

MARAn absoluuttinen läpäisy



**-fuusiohöyrystymisreaktiossa ^{176}Pt ,
 ^{175}Pt , ^{174}Os ja ^{172}Os -ytimille**

Pro gradu -tutkielma, 15.5.2024

Tekijä:

HENRI FLINK

Ohjaaja:

JAN SARÉN



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

© 2024 Henri Flink

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty. This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

Tiivistelmä

Flink, Henri

MARAn absoluuttinen läpäisy $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -fuusiohöyrystymisreaktiossa ^{176}Pt , ^{175}Pt , ^{174}Os ja ^{172}Os -ytimille

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2024, 47 sivua

Tämän tutkimuksen tavoite oli selvittää Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen ydinrakenneryhmän rekyylimassaseparaattori MARAn absoluuttinen läpäisy ^{176}Pt , ^{175}Pt , ^{174}Os ja ^{172}Os -ytimille $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -fuusiohöyrystymisreaktiossa. Läpäisy määritettiin vertaamalla JUROGAM3-ilmaisinaltisteistolla fuusioreaktion jälkeen havaittujen γ -piikkien intensiteettien suhteita erilaisilla ilmaisimien välisillä korrelaatioehdoilla. Tuloksia verrattiin simuloituihin läpäisyihin. Suurimmaksi läpäisyksi ytimelle ^{176}Pt saatiin 50 ± 5 % fokustason pii-ilmaisimelle ja noin 87 ± 8 % fokustason läpäisyilmaisimelle. Läpäisy riippuivat ytimien reaktiokinematiikasta ja kerätyistä varaustiloista. Simulaatiot antoivat puolestaan noin 45 – 50 % ja noin 60 – 65 %. Ytimelle ^{172}Os läpäisyksi saatiin noin 30 % pii-ilmaisimelle ja noin 50 % läpäisyilmaisimelle. Sovitusten suurin virhetekijä oli JUROGAM3:n raakadatan taustapiikit, jotka estivät hyvien sovitusten tekemisen. Huomattiin myös, että noin 55 – 65 % läpäisyilmaisimeen päätyvistä ytimistä päätyivät pii-ilmaisimeen riippumatta tutkitusta höyrystyskanavasta.

Avainsanat: Ydinfysiikka, rekyylimassaseparaattorit, MARA, absoluuttinen läpäisy

Abstract

Flink, Henri

Absolute transmission of MARA in a $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ fusion evaporation reaction for nuclei ^{176}Pt , ^{175}Pt , ^{174}Os and ^{172}Os

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2024, 47 pages.

The goal of this study was to find the absolute transmission of the recoil mass separator MARA used by the nuclear structure group of the Department of Physics of the University of Jyväskylä, Finland, for nuclei ^{176}Pt , ^{175}Pt , ^{174}Os and ^{172}Os in $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ fusion evaporation reaction. The transmission was determined by comparing the ratios of the intensities of the γ -peaks observed after the fusion reaction with the JUROGAM3 detector equipment under different inter-detector correlation conditions. The results were compared with simulated transmissions. The maximum transmission for the nucleus ^{176}Pt was 50 ± 5 % for the focal plane silicon detector and about 87 ± 8 % for the focal plane transmission detector. The transmissions depended on the reaction kinematics of the nuclei and the collected charge states. The simulations, on the other hand, yielded about 45 – 50 % and about 60 – 65 %. About 30 % for the silicon detector and about 50 % for the transmission detector were obtained for the nucleus ^{172}Os . The biggest error factor in the fits was the background spikes in the JUROGAM3 raw data, which prevented good fits. It was also noticed that about 55 – 65 % of the nuclei ending up in the transmission detector ended up in the silicon detector, regardless of the studied vaporization channel.

Keywords: Nuclear physics, Recoil Mass Separator, MARA, Absolute transmission

Sisällys

Tiivistelmä	3
Abstract	5
1 Johdanto	9
2 Teoreettinen tausta	11
2.1 Ydinfysiikka	11
2.1.1 Fuusiohöyrystymisreaktiot	11
2.1.2 Parillis-parilliset ja parillis-parittomat ytimet	12
2.1.3 Maagiset luvut	13
2.1.4 Työssä hyödynnetyt ytimet	13
2.2 Laitteisto	16
2.2.1 Kohtio	16
2.2.2 JUROGAM 3	17
2.2.3 MARA	17
2.2.4 Fokustaso	20
2.3 Datan analysointi	21
2.3.1 CERN ROOT	21
2.3.2 Menetelmä	21
2.3.3 TRIM ja PACE4 -simulaatiot	22
3 MARAn läpäisyn määrittäminen	29
3.1 Aineisto	29
3.2 Sovitukset	30
4 Tulokset	35
5 Päätäntö	41
Lähteet	42

1 Johdanto

Ydinfysiikan lyhyt, noin 130 vuoden historia on muuttanut maailmaa monin tavoin tarjoamalla ihmiskunnalle muun muassa lääketieteellisiä tutkimusvälineitä [1], puhdasta energiaa [2] ja joukkotuhoaseita [3].

Henry Becquerel havaitsi radioaktiivisuuden ja sitä kautta mahdollisuuden atomin ytimen olemassaololle vuonna 1896. Mahdollisuudesta tuli todellisuutta, kun Ernest Rutherford löysi atomin ytimen 1911 [4][5]. Hän löysi myös protonin onnistuttuaan tuottamaan ensimmäisen säteilytyksestä aiheutuvan ydinreaktion vuonna 1919. Vuonna 1932 Cockcroft ja Walton onnistuivat halkaisemaan litium-atomin pommittamalla niitä 400 keV protoneilla [6].

Viimeisen sadan vuoden aikana ydinfysiikan teoria, laitteisto ja datankeruumenetelmät ovat kehittyneet nopeasti, jonka seurauksena ydinfysiikan ala on monipuolistunut. Ydinrakenteen tutkiminen on yksi ydinfysiikan fundamentaali tutkimusalue. Massaseparaattori on yksi ydinrakenteen tutkimista varten käytettävä laitteisto, joiden avulla voidaan erottaa reaktiotuotteita toisistaan niiden m/q -jakauman perusteella [7].

Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkastellaan Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen ydinrakenneryhmän käyttämää MARA-nimistä laitteistoa. MARA on vuonna 2016 valmistunut rekyylimassaseparaattori, jota käytetään erilaisissa fuusiohöyrystys (fusion evaporation) -kokeissa [8][9][10][11]. Tutkimuksessani pyrin selvittämään, mikä on MARA:n absoluuttinen läpäisy eri varaustiloille $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -fuusioreaktiossa ^{176}Pt , ^{175}Pt , ^{174}Os ja ^{172}Os -ytimille.

Germanium-ilmaisimien käyttö absoluuttisen läpäisyn tutkimiseen on todettu hyväksi metodiksi [12]. Absoluuttista läpäisyä kaasulaskuri MWPC:hen tutkittiin ydinrakenneryhmän toiselle separaattorille RITUlle vuonna 2011, jolloin teoreettiseksi läpäisyksi saatiin 5-90 % ja kokeelliseksi saatiin noin 5-80 % riippuen reaktioytimestä, niiden varaustiloista, reaktiokinematiikasta ja separaattorin kaasunpaineesta. MARA:n läpäisystä ei ole paljon tutkittua dataa, mutta joidenkin kokeiden perusteella sen pitäisi olla noin 10-70 % riippuen reaktion asymmetrisyydestä ja kerättyjen varaustilojen lukumäärästä [13].

Tämän työn data kerättiin Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksella 13. tammi-kuuta 2024. Mittauksessa kerätystä raakadatasta muodostettiin loogisia tapahtumia, joiden avulla luotiin oleelliset histogrammit. Histogrammit tallennettiin CERNin ROOT-tiedostoihin ja analysoitiin python-pohjaisella koodilla. Vertaamalla histogrammeja saatiin laskettua läpäisyt eri ytimille. Kokeellisia tuloksia verrattiin simuloituihin tuloksiin, jotka saatiin PACE4-ohjelmalla.

MARA on tärkeä Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen laitteisto ja tulokset MARAn läpäisystä auttavat ymmärtämään paremmin MARAn suorituskykyä. Sitä kautta uusien tutkimusten suunnittelu, joissa ytimiä tuotetaan erilaisissa reaktiokinematiikoissa, käy helpommaksi.[12]

2 Teoreettinen tausta

Tässä luvussa käyn läpi tutkimukselleni tärkeitä aiheita ydinfysiikan teoriasta, ydinerakenneryhmän käyttämästä laitteistosta ja datan tulkintaan liittyen.

2.1 Ydinfysiikka

2.1.1 Fuusiohöyrystymisreaktiot

Raskain stabiili $N \sim Z$ -ydin on ^{40}Ca , josta raskaammilla stabiileilla ytimillä on enemmän neutroneja, kuin protoneja. Stabiilien ydinten taipuminen pois $N \sim Z$ -linjalta kohti neutronirikasta puolta johtuu Coulombin voimasta. Neutronirikkaudesta johtuen, β^+ -aktiivista puolta stabiilisuuden laaksoa voidaan tutkia kahden stabiilin ytimen fuusioreaktioilla. [8][14]

Fuusioreaktioita merkitään seuraavasti:



mikä lyhennetään monesti muotoon



jossa a on ionisuihku, X on (yleensä) paikoillaan oleva kohtio, Y ydinreaktiossa syntynyt raskas ioni ja b ydinreaktion kevyet tuotteet, kuten protonit, neutronit tai α -hiukkaset [15]. Fuusiohöyrystymisessä ydinreaktioon alku- ja lopputuotteiden väliin tulee virittynyt väliydin, joka purkaa viritystilansa höyrystämällä kevyitä reaktiotuotteita. Kaava 1 voidaan kirjoittaa fuusiohöyrystymisreaktiolle muotoon



jossa a ja X ovat edelleen ionisuihku ja kohtio, mutta C^* on virittynyt väliydin, tähti viittaa tässä virittyneeseen tilaan, b on höyrystymistuote ja Y on tutkittava fuusiotuote, jolle käytetään tässä työssä nimitystä rekyyli.

Fuusiohöyrystymisreaktion aikajana on seuraava: Kahden ytimen fuusion jälkeen nuklidit pyrkivät minimoimaan potentiaalienergian. 10^{-22} sekuntia ytimien törmäyksen jälkeen ammuksen ydin ja kohtio-ydin ovat edelleen osittain erossa toisistaan. Tässä vaiheessa ytimet voivat läpikäydä joko nopean fission tai fuusioytimen muodostumisen. Noin 10^{-19} sekuntia törmäyksen jälkeen fuusioydin jäähtyy höyrystämällä kevyitä hiukkasia, kuten neutroneja, protoneja tai α -hiukkasia, ja 10^{-15} sekunnin kohdalla virityksen purkautuminen jatkuu tilastollisten γ -säteiden säteilyllä. Säteily vähentää energiaa, mutta ei pyörimismäärää, jolloin jäljelle jäänyt energia koostuu lähinnä rotaatioenergiasta. 10^{-12} sekunnin kohdalla ydin säteilee lisää γ -säteitä, jolloin ytimen pyöriminen hidastuu. Tämän jälkeen ydin päättyy perustilalleen. Säteilyn tuloksena ytimen tilatiheys on pienentynyt, jolloin γ -ilmaisimilla on mahdollista nähdä ytimien siirtymiä. Mitä deformatuneempia ytimet ovat, sitä helpommin pyörimiseen liittyvät siirtymät ovat havaita. [8] [14] [16]

2.1.2 Parillis-parilliset ja parillis-parittomat ytimet

Ytimet, joiden sekä protonien että neutronien lukumäärä on parillinen ovat niin kutsuttuja parillis-parillis -ytimiä [15]. Parillis-parillis -ytimistä 145 on stabiileja, mikä kattaa noin 60 % kaikista stabiileista ytimistä [17]. Kaikilla parillis-parillis -ytimillä perustason spin on 0, johtuen Paulin kieltosäännöstä. Parillis-parillisten ytimien gammasäteiden siirtymät keskittyvät pitkälti yhteen rotaatiosarjaan, josta seuraa, että koska niiden sarjojen gammoja on mahdollista havaita paljon verrattuna muiden sarjojen gammoihin, ytimiä, joilla reaktiossa on pienikin vaikutusala (cross-section), on mahdollista tutkia [7].

Ytimet, joiden protonien lukumäärä on parillinen ja neutronien lukumäärä on pariton ovat niin kutsuttuja parillis-pariton -ytimiä [15]. Semi-empiirisen massakaavan mukaan parittomuus protonien tai neutronien lukumäärässä pienentää ytimen sidosenergiaa, mistä johtuu, että stabiileja parillis-pariton -ytimiä on vähemmän, kuin stabiileja parillis-parillis -ytimiä, noin 20 % stabiileista parillis-parittomista ytimistä [17]. Toisin kuin parillis-parillisissa ytimissä, parillis-parittomissa ytimissä γ -säteiden määrä jakautuu tasaisemmin eri rotaatiosarjojen välillä.

