

# Simulacije odziva detektora NeuLAND na nabijene čestice

Ivana Lihtar\*

*Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička cesta 32, Zagreb*

Mentor: Dr.sc. Igor Gašparić

*Institut Ruđer Bošković, Bijenička cesta 54, Zagreb*

(Dated: 26. siječnja 2020.)

Za dizajn i upotrebu detektora potrebno je znati na koji način će ulazne čestice s njime interagirati. NeuLAND je detektor neutrona koji se izgrađuje od scintilatorskih šipki na institutu GSI u okviru R3B kolaboracije. Početna verzija (13% konačnog detektora) korištena je na nekoliko eksperimenata na institutu RIKEN u Japanu gdje je služila i za detekciju nabijenih čestica. Budući da nabijene čestice za razliku od neutrona interagiraju uglavnom dobro poznatom elektromagnetskom interakcijom, ti eksperimenti čine izvrstan temelj za testiranje odziva detektora. U okviru ovog rada napravljene su simulacije interakcija nabijenih čestica s NeuLAND-om uz sustavnu usporedbu s eksperimentalnim podacima.

## I. UVOD

Računalne simulacije u fizici (kao i u mnogim drugim područjima ljudske djelatnosti - industriji, ekonomiji, zdravstvu i drugim prirodnim i društvenim znanostima) su vrlo moćan i koristan višenamjenski alat. U čestičnoj i nuklearnoj fizici su gotovo neizostavan predeksperimentalni postupak koji služi predviđanju ulaznih veličina koje će se u eksperimentu upotrijebiti, dizajnu, testiranju i optimizaciji odziva detektora, procjeni krajnjih rezultata itd. Nakon eksperimenta mogu biti od velike pomoći pri interpretaciji i razumijevanju dobivenih rezultata.

U ovom radu računalne simulacije su korištene za testiranje odziva dijela detektora NeuLAND<sup>1</sup> koji je originalno dio eksperimentalnog postava R3B kolaboracije (Reactions with Relativistic Radioactive Beams, dio NUSTAR kolaboracije<sup>2</sup> na FAIR-u<sup>3</sup>) na institutu GSI u Darmstadtu, Njemačka [1]. Od 2015. do 2017. godine detektor je poslan na institut RIKEN [2] u Japanu gdje je bio dio eksperimentalnog postava SAMURAI [3]. Između ostalog, korišten je u TPC-EOS eksperimentima S $\pi$ RIT kolaboracije<sup>4</sup> u kojima se proučavala jednadžba stanja nuklearne tvari (engl. equation of state, EOS). Koristeći te eksperimentalne podatke, sustavnom usporedbom, simulacije će se prilagoditi na opaženi odziv detektora.

### I.1. Interakcija čestica s detektorskim materijalom

Za proučavanje odziva detektora pomoću simulacija prvo je potrebno imati fizikalni model, odnosno znati koji fizikalni procesi se odvijaju pri interakciji čestica s detektorskim materijalom. Jasno, ovdje je uputno odvojeno

promatrati nabijene i nenabijene čestice jer će za njihove interakcije biti dominantno odgovorne različite sile.

Za interakciju nabijenih čestica s materijom odgovorna je primarno elektromagnetska sila. Čestica gubi energiju kroz neelastične sudare s atomskim elektronima pri čemu atomi materijala kroz koji prolazi ostaju pobuđeni ili ionizirani. Osim neelastičnih sudara s atomskim elektronima, relativno čest proces su elastična raspršenja na jezgrama, no pritom čestica generalno gubi malo energije budući da su mase jezgri većine materijala puno veće od mase ulaznih čestica [4].

Duž makroskopskog puta čestice kroz materijal događa se jako velik broj sudara pa je smisleno i običaj promatrati prosječni gubitak energije po jediničnom putu - dE/dx. Tu veličinu opisuju Bethe-Blochova formula

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right], \quad (1)$$

gdje je  $r_e$  klasični elektronski radijus,  $m_e$  masa elektrona,  $N_A$  Avogadrov broj,  $I$  srednji ionizacijski potencijal,  $Z$ ,  $A$  i  $\rho$  atomski broj, atomska težina i gustoća apsorberskog materijala,  $z$  naboj ulazne čestice u jedinicama  $e$  i  $\beta$  omjer  $v/c$  ulazne čestice.  $W_{max}$  predstavlja maksimalni transfer energije u jednom sudaru, a  $\delta$  i  $C$  korekcije koje postaju važne pri visokim i niskim energijama, respektivno. Srednja deponirana energija duž određenog puta, veličina koju je najčešće zanimljivo promotriti, dobije se integriranjem jednadžbe (1)

$$E = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dE}{dx} dx. \quad (2)$$

Međudjelovanje neutrona s materijom upravljano je jakim nuklearnom silom. Budući da je ona kratkog doseg a i da je sva materija koju srećemo na Zemlji prilično rijetka jasno je da će neutronske interakcije s detektorom biti manje od interakcija s nabijenim česticama.

\* lihtar.ivana@gmail.com

<sup>1</sup> New Large Area Neutron Detector

<sup>2</sup> NUclear STructure, Astrophysics, and Reactions

<sup>3</sup> Facility for Antiproton and Ion Research, <https://fair-center.eu>

<sup>4</sup> Samurai PION Reconstruction and Ion Tracker

Mehanizmi kojim neutroni interagiraju ovise o njihovoj energiji zbog čega se često koristi klasifikacija prema energiji. Nema strogo usuglašenih granica, ovdje iznosimo podjelu iz [4]. Neutroni energije  $\geq 100$  MeV svrstavaju se u visokoenergijske, oni između 100 keV-a i 10ak MeV-a u brze dok su oni između  $\simeq 0.1$  eV i  $\simeq 100$  keV epitermalni. Termalnim ili sporim neutronima nazivaju se oni čija je energija usporediva s termalnim fluktuacijama pri sobnoj temperaturi ( $kT \simeq 1/40$  eV). Elastična raspršenja na jezgrama:  $A(n,n)A$  su glavni oblik interakcije u MeV-skome području. Zatim slijede neelastična raspršenja -  $A(n,n')A^*$ ,  $A(n,2n')B$  te nuklearne reakcije:  $(n,p)$ ,  $(n,d)$ ,  $(n,\alpha)$ ,  $(n,t)$  i drugo u kojima uglavnom sudjeluju epitermalni neutroni.

Interakcija neutrona s detektorskim materijalom rezultira značajnim skretanjem, potpunim nestankom neutrona ili pojavom sekundarne čestice. Većina detektora primjenjuje neki mehanizam konverzije ulaznog neutrona u sekundarnu česticu koja se može direktno detektirati [5].

