Krzemowy Detektor Krotności w eksperymencie NA50 w CERN. Od budowy do wyników analiz fizycznych

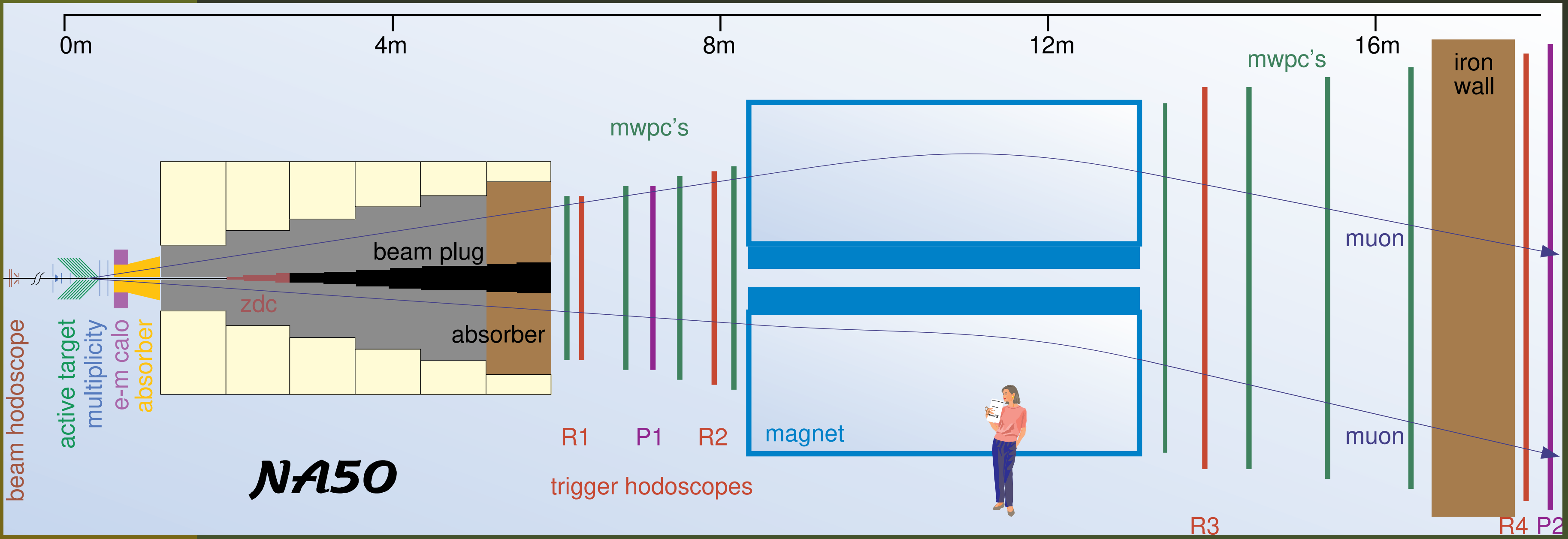
M. Idzik

Akademia Górniczo-Hutnuicza
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Plan

- Wprowadzenie do eksperymentu NA50
- Budowa Detektora Krotności
- Praca Detektora Krotności w eksperymencie
- Efekty radiacyjne w Detektorze Krotności
- Identyfikacja oddziaływań Pb-Pb przy pomocy Detektora Krotności
- Analizy rozkładów pseudorapidity cząstek naładowanych za pomocą Detektora Krotności
- Rezultaty pomiarów rezonansu J/ψ w NA50
- Konkluzje

Wprowadzenie do NA50



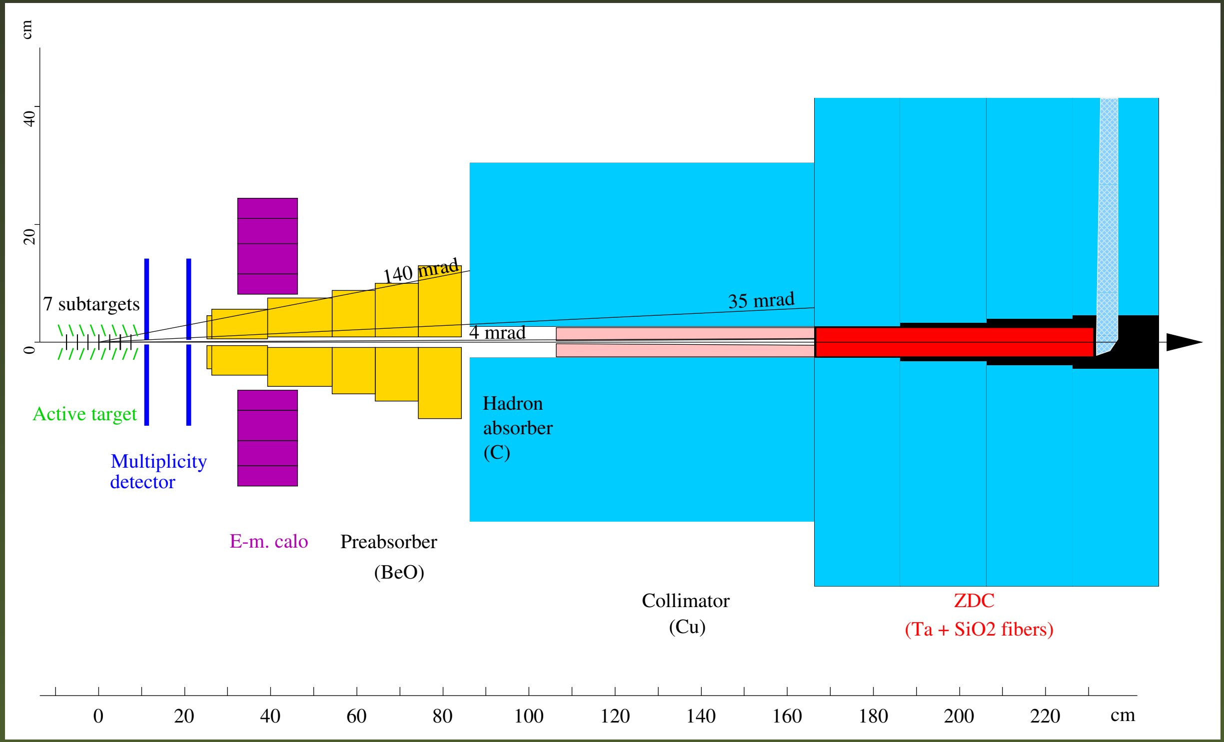
NA50 to pracujący przy wysokiej świetlności eksperyment ze stałą tarczą, badający produkcję rezonansów (J/ψ, ψ') rozpadających się na miony w zderzeniach Pb-Pb, przy energii 158 GeV/nukleon

---

T. Matsui and H. Satz, *J/ψ suppression ...*, Phys.Lett. **B 178** (1986).

Detektory w NA50

- Spektrometr mionów $(2.7 < \eta < 3.9)$
- Detektor Krotności $(1.1 < \eta < 4.2)$
- Kalorymetr elektromagnetyczny neutralnej energii poprzecznej E_T $(1.1 < \eta < 2.3)$
- Kalorymetr energii podłużnej E_{ZDC}



Kalendarz eksperymentu NA50

Wiązka		Energia	Intensywność	t_{cycle}	t_{spill}
Typ	Rok	(GeV na nukleon)	(ion/spill)	(s)	(s)
Pb	1995-1998	158	$5 \cdot 10^7$	19.2	5
Pb	1999	40	$\sim 10^6$	19.2	5
Pb	2000	158	$7 \cdot 10^7$	19.2	5
p	1994-2000	400 i 450	10^{11}	14	2.5

Rok	Ilość subtarcz	Grubość (mm)	medium
1995	7	7	powietrze
1996	7	12	powietrze
1998	1	3	powietrze
1999	1	3	próżnia
2000	1	4	próżnia

Budowa Detektora Krotności

- Założenia projektowe
- Architektura Detektora Krotności
- Testy i montaż Detektora Krotności

M. Idzik, *Design and operation of a fast high-granularity silicon detector system in a high-radiation environment*, presented at 7th Pisa Meeting on Advanced Detectors, La Biodola Isola d'Elba, Italy May 25-31 1997
B.Alessandro, ..., M. Idzik et al. Nucl. Instr. Meth. A409 (1998) 167

B.Alessandro, ...,M. Idzik et al., *Development of the silicon multiplicity detector for the NA50 experiment at CERN*, Nucl. Phys. B, Proc. Suppl. 44 (1995) - pp.303-307

Założenia projektowe

- **Kształtowanie sygnału**. mały przekrój czynny na produkcję J/$\psi \Rightarrow$ bardzo duża częstość wiązki 10^7 Pb ions/s $\Rightarrow$ wymagana bardzo dobra rozdzielczość czasowa (<50 ns) impulsów elektroniki front-end $\Rightarrow$ wybrano bardzo szybki odczyt binarny. Częstotliwość próbkowania podniesiono z 25 MHz do 50 MHz (największa znana autorowi w podobnych systemach).
- **Dostępna przestrzeń**. aby ograniczyć rozpady π i K absorber bardzo blisko tarczy $\Rightarrow$ mało miejsca na detektory krzemowe (15 cm pomiędzy tarczą a EMC), szerokość wiązki determinuje minimalny dystans detektora od wiązki $\Rightarrow$ dwa identyczne dyski (MD1, MD2 odległe o 10 cm) paskowych detektorów krzemowych, pokrywające pełny kąt 2π, o promieniu wewnętrznym 0.5 cm i zewn. 8.5 cm.

Założenia projektowe...

- **Ilość cząstek**. aby utrzymać okupancję poniżej 30% ⇒ radialne detektory mikropaskowe o stałej segmentacji w pseudorapidity $\Delta\eta \sim 0.013$ i kącie azymutalnym $\Delta\phi = 10^0$. Przy tym wyborze, nawet z elektroniką binarną dane z Detektora Krotności stanowiły ponad 50% całości.
- **Efekty radiacyjne**. zadana segmentacja ⇒ bardzo niejednordny rozkład cząstek na jednostkę powierzchni ⇒ maksymalne szacowane fluencje i dawki: 10^{14} eq. 1 MeV neutrons/cm^2 i 20 Mrads dla detektorów oraz $5 \cdot 10^{11}$ eq. 1 MeV neutrons/cm^2 i 200 krads dla elektroniki front-end. ⇒ paskowe detektory $p^+ - on - n$ oraz dedykowana elektronika rad–hard.

Architektura Detektora Krotności

Dwa dyski: MD1 i MD2.

$\sim$ 14000 kanałów

$\Downarrow$

Każdy dysk dwustronny:

up i *down*. Detektory po stronie *up* i *down* ułożone azymutalnie naprzemiennie co 20° $\Rightarrow$ każdy dysk pokrywa 2π

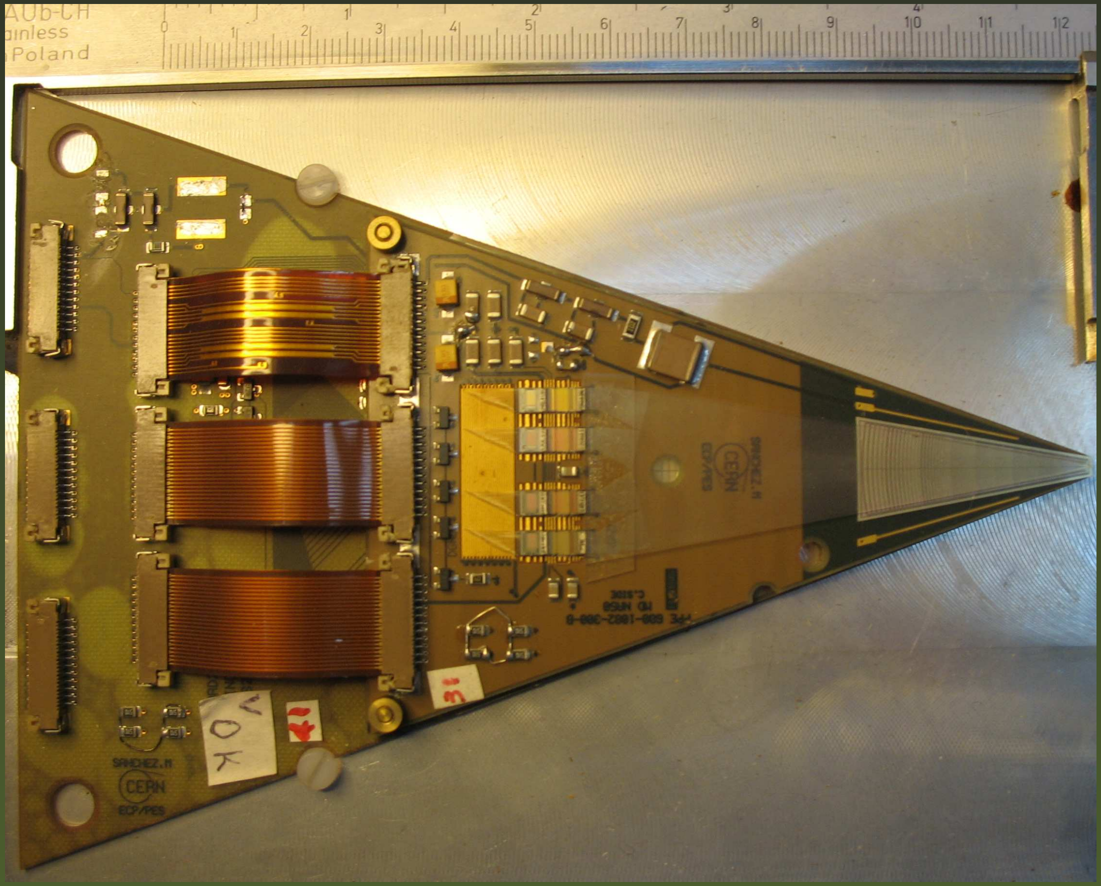
$\Downarrow$

Każda strona dysku zawiera 9 par detektorów

Strona *up* pojedynczego dysku. Detektory połączone z płytą EXTCARD taśmami kaptonowymi.

Architektura Detektora Krotności

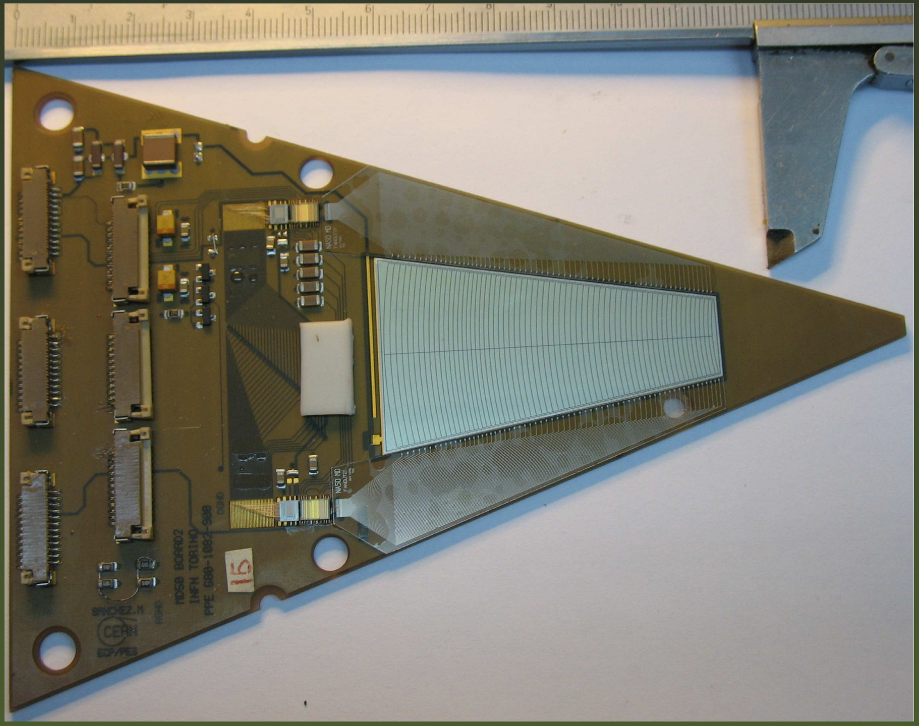
Każda z 9 par detektorów
składa się z pary płytek
PCB: BOARD1+BOARD2
BOARD1 umocowany jest
na BOARD2
Elektryczne połączenia
poprzez taśmy kaptonowe



Para płytek BOARD1+BOARD2

Detektor Krotności - BOARD2

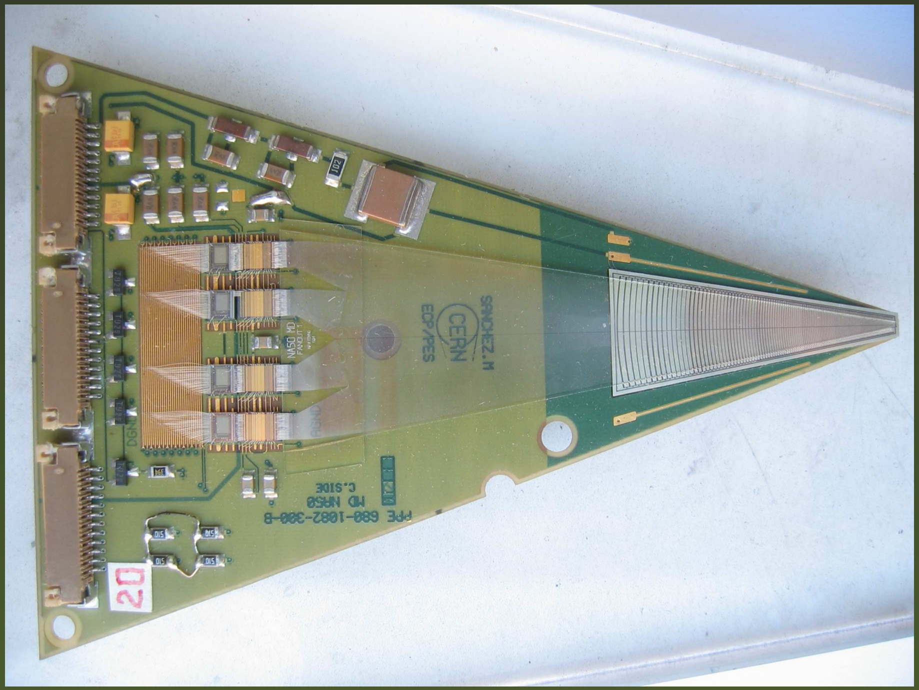
- Dwa azymutalne sektory detektora o $\Delta\phi$=10^0. Każdy sektor składa się z 64 pasków detektora. Paskowe detektory krzemowe $p^+ - on - n$ o sprzężeniu typu DC.
- Dwa szklane fanout-y ze ścieżkami Al łączące paski z elaktroniką front-end
- Dwie pary dedykowanych układów elektroniki front-end (2 x 64 kanały)



