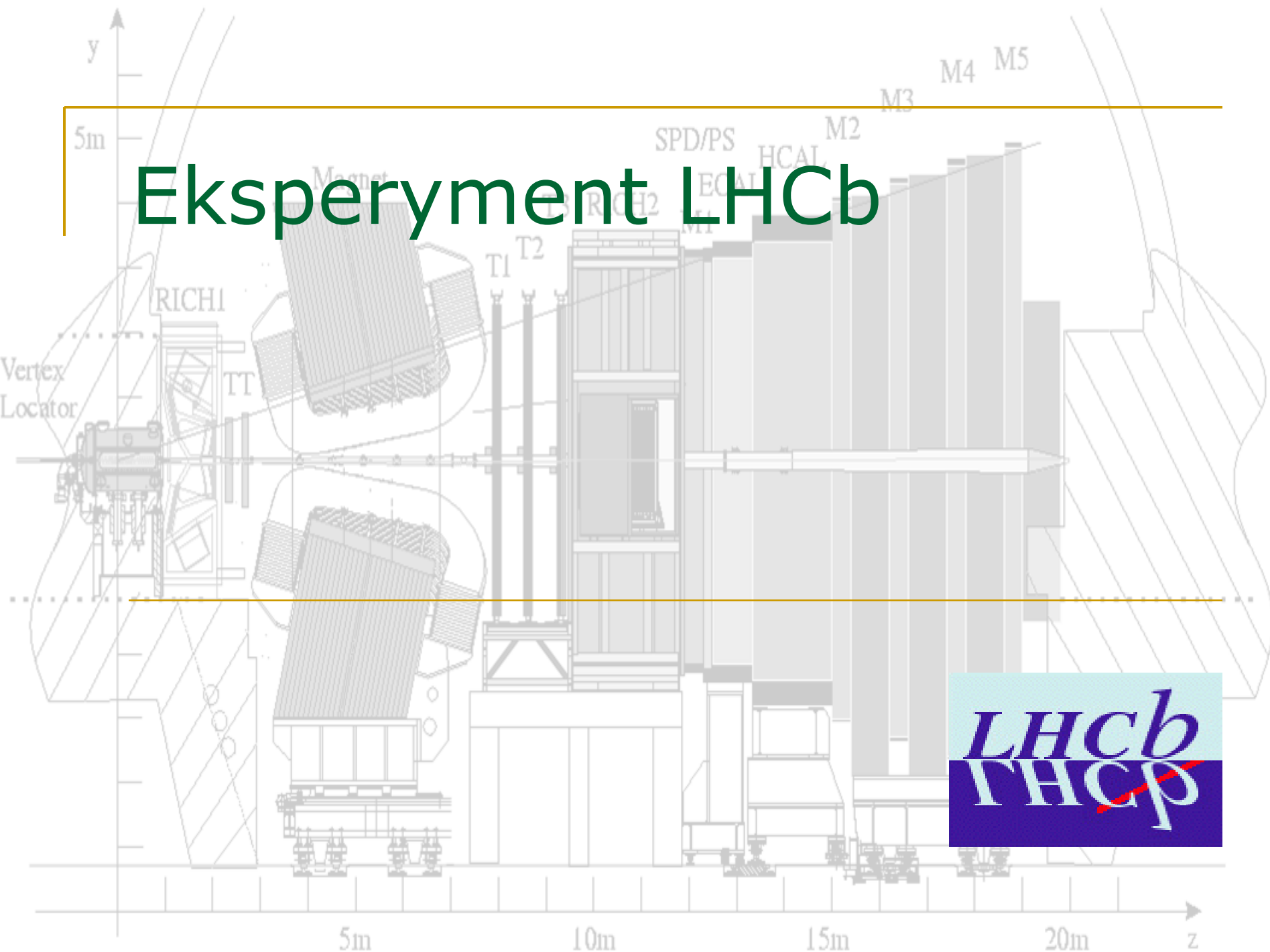


Eksperiment LHCb



- Motywacja fizyczna
- Program badań
- Akcelerator LHC
- Detektor LHCb
 - Opis wybranych systemów

Łamanie symetrii CP



■ *Parzystość CP*

- jednoczesne wykonanie operacji sprzężenia ładunkowego C i inwersji przestrzennej P, tzn. operacji $q \rightarrow -q$ oraz $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$. CP przeprowadza cząstkę w jej antycząstkę o przeciwnym pędzie i skrętności
- niezachowanie parzystości P (1956) oraz parzystości C (1957) w oddziaływaniach słabych

■ *Łamanie parzystości kombinowanej CP*

- łamanie symetrii CP w rozpadach długożyciowych mezonów K^0 (1964)

■ *Asymetria materia-antymateria*

- wszystkie obserwacje wskazują, że obecny wszechświat składa się głównie z materii
- hipoteza Sacharowa (1967)
 - jednym z 3 warunków powstania asymetrii materia-antymateria jest **łamanie CP**



Badanie łamania CP od 40 lat (zjawiska subtelne)

LHCb: duże próbki danych, rozszerzenie obszaru badań

Łamanie CP w Modelu Standardowym (MS)

■ *Macierz Cabibbo-Kobayashi-Maskawy (CKM)*

- macierz CKM opisuje przejścia pomiędzy trzema rodzinami kwarków poprzez wymianę bozonów pośredniczących

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \hat{V}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Macierz CKM

