

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



**ЗБОРНИК
РАДОВА**

**XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ
Сребрно језеро
27- 29. септембар 2017. године**

**Београд
2017. године**

**SOCIETY FOR RADIATION PROTECTION OF
SERBIA AND MONTENEGRO**



PROCEEDINGS

**XXIX SYMPOSIUM DZZSCG
Srebrno jezero
27- 29. September 2017**

**Belgrade
2017**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ
27-29.09.2017.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Др Борислав Грубор

Уредници:

Др Јелена Станковић Петровић
Др Гордана Пантелић

ISBN 978-86-7306-144-3

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Јелена Станковић Петровић, Гордана Пантелић

Штампа:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2017.

SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE FFF TERAPIJSKIH FOTONSKIH SNOPOVA MERENE FOTOAKTIVACIJOM ^{115m}IN

Arpad TOTH¹, Arif EFENDI², Elemer SZIL³, Nevena IGNJATOV⁴, Nikola JOVANČEVIĆ¹, Jan HANSMAN¹ i Miodrag KRMAR¹

1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija, arpad.toth@df.uns.ac.rs

2) Prince of Songkla University, Faculty of Sciences, Amphoe Hat Yai, Thailand, arief.sadanoer@gmail.com

3) Klinika za onkoterapiju, Segedin, Mađarska, szil.elemer@med.u-szeged.hu

4) Institut za plućne bolesti Vojvodine, Sremska Kamenica, Srbija ignjatov.nevena@gmail.com

SADRŽAJ

Fotonski snopovi FFF (*Flattening Filter Free*) terapijskih linearnih akceleratora zbog bitno redukovane filtracije poseduju i niskoenergetsku komponentu. Aktivacijom izomernog stanja ^{115m}In u sredini polja, kao i na njegovim ivicama načinjen je pokušaj da se uporede spektralne karakteristike standardnih FF i FFF snopova. Merenja su vršena u snopovima od 6 MeV na dva različita tipa akceleratora. Uprkos činjenici da je kod obe vrste akceleratora dozni profil polja jednak, saturacione aktivnosti aktiviranih uzoraka od prirodnog In se veoma razlikuju što ukazuje na značajne razlike u obliku spektra.

1. UVOD

Zakočno zračenje fotona u MeV-skomben energetskom opsegu preferentno se emituje unapred a intenzitet i energija primarnih fotona zavisi od ugla emisije. Da bi se kompenzovao ovaj efekat u glavu medicinskog linearnog akceleratora postavlja se filter za poravnanje (*Flattening Filter-FF*), što rezultuje skoro uniformnom dozom preko zračnog polja na određenoj dubini. FF je lociran između primarnog kolimatora i mete mada konfiguracija zavisi od proizvođača. Moderni FF su obično koničnog oblika, sastavljeni su od materijala srednjeg ili visokog rednog broja i debljina u sredini im je nekoliko centimetara kako bi proizveli ravan profil snopa [1-2].

FF je jedan od glavnih uzročnika rasejanog zračenja u glavi akceleratora. Doprinos ovog rasejanog zračenja u velikoj meri zavisi od veličine polja [3-5], i može da doprinese 3% -10% ukupnom fluksu fotona u izocentru. Kod FFF glavni uzročnik rasejanih fotona je uklonjen što rezultuje smanjenom zavisnošću rasejanog zračenja od veličine polja za bilo koj tip FFF akceleratora. Uvođenjem FF u fotonski snop, dolazi do pojave rasejanja i van samog terapijskog snopa tako da su ovi filteri glavni izvor rasejanog zračenja glave akceleratora. Dobro je poznato da distribucija doze u build-up regionu zavisi i od sekundarnih (rasejanih, parazitskih) elektrona, a u nekim slučajevima i od pozitrona. Kod FFF glavni uzročnik sekundarnih elektrona je uklonjen. Kao posledica smanjene kontaminacije elektronima, dubina maksimalne doze varira manje od veličine polja za FFF.

