

Važenje eksponencijalnog zakona atenuacije snopa gama zračenja u zavisnosti od debljine i vrste materijala apsorbera

Filip Haralambos Apostolakopoulos, Nikola Kržanović, Koviljka Stanković

Apstrakt— Pri proračunu i projektovanju strukturalne zaštite od zračenja potrebno je na osnovu poznavanja interakcija koje karakterišu prolaz različitih vrsta zračenja kroz materijal izvući zaključke o prolasku čestica ili kvanata zračenja kroz apsorbere različitih debljina, geometrija, izrađene od različitih materijala. U ovom radu ispituje se važenje eksponencijalnog zakona atenuacije snopa gama zračenja u zavisnosti od debljine i vrste materijala apsorbera. Kao apsorberi su korišćeni aluminijum i olovo. Eksperimentalni podaci su pokazali opseg vrednosti površinske gustine i debljine apsorbera u kome važi eksponencijalni zakon slabljenja inteziteta gama zračenja u geometriji uzanog snopa, kao i opseg vrednosti površinske gustine i debljine apsorbera u kom je neophodno uračunati faktor nagomilavanja.

Ključne reči—zakon slabljenja; koeficijent atenuacije; apsorber

I. UVOD

Sa aspekta zaštite od jonizujućeg zračenja projektuju se strukturalne fizičke barijere u cilju redukovanja nepotrebnog izlaganja zračenju profesionalno izloženih lica i stanovništva. Svrha apsorbera je da što efikasnije apsorbuju jonizujuće zračenje koje može biti veoma štetno za populaciju i životnu sredinu. Pri proračunu i projektovanju zaštite od zračenja potrebno je na osnovu poznavanja interakcija koje karakterišu prolaz različitih vrsta zračenja kroz materijal izvući zaključke o prolasku čestica ili kvanata zračenja kroz apsorbere različitih debljina, geometrija, izrađene od različitih materijala. Da bi se ovo postiglo jedan od načina projektovanja zaštite je korišćenje semi-empirijskih izraza, kao što su izrazi za zavisnost dometa različitih čestica od njihove energije. Naravno, najbolja provera karatkeristika apsorbera jeste utvrđivanje njegovih osobina i efikasnosti apsorbovanja različitih vrsta zračenja eksperimentalnim putem.

Postoji veći broj interakcija gama (γ) zračenja sa materijalom, od kojih su 3 najznačajnije u oblasti zaštite od zračenja, dok su ostale znatno manje zastupljene. To su fotoelektrični efekat (fotoelektrična apsorpcija), Komptonov (*Compton*) efekat i proizvodnja para elektron-pozitron.

Filip Haralambos Apostolakopoulos, student osnovnih studija Elektrotehničkog fakulteta, Univerzitet u Beogradu (e-mail: apostolfilip@gmail.com); Nikola Kržanović, student osnovnih studija Elektrotehničkog fakulteta, Univerzitet u Beogradu (e-mail: nikolakrzanovic@yahoo.com); Koviljka Stanković, docent Elektrotehničkog fakulteta, Univerzitet u Beogradu (e-mail: kstankovic@etf.bg.ac.rs).

Fotoelektrični efekat predstavlja apsorpciju γ fotona, pri čemu dolazi do eksitacije elektrona iz K ili L orbitale. Pobuđeni elektron može napustiti ljusku elektronskog, pri čemu za sobom ostavlja upražnjeno mesto koje se može popuniti elektronima sa viših ljuski uz emisiju karakterističnih X zraka, ili Ožeevih (*Auger*) elektrona.

Proizvodnja para takođe predstavlja iščezavanje γ fotona pri čemu nastaje par elektron-pozitron. Da bi do ove interakcije došlo neophodno je da je energija γ fotona veća od ukupne energije mirovanja nastalog para čestica-antičestica $E_{pp} = 1.022$ MeV.

Kod Komptonovog rasejanja ne dolazi do iščezavanja γ fotona već samo do promene njegovog pravca i energije, pri interakciji sa elektronima u spoljnjim ljuskama elektronskog omotača.

Verovatnoća odvijanja ovih interakcija se može izraziti pomoću mikroskopskog efikasnog preseka za te interakcije koji je srazmeran sa različitim stepenom atomskog broja materijala $\sigma_{PE} \sim Z^5$, $\sigma_{PP} \sim Z^2$, $\sigma_C \sim Z$, za fotoelektrični efekat, proizvodnju para, Komptonov efekat, respektivno.

Cilj rada je da se ispita važenje eksponencijalnog zakona atenuacije snopa gama zračenja u zavisnosti od debljine i vrste materijala apsorbera.

