

# Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład V

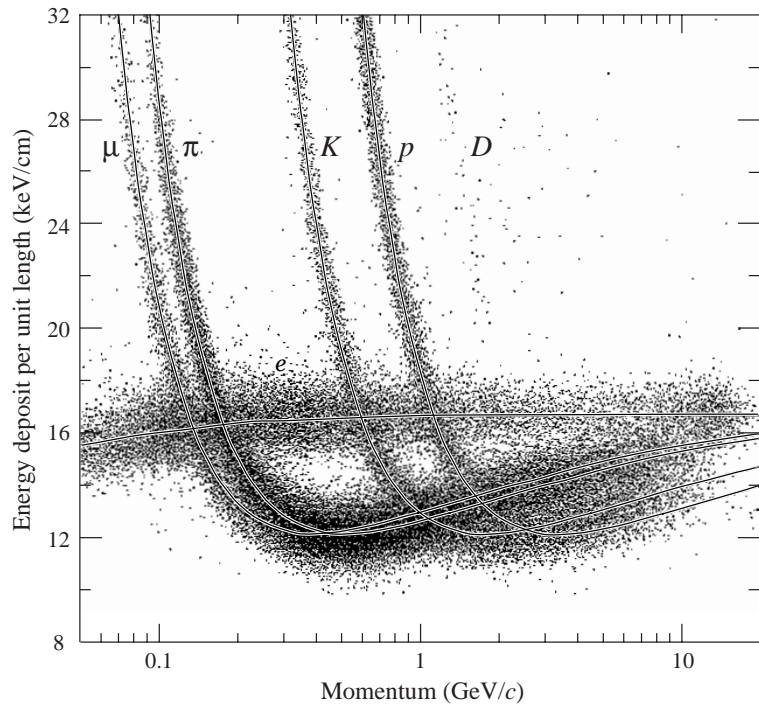
- Detektory identyfikacji cząstek

# Identyfikacja cząstek

Omówione dotychczas typy detektorów pozwalają jedynie na pośrednią identyfikację

## Detektory śladowe

Jednoczesny pomiar  $dE/dx$  i pędu  $\Rightarrow$  możliwość rozróżnienia cząstek o różnej masie  
 $\Rightarrow$  różnym współczynnikiem  $\gamma$  **Niestety tylko w ograniczonym zakresie !...**



## Kalorymetry

Pomiar rozmiarów kaskady

$\Rightarrow$  odróżnienie elektronów/fotonów od hadronów

## Kalorymetry + d. śladowe

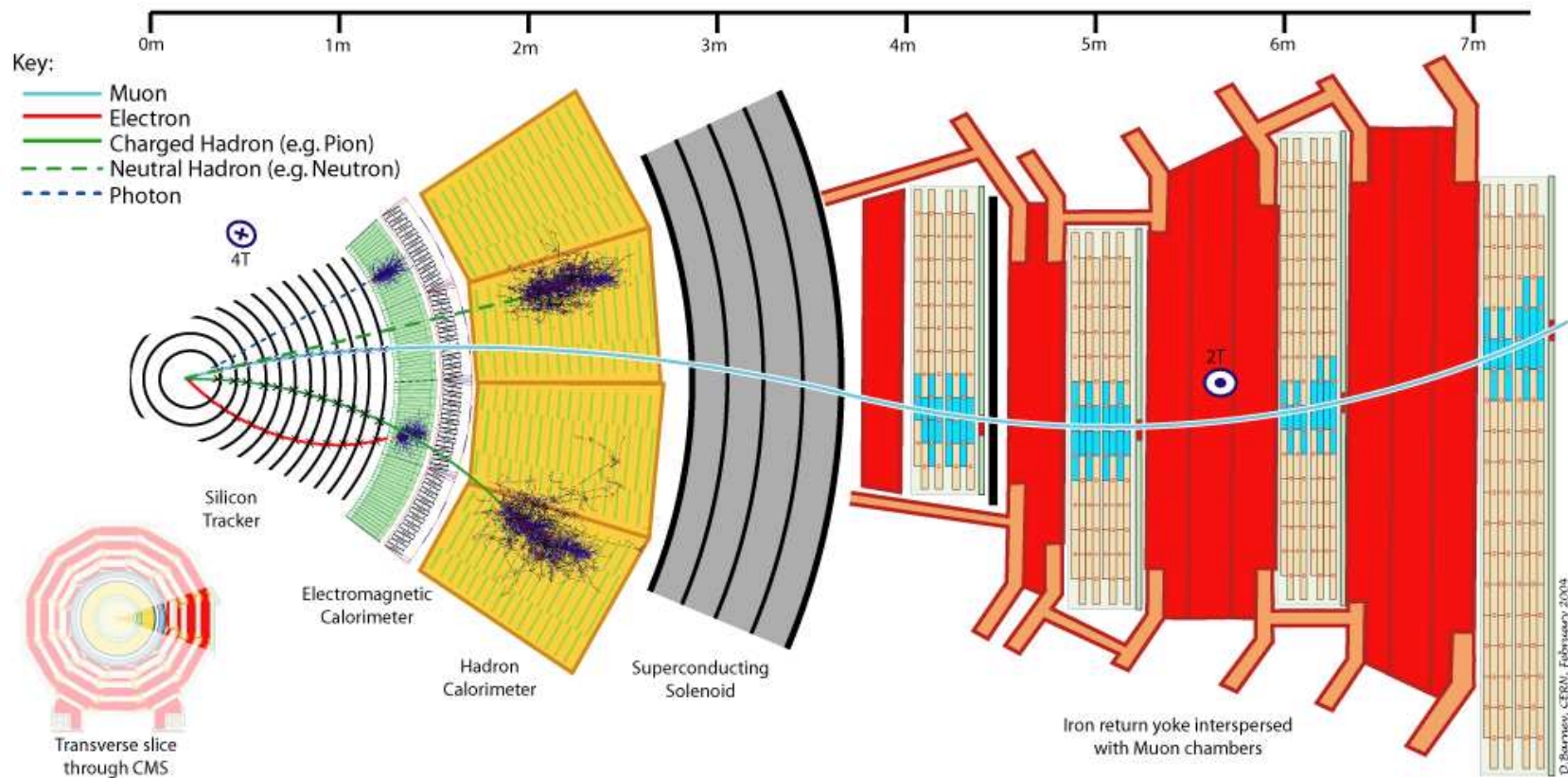
$\Rightarrow$  odróżnienie cząstek naładowanych i obojętnych  
np. elektron vs foton

## Kalorymetry + detektory mionowe

$\Rightarrow$  identyfikacja mionów

# Identyfikacja cząstek

Kolejność detektorów jest tu niezwykle istotna.

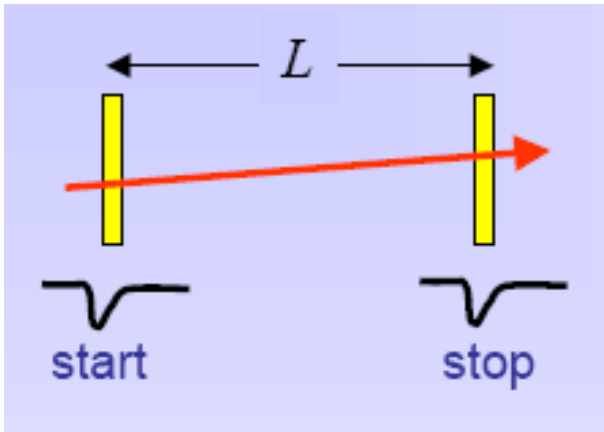


Jak możemy rozbudować ten układ, żeby poprawić identyfikację?

# Identyfikacja cząstek

## Liczniki czasu przelotu Time-of-Flight (TOF)

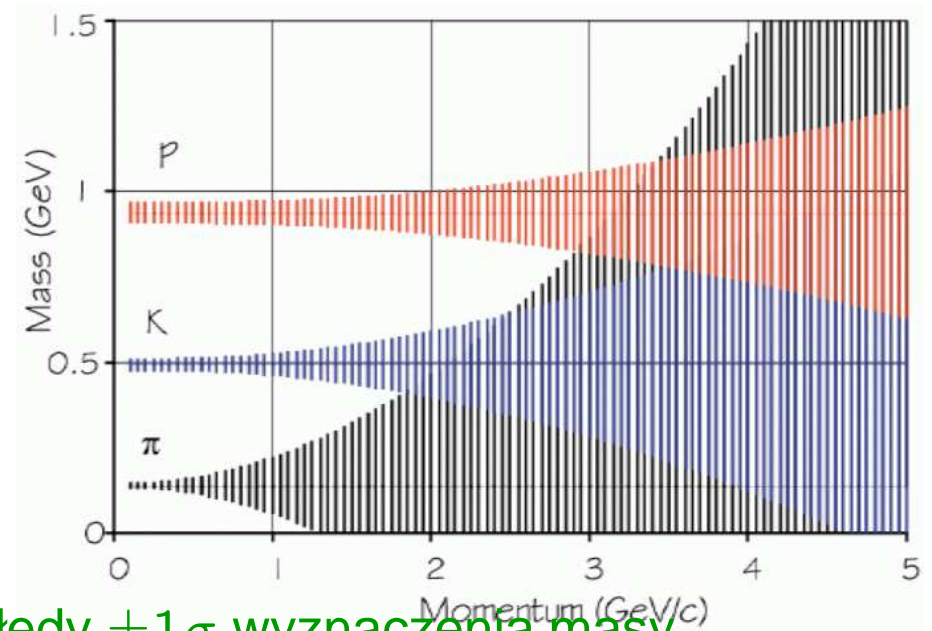
Pomiar czasu przelotu cząstki o znanym pędzie pozwala wyznaczyć jej masę:



$$p = \beta\gamma m$$

$$l = \beta ct \Rightarrow m^2 = \frac{p^2}{l^2} (c^2 t^2 - l^2)$$

Przykład:  $l = 12m$ ,  $\sigma_t = 150ps$ ,  $\frac{\sigma_p}{p} = 1\%$



Błędy  $\pm 1\sigma$  wyznaczenia masy

Dobra identyfikacja cząstek niskoenergetycznych ( $p \sim m$ )

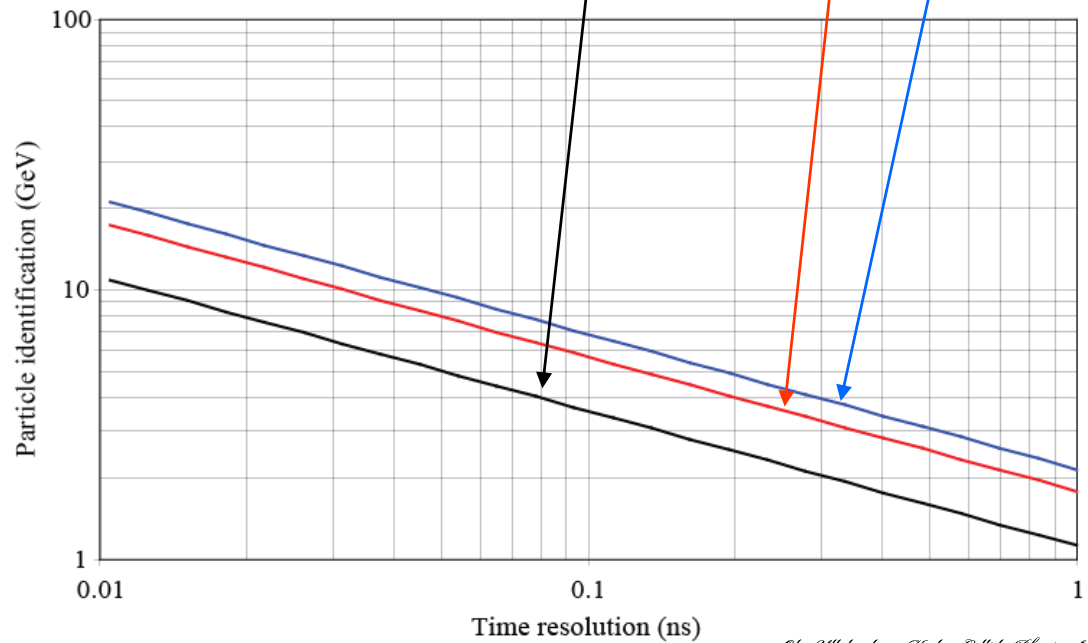
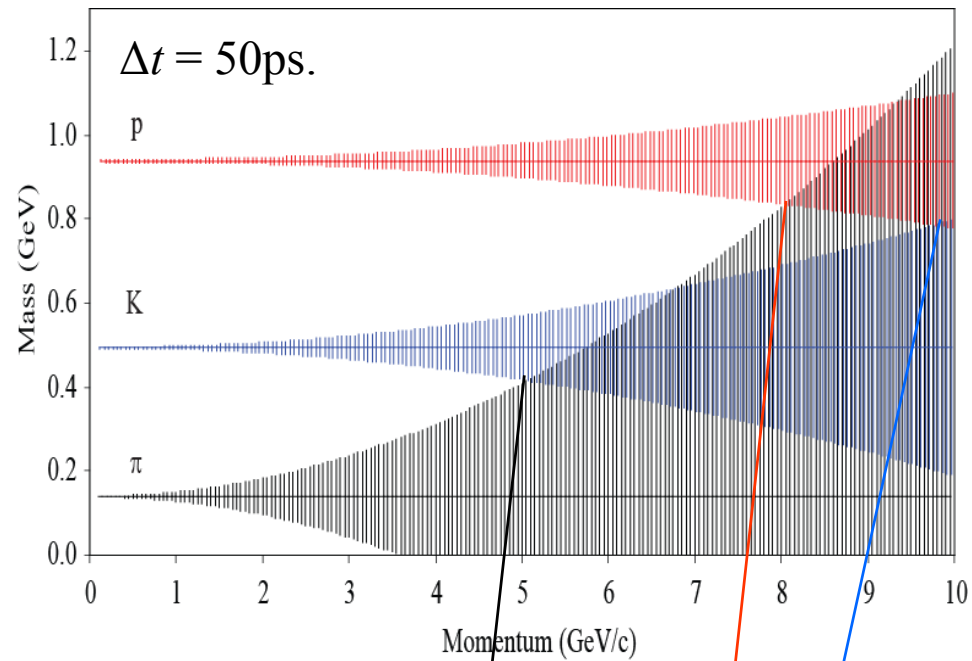


Assuming a spectrometer with the following characteristics:

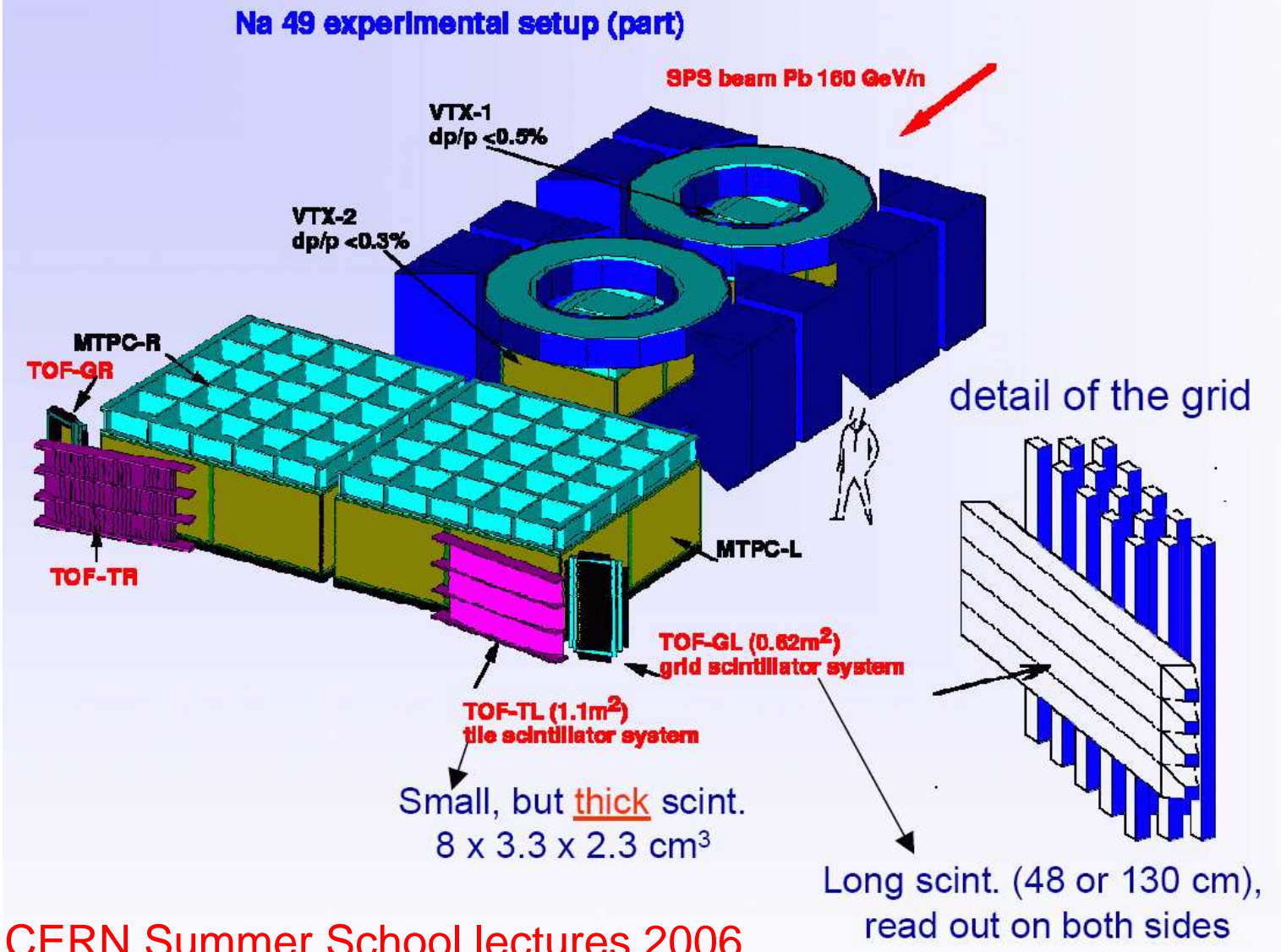
$$\Delta p/p = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$l = 10\text{m}, \Delta l/l = 10^{-4}$$

What time resolution is required to do a particle identification up to  $X \text{ GeV}/c$ ?

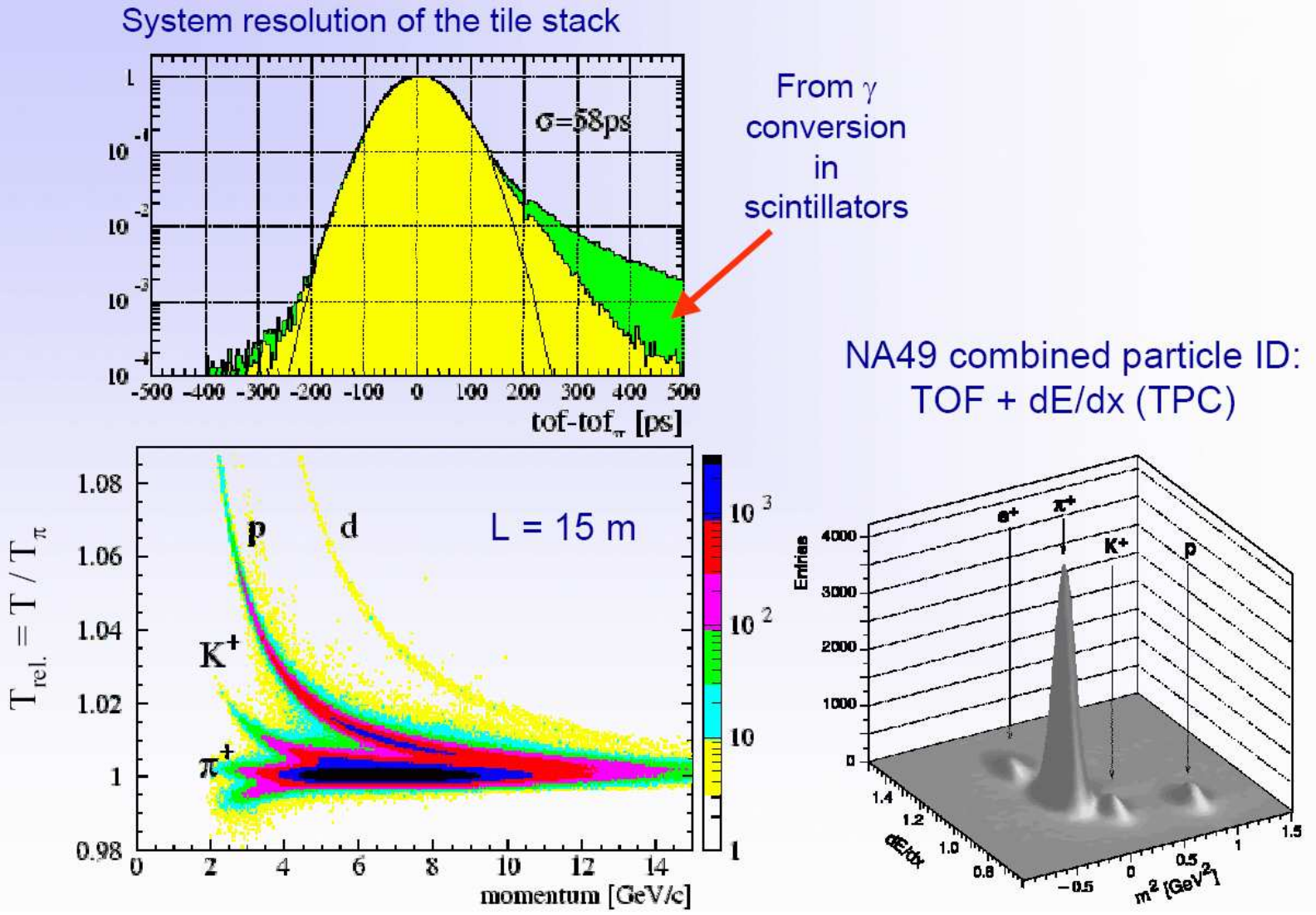


# Liczniki czasu przelotu



O.Ullaland, CERN Summer School lectures 2006

# Liczniki czasu przelotu

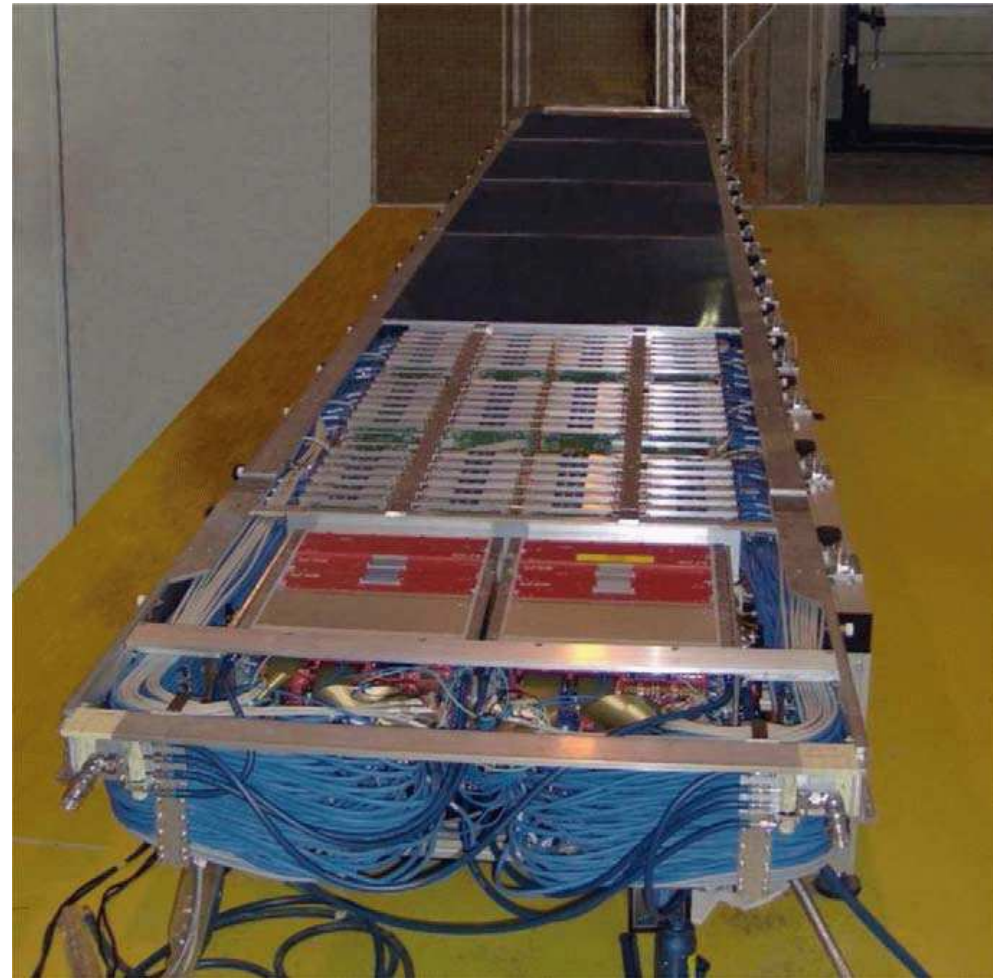
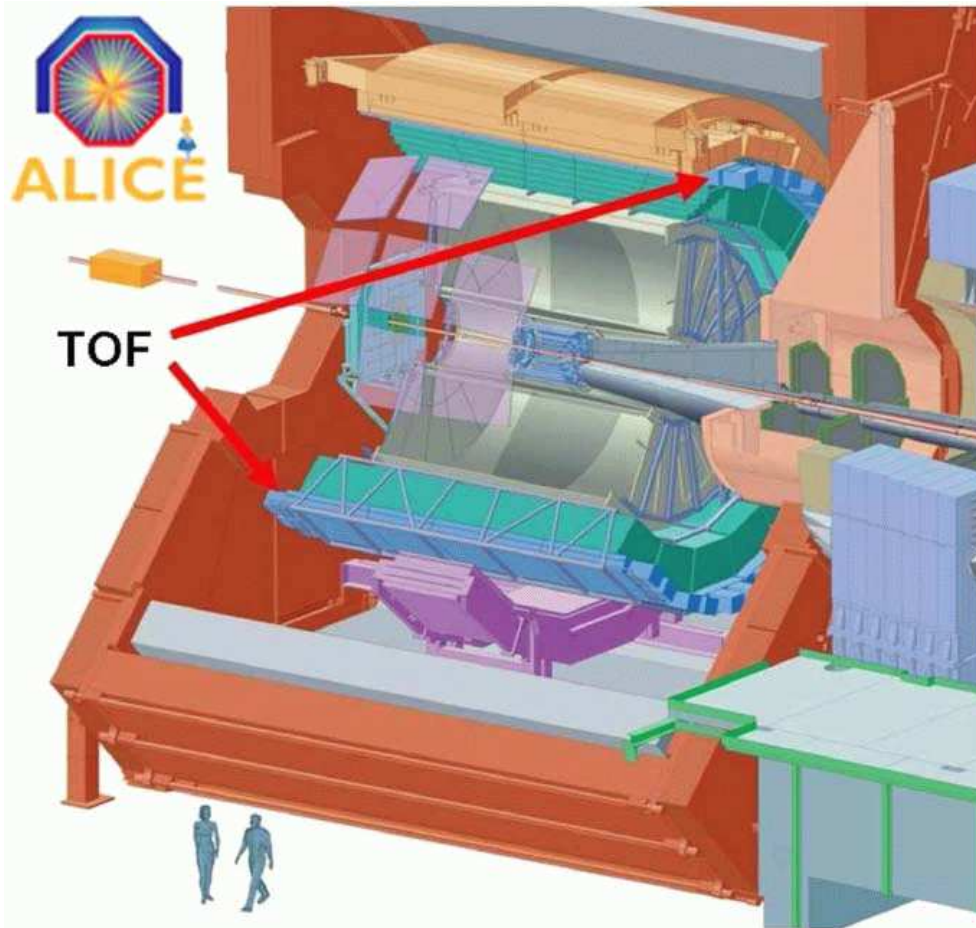




