



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

**Promieniotwórczość gamma wzbudzona
w środowisku cyklotronu Proteus C-235**

Szymon Guguła

Rozprawa doktorska

Promotor: dr hab. Krzysztof Kozak

Promotor pomocniczy: dr Dominik Grządziel

Pragnę serdecznie podziękować wszystkim osobom, dzięki którym powstanie tej pracy było możliwe. Szczególne wyrazy wdzięczności należą się moim promotorom: dr. hab. Krzysztofowi Kozakowi oraz dr. Dominikowi Grządzielowi.

Chciałbym również podziękować dr hab. Renacie Kopeć, mgr. inż. Konradowi Guguła, dr. inż. Tomaszowi Horwacikowi, dr inż. Agnieszce Szumskiej i pozostałym pracownikom CCB - IFJ PAN, którzy umożliwili oraz znacznie ułatwili mi przeprowadzenie koniecznych pomiarów.

Podziękowania za konsultację i pomoc w początkowym etapie realizacji pracy składam także dr Kindze Polaczek-Grelik z Instytutu Fizyki im. Augusta Chelkowskiego Uniwersytetu Śląskiego.

Pragnę również podziękować pozostałym pracownikom Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN: dr Jadwidze Mazur, mgr inż. Karolinie Danyłec oraz Mariuszowi Mroczkowi za ich życzliwość oraz pomoc przy realizacji pracy.

Promieniotwórczość gamma wzbudzona w środowisku cyklotronu Proteus C-235

STRESZCZENIE

Głównym celem niniejszej pracy było zbadanie promieniotwórczości wzbudzonej w różnych komponentach środowiska CCB - IFJ PAN, będącej efektem rutynowego działania cyklotronu Proteus C-235.

Wykonano pomiary gamma-spektrometryczne wybranych elementów systemu zarządzania wiązką (BMS, ang. *Beam Management System*) i elementów wykorzystywanych do prowadzenia terapii. Przeprowadzono także pomiary mocy dawki promieniowania gamma w wybranych miejscach w budynku CCB oraz w jego najbliższym otoczeniu, które uzupełniono o wskazania stacjonarnych sond dozymetrycznych znajdujących się w CCB.

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że największą zawartością sztucznie wygenerowanych izotopów promieniotwórczych odznaczały się elementy, które mają bezpośredni kontakt z wiązką protonów w trakcie działania cyklotronu.

W hali radioterapii oka elementami tymi były kolimator techniczny, modulator zasięgu i stoper wiązki, dla których wyznaczono ponadto aktywność zawartych w nich wzbudzonych radionuklidów. Pomiarom poddano również znajdujące się tam stanowisko terapii jako całość, w wyniku których stwierdzono obecność w nim szeregu sztucznie wygenerowanych radionuklidów. Ich ilość była jednak stosunkowo niewielka w porównaniu z naturalnie występującym izotopem K-40.

Elementem o największej zawartości wzbudzonych izotopów promieniotwórczych i praktycznie jedynym akcesorium, które wykazywało podwyższony poziom promieniotwórczości w pokoju gantry, był zmieniacz zasięgu. Zaobserwowano, iż największy wkład w jego całkowitą aktywność w początkowym okresie po jego użytkowaniu na stanowisku radioterapii ma krótkożyciowy izotop węgla C-11.

Na podstawie wyników pomiarów w hali cyklotronu stwierdzono, iż degrader energii wiązki oraz jego najbliższe otoczenie to obszar charakteryzujący się największym poziomem promieniotwórczości wzbudzonej w całym budynku CCB.

Potwierdzono również możliwość aktywacji materiałów znajdujących się poza bezpośrednim sąsiedztwem wiązki protonowej. Dokonano tego wykonując serię pomiarów aktywacyjnych w hali cyklotronu, w których stwierdzono obecność oraz wyznaczono aktywność wielu różnych izotopów wyprodukowanych w próbkach miedzi, stali, aluminium oraz betonu, poddanych uprzednio ekspozycji na strumienie wtórnych neutronów w hali akceleratora.

Pomiary tła w hali doświadczalnej CCB wykazały obecność kilku sztucznie wyprodukowanych izotopów promieniotwórczych, jednakże ich ilość była relatywnie niewielka. Stwierdzono również występowanie wzrostów mocy dawki promieniowania gamma i neutronowego wewnątrz hali. Były one każdorazowo większe w przypadkach, gdy wiązkę protonów kierowano na halę radioterapii oka, niż gdy wykorzystywaną ją w samej hali doświadczalnej.

Na zewnątrz budynku CCB - IFJ PAN nie stwierdzono obecności żadnych izotopów promieniotwórczych poza naturalnie występującymi.

Na podstawie analizy wyników zebranych podczas realizacji niniejszej pracy, stwierdzono, iż zjawisko wzbudzania promieniotwórczości jest procesem, który ma miejsce w budynku CCB - IFJ PAN i odgrywa niepoślednią rolę w aspekcie prowadzenia ochrony radiologicznej na jego terenie. Uzyskane wyniki wykazały, że największą zawartością sztucznie wygenerowanych izotopów promieniotwórczych odznaczały się elementy, które mają bezpośredni kontakt z wiązką protonów w trakcie działania cyklotronu. Niepomijalny udział w generowaniu nowych izotopów promieniotwórczych, również w miejscach znajdujących się poza bezpośrednim sąsiedztwem wiązki protonów, ma także wtórne promieniowanie neutronowe.

W przypadku większości badanych materiałów, główny wkład w ich całkowitą aktywność w początkowym okresie, następującym bezpośrednio po zakończeniu ich naświetlania, mają izotopy krótkożyciowe. W szczególności uwidacznia się to dla lekkich materiałów, składających się z atomów wodoru, węgla i tlenu. Wraz z upływem czasu dominować zaczynają izotopy o relatywnie długim okresie półrozpadu, które mogą się kumulować w niektórych materiałach nawet przez kilka – kilkadziesiąt lat i mieć istotne znaczenie pod kątem ochrony radiologicznej w dłuższej perspektywie czasowej.

Gamma radioactivity induced in the Proteus C-235 cyclotron environment

SUMMARY

The main goal of the thesis was to study radioactivity induced in different components of the CCB - IFJ PAN environment, which is the effect of routine work of Proteus C-235 cyclotron.

Gamma spectrometry measurements of the chosen elements of Beam Management System and components used to provide therapy were carried out. Gamma dose rate measurements in the chosen spots inside and outside of the CCB building were performed as well. They were supplemented by readings of stationary dosimetric probes used at CCB.

Based on the obtained results, it was found that elements that have direct contact with the proton beam during the operation of the cyclotron are the ones that contain the most of artificially produced radioactive isotopes.

In the eye treatment room those were technical collimator, range modulator and beam stopper. Activity values of induced radionuclides present in these objects were determined. Measurements of the treatment device as a whole were also carried out and they showed that a number of different artificial isotopes were produced in the device. Their concentration was relatively low in comparison with the naturally occurring K-40.

The element with the highest content of induced radioisotopes and basically the only one that exhibited increased level of radioactivity in the gantry room was range shifter. It was observed that short-lived carbon isotope C-11 had the biggest contribution in its total activity during the first period after its use in the treatment device.

Based on the results of measurements performed in the cyclotron hall, it was found that the beam energy degrader and its near vicinity is an area that contains the biggest amount of induced radioactivity in the whole CCB building.

Moreover, the possibility of activation of materials located further away from the beam was confirmed. It was proven by conducting series of activation measurements in the cyclotron hall which showed presence of many different isotopes produced in copper, steel, aluminum and concrete samples that were exposed to secondary neutrons in the accelerator hall beforehand. Activity values of these isotopes were determined as well.

Background radiation measurements in the experimental hall at CCB showed presence of several artificially produced radioactive isotopes, their concentration was relatively low, though. The occurrence of spikes of gamma and neutron dose rate values were observed as well. Furthermore, they were always bigger when the proton beam was used in the eye treatment room rather than in the experimental hall.

No other than naturally occurring radioisotopes were found outside the CCB - IFJ PAN building.

Based on the analysis of the results obtained in the measurements carried out within this work, it was found that the phenomenon of inducing radioactivity is a process that is present at CCB - IFJ PAN and is significant with regard to radiological protection provided at CCB. The main source of these newly produced radionuclides are nuclear reactions of protons with materials located directly in their path. Secondary neutron radiation is of importance in terms of producing new radioactive isotopes as well, especially when it comes to areas located outside of the near vicinity of the proton beam.

In case of majority of the examined materials, short-lived isotopes contribute the most to their initial activity measured immediately after their irradiation. Especially, it shows explicitly in case of light materials consisting of hydrogen, carbon and oxygen atoms. Over time, relatively long-lived isotopes start to dominate and they can accumulate in some materials for even dozens of years, thus, they can become of concern with regard to radiological protection in the long term.

Spis treści

1. Wstęp i cele pracy	9
2. Charakterystyka wybranych rodzajów promieniowania jonizującego.....	11
2.1 Promieniowanie protonowe	11
2.1.1 Pojęcie przekroju czynnego i jego znaczenie	11
2.1.2 Oddziaływanie protonów z materią	11
2.1.3 Określanie prawdopodobieństwa zajścia reakcji jądrowej protonu z jądrami atomów ośrodka	17
2.2 Promieniowanie neutronowe	20
2.2.1 Oddziaływanie neutronów z materią	21
2.2.2 Określanie prawdopodobieństwa zajścia reakcji jądrowej neutronu z jądrami atomów ośrodka	26
2.3 Znaczenie niesprężystych reakcji jądrowych w środowisku cyklotronu.....	28
2.4 Zapis reakcji jądrowych inicjowanych przez protony i neutrony.....	28
2.5 Promieniowanie gamma	29
2.5.1 Oddziaływanie promieniowania gamma z materią.....	29
2.5.2 Określanie prawdopodobieństwa zajścia danego rodzaju oddziaływania kwantu promieniowania gamma z materią ośrodka	34
2.6 Podstawowe pojęcia ochrony radiologicznej	37
3. Podstawy spektrometrii promieniowania gamma	39
3.1 Przebieg procesu pomiarowego.....	39
3.2 Powstawanie widma energetycznego promieniowania gamma	40
3.3 Kalibracja energetyczna i wydajnościowa	44
3.4 Kalibracja wydajnościowa w spektrometrii gamma in situ.....	47
3.5 Obliczanie aktywności izotopu promieniotwórczego.....	49
4. Aktywacja radionuklidów w materiałach naświetlanych protonami lub neutronami	50
5. Charakterystyka cyklotronu, jego hali, hali doświadczalnej oraz stanowisk terapii oka i gantry.....	52
5.1 System produkcji wiązki (BPS).....	52
5.2 System selekcji energii i transportu wiązki (ESBTS)	53
5.3 System dostarczania wiązki (BDS)	54
5.4 Elementy szczególnie istotne pod kątem promieniotwórczości wzbudzonej.....	56
6. Stan dotychczasowych badań w zakresie promieniotwórczości wzbudzonej.....	59
7. Metodyka pomiarowa.....	61

7.1	Mierzone wielkości.....	61
7.2	Aparatura pomiarowa	61
7.2.1	Moc dawki promieniowania gamma i neutronowego.....	61
7.2.2	Spektrometria promieniowania gamma	65
7.2.3	Kalibracja układu spektrometrycznego.....	68
8.	Wyniki pomiarów i ich analiza	71
8.1	Hala radioterapii oka	71
8.1.1	Pomiary stanowiska terapii	72
8.1.2	Pomiary promieniowania tła	84
8.1.3	Pomiary poszczególnych komponentów stanowiska radioterapii oka.....	88
8.2	Pokoje gantry	101
8.2.1	Pomiar stanowiska terapii	102
8.2.2	Pomiar zmieniacza zasięgu	104
8.3	Hala cyklotronu Proteus C-235	108
8.3.1	Pomiary systemu selekcji energii i transportu wiązki w hali cyklotronu	109
8.3.2	Długotrwałe pomiary mocy dawki w hali cyklotronu	117
8.3.3	Pomiary aktywacyjne.....	119
8.3.3.1	Identyfikacja izotopów aktywowanych w próbkach metali i betonu	121
8.3.3.2	Moc dawki aktywowanych próbek metali i betonu.....	128
8.3.3.3	Aktywność izotopów wzbudzonych w próbkach metali i betonu.....	132
8.3.3.4	Rozkład głębokościowy izotopów wzbudzonych w próbkach metali	138
8.4	Hala doświadczalna	141
8.4.1	Tło w hali doświadczalnej.....	141
8.4.2	Długotrwałe pomiary mocy dawki w hali doświadczalnej	143
8.5	Otoczenie budynku CCB	147
8.5.1	Pomiary mocy dawki	147
8.5.2	Pomiary gamma-spektrometryczne.....	148
9.	Podsumowanie i wnioski.....	150
	Literatura	161

1. Wstęp i cele pracy

Radioterapia jest w ostatnich latach coraz częściej stosowaną metodą leczenia różnego rodzaju nowotworów. Szacuje się, iż spośród około 14 milionów nowych przypadków diagnozowanych każdego roku, w przybliżeniu połowa z pacjentów leczona jest między innymi z wykorzystaniem promieniowania jonizującego [1].

Najczęściej stosowaną formą radioterapii jest tzw. teleradioterapia [2], czy inaczej EBRT (ang. *External Beam Radiation Therapy*). Polega ona na naświetlaniu nowotworów przy użyciu wiązek promieniowania jonizującego wytworzonych na zewnątrz ciała pacjenta. Coraz chętniej wykorzystywanym w tej metodzie rodzajem cząstek są protony, posiadające istotną przewagę nad elektronami i fotonami pod względem rozkładu dawki promieniowania jonizującego deponowanej w ciele pacjenta [3].

Obecnie na świecie działa 91 placówek leczących chorych z zastosowaniem protonoterapii, 34 kolejne są w trakcie budowy, natomiast 27 znajduje się na etapie planowania (stan na styczeń 2020 roku [4]). Wszystkie te obiekty produkują wiązki protonów przy użyciu akceleratorów kołowych – cyklotronów, synchrotronów bądź synchrociklotronów.

Jedyną taką placówką działającą w Polsce jest Centrum Cyklotronowe Bronowice znajdujące się w Instytucie Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie (CCB - IFJ PAN), dysponujące cyklotronem Proteus C-235 i świadczące usługi w zakresie radioterapii protonowej oka oraz radioterapii protonowej wiązką skanującą na tzw. stanowiskach gantry [5].

Wykorzystanie wiązek promieniowania jonizującego wymusza konieczność zapewnienia odpowiedniej ochrony radiologicznej zarówno pacjentom leczonym w CCB, jak i jego pracownikom. Jednakże źródłem dodatkowej niepożądanego dawki promieniowania dla tychże osób może być nie tylko pierwotna wiązka protonów wytwarzanych w cyklotronie. Są to także strumienie neutronów powstających w reakcjach jądrowych protonów z umieszczonymi na ich drodze elementami konstrukcyjnymi samego cyklotronu bądź stanowisk terapii oraz kwanty promieniowania gamma emitowane przez jądra radioaktywnych izotopów aktywowanych w materiałach znajdujących się bezpośrednio na i w bliskim otoczeniu toru przelotu protonów.

Głównym celem niniejszej pracy było zbadanie promieniotwórczości wzbudzonej w różnych komponentach środowiska CCB - IFJ PAN, będącej efektem rutynowego działania cyklotronu Proteus C-235. Celowym i ważnym jest zbadanie jakie izotopy i w jakich

materiałach mogą powstawać w trakcie rutynowej działalności CCB w środowisku cyklotronu i jaki jest poziom stężeń tych izotopów. Poza monitorowaniem mocy dawki promieniowania gamma i neutronowego realizowanego pod kątem ochrony radiologicznej pacjentów i pracowników w czasie używania wiązki protonowej ważne jest rozpoznanie dodatkowych źródeł promieniotwórczości wzbudzonej we wszelkich elementach systemu obiektu i materiałach obecnych w CCB.

Realizacja tego celu wymagała ustalenia możliwych kanałów reakcji jądrowych prowadzących do powstania izotopów w oddziaływaniach różnych materiałów z protonami i neutronami oraz opracowania odpowiedniej metodyki pomiarowej umożliwiającej identyfikację powstających izotopów oraz analizę ilościową wyników. Konieczne było wykonanie pomiarów gamma-spektrometrycznych wybranych elementów systemu zarządzania wiązką (BMS, ang. *Beam Management System*) oraz elementów wykorzystywanych do prowadzenia terapii. Realizacji celu pracy służyła także analiza wyników pomiarów mocy dawki promieniowania gamma w wybranych miejscach w budynku CCB oraz w jego najbliższym otoczeniu, które uzupełniono o wskazania stacjonarnych sond dozymetrycznych znajdujących się w CCB.

2. Charakterystyka wybranych rodzajów promieniowania jonizującego

2.1 Promieniowanie protonowe

W przypadku terapii protonowej wiązka opuszczająca cyklotron to strumień wielu protonów o zbliżonych do siebie pędach poprzecznych i wzdłużnych. Istotnym aspektem ze względu na dalsze rozważania w niniejszej pracy jest sposób interakcji protonów z materią. W dużej mierze jest on warunkowany poprzez właściwości protonu, z których najważniejsze zawarto w Tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane właściwości protonu – wg [6]

Właściwość	Wartość
Nazwa cząstki	Proton
Masa	$1,672\ 621\ 923\ 69\ (51) \cdot 10^{-27}$ kg
Energia spoczynkowa	938,272 088 16 (29) MeV
Średni czas życia	$> 2,1 \cdot 10^{29}$ lat (trwały)
Ładunek elektryczny	$+ 1,602\ 176\ 634 \cdot 10^{-19}$ C
Moment magnetyczny	$1,410\ 606\ 797\ 36\ (60) \cdot 10^{-26}$ J/T

2.1.1 Pojęcie przekroju czynnego i jego znaczenie

Przed rozpoczęciem omawiania sposobów oddziaływania protonów z materią, warto mieć na uwadze, iż istotne jest, aby wiedzieć z jakim prawdopodobieństwem dane rodzaje oddziaływania mogą zaistnieć. Prawdopodobieństwo zajścia danego oddziaływania, w którym biorą udział cząstka padająca oraz jej cel (często używa się angielskiego terminu *target*), którym może być np. jądro atomu ośrodka penetrowanego przez daną cząstkę padającą, najczęściej określane jest poprzez wielkość zwaną przekrojem czynnym, oznaczaną symbolem σ i wyrażaną w barnach ($1\ b = 10^{-24}$ cm²). Zdefiniowana jest ona jako pole powierzchni, mierzone na płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu pocisku (padającej cząstki), w które musi on trafić, by doszło do danego oddziaływania.

2.1.2 Oddziaływanie protonów z materią

W ogólności, sposoby oddziaływania protonów z materią można podzielić na trzy kategorie: oddziaływania z pojedynczymi elektronami atomów, oddziaływania z jądrami atomowymi oraz oddziaływania z atomami jako całością. Te ostatnie zachodzą jedynie dla bardzo małych energii protonów [7, 8].

a) oddziaływanie protonów z elektronami atomów

W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że protony penetrujące dane medium tracą swoją energię kinetyczną w sposób ciągły poprzez częste akty niesprężystego rozproszenia kulombowskiego na elektronach atomów ośrodka. Podczas takiego rozproszenia protonu dochodzi do przekazania części jego energii elektronowi co prowadzi do wzbudzenia lub jonizacji atomu ośrodka. W pojedynczym akcie rozproszenia proton traci bardzo małą część swojej energii (z uwagi na dużą różnicę masy protonu i elektronu), a jego trajektoria ulega niewielkiej zmianie [9].

Straty energii kinetycznej protonu na wzbudzenie i jonizację atomów ośrodka można ilościowo opisać wykorzystując tzw. wzór Bethego-Blocha, który w ogólnej postaci wygląda następująco [10] (wielkość fizyczną $\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{el}$ nazywa się również masową zdolnością hamowania – ang. *mass stopping power*; indeks dolny „el” oznacza, iż do straty energii doszło na skutek interakcji z elektronem):

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx}\right)_{el} = \frac{4\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} \cdot \frac{N_A Z}{A} \cdot z^2 L(\beta) \quad (1)$$

gdzie:

ρ – gęstość ośrodka,

dE – strata energii kinetycznej protonu,

dx – odcinek drogi przebytej przez proton,

r_e – klasyczny promień elektronu,

m_e – masa elektronu,

c – prędkość światła w próżni,

β – stosunek v/c , gdzie v to prędkość protonu,

N_A – liczba Avogadro,

Z – liczba atomowa ośrodka,

A – względna masa atomowa ośrodka,

z – ładunek elektryczny protonu,

$L(\beta)$ – liczba hamowania (ang. *stopping number*).

Czynnik $L(\beta)$ przyjmuje z kolei następującą postać [10]:

$$L(\beta) = \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 - \ln I \quad (2)$$

gdzie:

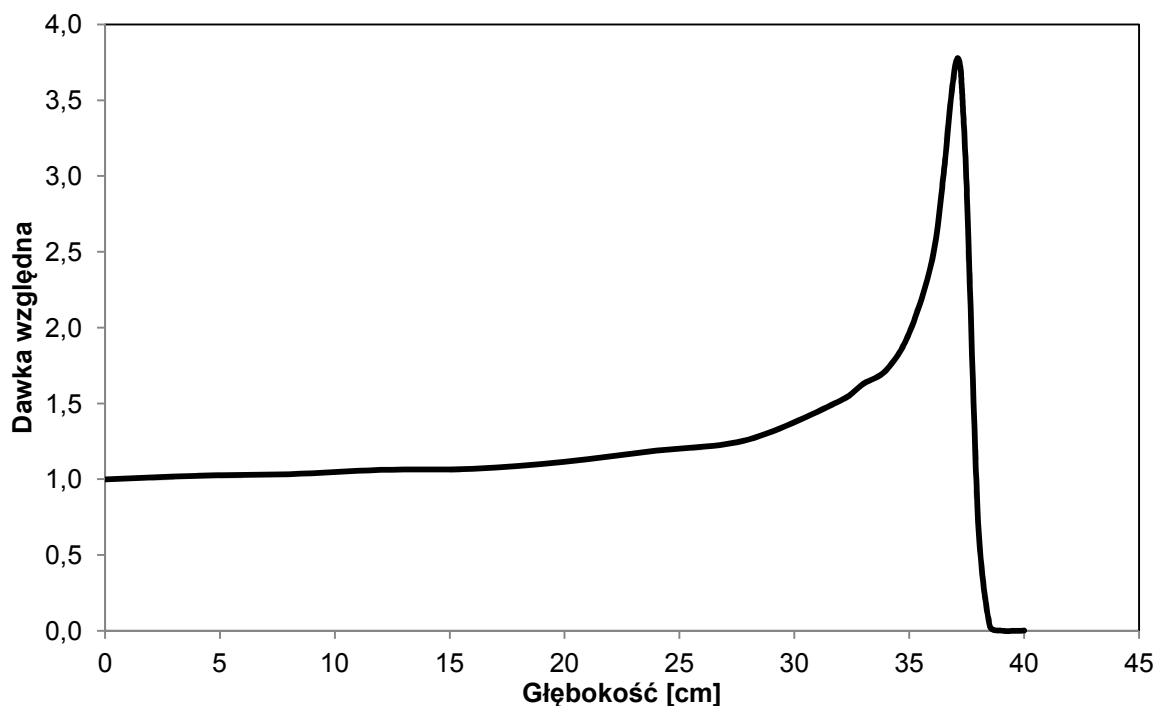
I – średnia energia jonizacji atomu ośrodka, wyrażona w elektronowoltach (eV).

Jest to uproszczona postać wzoru, w której pominięto tzw. poprawki Barkasa i Blocha, mające istotne znaczenie jedynie w przypadku, gdy prędkość protonu (a co za tym idzie jego energia kinetyczna) penetrującego ośrodek jest mała [10]. Energie protonów wykorzystywanych w cyklotronach do radioterapii zawierają się w zakresie 60 – 250 MeV [4], co sprawia, że wymienione wyżej poprawki Barkasa i Blocha są zanedbywalne. Należy jednakże wspomnieć, iż w niektórych przypadkach energia wykorzystywanych protonów jest celowo zmniejszana poniżej progu 60 MeV (patrz rozdział 5.3). Ponadto, dla bardzo małych oraz bardzo dużych prędkości protonów należałoby uwzględnić dodatkowo poprawki odpowiednio na efekt powłoki (założenie stacjonarnych elektronów w atomie jest wówczas nieprawdziwe) oraz na efekt gęstości pola związany z relatywistycznymi zmianami kształtu efektywnego pola elektrycznego protonu i polaryzacją atomów ośrodka.

Ostateczna postać wzoru Bethego-Blocha dla protonów o energiach w zakresie terapeutycznym wygląda zatem następująco:

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{el} = \frac{4\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} \cdot \frac{N_A Z}{A} \cdot z^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \beta^2 - \ln I \right] \quad (3)$$

Z powyższego wzoru wynika, iż straty energii protonu są odwrotnie proporcjonalne do kwadratu jego prędkości (prędkość jest zawarta w β), a zatem osiągają maksimum przy samym końcu drogi protonu w penetrowanym medium. Krzywa Bragga, czyli zależność straty energii protonu na jonizację atomów ośrodka (tzw. gęstość jonizacji) od drogi przebytej w danym ośrodku, zawdzięcza swój charakter tej właśnie relacji. Mianowicie, w zakresie niskich i średnich energii gęstość jonizacji bardzo powoli narasta (tzw. obszar plateau) i osiąga maksimum (tzw. pik Bragga), a po nim następuje jej gwałtowny spadek do zera. Przekłada się to bezpośrednio na zależność wartości deponowanej dawki od głębokości wniknięcia protonu w tkance człowieka. Taki rodzaj rozkładu dawki w ciele pacjenta jest niezwykle pożądany, gdyż w porównaniu do np. terapii fotonowej czy elektronowej dawka deponowana w zdrowej tkance jest znacznie ograniczana. Może to mieć kluczowe znaczenie w przypadku występowania w pobliżu naświetlanego nowotworu narządów krytycznych, w przypadku których minimalizowanie dostarczanej im dawki promieniowania jonizującego jest szczególnie ważne. Taki kształt krzywej Bragga jest charakterystyczny dla wszystkich ciężkich (wielokrotnie cięższych od elektronu) cząstek naładowanych. Na Rysunku 1 przedstawiono krzywą Bragga dla protonów o energii 250 MeV przechodzących przez HDPE (polietylen wysokiej gęstości, ang. *High-Density PolyEthylene*) o gęstości równej 0,97 g/cm³ (zbliżonej do gęstości wody).



Rysunek 1. Zależność dawki (wyrażonej jako bezwymiarowa dawka względna) deponowanej przez protony o energii 250 MeV od głębokości w polietylenie wysokiej gęstości (HDPE, gęstość $0,97 \text{ g/cm}^3$) – wg [11]

b) sprężyste rozpraszanie protonów na jądrach atomowych

Innym, nie mniej istotnym sposobem oddziaływania protonów z materią jest ich interakcja z jądrami atomów ośrodka. Oddziaływanie takie można podzielić na dwa rodzaje: sprężyste oraz niesprężyste.

W przypadku oddziaływania sprężystego proton jest rozpraszany kulombowsko na jądrze atomowym i energia kinetyczna układu proton-jądro jest zachowana, choć sam proton może przekazać część swojej energii kinetycznej do jądra. Straty energii kinetycznej protonu oraz jego odchylenie od pierwotnej trajektorii są już w takim procesie większe niż dla protonów oddziałujących z elektronami atomów ośrodka, z uwagi na porównywalne masy oddziałujących obiektów (proton i jądro atomowe). Na przykład dla protonu o energii kinetycznej 1 MeV rozpraszającego się na jądrze węgla maksymalna strata energii kinetycznej wynosi 0,09 MeV, natomiast maksymalny kąt rozproszenia wynosi ok. 5 stopni. Jednakże, przekrój czynny na zajście takiego procesu, a co za tym idzie prawdopodobieństwo jego wystąpienia, jest niski, a co więcej szybko spada wraz ze wzrostem energii protonu, dlatego udział sprężystych rozproszeń protonów na jądrach atomów ośrodka może być praktycznie zaniedbany dla protonów o energiach wyższych niż 1 MeV [12].

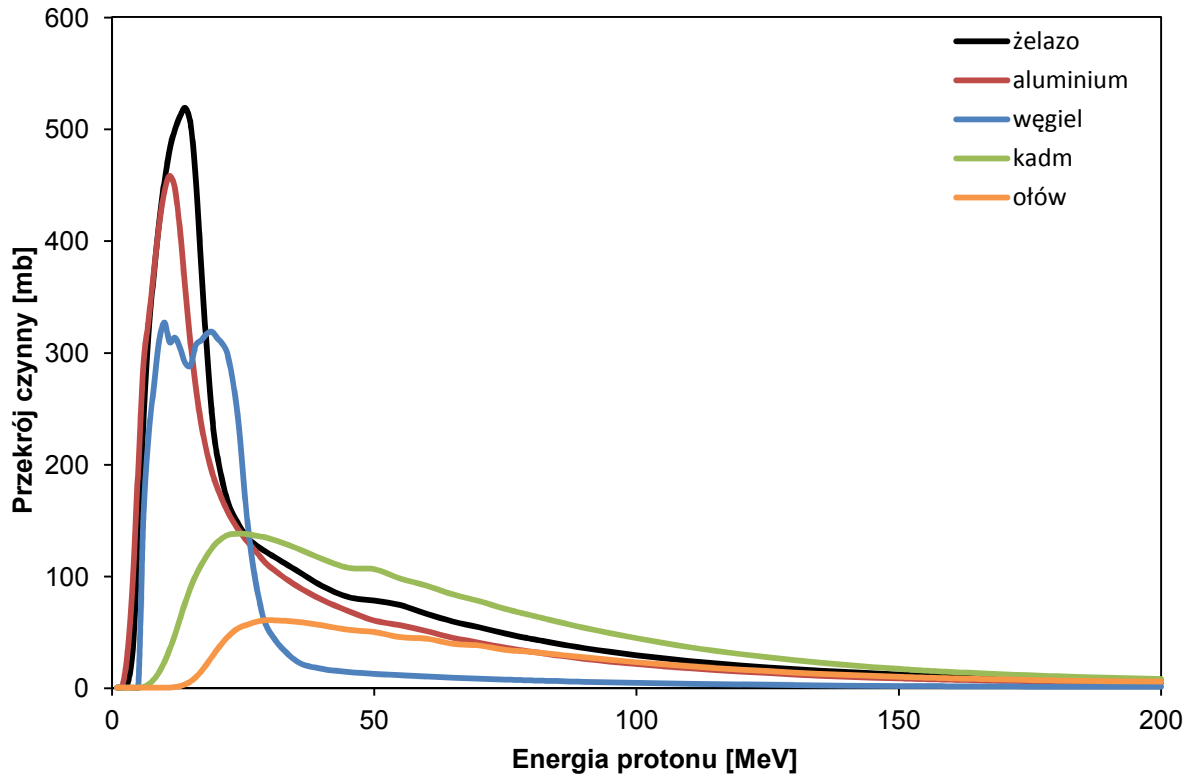
Dla protonów o niższych energiach rozproszenia sprężyste mogą występować już znacznie częściej i stać się niepomijalnym zjawiskiem. Pełny opis tego procesu, tzw. wielokrotnego rozproszenia kulombowskiego (ang. *MCS – Multiple Coulomb Scattering*) jest dość skomplikowany i w najpełniejszy sposób został opisany przez Moliere’a [13]. W skrócie, jego występowanie sprawia, iż tor lotu protonu w swojej końcowej fazie odbiega od przyjmowanej w pierwszym przybliżeniu linii prostej. W kontekście protonoterapii zjawisko to objawia się poszerzeniem wiązki protonów przy końcu ich drogi w ciele pacjenta, co ma oczywiście niekorzystny wpływ na dokładne wyznaczenie naświetlanego obszaru. Szerokość tzw. obszaru półcienia (z reguły przyjmuje się, że jest to obszar spadku wartości dawki z 80% jej maksymalnej wartości do 20%) jest zależna od głębokości w tkance (im głębiej, tym szerokość ta jest większa) i dla protonów wynosi z reguły kilka milimetrów [14, 15]. Zjawisko to będzie zachodzić oczywiście w dowolnym medium, w którym zatrzymywane są protony.

c) niesprężyste oddziaływanie protonów z jądrami atomowymi

Oddziaływanie niesprężyste protonu z jądrem atomowym to oddziaływanie, w którym całkowita energia kinetyczna układu proton-jądro nie jest zachowana. Proton może zostać niesprężysto rozproszony na jądrze atomowym, w wyniku czego jądro pozostaje w stanie wzbudzonym. Z takim procesem związane są duże straty energii protonu, rzędu wielu MeV na jedno oddziaływanie, oraz znaczna zmiana jego trajektorii. Samo jądro może deekscytować poprzez emisję „natychmiastowego” promieniowania gamma (ang. *prompt gamma rays*) [12, 16]. Ponadto, padający proton może wniknąć we wnętrze jądra, co prowadzi do reakcji jądrowych. Z takim oddziaływaniem wiąże się powstanie nowego jądra atomowego, wskutek czego najczęściej następuje również natychmiastowa emisja wtórnych cząstek przez to jądro – protonów, innych cięższych jonów czy neutronów [9]. W szczególności może dojść do zjawiska spalacji, czyli procesu, w którym w wyniku uderzenia wysokoenergetycznego protonu w jądro atomowe zostaje wyrzuconych z niego wiele nukleonów lub innych lekkich jąder. Nowo powstałe w wyniku którejkolwiek z powyższych reakcji jądrowych jądro atomowe jest często w dalszym ciągu niestabilne (jest jądrem promieniotwórczego izotopu) i może po pewnym czasie ulec jednemu z typowych rodzajów rozpadu promieniotwórczego (beta minus (β^-), beta plus (β^+), wychwyty elektronu itp.), czemu z reguły towarzyszy emisja promieniowania gamma.

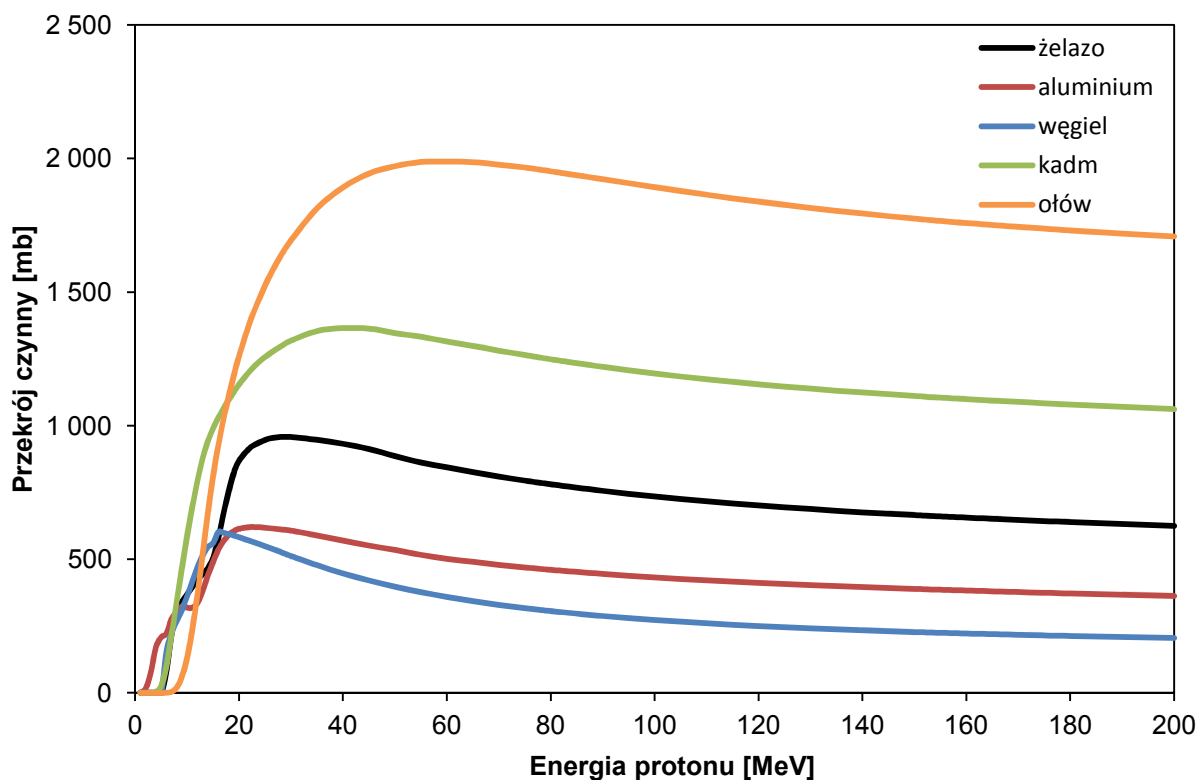
Przekrój czynny na samo rozproszenie niesprężyste protonu na jądrach atomowych ośrodka rośnie wraz ze wzrostem energii padającego protonu, osiąga maksimum dla energii

rzędu kilku-kilkunastu MeV, a następnie silnie maleje wraz z dalszym wzrostem energii protonu. Wykres zależności przekroju czynnego na niesprężyste rozproszenie protonu na różnych jądrach atomowych w zależności od jego energii został pokazany na Rysunku 2.



Rysunek 2. Zależność przekroju czynnego na niesprężyste rozproszenie protonu na różnych jądrach atomowych od energii tego protonu – wg [17]

Przekrój czynny na reakcję jądrową padającego protonu z jądrem atomowym ośrodka dającą w efekcie powstanie nowego jądra atomowego (nazywaną dalej po prostu reakcją jądrową) również rośnie wraz ze wzrostem energii padającego protonu i osiąga maksimum dla jej wartości z zakresu ok. 10 – 50 MeV. Następnie przekrój czynny maleje, jednak w dość niewielkim stopniu, tak że dla wysokich energii protonu rzędu 200 MeV zależność przekroju czynnego na reakcję jądrową od energii praktycznie ustala się na pewnym poziomie. Można ponadto zauważyć, iż im cięższy materiał ośrodka, tym generalnie wyższy przekrój czynny na reakcję jądrową protonu z jądrem atomowym tegoż ośrodka. Wykres zależności przekroju czynnego na reakcję jądrową protonu z różnymi jądrami atomowymi w zależności od jego energii został przedstawiony na Rysunku 3.



Rysunek 3. Zależność przekroju czynnego na niesprężystą reakcję jądrową protonu z różnymi jądrami atomowymi (w wyniku której powstaje nowe jądro atomowe) od energii tego protonu – wg [17]

d) Bremsstrahlung

Innym rodzajem możliwego oddziaływania protonów z jądrem atomowym jest emisja promieniowania hamowania w wyniku zakrzywania torów protonów przez jądra atomowe ośrodka (tzw. Bremsstrahlung) [9]. Efekt ten ma jednak istotne znaczenie dopiero w przypadku protonów o bardzo wysokich energiach (rzędu GeV [12]) i w rozważanym zakresie energii jest zanedbywalny.

2.1.3 Określanie prawdopodobieństwa zajścia reakcji jądrowej protonu z jądrami atomów ośrodka

W ogólności przejście ze znanej wartości przekroju czynnego na jakąś reakcję bezpośrednio na prawdopodobieństwo jej zajścia nie zawsze jest łatwe do określenia. W przypadku opisanych powyżej reakcji jądrowych z udziałem padającego protonu i jądra atomu ośrodka jest to jednak możliwe. Janni [18] podał wzór opisujący to prawdopodobieństwo, przy czym należy mieć na uwadze, że jest to prawdopodobieństwo zajścia reakcji jądrowej padającego protonu z jądrem atomu penetrowanego ośrodka na całej długości drogi protonu w tymże ośrodku, aż do jego całkowitego zatrzymania:

$$P(E_0) = 1 - \exp\left[-N_A \int_{E_f}^{E_0} \frac{dE}{\rho \frac{dx}{dE}} \frac{\sum_i r_i \sigma_i}{\sum_i r_i A_i}\right], \quad E > 10 \text{ eV} \quad (4)$$

gdzie:

E_0 – początkowa energia kinetyczna protonu,

E_f – końcowa energia kinetyczna protonu, przy której znajduje się on już niemal w spoczynku, tu przyjęta jako równa ok. 10 eV,

N_A – stała Avogadro,

dE – strata energii kinetycznej protonu,

dx – odcinek drogi przebytej przez proton,

ρ – gęstość ośrodka,

r_i – liczba atomów w cząsteczce i-tego pierwiastka w związku chemicznym stanowiącym ośrodek,

σ_i – przekrój czynny na niesprężystą reakcję jądrową dla i-tego pierwiastka w związku chemicznym,

A_i – względna masa atomowa i-tego pierwiastka w związku chemicznym.

Przykładowo, prawdopodobieństwo zajścia reakcji jądrowej dla protonu na całej jego drodze przelotu w wodzie jest praktycznie zerowe do energii protonu równej 2,5 MeV. Następnie prawdopodobieństwo to rośnie, by dla 70 MeV osiągnąć około 6%, a dla 225 MeV jest to już prawie 27%. Powyżej energii 1000 MeV zajście reakcji jądrowej jest już niemal pewne (prawdopodobieństwo bliskie 100%). W Tabeli 2 zawarto prawdopodobieństwa zajścia reakcji jądrowych dla protonów o kilku wybranych energiach w różnych materiałach. Wyraźnie widać, iż dla protonów o energiach w zakresie terapeutycznym (60 – 250 MeV), zainicjowanie reakcji jądrowej w penetrowanym medium występuje stosunkowo często i jest to jeden z istotnych procesów, które należy brać pod uwagę rozważając możliwe scenariusze zachowania protonu w przenikającym ośrodku.

Tabela 2. Prawdopodobieństwo zajścia niesprężystej reakcji jądrowej protonu z jądrami atomowymi w różnych ośrodkach dla kilku energi protonu – wg [18]

Energia [MeV]	Prawdopodobieństwo zajścia niesprężystej reakcji jądrowej w danym materiale [%]					
	Powietrze	Woda	Lexan	Beton	Stal	Mosiądz
10	0,26	0,18	0,25	0,18	0,06	0,05
40	3,29	2,43	3,02	2,80	2,22	2,14

70	7,81	5,86	7,11	7,01	5,77	5,64
100	12,92	9,83	11,73	11,78	10,03	9,92
150	21,60	16,63	19,77	20,08	17,87	17,75
225	34,22	26,75	31,78	32,50	30,17	29,99
500	73,09	62,86	70,32	71,46	69,33	69,81
1000	97,69	95,40	97,41	97,27	96,48	96,31

Jak wspomniano wcześniej, reakcja jądrowa protonu z jądrem atomowym ośrodka najczęściej prowadzi również do emisji wtórnych cząstek z nowo powstałego jądra. Wygenerowane w ten sposób cząstki mogą prowadzić do dalszych reakcji jądrowych w wyniku ich oddziaływania z jądrami atomowymi przenikającego ośrodka i cały proces może się powtarzać (do momentu utraty energii przez wtórne cząstki i zahamowania produkcji kolejnej generacji wtórnych cząstek). Seltzer ([19]) podaje względną liczbę produkowanych cząstek wtórnych różnego rodzaju w przypadku oddziaływania protonu z jądrem tlenu ^{16}O . Dane te zawarto w Tabeli 3.

Tabela 3. Względna (w stosunku do jednego padającego protonu) produkcja różnych cząstek wtórnych w reakcjach jądrowych protonu z jądrami tlenu ^{16}O dla kilku energii padającego protonu. Oznaczenia cząstek: n – neutron, p – proton, d – jądro deuteru, t – jądro trytu, ^3He – jądro izotopu helu ^3He , α – cząstka alfa – wg [19]

Energia [MeV]	Liczba produkowanych cząstek wtórnych na jeden padający proton					
	n	p	d	t	^3He	α
10	0,00	0,69	0,00	0,000	0,000	0,33
20	0,04	0,94	0,07	0,000	0,004	0,77
40	0,26	1,11	0,15	0,007	0,018	0,95
60	0,41	1,31	0,15	0,017	0,033	0,94
100	0,60	1,57	0,14	0,32	0,044	0,91
150	0,73	1,75	0,13	0,48	0,048	0,81
200	0,75	1,79	0,11	0,52	0,046	0,80
250	0,77	1,82	0,10	0,53	0,046	0,79

Można zauważyć, iż w wyniku powyższej reakcji jądrowej produkowane są głównie protony, natomiast dużą część wtórnych cząstek stanowią również neutrony oraz cząstki alfa. Seltzer oblicza również w swoim raporcie jaka część energii padającego protonu zostaje średnio

przeznaczona na energię kinetyczną wyprodukowanej cząstki wtórnej w zależności od jej rodzaju. Dane te zawarto w Tabeli 4.

Tabela 4. Część energii kinetycznej padającego protonu jaką unosi dana wtórna cząstka. Wartości podano dla kilku różnych energii padającego protonu – wg [19]

Energia [MeV]	Część energii kinetycznej padającego protonu unoszona przez daną cząstkę					
	n	p	d	t	³ He	α
10	0,000	0,17	0,000	0,000	0,000	0,11
20	0,003	0,28	0,018	0,000	0,001	0,15
40	0,054	0,32	0,058	0,001	0,003	0,11
60	0,092	0,40	0,044	0,002	0,003	0,090
100	0,15	0,50	0,029	0,002	0,003	0,056
150	0,20	0,57	0,106	0,002	0,002	0,029
200	0,20	0,63	0,009	0,002	0,002	0,022
250	0,21	0,66	0,005	0,002	0,001	0,019

W tym przypadku także można zaobserwować, że największą część energii pierwotnego protonu unoszą wtórne protony, w drugiej kolejności są to wtórne neutrony, zwłaszcza w przypadku wysokiej energii padającego protonu.

Wydaje się więc, że ważne jest, aby oprócz znajomości sposobów oddziaływania protonów z materią, mieć na uwadze rodzaje interakcji neutronów z materią, gdyż stanowią one istotną część produkowanych przez pierwotne protony cząstek wtórnych oraz unoszą one znaczny ułamek ich energii kinetycznej.

2.2 Promieniowanie neutronowe

Współcześnie wykorzystuje się wiele rodzajów źródeł neutronów, między innymi w przemyśle czy w różnorodnych badaniach naukowych. W środowisku cyklotronu stosowanego do celów radioterapii nie mamy do czynienia z żadnym źródłem pierwotnych neutronów, jednakże wszelkie elementy narażone na bezpośredni kontakt z wykorzystywaną wiązką protonów mogą stanowić potencjalne źródło wtórnego promieniowania neutronowego, powstałego wskutek reakcji jądrowych padających protonów z jądrami atomów budujących dany obiekt (patrz rozdział 2.1).

Podobnie jak dla protonów, również w przypadku neutronów istotnym aspektem w świetle dalszych rozważań jest ich sposób oddziaływania z materią, który także w dużej

mierze warunkowany jest właściwościami neutronu jako cząstki oraz jego energią. Wybrane właściwości neutronu zawarto w Tabeli 5, natomiast podział na rodzaje neutronów ze względu na ich energię zamieszczono w Tabeli 6.

Tabela 5. Wybrane właściwości neutronu – wg [6]

Właściwość	Wartość
Nazwa cząstki	Neutron
Masa	$1,674\ 927\ 498\ 04\ (95) \cdot 10^{-27}$ kg
Energia spoczynkowa	939,565 420 52 (54) MeV
Średni czas życia	881,5 (15) s (neutron swobodny)
Ładunek elektryczny	0
Moment magnetyczny	$-9,662\ 3651\ (23) \cdot 10^{-27}$ J/T

Tabela 6. Podział neutronów ze względu na ich energię (granice poszczególnych zakresów są dość płynne, ponadto można wprowadzić znacznie bardziej szczegółowy podział, w zależności od potrzeb) – wg [20]

Nazwa	Zakres energii
Neutrony termiczne	0,025 eV – 1 eV
Neutrony rezonansowe	1 eV – 1 keV
Neutrony prędkie	1 keV – 10 MeV
Neutrony superszybkie (relatywistyczne)	> 10 MeV

2.2.1 Oddziaływanie neutronów z materią

a) oddziaływanie neutronów z elektronami atomów

Neutron, będąc cząstką o wypadkowym zerowym ładunku elektrycznym, wchodzi w interakcje przede wszystkim z jądrami atomów ośrodka poprzez oddziaływanie silne. Jednakże, warto nadmienić, że oddziaływanie neutronu z elektronami atomów także jest możliwe i to z dwóch powodów. Po pierwsze, neutron posiada niezerowy moment magnetyczny, a zatem może oddziaływać poprzez magnetyczne oddziaływanie dipol-dipol z elektronem (który także posiada niezerowy moment magnetyczny) oraz z polem magnetycznym wytworzonym przez prąd powstały wskutek ruchu tegoż elektronu w atomie. Po drugie, mimo iż wypadkowy ładunek elektryczny neutronu jest zerowy, posiada on wewnętrzną strukturę i mogą w niej wystąpić obszary o niezerowej gęstości ładunku elektrycznego, co prowadzi do oddziaływania elektrostatycznego z elektronem obdarzonym

ładunkiem ujemnym [21]. Oddziaływanie neutronu z elektronem jest jednak w świetle dalszych rozważań w niniejszej pracy zaniedbywalne.

W zupełności wystarczające jest przyjęcie, iż neutron penetrujący dany ośrodek oddziałuje jedynie z jądrami atomów tego ośrodka. W wyniku takiej interakcji może dojść do szeregu procesów: sprężystego bądź niesprężystego rozproszenia neutronu, wychwytu neutronu przez jądro z następującą po nim emisją wtórnych cząstek (neutronów, protonów, cięższych jonów itp.) lub promieniowania gamma (tzw. wychwyt radiacyjny) czy nawet rozszczepienia jądra bądź jego spalacji [22, 23].

b) sprężyste rozpraszanie neutronów na jądrach atomowych

Przy rozproszeniu sprężystym neutronu energia kinetyczna układu neutron-jądro atomowe jest zachowana. Rozproszenie to możemy podzielić na dwa rodzaje, w pierwszym z nich, tzw. rozproszeniu potencjałowym (ang. *potential scattering*) neutron nie wnika do jądra, część jego energii przekazywana jest do jądra i zmienia ulega jego trajektoria. Drugi rodzaj sprężystego rozproszenia to tzw. rozproszenie rezonansowe (ang. *resonance scattering*). Zachodzi ono gdy energia kinetyczna neutronu ma odpowiednią wartość i jest on wówczas absorbowany przez jądro wskutek czego tworzy się tzw. jądro rezonansowe, a następnie z tego jądra emitowany jest neutron o takiej energii, aby całkowita energia kinetyczna układu została w całym tym procesie zachowana.

Sprężyste rozpraszanie neutronów na jądrach atomowych jest jednym z głównych procesów odpowiadających za znaczną utratę energii neutronów i ich spowalnianie w przenikającym ośrodku. Średnią stratę energii neutronu na jedno sprężyste rozproszenie można obliczyć w następujący sposób [24]:

$$E_{\text{loss}} = \frac{2EA}{(A + 1)^2} \quad (5)$$

gdzie:

E – energia kinetyczna neutronu przed zderzeniem,

A – względna masa atomowa jądra, z którym oddziałuje neutron.

Można zauważyć, że neutron traci tym więcej energii, im lżejsze jest jądro, na którym następuje rozproszenie, toteż lekkie materiały najlepiej nadają się na moderatory (spowalniacze) neutronów. Dla wodoru ($A = 1$) średnia strata energii kinetycznej neutronu w pojedynczym zderzeniu jest największa i wynosi połowę jej początkowej wartości.

Przekrój czynny na rozpraszanie sprężyste neutronów jest dla większości ośrodków w przybliżeniu stały dla neutronów o energiach do około 1 MeV. Przy większych energiach

istotną rolę może zacząć odgrywać rozproszenie rezonansowe, co prowadzi do występowania lokalnych wzrostów lub spadków przekroju czynnego (nawet o kilka rzędów wielkości) na rozpraszanie sprężyste dla szczególnych energii padającego neutronu (związane jest to z możliwością powstania jądra rezonansowego na skutek absorpcji padającego neutronu, co opisano powyżej) [25]. Gdy energia padającego neutronu dalej wzrasta, następuje efekt nakładania się pików rezonansowych i przekrój czynny staje się gładką funkcją energii padającego neutronu.

Dla przykładu, na Rysunku 4 przedstawiono wykres zależności przekroju czynnego na sprężyste rozproszenie neutronu na jądrze żelaza ^{56}Fe w zależności od jego energii. Wraz z nim zawarto analogiczne wykresy dla innych rodzajów interakcji neutronu z materią (wymienionych w kolejnym podpunkcie pracy).

c) niesprężyste oddziaływanie neutronów z jądrami atomowymi

W procesie rozproszenia niesprężystego neutron uderza w jądro atomowe tworząc jądro złożone, które znajduje się w stanie wzbudzonym. Jądro złożone następnie deekscytuje poprzez emisję neutronu (o energii niższej niż energia pierwotnego neutronu, ponieważ jej część została przekazana na wzbudzenie jądra) oraz ewentualnie promieniowania gamma. W procesie tym energia kinetyczna układu neutron-jądro nie jest zachowana.

Rozpraszanie niesprężyste jest procesem progowym, tzn. jego wystąpienie jest możliwe jedynie wtedy, gdy energia padającego na jądro atomowe neutronu jest większa niż pewna progowa wartość. Ponadto, wartość energii progowej maleje wraz ze wzrostem liczby nukleonów w jądrze, toteż rozpraszanie niesprężyste ma istotne znaczenie zwłaszcza w przypadku ciężkich jąder atomów ośrodka lub w przypadku jąder o średniej masie, ale dla neutronów o wysokich energiach (rzędu przynajmniej kilku lub kilkunastu MeV) [25]. Dla lekkich jąder jest to często proces zaniedbywalny, a dla jądra wodoru w ogóle niemożliwy, gdyż nie posiada ono stanów wzbudzonych [26].

Innym wspomnianym wcześniej rodzajem reakcji jest wychwyty neutronu przez jądro atomowe. Po takim akcie absorpcji neutronu jądro jest zawsze w stanie wzbudzonym i może deekscytować w różny sposób. Jednym z nich jest emisja jedynie promieniowania gamma, wówczas mamy do czynienia z tzw. wychwytem radiacyjnym. Wskutek wychwyty neutronu jądro może emitować również inne cząstki, np. neutrony, protony czy cząstki alfa.

Podobnie jak w przypadku niesprężystych reakcji jądrowych protonów z jądrem atomowym, tak i każde zjawisko wychwyty neutronu prowadzi do powstania nowego jądra atomowego, które w wielu przypadkach jest w dalszym ciągu niestabilne (jest jądrem jakiegoś

promieniotwórczego izotopu) i może po pewnym czasie ulec rozpadowi promieniotwórczemu, któremu przeważnie towarzyszy emisja promieniowania gamma.

Charakter zależności przekroju czynnego od energii padającego neutronu jest w przypadku wszelkiego rodzaju wychwyty podobny jak dla rozproszenia sprężystego, choć występują między nimi niewielkie różnice. Po pierwsze można wyróżnić tu wyraźnie oddzielne trzy obszary: tzw. obszar zależności $1/v$ (gdzie v to prędkość padającego neutronu), obszar rezonansowy oraz obszar neutronów prędkich, które są ułożone w kolejności zgodnej ze wzrostem energii neutronu. W pierwszym przypadku przekrój czynny na wychwyty neutronu przez jądro atomowe ośrodka maleje wraz ze wzrostem prędkości, a co za tym idzie energii, padającego neutronu. Dzieje się tak, ponieważ dla mniejszych prędkości neutronu, oddziaływanie silne pomiędzy neutronem a jądrem atomowym ma niejako więcej czasu na zaistnienie. Energia kinetyczna neutronu jest proporcjonalna do kwadratu jego prędkości, w związku z czym można zapisać następującą zależność między przekrojem czynnym na wychwyty (σ_c) a odpowiednio prędkością (v) lub energią (E) neutronu:

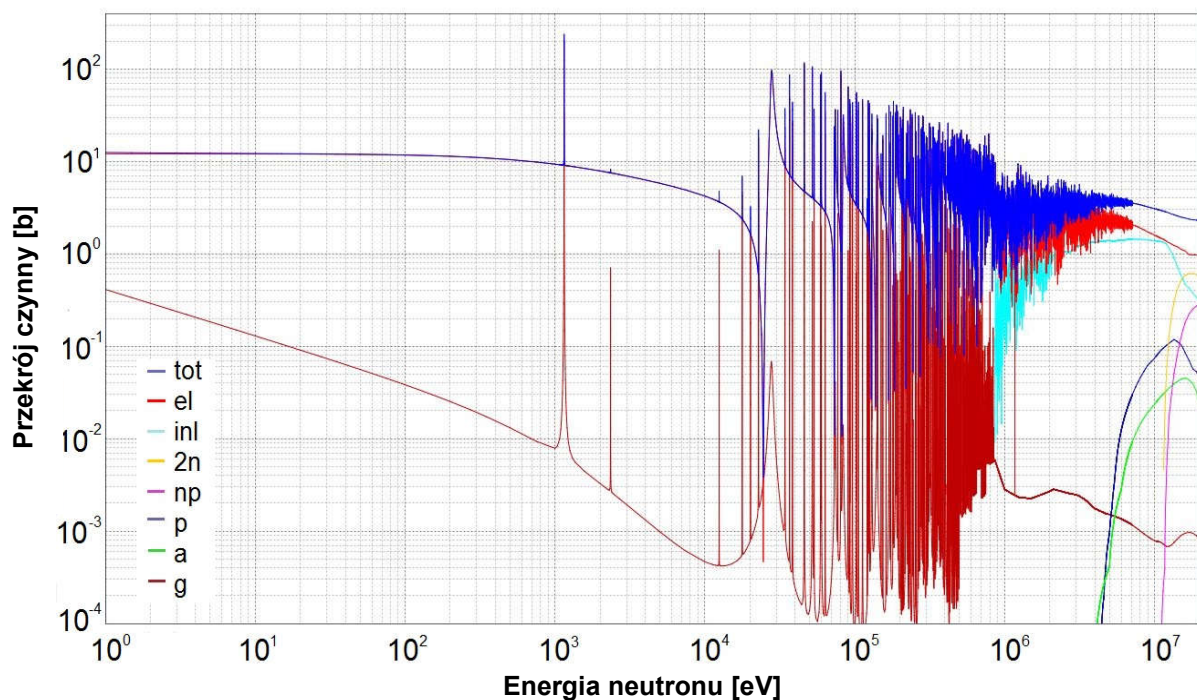
$$\sigma_c \sim \frac{1}{v} \sim \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (6)$$

Zależność ta jest prawdziwa tylko dla niewielkich energii neutronu.

Dla wyższych energii neutronu (od rzędu eV dla bardzo ciężkich jąder do rzędu MeV dla najlżejszych jąder) obowiązuje obszar rezonansowy. Jednak w przeciwieństwie do rozpraszania sprężystego, w przypadku wychwyty obserwowane w wykresie przekroju czynnego piki zwrócone są zawsze w górę, czyli są to lokalne wzrosty wartości przekroju czynnego (brak spadków ich wartości), niekiedy o kilka rzędów wielkości [27]. Ponadto piki te są symetryczne (w przeciwieństwie do asymetrycznych pików związanych z rozproszeniem sprężystym) oraz węższe niż te dla rozprożeń sprężystych. Powyższy fakt wiąże się z tym, iż czas życia wzbudzonego jądra złożonego jest odwrotnie proporcjonalny do szerokości piku, dlatego są one węższe w przypadku wychwyty (jądra złożone powstałe wskutek wychwyty żyją dłużej). Wraz ze wzrostem energii neutronu rośnie również częstość występowania pików rezonansowych, aż w końcu dochodzi do ich nakładania się. Dla jeszcze większych energii padającego neutronu w obszarze neutronów prędkich przekrój czynny jest już ciągłą i gładką funkcją energii neutronu (podobnie jak to miało miejsce z rozpraszaniem sprężystym).

W ogólności dla bardzo niskich energii padających neutronów (mniejszych niż ok. 1 meV) dominować może dowolny rodzaj oddziaływania. Zwiększając energię padającego neutronu swoją dominację zaczyna przejawiać zjawisko rozproszenia sprężystego

(kiedy to przekrój czynny na rozproszenie niesprężyste i wszelkie wychwyty spadł już znacząco zgodnie z relacją $1/v$, natomiast przekrój czynny na rozproszenie sprężyste ciągle utrzymuje się na stałym poziomie). Zwiększając energię neutronu jeszcze bardziej (do rzędu MeV), coraz większą część oddziaływań neutronu z jądrami atomowymi ośrodka zaczynają stanowić rozproszenia niesprężyste oraz wszelkiego rodzaju wychwyty, a także procesy spalacji, prowadzące do powstania nowych promieniotwórczych jąder w penetrowanym przez neutrony materiale. Dla energii rzędu kilkudziesięciu czy kilkuset MeV, przekrój czynny na zajście tych procesów może już przewyższać ten odpowiadający rozproszeniu sprężystemu. Wykres zależności przekroju czynnego na niesprężyste rozproszenie neutronu oraz jego wychwyty przez jądra atomowe żelaza ^{56}Fe w zależności od jego energii został zawarty na Rysunku 4 (wraz z wymienionym wcześniej wykresem dla rozproszenia sprężystego). Celem zachowania czytelności, skalę energii ograniczono oddolnie wartością 1 eV. Poniżej około 1 meV (niewidoczne na wykresie) dominującym rodzajem oddziaływania jest już wychwyty radiacyjny, a nie rozproszenie sprężyste.



