

K. GLADKOV

AATOMI ABC

4-29929

Kontrollleksikon

K. GLADKOV

AATOMI
A B C



KIRJASTUS «VALGUS» • TALLINN 1969

Originaali tiitel:

К. А. Гладков
Атом от А до Я
Атомиздат
Москва 1967

Vene keelest tõlkinud R. Toming
Kunstiliselt kujundanud U. Liivamägi

2

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

74638

AUTORILT

See raamat on mõeldud kahe lugejate kategooria jaoks. Esimese ja põhilise kategooria moodustavad need ajalehtede ja massilistes tiraažides ilmuvate ajakirjade lugejad, kel ei ole küllaldast ettevalmistust ja kel puuduvad kogemused populaarteadusliku kirjanduse lugemise alal, sest neil pole selleks aega olnud või neile pole lihtsalt huvitavat raamatut kätte sattunud. Peamiseks ülesandeks on siin võimalikult arusaadavalt seletada kõige sagedamini esinevaid teaduslikke ja tehnilisi termineid, mis on otse-see või kaudses seoses tuumaenergia (aatomenergia) tootmise ja kasutamisega.

Teise, niisama arvukasse kategooriasse kuuluvad lugejad, kes on aja jooksul juba jõudnud ilma igasuguse süsteemita läbi lugeda kenakese hulga seda teemat käsitlevaid artikleid ja kellel on olemas ettekujutus tuumaenergeetika põhialustest. Nende jaoks on raskem ja keerukam kirjutada. Paljude kordumiste tagajärjel omandatud ja loomulikult lihtsustatud tõed, mis sageli ei ole küllaldases seoses üldiste füüsikaalaste teadmistega, tekitavad sellisel lugejal illusiooni, et ta mõistab kogu probleemi olemust. Tal on raske sundida ennast lugema isegi hästi kirjutatud populaarteaduslikku raamatut, sageli kas või juba sellepärast, et niisugust raamatut lehitsedes põrkab ta kindlasti kokku paljukurratud «käibeseletustega» ning efektsete piltidega, mis kujutavad laialilendavaid aatomituumasid.

Pidades silmas just sellist lugejat, kes on juba «rikitud» mõningate algteadmistega tuumaenergiast, paigutas autor materjali sellisel viisil, et tuumaenergiat puudutavad mõisted ja terminid moodustaksid midagi populaarteadusliku entsüklopeedia taolist.

Iga tähe all on eraldi välja toodud aatomifüüsika põhialustesse kuuluvad mõisted ja terminid, kusjuures siin võib esineda üksikuid kõrvalekaldumisi tähestikulisest järjestusest. Põhimõistetest tulenevad mõisted, tehnilised terminid ja muud vähem olulised märksõnad järgnevad nendele peenemas kirjas ning rangelt tähestikulises järjestuses. Iga nähtust, mõistet ja terminit on püütud seletada nii, et jutustus sellest oleks võimalikult terviklik, kuigi mõned keerukamad, pikemaid seletusi vajavad mõisted on jaotatud mitmeks märksõnaks.

Kui selle «taskuentsüklopeedia» lugejal mõne aja pärast tekib soov põhjalikumalt tutvuda mõne hea populaarteadusliku raamatuga, siis loeb autor oma ülesande täidetuks.

AATOMIENERGIA JA INIMKOND

V. I. Lenini rajatud bolševike partei esimene programm eraldas meie riigi kapitalistlikust maailmast. Teine programm, mis kehtestati veel Lenini eluajal, viis sotsialismi täielikule võidule. NLKP XXII kongressil kinnitatud kolmandas programmis sisaldub konkreetne plaan kommunistliku ühiskonna ülesehitamiseks meie maal.

Nõukogude rahva jõupingutused, mis oma ulatuselt on titaanlikud, lõpptulemustelt fantastilised ja sisult romantilised, loovad kommunismi materiaal-tehnilise baasi, panevad aluse seninähtamatult võimsatele ja rikkalikele tootlikele jõududele, teevad Nõukogude Liidust maailma suurima tööstusriigi ning võimaldavad lõplikult võita majandusliku võistluse kapitalismiga.

Ja jälle, nagu 1920. aastal, on meie partei peajooneks, püsivaks ja muutumatuks «teiseks» programmiks kogu riigi elektrifitseerimine. «Elektrifitseerimine nõukogude korra pinnal loob kommunismi aluste lõpliku võidu,» kordas V. I. Lenin väsimatult iga kord, kui tekkis küsimus, mis on meie kodumaa ja kogu inimkonna tulevikku määrav tähtsaim tegur.

Seejuures ei ole küsimus lihtsalt elektrifitseerimises, vaid selle eelisarendamises kõigi teiste rasketööstusharude, riigi industrialiseerimise alustega võrreldes. Viimasel ajal on partei lisanud elektrifitseerimisele kui ökonoomika selgroole veel rahvamajanduse kemiseerimise.

1970. aastal 840—850 miljardit, 1980. aastal 2700—3000 miljardit (3 triljonit!) kilovatt-tundi elektrienergiat — poolteist korda rohkem, kui seda praegu toodavad kõik maailma riigid! Niisugune on kommunismi ehitamise uus, astronoomiline mastaap.

Suur laev sõidab suurel merel. 1980. aastal sulatakse 250 miljonit tonni terast, toodetakse 690—710 miljonit tonni naftat ja 1000—1200 miljonit tonni kivisütt. Nõukogude tööstuse kogutoodang kasvab vähemalt kuus korda, põllumajandussaaduste toodang aga umbes kolm ja pool korda. See tähendab, et meie riik omandab veel viie Nõukogude Liidu taolise tööstusriigi ja rohkem kui kahe samasuguse põllumajandusmaa tootmisressursid!

Elektrienergia küllus võimaldab senisest veelgi suuremal määral arendada kogu tööstuse alust — erakordselt energiamahukat rasketööstust, mis valmistab tootmisvahendeid ettevõtetele, kus omakorda toodetakse tööpinke ja masinaid kõike muud valmistavatele tehastele ja vabrikutele.

Niisiis: energia, energia ja veel kord energia. Just energiast selle kõige täiuslikumal kujul — elektrienergiast — oleneb, kui kiiresti luuakse kommunismi materiaal-tehniline baas ning täitub inimkonna unistus kuldsest külluseajastust, mis on juba nii käegakatsutavalt lähedal.

Teadlased on arvutanud, et kui täiskasvanud mees töötab iga päev kaheksa tundi, siis toodab ta aastas 250 kilovatt-tundi energiat. Kaasaegse elektrijaama küttekoldes tuleb samasuguse hulga elektrienergia saamiseks põletada umbes 125 kilogrammi kivisütt. Iga toodetud kütusetonn annab inimesele niisiis kaheksa energeetilist abilist.

Kui kolm triljonit kilovatt-tundi elektrienergiat jagada 300 miljoniga — selline on oletatav elanike arv meie riigis 1980. aastal —, siis tuleb ühe inimese kohta 10 000 kilovatt-tundi. Järelikult astub iga nõukogude inimene uue ühiskonnakorra lävele, ümbritsetuna tervenisti 40 väsimatust elektrilisest abilisest.

See on kahtlemata väga suur saavutus, eriti kui meenutada, et 1913. aastal tuli Venemaal ühe elaniku kohta ainult 14 kilovatt-tundi ja 1920. aastal, Venemaa elektrifitseerimise kuulsa leninliku plaani — GOELRO — kinnitamise ajal 3 kilovatt-tundi elektrienergiat.

Aga see on ju alles algus! 1980. aasta järel tuleb 1990. ja lõpuks ka 2000. aasta! Ja saavutused, mis meile täna on veel ainult unistus, näivad XX sajandi lõpu inimestele kaduvväikestena.

Uue, kommunistliku korra lävele jõudnud nõukogude inimesel seisab ees maakera palge ümberkujundamine, selle uuesti konstrueerimine oma tahte järgi. Praegu inimtühjadel põhjaala-

del voolavate jõgede suunamine lõunasse. Siberi jõgede tohutute veeülejääkide juhtimine Kesk-Aasia kõrbetesse. Kaspia mere veetaseme taastamine. Uute jõgede rajamine, uute merede loomine.

Edasi aga tulevad juba gigantsed tööd. Merehoovuste suuna muutmine tervete mandrite soojendamiseks. Kõrbete asendamine õitsvate aedadega, mis annab planeedile tagasi kõik tema taime- rikkused. Tundrate soojendamine ja igikeltsa likvideerimine. Sõnade «ikaldus», «vaesus» ja «nälg» kustutamine kõikide keelte sõnastikest. Maa sisemuse rikkalikesse varaaitudesse tungimine. Maailmamere muutmine ammendamatuks toidu- ja tööstustooraine allikaks, kunstlike saarte ja tervete mandrite loomine mere- avarustes. Arvukate Maa tehiskaaslaste ehitamine, Kuu ja lähemate planeetide asustamine...

Kõigi nende suurte ürituste elluviimiseks tuleb paratamatult kulutada kümneid, sadu ja isegi tuhandeid triljoneid kilovatt- tunde energiat.

Ja mida kaugemale tsivilisatsioon areneb, seda suuremaks muutub energiavajadus... Vajalik on terve energiaookean!

On täiesti loomulik, et juba praegu hakkab inimestele muret tegema küsimus, kui kauaks jätkub olemasolevatest energiaalli- katest. Kas ei alga juba käesoleva sajandi lõpul energianälg, sest lõpevad kivisöe, nafta, maagaasi, turba, põlevkivi ja puidu kui põhiliste kütuste varud? Mis on meie käsutuses tänapäeval, mil- lele võime loota lähemas ja kaugemas tulevikus?

Praegu oleme tunnustajateks haaravale võistlusele energie- tikagigantide ehitamise alal. Üksteise järel astuvad rivisse sõna otseses mõttes astronoomilise võimsusega hüdroelektrijaamad: V. I. Lenini nimeline Volga HEJ (2,1 miljonit kilovatti), NLKP XXII Kongressi nimeline Volga HEJ (2,3 miljonit kilovatti), Bratski HEJ (3,6 miljonit kilovatti). Rajatakse Krasnojarski giganti, mille võimsuseks on ette nähtud 5 miljonit kilovatti. Üks selline jaam annab energiat mitu korda rohkem, kui nägi ette terve GOELRO plaan! Angarale, Jenisseile, Leenale ja teistele Nõukogude Liidu jõgedele projekteeritakse veelgi võimsamaid hüdroelektrijaamu. Kõigist Nõukogude Liidu territooriumil voo- lavatest jõgedest kokku on võimalik saada umbes 250 miljonit kilovatti — kolm korda rohkem, kui 1960. aastal andsid kõik meie maa elektrijaamad. See on muidugi väga suur energiahulk, kuid kommunistliku homse inimeste vajadusi see siiski ei rahulda.

Midagi imestamisväärset ei ole selles, et kõige levinumaks

energiaallikaks on kogu maailmas seni jäänud kaevandatav kütus, peamiselt kivisüsi. Seda leidub maapõues kõige rohkem.

Teadaolevad naftavarud on kivisöevarudest umbes sada korda väiksemad. Et aga naftat on tunduvalt kergem, mugavam ja odavam toota, transportida ning kasutada, siis on nafta tootmine ja tarbimine kivisöe tootmisele ja tarbimisele järele jõudnud ning hakkab seda isegi ületama. 1965. aastal toodeti maailmas juba rohkem kui 1400 miljonit tonni naftat.

Niisama kiiresti, kui mitte veelgi kiiremini kasvab maagaasi toodang.

Kivisöe, eriti aga nafta ja gaasi toodangu järsk kasv võimaldab omakorda veelgi kiirendada ülivõimsate soojuselektrijaamade ehitamist ja eksploatatsiooni andmist ning järelikult ka kommunismi materiaal-tehnilise baasi loomist.

Väga pikaks ajaks jääb just elektrienergia selleks ideaalseks, valitsevaks energialiigiks, mida tulevikuühiskond rakendab oma tootmistegevuse kõigis harudes. Kuid sel energeetika valitsejal on ka omad kaasasündinud nõrkused.

Soojusenergiat näiteks saab, olgugi kaudselt, koguda ja säilitada kütuste, põlevate ja plahvatavate ainete ning keemiliste reaktiivide varude näol. Elektrienergiat aga tuleb tarbida vastavalt sellele, kuidas teda toodetakse: nimetamisväärsed elektrienergia hulki ei ole võimalik ei otseselt ega kaudselt koguda ega säilitada.

Aga mida teha sel juhul, kui kütustesse või langevasse vette talletunud energiat on liiga vähe või seda ei ole üldse? Nõukogude Liidu tööstusest ja elanikkonnast on näiteks umbes 80% koondunud riigi Euroopa-ossa ja Uraali, samal ajal kui suurem osa energiaressurssidest, veest ja kütusest paikneb ida- ja kirde-

250 kW·h aastas



1 kg = 11,6 kW·h

rajoonides. Missugune oleks kiireim, majanduslikult tulusaim ja tehniliselt otstarbekaim meetod selle probleemi lahendamiseks?

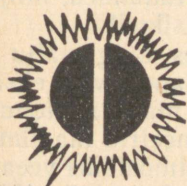
Või võtame kaugemale ulatuva ülesande: koondada tohutu võimsaks energeetiliseks rusikaks kogu riigis toodetav elektrienergia — kümned miljonid kilovatid. Seda ei ole võimalik raketi pardale paigutada ja kosmoselennuks kasutada. Seda ei saa milleski säilitada, sellega ei ole võimalik midagi laadida, seda ei saa kondenseerida ega kokku suruda. Tavalised mitmeastmelised seadmed ja masinad, mis muundavad kütuste energiat elektri-vooluks, on aga äärmiselt suured ja rasked ning neil on väike kasutegur.

Seepärast on teadlased juba ammu unistanud kaduvväikeste mõõtmega, kuid muinasjutuliselt võimsast energiaallikast, millest saadav energia ületaks maailma tugevaimate lõhkeainete energia.

Ja siis sündis ime. Kolmekümnest grammist uraanist 235 piisab täiesti, et ühe ööpäeva vältel energiaga toita elektriijaama, mille võimsus on viis tuhat kilovatti ja mis tavaliselt põletab selle aja jooksul umbes sada tonni kivisütt. Mõnisada grammi seda imepärast ainet aga võimaldab maailma võimsaima jää-lõhkuja «Lenin» masinatel arendada 44 000-hobujõulist võimsust!

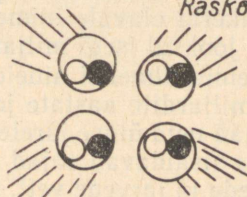
Loodus püüdis seda vapustavat energiahulka peita kaduvväikesesse ainekogusesse — aatomituuma. Inimesel aga õnnestus avada tuhanded ülikeerukad lukud, tungida aatomi südamesse, ammutada sealt energiat ja allutada see oma tahte.

Sellest suurest avastusest, mille kohta silmapaistev prantsuse füüsik Paul Langvin ütles, et tsivilisatsiooni ajaloo väärib see oma tähtsuse poolest kõrvutamist tule avastamisega, on küll



1 kg = 22,9 milj. kW·h

235U



1 kg = 117,5 milj. kW·h

Rasko vesinik (D)

möödunud peaaegu 30 aastat, ent praegusenä ei suuda ei lihtsad inimesed ega ka seda uut loodusjõudu uurivad teadlased harjuda nii «ebaloomuliku» mittevastavusega harjumuspäraste ainekoguste ja nendes sisalduvate energiahulkade vahel.

Mõtelve järele: ühe kilogrammi parima kütuse — nafta — täielikul põlemisel vabaneb 11,6 kilovatt-tundi soojusenergiat. Ühe kilogrammi uraani 235 aatomituumade jagunemisel aga eraldub samuti soojusena 22,9 miljonit kilovatt-tundi energiat — peaaegu kaks miljonit korda rohkem! Seejuures võib nimetatud energia vabaneda niihästi ühekorraga, ainult üks miljondik sekundit kestva kolossaalse purustusjõuga plahvatuse näol (aatomipomm), kui ka järk-järgult nagu tavalises elektri jaamas.

Veel rohkem energiat annab nõndanimetatud termotuumareaktsioon — kergete elementide, näiteks vesiniku aatomituumade liitumine. Eraldub energiahulk on sel juhul veel uskumatum — 117,5 miljonit kilovatt-tundi ühe kilogrammi vesiniku kohta! Ja lõpuks tundub juba täiesti fantastiline, et aine kui niisugune on muinasjutulise energiahulga kandja, just nagu astronoomiliste mõõtmetega «vedru», mis, kui seda kunagi õnnestub vabastada, annab ühe kilogrammi aine kohta 25 miljardit kilovatt-tundi energiat — kõikide Volga suurte hüdroelektrijaamade aastatoodangu! Seejuures koosneb kõik meie ümber ja ka me ise koosneme triljonitest triljonitest aatomitest, mille «vedrud» keerati üles siis, kui kosmose ajaloolises lõpinatuses tekkisid kõik meid ümbritsevad ained, meie planeet, Päikesesüsteem, Galaktika, galaktikate süsteem ja universum.

Termotuumareaktsiooni oskame praegu teostada ainult tohutu jõuga plahvatusena — vesinikupommi plahvatusena. Päeval, mil teadlased õpivad termotuumareaktsiooni juhtima, kujuneb inimesest tõeline looduse valitseja, sest ta saab oma käsutusse sõna otseses mõttes piiramatud ja ammendamatud energiaallikad. Igale maakeral elavale inimesele tulevad appi tuhanded, miljoniid ja aja jooksul isegi miljardid elektrilised teisikud!

Jagunemisvõimelisi aineid ei ole maakoos kuigi palju ja kümnete miljardite aastate jooksul, mil meie planeet veel eksisteerib, ei jää neid üldse järele. Vesinikku aga on maakeral tohutu hulk. Seda sisaldavad sajad miljonid kuupkilomeetrid maailmamere, jõgede ja järvede vett, maasisesed veed, atmosfääri veeaur ning kümned miljonid kuupkilomeetrid Arktika ja Antarktika jääd. Seda jätkub kauaks, terveteks epohhideks ja eeradeks.

Reguleeritava energia tohutu kontsentratsioon kaduvväikeses ruumalas võimaldab saata rakette kõige kaugematele planeetidele, teistesse päikesesüsteemidesse ja isegi naabergalaktikatesse, kunagi väga kauges tulevikus muuta maakera teije kaldenurka ja teha sellega meie planeedist igavesti õitsev paradiis, võib-olla aga hoopiski viia Maa mõnda teist, kuumemat tähte ümbritsevale orbiidile.

Aatomi sisemuses peituvate ammendamatu energiaallikate ja kommunistliku ühiskonnakorra kombinatsioon paneb inimkonna ajaloos aluse tõeliselt kuldsele ajastule, millest praegu ei suuda pilti anda kõige lennukamgi fantaasia.

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

A

«Aatomikeel»

Aatom

Aatomituum

Aatomi ja aatomituuma mudelid

Aatomituuma «ergastatud» seisund

Aatomituuma jagunemine

Aeglased (soojuslikud) neutronid

Ahelreaktsioon

«Aatomikeel.» Käesolevas raamatus oleme sageli sunnitud sõnade asemel kasutama mitmesuguseid tähiseid, arve ja valemid. Kõik need on väga lihtsad ja piltlikud ning nendega on kerge harjuda.

Tähised ja arvud. Keemilisi elemente tähistatakse tuumafüüsikas samade sümbolitega kui keemiaski. Elemendi sümbolile, mis kujutab enesest elemendi ladinakeelse nimetuse lühendit, lisatakse aga kaks arvu: vasakule üles massiarv, mis võrdub nukleonide (prootonite ja neutronite) koguarvuga elemendi aatomi tuumas, ja vasakule alla elemendi järjenumber Mendelejevi tabelis, mis näitab positiivsete laengute (prootonite) arvu aatomi tuumas ja sellele vastavat elektronide arvu aatomi elektronkattes. Näiteks ${}^7_3\text{Li}$ — liitium.

Vasakul all olev järjenumber 3 ütleb, et liitiumi aatomi tuum sisaldab kolm positiivselt laetud prootonit ja tuuma ümbritsevatel orbiitidel tiirleb kolm elektroni. Liitiumi massiarv on 7. Lahutades seitsmest kolm, saame teada neutronite arvu liitiumi aatomi tuumas. See on neli.

Sageli tähistatakse elementide isotoope ka elemendi täieliku nimetusega, millele lisatakse massiarv. Näiteks poloonium 210, raadium 226, uraan 238 jne.

Elementaarosakeste tähised on analoogilised elementide tähistega:

e^- — elektron. Paremalt ülal olev miinus märgib elementaarse elektrilaengu negatiivsust.

e^+ — positron. Paremalt ülal olev pluss märgib elementaarse elektrilaengu positiivsust.

1_0n — neutron. Vasakul ülal olev üks näitab neutroni massiarvu, vasakul all olev null elektrilaengu puudumist.

Meie raamatu igal leheküljel korduvad ka sellised sõnad ja mõisted, nagu «kiirus», «kiirendus», «jõud» ja eriti «energia». Seepärast tuleb algul meenutada üht-teist kooliõpikutest; see võimaldab õigesti mõista terminite mõningaid iseärasusi, misjärel on juba tunduvalt kergem üle minna tänapäeva füüsikas kasutatavatele keerukamatele mõistetele.

Kiirus. Kui ruumis liikuv füüsikaline keha («punkt») läbib võrdsetes ajavahemikes ühepikkused teelõigud, siis öeldakse, et ta liigub ühtlase kiirusega. Kiiruse mõõtühikuks on üks sentimeeter sekundis (cm/s).*

Kiirendus on kiiruse muutumise kiirus. Mõõtühikuks on siin 1 cm/s sekundis ehk 1 cm/s².**

Jõud. Kui massi omav keha liigub ruumis teatava kiirendusega, siis mõjub talle vahetpidamatult rõhk, mida nimetatakse jõuks. Jõud võrdub keha massi ja kiirenduse korrutisega. Jõu mõõtühikuks on düün (dyn). See on jõud, mis annab 1-grammise massiga kehale kiirenduse 1 cm/s².***

Töö. Kui mingisugune jõule vastupanu avaldab keha liigub jõu mõjul kiirendusega ühest kohast teise või tõuseb teatavale kõrgusele, siis öeldakse, et jõud teeb teatava hulga tööd. Mõõtühikuks on siin töö, mille teeb jõud 1 dyn, kui ta rakenduspunkt nihkub 1 cm võrra. Seda ühikut nimetatakse ergiks. Praktiliseks mõõtühikuks on džaul (J), mis võrdub 10⁷ ergiga.****

Võimsus on ajaühikus tehtav töö. Füüsikaliseks võimsuse mõõtühikuks on 1 erg/s, praktiliseks mõõtühikuks aga 1 J/s, mida nimetatakse vattiks (W). 1000 vatti võrdub ühe kilovattiga (kW).*****

Energia. Tööd, mis vastab teatavale ühes sekundis arendatavale võimsusele, võib teha ka kauem — tunde, päevi või aastaid. See oleneb antud töö tegemiseks kulutatavast energiahulgast. Energiahulka, mis on vajalik 1-kilovattise võimsuse arendamiseks ühe tunni jooksul, nimetatakse kilovatt-tunniks (kW · h).

Rõhulval enamikul juhtudel saavad inimesed energiat kivisöe, nafta, puidu, turba või tuumkütuse põletamise teel. Soojust aga on füüsikas tavaks mõjta teistsugustes ühikutes — kalorites (cal). Kalor on soojushulk, mis on vajalik 1 g vee soojendamiseks 1° võrra. 1000 kalorit ehk 1 kilokalor (kcal) soojendab 1° võrra 1 kg vett. 1 g kivisütt annab põletamisel 8 kcal soojust, 1 g naftat 12 kcal, 1 g maagaasi 10,6 kcal, 1 g puitu 4 kcal. 1 kW · h = = 860 kcal.*****

Kineetiline energia on mistahes materiaalse keha või osakese liikumise-energia või tööhulk, mida keha võib teha oma liikumise tõttu. Keha kineetiline energia võrdub keha massi ja kiiruse ruudu poole korrutisega. Materiaalsete kehade süsteemi kineetiline energia on võrdne üksikkehade kineetiliste energiatega summaga.

* Praegu juurutatavas rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis (SI) on kiiruse mõõtühikuks üks meeter sekundis (m/s). — *Tõlkija*.

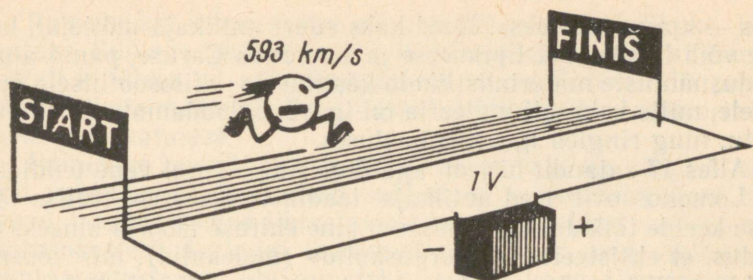
** SI-süsteemis 1 m/s². — *Tõlkija*.

*** SI-süsteemis on jõu mõõtühikuks njuuton (N) — jõud, mis annab 1-kilogrammise massiga kehale kiirenduse 1 m/s². 1N = 10⁵ dyn. — *Tõlkija*.

**** Džaul on töö mõõtühikuks SI-süsteemis. — *Tõlkija*.

***** Vatt on võimsuse mõõtühikuks SI-süsteemis. — *Tõlkija*.

***** SI-süsteemis mõõdetakse igasugust energiat (ka soojusenergiat) nagu töödki džaulides. 1 kW · h = 3,6 · 10⁶ J; 1 cal = 4,1868 J. — *Tõlkija*.



Elektronvolt. Elektroni laeng on rangelt konstantne suurus. Kui elektron satub elektrivälja, mille tekitab laetud kehade vaheline potentsiaalide vahe 1 volt (V), siis omandab ta kiiruse 593 km/s. Koos kiirusega aga kasvab loomulikult osakese kineetiline energia. Nimetatud kiiruse korral võrdub kineetiline energia osakese laengu (vt. «Elementaarlaeng») ja potentsiaalide vahe korrutisega, s. t. $1,6 \cdot 10^{-12}$ ergi ehk $1,6 \cdot 10^{-19}$ džauliga. Sellist energiahulka nimetatakse elektronvoldiks (eV).

Konkreetselt ettekujutuse saamiseks selle mõõtühiku suurusest on tarvis teada, et gaaside aatomite ja molekulide soojusliikumise keskmine energia, samuti tahkete ainete ja vedelike aatomite energia toatemperatuuril võrdub ligikaudu 0,03 elektronvoldiga.

Vesiniku aatomis kõrgeimal energeetilisel tasemel (tuumast kaugeimal orbiidil) viibiva elektroni energia on 13,53 eV. Kui elektron omandab sellest suurema energia, siis lahkub ta aatomist.

Elektronvoltides mõõdetakse ka kõigi teiste liikuvate, niihästi laengut kandvate kui ka laenguta osakeste, samuti fotonite energiat.

Potentsiaalne energia on töö, mida keha (näiteks kokkusurutud vedru, suurde kõrgusse tõstetud koormis, kütusevaru) on suuteline tegema oma asendi või seisundi tõttu, või töö, mida on tarvis teha keha ümberpaigutamiseks tema asendist oleneva jõu mõjumissuunale vastupidises suunas.

Aatom — peategelane käesolevas raamatus ja kogu meid ümbritsevas materiaalses maailmas.

Arvamust, et kõik looduses leiduvad lõpmatult mitmekesised ained koosnevad kaduvväikestest, silmaga nähtamatutest osakestest, mida ei ole enam võimalik väiksemateks osakesteks jagada, avaldasid juba muistsete idamaade, India, Hiina ja Kreeka mõtetargad. Kõik see oli siiski ainult mõtiskluste ja oletuste, olgugi et mõnel juhul geniaalsete oletuste vili, mitte katsete ja teaduslike üldistuste tulemus. Kõige täielikumal kujul väljendasid seda mõtet kreeka filosoof Leukippos ja ta õpilane Demokritos, kes elasid neli sajandit enne meie ajaarvamist. Demokritos oli ka esimene, kes jagamatuid materiaosakesi hakkas nimetama aatomi-

teks — «jagamatuteks». Need kaks suurt antiikaja mõtlejat, kellele võib lisada veel Epikurose ja Lucretius Caruse, panid aluse loodusnähtuste materialistlikule käsitlesele — filosoofilisele õpetusele, mille kohaselt materia on igavene, loodamatu ja hävitamatu, ning ringleb igavesti looduses.

Alles 17 sajandit hiljem aga õnnestus suurel vene teadlasel M. Lomonossovil need antiikaja teadlaste oletused tõelise teaduse keelde tõlkida. Lomonossovi aine ehituse teooria aluseks oli eeldus, et eksisteerivad «korpuskulid» (molekulid), mis koosnevad keemilistest elementidest ehk «tundetutest füüsikalistest osakestest» — aatomitest. Kogu materia liikumine taandub Lomonossovi õpetuse järgi aatomite liikumiseks ja on eranditult kõigi looduses toimuvate muutuste põhjuseks. Aatomite liikumine aines määrab ka aine soojusastme ehk temperatuuri. Ühtlasi väitis Lomonossov, et eksisteerib madalaim võimalik temperatuur — absoluutne null, mille puhul «tundetute aineosakeste» soojusliikumine lakkab täielikult.

Mistahes aine väikseimat osakest, millel veel on kõik selle aine omadused, hakati nimetama molekuliks. Molekuli lagunemisel lakkab aine iseseisev eksisteerimine ja vabanevad aatomid — suhteliselt vähese arvu üksteisest erinevate keemiliste elementide väikseimad osakesed.

Samm-sammult kõikvõimalikke looduslikke aineid uurides ja uusi elemente avastades selgitasid keemikud üha täpsemalt nende omadusi ja iseärasusi. Selle vaevarikka ja pikaajalise uurimistöö käigus ilmnis palju imestamisväärset ja ka lihtsalt arusaamatut. Ühtede elementide aatomid olid erakordselt kerged, teiste omad äärmiselt rasked. Ühed elemendid reageerisid üksteisega niivõrd energiliselt, et neid tuli üksteisest kaugel hoida. Teisi elemente aga ei õnnestunud mitte mingisugustes tingimustes reageerima panna.

Kõik see erutas teadlasi. Faktide kaootilisest korrapärasusest paistsid ähmaselt mingid seaduspärasused, mis andsid tunnistust teatava range, kuid seni veel tundmatu korra olemasolust. Kaos ei valitsenud nähtavasti mitte looduses, vaid teadlaste katkendlikes, ebapiisavates teadmistes. Just siin tuli kõigepealt kord luua. Looduse keeruka, hoolikalt hoitud saladuse paljastamise au langes osaks silmapaistvale vene teadlasele, Peterburi Tehnoloogiainstituudi professorile Dmitri Mendelejevile (vt. «Keemiliste elementide perioodilisuse süsteem»).

Rohkem kui tuhat aastat oli aatomit peetud lõplikuks, jagamatuks. Siis aga tehti kõigest mõnekümne aasta jooksul vaieldamatult kindlaks, et aatomite jagamatus on eksitus, mis peegeldab antiikaja materialistlike filosoofide üldist ideed materiate jagamatusest.

Ilmnes, et keemiliste elementide aatomid ei ole hoopiski aatomid, vaid terved omalaadsed, suhteliselt suuremõtmelised maailmad, mis koosnevad lihtsamatest komponentidest — elementaarosakestest. Ja kuigi teadlased nimetavad neid osakesi elementaarseteks — lihtsaimateks, annab kogu tänapäeva teaduse arenemiskäik põhjust arvata, et nad ei ole kaugeltki elementaarsed (vt. «Elementaarosakesed»).

Esimene ja põhiline avastus oli see, et aatom koosneb kahest osast — raskest positiivselt laetud tuumast (vt. «Aatomituum»), millesse on koondunud peaaegu kogu aatomi mass, ja kergest kattest, mille moodustavad tohtu kiirusega ümber tuuma tiirlevad ja mitte kunagi sellele langevad elektronid (vt. «Elektron — elektriaatom»). Aatomi läbimõõt võrdub ligikaudu ühe sajamiljondiku sentimeetriga (10^{-8} cm), tuuma läbimõõt aga on 10 000—100 000 korda väiksem.

Kergeima elemendi — vesiniku — aatomi koostisse kuulub ainult kaks osakest: tuum, mille mass on $1,6724 \cdot 10^{-24}$ g, ja selle ümber tiirlev elektron, mille mass — $9,1085 \cdot 10^{-28}$ g — on tuuma massist ligikaudu 1836 korda väiksem. Heeliumi, perioodilisuse süsteemis vesinikule järgneva elemendi, aatomi tuuma ümber tiirleb 2 elektroni, liitiumi aatomis on elektrone 3, hapniku aatomis 8, raua aatomis 26, uraani aatomis 92.

Et arvutused lõpmatult keerukaks ei muutuks, väljendatakse kõikide keemiliste elementide aatomite masse tavaliselt suhtelistes ühikutes. Selliseks ühikuks on $1/12$ süsiniku põhilise *isotoobi* $^{12}_6\text{C}$ aatomi massist (vt. «Aatommass»).

Aatomi tuum on laetud positiivselt, iga selle ümber tiirlev elektron aga kannab negatiivset elektrilaengut, mille väärtus on rangelt konstantne ja mida nimetatakse elementaarlaenguks. Tuumas positiivne elektrilaeng on täpselt võrdne aatomi elektronkattesse kuuluvate elektronide negatiivsete laengute summaga. Normaalses seisundis viibiv aatom on seetõttu elektriliselt neutraalne. Tuumas positiivse laengu väärtus määrab elemendi aatomnumbri ehk järjenumbri Mendelejevi keemiliste elementide perioodilisuse süsteemis. Välisjõudude mõjul võib aatom loovutada või omastada elektrone ja vastavalt sellele muutuda posi-

tiivseks või negatiivseks iooniks. Positiivseks iooniks muutub ta elektronide loovutamise korral, negatiivseks iooniks aga juhul, kui ta mõnelt naaberaatomilt või ümbritsevas keskkonnas leiduvate vabade elektronide hulgast omastab ajutiseks täiendavaid elektrone.

Elektronid, mida hoiavad orbiitidel nende ja aatomituuma vahelise elektrilise külgetõmbe jõud, moodustavad ühtse süsteemi, kusjuures igal elektronil on teatav energiavaru, mille suurus oleneb sellest, missugusel kaugusel tuumast antud elektron tiirleb. Mida suurem on elektroni kaugus tuumast, seda suurem on ka tema energiavaru ning seda nõrgem on tema side tuumaga. Et kaks elektroni ei saa viibida ühes ja samas energgeetilises seisundis (tiirelda ühel ja samal orbiidil), siis paiknevad elektronid aatomi elektronkattes kihtidena. Elektronide arv igas kihis ei saa seejuures ületada teatavat kindlat väärtust: esimeses, tuumale lähimas kihis võib olla maksimaalselt 2 elektroni, teises 8, kolmandas 18, neljandas 32 jne. Alates kolmandast kihist jagunevad elektronide orbiidid alakihitideks.

Aatomi keemilised omadused — võime astuda mingitesse keemilistesse reaktsioonidesse — olenevad peamiselt väliskihi elektronidest, sest need on tuumaga kõige nõrgemini seotud ja teised aatomid mõjustavad neid kõige kergemini.

Ainete kõik keemilised muundumised meid ümbritsevas looduses seisavad mingisuguste lihtainete muundumises lihtaineteks ja, vastupidi, lihtainete muundumises lihtaineteks. Nende protsessidega kaasneb alati energia neeldumine või eraldumine.

Aatomituum. Tuumaks nimetatakse aatomi sisemist osa, millesse on koondunud peaaegu kogu aatomi mass. Tuum koosneb nukleonidest — prootonitest ja neutronitest (erandiks on vesiniku aatomi tuum, mille moodustab üksainus prooton).

Tuuma koostisse kuuluvate prootonite ja neutronite koguarv määrab elemendi aatommassi, prootonite arv aga elemendi järjenumbriga Mendelejevi keemiliste elementide perioodilisuse süsteemis. Igale aatomituumale vastab teatav *seoseenergia*, mis iseloomustab osakesi tuumas hoidvaid jõudusid.

Aatomi- ja aatomituumamudelid. Kogu meie tutvus aatomi ja aatomituumaga põhineb väga kaudsetel uurimismeetoditel. Mõisted nagu «aatomituuma ehitus», «tuuma kujutis» ja muud selletaolised on seetõttu peaaegu täiesti tinglikud. Esiteks on aatomituum nähtamatu, teiseks aga sunnib peaaegu iga uus.

mitte üksnes fundamentaalne, vaid ka teisejärguline tuumafüüsika-alane avastus teadlasi muutma, täiustama ja sageli isegi täielikult ümber töötama kujutlust sellest mikromaailma tähtsaimast osakesest.

Et kirjeldatavate nähtuste tõelisest olemusest mitte teaduslikult ebaõiget ettekujutust luua, räägivad füüsikud tavaliselt aatomi või selle tuuma «mudelist». Niisugune termin peegeldab õigemalt ja täpsemalt uusimaid faktilisi teadmisi sellest salapärasest maailmast, mille uurimine on saanud paljude teadlaspölvkondade elu eesmärgiks ja mõtteks.

Esimeseks aatomimudeliks oli XIX sajandi lõpul J. J. Thomsoni «rosinapuding». See suur teadlane oletas, et näiteks süsiniku jagamatu aatom kujutab enesest kerakujulist positiivse elektri kogumit, milles sisaldub kuus elektroni. Kõigi nende elektronide negatiivsete laengute summa võrdub täpselt kogu kera positiivse laenguga, mistõttu aatom on tavalises seisundis alati neutraalne ja omandab positiivse laengu, s. t. muutub positiivseks ioniks ainult siis, kui ta kaotab ühe või mitu elektroni.

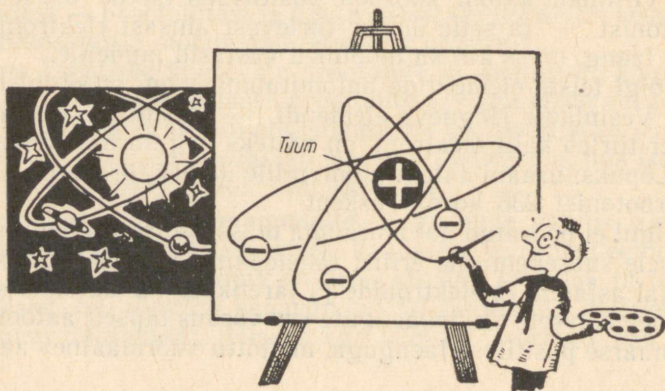
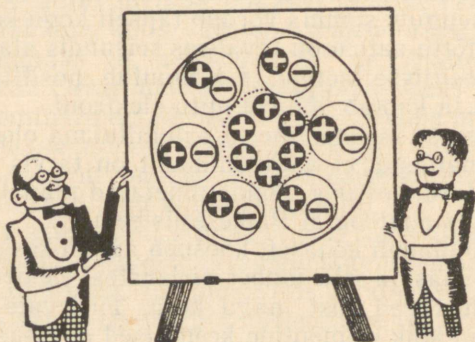
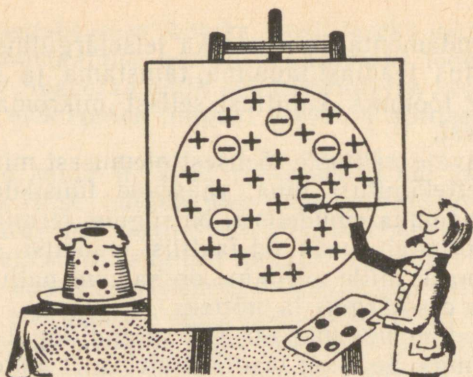
Radioaktiivsuse avastamine ja aatomituuma olemasolu kindlakstegemine näitasid, et aatomimudelit on tarvis muuta. Seda tegi E. Rutherford, kes uue, nõndanimetatud planetaarse mudeli loomisel kasutas analoogiat Päikesesüsteemiga.

Planetaarse mudeli kohaselt koosneb aatom keskel asetsevast positiivsest tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest, mille orbiidid moodustavad just nagu kera. Tiirlevate elektronide arvust olenevad kõik elementide keemilised omadused.

Niisugune mudel kirjeldas väga hästi vesiniku aatomi ehitust. Vesiniku aatom koosneb positiivselt laetud osakesest — prootonist — ja selle ümber tiirlevast ainsast elektronist. Niihästi laeng, mass kui ka mõõtmed vastasid mudelile.

Kõigi teiste elementide aatomituumad on prootonist raskemad. Vesinikule järgneva elemendi — heeliumi tuumal, mille ümber tiirleb kaks elektroni, on näiteks neli korda suurem mass jne. Lõpuks: uraani aatomituum, mille ümber tiirleb 92 elektroni, on prootonist 238 korda raskem.

Algul ei pööratud aatomituuma massi sellisele ebaproportsionaalsele suurenemisele erilist tähelepanu, sest tähtsamaks peeti tol ajal asjaolu, et elektronide ja järelikult ka aatomis sisalduvate negatiivsete elektrilaengute arv võrdus täpselt aatomituuma summaarse positiivse laenguga, mistõttu «normaalne» aatom oli



alati neutraalne. Kõike seda kinnitas ideaalselt ka Mendelejevi tabel, milles mõned elemendid ei paiknenud aatommassi, vaid elektrilaengute arvu, s. t. elektronkattes olevate elektronide arvu suurenemise järjekorras.

Sellest ajast peale, kui teadlastel esmakordselt õnnestus määrata keemiliste elementide aatommasse (aatomkaale), häämas-tas neid pidevalt seaduspärasus, mille järgi nimetatud massid olid täisarv kordi suuremad kergeima elemendi — vesiniku aatommassist. Juba 1816. aastal avaldas Londoni arst ja kirglik keemia austaja William Prout arvamust, et kui kõikide keemiliste elementide aatomid oleksid primaarsed algosakesed, tõelised «universumi telliskivid», mis ei ole osadeks langundatavad ja mil-lel puudub igasugune omavaheline seos, siis ei saaks seletada, miks lämmastiku aatom on täpselt 14 korda ja hapniku aatom täpselt 16 korda raskem kui vesiniku aatom.

Siit tegi teadmishimuline looduseuurija väga ettenägeliku järelduse, et kõikide ainete aatomid koosnevad nimelt vesiniku aatomitest: 14 vesiniku aatomi ühinemisel moodustub läm-mastiku aatom, 16 vesiniku aatomi ühinemisel hapniku aatom jne.

Kui kogu teadusemaailm oleks seda geniaalset oletust tun-nustanud, siis oleks füüsikateaduse areng võinud tunduvalt kii-reneda. Kuid . . . edasised täpsemad mõõtmised näitasid, et teiste elementide aatommassid ei ole vesiniku aatommassi täisarvkord-sed. Pealegi olid erinevused mõnel juhul nii suured, et võimali-kud mõõtnisvead ei tulnud kõne alla. Ahvatleva hüpoteesi vastu-olu teaduslike faktidega ei osanud tol ajal keegi rahuldavalt seletada ja see teadmishimulise arsti rohkem kui huvitav idee vajas unustusse, et XX sajandil uues vormis taassündida.

Paljude sajandite jooksul on teadlased kogenud, et kõik, mis looduses on suurt, on lõppkokkuvõttes väga lihtne. Rutherford tõestas, et kõikide aatomite tuumad — rasked osakesed — kan-navad positiivset laengut. Ja vesiniku aatomi tuumaks on vaiel-damatult prooton. Kui aga eeldada, et kõikide teiste aatomite tuumad koosnevad samuti teatavast hulgast prootonitest, siis tekib otsekohe üks arusaamatus. Tuumalaengu ja aatommassi arvulised väärtused langevad ühte ainult vesinikul. Kõikide teiste elementide puhul on aatommass tuumalaengust 2—2,5 korda suu-rem. Aga prootonite arv tuumas ei saa ju summaarsest tuuma-laengust suurem olla. Kas prootonitel on siis eri elementides eri-

sugune mass? Või kuuluvad aatomituumade koostisse veel mingid tundmatud osakesed?

Sedamööda, kuidas teadmised aatomituumast täienesid, tekkis üha tungivam vajadus nimetatud vastuolu lõplikult kõrvaldada. Siis esitati ja põhjendati uus aatomituumamudel, mis näis sellest puudusest vaba olevat.

Endist viisi eeldati, et kõikide aatomite tuumad koosnevad prootonitest, mille arv võrdub täpselt elektronide arvuga aatomi elektronkattes, s. t. elemendi järjenumbriga. Peale selle aga kuuluvad tuumade koostisse veel prootonid, millega on tihedalt seotud nende positiivseid laenguid neutraliseerivad elektronid. Selliste neutraliseeritud prootonite arv vastab aatommassi ja tuuma summaarse positiivse laengu vahele.

Niisugune mudel seletas täiesti rahuldavalt kõiki tol ajal tuntud fakte. Elektronide sisaldumist aatomituumades aga tõestas radioaktiivsete elementide aatomituumade lagunemine, mille käigus tuumadest lendasid välja kõige ehtsamad elektronid.

Üsna varsti tekkis siiski hulk uusi vastuolusid. Näitena võib nimetada korduvalt kontrollitud fakti, et prootoni ja oletatavasti sellega seotud elektroni massi korrutamisel aatommassi ja tuumalaengu vahega saadi vajalikest tunduvalt väiksemaid tulemusi. «Aritmeetika» ei klappinud mitte kuidagi. Seepärast oli kõnesoleva mudeli eluiga väga lühike.

Neutroni avastamine, mis toimus 1932. aastal, tõi segasesse olukorda otsekohe selguse ja lihtsustas tunduvalt aatomituumade ehituse pilti (tegelikult küll komplitseeris seda suurel määral). Varsti pärast selle avastuse teatavaks saamist esitas nõukogude teadlane D. Ivanenko uue, hämmastavalt piltliku aatomituumamudeli.

Ka Ivanenko teooria kohaselt sisaldavad kõikide aatomite tuumad prootoneid, mille arv võrdub tuuma summaarse positiivse laenguga, s. t. elemendi järjenumbriga perioodilisuse süsteemis. Elektronidega paaristunud prootonite asemel aga kuuluvad tuumade koostisse neutronid — uued tuumaosakesed, mille mass on veidi suurem prootonite massist ja mis ei kannu mingisugust elektrilaengut, s. t. on neutraalsed. Neutroneid on tuumas just nii palju, kui palju on vaja, et seletada aatommassi ja tuumalaengu vahet. «Aritmeetika» klappib sel juhul ideaalselt. Heeliu- mituum koosneb selle mudeli kohaselt kahest prootonist ja kahest neutronist. Tuuma positiivne laeng ja elektronide arv aatomi elektronkattes võrduvad prootonite arvuga — kahega, kõigi proo-

tonite ja neutronite kogumass aga võrdub elemendi aatommassiga — neljaga. Analoogiliselt sisaldub liitiumituumas kolm prootonit (nende arv on võrdne elemendi järjenumbriga ja elektronide arvuga orbiitidel), prootonite ja neutronite summaarne arv aga võrdub kuuega, mis vastab elemendi aatommassile.

Ja nõnda kogu Mendelejevi tabeli ulatuses.

Neutroni avastamine võimaldas suurepäraselt seletada ka *isotoopide* olemasolu. Isotoobid on ühe ja sama keemilise elemendi teisendid, mis erinevad üksteisest aatommassi poolest; seda erinevust põhjustab nende aatomituumadesse kuuluvate neutronite arvu erinevus.

Uus tuumamudel leidis füüsikute hulgas otsekohe tunnustust. See mudel on täielikus kooskõlas arvukate faktidega, mis on käesolevaks ajaks kogunenud, näitab uusi teid aatomituuma ehituse üksikasjalisemaks selgitamiseks ning stimuleerib edasisi teoreetilisi uurimisi.

Aatomituuma «ergastatud» seisund. Nõnda nimetatakse seisundit, millesse satub aatomituum, kui ta saab väljastpoolt juurde teatava hulga energiat, põrkab kokku mingisuguse teise osakesega või neelab selle.

Aatomituuma jagunemine — tuumareaktsioonide eriliik, mille puhul mõne raske elemendi, näiteks uraani või plutooniumi aatomituum neelab neutroni, satub tugevasti ergastatud seisundisse ning lühikese aja pärast jaguneb kaheks «killuks», mis kujutavad enesest Mendelejevi tabeli keskosas paiknevate elementide aatomituumasid. Ühtlasi paiskub välja terve hulk osakesi: elektrone, footoneid, gammakvante ja kaks-kolm kiiret neutronit. Laialilendavate kildude ja teiste osakeste summaarne kineetiline energia võrdub ligikaudu 200 megaelektronvoldiga. Vabanevad neutronid võivad teatavates tingimustes omakorda põhjustada uute uraani- või plutooniumituumade jagunemist ja uraani- või plutooniumitükis võib alata isearenev jagunemishelreaktsioon.

Raskete elementide aatomituumade jagunemist võivad peale neutronite põhjustada ka teised väga suure energiaga osakesed: prootonid, deutronid, alfaosakesed, gammakvandid jt. Laialdast tööstuslikku rakendamist aga on leidnud ainult jagunevate ainete kiiritamine neutronite vooga spetsiaalsetes seadmetes — *tuuma-reaktorites*.

On olemas veel üks jagunemise liik — uraanituumade nõnda-nimetatud spontaanne (iseeneslik) jagunemine, mille juba 1940. aastal avastasid nõukogude füüsikud K. Petržak ja G. Fljorov ning mis seisab selles, et mõned uraani aatomituumad jagunevad iseenesest, ilma igasuguse märgatava välise mõjustuseta kaheks osaks. Seda juhtub väga harva, kuid teatavates soodsates, hari-likult tuumareaktorites loodavates tingimustes piisab sellest täie-likult tuuma-ahelreaktsiooni esilekutsumiseks ilma igasuguse välise (initsieeriva) neutronite allikata.

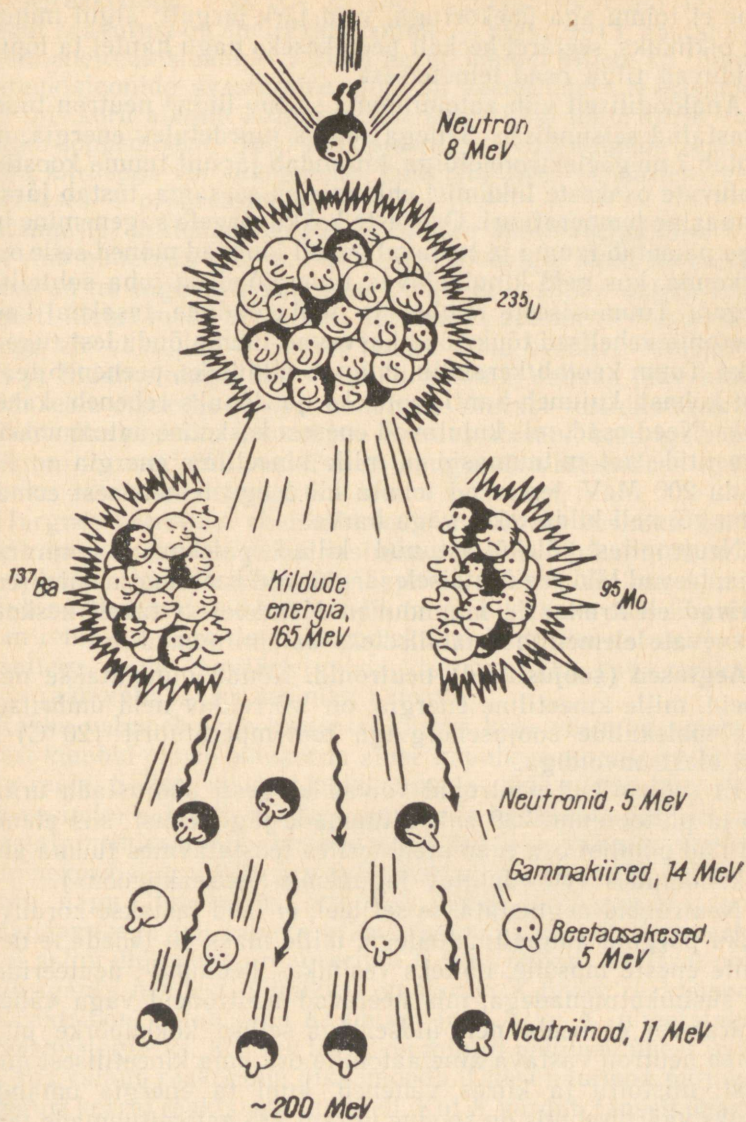
Et luua veidigi piltlikku kujutlust raske elemendi, näiteks uraani aatomituumade jagunemisest, mida põhjustab neelduv neut-ron, esitasid nõukogude füüsik J. Frenkel ja ameerika füüsik J. A. Wheeler juba kolmekümnendatel aastatel aatomituumade «tilkmudeli», s. t. mudeli, mis omaduste poolest meenutab posi-tiivselt laetud vedelikutilka. Nukleonid (prootonid ja neutronid), millest koosneb aatomituum, paiknevad selles mudelis sama-moodi ja alluvad peaaegu samasugustele seadustele kui moleku- lid kerakujulises vedelikutilgas. Ühemärgilisi elektrilaenguid kandvad vedeliku molekulid tõukavad üksteist võrdlemisi tuge-vasti eemale, nende omavaheline seos on seetõttu nõrk ja nad on väga liikuvad, tilgal kui tervikul aga on kaldumus laguneda. Umbes samuti tõukavad üksteist eemale ja püüavad laiali len- nata ka kerakujulise aatomituumade koostisse kuuluvad positiiv- selt laetud prootonid.

Vedelikutilgas mõjub aga ka teistsugune jõud. See on tilga välise molekulikihi pindpinevus, mis surub vedeliku molekulide kokku ja sunnib vedelikutilka omandama väga liikuvate ja üks- teisega nõrgalt seotud osakeste jaoks ainuvõimaliku kerakuju.

Kuid pindpinevusjõul on väga piiratud mõjusfäär, mis ole- neb vedeliku omadustest — tihedusest, viskoossusest jne. See- pärast ei saa ka tilga mõõtmed ületada teatavat piiri.

Siin esineb väga suur analoogia *tuumajõududega*, mis hoia- vad tuumaosakesi, peamiselt prootoneid tuuma väikeses ruum- alas ega võimalda neil hirmsa hooga laiali lennata. Ka nendel jõududel on teravalt piiritletud mõjusfäär, mille raadius võrdub ligikaudu aatomituumade kahekordse läbimõõduga ja millest väl- jaspool isegi nendest erakordselt tugevatest jõududest ei piisa tohutute elektrostaatiliste tõukejõudude ületamiseks.

Kui vedelikutilk muutub nii suureks, et antud vedeliku pind- pinevusjõud ei suuda teda enam koos hoida, siis jaguneb ta molekulaarsete elektriliste tõukejõudude toimel osadeks. Jagune-



mine ei toimu aga ühekorraga, vaid järk-järgult: algul muutub tilk piklikuks, seejärel keskelt peenikeseks nagu hantel ja lõpuks eralduvad tilga osad teineteisest.

Analoogiliselt viib aatomituumaa sattuv liigne neutron tuuma ergastatud seisundisse. Sellega seoses juurdetulev energia, mis võrdub 7 megaelektronvoldiga, kiirendab järsult tuuma koostisse kuuluvate osakeste liikumist ehk, mis on seesama, tõstab järsult tuumaaaine temperatuuri. Osakeste kokkupõrgete sagenemine just nagu paisutab tuuma ja teataval hetkel jõuavad mõned selle osad piirkonda, kus neid kinnihoidvad tuumajõud on juba suhteliselt nõrgad. Tuumasisesete tõmbe- ja tõukejõudude tasakaal kaob: prootonitevahelised tõukejõud kasvavad tuumajõududest tugevaks. Tuum kaotab kerakuju, muutub piklikuks, peeneneb teatavast kohast, kujuneb hantlitaoliseks ja lõpuks rebeneb kaheks osaks. Need osad, mis kujutavad enesest keskmise aatommassiga elementide aatomituumasid ja mille kineetiline energia on ligikaudu 200 MeV, lendavad tohutu kiirusega teineteisest eemale. Kolm või neli kildu tekib väga harva.