# Liczniki czasu przelotu

ALICE

Detektor TOF w części centralnej zbudowany z komór typu Multi-gap RPC

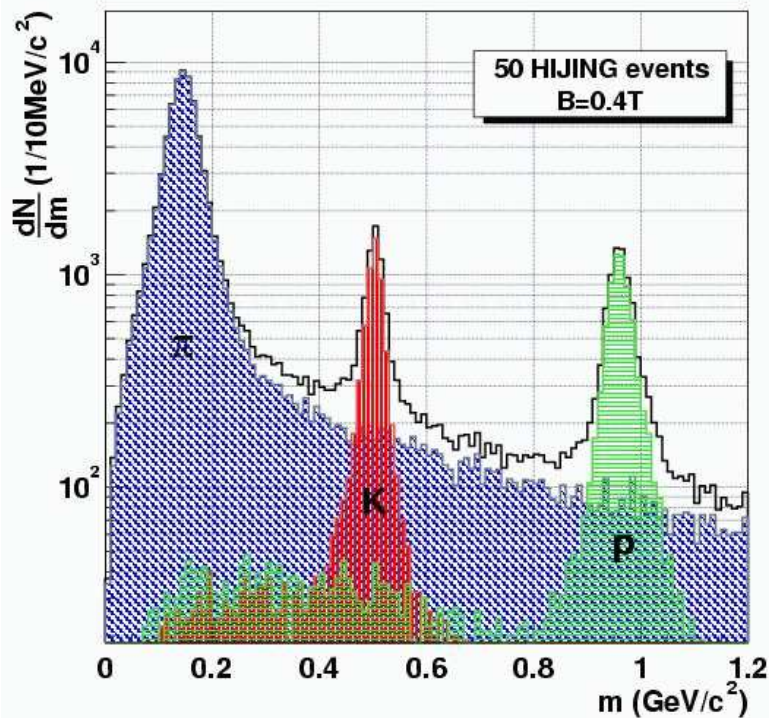


# Liczniki czasu przelotu

## ALICE

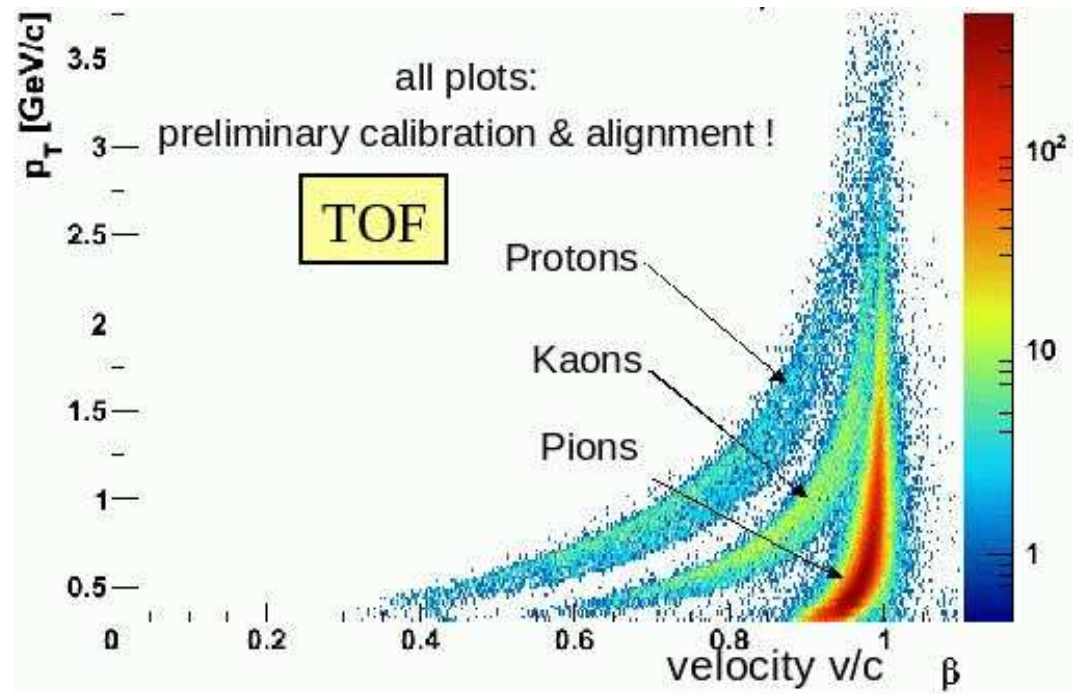
Rekonstruowana masa (TPC+TOF)

Wyniki symulacji MC:



Pęd cząstki vs zmierzona prędkość

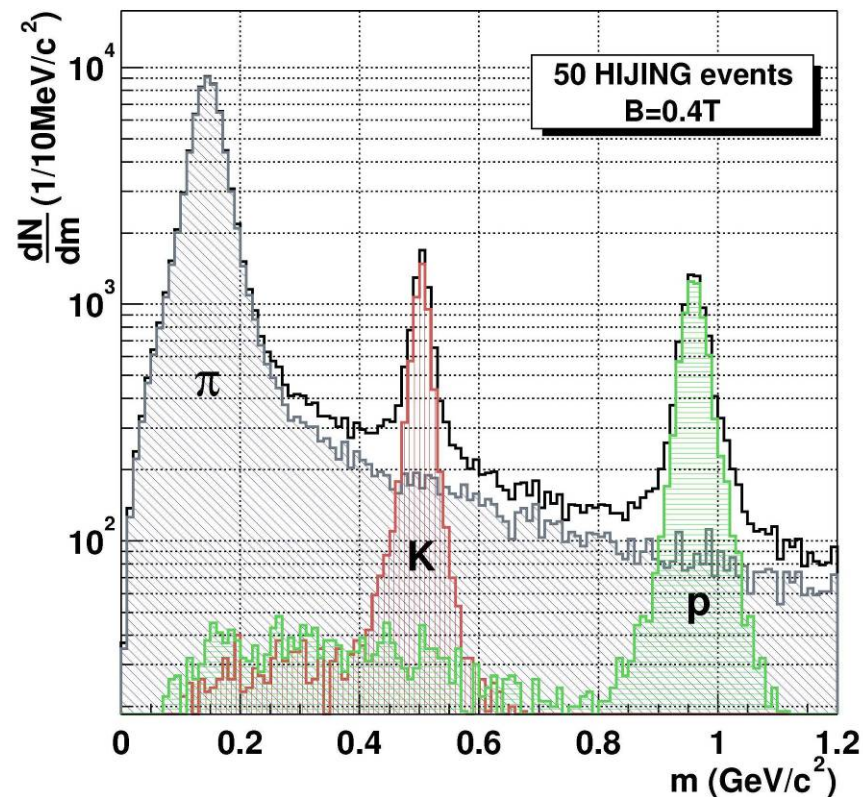
Pierwsze dane z LHC:



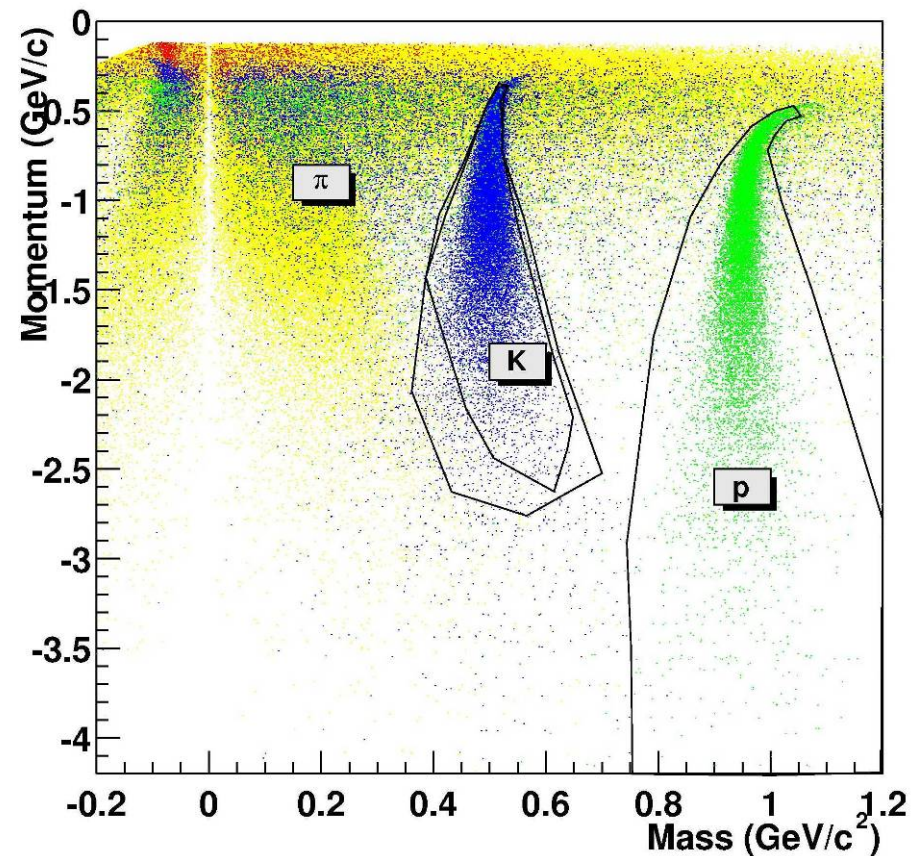


Which gives, with simulated events, particle identification with simple 1D or 2D cuts:

$$m = p \sqrt{c^2 t^2 / l^2 - 1}$$



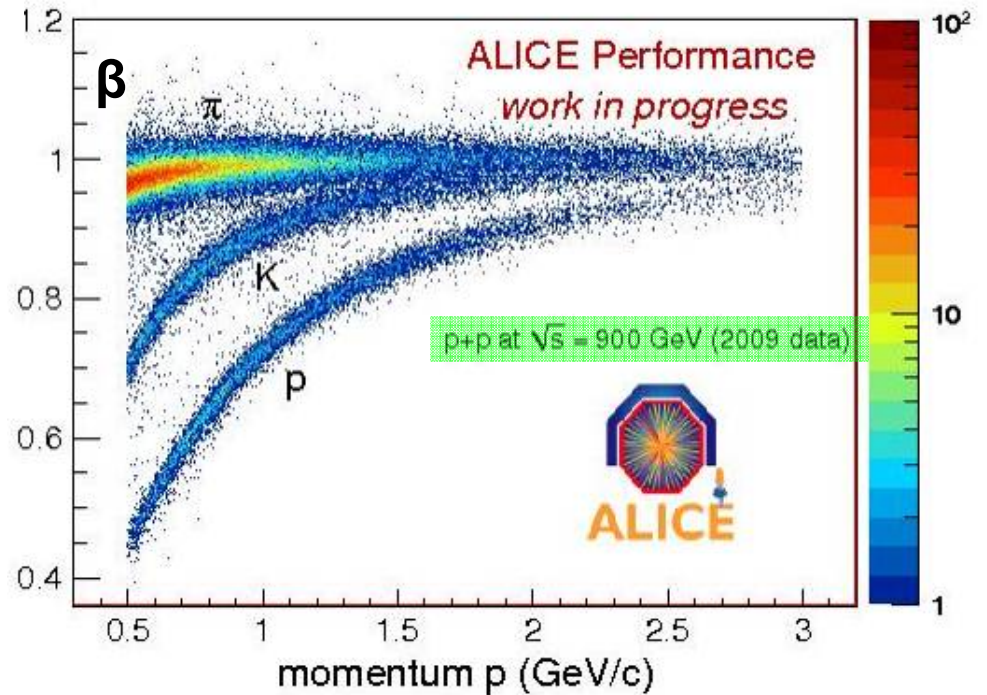
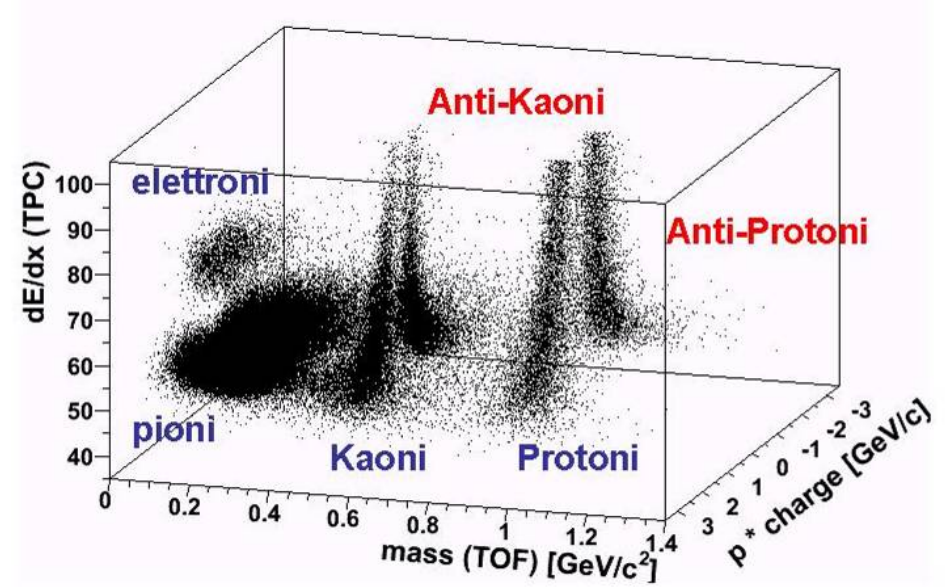
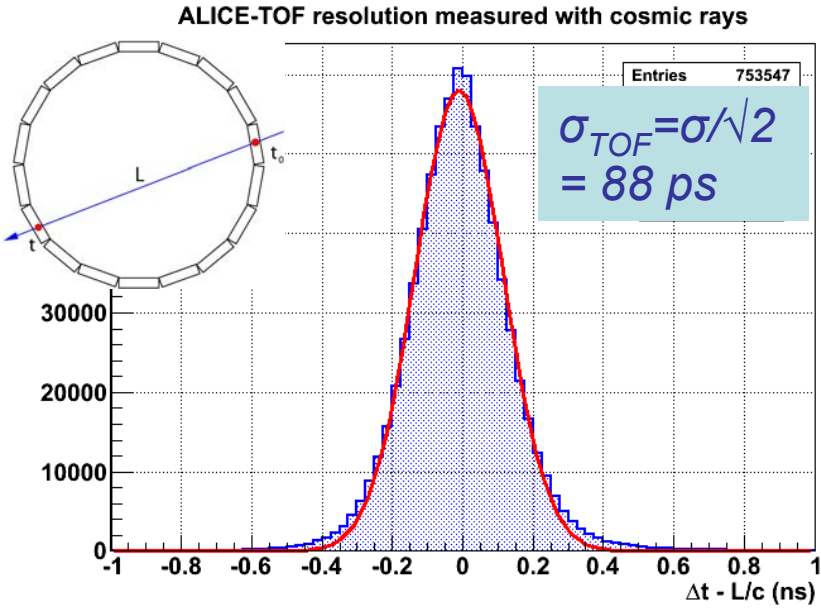
$$m = \pm p \sqrt{c^2 t^2 / l^2 - 1}$$



Neural network and Probability approach will of course also be used.



With real data:

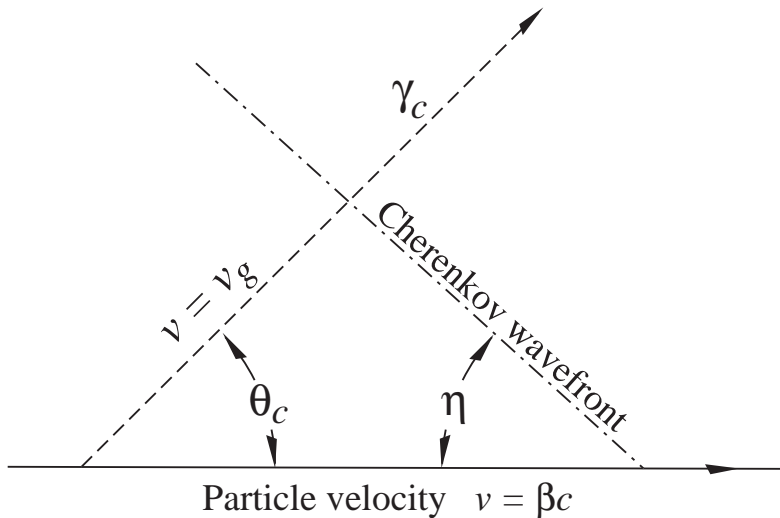


# Promieniowanie Czerenkowa

Jeśli cząstka porusza się w ośrodku z prędkością większą niż prędkość światła ( $\beta > \frac{1}{n}$ ) **wzbudzone atomy** mogą wypromieniować **niewielką część** traconej energii w postaci spójnej fali.

Kąt emisji promieniowania:

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$



Widmo promieniowania jest ciągłe.

Liczba emitowanych fotonów na jednostkę energii:

$$\frac{d^2 N_\gamma}{dE_\gamma dx} = \frac{\alpha z^2}{hc} \sin^2 \theta_c$$
$$\approx 370 \frac{1}{\text{eV} \cdot \text{cm}} \cdot \sin^2 \theta_c$$

Pomiar kąta rozwarcia stożka pozwala na bezpośredni pomiar prędkości cząstki!

# Identyfikacja cząstek

## Progowe detektory Czerenkowa

Promieniowanie Czerenkowa emitowane jest tylko gdy  $\beta > \frac{1}{n}$ .

Liczba emitowanych fotonów

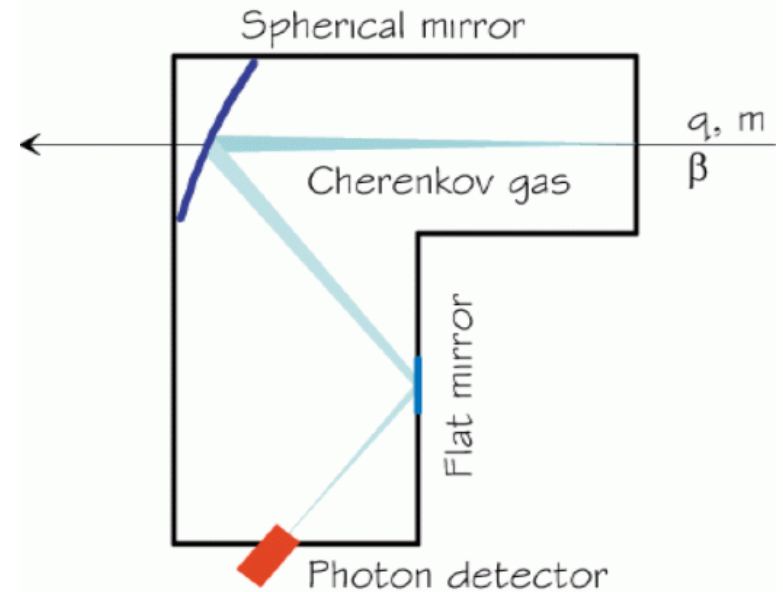
$$N_{ph} \sim \sin^2 \theta = 1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}$$

rośnie szybko powyżej progu.

⇒ “tagowanie” cząstek powyżej progu

⇒ efektywna rozróżnianie cząstek o różnych masach

Najczęściej stosuje się układy kilku liczników o różnych  $n$  ⇒ możliwość identyfikacji w szerszym zakresie pędów

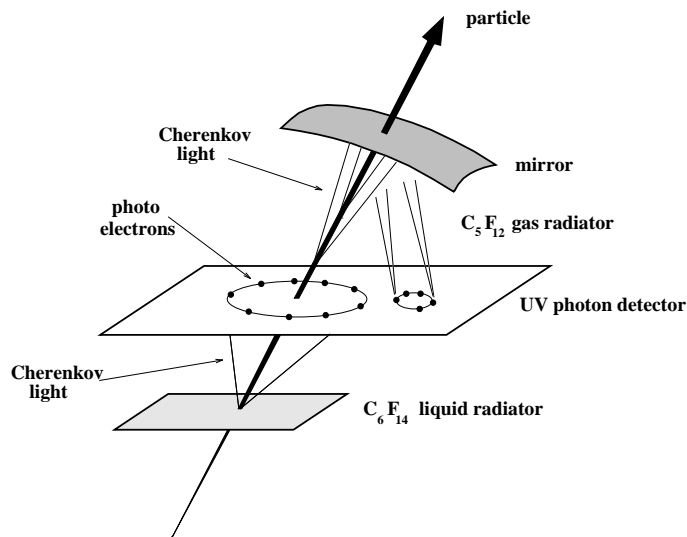


materiał	$n-1$	$\gamma_{thr}$
kwarc	0.46	1.37
woda	0.33	1.52
aerożel	0.025-0.075	2.7-4.6
izobutan	0.00127	19.9
powietrze	$2.8 \cdot 10^{-4}$	41.2
hel	$3.3 \cdot 10^{-5}$	123

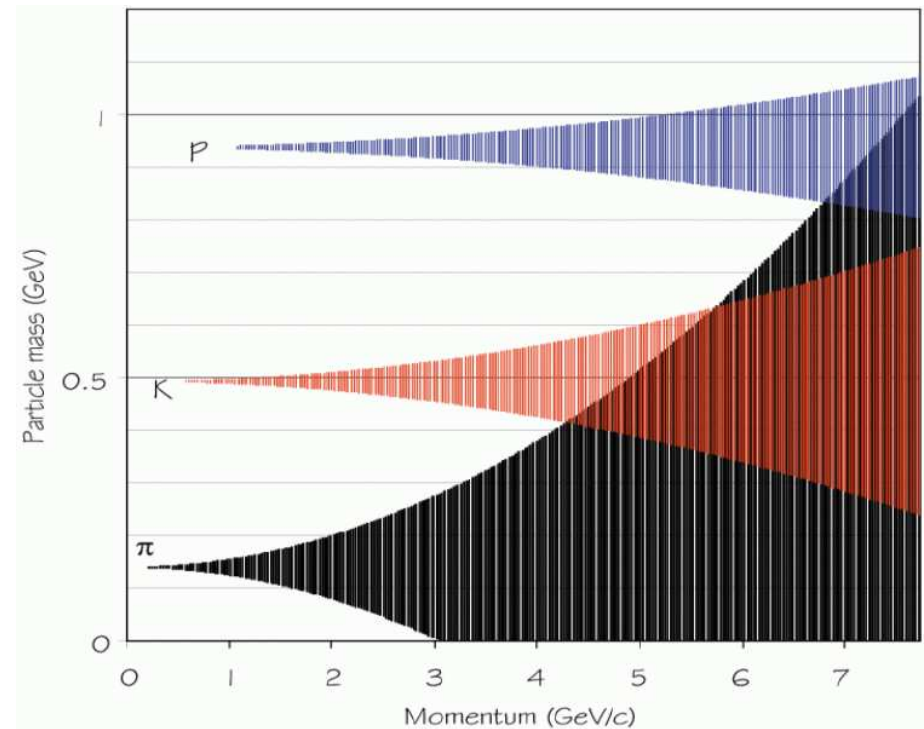
# Identyfikacja cząstek

## Detektory RICH Ring Imaging CHerenkov detector

Jeśli światło emitowane przez cząstkę skierujemy na zwierciadło wklęsłe to otrzymamy obraz w kształcie okręgu w płaszczyźnie ogniskowej.

