

**Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2016

Kraków, Grudzień 2016

Raport 2095/AP

Stanowisko cyklotronu AIC-144 do naświetlań wiązką protonów.

T. Nowak, J. Sulikowski, P. Bogdali, R. Cieślik, R. Grzybek, B. Lipka, J. Mołęda, M. Ruszel, B. Sałach, A. Sroka, M. Sumera, W. Pyziół, K. Zbroja, A. Rogóż-Duda, N. Mojżeszek, E. Durlak, E. Ogrodowicz, G. Mierzwińska, M. Rydygier

Streszczenie

W hali eksperymentalnej budynku cyklotronu AIC-144, na jednym z wyjść magnesu M2, ustawiono tymczasowe stanowisko do pomiarów parametrów wiązki protonowej. Kierunek prowadzenia wiązki ustawiono precyzyjnie wykorzystując niwelator oraz samopoziomujący się laser 3D. Wymieniono soczewki kwadrupolowe, a nowe ustawiono precyzyjnie względem osi wiązki. Wykonano szereg kolimatorów i uchwytów oraz podstawę do pozycjonowania kamery CCD na ławie optycznej. Stworzono procedurę wyprowadzania wiązki z wykorzystaniem tarcz pokrytych siarczkiem cynku ZnS(Ag) wraz z systemem kamer podglądu oraz zbudowanej w IFJ PAN kamery CCD. Wykorzystano kamerę CCD do obrazowania kształtu nierozproszonej oraz rozproszonej wiązki protonowej. Sprawdzone powtarzalność wyprowadzania wiązki oraz zoptymalizowano kształt wiązki. Za pomocą puszki Faraday'a zmierzono stosunek prądu rozproszonej i zogniskowanej wiązki na stanowisku pomiarowym do prądu ekstrakcji z cyklotronu. Wykonano pomiary dozymetryczne (mocy dawki) promieniowania gamma oraz neutronowego wewnątrz i wokół hali eksperymentalnej dla prądów ekstrakcji cyklotronu do wartości 100 nA.

Abstract:

In the experimental hall of the building of cyclotron AIC-144, on one of the outputs of the magnet M2, set up a temporary stand for measuring parameters of proton beam. Direction of the bundle is set precisely using leveling and self-leveling laser 3D. Replaced quadrupole lens and set it accurately relative to the beam axis. A series of collimators, handles and the basis for positioning the CCD camera was done on the optical bench. The procedure of beam output has been created using shield coated zinc sulphide (ZnS ennobled Ag), with cameras monitoring system and CCD camera built in the IFJ. Uses a CCD camera to imaging the shape of dispersible and focused proton beam. Checked repeatability and optimized the beam shape. Using the cans Faraday measured the ratio of current beam (number of protons per second) on the test bench to the current extraction from the cyclotron. Measurements dosimetry (dose rate) gamma and neutron radiation in and around the experimental hall for extraction current up to 100 nA.

Spis treści

1	Wstęp.....	4
1.1	Cel wykonanych pomiarów	4
1.2	Cyklotron AIC-144.....	4
1.3	Zastosowane urządzenia pomiarowe	5
1.3.1	Tarcze pokryte siarczkiem cynku.....	5
1.3.2	Kamera CCD do obrazowania wiązki protonów.....	7
1.3.3	Układ pomiarowy prądu wiązki na stanowisku do naświetlań.	8
2	Prace mechaniczne na stanowisku	11
3	Procedura oraz pomiary powtarzalności wyprowadzenia wiązki	12
3.1	Procedura wyprowadzenia wiązki	12
3.2	Pomiary powtarzalności wyprowadzeń wiązki.	15
4	Pomiary na stanowisku.....	18
4.1	Pomiary wiązki rozproszonej	18
4.2	Pomiar prądu wiązki protonów układem z puszką Faraday'a.	22
4.2.1	Pomiar prądu nierozproszonej wiązki protonów.....	22
4.2.2	Pomiar prądu rozproszonej wiązki protonów układem z puszką Faraday'a.	24
5	Pomiary dozymetryczne	28
6	Wnioski	33
7	Odwołania	34

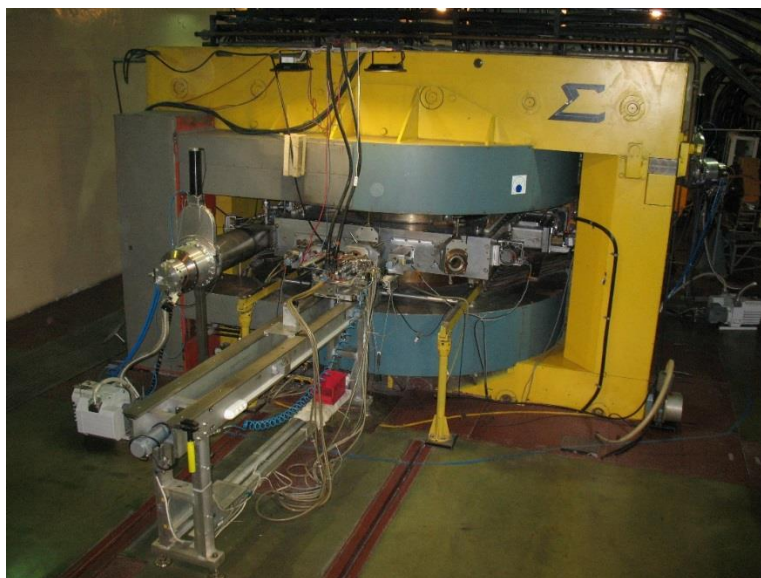
1 Wstęp

1.1 Cel wykonanych pomiarów

Celem wykonanych prac i pomiarów jest stworzenie funkcjonalnego stanowiska do naświetlań wiązką protonów charakteryzującą się następującymi właściwościami:

- zadana energia, o rozmyciu energetycznym wynikającym z zastosowanej folii oraz geometrii naświetlania mieści się w zakresie 10 – 60 MeV;
- niejednorodność pola protonów na zadanej średnicy wiązki w miejscu naświetlania mieści się w zakresie +/- 5%;
- znany jest strumień protonów [$\text{proton}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$] w miejscu naświetlania;
- dana jest możliwość określenia dawki protonów na tarczy [liczba protonów/ cm^2].

1.2 Cyklotron AIC-144



Rysunek 1. Cyklotron AIC-144. Widok od strony źródła.

Cyklotron AIC–144 (Rysunek 1), wchodzący w skład Centrum Cyklotronowego Bronowice, został zbudowany w latach 80-tych XX wieku jako urządzenie naukowo-badawcze przez zespół pod kierownictwem doc. dr Jerzego Schwabe. Cyklotron projektowano tak, aby umożliwić przyspieszanie trzech rodzajów cząstek: alfa, deuteronów oraz protonów. Projektowana energia dla poszczególnych cząstek wynosiła odpowiednio dla: cząstek alfa 60 MeV, deuteronów 30 MeV i protonów 50 MeV. Plany zastosowania cyklotronu w terapii protonowej nowotworów oka spowodowały konieczność zwiększenia energii protonów. W latach 2005-2008 zespół mgr Jacka Sulikowskiego przy wsparciu Dyrekcji IFJ PAN dokonał

przebudowy urządzenia. Efektem tych prac było uzyskanie 60 MeV energii wyjściowej protonów. Zmiany konstrukcyjne objęły swym zakresem wszystkie elementy akceleratora, a mianowicie:

- komorę cyklotronu,
- rezonator,
- układ wysokich częstotliwości,
- układ deflekcji wiązki,
- ciągi jonowodów,
- źródła jonów,
- system sterowania akceleratora,
- system próżniowy,
- zasilacze prądowe,
- system chłodzenia.

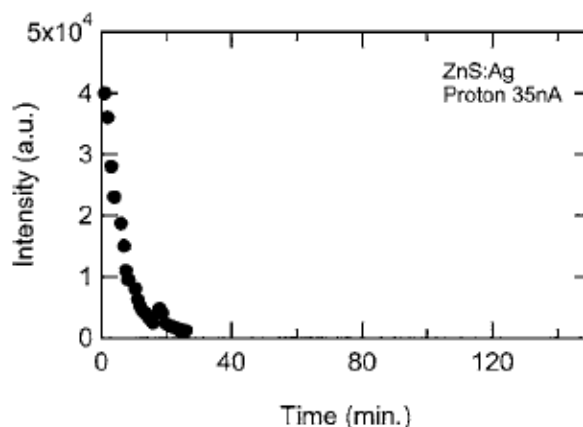
Aby dostosować warunki akceleracji do nowych wymogów wykonano pomiary istniejących pól magnetycznych. Mapy nowych rozkładów pól magnetycznych opracowali: p. Samsonow, p. Morozow oraz p. Kijan z Zjednoczonego Instytutu Fizyki w Dubnej.

Od roku 2011 prowadzona jest terapia protonowa nowotworów oka. W miarę możliwości kontynuowana jest modernizacja akceleratora, a także działalność z zakresu naświetlania izotopów we współpracy z grupą prof. W. Mieltskiego. Ze względu na przeniesienie terapii oka, na nowo powstały w ramach CCB akcelerator Proteus-235, powstało nowe stanowisko do aktywacji izotopów, badań biologicznych, testów materiałowych, itp.

1.3 Zastosowane urządzenia pomiarowe

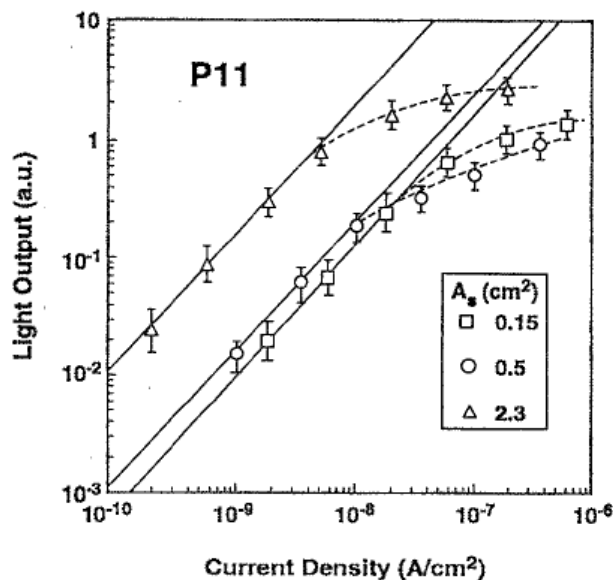
1.3.1 Tarcze pokryte siarczkiem cynku

Tarcze wykonane z folii aluminiowej o grubości 0,3 mm i średnicy 20 cm pokryto siarczkiem cynku z domieszką srebra ZnS(Ag). Układ tarcz wraz z zestawem kamer przesyłających obraz do sterowni cyklotronu wykorzystywany jest do wstępnego określania pozycji i kształtu wiązki na ławie optycznej. W celu uzyskania optymalnego natężenia emitowanego światła z tarczy grubość warstwy ZnS(Ag) powinna być mniejsza od 25 mg/cm² (tj. ok. 60 μm grubości). Gęstość ZnS(Ag) wynosi 4,09 g/cm³, a długość fali dla maksimum spektrum emisji 450 nm (kolor niebieski). Scyntylator ulega „wyświeceniu” (zmniejszanie natężenia emitowanego światła w funkcji pochłoniętej dawki), co przedstawiono na Rysunek 2.