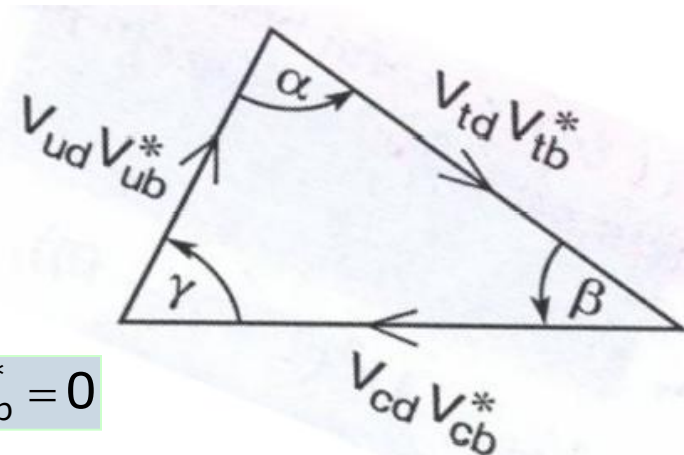
- unitarna 3x3
- 3 kąty rzeczywiste + 1 faza
- faza (zespolona) - jedyne źródło łamania CP w Modelu Standardowym

- w MS elementy macierzy CKM są parametrami → trzeba je wyznaczyć doświadczalnie
- 3 rodziny kwarków → nieredukowalna faza → łamanie CP

■ *Trójkąty unitarności*

- unitarność macierzy CKM $\Leftrightarrow$ trójkąty unitarności
- interpretacja geometryczna
np. kol(1) * kol(3):

$$V_{ud} \cdot V_{ub}^* + V_{cd} \cdot V_{cb}^* + V_{td} \cdot V_{tb}^* = 0$$



Wybrane zagadnienia programu badawczego LHCb



Precyzyjny pomiar parametrów mieszania B^0_s - $\bar{B}^0_s$:
 Δm , $\Delta \Gamma_s$

Precyzyjny pomiar kąta γ (z uwzględnieniem procesów z diagramami drzewiastymi oraz diagramami pingwinowymi
 $\rightarrow$ przyczynki od „nowej fizyki” - odstępstwa od MS)

Pomiary kątów mieszania w różnych kanałach w celu ograniczenia błędów na parametry macierzy CKM

Rzadkie rozpady mezonów B^0 oraz B_s ze stosunkami rozgałęzień rzędu 10^{-8}

Poszukiwanie efektów nowej fizyki w rzadkich ekskluzywnych i inkluzywnych rozpadach B

Fizyka mezonów D

Fizyka mezonów B_c , barionów z kwarkiem b, ...

$B_s \rightarrow D_s \pi, \dots$
 $B_s \rightarrow J/\psi \phi, B_s \rightarrow J/\psi \eta^{(')}$

$B_s \rightarrow D_s K, B^0 \rightarrow DK^{*0},$
 $B^0 \rightarrow \pi\pi + B_s \rightarrow KK, \dots$

$B^0 \rightarrow \phi K_s, B_s \rightarrow \phi\phi, \dots$
 $B^0 \rightarrow \rho\pi, B^0 \rightarrow \rho\rho, \dots$

$B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-, B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-, \dots$

$B^0 \rightarrow K^* \gamma, B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-,$
 $b \rightarrow s l^+ l^-, B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \dots$

~~CP~~, mieszanie D- $\bar{D}$

Przewidywania LHCb

BABAR, BELLE, CDF, D0 (2006)