Neutronitest üleküllastunud killud paiskavad neutroneid välja, teevad läbi rea üksteisele järgnevaid beetalagunemisi (emiteerivad elektrone) ja muunduvad Mendelejevi tabeli keskosas paiknevate elementide stabiilseteks aatomituumadeks.

Aeglased (soojuslikud) neutronid. Nõnda nimetatakse neutroneid, mille kineetiline energia on võrreldav neid ümbritseva aine molekulide soojusenergiaga toatemperatuuril (20 °C) — 0,03 elektronvoldiga.

Et soojuslikud neutronid võivad kergesti põhjustada uraani 235 ja plutooniumi 239 aatomituumade jagunemist, siis etendavad nad põhilist osa tuumareaktorites teostatavates tuuma-ahelreaktsioonides (vt. «Juhitav jagunemis-ahelreaktsioon»).

Neutroneid aeglustatakse sel teel, et neid lastakse korduvalt kokku põrgata aatomituumadega, mille mass on lähedane neutronite eneste massile, näiteks vesiniku-, heeliumi-, deuteeriumi- või süsinikutuumadega, mis neelavad neutroneid väga vähesel määral või ei neela neid üldse. Iga sellise kokkupõrke puhul annab neutron vastava aine aatomile osa oma kineetilisest energiast, mistõttu ta kiirus väheneb, kuni ta energia omandab lõpuks väärtuse, mis on soodne uraani 235 aatomituumade jagunemiseks.

Ahelreaktsioon. Üks XX sajandi silmapaistvamaid teadus-alaseid saavutusi on ahelreaktsioonide — algul, 1913. aastal keemiliste ahelreaktsioonide ja kolm aastakümnet hiljem ka tuuma-ahelreaktsioonide avastamine. Jutt on keemilistest reaktsioonidest, mis kord alanult kulgevad iseenesest kuni lähteainete varu täieliku lõppemiseni. Need reaktsioonid võivad kulgeda teatava kindla kiirusega või «hargneda» mingisuguses — näiteks geomeetrilises — progressioonis.

Esimeste, mittehargnevate keemiliste ahelreaktsioonide näitena võib nimetada vesiniku ühinemist klooriga. Need elemendid tõmbuvad nii tugevasti teineteise poole, et vesiniku aatom rebib kergesti kloori molekulist lahti ühe kloori aatomi ja liidab selle endaga või vastupidi — kloori aatom rebib vesiniku molekulist lahti ja liidab endaga ühe vesiniku aatomi. Vabaks jääv kloori aatom rebib otsekohe mõnest naabruses olevast vesiniku molekulist lahti ühe vesiniku aatomi jne. See kestab seni, kuni iga kloori aatom on liitunud ühe vesiniku aatomiga või vastupidi — iga vesiniku aatom on liitunud ühe kloori aatomiga.

Hargnev keemiline ahelreaktsioon on näiteks vesiniku ühinemine hapnikuga, mille puhul vesiniku aatom rebib hapniku molekulist lahti ja liidab endaga ühe hapniku aatomi. Seejuures moodustub nõndanimetatud vaba radikaal OH. Vabaks jääv hapniku aatom rebib otsekohe vesiniku molekulist lahti ühe aatomi ja liitub sellega, mille tagajärjel moodustub veel üks vaba radikaal OH ja jääb vabaks üks vesiniku aatom.

Kokku vabaneb selle protsessi käigus kaks vesiniku aatomit, millest kumbki paneb omakorda aluse hapniku aatomitega ühinemiste reale. Sellest «teisest põlvkonnast» jääb järele juba neli vaba vesiniku aatomit, nendest omakorda kaheksa, edasi 16 jne. Uute paljunemisahelate alustamiseks võimeliste vabade aatomite arv kahekordistub niisiis iga «põlvkonnaga» ja kasvab pidurdamatult nagu lumelaviin. Protsess lõpeb lähtegaaside varu ammendamise või tugeva plahvatusena. Lühidalt: iga reaktsiooni astuv ühik paneb reageerima K teist ühikut. Seejärel põhjustab igaüks nendest K ühikust omakorda K ühiku reaktsiooni, s. t. reaktsiooni astub juba K^2 ühikut jne. Arvu K nimetatakse paljunemisteguriks. Kui see tegur on mingil põhjusel ühest väiksem, siis vaibub reaktsioon pikkamööda. Ühest suurema paljunemisteguri korral reaktsioon kiireneb. Kui K võrdub täpselt ühega, jääb reaktsiooni kiirus muutumatuks.

Aatomi energiatasemed. Planetaarne aatomimudel (vt. «Aatomi ja aatomi-tuuma mudelid») annab aatomi tuuma ja selle ümber tiirlevate elektronide vastastikusest asendist ainult väga ligikaudse pildi. Elektronide käitumist, elektronide ja tuuma vastastikust mõju ning aatomi kui tervikut on tunduvalt kergem kirjeldada siis, kui elektronkihtide, elektronide orbiitide, trajektoore, kiiruste jms. piltlikelt mõistetelt üle minna energiatasemetete mõistele.

Igale ruumpunktile, milles viibib oma telje ümber pöörlev ja teatavas kauguses ümber tuuma tiirlev elektron, vastab rangelt kindel energiatase. Seejuures võib elektron antud tasemel viibida ainult siis, kui energiahulk, mis lahutab teda teise elektroni energiatasemest (ja järelikult ka tuumast), on täpselt võrdne kiirguskvandiga või täisarvu kvantidega, mitte mingil juhul aga poolega, veerandiga või mingi teise murdosaga kvandist. Elektronkihtide asetust ja kaugust aatomi tuumast ei määra mingisugune range geomeetiline struktuur nagu näiteks kristallides, vaid nendes kihtides paiknevate elektronide energiatasemed. Antud aatomis ei saa ühel ja samal energiatasemel korraga viibida rohkem kui kaks elektroni.

Iga keemilise elemendi aatomil on rida püsivaid (stационаarseid) seisundeid, milles elektronkihtidel on täiesti kindel energiavaru (energiatase). Kui aatom viibib sellises seisundis, siis ei kiirga ta mingisugust energiat. Energia kiirgamine on võimalik ainult tervete kvantide kaupa ja ainult juhul, kui elektron pöörduv mingilt aatomi ebapüsivale (ergastatud) seisundile vastavalt orbiidilt tagasi orbiidile, mis vastab aatomi normaalsele, stationaarsele seisundile. Kiirguvate kvantide energia võrdub seejuures täpselt alg- ja lõpp-energiatasemetete vahega.

Aatomikaitse — inimeste, loomade ja materiaalsete väärtuste kaitsmine vaenlase aatomirünnaku eest, kannatanutele meditsiinilise abi andmine, maastiku ja ehitiste *desaktiveerimine* ning tekitatud kahjustuste likvideerimine, samuti varjendite võrgu rajamine, elanikkonna ettevalmistamine, õhu- ja aatomikaitseüksuste formeerimine ning tuletõrjeliste ja muude ettevaatusabinõude rakendamine.

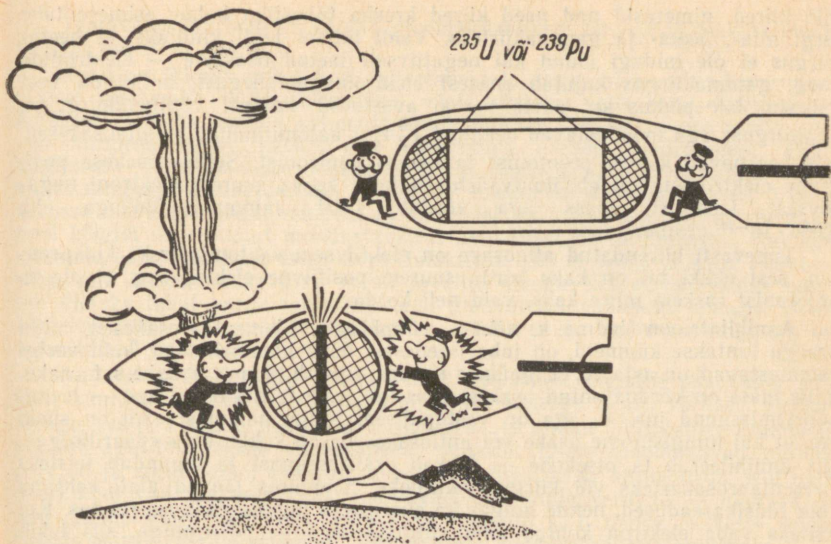
Aatomipomm — tohutu purustusjõuga lõhkekeha, mille plahvatuse põhjustab uraani 235 või plutooniumi 239 aatomi tuumade isearenev jagunemishelreaktsioon.

Pommi põhiosadeks on tuumkütuse laeng, sütik ja kest. Jaguneva aine laeng, mille kogumass on kriitilisest suurem (vt. «Kriitiline mass»), on enne plahvatust jagatud kaheks või rohkemaks osaks, nii et iga osa mass on kriitilisest väiksem. Sütik on konstrueeritud selliselt, et ta võimalikult kiiresti ühendaks laengu eri osad, näiteks «tulistaks» need üksteise vastu. Uhinemise hetkel muutub jaguneva aine kogumass kriitilisest suuremaks ja algab hargnev jagunemishelreaktsioon, mis mõne miljondiku sekundi pärast lõpeb plahvatusega.

Aatomipommi plahvatusega kaasneb tugev lööklaine, valguskiirgus ja läbiv kiirgus ning maastiku, õhu ja vee radioaktiivne saastumine.

Aatomipommide võimsuse iseloomustamiseks kasutatakse tavaliselt trootüüliequivivalenti, s. t. tavalise lõhkeaine (trootüüli) hulka, mis tuleks plahvatama panna, et plahvatuse energia oleks võrdne antud aatomipommi plahvatuse energiaga (1 g trootüüli on energeetiliselt ekvivalentne 1 kilokaloriga).

Aatomi tuuma energiatasemed. Analoogiliselt aatomi energiatasemetega, mille puhul peamisteks energiakandjateks on elektronid, nimetatakse aatomi tuuma energiatasemeteks tuuma suhteliselt püsivaid seisundeid, millele vastab täiesti kindel energiavaru. Sellisest püsivast seisundist väljumiseks peab



tuum väljastpoolt teatava hulga energiat juurde saama. See võib toimuda tema kokkupõrkamisel mõne kiire osakesega või gammakvandiga, samuti neutroni neelamisel.

Kui näiteks kiire neutron, mille energia on väiksem kui 2,3 MeV, põrkab kokku boori 11 aatomituumaga, siis on põrge elastne ja osakesed eemalduvad uuesti teineteisest, kusjuures neutron kaotab osa oma kineetilise energiast ja aeglustub. Kui aga neutroni energia ületab 2,3 MeV, neelab boorituum neutroni, satub ergastatud seisundisse ning väljastab saadud energialia mõne aja pärast gammakvandi näol.

Aatommass (varasem nimetus — aatomkaal). Aatomite massid on nii väikesed, et näiteks grammides oleks neid äärmiselt ebamugav väljendada: saaksime kümneid nulle sisaldavad arvud. Seepärast ei väljendata aatomite masse tavaliselt grammides, vaid suhtelistes ühikutes, milles hapniku aatomi mass on 16. Antud keemilise elemendi aatomi massi suhet $1/16$ hapniku aatomi massisse nimetatakse selle elemendi aatommassiks. Kergeima elemendi — vesiniku — aatommass peaks sellisel juhul võrduma täpselt ühega. Et aga hapnikul esineb mitu isotoopi, siis ei ole suhe täisarvuline ja vesiniku tegelik aatommass on 1,008.

$1/16$ hapniku aatomi mass on $1,674 \cdot 10^{-24}$ g. See ongi aatommassi ühik. Hiljuti leppisid teadlased kokku kasutada edaspidi aatommassi ühikuna $1/12$ süsiniku põhilise isotoobi ^{12}C aatomi massist.

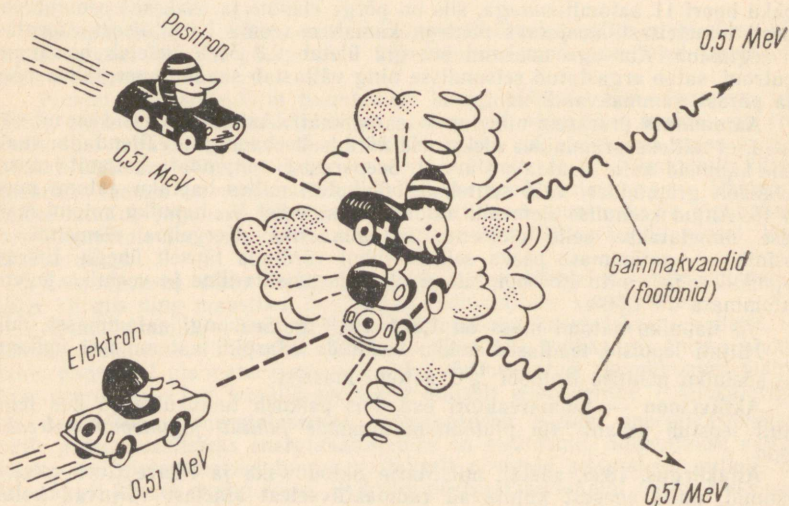
Aktiivtuoon — tuumareaktori osa, kus paikneb tuumkütus ja kus tegelikult teostub uraani- või plutooniumituumade juhitud jagunemis-ahelreaktsioon.

Alfakiirgus. 1896. aastal, mil Marie Skłodowska ja Pierre Curie veel ei teadnud, mida enesest kujutavad radioaktiivsetest ainetest väljuvad kolme

liiki kiired, nimetasid nad need kiired kreeka tähestiku kolme esimese tähe järgi alfa-, beeta- ja gammakiirteks. Veidi hiljem tehti kindlaks, et beeta-kiirgus ei ole midagi muud kui negatiivselt laetud osakeste — elektronide voog, gammakiirgus kujutab enesest elektromagnetkiirgust, millel on veel väiksem lainepikkus kui aasta varem avastatud kuulsal röntgenikiirgusel, alfakiirguse aga moodustavad heeliumi (${}^4_2\text{He}$) aatomituumad — alfaosakesed, mis koosnevad kahest prootonist ja kahest neutronist. Sellise osakese positiivne elektrilaeng on absoluutväärtuselt kaks korda suurem elektroni negatiivsest laengust, mass aga võrdub 4,004 aatommassiühikuga ehk $6,664 \cdot 10^{-24}$ grammiga.

Tugevasti kiirendatud alfaosake on efektiivsem «aatomimürsk» kui prooton, sest ehkki tal on kaks korda suurem positiivne elektrilaeng, ei ole ta prootonist raskem mitte kaks, vaid neli korda.

Annihilatsioon (ladina k. *nihil* — ei midagi). Elementaarosakesed, mida praegu tuntakse kümneid, on juba iseenesest üsna hämmastavad, kuid veelgi hämmastavam on asjaolu, et igäühele nendest vastab oma *antiosake*, s. t. osake, mille mass on võrdne antud osakese massiga, kõik teised omadused — laeng, pöörlemissuund jne. — aga on vastupidised. Kõige hämmastavam on siiski see, et kui mingisugune osake või antiosake põrkab kokku oma «paarilisega», siis annihileerub ta otsekohe — lakkab eksisteerimast ja muundub teisteks elementaarosakesteks või kiirguskvantideks. Seejuures jäävad alati kehtima kõik füüsikaseadused, nende hulgas ka energia ja impulsi jäävuse seadus. Kui näiteks vaba elektron kohtub oma antiosakesega — positroniga, siis tekib nendest annihilatsiooni tagajärjel tavaliselt kaks footonit (gammakvanti), mille koguenergia ja -impulss võrduvad kokkupõrganud paari energia ja impulsiaga.



Teatavates tingimustes võivad gammakvantidest omakorda tekkida elektroni ja positroni paarid.

Antiaine. Pärast antiosakeste avastamist ja nende olemasolu eksperimentaalset tõestamist tekkis loomulikult viisil küsimus, kas meid ümbritsevas looduses ei võiks leiduda aatomeid, mille tuumad koosnevad prootonite asemel antiprootonitest, katted aga elektronide asemel positronidest. Põhimõtteliselt ei muudaks see midagi. Selliseid «ümberpööratud» aatomeid tuleks ainult nimetada antiaatomiteks ja nendest koosnevat ainet antiaineks. Võttes arvesse looduses kõikjal esinevat sümmeetriat, võiksime eeldada, et vähemalt pool kõigist universumit moodustavatest aatomitest on antiaatomid. Kui aga antiainet oleks Maal või isegi meie Galaktikas, siis ei saaks ta kaua eksisteerida, vaid annihileeruks üsna varsti tavalise ainega, kusjuures eralduv energia ületaks tuhat korda vesinikupommi plahvatusel vabaneva energia. Antiaine leidumise kohta universumi teistes osades ei ole andmeid, kuigi see on teoreetiliselt võimalik.

Antiosakesed. Enamik tuntud elementaarosakesi jaguneb paarideks, millesse kuuluvad osakesed on massi poolest teineteisega täiesti võrdsed, elektrilaengu (välja arvatud neutraalsed osakesed) ja muude füüsikaliste omaduste poolest aga teineteisele vastupidised. Selliseid paare moodustavad näiteks prooton ja antiprooton, elektron ja positron, neutron ja antineutron. Kui ühte paari kuuluvad osakesed kokku põrkavad, siis annihileeruvad — hävivad — nad silmapilkselt. Seejuures tekib kaks footonit, s. t. nende osakeste seisumassis peituv energia muundub seisumassita kiirguseosakeste energiaks.

Antiosakesi ei ole ainult footonil ja neutraalsel müümesonil (μ -mesonil), mis loetakse oma antiosakestega identseteks.

Esimese antiosakesena sai tuntuks *positron*, mis avastati 1933. aastal, kuigi ta olemasolu ennustati juba tunduvalt varem. Positronil ehk positiivsel elektroniil on elektroni massiga võrdne mass, kuid vastandmargiline elektrilaeng. Kokku põrgates annihileeruvad positron ja elektron otsekohe. Kummagi tekkiva footoni energia on seejuures 0,51 miljonit elektronvolti (MeV), nii et koguenergia võrdub energiaga, mis on ekvivalentne elektroni kahekordse seisumassiga. Positron tekib protsessis, mida nimetatakse paaride tekkeks. Nimetatud protsess seisab selles, et mingi raske elemendi, näiteks plii aatomi-tuumaga kokkupõrkav suure energiaga foton lööb sellest välja vastasmargiliselt laetud osakeste paari — elektroni ja positroni. Footoni minimaalne energia, mis on vajalik sellise paari tekitamiseks, on 1,02 MeV, seega 0,51 MeV kummagi osakese kohta. See on üks arvukaid näiteid energia vahetust muundumisest seisumassiks. Elektron ja positron võivad tekkida ka *beetalagunemisel*. Sel juhul tekib positroni kõrval alati veel neutriino.

Prootonile vastandmargilist osakest, mis avastati 1955. aastal, nimetatakse antiprootoniks ehk negatiivseks prootoniks. Antiprootoneid saab tekitada, kui pommitada ainet footonitega, mille kineetiline energia on vähemalt 6 miljardit elektronvolti (GeV). Antud juhul muundub see energia vahetult prootonist ja antiprootonist koosneva paari seisumassiks ja kineetiliseks energiaks.

Aasta hiljem, 1956. aastal, avastati antineutron. Et neutron on laenguta osake, siis peab ka antineutron neutraalne olema. Ta annihileerub kohtumisel nii neutroni kui ka prootoniga.

Nukleonide, s. t. prootoni ja antiprootoni, neutroni ja antineutroni annihileerumisel tekivad tavaliselt piimesonid.

B

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Beetalagunemine

Beetalagunemine. Kui vaadelda ühtede radioaktiivsete elementide aatomituumade muundumist teisteks (vt. «Radioaktiivsus» ja «Radioaktiivsete elementide perekonnad»), siis ilmneb, et enamikul juhtudel kaasneb sellega elektronide (beetaosakeste) või alfaosakeste emiteerumine. Alfaosakeste eraldumine on enam-vähem arusaadav. Need on killud, mis lagunevast aatomituumast «lahti rebenevad». Aga kust tulevad elektronid? Aatomituum koosneb ju ainult prootonitest ja neutronitest.

Ainus, mida võib arvata, on see, et elektronid tekivad mingisuguste tuumasiseste muundumiste tagajärjel. Seda võimaldaski tõestada ühest prootonist ja kahest neutronist koosneva triitiumituumaga lagunemine (tritium — üliraske vesinik). Sellest tuumast tekib heeliumi 3 tuum, mis koosneb kahest prootonist ja ühest neutronist. Üks neutron kaob kuhugi, selle asemele aga ilmuvad prooton ja elektron. Tuleb välja, et elektroni tekkimise ja emiteerumise eelduseks on ühe neutroni prootoniks muundumine.

Tuntud on ka tuumareaktsioonid, mille käigus aatomituumast väljub elektroni asemel positron — osake, mis on täpselt samasugune kui elektron, kuid kannab negatiivse laengu asemel positiivset. Nii näiteks radioaktiivse lämmastiku 13 aatomituum, mis koosneb seitsmest prootonist ja kuuest neutronist, muundub lagunemisel süsiniku 13 aatomituumaks, milles on kuus prootonit ja seitse neutronit, ning emiteerib seejuures ühe positroni.

Loomulikud küsimused, mis teadlastel siinjuures tekkisid, said vastuse, kui õnnestus kindlaks teha, et ergastatud aatomituumade radioaktiivse lagunemise käigus võivad prooton ja neutron vastastikku teineteiseks muunduda, kusjuures liigse positiivse või negatiivse laengu viib ära positron või elektron. Elektronilise radioaktiivsuse korral, mil neutron muundub prootoniks ja negatiivse laengu kannab ära elektron, suureneb aatomituumaga positiivne laeng ühe ühiku võrra. Seejuures aga tekib juba uue, raskema elemendi isotoobi aatomituum. Näitena võib nimetada eespool mainitud heeliumi 3 tuuma tekkimist triitiumi 3 tuumast. Positronilise radioaktiivsuse puhul, kui prooton muundub neutroniks ja positiivse laengu kannab ära positron, väheneb aatomituumaga positiivne laeng ühe ühiku võrra, mille tagajärjel tekib

uue, kergema elemendi isotoobi aatomituum, näiteks süsiniku 13 tuum lämmastiku 13 tuumast.

Kui selles suhtes oli selgus käes, tekkis uus mõistatus. Energiabilanss ei klappinud. Eralduva elektroni või positroni energia osutus väiksemaks energiast, mille aatomituum muundumisel kaotas. Osa energiat näis niisiis kuhugi kaduvat. Mõned idealistlikel positsioonidel seisvad kodanlikud teadlased ruttasid rõõmuga energia jäävuse seadust kehtivusetuks kuulutama.

Nende rõõm oli siiski üürrike. Varsti tõestati, et üheaegselt elektroni või positroniga emiteerib aatomituum veel ühe osakese, millel puudub igasugune elektrilaeng ning mille mass on kaduvväike ja kiirus võrdub valguse kiirusega. Uus osake nimetati *neutriinoks* — väikeseks neutroniks. Neutriino viibki endaga kaasa selle osa energiast, mis energiabilansi «klappima paneb».

Neutroni tuumasisesega muundumisega prootoniks kaasneb niisiis elektroni ja neutriino eraldumine, protoni muundumisega neutroniks aga positroni ja neutriino eraldumine.

Beetakiirgus. Üks radioaktiivsete ainete aatomituumade jagunemisel tekivatest kiirgustest. Kujutab enesest tavaliste elektronide voogu (vt. «Elektron — elektriaatom»).

Beetatron — tsükliline elektronide *kiirendi*. Beetatron koosneb muutuvat magnetvälja tekitavast elektromagnetist ja selle pooluste vahel asetsevast rõngakujulisest vaakuumkambrist. Kambris paikneb elektronide allikas (vt. «Elektronkahur»).

Elektronid liiguvad beetatronis ringorbiidil. Kambrit läbiva magnetvoo muutumisel tekib pööriselektriväli, mis tõmbab elektrone endaga kaasa. Ühtlasi tekitab magnetväli jõu, mille suund on risti elektronide liikumissuunaga. See ringi keskpunkti suunatud jõud hoiabki elektrone ringorbiidil. Beetatronid võimaldavad elektrone kiirendada energiateni 100—200 MeV.

Väikesi beetatrone, mis kiirendavad elektrone mõne miljoni elektronvolti, kasutatakse laialdaselt tehnikas ja meditsiinis.

Bioloogiline kaitse — kaitsekraanide süsteem, mis nõrgendab radioaktiivset kiirgust inimorganismile kahjutu tasemeni. Selliste ekraanide abil eraldatakse kiirgusallikas piirkonnast, kus võivad viibida inimesed.

Ekraani materjal valitakse vastavalt kiirguse liigile, intensiivsusele ja läbimisvõimele, samuti seadme konstruktsioonile ja hinnale. Ekraanid võivad olla ühe- või mitmekihilised. Oluline on seejuures kihtide järjestus. Kaitseks gammakiirguse vastu on vajalikud suure massiarvuga elementidest koosnevad materjalid. Ekraaniks on sellisel juhul tavaliselt mitme meetri paksune betoonikiht. Kaitseks alfa- ja beetaosakeste vastu kasutatakse õhukesi ühekihilisi ekraane, mis on valmistatud kergetest metallidest või plastmassidest.

Kõige keerukam on kaitse neutronite vastu. Neutroneid neelates ergastuvad enamiku ainete aatomid ja lagunevad, kusjuures tekivad teised osakesed ja suure läbimisvõimega gammakvandid. Kaitseks neutronite vastu tuleb seepärast kasutada kombineeritud ekraane, mille esimene kiht koosneb hästi neutroneid aeglustavatest kergetest elementidest (vesi, grafiit jms.), teine kiht

aga rasketest elementidest, mis nõrgendavad esimeses kihis neutronite toimel tekkivat sekundaarset gammakiirgust (raud, plii ja eriti betoon). Suurt osa etendavad seejuures tehnilised ja majanduslikud kaalutlused. Statsionaarseid (liikumatud) reaktoreid, mille puhul kaitsekraani mass ja maht ei ole järsult piiratud, võib ekraneerida kõige odavamate materjalidega — hariliku veega, betooniga jne. Transportivahenditel, näiteks merelaevadel, kus bioloogilise kaitse massi ja mahu vähendamine on olulise tähtsusega, tuleb energeetiliste reaktorite ekraneerimiseks kasutada efektiivsemaid ja kallimaid materjale: pliid, boorkarbiidi, boraali, mõnede metallide hüdriide ja eriteraseid.

Lisaks reaktorile enesele ümbritsetakse kaitsekraanidega reaktorist soojuse väljajuhtimise süsteem (kaasa arvatud torustik, pumbad ja soojusvahetid), samuti kõik seadised ja ruumid töötanud varraste automaatseks reaktorist kõrvaldamiseks, transportimiseks, säilitamiseks jne.

Kaitstakse ka kanaleid, mida mööda reaktorisse suunatakse kiiritavaid aineid, kanaleid erineva energiaga neutronite väljajuhtimiseks aktiivtsoonist ja teisi seadiseid.

Juhtudel, kus soojuskandja käitab ühtlasi auruturbiini, tuleb bioloogilise kaitsega ümbritseda veel turbiin ja kogu torustik, milles tsirkuleerib ülekuumendatud ja töötanud aur (kaasa arvatud jahutid).

D

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Deuteerium

Deuteerium — vesiniku püsiv looduslik isotoop, mille aatommass on 2,0147. Deuteeriumi aatomituum koosneb ühest prootonist ja ühest neutronist, s. t. on tavalise vesiniku (prootiumi) aatomituumast kaks korda raskem.

Looduses on deuteerium laialdaselt levinud. Iga 6000 tavalise vesiniku aatomi kohta tuleb üks deuteeriumi aatom. Ühe kuuetuhandiku maailmamere tohutust veemassist moodustab *raske vesi*, mille molekul koosneb kahest deuteeriumi aatomist ja ühest hapniku aatomist.

Deuteeriumi kasutatakse tuumatehnikas, eriti neutronite aeglustina tuumareaktorites. Deuteeriumituumadega kokku põrgates aeglustuvad neutronid kiiresti soojuslike energiateni (kiirusteni), sest nende mass on lähedane deuteeriumituumade massile. Ioniseeritud (elektronidest vabastatud) deuteeriumituumasid kasutatakse kiirendites raskete pommitavate osakestena. Deuteeriumi ühendeid, näiteks ühendit liitiumiga, on võimalik kasutada tuumalõhkeainena vesinikupommis (termotuumapommis).

Desaktiveerimine — rõivaste, töövahendite, ehitiste, maastiku ja lahinguväe varustuse vabastamine radioaktiivsetest ainetest, mis on nendele sattunud

looduslike ja tehnilike radioaktiivsete ainete tootmise ja kasutamise, hoole- tuse, avarii või aatomirelva rakendamise tagajärjel.

Deutron — deuteeriumi (raske vesiniku) aatomituum. Koosneb ainult kahest osakesest — ühest prootonist ja ühest neutronist, mida teineteisega seovad tuumajõud. Prootoni ja neutroni seoseenergia on deutronis 1,1 MeV.

Dissotsiatsioon — molekulide lagunemine neid moodustavateks aatomiteks või aatomirühmadeks. Dissotsiatsiooni põhjustab näiteks kõrge temperatuur. Vastassuunalist protsessi — aatomite ühinemist molekulideks — nimetatakse rekombinatsiooniks.

Doos — ioniseeriva kiirguse energia, mis neeldub kiiritatavas objektis või mingis selle osas. See on nii lai mõiste, et olenevalt keskkonnast ja kiirguse laadist eristatakse mitut liiki doose.

Füüsikaliseks doosiks nimetatakse röntgeni- või gammakiirguse energiat, mis neeldub ühes kuupsentimeetris õhus. Selle mõõtühikuks on röntgen (r). Teiste ioniseerivate kiirguste (näiteks laetud osakeste või neutronite voogude) doose mõõdetakse röntgeni füüsikalistes ekvivalentides (rfe). Röntgeni füüsi- kaline ekvivalent on kiirguse hulk, mis ioniseerimisvõime poolest on ekviva- lentne ühe röntgeni gamma- või röntgenikiirgusega.

Et alfa-, beeta- ja teiste osakeste toime elusrakkudesse ja -organismidesse on ühesuguse füüsikalise ionisatsiooniefekti korral erinev, siis rakendatakse veel röntgeni bioloogilise ekvivalendi (rbe) mõistet, s. t. eristatakse olenevalt ioniseeriva kiirguse liigist gammakiirguse doosi, röntgenikiirguse doosi, sega- kiirguse doosi, neutronite doosi jne.

Inimeste ja teiste elusorganismide radioaktiivse kiirituse puhul eristatakse ka pinna-, süva- ja koedoose. Peale selle jaotatakse doosid lokaalseteks doosi- deks, mida saab keha pinna mingi punkt või piiratud osa, ja ülddoosideks, mida saab kogu organism kui tervik.

Üldkiirguse maksimaalseks lubatavaks doosiks loetakse doosi, mis prae- gusaegsete teadmiste kohaselt ei tekita inimorganismile olulisi kahjustusi kogu tema eluaja jooksul.

Nõukogude Liidus on üldkiirguse (integraalse kiirguse) ühekordne mak- simaalne lubatav doos 5 rbe. Pärast sellise doosi saamist ei tohi inimene pike- mat aega kiirguse mõju alla sattuda. Inimeste jaoks, kel on igapäevases töös tegemist radioaktiivse kiirgusega, on maksimaalne lubatav päevane kiirgus- doos praegu 0,017 rbe; kord nädalas on lubatav doos 1 rbe.

Dosimeetriline kontroll, dosimeetriateenistus — abinõude süsteem ohutuse tagamiseks ettevõtetes ja asutustes, kus tegeldakse kiiritusseadmetega ning looduslike ja tehnilike radioaktiivsete ainete, samuti saadavate kiirgusdoo- side ning maastiku, vee, atmosfääri, toiduainete, töövahendite ja ehitiste radio- aktiivse saastatuse astme pidevaks kontrollimiseks ja arvestamiseks.

Dosimeetrilise kontrolli teostamiseks rakendatakse arvukaid aparate: dosimeetreid, mis näitavad doosi suurust, röntgenomeetreid, mis määravad teatavas ajavahemikus saadava doosi võimsuse, ja lõpuks radiomeetreid, mis mõõdavad maastiku ning ümbritsevate esemete radioaktiivset saastatust.

Spetsiaalseid kontrollaparate konstrueeritakse kõige mitmekesisemate ülesannete täitmiseks: välise kiirgusfooni mõõtmiseks, territooriumi, ruumide, töökohtade, masinate, rõivaste, käte, jalatsitaldade jms. radioaktiivse saas- tatuse astme määramiseks.

Aparaadid võivad olla nii statsionaarsed kui ka portatiivsed (kuni taskus kantavateni). Paljud neist on varustatud heli- või valgussignalisatsiooniga.

E

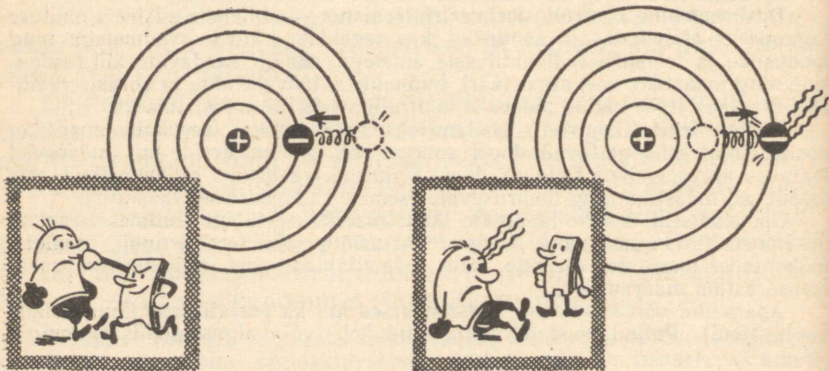
PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Elektromagnetkiirgus
Elektron — elektriaatom
Elektrostaatilised jõud
Elementaarlaeng
Elementaarosakesed

Elektromagnetkiirgus — keerukas füüsikaline protsess, mis seisab energia üleminekus atomaarsest süsteemist aatomit ümbritsevasse ruumi. Mistahes osakesega (elektroniga, prootoniga, mesoniga vms.) seotud elektrilaengu liikumis- või võnkumiskiiruse igasugusel muutumisel tekib laengu ümber muutuv magnetväli, see omakorda tekitab muutuva elektrivälja jne. Sel viisil kujunev elektromagnetiline häiritus, mis koosneb just nagu ühtsulavatest järjestikustest elektri- ja magnetväljadest, levib tekkimiskohast igas suunas valguse kiirusega (300 000 km/s) ja viib endaga kaasa teatava hulga energiat.

Sellist elektromagnetilist häiritust nimetatakse elektromagnetlaineiks. Mõisted, mida tehnikas kõige rohkem kasutatakse elektromagnetlainete iseloomustamiseks, on võnkesagedus (saadakse valguse kiiruse jagamisel lainepikkusega) ja lainepikkus (saadakse valguse kiiruse jagamisel võnkesagedusega).

Kõige tähtsam on see, et energiahulk, mida elektromagnet-



laine edasi kannab, ei ole alati ühesugune, vaid kasvab võnkesageduse suurenemisel. Selle energiahulga määrab valem $E=h\nu$, kus h on Plancki konstant ($6,62 \cdot 10^{-27}$ erg \cdot s *) ja ν võnkesagedus. Violetse valguse energia näiteks on kaks korda suurem punase valguse energiast.

Elektron — elektriaatom. Mida põhjalikumalt inimesed hakkasid ümbritsevate kehade omadusi tundma õppima, seda sagedamini pörkasid nad kokku elektrijõudude mitmesuguste avaldumisvormidega. Just elektrienergia on lõppkokkuvõttes andnud inimeste käsutusse parimad meetodid ja vahendid tänapäeva teaduse ja tehnika kõige mitmekesisemate probleemide lahendamiseks.

Me teame juba, et iga aatom kujutab enesest üksteist vastastikku mõjustavate, elektrilaengut kandvate osakeste — positiivselt laetud tuuma ja selle ümber tiirlevate negatiivselt laetud elektronide süsteemi. Kuna aga rõhuv enamik aatomi massist on koondunud just tuuma, siis tuleb välja, et ainete mass on peaaegu täielikult seotud positiivse elektriga, mis seetõttu oluliselt mõjustab meid ümbritseva looduse omadusi.

Ainete, näiteks hapniku ja raua keemiliste omaduste erinevus seletub ainuüksi sellega, et hapniku aatomituuma on koondunud 8 ja raua aatomituuma 26 positiivset laengut ning nende aatomi elektronkatted koosnevad vastavast arvust elektronidest. Enamikust looduslikest keemilistest reaktsioonidest võtavad osa ainult elektronkatete väliskihtide elektronid, mis tiirlevad aatomituumadest suhteliselt suurtes kaugustes.

Pikka aega peeti elektroni universumi lihtsaimaks ja väikseimaks osakeseks. Kõigis ainetes — ükskõik kas vees, puidus või rauas — on kõik elektronid täiesti ühesugused. Mitte mingisugustes tingimustes ei õnnestu tekitada ega täheldada negatiivseid või positiivseid elektrilaenguid, mis oleksid väiksemad ühe elektroni laengust.

Uurimiste käigus selgus, et aatomi koostisse kuuluvatele elektronidele ei ole rakendatavad suurte kehade liikumise seadused. Ruumpiirkondades, mis mõõtuvad sajamiljondike sentimeetritega, on liikumisseadused hoopis teistsugused.

Erinevalt Päikesesüsteemist või mõnest teisest suurest mehaanilisest süsteemist, milles keha võib olenevalt algkiiru-

* SI-süsteemi ühikutes $6,62 \cdot 10^{-34}$ J \cdot s. — Tõlkija.

sest liikuda mistahes orbiidil, on aatomis liikuvatele elektronele lubatud ainult orbiidid, mis vastavad nende energiatega ja magnetiliste momentide täiesti kindlatele väärtustele. Mitte mingisuguseid teisi energia väärtusi elektronil antud aatomis olla ei saa.

See, et elektron saab aatomis liikuda ainult teatavatel kindlatel orbiitidel ehk täpsemalt, et elektron võib aatomis viibida ainult teatavatel kindlatel energiatasemetel ja tal ei saa olla mingeid vahepealseid energia väärtusi, on üks põhilisi järeldusi, mis tuleneb kvantide teooriast. Elektroni üleminekuga ühelt orbiidilt teisele, s. t. ühest aatomisisest energaetilises seisundist teise, kaasneb selle teooria järgi rangelt kindla energiaga valguskvandi neeldumine või kiirgumine. Seejuures ei ole elektronil võimalik siirduda orbiidile, millel juba tiirleb üks elektron; aatomis ei saa olla kahte ühes ja samas energaetilises seisundis viibivat elektroni.

Kõigist võimalikest seisunditest, mis elektronil võib aatomis olla, on kõige tõenäolisem see, mille puhul elektroni energia on väiksem ja elektron tõmbub kõige tugevamini tuuma poole, s. t. tiirleb tuumale lähimal orbiidil.

Et aga igal orbiidil saab olla ainult üks elektron, siis peab iga järgmine elektron tiirlema orbiidil, millele vastab eelmisest kõrgem energiatase. Selle reegli järgi jaotuvadki elektronid keemiliste elementide aatomites vastavalt oma energiatega ehk nõndanimetatud kvantolekutele.

Aatomi keemilised omadused olenevad elektronide hulgast ja jaotusest elektronkattes. Mendelejevi tabeli igas perioodis on elementide järjestuse põhimõte ühesugune. Sellepärast on näiteks teise perioodi elementide keemilised omadused lähedased esimese perioodi elementide omadustele. Elektronide jaotus liitiumi aatomis kordub naatriumi aatomis, kuid energaetilise tasemeid on viimases juba rohkem. Järgmistes perioodides on elektronide seisundid analoogilised kaaliumi, rubiidiumi ja tseesiumi aatomites. Kõik need elemendid kuuluvad Mendelejevi tabeli esimesse veergu — leelismetallide rühma.

Et näiteks liitiumi aatomi välimist elektroni aatomist lahti rebida, on tarvis kulutada 5,39 eV energiat. Selle aatomi kaks ülejäänud elektroni, mis paiknevad tuumale lähemal, on tuumaga tugevamas seoses. Nende *seoseenergia* on vastavalt 75,6 ja 122,4 eV.

Vabade, s. t. aatomitest lahtirebitud elektronide suunatud

liikumine elektrijuhtides või pooljuhtides on kõigile hästi tuntud elektrivool.

Kui aatom neelab väljastpoolt tulevat energiat (energia neeldub temas ainult täiesti kindlate portsjonitena — *kvantidena*), siis lähevad elektronid tuumast kaugemal olevatele orbiitidele ehk kõrgematele energiatasemetele. Mida suurem on neelatavate kvantide energia, seda kaugemale tuumast siirduvad elektronid.

Sellises ergastatud seisundis ei saa vaba aatom kaua viibida, vaid on sunnitud oma tavalisse seisundisse tagasi pöörduma. Seejuures läheb elektron kaugemalt orbiidilt uuesti üle oma esialgsesse asukohta, liigne energia aga eraldub elektromagnetkiirguse kvandina. Kui selline üleminek toimub välimistel orbiitidel (kus elektronid on tuumaga kõige nõrgemas seoses), siis eralduvad infrapunase kiirguse, nähtava valguse või ultraviolettkiirguse kvandid. Elektronide üleminekul tuumalähedastele orbiitidele (näiteks korraga üle ühe või mitme orbiidi) tekib lühemalaineline elektromagnetkiirgus — *röntgenikiirgus*, mille energia on palju kordi suurem infrapunase kiirguse, nähtava valguse ja ultraviolettkiirguse energiast.

Elektrostaatilised jõud — tõmbe- või tõukejõud liikumatute või ühtlaselt liikuvate elektrilaengute vahel. Igapäevases elus on need jõud suhteliselt nõrgad, kuid mikromaailmas, kus laenguid kandvad osakesed on väga väikesed ning nendevahelised kaugused mõõtvavad sajamiljondike ja miljardike sentimeetritega, võivad elektrostaatilised jõud olla kolossaalsed.

Elementaarlaeg. Nõnda nimetatakse väikseimat looduses esinevat elektrilaengut. See on igasuguste laetud elementaarosakeste — elektronide, prootonite, positronide, mesonite jne. — olulisemaid tunnuseid sõltumatult sellest, kas need osakesed kannavad positiivset või negatiivset laengut. Elementaarlaeng võrdub $4,8029 \cdot 10^{-10}$ elektrostaatilise laenguühikuga.* Iga keha elektrilaeng saab olla ainult elementaarlaengu täisarv-kordne ning kujutab enesest seda keha moodustavate elementaarosakeste positiivsete ja negatiivsete elementaarlaengute summat.

Elementaarosakesed. Praegu pole enam tarvis tõestada, et kõik ained koosnevad molekulidest, molekulid aatomitest, aato-

* SI-süsteemi ühikutes $1,6021 \cdot 10^{-19}$ kuloniga. — *Tõlkija.*

mid tuumadest ja elektronidest, tuumad prootonitest ja neutronitest. Aga millest koosnevad prootonid, neutronid ja elektronid? Omal ajal nimetati neid osakesi elementaarseteks, s. t. jagamatuteks, sest arvati, et edasisel jagamisel võib nendest saada ükskõik mida, ainult mitte mingisuguseid teisi osakesi.

Kümmekond aastat tagasi aga asusid teadlased visale ja süstemaatilisele rünnakule, mille eesmärgiks oli elementaarosakeste, esmajoones nukleonide — prootonite ja neutronite struktuuri mõistatuse lahendamine.

Nagu tuumafüüsikas üldse, nii ka siin oli põhimõtteliselt võimalik minna kahte teed. Esimeseks võimaluseks oli katse purustada elementaarosakesi nende mingisugusteks koostisosadeks (kui selliseid koostisosi on üldse olemas). Ainus meetod selle saavutamiseks oli teiste samasuguste elementaarosakeste kiirendamine võimalikult valguse kiirusele lähedaste kiirusteni ning selliste «mürskude» kasutamine ainete aatomites sisalduvate elementaarosakeste pommitamiseks, näiteks kiirendatud prootonite kasutamine ioniseeritud vesiniku aatomituumade (samasuguste prootonite) pommitamiseks, alfaosakeste kasutamine alfaosakeste pommitamiseks jne. Selleks vajalikku (sadade miljonite ja miljardite elektronvoltideni ulatuvat) energiat võisid anda ainult võimsad laetud osakeste kiirendid. Algul loeti suureks saavutuseks kiirendeid, milles osakesed omandasid kümnete miljonite elektronvoltide suurusjärgus oleva energia. Hiljem kasvas osakeste energia sadade miljonite ja lõpuks kümnete miljardite elektronvoltideni.

Teine võimalus oli elementaarosakeste nii-öelda valgustamine. See põhineb juba optikast tuntud nähtusel, et mida väiksem on vaadeldav ese, seda väiksem peab olema ka eset valgustava elektromagnetkiirguse lainepikkus. Kui lainepikkus ületab eseme läbimõõdu, siis kiirgus lihtsalt möödub esemest ja me ei näe mitte midagi, kui aga lainepikkus on eseme läbimõõdust väiksem, siis kiirgus peegeldub ja me näeme valgustatud eset. Maksimaalset optilist suurendust on seetõttu võimalik saavutada uuritava objekti valgustamisel ultraviolettkiirgusega, mis on inimsilmale nähtamatu, kuid mida saab fikseerida fotoplaadi abil.

Pärast seda kui L. V. de Broglie avastas suure kiirusega liikuvate osakeste laineomadused, loodi elektronmikroskoop, mis energiateni 100 keV ja üle selle kiirendatud elektronide abil või-

maldab vaadelda kehi, mille läbimõõt on kõigest mõni ongström (üks ongström võrdub 10^{-8} sentimeetriga).

De Broglie' valemist järeldub, et mida raskem on osake ja mida kiiremini ta lendab, seda väiksem on talle vastav lainepikkus. Ilmneb, et kui elektronidele anda mõnesaja miljoni elektronvoltini ulatuv energia, siis muutub lainepikkus võrreldavaks tuumaosakeste läbimõõduga, mistõttu sellised elektronid võimaldavad aatomituuma «valgustada». Elektronilainete peegeldumise ja hajumise järgi määratakse tuuma koostisse kuuluvate nukleonide mõõtmed. Kui aga elektronid on kiirendatud energiani suurusjärgus üks-kaks miljardit elektronvolti, siis on nende lainepikkus nukleonide läbimõõdust palju kordi väiksem. Selliste elektronide abil on juba võimalik selgitada prootonite ja neutronite struktuuri.

Sellest ajast peale, mil teadlaste relvastus täienes võimsa «aatomisuurtükiväega», tehti üks avastus teise järel, eriti mis puutub uutesse osakestesse. Miljonite elektronvoltideni ulatuvad energiad olid piisavad positiivse elektroni — *positroni* — leidmiseks «mikrokatastroofide» tagajärjel tekkinud kildude hulgast. Kiirendid, mis andsid osakestele sadade miljoni elektronvoltideni küündiva energia, võimaldasid tehislikult saada *mesoneid*, mida enne seda oli täheldatud ainult kosmilises kiirguses. Pärast osakestele miljardeid elektronvolte energiat andvate kiirendite loomist avastati antiosakesed — anti-prooton, antineutron ja teised osakesed, mille füüsikalised omadused on tavaliste elementaarosakeste — prootoni, neutroni jt. omadustele vastupidised.

Praegu tuntakse juba 16 elementaarosakest ja umbes nii-sama palju antiosakesi. Kui aga kaasa arvata väga lühiealised osakesed, siis ulatub tuntud elementaarosakeste üldarv neljakümneni! *

Enamik neid osakesi on ebapüsivad. Nad lagunevad kaduvväikese ajavahemiku jooksul, emiteerides beetaosakesi ja muundudes rea vaheastmete kaudu mõningateks püsivateks, väiksema massiga osakesteks: elektronideks, prootoniteks, gamma-kvantideks ja neutriinodeks või vastavateks antiosakesteks, mis põhimõtteliselt on samuti püsivad (vt. «Beetalagunemine»).

Ühtegi püsivat osakest ei ole seni õnnestunud veel väikse-

* Käesoleva raamatu venekeelse väljaande ilmunisest möödunud aja jooksul on see arv tunduvalt suurenenud. — *Tõlkija*.

mateks osakesteks lagundada. Kõiki neid loetakse praegu struktuurita osakesteks.

Ebapüsivad osakesed jagunevad kaheks klassiks. Ühte klassi kuuluvad osakesed, mis on elektronist raskemad, kuid prootonist kergemad. Neid nimetatakse *mesoniteks*. Teise klassi moodustavad prootonist raskemad osakesed, mida nimetatakse *hüperonideks*. Hüperonide lagunemisel moodustuvad alati *nukleonid*. Mesonitest on tuntud müümesonid (μ -mesonid), piimesonid (π -mesonid) ja kaamesonid (K-mesonid). Müümesoni mass moodustab umbes $1/8$, piimesoni mass $1/7$ ja kaamesoni mass $1/2$ prootoni massist. Müümesonid saavad olla ainult negatiivsed või positiivsed. Neutraalset müümesonit ei ole olemas. Kui mass välja arvata, ei erine müümeson millegi poolest elektronist ja teda võib vaadelda kui rasket elektroni. Teisi raskeid elektrone looduses ei leidu.

Negatiivse müümesoni (μ^-) antiosakeseks on positiivne müümeson (μ^+). Universaalse vastastikuse mõju tõttu peab negatiivne müümeson lagunema elektroniks ja kaheks neutriinoks ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$); poolestusaeg on seejuures $2,2 \cdot 10^{-6}$ sekundit. Nimetatud vastastikuse mõju tõttu on neil kolmel osakesel palju ühist ja neid nimetatakse leptoniteks.

Piimesonid võivad olla nii negatiivsed ja positiivsed kui ka neutraalsed (π^-, π^+, π^0). Positiivse piimesoni antiosakeseks on negatiivne piimeson. Neutraalne piimeson nagu footongi on oma antiosakesega identne.

Piimeson, mille olemasolu 1935. aastal — 12 aastat enne selle osakese tegelikku avastamist — ennustas jaapani füüsik Yukawa, on aatomituumades mõjuvate *tuumajõudude* põhjustajaks. Nukleonid vahetavad üksteisega pidevalt piimesoneid, umbes samuti nagu elektrilaeng vahetpidamata kiirgab ja neelab elektromagnetkiirguse kvante ning põhjustab sellega elektrijõudude tekkimise. Piimesoneid on kerge saada, kui lasta kokku põrgata prootonitel, mille energia on mõnisada miljonit elektronvolti. Sel juhul toimub nukleonide kineetilise energia vahetu muundumine piimesoni seisumassiks.

Võimalikud on mitmesugused reaktsioonid:

a) prooton + prooton = prooton + neutron + positiivne piimeson;

b) prooton + neutron = prooton + prooton + negatiivne piimeson;

c) gammakvant + prooton = neutron + positiivne piimeson;

d) gammakvant + prooton = prooton + neutraalne piimeson;

e) gammakvant + neutron = prooton + negatiivne piimeson.

Võimsates kiirendites saadavad laetud piimesonid lagunevad vastavalt järgmistele skeemidele: positiivne piimeson \rightarrow positiivne müümeson + neutriino või positron + neutriino, negatiivne piimeson \rightarrow negatiivne müümeson + antineutriino või elektron + antineutriino; poolestusaeg on $1,56 \cdot 10^{-8}$ sekundit. Neutraalne piimeson laguneb tunduvalt kiiremini (poolestusaeg umbes 10^{-8} sekundit), kuid ainult kaheks footoniks.

Üks uusi, hiljuti avastatud osakesi on kaameson. Tuntud on positiivne ja neutraalne kaameson (K^+ ja K^0) ning vastavad antiosakesed: negatiivne kaameson (K^-) ja neutraalne kaameson. Suure massi tõttu on kaamesonil mitmesuguseid lagunemisevõimalusi. Laetud kaamesonite poolestusaeg on $0,85 \cdot 10^{-8}$ sekundit.

Hüperone — prootonitest raskemaid elementaarosakesi — on kolme liiki. Neid tähistatakse kreeka tähestiku suurtähtedega: λ (lambda), Σ (sigma) ja Ξ (ksii). Kõik hüperonid lagunevad nukleonideks. Igal hüperonil on vastandmärgiline antiosake.

Elementaarosakeste maailm on erakordselt mitmekesine niihästi osakeste eneste kui ka nende vastastike mõjude ja muundumiste poolest.

«Elektronkahur» — seadis elektronide suunatud voo tekitamiseks vaakuumis. Tavalistest hõõgniidiga või kuumkatoodiga ja kiirendava elektroodiga alaldus- ja võimendus-elektronlampidest erineb «elektronkahur» selle poolest, et ta on varustatud täiendavate elektroodidega, mis fokuseerivad (koondavad) elektronid peeneks kiireks. Teda kasutatakse väga laialdaselt kõikvõimalikes elektronkiiretorudes.

Tuumatehnikas rakendatakse «elektronkahurit» primaarse elektronide allikana, millest lähtuvaid elektrone kiirendatakse beetatronides, sünkrotronides, lineaarkiirendites ja teistes seadmetes, kus elektronide voog peab olema eriti tihe.

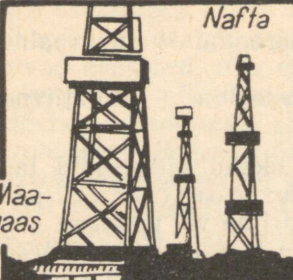

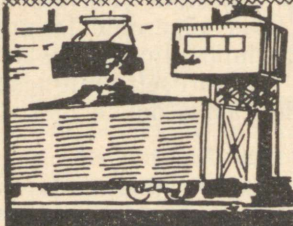

Energieiline tuumareaktor — tuumareaktor, mille põhiülesanne on elektrienergia tootmiseks vajaliku soojuse tekitamine.

Energiaallikad. Maakera energiaressursid jagunevad põhiliselt kütuselisteks (kivisüsi, nafta jt.) ja mitte-kütuselisteks ressursideks (vee-energia, tuuleenergia jt.). Eristatakse ka taastuvaid ja mittetaastuvaid energiaallikaid. Lk. 45 on toodud andmeid mõlemat liiki energiaallikate kohta.

Kütus

Varu, tonnides

Energia, kilovatt-tund

Kütus	Varu, tonnides	Energia, kilovatt-tund
<p><i>Nafta</i></p>  <p><i>Maa-gaas</i></p>	$0,12 \cdot 10^{12}$ $0,06 \cdot 10^{12}$	$0,97 \cdot 10^{15}$ $0,49 \cdot 10^{15}$
<p><i>Kivisüsi</i></p> 	$10,7 \cdot 10^{12}$	$86,0 \cdot 10^{15}$
<p><i>Uraan</i> <i>Toorium</i></p> 	$6,5 \cdot 10^{12}$	$527 \cdot 10^{15}$
 <p>Aastas Maale lan- gev päikeseenergia</p>		$1500 \cdot 10^{15}$
<p>Energia tarbimine maailmas aasta kohta</p>		$3 \cdot 10^{12}$

Mittetaastuvad energiaallikad (kütused)

	Miljardid tonnid tingkütust	Tuhanded miljardid kilovatt- tunnid
Kivisüsi	10 660	86 250
Nafta	120	970
Maagaas	60	490
Turvas	560	4 550
Taimne kütus	600	4 800
Uraan ja toorium	65 000	527 000

Vahetpidamatult taastuvad ja praktiliselt igavesed energiaallikad

	Tuhanded miljardid kilovatt- tunnid
Päikesekiirgus	1 500 000
Looded ja lainetus	70 000
Tuul	17 360
Maa sisesoojus	289
Jõgede vool	33

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Footon **F**

Footon — nähtava ja nähtamatu valguse, röntgeni- ja gamma-kiirguse energiakvant, millel on üheaegselt osakese ja laine omadused. Footonil puudub seisumass ja ta saab liikuda ainult valguse kiirusega, s. t. kiirusega 300 000 km/s. Elektrilaengu puudumise tõttu on ta elektriliselt neutraalne. Et igasuguse sagedusega elektromagnetlained võivad kiirguda ainult täiesti kindlate portsjonitena — kvantidena, siis on footoni energia kiirguse sagedusest:

$$E = h\nu,$$

kus E — footoni energia, h — Plancki konstant, ν — kiirguse sagedus.

