

# UURINGUD SÜNKROTRONKIIRGUSEGA

*Ergo Nõmmiste, Marco Kirm*

Tartu Ülikool, Füüsika Instituut

## SISSEJUHATUS

Sünkrotronkiirgus (SK) on elektromagnetiline kiirgus, mis tekib laetud osakeste liikumisel mööda kõverjoonelist trajektoori. Selle kiirguse spekter on pidev ja ulatub infrapunasest spektriosast kuni kalgi röntgenini, sõltuvalt laetud osakeste energiast, massist ja nende trajektoori raadiusest. Selle kiirguse saamiseks kasutatakse osakeste kiirendeid ja oma nimegi on ta saanud kiirenditüübi – sünkrotroni järgi. Just SK pideva spektri tõttu on kiirendid saanud tänapäeval laialt kasutatavateks röntgen- ja ultraviolettkiirguse allikateks, vaatamata nende keerukusele ja suurele maksumusele.

Füüsika ja keemia kõrval kasutatakse sünkrotrone üha rohkem ka bioloogias, materjaliteaduses, ravi- mitööstuses, elektroonikas jm. Viimastel aastakümnetel on SK saanud tähtsaks tööriistaks ka Eesti füüsikute jaoks. Ajalooliselt oli ilmselt esimene Eesti füüsik, kes töötas SKga, professor Mart Elango, kes aastatel 1969–70 uuris Wisconsinis USA-s defektide tekitamist SK abil. Samal ajal algas ka akadeemik Tšeslav Luštšiku juhitud Füüsika Instituudi (FI, alates 1998. a Tartu Ülikooli Füüsika Instituut – TÜ FI)ioonkristallide füüsika labori pikaajaline koostöö Moskva teadlastega SK kasutamise alal. Seitsmekümnendatel ja kaheksakümnendatel aastatel kasutasid FI röntgenspektroskoopia labori füüsikud Novosibirski kiirendit VEPP-2M pehme röntgenikiirguse poolt tahkistes tekitatud protsesside uurimiseks. Samal ajal kasutasid SKt aktiivselt ka FI madalate temperatuuride labori teadlased Rein Kingu eestvedamisel Moskvast, Kurtšatovi nimelises Aatomifüüsika Instituudis.

Viimasel aastakümnel on Eesti füüsikute poolt konkurentsituult kasutatavaim kiirendi MAX-labis,

Lundis Rootsis. Selle kiirendi teaduskomitee eesotsas oli kaheksakümnendate aastate lõpus, kui meie füüsikute ja MAX-labi teaduskontaktid tekkisid, Rootsi TA akadeemik, professor Indrek Martinson, tänu kellele ka finantsiliselt rasketel aegadel ei rohtunud meie füüsikute tee Lundi. Populaarsuselt järgmine sünkrotronkiirguse keskus on Eesti füüsikute jaoks ilmselt HASYLAB Hamburgis Saksamaal, kuigi TÜ FI teadlasi on nähtud töötamas ka BESSYs Berliinis, ESRFs Grenoblis jm. Enne kui tutvume lähemalt teadusprobleemidega, mida meie füüsikud sünkrotronide abil lahendavad, vaatleme sünkrotronkiirguse tekemehhanisme ja omadusi. Näitena kasutame MAX-labi kiirendeid.