## I.2. Atenuacija, prigušenje i saturacija

Na detekciju čestica i ispravno mjerenje njihovih opservabli također neizbježno utječu i karakteristike mjernih uređaja odnosno materijala od kojih su napravljeni. Budući da je NeuLAND scintilacijski detektor, spomenut ćemo važnije efekte koje uočavamo u eksperimentalnim podatcima pri mjerenjima sa scintilatorima.

Prilikom transmisije svjetlosti kroz scintilator dolazi do gubitaka na površini i apsorpcije fotona u materijalu. Zbog toga je ukupni svjetlosni doprinos od prolaska čestice atenuiran. Gubici na površini se u dobroj mjeri smanjuju poliranjem i omatanjem scintilatora reflektivnim materijalom, dok je apsorpcija unutar samog scintilatora značajniji problem tek za vrlo velike scintilatore. Pokazano je da intenzitet svjetlosti ovisno o prijedenoj udaljenosti prati ovisnost

$$L(x) = L_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right), \quad (3)$$

gdje je  $L_0$  početni svjetlosni intenzitet, a  $\lambda$  atenuacijska duljina karakteristična za scintilator. Kad je put fotona,  $x$ , usporediv s atenuacijskom duljinom efekt atenuacije dolazi do izražaja.

Sljedeća važna pojava je razlog nelinearnog odnosa između svjetlosti koju dobivamo iz scintilatora po jedinici puta i energije koju je čestica deponirala po jedinici puta. Nakon što ulazne čestice ekscitiraju scintilatorski materijal slijedi deekscitacija. Scintilatori za detekciju iskorištavaju samo jedan od mehanizama deekscitacije, a to je emisija vidljive svjetlosti. Osim toga, postoje i drugi, korisniku detektora nepovoljni, načini deekscitacije molekula materijala (primarno vibracijom rešetke odnosno u obliku topline). Svi procesi deekscitacije koji ne rezultiraju emisijom svjetlosti spadaju u tzv. svjetlosno

prigušenje (engl. light quenching) i smanjuju efikasnost scintilatora. Taj nelinearni odnos opisuje se empirijskom Birkovom formulom

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}, \quad (4)$$

gdje je  $L$  generirana svjetlost,  $S$  scintilacijska efikasnost, a  $kB$  Birkov koeficijent koji ovisi o vrsti materijala. Birkov koeficijent se praktično koristi kao podesiv parametar za usklađivanje s eksperimentom. Nekad se koristi i proširena verzija s dva podesiva parametra ( $kB$  i  $C$ )

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx} + C \left(\frac{dE}{dx}\right)^2}, \quad (5)$$

Za prikupljanje scintilacijske svjetlosti koriste se fotomultiplikatorske cijevi (PMT). Kod nekih PMT-jeva dolazi do saturacije, odnosno pojave da naboj koji proizvodi signal u PMT-ju nije linearno proporcionalan ulaznoj svjetlosti već vrijedi ovisnost

$$Q = \frac{L}{1 + \kappa L}, \quad (6)$$

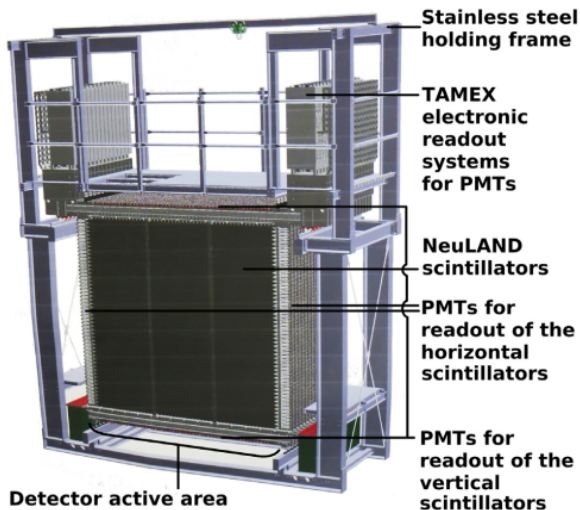
gdje je  $\kappa$  saturacijski koeficijent koji se određuje za uređaj.

Budući da želimo da simulacija što točnije odgovara rezultatima eksperimenata, ovakve je efekte nužno pravilno uključiti u simulaciju. Potrebno je i napomenuti da gornje relacije okvirno dobro opisuju pripadne procese, no oni još nisu u potpunosti istraženi niti su za sve vrste scintilatora izmjereni parametri koji se u njima pojavljuju.

## I.3. NeuLAND i eksperiment

NeuLAND (Slika 1) je detektor vremena preleta (engl. time-of-flight/ToF) namijenjen detekciji brzih neutrona u energijskom rasponu od 100 MeV-a i 1000 MeV-a. Građen je od scintilatorskih šipki (tipa RP408, organski kristal) složenih u dvostruke ravnine - jednu čine vertikalno, a drugu horizontalno orijentirane šipke. U završnom obliku (još je u izgradnji) sastojat će se od 60 ravnina od kojih će svaka imati 50 šipki i 100 fotomultiplikatora (po jedan sa svake strane pojedine šipke). Konačne dimenzije detektora bit će  $2.5 \times 2.5 \times 3$  m<sup>3</sup>. Predviđena postorna rezolucija iznosi  $\sigma_{x,y,z} \leq 1.5$  cm, a vremenska  $\sigma_t \leq 150$  ps.

NeuLAND je dizajniran u skladu s istraživačkim interesima i eksperimentalnim ciljevima R3B kolaboracije. U tom smislu svrha NeuLAND-a, kao dijela eksperimentalnog postava, jest da odgovori na pitanje: "Kako se svojstva nuklearnih sustava mijenjaju ovisno o izospinu?"



Slika 1: Shema detektora NeuLAND [6] s pripadnom elektronikom.

[7]. To uključuje istraživanja nuklearnih svojstava kratko živućih jezgri s ekstremnim omjerima broja neutrona i protona te svojstva asimetrične nuklearne tvari. Ovo je jedno od temeljnih pitanja čiji bi odgovor doprinio razumijevanju astrofizičkih objekata i fenomena poput neutronskih zvijezda i eksplozija supernova.

Cilj TPC-EOS eksperimenata bilo je istraživanje asimetričnog člana nuklearne jednadžbe stanja odnosno energije simetrije,  $S(\rho)$ . U obliku u kojem je razdvojen doprinos simetrične i asimetrične tvari, nuklearna jednadžba stanja odnosno energija po nukleonu glasi

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, \delta = 0) + S(\rho)\delta^2. \quad (7)$$

Pomoću veličine  $\delta$  izražava se asimetrija za velike nuklearne sustave. Ona se definira kao

$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p}, \quad (8)$$

gdje  $\rho_n$  i  $\rho_p$  predstavljaju gustoću neutrona i protona.