Teatavates tingimustes võib küllalt suure energiaga foton moodustada elektroni ja positroni paari.

Fasotron (sünkrotronsüklotron) — laetud osakeste kiirendi, milles rakendatakse nõndanimetatud autofaseerumise printsiipi. See printsiip, mille töötas välja nõukogude teadlane V. I. Veksler, seisab selles, et teatavates tingimustes ning kiirendavate elektriväljade ja suunavate magnetväljade õige valiku korral saab iga kiirendatavat osakest panna liikuma nii, et kui ta oma teekonna lõpetab, siis on tal võimalikest individuaalsetest kõrvalekaldumistest hoolimata ettenähtud maksimaalne energia. Selle saavutamiseks tuleb muu hulgas kompenseerida relativistlik efekt (osakeste massi suurenemine valguse kiirusele lähedastel liikumiskiirustel), millest peamiselt on tingitud sünkronisatsiooni häired tsüklotronis. Kompensatsiooniks vähendatakse järk-järgult kiirendusvahemikule rakendatava kiirendava vahelduvpinge sagedust.

Sagedust muudetakse selliselt, et pingeimpulsid jõuaksid kiirendusvahemikku osakese iga tiiru üha hiljem, täpses vastavuses osakese relativistliku «raskenemisega» ja kiiruse kasvutempo järkjärgulise aeglustumisega.

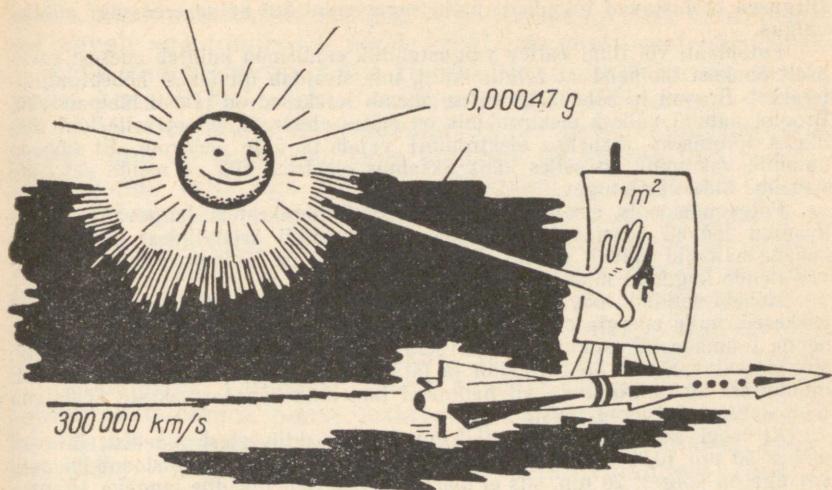
Footonirakett. On teada, et uraani ja plutooniumi aatomituumade jagunemisel vabaneb tohutu hulk energiat — umbes 22,9 miljonit kW·h 1 kg jaguneva aine kohta. Isegi see kolossaalne energiahulk aga moodustab kõigest 0,1% aines peituvast (õigemini aine massiga ekvivalentsest) energiast, mis vastab Einsteinile kuulsale massi ja energia vastastikuse seose valemile $E=mc^2$. Ka termotuumareaktsioon — kergete aatomituumade liitumine raskeimateks tuumadeks — ei vabasta rohkem kui ligikaudu 1% varjatud energiast!

Looduses on tuntud üksainus protsess, millest osavõtva aine kogu mass muundub kiirguseks — seisumassita fotoniteks, mis liiguvad valguse kiirusega (300 000 km/s). See protsess on annihilatsioon, mille käigus kaks vastandlike füüsikaliste omadustega osakest, meie maailma tavaline osake ja nõndanimetatud antiosake, näiteks elektron ja positron või prooton ja antiprooton (vt. «Elementaarosakesed»), hävitavad vastastikku teineteist. Sellise reaktsiooni puhul vabaneb kogu aines peituv energia — Einsteinile valemi järgi 25 miljardit kW·h 1 kg aine kohta!

Juba mitukümmend aastat tagasi tõestas P. N. Lebedev, et valgus, millel lisaks energiale on ka mass, avaldab oma teel olevatele esemetele küll väikest, kuid siiski täiesti märgatavat rõhku. Kui see aga nii on, siis peab hiiglasuurest lambist teatavas suunas kiirguv võimas fotonite voog andma sellele lambile püsiva kiirenduse. Sellist esialgu veel fantastilist rakettmootorit võib kujutleda tohutu võimsusega tuumareaktorina, mis vahetpidamatult toodab osakesi ja vastavaid antiosakesi, näiteks prootoneid ja antiprootoneid. Spetsiaalses kambris need osakesed kohtuvad ja annihileeruvad. Seejuures tekivad fotonid, mis koondatakse suure peegli abil ja väljuvad raketi sabaosast vajalikus suunas. Valgusvoog tekitabki reaktiivjõu.

Teoreetiliselt on seda liiki mootor energeetiliselt mõttes kõige täiuslikum, efektiivsem ja ökonoomsem, sest osakeste annihileerumisel vabaneb praktiliselt 100% aines peituvast energiast, tekkivad fotonid aga liiguvad maksimaalse looduses võimaliku kiirusega — valguse kiirusega.

Tuleviku teadlaste ees seisavad siiski kirjeldamatult rasked ülesanded. Peamised nendest on järgmised. Antiosakeste saamine on meie tavalistest elementaarosakestest koosnevas maailmas küll väga raske, kuid võimalik. Pea-



aeu lootusetu aga on neid säilitada nõnda, et nad ümbritsevate antagonisti-dega otsekohe tuumareaktsiooni ei astuks. Kuidas on neid siis võimalik raketi peegli fookuses paiknevasse põlemiskambrisse toimetada?

Et kõnesoleval mootoril oleks piisav võimsus, peavad valguseks muundu-ma küllaltki suured ainehulgad. Aine annihileerumine ja valguseks muundu-mine toimub aga nii pööraselt kõrgel temperatuuril, et seda vaevalt suudab silmapilkselt aurustumata taluda ka kõige fantastilisemalt kuumakindel aine, mida kasutatakse peegli valmistamiseks. Tekkiv valgus on võrreldamatult eredam kui paljumegatonmise vesinikupommi plahvatusega kaasnev valguse-sähvatus.

Pole siiski võimalik ennustada, mida teadus ja tehnika juba mõne aasta-kümne jooksul saavutavad. Ei ole kahtlust, et kaugel, aga võib-olla küllaltki lähedase tuleviku teadus lahendab ka selle vaieldamatult peadpööritava üles-ande. Perspektiivide näilisest lootusetusest hoolimata pühendavad teadlased fotoniraketi loomise esialgu veel väga abstraktsel ja unistusega sarnanevale ideele üsnagi palju tähelepanu.

Miks on fotoniraketi loomine ja isegi sellest unistamine nõnda ahvatlev?

Kosmilised, kümnete ja sadade valgusaastatega mõotuvad kaugused, mis lahutavad meid lähimatest tähtedest, kõnelemata juba teistest galaktikatest, ei anna inimele lootust, et ta kunagi võiks vabaneda aja halastamatust vangistusest. Isegi valguse kiirusega liikuval raketil kuluks lähima täheni jõudmiseks neli ja pool aastat! Ainult mootor, mis võimaldab raketil liikuda valguse kiirusele lähedase kiirusega, teeb niisiis reaalseks unistuse jõuda kunagi maailmadesse väljaspool Päikesesüsteemi piire.

Fotoemulsioonimeetod osakeste registreerimiseks. Juba röntgenikiirguse ja radioaktiivse kiirguse avastamise ajast peale on teada, et need nähtamatud

kiirgused mõjustavad fotoplaati palju tugevamini kui kõige eredamgi nähtav valgus.

Fotoplaati või filmi kattev valgustundlik emulsioon kujutab enesest tavaliselt õhukest läbipaistvat želatiinikihti, mis sisaldab üliväikesi hõbebromiiditerakesi. Broomi ja hõbeda keemilise ühendi terakesed on täiesti läbipaistvad. Broomi aatomi välises elektronihhis on seitse elektroni, nii et selle kihi lõplikuks täitmiseks (kaheksa elektronini) vajab ta ühte elektroni. Et hõbeda aatomil, vastupidi, on selles kihis üksainus elektron, siis on nende aatomite vaheline side väga tugev.

Fotoemulsioonis sisalduvatele hõbebromiiditerakestele langevad valguskvandid löövad seostavaid elektrone hõbebromiidi kristallidest välja ning hõbeda aatomid jäävad vabaks. Et need aatomid on läbipaistmatud, siis näevad nende kogumid mustadena.

Hõbebromiidist löövad elektrone välja ka kõik elektrilaengut kandvad osakesed, mille energia on piisav hõbeda aatomite ioniseerimiseks või koguni nende tuumade lõhustamiseks. Kui sellised osakesed läbivad fotoemulsiooni, siis lagundavad nad hõbebromiidi ja jätavad enesest jälgi, mis pärast plaadi ilmutamist on mikroskoobi all nähtavad tumedate hõbedaterakeste ahelatena läbipaistva emulsiooni taustal.

Et isegi alfaosakesed, mis kiirguvad radioaktiivsetest ainetest, jätavad umbes 50 μm (0,05 mm) pikkuse jälje, tavaliste plaatide emulsioonikihi paksus aga on kõigest 20 μm , siis ei mahu vertikaalselt plaadile langeva alfaosakese jälg emulsioonikihi piiridesse, kõnelemata juba osakestest, mis lendavad tunduvalt suurema kiirusega. Nõukogude füüsik Mõssovski soovitas esimesena võtta kasutusele plaadid, mille emulsioonikihi paksus on 400–600 μm . Kui osakeste jäljed võivad osutada veel pikemaks, siis kasutatakse mitut emulsioonikihti.

G

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Gammakiirgus

Gammakiirgus — nii looduslike kui ka tehislake radioaktiivsete elementide aatomituumadest lähtuv elektromagnetkiirgus, millel on äärmiselt väike lainepikkus (1 Å või alla selle) ja seetõttu erakordselt suur läbimisvõime. Gammakiirgus tekib laetud osakeste pidurdumisel (vt. «Pärsskiirgus»), antiosakeste paaride (elektroni ja positroni, prootoni ja antiprootoni jne.) annihileerumisel, uraani ja plutooniumi aatomituumade spontaansel ja tehislikult esilekutsutud lagunemisel ning mõningate teiste tuumareaktsioonide puhul.

Et gammakiirguse (mille lainepikkus on väiksem kui 1 Å) lainemadused — difraktsioon ja interferents — väljenduvad nõrgalt, siis loetakse seda kiirgust osakeste, gammakvantide

vooks. Gammakvantide energia kasv võnkesageduse suurenemisel annab aga tunnistust nende elektromagnetilisest päritolust.

Oma suure energia tõttu (looduslike radioaktiivsete ainete puhul kuni 5 MeV, tehislike tuumareaktsioonide puhul kuni 20 MeV) ioniseerivad gammakiired kergesti mitmesuguseid aineid ning on suutelised esile kutsuma ka mõnda liiki tuumareaktsioone, eriti aga tekitama elektroni ja positroni paare ning mõningaid teisi elementaarosakesi. Just gammakiirte ohtlikkus inimestele ja teistele elusorganismidele ongi põhjuseks, miks tuumareaktorid ümbritsetakse paksude betoonseintega — bioloogilise kaitsega, looduslikke ja tehisklikke radioaktiivseid aineid säilitatakse paksude pliiseintega konteinerites ning rakendatakse teisi keerukaid ja kalleid kaitsevahendeid.

Looduslikest radioaktiivsetest ainetest lähtuvat ja tehisklike tuumareaktsioonide puhul tekkivat gammakiirgust kasutatakse laialdaselt teaduses ja tehnikas. Selle abil hävitatakse vähkkasvajaid, valgustatakse läbi suuri metallivalandeid (paksusega kuni 250 mm) ja valmistooteid, et avastada neis varjatud defekte, konserveeritakse ja steriliseeritakse toiduaineid ja ravimeid ning tehakse uurimistöid paljudes tänapäeva teaduse harudes.

Gammadefektoskoopia — meetod defektide avastamiseks metallivalandites, keevisõmblustes ja igasugustes metalltoodetes looduslikest või tehisklikest radioaktiivsetest ainetest lähtuvate gammakiirtega või suure energiaga röntgenikiirtega läbivalgustamise teel. Sellist kontrolli rakendatakse tänapäeval laialdaselt tööstuse ja ehitustegevuse kõige erinevates harudes. Kontrolli teostamiseks paigutatakse kontrollitavast objektist ühele poole teatavasse kaugusse gammakiirguse allikas ja teisele poole kiirgusdetektor (kõige sagedamini fotoplaat). Objekti läbiva kiirguse intensiivsus oleneb objekti paksusest, koostisest ja tihedusest. Fotol on näha kiirguse intensiivsuse erinevused ja seega ka kõikvõimalikud defektid (tühikud, praod, poorid, ebakvaliteetsed keevisõmbused, montaaživead, kõrvalised esemed, murdekohad jne.). Radioaktiivne isotoop valitakse eelkõige olenevalt läbivalgustatava objekti paksusest ja materjali tihedusest, aga ka kiirgusdetektori tundlikkusest, töö iseärasustest ja teistest tingimustest.

Gammadefektoskoopia rakendamisel tuleb rangelt järgida radioaktiivsete ainete käsitsemise ja säilitamise ning ohutustehnika eeskirju.

Geiger-Mülleri loendur. Aatomite ja aatominähtuste maailm on nii väike, et inimese meeleeelundid ei ole suutelised seda vahetult tajuma. Füüsikutele on aga tarvis ühte osakest teisest eristada, nende energiat, kiirust ja liikumissuunda määrata ning osakesi täpselt loendada. Võttes arvesse ionisatsioonikambri võimaluste piiratust, konstrueeris saksa füüsik Geiger laetud osakeste loenduri, mida ta hiljem täiustas koos teise füüsikuga — Mülleriga.

Loendur on ehituse poolest äärmiselt lihtne. Ta kujutab enesest hõren-

datud gaasi (rõhk 100—200 mm Hg) sisaldavat klaastoru, mida piki telge läbib peenike metallniit.

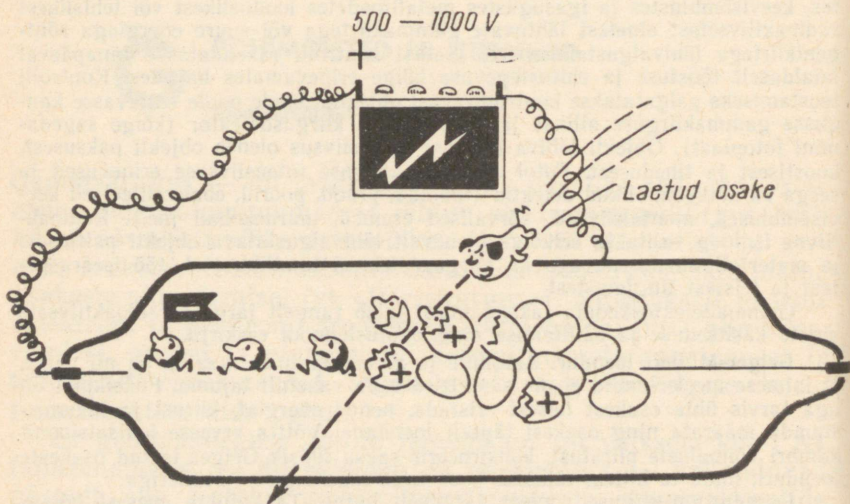
Niidi ja toru osaliselt metalliseeritud pinna vahele on rakendatud kõrge elektripingeline (500—1000 V või üle selle). Niit on tavaliselt positiivseks elekt-roodiks.

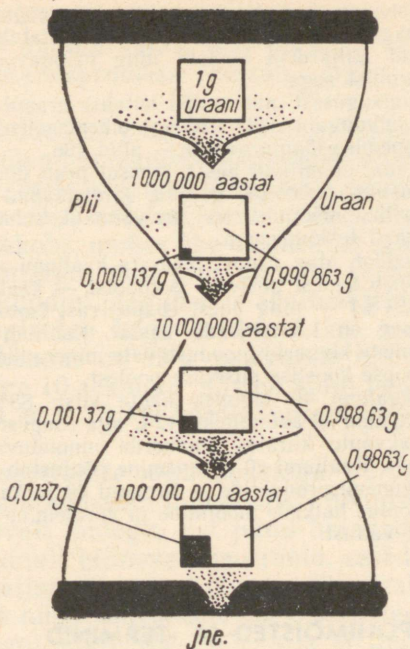
Kui laetud osake läbi toru lendab, siis ioniseerib ta väikese osa torus sisalduvast gaasist. Niidi ja toru seina vaheline tugev elektriväli annab gaasi aatomitest väljalöödud elektronidele väga suure kiiruse ja need hakkavad omakorda gaasi aatomeid ioniseerima. Ka «teise põlvkonna» elektronid kiirenduvad, ioniseerivad uusi aatomeid jne. Sel viisil tekib terve elektronide laviin, mille impulss (voolutugevus) onoleb algselt läbi toru lennanud osake-keese energiast ja kiirusest.

Seda impulssi saab vahetult või pärast võimendamist mõõta. Seadme tundlikkus võib olla kuitahes suur. Vajaduse korral on võimalik registreerida isegi üheainsa laetud osakese ilmumist.

Seadme tundlikkusest üksi aga ei piisa uurimistöödeks. Seepärast lisatakse Geiger-Mülleri toru võimendile harilikult veel võrdlemisi keerukas seadis — osakeste, õigemini nendest tingitud elektriimpulsside loendur, mis automaatselt «sorteerib» impulsse energia, laengu, kiiruse ja suuna järgi ning loendab neid välkkiirelt.

Seda tüüpi seadmed võimaldavad registreerida ja mõõta ka röntgeni- ja gammakiirgust, kuigi see teatavasti ei kujuta enesest laetud osakeste voogu, vaid väga väikese lainepikkusega elektromagnetilist võnkumist. Kui kiired langevad toru metalliseeritud pinnale, siis löövad nad metalli aatomitest välja elektrone. Need satuvad kiirendavasse elektrivälja ning edasi toimub kõik samuti kui laetud osakeste läbiminekuul torust.





Osakeste lennuasuuna kindlakstegemiseks kasutatakse omapäraseid teleskoope — torude patareisid, milles loendurid on häälestatud selliselt, et nad hakkavad tööle ainult siis, kui uuritav osake lendab näiteks vasakult paremale, ülalt alla või mõnes teises kindlas suunas. Selliste seadmete konstruktioon on ebauritavate osakeste kiirusest ja muudest teguritest. Need seadmed leiavad erakordselt laialdast rakendamist kõigis tuumatehnika harudes. Neid on suuri ja väikesi, stacionaarseid ja portatiivseid, vähetundlikke ja väga tundlikke. Vähetundlike loendurite abil mõõdetakse intensiivseid osakeste vooge, tundlike loendurite abil registreeritakse üksikuid osakesi (näiteks nõrgalt radioaktiivsete uraani- ja tooriumimaakide otsimisel).

Geoloogiline ajaarvamine radioaktiivsete ainete abil. Kui kolme radioaktiivsete elementide perekonna esimestel liikmetel — uraanil 238, tooriumil ja uraanil 235 — oleks suhteliselt väike poolestusaeg, siis oleksid nad juba väga ammu lakanud Maal eksisteerimast ja me isegi ei aimaks, et hästi tuntud ja igapäevasel pliil olid nii ebatavalised esivanemad.

Praegu on teada, et uraanil 235 on poolestusaeg 710 miljonit aastat, uraanil 238 4,5 miljardit aastat ja tooriumil 232 isegi 13,9 miljardit aastat! Mida täpsemalt teadlastel õnnestub määrata ühtede või teiste radioaktiivsete isotoopide poolestusaega, seda usaldusväärsemaks muutuvad nende isotoopide

abil Maa geoloogiliste moodustiste eksisteerimisaja mõõtmise meetodid. Sellised isotoobid on nagu imepäraseid kellad, mis väsimatult, ette minemata ja taha jäämata käivad miljardeid aastaid ning mõõdavad omaenese erilist, lõpmatult pikka kosmilist aega.

Oletame, et mingisugusest mineraalist leitakse uraani 238. Siis peab seal kindlasti olema ka mõningaid selle isotoobi pikemaalisi lagunemisprodukte ning tingimata lagunemise lõpp-produkti — pliid 106.

Kerge on arvutada, et miljoni aasta jooksul peab ühes grammis looduslikus uraanis moodustuma 0,000 137 g pliid. Järelejäänud uraani ja moodustunud plii hulga hoolika mõõtmise teel on võimalik suhteliselt täpselt määrata uuritava mineraali tekkimisaega.

Täpsemalt võimaldab Maa vanust määrata kaaliumi-argoonimeetod. Looduslik kaalium koosneb kahest püsivast isotoobist — kaaliumist 39 (93,08%) ja kaaliumist 41 (6,91%) — ning ühest ebapüsivast isotoobist — kaaliumist 40, mille poolestusaeg on 1,3 miljardit aastat. Kaalium on looduses väga levinud, kuulub peamiste kivimeid moodustavate mineraalide koostisse ja paistab silma oma isotoopse koostise püsivuse poolest.

Radioaktiivne kaalium 40 laguneb kahte viisi: 88% tema aatomitest muundub püsiva kaltsiumi 40 aatomiteks, 12% aga ebapüsiva argooni 40 aatomiteks, mis gammakvante kiirates omakorda muunduvad põhilise, püsiva argooni 40 aatomiteks. Kaaliumi 40 lagunemine põhjustab tema hulga pidevat vähenemist ning lagunemisproduktide — argooni 40 ja kaltsiumi 40 — kogunemist. Nende isotoopide hulkade mõõtmine ja võrdlemine võimaldab määrata kivimite absoluutset vanust.

H

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Heelium
Hilinevad neutronid
Hüperonid

Heelium — keemiline element, mille järjenumbr on 2 ja aatommass 4,004; inertgaas. Looduslik heelium koosneb kahest püsivast isotoobist: heeliumist 4 ja vähesest hulgast heeliumist 3. Heelium 4 tekib looduses peamiselt uraani, tooriumi ja teiste radioaktiivsete elementide lagunemisel, mille käigus eralduvad alfaosakesed (heeliumituumad).

Tehislikult on õnnestunud saada heeliumi 5 (poolestusaeg väiksem kui 10^{-21} sekundit) ja heeliumi 6 (poolestusaeg 0,8 sekundit).

Heeliumi aatom koosneb tuumast ja kahest elektronist. Heeliumi aatomi tuum, mille moodustavad kaks prootonit ja kaks neutronit, on võrdlemisi püsiv moodustis: kõigi tema osakeste seoseenergia on 28,2 MeV.

Hilinevad neutronid. Kui neutron tabab uraani 235 või plutooniumi 239 aatomituumade, siis jaguneb see kaheks osaks, kusjuures jagunemisprotsess kestab umbes üks miljardik sekundit.

Tekkivatest kildudest paiskub välja keskmiselt kaks või kolm neutronit, mis võivad omakorda põhjustada uute aatomituumade jagunemist, s. t. esile kutsuda iseareneva tuumareaktsiooni või seda alal hoida. Osa nendest neutronitest (ligikaudu 1%) ei eraldu siiski otsekohe, umbes ühe miljardiku sekundi vältel, vaid mõninga hilinemisega, mis võib ulatuda sekundi murdosadest mitmekümne sekundini. Jagunemis-ahelreaktsiooni ühe lüli hilinemine aga aeglustab kogu protsessi kui tervikut. Kui igas neutronite põlvkonnas on 99% neutronite iga 10^{-5} sekundit ja 1% neutronite iga 10 sekundit, siis on kõigi neutronite keskmine iga 0,1 sekundit, s. t. 10 000 korda suurem hetkeliste neutronite east.

Oletame, et *neutronite paljunemistegur* võrdub täpselt ühega, s. t. kõik uraanituumade jagunemist põhjustavad neutronid asenduvad pidevalt uutega. Sel juhul hoiavad ahelreaktsiooni alal tegelikult ainult hilinevad neutronid, sest kui neid ei oleks, siis muutuks paljunemistegur ühest väiksemaks ja reaktsioon vaibuks. Kui me nüüd sooviksime paljunemistegurit suurendada näiteks väärtuseni 1,001 või 1,007, siis ei muutuks reaktsioon otsekohe juhitamatuks, vaid ta kiirus kasvaks aeglaselt, umbes 0,1 sekundi jooksul. Selle aja vältel aga on võimalik täiesti rahulikult, isegi käsitsi viia reaktorisse neutroneid neelavatest ainetest reguleerimisvardaid, mis ei lase neutronite paljunemisteguril ohtlikku piiri ületada ja vajaduse korral võimaldavad reaktsiooni silmapilkselt katkestada.

Hüperonid. Hiljuti avastati kosmilises kiirguses ja seejärel ka kiirendites elementaarosakesed, mille mass ületab nukleonide (prootonite ja neutronite) massi. Neid äärmiselt ebapüsivaid, kiiresti lagunevaid osakesi nimetatakse hüperonideks. Nad võivad kanda elektrilaengut või olla neutraalsed.

Hüperonide rühma kuulub 12 osakest: lambdahüperon, kolm sigmahüperoni, kaks ksiihüperoni ja vastavad antiosakesed (vt. «Elementaarosakesed»). Suhteliselt hästi on uuritud neutraalset lambdahüperoni. Selle osakese mass võrdub 2182 elektroni massiga, s. t. on umbes 340 elektroni massi võrra suurem prootoni massist. Ta iga ei ületa $3 \cdot 10^{-10}$ sekundit ning ta laguneb

protoniks ja negatiivseks piimesoniks või neutroniks ja neutraalseks piimesoniks.

Heterogeenne tuumareaktor — reaktor, milles tuumkütus ja aeglusti paiknevad vahelduvate plokkidena teineteisest teatavas kauguses ja moodustavad neutronite jaoks heterogeense keskkonna.

Homogeenne tuumareaktor — reaktor, milles tuumkütus ja aeglusti on teineteisega segatud (peente pulbritena või suspensiooni näol) ja moodustavad neutronite jaoks homogeense keskkonna.

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Indutseeritud radioaktiivsus
Ionisatsioon
Isotoobid

Indutseeritud radioaktiivsus — õhu, vee, mulla ja teiste ainete radioaktiivsus, mida põhjustavad tuumareaktorites, kiirendites või aatomipommide plahvatustel tekkivad neutronid.

Kui aatomituum neelab neutroni, siis satub ta ergastus- seisundisse ja laguneb, kiirates beetaosakesi ja gammakvante. Seepärast tulebki kõik otsesed ja kaudsed neutronite allikad ümbritseda mitmekihilise bioloogilise kaitsega, mis neelab kõik nendest väljuvad neutronid ja tõkestab ka tehislake radioaktiivsete isotoopide gammakiirgust. Need isotoobid tekivad neutronite neeldumisel niihästi kiiritatavate ainete kui ka ümbritseva atmosfääri, seadmete ehitamiseks kasutatud materjalide, soojuskandja ning kaitsekihtide eneste aatomituumades.

Ionisatsioon. Kui aine aatom viibib normaalses seisundis, s. t. ei allu mingisugustele välismõjudele, siis on ta üldjuhul elektriliselt neutraalne: kõigi tuuma koostisse kuuluvate protonite positiivsete laengute summa võrdub täpselt kõikide tuuma ümber tiirlevate elektronide negatiivsete laengute summaga.

Keemiliste reaktsioonide käigus, tugeval kuumutamisel, tugevate elektriväljade, valguse ja teiste kiirguste mõjul võivad ühed aatomid kaotada ühe või mitu elektroni, mis tiirlevad kõige välimistel orbiitidel, teised aatomid aga võivad omastada «võõraid» elektrone. Sellest hetkest peale lakkab aatom olemast

neutraalne, «ükskõikne» süsteem ja muutub elektriliselt aktiivseks iooniks: elektrone kaotavast aatomist saab positiivne ioon, elektrone omastavast aatomist aga negatiivne ioon. Mingist aatomist vabanenud elektron võib neelduda mõnes teises aatomis või jääda vabaks (vaba elektron).

Elektriliselt neutraalsete aatomite muundumist ionideks nimetatakse ioniseerumiseks ehk ionisatsiooniks. Rõhuval enamikul juhtudel seisab aatomite ioniseerumine elektronide kaotamises, s. t. positiivsete ionide tekkes.

Et aine aatomite ja molekulide kaootiline soojusliikumine ning järelkult ka nendevahelised kokkupõrked ei alga temperatuurist 0°C , millega me oleme harjunud, vaid absoluutsest nullist — 0°K ($-273,16^{\circ}\text{C}$) —, siis algab sellest temperatuurist ka ionisatsiooniprotsess. Temperatuuri tõusuga kaasneb ionisatsiooni intensiivistumine, mis tahketes ainetes on peaaegu märkamatu, vedelikes märgatavam ja gaasides väga suur.

Kui ioniseeritud aine asetseb elektriväljas, siis toimub temas elektronide korrapärane, suunatud liikumine, s. t. teda läbib elektrivool.

Ionisatsiooni aste oleneb loomulikult mitmest asjaolust: aine loomusest (kui on tegemist gaasiga, siis selle tihedusest), temperatuurist, ioniseeriva kiirguse energiast ja teistest teguritest.

Isotoobid. Looduslikke radioaktiivseid elemente uurides pörkasid teadlased kokku mõningate arusaamatute nähtustega.

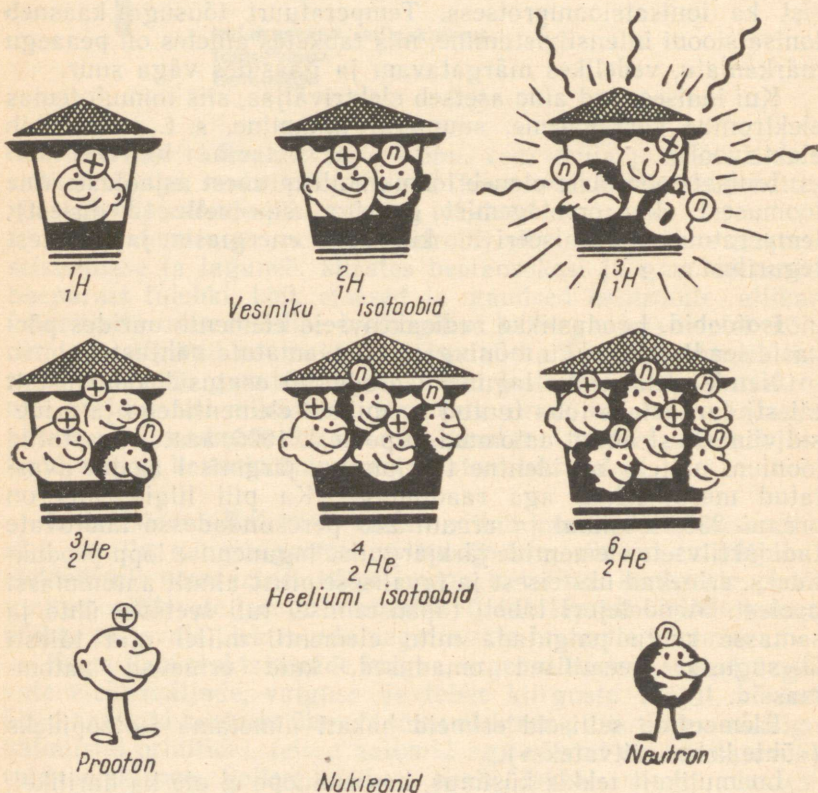
Nende elementide lagunemisproduktid osutusid omadustelt täiesti sarnasteks juba tuntud keemiliste elementidega ja erinevad viimastest ainult aatommassi poolest. 1906. aastal avastatud ionium näiteks oli identne tooriumiga, järgmisel aastal avastatud mesotoorium aga raadiumiga. Ka plii liigid, mis on uraani 238, tooriumi ja uraani 235 perekondadesse kuuluvate radioaktiivsete elementide järkjärgulise lagunemise lõpp-produktideks, erinevad üksteisest ja tavalisest pliiist ainult aatommassi poolest. Mendelejevi tabeli täpsustamisel tuli seetõttu ühte ja samasse ruutu paigutada mitu elementi, millel olid täiesti ühesugused keemilised omadused, kuid erinevad aatommassid.

Elementide selliseid erimeid hakati nimetama isotoopideks («ühte kohta täitvateks»).

Loomulikult tekkis küsimus, kas isotoope ei ole ka harilikel,

mitteradioaktiivsetel elementidel. Tavalised keemilised meetodid aga ei võimaldanud neid eraldada, sest elemendi isotoobid on keemiliselt identsed. Ka elektriväli ei aidanud, sest elektronide arv orbiitidel ja positiivne tuumalaeng on isotoopide aatomitel ühesugused.

Missugust omadust siis oleks võimalik kasutada isotoopide eraldamiseks? Ainult ühte — aatommasside erinevust. See ilmneb aga ainult elektrilaengut kandvate ionide liikumisel tugevas elektri- või magnetväljas. Ühesuguste kiiruste korral kõverdub kergema isotoobiiooni trajektoor suuremal määral kui raskema isotoobiiooni trajektoor.



Sellel põhimõttel töötabki omapärane «aatomite sorteerimise masin» — massispektrograaf, mille konstrueeris inglise füüsik Aston (vt. «Isotoopide segude lahutamine»).

Ilmneb, et isotoope on peaaegu kõigil keemilistel elementidel. Uhtedel on neid vähe, teistel küllaltki palju. Hapnik näiteks koosneb kolmest isotoobist: hapnikust 16 (99,76%), hapnikust 18 (0,2%) ja hapnikust 17 (0,04%).

Isotoobid võivad olla püsivad (stabiilsed) või ebapüsivad (radioaktiivsed). Viimased lagunevad aja jooksul iseenesest (vt. «Radioaktiivsed isotoobid»). Mendelejevi tabeli 92 elemendil on praeguseni avastatud üle 250 püsiva isotoobi, üle 50 loodusliku ja üle 1000 tehisliku radioaktiivse isotoobi!

Tavalistele keemilistele elementidele lisatud radioaktiivsed isotoobid signaliseerivad vahetpidamata nende elementide olemasolust. Selliseid segusid kasutatakse laialdaselt teaduslikel uurimistöodel, eriti bioloogias, meditsiinis, üldises ja orgaanilises keemias, samuti tehnikas ja tööstuses (vt. «Märgitud aatomid»).

Ioniseerivad kiirgused — kõik kiirgusliigid, mis põhjustavad aine aatomeid või molekulide ionisatsiooni. Ioniseerivate kiirguste hulka kuuluvad nähtav valgus, ultraviolettkiirgus, röntgeni- ja gammakiirgus ning igasugused laetud osakeste (elektronide, prootonite, alfaosakeste, mitmelaenguliste ioonide) vood.

Ioonimootor. Seoses võimsate kiirendite ja soojust vahetult elektrienergiaks muundavate plasmaseadmete loomisega on viimastel aastatel hakatud rakettide jaoks konstrueerima nõndanimetatud iooni-reaktiivmootoreid.

Peamiseks ahvatluseks on siin võimalus muuta gaaskütus algul madalatemperatuuriliseks plasmaks (s. t. ioniseerida kütus), seejärel aga kiirendada saadud ioonid valguse kiirusele lähedaste kiirusteni ning sel viisil suurendada mootori veojõudu tavalistel keemilistel kütustel töötavate mootoritega võrreldes nii mitu korda, kui mitu korda ioonide väljavoolu kiirus ületab sama hulga gaasiliste põlemisproduktide väljavoolu kiiruse. Siit tuleneb rakettide suurem kandevõime, kiirus ja lennukaugus, võimalus kaasa võtta suuremal hulgal kütust ja teised niisama olulised eelised.

On loomulik, et ioonimootorite kasutamisel ei saada midagi tasuta. Et oleks võimalik ioniseerida tohutul hulgal gaaskütuse aatomeid ning saadud ioonidele anda kiirust, mis ulatuvad kümnete ja sadade tuhandete kilomeetriteni sekundis, tuleb rakettidele paigutada võimsad energiaallikad, mille kaal ja maht «söövad ära» tunduva osa nendest eelistest, mida annab reaktiivjoo kiiruse tohtu kasv. Arvutused on siiski näidanud, et ioonimootorite loomine tasub ennast ära. Nõukogude teadlaste pikaajaliste uurimistööde tulemusena konstrueeritud plasmamootoreid rakendati esmakordselt 1964. aastal planeetidevahelisel automaatjaamal «Zond 2».

Ioonimootori ehitus on erakordselt lihtne. Mootori põhiliseks osaks on elektrigeneraator, mis tekitab tugeva kõrgepingelise elektrivälja. Positiivselt laetud ioonide allikateks võivad olla gaasilised ained, nagu näiteks vesinik

ja heelium, kerge metall tseesium või teised ained, mis ioniseeruvad, s. t. kaotavad elektrone juba suhteliselt madalatel, kahe kuni viie tuhande kraadi suurusjärgus olevatel temperatuuridel. Võimsa kiirendi elektrivälja sattudes omandavad ioonid hiiglasuure kiiruse, paiskuvad mootori tagaosast välja ning tekitavad sel viisil veojõu.

Isobaarid — keemiliste elementide erimid, millel on ühesugune aatommass, kuid erinevad tuumalaengud (aatomnumbrid). Tuntud on väga suur arv niihästi püsivaid kui ka radioaktiivseid isobaare. Isobaarid on näiteks tsirkoonium $96 \left(\begin{smallmatrix} 96 \\ 40 \end{smallmatrix} \text{Zr} \right)$, molübdeen $96 \left(\begin{smallmatrix} 96 \\ 42 \end{smallmatrix} \text{Mo} \right)$ ja ruteenium $96 \left(\begin{smallmatrix} 96 \\ 44 \end{smallmatrix} \text{Ru} \right)$. Kõigil neil on aatommass 96, aatomnumbrid aga vastavalt 40, 42 ja 44.

Isotoopide segude lahutamine — keemiliste elementide isotoopide osaline või täielik üksteisest eraldamine. Keemilistel meetoditel ei ole seda võimalik teha, sest ühe elemendi isotoopide keemilised omadused on täiesti identsed. Kasu ei ole ka elektriväljast, sest elektronide arv elektronkattes ja positiivne tuumalaeng on iga elemendi isotoopidel samuti täiesti ühesugused. Aga kuidas siis toimida? Onneks erinevad isotoobid üksteisest massi poolest. Seda asjaolu kasutataksegi «aatomite sorteerimise masinates» — laboratoorsetes aatommassi määramise seadmetes, mida nimetatakse massispektrograafideks.

Kui teatav hulk gaasilist ainet (lahutatavat isotoopide segu) paigutada õhust tühjaks pumbatud torusse, millesse on joodetud kaks elektroodi, ja rakendada elektroodidele kõrge pinge, siis võib tähendada järgmist pilti. Real põhjustel on igasuguses gaasikoguses alati teatav hulk vabu elektrone, mis on aatomitest nende omavahelistel kokkupõrgetel välja löödud. Positiivselt laetud anood tekitab tugeva elektrivälja, mille mõjul vabad elektronid hakkavad otsekohe liikuma anoodi suunas. Põrgates teel kokku neutraalsete gaasi aatomitega, ioniseerivad küllalt suure kiiruse omandanud elektronid neid aatomeid, s. t. löövad nendest omakorda välja elektrone. Viimased jäävad samuti vabaks, võtavad suuna anoodile ja rebivad teele sattuvatest aatomitest lahti uusi elektrone. Kõige selle tagajärjel läbib toru elektrivool, mille tugevus on oleb gaasi ionisatsioonistmest.

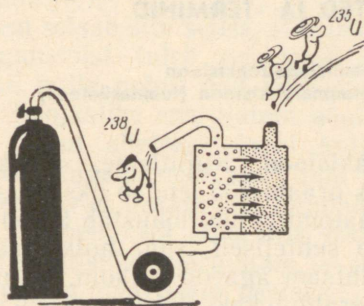
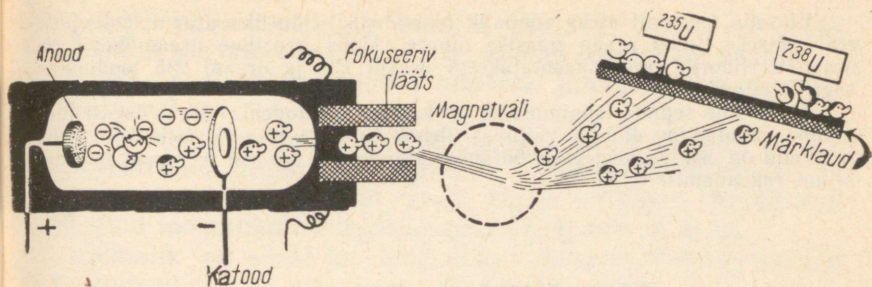
Aga kuidas käituvad sel ajal positiivsed ioonid — elektrone kaotanud aatomid? Nad liiguvad vastupidises suunas, negatiivselt laetud katoodi poole, kusjuures nende kiirus on küll samuti suur, kuid elektronide omast siiski tunduvalt väiksem, sest nende mass ületab tuhandeid kordi elektronide massi.

Kui toru katoodis on avaus, siis lendab osa kiiresti liikuvaid ioone sellest läbi ja väljub sealt peene kiirena. Sellise kiire teele võib asetada mõned negatiivselt pingestatud rõngakujulised elektroodid, et ionide kiirust veelgi suurendada. Edasi satub ionide kimp tugevasse magnetvälja. Magnetvälja mõjul muutub igasuguste laetud osakeste liikumissuund. Seejuures on loomulik, et erineva massiga ioonid kalduvad magnetvälja mõjul kõrvale erineval määral. Mida kergem on ioon, seda rohkem ta trajektor kõverdub. Kui nüüd ionide kimbu teele asetada nõrka negatiivset laengut kandev märklaud (metallplaat), siis sadestuvad eri liiki ioonid sellel eri kohtadesse.

Sellise operatsiooni paljukordne sooritamine võimaldab elementi kuitahes täielikult isotoopideks lahutada. Sellel põhimõttel töötabki massispektrograaf — võrdlemisi keerukas seade, mille leiutas inglise füüsik Aston.

Massispektrograafi abil on teadlased uurinud peaaegu kõiki Mendelejevi tabelisse kuuluvaid keemilisi elemente. Uhtedel elementidel on isotoope vähe, teistel üle kümne (vt. «Isotoobid»).

Üks asi on siiski üksteisest eraldada isotoopide kaduvväikesi koguseid,



teine asi aga saada neid hulgal, mis on vajalik aatomipommi valmistamiseks või tuumareaktori töölerakendamiseks.

Produktiivsemaks on osutunud järgmine meetod. Füüsikast on teada, et igasuguse gaasisegu koostisse kuuluvatel molekulidel on keskmiselt üks ja sama kineetiline energia. See aga ei tähenda sugugi, et nad kõik liiguvad ühesuguse kiirusega. Ühed molekulid liiguvad arvukate kokkupõrgete tagajärjel kiiremini, teised aeglasemalt, kusjuures kergemate molekulide kiirus on raskemate molekulide omast üldiselt suurem.

Et kergemad molekulid liiguvad kiiremini, siis põrkavad nad ka sagedamini vastu gaaside segu sisaldava anuma seinaga ja nende rõhk on seetõttu raskemate molekulide rõhust suurem. Kui anuma üks külg on valmistatud aimest, milles on palju mikroskoopilisi poore, siis väljub anumast teatava aja jooksul kergemaid molekule veidi rohkem kui raskemaid. Anumast väljunud gaas osutub anumasse jäänud gaasist mõnevõrra kergemaks. Kergemate molekulide sellist valikulist läbitungimist anuma poorsest seinast nimetatakse difusiooniks.

Praktiliselt aga on see (muuseas väga aeglane) protsess teostatav ainult siis, kui kergem gaas läbib anuma seinaga ainult ühes suunas — seest välja — ega saa enam tagasi pöörduda. Selleks peab anum koosnema kahest osast, mida teineteisest eraldab poorne vahesein. Ühes osas on gaasi rõhk veidi kõrgem, teisest aga pumbatakse gaasi pidevalt välja. Kui lahutatav gaas läbib järjestikku suure arvu selliseid anumaid, näiteks mitu tuhat anumad, siis sisaldab ta selle pika teekonna lõpul ainult kõige kergemaid aatomeid.

Et seda meetodit oleks võimalik rakendada loodusliku uraani isotoopide eraldamiseks, tuleb uraan gaasiks muuta. Ainus gaasiline uraaniühend on uraan(VI)fluoriid, mida kasutataksegi uraani 238 ja uraani 235 loodusliku segu lahutamiseks.

Isotoopide segude lahutamiseks on ka teisi meetodeid, näiteks tsentrifugimine, lahutamine düüsist väljuvas ühelikiirusega joas jt., kuid kõik need meetodid on esialgu veel väljatöötamise staadiumis ega ole seepärast laialdasemat rakendamist leidnud.

J PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Juhitav jagunemis-ahelreaktsioon

Juhitav termotuumareaktsioon (tuumasüntees)

Juhitav jagunemis-ahelreaktsioon. Kujutleme, et jagunemisvõimelisse isotoopi, näiteks uraani 235 lendab üksainus neutron. Tabades ühte uraani 235 aatomituuma, lõhustab ta selle kaheks osaks. Seejuures vabaneb suhteliselt suur hulk energiat — umbes 200 MeV. Kõige tähtsam aga on asjaolu, et uraani 235 aatomituuma jagunemisel eraldub kaks vaba neutronit, mis omakorda lõhustavad kaks tuuma ja vabastavad juba neli neutronit. Need neli neutronit lõhustavad neli uut uraanituuma. Neljast tuumast vabaneb kaheksa neutronit, mis on suutelised lõhustama niisama palju uraanituumasid. Edasi kasvab jagunevate tuumade ja vabanevate neutronite arv laviinitaoliselt, kahekordistudes igas uues «põlvkonnas». Ühesõnaga: toimub iserenev jagunemis-ahelreaktsioon.

Seda, kui kiiresti kulgeb selline reaktsioon mingisuguses jaguneva aine tükis, iseloomustab *neutronite paljunemistegur K*. See näitab, mitu korda on iga järgmine neutronite «põlvkond» eelmisest suurem, teiste sõnadega, mitu korda tugevneb neutronite voog iga järjekordse neutronite portsjoni vabanemisel.

Kui paljunemistegur on kas või tuhandiku protsendigi võrra ühest suurem, siis kasvab vabanevate neutronite ja seega ka jagunevate uraani 235 tuumade arv laviinitaoliselt. Tuumaenergia on aga võimalik kasulikuks otstarbeks rakendada ainult siis, kui protsess on kontrollitav, s. t. kui ajaühikus toimuvate jagunemiste arvu ja järelikult ka vabaneva energia hulga suurenemine on küllalt aeglane ning lakkab reaktsiooni soovitava võimsuse saavutamisel. See on ilmselt võimalik ainult juhul, kui

neutronite paljunemistegur muutub teataval hetkel võrdseks ühega. Kui see langeb alla ühe, siis alanud reaktsioon peatub.

Kuidas saab sellisel juhul teostada juhitavat tuuma-ahelreaktsiooni?

Looduslikus uraanis ahelreaktsioon iseendast kulgeda ei saa, sest neutronid neelduvad tugevasti uraani 238 tuumades ja nende paljunemistegur on alati ühest väiksem. Neelduvad neutronid loomulikult mingisuguseid «järglasi» ei anna.

Võimalik on siiski ka looduslikus uraanis ahelreaktsiooni esile kutsuda.

Probleem seisab siin selles, et otsekohe pärast iga uraani 235 tuuma jagunemist tuleb neutronid mingil viisil aeglustada energiateni, mille puhul nad kõik enam ei neeldu uraani 238 tuumades. Soojuslike energiateni aeglustunud neutronid lõhustavad sel juhul ahelreaktsiooni kulgemiseks vajaliku hulga uraani 235 tuumasid, need neutronid aga, mis ei jõudnud aeglustuda, neelduvad uraani 238 tuumades. Siit tuleneb uus ülesanne: leida vahend või aine, mis võimaldaks aeglustada vabu neutroneid soojuslike energiateni — umbes 0,03 eV —, ilma et ta ise seejuures neutroneid neelaks.

Neutronite aeglustamiseks on üksainus võimalus — neid tuleb panna paljukordselt kokku pörkama aeglusti aatomituumadega. Igal kokkupörkel peab neutron kaotama võimalikult palju energiat.

Mehaanika seadustest järeldub, et kui liikuva keha kiiruse vähendamiseks lastakse sel kehal elastselt kokku pörkata teiste, liikumatute või aeglaselt liikuvate kehadega, siis kaotab see keha (annab teisele kehale üle) maksimaalselt energiat juhul, kui kokkupörkavate kehade massid on võrdsed või teineteisele lähedased. Seepärast on neutronite aeglustamiseks sobivaimad kerge elementide aatomituumad, näiteks vesinikutuumad, mille mass on peaaegu võrdne neutroni massiga. Kui võtta arvesse selliseid omadusi, nagu neutronite neelamise võime väiksust, aeglustamise efektiivsust, odavust ja rakendamise lihtsust, siis on parimateks aeglustiteks raske vesi, puhas grafiit ja isegi harilik destilleeritud vesi. Efektiivselt aeglustuvad neutronid nõndanimetatud homogeensetes reaktorites, kus tuumkütus on aeglustis ühtlaselt jaotatud. Sel juhul ei ole võimalik vältida resonantsenergiateni (-kiirusteni) aeglustunud neutronite intensiivset neeldumist uraani 238 tuumades. Ahelreaktsiooni

esilekutsumiseks tuleb seepärast vastavalt suurendada jaguneva isotoobi (uraani 235) hulka.

Plutooniumi tootmiseks määratud reaktorites kasutatakse soojuselemente, mis koosnevad looduslikust uraanist.

Soojuselementide-vahelised kaugused valitakse nõnda, et kõik uraani 235 tuumade jagunemisel vabanevad neutronid ei neelduks otsekohe uraani 238 tuumades. Osa nendest peab aeglusti (grafiidi) kihti läbides ja resonantskiirusi (1—7 eV) vältides jõudma aeglustuda soojuslike kiirusteni (0,03 eV) ja naabruses olevasse uraanitükki sattudes rahulikult lõhustama uraani 235 tuumasid, ilma et nad teel neelduksid uraani 238 tuumades. On loomulik, et uraani 235 suur hajutatus, mida see meetod põhjustab, nõuab *kriitilise massi* saavutamiseks vajaliku loodusliku uraani koguse tunduvalt suurendamist. Selleks tuleb reaktorisse paigutada kümneid ja isegi sadu tonne looduslikku uraani.

Ent isegi juhul, kui kõik need tingimused oleksid täidetud, oleks juhitavat jagunemis-ahelreaktsiooni väga raske teostada, sest «enda hooleks» jäetud protsess kulgeb nii kiiresti (sajatuhandike sekundite jooksul), et seda ei ole suutelised reguleerima isegi kõige kiirematoimelised ja ülitundlikud aparaadid.

Täiesti ootamatult tulevad siin appi nõndanimetatud *hilinevad neutronid*.

Asi on selles, et neutronid, mis vabanevad uraani 235 aatomituumade jagunemisel, ei ilmu kõik ühekorraga, vaid eri aegadel. Algul lendavad välja hetkneutronid, mida on umbes 99% neutronite üldarvust; seejärel vabaneb ligikaudu 0,0001- kuni mõnekümnesekundilise hilineemisega ülejäänud 1% neutroneid.

Just need hilinevad neutronid võimaldavadki mitte üksnes automaatseadmete abil, vaid isegi käsitsi jagunemis-ahelreaktsiooni reguleerida. Reaktori võimsus kasvab sel juhul küllalt aeglaselt ega lähe kunagi «käest ära».

Ja lõpuks veel üks oluline tingimus. Mõned neutronid, mis vabanevad uraani 235 aatomituumade jagunemisel, võivad süsteemist välja lennata, ilma et nad uraanis või aeglustis ühtegi aatomituumata tabaksid. Sellist neutronite kadu saab vältida, kui reaktor ümbritseda hästi neutroneid peegeldavast ainest, näiteks juba eespool nimetatud grafiidist kestaga. Pärast arvukaid kokkupõrkeid aeglusti aatomituumadega peegelduvad neutronid tagasi reaktori aktiivtsooni. Niisugune neutronite kokku-

hoid võimaldab vastavalt vähendada reaktorisse paigutatava tuumkütuse hulka.

Juhitav termotuumareaktsioon (tuumasüntees). Termotuumareaktsiooni — kergema elemendi (vesiniku) aatomituumade sünteesi raskema elemendi (heeliumi) aatomituumadeks — on seni õnnestunud teostada ainult ühel viisil: tohutu purustusjõuga vesinikupommi plahvatuse näol. Suurt kasu selline plahvatusreaktsioon loomulikult inimkonnale ei too. Seepärast otsivad teadlased visalt võimalust kontrollitava, s. t. juhitava termotuumareaktsiooni teostamiseks, õigemini termotuumareaktsiooni selliseks aeglustamiseks, et teda oleks võimalik rakendada praktiliseks otstarbeks, esmajoones nähtavasti elektrienergia tootmiseks, sest sünteesireaktsiooni käigus vabaneb lähteainete massiühiku kohta kaheksa korda rohkem energiat kui jagunemisreaktsiooni käigus.

Jagunevad ained — ained, mille kiiritamisel neutronitega on võimalik esile kutsuda jagunemis-tuumareaktsioone. Sellised omadused on uraanil 235, uraanil 238 (ainult siis, kui teda kiiritatakse neutronitega, mille energia ületab 1 MeV), tuumareaktorites tehnikult saadud plutooniumil 239 ja uraanil 233 (mis tekib, kui tooriumi 232 kiiritatakse neutronitega). Uraani 235, plutooniumi 239 ja uraani 233 jagunemine võimaldab teostada isearenevat jagunemis-ahelreaktsiooni.

Joonkiirendi (lineaarkiirendi) — seade laetud osakeste kiirendamiseks; erineb teistest (tsüklilistest) kiirenditest selle poolest, et kiirendatavad osakesed liiguvad temas sirgjoonelisel.

Joonkiirendeid on kahte tüüpi. Elektrostaatilistes kiirendites annab osakestele ühekordse kiirenduse konstantne elektriväli, mille tekitavad alalis-kõrgepingegeneraatorid. Resonantskiirendites kiirendab osakesi elektriväli, mille tekitavad kõrgsagedusgeneraatorist lähtuvad suhteliselt nõrgad pingimpulsid (vt. «Kiirendid»).

K

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Kaitse radioaktiivse kiirguse vastu
Keemiliste elementide perioodilisuse süsteem
Kerged elemendid
Kiirendid
Kiirguse stimuleeriv toime
Kosmiline kiirgus
Kriitiline mass
Kunstlik radioaktiivsus, vt. tehisradioaktiivsus
Kvandid. Kvantide teooria

Kaitse radioaktiivse kiirguse vastu. Tuumaenergia rakendus-alade arvukuse tõttu on tulnud luua väga mitmekesiseid aparate, seadmeid, seadiseid ja seadeldisi, samuti erirõivastust, mille ülesandeks on kaitsta inimesi, kel otseselt või kaudselt on tegemist radioaktiivsete ainetega ja nendest lähtuvate kiirgustega selles pikas tehnoloogilises ahelas, mis ulatub lähtetooraine töötlemisest kuni aatomitööstuse jäätmete matmiseni.

