

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
Zespołowy projekt studencki II

DOZYMETRIA PROMIENIOWANIA
ALFA Z WYKORZYSTANIEM FILMÓW
RADIOCHROMOWYCH ORAZ KOLIMATORA

PATRYCJA CHUCHAŁA
PATRYCJA KAMIŃSKA
MAGDA OSTROWSKA
JOANNA SZCZECHOWSKA

Praca wykonana pod kierunkiem:
dr Beaty Brzozowskiej
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Zakład Fizyki Biomedycznej

17 maja 2022

Spis treści

1	Wprowadzenie	2
2	Wstęp teoretyczny	3
2.1	Charakterystyka promieniowania α	3
2.2	Kolimatory	3
2.3	Filmy radiochromowe	3
2.4	Druk 3D	4
3	Materiały i metody	5
3.1	Projekt układu pomiarowego	5
3.2	Źródło promieniowania α	6
3.3	Przeprowadzenie pomiarów	7
4	Wyniki i dyskusja	8
4.1	Oszacowanie mocy dawki	8
4.2	Pomiary dozymetryczne	9
5	Podsumowanie	15
	Bibliografia	17

Rozdział 1

Wprowadzenie

Celem Zespołowego Projektu Studenckiego było zaprojektowanie i wykonanie układu doświadczalnego, który miał zapewnić stałe położenie powierzchniowego źródła alfa (Am-241) oraz kolimatora. Z pomocą techniki druku 3D wykonany został element (dalej zwany trzymakiem), którego zadaniem była stabilizacja układu służącego do napromieniania celu. Układ został poddany weryfikacji dozymetrycznej poprzez użycie filmów radiochromowych. Filmy te pozwalają na pomiar rozkładu dawki, jaka zostaje zdeponowana w monowarstwie komórkowej. Układ doświadczalny został stworzony w celu przeprowadzania eksperymentów w Laboratorium Radiobiologicznym Zakładu Fizyki Biomedycznej, gdzie zostanie wykorzystany do napromieniania komórek ludzkich, w związku z czym należało zapewnić stabilne ułożenie źródła, by badania mogły cechować się powtarzalnością.

Rozdział 2

Wstęp teoretyczny

2.1 Charakterystyka promieniowania α

Promieniowanie α powstaje w wyniku emisji jąder atomu helu z niestabilnych jąder atomowych w promieniotwórczej przemianie jądrowej, która nazywana jest rozpadem alfa. Cząstki α składają się z dwóch protonów i dwóch neutronów, a ich całkowity ładunek jest dodatni. Promieniowanie α wykazuje zdolność jonizacji ośrodka, dlatego też jest jednym z przykładów promieniowania jonizującego. Charakteryzuje się tym, że jest silnie pochłaniane w tkankach. Należy zaznaczyć, że promieniowanie α wpływa na organizm, zwłaszcza wtedy gdy cząstki alfa dostaną się do organizmu drogą oddechową lub pokarmową. Promieniowanie alfa jest słabo przenikliwe, co oznacza, że ma mały zasięg.[1] Zasięg promieniowania α w powietrzu nie przekracza kilku centymetrów, natomiast w tkankach ułamków milimetra, dlatego też do jego zatrzymania wystarczy kartka papieru.[2]

2.2 Kolimatory

Kolimatory to urządzenia wykorzystywane do filtracji promieniowania, których zadaniem jest odrzucenie wiązek promieniowania padających na naświetlaną powierzchnię pod dużym kątem. Najczęściej spotykanym rodzajem kolimatorów są takie, w których otwory, w kształcie walca, wywiercone są w płaszczyźnie prostopadłej do ich powierzchni. Ze względu na wpływ kolimatora na parametry uzyskiwanego podczas napromieniania obrazu, jego grubość jest dobierana w zależności od wykonywanego badania. [3] Przyrządy te stosowane są również w badaniach radiobiologicznych.

2.3 Filmy radiochromowe

Filmy radiochromowe wykorzystywane są głównie do detekcji promieniowania X. Filmy radiochromowe to rodzaj detektorów pasywnych w postaci folii ulegającej zaciemnieniu pod wpływem promieniowania jonizującego, które jest proporcjonalne do dawki pochłoniętej, przy czym im wyższa dawka promieniowania, tym poziom zaczernienia staje się wyższy. W doświadczeniu wykorzystano filmy Gafchromic™ EBT 3. Model EBT 3 stosowany jest do wyznaczania krzywych dawka-głębokość dla wiązek fotonowych, elektronowych i jonowych [4].