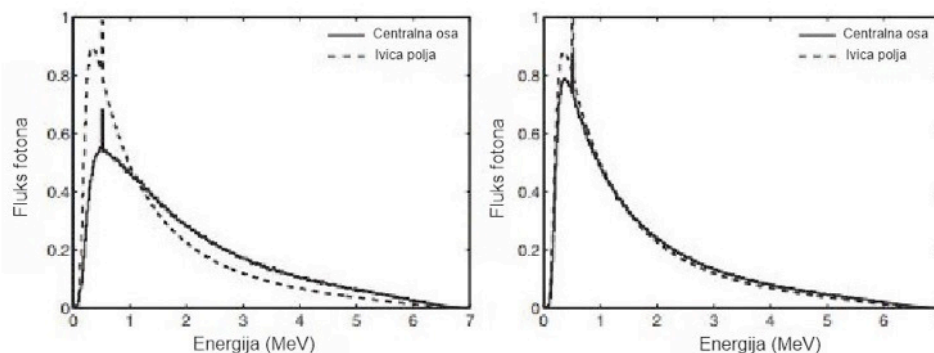
Manja filtracija kod FFF akceleratora kao konačan rezultat ima mekši snop zračenja (prisutnu niskoenergetsku komponentu). Najznačajniji efekat mekšeg snopa je povećanje površinske doze, mada su eliminisani rasejano zračenje i parazitski elektroni. Efekat je manja varijacija površinske doze od veličine polja u poređenju sa FF snopom. Uopšteno nefiltrirani snopovi proizvode veću površinsku dozu za male veličine polja u

poređenju sa FF snopovima i slične ili čak manje površinske doze za velika polja [6-8]. Površinska doza zavisi od energije snopa i spektra, ali uopšteno je veća za niže energije. Povećanje brzine doze je jedan od najočiglednijih efekata uklanjanja FF-a. Zabeleženo je povećanje jačine doze na 800 MU/min a u nekim slučajevima i više od dva puta u odnosu na FF snop.

Spektar fotonskog zračenja terapijskog snopa, predstavlja veličinu koja se ne može direktno meriti. Zbog toga, nije praksa da se određuje spektar zračenja u ustanovama za radioterapiju, iako postoje različite metode, npr. rekonstrukcija spektra iz transmisionih merenja, fotoaktivacija i dr. Većina do sada objavljenih radova o spektru nefiltriranog snopa zasnovane su na Monte Carlo metodama [9-13]. Osnovna ideja ovog rada je da se proverí da li je moguće jednostavnim fotoaktivacionim merenjima dobiti neku informaciju o razlikama fotonskog spektra FF i FFF terapijskih snopova. Kao aktivacioni detektor upotrebljen je prirodni indijum. Konkretno je posmatrana nuklearna reakcija $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$, ili pobuđivanje izomernog stanja $^{115\text{m}}\text{In}$. Period poluraspada izomernog stanja $^{115\text{m}}\text{In}$ je 4,486 časova.

2. OPIS EKSPERIMENTA I OSNOVNI PARAMETRI FF I FFF FOTONSKOG SNOPA

S obzirom da FF vrši selektivnu atenuaciju fotonskog snopa, znatno više na niskim nego na visokim energijama, njegovo uvođenje u izvesnoj meri uklanja niskoenergetsku komponentu, ili kako se to obično kaže kao rezultat daje čvršći snop. Spektar nefiltriranog snopa sadrži veći udeo niskoenergetskog zračenja tako da je znatno mekši (slika 1). Sa slike 1, vidimo još jedan efekat. Energetski fluks fotona za FFF je povećan što rezultuje povećanom dozom po puls.



Slika 1. Normirani spektar fotona u vazduhu dobijen MC simulacijama a) bez b) sa filterom za akcelerator nominalne energije 6 MeV (Dalaryd et al. [14])

Merena doza fotonskog zračenja D , kao i prinos fotonuklearne reakcije R zavise od oblika energetskog spektra fotona Φ :

