Detektory dla akceleratora liniowego
ILC (**I**nternational **L**inear **C**ollider)

(ze szczególnym uwzględnieniem detektora wierzchołka)

Paweł Łużniak

lupawel@mail.desy.de

29 lutego 2008

Plan seminarium

- Akcelerator
- Części składowe detektora
- Projekty detektora
- Symulacje rozdzielczości detektora wierzchołka
- Wpływ geometrii detektora wierzchołka na pomiar częstości rozpadów bozonu Higgsa (SM i MSSM) na ciężkie kwarki
- Wpływ tła (pary e^+e^-) na precyzję pomiaru

Dlaczego akcelerator liniowy?

- Poruszając się po okręgu elektrony tracą energię na promieniowanie synchrotronowe zgodnie ze wzorem:

$$U_{SR}[GeV] = 6\ 10^{-21}\ \gamma^4\ 1/r[km]$$

U_{SR} - starata energii na okrążenie
γ - czynnik relatywistyczny
r - promień alceleratora kolowego

- Dla akceleratora LEP : r = 4.3 km , E_e = 100 GeV , γ_{100GeV} = 2.0 10^5 , U_{SR} = 2 GeV

- Aby uzyskać 500 GeV w układzie środka masy dla akceleratora kołowego : E_e = 250 GeV , γ_{250GeV} = 4.9 10^5.
Nawet zakładając r = 27 km mamy U_{SR} = 13 GeV

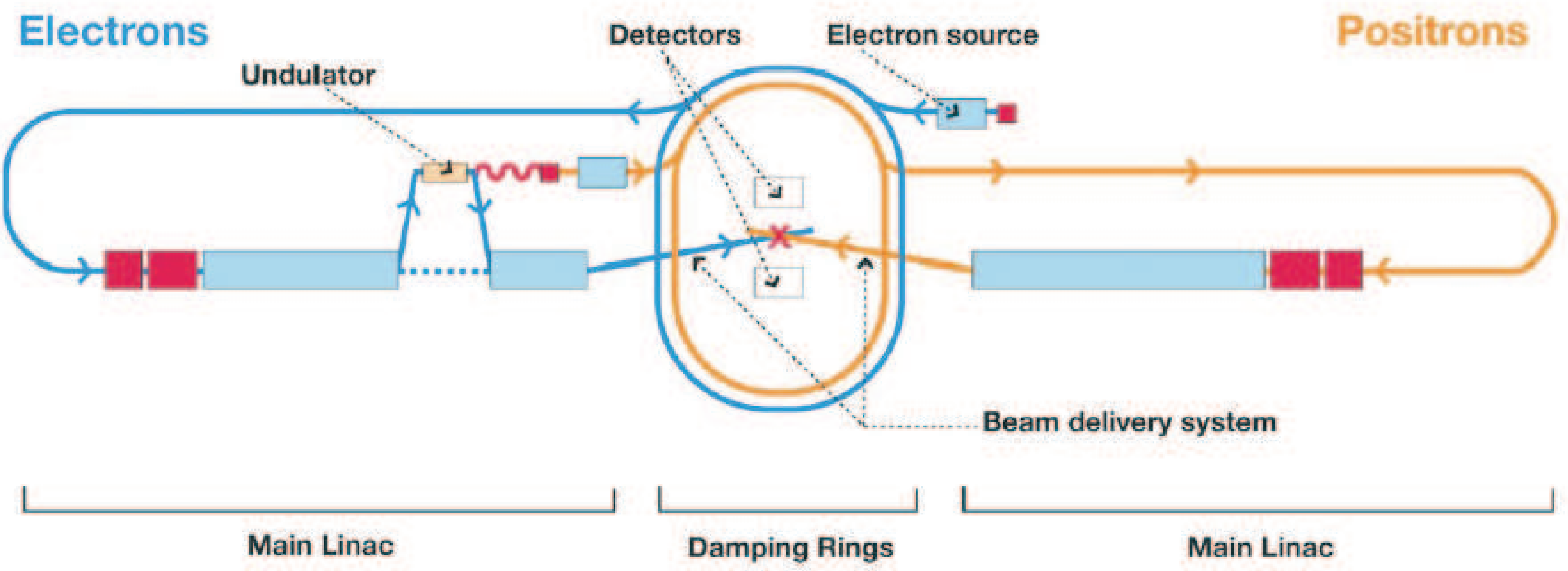
- Aby uzyskać planowaną świetlność $\approx 10^{34}/cm^2/s$ potrzebne są wiązki o prądach rzędu 1A wiec będą one tracić $13\,GeV \times 2A = 26GW$. Oznacza to że akcelerator będzie pobierał około $45GW$ - więcej niż stan Kalifornia. Zarówno rozmiar l=170km jak i zużycie energii byłoby więc ogromne.

Dlaczego akcelerator liniowy?

- W przypadku akceleratora liniowego nie ma strat na promieniowanie synchrotronowe ale za to przyspieszonych cząstek można użyć tylko raz.
- Okazuje się jednak że przy tak dużych energiach i tak się to opłaca. Aby uzyskać dużą świetlność będzie wytwarzana wiązka o bardzo małym przekroju poprzecznym i specyficznym profilu. W przypadku akceleratora liniowego jest to o wiele prostsze niz w przypadku akceleratora kołowego. Aby zwiększyć sprawność akcelerator ma pracować w trybie impulsowym.
- Przykładowe parametry akceleratora liniowego:

Długość akceleratora	33 km	Ilość pulsów wiązki na sekundę	5
Długość pulsu wiązki	969 μs	Ilość paczek w pulsie	2625
Ilość elektronów w paczce	$2\ 10^{10}$	Rozmiary poprzeczne wiązki w IP	639 nm $\times$ 5 nm
Długość paczki w IP	0.3 mm	Świetlność	$2\ 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$
Moc potrzebna do przyspieszania	22.6 MW	Moc zużywana przez akelerator	97 MW

Schemat akceleratora



Parametry projektowanych detektorów

Wymagane dla ILC:

Detektor wierzchołka: $\delta IP_{r\phi} \approx \delta IP_{rz} \approx 5 \otimes 10/(p\, sin^{3/2}\theta)$

Detektor śladowy: $\sigma(1/p_t) = 5 \times 10^{-5}(GeV^{-1})$

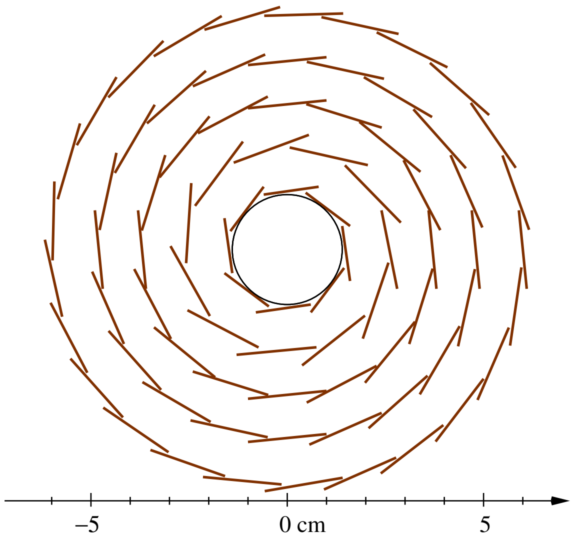
Kalorymetr: $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{30\%}{\sqrt{E}}$

Cały czas prowadzone są badania mające na celu rozwój niezbędnych technologii.

Detektor wierzchołka

Aby osiągnąć $\delta IP_{r\phi} \approx \delta IP_{rz} \approx 5 \otimes 10/(p\ sin^{3/2}\theta)$ detektor wierzchołka musi być zbudowany z 5 - 6 warstw krzemowych detektorów pikslowych. Grubość pojedynczej warstwy nie może przekraczać 0.1 % X_0.

Dostępne technologie:



- CPCCD (**C**olumn **P**arallel **CCD**),
- FPCCD (**F**ine **P**ixel **CCD**),
- SCCCD (**S**hort **C**olumn **CCD**),
- ISIS (**I**n-Situ **S**torage **I**mage **S**ensors),
- Chronopixel,SoI,3D.
- MAPS (**M**onolitic **A**ctive **P**ixel **S**ensor): FAPS, CAP,
- DEPFET (**De**pleted **P**- Channel **F**ield **E**ffect **T**ransistor),

Detektor śladowy

Istnieją dwie propozycje:

- TPC (**T**ime **P**rojection **C**hamber) - duża komora gazowa pozwalająca na wykonanie do 200 pomiarów wzdłuż toru cząstki. Ślad rejestrowany jest w trzech wymiarach z dokładnością rzędu 100 μm. Dodatkowe warstwy krzemowych detektorów paskowych otaczających TPC poprawiają precyzję pomiaru pędu do wymaganego $\sigma(1/p_t) = 5 \times 10^{-5}(GeV^{-1})$.
- Detektor śladowy składający sie z pięciu warstw krzemowych detektorów paskowych. Niewielka ilość pomiarów dostępnych wzdłuż toru cząstki rekompensowana jest doskonałą precyzją pomiaru w każdej warstwie. Mogą wystąpić problemy z rekonstrukcją torów cząstek w skomplikowanych przypadkach.

Kalorymetr

Istnieją dwa podejścia do pomiaru energii strumieni cząstek:

- PFA (**P**article **F**low **A**lgorithm) - metoda polegająca na rekonstrukcji wszystkich cząstek, zarówno naładowanych jak i neutralnych. Energia cząstek naładowanych mierzona jest w detektorze śladowym, energia cząstek neutralnych wyznaczana jest na podstawie depozytów w kalorymetrze. Wymagane są kalorymetry o dużej granularności i promieniu aby rozdzielić cząstki naładowane i neutralne.
- Kalorymetr kompensujący - odpowiedź detektora jest zależna tylko od energii wpadającej cząstki a nie od jej typu (elektron, foton, hadron). Wymaga specjalnej konstrukcji. W przypadku gdy różne kanały odczytu są czułe na różne składowe kaskady, kompensację można przeprowadzić po pomiarze (kompensacja programowa).

Solenoid i detektor mionowy

Pole magnetyczne w detektorze wytwarzane będzie za pomocą solenoidu nadprzewodzącego. Solenoid będzie otaczał zarówno detektor śladowy jak i kalorymetr. Pole magnetyczne będzie zamykane wewnątrz detektora za pomocą stalowego jarzma o grubości rzędu 2m. W szczelinach wewnątrz jarzma umieszczone będą detektory służące do identyfikacji mionów. Ze względu na obecność pola magnetycznego w jarzmie możliwy będzie pomiar pędu mionów z dokładnością rzędu 10 %.

W jednym z projektów detektora zrezygnowano z jarzma detektora i zastąpiono je solenoidem nadprzewodzącym wytwarzającym pole magnetyczne o przeciwnym zwrocie i dodatkowymi uzwojeniami na końcach detektora zamykającymi pole magnetyczne. Pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym solenoidem umieszczone będą gazowe komory dryfowe (ang. drift tubes) służące jako detektor mionowy. Pozwolą one na pomiar pędu mionów z dokładnością $\Delta p_\mu \,/\, p_\mu^2 \approx 10^{-4}$ GeV^{-1}.

Projekt LDC (Large Detector Concept)

Detektor wierzchołka: 5 cylindrycznych warstw. Rozmiar piksli $20 \times 20\ \mu m^2$.

Detektor śladowy: TPC o promieniu 30 - 150 cm.

Pomiar energii strumieni cząstek oparty o PFA.

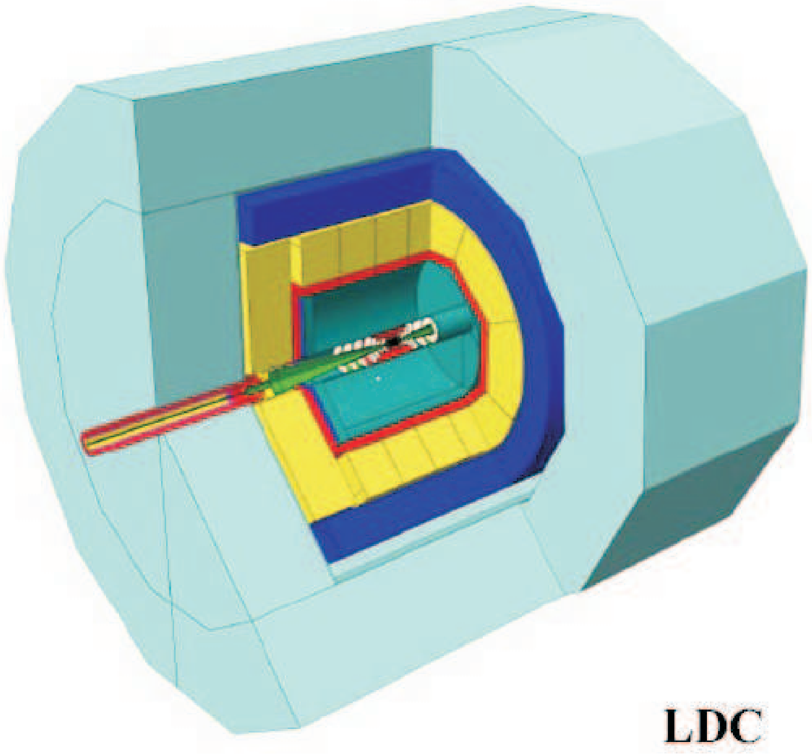
Kalorymetr elektromagnetyczny:

- wolfram(absorber),
- krzemowe detektory pikslowe(część aktywna),
- granularność: 5.5×5.5 mm^2

Kalorymetr hadronowy:

- stal, brąz lub wolfram(absorber),
- scyntylator(część aktywna),
- granularność: 1×1 cm^2 lub 3×3 cm^2

Pole magnetyczne 4 T.



Projekt GLD

Detektor wierzchołka: 6 cylindrycznych warstw. Rozmiar piksli $5 \times 5\ \mu\mathrm{m}^2$.

Detektor śladowy: TPC o promieniu 40 - 200 cm.

Pomiar energii strumieni cząstek oparty o PFA.

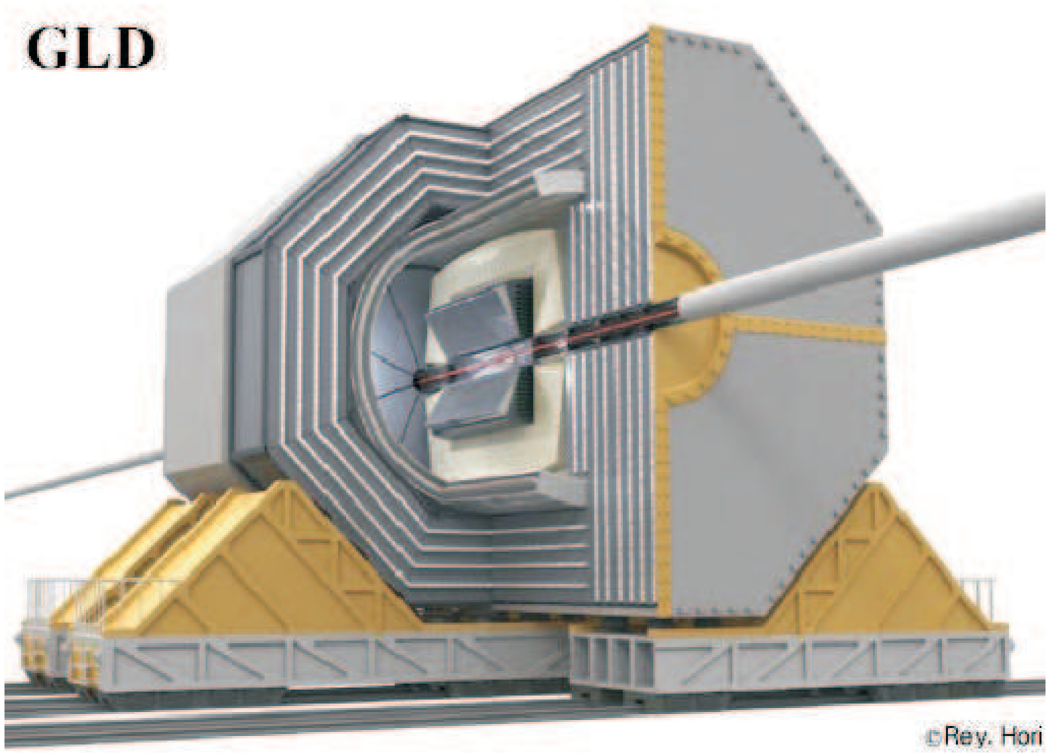
Kalorymetr elektromagnetyczny:

- wolfram(absorber),
- scyntylator(część aktywna),
- granularność (efektywna): 1×1 cm^2

Kalorymetr hadronowy:

- ołów(absorber),
- scyntylator(część aktywna),
- granularność (efektywna): 1×1 cm^2

Pole magnetyczne 3 T.

