

Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Adam Ciesielski

Nr albumu: 1039886

**Badanie właściwości detektorów
scyntylicyjnych otoczonych lustrami pod
kątem zastosowania w Pozytonowej
Emisyjnej Tomografii**

Praca licencjacka
na kierunku Fizyka Teoretyczna

Praca wykonana pod kierunkiem
prof. dra hab. Pawła Moskala
Instytut Fizyki, Zakład Fizyki Jądrowej

Kraków 2014

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Kraków, dnia

Podpis autora pracy

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Kraków, dnia

Podpis kierującego pracą

Spis treści

1	Cel pracy	5
2	Wprowadzenie do tomografii	6
2.1	Zasada działania tomografii pozytonowej	6
2.2	Rejestracja koincydencji	6
2.3	TOF	7
2.4	J-PET	8
3	Zasada działania detektorów scyntylacyjnych	9
3.1	Oddziaływanie promieniowania γ z materią	9
3.2	Scyntylatory	9
3.3	Fotopowielacz	10
4	Doświadczenie	12
4.1	Aparatura pomiarowa	12
4.2	Scyntylator	13
4.3	Folia vikuiti	13
4.4	Lustra	14
4.5	Przebieg doświadczenia	14
5	Wyniki i dyskusja	17
5.1	Zmiana charakteru sygnału	17
5.2	Rozmycie sygnału	17
5.3	Ilość wpadającego światła	19
5.4	Porównanie rozkładu amplitud i ładunków	20
5.5	Otrzymana rozdzielczość czasowa	22
5.6	Dyskusja	24
6	Podsumowanie	26
	Bibliografia	27

1 Cel pracy

Skanery PET pozwalają na nieinwazyjne obrazowanie rozkładu gęstości radiofarmaceutyków w ciele pacjenta. W wyniku anihilacji pozytonów (emitowanych przez radiofarmaceutyk) i elektronów w ciele pacjenta, najczęściej emitowane są dwa kwanty gamma poruszające się w przeciwnych kierunkach. Następnie rejestrowane są one w detektorach otaczających pacjenta. W oparciu o wyznaczone miejsca reakcji kwantów gamma w detektorach rekonstruowany jest rozkład gęstości miejsc anihilacji [1, 2, 3].

Nowa metoda obrazowania, TOF-PET (z ang. Time of Flight Positron Emission Tomography) mierzy różnicę czasów pomiędzy pojawieniem się dwóch kwantów gamma w detektorach [4]. Wykorzystanie scyntylatorów organicznych w PET pozwala na polepszenie dokładności TOF wobec standardowych tomografów TOF-PET zbudowanych ze scyntylatorów nieorganicznych [5, 6]. Dokładność zmierzenia różnicy czasów wpływa na rozdzielczość przestrzenną rekonstrukcji, dlatego jest to najważniejsza wielkość brana pod uwagę przy projektowaniu skanerów TOF-PET. Jeden z najlepszych, obecnie dostępnych skanerów posiada rozdzielczość czasową obrazu około 550 ps [7].

Celem pracy było zaprojektowanie i zmontowanie układu pomiarowego w którym scyntylator był otoczony lustrami, zbadanie go i sprawdzenie czy scyntylatory otoczone lustrami pozwalają na uzyskanie lepszych czasowych zdolności rozdzielczych. Lustra były naparowane z jednej strony warstwą aluminium, zaś folią użytą do pomiarów kontrolnych była folia o nazwie **vikuiti** firmy 3M [8].

Badania były wykonywane pod kątem użyteczności w emisyjnej tomografii pozytonowej. Dla pięciu położeń źródła zbadana została rozdzielczość czasowa, która jest najważniejszym parametrem wyznaczającym dokładność pomiaru w metodzie obrazowania rozwijanej przez grupę J-PET [9]. Oprócz tego wyznaczone zostały histogramy ładunków i amplitud, a także policzone uśrednione kształty sygnałów.

2 Wprowadzenie do tomografii

2.1 Zasada działania tomografii pozytonowej

Główną ideą tomografii pozytonowej jest lokalizacja źródła promieniotwórczego za pomocą precyzyjnej aparatury. W zastosowaniu medycznym podajemy pacjentowi radiofarmaceutyk - lekarstwo zawierające radioaktywny izotop (w bezpiecznej dawce). W procesie metabolizmu lekarstwo magazynuje się w aktywnych miejscach [1, 2, 3]. Izotop ulega rozpadowi promieniotwórczemu β^+ . Pozyton powstający w reakcji ulega anihilacji z elektronem z ciała pacjenta i emituje parę kwantów γ w przeciwnych kierunkach. Jednoczesne pojawienie się fotonów powstających z anihilacji pozwala na identyfikację par fotonów dzięki rejestracji koincydencji czasowej dwóch detektorów z całego układu otaczającego pacjenta. System detektorów z pomocą odpowiedniego oprogramowania oblicza miejsce zdarzenia. Używając metod obrazowania otrzymać można rozkład gęstości całej radioaktywnej substancji w ciele pacjenta [4, 5, 6, 10].

Rozpad β

Rozpad β^+ jest rozpadem promieniotwórczym wzbudzonego jądra (izotopu) atomowego. W rozpadzie tym proton zamieniany jest w pozyton, neutron i neutrino. W standardowym zapisie:



Natomiast w fizyce cząstek reakcję można opisać jako zamianę kwarku górnego u na dolny d i emisję bozonu W^+ , który rozpada się na pozyton i neutrino. Widmo energetyczne pozytonów w reakcji jest ciągłe [11, 12, 13].

Anihilacja pozytonów

Pozytony z poprzedniej reakcji poruszają się w ciele pacjenta, rozpraszają się, tracą swoją energię kinetyczną. Anihilacja pary e^+e^- następuje gdy energia pozytonu spadnie do kilku keV [12, 14]. Daje to ograniczenie na precyzję lokalizacji źródła rozpadu β (nawet do kilku mm). W istocie para e^+e^- w zależności od wzajemnego układu spinów cząstek może rozpaść się też na trzy kwanty γ (co zdarza się w przypadku równoległych spinów, w 0,03% przypadków) [14, 15].

Zastosowanie

Do organizmu można wprowadzić substancję chemiczną znakowaną izotopem ulegającym rozpadowi β^+ , zwaną radiofarmaceutykiem. W procesie metabolizmu rozprzestrzenia się on po organizmie tworząc pewien charakterystyczny rozkład gęstości. Zrekonstruowanie rozkładu gęstości radiofarmaceutyku pozwala na wykrycie obszarów o wzmocnionym metabolizmie [2, 15]. Bardzo często upośledzony metabolizm niektórych organów jest efektem widocznym nowotworów. Tomografia pozytonowa znalazła swoje zastosowanie w specjalistycznej medycynie i weterynarii. Jest szeroko stosowana w diagnostyce, m. in. w onkologii, kardiologii, neurologii i psychiatrii [16, 17].

2.2 Rejestracja koincydencji

Istnieje szereg czynników, które mają wpływ na jakość obrazowania, mogąc pogorszyć zdolność rozdzielczą tomografu:

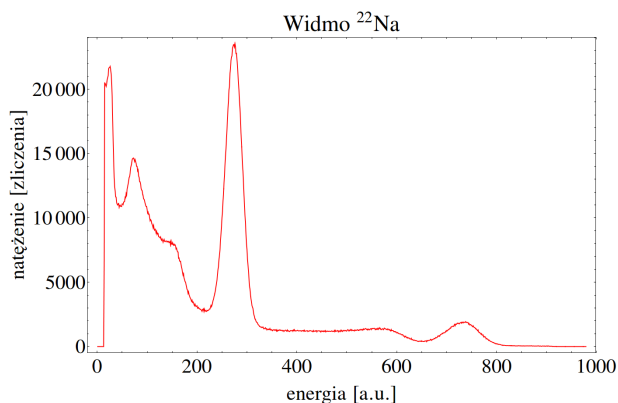
- **Zasięg pozytonów:** Pozytony mają ciągłe widmo, co więcej w organizmie ulegają w zderzeniach z elektronami atomowymi rozpraszaniu pod różnymi kątami. Pozytony nie mają dobrze zdefiniowanego zasięgu, określa się kulę, w której zatrzyma się określony procentaż cząstek. Przyjmuje się, że pozytony używane w metodzie PET mają zasięg kilku milimetrów.
- **Powstanie pozytonium:** Podczas anihilacji pozytonu z elektronem może powstać pozytonium rozpadające się na trzy fotony o różnym wówczas rozkładzie energii.
- **Rozproszenie kwantów:** Powstające fotony biegnące przeciwnie reagują z materią. Znaczący wpływ ma zjawisko fotoelektryczne oraz efekt Comptona.

- **Koincydencje:** Z wielu powodów (również wspomnianych wyżej) dwa fotony rejestrowane w ustalonym odstępie czasu na określonej parze przeciwległych detektorów nie zawsze pochodzą z rzeczywistej koincydencji. W wyniku rozproszenia w ośrodku (i w konsekwencji zmiany kierunku propagacji fotonów) powstają koincydencje tzw. „rozproszenia”. W wyniku detekcji dwóch niezależnych fotonów w tym samym czasie na wspomnianej parze detektorów obserwujemy koincydencje „przypadkowe”. Istnieją również koincydencje „wielokrotne”, gdy w ustalonym dla jednej koincydencji przedziale czasowym rejestrujemy więcej niż jeden foton.

W przykładowym widmie kwantów anihilacyjnych zmierzonych detektorem scyntylacyjnym z kryształów NaJ możemy wyróżnić:

- Maksimum pełnego pochłaniania kwantów pochodzących bezpośrednio z rozpadu β^+ ($E \approx 1,28$ MeV).
- Krawędź comptonowska od rozproszonych kwantów rozpadu β^+ ($E \approx 1,067$ MeV).
- Maksimum pełnego pochłaniania kwantów anihilacyjnych ($E = 0,511$ MeV).
- Krawędź comptonowska - rozproszone kwanty anihilacyjne ($E \approx 0,341$ MeV).
- Maksimum rozpraszania wstecznego.

Przykładowe widmo - uzyskane podczas pomiarów na II Pracowni Fizycznej - prezentowane jest na wykresie (Rys. 1). Dobry do celów tomografii detektor powinien mieć dobrą rozdzielczość energetyczną, która pozwala na rozróżnienie pochodzenia poszczególnych sygnałów. Detektor powinien też mieć dobrą wydajność i zapewniać najlepszą rozdzielczość czasową i przestrzenną.



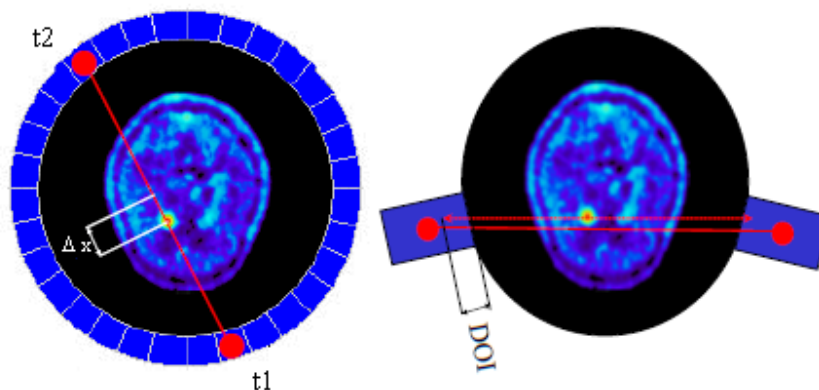
Rysunek 1: Widmo ^{22}Na zbadane podczas pomiarów na II Pracowni Fizycznej UJ detektorem scyntylacyjnym nieorganicznym. Widoczne są niskoenergetyczne szumy aparatury, maksimum rozpraszania wstecznego, krawędź comptonowska, wyraźne maksimum fotonów anihilacyjnych, krawędź fotonów comptonowskich rozpadu β oraz maksimum fotonów tego rozpadu.

2.3 TOF

Wyznaczając linię odpowiedzi (LOR), która służy do rekonstrukcji zdarzenia natrafiamy na różne problemy. Najpoważniejszym jest tzw. głębokość interakcji (DOI). Nie jesteśmy w stanie wyznaczyć miejsca scyntylatora, w którym nastąpiła absorpcja kwantu gamma. Dlatego każdej zaobserwowanej scyntylacji w metodzie rekonstrukcji przypisujemy środek scyntylatora. Jest to czynnik stanowiący problem w uzyskaniu większej rozdzielczości obrazu.

Rozdzielczość można poprawić wyznaczając linię odpowiedzi za pomocą różnicy czasu między przybyciem kwantów gamma do detektora. Ta technika nazywa się TOF (ang. time of flight), a tomografy korzystające z tej techniki określane są jako TOF-PET. Różnica jest zobrazowana na rysunku 2.

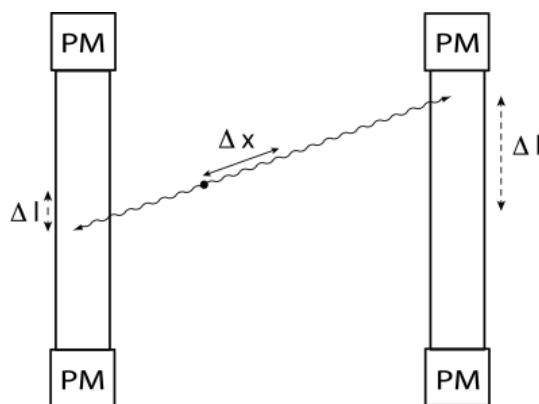
Kryształy nieorganiczne używane w scyntylatorach zapewniają niską rozdzielczość czasową. Scyntylatory organiczne (tańsze w produkcji) są pozbawione tej wady. Są też pozbawione niektórych zalet, dlatego te pierwsze wciąż są szeroko używane nawet z wykorzystaniem techniki TOF-PET. Kryształy nieorganiczne są higroskopijne [19]. Bardzo dobrą rozdzielczość energetyczną wykazują detektory półprzewodnikowe, jednak z powodu niskiej wydajności oraz konieczności pracy w niepraktycznie niskich temperaturach nie są one stosowane [15].



Rysunek 2: Przykładowe rekonstruowanie zdarzenia. Koincydencja wyznaczona z pary detektorów jest obarczona błędem (DOI), natomiast zastosowanie techniki TOF pozwala zwiększyć dokładność pomiaru. Rysunek zaczerpnięty z pracy [18].

2.4 J-PET

Biorąc pod uwagę fakt, że powszechnie dostępne i tanie scyntylatory organiczne charakteryzują się dobrą rozdzielczością czasową tomografia pozytonowa stoi przed szansą udoskonalenia sposobu pomiarów. Zastosowanie szybszych scyntylatorów pozwala zwiększyć efektywność i precyzję, a ich niska cena zmniejszy koszt produkcji takiego urządzenia. Na Uniwersytecie Jagiellońskim powstaje prototyp nowego urządzenia do tomografii, **J-PET** (Jagiellonian - Positron Emission Tomography). Innowacyjność rozwiązania polega na rejestrowaniu kwantów gamma emitowanych z wnętrza ciała pacjenta za pomocą dużych bloków polimerowych. Miejsce i czas uderzenia kwantu gamma w scyntylatorze określane jest na podstawie rozkładu czasu dotarcia sygnałów świetlnych do fotopowielaczy. Stosowaną metodą odtworzenia obrazu będzie również wspomniana wcześniej metoda **TOF** [20, 21]. Schematyczny rysunek wyznaczenia miejsca zdarzenia przedstawiony jest na rysunku 3.



Rysunek 3: Rysunek przedstawiający koncept rekonstrukcji za pomocą pasków polimerowych, z pomocą metody TOF. Rysunek zaczerpnięty z pracy [22].

3 Zasada działania detektorów scyntylacyjnych

3.1 Oddziaływanie promieniowania γ z materią

Promieniowanie γ może oddziaływać z materią na wiele sposobów. Oddziałuje ono z elektronami, jądrami oraz z polem elektrycznym elektronów i jąder (a nawet z polami mezonowymi jąder). Wynikiem oddziaływania może być absorpcja, rozproszenie koherentne i niekoherentne kwantu γ .

Większość z możliwych procesów ma bardzo małe prawdopodobieństwo zdarzenia, dlatego praktyczne znaczenie mają jedynie trzy zjawiska: fotoelektryczne, rozpraszanie kwantów γ przez elektrony, tworzenie pary elektron-pozyton [11, 12, 13, 14].

Zjawisko fotoelektryczne

Promieniowanie γ oddziałuje z elektronami związanymi w atomie i prowadzi do całkowitej absorpcji kwantu promieniowania γ , przekazując mu swoją energię ($E = h\nu$). Im niższa powłoka elektronowa, tym większe prawdopodobieństwo zajścia zjawiska. Elektron zostaje oderwany od atomu, a energia nie zużyta na pracę wyjścia jest unoszona jako energia kinetyczna elektronu. Opisuje to równanie Millikana - Einsteina:

$$h\nu = W_{wyj} + E_{kin} \quad (2)$$

W procesie bierze udział cały atom, dzięki czemu spełnione są zasady zachowania energii i pędu (ze względu na duży stosunek mas odrzut atomu jest zaniedbywalny). Przekrój czynny na reakcję przedstawiamy empirycznym wzorem:

$$\sigma_f = C \frac{Z^k}{(h\nu)^n} \quad (3)$$

dla absorbenta o liczbie atomowej Z . Współczynnik k i n zależą od energii kwantu, $k = 4, 0$ i $n = 3, 5$ dla energii niskich oraz $k = 4, 6$ i $n = 1$ dla bardzo wysokich ($h\nu \gg m_e c^2$) [11, 12, 14].

