

SPEKTROSKOPIJA ANTIMIONSKEG PLASTIČNOG DETEKTORA

Nataša Žikić-Todorović, Sofija Forkapić, Tatjana Jovin, Ljiljana Čonkić, Miodrag Krmar
Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu

Sadržaj - Fonu γ spektrometarskih sistema doprinose sekundarna zračenja proizvedena kosmičkim mionima. Ova komponenta fona ne može se smanjiti povećanjem debljine pasivne zaštite. Zato se za redukciju kosmičkog zračenja koriste se spoljašnji zaštitni detektori velike površine (veto detektori). U ovom radu opisane su spektroskopske osobine plastičnog veto detektora «SCIONIX». Pokazano je da je energetski odgovor detektora linearan i određeni su energija i fluks miona u niskofonskoj laboratoriji departmana za fiziku u IFNS.

1. UVOD

U mnogim poljima detekcije jonizujućeg zračenja, detektori se primenjuju za probleme vezane za događaje niskih aktivnosti. Tehnika merenja niskih aktivnosti koristi se za rešavanje niza problema, od kontrole kontaminacije prehrambenih proizvoda, pa do proučavanja fundamentalnih procesa u geofizici, astrofizici, nuklearnoj i subnuklearnoj fizici. Za to su neophodni sistemi koji smanjuju *pozadinsko zračenje (fon)*. Detaljno poznavanje izvora pozadinskog šuma preduslov je za preduzimanje efektivnih mera za njegovo smanjenje.

Fon niskofonskih γ spektrometarskih sistema potiče delimično od zračenja proizvedenog *mionima* iz kosmičkog zračenja. Upravo nam ta činjenica omogućuje praćenje intenziteta sekundarnog kosmičkog zračenja, kao i njegove varijacije, koje se prepisuju zemaljskim, solarnim i galaktičkim razlozima. Ovakvi eksperimenti zahtevaju specijalnu detektorsku opremu velike osetljivosti, koja nam omogućuje da razlikujemo događaje izazvane kosmičkim zračenjem od događaja indukovanih drugim zračenjem iz okoline. Sekundarno kosmičko zračenje, koje se na nivou mora sastoji pretežno od visokoenergijskih miona, prolazeći kroz detektor gubi deo svoje energije i proizvodi deo kontinuuma u spektru. Niskoenergijski deo ovog kontinuuma ispod oko 3 MeV kombinovan je sa delom proizvedenim sa drugim zračenjima iz okoline, dok visokoenergijski deo praktično sav potiče od kosmičkih zraka, tako da ga uz specijalne detektore u niskofonskim laboratorijama možemo sa velikom tačnošću izdvojiti od ostalog dela spektra, odnosno zračenja koje dolazi iz okoline, ispitujući tako njegove karakteristike kao što su npr. energija i fluks miona na nivou mora, kao i mnoge detalje vezane za interakciju kosmičkog zračenja sa materijalom. Kada materijal detektora ima veliku gustinu, tj. kada je u tečnom ili čvrstom stanju, kao plastični (polistiren, polietilen) i tečni scintilatori (NaI) ili Ge, većina impulsa koji potiču od miona je velika u odnosu na one koji se uobičajeno registruju u γ spektrometriji (ispod 2,6 MeV) [1].

U poglavlju koje sledi biće opisan jedan od specijalnih detektora za tu namenu, plastični scintilacioni detektor «SCIONIX», koji čini aktivnu zaštitu u niskofonskoj

laboratoriji na površini, čiju spoljašnju zaštitu čine samo tavanice i zidovi zgrade. Takođe će biti opisani i procesi koje mioni indukuju interagujući sa materijalom detektora, kao i teorijska izračunavanja gubitka energije miona na jonizacione procese, pri prolasku kroz aktivni materijal detektora.