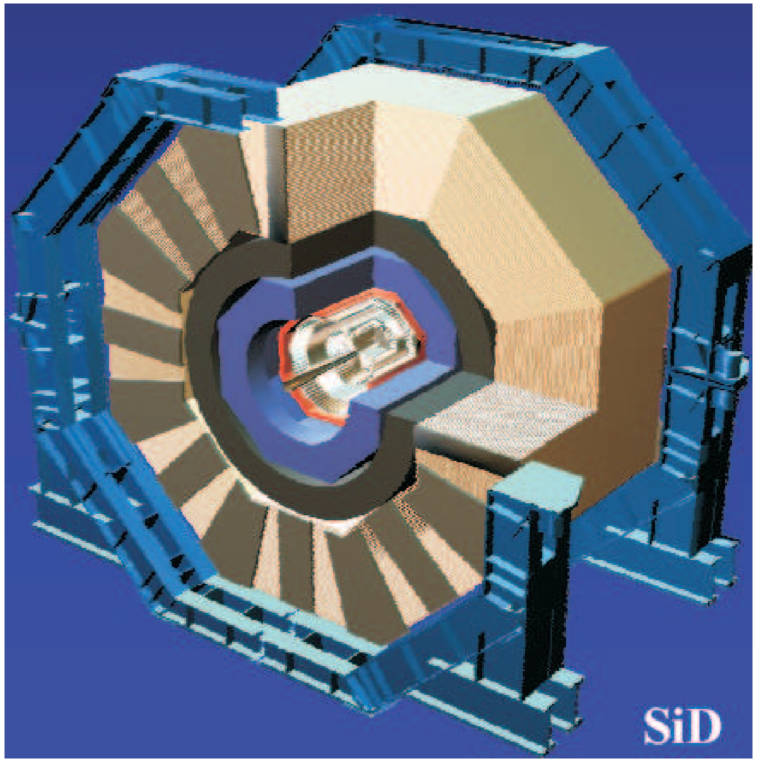


Projekt SiD (Silicon Detector)

Detektor wierzchołka: 5 cylindrycznych warstw. Rozmiar piksli $20 \times 20\ \mu\text{m}^2$.

Detektor śladowy: 5 warstw krzemowych detektorów paskowych.

Pomiar energii strumieni cząstek oparty o PFA.



Kalorymetr elektromagnetyczny:

- wolfram(absorber),
- krzemowe detektory pikslowe(część aktywna),
- granularność: $3.7 \times 3.7\ \text{mm}^2$

Kalorymetr hadronowy:

- stal(absorber),
- RPC,GEM,Micromegas,scyntylatory(część aktywna),
- granularność: $1 \times 1\ \text{cm}^2$

Pole magnetyczne 5 T.

Projekt 4th (czwarty)

Detektor wierzchołka: 5 cylindrycznych warstw. Rozmiar piksli 20 $\times$ 20 μm^2.

Detektor śladowy: TPC o promieniu 20 - 140 cm.

Pomiar energii strumieni cząstek za pomocą kalorymetru kompensującego.

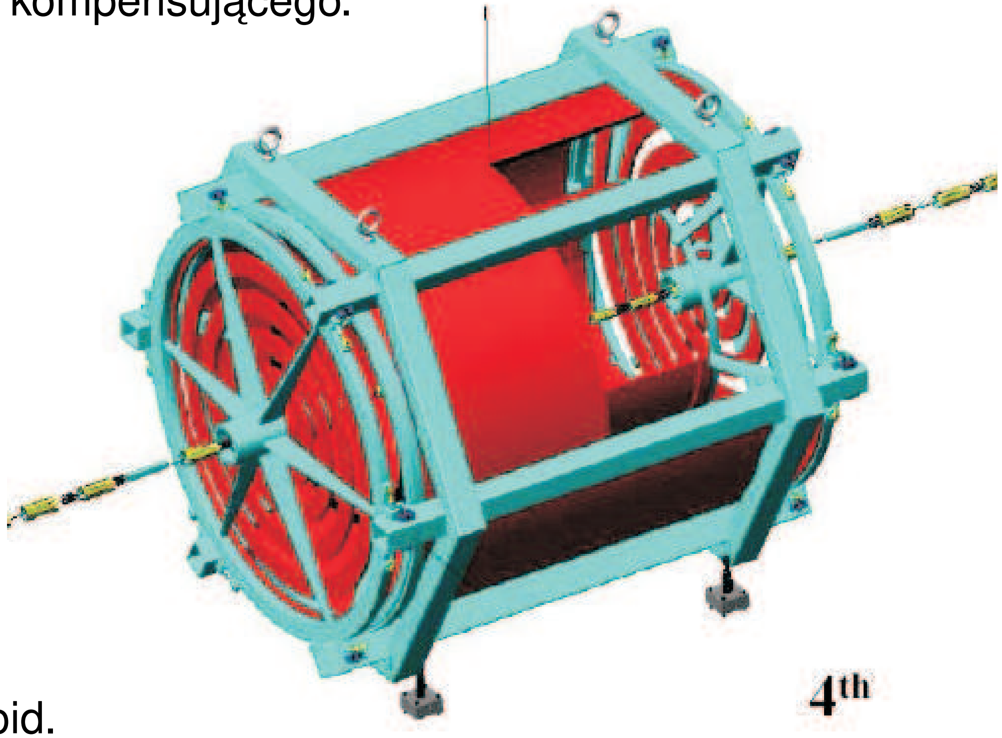
Kalorymetr elektromagnetyczny:

- kryształy(absorber i część aktywna),
- rejestracja światła Czerenkowa i scyntylacyjnego
- granularność: 2 $\times$ 2 cm^2

Kalorymetr hadronowy:

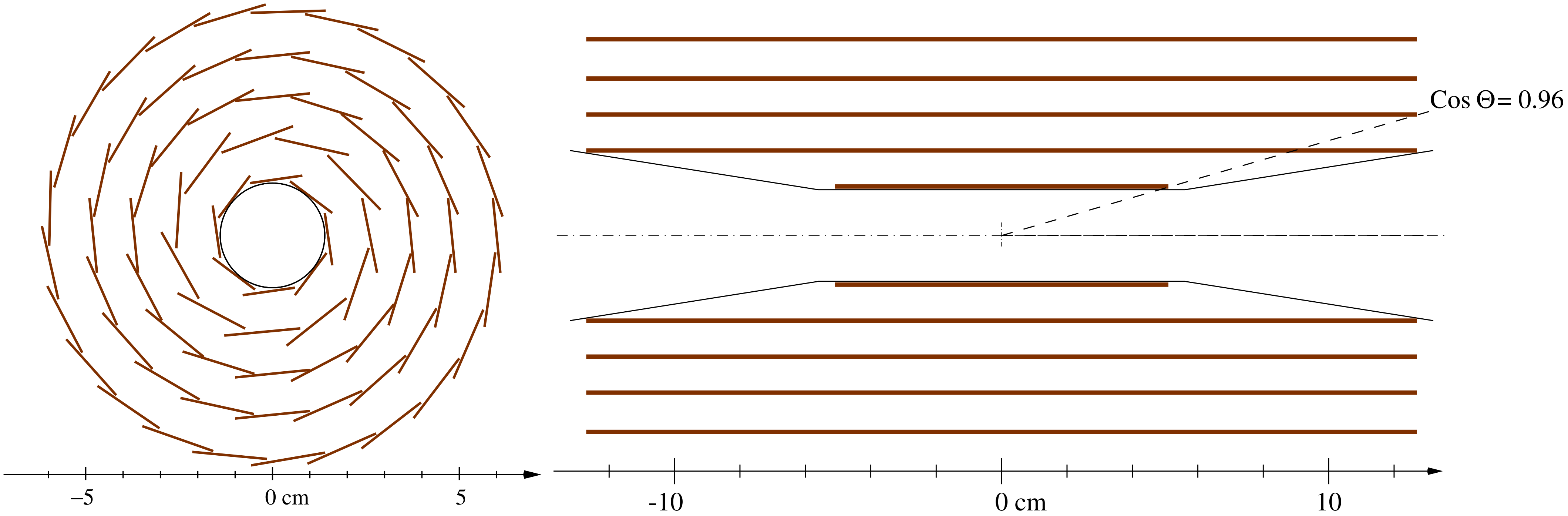
- wolfram(absorber),
- włókna scyntylacyjne i kwarcowe(część aktywna),
- granularność: 5 $\times$ 5 cm^2

Pole magnetyczne 3.5 T, wewnętrzny i zewnętrzny solenoid.



4^{th}

Symulacje detektora wierzchołka



Warstwa	Promień	Liczba segmentów	Szerokość segmentu
1	15 mm	8	19 mm
2	26 mm	11	22 mm
3	37 mm	16	22 mm
4	48 mm	20	22 mm
5	60 mm	25	22 mm

B = 4T

Simulation a **G**rande **V**itesse (M.Berggren)

$\Rightarrow$ Program do szybkiej symulacji stworzony dla eksperymentu DELPHI

$\Rightarrow$ Zaadoptowany dla TESLI

$+$ Jest szybki i elastyczny

$+$ Łatwo można definiować nowe geometrie detektora

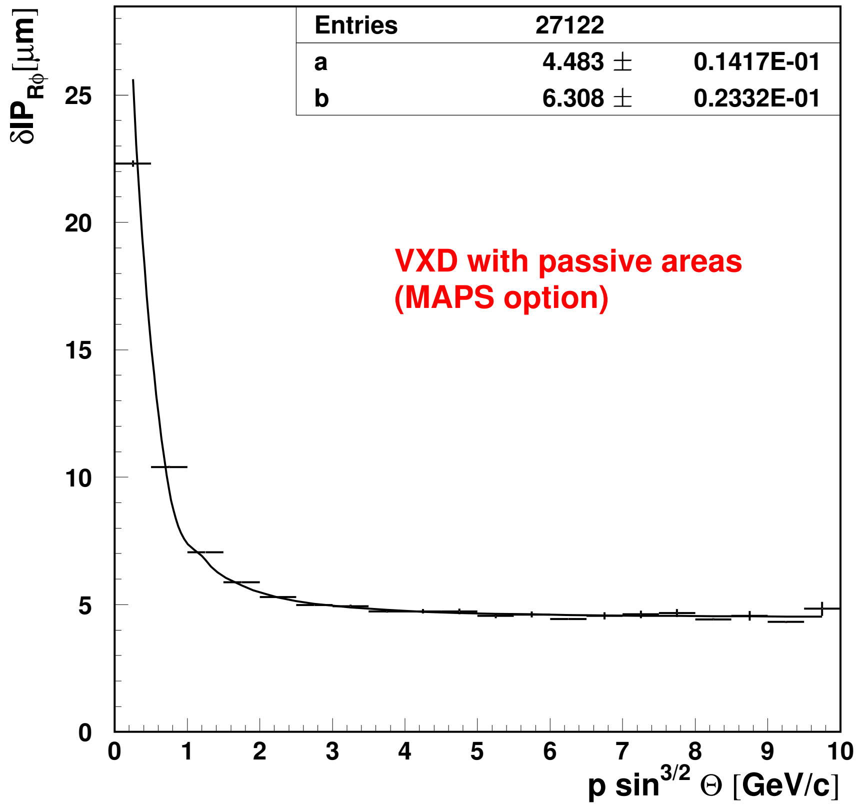
$+$ Pozwala na symulację do 9 geometrii jednocześnie

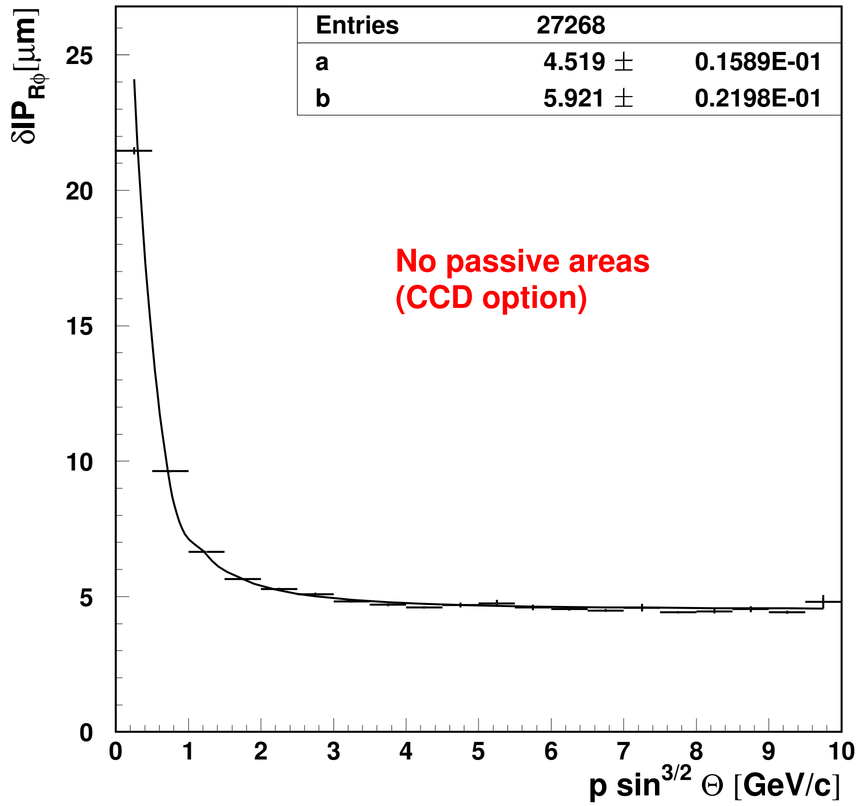
$-$ Pozwala tylko na uproszczony opis geometrii detektora

(płaszczyzny i walce podzielone na powtarzające się obszary w ϕ)

Precyzja pomiaru parametru zderzenia (Rϕ)

$$\delta IP = a \oplus b/(p\, sin^{3/2}\theta) \qquad \left(a \oplus b = \sqrt{a^2 + b^2}\right)$$