2.4 Druk 3D

Drukowanie przestrzenne jest to metoda polegająca na warstwowym nakładaniu materiału budulcowego i jego selektywnym spajaniu. Umożliwia szybkie otrzymanie zaprojektowanego przez siebie, niemal dowolnego obiektu. Z tego powodu jest szeroko wykorzystywane w różnych dziedzinach naukowych, m.in. fizyce medycznej. Przykładowo, w radioterapii technologia druku 3D umożliwia lepszą dokładność dopasowania bolusa (materiał umieszczony bezpośrednio na skórze pacjenta kompensujący tkankę miękką, mający za zadanie zapewnienie większej jednorodności dawki promieniowania wokół zmiany nowotworowej) do anatomii pacjenta [5].

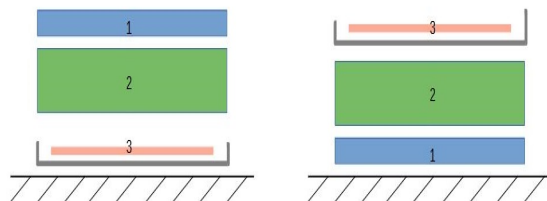
Opracowano wiele rodzajów druku przestrzennego, jednym z nich jest metoda Rapidprototypingu, jaką jest druk FDM/FFF (FDM jest nazwą handlową zastrzeżoną przez twórcę niniejszej technologii - firmę Stratasys) [6]. Metoda FFF polega na druku poprzez rozgrzewanie tworzywa sztucznego (filamentu), które dostarcza się w formie żyłki do głowicy drukującej. Warstwy półpłynnego filamentu nakładane są najpierw w płaszczyźnie XY. Po ukończeniu jednej warstwy, głowica podnosi się (lub stół roboczy się opuszcza) o wysokość warstwy i proces się powtarza. Tworzywo spaja się pod wpływem wysokiej temperatury i zastygając tworzy jednolitą strukturę [7].

Rozdział 3

Materialy i metody

3.1 Projekt układu pomiarowego

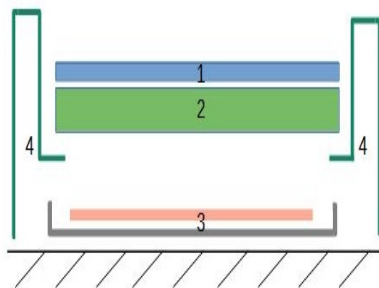
Zostały rozważone dwie metody napromieniania komórek - od dołu i od góry, schematycznie zaprezentowane na poniższym rysunku (Rysunek 3.1).



Rysunek 3.1: Schematy układów pomiarowych. Po lewej - metodą napromieniania od góry, po prawej - metodą od dołu, gdzie: 1 - źródło promieniowania alfa, 2 - kolimator, 3 - szalka z napromienianymi komórkami.

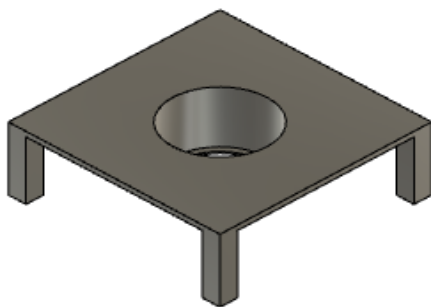
Metoda napromieniania komórek od dołu została odrzucona ze względu na znaczące obniżenie mocy dawki po przejściu przez denko szalki, na której będą znajdowały się komórki. Przyjęto więc metodę napromieniania od góry, do której niezbędne było zaprojektowanie i wykonanie przedmiotu utrzymującego kolimator oraz źródło promieniowania alfa nad komórkami (trzymaka).

Projekt trzymaka rozpoczęto od ustalenia niezbędnych wymiarów: średnicy studni (6,15 cm), głębokości studni (3,2 cm) oraz długości nóżek (3,5 cm). Niniejsze wymiary zależały od średnicy kolimatora i jego zakładanej odległości od napromienianych komórek (ok. 5 mm). Układ pomiarowy z uwzględnieniem zaprojektowanego trzymaka przedstawiono na Rysunku 3.2, gdzie: 1 - źródło promieniowania alfa, 2 - kolimator, 3 - napromieniane komórki, 4 - wydrukowany trzymak.