II. KOEFICIJENTI INTERAKCIJE ZA INDIREKTNO JONIZUJUĆE ZRAČENJE

Linearni koeficijent atenuacije (slabljenja) μ se definiše kao srednji relativni deo fotona uklonjenih iz snopa po jedinici dubine materijala:

$$\mu = \frac{1}{dx} \frac{dN}{N} \quad (1)$$

pri čemu se smatra da je snop uzak i da je pravac snopa normalan na posmatrani sloj materijala debljine dx . Totalni linearni koeficijent atenuacije predstavlja verovatnoću da foton doživi bilo koju interakciju po jedinici dubine i jednak je zbiru parcijalnih koeficijenata atenuacije pojedinih interakcija. Recipročna vrednost linearnog koeficijenta atenuacije $1/\mu$ predstavlja srednju dužinu slobodnog puta fotona, odnosno srednji put koji foton pređe između dve uzastopne interakcije. Linearni koeficijent atenuacije može da se izrazi kao proizvod koncentracije čestica mete N_m [$\#/cm^3$], na kojima fotoni mogu da dožive neku od interakcija koje ih uklanjaju iz snopa, i

totalnog mikroskopskog preseka za interakciju upadnih fotona σ na česticama mete:

$$\mu = N_m \sigma \quad (2)$$

Promena broja fotona u snopu koji pod pravim uglom nailazi na tanki sloj materijala srazmerna je broju fotona koji stižu do ovog sloja N i debljini sloja dx :

$$dN = -\mu N dx \quad (3)$$

gde se linearni koeficijent atenuacije μ pojavljuje kao konstanta proporcionalnosti i tumači se kao verovatnoća po jedinici dubine materijala dx da foton bude uklonjen iz snopa. Negativni predznak na desnoj strani jednačine označava da se broj fotona u snopu smanjuje, odnosno da je $dN < 0$. Integracijom prethodne jednačine dobija se eksponencijalni zakon opadanja broja fotona koji ostaju u snopu nakon prolaska kroz materijal debljine x :

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

gde je N_0 početni broj fotona u upadnom snopu. Ova jednačina je analogna zakonu radioaktivnog raspada i važi samo za uzak snop, što znači da zanemaruje mogućnost da do detektora sa zadnje strane materijala dospeju fotoni rasejani iz snopa koji potom dožive dodatna rasejanja. Ona ne uzima u obzir ni sekundarne fotone koji mogu da pogode detektor. Linearni koeficijent atenuacije zavisi od gustine sredine ρ . Ova zavisnost se u velikoj meri otklanja uvođenjem masenog koeficijenta atenuacije μ_m :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N} \frac{dN}{dx} \quad (5)$$

koji ima dimenziju [cm^2/g]. Pri računu sa masenim koeficijentom, debljina materijala se izražava u vidu površinske gustine [g/cm^2]. Maseni koeficijent slabljenja je definisan kao relativni deo fotona uklonjenih iz snopa u sloju materijala površinske gustine $1\text{g}/\text{cm}^2$.

Totalni maseni koeficijent atenuacije može se izraziti kao:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sum_j \sigma_j \quad (6)$$

gde je σ_j mikroskopski presek za interakciju tipa j , N_A Avogadrov broj, a M molarna masa materijala kroz koji snop fotona prolazi.

Eksponencijalni zakon slabljenja za fotone važi samo ako se radi o uskom monoenergetskom snopu fotona. U geometriji uskog snopa, do detektora iza materijala stižu samo fotoni primarnog snopa koji ne dožive interakciju (rasejanje ili apsorpciju). Kada se radi o širokom snopu, broj fotona koji pogađa detektor je veći. Pored fotona primarnog snopa koji nisu promenili pravac, detektor pogađaju fotoni primarnog snopa koji su se rasejali ali su ipak stigli do detektora, a takođe i sekundarni fotoni nastali u interakcijama primarnog snopa ili u interakcijama sekundarnih naelektrisanih čestica. Veličina kojom se uzima u obzir uticaj rasejanih i sekundarnih fotona je

faktor nagomilavanja (*build-up factor*) B . U opštem slučaju, faktor nagomilavanja može da se izrazi kao odnos efekta koji proizvode svi fotoni koji pogađaju detektor (primarni, rasejani i sekundarni) iza nekog materijala i efekta primarnih fotona preostalih nakon prolaska kroz materijal. Uzimajući nagomilavanje u obzir, za ukupan broj fotona sa zadnje strane materijala debljine x dobija se izraz:

$$N = N_0 e^{-\mu x} B \quad (7)$$

Za faktor nagomilavanja važi $B \geq 1$, pri čemu je za uzak snop $B=1$. Faktor nagomilavanja zavisi od više činilaca: energije i ugaone raspodele zračenja, atomskog broja i debljine atenuatora, širine snopa, geometrije izvora i atenuatora, međusobnog položaja izvora, atenuatora i detektora, kao i od fizičke veličine u odnosu na koju se definiše.