Rysunek 2. Wykres zmiany natężenia emitowanego światła o długości 450 nm dla tarczy szklanej pokrytej ZnS(Ag). Tarczę naświetlano wiązką protonów o energii 3 MeV w temperaturze 17 °C. Strumień protonów wynosił $1,4E12$ proton/cm²·s (Nishiura, 2006).

Zależność natężenia emitowanego światła z tarczy kwarcowej pokrytej ZnS(Ag) bombardowanej strumieniem protonów o energii 3 MeV przedstawia Rysunek 3.



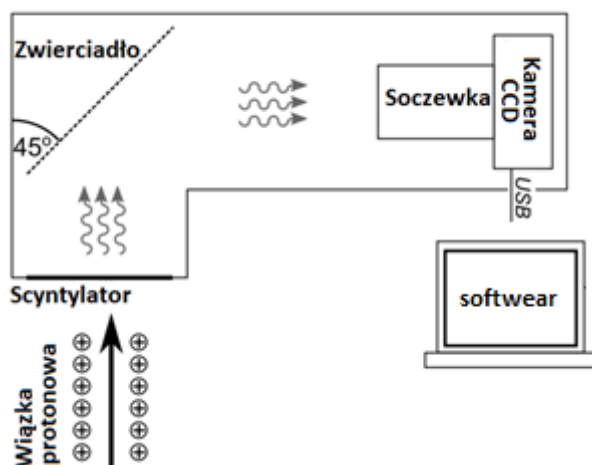
Rysunek 3. Zależność natężenia emitowanego światła z tarczy kwarcowej pokrytej ZnS(Ag) w funkcji strumienia protonów o energii 3 MeV. Parametr A_s oznacza powierzenie naświetlanego pola w cm² (M. Tuszewski, 1993).

Zależność natężenia emitowanego światła scyntylatora ZnS(Ag) jest funkcją liniową do wartości gęstości prądów protonów i wynosi w przybliżeniu $8 \cdot 10^{-9}$ A/cm², co odpowiada strumieniowi protonów około $5 \cdot 10^{10}$ proton/cm²·s. Proton o energii 3 MeV deponuje w warstwie scyntylatora o grubości 60 μm energię 1.9 MeV. Z Rysunek 3 wynika, że odpowiedź scyntylatora jest funkcją liniową do wartości gęstości strumienia energii i wynosi około 15 mW/cm². W przypadku wiązki protonów o energii 60 MeV cyklotronu AIC-144 strata energii w scyntylatorze o grubości 60 μm wynosi w przybliżeniu 260 keV, czyli

nasycenie może występować przy strumieniu w przybliżeniu $2,5 \cdot 10^{11}$ proton/cm²·s, co odpowiada gęstości prądu w przybliżeniu 40 nA/cm² (przy założeniu niewielkiej zależności przekroju czynnego na reakcję z protonami od ich energii). Oznacza to że, zależność natężenia emitowanego światła z tarczy Al pokrytej ZnS(Ag) jest funkcją liniową w całym zakresie prądów wiązki protonów o energii w przybliżeniu 60 MeV stosowanych w pomiarach na tymczasowym stanowisku do naświetlań (gdy całkowity prąd mierzony na tarczy shuttera technicznego nie przekracza 100 nA). Czego skutkiem jest obserwowany efekt „wyświecania się” (zmniejszanie się natężenia emitowanego światła) w funkcji otrzymanej dawki przez scyntylator.

1.3.2 Kamera CCD do obrazowania wiązki protonów

System **ProBImS** (**Proton Beam Imaging System**) został stworzony w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie w celu szybkiego zobrazowania pola promieniowania wiązki protonowej. Otrzymany obraz 2D wiązki może posłużyć do weryfikacji jej kształtu, wyznaczeniu profili poprzecznych wiązki oraz określeniu rozkładów głębokościowych dawki.



Rysunek 4. Schemat elementów ProBImS (M.Rydygier, 2015).

W skład systemu ProBImS (Rysunek 4. Schemat elementów ProBImS (M.Rydygier, 2015)) wchodzi: scyntylator, zwierciadło, kamera CCD wraz z układem soczewek oraz software wykorzystujący środowisko LabView i skrypty Matlab’a do analizy zarejestrowanego obrazu. Szczegółowe dane na temat podstawowych parametrów systemu ProBImS zestawiono w Tabeli 1.

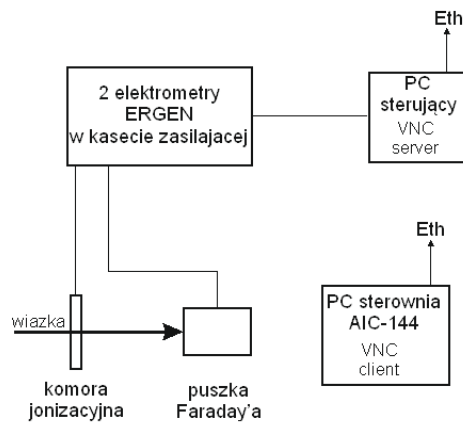
Tabela 1. Podstawowe parametry systemu ProBImS.

Kamera CCD	ATIK 383 L+
Rozdzielczość kamery CCD (mono)	3362 x 2537 pixeli
Scyntylator	DuPont EJ000128
Pierścienie pośrednie	3 szt. (M24)
Obiektyw	Takumar 85 mm/f.1,9
Wielkość pola obrazowania (scyntylatora)	5,5 cm x 7,2 cm
Rozdzielczość przestrzenna (średnia)	0,0215 mm/pixel
Przetwornik ADC	16 bit
Szum odczytu	560 zliczeń dla 40 s
Prąd ciemny	7 e ⁻ /piksel/sekundę
Minimalny czas ekspozycji	0,2 s
Max. wydajności kwantowa dla długości fali	550 nm
Standardowy czas naświetlania dla wiązki stosowanej w terapii 0.2 pA/mm ²	40 s (ok. 40 000 zliczeń dla 16 bitowego ADC)

Zasada działania systemu ProBImS opiera się o zjawisko scyntylacji, w którym wiązka protonowa padając na scyntylator (Rysunek 4) powoduje powstanie promieniowania elektromagnetycznego z zakresu światła widzialnego. Światło to, odbijane przez zwierciadło ustawione pod kątem 45° (w celu zabezpieczenia kamery CCD przed uszkodzeniem radiacyjnym) do kierunku wiązki protonowej, przechodząc przez zestaw soczewek ogniskujących jest rejestrowane przez kamerę CCD. Otrzymane dane z matrycy CCD przesyłane są do komputera (czas transmisji dla maksymalnej rozdzielczości matrycy 3362x2537 pixeli i biningu 1x1 wynosi w przybliżeniu 20 s), na którym przy użyciu oprogramowania ProBImS można uzyskać obraz wraz z wyznaczonymi parametrami wiązki (Boberek, 2014).

1.3.3 Układ pomiarowy prądu wiązki na stanowisku do naświetlań.

Układ pomiarowy stosowany do pomiaru prądu wiązki protonów przedstawia Rysunek 5. Dwa elektrometry wysokiej klasy połączone z komorą jonizacyjną PTW 7861 i puszką Faraday'a mierzą prąd wiązki protonów. Układ umożliwia kalibrację komory jonizacyjnej względem puszki Faraday'a. Jest to przydatne w przypadku pomiaru dostarczanej dawki do naświetlanego obiektu.



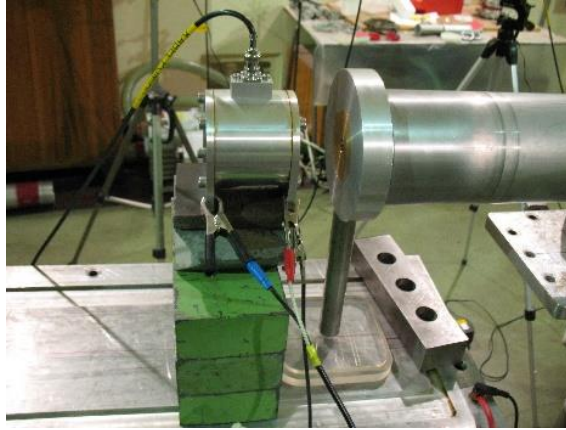
Rysunek 5. Schemat blokowy układu pomiarowego wiązki protonów na stanowisku.

1.3.3.1 Elektrometry

Elektrometr jest urządzeniem służącym do pomiaru bardzo małych prądów np. zkomór jonizacyjnych oraz jest wyposażony w programowany zasilacz wysokiego napięcia z możliwością zmiany polaryzacji. Wyniki pomiarów są wyświetlane na wyświetlaczu LCD w dwóch linijkach po 16 znaków każda. Klawiatura o ośmiu klawiszach służy do programowania funkcji elektrometru wówczas, gdy nie jest on sterowany z komputera. Elektrometr może pracować jako urządzenie samodzielne i w tym wypadku wszystkie parametry są ustawiane z klawiatury. Również może być w pełni sterowany przez komputer PC poprzez interfejs RS422 lub RS485 (wówczas klawiatura jest zablokowana). Najniższy zakres pomiarowy umożliwia pomiar prądów od 10 nA z rozdzielczością 1 pA (F.P.U.H. ERGEN).

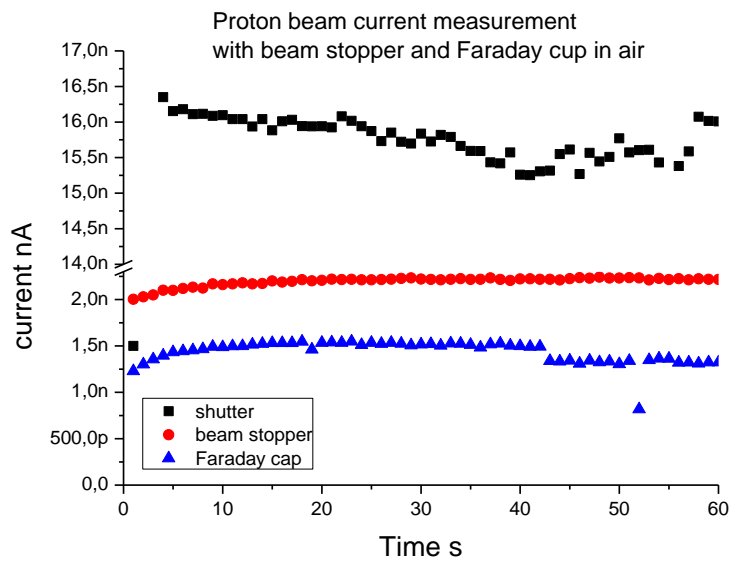
1.3.3.2 Puszka Faraday'a.

Stosowana w pomiarach puszka Faraday'a (Rysunek 6) posiada aluminiową obudowę o grubości uniemożliwiającej ucieczkę wyemitowanych elektronów z rdzenia puszki. Średnica rdzenia wewnętrznego puszki wynosi 60 mm. Grubość aluminium osłony puszki wynosi 7 mm. Grubość zastosowanej obudowy umożliwia pomiar wiązki protonów od energii 40 MeV.



