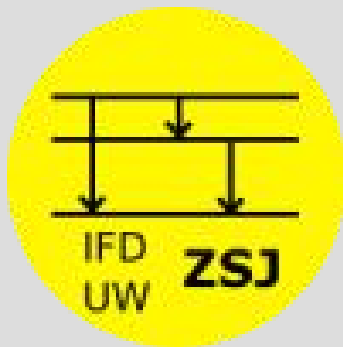


Przemiana beta ^{43}Cr

Marcin Pomorski
Zakład Spektroskopii Jądrowej
Wydział Fizyki UW



O czym będę mówił

- Emisja opóźnionych protonów – przypomnienie podstawowych informacji.
- Przypadek ^{43}Cr .
- Komora OTPC (po raz kolejny).
- Eksperyment – czyli jak to chrom w parze z żelazem chadza.
- Analiza, czyli 40 000 kliknięć jądrowych podróży.
- Wyniki, czyli o pożytku z danych kalibracyjnych.
- Podsumowanie

Przejścia β daleko od ścieżki stabilności

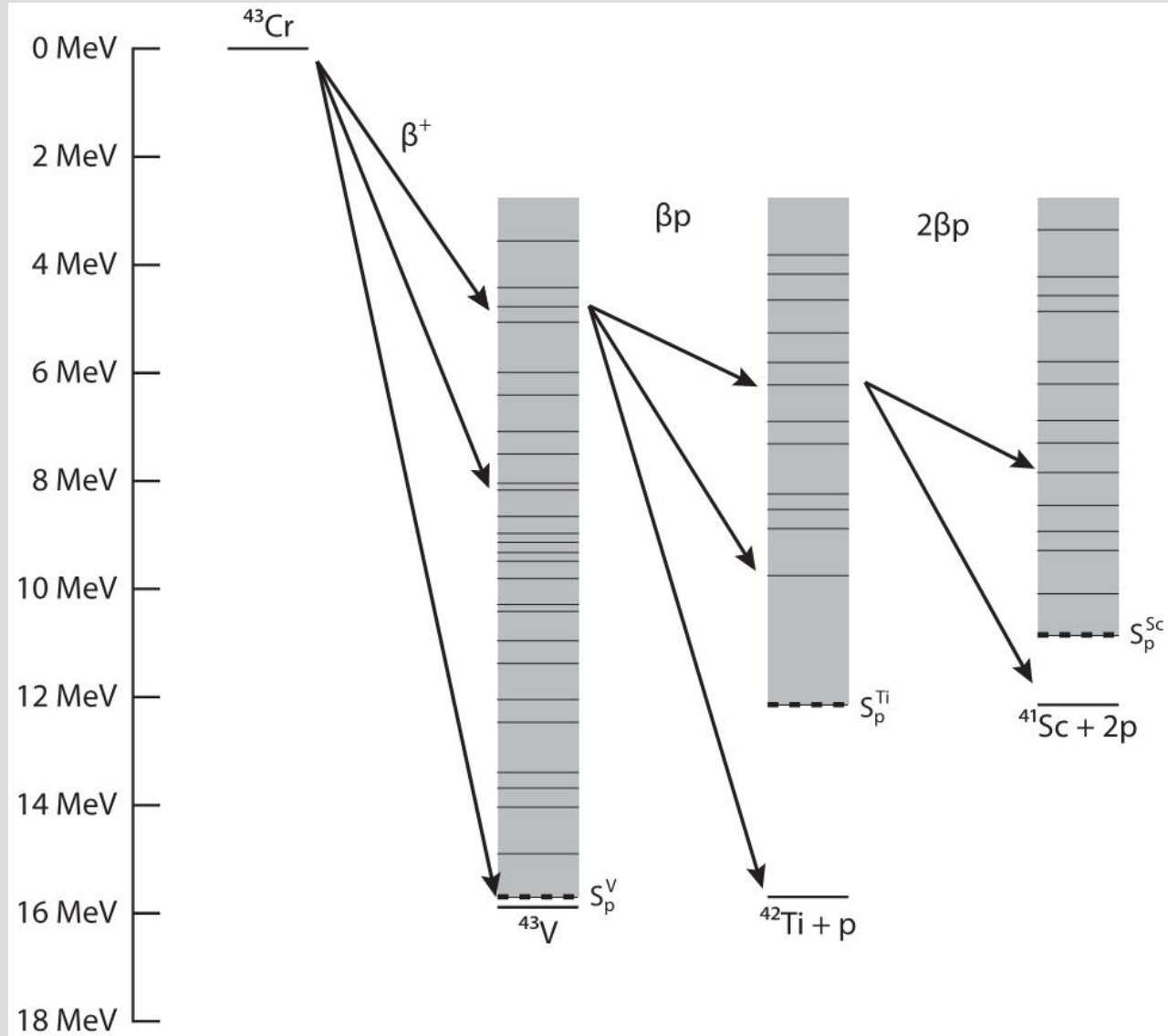
- Dla jąder neutrono-deficytowych leżących daleko od ścieżki stabilności energia dostępna w przejściu β jest duża (dla ^{43}Cr ~ 16 MeV).
- Jednocześnie energia separacji protonu jest mała (dla ^{43}V ~ 0.2 MeV).
- W takiej sytuacji obserwujemy emisje protonów po rozpadach β .



emisja opóźnionych protonów krok po kroku

- Emisja opóźnionego protonu składa się z trzech etapów:
 - Rozpad beta
 - Emisja protonu ze stanu wzbudzonego
 - Emisja γ w jądrze końcowym.
- W zasadzie możliwa jest emisja większej liczby protonów lub innych cząstek. Warunkiem jest, aby energia wzbudzenia jądra emitera była większa niż energia separacji cząstki.

Schemat rozpadu ^{43}Cr



Przypadek ^{43}Cr

- Bardzo neutrono deficytowy izotop, o 9 neutronów uboższy niż najbliższy stabilny izotop Cr o liczbie masowej 52.
- Energia dostępna w rozpadzie β to 15.9 ± 0.2 MeV.

	44 Mn p?	45 Mn p?	46 Mn $\beta^+ = 100\%$	47 Mn $\beta^+ = 100\%$	48 Mn $\beta^+ = 100\%$	49 Mn $\beta^+ = 100\%$	50 Mn $\beta^+ = 100\%$	51 Mn $\beta^+ = 100\%$	52 Mn $\beta^+ = 100\%$	53 Mn EC=100%	54 Mn EC=100%
42 Cr $\beta^+ \approx 100\%$	43 Cr $\beta^+ = 100\%$	44 Cr $\beta^+ = 100\%$	45 Cr $\beta^+ = 100\%$	46 Cr $\beta^+ = 100\%$	47 Cr $\beta^+ = 100\%$	48 Cr $\beta^+ = 100\%$	49 Cr $\beta^+ = 100\%$	50 Cr Abundance=1.34%	51 Cr EC=100%	52 Cr Abundance=83.789%	53 Cr Abundance=9.501%
41 V p?	42 V p?	43 V $\beta^+ ?$	44 V $\beta^+ = 100\%$	45 V $\beta^+ = 100\%$	46 V $\beta^+ = 100\%$	47 V $\beta^+ = 100\%$	48 V $\beta^+ = 100\%$	49 V EC=100%	50 V Abundance=0.257%	51 V Abundance=99.743%	52 V $\beta^- = 100\%$
40 Ti $\beta^+ = 100\%$	41 Ti $\beta^+ = 100\%$	42 Ti $\beta^+ = 100\%$	43 Ti $\beta^+ = 100\%$	44 Ti EC=100%	45 Ti $\beta^+ = 100\%$	46 Ti Abundance=8.25%	47 Ti Abundance=7.44%	48 Ti Abundance=73.12%	49 Ti Abundance=5.41%	50 Ti Abundance=5.18%	51 Ti $\beta^- = 100\%$
39 Sc p=100%	40 Sc $\beta^+ = 100\%$	41 Sc $\beta^+ = 100\%$	42 Sc $\beta^+ = 100\%$	43 Sc $\beta^+ = 100\%$	44 Sc $\beta^+ = 100\%$	45 Sc Abundance=100%	46 Sc $\beta^- = 100\%$	47 Sc $\beta^- = 100\%$	48 Sc $\beta^- = 100\%$	49 Sc $\beta^- = 100\%$	50 Sc $\beta^- = 100\%$
38 Ca $\beta^+ = 100\%$	39 Ca $\beta^+ = 100\%$	40 Ca Abundance=96.941%	41 Ca EC=100%	42 Ca Abundance=0.647%	43 Ca Abundance=0.135%	44 Ca Abundance=2.086%	45 Ca $\beta^- = 100\%$	46 Ca Abundance=0.004%	47 Ca $\beta^- = 100\%$	48 Ca Abundance=0.187%	49 Ca $\beta^- = 100\%$

Dotychczasowe badania ^{43}Cr

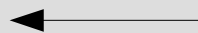
- ^{43}Cr był badany w laboratorium GANIL od 1992 roku, a w 2007 roku ukazała się praca podsumowująca wyniki tych badań [1]. Badań tych dokonywano metodą implantacji jonów w krzemowym detektorze.
- Czas połowicznego zaniku ^{43}Cr wyznaczono jako 21.1 ± 0.4 ms.
- Współczynnik rozgałęzienia dla przejść z emisją protonu ustalono na 92.5(28)%.
- Zidentyfikowano też przejście z emisją dwóch protonów ($\beta 2p$).

Jak mierzone współczynniki rozgałęzienia:

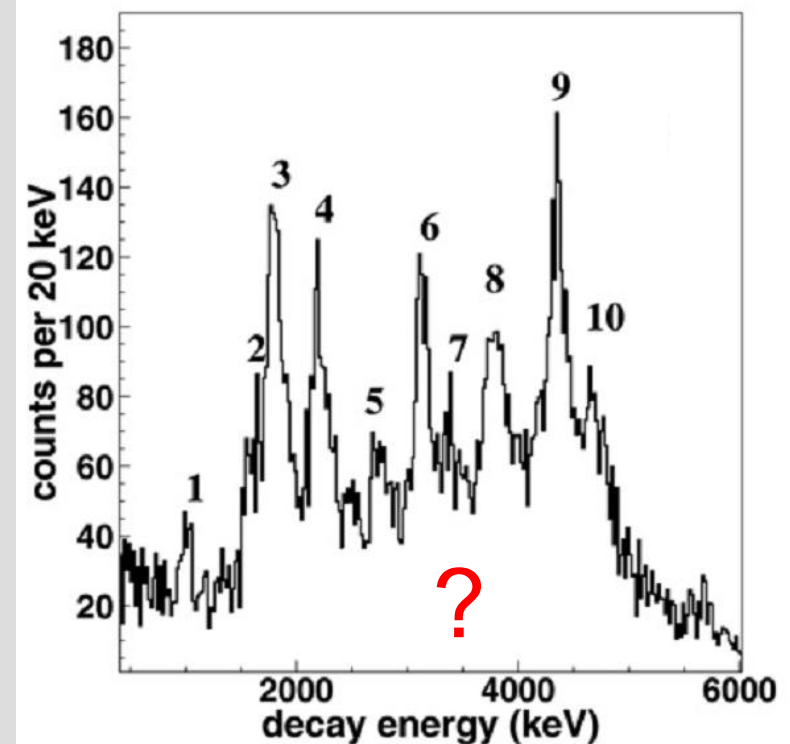
- Współczynniki konkretnych przejść wyznaczono bezpośrednio ze widma energetycznego protonów.

Present work		
	E_p (keV)	I_p (%)
1	998(16)	0.6(1)
2	1614(34)	2.1(11)
3	1812(15)	7.1(12)
4	2179(17)	4.7(7)
5	2753(19)	1.2(4)
6	3138(17)	3.4(7)
7	3382(25)	1.0(4)
8	3744(27)	3.0(14)
9	4348(16)	5.6(7)*
10	4671(26)	4.5(8)

$\beta 2p$



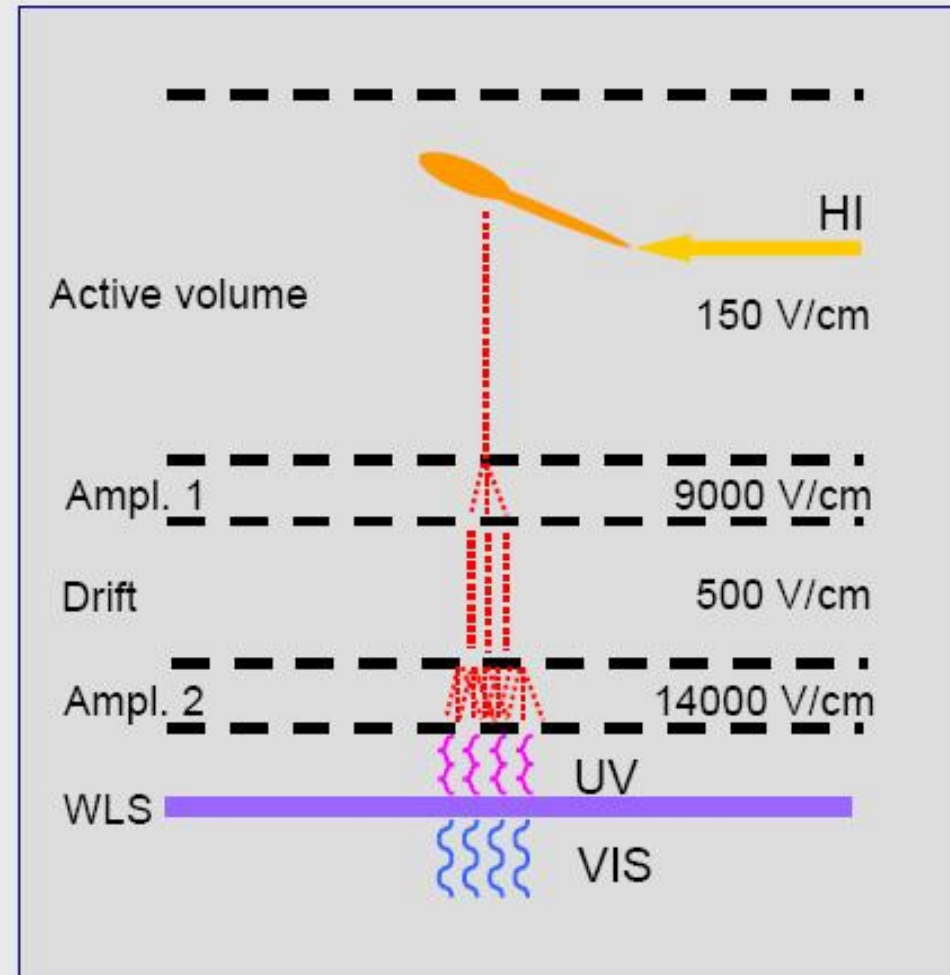
$$\Sigma = 33.2 < 92.5$$



- Całkowite prawdopodob. emisji protonu oszacowano na podstawie widm czasowych.

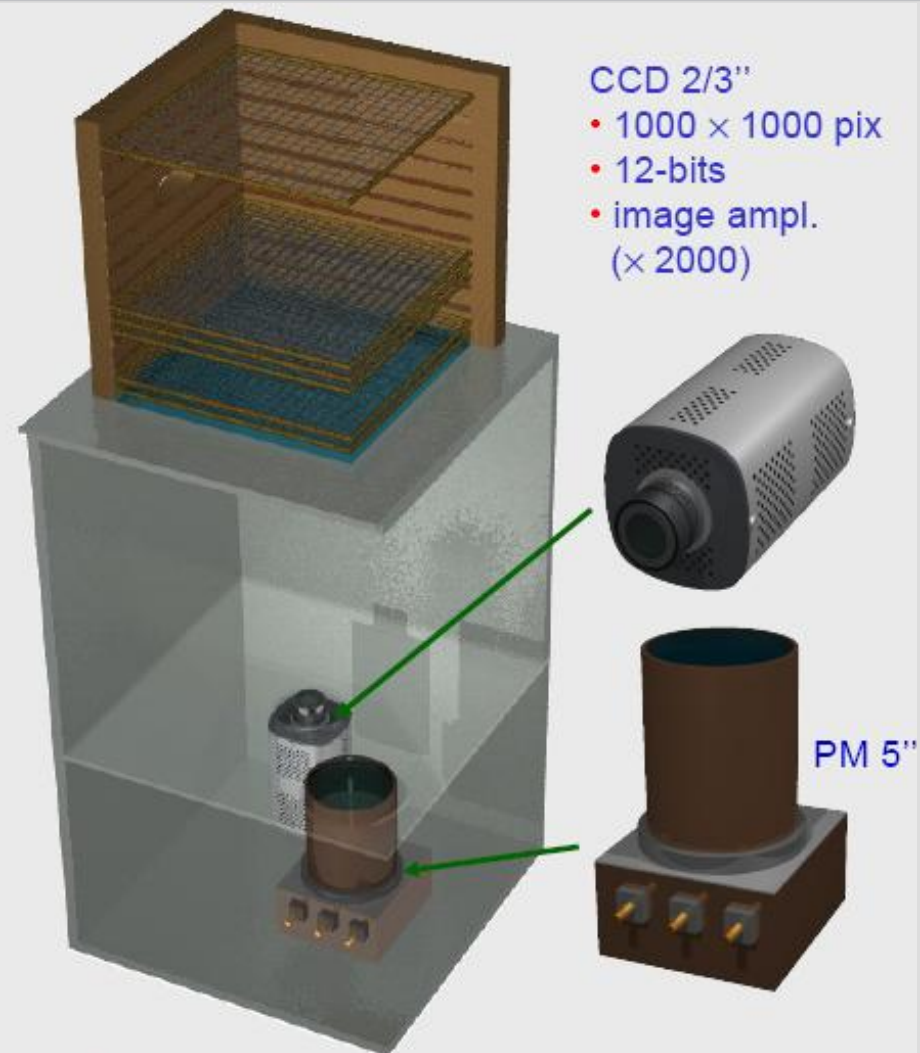
Zasada działania OTPC

- Naładowana cząstka jonizuje mieszanekę gazu w detektorze.
- Swobodne elektrony z tego procesu dryfują ze stałą prędkością w kierunku siatek.
- W dalszej części komory następuje wzmocnienie sygnału poprzez mnożenie elektronów.
- Na koniec wysokoenergetyczne elektrony powodują emisję światła UV, konwertowanego w WLS na światło widzialne.