Efekt Comptona

Zachodzi na słabo związanych lub swobodnych (częste zjawisko w przestrzeni międzygwiazdowej) elektronach. Foton rozprasza się na elektronie przekazując mu część energii i zmieniając kierunek propagacji i częstotliwość fali.

Przekrój czynny na reakcję można opisać za pomocą:

$$\sigma_c \propto Z \frac{\ln \epsilon}{\epsilon} \quad (4)$$

Gdzie za pomocą ϵ wyrażamy $h\nu/m_e c^2$ [11, 12, 14].

Kreacja par i anihilacja

W polu elektrycznym (np. jądra, elektronu) kwant γ może zamienić się w parę proton-pozyton. Energia kwantu musi być nie mniejsza niż suma składników (1,022 MeV). Gdy energia pozytonu jest wystarczająco niska, anihiluje on z elektronem wysyłając dwa kwanty γ o energii 511 keV w przeciwnych kierunkach [2, 14, 15]. W rzadkich przypadkach w reakcji powstają trzy kwanty gamma.

3.2 Scyntylatory

Obecnie w fizyce jądrowej, w metodzie detekcji promieniowania jądrowego, szeroko stosuje się liczniki scyntylacyjne. Wynikiem przejścia promieniowania przez materiał zwany scyntylatorem jest emisja fotonów (najczęściej ich zakres energetyczny znajduje się w paśmie promieniowania widzialnego) - scyntylacja. Błysk świetlny jest wywołany przez oddziaływanie z atomami scyntylatora. Powstanie błysku świetlnego nazywamy również luminescencją. Zaletami scyntylatorów jest prostota konstrukcji, wysoka wydajność liczenia promieni γ czy proporcjonalność wysokości impulsów do energii [12, 14, 15].

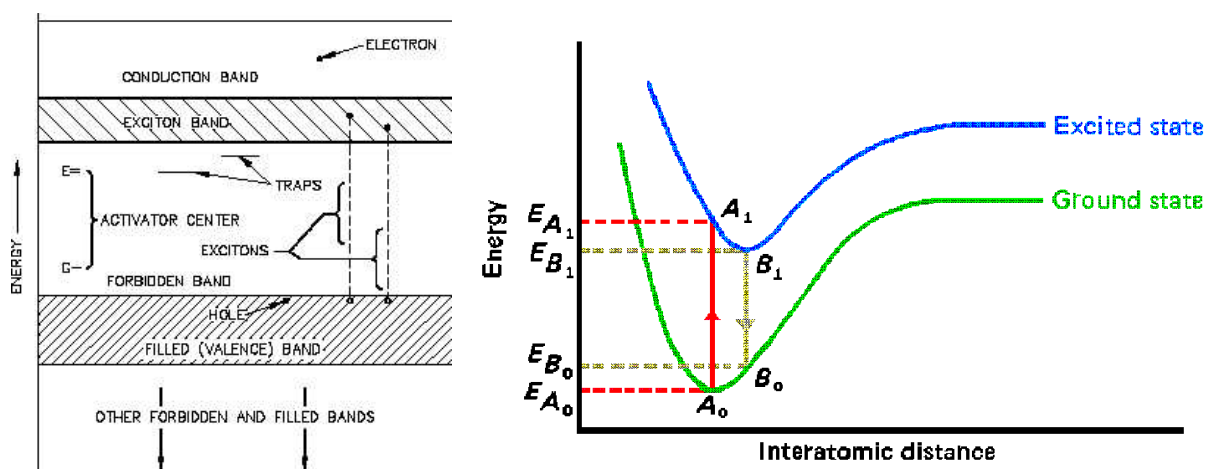
Dobre scyntylatory charakteryzują się silną scyntylacją, krótkim czasem narastania impulsu i krótkim czasem wyświecania. Korzystne jest, gdy widmo scyntylacji odpowiada spektralnej czułości fotopowielacza. Możemy rozróżnić trzy typy scyntylatorów: kryształy nieorganiczne, organiczne (i ze sztucznego tworzywa), ciekłe oraz gazowe.

Kryształy nieorganiczne

W kryształach nieorganicznych elektrony znajdują się tylko w określonych stanach energetycznych tworzących pasma (Rys. 4(a)). W stanie naturalnym elektrony wypełniają pasma o najniższej energii (podstawowe). Promieniowanie powoduje wzbudzenie - przeniesienie do pasma przewodnictwa. Powrót elektronu do pasma podstawowego powoduje emisję kwantu promieniowania. Przejście może też zajść przez lokalne poziomy w paśmie wzbronionym, które pochodzą od zanieczyszczeń sieci krystalicznej (tzw. aktywatorów). Dzięki temu energie promieniowania mogą być niższe, co umożliwi rejestrację sygnału [12].

Kryształy organiczne i scyntylatory ze sztucznego tworzywa

Na wykresie (Rys. 4(b)) przedstawiona została energia potencjalna w funkcji odległości międzyatomowej. Pod działaniem promieniowania drobina może przejść z punktu A_0 na krzywej stanu podstawowego do punktu A_1 stanu wzbudzonego. Oddaje część energii w formie ciepła i przechodzi do punktu wibracyjnego B_1 w pobliżu punktu równowagi. Następuje wypromieniowanie kwantu światła i drobina wraca do stanu podstawowego, do punktu B_0 . Ostatecznie oddaje resztę energii znów w formie ciepła i wraca do stanu podstawowego A_0 [12].



(a) Schemat działania scyntylatora nieorganicznego. Rysunek zaczerpnięty z [23]. (b) Schemat działania scyntylatora organicznego. Rysunek zaczerpnięty z [24].

Rysunek 4: Porównanie zasady działania scyntylatora organicznego i krystalicznego.

Scyntylatory ciekłe oraz gazowe

Atomy lub drobiny gazu są wzbudzone lub jonizowane przez naładowaną cząstkę przechodzącą przez ośrodek. Błysk jest emitowany przeważnie w rejonie nadfioletowym, dlatego często na ściankach detektorów stosowane są substancje emitujące promieniowanie widzialne pod wpływem promieniowania nadfioletowego (np. kwateryfenyl) [12].

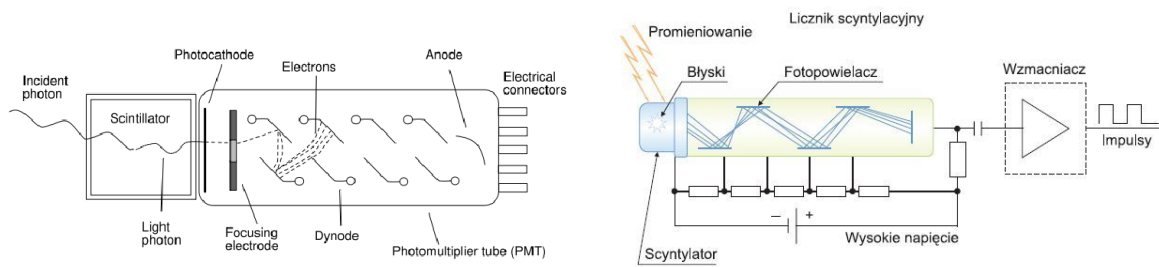
Tego rodzaju substancje są często używane w dużych detektorach cząstek (np. Super-Kamiokande, Antares, Amanda).

3.3 Fotopowielacz

Powstający w scyntylatorze sygnał świetlny jest bardzo słaby. Powstanie i rozwój fotopowielaczy spowodowały rozwój detekcji promieniowania za pomocą scyntylatorów.

Błysk ze scyntylatora dociera do katody fotopowielacza i wybija elektrony z jego powierzchni. Powstaje impuls prądu fotoelektrycznego, który zostaje wzmocniony przez tzw. zjawisko **emisji wtórnej** w fotopowielaczu. Elektron pada z pewną energią na płytkę pokrytą substancją łatwo emitującą elektrony i może wybić z niej kilka elektronów wtórnych. Umieszczając kilka takich elektrod w fotopowielaczu, można otrzymać współczynnik wzmocnienia nawet 10^7 . Aby zapewnić skupienie wybitych elektronów na następnej dynodzie odpowiednio formujemy pole elektrostatyczne między dynodami (w tym celu mają one różne kształty). Duży wpływ ma napięcie przyłożone na dynodach (powinno być stabilne i wysokie). Impuls wzmocniony w ten sposób może być rejestrowany na

wielokanałowym analizatorze amplitudy, przeliczniku lub na oscyloskopie [12, 14, 15]. Schematy fotopowielaczy oraz kompletnego układu umieszczone są na rysunkach (odpowiednio Rys. 5(a) i Rys. 5(b)).



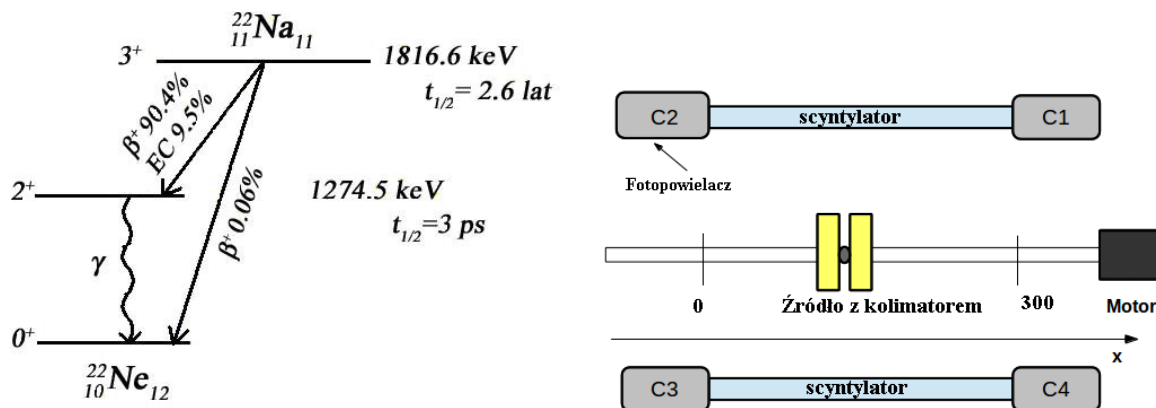
(a) Schemat działania fotopowielacza. Rysunek zaczerpnięty z [25]. (b) Schemat działania licznika scyntylacyjnego. Rysunek zaczerpnięty z [26].

Rysunek 5: Prezentacja działania fotopowielacza i licznika scyntylacyjnego.

4 Doświadczenie

4.1 Aparatura pomiarowa

Jako źródło fotonów zostało użyte radioaktywne źródło ^{22}Na o aktywności 14,23 MBq. Jądro ^{22}Na może ulec dwóm rozpadom, z różnymi prawdopodobieństwami (Rys. 6(a)). W rozpadzie β^+ powstaje pozyton, który ulega anihilacji, zgodnie z opisem podanym we wstępie.



(a) Schemat rozpadu sodu-22, wraz z prawdopodobieństwem odpowiadającym poszczególnym reakcjom. Rysunek zaczerpnięty z [27].

(b) Schemat układu, rysunek na podstawie [28].

Rysunek 6: Prezentacja schematu rozpadu sodu-22 oraz układu doświadczalnego.

Schemat układu przedstawiony jest na rysunku 6(b). Źródło umieszczamy w ołowianym kolimatorze, którego wąska (ok. 1 mm) przegroda kierowała przeciwnie do dwóch scyntylatorów. Źródło w kolimatorze znajdowało się na platformie, którą za pomocą precyzyjnego silnika można było ustawić z dokładnością do 0,1 mm. Scyntylatory były ustawione na tej samej wysokości (ok. wysokość źródła), paski scyntylatorów ustawione były horyzontalnie.

Na dwóch końcach scyntylatorów były ustawione fotopowielacze (z odpowiednio dopasowanymi napięciami). Fotopowielacze przekazywały sygnały do oscyloskopu łącznie na czterech różnych kanałach. Sygnał był rejestrowany (i zapisywany) na oscyloskopie jako spadek napięcia w funkcji czasu (dla wszystkich kanałów jednocześnie). Zapis sygnału był wyzwalany pewnym progowym napięciem na dwóch kanałach (ang. threshold).

Elementy układu:

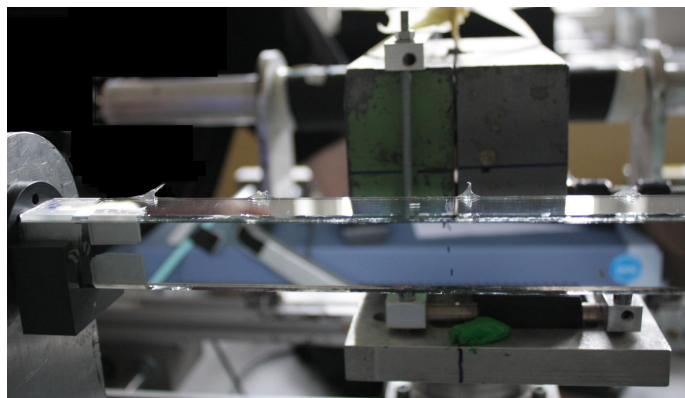
- źródło sodu, wyprodukowane w czerwcu 2013 roku, $t_{1/2} = 2,6$ lat, aktywność początkowa 18,5 MBq
- scyntylator BC-420 300mm x 19 x 5 mm, oznaczony jako **XI** (owinięty w folię vikuiti)
- scyntylator BC-420 300mm x 19 x 5 mm, oznaczony jako **M**
- folia vikuiti do owinięcia scyntylatora
- skrzynka lustrzana do umieszczenia w niej scyntylatora
- fotopowielacze z ustawionymi napięciami (patrz Tab. 1)
- czarne kartki bloku technicznego, taśmy izolacyjne, czarne folie i płótna
- oscyloskop marki LeCroy, SDA 6000A, wraz z oprogramowaniem.
- silnik poruszający platformą
- rozdzielnik wysokiego napięcia

Typ fotopowielacza, nr	kanal osc.	kanal HV	napięcie [V]	skala [mV/div]	szum (offset) [mV]
R9800 - CM9487	C 1	Ch 1	1466	200	600
R9800 - CM9491	C 2	Ch 0	1451	200	600
R9800 - CM9503	C 3	Ch 2	1442	200	600
R9800 - CM9475	C 4	Ch 3	1431	200	600

Tabela 1: Wykaz użytych fotopowielaczy, wraz z ich ustawieniami, przyłożonym napięciem oraz skalą i opóźnieniem sygnału na oscyloskopie.

Baza czasowa	Trigger	Trigger thresholds	przy oknie (C1-C2)	przy korytarzu (C3-C4)
0 ns; 5 ns/div	C1 z C3 (60 ns)	C1(-100 mV), C3 (-100 mV)	BC-420 XI (vikuiti)	BC-420 (lustra / vikuiti)

Tabela 2: Ustawienia oscyloskopu oraz użyte scyntylatory



Rysunek 7: Wygląd układu po złożeniu. Z tyłu widoczny jest scyntylator już zawinięty w kartonową osłonkę, między scyntylatorami znajduje się źródło w kolimatorze.

Tabela 1 przedstawia ustawienie napięć na katodach fotopowielacza. Fotopowielacze CM9503 i CM9475, oznaczone jako C3 i C4 znajdowały się przy badanym scyntylatorze z lustrami (owiniętym później w folię). Parametry wyzwalające zapis sygnału i pozostałe ustawienia w oscyloskopie przedstawione są w tabeli 2. Układ po montażu jest prezentowany na Rys. 7.

Scyntylatory po montażu były owijane dodatkowo w czarną tekturę i czarną folię, dokładnie zalepioną (zwłaszcza przy fotopowielaczach). Ich zadaniem było blokowanie światła widzialnego z zewnątrz. Cały układ był przykryty płachtą. Celem zastosowania lustra i folii było poprawienie odbiciowości emitowanych przez scyntylator sygnałów.

4.2 Scyntylator

Scyntylatory, których używaliśmy w pomiarach były plastikowe (oficjalna nazwa: BC-420). Są to scyntylatory szybkie (o krótkim czasie wyświecania), efektywność ich scyntylacji wynosiła 9700 fotonów na MeV, ilość emitowanego światła w stosunku do antracenu wyznaczona została na 64%. Punkt zmiękczenia materiału wynosi 70°C. Pozostałe własności przedstawia tabela 3

Widmo emisyjne scyntylatora prezentujemy na wykresie (Rys. 8). Scyntylator został wybrany ze względu na jego szybkość i dokonane wcześniej pomiary wskazujące na dobrą rozdzielczość czasową.

