

Optimizacija detektorskog postava za mjerenje nuklearne reakcije $^{20}\text{Ne} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ Monte Carlo simulacijom

Ivan Bićanić*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 25. siječnja 2022.)

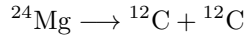
Mentori: dr. sc. Neven Soić – *Institut Ruder Bošković, Laboratorij za nuklearnu fiziku, Zagreb*

dr. sc. Daniele Dell’Aquila – *Università degli Studi di Sassari, Italia*

U svrhu potrage za pobuđenim stanjima u kanalu raspada $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ u području astrofizički relevantnih energija od približno 14 MeV do 17 MeV vršene su simulacije planiranog eksperimentalnog postava s debelom metom za dvije konfiguracije detektorskih postava. Koriste se Micron Semiconductor YY1 detektori postavljeni u konfiguraciju diska (DISC - konfiguracija) i konfiguraciju lampe (LAMP - konfiguracija). Pronađene su optimalne pozicije jedne i druge konfiguracije za ovo područje energija i uspoređene su efikasnosti konfiguracija u njihovim optimalnim pozicijama.

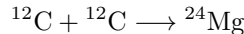
I. UVOD

Magnezij 24 u svome spektru pobuđenih stanja sadrži različite rezonancije koje se raspadaju na razne produkte. Među njima su potvrđene i rezonancije [12] (slika 1) koje se raspadaju na dvije jezgre ^{12}C

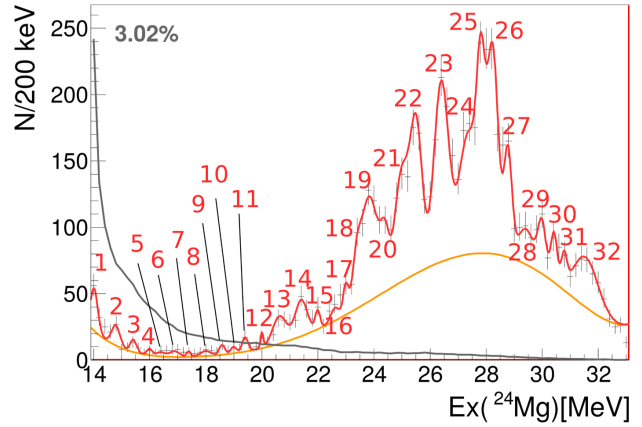


Te su rezonancije pronađene na energijama višima od kolonske barijere za taj slučaj, koja iznosi oko 18.9 MeV, međutim područje nižih energija (od praga raspada na 13.9 MeV do kulonske barijere) valja detaljnije istražiti. Ukoliko bi na tim energijama postojale rezonancije koje bi se raspadale na ^{12}C on bi se svakako odvijao QM tuneliranjem kroz barijeru pa je vjerojatnost takvog raspada odmah manja. Također je moguće da se ista rezonancija raspada i dodatnim kanalima raspada (npr. $^{24}\text{Mg} \rightarrow \alpha + ^{20}\text{Ne}$) te time vjerojatnost traženog kanala postaje još manja.

Ovo područje energija je interesantno jer odgovara energijama kakve nalazimo u slojevima izgaranja ugljika u crvenim divovima (do približno 17 MeV). Postojanje rezonancija u raspadu $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, u tom području energija, bi značilo da postoji pobuđeno stanje građe $^{12}\text{C} \times ^{12}\text{C}$ koje ubrzava sintezu magnezija reakcijom:



koja bi se mogla odvijati u zvijezdama. Takva fuzija je energetski povoljan proces čija bi prisutnost promijenila standardno objašnjenje nukleosinteze u zvijezdama, tj. teži elementi bi se brže razvijali pa bi masivnije zvijezde mogle imati kraći životni vijek nego što je pretpostavljano. Također to bi moglo značiti da i zvijezde sa masama od oko 5 do 6 masa Sunca, pa na više, mogu eksplozijama super-nova kolabirati u crne rupe, a ne samo



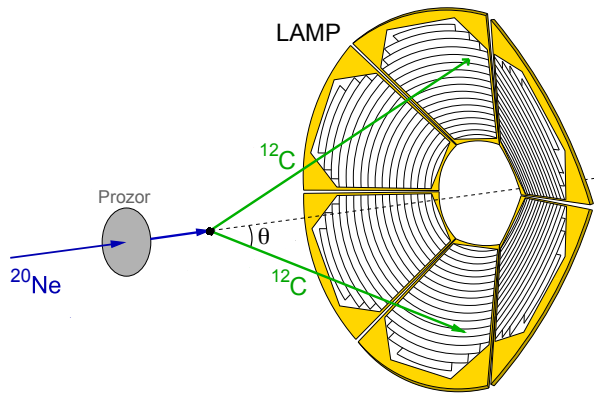
Slika 1. Energija pobuđenja jezgre ^{24}Mg u kanalu $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, [1].

one s masama od 8 masa Sunca ili više. Stoga potragu za fuzijom $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg}$ provodimo u području energija pobuđenja ^{24}Mg od približno 14 MeV (jer je Q vrijednost za ovu reakciju 13.9 MeV [5] pa za niže energije niti ne bismo mogli imati ovakvu reakciju) i do približno 17 MeV (energije unutar zvijezda).

Kako bismo promotrili cijelo ovo područje energija možemo ili koristiti tanku metu sa mnogo sukcesivnih energija upadnog snopa, kojima bismo pokrili ovo područje u nekoj željenoj rezoluciji energija, ili pak snopom jedne energije koji upada u debelu metu. Korištenjem debele mete možemo pokriti čitavo područje energija jer upadni snop prilikom prolaska kroz metu u interakciji sa atomima mete postepeno gubi energiju. Što dublje snop propagira u metu u prosjeku ima i nižu energiju kojom može interagirati sa jezgrama mete. Na taj način atomi mete služe i kao reaktanti (meta) i kao usporivači snopa, pa time pokrивamo energije od neke željene početne energije (upadne energije snopa) do izlazne energije iz mete (ili pak do potpunog zaustavljanja snopa, ovisno

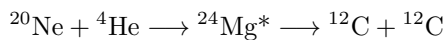
* ivan.bicanic@student.pmf.hr

o debljini i gustoći mete). Zbog smanjenja energije propagirajućeg snopa sa udaljenošću (dubinom) opada i energija pobuđenja mogućih produkata, koji mogu nastati unutar mete, sa udaljenošću (dubinom). Na taj način rezonance na različitim energijama nastaju na različitim dubinama unutar mete istovremeno. Kako bi se spriječilo curenje plina mete iz komore u točki upada ulaznog snopa koristi se ulazni prozor od specijalno dizajniranog materijala. Dakle, nakon što upadni snop prođe kroz ulazni prozor (na kojemu isto izgubi dio energije) u komoru sa metom on počinje gubiti energiju propagirajući kroz metu. Na nekoj dubini, kada spadne na odgovarajuću energiju, on reagira sa jezgrom mete i formira rezonantno stanje koje se potom raspada. Produkte raspada registriramo pomoću silicijskih detektora. Mjerenjem energija produkata raspada takvih pobuđenja, i kutova pod kojim upadaju u detektore, možemo rekonstruirati točke raspada.



Slika 2. Skica postava u LAMP konfiguraciji^[4].