Konstrukcja OTPC

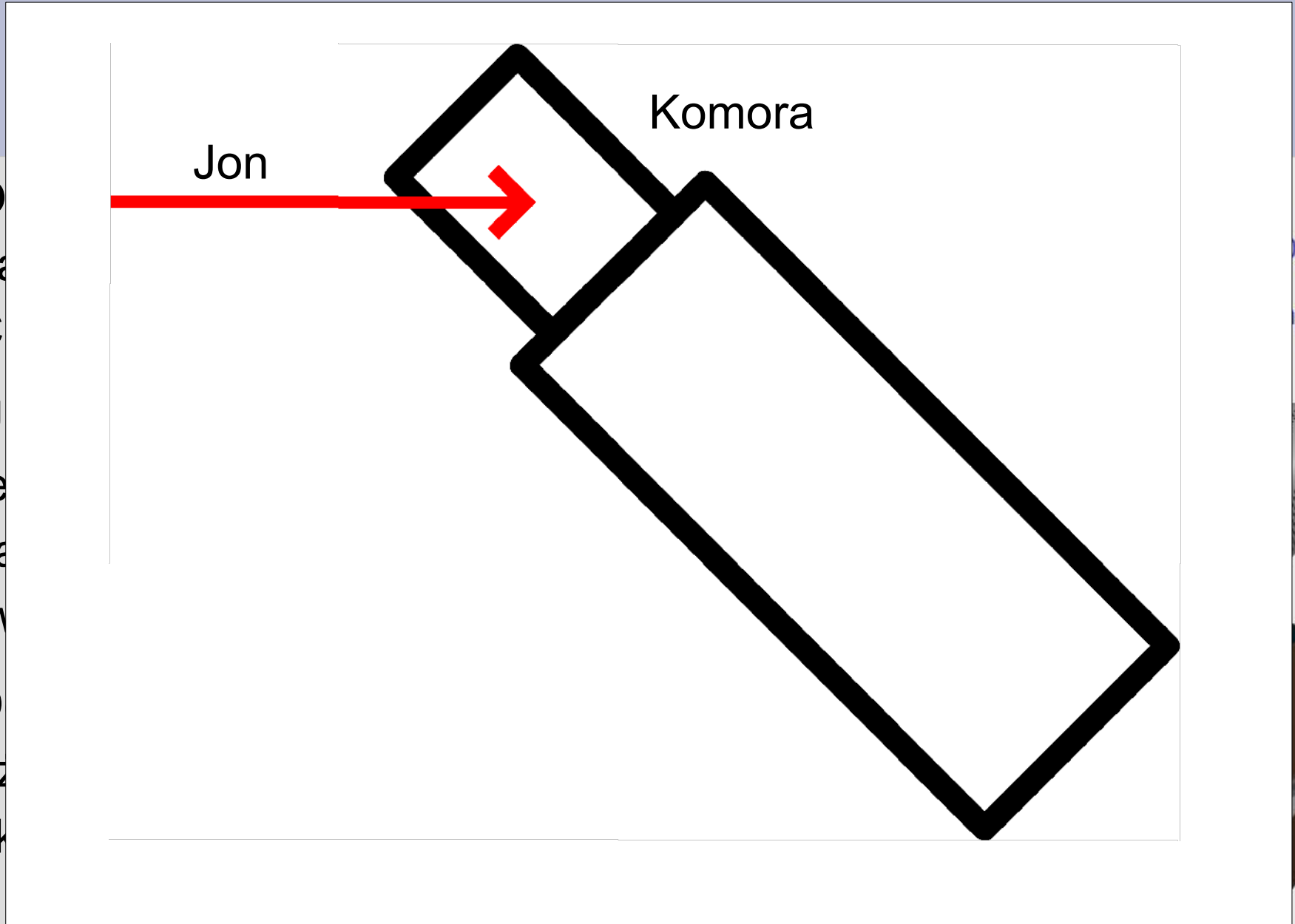
- Odczyt sygnału z komory następuje za pomocą kamery CCD i fotopowielacza.
- Układ zbierania danych zbierał też informację o identyfikacji i zapisywał wszystko na dysku twardym komputera PC.
- Do obsługi całego układu używano programu skonstruowanego w LabView.



M. Ćwiok et al., IEEE TNS, 52 (2005) 2895

K. Miernik et al., NIM A581 (2007) 194

- O
- na
- C
- U
- te
- za
- tw
- D
- uz
- sk



000 pix

pl.



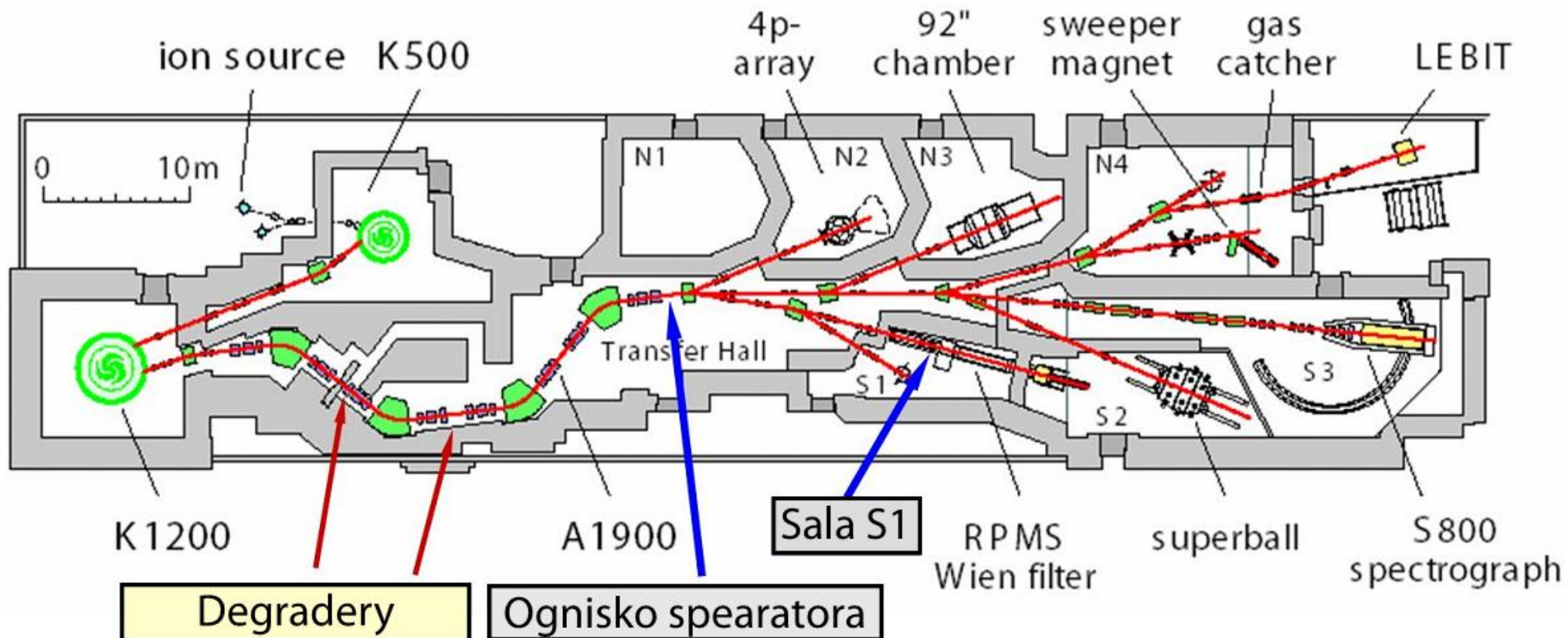
PM 5"

Eksperyment w NSCL

- Eksperyment, gdzie zebrano dane o ^{43}Cr odbył się w National Superconducting Cyclotron Laboratory (NSCL) przy Michigan State University (MSU) w East Lansing, Michigan, USA w 2007 roku.
- W eksperymencie bombardowano tarczę Ni wiązką ^{58}Ni o energii 161 AMeV.
- Produkty były separowane w separatorze A1900.
- Układ akwizycji komory OTPC był tak ustawiony, aby rejestrować wszystkie przypadki ^{45}Fe i część przypadków ^{43}Cr .

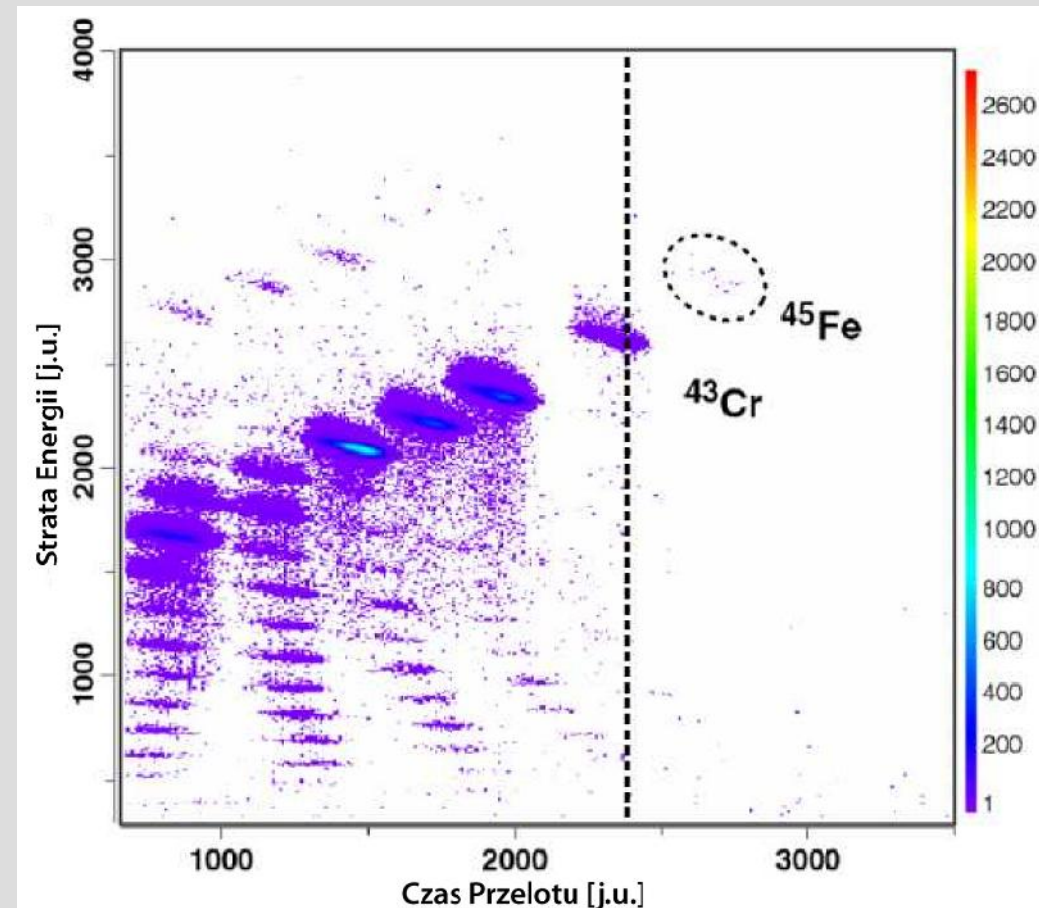
Eksperyment w NSCL

- Eksperyment, gdzie zebrano dane o ^{43}Cr odbył się w

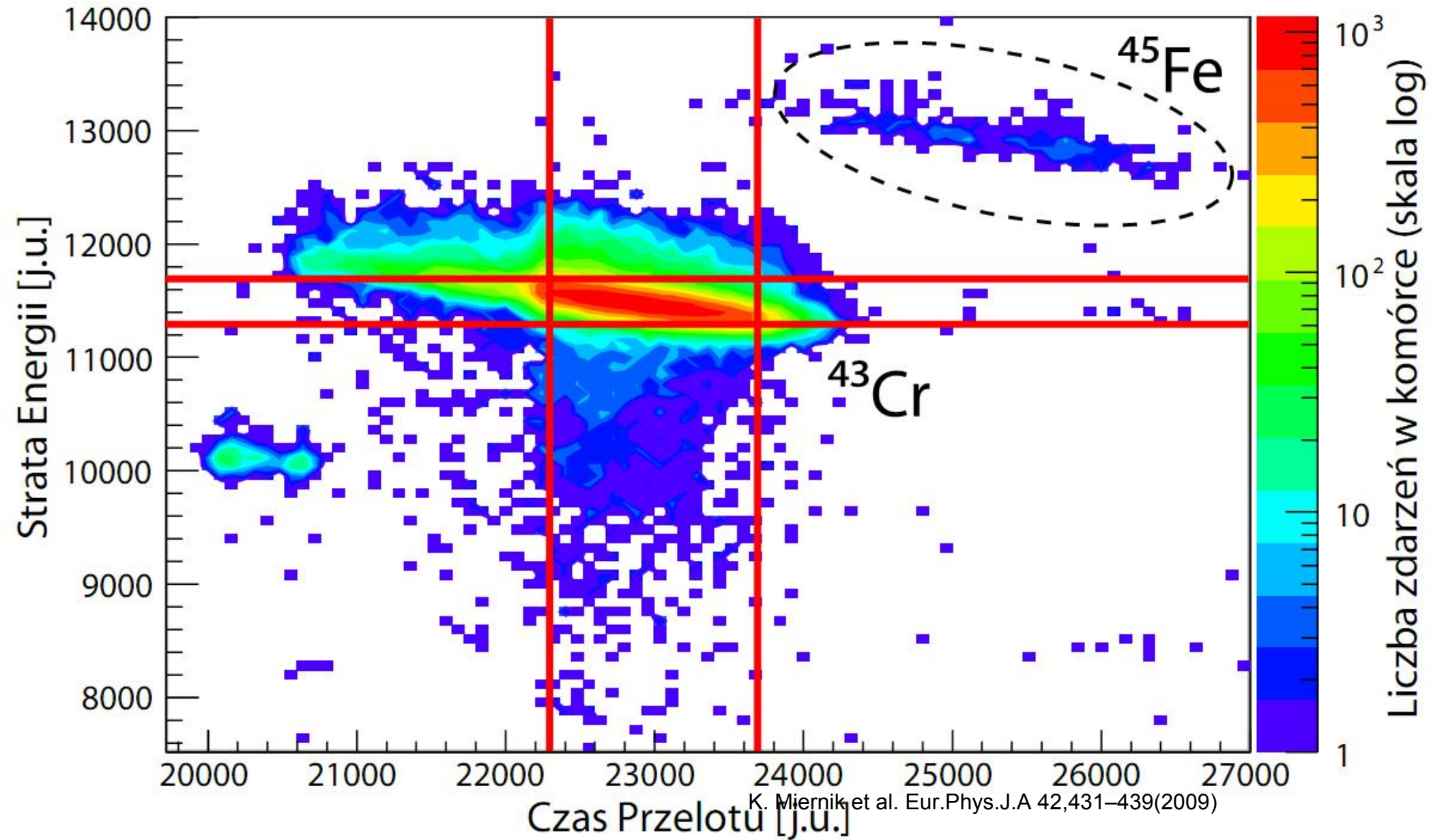


Zebrane dane

- Zdarzenia ^{43}Cr były zbierane głównie w celu monitorowania komory OTPC pomiędzy rzadkimi zdarzeniami ^{45}Fe .
- Z tego powodu rejestrowano tylko niewielką część wyprodukowanych jonów ^{43}Cr .
- Identyfikacja odbywała się metodą TOF-dE.
- Łącznie zarejestrowano około 40 000 zdarzeń ^{43}Cr .

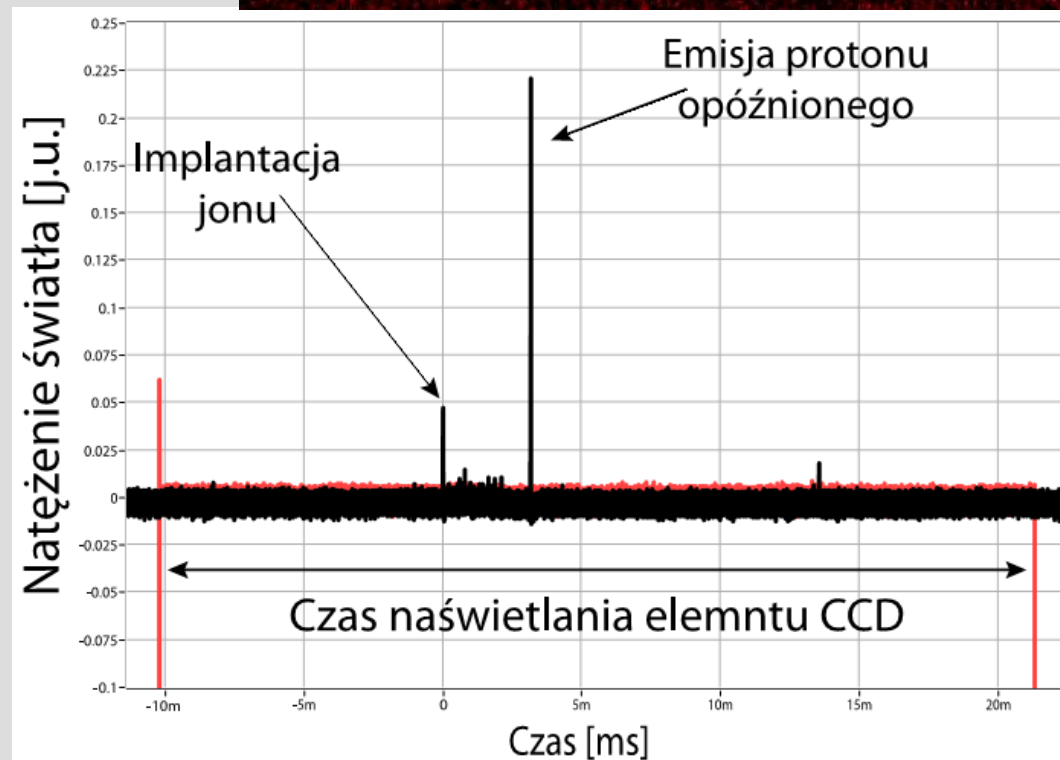
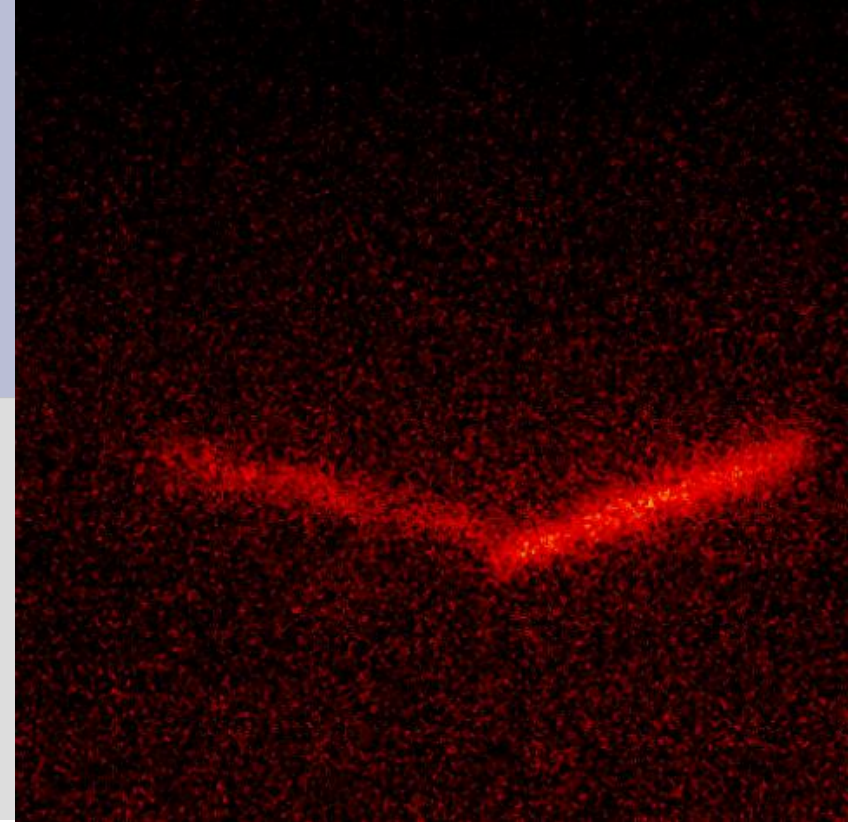


