

## Atomin ydin tutkimuksen kohteena – Kova pähkinä purtavaksi?

Juha Ytistö

**Aineen perusrakenteen ja sen vuorovaikutusten tutkimus on modernin fysiikan keskeisin tehtävä. Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen kiihdytinlaboratorion tutkimustoiminta on erikoistunut atomiytimen rakenteen ja ydinreaktioiden tutkimukseen sekä kiihdyttimellä tehtävään soveltavaan tutkimukseen, erityisesti lääketieteen ja materiaalitieteiden aloilla.**

Atomiydin on varsin monimutkainen monen hiukkasen kvanttimekaaninen järjestelmä, jonka koossapitävää voimaa ei vielä tunneta riittävän hyvin. Tämän vuoksi ydinrakenteen perusmallit ovat edelleen likimääräisteorioita. Esimerkiksi, edelleenkin on lähes mahdotonta edes ennustaa ytimien pysyvyyden rajoja niiden sisältämien neutroni- ja protonilukujen suhteen. Ytimen rakennetta näyttäisi joskus hallitsevan hiukkasten eli nukleonien yhteispeli toisinaan taas yksittäisten hiukkasten liike.

On vaikea tajuta, miten raskaan, tiheään pakatun ytimen parikin sataa nukleonia voivat poukkoilla vauhdikkaasti pitkin toistensa pintaa siten, että väistämättömältä näyttävät törmäykset eivät hajota systeemiä. Ydin käyttäytyy kuten supraneste tai sähkövarauksen kuljettajat suprajohteessa häviöttä ja kitkattomasti. Ytimien perusteorioiden kehittyminen vaatii kokeellisen tutkimuksen antamaa tietoa, joka usein liittyy ilmiöihin, joita teoreettisesti ei ole kyetty ennustamaan.

Eräs ilmentymä ytimen rakenteesta on nukleonien järjestäytymisen geometria. Toisin kuin luullaan yleisesti ytimet eivät suinkaan aina ole pallomaisia, vaan ne voivat olla sikaarin, letun tai päärynän muotoisia. Eräissä oloissa on ennustettu esiintyvän jopa rinkelin muotoisia ytimiä. Ytimet siis muuttavat rakennettaan ja muotoaan, kun neutronien ja/tai protonien lukumäärää muutetaan. Sama ilmiö voi tapahtua myös, kun ydintä kuumennetaan esimerkiksi ydinreaktioiden avulla.

Ytimien mallintamisessa saatu tieto on hyödyllistä varsin yleisestikin kvanttisysteemien, esimerkiksi metalliklustereiden, kvanttipisteiden ja korkean lämpötilan suprajohteiden tutkimuksessa.

### *Uusia isotooppeja ja alkuaineita etsimässä*

Jyväskylässä ydinfysiikan pääpaino on luonnossa esiintyvistä atomiytimistä voimakkaasti poikkeavien eksoottisten ytimien, raskaiden alkuaineiden sekä nopeasti pyöriä ja kuumien ytimien tutkimuksessa. Tämä ydinaineen ääritilojen tutkimus on keskeinen ydinfysiikan tutkimusalue, joka tarjoaa uuden näkökulman atomiytimen perusvuorovaikutuksiin ja on edellytys ytimen rakenteen teorioiden kehitykselle.

Tähtien energiatuotanto ja alkuaineiden synty ovat myös modernin ydinfysiikan tieteellistä sovellusalueita. Itse asiassa maailmankaikkeuden kehitys noin 100 s alkuräjähdyksen jälkeen on ollut ydinfysikaalisten prosessien hallitsema. Vasta nyt kykenemme pikkuhiljaa tutkimaan näiden prosessien yksityiskohtia laboratorio-olosuhteissa.

Eräs ulospäin näkyvä osa ydinfysiikan tutkimusta on uusien isotooppien tai jopa alkuaineiden valmistaminen. Suomalaiset tutkijat ovat aktiivisesti osallistuneet uusien isotooppien etsimiseen, aiemmin lähinnä ulkomaisten tutkijaryhmien jäsenenä Yhdysvalloissa ja Saksassa; tiille voidaan kirjata jo noin sata isotooppia ja peräti seitsemän uutta alkuainetta. Jyväskylän yliopiston uudella kiihdyttimellä on tähän mennessä löydetty jo parikymmentä uutta radioaktiivista isotooppia, joista 15 raskaiden alkuaineiden isotooppia tuotettiin fuusio- eli yhtymisreaktioilla ja 5 yttriumin, niobiumin ja teknetiumin isotooppia uraanin fissio- eli halkeamisreaktiolla. Lienee huomioimisen arvoista, että koko maailman uusien isotooppien löydöistä viime vuosina yli kolmasosa on tehty Jyväskylän kiihdyttimellä.