Da bismo proučili građu ^{24}Mg u ovom području energija pobuđenja (14 MeV–17 MeV), koristimo snop ^{20}Ne kojim gađamo debelu metu ^4He kako bismo sintetizirali ^{24}Mg u različitim energijama pobuđenja

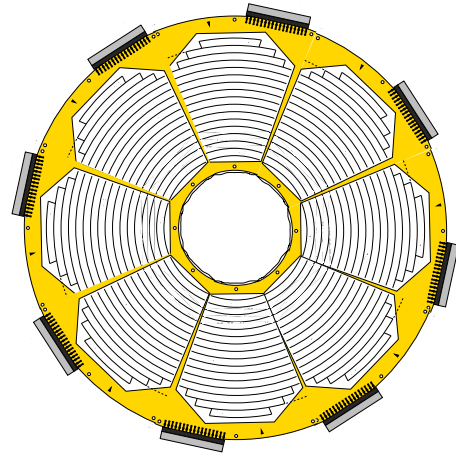


Da bismo kinematičkom rekonstrukcijom, iz mjerene energije i kuta raspršenja, uspješno identificirali produkte moramo istovremeno detektirati oba produkta. Svaka različita čestica ostavlja prepoznatljiv potpis. U našem slučaju uz prvenstveno promatrani kanal raspada $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{24}\text{C} + ^{12}\text{C}$, najvjerojatniji je kanal $^{24}\text{Mg} \rightarrow \alpha + ^{20}\text{Ne}$ jer upravo njega koristimo za proizvodnju ^{24}Mg u pobuđenim stanjima. Međutim potpis koji ostavljaju produkti ovoga kanala se uvelike razlikuju od produkata promatranog kanala. Mase ^4He i ^{20}Ne su bitno drugačije pa su, zbog očuvanja količine gibanja, njihove brzine u sustavu centra mase isto bitno različite. Zbog toga se “teški” ^{20}Ne jedva rasprši od pravca gibanja snopa, dok “lagani” ^4He ima bitno veći kut otklona. Također zbog puno veće brzine i manje zaustavne moći produkt ^4He

bitno dalje propagira kroz metu od sporijeg ^{20}Ne . Zbog svoje energije, relativno velike mase i naboja snopa ^{20}Ne , ioni snopa interagiraju s materijalom i imaju veću zaustavnu moć sukladno Bethe-Bloch formuli. U slučaju traženog kanala oba produkta imaju jednaku masu i stoga i jednake brzine u sustavu centra mase i zbog toga ostavljaju prepoznatljiv signal na detektorima. Međutim zbog njihove relativno velike mase (time ujedno i manje brzine prilikom raspada) te naboja, oni također imaju veću zaustavnu moć pa se relativno brzo zaustavljaju prilikom prolaska kroz metu. Stoga je potrebno pronaći idealnu poziciju detektorskog postava na kojoj bi se uhvatilo što više mogućih produkata tog raspada na svim energijama u promatranom rasponu.

Kako bi se pronašla idealna pozicija detektorskog postava potrebno je prethodno simulirati različite postavbe za ovaj kanala raspada ($^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$) na energijama u traženom rasponu (14 MeV–17 MeV). U tu svrhu je dizajniran programski paket REXpp (*Resonant EXcitation simulation plus plus*) koji je korišten za ove simulacije. Program je pisan u programskom jeziku C++ koji spada u kategoriju jezika srednjeg nivoa što omogućuje izuzetno dobro optimiziranje rada programa, odnosno program se može napisati na način da vrlo efikasno koristi resurse (*hardware*) na kojima se odvija. Za potrebe svih nasumičnih odabira tijekom kalkulacija program se koristi *Monte Carlo* metodom. U programu se mogu vrlo jednostavno definirati uvjeti eksperimentalnog postava koji se želi simulirati: pozicije i tipovi detektora, tlak i vrsta plina mete, volumen komore, debljina i tip materijala od kojega je načinjen ulazni prozor, energija i vrsta upadnog snopa i svakako energija na kojoj se pretpostavlja da postoji rezonantno stanje. Također je moguće promatrati različite izlazne kanale putem kojih se rezonantna jezgra raspada na način da se definiraju produkti raspada. Definirane uvjete je moguće promatrati u proizvoljnom broju ponavljanja. Izlazni rezultati su zapisani u .root formatu (*ROOT: Dana Analysis Framework*^[5]) i sadrže sve informacije o događajima za sva ponavljanja (ukupan broj, energije i kutovi raspada produkata; koji je detektor i točan položaj na detektoru gdje je određeni produkt registriran...). Podatke je moguće pregledati i obraditi pomoću frameworka za analizu podataka *ROOT* tako da je vrlo lako usporediti dobivene podatke simulacijama sa onima iz stvarnih eksperimenata. Programom se nastoji eksperiment simulirati što vjernije, stoga je moguće odabrati da se na početku svakog pojedinog događaja promatrana energija pobuđenja (na kojoj se smatra da postoji rezonantno stanje) odredi putem Gaussove distribucije centrirane oko energije koju je korisnik uneo kao zadanu ili se pak unesena može uzeti kao egzaktna. Snop se promatra od samog upada u ulazni prozor pa nadalje kroz komoru sa plinom u koracima dužine definirane od strane korisnika. Energija i položaj snopa započinju od zadane energije snopa i ulaznog prozora, te se u svakom sljedećem koraku računaju tri veličine: gubitak energije snopa nastao zbog prolaska kroz materijal ΔE , rasip

energije E_{rasip} i kutni rasip θ_{rasip} . Gubitak energije ΔE računamo numeričkim integriranjem iz izračunatih *SRIM*^[7] tablica za promatrani medij u prethodno definiranom koraku integracije. Rasip energije E_{rasip} u nekoj točki iteracije se određuje nasumičnim odabirom energije iz Gaussove raspodjele centrirane oko nule. Isto se ponovi i za kutni rasipa koji se definira i za kut u smjeru snopa i za kut na površini okomitoj na snop. Sve tri izračunate veličine se potom dodaju energiji i položaju snopa u Kartezijevom koordinatnom sustavu čime se određuje početna energija i položaj snopa za sljedeći korak iteracije. Svrha uvođenja ovih rasipa je da se energije i kutovi snopa "razmrljaju" za nasumični iznos, kako se i događa u stohastičkoj interakciji iona sa elektronima materijala. Nakon što se snop tako isprati iz ulaznog prozora on se dalje prati kroz plin sve dok mu energija ne poprimi vrijednost koja odgovara zadanoj energiji rezonancije. Potom se simulira željeni kanal raspada na način da je kut raspada proizvoljan te se na jednak način kao i za ulazni snop produkti nastavljaju pratiti. Kut i energija drugog produkta se izračunaju iz kinematike reakcije. Produkti se prate sve dok: ne izađu iz promatranog volumena, ne izgube svu svoju energiju prolaženjem kroz metu ili pak ne udare u definirane detektore. Signal na detektoru se registrira samo u slučaju ako čestica upadne u aktivni dio detektora. Mogući je također ishod u kojemu čestica ne padne na poluvodički dio detektora i tada događaj na detektoru neće biti registriran. Također energija čestice prilikom upada na detektor mora biti veća od energije praga detektora jer u suprotnom isto neće biti registrirana. Energijom praga određujemo iznad koje energije registrirani signali bivaju detektirani, na taj način izoliramo neželjeni šum. Udari čestica u aktivni dio detektora se utvrđuju konstantnim uspoređivanjem udaljenosti promatrane čestice od ishodišta i kuta koji zatvara vektor položaja čestice sa z osi (kojom prolazi snop) u nekom koraku sa udaljenostima i kutom koji pokriva aktivni dio detektora. Ukoliko je kut vektora položaja čestice pokriven nekom trakom detektora uspoređuju se udaljenosti od ishodišta čestice i detektora (pod kutem na kojemu se nalazi čestica). Ako je udaljenost čestice manja od udaljenosti detektora čestica neće još biti detektirana i računa se sljedeći korak, ali ako je udaljenost veća (čestica je prošla kroz detektor, što je moguće ovisno o izboru duljine svakog koraka) posljednji korak se ponavlja no sada sa pola definiranog koraka, sve dok udaljenosti detektora od ishodišta i čestice ne budu iste. Ukoliko su udaljenosti iste (uz dopuštenu toleranciju) registrira se udarac, pohranjuju se položaj, detektor i vrpca na detektoru te se prestaje pratiti ta čestica. Jednako tako se prati je li čestica udarila o okvir detektora.