Energija simetrije ovisi o gustoći nuklearne tvari. Iz tog razloga u ovakvim istraživanjima je potrebno postići raspon različitih gustoća. U svrhu razumijevanja astrofizičkih struktura i procesa potrebno je postići dva do tri puta veće gustoće od gustoće saturacije ( $\rho_0=0.16 \text{ fm}^{-1/3}$ ) što je moguće u centralnim sudarima teških iona [8]. Energija snopa mora iznositi nekoliko stotina AMeV. Jedna od opservabli koja daje informaciju o energiji simetrije je omjer multipliciteta i spektralnih raspodjela protona i neutrona što se mjeri detektorom NeuLAND. Na RIKEN-u su mjereni centralni sudari izotopa kositra:  $^{108}\text{Sn}$  na  $^{112}\text{Sn}$  i  $^{112}\text{Sn}$  na  $^{124}\text{Sn}$  te  $^{132}\text{Sn}$  na  $^{124}\text{Sn}$  i  $^{124}\text{Sn}$  na  $^{112}\text{Sn}$  pri 270 AMeV.

U eksperimentima je korišten tzv. NeuLAND Demonstrator, verzija NeuLAND-a s četiri duple ravnine. Za razliku od uobičajenog položaja NeuLAND-a u eksperimentima u kojima se proučava struktura atomskih jezgri - pod kutem od  $0^\circ$  u odnosu na ulazni snop (Slika 2), u ovoj je eksperimentalnoj hali (SAMURAI postav, Slika 3) stavljen na kut od  $30^\circ$  u odnosu na ulazni snop [9]. U centralnim sudarima teških iona nukleoni i ostale čestice emitirane su u veće polarne kuteve tako da će sada NeuLAND po prvi puta služiti i za detekciju nabijenih čestica. Zbog toga ovaj eksperiment ima vrlo korisne podatke što se tiče poznavanja odziva NeuLAND-a. Kako je interakcija nabijenih čestica s materijom u mnogome bolje poznata od interakcije nenabijenih, imamo bolji temelj za pouzdano testiranje i razumijevanje odziva detektora.

Zajedno s NeuLAND-om u ovim eksperimentima korišten je pripadni VETO detektor od istog scintilacijskog materijala, no u obliku osam ploča dimenzija  $1.90 \times 0.32 \times 0.01 \text{ m}^3$  koje su složene vertikalno s preklapom od 0.5 cm.

VETO detektori obično služe za odbacivanje pozadine od nabijenih čestica, no u ovom je slučaju VETO imao važnu ulogu u identifikaciji čestica. Budući da je tanak, vrlo je malo vjerojatno da će neutroni s njim interagirati. Nabijene čestice će, naprotiv, zasigurno u njemu ostaviti trag što u kombinaciji s mjerenom deponiranom energijom i vremenom preleta u NeuLAND-u omogućuje identifikaciju čestica.

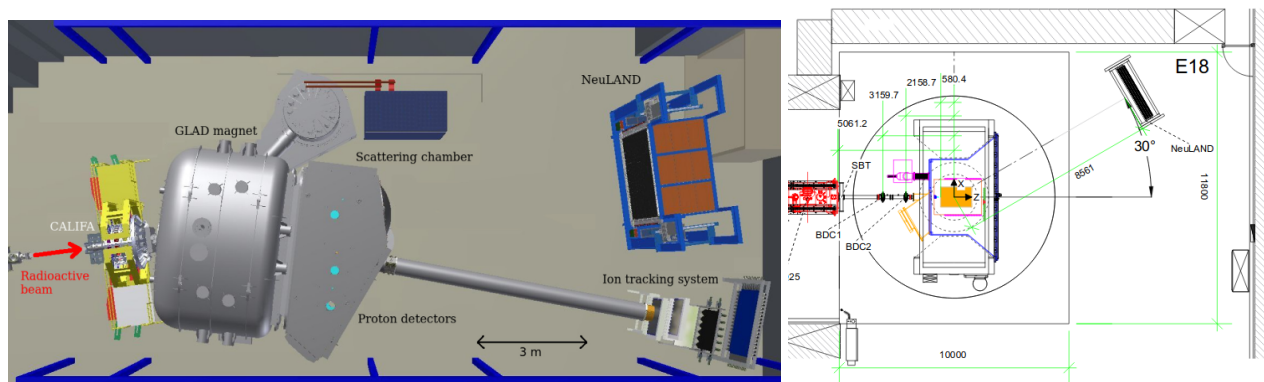
## II. SOFTWARE I SIMULACIJE

Na institutu GSI Darmstadt razvijeno je radno okruženje za FAIR eksperimente, tzv. FairRoot [10], unutar kojeg je moguće vršiti simulacije i analizu podataka. Radi se o unificiranom programskom paketu koji sadrži osnovne klase koje korisnicima omogućuju jednostavno konstruiranje detektora, razvijanje postupka analize ili rješavanje već nekog drugog problema. Temeljen je na ROOT-u, vrlo učestalom programskom paketu u visokoenergetskoj fizici i VMC (Virtual Monte Carlo) sučelju [11]. Za različite eksperimente (skupine eksperimenata unutar određenih grupa) unutar FAIR-a razvijeni su zasebni odgovarajući softveri s bazom u FairRoot-u. R3B grupa tako ima svoju verziju - R3BRoot.

R3BRoot je dakle specijaliziran za eksperimente u kojima se proučavaju reakcije koje se događaju u sudarima relativističkih radioaktivnih snopova. Nasljeđuje strukturu FairRoot-a s dodatkom detektora specifičnih za R3B i implementacijom algoritama za kalibraciju i analizu podataka.

Ove vrste kodova imaju modularni dizajn i ne proizvode izvršne programe. Umjesto toga, kod se kompajlira u podijeljene biblioteke (engl. shared libraries) koje se onda učitavaju i kojima se upravlja pomoću ROOT macroa bez potrebe rekompajliranja.

Pohrana podataka organizirana je prema principu "događaj po događaj" (gdje događaj znači jedna inte-



Slika 2: Desno: pregled GSI-jevog eksperimentalnog postava [6] : CALIFA -  $\gamma$ -kalorimetar i spektrometar, dipolni GLAD magnet, NeuLAND i drugo. Lijevo: shema SAMURAI - eksperimentalnog postava [8]: u kružnici se nalazi SAMURAI magnet unutar kojeg je TCP (Time Projection Chamber)-komora, gore desno je NeuLAND ispred kojeg se nalazio VETO detektor (nije prikazan na shemi).