Uusien isotooppien tuottaminen ei ole itsetarkoitus, vaikka se usein tieteellisenä urheilusuorituksena onkin vertaansa vailla. Jyväskylän kiihdyttimen avulla voidaan tutkia ytimien käyttäytymistä järjestelmällisesti neutroni- ja protonilukujen, lämpötilan ja pyörimisliikkeen muuttuessa. Esimerkiksi, ydin voidaan saattaa pyörimään kvanttimekaanisen hyrrän tavoin  $10^{20}$  kierrosta sekunnissa. Näiden prosessien kiinnostavimpia seurauksia ovat ytimessä tapahtuvat muodonmuutokset. Muotoon vaikuttaa ytimen neutroni- ja protonilukujen lisäksi sille annettu viritysendergia.

Tutkimuksen kuumimpia kysymyksiä on, minkä muotoinen tietty ydin on eri energiatiloissaan. Usein nämä muodot liittyvät kvanttitasolla vallitseviin symmetrioihin, joiden määrääminä nukleonit järjestäytyvät ydinaineksi. Eräs toinen ydinfysikoita askarruttava ongelma liittyy ydinaineen tiheyteen. Ytimen on perinteisesti otaksuttu olevan tiukkaan pakattua, vakiotiheyden omaavaa nukleonipuroa. Eräissä viimeaikaisissa kokeissa on kuitenkin voitu todeta, että runsasneutroniset keveät ytimet muodostavat ympärilleen harvan neutronihunnun. On ennustettu, että neutronihuntu tai -iho olisi hyvinkin yleinen ilmiö esimerkiksi raskaammassakin alkuaineissa. Jos näin olisi, käsityksemme ydinrakenteesta saattaa kokea merkittävän muutoksen lähivuosikymmenien aikana. Tämän toteaminen on hyvin haasteellinen tehtävä kokeellisen ydinfysiikan tutkimukselle.

On ehkä yllättävää, että Jyväskylän kiihdytinlaboratoriossa on, tavallisesti atomifysiikan prosesseissa käytettävä tehokas

väriainelaser, nyt ydinrakennetutkimuksen käytössä. Koska valokvantin vuorovaikutustodennäköisyys atomin kanssa on hyvin suuri, muodostaa lasertekniikka äärimmäisen herkän instrumentin atomien havaitsemisessa. Kohdistamalla vastakkain ydinreaktiossa tuotettu ja herkällä massaspektrometrillä puhdistettu keinotekoinen, radioaktiivinen atomisuihku ja tarkasti viritetty lasersuihku saadaan tietoa atomien ytimien rakenteesta. Samaan suuntaan lentävät atomit absorboivat vastakkaisesta suunnasta tulevia valokvantteja eli fotoneja, jotka hetkellisesti viritävät yksittäisiä atomeja resonanssi-ilmiön kautta. Viritetyt atomit purkautuvat takaisin perustilaansa emittoimalla fotoneja, jotka havaitaan hyvin herkillä valoon reagoivilla havaitsimilla.

Kiihdytinlaboratoriossa on englantilaisten ja suomalaisten tutkijoiden yhteistyönä käynnistynyt hanke, jossa sovelletaan englantilaista laserlaitteistoa ja Jyväskylässä kehitettyä nopeaa radioaktiivisten atomien massaerotinta. Tällä ainutlaatuisella laiteyhdistelmällä kyetään tutkimaan hyvinkin eksoottisia ytimien atomien ylihienorakenteita ja sen myötä ytimen kokoa ja muotoa.

Jyväskylän yliopiston kiihdytinlaboratorio on rakennettu vuosina 1989–1994. Itse kiihdytinlaitteisto valmistui asetetun aikataulun ja sovitun rahoituksen puitteissa vuoden 1991 lopussa. Täysimittainen tutkimustoiminta alkoi vuonna 1994, jolloin kiihdytintä käytettiin tutkimukseen jo noin 4000 tuntia. Kokonaisuena vuonna 1996 oli jo 6300 tuntia. Laboratoriosta on nopeasti muodostunut kansainvälisesti suosittu tutkimus- ja jatkokoulutuspaikka. Kymmenessä tutkijaryhmässä työskentelee noin 50 varttunutta tutkijaa, jatko-opiskelijaa ja tekniseen henkilökuntaan kuuluvaa. Laboratoriossa työskentelee lähes 20 Jyväskylän yliopiston jatko-opiskelijaa ja noin 10 ulkomaisten yliopistojen jatko-opiskelijoita. Laboratorioon tehtiin vuonna 1996 lähes 200 ulkomaista tutkimusvierailua noin 10:stä eri maasta. Ulkomaisten tutkimusryhmien tekemät laiteinvestoinnit edustavat yli 50 %:a koko laboratorion tutkimuslaitekannasta.