Slika 3. Skica rasporeda detektora u DISC konfiguraciji.

II. EKSPERIMENTALNA METODA I SIMULACIJA

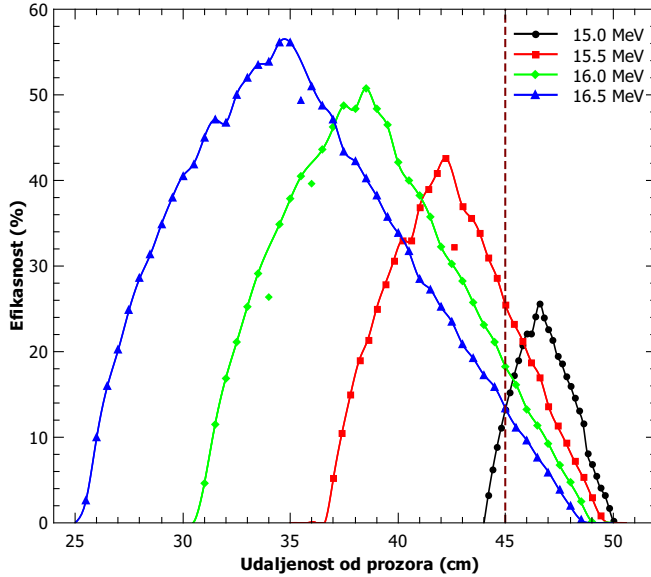
Ovakav eksperiment je već bio proveden^[8] u Padovi sa ulaznim snopom ^{20}Ne kojim je gađana debela meta ^4He . Proučavan je isti raspon energija i uočen je dominantniji kanal raspada $^{24}\text{Mg} \rightarrow \alpha + ^{20}\text{Ne}$. Utvrđeno je da za detekciju kanala $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ valja promijeniti eksperimentalni postav. Stoga se simulira ovaj kanal raspada na energijama: 14.5 MeV, 15 MeV, 15.5 MeV, 16.0 MeV i 16.5 MeV u dva oblika detektorskih postava koji se razlikuju od prethodnih, dok su ostali parametri kao tlak u komori i ulazni prozor ostali isti. Za ulazni prozor se koristi specijalno dizajnirani Havar[®] materijal debljine 2.25 μm , dok je tlak u komori 355 mbar. Produkt raspada sada registriramo pomoću jednostranih silicijskih detektora (Micron Semiconductor, YY1). To je detektor koji pokriva kut od 45° sa unutarnjim radijusom od 40 mm i vanjskim od 145 mm. Sastoji se od 16 radialno raspoređenih traka širine 5 mm koje pokrivaju aktivno područje oko 40° širine, unutarnjeg polumjera od 50 mm i vanjskog od 130 mm. Promatrana su dva različita postava ovakvih detektora: jedan u kojemu osam detektora formira disk (DISC konfiguracija) čija je površina okomita na upadni snop koji prolazi kroz rupu u sredini diska (slika [3](#)) i drugi u kojemu 6 detektora formira "lampu" (LAMP konfiguracija) kroz čije središte također prolazi upadni snop (slika [2](#)). U slučaju oblika lampe pravac upadnog snopa i površina svakog detektora zatvaraju kut od 46° . Provedene su simulacije sa 300 000 ponavljanja za svaku konfiguraciju detektorskog postava ("disk" i "lampa"), a konfiguracije su postavljane na različite udaljenosti od prozora u rasponu od 1 cm – 75 cm najprije u razmacima od 1 cm dok nije utvrđeno područje udaljenosti na kojima uopće bilježimo signale produkata i potom su ta područja promatrana u znatno većim rezolucijama. Postupak je

ponovljen za svaku od navedenih energija pobuđenja. Čestice su praćene u integracijskim koracima od 1 mm.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

III.1. DISC - konfiguracija

Najprije smo promotrili detektorski postav u kojemu je osam detektora postavito na način da čine disk. Izdvojeno je područje udaljenosti postava u kojemu su bilježena oba produkta raspada (oba izlazna ^{12}C) na detektorima (slika 4). Možemo primjetiti kako za svaku



Slika 4. Distribucija efikasnosti bilježenja produkata ^{12}C za DISC konfiguraciju detektora sa udaljenosti detektora od ishodišta. Efikasnost je gledana kao udio događaja po kutu u kojima su detektirana oba produkta. Crtkana okomita linija predstavljala odabranu optimalnu udaljenost postava, $d_{\text{DISC}} = 45.0$ cm

energiju pobuđenja efikasnost počne naglo rasti, te rast lagano saturira do svoga maksimuma, pa potom počne dalje opadati. Naime kako je jezgra upadnog snopa ^{20}Ne bitno teža od mirujuće mete ^4He prilikom sudara novonastali rezonantni ^{24}Mg se nastavi gibati u smjeru snopa. Kako je kut raspada rezonantnog stanja zadan kao uniforman većina raspada će se odviti oko kuta od 90° u sustavu centra mase dok je najmanje pod 0° , odnosno 180° . Stoga kada prijedemo u laboratorijski sustav, izlazni ^{12}C će činiti konus (lijevka) sa najvećim brojem produkata pod kutem koji zatvara konus sa z-osi (pravca ulaznog snopa) i sve manje produkata što taj kut postaje veći ili manji od kuta lijevka. Kako se pomičemo na sve veće udaljenosti od ishodišta raste i intenzitet događaja zbog sve većeg "otkrivanja" lijevka produkata detektoru. Isto tako sa povećanjem udaljenosti produkti raspada mo-

raju proći kroz sve deblji sloj mete da bi došli do detektora i pri tome gube energiju. Stoga zbroj tih doprinosa rezultira laganim opadanjem rasta efikasnosti i u konačnici kada se cijeli konus "otkrije" opadanjem efikasnosti. Može se primjetiti da je opadanje veće odmah nakon prelaska maksimuma (gdje produkti još uvijek imaju relativno velik moment) i da postaje sve "blaže" sa udaljenosti (na udaljenostima gdje produkti već imaju manji moment) što se slaže sa Bethe-Bloch formulom. Jednako ponašanje možemo primjetiti na svim energijama, jedino što više energije pokazuju generalno veću efikasnost i šire područje udaljenosti gdje relativno efikasno možemo pozicionirati detektorski postav. To je zbog toga što na višim energijama produkti ^{12}C imaju u startu veće impulse te stoga mogu propagirati dublje kroz metu i time u većem broju dospjeti do detektora. Za energiju od 14.5 MeV ne bilježimo apsolutno nikakvu efikasnost najvjerojatnije zbog premalog impulsa produkata koji ne mogu doseći do detektora.