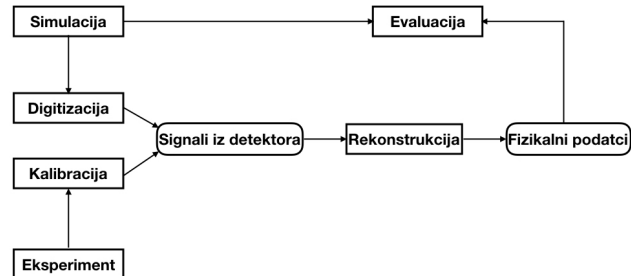
rakcija između čestice-projektile i čestice-mete) u binarne datoteke s ekstenzijom ".root". Pomoću klase TTree izlazni podatci strukturirani su u tzv.  $n$ -tuple. Tako organizirani podatci mogu se analizirati i prikazivati pomoću histograma.

## II.1. Simuliranje eksperimenta

Za izvođenje simulacije potrebno je definirati geometriju detektorskog postava, primarne čestice i Monte Carlo "stroj" (engl. engine) s implementacijom predviđenih fizikalnih procesa.

Pri definiciji geometrije daje se informacija o materijalima, dimenzijama detektora te njegovom položaju u eksperimentalnoj hali. Primarne čestice se generiraju u sklopu različitih generatora događaja (engl. event generator). Potrebno je definirati vrstu čestica, izvor, smjer i energiju. U fizici čestica postoji konvencija o imenovanju čestica gdje se svakoj pridružuje jedinstveni PDG (Particle Data Group) kod s informacijama o čestici tako da se vrsta čestice definira unošenjem pripadnog koda. Generatori događaja određuju izvor, smjer i energiju primarnih čestica na različite načine od kojih ćemo spomenuti dva. Tzv. "box"-generator gornje veličine određuje nasumično po jednolikoj raspodjeli unutar unaprijed korisnički zadanih raspona. Također, potrebne informacije o vrsti i kinematici čestica mogu se unijeti u kod iz tekstualnih datoteka pomoću tzv. "Ascii"-generatora.

Primarne čestice će u skladu s geometrijom postava i fizikalnim procesima interagirati s materijalima detektora i zrakom na putu do detektora, stvarati sekundarne čestice i pritom gubiti energiju. Opisanu propagaciju čestica izvodi gore spomenuti Monte Carlo "stroj" koristeći implementirane fizikalne procese. Stroj koji koristi R3BRoot je GEANT4 (GEometry ANd Tracking, ponovno, software vrlo čest u visokoenergetskoj i nukle-



Slika 3: Shema tijeka obrade, rekonstrukcije i analize podataka [14] - stadiji simuliranja su "simulacija" i "digitizacija".

arnoj fizici) [12]. GEANT4 nudi opsežan set fizikalnih procesa pomoću kojih se modelira ponašanje čestice. Fizikalne procese je moguće, u skladu s energetske rasponom ulaznih čestica, birati zasebno, imajući na raspolaganju različite implementacije interakcija, ili u obliku unaprijed definiranih lista fizikalnih procesa. Za simulacije u NeuLAND-u koristi se unaprijed definirana lista kodnog imena QGSP\_BERT\_HP (iako je moguće korištenje još nekoliko alternativnih lista). Njezino korištenje je preporučljivo u većini situacija u visokoenergetskoj fizici. Ukratko, svaki dio imena upućuje na određeni model koji pokriva hadronske i/ili elektromagnetske procese za čestice u određenom rasponu energija (više na [13]).

Simuliranje događaja može se podijeliti u dva osnovna stadija (vidi shemu - Slika 4). Nakon definiranja gore navedenog, pokreće se simulacija koja na primarne čestice prvo primjenjuje elementarnu fiziku implementiranu GEANT4-om. Rezultat su podatci koji sadrže informaciju o svakoj interakciji i depoziciji energije koju

je čestica proizvela prolaskom kroz materijal. Na toj razini podatci ne nalikuju na eksperimentalne podatke koje skuplja detektor, a nazivaju se točkama (engl. points, konkretno NeuLandPoints, VetoPoints). Nakon toga slijedi proces digitizacije koji točke pretvara u realne signale u detektoru (engl. hits, konkretno NeuLandHits, VetoHits) koji nalikuju onome što snimi detektor. Dijelove koda zadužene za ovu pretvorbu zvat ćemo zajednički - digitizer. Digitizer sumira individualne energetske depozicije čestice i pretvara ih u signal kakav vide PMT-jevi. U ovom stadiju se na elementarnu fiziku primjenjuju efekti izazvani svojstvima detektorskih uređaja poput gore opisane saturacije i konačna detektorska rezolucija.

## II.2. Pristup simulaciji

Cilj u našim simulacijama bio je reproducirati podatke koje su NeuLAND i VETO skupili za vrijeme TPC-EOS eksperimenata. U obzir su uzeta prigodna pojednostavljenja. Simulirane su čestice koje nastaju kao produkt reakcija u sudarima izotopa kositra te bivaju "opažene" u detektorima. Za generiranje čestica korišteni su zasebni "box"-generatori s tim da su čestice u detektor ulazile jedna po jedna. Generiranim česticama pridijeljena je energija iz širokog energijskog raspona prema uniformnoj raspodjeli. Za izvor čestica odabrano je mjesto sudara ionskih snopova, a emitirane su jednoliko u rasponu polarnih kuteva od  $\theta=0^\circ$  do  $\theta=6^\circ$  te uniformno po svim azimutalnim kutovima.

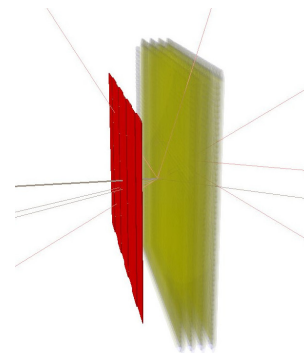
Generirane su sljedeće primarne čestice s rasponima energija:

- proton, (0.01 - 1.5) GeV
- neutron, (0.01 - 1.5) GeV
- deutron, (0.01 - 1.5) GeV
- triton, (0.01 - 1.5) GeV
- jezgra  $^3\text{He}$ , (0.01 - 1.5) GeV
- $\alpha$ , (0.01 - 1.5) GeV
- $\gamma$ , (0.01 - 1.5) GeV
- $\mu$ , (3.9 - 4.1) GeV

Mioni su generirani zato što su kozmički mioni iskoristeni za kalibraciju NeuLAND-a. Raspodjela energije s kojom kozmički mioni dolaze do površine Zemlje nije uniformna, no srednja vrijednost iznosi oko 4 GeV-a pa je generiranim mionima pridijeljena energija oko te vrijednosti. Multiplicitet svih primarnih čestica iznosio je  $10^6$ .

