



## Wyznaczanie profilu wiązki promieniowania używanego do cechowania tomografu PET

*Ines Moskal*

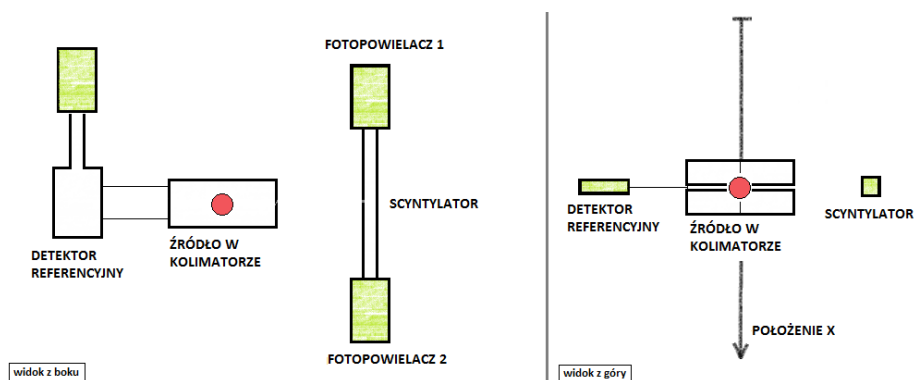
*Studentka, Instytut Fizyki UJ*

Na Uniwersytecie Jagiellońskim prowadzone są badania dotyczące usprawnienia i rozpowszechnienia Pozytonowej Tomografii Emisyjnej (w skrócie – PET). Tomografia PET jest coraz częściej stosowaną w medycynie metodą obrazowania ludzkiego ciała. Do rekonstrukcji obrazu stosuje się w niej kwanty anihilacyjne. Podczas badania pacjentowi zostaje podana substancja promieniotwórcza, która gromadzi się w komórkach nowotworowych. Substancja ta ulega rozpadowi  $\beta^+$ , po którym powstały pozyton anihiluje z elektronem z ciała pacjenta, tworząc dwa kwanty anihilacyjne rejestrowane przez detektory. Kwanty te poruszają się w przeciwnych kierunkach pod kątem  $180^\circ$ , co przy odpowiedniej statystyce rozpadów umożliwia zlokalizowanie komórek chorobowych.

W warunkach laboratoryjnych kwanty anihilacyjne otrzymujemy z silnego źródła promieniotwórczego emitującego pozytony, takiego jak na przykład izotopy germanu  $^{68}\text{Ge}$  lub sodu  $^{22}\text{Na}$ . Kwanty są emitowane izotropowo we wszystkich kierunkach, więc by większość z nich trafiała w wyróżniony obszar, źródło musi zostać skolimowane. Do tego celu stosuje się ołowiane bloki ze szczelinami wąskimi na kilka milimetrów, do których wkłada się substancję promieniotwórczą.

Teraz musimy zadać sobie pytanie, do czego potrzeba dobrze skolimowanej wiązki?

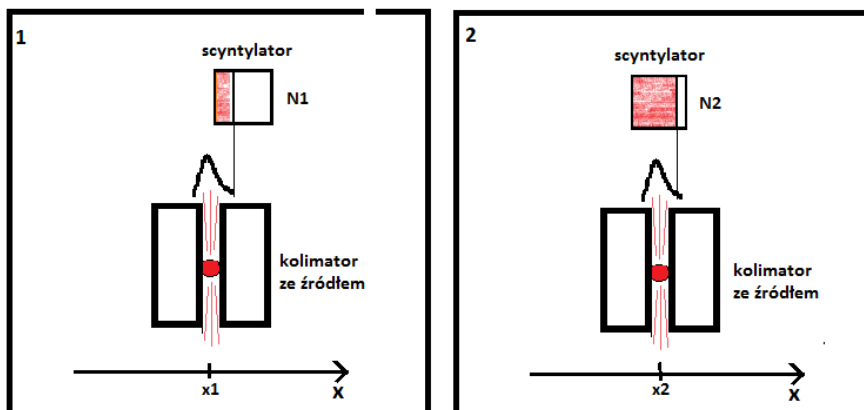
Jedną z podstawowych cech tomografu jest jego rozdzielczość przestrzenna, czyli miara dokładności odwzorowania szczegółów badanego obrazu. Rozdzielczość ta musi być wyznaczona dla całego detektora, ponieważ jej znajomość jest potrzebna do prawidłowej rekonstrukcji obrazu. Żeby wyznaczyć rozdzielczość przestrzenną tomografu naświetla się ustalone miejsce kwantami anihilacyjnymi i na podstawie sygnałów rejestrowanych w tomografie rekonstruuje się to miejsce. W idealnym przypadku w wyniku rekonstrukcji powinno się otrzymać współrzędne punktu naświetlania. Jednak w rzeczywistości otrzymuje się rozkład punktów, którego rozmycie mówi o rozdzielczości przestrzennej urządzenia i o rozmiarach wiązki kwantów anihilacyjnych użytych do naświetlania. Zatem, aby z takich pomiarów móc określić rzeczywistą rozdzielczość przestrzenną tomografu, musimy znać rozkład intensywności w przestrzeni (profil) wiązki kwantów anihilacyjnych.