Rysunek 6. Puszka Faraday'a na stanowisku pomiarowym.

Emitowane elektrony wtórne zwiększają wartość mierzonego prądu (co ma miejsce w przypadku pomiaru na beam stopperze, czyli metalowym walcu o grubości większej od zasięgu mierzonych cząstek). Porównanie pomiarów na beam stopperze (średnica 150 mm, grubość 22 mm Al) i puszce Faraday'a przedstawia Rysunek 7.



Rysunek 7. Porównanie wyników pomiaru wiązki protonów puszka Faraday'a i beam stopperem. Wskazania beam stoppera są średnio o 48% ($SD=4\%$) większe od wskazań puszki Faraday'a. W trakcie pomiarów starano się (brak możliwości pomiaru) utrzymać stały prąd cyklotronu 16 nA. Pomiarów dokonywano elektrometrem Keithley 6485 posiadającego aktualne świadectwo wzorcowania.

1.3.3.3 Komora jonizacyjna: monitor ionization chamber PTW 7861.

Monitorująca komora jonizująca (Rysunek 8) jest komorą przelotową, która przeznaczona jest do pomiaru pól o maksymalnej średnicy 155 mm. Nominalne napięcie pracy wynosi 400 V (PTW Freiburg).



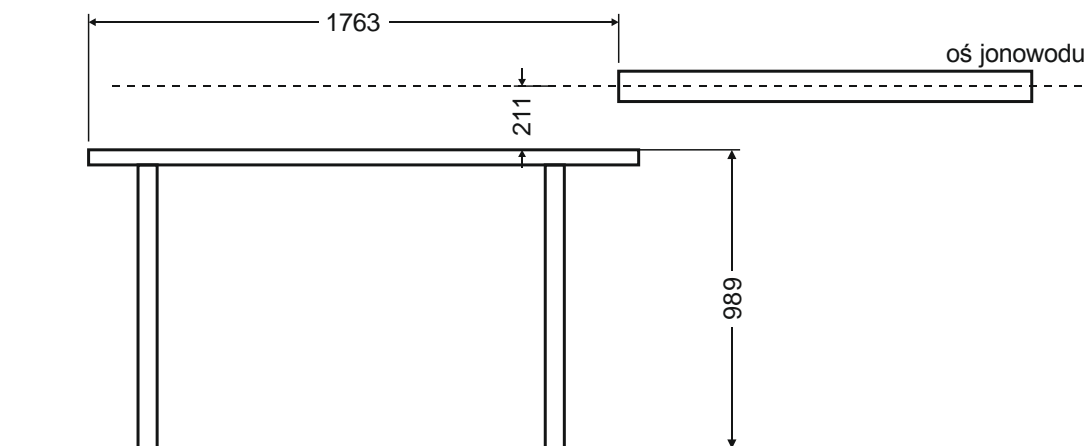
Rysunek 8. Monitorująca komora jonizująca PTW 7861.

2 Prace mechaniczne na stanowisku

Widok tymczasowego stanowiska do naświetlań oraz jego geometrię przedstawiają odpowiednio rysunki Rysunek 9 i Rysunek 10.



Rysunek 9. Widok na płytę granitową służącą za podstawę ławy optycznej.



Rysunek 10. Schemat stanowiska z podanymi wymiarami geometrycznymi.

W trakcie prac modernizacyjnych:

- ustawiono kierunek jonowodu za magnesem M2 (Rysunek 13). W tym celu umieszczono laser w wyjściu magnesu M2 oraz dwie przesłony z otworami odpowiednio: w kostce pomiarowej umieszczonej za magnesem M2 i na końcu jonowodu.
- sprawdzono płaszczyznę poziomą jonowodu wykorzystując punkty referencyjne umieszczone na ścianach hali 1102 (płaszczyzna akceleracji cyklotronu AIC-144). Punkty te naniesiono za pomocą niwelatora i samopoziomującego lasera 3D na jonowód.
- wymieniono soczewki S5 i S6 (Rysunek 13) tworzące kwadruplet. Umieszczono w nich centralnie jonowód z wykorzystaniem specjalistycznego centratora i ponownie sprawdzono kierunek i poziom jonowodu.
- wykonano szereg kolimatorów oraz uchwytów, które można dowolnie rozmieszczać na ławie (Rysunek 11) oraz uchwyt na kamerę CCD (Rysunek 12).



Rysunek 11. Zespół wykonanych uchwytów i kolimatorów wraz puszką Faraday'a.

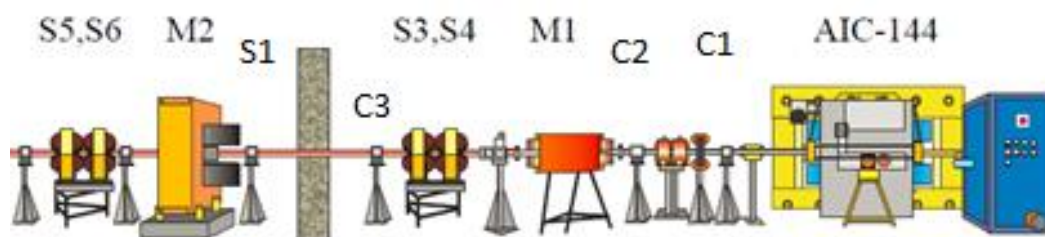


Rysunek 12. Wykonany uchwyt na kamerę CCD.

3 Procedura oraz pomiary powtarzalności wyprowadzenia wiązki

3.1 Procedura wyprowadzenia wiązki

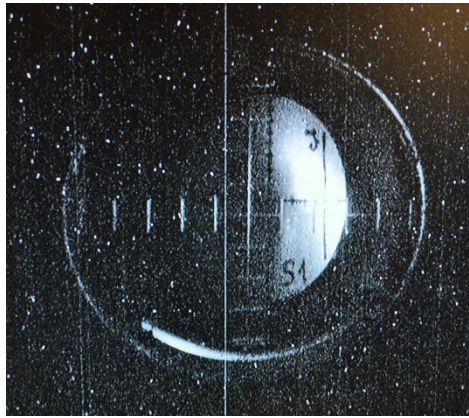
Schemat układu optycznego toru wiązki cyklotronu AIC-144 przedstawiony jest poglądowo na Rysunku 13.



Rysunek 13. Schemat układu optycznego toru wiązki cyklotronu AIC-144.

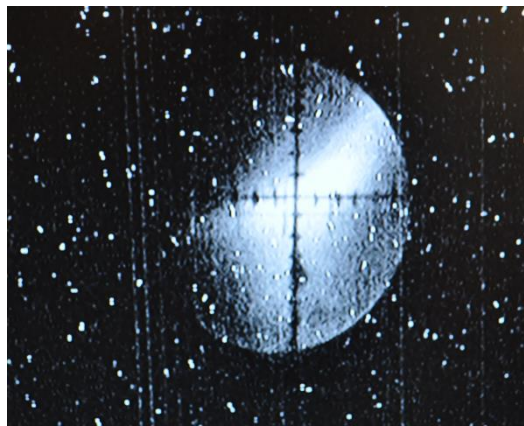
Procedura wyprowadzenia wiązki na stanowisku do naświetlań składa się z następujących etapów:

- prawidłowe ustawienie wiązki na tarczy S1 Rysunek 14) przed magnesem M1,



Rysunek 14. Prawidłowe położenie wiązki na tarczy S1.

- prawidłowe ustawienie wiązki na tarczy S1 przed magnesem M2 (Rysunek 15),



Rysunek 15. Prawidłowe położenie wiązki na tarczy przed magnesem M2.

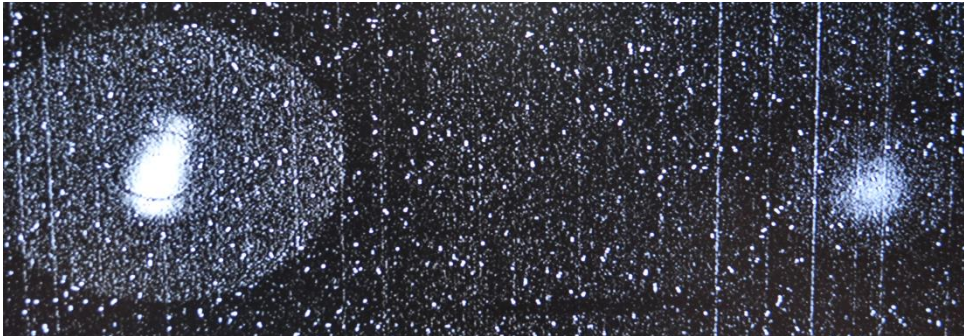
- uzyskanie prawidłowego obrazu na dwóch tarczach pokrytych ZnS(Ag) ustawionych na ławie optycznej w odległościach 50 i 136 cm od końca jonowodu dla kolimatorów umieszczonych w końcówce jonowodu: kolejno o średnicach 50 i 10 mm (Rysunek 16).



Rysunek 16. Układ dwóch tarcz fluorescencyjnych na tymczasowej ławie stanowiska.

Należy wykonać następujące czynności:

- ustawić kamery przekazujące obraz tarczy do sterowni cyklotronu,
- na monitorach zaznaczać środek tarczy fluorescencyjnej oraz obrys części centralnej tarczy (w trakcie wyprowadzania wiązki światło jest zgaszone na stanowisku),
- wyprowadzić wiązkę z cyklotronu o prądzie 20 nA mierzonym na tarczy pomiarowej (lub shutterze) wewnątrz jonowodu w próżni (ogniskujemy wiązkę na „nieskończoność”, czyli na drugą tarczę),
- sprawdzić czy obraz wiązki na II tarczy fluorescencyjnej umieszczony jest centralnie i czy ma w przybliżeniu kształt koła (Rysunek 17). W przypadku, gdy tak nie jest należy skorygować kształt wiązki.



Rysunek 17. Obraz wiązki na tarczach fluorescencyjnych znajdujących się na ławie optycznej.

- założyć kolimator 10 mm na wyjściu jonowodu i ponownie obserwować obraz wiązki na tarczy,
- zmierzyć obraz wiązki za pomocą kamery CCD bez i z kolimatorem 10 mm (ewentualnie 5 mm) w odległości 136 cm od końca jonowodu.,

Warunki pomiaru powinny uwzględniać:

- odchylenie środka ciężkości wiązki od środka ciężkości stanowiska nie może przekraczać 1 mm,
- współczynnik normalizacji dla obrazowania bez i z kolimatorem powinien być jak najbardziej zbliżony do siebie,
- jako obrazu referencyjnego dla kamery CCD używać obraz otrzymany w odległości 56 mm od końca jonowodu z kolimatorem 5 mm oraz z nałożoną folią ołowianą o grubości 1,5 mm,
- odchylenia standardowe dopasowanych krzywych gaussa do uzyskanego profilu X i Y w odległości 136 cm od końca jonowodu powinny być jak najbardziej zbliżone do siebie.

3.2 Pomiary powtarzalności wyprowadzeń wiązki.

Jako kryterium powtarzalności wyprowadzenia wiązki przyjęto podanie parametrów Δx i Δy , gdzie Δx i Δy są różnicami wartości pozycji środka stanowiska określonym poprzez wykonanie obrazu referencyjnego kamerą CCD a środkiem ciężkości wiązki - określanym każdorazowo w wykonanym zdjęciu. Przyjęto, że obraz referencyjny wyznaczono dla odległości 56 mm od końca jonowodu z kolimatorem 10 mm i folii ołowianej o grubości 1.5 mm.