BOARD2

Detektor Krotności - BOARD1

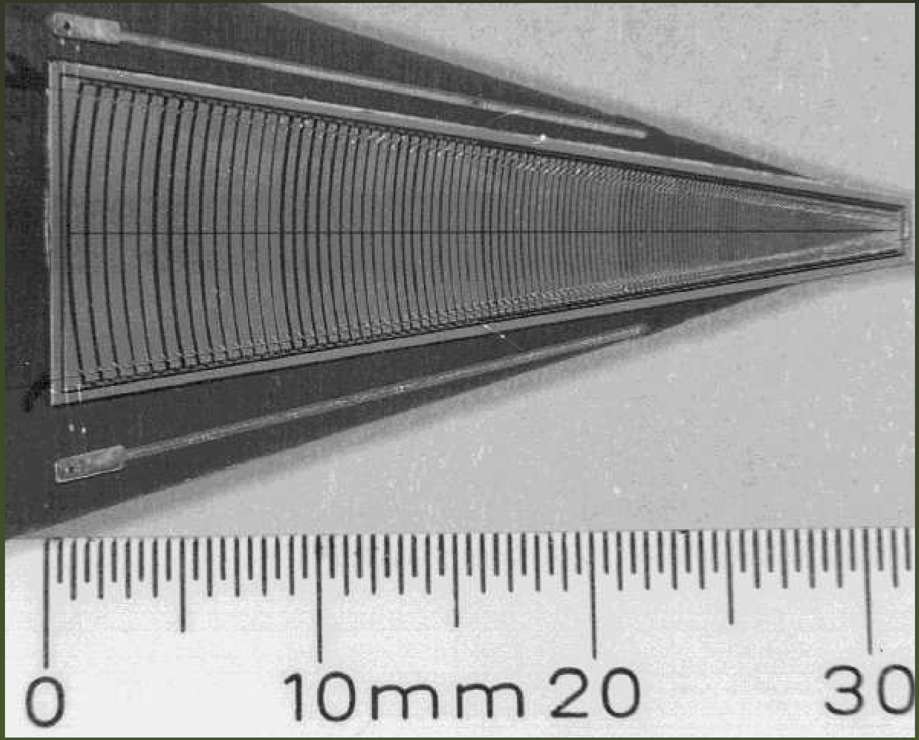
- Dwa azymutalne sektory detektora o $\Delta\phi$=10^0. Każdy sektor składa się z 128 pasków detektora. Paskowe detektory krzemowe $p^+ - on - n$ o sprzężeniu typu AC.
- Szklany fanout ze ścieżkami Al zapewniającymi połączenia pasków z elektroniką front-end
- Cztery pary dedykowanych układów elektroniki front-end (4 x 64 kanały)



BOARD1

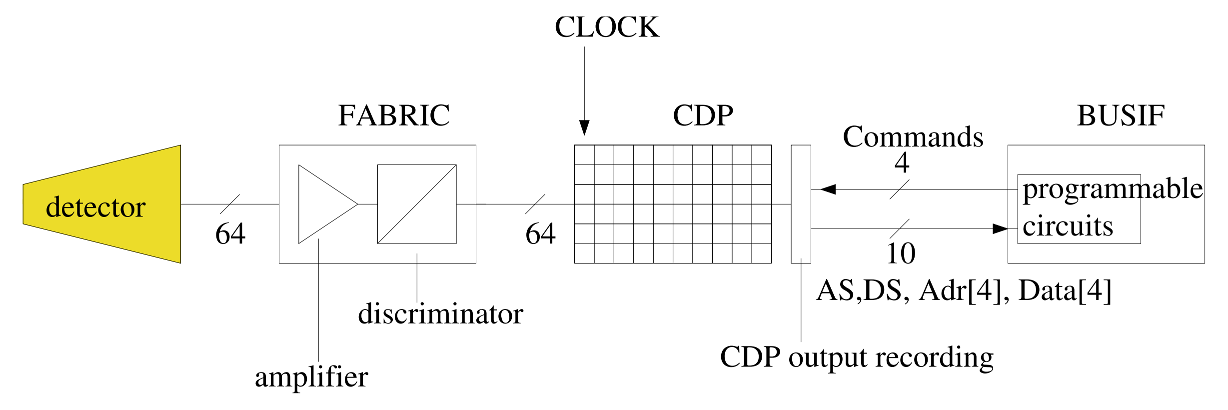
BOARD1 - detektor paskowy

Numer paska	Promień (mm)
1	6.5
30	9.5
60	13.7
90	20.1
120	31.2
150	52.6
192	88.5

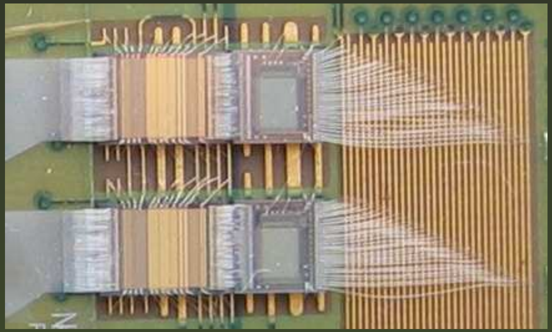


Detektor typu AC zawierający dwa 10^0 sektory (2 x 128 pasków). PITCH od 90 μm do 700 μm

Elektronika front-end



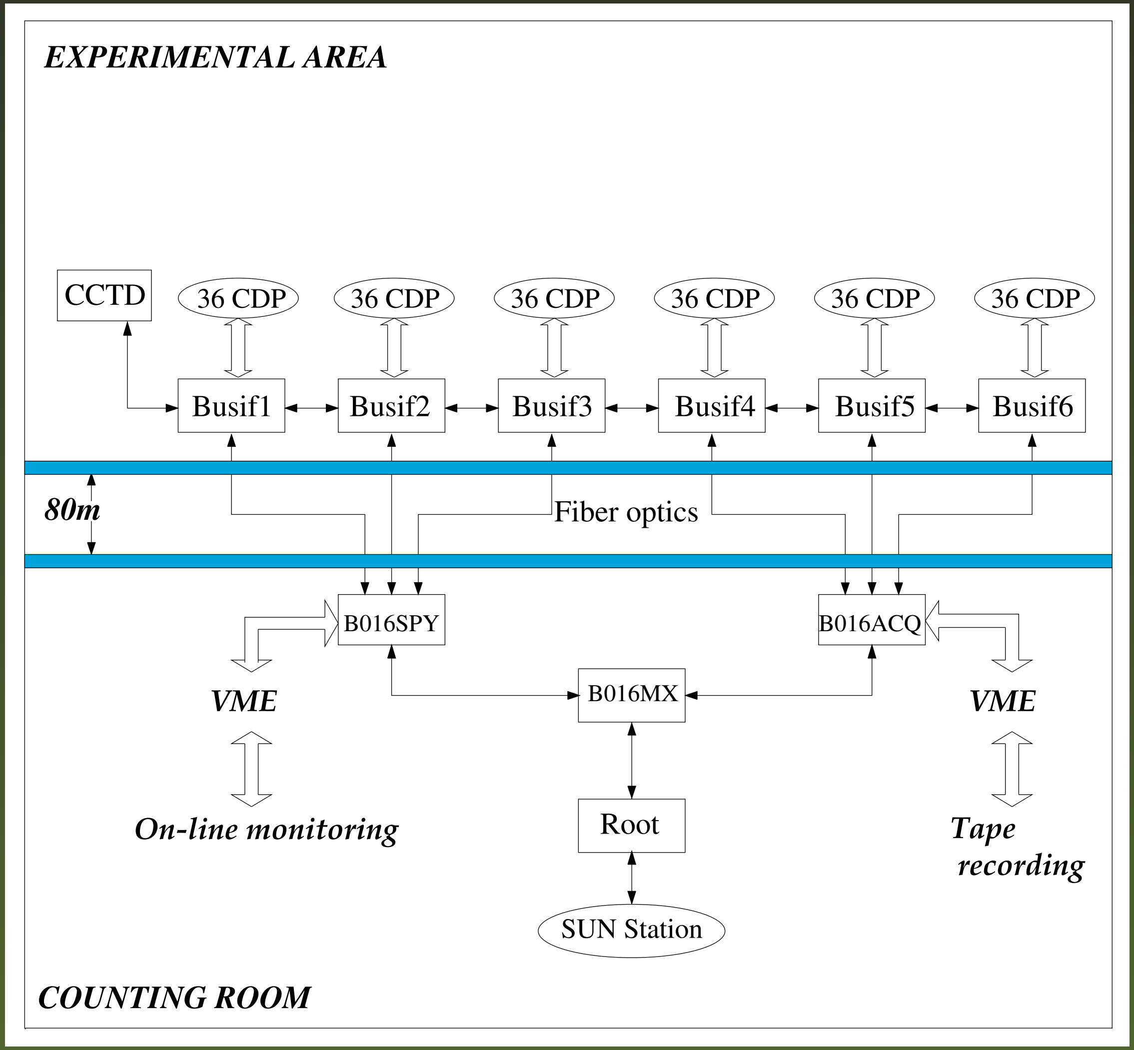
Schemat blokowy elektroniki front–end



Dwie pary układów:
analogowy
FABRIC(lewo) +
cyfrowy CDP(prawo)
zamontowanych na
BOARD1

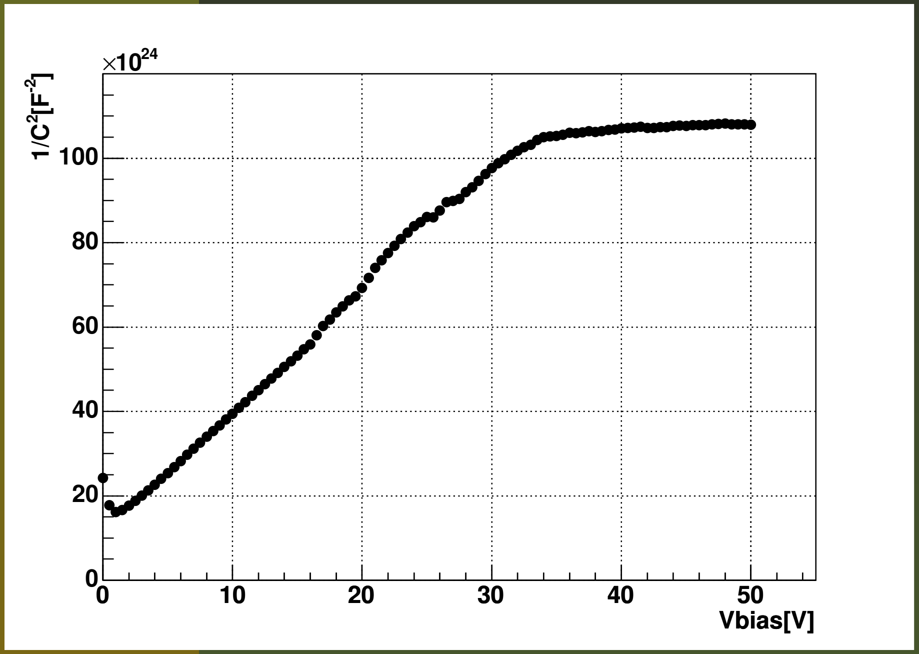
System odczytu Detektora Krotności

- BUSIF - odczyt i przechowywanie danych z 6-u par BOARD1+BOARD2 w czasie trwania cyklu wiązki
- CCTD - generacja zegara 50 MHz i sygnału odczytu (trigger) detektora



Testy detektorów

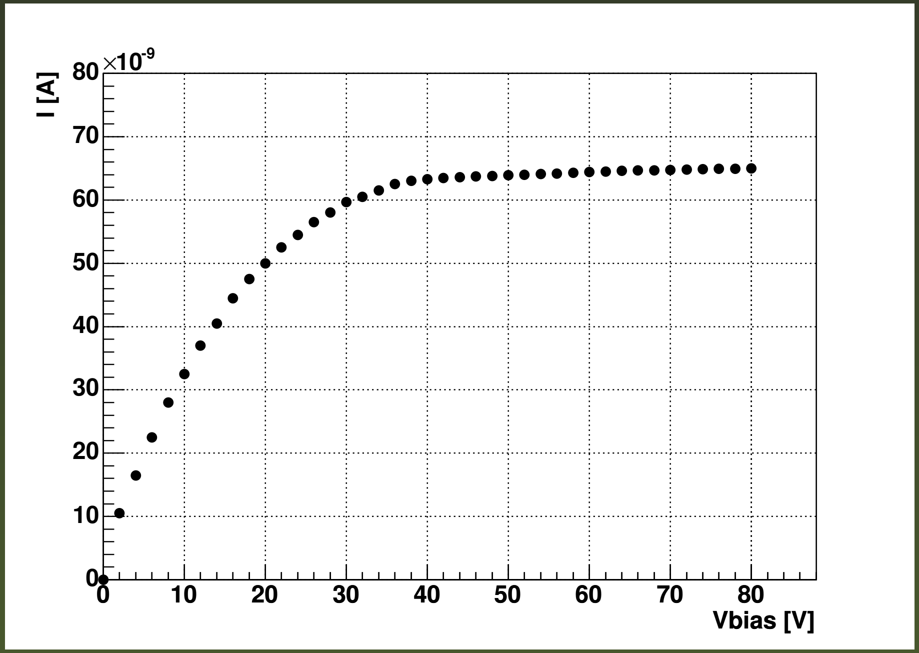
Napięcie zubożenia



Przykład pomiaru C–V

$$C = C_0/\sqrt{1 + V_{bias}/\Psi_{bi}}$$

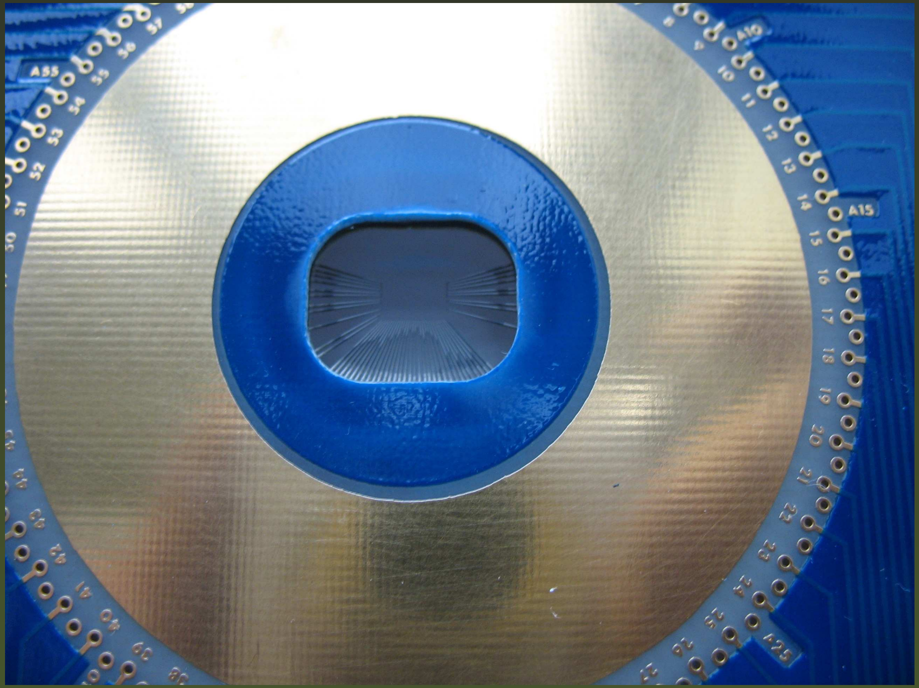
Prąd upływu



Przykład pomiaru I–V

Testy elektroniki front-end

- FABRIC - Pomiary wzmocnienia, szumów, "peaking time", czasu martwego
- CDP - Pomiary poprawności przetwarzania danych, pomiary częstotliwości pracy



Odrębne stanowiska testowe dla układów FABRIC i CDP. Dla każdego z nich dedykowana probecard

Testy i montaż Detektora Krotności

- Testy i montaż BOARD1 i BOARD2
    - Montaż układu cyfrowego CDP
    - Testy poboru mocy i komunikacji
    - Montaż układu analogowego FABRIC
    - Testy poboru mocy oraz zliczeń szumowych przy niskim i wysokim progu układu FABRIC
    - Montaż detektora
    - Testy z impulsami laserowymi, zliczeń szumowych, pobór mocy
    - Montaż pary BOARD1+BOARD2
    - Powtórzenie testów komunikacji i testu z impulsem laserowym
- Testy i montaż kompletnych dysków detektora