Rys. 1. Układ doświadczalny do wyznaczania profilu wiązki składający się z detektora scyntylacyjnego, źródła Germanu-68 umieszczonego w kolimatorze, detektora referencyjnego, który przemieszcza się wraz z kolimatorem oraz układu mechanicznego umożliwiającego przesuwanie kolimatora co 0,1 mm

W tym artykule przedstawiony został sposób wyznaczania profilu wiązki kwantów anihilacyjnych oraz wyniki otrzymane podczas badań autorki w trakcie wakacyjnej praktyki naukowej na Uniwersytecie Jagiellońskim. Wykonane pomiary profilu wiązki pomogą określić rozdzielczość przestrzenną nowego emisyjnego tomografu pozytonowego.

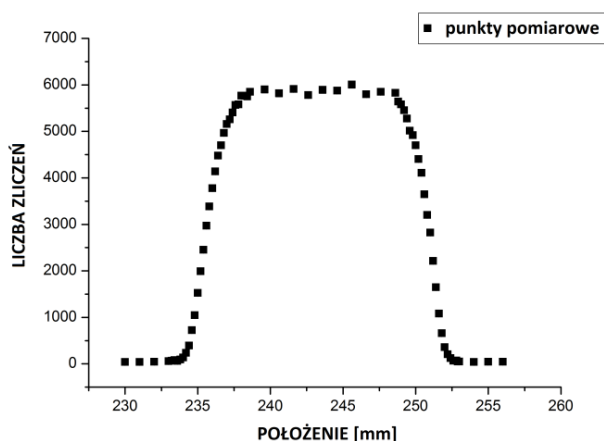
Metoda stosowana w omawianym pomiarze polega na przesuwaniu krokowo wzdłuż scyntylatora kolimatora ze źródłem, połączonych na sztywno z detektorem referencyjnym. Układ pomiarowy pokazany jest schematycznie na rys. 1. Dla każdego położenia mierzona jest liczba zdarzeń takich, gdy jednocześnie zarejestrowane zostały sygnały w scyntylatorze używanym do pomiarów profilu oraz w detektorze referencyjnym. Wymaganie jednoczesnego impulsu w obu detektorach zapewnia, że badamy kwanty anihilacyjne, które zawsze wytwarzane są jako para kwantów lecących w przeciwnych kierunkach. Wymaganie to redukuje znacząco liczbę przypadków, kiedy w scyntylatorze zarejestrowany jest kwant gamma nie pochodzący z anihilacji, tylko na przykład z przemiany jądrowej w źródle.



N1, N2 - liczba zarejestrowanych sygnałów  
x1, x2 - położenie źródła

Rys. 2. Schemat obrazujący ideę pomiaru profilu wiązki. Na rysunku pokazane są dwa przykładowe ustawienia kolimatora i scyntylatora. Na czerwono (tu – kolor szary) oznaczony jest obszar scyntylatora oświetlany wiązką kwantów anihilacyjnych

Liczba zliczeń na ustaloną jednostkę czasu zwiększa się, gdy wiązka kwantów wchodzi w zakres detektora, aż do osiągnięcia liczby maksymalnej, która utrzymuje się, dopóki położenie źródła nie wyjdzie poza zasięg detektora (jest to zobrazowane na rys. 2). W pierwszym przybliżeniu zakres położzeń, w którym następuje wzrost liczby zliczeń mówi nam o szerokości wiązki kwantów gamma. Wynik pomiaru pokazany jest na rys. 3.



Rys. 3. Dane uzyskane podczas eksperymentu. Liczba koincydencji w funkcji położenia kolimatora względem scyntylatora. Pomiar dla każdego położenia trwał tyle samo. Wartości absolutne na osi poziomej wyrażają położenie odczytywane na urządzeniu do przesuwania kolimatora

Na rys. 3 widać, że od miejsca, w którym wiązka zaczyna nachodzić na scyntylator (około 234 mm) liczba zliczeń w funkcji położenia zaczyna rosnąć i rośnie coraz szybciej do momentu aż maksimum intensywności wiązki wejdzie w obszar scyntylatora (około 237 mm), a następnie liczba zdarzeń dalej rośnie, ale już wolniej. Dla położenia około 237 mm widać punkt przegięcia krzywej. Powyższy opis pokazuje, że z pomiaru zależności liczby zliczeń w funkcji położenia możemy nie tylko określić szerokość całej wiązki, ale możemy także wyznaczyć szczegółowo jej profil, różniczkując zmierzoną krzywą.