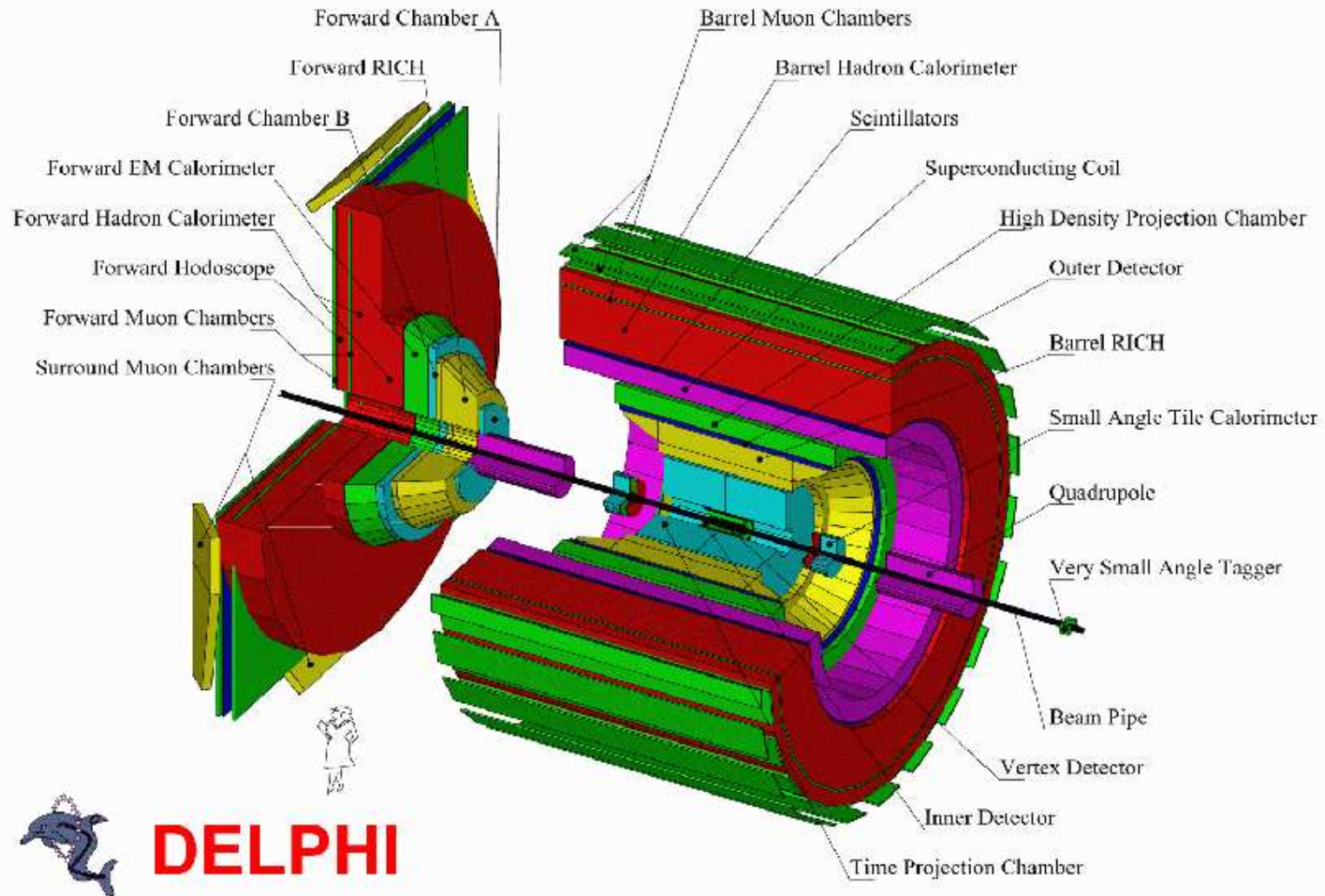


Przykład:  $n = 1.333$ ,  $\sigma_\theta = 15 \text{ mrad}$ ,  
 $\frac{\sigma_p}{p^2} = 5 \cdot 10^{-5}$



Rozmiar okręgu pozwala wyznaczyć kąt emisji promieniowania  $\Rightarrow$  prędkość

# Identyfikacja cząstek

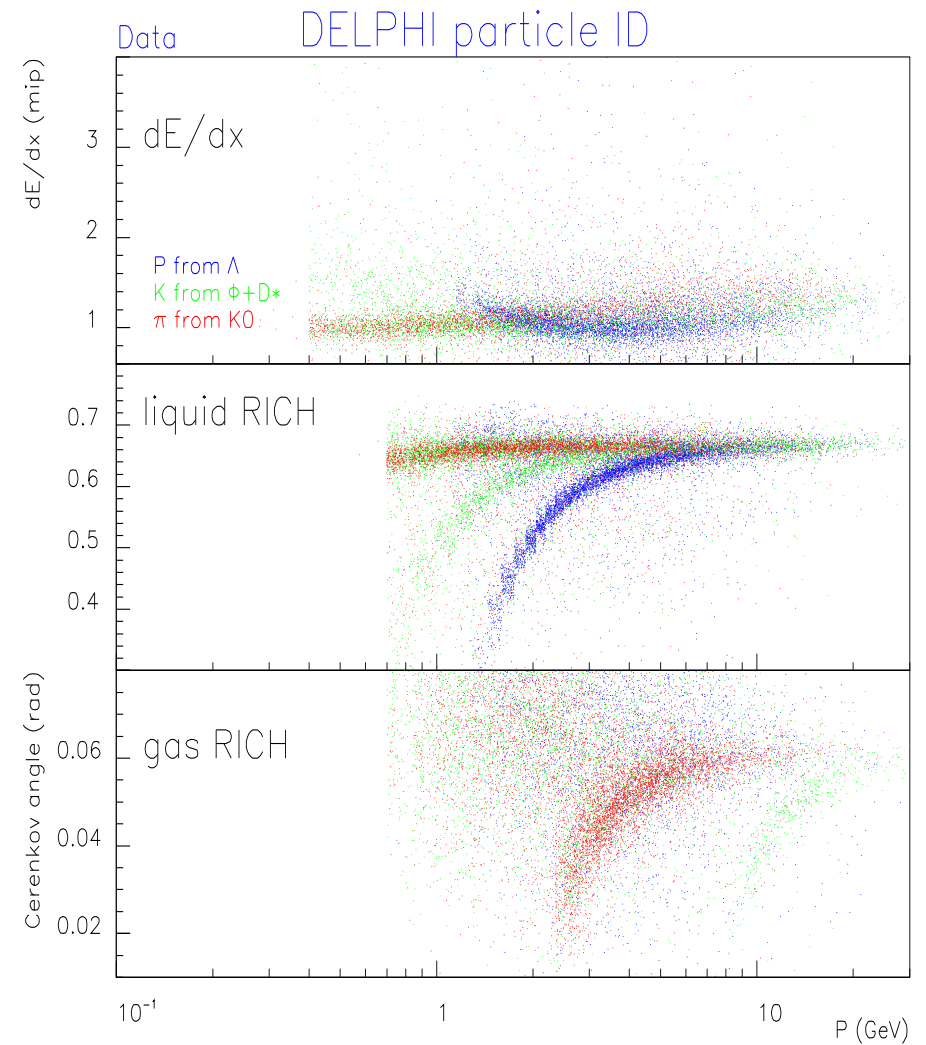
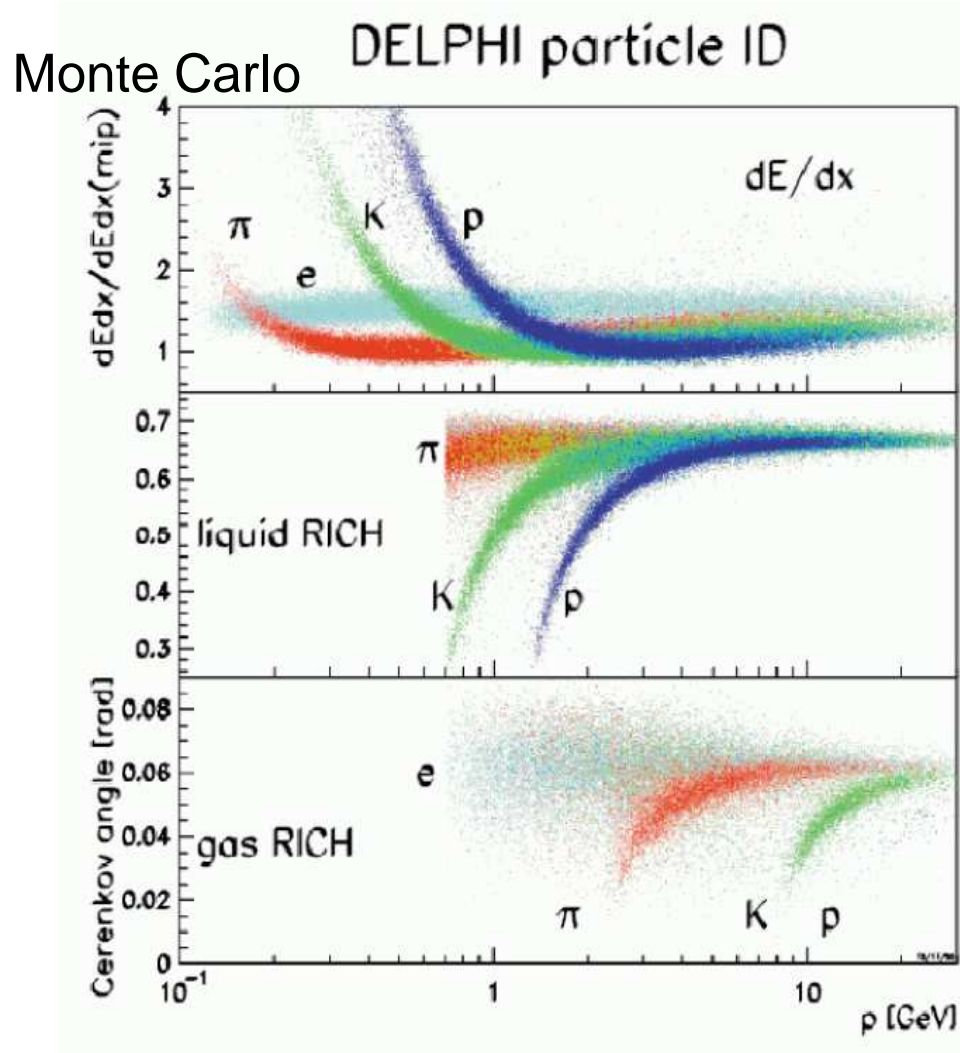




# Identyfikacja cząstek

## Detektory RICH

@ DELPHI



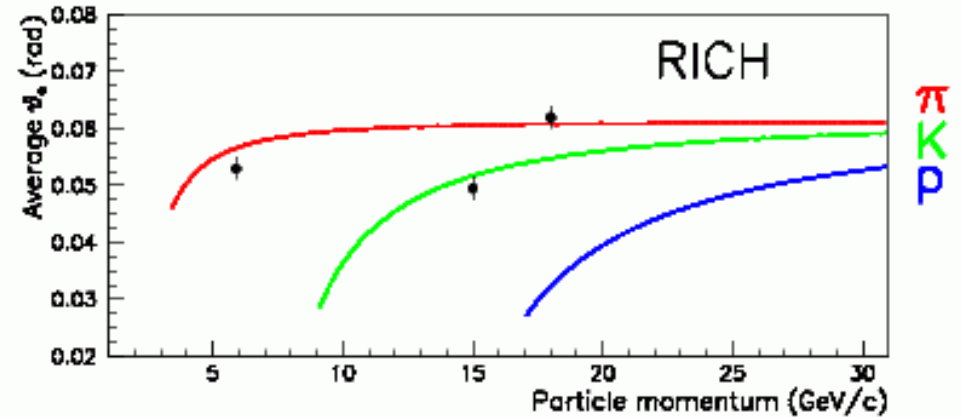
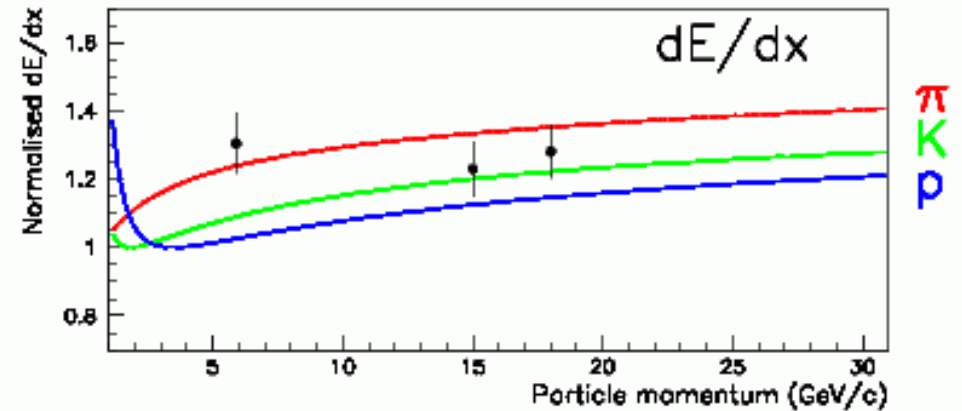
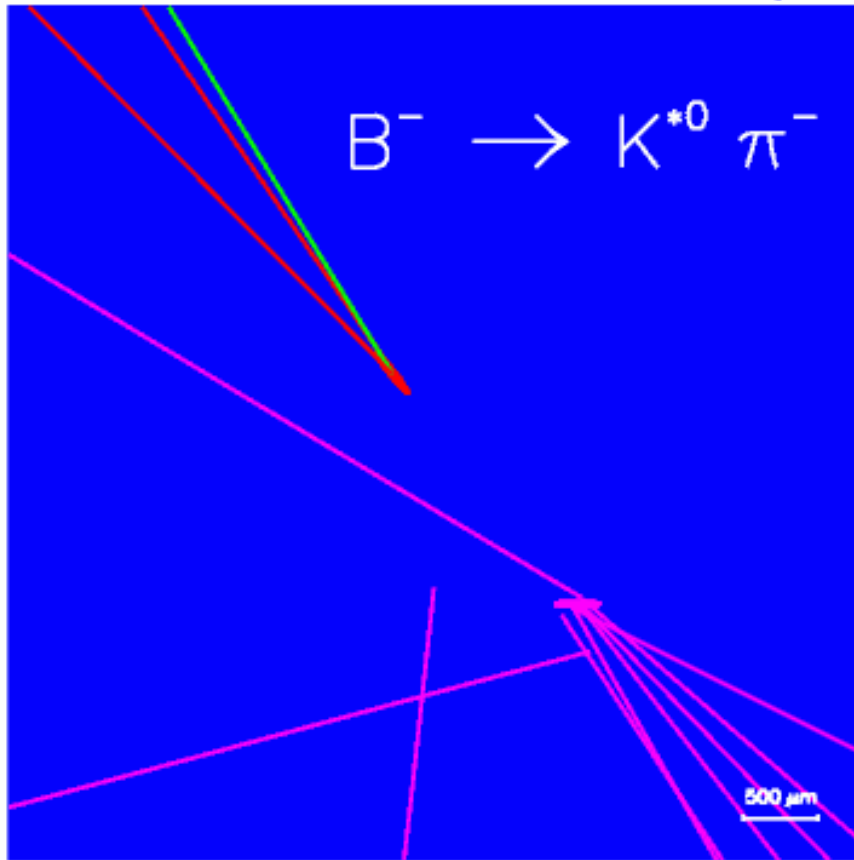


# Identyfikacja cząstek

Przykład rekonstrukcji rozpadu  $B^- \rightarrow K^{*0} \pi^- \rightarrow K^- \pi^+ \pi^-$  w oparciu o RICH

DELPHI Vertex Display

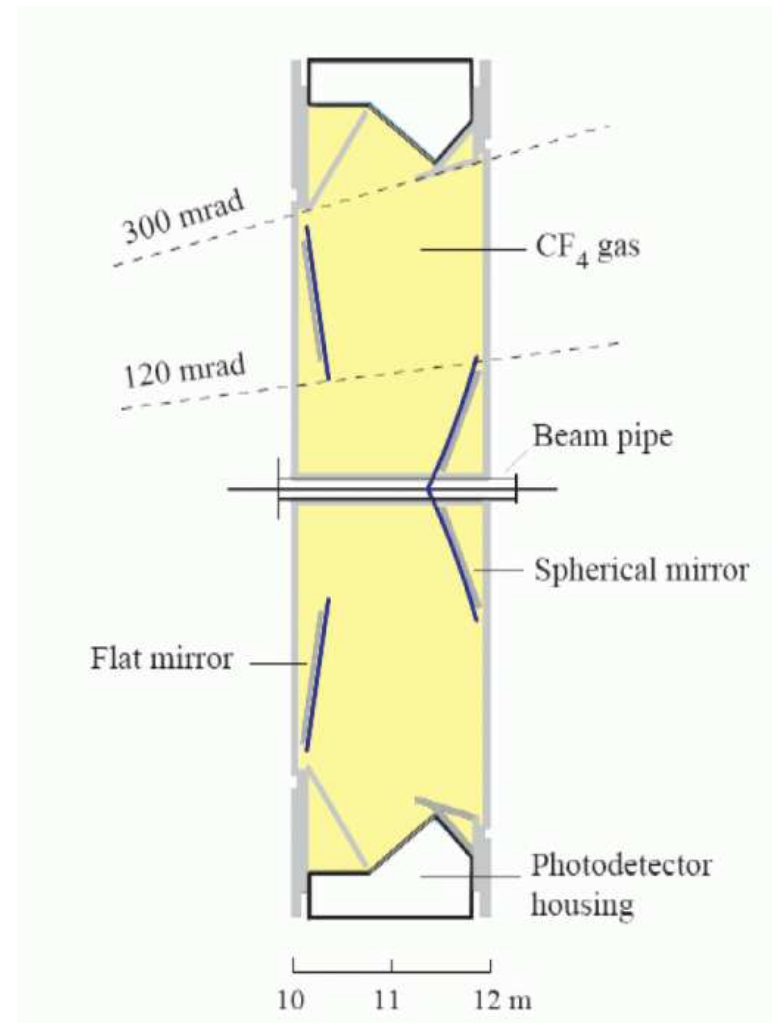
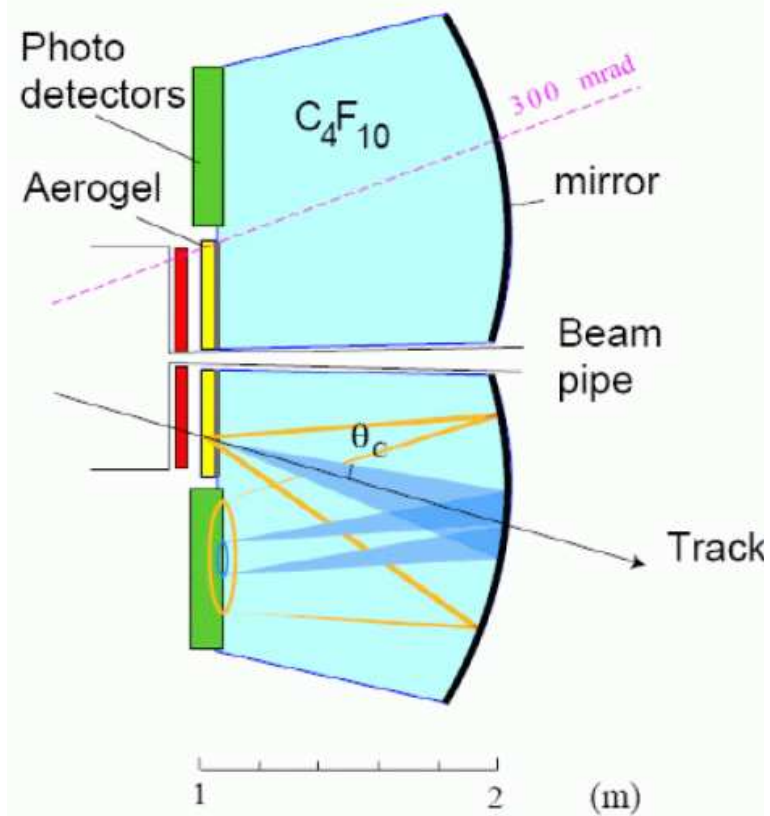
Run: 41541 Event: 1181