2. SPEKTROSKOPIJA MIONA SA PLASTIČNIM DETEKTOROM

2.1. Interakcija miona sa materijalom-teorijski uvod

Mioni sa materijom interaguju praktično najviše preko elektromagnetne interakcije. Zbog izuzetno velike energije imaju prodornu moć, tako da mogu prodreti duboko u površinu Zemlje. Proces koji provlađuju su jonizacija i ekscitacija, ali takođe dolazi i do sudara sa izbijanjem elektrona, i u manjoj meri, do zakročnog zračenja i stvaranja parova. Zaustavljeni negativni mioni upadaju u klopku atomskih orbita, koje su, zbog mnogo veće mase miona, mnogo bliže jezgru nego atomske orbite elektronau materijalima velikog Z . Pri tome se emituje mionsko X zračenje [1]. Radioaktivni raspad miona:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

praćen je i zahvatom miona na protonima:

$$\mu^- + p^+ \rightarrow n + \nu$$

Raspad je verovatniji u materijalima malog rednog broja, dok zahvat preovlađuje u jezgrima visokog rednog broja. Pri zahvatu otpušta se masa mirovanja miona i jezgro ostaje u visoko pobuđenom stanju. Ono se deekscituje emitovanjem jednog ili više neutrona. Broj neutrona emitovanih po jednom mionu zavisi od masenog broja jezgra. Ovi brzi neutroni generišu fotone posredstvom neutron-jezgro reakcija u materijalima sa velikim Z . Pri raspadu miona proizvode se pljuskovi elektromagnetnog zračenja [1]. Ovaj proces umnožavanja nastavlja se dok se ne dostigne kritična energija E_c , posle koje elektroni gube više energije jonizacijom nego radijacijom, a fotoni gube više energije Komptonovim rasejanjem nego proizvodnjom parova. Tada umnožavanje u pljuskov prestaje. Elektronsko-fotonske kaskade u laboratoriji mogu dolaziti i od spolja i od građevinskih materijala.

Kao što je već pomenuto, mioni, sa $E_\mu < E_c$ u interakciji sa materijom gube svoju energiju, uglavnom putem jonizacije. Srednju vrednost gubitka energije (ili zaustavne moći) miona na jonizaciju daje poznata Betha-Bloch formula [2]:

$$-\frac{dE}{dX} \approx \frac{\rho}{A} \frac{Z}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

gde je ρ gustina materijala, Z redni broj materijala, A atomski broj materijala, $\beta = v/c$, v je brzina upadne čestice, W_{\max} maksimalni energetski transfer čestice slobodnom elektronu, I minimalni jonizacioni potencijal, δ funkcija gustine koja opisuje zavisnost polarizacije sredine od gustine.

Pri tačnijim proračunima dodaju se dve korekcije: efekat gustine δ i efekat ljuske C . Srednji jonizacioni potencijal često se procenjuje iz semi empirijskih formula [2]:

$$\frac{I}{Z} = 12 + \frac{7}{Z} eV \quad Z < 13$$

$$\frac{I}{Z} = 9,76 + 58,8 Z^{-1,19} eV \quad Z \geq 13$$

U oblasti malih brzina dE/dX opada sa porastom brzine kao $1/v^2$ do minimalnog jonizacionog potencijala koji za mione iznosi $2 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$ [3]. Preko minimalne energije dE/dX logaritamski raste.

Na dovoljno visokim energijama, na gubitak energije miona značajnije utiču radijacioni procesi (proizvodnja parova, zakočno zračenje, fotonuklearne reakcije), za razliku od nižih energija gde prevladavaju procesi jonizacije. Radijacioni procesi počinju da dominiraju pri energijama upadnih miona iznad nekoliko stotina GeV.

Uobičajeno je da se piše za prosečnu vrednost gubitka energije miona piše u obliku [3]:

$$\frac{dE}{dX} = a(E) + b(E)E$$

gde je $a(E)$ gubitak energije čestica na jonizaciju dat Betha-Bloch formulom, a $b(E)$ je zbir doprinosa na proizvodnju parova, zakočno zračenje i fotonuklearnu reakciju.

Mionska kritična energija $E_{\mu c}$ može se definisati kao energija gde su radijacioni i jonizacioni gubici jednaki i definiše se kao $E_{\mu c} = a/b$. Ispod kritične energije dominiraju jonizacioni, a iznad radijacioni procesi. Pošto je $a(E) \approx 0.002 \text{ GeVg}^{-1} \text{ cm}^2$, $b(E)$ dominira kada su energetski gubici iznad nekoliko stotina GeV, gde je $b(E)$ približno konstantno [3].