Rysunek 4. Przekrój czynny na zajście określonego oddziaływania neutronu z jądrem żelaza ^{56}Fe w zależności od energii padającego neutronu. Oznaczenia oddziaływań związanych z wykresami: tot – całkowity przekrój czynny (suma wszystkich pozostałych), el – rozproszenie sprężyste, inl – rozproszenie niesprężyste, 2n, np, p, a, g – wychwyty neutronu z emisją kolejno: dwóch neutronów, neutronu i protonu, protonu, cząstki alfa, kwantu promieniowania gamma (wychwyty radiacyjny) – wg [28]

2.2.2 Określanie prawdopodobieństwa zajścia reakcji jądrowej neutronu z jądrami atomów ośrodka

W przypadku neutronów jednoznaczne określenie prawdopodobieństwa zajścia danego rodzaju oddziaływania na podstawie znajomości przekroju czynnego na to oddziaływanie nie jest trywialne. Dla neutronów oblicza się często inną wielkość, tzw. makroskopowy przekrój czynny (ang. *macroscopic cross-section*) na dane oddziaływanie, który reprezentuje efektywne pole powierzchni wszystkich jąder atomowych zawartych w pewnej objętości penetrowanego medium, w które musi trafić padająca cząstka, aby doszło do danego oddziaływania. Na podstawie tej wielkości oblicza się także średnią drogę swobodną (ang. *mean free path*) neutronu w danym ośrodku, czyli średnią odległość jaką neutron przebywa w rozważanym materiale pomiędzy dwoma kolejnymi oddziaływaniami. Powyższe wielkości można wyznaczyć w następujący sposób [25]:

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} = \frac{M_{\text{mol}}}{\rho N_A \sigma} \quad (7)$$

gdzie:

λ – średnia droga swobodna neutronu,

Σ – makroskopowy przekrój czynny,

M_{mol} – masa molowa ośrodka,

ρ – gęstość ośrodka,

N_A – stała Avogadro,

σ – mikroskopowy przekrój czynny.

Powyższy wzór można stosować do różnego rodzaju oddziaływań, czyli wyznaczać średnią drogę swobodną dla neutronów w danym materiale np. tylko ze względu na ich absorpcję, rozszczepienie itd.

W Tabeli 7 zawarto mikroskopowe i makroskopowe przekroje czynne oraz wartości średniej drogi swobodnej obliczone dla neutronów o różnych energiach w różnych ośrodkach. Z uwagi na fakt, iż w kontekście niniejszej pracy największe znaczenie mają reakcje jądrowe neutronów z jądrami atomowymi, które prowadzą do powstania nowych izotopów promieniotwórczych, w Tabeli 7 przedstawiono wartości przekrojów czynnych oraz średniej drogi swobodnej dla dowolnego wychwytu neutronu (czyli bez uwzględnienia rozprożeń sprężystych i niesprężystych, które nie prowadzą do zmiany składu wynikowego jądra).

Tabela 7. Mikroskopowy i makroskopowy przekrój czynny na dowolną reakcję wychwytu neutronu (bez uwzględniania rozprożeń sprężystego i niesprężystego) o określonej energii w danym ośrodku oraz określona dla nich wartość średniej drogi swobodnej. Przedział energii od 0,5 eV do 10^7 eV obejmuje w każdym przypadku obszar rezonansowy dla danego materiału – wg [17, 29]

Ośrodek	Energia [eV]	Mikroskopowy przekrój czynny [mb]	Makroskopowy przekrój czynny [mb]	Średnia droga swobodna [cm]
Fe-56	0,0253	2591	0,219	4,56
	1000	5,7	0,0005	2070
	całka: 0,5 - 10^7	1355	0,115	8,72
	$1,4 \cdot 10^7$	618	0,052	19,1
	10^8	710	0,060	16,6
Al-27	0,0253	230	0,014	72,2
	1000	1,58	0,0001	10500
	całka: 0,5 - 10^7	123	0,007	135
	$1,4 \cdot 10^7$	488	0,029	34,0
	10^8	386	0,023	43,0
C-12	0,0253	4	0,0004	2320
	1000	0,2	0,00002	46400
	całka: 0,5 - 10^7	1,9	0,0002	4880
	$1,4 \cdot 10^7$	73	0,008	127
	10^8	-	-	-
B-10	0,0253	3837000	541	0,00185
	1000	-	-	-
	całka: 0,5 - 10^7	1720000	242	0,00413
	$1,4 \cdot 10^7$	256	0,036	27,7
	10^8	-	-	-

Innym procesem, który może zajść w wyniku absorpcji neutronu przez jądro atomowe jest rozszczepienie tego jądra. Takie zjawisko może nastąpić tylko w przypadku bardzo ciężkich rozszczepialnych jąder i choć jest istotne z punktu widzenia energetyki jądrowej, to w aspekcie znaczenia dla niniejszych badań jest zaniedbywalne.

2.3 Znaczenie niesprężystych reakcji jądrowych w środowisku cyklotronu

Energie wtórnych protonów oraz neutronów powstałych w „środowisku cyklotronu” na skutek oddziaływania protonów opuszczających cyklotron z materią na swojej drodze zawierają się od praktycznie zera, aż do energii pierwotnych protonów [19, 30], a zatem pokrywają one dużą część rozważanego w tym rozdziale obszaru energii protonów i neutronów. Wiąże się z tym fakt, iż większość rodzajów oddziaływań z materią, którym mogą podlegać protony i neutrony, i które zostały powyżej opisane (rozproszenia sprężyste oraz niesprężyste na jądrach atomowych, a także niesprężyste reakcje jądrowe), będą miały swój pewien wkład w całościowe oddziaływanie tychże cząstek z materią na swojej drodze w środowisku cyklotronowym. W szczególności, w świetle dalszych rozważań w niniejszej pracy, istotne są niesprężyste reakcje jądrowe protonów oraz neutronów z jądrami atomów penetrowanych przez nie materiałów, które to reakcje prowadzą do powstania nowych jąder atomowych. Duża część tak powstałych nuklidów jest promieniotwórcza i ich rozpadom często towarzyszy emisja promieniowania gamma, na podstawie którego można je identyfikować i w niektórych przypadkach oceniać ich rozmieszczenie oraz ilość, co stanowi jeden z głównych przedmiotów badań tej pracy.

2.4 Zapis reakcji jądrowych inicjowanych przez protony i neutrony

W fizyce jądrowej bardzo często stosuje się skrócony zapis reakcji jądrowych, tzn. reakcję, w której a i b są oddziałującymi ze sobą cząstkami, natomiast c i d są produktami tej reakcji, czyli $a + b \rightarrow c + d$ można zapisać jako $a(b,c)d$. W takiej notacji dla lekkich cząstek najczęściej używa się odpowiednich skrótów, w szczególności: p to proton, n – neutron, α – cząstka alfa, γ – foton, itd. Jądra izotopów biorących udział w tych reakcjach zapisuje się w standardowy sposób, wykorzystując symbol pierwiastka chemicznego i dopisując po jego lewej stronie w indeksie górnym liczbę składających się na nie nukleonów, np. ^{16}O . W tekście pisanym często stosuje się dla wygody nieco inne oznaczenie dla izotopów, pisząc najpierw symbol chemiczny pierwiastka (bądź jego całą nazwę) i po myślniku liczbę nukleonów, np. O-16 lub tlen-16.

I tak, dla przykładu reakcję protonu z jądrem żelaza-56, w wyniku której powstaje neutron, cząstka alfa oraz wynikowe jądro manganu-52, można zapisać w następujący sposób: $^{56}\text{Fe}(p,n+\alpha)^{52}\text{Mn}$. Niekiedy wykorzystuje się również na drugim miejscu w nawiasie symbol x, który oznacza dowolną reakcję, w wyniku której powstanie określone jądro. Przykładowo, wszelkie reakcje protonu z jądrem żelaza-56, prowadzące do powstania jądra chromu-51 można zapisać w następującej postaci: $^{56}\text{Fe}(p,x)^{51}\text{Cr}$.

2.5 Promieniowanie gamma

W środowisku cyklotronu stosowanego do celów protonoterapii nie istnieje żadne pierwotne źródło promieniowania gamma, jednakże wszelkie elementy samego cyklotronu, jak i stanowisk terapii mogą stanowić potencjalne źródło promieniowania gamma, które w takim przypadku emitowane jest przez promieniotwórcze jądra izotopów wytworzonych w wyniku oddziaływania pierwotnych jąder atomowych danego elementu z padającymi na niego protonami bądź neutronami.

Powstawanie izotopów promieniotwórczych w wymieniony wyżej sposób nazywane jest w tej pracy ich produkcją, aktywacją, wzbudzeniem czy też ich generowaniem, natomiast w ogólności powstała w ten sposób promieniotwórczość określana jest najczęściej terminem promieniotwórczości wzbudzonej.

W przeciwieństwie do protonów czy neutronów, promieniowanie gamma jest falą elektromagnetyczną o odpowiednio wysokiej energii. Kwanty promieniowania gamma – fotony – obejmują zakres energii od kilku keV wzwyż. Bardzo wysokie energie kwantów gamma są spotykane np. w astrofizyce, natomiast w przypadku promieniowania gamma emitowanego przez radionuklidy jego energia leży w zakresie od kilku-kilkunastu keV do około 10 MeV [31].

Wybrane właściwości fotonu gamma, które podobnie jak w przypadku protonów i neutronów w dużej mierze warunkują jego sposób oddziaływania z materią, zawarto w Tabeli 8.

Tabela 8. Wybrane właściwości fotonu – wg [32]

Właściwość	Wartość
Nazwa cząstki	Foton
Masa	0
Średni czas życia	trwały
Ładunek elektryczny	0
Zakres energetyczny typowych fotonów gamma	od kilku keV do kilku MeV

2.5.1 Oddziaływanie promieniowania gamma z materią

Promieniowanie gamma może oddziaływać z materią na kilka sposobów, z których najważniejsze to efekt fotoelektryczny, rozpraszanie Comptona, kreacja par (lub trypletów) elektron-pozyton oraz rozpraszanie Rayleigha.

a) zjawisko fotoelektryczne

Zjawisko fotoelektryczne polega na absorpcji padającego fotonu gamma przez jeden z elektronów silnie związanych z jądrem atomowym (leżącym na wewnętrznych, bliskich jądra orbitach w atomie). Taki elektron jest następnie emitowany z atomu, uzyskując energię kinetyczną (E_k) równą różnicy energii padającego fotonu (E_f) i energii wiązania danego elektronu w atomie (E_w). Energię kinetyczną elektronu opisuje wzór:

$$E_k = E_f - E_w \quad (8)$$

Przekrój czynny na pojedynczy atom (jego jednostka to cm^2/atom) na zajście zjawiska fotoelektrycznego w funkcji liczby atomowej ośrodka i energii padającego fotonu ma następującą postać:

$$\sigma_{\text{EF}} \sim \frac{Z^m}{E^n} \quad (9)$$

gdzie:

Z – liczba atomowa ośrodka,

E – energia padającego fotonu.

Współczynniki m i n mogą przyjmować różne wartości w zależności od energii padającego kwantu promieniowania gamma. Współczynnik m przyjmuje wartości od około 4 dla niskich (rzędu 0,1 MeV) do 5 dla wysokich (kilka MeV) energii padającego fotonu. Współczynnik n przybiera wartości od około 3 do 1 dla odpowiednio niskich i wysokich energii fotonów [33]. Wynika stąd, iż prawdopodobieństwo zajścia efektu fotoelektrycznego jest tym wyższe, im wyższa jest liczba atomowa materiału ośrodka penetrowanego przez promieniowanie gamma oraz maleje wraz ze wzrostem energii tego promieniowania.

b) rozpraszanie Comptona

Kolejnym sposobem oddziaływania promieniowania gamma z materią jest rozpraszanie Comptona (komptonowskie). W takim przypadku foton padający na atom ośrodka uderza w jeden ze słabo związanych z jądrem elektronów (leżący na jednej z zewnętrznych orbit, dalej od jądra). W wyniku takiego oddziaływania padający foton zmienia swój kierunek toru lotu oraz przekazuje część swojej energii elektronowi. Elektron zostaje wyrwany z atomu i unosi przekazaną mu energię kinetyczną. Stosując zasadę zachowania pędu oraz energii i wykorzystując relatywistyczne wzory mechaniki można obliczyć energię uzyskaną przez elektron (przy założeniu, że elektron jest niezwiązany i przed oddziaływaniem spoczywa, co jest wystarczająco dobrym przybliżeniem rzeczywistej sytuacji):

$$E_{el} = E_f \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E_f}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \right) \quad (10)$$

gdzie:

E_f – energia padającego fotonu,

m_e – masa elektronu,

c – prędkość światła w próżni,

θ – kąt rozproszenia fotonu.

Z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że przekrój czynny na rozproszenie komptonowskie fotonu gamma jest praktycznie niezależny od liczby atomowej ośrodka (ze względu na upraszczające założenie, iż oddziałujący z fotonem elektron nie jest związany w atomie) oraz odwrotnie proporcjonalny do energii padającego fotonu [33]. A zatem przekrój czynny na rozpraszanie komptonowskie na jeden elektron można zapisać następująco:

$$\sigma_{RC} \sim \frac{1}{E} \quad (11)$$

gdzie E to energia padającego fotonu.

Warto zauważyć, że przekrój czynny na rozpraszanie komptonowskie obliczony na jeden atom musi być zatem proporcjonalny do wyrażenia $\frac{Z}{E}$, gdzie Z to liczba atomowa danego atomu ośrodka (a co za tym idzie liczba elektronów w danym atomie).

c) kreacja par lub trypletów

Następnym możliwym rodzajem oddziaływania promieniowania gamma z materią jest kreacja par lub trypletów. W pierwszym przypadku foton, który znajdzie się w polu elektrycznym jądra atomowego znika i w jego miejsce powstaje para elektron – pozyton. Powyższy sposób oddziaływania jest zjawiskiem progowym, pierwotny foton musi posiadać minimalną energię niezbędną do wytworzenia dwóch nowych cząstek. Wartość tej minimalnej energii jest równa sumie energii spoczynkowych elektronu i pozytonu (po 511 keV każda), czyli w dobrym przybliżeniu 1022 keV. Nadwyżka energii pierwotnego fotonu (ponad wartość progową) jest unoszona przez nowo powstałe cząstki.

Przekrój czynny na produkcję par w funkcji energii padającego promieniowania gamma i liczby atomowej ośrodka na jeden atom można przedstawić w następującej postaci [33]:

$$\sigma_{pp} \sim Z^2 \cdot f(E, Z) \quad (12)$$

gdzie:

E – energia padającego fotonu,

Z – liczba atomowa ośrodka.

Funkcja $f(E, Z)$ w niewielkim stopniu zmienia swoją wartość wraz ze zmianą Z i zaczynając od wartości progowej wzrasta logarytmicznie wraz ze wzrostem energii E [33]. W ogólności widać zatem, iż im większa energia padającego fotonu tym wyższe prawdopodobieństwo wystąpienia produkcji par elektron – pozyton (choć dla wysokich energii wzrost prawdopodobieństwa nie jest już tak bardzo widoczny z uwagi na logarytmiczny charakter funkcji $f(E, Z)$).

Istnieje także możliwość kreacji trzech cząstek (tzw. trypletu). W takim przypadku całe zjawisko zachodzi w polu kulombowskim już nie jądra atomowego, ale pojedynczego elektronu. Foton ponownie znika i w jego miejsce powstają elektron oraz pozyton, natomiast trzecią wyprodukowaną cząstką jest ten elektron, w którego polu elektrycznym całe oddziaływanie miało miejsce, i staje się on nierozróżnialny z elektronem powstałym w wyniku unicestwienia fotonu. Progowa wartość energii dla tego zjawiska jest wyższa i równa czterem energiom spoczynkowym elektronu, wynosi zatem około 2044 keV (wynika to z konieczności zachowania pędu układu [33]). W przypadku produkcji trypletu nadmiarową energię pierwotnego fotonu unoszą już trzy cząstki.

Poniżej przedstawiono stosunek sumy przekrojów czynnych na produkcję trypletu (σ_{PT}) na wszystkich elektronach danego atomu do przekroju czynnego na produkcję pary (σ_{PP}) z udziałem jądra tegoż atomu [33]:

$$\frac{\sigma_{PT}}{\sigma_{PP}} \cong \frac{1}{CZ} \quad (13)$$

gdzie:

C – parametr zależny jedynie od energii padającego fotonu,

Z – liczba atomowa ośrodka.

Dla energii fotonu dążącej do nieskończoności parametr $C = 1$ i jego wartość powoli wzrasta wraz ze spadkiem energii fotonu. Dla energii fotonu równej 5 MeV osiąga on wartość $C \approx 2$. Stąd, stosunek ze wzoru (13) przyjmuje z reguły niewielkie wartości, przykładowo dla atomów ołowiu ($Z = 82$) wynosi ok. 1% i wzrasta do kilku procent dla $Z = 10$ [33].

d) rozpraszanie Rayleigha

Innym możliwym rodzajem oddziaływania promieniowania gamma z materią jest tzw. rozpraszanie Rayleigha (istnieją również inne określenia na to rozpraszanie: spójne, sprężyste, koherentne – nazewnictwo angielskie to *coherent scattering* lub *Rayleigh scattering*) na związanych elektronach w atomie (czyli w praktyce na całych atomach). W takim procesie

niewielkiej zmianie ulega tor pierwotnego fotonu, nie zmienia się natomiast jego energia. Oddziaływanie to nie prowadzi do wybicia elektronu z atomu. Przekrój czynny na rozproszenie Rayleigha na atom jest proporcjonalny do kwadratu liczby atomowej ośrodka (Z) i odwrotnie proporcjonalny do kwadratu energii padającego na niego kwantu gamma (E) [33]:

$$\sigma_{RR} \sim \frac{Z^2}{E^2} \quad (14)$$

Poza wymienionymi powyżej, możliwe są także inne, choć w kontekście niniejszej pracy mniej istotne lub w ogóle zanedbywalne sposoby oddziaływania promieniowania gamma z materią.

e) rozpraszanie Thomsona

Pierwszym z nich jest tzw. rozproszenie Thomsona, w którym padający foton ulega sprężystemu rozproszeniu na praktycznie swobodnym (słabo związanym) pojedynczym elektronie. Zjawisko to jest dobrze opisane w ramach klasycznej teorii elektromagnetyzmu, gdzie z padającym na elektron fotonem stowarzyszona jest fala elektromagnetyczna o określonej częstotliwości i długości, pobudzająca elektron do drgań, który w ich wyniku emituje wtórne promieniowanie elektromagnetyczne (jest to tzw. promieniowanie dipolowe). W wyniku takiego oddziaływania nie zmienia się energia padającego fotonu, ani energia kinetyczna elektronu. Opisane wcześniej rozpraszanie Comptona w granicy małych energii padającego fotonu jest właśnie rozproszeniem Thomsona [34].

f) rozpraszanie fotonów na jądrach atomowych

Oprócz rozprożeń na elektronach, foton penetrujący dany ośrodek może także ulegać rozproszeniom na jądrach atomowych. W pierwszej kolejności mogą to być rozproszenia sprężyste: Thomsona (elektron zastąpiony jest tutaj po prostu przez jądro atomowe) lub rezonansowe (analogicznie jak dla neutronów, tak i w tym przypadku jądro może zaabsorbować padający na nie kwant promieniowania gamma i stać się jądrem rezonansowym, by następnie wyemitować foton o takiej samej energii co energia pierwotnego fotonu). Nastąpić może także niesprężyste rozproszenie fotonu na jądrze atomowym i wtedy nazywamy takie oddziaływanie jądrowym rozproszeniem Comptona [35].

g) rozpraszanie Delbrücka

Innym interesującym sposobem oddziaływania fotonów z materią jest tzw. rozproszenie Delbrücka. Jest to sprężyste rozproszenie fotonu w polu kulombowskim jądra atomowego.

Zjawisko to jest możliwe do teoretycznego opisanie jedynie w ramach elektrodynamiki kwantowej. Jego zajście jest możliwe w wyniku tzw. polaryzacji próżni, gdzie pole elektromagnetyczne (tu: pole kulombowskie jądra) produkuje wirtualne pary elektron-pozyton i padający kwant promieniowania gamma może zostać sprężysto rozproszony na takim właśnie wirtualnym elektronie, co nazywamy rozproszeniem Delbrücka [36].

h) reakcje fotojądrowe

Kolejnym możliwym sposobem interakcji promieniowania gamma z materią jest zajście tzw. reakcji fotojądrowej, czyli reakcji jądrowej wywołanej przez padający na jądro atomowe foton. W takim zjawisku padający foton jest absorbowany przez jądro atomowe penetrowanego ośrodka, w wyniku czego następuje emisja wtórnych cząstek z tego jądra, np. protonów, neutronów, cząstek alfa itp. W szczególnych przypadkach może nawet dojść do rozszczepienia takiego jądra. Jednakże, przekroje czynne na zajście reakcji fotojądrowych dla energii padającego kwantu gamma poniżej 5 MeV są praktycznie do zaniedbania [37], stąd reakcje te mają znikome znaczenie w kontekście detekcji promieniowania gamma emitowanego przez izotopy promieniotwórcze.

2.5.2 Określanie prawdopodobieństwa zajścia danego rodzaju oddziaływania kwantu promieniowania gamma z materią ośrodka

Podobnie jak dla neutronów, tak i w przypadku promieniowania gamma określenie prawdopodobieństwa zajścia danej interakcji kwantu promieniowania z materią jest trudne. Tu również wykorzystuje się powszechnie inną wielkość fizyczną – tzw. liniowy współczynnik osłabienia (ang. *linear attenuation coefficient*). Współczynnik ten oblicza się w następujący sposób [37]:

$$\mu_0 = \sigma \cdot \frac{\rho N_A}{M_{\text{mol}}} \quad (15)$$

gdzie:

σ - mikroskopowy przekrój czynny (na jeden atom) na zajście danego oddziaływania kwantu gamma z jądrem atomowym ośrodka,

ρ – gęstość ośrodka,

N_A – stała Avogadro,

M_{mol} – masa molowa ośrodka.

Liniowy współczynnik osłabienia jest miarą redukcji intensywności wiązki promieniowania gamma (czyli zmniejszenia liczby kwantów gamma w rozważanej wiązce) o określonej energii przez dany absorbent. W powyższy sposób można go obliczyć dla

każdego z wymienionych powyżej rodzajów interakcji fotonów z materią. Zsumowanie jego wartości dla wszystkich rodzajów oddziaływania fotonów z materią daje całkowity liniowy współczynnik osłabienia promieniowania gamma dla określonego materiału.

Często wykorzystuje się także podobną wielkość, jaką jest liniowy współczynnik absorpcji (ang. *linear absorption coefficient*). Różnica między tym współczynnikiem, a wymienionym wcześniej współczynnikiem osłabienia jest dość subtelna, mianowicie współczynnik absorpcji jest związany z ilością energii deponowanej przez promieniowanie gamma przechodzące przez dany absorbent. Ponownie, można go wyznaczyć dla każdego rodzaju oddziaływania osobno, jak i zsumować jego wartości dla wszystkich typów oddziaływań, otrzymując całkowity liniowy współczynnik absorpcji dla danego materiału. Liniowy współczynnik absorpcji można obliczyć wykorzystując znajomość liniowego współczynnika osłabienia (μ_0) w następujący sposób [37]:

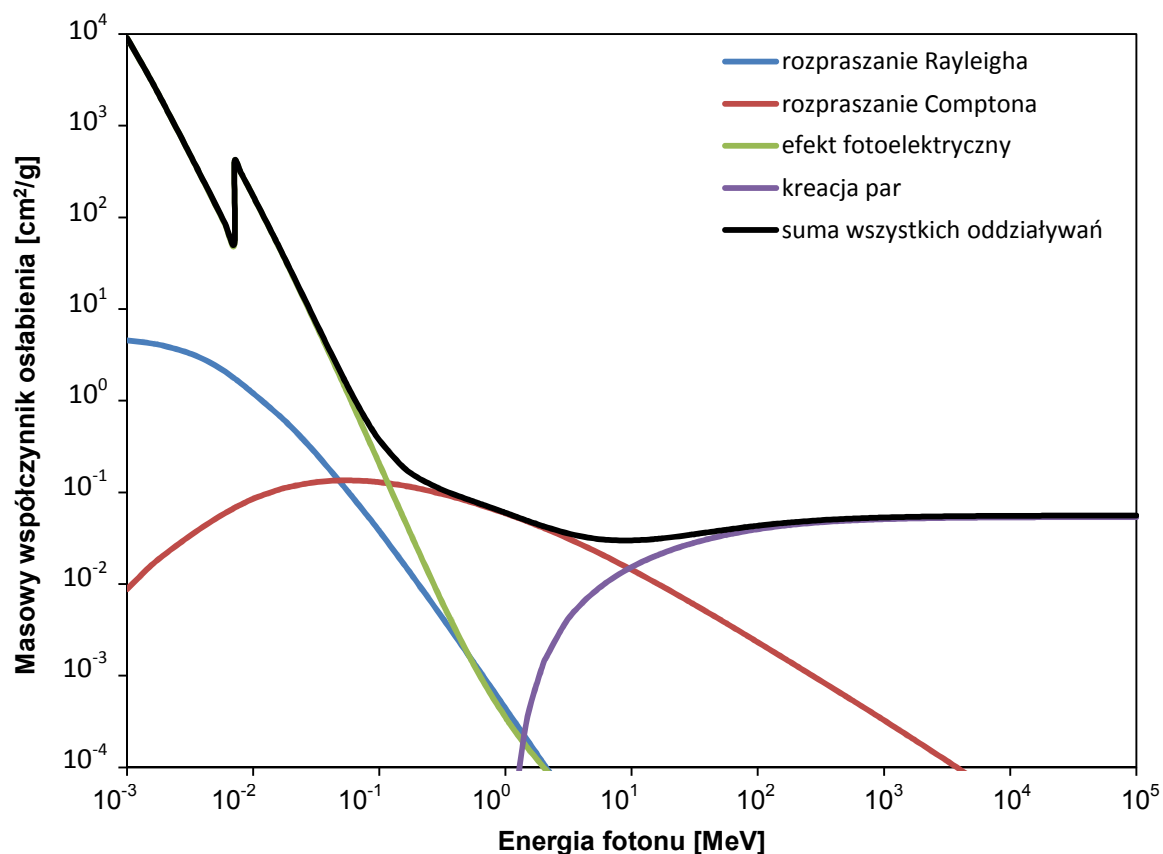
$$\mu_A = \mu_0 \cdot f \quad (16)$$

gdzie czynnik f jest stosunkiem energii przekazanej przez padający foton elektronom ośrodka (czyli energii zdeponowanej w ośrodku) do początkowej energii fotonu. Może on zatem przyjmować wartości od 0 do 1.

Warto nadmienić, że np. dla rozpraszania Rayleigha liniowy współczynnik absorpcji wynosi zero, ponieważ podczas tego oddziaływania kwant promieniowania gamma nie deponuje żadnej energii w penetrowanym medium.

Często w celach czysto praktycznych wykorzystuje się również masowe odpowiedniki podanych wyżej współczynników osłabienia lub absorpcji. Aby obliczyć wartość masowego współczynnika, należy jego liniowy odpowiednik podzielić przez gęstość (ρ) rozpatrywanego absorbenta, otrzymujemy wówczas odpowiednio masowy współczynnik osłabienia $\frac{\mu_0}{\rho}$ lub absorpcji $\frac{\mu_A}{\rho}$ [37].

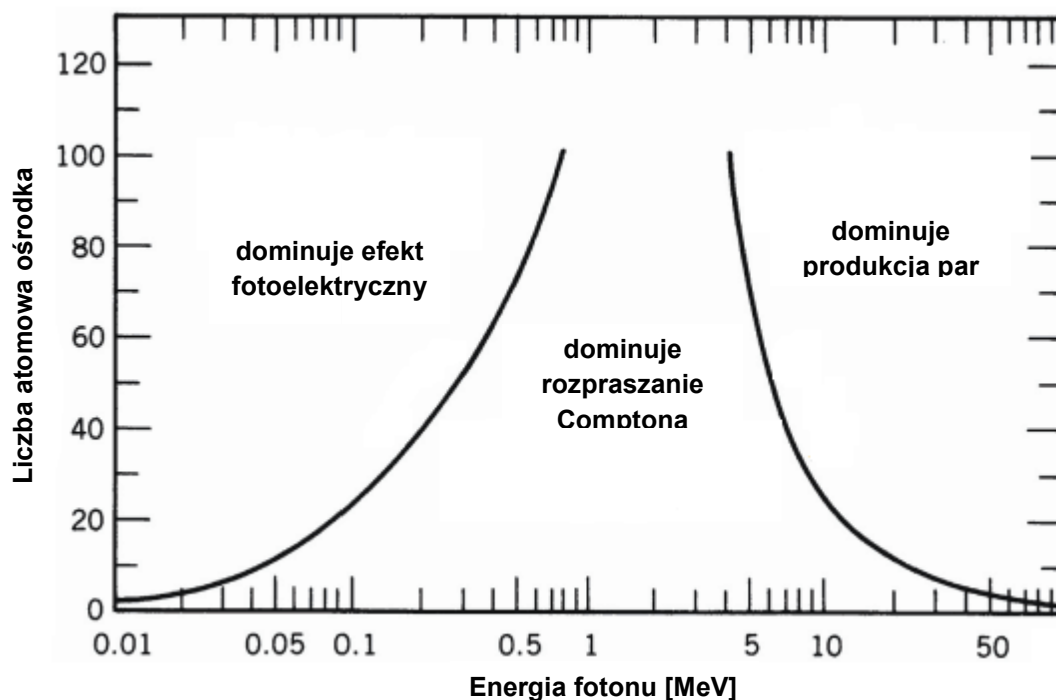
Wszystkie wymienione powyżej sposoby interakcji mają swój wkład w całościowe oddziaływanie promieniowania gamma z materią. Rysunek 5 przedstawia zależność wartości masowego współczynnika osłabienia dla różnych rodzajów oddziaływania fotonów gamma z materiałem ośrodka (w tym przypadku było to żelazo) oraz wartość całkowitego masowego współczynnika osłabienia od energii padającego kwantu promieniowania gamma.



Rysunek 5. Zależność masowego współczynnika osłabienia dla różnych rodzajów oddziaływania fotonu z materiałem ośrodka (tu: żelazo) od energii fotonu – wg [38]

Na podstawie Rysunku 5 wyraźnie widać, iż dla niskich energii padającego promieniowania dominującym sposobem oddziaływania jest zjawisko fotoelektryczne (rozpraszanie Rayleigha ma tu stosunkowo mały udział). Wraz ze wzrostem energii udział fotoefektu maleje i w zakresie średnich energii (od ok. 100 keV) dominuje już rozpraszanie Comptona. Po przekroczeniu progowej wartości energii 1022 keV swoją obecność zaczyna manifestować kreacja par elektron-pozyton i dla wysokich energii (powyżej ok. 10 MeV) produkcja par staje się już przeważającym rodzajem interakcji promieniowania gamma z materią.

Warto mieć na uwadze fakt, iż na Rysunku 5 zawarto zależność przekrojów czynnych na różne oddziaływania tylko dla jednego materiału ośrodka (zależność jedynie od energii), natomiast ich wartości w dużej mierze zależą także od rodzaju samego ośrodka (jego liczby atomowej Z). Na Rysunku 6 przedstawiono obszary dominacji różnych rodzajów oddziaływań promieniowania gamma z materią w zależności od zarówno energii padającego fotonu, jak i liczby atomowej ośrodka.



Rysunek 6. Obszary dominacji różnych rodzajów oddziaływania promieniowania gamma z materią w zależności od energii padającego kwantu promieniowania gamma i liczby atomowej ośrodka – wg [39]

Warto zauważyć, że zwłaszcza w przypadku lekkich ośrodków (o niskiej liczbie atomowej) zakres energetyczny fotonów, dla których dominuje rozpraszanie komptonowskie jest bardzo szeroki (od kilkunastu-kilkudziesięciu keV do kilkunastu-kilkudziesięciu MeV).

2.6 Podstawowe pojęcia ochrony radiologicznej

W kontekście ochrony radiologicznej najbardziej pożądana jest wiedza o wartości dawki zaabsorbowanej przez osobę narażoną na ekspozycję na promieniowanie jonizujące. I tak, podstawową wielkością dozymetryczną jest, wyrażana w grejach (Gy), dawka pochłonięta D zdefiniowana następująco [40]:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (17)$$

gdzie:

$d\bar{\epsilon}$ – średnia energia przekazana przez promieniowanie jonizujące materii w elemencie objętości,

dm – masa materii w tym elemencie.

Z punktu widzenia ochrony radiologicznej pacjentów bądź personelu dowolnej placówki gdzie wykorzystywane jest promieniowanie jonizujące, kluczowe jest określenie biologicznych skutków narażenia na to promieniowanie. W zależności od tego z jakim

rodzajem promieniowania mamy do czynienia, efekt jego interakcji z tkanką człowieka może być różny. Wielkością biorącą ten fakt pod uwagę jest, wyrażana w siwertach (Sv), dawka równoważna zdefiniowana w następujący sposób [40]:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (18)$$

gdzie:

w_R – czynnik wagowy promieniowania R,

$D_{T,R}$ – dawka pochłonięta uśredniona w tkance lub narządzie T, ważona dla rodzaju i energii promieniowania R.

Wielkością określającą stopień narażenia całego ciała na promieniowanie jest dawka efektywna (skuteczna) E , w której sumuje się wszystkie dawki równoważne dla poszczególnych narządów składających się na całość ludzkiego ciała [40]:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (19)$$

gdzie w_T – czynnik wagowy tkanki lub narządu T.

Niestety zarówno dawka równoważna, jak i dawka efektywna nie są wielkościami mierzalnymi w praktyce. Aby oszacować ich wartości stosuje się tzw. wielkości operacyjne, czyli wielkości, które są stosunkowo łatwo mierzalne w praktyce, a jednocześnie z akceptowalną dokładnością przybliżają wartości odpowiadających im wielkości niemierzalnych.

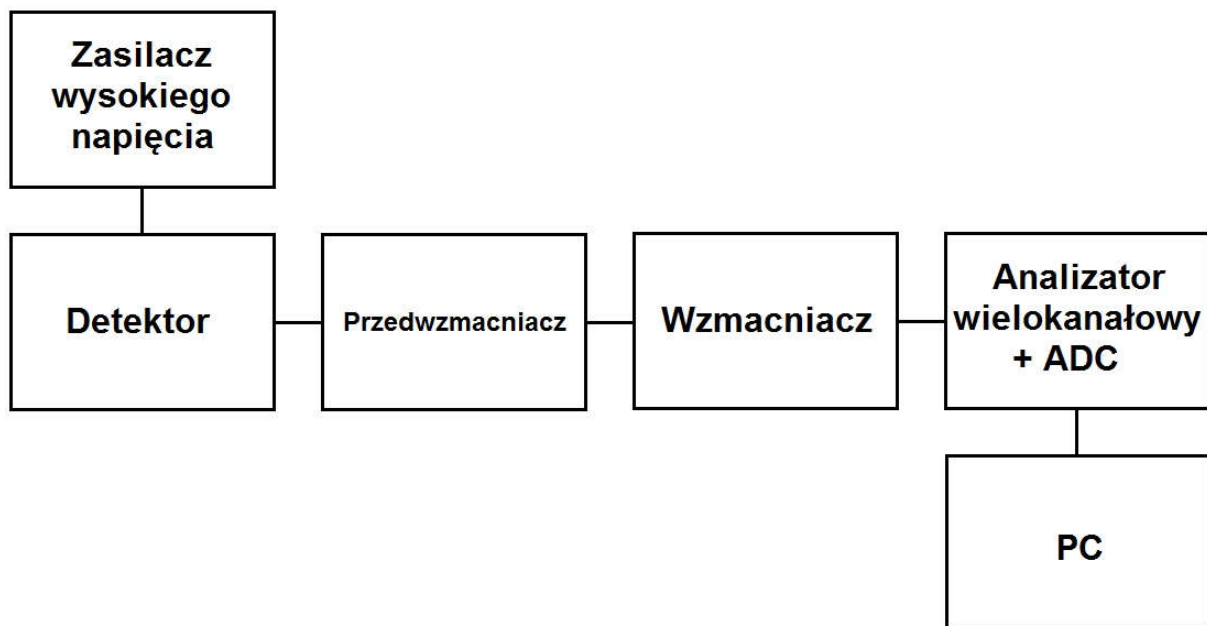
I tak, najczęściej używaną wielkością do monitorowania obszaru (ang. *area monitoring*) pod kątem zewnętrznego narażenia na promieniowanie jonizujące, która ma oddawać wartość dawki efektywnej, jest przestrzenny równoważnik dawki $H^*(10)$ (w odróżnieniu od monitorowania indywidualnego, z ang. *personal monitoring*, gdzie używa się $H_p(10)$ – wg [41]). $H^*(10)$ jest zdefiniowany jako równoważnik dawki w punkcie pola promieniowania, który byłby wytworzony przez odpowiednie pole rozciągnięte i zorientowane w kuli ICRU na głębokości 10 mm (patrz [40]) na promieniu przeciwnym do kierunku tego pola. Jednostką przestrzennego równoważnika dawki jest siwert (Sv).

Urządzenia radiometryczne najczęściej podają moc przestrzennego równoważnika dawki $H^*(10)$, czyli jego przyrost w odpowiednio małej jednostce czasu. Potocznie wielkość tę nazywa się dla wygody po prostu mocą dawki (w niniejszej pracy każde następne wystąpienie hasła moc dawki będzie oznaczało właśnie moc przestrzennego równoważnika dawki $H^*(10)$). Jednostką mocy dawki jest Sv/s, w praktyce częściej wykorzystuje się jej przeskalowaną wartość, np. $\mu\text{Sv/h}$ lub nSv/h .

3. Podstawy spektrometrii promieniowania gamma

Główną techniką eksperymentalną wykorzystywaną w ramach niniejszej pracy jest spektrometria promieniowania gamma. Jest to powszechnie stosowana metoda badawcza umożliwiająca otrzymanie widma energetycznego promieniowania gamma, tj. rozkładu częstości rejestrowanych fotonów w funkcji ich energii, emitowanego przez analizowaną substancję. Otrzymane w wyniku pomiaru spektrometryczne widmo może posłużyć do jakościowej (lokalizacja i identyfikacja radionuklidów), a w wielu przypadkach również ilościowej (m.in. wyznaczenie aktywności zidentyfikowanych radionuklidów) analizy zawartości gamma-promieniotwórczych izotopów obecnych w badanej próbce.

Uzyskanie widma energetycznego promieniowania gamma jest możliwe dzięki użyciu układu spektrometrycznego. Kluczową część całego urządzenia stanowi sam detektor, który wyposażony jest ponadto w niezbędny układ elektroniczny. Schemat blokowy typowego układu spektrometrycznego przedstawiono na Rysunku 7.



Rysunek 7. Schemat blokowy typowego układu gamma-spektrometrycznego

3.1 Przebieg procesu pomiarowego

Przebieg całego procesu pomiarowego można w uproszczeniu opisać w następujący sposób. Detektor rejestruje kwanty promieniowania gamma emitowanego przez badaną próbkę. Sygnałem na wyjściu detektora powstałym w wyniku absorpcji w jego objętości takiego kwantu gamma jest ładunek elektryczny, którego wartość w idealnym przypadku jest proporcjonalna do energii zarejestrowanego fotonu gamma. Następnie sygnał ten trafia do przedwzmacniacza, który przetwarza go na impuls napięciowy. Impuls ten kierowany jest

w dalszej kolejności do wzmacniacza, gdzie jest on odpowiednio kształtowany. Tak zmodyfikowany impuls napięciowy opuszczający wzmacniacz trafia do analizatora wielokanałowego (ang. *MCA – Multi-Channel Analyzer*), którego najważniejszym elementem jest przetwornik analogowo-cyfrowy (ang. *ADC – Analogue-to-Digital Converter*). W przetworniku sygnał z postaci analogowej konwertowany jest do postaci cyfrowej i po przejściu przez kolejne podzespoły analizatora umieszczany jest w odpowiednim kanale. Numer kanału, do którego przyporządkowany jest dany impuls jest wprost proporcjonalny do wysokości impulsu, a co za tym idzie do energii pierwotnie zarejestrowanego przez detektor kwantu promieniowania gamma. Kolejne impulsy trafiające do tego samego kanału analizatora są w nim sumowane, dzięki czemu w wyniku pomiaru otrzymuje się widmo energetyczne promieniowania gamma. Dokładniej rzecz ujmując jest to histogram, przedstawiający rozkład liczby rejestrowanych fotonów w zależności od odpowiadającej im energii (a ściślej od numeru kanału analizatora). Całość połączona jest z komputerem, dzięki czemu przebieg procesu pomiarowego, jego parametry oraz wyniki mogą być na bieżąco sprawdzane i ewentualnie modyfikowane przez użytkownika.

Warto nadmienić, iż w klasycznej spektrometrii promieniowania gamma stosuje się stacjonarne układy spektrometryczne, a samą próbkę umieszcza się najczęściej bezpośrednio na lub w niewielkiej odległości od detektora, tak, że geometria pomiarowa jest dokładnie określona. Inną odmianą tej metody badawczej jest tzw. spektrometria gamma *in situ*, gdzie wykorzystywane są przenośne układy spektrometryczne, a w większości przypadków próbka nie jest pobierana i transportowana do laboratorium, lecz sam pomiar odbywa się w miejscu, gdzie znajduje się badany obiekt (np. beczka z odpadami promieniotwórczymi, gleba na rozległym obszarze czy tak jak w niniejszej pracy elementy stanowisk terapii protonowej przy cyklotronie).

3.2 Powstawanie widma energetycznego promieniowania gamma

Ostateczna postać zebranego w trakcie pomiaru widma jest w dużej mierze uwarunkowana sposobem oddziaływania rejestrowanego promieniowania gamma z materiałem detektora. Z punktu widzenia niniejszej pracy, w której głównym źródłem informacji o promieniotwórczości wzbudzonej w różnych komponentach środowiska cyklotronu Proteus C-235 są właśnie widma energetyczne promieniowania gamma, znajomość procesu powstawania takiego widma i umiejętność poprawnej identyfikacji jego poszczególnych składowych wydaje się być bardzo istotna. Poniżej przedstawiono jakie fizyczne oddziaływania zachodzą w objętości detektora i jego najbliższym otoczeniu podczas pomiaru

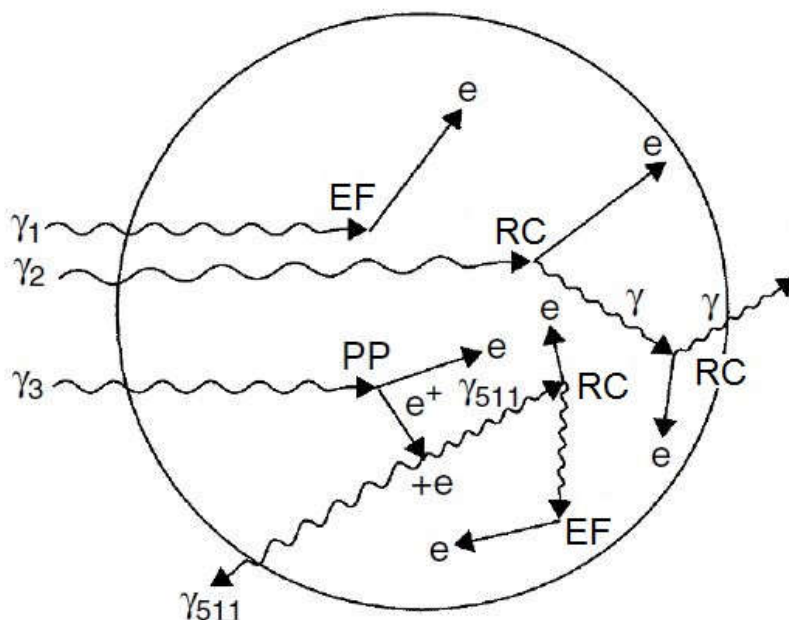
gamma-spektrometrycznego oraz jaki mają one wpływ na uzyskiwaną w jego wyniku postać widma.

Kwant promieniowania gamma nie posiada ładunku elektrycznego, w związku z czym nie powoduje bezpośredniej jonizacji materiału detektora. Musi on najpierw sprawić, by w wyniku jego oddziaływania z materią doszło do powstania elektronu swobodnego, który może już prowadzić do dalszej jonizacji i mieć bezpośredni wkład w sygnał wyjściowy detektora, jakim jest zebrany ładunek (patrz rozdział 3.1). Może to nastąpić na skutek trzech spośród wymienionych w rozdziale 2.5.1 rodzajów oddziaływań fotonów gamma z materią: efektu fotoelektrycznego, rozpraszania Comptona oraz tworzenia par elektron-pozyton. Rozpraszanie Rayleigha, mimo iż jest stosunkowo wysoko prawdopodobnym sposobem interakcji, nie powoduje powstania swobodnego nośnika ładunku elektrycznego, nie wnosi zatem żadnego wkładu do zbieranego widma promieniowania gamma.

Jeśli foton po wejściu w objętość detektora zostanie zaabsorbowany na skutek zjawiska fotoelektrycznego zanim nastąpi jego rozproszenie komptonowskie bądź kreacja par, to cała jego energia zostanie przekazana uwolnionemu elektronowi i będzie się to przekładało na występowanie w końcowym widmie tzw. pików całkowitej absorpcji (fotopików). Inną możliwością jest oczywiście rozproszenie Comptona, po zejściu którego pozostaje foton o zmniejszonej energii i elektron. Tak rozproszony foton może ponownie wejść w interakcję z materiałem detektora na trzy wymienione powyżej sposoby. Tym trzecim sposobem jest kreacja par, która może nastąpić jedynie gdy energia fotonu przekracza wartość progową równą 1022 keV. Powstały w jej wyniku elektron podobnie jak w przypadku poprzednich dwóch zjawisk ma już bezpośredni wkład w ładunek zbierany na wyjściu detektora, natomiast pozyton najczęściej anihiluje (po uprzedniej stracie większości swojej energii) po interakcji z elektronem zawartym w materiale detektora. W efekcie powstają dwa nowe przeciwbieżne kwanty gamma o energiach 511 keV każdy. Tak powstałe fotony znów mogą podlegać trzem powyższym rodzajom oddziaływań.

Należy mieć na uwadze fakt, że w przypadku dużych rozmiarów detektora, ostatecznym zjawiskiem doprowadzającym do absorpcji fotonu gamma w jego materiale jest, bez względu na jego wcześniejszą historię, zjawisko fotoelektryczne. Sprawia to, że swój wkład w obecny w widmie pik całkowitej absorpcji mogą mieć również pośrednio oddziaływanie Comptona oraz proces tworzenia par (ważne jest, aby całość niesionej przez pierwotny kwant gamma energii została zdeponowana w detektorze). W rzeczywistych przypadkach rozmiary detektora są oczywiście ograniczone i zawsze pewna część fotonów opuszcza objętość detektora nie będąc zaabsorbowanym. Może się to przytrafić zarówno

fotonom pierwotnym, jak i tym rozproszonym komptonowsko (nawet kilkakrotnie), czy powstałym w wyniku anihilacji pary elektron-pozyton. Różne możliwe rodzaje oddziaływania fotonu w materiale detektora przedstawiono na Rysunku 8.



Rysunek 8. Najczęstsze rodzaje oddziaływań fotonów z materiałem typowego detektora promieniowania gamma. Oznaczenia zjawisk: EF – efekt fotoelektryczny, RC – rozproszenie Comptona, PP – produkcja pary elektron-pozyton – wg [37]

Mając na uwadze powyższe rozważania można wyjaśnić obecność różnych składowych w widmie energetycznym promieniowania gamma. Jak już wyżej wspomniano piki całkowitej absorpcji wiążą się z depozycją całości energii padającego na detektor kwantu promieniowania gamma w objętości detektora. Nie zaabsorbowane w detektorze fotony o energiach 511 keV (powstałe po uprzedniej reakcji par, a następnie anihilacji pozytonu z elektronem) prowadzą z kolei do powstawania w widmie tzw. pików pojedynczej ucieczki (gdy z objętości detektora „ucieknie” jeden foton z anihilacji) i podwójnej ucieczki (gdy detektor opuszczą oba fotony), które są przesunięte względem związanego z nimi piku całkowitej absorpcji o odpowiednio 511 i 1022 keV w stronę niższych energii. Natomiast fotony o energiach 511 keV, które zostaną zaabsorbowane w materiale detektora prowadzą do powstania w widmie piku całkowitej absorpcji o tej właśnie energii 511 keV, często nazywanego pikiem anihilacyjnym.

Inną składową widma jest widoczna zwłaszcza w przypadku obecności niewielu dużych pików całkowitej absorpcji powiązana z każdym z nich tzw. krawędź komptonowska. Pojawia się ona w widmie przesunięta o pewną wartość w stronę niższych energii w stosunku

do odpowiadającego jej fotopiku. Jej obecność związana jest z faktem, że gdy foton rozprasza się komptonowsko, to biorący udział w tym procesie elektron może uzyskać jedynie pewną maksymalną wartość energii, zależną od energii padającego nań fotonu (patrz wzór (10)). Położenie krawędzi komptonowskiej jest równe tej energii. Ponieważ taki elektron może oczywiście uzyskać dowolnie mniejszą energię, to w zakresie energii niższych niż krawędź komptonowska znajduje się z kolei zawsze tzw. kontinuum komptonowskie (często nazywane również tłem komptonowskim), związane z tymi właśnie elektronami powstałymi w wyniku zjawiska Comptona.

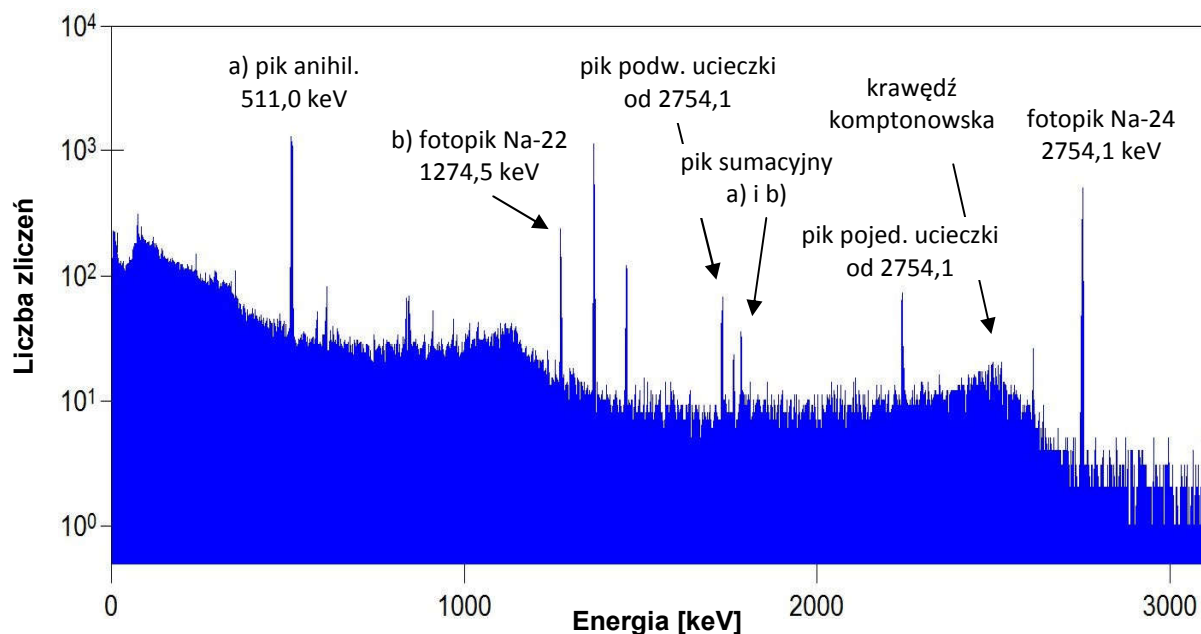
Elementem widma pojawiającym się w zakresie niskich energii jest również pik rozproszenia wstecznego. Związany jest on z faktem, iż foton, który opuścił już objętość detektora, może rozproszyć się wstecznie na elektronach materiału otaczającego detektor (np. jego ścianki), wrócić do objętości detektora i tam zostać zaabsorbowany.

Z uwagi na fakt, iż celem redukcji sygnału pochodzącego od promieniowania tła w ogromnej większości przypadków detektor znajduje się w domku osłonnym bądź osłonie ołowianej, to w widmie widoczne mogą być także piki pochodzące od charakterystycznego promieniowania X wzbudzonego na skutek absorpcji fotoelektrycznej promieniowania gamma w ołowiu (w zakresie energii 70 – 85 keV [37]). Często stosowanym rozwiązaniem jest użycie tzw. liningu, polegającego na obłożeniu wewnętrznej strony osłony ołowianej cienkimi warstwami kolejno kadmu i miedzi. Kadm ma za zadanie zatrzymywać promieniowanie X ołowiu, natomiast sam emituje wtedy własne promieniowanie charakterystyczne, które z kolei pochłaniane jest w warstwie miedzi. Ta również emituje kwanty charakterystycznego promieniowania X, lecz leżą one w zakresie energii 8 – 9 keV, co nie wpływa już negatywnie na jakość otrzymywanego w pomiarze widma.

W zakresie wysokich energii zawsze pojawia się ponadto region spiętrzenia impulsów (ang. *pile-up*). Obecność takich wysokoenergetycznych impulsów wynika z faktu, iż co pewien czas dwa kwanty gamma zostaną zarejestrowane przez detektor w tym samym momencie i układ elektroniczny potraktuje je jako jeden kwant gamma o energii równej sumie energii tychże dwóch fotonów.

W końcu, zawsze należy mieć na uwadze fakt, iż zwłaszcza w przypadku pomiarów nisko aktywnych próbek, swój wkład w ostateczną postać widma będą też miały piki pochodzące od tzw. tła promieniowania gamma emitowanego przez występujące naturalnie w środowisku radionuklidy, głównie izotop potasu K-40, a także izotopy uranu i toru, U-238 i Th-232 oraz ich pochodne.

Przykładowe widmo energetyczne promieniowania gamma zawierające niektóre z wymienionych powyżej składowych przedstawiono na Rysunku 9.

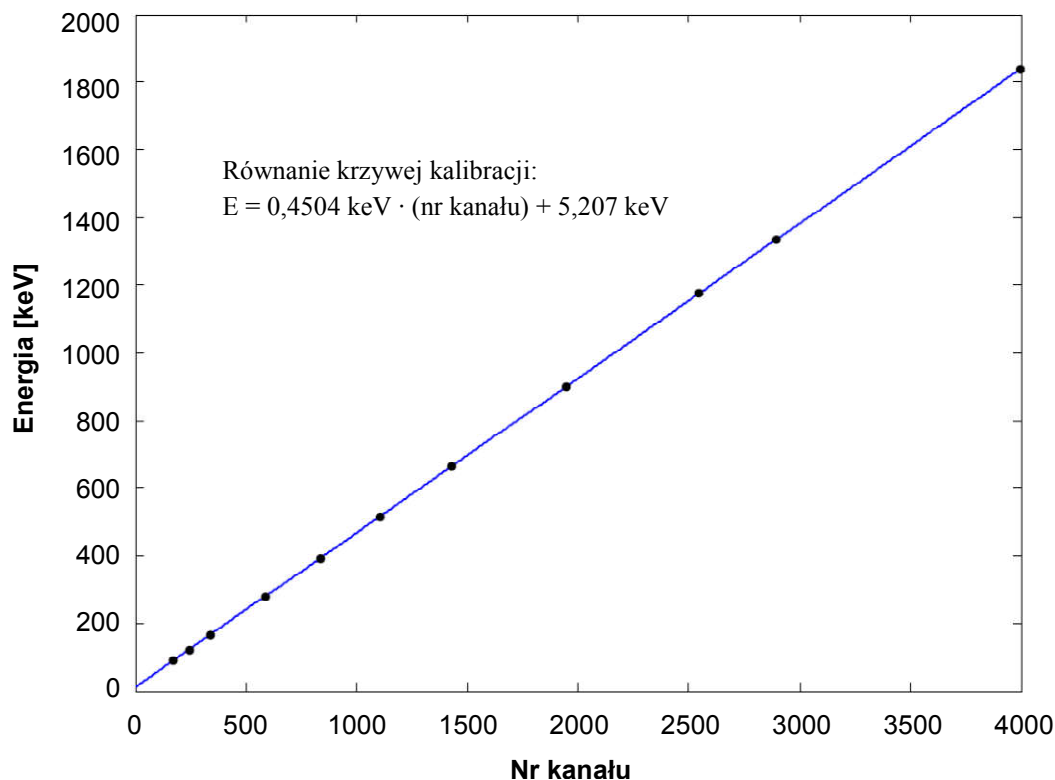


Rysunek 9. Przykładowe widmo uzyskane w wyniku pomiaru gamma-spektrometrycznego z charakterystycznymi dla niego składowymi: piki całkowitej absorpcji (fotopiki), piki pojedynczej i podwójnej ucieczki, krawędzie komptonowskie, piki sumacyjne

3.3 Kalibracja energetyczna i wydajnościowa

Pomiar energii rejestrowanego przez detektor promieniowania gamma umożliwia identyfikację obecnych w badanej próbce radionuklidów. Jest to możliwe dzięki temu, iż każdy izotop gamma-promieniotwórczy emituje kwanty promieniowania gamma o ściśle określonych wartościach energii. Celem uzyskania możliwości wyznaczania tej energii konieczne jest przeprowadzenie kalibracji energetycznej układu spektrometrycznego. Polega ona na wyznaczeniu zależności energii rejestrowanego promieniowania gamma od kanału analizatora. Najczęściej dokonuje się jej poprzez pomiar jednego lub wielu źródeł kalibracyjnych, które emitują promieniowanie gamma o znanych energiach. Oznacza to, że eksperymentator musi być w stanie jednoznacznie zidentyfikować pojawiające się w widmie w wyniku pomiaru takiego źródła fotopiki, czyli wiedzieć, jaka energia odpowiada danemu pikowi (danej linii w widmie promieniowania gamma). Dla każdego z takich pików odczytywany jest kanał, w którym znajduje się jego maksimum oraz odpowiadająca mu energia. Posiadając kilka lub kilkanaście takich dobrze określonych punktów zależności energia-kanał (najlepiej z jak najszerszego zakresu energii), dopasowuje się do nich odpowiednią funkcję, najczęściej jest to wielomian 1. lub 2. stopnia. W ten sposób otrzymuje

się krzywą opisującą zależność energii rejestrowanego promieniowania gamma E od kanału analizatora spektrometru, czyli zależność $E = f(\text{nr kanału})$. Przykładową krzywą kalibracji energetycznej przedstawiono na Rysunku 10.



Rysunek 10. Typowa krzywa kalibracji energetycznej układu spektrometrycznego

Do przeprowadzenia jakościowej analizy zebranego widma energetycznego promieniowania gamma, czyli identyfikacji obecnych w badanej próbce izotopów, wystarczające jest wykonanie kalibracji energetycznej układu spektrometrycznego. Celem przeprowadzenia analizy jakościowej, czyli wyznaczenia aktywności tychże izotopów w próbce, konieczne jest ponadto sporządzenie kalibracji wydajnościowej. Wynika to z faktu, iż do obliczenia aktywności konieczna jest znajomość wydajności detektora (czyli stosunku liczby kwantów rejestrowanych przez detektor do liczby wszystkich kwantów wyemitowanych przez próbkę) dla danej energii promieniowania gamma. Co istotne, wydajność ta jest różna dla różnych wartości energii.

Kalibracja wydajnościowa spektrometru polega na wyznaczeniu wydajności układu spektrometrycznego (ε) w zależności od energii rejestrowanego promieniowania (E), czyli na określeniu funkcji $\varepsilon = f(E)$. Wydajność można wyrazić poprzez aktywność zawartego w badanej próbce odpowiedniego radionuklidu w następujący sposób:

$$\varepsilon(E) = \frac{N(E)}{TAp(E)} \quad (20)$$

gdzie:

$N(E)$ – liczba zliczeń w fotopiku odpowiadającym energii E ,

T – czas trwania pomiaru,

A – aktywność zawartego w próbce radionuklidu emitującego fotony o energii E ,

$p(E)$ – prawdopodobieństwo emisji fotonów gamma o energii E przez ten radionuklid, liczone na jeden rozpad. Wielkość tę często nazywa się również intensywnością (ang. *intensity*) lub wydajnością kwantową.

Kalibracji wydajnościowej spektrometru dokonuje się standardowo poprzez pomiar widma jednego lub wielu źródeł kalibracyjnych mierzonych w takich samych geometriach jak próbki. Źródła muszą mieć znaną aktywność oraz emitować promieniowanie gamma z odpowiedniego zakresu energii. Na podstawie uzyskanego widma wyznacza się pole pod interesującym eksperymentatora pikiem o energii E , czyli liczbę zliczeń $N(E)$. Znając czas trwania pomiaru T , aktywność źródła kalibracyjnego A oraz prawdopodobieństwo emisji fotonu o energii E , tj. $p(E)$, przy wykorzystaniu wzoru (20) oblicza się wydajność spektrometru dla danej energii $\varepsilon(E)$. W kolejnych krokach powtarza się powyższe czynności otrzymując wydajność dla kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu różnych energii. Po dopasowaniu do tak uzyskanych punktów odpowiedniej funkcji otrzymuje się ciągłą zależność wydajności od energii promieniowania, jest to tzw. krzywa wydajności spektrometru $\varepsilon = f(E)$.