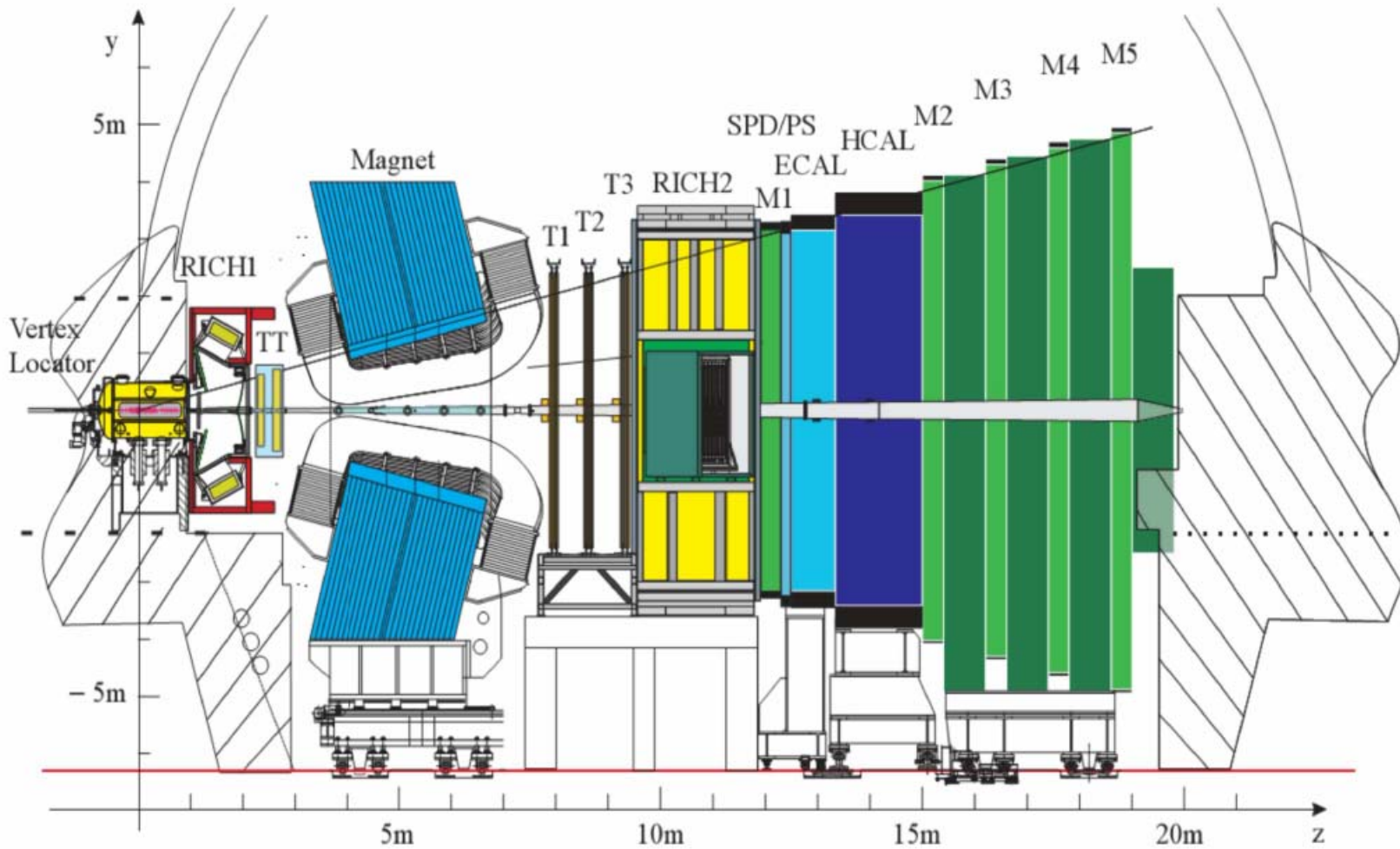


# Identyfikacja cząstek

## Detektory RICH

@ LHCb

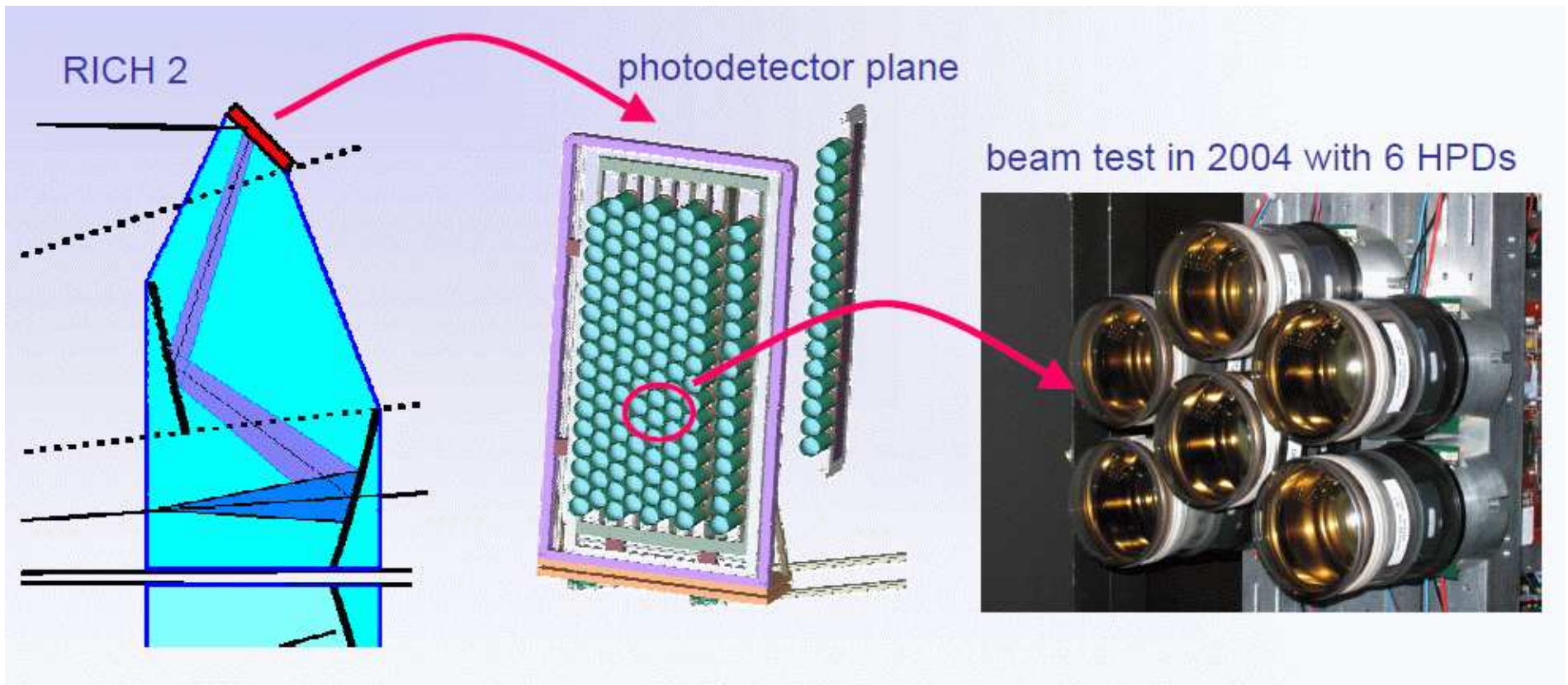




# Identyfikacja cząstek

## Detektory RICH

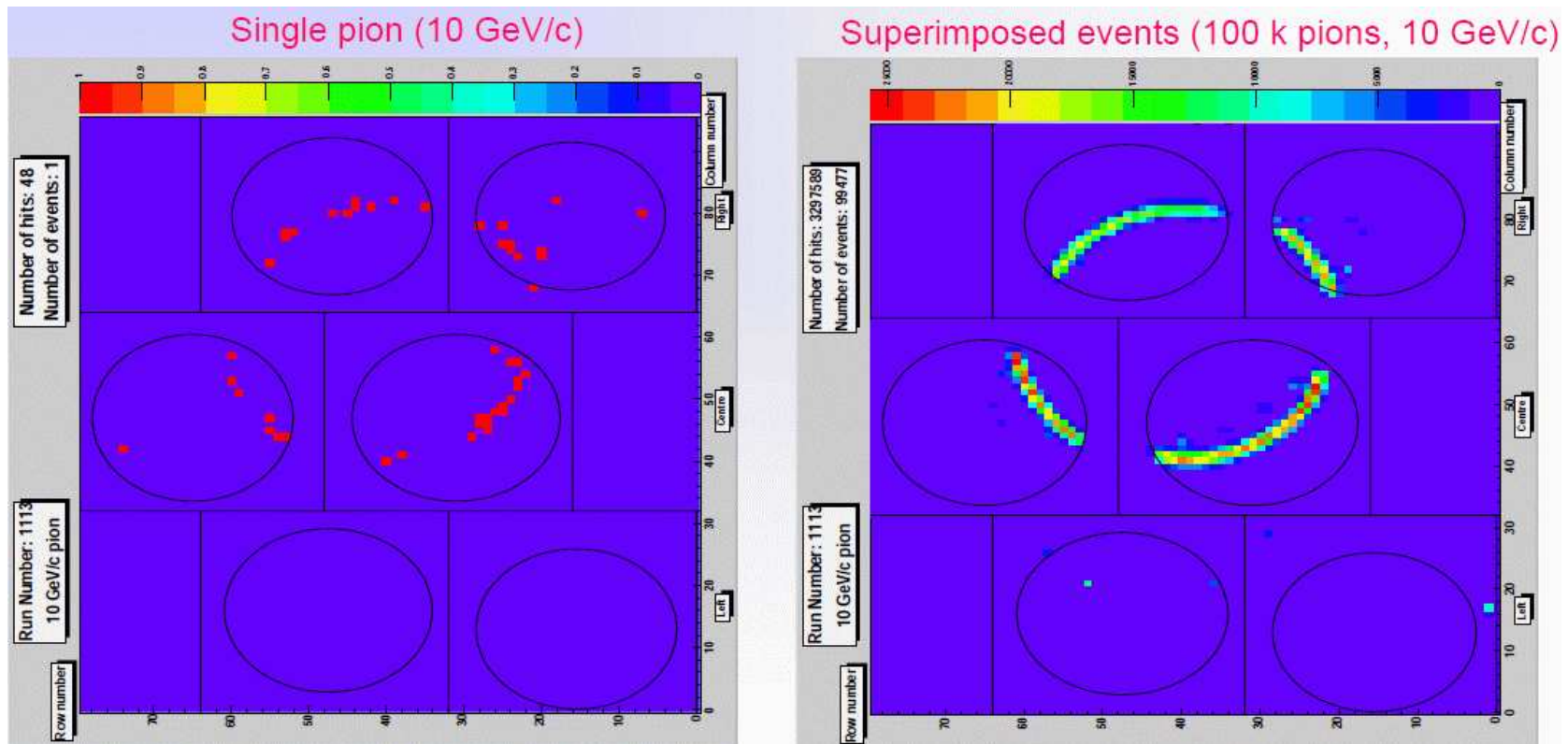
@ LHCb



# Identyfikacja cząstek

## LHCb

Przypadki z detektora RICH z radiatorem  $C_4F_{10}$  na wiązce testowej



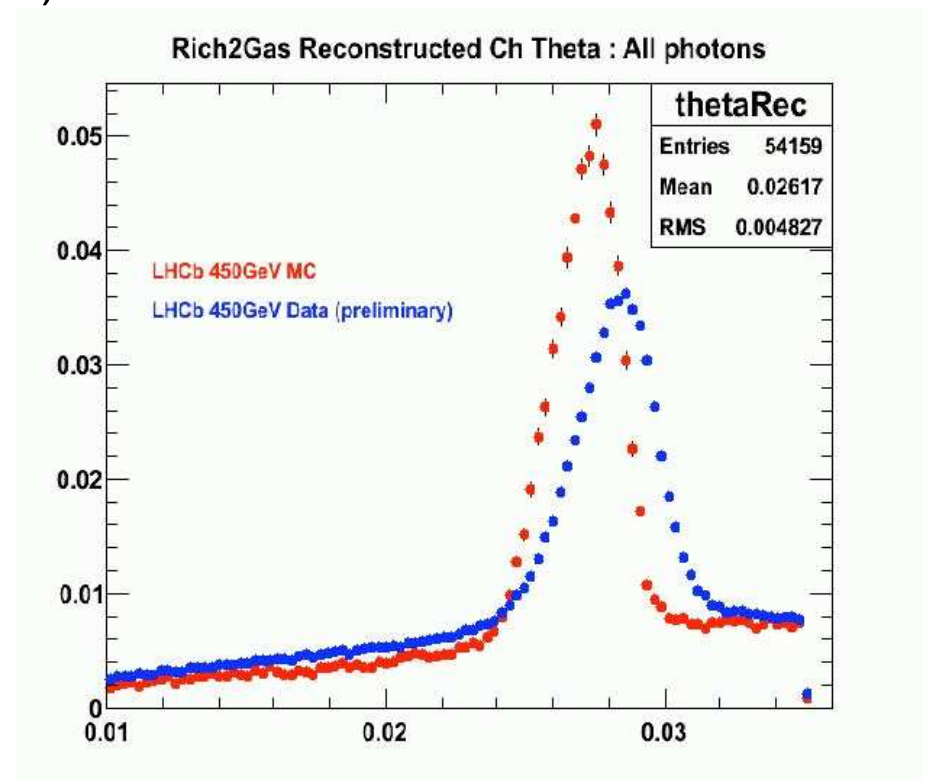
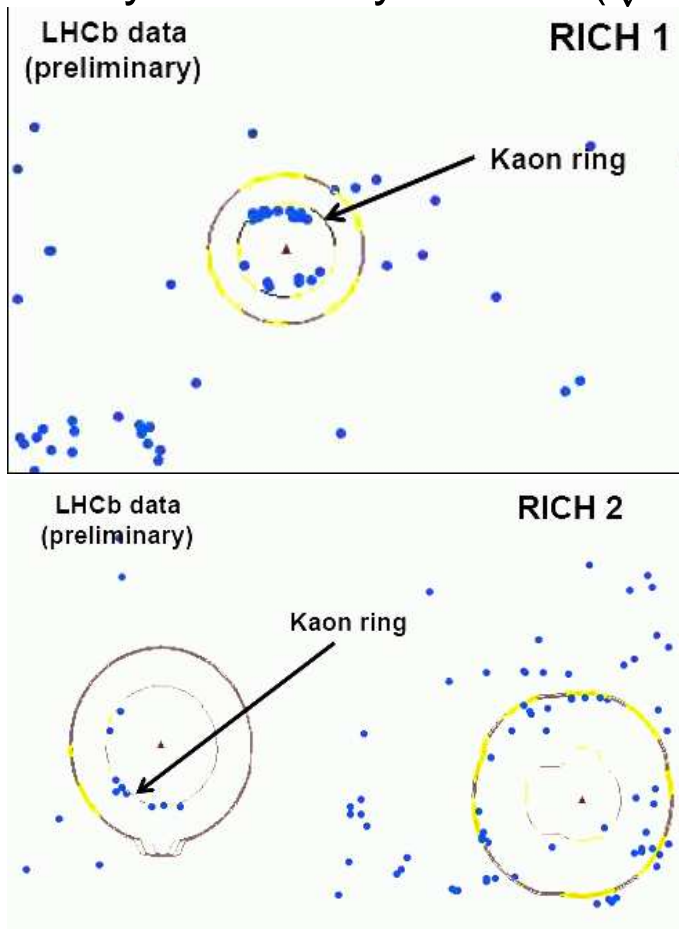
Pojedyncza cząstka: tylko kilkanaście punktów, ale wystarcza.



# Identyfikacja cząstek

## LHCb

Pierwsze wyniki z danych LHC ( $\sqrt{s} = 900\text{GeV}$ )

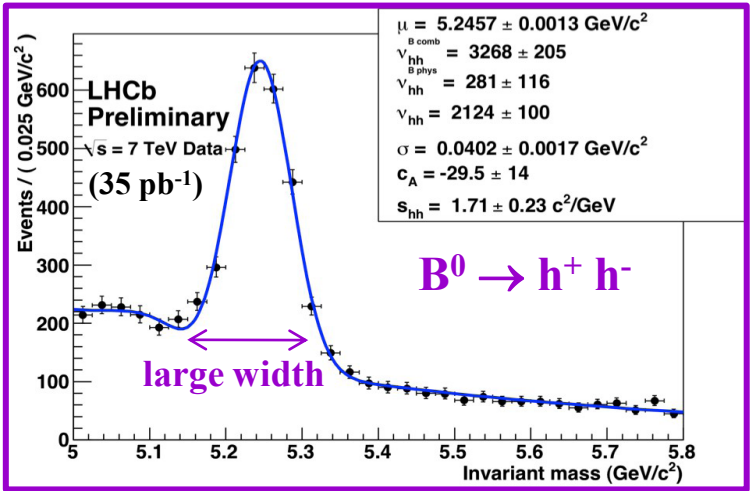


Porównanie z oczekiwanym kątem emisji  
⇒ dyskryminacja  $\pi$  vs  $K$

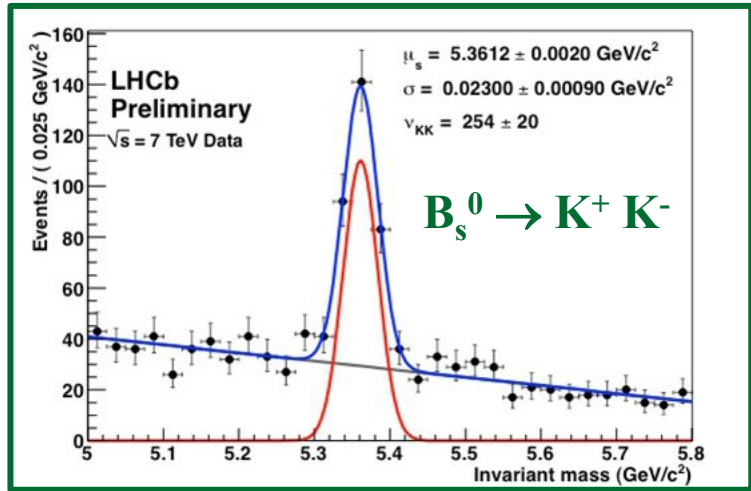


# Detector performance: Particle Identification on $B \rightarrow hh$

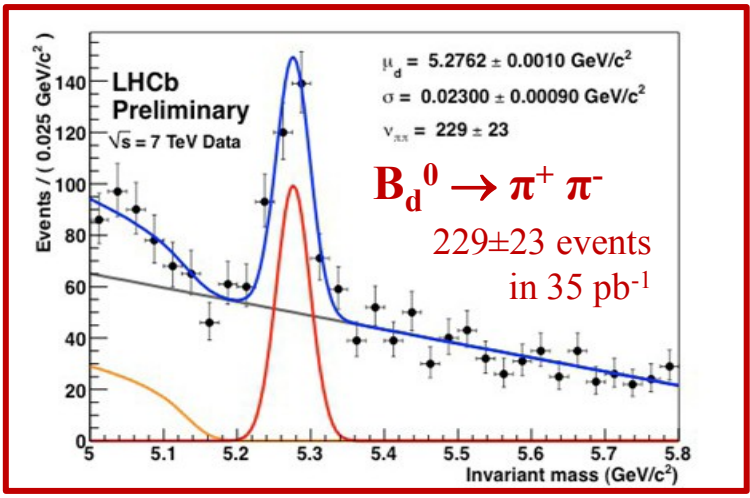
No particle identification  $\rightarrow$  any 2 hadrons!



particle identification of 2 Kaons

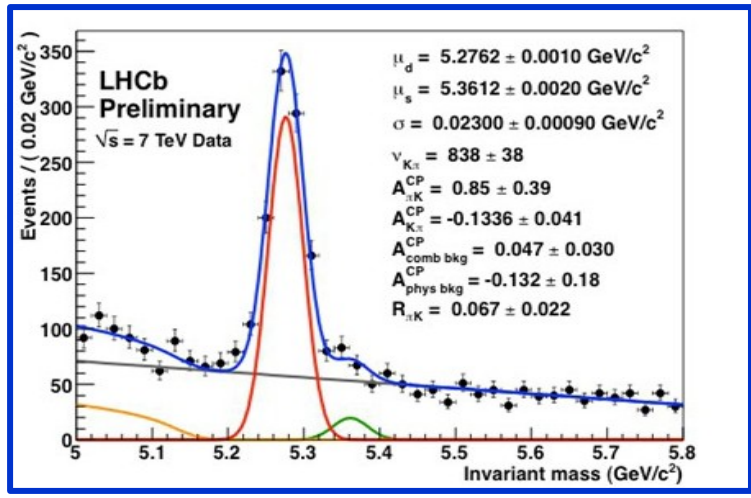


particle identification of 2  $\pi$   
 $BR(B \rightarrow \pi^+ \pi^-) = 5 \times 10^{-6}$  !



particle identification of 1  $\pi$  and 1 K

$B_d^0 \rightarrow K \pi$  &  $B_s^0 \rightarrow K \pi$   
(will get as many  $K\pi$  in  $<1$  fb<sup>-1</sup> as Belle in 1000 fb<sup>-1</sup>)

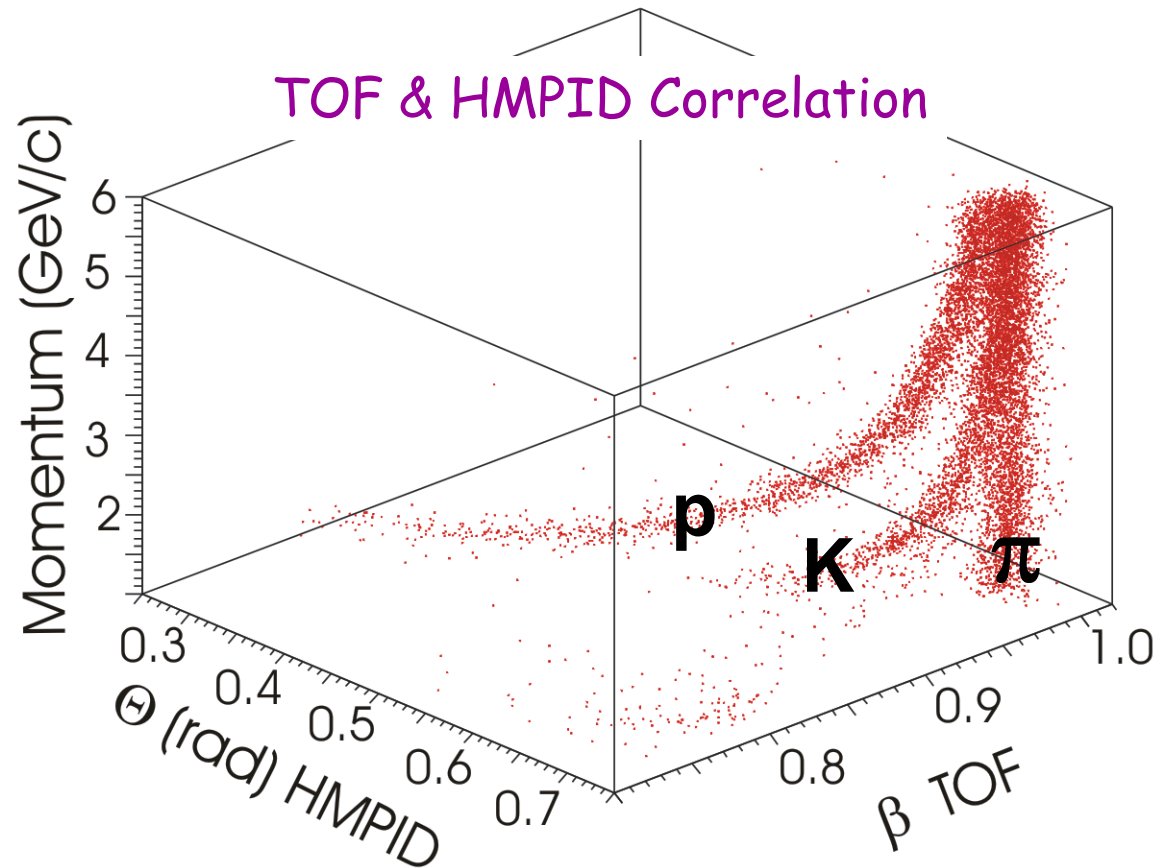


Expectations 2011:  
LHCb: 6500 ev./fb<sup>-1</sup>  
(CDF: 1100 ev./fb<sup>-1</sup>)

what is expected at ALICE combining RICH and TOF

## PID Performance

For  $p > 2.5$  GeV/c  
K-ID also improved with  
HMPID info  
(on  $\sim 8\%$  of the central  
acceptance)



$\pi$  and protons ID "easier" task, up to 5 GeV/c with:

PID Efficiency  $> 90\%$  and  $< 10\%$  Contamination for  $\pi$

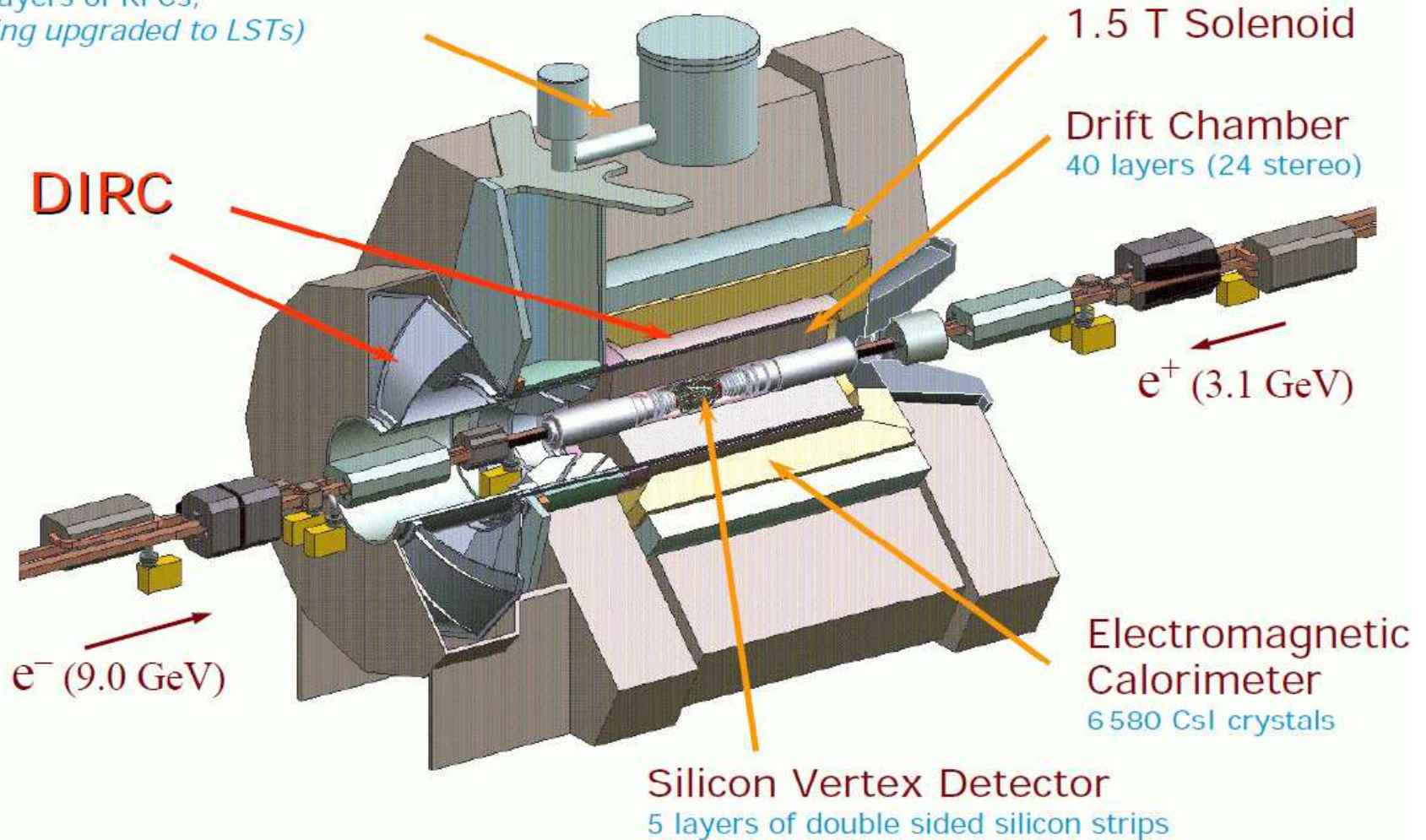
PID Efficiency  $90\%-70\%$  and  $< 10\%$  Contamination for protons

# Identyfikacja cząstek

## Detektor BaBar

Instrumented Flux Return

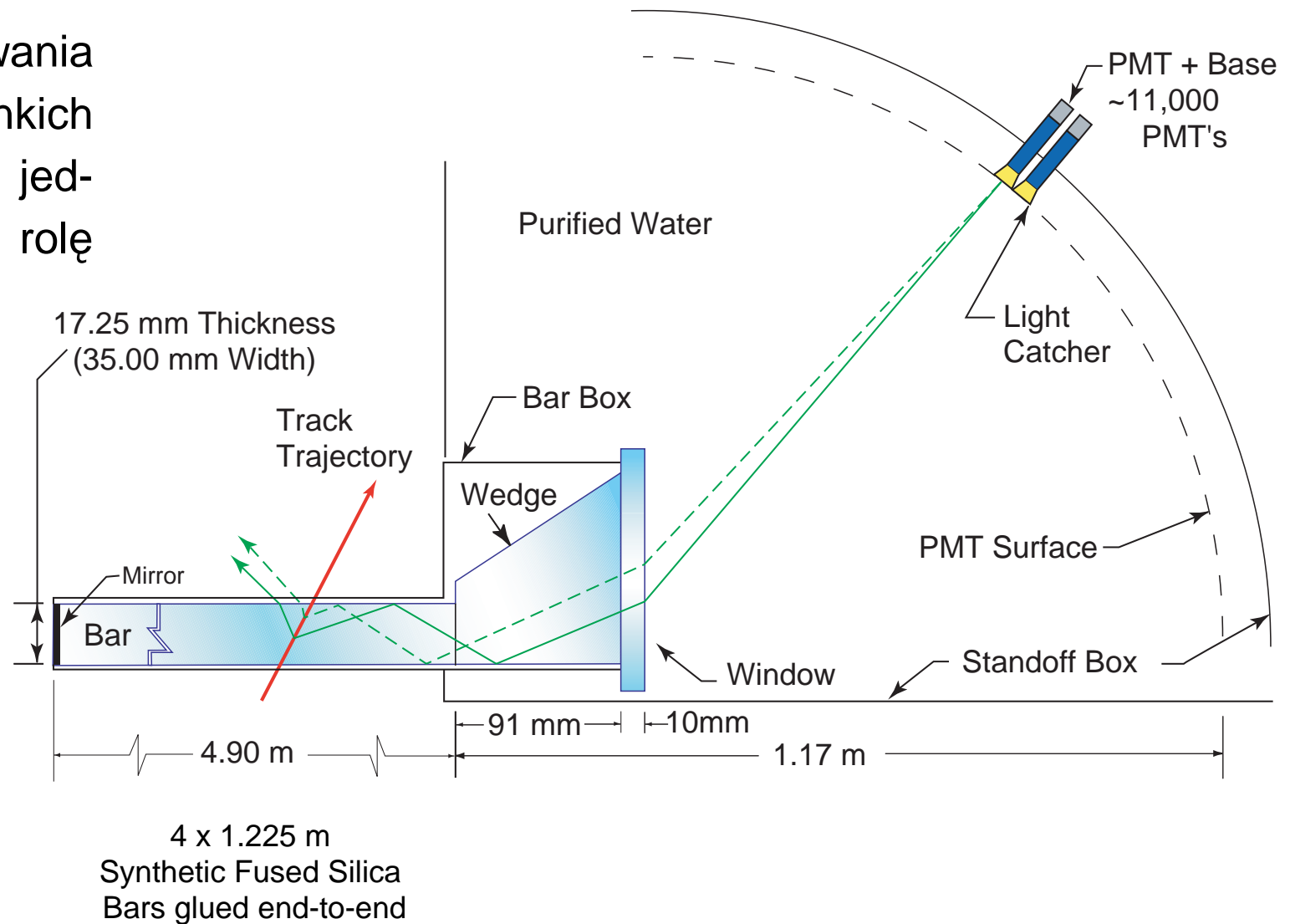
19 layers of RPCs,  
(being upgraded to LSTs)



# Identyfikacja cząstek

## DIRC @BaBar

Emisja promieniowania Czerenkowa w cienkich warstwach, które jednocześnie pełnią rolę światłowodów.