Eurooppalainen tutkimusyhteistyö tuottaa jatkuvasti uusia tutkimusvälineitä, joilla kiihdyttimen käytön tieteellistä arvoa voidaan nostaa tuntuvasti. Uusimpina hankkeina työn alla ovat äärimmäisen mittaustarkkuuden omaavat ioniloukut sekä yhteis-eurooppalaiset gammaspektrometrit. Voidaan sanoa, että laboratoriolle on keskeinen rooli eurooppalaisten ydinfysiikan tutkimuslaitosten joukossa. Se on johtava pohjoismainen laboratorio kiihdyttimellä tehtävässä ydinrakennetutkimuksessa ja laboratoriolle on EU:n "Large Scale Facility" asema.

#### *Tutkimuksen pääpaino perustutkimuksessa – sovelluksia unohtamatta*

Kiihdytinlaboratoriolla ei ole itsenäistä hallinnollista asemaa, vaan se toimii fysiikan laitoksen osana. Vahva side alan perusopetuslaitokseen on koettu hyvin tärkeäksi laboratorion toisen päätehtävän eli koulutuksen ja erityisesti jatkokoulutuksen kannalta. Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen hyvä yhteishenki ja fysiikan alojen monipuolinen edustus ovat keskeisen tärkeitä elementtejä myös kiihdytinlaboratorion toiminnalle. Laboratorio toimii myös kiinteässä yhteistyössä soveltavan fysiikan laboratorion kanssa, joka on erikoistunut nanotekniikkaan. Kiihdytinlaboratoriolla on laitoksen varttuneista tutkijoista ja professoreista koostuva johtoryhmä, jonka puheenjohtajana toimii laboratorion tieteellinen johtaja. Asiantuntijaelimenä johtoryhmän alaisuudessa toimii kansainvälinen ohjelmatoimikunta, joka arvioi vuosittain laboratoriolle tehdyt tutkimushanke-esitykset.

Jyväskylän yliopiston kiihdytinlaboratorion kiihdytin on 340 tonnia painava syklotroni, jonka magneetin napakentien halkaisija on 2,4 m. Syklotronissa ulkoisen magneetikentän vaikutuksesta spiraalin muotoista rataa kulkevien varattujen hiukkasten kiihdytys tapahtuu suurtaajuussähkökentän avulla. Hiukkasten kierrosnopeus voi olla jopa 20 miljoonaa kierrosta sekunnissa ja niiden kulkema kokonaismatka noin 2 km.

Kiihdytettäväksi aiottu varattu hiukkaset tuotetaan ionilähteessä, jossa atomeista "riisutaan" elektroneja elektronipommituksen avulla. Jyväskylän ECR-ionilähde perustuu mikroaaltojen kiihdyttämien elektronien käyttöön. Itse pääkiihdytin eli syklotroni ja sille keveitä ja raskaita varattuja hiukkasia syöttävä ionilähde ovat pitkälti kotimaista suunnittelua, ja kiihdytinlaboratorio on tehnyt merkittävän osan laitteiden rakennus- ja asennustyöstä. Syklotronin tehtävänä on antaa ionille niin suuri energia, että se kykenee saamaan aikaan ydinreaktion.

Kiihdytinlaitteiston eräs tärkeä ominaisuus on sen kyky tuottaa hiukkassuihkuja mahdollisimman monen alkuaineen isotoopeista. Laboratorion kilpailukykyyn voimakkaasti vaikuttava uusien raskasionisuihkujen kehitystyö on jo johtanut merkittäviin tuloksiin. Jyväskylän kiihdyttimellä voidaan jo nyt tuottaa ionisuihkuja lähes 30 alkuaineen isotoopeista. Tämä mahdollistaa laajan tutkimuskentän eri sovellusten sekä materiaali-, atomi- ja ydinfysiikan aloilla.