Zebrane dane



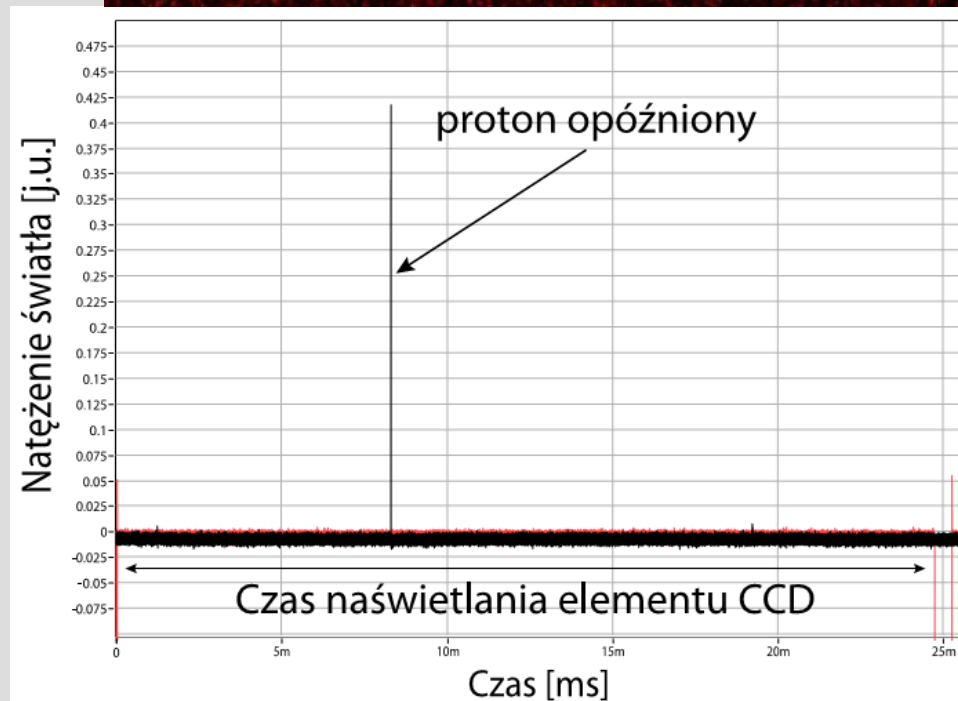
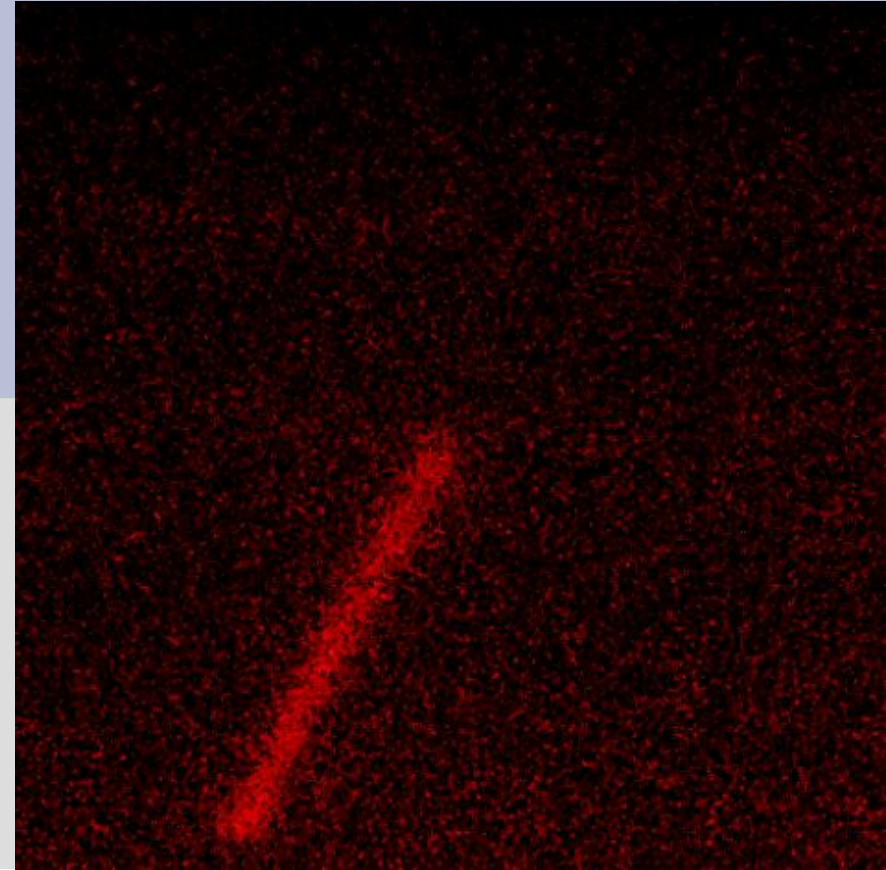
Tryb asynchroniczny

- Kamera CCD naświetlała 30 ms klatki w sposób ciągły.
- Oscyloskop również pracował w sposób ciągły.
- Jeżeli w trakcie naświetlania klatki przychodził sygnał identyfikacyjny, zdarzenie było zapisywane.
- W tym trybie widoczne były ślady ciężkich jonów, a komora była aktywna przez inny czas przy każdym zdarzeniu.

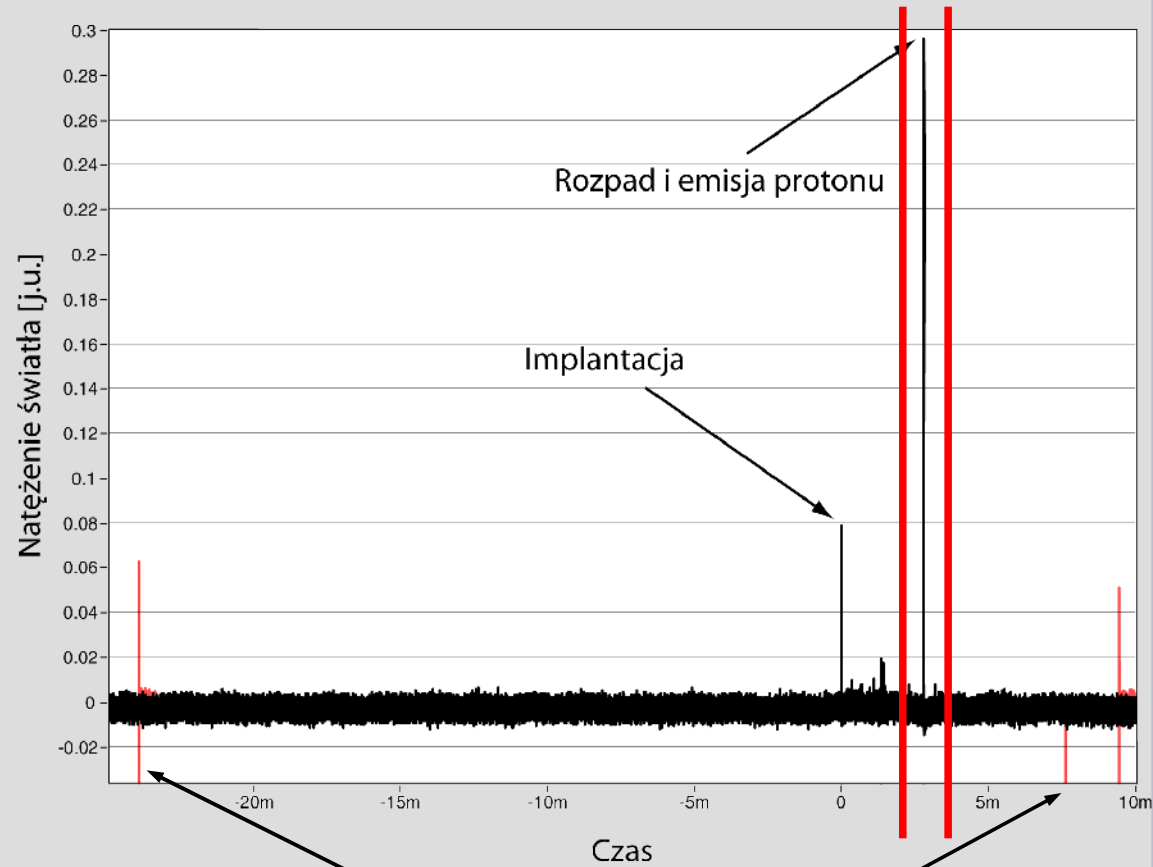


Tryb synchroniczny

- Układ czekał na sygnał potwierdzający identyfikację jonu.
- Po nadejściu sygnału element CCD był czyszczony i rozpoczynał naświetlanie przez 25 ms.
- Jednocześnie oscyloskop rozpoczynał zapisywanie danych z fotopowielacza.
- W trybie tym niewidoczny był ślad ciężkiego jonu, a komora była aktywna przez 25 ms w każdym przypadku.

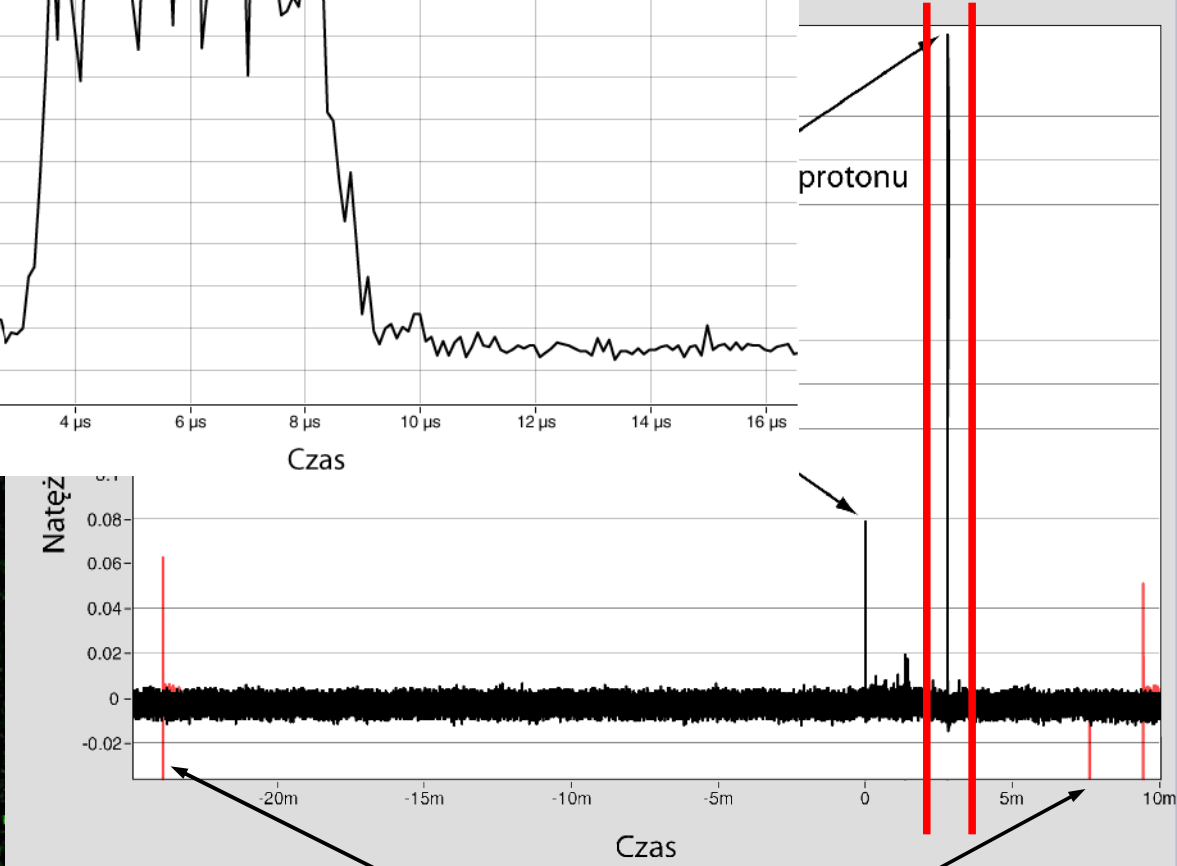
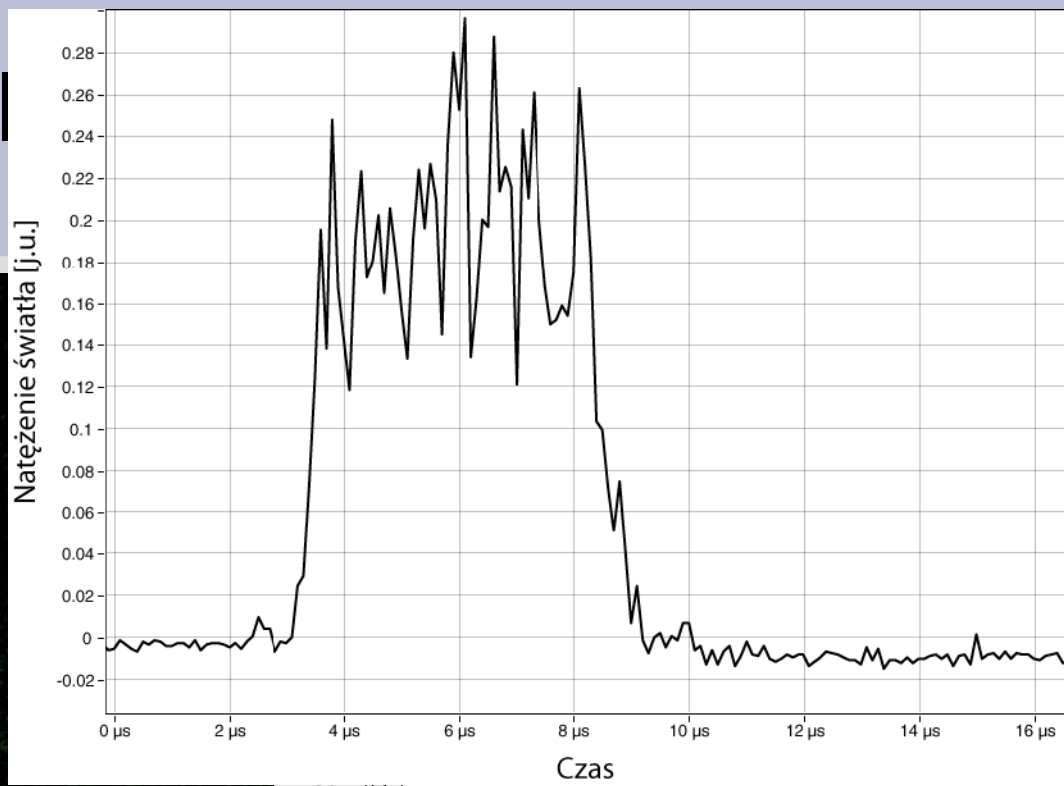
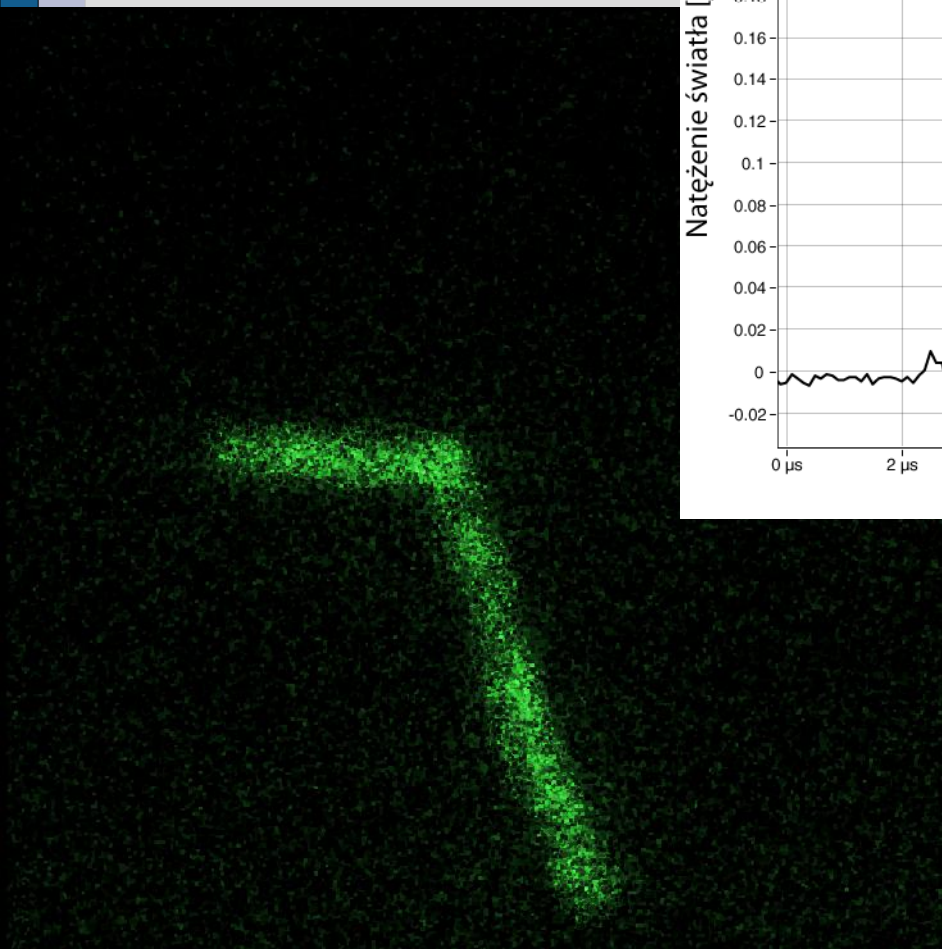