III. STATISTIKA RADIOAKTIVNOG RASPADA

Radioaktivni raspad je stohastički proces, i shodno tome merenje emitovane količine zračenja pri radioaktivnom raspadu se može opisati određenim statističkim fluktuacijama. Ove inherentne fluktuacije mogu biti dominantan uzrok mernih nesigurnosti pri merenju [1,2].

Poisson-ova raspodela predstavlja specijalan slučaj binomne raspodele, koja opisuje binarne procese sa konstantnom i malom verovatnoćom uspeha pri svakom pokušaju ($p \ll 1$). Ovom raspodelom se može opisati većina eksperimenata brojanja u nuklearnoj fizici gde je broj nuklida u uzorku veliki, a vreme merenja je mnogo manje u poređenju sa vremenom poluraspada radioaktivnog jezgra. Pozadinsko zračenje podleže *Poisson*-ovoj raspodeli:

$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x e^{-\bar{x}}}{x!} \quad (8)$$

gde je x slučajna promenljiva. Neophodan parametar za *Poisson*-ovu raspodelu je prvi moment te raspodele koji predstavlja proizvod ukupnog broja pokušaja n i verovatnoće uspešnih pokušaja p . Prvi moment ove raspodele je jednak prvom momentu binomne raspodele. Varijansa σ^2 *Poisson*-ove raspodele je jednaka srednjoj vrednosti te raspodele \bar{x} , pri čemu je σ standardna devijacija.

Gauss-ova raspodela predstavlja uprošćenje binomne raspodele kod koje takođe važi uslov $p \ll 1$, pri čemu je srednji broj uspeha relativno visok (veći od 30). Ova raspodela je takođe opisana jednim parametrom, prvim momentom $\bar{x} = np$, dok je varijansa takođe jednaka $\sigma^2 = np$ [3,4]. Pošto je merenje ponovljeno veliki broj puta, rezultati merenja podležu *Gauss*-ovoj raspodeli:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{x}}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\bar{x}}\right) \quad (9)$$

IV. EKSPERIMENT

U eksperimentu je korišćen tačkasti radioaktivni izvor $^{137}_{55}\text{Cs}$ (γ emiter koji emituje γ foton energije $E_\gamma = 662 \text{ keV}$, sa vremenom poluraspada $T_{1/2} = 33 \text{ a}$). Izvor emituje γ fotone u

približno usmerenom snopu. Radni napon Gajger-Milerovog brojača je postavljen na $U = 400$ V, i merenja su vršena u vremenskim intervalima od jedan minut. Impulsi koje Gajger-Milerov brojač detektuje, ne potiču isključivo od $^{137}_{55}\text{Cs}$, već na broj detektovanih impulsa utiče i neusmereno spontano radioaktivno zračenje koje dolazi iz okoline – pozadinsko zračenje (tkzv. fon). Merenje uticaja pozadinskog zračenja je ponovljeno 30 puta u intervalima od jedan minut. Kao što je već pomenuto pozadinsko zračenje podleže *Poisson*-ovoj raspodeli. GM brojač je korigovan na mrtvo vreme [5]. Merenje apsorpcije γ zračenja je vršeno u slučaju dve vrste apsorbera, slojeva od $^{27}_{13}\text{Al}$ i $^{207}_{82}\text{Pb}$ različite površinske gustine, odnosno različite debljine. Pri merenju atenuacije se između brojačke cevi i $^{137}_{55}\text{Cs}$ izvora postavljaju pomenuti apsorberi. Najpre je izmeren broj impulsa kada apsorberi nisu postavljeni. Nakon toga su postavljani apsorberi od $^{27}_{13}\text{Al}$ površinskih gustina u rasponu $6.38 - 1761.68$ mg/cm^2 . Apсорberi na bazi $^{207}_{82}\text{Pb}$ su pločice debljine u opsegu $0.1 - 1$ cm. Sva merenja apsorpcije γ fotona su ponovljena 30 puta u intervalima od po jedan minut. Zračenje koje potiče od izvora $^{137}_{55}\text{Cs}$ podleže *Gauss*-ovoj raspodeli [6].