2.1.3 Maagiset luvut

Ydinfysiikan maagisia lukuja ovat 2, 8, 20, 28, 50, 82 ja 126 [15] [18]. Ytimet, joissa protonin tai neutronin lukumäärä vastaa maagisia lukuja, ovat erityisen stabiileja verrattuna muihin ytimiin, joiden massat ovat samaa luokkaa [19]. Maagiset ytimet ovat muodoltaan palloja, eli niiden deformaatio on erittäin vähäistä. Ytimet, joiden sekä protonien että neutronien lukumäärä vastaa maagista lukua, ovat niin kutsuttuja kaksoismaagisia ytimiä. Niiden sidosenergia on erityisen suuri, mikä tekee niistä stabiileja. Toisaalta ytimet, joiden protonien ja neutronien lukumäärät poikkeavat huomattavasti maagisista luvuista ovat hyvin deformoituja, jolloin niillä on selvä rotaatiosarja.

2.1.4 Työssä hyödynnetyt ytimet

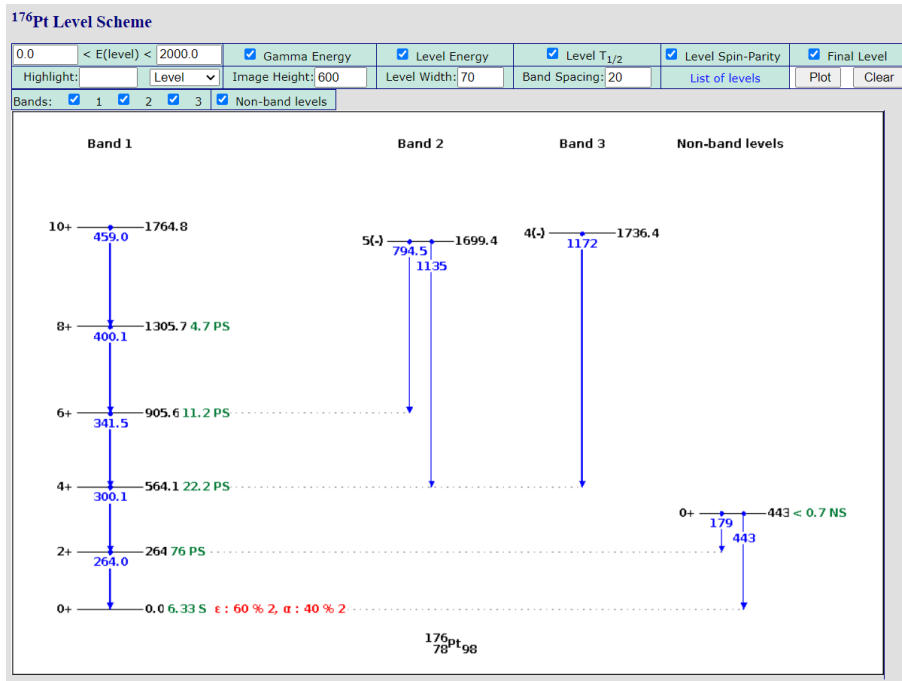
^{176}Pt -ydin sisältää 78 protonia ja 98 neutronia, eli se on parillis-parillinen ydin, jolloin sillä on yksi terävä rotaatiosarja. Sen protonilukumäärä on neljän päässä maagisesta luvusta ja neutronilukumäärä on 16 tai 28 päässä maagisesta luvusta, eli sen neutronilukumäärä on kaukana ympäröivistä maagisista luvuista. Tämän takia ^{176}Pt on deformoitunut ja epästabiili, minkä ansiosta sillä on rotaatiosarja [15], jonka voi havainnoida erilaisissa ydinspektroskopian kokeissa. Kuten kuvioista 1 voidaan nähdä, ^{176}Pt :n ensimmäisen rotaatiosarjan lähettämien gammasäteiden energiat energiatasovälillä 0 – 2000 keV ovat 264.0, 300.1, 341.5, 400.1 ja 459.0 keV [20].

Platina-175 -ydin sisältää 78 protonia ja 97 neutronia, eli se on parillis-pariton -ydin, jonka neutroniluku on lähellä kahden maagisen luvun puoltaväliä, jolloin se on deformoitunut ydin. Kuten kuvioista 2 nähdään, sen ensimmäisen rotaatiosarjan lähettämien gammasäteiden energiat energiatasovälillä $x+0 - x+2300$ keV ovat 328.6, 436.4, 466.4, 506.6, 554.6 ja 603.1 keV [21].

Osmium-174 -ydin sisältää 76 protonia ja 98 neutronia, eli se on parillis-parillinen -ydin ja senkin neutroniluku on lähellä kahden maagisen luvun puoltaväliä, miksi se on deformoitunut. Sen ensimmäisen rotaatiosarjan lähettämien gammasäteiden energiat energiatasovälillä 0 – 2300 keV, niin kuin kuvioista 3 voidaan nähdä, ovat 158.6, 276.4, 342.8, 394.4, 445.7 ja 496.3 keV [22].

Osmium-172 -ydin sisältää 76 protonia ja 96 neutronia, eli se on parillis-parillinen -ydin, jonka neutroniluku on lähellä kahden maagisen luvun puoltaväliä, jonka takia

sen on deformatiunut. Sen ensimmäisen siirtymäketjun lähettämien gammasäteiden energiat energiatasovälillä 0 – 2000 keV, kuten kuviosta 4 voidaan nähdä, ovat 227.8,



Kuvio 1. ^{176}Pt rotaatiosarjat energiavälillä 0-2000 keV. (Kuva: NuDat3 level scheme, haettu 28.3.2024)

P. PEURA *et al.*

PHYSICAL REVIEW C **89**, 024316 (2014)

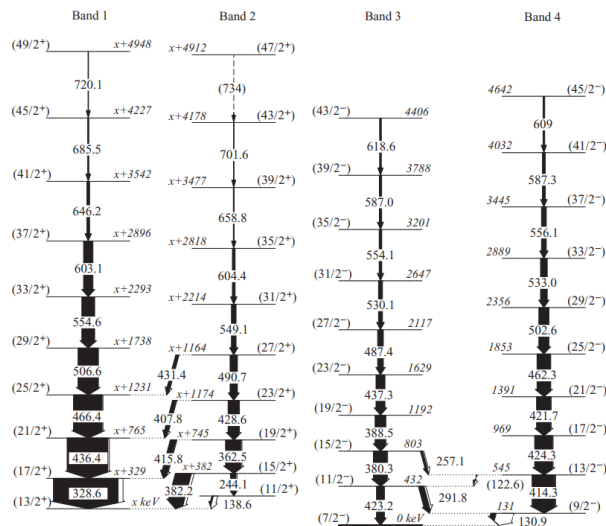
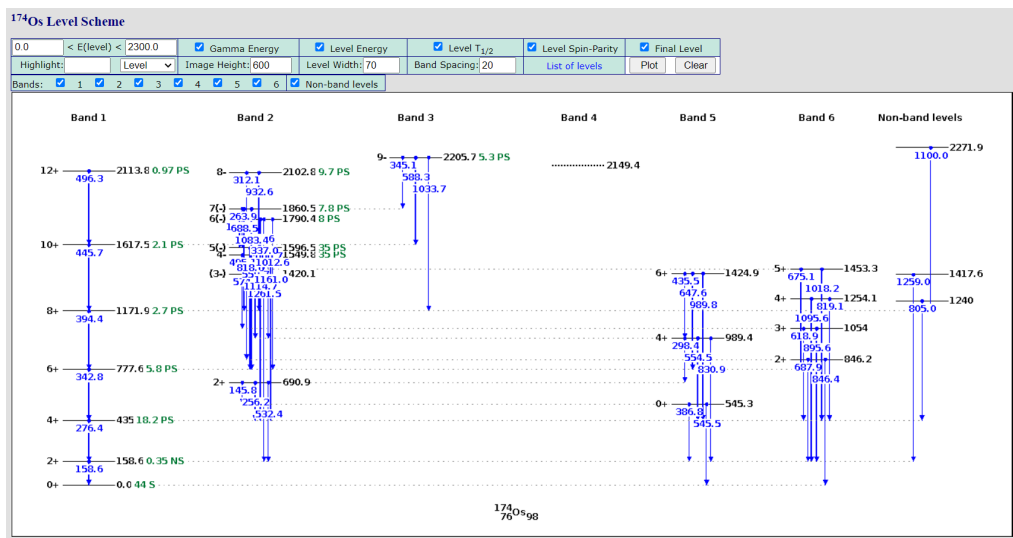


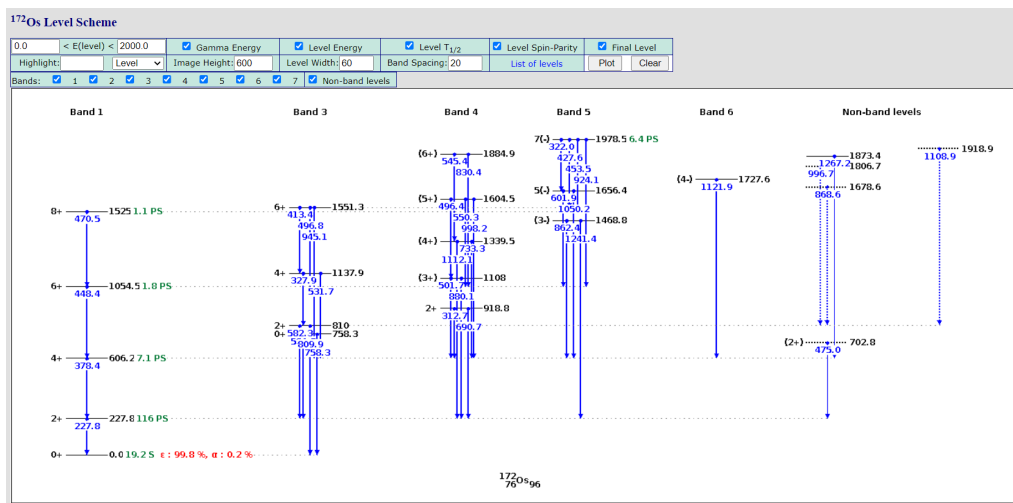
FIG. 8. The proposed level scheme for ^{175}Pt . The spin and parity assignments are based on the measured intensity ratios, angular distributions, the α -decay and ground-state properties of ^{179}Hg , ^{175}Pt , and ^{171}Os and the systematics in this region of nuclei.

Kuvio 2. ^{175}Pt rotaatiosarjat energiavälillä x+0-x+2000 keV. (Kuva: Peura *et al.* [21] level scheme)



Kuvio 3. ^{174}Os rotaatiosarjat energiavälillä 0-2300 keV. (Kuva: NuDat3 level scheme, haettu 28.3.2024)

378.4, 448.4 ja 470.5 keV [23].



Kuvio 4. ^{172}Os rotaatiosarjat energiavälillä 0-2000 keV. (Kuva: NuDat3 level scheme, haettu 28.3.2024)

2.2 Laitteisto

2.2.1 Kohtio

Ydin- ja kiihdytinfysiikassa kohtio on kohde tai systeemi, joka säteilytyksen seurauksena säteilee hiukkasia [24]. Kohtiot voivat olla kaasukohtioita tai kiinteitä kohtioita ja ne voivat olla eri paksuisia ja valmistettu eri alkuaineista. Tyypillisesti ydinfysiikan kokeissa käytetään kiinteää kohtiota, jonka tiheys on välillä $\sim 1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ja $10\text{-}20 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Hyvä kohtio on kestävä, tiheysjakaumaltaan tasainen ja kemiallisesti puhdas [24].

MARAn kanssa käytetään kiinteitä kohtioita. Kiinteän kohtion paksuus vaikuttaa separaattorien, kuten MARAn läpäisyyn. Mitä pidempään kohtiossa suihku liikkuu, sitä suuremman kulmajakauman se saa. Hiukkassuihkun energia laskee, mitä pidemmälle kohtiota suihku kulkeutuu. Tästä syystä paksumpi kohtio tuottaa suuremman fuusiotuotteiden energiajakauman. Energiajakauma puolestaan vaikuttaa varausjakaumaan, kuten kaavasta 9 voidaan nähdä. Varausjakaumaa voidaan kuvata esimerkiksi Schiwietzin and Granden kaavalla [25]

$$\bar{q} = Z \frac{12x + x^4}{0.07x^{-1} + 6 + 0.3x^{1/2} + 10.37x + x^4}, \quad (4)$$

jossa x on

$$x = (0.595v/v_0 Z^{-0.52} Z_t^{-0.019Z^{-0.52}v/v_0})^{1+1.8/Z}. \quad (5)$$

Kaavassa \bar{q} on keskimääräinen varaus, v on fuusioytimen nopeus, $v_0 = 2.19 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ on Bohrin nopeus, Z on rekyylin protoniluku ja Z_t kohtion protoniluku. Kaavan absoluuttinen virhe on $\Delta\bar{q} = 0.54 \text{ e}$ ja suhteellinen virhe on $\Delta\bar{q}/Z = 2.3 \%$. Varausjakauman redusoitu leveys on

$$w = d_{\bar{q}} Z^{-0.27} Z_t^{0.035-0.0009Z} f(\bar{q}) f(Z - \bar{q}), \quad (6)$$

jossa $f(y)$ on

$$f(y) = \sqrt{(y + 0.37Z^{0.6})/y} \quad (7)$$

ja $d_{\bar{q}}$ on Nikolaevin ja Dmitrievin [26] kehittämä varausjakauman leveys

$$d_{\bar{q}} = d_0 \sqrt{\bar{q}[1 - (\bar{q}/Z)^{1/k}]}, \quad (8)$$

missä $d_0 = 0.5$ ja $k = 0.6$.