## III. REZULTATI

Detektor NeuLAND je već definiran u R3BRoot-u, no detektor VETO nije. Kako bismo imali jednak skup podataka i mogli provesti ekvivalentnu analizu kao u eksperimentu, VETO je implementiran u simulacije. Proces se sastojao od definiranja materijala i geometrije detektora unutar eksperimentalne hale, dok su ostali dijelovi simu-



Slika 4: Prikaz VETO detektora (crveno) i NeuLAND Demonstratora (žuto) preko vizualizacije događaja (engl. "event display") - pravci predstavljaju trajektorije primarne (deblja crna linija) i sekundarnih čestice (ostale linije).

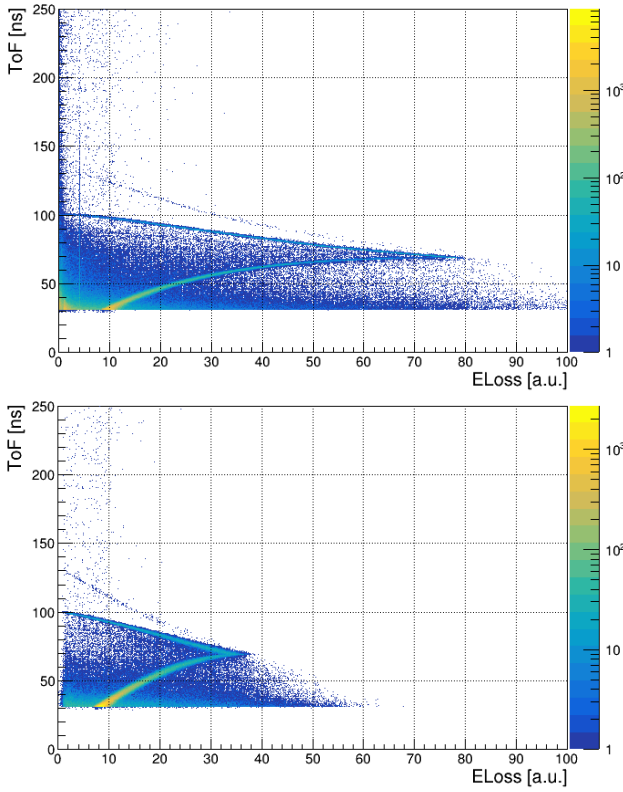
lacijskog i digitizacijskog koda preuzeti od NeuLAND-a uz potrebne preinake. Prikaz detektora i jednog događaja s upadnim protonom napravljen u R3BRoot-u dan je na Slici 5.

Nakon definicije detektora moguće je vršiti simulacije. U SAMURAI postavu nalazili su se i drugi detektori i uređaji te su kroz neke od njih čestice prolazile prije ulaska u NeuLAND kao što se može vidjeti na Slici 3. Primarno, tu je supravodljivi magnet koji je skretao nabijene čestice. U ovom pojednostavljenom pristupu on nije uključen u simulaciju. Razlog tome je i to što u R3BRoot-u imamo detektore iz R3B eksperimentalnog postava. Na RIKEN-u se ne koristi isti magnet kao na R3B-ju tako da bi njega trebalo posebno konstruirati unutar R3BRoot-a što je vremenski zahtjevno, a za sada nije neophodno za proučavanje glavnih karakteristika odziva detektora. Stoga su jedini aktivni detektori u simulacijama bili NeuLAND i VETO.

Prema gore opisanom postupku generirane su primarne čestice. Na Slici 5 prikazana je ovisnost vremena preleta protona od izvora do prve ravnine NeuLAND-a o depoziciji energije. Ta ovisnost prati Bethe-Blochovu formulu modificiranu gore opisanim efektima (I.2). Jasno uočljivu liniju (šiljak prema desno) nazivamo Bethe-Blochovom linijom. Slika 5 - gore prikazuje prvi stadij simulacije, tzv. NeuLandPoints. Svaka točka prikazuje depoziciju energije svake čestice koja je s nečime interagirala (dakle primarnih, sekundarnih i tako redom). Do ovdje veza između vremena preleta i deponirane energije glasi prema Bethe-Blochu

$$E = \int_0^L 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{(tc)^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \frac{L^2}{(tc)^2} \gamma^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2 \frac{L^2}{(tc)^2} - \delta - 2 \frac{C}{Z} \right] dx. \quad (9)$$

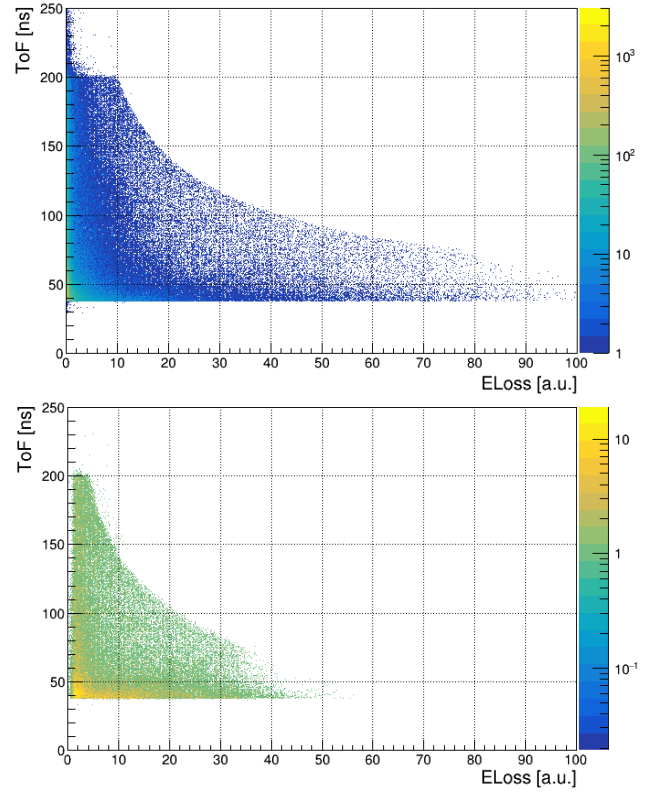
Točke koje vidimo izvan Bethe-Blochove linije mogu



Slika 5: Simulacija prolaska protona kroz prvu ravninu NeuLAND-a; prvi stadij - simulacija (NeulandPoints, gore) i drugi stadij - digitizacija (NeulandHits, dolje).