2.2. Opis i karakteristike detektorskog veto sistema "SCIONIX"

Kao što je već opisano u uvodnom delu, pozadinsko zračenje (fon) γ spektrometara potiče od svojstvene (unutrašnje) radioaktivnosti detektora, okoline detektora i od kosmičkog zračenja. Radijacija koja potiče od prva dva izvora, može se redukovati rigoroznom selekcijom materijala niskih aktivnosti. Fon niskofonskih γ spektrometarskih sistema, tada, potiče uglavnom od sekundarnog zračenja proizvedenog mionima iz kosmičkog zračenje i može se redukovati smeštanjem mernog sistema duboko pod zemlju, gde je intenzitet kosmičkog zračenja smanjen za nekoliko

redova veličine. U površinskim i plitko ukopanim laboratorijama, koje su ovde od interesa, kao alternativna tehnika za redukciju fona kosmičkog zračenja koristi se metod aktivne zaštite detektora, kod koje se detektori sem pasivnog sloja materijala (materijali visoke gustine, visokog rednog broja i visoke radiočistoće) okružuju posebnim zaštitnim (guard, veto) detektorima. Veto detektori rade u antikoincidentnom režimu sa glavnim detektorom i elektronski odbacuju istovremene događaje u oba detektora. U laboratoriji na površini u IFNS, čiju spoljašnju zaštitu čine tavanice i zidovi zgrade, postavljen je jedan takav γ spektrometrijski sistem, pod nazivom CRYME (Cosmic Ray Multipurpose Experiment), u kojem aktivna zaštita okružuje pasivno zaštićen detektor (Pb, Fe i Sn). Za razliku od mnogih sličnih sistema koji se eksploatišu u podzemnim laboratorijama, sistem CRYME koristi spektralnu informaciju iz veto detektora i radi u koincidentnom režimu. Na ovaj način, za svaki registrovani događaj u glavnom detektoru znaće se da li je kosmičkog porekla, koja je energija zračenja koja ga je indukovala i iz kog pravca primarnog zračenja dolazi.

Postojeća izvedba, u niskofonskoj laboratoriji IFNS, za redukciju fona od kosmičkog zračenja, koristi plastični veto detektor tipa «SCIONIX», dimenzija $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$. Plastika od koje je izrađen ovaj detektorski sistem na bazi je polistirena (C_6H_6). Da bi se postiglo maksimalno smanjenje sekundarnog zračenja i detektovali skoro svi mioni koji ulaze u detektor, u sistemu se koristi 6 velikih pljosnatih, plastičnih detektora; četiri čine zaštitu sa strane, jedan je gornja zaštita, dok je šesti smešten centralno oko sistema na visini od oko 2 m i čini teleskop za kosmičko zračenje. Ovaj zaštitni sistem ima efikasnost detekcije od praktično 100% za mione i protone. Najveći doprinos smanjenju kosmičkog fona, oko 76% [1], daje veto detektor postavljen odgore.

2.3. Gubici energije miona na jonizaciono zračenje u detektorskom materijalu-teorijski - proračun

Srednja procena gubitka energije miona na jonizaciju, kao što je već napomenuto, izražena je preko Betha-Bloch formule. U ovom radu određene su vrednosti gubitaka kosmičkih miona na jonizaciju, pri prolasku kroz materijal aktivne zaštite detektora «SCIONIX». Detektorski materijal na bazi je plastike-polistiren (C_6H_6).

Kritična energija miona, detektora «SCIONIX», iznosi, prema formuli [3]:

$$E_{\mu c} = \frac{6224 \text{ GeV}}{(Z + 2.05)^{0.876}}$$

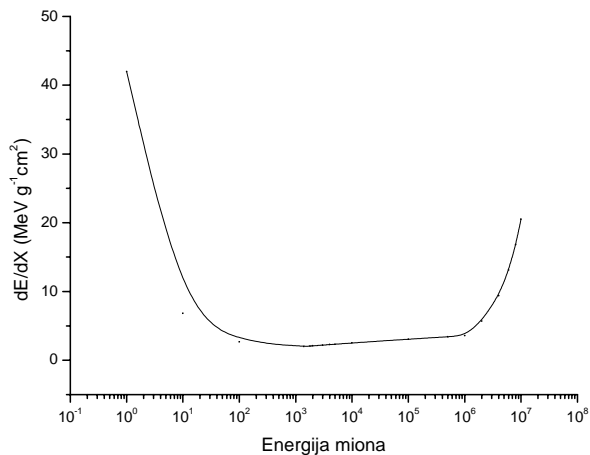
oko 1087 GeV. Iznad ove energije dominiraju radijacioni procesi sudara miona sa detektorskim materijalom. Na Sici 1 prikazan je gubitak energije kosmičkih miona u interakciji sa detektorom u funkciji od energije upadnih miona.