Najczęściej stosowanym rodzajem funkcji dopasowującej jest wielomian (w skali logarytmiczno-logarytmicznej) następującej postaci:

$$\log \varepsilon(E) = \sum_{i=0}^n a_i \left(\log \frac{E}{E_0} \right)^i \quad (21)$$

gdzie:

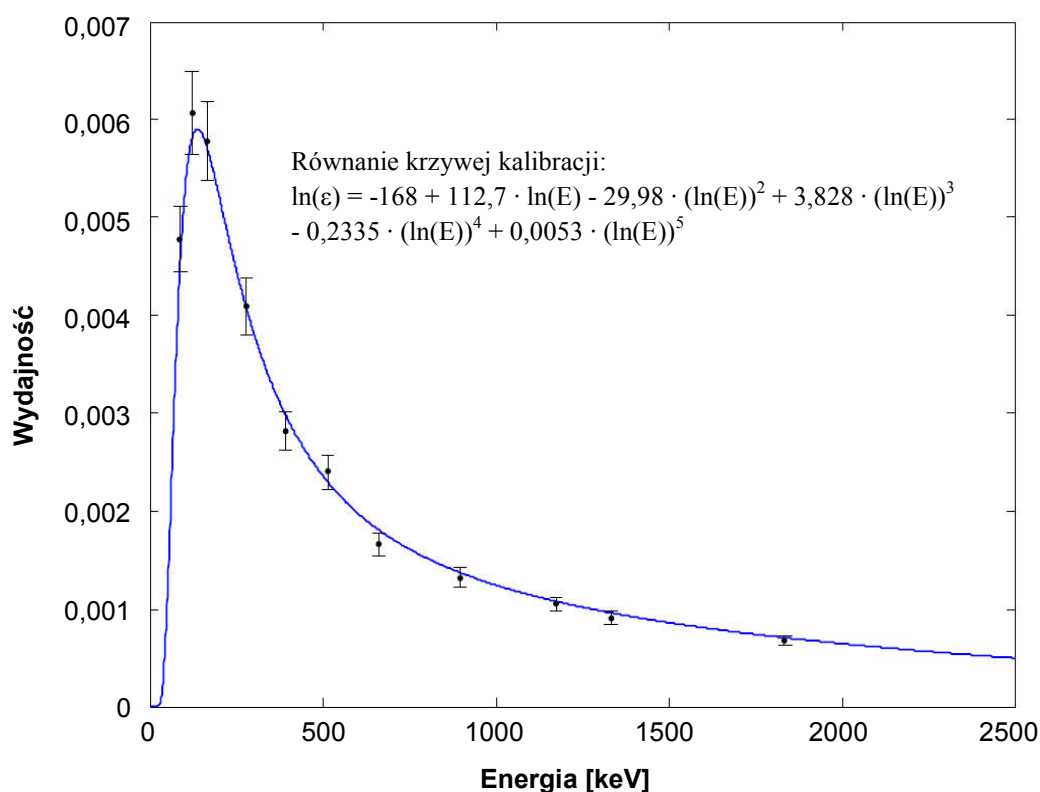
n - stopień wielomianu,

a_i - kolejne współczynniki wielomianu,

E_0 - stała zapewniająca bezwymiarowość argumentu logarytmu, najczęściej przyjmuje się, że $E_0 = 1$ keV.

Typowa krzywa wydajności spektrometru z detektorem HPGe ma charakterystyczny kształt (Rysunek 11). Dla niskich energii wydajność rośnie aż do energii około 100 - 150 keV, gdzie osiąga maksimum, a następnie wraz z dalszym wzrostem energii zaczyna maleć.

Należy pamiętać, że o ile kalibracja energetyczna spektrometru jest uniwersalna (przy stałości wzmocnienia wyjściowych impulsów z detektora zależność energia-kanal pozostaje praktycznie bez zmian), to kalibrację wydajnościową należy wyznaczyć oddzielnie dla każdej ze stosowanych geometrii pomiarowych.



Rysunek 11. Typowa krzywa kalibracji wydajnościowej układu spektrometrycznego

3.4 Kalibracja wydajnościowa w spektrometrii gamma in situ

Kalibracja wydajnościowa w spektrometrii gamma in situ stanowi kwestię bardziej problematyczną niż w przypadku pomiarów laboratoryjnych. Sporządzenie wzorców kalibracyjnych spełniających odpowiednie wymagania (znana aktywność zawartych w nich poszczególnych radionuklidów, wystarczająca liczba linii obecnych w widmie energetycznym itd.) w geometriach takich samych jak mierzone próbki jest trudne, a dla nietypowych geometrii pomiarowych często wręcz niemożliwe do wykonania.

W przeszłości często stosowanymi metodami kalibracyjnymi były metody półempiryczne, w których na podstawie pewnych teoretycznych założeń dotyczących zjawisk zachodzących w detektorze wyprowadza się matematyczne zależności pomiędzy mierzalnymi eksperymentalnie wielkościami. Wartość tych doświadczalnie mierzalnych wielkości określa się poprzez wykonanie serii pomiarów punktowych źródeł promieniotwórczych (łatwo dostępnych dla każdego laboratorium). Znajomość tych wielkości wyznaczonych dla różnych

energii padających kwantów gamma i wykorzystanie ich w wyprowadzonych matematycznych formułach (nierzadko skomplikowanych obliczeniowo) pozwala na determinację krzywych wydajności rozważanego układu spektrometrycznego dla pewnych szczególnych typów geometrii pomiarowych. Dla przykładu, można to zrobić dla nieskończonej powierzchni o pewnej grubości znajdującej się w ustalonej odległości od detektora, w której materiał będący źródłem promieniowania jest rozdystrybuowany w różny sposób – jednorodnie w całej objętości, powierzchniowo czy też eksponencjalnie maleje wraz z głębokością. Opisy takich metod można znaleźć np. w publikacjach Moensa [42], Lépy [43] czy EML (ang. *Environmental Measurements Laboratory*) [44].

W ostatnich latach coraz częściej stosowaną techniką kalibracji układów gamma-spektrometrycznych, zwłaszcza tych przeznaczonych do pomiarów *in situ*, jest „matematyczne” obliczanie ich wydajności. Podstawą w tego typu obliczeniach jest wykorzystanie metody Monte Carlo, która ma możliwość „rozwiązania” równania transportu dla fotonu poprzez symulację jego historii z uwzględnieniem przekrojów czynnych na różnego rodzaju oddziaływania fotonu z materią w zależności od jego energii, liczby atomowej danego ośrodka itd. Teoretycznie możliwe jest zatem zamodelowanie dowolnej geometrii pomiarowej.

Istnieją gotowe pakiety umożliwiające przeprowadzanie takich obliczeń wykorzystujących metodę Monte Carlo. Wśród nich można wyróżnić m.in. MCNP™ (ang. *Monte Carlo N-Particle code - MCNP is a trademark of Los Alamos National Security, LLC, Los Alamos National Laboratory*), GEANT4 (ang. *GEometry ANd Tracking*) czy FLUKA (niem. *FLUktuierende KAskade*). Są to pakiety ogólnego zastosowania stworzone na potrzeby dużych eksperymentów, głównie w dziedzinie fizyki cząstek. Nie można ich traktować jako łatwych w użyciu programów podających automatycznie pożądane przez użytkownika wielkości. Celem uzyskania wiarygodnych rezultatów należy korzystać z owych pakietów z dużą dozą zrozumienia sposobu ich działania.

Istnieją także programy wykorzystujące powyższe kody Monte Carlo, które są jednak ściśle dedykowane jedynie pomiarom gamma-spektrometrycznym. W przypadku każdego z nich konieczne jest wykonanie przynajmniej jednego pomiaru widma promieniowania gamma emitowanego przez wzorcowe, najczęściej punktowe, źródło promieniotwórcze. Robi się to w celu wyznaczenia wydajności detektora dla różnych energii w tejże wzorcowej geometrii pomiarowej. Przeliczenie na wydajność w innych geometriach następuje już przy pomocy metody Monte Carlo. Wśród tych programów można wyróżnić

bezpłatne, udostępnione przez twórców: ETNA, EFFTRAN, InSiCal lub komercyjne: GESPECOR, EffMaker, ANGLE czy ISOCS.

3.5 Obliczanie aktywności izotopu promieniotwórczego

Posiadając już sporządzoną kalibrację energetyczną i wydajnościową układu spektrometrycznego dla konkretnej geometrii pomiarowej, po zebraniu widma energetycznego promieniowania gamma, można na jego podstawie wyznaczyć aktywność zawartych w badanej próbce izotopów gamma-promieniotwórczych. Oblicza się ją w następujący sposób:

$$A = \frac{N(E)}{T\varepsilon(E)p(E)} C_s C_c C_r C_i \quad (22)$$

gdzie:

$N(E)$ – liczba zliczeń w fotopiku odpowiadającym energii E ,

T – czas trwania pomiaru,

$\varepsilon(E)$ – wydajność układu spektrometrycznego przy określonej geometrii pomiarowej dla fotonów o energii E ,

$p(E)$ – prawdopodobieństwo emisji fotonów gamma o energii E przez ten radionuklid, liczone na jeden rozpad,

C_s, C_c, C_r, C_i – poprawki odpowiednio na samoabsorpcję promieniowania w próbce, na zjawisko koincydencyjnego sumowania, na efekty związane z wysoką częstością zliczeń, inne poprawki; w standardowych przypadkach wartość tych poprawek jest bliska jedności.

Istotnym terminem przy wyznaczaniu aktywności izotopów promieniotwórczych jest tzw. minimalna mierzalna aktywność, w skrócie MDA (ang. *Minimum Detectable Activity*). Jest to minimalna aktywność danego izotopu, co do której jesteśmy pewni, że możemy ją zmierzyć [37]. Jeśli wartość zmierzonej w doświadczeniu aktywności jest niższa od odpowiadającej jej wartości MDA, to taki wynik nie jest uznawany za wiarygodny.

Znacząca część rozdziałów 3.3 – 3.5 została zaczerpnięta z pracy magisterskiej autora [45].

4. Aktywacja radionuklidów w materiałach naświetlanych protonami lub neutronami

Aktywność danego radionuklidu produkowanego w pewnym materiale na skutek naświetlania tego materiału wiązką protonów czy neutronów, można wyrazić jako następującą funkcję czasu [46]:

$$A(t) = C \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (23)$$

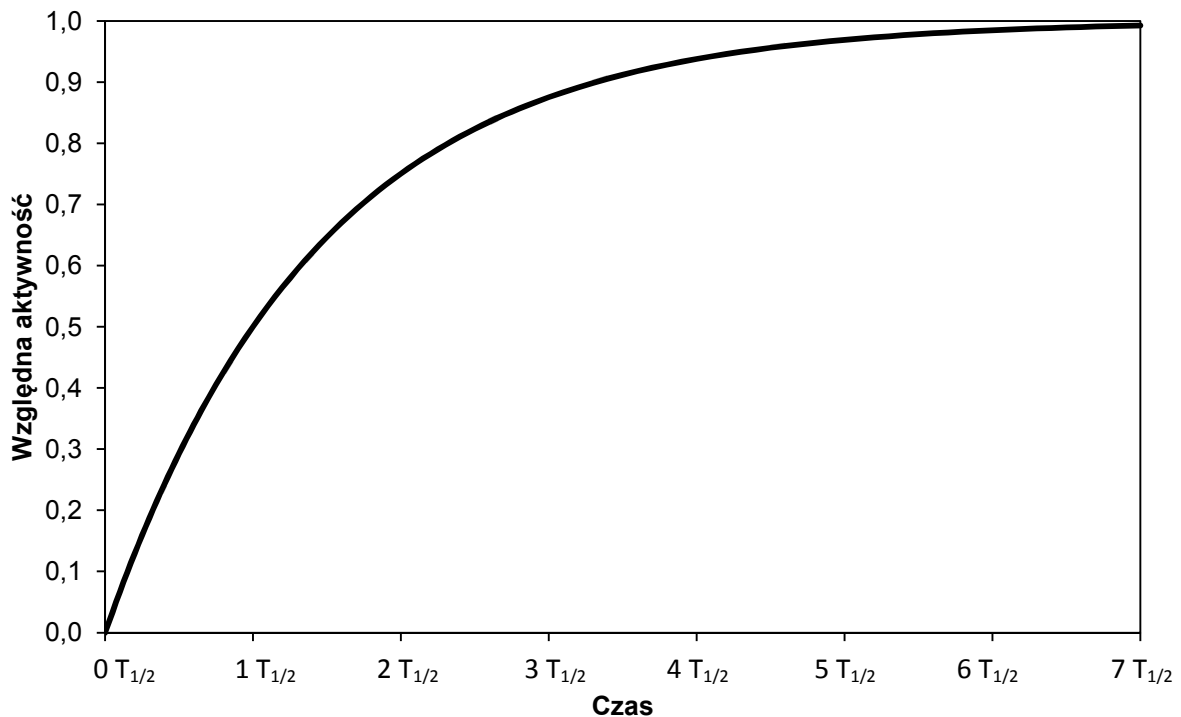
gdzie:

C – maksymalna aktywność jaką może w wyniku takiego naświetlania osiągnąć dany izotop, jest ona zależna od wielkości strumienia padających cząstek oraz wartości przekrojów czynnych na reakcje, w wyniku których może powstać rozważany izotop,

λ – stała rozpadu promieniotwórczego danego izotopu,

t – czas, jaki minął od rozpoczęcia naświetlania.

Zależność aktywności izotopu powstałego w wyniku irradiacji od czasu, opisaną wzorem (23), przedstawiono graficznie na Rysunku 12.



Rysunek 12. Zależność aktywności (podanej w postaci aktywności względnej, gdzie 1,0 to arbitralnie przyjęta maksymalna wartość tej aktywności) izotopu powstałego w wyniku naświetlania danego materiału protonami lub neutronami od czasu wyrażonego w wielokrotnościach okresu półrozpadu rozpatrywanego izotopu

Zależność ta jest spełniona, gdy naświetlanie ma charakter ciągły. W przypadku gdy przyjmuje ono charakter dyskretny, ale odstępy pomiędzy kolejnymi aktami naświetlania są wyraźnie krótsze niż wartość okresu półrozpadu rozważanego izotopu, to w dalszym ciągu

jest ona w dobrym przybliżeniu poprawna. Z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia analizując zmienność aktywności radionuklidów o czasach połowicznego zaniku rzędu kilku-kilkunastu dni oraz dłuższych, wzbudzonych w środowisku cyklotronu Proteus C-235 w CCB - IFJ PAN.

Warto zauważyć, że produkowane izotopy osiągają niemal maksymalną wartość aktywności po około 4-5 okresach półrozpadu (przekraczają jej 90% po około 3,5 okresach półrozpadu). Następnie aktywność osiąga poziom nasycenia i wraz z dalszym upływem czasu już praktycznie nie wzrasta.

5. Charakterystyka cyklotronu, jego hali, hali doświadczalnej oraz stanowisk terapii oka i gantry

Środowiskiem pomiarów wykonanych w ramach niniejszej pracy był budynek Centrum Cyklotronowego Bronowice, należącego do Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Sercem placówki jest cyklotron Proteus C-235, którego zadaniem jest produkcja wiązek protonów, dostarczanych następnie na cztery różne stanowiska. Dwa z nich stanowią pokoje terapii z użyciem skanującej wiązki ołówkowej (tzw. stanowiska gantry). Pozostałe dwa to hala radioterapii oka oraz hala doświadczalna. Pomiary wykonane podczas realizacji pracy zostały przeprowadzone w tych właśnie miejscach, a ponadto w hali cyklotronu i w najbliższym sąsiedztwie budynku CCB. Poniżej przedstawiono pokrótce charakterystykę systemu wykorzystywanego w CCB do terapii protonowej z wyszczególnieniem tych jego elementów, które mogą stanowić potencjalne źródła promieniotwórczości wzbudzonej, będącej głównym przedmiotem badań tej rozprawy.

Najbardziej interesującą częścią infrastruktury CCB jest z punktu widzenia potencjalnej obecności promieniotwórczości wzbudzonej system zarządzania wiązką (BMS, ang. *Beam Management System*), który można podzielić na kilka podsystemów: system produkcji wiązki (BPS, ang. *Beam Production System*), system selekcji energii i transportu wiązki (ESBTS, ang. *Energy Selection & Beam Transportation System*) oraz system dostarczania wiązki (BDS, ang. *Beam Delivery System*).

5.1 System produkcji wiązki (BPS)

Główny element systemu produkcji wiązki stanowi cyklotron Proteus C-235. Jest to cyklotron izochroniczny (określenie izochroniczny oznacza, że czas jednego pełnego obiegu rozpędzonych cząstek jest stały dla wszystkich orbit – taką własność uzyskuje się dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu pola magnetycznego poprzez zastosowanie nabiegunków o specyficznym kształcie), produkujący wiązki protonów o energii 230 MeV. Jego najważniejsze parametry techniczne zawarto w Tabeli 9.

Protony wytwarzane są w środku cyklotronu przez źródło z katodą bezpośrednio żarzoną. Po rozpędzeniu we wnętrzu cyklotronu, trafiają one do systemu ekstrakcji wiązki, którego zadaniem jest wyprowadzenie jej z akceleratora. Pierwszym elementem tego systemu jest deflektor elektrostatyczny odchylający tor lotu cząstek za pomocą pola elektrycznego. Dalej znajduje się kanał magnetyczny – korektor gradientu, służący do kompensacji wpływu silnego pola w miejscu wyjścia wiązki z deflektora. Następnie wiązka protonów przechodzi

przez dwie soczewki kwadrupolowe (składające się z magnesów stałych), które ponownie ją skupiają. Na koniec przebiega ona przez kolejny zestaw kwadrupoli (znajdujących się już na zewnątrz cyklotronu), które sprawiają, że wiązka jest maksymalnie skupiona, gdy w dalszej kolejności trafia ona na degrader energii [48] – patrz rozdział 5.2.

Tabela 9. Parametry techniczne cyklotronu Proteus C-235 - wg [47]

Cecha cyklotronu	Wartość
Masa	około 220 t
Wysokość	2,10 m
Średnica zewnętrzna	4,34 m
Energia protonów	230 MeV
Natężenie prądu wiązki ekstrakcyjnej	1 nA – 500 nA

5.2 System selekcji energii i transportu wiązki (ESBTS)

Po opuszczeniu cyklotronu wiązka protonów trafia do urządzeń selekcji w systemie ESBTS. Pierwszym elementem tego systemu jest degrader energii wiązki. Jego zadaniem jest przekształcenie wychodzącej z akceleratora wiązki o stałej energii 230 MeV w wiązkę o pożądanej na potrzeby terapii energii z zakresu 70 – 230 MeV [47]. Sam degrader jest to koło z precyzyjną regulacją pozycji kątowej, na którym umieszczone są bloki (kliny) aluminiowe, grafitowe oraz berylowe o zmiennej grubości. Zastosowany materiał oraz jego grubość determinują jak bardzo zredukowana zostanie energia wiązki protonów, decydują one również o szerokości rozkładu energetycznego i kątowego wiązki już po opuszczeniu degradera.

Tuż za degraderem energii umieszczony jest kolimator ograniczający rozbieżność wiązki. Jest to lita stalowa przysłona w ołowianej obudowie, służąca do kontrolowania emitancji wiązek niskoenergetycznych wychodzących z degradera [47]. W dalszej kolejności wiązka protonów trafia na szczelinę redukującą rozbieżność wiązki w osi poziomej i pionowej, a następnie na szczelinę limitującą rozrzut pędu wiązki. Zawiera ona bloki niklowe, mające na celu odrzucenie cząstek o innym pędzie niż pożądany.

Wymienione powyżej cztery elementy systemu ESBTS są często traktowane jako osobny system selekcji energii wiązki (ESS, ang. *Energy Selection System*) [47, 48].

Za odpowiedni transport wiązki do pomieszczeń terapii oraz hali doświadczalnej odpowiada szereg magnesów, zarówno dipolowych, jak i kwadrupolowych. Wszystkie magnesy kwadrupolowe są identyczne, mają strukturę warstwową i ich uzwojenie stanowi

miedziany przewód. Służą one do skupiania wiązki przechodzącej przez linię transportu. Zadaniem magnesów dipolowych jest z kolei uginanie wiązki protonów. Każdy z nich ugina wiązkę o 30° (dipole dobrane w parach dają ugięcie o 60°). Ponadto, są jeszcze magnesy dipolowe o ugięciach 45° i 135° , które znajdują się na obrotowych gantry.

W Centrum Cyklotronowym Bronowice znajdują się dwa gantry, obracające się izocentrycznie w płaszczyźnie pionowej, przeznaczone do terapii protonowej z użyciem skanującej wiązki ołówkowej. Stanowią one obrotowe części systemu transportu wiązki. Każde z nich zbudowane jest z dwóch pierścieni głównych oraz kilku elementów kratowych i osłonowych. Wśród zamontowanych na nich elementów są wymienione już powyżej magnesy uginające, a także skupiające magnesy kwadrupolowe, natomiast ostatnią ich częścią jest głowica, która stanowi już osobny system dostarczania wiązki.

5.3 System dostarczania wiązki (BDS)

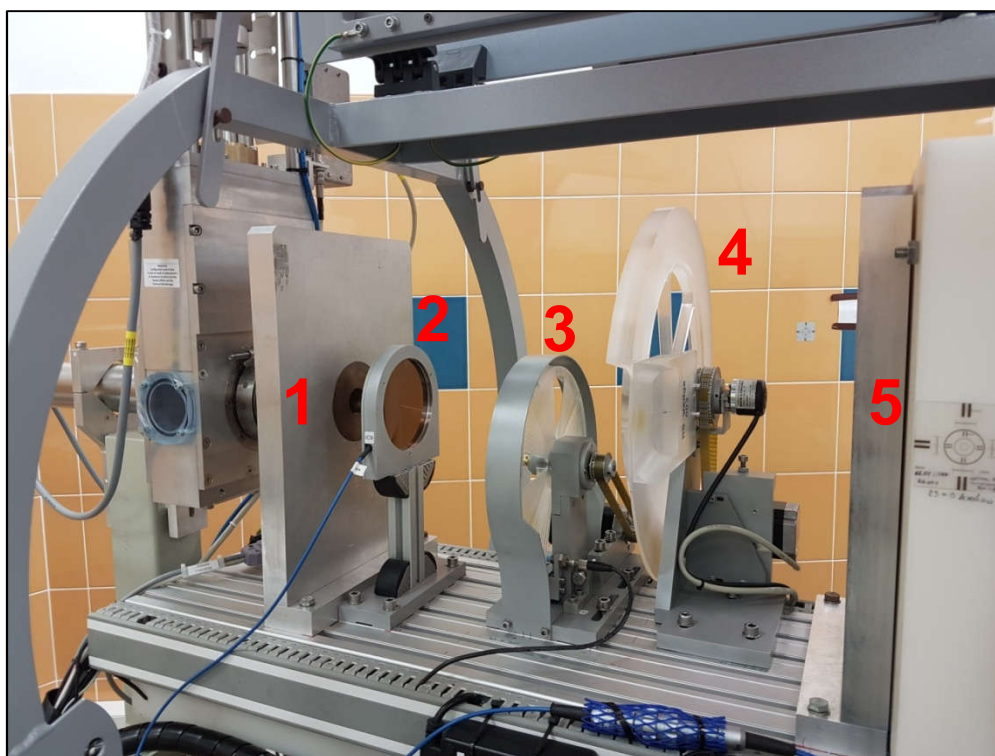
Ostatnim elementem dostarczającym wiązkę do pacjenta jest głowica. Jej zadania to dokładne kierowanie wiązki protonowej, tworzenie jej rozkładu poprzecznego i wzdłużnego oraz dostarczanie odpowiedniej dawki [47].

W przypadku terapii ze skanowaniem wiązką ołówkową (PBS, ang. *Pencil Beam Scanning*), która jest aktywną metodą dostarczania wiązki, wykorzystywana jest specjalna głowica PBS, będąca końcowym elementem obrotowego gantry. Składają się na nią komory jonizacyjne, służące do pomiaru i monitorowania parametrów wiązki oraz dawki, skupiające wiązkę magnesy kwadrupolowe, uginające wiązkę magnesy skanowania oraz komora próżniowa ze wsuwaną lampą rentgenowską. Na wyjściu głowicy PBS znajduje się ponadto szuflada, w której można umieścić zmieniacz zasięgu (ang. *range shifter*) lub filtr krawędziowy (ang. *ridge filter*).

Zmieniacz zasięgu to blok z materiału Lexan (poliwęglan), służący do dalszej redukcji energii wiązki (poniżej wartości 70 MeV), a co za tym idzie zmniejszenia głębokości wystąpienia piku Bragga, celem napromieniania guzów położonych bardzo płytko w ciele pacjenta. Filtr krawędziowy składający się z zestawu 10-milimetrowych krawędzi umożliwia z kolei zwiększenie szerokości piku Bragga.

W przypadku terapii nowotworów oka stosuje się tzw. rozproszoną wiązkę pasywną, która formowana jest przy użyciu ławy optycznej składającej się z nieco innych komponentów niż głowica w metodzie aktywnej. Zdjęcie początkowej części ławy optycznej przedstawiono na Rysunku 13. W metodzie pasywnej wiązka protonów trafia najpierw na tarczę rozpraszającą, po czym kierowana jest na odpowiedni modulator zasięgu, który

odpowiada za wytworzenie tzw. poszerzonego piku Bragga (SOBP, ang. *Spread Out Bragg Peak*) [49] – pozwala on na uzyskanie pożądanego w tego typu terapii niemal jednorodnego rozkładu dawki deponowanej w objętości całego guza. Sam modulator zasięgu to „śmigło” wykonane z PMMA o zmiennej grubości, obracające się stale w trakcie napromieniania pacjentów. Następnie wiązka przechodzi przez dyskryminator, którego zadaniem jest odpowiednie ograniczenie energii protonów, tak aby dopasować ich maksymalny zasięg do głębokości guza w ciele pacjenta. W dalszej kolejności wiązka pada na drugą tarczę rozpraszającą, by w końcu przejść przez lity mosiężny kolimator, który nadaje jej odpowiedni kształt dopasowany do kształtu naświetlanego guza [50]. Kolimator jest indywidualnie konstruowany dla każdego pacjenta z osobna i co za tym idzie wykorzystywany jest tylko w jednej serii napromieniowań. Celem przeprowadzania testów kalibracyjnych stosuje się również kolimatory techniczne, które poddawane są już wielokrotnym naświetlaniom. Wiązka ostatecznie zatrzymywana jest w parafinowym stoperze. Ława optyczna wraz z wyjściem jonowodu, fotelem oraz stoperem wiązki są w dalszej części pracy nazywane stanowiskiem radioterapii oka.



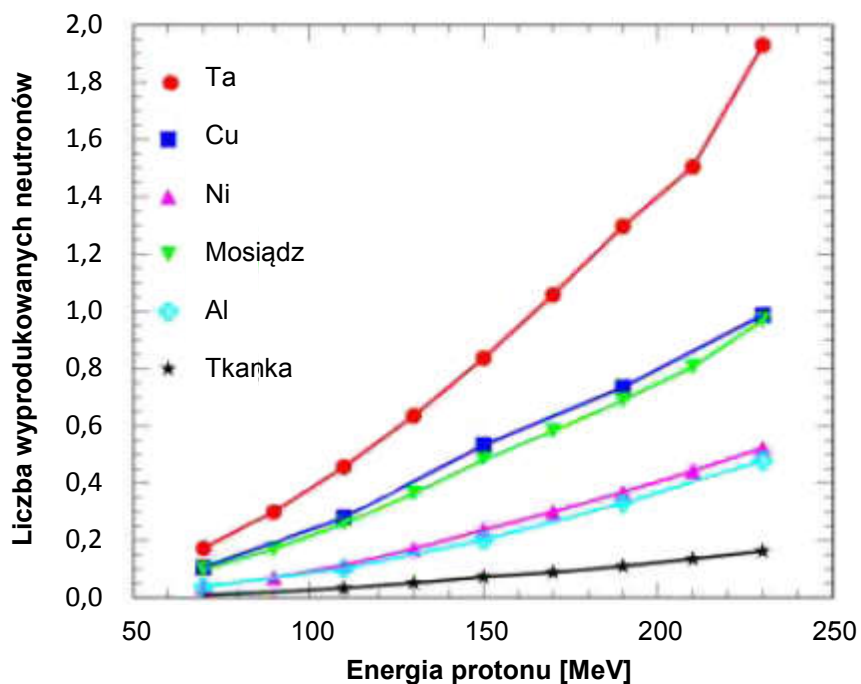
Rysunek 13. Początkowa część ławy optycznej w hali radioterapii oka. Oznaczenia elementów: 1 - pierwsza tarcza rozpraszająca, 2 - komora jonizacyjna, 3 - modulator zasięgu, 4 - dyskryminator, 5 - druga tarcza rozpraszająca

5.4 Elementy szczególnie istotne pod kątem promieniotwórczości wzbudzonej

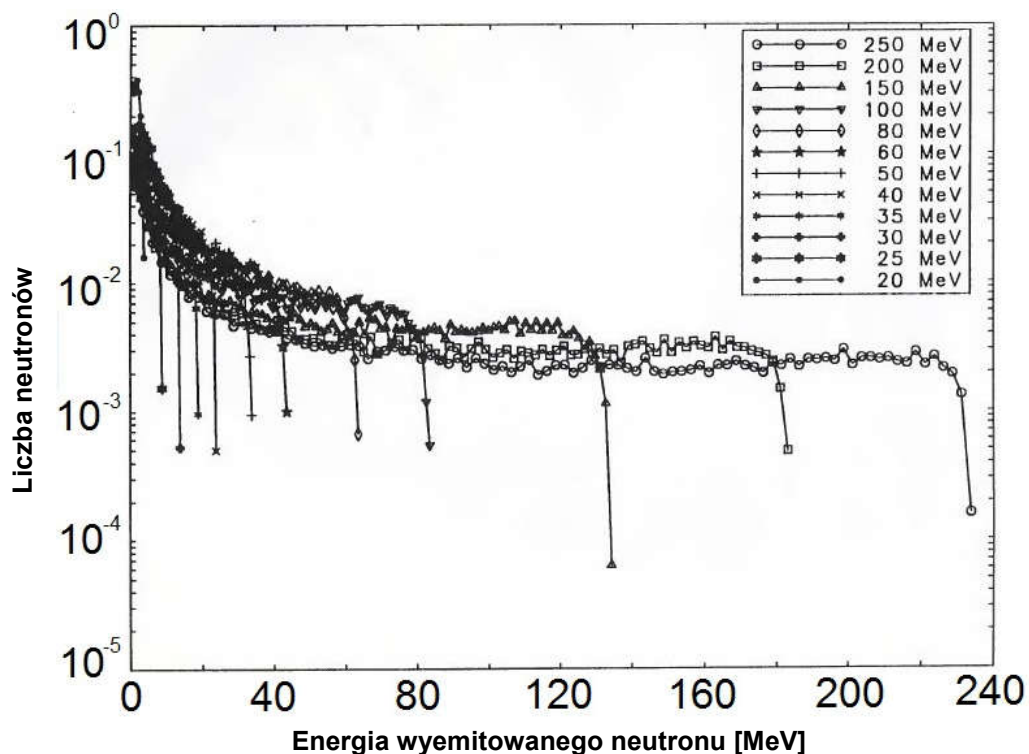
Spośród wymienionych w poprzednich podrozdziałach komponentów całego systemu w CCB, te, które mogą mieć bezpośredni kontakt z wiązką protonów stanowią najważniejsze potencjalne źródło promieniotwórczości wzbudzonej (patrz rozdział 2.1.2). Poniżej wyszczególniono najważniejsze z nich i tam gdzie było to możliwe, wskazano materiał, z którego dany element jest w głównej mierze skonstruowany (pozwala to przynajmniej w pewnym stopniu przewidzieć jakie radioizotopy zostaną wzbudzone w danym elemencie na skutek jego interakcji z wiązką protonów):

- wszelkie komponenty znajdujące się wewnątrz samego cyklotronu (żelazo, miedź),
- degrader energii wiązki (aluminium, węgiel, beryl),
- kolimator ograniczający rozbieżność wiązki (stal, ołów, tantal),
- szczeliny kolejno ograniczające rozbieżność oraz rozrzut pędu wiązki (nikiel),
- modulatory zasięgu (PMMA – węgiel, wodór, tlen),
- lity kolimator (mosiądz – stop cynku i miedzi),
- stoper wiązki (parafina – węgiel, wodór)
- głowica PBS,
- zmieniać zasięgu (Lexan [51] – węgiel, wodór, tlen).

Oddziaływanie pierwotnych protonów z wszystkimi wymienionymi powyżej materiałami będzie również prowadzić do produkcji wtórnych cząstek, głównie protonów oraz neutronów (patrz rozdział 2.1.3, Tabele 3 i 4). Na Rysunku 14a zawarto średnią liczbę neutronów produkowanych w wyniku interakcji jednego protonu o zadanej energii z określonym materiałem. Na Rysunku 14b przedstawiono widmo wtórnych neutronów powstałych w wyniku oddziaływania protonów z jądrami tlenu ^{16}O (co ma przybliżać oddziaływanie protonów z wodą). Jest to widmo zsumowane po wszystkich kątach emisji wtórnych neutronów.



Rysunek 14a. Średnia liczba wtórnych neutronów wyprodukowanych w wyniku interakcji jednego protonu z różnymi materiałami ośrodka w zależności od energii protonu – wg [30]



Rysunek 14b. Widmo wtórnych neutronów powstałych w wyniku oddziaływania protonów z jądrami tlenu ^{16}O zsumowane po wszystkich kątach emisji wtórnych neutronów dla różnych energii padających protonów – wg [19]

Powyższe dane oraz informacje zawarte w rozdziałach 2.1.3 i 2.3 wskazują, iż niepomijalnym zjawiskiem będzie aktywacja neutronowa materiałów znajdujących się w najbliższym

otoczeniu toru przelotu wiązki protonowej. Biorąc pod uwagę to jakie elementy znajdują się w jej bliskim sąsiedztwie – jonowód, magnesy skupiające i zakrzywiające wiązkę, elementy konstrukcyjne linii transportu wiązki, wyposażenie stanowisk terapii i hali doświadczalnej, ściany pomieszczeń CCB itp. – wśród aktywowanych materiałów można wyróżnić te najczęściej występujące, tj. stal, aluminium, miedź i beton. W związku z tym, w pomiarach aktywacyjnych przeprowadzonych w hali cyklotronu CCB w ramach niniejszej pracy, wykorzystano te właśnie materiały.

6. Stan dotychczasowych badań w zakresie promieniotwórczości wzbudzonej

Zagadnienie promieniotwórczości wzbudzonej w środowisku akceleratorowym jest problemem, który istniał od początków stosowania technik akceleratorowych we wszelkiego rodzaju obszarach nauki oraz przemysłu i od pewnego czasu stał się przedmiotem bardziej dogłębnych badań.

Jedne z pierwszych pomiarów promieniotwórczości wzbudzonej w środowisku akceleratorowym przeprowadził Barbier przy synchro-cyklotronie w CERN [52], jest on także autorem jednej z pierwszych książek opisujących dogłębnie powyższe zjawisko [53].

W 1974 roku, a następnie w 1987, Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA, ang. *International Atomic Energy Agency*) wydała tomy zawierające użyteczne dane dotyczące przekrojów czynnych, m. in. na reakcje protonów oraz neutronów z jądrami atomów różnych pierwiastków [54, 55]. Od tamtego czasu pojawiło się więcej tego rodzaju danych, zarówno wyznaczonych eksperymentalnie, jak i czysto obliczeniowo. Wśród ogólnie dostępnych bibliotek można wyróżnić m. in. amerykańską ENDF, japońską JENDL czy europejskie JEFF oraz TENDL [17, 29, 56, 57].

Aspekt bezpieczeństwa radiologicznego w placówkach wykorzystujących akceleratory cząstek, również pod kątem promieniotwórczości wzbudzonej, został poruszony m. in. w jednym z raportów IAEA [58] oraz książce Sullivana z CERN [59], głównie jednak w przypadkach akceleratorów rozpędzających cząstki do bardzo wysokich energii. W szczególności w pracy Sullivana wyróżnione zostały konkretne materiały obecne w najbliższym otoczeniu wykorzystywanych akceleratorów, na które należy zwrócić szczególną uwagę w kontekście ich aktywacji pierwotnymi bądź wtórnymi cząstkami.

Od tamtego czasu powstał szereg prac o tematyce związanej z promieniotwórczością wzbudzoną w środowisku akceleratorowym. Wiele z nich poświęconych było aktywacji różnych komponentów samego akceleratora oraz jego najbliższego otoczenia [60 – 65]. Część dotyczyła wzbudzonej promieniotwórczości w powietrzu w hali cyklotronu [66, 67], w wodzie chłodzącej niektóre z podsystemów akceleratora [68, 69] czy też w betonie będącym budulcem ścian placówek [70, 71]. Kilka z nich zajmowało się aktywacją specyficznych elementów systemu akceleratorowego, jak np. indywidualnie dobieranego dla pacjenta kolimatora [72], folii wejściowej do targetu wodnego przy produkcji radioizotopu F-18 [73], olejów stosowanych w pompach próżniowych [74] itp. W 2010 roku PTCOG (ang. *Particle Therapy Co-Operative Group*), organizacja zajmująca się tematyką radioterapii,

wydała raport, w którym m. in. wyszczególniono różne typy aktywacji towarzyszące działaniu wykorzystywanych w radioterapii akceleratorów medycznych [75].

Duża część z wyżej wymienionych prac dotyczyła pomiarów aktywacyjnych wykonywanych w kontrolowanych, stworzonych na ich potrzeby warunkach, tj. zajmowano się w nich aktywacją różnych materiałów w ściśle określonych polach protonowym i neutronowym, najprawdopodobniej nie będących dokładnym odzwierciedleniem rzeczywistych sytuacji. Spory ułamek badań stanowiły również prace przeprowadzane w przypadkach konkretnych placówek i konkretnych akceleratorów, w których szacowano rozmieszczenie oraz poziomy aktywności izotopów promieniotwórczych wzbudzonych w różnych materiałach, jednakże obliczenia te były wykonywane na bazie symulacji Monte Carlo, przy użyciu odpowiedniego oprogramowania (patrz rozdział 3.4), często nie zweryfikowane poprzez żaden rzeczywisty pomiar. Wiele z publikacji dotyczyło również pomiarów przeprowadzanych w placówkach, które stosowały akceleratory znacznie różniące się od znajdującego się w CCB cyklotronu Proteus C-235, jak np. akceleratory liniowe, wykorzystujące wiązkę elektronów czy te o znacznie większych energiach rozpędzanych cząstek bądź wykorzystywane do innych celów, np. produkcji radioizotopów.

W związku z powyższym, o ile nie można umniejszyć znaczenia naukowego wspomnianych prac i należy stwierdzić, że w znacznym stopniu pozwalają one na zwiększenie zrozumienia i bardziej dogłębne poznanie tematu promieniotwórczości wzbudzonej w środowisku akceleratorowym, to wydaje się, że pomiary oraz działania wykonane w ramach niniejszej pracy doktorskiej stanowią nie tylko istotne uzupełnienie, ale także poszerzenie stanu wiedzy w tej tematyce, zwłaszcza w kontekście prac i wyników eksperymentalnych. Ponadto, nie licząc pomiarów z 2013 roku [76, 77], podczas których przeprowadzono jednorazowe pomiary mocy dawki na terenie CCB oraz wykonano kilka pomiarów gamma-spektrometrycznych w hali doświadczalnej i hali cyklotronu, nie przeprowadzano do tej pory tak kompleksowych pomiarów radiometrycznych oraz gamma-spektrometrycznych promieniotwórczości wzbudzonej w środowisku cyklotronu Proteus C-235 w CCB. Wydaje się więc, iż mogą one stanowić istotne źródło dodatkowych informacji w kontekście zagadnienia ochrony radiologicznej w CCB, zwłaszcza, że zostały przeprowadzone przy okazji rutynowego działania cyklotronu oraz stanowisk terapii protonowej, dzięki czemu oddają one rzeczywistą sytuację radiologiczną placówki.

7. Metodyka pomiarowa

7.1 Mierzone wielkości

W ramach niniejszej pracy wykonywano w ogólności dwa rodzaje pomiarów promieniowania. Były to pomiary mocy dawki promieniowania gamma oraz neutronowego, a także pomiary widm energetycznych promieniowania gamma, po których następowała analiza zebranych wyników.

7.2 Aparatura pomiarowa

7.2.1 Moc dawki promieniowania gamma i neutronowego

Do pomiarów mocy dawki promieniowania gamma wykorzystywano kilka rodzajów urządzeń. Były to: radiometr RKP-2, dwa mierniki GammaTracer oznaczane jako GT oraz GT-XL, a także radiometry stacjonarne (LB 6360-H10 i LB 6411) umieszczone w budynku CCB. Do pomiarów mocy dawki promieniowania neutronowego wykorzystywano jedynie radiometry stacjonarne w CCB. Poniżej zamieszczono zwięzłe opisy używanej aparatury.

a) radiometr RKP-2

Radiometr RKP-2 służy do pomiaru skażeń powierzchni substancjami beta promieniotwórczymi, pomiaru mocy przestrzennego równoważnika dawki promieniowania X i gamma oraz do pomiaru skażeń powierzchni substancjami alfa promieniotwórczymi (przy użyciu zewnętrznej sondy scyntylicyjnej). Urządzenie składa się z trzech liczników Geigera-Müllera i wyposażone jest w tzw. filtr korekcyjny, będący cienką metalową osłoną, którego użycie umożliwia całkowite zatrzymanie promieniowania beta przy zanedbywalnym osłabieniu promieniowania gamma. Poniżej przedstawiono najważniejsze parametry techniczne radiometru RKP-2 [78]:

- masa: ok. 1,4 kg
- wymiary zewnętrzne: 237 x 127 x 123 mm
- zakres temperatur pracy: -10°C do 40°C
- mierzona wielkość (w niniejszej pracy): moc przestrzennego równoważnika dawki promieniowania gamma $H^*(10)$ [$\mu\text{Sv/h}$]
- zakres mierzonej mocy dawki: 0,02 – 1999 $\mu\text{Sv/h}$
- zakres energetyczny rejestrowanych kwantów gamma: ok. 60 – 1250 keV
- niepewność względna wyników pomiaru: $\leq 20\%$

Nr fabryczny: HA 0006, producent: POLON-ALFA.

b) miernik GammaTRACER Basic (GT)

Urządzenie GammaTRACER Basic oraz wymienione w kolejnym podpunkcie GammaTRACER XL to autonomiczne mierniki pomiarowe wykorzystywane do pomiarów mocy dawki promieniowania gamma. Są to tzw. mierniki typu ADL (ang. *Autonomous Data Logging*), co oznacza, że ich cały system elektroniczny włącznie ze źródłem zasilania (baterie litowe) mieszczą się w jednej hermetycznej osłonie.

GT daje możliwość odczytywania wyników pomiarów jedynie wówczas, gdy jest on podłączony do komputera. Jednakże, pomiar przeprowadzany jest przez cały czas, bez żadnych przerw. Wszystkie wyniki pomiarów zapisywane są w pamięci urządzenia i można je w dowolnej chwili odczytać łącząc urządzenie z komputerem. W zależności od trybu użytkowania i baterii, żywotność GT (na jednym zestawie baterii) może wynosić aż do 10 lat. Egzemplarze wykorzystywane w ramach niniejszej pracy zostały wyposażone ponadto w dodatkowe zestawy baterii, które zwiększają żywotność urządzenia o kolejne kilka lat.

Całe urządzenie jest w kształcie podłużnej tuby. W jego wnętrzu znajdują się właściwe detektory promieniowania gamma, które stanowią dwa identyczne liczniki Geigera-Müllera, umieszczone na jednej osi. Oprócz detektorów do pomiarów mocy dawki, GammaTRACER jest ponadto wyposażony w miernik temperatury oraz czujniki wstrząsów, wilgotności i żywotności baterii, które dostarczają dodatkowych informacji odnośnie wyników pomiarów i stanu urządzenia.

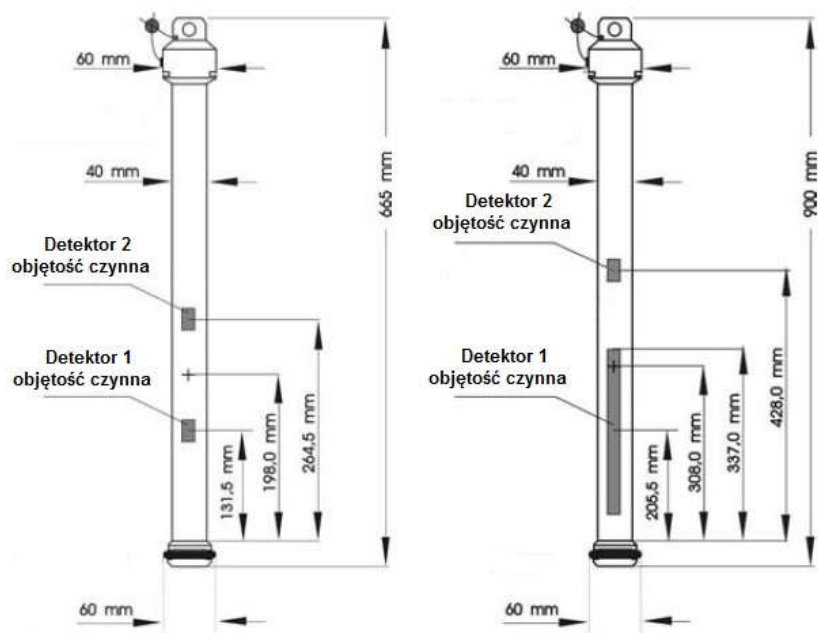
Sam pomiar mocy dawki i temperatury może być wykonywany w różnych trybach czasowych. Oznacza to, że wartości mierzonych wielkości są uśredniane na określonym przedziale czasu. Dostępne tryby czasowe, wyrażone w minutach, to: 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 i 120. W ramach niniejszej pracy używano trybu dziesięciominutowego, wówczas w pamięci urządzenia zapisywane są wyniki z pomiarów przeprowadzonych do 89 dni wstecz.

c) miernik GammaTRACER XL (GT-XL)

GammaTRACER XL jest bardziej zaawansowaną wersją opisanego w poprzednim podpunkcie urządzenia GammaTRACER Basic. Główną różnicą jest użycie innych detektorów. Ponownie są to dwa liczniki Geigera-Müllera, przy czym jeden z nich jest znacznie większy od tych zastosowanych w wersji Basic, drugi natomiast jest od nich nieco mniejszy (patrz Rysunek 15). Przekłada się to m.in. na mniejsze niepewności wyników dla niewielkiej mocy dawki, większy zakres mierzonych wartości mocy dawki i oczywiście na zwiększenie masy oraz zewnętrznych wymiarów. Parametry techniczne obu mierników GammaTRACER zebrano w Tabeli 10.

Tabela 10. Parametry techniczne mierników GT i GT-XL

Nazwa	GammaTRACER Basic (GT)	GammaTRACER XL (GT-XL)
Nr fabryczny	GF1415	GX0249
Producent	Genitron Instruments, Niemcy	Genitron Instruments, Niemcy
Masa	ok. 1,0 kg	ok. 1, 6 kg
Wymiary zewnętrzne (średnica/długość)	ok. 60 x 755 mm	ok. 60 x 1310 mm
Zakres temperatur pracy	-20°C do 50°C	-20°C do 50°C
Mierzona wielkość	H_x [nSv/h] = $H^*(10)$ zgodnie z [79]	$H^*(10)$ [nSv/h]
Zakres mierzonej mocy dawki	20 nSv/h – 10 mSv/h	10 nSv/h – 10 Sv/h
Zakres energetyczny	ok. 45 – 2000 keV	ok. 45 – 1800 keV
Niepewność względna wyników pomiaru	< 6%, dla dużych mocy dawek (powyżej 0,1 mSv/h) < 15%	< 6%, dla dużych mocy dawek (powyżej 0,1 mSv/h) < 15%



Rysunek 15. Wymiary mierników mocy dawki GammaTRACER Basic (z lewej strony) i GammaTRACER XL (z prawej strony) wraz z zaznaczonymi objętościami czynnymi detektorów – wg [80]

Zarówno radiometr RKP-2, jak i mierniki GammaTRACER posiadają aktualne kalibracje wykonane w Laboratorium Wzorcowania IFJ PAN (świadectwa wzorcowania nr 14743/2019, 13537/2018 i 13538/2018).

d) sonda LB 6360-H10 (sonda stacjonarna w CCB)

LB 6360-H10 jest to sonda w postaci tuby z zamkniętym wewnątrz licznikiem proporcjonalnym, wykorzystywana do pomiaru mocy dawki promieniowania gamma w budynku CCB. Na terenie CCB rozmieszczonych jest kilkanaście takich sond.

e) sonda LB 6411 (sonda stacjonarna w CCB)

LB 6411 to wykorzystywana do pomiaru mocy dawki promieniowania neutronowego w budynku CCB sonda w postaci kuli z polietylenu, w centrum której znajduje się helowy (^3He) licznik proporcjonalny. Na terenie CCB znajduje się kilkanaście takich sond. Parametry techniczne obu stacjonarnych sond obecnych w CCB zebrano w Tabeli 11.

Tabela 11. Parametry techniczne stacjonarnych sond LB 6360-H10 i LB 6411 - wg [81, 82]

Nazwa	LB 6360-H10	LB 6411
Producent	Berthold Technologies	Berthold Technologies
Masa	ok. 1,6 kg	ok. 10 kg
Wymiary zewnętrzne	średnica/długość: ok. 53 x 550 mm	średnica kuli: 250 mm; objętość czynna licznika helowego: ok. 45 cm ³
Zakres temperatur pracy	-20°C do 60°C	-10°C do 50°C
Rejestrowany rodzaj promieniowania	promieniowanie gamma	neutrony
Mierzona wielkość	H*(10) [$\mu\text{Sv/h}$]	H*(10) [$\mu\text{Sv/h}$]
Zakres mierzonej mocy dawki	30 nSv/h – 20 mSv/h	30 nSv/h – 100 mSv/h
Zakres energetyczny rejestrowanego promieniowania	kwanty gamma: ok. 35 – 1300 keV	neutrony: termiczne (ok. 0,025 eV) – 20 MeV

7.2.2 Spektrometria promieniowania gamma

Do pomiarów gamma-spektrometrycznych wykorzystano mobilny układ spektrometryczny składający się z następujących komponentów:

a) detektor zintegrowany z przedwzmacniaczem i kriostatem

Półprzewodnikowy detektor germanowy HPGe (ang. *High Purity Germanium*) firmy Canberra (obecnie Mirion Technologies), model GX4020. Jest to detektor koaksjalny o rozszerzonym zakresie mierzonej energii kwantów gamma (XtRa – *Extended Range Coaxial Ge Detector*), dzięki czemu możliwe jest rejestrowanie fotonów o energiach już rzędu kilku keV. Jest on zintegrowany z przedwzmacniaczem i kriostatem typu 7935SL-7, wykorzystywanym do schładzania go w czasie jego pracy ciekłym azotem. Poniżej podano najważniejsze parametry techniczne detektora:

- średnica kryształu: 64 mm
- długość kryształu: 51 mm
- okienko: aluminiowe o grubości 0,5 mm
- średnica czoła detektora w obudowie (tzw. *endcap*): 76 mm
- wydajność względna: 43,8%
- napięcie polaryzacji: 3000 V
- szerokość połówkowa piksu (FWHM – ang. *Full Width at Half Maximum*): 0,897 keV dla linii o energii 122 keV i 1,8 keV dla linii o energii 1332 keV

b) tor spektrometryczny

Przenośny spektrometr InSpector2000 (Canberra), model 1300, wykorzystujący technikę cyfrowego przetwarzania sygnału (DSP – ang. *Digital Signal Processing*). Zawiera w sobie wszystkie elektroniczne elementy występujące w typowym układzie spektrometrycznym (oprócz przedwzmacniacza, który jest zintegrowany z samym detektorem). Pierwszym z nich jest wzmacniacz z opcjami PUR (ang. *Pile-Up Rejector*) i LTC (ang. *Live Time Corrector*). PUR bada spiętrzenia impulsów i pozwala tylko nie spiętrzone zdarzeniom, aby zostały przetworzone i zachowane w widmie, natomiast LTC kompensuje czasy martwe związane z odrzuconymi impulsami i czasami przetwarzania wzmacniacza poprzez odpowiednie przedłużenie czasu akwizycji widma [83]. Kolejnym elementem spektrometru InSpector2000 jest analizator wielokanałowy wraz z przetwornikiem analogowo-cyfrowym. Całość spektrometru mieści się w poręcznej, kompaktowej obudowie i może być zasilana bezpośrednio napięciem sieciowym lub dołączonymi do zestawu akumulatorami

litowo-jonowymi. Spektrometr w czasie pracy może być połączony z komputerem, gdzie możliwa jest w programie Genie 2000 (patrz podpunkt d)) kontrola i modyfikacja jego parametrów pracy. Poniżej podano najważniejsze dane techniczne toru spektrometrycznego:

- wymiary: 185 x 173 x 80 mm
- waga: < 1,3 kg
- temperatura pracy: od 0°C do 50°C
- czas pracy ze standardowym detektorem HPGe przy zasilaniu bateryjnym: do 12 godzin
- liczba kanałów: maksymalnie 16 384 (przy szerokim zakresie energii)
- maksymalna częstość zliczeń: 10^6 cps
- minimalna szerokość wchodzącego impulsu napięciowego: 20 ns
- wskaźniki: diody LED informujące o stanie wysokiego napięcia, stanie akwizycji analizatora wielokanałowego, poziomie naładowania baterii itp.

c) osłona na mobilnym wózku

Detektor podczas pracy może zostać umieszczony w specjalnej osłonie dedykowanej pomiarom in situ (ISOCS Shield Systems, model ISOXSHLD firmy Canberra). Składa się ona z czterech ołowianych pierścieni o grubości 50 mm każdy, otaczających detektor w trakcie pomiaru. Ostatni pierścień znajdujący się najbliżej czoła detektora może być zakończony kolimatorami 30° lub 90°. Istnieje także możliwość całkowitego zaślepienia osłony, celem wykonywania pomiarów próbek, mieszczących się w całości na detektorze wewnątrz osłony. Można również zrezygnować z użycia kolimatora, wówczas kąt, z którego detektor rejestruje sygnał jest równy niemal 180°. Według producenta, wykorzystana w zestawie osłona redukuje tło promieniowania gamma o energii 1000 keV o czynnik 60 [84].

Detektor wraz z osłoną są integralną częścią mobilnego wózka, umożliwiającego stosunkowo sprawne przemieszczanie całego układu spektrometrycznego (detektor, osłona, tor spektrometryczny, laptop) w terenie. Ołowiana osłona z umieszczonym w jej wnętrzu detektorem może zostać obrócona o dowolny kąt wokół poziomej osi, dzięki czemu czoło detektora może zostać zwrócone podczas pomiaru praktycznie w dowolną stronę. Mobilność zestawu ograniczona jest oczywiście fizycznymi wymiarami (szerokość: 74 cm, wysokość: 102 cm, długość: 104 cm) oraz masą (ok. 160 kg) całego zestawu.

W niektórych przypadkach użycie ołowianej osłony nie jest konieczne, a czasem wręcz niepożądane. Wówczas dobrym i stosunkowo prostym rozwiązaniem, z uwagi na jego niewielkie rozmiary oraz masę, jest wykorzystanie trójnogu INSITPOD (Canberra), do którego w łatwy sposób można przymocować detektor. W takiej konfiguracji czoło detektora

może jednakże być zwrócone jedynie pionowo w dół lub w górę, bądź poziomo. Na Rysunku 16 przedstawiono detektor umieszczony w ołowianej osłonie na mobilnym wózku oraz osobno samą osłonę rozłożoną na części wraz z dwoma kolimatorami 30° i 90°.



Rysunek 16. Detektor HPGe umieszczony na mobilnym wózku wraz z osłoną ołowianą i kolimatorami 30° i 90°. Na blacie wózka widoczny jest tor spektrometryczny oraz komputer do akwizycji i bieżącej analizy zebranych widm – z [84]

d) oprogramowanie spektrometru promieniowania gamma

Programem obsługującym cały układ spektrometryczny jest Genie 2000 firmy Canberra. Umożliwia on akwizycję oraz analizę widm energetycznych promieniowania gamma [85]. Poniżej wymieniono najczęściej wykorzystywane funkcje programu:

- nastawienie parametrów toru spektrometrycznego (detektor, wzmacniacz, MCA wraz z ADC) takich jak wartość napięcia polaryzującego, zgrubne oraz dokładne wzmocnienie itp.,
- wprowadzenie danych dotyczących mierzonej próbki,
- akwizycja widma energetycznego promieniowania gamma,
- manualna lub automatyczna lokalizacja pików w zebranym widmie,
- obliczenie liczby zliczeń w znalezionych w widmie pikach,
- odjęcie widma tła dla określonej geometrii pomiarowej,
- stworzenie/wczytanie kalibracji energetycznej oraz wydajnościowej dla danej geometrii,
- stworzenie/wczytanie biblioteki nuklidów gamma-promieniotwórczych,
- identyfikacja izotopów zawartych w próbce na podstawie analizy położenia pików znalezionych w zebranym widmie przy wykorzystaniu odpowiedniej biblioteki nuklidów,

- obliczenie aktywności (Bq) lub stężenia aktywności (Bq/kg) izotopów zawartych w badanej próbce korzystając z wprowadzonych informacji na temat próbki oraz opracowanej kalibracji wydajnościowej,
- obliczenie minimalnych mierzalnych aktywności MDA lub odpowiednio minimalnych mierzalnych stężeń aktywności (MDC, ang. *Minimum Detectable Concentration*) dla danej próbki,
- stworzenie raportu z każdej operacji wykonanej dla danego widma.

Genie 2000 oferuje wykonanie wielu więcej innych operacji, a każda z nich (również te wymienione powyżej) może być w dość zaawansowanym stopniu modyfikowana, tj. użytkownik ma dużą swobodę w zmienianiu ich parametrów, a co za tym idzie sposobów działania algorytmów.

Interesującym z punktu widzenia niniejszej pracy i w ogólności pomiarów gamma-spektrometrycznych in situ, jest podprogram o nazwie Geometry Composer, wchodzący w skład Genie 2000. Jest to aplikacja, w której dokonuje się kalibracji wydajnościowej układu spektrometrycznego przy pomocy pakietu ISOCS (ang. *In Situ Object Counting System*) firmy Canberra [86]. Polega ona na matematycznym generowaniu krzywych wydajności układu spektrometrycznego dla określonych geometrii pomiarowych przy wykorzystaniu metody Monte Carlo w kodzie MCNP (patrz rozdział 3.4). Dużym udogodnieniem dla użytkownika jest fakt, iż eksperymentalna część procesu kalibracji leży po stronie producenta. Następuje to w procesie tzw. charakteryzacji detektora, która musi być wykonana przez firmę Canberra indywidualnie dla każdego egzemplarza detektora z osobna. Po jej sporządzeniu użytkownik otrzymuje plik z charakterystyką swojego egzemplarza detektora i wczytując go do programu Geometry Composer może kalibrować detektor bez konieczności przeprowadzania jakichkolwiek pomiarów widm wzorcowych źródeł promieniowania. Sposób w jaki sporządza się kalibrację wydajnościową w programie Geometry Composer przy użyciu pakietu ISOCS przedstawiono w rozdziale 7.2.3.

7.2.3 Kalibracja układu spektrometrycznego

a) kalibracja energetyczna

Wykorzystywany w niniejszej pracy układ spektrometryczny był pierwotnie kalibrowany poprzez pomiar wzorcowych źródeł promieniowania gamma zgodnie z metodą opisaną w rozdziale 3.3. Jednakże, w przypadku każdego spektrometru, wraz z upływem czasu położenie pików w widmie może się nieznacznie zmieniać (niewielkiej zmianie może ulegać

numer kanału, w którym dany pik występuje), co sprawia, że co jakiś czas krzywa kalibracji energetycznej przestaje być idealnie dokładna i należy ją aktualizować.

W ramach niniejszej pracy, przed każdym pomiarem spektrometrycznym sprawdzano poprawność kalibracji energetycznej poprzez krótki (rzędu 1-2 minut) pomiar widma promieniowania emitowanego przez naturalną próbkę o stosunkowo dużej zawartości izotopu Th-232 oraz jego pochodnych. Dają one wystarczająco wiele dobrze widocznych w widmie linii o dobrze znanych energiach oraz z szerokiego jej zakresu (od ok. 200 do 2600 keV), dzięki czemu taki pomiar umożliwia sprawne skontrolowanie i ewentualne poprawienie obecnej kalibracji energetycznej układu.