Välja on töötatud kaks rangelt läbimõeldud, teineteisega seoses olevat ja teineteist katvat «kaitseliini», mida pidevalt täiustatakse. Esimese nendest «liinidest» moodustavad täielikult automatiseeritud kaitsetõkked (barjäärid, ekraanid, boksid, lüüsid, konteinerid, kontrollaparaadid jms.), mis teevad võimatuks vahetu kokkupuute radioaktiivsete ainetega ja ohtlike ioniseerivate kiirguste mõjupiirkonda sattumise. Et kõik inimese meeheelundid on nende kiirguste suhtes täiesti tundetud, siis on erakordselt rikkalik teise «kaitseliini» arsenal — kõige mitmekesisemat liiki ja kõige mitmekesisema otstarbega, statsionaarne ja portatiivne dosimeetriline aparatuur. Selle aparatuuri ülesandeks on igasuguste kiirgusliikide mõõtmine, kiirguse olemasolu kindlakstegemine või inimestele ohtlike kiirgusdooside määramine.

Usaldusväärsema kaitse tagamiseks kasutatakse automaatseid signalisaatoreid, mis annavad häiresignaali, kui kiirguse intensiivsus saavutab teatava etteantud taseme.

Et õhk, rõivad, seadmed ja instrumendid võivad saastuda radioaktiivsete ainetega, siis kasutatakse laboratoorseid aparate — radiomeetreid, mis võimaldavad uurida suuri ja väikesi pindu, mille suhtes on tekkinud kahtlus, et nad võivad olla

saastunud. Kui kiirguse doos ületab normi, annab aparaat automaatselt häiresignaali.

Individuaalseks kontrolliks kasutatakse dosimeetrilisi seadmeid, mis registreerivad summaarse kiirgusdoosi, mille töötaja saab tööpäeva jooksul. Need on mitmesugused riistad («pliiatsid», kassetid vms.), millesse paigutatud spetsiaalse filmilindi tükid tumenevad kiirguse mõjul, individuaalsed miniatuursed ionisatsioonikambrid, taskuelektromeetrid jne.

Keemiliste elementide perioodilisuse süsteem. 6. märtsil 1869 esitas D. Mendelejev Vene Füüsika- ja Keemiaseltsi istungil oma ettekande «Katse luua elementide süsteemi nende atomaarse ja keemilise sarnasuse alusel».

Selle ettekande sisu tekitas teadlaste ringkondades tohutut sensatsiooni ning tõi ettekande autorile ja vene teadusele maailmakuulsuse, sest see tähistas uut etappi teaduse arenemises atomiajastu künnisel.

Noor teadlane (ta oli tol ajal ainult 35-aastane) murdis kaua pead, et keemiliste elementide maailmas mingisugust seaduspärasust leida. See aga oli tema kindla veendumuse järgi võimalik ainult siis, kui kõik tuntud elemendid (paljud elemendid olid veel avastamata) paigutati nende põhiliste omaduste alusel mingisugusesse järjekorda.

Ent mida nimelt tuli siin kõige põhilisemaks lugeda?

Mendelejev valis aatommassi. Ta kirjutas elementide aatommassid ja keemilised omadused oma visiitkaartide tagakülgedele ning seadis neid kaua ja visalt igasugustesse mõeldavatesse ja mõeldamatutesse järjekordadesse.

Mõistatuse lahendus hakkas paistma, kui ta aatommassi kasvu järgi reastatud keemilised elemendid jagas horisontaalseteks rühmadeks. Sarnaste keemiliste omadustega elemendid paiknesid nendes rühmades üksteise all ning kordusid nähtavasti mingisuguse üldise ja lihtsa seaduse järgi.

«... Kui ma järjestasin elemendid nende aatommasside järgi, alustades kõige väiksemast aatommassist,» meenutas D. Mendelejev hiljem, «siis sai ilmseks, et elementide omadustes valitseb perioodilisus. Elementide omaduste ja aatommasside vahelise sõltuvuse nimetasin ma perioodilissuaduseks; see sõltuvus kehtib kõigi elementide puhul ja see on oma olemuselt perioodiline.»

Ranged vertikaalsed tulbad ei tulnud algul kuidagi välja. Ja

siis, olles veendunud, et eksisteerib täiesti täpne perioodilisus, astus teadlane erakordselt julge sammu. Ta väitis, et seal, kus mingi element ei paikne horisontaalreaas täpselt oma keemilise teisiku all, on elementide üldtunnustatud aatommassid valesti määratud ja vajavad revideerimist või reast puudub mõni veel avastamata element. Selliste elementide jaoks jättis ta lihtsalt tabelisse vabad kohad. Veel enam, tundes avastamata elementide ülemisi ja alumisi «naabreid», ennustas Mendelejev hämmastava täpsusega nende senitundmatute elementide keemilisi omadusi.

Suure teadlase veendumus leidis hiilgavat kinnitust. 1875. aastal avastati element gallium, 1879. aastal skandium ja 1886. aastal germaanium.

Nõnda sündis D. Mendelejevi kuulus keemiliste elementide perioodilisuse süsteem, täpsemalt perioodilisusseadus, millest juhindudes teadlastel on võimalik orienteeruda «aatomikosmose» kõige varjatumates nurgakestes.

Mõned keemiliste elementide omaduste perioodilisusest lähtuvad, osalt vägagi komplitseeritud kaalutlused viisid teadlasi teisele, veel julgemale mõttele: kas on õige väita, et aatom on materiaalse maailma jagamatu osake, viimane samm teel mikrokosmosse? Mis on elementide aatommasside ja keemiliste omaduste erinevuse aluseks? Kas ei saaks tungida aatomi sisse-
musse ja teha kindlaks, millest ta koosneb? Kas ka aatomi ehitus ei allu suurele perioodilisusseadusele? Nagu arvas ka D. Mendelejev ise, oli «kerge eeldada, et praegu pole veel võimalik tõestada, et lihtainete aatomid on keerukad objektid, mis on moodustunud mõningatest veel väiksematest osakestest». Tema kujutluse järgi «on aatomite maailm samasugune kui taevakehade maailm, selles on omad päikesed, planeedid ja nende kaaslased».

Suur seadus purustas müüri, mis pikka aega oli keemiat füüsikast eraldanud. Läbi laia lõhe anti teatepulk edasi mikro-
maailma uurijaile.

Kerged elemendid. Kergeteks elementideks nimetatakse tinglikult neid keemilisi elemente, mille aatomituumades neutronite arv ei ületa prootonite arvu (elemendid vesinikust hapnikuni).

Küirendid. Aatomi ja selle tuuma esialgseks, pealiskaudseks uurimiseks piisas radioaktiivsete ainete lagunemisel vabanevate alfaosakeste energiast. Varsti aga osutus see täiesti ebapiisa-

vaks. Seepärast tuli konstrueerida spetsiaalsed, väga keerukad seadmed aatomiosakestele suuremate kiiruste andmiseks. Missugused on need seadmed?

Me teame, et kui laetud osake satub elektrivälja, siis kiireneb ta liikumine, magnetväljas aga hakkab ta tiirlema selle välja kujutletavate jõujoonte ümber. Need nähtused eraldi ja koos võetult andsidki idee aatomi-raskesuurtükkide — laetud osakeste kiirendite loomiseks. Esimesel juhul liigub kiirendatav osake sirgjooneliselt. Seda tüüpi kiirendeid nimetatakse joone- ehk lineaarkiirenditeks. Teisel juhul tiirlevad osakesed mööda spiraali. Selliseid kiirendeid nimetatakse tsüklilisteks kiirenditeks.

Joonkiirendi on pikk sirge toru, mis on hoolikalt õhust tühjaks pumbatud. Sellesse torusse on paigutatud suur hulk üksteisele järgnevaid elektroode — metalltorusid, mis on peatorust hästi isoleeritud. Mida kaugemal paikneb elektrood kiirendi algusest, seda pikem ta on. Elektroodidele antakse spetsiaalsest kõrgsagedusgeneraatorist suhteliselt madal vahelduvpinge.

Kui esimene elektrood on mingil hetkel laetud näiteks positiivselt, siis talle järgnev elektrood kannab negatiivset laengut. Edasi tuleb jälle positiivselt laetud elektrood, selle järel negatiivselt laetud elektrood ja nõnda edasi kuni kiirendi lõpuni. Pinge vaheldub pidevalt, nii et positiivsed ja negatiivsed laengud just nagu liiguvad üksteise järel piki kiirendi elektroode.

Kui nüüd kiirendisse «piserdada» eelnevalt kiirendatud laetud osakesi, näiteks elektrone, siis suurendab lähim positiivselt laetud elektrood nende kiirust ja nad läbivad selle elektroodi. Samal hetkel muutuvad elektroodide laengud. Elektrood, mis äsja elektrone külge tõmbas, omandab negatiivse laengu ja hakkab teda läbinud elektrone «tagant tõukama». Järgmine, selleks ajaks positiivse laengu omandanud elektrood aga hakkab lähenevaid elektrone külge tõmbama. Pärast elektronide läbimineku muutub selle elektroodi laeng omakorda negatiivseks ja elektrood tõukab elektrone edasi.

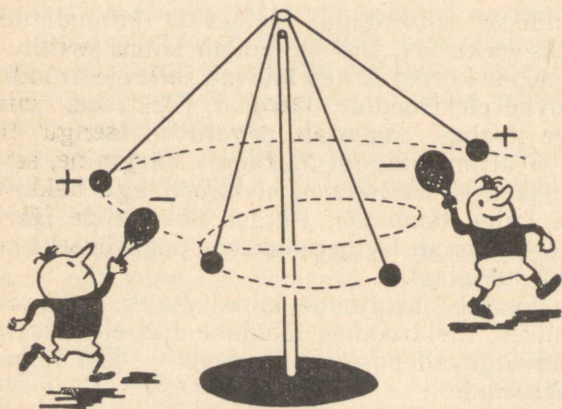
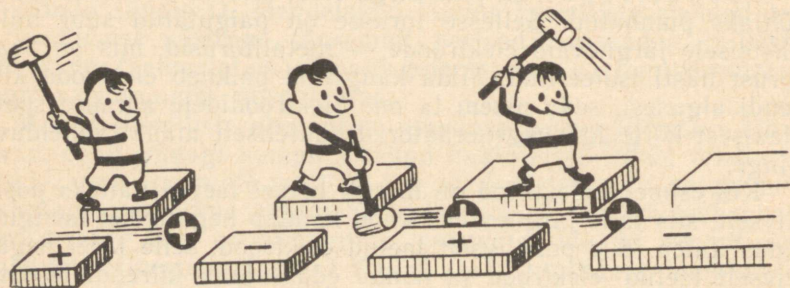
Täpsemalt võttes kasvab elektronide kiirus ainult elektroodidevahelistes vahemikes. Elektroodide läbimise ajal elektrivälja neile ei mõju ja nad liiguvad püsiva kiirusega — just nagu «triivivad» läbi elektroodide.

Mida kaugemale elektronid kiirendis jõuavad, seda suure-

maks muutub nende kiirus. Vastavalt sellele kasvab ka kiirendavate elektroodide pikkus.

Kogu kiirendi läbimisel omandavad elektronid valguse kiirusele lähedase kiiruse ja sadade miljonite või isegi miljardite elektronvoltideni ulatuva energia. Toru lõpus oleva õhukindla akna kaudu suunatakse kiirendatud elektronid spetsiaalsesse seadmesse, kus nendega kiiritatakse uuritavat ainet.

Tsüklilised kiirendid. Sama tulemust on võimalik saavutada ka veidi teistsugusel viisil. Kujutlege, et eespool kirjeldatud pikk toru keeratakse spiraaliks. Et kiirendavad elektroodid üksteise peale ei kuhjaks, võib kõik nad asendada



kahe elektroodiga, mis kokku kujutavad enesest just nagu poolekslõigatud lamedat silindrilist karpi ja ümbritsevad spiraali väljastpoolt. Kogu see süsteem paigutatakse suure magneti pooluste vahele. Laetud osakesed ei liigu sel juhul sirgjooneliselt, vaid vertikaalse magnetvälja mõjul spiraalselt. Järelikult võib spiraaliks keeratud toru asemel olla lihtsalt õhust tühjaks pumbatud lame ümmargune kamber, milles puuduvad igasugused vaheseinad. Kõrgsagedusliku vahelduvpinge võib nüüd anda poolsilindrilistele elektroodidele, mida nimetatakse duantideks. Duant, mis antud hetkel kannab positiivset laengut, tõmbab elektrone endasse, negatiivset laengut kandev duant aga tõukab elektrone endast eemale.

Kiirendatavad laetud osakesed «piserdatakse» kujutletava spiraali keskele. Algul on nende kiiruse kasv võrdlemisi suur, hiljem see aga väheneb ja lõpuks lakkab hoopis, sest mida enam osakeste kiirus läheneb valguse kiirusele, seda raskemaks nad muutuvad ja seda enam hakkavad nad duantidele rakendatud vahelduvpinge märgi muutustest «maha jääma». Piir saabub kusagil 20—30 MeV juures. Selliseid seadmeid nimetatakse tsüklotronideks.

Osakeste edasiseks kiirendamiseks muudetakse elektroodidele rakendatava vahelduvpinge sagedust: mida suuremaks kasvab osakeste kiirus, seda enam aeglustatakse pinge vaheldumist, et pinge märgi muutused «raskenenud» osakestest ette ei jõuaks. Sellistes sünkrotsüklotronideks nimetatavates seadmetes saab osakesi, eriti prootoneid kiirendada juba energiateni 600—800 MeV.

Vastavalt «aatomimürskude» energia suurenemisele selgusid aatomituumade ja neid moodustavate osakeste ehituse üha peenemad detailid ning paljastati uute osakeste tekkimise saladused (tuntud osakeste arv tõusis juba üle kolmekümne). Seejärel hakati ehitama veel võimsamaid kiirendeid — sünkrotrone, ja sünkrofasotrone, milles osakesed ei liigu mööda spiraali, vaid suures rõngakujulises kambris mööda kinnist ringjoont, kiirendus aga antakse neile selle ringjoone ühes või mitmes punktis.

Algul ehitati USA-s seadmed, mis andsid osakestele energia 2,9 ja 6,2 GeV (miljardit elektronvolti), seejärel Dubnas (NSVL) 10 GeV, lõpuks Bernis (Šveits) 25 GeV ja Brookhavenis (USA) 33 GeV. Praegu ehitatakse Nõukogude Liidus maailma võimsaimat kiirendit, millega saavutatakse osakeste

energia 60—70 GeV, * ja kavas on veelgi võimsamate seadmete loomine.

Kiirguse stimuleeriv toime. Valitseb arvamus, et radioaktiivse kiirguse väga väikesed doosid ei häiri rakkude ja organismide elutegevust, vaid vastupidi, tugevdavad nende põhilisi elufunktsioone, kiirendades eriti taimede kasvu. Arvukad uurimised siiski ei kinnita seda seisukohta, vähemalt mitte loomsete rakkude osas. Et taimerakkude puhul on saadud väga vastuolulisi tulemusi, siis uuritakse seda probleemi hoolikalt paljudes maailma teaduslikes asutustes.

Loomorganismi kui terviku elufunktsioonide teatav tugevnemine väikeste kiirgusdooside mõjul, näiteks radoonivannide võtmisel, ei ole tingitud üksikute rakkude funktsioonide tugevnemisest kiirguse otsesel toimel, vaid seda põhjustavad mõningad närvi- ja sisesekretsioonisüsteemis kiirguse mõjul toimuvad funktsionaalsed nihked, mis omakorda mõjustavad rakkude põhi-funktsioone. Organismi rakkude elutegevuse stimulatsioon ei ole siin seega otsene, vaid kaudne.

Kosmiline kiirgus. Pärast seda kui 1895. aastal avastati röntgenikiirgus ja hiljem radioaktiivne kiirgus, tekkis teadlastel küsimus, kas looduses ei leidu veel teisi senitundmatuid kiirgusi, mis võiksid aatomite lõpmatutes sügavustes toimuvatele kõige varjatumatele füüsikalistele protsessidele veelgi rohkem valgust heita.

1912. aastal saatis austria füüsik V. F. Hess registreerimisaparatuuriga varustatud õhupalli 5 km kõrgusele. Kogu teadusemaailma üllatuseks oli kiirgus seal palju tugevam kui Maa pinnal. Edasised arvukad uurimised näitasid, et uus kiirgus tuleb kusagilt väljastpoolt, kosmosest. Oletatava tekkimiskoha järgi hakati seda kiirgust nimetama kosmiliseks kiirguseks.

Juba esimesed katsed kosmilise kiirguse olemust selgitada tõid kaasa palju ootamatusi ja avastusi.

Kõigepealt ilmnes, et tegemist ei ole kiirtega, vaid osake-tega — protonitega, väikese hulga heeliumituumadega (alfa-osakestega) ja väga väheste raskemate aatomituumadega (süsiniku-, lämmastiku-, raua- jt. tuumadega). Edasi selgus, et rõhuval enamikul nendest osakestest on väga suur, mõnel juhul

* See kiirendi (76 GeV) lasti käiku 14. oktoobril 1967. — *Tõlkija.*

lausa kolossaalne energia, mis ulatub miljardite miljardite elektronvoltideni, samal ajal kui kõige kiirematel osakestel, mida saadavad välja radioaktiivsed ained, on energia «vaevalt» 10 MeV. Kosmilisi osakesi registreeriti isegi mitme kilomeetri sügavusel maa ja vee all! Lõpuks — ja see oli kõige tähtsam — õnnestus kindlaks teha, et tõeliselt «kosmilisi» osakesi Maale langevas osakeste voos üldse ei sisaldu. «Kiirte» põhimassi moodustavad arvutud killud, milleks lagunevad õhu aatomituumad, kui neid tabavad primaarsed kosmilised osakesed, mille energia on nii suur, et ka tekkivad killud on suutelised niisama kergesti õhu aatomituumasid purustama. Isegi «kildude killud» purustavad omakorda aatomeid ja tekitavad sel viisil laviini-taoliselt kasvava tuumakatastroofide ahela. Tegemist pole aga ainuüksi kildudega. Sellistel kokkupõrgetel vabanevad tohutud energiahulgad tekitavad terveid perekondi uusi, tavalistes tingimustes mitteeksisteerivaid lühiealisi osakesi, mille lagunemisel tekivad omakorda kõige mitmekesisemate füüsikaliste omaduste ja tunnustega osakesed. Loodus just nagu tekitab miljardikeks sekunditeks omaenese «tehisosakesi» ja kergitab sel viisil tahtmatult katet materia tekkimise kõige varjatumatelt saladustelt (vt. «Elementaarosakesed»).

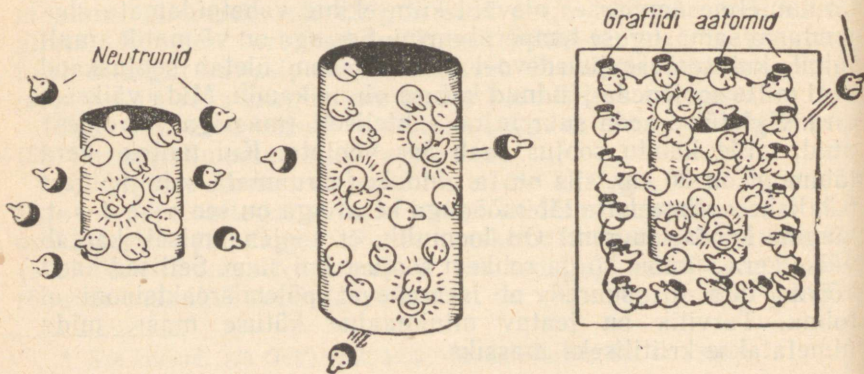
Kriitiline mass. On hästi teada, et väikest kivisöetükki ei ole kuidagi võimalik põlema süüdata ja põlemas hoida, samal ajal kui suur kuhi kivisütt põleb väga hästi. Niisuguse näiliselt arusaamatu vastuolu põhjuseks on see, et kütuse põlemise keemiline ahelreaktsioon, milleks on vajalik temperatuur 500—600 °C, saab iseenesest kulgeda ainult siis, kui eralduv soojus on suuteline naabruses olevaid kütusekihte vahetpidamata soojendama samasuguse temperatuurini. See aga on võimalik ainult juhul, kui soojuse juurdevool põlemistsooni ületab soojuskaod veel mitte soojeneda jõudnud kütuse pinna kaudu. Mida väiksem on kivisöetükk, seda suurem on suhteliselt (massiga võrreldes) pind, mille kaudu soojus saab ära voolata. Kui näiteks kera läbimõõt on 20 cm, siis on ta pindala ja ruumala suhe kõigest 0,3, kahesentimeetrise läbimõõduga keral aga on see suhe 3, s. t. kümme korda suurem! On loomulik, et soojendamisel kaotab väike kera kümme korda rohkem soojust kui suur. Sellised kaod võivad olla nii suured, et isearenevat põlemisreaktsiooni ei toimu. Tarvilik on teatav minimaalne kütuse mass, mida nimetatakse kriitiliseks massiks.

Uraani- või plutooniumituumade iseareneva jagunemis-ahelreaktsiooni alguseks on vajalik, et mingist spontaanselt jagunevast tuumast paiskuks välja näiteks kaks neutronit, mis peavad kumbki lõhustama ühe naabertuumade ja vabastama kokku neli neutronit, viimased peavad omakorda lõhustama neli tuuma ja vabastama 16 neutronit jne.

Neutronid võivad aga ka mitte naabertuumadesse sattuda. 1 g uraani ruumala on $0,053 \text{ cm}^3$ ja selles sisaldub $2,56 \cdot 10^{21}$ aatomit. Kui koondada kokku kõigi nende aatomite tuumad, siis hõivavad need ainult $4,1 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^3$ ehk ühe kümnetiljondiku uraaniterakese koguruumalast. Ruumalade vahetegur on siin umbes samasugune kui ühekuupmillimeetrise kerakese ja Päikesese puhul. Seetõttu on neutronitel vähe võimalusi aatomituumasid tabada ja nad lendavad uraanitükist välja. Mitte mingisugust jagunemis-ahelreaktsiooni ei teki.

Kui aga võtta uraanikera, mille läbimõõt on 25–30 cm ja mass mitukümmend kilogrammi, siis on väga vähe tõenäoline, et neutronid lendavad sellest välja, riivamata teel aatomituumasid.

Uraanitüki võib ka ümbritseda mingi materjaliga, mis hästi peegeldab neutroneid, — grafiidiga, raske veega või mõne teise ainega, mille aatomituumade mass on lähedane neutronite massile. Selline ekraan suunab neutronid tagasi uraanitükki ning annab neile täiendavaid võimalusi uraanituumadega kokkupõrkamiseks ja nende lõhustamiseks.



On veel kolmas võimalus. Tohutu kiirusega liikuvatel tuumaosakestel on osakeste omaduste kõrval ka laineomadused, kusjuures need avalduvad seda tugevamini, mida aeglasemalt osakesed liiguvad. Kõige paradoksaalsem aga on see, et kui osake aeglustub, siis kasvab ta mõjuraadius, s. t. maksimaalne kaugus, millest ta on suuteline oma teele sattuvaid aatomituumasid mõjustama. Osake just nagu suureneb, «valgub laiali». Seal, kus kiire neutron ei riiva läbilennul ühtki uraanituuma, lõhubab väga aeglaselt liikuv, «tursunud» neutron kindlasti mõne tuuma. Niisiis tuleb neutroneid mingisugusel viisil aeglustada.

Nüüd on võimalik teha kokkuvõte. Ahelreaktsiooni kulgemiseks uraanis on vajalik, et uraani mass ületaks teatava kriitilise massi.

Olenevalt konkreetsetest tingimustest võib kriitiline mass olla erinev.

Võib öelda ka nõnda: kriitilisele massile, mille puhul algab jagunemis-ahelreaktsioon, vastab see minimaalne tuumkütuse kogus, milles iga neutronite «põlvkond» tekitab uue, niisama suure või veidi suurema «põlvkonna», s. t. milles väljalennust või lisandites neeldumisest tingitud neutronikaod täielikult kompenseeruvad.

Kunstlik radioaktiivsus, vt. tehisradioaktiivsus.

Kvandid. Kvantide teooria. Olgugi et valguse, röntgeni- ja gammakiirguse käitumine tavalistes tingimustes andis veenvat tunnistust nende kiirguste laineomadustest, olid juba ammu tuntud ka mitmed sellised nähtused, mida laineteooria kuidagi ei võimaldanud seletada. Kergesti olid need nähtused seletatavad ainult siis, kui eeldati, et väga lühikesed elektromagnetlained — vähemalt juhul, kuid nad on vastastikusel mõjustuses ainega — käituvad nagu diskreetsed osakesed, s. t. lõplike mõõtmetega kehad, mis saavad eksisteerida ainult valguse kiirusega liikudes.

1901. aastal esitas tuntud saksa füüsik Max Planck teooria, mille kohaselt aine aatomite füüsikaliste muundumiste ja vastastikuse mõju korral ei eraldu ega neeldu energiat pideva voona, vaid teatavate lõplike väikeste hulkadena ehk portsjonitena. Hiljem hakati neid energiaportsjoneid nimetama kvantideks.

Ka valguse, röntgeni- ja gammakiirguse neeldumine mitmesugustes ainetes, samuti valguse kiirgumine ergastatud aatomitest, näiteks kõrge temperatuurini kuumutatud aine, toimub järelikult täiesti kindlate portsjonitena — kvantidena. Kvandi

energia mõõduks luges Planck suurust, mis on arvatav valemist

$$E = h\nu,$$

kus E — energia, ν — kiirgusallika võnkesagedus, h — Plancki konstant (vt. «Elektromagnetkiirgus»).

Sellest lihtsast avaldisest järeldub, et mida suurem on elektromagnetkiirguse sagedus, seda suuremat energiat kannab selle kiirguse iga kvant.

Energiakvandid neelduvad ja kiirguvad ainult siis, kui neil on teatav kindel, antud protsessile iseloomulik suurus.

Fotoefekt on füüsikaline protsess, mille puhul küllalt suure energiaga valguskvandid löövad metallist välja elektrone.

Selliseid valgusportsjoneid hakati hiljem nimetama footoniteks, et rõhutada valguse korpuskulaarsust.

Kiired neutronid — neutronid, mille energia ületab 1—2 MeV. Selline energia vastab osakeste liikumisele temperatuuril mitu miljardit kraadi. Aeglaste (soojuslike) neutronite energia on 0,03 eV.

Kiirguskeemia — uus keemiaharu, mis uurib mitmesuguste kiirguste mõju ainete keemilistele ja füüsikalistele omadustele. Paljudel juhtudel võimaldab kiirgus teostada keemilisi tootmisprotsesse, mis muidu ei oleks võimalikud. Eriti perspektiivne on kiirguse rakendamine polümeersete materjalide tootmisel, s. t. monomeeride muundamisel polümeerideks ilma tavaliste lisandite (polümerisatsiooni initsiaatorite) kasutamisetä. Kiirguskeemia uurib ka mitmesuguste materjalide vastupidavust kiirguse mõjule, töötab välja meetodeid nende materjalide kaitsmiseks kiirguse vastu, otsib uusi teid ainete sünteesimiseks ja nende omaduste muutmiseks soovitavas suunas.

Kiiritustõbi — haigus, mis tekib ioniseeriva kiirguse (alfa-, beeta- või gammakiirguse, neutronite voo) toimel või radioaktiivsete ainete sattumisel organismi (sisekiiritus). Esmajärjekorras ja kõige suuremal määral saavad seejuures kannatada vereloomeelundid, limaskestad ja sisesekretsiooninäärmed.

Eristatakse kiiritustõve ägedat ja kroonilist vormi. Äge vorm võib tekkida siis, kui organism saab ühekordselt suure doosi väliskiirgust või organismi satub suur hulk radioaktiivset ainet. Eri inimestel, kes on saanud ühesuguse kiirgusdoosi, võib haigus olenevalt organismi vastupanuvõimest kulgeda erinevalt. Kiiritustõve krooniline vorm tekib juhul, kui kiirgus mõjub organismile pikemat aega pidevalt või väikeste doosidena, ja seda iseloomustavad mitmed üksteisest erinevad tunnused. Käesolevaks ajaks on välja töötatud nii ägeda kui ka kroonilise kiiritustõve kompleksse ravimise süsteem, millesse eriti rasketel juhtudel kuulub luuüdi siirdamine.

Kohtuvad kimbud — uus meetod ülisuure, sadade ja tuhandete miljardite elektronvoltideni ulatava energiaga osakeste saamiseks. Meetodi olemus seisab selles, et kui kaks osakeste kimpu, millesse kuuluvate osakeste energia on näiteks 130 MeV, põrkavad teineteisega kokku, siis muundub osa massi energiaks ja tekivad osakesed, mille energia on juba 70 GeV ning mille tekitamiseks tavalisel meetodil oleks vajalik hiiglasuur, vähemalt 500-meetrise läbimõõduga sünkrofotron. Novosibirski tuumafüüsikainstituudis on projek-

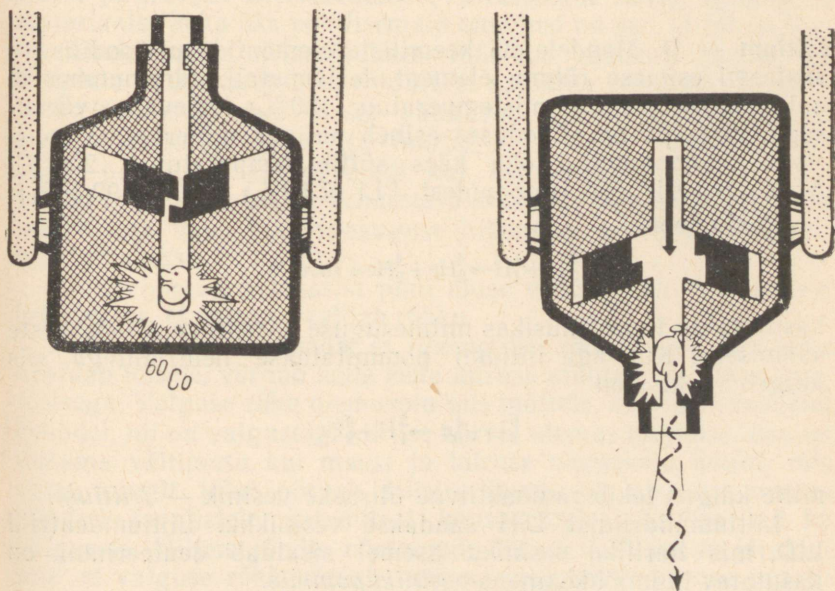
teeritud seade, milles 700-megaelektronvoldise energiaga elektronide ja positronide kimpude kokkupõrkamisel tekivad osakesed, mille energia võrdub kahe tuhande miljardi (kahe triljoni) elektronvoldiga!

Koobalt — raskesti sulav metall, mida laialdaselt kasutatakse metallurgias (kuumakindlate ja magnetiliste teraste ja sulamite saamiseks) ning teistes tööstusharudes. Koobalt on üks väheseid keemilisi elemente, millel on üksainus looduslik isotoop. Selle isotoobi aatomituum koosneb 27 prootonist ja 32 neutronist ($^{59}_{27}\text{Co}$).

Koobalti kiiritamisel tuumareaktoris intensiivse neutronivooga saadakse radioaktiivne tehisisotoop koobalt 60 ($^{60}_{27}\text{Co}$), mille poolestusaeg on 5,25 aastat. Koobalt 60 emiteerib gammakiiri, mille energia on 1,33 ja 1,17 MeV, ning suhteliselt väikese energiaga (0,31 eV) beetaosakesi.

Tehnikas kasutatakse koobaltit 60 suurte metallvalandite ja -toodete läbi- valgustamiseks, keemias uute omadustega plastmasside saamiseks, meditsiinis kõige hirmsama haiguse — vähktõve — ravimiseks, ravimite ja meditsiinilise aparatuuri steriliseerimiseks, põllumajanduses võitluseks kartulite idanemise vastu, kahjurite tõrjeks, taimede kasvu stimuleerimiseks ja muuks otstarbeks.

Koobalkahur. Et tõkestada ja ohutuks teha radioaktiivsest koobaltist 60 lähtuvat gammakiirgust (mille energia on 1,33 MeV) ning ühtlasi kasutada seda kiirgust teaduslikeks, meditsiinilisteks ja tehnilisteks otstarveteks, tuleb nimetatud elementi hoida plii- või teraskonteineris. Sellist konteinerit koos kontrollmehhanismidega, juhtimisseadistega ja seadistega kitsa gammakiirte kimbu väljalaskmiseks nimetatakse koobalkahuriks (vt. joonist).



Kristall-loendurid — radioaktiivse kiirguse loendurid, mille töö põhineb mõnede ainete (teemandi, hõbekloriidi, talliumkloriidi jt.) kristallide elektri-juhtivuse muutumisel kiirete ioniseerivate laetud osakeste ja gammakiirte mõjul.

Kuumkamber, kuumlaboratoorium — spetsiaalselt sisustatud laboratoorium töötamiseks tugevasti radioaktiivsete ainetega.

Kõik tööd tehakse sellistes kambrites ja suurtes laboratooriumides automaatselt või kaugjuhitavate manipulaatorite abil, kusjuures manipulaatoreid juhtivaid operaatoreid varjab läbiva kiirguse eest mitme meetri paksune bioloogiline kaitse. Laboratoorium on ka varustatud vahenditega, mis väldivad inimeste kasutuses olevate ruumide saastumist radioaktiivse tolmu, aerosoolide ja aurudega.

Kürii (Ci) — radioaktiivsuse mõõtühik. Radioaktiivse aine koguse radioaktiivsus on 1 Ci, kui selles ainekoguses toimub 1 sekundi jooksul 37 miljardit lagunemist (1 g raadiumi radioaktiivsus). Praktikas kasutatakse väiksemaid ühikuid: milliküriid (1 mCi=0,001 Ci) ja mikroküriid (1 μ Ci=0,000 001 Ci).

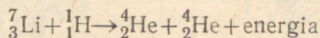


PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

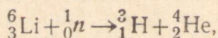
Liitium

Liitium — D. Mendelejevi keemiliste elementide perioodilisuse süsteemi esimese rühma element, leelismetall. Järjenumber 3, aatommass 6,94, sulamistemperatuur 180 °C; hõbevalge värvusega, väga pehme. Looduses esineb paljude mineraalide koostises. Soojendamisel õhu käes süttib temperatuuril 200 °C. Koosneb püsivatest isotoopidest ${}^6_3\text{Li}$ (7,52%) ja ${}^7_3\text{Li}$ (92,48%).

Reaktsiooni



kasutatakse tuumafüüsikas mitmesuguse energiaga alfaosakeste saamiseks. Kui aga liitiumi pommitatakse neutronitega, siis kulgeb reaktsioon



mille käigus tekib radioaktiivne üliraske vesinik — *tritium*.

Liitiumhüdriidist LiH saadakse vesinikku. Liitiumdeutriid LiD, mis hariliku vesiniku asemel sisaldab deuteriumi, on kasutatav tuumlõhkeainena *vesinikupommis*.

Liikumismass. Relatiivsusteooria järgi on keha mass kõige väiksem siis, kui keha seisab paigal (seisumass). Liikuva keha mass on sellest suurem ja oleneb liikumiskiirusest. Tavaliste, isegi kosmilise kiirusega liikuvate kehade puhul on massi selline juurdekasv nii väike, et seda ei ole mingisuguste olemasolevate vahenditega võimalik mõõta. Valguse kiirusele lähedaste kiirustega liikuvate aatomiosakeste massi juurdekasv aga on juba märgatav ja mõõdetav. Kui näiteks elektroni energia on 1000 eV ja ta liigub kiirusega 18720 km/s, siis ületab ta mass seisumassi 1,002 korda. Kui energia on 1 MeV ja kiirus 282 100 km/s, on mass 2,957 korda, energia 10 MeV ja kiiruse ~ 299 400 km/s korral aga juba 20,58 korda seisumassist suurem.

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

M

Massi ja energia ekvivalentsus (vastastikune seos)

Massidefekt

Mesonid

Märgitud aatomid

Mössbaueri efekt

Massi ja energia ekvivalentsus (vastastikune seos). Igasuguse materiaalse keha üks põhilisemaid omadusi on see, et tal on teatav kindel mass. Klassikalises füüsikas mõisteti massi all mateeria hulka. Seejuures eeldati, et aatomite mateeria on absoluutselt homogeenne ja sel puuduvad igasugused omadused peale «läbitungimatuse» ja inertsi, s. t. võime välisjõududele vastu panna. Massi vaadeldi kui aatomitest koosneva keha inertsi mõõtu. Arvati, et keha mass ei olene mingil määral tema liikumisest, vaid jääb igasuguse liikumise puhul absoluutselt muutumatuks.

Uuele õpetusele massist pani aluse vene füüsik P. Lebedev, kes tõestas, et valgus avaldab rõhku.

Mehaanikast on teada, et igasugune rõhk, mida üks keha avaldab teisele, võrdub selle keha kiiruse muutuse ja massi korrutisega. Valguse rõhu olemasolu viis mõttele, et nagu tavalistel kehadel, nii on valguselgi kiiruse kõrval olemas ka mass. See on niisama vältimatu kui massi ja kiiruse olemasolu kuulil, mis vastu mingit tõket põrkab. Niisiis ilmnes, et mass on omane niihästi tavalistele, aatomitest koosnevatele kehadele kui ka valgusele. Hiljem jõudis nõukogude füüsik S. Vavilov järeldusele, et valguse rõhk võrdub valguse energia ja kiiruse jagati-

sega. Kui valguse energiat tähistame tähega E , valguse massi tähega m ja valguse kiirust tähega c , siis saame avaldise

$$\frac{E}{c} = mc \text{ ehk } E = mc^2.$$

Einsteini relatiivsusteooria näitas, et see avaldis kehtib mitte üksnes valguse energia, vaid ka igasuguse teise energia kohta. Seepärast võib E ülaltoodud valemis lugeda mistahes energialiigiks, m mistahes materiaalse objekti, sealhulgas ka valguse massiks ja c valguse kiiruseks. Seda valemit hakati ebaõnnestunult nimetama «massi ja energia ekvivalentsuse valemiks» ning kodanlikud idealistlikud filosoofid hakkasid seda varsti tõlgendada kui tõendit, et materia võib muunduda energiaks ja vastupidi. Selline tõlgendus aga ei vasta seaduse tõelisele sisule. Massi ja energia vastastikune seos, mida see kuulsaks saanud valem peegeldab, ei tähenda sugugi, et mass ja energia on ekvivalentsed ja võivad teineteiseks muunduda. Õigem oleks seda nimetada «massi ja energia vastastikuse seose valemiks».

Kõnesolev valem ei ütle seda, et massi m on võimalik muundada energiaks E , vaid ainult seda, et objektile, mille mass on m , on ühtlasi ka energia E .

Massi ja energia ekvivalentsuse printsiip näitab täpselt, missugune energiahulk vastab antud massile. Selle energiahulga arvutamiseks piisab keha massi korrutamisest valguse kiiruse ruuduga. Just siin põrkasid teadlased esmakordselt kokku vapustava ja kujutlusvõimet tiivustava faktiga, et kehasse, mille mass on üks kilogramm, on koondunud energia, mida oleks võimalik saada umbes kolme miljoni tonni kivisöe põletamisel! On küllalt, kui öelda, et termotuumareaktsioon, mis päästab inimkonna igaveseks ajaks murest energiaallikate pärast, võimaldab vabastada ainult 1% aines peituvast energiast, uraani või plutooniumi aatomituumade jagunemine 0,1%, tavaline põlemisreaktsioon aga kõigest 0,000 000 1%!

Peale selle tuleneb relatiivsusteooriast, et keha massi ja liikumiskiiruse vahel kehtib seos

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

kus m_0 on keha või osakese mass paigalolekus (seisumass), m sama keha mass, kui see keha liigub kiirusega v , ja c valguse

kiirus. Et juurealune avaldis $1 - \frac{v^2}{c^2}$ on ühest väiksem, siis peab liikuva keha mass m alati olema suurem paigalseisva keha massist m_0 . Niisiis näitab see valem, et mass ei ole konstantne, vaid kasvab keha kiiruse suurenemisel. Kiiruse suuremine aga tähendab ühtlasi keha kineetilise energia suurenemist. Ülaltoodud valemile vastavat massi kasvu olenevalt keha kiirusest võib järelikult mõista kui massi olenevust keha kineetilisest energiast. Mida suurem on keha kineetiline energia, seda suurem on ka ta mass. Seda olenevust silmas pidades võime öelda, et mass on kehas sisalduva energia mõõt. Massi ja energia seost väljendab valem $E=mc^2$. Seejuures tuleb eristada paigalseisva osakese massi (seisu- ehk omamassi) ja liikuva osakese massi (liikumismassi).

Valguskvantidel ehk footonitel näiteks puudub üldse seisumass. Nad erinevad protonitest, elektronidest, positronidest ja teistest taolistest elementaarosakestest veel selle poolest, et nad ei kanna elektrilaengut ega saa liikuda valguse kiirusest erineva kiirusega.

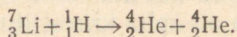
Osakesi (või osakestest koosnevaid kehi), millel erinevalt footonitest on olemas seisumass, nimetatakse aineks. Materiaalseid objekte, millel seisumass puudub (footoneid), üldiselt aineks ei loeta. Nad on aga niisama materiaalsed kui ainegi.

Kui konkreetset juhul on tegemist mingi tuumareaktsiooniga, näiteks uraani- või plutooniumituuma jagunemisega neutroni toimel, siis ei muutu mingil määral materia summaarne hulk looduses.

Et jaguneva tuuma osakesed ja jagunemist põhjustav neutron liiguvad ning jagunemisel tekkivate ebavõrdsetel kildudel ja vabanevatel neutronitel on suuremad kiirused, siis on sellest sündmusest osavõtivate osakeste energiatega ja masside arvutamise valemid suhteliselt keerukad. Lõpptulemus aga on ikka sama — kõigi energiatega ja masside summa enne reaktsiooni võrdub täpselt kõigi energiatega ja masside summaga pärast reaktsiooni. Ka elektroni ja positroni annihilatsiooni — «hävimise» puhul on võimalik analoogiliselt viisil veenduda, et tekkiva footoni või tekkivate footonite summaarne energia ja mass on täpselt võrdne «hävinud» elektroni ja positroni summaarse energia ja massiga.

Mass ja energia on niisiis ainult materia kaks omadust, mis ilmnevad materia teatavate olekute puhul.

Massidefekt. Lootes avastada midagi uut ja huvitavat, pommitasid inglise füüsikud Cockcroft ja Walton 1932. aastal liitiumi isotoopi ${}^7_3\text{Li}$ kiirendatud prootonitega. See uus ei lasknud ennast kaua oodata. Wilsoni kambris tehtud ülesvõtted näitasid, et mõned liitiumi 7 aatomituumad muundusid prootonite toimel kaheks alfaosakeseks, s. t. kaheks heeliumi 4 aatomituumaks. Seda sündmust võib kirjeldada järgmiselt:



Tulemus on kahtlemata hämmastav! Tõeliselt aga vapustas teadlasi hoopis miski muu. Kui võeti pliiats ja püüti koostada selle esimesel pilgul väga lihtsana näiva tuumareaktsiooni massi- ja energiabilanssi, siis ilmnesid täiesti arusaamatud «ülejäädid» ja «puudujäädid». Lähteosakeste kogumass on $7,0182$ (liitiumi 7 tuum) + $1,0081$ (prooton) = $8,0263$ aatommassiühikut, tekkiva kahe alfaosakese kogumass aga kõigest $2 \cdot 4,004 = 8,008$ aatommassiühikut. $8,0263 - 8,008 = 0,0183$ aatommassiühikut kaob teadmata kuhu!

Uhtlasi ilmnes, et reaktsiooni tagajärjel laialilendavate alfaosakeste liikumisenergia on tunduvalt suurem liitiumi 7 tuuma jagunemist põhjustava prootoni energiast.

Kas massi ja energia jäävuse seadused kaotavad siin kehtivuse?

Ei ühte ega teist. Seda, et just nõnda peabki toimuma, ennustas teoreetiliselt juba 1905. aastal meie aja suurim füüsik Albert Einstein, kelle relatiivsusteooria kuulub tänapäeva kõige julgema ja kaugelenägelikumate teaduslike ideede hulka.

Üks olulisemaid relatiivsusteooriast tulenevaid järeldusi oli see, et mitte mingisugune keha ei saa tühjuses liikuda valguse kiirusega ($300\,000$ km/s) või sellest kiiremini. See oli vastuolus seni ainuõigeks peetud Newtoni mehaanikaseadusega, mille kohaselt keha mass ei olene kiirusest ning igasugune täiendav jõud, mis mõjub liikuvale kehale, peab proportsionaalselt ja järelikult piiramatult selle keha kiirust suurendama. Relatiivsusteooria järgi aga tuleb eristada seisumassi m_0 ja massi m , mis oleneb antud keha kiirusest. Väikeste kiiruste puhul on massid m_0 ja m praktiliselt võrdsed; kui aga keha kiirus muutub võrreldavaks valguse kiirusega, siis suureneb mass m väga kiiresti ja läheneb lõpmatusale. Kiirusel $282\,100$ km/s näiteks elektroni mass peaaegu kolmekordistub; kiirusel $298\,500$ km/s

suureneb see 10,79 korda, kiirusel 299 400 km/s juba 20,58 korda jne. Siit tuleneb ka teine järeldus: igale kehale on võimalik anda kiirust, mis on kuitahes lähedane valguse kiirusele, kuid mitte mingil juhul ei võrdu sellega.

Tuginedes vene füüsiku P. Lebedevi poolt avastatud valguse rõhu, s. t. valguslainete massi olemasolule, eksperimentaalselt kindlakstehtud faktile, et valguse kiirusele lähedastel kiirustel elektronid raskenevad, ja mitmetele teistele avastustele, tuletas Einstein oma kuulsa, palju vaidlusi ja väärtõlgendusi põhjustanud valemi, mis seob teineteisega massi kui inertsiooni mõõtu ja energiat kui materiaali liikumise mõõtu:

$$E=mc^2,$$

s. t. keha energia võrdub selle keha massi ja valguse kiiruse ruudu korrutisega.

Järelikult on igal ainel teatav hulk energiat, mis on rangelt võrdeline selle aine massiga, ja vastupidi — igale energiat omavale materiaalsele kehale vastab rangelt kindel mass. Mida suurem on keha mass, seda rohkem peitub selles kehas energiat. Suurendades mingi keha energiat näiteks soojendamise või valguse kiirusele lähedase kiiruse andmise teel, suurendame ühtlasi selle keha massi. Kui aine ergastatud aatom emiteerib valguskvandi (footoni), siis kaotab ta koos energiaga teatava massi.

Kogu oma energiaküllusest hoolimata annab aatom energiat ära väga ihnsalt. Tuumas osakesi siduvate ja tuuma ümberkujunemist takistavate jõudude ületamiseks on kõigepealt tarvis kulutada teatav hulk energiat. Alles pärast seda vabaneb jagunevast või ümberkujunevast tuumast energia, mis vastab massi vähenemisele. Tuuma jagunemisel või ümberkujunemisel vabanev energia ei ole aga alati suurem tuuma lõhustamiseks või ümberkujundamiseks kulutatavast energiast. Järelikult on energia saamiseks kasulik lõhustada või ümber kujundada ainult nende elementide aatomituumasid, mille puhul «kulud» on «tuludest» väiksemad. Üldiselt on sellised kõige kergemate ja kõige raskemate elementide aatomituumad.

Heeliumi aatomituum (alfaosake) koosneb teatavasti kahest prootonist ja kahest neutronist. Et sellist tuuma elementaarosakesteks lagundada, tuleb ületada neid osakesi koos hoidvad tohutud tõmbejõud, mille mõjuraadius, nagu on selgunud, ei ületa tuuma kahekordset läbimõõtu.

Seda on võimalik saavutada, kui heeliumituuma tabada mingisuguse raske osakesega, millele on antud suur kiirus. Katses, mille inglise teadlased tegid liitiumiga 7, oli selliseks osakeseks prooton. Selles faasis toimub järelikult energia neeldumine. Niipea aga, kui lagundatava tuuma osakesed eemalduvad üksteisest kaugusse, mis ületab tuuma kahekordse läbimõõdu, lakkab tuumajõudude mõju ning tegevusse astuvad ühesuguse laenguga prootonite vahelised kolossaalsed tõukejõud.

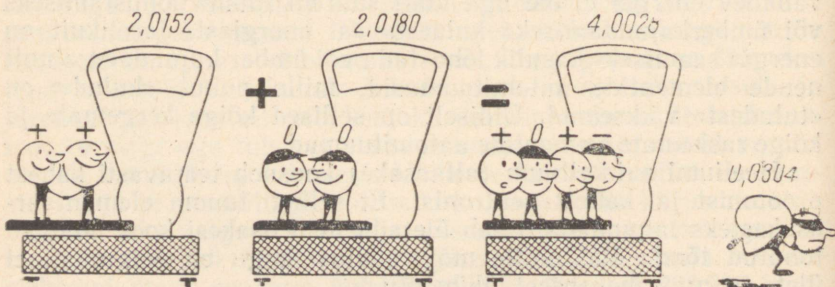
Tohutu kiirusega laiali lendavate osakeste energia on tunduvalt suurem tuuma lagundamiseks kulutatud energiast.

Aga mis juhtub siis, kui teha katset neli vesinikutuuma (prootonit) üheks heeliumituumaks liita?

Loogiline on eeldada, et algul tuleb kulutada suur hulk energiat nelja positiivselt laetud prootoni vaheliste üha kasvavate tõukejõudude ületamiseks. Veel suurem, tõeliselt tohutu energiahulk aga vabaneb siis, kui üksteisele lähenemisel tuumajõudude mõjusfääri jõudnud prootonid liituvad uueks tuumaks. Kaks prootonit muunduvad seejuures neutroniteks, paisates välja kaks positroni ja kaks neutriinot. Kokkuvõttes vabaneb teatav hulk energiat ja väheneb mass. Liituvate osakeste kogumassi ja nende liitumisel moodustuva raskema elemendi aatomituuma massi vahet nimetatakse massidefektiks.

Nüüd võime asuda arvutuste juurde.

Reaktsioonist osavõtvate nukleonide masside summa on $2 \cdot 1,0076$ (kaks prootonit) + $2 \cdot 1,0090$ (kaks neutronit) = $4,0332$ aatommassiühikut. Samasugustest osakestest moodustunud heeliumituuma mass aga on $4,0028$ aatommassiühikut



ja vahe seega 0,0304 aatommassiühikut. Oma näilisest väiksesest hoolimata on selline massivahe ekvivalentne 28,8-megaelektronvoldise energiaga!

Massidefekt ei esine ainuüksi prootonite ja neutronite liitumisel aatomituumadeks, vaid ka raskete aatomituumade jagunemisel kaheks kergemaks tuumaks.

Kuid ...mitte kõigi elementide puhul ei ületa aatomituumade moodustumisel või jagunemisel vabanev energia kulutatavat energiat. Sellised on ainult väga vähesed elemendid: kõige kergemad (vesinik, deuteerium, tritium, heelium, liitium) ja kõige raskemad (uraan, plutoonium). Kõik Mendelejevi tabeli keskosas paiknevad elemendid on selles suhtes täiesti kasutatud. Tee ääres lebav munakivi, rauatükk, hõbe, kuld, elavhõbe ja teised ained jäävad seepärast alati samasuguseks, nagu nad on praegu. Just sellepärast ei detoneeri aatomi- või vesinikupommi plahvatus kõiki meid ümbritsevaid aineid: vett, õhku, mulda, kogu planeeti.

Kergete elementide liitumisel vabaneb energia ainult siis, kui vastavasse tuumareaktsiooni õnnestub tõmmata kõiki juuresolevaid aatomeid või tunduvat osa nendest. Ent isegi kõige võimsamatest teadlaste käsutuses olevatest rasketest «mürskudest» — kiirendatud alfaosakestest, deutronitest ja prootonitest — tabab märki vaevalt üks kümnemiljondik. Kõik teised lendavad märgist mööda. Seepärast otsivad tuhanded teadlased kõigis maailma riikides teid ja vahendeid aatomite sisemuses kulgevate füüsikaliste protsesside mõjustamiseks, et nende protsesside juhtimise teel vabastada aatomites peituvat energiat (vt. «Termotuumareaktsioon»).

Mesonid — elementaarosakesed, mille mass on suurem elektroni massist, kuid väiksem prootoni massist. Mesoneid leidub kosmilises kiirguses ning nad tekivad suurte energiatega kiirendatud osakeste vastastikusel toimel. On olemas positiivseid, negatiivseid ja ka neutraalseid mesoneid. Absoluutväärtuselt on positiivsete ja negatiivsete mesonite laeng täpselt võrdne elektroni elementaarlaenguga. Mesonid on äärmiselt ebapüsivad: nende iga on 10^{-6} — 10^{-14} sekundi piirides.

Tuntud on järgmised mesonite liigid: positiivsed ja negatiivsed müümesonid, mille mass võrdub 207 elektroni massiga; positiivsed, negatiivsed ja neutraalsed piimesonid, mille mass ületab elektroni massi 273 korda (neutraalsete piimesonite mass

on siiski veidi väiksem); positiivsed, negatiivsed ja neutraalsed kaamesonid, mis massi poolest ületavad elektroni 966,5 korda.

Nagu arvatakse, püsivad nukleonid aatomituumas tänu sellele, et nad pidevalt vahetavad üksteisega piimesoneid. Sellisest vahetusest ongi tingitud nõndanimetatud tuumajõud, mis annavad aatomituumale nii hämmastava püsivuse.

Märgitud aatomid. Praktikas esineb igal sammul sadu ja tuhandeid juhtumeid, mil mingisuguse teadusliku või tehnilise probleemi lahendamine oleneb täielikult sellest, kas me teame või ei tea, kus asetseb, kuhu ja kuidas satub või kuhu kaob üks või teine aine. Metallurgil näiteks on tähtis teada, miks isegi väike hulk väävlit teeb metalli hapraks. Selle teadasaamiseks lisati metallile väävli radioaktiivset isotoopi. Nimetatud isotoobi aatomitest, nn. märgitud aatomitest väljuvate beetaosakeste toimel saadud fotode uurimisel ilmnes, et väävel paikneb peamiselt metallikristallide piiretel ja see vähendabki järsult metalli tugevust. Bioloogil on äärmiselt tähtis jälgida toitainete teekonda elusorganismis, nende ainete omastamise ülipeeni protsesse ning ravimite ja muude preparaaside mõju organismile. Uuritavate nähtuste pilt saab palju selgemaks, kui nende ainete koostisse kuuluvatele aatomitele lisatakse väike hulk täpselt samasuguseid, kuid radioaktiivseid aatomeid. Nende aatomite liikumist organismis jälgitakse väljastpoolt kõige mitmekesisemate loendurite ja muude vahendite abil.

Radioaktiivsete isotoopide lisamine sulamitele, millest valmistatakse löikeinstrumente ja suurtel koormustel töötavaid masinaosi, võimaldab suhteliselt kergesti kindlaks teha nende kulumise astet ja laadi, kulumise olenevust sulami koostisest, määride kvaliteedist, temperatuurist, kiirusest ja teistest töötingimustest.

Keemikul on väga oluline täpselt teada isegi seda, kuidas ühed või teised ained käituvad hästi uuritud keemilistes reaktsioonides, kõnelemata juba kõige keerukamatest või tavalistel meetoditel mitteuuritavatest reaktsioonidest. Et kiirguse intensiivsus oleneb kiirgusallika ja loenduri vahel oleva aine paksusest, tihedusest, hulgast ja neelamisvõimest, siis on kerge konstrueerida mitmesuguseid seadmeid ja aparate lehtmaterjali, paberilehtede ja igasuguste teiste lehtmaterjalide paksuse võrdlemiseks etteantud etaloniga. Veel enam, kui loenduri väljund ühendatakse näiteks seadisega, mis reguleerib valtsidevahelist

kaugust, millest oleneb lehe või lindi paksus, siis on võimalik teha nii, et masin ise automaatselt säilitab toote vajaliku paksuse. Niisama edukalt saab kontrollida tükktoodete kvaliteeti ja mõõtmeid, lahuste tihedust, vedelike või puistainete voolamiskiirust torudes ja palju muud selletaolist.