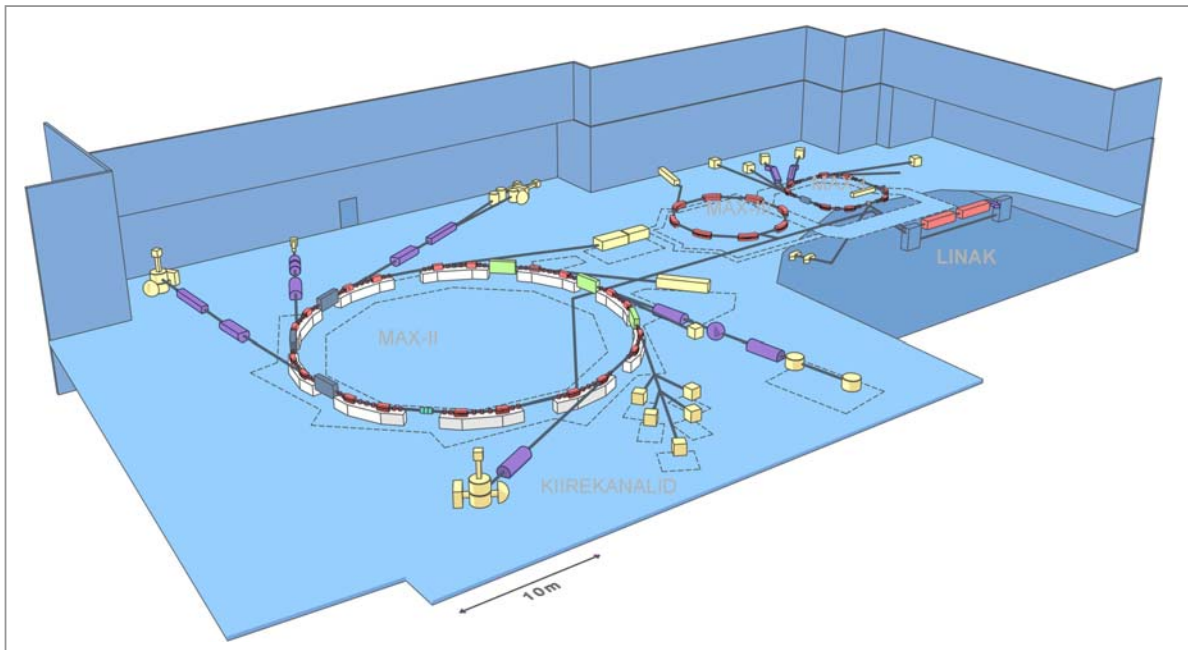
## SÜNKROTRONKIIRGUSE TEKITAMINE

Nagu teada, kiirgab iga kiirendusega liikuv vaba laeng elektromagnetlainet. Samuti kiirgab relativistlik elektron, mille kiirus on lähedane valguse kiirusele, kui teda kallutada magnetväljas. Tänu relativistlikele efektidele on sellise elektroni kiirgus suunatud otse, piki tema liikumistrajektoori puutujat. Selline elektron kiirgab väga laias spektripiirkonnas, alates infrapunasest kuni kalgi röntgenini. Kiirguse lühilainelisuse piir on määratud elektroni energiaga: mida suurem on elektroni energia, seda lühemate lainepikkuste poole on see piir nihutatud (st seda suurema energiaga footonid sealt väljuvad). Loomulikult kiirgab samuti iga laetud osake, näiteks prooton, aga kiirguse intensiivsus on pöördvõrdeline osakese seisumassi neljanda astmega. Seega kasutataksekiirguse intensiivse sünkrotronkiirguse tekitamisel osakestena just “kergeid” elektrone. Et genereerida kiirgust ultraviolet- ja röntgenipiirkonnas pannakse elektronid liikuma mööda ringtrajektoori, kasutades magnetvälja. Muidugi peab elektronide energia olema pii-

savalt suur, et nad liiguks peaaegu valguse kiirusega. Kuidas aga selliseid suure energiaga elektrone saada?

Elektronide algallikaks on elektronkahur, mis annab suure tihedusega ja väikeste lineaarmõõtmega elektronide kimbu. Kahurist väljuvate elektronide energia on mõnisada tuhat kuni mõni miljon elektronvolti. Enamasti ei piisa sellise energiaga elektronidest veel koguri täitmiseks, vaid kasutatakse ka vahekiirendeid, mis tavaliselt on lineaarkiirendid – linakid (ingl *linac*) ja/või nn buustersünkrotronid – kiirendusringid. MAX-laboratooriumis on kasutusel kaks kogurit – MAX-I elektronide energiaga 550 MeV ja MAX-II energiaga 1,5 GeV. Valmimisel on ka kolmas kogur MAX-III, milles tiirlevate elektronide energia saab ole-

ma 700 MeV (vt joonis 1). Elektronkahurist emiteeritud elektronide “rong” siseneb järgmiseks linakisse, mis koosneb paljudest kiirendusrakudest, mille vahele tekitatakse väga tugev elektriväli (paarkümmend miljonit volti meetri kohta), mis resoneerib mõne gigahertsi juures. Selline tugev elektriväli tekitatakse raadiosagedusliku klüstroni abil. MAXis kasutatakse kahte linakit, kumbki 125 MeV. Läbides need mõlemad kaks korda, on elektronkimbu energia 500 MeV ning kimbuga saab täita kõik kogurid. Kogurite magnetsüsteem koosneb kallutusmagnetitest (kutsutakse ka diipolmagnetiteks) ning magnetlätsetest, milleks on kvadrupolmagnetid. Samuti on kogurites nii horisontaal- kui vertikaalsuunalised kallutusmagnetid kimbu asukoha muutmiseks.



Joonis 1.

Skemaatiline läbilõige MAX-laboratooriumist. Käesoleval ajal on töös 3 kogurit-MAX-I (elektronide energia 550 MeV, ümbermõõt 32 m), MAX-II (1,5 GeV, 90 m) ja MAX-III (700 MeV, 36 m valmib sellel aastal). Elektronide eelkiirendajana kasutatakse keldris asuvat kahte 125 MeV lineaarkiirendit – linakit. Lähtuvate mustade joontega on kujutatud kiirekanaleid, mida hetkel töötab 5 MAX-Is ja 8 MAX-IIs. Kõik ringid on ümbritsetud paksu betoonseinaga, et vältida inimeste kokkupuudet ohtlikku kõrgenergeetilise pidurduskiirgusega (sks *bremssstrahlung*), mis võib tekkida, kui elektronkimp hävineb.

Linakist transportkanali kaudu MAX-I ja MAX-II koguritesse tulistatud elektronkimbud hoitakse kogurites ringorbiidil, kuna magnetite toitevool loob sobiva tugevusega magnetvälja. Niipea kui elektronid läbivad kallutusmagneti, kaotavad nad kiirates oma energiat. Selle kao kompenseerimiseks kasutatakse raadiosageduslikku õõsresonaatorit (ingl *cavity*). Elektronid, mis sisenevad resonatorisse faasis raadiosagedusliku väljaga, saavad sellelt tagasi täpselt selle energiahulga, mille nad on kaotanud ühe ringi läbimise jooksul. Kuna raadiovälja sagedus on konstantne, saab ainult väike osa elektronidest õige kiirenduspinge resonatori ühe resonantslainepikkuse juures. Seetõttu tekivad kogurisse lühikesed, mõne sentimeetri pikkused elektronide salgad (ingl *bunches*). Raadiogeneraatori sagedus peab olema selline, et lainepikkusi mahuks ringi täisarv korda. MAX-Is on see arv normaalses töörežiimis 54, ehk koguris tiirleb kuni 54 elektronsalka, MAX-IIs aga 30.

Linakist tulnud järgmine elektronide “rong” läbib sama tee ning elektronide arv salkades kasvab, st ringi vool suureneb. Nagu öeldud, on elektronide energia nüüd 500 MeV. Et nad saaksid lõppenergia 1,5 GeV (MAX-II-s), tuleb nad “rampustada” (ingl *ramping*), anda neile see täiendav energia (kuna elektronide kiirus on juba väga lähedane valguse kiirusele, siis nendele energia lisamine viib vaid relativistliku massi kasvuni, ilma et kiirus oluliselt muutuks). Kui suurendada kallutusmagnetite ja kvadrupolide välja lineaarselt, st suurendada magnetite voolu, väheneb elektronide trajektoori kõverusraadius, nad jõuavad õõsresonaatorisse varem ja seetõttu saavad sealt rohkem energiat. Rammustamine kestab, kuni magnetid on saavutanud magnetvälja, mis on piisav 1,5 GeV elektronide hoidmiseks ringis.