Kao najoptimalnije mjesto za pozicioniranje detektorskog postava oblika diska uzimamo presjecište ovisnosti efikasnosti sa udaljenosti za najnižu i najvišu promatranu energiju:

$$d_{\text{DISC}} = 45.0 \text{ cm}$$

Tu poziciju uzimamo jer se na toj udaljenosti za najnižu i najvišu promatranu energiju efikasnosti podudaraju, a za energije između imamo samo veće efikasnosti od te. Odnosno, to je pozicija u kojoj dvije energije imaju jedanko malu efikasnost, a preostale dvije još veće efikasnosti:

$$\eta_{\text{DISC}}(15.0 \text{ MeV}) = 13.31 \%$$

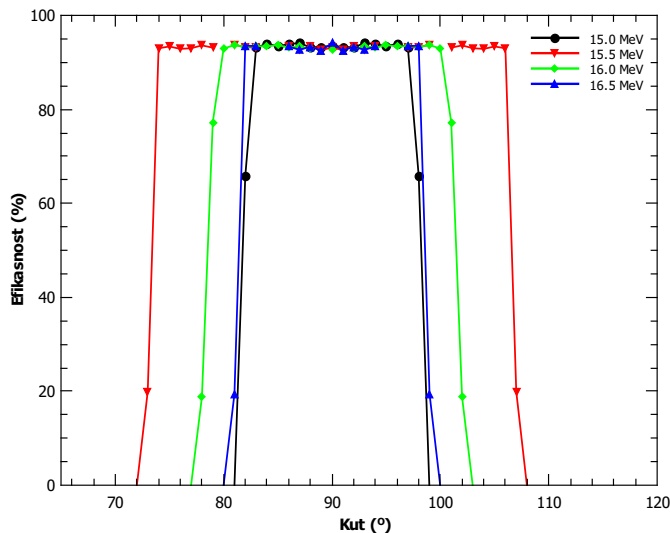
$$\eta_{\text{DISC}}(15.5 \text{ MeV}) = 25.44 \%$$

$$\eta_{\text{DISC}}(16.0 \text{ MeV}) = 18.23 \%$$

$$\eta_{\text{DISC}}(16.5 \text{ MeV}) = 13.36 \%$$

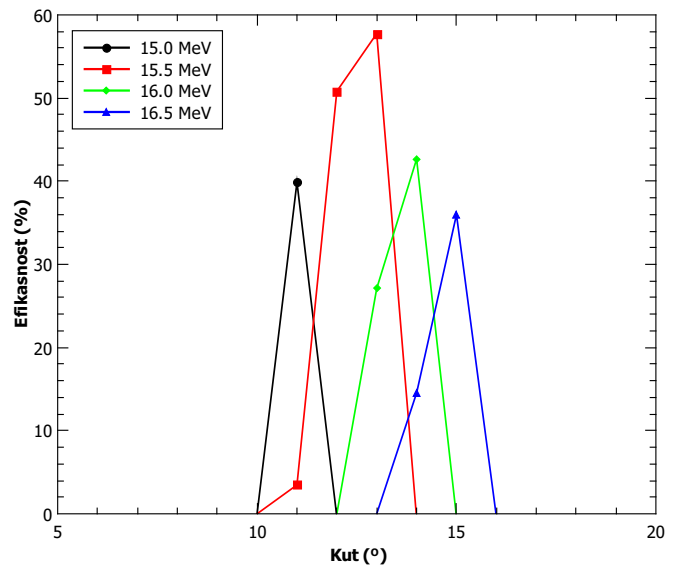
Efikasnosti se variraju u rasponu od $\approx 12 \%$. Ova odabrana udaljenost je dalje detaljnije promatrana.

Ukoliko skiciramo bilježene efikasnosti sa kutom raspada produkata u sustavu centra mase (slika 5) na toj udaljenosti, možemo primjetiti da je efikasnost najveća i gotovo konstantna u području oko kuta raspada od 90° i da nakon određenog kritičnog kuta strmo iščezava. Ovakvo ponašanje je očekivano zbog uniformnosti raspodjele kuteva pod kojim se produkti raspadaaju ($\sim \sin(\theta)$) pa je ujedno i najveći broj raspada pod kutevima upravo u području oko $\theta = 90^\circ$. Oni produkti raspadni na kutevima većim od kritičnog kuta zbog gubitka energije prolaskom kroz metu ne dostignu do detektora, jer ponovimo, efikasnost smo definirali kao broj događaja u kojima su detektirana oba produkta od svih simuliranih događaja, pa onaj ^{12}C koji je raspadnut u smjeru suprotnom od smjera ulaznog snopa zbog gubitka energije ne može dostići do mete. Isprava bi bilo za očekivati da je područje visoke efikasnosti šire za raspade na većim energijama, tj. da se ono proteže u većem rasponu kuteva prema $\theta = 0^\circ$ odnosno $\theta = 180^\circ$, jer je za veće energije



Slika 5. Distribucija efikasnosti s obzirom na kut raspada produkata ^{12}C u sustavu centra mase rezonantne jezgre za DISC konfiguraciju detektora. Efikasnost je gledana kao udio događaja po kutu u kojima su detektirana oba produkta.