Rysunek 3.2: Schemat układu pomiarowego z wykorzystaniem trzymaka.

Projekt trzymaka zgodny ze schematem przedstawionym powyżej wykonano w programie Autodesk Fusion 360 i przedstawiono na Rysunku 3.3.



Rysunek 3.3: Projekt trzymaka.

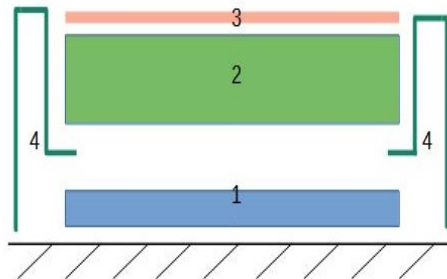
Następnie wydrukowano, za pomocą drukarki 3D, zaprojektowany trzymak i kolimator o grubości 0,5 cm. Do wydruku wykorzystano model drukarki Prusa Mk3S.

3.2 Źródło promieniowania α

Źródło użyte do przeprowadzenia pomiarów zostało wypożyczone ze Środowiskowego Laboratorium Ciężkich Jonów. Wykorzystany model źródła AM1AP1 0053U o aktywności 1,96 MBq został wyprodukowany przez firmę Eckert & Ziegler. Źródło ma kształt koła, którego średnica mierzy 5 cm, zaś grubość warstwy aktywnej wynosi 0,4 μm . Powierzchniowa aktywność źródła wynosi 100 kBq/cm² z niepewnością 3,5%. Średnia energia emitowanych prostopadle do źródła cząstek alfa wynosi 4,92 MeV. Źródło osłonięte jest warstwą złota o grubości 1 μm [8].

3.3 Przeprowadzenie pomiarów

Przed przystąpieniem do przeprowadzenia pomiarów wycięto trzy identyczne koła z filmu radiochromowego, których średnica była zbliżona do średnicy użytego kolimatora, tak aby filmy radiochromowe dało się położyć bezpośrednio na kolimatorze w studni trzymaka. Na Rysunku 3.4 przedstawiono schemat przekroju przez trzymak, gdzie: 1 - źródło promieniowania α , 2 - kolimator o grubości 0,5 cm, 3 - film radiochromowy, 4 - trzymak.



Rysunek 3.4: Zmodyfikowany schemat układu pomiarowego z wykorzystaniem trzymaka.

Układ pomiarowy składał się odpowiednio ze źródła promieniowania α , trzymaka, kolimatora oraz filmu radiochromowego. Zdjęcie przedstawiające układ pomiarowy ukazano na Rysunku 3.4

Przeprowadzenie każdego z pomiarów składało się z trzech etapów: ustawienie układu pomiarowego (rozpoczęcie pomiaru), demontaż układu pomiarowego oraz schowanie filmu w zaciemnionym miejscu (zakończenie pomiaru) oraz skanowania filmu radiochromowego po upływie 24 godzin od zakończenia pomiaru. Podczas skanowania filmów radiochromowych wykorzystano skaner Epson Expression 1200XL, rozdzielczość zdjęć ustawiono na 1200, natomiast skany zapisano w formacie tif.

Pomiar kontrolny oraz pierwszy właściwy pomiar przeprowadzono w tym samym czasie, przy czym film radiochromowy wykorzystany do pomiaru kontrolnego został umieszczony obok źródła powierzchniowego. Pierwsza seria pomiarów trwała 19 godzin i 10 minut. Natomiast czas trwania drugiego pomiaru wynosił 19 godzin.