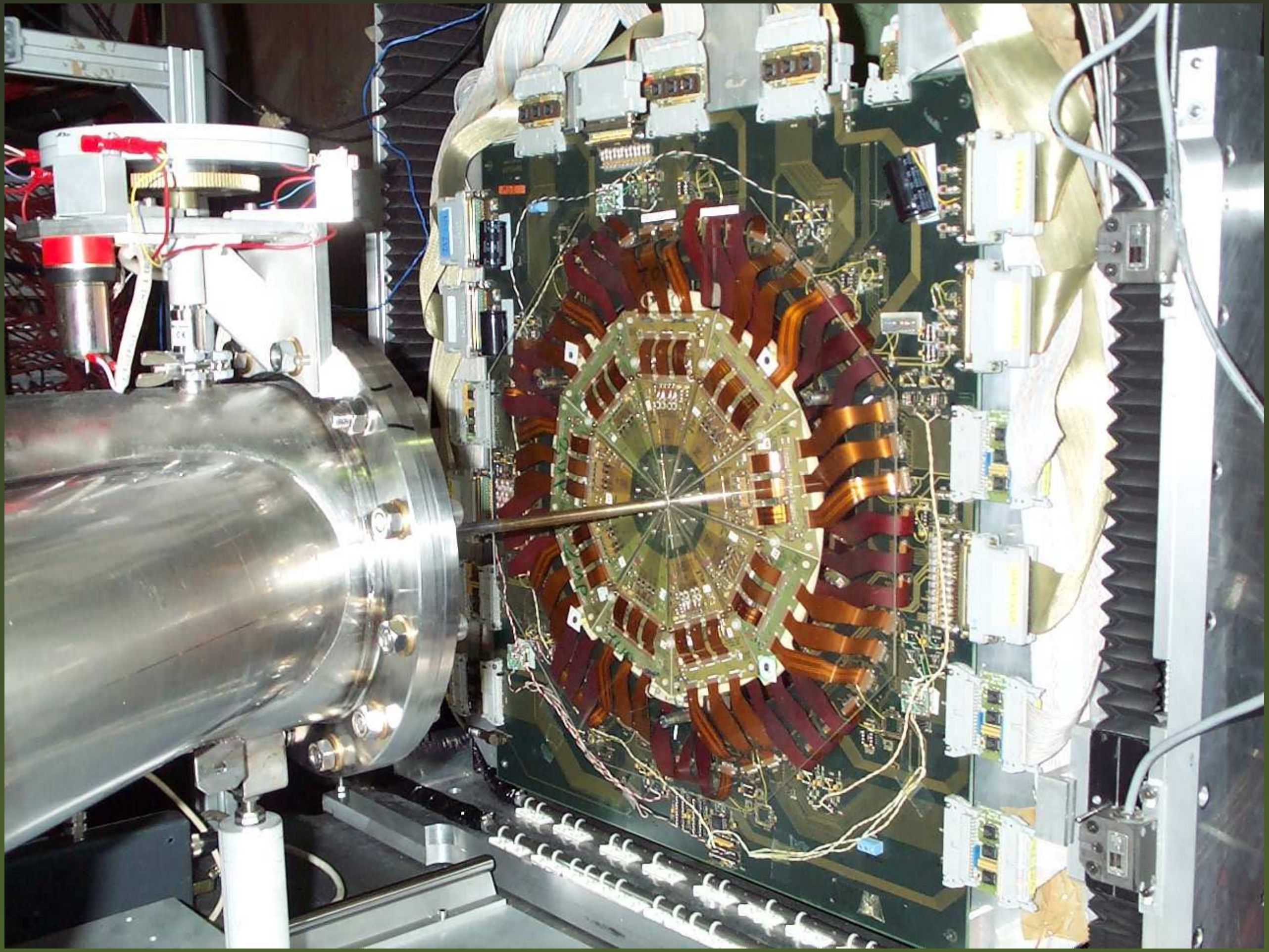
Podwyższenie częstotliwości próbkowania z 25 MHz do 50 MHz

- Przeprojektowanie interfejsu wewnątrz BUSIF na w pełni różnicowy
- Przeprojektowanie układu dystrybucji zegara na EXTCARD
- Zapewnienie poprawnej terminacji sygnałów
- Zapewnienie poprawnej fazy zapisu sygnałów do BUSIF poprzez dodanie dodatkowych modułów opóźnień pomiędzy sygnałami kontrolnymi a danymi

Po tych zmianach efektywność transmisji danych osiągnęła ponad 90%

Montaż kompletnego Detektora Krotności

Kompletny detektor zamontowano po raz pierwszy w 1996 roku w hali eksperymentu NA50 w CERN



Strona up dysku Detektora Krotności

Praca Detektora Krotności w NA50

- Dostrajanie Detektora Krotności
  - Geometria
  - Moment odczytu Detektora Krotności w stosunku do sygnału wyzwalania eksperymentu NA50
  - Próg na energię deponowaną w detektorach krzemowych
  - Napięcie polaryzacji detektorów krzemowych
- Monitorowanie Detektora Krotności
  - Napięcie zasilania i pobór prądu elektroniki i front-end
  - Prądy upływu detektorów krzemowych
  - Okupancja cząstek w detektorach krzemowych

Praca Detektora Krotności w NA50...

- Napotkane problemy
  - Przypadki oddziaływań o nieskorelowanej energii
  - Klastry - grupy sąsiadujących pasków dających sygnał jednocześnie

---

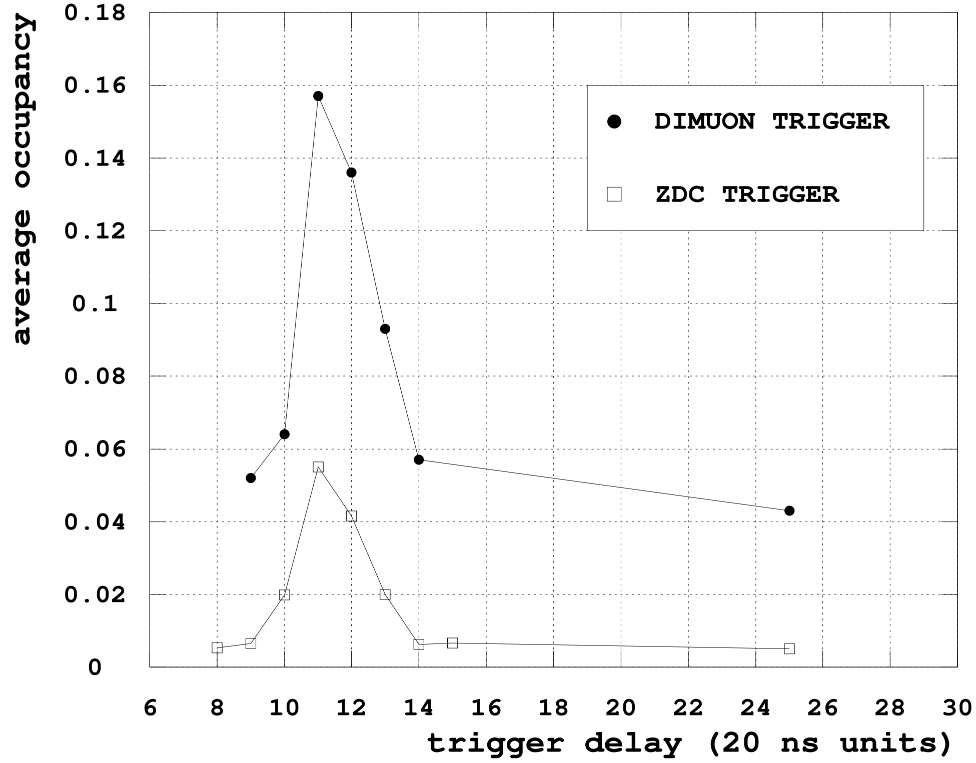
M. Idzik, *The silicon Multiplicity Detector for the NA50 experiment*, presented at 6th Conference on Position–Sensitive Detectors, University of Leicester, UK September 9–13 2002.

B. Alessandro, ..., M. Idzik et al, Nucl. Instr. Meth. A513 (2003) p107-111

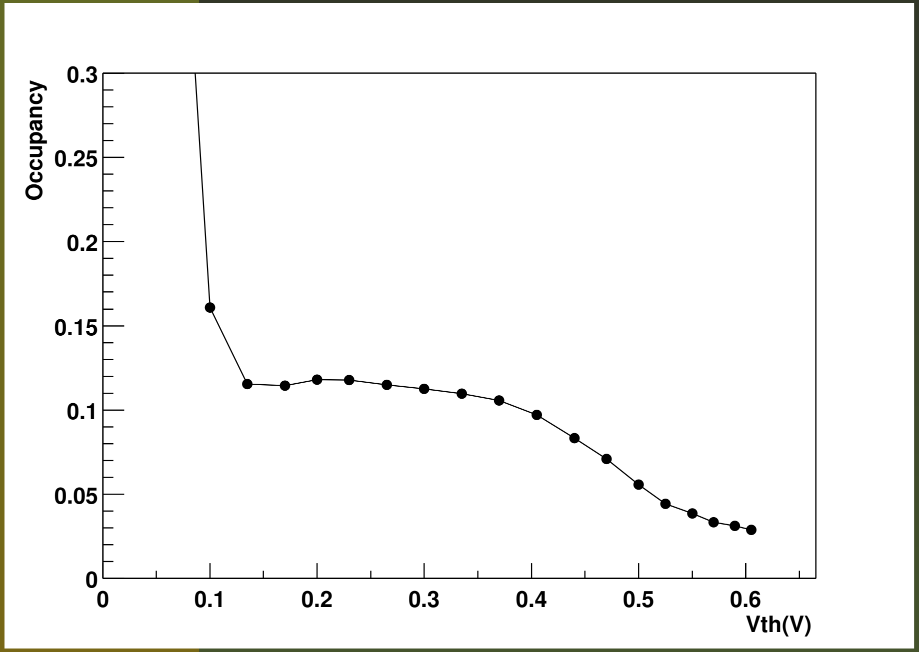
B. Alessandro,..., M. Idzik et al, *The silicon multiplicity detector for the NA50 experiment at CERN*, Nucl. Instr. Meth. A493, (2002) p30-44

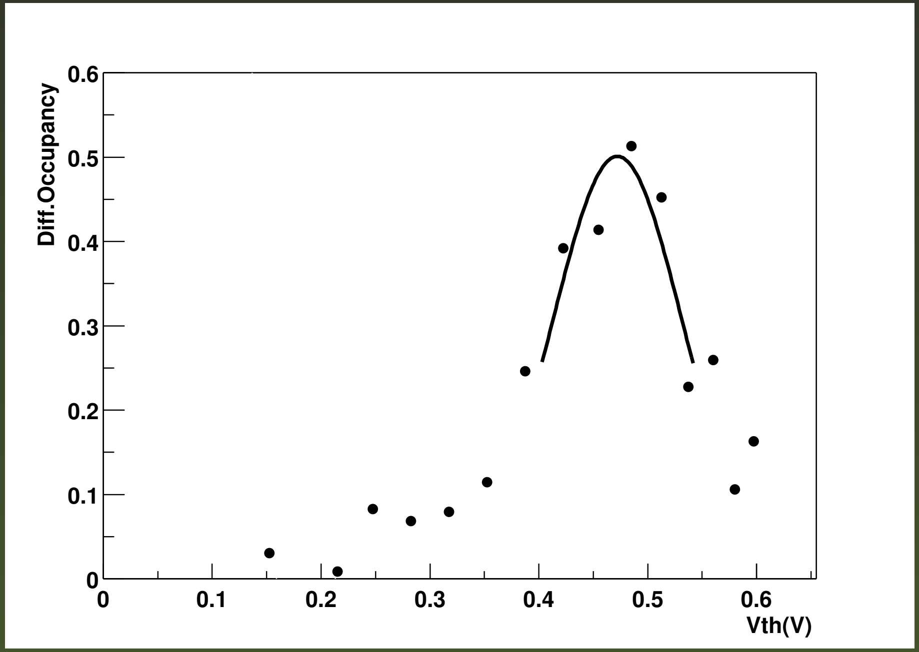
Moment odczytu Detektora Krotności

Aby odczytać Detektor Krotności we właściwym momencie badano mierzoną okupancję w funkcji opóźnienia odczytu w stosunku do wyzwalania (trigger) eksperymentu NA50



Próg na deponowaną energię

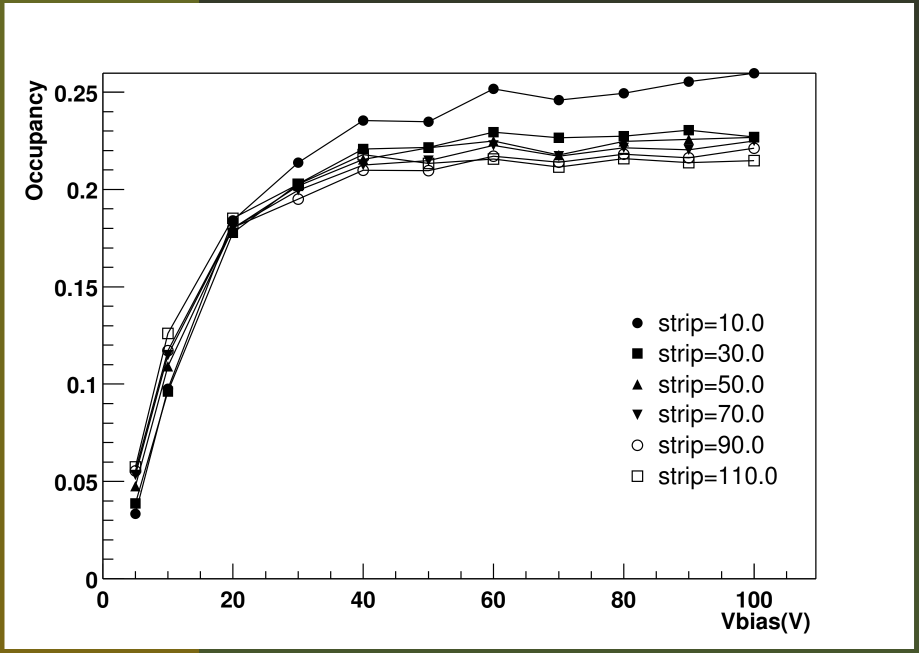




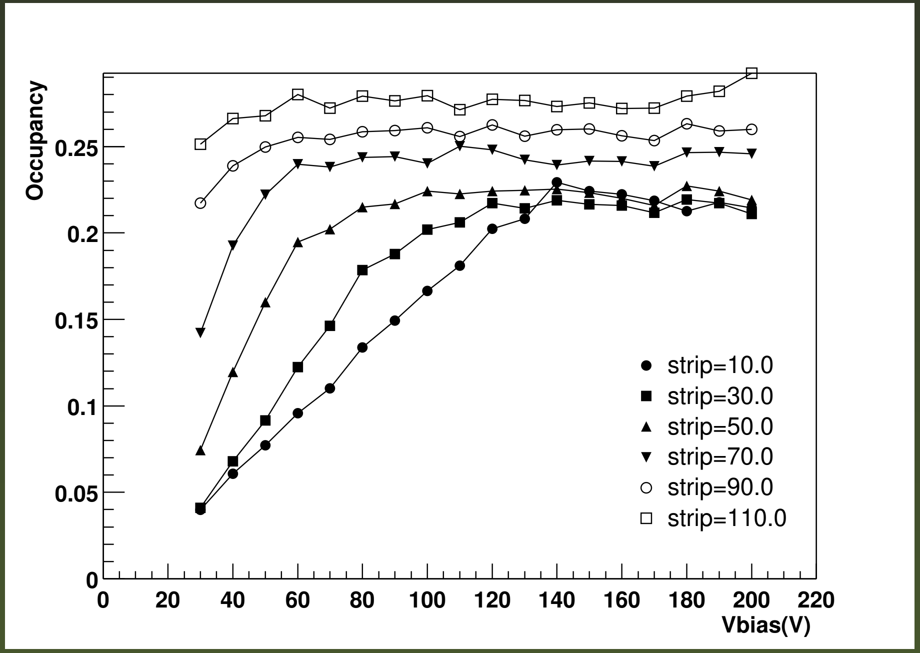
Aby ustawić właściwy próg na energię deponowaną w detektorze badano okupancję cząstek w funkcji ustawionego progu. Do tego celu używano wiązki relatywistycznych protonów

Napięcie polaryzacji detektorów

Detektor nowy



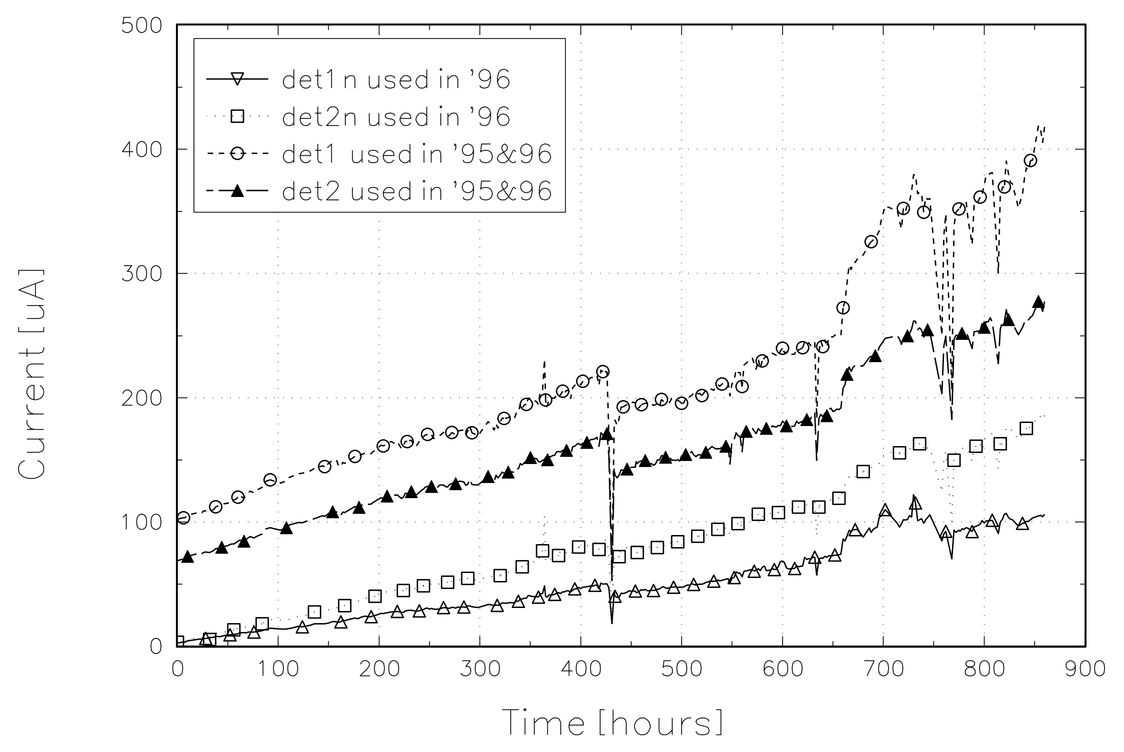
Detektor po napromieniowaniu



Aby ustawić właściwe napięcie polaryzacji detektorów badano okupancję cząstek w funkcji napięcia polaryzacji