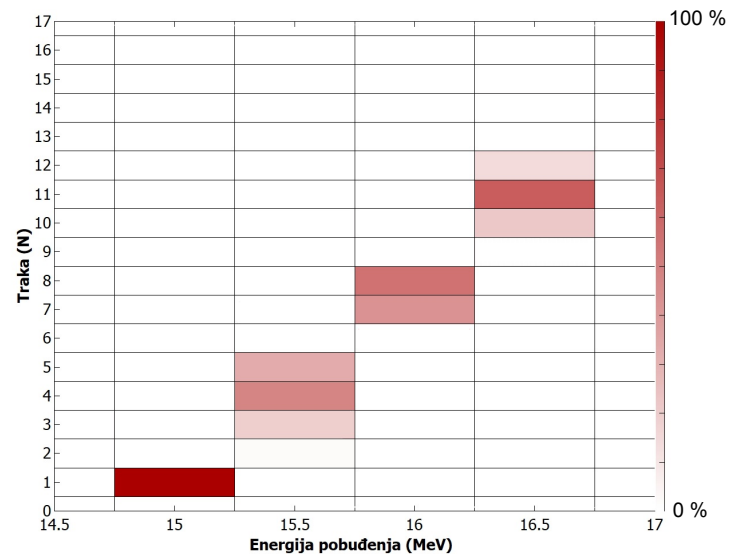
rezonance veći i impuls produkta pa bi i oni produkti koji su rasoršeni na većim (udaljenijim) kutevima od $\theta = 90^\circ$ imali dovoljnu energiju da dospiju do mete. Međutim treba imati na umu da se različite rezonance odvijaju na različitim dubinama unutar mete, tako da ako pobliže promotrimo graf efikasnosti (slika 4) možemo primjetiti da smo izabrali udaljenost na kojoj energija rezonance 15.5 MeV ima najveću efikasnost, 16.0 MeV drugu, a 15 MeV i 16.5 MeV približno istu. Tako nam se i ponašaju efikasnosti ovisno o kutu raspada, rezonanca na 15.5 MeV ima najveću širinu kuteva, 16.0 MeV drugu, a 15 MeV i 16.5 MeV približno istu, zbog udaljenosti koju produkti moraju preći da bi došli do mete (ili pak da je dio produkata prošao kroz otvor diska, što će biti diskupirano uskoros). Valja i dalje imati na umu da ovakva raspodjela kuteva zbog *boost*-a u smjeru gibanja centra mase (smijera upadnog snopa) rezultira oblikom lijevka u laboratorijskom sustavu, pa se i područje visoke efikasnosti zbog *boost*-a "suzi". Možemo promotriti kuteve raspada i u laboratorijskom sustavu, jer je u konačnici to ono što direktno mjerimo (slika 6). Primjećujemo da su se širine područja efikasnih kuteva sa za svaku energiju značajno suzile, ali da su im širine donekle proporcionalne sa onima u sustavu centra mase (rezonanca na 15.5 MeV ima i dalje najveću širinu kuteva, 16.0 MeV drugu, a 15 MeV i 16.5 MeV približno istu). Također su se vrhovi maksimuma efikasnosti (odnosno centri područja efikasnih kuteva) međusobno smakli ovisno o *boost*-u koji su imali zbog različitih energija rezonanci. Tako su područje kuteva na nižim energijama pomaknuta prema manjim kutevima, a ona na višim prema većim kutevima. Također je vidljivo da se vrhovi maksimuma efikasnosti međusobno ne preklapaju stoga je za pretpostaviti da će produkti različitih



Slika 6. Distribucija efikasnosti s obzirom na kut raspada produkata ^{12}C u laboratorijskom sustavu za DISC konfiguraciju detektora. Efikasnost je gledana kao udio događaja po kutu u kojima su detektirana oba produkta.

energija rezonanci biti aktivirani na različitim trakama na detektorima.

Pogledajmo detaljnije efikasnost bilježenih detekcija (i dalje za dva bilježena produkta ^{12}C po događaju) po trakama u detektorskom postavu (slika 7). Kao



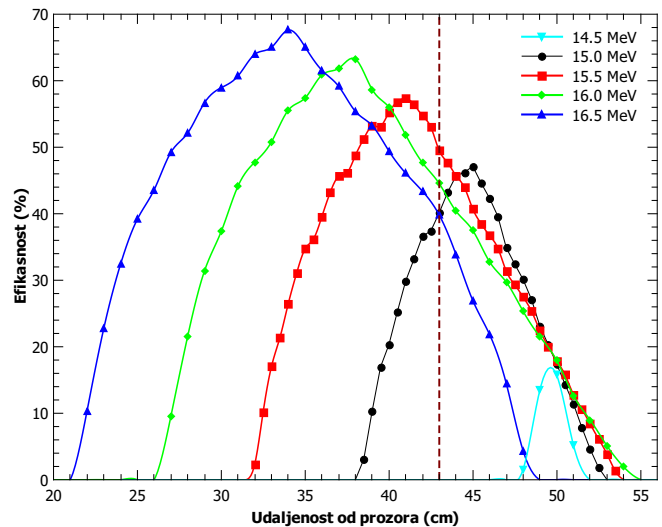
Slika 7. Efikasnost bilježenja oba produkta ^{12}C u svim iteracijama po trakama na detektorima gdje su bilježeni za različite energije rezonanci. Traka detektora sa rednim brojem 1 je najbliža z-osi, dok je posljednja traka 16 najudaljenija. Svi signali koji su zabilježeni na različitim detektorima u trakici nekog određenog rednog broja su zbrojeni i prikazani pod tim rednim brojem na grafu.

što smo mogli pretpostaviti iz raspodjele efikasnosti po kutevima za svaku rezonantnu energiju (slika [6]), vidimo da produkte raspada svake pojedine energije bilježimo različite trake na detektorima (trake različite udaljenosti od snopa). Možemo zaključiti da smo sa odabirom razmaka u energijama od 0.5 MeV za analizu različitih efikasnosti sasvim dobro pokrili ovo područje energija (15.0 MeV–16.5 MeV). Također možemo primjetiti da za sve energije (osim 15.0 MeV) bilježimo u principu sve efikasne događaje (osim onih koji su usporeni zbog gušenja prolaskom kroz metu) jer nijedna traka maksimalne efikasnosti ne izlazi iz područja koje pokriva detektor. Međutim za energiju od 15.0 MeV možemo primjetiti da samo najniža traka (ona najbliža snopu) bilježi produkte i to sa 100 % efikasnosti što znači da postoji velika mogućnost da smo sa tom trakom uhvatili samo vanjski rup "lijevka produkata" ovoga raspada i da je velik dio produkata prošao upravo kroz otvor diska. To također možemo zaključiti i iz grafa efikasnosti (slika [4]) gdje za daljnje udaljenosti efikasnost bilježenja produkata ovoga raspada raste sa udaljenosti, što bi značilo da se konus produkata sve više "otkriva" detektorima.

Isto tako možemo pretpostaviti da je i razlog ne bilježenja produkata za rezonanciju na 14.5 MeV upravo to da je otvor ovakvog postava detektora prevelik i da produkti jednostavno nisu uspjeli doći do aktivnog dijela detektora zbog svoje male energije i relativno velike udaljenosti do detektora. Stoga u sljedećem koraku valja odabrati postav koji bi imao manji središnji otvor, pa koristimo prethodno najavljenju konfiguraciju lampe (LAMP konfiguraciju). Također treba razmotriti i konfiguraciju gdje bi uz isti raspored detektora u obliku diska samo promjenili tlak (gustoću) mete u komori jer je bilježena maksimalna udaljenost do koje mjerimo određenu efikasnost do približno 50 cm, a komora je dužine 75 cm. Na taj način bi postigli da produkti mogu dulje propagirati kroz metu i da bi ih mogle i više trake na detektorima bilježiti (bolje bismo iskoristili površinu detektora, a ne samo do dvanaeste trake) i u većem broju. Naravno nakon promjene pritiska treba ponovno pronaći optimalnu udaljenost postava i ponoviti cijelu analizu.

