärel asuti leitud objekte liigitama-süsteemiseerima (saadi omapärane "Mendelejevi tabel"). Kui aga osakeste koguarv lähenes juba kolmesajale, löödi "elementaarsusele" käega ning asuti uurima nende võimalikku koostist.

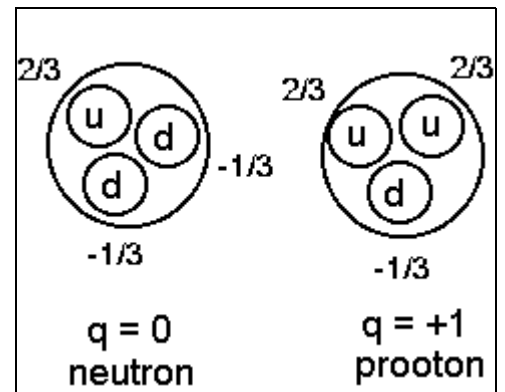
Kvarkmudel. 1965. a. esitasid Murray Gell-Mann ja Georg Zweig idee koostada kõik tol ajal tuntud osakesed kolmest algosakesest -- kvargist.

Kvark oleks siis midagi tuumaosakeste-nukleonide taolist; tema laeng võis omada nelja murdarvulist väärtust ($\pm\frac{1}{3}, \pm\frac{2}{3}$) ning kvarkide energiaseisundit osakeses määraksid kaks "kvantarvu" - veidrus ja isospinn.

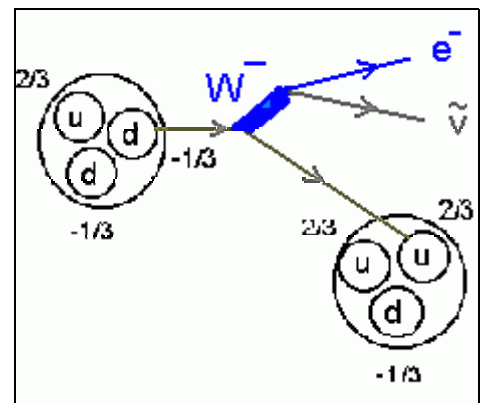
Tänaseks on lisandunud veel kaks sellist "omadust" - värvus ja šarm. Mõnikord piirduakse ka kolme "kirjeldajaga", isospinn, sarm ja veidrus võetakse kokku üheks kvantarvuks - **lõhnaks** analoogselt kvantarvude liitmisega aatomite mitmeelektronsetes termides.

Kes tahab asjast paremat ülevaadet saada, soovitan vaadata üht raamatut:

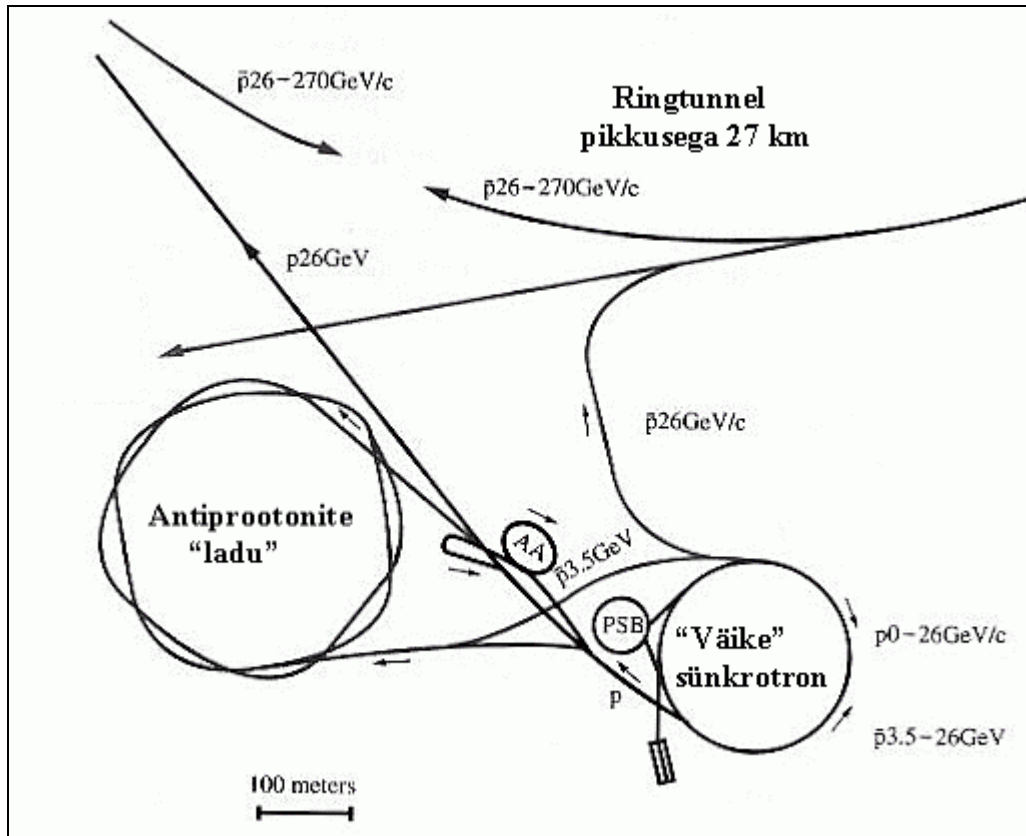
Jaak Lõhmus, Laur Palgi. **Osakestest osakeses**. "Mosaiik 40", "Valgus", 1985.



Protoni ja neutroni kvarkmudelid.



Neutroni lagunemisreaktsioon kvarkmudeli valguses. Virtuaalne vaheboson W^- kaasneb d-kvarki muundumisega u-kvargiks; tema lagunemisel tekib leptonite paar elektron-antineutriino. Leptonid kvarkidest ei koosne, olles ise fundamentaalosakesteks.



Maailma kalleima füüsikaseade - Euroopa Tuumauuringute Nõukogu (CERN) kiirendikompleksi skeem. Just sellel kiirendil avastati elektronõrga vastasmõju vahebosonid, nende hulgas ka meile juba tuttav W^- .