$$D = \int_0^{E_{max}} \mu_{en}(E) E \Phi(E) dE \quad (1)$$

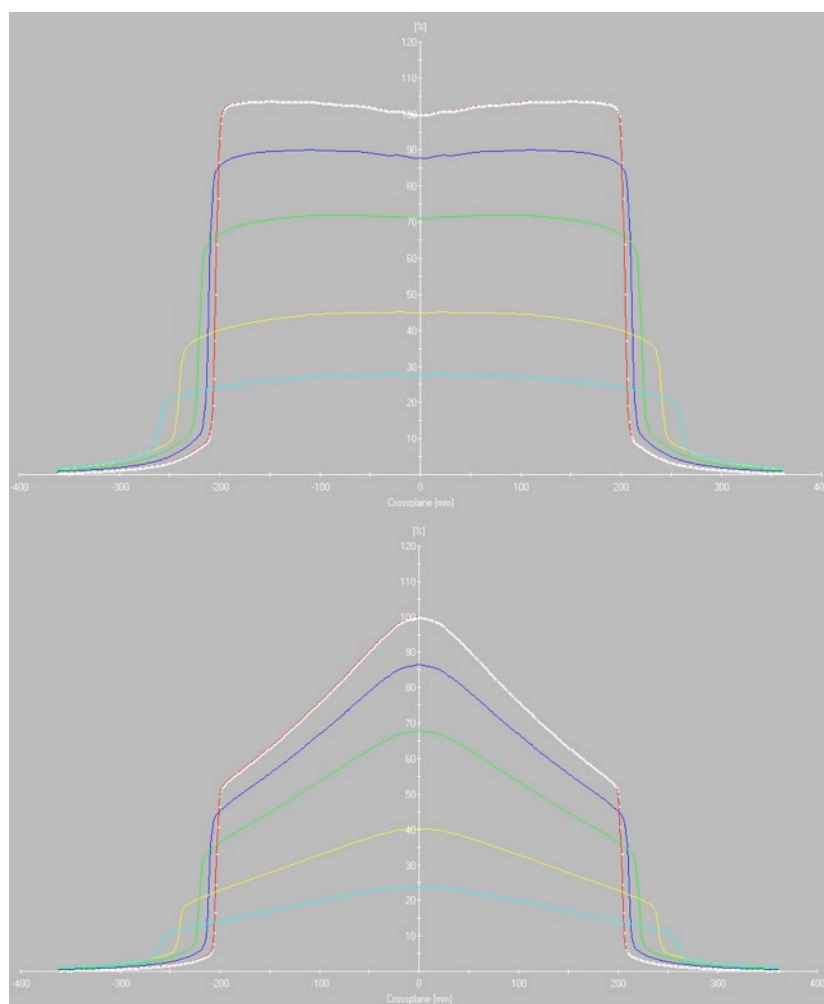
$$R = \int_{E_{th}}^{E_{max}} \sigma(E) \Phi(E) dE \quad (2)$$

Doza zavisi od apsorpcionih svojstava materijala, tj. od masenog apsorpcionog koeficienta $\mu_{en}(E)$ u kome se fotoni kreću, a prinos fotoaktivacije zavisi od efikasnog preseka $\sigma(E)$ za posmatranu nuklearnu reakciju. Ove se dve veličine veoma razlikuju.

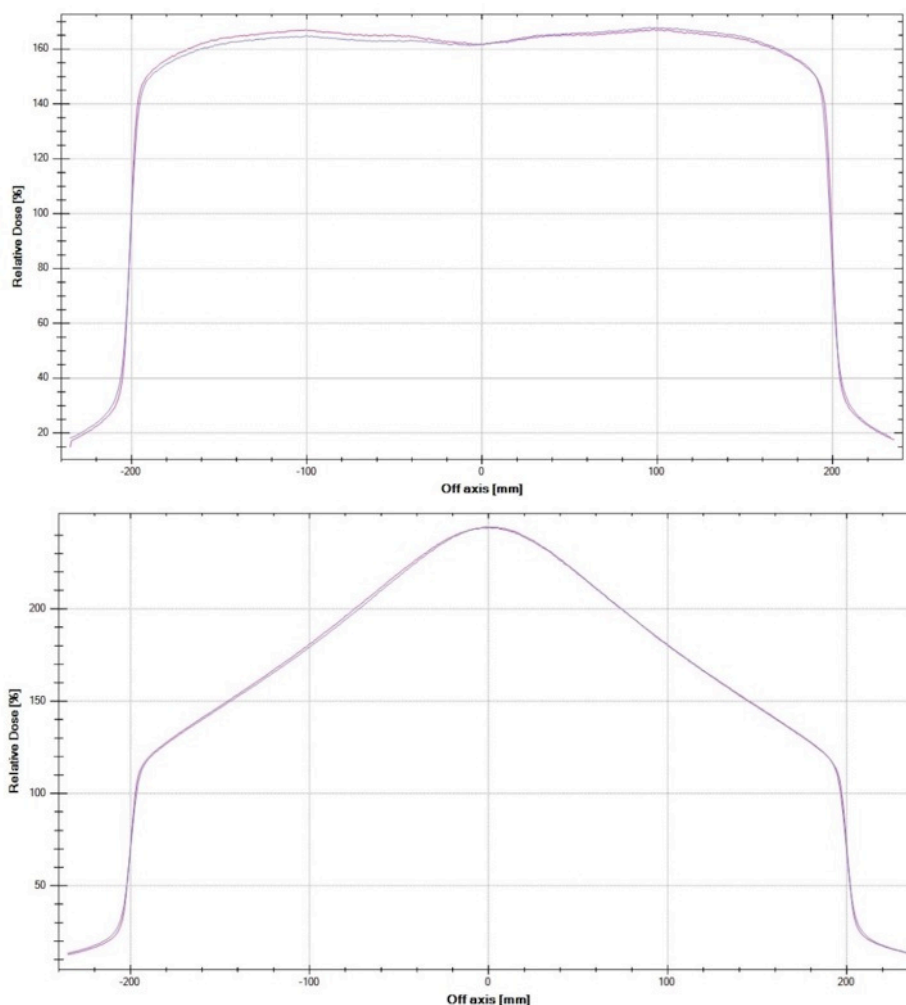
Maseni apsorpcioni koeficijent koji određuje dozu veoma brzo opada sa energijom, dok efikasni presek za fotoaktivaciju ima prag na niskim energijama (E_{th}) i najviše vrednosti su mu baš na visokim energijama, do 10 MeV. To znači da je doza osetljiva na promene spektra fotona u niskoenergetskoj oblasti, dok fotoaktivacije mogu da uoče promene spektra fotona u visokoenergetskom delu spektra.