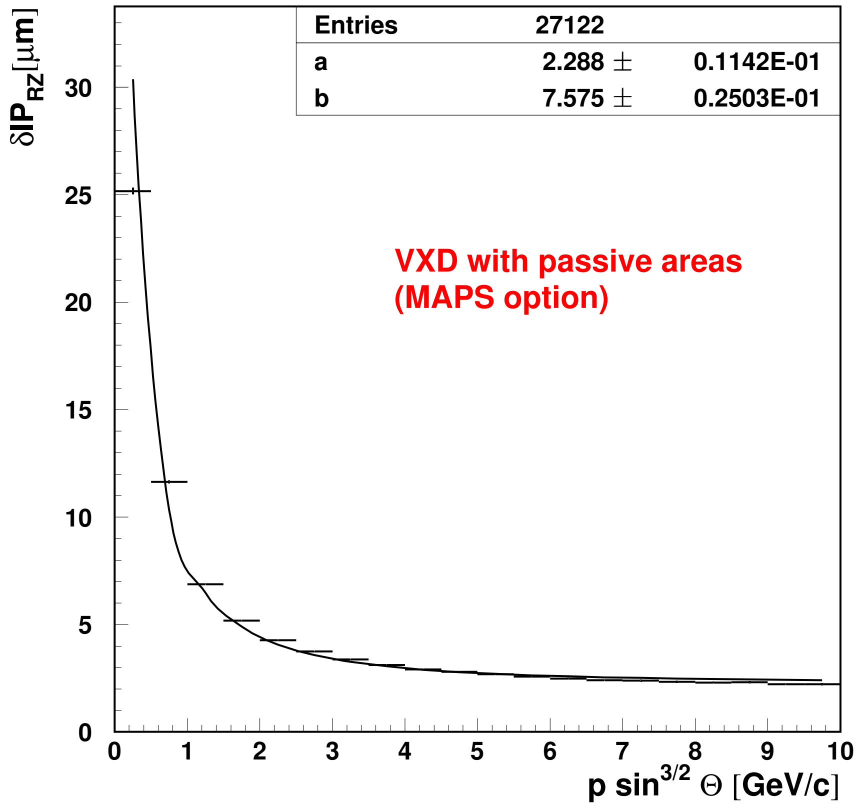


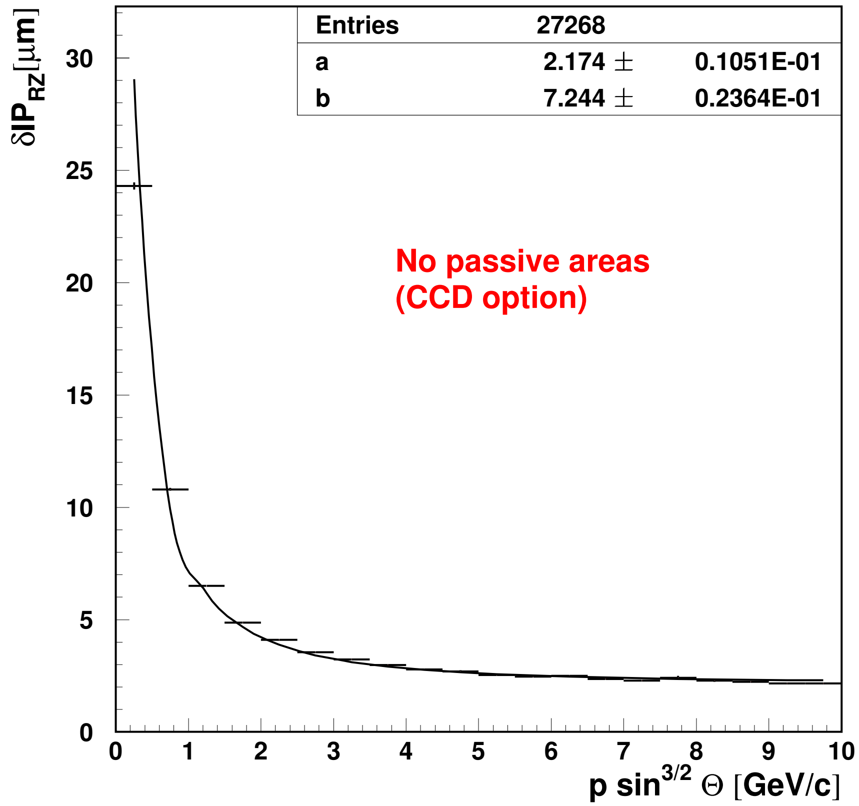


Rozdzielczość przestrzenna - 1.5 μm Grubość warstwy 50 $\mu m \approx 0.05$ % X_o

Precyzja pomiaru parametru zderzenia (RZ)

$$\delta IP = a \oplus b/(p\, sin^{3/2}\theta) \qquad \left(a \oplus b = \sqrt{a^2 + b^2}\right)$$

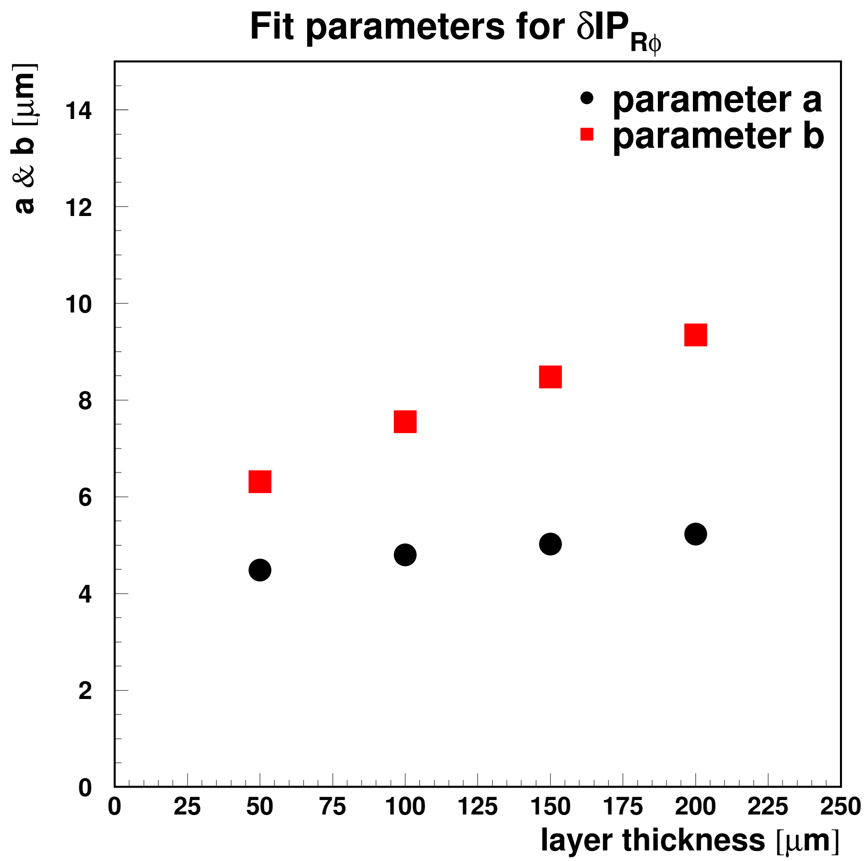


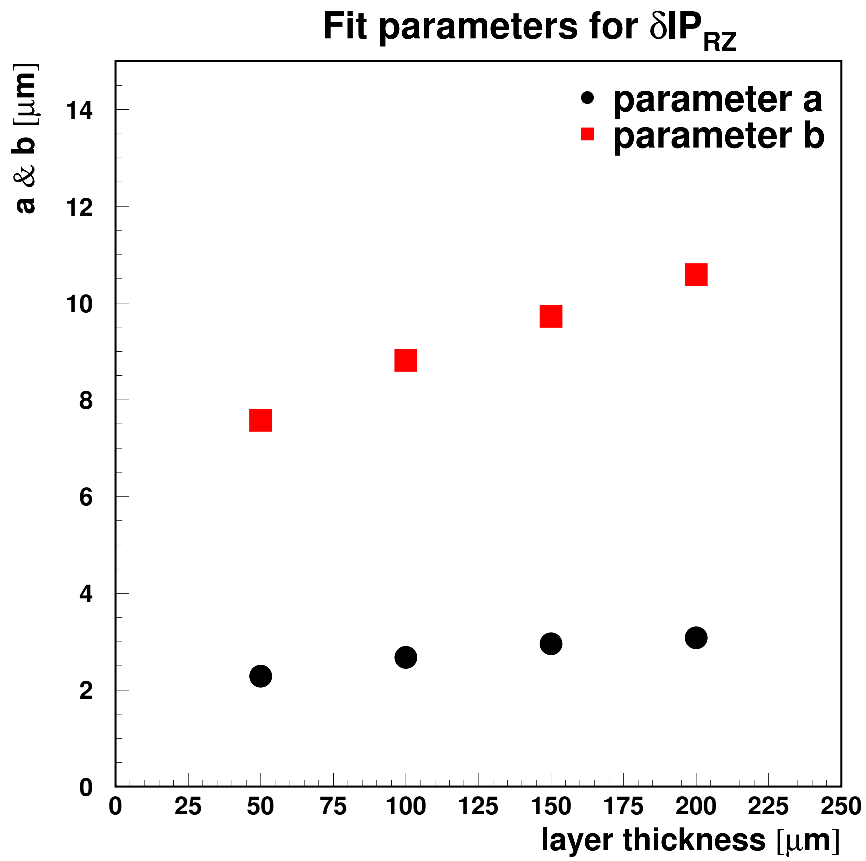


Wyniki symulacji dla detektora CCD $\quad \delta IP_{RZ} \approx \delta IP_{R\phi} = 4.2 \otimes 4.0/(p\, sin^{3/2}\theta)\ \mu m$

Od czego zależy rozdzielczość detektora?

$$\delta IP = a \oplus b/(p\, sin^{3/2}\theta)$$

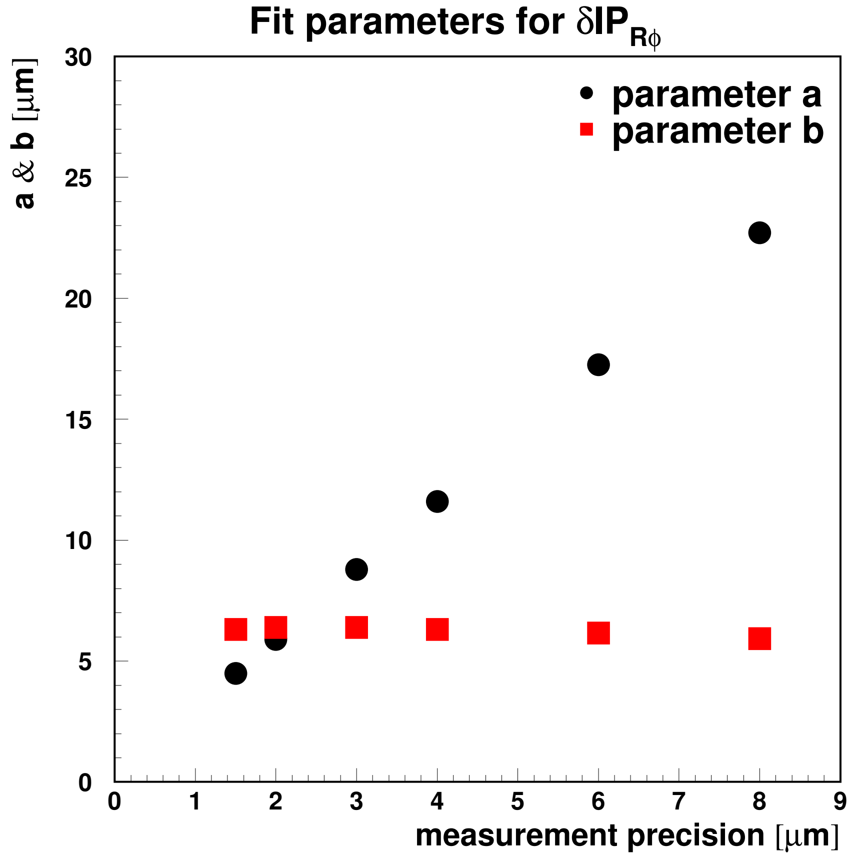


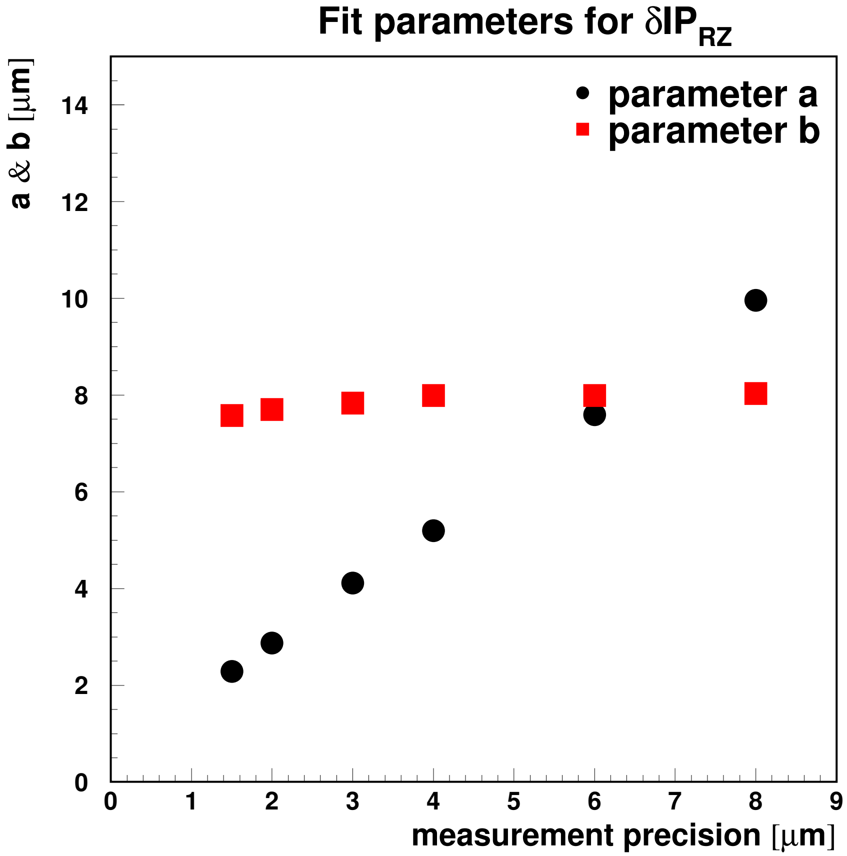


Zależność rozdzielczości detektora od grubości warstw .

Od czego zależy rozdzielczość detektora?

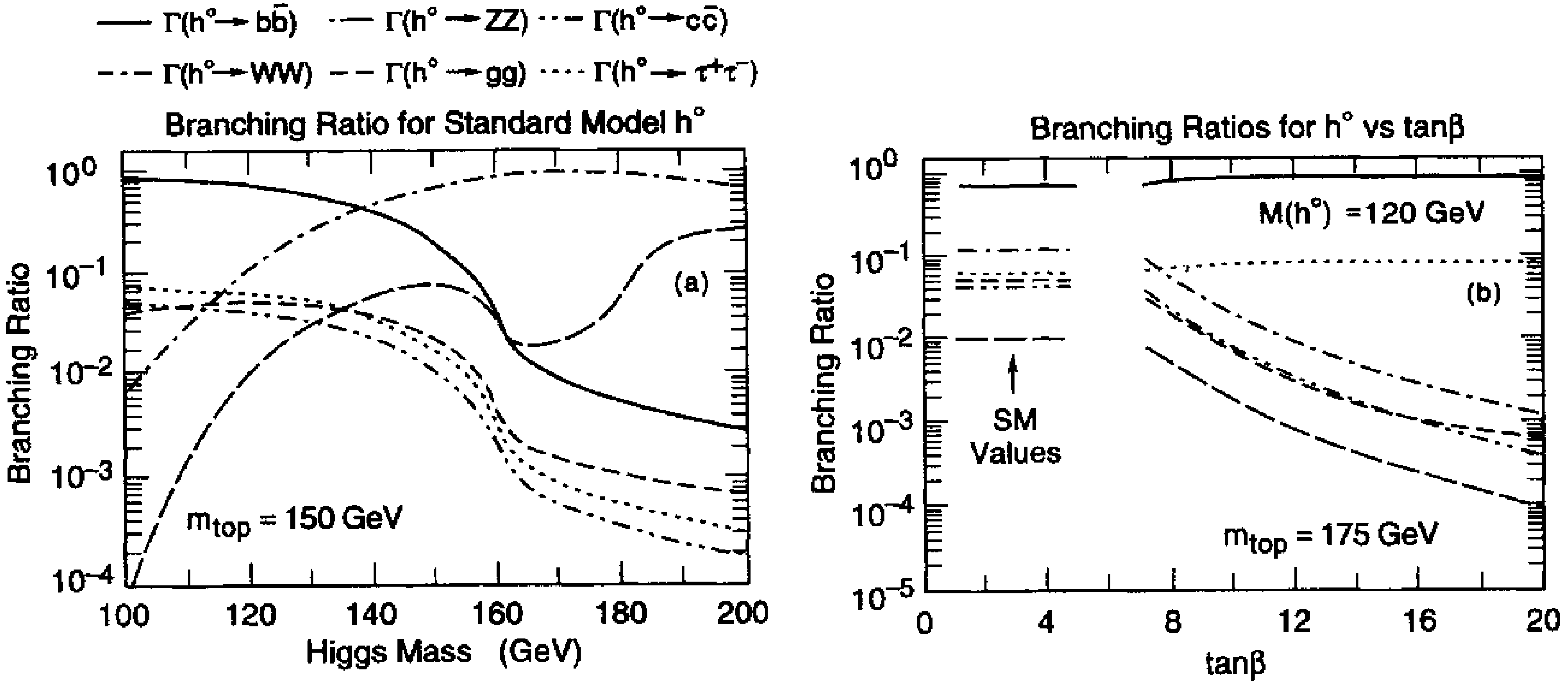
$$\delta IP = a \oplus b/(p\, sin^{3/2}\theta)$$





Zależność rozdzielczości detektora od rozdzielczości przestrzennej pojedynczej warstwy.