2.2.2 JUROGAM 3

JUROGAM 3 on γ -sädespektroskopiakokeissa käytetty gammailmaisin [13][27]. Se koostuu 39 kohtiota ympäröivästä germanium-ilmaisimoduulista, joissa on yhteensä 111 germanium-kidettä. Se mittaa radioaktiivisten ytimien lähettämiä γ -säteitä, ja 1332 keV:n gammasäteiden havainnoinnin tehokkuus sillä on 5.2 %. JUROGAM 3:a käytetään MARAn tai RITUn kanssa ja muiden lisälaitteiden, kuten JYTuben kanssa. JUROGAM 3:n käyttö MARAn kanssa tuottaa aiempaa tarkempia tutkimustuloksia. Tässä työssä JUROGAM 3:lla kerätään läpäisymittaukseen käytettyjä γ -hiukkasia.

2.2.3 MARA

MARA eli Mass Analyzing Recoil Apparatus on Jyväskylän yliopistossa rakennettu rekyylimassaseparaattori. MARA koostuu tuplafokusointilaitteistosta, jonka tarkoitus on luoda pisteestä-pisteeseen -fokusointi kohtion ja fokustason välille. Tuplafokusointilaitteisto koostuu kolmesta magneettisesta kvadrupolista, sähköstaattisesta deflektorista ja magneettisesta dipolista, eli MARA on ionioptiselta rakenteeltaan QQQEM-separaattori. [8] [9] [13]

Rekyylimassaseparaattorien tärkein tehtävä on erottaa halutut reaktiotuotteet suurilla energioilla kohtioon törmäävästä hiukkassuihkusta. Kokeen luonne ja sen rajoitukset vaikuttavat siihen, millaista separaattoria kannattaa käyttää. Esimerkki kokeen rajoituksista voi olla, millaista kinematiikkaa kokeelta odotetaan. MARAa käytetään tyypillisesti fuusiotuotteiden tutkimiseen ytimille, joiden massaluku on alle 150 ja kokeissa, joissa käytetään käänteistä (suihkun massa suurempi, kuin kohtion massa) tai symmetristä (suihku ja kohtio saman massaisia) kinematiikkaa [13].

MARA rakennettiin vuonna 2016 ydinrakennetutkimuksia varten, jotka suoritetaan $N \sim Z$ -linjan paikkeilla ja lähellä protonisidoslinjaa. Se rakennettiin laajentamaan tutkittavia alueita, joita RITulla oli vaikea tutkia tarpeeksi luotettavasti, esimerkiksi tina-100:a kevyempiä ytimiä. RITulla on tutkittu protonisidoslinjalla olevia ytimiä, joiden massat ovat arseeni-66:n ja rutherfordium-256:n välillä [9].

MARA:ssa hiukkassuihkun ja fuusiotuotteiden erottaminen tapahtuu sähköstaattisessa deflektorissa. Deflektorin anodissa on 15 mm korkea vaakasuora rako, jonka läpi suihkun hiukkaset ajautuvat suihkulle tarkoitettuun kuppiin. Deflektorin sisään- ja ulostulokohdassa on säädettäviä metallilevyjä, joiden avulla voidaan luoda eri

kokoisia aukkoja, joita säätämällä voidaan vaikuttaa MARAn massanerotuskykyyn. Suihkun ja fuusiotuotteiden erotusta varten lasketaan ei-relativistisen ionin sähköinen jäykkyys, joka saadaan kaavasta

$$E\rho = 2K/q, \quad (9)$$

missä E on sähkökentän suuruus, ρ on kaarevuussäde, K on ionin liike-energia ja q on ionin sähkövaraus. Hiukkassuihkun hiukkasen sähköinen jäykkyys on aina suurempi kuin fuusiotuotteiden, ja siksi sen hiukkaset taipuvat vähemmän deflektorissa.

Ionien lentorata magneettikentän läpi dipolissa saadaan magneettisen jäykkyyden avulla.

$$B\rho = p/q, \quad (10)$$

jossa B on magneettikenttä, ρ on kaarevuussäde, p on ionin liikemäärä ja q ionin sähkövaraus.

MARAn asetukset magneettiselle jäykkyydelle ja sähköstaattiselle jäykkyydelle tulevat ionioptiikan laskuista, joissa vaaditaan pisteestä-pisteeseen -fokusointi niin kutsutulle referenssihiukkaselle. Referenssihiukkanen on teoreettinen hiukkanen, jolla on jokin massa, varaus ja energia, joka tullessaan separaattoriin optisen akselin mukaisesti, kulkee optisen systeemin (separaattorin) läpi poikkeamatta optiselta akselilta. Toisin sanoen kaavojen 9 ja 10 kaarevuussäteet on asetettu vastaamaan deflektorin ja magneettisen dipolin kaarevuussäteitä ja K , p ja q on asetettu vastaamaan referenssihiukkasen liike-energiaa, liikemäärää ja varausta. Valitsemalla referenssihiukkanen siten, että se vastaa tutkittavaa fuusiotuotetta mahdollisimman hyvin, saadaan maksimoitua läpäisy.

Sähköinen ja magneettinen jäykkyys eivät riipu hiukkasen massasta ja energiasta samalla tavalla, jonka takia MARAssa on m/q -dispersiota 8 mm/%. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden prosentin muutos ionin massassa tai varauksessa siirtää sitä noin 8 millimetriä fokustasolla sivusuunnassa. Sen m/q -läpäisy on 4 %.

MARAn kulmaläpäisy vaaka- ja pystysuunnassa on $\pm 45 \cdot \pm 55$ mrad². Suurin separaattorin läpäisyyden vaikuttava asia on separaattorin kulmaläpäisy, sillä mitä suurempi kulmaläpäisy on, sitä suurempi osa syntyneistä reaktiotuotteista saadaan kuljetettua separaattorin läpi fokustasolle. MARAn tyypillinen massanerotuskyky on noin 170 ja läpäisy on noin 10–70 % riippuen reaktion kinematiikasta.

MARAn kulmaläpäisy ja kulmaläpäisy riippuen suhteellisista massa- ja liike-

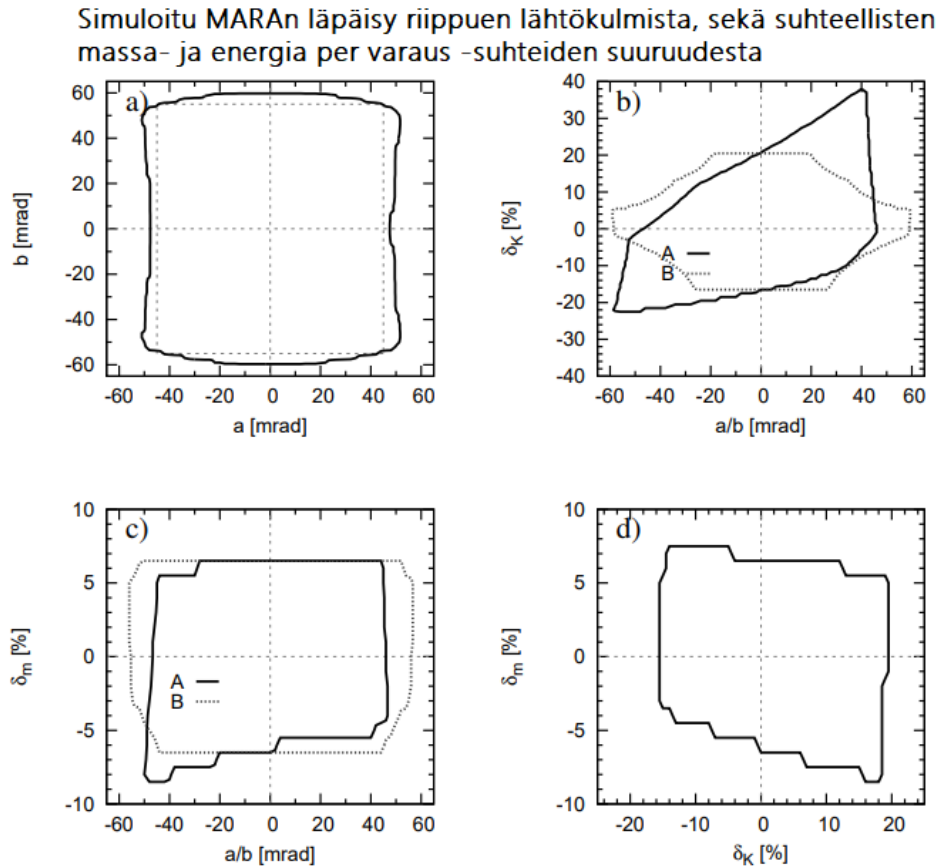
energia per varaus -suhteista esitetään kuviossa 5, jossa $a = \frac{p_x}{p_z} = \tan(\alpha)$ ja $b = \frac{p_y}{p_z} = \tan(\beta)$ ovat ionin pysty- ja vaakasuuntaisten liikemäärien suhteet kulkusuunnan liikemäärään, mikä antaa kulmat, jolla ioni poikkeaa optiselta akselilta, ja δ_K sekä δ_m ovat suhteelliset m/q ja K/q -suhteet verrattuna referenssihiukkaseen, on määritelty niin, että

$$\frac{m}{q} = \frac{m_0}{q_0}(1 + \delta_m) \quad (11)$$

ja

$$\frac{K}{q} = \frac{K_0}{q_0}(1 + \delta_K), \quad (12)$$

joissa m_0 , K_0 ja q_0 ovat referenssihiukkaseen massa, liike-energia ja varaus.



Kuvio 5. a) MARAn kulmaläpäisy. b) δ_K läpäisy a:n (tumma viiva) tai b:n (katkoviiva) funktiona. c) δ_m läpäisy a:n (tumma viiva) tai b:n (katkoviiva) funktiona. d) δ_m läpäisy δ_K funktiona. (Kuva: Jan Saren 2011 [8].)

Muita MARAn kaltaisia rekyylimassaseparaattoreita on esimerkiksi aiemmin

mainittu Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen RITU [12], USA:n Illinoisissa sijaitseva Argonne National Laboratoryn Argonne fragment mass analyzer FMA [28], Intian New Delhin Nuclear Science Centerin Heavy ion reaction analyzer HIRA [29] ja Kanadan Vancouverin kiihdytinlaitos TRIUMF:n EMMA [30]. RITUn kulmaläpäisy on noin 8.5 msr ja kokonaisläpäisy on mitattu olevan noin 7 – 75 % MWPC:hen ja noin 10 – 70 % DSSD:hen erilaisissa fuusiohöyrystysreaktioissa, kuten $^{170}\text{Er}(^{40}\text{Ar},5n)^{205}\text{Rn}$ ja $^{nat}\text{Mo}(^{84}\text{Kr},4n)^{180}\text{Pt}$. FMA:n kulmaläpäisyksi on mitattu noin 6 msr ja kokonaisläpäisyksi $^{32}\text{S} + ^{184}\text{W}$, $^{32}\text{S} + ^{208}\text{Pb}$ ja $^{32}\text{S} + ^{232}\text{Th}$ -reaktioissa on mitattu jopa noin 85 %. HIRAn ja EMMA:n kulmaläpäisyksi on mitattu noin 10 msr ja 17 msr.

2.2.4 Fokustaso

Fokustasoon kuuluu säädettävä m/q -rakosysteemi ja ilmaisimia, kuten paikkaherkkä, kaasutäytteen läpäisyilmainen MWPC ja paikkaherkkä pii-puolijohdeilmaisoin DSSD. [8][13]

Fokustaso on voimakkaasti vinossa ja sivussa optisesta akselista, minkä vuoksi hiukkasilla, jotka eivät ole referenssihiukkasia, eli joilla ei ole haluttua m/q -arvoa, polttopiste on liian edessä tai takana.

MWPC (multi-wire proportional counter) on kaasulaskuri, jolla voidaan mitata m/q -spektri [9]. MWPC koostuu kolmesta elektrodista, jotka ovat pakattuna peräkkäin kaasuun ohuiden Mylar-ikkunoiden väliin. Keskielektrodina toimiva lankataso, on asetettu noin 500 V positiiviseen jännitteeseen ja sitä ympäröivät langat on maadoitettu. Kullattujen volframilankojen väli on 1 mm x- ja y-suuntaan ja niiden avulla voidaan mitata rekyyliin paikka ilmaisimessa [11]. Rekyylin paikan antaa aika-amplitudimuunnin (TAC) käyttämällä nopealta anodilta (lankatasolta) tulevien signaalien aikaeroa ja viivelinjojen kautta luettavia signaaleja. MWPC:n käytön haittapuoli MARA:ssa on ilmaisimen suhteellisen korkea materiaali- ja paksuus.

DSSD eli double-sided Si-strip detector (pii-ilmaisimien) on MARAn pääilmaisimien. Se on kooltaan 48 mm (y-suunnassa) X 128 mm (x-suunnassa). DSSD:ssä liuskan leveys on 0,67 mm ja siinä on 72 + 192 liuskaa. DSSD:n liuskojen avulla saadaan tietoa tapahtumien eli DSSD:hen iskeytyneiden hiukkasten paikoista, energioista ja lentoajoista. DSSD:n lisäksi sen takana käytetään toista pii-ilmaisinta DSSD:n läpäisevien kevyiden hiukkasten, kuten protonien, neutronien ja α -hiukkasten selvittämiseksi ja DSSD:n edessä käytetään silikoni-ilmaisinta DSSD:stä takakulmiin karanneiden

hajoamistuotteiden, kuten protonien, α -hiukkasten ja konversioelektronien mittaamiseen. Ilmaisimet on ympäröity gammasäteitä havainnoivilla Germanium-ilmaisimilla. Jokainen kanava liipaisee itsenäisesti digitaalisessa datankeruujärjestelmässä, johon kanavat on yhdistetty.