Na slici 1 prikazana je aparatura korišćena u eksperimentu, a na slici 2 prikazani su setovi apsorbera $^{27}_{13}\text{Al}$ i $^{207}_{82}\text{Pb}$.



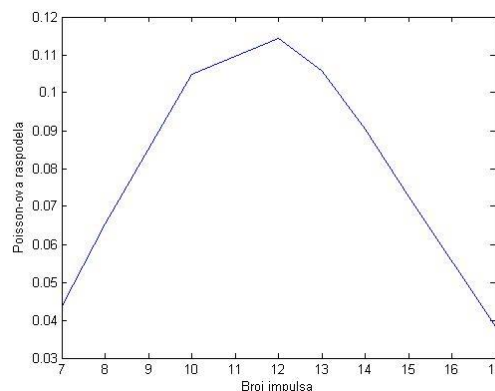
Sl.1. Fotografija merne aparature korišćene u eksperimentu



Sl.2. Fotografija setova apsorbera korišćenih u eksperimentu

V. REZULTATI

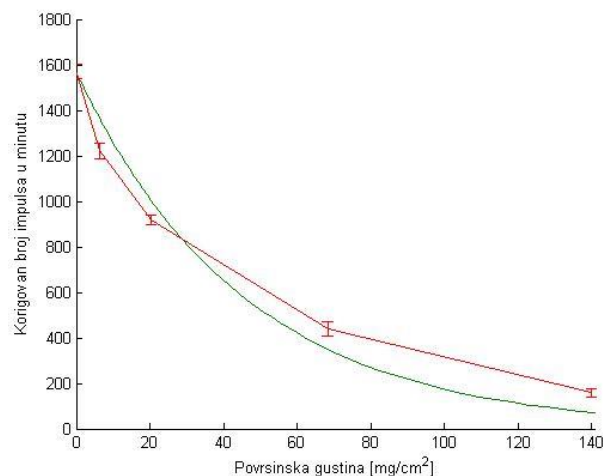
Na slici 3 je prikazana raspodela impulsa pozadinskog zračenja dobijena tokom eksperimentalnog postupka.



Sl. 3. *Poisson*-ova funkcija gustine verovatnoće za broj impulsa pozadinskog zračenja.

Na slici 4 prikazana je zavisnost broja impulsa u minutu u zavisnosti od površinske gustine apsorbera od aluminijuma manje od 140 mg/cm^2 koja je dobijena eksperimentalno. Takođe, na slici 4 je prikazana kriva dobijena fitovanjem eksperimentalnih podataka na eksponencijalno opadajuću funkciju oblika ae^{-bx} .

Na slici 5 je prikazana zavisnost broja impulsa u minutu u zavisnosti od površinske gustine apsorbera od aluminijuma koja je dobijena eksperimentalno, kao i fitovani podaci na eksponencijalno opadajuću funkciju oblika ae^{-bx} .



Sl. 4. Prikaz korigovanog broja impulsa u minutu u zavisnosti od površinske gustine Al apsorbera, za površinske gustine manje od 140 mg/cm^2 .

VI. ZAKLJUČAK

U radu je ispitivano važenje eksponencijalnog zakona atenuacije snopa gama zračenja u zavisnosti od debljine i vrste materijala apsorbera. Kao apsorberi su korišćeni aluminijum i olovo. Prema dobijenim rezultatima pokazan je opseg vrednosti površinske gustine i debljine apsorbera u kome važi eksponencijalni zakon slabljenja inteziteta gama zračenja u geometriji uzanog snopa, kao i opseg vrednosti površinske gustine i debljine apsorbera u kom dolazi do odstupanja od ovog izraza, i u kom se u proračunu strukturalne zaštite mora uračunati faktor nagomilavanja. Dobijeni rezultati imaju primenu u proračunima strukturalne zaštite od gama zračenja u oblasti zaštite od zračenja.

ZAHVALNICA

Rad je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja republike Srbije u okviru projekta 171007.