Prądy upływu detektorów

$$I_{leak} = \alpha \cdot \Phi_{eq} \cdot V$$

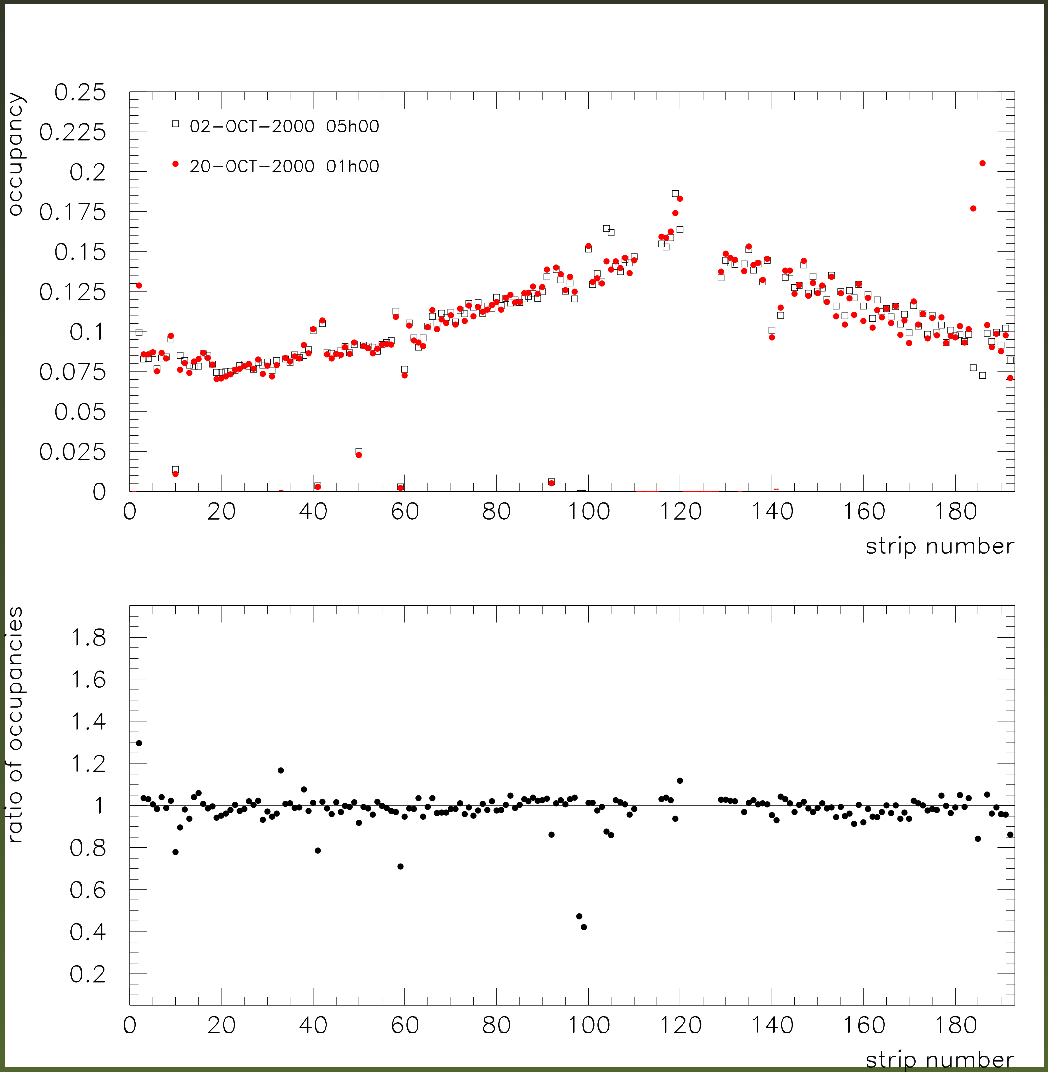


Prądy upływu rosną liniowo z otrzymaną fluencją Φ_{eq}

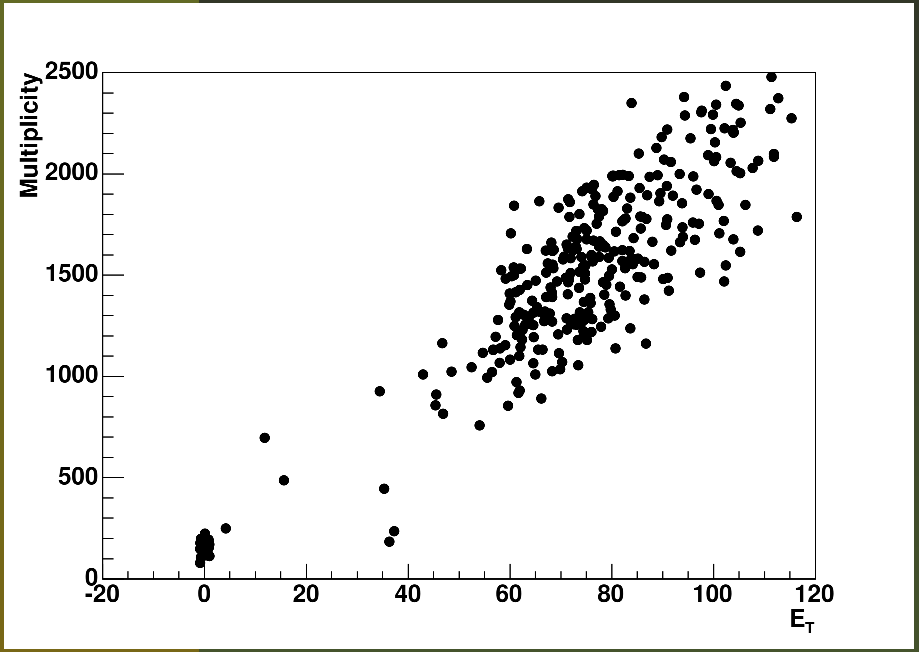
Jeśli prąd upływu przekraczał $\sim 500\ \mu$A detektor wymieniano na nowy

Okupancja detektorów krzemowych

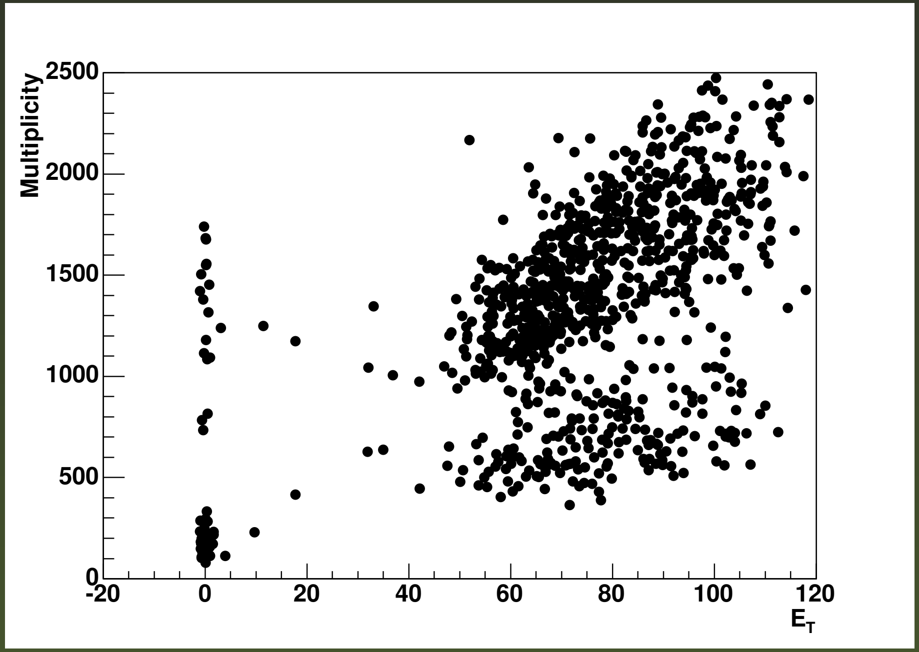
Okupancja pasków regularnie kontrolowana poprzez porównanie z okupancją początkową



Oddziaływania o nieskorelowanej energii



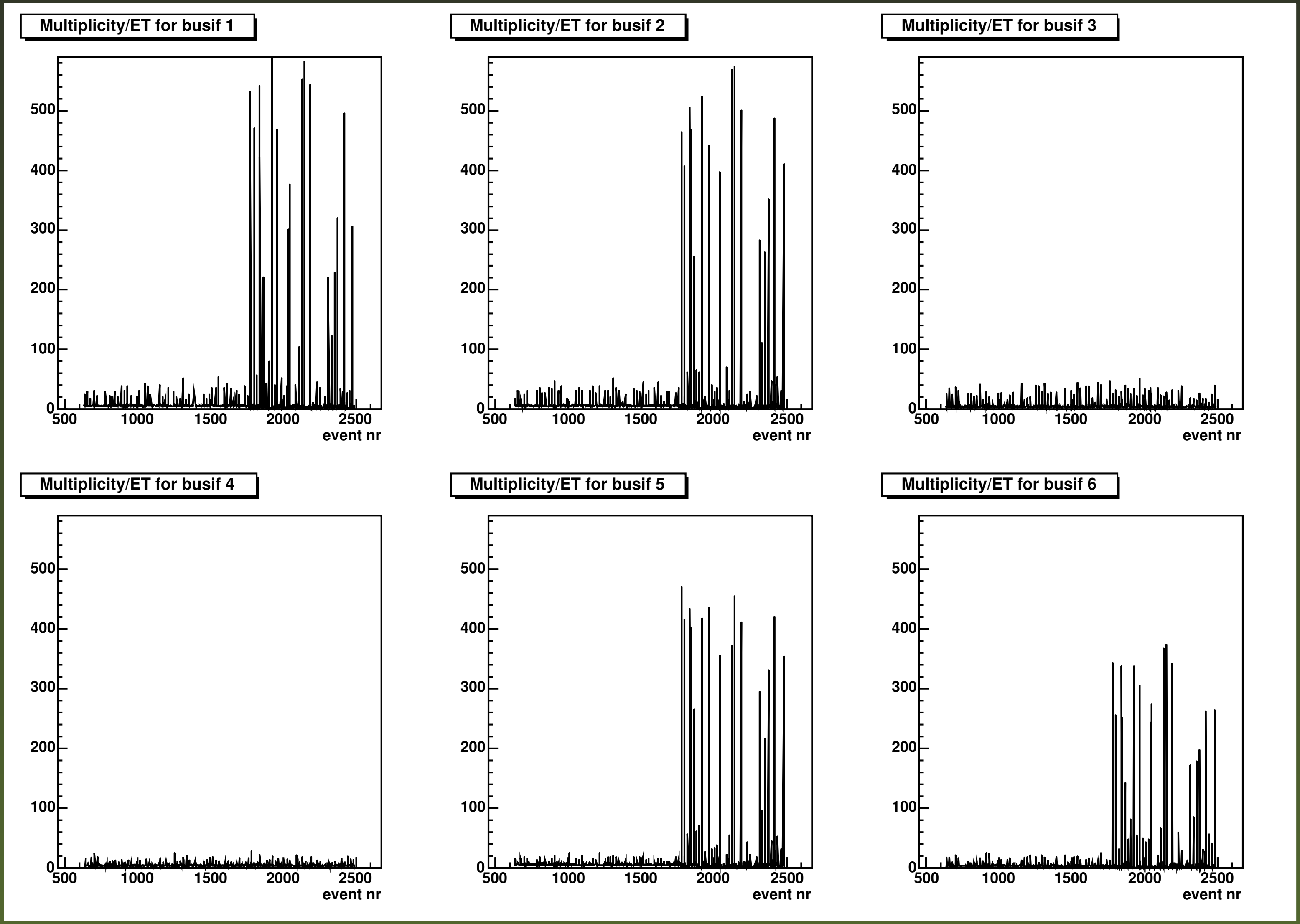
Normalny cykl wiązki



"Dziwny" cykl wiązki

Oddziaływania o nieskorelowanej energii...

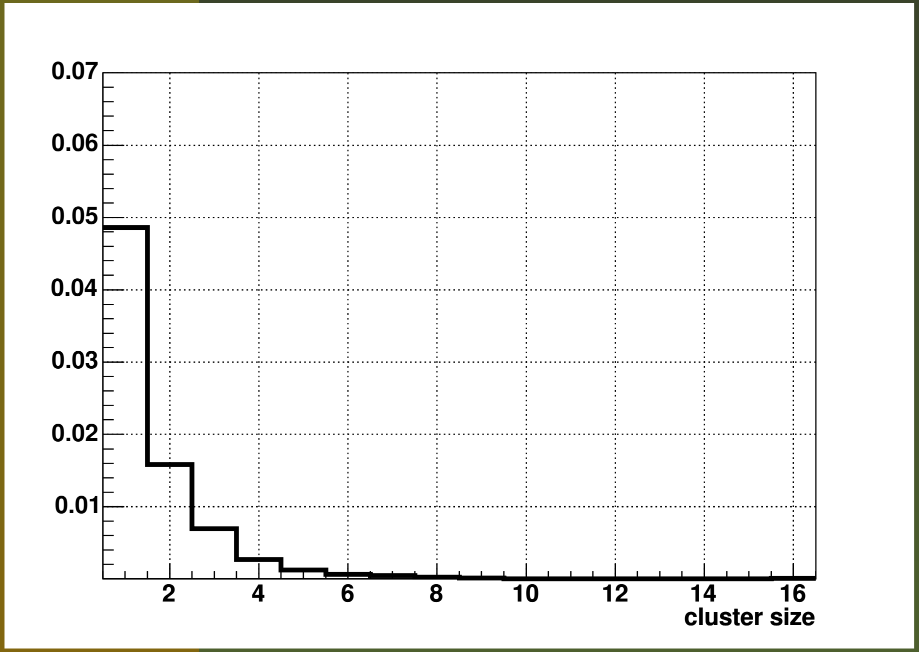
Za krótki czas na odczyt rejestrowanych oddziaływań. Wydłużono go!



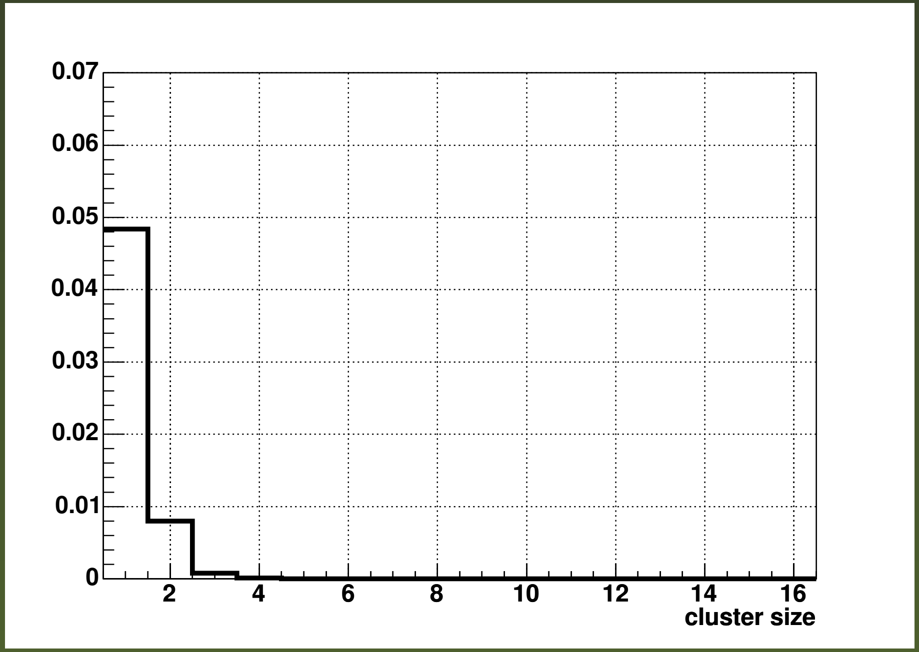
Problem klastrów

Histogramy klastrów czyli rozmiaru grup sąsiadujących pasków dających sygnał jednocześnie

Dane eksperymentalne



Symulacje MC



W danych eksperymentalnych za duży średni rozmiar klastrów!

Efekty radiacyjne

- Symulacje Monte Carlo efektów radiacyjnych
- Napięcie zubożenia detektorów krzemowych

M. Idzik, *Radiation damage of silicon strip detectors in the NA50 experiment*, presented at 8th International Vienna Wire Chamber Conference, Vienna Austria, February 23-27 1998.