Radioaktiivsed isotoobid asendavad edukalt võimsaid röntgeniaparate. Masinaehituses ja metallurgias on juba igapäevaseks saanud suurte metallvalandite ja -toodete läbivalgustamine gammakiirtega, et nendes avastada varjatud defekte: õhumulle, pragusid, võõrkehi ja muud selletaolist. Vastavad seadmed on sama võimsusega röntgeniaparatuuridest palju lihtsamad, kergemini käsitsetavad ja odavamad ning võimaldavad läbi valgustada kuni 250 mm paksust terast.

Toodud näited (näidete toomist aga võib lõpmatuseni jätkata) iseloomustavad rohkem kui küllaldaselt radioaktiivsete isotoopide märgitud aatomite suurt tähtsust.

Mössbaueri efekt. On teada, et kui aatomituum neelab teatava kindla energiakoguse, siis satub ta ergastusseisundisse — deformeerub. Mõne aja pärast väljuvad temast suure energiaga footonid (gammakvandid), millel on üheaegselt nii osakeste kui ka lainete omadused (vt. «Kvandid. Kvantide teooria», «Footon»). Neid laineid püüti juba ammu kasutada aja mõõtmiseks, sest nende võnkesagedus on tunduvalt püsivam iga-aastaste teiste võnkumiste sagedusest. Ei ole isegi võimalik kujutleda mingisugust muud kella, mille täpsus oleks 1 sekund 100 000 aasta kohta.

Tuumaprotsesside teooriast järeldub, et antud võnkesagedusega gammakvantidele reageerivateks vastuvõtjateks saavad olla ainult samasuguste aatomite tuumad. Gammakvante neelates siirduvad need aatomituumad ergastusseisundisse ja sekundi murdosade möödumisel emiteerivad omakorda jällegi samasuguse sagedusega gammakvante.

Lühemalt: kui üks aatomituum kiirgab footoneid (gammakvante) ja teine neelab neid, siis näitavad mõlemad «tuumakellad» (kiirgav ja neelav tuum) ühesugust aega, sest nende sagedused on täpselt võrdsed. Niipea kui need sagedused teineteisest lahku lähevad, kaob resonants. See näitab, et aja kulg on kiirgaja ja neelaja asukohas erinev.

Pikka aega ei õnnestunud sellist (resonantsilist) neeldumist täheldada, sest gammakiirguse võnkesagedus on väga suur ja

kiirguse kestus väga väike. Alles 1958. aastal avastas saksa füüsik R. Mössbauer raua radioaktiivse ja mitteradioaktiivse isotoobi aatomite vahelise resonantsi ning rakendas seda kaduvväikeste ajavahemike mõõtmiseks. Enne Mössbauerit ei täheldatud seda nähtust sellepärast, et kiirgajast väljuvad gammakvandid ei olnud enamikul juhtudel suutelised neelajat ergastama, sest kiirgudes kaotasid nad osa oma energiast ja nende sagedus vähenes. Miks?

Kasutame teatavat analoogiat. Kui mürsk-suurtükist välja lendab, siis toimub tagasilöökk, s. t. mürsk annab osa saadud energiast suurtükile. Analooiliselt annab ka aatomituumast väljuv gammakvant tuumale tagasilöögiimpulsi ja kaotab seejuures osa saadud kineetilisest energiast, mistõttu ta sagedus väheneb ja vastuvõtja ei ole enam suuteline teda neelama (resonantsi kadumise tõttu).

Olukorda saab parandada, kui kiirgaja ja neelaja panna liikuma teineteisele vastu sellise kiirusega, et gammakvandi sagedus (ja järelikult ka energia) suureneb resonantssageduseni. See on nõndanimetatud Doppleri efekt, mis ilmneb näiteks rongi läbisõidul jaamast. Kui rong läheneb vaatlejale, siis suureneb märgatavalt ta vile võnkesagedus (heli kõrgus), rongi eemaldumisel aga sagedus väheneb (heli madaldub). Gammakvantide puhul võrdub sageduse muutus kvandi kiiruse ja valguse kiiruse (300 000 km/s) suhtega. Seepärast on kvandi sageduse küllaldaseks suurendamiseks vajalik väga suur kiirus.

Mürsu energiakadu on aga tunduvalt väiksem, kui suurtükk on tulistamise ajal jäigalt kinnitatud suure massiga alusele.

Mössbaueri efektiks nimetatud avastus seisabki selles, et tagasilöögienergiat, mille kiirgaja saab gammakvanti emiteerides, on võimalik järsult vähendada, kui kiirgav aatomituum siduda mingi suure massiga, näiteks «sisestada» ta mingisse kristalli. Sel juhul jaotub tagasilöögienergia paljude kristalli aatomite vahel ega põhjusta nende olulisi nihkeid, mistõttu emiteeritava gammakvandi sagedus vastab neelaja resonantssagedusele. Analooiliselt saab kinnistada ka neelajat. Viimast väljuva gammakvandi võib siis neelata mingi teine tuum või esialgne kiirgaja.

Kõige tähtsam on siiski see, et gammakvantide resonantsiline neeldumine võimaldab eespool nimetatud Doppleri efektist põhjustatud sageduse muutusi täheldada juba kiirustel, mis ei

ületa tuhandikke millimeetreid sekundis! See avab täiesti ootamatud võimalused niisuguste nähtuste jälgimiseks, mis varem näisid eksperimentaalselt saavutamatud olevat. Einstein näiteks väitis juba 1911. aastal oma relatiivsusteooriast lähtudes, et raskusjõud põhjustab kiirguva valguse sageduse kaduvväikesi muutusi. Selle väite kontrollimiseks aga olid vajalikud astronoomilised kaugused. Mössbaueri efekt võimaldas teadlastel seda katset teostada kiirgajaga, mis oli maapinnast tõstetud ainult 21 meetri kõrgusele.

Maa kiirgusvööndid (Van Allen—Vernovi vööndid). Pärast seda kui avastati *kosmiline kiirgus* — väljastpoolt Maale langev osakeste voog —, olenesid edusammud selles uues ja erakordselt tähtsas füüsikaharus peaaegu täielikult kõrgusest, millesse õnnestus tõsta loendureid ja muid keerukaid aparate. Selleks otstarbeks kasutati edukalt kõrgmäestiku-observatooriume, õhupalle, sondpalle ja stratostaate. Kuid ka suurimad saavutatud kõrgused (20—80 km) ei viinud aparate välja suhteliselt tihedatest atmosfäärikihtidest, see aga omakorda vähendas tugevasti võimalust eraldada mitmekesistest registreeritavatest osakestest kõige tähtsamaid — primaarseid kosmilisi osakesi.

Seepärast pole imestada, et esimeste Maa atmosfäärist väljunud ja kosmilise ruumi tühjusse siirdunud raketite kasulikust koormast moodustasid suure osa kõikvõimalikud seadmed laetud osakeste uurimiseks. Juba esimesed raadio teel Maale saabunud signaalid aparaatide näitude kohta hämmastasid teadlasi. Teatavates kõrgustes sattusid kosmoselaboratooriumid piirkondadesse, kus oli väga palju energiarikkaid laetud osakesi, mis järsult erinesid nii primaarse kui ka sekundaarse kosmilise kiirguse senitäheldatud komponentidest. Mõnda aega tekitas imestust asjaolu, et andmed, mida selles küsimuses saadi nii Nõukogude kui ka Ameerika tehiskaaslaste abil, olid väga erinevad (täppisteadustes on sellised juhtumid võrdlemisi haruldased). Varsti see probleem siiski lahenes. Nõukogude teadlane Vernov ja ameerika füüsik Van Allen tegid peaaegu üheaegselt kindlaks, et Maad ümbritseb ekvaatori tasandis kaks, viimastel andmetel isegi kolm suhteliselt selgepiirilist vööndit, milles on palju mitmesuguse laengu, energia ja massiga osakesi. Osakeste esinemissagedus ei ole vööndite piirides ühesugune ja Maa pooluste ümbruses on kosmiline ruum nendest praktiliselt vaba. Esimeste raketite ja tehiskaaslaste abil saadud andmete töötlemisel selgus, et tegemist on Maa magnetvälja sattunud laetud osakestega.

On teada, et kui mingisugune laetud osake satub magnetvälja, siis hakkab ta ümber selle välja jõujoone tiirlema ja samal ajal piki jõujoont edasi liikuma. Tekkiva spiraali keerdude suurus oleneb osakese algkiirusest, massist, laengust ja magnetvälja tugevusest kohas, kus osake magnetvälja siseneb. Maa magnetväli ei ole homogeenne. Pooluste kohal on ta «tihedam». Piki selle välja jõujoont spiraalselt pooluse suunas liikuvale osakesele mõjub seetõttu üha suurem takistus, lõpuks osake peatub, hakkab uuesti liikuma ekvaatori poole ja sealt edasi teisele poolusele, kust jälle algab vastassuunaline liikumine. Osake viibib just nagu hiiglaslikus «magnetlõksus».

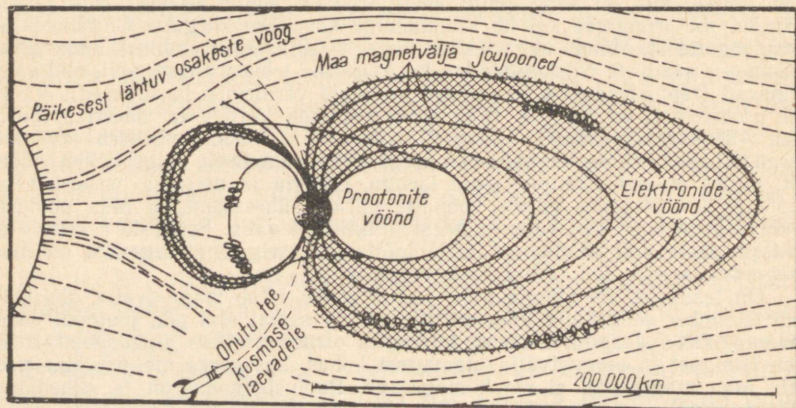
Esimene selline vöönd algab Maa läänepoolkeral umbes 500 km ja idapoolkeral 1500 km kõrguselt. Suurim on osakeste kontsentratsioon kahe-kolme

tuhande kilomeetri kõrgusel. Võõndi üläpiir paikneb kolme-nelja tuhande kilomeetri kõrgusel. Teine võõnd ulatub 10 000—11 000 kilomeetrist 40 000—60 000 kilomeetriteni, kusjuures osakeste kontsentratsioon on maksimaalne 20 000 km kõrgusel. Kolmas võõnd algab 60 000—75 000 km kõrguselt.

Võõndite piirid on esialgu kindlaks tehtud üksnes ligikaudselt ja näivad teatavas ulatuses perioodiliselt muutuvat. Saates süstemaatiliselt välja arvukaid mõõteaparatuuriiga varustatud tehiskaaslasi, püüavad teadlased selle muutumise seaduspärasusi selgitada.*

Esimese, Maale kõige lähemal paikneva võõndi moodustavad positiivselt laetud prootonid, mille energia on 100 MeV suurusjärgus. Neid osakesi suudab haarata ja kinni hoida ainult Maa magnetvälja kõige tihedam osa. Teise võõndi moodustavad peamiselt elektronid, mille energia on «kõigest» 30—100 keV. Kolmandas võõndis, kus Maa magnetväli on kõige nõrgem, paiknevad osakesed energiaga 200 eV ja üle selle. Et tavaliste, meditsiiniliseks otstarbeks rakendatavate röntgenikiirte energia on 30—50 keV, suurte metallvalandite läbivalgustamiseks aga kasutatakse kiirgust, mille energia ulatub 200 kiloelektronvoldist 2 megaelektronvoldini, siis on kerge kujutleda, mis-suguseks surmaohuks on need võõndid (eriti esimesed kaks) tulevastele kosmonautidele lendudel teistele planeetidele. Seepärast püüavadki teadlased praegu nii visalt selgitada kiirgusvõõndite asendit ja kuju ning osakeste jaotust nendes. Esialgu on selge ainult see, et koridorideks, mida mööda mehitud kosmoselaevad saavad siirduda teistesse maailmadesse, on Maa magnetvälja pooluste lähedased piirkonnad, kus ei ole suure energiaga osakesi.

Loomulikult tekib küsimus, kust on kõik need osakesed pärit. Nende peamiseks allikaks on Päike. Praegu on juba kindlaks tehtud, et tohutule kaugusele vaatamata paikneb Maa Päikese atmosfääris. Seda kinnitab eriti



* Uusimate andmete järgi üksteisest eraldi paiknevaid selgepiirilisi võõndeid ei eksisteeri. Osakesed täidavad kogu piirkonna, kus Maa magnetvälja jõujooned on suletud. — Tõlkija.

asjaolu, et iga kord kui suureneb Päikese aktiivsus ja järelikult ka Päikesest väljuvate osakeste hulk ning energia, kasvab elektronide hulk teises kiirgusvööndis, mida nendest osakestest tingitud «tuul» lähendab Maale. Maa magnetlõks püüab ka kosmilisi osakesi, mille energia ei ole piisav selle läbimiseks, samuti osakesi, mis tekivad primaarsete, suure energiaga kosmiliste osakeste kokkupõrkamisel aatomitega atmosfääri äärmiselt hõredates ülakihtides, mis ulatuvad tunduvalt kaugemale, kui veel hiljuti arvati, — Maa pinnast peaegu 1500 kilomeetri kõrgusele.

Me ei oska aimatagi, kui kindlalt kaitseb inimesi ja üldse kõiki elusolendeid Maa läbipaistev ja peaaegu tajumatu atmosfäär ning täiesti nähtamatu ja tajumatu magnetväli. Selle suhteliselt vähesel kiirgusega, millel õnnestub läbida Maa kahekordset looduslikku soomusrüüd, on elav materiat ja selle kroon — inimkond — oma sadu miljoneid aastaid kestnud evolutsiooni käigus täielikult kohastunud. Raske oleks isegi kujutleda, missugused eluvormid oleksid meie planeedil kujunenud siis, kui ta ei oleks täielikult kaitstud igasuguse kosmilise kiirguse eest. Kosmosesse lendav inimene väljub atmosfääri ja magnetvälja kaitsekiilbi varjust ning allub kõigi kiirgusliikide mõjule.

Eriti ohtlikud on Maa kiirgusvööndid nendesse koondunud elektronide suure kontsentratsiooni ja energia tõttu. Põrgates vastu kosmoselaeva keret ja igasuguseid metallesemeid, tekitavad elektronid, mille energia ületab 10 keV, nõndanimetatud *pärsskiirgust* — röntgenikiirgust, mis samuti kui osakesedki ioniseerib inimorganismi rakkude ainet ning olenevalt doosist põhjustab rakkude lagunemise ja hävimise. Kõige lihtsam oleks kosmonaute selle kiirguse eest kaitsta kabiini seina paksuse suurendamise, näiteks paksu pliikihiga katmise teel. Sel juhul aga muutuks kosmoselaev lubamatult raskeks. Välismaa ajakirjanduse andmetel püüavad teadlased selle probleemi lahendamiseks ümbritseda kosmoselaeva Maa eeskujul tehniliku magnet- või elektriväljaga, mis on küllalt tugev vastulendavate osakeste kõrvalekallutamiseks. Ühtlasi otsivad teadlased ka teisi kaitsevahendeid, mis väldivad kiirguse kahjulikku mõju organismi rakkudele või vähendavad seda järele. Mõned teadlased arvavad, et kui kosmonaudid suigutada hüpnootilisse unne või isegi jahutada nende kehasid anabioosiseisundini, mille puhul kõik organismi elufunktsioonid on tugevasti pidurdatud ja hapnikuvajadus järelikult palju väiksem, siis on vastavalt väiksem ka kahju, mida ioniseeriv kiirgus tekitab rakkudele.

Manipulaator — keerukas seade, mis võimaldab eemalt teostada igasuguseid manipulatsioone radioaktiivsete ainetega, mida ümbritseb kindel bioloogilise kaitse kiht. Manipulaatorid võivad olla lihtsad (käsitsi juhitud), mehaanilised (hüdrauliliselt või elektriliselt juhitud) või automaatsed. Nad on ehitatud nõnda, et «kuumade» radioaktiivsete ainetega vahetult kokkupuutuvad haaratsid kordavad täpselt manipulaatorit juhtiva operaatori käte ja sõrmede liigutusi. Nad võimaldavad esemeid (katseklaase, instrumente, isegi ainetesakesi) hoida ja ühest kohast teise paigutada, vedelikke ühest anumast teise valada, mitmesuguseid aineid kaaluda ja segada ning teisi operatsioone-sooritada.

Massiarv — aatomituuma koostisse kuuluvate nukleonide (prootonite ja neutronite) arv. Erinevalt aatommassist, mis peaaegu kunagi ei ole täisarvuline, on massiarv alati täisarv, mis on lähedane vastava keemilise elemendi aatommassile.

Massispektrograaf — laetud osakeste massi määramise vahend, milles kasutatakse ära asjaolu, et tugeva magnetvälja mõjul muutub selliste osa-

keste trajektoor (liikumistee), kusjuures muutus on seda väiksem, mida suurem on osakese mass. Kui kiirendatud ja magnetvälja läbinud osakeste teele asetatakse mingisugune «märklaud», siis ei satu osakesed sellel ühte punkti, vaid moodustavad riba, mille ühes otsas paiknevad kõige kergemad ja teises otsas kõige raskemad osakesed. Massispeketrograafe kasutatakse keemiliste elementide isotoopide üksteisest eraldamiseks (vt. «Isotoopide segude lahutamine») ja teisteks uurimistöödeks.

Mullikamber. Kuigi *Wilsoni kambri* leiutamisest on möödunud juba üsna palju aastaid ja ta konstruktsiooni on oluliselt täiustatud, on see tänapäevani jäänud hämmastavalt lihtsaks, kusjuures selle lihtsusega kaasneb saadavate tulemuste täpsus ja äärmine veenvus.

Päevast päeva aga on tuumafüüsikutel üha rohkem tegemist erakordselt kiirete osakestega, mis kuuluvad kosmilise kiirguse koostisse või mida saadakse kaasaegsete ülivõimsate kiirendite abil. *Wilsoni kambrit* läbides jätavad need osakesed enesest sageli jälje, mis ei jõua kõverduda ning on nii lühike, nõrk ja katkendlik, et seda ei ole võimalik täpselt mõõta. Kõige tähtsamad ja huvitavamad vaatlused jäävad seetõttu tegemata. Peale selle tekivad *Wilsoni kambri* paisuvas gaasis voolused ja keerised, mis küll vähesel määral, kuid siiski moonutavad osakeste jälgi. Väga sageli on tarvis täpselt teada, missuguses järjekorras need jäljed tekivad — missugune nendest on esimene, missugune teine ja nõnda edasi kuni viimaseni, missugune nendest paikneb kõrgemal ja missugune madalamal.

Nendele küsimustele *Wilsoni kambri* vastust ei anna.

Kuidas siis nendele vastust saada? Appi tuleb keev vesi. Mis on vedeliku keemahakkamise esimene tunnus? Mullide ilmumine. Ent kuidas ja kus mullid tekivad, sellele on keegi vaevalt erilist tähelepanu pööranud. Vedelike keemise füüsikas aga on sellel probleemil väga suur ja otsustav tähtsus.

Katsed on näidanud, et aurumullid tekivad peamiselt anuma seinal — kohtades, kus leidub üliväikesi süvendeid ja kühme, mida on praktiliselt võimatu kõrvaldada isegi kõige hoolikama lihvimise või poleerimise teel. Need süvendid ja kühmid ongi mullide tekkimise ja edasise kasvu keskusteks.

Kui vedelik sisaldab tahke aine või mingi lahustunud gaasi osakesi, siis võivad aurumullide tekkimise keskusteks olla ka need osakesed.

Kui aga vesi on väga puhas ja anuma sein ideaalselt poleeritud, siis saab vett igasuguste, ka kõige väiksemate tõugete ja raputuste vältimise korral «üle kuumendada», ilma et ta avaldaks mingisuguseid keemise tundemärke. Niipea kui anumata kergelt tõugatakse või ülekuumendatud vett mingil teisel viisil häiritakse, hakkab see silmapilkselt keema.

Kirjeldatud nähtus viiski füüsikud mõttele kasutada nähtamatut auru sisaldava *Wilsoni kambri* asemel ülekuumendatud vedelikuga täidetud kambrit.

Kui mingi laetud osake lendab läbi sellise vedeliku ja ioniseerib selle molekule, siis saavad ioniseeritud molekulidest osakese kogu teekonna ulatuses aurumullide tekkimise keskused, s. t. vedelik hakkab osakese teel silmapilkselt keema.

Kui nüüd küllalt kiiresti õnnestub teha ülesvõte, siis on sellel näha aurumullide ahel — samasugune osakese jälg nagu tavalise *Wilsoni kambri* puhul.

On võimalik toimida ka teisiti. Vedeliku keemahakkamist saab teatavasti vältida, kui suurendada auru rõhku vedeliku kohal. Suurendatud rõhu kiire vähenemise korral ei hakka vedelik keema silmapilkselt, vaid teatava lühikese

ajavahemiku möödumisel. Vedelikku läbivate osakeste jälgi saab fotografeerida rõhu vähendamise ja vedeliku keemahakkamise vahelises ajavahemikus.

Missugused siis on ülekuumendatud vedelikku sisaldava kambri eelised tavalise «aurukambriga» võrreldes? Neid eeliseid on üsnagi palju.

Igasugune vedelik on tunduvalt tihedam kui veeaur ja aeglustab tugevamini osakesi, mis teda läbivad. Seetõttu jätavad osakesed tihedamaid, kompaktsmaid ning kergemini vaadeldavaid ja mõdetavaid jälgi. Mullid tekivad ülekuumendatud vedelikus tunduvalt kiiremini kui aurus ning vedelikuosakeste liikumine on vähem märgatav kergete auruosakeste liikumisest, mistõttu osakeste jälg moondub vedelikus palju väiksemal määral kui aurus. Mullikambri peamiseks eeliseks aga on see tähtis asjaolu, et ioniseeritud vedelikuosakeste ümber tekkinud aurumullid suurenevad pidevalt. Kui teha üksteise järel mitu fotot, siis on mullide suuruse järgi võimalik küllalt täpselt määrata, missugused jäljed tekkisid varem ja missugused hiljem.

«Ülekuumendatud vedelik» ei tähenda alati kõrge temperatuurini kuumutatud vedelikku. On väga palju vedelikke, mis keevad ja muutuvad auruks toatemperatuurist tunduvalt madalamatel temperatuuridel või välisrõhu tühisel kahanemisel. Sellised on näiteks vedel vesinik, propaan, isopentaan jt.

Mullikambrit täitev veeldatud ja järelkult suure rõhu all viibiv gaas on ideaalselt läbipaistev. Kui aga rõhku vähendatakse kriitilise väärtuseni, mille puhul vedelik ei hakka keema ainult sellepärast, et temas ei ole mullide teket soodustavaid tsentreid — tolmu- ja keemilisi, laetud osakesi vms., siis jätab laetud osake, mis sellisest ülitundlikust, silmapilkseks keemahakkamiseks valmis olevast vedelikust läbi lendab, ioniseeritud molekulide ümber tekkinud aurumullidest koosneva selgesti nähtava jälje.

Sellises kambris puuduvad igasugused kolvid ja teised liikuvad osad ning ta võib olla mitme meetri pikkune. Seda just ongi teadlastel tarvis!

Ja veel. Wilsoni kambri saab läbilendavate laetud osakeste jälgi vaadelda iga kord ainult sekundi murdosa vältel, mullikamber aga võimaldab vaatlusi teha tunduvalt kauem. See on tohutu suur, paljudel juhtudel otsustav eelis.

Uue kambri väärtuslike omaduste tähtsus saab eriti mõistetavaks, kui meenutame, et võimsad kiirendid võimaldavad teadlastel praegu anda osakeste kiiruse ja energiad, mida ei ole looduslike ega ka tehislise radioaktiivsete ainete osakestel ning mis lähemal ajal nähtavasti muutuvad võrreldavaks kosmiliste osakeste kiiruse ja energiaga.

Enamik avastusi tehakse tänapäeva füüsikas just Wilsoni kambrite ja teiste analoogiliste seadmete abil.

Müümeson — ebapüsiv elementaarosake, mille mass võrdub 206,86 elektroni massiga. Eristatakse positiivseid ja negatiivseid müümesoneid, mille elektrilaeng absoluutväärtuselt võrdub elektroni laenguga. Müümesoni iga on umbes $2,2 \cdot 10^{-6}$ sekundit. Pärast selle ajavahemiku möödumist laguneb ta elektroniks või positroniks ja kaheks neutriinoks (või antineutriinoks). Enamik müümesoneid tekib raskemate *piimesonite* lagunemisel. Erinevalt teistest mesonitest on müümesonite vastastikune mõju (interaktsioon) tuumaainega nõrk ja nende hajumist põhjustavad peamiselt kokkupõrked samasugust laengut kandvate osakestega.

N

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Neutriino
Neutron
Neutronihaare
Neutronife aeglustamine
Neutronife paljunemistegur

Neutriino. Nõrkade interaktsioonide füüsika ajalugu on suurel määral seotud neutriino, selle vist küll kõige mõistatuslikuma elementaarosakese omaduste uurimisega. Neutriino on raskesti avastatav ja veel raskemini kinnipüütav neutraalne osake.

Kust tuli neutriino olemasolu idee?

Beetalagunemise — aatomituumadest elektronide emiteerumise eksperimentaalsel uurimisel ilmnes, et selle protsessi käigus vabanevatel elektronidel on kõige erinevamad energiad. Enamikul juhtudel oli elektronide energia ilmselt liiga väike. Jäi mulje, et energia kaob kuhugi, just nagu ei kehtiks energia jäävuse seadus. Raskused osutusid nii tõsisteks, et paljud füüsikud pidasid isegi vajalikuks energia jäävuse seadusest loobuda. Kõnesolev energia mittejäävus aga oli küllaltki veider. Kui energia tõepoolest ei oleks beetalagunemise protsessis jääv olnud, siis oleks võinud oodata, et mõnel elektronil esineb energia puudujääk, mõnel ülejääk. Tegelikult aga ei täheldatud energia ülejääki mitte kunagi.

Selline vastuolu viis tuntud šveitsi füüsiku Pauli 1931. aastal oletusele, et looduses eksisteerib veel üks neutraalne osake, mille mass on neutroni massist palju väiksem. Kuulus itaalia füüsik E. Fermi andis sellele osakesele otsekohe nimeks neutriino (itaalia keeles «neutronike»).

Argumendid, mis rääkisid selle osakese eksisteerimise poolt, olid järgmised. Energia näiline mittejäävus on tingitud sellest, et beetalagunemine ei kujuta enesest ainuüksi elektronide emiteerimist. Lagunemisprotsessist võtab osa veel neutraalne (ja seepärast praktiliselt mittevaadeldav) osake, mis viib kaotsi mineva energia endaga kaasa. Igas protsessis vabaneb küll rangelt kindel summaarne energiahulk, kuid see jaotub lagunemisproduktide vahel selliselt, et elektron omandab eri juhtudel erisuguse energia.

Üksteist aastat hiljem, 1942. aastal, avastatigi osake, mille olemasolu Pauli oli ennustanud. Selle osakese omadused vas-

tasid täielikult ennustusele: ta ei kannu elektrilaengut ja tal on erakordselt väike mass.

Relatiivsusteooriast järeldub, et äärmiselt väikese massi tõttu ei saa neutriino püsida paigal, vaid peab alati liikuma valguse kiirusega. Neutriino kui elementaarosake sarnaneb mõnes suhtes footoniga.

Osakeste muundumiste puhul kehtib teatavasti mitte üksnes energia jäävuse, vaid ka impulsi jäävuse seadus. Arvukate katsetega tehti kindlaks, et beetalagunemisel summaarne impulss ei säili, kui mitte eeldada neutriino olemasolu. «Tabamatu» osake viib enesega kaasa mitte ainult «kaotsi mineva» energia, vaid ka «kaotsi mineva» impulsi!

Neutriino mittevaadeldavus oli ajutine nähtus. Seda põhjustasid tema kinnipüüdmise ja registreerimisega seotud raskused. Neutriinode kinnipüüdmine ja vabadest neutriinodest tingitud tuumamuundumiste registreerimine õnnestus alles üsna hiljuti.

Viimastel aastatel on välja kujunenud elementaarosakeste füüsika uus, väga tähtis ja huvitav haru, millele on praegu koondunud kogu maailma teadlaste tähelepanu. See on suure energiaga neutriinode füüsika, mille teoreetilised alused rajas Lenini preemia laureaata akadeemik B. Pontecorvo. Siin uuritakse «mesonilise» päritoluga neutriinosid, mis tekivad üli-võimsates kiirendites saadavate mesonite lagunemisel.

Aga kas «tabamatud» osakesed, mis tekivad täiesti erinevates protsessides, on identsed? Ilmnes, et «elektronneutriinod» (mis tekivad beetalagunemisel) erinevad mesonite lagunemisel tekkivatest neutriinodest! Ühed nendest esinevad ainult koos elektronidega, teised koos mesonitega.

Nõrkade interaktsioonide universaalsuse idee sai veel ihe kinnituse, kui füüsikud avastasid rea uusi, nõndanimetatud veidraid osakesi. Ilmnes, et ka neile osakestele on iseloomulikud nõrgad interaktsioonid.

Analoogia põhjal kõigi teiste osakestega ennustati omal ajal, et eksisteerivad kaks neutriinode antagonisti — antineutriino 1 ja 2 (elektroniline ja mesoniline antineutriino). Üsna hiljuti leidis nende olemasolu ka eksperimentaalset kinnitust.

Neutron. 1930. aastal viis saksa teadlasi W. Bothet ja G. Beckerit arusaamatusse järgmine nähtus. Pommitades alfa-osakestega berülliumplaati, avastasid nad sellest lähtuva väga nõrga, kuid hämmastavalt läbitungiva kiirguse, mida ei suutnud

nimetamisväärselt nõrgendada isegi kümnete sentimeetrite paksused, kõige tugevamaidki gammakiiri tõkestavad plii-ekraanid.

Andekate prantsuse füüsikute abielupaar — Frédéric Joliot ja Irène Curie (Marie Skłodowska ja Pierre Curie tütar) — pani tähele veel ühte huvitavat asjaolu. Kui nad asetasiid selle kummalise kiirguse teele parafiinplaadi, siis hakkasiid parafiinist — vesinikurikkast ainest — välja lendama tohutu kiirusega ja järelikult ka suure energiaga prootonid.

Alfaosakesed takerduisid täielikult juba berülliumplaadis ega saanud kuidagi parafiinplaati sattuda. Prootoneid, mille energia oli ligikaudu 50 MeV, ei olnud suutelised parafiinist välja lööma ka gammakiired. Missugune ülivõimas «suurtükivägi» siis tegutses berülliumis ja missuguste «mürskudega» see tulistas parafiini?

Inglise füüsik, Rutherfordi õpilane J. Chadwick, kes pikka aega seda salapärasest kiirgust uuris, jõudis lõpuks ainuvõimalikule ja õigele järeldusele: «Tegemist ei ole mingisuguste kiirtega; parafiinist väljalendavaid prootoneid panevad liikuma osakesed, mille mass võrdub prootonite massiga, kuid millel puudub igasugune, nii positiivne kui ka negatiivne elektrilaeng.» Neid osakesi hakati nimetama neutroniteks.

Et neutron ei kannu elektrilaengut, siis on igasugune aine tema jaoks «lääbipaistev». Teda ei tõkesta aatomi «kaitseliinid»: elektronkate, mis suure jõuga tõukab eemale negatiivselt laetud osakesi, ega ka positiivne tuum, mis kallutab kõrvale isegi tohutu kiirusega liikuvaid raskeid alfaosakesi.

Neutroni avastamine lahendas mõistatuse, mis oli seotud aatomituumade masside arusaamatu ja «ebaloogilise» kasvuga laengu suurenemisel üheainsa ühiku võrra, ning võimaldas nõukogude teadlasel D. Ivanenkol ja saksa teadlasel W. Heisenbergil esitada 1932. aastal uue aatomituumamudeli, milles kõik osutus hämmastavalt «lihtsaks ja selgeks».

Ivanenko ja Heisenbergi idee järgi koosnevad kõik aatomituumad prootonitest ja neutronitest. Prootonite arv võrdub elemendi järjenumbriga Mendelejevi tabelis, prootonite ja neutronite koguarv aga on ligikaudu võrdne elemendi aatommassiga (vt. «Massiarv»).

Heeliumi aatomituum (kuulsa alfaosakese) näiteks moodustavad kaks prootonit, mis annavad talle kaks positiivset elektrilaengut (ja kahest elektronist koosneva elektronkate), ning

kaks neutronit. Prootonite ja neutronite koguarv on neli; see võrdub ligikaudu heeliumi aatommassiga, mis teadlastes pikka aega arusaamatust tekitas.

Liitiumi aatomituum sisaldab analoogiliselt kolm prootonit (järjenumber 3) ja kolm neutronit, mis kokku annavad elemendi aatommassi (~ 6).

Neutroni avastamine võimaldas võrdlemisi lihtsalt seletada ka teist mõistatust — isotoopide olemasolu.

Näitena võib vaadelda lihtsaimat keemilist elementi — vesinikku, mille aatomituuma moodustab üksainus positiivselt laetud prooton. Sellist vesinikku nimetatakse mõnikord prootiumiks. Selle kõrval on olemas vesiniku raske isotoop, mille aatomituumas on üks prooton ja üks neutron ning mille aatommass võrdub ligikaudu kahega. Seda vesiniku isotoopi nimetatakse deuteriumiks. Lõpuks eksisteerib veel väga haruldane, looduses peaaegu mitteesinev üliiraske ja radioaktiivne vesinik, mille aatomituumas sisaldub üks prooton ja kaks neutronit. See isotoop kannab triitiumi nime.

Uus aatomituumamudel, mis meie käsitluses on võib-olla liialt lihtsustatud, vastab peaaegu täielikult füüsikas käesolevaks ajaks kogunenud arvukatele faktidele, seletab esialgseid keerukaid ja segaseid vastuolusid ning, mis on peamine, avab palju uusi teid ja võimalusi aatomi «pühimasse paika» — tuuma tungimiseks, ühtlasi aga ka, nagu see teaduses on tavaline, seab meid salakavalalt vastamisi uute, veel suuremate saladustega, vastuoludega ja tõeliste imedega!

Neid saladusi ja imesid loetleda tähendaks lihtsalt kogu kaasaja tuumafüüsika algusest lõpuni ümber jutustada. Seetõttu piirdume siin ainult sellega, mis enam või vähem otseselt ja vahetult puudutab neutronit.

Juba algul näiteks tekkis küsimus, miks aatomituum, mille koostisse neutronite kõrval kuuluvad positiivselt laetud prootonid, ei lagune ühemärgiliste laengute vaheliste, sõna otseses mõttes titaanlike (kui arvestada laengutevaheliste kauguste väiksust) tõukejõudude mõjul. Alles tunduvalt hiljem tehti kindlaks, et aatomituuma piirides mõjuvad erilised, mitte millegi muuga sarnanevad jõud, nõndanimetatud tuumajõud, mille tõttu osakesed tõmbuvad üksteise poole sõltumatult sellest, kas nad kannavad laengut või on neutraalsed, kusjuures need äärmiselt väikestest kaugustest mõjuvad tõmbejõud ületavad tunduvalt kõigi prootonite vahelisi tõukejõude. Nende jõudude

puudumise korral lendaksid tuumaosakesed otsekohe laiali, kuid nad üldse saaksid liituda.

Looduses aga ei eksisteeri ega saagi eksisteerida mingisuguseid, isegi mitte tuumaosakeste suurusjärgus olevaid kehi, mis ei viibi vahetpidamatus liikumises. Selle liikumise intensiivsus oleneb osakeste energiast, mille omakorda määrab nendest osakestest koosneva aine temperatuur. Kui osakeste süsteem saab kusagilt väljastpoolt energiat juurde, siis hakkavad osakesed tunduvalt kiiremini liikuma. Lõpuks võib saabuda hetk, kus liikumine muutub nii tormiliseks, et selle energia võimaldab ühel või mitmel osakesel tuumajõude ületada ja nende mõjusfäärist väljuda. Sel juhul lendavad need osakesed ühemärgiliste laengute vaheliste tõukejõudude mõjul tuumast välja.

Kui aga juurde tuleb tunduvalt suurem energiakogus, siis on kõik tuumaosakesed suutelised salapärase tuumajõudude mõju pii ri ületama ja tuum laguneb.

Kui suur on selleks vajalik energia, mida füüsikud nimetavad ergastusenergiaks?

Ergastusenergia on seda väiksem, mida raskem on aatomi tuum. Ühtlasi aga on seda suurem tuuma jagunemisel vabanev energiahulk:

Aatomituumade massiarv	140	200	235
Tuumade ergastamiseks vajalik energia, MeV	62	40	5
Lagunemisel vabanev energia, MeV	48	135	200

Kõige raskemad tuumad on kõige ebapüsivamad. Niipea kui sellisele käsnataoliselt omaenda energiast küllastunud tuumale antakse kerge «tõuge», s. t. väike hulk lisaenergiat (antud juhul 5 MeV), laguneb ta edasi juba iseenesest!

Lisaenergiat saab anda kahel viisil. Suhteliselt raske on «jõuga» sundida aatomituumade tungima mingit rasket laetud osakest, mis on suuteline murdma tuuma summaarse positiivse laengu meeletult vastu.

Protoni või alfaosakese lähteenergiast 5 MeV selleks ilm-

selt ei piisa. Enamiku oma energiast kulutavad need osakesed aatomituuma positiivsest laengust tingitud «soomusrüü» läbimiseks ega suuda seetõttu üldse tuumani jõuda, kõnelemata tema lõhustamisest.

Peale selle ei emiteeri looduslikud radioaktiivsed ained isegi mitte sellise energiaga raskeid osakesi. Osakestele tunduvalt suurema energia ja kiiruse andmiseks on järelikult vajalikud spetsiaalsed seadmed — *kiirendid*.

Hoopis teistsuguseid, tõeliselt hämmastavaid võimalusi avab neutron. Et ta ei kanna elektrilaengut, siis ei vaja ta energiat aatomituuma positiivsest laengust põhjustatud tõukejõudude ületamiseks. Oma neutraalsust kasutades läheneb ta vabalt tuumale, jõuab tuumajõudude mõjusfääri ja siseneb tuuma.

Tuumas, millesse neutron siseneb, algab ümberkujunemine. Seejuures omandab tuum lisaenergia, mis uraani 235 puhul võrdub 7 megaelektronvoldiga ja millest ta ergastusseisundisse sattudes peab otsekohe vabanema. Järelikult annab ainuüksi neutroni liitumine uraanituumaga sellele tuumale lisaenergia, mis võrdub 7 megaelektronvoldiga.

Kust see energia siis tuleb? Mitte mingisuguseid imesid siin muidugi ei sünni. Vana aatomituuma sisemisel ümberkujunemisel tekib uus tuum, mille koostisse kuuluvate nukleonide summaarne mass osutub veidi väiksemaks üksikult võetud nukleonide masside summast. Massivahe arvel vabanebki sellega ekvivalentne energiahulk (vt. «Massidefekt»), mis algul ergastab tuuma ja hiljem kutsub esile tuuma lagunemise.

Tuleb välja, et neutronil ei pea olema mitte mingisugust algenergiat. Tal tuleb ainult aidata vajalikku aatomituuma sattuda. Kord sinna jõudnud, mobiliseerib ta tuuma varjatud energiakeskused ja vabastab (tõsi küll, kaotades seejuures väikese osa oma massist) energia, mis on suuteline tuuma lõhustama.

Nimetamisväärsed algenergiata neutronid ei saa aga lõhustada kõigi elementide aatomituumasid, vaid ainult selliseid tuumasid, mille lõhustamiseks vajalik ergastusenergia on väiksem 7 megaelektronvoldist, s. t. energiast, mis vabaneb, kui tuum saab juurde neutroni ja selle tagajärjel sisemiselt ümber kujuneb. Selliseid tuumi ei ole palju: need on uraani 233, uraani 235 ja plutooniumi 239 tuumad.

Siin tekib küsimus, miks on neutronil nii ebatavalised omadused, mis järsult erinevad teiste tuumaosakeste omadustest

(kuigi ka teistel osakestel on küllaltki imestamisväärseid omadusi).

Kõige ebatavalise algallikaks on valguse omaduste dualism (kahesus), mis avastati käesoleva sajandi algul ja mis seisab selles, et valgus käitub üheaegselt nii osakestena kui ka elektromagnetlainetena. Veel rohkem erutas teadlasi samasuguste omaduste avastamine elektronil. Neid avastusi seletas väga hästi teooria, mille 1900. aastal esitas saksa füüsik Max Planck ja mille kohaselt kehad ei kiirga soojust ega valgust pidevalt, vaid diskreetselt, s. t. üksikute kindla suurusega portsjonitena — *kvantidena*, ning valguslainetel, millel on täiesti konkreetne pikkus, avalduvad mõnel juhul omadused, mis on iseloomulikud osakestele. 1923. aastal tegi prantsuse füüsik Louis de Broglie kindlaks, et spetsiifilised laineomadused on kõigil liikuvatel osakestel. Igasuguse osakese lainepikkus on tema teooria kohaselt võrdeline teatava väga väikese suurusega, mida nimetatakse Plancki konstandiks, ning pöördvõrdeline osakese massi ja kiiruse korrutisega. Vastav valem on üsna lihtne: $\lambda = h/mv$. Sellest valemist järeldub, et mida suurem on osakese mass või kiirus või nii mass kui ka kiirus, seda väiksem on lainepikkus ja vastupidi.

Füüsika seadustel ei ole erandeid. Ka kõigil makromaailma objektidel, näiteks mürsul ja maakeral, peavad seepärast lisaks «osakeste» omadustele olema laineomadused. Massi suuruse tõttu aga on neile vastav lainepikkus nii väike, et nende laineomadused võib täielikult arvestamata jätta. Suure kiirusega neutronitel on lainepikkus samuti küllalt väike ja nad käituvad faktiliselt kui osakesed. Nende käitumise mõningaid eriti «veidraid» külgi aga saab ilmselt seletada ainult laineomadustega. Et neutroni mass on igasuguste, isegi mikroskoopiliste kehade massiga võrreldes kaduvväike, siis on ta lainepikkus mikromaailma tüüpilistes nähtustes täiesti reaalne suurus.

Laineomaduste küllaldaseks ilmnemiseks peab neutroni kiirus olema väike. Seda saab niivõrd vähendada, et neutron kaotab täielikult osakese omadused ja käitub tõelise lainena.

Seoses eeltooduga tekivad ilmselt raskused neutroni mõõtmete määramisel, sest need, nii veider kui see ka pole, olenevad selle osakese liikumiskiirusest. Tavalise aatomi läbimõõt näiteks on ligikaudu $(2-4) \cdot 10^{-8}$ cm. Tuuma läbimõõt on veelgi väiksem — umbes 10^{-13} cm. Lõpuks: prootoni läbimõõt on vaevalt $2 \cdot 10^{-14}$ cm. Et neutroni lainepikkus ligikaudu vastaks aatomi

läbimõõdule, s. t. 10^{-8} sentimeetritele, peab ta energia (s. t. liikumiskiirus) olema ainult umbes 0,1 eV. Nii väikese energiaga neutronit on õigem kujutleda lainena, mille pikkus on 10^{-8} cm, mitte samasuguse läbimõõduga osakesena.

Edasi tulevad juba paradoksid. Neutron, mille lainepikkus on 10^{-8} cm, osutub tuumast kümneid tuhandeid kordi suuremaks, tuum aga omakorda sisaldab neutroneid, mida mõnel juhul on isegi suur hulk!

Neutron saab tuumas viibida ainult juhul, kui ta liigub suure kiirusega ja tal on järelikult väike lainepikkus. Suur kiirus aga tähendab teatavasti suurt energiat. Tuuma koostisse kuuluvate neutronite energia on seetõttu umbes 50 MeV, millele vastab väga väike, 10^{-13} cm suurusjärgus olev lainepikkus. See asjaolu võimaldas lahendada radioaktiivsete ainete beetalagunemise saladuse, mis kaua piinas teadlasi ja ajas neii kõik kaardid segi.

Kui neutron võõrasse aatomituuma lendab ja seal hirmsat segadust tekitab, siis ei suuda ta vastu panna tekkivatele ülikeerukatele mõjudele, mis on ekvivalentsed tohutute temperatuuridega, ning laguneb seetõttu prootoniks ja elektroniks.

See avastus võimaldas teadlastel lugeda prootoneid ja neutroneid ühtedeks ja samadeks, kuid eri olekutes viibivateks tuumaosakesteks — nukleonideks.

Beetalagunemisel muundub üks neutron prootoniks. Seejuures ilmub elektron, mille laeng kompenseerib tekkiva prootoni positiivse laengu. Ebapüsivate tuumade radioaktiivse lagunemise seaduste järgi aga ei leidu selle elektroni jaoks orbiiti ja ta peab tuumast lahkuma. See ongi beetaosake. Endiselt ebapüsivaks jääva tuuma positiivne laeng suureneb ühe ühiku võrra.

Prooton võib teatavatel tingimustel omakorda neutroniks muunduda. Siis aga peab kuhugi kaduma ta positiivne laeng. Selle viib ära osake, mis on elektroni täpne koopia, kuid kannab vastandmäärgilist, positiivset laengut. Seda osakest nimetatakse positroniks ja selle avastas 1930. aastal ameerika füüsik Anderson. Mõlema kirjeldatud muundumise puhul eraldub veel üks osake — eespool käsitletud neutriino.

Berülliumist väljuvad neutronid lendavad tohutu kiirusega. Nende «efektiivne ristlõige» on järelikult väga väike. Kerge elementide aatomituumadega kokku põrgates muudavad nad oma lennuuunda umbes samuti, nagu muutub kokkupõrkavate

piljardikuulide liikumissuund. Igal kokkupõrkel kaotab neutron osa oma energiast, mistõttu ta kiirus väheneb ja «ristlõige» suureneb.

Seda asjaolu kasutasidki teadlased neutronite aeglustamiseks, lastes neil korduvalt kokku põrgata neile massi poolest lähedaste aatomitega (vesiniku, heeliumi või süsiniku aatomitega). Neutronit ennast ei saa vahetult vaadelda, temast eemale põrkavate aatomite kiirus ja energia aga on kergesti mõõdetavad. See võimaldab kindlaks teha ka neutroni kiirust, energiat ja mõõtmeid.

Neutron kui osake osutus prootonist veidi raskemaks. Väljaspool aatomituuma on ta radioaktiivne ja laguneb umbes 11,7 minuti jooksul, emiteerides elektroni ja neutriino ning muundudes prootoniks. Neutroni lagunemisel vabaneb energia, mis võrdub ligikaudu 1 megaelektronvoldiga. Sellepärast ongi neutron prootonist raskem.

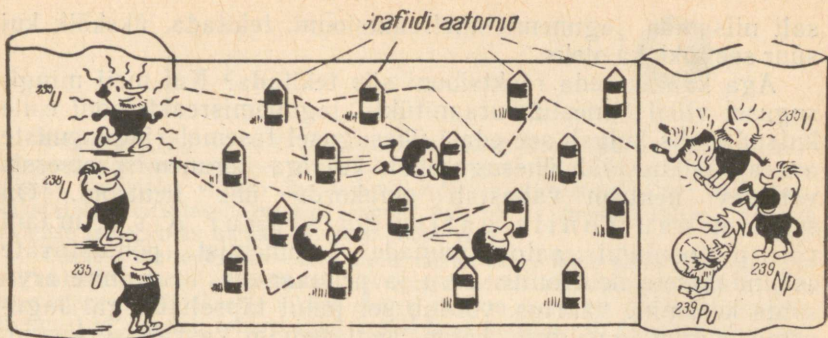
Neutronite käitumist jälgides avastasid teadlased varsti veel ühe hämmastava iseärasuse: neutronid tungivad kergesti läbi paksu terassoomuse, kuid ei ole suutelised läbima õhukest kaadmiumplaati, mis on kergesti läbitav niihästi gammakiirgusele kui ka beetaosakestele (elektronidele).

Varsti leiti ka sellele «veidrusele» seletus.

Mõningate elementide (kaadmiumi, boori, hafniumi jt.) aatomituumad ei tõuka neutroneid eemale, vaid «haaravad» neid endasse. Mida aeglasemalt neutron liigub, seda edukamalt toimub selline haaramine.

Neutronihaare. Kui vaba neutron läheneb mingile aatomituumale ja jõuab võimsate tuumajõudude mõjusfääri (mille raadius on 10^{-13} cm), siis võib ta olenevalt oma kiirusest (energiast) edasi lennata või tuumas neelduda. Neutroni lisandumine viib tuuma ergastusseisundisse. Moodustub nõndanimetatud vahepealne tuum, mis lühikese aja pärast laguneb. Seejuures vabaneb prootoni, neutroni, alfaosakese või gammakvandi emiteerumise arvel teatav hulk energiat.

Neutronite aeglustamine. Neutroneid on võimalik aeglustada ainult sel teel, et neil lastakse korduvalt kokku põrgata aatomituumadega, mis neid ei neela. Et neutron igal sellisel kokkupõrkel kaotaks võimalikult palju kineetilist energiat, peab aeglusti aatomituuma mass võrduma neutroni massiga või



olema sellele lähedane. Peale selle peab aeglusti olema püsiv niihästi intensiivse neutronkiirguse ja teiste kiirgusliikide kui ka tuumareaktorites valitseva kõrge temperatuuri suhtes. Väga head aeglustid on näiteks harilik ja raske vesi, heelium, berüllium, grafiit ja mõned teised ained.

Neutronite paljunemistegur. Uraani 235 aatomituuma jagunemisel kaheks killuks (Mendelejevi tabeli keskosas paiknevate elementide aatomituumadeks) vabaneb kaks-kolm (keskmiselt 2,5) neutronit. Iga uus jagunemiste «põlvkond» kahe- või kolmekordistab jagunevate tuumade arvu. Nõnda on see aga ainult ideaalsel, teoreetiliselt võimalikul juhul. Tegelikult sisaldab kõige puhtamgi uraan alati lisandeid, mis neelavad teatava osa uraanituumade jagunemisel vabanevatest neutronitest. Selliseid kadusid on võimalik kompenseerida ainult siis, kui viia miinimumini nende neutronite arv, mis lendavad reaktori aktiivtsoonist välja ega võta osa uraani 235 aatomituumade lõhustamisest, või suurendada tuumkütuse hulka reaktoris (vt. «Kriitiline mass»). Kui aga kahjulikke, neutroneid neelavaid lisandeid on uraanis väga palju, siis ei aita uraani hulga suurendamine ega neutroneid tagasi reaktori aktiivtsooni suunava peegeldaja kasutamine. Mitte mingisugust ahelreaktsiooni sel juhul ei teki.

«Kahjulikeks» lisanditeks tuleb lugeda ka uraani loodusliku põhiisotoobi ^{238}U aatomeid. Nende aatomite tuumad neelavad neutroneid liiga ahnelt. Loodusliku uraani tükis, mis 99,3% ulatuses koosneb sellest isotoobist, ei ole seepärast võimalik «liht-

salt niisama» jagunemis-ahelreaktsiooni tekitada, ükskõik kui suur see tükk ka oleks.

Aga kuidas seda reaktsiooni siis tekitada? Kui meil mingisugusel viisil õnnestub uraanitükis jagunemisreaktsiooni esile kutsuda, siis kulgeb see edasi ühesugusel tasemel (jagunemiste arv ajaühikus jääb ühesuguseks), kui iga jagunemisprotsessis vabanev neutron vabastab omakorda ühe neutroni. On selge, et neutronite paljunemistegur K , s. t. uraani või plutooniumi aatomituumade jagunemist põhjustavate sekundaarsete neutronite arvu ja primaarsete neutronite arvu suhte keskmine väärtus, võrdub sel juhul täpselt ühega. Jagunemiste arvu igasuguse, kõige aeglasemagi kasvamise korral, kui kütuse aatomituumade jagunemist põhjustavate neutronite arv järgmises põlvkonnas kas või ühe miljondikugi võrra ületab selliste neutronite arvu eelmises põlvkonnas, on paljunemistegur ühest suurem. Kerge on taibata, et ideaalsel juhul on see tegur 2,5—3,0, s. t. võrdub uraani 235 aatomituumade jagunemisel vabanevate neutronite arvuga. Ühes kilogrammis uraanis 235 on umbes 2^{80} aatomit. Isegi juhul, kui ahelreaktsioonile paneks aluse üksainus neutron, jaguneks see sõna otseses mõttes astronoomiline arv aatomeid sekundi kaduvväikese murdosa jooksul — selleks kuluks ainult 80 jagunemiste «põlvkonda»! Kui jagunemis-ahelreaktsiooni ei aeglustata (s. t. ei juhita), siis lõpeb see silmapilkselt plahvatusega (aatomipomm). Kui $K < 1$, siis ei ole ahelreaktsioon võimalik, sest alanud reaktsioon lakkab vältimatult.

Nukleon. Et vältida (seal, kus selleks pole erilist vajadust) aatomituumade koostisse kuuluvate osakeste — positiivselt laetud prootonite ja elektrilaenguta neutronite — nimetuste liiga sagedat kordamist, on mõlemaid osakesi hakatud nimetama nukleonideks, s. t. tuumaosakesteks. Nende osakeste massid on veidi erinevad: prootoni mass võrdub 1836,1 elektroni massiga, neutroni mass aga 1838,6 elektroni massiga. On alust arvata, et prootonid ja neutronid kujutavad enesest ühtesid ja samu, kuid eri «laenguolekutes» viibivaid osakesi, mis teatavates tingimustes võivad teineteiseks muunduda.



Ongström (Å) — ühik väga lühikeste elektromagnetlainete (infrapunase kiirguse, nähtava valguse, ultraviolet-, röntgeni- ja gammakiirguse) mõõtmiseks. Ongström võrdub ühe sajamiljondiku sentimeetriga (10^{-8} cm). Teda kasutatakse laialdaselt optikas, samuti aatomi- ja tuumafüüsikas. Nähtava valguse lainepikkus näiteks on 4000—8000 Å.*

Osakese läbijooksutee — tee, mille laetud osake läbib aines enne täielikku aeglustumist, mida põhjustavad arvukad elastsed kokkupõrked aine aatomituumadega. Läbijooksutee pikkus oleneb osakese energiast (liikumiskiirusest), laengust ja massist, samuti aine (keskkonna) omadustest. Läbijooksutee pikeneb osakese energia suurenemisel, antud kiiruse puhul aga on ligikaudu võrdeline osakese massiga ja pöördvõrdeline laengu ruuduga. Enamasti ei mõõdata läbijooksuteed pikkusühikutes, vaid osakese poolt läbitava ainekihi massiühikutes.

Osakese vaba tee — tee, mille mingisuguses keskkonnas, näiteks gaasis või mõnes teises aines liikuv ja selle aine osakestega kokkupõrkav osake läbib kahe järjestikuse kokkupõrke vahel.

Osakeste sisestamine. Enne kiirendamist tuleb laetud osakestele anda teatav lähteenergia, mille suurus oleneb kiirendi tehnilistest parameetritest.

Selliste osakeste orbiidile viimine põhikiirendis on võrdlemisi keerukas protsess, mida nimetatakse sisestamiseks ehk injektsiooniks. Osakesi võib sisestada niihästi kiirendi magnetväljast (väikese võimsusega kiirendite puhul) kui ka väljastpoolt seda (väga suure energiaga osakeste saamiseks määratud kiirendite puhul). Sisestamine võib toimuda pidevalt või üksikute impulssidena.

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

P

Plasma
 Poolestusaeg
 Positron [positiivne elektron]
 Prooton
 Prootonradioaktiivsus

Plasma. On teada, et iga aine saab eksisteerida ainult kolmes — tahkes, vedelas ja gaasilises olekus. Klassikaliseks näiteks on vesi, mis võib esineda tahke aina (jäätuna), vedelikuna ja auruna. Universumis kui teryikus aga leidub nendes vaielda-

* SI-süsteemis tuleb ongströmi asemel kasutada nanomeetrit (nm) või pikomeetrit (pm). $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm}$; $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} = 10^{-10} \text{ cm}$.
 — Tõlkija.

matuteks ja ainuvõimalikeks peetavates olekutes viibivaid aineid väga vähe. Nende hulka võib lugeda kaduvvääikeseks. Universumi kogu ülejäänud aine on nõndanimetatud plasmaolekus. Mida see enesest kujutab?