fabryki B + Tevatron

$$\beta = 21.7^{\circ} \begin{matrix} +1.3 \\ -1.2 \end{matrix}$$

$$\alpha = 100^{\circ} \begin{matrix} +15 \\ -9 \end{matrix}$$

$$\gamma = 63^{\circ} \begin{matrix} +35 \\ -25 \end{matrix}$$

2006

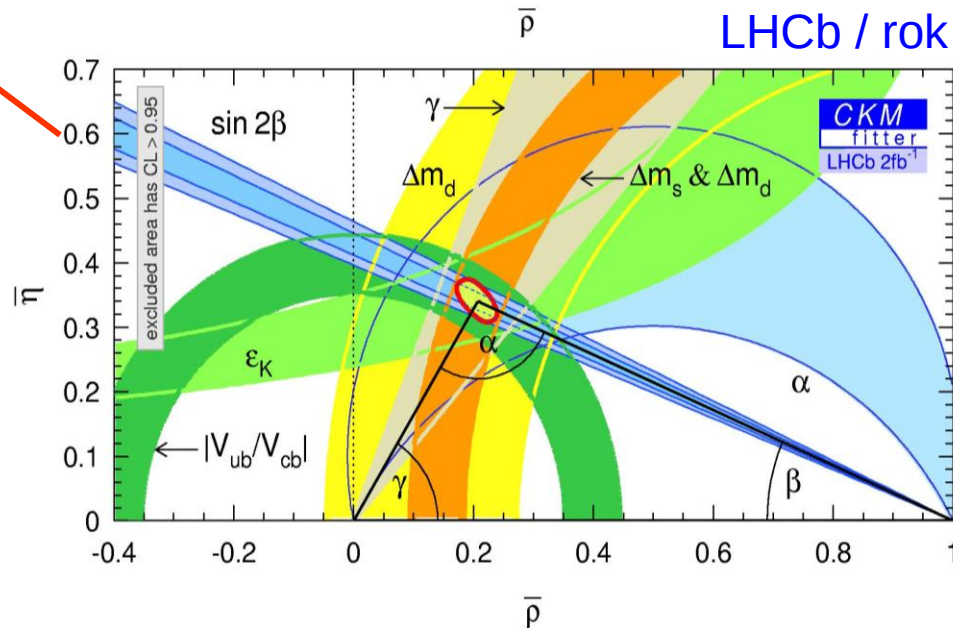
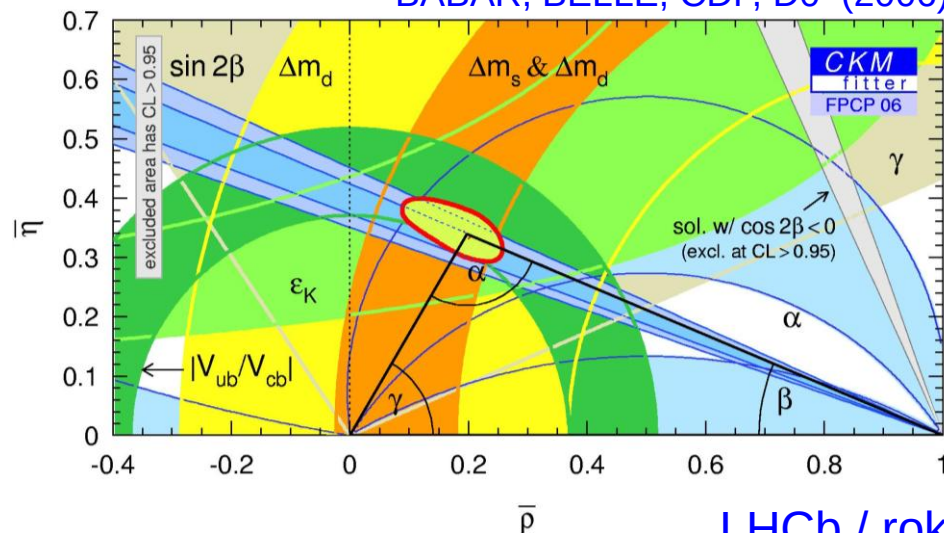
LHCb / rok

$$\begin{matrix} +0.5^{\circ} \\ - \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} +10^{\circ} \\ - \end{matrix}$$

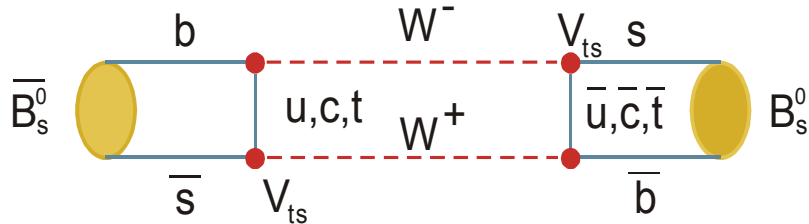
$$\begin{matrix} +5^{\circ} \\ - \end{matrix}$$

Zasadnicza poprawa
dokładności pomiaru
parametrów macierzy CKM



Oscylacje mezonów B_s

W Modelu Standardowym oscylacje B_s wynikają z diagramów typu:



słabe przejścia drugiego rzędu

BRĄK ODDZIAŁYWAŃ SŁABYCH

→ **dwa stabilne mezony B_s i $\bar{B}_s$**

ODDZIAŁYWANIA SŁABE

→ **niezachowanie dziwności**

- **stany własne masy o nieokreślonej dziwności (nie są to stany własne CP)**

→ **mieszanie B_s - $\bar{B}_s$ (B^H, B^L)**

- **oscylacje mezonów B_s**

→ **$B_s \rightarrow \bar{B}_s \rightarrow B_s \dots$**

Parametryzacja

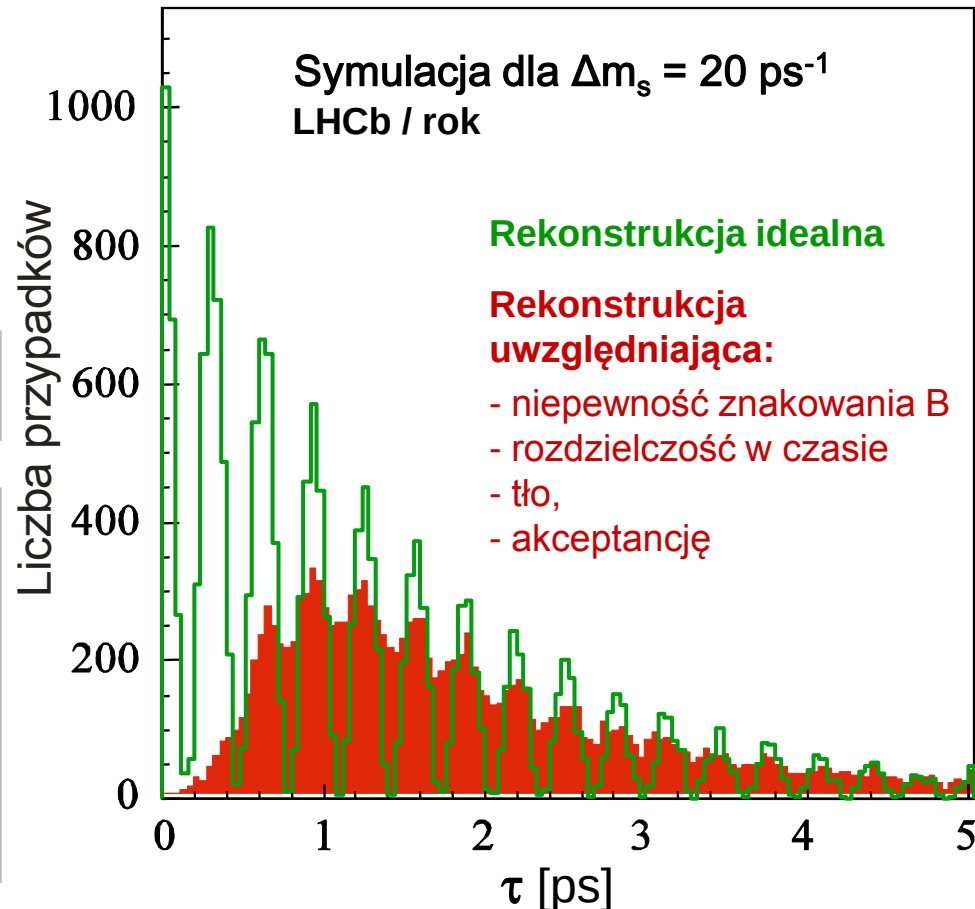
$$\Delta m_s = m_H - m_L, \quad \Delta \Gamma = \Gamma_H - \Gamma_L, \quad x_s = \Delta m_s \cdot \tau$$