4.3 Folia vikuiti

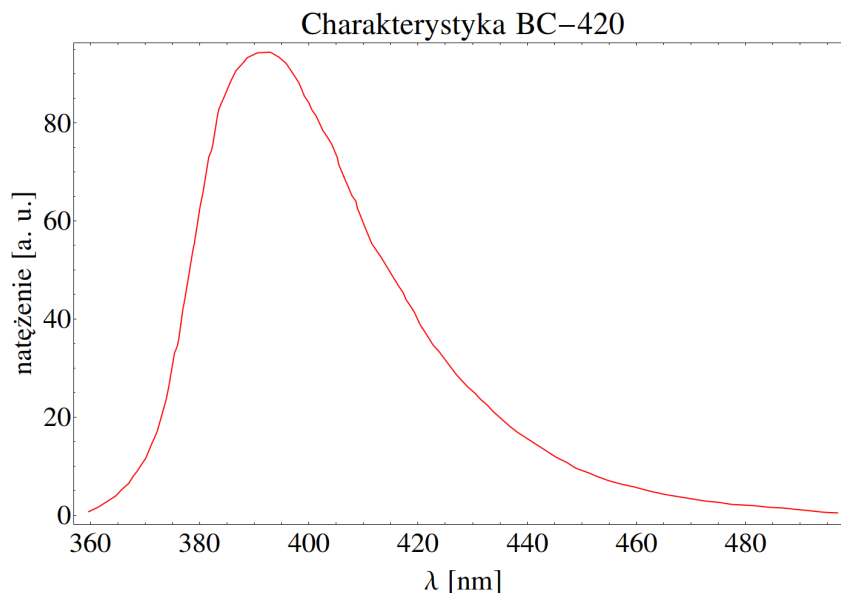
Scyntylator owinięty w folię vikuiti firmy 3M wykazuje lepszą rozdzielczość czasową względem nieowiniętego scyntylatora, a także daje lepsze rezultaty niż w przypadku używania innych folii: tyvec, mylar, aluminium, teflon [30]. Zwiększenie ilości promieni odbitych, pochodzących od scyntylatora zwiększa liczbę rejestrowanych fotonów w fotopowielaczu.

Scyntylator referencyjny XI był owinięty w folię vikuiti w ciągu całego doświadczenia. Scyntylator drugi, roboczo nazwany „M”¹ w drugiej, porównawczej części pomiarów również owinięty był w tę folię. Jeden arkusz tej

¹W wyniku zamieszania jego numer porządkowy jest nieznan. Na potrzeby eksperymentów z lustrami jest oznaczony w ten sposób, by nie został pomyłony z innymi podobnymi scyntylatorami.

λ_{max} [nm]	Czas narastania [ns]	czas zaniku sygnału [ns]	dł. tl. światła [cm]	indeks refrakcji
391	0,5	1,5	140	1,58
At. H na cm^3 [w 10^{22}]	At. C na cm^3 [w 10^{22}]	stosunek at. H:C	Ilość e^- na cm^3 [w 10^{23}]	
5,21	4,74	1,100	337	

Tabela 3: Spis niektórych parametrów scyntylatora typu BC-420 oraz jego własności strukturalnych.



Rysunek 8: Widmo emisyjne scyntylatora typu BC-420 [29].

folii kosztuje ok. 400zł.

4.4 Lustra

Lustrami nazywamy płyty szklane o wymiarach 299 mm x 21 mm x 2 mm, na które z jednej strony została napyłona warstwa aluminium. Aluminium zostało naporowane w temperaturze $30^{\circ}C$ w próżni $p = 2 \times 10^{-5}$ mbar. Pełne własności spektralne prezentowane są poniżej (Rys. 9).

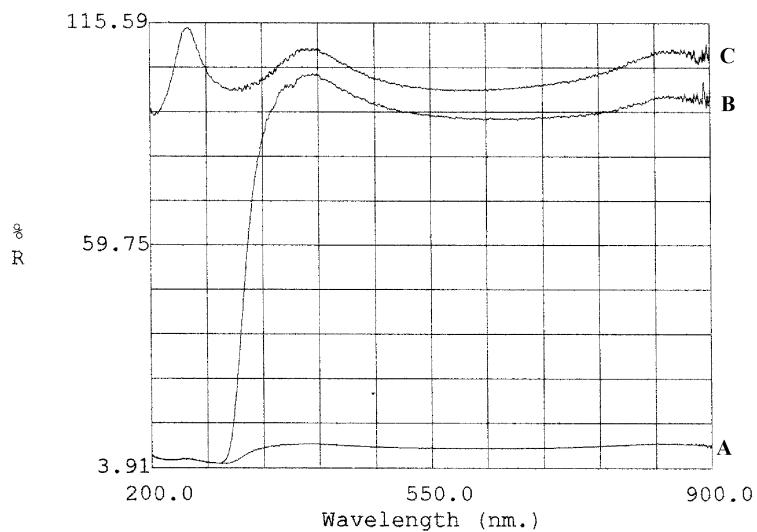
Z luster została utworzona skrzynia, zgodnie z rysunkiem 10. W środku skrzyni poziomo znajdował się scyntylator. Żadna ścianka scyntylatora nie stykała się z lustrami. Przy dwóch końcach scyntylatora z każdej jego strony zostały umieszczone małe paski pleksi o konstrukcji ażurowej, zapewniające równoległe położenie w środku skrzyni. Całość konstrukcji spoczywała na specjalnie wyrzeźbionym plastikowym korytku, jak na obrazku (Rys. 11).

Koszt wykonania luster jest niski, a co najważniejsze, ze względu na prostotę ich wykonania można je wytwarzać we własnym laboratorium i dowolnie modyfikować. Jednak nie jest to główna przyczyna wykonania eksperymentu. Jak prezentuje rysunek 12, fotony scyntylacyjne, które w nieokrytym scyntylatorze są stracone, mogą zostać odbite od powierzchni lustra. W przeciwieństwie do folii, która kieruje fotony ponownie przez scyntylator, lustra odbijają fotony w powietrzu, co ma zapewnić szybszą propagację (a także większą ilość) docierających fotonów scyntylacyjnych (Rys. 12). Może to wpłynąć na wielkość parametrów ważnych w tomografii, m. in. rozdzielczości czasowej.

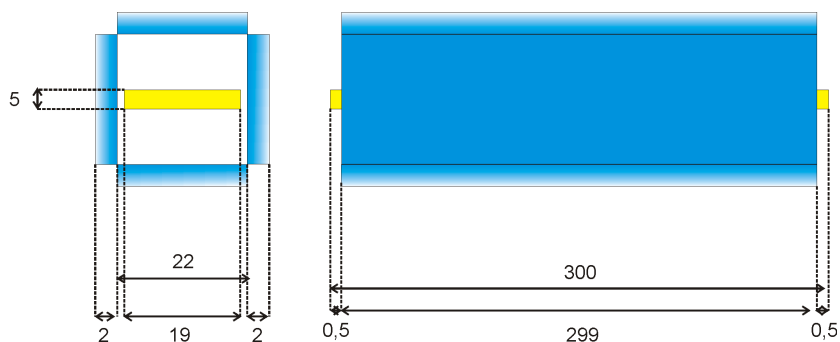
Proces jest skomplikowany, gdyż fotony w układzie z lustrami przeważnie pokonują krótszą drogę. Do fotopowielacza powinna też dojść większa ilość fotonów. Istotny jest wpływ użycia luster na rozdzielczość czasową uzyskiwanych pomiarów. Należało te własności sprawdzić empirycznie, co było głównym celem eksperymentu.

4.5 Przebieg doświadczenia

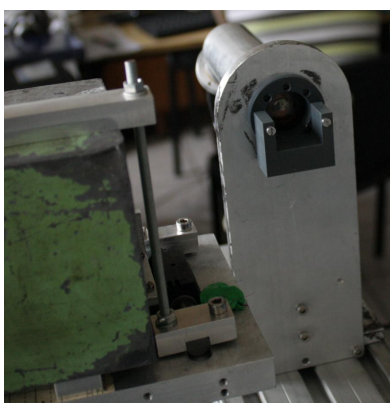
Pierwszym krokiem po zmontowaniu aparatury, było dopasowanie napięć na fotopowielaczach. Należało umieścić kolimator na (poprzednio wyznaczonym) środku długości scyntylatorów i zmierzyć sygnały dochodzące do oscyloskopu. Program na podstawie wyników obliczał sugerowane napięcie. Napięcia dopasowuje się parami dla



Rysunek 9: Wartość odbicia w funkcji długości fali względem uznanego wzorca dla pasków lustrzanych w trzech przypadkach: A. czyste szkło; B. napyłone szkło, od strony warstwy nienapyłonej; C. napyłone szkło, warstwa aluminium z wierzchu. Pomiar wykonany w Instytucie Fizyki UJ.



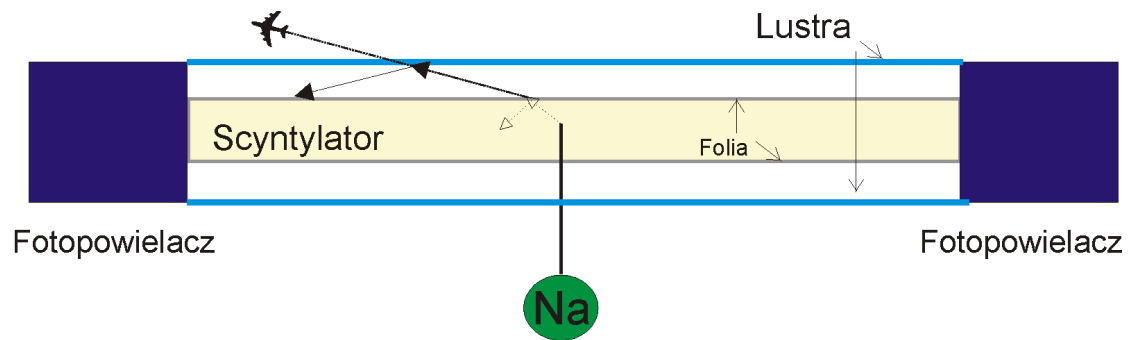
Rysunek 10: Schematyczny wygląd skrzyni z lustrami wraz ze scyntylatorem w środku. Skrzynia była klejona specjalnym silikonem, dodatkowo usztywniona ażurowymi plastikowymi podkładkami, które utrzymywały w czterech punktach scyntylator na odpowiedniej wysokości. Wartości odległości podane w mm. Lustra zostały złożone napyłoną stroną do środka.



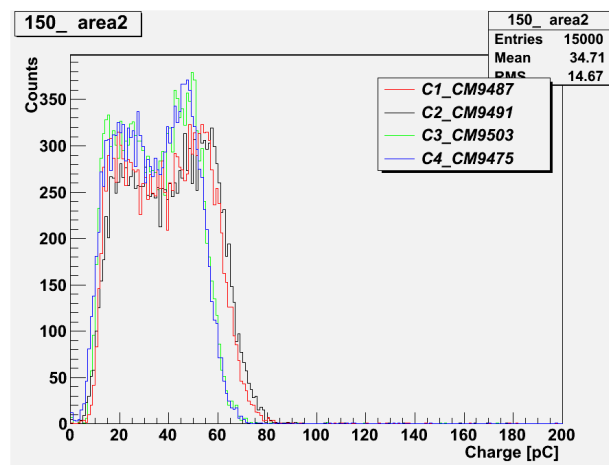
Rysunek 11: Korytka przy fotopowielaczu na którym opierało się lustro.

każdego scyntylatora osobno. Dobrze dopasowane napięcia charakteryzuje dobra korelacja między histogramami ładunków dla fotopowielaczy przy tym samym scyntylatorze, np. jak na wykresie (Rys. 13):

Przebieg doświadczenia można zebrać w punkty:



Rysunek 12: Porównanie dróg optycznych fotonu rozproszonego odbitego przez folię i przez lustro. Po wydostaniu się przez krawędź scyntylatora w przypadku braku folii (pełne strzałki) foton pokonuje drogę w ośrodku o mniejszej gęstości, dzięki czemu podróżuje bezwzględnie szybciej niż foton odbity od folii (puste strzałki), a także zmniejsza się prawdopodobieństwo wtórnej scyntylacji. W przypadku braku materiału odbijającego, foton jest tracony bezpowrotnie (samolot).



Rysunek 13: Przykładowy histogram ładunków sygnałów w przypadku dobrze dopasowanych napięć. Widać wysoką korelację fotopowielacza C1 z C2 oraz C3 z C4.

1. Zmontować układ ze scyntylatorem z lustrami
2. Ustalić parametry wyzwalania na oscyloskopie
3. Dopasować napięcia, skalibrować pozycję silnika
4. Wykonać 15000 pomiarów w 5 różnych pozycjach: 5cm, 10cm, 15cm (środek), 20cm i 25cm.
5. Wymontować scyntylator z lustrem, owinać go w folię vikuiti
6. Ponownie zmontować układ, z owiniętym scyntylatorem
7. Upewnić się, że parametry oscyloskopu są takie same
8. Przywrócić napięcia i ew. ponownie dopasować (nie było to konieczne w tym przypadku)
9. Ponownie wykonać 15000 pomiarów dla tych samych pozycji
10. Zakończyć eksperyment

W drugiej parze fotopowielaczy (C1-C2) przez cały eksperyment znajdował się ten sam scyntylator owinięty w folię vikuiti². Należy zwrócić uwagę, że scyntylator referencyjny wyzwał pomiar (fotopowielacz C1), wraz z późniejszym sygnałem w badanym scyntylatorze (fotopowielacz C3).

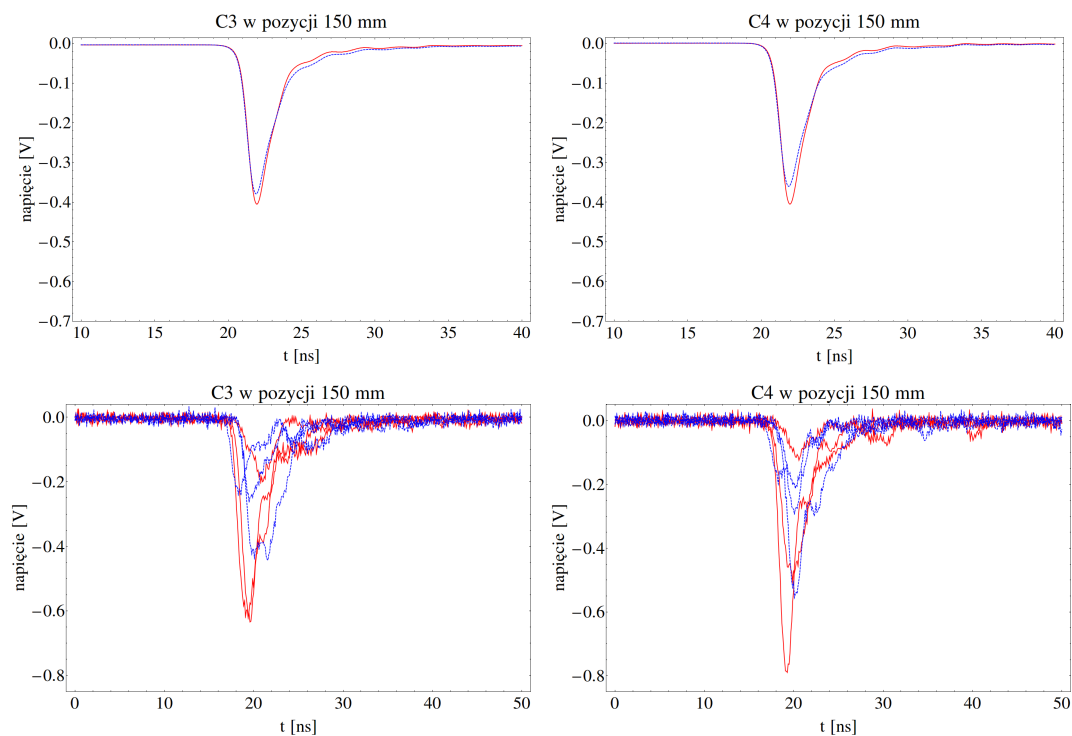
²Naprawdę scyntylator i fotopowielacze były wymontowane pomiędzy jedną a drugą częścią eksperymentu (nie jest istotna tego przyczyna). Potem scyntylator został zmontowany w ten sam sposób

5 Wyniki i dyskusja

5.1 Zmiana charakteru sygnału

Interesujące jest jak zmienia się charakter uzyskiwanego w fotopowielaczu (na oscyloskopie) sygnału, gdy scyntylator jest otoczony lustrami i gdy jest owinięty w folię vikuiti. Przyjrzyjmy się wynikom w pozycji środkowej (ok. 150 mm). Dla dobrego zobrazowania prezentujemy na jednym wykresie dla tego samego fotopowielacza sygnały z obu przypadków. Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź z tego samego scyntylatora ale owiniętego w folię vikuiti.

Na dwóch wykresach przedstawionych jest pięć pierwszych sygnałów dla ogólnej prezentacji charakteru. Jest to jednak bardzo subiektywny wybór. Dlatego prezentujemy 15000 uśrednionych sygnałów w każdym przypadku (Rys. 14 i 15). Rysunek 14 zawiera sygnały rejestrowane przez fotopowielacze C3 i C4, w których zmieniana była „obudowa” scyntylatora (lustro/folia). Rysunek 15 przedstawia taki sam zestaw wykresów dla fotopowielaczy C1 i C2, przy których scyntylator nie został zmieniony.



Rysunek 14: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych oraz wybranych trzech sygnałów w pozycji źródła 150 mm (środek). Wykresy dla fotopowielaczy C3 i C4. Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z zamontowanymi lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.

