

Marcin Bieniasiewicz

Badanie promieniowania wtórnego wytworzonego przez wiązki terapeutyczne, generowane przez liniowe akceleratory medyczne, w kontekście optymalizacji ochrony radiologicznej osób pracujących w ośrodkach realizujących teleradioterapię.

### Streszczenie

Celem niniejszej pracy było dokładne zbadanie konkurencyjnych procesów fizycznych prowadzących do wytworzenia promieniowania nie mającego zastosowania w radioterapii, będącego jej ubocznym skutkiem w kontekście poszukiwania skutecznych rozwiązań mających zastosowanie w ochronie radiologicznej. W badaniach wykorzystano metody eksperymentalne i obliczeniowe stosowane w fizyce jądrowej, takie jak spektroskopia promieniowania gamma, pomiar neutronów metodą aktywacyjną, symulacje Monte Carlo i kilka innych. Pozwoliło to na uzyskanie szeregu bardzo interesujących i istotnych wyników.

Zidentyfikowano reakcje jądrowe indukowane w komponentach i akcesoriach akceleratorów Elekta i TrueBeam, a także w innych przedmiotach znajdujących się w pobliżu wiązki terapeutycznej takich jak aplikator elektronowy, szuflada na osłony antyradiacyjne, indywidualny kolimator elektronowy ze stopu Wooda itp. Ponadto zmierzono widmo promieniowania gamma wychodzącego z drzwi pomieszczenia do radioterapii akceleratora Elekta. W sumie zidentyfikowano 14 radioizotopów powstających w reakcjach jądrowych rejestrując promieniowanie gamma emitowane podczas rozpadów promieniotwórczych i 5 reakcji jądrowych rejestrując gammy natychmiastowe. Do tej pierwszej grupy radioizotopów należą: Mn-56, Cl-36, Al-28, W-187, Na-24, Br-82, Sb-122, Sb-124, Co-60, Co-57, Ba-131, Ni-57, Cr-51 i Fe-59. Ww. reakcje jądrowe to:  $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ ,  $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ ,  $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$ ,  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  i  $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ .

Poza tym zmierzono rozkład neutronów w otoczeniu akceleratorów medycznych i określono zależność pola neutronowego od energii i rodzaju wiązki terapeutycznej stosując metodę aktywacyjną oraz komorę helową. Największą fluencję neutronów termicznych i rezonansowych, odnoszącą się do dawki z wiązki terapeutycznej, wynoszącą odpowiednio  $3.1 \cdot 10^6$  i  $2.0 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{Gy}^{-1}$ , zarejestrowano w trakcie emisji wiązki 20 MV przez akcelerator TrueBeam. Najmniejsza fluencja neutronów termicznych ( $1.1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{Gy}^{-1}$ ) i rezonansowych ( $2.1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{Gy}^{-1}$ ) występowała dla wiązki elektronowej o energii 22 MeV. Udało się także zidentyfikować pole neutronowe w sterowni akceleratora medycznego za pomocą spektroskopii promieniowania gamma pochodzącego z reakcji jądrowych neutronów z jądrami atomów Ge w kryształach germanu detektora HPGe. Informacja o indukowanych reakcjach i radioizotopach powstających w komponentach i akcesoriach akceleratorów medycznych, a także powiązanie energii i rodzaju wiązki z wielkością wytwarzanego pola neutronowego stanowi cenną informację dla producentów terapeutycznych linaków.

Stosując metodę Monte Carlo realizowaną w oparciu o oprogramowanie GEANT4, zoptymalizowano konstrukcję drzwi do pomieszczenia do radioterapii, przy czym ustalono dwa priorytety, które nowa konstrukcja musi spełniać. Pierwszy to redukcja promieniowania gamma wychodzącego z drzwi i zmniejszenie energii tego promieniowania, a także całkowita absorpcja niskoenergetycznych neutronów w materiałach drzwi. Głównym materiałem zastosowanym w nowym rozwiązaniu jest boraks użyty jako moderator i jednocześnie absorbent neutronów. Z jednej strony boraks jest materiałem bogatym w wodór, a więc jego zdolność wyhamowywania neutronów jest duża. Z drugiej strony obecność izotopu boru-10 powoduje silną absorpcję spowolnionych neutronów. Nowa konstrukcja spełnia postawione przed nią wymagania.

Słowa kluczowe: promieniowanie gamma, radioterapia, reakcje jądrowe, neutrony termiczne, neutrony rezonansowe, reakcje jądrowe.

Marcin Bieniasiewicz

Study of secondary radiation generated by therapeutic beams generated by linear medical accelerators in the context of optimizing radiological protection of people working in centers providing teleradiotherapy.

### Abstract

The aim of this study was to thoroughly investigate the competing physical processes leading to the production of radiation not applicable in radiotherapy, which is its side effect in the context of searching for effective solutions applicable in radiological protection. The research used experimental and computational methods applied in nuclear physics, such as gamma-ray spectroscopy, measurement of neutrons using the activation method, Monte Carlo simulations and several others. This allowed for a number of very interesting and relevant results.

Nuclear reactions induced in components of Elekta and TrueBeam accelerators were identified, as well as in other items such as electron applicator, block holder, Wood's alloy insert, etc. In addition, the gamma-ray spectrum from the door to the radiotherapy room was measured for the Elekta accelerator. A total of 14 radioisotopes generated in nuclear reactions were identified by recording the gamma radiation emitted during radioactive decay and 5 nuclear reactions by recording prompt gamma-rays. The first group of radioisotopes includes: Mn-56, Cl-36, Al-28, W-187, Na-24, Br-82, Sb-122, Sb-124, Co-60, Co-57, Ba-131, Ni-57, Cr-51 i Fe-59. The above-mentioned nuclear reactions were:  $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ ,  $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ ,  $^{12}\text{C}(n,n'\gamma)^{12}\text{C}$ ,  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  i  $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ .

In addition, the distribution of neutrons in the vicinity of medical accelerators was measured and the dependence between the neutron field and the energy as well as the type of therapeutic beam was determined using the activation method and a helium chamber. The highest fluence of thermal and resonance neutrons, amounting to  $3.1 \cdot 10^6$  and  $2.0 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{Gy}^{-1}$ , respectively, was registered during the emission of the 20 MV beam by the TrueBeam accelerator. The lowest fluence of thermal ( $1.1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{Gy}^{-1}$ ) and resonance ( $2.1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{Gy}^{-1}$ ) neutrons occurred for the electron beam energy of 22 MeV. There were also identified a neutron field in the medical accelerator control room using gamma-ray spectroscopy from nuclear neutron reactions with Ge nuclei in the germanium crystal of the HPGe detector. Information about induced reactions and radioisotopes generated in components and accessories of medical accelerators, as well as the connection of energy and beam type with the intensity of the generated neutron field is valuable information for producers of therapeutic linacs.

Using the Monte Carlo method implemented on the basis of the GEANT4 toolkit, the design of the door to the radiotherapy room was optimized, with two priorities that must be met by the new structure. The first was the reduction gamma-rays coming from the door, as well as the increase of absorption of low-energy neutrons in the door materials. The main material used in the new solution is borax used as a moderator and

as a neutron absorbent at the same time. On the one hand, borax is a hydrogen-rich material, so its neutron-stopping capacity is high. On the other hand, the presence of the boron-10 isotope causes a strong absorption of slowed neutrons. The new design met the requirements set for it.

Key words: gamma radiation, radiotherapy, nuclear reactions, thermal neutrons, resonance neutrons, nuclear reactions.