Kui nüüd mõne sentimeetri pikkune elektronide salk läbib kallutusmagneti, kiirgab ta valgusimpulsi, mis laboratoorse vaatleja suhtes on sajakonna pikosekundilise kestvusega. Valgussähvatused järgnevad iga 2 ns järel MAX-Is ja 10 ns järel MAX-IIs. Pärast mitmeid tunde tiirlemist on kogurid erinevate kaoprotsesside tõttu kaotanud

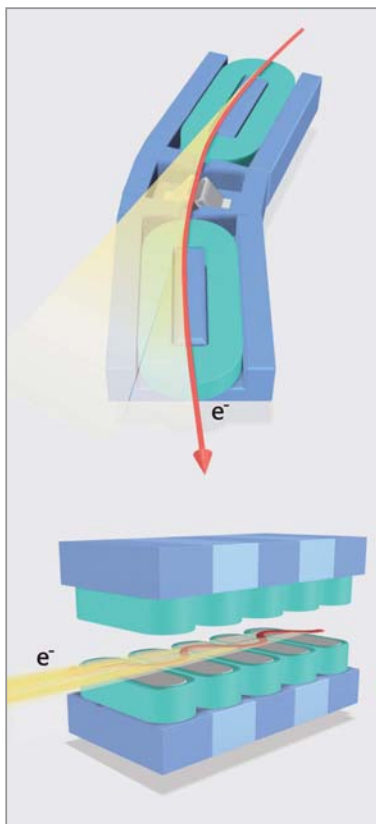
enamuse oma elektronidest ja toimub uus ringi elektronidega täitmine ehk injeksioon.

#### RIVIMAGNETSEADMED EHK VÕNGUTID JA UNDULAATORID

Nagu eespool öeldud, kiirgavad relativistlikud elektronid magnetväljas väga laias spektriribas. Näiteks MAX-I koguris ulatub elektronide poolt kiiratava footoni energia mõnest mikroelektronvoldist mõne tuhande elektronvoldini, kusjuures järsk intensiivsuse vähenemine, kiirguse lühilaine-line piir on umbes 1000 eV juures. MAX-I intensiivsuse maksimumis, sajakonna elektronvoldi kohal, kiirgub kallutusmagnetitest ühe milliradiaani laiusesse horisontaalnurka ühe elektronvoldi laiuses spektriribas kuni  $10^{13}$  footonit sekundis iga mA ringi voolu kohta. MAX-IIs on vastav number  $10^{14}$  paari tuhande elektronvoldi juures. Kuigi selline footonite arv oli veel mõned aastad tagasi piisav enamuse tahkisespektroskoopia eksperimentide jaoks, pole see tänapäeval enam nii. Eriti veel, kui uuritav aine on gaasilises olekus, on uuritavad efektid väga väikese väljundiga ning vajatakse suuri kiirguse tihedusi.

Kasutades kallutusmagnetitest tulevat kiirgust, on mitmete selliste eksperimentide sooritamine praktiliselt võimatu, seda enam et diipolkiirgus on jaotunud laia horisontaalnurka, otsekui lehvikusse (vt joonis 2, ülemine pilt). Järelikult on suure footonite tiheduse saamiseks spektromeetri fookuses vaja väga intensiivset punktvalgusallikat. Selliseks punktvalgusallikaks ongi undulaator. Undulaator on üks seade perekonnast, mida inglise keeles nimetatakse *insertion devices*, eesti keeles võiks neid kutsuda rivimagnetseadmeteks. Need seadmed koosnevad koguri sirgetele lõikudele paigutatud järjestikustest püsiväljaga magnetitest. Sellises väljas liikudes on elektroni trajektoor lähedane sinusoidile (vt joonis 2, alumine pilt). Kui magnetvälja tugevus ja magnetpooluste samm on selline, et järjestikustelt siinuseperioodidelt kiiratud valguslained on omavahel koherentsed ja interfereeruvad, on tegu undulaatoriga (it *undula* – laine).

Millistel lainepikkustel tekivad interferentspildi maksimumid ja miinimumid, sõltub elektronidele mõjuvast magnetvälja tugevusest, püsिमagnetite korral magnetpilu laiusest. Kui suurendada magnetvälja ja magnetpooluste sammu nii, et igas siinuse perioodis kiiratud valguslainel on sõltumatu eelmistest ja järgnevatest, on tegu vigleri e võngutiga (ingl *wiggle* – loksutama, väristama). Viglerist või täpsemalt mitmepooluselisest viglerist



Joonis 2.

Kui elektronkimp läbib kallutava magnetvälja (ülemine pilt, kujutatud on ainult magnetite alumine pool), kiirgab ta footoneid laia ruuminurka, nn lehvikusse. Kui paigutada elektronkimbu teele eripooluselisestest püsिमagnetitest moodustatud rivistruktuur, hakkab sellises väljas kimp liikuma mööda siinuselist joont ning kiirgus on suunatud väikesesse koonusesse (alumine pilt).

tulnud kiirgus on tavaliselt paar suurusjärku intensiivsem kui kallutusmagnetitest tulnud kiirgus, kuid on samuti suunatud laia ruuminurka. Suure eredusega paistab silma ainult undulaator. Veel võib lisada, et siin kirjeldatud undulaatoritest ja võngutitest lähtunud kiirgus on lineaarselt polariseeritud. Nagu näha, saame tänu interferentsile küll intensiivse ja suure eredusega kiirguse, kuid intensiivsus sõltub tugevasti footoni energiast. Seetõttu saab eksperimentis varieerida footoni energiat fikseeritud magnetpilu korral suhteliselt väikestes piirides. Et mööda spekter laiemas energiapiirkonnas, tuleb muuta magnetpilu.

### KIIREKANALID

Nagu eelpool kirjeldatud, on footonite allikateks kogurites kas kallutusmagnetid või rivimagnetseadmed. Selleks et neid footoneid eksperimentides kasutada, tuleb nad tavaliselt monokromatiseerida. Kuna kogurid kiirgavad footoneid väga laias spektripiirkonnas, alates infrapunasest kuni kalgi röntgenini (footoni energia kümnetest millielektronvoltidest kuni kümnete tuhandete elektronvoltideni), siis on ka eri lainepikkuspiirkondades kasutatavad monokromaatorid väga erineva ehitusega. Kuigi on ringe, kus tehakse eksperimente ka infrapunapiirkonnas, on siiski põhilises osas kasutusel ultraviolet- ja röntgenkiirgus footoni energiaga vahemikus paarist elektronvoltist kuni mõnekümne tuhande elektronvoltini.