Mimo, że przeprowadzenie kalibracji energetycznej jest relatywnie łatwe, to w kontekście badań wykonywanych w niniejszej pracy jest to istotna operacja. Dzieje się tak, ponieważ ogromna część rejestrowanych w zbieranych widmach kwantów gamma pochodzi od sztucznie wytworzonych (na skutek oddziaływania protonów lub neutronów z materią – patrz rozdziały 2.1 i 2.2) izotopów promieniotwórczych. Autor postawiony był więc najczęściej w sytuacji, gdzie mimo iż można było w pewnym stopniu przewidywać jakie linie pojawią się w zebranych widmie, to w ogólności nie było co do tego nigdy pewności. W takich przypadkach posiadanie dokładnej kalibracji energetycznej jest konieczne, by móc poprawnie zidentyfikować pojawiające się w widmie piki, a co za tym idzie związane z nimi nuklidy.

b) kalibracja wydajnościowa

Sporządzenie dokładnej kalibracji wydajnościowej wymaga w pierwszej kolejności dobrze zdefiniowanej geometrii pomiarowej. Warunek ten nie był spełniony w przypadku wielu pomiarów wykonanych w ramach niniejszej pracy, z uwagi na specyfikę obiektów, które były przedmiotami tych pomiarów, jak np. stanowisko terapii oka składające się z wielu elementów, o stosunkowo dużych wymiarach, gdzie rozmieszczenie powstałych nuklidów promieniotwórczych nie jest oczywiste.

Tam gdzie zdefiniowanie geometrii pomiarowej było możliwe oraz w przypadkach pośrednich, w których rzeczywistą geometrię pomiarową przybliżano uproszczonym modelem, kalibrację wydajnościową przeprowadzono w programie Geometry Composer przy użyciu pakietu ISOCS. Poniżej przedstawiono kolejno najważniejsze kroki, które należy wykonać celem skalibrowania układu spektrometrycznego stosując pakiet ISOCS:

- 1) wybór bazowej geometrii pomiarowej spośród dostępnych w programie (np. próbka cylindryczna, prostopadłościan, sfera, pojemnik Marinelli, rura, itp.), która w kolejnych

krokach odpowiednio sparametryzowana najlepiej odda rzeczywistą geometrię; nie jest możliwe idealne zamodelowanie dowolnie skomplikowanej geometrii,

2) wczytanie pliku charakterystyki dla używanego aktualnie egzemplarza detektora,

3) podanie wymiarów próbki, jej odległości i położenia względem detektora (próbka nie musi być umieszczona centralnie nad detektorem),

4) w przypadku wykorzystywania w pomiarze kolimatora, wczytanie odpowiedniego pliku opisującego tenże kolimator,

5) wprowadzenie składu próbki, gęstości oraz rozmieszczenia w niej materiału promieniotwórczego (pewne części próbki mogą zawierać go więcej niż inne), ewentualnie oznaczenie pewnych elementów próbki jako absorbentów (w ogóle nie zawierających materiału promieniotwórczego); w przypadku wprowadzania składu próbki możliwe jest korzystanie z podprogramu MuEditor – jest to biblioteka materiałów, do której można dodawać nowe poprzez dokładne podanie ich składu chemicznego z procentowym udziałem każdego pierwiastka z osobna w całości,

6) podanie warunków atmosferycznych (temperatura, ciśnienie powietrza, wilgotność),

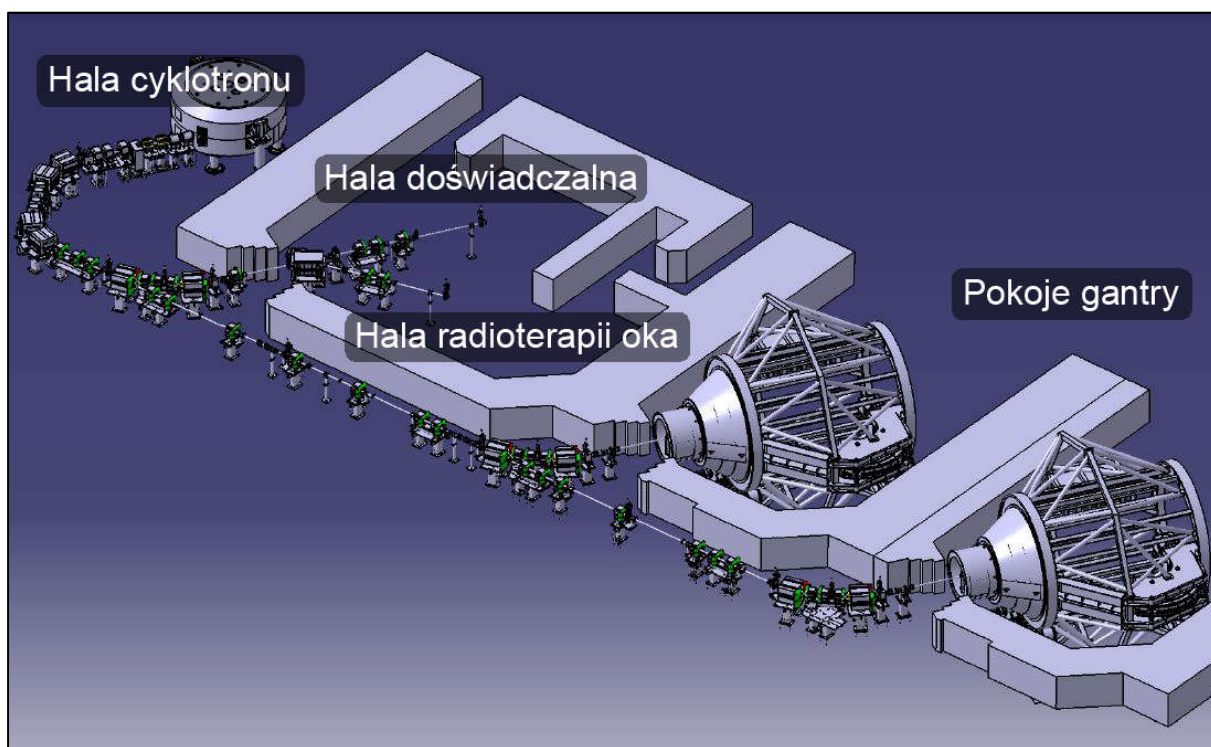
7) wprowadzenie wartości energii (w keV), dla których obliczone mają zostać wartości wydajności układu spektrometrycznego w zdefiniowanej geometrii pomiarowej,

8) uruchomienie obliczeń wydajności, w wyniku których powstaje plik ECC, którego zawartością są pary liczb energia – wydajność dla danej geometrii pomiarowej,

9) wczytanie w programie Genie 2000 wygenerowanego w poprzednim kroku pliku ECC, na podstawie którego generowana jest krzywa wydajnościowa układu spektrometrycznego dla zdefiniowanej geometrii pomiarowej.

8. Wyniki pomiarów i ich analiza

Celem zachowania przejrzystości, przedstawienie wyników pomiarów sporządzonych w ramach niniejszej pracy podzielono ze względu na miejsce ich przeprowadzenia. Miejscami przeprowadzenia pomiarów były odpowiednio: Hala Radioterapii Oka (nazywana dalej halą radioterapii oka), Gantry - Sale Terapii (nazywane dalej pokojami gantry), Hala Cyklotronu (hala cyklotronu), Hala Doświadczeń Naukowych (hala doświadczalna) oraz otoczenie budynku CCB (Rysunek 17). W każdym przypadku wykonano pomiary mocy dawki promieniowania gamma oraz pomiary spektrometrii promieniowania gamma (gamma-spektrometryczne), a następnie przeprowadzono ich analizy, których dokładność i złożoność mogła być już różna w konkretnych sytuacjach.



Rysunek 17. System prowadzenia wiązki w cyklotronie Proteus C-235 w CCB – wg [87]

8.1 Hala radioterapii oka

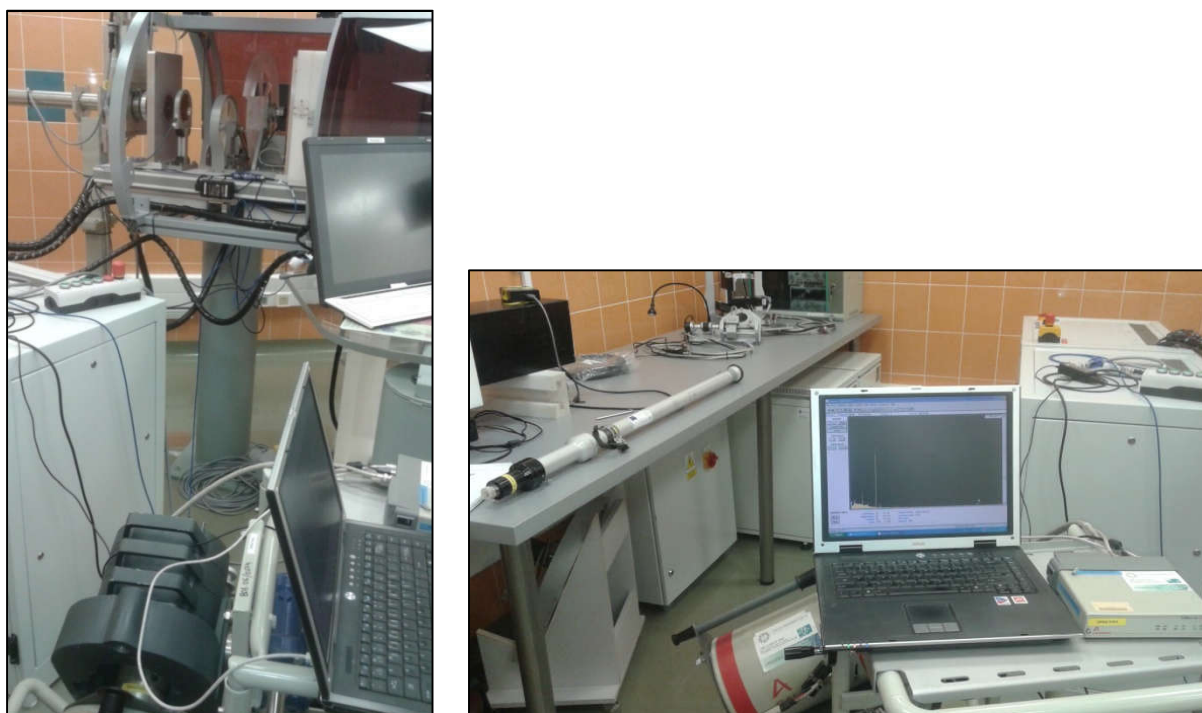
Pomiary w hali radioterapii oka CCB zostały podzielone na kilka serii. W każdej z nich z osobna skupiano się na nieco innych aspektach. Trzy z nich (dwie pierwsze przeprowadzone w lutym 2018, trzecia w maju 2018) stanowiły badania, w których detektor HPGe był zwrócony w stronę stanowiska do naświetlania, a same pomiary przeprowadzane były bezpośrednio po zakończeniu bądź to napromieniania pacjentów, bądź cotygodniowych technicznych testów stanowiska. W szczególności pomiary wykonywane w serii drugiej oraz

trzeciej były przeprowadzane w bardzo podobnych konfiguracjach, w związku z czym możliwe było ich miarodajne porównanie. Jedną z innych serii pomiarowych, były pomiary tła promieniowania gamma przeprowadzone w kilku różnych miejscach pokoju terapii oka (czerwiec 2018). Pozostałe serie dotyczyły pomiarów konkretnych komponentów stanowiska terapii oka, które podczas korzystania z wiązki protonowej ulegały największej aktywacji. Były to: jeden z kolimatorów technicznych (marzec 2018), jeden z modulatorów zasięgu (sierpień 2018) oraz stoper wiązki (lipiec 2018).

8.1.1 Pomiary stanowiska terapii

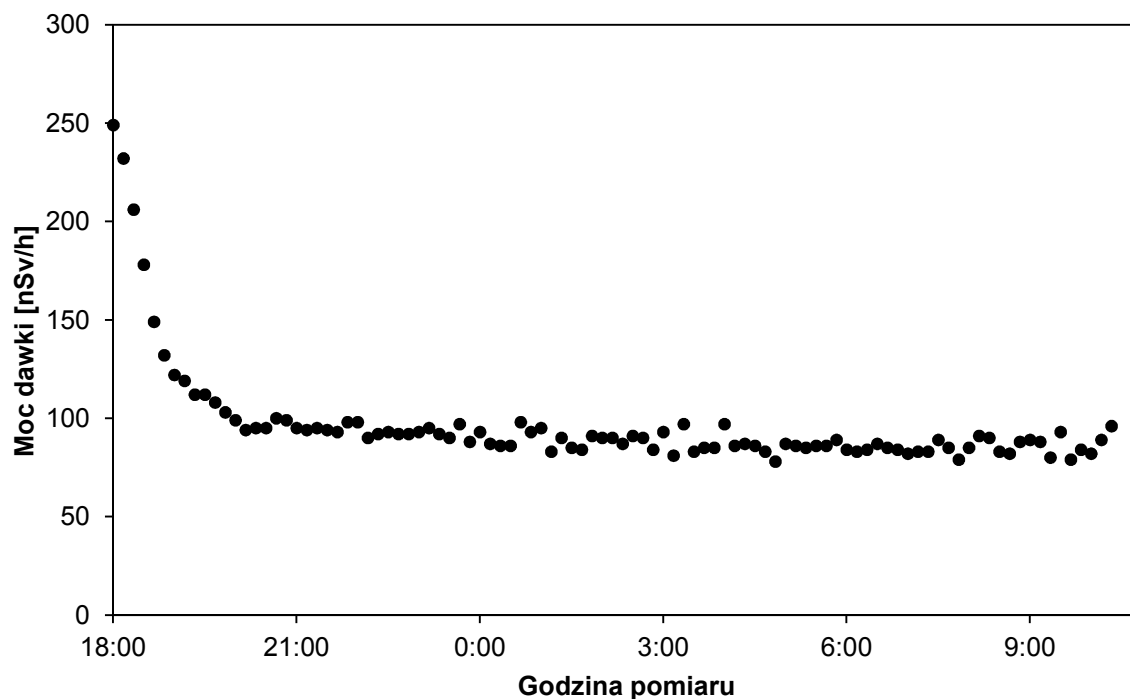
a) pomiar nr 1

Pierwszy z pomiarów przeprowadzono w dniach 01-02.02.2018. Detektor HPGe był zwrócony w stronę modulatora zasięgu, znajdował się w osłonie z kolimatorem 90° w odległości 1,72 m od modulatora. Pomiar rozpoczęto o godzinie 18:00 bezpośrednio po zakończeniu rutynowych testów tygodniowych na stanowisku (od ich ukończenia upłynęło ok. 15 minut). Trwał on do godziny 10:20 następnego dnia (02.02). Miernik mocy dawki promieniowania gamma GammaTRACER GT-XL umieszczony został na stole za detektorem w odległości około 2,4 m od stanowiska. Na Rysunku 18 przedstawiono rozmieszczenie urządzeń pomiarowych podczas eksperymentu.



Rysunek 18. Rozmieszczenie urządzeń pomiarowych podczas eksperymentu przeprowadzanego w hali radioterapii oka w dniach 01-02.02.2018

Wartość mocy dawki promieniowania gamma wynosiła początkowo 250 nSv/h. Po około dwóch godzinach nastąpił jej spadek do poziomu poniżej 100 nSv/h. W ciągu nocy miał miejsce dalszy spadek wartości mocy dawki do poziomu 80 – 90 nSv/h, co jest typowym wskazaniem mocy dawki promieniowania gamma pochodzącego od naturalnego tła w Polsce [88]. Na Rysunku 19 przedstawiono wykres zależności mocy dawki od czasu (jeden punkt pomiarowy co 10 minut).



Rysunek 19. Zależność mocy dawki promieniowania gamma od czasu zarejestrowana przez miernik GT-XL w dniach 01-02.02.2018 w hali radioterapii oka

Poza wykonaniem pomiarów mocy dawki, dokonano sekwencyjnego pomiaru widma energetycznego promieniowania gamma – zebrano 16 widm, jedno po drugim, czas akwizycji każdego z nich wynosił 60 minut. Oprócz zarejestrowania linii pochodzących od naturalnie występujących izotopów promieniotwórczych (U-238, Th-232 i ich pochodne oraz K-40), po przeprowadzeniu analizy powyższych widm stwierdzono obecność szeregu sztucznie wzbudzonych radionuklidów. Zawarto je w Tabeli 12 wraz z ich najważniejszymi własnościami, tj. okresem półrozpadu i najbardziej prawdopodobnymi kanałami ich produkcji. W Tabeli 12 podano również częstości zliczeń ich najbardziej intensywnych linii obecnych w jednym z zarejestrowanych widm (zebranych jako drugie w kolejności).

Tabela 12. Częstość zliczeń dla najbardziej intensywnych linii nuklidów, których obecność została zarejestrowana podczas pierwszej serii pomiarowej w hali radioterapii oka. Podano wyniki dla jednego z zebranych widm – jego akwizycja rozpoczęła się o godzinie 19:20, 01.02.2018

Izotop	Okres półrozpadu	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń [cpm]	Prawdopodobne kanały produkcji
Be-7	53 d	477,6	- ¹	$^{12}\text{C}(\text{p},\text{d}+\alpha)^7\text{Be}$
Na-22	2,6 y	1274,5	1,4 (2)	$^{27}\text{Al}(\text{p},\text{n}+\text{p}+\alpha)^{22}\text{Na}$
Na-24	15 h	1368,6	2,0 (2)	$^{27}\text{Al}(\text{p},\text{n} + 3\text{p})^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{24}\text{Na}$
Co-56	77 d	846,8 ²	5,2 (4) ²	$^{56}\text{Fe}(\text{p},\text{n})^{56}\text{Co}$
Co-58	71 d	810,8	1,4 (3)	$^{58}\text{Fe}(\text{p},\text{n})^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(\text{p},\text{n}+\text{p}+\alpha)^{58}\text{Co}$
Mn-56	2,6 h	846,8 ²	5,2 (4) ²	$^{57}\text{Fe}(\text{p},2\text{p})^{56}\text{Mn}$, $^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{p})^{56}\text{Mn}$
		1810,7	1,2 (2)	
Cu-60	24 min	1333,0	0,5 (2)	$^{64}\text{Zn}(\text{p},\text{n}+\alpha)^{60}\text{Cu}$
Cu-61	3,4 h	656,0	1,9 (4)	$^{63}\text{Cu}(\text{p},2\text{n}+\text{p})^{61}\text{Cu}$, $^{64}\text{Zn}(\text{p},\alpha)^{61}\text{Cu}$,
				$^{63}\text{Cu}(\text{n},3\text{n})^{61}\text{Cu}$
Zn-62	9,3 h	596,6	1,5 (4)	$^{63}\text{Cu}(\text{p},2\text{n})^{62}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(\text{n},3\text{n})^{62}\text{Zn}$
Zn-63	38 min	669,6	0,9 (3)	$^{63}\text{Cu}(\text{p},\text{n})^{63}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(\text{p},3\text{n})^{63}\text{Zn}$,
				$^{64}\text{Zn}(\text{n},2\text{n})^{63}\text{Zn}$
Zn-65	244 d	1115,5	1,9 (3)	$^{66}\text{Zn}(\text{p},\text{n}+\text{p})^{65}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(\text{p},\text{n})^{65}\text{Zn}$,
				$^{64}\text{Zn}(\text{n},\gamma)^{65}\text{Zn}$, $^{66}\text{Zn}(\text{n},2\text{n})^{65}\text{Zn}$
Ga-66	9,5 h	1039,2 ³	- ³	$^{66}\text{Zn}(\text{p},\text{n})^{66}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(\text{p},3\text{n})^{66}\text{Ga}$
anihil.	-	511,0	247 (2)	-
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ y	1460,8	10,6 (4)	izotop naturalny
Częstość zliczeń w całym widmie:			4535	-

¹Bardzo mała i obciążona bardzo dużą niepewnością częstość zliczeń.

²Wkład w wielkość pików o energii 846,8 keV mają jednocześnie dwa izotopy: Co-56 i Mn-56. Podana w tabeli częstość zliczeń w tym pikcie stanowi sumaryczny wkład od tych dwóch radionuklidów.

³Izotop Ga-66 ma dwie linie o stosunkowo dużej intensywności, o energiach 1039,2 keV i 2751,9 keV, przy czym obie znajdują się bardzo blisko linii pochodzących od innych izotopów obecnych w widmie (odpowiednio od Co-56 i Na-24), więc nie sposób jednoznacznie określić częstości zliczeń w żadnym z tych pików jedynie dla Ga-66. Nie zmienia to faktu, iż Ga-66 został bez wątpliwości zidentyfikowany w widmie.

Wśród wymienionych kanałów produkcji bardziej prawdopodobne wydają się te z reakcji, które są inicjowane przez protony, z uwagi na fakt, iż na stanowisku radioterapii oka znajduje się stosunkowo dużo elementów mających w czasie pracy bezpośredni kontakt z wiązką (patrz rozdziały 5.3 i 5.4).

Izotop Be-7 został wyprodukowany w materiale PMMA (pleksiglas), z którego zrobione są modulatory zasięgu znajdujące się na stanowisku terapii oka. Izotopy sodu powstały w szeroko wykorzystywanym aluminium, kobalt i mangan w stali nierdzewnej (choć izotop Co-58 z dużym prawdopodobieństwem został wygenerowany w miedzi). Izotopy miedzi, cynku oraz galu wzbudzono w miedzi lub cynku, najprawdopodobniej głównym miejscem ich produkcji był w tym przypadku mosiężny (stop miedzi i cynku) kolimator techniczny umieszczony na samym końcu stanowiska.

Jak widać częstość zliczeń jest niska, obecny zawsze w zbieranych widmach promieniowania tła naturalnego lub widmach rejestrowanych dla stosunkowo niskoaktywnych próbek pik naturalnego izotopu potasu K-40 znacznie przewyższał pod względem częstości zliczeń każdy z zaobserwowanych w tym widmie pików pochodzących od sztucznie wyprodukowanych izotopów.

Warto zwrócić uwagę, że relatywnie duży jest pik anihilacyjny o energii 511 keV. Swój wkład w jego okazałą wielkość mają dwa czynniki. Jednym z nich jest oczywiście zjawisko kreacji par, któremu ulegać może duża część wysokoenergetycznych fotonów emitowanych przez niektóre z zarówno naturalnych, jak i wzbudzonych izotopów. Przede wszystkim jednak, znaczna część z wygenerowanych radionuklidów ulega rozpadowi beta plus, co zawsze prowadzi do emisji kwantów gamma o energii 511 keV.

Ponadto, swój wkład w wielkość pików anihilacyjnych mogą mieć fotony wyemitowane przez nuklidy, które nie emitują promieniowania gamma o żadnej innej energii niż 511 keV (lub wydajność kwantowa tych pozostałych linii jest bardzo niska) i nie sposób stwierdzić ich obecności analizując to widmo. Wśród takich radionuklidów możemy wyróżnić obecne tu ze sporym prawdopodobieństwem C-11 (w PMMA) czy Cu-64 (w kolimatorze).

b) pomiar nr 2

Pomiar miał miejsce w dniach 23-26.02.2018. Detektor zwrócony był w stronę kolimatora technicznego zamocowanego na samym końcu stanowiska, w miejscu, gdzie strumień protonów opuszcza już system dostarczania wiązki. Detektor znajdował się w osłonie z kolimatorem 90° w odległości 1,6 m od kolimatora technicznego. Do pomiarów mocy dawki promieniowania gamma wykorzystano oba mierniki GammaTRACER (GT oraz

GT-XL). GT znajdował się za fotelem pacjenta (ok. 1,3 m od kolimatora), natomiast GT-XL umieszczono przy ławie (ok. 1,8 m od kolimatora). Należy mieć na uwadze fakt, iż podobnie jak w przypadku pomiarów nr 1 i 3, tak i tu detektor układu spektrometrycznego rejestrował sygnał pochodzący z pewnego kąta bryłowego (pewnej objętości w przestrzeni), a nie tylko z jednego konkretnego elementu stanowiska terapii oka.

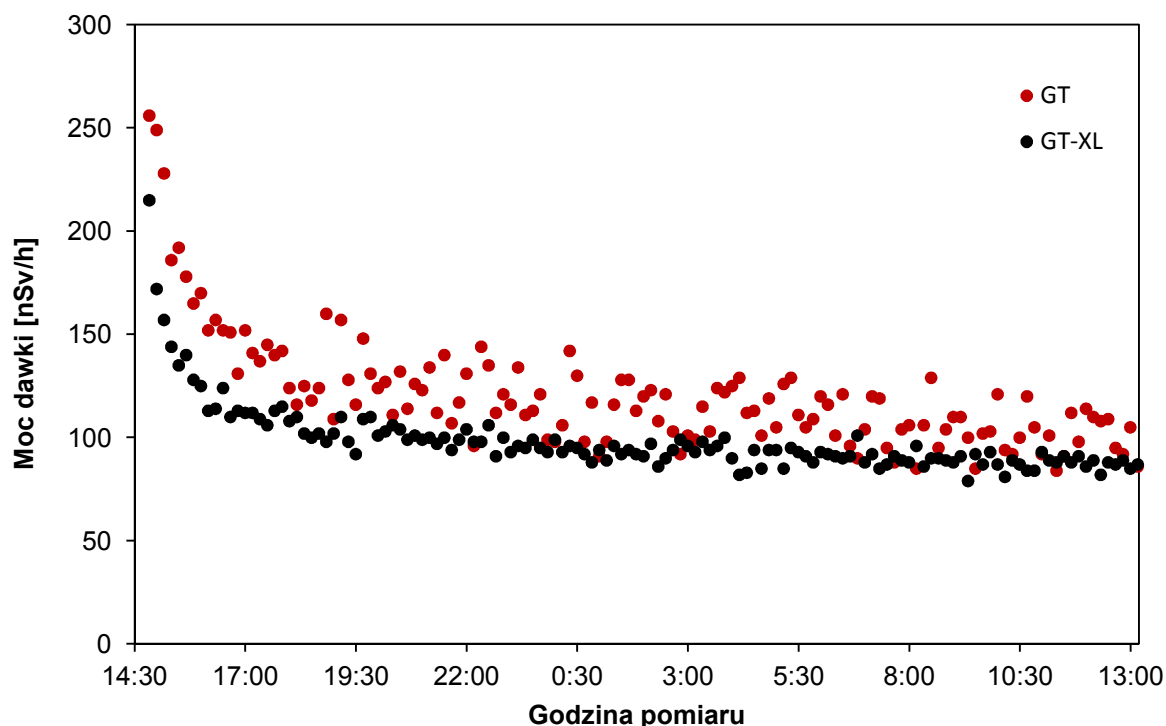
Pomiar rozpoczęto w piątek 23.02 o godzinie 14:50 pod koniec tygodnia, w którym przeprowadzano napromieniania pacjentów. Ostatnie napromienianie miało miejsce o 14:19 tego samego dnia, natomiast jeszcze dodatkowo na około 10 minut przed rozpoczęciem pomiarów na mierzony kolimator wyprowadzono ponownie wiązkę przez niecałe 3 minuty. Pomiar zakończono o godzinie 10:00 w poniedziałek następnego tygodnia (26.02).

Wartość mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowana przez miernik GT-XL wynosiła początkowo 215 nSv/h i zmalała do poziomu poniżej 100 nSv/h po około sześciu godzinach. Następnie dalej następował jej powolny spadek do wartości rzędu 80 – 90 nSv/h. Miernik GT zarejestrował początkowo moc dawki 256 nSv/h, po czym obniżyła się ona do poziomu poniżej 100 nSv/h po około 15 – 19 godzinach. W przypadku miernika GT trudno jest jednoznacznie ustalić moment obniżenia się mocy dawki do konkretnej wartości, ponieważ dysponuje on mniejszymi objętościowo detektorami, w związku z czym jego wskazania przy niskich mocach dawek charakteryzują się większym rozrzutem niż ma to miejsce dla miernika GT-XL. Na Rysunku 20 zawarto wykresy zależności mocy dawki zarejestrowanej przez oba mierniki od czasu.

Łatwo zauważyć, że w pomiarze nr 2 spadek mocy dawki do przyjętego nieco arbitralnie poziomu 100 nSv/h następował wolniej niż w pomiarze nr 1. Wpływ na to mogły mieć z pewnością dwa czynniki. Pierwszy z nich to ustawienie mierników, które w przypadku drugiego pomiaru znajdowały się nieco bliżej stanowiska niż miernik GT-XL w pomiarze nr 1.

Po drugie swój wkład w zaistniałą sytuację mogła mieć częstotliwość i czas obecności wiązki w dniu pomiarów na stanowisku. W drugim przypadku wiązka była sumarycznie przez dłuższy czas włączona, a także przez pewien okres wykorzystywano jej większy prąd (500 nA w stosunku do najczęściej stosowanej wartości 300 nA). Z drugiej strony w pierwszym przypadku obecność wiązki była bardziej skumulowana w ostatnich dwóch godzinach poprzedzających sam pomiar, natomiast w drugim przypadku była ona bardziej rozłożona na przestrzeni kilkunastu godzin dnia pomiarowego. W związku z powyższym trudno jest jednoznacznie ocenić wpływ rozkładu obecności wiązki na charakter zmienności rejestrowanej mocy dawki, zwłaszcza, że duży udział mogą w tej sytuacji mieć

wygenerowane izotopy krótkożyciowe, dla których parogodzinny przedział czasu może stanowić już kilka okresów półrozpadu.



Rysunek 20. Zależność mocy dawki promieniowania gamma od czasu zarejestrowana przez mierniki GT-XL i GT w dniach 23-24.02.2018 w hali radioterapii oka. Dla obu mierników odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi wskazaniem wynosił 10 minut

Zanotowano również powolniejsze obniżanie się wartości mocy dawki rejestrowanej przez miernik GT w stosunku do GT-XL. Wydaje się, iż ten fakt można wytłumaczyć w dość prosty sposób, mianowicie podczas pomiaru GT znajdował się nieco bliżej technicznego kolimatora niż GT-XL, a kolimator ten jest jednym z elementów stanowiska, który ulega znacznej aktywacji (patrz rozdział 8.1.3).

Pomiary spektrometryczne – analogicznie jak wcześniej dokonano także sekwencyjnego pomiaru widma energetycznego promieniowania gamma. Tym razem zebrano 67 widm, a czas pojedynczego pomiaru, tak jak poprzednio, wynosił 60 minut. Ponownie oprócz zarejestrowania linii pochodzących od naturalnie występujących izotopów promieniotwórczych, stwierdzono obecność kilkunastu sztucznie wzbudzonych radionuklidów. Przedstawiono je w Tabeli 13 wraz z ich najważniejszymi własnościami oraz częstościami zliczeń ich najbardziej intensywnych linii w jednym z widm (ponownie drugim w kolejności).

Tabela 13. Częstość zliczeń dla najbardziej intensywnych linii nuklidów, których obecność została zarejestrowana podczas drugiej serii pomiarowej w hali radioterapii oka. Podano wyniki dla jednego z zebranych widm – jego akwizycja rozpoczęła się o godzinie 15:53, 23.02.2018

Izotop	Okres półrozpadu	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń [cpm]	Prawdopodobne kanały produkcji
Na-22	2,6 y	1274,5	1,8 (3)	$^{27}\text{Al}(p,n+p+\alpha)^{22}\text{Na}$
Na-24	15 h	1368,6	5,3 (4)	$^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
Co-55	18 h	931,1	- ¹	$^{56}\text{Fe}(p,2n)^{55}\text{Co}$
Co-56	77 d	846,8 ²	6,1 (5) ²	$^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$
		1238,3	1,4 (3)	
Co-58	71 d	810,8	3,9 (5)	$^{58}\text{Fe}(p,n)^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(p,n+p+\alpha)^{58}\text{Co}$
Mn-52	5,6 d	1434,1	- ¹	$^{52}\text{Cr}(n,p)^{52}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,t)^{52}\text{Mn}$
Mn-54	313 d	834,8	4,6 (5)	$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Mn-56	2,6 h	846,8 ²	6,1 (5) ²	$^{57}\text{Fe}(p,2p)^{56}\text{Mn}$, $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
		1810,7	0,7 (2)	
Ni-57	36 h	1377,6	- ¹	$^{58}\text{Ni}(n,n+p)^{57}\text{Ni}$
Cu-60	24 min	1333,0	2,2 (3)	$^{64}\text{Zn}(p,n+\alpha)^{60}\text{Cu}$
Cu-61	3,4 h	283,0	9,9 (13)	$^{63}\text{Cu}(p,2n+p)^{61}\text{Cu}$, $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$, $^{63}\text{Cu}(n,3n)^{61}\text{Cu}$
		656,0	10,2 (6)	
Zn-62	9,3 h	596,6	8,5 (6)	$^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,3n)^{62}\text{Zn}$
Zn-63	38 min	669,6	3,8 (5)	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,3n)^{63}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,2n)^{63}\text{Zn}$
Zn-65	244 d	1115,5	4,5 (5)	$^{66}\text{Zn}(p,n+p)^{65}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$, $^{66}\text{Zn}(n,2n)^{65}\text{Zn}$
Ga-66	9,5 h	1039,2	- ³	$^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(p,3n)^{66}\text{Ga}$
Bi-204	11 h	899,2	2,8 (4)	$^{208}\text{Pb}(p,5n)^{204}\text{Bi}$, $^{206}\text{Pb}(p,3n)^{204}\text{Bi}$, $^{207}\text{Pb}(p,4n)^{204}\text{Bi}$
anihil.	-	511,0	359 (3)	-
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ y	1460,8	10,8 (5)	izotop naturalny
Częstość zliczeń w całym widmie:			6182	-

¹Bardzo mała i obciążona bardzo dużą niepewnością częstość zliczeń.

²Wkład w wielkość pików o energii 846,8 keV mają jednocześnie dwa izotopy: Co-56 i Mn-56. Podana w tabeli częstość zliczeń w tym pikcie stanowi sumaryczny wkład od tych dwóch radionuklidów.

³Izotop Ga-66 ma dwie linie o stosunkowo dużej intensywności, o energiach 1039,2 keV i 2751,9 keV, przy czym obie znajdują się bardzo blisko linii pochodzących od innych izotopów obecnych w widmie (odpowiednio od Co-56 i Na-24), więc nie sposób jednoznacznie określić częstości zliczeń w żadnym z tych pików jedynie dla Ga-66. Nie zmienia to faktu, iż Ga-66 został bez wątpliwości zidentyfikowany w widmie.

W pomiarze nr 2 oprócz pików, które zarejestrowano również w pomiarze nr 1, zidentyfikowano także linie pochodzące od izotopów Mn-52, Mn-54, Ni-57 i Bi-204. Zwłaszcza obecność tego ostatniego wydaje się interesująca. Powstaje on najprawdopodobniej w reakcjach protonów z ołowiem, którego domieszki mogą znajdować się w mosiężnym kolimatorze technicznym umieszczonym na wyjściu jonowodu.

Pojawienie się nowych izotopów nie powinno być szczególnie zaskakujące, ponieważ w pomiarze nr 2 detektor zbierał sygnał z nieco innej części stanowiska. W szczególności miał on w swoim polu widzenia techniczny kolimator, który ulega znacznej aktywacji, toteż ma istotny wkład w charakter zebranego widma. Fakt ten dobrze tłumaczy również większą częstość zliczeń w całym widmie, jak i w poszczególnych pikach, również anihilacyjnym. Ciągłe jednak nie są to duże wartości, gdyż jak widać częstość zliczeń w pikcie naturalnego potasu K-40 (która rzecz jasna praktycznie jest taka sama) w dalszym ciągu przewyższa częstość rejestrowaną dla pików pochodzących od sztucznie wyprodukowanych izotopów.

Warto pamiętać również o tym, że wraz z upływem czasu częstość zliczeń w pikach pochodzących od wzbudzonych radionuklidów oraz w pikcie anihilacyjnym, a co za tym idzie w całym widmie, będzie malała z powodu rozpadów promieniotwórczych jąder. Oczywiście im krótszy okres półrozpadu danego izotopu, tym szybsze będzie tempo zaniku odpowiadających mu linii. To z kolei prowadzi do wniosku, iż w przypadku najbardziej krótkożyciowych izotopów, ich produkcja nastąpiła w bardzo nieodległej przeszłości, na skutek niedawnego wykorzystania wiązki protonów na stanowisku terapii oka. Jeśli chodzi o izotopy o dłuższym czasie połowicznego zaniku (rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu dni i dłuższych), to ich zawartość wynika raczej z ich ciągłego nagromadzania, które następuje podczas kolejnych dni użytkowania wiązki. Niedawne jej użycie nie ma aż tak znaczącego wkładu w ich całkowitą aktywność, która wynika z ich kumulacji w dłuższym przedziale czasu (patrz rozdział 4.).

c) pomiar nr 3

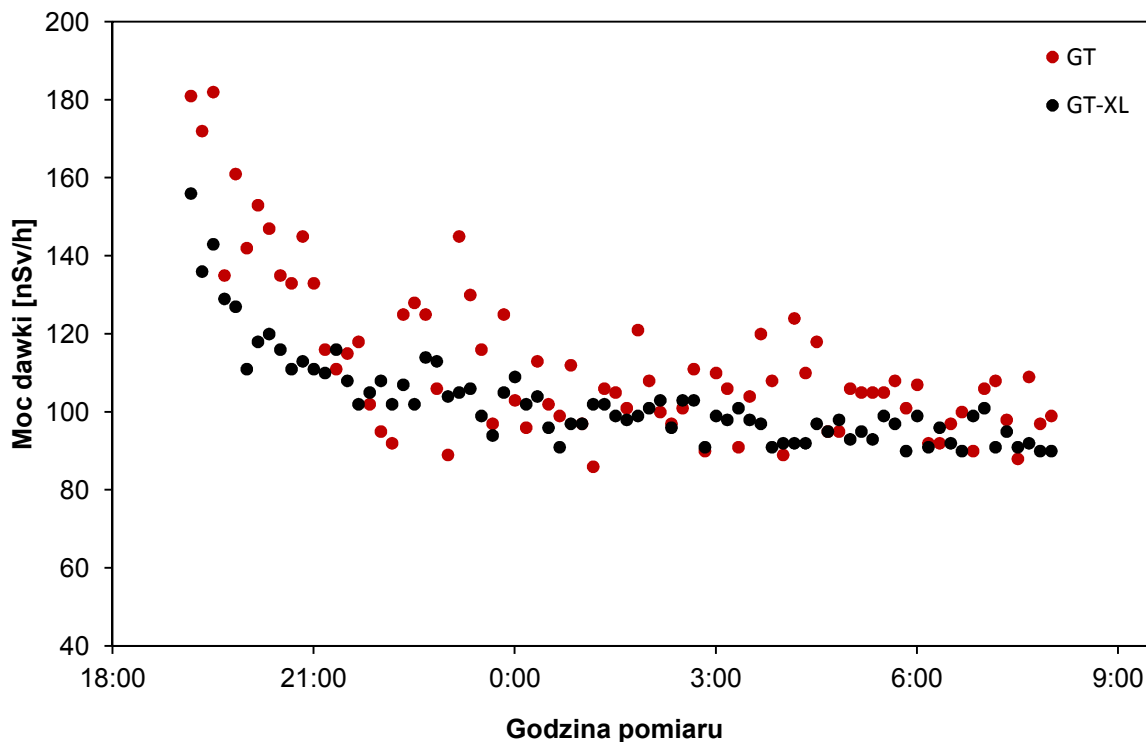
Pomiar nr 3 miał miejsce w dniach 15-16.05.2018. Ustawienie przyrządów pomiarowych było niemal identyczne jak w przypadku pomiaru nr 2, przy czym mierniki mocy dawki GT i GT-XL zostały zamienione miejscami. Sam detektor HPGe ponownie znajdował się w osłonie z kolimatorem 90° w odległości 1,6 m od kolimatora technicznego zamocowanego na końcu stanowiska terapii.

Pomiary rozpoczęto we wtorek 15.05 o godzinie 19:10, po całym dniu, w którym przeprowadzano napromieniania pacjentów. Ostatni raz przed rozpoczęciem pomiarów wiązka była obecna na stanowisku o godzinie 18:27.

Kluczową różnicą w stosunku do pomiaru nr 2 była częstotliwość oraz czas obecności wiązki na stanowisku terapii oka w ciągu całego dnia pomiarowego. W przypadku pomiaru nr 2 wiązka była włączona przed jego rozpoczęciem na przestrzeni około 8 h, a jej sumaryczny czas aktywności to 1997 s. W sumie przez około 800 s prąd wiązki wynosił 500 nA, natomiast przez pozostałe 1200 s wynosił on 300 nA. Przez około 250 s na końcu stanowiska zamocowany był kolimator 40 mm, natomiast przez pozostały czas umieszczony był w tym miejscu kolimator 25 mm, który to kolimator pozostał na tym miejscu na czas przeprowadzania pomiaru nr 2. W przypadku pomiaru nr 3 wiązka była aktywna przed jego rozpoczęciem na przestrzeni około 6,5 h, natomiast sumaryczny czas jej obecności wyniósł 3647 s, przy czym tu wykorzystywano jedynie kolimator 25 mm (obecny również w czasie przeprowadzania pomiaru nr 3), a prąd wiązki był przez cały czas równy 300 nA.

Można zatem zauważyć, że w przypadku pomiaru nr 3 obecność wiązki była nieco bardziej „skupiona” w czasie, a co więcej jej sumaryczny czas obecności był dłuższy. Z drugiej strony pomiar nr 2 wykonywany był w piątek po całym tygodniu, w którym przeprowadzano napromieniania pacjentów, natomiast pomiar nr 3 odbył się we wtorek, bezpośrednio po zaledwie jednym dniu napromieniania (drugie wcześniejsze użycie wiązki miało miejsce w poprzednim tygodniu w czwartek 10.05).

Wartość mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowana przez GT-XL wynosiła początkowo 156 nSv/h i spadła do poziomu poniżej 100 nSv/h po około 5-7 godzinach i podobnie jak we wcześniejszych przypadkach dalej następował jej powolny spadek do wartości rzędu 80 – 90 nSv/h. Miernik GT zarejestrował początkowo moc dawki 181 nSv/h, po czym spadła ona do poziomu około 100 nSv/h również po kilku godzinach. Na Rysunku 21 zawarto wykresy zależności mocy dawki zarejestrowanej przez oba mierniki od czasu.



Rysunek 21. Zależność mocy dawki promieniowania gamma od czasu zarejestrowana przez mierniki GT-XL i GT w dniach 15-16.05.2018 w hali radioterapii oka. Dla obu mierników odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi wskazaniem wynosił 10 minut

Wskazania obu mierników mocy dawki są nieco mniejsze w porównaniu do pomiaru nr 2, choć różnice są bardzo subtelne. Najprawdopodobniej główny wpływ miał na to sposób użytkowania wiązki w dniach oraz godzinach poprzedzających pomiar.

W przypadku pomiarów gamma-spektrometrycznych dokonano sekwencyjnego pomiaru widma energetycznego promieniowania gamma. Zebrano 18 widm, czas pojedynczego pomiaru wynosił 60 minut. W Tabeli 14 opisano wzbudzone radionuklidy, których obecność stwierdzono w zarejestrowanych widmach wraz z ich najważniejszymi własnościami oraz częstościami zliczeń ich najbardziej intensywnych linii w jednym z widm (znów zebranych jako drugie w kolejności).

W pomiarze nr 3 zidentyfikowano te same izotopy co w pomiarze nr 2, za wyjątkiem Mn-52, którego obecności tym razem nie dało się jednoznacznie potwierdzić. Można również poczynić ciekawą obserwację, iż w pomiarze nr 3 aktywność krótkożyciowych izotopów jest nieco większa niż w pomiarze nr 2. Widać to w szczególności w przypadku izotopów Mn-56, Cu-61, Zn-62 oraz Bi-204. Z kolei częstości zliczeń w pikach pochodzących od izotopów o dłuższym okresie półrozpadu pozostały praktycznie bez zmian w stosunku do pomiaru nr 2. Takie wyniki wydają się dobrze odzwierciedlać sposób użytkowania wiązki w okresie poprzedzającym pomiary nr 2 i 3, gdzie przed pomiarem nr 3 wiązka była nieco bardziej

skupiona w czasie, a co więcej jej sumaryczny czas obecności był dłuższy. To mogło doprowadzić do zwiększonej produkcji krótkożyjących izotopów, co zaobserwowano w pomiarach gamma-spektrometrycznych. Udział radionuklidów o większym okresie półrozpadu się nie zmienił, gdyż ich aktywność wynika z ich kumulacji na przestrzeni dłuższego przedziału czasu i sposób eksploatacji wiązki w ostatnich godzinach oraz dniach nie ma w ich przypadku tak dużego znaczenia.

W pomiarze nr 3 zaobserwowano również większą częstość zliczeń w pikie anihilacyjnym i sumarycznie w całym widmie, w stosunku do pomiaru nr 2. Najprawdopodobniej było to następstwem odmiennego czasu i częstotliwości stosowania wiązki w dniach poprzedzających pomiary nr 2 i 3.

Tabela 14. Częstość zliczeń dla najbardziej intensywnych linii nuklidów, których obecność została zarejestrowana podczas trzeciej serii pomiarowej w hali radioterapii oka. Podano wyniki dla jednego z zebranych widm – jego akwizycja rozpoczęła się o godzinie 20:07, 15.05.2018

Izotop	Okres półrozpadu	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń [cpm]	Prawdopodobne kanały produkcji
Na-22	2,6 y	1274,5	1,4 (4)	$^{27}\text{Al}(p,n+p+\alpha)^{22}\text{Na}$
Na-24	15 h	1368,6	6,0 (4)	$^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
Co-55	18 h	931,1	- ¹	$^{56}\text{Fe}(p,2n)^{55}\text{Co}$
Co-56	77 d	846,8 ²	11,3 (7) ²	$^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$
		1238,3	1,4 (3)	
Co-58	71 d	810,8	3,7 (5)	$^{58}\text{Fe}(p,n)^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(p,n+p+\alpha)^{58}\text{Co}$
Mn-54	313 d	834,8	4,8 (6)	$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Mn-56	2,6 h	846,8 ²	11,3 (7) ²	$^{57}\text{Fe}(p,2p)^{56}\text{Mn}$, $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
		1810,7	2,0 (2)	
Ni-57	36 h	1377,6	- ¹	$^{58}\text{Ni}(n,n+p)^{57}\text{Ni}$
Cu-60	24 min	1333,0	1,5 (2)	$^{64}\text{Zn}(p,n+\alpha)^{60}\text{Cu}$
Cu-61	3,4 h	283,0	20,7 (22)	$^{63}\text{Cu}(p,2n+p)^{61}\text{Cu}$, $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$, $^{63}\text{Cu}(n,3n)^{61}\text{Cu}$
		656,0	17,0 (9)	
Zn-62	9,3 h	596,6	11,8 (7)	$^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,3n)^{62}\text{Zn}$
Zn-63	38 min	669,6	4,1 (7)	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,3n)^{63}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,2n)^{63}\text{Zn}$

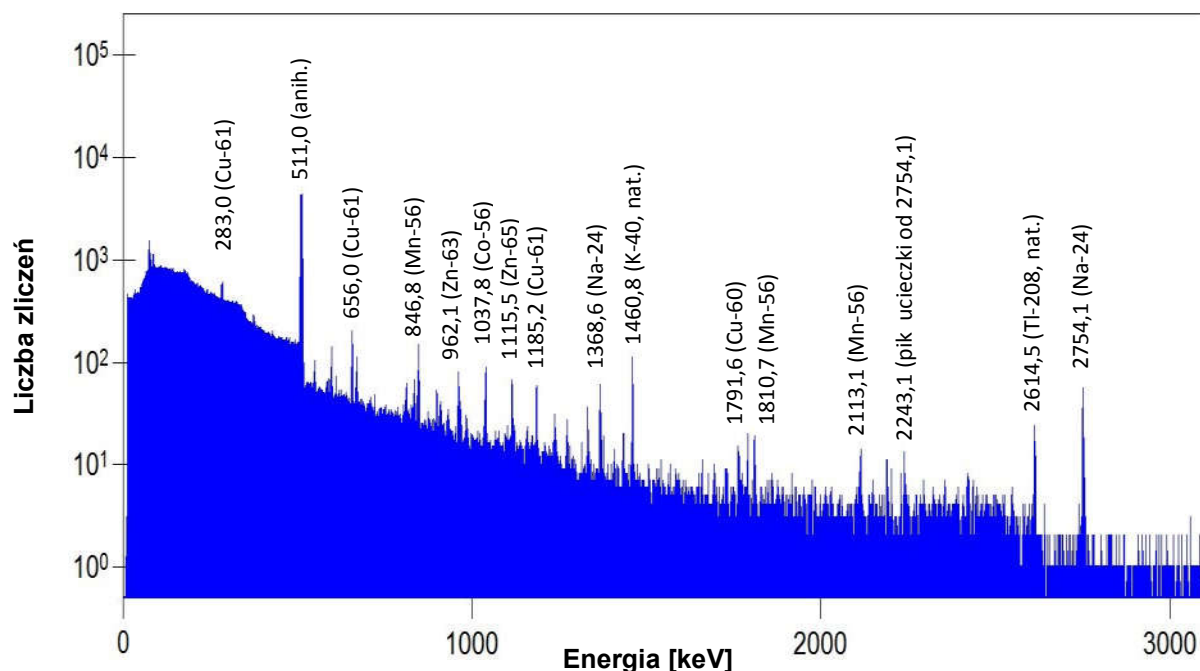
Zn-65	244 d	1115,5	3,8 (6)	$^{66}\text{Zn}(p,n+p)^{65}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$, $^{66}\text{Zn}(n,2n)^{65}\text{Zn}$
Ga-66	9,5 h	1039,2 ³	- ³	$^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(p,3n)^{66}\text{Ga}$
Bi-204	11 h	899,2	4,0 (6)	$^{208}\text{Pb}(p,5n)^{204}\text{Bi}$, $^{206}\text{Pb}(p,3n)^{204}\text{Bi}$, $^{207}\text{Pb}(p,4n)^{204}\text{Bi}$
anihil.	-	511,0	495 (3)	-
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ y	1460,8	10,6 (5)	izotop naturalny
Częstość zliczeń w całym widmie:			8044	-

¹Bardzo mała i obarczona bardzo dużą niepewnością częstość zliczeń.

²Wkład w wielkość piku o energii 846,8 keV mają jednocześnie dwa izotopy: Co-56 i Mn-56. Podana w tabeli częstość zliczeń w tym pikcie stanowi sumaryczny wkład od tych dwóch radionuklidów.

³Izotop Ga-66 ma dwie linie o stosunkowo dużej intensywności, o energiach 1039,2 keV i 2751,9 keV, przy czym obie znajdują się bardzo blisko linii pochodzących od innych izotopów obecnych w widmie (odpowiednio od Co-56 i Na-24), więc nie sposób jednoznacznie określić częstości zliczeń w żadnym z tych pików jedynie dla Ga-66. Nie zmienia to faktu, iż Ga-66 został bez wątpliwości zidentyfikowany w widmie.

Na Rysunku 22 zamieszczono jedno z widm zebranych podczas pomiaru nr 3 wraz z zaznaczonymi w nim najważniejszymi liniami energetycznymi (pikami).

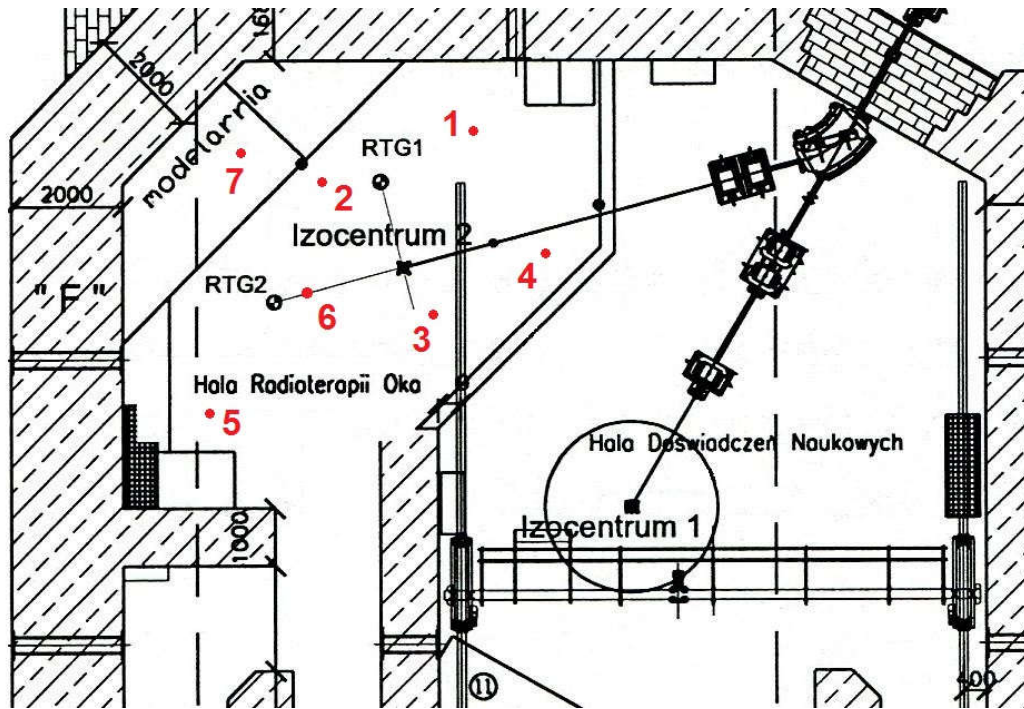


Rysunek 22. Widmo zebrane w pomiarze nr 3, którego akwizycja rozpoczęła się 15.05 o godz. 20:07. Na widmie zaznaczono najważniejsze obecne w nim linie – podano ich energię w keV oraz izotop, który je wyemitował. Celem poprawienia czytelności oś pionowa przedstawiona jest w skali logarytmicznej

8.1.2 Pomiary promieniowania tła

W dniach 08-11.06.2018 przeprowadzono pomiary promieniowania tła w pokoju terapii oka CCB. Rozpoczęto je w piątek około godziny 10:30 i zakończono w poniedziałek około godziny 11:00. Taki termin ich przeprowadzenia wydawał się być dogodny, ponieważ ostatnie użycie wiązki protonów w hali terapii oka przed ich rozpoczęciem miało miejsce trzy dni wcześniej we wtorek 05.06. W związku z tym dane zebrane podczas tego eksperymentu można było traktować jako nieobciążone skutkami niedawnego wykorzystania wiązki, co zapewniło brak udziału izotopów krótkożyciowych (o czasach połowicznego zaniku rzędu godzin i krótszych) w uzyskanych wynikach. Otrzymane w ten sposób tło promieniowania w hali terapii oka nie jest jedynie tłem naturalnym promieniowania gamma, gdyż swój wkład w jego charakter mają inne, bardziej długożyciowe radionuklidy, które zostały sztucznie wyprodukowane podczas wcześniejszych aktów użycia wiązki protonowej na stanowisku radioterapii oka. Jednakże, z uwagi na fakt, iż wiązka protonów jest wykorzystywana w hali radioterapii oka prawie każdego dnia (od poniedziałku do piątku), to przedział trzech dni jest jednym z najdłuższych osiągalnych okresów bez obecności wiązki. Wydaje się zatem, że taki dobór terminu przeprowadzenia badania sprawiał, że otrzymane w nich rezultaty można jak najbardziej traktować jako wyniki pomiarów promieniowania tła w pokoju terapii oka CCB.

Pomiary przeprowadzono w następujący sposób. Miernik mocy dawki GT znajdował się przez cały czas ich trwania w jednym miejscu, za fotelem pacjenta. Z kolei miernik GT-XL zmieniał każdorazowo swoją pozycję i był zawsze umieszczany obok spektrometru z detektorem HPGe. Zebrano 7 widm energetycznych promieniowania gamma w 7 różnych miejscach w hali terapii oka. Za każdym razem detektor umieszczony był na specjalnym statywie bez osłony ołowianej i zwrócony pionowo w górę. Na Rysunku 23 przedstawiono położenie punktów pomiarowych, które naniesiono na techniczny schemat hali radioterapii oka CCB. Dla porównania wykonano również dwa pomiary gamma-spektrometryczne promieniowania tła w dwóch różnych pomieszczeniach LER IFJ PAN (pokoje nr 3201 i 3105, oznaczone odpowiednio numerami 8 i 9). W obu tych przypadkach detektor również był nieosłonięty oraz zwrócony w górę i w trakcie tych pomiarów zarejestrowano jedynie linie pochodzące od naturalnie występujących radionuklidów.



Rysunek 23. Położenie punktów (numery od 1 do 7) w pomiarach tła promieniowania gamma w hali radioterapii oka

Tabela 15. Sztucznie powstałe izotopy zarejestrowane w widmach zebranych w kolejnych punktach pomiarowych w hali radioterapii oka (punkty 1 – 7) i pomieszczeniach LER IFJ PAN (punkty 8 – 9). Symbol „+” oznacza, że obecność danego izotopu została stwierdzona

Izotop	Punkt pomiarowy								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Be-7	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Na-22	+	+	+	+	-	+	-	-	-
Na-24	+	+	+	+	-	+	-	-	-
Mn-54	+	+	+	+	-	+	-	-	-
Co-56	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Co-58	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Zn-65	+	+	+	+	-	-	-	-	-

W przypadku obu mierników mocy dawki promieniowania gamma ich wskazania były niskie i mieściły się w zakresach 60 – 120 nSv/h i 70 – 95 nSv/h odpowiednio dla mierników GT oraz GT-XL. Ponownie szerszy zakres rejestrowanych wartości przez miernik GT bierze się z jego fizycznej budowy, a co za tym idzie parametrów pracy. W związku z powyższym można z całą pewnością uznać, iż wskazania obu mierników były takie same, a poziom mocy dawki od „tła” w hali terapii oka nie przekracza poziomu mocy dawki promieniowania

gamma od naturalnego tła w Polsce [88]. Taki wynik jest również potwierdzeniem rezultatów z rozdziału 8.1.1, mówiących iż za tymczasowo podwyższony poziom mocy dawki w pokoju terapii oka zdecydowanie odpowiadają krótkożyciowe izotopy gamma-promieniotwórcze wzbudzone w komponentach stanowiska podczas pracy z wiązką protonową.

W przypadku pomiarów gamma-spektrometrycznych, w każdym z punktów pomiarowych stwierdzono obecność naturalnie występujących izotopów promieniotwórczych. Ponadto, w niektórych pomiarach zarejestrowano również linie pochodzące od radionuklidów wzbudzonych sztucznie. W Tabeli 15 zawarto właśnie te sztucznie wygenerowane izotopy zaobserwowane w poszczególnych widmach.

Izotopy Mn-54, Co-56 i Co-58 powstały z dużym prawdopodobieństwem w wyniku aktywacji stalowych elementów stanowiska terapii oka. Izotop Zn-65 z największym prawdopodobieństwem został wyprodukowany na skutek aktywacji miedzi (najbardziej zaktywowanym komponentem układu zawierającym miedź wydaje się być techniczny kolimator umieszczony na końcu stanowiska). W miedzi wzbudzony mógł zostać również wymieniony już wcześniej izotop kobaltu Co-58. W przypadku izotopów sodu Na-22 oraz Na-24, ich źródłem są wszelkie zaktywowane elementy aluminiowe. Z uwagi na powszechność wykorzystania tych materiałów w różnych komponentach stanowiska terapii oka, obecność wymienionych wyżej izotopów w większości widm wydaje się być uzasadniona. Wyjątkiem są tu widma nr 5 oraz 7, gdzie nie zaobserwowano linii pochodzących od tychże izotopów. Można to jednak wytłumaczyć faktem, iż te właśnie punkty pomiarowe były najbardziej oddalone od stanowiska terapii, a co za tym idzie od wszystkich najbardziej zaktywowanych elementów. Ciekawa wydaje się obecność izotopu Be-7, którą zaobserwowano jedynie w widmach nr 1 i 4. Ponieważ wynika ona z aktywacji pleksiglasu, z którego zrobione są modulatory zasięgu, to stwierdzono ją jedynie w tych punktach pomiarowych, które znajdowały się najbliżej właśnie tych modulatorów.

Wymienione wyżej izotopy mogły zostać wyprodukowane zarówno w wyniku aktywacji określonych materiałów przez pierwotne protony, jak i wtórne neutrony. Wydaje się jednak, iż udział pierwotnych protonów w tych wzbudzeniach jest istotnie większy, z uwagi na fakt, iż na stanowisku terapii oka znajduje się stosunkowo dużo elementów, w które wiązka protonowa trafia bezpośrednio i to właśnie one wykazywały największą aktywność (patrz rozdział 8.1.3).

Aby mieć obraz tego jaki udział w całym widmie promieniowania tła mają linie pochodzące od tych sztucznie wzbudzonych izotopów, w Tabeli 16 zawarto dla każdego zebranego widma częstości zliczeń w poszczególnych liniach odpowiadających

zarejestrowanym zarówno naturalnym, jak i sztucznym izotopom. Ponadto wszędzie podano również całkowitą częstość zliczeń w danym widmie oraz częstość zliczeń w piku anihilacyjnym o energii 511 keV. Ta linia wydaje się być dość dobrym indykatozem udziału promieniotwórczości sztucznie wzbudzonej w danym widmie promieniowania tła. Dzieje się tak, ponieważ występuje ona również w widmach, gdzie mamy do czynienia jedynie z naturalnymi radionuklidami, natomiast przyrost jej częstości zliczeń będzie się wiązał głównie z obecnością sztucznie wyprodukowanych izotopów ulegających rozpadowi β^+ , które zawsze stanowią niepomijalną część ogółu wzbudzonych izotopów.