Aby wykazać, że różniczkowanie funkcji wyznaczonej na wykresie pozwoli na zrekonstruowanie profilu wiązki, oznaczymy zmierzoną liczbę zdarzeń w funkcji położenia jako funkcję  $M(x)$ .  $M(x)$  możemy wyrazić jako spłot profilu wiązki  $h(x)$  oraz wydajności detektora  $g(x)$ .

$$M(x) = h(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x-x')g(x')dx'$$

Powyższy spłot oznacza, że dla danego położenia środka kolimatora ( $x$ ) do detektora w przedziale  $dx'$  wokół położenia  $x'$  dolatują kwanty gamma z intensywnością  $h(x-x')$  i są rejestrowane z wydajnością  $g(x')$ . Teoretycznie, żeby uzyskać liczbę zdarzeń mierzoną przez cały detektor, musimy wycalkować wyrażenie  $h(x-x')g(x')dx'$  dla wszystkich możliwych wartości  $x'$ . Powyższe wyrażenie upraszcza się, ponieważ wydajność rejestrowania detektora możemy zdefiniować jako:

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } x \in [a, b] \\ 0 & \text{jeśli } x \notin [a, b] \end{cases}$$

gdzie ' $a$ ' i ' $b$ ' określają pozycję początkową i końcową detektora. To ograniczenie umożliwia wykluczenie sygnałów, które są poza zakresem scyntylatora. Gdy wykorzystamy to równanie, otrzymujemy:

$$M(x) = h(x) * g(x) = \int_a^b h(x-x')dx'$$

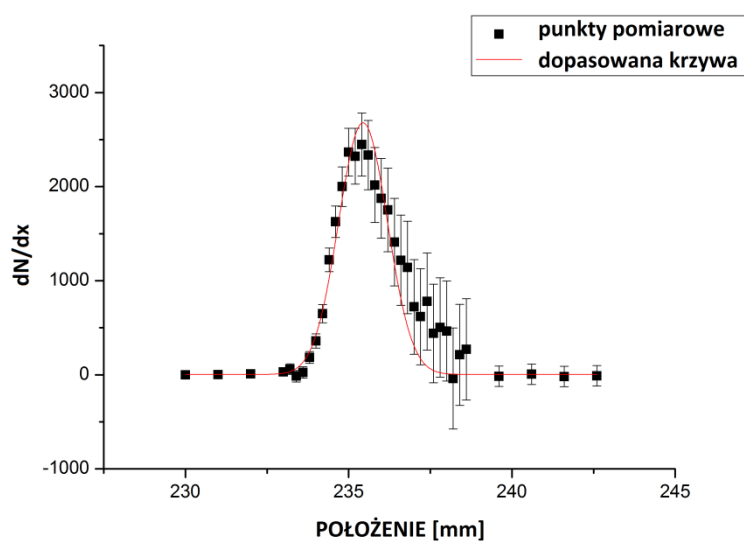
Zróżniczkowanie funkcji  $M(x)$  daje nam następujące wyrażenie:

$$\frac{d}{dx}M(x) = h(x-b) - h(x-a)$$

Powyższe wyprowadzenie pokazuje, że ze zmierzonej krzywej  $M(x)$  po zróżniczkowaniu otrzymuje się funkcję  $h(x)$  opisującą profil wiązki. Wyrażenie  $h(x-b) - h(x-a)$  oznacza, że po zróżniczkowaniu otrzymujemy profil dwa razy: wokół punktu  $b$  (jednego brzegu detektora) i wokół punktu  $a$  (drugiego brzegu). Czyli gdy wiązka wchodzi w zakres detektora oraz gdy wiązka opuszcza ten zakres.

Dla przykładu na rys. 4 pokazany jest profil wiązki otrzymany po zróżniczkowaniu zmierzonej funkcji  $M(x)$  (rys. 3) w pobliżu jednego z brzegów detektora. Otrzymany wynik (rys. 4) pokazuje, że wiązka ma w połowie intensywności rozmiary około 2 mm i daje się dobrze przybliżyć rozkładem Gaussa o odchyleniu standardowym 0,6 mm.

Dzięki tej metodzie można w powtarzalny sposób wyznaczyć profil wiązki kwantów gamma, używanej przy wyznaczaniu rozdzielczości przestrzennej tomografu.



Rys. 4. Otrzymany profil wiązki. Linia ciągła oznacza krzywą Gaussa dopasowaną do punktów pomiarowych. W wyniku dopasowania otrzymano odchylenie standardowe wynoszące 0,6 mm