Do czego jest potrzebny detektor wierzchołka?



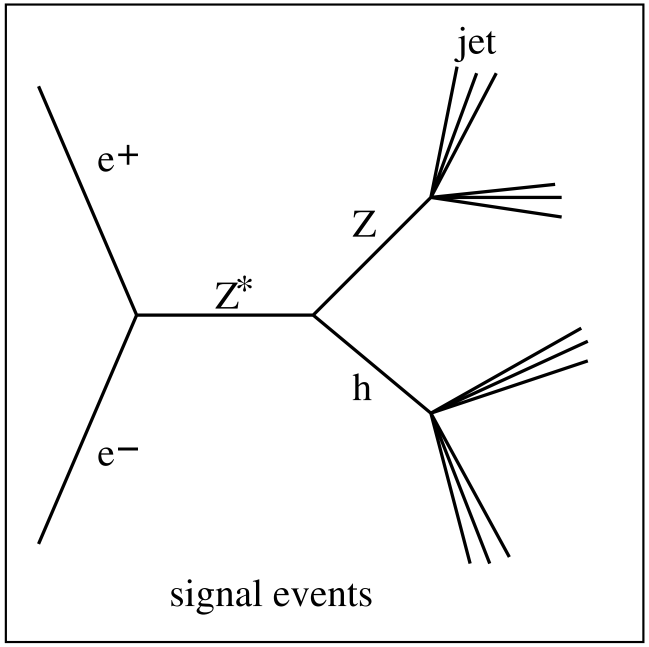
Badając częstość rozpadów bozonu Higgsa na ciężkie kwarki można rozróżnić pomiędzy Modelem Standardowym a Supersymetrią

Symulacje Higgsa SM i MSSM

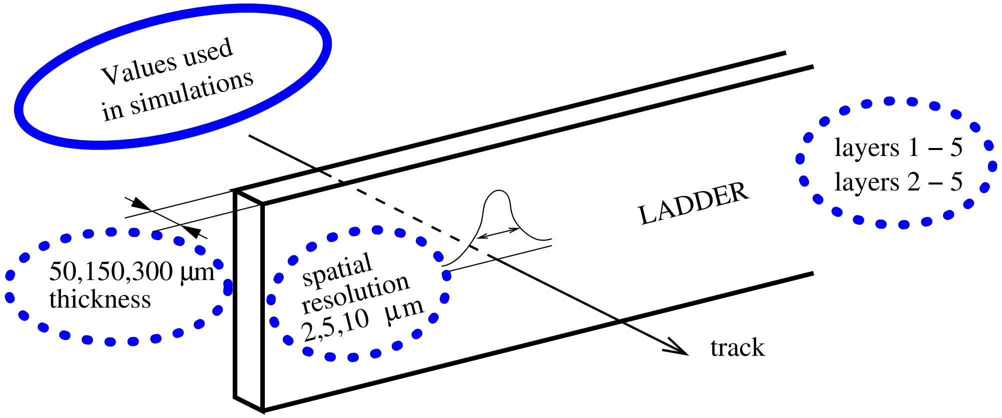
- **Generator przypadków- PYTHIA :**
  Sygnał: $e^+e^- \rightarrow Zh \quad (h \rightarrow c\bar{c},\ h \rightarrow b\bar{b})$

  – **SM:** **M**$_h$ **= 127 GeV**
  – **MSSM:** **M**$_A$ **= 350 GeV,**
  M$_2$ **= 200 GeV,**
  A$_{\tilde{f}}$ **= 2450 GeV,**
  M$_h$ **,** Γ_h**, b. r. z HDECAY**
  M$_h$ **= 127 GeV**

  Tło: $e^+e^- \rightarrow W^+W^-,$
  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q},\ e^+e^- \rightarrow ZZ$**, inne rozpady Higgsa**



- **Energia w środku masy 500: GeV**
- **Zakładane luminosity: 500 fb**$^{-1}$
- **Detektor: geometria jak w TESLA TDR, Różne zestawy parametrów detektora wierzchołka.**



Analiza danych

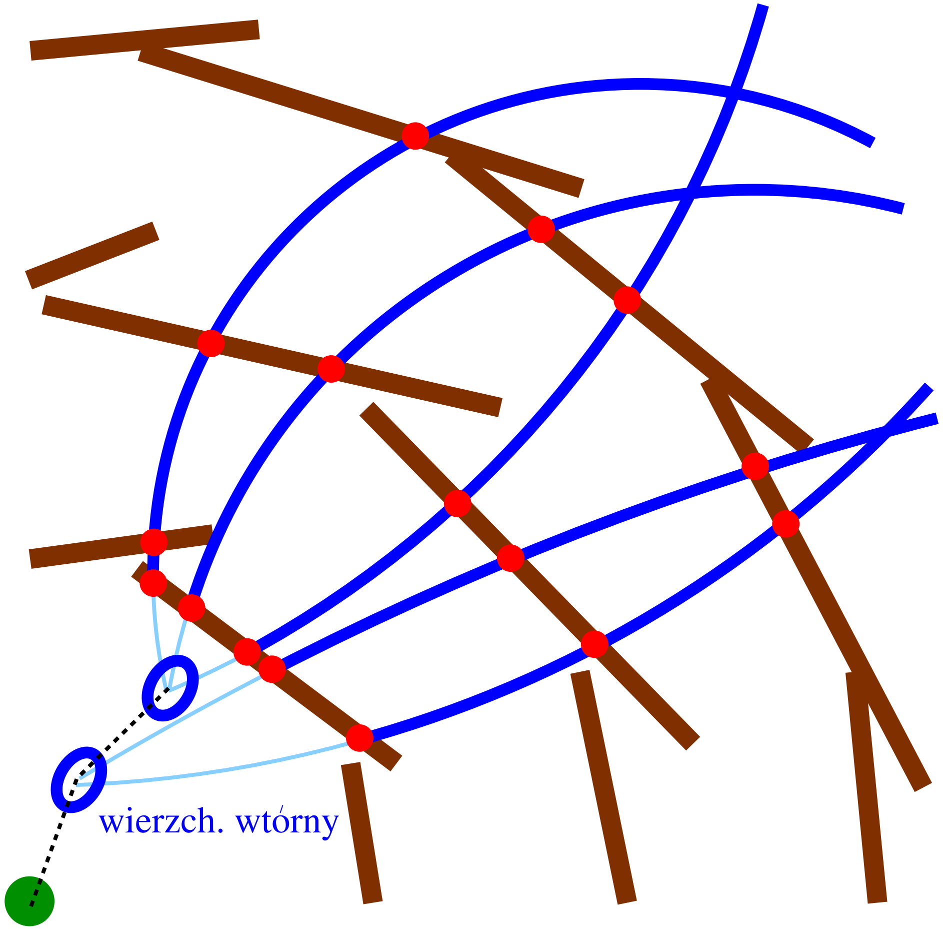
- $E_{vis} > 0.8\ E_{cms}$
- $P_t < 20\ GeV$
- $|P_z| < 30\ GeV$
- $|\cos(\theta_{thrust})| < 0.7$
- **Przypadek jest rozdzielany na 4 dżety (algorytm JADE)**
- **Energie dżetów są przeskalowywane tak aby energia i pęd w przypadku były zachowane (przy ustalonych kierunkach i czteroprędkościach jetów)**
- **Pary dżetów są przypisywane do** Z^o **i** H^o
- **Cięcie na masy niezmiennicze:**

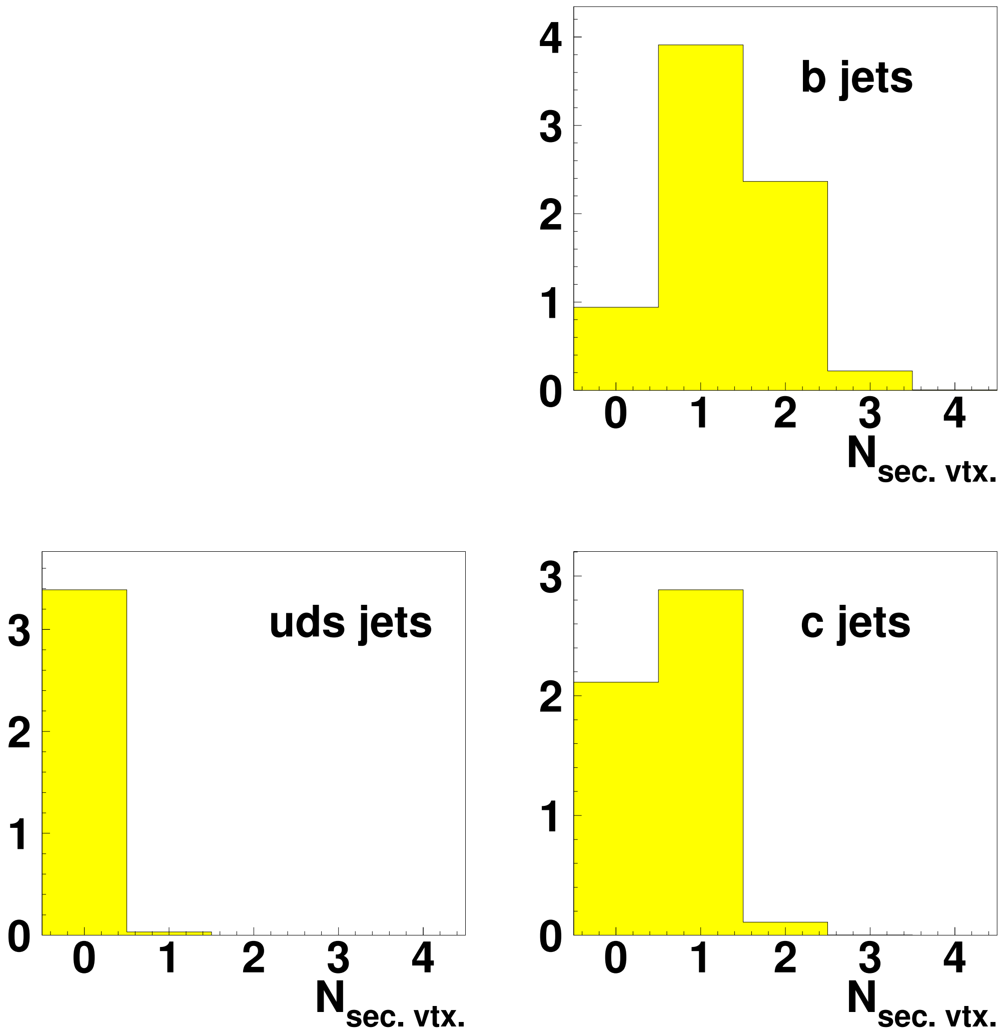
  $\rightarrow |M_{JJ(Z^o)} - M_{Z^o}| < 10\ GeV$

  $\rightarrow |M_{JJ(H^o)} - M_{H^o}| < 10\ GeV$
- **Typ kwarku z którego powstaje dżet jest rozpoznawany za pomocą sieci neuronowej (“Jet tagging”)**

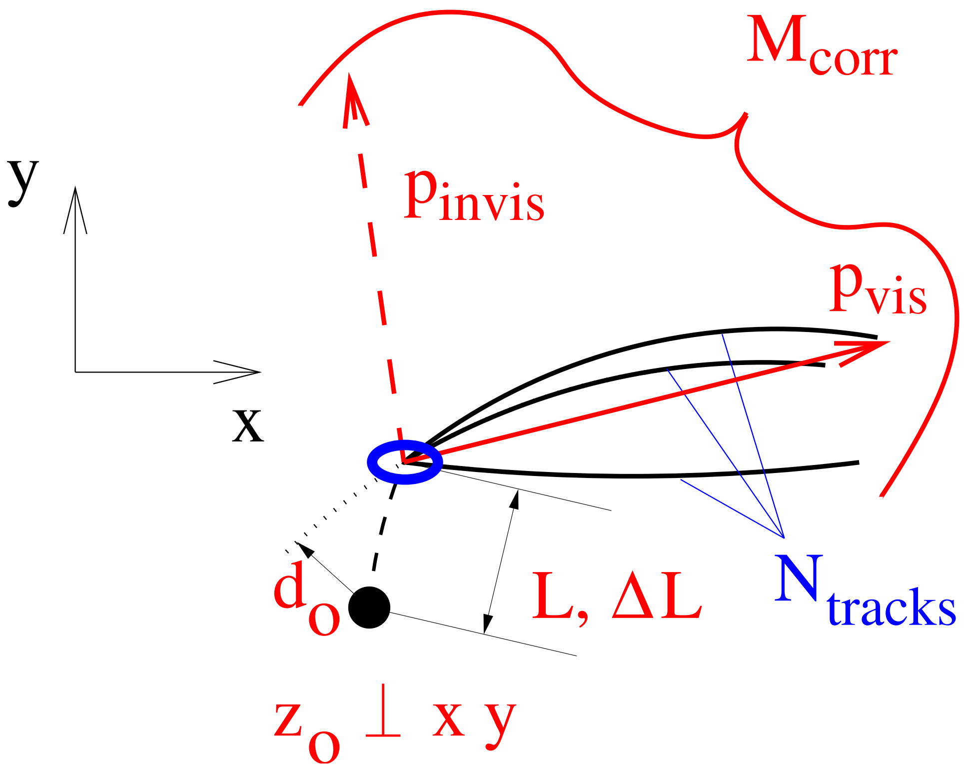
“Jet tagging” - 1

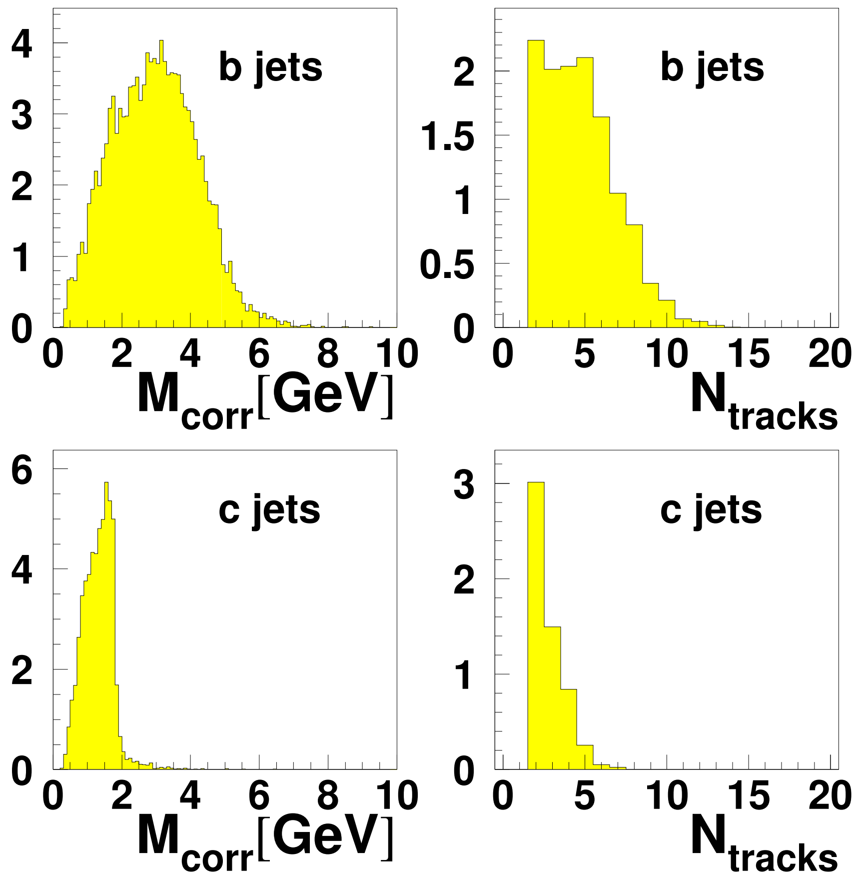
- Dla każdego dżetu wierzchołki wtórne są wyznaczane za pomocą ZVTOP