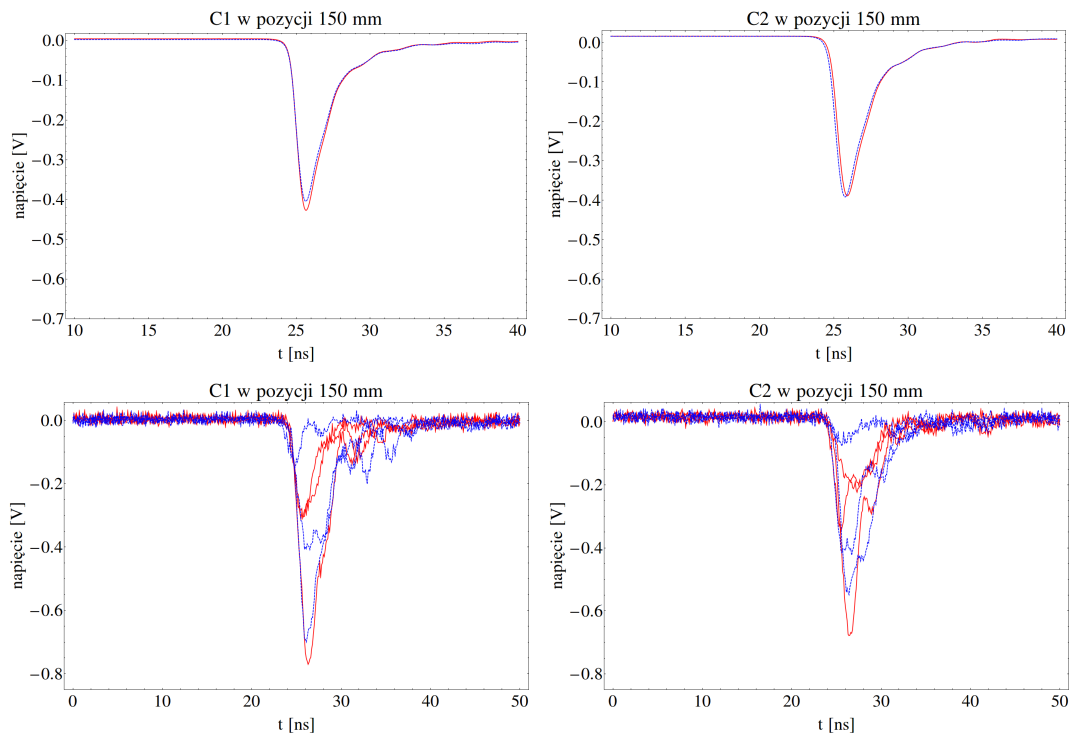
Możemy się odnieść do scyntylatora przy oknie (XI), który nie był praktycznie zmieniany. Dzięki temu porównaniu możemy wywnioskować, co jest fluktuacją, a co może być rzeczywistym efektem.

Wykresy uśrednione jasno ukazują, że istnieją mało znaczące, ale widoczne różnice między sygnałami. Wykresy referencyjne są między sobą identyczne, co zaprzecza przypadkowej rozbieżności. Możemy zauważyć, że sygnał od lustro jest „zgrabniejszy” - jest głębszy, co odpowiada większej amplitudzie napięcia, oraz węższy, czyli sygnał szybciej zanika.

Wykresy uśrednionych sygnałów dla wszystkich kanałów dla określonej pozycji na pojedynczym wykresie zamieszczone są w dodatku.

5.2 Rozmycie sygnału

Efekt, który może wystąpić i mieć istotny wpływ na wyniki doświadczenia jest rozmycie przychodzącego sygnału. Rysunek 17 prezentuje porównanie dróg optycznych sygnałów odbijanych przez folię oraz przechodzących przez powietrze i odbijających się od luster. Z porównania widać wyraźnie, że droga optyczna w przypadku układu otoczonego lustrami powinna być mniejsza.



Rysunek 15: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych oraz wybranych trzech sygnałów w pozycji źródła 150 mm (środek). Wykresy dla fotopowielaczy C1 i C2. Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu w doświadczeniu, w którym jeden scyntylator (fotopowielacze C3 i C4) otoczony był lustrami. Niebieską przerywaną linią prezentuje odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.

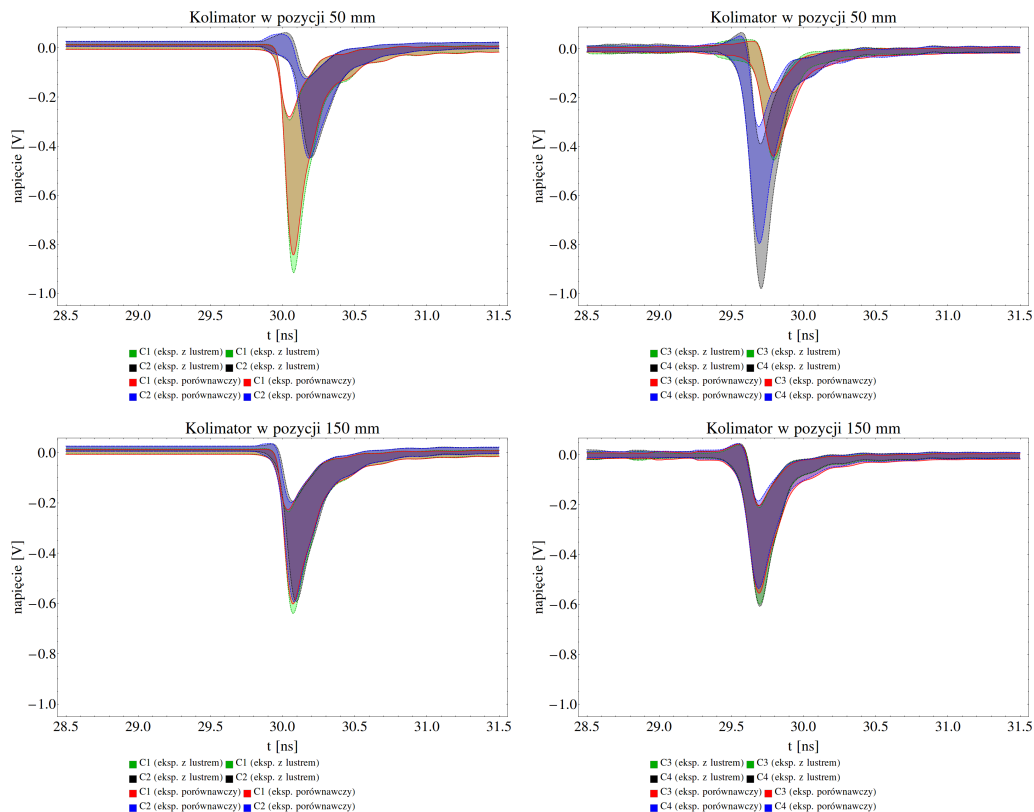
Fotony scyntylacyjne propagujące się w scyntylatorze mają stałą prędkość, natomiast fotony w układzie z lustrem propagują się w dwóch ośrodkach z różnymi prędkościami. Współczynnik załamania ma wpływ na różnicę między drogami optycznymi w powietrzu. W przypadku, gdy jeden foton powraca do scyntylatora, a drugi nie, różnica czasów przejścia między poszczególnymi fotonami może być znacząca. Korzystna jest więc sytuacja, w której fotony scyntylacyjne wychodzą ze scyntylatora, lecz po odbiciu przez lustro nie wracają do niego.

Cztery wykresy (Rys. 16) porównują rozrzut (dyspersję) 15000 sygnałów w dwóch różnych pozycjach - środkowej i skrajnej, dla dwóch scyntylatorów w obu eksperymentach. Wykresy były sporządzane dla każdego kanału osobno zgodnie z procedurą:

1. W zbiorze danych znajduje się 15000 plików z zarejestrowaną zmianą napięcia w funkcji czasu
2. W każdym punkcie czasu dane zostały uśrednione, dając funkcję $\bar{x}(t)$
3. Z 15000 danych obliczone zostało także odchylenie standardowe w każdym punkcie - $\sigma(t)$
4. Wykresy prezentują pole między dwiema krzywymi $\bar{x} - \sigma$ oraz $\bar{x} + \sigma$

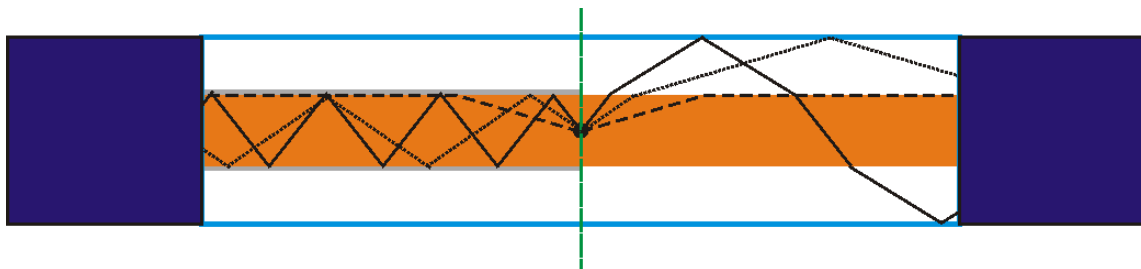
Na jednym wykresie zostały umieszczone dane rejestrowane z fotopowielaczy przy konkretnym scyntylatorze, zarówno w układzie z folią jak i lustrem. Analiza tych wyników prowadzi do wniosku, że:

- W pozycji kolimatora 150mm (środkowa): scyntylator owinięty folią dostarcza do przeciwległych fotopowielaczy bardziej rozbieżne sygnały, zaś scyntylator obudowany lustrami zapewnia sygnały o identycznej rozbieżności.
- W pozycji skrajnej kolimatora (np. 50mm): scyntylator owinięty folią dostarcza do przeciwległych fotopowielaczy rozbieżne sygnały, lecz rozbieżność jest porównywalna z pozycją środkową. Scyntylator obudowany lustrami generuje w fotopowielaczu sygnały o wyraźnej rozbieżności (wyraźniejszej w fotopowielaczu bliższym kolimatora).
- Układ z lustrami generuje „fluktuujący szum”



Rysunek 16: Lewy górny panel prezentuje wykresy dyspersji dla próbki 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (50mm/48mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy górny panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, w których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylnator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni. Lewy dolny panel prezentuje wykresy dyspersji dla próbki 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (150mm/148mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy dolny panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, w których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylnator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni.

Jest to zjawisko, które należy zbadać dodatkowo (np. przez otoczenie scyntylatora lustrem o mniejszym przekroju poprzecznym. Wszystkie wykresy prezentujące zakres odchylenia standardowego od średniej wartości sygnałów przedstawione są w dodatku.



Rysunek 17: Rysunek przedstawia drogę przykładowych trzech fotonów scyntylacyjnych wewnątrz scyntylatora, gdy układ jest owinięty odbijającą folią wiktui oraz drogę takich samych fotonów w przypadku obudowania scyntylatora skrzynią lustrzaną.

5.3 Ilość wpadającego światła

Po uśrednieniu 15000 sygnałów otrzymujemy wartość średniego sygnału docierającego do oscyloskopu. Całka z sygnału daje wartość ładunku. Ładunek w fotopowielaczu w pewien sposób odpowiada ilości docierającego

poz. źródła [mm]	C1 L	C1 V	C2 L	C2 V	C3 L	C3 V	C4 L	C4 V
50	-23,43	-22,59	-7,66	-7,92	-14,34	-15,82	-26,44	-23,76
100	-20,36	-19,92	-9,82	-10,24	-16,20	-17,42	-20,68	-19,74
150	-18,46	-18,32	-12,78	-13,23	-18,13	-19,12	-16,52	-16,82
200	-17,02	-16,55	-15,54	-15,45	-21,15	-20,59	-13,60	-14,15
250	-15,47	-15,11	-19,18	-19,05	-25,82	-23,38	-11,34	-12,34

Tabela 4: Zestawienie pól uśrednionych sygnałów (czyli uśrednionych ładunków) dla 15000 zdarzeń dla wszystkich kanałów fotopowielaczy i pięciu różnych pozycji źródła. Literą L (i kolorem niebieskim) oznaczone zostały pomiary w układzie z zamontowanym lustrem (w scyntylatorze przy parze fotopowielaczy C3C4, drugi scyntylator był owinięty w folię vikuiti), literą V - z folią vikuiti. Pogrubioną czcionką zaznaczone są fotopowielacze zbierające sygnał z badanego scyntylatora ze zmieniającą obudową (lustra/vikuiti).

światła³.

Za pomocą programu scałkowałem uśrednione sygnały (Tabela 4) z fotopowielaczy dla wszystkich pozycji porównując rezultaty scyntylatora „M” owiniętego folią i otoczonego lustrami.

Dostrzegamy zauważalne, choć mało znaczące różnice między dwoma układami. W scyntylatorze referencyjnym różnica między średnimi jest rzędu 0,5 pC; niezależnie od ustawienia dla układu lustrzanego ładunek w C1 jest mniejszy, a w C2 większy. Wynika to z montażu i ustawienia „środku” źródła bliżej lub dalej fotopowielacza w ponownym montażu.

W badanym zestawie fotopowielaczy C3-C4 zauważyć można:

- W pozycji środkowej różnice są nieznaczne, jednak więcej światła przyjmuje fotopowielacz owinięty w folię
- Gdy źródło jest blisko fotopowielacza, układ otoczony lustrem przyjmuje o 2pC większy średni ładunek niż układ w folii. Są to zauważalne różnice, choć nie przełomowe
- Gdy źródło jest daleko od fotopowielacza, większy ładunek zbiera układ w którym scyntylator owinięty jest w folię, choć różnice są dwukrotnie mniejsze niż w poprzednim przypadku (ok. 1pC)

Można wyciągnąć wniosek, że folia dużo lepiej „skupia” światło rozproszone ze scyntylatora. Gdy źródło jest blisko, światło efektywniej skupione jest w lustrze. Prawdopodobnie część fotonów odbitych wchodzi bezpośrednio do fotopowielacza. Lustra, a także korzyści wynikające z przechodzenia fotonów przez powietrze, mogłyby być użyteczne dla krótszego scyntylatora.

Należy wspomnieć też, że przekrój poprzeczny fotopowielacza jest mniejszy od przekroju poprzecznego lustrzanej skrzyni. Oznacza to, że część fotonów scyntylacyjnych może nie docierać do fotopowielacza (lecz do jego obudowy).

5.4 Porównanie rozkładu amplitud i ładunków

Ważną częścią pomiarów są histogramy ładunków i amplitud zebranych sygnałów. Zmieniając położenie źródła można zauważyć przesunięcie rozkładów: liczba sygnałów o wysokiej amplitudzie i ładunku staje się większa przy fotopowielaczu, który jest bliżej źródła, a mniejsza przy fotopowielaczu bardziej oddalonym. Algorytmy uwzględniające zależność rozkładu od położenia źródła są ważne przy cechowaniu tomografu. Wzmocnienia fotopowielaczy powinny być dobrane tak, by w przypadku kolimatora ustawionego w pozycji środkowej widma ładunków obserwowane z lewej i prawej strony były takie same. Wykresy amplitud i ładunków dla pozycji: ok. 150 mm pokazane są na Rys. 18 i dla ok. 200 mm na Rys. 19.

Histogramy są ważne do wyznaczenia rozdzielczości czasowej. Ładunek [pC] wyznaczony jest jako całka z interpolowanej funkcji sygnału (zmiana napięcia [mV] w czasie [ps]). Przy obliczaniu napięcia i amplitudy uwzględniono fakt, że zerowy poziom szumu może być przesunięty. W tym celu za punkt odniesienia (napięcie zerowe) został przyjęty uśredniony poziom szumów.