3. EKSPERIMENT

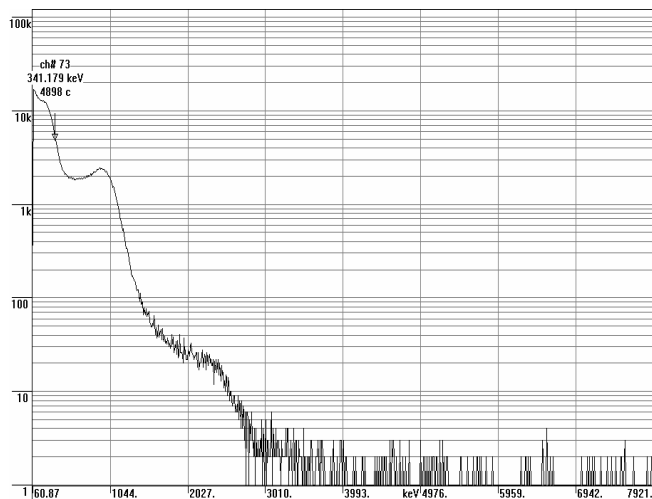
3.1. Energetska kalibracija plastičnog detektora "SCIONIX"

Da bi odredili energiju kosmičkih miona, neophodno je da izvršimo energetsku kalibraciju spektra kosmičkog

zračenja. Kalibracija je izvršena snimanjem sledećih kalibracionih izvora: Na-22 (pozitronski izvor), Co-60 i Cs-137. U spektrima ovih izvora uočene su karakteristične Komptonove ivice, dok je presek za fotoefekat zanemarljiv, zbog malog rednog broja detektorskog materijala ($Z_{eff} = 5.28$). Jedan takav spektar prikazan je na Slici 2.



Sl.1. Gubitak energije kosmičkih miona dE/dX u funkciji od energije miona



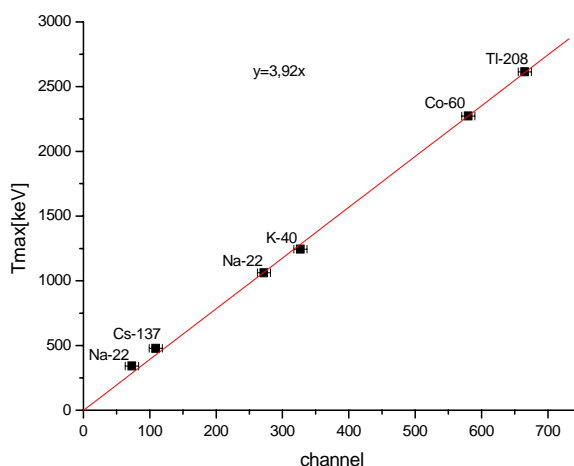
Sl.2. Spektar izvora Na-22 u aktivnoj zaštiti "SCIONIX"

Teorijski proračunate vrednosti Komptonovih ivica i pozicije ivica očitanih sa kalibracionih spektara, date su u Tabeli I.

Tab.I. Energije i pozicije Komptonovih ivica

Channel	Δ Channel	T_{compt}^{max} [keV]
73	10	341.179
109	10	477.937
272	10	1062.49
327	10	1244.202
580	10	2273.506
665	10	2614.35

Na osnovu podataka datih u Tab.1, energetska kalibraciona kriva, predstavljena je na slici 2.