Različiti spektar i srednja energija nefiltriranog snopa ogleda se u distribuciji dubinske doze. Krive dubinske doze nefiltriranog snopa pokazuju strmije opadanje u eksponencijalnom regionu u poređenju sa dubinskom dozom snopa sa FF slične nominalne energije. Distribucija dubinske doze nefiltriranog 6 MeV snopa odgovara standardnom 4-5 MeV snopu i 18 MeV FFF odgovara standardnom 15 MeV [6-7].

Kada se definišu referentni parametri profila fotonskog snopa, dubina je bitan parametar budući da raspodela doze zavisi od lateralne varijacije kvaliteta snopa. Bez FF, lateralni profil doze se značajno razlikuje od tipičnog ravnog profila snopa sa FF. Sa povećanjem energije sve je izražajniји pik, što se može objasniti manjim uglovima rasejanja na većim energijama (slike 2, 3).



Slika 2. Profila snopa Varian TrueBeam akceleratora određenog na različitim dubinama 14 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm i 300 mm u vodi za FF (gore) i FFF(dole) za polje 40x40 cm



Slika 2. Profila snopa Elekta VersaHD akceleratora određenog na dubini od 100 mm, u vodi za FF (gore) i FFF(dole) za polje 40x40 cm

3. MERENJA

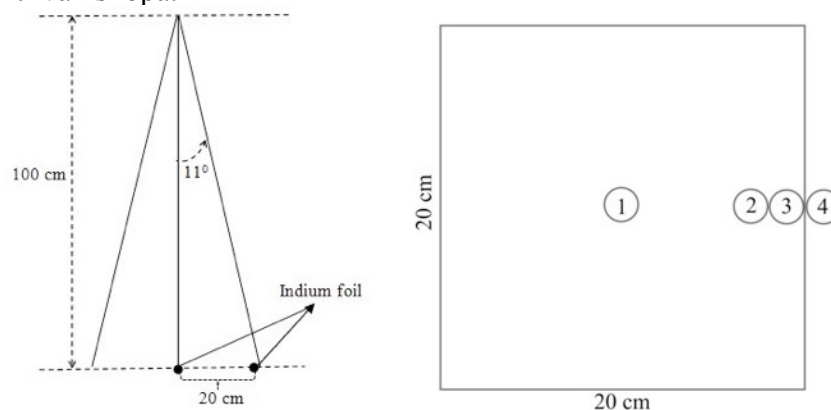
Za merenje određenih spektralnih karakteristika fotonskog snopa medicinskog linearnog akceleratora koristi se fotoaktivaciona tehnika. Prilikom izlaganja neke odabrane mete snopu fotona, dolazi do stvaranja izvesne količine radioaktivnog produkta neke od fotonuklearnih reakcija. Nakon ozračivanja mete, meri se spektar gama zračenja kojeg emituje produkt fotonuklearne reakcije koristeći neki gama spektroskopski uređaj. Na osnovu intenziteta odabrane gama linije u spektru, moguće je izračunati saturacionu aktivnost R . Ova veličina predstavlja verovatnoću da se nuklearna reakcija desi u jedinici vremena po jednom atomu izotopa. Na osnovu merenja intenziteta gama linije u spektru, R se može izračunati na sledeći način:

$$R = \frac{N_\gamma \lambda A}{m N_A \epsilon \eta e^{-\lambda \Delta t} (1 - e^{-\lambda t_m}) (1 - e^{-\lambda t_{irr}})} \quad (3)$$

gde je N_γ broj registrovanih gama kvanata određene energije, λ konstanta radioaktivnog raspada, A maseni broj ozračenog izotopa, m masa aktivacionog detektora, N_A Avogadrov broj, ϵ efikasnost detektora za određenu energiju, η prirodna zastupljenost aktivi-

ranog izotopa, Δt vreme hlađenja, t_m vreme merenja, t_{irr} vreme ozračivanja. Merenja su vršena na dva medicinska akceleratora, Varian TrueBeam (Klinika za onkoterapiju, Segedin) i Elekta VersaHD (Institut za plućne bolesti Vojvodine, Sremska Kamenica) koji imaju mogućnost rada u FF i FFF modu. Kod oba akceleratora korišćeni su sledeći parametri: nominalna energija 6 MeV, SSD 100 cm, veličina polja 40x40 cm, jačina doze 1400 MU/min za FFF mod rada, 600 MU/min sa FF u snopu, vreme ozračivanja 4 min. Kao fotoaktivacioni detektor korišćeni su novčići ^{115}In , diametra 2 cm i mase oko 12 g. Spektar gama zračenja indijuma meren je poluprovodničkim germanijumskim HPGe detektorom proizvođača Canberra. Detektovana je gama linija od 336,2 keV, koja se emituje prilikom deekscitacije izomernog stanja ^{115m}In . Merenje indijumskog detektora na HPGe spektrometru vršeno je dovoljno duga da statistička neodređenost intenziteta posmatrane gama linije od 336,2 keV bude manja od 2%.

Kako bi se ispitala spektralne karakteristike fotonskog snopa, ozračivanje indijumskih detektora vršeno je u dve konfiguracije. U prvoj konfiguraciji (slika 3) jedan indijumski detektor postavljen je u centar snopa, a drugi na ivicu snopa. Ozračivanje je vršeno sa FF i FFF modom. U drugoj konfiguraciji (slika 3) merenje je vršeno samo u FFF modu i to tako da je jedan indijumski detector postavljen u sredinu snopa, drugi i treći na ivicu snopa, četvrti van snopa.



Slika 3. Šematski prikaz konfiguracije indijumskih detektora kod ozračivanja

Kako bi ispitali ugaonu zavisnost emisije gama zračenja, uporedili smo saturacione aktivnosti na različitim pozicijama snopa. Prilikom poređenja na osnovu jednačine 1 dobijamo:

$$\frac{R(\theta)}{R(0^\circ)} = \frac{N_\gamma(\theta)m(0^\circ)e^{-\lambda\Delta t(0^\circ)}(1-e^{-\lambda t_m(0^\circ)})}{N_\gamma(0^\circ)m(\theta)e^{-\lambda\Delta t(\theta)}(1-e^{-\lambda t_m(\theta)})} \quad (4)$$

Sve veličine u gornjoj jednačini koje se odnose na sredinu polja su označene sa (0°) , dok su veličine koje se odnose na neki položaj van ose snopa, tj. Posmatrane su u nekoj tački pod određenim uglom, označene su sa (θ°) .