“Jet tagging” - 2

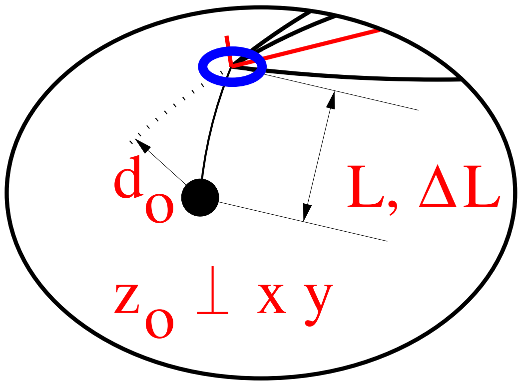


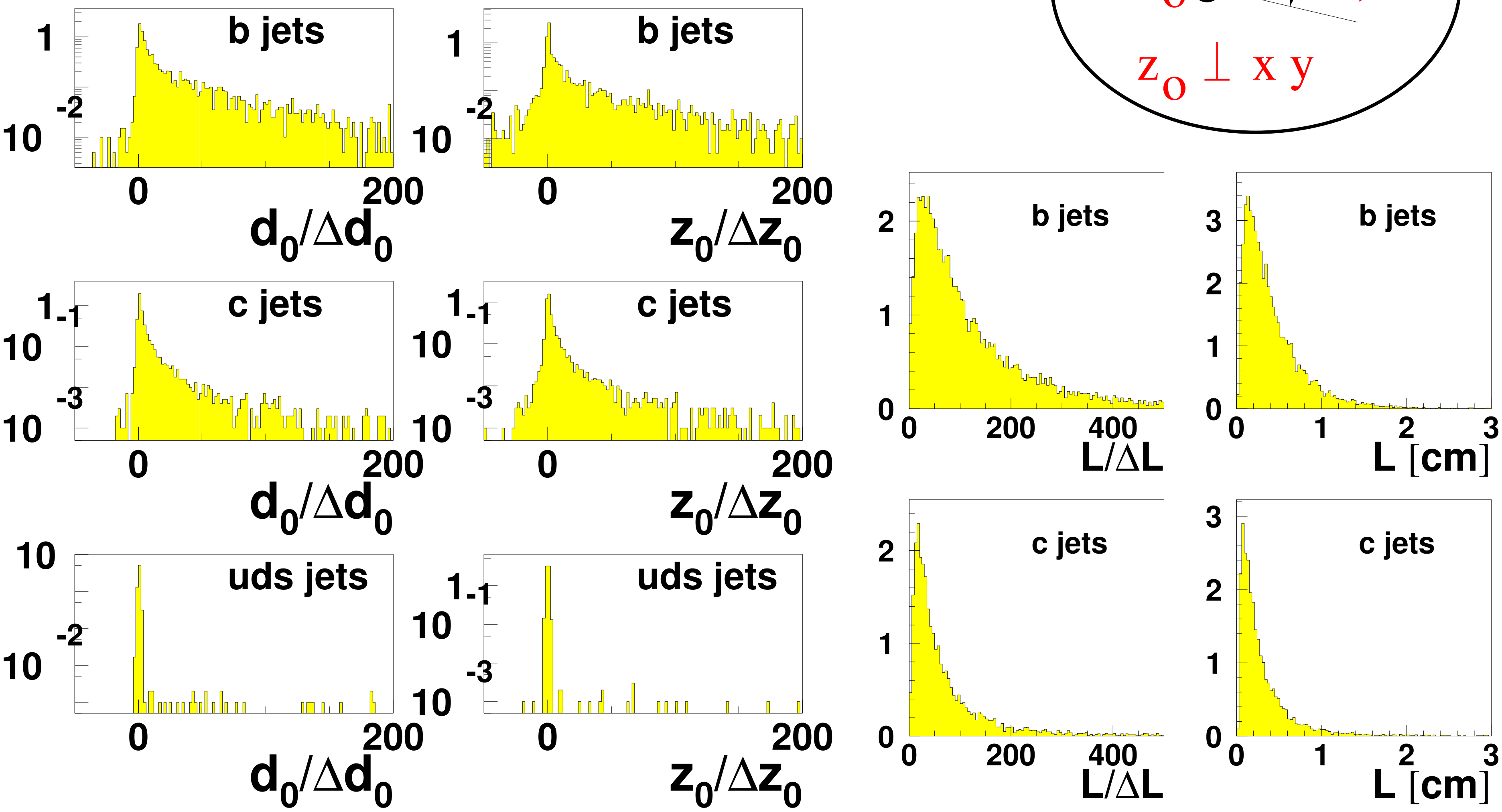


- **Dla każdego dżetu sieć neuronowa (na podstawie powyższych wielkości) zwraca**

  b-tag i c-tag $\in (0, 1)$ **- wielkości mówiące na ile jet jest podobny do dżetu “b” lub “c”**

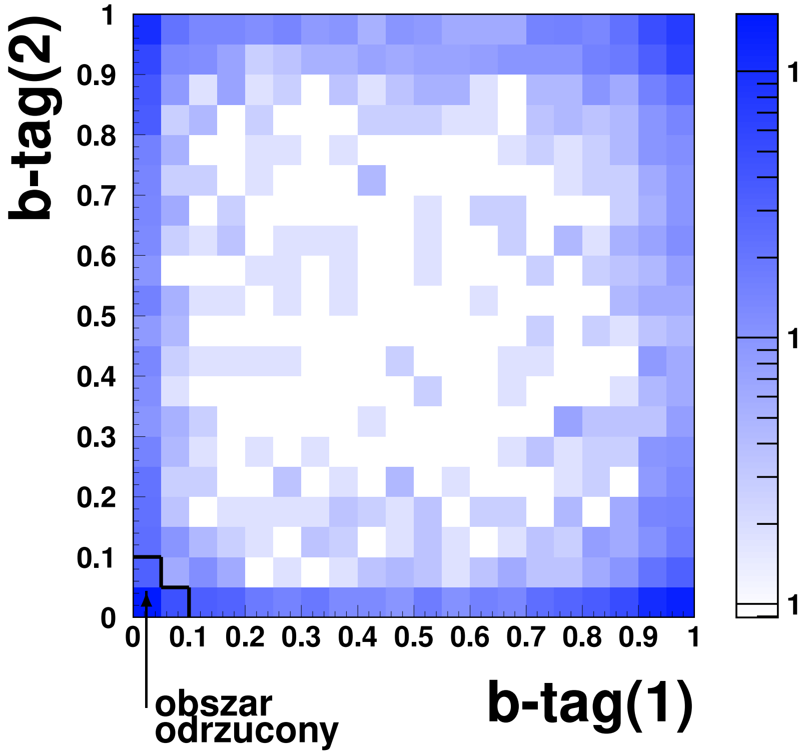
“Jet tagging” - 3





b-tag dla h $\to$ jet(1) jet(2)

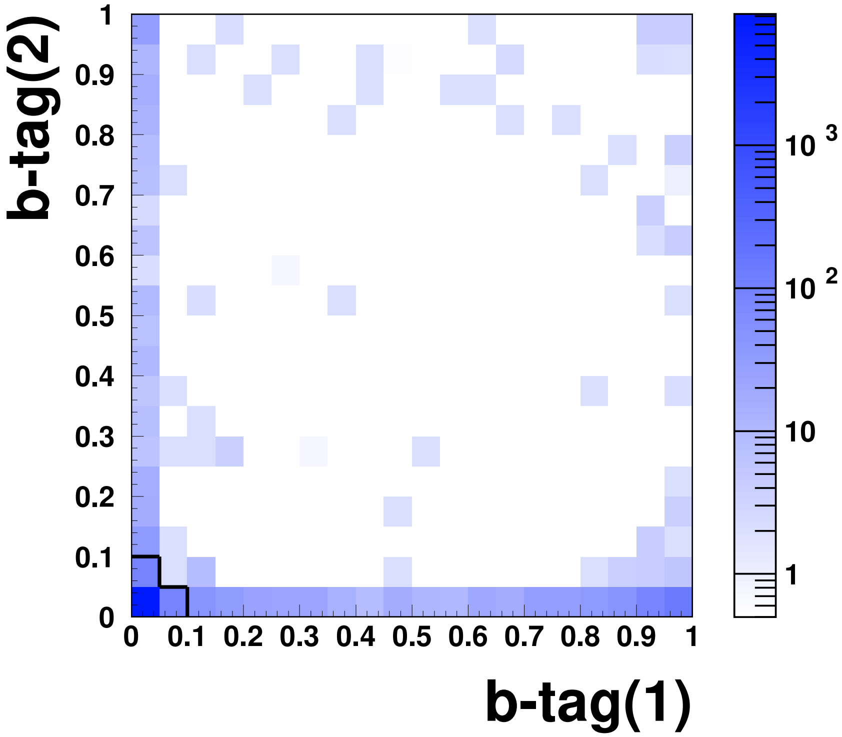
Signal: h$\to$ b$\bar{b}$



E(1) $>$ E(2)

500 fb^{-1}

Background



Cięcia optymalizujące $\Delta\Gamma/\Gamma$

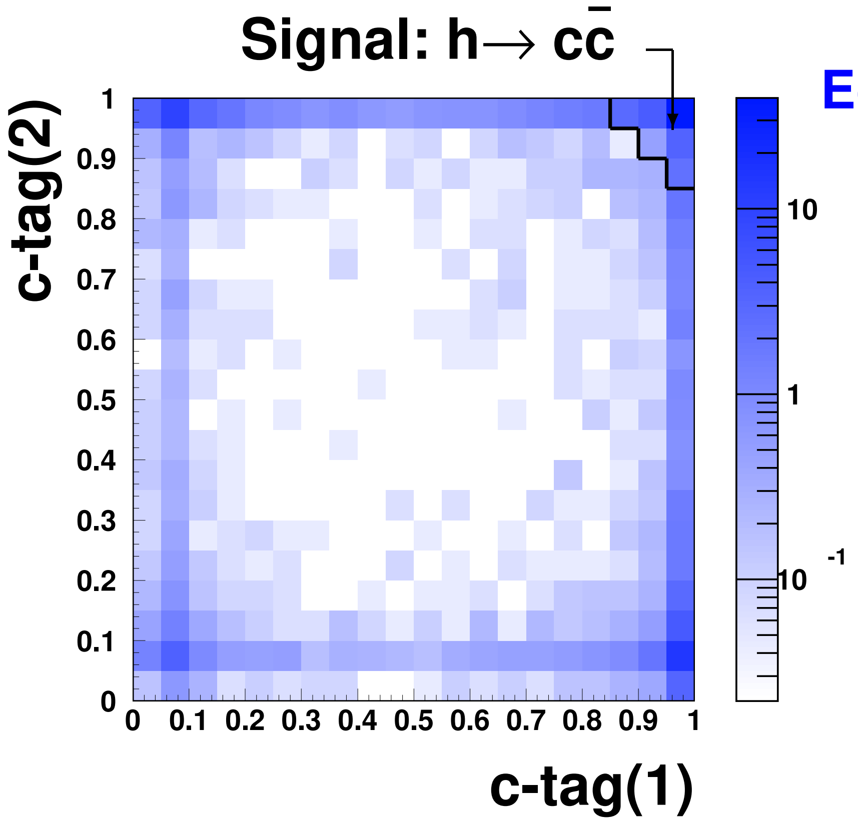
Sygnał:	**2414 przypadków**
Tło:	**785 przypadków**

Precyzja pomiaru:

$$\frac{\Delta\Gamma(h \to b\bar{b})}{\Gamma(h \to b\bar{b})} = 2.3\%$$

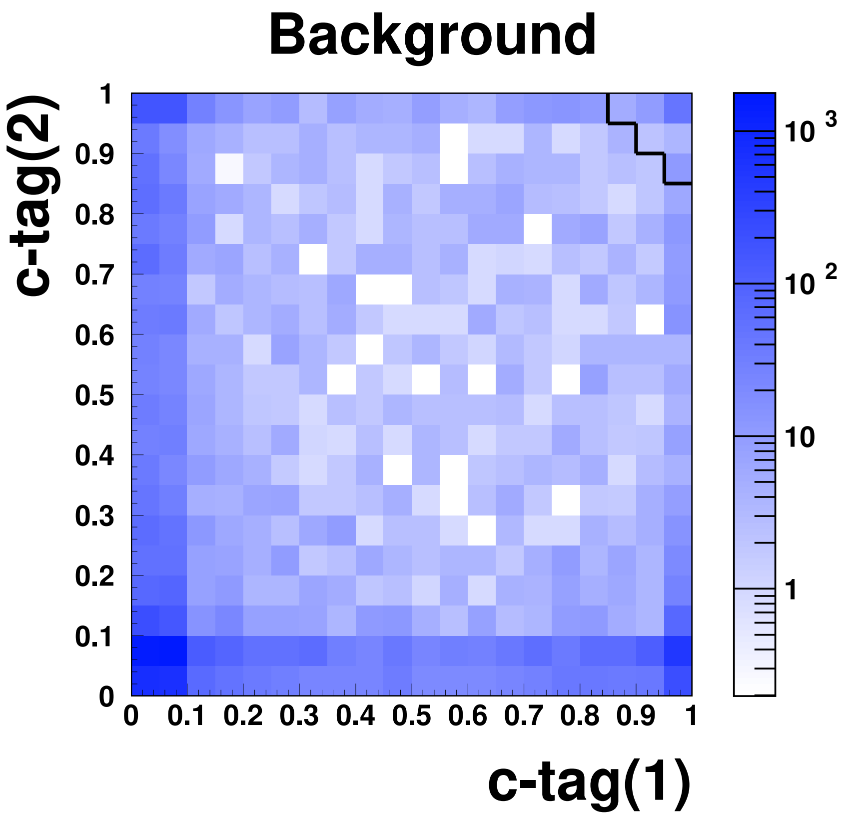
Przykładowe rozkłady dla :
warstwy: 1 - 5
grubość warstwy $50\mu m$
rozdzielczość warstwy $2\mu m$

c-tag dla h $\rightarrow$ jet(1) jet(2)



E(1) $>$ E(2)