Kilka przykładów - 1p



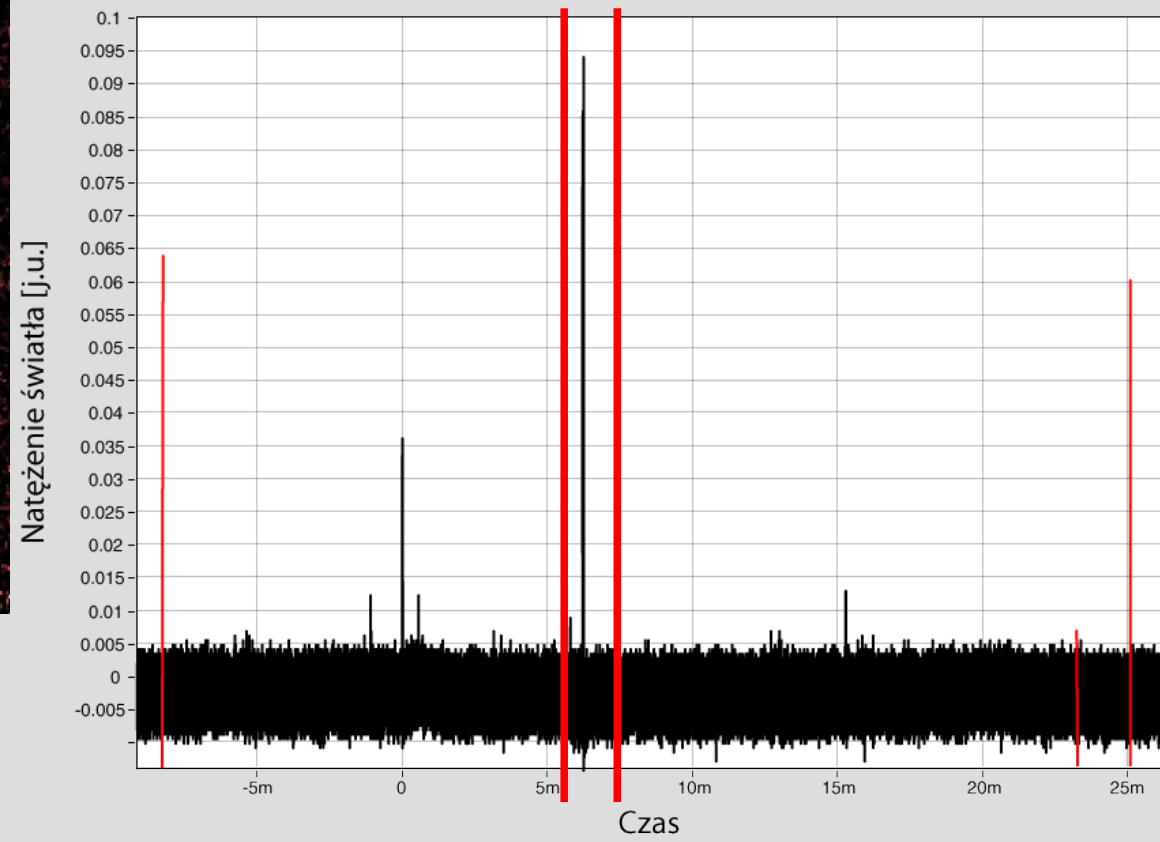
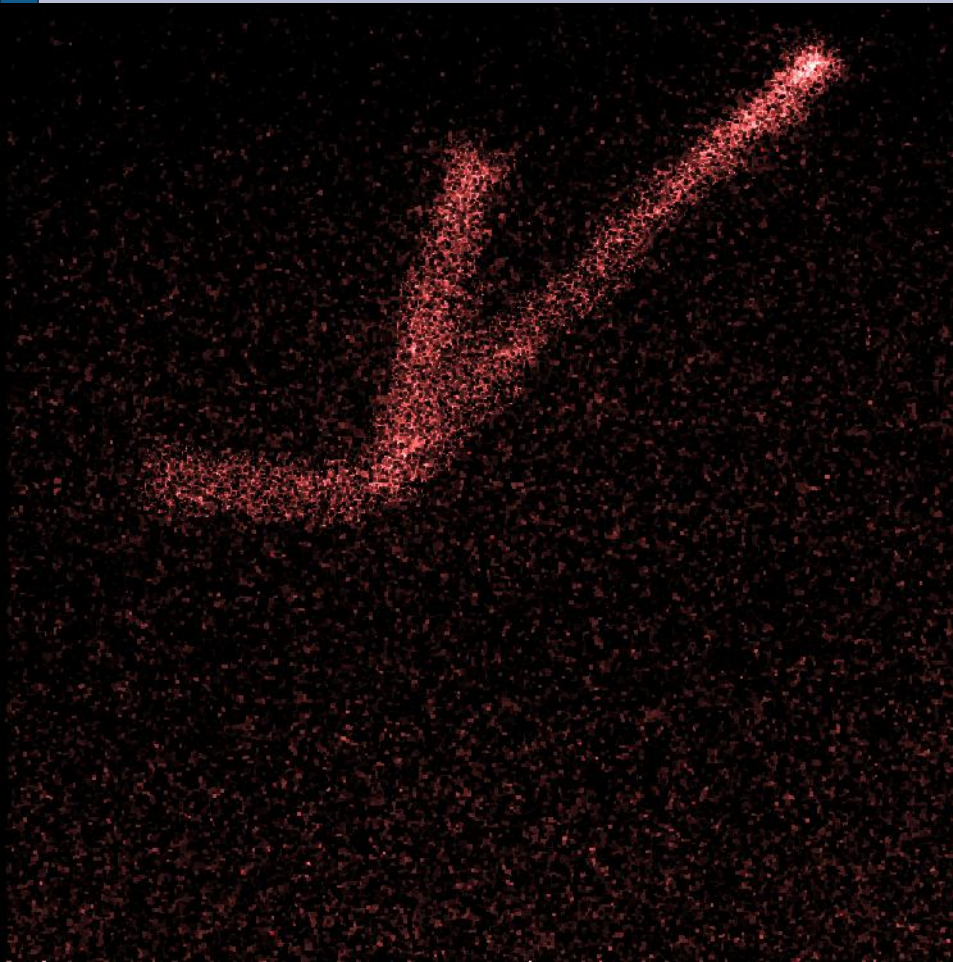
Granice naświetlania

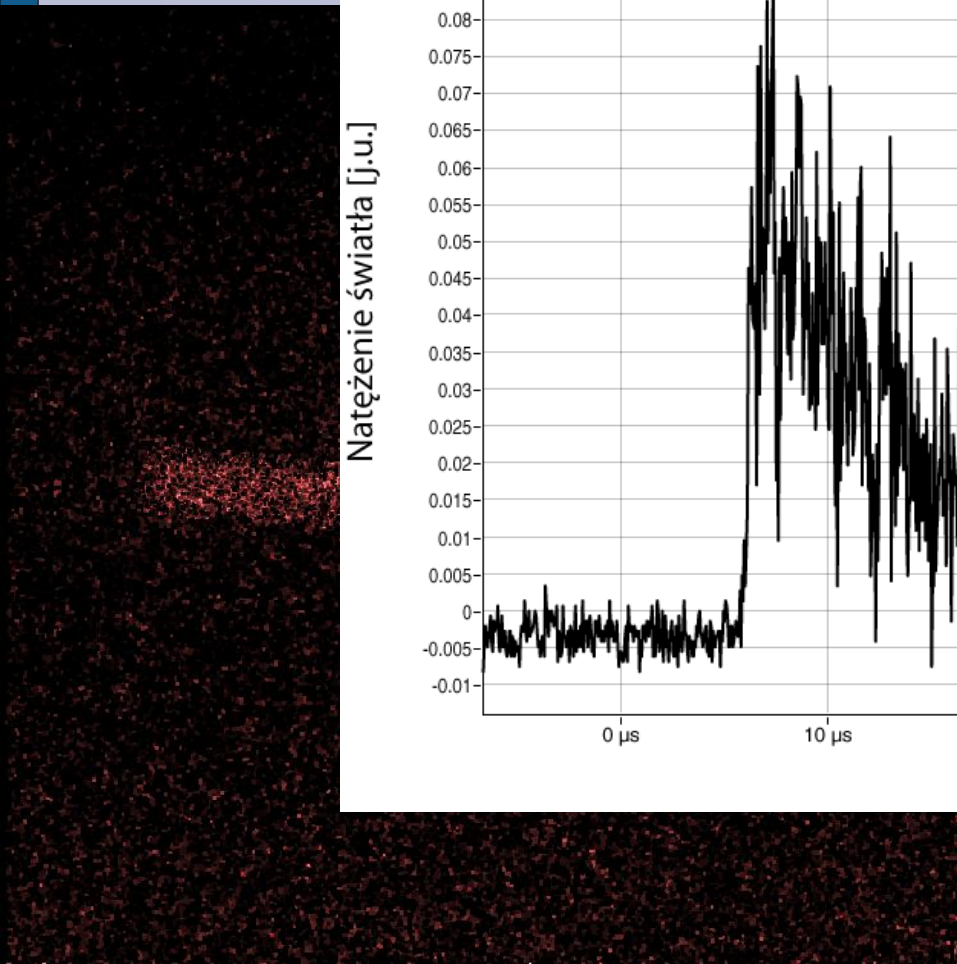
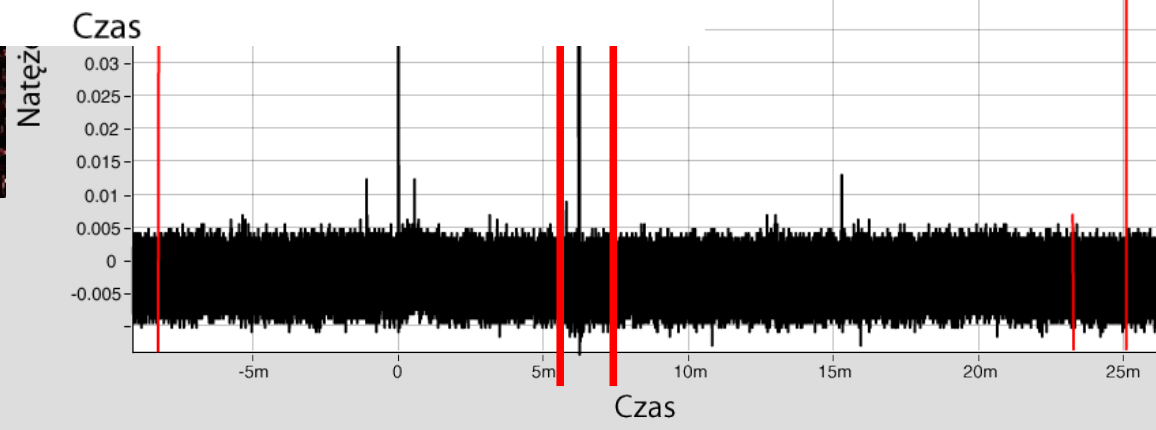
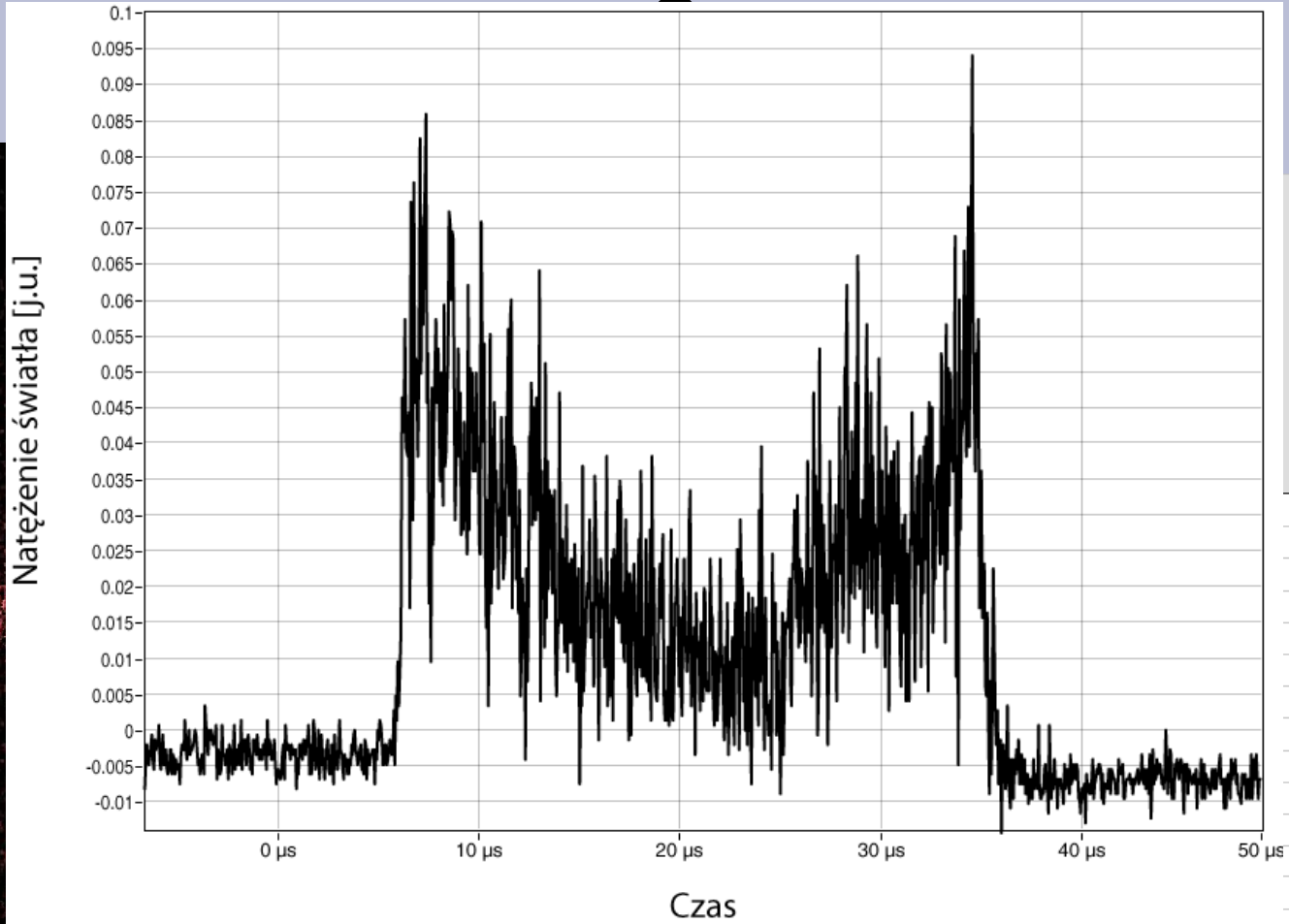
Kil



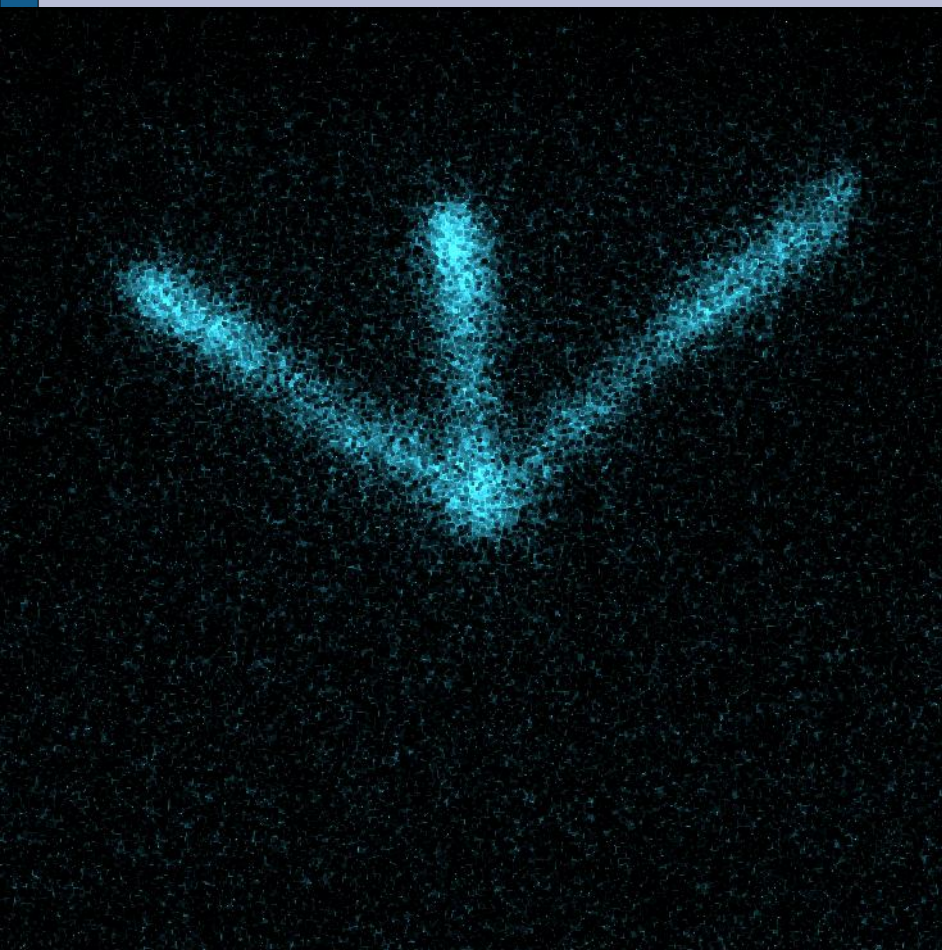
Granice naświetlania

2p

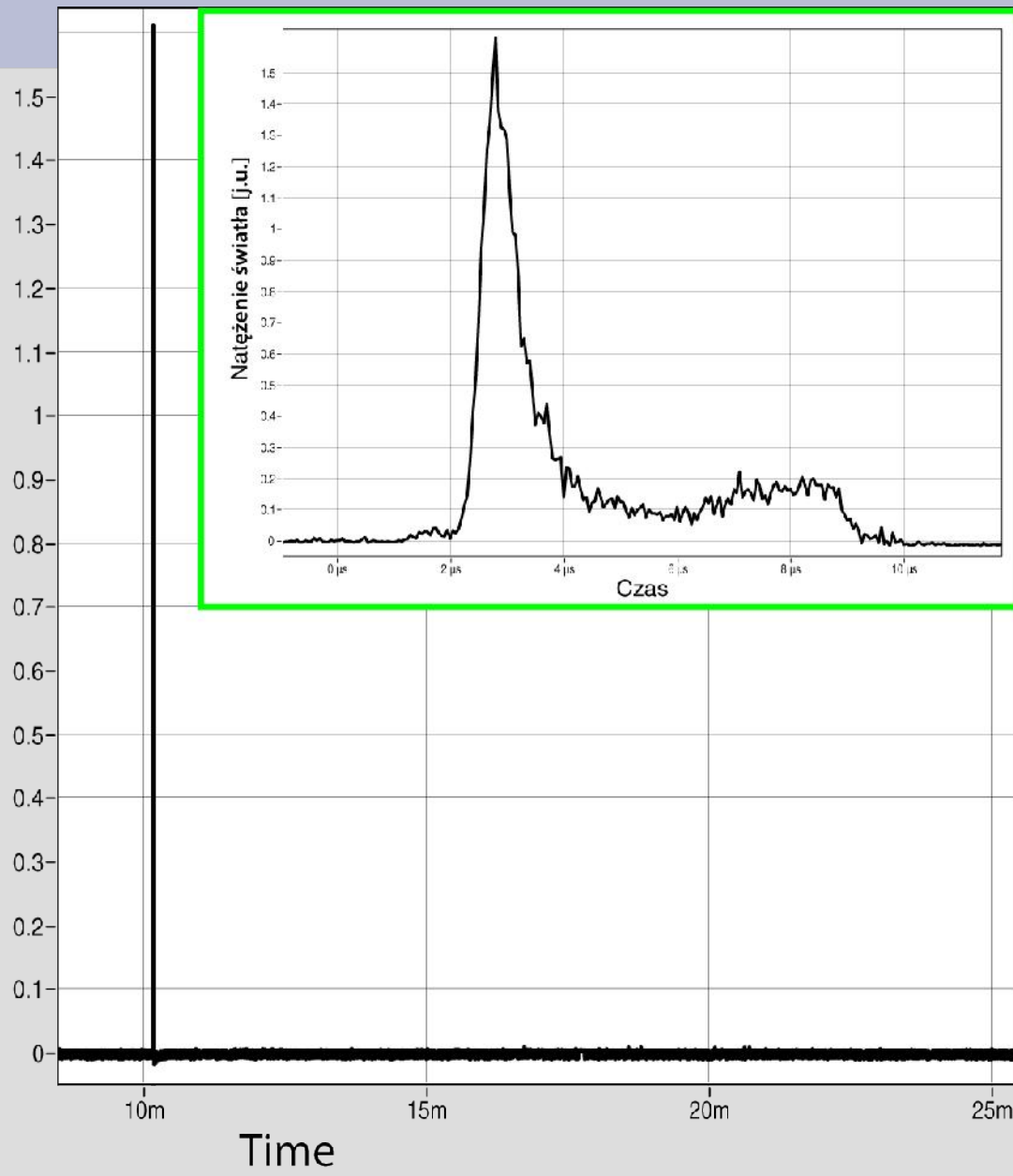




3p



Natężenie światła [j.u.]



Duch chętny, ale ciało słabe...

Czyli jak OTPC ustawione na ^{45}Fe radziło sobie z ^{43}Cr

Ponieważ komora OTPC przygotowana była do pomiarów innego nuklidu, warunki eksperymentu były nieoptymalne dla ^{43}Cr .