Środek stanowiska wyznaczany jest w następujący sposób: jest to środkowy wiersz i środkowa kolumna matrycy dla tych pikseli, których poziom sygnału przekracza 50% normalizacji (poziom normalizacji wybierany jest przez użytkownika).

Natomiast pozycja środka ciężkości wiązki wyznaczana jest w następujący sposób: z matrycy CCD wybierane są piksele, których liczba zliczeń przekracza 80% sygnału znormalizowanego, a następnie obliczamy współrzędne środka ciężkości wg wzoru (1). Normalizacja dla dowolnego kolimatora obliczana jest jako wartość średnia dla wartości zliczeń w pikselach z obszaru kwadratu, na którym możemy opisać okrąg o średnicy równej w przybliżeniu $\frac{1}{2}$ średnicy stosowanego kolimatora. Środek kwadratu pokrywa się ze środkiem stanowiska (wyznaczanego za pomocą kolimatora 5 mm).

$$\sum k_i r_i / \sum k_i \quad (1)$$

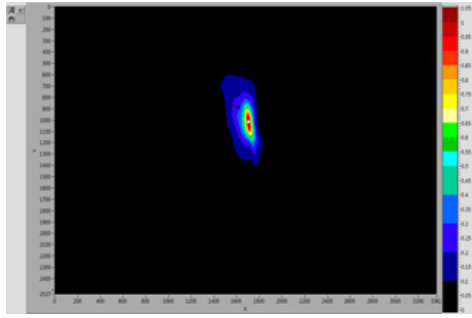
gdzie:

k_i – liczba zliczeń w i-tym pikselu,

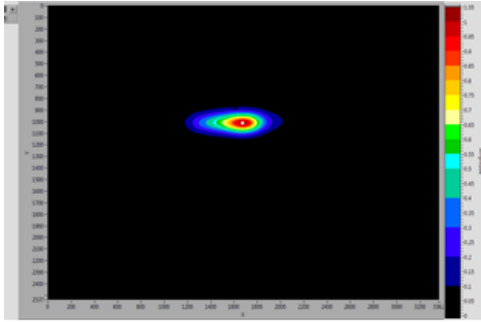
r_i – współrzędne i-tego piksela.

Tabela 2 Porównanie wyprowadzeń wiązki.

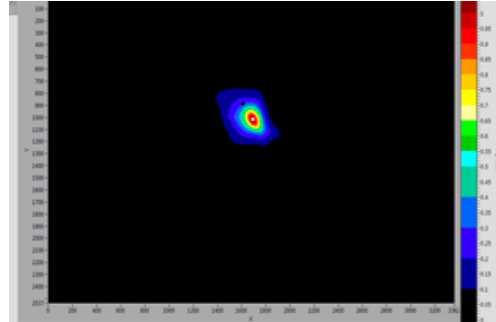
Lp.	Odległość kamery od końca jonowodu [mm]	Kolimator [mm]	Δx [mm]	Δy [mm]	FWHM _x [mm]	FWHM _y [mm]
1	58,0	50	-1,38	-0,129	2,4	6,2
2	228,2	50	0,04	0,6	4	4,4
3	478,2	50	3,7	0	9,5	3,1
4	1098,2	50	1,2	-0,8	16,9	16,9
5	1398,2	50	-0,09	-1,1	21,3	24,6
6	1100,0	50	2,0	-5,8	19,1	16,47
7	1300,0	50	1,2	-7,4	22,9	21
8	1360,0	50	0,7	-7,8	22,6	21,6
9	1420,0	50	1,0	-8,2	22,2	23,2



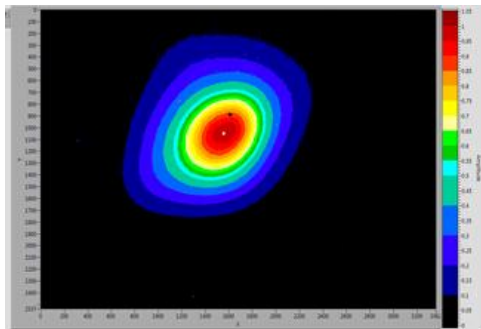
a) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 58 mm.



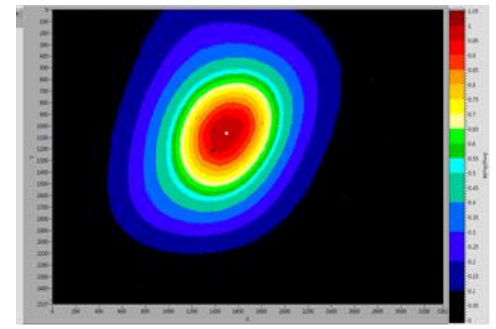
b) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 278,2 mm.



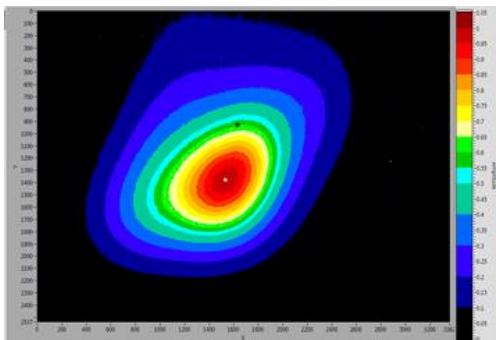
c) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 478,2 mm.



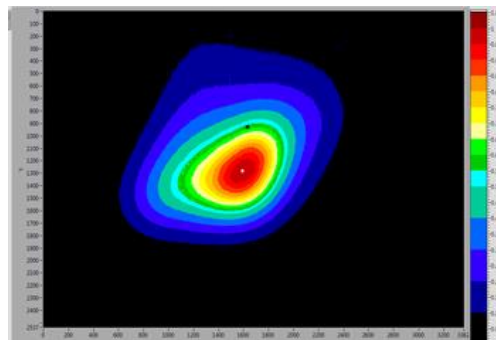
d) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 1098,2 mm.



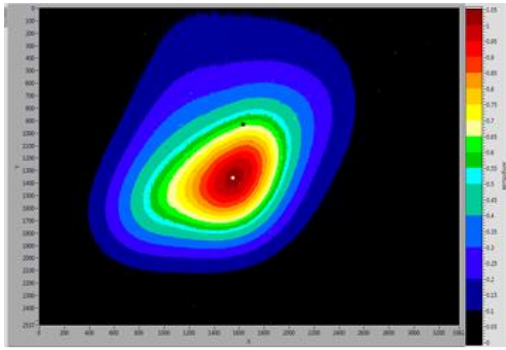
e) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 1398,2 mm.



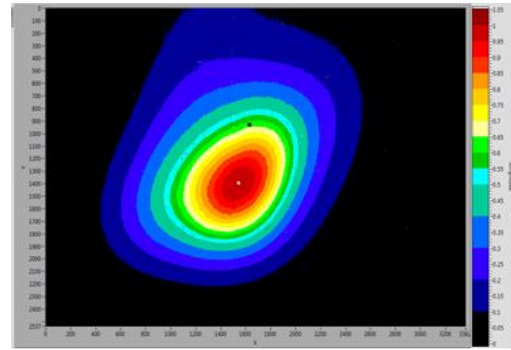
f) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 1100 mm.



g) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 1300 mm.



h) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 1360 mm.



i) Odległość kamery od końca jonowodu wynosi 1420 mm.

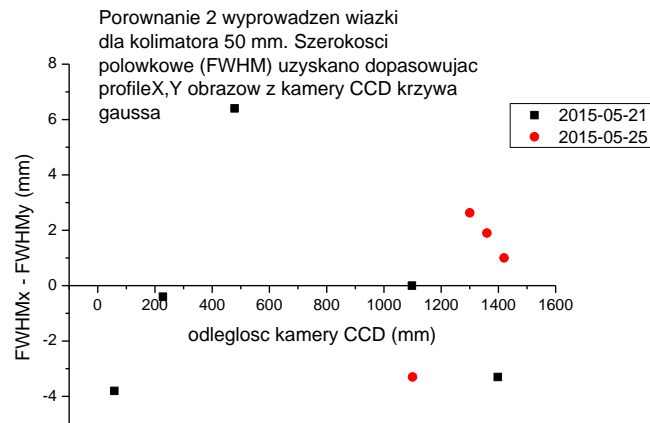
Rysunek 18. Obraz wyprowadzenia wiązki w funkcji odległości.

Celem porównania wyprowadzeń wiązki protonów na stanowisku w dniach 21 i 25 maja 2015 było stwierdzenie, czy środek ciężkości wiązki pokrywa się z osią jonowodu (rozumianą jako środek stanowiska) w funkcji odległości od końca jonowodu. Miarą pokrywania się środków są parametry Δx i Δy (Tabela 2). Ognisko wiązki starano się uzyskać na II tarczy fluorescencyjnej umieszczonej w odległości 136 cm od końca jonowodu (Rysunek 17). Jako miarę ogniskowania wiązki przyjęto różnicę szerokości połówkowej dopasowanych krzywymi Gaussa do profili X i Y obrazów wiązki protonów uzyskanych kamerą CCD. Analiza wartości szerokości połówkowych dopasowanych krzywych Gaussa i wartości Δx i Δy z tabeli 2 i rysunku 18 wskazują, że wyprowadzenie wiązki protonów na stanowisku jest podobne. Natomiast ognisko jest przesunięte (odpowiednio 110 cm dla 2015-05-21 i w przybliżeniu 150 cm dla 2015-05-25 rysunek 19) oraz wiązki różnią się nieznacznie (różnica w przybliżeniu 1 mm) położeniem w pionie. Parametry nastaw toru optycznego wiązki podane są w Tabeli 3.

Tabela 3 Porównanie nastaw toru optycznego dla 2 wyprowadzeń. wszystkie wartości podane są w amperach.

Data	S5 (w X)	S6 (w Y)	MK2	MK1	M2	M1
2015-05-21	5,75	6,8	0	0	12,02	229,4
2015-05-25	5,74	6,8	0	0	11,99	229,4

Niestety nastawy kanału magnetycznego 2, który również jest elementem optyki wiązki, nie były w tym czasie wymiarowane. Jest to jedna z trudności występująca przy próbach powtarzalnego wyprowadzenia wiązki.

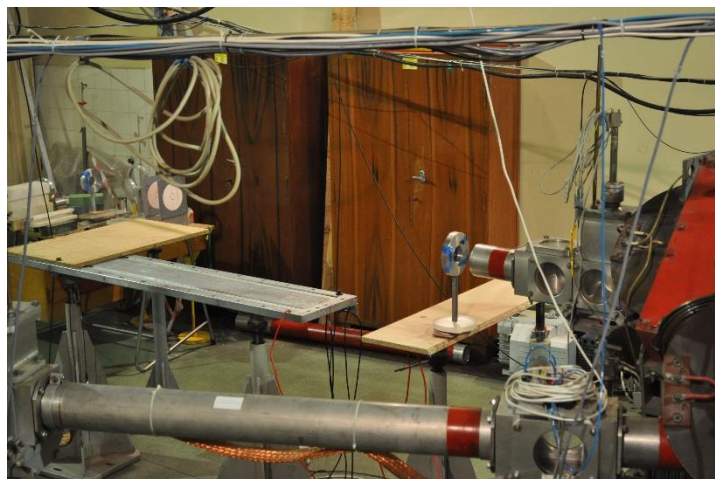


Rysunek 19. Porównanie wyprowadzeń wiązki protonów na stanowisku w dniach 2015-05-21 oraz 2015-05-25.