On selge, et monokromaatorite tööpõhimõtted sellises laias energiavahemikus on vägagi erinevad. Ühisnimetajaks on aga see, et põhiosa selle piirkonna footonitest neeldub tugevalt õhus ja seetõttu peab kogu aparatuur olema kõrgvaakumis. Samuti on kõrgvaakumis sünkrotroni erinevad osad – elektronkahurid, linakid ja kogurid. See võimaldab lihtsalt ühendada teadusaparatuuri koguri vaakumkambri külge. Seda kompleksi, mis koosneb erinevatest optikaelementidest kiirguse fokuseerimiseks, monokromaatorist, eksperimentiseadmetest ja mis kõik asub kõrgvaakumis, nimetataksegi kiirekanaliks (ingl *beamline*). Tavaliselt on kiirekanali esimeseks elemendiks peegel, mille ülesandeks on fokuseerida kas rivimagnetseadmetest või

kallutusmagnetitest tulnud kiirgus monokromaatori sisendisse. Selle peegli tähtsaks ülesandeks on ka soojuskoormuse vastuvõtt, mistõttu ta on tavaliselt veega jahutatav.

#### EKSPERIMENDID MAX-I RINGIL

Nagu öeldud, on elektronide energia MAX-I koguris võrdne 550 MeV-ga, mis teeb selle ringi kasutatavaks just vaakumultavioleti spektriosas kvandi energiaga mõnest elektronvoldist mõnesaja elektronvoldini. Eesti füüsikute põhitegevus on käinud siiani just kahel kiirekanalil, numbritega 31 ja 52. Undulaatorkiirekanalil 31 on nn lõppjaamaks skaneeriv fotoelektronmikroskoop kiirgustäpi mõõtmega suurusjärgus üks mikromeeter ja kvandi energia vahemikus 15 kuni 150 eV. Selle laineala katmiseks kasutatakse kahe võrega monokromaatorit. TÜ FI uurimisrühm professor Väino Sammelselja eestvedamisel alustas sellel kiirekanalil kilestruktuuride süstemaatiliste tehnoloogiliste uuringutega aastal 2000. Põhiliselt on uuritud aatomkihtsadestamise meetodil kasvatatud (aatomkihtsadestamise meetodikast loe A. Rosentali, J. Aariku ja K. Kukli artiklist käesolevas kogumikus) üliõhukesi metalloksiidkilesid, mis koosnevad mõnest kuni paarikümnest aatomkihist alumiiniumi, titaani, tsirkooniumi, hafniumi või tina oksiidist. Sellised kiled on suure rakendusliku väärtusega mikroelektronikas, sensorite valmistamisel, optilistes katetes jm.

Tänu võimalusele uurida fotoelektronide spektri abil kilede keemilist koostist lokaalselt, mõne nanomeetrilise lahutusvõimega kile paksuse ja paari mikromeetrilise lahutusvõimega lateraalsel suunal, on määratud erinevate kasvatustingimustega ja erinevatest lähteallikatest kasvatatud oksiidkilede ning nende mõningate defektsete alade koostist, kilede homogeensust, temperatuurilist vastupidavust ning vahekihtide olemasolu aluse ja oksiidkile vahel. Samuti on uuritud erineva eeltötluse läbinud ränialuste pinna oksüdeerimise ulatust ning pindade puhtust. On selgitatud välja temperatuuride vahemikud, millistes kiled hakkavad kasvama praktiliselt esimeste kasvatustsükli jooksul, ning piirkonnad, kus kile kasv on algstaadiu-

mis tuntavalt pärsitud. On näidatud vahekihtide olemasolu kõrgemate kasvatustemperatuuride kasutamisel ning antud soovitusel aluskristallide sobiva eeltötluse osas. Seega on need uuringud koos teiste struktuursete, mikroskoopiliste, optiliste ja elektriliste uuringutega aidanud paremini mõista valmistatud kilede omadusi ja aidanud edasi arendada nende kilede valmistamise tehnoloogiat.

Teine MAX-Is kasutamist leidev kiirekanal – nr 52 on kallutusmagnetil põhinev nn normaallangemisega monokromaatoriga kiirekanal, mis tähendab et sealt saadavate kvantide energia jääb vahemikku 4–30 eV. Tegemine on nn “avatud lõpuga” kiirekanaliga, seetõttu on statsionaarselt paigal ainult monokromaator. Eksperimendiseadmeid on aga mitu ja neid ühendatakse kiirekanali külge vastavalt vajadusele. See kiirekanal sai uue hingamise pärast põhjalikku rekonstrueerimist 90date alguses eestlaste aktiivsel osalusel. Selle kanali jaoks ehitati seadmete kompleks, mis on vajalik tartlaste ühe “lemmikala” – tahkiste luminesentsi uuringuteks vedela heeliumi temperatuuril ning mis senini Lundis puudus. See andis võimaluse rakendada SK-t kombinatsioonis mitmete unikaalsete tehniliste ja spektroskoopiliste võimalustega. Näiteks on võimalik uuritavaid kristalle kõrgvaakumis lõhestada, rakendada elastset ühe telje suunalist rõhku (mõjutab vabade- ja autolokaliseeritud eksitonide vahelist potentsiaalibarjääri kõrgust) ning kasutada lisaks laia levikuga tavatehnikatele eksootilisemaid termo- ja fotostimuleeritud luminesentsi ja polarisatsioonimeetodeid objektide uurimisel VUV piirkonnas.

Eestlaste tegevus kiirekanalil 52 algas mitmesuguste laia keelutsooniga kristallide luminesentsi omaduste uurimisega. Selle suuna puhul on olnud peamiseks mootoriks klassikaline luminesentspektroskoopia, kus uuritakse sünkrotronkiirguse toimel kristallis tekkiva kiirguse spektraalset koostist (kiirgusspektrid) ja kiirguse tekkimise sõltuvust ergastavate footonite energiast (ergastusspektrid). Lisaks on kasutusele võetud SK “mõju” spektrite uurimine. Seejuures “mõju” on lai mõiste, kattes näiteks defektide, fosforestsentsi või fotostimuleeritud luminesentsi tekke spektri.