Tabela 16. Częstości zliczeń w poszczególnych liniach odpowiadających zarejestrowanym sztucznym oraz naturalnym izotopom w kolejnych punktach pomiarowych (1 - 9)

Izotop	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń danej linii w danym punkcie pomiarowym [cps]								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Be-7	477,6	-	-	-	0,28	-	-	-	-	-
Na-22	1274,5	0,11	0,04	0,06	0,06	-	0,01	-	-	-
Na-24	2754,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn-54	834,8	0,05	0,05	0,12	0,07	-	0,02	-	-	-
Co-58	810,8	-	-	0,08	0,1	-	-	-	-	-
Zn-65	1115,5	0,02	0,02	0,09	0,11	-	-	-	-	-
anilh.	511,0	0,59	0,32	0,41	0,44	0,21	0,2	0,23	0,25	0,24
K-40	1460,8	1,26	1,17	1,28	1,26	1,4	1,24	1,41	2,21	1,74
Tl-208	2614,5	0,24	0,23	0,23	0,25	0,26	0,23	0,25	0,43	0,35
Bi-214	609,3	0,61	0,56	0,62	0,57	0,7	0,67	0,67	0,82	0,62
Całe widmo:		143	126	157	157	160	137	141	257	207

Dla zachowania czytelności nie zamieszczono przy wartościach częstości zliczeń ich niepewności pomiarowych. Dla linii emitowanych przez izotopy naturalne mieściły się one w zakresie 1 – 5%, natomiast dla pozostałych linii było to z reguły kilka-kilkanaście procentów.

Można zauważyć, zwłaszcza patrząc na linię anihilacyjną, iż w niektórych punktach pomiarowych udział promieniotwórczości wzbudzonej jest nieco większy niż w innych (w szczególności w punktach 1, 3 i 4). Z drugiej strony wyraźnie widać, że częstości zliczeń w pikach odpowiadających wzbudzonym radionuklidom są stosunkowo małe, żadna z nich nie przekracza częstości zliczeń w piku naturalnego potasu K-40 czy bizmutu Bi-214. Na tej podstawie można jednoznacznie stwierdzić, iż izotopy sztucznie wzbudzone w różnych komponentach stanowiska mają bardzo mały wpływ w całościowe tło promieniowania gamma w hali radioterapii oka CCB. Interesująca wydaje się być również obserwacja, iż

częstości zliczeń w pikach pochodzących od naturalnych izotopów oraz w całych widmach są istotnie niższe dla hali radioterapii oka niż dla punktów zlokalizowanych w pokojach LER, w których rutynowo na co dzień przebywają jego pracownicy (patrz punkty pomiarowe nr 8 i 9). Wynika to z faktu, iż w budynku CCB stosowana jest duża liczba grubych betonowych ścian, które stanowią jednocześnie osłonę przed naturalnym promieniowaniem zewnętrznym z powierzchni gruntu i promieniowaniem kosmicznym. Stoi to w zgodzie z wysuniętym wcześniej w tym podrozdziale wnioskiem, iż moc dawki promieniowania gamma w budynku CCB jest nieco mniejsza niż jej średnia wartość w Polsce.

8.1.3 Pomiary poszczególnych komponentów stanowiska radioterapii oka

Kolejne serie pomiarowe dotyczyły konkretnych elementów stanowiska radioterapii oka, które podczas korzystania z wiązki protonowej ulegały największej aktywacji. Wszystkie poniższe trzy pomiary koncepcyjnie wyglądały bardzo podobnie. Najpierw dany element ulegał aktywacji przez wykorzystywaną na stanowisku terapii oka wiązkę protonową i w miarę możliwości jak najszybciej po zakończeniu napromieniania był on „demonstrowany” ze stanowiska, umieszczany na detektorze HPGe i jako jedyny (bez wpływu innych elementów stanowiska) poddawany pomiarom gamma-spektrometrycznym. Dla kolimatora technicznego oraz modulatora zasięgu wykonywano również przynajmniej szacunkowe pomiary mocy dawki promieniowania gamma przy powierzchni danego elementu z wykorzystaniem radiometru RKP-2, natomiast w przypadku stopera wiązki wykorzystano w tym celu miernik GT-XL.

a) kolimator techniczny

Pierwszym z badanych komponentów był lity mosiężny kolimator techniczny, umieszczany na samym końcu stanowiska radioterapii oka (patrz rozdział 5.3) o średnicy wewnętrznej 25 mm (wykorzystuje się również kolimatory innych rozmiarów). Poddano go sekwencyjnym pomiarom gamma-spektrometrycznym, pierwszy z nich rozpoczęto w czwartek 15.03.18 o godzinie 10:40. Kolimator był wcześniej tego dnia używany podczas rutynowych testów tygodniowych na stanowisku radioterapii oka. Wiązka była włączana na przestrzeni czasu od około 08:15 do 10:15. Sumaryczny czas aktywności wiązki z wykorzystaniem 25 mm kolimatora technicznego wynosił 947 s. Prąd wiązki wynosił standardowo 300 nA.

Pomiary rozpoczęto o 10:40. Najpierw wykonano sześć gamma-spektrometrycznych pomiarów 15-minutowych, następnie wykonano dwa pomiary 30-minutowe, a po nich jeszcze ponad 70 pomiarów 60-minutowych. Zdecydowano się na taką właśnie sekwencję pomiarów

(rozpoczęcie od pomiarów stosunkowo krótkich, a następnie przejście do pomiarów dłuższych), aby w miarę możliwości móc zarejestrować w kilku pierwszych widmach izotopy krótkożyciowe, o czasie połowicznego zaniku rzędu nawet kilku-kilkunastu minut. Zbieranie widm zakończono w poniedziałek 19.03.

Kolimator był umieszczony centralnie nad czołem detektora w odległości 17,4 cm. Konieczne było odsunięcie go od detektora na pewną odległość z uwagi na bardzo wysoką częstość emitowanych przez niego kwantów gamma, co prowadziło do pojawienia się niekorzystnie dużego czasu martwego detektora podczas pomiaru (dla kolimatora umieszczonego bezpośrednio na detektorze czas martwy wynosił około 90%).

W Tabeli 17 zawarto listę radionuklidów, których obecność stwierdzono w badanym kolimatorze. Przedstawiono również ich najważniejsze własności oraz najbardziej prawdopodobne kanały ich produkcji.

Większość wzbudzonych izotopów powstała w wyniku reakcji pierwotnych protonów z materiałem kolimatora – mosiądzem (stop miedzi i cynku). W każdym mosiądzu można jednak zawsze znaleźć niewielkie domieszki żelaza – stąd najprawdopodobniej wynika obecność w kolimatorze izotopów Mn-54, Co-56 i Co-57. Z kolei domieszki ołowiu były powodem wyprodukowania ciężkich izotopów ołowiu oraz bizmutu: Pb-203, Bi-204, Bi-206.

Tabela 17. Izotopy, których obecność stwierdzono w kolimatorze technicznym

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji
Mn-54	313 d	$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Co-56	77 d	$^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$
Co-57	272 d	$^{58}\text{Fe}(p,2n)^{57}\text{Co}$
Co-58	71 d	$^{58}\text{Fe}(p,n)^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(p,n+p+\alpha)^{58}\text{Co}$
Cu-60	24 min	$^{64}\text{Zn}(p,n+\alpha)^{60}\text{Cu}$
Cu-61	3,4 h	$^{63}\text{Cu}(p,2n+p)^{61}\text{Cu}$, $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$, $^{63}\text{Cu}(n,3n)^{61}\text{Cu}$
Cu-64	12,7 h	$^{65}\text{Cu}(p,n+p)^{64}\text{Cu}$
Zn-62	9,3 h	$^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,3n)^{62}\text{Zn}$
Zn-63	38 min	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,3n)^{63}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,2n)^{63}\text{Zn}$

Zn-65	244 d	$^{66}\text{Zn}(p,n+p)^{65}\text{Zn}$, $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$, $^{66}\text{Zn}(n,2n)^{65}\text{Zn}$
Ga-66	9,5 h	$^{66}\text{Zn}(p,n)^{66}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(p,3n)^{66}\text{Ga}$
Pb-203	51,9 h	$^{204}\text{Pb}(n,2n)^{203}\text{Pb}$
Bi-204	11 h	$^{208}\text{Pb}(p,5n)^{204}\text{Bi}$, $^{206}\text{Pb}(p,3n)^{204}\text{Bi}$, $^{207}\text{Pb}(p,4n)^{204}\text{Bi}$
Bi-206	6,2 d	$^{208}\text{Pb}(p,3n)^{206}\text{Bi}$, $^{206}\text{Pb}(p,n)^{206}\text{Bi}$, $^{207}\text{Pb}(p,2n)^{206}\text{Bi}$

Dokładne zmierzenie wymiarów oraz masy kolimatora pozwoliło na sporządzenie odpowiedniego modelu geometrii pomiarowej w programie ISOCS, na podstawie którego została dla tego pomiaru wygenerowana krzywa wydajnościowa, dzięki której możliwe było oszacowanie aktywności poszczególnych radionuklidów w badanym kolimatorze. Podobne postępowanie przeprowadzono również dla mierzonych w dalszej kolejności modulatora zasięgu oraz stopera wiązki. Przyjętą w przypadku kolimatora geometrią był walec o wysokości 0,88 cm i średnicy 4,71 cm.

Oszacowane aktywności stwierdzonych radionuklidów w zależności od momentu przeprowadzenia pomiaru (pierwszy wynik dla widma zebranego zaraz po napromienianiu, kolejne w odstępach po kilka godzin) zawarto w Tabeli 18.

Tabela 18. Aktywności izotopów w kolimatorze technicznym zmierzone w kilkugodzinnych odstępach czasu

Izotop	Okres półrozpadu	Aktywność [kBq]		
		15.03, 10:40	15.03, 13:30	15.03, 21:40
Co-58	71 d	-	0,87 (3)	1,00 (4)
Cu-60	24 min	10,0 (3)	0,14 (1)	-
Cu-61	3,4 h	95 (18)	55 (10)	9,2 (18)
Zn-62	9,3 h	12,2 (11)	11,2 (10)	5,8 (5)
Zn-63	38 min	141 (10)	11 (1)	-
Zn-65	244 d	-	1,3 (1)	1,2 (1)
Ga-66	9,5 h	7,4 (4)	6,7 (3)	3,5 (2)

Wyraźnie widać, iż początkowe aktywności niektórych ze wzbudzonych izotopów są bardzo wysokie, dotyczy to głównie izotopów Cu-61 oraz Zn-63. Jednocześnie wszystkie nuklidy, których aktywność została powyżej wyznaczona są stosunkowo krótkożyciowe, o okresach półrozpadu rzędu maksymalnie kilku godzin. W związku z powyższym aktywność całego kolimatora spada relatywnie szybko wraz z upływem czasu.

Wśród zidentyfikowanych w kolimatorze nuklidów znalazły się również te o dłuższych czasach połowicznego zaniku. Obliczono aktywność również niektórych z tych właśnie izotopów (tych, dla których statystyka zliczeń była wystarczająco dobra) – dokonano tego bazując na ostatnim zarejestrowanym widmie, aby zminimalizować wpływ krótkożyciowych izotopów na jakość analizy. W Tabeli 19 zawarto wyznaczone aktywności długożyciowych nuklidów, których obecność stwierdzono w kolimatorze technicznym.

Tabela 19. Aktywność długożyciowych izotopów stwierdzonych w kolimatorze technicznym

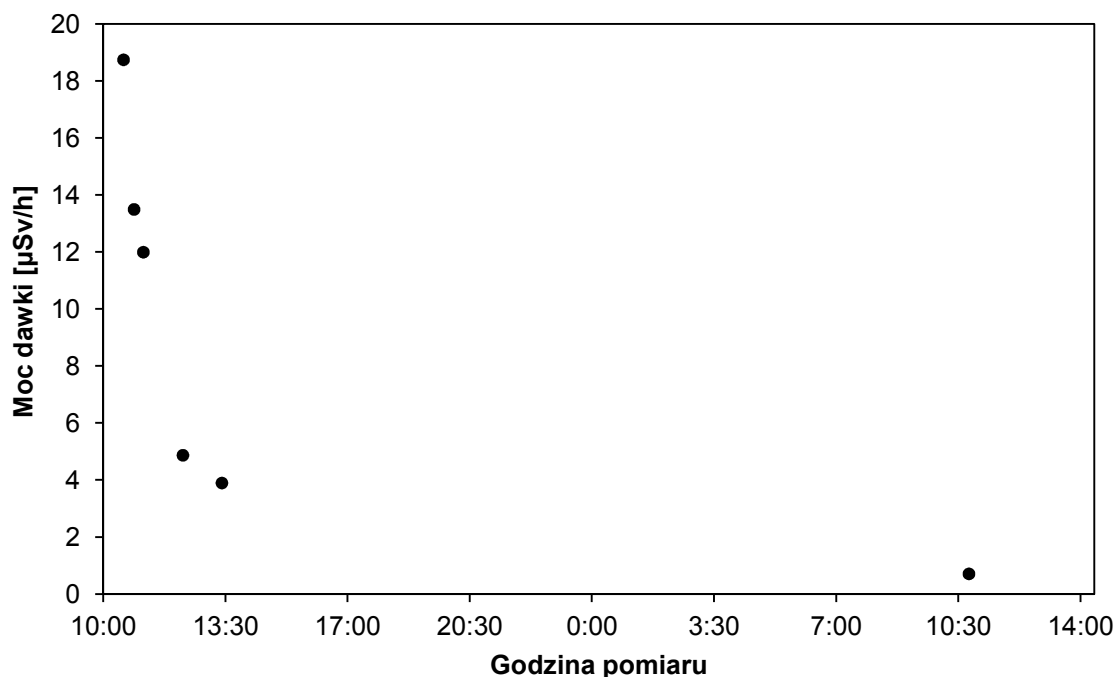
Izotop	Okres półrozpadu	Aktywność [Bq]
Co-56	77 d	66 (14)
Co-57	272 d	267 (28)
Co-58	71 d	920 (33)
Zn-65	244 d	972 (39)

Warto zaznaczyć, iż jest to aktywność izotopów skumulowana po dłuższym okresie użytkowania kolimatora (patrz rozdział 4.). Jak widać ich wartości nie są bardzo wysokie, przy czym należy pamiętać, iż wraz z dalszą eksploatacją mogą one jeszcze nieco wzrosnąć, zwłaszcza w przypadku Co-57 i Zn-65, z uwagi na ich dłuższe okresy półrozpadu, przekraczające 200 dni.

Zarówno w Tabeli 18, jak i w Tabeli 19 nie podano aktywności izotopów Mn-54, Cu-64, Pb-203, Bi-204 oraz Bi-206, z uwagi na zbyt małą częstość zliczeń w odpowiadających im pikach, która nie pozwoliła na dostatecznie dokładne oszacowanie ich aktywności.

Podczas wykonywania pomiarów gamma-spektrometrycznych kolimatora, przeprowadzano co pewien czas również równoległe pomiary mocy dawki promieniowania gamma przy samej powierzchni kolimatora (w odległości mniejszej niż 1 cm) za pomocą radiometru RKP-2. Początkowo (godz. 10:35) moc dawki wynosiła około 18,8 $\mu\text{Sv/h}$, przy czym jej wartość szybko malała, by o godz. 13:25 osiągnąć już ok. 3,9 $\mu\text{Sv/h}$. Wartość mocy dawki po upływie 24 godzin wyniosła około 0,7 $\mu\text{Sv/h}$, natomiast po upływie kolejnych 72

godzin (po weekendzie) była ona na poziomie $0,25 \mu\text{Sv/h}$. Wykres zależności mocy dawki od czasu przedstawiono na Rysunku 24. Na wykresie nie zawarto ostatniego poniedziałkowego wyniku pomiaru.



Rysunek 24. Zależność mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przez radiometr RKP-2 przy powierzchni kolimatora technicznego od czasu

Charakter zmienności mocy dawki w czasie potwierdza obserwacje poczynione podczas analizy wyników pomiarów gamma-spektrometrycznych. Początkowo wysoka moc dawki szybko maleje (już niemal pięciokrotnie po upływie trzech godzin), co świadczy o dużym w niej udziale izotopów krótkożyciowych. Późniejsze utrzymywanie się mocy dawki na nieco podwyższonym poziomie (pomiar poniedziałkowy) może z kolei wskazywać na obecność właśnie tych ze wzbudzonych izotopów, które cechuje dłuższy okres półrozpadu.

Warto nadmienić, iż w przypadku radioterapii oka stosuje się kolimatory przygotowane specjalnie dla konkretnego pacjenta, w zależności od charakterystyki guza nowotworowego. Dla tych indywidualnych kolimatorów początkowa moc dawki emitowanego przez nie promieniowania gamma może być na podobnym poziomie co w przypadku analizowanego powyżej kolimatora technicznego. Kolimatory indywidualne są wykorzystywane praktycznie jednorazowo, w związku z tym aktywność skumulowanych w nich izotopów długożyciowych będzie zdecydowanie niższa.

b) modulator zasięgu

Kolejnym z badanych komponentów był jeden z modulatorów zasięgu stosowanych w stanowisku terapii oka. Jest to wykonany z PMMA (pleksiglas) element służący do ciągłej zmiany energii, a co za tym idzie zasięgu wiązki protonów, dzięki czemu możliwe jest wytworzenie odpowiedniego poszerzonego piku Bragga (patrz rozdział 5.3). Poddano go sekwencyjnym pomiarom gamma-spektrometrycznym oraz pomiarom mocy dawki promieniowania gamma. Pierwszy z pomiarów rozpoczęto w piątek 24.08.2018 o godzinie 08:55. Modulator był wcześniej tego dnia użytkowany przy typowym przygotowaniu stanowiska do późniejszej radioterapii pacjentów. Wiązka protonowa była przez ten czas przynajmniej kilka razy włączona. Modulator został zdjęty ze stanowiska około godziny 08:15 tego samego dnia.

Podobnie jak w przypadku kolimatora, tak i tu rozpoczęto od pomiarów krótszych, by później przejść do tych dłuższych. Pierwsze 8 widm były to rezultaty pomiarów 15-minutowych, kolejne 4 to pomiary 30-minutowe, a następnie wykonano jeszcze ponad 60 pomiarów 60-minutowych. Zbieranie widm zakończono w poniedziałek 27.08 w godzinach porannych.

Modulator zasięgu był podczas pomiaru gamma-spektrometrycznego umieszczony centralnie nad czołem detektora w odległości 8,7 cm (ponownie z uwagi na duży czas martwy detektora przy zbyt bliskim położeniu modulatora).

W Tabeli 20 zawarto listę radionuklidów, których obecność stwierdzono w badanym modulatorze zasięgu. Przedstawiono również ich najważniejsze własności oraz najbardziej prawdopodobne kanały ich produkcji.

Tabela 20. Izotopy, których obecność stwierdzono w modulatorze zasięgu

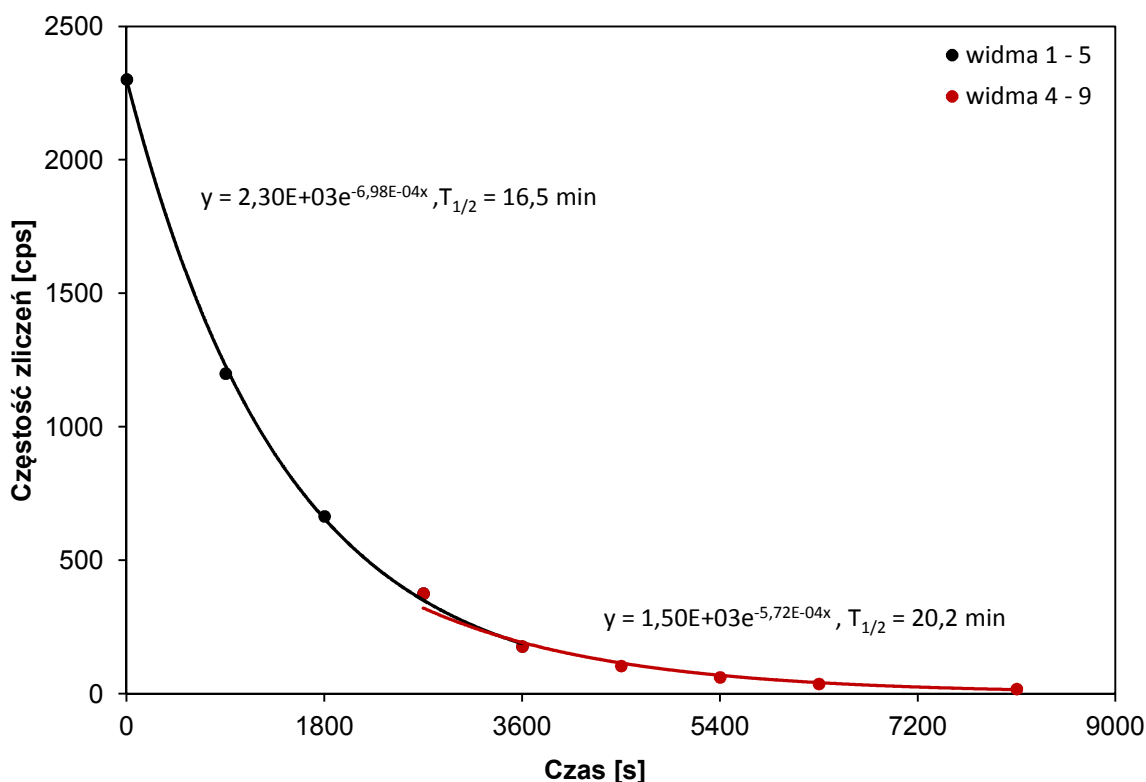
Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji
Be-7	53 d	$^{12}\text{C}(p,d+\alpha)^7\text{Be}$
C-11	20,4 min	$^{12}\text{C}(p,n+p)^{11}\text{C}$, $^{16}\text{O}(p,d+\alpha)^{11}\text{C}$
N-13	10,0 min	$^{16}\text{O}(p,x)^{13}\text{N}$

Warto nadmienić, że o ile obecność izotopu Be-7 jest stosunkowo łatwo stwierdzić na podstawie jego linii o energii 477,6 keV, to nie jest to możliwe dla izotopów C-11 oraz N-13, ponieważ nie emitują one kwantów promieniowania gamma o żadnej innej energii niż 511 keV (co wynika ze sposobu ich rozpadu – beta plus). Ich obecność można jednak po pierwsze

przewidzieć, analizując przekroje czynne na reakcje protonów z jądrami atomów węgla oraz tlenu, które składają się na PMMA, czyli materiał, z którego zrobiony jest modulator.

Po drugie, obecność izotopów C-11 oraz N-13 można potwierdzić analizując samo widmo, poprzez oszacowanie czasu połowicznego zaniku dla samej linii 511 keV. Można to wykonać w następujący sposób: wyznacza się liczbę zliczeń w pikie o energii 511 keV dla kilku-kilkunastu kolejnych widm i do tak zebranych wyników dopasowuje się opadającą krzywą o charakterze eksponencjalnym (czyli opisaną wzorem $A \cdot e^{-\lambda t}$, gdzie A – stała początkowa wartość, t – czas, λ – efektywna „stała rozpadu” dla linii 511 keV) i z uzyskanej postaci krzywej odczytuje się wartość stałej rozpadu, z której następnie oblicza się efektywny okres półrozpadu dla linii 511 keV (pamiętając, że $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$, gdzie $T_{1/2}$ to czas połowicznego zaniku).

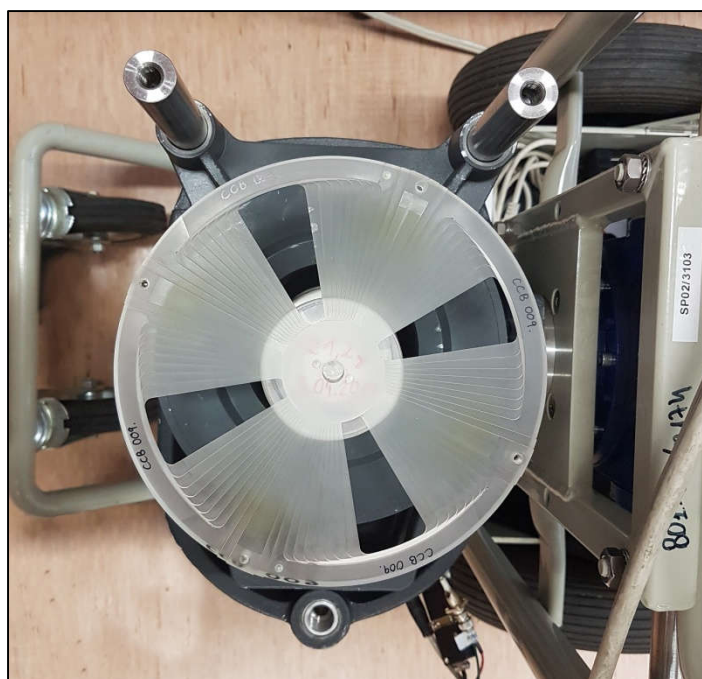
Powyższe postępowanie przeprowadzono w przypadku widm zebranych z badanego modulatora zasięgu. Stwierdzono, iż dla kilku początkowych widm, czas połowicznego zaniku linii 511 keV wynosi kilkanaście minut, natomiast wraz z wykorzystaniem do oszacowania jego wartości widm zebranych w dalszej kolejności, ów okres półrozpadu się wydłuża. I tak dla przykładu, okres półrozpadu linii 511 keV oszacowany dla widm nr 1 – 5 wyniósł 993 s (ok. 16,5 min), z kolei jego wartość wyznaczona dla widm nr 4 – 9 wyniosła już 1212 s (20,2 min). Świadczy to o obecności w kilku początkowych widmach zarówno izotopu N-13 ($T_{1/2} = 10,0$ min), jak i C-11 ($T_{1/2} = 20,4$ min). Wraz z upływem czasu oba te izotopy się rozpadają, lecz rozpad N-13 następuje szybciej, z uwagi na jego krótszy okres półrozpadu. W związku z tym, w tych nieco później zebranych widmach dominuje już C-11 i niemal wszystkie zliczenia zarejestrowane w pikie o energii 511 keV pochodzą już z rozpadów tego właśnie radionuklidu, co potwierdza oszacowana wartość czasu połowicznego zaniku linii 511 keV równa 20,2 min, a zatem bardzo bliska faktycznej wartości okresu półrozpadu dla nuklidu C-11. Na Rysunku 25 przedstawiono wykres zależności częstości zliczeń w linii o energii 511 keV od czasu wraz z dopasowanymi do odpowiednich punktów pomiarowych krzywymi o charakterze eksponencjalnym.



Rysunek 25. Zależność częstości zliczeń w linii o energii 511 keV emitowanej przez modulator zasięgu od czasu pomiaru wraz z dopasowanymi do odpowiednich punktów pomiarowych krzywymi o charakterze eksponencjalnym

Wśród aktywowanych w modulatorze zasięgu izotopów spodziewano się również obecności izotopu tlenu O-15, powstałego z reakcji $^{16}\text{O}(p,n+p)^{15}\text{O}$ [57, 89]. W praktyce bezpośrednie zaobserwowanie jego śladu w widmie jest bardzo trudne, ponieważ emituje on jedynie kwanty gamma o energii 511 keV i co więcej charakteryzuje się on bardzo krótkim czasem połowicznego zaniku równym 122 s.

Przy użyciu pakietu ISOCS sporządzono ponadto trzy różne kalibracje wydajnościowe odpowiadające trzem różnym przyjętym modelom geometrii pomiarowej, które najlepiej przybliżały geometrię rzeczywistą (sporządzenie pojedynczego modelu geometrii, który idealnie oddawałby rzeczywistą geometrię było niemożliwe, z uwagi na specyficzny kształt analizowanego elementu). Przyjętymi modelami geometrii były walec o średnicy identycznej jak średnica modulatora (21 cm), a także mniejszy walec o średnicy 3 cm przesunięty względem środka detektora oraz pierścien o szerokości 3 cm i średnicy wewnętrznej 13 cm, mające imitować najbardziej naświetlony przez wiązkę protonów obszar modulatora. Zdjęcie modulatora podczas pomiaru gamma-spektrometrycznego przedstawiono na Rysunku 26.



Rysunek 26. Modulator zasięgu w trakcie pomiaru spektrometrycznego (widziany z góry)

Na podstawie sporządzonych kalibracji wydajnościowych obliczono aktywność izotopu Be-7 w badanym modulatorze. Celem zminimalizowania niepewności pomiarowych, wartości te wyznaczono jako średnie z wyników z dziesięciu zebranych widm. Obliczone aktywności wraz z niepewnościami zamieszczono w Tabeli 21.

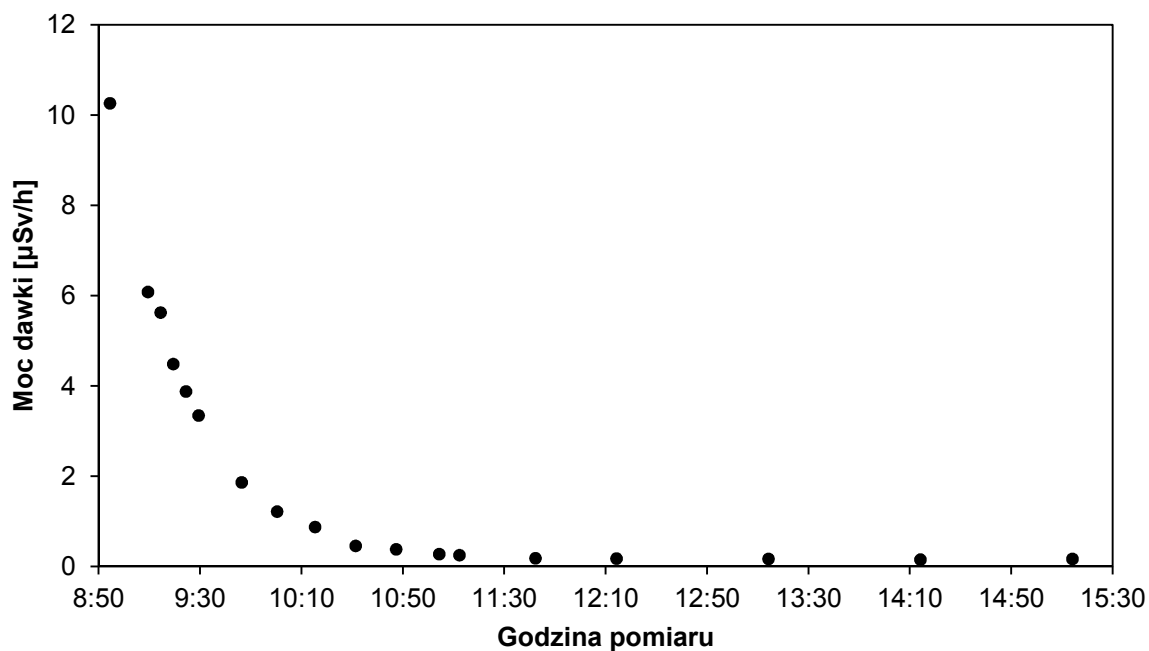
Tabela 21. Aktywność izotopu Be-7 w modulatorze zasięgu obliczona na podstawie trzech różnych kalibracji wydajnościowych

Izotop	Aktywność [Bq]		
	Kalibracja 1. (walec, d = 21 cm)	Kalibracja 2. (walec, d = 3 cm)	Kalibracja 3. (pierścień)
Be-7	862 (17)	971 (20)	959 (19)

Po pierwsze, łatwo stwierdzić, iż aktywności oszacowane dla wszystkich trzech przyjętych modeli geometrii pomiarowych nie różnią się znacznie od siebie. Ponadto, można zauważyć, że są to dość niskie aktywności, które poza tym nie powinny już znacznie wzrosnąć wraz z dalszym użytkowaniem modulatora. Jest tak, gdyż czas połowicznego zaniku izotopu Be-7 wynosi 53 dni, a zatem jego zawartość w modulatorze wynika z jego kumulacji przez poprzedzający okres rzędu 250 – 300 dni (patrz rozdział 4.).

Podczas wykonywania pomiarów gamma-spektrometrycznych modulatora zasięgu, przeprowadzano co pewien czas również równoległe pomiary mocy dawki promieniowania

gamma przy samej powierzchni modulatora (w odległości mniejszej niż 1 cm) oraz w odległości około 0,5 m od jego powierzchni za pomocą radiometru RKP-2, na początku z większą, potem z nieco mniejszą częstotliwością. Patrząc na wyniki pomiarów przy powierzchni modulatora można zaobserwować, iż po upływie około 70 – 80 minut wartość mocy dawki spadła dziesięciokrotnie w stosunku do początkowego poziomu, który wynosił 10,3 $\mu\text{Sv/h}$, natomiast po upływie trzech godzin była ona już niższa niż 0,2 $\mu\text{Sv/h}$. Świadczy to o fakcie, iż w istocie decydujący wpływ na moc dawki promieniowania gamma emitowanego przez modulator mają wyprodukowane w nim dwa krótkożyciowe izotopy C-11 oraz N-13. W odległości około 0,5 m od powierzchni modulatora moc dawki początkowo wynosiła 0,6 $\mu\text{Sv/h}$ i obniżała się w podobnym tempie jak to miało miejsce przy samej powierzchni badanego elementu. Na Rysunku 27 zawarto wykres zależności mocy dawki promieniowania gamma przy samej powierzchni modulatora zasięgu od czasu.



Rysunek 27. Zależność mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przez radiometr RKP-2 przy powierzchni modulatora zasięgu od czasu

c) stoper wiązki

Ostatnim badanym osobno komponentem ze stanowiska terapii oka był stoper wiązki. Jest to parafinowy blok o objętości około 1,5 litra, który podczas wszelkiej pracy z wiązką umieszczany jest bezpośrednio za fotelem pacjenta na wysokości głowy. Zadaniem stopera jest całkowite zatrzymanie wiązki protonów (patrz rozdział 5.3).

Stoper poddano sekwencyjnym pomiarom gamma-spektrometrycznym. Było to 30 widm, z których każde zbierano przez 30 minut. Pierwszy pomiar rozpoczęto w środę 11.07.2018 o godzinie 16:45, ostatni zakończył się następnego ranka w czwartek.

Podczas pomiarów stoper był umieszczony w miarę możliwości centralnie nad czołem detektora w odległości 4,5 cm.

W Tabeli 22 zawarto listę radionuklidów, których obecność stwierdzono w badanym stoperze wiązki. Przedstawiono również ich najważniejsze własności oraz najbardziej prawdopodobne kanały ich produkcji.

Tabela 22. Izotopy, których obecność stwierdzono w stoperze wiązki

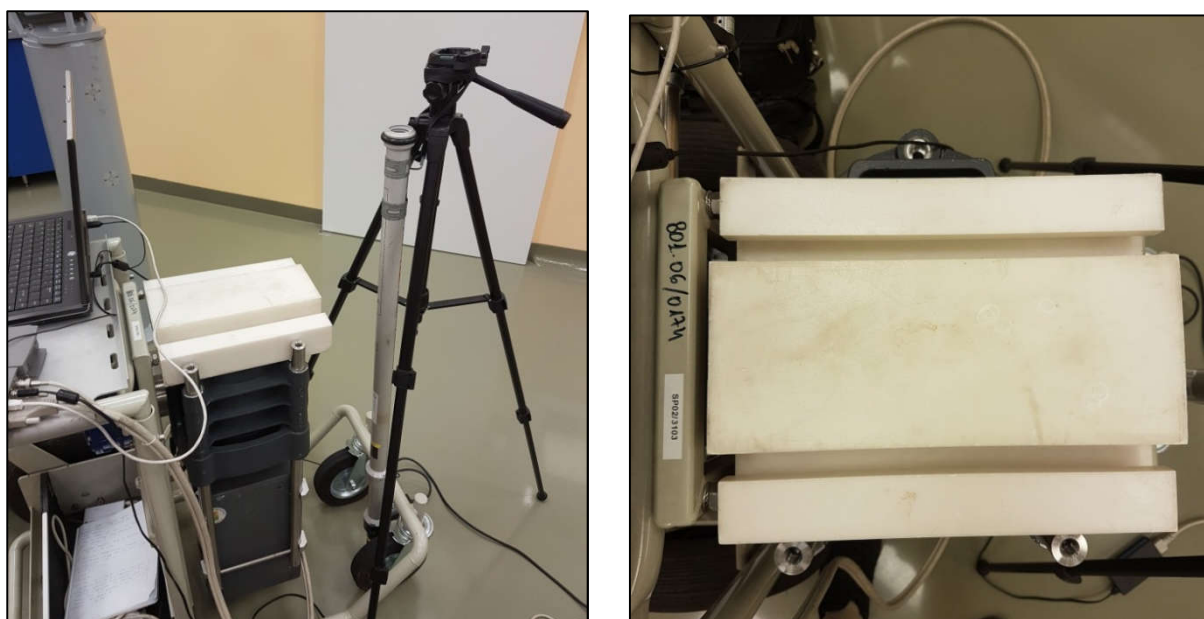
Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji
Be-7	53 d	$^{12}\text{C}(p,d+\alpha)^7\text{Be}$
C-11	20,4 min	$^{12}\text{C}(p,n+p)^{11}\text{C}$

Warto zauważyć, że parafina jest mieszaniną alkanów, nie zawiera zatem tlenu. Stąd wynika brak obecności w badanym stoperze wiązki izotopu N-13, wyprodukowanego w analizowanym wcześniej modulatorze zasięgu. Izotop węgla C-11 był w stoperze jak najbardziej obecny, ponieważ może on zostać wzbudzony na skutek reakcji protonów nie tylko z izotopem tlenu ^{16}O , ale także z węglem ^{12}C .

Obecność izotopu C-11 oraz brak obecności izotopu N-13 potwierdzono przeprowadzając identyczne postępowanie jak w przypadku modulatora zasięgu (patrz rozdział 8.1.3 b)). Przeanalizowano liczby zliczeń w pikie o energii 511 keV w kolejnych widmach i dopasowując do tak uzyskanych danych krzywą eksponencjalną, wyznaczono okres półrozpadu linii 511 keV. Obliczony czas połowicznego zaniku na podstawie pierwszych sześciu widm wyniósł 20,7 min, co niemal idealnie pokrywa się z okresem półrozpadu izotopu C-11 (20,4 min) – stąd wniosek, iż swój wkład w zliczenia w pikie anihilacyjnym miał praktycznie tylko ten radionuklid.

Wykorzystując pakiet ISOCS sporządzono ponadto cztery różne kalibracje wydajnościowe odpowiadające czterem różnym przyjętym modelom geometrii pomiarowej, które ponownie najlepiej przybliżały rzeczywistą geometrię pomiarową dla stopera wiązki. Wszystkie cztery modele stanowiły walce o wysokości 10 cm (przybliżona grubość stopera). Pierwsze dwa miały średnicę 10,8 cm, co odpowiadało średnicy wewnętrznej ołowianej osłony, w której znajdował się detektor. Średnica pozostałych dwóch wynosiła 3 cm, co

w teorii lepiej mogło oddawać rzeczywisty rozkład izotopów promieniotwórczych wygenerowanych w wyniku oddziaływania materiału stopera z wiązką protonów. Walce o tych samych średnicach różniły się między sobą przyjętym głębokościowym rozkładem promieniotwórczości – w przypadku jednego z nich rozkład był jednorodny, dla drugiego zaś eksponencjalnie malejący wraz z głębokością. Zdjęcie stopera wiązki podczas pomiaru gamma-spektrometrycznego przedstawiono na Rysunku 28.



Rysunek 28. Stoper wiązki w trakcie pomiaru spektrometrycznego

Na podstawie tak sporządzonych kalibracji wydajnościowych obliczono aktywność zawartego w stoperze izotopu Be-7. Aby zminimalizować niepewności pomiarowe, aktywność dla każdej z kalibracji wyznaczono jako wartość średnią z wyników pochodzących z sześciu zebranych widm. Obliczone aktywności wraz z niepewnościami zamieszczono w Tabeli 23.

Tabela 23. Aktywność izotopu Be-7 w stoperze wiązki obliczona na podstawie czterech różnych kalibracji wydajnościowych

Izotop	Aktywność [Bq]			
	Kalibracja 1. d = 10 cm, r. jednorodny	Kalibracja 2. d = 3 cm, r. jednorodny	Kalibracja 3. d = 10 cm, r. eksponencjalny	Kalibracja 4. d = 3 cm, r. eksponencjalny
Be-7	3528 (72)	2892 (59)	2506 (51)	2039 (42)

Aktywności obliczone przy użyciu różnych modeli geometrii różnią się nieco od siebie, rozsądne wydaje się jednak założenie, iż rzeczywista wartość aktywności izotopu Be-7

w badanym stoperze wiązki mieści się w zakresie obejmowanym przez podane w Tabeli 23 wartości – od ok. 2,0 do 3,5 kBq.

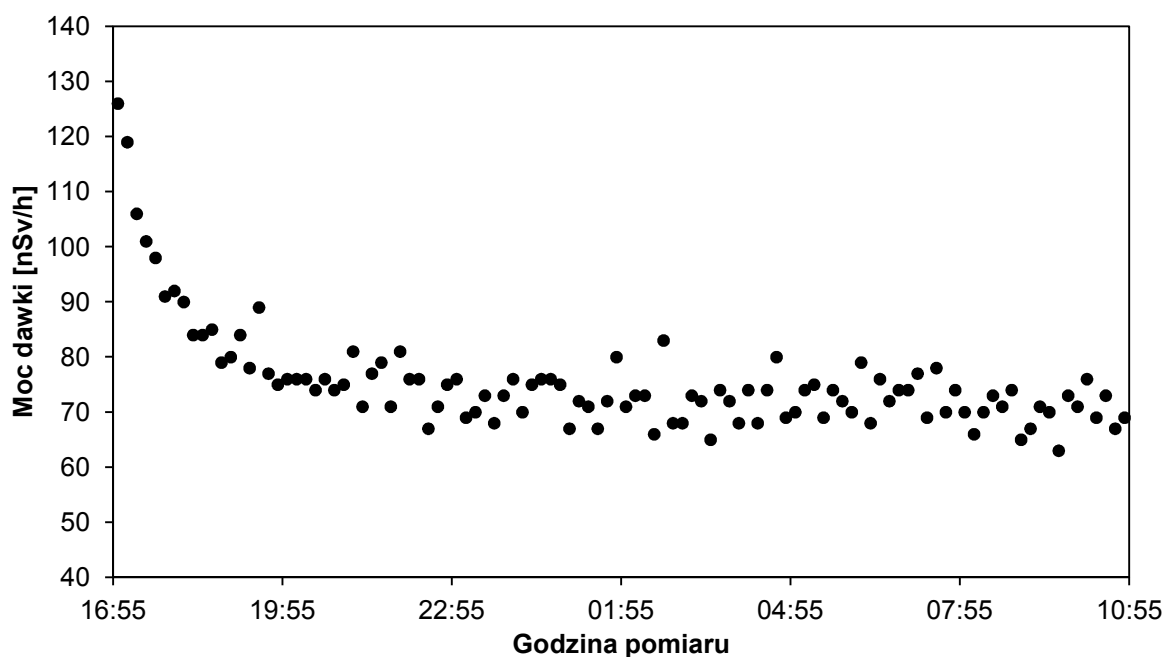
W przypadku pomiarów stopera wiązki możliwe było również wyznaczenie aktywności izotopu C-11, ponieważ był on jedynym izotopem mającym znaczący wkład w obecny w początkowych widmach pik o energii 511 keV. Jego aktywność obliczono jedynie dla pierwszych sześciu widm (czas akwizycji każdego z nich wynosił 1800 s), gdyż wraz z upływem czasu jego zawartość rzecz jasna szybko malała, z uwagi na jego krótki okres półrozpadu (20,4 min). W Tabeli 24 zamieszczono zmierzone wartości aktywności izotopu C-11 w badanym stoperze wraz z ich niepewnościami. Podano wartości obliczone dla kalibracji nr 1 (tej, która dawała najwyższe wartości aktywności izotopu Be-7 – patrz Tabela 23).

Tabela 24. Aktywności izotopu C-11 w stoperze wiązki dla pierwszych sześciu zebranych widm (czas akwizycji każdego z nich wynosił 1800 s). Uwzględniono również rozpad izotopu C-11 w trakcie samego trwania pomiaru

Izotop	Okres półrozpadu	Nr widma	Aktywność [Bq]
C-11	20,4 min	1	15670 (656)
		2	5550 (233)
		3	1963 (84)
		4	718 (31)
		5	279 (13)
		6	113 (6)

Jak widać aktywność C-11 maleje bardzo szybko z czasem. Po upływie nieco ponad godziny od zakończenia naświetlania jest ona już mniejsza niż skumulowana na przestrzeni setek dni aktywność izotopu Be-7.

Równocześnie z pomiarami gamma-spektrometrycznymi stopera wiązki przeprowadzano pomiary mocy dawki emitowanego przez niego promieniowania gamma. Wykorzystano w tym celu miernik GammaTRACER GT-XL, który został umieszczony w odległości kilkunastu centymetrów od stopera wiązki. Na Rysunku 29 zawarto wykres zależności zarejestrowanej mocy dawki od czasu.



Rysunek 29. Zależność mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przez miernik GT-XL w odległości kilkunastu centymetrów od stopera wiązki od czasu

Łatwo zauważyć, że początkowa wartość mocy dawki nie była wysoka, wynosiła bowiem 126 nSv/h. Co więcej, następował jej szybki spadek wraz z upływem czasu, zgodny z czasem połowicznego zaniku izotopu C-11, który miał dominujący udział w mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez stoper wiązki. Wartość mocy dawki osiągnęła poziom tła, który w hali radioterapii oka mieści się w zakresie 70 – 80 nSv/h, po upływie około 4 – 5 godzin.

8.2 Pokoje gantry

Pomiary w pokojach gantry zostały podzielone na dwie serie pomiarowe. W pierwszej z nich (grudzień 2019) detektor HPGe był skierowany w stronę głowicy PBS oraz stołu terapeutycznego i zbierał sygnał z ich najbliższego otoczenia niedługo po zakończeniu terapii.

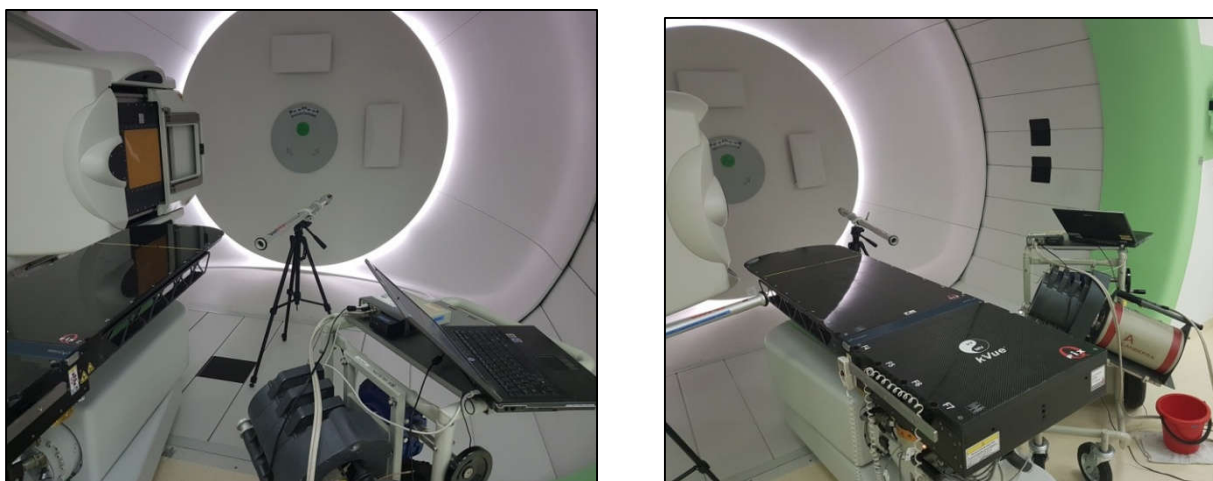
Druga seria pomiarowa (grudzień 2018) była związana z pomiarami zmieniacza zasięgu umieszczanego podczas radioterapii na wyjściu wiązki z głowicy PBS (patrz rozdział 5.3). Stwierdzono bowiem, wykonując szybkie pomiary mocy dawki promieniowania gamma za pomocą radiometru RKP-2, że to właśnie zmieniacz zasięgu jest elementem, który ulega największej aktywacji w pokoju gantry podczas przeprowadzania w nim radioterapii.

W pierwszej serii pomiary prowadzono w pokoju gantry nr 1, w drugiej serii w pokoju gantry nr 2.

8.2.1 Pomiar stanowiska terapii

Pomiar stanowiska gantry przeprowadzono w dniu 13.12.2019. Detektor HPGe znajdował się w osłonie ołowianej z kolimatorem 90° i zwrócony był w stronę głowicy PBS ustawionej w pozycji wyjściowej oraz w stronę stołu terapeutycznego. Czoło detektora znajdowało się w odległości 2,00 m od wyjścia głowicy. Miernik GammaTRACER GT-XL umieszczony został naprzeciwko głowicy za stołem terapeutycznym w odległości około 90 cm od wyjścia głowicy. Miernik GT usytuowano z boku głowicy, w odległości około 70 cm od niej. Wykorzystywany tego dnia zmiennacz zasięgu został przed rozpoczęciem pomiarów zdjęty ze stanowiska.

Pomiar rozpoczęto o godzinie 11:35 bezpośrednio po zakończeniu radioterapii na stanowisku gantry (od jej ukończenia upłynęło około 30 minut). Ponadto przez cały tydzień poprzedzający pomiar, który odbył się w piątek, na stanowisku prowadzono rutynowo radioterapię protonową. Pomiar zakończono tego samego dnia około godziny 15:35. Na Rysunku 30 przedstawiono rozmieszczenie urządzeń pomiarowych podczas eksperymentu.



Rysunek 30. Rozmieszczenie urządzeń pomiarowych podczas eksperymentu przeprowadzanego w pokoju gantry w dniu 13.12.2019

Zarejestrowana wartość mocy dawki promieniowania gamma przez oba mierniki była niska. W przypadku GT-XL oscylowała ona w zakresie 60 – 90 nSv/h, natomiast dla miernika GT był to zakres 50 – 100 nSv/h. Ich średnie wartości były nieco niższe niż typowe wskazania mocy dawki promieniowania gamma pochodzącego od naturalnego tła w Polsce [88].

Poza wykonaniem pomiarów mocy dawki, dokonano sekwencyjnego pomiaru widma energetycznego promieniowania gamma – zebrano 4 widma, jedno po drugim, czas akwizycji każdego z nich wynosił 60 minut. Oprócz zarejestrowania linii pochodzących od naturalnie występujących izotopów promieniotwórczych po przeprowadzeniu analizy powyższych widm

stwierdzono obecność kilku sztucznie wzbudzonych radionuklidów. Zawarto je w Tabeli 25 wraz z ich najważniejszymi własnościami i najbardziej prawdopodobnymi kanałami ich produkcji. W Tabeli 25 podano również częstości zliczeń ich najbardziej intensywnych linii obecnych w widmie powstałym z zsumowania czterech kolejnych 1-godzinnych widm zarejestrowanych w tej serii pomiarowej.

Tabela 25. Częstość zliczeń dla najbardziej intensywnych linii nuklidów, których obecność została zarejestrowana podczas pomiaru stanowiska terapii w pokoju gantry. Podano wyniki uzyskane poprzez zsumowanie czterech kolejno zarejestrowanych 1-godzinnych widm

Izotop	Okres półrozpadu	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń [cpm]	Prawdopodobne kanały produkcji
Be-7	53 d	477,6	1,8 (2)	$^{12}\text{C}(p,d+\alpha)^7\text{Be}$
Na-24	15 h	1368,6	0,6 (1)	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$
Mn-52	5,6 d	1434,1	0,2 (1)	$^{54}\text{Fe}(n,t)^{52}\text{Mn}$
Mn-54	313 d	834,8	0,6 (1)	$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
Mn-56	2,6 h	846,8 ¹	0,5 (1) ¹	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
Co-56	77 d	846,8 ¹	0,5 (1) ¹	$^{58}\text{Ni}(n,t)^{56}\text{Co}$
anihil.	-	511,0	22,3 (4)	-
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ y	1460,8	5,4 (2)	izotop naturalny
Częstość zliczeń w całym widmie:			1175	-

¹Wkład w wielkość pikę o energii 846,8 keV mają jednocześnie dwa izotopy: Co-56 i Mn-56. Podana w tabeli częstość zliczeń w tym pikę stanowi sumaryczny wkład od tych dwóch radionuklidów.

Izotop Be-7 został z dużym prawdopodobieństwem wyprodukowany w folii, która znajduje się na wyjściu głowicy PBS. Pozostałe izotopy sodu, manganu i kobaltu powstały najprawdopodobniej poprzez aktywację elementów głowicy wtórnymi neutronami wyemitowanymi w wyniku oddziaływania wiązki protonowej z folią i zmieniaczem zasięgu na wyjściu głowicy czy też samym ciałem pacjenta.

Można zauważyć, że częstość zliczeń w pikach odpowiadających wzbudzonym izotopom jest niska – znacznie mniejsza niż w pikę naturalnie występującego izotopu potasu K-40. Szczególną uwagę może zwrócić wysoka częstość zliczeń w pikę anihilacyjnym. Warto jednak w tym miejscu nadmienić, iż bierze się ona głównie ze zliczeń zarejestrowanych w pierwszym widmie. Częstość zliczeń w pikę anihilacyjnym w pierwszym widmie wynosiła 65,7 cpm, natomiast w drugim widmie już tylko 12,2 cpm, po czym w kolejnych widmach również szybko malała. Świadczy to o tym, iż główny udział w emisji kwantów gamma

o energii 511 keV miały w tym przypadku izotopy krótkożyciowe, ulegające szybkiemu rozpadowi promieniotwórczemu. Głównym kandydatem odpowiedzialnym za to zjawisko jest izotop węgla C-11 (powstały najprawdopodobniej w folii na wyjściu głowicy w reakcji $^{12}\text{C}(p,n+p)^{11}\text{C}$ lub $^{16}\text{O}(p,d+\alpha)^{11}\text{C}$), możliwa była również obecność izotopu N-13 (powstałego również w folii, tym razem najpewniej w reakcjach typu $^{16}\text{O}(p,x)^{13}\text{N}$).

8.2.2 Pomiar zmieniacza zasięgu

Jedynym badaniem z osobną komponentem w pokoju gantry był tzw. zmieniacz zasięgu. Jest to prostopadłościenny blok wykonany z poliwęglanu Lexan, wykorzystywany na wyjściu głowicy PBS w przypadkach, gdy konieczna jest redukcja energii wiązki, celem napromieniania guzów położonych bardzo płytko w ciele pacjenta (patrz rozdział 5.3).

Zmieniacz zasięgu poddano sekwencyjnym pomiarom gamma-spektrometrycznym. Zebrano łącznie 23 widma, akwizycja każdego z nich trwała 900 s. Pierwszy pomiar rozpoczęto w piątek 14.12.2018 o godzinie 13:35. Sam zmieniacz był tego dnia wykorzystywany przy napromienianiu pacjentów. Terapia w tym dniu zakończyła się około godziny 13:10.

Podczas pomiaru zmieniacz zasięgu umieszczony został w miarę możliwości centralnie w stosunku do detektora w odległości 54 cm od niego. Detektor znajdował się w ołowianej osłonie z założonym kolimatorem 90° . Zdjęcie zmieniacza zasięgu podczas pomiaru gamma-spektrometrycznego przedstawiono na Rysunku 31.



Rysunek 31. Zmieniacz zasięgu w trakcie pomiaru spektrometrycznego

W Tabeli 26 zawarto listę radionuklidów, których obecność stwierdzono w badanym zmienniczu zasięgu. Przedstawiono również ich najważniejsze własności oraz najbardziej prawdopodobne kanały ich produkcji.

Tabela 26. Izotopy, których obecność stwierdzono w zmienniczu zasięgu

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji
Be-7	53 d	$^{12}\text{C}(p,d+\alpha)^7\text{Be}$
C-11	20,4 min	$^{12}\text{C}(p,n+p)^{11}\text{C}$

Lexan, będąc poliwęglanem [51], składa się z atomów wodoru, węgla i tlenu. Spodziewano się zatem, że podobnie jak to miało miejsce dla zrobionego z PMMA modulatora zasięgu stosowanego w hali radioterapii oka, tak i w przypadku zmiennicza zasięgu zaobserwowana zostanie obecność izotopu N-13. Jednakże, analizując zebrane widma oszacowano czas połowicznego zaniku dla linii 511 keV, który wyniósł w przybliżeniu 20,1 min, co jest wartością bardzo bliską okresowi półrozpadu izotopu C-11, wynoszącego 20,4 min. Obecność N-13 o okresie półrozpadu 10,0 min powinna dawać w efekcie nieco krótszy szacowany czas połowicznego zaniku linii o energii 511 keV. Wydaje się zatem, iż podczas stosowania zmiennicza zasięgu w ostatnich kilkudziesięciu minutach terapii z użyciem wiązki protonowej w pokoju gantry powstała bardzo niewielka ilość izotopu N-13, tak, że jej obecność podczas pomiaru gamma-spektrometrycznego nie była już mierzalna.

Przy użyciu pakietu ISOCS sporządzono ponadto dwie różne kalibracje wydajnościowe odpowiadające dwóm różnym przyjętym modelom geometrii pomiarowej, które najlepiej przybliżały rzeczywistą geometrię pomiarową. Pierwszym z nich był prostopadłościan o wymiarach odpowiadających rzeczywistym wymiarom zmiennicza zasięgu (40 cm x 30 cm x 4,19 cm). Drugi model stanowił walec o średnicy 8 cm i wysokości 4,19 cm (odpowiadającej grubości zmiennicza zasięgu), co w teorii lepiej mogło oddawać rzeczywisty rozkład izotopów promieniotwórczych wygenerowanych w wyniku oddziaływania materiału zmiennicza zasięgu z wiązką protonów.

Na podstawie tak sporządzonych kalibracji wydajnościowych obliczono aktywność zawartego w zmienniczu zasięgu izotopu Be-7. Aby zminimalizować niepewności pomiarowe, aktywność dla każdej z kalibracji wyznaczono jako wartość średnią z wyników pochodzących z sześciu zebranych widm. Obliczone aktywności wraz z niepewnościami zamieszczono w Tabeli 27.

Tabela 27. Aktywność izotopu Be-7 w zmieniającym zasięgu obliczona na podstawie dwóch różnych kalibracji wydajnościowych. Dla każdej z kalibracji uzyskany wynik jest wartością średnią z sześciu wyników uzyskanych dla każdego z zebranych widm z osobna

Izotop	Aktywność [kBq]	
	Kalibracja 1. (prostokąt)	Kalibracja 2. (walec)
Be-7	13,8 (6)	11,8 (5)

Aktywności obliczone przy użyciu dwóch różnych modeli geometrii różnią się nieco od siebie, rozsądne wydaje się jednak założenie, iż rzeczywista wartość aktywności izotopu Be-7 w badanym zmieniającym zasięgu mieści się w zakresie obejmowanym przez podane w Tabeli 27 wartości – od ok. 11,8 do 13,8 kBq.

W przypadku pomiarów zmieniającego zasięgu możliwe było również wyznaczenie aktywności izotopu C-11, ponieważ był on jedynym izotopem mającym znaczący wkład w obecny w początkowych widmach pik o energii 511 keV. Jego aktywność obliczono dla pierwszych ośmiu widm. W Tabeli 28 zamieszczono zmierzone wartości aktywności izotopu C-11 w badanym zmieniającym zasięgu wraz z ich niepewnościami. Podano wartości obliczone dla kalibracji nr 1 (tej, która dawała wyższe wartości aktywności izotopu Be-7 – patrz Tabela 27).

Tabela 28. Aktywności izotopu C-11 w zmieniającym zasięgu dla pierwszych ośmiu zebranych widm (czas akwizycji każdego z nich wynosił 900 s). Uwzględniono również rozpad izotopu C-11 w trakcie samego trwania pomiaru

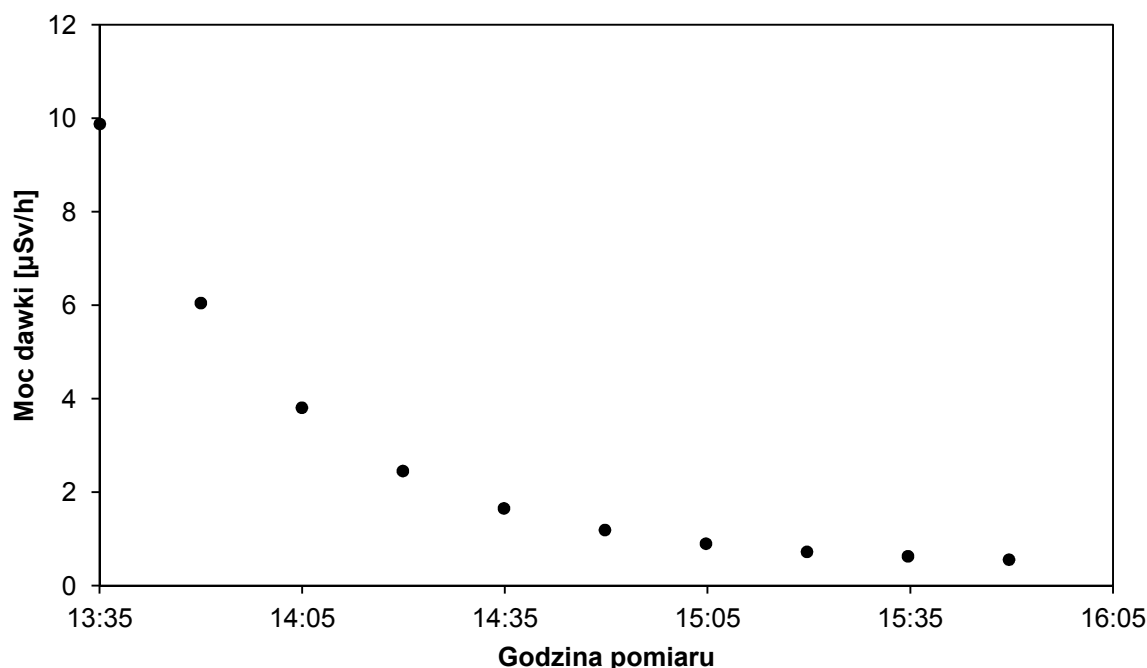
Izotop	Okres półrozpadu	Nr widma	Aktywność [kBq]
C-11	20,4 min	1	390 (16)
		2	233 (10)
		3	136 (6)
		4	83 (4)
		5	49 (2)
		6	29 (1)
		7	18 (1)
		8	10 (1)

Jak widać początkowo bardzo wysoka aktywność C-11 maleje szybko z czasem. Po upływie około dwóch godzin od zakończenia naświetlania jest ona już w przybliżeniu na tym samym poziomie co skumulowana w zmieniaczu zasięgu na przestrzeni setek dni aktywność izotopu Be-7.