CDF (2006)

$$\Delta m_s = (17.77 \pm 0.10 \pm 0.07) \text{ps}^{-1}$$

LHCb / rok

$$0.01 \text{ps}^{-1}$$

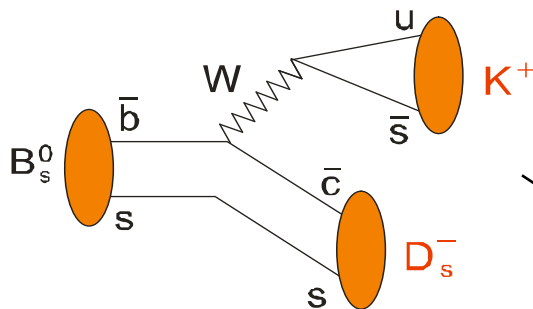


Wgląd w fizykę poza Modelem Standardowym

Dwa różne pomiary tych samych parametrów macierzy CKM (np. pomiar kąta γ)

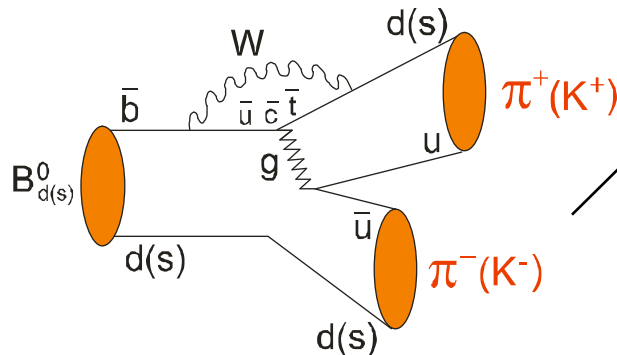
- pomiary parametrów macierzy CKM niezależnie od nowej fizyki

→ procesy opisywane przez diagramy drzewiaste, np.



- pomiary zależne od nowej fizyki

→ procesy opisywane dodatkowo przez diagramy typu „pingwin”, np.



Niezgodność



NOWA FIZYKA

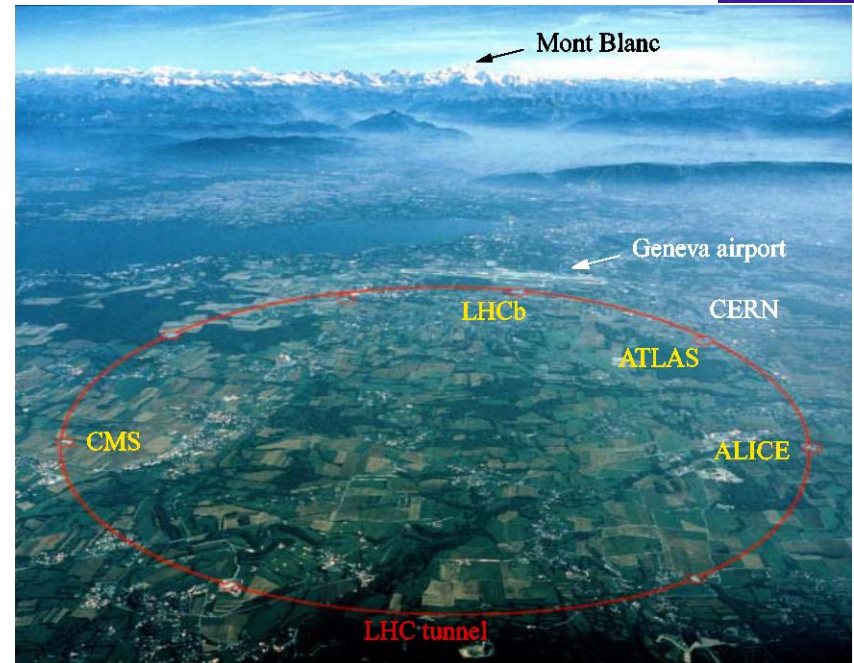
Badanie rzadkich rozpadów mezonów pięknych

- niezgodności obserwowanych częstości rozpadów z przewidywaniami MS
(np. $B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$)