Otrzymane wartości średnich amplitud oraz ładunków zestawione są odpowiednio w Tab. 6 oraz Tab. 5. Dla pozycji 50 - 150 mm w układzie z lustrami rejestrowane są sygnały o większej średniej amplitudzie, a dla pozycji 200 - 250 mm o mniejszej. Natomiast ogólnie rejestrowany jest mniejszy średni ładunek w całym układzie, w którym używane były lustra. Co więcej, łącząc informacje z obu tabel widzimy tendencję: dla pozycji 50 mm obserwujemy małe różnice, dla pozycji 250 mm duże. Może być to wynik własności fotopowielaczy lub niedokładności przy składaniu układu; w szczególności niedokładności kształtów obudowy z lustrami lub połączenia optycznego

³W obu przypadkach był ten sam referencyjny scyntylator XI owinięty w folię vikuiti, więc nie jest dziwne, że liczba zliczeń sygnałów na godzinę była podobna

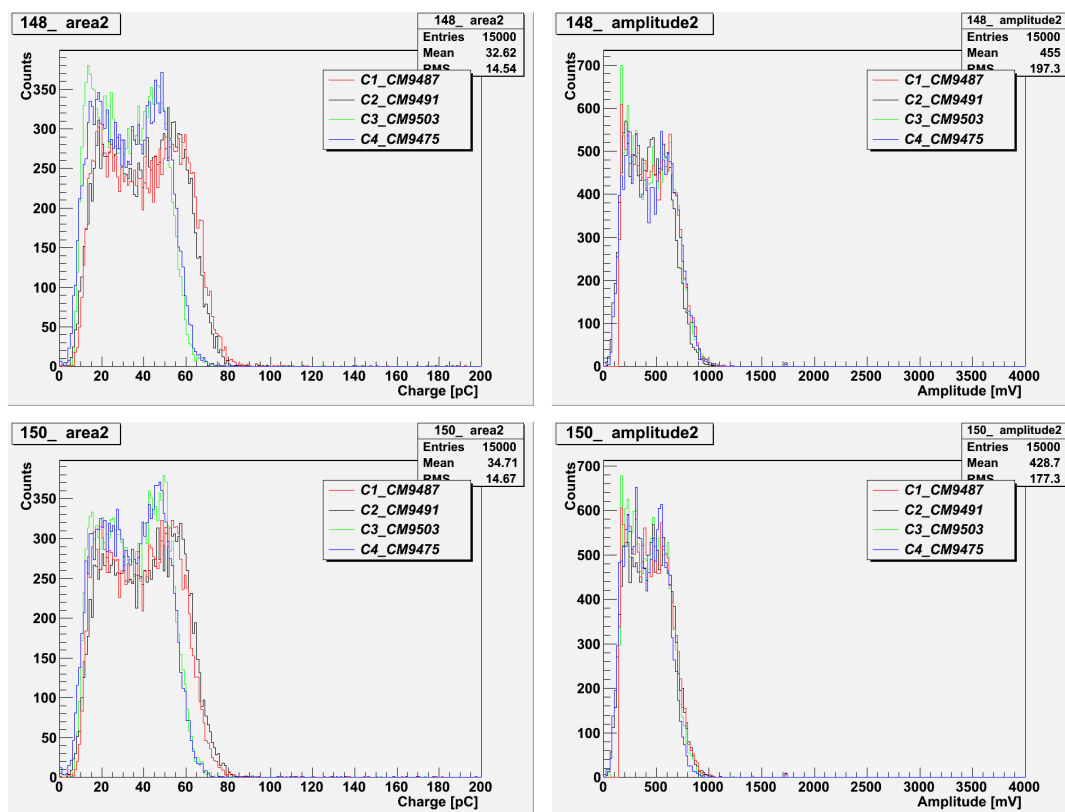
pozycja	Q [pC] lustra	Q [pC] vikuiti
50	25,26	26,67
100	28,74	31,61
150	32,62	34,71
200	27,13	29,46
250	22,53	33,10

Tabela 5: Zestawienie pól uśrednionych sygnałów (czyli uśrednionych ładunków) dla 15000 zdarzeń dla wszystkich kanałów fotopowielaczy i pięciu różnych pozycji źródła. Kolorem niebieskim oznaczone zostały pomiary w układzie z zamontowanym lustrem. Uśrednienie jest zrobione dla wszystkich fotopowielaczy razem wykorzystując rezultaty otrzymane z histogramów.

pozycja	V_{max} [mV] lustra	V_{max} [mV] vikuiti
50	359,9	352,0
100	402,5	386,2
150	455,0	428,7
200	371,5	401,2
250	313,6	371,1

Tabela 6: Zestawienie uśrednionych amplitud sygnałów dla 15000 zdarzeń dla wszystkich kanałów fotopowielaczy i pięciu różnych pozycji źródła. Kolorem niebieskim oznaczone zostały pomiary w układzie z zamontowanym lustrem. Uśrednienie jest zrobione dla wszystkich fotopowielaczy razem wykorzystując rezultaty otrzymane z histogramów.

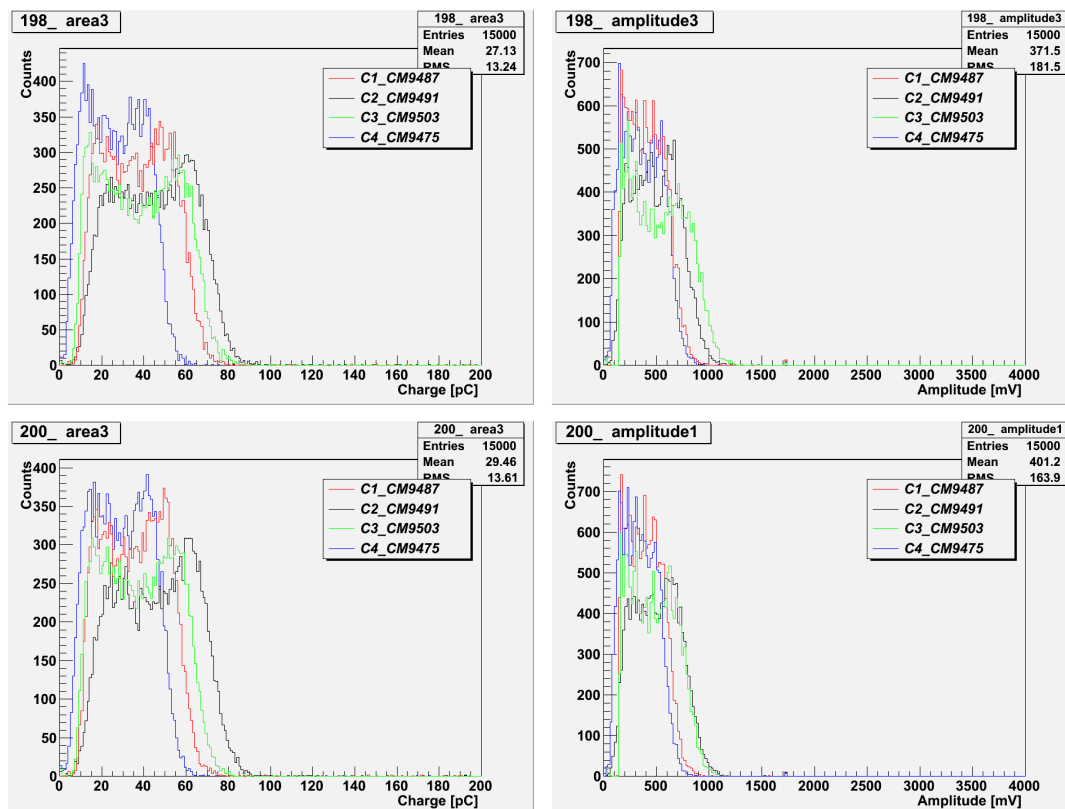
scyntylicatora z fotopowielaczem. W ogólności w wyniku wykonanych pomiarów możemy stwierdzić, że różnice w widmach amplitud obserwowanych dla scyntylicatora owiniętego folią i otoczonego lustrami znajdują się w granicach niepewności systematycznych przeprowadzonych doświadczeń.



Rysunek 18: Histogramy ładunków i amplitud zebranych w pomiarach dla wszystkich fotopowielaczy, w pozycji źródła 150mm. Górne rysunki przedstawiają sytuację w której scyntylicator „M” był otoczony lustrami, dolne - gdy folią.

Porównując histogramy ładunków spostrzegamy, co następuje:

- Gdy źródło znajduje się blisko fotopowielacza, układ ze scyntylicatorem obudowanym lustrami rejestruje znacz-



Rysunek 19: Histogramy ładunków i amplitud zebranych w pomiarach dla wszystkich fotopowielaczy, w pozycji źródła 200mm. Górne rysunki przedstawiają sytuację w której scyntylator „M” był otoczony lustrami, dolne - gdy folią.

nie więcej sygnałów o większej amplitudzie niż gdyby był owinięty w folię wikuiti. Trudno jest jednoznacznie zinterpretować wynik dla fotopowielacza, który jest daleko od źródła.

- Podobnie, scyntylator obudowany lustrami generuje większe ładunki w fotopowielaczu, niż ten owinięty folią wikuiti, gdy źródło znajduje się blisko fotopowielacza.
- Gdy źródło znajduje się daleko fotopowielacza, owinięcie folią wikuiti pozwala na detekcję większej ilości większych ładunków.

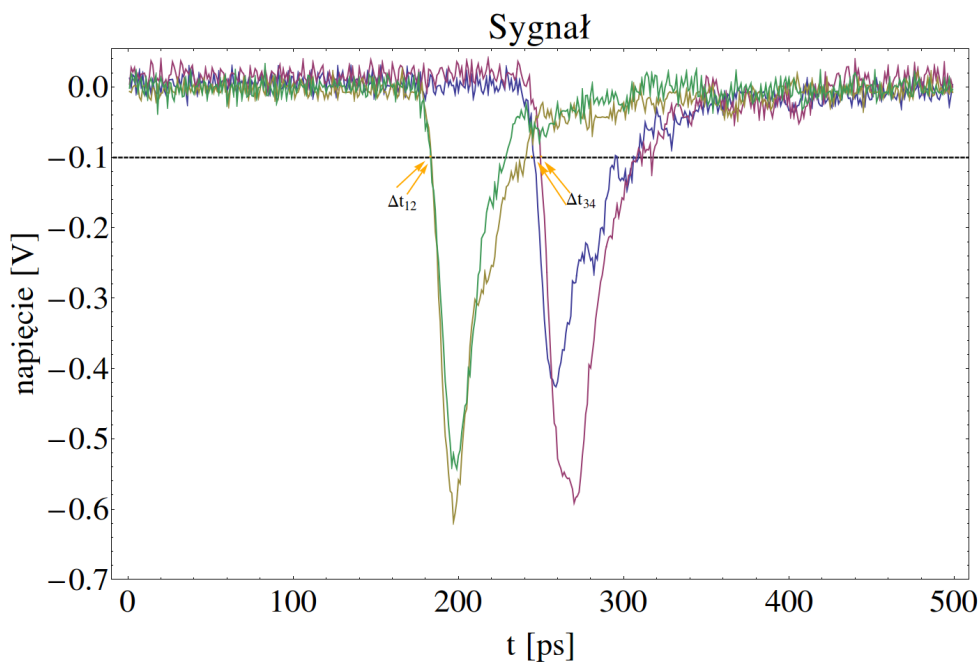
Najlepiej zaobserwowane cechy widać porównując histogramy dla skrajnych pozycji. Dla pozycji środkowej histogramy są dopasowywane względem siebie.

5.5 Otrzymana rozdzielczość czasowa

Korzystna jest sytuacja, w której wszystkie sygnały rejestrowane na fotopowielaczach są symetryczne. Tak nie jest. Istotna jest rozdzielczość czasowa pomiaru. Każdy scyntylator emituje sygnał do fotopowielacza lewego i prawego. Mierzmy moment dotarcia sygnału do każdego z fotopowielaczy osobno, przyjmując za czas pomiaru np. miejsce, w którym napięcie spadło do -50 mV. Tak liczymy również w tym opracowaniu. Liczymy różnicę czasu między sygnałami docierającymi do lewego i prawego końca scyntylatora (Rys. 20).

W sytuacji idealnej w danym położeniu źródła różnica ta byłaby taka sama niezależnie od zdarzenia. Tak nie jest, więc należy wykonać histogram wartości Δt . Obliczamy rozrzut tej wartości, dopasowujemy funkcję opisującą jej rozkład. Wartość średnia Δt służy do wyznaczenia pozycji źródła (rekonstrukcji). Rozrzut wokół wartości średniej świadczy o dokładności tego wyznaczenia, czyli rozdzielczości aparatury.

Aby uwzględnić zmiany w wyznaczaniu czasu od amplitudy sygnału (w literaturze angielskiej efekt jest opisany pod nazwą „time walk”), musimy ustalić poprawkę na obliczone wartości różnicy czasu. Naszą zmienną Δt jest:



Rysunek 20: Przykładowy sygnał widoczny na oscyloskopie, wszystkie cztery kanały fotopowielaczy. Widać, że na ustalonym napięciu -100 mV różnica czasów między kanałem pierwszym a drugim (Δt_{12}) jest niewielka w porównaniu z kanałem trzecim i czwartym (Δt_{34}). Dobrze zaprezentowany jest też problem związany z asymetrią sygnału - z prawej strony wykresu napięcie wzrasta wolniej niż z lewej i funkcja jest dodatkowo postrzępiona.

pozycja źródła	$\sigma(\Delta t)$ (ps) C1-C2 V	$\sigma(\Delta t)$ (ps) C3-C4 L	$\sigma(\Delta t)$ (ps) C1-C2 V	$\sigma(\Delta t)$ (ps) C3-C4 V
50	185,1 ± 2,6	187,3 ± 2,6	183,2 ± 2,5	169,6 ± 2,3
100	176,0 ± 2,3	172,7 ± 2,4	184,4 ± 2,4	170,0 ± 2,1
150	179,7 ± 2,3	171,5 ± 2,4	175,0 ± 2,4	169,1 ± 2,4
200	176,5 ± 2,6	176,8 ± 2,6	183,2 ± 2,4	168,4 ± 2,3
250	182,9 ± 2,7	185,8 ± 2,5	182,3 ± 2,3	171,0 ± 2,2

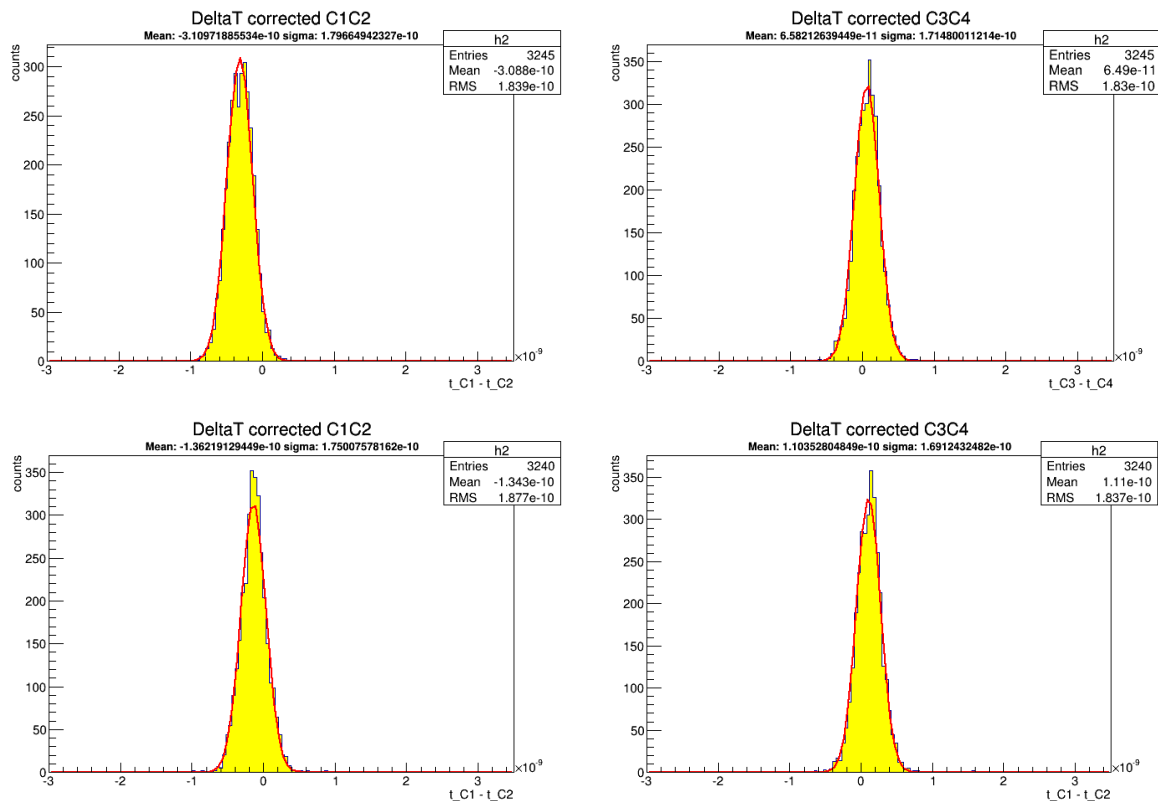
Tabela 7: Tabela przedstawia zebrane wyniki odchylenia standardowego dopasowanej funkcji 5 odpowiadającej rozdzielczości czasowej. Wyniki dla pary fotopowielaczy C3-C4, gdzie znajdował się scyntylator badany (M) są pogrubione, dla pary C1-C2, gdzie znajdował się scyntylator referencyjny (XI) nie. Litera L przypomina o obudowaniu scyntylatora w lustrzaną skrzynię, zaś litera V o owinięciu w folię vikuiti. Dwie „niebieskie” kolumny po lewej stronie, dodatkowo podkreślone, są wynikami jednego eksperymentu, „czarne”, niepodkreślone - drugiego.

$$\begin{cases} \Delta t_{12} = (t_1 - t_2) - fit \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{Q_1}} - \frac{1}{\sqrt{Q_2}} \right) \\ \Delta t_{34} = (t_3 - t_4) - fit \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{Q_3}} - \frac{1}{\sqrt{Q_4}} \right) \end{cases} \quad (5)$$

czasy t_i są czasami zanotowania spadku napięcia na odpowiednim fotopowielaczu o odpowiednią, równą dla wszystkich wartość (Rys. 20). Podobnie ładunki Q_i są ładunkami obliczonymi dla sygnałów rejestrowanych na odpowiednim fotopowielaczu. Funkcję podaną w równaniu (5) dopasowujemy do danych doświadczalnych. Zmienna „fit” traktowana jest jako wolny parametr dopasowania. Po wyznaczeniu tego parametru korygujemy różnicę czasu ($t_1 - t_2$) oraz ($t_3 - t_4$) zgodnie z równaniem (5) i do dalszych badań używamy skorygowanych wartości Δt_{12} oraz Δt_{34} .