2.3 Datan analysointi

2.3.1 CERN ROOT

ROOT on CERNin luoma ilmainen avoimen lähdekoodin tiedonlouhintatyökalu [31]. ROOT kehitettiin suurten datamäärien, kuten tuhansien teratavujen käsittelyyn, jota tarvitaan muun muassa CERNissä tehtävissä hiukkasfysiikan kokeissa. ROOT on C++:lla kirjoitettu olio-ohjelmointipohjainen data-analyysikehys, joka sisältää useita tilastojen tutkimista ja sovittamista varten kehitettyjä työkaluja. Se sisältää myös graafisen käyttöliittymän sekä itsenäisen GUI-kehityspaketin. ROOTin kyky kompressoida dataa tiiviisti auttaa, ettei tietokoneen levytila lopu kesken yhtä nopeasti, kuin jos sama data olisi tallennettu tekstitiedostona tai pakkaamattomana binääritiedostona.

2.3.2 Menetelmä

Tutkimusaineisto, joka on tallennettu CERN ROOT -tiedostojen muodossa voidaan tulkita python-koodilla. Koodissa voidaan luoda datalle veräjiä, joiden avulla saadaan suodatettua taustasäteilyn määrää ja näin saada haluttujen ytimien gammapiikit esiin. Tämä perustuu $\gamma - \gamma$ koinvidensseihin [7] [32]. Tämä tarkoittaa sitä, että jos fuusiohöyrystysreaktiossa fuusiotuotteen lähettämiä γ -hiukkasia havaitaan tietyn aikaikkunan (esimerkiksi $1 \mu s$) sisällä sekä kohtiossa JUROGAM 3:lla, että fokus-
tasolla DSSD:lla ja MWPC:llä, niin voidaan olettaa niiden olevan saman ytimen γ -hiukkasia. Kun seulotaan kaikki sellaiset tapahtumat pois, jotka eivät täytä $\gamma - \gamma$ koinvidenssin ehtoja, niin taustasäteilyn intensiteettiä saadaan laskettua huomattavasti. Kun halutut piikit on saatu esiin, saatuihin spektrien piikkeihin voidaan sovittaa normaalijakaumat. Vertaamalla spektrien piikkien intensiteettejä DSSD:n ja JUROGAM 3:n välillä tai MWPC:n ja JUROGAM 3:n välillä saadaan määritettyä kokonaisläpäiy DSSD:hen ja MWPC:hen. Tässä työssä tuotettiin kolme $\gamma - \gamma$ -spektriä JUROGAM 3:n välittömistä γ -säteistä eri ehdoilla. Ensimmäinen spektri oli ilman ehtoja fokustason ilmaisimista, jotta saatiin pelkkä JUROGAM 3:n $\gamma - \gamma$ raakadata.

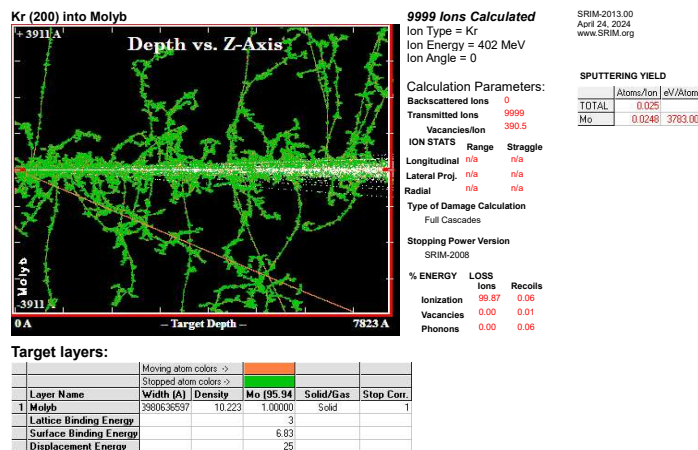
Toinen ehto oli, että jotain havaitaan MWPC:ssä rekyylin lentoajan MARAn läpi sisässä. Kolmas ehto oli, että fokustasolla havaittu hiukkanen ollaan varmistettu rekyyliksi MWPC-DSSD lentoajan ja DSSD:llä havaitun rekyylin energian avulla. Piikkien intensiteettien virheet lasketaan virheen etenemislaila [33] ja sovituksen kovarianssimatriisia hyödyntäen. Virheen etenemislaki on

$$\delta f = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2}, \quad (13)$$

jossa δf on funktion virhe, δx_i i:nnen muuttujan virhe ja $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ funktion osittaisderivaatta i:nnen muuttujan suhteen. Intensiteettien suhteiden virhe lasketaan virheen etenemislaila käyttäen hyödyksi intensiteettien virheitä.

2.3.3 TRIM ja PACE4 -simulaatiot

TRIM on simulaatio-ohjelma, jonka avulla voidaan simuloida ionien liikettä materiaassa [34]. Se kykenee muun muassa laskemaan ionien lopullisen 3-ulotteisen jakouman ja ionien energiahäviöön liittyvät kineettiset ilmiöt. Simuloin TRIM-ohjelmalla ^{84}Kr -hiukkassuihkun liikettä ^{96}Mo -kohtiassa, kuvassa 6, huomataan, että suurin osa suihkusta pääsee kohtiosta läpi.



Kuvio 6. TRIM:llä simuloitu 402 MeV ^{84}Kr -hiukkassuihkun liike ^{96}Mo -kohtiassa.

Fuusiohöyrystymistuotteiden vaikutusaloja ja kulmajakaumia voidaan simuloida LISE++ -ohjelman PACE4 -lisäosalla [35][36]. Laskin PACE4-ohjelmalla reaktion $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ fuusiohöyrystymistuotteiden vaikutusalat, kun suihkun energia on 402 MeV ja kohtion tiheys on $0,8 \text{ mg/cm}^2$. Tässä työssä käytettyjen ytimien vaikutusalat ovat $\sigma(^{176}\text{Pt}) = 16.2 \text{ mb}$, $\sigma(^{175}\text{Pt}) = 38.4 \text{ mb}$, $\sigma(^{174}\text{Os}) = 48 \text{ mb}$ ja $\sigma(^{172}\text{Os}) = 126 \text{ mb}$. Mitä suurempi vaikutusala ytimellä on, sitä todennäköisemmin sitä syntyy reaktiossa [15]. Vaikutusalan yksikkö barn, $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$. Suihkun energia laskee, mitä pidemmälle kohtiota suihku kulkee ja sen seurauksena vaikutusala kasvaa tai pienenee riippuen höyrystyskanavasta. Tästä seuraa, että teoreettiset vaikutusalat antavat hyvän kuvan ytimien vaikutusaloista kohtion alkupäässä, mutta ei kohtion loppupäässä.

Neutron spectra in laboratory coordinates 325094 events

Energy range (MeV)	Angular range (deg)																	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
0-1	113	400	394	1191	1000	2217	1118	1973	4915	4698	4062	3878	2924	2302	1717	1286	708	240
1-2	182	450	924	1584	2149	1901	7301	8005	5594	4885	4092	2630	2185	1820	1075	692	440	158
2-3	379	1061	1838	1894	3451	9544	6403	6364	4484	3288	2443	1637	1305	791	654	384	160	49
3-4	524	1415	1562	5955	9272	6221	5798	4076	2931	2098	1392	977	602	475	227	186	116	26
4-5	724	2829	7959	7181	6234	5075	4144	2732	1944	1311	811	545	376	193	174	90	30	18
5-6	2046	5077	4087	6281	4386	4021	2616	1825	1201	819	432	292	170	103	55	44	23	8
6-7	1082	3804	4973	3618	4010	2588	1731	1198	737	423	262	150	85	51	28	28	9	
7-8	1054	2085	3302	3252	2574	1782	1157	736	444	259	110	83	42	36	18	1	9	
8-9	835	2281	2010	2392	1573	1160	784	443	266	135	80	40	29	7	13	10	3	1
9-10	379	1438	1906	1430	1198	831	468	251	162	87	39	23	17	4	4	3		
10-11	437	792	1270	1089	826	515	280	172	79	52	28	15	7	3	1	1		1
11-12	312	771	673	769	526	292	168	87	57	27	10	6	2	2				
12-13	140	523	547	494	308	183	109	55	38	14	6	3	2	2				
13-14	130	219	391	260	223	116	55	33	20	9	1	2	1	1				
14-15	101	223	202	178	131	62	39	16	8	2	1	1	2		1		1	
15-16	50	179	157	129	101	50	36	8	6			2	1	1				
16-17	14	95	111	91	58	32	13	8	3	1								
17-18	32	42	85	52	38	20	13	4	1	2								
18-19	12	34	40	27	20	11	9	5	3									
19-20	7	37	26	21	11	8	3											
20-21	1	19	21	9	9	5	4	3										
21-22	2	14	7	11	4	2												
22-23	2	4	6	4	1	1		1										
23-24	3	4	4	4		2												
24-25	5	5	1	1	3		2											
25-26	1	2	4	3	2													
26-27		1	3															
27-28			1															
28-29	1		2		1													
29-30		1	1	1														
Above 30	1		1		1	1												
Total	8569	23805	32508	37921	38110	36640	32251	27995	22893	18110	13769	10287	7751	5791	3969	2725	1499	501
dSig/dOmega	723.385	676.715	565.943	486.422	396.526	329.079	261.797	213.216	169.053	133.726	104.851	83.4815	69.586	60.2184	50.8683	47.3802	42.5187	42.0092
0-5	1922	6155	12677	17805	22106	24958	24764	23150	19868	16280	12800	9667	7392	5581	3847	2638	1454	491
5-10	5396	14685	16278	16973	13741	10382	6756	4453	2810	1723	923	588	343	201	118	86	44	9
10-20	1235	2915	3502	3110	2242	1289	725	388	215	107	46	32	16	9	4	1	1	1
Above 20	16	50	51	33	21	11	6	4										

Kuvio 7. PACE4-simulointi: Neutronien kulmajakaumat laboratorikoordinaateissa $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -fuusioreaktiossa.

Alpha spectra in laboratory coordinates 60289 events

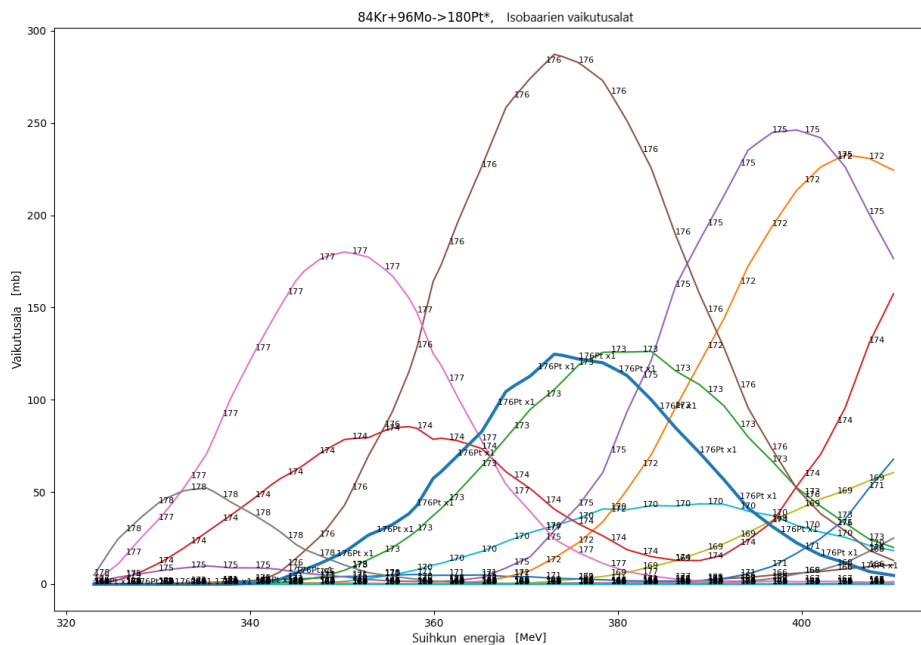
Energy range (MeV)	Angular range (deg)																	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
1 - 2													1				2	
2 - 3												1	2	6	11	10	6	
3 - 4									1	3	22	37	49	56	57	16		
4 - 5									1	8	28	68	111	148	143	85	33	
5 - 6									5	32	88	175	254	239	201	119	39	
6 - 7									1	9	89	233	309	380	277	203	113	36
7 - 8									2	38	165	327	379	376	231	158	63	19
8 - 9									24	120	303	414	440	291	159	101	42	8
9 - 10								2	52	214	409	489	340	205	119	64	25	11
10 - 11								7	120	308	513	425	252	104	67	30	11	2
11 - 12								25	187	435	490	323	145	76	42	15	9	5
12 - 13							2	67	264	559	421	195	97	29	19	15	1	2
13 - 14							7	126	394	514	324	154	65	13	18	4	2	2
14 - 15						1	43	218	471	483	254	86	43	15	9	3	1	
15 - 16						1	62	316	549	416	166	44	22	7	1	2	1	
16 - 17						11	115	424	566	320	101	34	6	4	1	1		
17 - 18				1	25	183	490	480	236	57	16	4	1					
18 - 19				2	57	257	557	441	131	50	6	4	2					
19 - 20				10	88	352	559	301	89	31	3	2						
20 - 21				1	19	147	440	523	224	81	17	5						
21 - 22				2	43	224	506	425	153	39	8	1						
22 - 23				8	74	295	587	381	111	24	4							
23 - 24			1	13	113	410	575	263	69	15	2		1					
24 - 25				30	194	442	520	200	47	9	2							
25 - 26				6	61	284	514	443	145	34	5	1						
26 - 27		1	16	95	298	527	369	99	23	3								
27 - 28	1	3	17	129	397	584	298	76	8	3								
28 - 29			11	54	205	494	544	185	50	11	1							
29 - 30	2	16	96	269	498	432	128	29	6									
Above 30	1296	3817	4956	4846	3426	1383	362	64	6									
Total	1299	3848	5146	5659	5853	5685	5434	5046	4544	4058	3448	2874	2375	1908	1385	1007	541	179
dSig/dOmega	109.66	109.389	89.5884	72.5895	60.8992	51.0593	44.1104	38.4314	33.5551	29.9647	26.2565	23.3232	21.322	19.8406	17.7507	17.5089	15.3453	15.0093
0 - 5									1	9	31	92	150	203	210	154	55	
5 - 10								2	79	386	998	1551	1643	1506	1025	727	362	113
10 - 20					13	183	1021	2789	3773	3491	2407	1286	640	251	157	70	25	11
Above 20	1299	3848	5146	5659	5840	5502	4413	2255	692	180	34	6		1				

Kuvio 8. PACE4-simulointi: α -hiukkasten kulmajakaumat laboratorikoordinaateissa $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -fuusioreaktiossa.