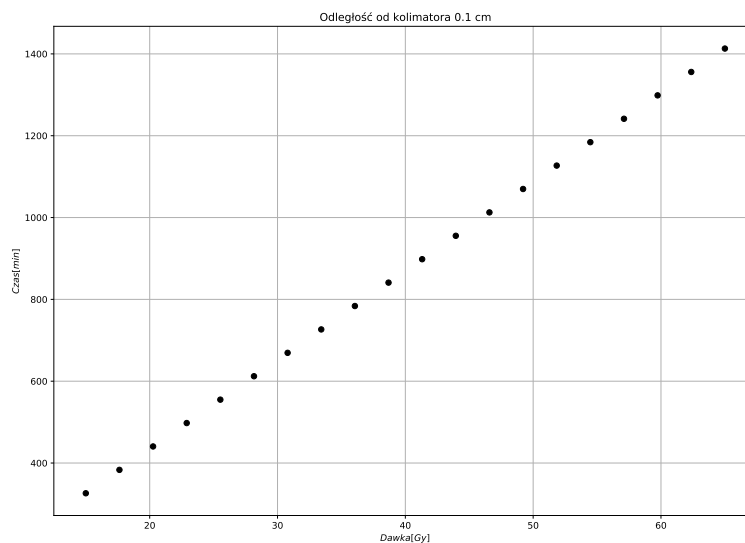
Rozdział 4

Wyniki i dyskusja

4.1 Oszacowanie mocy dawki

W celu obliczenia mocy dawki wykorzystano program SRIM [9]. Program ten pozwala na przeprowadzenie symulacji przejścia cząstek alfa przez warstwę absorbentu i otrzymanie energii jaka ostatecznie zostanie dostarczona do celu, w tym przypadku filmu radiochromowego, po przejściu przez absorbent. Po dokonaniu symulacji dla źródła o aktywności 1,96 MBq przy energii początkowej cząstek alfa wynoszącej 4920 keV otrzymano wyniki z energią końcową każdej cząstki, jaka dotarła do celu. Energię tę uśredniono, by w obliczeniach posługiwać się średnią energią cząstki alfa po przejściu przez 6 mm powietrza w badanym układzie pomiarowym. Energię tę wykorzystano do obliczenia dawki, jaka jest dostarczana przez jedną cząstkę alfa, a następnie za pomocą proporcji obliczono, ile cząstek jest potrzebnych by cel otrzymał dawkę wynoszącą 1 Gy. Dzięki temu możliwym stało się obliczenie czasu jaki potrzebny jest do naświetlenia celu wspomnianą dawką. Otrzymany czas wyniósł 8,03 s, co oznacza, iż moc dawki wynosi 7,92 nGy/s. Czas, jaki został otrzymany, jest bardzo krótki, wobec czego należy założyć, iż istnieją czynniki, które wpłynęły na otrzymany wynik. Należy uwzględnić fakt, iż do obliczeń została wykorzystana nominalna aktywność źródła, czyli 1,96 MBq, które emituje cząstki izotropowo. W układzie pomiarowym źródło to dostarcza promieniowanie tylko w obrębie kąta bryłowego, którego wierzchołek umiejscowiony jest na źródle, co w praktyce zmniejsza aktywność, która odpowiada za emitowane cząstki alfa. Kolejnym aspektem jest wpływ kolimatora, który przepuszcza wyłącznie prostopadle lecące cząstki. Należałoby również uwzględnić fakt, iż rozkład pochłanianej dawki dla cząstek alfa przyjmuje rozkład Poissona, nie jest to zaś rozkład jednorodny jak w przypadku promieniowania X. W dodatku, program SRIM traktuje źródło jako punktowe, zaś w projekcie zostało wykorzystane źródło powierzchniowe.

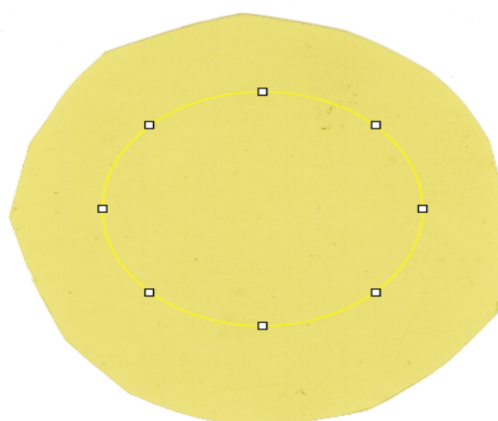
Wobec otrzymanych wyników podjęto decyzję, by skorzystać z innej metody obliczenia dawki przy pomocy programu Geant4 [10]. Dla odległości 1 mm od kolimatora moc dawki wynosi 0,046 Gy/min. Zależność ilości czasu, jaka potrzebna jest by dostarczyć daną dawkę została przedstawiona na Rysunku 4.1.



Rysunek 4.1: Wykres zależności czasu od dawki zdeponowanej w filmie radiochromowym po przejściu przez 0,1 cm warstwę powietrza od krawędzi kolimatora.