Do uzyskanych histogramów Δt dopasowujemy funkcję Gaussa. Możemy obliczyć odchylenie standardowe, które przeliczyć można liniowo na szerokość połówkową (dla funkcji gaussa: $FWHM = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$). Przykładowe histogramy i wyniki dopasowań dla dwóch różnych pozycji naświetlania przedstawiają wykresy: Rys. 21 dla pozycji centralnej (150 mm) oraz Rys. 22 dla ustawienia źródła w pozycji 200 mm. Pełne zestawienie odchyleń standardowych uzyskanych w eksperymencie prezentuje tabela 7.

Jednym z celów badań prowadzonych w ramach tej pracy jest znalezienie optymalnego zestawu (np. fotopowielaczy, scyntylatorów, itd.) który pozwala na najdokładniejsze wyznaczenie czasu zarejestrowania kwantu gamma, czyli najlepszą rozdzielczość czasową.



Rysunek 21: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 150mm (środek) dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami (górne rysunki), w drugim - folią (dolne rysunki). Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.

Ze względu na szumy, do obliczania rozdzielczości czasowej bierzemy pod uwagę tylko sygnały, których ładunek był w górnej połowie (tej, o większych ładunkach) rejestrowanych sygnałów. Docelowo tego rodzaju cięcia powinno być ustalone w górnym zakresie energii rejestrowanych ładunków.

Uzyskane wyniki pokazują, że zastosowanie lusterek pogarsza rozdzielczość czasową w stosunku do owinięcia folią wiktuiti od kilku do kilkunastu pikosekund, w zależności od miejsca naświetlania. Jedynie w przypadku naświetlania w samym środku scyntylatora rozdzielczość czasowa w przypadku użycia lusterek była nieznacznie poprawiona.

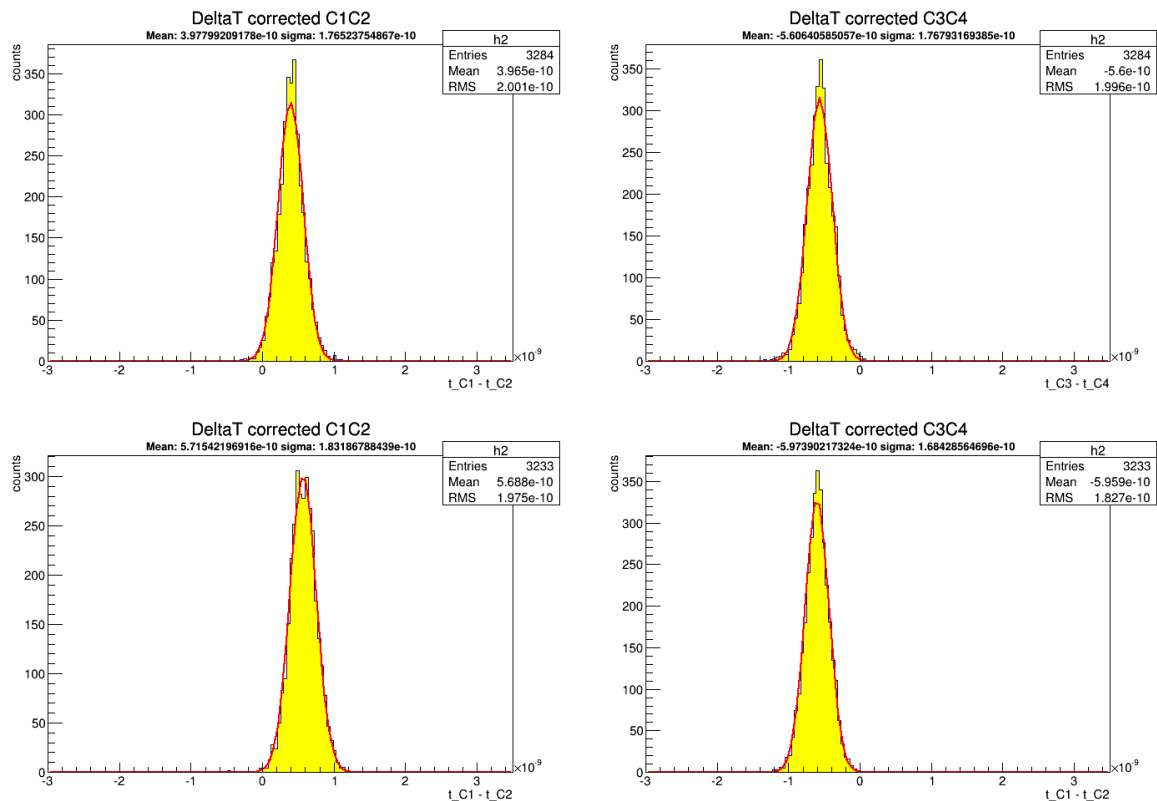
Różnice są zauważalne, ale nie są olbrzymie. Można uznać, że otrzymujemy tej samej klasy rozdzielczość czasową w obu przypadkach, z przewagą folii wiktuiti. W ogólności, rozdzielczość czasowa jest tym gorsza im miejsce naświetlania jest dalej od środka długości scyntylatora - większa różnica czasów między momentem zarejestrowania fotonów scyntylacyjnych przez różne fotopowielacze. Efekt ten jest wyraźniejszy w układzie z lustrami.

5.6 Dyskusja

Zaprezentowane wyniki świadczą o zauważalnych różnicach między scyntylatorem owiniętym w folię wiktuiti a obudowanym lustrami. Zmiany te nie są jednak rewolucyjne, więc dla użyteczności w tomografii emisyjnej przyjmujemy, że wyniki są porównywalne. Zaobserwowaliśmy wyraźniejszy średni kształt sygnału a także bardziej symetryczny w układzie, w którym użyte były lustro. Jednorazowe skonstruowanie skrzyni lustrzanej w laboratorium jest bardziej problematyczne niż zwykle owinięcie w folię. Lustro jednak można wytwarzać w całości samemu w laboratorium, zaś folię należy zakupić u producenta.

Z doświadczenia wynika, że najkorzystniejsze wyniki rozdzielczości czasowej dla lusterek dostaliśmy, gdy fotopowielacze były równoodległe od źródła kwantów. Nie znamy jednoznacznego mechanizmu, który mógłby powodować taki wynik.

Obserwujemy poprawę jakości, amplitudy i mocy sygnału w układzie z lustrami, gdy kolimator ze źródłem jest blisko fotopowielacza. Prawdopodobnie kwanty odbite w dużej ilości z dużą prędkością docierają bezpośrednio do fotopowielacza, stąd obserwujemy zauważalny wzrost amplitudy i ładunku zaobserwowanego sygnału. Gdy fotopowielacz jest daleko od źródła, odpowiedź w przypadku układu z lustrami jest dla nas niekorzystna. Otrzymujemy mniej światła i rozrzut sygnałów jest większy.



Rysunek 22: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 200mm dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami (górne rysunki), w drugim (dolne rysunki) - folią. Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.

Można podejrzewać, że dla krótszych scyntylatorów lub lusterek ułożonych bliżej scyntylatora lustro sprawiałoby, że różnica byłaby interesująca do dalszych eksperymentów. Należy sprawdzić, jakie są rezultaty w przypadku lusterek o mniejszym przekroju poprzecznym, a także jakie wyniki uzyskamy w przypadku zastosowania scyntylatora na którego została napyłona warstwa aluminium. Ciekawym, ważnym eksperymentem będzie owinięcie folią np. środkowej części scyntylatora, gdy cały znajduje się w lustrzanej skrzyni.

Głównym celem było zbadanie i porównanie rozdzielczości czasowej w obu przypadkach. Okazało się, że w większości położeni rozdzielczość czasowa jest gorsza w przypadku lusterek. Nie jest to jednak duża różnica. Można nawet rozważać, czy w przypadku innych fotopowielaczy wynik nie byłby różny. Również metoda liczenia rozdzielczości, a także wyboru danych (tylko sygnały w górnej połowie ładunków) może mieć wpływ na taki wynik. W związku z tym możemy stwierdzić, że w tym doświadczeniu scyntylator obudowany lustrami zwraca zasadniczo gorszy wynik niż owinięty folią vikuiti, ale jest to różnica niewielka.

6 Podsumowanie

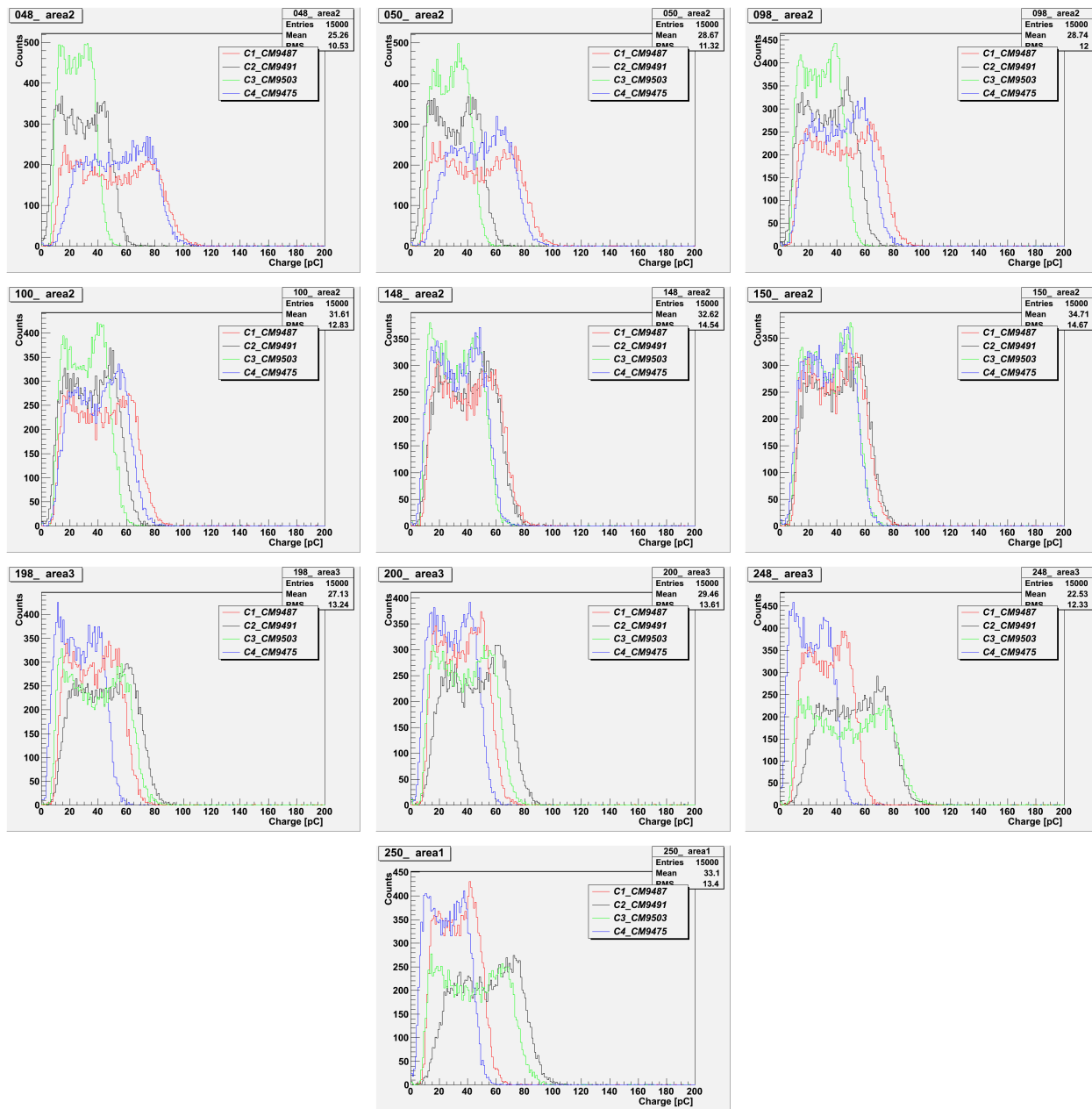
W ramach tej pracy licencjackiej wykonane zostały pomiary sygnałów z paskowych plastikowych detektorów scyntylacyjnych naświetlanych anihilacyjnymi kwantami gamma o energii 511 keV. Celem pracy było wyznaczenie rozdzielczości czasowej i wydajności świetlnej detektorów otoczonych lustrami. Otrzymane wyniki porównano z wartościami otrzymanymi dla detektorów owiniętych folią vikuiti. Pomiary wykonano dla pięciu różnych położeń źródła w układzie ze scyntylatorami owiniętymi w folię vikuiti oraz ze scyntylatorem obudowanym lustrami (napyłone na szkło aluminium), gdy drugi scyntylator był owinięty w folię vikuiti. Wyniki rozdzielczości czasowej różnią się nieznacznie, na niekorzyść luster. Na taki wynik może wpływać wiele niezależnych czynników. Wyraźniejsze maksima pojawiają się w scyntylatorze otoczonym lustrami. W układzie z lustrami zaobserwowana została większa ilość sygnałów o wyższej amplitudzie i ładunku gdy źródło znajduje się blisko fotopowielaczy w porównaniu do podobnych pomiarów z folią. Gdy źródło jest daleko od fotopowielaczy, wyższe amplitudy i ładunki obserwować można w układzie z folią. Zaobserwowany został także większy rozrzut sygnałów scyntylatorów z lustrem w pozycjach skrajnych. W pozycji środkowej rozrzut sygnałów w układzie z użytymi lustrami był znacznie mniejszy niż w zestawie, w którym wszystkie scyntylatory były owinięte folią. Dla porównania pomiary powinny zostać wykonane również dla obudowy z luster o mniejszym przekroju, w z folią owiniętą na część scyntylatora otoczonego lustrami a także dla scyntylatora z napyłonym aluminium.

Literatura

- [1] J. L. Humm, A. Rosenfeld, and A. Del Guerra. From pet detectors to pet scanners. Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging, 30(11):1574–1593, 2003.
- [2] A.Z. Hrynkiewicz and E. Rokita. Fizyczne metody diagnostyki medycznej i terapii. PWN, Warszawa, 2000.
- [3] G. B. Saha. Basics of PET Imaging. Springer Science+Business Media, 2010.
- [4] J. S. Karp. Benefit of time-of-flight in pet: Experimental and clinical results. J. Nucl. Med., 49(3):462–470, 2008.
- [5] A.T Nassalski. Wspólny detektor do tomografii pozytonowej i rentgenowskiej. PhD thesis, Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana, 2010.
- [6] C. L. Melcher and J. S. Schweitzer. Cerium doped lutetium oxy-orthosilicate: A fast efficient new scintillator. IEEE Trans. Nucl. Sci., 39:502–505, 1992.
- [7] Moses WW. and Ullisch M. Factors influencing timing resolution in a commercial Iso pet camera. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-53, 2006.
- [8] 3M. 3m united states. <http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/>, June 2014.
- [9] UJ. J-pet (jagiellonian-pet tomography), August 2014.
- [10] Guillem Prats. Image reconstruction in high-resolution PET: GPU-accelerated strategies for improving image quality and accuracy. PhD thesis, Stanford University, 2009.
- [11] D. Oleszczak. Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią, 2004.
- [12] Adam Strzałkowski. Wstęp do fizyki jądra atomowego. PWN, Warszawa, 1978.
- [13] Sz. Szczeniowski. Fizyka doświadczalna, część IV, Fizyka Jądra i cząstek elementarnych. PWN, Warszawa, 1974.
- [14] Z. Wróbel, A. Budziak, H. Hrynkiewicz, and L. Jarczyk. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki jądrowej w pracowni studenckiej IFUJ. Skrypty Uczelniane UJ Nr. 315, Kraków, 1979.
- [15] Ewelina Czaicka. Liniowy model pozytonowego tomografu emisyjnego. Master's thesis, Uniwersytet Jagielloński, 2008.
- [16] Jarosław Choiński. Oddział produkcji radiofarmaceutyków w Ślcj uw. <http://www.slcyj.uw.edu.pl/pet/en/Pliki/Choinski.pdf>, Czerwiec 2014.
- [17] Jarosław Choiński. Production of pet radionuclides. <http://www.petnm.unimelb.edu.au/pet/detail/radionuc.html>, Czerwiec 2014.
- [18] P. Moskal, P. Salabura, M. Silarski, J. Smyrski, J. Zdebik, and M. Zieliński. Novel detectors systems for the positron emission tomography. Bio-algorithms and med-systems, 7(2):73–78, 2011.
- [19] M. Conti et al. Comparison of fast scintillators with tof pet potential. IEEE Trans. Nucl. Sci., 56:1, 2009.
- [20] J-pet (jagiellonian-pet tomography). <http://koza.if.uj.edu.pl/pet/>, June 2014.
- [21] Szymon Niedźwiecki. Studies of detection of gamma radiation with use of organic scintillator detectors in view of positron emission tomography. Master's thesis, Uniwersytet Jagielloński, 2011.
- [22] P. Moskal, T. Bednarski, A. Heczko, M. Kajetanowicz, Ł. Kapłon, A. Kochanowski, G. Konopka-CUPIAŁ, G. Korcyl, W. Krzemień, K. Łojek, W. Migdał, M. Molenda, Sz. Niedźwiecki, P. Salabura, M. Silarski, A. Słomski, J. Smyrski, Z. Rudy, J. Zdebik, and M. Zieliński. P11. strip-pet: concept of tof-pet scanner based on polymer scintillator strips. Nuclear Medicine Review, 15:A61, 2012.
- [23] Scintillation counter. <http://nuclearpowertraining.tpub.com>, Czerwiec 2014.