- Zdolność zatrzymująca gazu była tak dobrana, aby obserwować ślady od protonów z rozpadu ^{45}Fe o energii do 2 MeV. Protony o energii 2,5 MeV miały zasięg ponad 20 cm, a co za tym idzie opuszczały przestrzeń aktywną detektora.
- Czas naświetlania klatki (25 ms) był porównywalny z czasem połowicznego rozpadu ^{43}Cr (21 ms), co powodowało, że wiele rozpadów następowało po zakończeniu naświetlania klatki.

Analiza zebranych danych

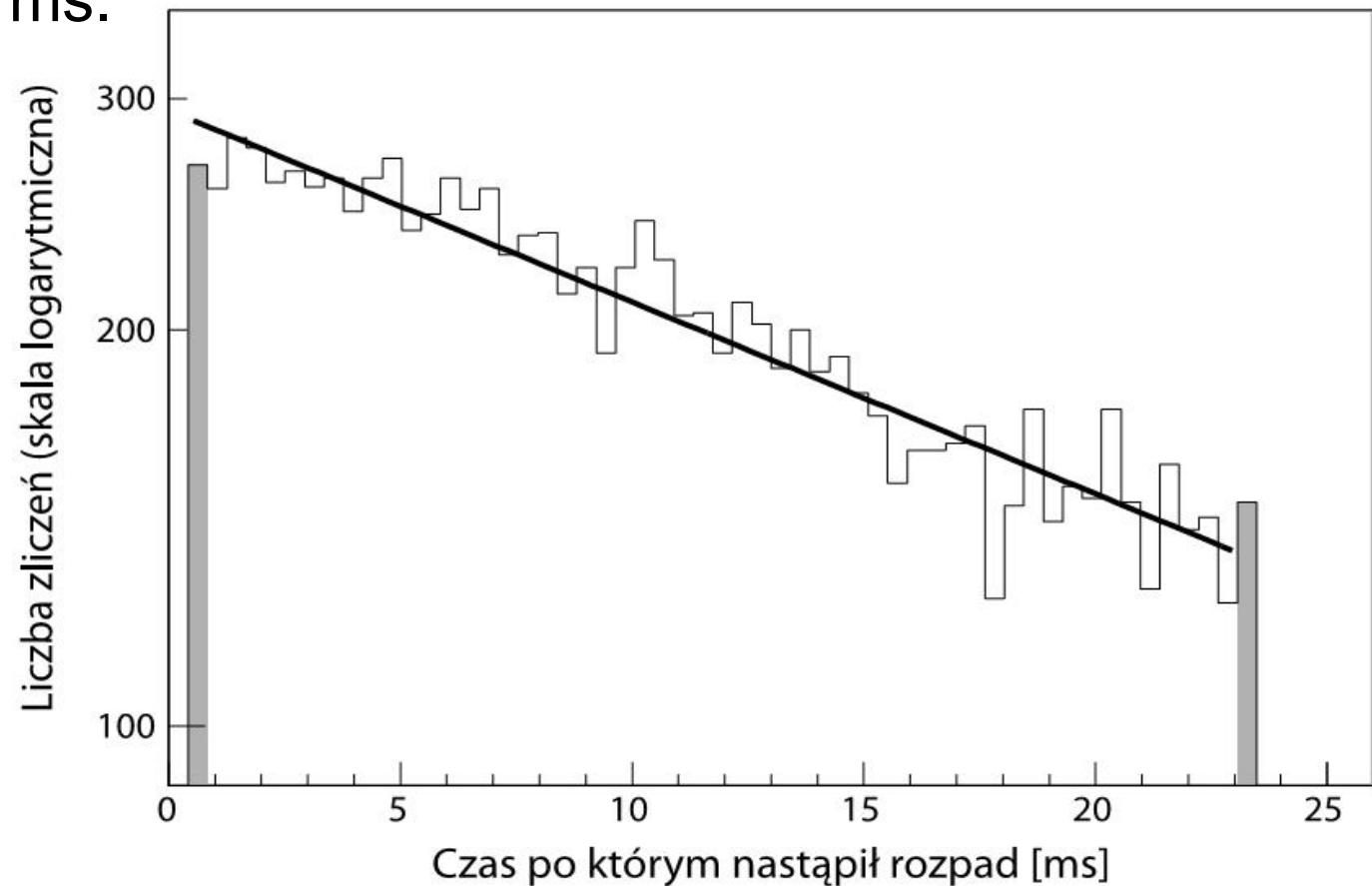
- Analiza przeprowadzona była za pomocą programów skonstruowanych w LabView.
- Głównym celem było wyznaczenie współczynników rozgałęzienia dla ^{43}Cr w zależności od liczby emitowanych protonów.
- Wyznaczyłem też czas połowicznego rozpadu ^{43}Cr .

Czas życia ^{43}Cr

- Aby wyznaczyć czas życia ^{43}Cr wystarczyło odczytać z sygnału z oscyloskopu czas pomiędzy umieszczeniem jonu w komorze a rozpadem.
- Użyłem tutaj zdarzeń zebranych w trybie synchronicznym z emisją jednego protonu.
- Do zebranych czasów życia dopasowałem krzywą rozpadu, co pozwoliło wyznaczyć czas życia.

Histogram czasów życia ^{43}Cr

- Z dopasowania uzyskano wynik $T_{1/2} = 20.6 \pm 0.9$ ms.
- W pracy Dossat et al [1] określono czas życia jako $T_{1/2} = 21.1 \pm 0.4$ ms.



Współczynniki rozgałęzienia.

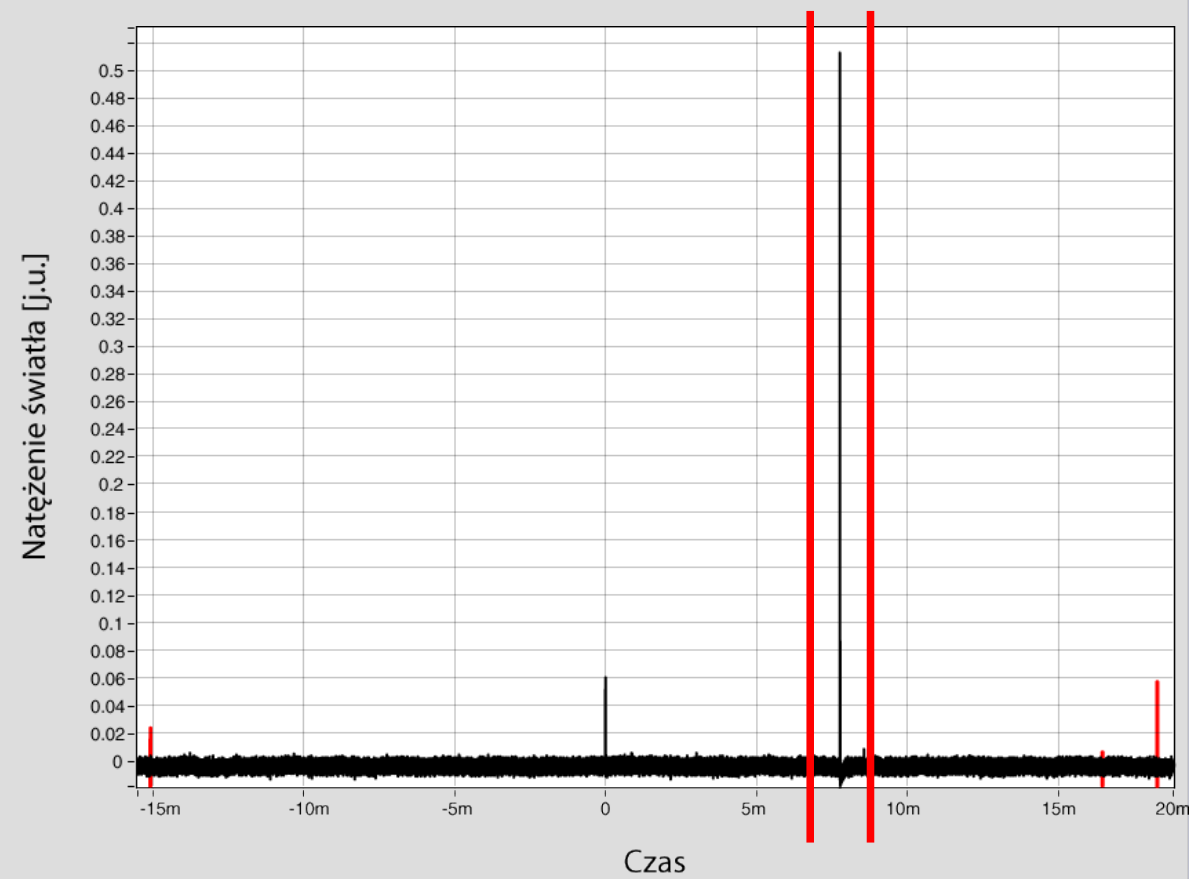
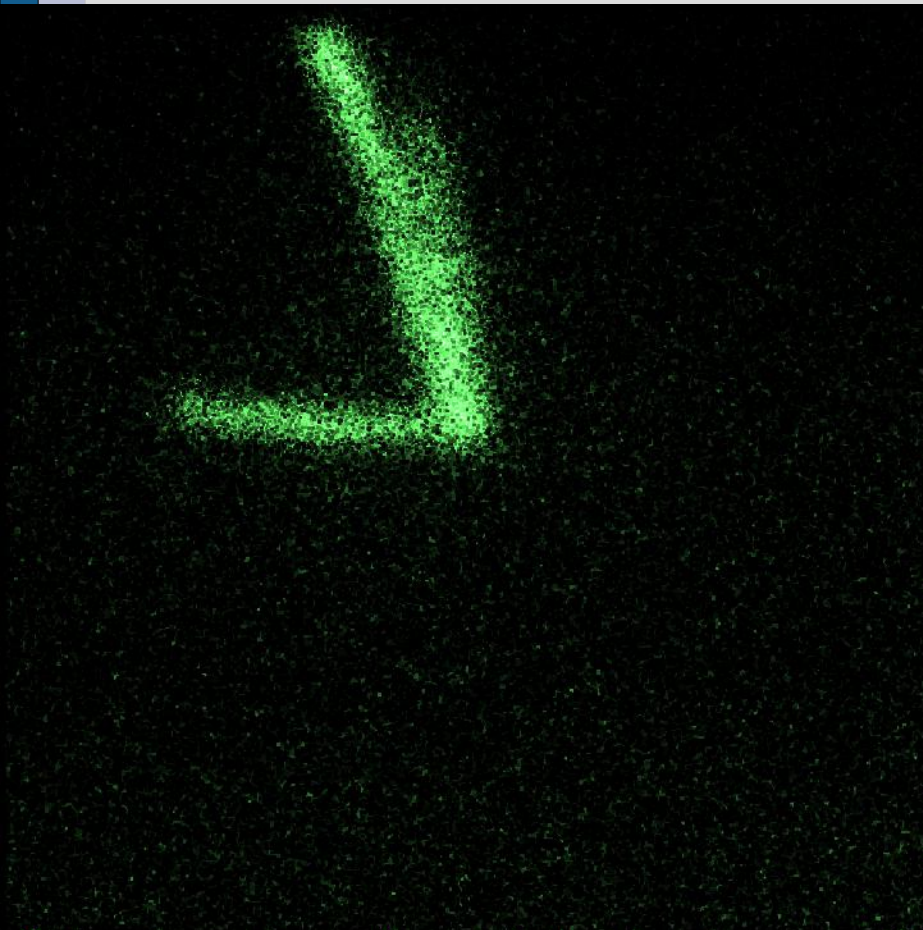
Wyznaczanie współczynników rozgałęzienia podzielone było na dwa etapy:

- W pierwszym etapie wyznaczyłem współczynniki względne – czyli określające jaki ułamek rozpadów z emisją dowolnej liczby protonów odbywa się z emisją 1p, 2p i 3p.
- W drugim etapie określiłem jaka część rozpadów ^{43}Cr odbywa się bez emisji protonów.

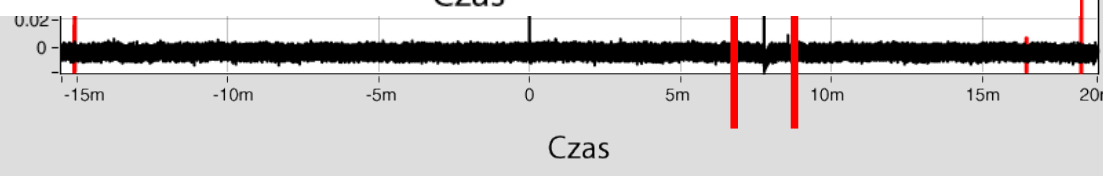
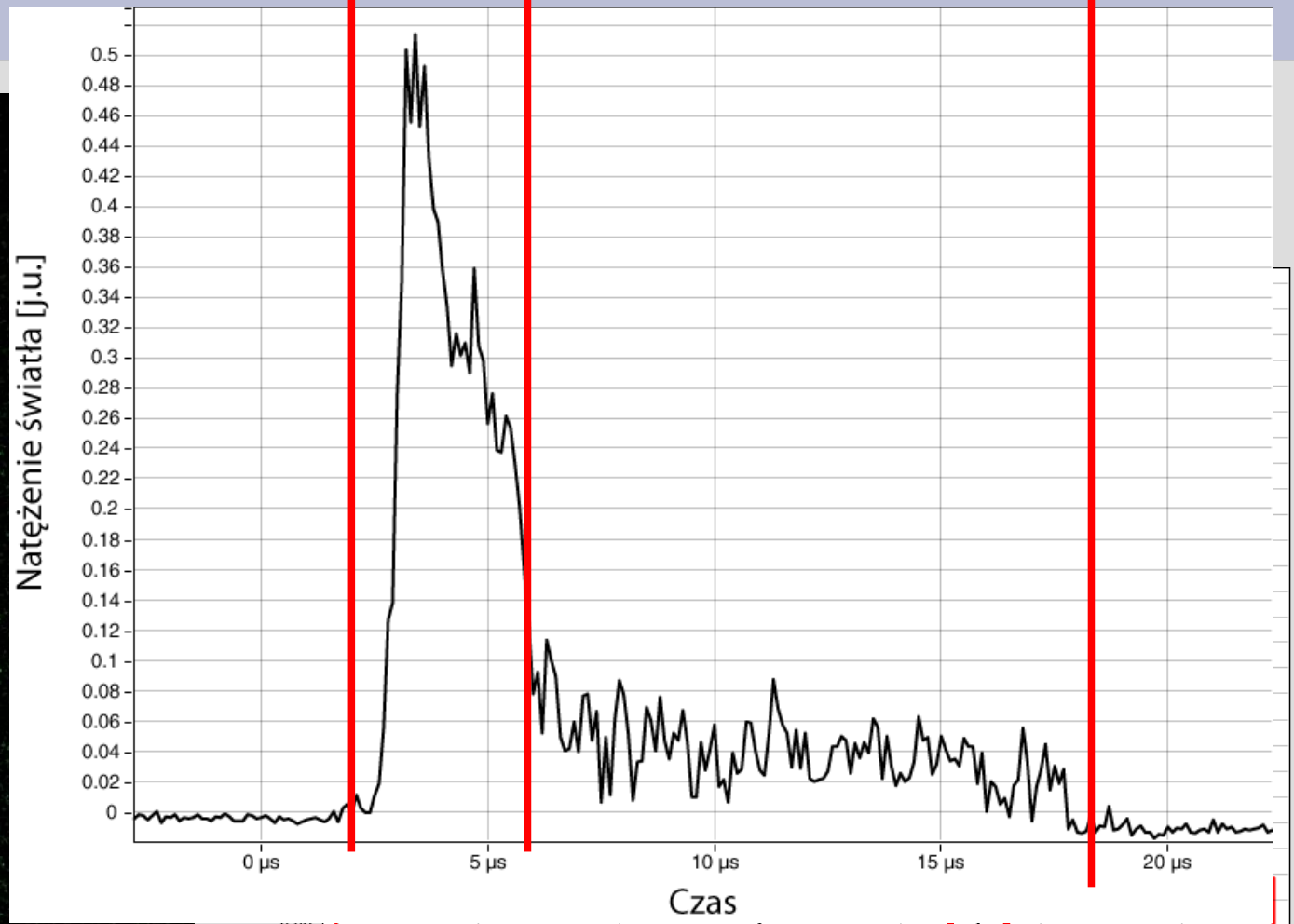
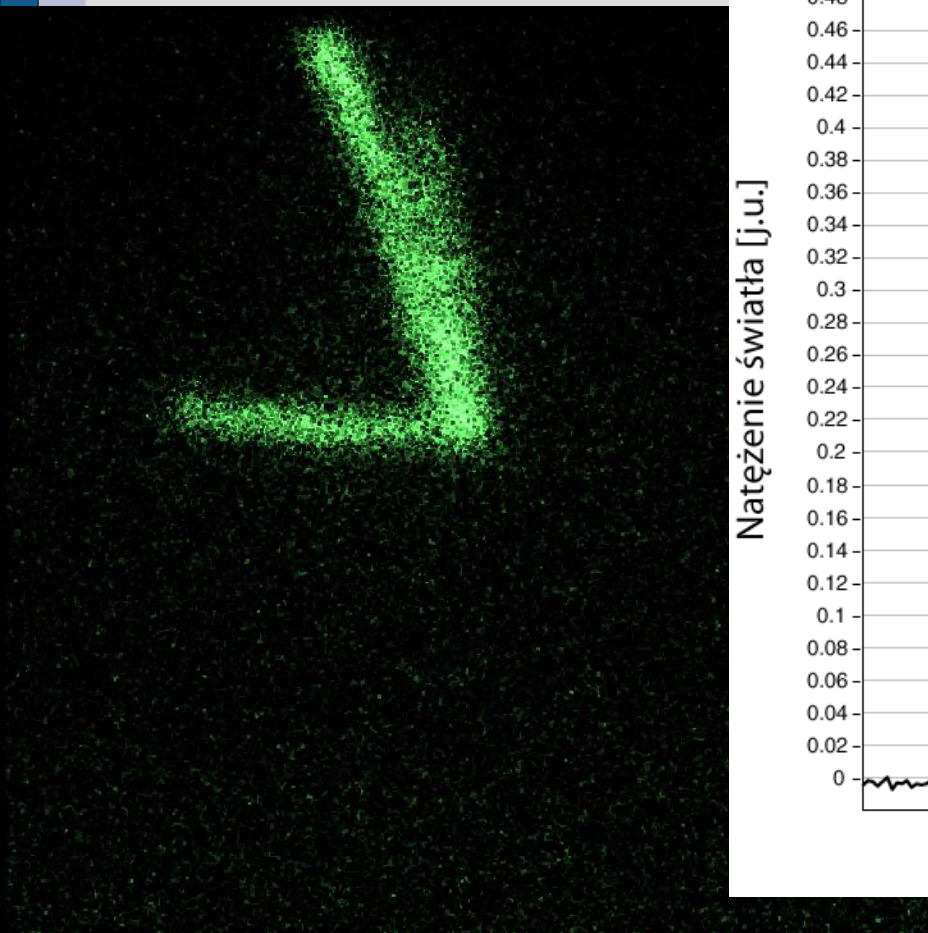
Akt pierwszy – współczynniki względne

- Współczynniki względne, czyli określające jaka część wszystkich rozpadów z emisją protonów zachodzi z emisją 1p, 2p i 3p.
- Aby je wyznaczyć wystarczyło określić dla każdego zdjęcia ile śladów jest na nim widocznych.
- W przypadku, kiedy zdjęcie nie dawało jednoznacznej informacji można było się posłużyć sygnałem z fotopowielacza.