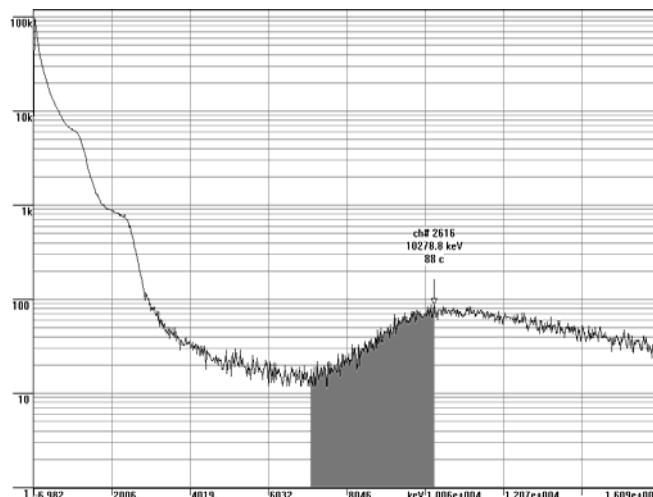
Sl. 3. Energetska kalibracija detektora "SCIONIX"

Kalibracioni faktor iznosi:

$$3.92(4)\text{keV/ch.}$$

3.2 Određivanje energije i fluksa miona na nivou mora (iz spektra)

Nakon kalibracije, pristupilo se merenju fonskog spektra u cilju određivanja energije i fluksa kosmičkih miona. U tom cilju koristili smo 5 zaštitnih detektora (4 bočna i teleskop). Vreme sakupljanja iznosilo je $t = 4000$ s, priključeni napon od $U = 1000$ V i pojačanje 30. Dobijeni spektar prikazan je na Slici 4. Nakon energetske kalibracije, očitana je vrednost energetskog gubitka vertikalne komponente kosmičkih miona i određen fluks integraljenjem ispod krive vertikalne komponente miona.



Sl.4. Fonski spektar u aktivnoj zaštiti «SCIONIX»

Kao što se uočava sa slike vrednost deponovane energije upadnih miona u detektorskom materijalu iznosi:

$$E_{\mu d}^{exp} = 10.278(28) \text{ MeV}$$

Ovoj vrednosti odgovaraju mioni sa energijama od oko 1.96 GeV. Teorijska izračunavanja pokazuju da ovoj energiji miona odgovara vrednost izgubljene energije od:

$$E_{\mu d}^{teor} = 10.814 \text{ MeV.}$$

Vrednost fluksa vertikalne komponente miona na nivou mora iznosi:

$$\Phi_{\mu}^{\text{exp}} = 54.15(11) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

4. ZAKLJUČAK

Dobijeni rezultati za energiju i fluks miona na nivou mora, kao i za deponovanu energiju miona u detektorskom materijalu, pokazali su dosta dobru saglasnost između eksperimentalnih rezultata za energiju i fluks miona na nivou mora od, sa rezultatima datim u [3] i [4]. Vrednost energije kosmičkih miona na nivou mora datim prema [3] iznosi oko 2 GeV. Rezultat dobijen na osnovu eksperimenta za vrednost energije iznosi 1,96 GeV. U [4], vrednost fluksa kosmičkih miona na nivou mora iznosi oko $56 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, dok vrednost dobijena iz eksperimenta iznosi $54.15 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Takođe je pokazano da je energetski odgovor detektora linearan.

LITERATURA

- [1] J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, "Gama spektrometrija," Univerzitetski udžbenik, Novi Sad, 2000.
- [2] William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, A how to approach," 2th ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994
- [3] R.M. Barnett et al., *Physical Review D*54, 1th ed., AIP Available from LBNL and CERN, 1996
- [4] J.F.Ziegler "Terrestrial cosmic ray intensities", *IBM Journal of Research and Development*, Vo.42, No.1, 1998

Abstract – Background in γ spectrometry systems arises mainly from secondary radiation produced by cosmic ray muons. This particular background component can not be reduced by increasing the thickness of the passive protective shielding. Therefore, large surface external protective detectors (i.e. Veto Detectors) are implemented for cosmic radiation reduction. This paper describes the spectroscopic characteristics of a plastic based «SCIONIX» detector aperture. The experiments in the low-level background surface laboratory at IFNS have shown the linear response of the detector and determined the muon flux and energy.

PLASSTIC BASED DETECTOR SPECTROMETRY

Nataša Žikić-Todorović, Sofija Forkapić, Tatjana Jovin,
Ljiljana Čonkić, Miodrag Krmar