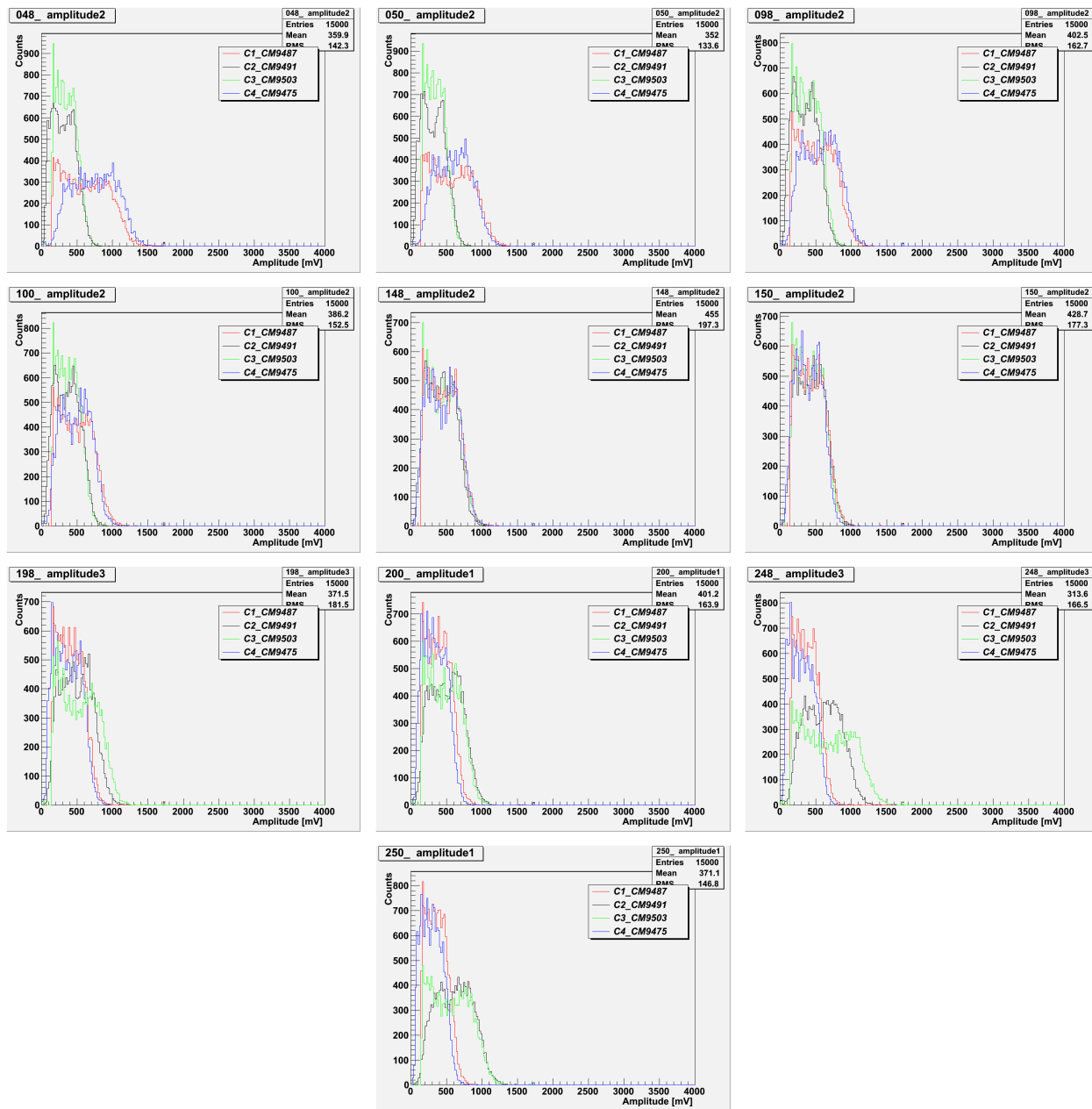
- [24] Plastic scintillators and fast pulse techniques. <http://adweb.desy.de>, Czerwiec 2014.
- [25] The experiment. <http://www.southampton.ac.uk>, Czerwiec 2014.
- [26] Pomiary izotopowe w przemyśle. <http://automatykab2b.pl>, Czerwiec 2014.
- [27] H. Wenninger, J. Stiewe, and H. Leutz. The 22na positon spectrum. Nuclear Physics, A109:564, 1986.
- [28] E. Kubicz, I. Moskal, and M. Silarski. Determination of the beam profile of annihilation quanta used for the calibration of pet devices, Kwiecień 2014. Plakat, zaprezentowany na WSFM 2014, 15-17.05.2014.
- [29] Saint-Gobain Crystals. Sgc bc418-420-422 data sheet. <http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/SGC%20BC418-420-422%20Data%20Sheet.pdf>, June 2014.
- [30] N. G. Sharma, E. Kubicz, M. Silarski, N. Zon, A. Wieczorek, Ł. Kapłon, and P.Kowalski. Different foils tests. Technical Report 10, Uniwersytet Jagielloński, 2014. PET UJ Report.

Komplet histogramów ładunków



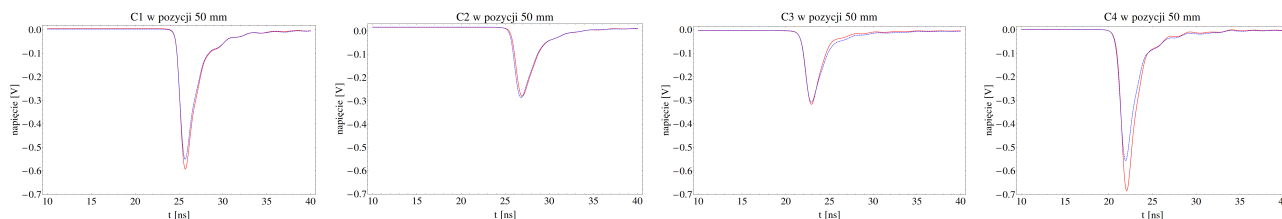
Rysunek 23: Histogramy ładunków zebranych w pomiarach dla wszystkich fotopowielaczy, dla wszystkich pozycji źródła (50, 100, 150, 200, 250 mm). W jednym przypadku (ozn.: 048, 098, 148, 198, 248) scyntylnator M był otoczony lustrami, w drugim (ozn.: 050, 100, 150, 200, 250) - folią

Komplet histogramów amplitud

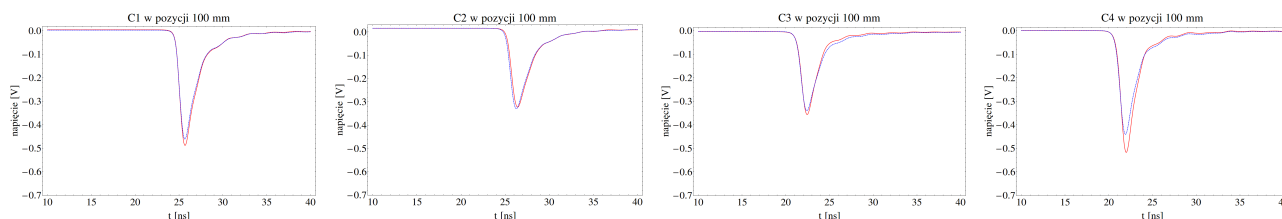


Rysunek 24: Histogramy amplitud sygnałów pochodzących od wszystkich fotopowielaczy, dla wszystkich pozycji źródła (50, 100, 150, 200, 250 mm). W jednym przypadku (ozn.: 048, 098, 148, 198, 248) scyntylator M był otoczony lustrami, w drugim (ozn.: 050, 100, 150, 200, 250) - folią

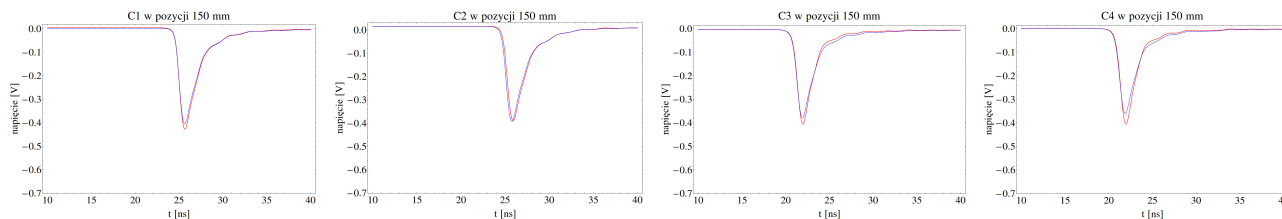
Uśrednione sygnały: ustalone kanały fotopowielacza



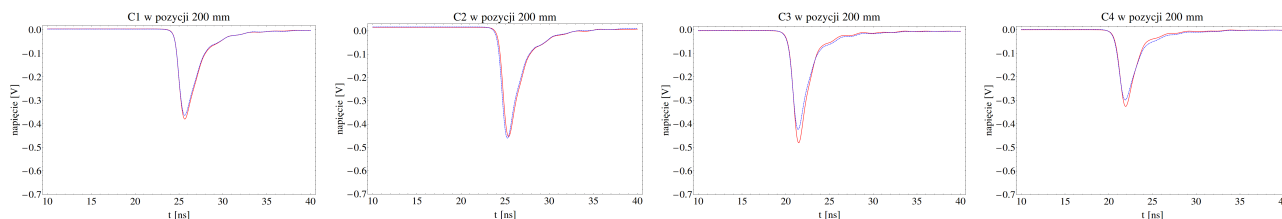
Rysunek 25: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych w pozycji źródła 50 mm (przy parze fotopowielaczy C2-C3). Wykresy dla fotopowielaczy C1, C2, C3 i C4 (odpowiednio na każdym wykresie). Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z użytymi lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.



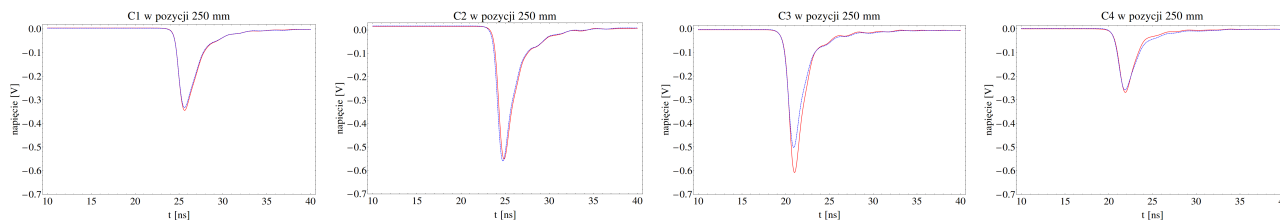
Rysunek 26: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych w pozycji źródła 100 mm. Wykresy dla fotopowielaczy C1, C2, C3 i C4 (odpowiednio na każdym wykresie). Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z użytymi lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.



Rysunek 27: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych w pozycji źródła 150 mm (środek). Wykresy dla fotopowielaczy C1, C2, C3 i C4 (odpowiednio na każdym wykresie). Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z użytymi lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.

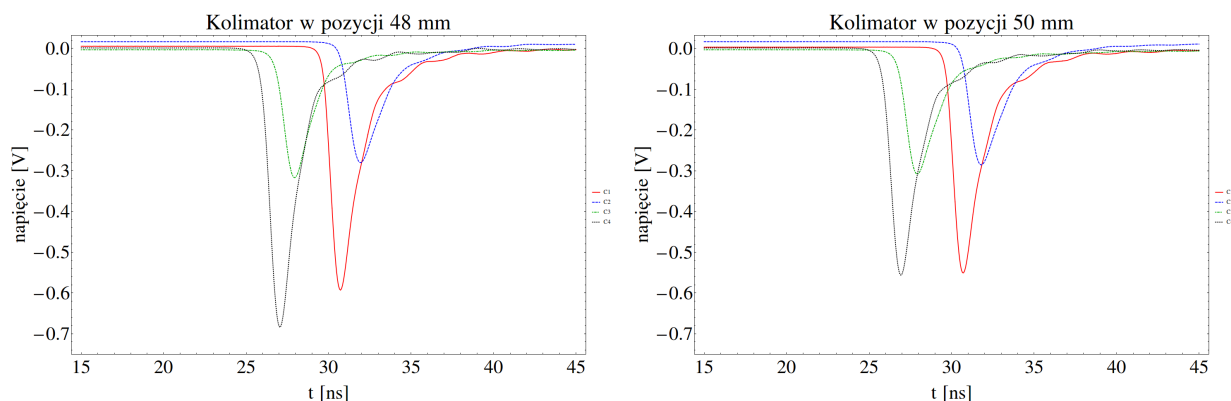


Rysunek 28: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych w pozycji źródła 200 mm. Wykresy dla fotopowielaczy C1, C2, C3 i C4 (odpowiednio na każdym wykresie). Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z użytymi lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.

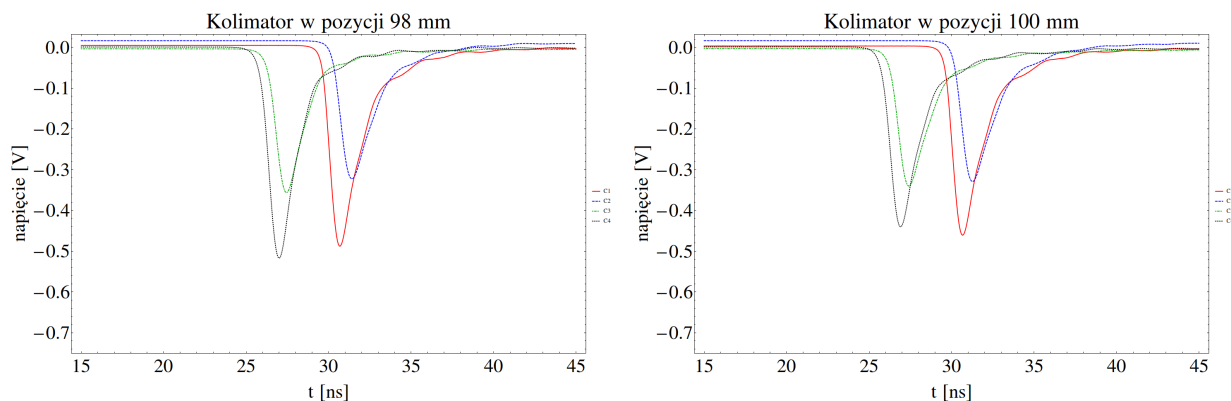


Rysunek 29: Wykres 15000 sygnałów uśrednionych w pozycji źródła 250 mm (przy parze fotopowielaczy C1-C4). Wykresy dla fotopowielaczy C1, C2, C3 i C4 (odpowiednio na każdym wykresie). Czerwoną linią ciągłą oznaczona jest odpowiedź układu z użytymi lustrami, niebieską przerywaną zaś odpowiedź układu w którym oba scyntylatory były owinięte w folię.

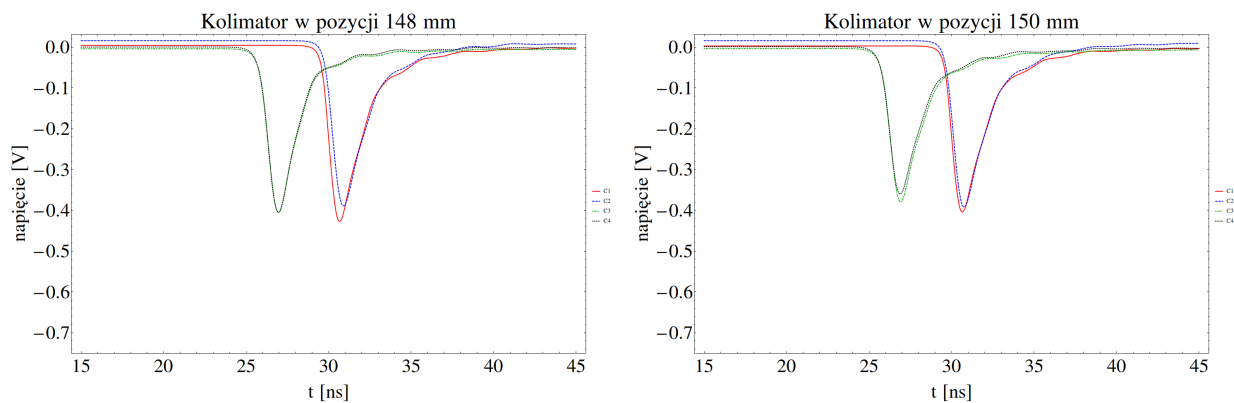
Uśrednione sygnały: ustalona pozycja kolimatora



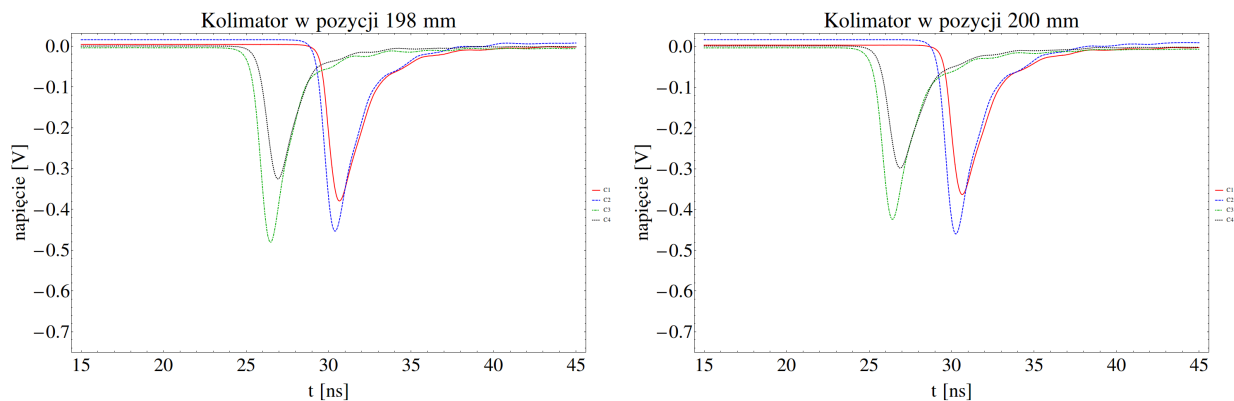
Rysunek 30: Uśrednione wykresy 15000 sygnałów wszystkich kanałów dla określonej pozycji w przypadku układu z zamontowanym lustrem (na scyntylatorze z fotopowielaczami C3-C4, pozycja 48) oraz owiniętego folią (wszystkie scyntylatory, pozycja 50).