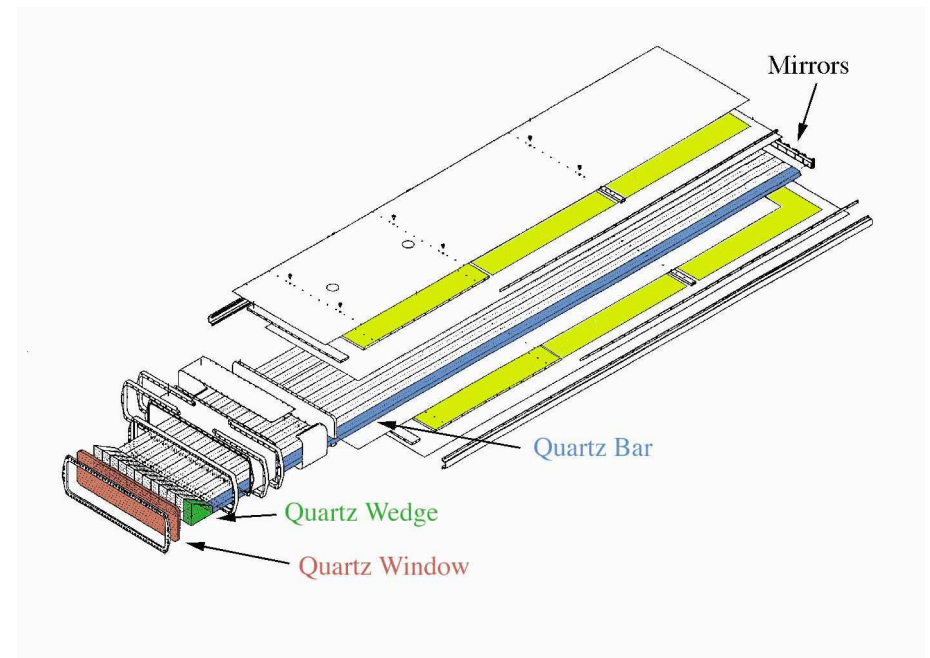
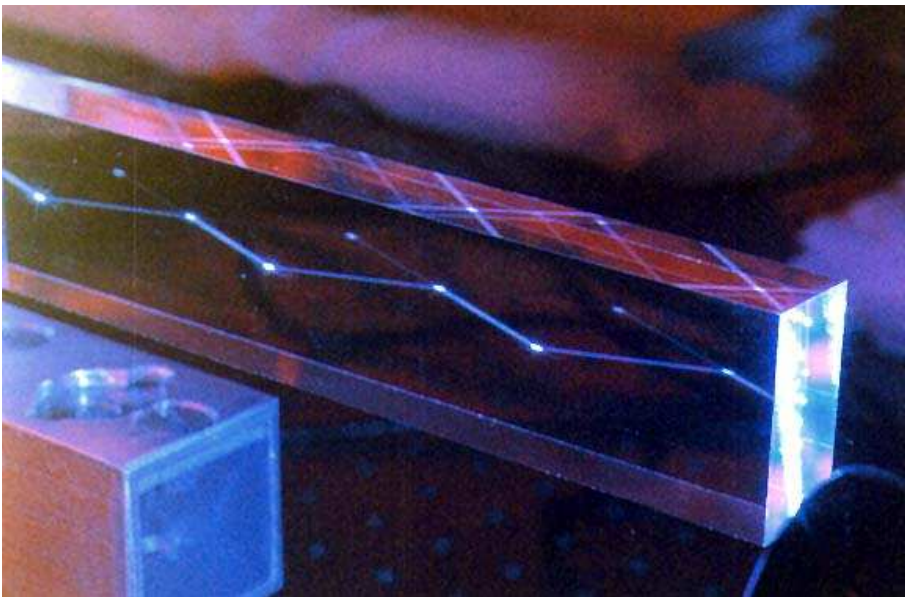
# Identyfikacja cząstek

## DIRC @BaBar

DIRC: Detection of Internally Reflected Cherenkov light

Całkowite wewnętrzne odbicia w prostopadłościennym elemencie - stały kąt propagacji!

Informacja o kącie emisji promieniowania Czerenkowa może być “wyprowadzona” z centralnej części detektora - mniejsze rozmiary, mniej materiału przed kalorymetrami.



# Identyfikacja cząstek

[DIRC @BaBar](#)

Widok płaszczyny fotopowielaczy i otwartego zbiornika wodnego

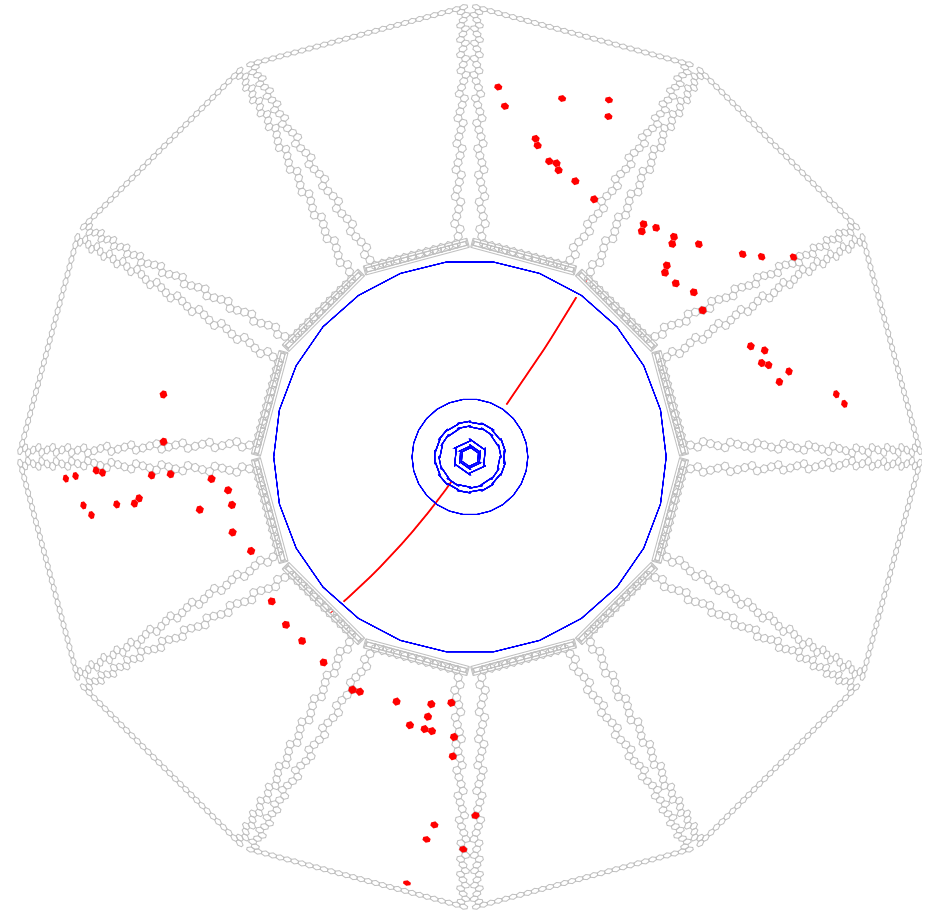
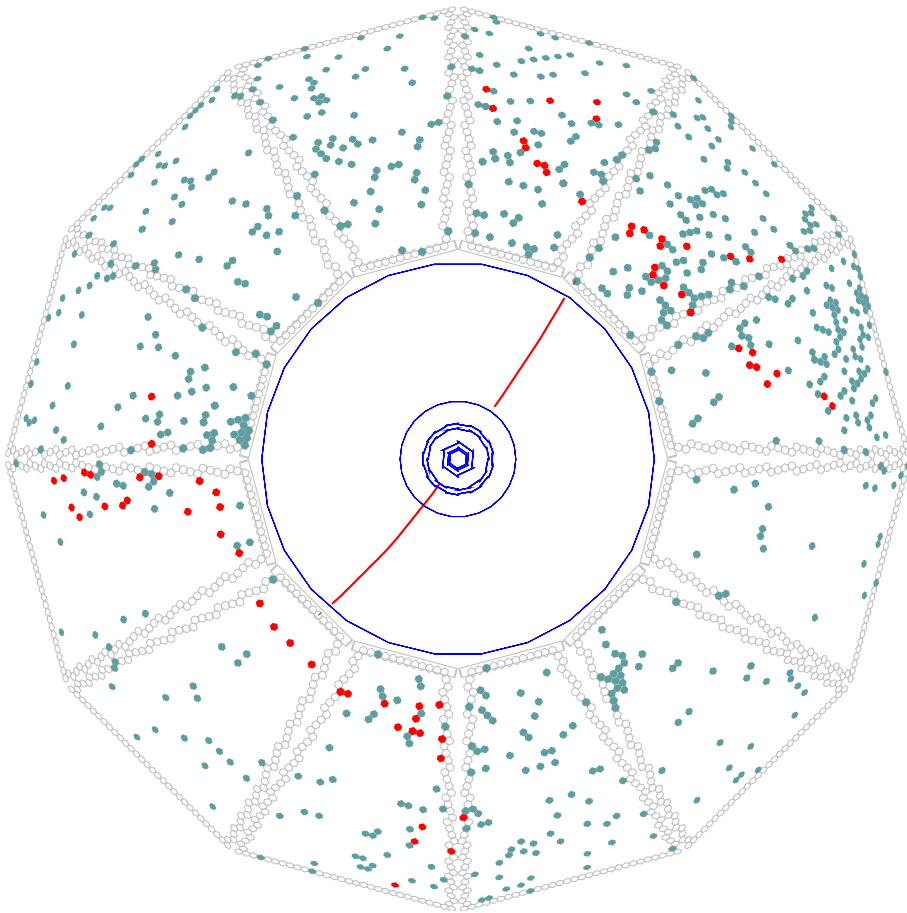




# Identyfikacja cząstek

## DIRC @BaBar

Precyzyjny pomiar czasu ( $\sigma_t \sim 1.7ns$ ) pozwala na istotną redukcję tła (cięcie  $\pm 8ns$ )



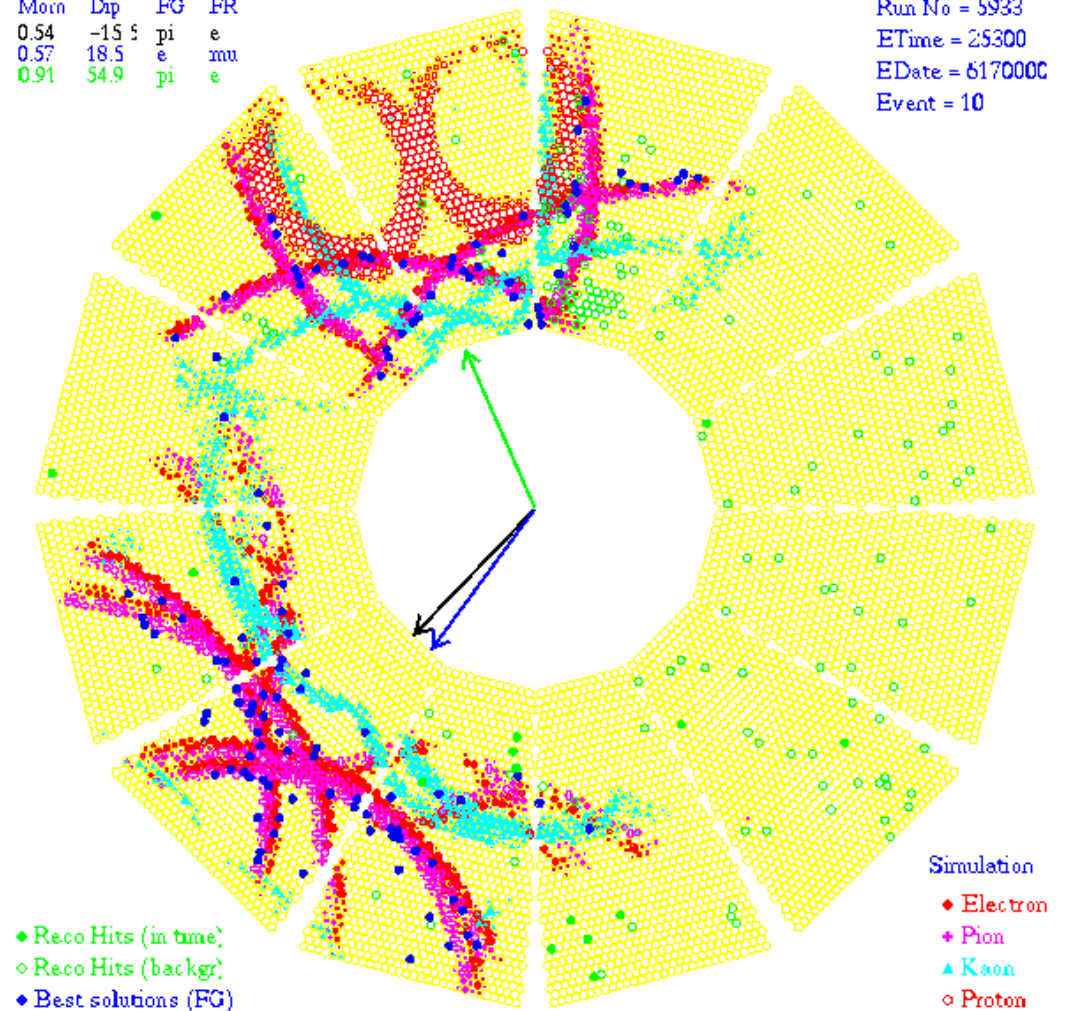
# Identyfikacja cząstek

## DIRC @BaBar

Identyfikacja cząstki odbywa się poprzez porównanie mierzonego rozkładu światła z oczekiwaniami opartymi na symulacjach Monte Carlo.

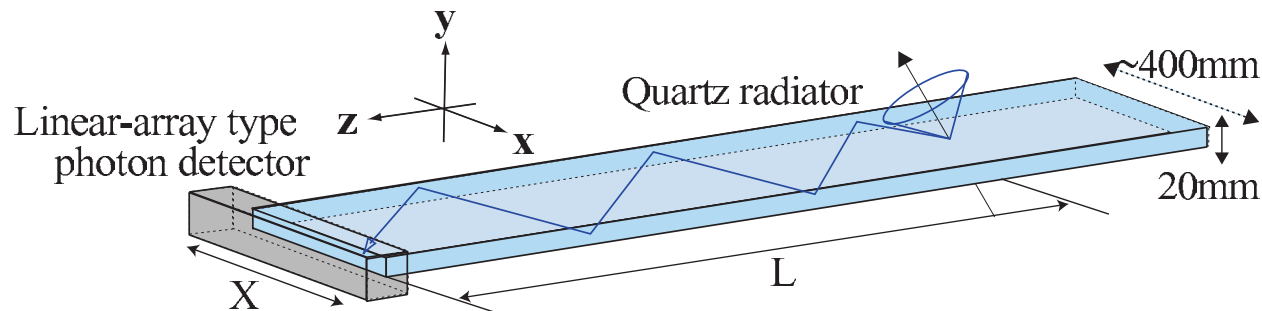
Mom	Dip	FG	FR
0.54	-15.5	pi	e
0.57	18.5	e	mu
0.91	54.9	pi	e

Run No = 5933  
ETime = 25300  
EDate = 617000C  
Event = 10

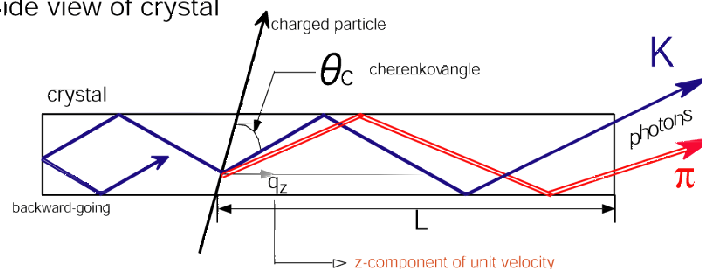


# TOP counter

- Cherenkov ring imaging using timing information



Side view of crystal



$$\cos\theta_c = \frac{1}{n(\lambda)\beta}$$

Difference of path length

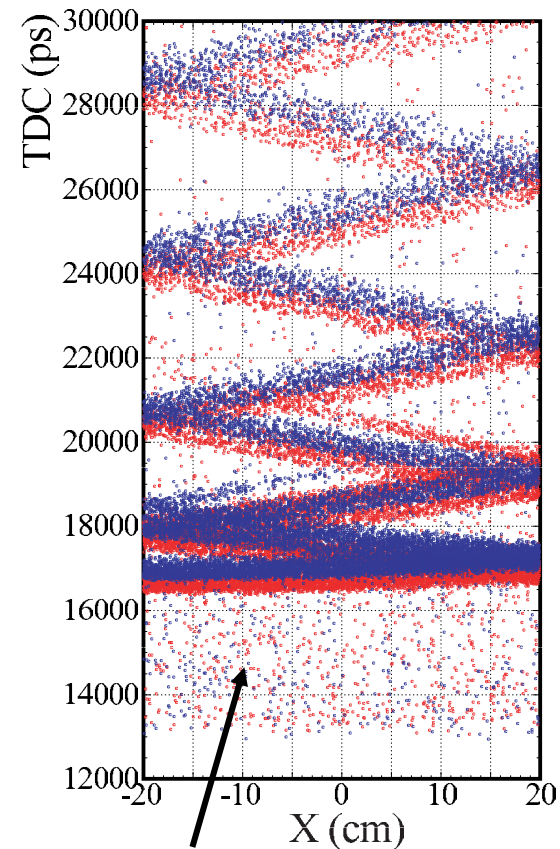
→ Difference of **time of propagation (TOP)**

150~200ps from **TOP + TOF from IP**

with precise time resolution ( $\sigma \sim 40\text{ps}$ ) for each photon

Simulation

2GeV/c,  $\theta = 90$  deg.



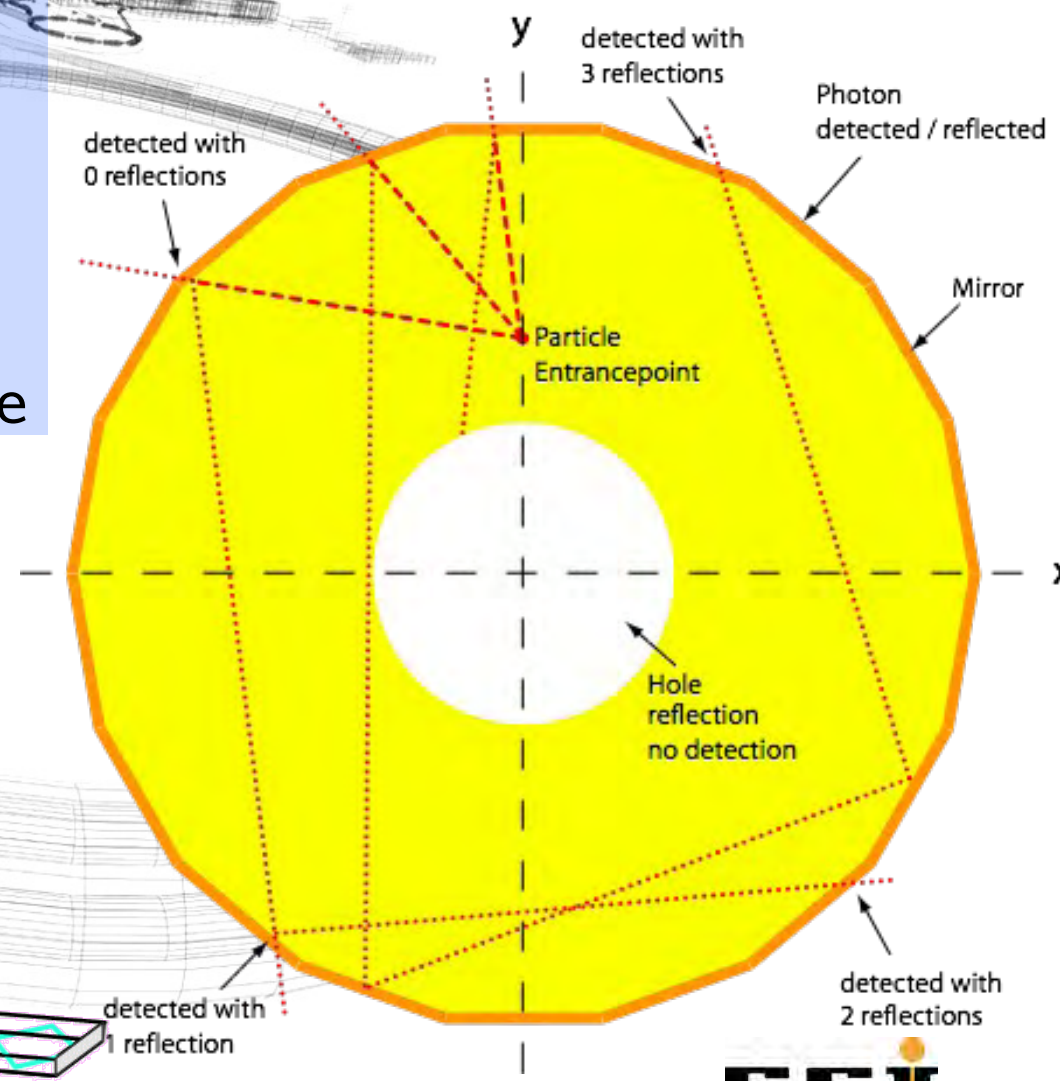
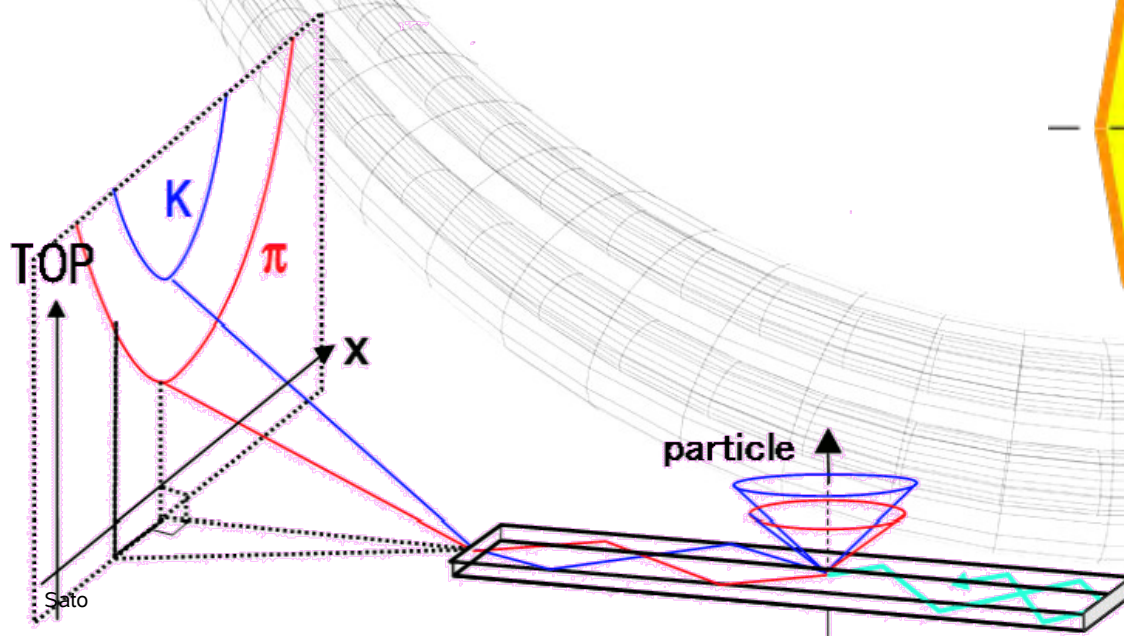
$\delta$ -ray,  
had. int.