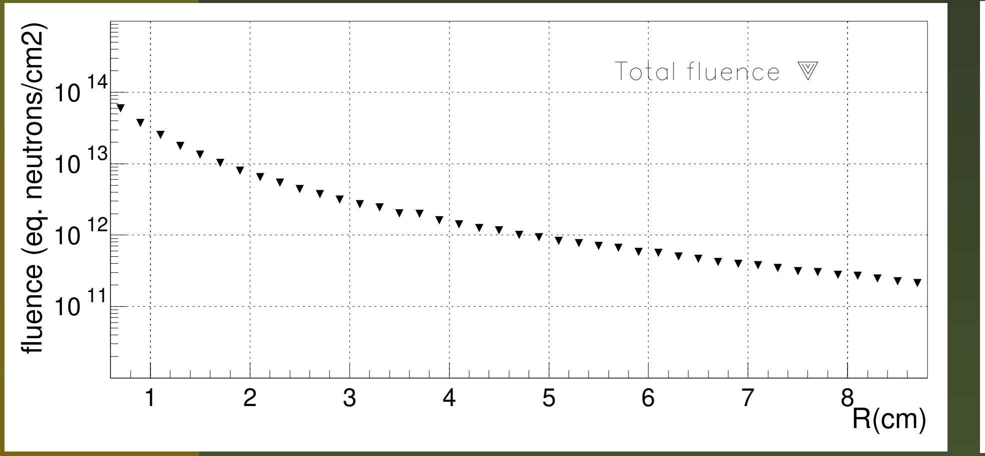
B.Alessandro, ..., M. Idzik et al.,Nucl. Instr. Meth. **A419** (1998) 556-569.

B.Alessandro, ..., M. Idzik et al., *Analysis of radiation effects on silicon strip detectors in the NA50 experiment*, Nucl. Instr. Meth. **A432** (1999) 342-357.

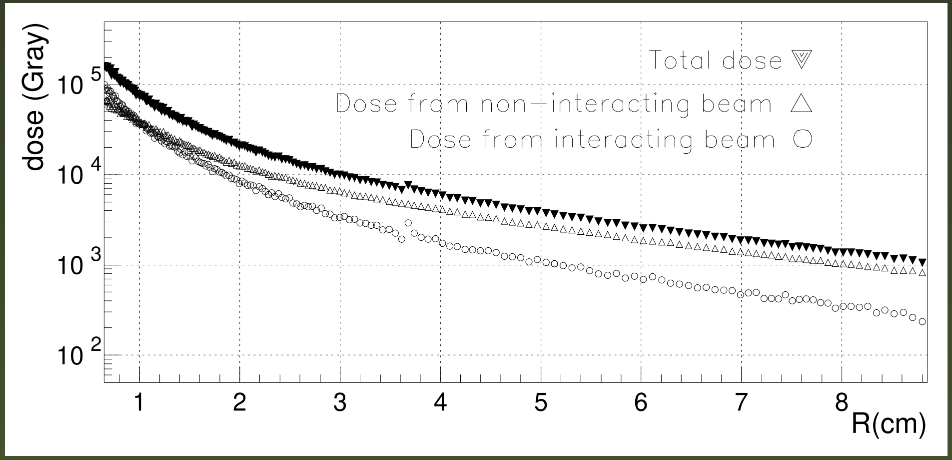
B.Alessandro, ..., M. Idzik et al., *Observation of radiation induced latchup in the readout electronics of NA50 multiplicity detector*, Nucl. Instr. Meth. **A476** (2002) 758-764.

Symulacje MC efektów radiacyjnych

Symulacje MC fluencji otrzymanych podczas zbierania danych w 1996 r.



Symulacje MC dawek otrzymanych podczas zbierania danych w 1996 r.



maksymalne fluencje:

detektory 10^{14} eq. n/cm^2

elektronika front-end $5 \cdot 10^{11}$ n/cm^2

maksymalne dawki:

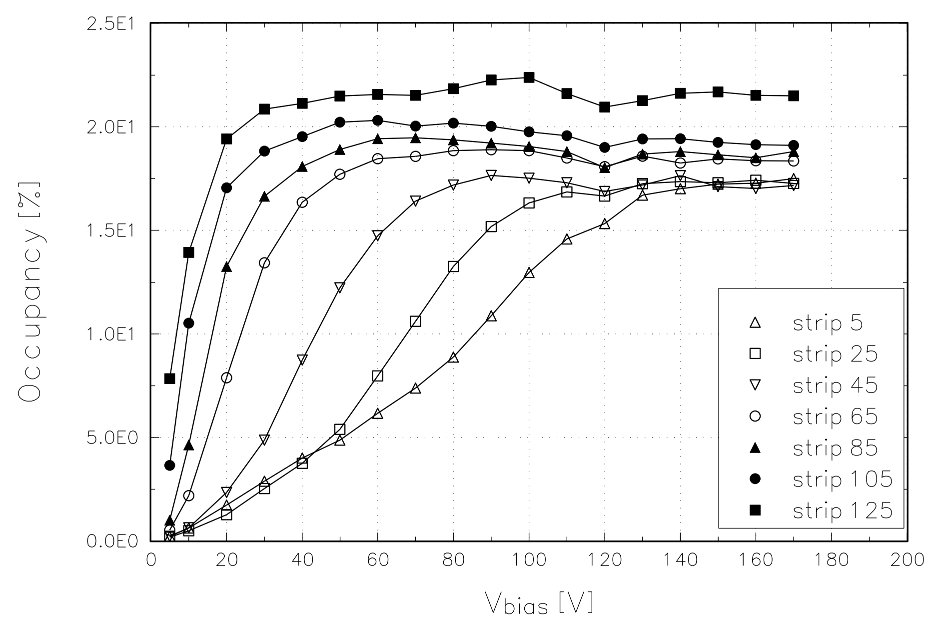
detektory 20 Mrads

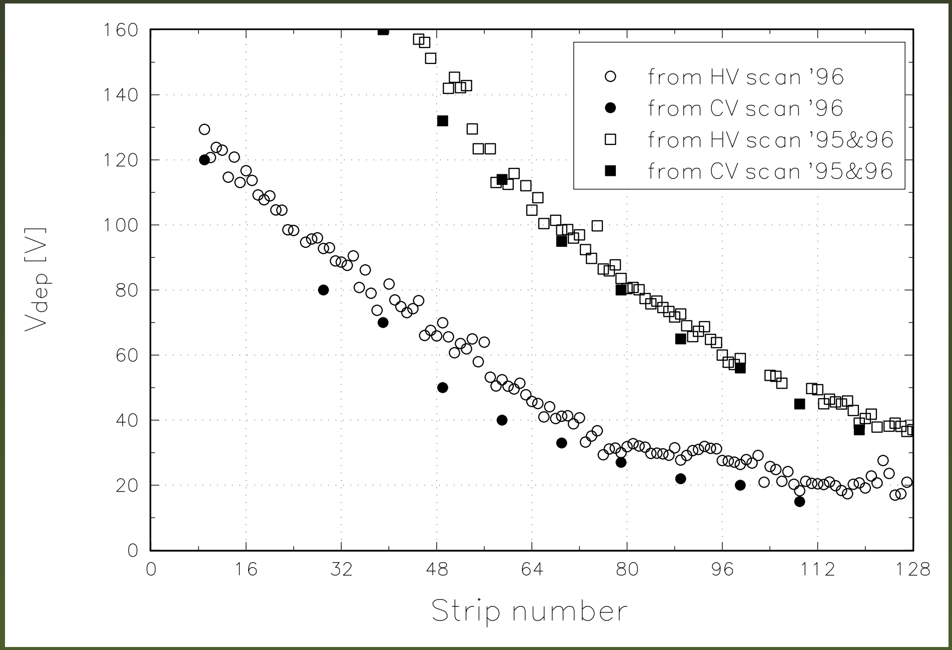
elektronika front-end 200 krads

Napięcie zubożenia detektorów

Krzywe otrzymane podczas skanu po napięciu polaryzacji detektora

Napięcie zubożenia wyliczone na podstawie skanu i zmierzone techniką C-V





Napięcie zubożenia można mierzyć online!

Identyfikacja zderzeń Pb-Pb

- Standardowa metoda
- Tablice korespondencji (lookup table) między paskami detektora w MD1 i MD2
- Wykorzystanie tablic korespondencji do wyznaczenia pozycji Detektora Krotności
- Identyfikacja zderzeń Pb-Pb

Standardowa metoda

- Założyć pozycję (tarczę) oddziaływania jonu Pb
- Policzyć estymator prawdopodobieństwa dla tej pozycji

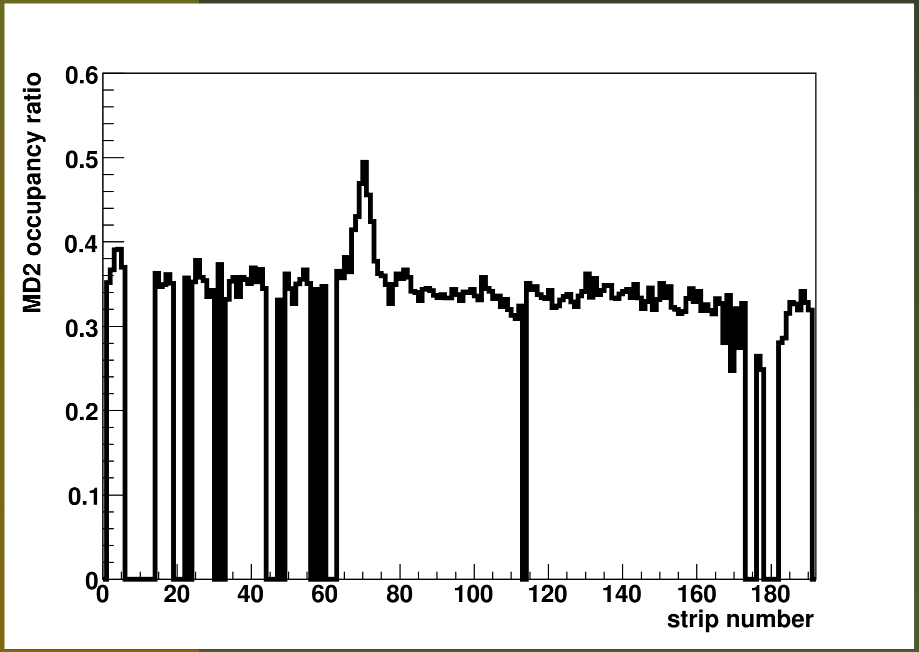
  $$est_n = \frac{N_{match}}{N_{pos}} = \frac{ilość\, znalezionych\, korespondencji}{ilość\, możliwych\, korespondencji}$$

  gdzie n odpowiada numerowi założonej pozycji.
- Korespondencje pomiędzy paskami dysków MD1 i MD2 znajduje się propagując liniowo tor cząstki od założonej pozycji oddziaływania poprzez paski dysków MD1 i MD2
- Wybranie jako miejsca oddziaływania pozycji dla której otrzymano maksymalny estymator

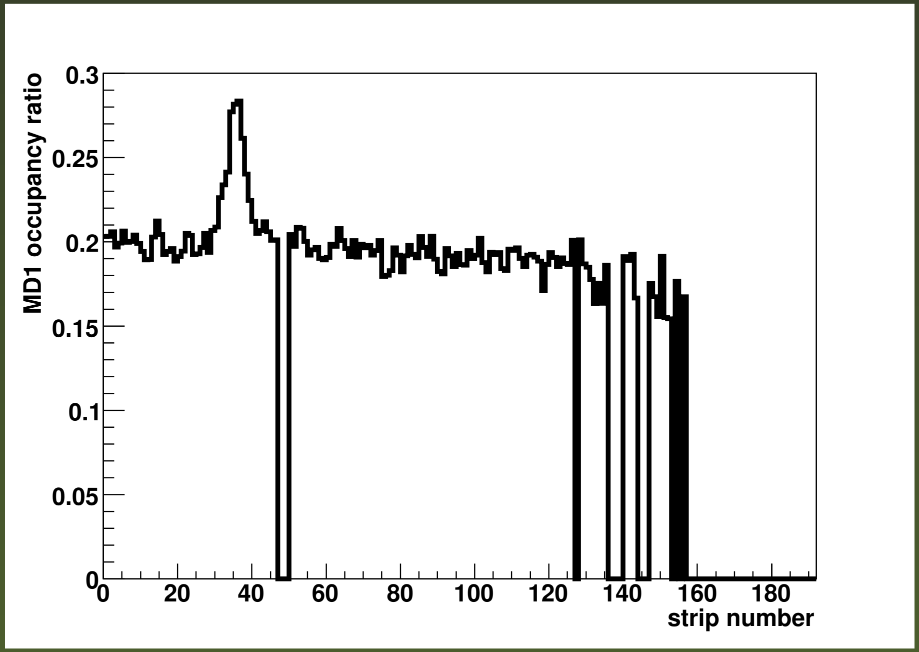
Metoda ta nie przyniosła zadawalających rezultatów!

Eksperymentalne tablice korespondencji

Dla znalezienia grupy pasków MD2 skorelowanych z danym paskiem MD1 liczono stosunek okupancji w MD2 przy wymaganym zdarzeniu na pasku MD1 do okupancji bez tego wymagania



Korelacja paska nr 36 MD1 z odpowiednim sektorem MD2

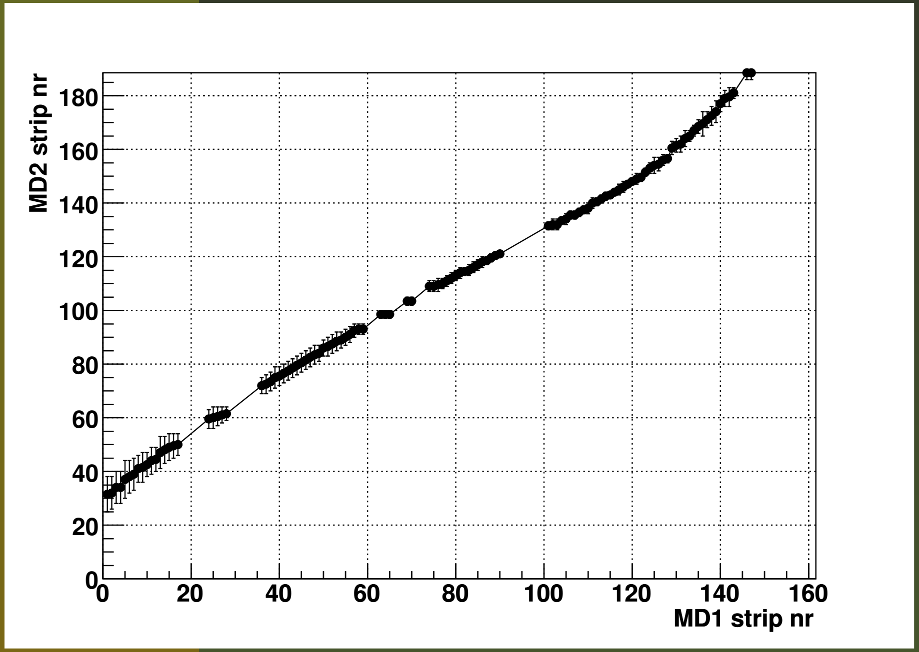


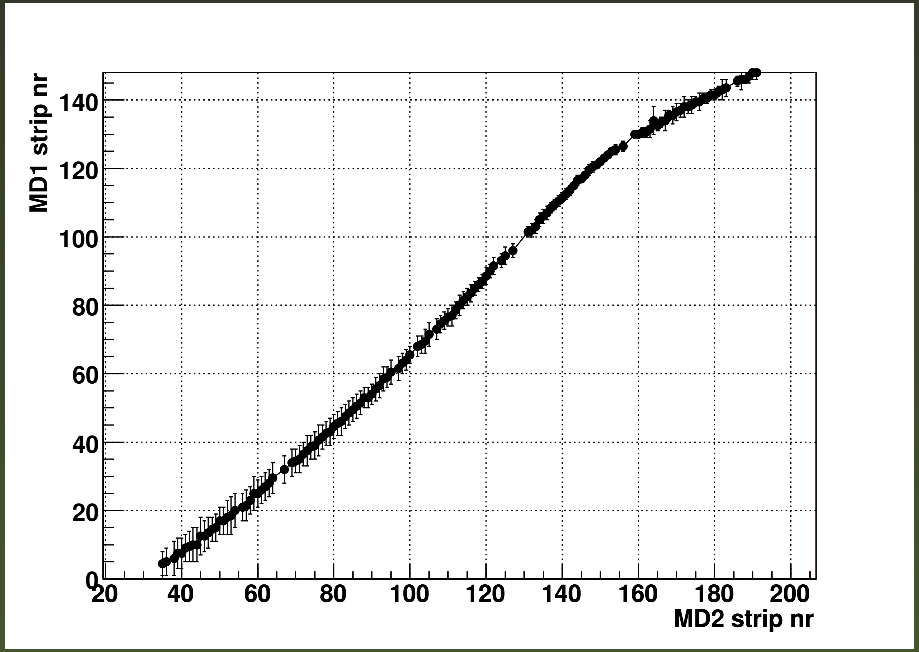
Korelacja paska nr 71 MD2 z odpowiednim sektorem MD1

Tablice korespondencji...

sector MD2 vs sector MD1

sector MD1 vs sector MD2

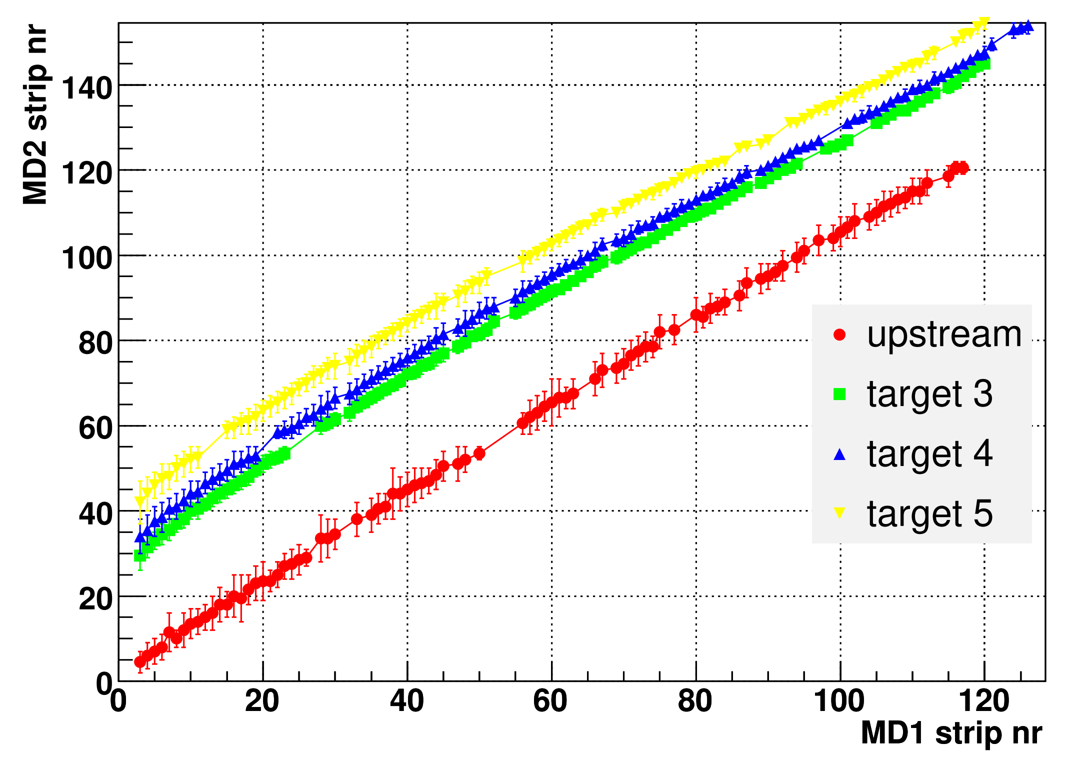




Na podstawie danych ekperymentalnych wyznaczono tablice korespondencji między dyskami Detektora Krotności!