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Kao prvu informaciju o kvalitetu fotonskog snopa uporedili smo saturacione aktivnosti dve vrste akceleratora, i to u oba moda rada. Kod Elekting akceleratora u FFF modu u sredini polja zabeležena je 3,38 puta veća saturaciona aktivnost u odnosu na Varian, a na ivici polja taj odnos je 2,05. Evidentno je da se za istu dozu fotonskog zračenja

dobija veoma različita saturaciona aktivnost. Ova vrednost i ukazuje da je snop Elektnog akceleratora znatno tvrđi od Varijanovog, tj. Sadrži znatno više fotona visoke energije što dovodi do znatno većeg broja fotoaktivacija. Na ivici polja je ta razlika nešto malo manja, ali još uvek Elektni akcelerator ima znatno tvrđe zračenje. Uporedili smo I saturacione aktivnosti u FF modu i zabeležili da odnos (Elekta/Varian) u sredini polja iznosi 1,39, a na ivici polja 1,78. Ove vrednosti ukazuju da je razlika u obliku spektra znatno manja nakon filtracije. U prvoj konfiguraciji prikazanoj na slici 3 uporedili smo saturacione aktivnosti u centru polja i na ivici za FF moda rada oba akceleratora. Kod akceleratora proizvođača Varian saturaciona aktivnost u centru polja u FF modu je 1,28 puta veća nego na ivici. Kod akceleratora proizvođača Elekta zabeležen je isti odnos (1,00) u centru u odnosu na ivicu u FF modu. Odavde vidimo da je kod Varijanovog akceleratora u FF modu rada snop nešto malo tvrđi u centru nego na ivici polja, dok kod Elektnog akceleratora ta razlika ne postoji.

Rezultati poređenja saturacionih aktivnosti na različitim pozicijama indijumskih detektora za oba akceleratora u FFF modu dati su u tabeli 1. Ni kod jednog akceleratora nije zabeležena merljiva aktivnost indijumskog novčića van polja, tj. u poziciji 4 indijumskog detektora.

Tabela 1. Poređenje saturacionih aktivnosti u različitim delovima polja u FFF modu akceleratora (indeksi odgovaraju pozicijama detektora na slici 1)

	Varian TrueBeam	ElektaVersaHD
R ₁ /R ₂	2,305313	2,558442
R ₁ /R ₃	2,008007	2,490731
R ₂ /R ₃	0,871034	0,973535

Iz gornje tabele možemo videti da je u FFF režimu rada saturaciona aktivnost preko dva puta veća u sredini polja nego na njegovoj ivici. Ova se tendencija jasno uočava kod oba proizvođača sa nekim malim razlikama. Evidentno je da bez flattening filtera fotonski snop u sredini polja kod oba akceleratora ima već isadržaj visokoenergetskih fotona što dovodi do većeg nivoa fotoaktivacije izomernog stanja ^{115m}In preko dva puta.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su ispitane mogućnosti da se putem fotoaktivacije izomernog stanja ^{115m}In uoče razlike u obliku spektra zakočnog zračenja terapijskih linearnih akceleratora. Sama dozimetrijska merenja u snopu su u velikoj meri osetljiva na razlike u niskoenergetskom delu fotonskog spektra, dok saturaciona aktivnost kao mera efekta fotoaktivacije zavisi od broja fotona u visokoenergetskom delu spektra. Osnovna ideja ovog rada se sastojala u tome da se ustanovi da li fotoaktivacije daju različite rezultate za snopove koji razvijaju jednaku dozu u izocentru. Testirana su dva akceleratora različitih proizvođača, Varijan i Elekta. Oba su akceleratora opremljena da rade u standardnom modu rada sa flattening filterom (FF) kao i bez njega (FFF). Merenja su pokazala da za istu dozu fotonskog zračenja u izocentru akcelerator tipa Elekta proizvodi preko tri puta više aktivnosti izomera ^{115m}In u sredini polja, a preko dva puta više na ivici polja veličine 40 x 40 cm². Nakon filtracije, ta razlika nije toliko velika i aktivnosti indijumske mete se razlikuju za oko 30%. Kada se uporede saturacione aktivnosti jednog istog akceleratora, ali ovoga puta u sredini polja i na njegovoj ivici, za dva proizvođača se dobijaju slični

odnosi, s tim da je u sredini polja saturaciona aktivnost preko dva puta veća nego na ivici. Svi ovi rezultati ukazuju da se kod dva tipa akceleratora oblik spektra u visoko-energetskom delu znatno razlikuje, kao i da postoji razlika u obliku spektra na ivici polja i u njegovoj sredini.