Akcelerator LHC

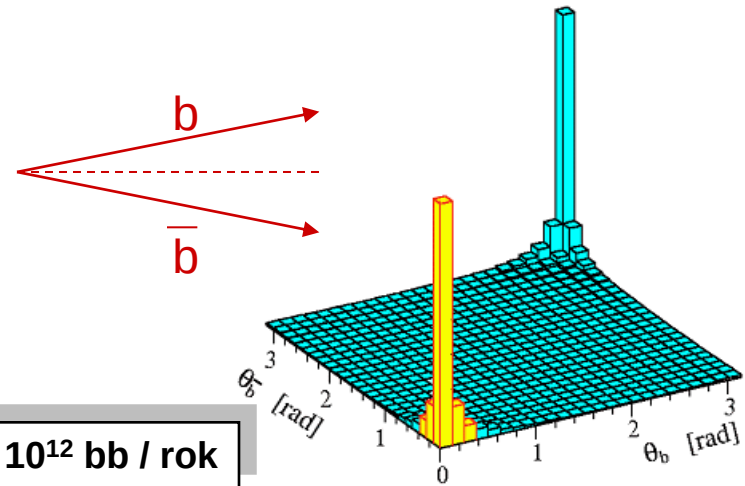
LHC (Large Hadron Collider)

- zlokalizowany w dawnym tunelu LEP-u (LHCb w miejscu eksperymentu DELPHI)
- przyspiesza dwie przeciwbieżne wiązki protonów; zderzenia przy $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$
- przekrój czynny $\sigma_{bb} = 500 \mu\text{b}$
- przekrój czynny $\sigma_{\text{hadr}} = 80 \text{ mb}$
- przecięcie wiązek co 25 ns (40MHz)
- nominalna świetlność: $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- punkt pracy LHCb: $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
→ wybieramy przypadki z pojedynczym oddziaływaniem p - p w zderzeniu wiązek



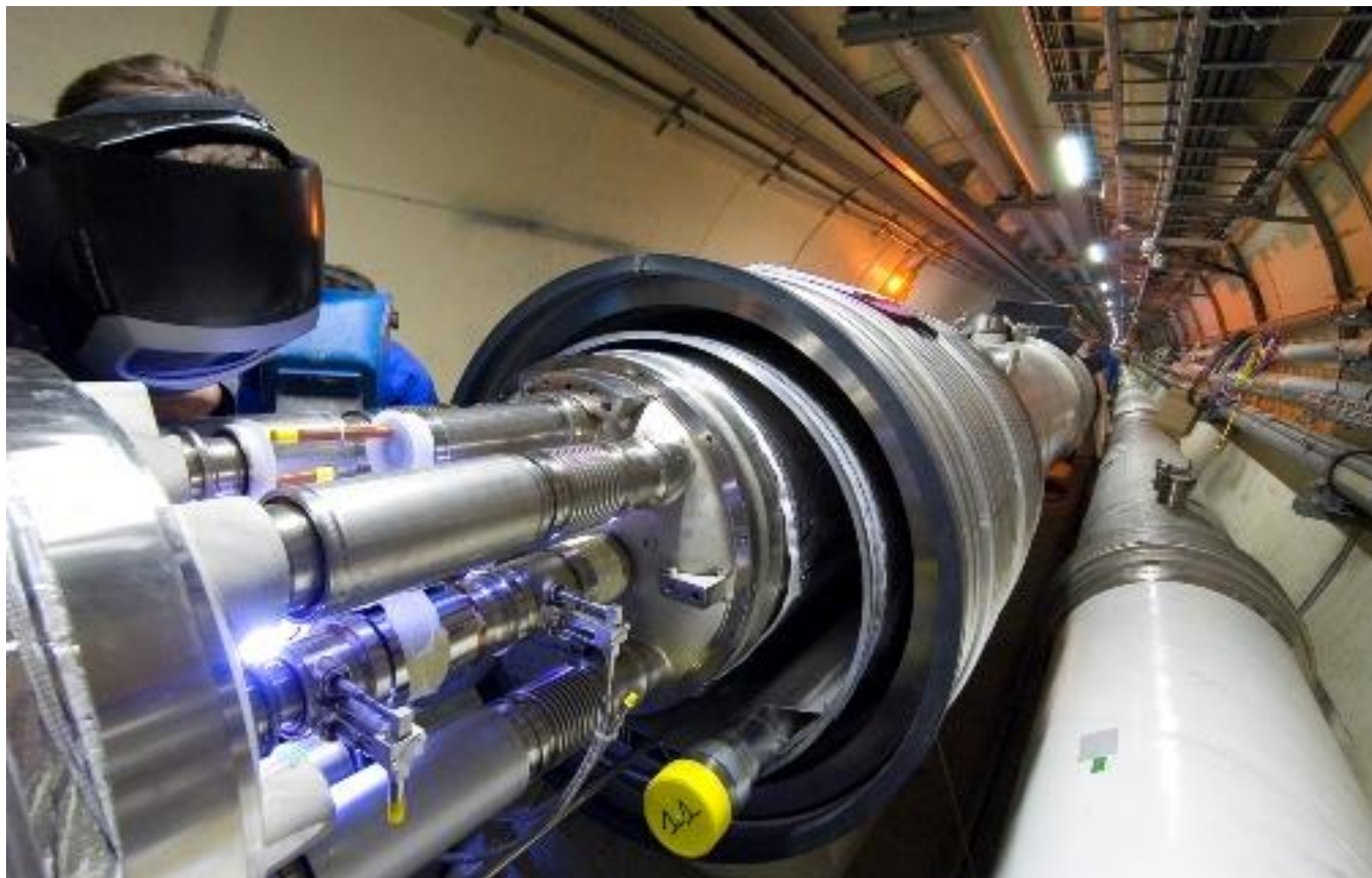
■ Skorelowana produkcja par $b\bar{b}$

- produkcja cząstek pięknych zachodzi pod małymi kątami względem osi wiązki
- para mezonów $B\bar{B}$ razem do przodu lub do tyłu → geometria LHCb