Równocześnie z pomiarami gamma-spektrometrycznymi zmieniacza zasięgu przeprowadzono pomiary mocy dawki emitowanego przez niego promieniowania gamma. Niestety z przyczyn technicznych wyniki uzyskane za pomocą miernika GammaTRACER GT-XL zostały utracone. Jednakże, w momencie rozpoczęcia pomiaru gamma-spektrometrycznego wykonano również jednorazowy pomiar mocy dawki promieniowania gamma przy samej powierzchni zmieniacza zasięgu za pomocą radiometru RKP-2. Zmierzona wartość mocy dawki wyniosła $9,88 \mu\text{Sv/h}$. Na podstawie tego wyniku oraz analizy całkowitej liczby zliczeń w kolejnych widmach zebranych w pomiarze spektrometrycznym oszacowano wartości mocy dawki promieniowania gamma przy powierzchni zmieniacza zasięgu w kolejnych, następujących co 15 minut (tyle trwał jeden pomiar spektrometryczny) momentach w czasie.

Postępowanie przebiegało następująco: przyjęto, iż moc dawki jest wprost proporcjonalna do całkowitej liczby zliczeń w danym widmie. Zmierzono wartość mocy dawki za pomocą RKP-2 na początku pomiaru, czyli niejako dla pierwszego widma, oraz odczytano całkowitą liczbę zliczeń w tym widmie. Następnie odczytywano kolejne wartości całkowitej liczby zliczeń dla następujących po sobie widm i wykorzystując proporcjonalność całkowitej liczby zliczeń do mocy dawki, wyznaczano dla nich pożądaną wartość mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez zmieniacz zasięgu przy jego powierzchni. Na Rysunku 32 zawarto wykres zależności częściowo oszacowanej mocy dawki od czasu.

Jak widać początkowa wartość mocy dawki ($9,88 \mu\text{Sv/h}$) była dość wysoka, co stoi w zgodzie z wynikami pomiaru gamma-spektrometrycznego, na podstawie których stwierdzono bardzo wysoką aktywność izotopu C-11 w badanym zmieniaczu zasięgu. Bazując na podstawie powyższych oszacowań, stwierdzono, iż moc dawki promieniowania gamma przy powierzchni zmieniacza zasięgu zmalała po mniej więcej dwóch godzinach do poziomu ok. $0,5 \mu\text{Sv/h}$, po czym nie obserwowano już tak szybkiego jej spadku. Za ten fakt z pewnością przynajmniej częściowo odpowiedzialna jest dość duża aktywność izotopu Be-7 (na poziomie ponad 10 kBq) w badanym zmieniaczu zasięgu. Wydaje się, iż z uwagi na jego stosunkowo długi okres półrozpadu (53 dni) i regularne wykorzystywanie zmieniacza zasięgu podczas radioterapii, moc dawki przy jego samej powierzchni będzie stale przekraczać poziom tła.



Rysunek 32. Zależność mocy dawki promieniowania gamma przy powierzchni zmieniaacza zasięgu od czasu. Pierwszy punkt pomiarowy wyznaczono na podstawie bezpośredniego pomiaru mocy dawki promieniowania gamma przy pomocy radiometru RKP-2. Wartość pozostałych wskazań została oszacowana na podstawie całkowitej liczby zliczeń rejestrowanych w kolejnych widmach podczas pomiaru spektrometrycznego

8.3 Hala cyklotronu Proteus C-235

Eksperymenty w hali cyklotronu również podzielono na kilka serii. Pierwsza z nich odbyła się w dniach 26-27.01.2018 i obejmowała pomiary mocy dawki promieniowania gamma oraz pomiary gamma-spektrometryczne w dwóch różnych miejscach hali cyklotronu. Pomiary wykonano podczas przeprowadzanej (średnio co pół roku) przerwy w działaniu cyklotronu z uwagi na jego przegląd techniczny. Nie podjęto się wykonywania pomiarów przy użyciu spektrometru promieniowania gamma w okresach gdy wiązka była aktywna, z uwagi na fakt, iż generowane wówczas duże strumienie neutronów miałyby destruktywny wpływ na strukturę kryształu germanowego w detektorze HPGe, co skutkowałoby pogorszeniem jego właściwości i następnie obniżeniem jakości rejestrowanych przez niego widm [90].

Drugą serię pomiarową stanowiły długotrwałe pomiary mocy dawki promieniowania gamma w hali cyklotronu Proteus C-235 przy użyciu mierników GT i GT-XL. Obejmowała ona prawie miesięczny okres 20.02.2019 – 15.03.2019, w którym cyklotron był już standardowo użytkowany w celach terapeutycznych.

Innymi badaniami wykonanymi w hali cyklotronu były pomiary aktywacyjne różnych materiałów (stal, miedź, aluminium, beton) umieszczonych w trzech różnych miejscach

w hali cyklotronu. Pierwsza seria była napromieniana neutronami w okresie 20.02.2019 – 15.03.2019, druga w dniach 15.03.2019 – 06.08.2019, trzecia w terminie 20.02.2019 – 13.08.2019.

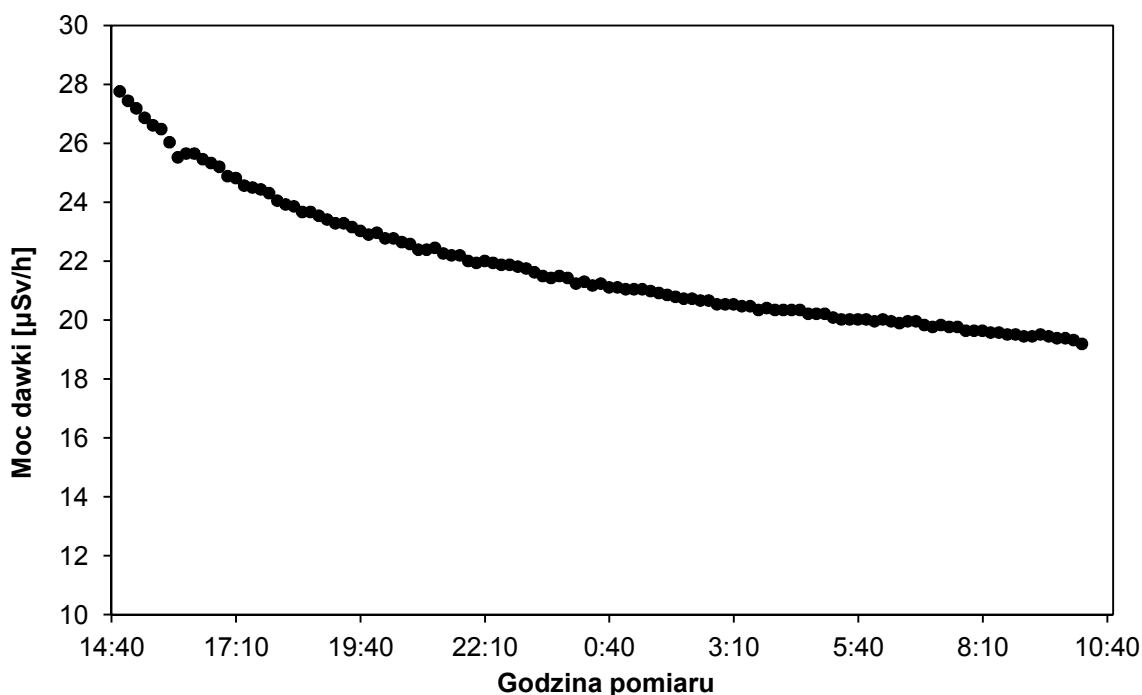
8.3.1 Pomiary systemu selekcji energii i transportu wiązki w hali cyklotronu

a) pomiar nr 1 (obok degradera energii wiązki)

Podczas pierwszego z pomiarów detektor HPGe znajdował się w hali cyklotronu, pod ścianą po prawej stronie od wejścia, w pobliżu obecnej tam stacjonarnej sondy gamma, na wysokości degradera wiązki. Umieszczony był w osłonie ołowianej z kolimatorem 90° i został zwrócony w stronę degradera. Odległość detektora od degradera wynosiła około 3,4 m. Przy takiej geometrii pomiarowej detektor rejestrował sygnał pochodzący nie tylko z samego degradera, ale również z innych elementów systemu transportu wiązki znajdujących się w jego najbliższym otoczeniu. Miernik mocy dawki promieniowania gamma GT-XL umieszczony został bezpośrednio obok detektora.

Wartość zmierzonej mocy dawki na samym początku (w piątek 26.01 o godzinie 14:40 - wcześniej, jeszcze tego samego dnia, wiązka protonów była obecna w hali) wynosiła prawie $28 \mu\text{Sv/h}$ i malała z czasem, choć stosunkowo wolno w porównaniu do hali terapii oka czy pokoju gantry. Jej spadek do poziomu $20 \mu\text{Sv/h}$ zanotowano dopiero o 06:00 rano kolejnego dnia, a zatem po upływie prawie 16 godzin. Na Rysunku 33 zawarto wykres zależności mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przy detektorze HPGe w pobliżu degradera od czasu.

Jak widać wartość mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez degrader jest bardzo wysoka, nawet w odległości ponad 3 metrów. Powyższe pomiary mocy dawki potwierdzają fakt, iż degrader jest najbardziej aktywnym elementem całego systemu cyklotronu, a jego najbliższe otoczenie jest obszarem, w którym moc dawki promieniowania gamma osiąga największą wartość w całym budynku CCB.



Rysunek 33. Zależność mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przy detektorze HPGe w pobliżu degradera energii wiązki od czasu

Pierwszy pomiar gamma-spektrometryczny, trwający niecałe 20 minut, rozpoczęto w piątek 26.01 o godzinie 14:30. Po zakończeniu akwizycji pierwszego widma rozpoczęto serię 18 sekwencyjnych pomiarów, z których każdy trwał 1 godzinę. Należy mieć na uwadze fakt, iż podany tu czas pomiaru, to czas rzeczywisty (*real time*), będący sumą tzw. „czasu żywego” (*live time*) oraz czasu martwego (*dead time*). Czas żywy to ten, w którym detektor faktycznie rejestruje zliczenia. W tym przypadku rozróżnienie tych pojęć jest szczególnie istotne, ponieważ z uwagi na bardzo dużą aktywność degradera i znajdujących się w jego pobliżu innych elementów cyklotronu, częstość emitowanych przez nie fotonów była bardzo duża, w wyniku czego czas martwy detektora sięgał na początku pomiarów wartości rzędu 75% (czas żywy stanowił więc około 25% całości). A zatem, mimo, iż rzeczywisty czas trwania pierwszego pomiaru był równy 3600 s, to czas żywy wynosił jedynie około 900 s. Wraz z upływem czasu, czas martwy rzecz jasna malał, z uwagi na rozpad krótkożyciowych izotopów promieniotwórczych obecnych w badanych materiałach i dla ostatniego pomiaru w tej sekwencji czas żywy wynosił już około 1170 s.

W Tabeli 29 zawarto listę radionuklidów, których obecność stwierdzono w badanym degraderze oraz jego otoczeniu wraz z ich najważniejszymi własnościami oraz najbardziej prawdopodobnymi kanałami produkcji. Ponadto, ponownie wykorzystując pakiet ISOCS sporządzono po trzy różne modele geometrii pomiarowych (trzy dla samego degradera oraz osobno trzy dla jego najbliższego otoczenia), które najlepiej oddawały rzeczywistą geometrię.

W przypadku degradera przyjętymi modelami były sześciany o długościach boków odpowiednio 1 cm, 5 cm i 10 cm. Dla każdego rozpatrzono trzy rodzaje materiałów, z których były one zrobione (beryl, węgiel, aluminium – takie trzy rodzaje degraderów są stosowane w CCB). Wyniki uzyskane dla każdego z nich były do siebie zbliżone (różnice wynosiły maksymalnie 5%), toteż zdecydowano się zaprezentować wyniki jedynie dla węgla.

W przypadku najbliższego otoczenia degradera (kwadrupole elektryczne, szczeliny redukujące rozbieżność wiązki, magnesy skupiające) przyjętymi geometriami ponownie były sześciany, tym razem stalowe. Ponieważ wymienione elementy z najbliższego otoczenia degradera są objętościowo większe od niego samego, to zdecydowano się użyć jako ich modeli nieco większych sześcianów, o bokach długości kolejno 10 cm, 25 cm i 40 cm.

W ten sposób uzyskano trzy różne wartości aktywności dla każdego z izotopów. Wyniki te zawarto w Tabeli 29, podając w przypadku każdego z izotopów zakres jego aktywności, gdzie jego granicami były uzyskane w wyniku przeprowadzenia kalibracji w programie ISOCS skrajne wartości aktywności danych nuklidów. Aktywności izotopów zostały podane dla dwóch najbardziej odległych od siebie w czasie widm (widma zebrane odpowiednio jako pierwsze i ostatnie w trakcie całego pomiaru), tak, aby móc zauważyć rozpad ewentualnych krótkożyciowych izotopów, a co za tym idzie w przypadku ostatniego widma zminimalizować ich wpływ na wyznaczenie aktywności izotopów długożyciowych.

Tabela 29. Oszacowane przedziały aktywności izotopów, których obecność stwierdzono w degraderze energii wiązki oraz jego najbliższym otoczeniu. Celem zachowania przejrzystości w tabeli nie podano niepewności pomiarowych. W każdym przypadku wynosiły one kilka procentów (niepewność względna nie przekraczała 10%)

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji	Aktywność [$\cdot 10^7$ Bq]	
			26.01.18, 16:05	27.01.18, 09:05
Be-7 ^a	53 d	$^{12}\text{C}(p,d+\alpha)^7\text{Be}$	16,8 – 35,0	16,2 – 33,8
Na-22 ^a	2,6 y	$^{27}\text{Al}(p,n+p+\alpha)^{22}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$	0,53 – 0,88	0,56 – 0,93
Na-24 ^a	15 h	$^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1,09 – 1,81	1,15 – 1,91
Sc-46 ^b	84 d	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{46}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{46}\text{Sc}$	0,69 – 2,74	0,90 – 3,57
Sc-48 ^b	44 h	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{48}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{48}\text{Sc}$	0,89 – 3,53	0,39 – 1,57

Mn-52 ^b	5,6 d	⁵² Cr(p,n) ⁵² Mn, ⁵⁴ Fe(n,t) ⁵² Mn	3,13 – 12,5	2,78 – 11,1
Mn-54 ^b	313 d	⁵⁴ Cr(p,n) ⁵⁴ Mn ⁵⁷ Fe(p,α) ⁵⁴ Mn, ⁵⁶ Fe(n,t) ⁵⁴ Mn, ⁵⁴ Fe(n,p) ⁵⁴ Mn	53 – 212	34 – 136
Mn-56 ^b	2,6 h	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	6,84 – 26,6	-
Co-55 ^b	18 h	⁵⁶ Fe(p,2n) ⁵⁵ Co, ⁵⁸ Ni(n,x) ⁵⁵ Co	-	-
Co-56 ^b	77 d	⁵⁶ Fe(p,n) ⁵⁶ Co, ⁵⁸ Ni(n,t) ⁵⁶ Co	20,2 – 79,0	19,2 – 74,9
Co-57 ^b	272 d	⁵⁶ Fe(p,γ) ⁵⁷ Co, ⁵⁸ Ni(n,d) ⁵⁷ Co	-	-
Co-58 ^b	71 d	⁶² Ni(p,n+α) ⁵⁸ Co, ⁶³ Cu(p,n+p+α) ⁵⁸ Co, ⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co	16,1 – 64,2	13,9 – 55,6
Co-60 ^b	5,3 y	⁶⁰ Ni(n,p) ⁶⁰ Co	1,62 – 6,44	1,40 – 5,57
Ni-57 ^b	36 h	⁵⁸ Ni(p,n+p) ⁵⁷ Ni, ⁵⁸ Ni(n,2n) ⁵⁷ Ni	6,02 – 23,5	4,36 – 17,0
Zn-65 ^b	244 d	⁶⁵ Cu(p,n) ⁶⁵ Zn, ⁶⁴ Zn(n,γ) ⁶⁵ Zn, ⁶⁶ Zn(n,2n) ⁶⁵ Zn	-	-

^aIzotopy obecne w głównej mierze w samym degraderze.

^bIzotopy obecne w głównej mierze w najbliższym otoczeniu degradera.

Stwierdzono, iż trzy najlżejsze izotopy, których obecność została potwierdzona na podstawie analizy uzyskanych widm (Be-7, Na-22 i Na-24), zostały wygenerowane w wyniku oddziaływania protonów (i częściowo neutronów) z materiałem samych degraderów, ponieważ w CCB stosuje się trzy rodzaje degraderów – grafitowy, berylowy oraz aluminiowy. Są to materiały stosunkowo lekkie, a co za tym idzie to właśnie dla nich przekrój czynny na produkcję wyżej wymienionych trzech izotopów był największy. Pozostałe zarejestrowane w pomiarze nuklidy są zdecydowanie cięższe, a zatem ich wzbudzenie nastąpiło na skutek oddziaływania protonów i neutronów z materiałami stanowiącymi część

samego cyklotronu oraz jonowodu, które znajdowały się w bliskim otoczeniu samego degradera – były to przede wszystkim żelazo, chrom, nikiel czy miedź.

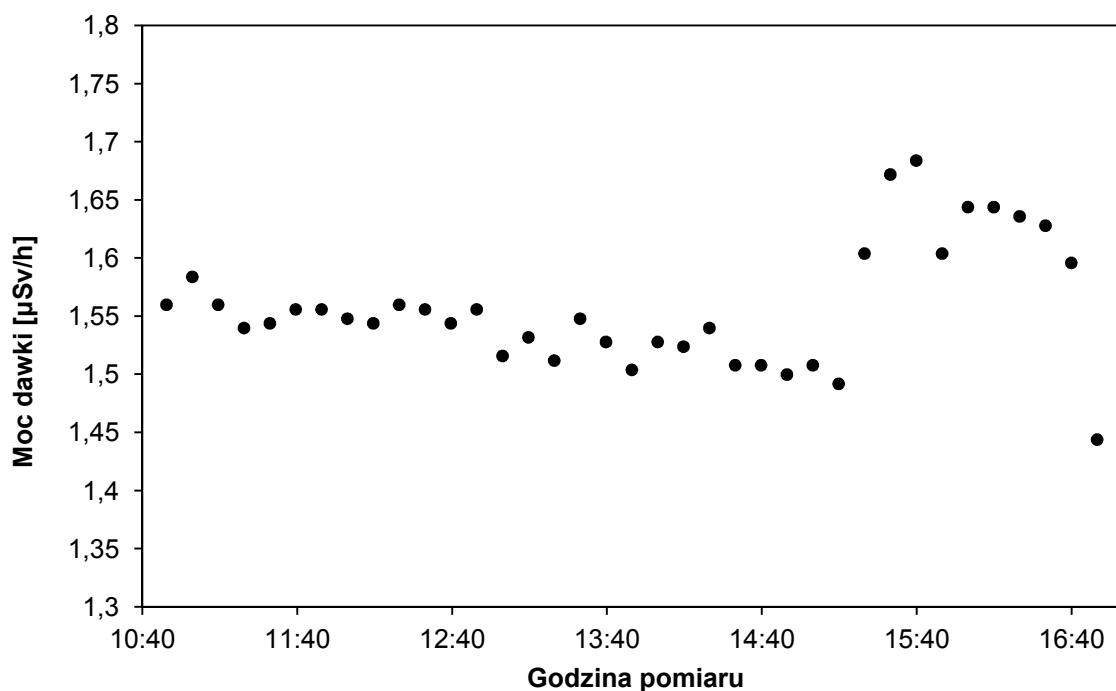
Można zauważyć, że aktywności zarejestrowanych izotopów były bardzo duże, rzędu kilkunastu-kilkuset MBq, a dla Mn-54 mogło być to nawet ponad 2 GBq. Takie wyniki potwierdzają wcześniejszą obserwację poczynioną na podstawie pomiarów mocy dawki promieniowania gamma, iż degrader oraz jego najbliższe otoczenie to obszar o najwyższym poziomie promieniowania jonizującego w budynku CCB.

Warto nadmienić, iż niektóre z izotopów zostały zarejestrowane, natomiast nie podano dla nich obliczonych aktywności. Taka sytuacja miała miejsce, ponieważ przy tak dużych częstościach zliczeń jakość powstałego w wyniku pomiaru widma znacznie się pogarsza – kontinuum komptonowskie całkowicie pokrywa część pików o niższych energiach, a ponadto same piki stają się bardzo szerokie, co znacznie ogranicza możliwość ich dokładnego rozdzielania. Z tych właśnie powodów nie udało się z zadowalającą dokładnością oszacować aktywności trzech izotopów: Co-55, Co-57 i Zn-65, choć ich sama obecność została potwierdzona ponad wszelką wątpliwość.

b) pomiar nr 2 (w rogu hali cyklotronu)

Drugi pomiar przeprowadzono w północno-wschodnim rogu hali cyklotronu. Detektor był umieszczony w osłonie ołowianej z kolimatorem 90° i został zwrócony w stronę jonowodu, na jego zagięciu (punkt pomiędzy dwoma magnesami). Odległość detektora od jonowodu wynosiła ok. 3 m. W związku z powyższym, w tym przypadku detektor także rejestrował sygnał z pewnego przestrzennego kąta bryłowego. Miernik mocy dawki GT-XL znajdował się bezpośrednio obok detektora HPGe.

Pomiary rozpoczęto w sobotę 27.01 o godzinie 10:35. Moc dawki promieniowania gamma wynosiła początkowo 1584 nSv/h i obserwowano jej bardzo powolny spadek do wartości poniżej 1500 nSv/h po upływie 4,5 h. Po tym czasie zarejestrowano jej nagły wzrost o ok. 150 nSv/h, natomiast po upływie kolejnych 1,5 h zanotowano jej ponowny spadek, aż do wartości poniżej 1450 nSv/h (Rysunek 34). Jednym z możliwych wyjaśnień takiej obserwacji było to, iż któryś z mocno aktywowanych elementów systemu (być może wymieniany podczas tego przeglądu) został na pewien czas umieszczony w pobliżu miernika GT-XL.



Rysunek 34. Zależność mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przy detektorze HPGe w pobliżu jonowodu w północno-wschodnim rogu hali cyklotronu od czasu

Oprócz pomiarów mocy dawki, przeprowadzono także 7 sekwencyjnych pomiarów gamma-spektrometrycznych, z których każdy trwał 3600 s czasu rzeczywistego. Czas martwy dla pierwszego zebranego w tej serii widma (rozpoczęcie akwizycji pierwszego widma nastąpiło o 10:35) wynosił już teraz zaledwie 5%, co było związane z dwoma faktami. Po pierwsze, minęła już niemal doba od ostatniego użycia wiązki protonów, a zatem część wyprodukowanych wtedy izotopów zdążyła się już w dużej mierze rozpaść. Po drugie, róg hali cyklotronu jest już znacznie oddalony od degradera i samego cyklotronu, które są w tym przypadku głównymi źródłami sztucznie wzbudzonej promieniotwórczości. Co ciekawe, w przypadku ostatniego pomiaru spektrometrycznego, który rozpoczął się o 15:35, czas martwy wzrósł do nieco ponad 6%, co potwierdza zarejestrowany przez GT-XL skok mocy dawki po godzinie 15:00.

Podobnie jak to miało miejsce w przypadku pomiarów przy degraderze, tak i dla pomiarów w rogu hali sporządzono wykorzystując pakiet ISOCS różne (tym razem cztery) modele geometrii pomiarowych, które najlepiej mogły oddawać rzeczywistą geometrię. Ponieważ w tym pomiarze detektor zbierał sygnał z obszaru, w którym znajdowały się umieszczone obok siebie magnesy zakrzywiające tor lotu wiązki, zdecydowano się użyć jako modeli czterech różnych stalowych bloków. Trzy z nich stanowiły sześciiany o długościach boków odpowiednio 10 cm, 25 cm i 40 cm, natomiast ostatnim z nich był prostopadłościan o wymiarach 40 cm x 40 cm x 100 cm.

W ten sposób uzyskano cztery różne wartości aktywności dla każdego z izotopów. Wyniki te zawarto w Tabeli 30, podając w przypadku każdego z izotopów zakres jego aktywności, gdzie jego granicami były uzyskane w wyniku przeprowadzenia kalibracji w programie ISOCS skrajne wartości aktywności danych nuklidów. Ponownie aktywności izotopów zostały podane dla dwóch najbardziej odległych od siebie w czasie widm (widma zebrane odpowiednio jako pierwsze i ostatnie w trakcie całego pomiaru), tak, aby móc zauważyć rozpad krótkożyciowych izotopów, a co za tym idzie w przypadku ostatniego widma zminimalizować ich wpływ na wyznaczenie aktywności izotopów długożyciowych.

Tabela 30. Oszacowane przedziały aktywności izotopów, których obecność stwierdzono w jonowodzie wiązki w rogu hali cyklotronu oraz w jego najbliższym otoczeniu. Celem zachowania przejrzystości w tabeli nie podano niepewności pomiarowych. W większości przypadków wynosiły one kilka procentów. Dla Co-57 i Ni-57 przekraczały one nieznacznie 10%, dla Be-7 niepewność względna wynosiła ponad 20%

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji	Aktywność [$\cdot 10^5$ Bq]	
			27.01.18, 10:35	27.01.18, 15:35
Be-7	53 d	$^{12}\text{C}(n,x)^7\text{Be}$	16,2 – 66,7	20,9 – 86,0
Na-22	2,6 y	$^{27}\text{Al}(p,n+p+\alpha)^{22}\text{Na}$, $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$	16,4 – 66,4	16,3 – 66,1
Na-24	15 h	$^{27}\text{Al}(p,n+3p)^{24}\text{Na}$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	15,8 – 64,9	12,4 – 50,2
Sc-46	84 d	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{46}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{46}\text{Sc}$	2,66 – 10,9	3,43 – 14,0
Sc-48	44 h	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{48}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{48}\text{Sc}$	4,71 – 19,3	5,89 – 24,1
Cr-51	28 d	$^{52}\text{Cr}(p,n+p)^{51}\text{Cr}$, $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$, $^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr}$	47,2 – 193	55,2 – 226
Mn-52	5,6 d	$^{52}\text{Cr}(p,n)^{52}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,t)^{52}\text{Mn}$	7,42 – 30,4	8,23 – 33,8
Mn-54	313 d	$^{54}\text{Cr}(p,n)^{54}\text{Mn}$, $^{57}\text{Fe}(p,\alpha)^{54}\text{Mn}$, $^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	106 – 434	143 – 587

Mn-56	2,6 h	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	-	-
Co-55	18 h	$^{56}\text{Fe}(p,2n)^{55}\text{Co}$, $^{58}\text{Ni}(n,x)^{55}\text{Co}$	2,50 – 10,2	2,63 – 10,8
Co-56	77 d	$^{56}\text{Fe}(p,n)^{56}\text{Co}$, $^{58}\text{Ni}(n,t)^{56}\text{Co}$	25,0 – 102	39,3 – 161 ¹
Co-57	272 d	$^{56}\text{Fe}(p,\gamma)^{57}\text{Co}$, $^{58}\text{Ni}(n,d)^{57}\text{Co}$	23,6 – 95,5	143 – 580 ¹
Co-58	71 d	$^{62}\text{Ni}(p,n+\alpha)^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(p,n+p+\alpha)^{58}\text{Co}$, $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	18,4 – 75,3	63,7 – 261 ¹
Co-60	5,3 y	$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	10,7 – 43,5	20,0 – 81,1 ¹
Ni-57	36 h	$^{58}\text{Ni}(p,n+p)^{57}\text{Ni}$, $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	8,18 – 32,6	8,24 – 32,8
Fe-59	45 d	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$	4,87 – 19,8	5,75 – 23,4
Zn-65	244 d	$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$, $^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$, $^{66}\text{Zn}(n,2n)^{65}\text{Zn}$	28,5 – 116	32,7 – 133
Sb-124	60 d	$^{124}\text{Sn}(p,n)^{124}\text{Sb}$	1,25 – 5,13	1,64 – 6,74

¹Aktywności izotopów kobaltu Co-56, Co-57, Co-58 i Co-60 obliczone na podstawie analizy ostatniego widma były znacznie większe niż na podstawie widma pierwszego. Wydaje się, że najprawdopodobniej jest to związane z obecnością w pobliżu detektora w trakcie pomiaru jakiegoś aktywowanego elementu cyklotronu zawierającego te właśnie izotopy (na co wskazuje również sam pomiar mocy dawki – patrz Rysunek 34). W związku z powyższym wartości aktywności dla tego ostatniego widma nie mogą być uznawane za rzeczywiste aktywności tych izotopów zawartych w fragmencie jonowodu, z którego sygnał był zbierany przez detektor podczas pomiaru.

W przypadku rogu hali aktywności stwierdzonych radionuklidów ponownie były bardzo wysokie, choć niższe niż w pobliżu degradera - w większości przypadków były one rzędu pojedynczych MBq. Największą aktywnością ponownie charakteryzował się izotop Mn-54, w tym przypadku mogła ona wynosić dla niego ponad 50 MBq.

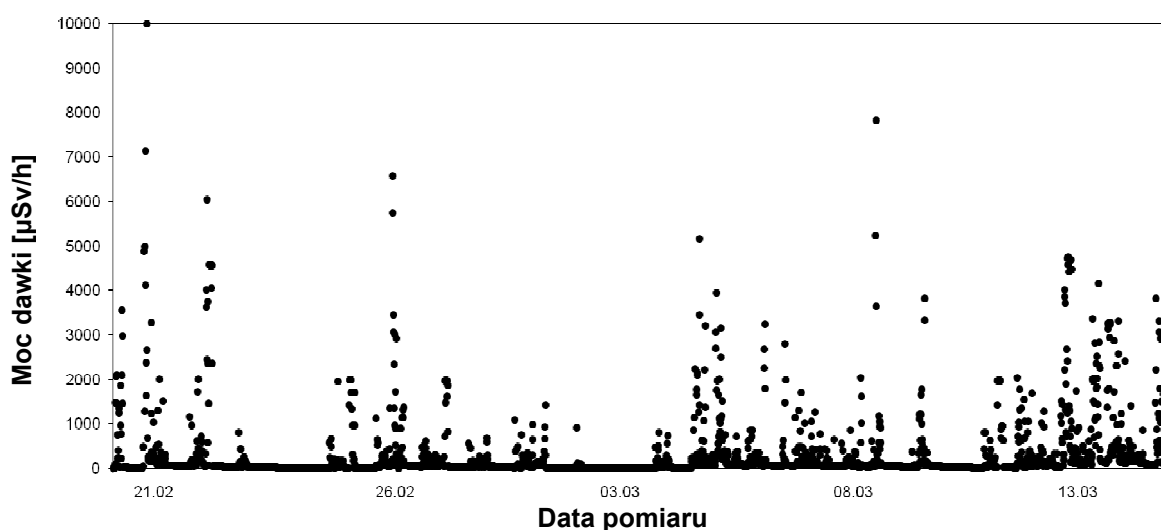
Powyższe nuklidy były w większości obecne także w widmach zebranych przy pomiarach degradera. Brak tu Mn-56, co nie jest zaskoczeniem, ponieważ z uwagi na jego krótki okres półrozpadu, izotop ten zdążył się już rozpaść i przestał być widoczny w rejestrowanych widmach. Stwierdzono jednak również występowanie innych nuklidów,

nieobecnych w widmach degradera (to mogło być spowodowane jednakże jedynie tym, iż częstość zliczeń przy degraderze była znacznie większa i w tamtej sytuacji piki pochodzące od tych nuklidów były przesłonięte przez piki bądź kontinuum komptonowskie pochodzące od pików nuklidów o większych aktywnościach). Są to izotopy Cr-51, Fe-59 oraz Sb-124.

8.3.2 Długotrwałe pomiary mocy dawki w hali cyklotronu

W długotrwałych pomiarach mocy dawki wykorzystano oba mierniki GammaTRACER: GT oraz GT-XL. Miernik GT-XL umieszczony został pod ścianą po prawej stronie od wejścia, w pobliżu obecnej tam stacjonarnej sondy gamma (oznaczonej symbolem T 2-4), na wysokości degradera wiązki. Miernik GT zainstalowano w samym północno-wschodnim rogu hali cyklotronu. W trakcie pomiarów w hali cyklotronu obecna była również druga stacjonarna sonda gamma (oznaczona symbolem T 2-5). Znajduje się ona na tej samej ścianie po prawej stronie co sonda T 2-4, przy czym jest ona przesunięta o kilka metrów w stronę rogu hali cyklotronu. Wskazania obu stacjonarnych sond stanowiły dane porównawcze dla wartości zmierzonych przez mierniki GT i GT-XL.

Na Rysunku 35 zawarto wykres zależności mocy dawki zmierzonej przez miernik GT-XL od czasu. Wyraźnie widać na nim okresowy charakter wzrostów mocy dawki w czasie. Występowały one w momentach, gdy wiązka protonowa była włączona. Miało to miejsce przez sześć dni (od poniedziałku do soboty włącznie) w każdym tygodniu, który został objęty terminem pomiarów. Zdecydowanie niższe wartości rejestrowano podczas niedziel oraz w trakcie każdej doby w godzinach nocnych, gdy wiązka nie była używana.



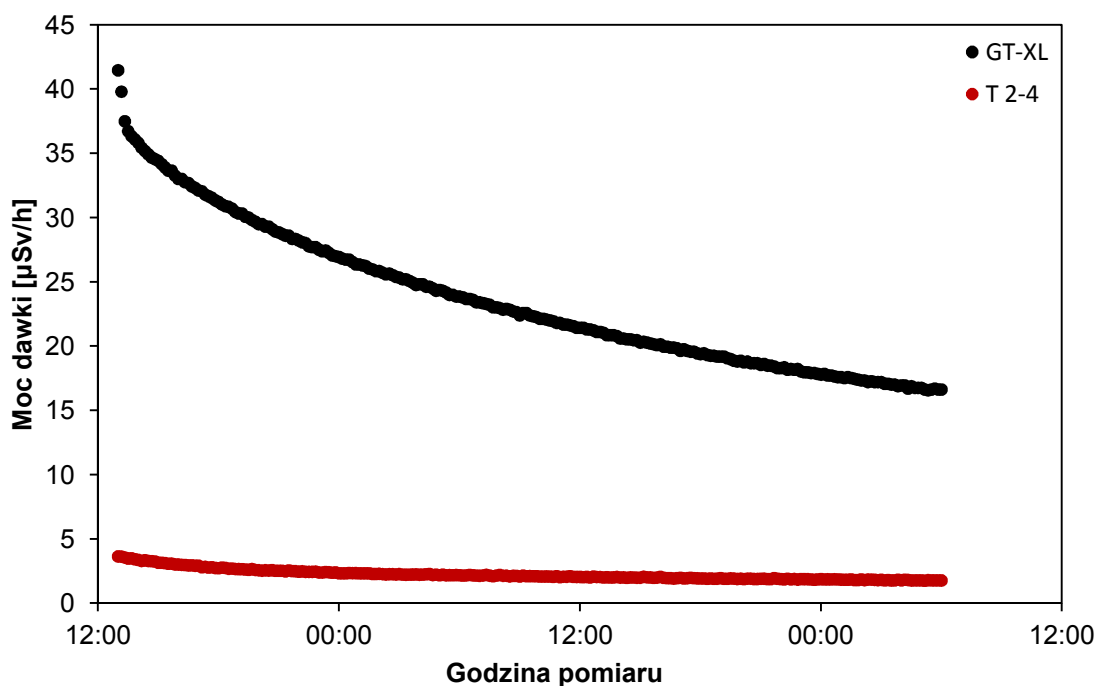
Rysunek 35. Moc dawki promieniowania gamma zarejestrowana przez GT-XL umieszczony w hali cyklotronu przy sondzie stacjonarnej T 2-4 w pobliżu degradera wiązki w dniach: od 20.02, godz. 16:00 do 15.03, godz. 10:00

Jak można zauważyć, moc dawki osiągała wartość nawet kilku tysięcy $\mu\text{Sv/h}$, co jest bardzo wysoką wartością. W okresach, gdy wiązka nie była włączona, wskazania miernika malały do kilkunastu lub kilkadziesiątu $\mu\text{Sv/h}$. Wówczas obserwowano w przybliżeniu eksponencjalny spadek mocy dawki, związany z rozpadem stosunkowo krótkożyciowych izotopów promieniotwórczych. Część z nich stanowiły nuklidy wzbudzone w systemie transportu wiązki cyklotronu, natomiast najprawdopodobniej większy wkład w rejestrowaną przez miernik GT-XL moc dawki miały radionuklidy powstałe w samym mierniku, na skutek reakcji jądrowych wtórnych neutronów z jądrami atomów materiału miernika. Wysłano taki wniosek z uwagi na fakt, że już po zabraniu miernika z hali cyklotronu do pokoju LER, ciągle rejestrował on znacznie zwiększoną moc dawki (kilkadziesiąt $\mu\text{Sv/h}$), której wartość eksponencjalnie opadała przez kolejne dni.

Dla stacjonarnej sondy T 2-4 widać bardzo podobny charakter zmienności mocy dawki w czasie, tak jak to miało miejsce w przypadku GT-XL. Można zdecydowanie wyróżnić wzrosty jej wartości, które występowały w okresach, gdy wiązka była włączona. W przedziałach czasu, gdy wiązka nie była używana, następował eksponencjalny spadek mocy dawki. Same wskazania sondy T 2-4 były natomiast niższe niż te rejestrowane przez GT-XL. Moc dawki podczas jej nagłych wzrostów sporadycznie przekraczała 2 000 $\mu\text{Sv/h}$, a gdy wyłączano wiązkę jej wartość wynosiła zaledwie kilka $\mu\text{Sv/h}$.

Trudno jest jednoznacznie porównać wskazania obu tych przyrządów, głównie z uwagi na fakt, iż dokonywały one pomiarów mocy dawki w różnych interwałach czasowych. Dla GT-XL było to 10 minut, dla sondy stacjonarnej 29 – 30 sekund. Porównanie było szczególnie trudne podczas wzrostów wartości mocy dawki, z uwagi na ich dynamiczny charakter. Jednakże, można oszacować, iż podczas skoków mocy dawki wskazania GT-XL były około 2 – 4 razy większe niż wskazania sondy T 2-4.

Porównanie było dużo łatwiejsze dla okresów z wyłączoną wiązką, z uwagi na występującą wówczas niewielką zmienność wyników. Interesująca wydaje się obserwacja, iż w tych przedziałach czasu wartości podawane przez GT-XL były około 10-krotnie większe niż te uzyskiwane przez sondę T 2-4. Tak duża różnica wynika najprawdopodobniej z faktu, iż miernik GT-XL ulega znacznie większej aktywacji przez wtórne neutrony niż stacjonarne sondy w CCB. Na Rysunku 36 można zaobserwować różnicę we wskazaniach obu tych przyrządów w okresie, gdy wiązka była wyłączona (od 23.02, godz. 13:00 do 25.02, godz. 06:00).



Rysunek 36. Zależność mocy dawki promieniowania gamma zarejestrowanej przez miernik GT-XL oraz sondę stacjonarną T 2-4 w pobliżu degradera w hali cyklotronu od czasu w okresie, gdy wiązka była wyłączona: od 23.02, godz. 13:00 do 25.02, godz. 06:00

Wskazania miernika GT oraz sondy T 2-5 również miały podobny charakter, z zauważalnymi wzrostami wartości mocy dawki oraz jej eksponencjalnym spadkiem pomiędzy nimi. W przypadku GT moc dawki podczas wzrostów osiągała do około 5 000 $\mu\text{Sv/h}$ (w przybliżeniu dwukrotnie mniej niż dla GT-XL), a przy wyłączonej wiązce były to wartości rzędu kilku $\mu\text{Sv/h}$, a zatem już znacznie mniej niż w przypadku GT-XL. Takie wyniki można wytłumaczyć faktem, iż miernik GT-XL znajdował się bliżej degradera niż GT.

Sonda T 2-5 podczas wzrostów mocy dawki rejestrowała wartości najczęściej nie przekraczające 1400 $\mu\text{Sv/h}$, natomiast gdy wiązka była wyłączona to mierzona przez nią moc dawki była na poziomie około 1 $\mu\text{Sv/h}$. Można zauważyć, że podobnie jak miało to miejsce dla pomiarów przy degraderze wiązki, tak i w przypadku pomiarów przeprowadzonych w rogu hali cyklotronu, wskazania laboratoryjnego miernika (tym razem GT) były około 2 – 4 razy większe niż wskazania sondy stacjonarnej T 2-5. Należy przy tym pamiętać, że miernik GT oraz sonda T 2-5 nie znajdowały się podczas pomiarów dokładnie w tym samym miejscu, a więc porównywanie ich wskazań może nie być do końca miarodajne.

8.3.3 Pomiary aktywacyjne

Kolejne serie pomiarów, które przeprowadzono w hali cyklotronu Proteus C-235 stanowiły pomiary aktywacyjne czterech często występujących w środowisku cyklotronu materiałów.

Były to miedź typu M1E, stal nierdzewna typu H17, aluminium typu EN AW-1050A oraz beton zwykły. Próbki tych materiałów zostały zainstalowane na dwóch przygotowanych stanowiskach (statywach) i umieszczone w dwóch różnych miejscach hali cyklotronu w pobliżu jonowodu (data: 20.02.2019). Pierwszy statyw umieszczono w pobliżu degradera, w odległości 0,88 m od niego. Drugi usytuowano w północno-wschodnim rogu hali, w odległości również 0,88 m od jonowodu.

Próbki metali miały postać kwadratowych blaszek o wymiarach 5 cm x 5 cm i grubości 0,2 cm. Na każdym statywie umieszczono po pięć blaszek danego metalu, ułożone jedna za drugą w specjalnie przygotowanych uchwytach. Jedną próbkę (np. miedzi) stanowił zatem blok złożony z pięciu identycznych warstw miedzi o grubości 0,2 cm każda. Każda blaszka została ponumerowana, aby móc później w wynikach pomiarów znaleźć ewentualne zależności od „głębokości” warstwy w całym bloku metalu. Próbki betonu stanowiły dwa podobne bloki o wymiarach ok. 15 cm x 7,5 cm x 7,5 cm.

W trakcie wszystkich opisanych poniżej trzech okresów pomiarowych próbki były poddane ekspozycji na strumienie wtórnych neutronów powstałych w różnych materiałach znajdujących się na torze lotu wiązki pierwotnych protonów wygenerowanych w cyklotronie. Reakcje jądrowe neutronów penetrujących próbki z jądrami tworzących je atomów prowadziły do powstawania w nich różnych izotopów promieniotwórczych, które następnie były przedmiotem badań gamma-spektrometrycznych oraz pomiarów mocy dawki.

Poniżej opisano poszczególne serie pomiarowe:

- seria nr 1:

Jako pierwsze zbadane zostały próbki metali ze statywu znajdującego się przy degraderze. Były one napromieniane neutronami w okresie 20.02.2019 – 15.03.2019. Ostatnim dniem tego okresu był piątek 15.03, w tym dniu odbywała się jeszcze radioterapia, zakończona około godziny 13:45. Po godz. 14:00 blaszki zostały zabrane ze stanowiska do laboratorium LER i od razu poddane pomiarom, aby zarejestrować ślady najbardziej krótkożyciowych z nowopowstałych izotopów. Próbka betonu nie została jeszcze w tej serii zabrana ze statywu pomiarowego w hali cyklotronu. Pomiary gamma-spektrometryczne rozpoczęto w piątek 15.03 o godzinie 14:30 (czyli ok. 45 minut po zakończeniu terapii).

- seria nr 2:

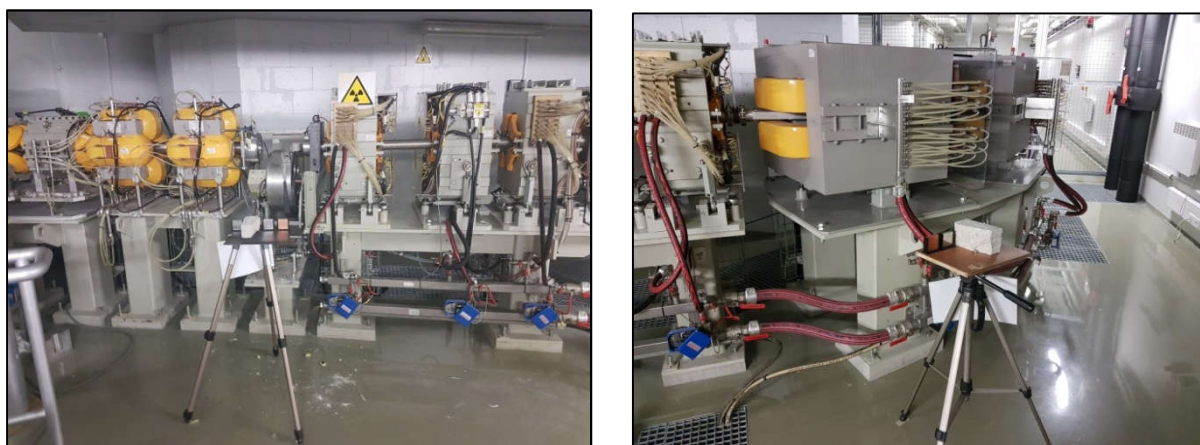
Druga seria obejmowała pomiary blaszek oraz betonu zebranych ze statywu znajdującego się przy degraderze. Próbki metali były naświetlane rozproszonymi neutronami w dniach 15.03.2019 – 06.08.2019 (próbka betonu była naświetlana już od 20.02.2019). We wtorek 06.08 statyw wraz z próbkami został zabrany do laboratorium LER. Wykorzystanie wiązki

protonów w celach terapeutycznych ostatni raz przed zebraniem statywu z hali cyklotronu miało miejsce w poprzedni piątek 02.08. Od tamtego czasu w hali cyklotronu prowadzone były prace serwisowe, podczas których wiązka była co pewien czas włączana. Pomiary gamma-spektrometryczne rozpoczęto we wtorek 06.08 o godzinie 11:30.

- seria nr 3:

Trzecia seria obejmowała pomiary blaszek oraz betonu zebranych ze statywu znajdującego się w rogu hali cyklotronu. Próbkki metali i betonu były naświetlane neutronami w dniach 20.02.2019 – 13.08.2019. We wtorek 13.08 o godzinie 21:30 statyw wraz z próbkami został zabrany do laboratorium LER. Tego samego dnia oraz dzień wcześniej w poniedziałek w CCB prowadzona była rutynowo radioterapia. Ponadto, po zakończeniu terapii w dniu zebrania statywu z hali, wiązka protonów była jeszcze wykorzystywana w hali radioterapii oka oraz pokoju gantry do innych celów, aż do około 21:15. Pomiary gamma-spektrometryczne rozpoczęto we wtorek 13.08 o godzinie 21:40.

Na Rysunku 37 zawarto zdjęcia przedstawiające sposób w jaki statywy z umieszczonymi na nich próbkami metali oraz betonu zostały ulokowane w hali cyklotronu CCB.



Rysunek 37. Rozmieszczenie statywów z próbkami metali i betonu podczas eksperymentów aktywacyjnych przeprowadzanych w hali cyklotronu

8.3.3.1 Identyfikacja izotopów aktywowanych w próbkach metali i betonu

Na podstawie źródeł [17], [91] i [92] przewidziano jakie izotopy promieniotwórcze mogą zostać wyprodukowane w badanych blaszkach oraz betonie na skutek ich oddziaływania z uzyskiwanymi w analizowanym przypadku neutronami o energiach od 0 do praktycznie 230 MeV (patrz rozdziały 2.3 i 5.4). Pomiar gamma-spektrometryczny był w stanie zweryfikować owe prognozy.

Wszystkie metalowe blaszki podczas pomiarów były umieszczane bezpośrednio i centralnie na detektorze. Niektóre z pomiarów polegały na rejestrowaniu widm pochodzących od wszystkich blaszek z danego materiału naraz. Wówczas układano je bezpośrednio na detektorze w takiej kolejności w jakiej znajdowały się one w uchwytach podczas ich naświetlania (blaszka pierwsza znajdowała się najbliżej detektora). W przypadku próbek betonu umieszczano je również bezpośrednio na detektorze, kładąc je na powierzchni, która była najbardziej eksponowana na strumienie neutronów podczas naświetlania (znajdowała się najbliżej degradera/jonowodu). Czas zbierania widm rejestrowanych w pierwszej kolejności (bezpośrednio po zebraniu danych próbek z hali cyklotronu) był stosunkowo krótki, rzędu kilku-kilkunastu minut. Zdecydowano się na tak krótki czas akwizycji z uwagi na możliwość zarejestrowania krótkożyciowych izotopów aktywowanych w próbkach (tych o okresach półrozpadu rzędu nawet kilku minut). Te same próbki poddawano czasem nawet kilkukrotnym pomiarom gamma-spektrometrycznym. Czas zbierania kolejnych widm stopniowo wydłużano, aż do około dwóch dób, co umożliwiło uzyskanie dobrej statystyki zliczeń w występujących w tych widmach pikach.

W Tabelach 31a,b,c,d zawarto radionuklidy, których obecność przewidywano w próbkach badanych metali i betonu w poszczególnych seriach pomiarowych (próbki betonu były mierzone jedynie w drugiej i trzeciej serii). Te z nich, których obecność została faktycznie stwierdzona w trakcie pomiarów (w którejkolwiek z pięciu naświetlanych dla każdego materiału blaszek) zostały oznaczone symbolem „+” w odpowiedniej kolumnie tabeli.

Tabela 31a. Izotopy przewidywane w próbkach miedzi. Symbol „+” oznacza, iż obecność danego izotopu została faktycznie stwierdzona w danej serii pomiarowej

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji	Obecny w widmach		
			seria 1.	seria 2.	seria 3.
Mn-52	5,6 d	$^{54}\text{Fe}(n,t)^{52}\text{Mn}$	+	+	- ¹
Mn-54	313 d	$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$,	+	+	+
		$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$			
Mn-56	2,6 h	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	- ¹	+	- ¹
Co-56	77 d	$^{58}\text{Ni}(n,t)^{56}\text{Co}$	+	+	+
Co-57	272 d	$^{58}\text{Ni}(n,d)^{57}\text{Co}$	+	+	+
Co-58	71 d	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	+	+	+

Co-60	5,3 y	$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$, $^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	+	+	+
Co-61	1,7 h	$^{63}\text{Cu}(n,^3\text{He})^{61}\text{Co}$, $^{65}\text{Cu}(n,n+\alpha)^{61}\text{Co}$	⁻¹	+	⁻¹
Fe-59	45 d	$^{63}\text{Cu}(n,p+\alpha)^{59}\text{Fe}$	+	+	+
Cu-60	24 min	$^{63}\text{Cu}(n,x)^{60}\text{Cu}$	⁻¹	+	⁻¹
Cu-61	3,4 h	$^{63}\text{Cu}(n,3n)^{61}\text{Cu}$	+	+	+
Cu-62	9,7 min	$^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$	⁻²	⁻²	⁻²
Cu-64	12,7 h	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$, $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	+	+	+
Cu-66	5,1 min	$^{65}\text{Cu}(n,\gamma)^{66}\text{Cu}$	⁻⁴	⁻⁴	⁻⁴
Ni-63	96 y	$^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$, $^{65}\text{Cu}(n,t)^{63}\text{Ni}$	⁻³	⁻³	⁻³
Ni-65	2,5 h	$^{65}\text{Cu}(n,p)^{65}\text{Ni}$	+	+	⁻¹
Zn-65	244 d	$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$, $^{66}\text{Zn}(n,2n)^{65}\text{Zn}$	+	+	⁻¹

¹Zbyt mała liczba zliczeń w odpowiednim pikcie, by jednoznacznie potwierdzić obecność izotopu.

²Brak wystarczająco intensywnej linii, za wyjątkiem linii anihilacyjnej o energii 511 keV.

³Brak wystarczająco intensywnej linii.

⁴Brak wystarczająco intensywnej linii przy jednoczesnym zbyt krótkim okresie półrozpadu.

Tabela 31b. Izotopy przewidywane w próbkach stali. Symbol „+” oznacza, iż obecność danego izotopu została faktycznie stwierdzona w danej serii pomiarowej

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji	Obecny w widmach		
			seria 1.	seria 2.	seria 3.
Sc-46	84 d	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{46}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{46}\text{Sc}$	+	+	+
Sc-47	3,3 d	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{47}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{47}\text{Sc}$	+	+	+
Sc-48	44 h	$^{50}\text{Cr}(n,x)^{48}\text{Sc}$, $^{52}\text{Cr}(n,x)^{48}\text{Sc}$?	?	?
V-48	16 d	$^{50}\text{Cr}(n,t)^{48}\text{V}$	+	+	+
V-49	330 d	$^{50}\text{Cr}(n,2n)^{49}\text{Cr} \rightarrow ^{49}\text{V}$	⁻³	⁻³	⁻³

Cr-48	23 h	$^{50}\text{Cr}(n,3n)^{48}\text{Cr}$	- ¹	- ¹	- ¹
Cr-49	42 min	$^{50}\text{Cr}(n,2n)^{49}\text{Cr}$	- ¹	- ¹	- ¹
Cr-51	28 d	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$, $^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr}$, $^{53}\text{Cr}(n,3n)^{51}\text{Cr}$, $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$	+	+	+
Mn-52m	21 min	$^{54}\text{Fe}(n,3n)^{52}\text{Fe} \rightarrow ^{52\text{m}}\text{Mn}$	+	+	- ¹
Mn-52	5,6 d	$^{54}\text{Fe}(n,t)^{52}\text{Mn}$	+	+	+
Mn-54	313 d	$^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	+	+	+
Mn-56	2,6 h	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	+	+	+
Fe-52	8,3 h	$^{54}\text{Fe}(n,3n)^{52}\text{Fe}$	+	- ¹	- ¹
Fe-55	2,7 y	$^{54}\text{Fe}(n,\gamma)^{55}\text{Fe}$, $^{56}\text{Fe}(n,2n)^{55}\text{Fe}$, $^{58}\text{Ni}(n,\alpha)^{55}\text{Fe}$	- ³	- ³	- ³
Fe-59	45 d	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$, $^{62}\text{Ni}(n,\alpha)^{59}\text{Fe}$	+	+	+
Co-55	18 h	$^{58}\text{Ni}(n,x)^{55}\text{Co}$	+	- ¹	- ¹
Co-56	77 d	$^{58}\text{Ni}(n,t)^{56}\text{Co}$	+	+	+
Co-57	272 d	$^{58}\text{Ni}(n,d)^{57}\text{Co}$	+	+	+
Co-58	71 d	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	+	+	+
Co-60	5,3 y	$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	+	+	+
Co-61	1,7 h	$^{61}\text{Ni}(n,p)^{61}\text{Co}$	- ⁴	- ⁴	- ⁴
Ni-56	6,1 d	$^{58}\text{Ni}(n,3n)^{56}\text{Ni}$	- ¹	- ¹	- ¹
Ni-57	36 h	$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	- ¹	- ¹	- ¹
Ni-59	$7,6 \cdot 10^4$ y	$^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{59}\text{Ni}$	- ²	- ²	- ²
Ni-63	96 y	$^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$, $^{64}\text{Ni}(n,2n)^{63}\text{Ni}$	- ³	- ³	- ³
Ni-65	2,5 h	$^{64}\text{Ni}(n,\gamma)^{65}\text{Ni}$	- ¹	- ¹	- ¹

¹Zbyt mała liczba zliczeń w odpowiednim pikcie, by jednoznacznie potwierdzić obecność izotopu.

²Brak wystarczająco intensywnych linii, za wyjątkiem linii anihilacyjnej o energii 511 keV.

³Brak wystarczająco intensywnych linii.

⁴Brak wystarczająco intensywnych linii przy jednoczesnym zbyt krótkim okresie półrozpadu.

Sc-48 emituje kwanty promieniowania gamma o tych samych energiach co V-48 (983,5 keV i 1312,1 keV), którego obecność została z kolei potwierdzona poprzez zarejestrowanie innej pochodzącej od tego izotopu linii. Nie da się zatem jedynie na podstawie powyższych pomiarów jednoznacznie stwierdzić czy izotop Sc-48 był obecny w badanej próbce.

Ponadto, w drugiej serii pomiarowej nie zarejestrowano izotopów Fe-52 i Co-55, których obecność stwierdzono w serii pierwszej. Stało się tak najprawdopodobniej dlatego, iż pierwsze pomiary wykonywane w serii drugiej były zbyt krótkie, by zarejestrować piki pochodzące od emitowanych przez te izotopy kwantów gamma, natomiast kolejne długie pomiary zostały wykonane już zbyt późno i nuklidy te uległy rozpadowi z uwagi na swój krótki okres półrozpadu.

Tabela 31c. Izotopy przewidywane w próbkach aluminium. Symbol „+” oznacza, iż obecność danego izotopu została faktycznie stwierdzona w danej serii pomiarowej

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji	Obecny w widmach		
			seria 1.	seria 2.	seria 3.
Be-7	53 d	?	₋₃	+	₋₃
Na-22	2,6 y	²³ Na(n,2n) ²² Na	+	+	+
Na-24	15 h	²⁷ Al(n,α) ²⁴ Na	+	+	+
Al-26	7,2 · 10 ⁵ y	²⁷ Al(n,2n) ²⁶ Al	₋₁	₋₁	₋₁
Al-28	2,2 min	²⁷ Al(n, γ) ²⁸ Al	₋₂	₋₂	₋₂
Mg-27	9,5 min	²⁷ Al(n,p) ²⁷ Mg	₋₃	+	₋₃
Sc-46	84 d	?	₋₃	+	₋₃
Mn-54	313 d	⁵⁶ Fe(n,t) ⁵⁴ Mn, ⁵⁴ Fe(n,p) ⁵⁴ Mn	+	+	₋₃
Mn-56	2,6 h	⁵⁶ Fe(n,p) ⁵⁶ Mn	₋₃	+	+
Co-56	77 d	?	₋₃	+	₋₃
Co-58	71 d	?	₋₃	+	₋₃
Zn-65	244 d	?	₋₃	+	₋₃

¹Prawdopodobnie zbyt mały przekrój czynny na produkcję tego izotopu.

²Zbyt krótki okres półrozpadu.

³Zbyt mała liczba zliczeń w odpowiednim pikie, by jednoznacznie potwierdzić obecność izotopu.

Nie udało się stwierdzić jakie było źródło obecności izotopu Be-7 w próbkach aluminium. Z kolei w przypadku izotopów Sc-46, Co-56, Co-58 i Zn-65 można zauważyć, że były one obecne w próbkach stali, której głównym składnikiem jest żelazo, a w aluminium mogą występować domieszki żelaza. Warto jednak zauważyć, iż dla stali obecność skandu brała się z obecnego w niej chromu, natomiast wymienione izotopy kobaltu i cynku powstawały w głównej mierze ze znajdującego się w stali niklu. Obecność chromu i niklu w próbce aluminium wydaje się z kolei dość dyskusyjna, a co za tym idzie trudno jest jednoznacznie stwierdzić jakie były kanały produkcji wymienionych izotopów w próbkach aluminium.