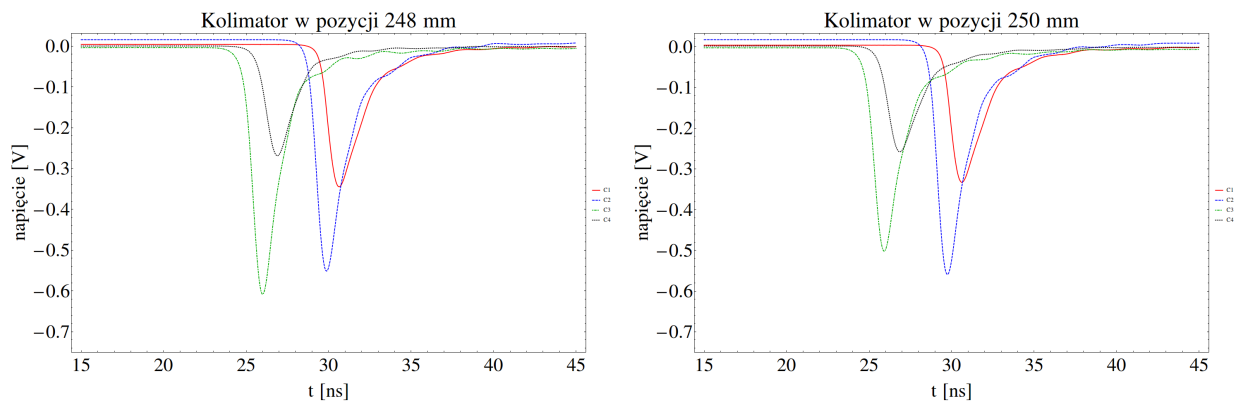
Rysunek 31: Uśrednione wykresy 15000 sygnałów wszystkich kanałów dla określonej pozycji w przypadku układu z zamontowanym lustrem (na scyntylatorze z fotopowielaczami C3-C4, pozycja 98) oraz owiniętego folią (wszystkie scyntylatory, pozycja 100).



Rysunek 32: Uśrednione wykresy 15000 sygnałów wszystkich kanałów dla określonej pozycji w przypadku układu z zamontowanym lustrem (na scyntylatorze z fotopowielaczami C3-C4, pozycja 148) oraz owiniętego folią (wszystkie scyntylatory, pozycja 150).

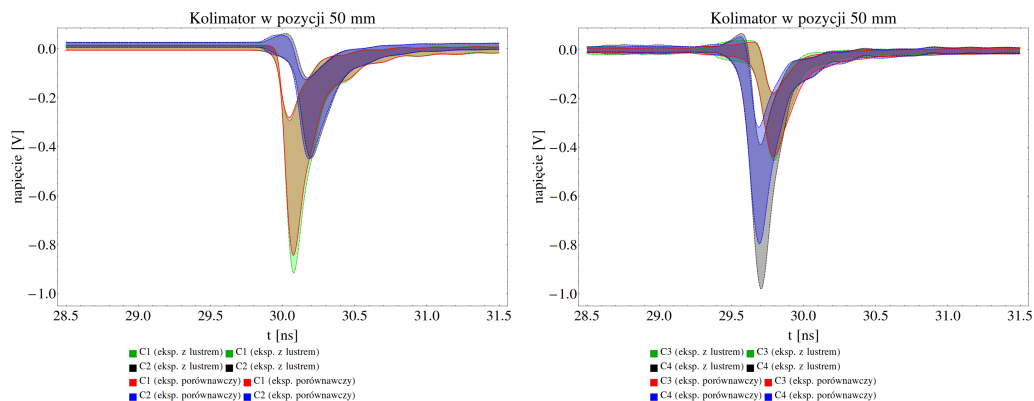


Rysunek 33: Uśrednione wykresy 15000 sygnałów wszystkich kanałów dla określonej pozycji w przypadku układu z zamontowanym lustrem (na scyntylatorze z fotopowielaczami C3-C4, pozycja 198) oraz owiniętego folią (wszystkie scyntylatory, pozycja 200).

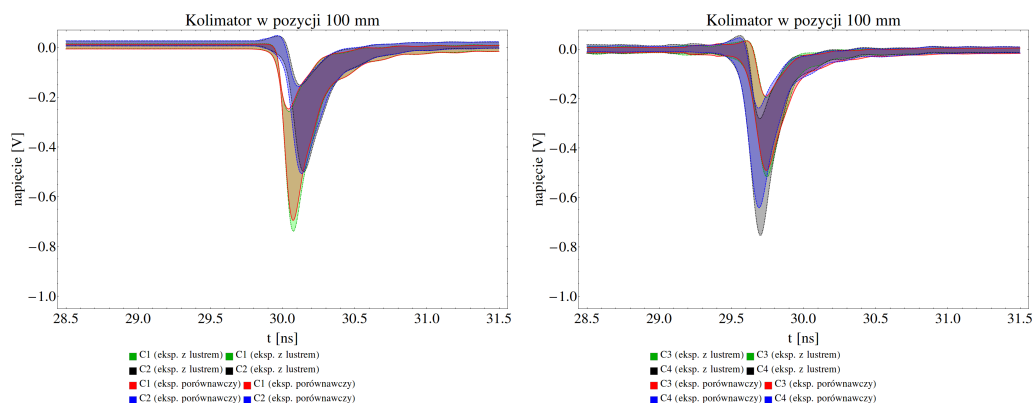


Rysunek 34: Uśrednione wykresy 15000 sygnałów wszystkich kanałów dla określonej pozycji w przypadku układu z zamontowanym lustrem (na scyntylatorze z fotopowielaczami C3-C4, pozycja 248) oraz owiniętego folią (wszystkie scyntylatory, pozycja 250).

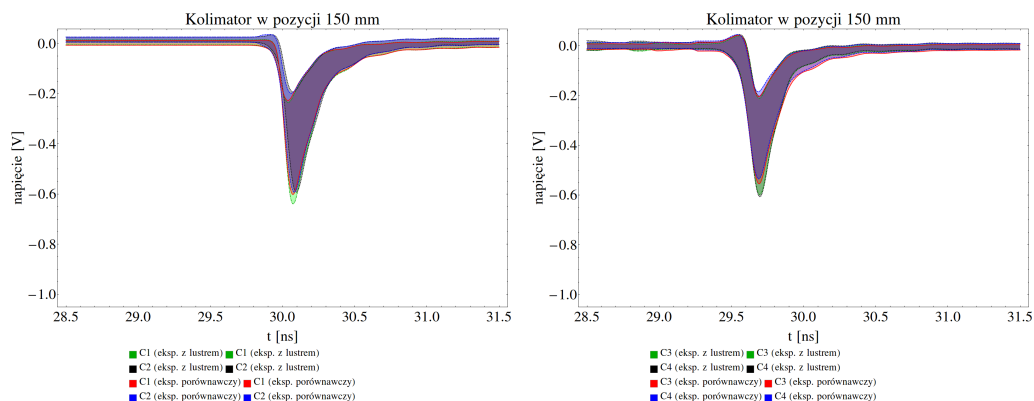
Rozrzut sygnału



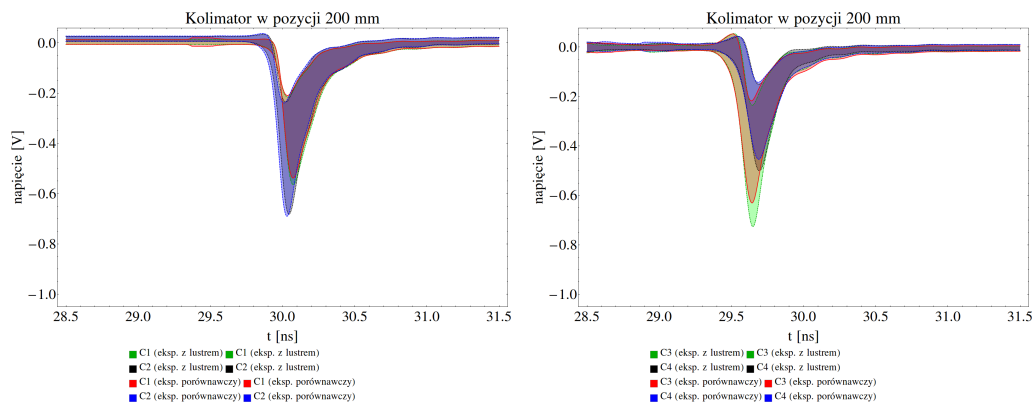
Rysunek 35: Lewy panel prezentuje wykresy dyspersji w próbce 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (50mm/48mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, w których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylnator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni.



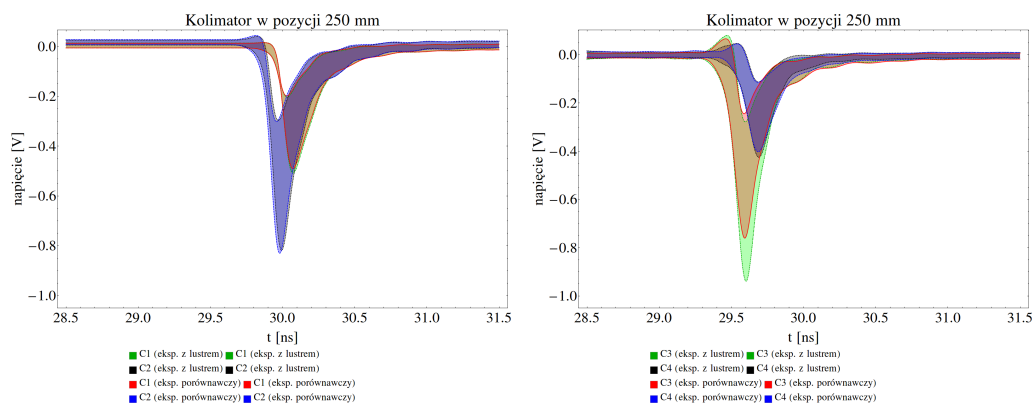
Rysunek 36: Lewy panel prezentuje wykresy dyspersji w próbce 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (100mm/98mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, w których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylnator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni.



Rysunek 37: Lewy panel prezentuje wykresy dyspersji w próbce 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (150mm/148mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, w których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni.

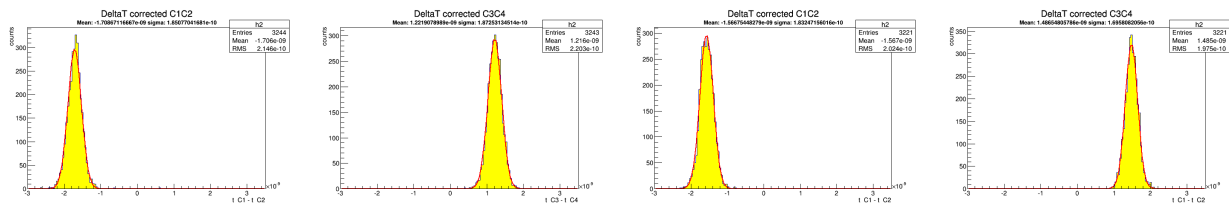


Rysunek 38: Lewy panel prezentuje wykresy dyspersji w próbce 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (200mm/198mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, w których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni.

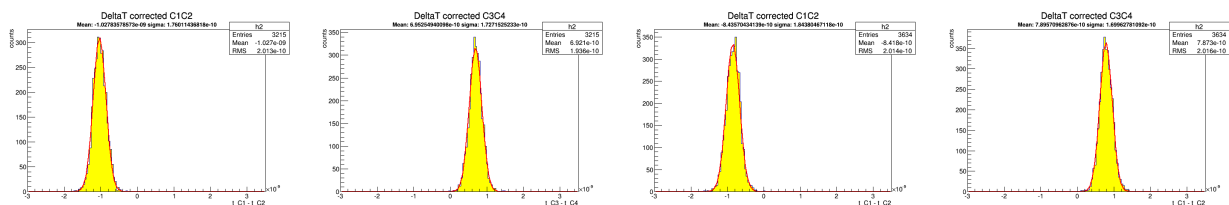


Rysunek 39: Lewy panel prezentuje wykresy dyspersji w próbce 15000 sygnałów zarejestrowanych w określonej pozycji kolimatora (250mm/248mm), dla pary fotopowielaczy C1C2, dla których scyntylator nie był zmieniany (był owinięty w folię). Prawy panel prezentuje wykresy dla par fotopowielaczy C3C4, dla których scyntylator był owinięty folią w jednym doświadczeniu a obudowany lustrami w drugim. Adnotacja „lustra” przy legendzie podkreśla fakt, że dane były wzięte z doświadczenia, w którym para C3C4 (scyntylator M) znajdowała się w lustrzanej skrzyni.

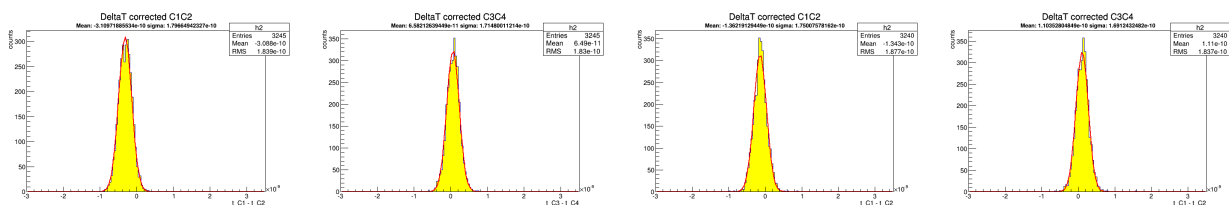
Histogramy i dopasowania Δt



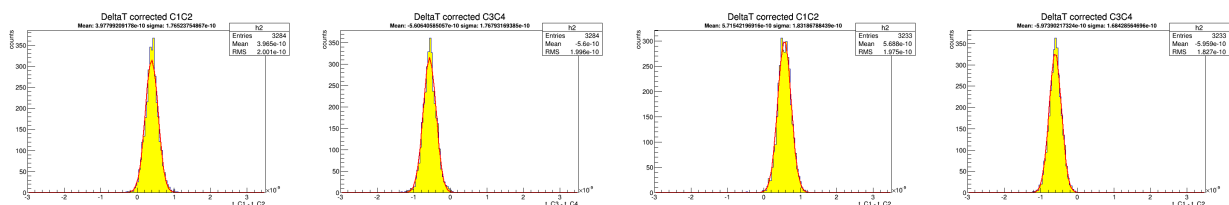
Rysunek 40: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 50mm dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami, w drugim - folią. Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.



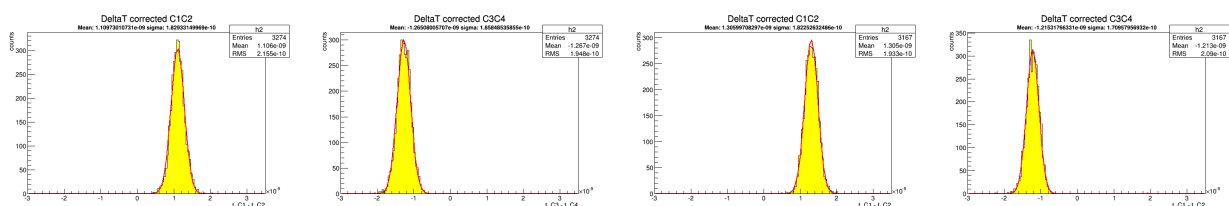
Rysunek 41: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 100mm dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami, w drugim - folią. Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.



Rysunek 42: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 150mm dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami, w drugim - folią. Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.



Rysunek 43: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 200mm dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami, w drugim - folią. Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.



Rysunek 44: Histogramy różnicy czasów dla pozycji źródła 250mm dla obu par fotopowielaczy w układzie, gdzie w jednym przypadku scyntylator M jest otoczony lustrami, w drugim - folią. Na wykresach przedstawiona jest dopasowana funkcja.