Akcelerator

- Akcelerator gotowy pod koniec 2007



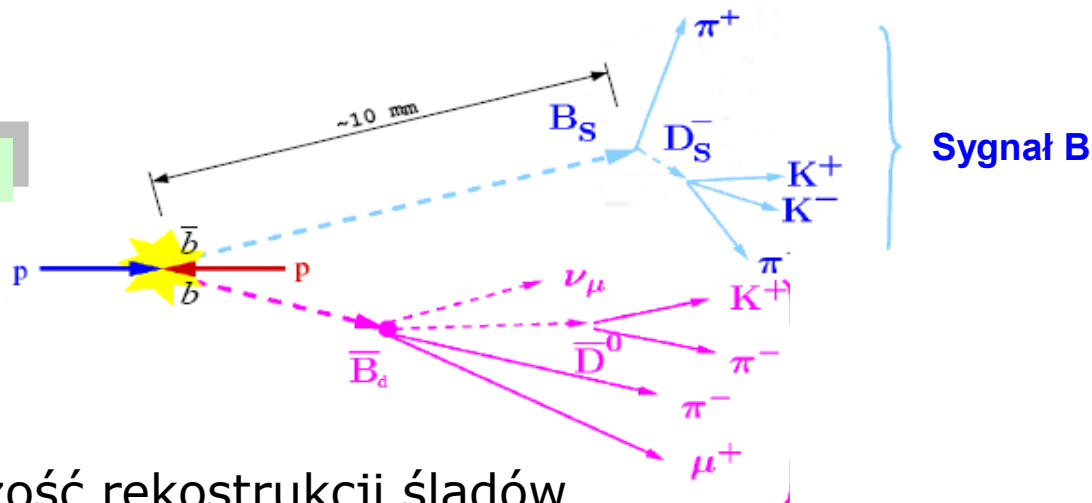
Wymagane własności detektora LHCb



Dobra rozdzielczość rekonstrukcji wierzchołków

- wyznaczenie współrzędnych punktu rozpadu
- redukcja tła

przykład produkcji B



Dobra rozdzielczość rekonstrukcji śladów

- wyznaczenie torów i pomiar pędów cząstek

Identyfikacja cząstek w szerokim zakresie pędów (2 - 100 GeV/c)

- redukcja tła gdy separacja kinematyczna niewystarczająca

Szybki i efektywny układ wyzwalania

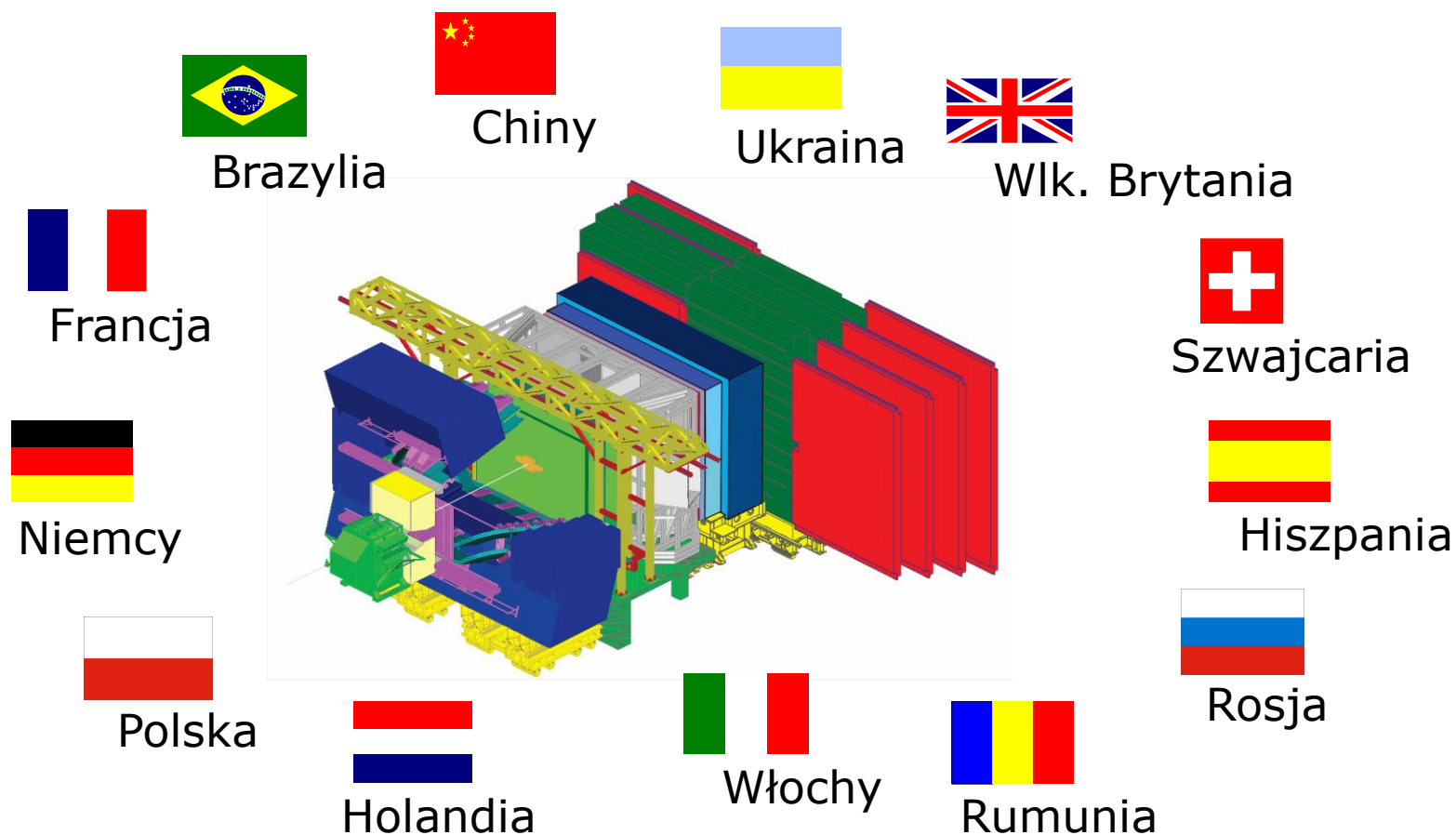
- selekcja interesujących przypadków z dużego tła