On teada, et kui mingisugune tahke keha soojeneb, siis intensivistub selle keha koostisse kuuluvate aatomite soojusliikumine, kuni lõpuks hakkavad nõrgenema ja katkema keha struktuuri määravad sidemed.

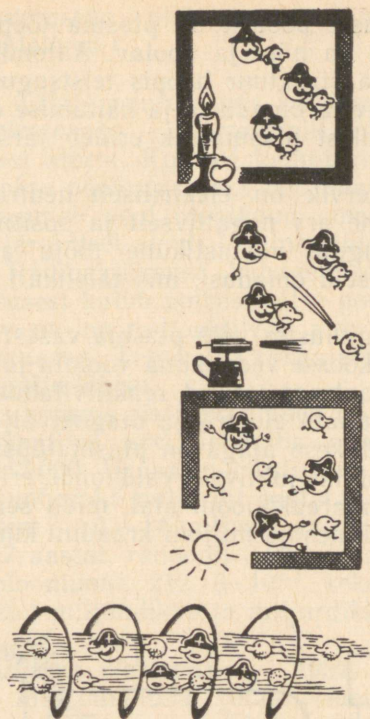
Kõigepealt laguneb kristallivõre — tahke aine sulab ja muutub vedelikuks. Seejärel nõrgenevad molekulidevahelised sidemed ja aine aurustub. Temperatuuril, mis ületab 2000 °C, ei saa vedel vesi eksisteerida, ükskõik kui kõrge ka oleks rõhk. Järelikult ei ole sellisel temperatuuril võimalikud vesilahustes kulgevad keemilised reaktsioonid. Temperatuuril 4000—5000 °C katkevad kõik molekulisisesed sidemed ja aine laguneb lõplikult aatomiteks. Seepärast lakkavad kõik tavalised keemilised reaktsioonid.

Agas mis juhtub siis, kui soojendada anumad, milles on gaas?

Temperatuuri tõusmisel muutub gaasi aatomite liikumine üha intensiivsemaks ning aatomid hakkavad järjest sagedamini ja tugevamini üksteisega kokku põrkama. Kokkupõrgete tagajärjel eralduvad aatomitest kõigepealt välisorbiitidel liikuvad elektronid, mille side aatomituumaga on kõige nõrgem. Gaasi ilmub just nagu teine gaas, mis koosneb elektronidest, mille arv vastavalt aatomituumade paljastumisele pidevalt kasvab. Väliselektronide järel tuleb järg ka sügavamal paiknevate ja püsivamatel orbiitidel liikuvate elektronide kätte. Ühtlasi sagenevad kokkupõrked elektronkattest täielikult või osaliselt vabanenud ionide vahel.

Gaasi, milles aine on erakordselt kõrge temperatuuri toimel lagunenuid pöörase kiirusega lendavateks ning üksteisega ja anuma seinaga kokkupõrkavateks vabadeks elektronideks, täiesti paljasteks aatomituumadeks ja aatomiteks, millel osa elektrone on mingisuguse juhuse läbi veel säilinud, on hakatud nimetama plasmaks. «Idealsele» plasmale, milles aatomiosakesed on üksteisest täielikult eraldunud, vastab temperatuur mitukümmend miljonit kraadi. Kõikjal, kus on väga kuum, viibib aine plasmaolekus.

Plasma ei ole aga lihtsalt ülikõrge temperatuurini kuunenud aine. Plasmaolek on eriline füüsikaline olek, milles viibival ainel on terve rida tähtsaid ja isegi erakordseid omadusi.



Näitena võib nimetada seda, et olenevalt koostisest, struktuurist ja hõrenäisastmest võib gaasiline aine plasmaolekusse siirduda ka madalamatel ja isegi suhteliselt madalatel temperatuuridel. Küünlaleek, päevavalguslambi valgus, mitmesugused elektrilahendused, reaktiivmootori või raketi düüsiist välja paiskuv tulejuga, välgu pimestav jälg — see pole kaugeltki täielik ülevaade nähtustest, mille puhul inimene otseselt või kaudselt puutub kokku aine neljanda olekuga, plasmaolekuga, ja mõnel juhul kasutab seda ära.

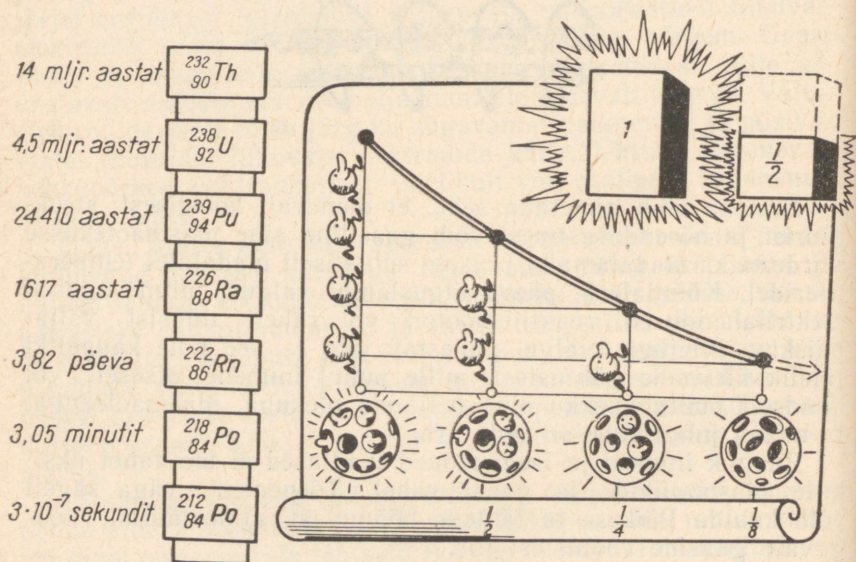
Enamik inimesi ja isegi mõned teadlased ei tee vahet üksikute plasmaliikide ja gaasi vahel. Tõepoolest, väga sageli võib kuulda Päikese ja tähtede hõõguvast atmosfäärast, hõõguvate gaaside voolustest jne.

Mitmete tunnuste poolest on plasma tõepoolest väga sarnane gaasiga. Ta on hõre ja voolav. Aatomite ja molekulide tasemel aga on ta struktuur hoopis teistsugune ning just sellega ongi seletatav ta omaduste ja käitumise erakordne mitmekesisus, mille poolest plasmaolek erineb järsult kõigist aine teistest olekutest.

Plasma kui tervik on elektriliselt neutraalne, sest temas sisaldub ühesugune arv negatiivselt ja positiivselt laetud osakesi. Nende laengute vastastikune mõju annabki plasmale ülimalt mitmekesiseid omadusi, mis täielikult erinevad gaaside omadustest.

Teatavates tingimustes võib plasma vasest paremini elektrivoolu juhtida, viskoosse vedelikuna voolata ja reageerida teiste ainetega nagu kontsentreeritud reaktiivilahus. Peale selle on plasmal kerge suunata elektri- ja magnetväljade abil.

Erakordselt lühikese ajaga on plasmafüüsikast saanud teaduslase progressi üks juhtivaid valdkondi, eriti seoses uurimistöödega termotuumareaktsiooni alal, mida seni on õnnestunud teostada ainult mitmesaja miljoni kraadini kuumenenud plasma



silmapilkse sähvatusena plahvatavas vesinikupommis (vt. «Termotuumareaktsioon»).

Poolestusaeg. Tähtis suurus, mis iseloomustab radioaktiivset ainet, on poolestusaeg — ajavahemik, mille vältel laguneb pool olemasolevast ainest. Kui see toimub näiteks nelja päeva jooksul, siis loetakse poolestusajaks neli päeva. Järgmise nelja päeva jooksul laguneb pool ülejäänud ainest, nii et kaheksa päeva pärast on järel veel ainult $\frac{1}{4}$ aine lähtehulgast, 12 päeva pärast $\frac{1}{8}$ jne. Radioaktiivsuse kahanemiseks 1 protsendini esialgsest aktiivsusest kulub umbes seitse poolestusaega.

Mida intensiivsem on radioaktiivse aine lagunemine, seda lühem on poolestusaeg. Tugevate kiirgajate iga on nõrkade kiirgajate omast palju lühem.

Ühes grammis uraanis sisaldub umbes $2,5 \cdot 10^{21}$ aatomit, mis on üsna astronoomiline arv. Sekundis aga laguneb nendest ainult ligikaudu 12 000. Uraani poolestusaeg on seepärast erakordselt pikk — umbes 4,5 miljardit aastat. Tooriumi poolestusaeg on veelgi pikem — üle 14 miljardi aasta. Raadiumil 226 on poolestusaeg 1617 aastat, radoonil 3,82 päeva, polooniumil 218 3,05 minutit, polooniumil 212 $3 \cdot 10^{-7}$ sekundit, mõningatel elementaarosakestel miljondikke ja miljardikke sekundeid.

Positron (positiivne elektron) — 1932. aastal avastatud elementaarosake, mis omaduste (massi, laengu suuruse jne.) poolest on identne elektroniga, kuid kannab negatiivse laengu asemel positiivset ja on seetõttu elektroni *antiosake* — esimene avastatud antiosakeste seeriast. Positron tekib kahe või kolme gammakvandi annihileerumisel või aatomituumade ja ebapüsivate tuumaosakeste beetalagunemisel. Kui positron kohtub elektroniga, siis annihileeruvad mõlemad osakesed. Seejuures tekib kaks või kolm gammakvanti (footonit).

Prooton — üks väheseid püsivaid elementaarosakesi, mis kuulub koos neutroniga kõigi keemiliste elementide aatomituumade koostisse, välja arvatud vesiniku kergeim isotoop, mille aatomituuma moodustab üksainus prooton.

Et vesinik on Mendelejevi keemiliste elementide perioodilise süsteemi esimene element, siis nimetatakse tema kergeimat isotoopi sageli prootiumiks (kreeka k. *protos* — esimene).

Kuigi prooton kannab elektroni laenguga võrdset (kuid vas-

tandmürgilist) elektrilaengut, ületab ta mass 1836 korda elektroni massi. Juhtudel, kus tuumaosakeste elektrilaeng ei ole oluline, nimetatakse prootoneid ja neutroneid ühiselt nukleonideks. Eriti õigustab seda praegu juba väljaspool kahtlust olev asjaolu, et prooton ja neutron kujutavad enesest ühe ja sama elementaarosakese eri füüsikalisi olekuid. Kui aatomituum väljastpoolt energiat juurde saab ja seejärel laguneb, siis võib prooton temas neutroniks muunduda. Selle protsessi käigus tekib veel positron, mille mass võrdub täpselt elektroni massiga, kuid mis kannab vastandmürgilist (positiivset) elektrilaengut, ja *neutriinoks* nimetatav laenguta (neutraalne) osake, millel puudub seisumass ja mis liigub ainult valguse kiirusega. Neutroni muundumisel prootoniks paiskuvad aatomituumast välja elektron ja neutriino.

Prootonradioaktiivsus. Veel hiljuti olid teadlastele tuntud ainult järgmised aatomituumade radioaktiivse lagunemise põhiligid. Kolme nendest — alfaosakeste (heeliumituumade), beetaosakeste (elektronide) ja gammakiirguse emiteerimist — tunti juba Marie ja Pierre Curie ajast. Ühe lagunemisliigi — uraanituumade spontaanse (iseenesliku) jagunemise, millega kaasneb neutronite, elektronide ja gammakvantide emiteerumine, — avastasid 1940. aastal nõukogude teadlased Fljorov ja Petržak. Lõpuks tuleb nimetada «hilinevate neutronite» väljumist uraanituumade jagunemisproduktidest mõni aeg pärast jagunemist.

Omaval ajal ennustati teoreetiliste kaalutluste põhjal, et eksisteerib lagunemisliik, mille puhul ergastatud, s. t. teatava hulga energiat neelanud aatomituum emiteerib prootoni — positiivselt laetud elementaarosakese. Selle nõndanimetatud prootonradioaktiivsuse avastasid nõukogude teadlased 1962. aastal. Lisaks nimetatutele on olemas veel mitu lagunemisliiki: K-haare, isomeersed üleminekud, positronlagunemine jt.

Piimeson — ebapüsiv elementaarosake, mille mass võrdub ligikaudu 273 elektroni massiga. Piimesoneid on kolme liiki. Positiivsed ja negatiivsed piimesonid kannavad elektrilaenguid, mis absoluutväärtuselt võrduvad elektroni laenguga; neutraalsel piimesonil laeng puudub. Neutraalse piimesoni mass on laetud piimesonite massist veidi väiksem — 264 elektroni massi. Piimesonid eralduvad nukleonidest või aatomituumadest, kui neid tabavad energiarikkad nukleonid või gammakvandid. Laetud piimesoni iga on umbes $2,5 \cdot 10^{-8}$ sekundit. Kõige sagedamini laguneb piimeson müümesoniks ja neutriinoks. Neutraalse piimesoni iga ei ületa 10^{-15} sekundit. Selle aja möödumisel laguneb ta kaheks footoniks. Erinevalt müümesonitest on piimesonitele iseloomulik aktiivne vastastikune mõju aatomituumadega. Nendest ongi tin-

gitud tuumajõudude olemasolu. Piimesoneid vahetavad nukleonid püsivad koos vaatamata positiivselt laetud protonite vahelistele tohututele tõukejõududele, mis seestpoolt püüavad tuuma lõhkuda.

Plutoonium — keemiline element, mille järjenumbr on 94 ja aatommass 239. Esmakordselt saadi seda elementi uraanituumade juhitava jagunemisreaktsiooni käigus.

Tuumaenergia kasutamine algas teatavasti uraanist 235, mis oli ja jääb tähtsaimaks tuumkütuseks. Looduslikku uraani võiks olla terve mägi, kuid selle energiast ei oleks võimalik vähimatki osa ära kasutada, kui ta ei sisaldaks jagunevat isotoopi ^{235}U . See isotoop jaguneb võrdselt hästi igasuguse energiaga neutronite toimel. Looduslikus uraanis on uraani 235 aga väga vähe — kõigest 0,7%. Ülejäänud 99,3% moodustab uraan 238, mis jaguneb ainult kiirete neutronite toimel. See-eest aga neelab uraan 238 väga hästi *vahepealseid neutroneid*. Ja siis algavad imed. Kui uraani 235 tuumade jagunemisel eralduvad kiireid neutroneid aeglustatakse grafiidi, raske või hariliku vee või mõne teise aeglusti abil, siis neelavad uraani 238 tuumad neid neutroneid, ergastuvad tugevasti ja muunduvad plutooniumituumadeks, mille poolestus- aeg on juba 24,40 aastat. Kõige tähelepanuväärsem on see, et tekkiv plutoonium on just nagu uraani 235 teisik — ta jaguneb samuti niihästi kiirete kui ka aeglaste neutronite toimel. See aga võimaldab paralleelselt uraani 235 «väljapõlemisega» saada praktiliselt mittejagunevast uraanist 238 teatava hulga jagunevat plutooniumi 239. «Põletades» tuumareaktoris uraani 235 (0,7%) ja kõrvalproduktina tekkivat plutooniumi 239 (mida on loomulikult vähem kui 0,7%), muundatakse nõnda järk-järgult tuumkütuseks ka tunduv osa looduslikust uraanist 238.

Puhas plutoonium 239 on tugevasti mürgine aine, mis õhus kergesti süttib. Lagunedes emiteerib ta alfaosakesi, mille energia on umbes 5 MeV.

Eriti ohtlik on plutooniumi sattumine organismi, sest loomulikult viisil ta sealt ei välju, pikaajaline sisemine alfakiiritus aga põhjustab raskekujulist kiiritustõbe ja isegi organismi hukkumist.

Pneumoölikond — eriülikond, mis on ette nähtud töötamiseks radioaktiivsetest ainetest — tolmust, gaasist, aerosoolist — saastunud atmosfääris. Ülikonna kaitsetoime põhineb sellel, et temasse siseneb pidevalt õhk, mille rõhk on veidi suurem atmosfäärirõhust. See väldib radioaktiivsete osakeste tungimist pneumoölikonda. Ülikond võimaldab saastunud ruumides vabalt liikuda ja mõnda aega töötada, teda saab väljapoole külgejäädud radioaktiivsetest osakestest kergesti puhtaks pesta ja tal võib olla sundõhuvahetus (nagu tuukriülikonnal) või autonoomne õhuvahetus (balloonidest).

Prootium — vesiniku kergeim isotoop, mille aatomituuma moodustab üksainus proton. Seda nimetust on mugav kasutada juhtudel, kus on juttu ka deuteriumist (raskest vesinikust) või tritiumist (üliraskest vesinikust). Prootiumi aatomituuma nimetatakse prootoniks, deuteriumi aatomituuma deutroniks ja tritiumi aatomituuma triitoniks.

Pärsskiirgus. Kui suure kiirusega lendav osake saab kusagilt väljastpoolt teatava hulga energiat juurde, siis muutub otsekohe ta kiirus: see suureneb antud energiahulgale rangelt vastaval määral. Järsu aeglustumise korral aga eraldub vabanev energia röntgenikiirguse kvantidena. Sellist kiirgust nimetataksegi pärsskiirguseks.

Mitmesuguse lainepikkusega röntgenikiired tekivad näiteks siis, kui elektronid, mille energia ületab 12 keV, pidurduvad järsult, põrgates kokku röntgenitoru raskesti sulava volframanoodi aatomitega.

R

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Radium

Radioaktiivsus

Radioaktiivsed isotoobid

Radioaktiivse kiirguse bioloogiline toime

Radioaktiivsete elementide perekonnad

Radium — üks esimesi tundmaõpitud looduslikke radioaktiivseid elemente, mille juba möödunud sajandi lõpul avastasid ning eraldasid puhtal kujul Marie Skłodowska ja Pierre Curie.

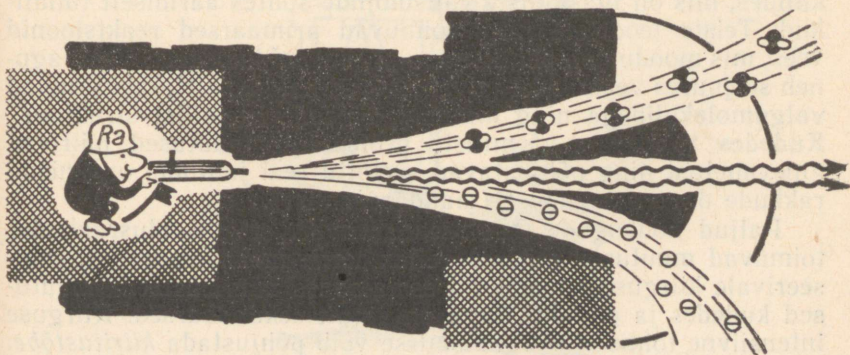
Senitundmatu aine osutus sõna otseses mõttes hämmastavaks. Ta saatis vahetpidamata välja tohutu läbimisvõimega nähtamatut kiirgust. See salapärane kiirgus nagu röntgenikiirguski pani pimeduses tugevasti helendama tsinksulfiidiga, baariumtetratsüanoplatinaadiga (II) ja teiste ainetega kaetud ekraane ning säritas fotoplaate.

Uue elemendi kaduvväikesi, miljardike grammidega mõõtuvaid hulki oli võimalik kindlaks teha õhu ionisatsiooni järgi, mida põhjustas nende kiirgus. See kiirgus avaldas tugevat mõju elusorganismidele ja kahjustas paljudel juhtudel inimeste tervist. Kõigi nende ebatavaliste omaduste tõttu nimetasid avastajad uue elemendi radiumiks, mis tähendab «kiirgav».

Radium tekib uraaniga 238 algavasse elementide ahelasse kuuluvate elementide järkjärgulisel lagunemisel ning koosneb neljast looduslikust isotoobist, mille massiarvud on 228, 226, 224 ja 223 (aatommass 226,05). Suurima poolestusajaga (1617 aastat) isotoop — radium 226 — emiteerib alfaosakesi, mille energia on 4,78 MeV. Alfakiirgusega kaasneb gammakiirgus, mille energia on 0,188 MeV. Emiteerivate alfaosakeste suure energia tõttu kasutati radiumi koos polooniumiga 210 (alfaosakeste energia on veelgi suurem — 5,3 MeV) pikka aega — kuni laetud osakeste kiirendite ja tuumareaktorite loomiseni — peamiste «aatomisuurtükkidena» Mendelejevi tabeli kõigi kergete elementide aatomituumade pommitamiseks. Just nende abil tehti kindlaks võimalus ühtesid elemente teisteks muundada, avastati neutron ja tehti rõhuv enamik aatomisajandi teisi tähtsaid avastusi. Radiumist lähtuv gammakiirgus oli kaua aega ainus vahend võitluseks kõige hirmsama haiguse — vähktõve vastu, metallesemete läbivalgustamiseks jne.

Radioaktiivsus — mõningate looduslike ja tehislise keemiliste elementide pidev iseeneslik, mitte mingisugustele välismõjustustele alluv lagunemine, mille käigus need ained saavad välja alfa-, beeta- ja gammakiirgust. Radioaktiivsuse avastas 1896. aastal prantsuse füüsik H. Becquerel, üksikasjaliselt uurisid seda Marie Skłodowska ja Pierre Curie, kes avastasid ka kaks tähtsat looduslikku radioaktiivset elementi: polooniumi ja raadiumi.

Inglise füüsikud E. Rutherford ja F. Soddy tegid kindlaks, et radioaktiivsete elementide aatomituumad on erinevalt tavalistest aatomituumadest ebapüsivad moodustised ja lagunevad seetõttu vahetpidamatult. Alfa- ja beetaosakesi (heeliumituumasid ja elektrone) emiteerides muunduvad nad uute, kergemate elementide aatomituumadeks. Kui näiteks raadium 226 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) emiteerib alfaosakese (^4_2He) ning kaotab seejuures kaks positiivset laengut ja neli massiühikut, siis muundub ta radooniks 222 ($^{222}_{86}\text{Rn}$). Niisiis tekivad kokkuvõttes kahe uue elemendi — radooni ja heeliumi aatomid. Sellega aga radioaktiivse lähte elemendi lagunemine veel ei lõpe. Tekkiv radoon 222 on samuti ebapüsiv, emiteerib omakorda alfaosakese ja muundub uueks, jällegi ebapüsivaks aineks: raadiumiks A ehk polooniumiks 218 ($^{218}_{84}\text{Po}$). Radioaktiivsete ainete järjestikuse tekkimise ja lagunemise protsess peatub alles siis, kui kogu raadium on muundunud tavaliseks pliiks, õigemini selle elemendi üheks isotoobiks ($^{206}_{82}\text{Pb}$).



Radioaktiivsed isotoobid. Uraani ja plutooniumi jagunemisel tekib väga suur hulk mitmesuguseid radioaktiivseid elemente. Mõned neist on pika, mõned lühikese poolestusajaga, ühed kiirgavad tugevasti, teised nõrgalt, ja nad võivad tekkida praktiliselt igasugustes kombinatsioonides. Strontsiumil 90 (5,3% saagisest) näiteks on poolestusaeg 25 aastat ja ta emiteerib ainult beetaosakesi, mille energia on 0,63 MeV, temaga üheaegselt tekkingiva ütriumi 90 poolestusaeg aga on ainult 62 tundi ja emiteerivate beetaosakeste energia 2,3 MeV. Kumbki nendest ei saada välja suure läbimisvõimega gammakiirgust. Tsiirkoonium 95, mille poolestusaeg on 65 päeva, emiteerib kahte liiki beetaosakesi, millest ühtedel on energia 0,39 MeV (98%), teistel 1 MeV (2%), ning ühtlasi kolme liiki gammakiirgust, mille energia on vastavalt 0,73 MeV, 0,23 MeV ja 0,92 MeV; niobiumil 95 on poolestusaeg 35 päeva ning ta emiteerib beetaosakesi energiaga 0,15 MeV ja gammakiirgust energiaga 0,76 MeV. Siin võib täheldada üldist seaduspärasust, mis avaldub selles, et lühima poolestusajaga isotoopidel on kiirguse energia suurim ja vastupidi.

Radioaktiivse kiirguse bioloogiline toime. Nagu kõik teised aatomid ja molekulid, nii ioniseeruvad ka elusrakkude aatomid ja molekulid röntgeni- ja gammakiirguse ning laetud osakeste voogude toimel. Selle tagajärjel toimuvad rakkudes füüsikaliskemilised muutused, mis mõjustavad nende edasist elutegevust, eriti aga organismi pärilikkust.

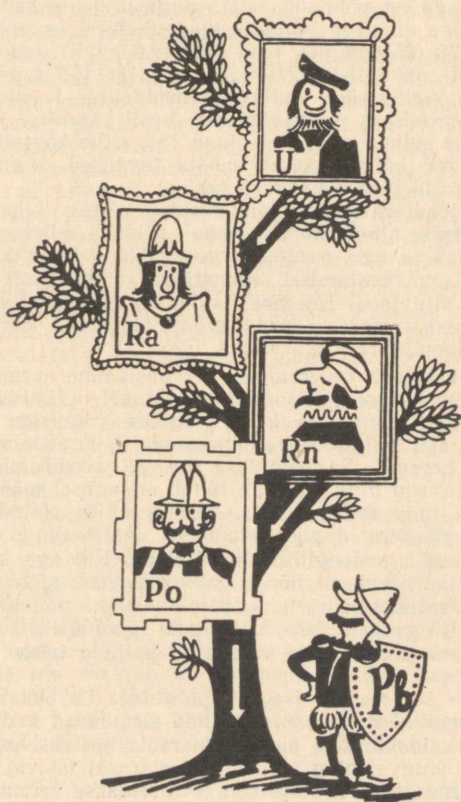
Uhtede vaadete kohaselt põhjustab kiirgusest tingitud ionisatsioon keemiliste sidemete katkemise keerukates valgumolekulides, mis on igasuguste välismõjude suhtes äärmiselt tundlikud. Teiste teooriate järgi toimuvad primaarsed reaktsioonid vees, mis moodustab põhilise osa organismi kudetest. Vesi laguneb seejuures vesinikuks ja vabaks radikaaliks OH, mis liituvad valgumolekulidega ning muudavad nende keemilist struktuuri. Kudedes toimuvate keemiliste protsesside muutused häirivad ainevahetust ning põhjustavad seetõttu real juhtudel organismi rakkude degenerereerumist (taandarenemist).

Paljud nõukogude teadlased arvavad, et kõik elusrakkudes toimuvad muutused määrab reflektorne mehhanism, sest ioniseerivale kiirgusele reageerib esmajoones närvisüsteem, muutused kudedes ja elundites aga on ainult sekundaarsed. Kiirguse intensiivne toime elusorganismisse võib põhjustada *kiiritustõbe*.

Radioaktiivsete elementide perekonnad. Radioaktiivsel lagunemisel üksteisest järjestikku tekkivate elementide ahelat nimetatakse radioaktiivsete elementide perekonnaks. Selliseid perekondi on neli. Need hõlmavad kõiki tuntud looduslikke radioaktiivseid elemente.

Esimene ahel saab alguse uraanist 238, mille lagunemine lõpeb pliiiga 206. Teine ahel algab tooriumist 232, mis lõppkokkuvõttes muundub pliiiks 208. Kolmas ahel algab uraanist 235 ja lõpeb pliiiga 207.

Lagunemine toimub järgmiselt. Kui aine emiteerib alfaosakese, siis väheneb ta mass nelja ühiku võrra ning temast tekib



uus aine, mis paikneb Mendelejevi tabelis kahe ruudu võrra eespool. Beetaosakese (elektroni) emiteerimise korral aga muundub üks neutron prootoniks. Et sel juhul toimub ainult neutronite ja prootonite arvu ümberjaotumine aatomituumas, siis tekib tabeli järgmises ruudus paikneva elemendi isotoop.

Neljas radioaktiivsete elementide perekond algab tehislikult saadavast üliraskest radioaktiivsest *transuraanist* plutooniumist 241, läheb seejärel üle uraani 235 ahelaks ja lõpeb püsiva talliumiga 205.

Radioaktiivne jood. Loodusliku joodi moodustab üksainus isotoop, mille massiarv on 127 ($\frac{127}{53}$). Antimoni ja telluuri pommitamisel neutronitega tuumareaktoris, samuti uraani 235 ja plutooniumi 239 aatomituumade jagunemise tagajärjel aga on võimalik saada paljusid joodi radioaktiivseid isotoope, millel on väga erinevad poolestusajad. Sellised isotoobid on jood 125 (56 päeva), jood 128 (25 minutit), jood 130 (12,6 tundi), jood 131 (8 päeva), jood 132 (2,4 tundi), jood 133 (22 tundi), jood 135 (6,7 tundi). Joodi radioaktiivseid isotoope kasutatakse laialdaselt meditsiinis ja bioloogias, peamiselt kilpnäärme uurimiseks ja ravimiseks, sest kilpnäärme kogub enesesse joodi. Eriti sobiv on selleks otstarbeks jood 131, mille kontsentratsiooni kilpnäärmes võimaldavad küllalt täpselt mõõta tavalised dosimeetrid, mis on tundlikud selle isotoobi gammakiirguse suhtes.

Radioaktiivse joodi ravitoime, mis avaldub näiteks kilpnäärme talitluse haigusliku tegevnemise ning vähktõve puhul, põhineb sellel, et kilpnäärmesse kogunenult lagundab ta oma gammakiirgusega haigeid rakke.

Aatomipommide plahvatamisel atmosfääris tekib teiste radioaktiivsete ainete kõrval ka palju joodi isotoope, millel on pikk poolestusaeg. Inimese või looma organismi sattudes võivad need põhjustada kiiritustõbe, küllalt suure kontsentratsiooni korral aga surma.

Radioaktiivne karootaž (puuraukude geofüüsikaline uurimine). Üks kindlamaid meetodeid maakoore geoloogilise struktuuri uurimiseks ja maapõuevarade otsimiseks on puurimine koos proovide võtmisega mitmesugusest sügavusest. Puuri abil väljatoodavate proovide (puursüdamike) järgi saab otsustada kivimite koostise ja paigutuse üle. Sügavpuurimisel, kui kasutatakse jätkatavaid torusid ning puurauk täitub erisugusel määral veega, savisuspensiooniga või muu selletaolisega, näiteks nafta otsimisel, ei ole aga enam võimalik saada terveid puursüdamikke. Järelikult ei saa sel juhul otsustada ka puuraugu geoloogilise läbilõike üle. Kui aga konstrueeriti ülitundlikud vastuvõtjad äärmiselt nõrga gammakiirguse püüdmiseks, siis said geoloogid enda käsutusse uue, erakordselt täpse, paindliku ja mugava vahendi puuraukude geoloogiliste läbilõigete geofüüsikaliseks uurimiseks, samuti radioaktiivsete maakide ja vete ning paljude teiste maapõuevarade, eriti nafta otsimiseks.

Praegu tundub see meetod isegi liiga lihtne. Ta olemus on järgmine. On teada, et peaaegu kõik maakoore kivimid sisaldavad kaduvvääkesel, kuid erisugusel hulgal radioaktiivseid aineid. Puurauku lastakse seade, mis püüab eri kivimikihtidest lähtuvat ning kergesti puurtorusid läbivat gammakiirgust. Andmeid kiirguse energia ja kestuse kohta võrreldakse varem uuritud kivimi-

proovidest saadud andmetega. Sel teel on võimalik saada väga täpne ülevaade igasuguse sügavusega puuraugu geoloogilisest läbilõikest.

Nafta ja vett sisaldavad kihid aga gammakiirgust välja ei saada ja nende olemasolu kohta tuleb sageli ainult oletusi teha. Passiivne uurimismeetod asendatakse seetõttu aktiivsega. Selleks lastakse puurauku küllalt tugev neutronite allikas (meetodit nimetatakse neutronkarotaažiks). Kivimite koostisse kuuluvate elementide aatomid muutuvad intensiivse neutronivoo toimel radioaktiivseks ja hakkavad välja saatma gammakiirgust, mis ühtede elementide puhul on tugevam, teiste puhul nõrgem. Neutronite allikast teatavas kauguses paiknev gammakiirguse vastuvõtja registreerib sel juhul kivimite tehislisku radioaktiivsust.

Vesiniku aatomid, mille poolest on eriti rikkad nafta ja vesi, peegeldavad väga hästi neutroneid. Peegeldunud neutronite hulga järgi on kerge kindlaks teha naftat ja vett sisaldavate kihtide asukohta ning paksust. Analoožilised meetodid on rakendatavad ka paljude teiste geofüüsikaliste uurimiste puhul.

Radioaktiivne saastumine — atmosfääri, pinnase, veekogude ja ehitiste saastumine radioaktiivsete ainetega tuumaplahvatuste tagajärjel või aatomi-tööstuse radioaktiivsete jäätmete pihustumisel õhus.

Aatomipommide plahvatamisel õhus sadestuvad suured radioaktiivsed osakesed plahvatuskoha lähedusse ning põhjustavad pinnase saastumist, väiksemaid osakesi aga kannavad troposfääri ja stratosfääri õhuvoolud üle terve maakera. Veealuse plahvatuse korral saastuvad tugevasti suured veehulgad, mis seejärel veealuste hoovuste mõjul ja vee loomuliku tsirkulatsiooni tagajärjel jaotuvad kogu maailmameres. Maa-alused tuumaplahvatused põhjustavad pinnase radioaktiivset saastumist plahvatuskoha vahetus läheduses, mõnel juhul aga ka radioaktiivsete gaaside ning jagunemisproduktide tungimist atmosfääri ning saastumist maapinnale. Nõnda on juba juhtunud mõningate USA-s teostatud maa-aluste tuumaplahvatuste puhul.

Radioaktiivne süsinik. Astronoomid, geofüüsikud ja geoloogid arvestavad aega sadades miljonites ja miljardites aastates. Mõnedel teistel teadlastel on tegemist lühemate ajavahemikega — aastatuhandetega. Siin, nii veider kui see ka näib, kasutatakse kosmilise päritoluga geoloogilist kella — radioaktiivset süsinikku 14.

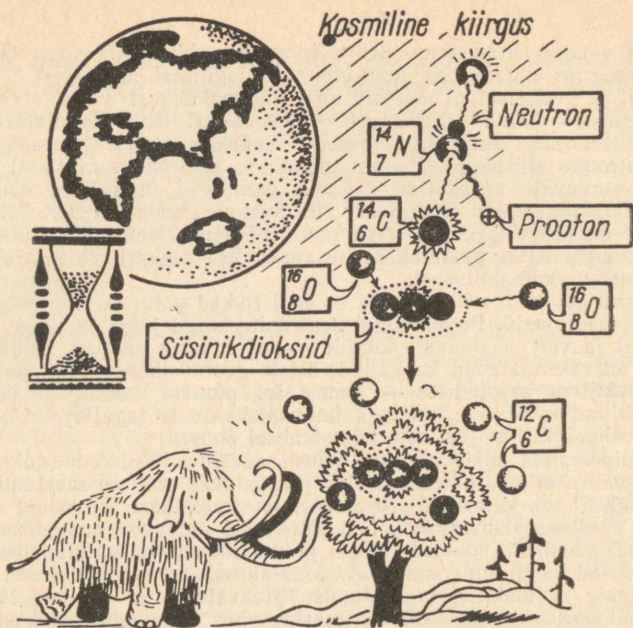
Looduslik süsinik, mille ühendid on kõigi elusorganismide põhialuseks, koosneb kahest püsivast isotoobist: süsinikust 12 (98,892%) ja süsinikust 13 (1,108%). Väga väikestes kogustes sisaldab atmosfäär ka selle elemendi radioaktiivset isotoopi — süsinikku 14, millel on maaväline päritolu. Kust on see isotoop pärit?

Meie planeeti pommitavad vahetpidamata kosmilised osakesed, millel on tohutu suur, kümnete ja sadade tuhandete miljardite elektronvoltidega mõõtu energia (vt. «Kosmiline kiirgus»). Nende osakeste kokkupõrkamisel õhu aatomituumadega tekivad neutronid, mis neelduvad teiste aatomite, sealhulgas ka lämmastiku 14 aatomite tuumades. Kulgeb tuumareaktsioon, mille käigus tekib süsinik 14. Selle isotoobi poolestusaeg on 5760 aastat.

Süsinik on looduses üks aktiivsemadest keemilisi elemente. Otsekohe pärast tekkimist «ründavad» süsiniku 14 aatomeid seetõttu hapniku aatomid ning nendest tekib süsinik (^{14}C) dioksiid.

Kõikjal puhuva tuule ning gaaside vastastikuse difusiooni tõttu seguneb süsiniku märgitud aatomeid sisaldav gaas põhjalikult tavalise süsinikdioksiidiga.

Edasi läheb kõik tavalisel viisil: taimed neelavad süsinikdioksiidi (süsi-



50 mljr. $^{14}_6\text{C}$
aatomit



5760 aasta pärast
25 mljr.



11500 aasta pärast
12,5 mljr.



18000 aasta pärast
6 mljr.

happegaasi), loomad ja inimesed aga tarvitavad taimi koos nendesse sattunud radioaktiivse süsinikuga toiduks.

Nüüd oletame, et kusagil ja kunagi haigestus, lakkas toitumast ja suri mingi loom või raiuti maha puu. 5760 aastat hiljem leiab paleontoloog või arheoloog väljakaevamistel selle looma luu või ehitisest säilinud puidutüki.

On loomulik, et kui loom või taim hukkub, siis lakkab radioaktiivse süsiniku juurdevool tema organismi, varem sinna kogunenud radioaktiivne süsinik aga laguneb ja kaob järk-järgult. Pool organismi hukkumise momendil olemasolnud süsinikust 14 kaob 5760 aasta jooksul, pool ülejäänud hulgast järgmise 5760 aasta jooksul jne.

Aga missugune radioaktiivse süsiniku hulk tuleb võtta lähtehulgaks? Asi on selles, et «kosmilise» isotoobi kogus tavalises looduslikus süsinikus ei ole miljonite aastate jooksul muutunud, sest tekkivate ja lagunevate süsiniku aatomite vahel on juba ammu välja kujunenud tasakaal.

Järelikult jääb ainult määrata, kui palju erineb loomade ja taimede välja-kaevatud jäänustes sisalduva süsiniku 14 radioaktiivsus meid ümbritsevas elusmaterias sisalduva süsiniku 14 radioaktiivsusest.

Iga praegu elava looma kudedes ja taime telluloosis sisaldub 1 g süsiniku kohta niisama palju radioaktiivse süsiniku 14 aatomeid, kui palju neid sisaldus 5760 aastat tagasi hukkunud loomas või maharaiutud puus, nimelt ligikaudu 50 miljardit aatomit. Kui väljakaevatud jäänustes on neid kaks korda vähem, siis võib järeldada, et loom või taim hukkus 5760 aastat tagasi. Kui radioaktiivseid aatomeid on järele jäänud ainult $\frac{1}{4}$, võime öelda, et jäänused on 11 500 aastat vanad, jne.

Selle meetodi kontrollimiseks on kasutatud egiptuse muumiaid, mille matmise aeg on täpselt teada, ja teisi arheoloogilisi leide.

Radiobioloogia — bioloogia haru, mis uurib loom- ja taimorganismides ioniseeriva kiirguse mõjul toimuvaid muutusi. Radiobioloogia uurimisobjektideks on ioniseeriva kiirguse toime elusrakkudes, kahjustused ja pöördumatud muutused, mida see kiirgus rakkudes tekitab, kiirguse mõjul organismides tekkivad komplikatsioonid ning kiirguse mõju organismide pärilikkusele.

Radiograafia — ioniseerivate kiirguste (laetud osakeste voogude ja gammakiirguse) fotograafiline registreerimine ja uurimine. Kui laetud osake või gammakvant satub fotoemulsioonikihti, siis jätab ta sellesse jälje, mille moodustavad ioniseeritud aatomid. Fotoemulsiooni koostisse kuuluva hõbebroomiidi terakestes tekivad seejuures varjatud kujutise punktid, mis fotoplaadi (või filmi) ilmutamisel muutuvad nähtavaks (värvuvad mustaks). Sel viisil on näiteks kerge saada pilti radioaktiivsete indikaatorite (märgitud aatomite) jaotusest uuritava eseme kogu pinna või löike ulatuses. Selleks lihtsalt surutakse fotoplaat mõneks ajaks vastu uuritavat eset (näiteks taimelehte, metalliplaati või koelõiget). Analooiliselt on võimalik uurida igasuguseid pinnanähtusi — adsorptsiooni, korrosiooni jms., samuti kristallide teket ja kasvu ning komponentide jaotust metallisulamites.

Radiokeemia — teadusharu, mis uurib radioaktiivsete ainete saamise, üksteisest eraldamise, puhastamise ja määramise probleeme, samuti nende põhiomaduste kindlakstegemise meetodeid ning radioaktiivsete elementide tekkimise ja lagunemisega seotud tuumareaktsioonide kemismi. Radiokeemia meetodid erinevad tavalise keemia meetoditest, sest radioaktiivsete ainete kiirgus võimaldab rakendada paljusid füüsikalisi analüüsimeetodeid (kõikvõimalike loendurite abil).

Radiokeemiline analüüs paistab silma suure täpsuse ja tundlikkuse poo-

lest. Uhelgi teisel viisil näiteks ei oleks olnud võimalik kindlaks teha ühe tehisliku transuraanelemendi keemilisi omadusi, sest uurijate käsutuses oli ainult ... 17 selle elemendi aatomit! Rakenduslik radiokeemia selgitab ka võimalusi radioaktiivsete isotoopide kasutamiseks tavalises keemiaalases uurimistöös.

Oma praegusel arenemisastmel on radiokeemia väga tihedas seoses tuumareaktoritega, mida kasutatakse niihästi neutronite allikatena kui ka kõikvõimalike elementide radioaktiivsete, kõige mitmekesisemate omadustega tehisisotoopide tootmiseks, samuti võimsate kiirenditega, mis võimaldavad saada tehislikke transuraanelemente.

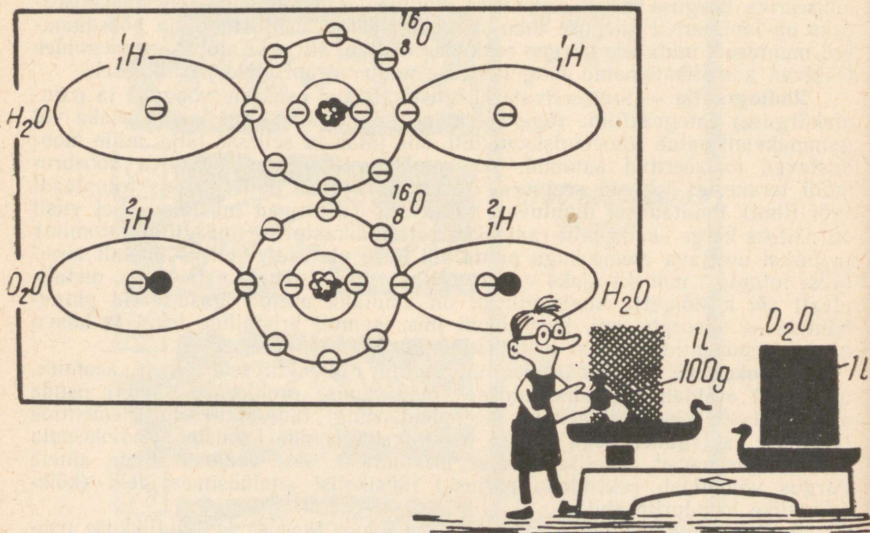
Seoses võimsa aatomitööstuse arenemisega uurib ja arendab radiokeemia radioaktiivse lähtetooraine saamise, reaktorites töötanud tuumkütuse regenererimise ja jagunemisproduktide üksteisest eraldamise tehnoloogilisi protsesse ning lahendab paljusid teisi ülesandeid ja probleeme.

Rasketed elemendid. Rasketeks nimetatakse tinglikult keemilisi elemente polooniumist uraanini. Nende elementide aatomituumades ületab neutronite arv vähemalt poolteist korda protonite arvu.

Raske vesi — vesi, mille molekulide koostisse tavalise vesiniku (H) aatomite asemel kuuluvad raske vesiniku — deuteriumi (D) aatomid.

Raske vesi erineb tavalisest veest mitmete huvitavate omaduste poolest. Ta ei külmu temperatuuril 0 °C, vaid +3,82 °C, ega kee temperatuuril 100 °C, vaid 101,42 °C (ta tihedus on 1,11 g/cm³). Temas ei idane seemned ning surevad taimed, kalad ja loomad.

Raske vesi on suurepärane neutroniaeglusti. Tuumareaktorites kasutatakse teda üheaegselt niihästi aeglustina kui ka soojuskandjana.



Registreerimiskambrid. Nõnda nimetatakse arvukaid aparate ja seadmeid, mida osakeste loendurite ja paksukihiliste fotoplaatide kõrval kasutatakse põhiliselt vahenditena elementaarosakeste vastastikusest mõjust põhjustatud muundumiste ja tuumareaktsioonide jälgimiseks ning registreerimiseks, samuti nende muundumiste ja reaktsioonide uurimiseks mitte üksnes kvalitatiiivsest, vaid ka kvantitatiivsest küljest. Peamised nendest seadmetest on järgmised: *Wilsoni kambrid*, millest läbilendav laetud osake jätab nähtava jälje, mis tekib üleküllastunud auru kondenseerumisel; *mullikambrid*, mille töö põhineb asjaolul, et laetud osake paneb ülekuumendatud vedeliku keema ja jätab samuti üliväikestest aurumullidest koosneva nähtava jälje; *südemekambrid*, milles osakese ilmumist tähistab mikroskoopiline elektrilahendus.

Rekombinatsioon — välisjõudude, näiteks väga kõrge temperatuuri mõjul aatomiteks lagunenuid (dissotsieerunud) molekulide taastekkimine.

Resonantsosakesed, resononid — erakordselt lühiealised (iga umbes 10^{-24} s) osakesed, mis uute hiiglakiirendite abil avastati 1962. aastal üheaegselt NSV Liidus ja USA-s. Ühiliühike iga viis teadlased arvamusele, et tegemist ei ole elementaarosakeste omalaadse alaperekonnaga, vaid pigemini «normaalsete» elementaarosakeste teatava vahepealse, äärmiselt ebapüsiva eksisteerimisvormiga.

Rikastatud uraan. Jagunemis-ahelreaktsioonist võtab tavaliselt osa ainult üks uraani looduslikest isotoopidest — uraan 235. Puhas metallne uraan aga sisaldab seda isotoopi ainult 0,72%; 99,27% on temas uraani 238 ja kaduvväike hulk (0,006%) uraani 234. Et jagunemisvõimelise uraani 235 eraldamine on seotud väga suurte raskuste ja kulutustega, siis on tehniliselt ja majanduslikult palju otstarbekam tekitada juhitav jagunemis-ahelreaktsioon tavalisest metalsest uraanist eraldamata uraanis 235; sellega kaasneb uraani 238 osaline muundumine plutooniumiks. Puhttehnilistel põhjustel tuleb selleks tuumareaktorisse laadida üsna suur hulk looduslikku uraani — mõnel juhul mitukümmend tonni.

Kui aga tuumareaktorit kasutatakse näiteks transpordi otstarbeks (laeval, allveelaeval, lennukil) või väga tiheda neutronivoo saamiseks, kui reaktor peab pikka aega töötama ümberlaadimiseta vms., siis tuleb tema mõõtmeid maksimaalselt vähendada. Sellistel juhtudel lisatakse reaktorisse laaditavale looduslikule uraanile jagunevat isotoopi (uraani 235), mida saadakse isotoopide segu keerukal ja kulukal lahutamisel spetsiaalsetes tehastes.

Tavalises uraanis sisalduva jaguneva isotoobi hulga suurendamist nimetataksegi uraani rikastamiseks.

Röntgen — tuumatehnikas väga tähtsat osa etendav suurus, mis näitab röntgeni- või gammakiirgusest tingitud ionisatsiooni astet ehk, mis on seesama, aines neeldunud kiirguse hulka. See suurus võrdub kiirgusega, mis 1 cm^3 õhus atmosfäärirõhul ja temperatuuril 0°C tekitab sellise hulga mõlemargilisi ioone, et kummagiiooniliigi kogulaeng on üks elektrostaatiline laenguühik. Üks röntgen vastab 2,1 miljoni ioonipari tekkimisele 1 cm^3 õhus. Et õhus tekiks üks ioonipaar, peab kiirguskvant kulutama 32,5 eV energiat. Röntgenites määratakse tavaliselt elusorganismidele ohutuid ja ohtlikke kiirgusdoose.

Röntgeni- ja gammakiirgusest erinevate ioniseerivate kiirguste (näiteks alfa- ja beetaosakeste, protonite ja neutronite voogude) dooside mõõtmiseks kasutatakse ühikut, mida nimetatakse röntgeni füüsikaliseks ekvivalendiks

(rfe). Et aga eri osakesed avaldavad elusorganismidesse erisugust bioloogilist toimet, siis mõeldakse viimast röntgeni bioloogilistes ekvivalentides (rbe).

Röntgenikiirgus — väga väikese lainepikkusega — umbes $0,06-20 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$) — elektromagnetikiirgus, mis tekib kiirete elektronide voo pidurdumisel aines (vt. «Pärsskiirgus»). Tekkival röntgenikiirgusel võib olla pidev, kõige väiksematest kõige suuremate lainepikkusteni ulatuv spekter, kuigi üldiselt emiteerib aine seda lühemalainelist kiirgust, mida suurem on teda pommitavate elektronide energia (kiirus). Kui aga viimane on nii suur, et toimub elektronide siirdumine ühelt orbiidilt teisele aatomite kõige «sügavamal» paiknevates sisemistes elektronkihtides, siis tekib nõndanimetatud karakterne kiirgus, mille spekter ei ole pidev, vaid koosneb üksikutest joontest.

See võimaldab kiirete elektronide voo toimel tekkiva röntgenispektri järgi määrata aine füüsikalisi omadusi ja struktuuri iseärasusi. Röntgenikiired võivad murduda ja peegelduda ning nende puhul võib esineda difraktsioon ja interferents, kuid seda ainult ainetes, mille aatomite vahelised kaugused ligikaudu võrduvad kasutatava röntgenikiirguse lainepikkusega, s. t. peamiselt kristallides.

Röntgenikiirgusel on suur läbimisvõime ning ta põhjustab fotoplaatide tumenemist ja mõningate ainete helendamist, ioniseerib gaase ja avaldab elusrakkudesse biokeemilist toimet. Nendel omadustel põhineb röntgenikiirguse kasutamine defektide avastamiseks läbipaistmatutes esemetes (sealhulgas kuni mitmekümne sentimeetri paksustes terasvalatistes), haigete läbivalgustamiseks, pahaloomuliste kasvujate ravimiseks, ainete keemilise koostise uurimiseks, taime kasvu stimuleerimiseks, kahjuritõrjeks jne.

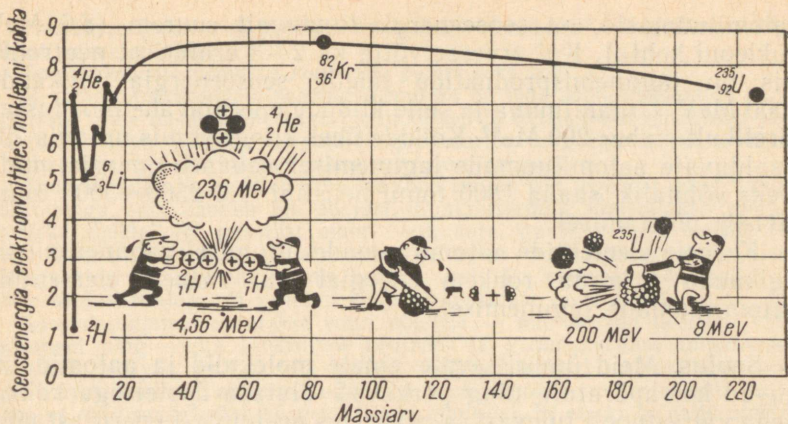
S

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID

Seoseenergia
Soojus
Spinn

Seoseenergia. Et oleks võimalik otsustada selle energiahulga üle, mis võiks vabaneda elementaarosakeste ümberpaigutumisel aatomituumades, on teadlased koostanud tabeli, milles on ära toodud iga nukleoni keskmine (elektronvoltides väljendatud) energia eri aatomituumades. Tabel võimaldab kindlaks teha, missugustel juhtudel on seda energiat võimalik vabastada ja missugustel juhtudel mitte, s. t. arvutada teatava hulga üksteisega seotud tuumaosakeste kogumi ja samade, kuid üksteisest eemal viibivate osakeste energia vahet.

Graafikust nähtub, et suurimad keskmise seoseenergia väärtused, ligikaudu 8,6 MeV nukleoni kohta, vastavad Mendelejevi



tabeli keskosas paiknevate keemiliste elementide aatomituumadele. Ükskõik missugusel viisil me neid tuumasid ka ümber kujundaksime, ikka võrduks selleks tööks kulutatav energia mingisuguse teise paigutuse puhul vabaneva energiaga või oleks sellest isegi suurem, nii et mingisugust tulu me nendest operatsioonidest ei saaks.

Tabeli alguses ja lõpus paiknevad, s.t. kõige kergemad ja kõige raskemad elemendid seevastu paistavad silma keskmise seoseenergia tunduva kõikumise poolest.

Neljast nukleonist koosneva heeliumituumata täielik seoseenergia näiteks on 28,2 MeV — umbes 7 MeV iga nukleoni kohta. Kahest nukleonist koosneva deuteriumituumata täielik seoseenergia aga on 2,28 MeV. Kui meil õnnestuks kaks deuteriumituumata liita üheks heeliumituumaks, siis võidaksime iga sellise tuuma kohta 23,64 MeV energiat!

Uhes kilogrammis heeliumis on $1,505 \cdot 10^{26}$ aatomit. Nende aatomite tuumade moodustumisel deuteriumituumadest peab vabanema $1,505 \cdot 10^{26} \cdot 23,64 = 35,6 \cdot 10^{26}$ MeV energiat. Sellise energia hulga saamiseks tavalisel viisil oleks tarvis põletada 13600 tonni bensiini!

Teine näide. 235 nukleonist koosneva uraani 235 tuumata täielik seoseenergia on 1786 MeV (7,6 MeV nukleoni kohta). Selle tuumata jagunemisel tekkival kahel killul, mis kujutavad enesest kergemate, Mendelejevi tabeli keskosas paiknevate elementide

aatomituumasid, on seoseenergia tunduvalt suurem (8,6 MeV nukleoni kohta). Kui arvesse võtta ka 2—3 eralduvat neutronit, siis on jagunemisproduktide täielik seoseenergia ligikaudu 2000 MeV. Uraanituuma ja selle kildude energiavahe moodustab järelikult umbes 200 MeV. Kõikide ühes kilogrammis uraanis 235 sisalduvate aatomituumade jagunemisel vabaneb energia, mida oleks võimalik saada 1800 tonni bensiini või 2500—3000 tonni kivisöe põletamisel.

Kergeste elementide aatomituumade liitumisel vabaneb niisiis ligikaudu 8 korda rohkem energiat kui raskete elementide aatomituumade jagunemisel.

Soojus. Meid ümbritsevate ainete molekulid ja aatomid liiguvad korrapäraselt ning pörkavad alatasa üksteisega kokku. Seda väljastpoolt tulevast ja osakestes neelduvast energiast põhjustatud liikumist nimetatakse soojusliikumiseks. Mida rohkem energiat osakesed neelavad, mida intensiivsem on nende liikumine ja mida sagedamini nad kokku pörkavad, seda soojem on antud aine.

Spinn. Lisaks energiale, mis on elektronil seoses liikumisega ümber aatomituuma, omab ta energiat veel seoses sellega, et pöörleb ümber oma telje nagu vurr. Sellest tulenebki sõna «spinn» (inglise k. *to spin* — pöörlema). Elektron kannab elektrilaengut; seetõttu tekib tema pöörlemisel ringelektri vool ja järelikult ka magnetväli, mis muudab elektroni väikeseks kahe poolusega elektromagnetiks. Et elektron võib pöörelda kahes eri suunas — päri- ja vastupäeva —, siis võib ta viibida kahes erisuguses energeetilises olekus ehk, nagu öeldakse, spinniolekus. Elektroni spinnist on tingitud mitmed vastastikused mõjud, mis etendavad aatomi füüsikalistes omadustes erakordselt tähtsat osa.