Selliste meetodite ainulaadse kombineerimise tulemusena on esmakordselt maailmas välja selgitatud defektide moodustumise iseärasused leelishalogeniidides (KBr, KCl) VUV piirkonnas, kus üks ergastav foton võib tekitada rohkem kui ühe ruumiliselt korreleeritud elektronergastuse: elektron-auk paari ja eksitoni (Tartus avastatud elektronergastuste kordistumise tingimustes). Lisaks on välja selgitatud energia ülekandeprotsesside iseärasused lisanditsentrite ergastamisel kuumade laengukandjate (nii juhtivuselektronid kui valentsaugud) poolt, millel on oluline tähtsus praktilistes rakendustes, nagu näiteks efektiivsete kiirgurite väljatöötamine keskkonnasõbralike luminesentsvalgusallikate või plasmadisplei paneelide jaoks.

Maailmas unikaalsete uuringute abil, kasutades kombineeritud meetodeid, on edu saavutatud ka keeruliste oksüaanioonidega ( $\text{WO}_4$ ,  $\text{MoO}_4$ ,  $\text{SO}_4$ ) materjalide juhtivustsooni seisundite struktuuri määramisel ning on avastatud ebatavaliselt suur energeetiline vahe (kuni 4 eV) protsessidel, mis viivad eksitonide ja vabade laengukandjate moodustumiseni. Elektronergastuste teket ning kiirguslikku ja mittekiirguslikku lagunemist on uuritud väga erinevates kristallides, alates klassikalistest mudelsüsteemidest, nagu binaarsed leelishalogeniidid (KI, NaF, jt) ja metallioksiidid ( $\text{MgO}$ , CaO, SrO jt), kuni rakendusliku tähtsusega keeruliste oksiidideni (nt fosfoorid  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$ , stsintillaatorkristallid  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{LuAlO}_3$ ,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ; mittelineaarsed kristallid  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  ja  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ , jt).

Lisaks eelnevale uuritakse kiirekanalil 52 ka süsteeme, mille puhul olulised füüsikalised protsessid toimuvad just nimelt vaakumultaviolettkiirguse mõjul. Nii näiteks on sellel kiirekanalil uuritud leelishalogeniidide molekulide ( $\text{CsCl}$ ,  $\text{RbCl}$ ,  $\text{RbBr}$  jne) ergastus- ja fragmentatsiooniprotsesse. Leelishalogeniidid on oma ehituselt suhteliselt lihtsad, koosnedes positiivsest ja negatiivsest ionist. Ergastades nende aurufaasis molekule erineva energiaga fotonitega, on võimalik vaadelda nende lagunemist sõltuvalt ergastavate fotonite energiast. Uurides, millised ioonid tekivad ja mõttes tekitatud elektronide kineetilist energiat, on või-

malik teha järeldusi fotonite mõjul toimuvate füüsikaliste protsesside ning ka antud molekulide elektronstruktuuri kohta. Kuigi tegu on nn ioonse sidemega ainetega, on nendest eksperimentidest leitud, et pärast ergastamist toimub molekuli elektroonse struktuuri ümberformeerumine ning fragmentatsiooniprotsessis käitub leelishalogeniid pigem kui kovalentse sidemega ühend. Samuti on jälgitud maailmas esmakordselt aniooni elektronspektrite resonanceerumist kationi neeldumisäärel.

Selle meetodikaga tegelemisel on kasutatud teadusaparatuuri, mis on küll konstrueeritud ja ehitatud Oulu Ülikoolis, kuid selle kompleksi valmimisel oli aktiivne osalus ka Ergo Nõmmistel mõningasel ETFi toel. Katseseade koosneb elektronspetromeetrist SES-100 ja ionide lennuaja mass-spektromeetrist, monteerituna ühtsesse vaakumkambrisse koos eri konstruktsioonidega ahjudega, mis võimaldavad normaaltingimustes tahkiste või vedelike aurufaasis (st molekulaarses faasis) uuringuid. Katseseade on mobiilne, st liigutatav nii MAXi erinevate kiirekanalite vahel kui ka transporditav teistesse teaduskeskustesse. Siiani saadud tulemused julgustavad seda uuringute-maatikat laiendama.

Teadusprojektide juhid on sellel kiirekanalil olnud prof Aleksandr Luštšik, dr Rein Kink, dr Marco Kirm, dr Vitali Nagirnõi, dr Ergo Nõmmiste ja dr Vambola Kisand.

## EKSPERIMENDID MAX-II RINGIL

MAX-II kogur kuulub kogurite kolmandasse põlvkonda, mis on optimeeritud rivimagnetseadmete kasutamiseks (teine põlvkond oli optimeeritud kallutusmagnetite kiirguse kasutamiseks ja esimene põlvkond oli mõeldud just tuumafüüsikalisteks eksperimentideks, mitte SK jaoks). Seetõttu on ringist väljuv valgustäpp hästi väike, mis võimaldab saada eksperimentiseadme väljundis ülisuuri kiirgustihedusi. Ka ringis tiirlevate elektronide energia on suurem kui MAX-Is, nimelt 1,5 GeV. See määrab ka optimaalse kvandi energia vahemiku, mis on sajakonnast kuni paari

tuhande elektronvoldini. Kõik need omadused teevad MAX-IIe ideaalseks kiirgusallikaks protsesside uurimisel, mille väljund on väike – näiteks kui uuritav aine on gaasfaasis või õhukese kilena. Tartu füüsikud on kahe MAX-IIe kiirekanali aktiivsed kasutajad – need on kiirekanalid nr I511 ja D1011. Esimene nendest on undulaatorkanal tasavõrelise primaarmonokromaatoriga SX-700, mis võimaldab töötada kvantidega energia vahemikus 100–1500 eV. Selle kiirekanali omapära on selles, et pärast monokromaatorit suunatakse kiirekimp peegli abil ühte kiirekanali kahest erinevast harust. Kumbki nendest on varustatud oma lõppjaamaga. Meie kasutada olnud lõppjaam on komplekteeritud sekundaarse röntgenmonokromaatoriga, mis võimaldab uurida röntgenkiirguse resonantset ja mitteresonantset hajumist tahkistes.