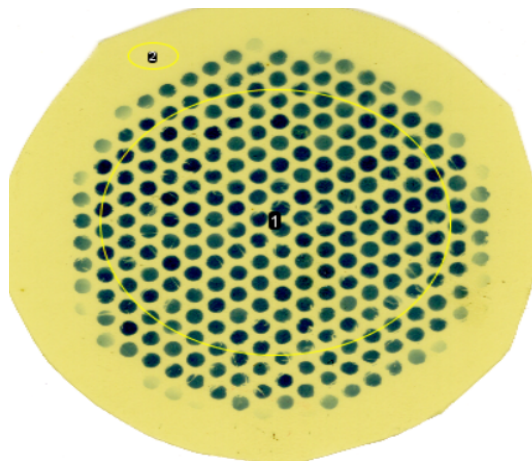
4.2 Pomiary dozymetryczne

Do wykonania analizy danych pomiarowych wykorzystano program ImageJ [11]. Na skanie z pomiaru kontrolnego zaznaczono obszar ROI (*ang* Region of Interest), widoczny na Rysunku 4.2, na podstawie którego została wyznaczona średnia intensywność piksela dla wspomnianego pomiaru.



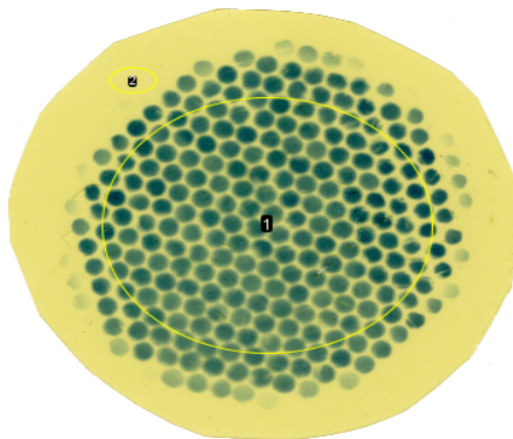
Rysunek 4.2: Obszar zaznaczony w programie ImageJ do wyznaczenia średniej intensywności piksela w pomiarze kontrolnym.

W celu wyznaczenia średniej intensywności piksela dla pierwszego pomiaru posłużono się obszarem ROI z pomiaru kontrolnego, a następnie na wspomnianym skanie zaznaczono obszar tła (obszar poza ROI), który również zapisano w menu ROI Manager. Oba obszary zaznaczone na skanie z pierwszego pomiaru pokazano na Rysunku 4.3, gdzie: 1 - ROI, 2 - tło.



Rysunek 4.3: Obszar zaznaczony w programie ImageJ do wyznaczenia średniej intensywności piksela dla pierwszego pomiaru oraz obszar tła.

Następnie w programie ImageJ wyznaczono średnią intensywność piksela ROI oraz tła pierwszego pomiaru. Analogiczną procedurę wykonano dla drugiego pomiaru, nanosząc na skany tego pomiaru obszary z ROI Manager zaznaczone na pierwszym pomiarze. Na Rysunku 4.4 przedstawiono obszary zaznaczone na skanie z drugiego pomiaru, gdzie: 1 - ROI, 2 - tło.



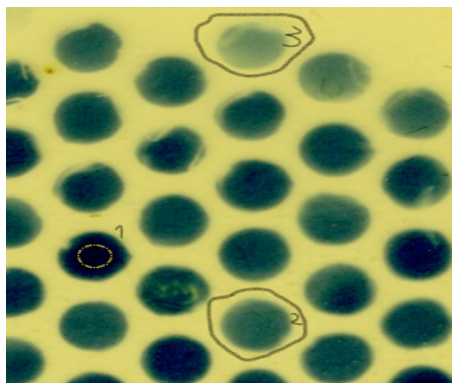
Rysunek 4.4: Obszar zaznaczony w programie ImageJ do wyznaczenia średniej intensywności piksela dla drugiego pomiaru oraz obszar tła.

W Tabeli 4.1 zostały zaprezentowane średnie intensywności piksela oraz ich odchylenie standardowe w danym obszarze dla każdego z trzech pomiarów. Zgodnie z oczekiwaniami średnia intensywność piksela wyznaczona dla pomiaru kontrolnego ma największą wartość, co oznacza, że film radiochromowy odpowiadający pomiarowi kontrolnemu nie został zaczerniony mimo znajdowania się obok źródła.