500 fb^{-1}



Cięcia optymalizujące $\Delta\Gamma/\Gamma$

Sygnał: **42 przypadków**

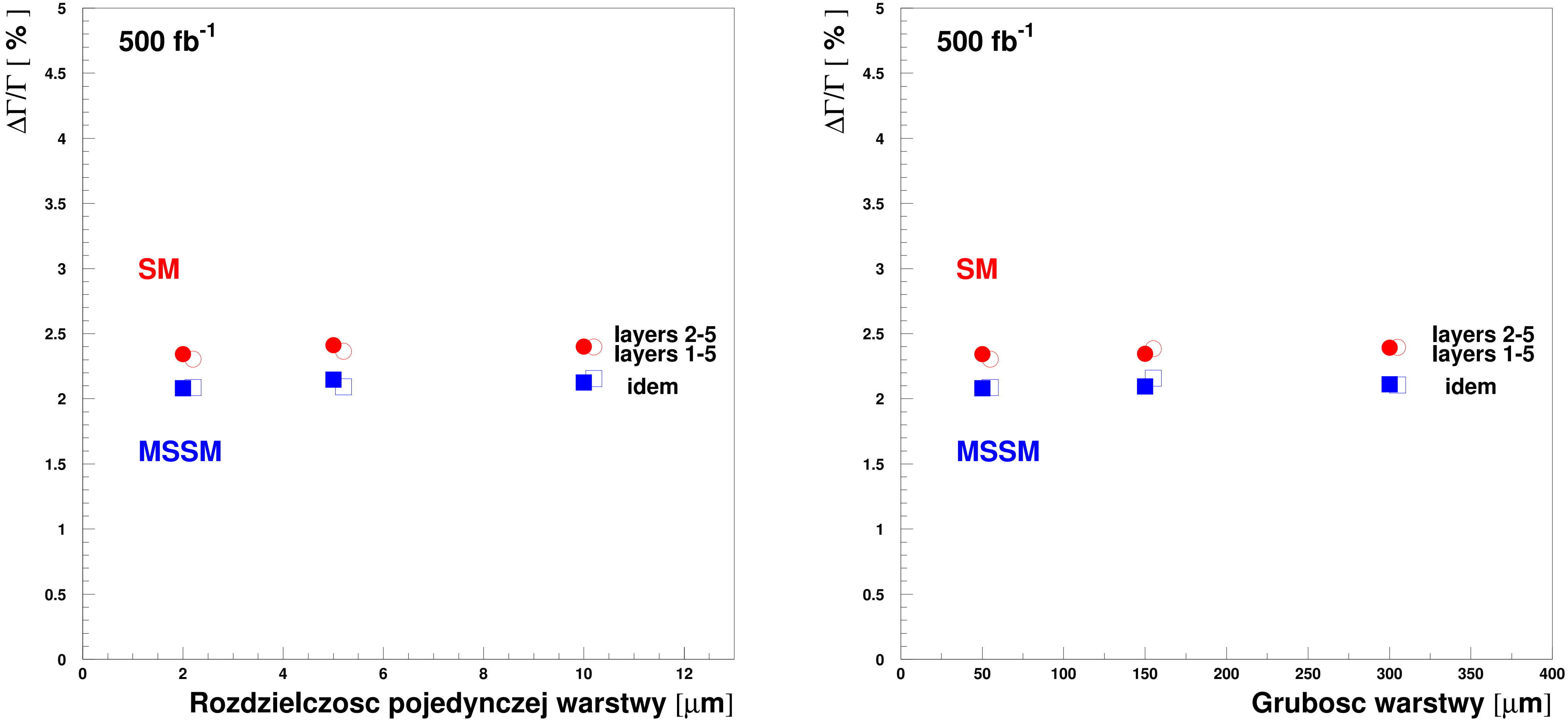
Tło: **79 przypadków**

Precyzja pomiaru:

$$\frac{\Delta\Gamma(h \rightarrow c\bar{c})}{\Gamma(h \rightarrow c\bar{c})} = 26\%$$

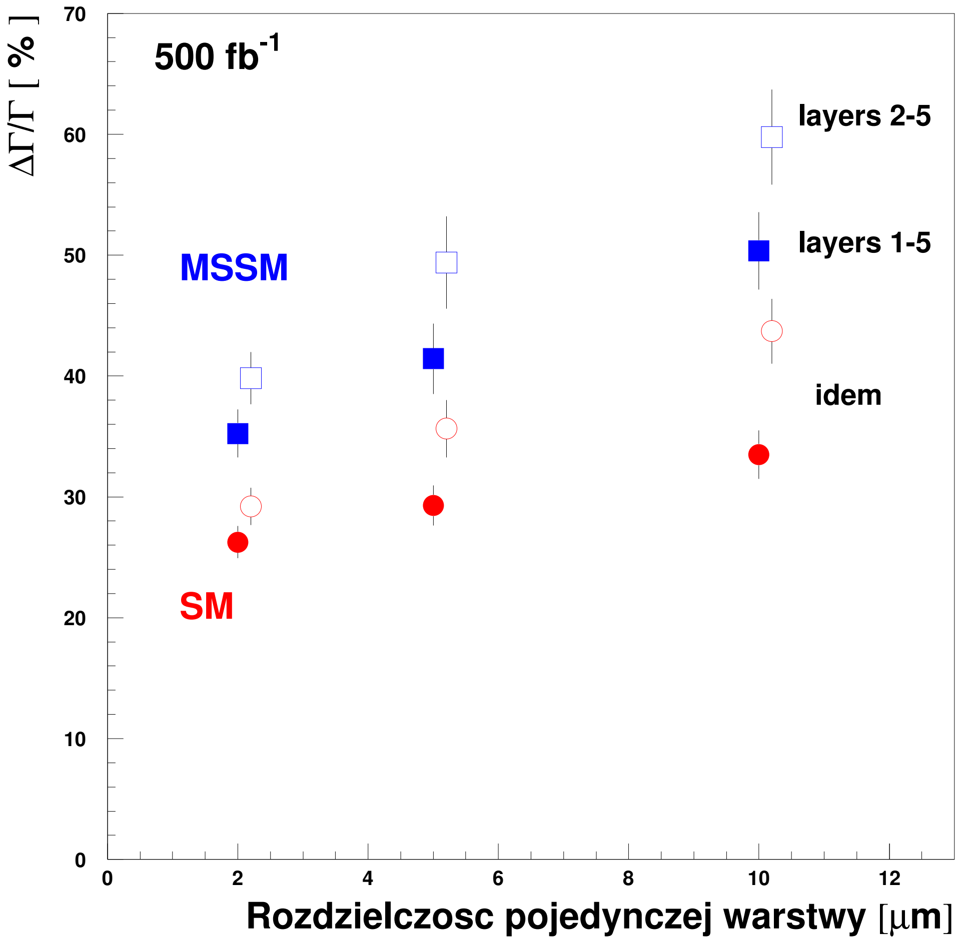
Przykładowe rozkłady dla :
warstwy: 1 - 5
grubość warstwy $50\mu m$
rozdzielczość warstwy $2\mu m$

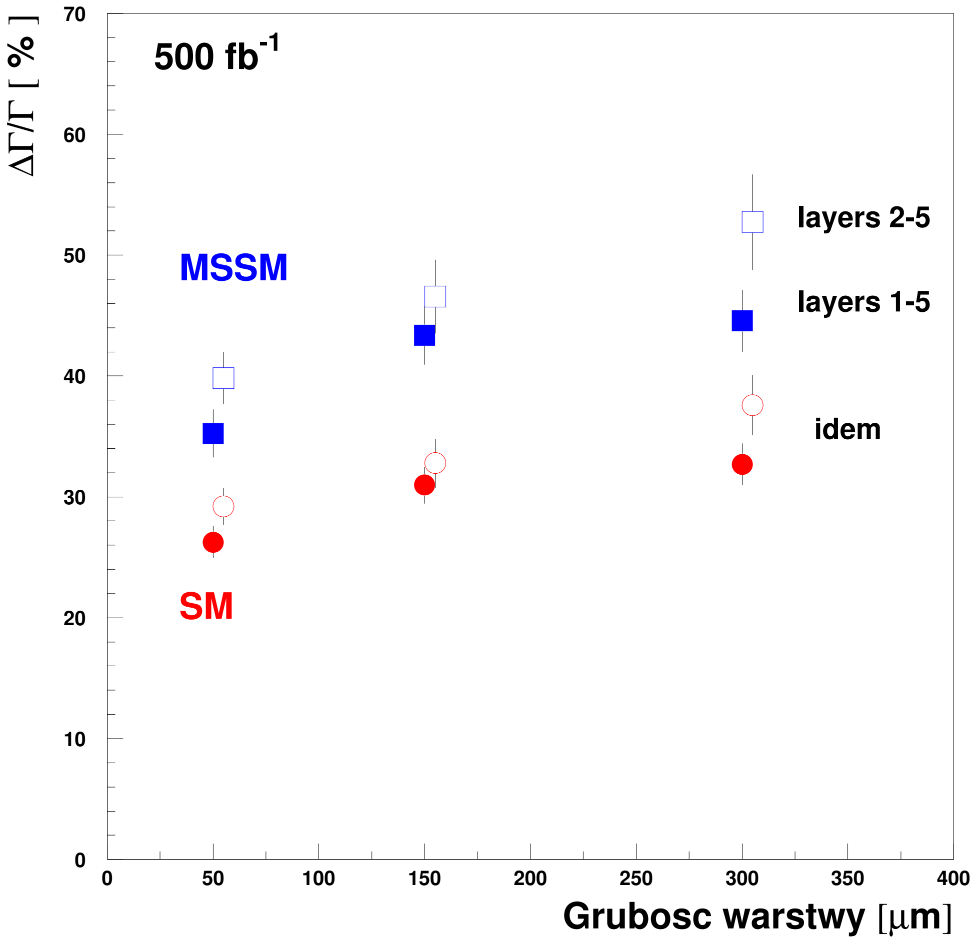
Precyzja pomiaru częstości rozpadu $\Gamma(h \to b\bar{b})$



Grubość warstwy $50\mu m$ **Rozdzielczość pojedynczej warstwy** $2\mu m$

Precyzja pomiaru częstości rozpadu $\Gamma(h \to c\bar{c})$



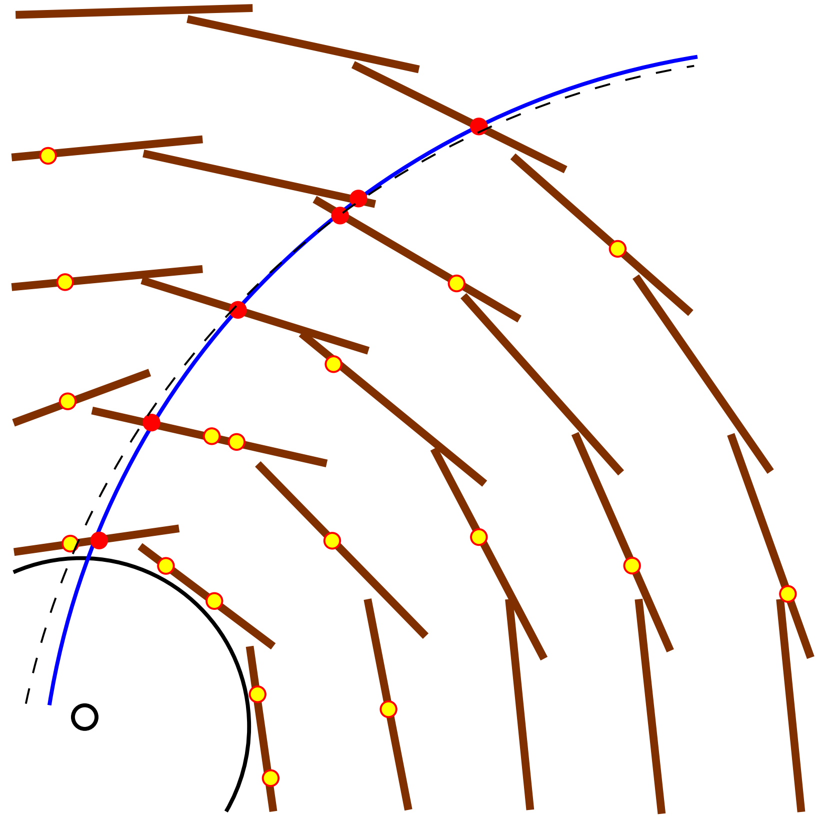


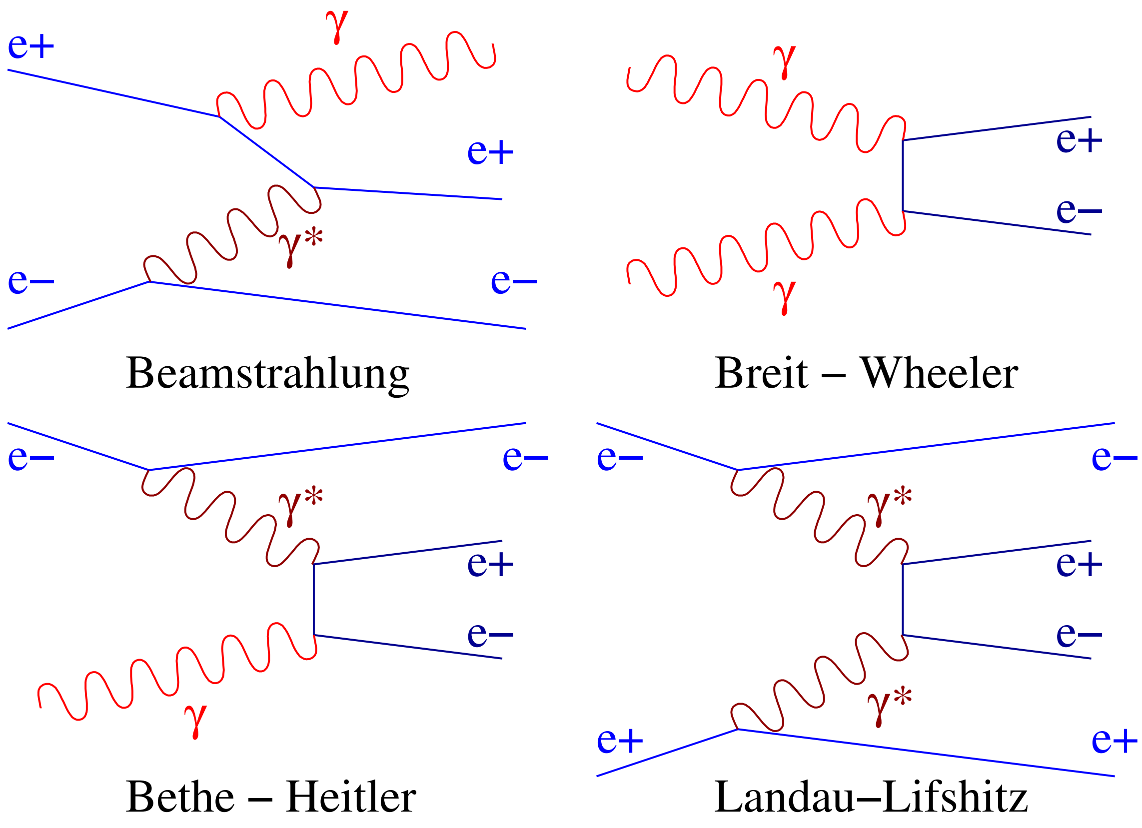
Grubość warstwy $50\mu m$

Rozdzielczość pojedynczej warstwy $2\mu m$

Co jeszcze wpływa na precyzję pomiaru?

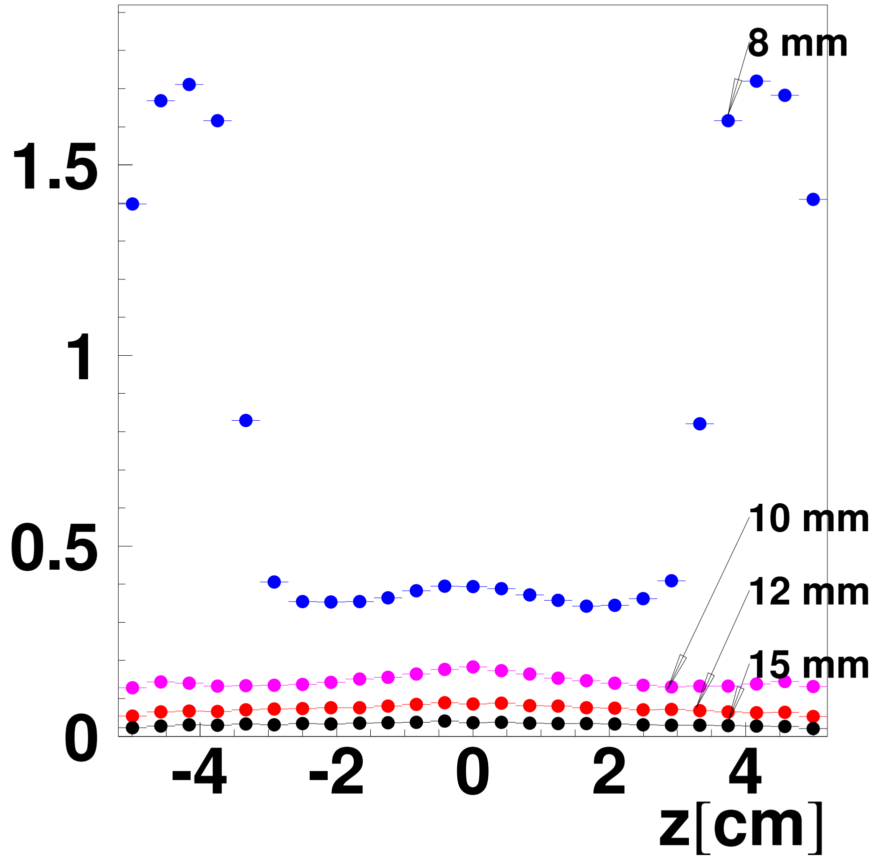
W oddziaływaniu pomiędzy wiązkami powstają pary e^+e^- o małych pędach poprzecznych, z których część zostawia ślady (ang. “hit”) w detektorze wierzchołka utrudniając rekonstrukcję innych torów. W pięciowarstwowym detektorze oczekuje się około 60 000 dodatkowych “hitów”.