Viimastel aastatel huviorbiiti tõusnud röntgenkiirguse mitteelastne hajumine on hajumise selline erijuht, mille korral röntgenfoton kaotab energiat, ergastades elektroni aatomi täidetud energiatasemelt põhiolekus täitmata energiatasemele. Protsessi nimetatakse röntgenkiirguse resonantseks Ramani hajumiseks, kuna oma olemuselt on ta sarnane Ramani hajumisega elektromagnetlainete spektri nähtavas (optilises) osas. Erinevuseks on see, et kui optilise Ramani hajumise korral kulutatakse energia foononite loomiseks, siis röntgenkiirguse Ramani hajumise korral kulutatakse energia elektron-auk paaride, või nende seotud seisundite, eksitonide, loomiseks. Eriti tugev on see protsess siis, kui uuritavale objektile langevate fotonite energia asub intensiivsete neeldumisüleminekute piirkonnas, sellisel juhul nimetatakse seda röntgenkiirguse resonantseks Ramani hajumiseks. Selle kaudu saab uurida aine omadusi ja keemilist koostist. Eriti kasulik on ta isolaatorite uurimiseks, kuna fotonite mõõtmise tõttu ei ole ta tundlik laadumisprotsesside suhtes, mis segavad oluliselt elektronide mõõtmisel põhinevate uurimismeetodite kasutamist.

Meie uurisime röntgenkiirguse resonantset Ramani hajumist liitiumfluoriidi kristallis. Näitasime, kuidas röntgenkiirguse Ramani hajumise kau-

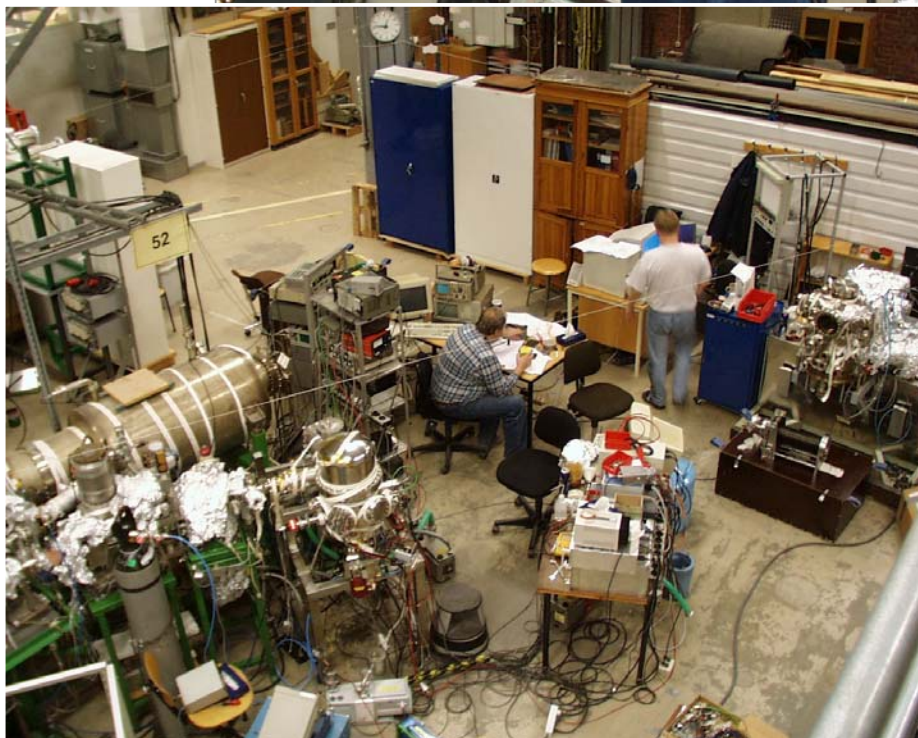
du saab tuvastada röntgeneksitonide tekitamist röntgenkiirguse neeldumisel, ning kuidas seda kasutades saada informatsiooni aine elektronseisundite kohta. Teadusprojekte on sellel kiirekanalil juhtinud doktorid Arvo Kikas ja Tanel Käämbre.

Teine meie kasutatav kiirekanal MAX-II koguril on kallutusmagnetil baseeruv D1011. Ka seal on primaarseks monokromaatoriks SX-700 ning kvantide energia vahemik analoogne eelneva kiirekanaliga. D1011 lõppjaamaks on tänapäevane pinnafüüsika mõõtekompleks, kus lisaks elektron-spektromeetrile SES-200 on ettevalmistuskambris rida pinna puhastamise ja pinna morfoloogia uurimise seadmeid, nagu argoonkahur, elektronkahurid, madalate energiatega elektronide difraktoomeeter (LEED), sekundaarne mass-spektromeeter j.m. Selle kiirekanali aparatuuri kasutamisel on meil väga pikaajaline kogemus, kuna antud lõppjaam oli algselt monteeritud MAX-I kiirekanali nr 22 (tänapäeval suletud, kuna sellele kohale on ehitatud MAX-III ring) külge ja antud kiirekanalil tehtud eksperimendid olid ühed esimesed, mida me MAX-labis teostasime.

Meie esimesed uuringud näitasid, et juhul kui fotonite energia langeb kokku neeldumismaksimumiga (seda nimetatakse resonantsergastuseks), on tahkises tekitatud ergastuste mittekiirgusliku e Auger lagunemise tulemusena tekkinud elektronide energiajaotuste mõõtmine (seda nimetatakse ka resonantseks Auger spektroskoopiaks) väga heaks vahendiks väliste, normaalolekus täitmata elektronseisundite energeetilise ja ruumilise jaotuse uurimiseks. Viimasel ajal oleme sellel kanalil uurinud tahkiste monokihtide kasvatamist metallide pinnale ja metall- dielektrik struktuuride omadusi, kasutades nii röntgenneeldumisspektroskoopiat kui ka resonantsergastusega Auger ja fotoelektronspektroskoopiat.