6. LITERATURA

- [1] D. Georg, T. Knoos, B. McClean. Current status and future perspective of flattening filter free photon beams. *Med. Phys.* 38, 2011, 1280-1293.
- [2] J. Izewska, Shaping of photon beams from electron linear accelerators in radiation therapy. *Med. Phys.* 20, 1993, 171-177.
- [3] D. Sheikh-Bagheri, D.W.O. Rogers, Monte Carlo calculation of nine megavoltage photon beam spectra using BEAM code, *Med. Phys.* 29, 2002, 391-402.
- [4] E. L. Chaney, T. J. Cullip, T.A. Gabriel. A Monte Carlo study of accelerator head scattering. *Med. Phys.* 21, 1994, 1383-1390.
- [5] X. R. Zhu, Y. Kang, M.T. Gillin. Measurement of in-air output ratios for a linear accelerator with and without the flattening filter. *Med. Phys.* 33, 2006, 3723-3733.
- [6] J. Cashmore. The characterization of unflattened photon beams from a 6 MV linear accelerator. *Phys. Med. Biol.* 53, 2008, 1933-1946.
- [7] O. N. Vassiliev, U. Titt, F. Ponisch, S.F. Kry, R. Mohan, M. T. Gillin. Dosimetric properties of photon beams from a flattening filter free clinical accelerator. *Phys. Med. Biol.* 51, 2006, 1907-1917.
- [8] G. Kragl, S. af Wetterstedt, B. Knausl, M. Lind, P. McCavan, T. Knoos, B. McClean, D. Georg. Dosimetric characteristic of 6 and 10 MV unflattened photon beams. *Radiother. Oncol.* 93, 2009, 141-146.
- [9] K.E. Sixel, B.A. Faddegon. Calculation of x-ray spectra for radiosurgical beams. *Med. Phys.* 22, 1995, 1657-1661.
- [10] F. Araki. Monte Carlo study of a Cyberknife stereotactic radiosurgery system. *Med. Phys.* 33, 2006, 2955-2963.
- [11] R. Jeraj, T.R. Mackie, J. Balog, G. Olivera, D. Pearson, J. Kapatoes, K. Ruchala, P. Reckwerdt. Radiation characteristics of helical tomotherapy. *Med. Phys.* 31, 2004, 396-404.
- [12] U. Titt, O. N. Vassiliev, F. Ponisch, L. Dong, H. Liu, R. Mohan. A flattening filter free photon treatment concept evaluation with Monte Carlo. *Med. Phys.* 33, 2006, 1595-1602.
- [13] A. Mesbahi, F.S. Nejad. Monte Carlo study on flattening filter-free 18-MeV photon beam of medical linear accelerator. *Radiat. Med.* 26, 2008, 331-336.
- [14] M. Dalaryd, G. Kragl, C. Ceberg, D. Georg, B. McClean, S. Wetterstedt, E. Wieslander, T. Knoos. A Monte Carlo study of a flattening filter-free linear accelerator verified with measurements. *Phys.Med.Biol.* (55), 2010, 7333-7344.

**SPECTRAL CHARACTERISTICS OF FFF THERAPEUTIC
PHOTON BEAMS MEASURED BY PHOTOACTIVATION OF ^{115m}IN**

Arpad TOTH¹, Arif EFENDI², Elemer SZIL³, Nevena IGNJATOV⁴, Nikola JOVANČEVIĆ¹, Jan HANSMAN¹ i Miodrag KRMAR¹

1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia,
arpad.toth@df.uns.ac.rs*

2) *Prince of Songkla University, Faculty of Sciences, Amphoe Hat Yai, Thailand
arief.sadanoer@gmail.com*

3) *Clinic for Oncotherapy, Szeged, Hungary, szil.elemer@med.u-szeged.hu*

4) *Institute for pulmonary diseases of Vojvodina, Sremska Kamenica, Serbia
ignjatov.nevena@gmail.com*

ABSTRACT

Photon beams of FFF (Flattening Filter Free) therapeutic linear accelerator because of substantially reduced filtration have noticeable low-energy component. With activation of isomeric state of ^{115m}In in the middle of the field, and on its edges we made an attempt to compare the spectral characteristics of standard FF and FFF beams. Measurements were performed in beams of 6 MeV nominal energy in two different types of accelerators. Despite the fact that in both types of accelerators have the same dose profile of beam, the saturation activity of the activated samples of natural In are very different, indicating significant differences in the form of spectrum.