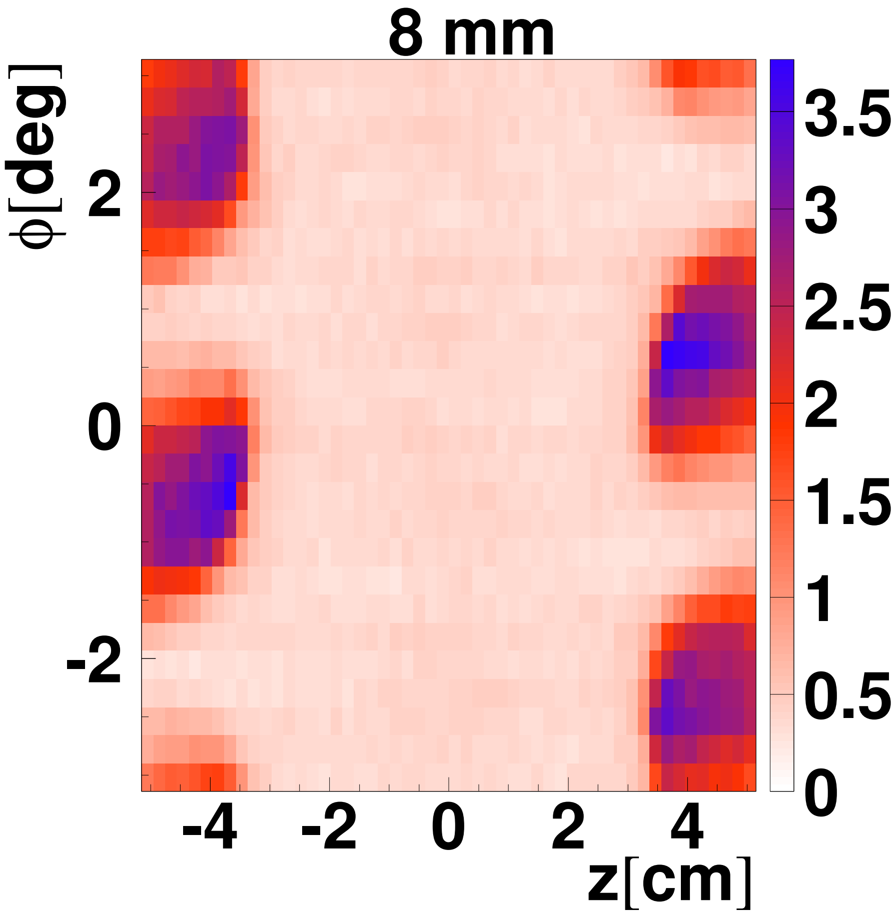




Gęstość śladów w pierwszej warstwie [1/mm^2/BX]

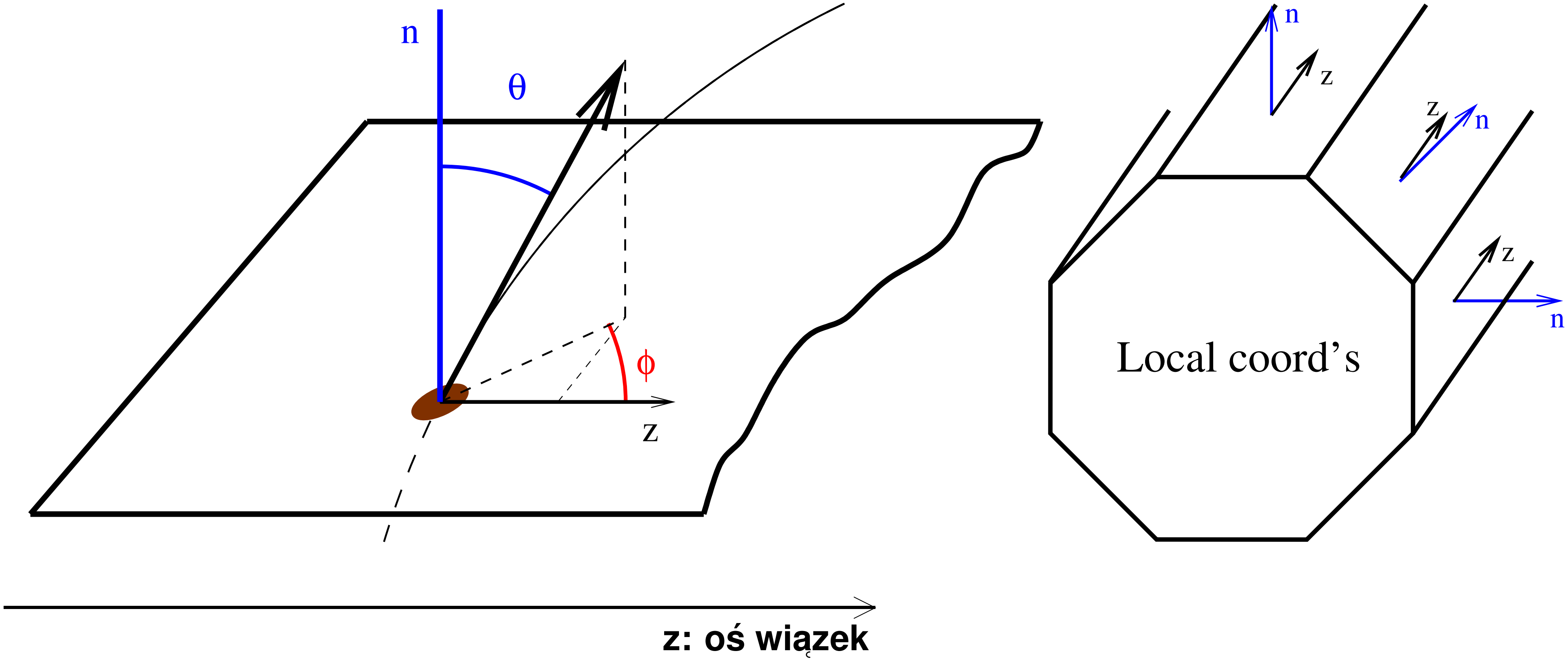
Pary e^+e^- symulowane za pomocą Guinea Pig. Gęstości liczone dla różnych wartości promienia pierwszej warstwy.



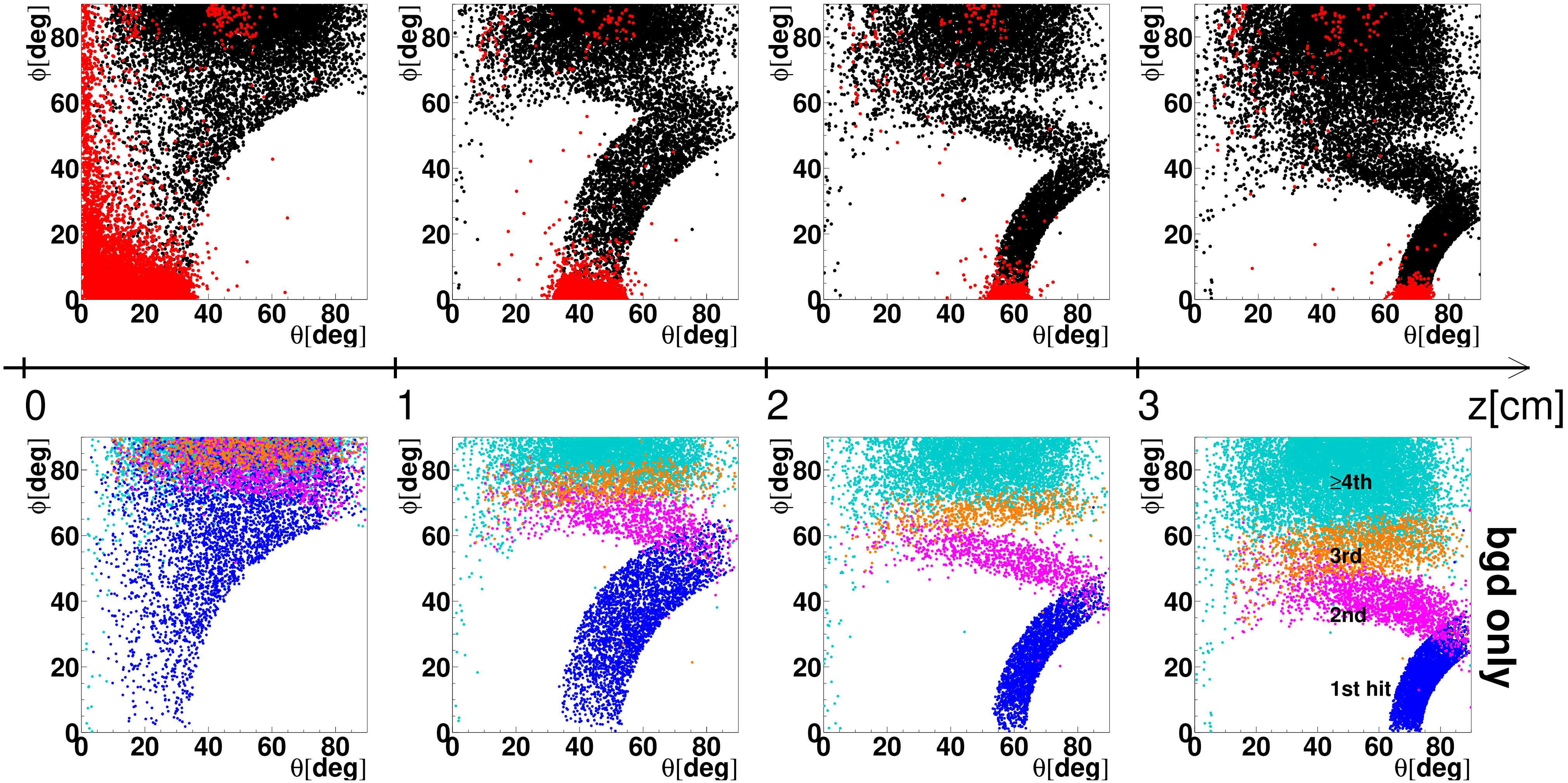


Kształt śladu pozostawionego przez cząstkę

To czy ślad będzie okrągły, czy eliptyczny zależy od kąta θ, a także od technologii w jakiej wykonany będzie detektor.