Laskin myös neutronien ja α -hiukkasten kulmajakaumat, ja kuvioista 7 ja 8 nähdään, että α -hiukkasten saamat kulmat ja energiat ovat keskimäärin suuremmat, kuin neutronien. Niiden massat ovat myös nelinkertaiset neutroneihin verratuna. Fuusiohöyrystymisreaktiossa ydin, joka höyrystää α -hiukkasia täysin epäelastisessa reaktiossa kokee siis suuremman liikemäärän muutoksen, kuin neutroneja höyrystävä ydin. Höyrystyvät hiukkaset tuottavat osan fuusiotuotteiden kulmajakaumasta. Sivulle höyrystyneet α -hiukkaset tuottavat fuusiotuotteille suurimmat kulmat, jolloin monien α -hajonneiden ytimien kulmajakaumat ylittävät MARAn kulmaläpäisyyden rajan ja eivät siksi päädy fokustasolle.

Myös ohjaajani Jan Sarén simuloi PACE4-datalla työssä käytettävää reaktiota ja simuloinnin pohjalta loi kuvaajia. Yksi niistä, kuvio 9, oli isobaarien vaikutusalojen

suuruus suihkun energian funktiona. Kuvioista 9 nähdään, että riippuen suihkun

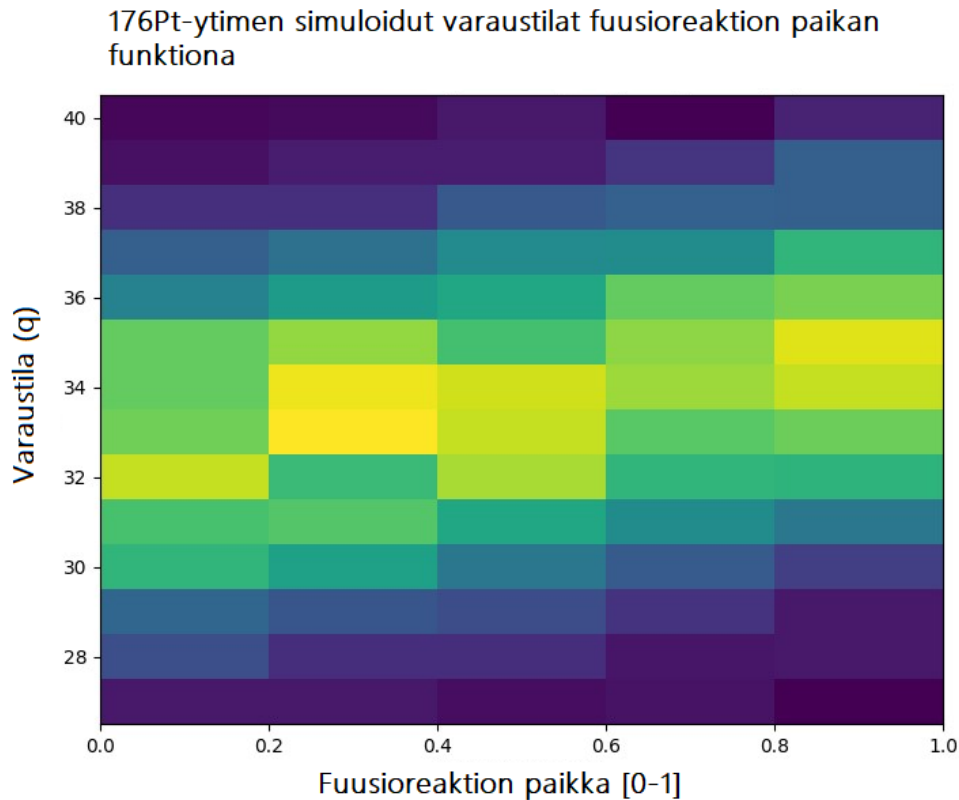


Kuvio 9. Reaktion $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ isobaarien vaikutusalat suihkun energian funktiona välillä 320-410 MeV. (Kuva: Jan Sarén)

energiasta eri isobaarit syntyvät muita todennäköisemmin. Esimerkiksi suihkun energia ollessa 380 MeV, muodostuu eniten 176u-massaisia ytimiä, kuten ^{176}Pt :tä. Energialla ~ 400 MeV syntyy eniten 175u- ja 172u-massaisia ytimiä.

Toinen simuloinnin pohjalta luotu kuvaaja oli ^{176}Pt -ytimen varaustilajakaumista fuusiotuotteiden syntymispaikkojen funktiona, joka näkyy kuviossa 10. Todennäköisimmät ^{176}Pt varaustilat ovat välillä $\bar{q} = 32 - 35$ e. Ytimen todennäköinen varaustila kasvaa, mitä pidemmällä kohtiota ollaan. Simulaatiot perustuvat varaustilayhtälöihin (kaavat 4, 6). Yhtälöistä saadaan, että ytimelle ^{176}Pt rekyyliä liike-energialla $K = 165$ MeV kohtiota alussa varaus on $\bar{q} = 33.0$ e keskihajonnalla 2.4 e.

Samanlaiset kuvaajat tuotettiin myös muille työssä tutkittaville ytimille. Simulaatiot antoivat ytimelle ^{175}Pt todennäköisimmiksi varaustiloiksi 33 e ja 34 e. Kaavat antavat $\bar{q} = 33.1$ e keskihajonnalla 2.4 e. Ytimelle ^{174}Os todennäköisin varaustila on 33 e tai 34 e. Kaavat antavat $\bar{q} = 32.6$ e keskihajonnalla 2.3 e. Ja ytimelle ^{172}Os todennäköisimmät varaustilat ovat 32 ja 33 e. Kaavat antavat $\bar{q} = 32.7$ e keskihajonnalla 2.3 e.



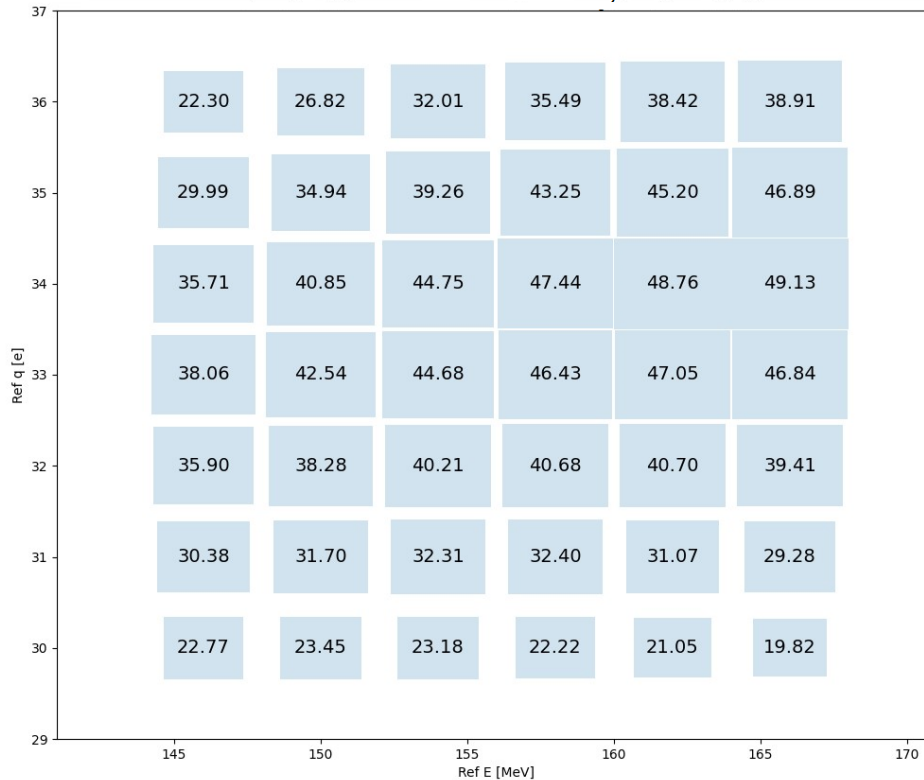
Kuvio 10. ^{176}Pt :n varaustilajakaumat fuusiotuotteen syntymispaikan funktiona $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -reaktiossa. (Kuva: Jan Sarén 2024)

Kuvioissa 11 ja 12 on PACE4-ohjelman dataan perustuvat MARAn läpäisyt ^{176}Pt :lle. Niiden mukaan tutkimuksessa käytetyllä referenssihiukkasen varauksella 33 e ja energialla 158 MeV läpäisy DSSD:hen on 46.43 % ja MWPC:hen 63.49 % ja tutkimuksessa käytetyllä referenssihiukkasen varaustilalla 34 e ja energialla 165 MeV läpäisyksi ytimille saadaan 49.13 % DSSD:hen ja 66.07 % MWPC:hen.

Muille ytimille määritettiin myös läpäisy. Referenssihiukkasen varaustilalle 33 e ja energialle 158 MeV ytimien läpäisy DSSD:hen ja MWPC:hen ytimelle ^{175}Pt on 45.39 % ja 61.89 %, ytimelle ^{174}Os on 31.22 % ja 43.75 % ja ytimelle ^{172}Os 28.41 % ja 41.23 % Referenssihiukkasen varaustilalle 34 e ja energialle 165 MeV ytimien läpäisy DSSD:hen ja MWPC:hen ytimelle ^{175}Pt on 46.83 % ja 64.71 %, ytimelle ^{174}Os on 31.20 % ja 44.76 % ja ytimelle ^{172}Os 29.92 % ja 42.46 %.

Simulaatioissa simuloitiin monelle fuusiohöyrystymiskanavalle oma läpäisy. Aluksi määriteltiin lähtöparametrit, jotka kuvastivat oikeaa koetta. Jokaiselle simuloitulle ammusytimelle arvottiin syntymissyvyys kohtiossa, jolloin TRIM-ohjelmalla voitiin

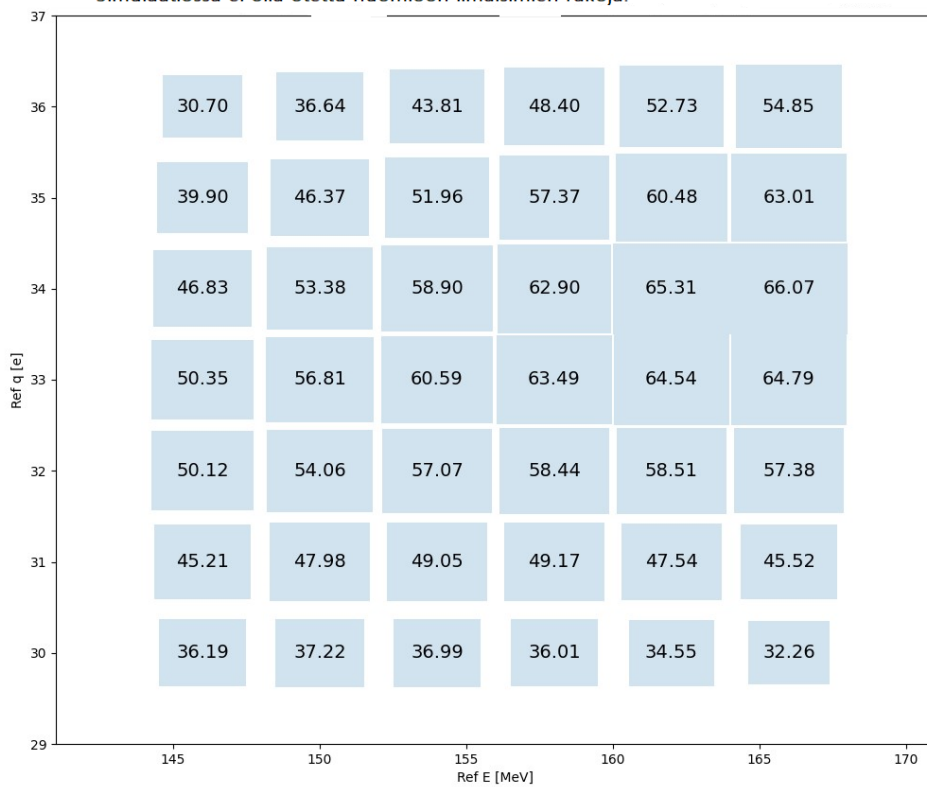
Teoreettinen MARAn absoluuttinen läpäisy ^{176}Pt :lle eri referenssihiukkasen energioille ja varaustiloille reaktiossa $84\text{Kr} + 96\text{Mo} \rightarrow 180\text{Pt}^*$, hiukkassuihkun energialla 402 MeV. Simulaatiossa ei olla otettu huomioon ilmaisimien rakoja.