Üheks huvitavamaks tulemuseks selles vallas oli röntgenkiirguse mõjul tahkise sisekihist välisesse elektronseisundisse ergastatud elektroni siire isolaatorist metallalusesse üliõhukese isolaatorkile korral. Need uuringud näitasid, et ühe monokihi paksuse isolaatori korral ei saa rääkida isoleerivatest omadustest, viimaste tekkeks on vaja pakse-

Järel doktor Tanel Käämbre ja doktorant Kuno Kooser mõõtmishoos kiirekanalil I511.



Käivad mõõtmised kiirekanalil 52.

mat kilet. Et vältida kile saastumist õhus, toimub nii õhukeste kilede korral selle valmistamine ja uurimine kõrgvaakumiga vaakumsüsteemis (nn *in situ* eksperiment). Sellel kiirekanalil oleme uurinud ka Tartus aatomkihtsadestusega kasvatatud kilede omadusi. Lähiajal on Tartus valmimas portatiivne aatomkihtsadestamise reaktor, mis on küll statsionaarselt ühendatud TÜ FI pinnafüüsika uurimiskompleksiga, kuid on ka transporditav Lundi (või mõnda teise sünkrotronkeskuse), et siis sünkrotronkiirgust kasutades uurida üliõhukeste oksiidikihtide moodustamise algstaadiumi dünaamikat juba *in situ* tingimustes. Töörühmade juhtideks selle kiirkanalil on TÜ FI poolt olnud A. Kikas ja E. Nõmmiste.

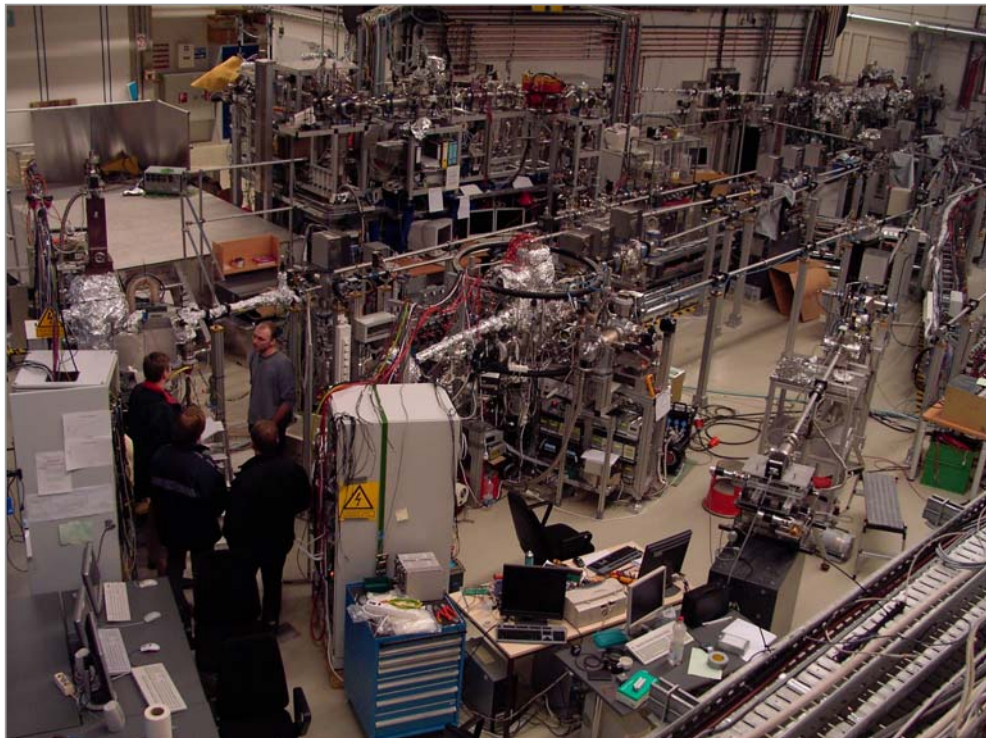
#### TÖÖ SAKSAMAAL HASYLABIS DESY UURIMISKESKUSES

Eesti füüsikute esimesed kontaktid Hamburgi Sünkrotronkiirguse laboriga (HASYLAB), mis kuulub

rahvusvahelise tuntusega Saksamaa uurimiskeskuse DESY koosseisu, leidsid aset juba 1980ndate aastate alguses. Koostöö sai suurema hoo sisse 1990ndatel, mil avanesid piirid ja tekkisid uued võimalused Tartu füüsikute lühemateks eksperimentireisideks ja pikemaks töötamiseks Hamburgis. Alates 1997. aastast on ühine uurimistevõime intensiivistunud ja HASYLABi arengusse oma panuse andnud kolm tartlast (M. Kirm, V. Babin, V. Kisand; kokku 14 inimaastat) kahe kiirekanali teadlasena ja doktorandina. Hetkel on HASYLABs käsil olevate teadusprojektide juhtideks prof Aleksandr Luštšik, dr Vladimir Babin, dr Eduard Feldbach, dr Arvo Kikas, dr Marco Kirm ja dr Ilmo Sildos.

Eestlaste meelispaigaks on Hamburgi Ülikooli professori Georg Zimmereri grupi poolt ehitatud ja täiustatud SUPERLUMI uurimisjaam, mis on konkurentsivõimeline maailma parim luminesentsiuringute katseseade. Lisaks võimalustele, mida

Nii näeb välja vabadel elektronidel töötava laseri eksperimendihall Hamburgis, kus 2006. a ka tartlased hakkavad katseid läbi viima.



pakuvad MAX-labi kiirendid, on tänu DORISE (kogujaring Hamburgis) suuremale übermõõdule võimalik seal sooritada rutiinselt ajalise lahutusega eksperimente 200 ns intervallis (ühe salga puhul isegi kuni 1 mikrosekund).