4 Pomiar na stanowisku

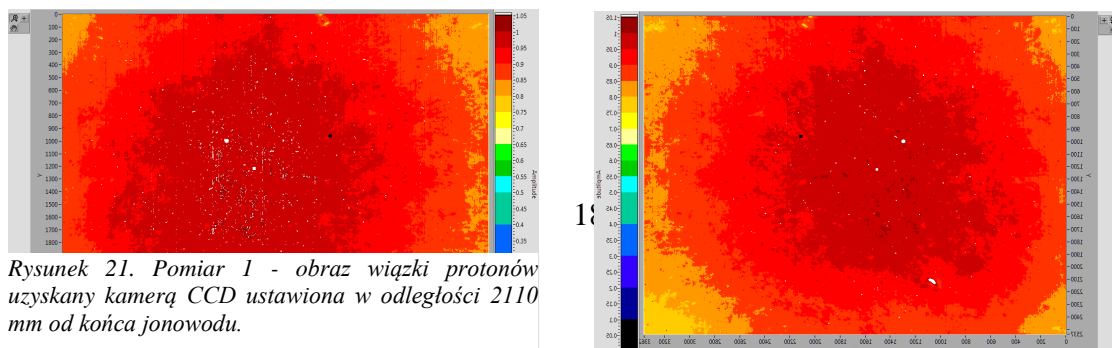
4.1 Pomiar wiązki rozproszonej

W wyniku przeprowadzanych prób stwierdzono, że optymalne rozpraszanie można osiągnąć dla geometrii z obrazowanej na rysunku 20, gdzie odległość folii ołowianej od powierzchni jonowodu wynosi 96 mm. Do rozpraszania użyto folii ołowianej o grubości 1,5 mm (folie: 1 mm + 0,5 mm).



Rysunek 20. Stanowisko do rozprożeń wiązki protonów.

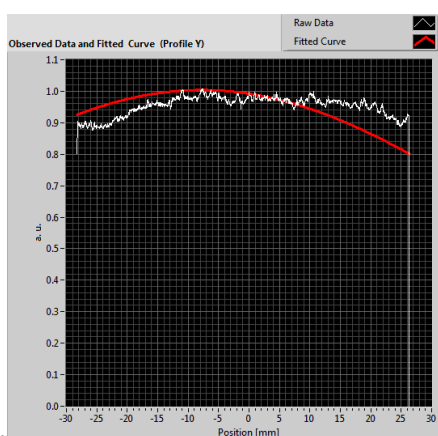
Wyniki rozprożeń wiązki protonów na folii ołowianej przedstawiają poniższe zdjęcia wykonane kamerą CCD.



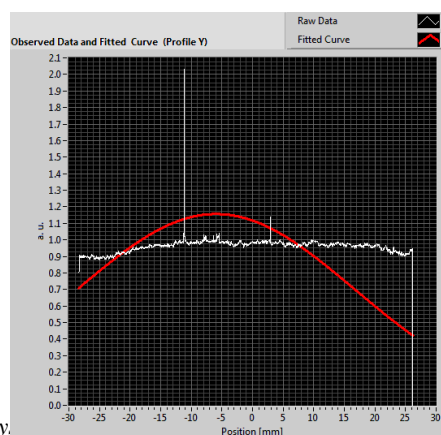
Rysunek 21. Pomiar 1 - obraz wiązki protonów uzyskany kamerą CCD ustawioną w odległości 2110 mm od końca jonowodu.

Rysunek 22. Pomiar 2 - obraz wiązki protonów uzyskany kamerą CCD ustawioną w odległości 2110 mm od końca jonowodu.

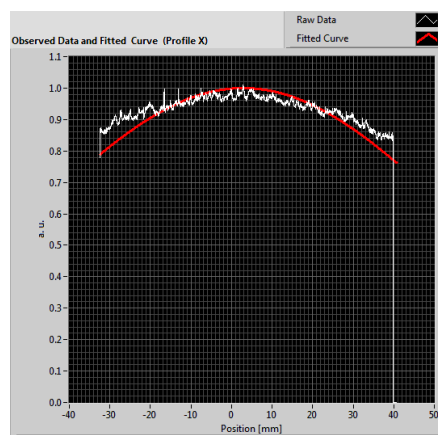
Poniżej przedstawiono profile X i Y obrazów wiązki z Rysunku 21 i 22. Dla porównania przedstawiono profile wykonane programem ProBlmS oraz programem Origin na podstawie obrazu tiff z kamery CCD.



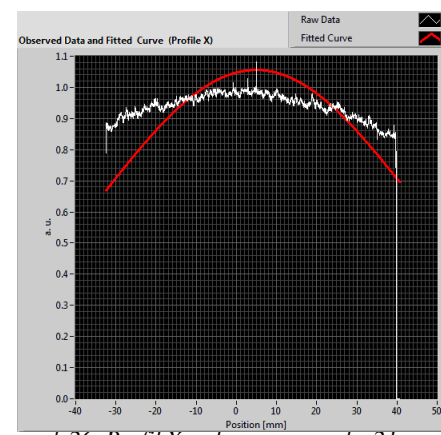
Rysunek 25. Profil Y z obrazu z rysunku 21 uzyskany programem ProBlmS



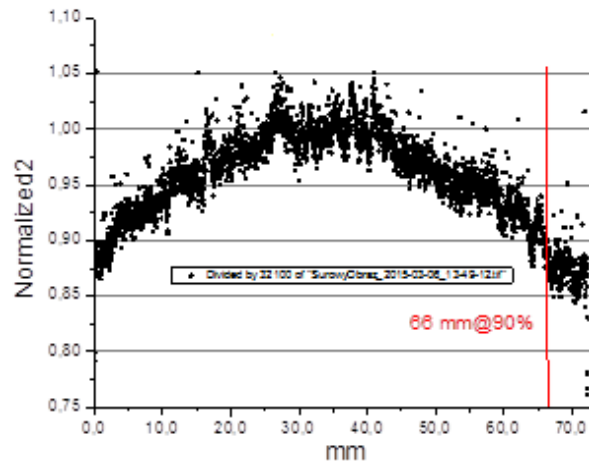
Rysunek 26. Profil Y z obrazu z rysunku 22 uzyskany programem ProBlmS



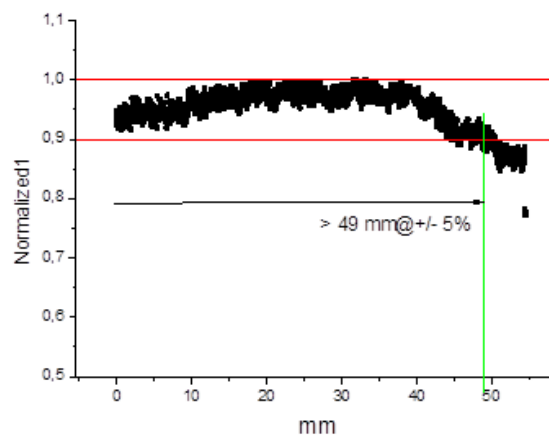
Rysunek 25. Profil X z obrazu z rysunku 22 uzyskany programem ProBlmS.



Rysunek 26. Profil X z obrazu z rysunku 21 uzyskany programem ProBlmS.

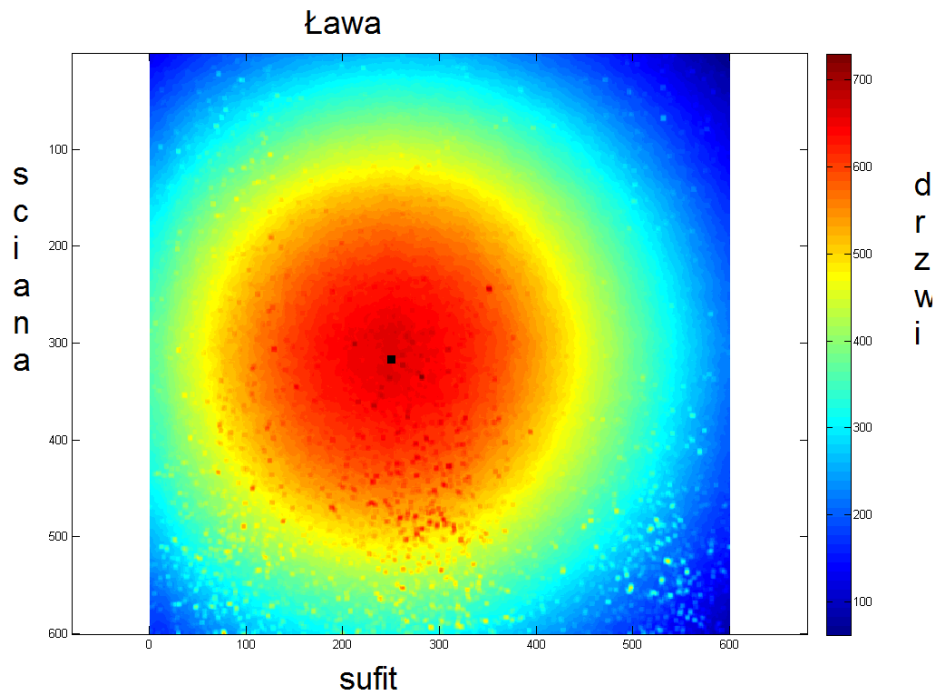


Rysunek 27. Profil X obrazu z rysunku 22. Profil wykonano z obrazu tiff programem Origin.

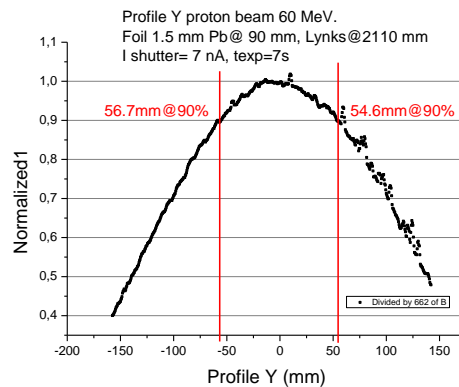


Rysunek 28. Profil Y obrazu z rysunku 22. Profil wykonano z obrazu tiff programem Origin.

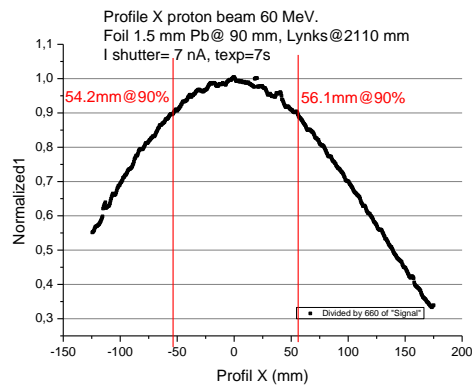
Dla porównania wykonano zdjęcia kamerą Lynks, którą ustawiono w tej samej odległości od końca jonowodu (2110 mm), co kamerę CCD. Kamerę ustawiono na osi jonowodu (oś na ławie) przy pomocy pionu. Odległość od powierzchni scyntylatora do jonowodu mierzono z obu stron kamery. Wysokość centrum kamery mierzono od powierzchni ławy (tak aby zachować odległość centrum jonowodu od powierzchni ławy).