Kuvio 11. Absoluuttinen läpäisy DSSD:lle ytimelle ^{176}Pt riippuen referenssihiukkasen varaustilasta ja energiasta. (Kuva: Jan Sarén, 2024)

määrittää niille energiat ja paikat. Reaktioille laskettiin Q-arvot ja annettiin painokerroin PACE4:n vaikutusalaennusteiden perusteella. Hiukkaset höyrystettiin ja niille arvottiin energiajakaumat ja kulkusuunta. TRIM-ohjelmalla saatiin prosentiosuus ytimistä, jotka pääsevät pois kohtiosta. Niille arvottiin varausjakauma ja kuljetettiin MARAn läpi käyttäen hyväksi ionioptisia siirtomatriiseja. Läpäisy saatiin vertaamalla kaikkien läpäistyjen ytimien painojen summaa kaikkien ytimien painojen summaan.

Teoreettinen MARAn absoluuttinen läpäisy MWPC:een ^{176}Pt :lle eri referenssihiukkasen varaustiloille reaktiossa $84\text{Kr} + 96\text{Mo} \rightarrow 180\text{Pt}^*$, hiukkassuihkun energialla 402 MeV. Simulaatiossa ei olla otettu huomioon ilmaisimien rakoja.



Kuvio 12. Absoluuttinen läpäisy MWPC:hen ytimelle ^{176}Pt riippuen referenssihiukkasen varaustilasta ja energiasta (Kuva: Jan Sarén, 2024)

3 MARAn läpäisyn määrittäminen

3.1 Aineisto

Aineisto kerättiin Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen kiihdytinlaboratoriossa 13. tammikuuta 2024. Aineistonkeruun aikana tehtiin kuusi ajoa, mikä mahdollistaa yhden pitkän datankeruun ankkuroinnin referenssidataksi, johon muita ajoja verrataan. Jokaisen ajon ydinreaktio oli $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$. K130-syklotronilla tuotettu hiukkassuihku oli 402 MeV krypton-84-suihku, kohtiona toimi molybdeeni-96, tiheydeltään $0,8 \text{ mg/cm}^2$. Lopputuotteena syntyi virittynyt platina-180 josta höyrystyi hiukkasia. Ajoissa esiintyi reaktioita, kuten $^{96}\text{Mo}(^{84}\text{Kr}, 4n)^{176}\text{Pt}$, $^{96}\text{Mo}(^{84}\text{Kr}, 5n)^{175}\text{Pt}$, $^{96}\text{Mo}(^{84}\text{Kr}, \alpha + 2n)^{174}\text{Os}$ ja $^{96}\text{Mo}(^{84}\text{Kr}, \alpha + 4n)^{172}\text{Os}$, joihin tässä tutkimuksessa keskitytään, mutta myös muita reaktioita esiintyi. Taulukkoon 1 on koottu tiedot ajoista.

Taulukko 1. Ajojen tiedot referenssihiukkasesta, MARAn kentistä ja suihkun intensiteetistä (I).

Ajo	Dataa (GB)	Referenssihiukkanen			MARAn kentät		I (pnA)
		m(u)	q(+e)	K(MeV)	E(\pm V)	B(T)	
R8	20	176	33	158	170 017	0.7275	4.4
R9	28	176	34	165	172 418	0.7216	4.4
R10	9	176	32	165	183 194	0.7667	5.0
R11	4	176	36	165	162 840	0.6815	5.0
R12	10	176	33	151	162 570	0.7112	5.0
R13	7	176	31	158	181 081	0.7745	5.0

Referenssihiukkanen valittiin niin, että ^{176}Pt -ytimiä pääsisi MARAn läpi, koska simulaatioiden (kuva 9) perusteella tiedettiin, että ^{176}Pt oli todennäköisin fuusiotuote $\sim 380 \text{ MeV}$ hiukkassuihkulla. Kokeessa käytettiin 402 MeV suihkua johtuen siitä, että samaa suihkun energiaa käytettiin myös toisella kokeella, joka suoritettiin ennen $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}^*$ -koetta. Arvioitiin, että koska ^{176}Pt :aa syntyy todennäköisimmin varaustilalla 33 e tai 34 e ja sitä syntyy kohtion sisällä, suihkun energia on tippunut joitain MeV:ja, jolloin ^{176}Pt :n vaikutusala alkaa nousta.

Ajoissa kerätty data tallennettiin histogrammeiksi CERNin ROOT-datan muodossa. Histogrammit tulkittiin python-pohjaisella koodilla, jolla tuotettiin veräjöidyn datan kuvaajia, joihin sovitettiin normaalijakaumat. Jakaumien pinta-alojen vertailusta voitiin laskea MARAn läpäisy. Läpäisyn virheet laskettiin virheen etenemislailalla (kaava 13). Virheen kaava DSSD:n läpäisylle saadaan muotoon:

$$\delta \frac{N_{rg}}{N_{raw}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{N_{rg}}{N_{raw}}}{\partial N_{rg}} \delta N_{rg}\right)^2 + \left(\frac{\partial \frac{N_{rg}}{N_{raw}}}{\partial N_{raw}} \delta N_{raw}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{N_{raw}} \delta N_{rg}\right)^2 + \left(-\frac{N_{rg}}{N_{raw}^2} \delta N_{raw}\right)^2}, \quad (14)$$

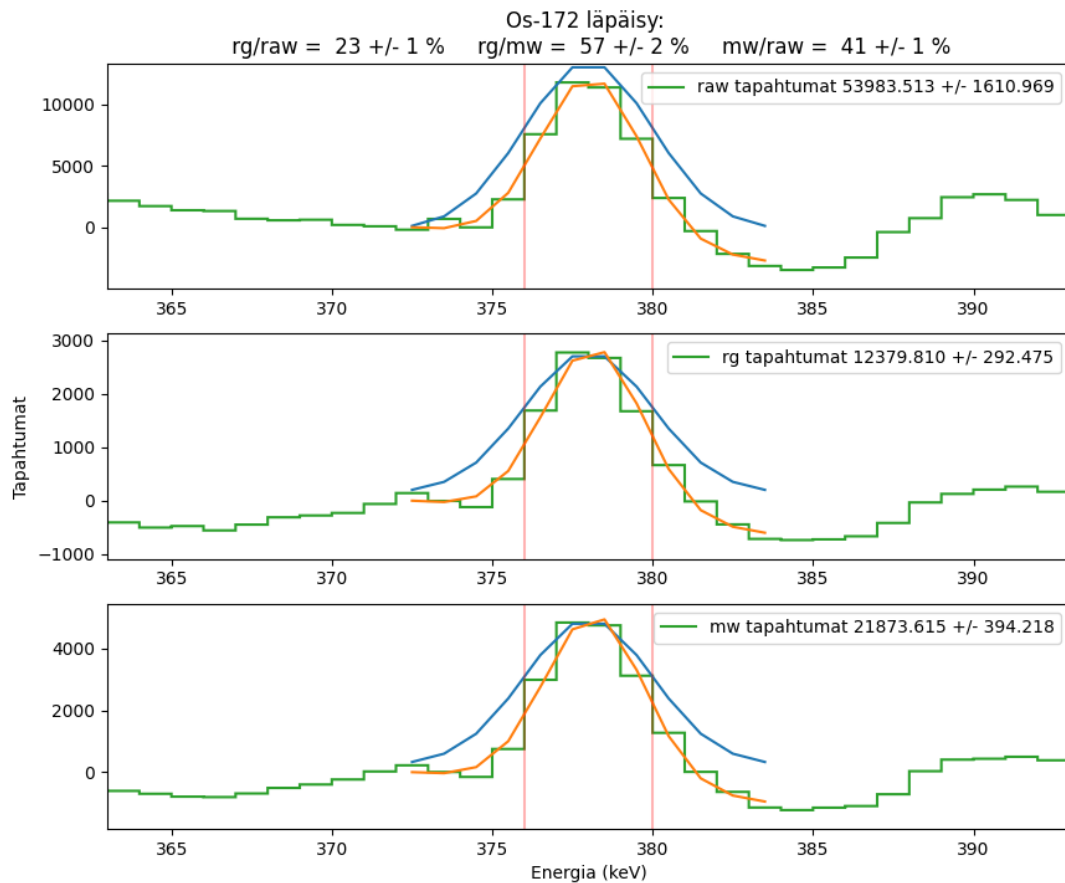
jossa N_{rg} ja N_{raw} ovat DSSD:n ja JUROGAM3:n normaalijakaumien pinta-alat, jotka kertovat tapahtumien määrän.

Tässä työssä veräjöitiin ytimien piikkejä. Tämä tarkoittaa sitä, että ytimelle tuotettiin $\gamma - \gamma$ -matriisi, jossa yhtä aikaa havaitut γ -hiukkaset on sijoitettu pareittain energia-energia histogrammiin. Tuotetusta spektristä saadaan valittua eri energioiden viipaleita. Yksi viipale x- tai y-suunnassa näyttää energiat, jotka nähdään samaan aikaan jonkin γ -energian kanssa. Eli kun veräjöidään joillakin eri energioilla, summaataan energioiden viipaleet yhteen ja näin saadaan γ -spektri veräjöityjen energioiden ehdolla. Summa tarkoittaa tässä sitä, että ainakin yksi veräjöity γ -hiukkanen on havaittu.

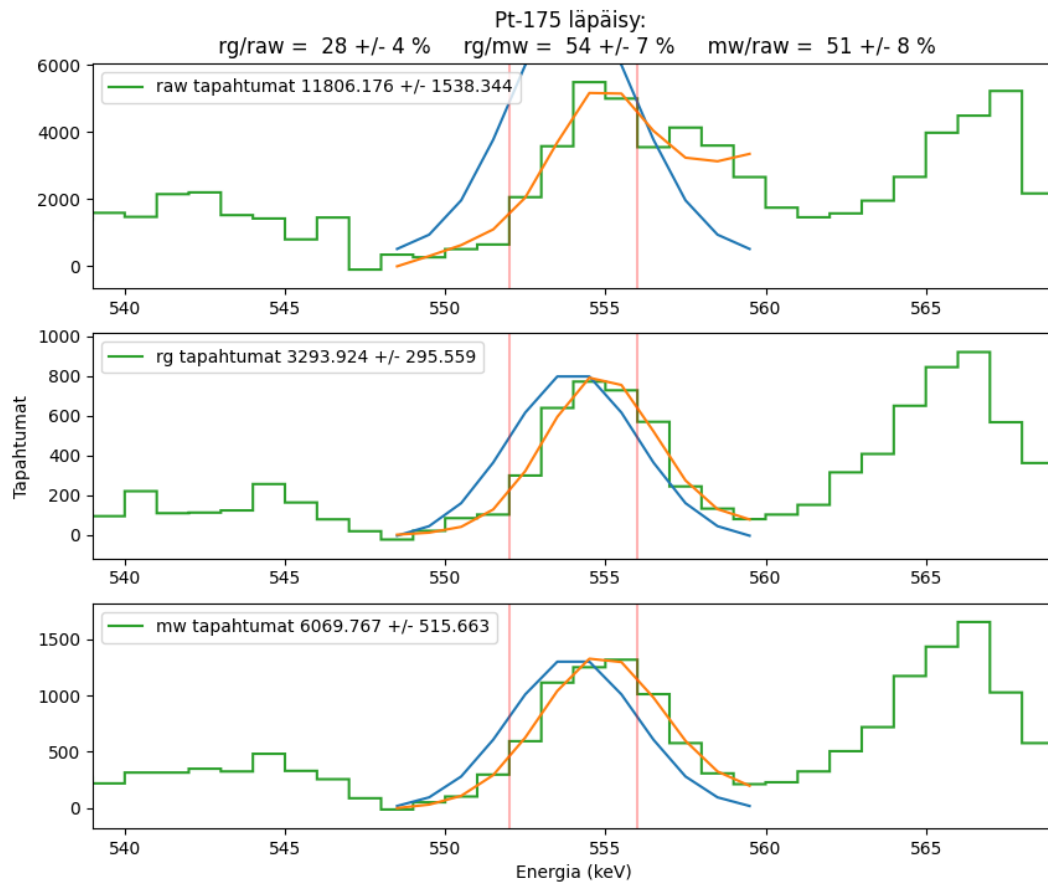
3.2 Sovitukset

Kuviossa 13 näkyy esimerkki kuvaajasta, johon normaalijakauman sovittaminen on suoraviivaista. Normaalijakaumat (oranssit käyrät) asettuvat gammapiikkien mukaisesti ja piikit ovat teräviä sekä JUROGAM3:n datassa että DSSD:n ja MWPC:n veräjöidyissä datoissa.