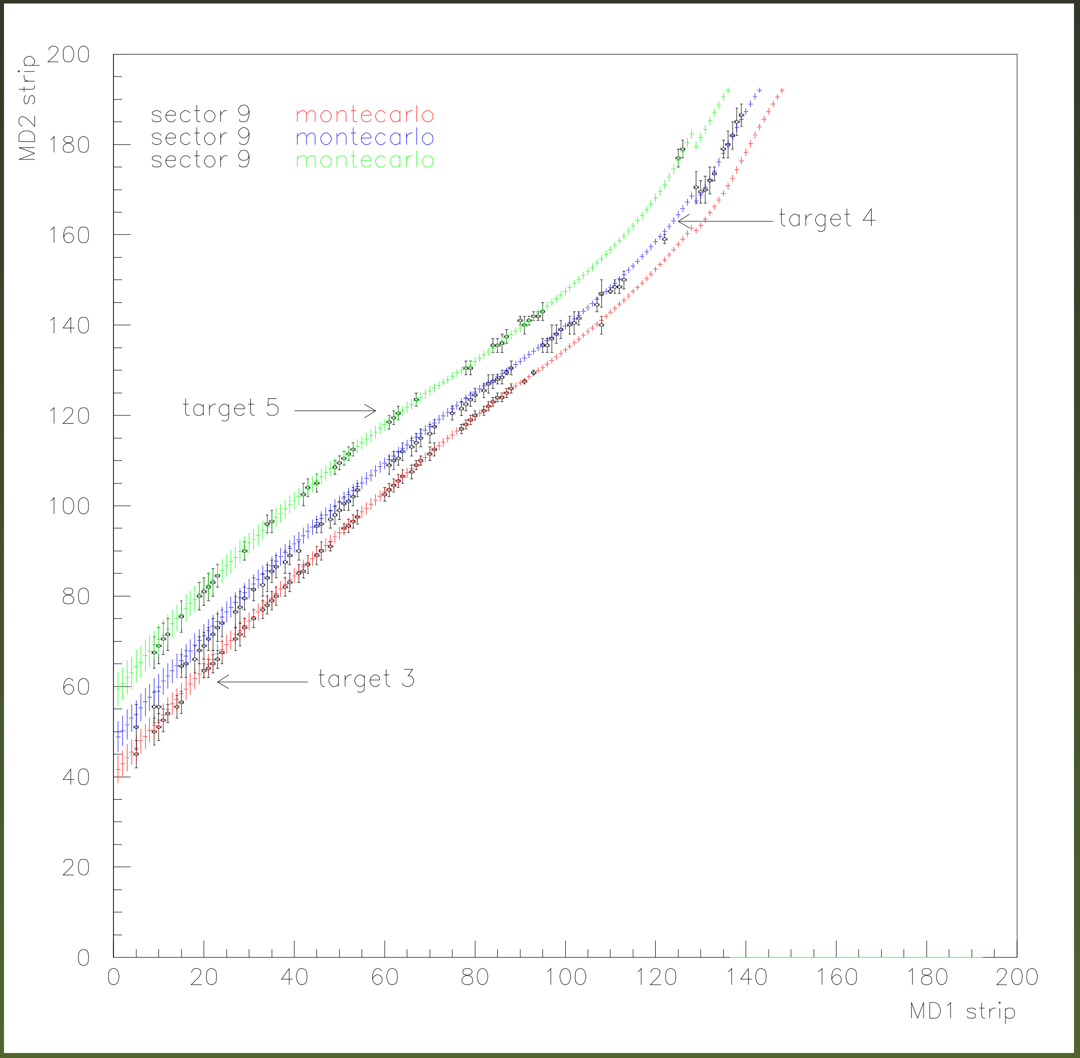
Tablice korespondencji...

Mając dane zebrane przy różnych pozycjach tarczy wyznaczono odrębne tablice korespondencji Tablice korespondencji wyznaczono też dla danych zebranych bez tarczy (upstream)!



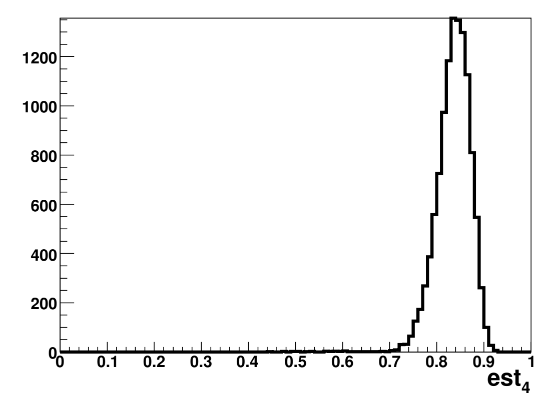
Wyznaczenie pozycji Detektora Krotności

Mając eksperymentalne tablice korespondencji i porównując je z tablicami wygenerowanymi na podstawie symulacji MC (przy zadanej geometrii) można było precyzyjniej wyznaczyć pozycję Detektora Krotności

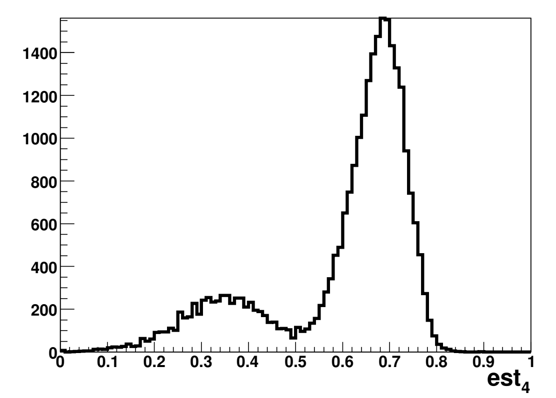


Identyfikacja zderzeń Pb-Pb

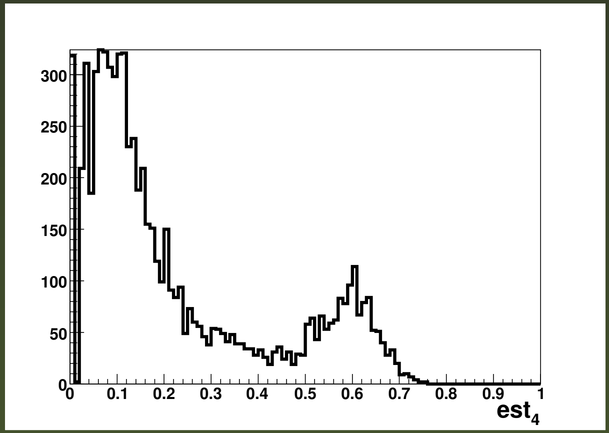
Rozkłady estymatora wyliczonego dla standardowej pozycji tarczy przy różnych centralnościach zderzenia



Zderzenia centralne



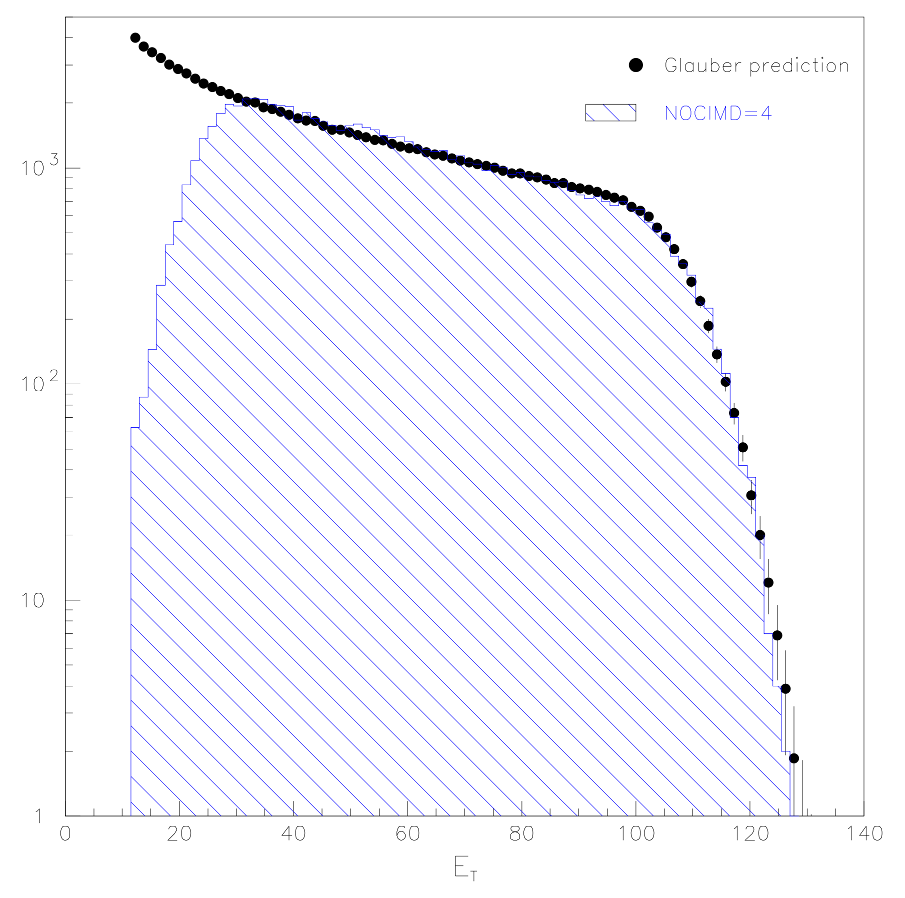
Zderzenia semicentralne



Zderzenia peryferyjne

Identyfikacja zderzeń Pb-Pb...

Porównanie spectrum zidentyfikowanych zderzeń (NOCIMD=4) z otrzymanym z teoretycznego modelu, dla danych zebranych w 1998 roku. Dla danych z 2000 roku (tarcza umieszczona w próżni) pełną wydajność osiągnięto już dla E_T=15 GeV



Analizy $dN_{ch}/d\eta$ w zderzeniach Pb-Pb

- Selekcja danych i klas centralności
- Obliczenia okupancji cząstek w detektorze
- Obliczenia $dN_{ch}/d\eta$ cząstek pierwotnych
- Wyniki

M. Idzik, *Pseudorapidity distributions of...* , Phys. and Astrophysics of Quark-Gluon Plasma, Jaipur India, Nov. 2001.

M. Idzik, *Pseudorapidity distributions of charged particles in Pb-Pb ...*, Winter Meeting on Nucl. Physics, Bormio Italy, Jan. 2002.

M.C. Abreu, ..., M. Idzik et al., NA50 Collaboration, *Pseudorapidity distributions of charged particles...* , Phys.Lett. **B 530** (2002) 33.

M.C. Abreu ..., M. Idzik et al., NA50 Collaboration, *Scaling of charged particle multiplicity in Pb-Pb collisions at SPS energies*, Phys.Lett. **B 530** (2002) 43.

Selekcja danych

Energia wiązki (GeV/nukleon)	Intensywność (jony/5 s burst)	Grubość tarczy	Odległość (cm) tarcza-MD1	Ilość zdarzeń
158	$3.2 \cdot 10^6$	3 mm	11.65	48000
158	$3.9 \cdot 10^6$	1 mm	9.15	18000
40	$1 \cdot 10^6$	3 mm	12.55	35000

Dane analizowano dla 6-u klas centralności zderzenia

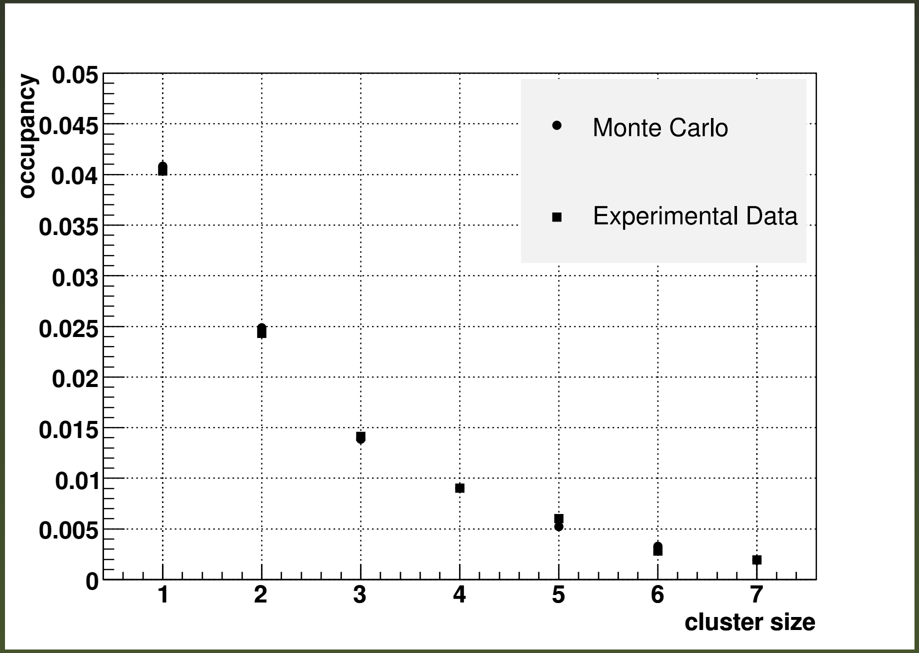
Dla energii 158 GeV/nukleon dwa estymatory centralności - E_T i E_{ZDC}

Dla energii 40 GeV/nukleon jeden estymator centralności - E_T

Wyznaczenie okupancji cząstek

Okupancję cząstek wyznaczono z okupancji pasków zakładając możliwość sprzężeń między paskami detektora

Współczynniki sprzężeń i okupancję cząstek wyznaczono minimalizując różnicę między rozkładem klastrów w danych eksperymentalnych i rozkładem otrzymanym z symulacji Monte Carlo