III.2. LAMP - konfiguracija

Sada smo promotrili detektorski postav u kojemu je šest detektora postavito na način da čine oblik lampe. U ovoj konfiguraciji rupa kroz središte ima manji opseg jer je postav sastavljen od manjeg broja YY1 detektora, pa time ima i manji promjer. Također je prednost ovoga postava što produkti raspada moraju proći manju udaljenost kroz metu da bi stigli do površine aktivnog dijela detektora jer je svaki detektor nagnut prema osi snopa (z-osi). Ponovno promatramo ovisnost efikasnosti postava sa udaljenosti od ishodišta (slika [8]) gdje je efikasnost gledana kao omjer broja događaja u kojima su zabilježena oba produkta ^{12}C sa svim događajima. Kod ovog postava primjećujemo bilježenje produkata raspada na



Slika 8. Distribucija efikasnosti bilježenja produkata ^{12}C za LAMP konfiguraciju detektora sa udaljenosti detektora od ishodišta. Efikasnost je gledana kao udio događaja po kutu u kojima su detektirana oba produkta. Crtkana okomita linija predstavlja odabranu optimalnu udaljenost postava, $d_{\text{LAMP}} = 43.0$ cm.

energiji rezonancije od 14.5 MeV, što u prethodnom postavu nismo mogli primjetiti. Smanjenje puta potrebnog da čestica doprije do detektora je dovoljna i da se produkti i pod ovako malom energijom registriraju. Ponovno možemo primjetiti kako za svaku energiju pobuđenja efikasnost počne naglo rasti, i da rast lagano saturira do svoga maksimuma, pa potom počne ponovno opadati. Ponovno, kako je kut raspada rezonantnog stanja zadan kao uniforman većina raspada će se odviti oko kuta od 90° u sustavu centra mase nakon prelaska u laboratorijski sustav, izlazni ^{12}C će činiti konus sa najvećim brojem produkata pod kutem koji zatvara konus sa z-osi. Kako se pomičemo na sve veće udaljenosti od ishodišta raste i intenzitet događaja zbog sve većeg "otkrivanja" lijevka produkata detektoru, ali i produkti raspada moraju proći kroz sve deblji sloj mete da bi došli do detektora pa pri tome gube energiju. Zajedno ova dva doprinosa, kao i u prethodnoj konfiguraciji, rezultiraju laganim opadanjem rasta efikasnosti i u konačnici kada se cijeli konus "otkriva" opadanjem efikasnosti. Opadanje je i dalje veće odmah nakon prelaska maksimuma i postaje sve "blaže" sa udaljenosti gdje produkti već imaju manji moment, kao što se može predvidjeti sa Bethe-Bloch-om formulom zaustavne moći. Jednako ponašanje imamo na svim energijama, i na novoprimjećenim događajima na 14.5 MeV. Zato što na višim energijama produkti ^{12}C imaju i veće impulse, i mogu propagirati dublje kroz metu prije nego li se zaustave, više energije pokazuju općenito više efikasnosti i šire područje udaljenosti gdje efikasno možemo pozicionirati detektorski postav od nižih.

U odnosu na DISC konfiguraciju možemo primjetiti generalno bolju efikasnost na svim energijama. Maksi-

mumi efikasnosti su se poboljšali za od oko 10 % (za najvišu energiju, 16.5 MeV) do čak oko 30 % (za najnižu, 15.0 MeV). Očigledno povećanje efikasnosti je veće za one energije za koje je efikasnost u DISC konfiguraciji bila manja, ponovno zbog razloga što sada produkti manjeg impulsa imaju manji put za dolazak do detektora. Također su se i širine raspona udaljenosti u kojemu efikasno bilježimo produkte povećale jer sada zbog manje udaljenosti detektora od točke raspada i oni produkti raspada iz perifernih dijelova konusa produkata mogu dospjeti do detektora.

U izboru najoptimalnijeg položaja detektorskog postava nećemo uzimati u obzir produkte raspada na energiji 14.5 MeV. Njihovo uzimanje u obzir bi jako smanjilo efikasnost detekcije produkata na ostalim energijama, a to je energija koja jedva iznad Q vrijednosti za ovaj raspad. Da bi se ti produkti detektirali valjalo bi postaviti pravokutni DSSD na os snopa nakon LAMP postava. Na tom dodatnom DSSD detektoru bi svakako trebalo zaštititi nekoliko središnjih piksela od upadnog snopa kako bi se spriječilo njegovo oštećenje. Stoga kao najoptimalnije mjesto za pozicioniranje detektorskog postava uzimamo presjecište ovisnosti efikasnosti najvišu promatranu energiju i sljedeću najnižu energiju, odnosno 16.5 MeV i 15.0 MeV, koja iznosi:

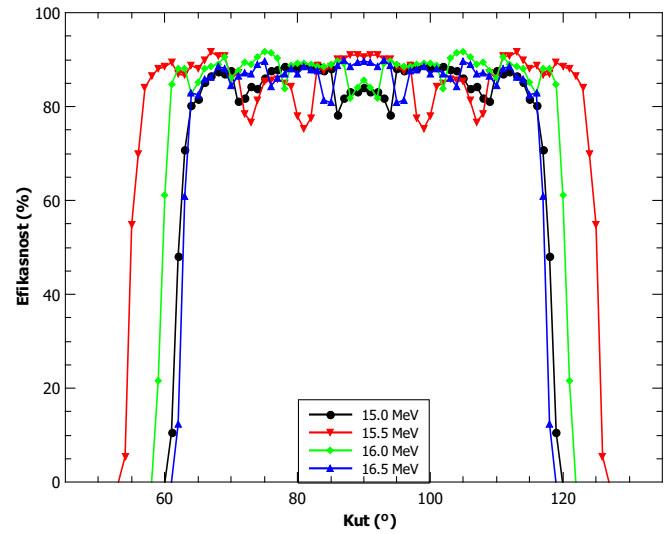
$$d_{\text{LAMP}} = 43.0 \text{ cm}$$

Na toj se poziciji efikasnosti za obje te energije gotovo podudaraju, a za ostale dvije su samo još višlje:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{LAMP}}(15.0 \text{ MeV}) &= 40.15 \% \\ \eta_{\text{LAMP}}(15.5 \text{ MeV}) &= 49.49 \% \\ \eta_{\text{LAMP}}(16.0 \text{ MeV}) &= 44.54 \% \\ \eta_{\text{LAMP}}(16.5 \text{ MeV}) &= 39.81 \% \end{aligned}$$

Uz sličnu udaljenost kao u prethodnom DISC postavu sada bilježimo drastično veće efikasnosti koje variraju u rasponu od svega ≈ 10 %. Promotrimo detaljnije ovaj postav na udaljenosti d_{LAMP} .

Bilježene efikasnosti sa kutom raspada produkata u sustavu centra mase (slika 9) na toj udaljenosti, pokazuju najveću efikasnost u području oko kuta raspada od 90° i nakon određenog kritičnog kuta strm gubitak efikasnosti. Ovo je ponovno sukladno sa uniformnom raspodjelom kuteva raspada ($\sim \sin \theta$) pa je ujedno i najveći broj raspada pod kutevima upravo u području oko $\theta = 90^\circ$. Oni produkti raspadnuti na kutevima većim od kritičnog kuta zbog gubitka energije prolaskom kroz metu ne dostignu do detektora. Kako izabrana udaljenost d_{LAMP} odgovara udaljenosti na kojoj najbolje detektiramo produkte raspada na energiji 15.5 MeV širina efikasnih kuteva je i za ovu energiju najveća. Za sljedeću niže efikasnu energiju, 16.0 MeV, širina kuteva je nešto uža, dok je najuža i podjednaka za najmanje efikasno uočene energije od 15.0 MeV i 16.5 MeV. Međutim, kako sa ovom konfiguracijom efikasnije bilježimo produkte na svim energijama nego sa prethodnom, sve širine kuteva su bitno veće i međusobno