# PANDA Endcap DIRC



## Setup of Endcap Cherenkov

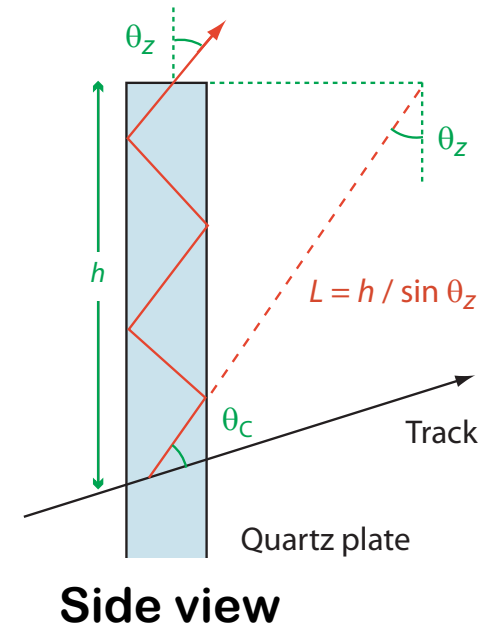
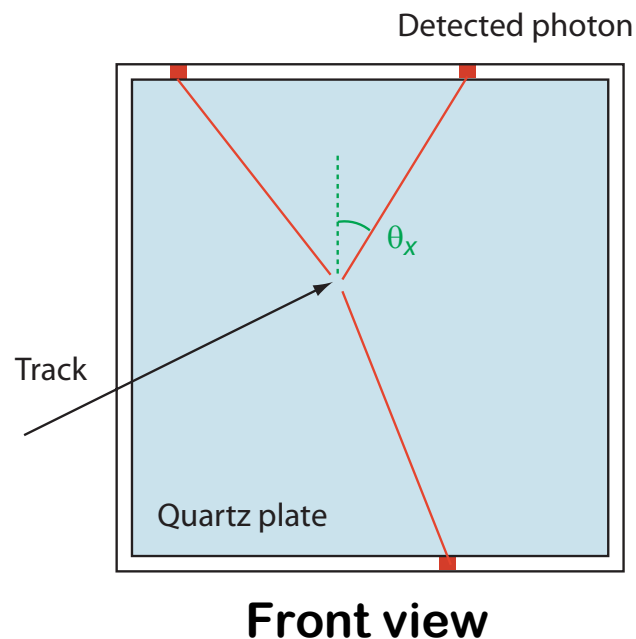
- DIRC principle
- Disc shaped fused silica radiator  
2.1 m diameter
- Measure coordinate and time
- Dispersion correction through dichroic filters or second coordinate





# TORCH concept

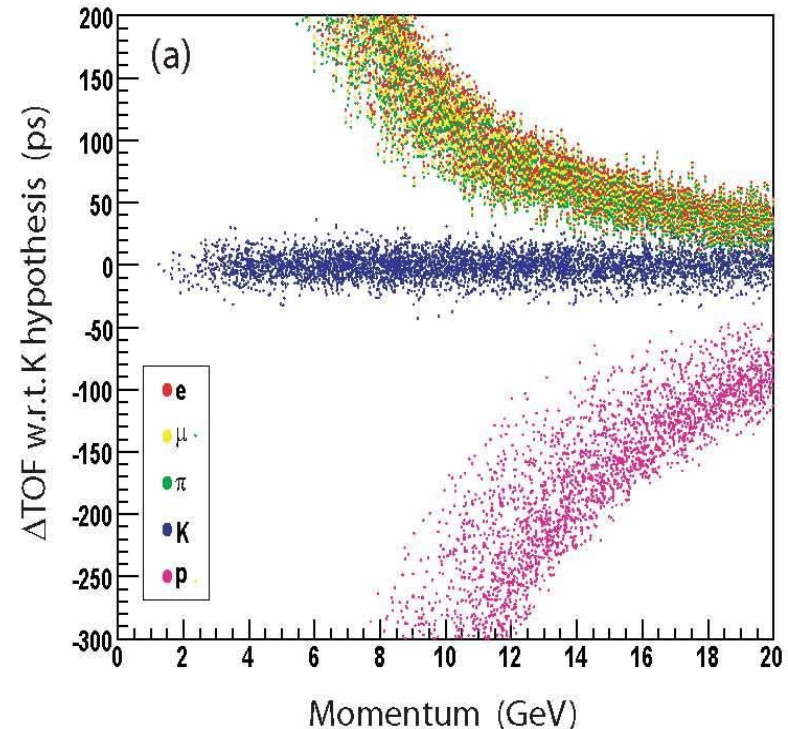
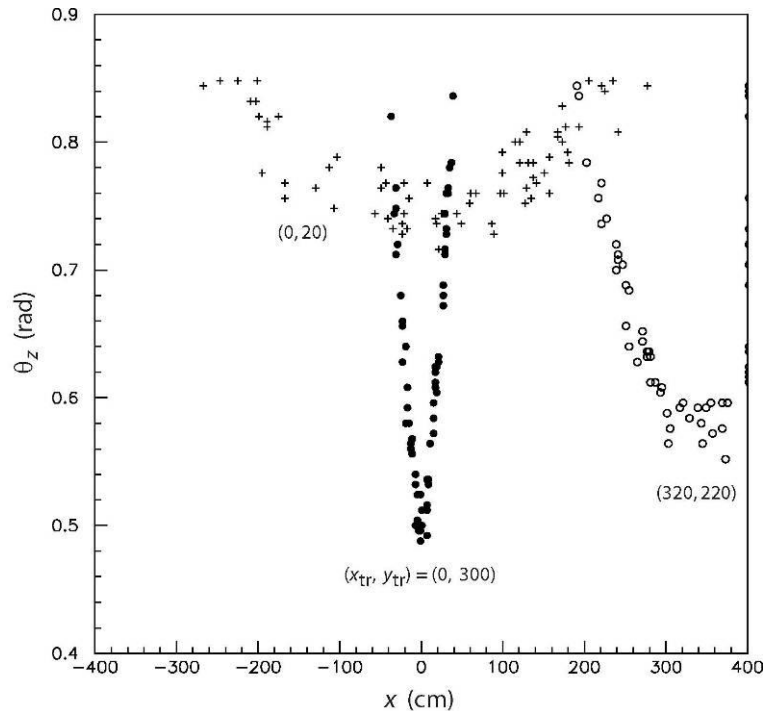
- I am currently working on the design of a new concept for Particle ID for the upgrade of LHCb (planned to follow after  $\sim 5$  years of data taking)
- Uses a large plate of quartz to produce Cherenkov light, like a DIRC  
But then identify the particles by measuring the photon arrival times  
Combination of **TOF** and **RICH** techniques  $\rightarrow$  named TORCH
- Detected position around edge gives photon angle ( $\theta_x$ )  
Angle ( $\theta_z$ ) out of plane determined using focusing  
Knowing photon trajectory, the track arrival time can be calculated





# Predicted performance

- Pattern recognition will be a challenge, similar to a DIRC
- Assuming a time resolution per detected photon of 50 ps, the simulated performance gives  $3\sigma$   $K$ - $\pi$  separation up to  $> 10$  GeV  
Will need to be confirmed with an R&D program using test detectors



# Identyfikacja cząstek

## Promieniowanie przejścia

Transition radiation

Promieniowanie gamma emitowane przez ultra-relatywistyczne cząstki przy przechodzeniu przez granicę dwóch ośrodków o różnym stałej dielektrycznej.

Średnia wypromieniowana energia:

$$W \approx \frac{\alpha}{3} \hbar \omega_p \gamma$$

$\omega_p$  - częstość plazmowa ( $\hbar \omega_p \sim 20 eV$ )

Energie fotonów  $\hbar \omega \approx \frac{1}{4} \hbar \omega_p \gamma$

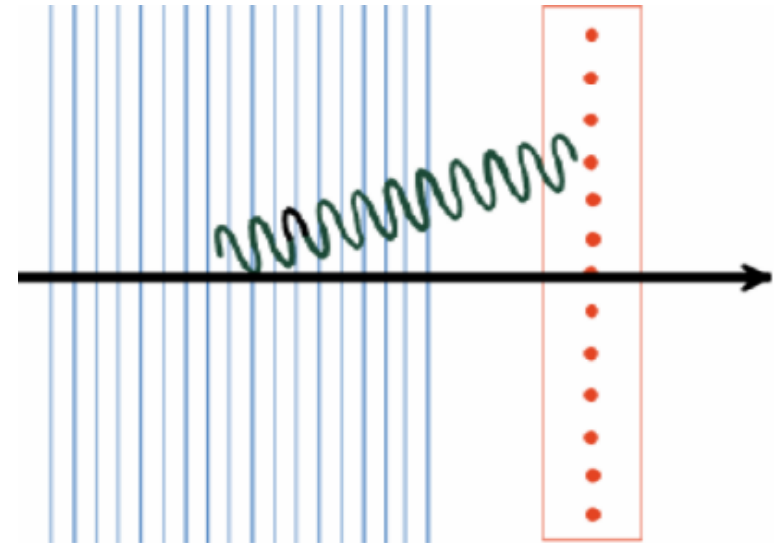
⇒ prawdopodobieństwo emisji  $\sim \alpha = \frac{1}{137}$

Aby uzyskać mierzalny efekt potrzebny jest układ wielu naprzemian ułożonych warstw.

Kąt emisji promieniowania  $\theta \sim \frac{1}{\gamma}$

⇒ fotony rejestrowane wzdłuż toru cząstki, widoczne jako wzrost  $dE/dx$

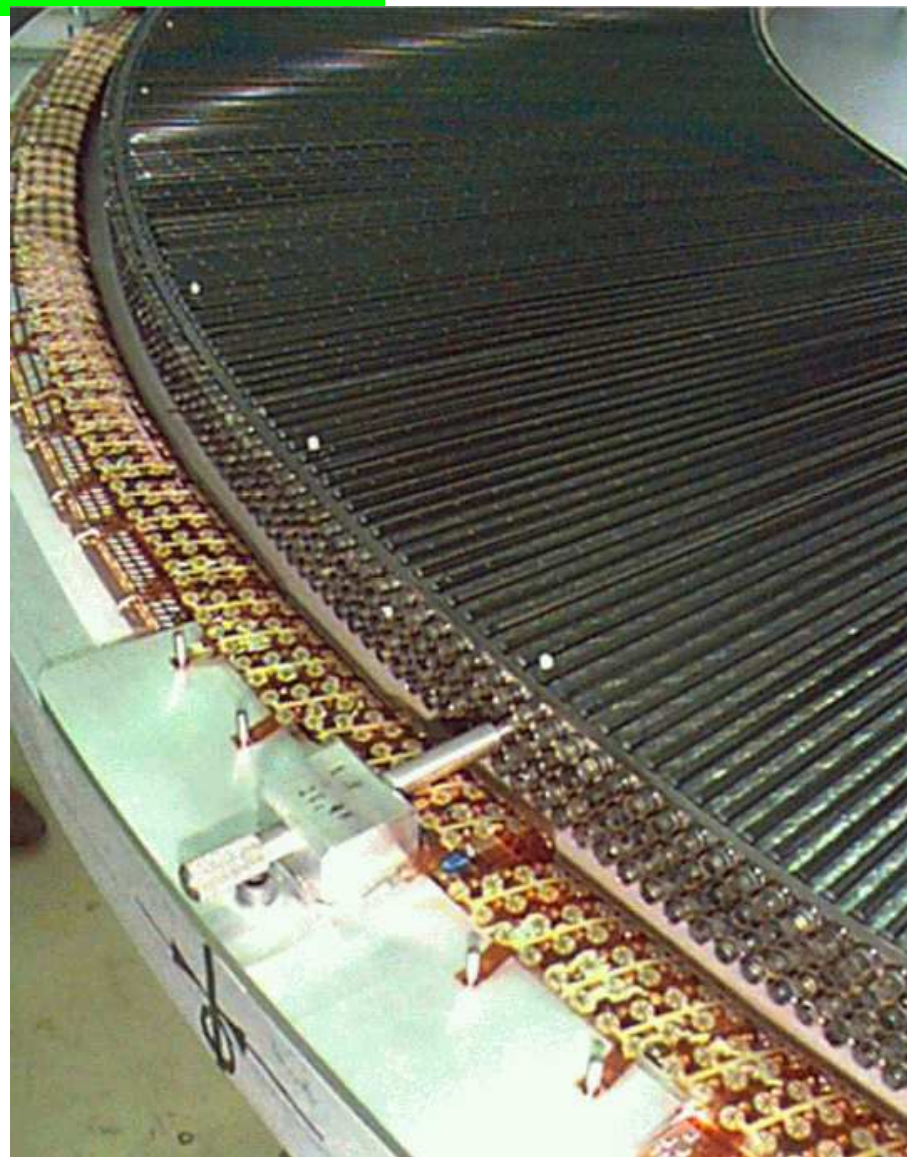
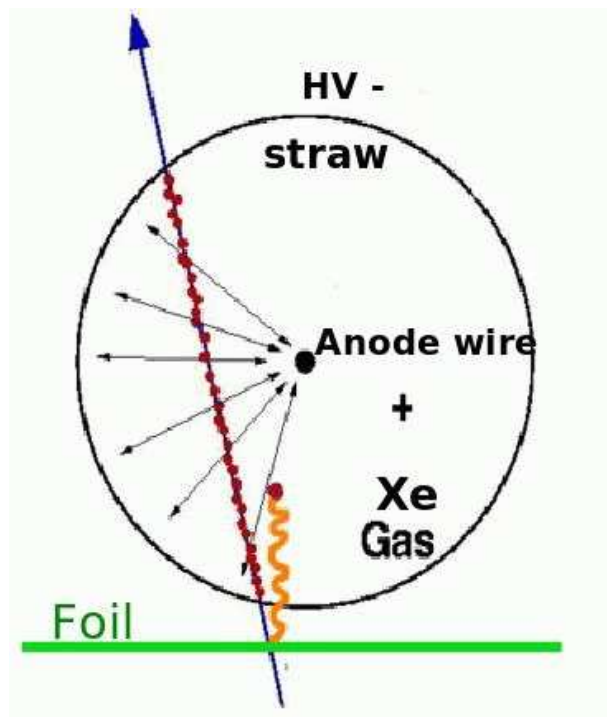
Najczęściej wykorzystywane do rozróżniania  $e^\pm / \pi^\pm$  przy wysokich pędach



# Promieniowanie przejścia

## ATLAS

Radiator jest cienka folia polipropylenowa ( $15\mu m$ ) umieszczana pomiędzy warstwami komór słomkowych.



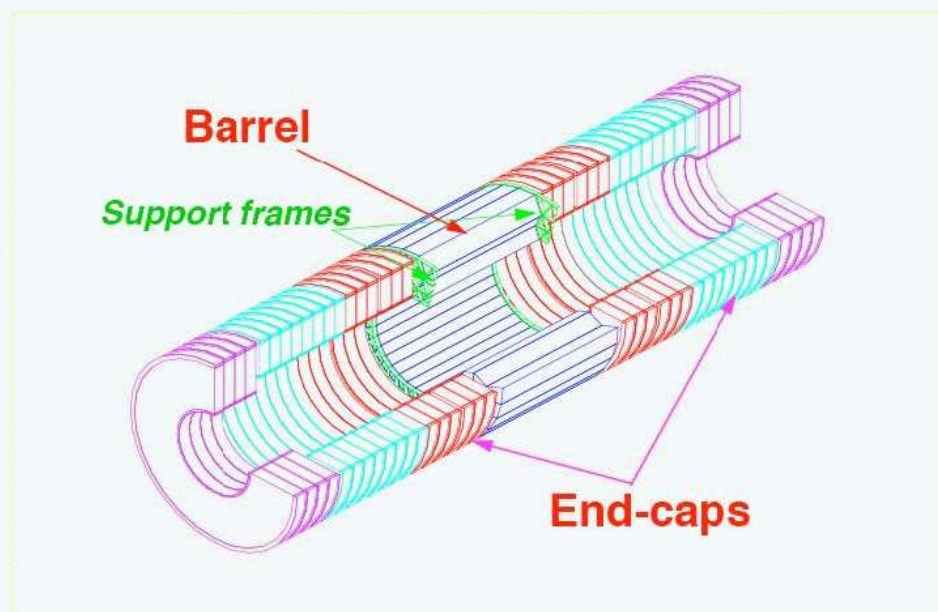
Ksenon - efektywna absorbcja X (10-30 keV)



# Promieniowanie przejścia

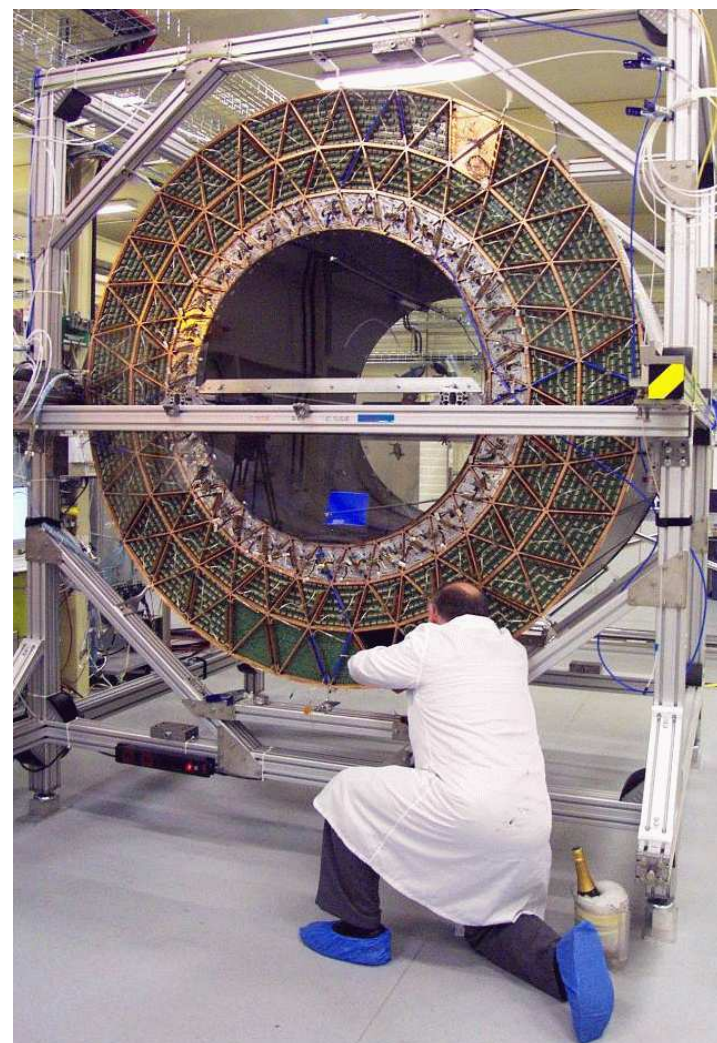
ATLAS

## TRT global parameters



Length: Total	6802 cm	N straws: Total	372032
Barrel	148 cm	Barrel	52544
End-cap	257 cm	End-cap	319488
Outer diameter	206 cm	N electronics channels	424576
Inner diameter	96-128 cm	Weight	~ 1500 kg

Transition Radiation Tracker (barrel)

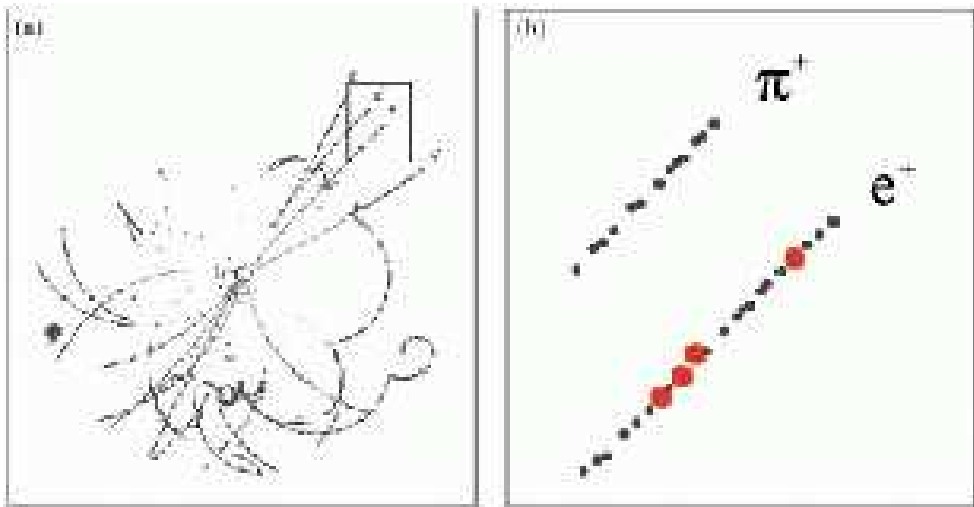




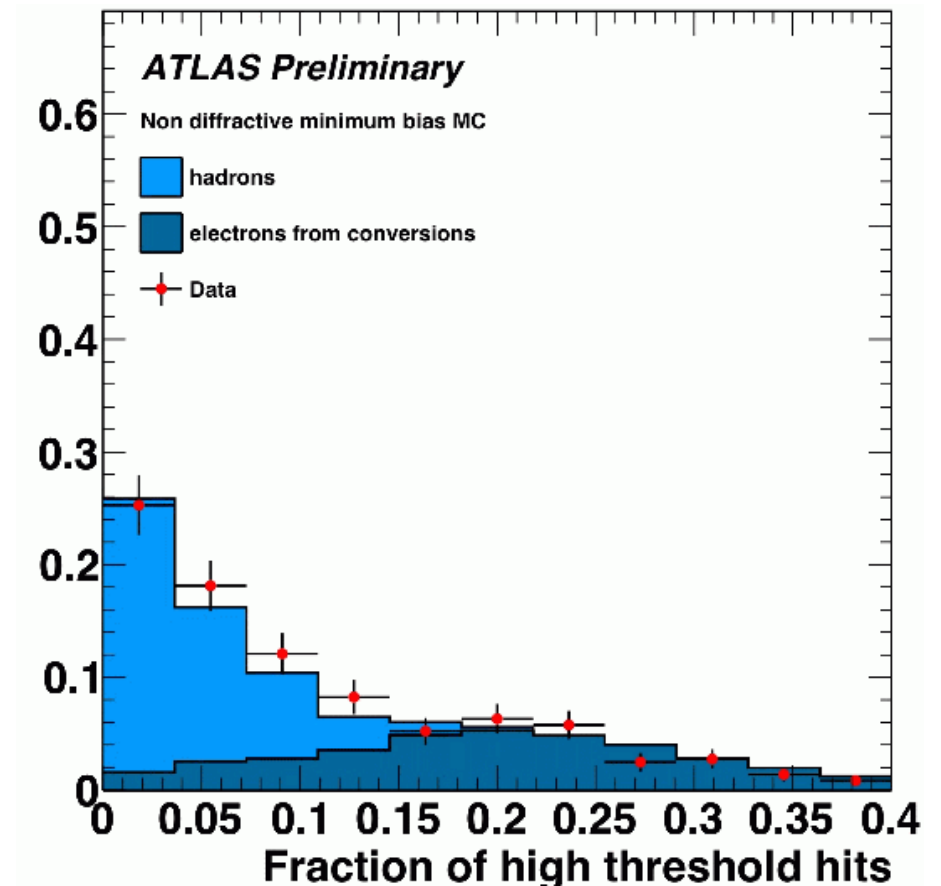
# Promieniowanie przejścia

## ATLAS

Dla cząstki o  $\gamma > 1000$  oprócz jonizacji obserwujemy duże depozyty pochodzące od fotonów X.