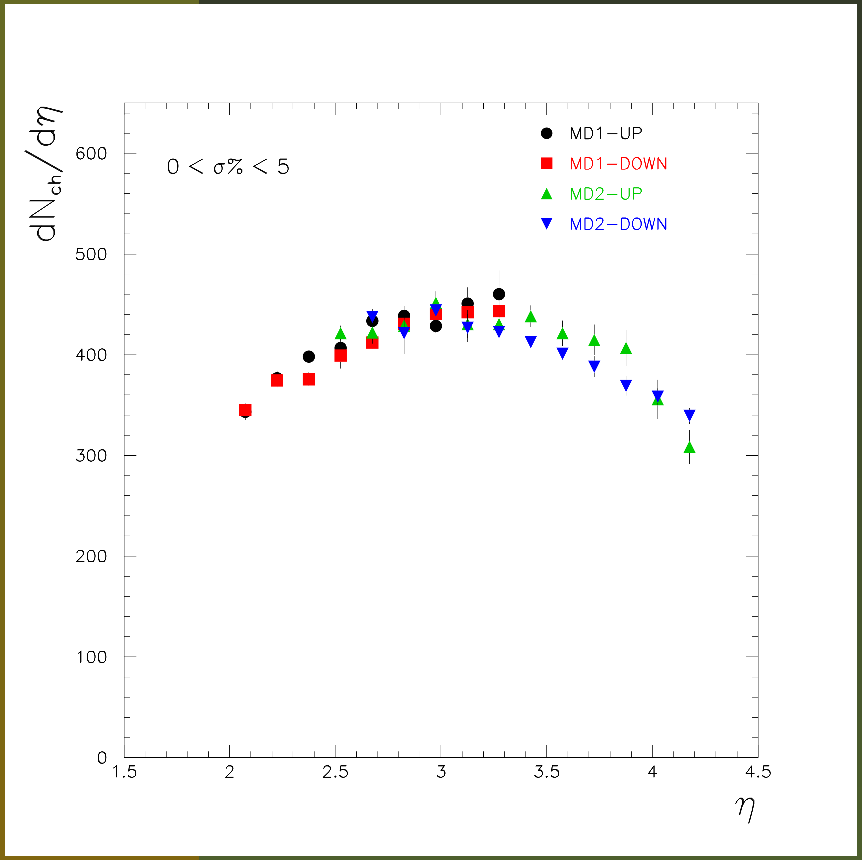
Przykładowy rozkład klastrów

Dedykowane oprogramowanie w C++

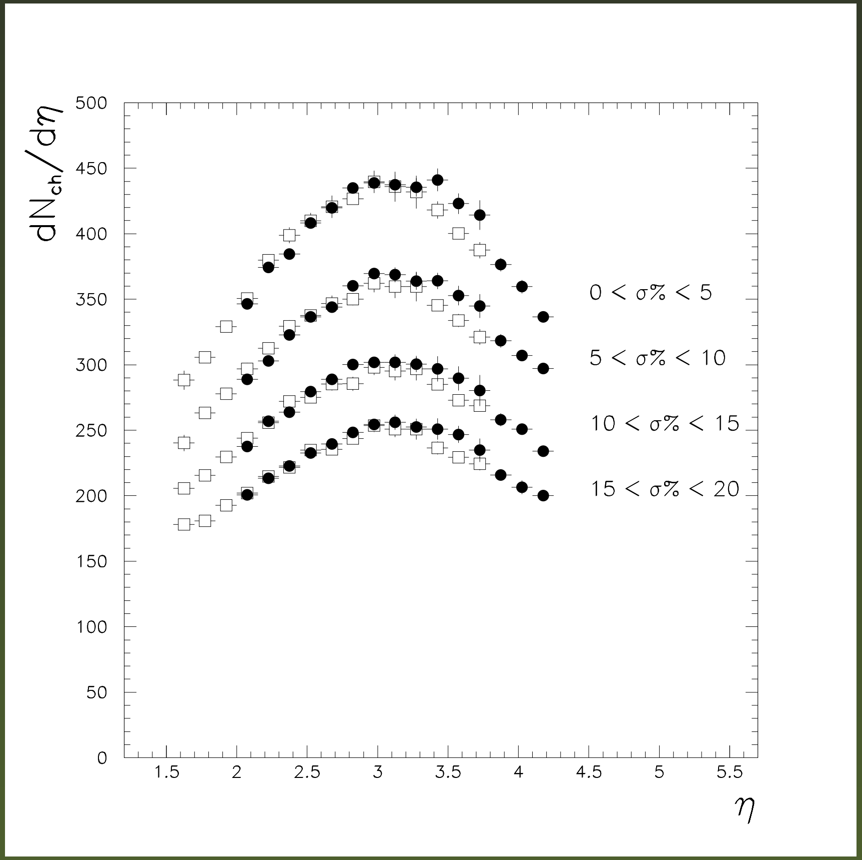
- Organizacja danych w detektorze
- Trójwymiarowy opis detektora z przesunięciami i obrotami
- Analiza akceptancji detektora
- Identyfikacja oddziaływań Pb-Pb
- Generacja MC cząstek w detektorze
- Znajdowanie okupancji pasków detektora na podstawie rozkładu klastrów. Do minimalizacji zastosowano metodę simpleks (downhill simplex method)

$dN_{ch}/d\eta$ cząstek pierwotnych

Stosunek $dN_{mierzona}/d\eta$ do $dN_{ch}/d\eta$ z symulacji MC GEANT+VENUS



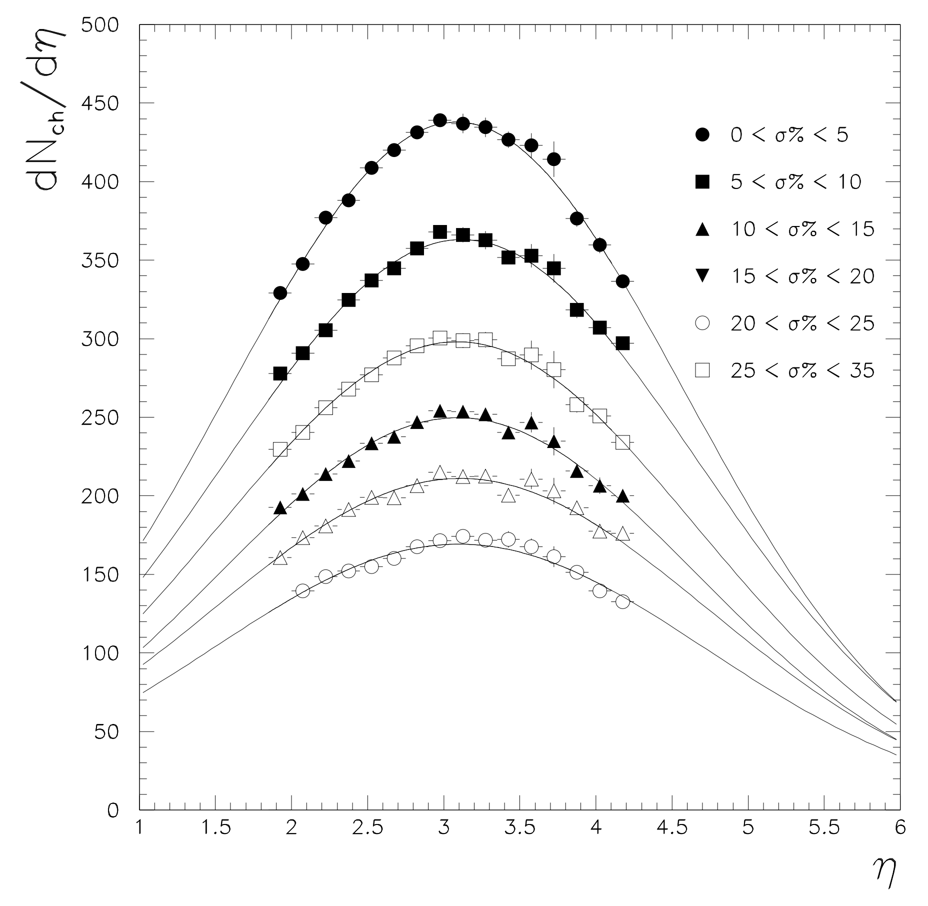
Wyniki dla MD1 i MD2, *up* i *down*



Wyniki dla dwóch różnych tarcz Pb

$dN_{ch}/d\eta$ dla energii 158 GeV/nukleon

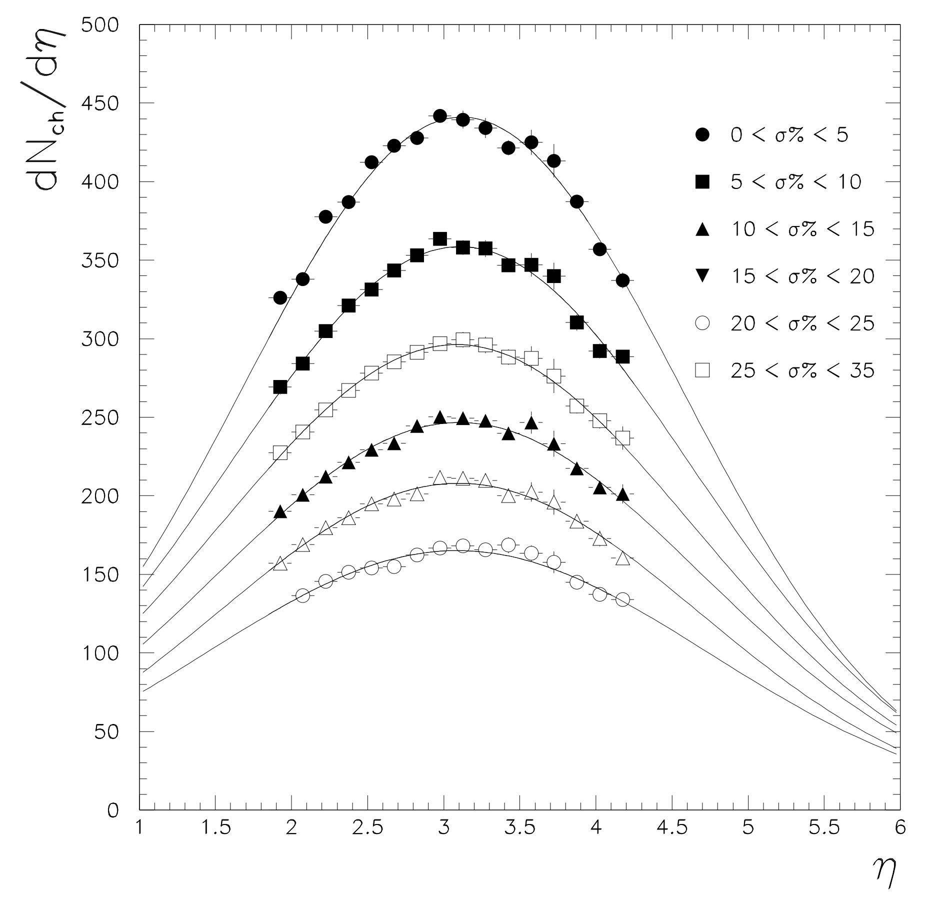
Rezultaty otrzymane dla klas centralności wyznaczonych z energii poprzecznej E_T



$dN_{ch}/d\eta$ dla energii 158 GeV/nukleon

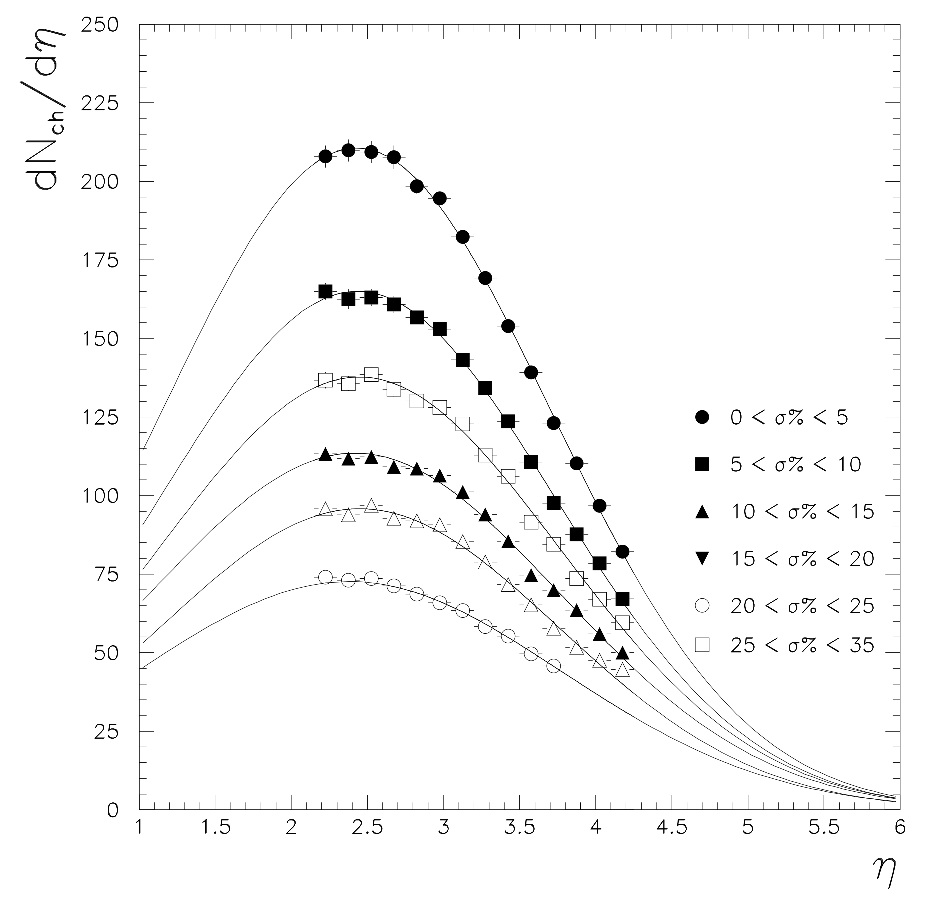
Rezultaty otrzymane dla klas centralności wyznaczonych z energii podłużnej E_{ZDC}

Bardzo dobra zgodność z E_T



$dN_{ch}/d\eta$ dla energii 40 GeV/nukleon

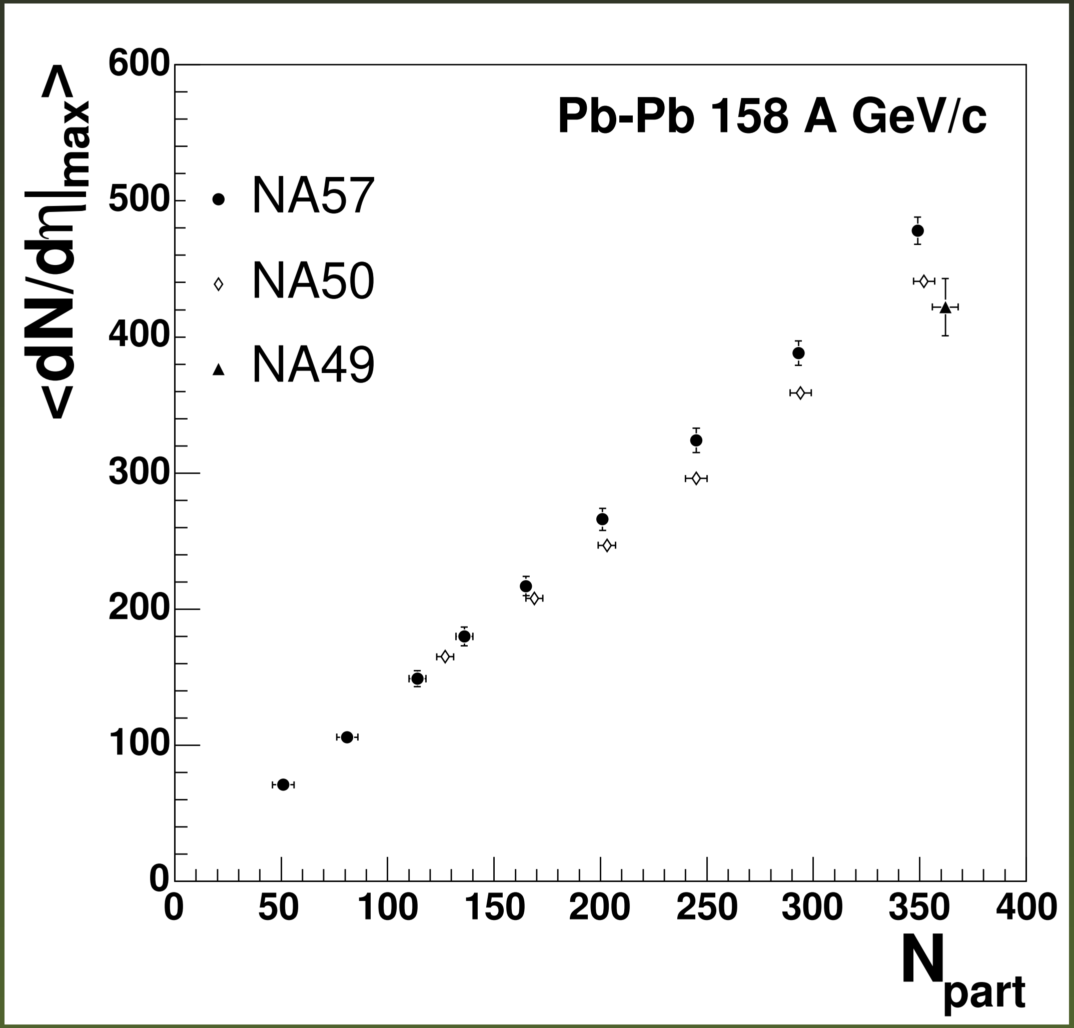
Rezultaty otrzymane dla klas centralności wyznaczonych z energii poprzecznej E_T



Porównanie z innymi eksperymentami

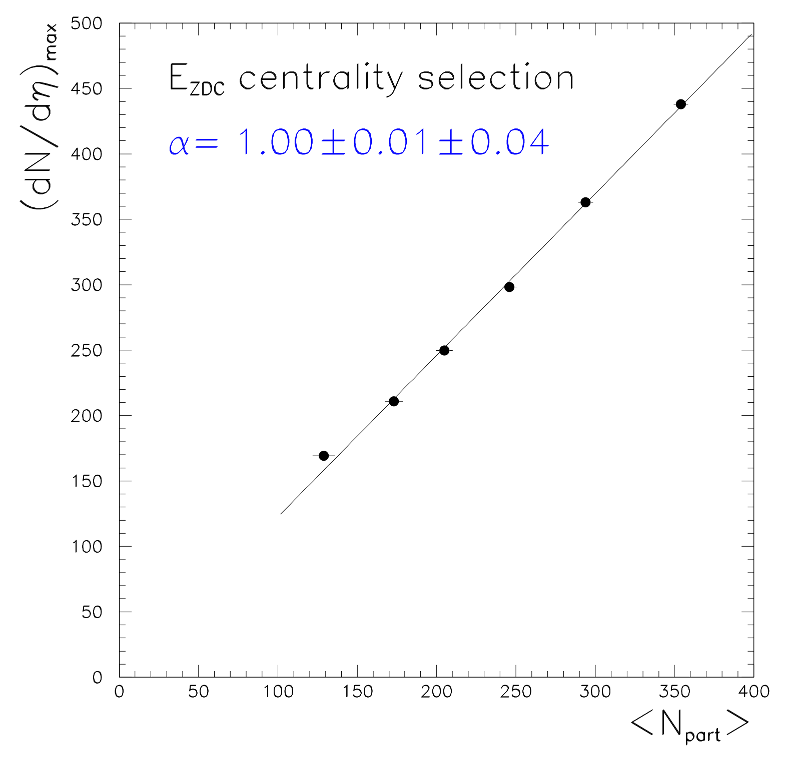
Dla energii 158 GeV/nukleon bardzo dobra zgodność z NA49 i dobra z NA57