Spinn on ka teistel elementaarosakestel: prootonil ja neutronil, samuti kiirguskvantidel — footonitel. Kvantmehaanika seaduste kohaselt on spinnil rangelt kindel, antud osakesele iseloomulik väärtus. Kvantmehaanikas rakendatavas ühikute süsteemis on elektroni, prootoni ja neutroni spinn $1/2$, footoni spinn 1.

Seisumass (omamass) — aatomiosakese mass juhul, kui ta kiirus võrdub või loetakse võrdseks nulliga. Igapäevases elus aetakse see tihti segamini kaaluga.

Soojuselement — tuumareaktori kõige põhilisem ja tähtsam sõlm, mille abil viiakse aktiivsooni tuumkütust ja juhitakse sealt välja soojust.

Harilik soojuselement koosneb tuumkütust sisaldavast silindrilisest südamikust ja metallkestast.

Soojuselemente võidakse koondada patareideks vms.

Reaktorikonstrueerijate peamiseks mureks on luua soojuselementide jaoks materjale, mille mehaaniline tugevus, mõõtmed ja füüsikalised omadused jäävad mehaaniliste pingete, kõrgete temperatuuride ning intensiivse neutron- ja gammakiirguse tingimustes pikka aega muutumatuks.

Soojuskandja. Nagu ütleb juba see sõna ise, on siin tegemist mingisuguse keskkonnaga, mis kannab üle soojust. Konkreetsemalt nimetatakse soojuskandjaks vedelat või gaasilist ainet (vett, auru, gaasi, vedelat metalli või soola, vedelat orgaanilist ainet), mida juhitakse jahutamise otstarbel läbi tuumareaktori aktiivsooni ja mis kannab sealt ära soojust, andes selle üle teisele soojuskandjale või vahetult soojusjõumasinale (aur, gaas).

Soojuskandjatele esitatakse suuri nõudeid — nad peavad neelama vähe neutroneid ning olema intensiivse neutron- ja gammakiirguse tingimustes keemiliselt püsivad, nad ei tohi kestval kokkupuutumisel reaktori materjali-dega korrosiooniliselt aktiivsed olla, neil peab olema suur soojusjuhtivus ja erisoojus ning madal rõhk kõrgetel temperatuuridel. Ei ole kuigi palju aineid, mille puhul kõik need nõuded on üheaegselt täidetud. Gaasid, näiteks süsinikdioksiid (süsihappegaas), neelavad vähe neutroneid, nad on kasutatavad kõrgetel temperatuuridel ja ohutud, kuid juhivad halvasti soojust. Neid tuleb reaktoris kuumutada kõrgete rõhkudeni ja tunduv osa reaktori võimsusest kulub nende läbipumpamiseks. Suure soojusjuhtivusega inertgaas heelium on väga haruldane ja kallis. Niisama defitsiitne on ka raske vesi.

Suur soojusjuhtivus on vedelatel metallidel: kaaliumil, naatriumil, liitiumil, vismutil, pliiil, elavhõbedal, naatriumi ja kaaliumi segul, plii ja vismuti segul. Reaktorist väljumisel võib neil olla väga kõrge temperatuur ja seejuures üsna madal rõhk. Paljud neist on aga korrosiooniliselt väga aktiivsed, võivad veega kokkupuutumisel plahvatada ja muutuvad reaktori töötsoonis mõjuva kiirguse toimel võrdlemisi kiiresti radioaktiivseks.

Nendel põhjustel on soojuskandjana seni kõige rohkem kasutatud destilleeritud vett. Tunduvalt vähem on kasutatamist leidnud raske vesi.

Soojusvaheti. Tuumareaktori aktiivsoonis kõrgele rõhul kuumenevat vett või auru pommitavad väga intensiivselt neutronid, mistõttu hapniku ja veesalati leiduvate lisandite aatomituumad muutuvad tugevasti radioaktiivseks ning inimestele ohtlikeks. Saadava auru vahetu kasutamine tuumaelektrijaamade auruturbiinides on seetõttu võimalik ainult juhul, kui kõik aurujõuseadme tööagregaadid ja ka reaktor ise ümbritsetakse bioloogilise kaitsega — mitme meetri paksuse kompaktsel betoonkihiga.

Ülekuumendatud vett, auru, kuumat gaasi, vedelat metalli ja teisi soojuskandjaid võib aga ka juhtida läbi soojusvaheti — seadise, milles kõrgema temperatuuriline soojuskandja annab osa oma soojusest üle madalamatemperatuurilisele soojuskandjale. Lihtsaim soojusvaheti kujutab enesest hermeetiliselt suletud anumad, milles paikneb spiraalator. Viimast läbiv kuum soojuskandja soojendab ja aurustab anumast läbijuhitavat vett. Radioaktiivsed ained jäävad sel juhul reaktoris ja soojusvaheti spiraalatorus tsirkuleerivasse soojuskandjasse (esimesse kontuuri) ega satu soojusvahetis ja turbiinis tsirkuleerivasse soojuskandjasse ning sealt edasi muudesse seadmetesse, mistõttu teist kontuuri — aurutorustikku, jahutit, turbiine jms. — ei ole tarvis ümbritseda kohmaka, raske ja kalli bioloogilise kaitsega. See on suur eelis, kuigi soojusvaheti olemasolu suurendab soojuskadusid tuumareaktoris kui tervikus.

Strontsium — leelismuldmetallide hulka kuuluv keemiline element, mille järjenumber on 38 ja aatommass 87,63. Strontsiumil on neli püsivat isotoopi: strontsium 84 (0,56%), strontsium 86 (9,86%), strontsium 87 (7,02%) ja strontsium 88 (82,56%).

Uraani jagunemisel moodustub terve perekond strontsiumi radioaktiivseid isotoope. Tähtsaimad nendest on strontsium 89, mille poolestusaeg on 50,5 päeva ja mis emiteerib beetaosakesi energiaga 1,463 MeV, ning strontsium 90, millel on poolestusaeg 27,7 aastat ja beetaosakeste energia 0,61 MeV.

Strontsium 90 on omandanud kurva kuulsuse selle tõttu, et ta moodustab ohtliku sademe, mis langeb maapinnale pärast aatomipommi plahvatust. Vees lahustunult imendub ta taimedesse, neid söövate koduloomade piimaga aga satub inimorganismi. Et strontsium 90 on keemiliselt lähedane kaltsiumile, siis ladestub ta inimese luudesse ning kiirtab pidevalt luukudet ja sellest ümbritsetud luuüdi.

Strontsiumi radioaktiivsed isotoobid on beetakiirgajad (emiteerivad elektrone), mistõttu nende aatomeid kasutatakse keemias, tehnikas ja tööstuses laialdaselt «märgitud aatomitena». Strontsiumi 90 ja selle tütarisotoopi ütriiumi 90 kasutatakse elektronide allikana tuumapatareides.

Stsintillatsioon. Stsintillatsioonloendurid. Mõnedes orgaanilistes ja anorgaanilistes ainetes ning nende lahustes, näiteks tsinksulfiidis, kaltsiumvolframaadis, terfenüüli toluleenlahuses jt., tekivad ioniseerivate kiirguste toimel valgusesähvatused — stsintillatsioonid. Sageli nimetatakse neid aineid fosfoorideks.

Kui fosfoorikristall ühendatakse väga tundliku paljukaskaadilise fotokordistiga, millele järgneb veel lampvõimendi, siis on iga paljukordselt võimaldatud stsintillatsioonisähvatus suuteline tööle panema mistahes loendusseadist. Stsintillatsioonloendurid on tundlikud eri liiki kiirguste suhtes. Et tuumaeksperimentide käigus mõnikord vajaminevaid väga suuri kristalle on raske valmistada, siis kasutatakse nende asemel tahkete orgaaniliste ja anorgaaniliste stsintillaatorite lahuseid benseenis, ksüleenis, tolueenis ja teistes lahustites. Lahuste efektiivsus on puhaste kristallide omast siiski veidi väiksem. Kasutamist leiavad ka stsintillaatorite tahked lahused polüstüroolis, pleksiklaasis ja teistes läbipaistvates plastmassides, millel on vedelate lahustega võrreldes tunduvalt eeliseid.

Sädemekamber — seade radioaktiivse kiirguse registreerimiseks. Lennates läbi täpselt määratud laiusega vahemiku kõrge pinge all olevate elektrootodide vahel, ioniseerib laetud osake seda vahemikku täitvat gaasi või mingit teist ainet, mistõttu iga osakese ilmumisega kaasneb tavaline elektrilahendus (säde). Sellise kambriga ühendatud loendusseadis võimaldab kindlaks teha ajauhikus toimuvate lahenduste ja seega ka kambrit läbivate laetud osakeste arvu.

Sümkrofasotron — raskete laetud osakeste kiirendi, milles erinevalt tsüklotronist ja fasotronist kasutatakse muutuvat magnetvälja, mille tugevus perioodiliselt kasvab ja siis jälle kahaneb teatava algväärtuseni. See võimaldab osakel liikuda mitte mööda spiraali nagu tsüklotronis ja fasotronis, vaid mööda konstantse raadiusega ringjoont. Suunava magnetvälja tugevuse igale suurenemisele vastab siin kiirendava pinge sageduse täiesti kindel kasv, mis võimaldab ühel ja samal orbiidil üha kiiremini lendavat osakest järjest sagedamini «piitsutada». Magnetsüsteemiks võib sellisel juhul olla üksikutest elektromagnetitest koosnev rõngas. Kiirendatavatele osakestele suurte energiatega andmiseks aga peab magnetsüsteem olema väga suur.

Dubna sünkrofasotroni magnet kaalub umbes 35 000 tonni (see sünkrofasotron annab osakestele energia 10 GeV, s. t. 10 miljardit elektronvolti).

Seda tüüpi kiirendite abil osakestele antava energia edasine suurendamine nõuaks veel võimsamaid magnetsüsteeme. Seepärast püütakse leida kiirendite täiuslikumaid tööprintsippe. Paljudest raskustest on võimaldanud üle saada näiteks jäiga fokuseerimise printsip, mille töötas välja nõukogude teadlane V. Veksler. Selle printsibi olemus seisab kiirendatavate osakeste kimbu igakülgses tugevas «kokkukurumises» erilise kujuga magnetvälja abil. Erinevalt vanadest, «pehme» fokuseerimisega kiirenditest, mille magnetsüsteem fokuseeris osakesi üheaegselt nii vertikaal- kui ka horisontaalsuunas, rakendatakse «jäiga» fokuseerimisega kiirendites «tööjaotust»: magnetid fokuseerivad osakesi järgemisi kord vertikaal-, kord horisontaalsuunas. See suurendab fokuseerimise täpsust ning võimaldab tugevasti vähendada kambri mõõtmeid ja magnetite kaalu. Selleks kasutatakse magneteid, mille väli raadiuse suurenemisel järsult tugevneb.

Jäiga fokuseerimise printsipi rakendatakse kõigis viimastel aastatel ehitatud suurtes kiirendites, sealhulgas ka Serpuhhovi 76-gigaelektronvoltdises kiirendis, mis praegu on maailma suurim.

PÕHIMÕISTED JA -TERMINID



Tehisradioaktiivsus
Temperatuur
Termo tuumareaktsioon
Transuraanid
Tšerenkov-Vavilovi efekt
Tuumaenergia
Tuumajõud
Tuumareaktorid
Tuumareaktsioonid
Tuumasüntees

Tehisradioaktiivsus — radioaktiivsus, mis tekib püsivate keemiliste elementide kiiritamisel tuumareaktorites neutronivoogudega või nende pommitamisel raskete osakeste — protonitega, alfaosakestega jt.

Omaduste (kiirguse liigi ja energia, poolestusaja, emiteeritavate osakeste massi jt.) tohtu mitmekesisuse tõttu leiavad tehnilikult saadavad radioaktiivsed ained tunduvalt laialdasemat kasutamist kui looduslikud radioaktiivsed ained (vt. «Isotoobid»). Seoses tehisradioaktiivsuse avastamisega avanes võimalus teostada keskaja alkeemikute unistus — muundada ühtede keemiliste elementide aatomeid teiste elementide aatomiteks (vt. «Radioaktiivsus»).

Pärast seda avastust hakkasid teadlased paljudes riikides tuumaosakestega pommitama sõna otseses mõttes kõiki Mende-
lejevi tabelisse kuuluvaid keemilisi elemente. Seejuures selgus,
et peaaegu kõigist neist võivad tekkida uued radioaktiivsed tehis-
isotoobid. Võrdlemisi lühikese ajaga jõudis selliste tehisisotoo-
pide arv tuhandeni ja iga aasta avastatakse üha uusi isotoope.

Teaduses ja tehnikas etendavad radioaktiivsed tehisisotoobid praegu erakordselt tähtsat osa.

Temperatuur. Aine kõikide osakeste kogumi kaootilise, soo-
jusenergia avalduva liikumise mõõduks on selle aine tempera-
tuur. Soojusenergia ei ole midagi muud kui kõiki füüsikalisi kehi
moodustavate molekulide kineetiline ja potentsiaalne energia.
Suurele soojusenergiale vastab kõrge temperatuur. Kui energia
on suur ja temperatuur järelkult kõrge, siis liiguvad aineosake-
sed kiiremini ning põrkavad üksteisega tugevamini ja sageda-
mini kokku. Väikese energia ja madala temperatuuri korral on
osakeste kiirus ja kokkupõrgete arv väiksem.

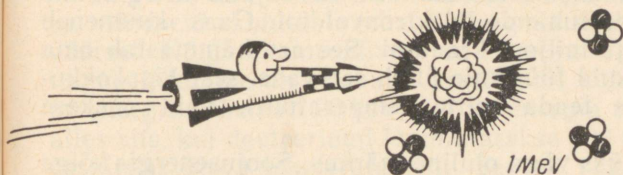
Keha või aine temperatuuri määrab kõigi seda keha või ainet
moodustavate osakeste keskmine energia. Et aga osakeste liiku-
mine on kaootiline, korrapäratu, siis võib üksikutel osakestel olla
väga erinev energia, s. t. väga erinev kiirus.

Siit tuleneb järeldus, et osakese või osakeste kogumi igale
energiale vastab oma kiirus, järelkult ka erisugune kokkupõr-
gete arv ja seetõttu erisugune temperatuur. Aine oleku üle otsus-
tamiseks on oluline teada tema osakeste energia kõige põhilise-
mat lähtekarakteristikut, osakeste kogumi temperatuur aga on
juba osakeste keskmise liikumisenergia tagajärg.

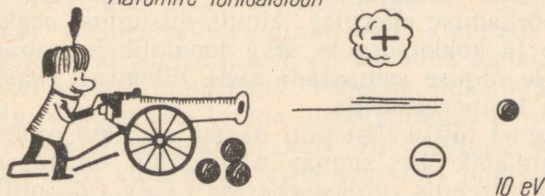
Hoolikad mõõtmised on näidanud, et osakese liikumisener-
giale 1 eV vastab temperatuur 1160 kraadi. Et näiteks vesiniku
aatomist elektroni lahti rebida, on tarvis kulutada 13,53 eV eneri-
giat. Selle operatsiooni teostamiseks ainuüksi soojendamise teel
tuleks temperatuur järelkult tõsta tunduvalt kõrgemaks 10 000
kraadist. Selline seos valitseb elektronvoltides ja kraadides väl-
jendatud energia vahel.

Enamik molekule laguneb aatomiteks (dissotsieerub) tempe-
raatuuril 10 000 kraadi. Aatomid kaotavad enamiku oma välis-
elektronidest või kõik väliselektronid temperatuuril 100 000 kraadi
ja, lõpuks, aatomituum laguneb prootoniteks ja neutroniteks
temperatuuril, mis ületab tuhandeid ja kümneid tuhandeid mil-
joneid kraade. Kõigi nende protsesside puhul neeldub energiat,

Radioaktiivsetest elementidest emiteeruvate alfaosakeste energia



Aatomite ionisatsioon



Vee lagunemise varjatud soojus



Molekulide pöörlemise energiatega erinevus



°K

10 000 000 000

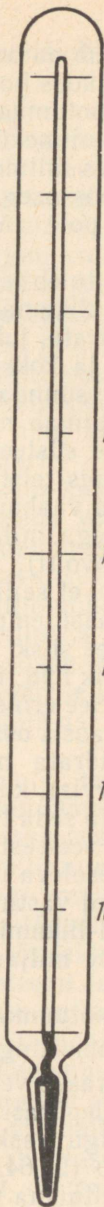
100 000

10 000

1000

100

10



mis kulub aatomituumasid, aatomeid ja molekule moodustavaid osakesi koos hoidvate tõmbejõudude ületamiseks.

Termotuumareaktsiooni teostamiseks on vajalik energia, mis ulatub mitmekümne tuhande elektronvoltini. Gaas kuumeneb seejuures mitmesaja miljoni kraadini. See arv hämmastab oma grandioossusega, kuid füüsikule ütleb see vähe, sest lõppkokkuvõttes pole tähtis teada mitte temperatuuri, vaid osakese energiat.

Siin tuleb teha üks väga oluline märkus. Soojusenergia kõige iseloomulikumaks jooneks on see, et ta kujutab enesest osakeste korrapäratu, juhuslikes suundades toimuva, ajast sõltumatu liikumise ja kokkupõrkamise energiat. Ainult niisugune osakeste kiiruste suundade ja kokkupõrgete arvu loomulik korrapäratu jaotus annab meile õiguse samastada seda liikumist gaasilise osakeste süsteemi temperatuuriga.

Hoopis teistsugust füüsikalist pilti näeme siis, kui osakesed liiguvad vaakuumis kõik ühes suunas, näiteks kui on tegemist osakestega, millele kiirendis antakse energia 1 GeV (üks miljard elektronvolti).

Näib, et sellise energia korral peaks nendest osakestest koosneva gaasi temperatuur olema 10 miljonit miljardit kraadi. Tegelikult see siiski nii ei ole, sest osakeste liikumine on organiseeritud. Kõik nad liiguvad ühes suunas ja põrkavad vähe üksteisega kokku. See erineb järsult korrapäratust soojusliikumisest, mis toimuks gaasis osakeste sellise kiiruse puhul. Seepärast saame edukalt määrata nende osakeste energiat (mida meil õigupoolest ongi tarvis), kuid ei saa midagi öelda osakeste voo temperatuuri kohta. Ja seda teada pole olulinegi, sest see temperatuur on väga madal. See-eest aga on meil võimalik täpselt öelda, missugune on kõnesoleva osakeste kogumi temperatuur, kui need osakesed põrkavad vastu mingisugust märklauda, s. t. kui nende organiseeritud liikumine muutub kaootiliseks. See temperatuur ulatub miljonite miljardite kraadideni.

Termotuumareaktsioon. Mis reaktsioon see on?

Võtame tinglikult heeliumi ${}^4\text{He}$ aatomituuma moodustumise kahest raske vesiniku ${}^2\text{H}$ (deuteeriumi) aatomituumast. Tinglikult sellepärast, et seda reaktsiooni, millest allpool juttu tuleb, on esialgu raskem teostada kui teisi. Energia, mis seejuures vabaneb (23,64 MeV), kujutab enesest nelja nukleoni sisaldava heeliumituuma täieliku seoseenergia (28,2 MeV) ja kahe kahest

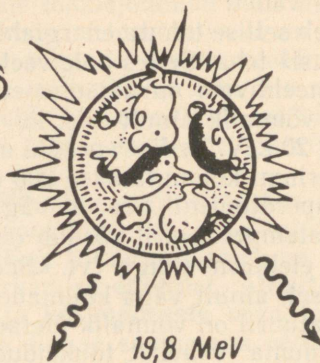
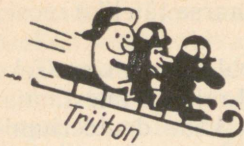
nukleonist koosneva deuteriumituuma summaarse täieliku seoseenergia (4,56 MeV) vahet.

Nagu näeme, tuleb sellise tohutu energiahulga vabastamiseks ka soliidseid «kulutusi» teha. Selles pole veel midagi imestamisväärtset. Kõige ebameeldivam on asjaolu, et kahe deuteriumituuma liitumine on võimalik ainult siis, kui kummalgi nendest on energia vähemalt 20 keV. Sellise energia aga omandavad nad alles siis, kui deuteriumi kuumutatakse 200 miljoni kraadi suurusjärgus oleva temperatuurini! See on väga palju, kui arvestada, et tavalisel toatemperatuuril võrdub õhu osakeste soojusenergia kõigest 0,25 elektronvoldiga (vt. «Soojus» ja «Temperatuur»). Üksnes sellisel, ainult väga kuumade tähtede sisemuses eksisteerival temperatuuril on võimalik ületada kahe positiivselt laetud deuteriumituuma vahelist tõukejõudu ning viia neid veelgi võimsamate tuuma-tõmbejõudude mõjusfääri.

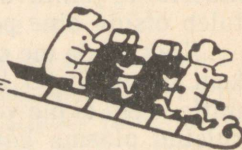
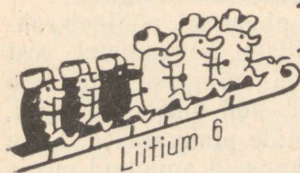
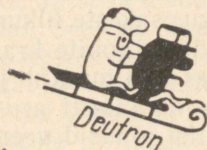
Kakssada miljonit kraadi! Sellist «ülipõrgulikku» kuumust on raske isegi kujutleda. Siiski õnnestus inimesel seda võrdlemisi kergesti tekitada, pannes kõige kergemini termotuumareaktsiooni astuvate ainetega täidetud kestas plahvatama «tavalise» aatompommi. Mingisuguse väga lühikese hetke — miljondike sekundite — vältel tõusis temperatuur veel mitte puruneda jõudnud kestas mitmesaja miljoni kraadini, rõhk aga sadade miljonite atmosfäärideni. Selle tagajärjel algas vesinikutuumade liitumine heeliumituumadeks ja energia vabanemine, millega kaasnes teine, veelgi võimsam plahvatus.

Et kergete elementide aatomituumade liitumist raskemate elementide aatomituumadeks — näiteks vesinikutuumade liitumist heeliumituumadeks — ja selleks vajalikku osakeste liikumisenergiat on võimalik saavutada ainult sadade miljonite kraadideni ulatuvatel temperatuuridel, kõik looduses aga muutub juba madalamatel temperatuuridel plasmaks, siis on täiesti arusaadav, miks teadlased pärast pikaajalisi uurimisi jõudsid veendumusele, et juhitava termotuumareaktsiooni probleemi lahendust tuleb otsida aine plasmaoleku arvukate saladuste hulgast.

Kõik, mida me oma raamatus räägime plasmast, põhineb rohkem teoreetilistel kaalutlustel kui praktilistel kogemustel, sest mitte keegi ei ole veel kunagi näinud, kuidas mingisse anumasse suletud plasma käitub temperatuuril 200—400 miljonit kraadi, kui välja arvata aatomi- ja vesinikupommide plahvatused. Seda ei ole nähtud sel lihtsal põhjusel, et niisuguseid anumaid ei ole



Gammakiirgus



ega saagi olla. Kõik aurustub, kõik laguneb mitte üksnes aatomi-, vaid isegi tuumaosakesteks.

Ent isegi kui selline anum leiduks, ei kuumeneks plasma temas ikka mitte kunagi nii kõrge temperatuurini. Miks?

Füüsikas kehtib seadus, mille kohaselt kuuma keha võime soojust ära anda suureneb temperatuuri tõusmisel kiiresti. Vastavalt Stefan-Boltzmanni seadusele on kiirgus võrdeline temperatuuri neljanda astmega. Kõik katsed soojendada plasmat temperatuurini, mille puhul temas algaks raske vesiniku tuumade liitumine heeliumituumadeks, lõpevad seetõttu ebaõnnestumisega. Kui on saavutatud tasakaalutemperatuur, siis kandub kogu plasma poolt saadav soojus üle anuma seinale, viimane aga omakorda hajutab selle ümbritsevasse ruumi.

Meenutame, et kõik eespool toodud kaalutlused on tinglikud, sest me ei öelnud peamist: kust võtta soojusallikat plasma kuumutamiseks tähtede sisemuse temperatuurini — 200 miljoni kraadini?

Appi tuleb siin ... välk.

Külm gaas on väga hea elektriisolaator, kuid seda ainult teatava piirini.

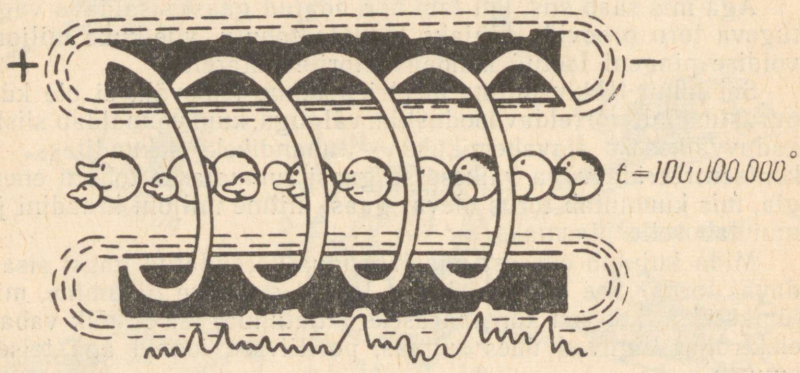
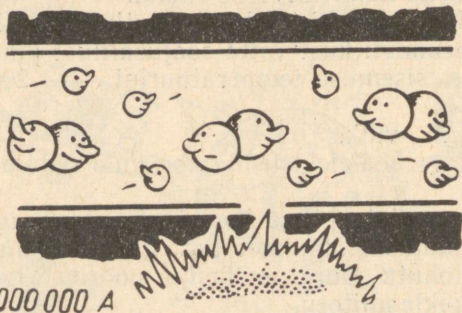
Juba suhteliselt madala pinge korral võib tugevasti hõrendatud gaasis toimuda nõndanimetatud gaaslahendus. Gaaslahenduseseadmete tohtu suure perekonna noorim liige on kõigile tuntud valgusreklaamitoru.

AGA mis saab siis, kui läbi hõrendatud gaasi sisaldava väga tugeva toru proovida tühjaks laadida tohtu, viie-kuue miljoni voldise pingeni laetud kondensaatorite patareid?

Sel juhul tekkiv mitme meetri pikkune tehisevälk ei ole küll purustusjõult võrreldav loodusliku välguga, kuid võimaldab siiski kaduvväikeseks ajavahemikuks — tuhandikeks sekunditeks — kontsentreerida väga väikesesse gaasi ruumalasse tohtu energia, mis kuumutab torus olevat gaasi mitme miljoni kraadini ja muudab selle plasmaks.

Mida kujutab enesest gaaslahendus hõrendatud gaasi sisaldavas torus? See on elektriliselt laetud osakeste liikumine, mis lühikeseks ajaks on korrapäraseks muutunud, nii et kõik vabad elektronid liiguvad ühes suunas, positiivsed ioonid aga teises suunas.

AGA mis on elektronide korrapärane liikumine? Elektrivool. Seejuures teame, et elektrivoolu kandva juhtme ümber tekib magnetväli. Mida tugevam on vool, seda suurem on ka tekkiva mag-



netvälja tugevus. Kui selline ühesuunaline vool lasta läbi paralleelsete juhtmete kimbu, siis surub magnetväli juhtmed otsekohe suure jõuga kokku. Ideaalselt ioniseeritud plasma kujutabki enesest sisuliselt võrdlemisi hõredalt paiknevate juhtmete kimpu.

Kui see aga on nii, siis hakkab toru ümber tekkiv ja plasmat läbiva voolu tugevuse suurenemisel pidevalt tugevnev magnetväli hõredat plasmat peeneks plasmanööriks kokku suruma, vähendades sel teel ta ruumala ning tõstes järelikult ta temperatuuri ja rõhku, sest plasma väikeses ruumalas kasvab aatomiosakeste kokkupõrgete arv järsult. Peaasi aga on see, et plasmat kokkusuruv magnetusikas eraldab plasma toru seinast ja katkestab seega soojuste äravoolu läbi toru seina. Seetõttu tõuseb plasma temperatuur veelgi. Kui aga osakesed ei pommita enam toru seina, siis ei avalda nad sellele ka rõhku ja langeb ära fantastiliselt tugevaseinaliste torude valmistamise lahendamatu ülesanne.

Lühemalt: plasma organiseerib ennast ise — tõmbub kokku, kuumeneb ja isoleerub täielikult toru seinast. Järelikult jääb vaid üks mure: elektrivoolu tugevuse ja pinge suurendamise ning voolu mõjul plasma ümber tekkiva magnetvälja tugevdamise teel «pumbata» plasmasse võimalikult palju energiat. Ja oodata, kuni alanud termotuumareaktsioon purustab seadme ja kõik muu ümberringi mitme kilomeetri ulatuses?

Mitte midagi sellist muidugi ei toimu ega saagi toimuda. Esiteks tekib plasma suhteliselt väga väikeses gaasi ruumalas, kusjuures gaas on pealegi veel tugevasti hõrendatud. Ja isegi kui plahvatuslik termotuumareaktsioon kulgeks korruga kogu gaasi mahus, oleks plahvatuse jõud ikkagi piiratud — igal juhul ohutu.

Edasi. Plasma sellisel kuumendamisel saavutatavast temperatuurist on sünteesiks vajaliku 200 miljoni kraadini esialgu veel väga pikk samm.

Tõsi küll, kui puhta deuteeriumi asemel kasutada deuteeriumi ja tritiumi segu, siis on termotuumareaktsiooniks vajalik temperatuur tunduvalt madalam ja reaktsioon võib kulgeda juba temperatuuril mõnikümmend miljonit kraadi.

Agas kuidas kindlaks teha sellise reaktsiooni kulgemist elektrilahenduse ajal? Neutronkiirguse järgi. Kahe raske vesiniku (deuteeriumi) aatomituumade liitumisel moodustub heeliumi 3 aatomituum, paiskub välja prooton või neutron, tekib gamma-kiirgus ja vabaneb 3,2 MeV energiat. Kui üks deuteeriumi aatom asendada üliraske vesiniku (tritiumi) aatomiga, siis moodustub

heeliumituum (alfaosake) ning emiteerub üks neutron ja veidi gammakiirgust. Energiat vabaneb sel juhul 17,6 MeV. Triitiumituuma liitumine prootoniga annab alfaosakese ja 19,8 MeV energiat; lõpuks, liitiumi 6 tuumast ja deuteeriumituumast moodustub kaks alfaosakest ning vabaneb 22,4 MeV energiat.

Plasmast väljuvate neutronite kinnipüüdmise ja nende hulga määramise teel on kerge saada kõiki vajalikke andmeid selle kohta, mis toimub plasmas: kindlaks teha termotuumareaktsiooni astuvate tuumade arvu, reaktsiooni kiirust jms.

Kahjuks on selgunud, et magnetväli ei ole ideaalne nähtamatu sein, mis hoiaks plasmat kindlalt toru keskjoonel. Esiteks võib juhtuda, et üksikud plasmaosakesed, mis üksteisega lõpmatutes kiiruse ja energia kombinatsioonides kokku põrkavad, omandavad juhuslikult nii suure energia, et isegi kõige tugevam magnetväli ei suuda neid tõkestada ja nad jõuavad anuma seinani.

Teiseks võib suur hulk mingil hetkel ühes suunas liikuvaid laetud osakesi teatavates tingimustes tekitada omaenese magnetvälja, mis võib plasma teda isoleerivast magnetväljast «läbi suruda». Võib esineda veel teisigi kapriise. Aga miks on teadlased plasma selliste kapriiside suhtes nii «tundlikud»?

Asi on selles, et plasmas ei kulge termotuumareaktsioon miljondikke sekundeid või sekundi veel väiksemaid murdosi kestva plahvatusena nagu vesinikupommis. Osakeste liitumiseks kuluv aeg oleneb plasma «tihedusest». Antud magnetväljale vastab teatav «tiheduse» maksimum. Kui plasma on saavutanud sellise «tiheduse», siis kestab liitumine ligikaudu üks sekund. Järelikult on vajalik termoisolatsioon — plasma temperatuuri säilitamine vähemalt ühe sekundi vältel või kauemgi. See aga on väga raske.

Et otsene tee — elektrilahenduse tekitamine gaasis — ei anna soovitavaid tulemusi, plasmaolekut aga on võimalik saavutada ka teisiti, siis on teadlased hakanud üksteise järel proovima kõiki teisi võimalusi. On teada, et kui tugevasti kiirendatud osake satub magnetvälja, siis hakkab ta liikuma spiraalselt, kusjuures selle liikumise intensiivsus oleneb magnetvälja tugevusest. Osake just nagu «mähkub» oma teel oleva nähtamatu, teadmata millest koosneva, arvatavasti ainult tingliku «magnetjõujoone» ümber.

Suunamine elektronide või positiivselt laetud deuteeriumioonide kimbu küljelt suurde, õhust hoolikalt tühjaks pumbatud torusse, milles selle ümber olevad suured poolid tekitavad tugeva mag-

netvälja. Torusse suunatud osakesed hakkavad otsekohe selle välja jõujoonte ümber «mähkuma», kokku pörkama ja soojenema. Kui me nüüd magnetvälja tugevust suurendame, siis tõmbub väli kokku ja surub seetõttu kokku ka jõujoonte ümber mähkunud laetud osakeste girlande. Osakeste kokkupõrgete arv suureneb ja plasma temperatuur tõuseb. Kui toru otstes tekitatakse veel tugevam magnetväli, siis pörkavad toru otsani jõudnud spiraalselt liikuvad laetud osakesed tagasi, läbivad toru vastasuunas, pörkavad teises otsas vastu samasugust «magnetpeeglit» ja pöörduvad jälle ringi. Nõnda liiguvad osakesed piki magnetvälja jõujooni edasi-tagasi, koguvad neid kokkusuruva magnetvälja mõjul energiat ja tõstavad kogu plasma temperatuuri. Sellel põhimõttel töötav seade, mis kannab «Ogra» nime, on konstrueeritud I. V. Kurtšatovi nimelises Aatomienergia Instituudis.

Plasmaosakesi saab panna liikuma ka lõputus (rõngakujulises) torus, kui plasmat kokku suruda mitte põik-, vaid pikisuunalise magnetväljaga. Et sellisel rõngal on mõningaid puudusi, siis võib sellest teise rõnga lisamise teel teha «kaheksa». Sel viisil saadakse «stellaraator», mida kõige rohkem kasutavad ameerika teadlased.

On veel suur hulk teisi, üksteisest mitmesuguste täiustuste poolest erinevaid seadmeid. Täiustuste peamiseks eesmärgiks on plasma ebapüsivuse põhjuste likvideerimine.

Transuraanid. Kolmekümnendate aastate keskel, püüdes luua uusi, uraanist raskemaid keemilisi elemente, pommitasid E. Fermi ja ta noored kolleegid uraani neutronitega. Need katsed viisid teadlasi algul üsna kaugele kõrvale ning alles sensatsioonilistest avastustest tulvil ringteed mööda jõuti lõpuks üliiraskete tehislike transuraanelementideni — neptuuniumini 239 (nr. 93) ja plutooniumini 239 (nr. 94). Veel raskemate elementide loomine aga ebaõnnestus, sest ilmnis, et teadlaste käsutuses olevate osakeste, sealhulgas ka kõikvõimsa neutroni energia oli selleks otstarbeks liiga väike. Alles pärast seda, kui lasti käiku võimsad kiirendid, mis andsid osakestele sadade miljonite ja miljardite elektronvoltideni ulatuva energia, ilmusid üksteise järel uued tehislikud transuraanid järjenumbritega 95 kuni 104: ameriitium 243 (1945. aastal), kuurium 247, berkeelium 247, kalifornium 249, einsteinium 254, element nr. 100 — fermium 253 (nimetatud E. Fermi auks), uue saja esimene element mendelee-

vium 256 (nimetatud suure vene keemiku D. Mendelejevi auks), nobeelium 254 ning lõpuks üsna hiljuti avastatud laurentsium 257 ja element nr. 104, millel veel puudub nimetus*.

Kogu seda elementide rühma on seni veel suhteliselt vähe uuritud. Kõik need elemendid on radioaktiivsed ja neil on äärmiselt väike poolestusaeg: mida suurem on nende aatommass, seda kiiremini nad lagunevad.

Looduslikes kivimites neid elemente ei esine. Mõnda nendest on saadud nii vähe (17 aatomit!), et nende omaduste kindlakstegemiseks on tulnud rakendada tänapäeva radiokeemia kõige täpsemaid meetodeid.

Tšerenkov-Vavilovi efekt — helendus, mis tekib aines, kui seda läbib osake, mille kiirus ületab valguse kiiruse antud aines. Selle nähtuse avastasid nõukogude füüsikud P. Tšerenkov ja S. Vavilov.

Uus kiirgus osutus väga tähelepanuväärseks. Ta ei levi igas suunas, vaid koonusekujuliselt, kusjuures koonuse telg ühtib osakese liikumissihiga. Koonuse tipunurk sõltub rangelt osakese kiirusest ja aine murdumisnäitajast temas tekkiva kiirguse suhtes. See võimaldab kõnesolevat nähtust rakendada kiirete laetud osakeste — elektronide, prootonite, mesonite — kiiruse ja lennu-suuna täpseks määramiseks, sest kiirguse heledus kasvab seda tekitava osakese kiiruse suurenemisel ja on võrdeline osakese eiekrilaengu ruuduga.

1958. aastal määrati nõukogude teadlastele P. Tšerenkovile, I. Frankile ja I. Tammele selle silmapaistva avastuse ning kiirguse teooria väljatöötamise eest Nobeli füüsikapremia.

Tuumaenergia — energia, mis vabaneb raskete elementide (uraani, plutooniumi) aatomituumade jagunemisel või kõige kergemate elementide (vesiniku) aatomituumade liitumisel raskemate elementide (heeliumi) aatomituumadeks. Nimetus «tuumaenergia» on õigem ja täpsem kui sageli kasutatav nimetus «aatomenergia».

Tuumajõud. Elektrilised jõud, mis tõmbavad negatiivselt laetud elektrone positiivselt laetud aatomituuma poole, peaksid

* Nõukogude teadlase I. Kurtšatovi auks on element nr. 104 nimetatud kurtšatoviumiks. — *Tõlkija.*

füüsika seaduste kohaselt põhjustama tuuma koostisse kuuluvate positiivselt laetud osakeste — prootonite — laialilendamise.

Tegelikult aga ei lenda tuumas olevad prootonid laiali, vaid püsivad millegipärast koos, ja sageli nii tugevasti, et nende eemaldamiseks üksteisest või üheaainsagi prootoni väljalöömiseks tuumast kulub tohutu hulk energiat.

Missugused salapärased, senitundmatud jõud seda põhjustavad?

Need jõud ei saa olla elektrilise päritoluga, sest isegi kui poolte prootonite positiivne elektrilaeng aatomituumas äkki asenduks negatiivse laenguga, oleksid positiivsete ja negatiivsete laengute vahelised tõmbejõud umbes nelikümmend korda nõrgemad ühemärgilise laenguga prootoneid tegelikult aatomituumas hoidvatest jõududest. Võib-olla on siis tegemist gravitatsioonijõududega? Need osutuvad veel vähem sobivateks, sest aatomituumas kahe osakese vahel mõjuv gravitatsioonijõud on neid tegelikult koos hoidvast jõust 10^{37} korda nõrgem.

Tänapäeva teoreetiline füüsika on seisukohal, et elektriliselt laetud kehade ja osakeste vahelist külgetõmmet ning tõukumist põhjustavad nendest emiteeruvad ja nendes neelduvad footonid. Tunduvalt raskem on kujutleda ilmselt ebatavalisi jõude, mis mõjuvad aatomituuma koostisse kuuluvate elementaarosakeste vahel.

Arvukad katsed on näidanud, et kahe tuumaosakese vastastikune mõju oleneb mitte üksnes nendevahelisest kaugusest, vaid ka nende suhtelise liikumise kiirusest ja pöörlemissuunast. Veel enam: on olemas jõude, mis mõjuvad üheaegselt kolme, nelja ja suurema arvu osakeste vahel.

Eriti tuleb rõhutada, et need jõud ei olene üldse osakeste elektrilaengust. Prooton ja prooton, neutron ja neutron, prooton ja neutron tõmbuvad teineteise poole ligikaudu ühesuguse jõuga. Kõige tähelepanuväärsem aga on see, et nende jõudude mõju-raadius on väga väike. Kui kaks prootonit asetsevad teineteisest näiteks 10^{-13} cm kaugusel (see moodustab ühe sajatuhandiku aatomi raadiusest), siis on nendevaheline tuuma-tõmbejõud kahe ühesuguse positiivse elektrilaengu vahelisest tõukejõust nelikümmend korda tugevam. Kauguse suurenemisel kõigest neli korda aga muutuvad need jõud juba võrdseks. Kui kaugus suureneb 25 korda, siis ületavad elektrilised tõukejõud tuuma-tõmbejõude... miljon korda!

Teisest küljest: kaugustel, mis on tunduvalt väiksemad kui

$0,5 \cdot 10^{-13}$ cm, lakkab järsult tuuma-tõmbejõudude toime ja nende asemel hakkavad mõjuma veel tugevamad tõukejõud.

Tuumaosakeste-vaheline vastastikune mõju on analoogiline elektriliste jõudude mõjuga ja seda põhjustab mingisuguste footonitaoliste osakeste vahetus. Sellist mõtet väljendas esimesena nõukogude füüsik, akadeemik I. Tamm.

Toetudes kogunenud teoreetilisele ja eksperimentaalsele materjalile, avaldas jaapani füüsik Hideki Yukawa 1935. aastal arvamust, et tuumaosakesi siduva kvandi ülesannet täidab seni-tundmatu materiaalne osake, mille ta nimetas mesoniks. Ta ennustas ka, missuguste omadustega peavad olema osakesed, mida omavahel vahetavad prooton ja neutron, et tekiksid tohutud jõud, mis mõjuvad väga väikestest kaugustest ja ainult aatomi tuuma piirides. Et need vahetusosakesed saaksid oma ülesannet täita, peab nende ning prootonite ja neutronite vahel laengust sõltumatult esinema tugev interaktsioon (tugev vastastikune mõju).

Elektromagnetiliste jõudude taolisi suurtest kaugustest mõjuvaid jõude saavad kvantmehaanika printsiipide kohaselt üle kanda ainult osakesed, millel puudub seisumass, s. t. mis saavad eksisteerida ainult valguse kiirusega liikudes. Sellised osakesed, nagu eespool öeldud, ongi footonid. Footonil on mass, s. t. osakese omadused siis, kui ta liigub valguse kiirusega.

Väga väikestest kaugustest mõjuvaid jõude aga peavad samade kvantmehaanika seaduste järgi üle kandma osakesed, millel on mass ka siis, kui nad seisavad paigal. Nende mass peab olema seda suurem, mida väiksem on vastavate jõudude mõjuraadius.

Kui jõudude mõjuraadius on umbes 10^{-13} cm, siis peab neid üle kandvate osakeste mass ligikaudu kakssada korda ületama elektroni massi.

Et eri nukleonid saaksid neid osakesi vahetada, peavad need kandma elektrilaengut. Protoni ja neutroni interaktsiooni korral emiteerib prooton positiivse mesoni, mille neelab neutron. Prooton kaotab seejuures oma positiivse laengu ja muundub neutroniks, neutron aga omandab positiivse laengu ja muundub protoniks. Samasugune on tulemus muidugi ka siis, kui neutron emiteerib negatiivse mesoni, mille neelab prooton.

Yukawa oletus, et eksisteerivad positiivsed ja negatiivsed mesonid, oli kooskõlas tänapäeva füüsika põhiprintsiibiga, mille

kohaselt igale laetud osakesele vastab looduses vastandmargilise laenguga osake.

Esimesed sellised osakesed, mida hakati nimetama müümesoniteks (μ -mesoniteks), avastati kosmilises kiirguses. Nende mass võrdus 207 elektroni massiga.

Varsti aga selgus, et müümesonid ei olnud sellised, nagu oodati. Nende interaktsioonid prootonite ja neutronitega olid nõrgad, mistõttu nad ei saanud olla tuumajõudude ülekandjateks. Pealegi olid nad äärmiselt ebapüsivad. Nende keskmine iga oli kõigest $2,2 \cdot 10^{-6}$ sekundit. Sellise mesoni lagunemisel tekkis olenevalt laengust elektron või positron. Seejuures vabaneva energia arvutamine ja «massibilanss» näitasid, et lisaks sellele pidi tekkima veel vähemalt kaks osakest, mis pidid olema laenguta ning nulliga võrdse või nullile lähedase massiga, s. t. seisumassita. Need osakesed olid *neutriinod*. Pärast mitmeaastast suurt segadust ja arusaamatust avastasid C. F. Powell ja ta kaastöötajad lõpuks 1948. aastal mesonid, mis olid tuumaosakeste-vaheliste vahetusjõudude tegelikud ülekandjad. Need nimetati piimesoniteks (π -mesoniteks). Piimesonite mass osutus elektroni massist 273 korda suuremaks.

Piimesoni tekkimise ja eksisteerimise tingimused ning edasised muundumised on väga keerukad. Kui kosmilisest kiirgusest pärinev piimeson aines pidurdub, siis laguneb ta kaheks osakeseks — eespool kirjeidatud müümesoniks ja neutriinoks.

Edasi aeglustub ka müümeson ning laguneb elektroniks ja kaheks neutriinoks. Kui kiire piimeson aatomituumaga kokku põrkab, siis on ta suuteline seda lagundama. Erinevalt müümesonitest on raskete piimesonite interaktsioonid nukleonidega tugevad. Just need osakesed osutusidki tuumavälja juba 1933. aastal ennustatud kvantideks, samuti nagu footonid on elektromagnetvälja kvandid. Et aga kõik täpselt klapiks, pidi eksisteerima veel laenguta, neutraalne piimeson, mis pidi vastastikust mõju üle kandma prootoni ja prootoni ning neutroni ja neutroni puhul, s. t. juhtudel, kus ükski nukleon ei muundu teiseks. On loomulik, et prooton ei saa neelata positiivset mesonit, sest ta ei saa omandada teist positiivset laengut. Järelikult ei ole ükski laetud meson suuteline üle kandma prootonite vastastikust mõju.

Varsti avastatigi kosmilises kiirguses ka neutraalsed mesonid, mille mass ületab elektroni massi 264 korda, kuid mis ei kannu mingisugust elektrilaengut.

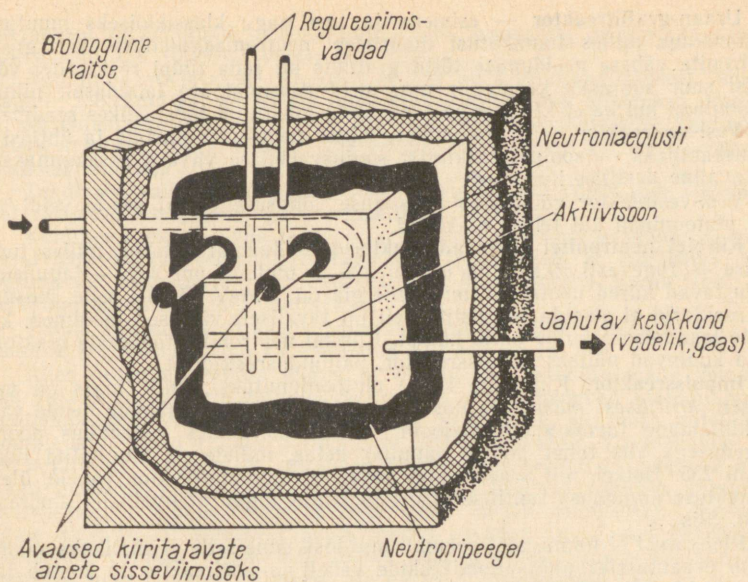
Neutraalsete piimesonite olemasoluga on muu hulgas seletatav tuumajõudude mõju sõltumatus tuuma koostisse kuuluvate osakeste laengutest. Ka nende mesonite iga on väga lühike ja nad lagunevad kaheks footoniks. Tuumajõudude tekkes ja eksisteerimises on järelikult «süüdi» kolme liiki osakesed, mida aatomituumade koostisse kuuluvad nukleonid emiteerivad ja neelavad. Need osakesed on positiivsed, negatiivsed ja neutraalsed piimesonid.

Tuumareaktorid (aatomireaktorid, aatomikatlad). Nõnda nimetatakse seadmeid, milles toimuva uraani- või plutooniumituumade juhitava jagunemis-ahelreaktsiooni käigus vabaneb tohutu hulk soojusenergiat — miljoneid kordi rohkem kui sama koguse parima kütuse põlemisel. Sõna *pile*, millega inglise keeles tähistatakse tuumareaktorit, tähendab pigemini virna kui katelt. Esimene tuumareaktor oligi oma olemuselt virn, sest ta koosnes mitmesajast suurte grafiittelliste kihist, mis kokku moodustasid midagi tohutu grafiitkera taolist. Kera suhteliselt väikeses keskosas, reaktori nõndanimetatud *aktiivtsoonis*, läbis telliseid kaks silindrilist avaust, millesse asetati metalset uraani või selle oksiide sisaldavad alumiinupadrunid. Kokku viidi aktiivtsooni umbes 50 tonni uraani, mille mass ületas *kriitilise massi* ja milles seetõttu võis kulgeda iscarenev jagunemis-ahelreaktsioon.

Aktiivtsoonis uraanipadrunitel vahel olev grafiit etendas neutroniaeglusti osa, välised kompaktsed grafiidikihid aga moodustasid peegli, mis suunas neutronid tagasi aktiivtsooni, kui nad sealt uraani 235 tuumasid lõhustamata või uraani 238 tuumades neeldumata välja lendasid.

Et ahelreaktsioon ei algaks enneaegselt, paigutati reaktorit ülalt alla läbivatesse spetsiaalsetesse kanalitesse kaadmiumvardad, mida oli kerge üles tõsta ja alla lasta. Kaadmium neelas ahnelt neutroneid ega võimaldanud neil geomeetrilises progressioonis laviinitaoliselt paljuneda. Varraste järkjärgulise reaktorist väljatõmbamise teel oli võimalik väga kindlalt ja täpselt reguleerida ahelreaktsiooni algusmomenti ja kiirust ning automaatselt hoida seda mistahes soovitava tasemel. Peale selle olid reaktoris kanalid mõõteriistade ning neutronitega kiiritamiseks aktiivtsooni viidavate ainete jaoks.

Reaktori töö käigus tekkis tohutu hulk väga ohtlikku, suure läbimisvõimega neutron- ja gammakiirgust. Seepärast tuli



reaktor ümbritseda kahe-kolme meetri paksuse betoonkestaga, nõndanimetatud *bioloogilise kaitsega*.

Esimese tuumareaktori käikulaskmisest on möödunud rohkem kui 20 aastat. Selle aja jooksul on paljudes maailma riikides ehitatud suur hulk kõige mitmekesisemat liiki ja tüüpi reaktoreid, millest ühed on jalgpallisuurused, teised meenutavad paljukorruselisi hiiglatehaseid, kusjuures nende võimsus varieerub vati murdosadest sadade tuhandete kilovattideni. Konstruksiooni ning otstarbe muutumisest ja komplitseerumisest hoolimata aga on kõigi reaktorite põhimõtteskeem jäänud samasuguseks kui esimesel reaktoril.

Tuumareaktoreid kasutatakse elektrienergia tootmiseks, teaduslikel uurimistöödel rakendatavate võimsate neutronivoo-
gude tekitamiseks, mitmesuguse kiirgusintensiivsuse ja poolestusajaga radioaktiivsete tehisotopide valmistamiseks, ainete kiiritamiseks nende füüsikaliste ja keemiliste omaduste muutmise eesmärgil, tuumkütuse — plutooniumi 239 ja uraani 233 — saamiseks mittejagunevast uraanist 238 ja tooriumist 232 ning teisteks otstarveteks.

Uraan-grafiitreaktor — esimene ja just nagu klassikaliseks muutunud reaktoritüüp, milles tuumkütust ümbritseb neutroniaeglustiks olev grafiit. Neutronite vähesel neeldumise tõttu grafiidis on seda tüüpi reaktoritel võrdlemisi suur soojuslik kasutegur ning neid rakendatakse laialdaselt niihästi plutooniumi kui ka elektrienergia tootmiseks määratud tööstuslikes seadmetes.

Vesi-vesireaktor — tuumareaktor, milles neutroniaeglustiks ja ühtlasi ka soojuskandjaks — soojust reaktorist soojusvahetisse viivaks keskkonnaks — on tavaline destilleeritud vesi.

Vesi-vesireaktor võimaldab ühesuguse võimsuse korral saada veidi rohkem plutooniumi kui teised reaktorid.

Kiiretel neutronitel töötavad reaktorid — tuumareaktorid, milles tuumkütuse — tugevasti rikastatud uraani 235 ja plutooniumi 239 — jagunemist põhjustavad kiired neutronid, mille energia on 1 MeV või üle selle. Niisugused reaktorid ei sisalda aeglustit. Neil on tavaliselt väikesed mõõtmed, kuid nende laadimiseks kulub palju kütust. Kiiretel neutronitel töötavate reaktorite hulka kuuluvad näiteks impulssreaktor, paljundusreaktor jt.

Impulssreaktor. Kujutlege kahte plutooniumitükki, mille mass on veidi väiksem kriitilisest massist ja mis on paigutatud nii, et vahemik nende vahel on küllaldane tuuma-ahelreaktsiooni vältimiseks. Selles vahemikus pöörleb (sagedusega viis tuhat pöört minutis) ketas, millele on kinnitatud tükike uraani 235. Hetkel, mil uraanitükike jõuab plutooniumitükkide vahele, ületab tuumkütuse kogumass kriitilise massi ja temas algab plahvatuslik ahelreaktsioon. Siis...

Plahvatust ei toimu, sest sekundi murdosa enne selle võimalikuks saamist väljub uraanitükike plutooniumitükkide vahelt ja ahelreaktsioon kustub jälle niisama kiiresti. Plutooniumi ja uraani «vastasseisu» hetkel aga paiskub välgsähvatusena välja suur hulk kiireid neutroneid.

Niisuguse reaktori väärtus seisab selles, et kõigest 1-kilovattisel keskmisel võimsusel annab ta viis tuhat korda minutis neutronimpulssi, mille võimsus on mitu tuhat kilovatti. Selline võimsus on jõukohane ainult suurele tööstuslikule reaktorile.

See võimaldab uurida ja mõõta mitte üksnes suurte neutronikoguste energiat, kiirust ja omadusi, vaid ka nende vastastikust mõju kõige mitmekesisemate ainetega.

Paljundusreaktor (briiderreaktor). Meil oli juba juttu sellest, et jagunevat isotoopi (uraani 235) sisaldub looduslikus uraanis ainult 0,7%. Ülejäänud 99,3% moodustab uraan 238, millest uraani 235 eraldamine on väga keerukas ning mis pärast viimase eraldamist varem kujutas enesest väga kallist ning mujal mitterakendatavat tootmisjääki. Seda säilitati, ilma et oleks teadud, mida sellega peale hakata.

Teadlaste ette kerkis probleem, kuidas on tulusam ja tehniliselt lihtsam vabastada aatomi sisemuses varjul olevat energiat — kas otseselt, eraldades selleks looduslikust uraanist 0,7% väärtuslikku jagunevat isotoopi (vt. «Isotoopide segude lahutamine»), või tekitades iseareneva jagunemis-ahelreaktsiooni looduslikust uraanist eraldamata uraanis 235. Kui uraani 235 aatomi tuumade jagunemisel vabanevad neutroneid sellisel määral aeglustatakse, et enamik neist intensiivselt neeldub uraani 238 aatomituumades, siis muunduvad viimased pärast lühikest radioaktiivsete lagunemiste ahelat looduses mitteeksisteeriva radioaktiivse tehiselemendi plutooniumi 239 aatomituumadeks, mis jagunevad igasuguse energiaga neutronite toimet.