doći od interakcija sekundarnih čestica koje nastaju u interakcijama s molekulama u zraku ili VETO-u ili protona koji nisu interagirali elektromagnetski već preko nuklearne sile (procesi koje Bethe-Blochova formula ne obuhvaća). Vrijedi spomenuti da je u simulaciji takve događaje moguće izdvojiti i promotriti konkretno otokud dolaze. Također, ovdje je zgodna prilika za analizu događaja "sekundarna" Bethe Blochova linija koja se nazire iznad glavne linije. Tim postupkom može se utvrditi da ona dolazi od čestica koje su prošle kroz dio površine NeuLAND-a koji se ne preklapa s površinom VETO-a (visina NeuLAND-a je veća od visine VETO-a). Slika 5 - dolje prikazuje digitizirane podatke gdje su točke iz simulacije transformirane na način da prema formatu odgovaraju eksperimentalnim podacima, tzv. NeulandHits. Odmah je uočljivo kako je oblik Bethe-Blochove linije izmijenjen. To je zbog efekta saturacije PMT-jeva koji je implementiran u digitizeru te utjecaja Birkovog zakona (jedn. (5)). Teže nabijene čestice će u NeuLAND-u također biti predstavljene Bethe-Blochovim linijama u skladu s njihovim karakteristikama koje ulaze u Bethe-Blochovu formulu.

Neutroni u detektoru ostavljaju drugačiji trag (Slika 6). Ovdje također vidimo utjecaj saturacije i Birkovog zakona u digitiziranim podacima. Njihova energija u



Slika 6: Simulacija prolaska neutrona kroz prvu ravninu NeuLAND-a; prvi stadij - simulacija (NeulandPoints, gore) i drugi stadij - digitizacija (NeulandHits, dolje).

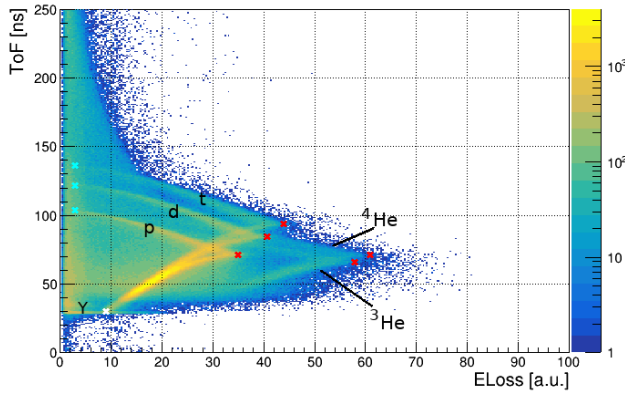
NeuLAND-u se računa iz vremena preleta preko izraza za kinetičku energiju

$$E_{ToF} = (\gamma - 1)m_n c^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{L^2}{(tc)^2}}} - 1 \right) m_n c^2. \quad (10)$$

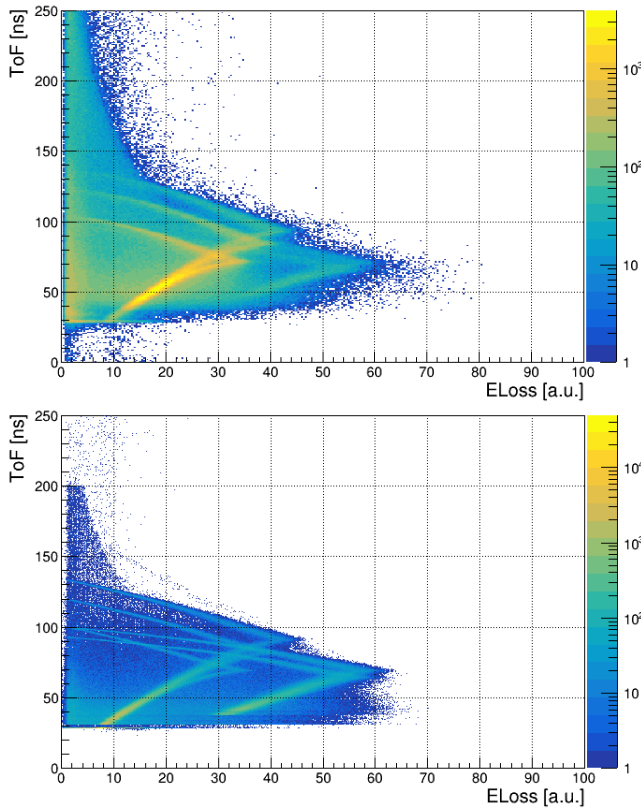
Nadalje prikazujemo samo digitizirane podatke iz simulacije. Njih je smisleno direktno uspoređivati s eksperimentom.

U eksperimentu čestice ne ulaze u detektor jedna po jedna, niti ulaze raspoređene prema vrsti. Ono što dobijemo iz eksperimentalnih podataka su mjerenja koja sadrže signale svih čestica koje izlaze iz teškoionskih sudara zajedno. Princip prema kojem je izvedeno usklađivanje simuliranih i eksperimentalnih podataka sastojao se od namještanja karakterističnih točaka odabranih u eksperimentalnim podacima na istu vrijednost u simulaciji. Odabrane točke prikazane su na Slici 7.

Najvažnije od tih su tzv. točke probijanja ravnine (označene crvenim križićima). U tim točkama nabijene čestice imaju točno dovoljno energije da prođu kroz ravninu. Ustvari predstavljaju granicu između onih koje su energiju deponirale unutar prve ravnine (veće vrijeme preleta) i onih koje su prošle prvu ravninu i imaju još energije koju će deponirati u ostalim ravninama



Slika 7: Eksperimentalni podaci s označenim česticama - označene točke odabrane za usklađivanje sa simulacijom.



Slika 8: Eksperimentalni rezultati (gore) i simulacija (dolje) - vrijeme preleta ovisno o deponiranoj energiji za prvu ravninu NeuLAND-a.

NeuLAND-a (manje vrijeme preleta). Sljedeće su točke maksimalnog vremena preleta (plavi križići) za nabijene čestice te mionski vrh koji se okvirno poklapa s brzim, minimalno ionizirajućim protonima (bijeli križić).

Da bi reproducirali rezultate eksperimenta prikazujemo simulacije svih generiranih čestica na istom histogramu. Na Slici 8 uspoređujemo rezultate eksperimenta i simulacije.