Kuviossa 14 näkyy esimerkki kuvaajasta, johon normaalijakaumien sovittaminen ei ollut suoraviivaista. Normaalijakaumat (oranssit käyrät) asettuvat kohtalaisesti tai huonosti gammapiikkien mukaisesti, piikit voivat olla leveitä ja isoja piikkejä on nähtävänä veräjöidyn piikin vieressä, mikä tarkoittaa, että päällekkäin voi olla monta gammapiikkiä ja taustasäteilyn määrä on suuri. Veräjäviiivoista sekä arvauksen ja sovituksen välisestä erosta vaakasuunnassa nähdään myös, että piikit ovat liikkuneet suuremmalle tai pienemmälle energialle. Tämä voi johtua taustan voimakkuudesta, mutta myös siitä, että JUROGAM3:n raakadatan doppler-korjaus gammoille on hieman väärä.



Kuvio 13. Esimerkki hyvästä kuvaajasta ajosta R9 saadusta datasta. Piikki on 172-Osmiumin 378 keV:n gammapiikki. Pystysuorat viivat kertovan veräjöinnin leveyden. Sininen käyrä on gaussisen sovituksen arvaus ja oranssi käyrä gaussinen sovitus. Otsikossa näkyy läpäisy DSSD:hen (rg/raw) ja MWPC:hen (mw/raw) sekä DSSD:n ja MWPC:n välinen läpäisy (rg/mw).



Kuvio 14. Esimerkki huonosta kuvaajasta ajosta R9 saadusta datasta. Piikki on 175-platinan 554 keV:n gammapiikki. Pystysuorat viivat kertovan veräjöinnin alan. Sininen käyrä on gaussisen sovituksen arvaus ja oranssi käyrä gaussinen sovitus. Otsikossa näkyy läpäisy DSSD:hen (rg/raw) ja MWPC:hen (mw/raw) sekä DSSD:n ja MWPC:n välinen läpäisy (rg/mw).

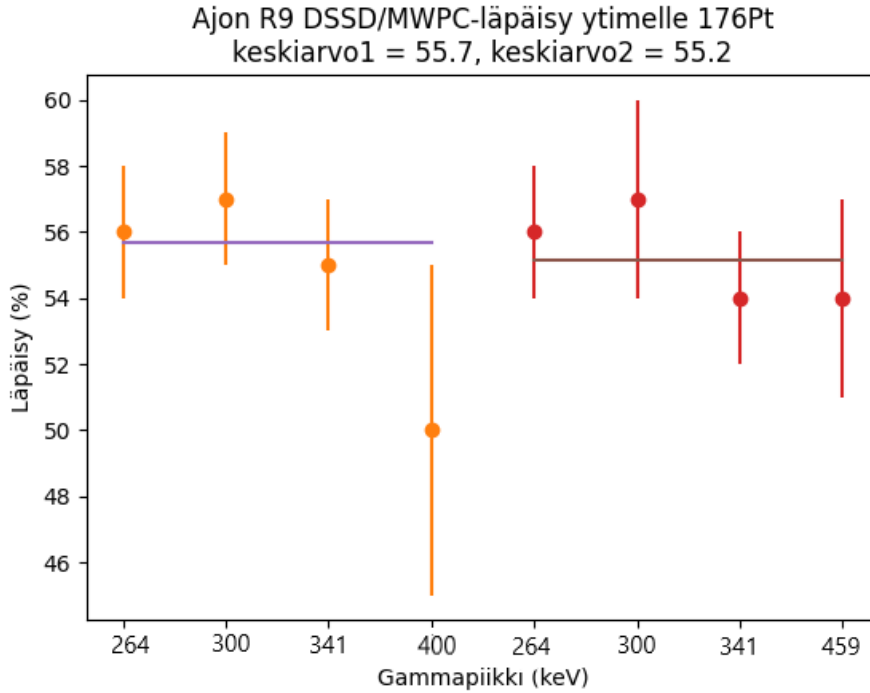
Kohtalainen sovitus on määritelty niin, että se on lähellä suoraviivaista sovitusta, mutta se ei ole yhtä onnistunut. Syynä voi olla esimerkiksi, että taustan suuruus alkaa vaikuttaa sovituksen luotettavuuteen, mutta se ei ole epäluotettava samalla tavalla, kuin epäonnistunut sovitus on epäluotettava.

4 Tulokset

Taulukkoihin 2 ja 3 on koottu ajojen R8 ja R9 kaikkien tutkittujen ytimien python-koodilla tuotetut läpäisyt kohtiosta DSSD:hen ja MWPC:hen, sekä DSSD:n ja MWPC:n välinen läpäisy. Ajo R9 oli ajoista pisin ja koska siinä oli eniten dataa, se oli tilastollisesti varmin ajo. Tämä näkyy siinä, että ajon R9 läpäisyjen virheet ovat keskimäärin pienemmät, kuin ajossa R8. Ajojen erot näkyvät taulukossa 1.

^{176}Pt veräjöitiin kahdella eri tavalla, [264, 300, 341, 400] keV piikeillä ja [264, 300, 341, 459] keV piikeillä. Tämä johtui siitä, että gaussinen sovitus ei toiminut, kun sekä 400 keV:n että 459 keV:n gammapiikit veräjöitiin muiden piikkien kanssa. Tämä johtui siitä, että molemmat piikit olivat heikkoja piikkejä suhteessa taustaan, jolloin molempien käyttö toisen veräjöimiseen laski toisen resoluutiota suhteessa taustaan. Loput ytimet veräjöitiin kaikilla tarkasteluvälin gammapiikeillä. Molemmissa ajoissa ^{176}Pt :n 300 keV:n piikki oli voimakkain suhteessa taustaan, jolloin käyrän sovittaminen siihen oli parempi muihin ^{176}Pt :n piikkeihin verrattuna. 300 keV piikin avulla määritetyksi läpäisyksi koko MARAn läpi kohtiosta DSSD:lle ajolle R8, riippuen veräjöinnistä, saatiin joko $50 \pm 5 \%$ tai $51 \pm 5 \%$, ja ajolle R9 $49 \pm 5 \%$ tai $51 \pm 5 \%$. MWPC:n läpäisyksi piikille 300 keV veräjöinnistä riippuen ajossa R8 saatiin $83 \pm 8 \%$ ja $85 \pm 10 \%$ ja ajossa R9 $87 \pm 8 \%$ ja $90 \pm 9 \%$. PACE4-simulaatioihin perustuvat läpäisyt olivat ajon R8 referenssihiukkaselle 46.43 % DSSD:hen ja 63.49 % MWPC:hen, ja ajon R9 referenssihiukkaselle 49.13 % DSSD:hen ja 66.07 % MWPC:hen. DSSD:n simuloitu läpäisy on kokeellisesti saadun läpäisyn virherajojen sisällä, mutta MWPC:n läpäisy ei, vaan on huomattavasti pienempi. Yksi syy voi olla, että simulaatiot eivät ota ilmaisimien fyysisiä ominaisuuksia, kuten fyysisiä rakoja tai lankojen paksuuksia huomioon. Ajon R9 isotoopin ^{176}Pt molempien veräjöintien DSSD:n ja MWPC:n välistä läpäisyä kuvataan kuviossa 15. Sekä kuviosta, että taulukosta 3 nähdään, että gammapiikkien 264, 300 ja 341 keV DSSD:n ja MWPC:n väliset läpäisyt ovat lähellä toisiaan.

Molemmissa ajoissa ^{175}Pt ja ^{174}Os -ytimien piikit, varsinkin JUROGAM3:n raakatassa, jäivät taustan alle, minkä takia sovitukset eivät olleet hyviä. Joissain veräjöidyissä DSSD:n ja MWPC:n datan kuvaajissa oli tarpeeksi vähän taustaa,



Kuvio 15. Oranssit datapisteet olivat veräjäinnin 1 [264, 300, 341, 400] datapisteet ja punaiset datapisteet olivat veräjäinnin 2 [264,300,341, 459] datapisteet. Virherajat näkyvät pystyviivoina. Violetti vaakaviiva näyttää veräjäinnin 1 painotetun keskiarvon ja punainen vaakaviiva veräjäinnin 2 painotetun keskiarvon.

jonka ansiosta DSSD:n ja MWPC:n välisen läpäisyn määrittäminen onnistui. Tästä esimerkki oli ajon R8 ^{175}Pt :n 328 keV gammapiikki tai ajon R9 ^{174}Os :n 276 keV gammapiikki, joissa läpäisy olivat $65 \pm 3 \%$ ja $56 \pm 1 \%$. Ytimen ^{175}Pt raakadatan epäselvyys johtuu isoin osin siitä, että parillis-parittomana ytimenä ^{175}Pt :n γ -energiat ovat jakautuneet tasaisemmin rotaatiosarjojen välillä, eivätkä ne ole keskittyneet yhdelle sarjalle, kuten parillis-parillisissa ytimissä, ja näin ensimmäisen sarjan piikit eivät ole riittävän teräviä, vaikka PACE4 simulaatioiden mukaan ^{175}Pt :n vaikutusala oli suurempi kohtion alussa, kuin ^{176}Pt :n. Toisaalta tilanteen pitäisi kääntyä toisin päin ~ 390 MeV kohdilla, eli on hyvinkin mahdollista, ettei ytimen ^{175}Pt vaikutusala ollut kokeessa paljoa ^{176}Pt :a suurempi ja on mahdollista, että se oli myös pienempi. Mikä tulee ytimeen ^{174}Os , senkin vaikutusala pienenee, kun mennään ~ 400 MeV:sta pienempiin energioihin, jolloin senkin vaikutusala suhteessa ^{176}Pt :en alkaa laskea. Siihen vaikuttaa myös sen α -höyrystymiskanava. Koska α -hiukkanen on raskaampi, kuin neutroni, se potkaisee ^{174}Os :ia enemmän reitiltään, jolloin ^{174}Os :n tilastollinen kulmajakauma on suurempi, kuin ^{176}Pt :llä.

Molemmissa ajoissa ^{172}Os :n kuvaajat olivat parhaimpia ja jokaiseen piikkiin oli mahdollista sovittaa luotettava gaussinen käyrä. Absoluuttinen läpäisy oli ajossa R8 22 – 36 % DSSD:hen ja 35 – 59 % MWPC:hen, ja ajossa R9 18 – 28 % DSSD:hen ja 32 – 47 % MWPC:hen. Tulokset ovat suurin piirtein sopusoinnussa simulaatioiden kanssa. DSSD:n ja MWPC:n välinen läpäisy oli 55–61 %. ^{172}Os :n läpäisy on pienempi, kuin ^{176}Pt :lla, mikä johtuu, niin kuin ^{174}Os :lla, virittyneen ^{180}Pt :n α -hiukkasen höyrystämisestä. ^{172}Os :n vaikutusala on kuitenkin suurempi, kuin muilla tutkittavilla ytimillä välillä $\sim 400 \rightarrow 390$ MeV, miksi tarpeeksi dataa päätyy JUROGAM3:n ilmaisimiin, mistä johtuu, että γ -piikit näkyvät selvästi, josta johtuu kuvaajien luotettavuus.

Molemmissa ajoissa DSSD:n ja MWPC:n veräjöidyt kuvaajat olivat laadullisesti parhaat kuvaajat. Ajossa R8 hyvistä kuvaajista DSSD:n ja MWPC:n väliseksi läpäisyksi saadaan systemaattisesti $\sim 56 - 70$ % ja ajossa R9 $\sim 53 - 61$ %, riippumatta ytimistä.

Taulukko 2. Ajon R8 tulokset. Väri kertoo kuvaajan datan ja sovituksen laadun. Harmaa teksti suluissa tarkoittaa heikkoa, harmaa kohtalaista ja musta hyvää.

^{176}Pt veräjäyty energiolla [264, 300, 341, 400]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
264	58 ± 7	96 ± 11	61 ± 3
300	50 ± 5	83 ± 8	63 ± 3
341	(27 ± 7)	(42 ± 12)	63 ± 3
400	(38 ± 8)	(59 ± 13)	64 ± 6
^{176}Pt veräjäyty energiolla [264, 300, 341, 459]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
264	(72 ± 10)	(115 ± 15)	63 ± 3
300	51 ± 6	85 ± 10	60 ± 3
341	28 ± 9	46 ± 15	62 ± 3
459	42 ± 5	70 ± 9	60 ± 4
^{175}Pt veräjäyty energiolla [328, 436, 506, 554, 603]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
328	(50 ± 7)	(78 ± 11)	65 ± 3
436	(60 ± 89)	(98 ± 146)	61 ± 5
506	(1 ± 0)	(2 ± 0)	(72 ± 11)
554	(44 ± 12)	(64 ± 17)	(72 ± 11)
603	(2 ± 2)	(3 ± 3)	(53 ± 15)
^{174}Os veräjäyty energiolla [158, 276, 342, 394, 445, 496]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
158	(53 ± 4)	(85 ± 6)	62 ± 2
276	(25 ± 1)	(40 ± 2)	62 ± 2
342	(38 ± 2)	(62 ± 4)	62 ± 2
394	(26 ± 4)	(40 ± 5)	(65 ± 3)
445	(29 ± 9)	(47 ± 15)	(63 ± 4)
496	(130 ± 32)	(235 ± 57)	55 ± 4
^{172}Os veräjäyty energiolla [227, 378, 448, 470]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
227	35 ± 1	57 ± 2	62 ± 2
378	32 ± 1	51 ± 2	62 ± 2
448	32 ± 2	50 ± 3	63 ± 2
470	23 ± 1	37 ± 2	62 ± 3

Taulukko 3. Ajon R9 tulokset. Väri kertoo kuvaajan datan ja sovituksen laadun. Harmaa teksti suluissa tarkoittaa heikkoa, harmaa kohtalaista ja musta hyvää.