Szybki system akwizycji danych

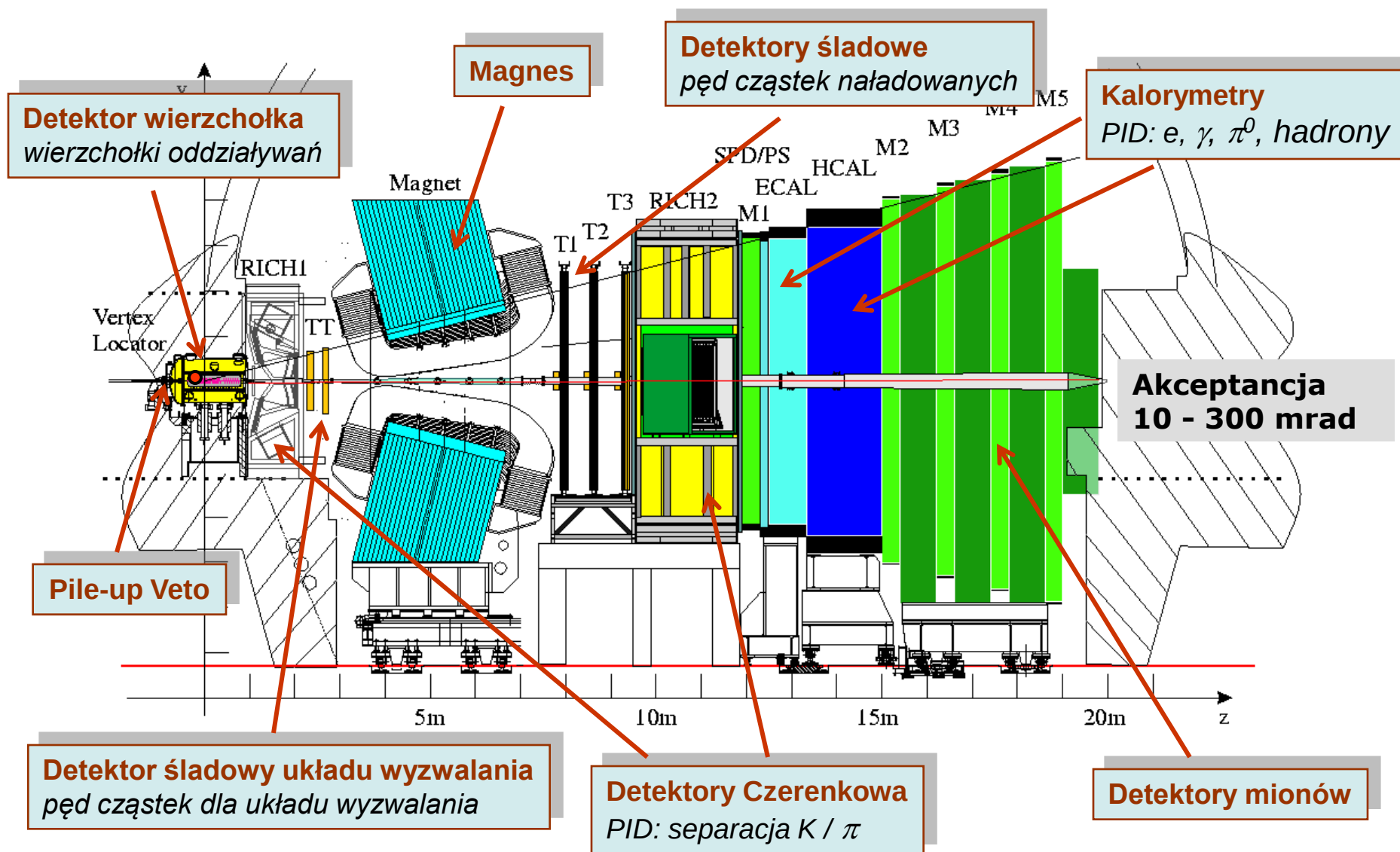
Współpraca LHCb



- Detektor eksperymentu LHCb jest budowany przez zespół ponad 600 osób z 14 krajów i około 50 laboratoriów
- Udział Polski: IFJ PAN, AGH, IPJ (ponad 30 osób)