Kiihdytintutkimuksen pääpaino on perustutkimuksessa. Tämän ohella laboratoriossa tehdään myös soveltavaa tutkimusta. Sovelluksia kehitetään järjestelmällisesti kiihdytin- ja mikrorakennetekniikan laitesuunnittelussa ja -valmistuksessa, lääketieteen, ympäristötutkimuksen ja energiatekniikan sovelluksissa sekä avaruustekniikassa.

Lääketieteessä tarjovat sovellusmahdollisuuksia ennen kaikkea hiukkassuihkujen avulla tuotettavat diagnoosiin ja hoitoon tarkoitetut säteilevät aineet. Lääketieteen sovelluksissa on jo edetty yritystoiminnan aloittamiseen Jyväskylän seudulla. MAP Medical Technologies Oy kehittää, valmistaa ja markkinoi isotooppilääkkeitä. Tutkimus ja tuotekehitys toteutetaan kiinteässä yhteistyössä yliopiston kiihdytinlaboratorion kanssa.

Ympäristönsuojelun sovelluksissa yksi keskeinen selvityskohde on ihmisen toiminnallaan aiheuttamien ympäristövaikutusten määrittäminen, esimerkiksi maaperää tai vesistöä saastuttavan aineen määrä, alkuperä ja saastuttamisen ajankohta. Ympäristöstä otetun näytteen määrittäminen kiihdytintekniikan avulla on kilpailevia menetelmiä merkittävästi nopeampaa ja tehokkaampaa. Kun tarvitaan erittäin pienten ainemäärien määrittäystä, tarjoo kiihdytinpohjainen massaspektrometria yhden herkimmistä menetelmistä.

Energiatekniikan sovelluksissa kiihdytinperustaiset menetelmät tarjoavat täysin uusia, teknisesti ja taloudellisesti tehokkaita mahdollisuuksia, etenkin fossiilisten polttoaineiden polton ympäristövaikutusten vähentämisessä. Mikrorakenteiden sovelluksissa keskeinen kohde on metallien ja puolijohdeiden rakenne ja säteilynkesto, joita voidaan tutkia tehokkaasti hiukkaspommituksella.

Avaruudessa käytettävien elektroniikan komponenttien ja laitteiden säteilynkestävyyden selvittämisessä kiihdytin- ja mikrorakennetekniikan tarjoamat menetelmät ovat kiistatta parhaat mahdolliset. Euroopan avaruusjärjestön ESA:n kanssa on aloitettu satelliiteissa käytettävän elektroniikan säteilynkestävyyden testaukset jo vuonna 1994.

Sovellusmahdollisuuksia on luonnollisesti myös pääsovellusalueiden ulkopuolisilla toimialoilla. Esimerkiksi kiihdytintutkimuksen yhteydessä kehitetyt erittäin suurten signaalitiheyksien välitys- ja käsittelytekniikat tarjoavat sekä ohjelmisto- että laiteratkaisuja tietotekniikan sovelluksiin.

#### *Tieteellisten hankkeiden kokonaisarviointijärjestelmästä arkipäivää*

Muutaman vuoden kokemuksen jälkeen rohkenen sanoa, että Suomenkin maaperälle tehdyt "suuret" tutkimusinvestoinnit voivat olla erittäin kannattavia. Voi kysyä, miksi tämän tyyppisiä hankkeita ei saada syntymään Suomeen enempää. Tilanne esimerkiksi naapurimaassamme Ruotsissa tai toisessa vastaavankokoisessa Euroopan maassa Belgiassa on aivan toinen.

Eräs syy on varmasti se, että Suomessa ei ole arkikäytössä tieteellisten hankkeiden kokonaisarviointijärjestelmää. Suomen Akatemia esimerkiksi keskittyy lähes pelkästään tutkijoiden palkkojen ja matkakulujen rahoitukseen.

Laboratiivisissa tieteissä laiteinvestointien määrä parhaimmillaan on palkkoihin nähden moninkertainen. Esimerkiksi Jyväskylän kiihdytinhanke käynnistettiin aikoinaan siten, että hankkeen esityksen opetusministeriölle teki Jyväskylän yliopisto fyysikkojen aloitteesta. Tätä aloitetta edelsi kylläkin kansallinen tapaaminen, jossa Suomen muut alan fyysikot antoivat tukensa hankkeelle. Varsinaista asiantuntija-arviointia ei hanke-esitykseen liittynyt. Se kylläkin arvioitiin sitten myöhemmin erikoistilauksesta tehdyssä, jo aiemmin mainitussa Suomen Akatemian evaluaatiossa.

*Juha Äystö on Jyväskylän yliopiston fysiikan professori ja Kiihdytinlaboratorion johtaja.*