^{176}Pt veräjäyty energioilla [264, 300, 341, 400]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
264	(66 ± 7)	(118 ± 13)	56 ± 2
300	49 ± 5	87 ± 8	57 ± 2
341	(39 ± 4)	(70 ± 8)	55 ± 2
400	(59 ± 115)	(119 ± 232)	(50 ± 5)
^{176}Pt veräjäyty energioilla [264, 300, 341, 459]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
264	(64 ± 8)	(115 ± 14)	56 ± 2
300	51 ± 5	90 ± 9	57 ± 3
341	(35 ± 5)	(64 ± 10)	54 ± 2
459	28 ± 3	51 ± 5	54 ± 3
^{175}Pt veräjäyty energioilla [328, 436, 466, 506, 554, 603]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
328	(37 ± 3)	(63 ± 5)	58 ± 2
436	(72 ± 15)	(122 ± 25)	59 ± 4
466	(6 ± 13)	(10 ± 22)	(57 ± 8)
506	(1 ± 0)	(2 ± 0)	(66 ± 8)
554	(28 ± 4)	(51 ± 8)	54 ± 7
603	(4 ± 1)	(6 ± 2)	(63 ± 15)
^{174}Os veräjäyty energioilla [158, 276, 342, 394, 445, 496]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
158	(37 ± 2)	(66 ± 3)	56 ± 2
276	17 ± 1	30 ± 1	56 ± 1
342	32 ± 2	57 ± 3	56 ± 2
394	(25 ± 2)	(41 ± 3)	(60 ± 3)
445	(31 ± 4)	(56 ± 8)	(55 ± 3)
496	(110 ± 23)	(183 ± 37)	(60 ± 5)
^{172}Os veräjäyty energioilla [227, 378, 448, 470]			
Energia (keV)	rg/raw (%)	mw/raw (%)	rg/mw (%)
227	27 ± 1	46 ± 1	58 ± 1
378	23 ± 1	41 ± 1	57 ± 2
448	22 ± 1	37 ± 1	59 ± 2
470	19 ± 1	34 ± 2	57 ± 2

5 Päätäntö

Tässä työssä tutkittiin massaseparaattori MARAn absoluuttista läpäisyä $^{84}\text{Kr} + ^{96}\text{Mo} \rightarrow ^{180}\text{Pt}$ -fuusiohyörystymisreaktiossa, jotta MARAn toiminnasta ja tehokkuudesta olisi enemmän ja uudempaa tutkimustulosta.

MARAn absoluuttiseksi läpäisyksi kohtiosta fokustason pii-ilmaisina DSSD:hen fuusiohyörystymisreaktiossa $^{96}\text{Mo}(^{84}\text{Kr}, 4n)^{176}\text{Pt}$ luotettavimmista sovituksista ajossa R9 saatiin $49 \pm 5 \%$ tai $51 \pm 5 \%$, riippuen veräjöinnistä. Kyseessä oli 300 keV γ -piikki. Ajossa R8 läpäisy oli samaa luokkaa. MARAn läpäisyksi, riippuen ytimen reaktiosta ja reaktiokinematiikasta, sekä kerätyistä varaustiloista, massoista ja energioista, saatiin noin 20 – 60 % DSSD:hen ja 30 – 90 % MWPC:hen. Simulaatiot antoivat läpäisyiksi noin 30 – 50 % DSSD:hen ja noin 40 – 65 % MWPC:hen. Huomasin myös, että DSSD:n ja MWPC:n välinen läpäisy oli noin 55 – 65 % riippuen kerätyistä varaustiloista.

Läpäisyn tulokset ovat sovussa aiempien kokeiden kanssa, joiden mukaan MARAn absoluuttinen läpäisy DSSD:hen on 10 – 70 %, riippuen fuusioreaktion kinematiikasta ja kerätystä varausjakaumasta, mutta koska aiempaa tutkimusta MARAn läpäisystä on vähän, tarvitaan lisää tutkimusta aiheesta vertailukohteeksi.

Saatu läpäisy on samaa luokkaa muihin samanlaisiin separaattoreihin verrattuna. Esimerkiksi RITUn läpäisy DSSD:lle on luokkaa 5 – 70 % riippuen reaktiokinematiikasta ja kerätyistä varaustiloista.

Suurin virhelähde sovituksissa tuli JUROGAM3:n raakadatasta. Koska monet piikit hukkuivat taustan alle, niihin ei voitu sovittaa hyviä normaalijakaumia. Tämä vaikutti sekä DSSD:n että MWPC:n läpäisyjen määrittämiseen. Kuitenkin monet DSSD:n ja MWPC:n kuvaajista olivat hyviä samoille isotooppien piikeille, joille JUROGAM3:n kuvaajat olivat huonoja, minkä takia niiden välisen läpäisyn määrittäminen oli monelle piikille mahdollista. Niiden väliseksi läpäisyksi saatiin 50 – 60 %. Tulos on järkevä, koska MWPC on pinta-alaltaan suurempi ilmaisin, kuin DSSD ja hiukkaset osuvat siihen ennen DSSD:tä, jolloin osa hiukkasista siroaa MWPC:n jälkeen pois radaltaan.

^{176}Pt -ytimien kuvaajista olisi saatu parempia, jos suihkun energia olisi ollut

pienempi, esim 385 MeV. Tällöin ^{176}Pt :n vaikutusala olisi ollut suurempi ja γ -piikit olisivat olleet suurempia suhteessa taustaan. Suihkun energiaa ei kuitenkaan voitu laskea, johtuen muista kokeista, joita suoritettiin MARAlla.

Huomattiin vielä myös, että α -kanavien läpäisyt olivat kokeellisesti pienemmät, kuin neutroni-kanavien läpäisyt, eli α -hiukkasten suurempi kulmajakauma voitiin havaita.

Lähteet

- [1] J. S. Lilley. *Nuclear physics : principles and applications*. John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [2] S. Sadekin ym. "Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review". *Energy Procedia* 160 (2019), s. 513–518. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.200>. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.200> (viitattu 05.05.2024).
- [3] S. Xu ja A. Dodt. "Nuclear bomb and public health". *Journal of public health policy* 44 (3 2023), s. 348–359. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41271-023-00420-x>.
- [4] J. P. Dahl. *Introduction to the Quantum World of Atoms and Molecules*. World Scientific, 2001.
- [5] E. Rutherford. "Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen". *LIV* (1919). DOI: <https://doi.org/10.1080/14786440608635919>.
- [6] P. J. Bryant. *A brief history and review of accelerators*. CERN, 1994.
- [7] C. Theisen ym. "In-beam spectroscopy of heavy elements". *Nuclear Physics A* 944 (2015), s. 333–375. ISSN: 0375-9474. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2015.07.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947415001621> (viitattu 12.01.2024).
- [8] J. Sarén. "The ion-optical design of the MARA recoil separator and absolute transmission measurements of the RITU gas-filled recoil separator". Väitöskirja. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, 2011. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:101991933> (viitattu 10.04.2024).
- [9] U. Juha ym. "Mass Analyzing Recoil Apparatus, MARA". *Acta Physica Polonica B* 50 (2019), s. 319. DOI: 10.5506/APhysPolB.50.319.

- [10] A. K. ym. "Nanosecond-Scale Proton Emission from Strongly Oblate-Deformed ^{149}Lu ". *Phys. Rev. Lett.* 128 (11 2022), s. 112501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.112501. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.128.112501>.
- [11] H. J. ym. " α -spectroscopy studies of the new nuclides ^{165}Pt and ^{170}Hg ". *Phys. Rev. C* 100 (1 heinäkuu 2019), s. 014305. DOI: 10.1103/PhysRevC.100.014305. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.100.014305> (viitattu 08.05.2024).
- [12] J. Sarén ym. "Absolute transmission and separation properties of the gas-filled recoil separator RITU". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 654 (1 2020), s. 508–521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.068>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211011922>.
- [13] J. Sarén, J. Uusitalo ja H. Joukainen. "In-flight recoil separators RITU and MARA and the standard detector setups". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 541 (2023), s. 33–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2023.04.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X23001787> (viitattu 10.04.2024).
- [14] H. Kettunen. "Decay spectroscopy of heavy nuclei beyond the proton drip line". Väitöskirja. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos, 2003. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:92889233> (viitattu 28.04.2024).
- [15] K. S. Krane. *Introductory nuclear physics*. New York, NY: Wiley, 1988. URL: <https://cds.cern.ch/record/359790>.
- [16] G. Henning. "Stability of Transfermium Elements at High Spin : Measuring the Fission Barrier of ^{254}No ". Väitöskirja. Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse, Ranska, 2012.
- [17] R. Evans. *The atomic nucleus*. Vol. 582. New York: McGraw-Hill, 1955, s. 1–972.

- [18] X. Z. Y. ym. " β -Decay Half-Lives of $^{76,77}\text{Co}$, $^{79,80}\text{Ni}$, and ^{81}Cu : Experimental Indication of a Doubly Magic ^{78}Ni ". *Phys. Rev. Lett.* 113 (3 2014), s. 032505. DOI: [10.1103/PhysRevLett.113.032505](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.032505). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.032505>.
- [19] B. B. ja R. P. H. "Magic and Doubly-Magic Nuclei". *Nuclear Physics News* 11 (2001), s. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/10506890109411553>.
- [20] M. Basunia. "Nuclear Data Sheets for $A = 176$ ". *Nuclear Data Sheets* 107 (4 2006), s. 791–1026. ISSN: 0090-3752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2006.03.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375206000202> (viitattu 23.02.2024).
- [21] P. Peura ym. "Quasiparticle alignments and α -decay fine structure of ^{175}Pt ". *Phys. Rev. C* 89 (2 2014), s. 024316. DOI: [10.1103/PhysRevC.89.024316](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.89.024316). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.89.024316> (viitattu 15.02.2024).
- [22] E. Browne ja H. Junde. "Nuclear Data Sheets for $A = 174$ ". *Nuclear Data Sheets* 87 (1 1999), s. 15–176. ISSN: 0090-3752. DOI: <https://doi.org/10.1006/ndsh.1999.0015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375299900157> (viitattu 23.02.2024).
- [23] B. Singh. "Nuclear Data Sheets for $A = 172$ ". *Nuclear Data Sheets* 75 (2 1995), s. 199–376. ISSN: 0090-3752. DOI: <https://doi.org/10.1006/ndsh.1995.1025>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0090375285710253> (viitattu 23.02.2024).
- [24] A. Stolarz. "Target preparation for research with charged projectiles". *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry* 299(2) (2014), s. 913–931. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2652-2>.
- [25] P. G. G Schiwietz. "Improved charge-state formulas". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 175-177 (2001), s. 125–131. ISSN: 0168-583X. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(00\)00583-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00583-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X00005838> (viitattu 22.04.2024).

- [26] I. D. V.S. Nikolaev. "On the equilibrium charge distribution in heavy element ion beams". *Physics Letters A* 28 (4 1968), s. 277–278. ISSN: 0375-9601. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(68\)90282-X](https://doi.org/10.1016/0375-9601(68)90282-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037596016890282X> (viitattu 05.03.2024).
- [27] J. Pakarinen, J. Ojala ja P. e. a. Ruotsalainen. "The JUROGAM 3 spectrometer". *The European Physical Journal A* 56 (2020), s. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00144-6>.
- [28] B. Back ym. "Transport efficiency of the Argonne fragment mass analyzer". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 379 (2 1996), s. 206–211. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00650-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00650-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016890029600650X> (viitattu 29.04.2024).
- [29] A. Sinha ym. "Heavy ion reaction analyzer (HIRA): a recoil mass separator facility at NSC". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 339 (3 1994), s. 543–549. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90191-0](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90191-0). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294901910> (viitattu 29.04.2024).
- [30] B. Davids ym. "Initial operation of the recoil mass spectrometer EMMA at the ISAC-II facility of TRIUMF". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 940 (2019), s. 191–195. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.070>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900219304000> (viitattu 29.04.2024).
- [31] R. Brun ja F. Rademakers. "ROOT — An object oriented data analysis framework". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 389 (1997), s. 81–86. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890029700048X> (viitattu 17.03.2024).

- [32] A. Steer ym. "Recoil-beta tagging: A novel technique for studying proton-drip-line nuclei". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 565 (2 2006), s. 630–636. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.06.034>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900206011442> (viitattu 07.05.2024).
- [33] J. R. Taylor ja W. Thompson. *An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements*. Vol. 2. Mill Valley, CA: University science books, 1982.
- [34] J. Ziegler. *SRIM—The Stopping and Range of Ions in Matter*. 2013. URL: <http://www.srim.org/>.
- [35] O. B. Tarasov ja D. Bazin. "LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 266 (2008), s. 4657–4664. ISSN: 0168-583X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.05.110>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X08007969> (viitattu 08.02.2024).
- [36] A. Gavron. "Statistical model calculations in heavy ion reactions". *Phys. Rev. C* 21 (1 1980), s. 230–236. DOI: [10.1103/PhysRevC.21.230](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.21.230). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.21.230> (viitattu 08.02.2024).