LITERATURA

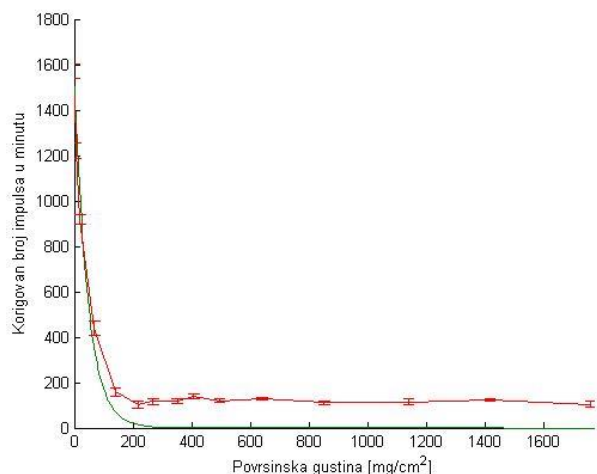
- [1] Evans, R. D., *The Atomic Nucleus*, McGraw-Hill, New York, 1955.
- [2] Green, A., *Nuclear Physics*, McGraw-Hill, New York, 1955.
- [3] Stankovic, K., Vujisic, M., Delic, Lj., Influence of Tube Volume on Measurement Uncertainty of GM Counters, *Nuclear Technology & Radiation Protection* 25 (2010) 1, pp. 46-50.
- [4] Knoll, G.F., *Radiation Detection and Measurement*, Wiley, New York, 1979.
- [5] *Radiation Protection*, 23 (2008), 1 pp. 41-43 ***, IAEA Safety Reports Series, No. 16, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, Vienna, 2000.
- [6] Burcham, W.E., *Nuclear Physics – An Instruction*, Longman Group Limited, London, UK, 1972.

ABSTRACT

The calculation and design of radiation protection shielding should be based on the interactions that characterize the passage of various types of radiation through the material to draw conclusions about the passage of particles or quanta of radiation through absorbers of different thickness, geometry, made of different materials. This paper examines the validity of the exponential law of attenuation for a beam of gamma radiation, depending on the thickness and type of material of the absorber. Aluminium and lead were used as absorbers. Experimental data showed a range of values of the surface density and the thickness of the absorber in which the exponential law of attenuation of gamma rays can be applied in the narrow-beam geometry, as well as the range of values of the surface density and the thickness of the absorber where it is necessary to include the build-up factor.

The validity of the exponential law of attenuation for the beam of gamma radiation in depending on the thickness and type of material of the absorber

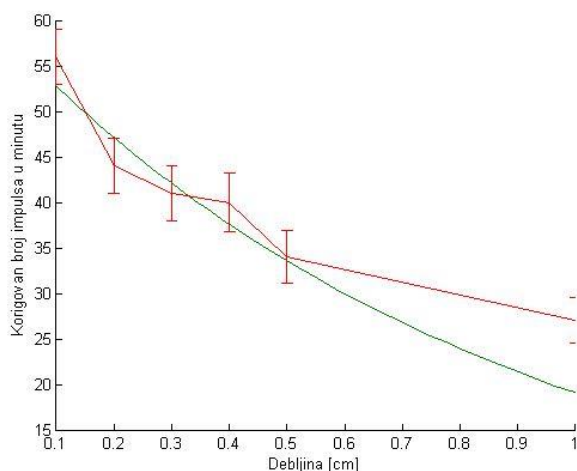
Filip Haralambos Apostolakopoulos, Nikola Kržanović, Koviļjka Stanković.



Sl. 5. Prikaz korigovanog broja impulsa u minutu u zavisnosti od površinske gustine Al.

Na osnovu rezultata sa slika 4 i 5 uočava se da za površinske gustine manje od 200 mg/cm² zavisnost je eksponencijalno opadajuća, dok za površinske gustine veće od 200 mg/cm² zavisnost dobija asimptotski karakter, što se može pripisati faktoru nagomilavanja i pojavi zakočnog zračenja u materijalu apsorbera. ¹³⁷Cs je β^- radioaktivan nuklid. Pri emisiji β^- čestice moguća su dva scenarija radioaktivnog raspada pri čemu mogu nastati ¹³⁷Ba ili ^{137m}Ba. Pri relaksaciji ^{137m}Ba dolazi do emisije γ fotona energije 662 keV, što je korisni signal u ovom eksperimentu. Ukoliko se emituje β^- čestica tako da je produkt radioaktivnog raspada stabilan ¹³⁷Ba, tada ova čestica ima dovoljno veliku energiju da izazove zakočno zračenje koje je posledica interakcije sa poljem jezgra atoma apsorbera, tako da se pri površinskoj gustini apsorbera većoj od 200 mg/cm² u izraz za zakon eksponencijalnog slabljenja inteziteta snopa gama zračenja mora uračunati faktor nagomilavanja B (za geometriju širokog snopa).

Na slici 6 je prikazana zavisnost broja impulsa u minutu od debljine apsorbera od olova u rasponu 0.1 – 1 cm koja je dobijena eksperimentalno, kao i fitovani podaci na eksponencijalno opadajuću funkciju oblika ae^{-bx} .



Sl. 6. Prikaz korigovanog broja impulsa u minutu u zavisnosti od debljine Pb.