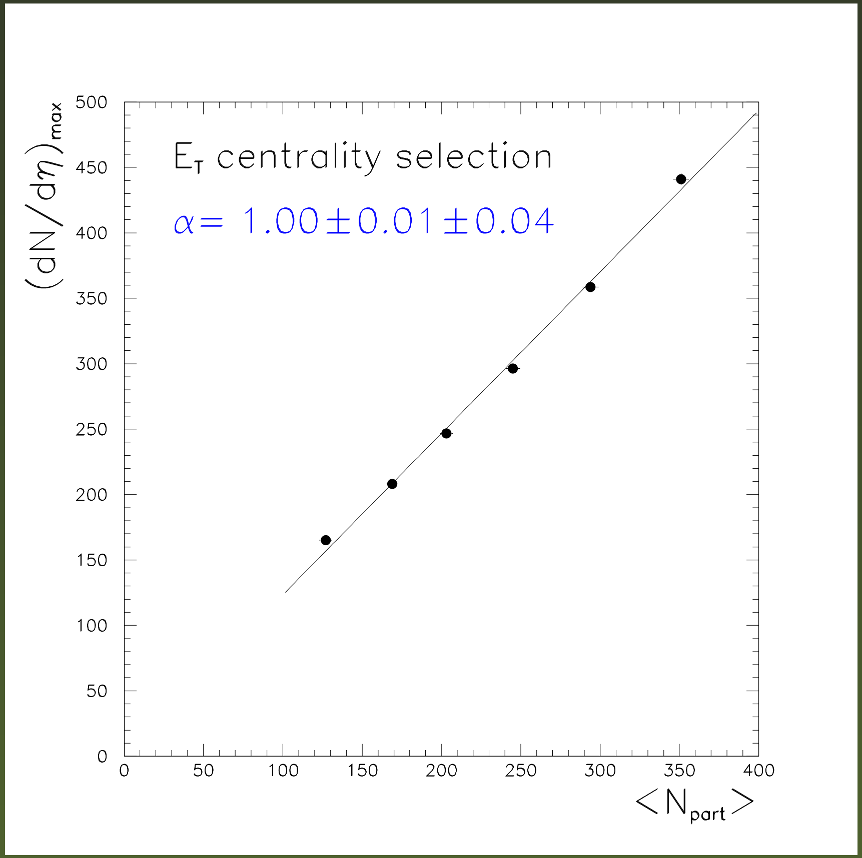
Dla energii 40 GeV/nukleon duże rozbieżności



$dN_{ch}/d\eta\,|_{max}$ vs N_{part} dla 158 GeV/nukleon

$$\left(\frac{dN_{ch}}{d\eta}\right)_{max} \propto N_{part}^{\alpha}$$

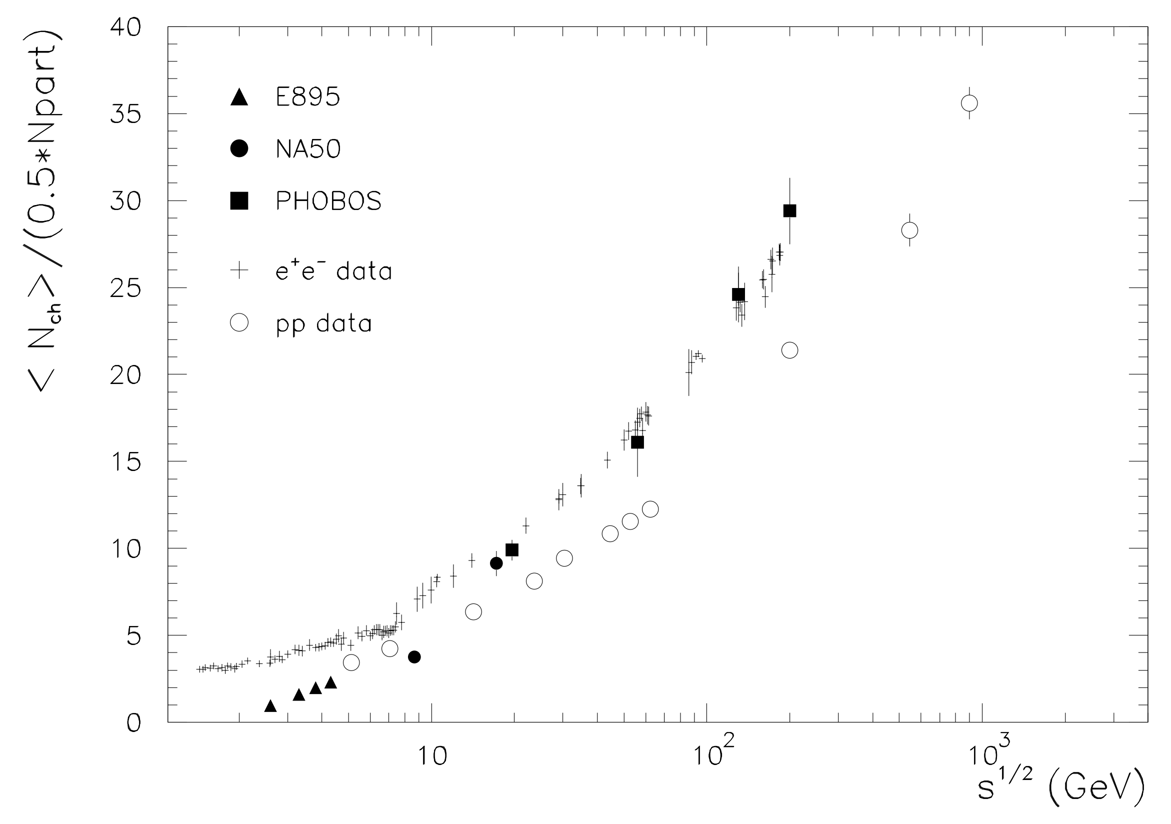




$dN_{ch}/d\eta\,|_{max}$ skaluje sie liniowo z N_{part}!

$\left(\frac{N_{ch}}{0.5\cdot<N_{part}>}\right)$ vs $\sqrt{s}$ dla różnych systemów

Z rosnącym $\sqrt{s}$ $\left(\frac{N_{ch}}{0.5\cdot<N_{part}>}\right)$ dla ciężkich jonów skaluje się podobnie jak w oddziaływaniach e^+e^-



Produkcja J/ψ w zderzeniach Pb-Pb przy energii 158 GeV/nukleon

- J/ψ vs centralność oddziaływania

B. Alessandro, ..., M. Idzik et al. (NA50 Collaboration), *A new measurement of J/PSI suppression in Pb-Pb collisions at 158 GeV per nucleon*, Eur. Phys. J. **C 39** (2005) 335.

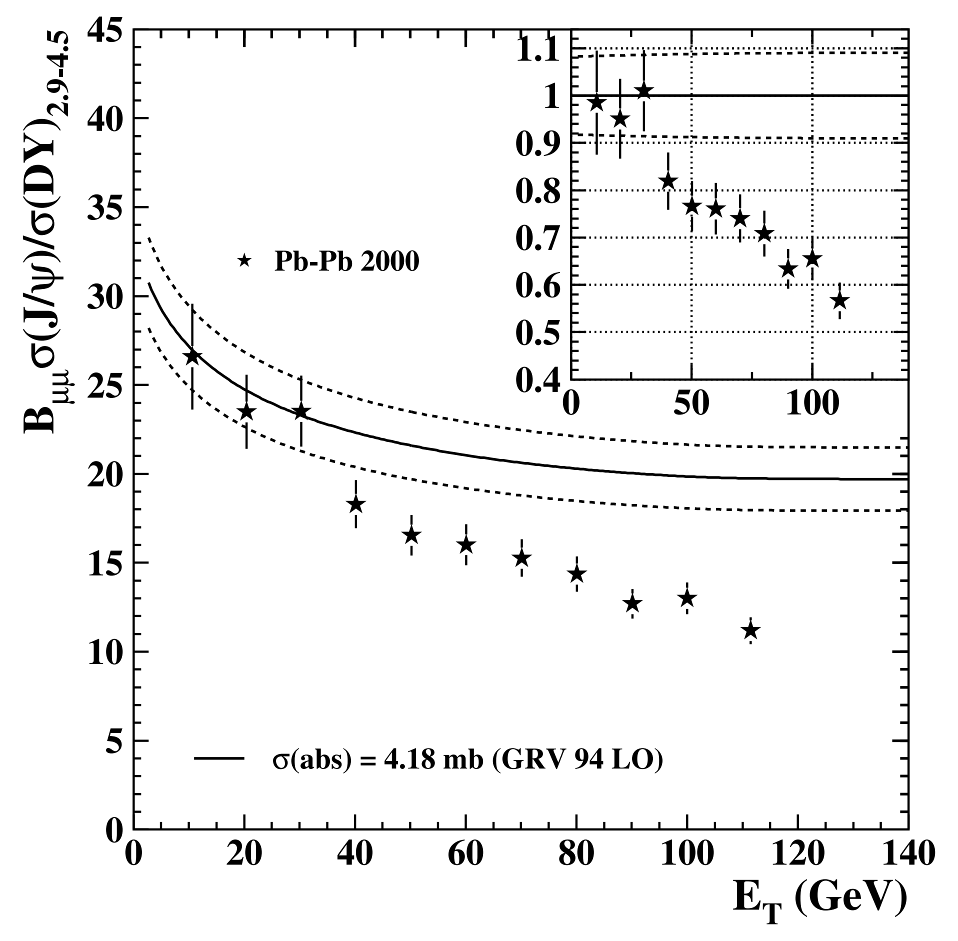
M. Idzik for the NA50 Collaboration, *Pseudorapidity distributions of charged particles at super proton synchrotron energies from the NA50 experiment*, 29th Int. Symposium on Multiparticle Dynamics, World Scientific, Singapore 2000.

M.C. Abreu, ..., M. Idzik et al. (NA50 Collaboration), *Anomalous J/Psi suppression in Pb-Pb interactions at 158 GeV/c per nucleon*, Phys. Lett. **B 410** (1997) 337.

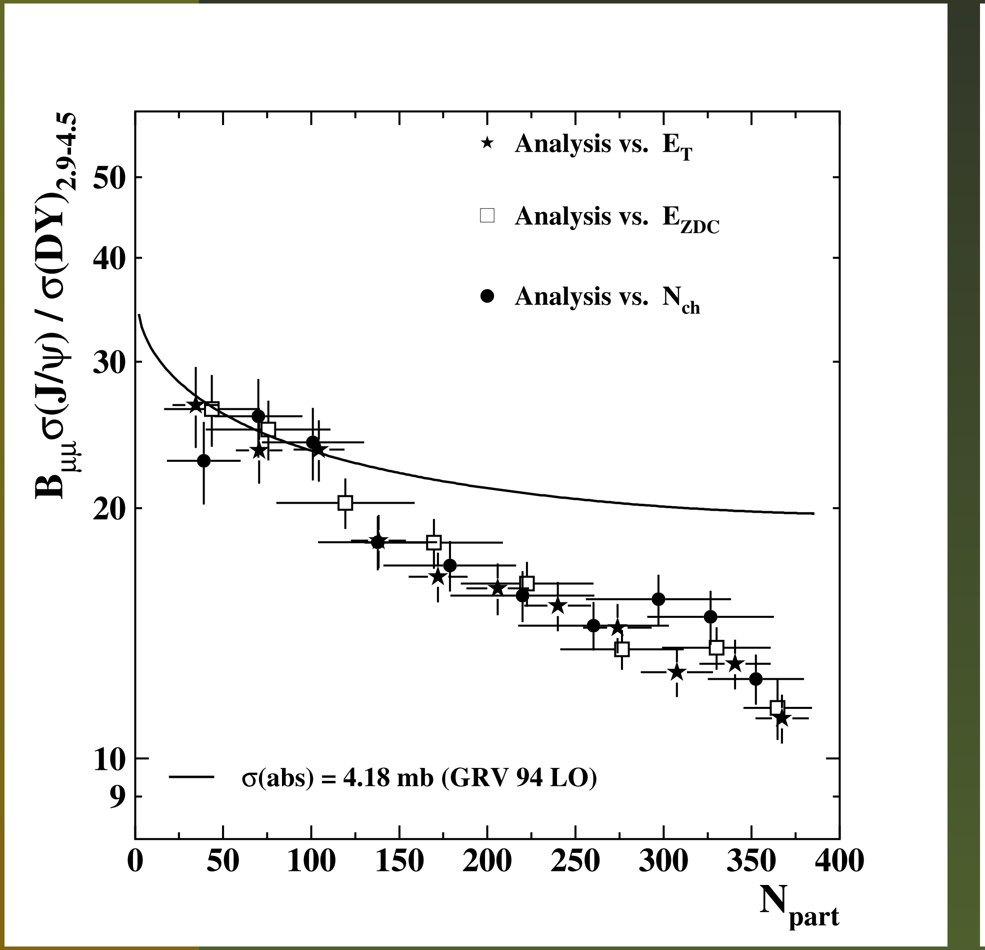
M.C. Abreu, ..., M. Idzik et al. (NA50 Collaboration), *The dependence of the anomalous J/psi suppression on the number of participant nucleons*, Phys. Lett. **B 521** (2001) 195.

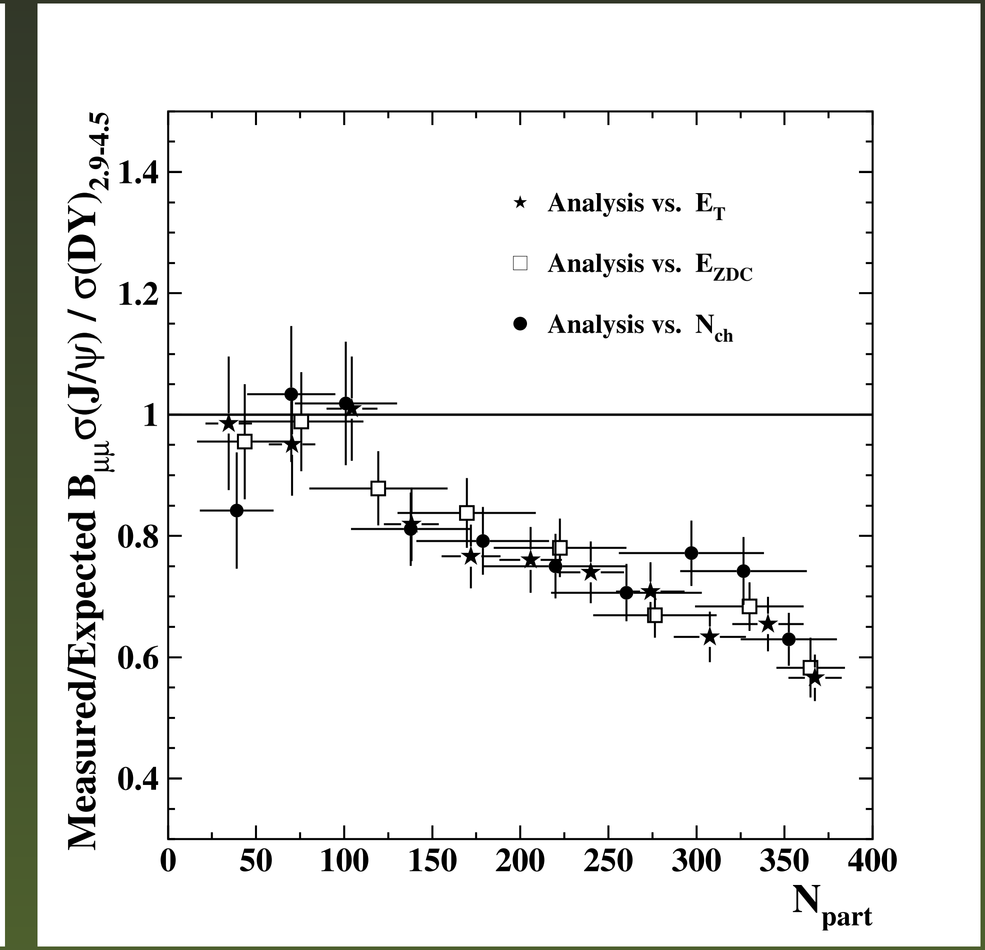
J/ψ vs E_T

Powyżej E_T=35 GeV przekrój czynny na J/ψ wyraźnie spada poniżej wartości oczekiwanych dla normalnej materii jądrowej



J/ψ vs centralność oddziaływania





Czy tłumienie J/ψ jest przejawem istnienia QGP ?

Konkluzje

- Zbudowano Detektor Krotności przy bardzo trudnych wymaganiach dotyczących wysokiej częstotliwości próbkowania, wysokiej okupancji cząstek, bardzo silnych obciążeń radiacyjnych
- Detektor funkcjonował i dostarczał dane z oddziaływań Pb-Pb w latach 1996-2000
- Przy pomocy Detektora Krotności zapewniono identyfikację oddziaływań Pb-Pb dla analiz NA50
- Wykonano samodzielne analizy $dN_{ch}/d\eta$, analizy krotności w funkcji centralności zderzeń i energii zderzeń. Zaobserwowano liniowe skalowanie $dN_{ch}/d\eta\,|_{max}$ z N_{part}