Tabela 31d. Izotopy przewidywane w próbkach betonu. Symbol „+” oznacza, iż obecność danego izotopu została faktycznie stwierdzona w danej serii pomiarowej

Izotop	Okres półrozpadu	Prawdopodobne kanały produkcji	Obecny w widmach	
			seria 2.	seria 3.
H-3	12,3 y	$^2\text{H}(n,\gamma)^3\text{H}$	- ¹	- ¹
Be-7	53 d	$^{12}\text{C}(p,d+\alpha)^7\text{Be}$	+	+
Be-10	$1,5 \cdot 10^6$ y	$^{13}\text{C}(n,\alpha)^{10}\text{Be}$	- ¹	- ¹
C-11	20,4 min	$^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$	- ³	- ³
C-14	5730 y	$^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$	- ¹	- ¹
O-14	71 s	$^{16}\text{O}(n,3n)^{14}\text{O}$	- ²	- ²
O-15	122 s	$^{16}\text{O}(n,2n)^{15}\text{O},$ $^{17}\text{O}(n,3n)^{15}\text{O}$	- ²	- ²
O-19	27 s	$^{18}\text{O}(n,\gamma)^{19}\text{O}$	- ²	- ²
Na-22	2,6 y	$^{24}\text{Mg}(n,t)^{22}\text{Na}$	+	+
Na-24	15 h	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na},$ $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	+	+
Al-26	$7,2 \cdot 10^5$ y	$^{27}\text{Al}(n,2n)^{26}\text{Al}$	- ⁴	- ⁴
Al-28	2,2 min	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	- ²	- ²
Mg-27	9,5 min	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg},$ $^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$	+	- ⁴
Si-31	2,6 h	$^{30}\text{Si}(n,\gamma)^{31}\text{Si}$	- ¹	- ¹
Cl-34m	32 min	$^{39}\text{K}(n,x)^{34m}\text{Cl},$ $^{40}\text{Ca}(n,x)^{34m}\text{Cl}$	+	- ⁴

Cl-38	37 min	$^{39}\text{K}(\text{n},\text{x})^{38}\text{Cl}$, $^{40}\text{Ca}(\text{n},\text{x})^{38}\text{Cl}$	+	- ⁴
Ar-37	35 d	$^{40}\text{Ca}(\text{n},\alpha)^{37}\text{Ar}$, $^{39}\text{K}(\text{n},\text{t})^{37}\text{Ar}$	- ¹	- ¹
Ar-39	269 y	$^{42}\text{Ca}(\text{n},\alpha)^{39}\text{Ar}$, $^{39}\text{K}(\text{n},\text{p})^{39}\text{Ar}$	- ¹	- ¹
Ar-41	109 min	$^{44}\text{Ca}(\text{n},\alpha)^{41}\text{Ar}$	+	- ⁴
K-38	7,6 min	$^{40}\text{Ca}(\text{n},\text{t})^{38}\text{K}$, $^{39}\text{K}(\text{n},2\text{n})^{38}\text{K}$	+	- ⁴
K-42	12,4 h	$^{42}\text{Ca}(\text{n},\text{p})^{42}\text{K}$	- ⁴	+
K-43	22,3 h	$^{43}\text{Ca}(\text{n},\text{p})^{43}\text{K}$	+	- ⁴
K-44	22 min	$^{44}\text{Ca}(\text{n},\text{p})^{44}\text{K}$	- ⁴	- ⁴
Ca-41	$1,03 \cdot 10^5$ y	$^{40}\text{Ca}(\text{n},\gamma)^{41}\text{Ca}$	- ¹	- ¹
Ca-45	163 d	$^{44}\text{Ca}(\text{n},\gamma)^{45}\text{Ca}$	- ¹	- ¹
Ca-47	4,5 d	$^{46}\text{Ca}(\text{n},\gamma)^{47}\text{Ca}$	+	+
Ca-49	8,7 min	$^{48}\text{Ca}(\text{n},\gamma)^{49}\text{Ca}$	+	+
Sc-46	84 d	?	+	+
Sc-47	3,3 d	$^{46}\text{Ca}(\text{n},\gamma)^{47}\text{Ca} \rightarrow ^{47}\text{Sc}$	+	- ⁴
V-48	16 d	?	+	- ⁴
Cr-51	28 d	$^{54}\text{Fe}(\text{n},\alpha)^{51}\text{Cr}$	- ⁴	- ⁴
Mn-52	5,6 d	$^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{t})^{52}\text{Mn}$	+	- ⁴
Mn-54	313 d	$^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{t})^{54}\text{Mn}$, $^{54}\text{Fe}(\text{n},\text{p})^{54}\text{Mn}$	+	+
Mn-56	2,6 h	$^{56}\text{Fe}(\text{n},\text{p})^{56}\text{Mn}$	+	+
Co-56	77 d	?	+	+
Fe-52	8,3 h	$^{54}\text{Fe}(\text{n},3\text{n})^{52}\text{Fe}$	- ⁴	- ⁴
Fe-55	2,7 y	$^{54}\text{Fe}(\text{n},\gamma)^{55}\text{Fe}$, $^{56}\text{Fe}(\text{n},2\text{n})^{55}\text{Fe}$,	- ¹	- ¹
Fe-59	45 d	$^{58}\text{Fe}(\text{n},\gamma)^{59}\text{Fe}$,	- ⁴	- ⁴
Zn-65	244 d	?	+	+

¹Całkowity brak emitowanego promieniowania gamma lub brak wystarczająco intensywnych linii.

²Zbyt krótki okres półrozpadu.

³Brak wystarczająco intensywnych linii, za wyjątkiem linii anihilacyjnej o energii 511 keV.

⁴Zbyt mała liczba zliczeń w odpowiednim pikcie, by jednoznacznie potwierdzić obecność izotopu.

W przypadku izotopów Sc-46, V-48, Co-56 i Zn-65 sytuacja jest analogiczna jak to opisano dla próbek aluminium, ponieważ w betonie również mogą się pojawić domieszki żelaza.

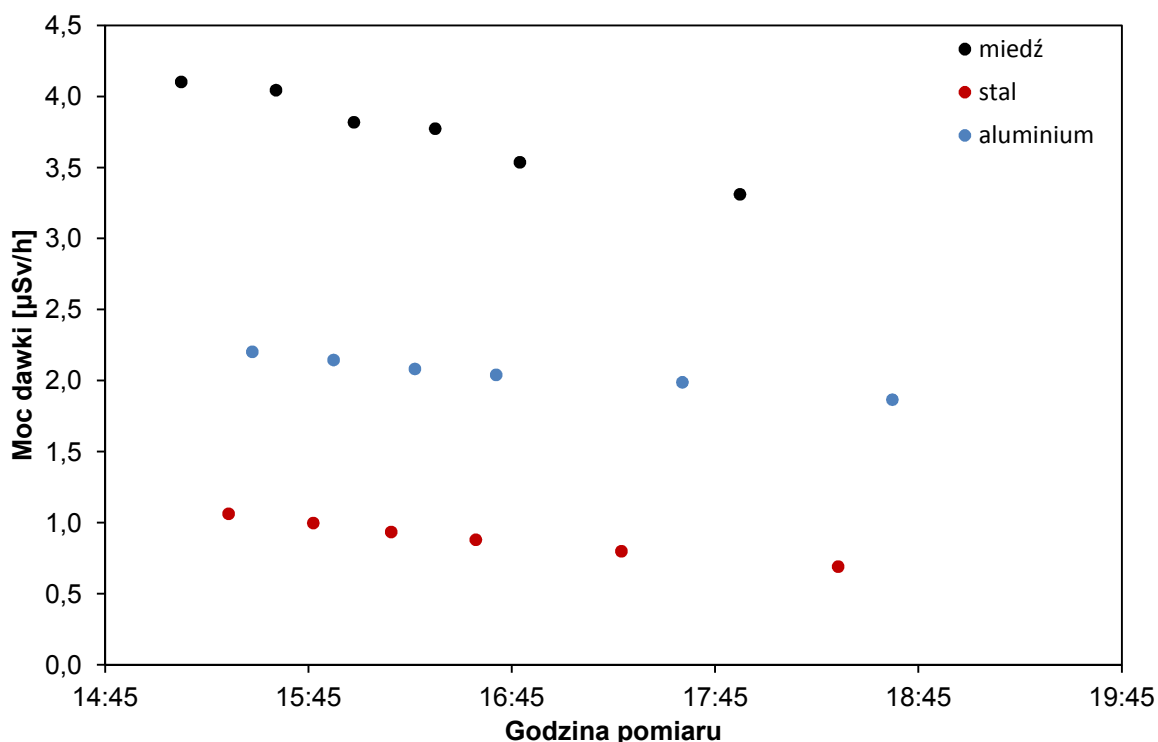
Aktywności poszczególnych izotopów zarejestrowanych w odpowiednich materiałach podano w podrozdziale 8.3.3.3 dla każdej serii pomiarowej z osobna.

8.3.3.2 Moc dawki aktywowanych próbek metali i betonu

Wykorzystując radiometr RKP-2 mierzono moc dawki promieniowania gamma emitowanego z wszystkich pięciu blaszek dla każdego metalu, przy samej ich powierzchni. Wykonano to dla blaszek ze wszystkich trzech serii pomiarowych. Analogiczne postępowanie przeprowadzono dla próbek betonu w przypadku drugiej i trzeciej serii pomiarowej.

a) seria nr 1

Wartości mocy dawki w kolejnych momentach w czasie oszacowano na podstawie całkowitej liczby zliczeń w kolejno zbieranych widmach promieniowania gamma emitowanego przez te próbki (wykorzystano tę samą metodę co w przypadku zmieniacza zasięgu w pokoju gantry – patrz rozdział 8.2.2) – pierwsza wartość została odczytana bezpośrednio z radiometru RKP-2. Na Rysunku 38 przedstawiono wykres zależności mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez próbki miedzi, stali oraz aluminium przy samej ich powierzchni od czasu. Punkty pomiarowe obejmują jedynie zakres kilku godzin pomiarów, które odbywały się w jednym dniu, tj. piątek 15.03.



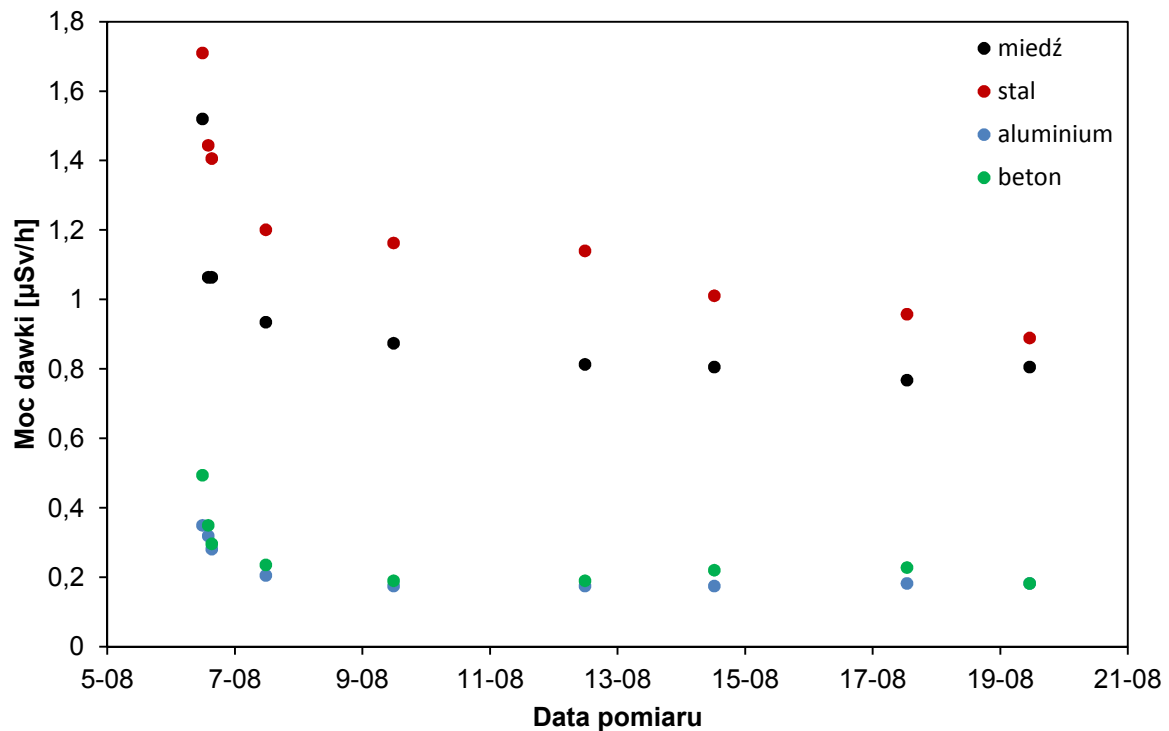
Rysunek 38. Zależność mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez próbki metali z pierwszej serii pomiarowej przy ich powierzchni od czasu. Wartość dla pierwszego punktu pomiarowego w przypadku każdego z metali była bezpośrednio odczytana z radiometru RKP-2, kolejne wartości zostały oszacowane na podstawie pomiarów gamma spektrometrycznych próbek metali

W poniedziałek 18.03 około godziny 18:55 dokonano drugiego pomiaru wartości mocy dawki przy powierzchni metalowych próbek przy użyciu RKP-2. Wartości mocy dawki przy powierzchni blaszek miedzianych, stalowych i aluminium wyniosły wówczas odpowiednio: 0,27 µSv/h, 0,34 µSv/h oraz 0,23 µSv/h. Powyższe wyniki wskazują na fakt, iż najwięcej stosunkowo długożyciowych izotopów zostało aktywowanych w próbkach stali, ponieważ początkowo moc dawki promieniowania gamma emitowanego przez blaszki stalowe była najniższa (patrz Rysunek 38), a po upływie trzech dni była już najwyższa. Co więcej, dla każdego z badanych metali duży wkład w początkową moc dawki miały nuklidy krótkożyciowe, gdyż jej wartość po trzech dniach w przypadku każdego z nich zmalała kilkukrotnie (dla miedzi nawet ponad 10-krotnie).

b) seria nr 2

W serii drugiej wszystkie wartości zostały zmierzone przy użyciu radiometru RKP-2. Było to kilka wyników, część z dnia, w którym próbki zostały zebrane z hali cyklotronu (pomiar wykonywany w różnych godzinach), a część stanowiły wskazania radiometru z kolejnych dni.

Wykres zależności mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez blaszki oraz próbkę betonu od czasu w przypadku drugiej serii pomiarowej zawarto na Rysunku 39.



Rysunek 39. Zależność mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez próbki metali oraz betonu z drugiej serii pomiarowej przy ich powierzchni od czasu

Początkowa wartość mocy dawki promieniowania gamma w drugiej serii pomiarowej była dla każdego z metali mniejsza niż w przypadku serii pierwszej. Było to spowodowane różnicą w sposobach wykorzystywania wiązki protonów w godzinach bezpośrednio poprzedzających przeprowadzenie powyższych pomiarów mocy dawki. Próbkę z serii pierwszej były wystawione na działanie wtórnych neutronów w hali cyklotronu jeszcze na kilkadziesiąt minut przed rozpoczęciem pierwszego pomiaru. Ponadto, próbki te były narażone na oddziaływanie z wtórnymi neutronami przez okres pięciu dni z rzędu poprzedzających pomiar mocy dawki, w których to rutynowo wykorzystywano wiązkę protonów do celów radioterapii na stanowiskach gantry. W przypadku serii drugiej, ostatnie użycie wiązki w celach terapeutycznych przed rozpoczęciem pomiarów mocy dawki miało miejsce cztery dni wcześniej. Potem wiązka była włączana jedynie sporadycznie, na potrzeby wykonywanych w tych dniach prac serwisowych w hali cyklotronu.

Wyraźnie widać jednak, iż dla próbek z serii drugiej, w szczególności dla blaszek miedzianych oraz stalowych, moc dawki emitowanego przez nie promieniowania gamma utrzymuje się na stosunkowo wysokim poziomie przez znacznie dłuższy czas. W przypadku

serii pierwszej już po upływie trzech dni wartość mocy dawki przy powierzchni próbek była rzędu 0,3 $\mu\text{Sv/h}$. Tymczasem dla próbek miedzi i aluminium z serii drugiej, wartość mocy dawki przy ich powierzchni była w zakresie 0,8 – 1,0 $\mu\text{Sv/h}$ nawet po upływie dwóch tygodni, a co więcej, nie wykazywała już zbyt dużej zmienności w czasie. Jest to z całą pewnością związane z faktem, iż próbki z serii drugiej znajdowały się w hali cyklotronu łącznie przez znacznie dłuższy okres niż próbki z serii pierwszej. To z kolei doprowadziło do produkcji większej ilości izotopów promieniotwórczych w próbkach z serii drugiej. W szczególności wygenerowana została również większa ilość izotopów o stosunkowo długim okresie półrozpadu (patrz rozdział 4.), a to przełożyło się na utrzymującą się na wysokim poziomie przez długi czas wartość mocy dawki emitowanego przez te próbki promieniowania gamma.

Warto również zauważyć, iż blaszki z miedzi oraz stali aktywowały się znacznie bardziej niż blaszki aluminiowe i próbka betonu, dla których wartość mocy dawki promieniowania gamma spadła do poziomu rzędu 0,2 $\mu\text{Sv/h}$ (co jest bliskie poziomowi tła) już praktycznie po jednym dniu.

c) seria nr 3

W serii trzeciej, podobnie jak to miało miejsce w serii drugiej, wszystkie wartości zostały zmierzone przy użyciu radiometru RKP-2. Wyniki pochodzą z dnia, w którym próbki zostały zebrane z hali cyklotronu (pomiar wykonywany w różnych godzinach), natomiast część z nich stanowią również wskazania radiometru z kolejnych dni. Wykres zależności mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez blaszki oraz próbkę betonu od czasu w przypadku trzeciej serii pomiarowej zawarto na Rysunku 40.

Można zauważyć, że początkowa wartość mocy dawki dla wszystkich próbek jest mniejsza niż w przypadku zarówno serii drugiej, jak i pierwszej. Ponadto, podobnie jak to miało miejsce w serii pierwszej, tak i w serii trzeciej spadek wartości mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez badane próbki był stosunkowo szybki. Po upływie trzech dni wynosiła ona dla każdej próbki poniżej 0,2 $\mu\text{Sv/h}$.

Warto nadmienić, iż próbki w serii trzeciej były ekspozowane na wtórne neutrony w hali cyklotronu o tydzień dłużej niż próbki w serii drugiej. Taki charakter wykresu zależności mocy dawki od czasu świadczy o tym, że w próbkach z serii drugiej wyprodukowanych zostało znacznie więcej izotopów długożyciowych niż w próbkach z serii trzeciej, co związane jest z emisją znacznie większej liczby wtórnych neutronów w pobliżu degradera niż w otoczeniu fragmentu jonowodu w rogu hali cyklotronu.

pomiaru), tak, aby móc zauważyć rozpad krótkożyciowych izotopów, a co za tym idzie w przypadku ostatniego widma zminimalizować ich wpływ na wyznaczenie aktywności izotopów długożyciowych.

Tabela 32a. Aktywności izotopów, których obecność stwierdzono w próbkach miedzi eksponowanych na wtórne neutrony w hali cyklotronu (wyniki podano dla pierwszej blaszki znajdującej się najbliżej jonowodu)

Izotop	Okres półrozpadu	Aktywność [Bq]					
		Seria nr 1		Seria nr 2		Seria nr 3	
		15.03, 14:30	24.04, 10:45	06.08, 13:25	05.09, 15:30	13.08, 22:20	13.09, 14:45
Mn-52	5,6 d	- ¹	- ²	3,71 (66)	- ²	- ¹	- ²
Mn-54	313 d	- ¹	1,02 (40)	55,2 (21)	52,1 (17)	- ¹	0,32 (1)
Mn-56	2,6 h	- ¹	- ²	6,49 (151)	-	- ¹	- ²
Co-56	77 d	- ¹	1,74 (62)	54,2 (22)	42,9 (13)	- ¹	0,44 (2)
Co-57	272 d	- ¹	8,53 (64)	249 (19)	231 (17)	- ¹	1,02 (8)
Co-58	71 d	68,2 (41)	55,7 (18)	1024 (33)	763 (25)	4,17 (5)	3,23 (11)
Co-60	5,3 y	- ¹	3,03 (10)	39,5 (15)	38,5 (11)	- ¹	0,20 (2)
Co-61	1,7 h	- ¹	- ²	53,5 (182)	- ²	- ¹	- ²
Fe-59	45 d	- ¹	3,97 (17)	79,3 (36)	47,9 (19)	- ¹	0,17 (2)
Cu-61	3,4 h	469 (96)	- ²	133 (27)	- ²	22,9 (76)	- ²
Cu-64	12,7 h	57150 (2135)	- ²	2515 (166)	- ²	13360 (557)	- ²
Ni-65	2,5 h	56,2 (56)	- ²	13,8 (23)	- ²	- ¹	- ²
Zn-65	244 d	- ¹	2,78 (10)	19,2 (14)	19,2 (6)	- ¹	- ¹

¹Wartość poniżej MDA.

²Zbyt krótki okres półrozpadu.

Można zauważyć, iż aktywności stosunkowo długożyciowych izotopów (wyniki w drugiej kolumnie każdej z serii pomiarowych) są największe w próbkach z serii drugiej, osiągając w niej wartości rzędu kilkudziesięciu – kilkuset Bq. Dla serii pierwszej aktywności te są kilkanaście razy mniejsze, rzędu kilku – kilkunastu Bq. Można to powiązać z czasem ekspozycji próbek w obu seriach na wtórne neutrony w hali cyklotronu – dla serii pierwszej wynosił on 24 dni, dla serii drugiej było to 145 dni – a zatem około 6 razy dłużej. Ponadto,

tak duże rozbieżności w aktywnościach mogą wynikać również z różnicy w intensywności wykorzystywania wiązki protonów w obu tych okresach pomiarowych. Aktywności tych samych izotopów w próbkach z serii trzeciej są zdecydowanie najmniejsze, osiągając najczęściej wartości rzędu ułamków, a maksymalnie pojedynczych Bq. Warto zwrócić również uwagę na bardzo dużą aktywność izotopu Cu-64 w każdej z serii pomiarowych, przy czym z uwagi na jego krótki okres półrozpadu jego obecność nie jest zauważalna w dłuższej perspektywie czasowej.

Tabela 32b. Aktywności izotopów, których obecność stwierdzono w próbkach stali eksponowanych na wtórne neutrony w hali cyklotronu (wyniki podano dla pierwszej blaszki znajdującej się najbliżej jonowodu)

Izotop	Okres półrozpadu	Aktywność [Bq]					
		Seria nr 1		Seria nr 2		Seria nr 3	
		15.03, 14:45	11.04, 15:10	06.08, 14:05	06.09, 12:40	13.08, 22:40	16.09, 15:45
Sc-46	84 d	- ¹	1,41 (60)	52,9 (21)	40,9 (13)	- ¹	0,22 (2)
Sc-47	3,3 d	15,5 (13)	- ²	17,6 (14)	- ²	- ¹	- ²
V-48	16 d	16,7 (17)	5,54 (17)	117 (4)	30,7 (9)	- ¹	0,13 (2)
Cr-51	28 d	1023 (62)	528 (31)	3136 (182)	1442 (83)	199 (13)	84,2 (49)
Mn-52	5,6 d	63,3 (26)	2,43 (8)	86,7 (33)	1,95 (7)	- ¹	- ²
Mn-54	313 d	82,6 (32)	81,8 (26)	1085 (35)	1006 (32)	5,27 (63)	4,92 (16)
Mn-56	2,6 h	701 (34)	- ²	172 (9)	- ²	- ¹	- ²
Co-55	18 h	26,9 (22)	- ²	- ¹	- ²	- ¹	- ²
Co-56	77 d	6,7 (12)	6,51 (21)	38,8 (16)	31,2 (1)	- ¹	- ¹
Co-57	272 d	- ¹	0,68 (6)	6,39 (69)	5,57 (42)	- ¹	- ¹
Co-58	71 d	- ¹	2,09 (8)	9,78 (93)	7,12 (23)	- ¹	- ¹
Co-60	5,3 y	- ¹	0,78 (6)	5,35 (99)	4,95 (14)	- ¹	0,72 (4)
Fe-59	45 d	10,5 (24)	7,39 (31)	29,4 (22)	19,3 (8)	6,45 (122)	3,18 (14)

¹Wartość poniżej MDA.

²Zbyt krótki okres półrozpadu.

W przypadku stali również stwierdzono największą aktywność izotopów długożyciowych w próbkach z serii drugiej, najmniejszą zaś w próbkach z serii trzeciej. Na szczególną uwagę

zasługują przede wszystkim izotopy Cr-51 i Mn-54, które osiągają aktywności rzędu nawet pojedynczych kBq (w serii drugiej), a są stosunkowo długożyciowe (odpowiednio 27,7 d i 313 d). Dużą aktywnością charakteryzuje się także izotop Mn-56, przy czym jego okres półrozpadu jest bardzo krótki (2,6 h), wobec czego rozpada się całkowicie już praktycznie po jednym dniu od zakończenia ekspozycji.

Tabela 32c. Aktywności izotopów, których obecność stwierdzono w próbkach aluminium eksponowanych na wtórne neutrony w hali cyklotronu (wyniki podano dla pierwszej blaszki znajdującej się najbliżej jonowodu)

Izotop	Okres półrozpadu	Aktywność [Bq]					
		Seria nr 1		Seria nr 2		Seria nr 3	
		15.03, 14:55	20.05, 13:00	06.08, 14:35	12.09, 15:15	13.08, 23:00	17.09, 14:50
Be-7	53 d	⁻¹	⁻¹	3,07 (166)	1,52 (19)	⁻¹	⁻¹
Na-22	2,6 y	⁻¹	0,48 (2)	9,33 (52)	9,96 (28)	⁻¹	0,08 (1)
Na-24	15 h	820 (23)	⁻²	50,4 (17)	⁻²	7,74 (57)	⁻²
Mn-54	313 d	⁻¹	⁻¹	1,3 (24)	0,82 (4)	⁻¹	⁻¹
Mn-56	2,6 h	⁻¹	⁻²	⁻¹	⁻²	1,42 (23)	⁻²

¹Wartość poniżej MDA.

²Zbyt krótki okres półrozpadu.

W przypadku aluminium zaobserwowano generalnie znacznie mniej wygenerowanych izotopów promieniotwórczych niż miało to miejsce dla miedzi czy stali. Ponadto, ich aktywności były dla aluminium relatywnie niskie. Jedynie krótkożyciowy izotop Na-24 osiągał wartości przekraczające kilka Bq – sięgające nawet kilkuset Bq zaraz po zakończeniu ekspozycji w serii pierwszej. Jego krótki okres półrozpadu (15 h) sprawia jednak, że już po kilku dniach jego obecność staje się niemierzalna.

Tabela 32d. Aktywności izotopów, których obecność stwierdzono w próbkach betonu eksponowanych na wtórne neutrony w hali cyklotronu (wyniki podano dla całych bloków betonowych)

Izotop	Okres półrozpadu	Aktywność [Bq]			
		Seria nr 2		Seria nr 3	
		06.08, 11:30	23.08, 03:55	13.08, 21:45	04.09, 15:15
Be-7	53 d	1671 (93)	1902 (88)	- ¹	13,6 (15)
Na-22	2,6 y	311 (17)	332 (10)	- ¹	2,55 (13)
Na-24	15 h	624 (23)	- ²	651 (98)	- ²
Mg-27	9,5 min	308 (26)	- ²	- ¹	- ²
Cl-34m	32 min	208 (21)	- ²	- ¹	- ²
Cl-38	37 min	100 (16)	- ²	- ¹	- ²
Ar-41	109 min	- ¹	- ²	- ¹	- ²
K-43	22,3 h	- ¹	- ²	- ¹	- ²
Ca-47	4,5 d	33,3 (61)	1,77 (32)	- ¹	- ¹
Ca-49	8,7 min	27,3 (78)	- ²	38,1 (101)	- ²
Sc-46	84 d	31,3 (56)	41,3 (13)	- ¹	2,94 (21)
Sc-47	3,3 d	40,7 (109)	9,99 (84)	- ¹	- ²
V-48	16 d	8,03 (454)	5,01 (56)	- ¹	- ¹
Mn-52	5,6 d	15,1 (51)	2,26 (49)	- ¹	- ¹
Mn-54	313 d	162 (7)	191 (6)	- ¹	1,87 (11)
Mn-56	2,6 h	679 (42)	- ²	2000 (131)	- ²
Co-56	77 d	- ¹	3,23 (63)	- ¹	- ¹
Zn-65	244 d	- ¹	13,5 (7)	- ¹	1,17 (16)

¹Wartość poniżej MDA.

²Zbyt krótki okres półrozpadu.

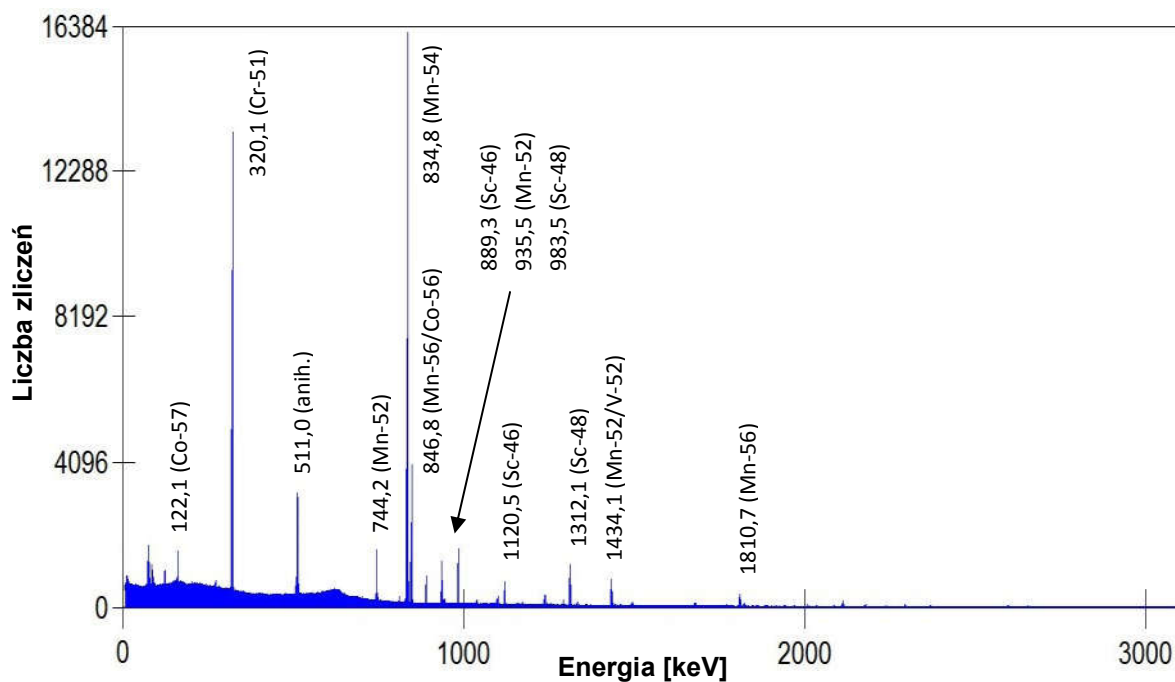
W przypadku betonu ponownie stwierdzono, iż aktywność izotopów długożyciowych zawartych w próbce z serii drugiej jest znacznie większa niż tych zawartych w próbce z serii trzeciej. Największe aktywności osiągały izotopy Be-7 oraz Na-22 – odpowiednio 1902 Bq i 332 Bq dla próbki z serii drugiej. Wysoką aktywność posiadały również izotopy Na-24 i Mn-56, których okresy półrozpadu są jednak relatywnie krótkie – odpowiednio 15 h i 1,6 h.

Ciekawą obserwacją było również zarejestrowanie w drugiej serii pomiarowej kilku bardzo krótkożyciowych (o czasach połowicznego zaniku rzędu pojedynczych minut) izotopów magnezu, chloru czy wapnia.

Warto zauważyć, że dla każdej z badanych próbek niejednokrotnie brakuje wyniku w pierwszej kolumnie danej serii, podczas gdy widnieje on już w kolumnie drugiej (co odpowiada pomiarowi przeprowadzonemu później). Dzieje się tak, gdyż zaraz po zakończeniu ekspozycji na neutrony w hali cyklotronu, największą aktywnością w badanych próbkach często cechują się bardzo krótkożyciowe izotopy. Kontinuum komptonowskie pochodzące od odpowiadających im w widmie pików jest wówczas stosunkowo duże i niejednokrotnie pokrywa ono całkowicie piki pochodzące od innych długożyciowych izotopów. Po pewnym czasie, wraz z rozpadem krótkożyciowych izotopów maleje również komptonowska składowa widma i piki związane z długożyciowymi izotopami stają się widoczne i mierzalne.

Porównując ze sobą wszystkie rodzaje badanych próbek, można zauważyć, iż zawartością największej ilości najbardziej aktywnych izotopów długożyciowych cechuje się stal oraz miedź. W przypadku betonu największy wkład w jego aktywność ma izotop Be-7. Dla aluminium aktywności długożyciowych izotopów są stosunkowo małe. Stoi to w zgodzie z przedstawionymi w rozdziale 8.3.3.2 wynikami pomiarów mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez badane próbki – w dłuższej perspektywie czasowej próbki stali i miedzi znacznie przewyższają pod względem mocy dawki zarówno beton, jak i aluminium. Warto nadmienić, iż relatywnie wysoka aktywność izotopu Be-7 w betonie jest rozłożona na jego dużą objętość (w porównaniu do niewielkich blaszek metalowych) i w związku z tym nie przekłada się ona na podobnie wysoką moc dawki promieniowania gamma emitowanego przez tenże izotop zawarty w próbce betonu.

Na Rysunku 41 zamieszczono jedno z widm zebranych podczas pomiaru blaszki stalowej w serii nr 2 wraz z zaznaczonymi w nim najważniejszymi pikami.

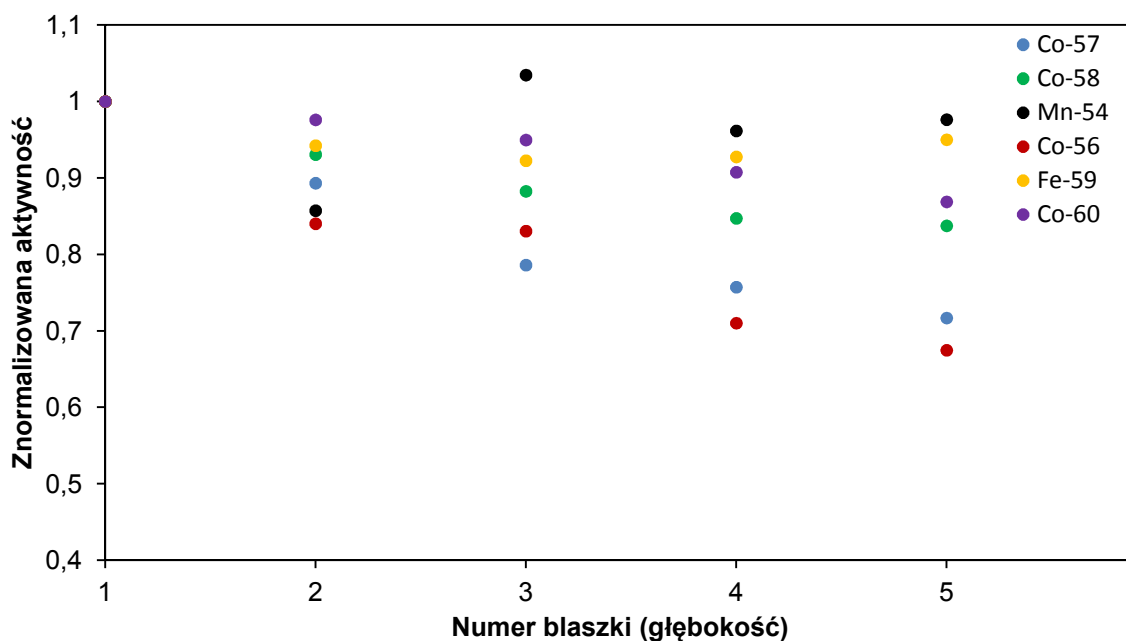


Rysunek 41. Widmo stalowej blaszki zebrane w serii pomiarowej nr 2, którego akwizycja rozpoczęła się 06.08.2019 o godz. 14:03. Na widmie zaznaczono najważniejsze obecne w nim linie – podano ich energię w keV oraz izotop, który je wyemitował. Oś pionowa w skali liniowej

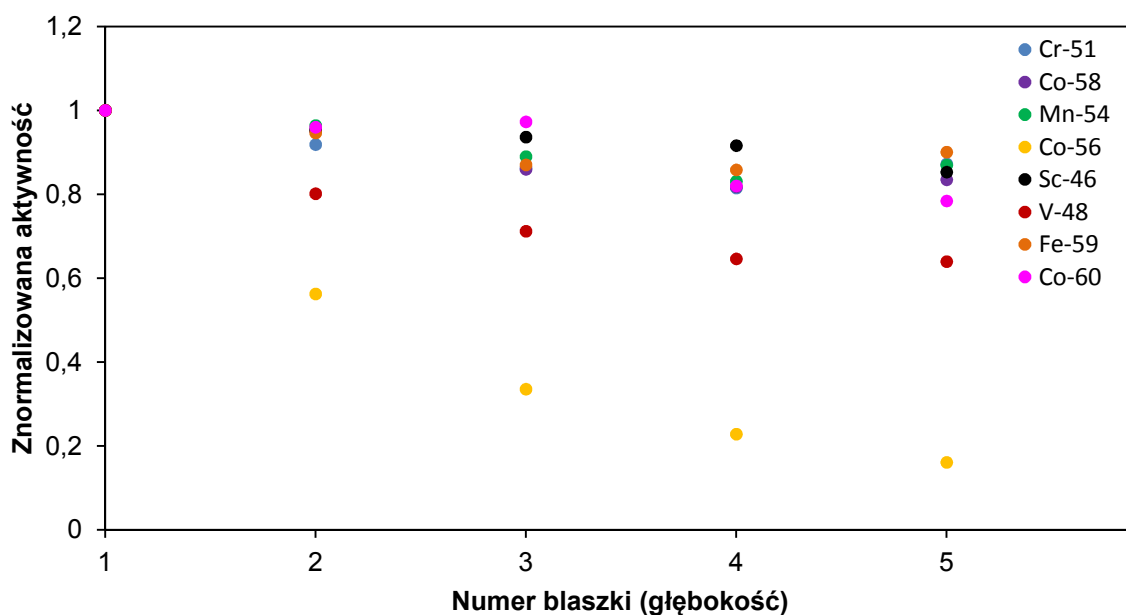
8.3.3.4 Rozkład głębokościowy izotopów wzbudzonych w próbkach metali

Kolejnym krokiem było wyznaczenie rozkładu głębokościowego nowopowstałych izotopów w próbkach metali. Miarą głębokości był po prostu numer kolejnej blaszki (od 1 do 5, gdzie 5 to największa głębokość). Dokonano tego poprzez spektrometryczny pomiar każdej blaszki i obliczenie dla każdej z nich aktywności obecnych w niej radionuklidów. Ze względów praktycznych (celem uzyskania dobrej statystyki zliczeń pomiar każdej blaszki trwał co najmniej 24 h) w analizie pominięto najbardziej krótkożyciowe izotopy, których okresy półrozpadu były w granicach kilku godzin czy minut. Pomiary rozkładu głębokościowego izotopów w próbkach metali przeprowadzono jedynie dla próbek z pierwszej serii pomiarowej.

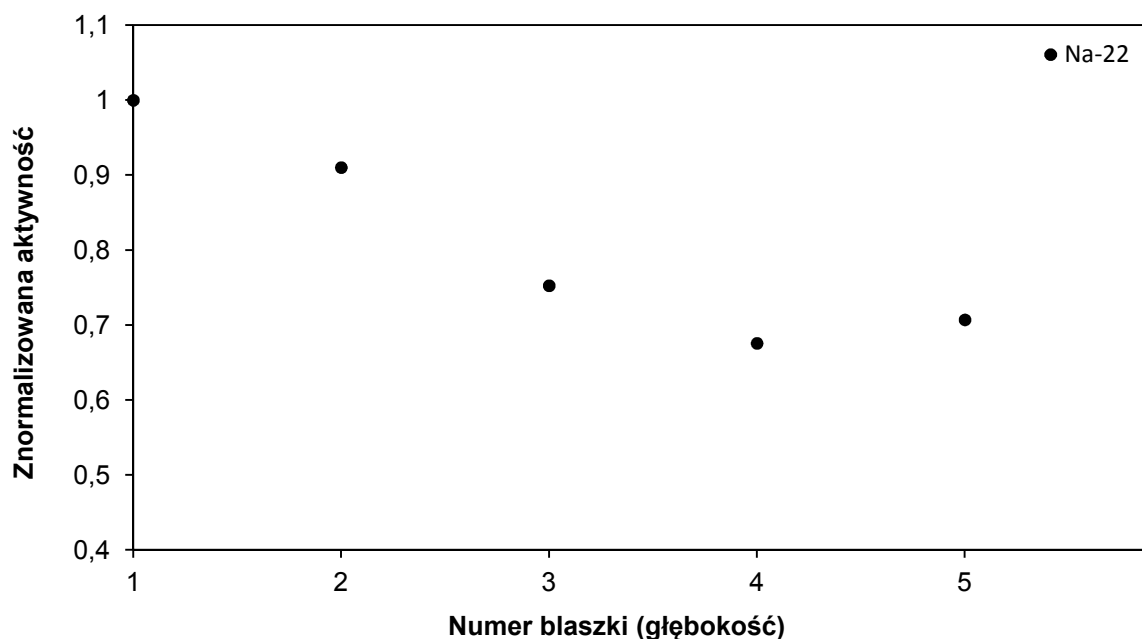
Na Rysunkach 42a,b,c zawarto rozkłady głębokościowe izotopów we wszystkich trzech badanych metalach. Celem bardziej przejrzystej wizualizacji danych, na osi pionowej widnieje w każdym przypadku aktywność danego izotopu znormalizowana do jej wartości dla pierwszej blaszki (czyli dla najmniejszej głębokości).



Rysunek 42a. Aktywność danego izotopu w próbce miedzi w zależności od numeru blaszki (głębokości). Aktywność została znormalizowana do jej wartości dla pierwszej blaszki odpowiadającej najmniejszej głębokości. Celem zachowania czytelności rysunku nie zaznaczono na nim niepewności pomiarowych. Mieściły się one w zakresie od ułamków procenta do maksymalnie 7%



Rysunek 42b. Aktywność danego izotopu w próbce stali w zależności od numeru blaszki (głębokości). Aktywność została znormalizowana do jej wartości dla pierwszej blaszki odpowiadającej najmniejszej głębokości. Celem zachowania czytelności rysunku nie zaznaczono na nim niepewności pomiarowych. Mieściły się one w zakresie od ułamków procenta do maksymalnie 7%



Rysunek 42c. Aktywność izotopu Na-22 w próbce aluminium w zależności od numeru blaszki (głębokości). Aktywność została znormalizowana do jej wartości dla pierwszej blaszki odpowiadającej najmniejszej głębokości. Celem zachowania czytelności rysunku nie zaznaczono na nim niepewności pomiarowych. Dla izotopu Na-22 wynosiły one niemal 10%

Można zauważyć, że generalnie wraz ze wzrostem głębokości, ilość wyprodukowanych radionuklidów maleje. Wydaje się być to normalnym zjawiskiem, z uwagi na fakt, iż im większa głębokość, tym neutrony mają grubszą warstwę materiału do przebycia. To skutkuje oczywiście zmniejszeniem ich fluencji, a co za tym idzie zmniejszonym poziomem produkcji nowych izotopów.

Z drugiej strony, zarówno dla stali, jak i miedzi, zaobserwowano pewne odstępstwa od tej charakterystyki. W stali dla izotopów Cr-51, Mn-54 czy Fe-59, można stwierdzić zauważalny wzrost ich ilości w ostatniej warstwie (uwzględniając oczywiście niepewności pomiarowe, które nie zostały zawarte na rysunku). Najprawdopodobniej dzieje się tak, ponieważ na głębokości piątej warstwy, nie tylko maleje liczba neutronów, ale również spada ich średnia energia. Tymczasem, przekroje czynne na reakcje $^{52}\text{Cr}(n,2n)^{51}\text{Cr}$, $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$, $^{56}\text{Fe}(n,t)^{54}\text{Mn}$ oraz $^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ mają swoje maksima dla neutronów o energiach rzędu 10 – 30 MeV [57], a być może właśnie takie energie uzyskuje wiele neutronów na głębokości piątej warstwy stali w analizowanym przypadku. Potwierdzenie tej hipotezy wymaga jednak dalszych badań.

W miedzi podobne odstępstwa od ogólnej tendencji do obniżenia się ilości izotopu wraz z głębokością zaobserwowano ponownie dla radionuklidów Mn-54 i Fe-59 (Cr-51 nie

aktywował się w miedzi, ponieważ nie ma w niej chromu, podczas gdy w stali nierdzewnej H17 stanowi on około 17% całości).

W przypadku aluminium analizowano tylko jeden izotop, Na-22. Tam również widać wzrost jego ilości w piątej warstwie, przy czym w tej sytuacji wynik ten nie jest do końca wiarygodny, z uwagi na dość duże, niemal 10-procentowe niepewności pomiarowe.

8.4 Hala doświadczalna

Pomiary w hali doświadczalnej CCB zostały podzielone na trzy serie. Celem dwóch pierwszych było zmierzenie promieniowania tła w hali (patrz rozdział 8.4.1). Było to możliwe z uwagi na fakt, iż przeprowadzono je odpowiednio 15.01.2018 i 19.01.2018, tymczasem ostatni eksperyment z użyciem wiązki protonowej w hali doświadczalnej miał miejsce w listopadzie poprzedniego roku, w związku z czym dane zebrane w tych dwóch seriach pomiarowych można było jak najbardziej traktować jako nie będące bezpośrednim następstwem niedawnego użycia wiązki, a raczej jako właśnie promieniowanie „tła” w hali. Nie jest to jedynie tło naturalne, ponieważ wpływ na jego charakter mogły mieć wcześniejsze eksperymenty wykorzystujące wiązkę protonów, prowadzące do pojawienia się promieniotwórczości sztucznie wzbudzonej.

Trzecia seria obejmowała jedynie pomiary mocy dawki prowadzone przez okres od 04.05.2018 do 14.05.2018, w trakcie którego wiązka protonów była jeden raz poprowadzona do hali doświadczalnej i jeden raz do sąsiadującej hali radioterapii oka (patrz rozdział 8.4.2). Celem uzupełnienia wyników powyższych pomiarów pozyskano również wskazania stacjonarnych sond gamma oraz sondy neutronowej zainstalowanych w hali doświadczalnej w CCB.

8.4.1 Tło w hali doświadczalnej

Podczas pierwszego pomiaru (15.01) promieniowania tła, detektor HPGe został umieszczony na osi pomiędzy wyjściem wiązki z jonowodu a stoperem wiązki, w odległości 2,6 m od stopera. Detektor ustawiono na specjalnym statywie bez osłony ołowianej i zwrócono go pionowo w górę. Miernik GammaTRACER GT-XL do pomiaru mocy dawki ustawiono bezpośrednio obok detektora.

W drugim pomiarze (19.01) detektor znajdował się już w osłonie ołowianej z kolimatorem 30° i zwrócony był w stronę drugiego, licząc od wyjścia wiązki z jonowodu, magnesu skupiającego wiązkę protonów. Odległość detektora od magnesu wynosiła ok. 1,4 m. Wybrano takie ułożenie detektora, ponieważ ten właśnie magnes wykazywał emisję

zauważalnej ilości promieniowania gamma (pomiar mocy dawki radiometrem RKP-2 przy powierzchni magnezu wskazał wartość ok. 0,4 $\mu\text{Sv/h}$), wydawał się więc być najbardziej znaczącym źródłem promieniowania w hali, podczas gdy inne elementy nie wykazywały żadnej zauważalnie zwiększonej emisji promieniowania gamma. Miernik GT-XL ponownie znajdował się bezpośrednio obok detektora. W obu przypadkach były to kilkugodzinne pomiary mocy dawki i gamma-spektrometryczne.

W przypadkach obu pomiarów wartości mocy dawki zmierzone przez GT-XL oscylowały w zakresie 75 – 90 nSv/h, co stanowiło nawet nieco mniejsze wskazania niż na zewnątrz budynku (patrz rozdział 8.5.1). Powodem jest to, iż aktywność elementów znajdujących się wewnątrz hali nie była wysoka, natomiast grube ściany w budynku CCB stanowią w pewnym stopniu osłonę przed docierającym z zewnątrz promieniowaniem gamma pochodzenia naturalnego.

W trakcie pomiarów gamma-spektrometrycznych w pierwszym przypadku (15.01) oprócz linii pochodzących od naturalnie występujących izotopów promieniotwórczych (U-238, Th-232 i ich pochodne oraz K-40) stwierdzono obecność sztucznie wzbudzonych izotopów Be-7, Na-22 oraz Mn-54. Be-7 powstał najprawdopodobniej w wyniku aktywacji protonami grafitowego stopera wiązki. Obecność Na-22 wynika z kolei z aktywacji znajdującego się w hali doświadczalnej w dużych ilościach aluminium (najpewniej główną rolę odgrywała tu aktywacja neutronowa), natomiast Mn-54 jest rezultatem aktywacji stali.

W drugim pomiarze (19.01) oprócz naturalnie występujących radionuklidów zaobserwowano sztuczne izotopy Mn-54 oraz Co-56 (prawdopodobnie będące efektem aktywacji głównie stali).

Warto nadmienić, iż dwa z wyżej wymienionych izotopów, Be-7 i Na-22, są izotopami, które mogą być w ogólności również pochodzenia naturalnego, istnieje bowiem możliwość ich powstania wskutek oddziaływania promieniowania kosmicznego z atomami obecnymi w ziemskiej atmosferze (Be-7 jest produkowany w wyniku spalacji atomów tlenu i azotu, natomiast Na-22 przy spalacji atomów argonu [93]). W tym jednak przypadku wykluczono możliwość ich naturalnego pochodzenia, ponieważ przy pomiarze tła promieniowania gamma w takiej samej geometrii i o tym samym czasie trwania, ale w innych miejscach IFJ PAN (np. pokoje LER nr 3201 i 3105 – patrz rozdział 8.1.2), nie stwierdzono w ogóle ich śladów w analizowanych widmach gamma-spektrometrycznych.

W Tabeli 33 zawarto wzbudzone radionuklidy, których obecność stwierdzono w zarejestrowanych widmach wraz z ich najważniejszymi własnościami oraz częstościami

zliczeń ich najbardziej intensywnych linii. Dla porównania przedstawiono w niej częstość zliczeń w pikie pochodzącym od naturalnie występującego izotopu K-40.

Tabela 33. Częstość zliczeń w najbardziej intensywnych liniach izotopów, których obecność została stwierdzona podczas spektrometrycznych pomiarów tła w hali doświadczalnej

Izotop	Okres półrozpadu	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń [cpm]	
			15.01.2019	19.01.2019
Be-7	53 d	477,6	2,43 (32)	-
Na-22	2,6 y	1274,5	3,38 (20)	-
Mn-54	313 d	834,8	2,09 (25)	2,75 (12)
Co-56	77 d	846,8	-	0,52 (8)
anihil.	-	511,0	24,7 (5)	2,06 (13)
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ y	1460,8	71,7 (5)	3,92 (13)

Aktywność zarejestrowanych sztucznie wyprodukowanych izotopów promieniotwórczych była w obu przypadkach relatywnie niska, na co wskazuje zdecydowanie większa częstość zliczeń w pikie pochodzącym od naturalnego izotopu K-40 od częstości zliczeń w pikach tychże sztucznie wygenerowanych izotopów. Na tej podstawie można stwierdzić, iż promieniotwórczość wzbudzona w hali doświadczalnej CCB znajduje się na stosunkowo niskim poziomie, zwłaszcza w porównaniu do hali radioterapii oka czy też hali cyklotronu.

8.4.2 Długotrwałe pomiary mocy dawki w hali doświadczalnej

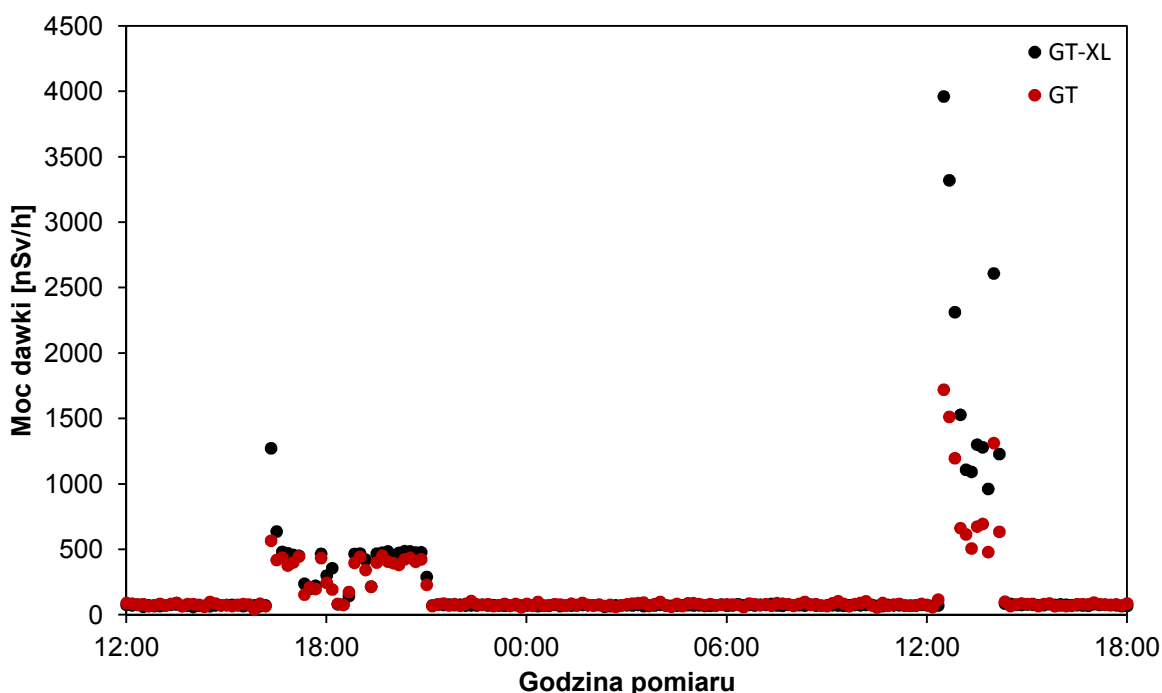
W przypadku długotrwałych pomiarów mocy dawki (realizowanych w dniach 04.05 – 14.05) wykorzystano oba mierniki (GT oraz GT-XL). Miernik GT-XL został umieszczony na siatce ograniczającej dostęp do jonowodu, w pobliżu magnesu wspomnianego w poprzednim podrozdziale. Miernik GT zainstalowano po drugiej stronie jonowodu.

Mierzone wartości mocy dawki w czasie braku wiązki były niskie i mieściły się w zakresach 65 – 80 nSv/h oraz 55 – 100 nSv/h, odpowiednio dla mierników GT-XL i GT.

W przeciągu całego 10-dniowego pomiaru oba mierniki zarejestrowały dwa przypadki nagłych wzrostów mocy dawki. Nastąpiło to kolejno 09.05 w godzinach ok. 16:20 – 21:00 i 10.05.2018 w godzinach ok. 12:30 – 14:10. Pierwszy z nich związany był z obecnością wiązki na hali doświadczalnej, natomiast drugi z wykorzystaniem wiązki w hali terapii oka. Dzieje się tak, ponieważ dostarczenie wiązki protonów do hali terapii oka wiąże się z jej wcześniejszym częściowym poprowadzeniem przez halę doświadczalną. Tam jej tor zostaje

zakrzywiony przy użyciu jednego z magnesów i dopiero wtedy prowadzona jest ona do stanowiska terapii oka znajdującego się bezpośrednio za ścianą hali eksperymentalnej.

Na Rysunku 43 zawarto wskazania mocy dawki w zależności od czasu dla obu mierników GT-XL oraz GT.

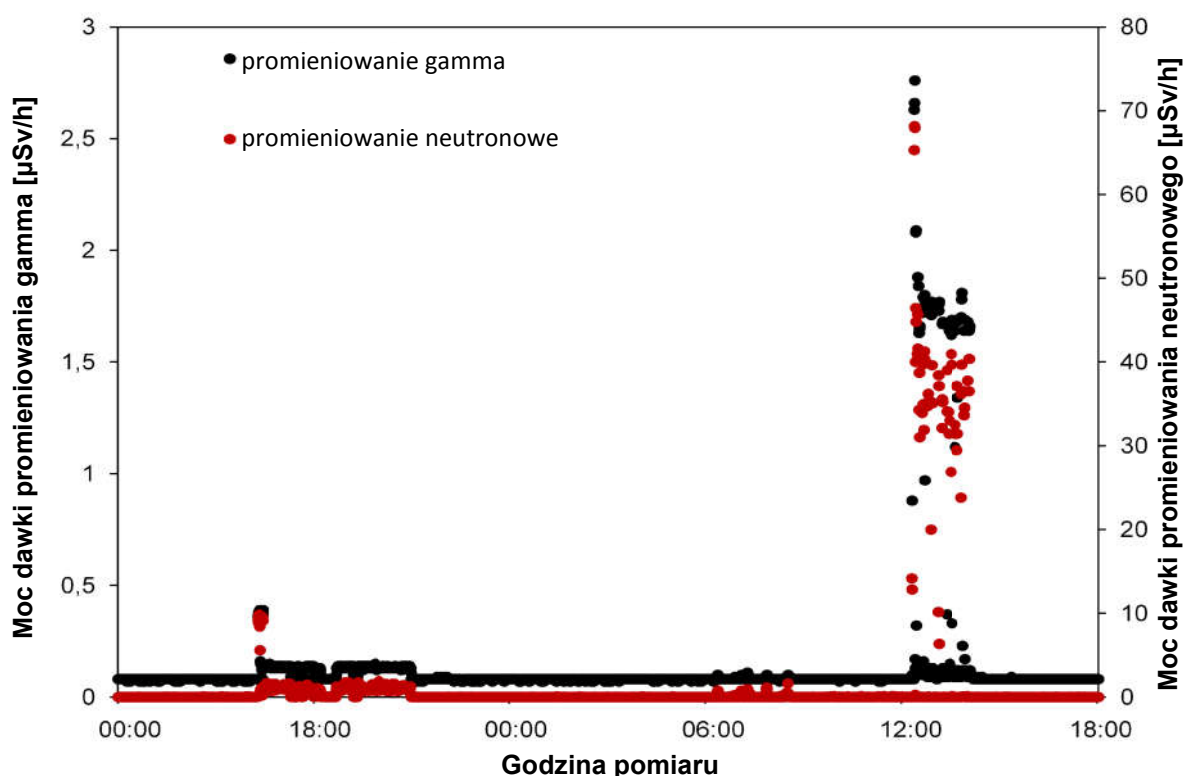


Rysunek 43. Moc dawki promieniowania gamma zarejestrowana przez mierniki GT oraz GT-XL w hali doświadczalnej CCB na przestrzeni dwóch dni (09-10.05.2018). Widoczne wzrosty poziomu mocy dawki związane były z wykorzystaniem wiązki protonów kolejno w hali doświadczalnej i hali radioterapii oka

W przypadkach obu mierników większy wzrost mocy dawki zaobserwowano za drugim razem, kiedy to wiązka poprowadzona została do pokoju terapii oka. W pierwszym przypadku maksymalne wartości zarejestrowanej mocy dawki przez mierniki GT-XL i GT wyniosły odpowiednio 1272 nSv/h i 566 nSv/h. Również w przypadku drugiego wzrostu mocy dawki miernik GT-XL zarejestrował jej ponad dwukrotnie wyższą maksymalną wartość niż GT. Dla obu mierników te maksymalne wskazania mocy dawki w sytuacji poprowadzenia wiązki na halę radioterapii oka wyniosły odpowiednio 3960 nSv/h dla GT-XL oraz 1720 nSv/h dla GT. Wydaje się, iż rejestrowanie w tych pomiarach przez GT-XL wyższych wartości mocy dawki w porównaniu z GT można łatwo wytłumaczyć faktem, iż miernik GT-XL znajdował się zdecydowanie bliżej jonowodu oraz magnesów zakrzywiających wiązkę w kierunku hali terapii oka niż miernik GT.

Powyższe wyniki porównano ze wskazaniami sond promieniowania gamma oraz neutronowej znajdujących się przy wejściu w hali doświadczalnej. Na Rysunku 44 zawarto

wskazania mocy dawki promieniowania gamma oraz neutronowego zarejestrowane przez te sondy w zależności od czasu.