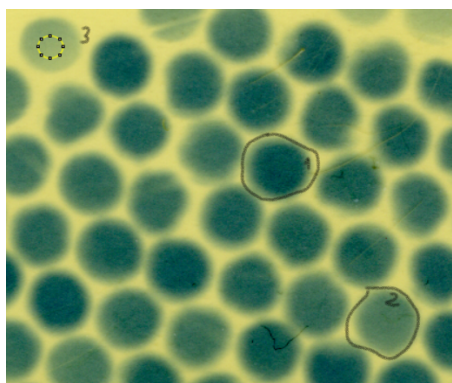
Tabela 4.1: Średnie intensywności piksela dla każdego pomiaru.

	Pomiar kontrolny	Pomiar nr 1		Pomiar nr 2	
	tło (obszar poza ROI)	tło (obszar poza ROI)	ROI	tło (obszar poza ROI)	ROI
mean	191,8	188,0	122	192,6	115
sd	2,3	1,9	64	2,2	38

Na podstawie wykresu z Rysunku 4.1 oszacowano, że dla pomiaru pierwszego dawka pochłonięta wyniosła $(52,90 \pm 0,05)$ Gy, zaś dla drugiego $(52,44 \pm 0,05)$ Gy.



Rysunek 4.5: Obszar zaznaczony w programie ImageJ do wyznaczenia średniej intensywności piksela dla trzech różnych otworów (skan 1 pomiaru).



Rysunek 4.6: Obszar zaznaczony w programie ImageJ do wyznaczenia średniej intensywności piksela dla trzech różnych otworów (skan 2 pomiaru).

Początkowo planowano porównać między sobą średnie intensywności piksela wyznaczone dla

pomiaru pierwszego i drugiego. Jednak z racji tego, że pierwszy pomiar trwał dłużej niż drugi pomiar nie możemy traktować ich jako równoważne pomiary. Wobec tego postanowiono obliczyć stosunek odchylenia standardowego (sd) do średniej wartości intensywności piksela (mean) p dla każdego z losowo wybranych otworów ukazanych na Rysunkach 4.5 i 4.6, dla obu pomiarów (zobacz Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Wartości p dla każdego otworu dla obu pomiarów.

Numer pomiaru	Numer otworu	p
1	1	0,39
	2	0,12
	3	0,059
2	1	0,11
	2	0,055
	3	0,028

W celu porównania stopnia zaczernienia filmów dla obu pomiarów wykonano test istotności średnich. Wartości średnie oraz ich odchylenia standardowe zostały przedstawione w Tabeli 4.3. Jako hipotezę zerową przyjęto, że filmy zostały zaczernione w ten sam sposób, a hipotezę al-

Tabela 4.3: Średnie wartości p dla obu pomiarów oraz ich odchylenia standardowe.

Pomiar 1		Pomiar 2	
mean	sd	mean	sd
0,19	0,14	0,064	0,033

ternatywną, że filmy nie zostały zaczernione w ten sam sposób. Poziom istotności przyjęto na poziomie 5%. Do obliczenia wartości statystyki skorzystano ze wzoru 4.1:

$$u = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}, \quad (4.1)$$

gdzie x_1 i x_2 to wartości średnie p dla obu pomiarów, σ_1 i σ_2 to odchylenia standardowe p dla obu pomiarów, a n_1 i n_2 to liczebności prób dla obu pomiarów.

Otrzymano wartość u równą 1,502, następnie odczytano wartość krytyczną z tabel rozkładu t-Studenta [12] o nieskończonej liczby stopni swobody dla przyjętego poziomu istotności (1,9600). Na podstawie otrzymanych wyników nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, więc można stwierdzić, że pomimo różnych czasów napromieniania, nie ma statystycznie istotnych różnic w zaczernieniu obu filmów radiochromowych.

W celu sprawdzenia czy każdy z filmów radiochromowych zaczerniał się jednorodnie zdecydowano się wykonać test 3 sigma. W tym celu wykorzystane zostaną średnie wartości intensywności piksela 3 losowo wybranych otworów z każdego pomiaru przedstawionych na Rysunkach 4.5 oraz 4.6. Uzyskane dane zostały zaprezentowane w Tabelach 4.4 oraz 4.5.