Mida seejuures kaotatakse? Looduslikust segust 0,7% uraani 235 välja-

põletamisel on võimalik plutooniumiks 239 muundada mõnevõrra väiksem hulk uraani 238 (0,7%-st umbes 0,3—0,5).

Agas mida võidetakse? Plutoonium 239 on küll massi poolest lähedane uraanile 238, kuid tal on hoopis teistsugused keemilised omadused ning teda on võrreldamatult kergem uraani 235 jagunemise produktidest, jagunemata jäänud uraanist 235 ja uraanist 238 eraldada kui uraani isotoopide segu füüsikalisel lahutada.

Teadlased valisid teise suuna, mis on õigem ning võimaldab aatomienergiat rakendada tehnilistes ja energeetilistes seadmetes.

Kuid see meie päevade teaduse ja tehnika iseenesest grandioosne saavutus ei lahendanud veel põhiprobleemi, mis seisib selles, et loodusliku uraani kogumassist õnnestus kiirete neutronite abil ära kasutada ainult 1/140, kogu ülejäänud uraan aga läks jäätmeteks.

Tekkis küsimus, kust saada küllaldaselt hulgal kiireid neutroneid, et oleks võimalik jagunema panna ka ülejäänud 139 osa uraani 238.

Alles tunduvalt hiljem selgus, et uraani 238 aatomituumade lõhustamiseks vajalik energia on paljudel neutronitel, mis vabanevad plutooniumi 239 jagunemis-ahelreaktsiooni käigus. Kui see aga on nii, siis miks mitte püüda tuumareaktori tööd rajada plutooniumi 239 jagunemisel vabanevatele kiiretele neutronitele. Skeem on umbes järgmine. Reaktori keskel paikneva aktiivtsooni moodustavad plutooniumvardad, milles kulgeva juhitava jagunemis-ahelreaktsiooni käigus vabaneb suur hulk kiireid neutroneid. Neutroneid tagasi aktiivtsooni suunavat grafiitpeeglit asendab mitu rida uraanist 238 koosnevaid vardaid. Uraan 238 neelab jäägitult kõik temani jõudvad kiired neutronid ning muundub lühikese aja pärast plutooniumiks 239.

Oletame, et reaktoris «põleb ära» 1 kg kusagilt tavalisel viisil saadud plutooniumi 239. Iga jagunev plutooniumituum paiskab välja kaks-kolm kiiret neutronit, mille energia ületab 1 MeV. Kui, ütleme, keskmiselt üks neutron kulub ahelreaktsiooni säilitamiseks plutooniumis eneses, siis 1,5—2 neutronit neeldub uraani 238 aatomituumades ning muundab need algul neptuuniumi 239 ja seejärel plutooniumi 239 aatomituumadeks. Lõppkokkuvõttes tekib «uraanpeegli» eespool toodud eeldustel 0,5—1 kg plutooniumi 239.

Kui see kilogramm plutooniumi 239 uuesti paigutada samasugusesse reaktoris, siis muundub plutooniumiks 239 juba 2 kg uraani 238. Lühidalt: 1/140 asemel on võimalik ära kasutada mitu korda rohkem looduslikku uraani, aja jooksul isegi 100%!

Et reaktori aktiivtsoon on väga väike, kuid temas vabaneb sadu tuhandeid kilovatte energiat, siis on soojuste ärajuhtimine aktiivtsoonist äärmiselt keerukas ülesanne.

Vahepealsetel neutronitel töötav reaktor — tuumareaktor, milles uraanituumade jagunemist põhjustavad nõndanimetatud vahepealsed neutronid, mille energia on 0,1 keV kuni 0,1 MeV.

Aeglastel (soojustel) neutronitel töötav reaktor — tuumareaktor, milles tuumkütuse jagunemist põhjustavad peamiselt aeglastel (soojustel) neutronid. Sellistes reaktorites kasutatakse aeglusteid (vett, grafiiti, rasket vett), mis vähendavad neutronite energia ligikaudu 0,03 elektronvoltini.

Rikastatud uraanil töötav reaktor — tuumareaktor, milles kasutatavat tuumkütust on rikastatud uraaniga 235. Rikastatud kütuse kasutamise korral suureneb neutronite paljunemistegur niivõrd, et vähe neutroneid neelavate spetsiaalsete materjalide asemel on reaktori ehitamisel võimalik kasutada

veidi rohkem neutroneid neelavaid materjale, näiteks roostevaba terast, aeglustina aga on rakendatav harilik vesi. Lisaks sellele vähendab suurem uraani 235 sisaldus tuumkütuse kriitilist massi ja seetõttu ka reaktori mõõtmeid.

Nullvõimsusega reaktor — tuumareaktor, mille võimsus on nii väike, et ei ole tarvis sundjahutust ega spetsiaalseid vahendeid teenindava personali kaitsmiseks kiirguse eest. Selliseid reaktoreid kasutatakse ainult uurimistöödeks ja õppeotstarbeks.

Gaasjahutusega reaktor — tuumareaktor, milles vee või vedela metalli asemel on soojuskandjaks vähe neutroneid neelav gaas. Gaasjahutus annab reaktori väljundil väga kõrge temperatuuri, mis on vajalik seadme kasuteguri suurendamiseks, kuid nõuab tunduvalt energiakulu suurte gaasihulka läbipumpamiseks reaktorist.

Orgaanilise aeglusti ja soojuskandjaga reaktor — tuumareaktor, milles aeglustina ja soojuskandjana kasutatakse orgaanilisi aineid, näiteks bifenüüli, terfenüüli jt. Nende ainete kasutamise korral on võimalik tunduvalt vähendada reaktori aktiivsooni mõõtmeid, korpuse tugevus võib olla väiksem, langeb ära soojuselementide ja teiste detailide korrosiooni oht ning väheneb neutronite neeldumine.

Raskel veel töötav reaktor — tuumareaktor, milles aeglustiks on raske vesi. Seda tüüpi reaktorid on eriti sobivad teaduslikeks uurimistöödeks, sest nad võimaldavad aktiivsoonis saada väga suurel hulgal neutroneid.

Basseinreaktor — tuumareaktor, milles soojuselemendid on kassetidena paigutatud suure basseini põhja. Basseinis olev vesi täidab üheaegselt nii hästi jahuti kui ka neutroniaeglusti ülesandeid. Basseinreaktoreid kasutatakse peamiselt uurimistöödeks ja radioaktiivsete isotoopide valmistamiseks.

Vedelkütusel töötav reaktor — tuumareaktor, milles tuumkütust kasutatakse vedelikuna — uraani- või plutooniumisoola lahusena või jaguneva aine peene suspensioonina. Vedelik, milles tuumkütus on lahustatud või suspendeeritud, etendab ühtlasi neutroniaeglusti ning aktiivsoonest soojust ära viiva soojuskandja osa. Niisugust tüüpi reaktori eeliseks on see, et jagunemisproduktide ja kasutamata jäänud tuumkütuse kõrvaldamine ning värske kütuse sisseviimine võib toimuda pidevalt, ilma reaktori seiskamiseta ümberlaadimise otstarbel. Ühtlasi aga komplitseerib see eelise reaktori konstruktsiooni ja raskendab ta tööd, sest kütuse pidevaks regenereerimiseks on vajalik spetsiaalne sõlm, milles kogu aeg peab viibima osa reaktoris ringlevast jagunevast materjalist. Samal põhjusel suureneb tunduvalt bioloogilise kaitse maht.

Tuumareaktsioonid — ühete aatomituumade iseeneslikud või tehislikult esilekutsutavad muundumised teisteks aatomituumadeks, millega kaasneb tuumade struktuuri ümberkujunemine või tuumades sisalduvate nukleonide arvu muutumine. Tuuma-reaktsioonide käigus võib toimuda kogu tuuma täielik lagunemine, kui teda tabab väga suure energiaga (kiirusega) osake; mingi osakese, tavaliselt neutroni neeldumine; tuuma jagunemine kaheks mittevõrdseks osaks; prootonite, neutronite, alfa-osakeste ja gammakvantide emiteerumine (vt. «Alielreaktsioon»). Tuumareaktsioonide hulka kuulub ka *tuumasüntees*.

Tuumasüntees (vt. «Termotuumareaktsioon») — tuuma-reaktsioon, mille käigus vesiniku (prootiumi, deuteeriumi või triitiumi) aatomituumad liituvad raskemateks heeliumi aatomituumadeks. Seejuures vabaneb ühe kilogrammi lähteaine kohta umbes kaheksa korda rohkem energiat kui uraani 235 või plutooniumi 239 aatomituumade jagunemisel.

Just kerge elementide aatomituumade liitumine raskemate elementide aatomituumadeks on meie Päikesel juba miljardeid aastaid võimaldanud kiirata muinasjutulisi energiahulki ja selle reaktsiooni arvel «säraavad» ka teised tähed. Inimene teostas tuumasünteesi esmakordselt vesinikupommi plahvatuse näol.

Toiduainete steriliseerimine. Radioaktiivne kiirgus hävitab paljusid haigusi tekitavaid baktereid ja teisi parasiite. See on võimaldanud välja töötada mitmeid meetodeid mitte üksnes valmistoitude; vaid ka tooreste toiduainete, eriti toore liha, värske kala jms. steriliseerimiseks. Meditsiinis desinfitseeritakse radioaktiivse kiirguse abil kirurgiainstrumente, sidemematerjale, mikrobioloogilisi söötmeid, joogivett jne.

Toorium — looduslik radioaktiivne element, mille järjenumber Mendelejevi tabelis on 90 ja aatommass 232,05. Metalse tooriumi moodustab praktiliselt üksainus isotoop — toorium 232, sest ülejäänud 13 isotoopi on kokku vähem kui 1%.

Tooriumil on kõigist teistest looduslikest radioaktiivsetest elementidest pikem poolestusaeg: 14,5 miljardit aastat!

Tooriumi loetakse küll tuumkütuseks nagu uraanigi, kuid mitte mingisugust ahelreaktsiooni ei saa temas toimuda, sest temas pole sellist nihästi kiirete kui ka aeglaste neutronite toimel jagunevat isotoopi, nagu seda on uraan 235 tavalises uraanis. Oma harilikus seisundis ei ole ta seepärast energetiliseks otstarbeks kasutatav.

Aga miks siis loetakse teda niisama väärtuslikuks tuumkütuseks kui plutooniumi? Just nimelt «kui plutooniumi». Asi on selles, et nagu mittejagunevat uraani 238, nii on ka tooriumi 232 kerge tuumkütuseks muuta. Selleks tuleb teda tavalises või eritiüpi tuumareaktoris intensiivselt pommitada neutronitega. Tehes läbi kaks lagunemist, millega kaasneb beetakiirgus, muundub toorium 232 tehiskütuseks, looduses mitteleiduvaks uraani isotoobiks — uraaniks 233, mis samuti nagu plutoonium 239 jaguneb nihästi kiirete kui ka aeglaste neutronite toimel.

Triitium — vesiniku üliraske radioaktiivne isotoop, mille aatommass on 3 ja poolestusaeg 12 aastat. Triitiumi aatomituum — triiton — koosneb ühest prootonist ja kahest neutronist. Lagunedes emiteerib triiton beetaosakesi, mille energia on umbes 0,018 MeV.

Tsüklilised kiirendid (resonantskiirendid) — laetud osakeste kiirendid, milles osakesed liiguvad kinnistel orbiitidel ning kiirenduvad paljukordsel kiirendusvahemike läbimisel. Nendes vahemikes saavad osakesed energiat vahelduvalt elektriväljalt, mille sagedus mõnedes kiirendites muutub vastavalt osakeste tiirlemisperioodile. Tsükliliste kiirendite hulka kuuluvad tsüklotron, fasetron, sünkrofasetron ja sünkrotron (vt. «Kiirendid»).

Tsüklotron — prootonite, alfaosakeste ja deutronite kiirendi, milles osakesed kiirenduvad muutuva amplituudiga, kuid püsiva sagedusega elektrivälja mõjul. Osakesi fokuseerib ja nende liikumist juhib võimsa elektromagnetiga tekitatav magnetväli, mis on samuti ajaliselt püsiv. Kiirendava välja sagedus valitakse selliselt, et osake pärast seda, kui ta inertsil mõjul on läbinud ühe kahest õõnsast poolkettakujulisest elektroodist — duandist, satuks duantide vahele alati sel hetkel, mil sealne elektrivälj just nagu tõukab osakese tagant, nii et ta omandab iga tiiruga üha suurema kiiruse.

Maksimaalne energia, mida võimaldavad osakestele anda tavalised tsüklotronid, on 20—30 MeV. See seletub asjaoluga, et osakeste suurte kiiruste (energiate) korral hakkab avalduma relativistlik efekt: osakeste kiiruse lähemisel valguse kiirusele suureneb nende mass, mistõttu kaob osakeste ning generaatorist lähtuva vahelduva elektrivälja impulsside kiirendusvahemikesse saabumise sünkroonsus (ajaline ühtelangevus).

Tsüklotronis kiirendatavate osakeste energia suurendamiseks tuleb rakendada mitmesuguseid tehnilisi täiustusi, näiteks muuta elektromagnetiga tekitatava magnetvälja tugevuse amplituudi. Muutuva magnetväljaga tsüklotrone nimetatakse sünkrotronideks.

Tšerenkov-Vavilovi loendurid. *Tšerenkov-Vavilovi efekt*il põhineb terve perekond kiirete osakeste — suure energiaga elektronide, prootonite, mesonite ja gammakvantide loendureid. Nendes püütakse kinni, võimendatakse paljukordselt ja registreeritakse kas kogu valgus, mida osake kiirgab, või ainult see osa valgusest, mis kiirgub teatava kindla nurga all osakese liikumissuuna suhtes. Kui uuritavad osakesed lastakse järjestikku läbi mitmest sellisest loendurist, siis on kerge kindlaks teha nende täpset kiirust, teiste loendurite ja aparaatide kaasabil aga ka massi, laengut ja muid omadusi.

Tuumaelektrijaam — elektrijaam, mis töötab uraani või plutooniumi aatomituumade jagunemisel vabaneva energia arvel. Esimene tuumaelektrijaam, mille võimsus oli 5000 kW, lasti käiku Nõukogude Liidus 27. juunil 1954.

Et tuumkütuse jagunemisel vabaneb soojusenergia, siis kujutab selline elektrijaam enesest tuumatehnika praegusel arenemisastmel tavalist soojus-elektrijaama, milles aurukatelt asendab tuumareaktor. Igasugune soojuskandja, mis jahutab reaktorit ja kannab sellest soojust ära, muutub reaktori läbimisel tugevasti radioaktiivseks ning on sel kujul inimestele väga ohtlik. Reaktor ja kogu torustik, milles ringleb soojuskandja, eraldatakse seepärast elektrijaama ülejäänud, tavalisest osast soojusvahetiga (aurugeneraatoriga), milles suletud ja hoolikalt isoleeritud primaarkontuuri soojuskandja annab soojuse üle sekundaarkontuuri soojuskandjale, ilma et ta sellega vahetult kokku puutuks.

Peale selle ümbritsetakse reaktor ja kõik muu primaarkontuuri kuuluv *bioloogilise kaitsega* — mitme meetri paksuse betoon- või vesikestaga, mis kindlalt tõkestab iga liiki kiirgust.

Reaktori ja jaama kõigi teiste, isegi ohutute lülide töö juhtimine on täielikult automatiseeritud ning toimub kaugjuhtimise teel.

Vastavalt riigi energiaga varustamise vajadustele on välja töötatud mitmeid selliste elektrijaamade skeeme.

Tuumafüüsika — füüsika haru, mis uurib aatomituumasid, tuumareaktioone ja neist osavõtvaid elementaarosakesi. Tuumafüüsika on tuumatehnika ja aatomitööstuse teoreetiliseks ning eksperimentaalseks aluseks.

Tuumafüüsika põhiprobleemide tinglik liigitus on järgmine: aatomituumade üldomadused ja struktuur; tuumajõud; tuumade spontaansed (iseenes-

likud) muundumised; tuumareaktsioonid; elementaarosakesed; tuumafüüsika eksperimentaalmeetodid.

Tuumafüüsika baasil on tekkinud uued teadusharud: radiokeemia, kiirguskeemia, geoloogiliste ning arheoloogiliste leidude «vanuse» määramise uued meetodid ja paljud teised.

Tuumaisomeerid. Mõnede radioaktiivsete elementide aatomituumad võivad koosneda ühest ja samast arvust, kuid tuuma piirides erisuguselt paiknevatest protonitest ja neutronitest. Seetõttu võivad tuumad viibida erisugustes ergastusseisundites ning erineda üksteisest radioaktiivsusest, s. t. poolestusajalt. Tehisliku radioaktiivse antimoni 124 aatomituumade isomeersetele ergastusseisunditele näiteks vastavad poolestusajad 1,3 minutit, 21 minutit ja 53,7 päeva.

Tuumamootor — jõuseade, mis töötab uraani või plutooniumi raskete aatomituumade jagunemisel tuumareaktoris vabaneva energia arvel.

Vabaneva soojusenergia viib reaktori aktiivtsoonist *soojusvahetisse* mingi *soojuskandja*: veeaur, rõhu all olev ülekuumendatud vesi, gaas, vedel metall vms.

Soojusvahetis annab soojuskandja oma energia üle aurule (gaasile), mis seejärel suundub turbiini (kus ta soojusenergia muundatakse mehaaniliseks energiaks või vajaduse korral elektrienergiaks) või paiskub läbi düüsi välja ning tekitab reaktiivjõu nagu tavalises reaktiivmootoris.

Statsionaarsed tuumajõuseadmed erinevad harilikult vähe tuumaelektrijaamadest. Nendes kasutatakse aeglastel (soojuslikel) neutronitel töötavaid energetilisi tuumareaktoreid.

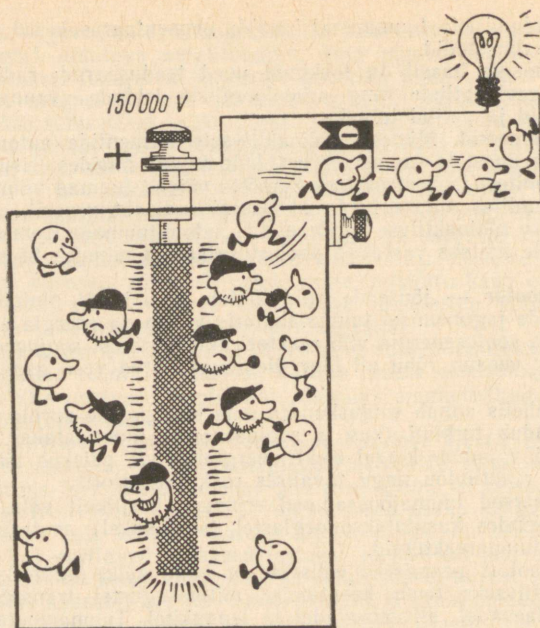
Tuumamootori peamiseks eeliseks on kaduvväike kütusekulu, mis teeb eriti perspektiivseks tema kasutamise mitmesugustel transpordivahenditel: mere- ja jõelaevadel, allveelaevadel ja lennukitel. Tuumamootoriga varustatud jäälohkuja võib kuni poolteist aastat merel viibida, ilma et tal oleks kütusevarude täiendamiseks tarvis sadamasse sõita. Eriti tähtis on see töötamisel Arktikas ja Antarktikas, sest tavaliste kütuste (nafta ja kivisöe) sanna-toimetamine on äärmiselt raske ja kulukas ning nõuab sadamaid ja spetsiaalset laevastikku kiiresti kuluva, sealhulgas ka nende laevade eneste poolt tarvitava kütuse tohutute hulkade vedamiseks.

Tuumamootorite põhiliseks puuduseks, mis raskendab nende kasutamist veduritel, lennukitel, autodel ja väikesettonnažilistel laevadel, on see, et tuumareaktor ja kõik teised seadme elemendid, mis saadavad välja inimestele ohtlikke gammakiiri ja neutronivooge, tuleb ümbritseda kohmaka ning raske *bioloogilise kaitsega*.

Tuumapatarei — seade, mis otseselt, ilma arvukate «vahendajateta» — aurukateldeta, aurutorstiketa, soojusvahetiteta, turbiinideta, generaatoriteta — muundab tuumaenergiat elektrienergiaks.

Lihtsaim patarei koosneb kahest plaadist. Ühe nendest plaatidest moodustab puhas beetakiirgaja — strontsium 90, teise mingi pooljuht, näiteks räni. Strontsiumist lähtuvad kiired elektronid löövad pooljuhust välja täiendavaid elektrone, mida on radioaktiivsest isotoobist väljuvate elektronidega võrreldes kümneid ja sadu tuhandeid kordi rohkem. Selline võimendatud elektronivoog liigub ainult ühes kindlas suunas. See ongi elektri-alalisvool.

Üks niisuguse ehitusega element, mille maht ei ületa kuupsentimeetri murdosi, võimaldab saada mõne miljondiku ampri tugevust elektrivoolu, kusjuures pinge ulatub kümnendike voltideni. Kui mitu tuhat sellist elementi ühendatakse paralleelselt (voolutugevuse suurendamiseks), siis kasvab voo-



lutugevus sadade milliampriteni, omakorda järjestikku ühendatuna (pinge suurendamiseks) aga moodustavad niisugused elementide grupid patarei, mille mitmevoldine pinge on täiesti piisav kantava raadioaparatuuri, telefoniaparatuuri jms. toitmiseks.

Et strontsiumi 90 poolestusaeg on 24 aastat, siis võib selline tuumapatarei pidevalt töötada 10—15 aastat. Kõrgepingelisi (kuni 150 000 V) tuumapatareisi, mis, tõsi küll, annavad kaduvväikese tugevusega voolu (10^{-10} — 10^{-12} A), konstrueeritakse teistsugusel põhimõttel. Radioaktiivne kiirte elektronide allikas paigutatakse metallkera või -silindri keskel olevale iso-laatorile. Et elektronid lendavad temast välja, siis omandab ta positiivse laengu, elektronide koguja (kera) aga laadub negatiivselt. Sellest tingitud potentsiaalide vahe põhjustab elektrivoolu, kui elektroodide vahele lülitatakse mingi koormus. Et beetakiirgajast väljuvate elektronide kiirus on väga suur, siis on suur ka potentsiaalide vahe.

Kui beetaosakeste allika aktiivsus on 1 kūrri, siis on tuumapatarei võimsus tööpingel 20 kV umbes 200 μ W (mikrovatti). Patarei tööiga oleneb ka selle konstruktsiooni puhul radioaktiivse aine poolestusajast.

Tuumapatareidel võib olla veel teistsugune ehitus. Patarei ülesannet võib täita näiteks gaasi sisaldav toru, milles radioaktiivne kiirgus algul ioniseerib gaasi aatomeid, seejärel aga põhjustavad tekkinud ioonid toru elektroodide

vahelise väikese potentsiaalivahe tõttu elektrivoolu. Radioaktiivse kiirguse energia võib kõrge temperatuurini soojendada alalisvoolu andvate pooljuht-termoelementide jootekohti. On ka keeruka konstruktsiooniga seadmeid, kus elektronide allika ees paikneb luminofoor — aine, milles seda pommitavate elektronide mõjul tekivad heledad valgussähvatused. Sellest ainest lähtuv valgus fokuseeritakse fotoelementidele, mis muundab valgusenergia elektrienergiaks.

Tuumareaktiivmootor. Üks soojusenergia otseselt liikumisenergiaks muundamise väga efektiivseid vahendeid on raketimootor (reaktiivmootor), sest selles puuduvad täielikult igasugused vahepealsed seadised, nagu kolvid, kepsud ning propelleri või veorastastega ühendatud ülekanalid.

Suure kütteväärtusega keemiline kütus muundub sellise mootori põlemiskambri äärmiselt kõrgetemperatuuriliseks ja kõrgerõhuliseks gaasiks, mis tohutu kiirusega düüsist välja voolates tekitab raketti vastassuunas liikuma paneva reaktiivjõu.

Raketi liikumiskiirus on kõigi muude tingimuste võrdsuse korral seda suurem, mida kiiremini kuum gaas mootori düüsist välja voolab. Raketimootori võimsus ning järelikult raketi mass ja kandevõime omakorda on seda suuremad, mida suurem on üheaegselt kuumeneva ja düüsist väljuva gaasi hulga mass. Gaasijoa kiirus aga on temperatuurist ja rõhust, mida on suuteline tekitama põletatav kütus.

Lõpuks, aeg, mille vältel mootor saab antud võimsusel töötada, on sellest, kui palju kütust on raketil suuteline kaasa võtma.

Lühidalt: raketi kiiruse ja võimsuse suurendamiseks on põhimõtteliselt mitu teed — gaasi temperatuuri tõstmine, gaasi väljavoolu kiirendamine, kuumentatava aine massi suurendamine või kõigi nende võimaluste üheaegne ärakasutamine.

Praktiliselt on kõik see teostatav ainult tuumamootoris, milles reaktiivjõudu tekitava aine kuumendamiseks või kiirendamiseks kasutatakse tuumareaktorist saadavat tuumaenergiat.

Vaevalt on tarvis teostada, et just tuumkütus, mille kütteväärtus palju kordi ületab parimate keemiliste kütuste oma, avab kõige laialdasemad perspektiivid kosmoselendude alal.

Kosmoselendude tulevik on sellest seepärast täielikult võimalusest kasutada selleks otstarbeks kompaktselt, tohutu energiasisaldusega tuumkütust, mis ei moodusta raketi kogumassist ja -massist üheksakümmend või rohkem protsenti nagu keemiline kütus, vaid palju vähem ning võimaldab seetõttu järsult vähendada raketi kogumassi või tunduvalt suurendada raketi kiirust ja kandevõimet.

Tuumareaktiivjõudu on võimalik selleks otstarbeks kasutada vähemalt kahel viisil. Esiteks võib reaktorist läbijuhtimise teel vahetult kuumendada reaktiivjõudu tekitavat ainet, näiteks vesinikku, mille varu peab kokkusurutult või veeldatult muidugi raketi pardal olema. Teiseks võib reaktorist saadava soojuse algul elektrienergiaks muundada ning viimast seejärel kasutada gaasi ioniseerimiseks ning ioniseeritud raskete osakeste kiirendamiseks (vt. «Ioonimootor»).

Tuumareaktori võimsus. Tuumareaktoris toimuva energiavabanemise intensiivsus on sekundis jagunevate uraani- või plutooniumituumade arvust.

Teoreetiliselt võib reaktori piirvõimsus olla kuitahes suur, praktiliselt aga on see väga suurel määral suhteliselt madalast temperatuurist, mida suudavad taluda reaktori materjalid, soojuskandja võimest soojust neelata, edasi

kanda ja ära anda, soojuskandja võimalikust kiirusest, neutroniaeglusti omadustest ja teistest teguritest.

Soojushulka, mis tekib tuumareaktoris nominaalse töörežiimi korral ühe sekundi jooksul (sõltumatult selle soojuse edasisest kasutamisest), nimetatakse reaktori soojuslikuks võimsuseks.

Kui tuumareaktorit kasutatakse energeetiliseks otstarbeks, näiteks tuumaelektrijaamas või laeva jõuseadmes, siis on tema soojuslik võimsus kogu seadme elektrilise võimsusest mitu korda suurem. Nõukogude Liidus käikulastud maailma esimese tuumaelektrijaama elektriline võimsus näiteks on 5000 kW, reaktori soojuslik võimsus aga 30 000 kW.

Tuumarelvad — peamiselt plahvatustoimelised relvad, mille toime põhineb tohutul energial, mis vabaneb tuumareaktsioonide käigus (raskete elementide aatomituumade jagunemisel või kergete elementide, näiteks vesiniku aatomituumade liitumisel raskemate elementide, näiteks heeliumi aatomituumadeks). Tuumarelvade hulka kuuluvad ka nõndanimetatud radioaktiivsed ründeained — tavaliselt raskete elementide aatomituumade radioaktiivsed jagunemisproduktid.

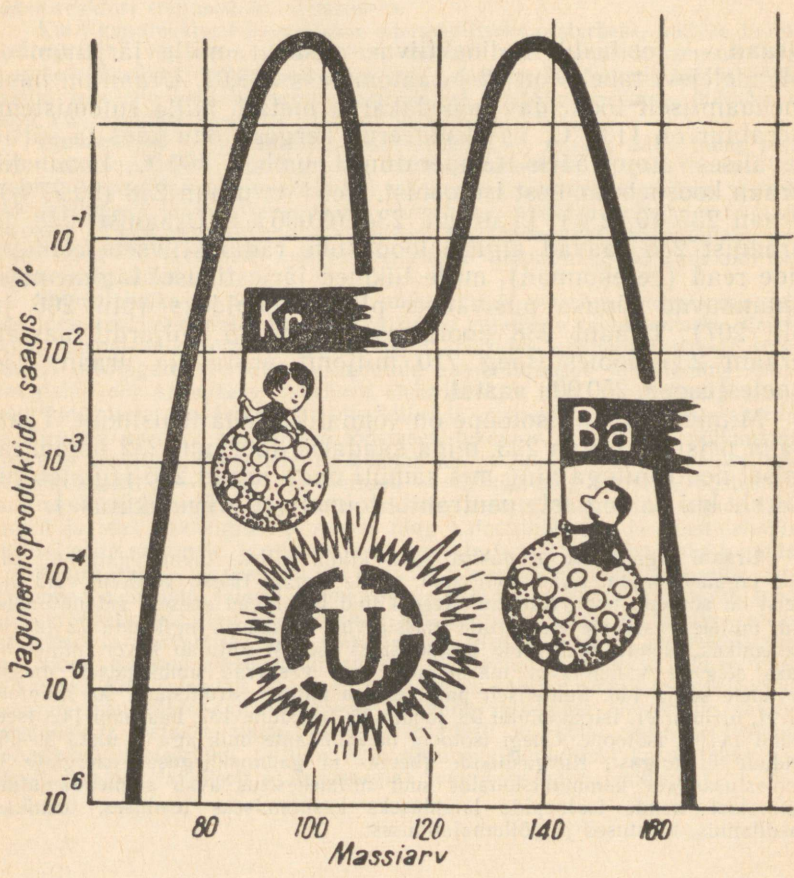
Tuumatehnika — tehnika haru, mis tegeleb tuumaenergiaga ning selle kasutamisega rahvamajanduse ja riigikaitse vajaduste rahuldamiseks. Eristatakse tuumatehnika otseseid ja kaudseid rakendusi. Esimesse kategooriasse kuulub mõningate keemiliste elementide aatomituumade lõhustamine suurte energiahulkade saamiseks, tavaliselt elektrienergia näol (tuumaenergeetika); teise kategooria moodustavad radioaktiivsete isotoopide lagunemisproduktide ja kiirguste arvukad rakendused tööstuses, teaduses, meditsiinis, põllumajanduses ja tehnikas. Tuumatehnika hõlmab ka reaktoriehitust, looduslike jagunevate elementide — uraani ja tooriumi — otsimise ning tootmise tööstuslikke meetodeid, metalse uraani ja selle sulamite saamist, isotoopide segude lahutamist ja teisi analoogilisi protsesse ning aatomitööstuses ja tuumatehnikas kasutatavate seadmete, masinate ja aparatuuride konstrueerimist ning tootmist.

Tuumkütus — looduslikud või tehislilikud keemilised elemendid, mille aatomituumad neutronite toimel jagunevad, vabastades seejuures kaks-kolm korda rohkem neutroneid, kui kulub nende lõhustamiseks. Neutronite arvu sellise laviinitaolise kasvamise tõttu võib nendes ainetes kulgeda jagunemis-ahelreaktsioon. Sellised ained on uraan 235, plutoonium 239, uraan 233 ja kaudselt uraan 238. Tulevikus, kui saab võimalikuks juhitav *termotuumareaktsioon* (kergete elementide aatomituumade liitumine raskemate elementide aatomituumadeks), loetakse tuumkütuseks nähtavasti ka kõiki vesiniku isotoope (prootiumi, deuteeriumi, tritiumi) ja liitiumi. Tuumkütust kasutatakse peamiselt energia (tavaliselt soojusenergia) saamiseks tuumareaktorites.

Uraan — looduslik radioaktiivne element, mille järjenumber Mendelejevi tabelis on 92 ja aatommass 238,07. Uraan on hästi mehaaniliselt töödeldav hõbedakarva metall, mille sulamistemperatuur on 1130 °C. Ta oksüdeerub kergesti õhu käes ja süttib tavalises atmosfääris temperatuuril umbes 100 °C. Looduslik uraan koosneb kolmest isotoobist. Need on uraan 238 (99,27%), uraan 235 (0,72%) ja uraan 234 (0,006%). Uraanist 238 ja uraanist 235 saavad alguse looduslike radioaktiivsete elementide read (perekonnad), mille liikmed järjestikusel lagunemisel muunduvad lõpuks püsivateks plii isotoopideks (plii 206 ja plii 207). Uraani 238 poolestusaeg on 4,5 miljardit aastat, uraani 235 poolestusaeg 710 miljonit aastat ja uraani 234 poolestusaeg 250 000 aastat.

Mitmeid uraani isotoope on võimalik saada tehnikult. Tähtsaim neist on uraan 233, mida saadakse tooriumi 232 pommitamisel neutronitega ning mis samuti nagu uraan 235 jaguneb nii kiirete kui ka aeglaste neutronite toimel (vt. «Tuumkütus»).

Uraani jagunemise produktid. Kaks kildu, milleks tuumareaktsiooni käigus jaguneb uraani 235 aatomituum, ei ole kunagi täiesti võrdsed, vaid üks neist on suurem, teine väiksem. Need killud kujutavad enesest aatomituumasid, millele vastavate elementide massiarvud paiknevad ligikaudu 72 ja 162 vahemikus. Nende elementide protsendilist jaotust kujutab kõver, millel on kaks selgesti väljenduvat maksimumi, mis vastavad umbkaudselt massiarvudele 90 ja 140. Suhteliselt palju esineb näiteks strontsiumi 90, krüptooni 91, ütriumi 91, tsirkooniumi 95, joodi 126, tseesiumi 137, baariumi 142, tseeriumi 144 jt. isotoope. Ühegi isotoobi maksimaalne hulk aga ei ületa 5—6% kildude üldhulgast. Kiirgusliikide (beeta- ja gammakiirguse) energiatega ja poolestusaegade kombinatsioonide suur mitmekesisus avab ammendamatuid võimalusi nende isotoopide laialdaseks kasutamiseks teaduses, tehnikas, meditsiinis, tööstuses ja põllumajanduses.





Vahetismõju. Nõnda nimetatakse kahe füüsikalise süsteemi või osakese vastastikust mõju, mida põhjustab mingi kolmanda osakese pidev vahetus nende vahel. Aatomituuma koostisse kuuluvate nukleonide vahelised *tuumajõud* näiteks on tingitud sellest, et nukleonid vahetavad piimesoniteks nimetatavaid osakesi.

Vedelad metallid tuumatehnikas. Peaaegu $\frac{3}{4}$ uraani 235 või plutooniumi 239 aatomituuma jagunemisel vabanevast energiast viivad endaga kaasa kaks tohutu kiirusega teineteisest eemalduvat kildu. Kildude järsul pidurdumisel muundub see energia silmapilkselt soojuseks. Energeetika praegusel arenemisastmel on tuumaenergiat seepärast kõige otstarbekam rakendada soojuse saamiseks.

Uus tehnika nõuab aga ka vastavaid vahendeid energia muundamiseks. Võistelda tuleb seejuures väga täiuslike aurujõuseadmetega. Kui näiteks soojuselektrijaama turbiine käitab aur, mille temperatuur on 600—650 °C ja rõhk 300—350 at, siis ulatub jaama kasutegur 38—41 protsendini. Et tuumareaktor astub siin võistlusse kui omalaadne aurukatel, ei tohi ta karakteristikud kaasaegsete aurukatelde omadest halvemad olla. Seejuures tekib aga terve rida põhimõttelisi raskusi.

Aurukatlad konstrueeritakse spetsiaalselt sellistena, et nad oleksid suutelised taluma tohutu kõrget rõhku, mis nendes valitseb. Selleks kasutatavatel metallidel ja teistel materjalidel on täpselt arvatav mehaaniline tugevus ja kuumakindlus.

Tugeva neutron- ja gammakiirguse pikaajalisel mõjumisel aga muutuvad paljude metallide ja teiste materjalide omadused järsult, seejuures enamikul juhtudel mitte paremuse, vaid halvemuse suunas. Väga kõrged rõhud ei ole seepärast tuumareaktorites lubatavad.

Erinevalt aurukatlast võib reaktor arendada kuitahes suurt võimsust, ent seda ainult juhul, kui kogu tekkiv soojus temast otsekohe välja juhitakse, sest vastasel korral sulavad uraan-

vardad või nende katted, kogu reaktor saastub radioaktiivsete lagunemisproduktidega ja langeb rivist välja.

Kui aga aurukatla kuumenevate osade (torude) ja neid jahutava keskkonna (soojuskandja) kokkupuutepind võib olla kiitahes suur, siis soojuselementide pind on isegi suurte reaktorite aktiivsoonis suhteliselt väike. Järelikult langeb ära ka reaktori töötemperatuuri järsu tõstmise võimalus.

Kuidas radikaalselt kõrvaldada seda põhimõttelist vastuolu, millest teataval määral oleneb «suure» tuumaenergeetika saatus? Kas reaktorite efektiivsust ei saaks võrdsustada kaasaegsete aurukatelde omaga, ilma et nendes oleks tarvis tekitada liiga kõrget rõhku?

Üks loomulik võimalus on luua kuumakindlamaid ja tugevamaid konstruktsioonimaterjale: metalle, sulameid, uusi aineid. Teine võimalus on otsida uusi, efektiivsemaid soojuskandjaid.

Tänapäeva efektiivsetes ja ökonoomsetes aurukateldes, eriti kompaktsetes seadmetes, on soojuskandjatena üha sagedamini hakatud kasutama suure soojusjuhtivusega vedelaid metalle: elavhõbedat, naatriumi, kaaliumi, vismutit, nende sulameid jms. Nende eelised vee ja gaasidega võrreldes on paljudel juhtudel tohtu suured.

Peaasi ei ole siiski see. Vedel naatrium näiteks keeb temperatuuril 800 °C. See tähendab, et vedel metall võimaldab soojust reaktorist välja juhtida tavalisel atmosfäärirõhul! Kui niisuguse temperatuurini kuumutatud vesi auruks muutuks, siis oleks selle rõhk 160 at suurusjärgus!

Suure soojusjuhtivuse tõttu on reaktori jahutamiseks vajaliku vedela metalli maht palju kordi väiksem vee või gaasi mahust.

Järelikult on reaktori jahutamisel vedela metalliga põhimõtteliselt võimalik tugevasti tõsta reaktori töötemperatuuri ning saavutada kogu energeetilise seadme küllalt suur kasutegur.

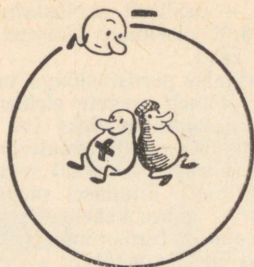
Nõukogude Liidus on loodud seadmeid, milles soojuskandjateks on vedelad metallid. Neil seadmetel on kahtlemata suur tulevik.

Vesinik — lihtsaim, kergeim ja looduses levinuim keemiline element, mis moodustab mahu järgi umbes 93% ja massi järgi 76% kogu universumi ainest.

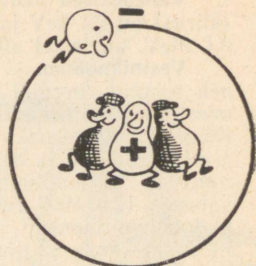
Vesiniku aatom koosneb ainult kahest elementaarosakesest:



Prootium (${}^1_1\text{H}$)



Deuteerium (${}^2_1\text{H}$)



Triitium (${}^3_1\text{H}$)

positiivselt laetud prootonist ja selle ümber tiirlevast negatiivselt laetud elektronist.

Normaaltingimustes on vesinik gaasiline. Nagu enamiku teiste gaaside, nii ka vesiniku molekulid koosnevad kahest aatomist. Vesiniku aatomite vaheline kovalentne side on üks tugevamaid ja tähtsamaid looduses esinevaid keemilisi sidemeid. Vesiniku viimiseks atomaarsesse seisundisse, s. t. vesiniku molekuli lõhkumiseks kulub teatav (üsna suur) hulk energiat.

Tuntud on kaks vesiniku püsivat isotoopi: kerge vesinik (${}^1_1\text{H}$), mida nimetatakse prootiumiks ja mis moodustab 99,98% vesinikust, ning raske vesinik (${}^2_1\text{H}$) — deuteerium, mille hulk ei ületa 0,015%. Nende isotoopide aatommassid on vastavalt 1,008 ja 2,015.

Kosmilise kiirguse mõjul tekib Maa atmosfääris kaduvvälkesel hulgal vesiniku radioaktiivset isotoopi triitiumi (${}^3_1\text{H}$), mis emiteerib ainult beetaosakesi ja mille poolestusaeg on 12,3 aastat. Nimetamisväärsetes kogustes on seda isotoopi võimalik saada vaid tehislikult: kiirendites (deuteeriumi ja berülliumi pommitamisel raskete osakestega — prootonite ja deutroneitega) või tuumareaktorites (liitiumi 6 aatomituumade pommitamisel neutronitega). Neelates neutroni, jaguneb liitiumi 6 tuum kaheks killuks: heeliumi 4 tuumaks (alfaosakeseks) ja triitiumituumaks.

Et vesinikul on kõigist gaasidest kõige suurem soojusjuhtivus, siis leiab ta laialdast rakendamist tehnikas ja tootmises. Madalate temperatuuride füüsika edusammud aga võimaldavad vedelat vesinikku kasutada teadusliku uurimistöö kõige mitmekesisemates valdkondades.

Vahepealsed neutronid — osaliselt aeglustatud neutronid, mille energia (kiirus) on 0,1 keV ja 0,1 MeV vahemikus (kiiretel neutronitel on energia üle 0,1 MeV, aeglastel alla 0,1 keV).

Vesinikupomm — kolossaalse purustusjõuga tuumarelv, mille toime põhineb tohutul energial, mis vabaneb kergete elementide aatomituumade liitumisel raskemate elementide aatomituumadeks (vt. «Termotuumareaktsioon»). Kõige efektiivsemaks vesinikupommi täitematerjaliks peetakse deuteriumi (raske vesiniku) ja tritiumi (üliraske vesiniku) segu. Deuteriumituuma (deuteroni) ja tritiumituuma (tritiooni) liitumisel moodustub heeliumituum ning vabaneb 17,6 MeV energiat — umbes kaheksa korda rohkem kui uraani- või plutooniumituumade jagunemisel. Termotuumareaktsiooni kulgemiseks vajalik mitmekümne miljoni kraadine temperatuur saavutatakse sel teel, et vesinikupommi kestab pannakse lõhkema küllalt võimas aatomipomm.

Wilsoni kamber. Edusammud laetud osakeste loendurite konstrueerimise alal panid teadlasi mõtlema, kas aatomite koostisse kuuluvaid osakesi ei oleks võimalik mingil viisil «näha», kuigi nad on miljardeid kordi väiksemad kõige pisematest kehakest, mida võimaldavad vaadelda kõige paremad optilised mikroskoobid.

Kui nähtavus on mingil põhjusel halb, siis öeldakse tavaliselt, et «kõik on nagu udus». Mõnel juhul aga, vähemalt füüsikas, võimaldab «udu» nähtamatut nähtavaks teha. See mõnevõrra ootamatu asjaolu on seoses küsimusega, miks ja kuidas tekivad selges taevas pilved ning miks sajab vihma.

Õhk, ükskõik kui kuiv ja läbipaistev ta ka on, sisaldab alati teataval hulgal veeauru, mida pidevalt eritavad mered, järved, jõed, taimed ja muld. Nagu vees lahustunud sool, nii ei ole ka õhus leiduv veeaur nähtav, sest auru molekulide ühtlase jaotuse tõttu jääb õhk homogeenseks.

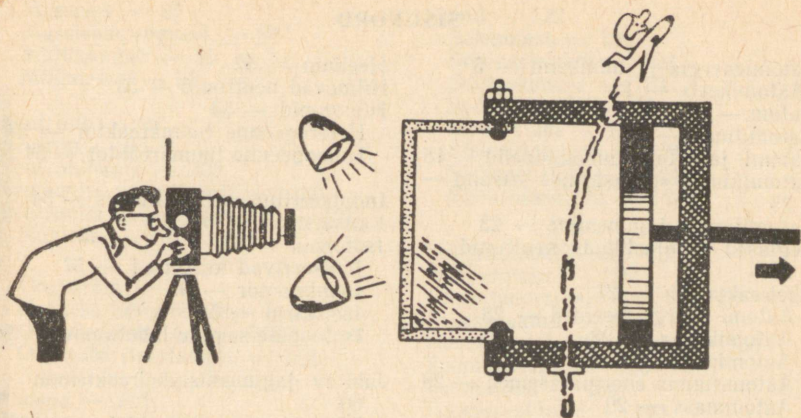
Kui aga õhurõhk mingil põhjusel langeb, siis muutub õhus sisalduv veeaur üleküllastunuks. Sel juhul ühinevad auru molekulid algul väikesteks piisakesteks, mis on nähtavad meile tuttavatele pilvede ja udu näol, ning seejärel suuremateks tilkadeks, mis ei ole suutelised õhus hõljuma ja langevad vihmuna alla.

Kuid veeaur saab tilkadeks koonduda ainult siis, kui õhk sisaldab küllaldaselt tolmuübemeid, eriti selliseid, mis kannavad elektrilaengut. Kui kondensatsioonitsentriteks olevad tolmuübemed puuduvad, ei ole veeaur suuteline tilkadeks koonduma isegi juhul, kui õhk sisaldab teda väga palju.

Inglise füüsik Charles Wilson, kes varem oli pikka aega uurinud vihma ja udu tekkimist, esitas 1912. aastal väga teravmeelse ja hämmastavalt lihtsa meetodi laetud osakeste «vaatlemiseks». Selleks on vaja ainult üleküllastunud auru sisaldavat kambrit. Kambrist läbilendavad laetud osakesed ioniseerivad oma teel molekule ja tekitavad ionide näol kondensatsioonitsentreid, mille ümber koonduvad auru molekulid. Sel viisil kujunevatest vedelikupiiskadest moodustub nähtav ahel (osakese jälg).

Wilsoni kamber kujutab enesest mingi vedeliku, näiteks piirituse auru sisaldavat klaasilindrit, mille põhja asendab liikuv kolb. Kui kolb väga kiiresti alla lastakse, siis alaneb kambris järsult auru rõhk ja järelikult ka temperatuur ning aur muutub allajahtunuks ja üleküllastunuks. Et ta aga on hoolikalt puhastatud tolmuübemetest ja muudest heljuvatest osakestest, siis puuduvad kondensatsioonitsentrid ja mingisugust udu kambris ei teki.

Kui nüüd sel kriitilisel hetkel lendab läbi kambri mingisugune, kas või väga kiire laetud osake, siis ioniseerib see kogu oma tee ulatuses tavalisel viisil molekule, s. t. tekitab ionide näol kondensatsioonitsentreid. Nende



ümber koonduvad otsekohe auru molekulid ning osakese jälg muutub nähtavaks enam või vähem selgepiirilise joonena, mille koosnemist üksikutest udupiisakestest on võimalik kindlaks teha ainult tugeva mikroskoobi abil. Eriti hästi on sellised jäljed nähtavad juhul, kui neid küljelt tugevasti valgustatakse ning kambri sisesein ja kolb kaetakse mati musta värviga. Kui kolvi allalaskmine sünkroniseeritakse fotokaamera päästiku vabastamisega ja valguse-sähvatuslega, siis on osakeste jälgi kerge fotograferida.

Wilsoni kambri võimaldab mitte üksnes näha läbilendavate osakeste jälgi, vaid ka määrata nende osakeste mõningaid omadusi. Jälje paksuse ja puhtuse järgi näiteks on võimalik teada saada, kas laetud osake lendab aeglaselt või kiiresti: mida aeglasemalt ta lendab, seda rohkem molekule jõuab ta ioniseerida oma teekonna igal sentimeetril. Jälgede laiuse või tiheduse mõõtmise teel saab küllalt täpselt määrata ka tundmatute uuritavate osakeste kiirust. Kui jälg lõpeb kambri piirides, siis saab teda moodustavate vedelikutilkade arvu järgi leida uuritava laetud osakese poolt tekitatud ioonipaare üldarvu. Teades ühe ioonipaari tekitamiseks vajalikku energiat, on omakorda võimalik arvutada osakese koguenergiat kambri sisenemise hetkel.

Pärast leiutamist täiustati Wilsoni kambrit tunduvalt. Eriti väärtusliku panuse andsid selles osas nõukogude füüsikud P. Kapitsa ja D. Skobeltsõn, kes 1927. aastal soovitasid paigutada kambri tugevasse magnetvälja. Magnetväli kõverdab laetud osakeste trajektoore. See võimaldab esiteks selgitada, kas osake kannab positiivset või negatiivset laengut, teiseks aga veel ühel viisil määrata osakese energiat, sest mida kiiremini osake liigub või mida suurem on ta mass, seda vähem kõverdub ta trajektoori magnetväljas. Lõpuks, kõige tähtsam on see, et avaneb võimalus uurida kõiki nähtusi, mis esinevad uuritavate osakeste kokkupõrkamisel kambrit täitva auru või osakeste teele asetatud ainete aatomitega. Sellistel kokkupõrgetel tekkivate ja laialilendavate laetud osakeste jälgede põhjal on võimalik uurida isegi laenguta osakeste käitumist.

SISUKORD

- Aatomienergia ja inimkond — 5
 «Aatomikeel» — 13
 Aatom — 15
 Aatomituum — 18
 Aatomi- ja aatomituumamudelid — 18
 Aatomituuma «ergastatud» seisund — 23
 Aatomituuma jagunemine — 23
 Aeglased (soojuslikud) neutronid — 26
 Ahelreaktsioon — 27
 Aatomi energiatasemed — 28
 Aatomikaitse — 28
 Aatomipomm — 28
 Aatomituuma energiatasemed — 28
 Aatommass — 29
 Aktiivtsoon — 29
 Alfakiirgus — 29
 Annihilatsioon — 30
 Antiaine — 31
 Antiosakesed — 31
 Beetalagunemine — 32
 Beetakiirgus — 33
 Beeatron — 33
 Bioloogiline kaitse — 33
 Deuteerium — 34
 Desaktiveerimine — 35
 Deutron — 35
 Dissotsiatsioon — 35
 Doos — 35
 Dosimeetriline kontroll — 35
 Elektromagnetkiirgus — 36
 Elektron — elektriaatom — 37
 Elektrostaatiliselt jõud — 39
 Elementaarlaeng — 39
 Elementaarosakesed — 39
 «Elektronkahur» — 43
 Energeetiline tuumareaktor — 43
 Energiallikad — 43
 Footon — 45
 Fasotron — 46
 Footonirakett — 46
 Fotoemulsioonimeetod — 47
 Gammakiirgus — 48
 Gammadefektoskoopia — 49
 Geiger-Mülleri loendur — 49
 Geoloogiline ajaarvamine — 51
 Heelium — 52
 Hilinevad neutronid — 53
 Hüperonid — 53
 Heterogeenne tuumareaktor — 54
 Homogeenne tuumareaktor — 54
 Indutseeritud radioaktiivsus — 54
 Ionisatsioon — 54
 Isotoobid — 55
 Ioniseerivad kiirgused — 57
 Ioonimootor — 57
 Isobaarid — 58
 Isotoopide segude lahutamine — 58
 Juhitav jagunemis-ahelreaktsioon — 60
 Juhitav termotuumareaktsioon — 63
 Jagunevad ained — 63
 Joonkiirendi — 63
 Kaitse radioakt. kiirguse vastu — 64
 Keemil. elem. perioodil. süsteem — 65
 Kerged elemendid — 66
 Kiirendid — 66
 Kiirguse stimuleeriv toime — 70
 Kosmiline kiirgus — 70
 Kriitiline mass — 71
 Kunstlik radioaktiivsus, vt. tehisradioaktiivsus
 Kvandid — 73
 Kiired neutronid — 74
 Kiirguskeemia — 74
 Kiiritustõbi — 74
 Kohtuvad kimbud — 74
 Koobalt — 75
 Koobaltkahur — 75
 Kristall-loendurid — 76
 Kuumkamber — 76
 Kürii — 76
 Liitium — 76
 Liikumismass — 77
 Massi ja energia ekvivalentsus — 77
 Massidefekt — 80
 Mesonid — 83
 Märgitud aatomid — 84
 Mössbaueri efekt — 85
 Maa kiirgusvööndid — 87
 Manipulaator — 89

- Massiarv — 89
 Massispektrograaf — 89
 Mullikamber — 90
 Müümeson — 91

 eutriino — 92
 eutron — 93
 eutronihaare — 100
 eutronite aeglustamine — 100
 eutronite paljunemistegur — 101
 Nukleon — 102

 Ongström — 103
 Osakese läbijooksutee — 103
 Osakese vaba tee — 103
 Osakeste sisestamine — 103

 Plasma — 103
 Poolestusaeg — 106
 Positron — 107
 Prooton — 107
 Prootonradioaktiivsus — 108
 Piimeson — 108
 Pluutoonium — 108
 Pneumoõlikond — 109
 Prootium — 109
 Pärsskiirgus — 109

 Radium — 110
 Radioaktiivsus — 111
 Radioaktiivsed isotoobid — 112
 Rad. kiirguse biol. toime — 112
 Rad. elementide perekonnad — 113
 Radioaktiivne jood — 114
 Radioaktiivne karotaaž — 114
 Radioaktiivne saastumine — 115
 Radioaktiivne süsinik — 115
 Radiobioloogia — 117
 Radiograafia — 117
 Radiokeemia — 117
 Rasked elemendid — 118
 Raske vesi — 118
 Registreerimiskambrid — 119
 Rekombinatsioon — 119
 Resonantsosakesed — 119
 Rikastatud uraan — 119
 Röntgen — 119
 Röntgenikiirgus — 120

 Seoseenergia — 120
 Soojus — 122

 Spinn — 122
 Seisumass — 122
 Soojuselement — 122
 Soojuskandja — 123
 Soojusvaheti — 123
 Strontsium — 124
 Stsintillatsioon — 124
 Sädemekamber — 124
 Sünkrofosotron — 124

 Tehisradioaktiivsus — 125
 Temperatuur — 126
 Termotuumareaktsoon — 128
 Transuraanid — 135
 Tšerenkov-Vavilovi efekt — 136
 Tuumaenergia — 136
 Tuumajõud — 136
 Tuumareaktorid — 140
 Tuumareaktsoonid — 144
 Tuumasüntees — 145
 Toiduainete steriliseerimine — 145
 Toorium — 145
 Triitium — 145
 Tsüklilised kiirendid — 145
 Tsüklotron — 146
 Tšerenkov-Vavilovi loendurid — 146
 Tuumaelektrijaam — 146
 Tuumafüüsika — 146
 Tuumaisomeerid — 147
 Tuumamootor — 147
 Tuumapatarei — 147
 Tuuma-reaktiivmootor — 149
 Tuumareaktori võimsus — 149
 Tuumarelvad — 150
 Tuumatehnika — 150
 Tuumkütsus — 150

 Uraan — 151
 Uraani jagunemise produktid — 151

 Vahetusmõju — 153
 Vedelad metallid tuumatehnikas — 153
 Vesinik — 154
 Vahepealsed neutronid — 156
 Vesinikupomm — 156

 Wilsoni kamber — 156

Кирилл Александрович Гладков. АТОМ ОТ А ДО Я. На эстонском языке. Перевел с русского Р. Томинг. Художественное оформление У. Лийвамяги. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

Toimetaja H. Heinoja. Kunstiline toimetaja A. Säde. Tehniline toimetaja A. Muna. Korrektorid S. Türn ja E. Bitter. Laduda antud 12. II 1969. Trükkida antud 12. VI 1969. Kohila Paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×84/16. Trükipoognaid 10. Tingtrükipoognaid 9,3. Arvestuspoognaid 10,41. Trükiarv 6000. Tellimuse nr. 1151. Hans Heidemanni nim. trükkoda, Tartu, Ülikooli 17/19. I.

Hind 31 kop.

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00410745 6