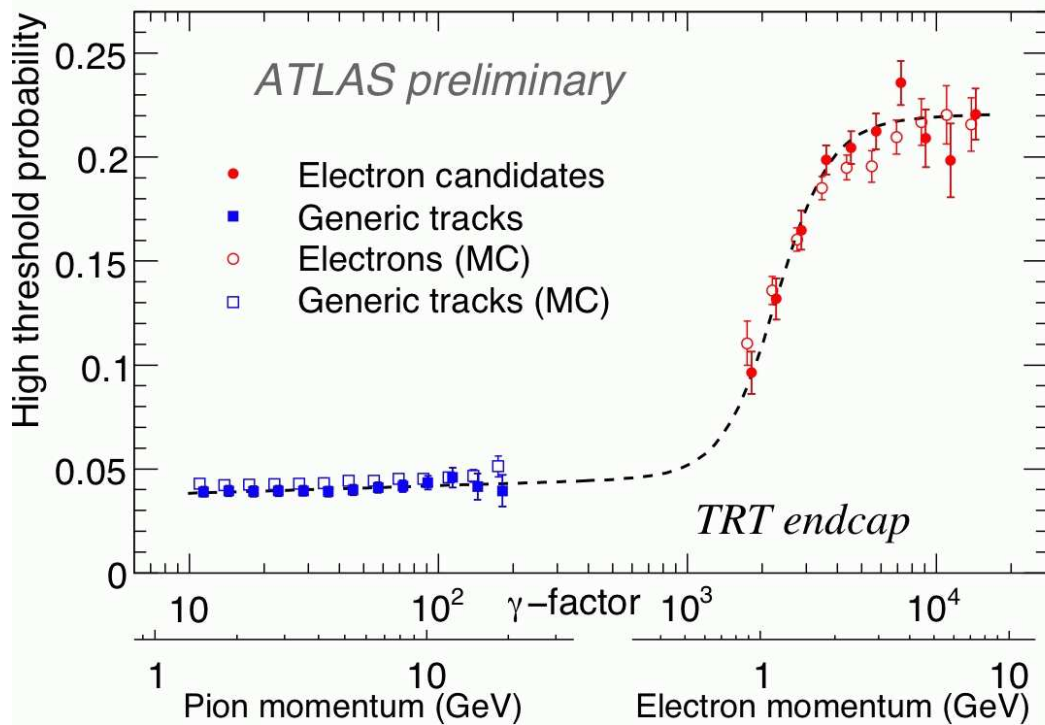
Ułamek dużych depozytów wskazuje na typ cząstki. Pierwsze dane LHC:



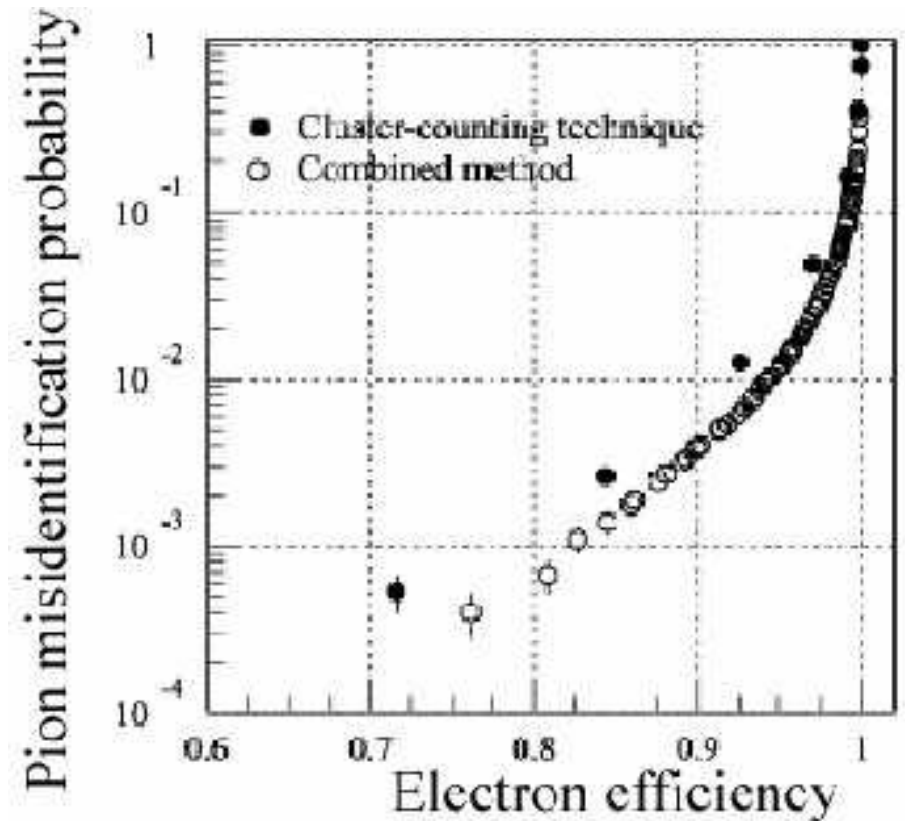
# Promieniowanie przejścia

## ATLAS

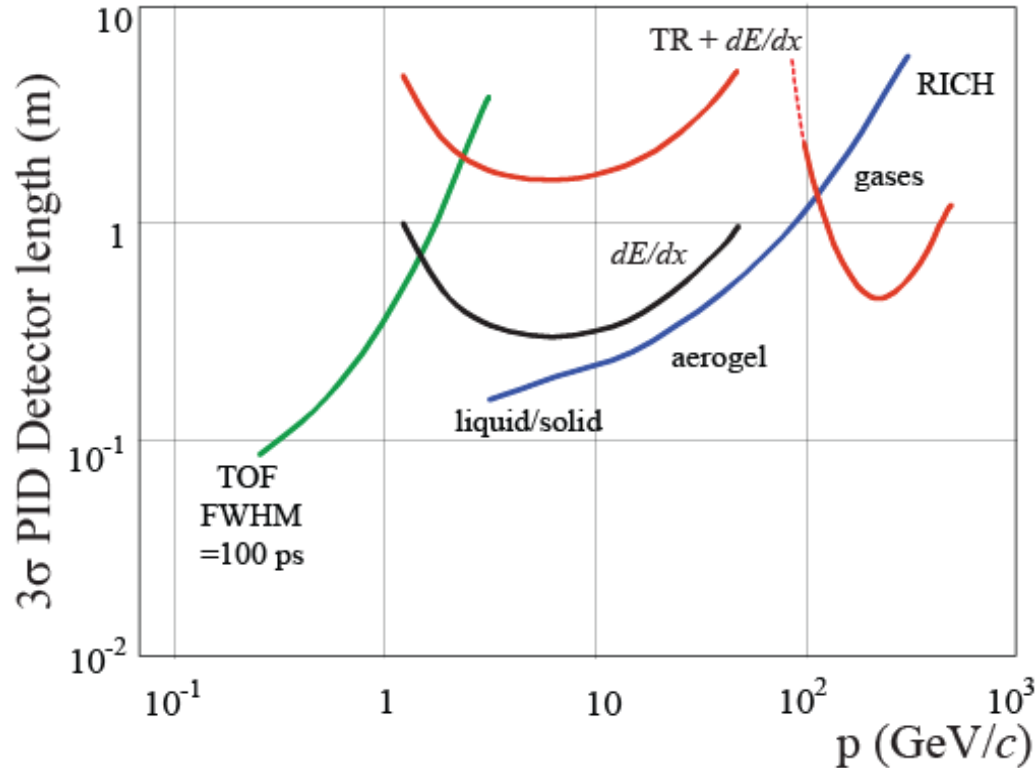
Prawdopodobieństwo depozytu powyżej progu, dla pojedynczej warstwy detektora:



Dyskryminacja  $e$  vs  $\pi$  @ 20GeV:



# Conclusion



Pion-Kaon separation by different PID methods: the length of the detectors needed for 3 sigma separation.

B. Dolgoshein, Complementary particle ID: transition radiation and  $dE/dx$  relativistic rise, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A : 433 (1999) 533

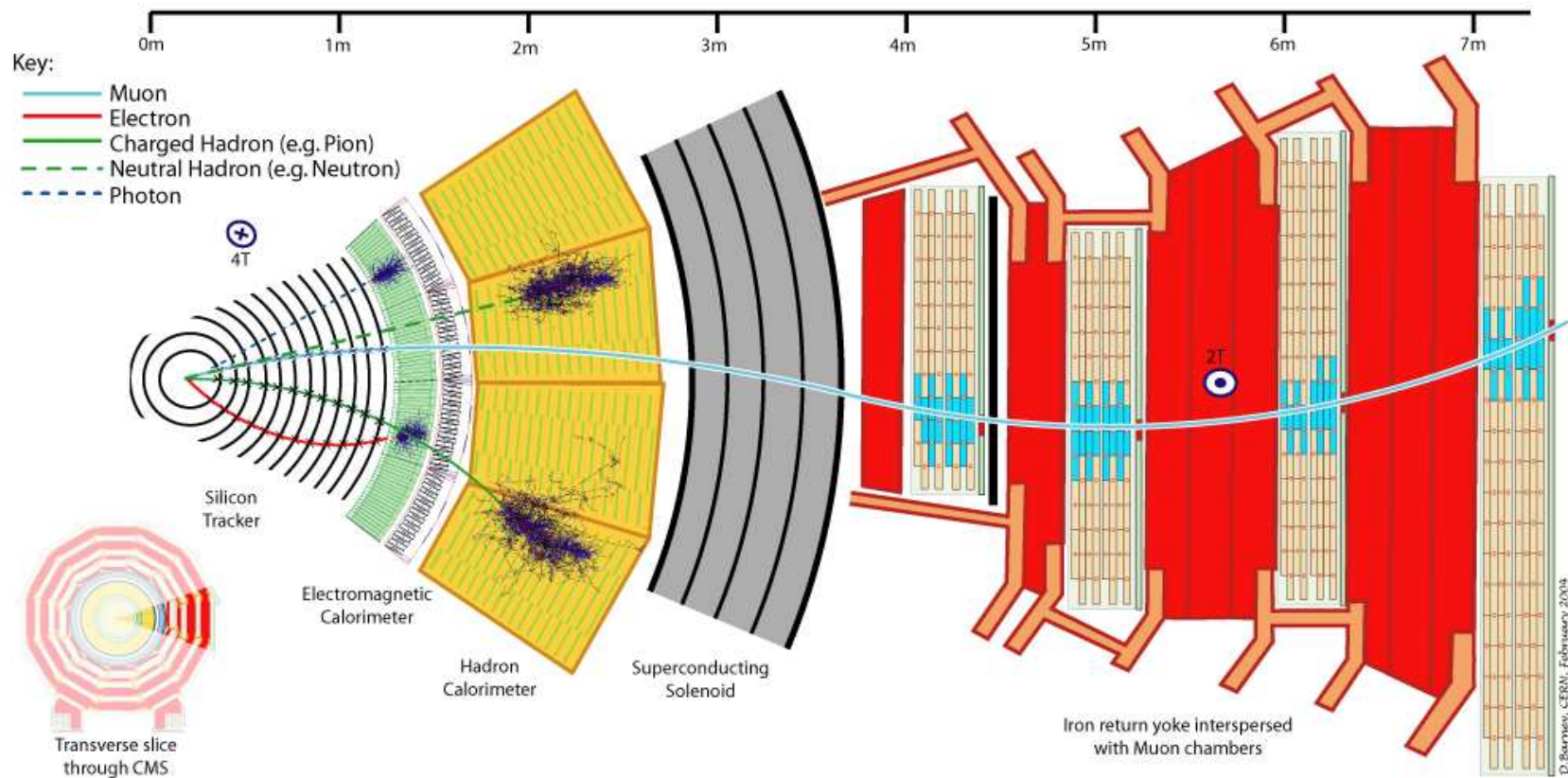
Particle Identification over a large momentum range is possible, but might require the use of all the tools in the box.

Some ingenuity in addition will always be helpful.

A little thinking might also come in handy, (to quote Einstein).

# Identyfikacja cząstek

## Identyfikacja mionów - detektory mionowe



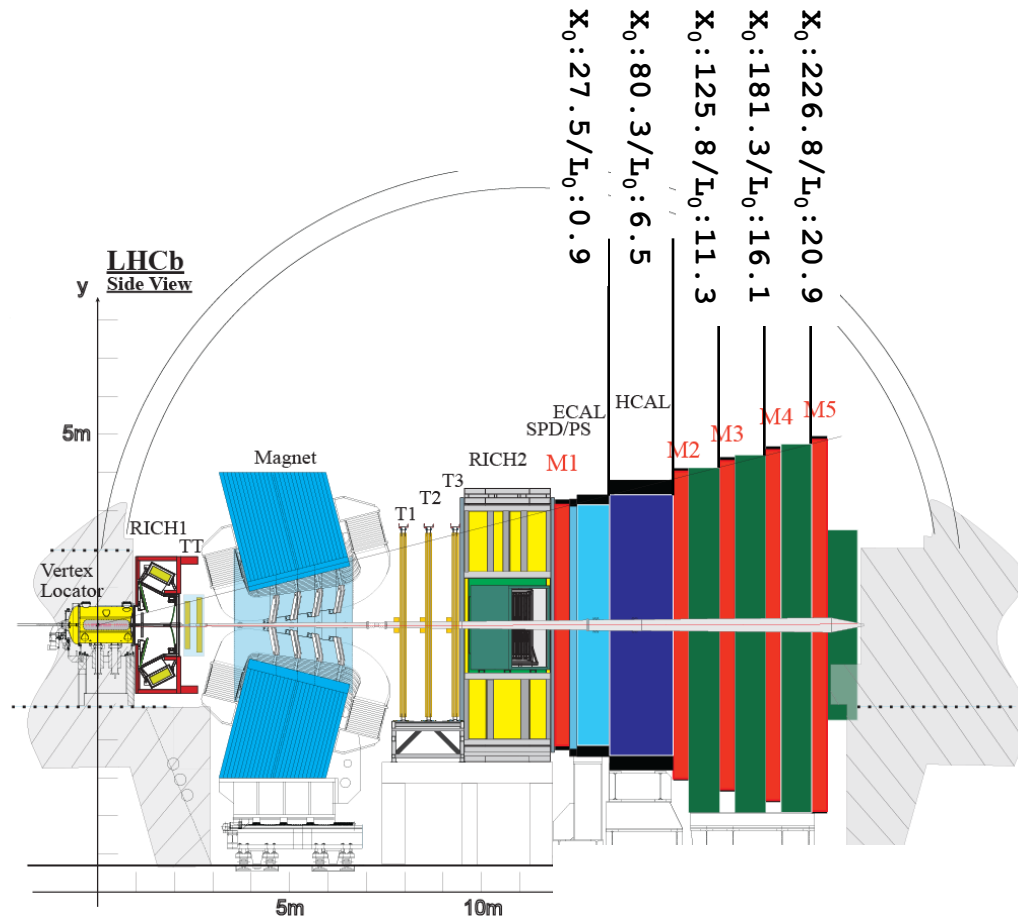
Jako mion identyfikujemy cząstkę, która doleciała do detektorów mionowych...



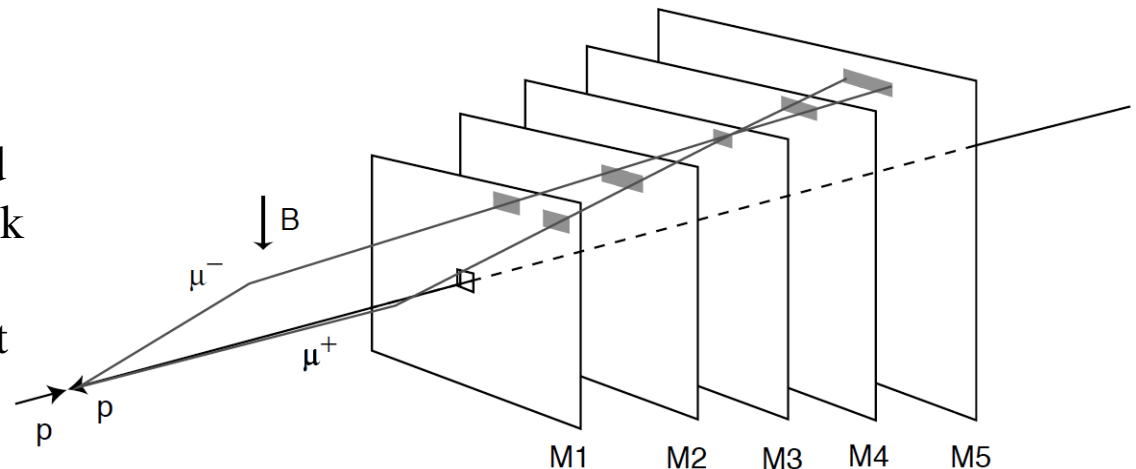
Material in the muon arm of the LHCb experiment.

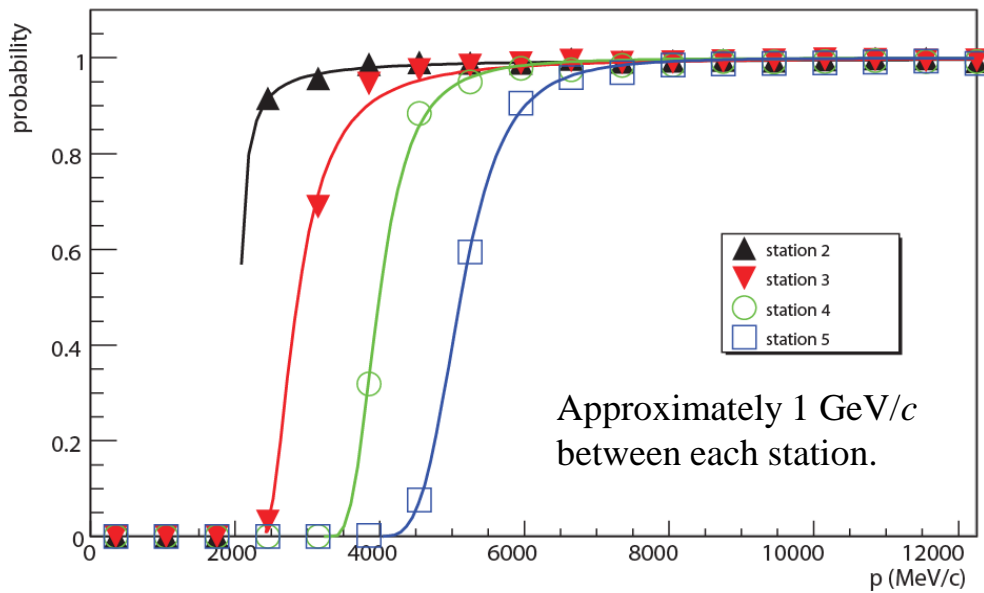
Will follow:

G. Lanfranchi et al., LHCb-PUB-2009-013  
 X.C. Vidal, Muon Identification in the LHCb experiment, Rencontres de Moriond EW 2010



The  $\mu$  ID hypothesis is calculated starting from a reconstructed track and looking for hits in the muon stations, within a Field of Interest (FOI), around the track extrapolation direction.





The efficiency of a muon algorithm can be strongly dependent on small variations of the performance of the detector

and the fine-tuning can be very much dependent on the specific sample used to calibrate it.

One can then make a practical loose decision function:

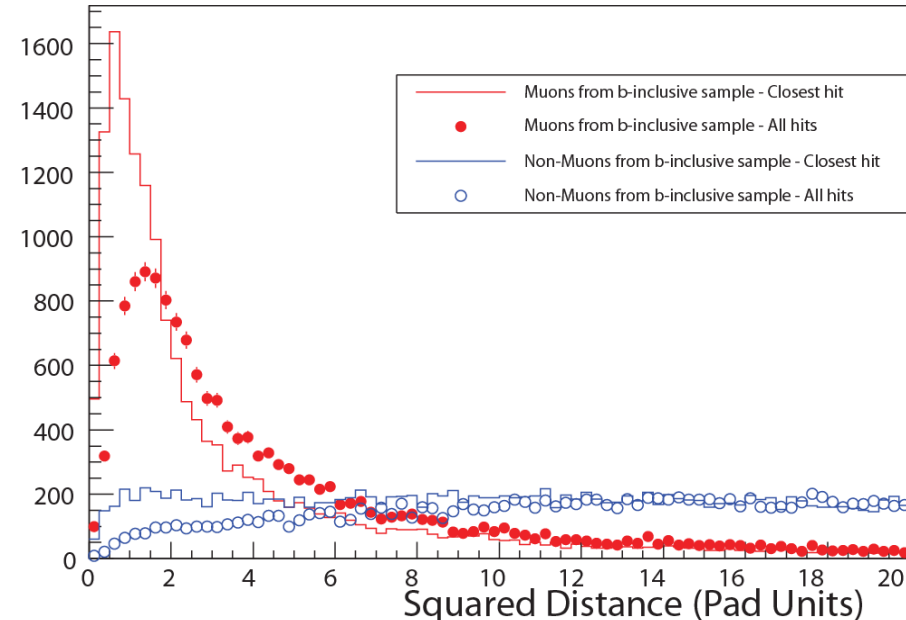
If  $3 < p(\text{GeV}/c) < 6$  then at least 1 hit in at least 2 stations of M2, M3, M4

$p > 6$  then at least 1 hit in at least 3 stations of M2, M3, M4, M5

and define a proximity variable,  $D$ , as:

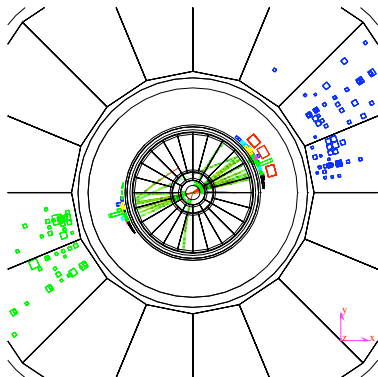
$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left\{ \left( \frac{x_{\text{closest},i} - x_{\text{track}}}{\text{pad}_x} \right)^2 + \left( \frac{y_{\text{closest},i} - y_{\text{track}}}{\text{pad}_y} \right)^2 \right\}$$

where  $i$  runs over the fired stations

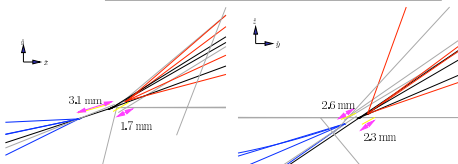


# B-Tagging: Basic Idea

Run # 441525 Event # 1504 Total Energy : 110.38 GeV



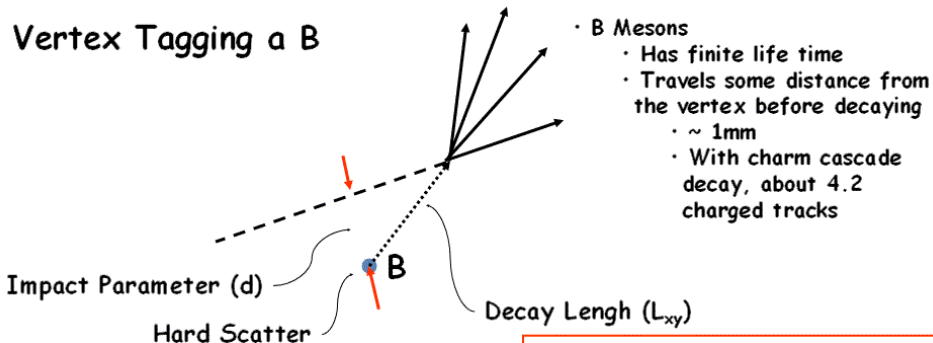
Transverse imbalance :	.0290	Longitudinal imbalance :	-.2966		
Thrust :	.9175	Major :	.2847	Minor :	.0800
Event DAQ Time :	800000	1			



- ▶ B hadrons have lifetimes and decay lengths distinct from other species
- ▶ Decay length is measurable in a given event by finding a vertex (“secondary”) and taking the distance to the “primary” vertex
- ▶ Can look for B hadrons by finding these vertexes which are compatible with known properties of B hadrons

# Example B-Tag (D0)

## Vertex Tagging a B



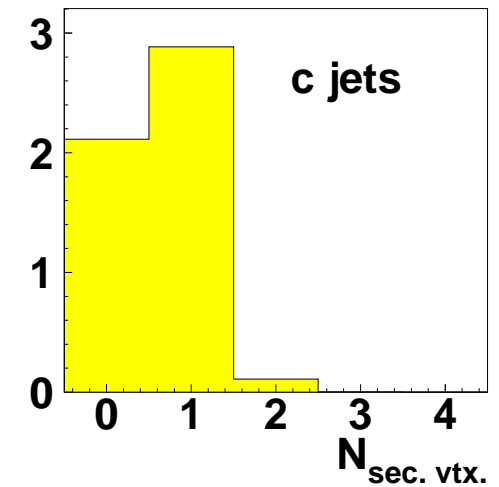
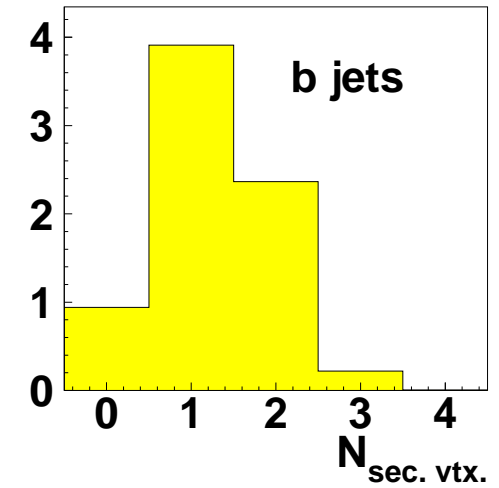
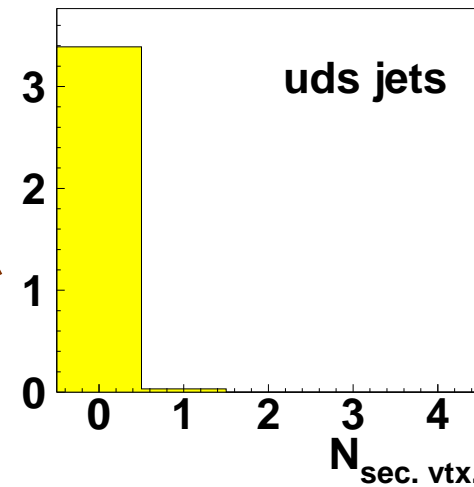
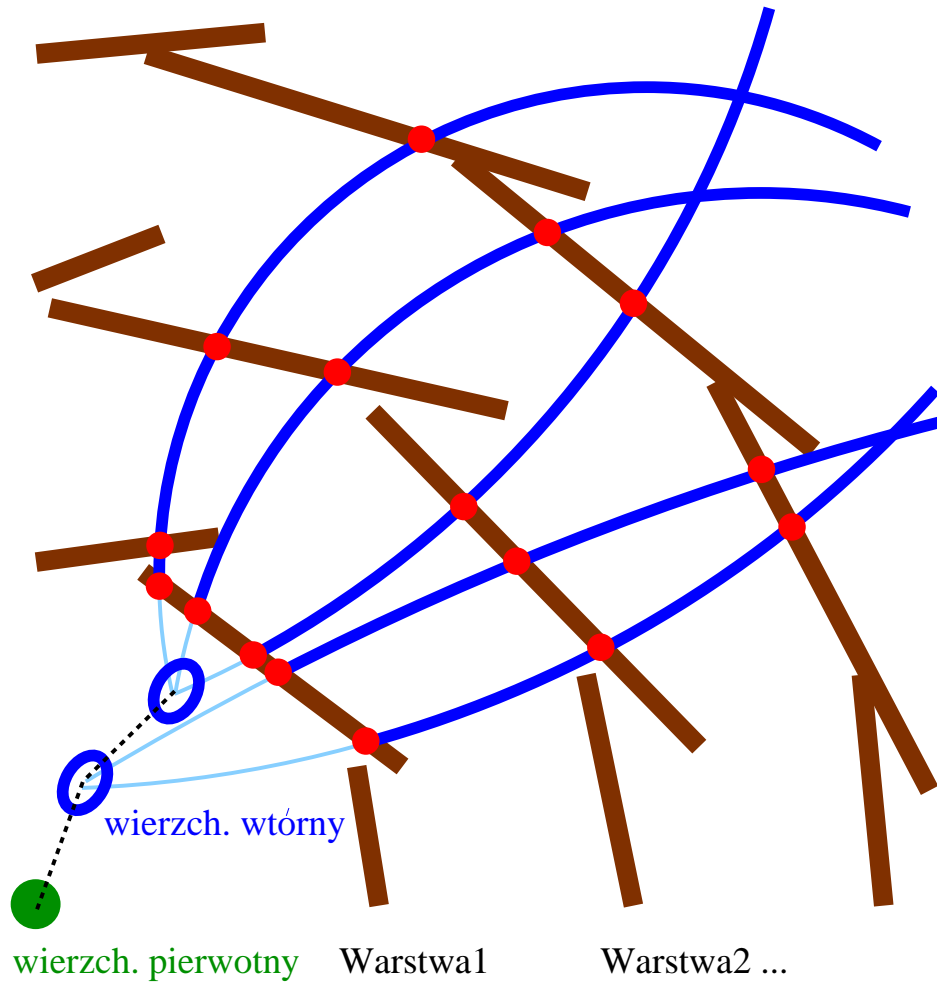
Several algorithms under active development