Rysunek 29. Obraz wiązki protonów o energii 60 MeV rozproszonej przez folie ołowianą. Jednostki osi X i Y to piksele (odległość między dwoma sąsiednimi pikselami 0.5 mm). Obraz jest odwrócony względem rzeczywistości.



Rysunek 30. Profil Y obrazu z rysunku 28. Profil wykreślono programem Origin.



Rysunek 31. Profil X obrazu z rysunku 28. Profil wykreślono programem Origin.

Zdjęcia wykonane kamerą CCD i przyrządem Lynks wykazują różną szerokość profili X i Y dla sygnału na poziomie 90% (51 mm i 111,3 mm dla profilu Y (odpowiednio Rysunek 28 i 30) oraz 66 mm i 110,3 mm dla profilu X (odpowiednio Rysunek 27 i 31)). Różnica ta spowodowana jest prawdopodobnie różną charakterystyką energetyczną scyntylatorów użytych w kamerze CCD i przyrządzie Lynks lub istnieniem warstwy ochronnej przed scyntylatorem w przyrządzie Lynks.

4.2 Pomiar prądu wiązki protonów układem z puszką Faraday'a.

4.2.1 Pomiar prądu nierozproszonej wiązki protonów.

Do pomiarów wiązki protonów zastosowano układ pomiarowy z Rysunku 32-34 składający się z puszek Faraday'a, komory jonizacyjnej PTW 7861 oraz kolimatora o średnicy 30 mm i grubości 15 mm wykonanego z mosiądzu. Mierzony prąd jest prądem całkowitym, nie normalizowanym do powierzchni np. puszek Faraday'a. W kolejnych krokach pomiarowych usuwano kolimator i komorę jonizacyjną celem stwierdzenia jaki wpływ na wynik pomiaru ma obecność w/w elementów.



Rysunek 32. Układ do pomiaru wiązki protonów z usuniętą komorą jonizacyjną i kolimatorem 30 mm.

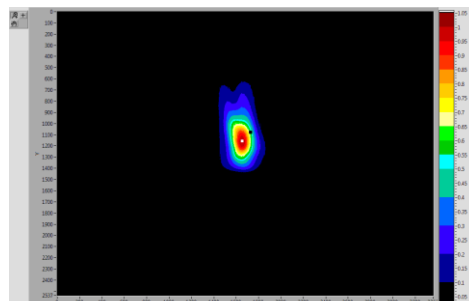


Rysunek 33. Układ do pomiaru wiązki protonów: puszka Faraday'a, komora jonizacyjna PTW, kolimator 30 mm.



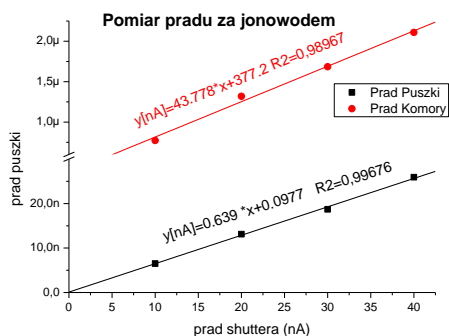
Rysunek 34. Układ do pomiaru wiązki protonów z usuniętym kolimatorem 30 mm.

Obraz wiązki z kamery CCD mierzonej układem z Rysunku 32-34 przedstawia Rysunek 35.

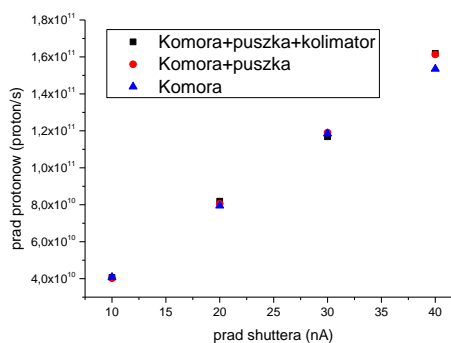


Rysunek 35. Obraz wiązki zmierzony kamerą CCD ustawionej w miejscu gdzie znajduje się puszka Faraday'a. $FWHM_x = 4.3 \text{ mm}$, $FWHM_y = 8.6 \text{ mm}$

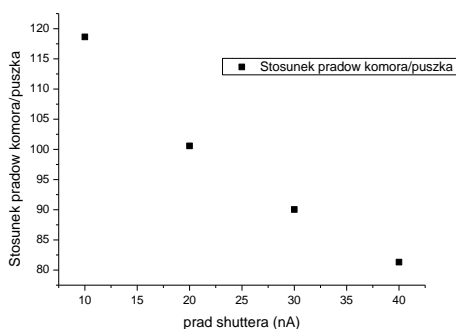
Wyniki pomiarów wiązki protonów w różnych konfiguracjach przedstawiają Rysunki 36-38.



Rysunek 36. Porównanie prądów mierzonych



Rysunek 37. Wpływ obecności kolimatora i komory jonizacyjnej na wynik pomiaru prądu puszką Faraday'a



Rysunek 38. Stosunek prądów komory jonizacyjnej i puszką Faraday'a w funkcji prądu mierzonego na shutterze technicznym cyklotronu AIC-144.

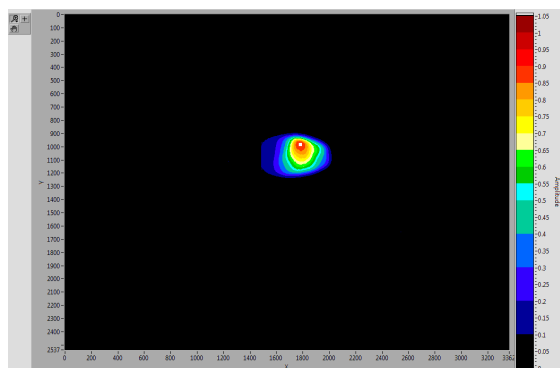
Wpływ obecności elementów pomiarowych ujawnia się wyraźnie dla mniejszych (10 - 40 nA Rysunek 38) wartości prądu mierzonego na shutterze technicznym. Fakt ten może być powodowany przez:

- zmianę wartości prądu cyklotronu AIC-144 w trakcie pomiaru. Nie ma możliwości pomiaru prądu wiązki protonów w jonowodzie bez wprowadzania zakłóceń (zmiana energii, rozpraszanie wiązki),
- wraz ze wzrostem prądu cyklotronu może maleć udział protonów daleko od rdzenia wiązki. Usunięcie kolimatorów przed puszką Faraday'a spowoduje w tej sytuacji wzrost wartości dla mniejszych prądów.

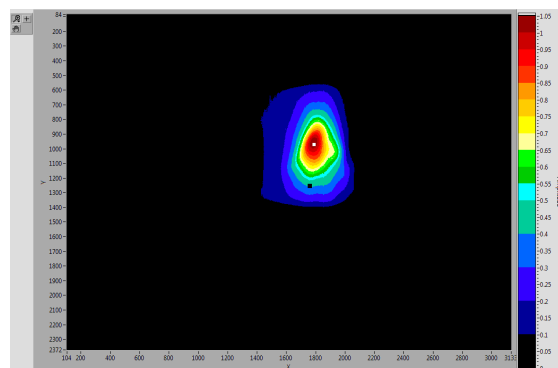
4.2.2 Pomiar prądu rozproszonej wiązki protonów układem z puszką Faraday'a.

4.2.2.1 Przygotowanie wiązki

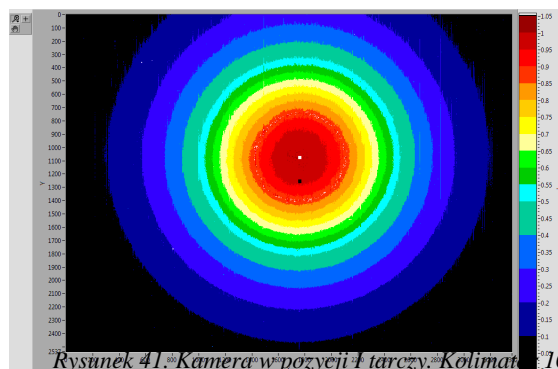
Wiązkę do pomiarów przygotowano stosując procedurę opisana w 3.1, z tym, że pomiaru referencyjnego wykonano za pomocą kamery umieszczonej w pozycji Tarcza I (30 cm od jonowodu). Obrazy wiązki z tej pozycji kamery i ich parametry prezentują Rysunki 39-41, oraz Tabela 4. Na końcu jonowodu umieszczono kolimator 10 mm.



Rysunek 39. Kamera w pozycji I tarczy. Kolimator 10 mm.



Rysunek 40. Kamera w pozycji I tarczy, brak kolimatora.



Rysunek 41. Kamera w pozycji I tarczy. Kolimator 10 mm. Folia ołowiana rozpraszająca 1,5 mm na kolimatorze.

Tabela 4 Parametry obrazów wiązki wykonanych kamerą CCD.

Lp.	1	2	3	4
Odległość [mm]	I Tarcza	I Tarcza	I Tarcza	Tarcza II (1360)
Kolimator [mm]	brak	10	10	brak
Folia	brak	brak	1,5 Pb	brak
DistX [mm]	0,774	0,408	0,215	1.655
DistY [mm]	2,042	5,826	-0,28	-2.107
Prąd shutter [nA]	0,6	1,1	2	4,5
Normalizacja	54000	54000	37000	57000
FWHMx[mm]	5,8	5,329	32,9	25,1
FWHMy[mm]	9,8	4,874	32	26,8
Czas ekspozycji[s]	1,5	1	20	5

gdzie:

DistX – różnica pomiędzy współrzędną *x* środka ciężkości wiązki a środkiem stanowiska.

DistY – różnica pomiędzy współrzędną *y* środka ciężkości wiązki a środkiem stanowiska.

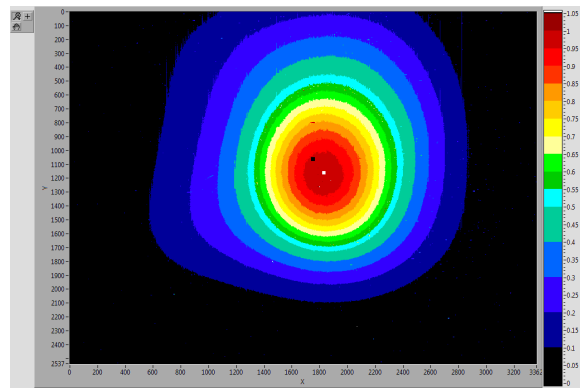
Odległość – odległość w mm powierzchni scyntyлятора kamery CCD a powierzchnią końcową jonowodu.

Normalizacja – poziom normalizacji wybierany jest przez użytkownika.

Energia – średnia energia protonów po przejściu przez rozpraszającą płytkę z PMMA. Źródło protonów punktowe o energii 60 MeV. Obliczenia dla 100 protonów programem SRIM 2012.