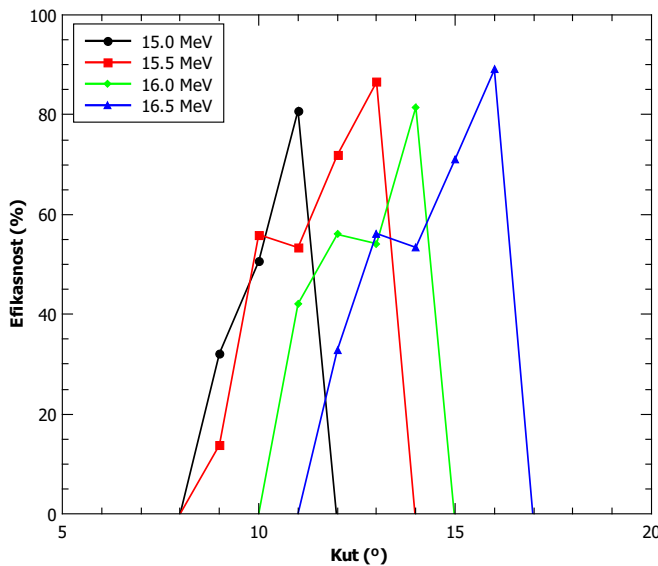


Slika 9. Distribucija efikasnosti s obzirom na kut raspada produkata ^{12}C u sustavu centra mase rezonantne jezgre za LAMP konfiguraciju detektora. Efikasnost je gledana kao udio događaja po kutu u kojima su detektirana oba produkta. Broj minimuma sa jedne strane od centra 90° odgovara upravo broju granica između aktiviranih trakica u detektorima za svaku energiju (slika 11).

se razlikuju u rasponu od svega 10° u jednu stranu. To je zbog toga što bilježimo bitno manje razlike u efikasnostima na udaljenosti d_{LAMP} za ovu konfiguraciju nego na udaljenosti d_{DISC} u slučaju diska, a zbog ukupno veće efikasnosti su širine kuteva veće u ovoj konfiguraciji. Ovakvo širok raspon kuteva pod kojima se efikasno detektiraju produkti je poprilično dobar.

Za razliku od prošloga postava ovdje možemo primjetiti određene oscilacije u efikasnosti u području efikasnih kuteva. Te oscilacije su simetrične za svaku energiju s obzirom na kut od 90° . Do njih najvjerojatnije dolazi zbog toga što je sada površina detektora bliža točkama raspada, i produkti prelaze manji put da bi došli do detektora, pa je efekt "mrljanja" trajektorije produkta manji i vide se efekti nalijetanja produkata u područje između trakica detektora, gdje se oni ne registriiraju. U slučaju DISC konfiguracije je udaljenost veća pa se trajektorija može bolje "razmrljati" pa su ovi efekti slabo vidljivi.

Kada promotrimo ovu raspodjelu kuteva u laboratorijskom sustavu (slika 10), zbog *boost*-a u smjeru gibanja centra mase (smjera upadnog snopa) područje visoke efikasnosti se "suzi". Kako su sada u sustavu centra mase sve energije imale vrlo slično široko područje kuteva, sada je utjecaj *boost*-a imao najveći doprinos u određivanju širine kuteva u laboratorijskom sustavu, pa nemamo striktnu proporcionalnost između širina u sustavu centra mase i u laboratorijskom sustavu. Produkti različitih energija rezonanci različito *boost*-ani pa širine kuteva ovise o tome, a i vrhovi maksimuma efikasnosti (odnosno centri područja efikasnih kuteva) su međusobno pomaknuti, ovisno o *boost*-u koji su imali zbog različitih

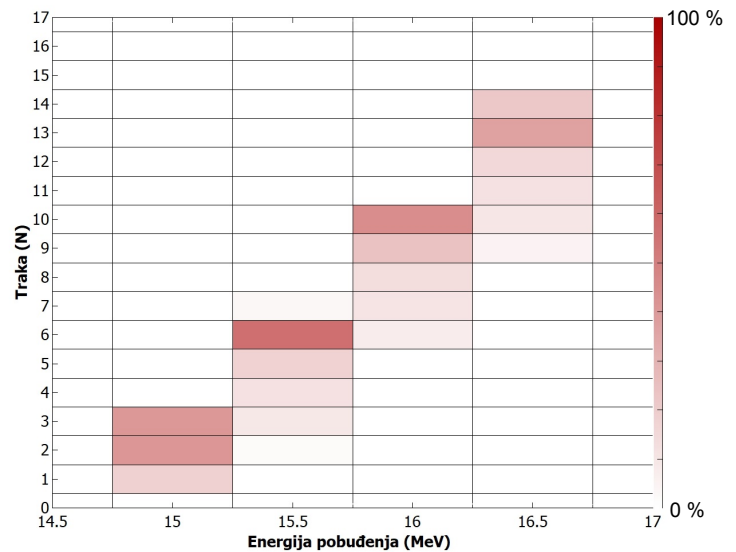


Slika 10. Distribucija efikasnosti s obzirom na kut raspada produkata ^{12}C u laboratorijskom sustavu za LAMP konfiguraciju detektora. Efikasnost je gledana kao udio događaja po kutu u kojima su detektirana oba produkta.

energija rezonanci. Tako su područja kuteva na nižim energijama pomaknuta prema manjim kutevima, a ona na višim prema većim kutevima. Sada primjećujemo veće preklapanje efikasnosti po kutevima nego li u DISC postavu, pa bi mogli očekivati i preklapanje signala sa različitim energija rezonanci u istim trakicama detektora.

Stoga promotrimo detaljnije efikasnost bilježenih detekcija (i dalje za dva bilježena produkta ^{12}C po događaju) po trakama u detektorkom postavu (slika 11).

Kao što smo mogli pretpostaviti iz raspodjele efikasnosti po kutevima za svaku rezonantnu energiju (slika 10), vidimo da produkte raspada svake pojedine energije bilježe i neke zajedničke trake na detektorima. Međutim trake koje bilježe najintenzivnije, tj. najefikasnije, signale pojedine energije (najtamnije trakice na slici 10) su različite, tako da i dalje nemamo preklapanja. Možemo zaključiti da razmakom u energiji od 0.5 MeV dobro pokrивamo ovo područje promatranih energija (15.0 MeV–16.5 MeV). Zbog većeg broja aktiviranih trakica po energiji možemo ujedno zaključiti da ovom konfiguracijom bilježimo više detekcija, jer je sada detektor efektivno bliži točkama raspada. Također možemo primjetiti da za sve energije (osim 15.0 MeV) bilježimo u principu sve efikasne događaje (osim onih koji su usporeni zbog gušenja prolaskom kroz metu) jer nijedna traka koja bilježi signale ne izlazi iz područja koje pokriva detektor. Međutim za energiju od 15.0 MeV možemo primjetiti da i najniža traka (ona najbliža snopu) ipak bilježi neke produkte, pa ne možemo isključiti mogućnost da je dio produkata ipak prošao kroz otvor, premda je najintenzivniji dio raspadnutih produkata za energiju pobuđenja od 15.0



Slika 11. Efikasnost bilježenja oba produkta ^{12}C u svim iteracijama po trakama na detektorima gdje su bilježeni za različite energije rezonanci. Traka detektora sa rednim brojem 1 je najbliža z-osi, dok je posljednja traka 16 najudaljenija. Svi signali koji su zabilježeni na različitim detektorima u trakici nekog određenog rednog broja su zbrojeni i prikazani pod tim rednim brojem na grafu.