2p po raz drugi



2p po raz drugi



Wartości względnych współczynników rozgałęzienia

- Do wyznaczenia współczynników rozgałęzienia użyłem tylko danych z trybu synchronicznego. Spowodowane to było brakiem śladu jonu, co upraszczało analizę.
- Po przeanalizowaniu wszystkich (~30 000) zdarzeń synchronicznych otrzymałem następujące wartości:

Liczba protonów opóźnionych	Współczynnik rozgałęzienia [%]	niepewność [%]
1	92	± 2
2	8.0	± 0.1
3	0.09	± 0.02

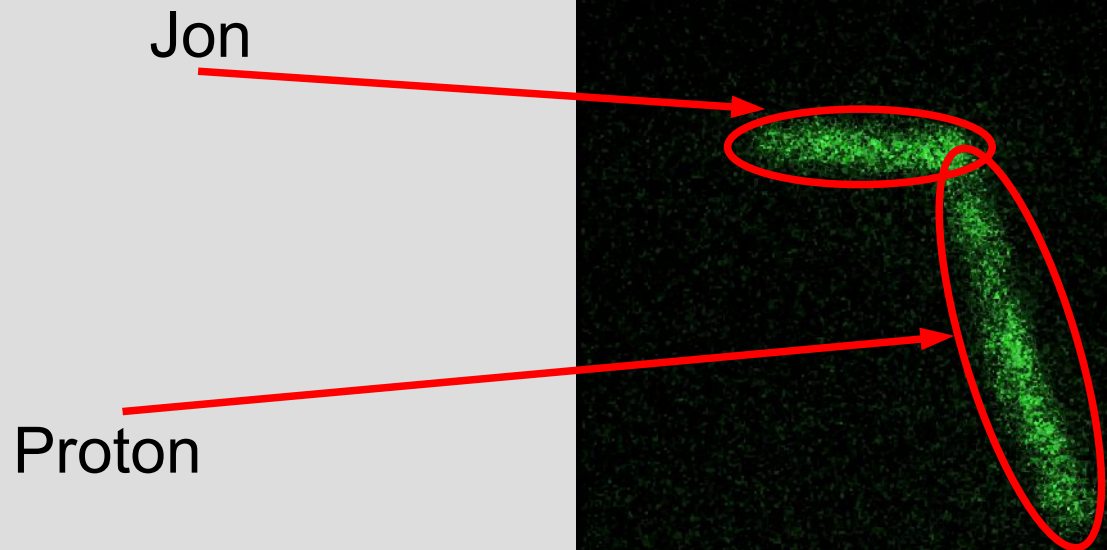
Akt drugi – współczynnik rozgałęzienia dla rozpadów bez emisji protonów

W tym zagadnieniu mamy przed sobą dwa problemy:

- Jak odróżnić zdarzenia, w których komora została wyzwolona, ale jon nie pojawił się w komorze (na przykład zatrzymał się w okienku) od zdarzeń rozpadu beta bez emisji protonu?
- Jak uwzględnić fakt, że komora jest aktywna tylko przez krótki czas, a rozpad może nastąpić po zakończeniu naświetlania?

Drogocenny ślad jonu

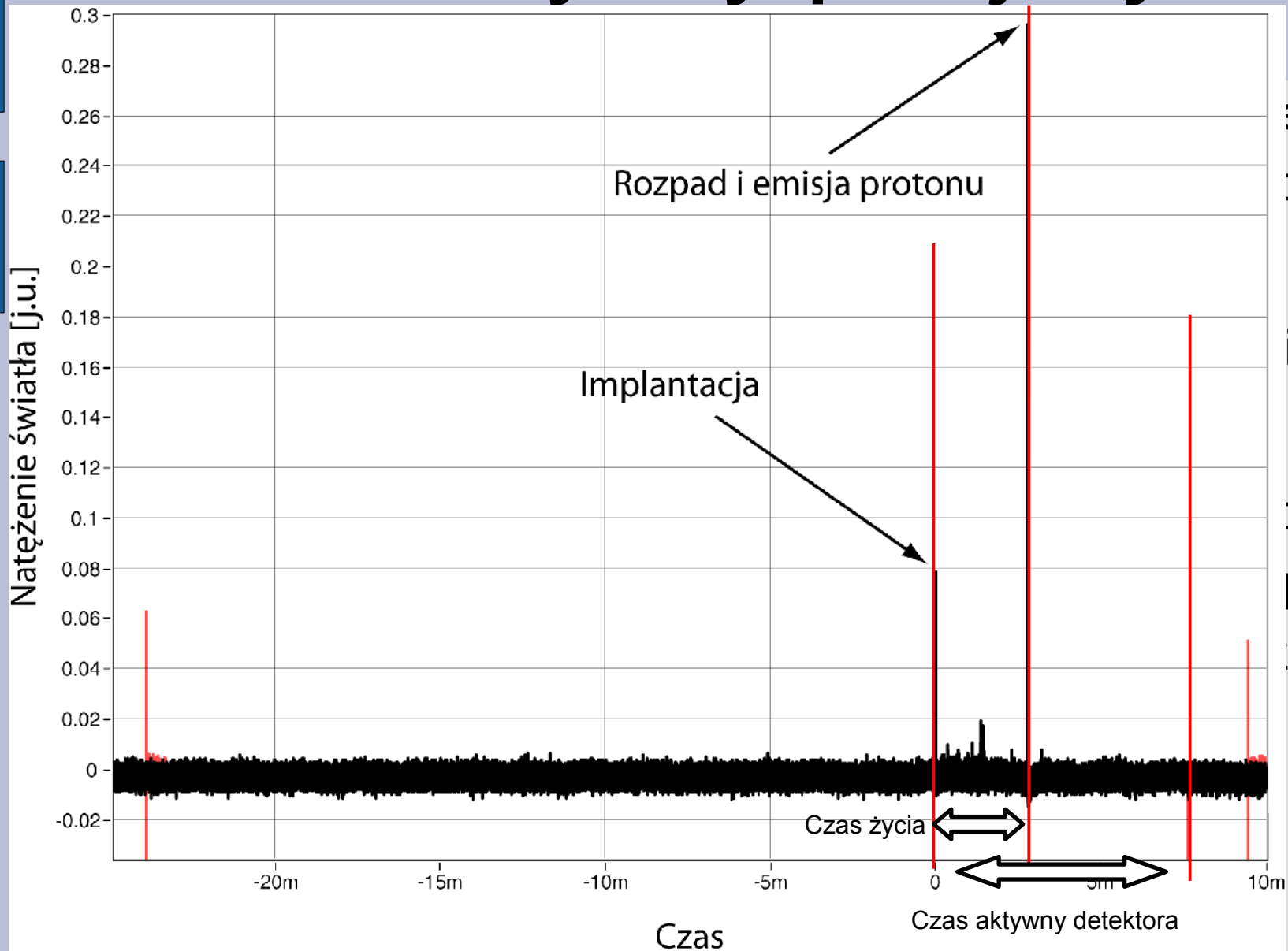
- Pierwszy problem łatwo rozwiązać używając zdarzeń zebranych w trybie asynchronicznym, gdzie widoczny jest ślad jonu.
- Ale wtedy w każdym zdarzeniu mamy inny czas naświetlania!



Czym dysponujemy

- Potrafimy już odróżnić puste zdarzenia od tych, gdzie rozpad nie nastąpił w czasie aktywności komory, bądź nastąpił bez emisji protonów.
- Ale w każdym zdarzeniu komora jest aktywna przez inny czas, na ogół krótszy niż czas połowicznego rozpadu.
- Jesteśmy w stanie odczytać z sygnału z fotopowielacza jak długo w każdym przypadku komora jest aktywna (czas od implantacji jonu do zakończenia naświetlania) oraz kiedy nastąpił rozpad (czas życia).
- Co dalej?

Czym dysponujemy



o rozpad nie
bez emisji

inny czas, na

czy jak długo w
plantacji jonu
pad (czas

Metoda największej wiarygodności

- Problem rozwiązuje użycie metody największej wiarygodności [2].
- Metoda ta daje jako estymatę poszukiwanej wartości najbardziej prawdopodobną wartość (w świetle uzyskanych wyników).
- Odbywa się to poprzez szukanie maksimum pewnej funkcji.
- Dokładniej...

Krok 1 – Budowa funkcji największej wiarygodności

- W naszym problemie mamy w każdym zdarzeniu dwie możliwości:

Zdjęcie przedstawia ślad jonu i protonów	Zdjęcie przedstawia tylko ślad jonu
Prawdopodobieństwo obserwacji takich zdarzeń to:	
$b_e [1 - \exp(-\lambda\tau)]$	$\exp(-\lambda\tau) + b_{ne} [1 - \exp(-\lambda\tau)]$
Gdzie: λ - stała rozpadu, τ - czas aktywności komory, b_e – prawdopodobieństwo rozpadu z emisją protonów, b_{ne} – prawdopodobieństwo rozpadu bez emisji protonu	

- Funkcja największej wiarygodności jest iloczynem takich prawdopodobieństw dla wszystkich zarejestrowanych zdarzeń.

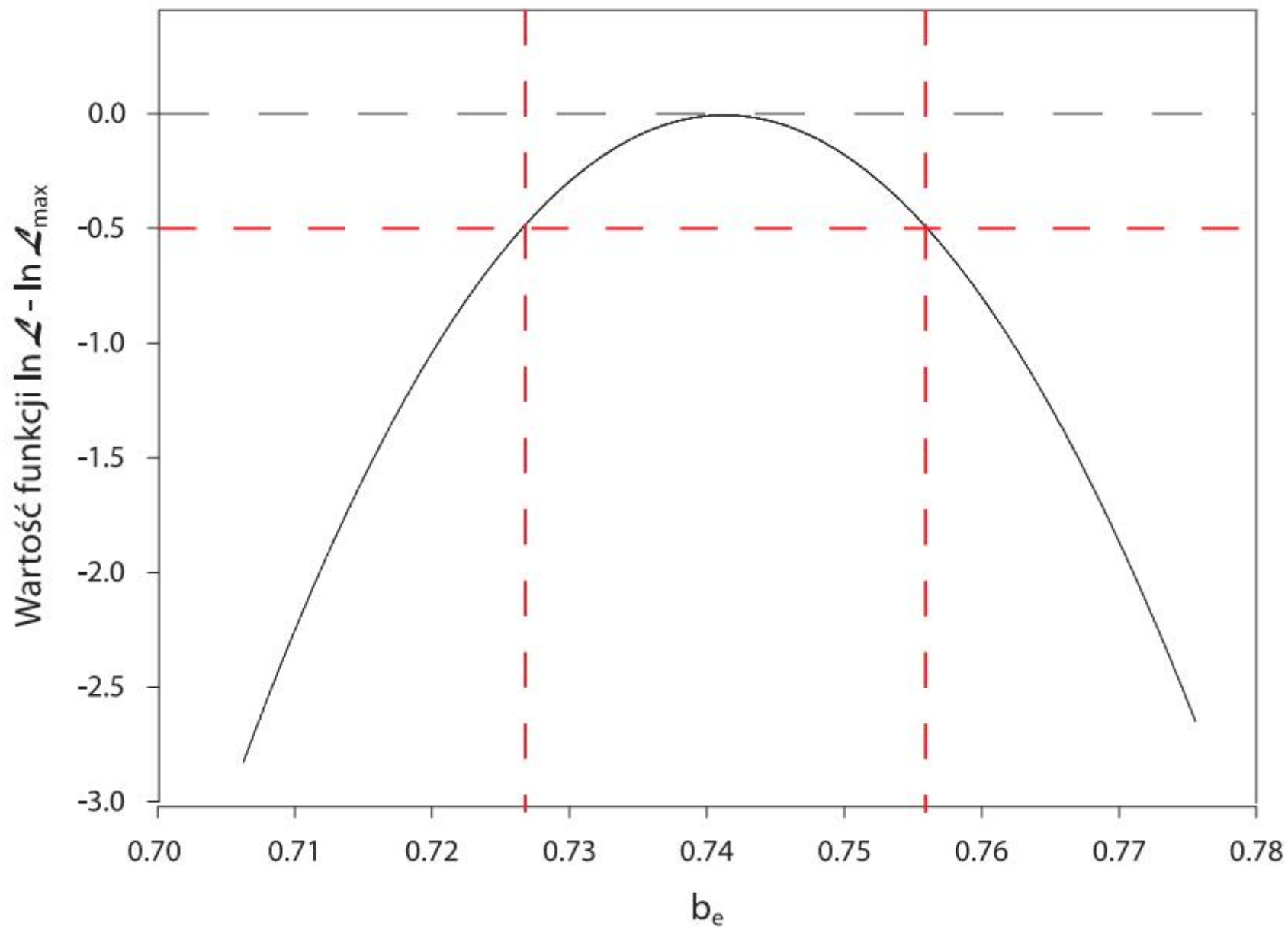
I wystarczy znaleźć maksimum...

... takiej prostej funkcji:

$$\mathcal{L} = \prod_{i=0}^{N_e} \left\{ b_e \left[1 - \exp \left(-\lambda \tau^i \right) \right] \right\} \prod_{j=0}^{N_{ne}} \left\{ \exp \left(-\lambda \tau^j \right) + (1 - b_e) \left[1 - \exp \left(-\lambda \tau^j \right) \right] \right\} ,$$

gdzie mnożenie odbywają się po wszystkich zaobserwowanych, czytelnych zdarzeniach ^{43}Cr w trybie asynchronicznym. b_e jest tutaj swobodnym parametrem i względem niego szukamy maksimum \mathcal{L} .

- Wartość b_e dla maksimum \mathcal{L} jest szukaną przez nas estymatą.
- W naszym wypadku iloczyn ma około 1500 czynników.



$\lambda \tau^j) \}} ,$

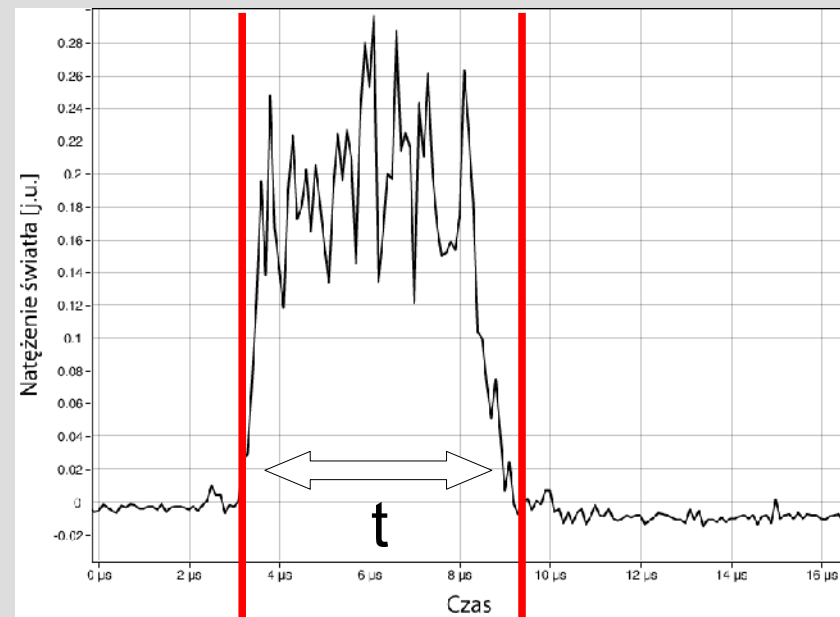
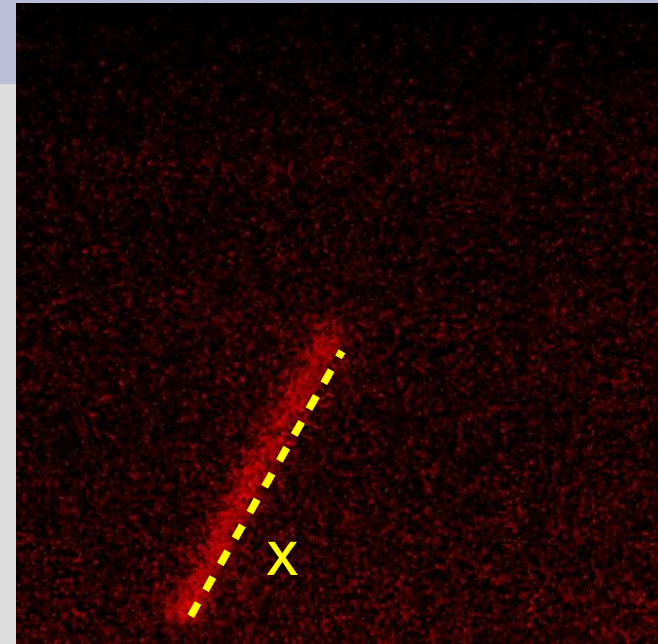
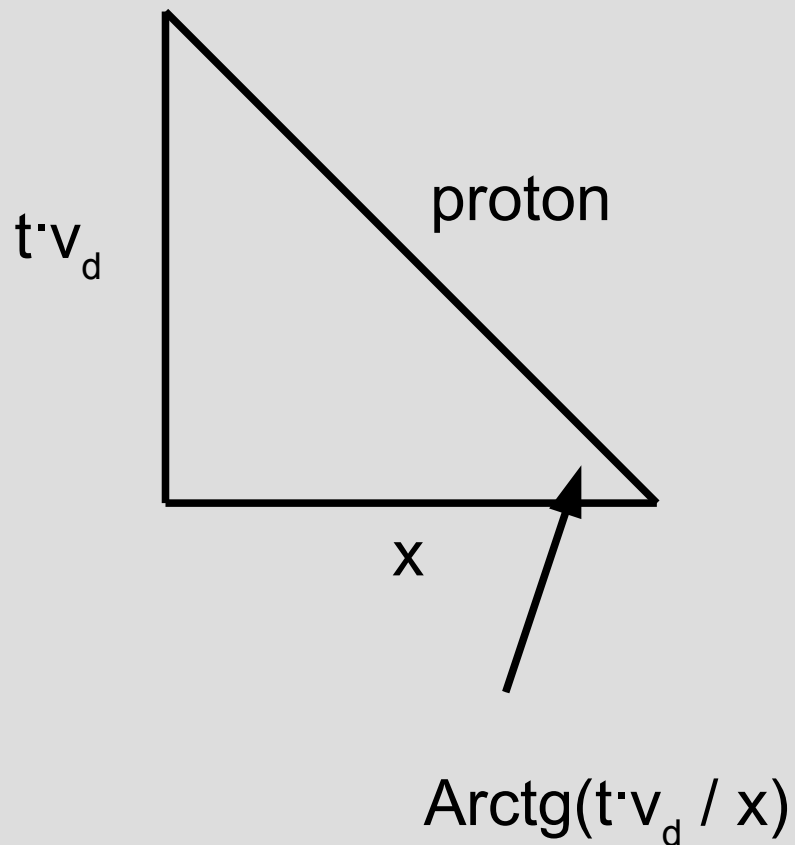
nych,
est tutaj
mum \mathcal{L} .
tymata.