Czas ekspozycji – czas mechanicznego otwarcia migawki w kamerze CCD.

Wykonano również zdjęcie wiązki w miejscu położenia II tarczy fluorescencyjnej, gdzie zostały wykonywane pomiary w konfiguracji bez kolimatora i folii rozpraszającej. Parametry wiązki wskazują, że *DistX* równa się 1,7 mm i *DistY* równa się -2,1 mm co odpowiada przemieszczeniu osi wiązki w lewo i na dół (patrzac od strony wiązki) (Rysunek 42).



Rysunek 42. Obraz wiązki w odległości 136 cm (II Tarcza).
Biały punkt – środek ciężkości wiązki, czarny- środek stanowiska mierzony w miejscu Tarczy I.

4.2.2.2 Pomiar parametrów wiązki protonów dla różnych energii protonów

W celu pomiarów wiązki dla różnych energii protonów kamerą CCD przygotowano zestawy płytek w różnych konfiguracjach. Energię protonów dla różnych konfiguracji płytek obliczano korzystając z programu SRIM2012. Przyjęto, że energia wejściowa protonów (na powierzchni płytki) to 60 MeV. Kolumna WET w Tabeli 5 oznacza grubość warstwy wody przyjęta do obliczeń w programie SRIM2012. Kolumna WET płytek oznacza sumaryczny ekwiwalent wody płytek o podanych numerach zmierzony przez Samodzielną Pracownię Terapii Protonowej w IFJ PAN. Wartości WET podawane są w mm H₂O.

Tabela 5 Zestawienie energii protonów i płytek z PMMA.

Lp.	Energia [eV]	SD	RDS%	WET	Nr płytki	WET płytek	Odległość [mm]	Odległość płytek [mm]	Prąd shuttera [nA]
1	5,01E+07	3,45E+05	0,7	8.5	13+16+15	8,64	1360	145	4,3
2	4,01E+07	5,03E+05	1,3	15.8	27+17+15	15,72	1360	145	4,0
3	2,99E+07	6,72E+05	2,2	21.8	18+28+11	21,90	1360	145	4,0
4	2,07E+07	1,11E+06	5,4	26	24+28	26,17	1360	145	4,3

Obrazy wiązki i jej parametry dla różnych energii przedstawione są na rysunkach 43 – 46 oraz w Tabeli 6.

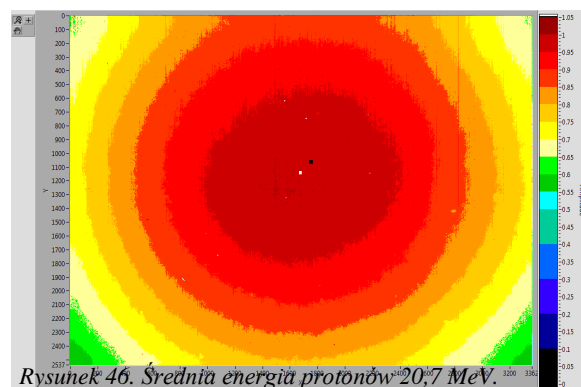
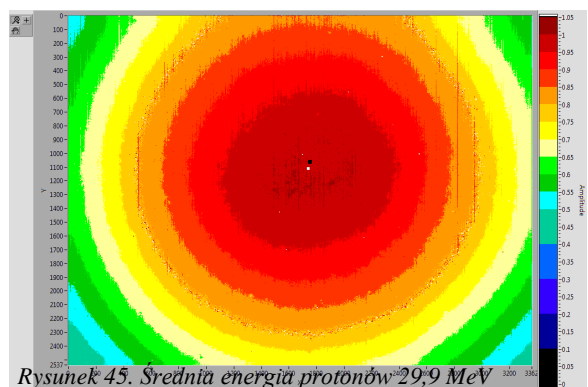
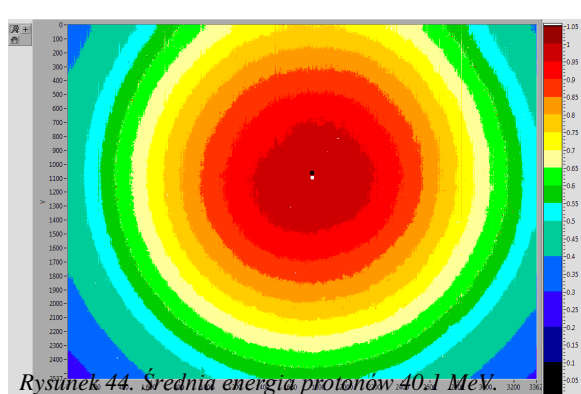
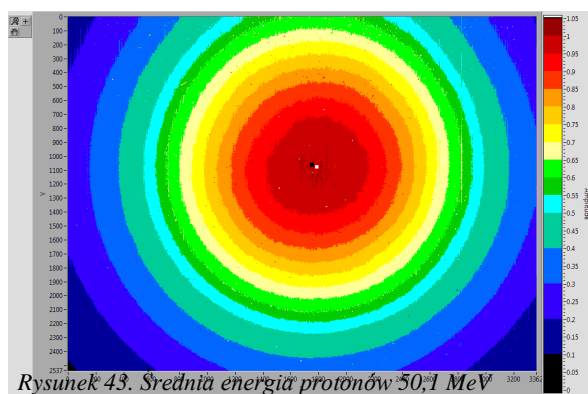


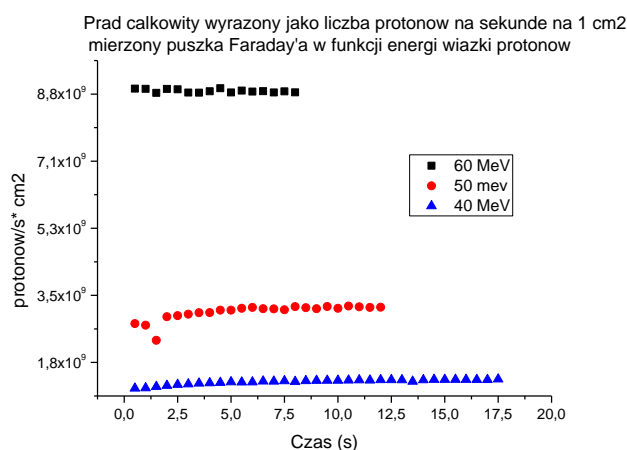
Tabela 6 Parametry wiązki protonów o różnych energiach w odległości 136 cm od jonowodu.

Lp.	1	2	3	4
Energia [eV]	5,01E+07	4,01E+07	2,99E+07	2,07E+07
Odległość [mm]	1360	1360	1360	1360
DistX [mm]	0,688	0,043	-0,279	-1,655
DistY [mm]	-0,322	-0,709	-1,032	-1,655
Prąd shutter [nA]	4,3	4,0	4,0	4,3
Normalizacja	54500	54000	41000	50500
FWHMx [mm]	60,4	70,618	91,1	106
FWHMy [mm]	50,3	66,2	84,7	101,5
Czas ekspozycji [s]	20	30	30	45

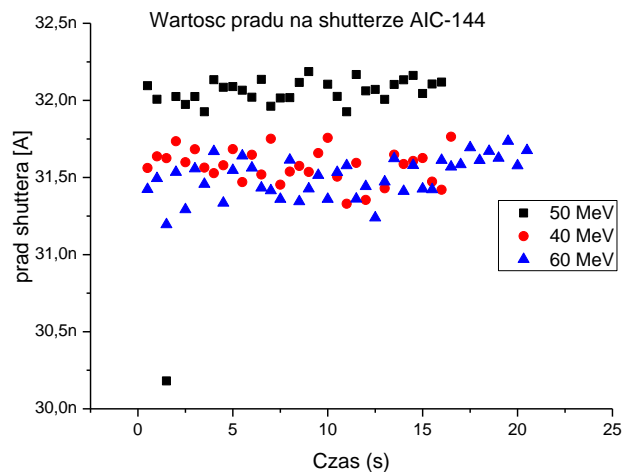
4.2.2.3 Pomiar prądu wiązki rozproszonej puszką Faraday'a

Po określeniu parametrów wiązki mierzono prąd puszką Faraday'a dla różnych energii protonów. Układ pomiarowy przedstawiono na rysunku 33, w którym odległość kolimator -puszka Faraday'a wynosi 30 mm. Odległość płytek rozpraszających od powierzchni końcowej kolimatora to 145 mm.

Na wykresie poniżej nie przedstawiono wartości prądów dla energii 20 i 30 MeV, ponieważ wartości prądów dla tych energii wiązki rozproszonej były niemierzalne. Prąd ciemny układu pomiarowego wynosi -3,5 pA a jego odchylenie 1,3 pA. Po przeliczeniu wartości prądu na liczbę protonów na sekundę i znormalizowaniu do powierzchni puszki Faraday'a wykres przedstawia się następująco (Rysunek 47). W trakcie pomiaru wahania prądu wiązki cyklotronu wynosiły +/- 2.5%. (Rysunek 48).



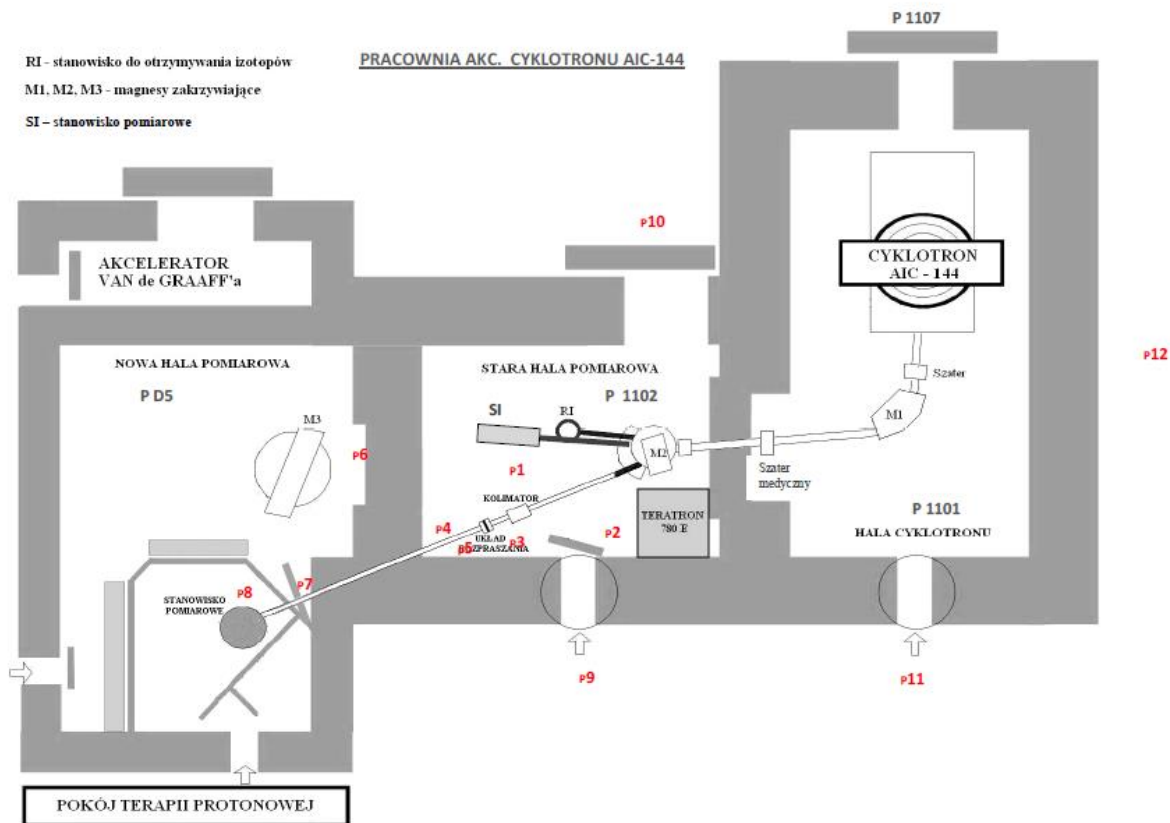
Rysunek 47. Prądy wiązki dla różnych energii protonów.