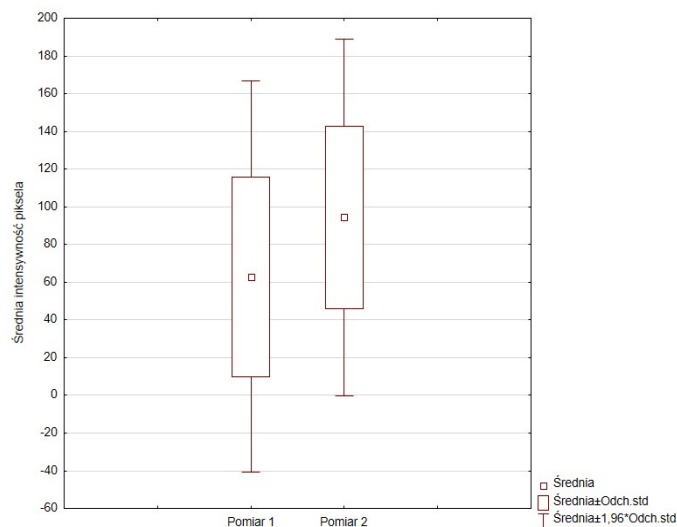
Tabela 4.4: Średnia intensywność piksela dla wybranych trzech otworów w pomiarze 1.

	POMIAR 1					
	1 otwór		2 otwór		3 otwór	
	tło (obszar poza ROI)	ROI	tło (obszar poza ROI)	ROI	tło (obszar poza ROI)	ROI
mean	188,0	10,1	188,0	62,8	188,0	116,0
sd	1,9	3,9	1,9	7,8	1,9	6,8

Tabela 4.5: Średnia intensywność piksela dla wybranych trzech otworów w pomiarze 2.

	POMIAR 2					
	1 otwór		2 otwór		3 otwór	
	tło (obszar poza ROI)	ROI	tło (obszar poza ROI)	ROI	tło (obszar poza ROI)	ROI
mean	192,6	47,9	192,6	91	192,6	144,1
sd	2,2	5,2	2,2	5	2,2	4,1

Na podstawie danych z Tabeli 4.4 oraz 4.5 został utworzony wykres pudełkowy ukazany na Rysunku 4.7.



Rysunek 4.7: Wykres ramka wąsy dla pomiarów średniej intensywności piksela wybranych losowo trzech otworów.

Do wykonania testu trzy sigma obliczono, z wykorzystaniem danych z Tabeli 4.4 i 4.5, wartości 3σ na podstawie wzoru 4.2:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (4.2)$$

gdzie σ_1 i σ_2 są odchyleniami standardowymi porównywanych obszarów.

Wyznaczono również różnicę wartości średnich dla porównywanych między sobą obszarów na podstawie równania 4.3:

$$\Delta = (x_1 + \sigma_1) - (x_2 + \sigma_2), \quad (4.3)$$

gdzie x_1 i x_2 to wartości średnie wybranych obszarów. Otrzymane wyniki zamieszczono w tabelach 4.6 i 4.7.

Tabela 4.6: Wyznaczone wartości 3σ oraz Δ dla porównywanych obszarów.

Porównywane obszary	3σ	Δ
1 z 2	26,20	56,58
2 z 3	31,10	52,15
3 z 1	23,63	108,73

Tabela 4.7: Wyznaczone wartości 3σ oraz Δ dla porównywanych obszarów.

Porównywane obszary	3σ	Δ
1 z 2	21,54	43,04
2 z 3	19,40	52,07
3 z 1	19,78	95,12

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że porównywane obszary nie zostały napromienione w tym samym stopniu, ponieważ wartości różnic Δ są większe od wartości 3σ .

Rozdział 5

Podsumowanie

W ramach Zespołowego Projektu Studenckiego zaprojektowano, a następnie wydrukowano trzymak używany podczas wykonanych pomiarów. Wstępne oszacowania czasu wykonania pomiarów przeprowadzono w programie SRIM.

Z przyczyn technicznych nie było możliwe wykonanie pomiarów zgodnie z początkowo założonym schematem (zob. podrozdział 3.1), więc wprowadzono modyfikację zmniejszającą odległość powierzchniowego źródła alfa od napromienianego obiektu. Odwrócono również geometrię układu - źródło zostało umieszczone pod studnią trzymaka, a film radiochromowy ułożony został bezpośrednio na kolimatorze wewnątrz studni, co przedstawiono na Rysunku 3.4.