Tablica I: Vremena preleta nabijenih čestica i  $\gamma$ -zraka; prva dva stupca označavaju "punch-through", a zadnja dva maksimalna vremena preleta za eksperiment i simulaciju

Vrijeme preleta [ns] - NeuLAND				
Čestica	ToF <sub>pt,exp</sub>	ToF <sub>pt,sim</sub>	ToF <sub>max,exp</sub>	ToF <sub>max,sim</sub>
proton	71.5	69.5	103	101
deuteron	84.5	82.5	122	120
triton	93.5	91.5	136	134
jezgra $^3\text{He}$	66	65	-	200
alfa	71	69.5	-	93.5
$\gamma$	28.9	28.9	-	100

Tablica II: Energije probijanja ravnine NeuLAND-a za nabijene čestice - u prvom stupcu su eksperimentalne vrijednosti, a u drugom simulacijske

Energija [a.u.] - NeuLAND		
Čestica	E <sub>pt,exp</sub>	E <sub>pt,sim</sub>
proton	35	36
deuteron	40.8	41
triton	44	44
jezgra $^3\text{He}$	59	60
alfa	61	62
$\mu$	9	8.5

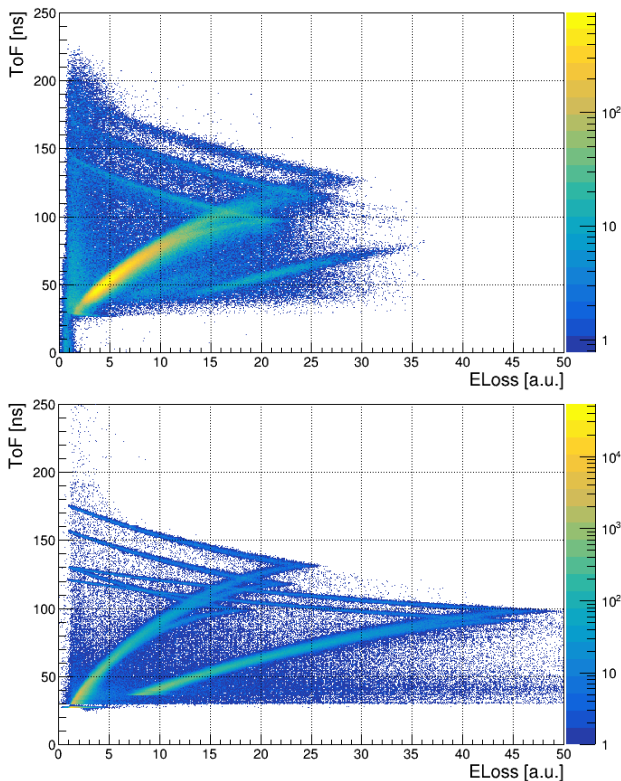
S obzirom na način prikupljanja eksperimentalnih podataka zadatak je podijeljen u dva dijela - zasebno namještanje vremenske i energetske osi. Očitane vrijednosti na vremenskoj skali prikazane su u Tablici 1.

Vrijednosti energija dane su u Tablici 2. Osim konačne razlučivosti detektora koja iznosi 150 ps u vremenu preleta i 5% od očitane vrijednosti energije, vrijednosti iz tablica imaju i pogrešku od očitavanja s histograma što slobodno procjenjujemo na najviše 1 ns i 1 MeV. S tim u vidu, možemo zaključiti da za nabijene čestice imamo zadovoljavajuće slaganje eksperimenta i simulacije.

Ista usporedba je napravljena za VETO detektor (Slika 10). Razlika koju odmah uočavamo jest da su u simulaciji prisutne linije jezgri  $^3\text{He}$  i  $^4\text{He}$ . To je najvjerojatnije zato što u elektronici za VETO postoji ograničenje na maksimalnu vrijednost signala što ostaje za provjeriti. Slaganje u vremenima preleta je kao i za NeuLAND zadovoljavajuće, a u energijama nešto lošije što pripisujemo tome što za kalibraciju VETO detektora ne možemo koristiti signale kozmičkih miona.

Nakon što imamo slaganje simulacije i eksperimenta što se tiče odziva nabijenih čestica možemo provjeriti daju li namješteni parametri dobar odziv za neutrone. Na Slici 10 -gore prikazani su neutroni u NeuLAND-u u eksperimentu (koji se mogu izdvojiti od nabijenih čestica tako da se u histogramu ne prikazuju događaji za koje je VETO nešto snimio) i simulaciji (Slika 10 - sredina i dolje).

Prvo, u eksperimentalnim podacima je uočeno kako je maksimalno vrijeme preleta neutrona (Slika 10 - gore) oko 40ak ns (ispod toga se još vide  $\gamma$ -zrake) pa je u



Slika 9: Eksperimentalni rezultati (gore) i simulacija (dolje) - vrijeme preleta ovisno o deponiranoj energiji za VETO.

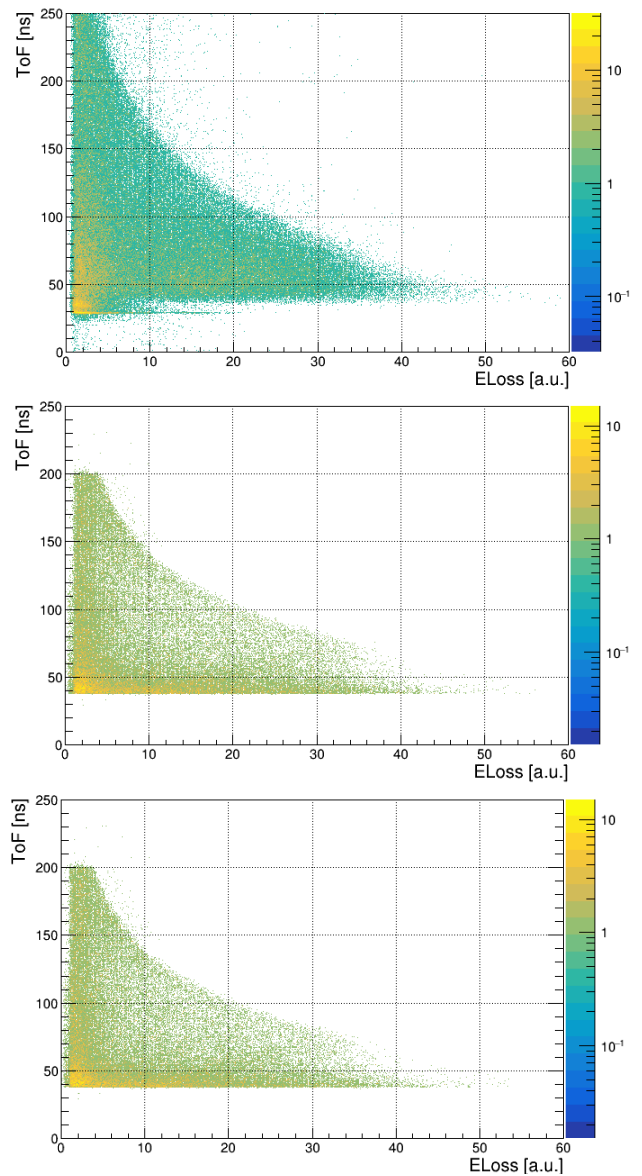
Tablica III: Vrijednosti Birkovih koeficijenata

Scintilator RP408 (equiv. BC408)	kB /gcm <sup>-2</sup> MeV <sup>-1</sup>	C /10 <sup>-6</sup> g <sup>2</sup> cm <sup>-4</sup> MeV <sup>-2</sup>
R3BRoot	0.013	9.6
Jian-Fu et al. [15]	0.015	8.4

skladu s tim gornja granica energetskog raspona generiranih neutrona smanjena na 515 MeV-a (vrijednost dobivena upotrebom formule 10). Histogrami se na očigled dobro slažu, no pažljivijom analizom može se primijetiti kako simulacija za manje energije (veća vremena preleta) daje manje vrijednosti deponirane energije.