Rysunek 48. Wartość prądu wiązki mierzona na shutterze każdorazowo przed pomiarem prądu.

5 Pomiary dozymetryczne

Pomiary mocy dawki promieniowania gamma oraz neutronowego wykonano za pomocą radiometru FH-40 G-10 nr 022100 wraz z detektorem promieniowania neutronowego typu FHT 762 nr 0236. Prąd wiązki 100 nA mierzono na tarczy shuttera technicznego. Położenie punktów pomiarowych (oznaczonych na rysunku jako Pn w kolorze czerwonym gdzie n jest numerem punktu pomiarowego) przedstawiono na poniższym rysunku.



Rysunek 49. Położenia punktów pomiarowych wokół stanowiska do naświetlań na hali 1102.

Wartości zmierzonych wartości mocy dawek w odpowiednich punktach przedstawia poniższa tabela.

Tabela 7 Wartości mocy dawki promieniowania gamma i neutronowego w wybranych punktach wokół stanowiska pomiarowego na hali 1102.

Nazwa punktu	Moc dawki promieniowania neutronowego [uSv/h]	Moc dawki promieniowania gamma [uSv/h]
P1	1,34E+4	1,95E+3
P2	8,93E+3	7,29E+2
P3	7,82E+3	5,66E+2
P4	4,45E+3	3,4E+2
P5	3,3E+2	16
P12	0	0,4 (tło)
P9	0	0,4
P11	1,6	0,5
P6	22,1	0,5
P7	0,023	4,15
P10	0,342	0,2
P8	0	0,1

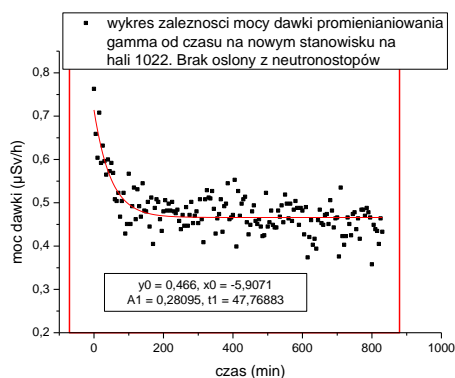
Zmierzono wpływ obecności osłony wykonanej z neutronostopów (Rysunek 51) umieszczanej na końcu ławy optycznej na aktywacje metalowych elementów ściany hali (mierzonej jako zanik promieniowania gamma po zakończeniu ekspozycji wiązką protonów o prądzie 100 nA). Dodatkowo wykonano wykres zależności mocy dawki promieniowania gamma od czasu bez osłony z neutronostopów, co pokazuje Rysunek 52. Mierzono również moc dawki promieniowania gamma oraz neutronowego w ustalonym punkcie (P1 na Rysunku 49) w funkcji prądu wiązki protonów mierzonego na tarczy shuttera technicznego. Prąd ten zmieniano w granicach 2–100 nA, co pokazuje Rysunek 53.



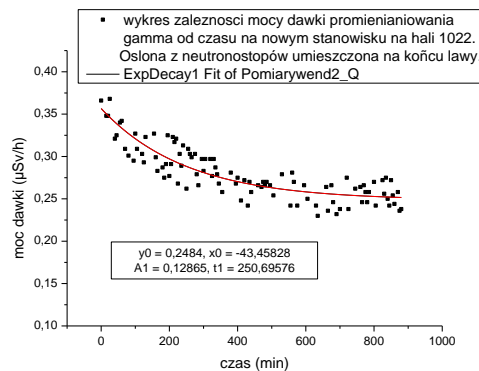
Rysunek 50. Ława optyczna bez osłony.



Rysunek 51. Osłona na końcu ławy optycznej.



Rysunek 52. Wykres przedstawiający związek mocy dawki promieniowania gamma od czasu bez osłony.



Rysunek 53. Wykres przedstawiający związek mocy dawki promieniowania gamma od czasu z osłoną.

Wykonano również pomiar mocy dawki promieniowania gamma i neutronowego w punkcie referencyjnym (Punkt P1 na Rysunku 49) na hali 1102.



Rysunek 54. Obraz przedstawia położenie punktu P1 względem ławy optycznej.

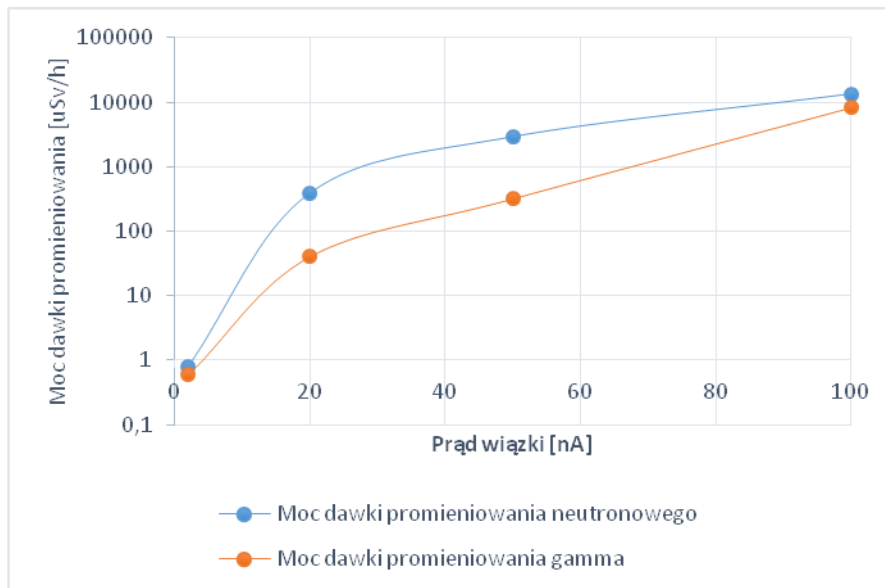
Wyniki pomiarów

umieszczono w

Tabeli 8 oraz na Rysunku 55.

Tabela 8. Wartość mocy dawki w punkcie P1 dla różnych wartości prądu wiązki.

Prąd wiązki [nA]	Moc dawki promieniowania neutronowego [uSv/h]	Moc dawki promieniowania gamma [uSv/h]
100	1,34E+04	8,32E+03
50	2,91E+03	3,23E+02
20	3,92E+02	41
2	8,00E-01	0,6



Rysunek 55. Zależność mocy dawki promieniowania gamma i neutronowego od wartości prądu wiązki.

Charakter wzrostu mocy dawek (nieliniowy) wskazuje, że wraz ze wzrostem wartości prądu wyjściowego wiązki z cyklotronu maleje współczynnik jej transmisji (mierzony jako stosunek wartości prądu: na beam stoperze umieszczonym na ławie optycznej (za magnesem M2) i na shutterze (przed magnesem M2)). Transmisja wiązki przez magnes M2 jest funkcją prądu ekstrakcji (szczególnie dla prądów przekraczających wartość 50 nA).

6 Wnioski

Wykonane pomiary wykazały, że ognisko wiązki (rozumiane jako miejsce gdzie strumień protonów ma kształt symetryczny) znajduje się w odległości 110 – 120 cm od końca jonowodu. W tym miejscu należałoby umieszczać folie rozpraszającą, aby otrzymywać maksymalnie symetryczne profile wiązki. Pomiary prądu wiązki wykonane dla różnych energii protonów wykazały, że osiągnięte gęstości prądu dla energii 60 MeV (wiązka nierozproszona) są rzędu $8,8 \cdot 10^8$ protonów/s \cdot cm² dla pola o średnicy 10 mm o niejednorodności +/- 5% w odległości 136 cm od końca jonowodu. Natomiast dla wiązki o energii 40 MeV gęstość prądu jest rzędu $1,5 \cdot 10^8$ protony/s \cdot cm² dla pola o niejednorodności +/- 5% o średnicy w przybliżeniu 30 mm. Zestawienie parametrów wiązki protonów przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 9 Zebrane parametry wiązki protonów cyklotronu AIC-144.

Pozycja ogniska [mm] ⁽¹⁾	energia [MeV]	tarcza [mmH ₂ O] ⁽²⁾	gęstość prądu [protony/s \cdot cm ²]	średnica pola [mm] ⁽³⁾	prąd shutter [nA]
1100-1200	60	brak	8,80E+08	10	31,5 – 32,5
	50	8,64	3,60E+08	20	
	40	15,72	1,50E+08	30	
	30	21,90	niemierzalny	40	
	20	26,17	niemierzalny	44	

Należy poprawić transmisję wiązki dla wyższych prądów ekstrakcji cyklotronu AIC-144 przez Magnes M2 (Rysunek 13). Proponowane dalsze pomiary i obliczenia mają na celu stworzenie tabeli z parametrami, a w szczególności: emitancję wiązki, energię wiązki, średnicę pola o jednorodności gęstości prądu +/-5%, wartość gęstości prądu, rozmieszczenie folii rozpraszającej i tarczy. Oprócz pomiarów należy wykonać obliczenia z wykorzystaniem programu Fluke.

¹ oznacza pozycje ogniska bez tarcz rozpraszających.

² oznacza odległość tarczy rozpraszającej o danym ekwiwalencie WET od końca jonowodu (145 mm)

³ średnicy pola o niejednorodności +/-5% określonej w odległości 136 cm od końca jonowodu

7 Odwołania

- PTW Freiburg. (2006). Instruction Manual Monitor Chambers Type 786, 7861, 7862, 7863, 34014.
- Boberek, M. (2014, 66). A monitoring system for the 60 MeV radiotherapy proton beam at IFJ PAN using a scintillating screen and a CCD camera. *Romanian Reports in Physics*, strony 5–15.
- F.P.U.H. ERGEN. (2012). *Elektrometr z zasilaczem wysokiego napięcia*.
- M. Tuszewski, S. Z. (1993). Scintillator studies with MeV charged particle beams. *Rev. Sci. Instr.* 64, 2459.
- M. Rydygier. (2015). Application of scintillator based imaging system for 60 MeV proton beam.. *Second Central European Symposium on Radiation Oncology*.
- Nishiura, M. (2006). Characterization of scintillators for lost alpha diagnostics on burning plasma experiments. *Rev. Sc. Instr.* 77, 10E720.
- Rydygier M., e. a. (2015). Application of scintillator based imaging system for 60 MeV proton beam. *Second Central European Symposium on Radiation Oncology*.