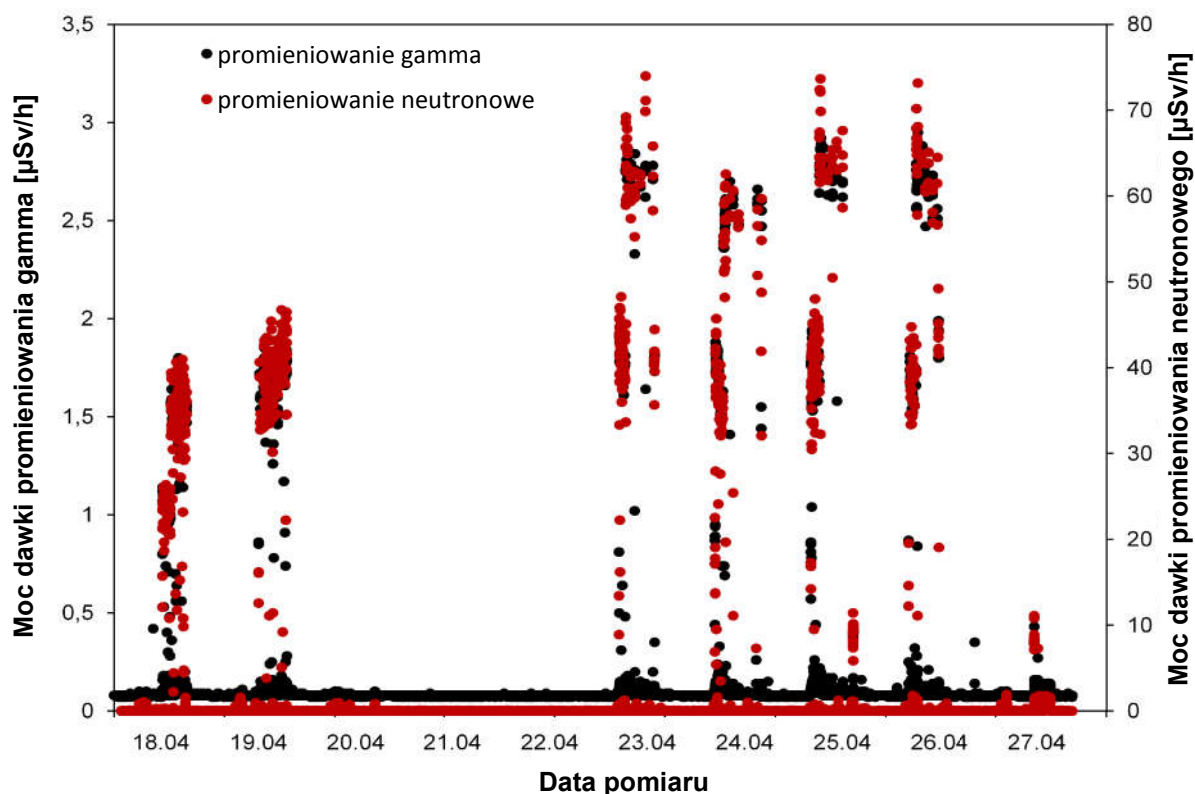


Rysunek 44. Moc dawki promieniowania gamma i promieniowania neutronowego zarejestrowana przez sondy stacjonarne znajdujące się w hali doświadczalnej CCB na przestrzeni dwóch dni (09-10.05.2018). Widoczne wzrosty poziomu mocy dawki związane były z wykorzystaniem wiązki protonów kolejno w hali doświadczalnej i hali radioterapii oka

W przypadku stacjonarnych sond w hali doświadczalnej zaobserwowano bardzo podobną zależność jak dla mierników GT oraz GT-XL. Po pierwsze, średnia wartość mocy dawki promieniowania gamma w czasie braku wiązki wynosiła około 80 nSv/h. W tym czasie moc dawki promieniowania neutronowego była równa zero, ponieważ neutrony generowane są tylko wtedy, gdy wiązka jest włączona. Ponadto, wzrost mocy dawki był większy w momencie poprowadzenia wiązki na halę terapii oka, niż gdy użyto jej w samej hali eksperymentalnej. Maksymalne wartości zarejestrowanej mocy dawki podczas pierwszego wzrostu wyniosły dla promieniowania gamma i promieniowania neutronowego odpowiednio 0,39 $\mu\text{Sv/h}$ i 9,84 $\mu\text{Sv/h}$. Z kolei podczas prowadzenia wiązki na halę radioterapii oka maksymalne wartości zarejestrowanej mocy dawki dla promieniowania gamma i neutronowego wyniosły kolejno 2,76 $\mu\text{Sv/h}$ i 68,2 $\mu\text{Sv/h}$. Ilościowe porównywanie wyników sondy stacjonarnej gamma ze wskazaniami mierników GT oraz GT-XL nie wydaje

się zasadne, z uwagi na fakt, iż przyrządy te były zlokalizowane podczas pomiarów w zupełnie innych miejscach hali doświadczalnej.

Podobny charakter zmienności wartości mocy dawki rejestrowanej przez stacjonarne sondy w hali doświadczalnej stwierdzono również analizując dane z innego okresu pomiarowego, tj. 18.04 – 27.04.2019. Mianowicie, przy wyłączonej wiązce moc dawki promieniowania gamma wynosiła ok. 80 nSv/h (0 nSv/h dla promieniowania neutronowego). Zarejestrowano podwyższone wskazania w momencie, gdy wiązka pojawiała się w hali doświadczalnej lub była prowadzona do hali terapii oka. Wzrosty wartości mocy dawki, czy to promieniowania gamma czy neutronowego, były zawsze kilkukrotnie wyższe w przypadku wykorzystywania wiązki na stanowisku terapii oka (wskazania z dni 18-19.04 oraz 23-26.04) niż w hali eksperymentalnej (wskazania z 27.04). Powyższe zależności można zaobserwować wyraźnie na Rysunku 45, na którym zawarto wskazania mocy dawki promieniowania gamma oraz neutronowego zarejestrowane przez sondy stacjonarne w hali doświadczalnej w okresie 18.04 - 27.04.2019 (ograniczono się do czasu, w którym wiązka była obecna bądź to w hali doświadczalnej, bądź to w hali terapii oka) w zależności od czasu.



Rysunek 45. Moc dawki promieniowania gamma i promieniowania neutronowego zarejestrowana przez sondy stacjonarne znajdujące się w hali doświadczalnej CCB na przestrzeni kilkunastu dni (18-27.04.2019). Widoczne wzrosty poziomu mocy dawki związane są z wykorzystywaniem wiązki protonów w hali radioterapii oka (18-19.04 i 23-26.04) lub hali doświadczalnej (27.04)

Moc dawki promieniowania gamma na poziomie 3 – 4 $\mu\text{Sv/h}$ oraz promieniowania neutronowego rzędu 70 – 80 $\mu\text{Sv/h}$ są wskazaniem wysokimi, znacznie przekraczającymi poziom tła. Trzeba jednak pamiętać o tym, iż są to wartości występujące w momencie, gdy wiązka protonowa jest włączona i wejście do hali doświadczalnej nie jest wówczas możliwe. Staje się ono dozwolone dopiero, gdy wartości mocy dawki spadną już do dopuszczalnego poziomu. Promieniowanie neutronowe ustaje praktycznie natychmiast po wyłączeniu wiązki, w związku z czym moc dawki tego promieniowania maleje niemal momentalnie do zera. W przypadku kwantów gamma, emisja tzw. natychmiastowego promieniowania gamma (patrz rozdział 2.1.2) również gwałtownie zanika, a jedyny wkład do podwyższonego poziomu mocy dawki może mieć emisja kwantów gamma przez izotopy wzbudzone. Na podstawie ww. pomiarów stwierdzono jednak, że ich zawartość we wszelkich komponentach systemu transportu wiązki i pozostałych materiałach znajdujących się w hali doświadczalnej jest na tyle niewielka, iż nie stanowi żadnego zagrożenia pod kątem radiologicznym.

8.5 Otoczenie budynku CCB

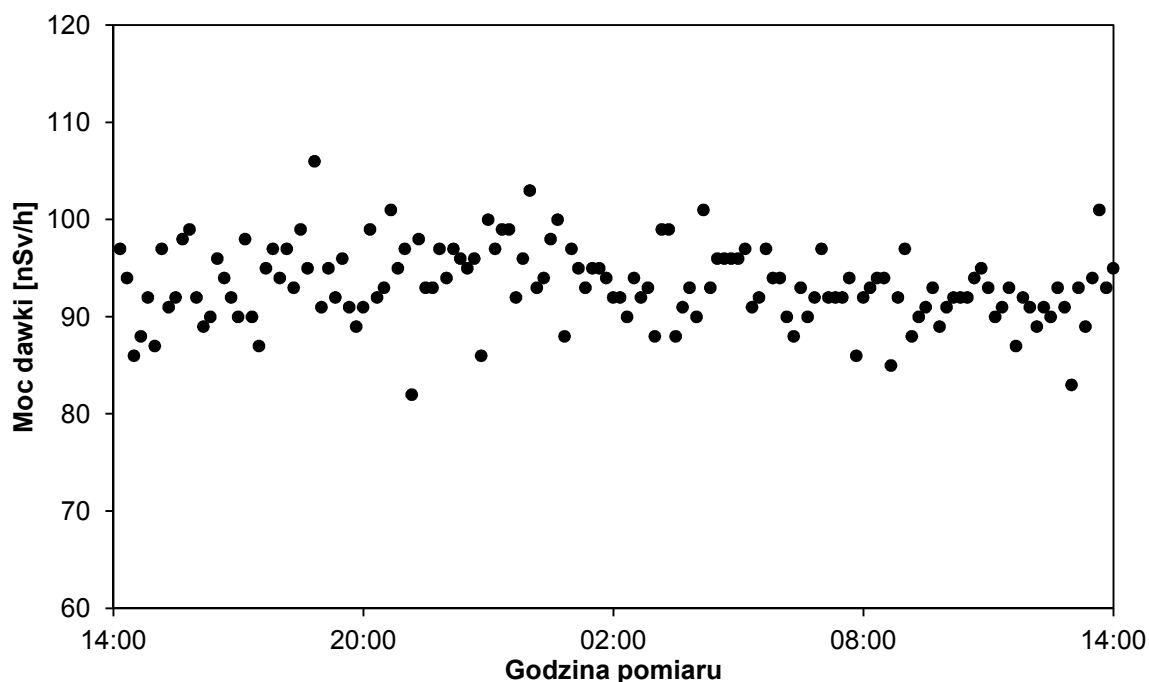
Celem ustalenia poziomu odniesienia dla pomiarów wykonanych we wnętrzu budynku CCB oraz sprawdzenia czy promieniotwórczość wzbudzona wewnątrz placówki ma jakiś wpływ na otoczenie zewnętrzne (a jeśli tak, to jak duży), przeprowadzono serię pomiarów mocy dawki promieniowania gamma przy użyciu mierników GT i GT-XL oraz gamma-spektrometrycznych w najbliższym otoczeniu budynku CCB.

8.5.1 Pomiary mocy dawki

Przeprowadzono dwie serie pomiarów mocy dawki na zewnątrz budynku CCB. Pierwsza z nich miała miejsce 17.11.2017 i trwała około jednej doby, druga przebiegała na przestrzeni kilku dni, w okresie 4-12.12.2017. W obu przypadkach miernik GT-XL umieszczony był przy ścianie budynku na jego północno-wschodnim narożu, natomiast miernik GT znajdował się przy północnej ścianie budynku, pomiędzy dwoma stanowiskami gantry. Na miejsca pomiarów wybrano akurat te lokalizacje, ponieważ to właśnie w północnej części budynku CCB znajduje się cyklotron, cały system transportu wiązki, a także stanowiska gantry, radioterapii oka oraz hala doświadczalna. W związku z powyższym ewentualne podwyższenie mocy dawki promieniowania gamma w stosunku do poziomu naturalnego tła powinno z największym prawdopodobieństwem wystąpić właśnie od północnej strony budynku.

W przypadku każdego z pomiarów zarejestrowana moc dawki promieniowania gamma na zewnątrz placówki CCB w obu miejscach mieściła się w zakresie 80 – 110 nSv/h, co jest

typowym wskazaniem mocy dawki promieniowania gamma w Polsce [88]. Na Rysunku 46 zawarto wskazania miernika GT-XL z jednej doby pomiarowej, obejmującej przedział czasu od godziny 14:00 dnia 07.12 do godziny 14:00 dnia następnego. Cyklotron standardowo dostarczał w tym okresie wiązkę protonową każdego dnia od około godz. 7:00 do godz. 16:00.



Rysunek 46. Moc dawki promieniowania gamma zarejestrowana na zewnątrz budynku CCB w zależności od czasu w dniach 07.12.2017 i 08.12.2017

8.5.2 Pomiary gamma-spektrometryczne

W ramach pracy przeprowadzono dwa pomiary gamma-spektrometryczne na zewnątrz budynku CCB (w jego pobliżu) oraz jeden pomiar porównawczy, również na zewnątrz, ale w pobliżu innego budynku na terenie IFJ PAN. Pierwszy przeprowadzono przy wschodniej ścianie budynku na wysokości położenia cyklotronu. Drugi pomiar przeprowadzono przy północnej ścianie budynku, na wysokości położenia prostego odcinka jonowodu pomiędzy halą cyklotronu a halą doświadczalną. W tym miejscu ściana budynku CCB jest najcieńsza (biorąc pod uwagę północno-wschodnią część budynku gdzie zlokalizowany jest cyklotron i hale doświadczalna oraz terapii). Pomiar porównawczy przeprowadzono przy północnej ścianie budynku nr 3 IFJ PAN. W każdym z tych trzech pomiarów detektor znajdował się w ołowianej osłonie z założonym kolimatorem 90° i zwrócony był do ściany danego budynku, a odległość czoła detektora od ściany wynosiła 40 cm.

Na podstawie analizy widm zebranych w pomiarach gamma-spektrometrycznych przeprowadzonych na zewnątrz budynku CCB, nie stwierdzono tam obecności izotopów promieniotwórczych innych niż te naturalnie występujące w materiałach budowlanych i glebie. W Tabeli 34 zawarto częstości zliczeń w największych pikach pojawiających się w tychże widmach. Dla odniesienia podano również te wartości dla widma porównawczego, zebranego w pobliżu budynku nr 3 IFJ PAN.

Tabela 34. Częstości zliczeń w wybranych liniach emitowanych przez naturalnie występujące izotopy gamma-promieniotwórcze zarejestrowane podczas pomiarów spektrometrycznych w różnych miejscach na zewnątrz budynku CCB oraz w pobliżu budynku nr 3 na terenie IFJ PAN. Przy symbolu izotopu podano w nawiasie prekursora naturalnego szeregu promieniotwórczego, do którego należy dany izotop (o ile takowy istnieje)

Izotop	Okres półrozpadu	Energia linii [keV]	Częstość zliczeń [cpm]		
			przy wschodniej ścianie	przy północnej ścianie	przy budynku nr 3
Pb-214 (U-238)	26,8 min	351,9	5,9 (6)	5,3 (4)	7,3 (6)
pik anihilacyjny	-	511,0	4,0 (5)	3,8 (4)	6,9 (4)
Bi-214 (U-238)	19,9 min	609,3	5,2 (4)	5,9 (3)	9,1 (4)
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ y	1460,8	12,6 (4)	12,9 (4)	27,6 (5)
Bi-214 (U-238)	19,9 min	1764,5	1,9 (2)	1,7 (1)	3,0 (2)
Tl-208 (Th-232)	3,05 min	2614,5	2,8 (2)	2,5 (2)	5,9 (2)

Można zauważyć, że częstości zliczeń we wszystkich pikach są dla obu pomiarów przy budynku CCB porównywalne do siebie i dla każdego izotopu są to jednocześnie częstości mniejsze niż w przypadku pomiaru gamma-spektrometrycznego przy budynku nr 3. Jest tak, ponieważ grube ściany budynku CCB stanowią dla detektora HPGe osłonę przed docierającym z jednej ze stron promieniowaniem gamma pochodzenia naturalnego (emitowanym przez naturalne izotopy zawarte w glebie i kwanty gamma promieniowania kosmicznego).

9. Podsumowanie i wnioski

Głównym celem niniejszej pracy było zbadanie promieniotwórczości wzbudzonej w różnych komponentach środowiska CCB-IFJ PAN, będącej efektem rutynowego działania cyklotronu Proteus C-235.

Realizacja tego celu wymagała ustalenia możliwych kanałów reakcji jądrowych prowadzących do powstania izotopów w oddziaływaniach różnych materiałów z protonami i neutronami oraz opracowania odpowiedniej metodyki pomiarowej umożliwiającej identyfikację powstających izotopów oraz analizę ilościową wyników. Konieczne było wykonanie pomiarów gamma-spektrometrycznych wybranych elementów systemu zarządzania wiązką (BMS, ang. *Beam Management System*) oraz elementów wykorzystywanych do prowadzenia terapii. W ramach realizacji pracy zostały opracowane pliki kalibracyjne dla typowych geometrii pomiarowych elementów systemu BMS występujących w CCB. Pliki te mogą być wykorzystane w kolejnych pomiarach służących badaniu dynamiki zmian promieniotwórczości wzbudzonej na terenie CCB. Realizacji celu pracy służyła także analiza wyników pomiarów mocy dawki promieniowania gamma w wybranych miejscach w budynku CCB oraz w jego najbliższym otoczeniu, które uzupełniono o wskazania stacjonarnych sond dozymetrycznych znajdujących się w CCB.

W rozdziale 6. pracy dokonano przeglądu prac naukowych traktujących o tematyce promieniotwórczości wzbudzonej występującej w innych jednostkach stosujących techniki akceleratorowe, czy to w celach eksperymentalnych, czy medycznych. Generacja izotopów promieniotwórczych na skutek rutynowego użytkowania wiązki jonowej (w tym protonowej) jest nieuchronnym procesem towarzyszącym działaniu placówek wykorzystujących standardowo wszelkiego rodzaju akceleratory, w tym cyklotrony. Dodatkowo, analiza wyników pomiarów gamma-spektrometrycznych przeprowadzonych przez Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych IFJ PAN (LER IFJ PAN) w 2013 roku w hali doświadczalnej oraz hali cyklotronu CCB ([76]) potwierdziła, że zjawisko promieniotwórczości wzbudzonej jest obecne również w CCB - IFJ PAN i może mieć ono istotne znaczenie w kontekście ochrony radiologicznej.

Zauważono, że obiektami, które w największym stopniu podatne są na powstawanie w nich nowych izotopów promieniotwórczych podczas działania cyklotronu, są elementy znajdujące się bezpośrednio na torze wiązki protonów. Produkcja radionuklidów następuje w nich przede wszystkim wskutek reakcji jądrowych protonów penetrujących dany materiał z jądrami atomów tego materiału. Częstym produktem takich interakcji są wtórne neutrony,

które w dalszej kolejności również mają niepomijalny udział we wzbudzaniu izotopów promieniotwórczych – podobnie jak protony, także poprzez reakcje z jądrami atomowymi przenikane go ośrodka (rozdział 5.4). Co więcej, neutrony stanowiąc znacznie bardziej przenikliwy typ promieniowania w stosunku do protonów, są zdolne do aktywacji materiałów znajdujących się nawet poza najbliższym otoczeniem wiązki protonowej.

Nowopowstałe izotopy promieniotwórcze w środowisku cyklotronu Proteus C-235 w CCB - IFJ PAN najczęściej podlegają rozpadom beta minus, beta plus lub wychytowi elektronu i rozpadom tym towarzyszy zwykle również emisja promieniowania gamma. Wybór spektrometrii promieniowania gamma jako metody przeznaczonej do identyfikacji wzbudzonych radionuklidów oraz określenia ich rozmieszczenia i ilości wydawał się z tego powodu jak najbardziej zasadny. Dodatkowe rozszerzenie metodyki badawczej o pomiary radiometryczne dobrze dopełniało się z techniką spektrometrii promieniowania gamma i uzupełniło obraz poziomów radioaktywności w CCB - IFJ PAN.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy, z podziałem ze względu na miejsce ich wykonania, przedstawiono poniżej:

a) hala radioterapii oka

W hali radioterapii oka przeprowadzono początkowo trzy serie pomiarów gamma-spektrometrycznych oraz pomiarów mocy dawki promieniowania gamma stanowiska radioterapii jako całości. Pierwszą serię realizowano bezpośrednio po zakończeniu rutynowych testów tygodniowych z wykorzystaniem wiązki w hali terapii oka, kolejne dwie odbywały się po zakończeniu naświetlania pacjentów jeszcze tego samego dnia.

Maksymalna początkowa wartość mocy dawki wynosiła 256 nSv/h i została zmierzona po około 10 minutach od momentu ostatniego dostarczenia wiązki protonów do hali. Jej wartość obniżyła się do poziomu 100 nSv/h po około 15 – 19 godzinach (Rysunek 20). W pozostałych przypadkach początkowo rejestrowana wartość mocy dawki była niższa, (156 – 250 nSv/h) i spadała poniżej 100 nSv/h po 5 – 7 godzinach (Rysunki 19, 21). Na podstawie tych wyników stwierdzono, iż moc dawki promieniowania gamma w otoczeniu stanowiska radioterapii oka w CCB - IFJ PAN bezpośrednio po zakończeniu użytkowania wiązki nieznacznie przekracza średnią moc dawki promieniowania gamma pochodzącą od tła naturalnego w Polsce (89 nSv/h) i osiąga w przybliżeniu jej wartość z reguły już po upływie kilku godzin.

Pomiary gamma-spektrometryczne wykazały obecność szeregu sztucznie powstałych izotopów na skutek oddziaływania materiału stanowiska z wiązką protonów oraz potencjalnie

z wtórnymi neutronami. Wśród zarejestrowanych nowopowstałych nuklidów można było wyróżnić izotopy berylu, sodu, kobaltu, manganu, miedzi, cynku czy galu (Tabele 12 – 14). Wyznaczono częstość zliczeń dla ich najbardziej intensywnych linii obecnych w zebranych widmach, która w większości przypadków wynosiła kilka cpm (poniżej częstości zliczeń w pikach naturalnie występującego izotopu K-40). Wyższą wartość stwierdzono jedynie w przypadku trzeciej serii pomiarowej dla izotopów Mn-56, Cu-61 (najwyższa zarejestrowana wartość: 20,7 cpm) i Zn-62. Wszystkie z nich są jednak izotopami krótkożyciowymi (o okresie półrozpadu rzędu kilku godzin), a zatem częstości zliczeń w odpowiadających im pikach szybko się zmniejszały. W każdym przypadku zarejestrowano natomiast wysoką częstość zliczeń (247 – 495 cpm) w pikach anihilacyjnych (511 keV), co wynika z faktu, że pewna część wzbudzonych radionuklidów ulega rozpadowi beta plus, a te zawsze emitują kwanty gamma o energii 511 keV.

W hali radioterapii oka przeprowadzono także pomiary tła promieniowania gamma. Odbyły się one w dniu, gdy wiązka była ostatni raz użytkowana w hali trzy dni wcześniej. W ramach badania tła wykonano pomiary w 7 różnych punktach hali terapii oka (Rysunek 23). Moce dawki promieniowania gamma były w każdym z punktów niskie i mieściły się w zakresie 60 – 120 nSv/h.

Pomiary gamma spektrometryczne wykazały w niektórych punktach obecność sztucznie powstałych izotopów berylu, sodu, kobaltu, manganu i cynku, jednak częstości zliczeń ich najbardziej intensywnych linii, a także linii anihilacyjnej, były mniejsze niż częstość zliczeń dla linii izotopu K-40 (Tabela 16).

Ponadto, wykonano osobne pomiary mocy dawki i spektrometryczne dla trzech elementów stanowiska, które mają w trakcie jego użytkowania bezpośredni kontakt z wiązką protonową: kolimator techniczny, modulator zasięgu oraz stoper wiązki. Dla każdego z nich pomiary wykonywano w miarę możliwości bezpośrednio jak najszybciej po zakończeniu ich użytkowania danego dnia na stanowisku radioterapii oka.

W mosiężnym kolimatorze technicznym stwierdzono obecność izotopów kobaltu, manganu, miedzi, cynku, galu oraz pierwiastków ciężkich, jak ołów czy bizmut (Tabela 17). W pierwszym z zarejestrowanych widm największą aktywnością charakteryzowały się krótkożyciowe izotopy Cu-61 (95 kBq) i Zn-63 (141 kBq), a także Cu-60, Zn-62, Ga-66 (wszystkie około 10 kBq) – Tabela 18. Były to bardzo duże aktywności, które jednak z uwagi na krótki okres półrozpadu rozpatrywanych radionuklidów stosunkowo szybko malały w czasie. W kolimatorze stwierdzono również obecność izotopów o relatywnie długim czasie

połowicznego zaniku: Co-56, Co-57, Co-58 i Zn-65. Ich aktywności wynosiły kilkadziesiąt – kilkaset Bq, największą z nich charakteryzował się Zn-65 (972 Bq) – Tabela 19.

Początkowa moc dawki promieniowania gamma przy powierzchni kolimatora wynosiła 18,8 $\mu\text{Sv/h}$. Jej wartość szybko malała, po trzech godzinach osiągnęła 3,9 $\mu\text{Sv/h}$, po 24 godzinach wynosiła 0,7 $\mu\text{Sv/h}$, natomiast po upływie kolejnych 72 godzin była ona na poziomie 0,25 $\mu\text{Sv/h}$ (Rysunek 24). Takie wyniki świadczą o dużym udziale izotopów krótkożyciowych w całkowitej promieniotwórczości wzbudzonej w kolimatorze (wysoka początkowa moc dawki i jej szybkie opadanie w czasie) oraz o zauważalnym wkładzie izotopów długożyciowych (długotrwałe utrzymywanie się mocy dawki na nieco podwyższonym poziomie).

W modulatorze zasięgu oraz stoperze wiązki znaleziono podobne izotopy (Be-7, C-11, N-13 oraz Be-7, C-11 odpowiednio dla modulatora i stopera – Tabele 20 i 22). Aktywność Be-7 w modulatorze zasięgu i w stoperze wiązki mieściła się odpowiednio w zakresach 862 – 971 Bq (Tabela 21) oraz 2039 – 3528 Bq (Tabela 23). W przypadku stopera wiązki oszacowana aktywność izotopu C-11 wynosiła początkowo 15,67 kBq, jednak z uwagi na krótki okres półrozpadu tego izotopu (20,4 min), po upływie 2,5 godziny obniżyła się do poziomu 113 Bq (Tabela 24).

Moc dawki promieniowania gamma przy powierzchni modulatora zasięgu wynosiła początkowo 10,3 $\mu\text{Sv/h}$, po upływie około 70 – 80 minut spadła dziesięciokrotnie, natomiast po upływie trzech godzin była już niższa niż 0,2 $\mu\text{Sv/h}$ (Rysunek 27). Początkowa wartość mocy dawki w odległości kilkunastu cm od stopera wiązki wynosiła zaledwie 126 nSv/h i osiągnęła poziom tła, który w hali radioterapii oka mieści się w zakresie 70 – 80 nSv/h, po upływie około 4 – 5 godzin (Rysunek 29). Takie wyniki świadczą o największym wkładzie izotopów krótkożyciowych (głównie C-11) w całkowitą aktywność obu tych elementów.

Elementami charakteryzującymi się największą ilością wzbudzonych izotopów promieniotwórczych w hali radioterapii oka są kolimator techniczny, modulator zasięgu oraz stoper wiązki.

b) pokoje gantry

W pokojach gantry przeprowadzono dwa rodzaje pomiarów mocy dawki oraz spektrometrii promieniowania gamma. Pierwszy z nich stanowił pomiar stanowiska radioterapii wykonany bezpośrednio po zakończeniu naświetlania pacjentów. Wykorzystywany tego dnia zmieniacz zasięgu został przed rozpoczęciem pomiarów zdjęty ze stanowiska. Zarejestrowana moc

dawki mieściła się w zakresie 50 – 100 nSv/h, ze średnią wartością niższą niż tło naturalne w Polsce.

Pomiary gamma-spektrometryczne wykazały obecność sztucznie powstałych izotopów: Be-7, Na-22, Mn-52, Mn-54, Mn-56 i Co-56 (Tabela 25). Największą częstość zliczeń (1,8 cpm) stwierdzono w pikie pochodzącym od Be-7. Dla pozostałych nuklidów częstości zliczeń były mniejsze niż 1 cpm. Były to relatywnie niskie wartości, gdyż dla K-40 wynosiła ona 5,4 cpm. Stosunkowo wysoką częstość zliczeń ponownie zarejestrowano w przypadku pikii anihilacyjnego (22,3 cpm). Zaobserwowano jednakże jej szybki spadek, co potwierdza, iż największy udział w pikii anihilacyjnym miały kwanty gamma emitowane przez izotopy krótkożyciowe (głównie C-11).

Drugi pomiar w pokoju gantry obejmował pomiary mocy dawki i gamma-spektrometryczne poliwęglanowego zmiennicza zasięgu – demontowalnego elementu znajdującego się podczas terapii na wyjściu głowicy, mającego w przypadku napromieniania płytkich guzów bezpośredni kontakt z wiązką protonów. Pomiary wykonano po rutynowym dniu terapii pacjentów, podczas którego wykorzystywany był również zmiennicz zasięgu.

W zmienniczu zasięgu stwierdzono obecność izotopów Be-7 oraz C-11 (Tabela 26). Aktywność Be-7 była stosunkowo wysoka (11,8 – 13,8 kBq) - Tabela 27. Początkowa wysoka aktywność C-11 (390 kBq) po upływie dwóch godzin obniżyła się do poziomu 10 kBq (Tabela 28).

Początkowa wartość mocy dawki promieniowania gamma przy powierzchni zmiennicza zasięgu wynosiła 9,88 μ Sv/h. Po upływie dwóch godzin zmalała do poziomu ok. 0,5 μ Sv/h, po czym nie obserwowano już jej dalszego zauważalnego spadku (Rysunek 32). Taki charakter zmienności mocy dawki promieniowania gamma emitowanego przez zmiennicz zasięgu był zgodny z wynikami pomiarów spektrometrycznych – największy wkład w promieniotwórczość wzbudzoną w zmienniczu zasięgu bezpośrednio po zakończeniu jego użytkowania na stanowisku terapii ma izotop C-11, a wraz z upływem czasu i jego rozpadem, dominować zaczyna izotop Be-7.

Elementem charakteryzującym się największą zawartością wzbudzonych izotopów promieniotwórczych w pokojach gantry są wykorzystywane w terapii zmiennicze zasięgu.

c) hala cyklotronu

Pierwszymi pomiarami w hali cyklotronu były pomiary mocy dawki oraz spektrometrii gamma w jej dwóch punktach: w pobliżu degradera energii wiązki i w północno-wschodnim

rogu hali. Pomiary wykonywano podczas przerwy serwisowej w pracy cyklotronu, choć wiązka protonowa była aktywna wcześniej jeszcze tego samego dnia, w którym wykonywano pomiary.

Początkowa wartość mocy dawki zmierzona w pobliżu degradera wynosiła niemal 28 $\mu\text{Sv/h}$. Jej wartość zmalała do 20 $\mu\text{Sv/h}$ dopiero po upływie prawie 16 godzin (Rysunek 33). Moc dawki w rogu hali cyklotronu była znacznie niższa, jej początkowa wartość 1584 nSv/h po upływie 4,5 godzin powoli zmalała do wartości poniżej 1500 nSv/h (Rysunek 34).

Pomiary gamma-spektrometryczne w pobliżu degradera wykazały w nim obecność następujących nuklidów: Be-7, Na-22, Na-24. W jego najbliższym otoczeniu zarejestrowano również izotopy skandu, manganu, kobaltu, niklu oraz cynku. Ich oszacowane aktywności przyjmowały bardzo wysokie wartości, dla izotopów Be-7, Mn-56, Co-56, Co-58, Ni-57 były one rzędu kilkuset MBq, a w przypadku Mn-54 mogła ona przekroczyć nawet 2 GBq. Szacunkowe aktywności pozostałych izotopów mieściły się w zakresie kilku-kilkudziesięciu MBq (Tabela 29).

W pomiarach spektrometrycznych przeprowadzonych w rogu hali stwierdzono obecność tych samych izotopów, co w pobliżu degradera oraz dodatkowo zarejestrowano izotopy Cr-51, Fe-59 i Sb-124. Aktywność większości z nich była na poziomie kilku MBq, a zatem znacznie mniej niż w przypadku pomiaru w pobliżu degradera. Aktywność izotopów Cr-51, Co-56 i Zn-65 mogła przekroczyć 10 MBq, natomiast największą aktywnością, potencjalnie przekraczającą 50 MBq, charakteryzował się ponownie izotop Mn-54 (Tabela 30).

Degrader energii wiązki oraz jego najbliższe otoczenie stanowią obszar odznaczający się najwyższą zawartością promieniotwórczości wzbudzonej w całym CCB - IFJ PAN.

Kolejnymi pomiarami wykonanymi w hali cyklotronu były długotrwałe (trwające niemal cały miesiąc) pomiary mocy dawki promieniowania gamma. Miernik GT-XL umieszczono bezpośrednio obok sondy stacjonarnej T 2-4 ulokowanej przy wschodniej ścianie hali w pobliżu degradera. Miernik GT zainstalowano w północno-wschodnim rogu hali, w odległości kilku metrów od kolejnej sondy stacjonarnej zlokalizowanej na wschodniej ścianie, sondy T 2-5. Wskazania obu stacjonarnych sond stanowiły dane porównawcze dla wartości zmierzonych przez mierniki GT i GT-XL.

Wszystkie cztery urządzenia pomiarowe zarejestrowały podobny charakter zmienności mocy dawki promieniowania gamma w hali cyklotronu. Jej wartość znacznie wzrastała w czasie użytkowania wiązki protonowej, natomiast gdy wiązka była wyłączona,

każdorazowo rejestrowano jej eksponencjalny spadek związany z rozpadem promieniotwórczym wzbudzonych w hali cyklotronu radionuklidów.

W czasie, gdy wiązka była włączona, GT-XL rejestrował wzrosty mocy dawki do wartości rzędu nawet kilku tysięcy $\mu\text{Sv/h}$. Przy wyłączonej wiązce mierzona moc dawki osiągała wartości rzędu kilkunastu – kilkudziesięciu $\mu\text{Sv/h}$ (Rysunek 35). Wskazania sondy stacjonarnej T 2-4 były niższe (2 – 4 razy dla włączonej wiązki, 10 razy w okresie wyłączonej wiązki) - Rysunek 36. Ta rozbieżność związana była z faktem, iż miernik GT-XL ulegał znacznie większej aktywacji przez wtórne neutrony niż sondy stacjonarne w hali cyklotronu.

Wszystkie rejestracje zmian mocy dawki potwierdzają wcześniejsze obserwacje, iż degrader wraz z jego najbliższym otoczeniem jest obszarem charakteryzującym się największą ilością promieniotwórczości wzbudzonej w całym CCB - IFJ PAN.

Ostatnimi pomiarami wykonanymi w hali cyklotronu były długotrwałe (trwające od kilku tygodni do kilku miesięcy) pomiary aktywacyjne, w których badano promieniotwórczość wzbudzoną w próbkach miedzi, stali nierdzewnej, aluminium oraz betonu na skutek oddziaływania wtórnych neutronów z tymi materiałami podczas rutynowego działania cyklotronu. Pomiary podzielono na trzy serie, w dwóch z nich próbki znajdowały się w pobliżu degradera (pomiar 1-miesięczny oraz 5-miesięczny), natomiast w trzeciej były one umieszczone w pobliżu jonowodu w północno-wschodnim rogu hali cyklotronu (pomiar 6-miesięczny). W obu przypadkach odległość próbek od jonowodu wynosiła 0,88 m.

Początkowa moc dawki przy powierzchni badanych próbek wynosiła maksymalnie ponad 4 $\mu\text{Sv/h}$ (miedź, pomiar 1-miesięczny), dla pozostałych próbek i serii pomiarowych była to wartość około 1 $\mu\text{Sv/h}$. Dla każdej z nich notowano spadek mocy dawki z czasem, przy czym następował on szybciej w przypadku próbek aluminium oraz betonu (Rysunki 38 – 40). Dla miedzi oraz stali wartość mocy dawki utrzymywała się na nieco podwyższonym poziomie przez dłuższy czas, co wskazywało na obecność w tych próbkach większej ilości długożyciowych izotopów promieniotwórczych w porównaniu do aluminium oraz betonu.

Obserwacje te potwierdziły również rezultaty pomiarów gamma-spektrometrycznych. W pierwszej kolejności wykazały one obecność w badanych próbkach metali oraz betonu bardzo wielu różnych sztucznie wygenerowanych izotopów (Tabela 31a,b,c,d). Próbki naświetlane w pobliżu degradera charakteryzowały się wyższą aktywnością zawartych w nich wzbudzonych radionuklidów niż te eksponowane na neutrony w rogu hali. Aktywności większości izotopów były stosunkowo niewielkie, rzędu kilku – kilkudziesięciu Bq (Tabela 32a,b,c,d). W przypadku nielicznych izotopów ich aktywności dla próbek naświetlanych w pobliżu degradera przekraczały 1 kBq, np. Co-58 w miedzi, Cr-51 w stali

czy też Be-7 i Mn-56 w betonie. Największą wartość, przekraczającą początkowo 57 kBq, zarejestrowano dla izotopu Cu-64 w próbkach miedzi. Z uwagi na relatywnie krótki okres półrozpadu tego izotopu (12,7 h) wartość ta po kilku dniach była już na poziomie porównywalnym z aktywnością pozostałych izotopów.

Dla próbek metalu z 1-miesięcznej serii pomiarowej wykonano także pomiary rozkładu głębokościowego aktywności zawartych w nich wzbudzonych izotopów promieniotwórczych. Dla większości izotopów wraz ze wzrostem głębokości aktywność danego izotopu w badanym materiale malała (Rysunki 42a,b,c). Zauważono jednak pewne odstępstwa od tej reguły, mianowicie w przypadku izotopów Mn-54 i Fe-59 w miedzi oraz Mn-54, Fe-59 i Cr-51 w stali nierdzewnej zauważono nagły wzrost ich aktywności w najgłębszej z analizowanych warstw.

Wtórne neutrony oddziałujące z materiałami znajdującymi się dookoła jonowodu mogą prowadzić w nich do powstawania promieniotwórczości wzbudzonej o dość zróżnicowanym profilu głębokościowym aktywności.

d) hala doświadczalna

Pierwsze dwa pomiary w hali doświadczalnej stanowiły pomiary obecnego tam tła promieniowania gamma (pomiary mocy dawki oraz spektrometryczne). Bezpośrednio przed tymi pomiarami wiązka protonowa była wykorzystywana w hali doświadczalnej około dwa miesiące wcześniej. Pomiary różniły się ustawieniem detektora HPGe, w pierwszym z nich był on nieosłonięty i znajdował się na osi pomiędzy punktem wyjścia wiązki z jonowodu a stoperem wiązki, natomiast w drugim przypadku znajdował się on w kolimatorze i zwrócony był w stronę jednego z pobliskich magnesów skupiających wiązkę.

Moc dawki promieniowania gamma w obu przypadkach zawierała się w zakresie 75 – 90 nSv/h, co stanowi wartość niższą niż moc dawki rejestrowana na zewnątrz budynku CCB. Wynika to z osłonności ścian budynku CCB przed zewnętrznym promieniowaniem gamma pochodzenia naturalnego.

Pomiary gamma spektrometryczne wykazały obecność sztucznie wygenerowanych izotopów Be-7, Na-22, Mn-54 i Co-56 jednakże ich zawartości we wszelkich materiałach obecnych w hali doświadczalnej były stosunkowo niewielkie, gdyż w przypadku żadnego z nich częstość zliczeń dla jego najbardziej intensywnej linii (maksimum 3,38 cpm dla Na-22) nie przekroczyła częstości zliczeń w pikcie pochodzącym od naturalnego izotopu K-40 (Tabela 33).

W hali doświadczalnej przeprowadzono również 10-dniowe pomiary mocy dawki promieniowania gamma. Wiązka protonowa w tym okresie była wykorzystana jeden raz w hali doświadczalnej, a drugi raz w hali radioterapii oka, przy czym część jonowodu dostarczającego tam wiązkę przechodzi przez halę doświadczalną. W obu sytuacjach zarejestrowano podwyższone wartości mocy dawki: wzrost do 1,27 $\mu\text{Sv/h}$ w przypadku wykorzystania wiązki w hali doświadczalnej oraz do 3,96 $\mu\text{Sv/h}$, gdy kierowana była ona do hali radioterapii oka (Rysunek 43). Podobną zależność zarejestrowała stacjonarna sonda w hali doświadczalnej. Sonda neutronowa w tej hali również wskazała wzrosty mocy dawki promieniowania neutronowego od 0 $\mu\text{Sv/h}$ w momencie braku wiązki (brak wówczas wtórnych neutronów) do wartości rzędu 2,76 $\mu\text{Sv/h}$ i 68,2 $\mu\text{Sv/h}$ w przypadku wykorzystywania wiązki odpowiednio w hali doświadczalnej i hali radioterapii oka (Rysunek 44). Wzrosty wartości mocy dawki promieniowania gamma i neutronowego były zawsze kilkakrotnie wyższe w przypadku wykorzystywania wiązki na stanowisku terapii oka (odpowiednio 3 $\mu\text{Sv/h}$ i 70 $\mu\text{Sv/h}$), niż gdy była ona kierowana do hali eksperymentalnej – Rysunek 45.

W przypadku braku obecności wiązki w hali doświadczalnej i hali radioterapii oka, poziom mocy dawki w hali doświadczalnej jest niższy niż na zewnątrz budynku CCB, natomiast podczas użytkowania wiązki w tych dwóch miejscach następują jej krótkotrwałe wzrosty do wyższych wartości.

e) otoczenie budynku CCB - IFJ PAN

Celem ustalenia poziomu odniesienia dla pomiarów wykonanych wewnątrz budynku CCB oraz sprawdzenia czy promieniotwórczość wzbudzona ma wpływ na jego otoczenie przeprowadzono serię dwóch pomiarów mocy dawki promieniowania gamma oraz gamma-spektrometrycznych w najbliższym otoczeniu budynku CCB.

Moc dawki mieściła się w zakresie 90 – 100 nSv/h (Rysunek 46), co jest typowym poziomem naturalnego tła promieniowania gamma w Polsce.

W pomiarach gamma-spektrometrycznych stwierdzono obecność jedynie naturalnie występujących radionuklidów. Częstości zliczeń dla najbardziej intensywnych linii zarejestrowanych naturalnych izotopów były w obu przypadkach porównywalne do siebie i jednocześnie mniejsze niż częstości tych samych linii w porównawczym widmie zebrany w analogiczny sposób w pobliżu budynku nr 3 na terenie IFJ PAN (Tabela 34).

Działalność CCB - IFJ PAN nie powoduje wzrostu mocy dawki promieniowania gamma na zewnątrz budynku CCB. Promieniowanie gamma emitowane przez izotopy

wzbudzone wewnątrz i w ścianach zewnętrznych budynku nie jest rejestrowane w jego otoczeniu. Nie obserwuje się także aktywacji neutronowej materiałów poza budynkiem CCB.

Można dodatkowo sformułować poniższe wnioski:

1. Zjawisko wzbudzania promieniotwórczości jest procesem, który nieuchronnie towarzyszy działaniu placówek wykorzystujących techniki akceleratorowe i ma miejsce również w CCB - IFJ PAN. Promieniotwórczość wzbudzona odgrywa niepomijalną rolę w aspekcie ochrony radiologicznej na terenie CCB - IFJ PAN.
2. Wykonując analogiczne pomiary w innych tego typu instytucjach, warto zwrócić w kontekście promieniotwórczości wzbudzonej szczególną uwagę na wszelkie elementy mające bezpośredni kontakt z wiązką jonową – najprawdopodobniej to one będą charakteryzowały się największą aktywnością. W przypadku CCB - IFJ PAN były to przede wszystkim degrader energii wiązki (hala cyklotronu), modulator zasięgu, kolimator techniczny, stoper wiązki (hala radioterapii oka) oraz zmieniacz zasięgu (pokój gantry).
3. Niepomijalny udział w generowaniu nowych izotopów promieniotwórczych ma wtórne promieniowanie neutronowe. Może ono prowadzić do wzbudzania sztucznych radionuklidów w materiałach nie znajdujących się bezpośrednio na torze wiązki jonowej, a nawet w tych znajdujących się poza jej bliskim otoczeniem.
4. W przypadku większości aktywowanych materiałów (przez protony lub neutrony), w okresie bezpośrednio po ich aktywacji dominują w nich izotopy krótkożyciowe – to one w głównej mierze odpowiadają za początkową wysoką aktywność tych materiałów i wysoką moc dawki emitowanego przez nie promieniowania gamma. Jest to szczególnie widoczne w przypadku często stosowanych w tego typu placówkach lekkich materiałów, składających się z wodoru, węgla i tlenu (np. PMMA, grafit, parafina itp.). Wraz z upływem czasu główny udział w promieniotwórczości wzbudzonej w tych materiałach zaczynają mieć izotopy o stosunkowo długim okresie półrozpadu.
5. Obecność izotopów długożyciowych w aktywowanych materiałach jest szczególnie istotna w dłuższej perspektywie czasowej. Ich aktywność, w zależności od ich okresu półrozpadu, kumuluje się w różnych materiałach nawet przez kilka – kilkadziesiąt lat. Może mieć to duże znaczenie w kontekście zakończenia działania danej placówki akceleratorowej czy też przeznaczenia jej budynku na inne cele. Warto wówczas zwrócić uwagę na zawartość długożyciowych izotopów promieniotwórczych na

przykład w betonie budującym ściany, wszelkich elementach wyposażenia budynku obecnych tam od początków jego działania itp.

6. Podczas wykonywania analogicznych pomiarów warto mieć na uwadze możliwość wzbudzenia promieniotwórczości w samych urządzeniach pomiarowych. Ryzyko to istnieje przede wszystkim w trakcie wykonywania pomiarów w okresie włączonej wiązki jonowej. Oprócz samej aktywacji danego urządzenia, w niektórych przypadkach możliwe jest wręcz jego uszkodzenie czy pogorszenie jego parametrów. Duże strumienie neutronów mają destruktywny wpływ na strukturę kryształu germanowego detektora półprzewodnikowego HPGe, powszechnie stosowanego w tego typu pomiarach. Prowadzi to do obniżenia jakości rejestrowanych przez niego widm.
7. Poziom rejestrowanej promieniotwórczości naturalnej wewnątrz placówek akceleratorowych, gdzie na potrzeby ochrony radiologicznej wykorzystuje się grube ściany, może być niższy niż na zewnątrz budynku (takie zjawisko zaobserwowano w przypadku CCB - IFJ PAN).
8. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy mogą być kontynuowane i rozszerzone o pomiary aktywacji powietrza oraz o pomiary aktywacji wody stosowanej w obiegu w celach chłodniczych. Dotyczy to zarówno CCB - IFJ PAN, jak i innych tego typu obiektów.

Literatura

- [1] Jaffray, D. A., Gospodarowicz, M. K. (2015). Chapter 14: Radiation therapy for cancer. W: Gelband, H., Jha, P., Sankaranarayanan, R., Horton, S. (red.) *Cancer* (s. 239-248). Washington (DC).
- [2] The American Cancer Society (2017). *External Beam Radiation Therapy*. Pobrane z: <https://www.cancer.org/treatment/treatments-and-side-effects/treatment-types/radiation/external-beam-radiation-therapy.html> (dostęp: 01.08.2018).
- [3] Liu, H., Chang, J. Y. (2011). Proton therapy in clinical practice. *Chinese Journal of Cancer*, 30(5), 316-325.
- [4] Particle Therapy Co-Operative Group (2020). *Particle therapy facilities in clinical operation*. Pobrane z: <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation> (dostęp: 15.01.2020).
- [5] Centrum Cyklotronowe Bronowice (2020). *Radioterapia protonowa*. Pobrane z: https://ccb.ifj.edu.pl/pl.dla_medycyny.html (dostęp: 21.09.2019).
- [6] NIST (2018). CODATA Internationally recommended 2018 values of the Fundamental Physical Constants. Pobrane z: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (dostęp: 22.12.2019).
- [7] Bichsel, H. (1968). Chapter 4: Charged Particles Interactions. W: Attix, F. H., Roesch, W. C. (red.) *Radiation Dosimetry Second Edition, Volume I: Fundamentals* (s. 157-228). Academic Press.
- [8] ICRU (1998). Proton interactions with matter. W: ICRU Report 59, *Clinical Proton Dosimetry Part I: Beam Production, Beam Delivery and Measurement of Absorbed Dose* (s. 13-14).
- [9] Newhauser, W. D., Zhang, R. (2015). The physics of proton therapy. *Phys Med Biol.*, 60(8), R155-R209.
- [10] ICRU (1992). Electronic (Collision) Stopping Powers from Bethe's Theory. W: ICRU Report 49, *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles* (s. 6-17).
- [11] Brookhaven National Laboratory (2019). III. Technical Data. Bragg Curves and Peaks. Pobrane z: <https://www.bnl.gov/nsrl/userguide/bragg-curves-and-peaks.php> (dostęp: 22.12.2019).
- [12] Breuer, H. Smit, B. J. (2000). Chapter C: Interaction of Protons with Matter. W: Breuer, H. Smit, B. J. *Proton Therapy and Radiosurgery* (s. 21-53). Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- [13] Moliere, G. (1948). Theory of the scattering of fast charged particles. 2. Repeated and multiple scattering. *Z. Naturforsch.*, A3, 78-97.
- [14] Mumot, M. (2008). Opracowanie uproszczonej metody obliczeń i pomiarów dawek w radioterapii protonowej 70-250 MeV oraz porównanie otrzymanych rozkładów dawek z rozkładami dla promieniowania fotonowego/elektronowego (4-25 MV/3-25 MeV),

w wybranych przypadkach klinicznych. Praca doktorska, Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu.

- [15] Shinohara, E. (2016). *Module 2: The Physics of Proton Therapy*. Pobrane z: <https://www.oncolink.org/healthcare-professionals/oncolink-university/proton-therapy-professional-education/oncolink-proton-education-modules/module-2-the-physics-of-proton-therapy> (dostęp: 25.06.2019).
- [16] Polf, J. C., Peterson, S., Ciangaru, G., Gillin, M., Beddar, S. (2009). Prompt gamma-ray emission from biological tissues during proton irradiation: a preliminary study. *Phys. Med. Biol.*, 54(3), 731-743.
- [17] Koning, A. J. (2019). TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology. *Nucl. Data Sheets*, 155, 1.
- [18] Janni, J. F. (1982). Energy loss, range, path length, time-of-flight, straggling, multiple scattering, and nuclear interaction probability. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 27, 147-339.
- [19] Seltzer, S. M. (1993). An Assessment of the Role of Charged Secondaries from Nonelastic Nuclear Interactions by Therapy Proton Beams in Water. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR).
- [20] Nuclear Power (2019). Classification of free neutrons according to kinetic energies. Pobrane z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/neutron/neutron-energy/> (dostęp: 17.03.2019).
- [21] Foldy, L. L. (1958). Neutron-Electron Interaction. *Rev. Mod. Phys.*, 30(2), 471-481.
- [22] Martin, J. E. (2013). Nuclear Interactions. W: Martin, J. E. *Physics for Radiation Protection* (s. 98-100). Wiley-VCH.
- [23] Ahmed, S. N. (2014). Interaction of neutral particles with matter. W: Ahmed, S. N. *Physics and Engineering of Radiation Detection* (s. 146-155).
- [24] Rinard, P. (1991). Neutron Interactions with Matter. W: Reilly, D., Ensslin, N., Smith Jr., H. (red.) *Passive Non-destructive Assay of Nuclear Materials* (s. 357-377). Washington (DC).
- [25] Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. (2001). Interaction of radiation with matter. W: Lamarsh, J. R., Baratta, A. J. *Introduction to Nuclear Engineering* (s. 52-116). Prentice-Hall, Inc.
- [26] IAEA Nuclear Data Service (2019). Live Chart of Nuclides. Pobrane z: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (dostęp: 19.02.2019).
- [27] Kaiba, T. (2014). Determination of neutron induced nuclear cross sections by time-of-flight measurements. Seminar, University of Ljubljana.
- [28] Nuclear Data Center at KAERI (2019). Table of Nuclides. Pobrane z: <http://atom.kaeri.re.kr/nuchart/> (dostęp: 28.11.2019).
- [29] Shibata, K. et al. (2011). JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. *J. Nucl. Sci. Technol.* 48(1), 1-30.

- [30] Stichelbaut, F., Jongen, Y. (2013). *Radiation Protection Studies for Proton Therapy Centres*. Prezentacja podczas: BVS-ABR Symposium, 10.04.2013.
- [31] Chu, S. Y. F., Ekström, L. P., Firestone, R. B. (1999). The Lund/LBNL Nuclear Data Search. Z: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/> (dostęp: 12.09.2019).
- [32] Amsler, C. et al. (2008). The Review of Particle Physics. *Phys. Lett. B*, B667, 1.
- [33] Attix, F. H. (1986). Gamma- and X-ray interactions in matter. W: Attix, F. H., *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Wiley-VCH.
- [34] Moore, C. I., Knauer, J. P., Meyerhofer, D. D. (1995). Observation of the Transition from Thomson to Compton Scattering in Multiphoton Interactions with Low-Energy Electrons. *Phys. Rev. Lett.*, 74(13), 2439-2442.
- [35] Davisson, C. M. (1968). Interaction of γ -radiation with matter. W: Siegbahn, K. (red.) *Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy* (s. 37-78). North Holland.
- [36] Schumacher, M. (1999). Delbrück scattering. *Radiat. Phys. Chem.*, 56, 101-111.
- [37] Gilmore, G. R. (2008). Interactions of Gamma Radiation with Matter. W: Gilmore, G. R. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. John Wiley & Sons.
- [38] NIST (2019). Element/Compound/Mixture Selection. Z: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (dostęp: 14.12.2019).
- [39] Choppin, G., Liljenzin, J., Rydberg, J., Ekberg, C. (2013). Chapter 7 – Absorption of Nuclear Radiation. W: Choppin, G., Liljenzin, J., Rydberg, J., Ekberg, C. *Radiochemistry and Nuclear Chemistry* (s. 163-208). Academic Press.
- [40] Musiałowicz, T. (2016). Ochrona Radiologiczna Encyklopedyczny Słownik Angielsko Polski. CLOR, Warszawa.
- [41] ICRP (2007). Quantities Used in Radiological Protection. W: ICRP Publication 103, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* (s. 61-80).
- [42] Moens, L. et al. (1981). Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries. *Nucl. Instrum. Methods*, 187, 451-472.
- [43] Lépy, M. C. (2001). Intercomparison of efficiency transfer software for gamma-ray spectrometry. *Appl. Radiat. Isot.*, 55, 493-503.
- [44] Environmental Measurements Laboratory (1997). Procedures Manual of the EML, U.S. Department of Energy Report HASL-300, Nowy Jork.
- [45] Guguła, S. (2015). Szybka spektrometria gamma in situ z zastosowaniem przenośnego spektrometru z detektorem scyntylicyjnym. Praca magisterska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- [46] Dybczyński, R. (2001). Zastosowania analizy aktywacyjnej. W: Raport Polskiego Towarzystwa Nukleonowego (PTN--5/2001).
- [47] IBA. System terapii protonowej. Podręcznik konserwacji dla Instytutu Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN w Krakowie. Tom 1 – Opis systemu.

- [48] Anferov, V. (2003). Energy degrader optimization for medical beam lines. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 496, 222-227.
- [49] Jette, D., Chen, W. (2011). Creating a spread-out Bragg peak in proton beams. *Phys. Med. Biol.*, 56, N131-N138.
- [50] Swakoń, J. (2019). Zastosowanie wiązek z cyklotronów AIC-144 i Proteus C-235 do radioterapii protonowej nowotworów oka w IFJ PAN. Rozprawa habilitacyjna, Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. ISBN 978-83-63542-06-1 (2019). Pobrane z: <https://www.ifj.edu.pl/badania/publikacje/monografie-habilitacje/2019/Swakon.pdf> (dostęp: 18.12.2019).
- [51] U.S. National Library of Medicine (2019). ChemIDplus: Lexan. Pobrane z: <https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/rn/24936-68-3> (dostęp: 04.12.2019).
- [52] Barbier, M. (1963). Induced radioactivity in accelerators. Intern. Conf. on Accelerators for charged particles, Dubna.
- [53] Barbier, M. (1969). Induced radioactivity. North Holland.
- [54] IAEA (1974). Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections, Technical Reports Series No. 156.
- [55] IAEA (1987). Handbook on Nuclear Activation Data, Technical Reports Series No. 273.
- [56] Brown, D. A. et al. (2018). ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data. *Nucl. Data Sheets* 148, 1.
- [57] Soppera, N. et al. (2014). JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System. *Nucl. Data Sheets*, 120, 294-296.
- [58] IAEA (1988). Radiological Safety Aspects of the Operation of Proton Accelerators, Technical Reports Series No. 283.
- [59] Sullivan, A. H. (1992). A Guide to Radiation and Radioactivity Levels Near High Energy Particle Accelerators. Nuclear Technology Publishing.
- [60] Mukherjee, B., Khachan, J. (2007). Component Activation of a High Current Radioisotope Production Medical Cyclotron. 18th International Conference on Cyclotrons and Their Applications Proceedings (s. 119-121).
- [61] Carbonez, P., La Torre, F. P., Michaud, R., Silari, M. (2012). Residual radioactivity at the CERN 600 MeV synchro-cyclotron. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 694, 234-245.
- [62] Polaczek-Grelik, K., Karaczyn, B., Konefał, A. (2012). Nuclear reactions in linear medical accelerators and their exposure consequences. *Appl. Radiat. Isot.*, 70, 2332-2339.
- [63] Fujibuchi, T. et al. (2017). Evaluation of the distribution of activation inside a compact medical cyclotron. *Appl. Radiat. Isot.*, 124, 27-31.
- [64] Konefał, A., Orlef, A., Bieniasiewicz, M. (2016). Measurements of neutron radiation and induced radioactivity for the new medical linear accelerator, the Varian TrueBeam. *Radiat. Meas.*, 86, 8-15.

- [65] Mukherjee, B. (1997). Decay Characteristics of the Induced Radioactivity in the Target Cave of a Medical Cyclotron. *Appl. Radiat. Isot.*, 48(6), 735-738.
- [66] Dodd, A. C., Shackelton, R. J., Carr, D. A., Ismail, A. (2017). Activation of Air and Concrete in Medical Isotope Production Facilities. AIP Conference Proceedings, 1845, 020006.
- [67] Bezshyyko, O. A., Golinka-Bezshyyko, L. O., Kadenko, I. M. (2009). Argon Activation in Air at Medical Cyclotron RDS Eclipse During Production of ^{18}F . *Nucl. Phys. Inves.*, 52, 37-39.
- [68] La Torre, F. P. (2014). Study of induced radioactivity in proton accelerator facilities. PhD thesis, CERN.
- [69] Kum, O. (2018). Chapter 5: Nuclear Safety Study of High Energy Heavy-ion Medical Accelerator Facility. W: Ahmad, I. (red.) *Accelerator Physics – Radiation Safety and Applications* (s. 97-121). IntechOpen.
- [70] Martinez-Serrano, J. J., Diez de los Rios, A. (2010). Prediction of neutron induced radioactivity in the concrete walls of a PET cyclotron vault room with MCNPX. *Med. Phys.*, 37(11), 6015-6021.
- [71] Eggermont, G. X., Buls, N., Hermanne, A. (1996). Decommissioning Analysis of a University Cyclotron. International Congress on Radiation Protection Proceedings, 3, 338-343.
- [72] Cesana, A., Mauro, E., Silari, M. (2010). Induced radioactivity in a patient-specific collimator used in proton therapy. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 268, 2272-2280.
- [73] O'Donnell, R. G., Leon Vintro, L., Duffy, G. J., Mitchell, P. I. (2004). Measurement of the residual radioactivity induced in the front foil of a target assembly in a modern medical cyclotron. *Appl. Radiat. Isot.*, 60, 539-542.
- [74] Mochizuki, S., Ishigure, N., Ogata, Y., Kobayashi, T. (2013). Analysis of induced radionuclides in replacement parts and liquid wastes in a medical cyclotron solely used for production of ^{18}F for [^{18}F]FDG. *Appl. Radiat. Isot.*, 74, 137-143.
- [75] Ipe, N. E. et al. (2010). Shielding Design and Radiation Safety of Charged Particle Therapy Facilities. PTCOG Report 1.
- [76] Męczyński, W., Kozak, K., Mazur, J., Grządziel, D., Mroczek, M. (2013). Pomiar tła neutronowego w hali doświadczalnej CCB. Prezentacja w Instytucie Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, 22.04.2013.
- [77] Zbroja, K. (2013). Raport z pomiarów dozymetrycznych wykonanych wokół bunkra cyklotronu Proteus C-235. Raport wewnętrzny IFJ PAN.
- [78] Polon-Alfa (2002). Radiometr RKP-2. Instrukcja obsługi IO-R113-001.
- [79] Buttler, W. (2011). *Radiation Quantities and Units*. Pobrane z: https://www.automess.de/Messgroessen_E.htm (dostęp: 11.07.2019).
- [80] Genitron Instruments GmbH (2006). Manual GammaTRACER Version 01/06.

- [81] Berthold Technologies (2011). Low Dose Rate - Gamma Probe LB 6360-H10 Data Sheet.
- [82] Berthold Technologies (2007). Neutron Probe LB 6411 Technical Data.
- [83] Canberra Industries, Inc. Cyfrowy analizator widma InSpector 2000 Model 1300. Podręcznik użytkownika.
- [84] Canberra Industries, Inc. (2013). Broszura Model ISOXSHLD ISOCS Shield Systems.
- [85] Canberra Industries, Inc. (2006). Genie 2000 Spectroscopy Software. Operations Manual.
- [86] Canberra Industries, Inc. Program kalibracyjny ISOCS Model S673. Podręcznik użytkownika.
- [87] Olko, P. (2014). *Centrum Cyklotronowe Bronowice*. Prezentacja podczas konferencji Nauka.Infrastruktura.Biznes, 13-15.10.2014.
- [88] Państwowa Agencja Atomistyki (2019). Rozkład mocy dawki promieniowania gamma w Polsce. Pobrane z: <http://www.paa.gov.pl/monitoring.html> (dostęp: 21.04.2019).
- [89] Zhang, J. et al. (2018). Evaluation of Proton Therapy Accuracy Using a PMMA Phantom and PET Prediction Module. *Front. Oncol.*, 8:523. s92
- [90] Borrel, V. et al. (1999). Fast neutron-induced damage in INTEGRAL n-type HPGe detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 430, 348-362.
- [91] WISE Uranium Project (2017). Neutron Activation Calculator. Z: <http://www.wise-uranium.org/rnac.html> (dostęp: 14.07.2019).
- [92] Žagar, T., Ravnik, M. (2000). Measurement of Neutron Activation in Concrete Samples. International Conference Nuclear Energy in Central Europe Proceedings.
- [93] Warner, F., Harrison, R. M. (1993). SCOPE 50 - Radioecology after Chernobyl. Wiley-VCH.