To smo pokušali razjasniti uvidom u koeficijente koji ulaze u korekcije energije preko Birkovog zakona i saturacije. Naime, u sadašnjem kodu za simulacije koriste se jedne vrijednosti Birkovih koeficijenata dok su u [15] za isti materijal navedene druge vrijednosti kao u Tablici 3. Ipak, različite vrijednosti koeficijenata ne mijenjaju značajno rezultate dobivene s do sada korištenim vrijednostima.

Pokušano je mijenjanje koeficijenata do konačnog slaganja, no to jako mijenja rezultate dobivene za nabijene čestice. Također, u tom slučaju koeficijente je trebalo promijeniti za faktor tri što je prilično velika korekcija. Budući da nemamo pravu osnovu biti toliko sigurni da neslaganje dolazi zbog koeficijenata u Birkovom zakonu,



Slika 10: Vrijeme preleta neutrona ovisno o deponiranoj energiji za prvu ravninu NeuLAND-a, eksperimentalni rezultati - gore, simulacija (R3B-jevi Birkovi koeficijenti) - sredina, simulacija (Birkovi koeficijenti iz [15]) - dolje.

odbacujemo ovaj pokušaj objašnjenja neslaganja za neutrone. Ni mijenjanje saturacijskog koeficijenta ne rezultira boljim slaganjem. Ostaje nam zaključiti da je potrebno detaljnije razmotriti zbog čega se javlja ovakvo ponašanje kod neutrona.

#### IV. ZAKLJUČAK

U software za simuliranje R3BRoot dodan je VETO detektor - njegova geometrija, digitizer i ostali moduli potrebni za potpuno izvođenje simulacije. Na taj



način omogućena je ekvivalentna analiza podataka kao u TCP-EOS eksperimentu u kojem su NeuLAND i VETO zajednički korišteni. Odziv detektora u simulacijama uspoređen je i nakon toga usklađen sa stvarnim odzivom detektora za nabijene čestice što je temelj za daljnja proučavanja pomoću simulacija. Njihova prednost je i u tome što se može vršiti analiza pojedinih događaja. To otvara mogućnost proučavanja i boljeg razumijevanja nekih efekata koje vidimo u eksperimentalnim podacima - npr. događaja u kojem čestica prolazi kroz preklapajuć dio ploča detektora VETO. Svakako treba detaljnije proučiti odziv detektora na neutrone odnosno u čemu simulacija odskače od opisa stvarnih procesa koji

se odvijaju u interakcijama s neutronima.

Ono što također ostaje za proučiti jest distribucija i raspon energija ulaznih čestica. Ovdje smo simulirali najjednostavniji mogući slučaj - uniformnu raspodjelu u širokom rasponu energija, no prema multiplicitetima signala na histogramima jasno vidimo razliku simulacije u odnosu na eksperiment. S obzirom na motivaciju eksperimenta koji smo koristili kao izvor eksperimentalnih podataka, te raspodjele bi bilo vrlo korisno rekonstruirati budući da je omjer multipliciteta izospinskih parova veličina koja nam daje informaciju o energiji simetrije u nuklearnoj jednadžbi stanja.

- 
- [1] <https://www.gsi.de/>. Pristup: 2010-01-25.
- [2] <https://www.riken.jp/RIBF/>. Pristup: 2010-01-25.
- [3] <https://www.riken.jp/RIBF/SAMURAI/overview.html>. Pristup: 2010-01-25.
- [4] W.R.Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer - Verlag, 2 edition, 1987.
- [5] Glenn F. Knoll. *Radiation detection and Measurement*. WILEY, John Wiley and Sons, Inc., 4 edition, 2010.
- [6] C.A. Douma, K. Boretzky, I. Gašparić, N. Kalantar-Nayestanaki, D. Kresan, J. Mayer, and C. Rigollet. Investigation of background reduction techniques for the neuland neutron detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 930:203 – 209, 2019.
- [7] Technical report for the design, construction and commissioning of neuland: The high-resolution neutron time-of-flight spectrometer for r<sup>3</sup>b. Technical report, R<sup>3</sup>B Collaboration, 11 2011.
- [8] Jonathan Elijah Barney. *Charged pion emission from  $^{112}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  and  $^{124}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  reactions with the  $\pi\text{RIT}$  time projection chamber*. PhD thesis, Michigan State University, 2019.
- [9] Igor Gašparić et al. Neuland demonstrator performance in eos experiments, 2017.
- [10] M Al-Turany, D Bertini, R Karabowicz, D Kresan, P Malzacher, T Stockmanns, and F Uhlig. The Fair-Root framework. *Journal of Physics: Conference Series*, 396(2):022001, dec 2012.
- [11] Dmytro Kresan, Mohammad Al-Turany, Denis Bertini, Radoslaw Karabowicz, Anar Manafov, Alexey Rybalchenko, and Florian Uhlig. Event reconstruction and analysis in the r3broot framework. *Journal of Physics: Conference Series*, 523:012034, jun 2014.
- [12] S. Agostinelli et al. Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3):250 – 303, 2003.
- [13] [http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/reference\\$\\_P\\_L/QGSP\\$\\_BERT.html](http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/reference$_P_L/QGSP$_BERT.html). Pristup: 2020-01-23.
- [14] Jan Mayer. *Charting NeuLAND: Towards multi-neutron reconstruction with the New Large Area Neutron Detector and the virtual  $\gamma$ -ray spectrometer G4Horus*. PhD thesis, TMathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln, 2018.
- [15] Zhang Jian-Fu, Ruan Xi-Chao, Hou Long, Li Xia, Bao Jie, Zhang Guo-Guang, Huang Han-Xiong, and Song Chao-Hong. Measurements of the light output functions of plastic scintillator using  $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$  reaction neutron source. *Chinese Physics C*, jul 2010.