Tänu kohaliku uurimiserühma teemaatikale (külmutatud vääriskaasid, enamasti tuntud krüokristallide nime all) on SUPERLUMIL välja arendatud originaalne spektraalaparatuur vaakumultraviolet spektraskoopiaks, mis võimaldab sooritada nii kõrglahutusega ( $\Delta\lambda \sim 0,5 \text{ \AA}$ ) kui ka väga nõrkade kiirguste uuringuid, rakendades selleks suure läbilaskvusega sisendpiluta spektraalseadet. Kasutades laienenud võimalusi Hamburgis, on lisandunud Tartu füüsikute uurimistemaatikasse elektron-ergastuste relaksatsiooni dünaamika VUV piirkonnas.

Näiteks on uuritud vaba eksitonide moodustumise ajaliskulgu läbi elektron-auk paaride rekombinatsiooni Kr ja MgO kristallides ning autolokaliseeritud eksitonide kiirgusliku lagunemise protsesse  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mis on aidanud selgust tuua metallioksiidide eksitonseisundite struktuuri ja energiaülekanne protsessidesse. Aeglahutusega spektroskoopia meetodid on võimaldanud pilku heita ka termiliselt stabiilse krossluminesentsi, mis tekib valentselektronide kiirguslikul rekombinatsioonil auguga välimises katioontsoonis, ergastusmehhanismidesse ( $\text{CsCl}$ ,  $\text{CsBr}$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{BaY}_2\text{F}_8$  kristallides) nii VUV kui ka veelgi lühilainelisema ekstreemse ultraviolettkiirguse (XUV) piirkonnas. Viimased eksperimendid on toimunud undulaator-kiirekanalil BW3, mis katab energia piirkonna 40-1600 eV. See aga on luminesentsmeetodil küllaltki vähe uuritud spektraalpiirkond, mis on võimaldanud meil ka esmakordselt uurida katioonergastuste lagunemist LiF, NaCl ja MgO kristallides. Mudelsüsteemide LiF ja NaCl kationeksitonide mittekiirguslik relaksatsioon viib anioneksitoni ja mitme elektron-auk paari moodustumiseni, mis hiljem transformeeruvad stabiilsete ruumiliselt korreleeritud defektide kolmikuteks. Nii elementaarsed defektid kui ka sellised kolmikud on materjalide püsiva kahjustumise algidud, mis tekivad intensiivse ioniseeriva kiirguse või osakeste voo tagajärjel (nt termotuumareaktorites).

Praktiliste rakenduste poole pealt tuleb veel märkida mitmete perspektiivsete stsintillaatormaterjalide (Lu ühendid, volframaadid) energia ülekan-demehhanismide uuringuid kui ka haruldaste muldmetallide ioonide f-d ja f-f üleminekute spektroskoopiat. Sellised ioonid töötavad kiirguritena nii tahke keha laserites (Er, Tm, Nd) kui ka uutefektiivsetes (Eu, Tb, Pr; kvantsaagis  $> 1$ ) elavhõbedavabades luminesentslampides ja plasmadisplei paneelides ning ka stsintillaatorites (Ce, Pr, Nd). Lisaks klassikalistele kristallidele ja pulbrilistele objektidele, uuritakse Tartu füüsikute poolt ka õhukesi oksiidkiile (sh nanostruktuurseid objekte), mille võimalikud rakendused on näiteks ioniseeriva kiirguse konverteerimisel röntgenmikrotomograafia süsteemides nähtavaks valguseks, et saada uuritavatest objektidest kujutisi CCD kaamerate abil.

Tänapäeva kiirendite tehnoloogia üheks tippsaavutuseks on vabadel elektronidel töötavate laserite (ingl *free electron laser* – FEL) väljaarendamine, kus DESY on vaieldamatult maailma juhtivate keskuste hulgas. Sellised FEL laserid funktsioneerivad spontaanse kiirguse iseenesliku võimendumise (ingl *self-amplified spontaneous emission* – SASE) printsiibil, sest lühilainelises piirkonnas puuduvad materjalid, mille peegelduskoeffitsient oleks piisavalt kõrge, et tagada kiirguse võimendumine analoogselt klassikalise peeglitega resonatoriga laseris. FEL kiirguse saamiseks on vajalik esmalt genereerida väga kvaliteetne elektronide kimp, mida siis surutakse veelgi ruumiliselt kokku, kiirendatakse linakis ja juhitakse undulaatorisse. Võimendumine tekib piisavalt pikas undulaatoris liikuvate elektronide salkade ja nende poolt kiiratud valguse vahelise interaktsiooni tulemusena. Undulaatori lõpus juhitakse elektronid magnetvälja abil kõrvale, ning koherentsed, ülilühikesed ja intensiivsed ( $10^{13}$  footonit pulsiks kestvusega  $< 50$  fs) valgusimpulsid jätkavad teed uuritavale objektile.

Aastal 2002 õnnestus Tartu füüsikutel osaleda esimesel VUV-FEL prototüübil sooritatud üksikutes füüsikaeksperimentides ning uurida selle poolt genereeritud FEL kiirguse (13,9 eV) mõju  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ :

Ce ja BaF<sub>2</sub> kristallidel ning jälgida Ce d-f kiirguse ja BaF<sub>2</sub> omaluminestsentsi eluigade märgatavat lühenemist sõltuvalt ergastustihedusest. Süstemaatilisemad uuringud ülilühikeste valgusimpulsside efektidest tahkistel seisavad veel ees, sest laiemaks uurimistöökä möeldud VUV-FEL valmis alles 2005 ja möötmisaeg luminestsentsieksperimentideks on eraldatud aastasse 2006.

Autorid tänavad abi eest materjali kokkupanekul Arvo Kikast (kiirekanal I511 ja D1011), Väino Sammelselga (kiirekanal 31), Aleksandr Luštšikut

ja Vambola Kisandit (mõlemad kiirekanal 52). Kuna käesolev kirjatükk on kirjutatud populaarteaduslikus vaimus, ei pidanud me siin õigeaks kasutada viiteid teadustulemusi kajastavatele artiklitele, sest nendest valiku tegemine oleks liiga meelevaldne. Kokku on Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi teadlased viimase viieteistkümnep aasta jooksul publitseerinud rohkem kui 300 rahvusvahelisel tasemel artiklit tulemustest, mis on saadud möötmistest MAX-labis ja DESYs. Eesti noored füüsikud on nende tulemuste alusel kaitsnud 12 doktoriväitekirja.