Pomiary wykonano za pomocą filmów radiochromowych. Czasy napromieniania wynosiły kolejno 19 godzin i 10 minut oraz 19 godzin. Analizę wyników wykonano za pomocą programu ImageJ. Ze względu na różnicę czasów pomiary nie mogły zostać porównane, jednak postanowiono porównać wartości odchylenia standardowego podzielonego przez średnią wartość intensywności piksela. Na podstawie przeprowadzonego testu statystycznego istotności dwóch średnich stwierdzono, iż filmy zostały zaczernione w ten sam sposób. Zbadano również jednorodność zaczernienia trzech wybranych otworów dla każdego z pomiarów z pomocą testu 3σ . Stwierdzono, iż filmy zostały zaczernione w sposób niejednorodny.

Podsumowując, aby wykonać niniejsze doświadczenie zgodnie z pierwotnie założoną geometrią układu, należałoby zmniejszyć głębokość studni do grubości kolimatora, oraz skrócić nóżki o około 3 milimetry. Zaproponowana zmiana skróciłaby również czasy napromieniania. Byłoby to wręcz wskazane, ponieważ dla eksperymentów z materiałem komórkowym długi czas napromieniania jest nieakceptowalny. Modyfikacją, która mogłaby rozwiązać problem niejednorodnego napromieniania byłaby zmiana projektu kolimatora, np. powiększenie sept kolimatora.

Bibliografia

- [1] Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materia: [dostęp: 2022-02-20]. Dostępne w internecie: <http://onkologia.szczecin.pl/wp-content/uploads/2013/05/Oddzia%C5%82ywanie-promieniowania-jonizuj%C4%85cego-z-materi%C4%85.pdf>.
- [2] Działanie promieniowania jonizującego na organizm ludzki: [dostęp: 2022-02-22]. Dostępne w internecie: https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/mobi?_nfpb=true&_pageLabel=P39200118761482245057910&html_tresc_root_id=300006202&html_tresc_id=300006196&html_klucz=300004753&html_klucz_spis.
- [3] Scyntygrafia, Tomografia Emisyjna Pojedynczego Fotonu, Pozytonowa Tomografia Emisyjna: [dostęp: 2022-01-30]. Dostępne w internecie: https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/Obrazowanie:Obrazowanie_Medyczne/Scyntygrafia,_Tomografia_Emisyjna_Pojedynczego_Fotonu,_Pozytonowa_Tomografia_Emisyjna#Kolimator.
- [4] Pierluigi Casolaro, Luigi Campajola, Giovanni Breglio, Salvatore Buontempo, Marco Consales, Andrea Cusano, Antonello Cutolo, Francesco Di Capua, Francesco Fienga, and Patrizio Vaiano. Real-time dosimetry with radiochromic films. *Scientific reports*, 9(1):1–11, 2019.
- [5] Zastosowanie druku 3D w radioterapii: [dostęp: 2022-02-22]. Dostępne w internecie: <http://wmpm.fuw.edu.pl/event/fizyka-medyczna-farmacja-fizyczna-2018-2015-05-14-2015-05-16-1/track/zastosowanie-druku-3d-w-radioterapii-na-przykadle-bolusa-\dedykowanego-dla-pacjenta-z-nowotworem-gowy-i-szyi-101>.
- [6] Erwin Garbarczyk, Karol Józefowicz, and Andrzej Rybarczyk. Technologia druku 3d na zajęciach laboratoryjnych. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, pages 245–251, 2014.
- [7] Rodzaje technologii druku 3D: [dostęp: 2022-02-20]. Dostępne w internecie: <https://3dwpaktyce.pl/rodzaje-technologie-druku-3d/>.
- [8] Zygmunt Szepliński, Mateusz Filipek, Jakub Gotlib, and Urszula Kaźmierczak. Radiobiological research and dosimetry using a flat alpha source. *RAP Proceedings*, 4(1):7–9, 2019.
- [9] James F Ziegler, Matthias D Ziegler, and Jochen P Biersack. Srim—the stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(11-12):1818–1823, 2010.
- [10] John Allison. Facilities and methods: Geant4 – a simulation toolkit. *Nuclear Physics News*, 17(2):20–24, 2007.

- [11] Caroline A Schneider, Wayne S Rasband, and Kevin W Eliceiri. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods*, 9(7):671-675, 2012.
- [12] Tabela rozkładu testu t-Studenta: [dostęp: 2022-05-11]. Dostępne w internecie: https://www.naukowiec.org/tablice/statystyka/rozklad-t-studenta_248.html.