Ufff... nareszcie wynik

- Czasy aktywności komory OTPC można względnie łatwo uzyskać w sposób automatyczny z zapisu sygnału z fotopowielacza.
- Po zastosowaniu metody największej wiarygodności uzyskałem wyniki:

Liczba emitowanych protonów	Współczynnik rozgałęzienia [%]	Niepewność [%]	Wyniki [1] [%]
0	26	± 2	7.5(3)
1	68	± 2	28(1)*
2	5.9	± 0.6	5.6(7)
3	0.07	± 0.02	-

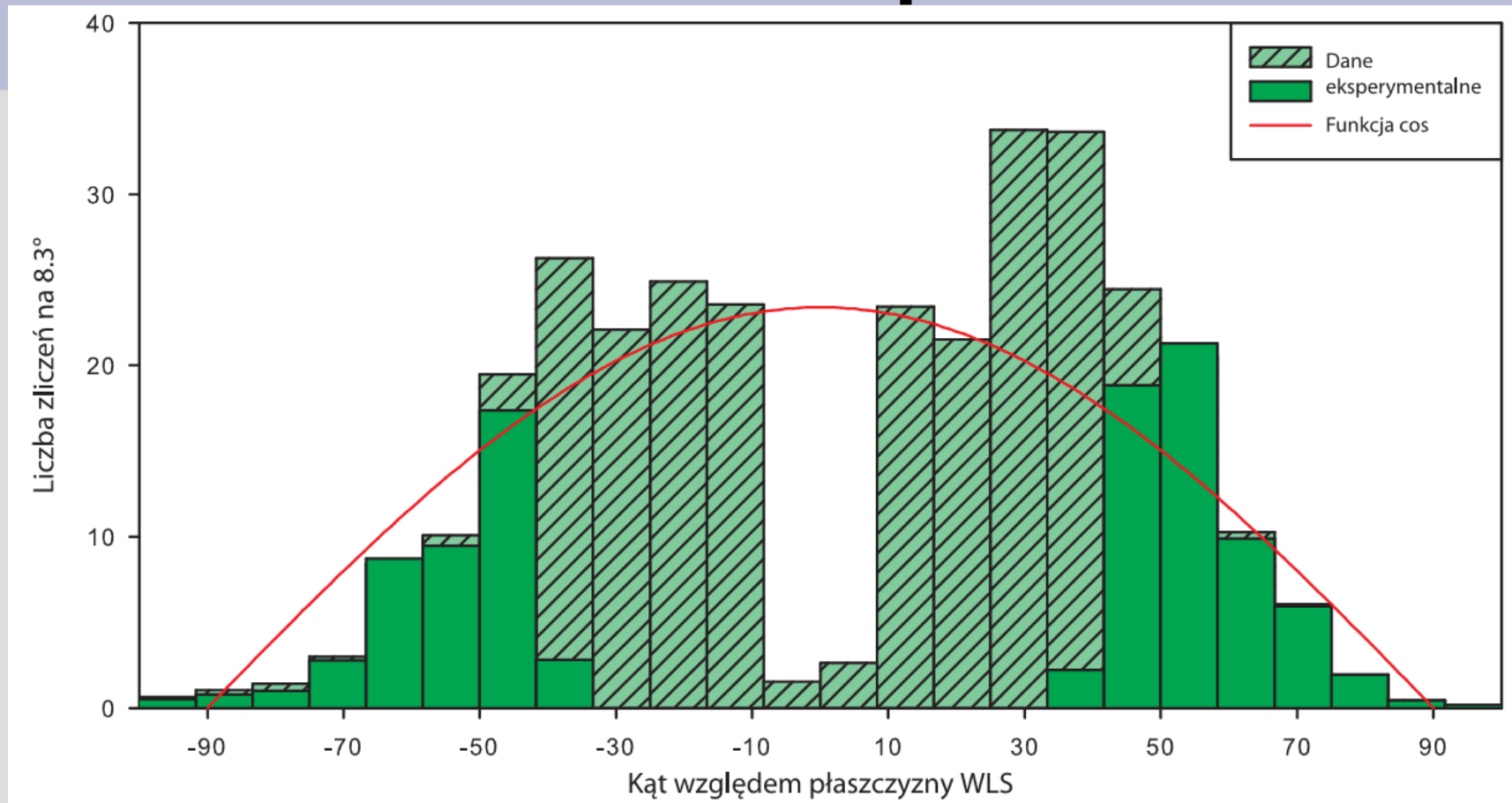
Prosta metoda rekonstrukcji 3D



Test izotropii OTPC

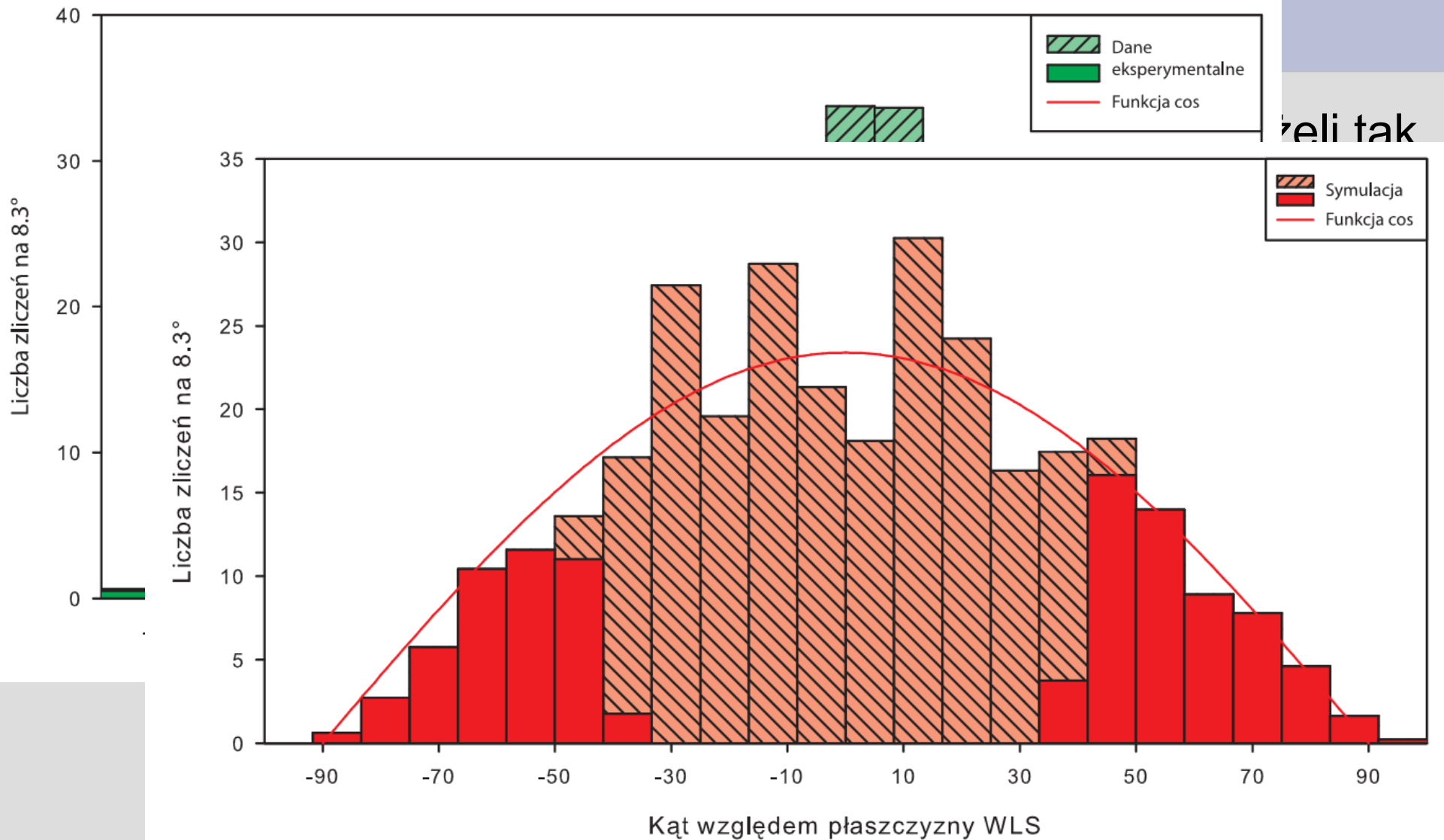
- Czy protony wpadające w siatki nie wywołują błysku? Jeżeli tak, wyniki byłyby przekłamane.
- Przeprowadziłem test na losowej próbce ponad 400 przypadków.

Test izotropii OTPC



zeli tak,
padków.

Test izotropii OTPC



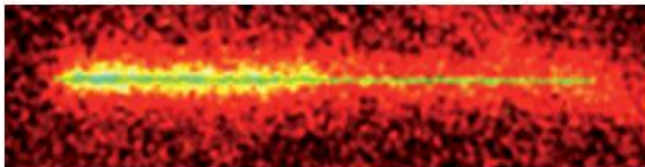
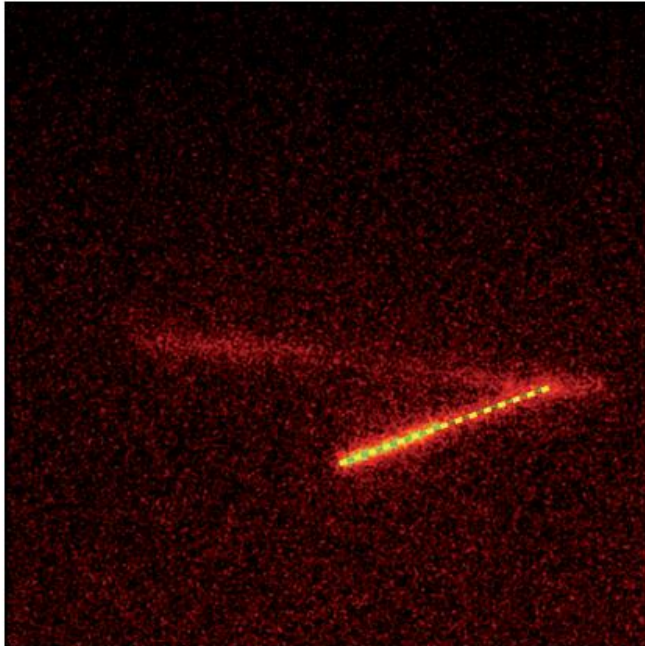
zeli tak

Koniec końców

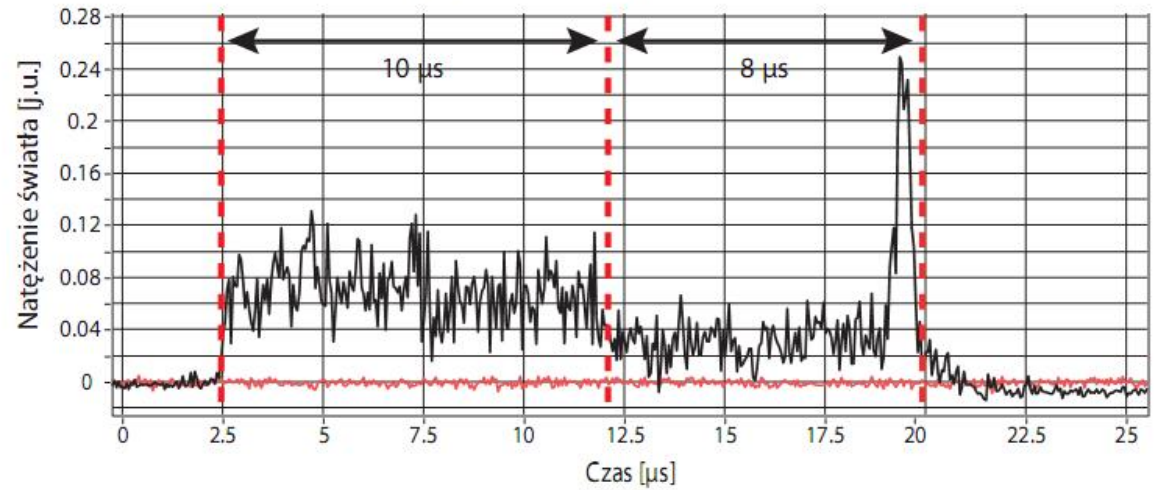
- Widać niewielką różnicę, ale jeżeli przeprowadzimy więcej testów...
- Zaobserwowane różnice mieszczą się w zakresie odchyłeń statystycznych.

	l.p.	w dół	w górę	różnica
	1	44	57	13
	2	60	52	-8
	3	49	57	8
	4	56	65	9
	5	62	52	-10
	6	61	57	-4
	7	55	43	-12
	8	44	61	17
	9	50	58	8
	10	57	58	1
	Eksperyment	43	60	17

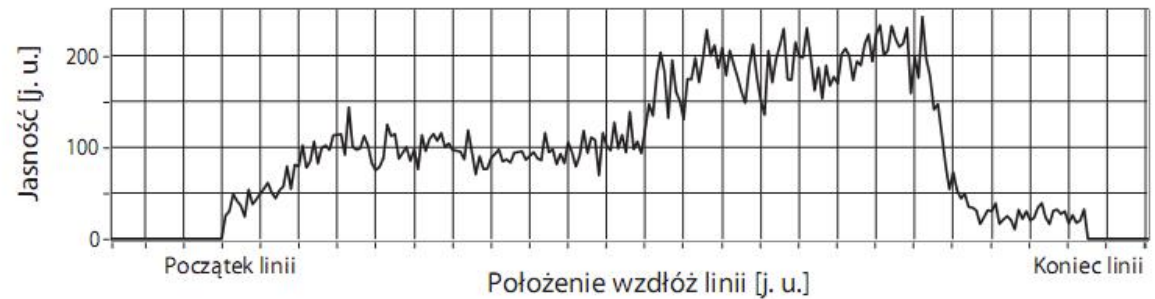
Koniec końców



Sygnal z fotopowielacza



Profil wzdłuż linii



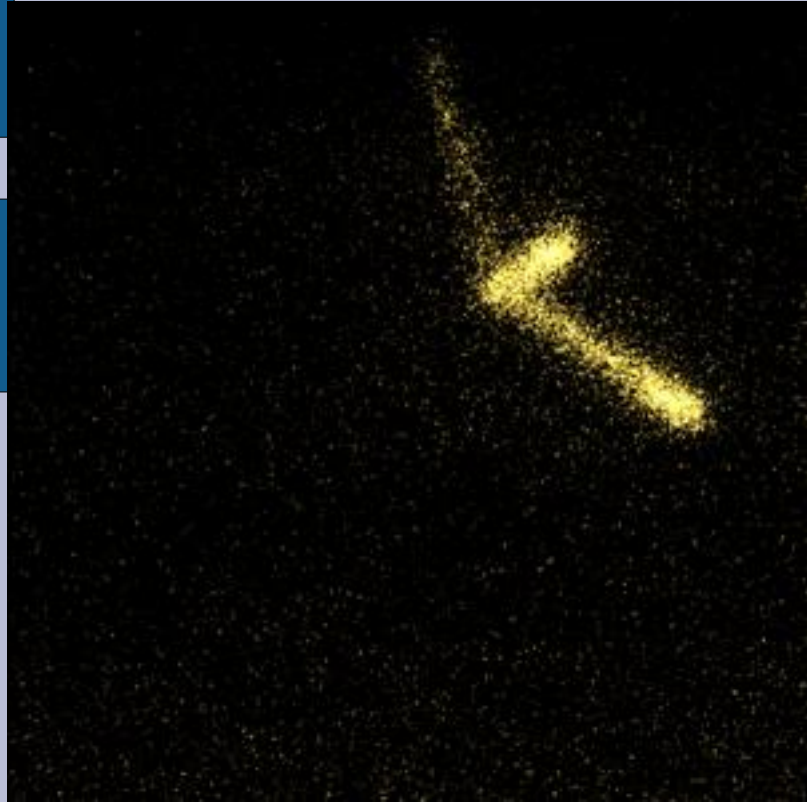
Metody z pracy Dossat et al.

- W pracy z 2007[1] roku metoda wyznaczania współczynnika dla przejść bez emisji protonu była zupełnie inna.
- Tam za przypadki bez emisji protonu brano te zdarzenia, gdzie jon został zidentyfikowany i zatrzymany w krzemowym detektorze, ale sygnał z rozpadu nie przekroczył 900 keV.
- Zakłada się tutaj, że ogon rozkładu cząstek β zastępuje tą część protonów, które generują w krzemie sygnał mniejszy niż 900 keV.

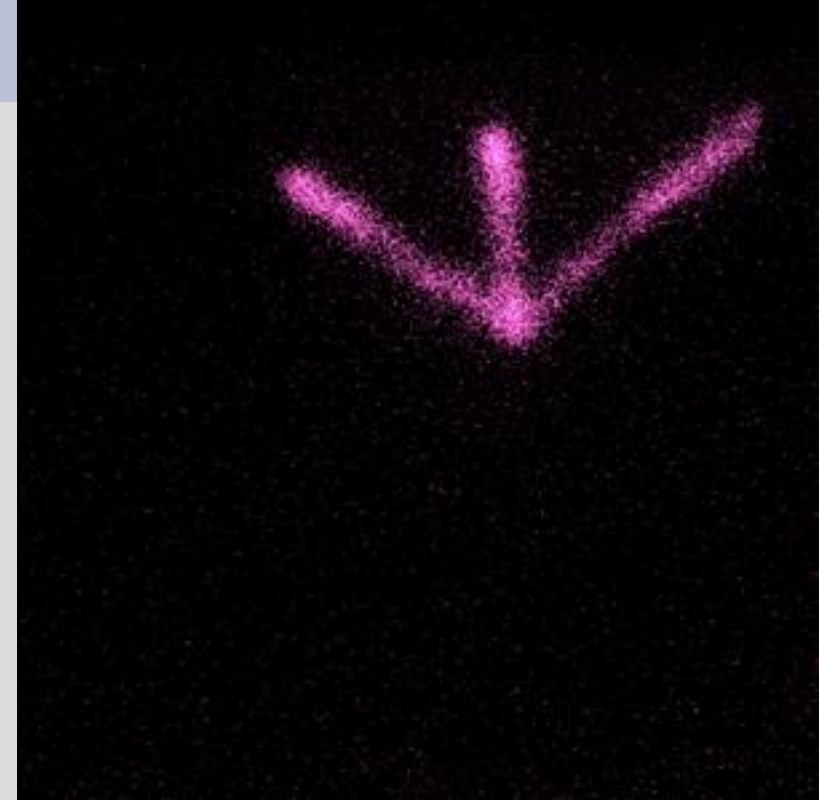
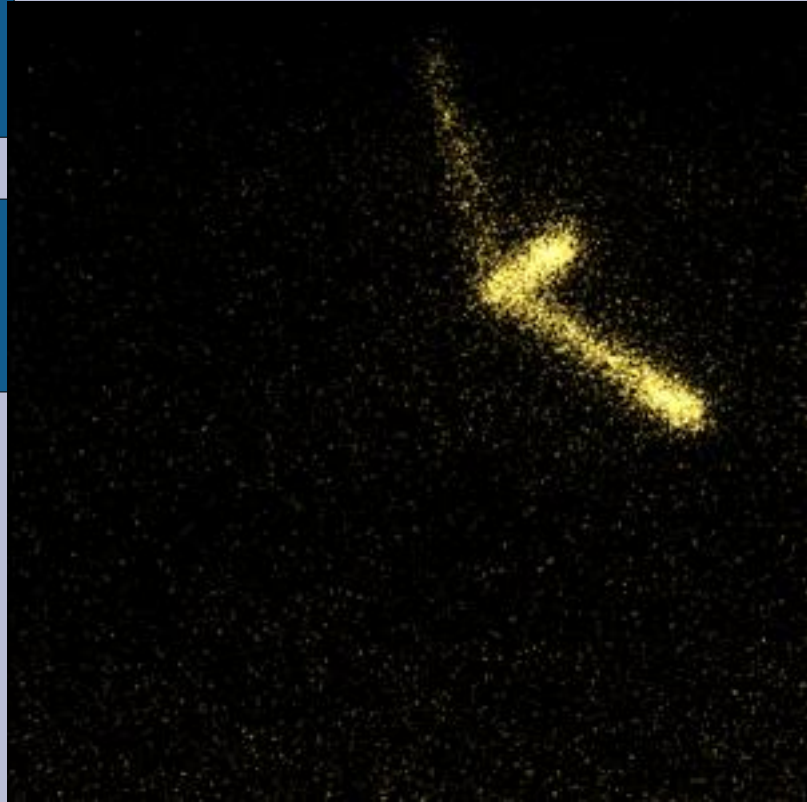
Pierwsze obserwacje $3\beta\beta$ dla ^{43}Cr

- Wśród ponad 10 000 rozpadów z emisją opóźnionych protonów z ^{43}Cr zaobserwowałem 12 zdarzeń z emisją 3 protonów.
- To stanowi zaledwie promil zarejestrowanych rozpadów!
- Tak dokładny wynik znakomicie obrazuje czułość komory OTPC. Jest to znakomite narzędzie do badania procesów o małym prawdopodobieństwie.
- Poniżej kilka zdjęć...