MeV uhvaćen na trakama 2 i 3.

Ako promotrimo broj minimuma u području efikasnih kuteva sa jedne strane od centra (slika 9) on odgovara upravo broju granica između aktiviranih trakica u detektorima za svaku energiju. To nas upućuje da su ti minimumi nastali zbog udaraca produkata u granično područje između dvije trakice. Ovom konfiguracijom dobro iskoristavamo površinu detektora jer nam efektivno samo posljednja (šesnaesta) trakica ne bilježi efikasne događaje. Jedna je mogućnost ponovno malo smanjiti tlak u komori kako bi se omogućila dalja propagacija produktima kroz metu, ili pak postaviti DSSD-a na z-os kako bi se uhvatili eventualni produkti koji su prošli unutar rupe i mogući produkti 14.5 MeV rezonancije.

IV. ZAKLJUČAK

Korištenje debelih meta u proučavanju rezonantnih stanja jezgara je vrlo korisna metoda kojom možemo u jednom dobro definiranom eksperimentalnom postavu promatrati nekoliko rezonantnih stanja istovremeno. Zbog različitih potpisa u signalima (kut otklona i energija) produkti se daju inverznom kinematikom relativno jednostavno identificirati. Međutim zbog kompleksnosti postava, konstantnog gubitka energije produkata i snopa u meti, krivim odabirom eksperimentalnog postava traženi produkti mogu ostati nedetektirani. Stoga je nužno utvrditi optimalni postav za neki željeni problem simuliranjem različitih postava i izborom onoga najefikas-

nijega. U tu svrhu je razvijen programski paket *REXpp*. Rezonantna stanja ^{24}Mg se mogu postići sudarima snopa ^{20}Ne na metu ^4He . Kako su produkti traženog kanala raspada $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ jednakih masa smisleno je koristiti eksperimentalni postav simetričan s obzirom na pravac propagacije snopa (z-os). Proučavanjem dvaju takvih postava detektora DISC i LAMP u rasponu energija koje su između Q vrijednosti za ovu reakciju i maksimalne energije unutar zvijezda, gdje i tražimo efekt ove reakcije, možemo zaključiti da efikasnost uspješno registriranih produkata značajno ovisi o udaljenosti koju produkti moraju proći kroz metu. Zbog uniformnosti kutne distribucije pod kojom se rezonancija raspadne efikasnost svakog od promatranih postava na određenoj energiji najprije raste sa udaljenosti, jer detektor biva izložen sve većem broju dospjelih produkata, i potom počne sa udaljenosti opadati jer produkti sa perifernih dijelova kutne distribucije zbog sve većeg gubitka energije ne uspijevaju dosegnuti do detektora. Iz tog razloga u slučaju DISC konfiguracije područje kuteva raspada (u sustavu centra mase) u kojemu efikasno bilježimo produkte ima strmi prekid na svim energijama, jer produkti raspada na većim kutevima više nemaju dovoljnu energiju da prođu do detektora. Kod LAMP konfiguracije taj je prijelaz blaži jer je udaljenost koju produkti moraju proći manja pa i oni produkti sa periferije kutne raspodjele raspada mogu donekle prodrijeti do detektora. Možemo reći da LAMP konfiguracija ima dobro kutno pokrivanje na praktički svim promatranim energijama, jer ostali neregistrirani produkti odgovaraju perifernijem dijelu kutne raspodjele. Zbog različitog *boost*-a produkata nastalih na različitim energijama, ove distribucije bivaju pomaknute i razmaknute u laboratorijskom sustavu. Kako je efikasnost LAMP konfiguracije općenito bolja, i distribucije efikasnih kuteva u laboratorijskom sustavu za LAMP

konfiguraciju su šire nego za DISC konfiguraciju. Zbog smicanja distribucija kutova produkti svake energije dominantno aktiviraju trakice na različitim udaljenostima s obzirom na z-os. U slučaju DISC konfiguracije niti nema preklapanja signala između različitih energija u nekoj traki, dok za LAMP konfiguraciju ima preklapanja perifernih signala. U oba slučaja možemo zaključiti da smo izborom iteracije po 0.5 MeV dobro pokrili ovo područje energija. U oba slučaja produkti najviše energije ne dopijevaju do posljednje trakice detektora koja ostaje neaktivirana, ali u oba slučaja najniža biva aktivirana od strane produkata najniže promatrane energije (15.0 MeV). Premda je ta aktivacija u LAMP konfiguraciji prouzročena perifernijim produktima (jer 2. i 3. trakica bilježe vidljivo dominantniju efikasnost) postoji ipak mogućnost da je dio produkata ipak prošao kroz otvor koji je u LAMP konfiguraciji manji nego u DISC slučaju.

LAMP konfiguracija pokazuje značajne prednosti u odnosu na DISC konfiguraciju. Ima veću efikasnost, bolje kutno pokrivanje i bolje iskorištava aktivni dio površine detektora. Preporučava se udaljenost od $d_{\text{LAMP}} = 43.0$ cm za zadani eksperimentalni postav za optimalnu detekciju ^{12}C produkata u $^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ kanalu raspada na energijama od 15.0 MeV do 16.5 MeV. Kako bi se bolje pokrila efikasnost na nižim energijama može se dodati DSSD na os snopa iza LAMP konfiguracije ili pak probati malo smanjiti tlak ^4He u komori. Za svaki od tih slučajeva treba nanovo provesti simulacije i analizu kako bi se u potpunosti utvrdila optimalna konfiguracija. Također bi trebalo u sljedećem koraku uzeti u obzir i prisutnost "neželjenog" kanala raspada: $^{24}\text{Mg} \rightarrow \alpha + ^{20}\text{Ne}$ i pak Rutherfordovog raspršenja projektila snopa na meti, koji mogu stvarati neželjeni šum u detektorskom postavu.

¹ Vedrana Tokić - doktorski rad, *Građa pobuđenih stanja ^{24}Mg i njihov utjecaj na nukleosintezu*, Prirodoslovnomatematički fakultet u Zagrebu (2016.)
² D. A. Bromley, J. A. Kuehner, i E. Almqvist, *Resonant Elastic Scattering of ^{12}C by Carbon*, Physical Review Letters, 4(7):365-367 (1960.)
³ M.E. Bennett et al., *The effect of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ rate uncertainties on the evolution and nucleosynthesis of massive stars.*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 420:3047-3070 (2012.) [16] W. Hillebrandt and J.C. Niemeyer. Type IA
⁴ N. Curtis and J. Walshe, *REX: A Monte Carlo simulation of thick gas target resonant scattering reactions*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 797, 44-56, (2015)

⁵ NNDC kalkulator Q vrijednost: <https://www.nndc.bnl.gov/qcalc>
⁶ Programski paket ROOT za analizu podataka razvijen na CERN-u: <https://root.cern>
⁷ Programski paket SRIM (*The Stopping and Range of Ions in Matter Software*) za izračun moći zaustavljanja: <http://www.srim.org>
⁸ Programski paket REXpp za vršenje simulacija eksperimentalnih postava sa debelom metom: <https://github.com/dellaquilamaster/REXpp>
⁹ W. R. Leo (1994). *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Second*, Springer-Verlag.