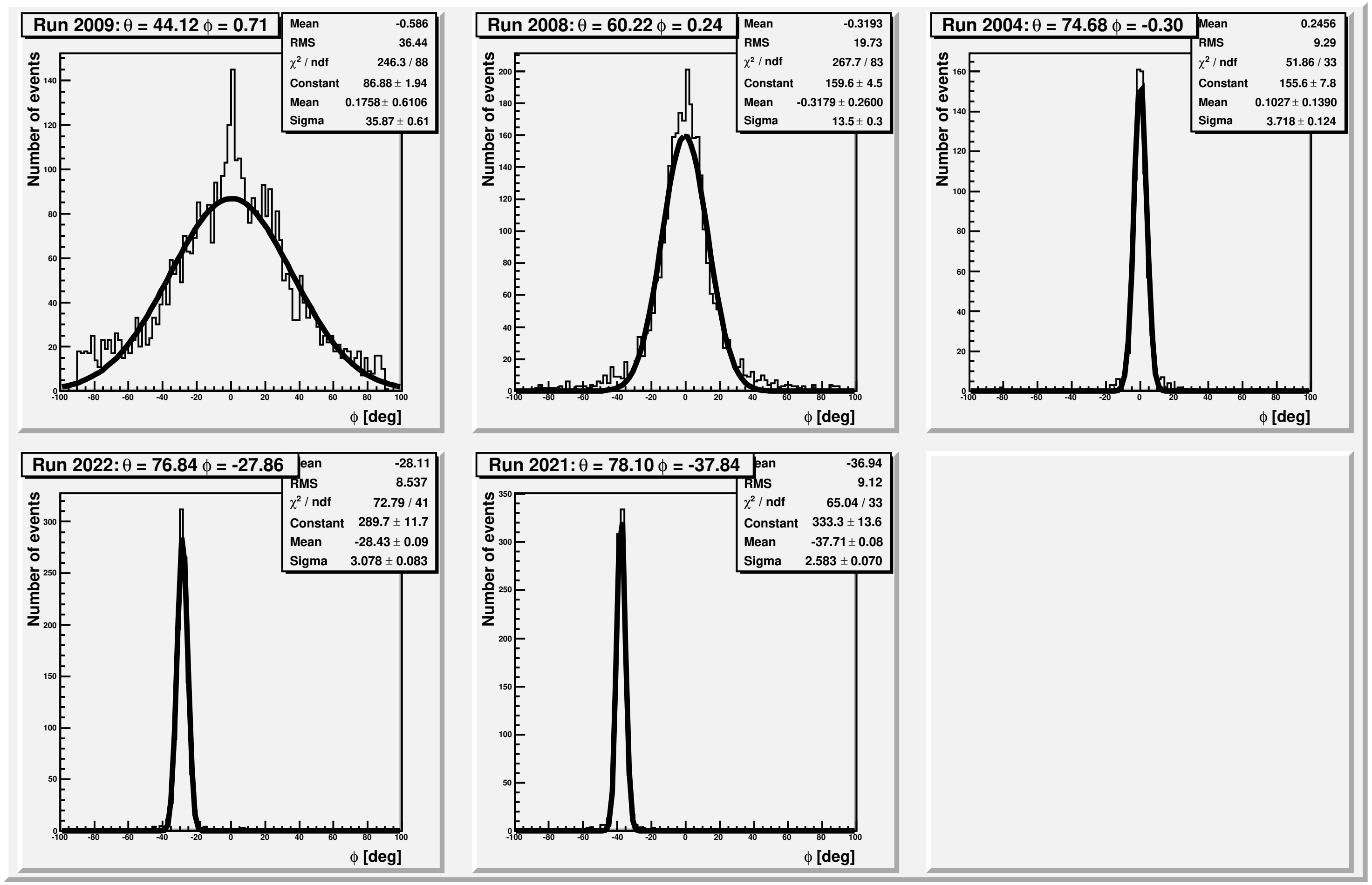


ϕ vs θ, ślady fizyczne i tło , pierwsza warstwa



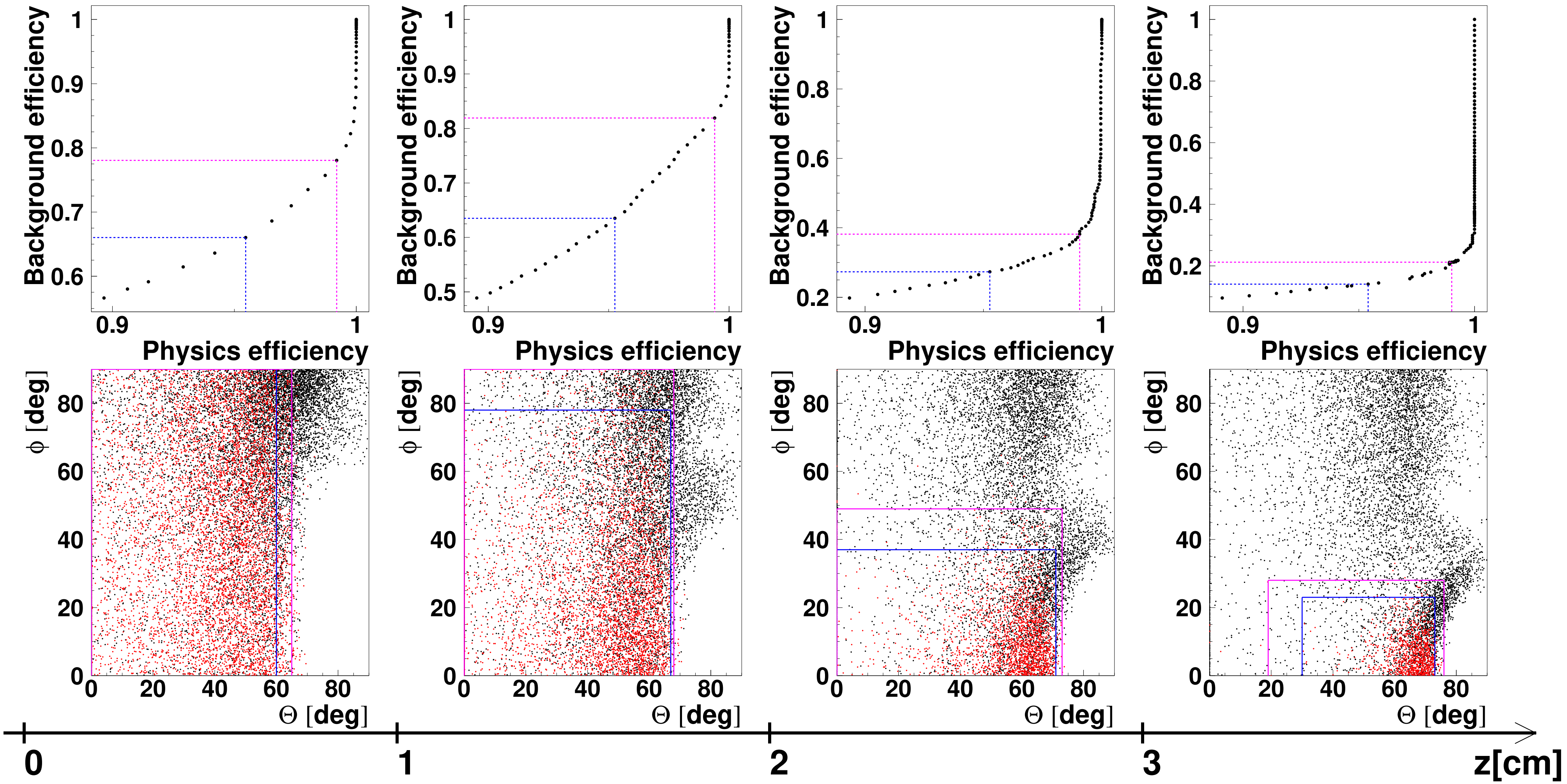
Pomiar θ i ϕ śladu

Na podstawie pomiarów dokonanych na prototypie MIMOSA5.



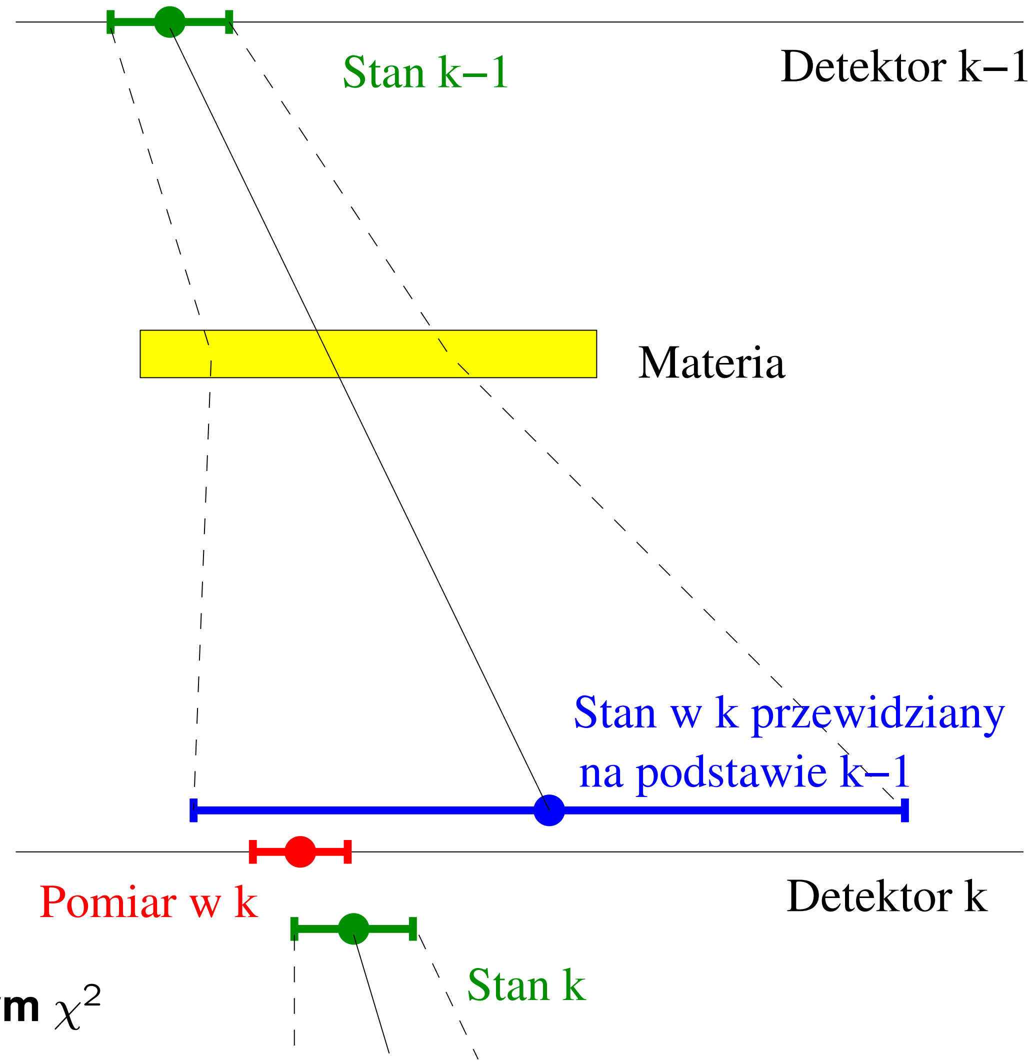
Odrzucanie tła

Kąty θ i ϕ zrekonstruowane na podstawie wyników dla MIMOSA5:

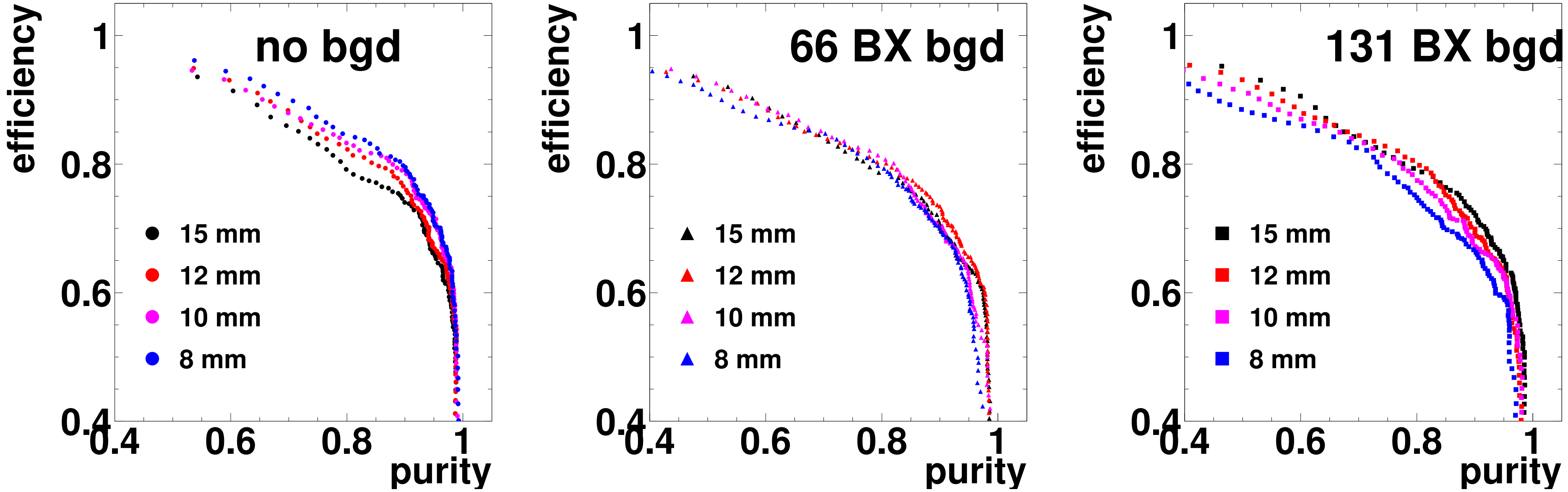


Filtr Kalmana - sposób na dopasowywanie torów

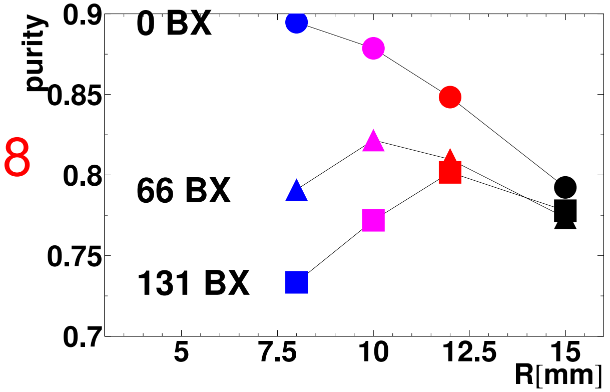
- **Algorytm oblicza parametry toru używając punktów “pasujących” do toru:**
- **Punkty są dodawane zaczynając od najbardziej zewnętrznych**
- **Stan początkowy jest brany z zewnętrznych detektorów śladowych**
- **Stan obliczony dla detektora k-1 jest ekstrapolowany do detektora k z uwzględnieniem wpływu materii.**
- **Punkty w znalezione w detektorze k są porównywane z przewidywaniem i są dodawane jeżeli nie wprowadzaja dużego wzrostu χ^2 przy dopasowaniu toru - obliczany jest stan k**
- **Jezeli więcej niż jeden punkt “pasuje” brane są pod uwagę wszystkie możliwości i ostatecznie wybierany jest tor z największą liczbą punktów i najmniejszym χ^2**

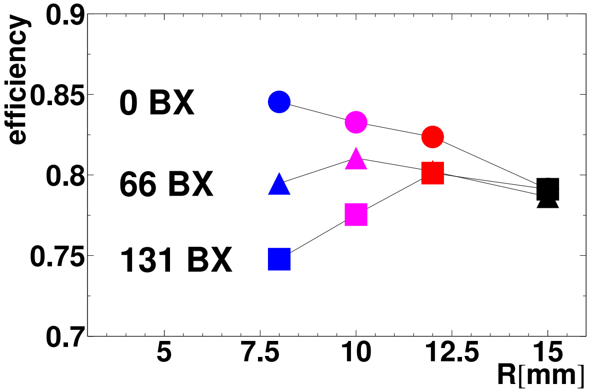


Wpływ tła na identyfikację kwarków b



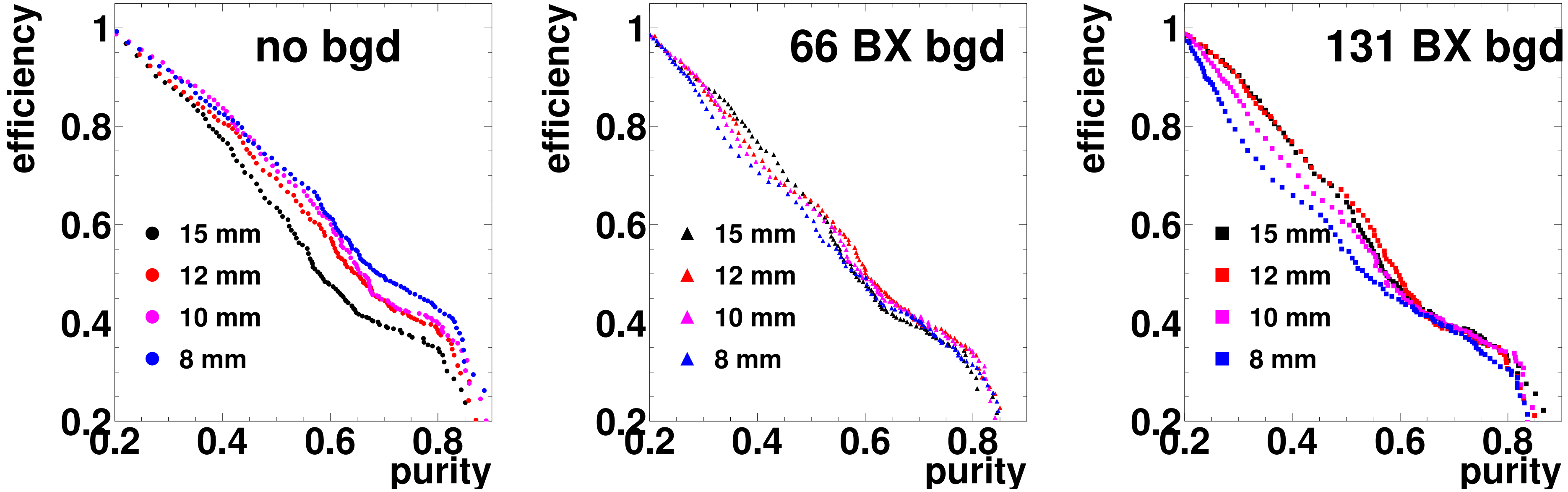
Efficiency 0.8



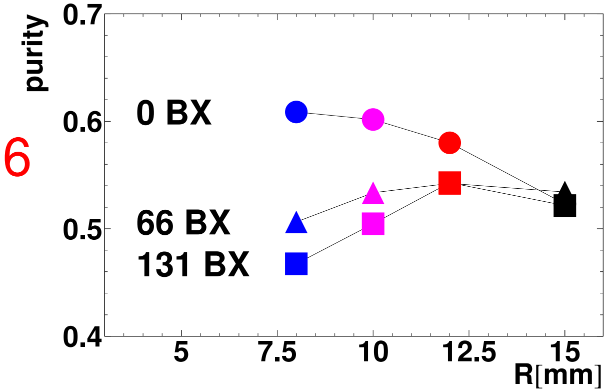


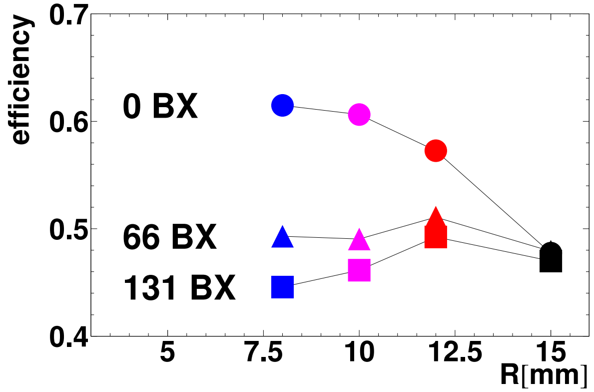
Purity 0.8

Wpływ tła na identyfikację kwarków c



Efficiency 0.6





Purity 0.6

Podsumowanie

- Projekty detektorów są cały czas rozwijane i modyfikowane. Trwają badania nad nowymi technologiami.
- Detektor wierzchołka jest niezbędny do identyfikacji kwarku z którego powstaje dżet.
- Pary e^+e^- powstające na skutek oddziaływania pomiędzy wiązkami pozostawiają ślady w detektorze wierzchołka. Dodatkowe ślady utrudniają rekonstrukcję torów cząstek.
- Promień pierwszej warstwy detektora jest ważnym parametrem wpływającym na rozdzielczość detektora wierzchołka. W obecności tła optymalny promień pierwszej warstwy wynosi $1,2$ cm.