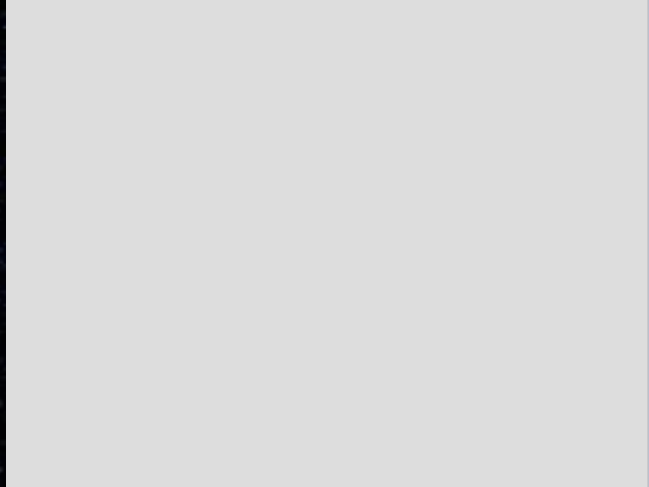
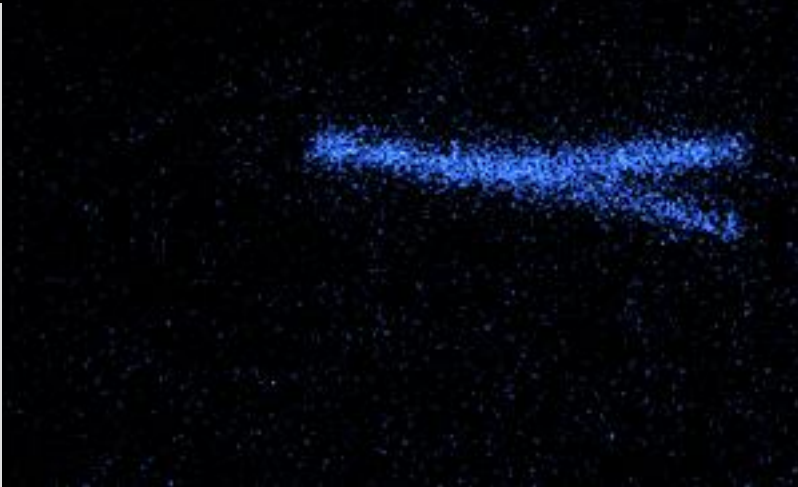
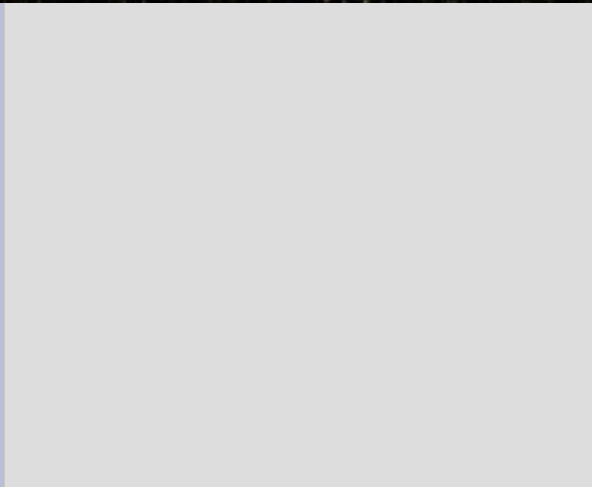
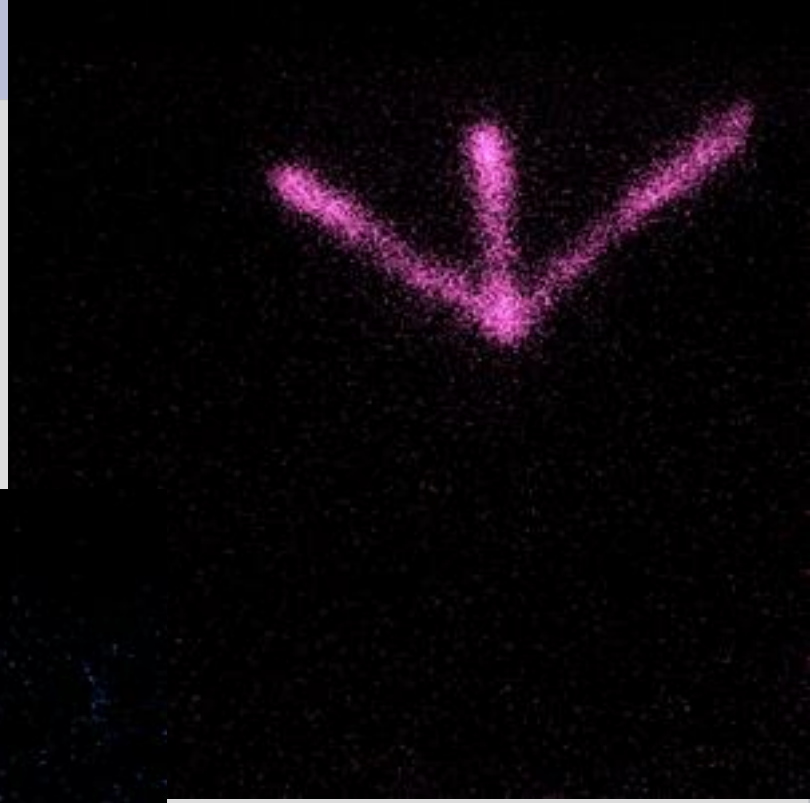
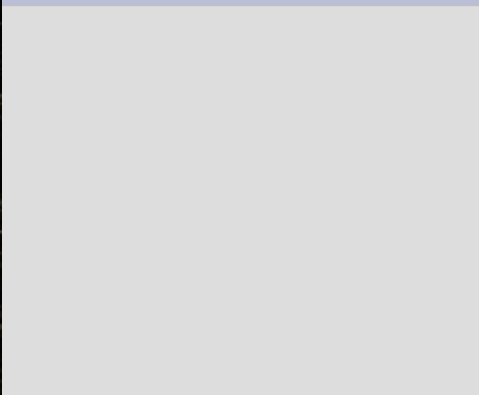
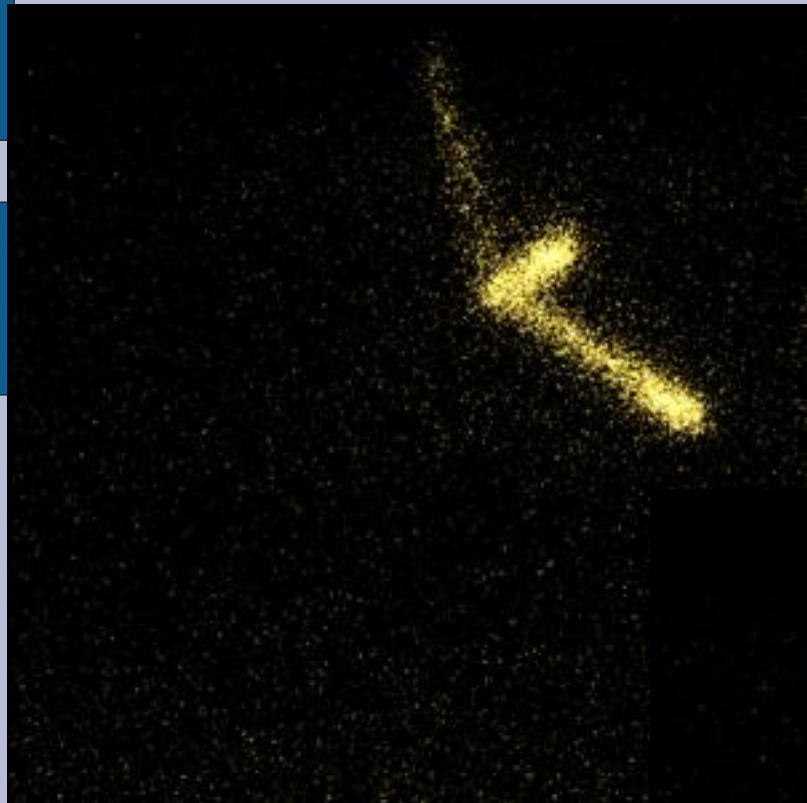
Galeria 3p



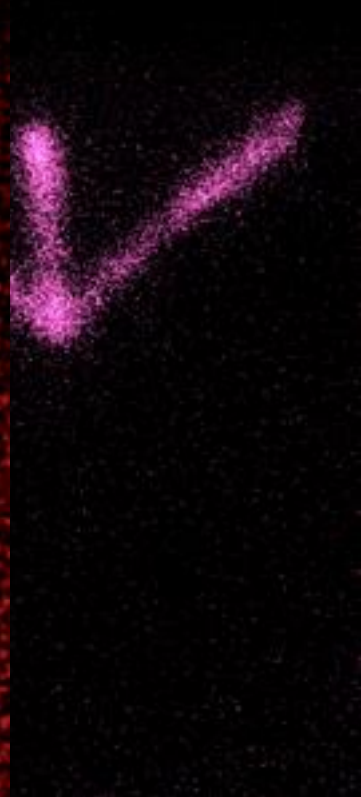
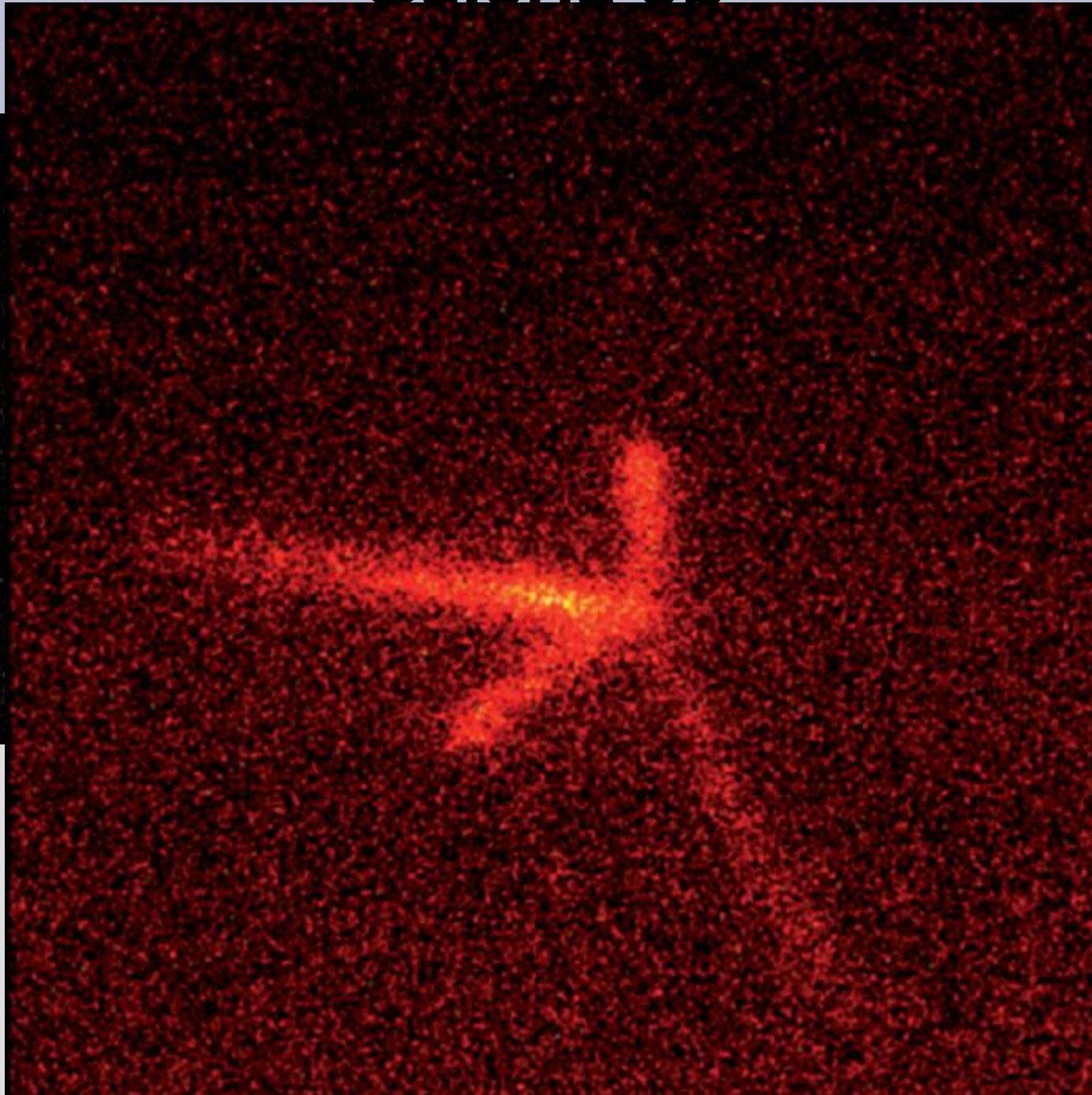
Galeria 3p



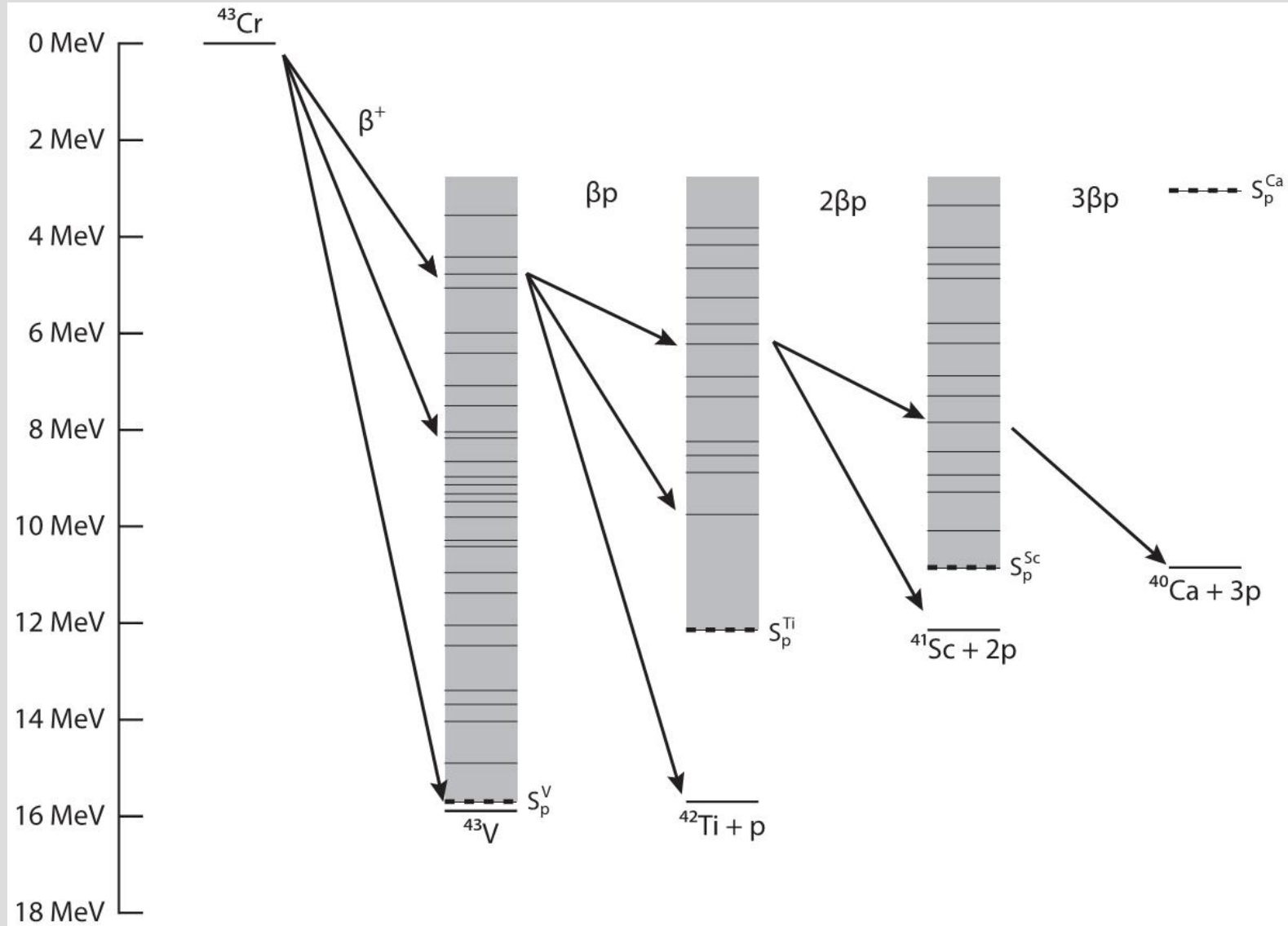
Galeria 3p



Galeria 3p



Jeszcze bardziej aktualny schemat rozpadu ^{43}Cr



Podsumowanie

- Przedstawiłem wyniki badań przeprowadzonych za pomocą OTPC. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że dane te były zebrane „przy okazji” - jako dane monitorujące działanie komory nie zakłócając głównego eksperymentu.
- Zmierzono $T_{1/2}$ ^{43}Cr , a także współczynniki rozgałęzienia.
- Pewną niespodzianką było zarejestrowanie emisji 3 protonów.
- OTPC okazuje się rewelacyjnym narzędziem do badań emisji protonów opóźnionych.

Przyszłość

- Automatyzacja analizy – problemy głównie z zakresu analizy i przetwarzania obrazu.
- Zmierzenie rozkładu kąтового dla emisji dwóch protonów opóźnionych (w 2D jest to proste, w 3D może okazać się nie możliwe)
- Latem a pomocą ulepszonej wersji komory przeprowadzone zostaną (miejmy nadzieję) badania ^{48}Ni w poszukiwaniu promieniotwórczości dwuprotonowej.

Literatura

- [1] Dossat et al. NuclearPhysicsA792(2007)18–86
- [2] Roman Nowak Statystyka dla fizyków in spe (studentów fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych). Wydział Fizyki, UW, 1999.
- [3] M. Pomorski – praca magisterska pt. „Badanie rozpadu beta bardzo neutrono-deficytowego izotopu ^{43}Cr ” - najłatwiej namierzalna poprzez e-mail feld12@wp.pl