Impact Parameter Resolution	$d/\sigma(d)$
Decay Length Resolution	$L_{xy}/\sigma(L_{xy})$

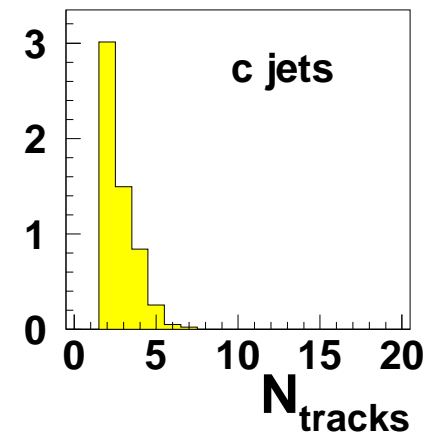
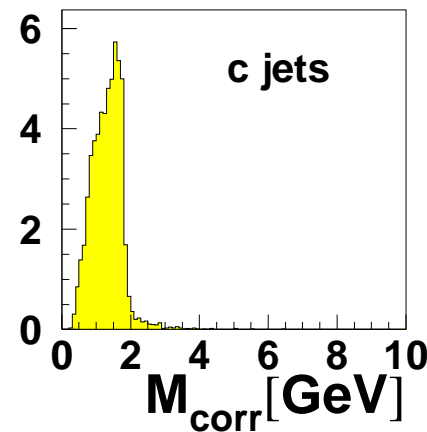
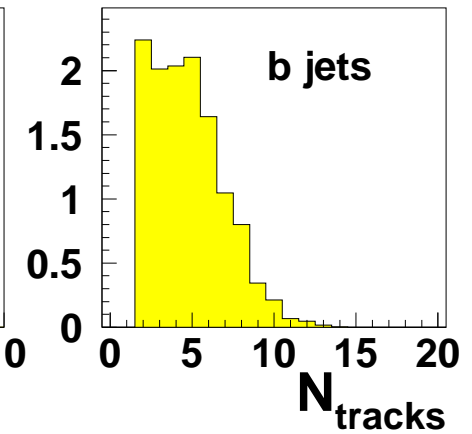
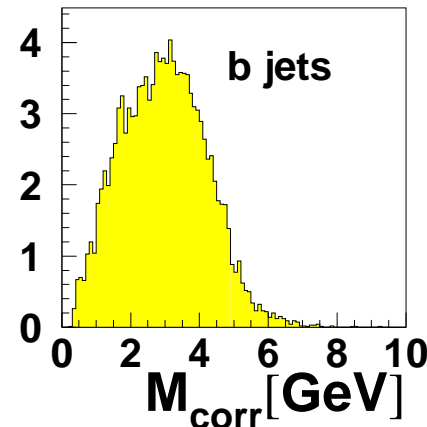
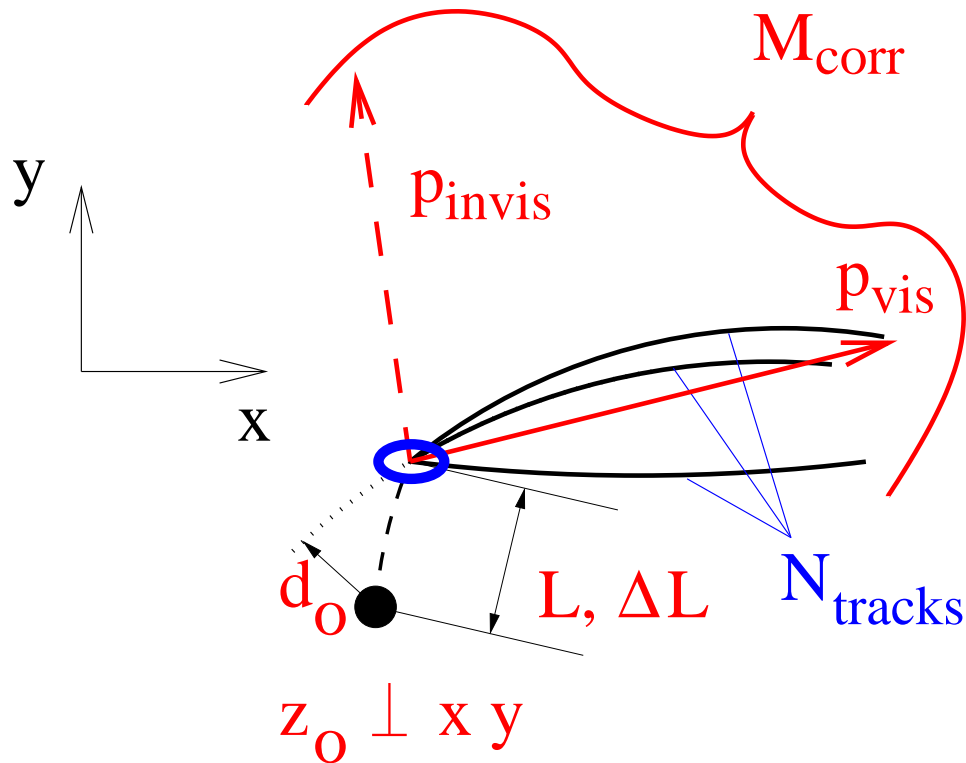


# “Jet tagging” - 1

- Dla każdego dżetu wierzchołki wtórne są wyznaczane za pomocą ZVTOP

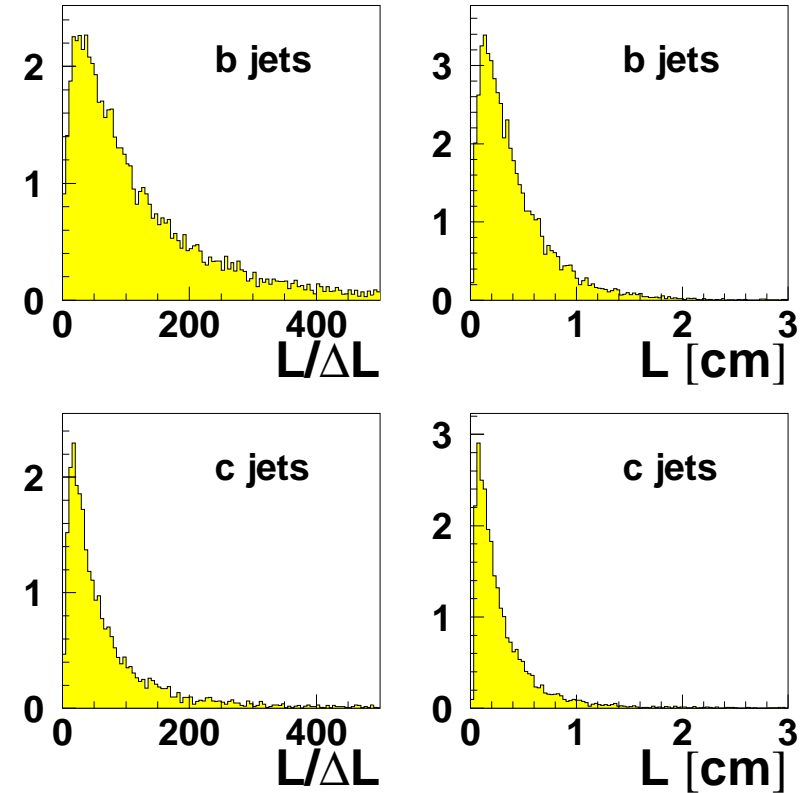
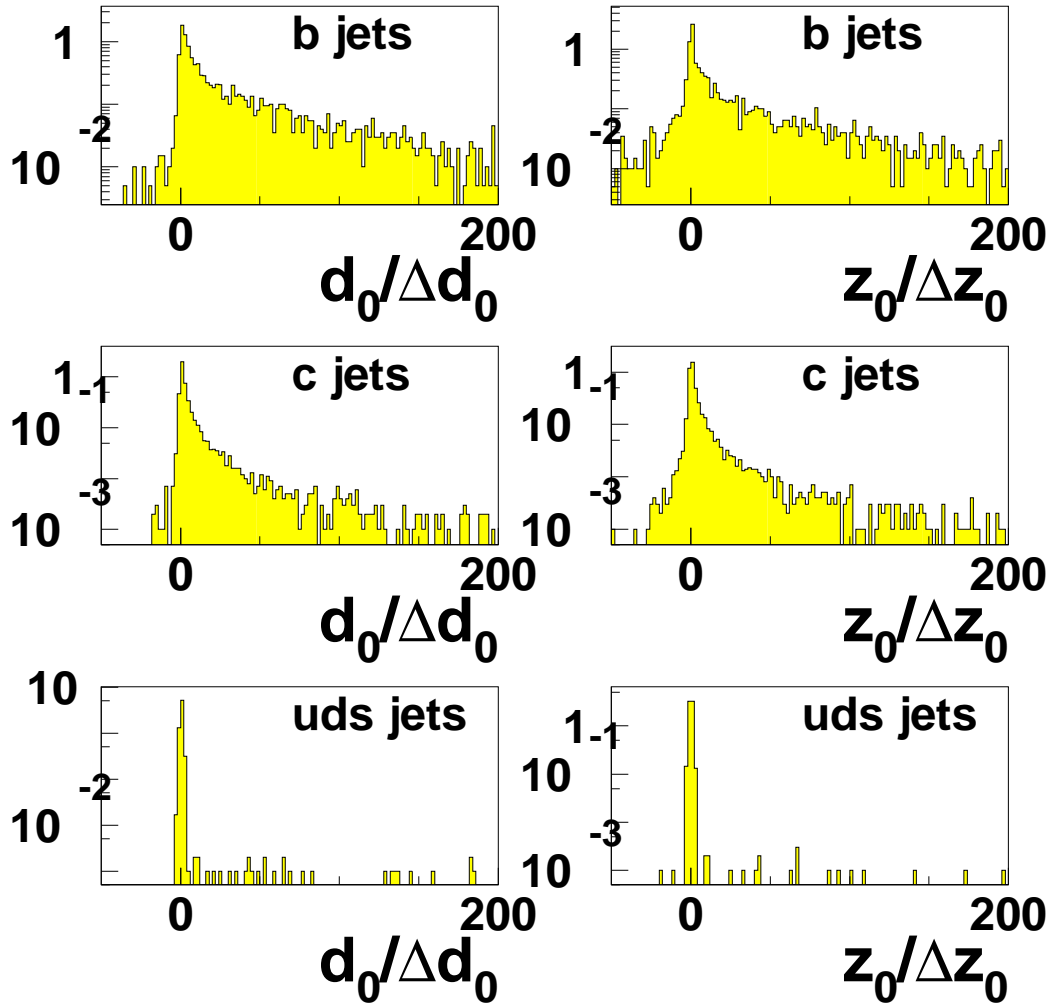
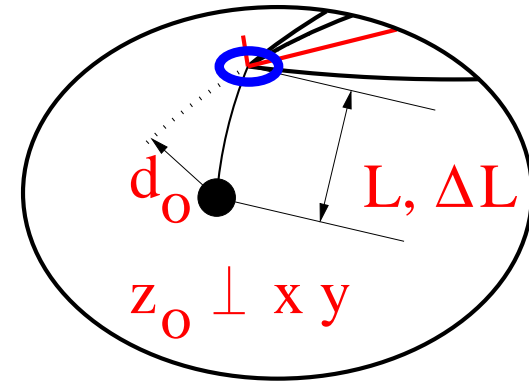


## “Jet tagging” - 2



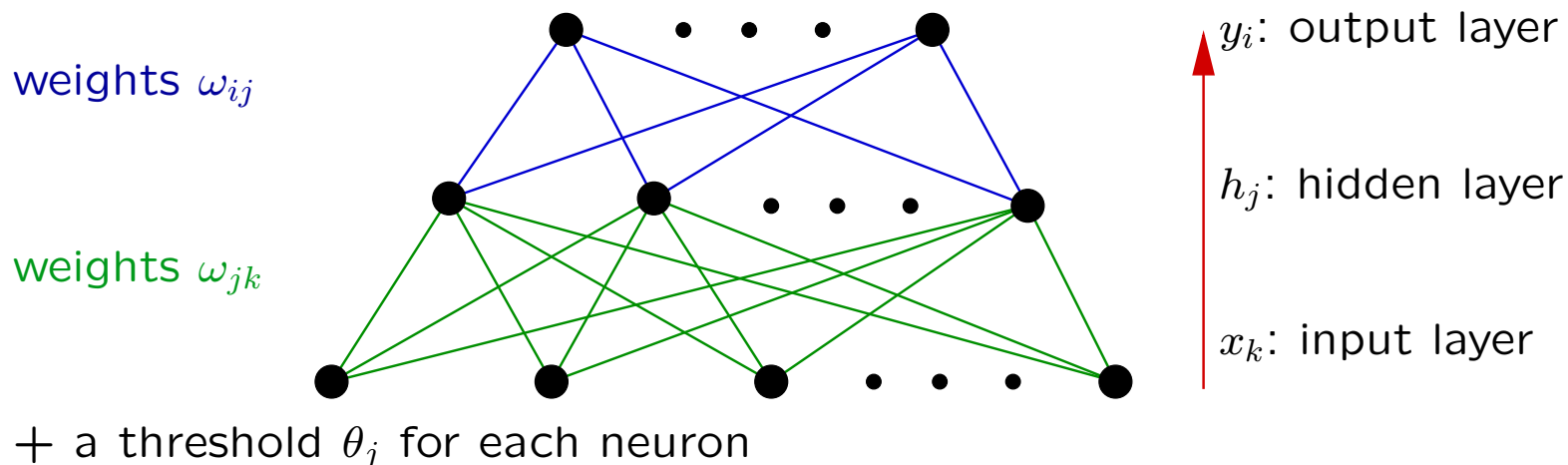
- Dla każdego dżetu **sieć neuronowa** ( na podstawie powyższych wielkości ) zwraca **b-tag** i **c-tag**  $\in (0, 1)$  - wielkości mówiące na ile jet jest podobny do dżetu “b” lub “c”

# “Jet tagging” - 3



# What is a neural network?

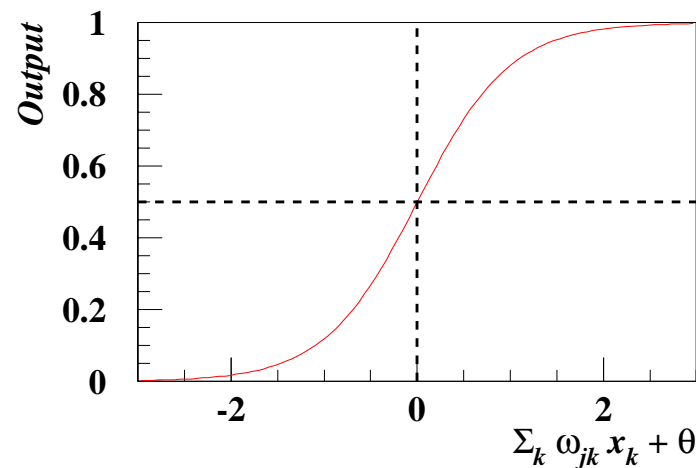
## Feed-Forward Neural Network



Output of a neuron:

$$O_j = g\left(\sum_k \omega_{jk} x_k + \theta_j\right)$$

$$\text{with } g(x) = \frac{1}{1 + e^{-2x}}$$

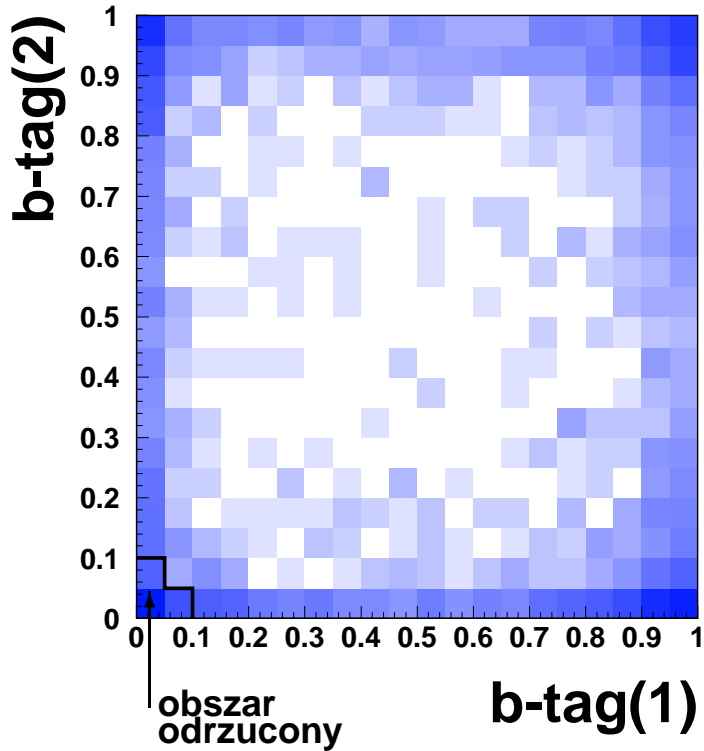


**Training:** adjust weights  
→  $NN_{\text{out}}$  el.  $\sim 1$  and had.  $\sim 0$



# b-tag dla $h \rightarrow \text{jet}(1) \text{jet}(2)$

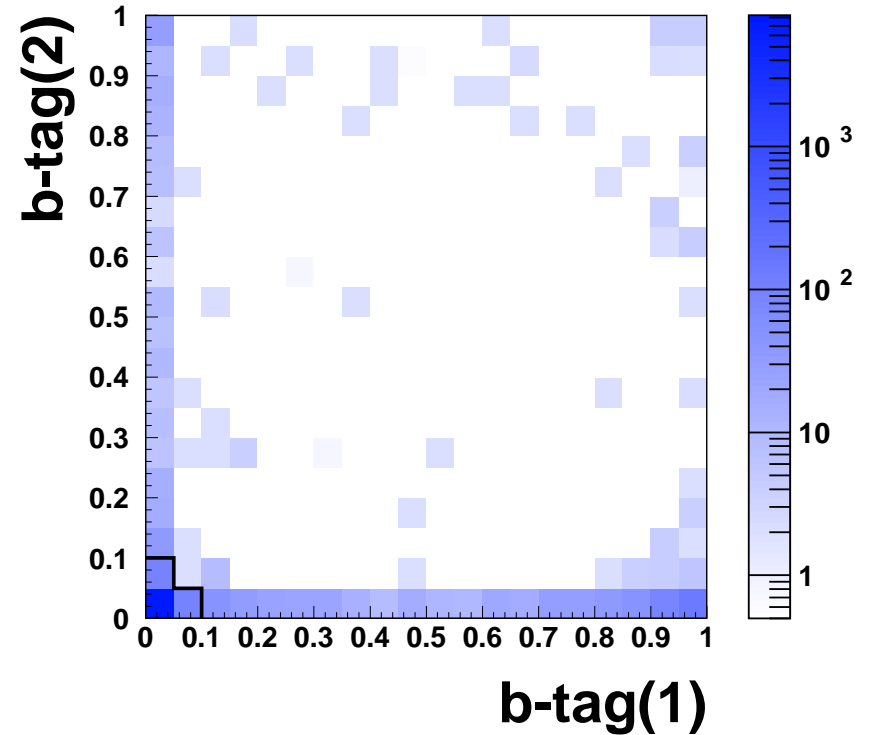
**Signal:  $h \rightarrow b\bar{b}$**



$E(1) > E(2)$

$500 \text{ fb}^{-1}$

**Background**



**Cięcia optymalizujące  $\Delta\Gamma/\Gamma$**

**Sygnal:** 2414 przypadków

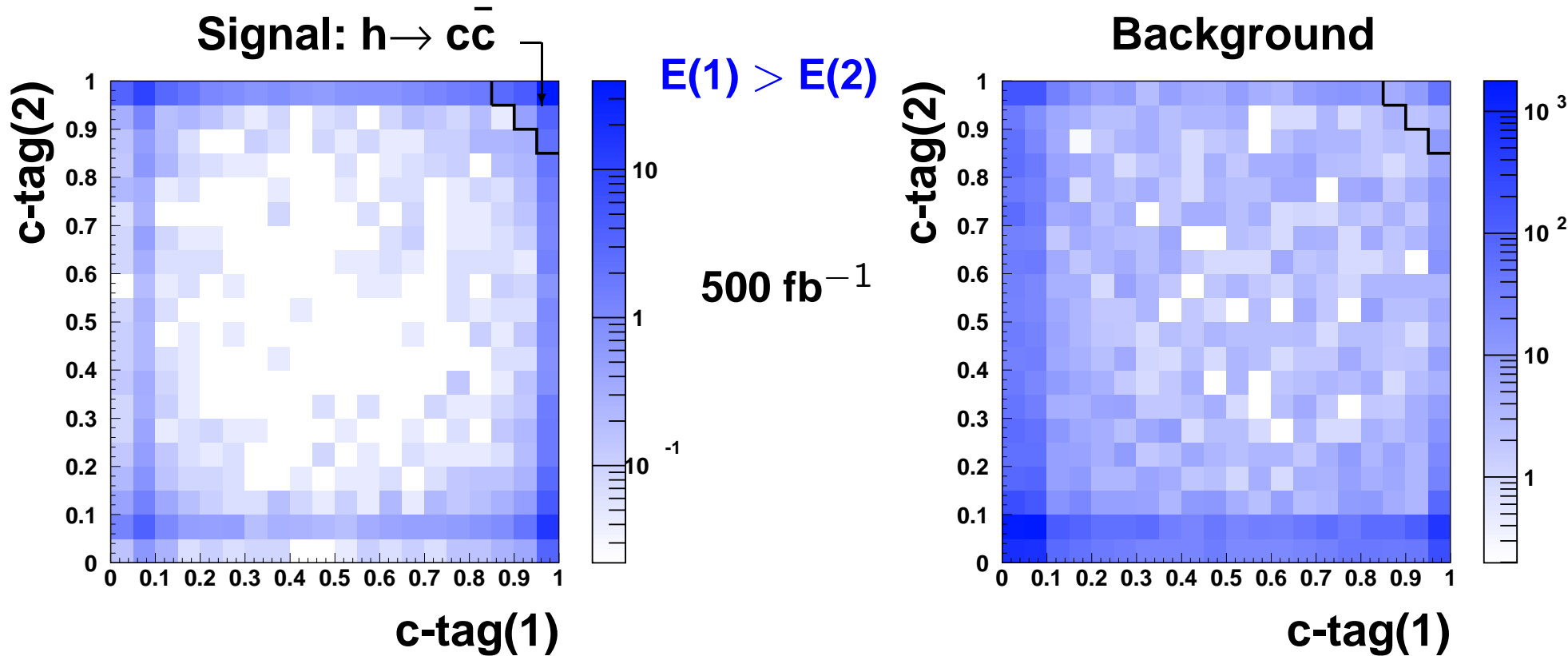
**Tło:** 785 przypadków

**Precyzja pomiaru:**

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

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

# c-tag dla $h \rightarrow \text{jet}(1) \text{jet}(2)$



**Cięcia optymalizujące  $\Delta\Gamma/\Gamma$**

**Sygnal:** 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  $2\mu m$