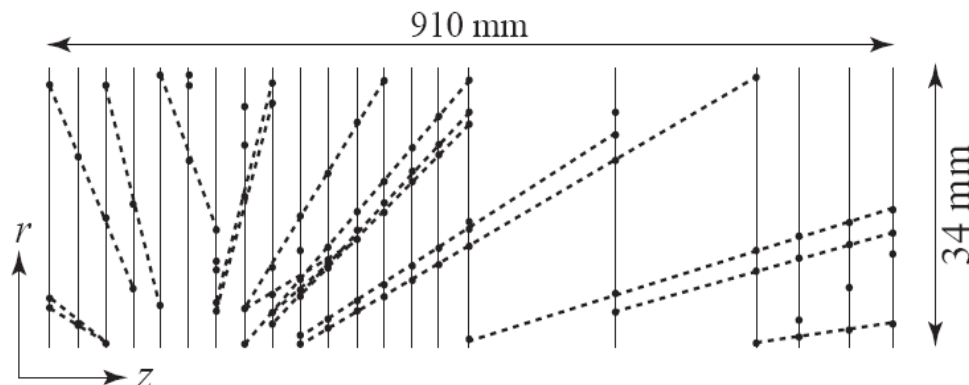
Spektrometr LHCb



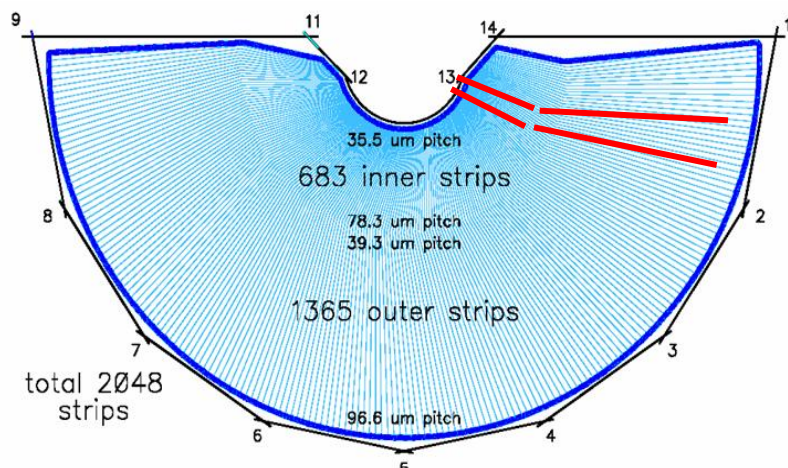
Sensory VELO

Geometria VELO zoptymalizowana aby zapewnić rekonstrukcję on-line

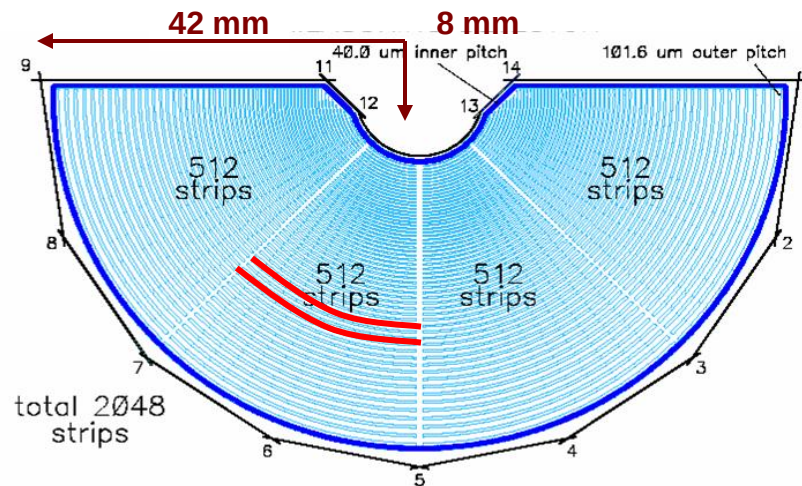
- sensory - 2 płaszczyzny w formie półkoli
- technologia $n^+ - n$
- promień 42 mm
- 2048 pasków / sensor
- 220 tys. kanałów odczytu
- Producent: Micron Semiconductor (UK)



Pomiar w płaszczyźnie ϕ



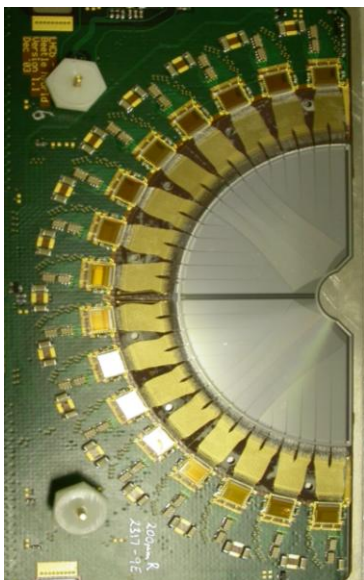
Pomiar w płaszczyźnie R (segmenty o szerokości 45°)



VELO - produkcja modułów

- Ukończenie produkcji, testów i instalacji modułów: koniec 2007

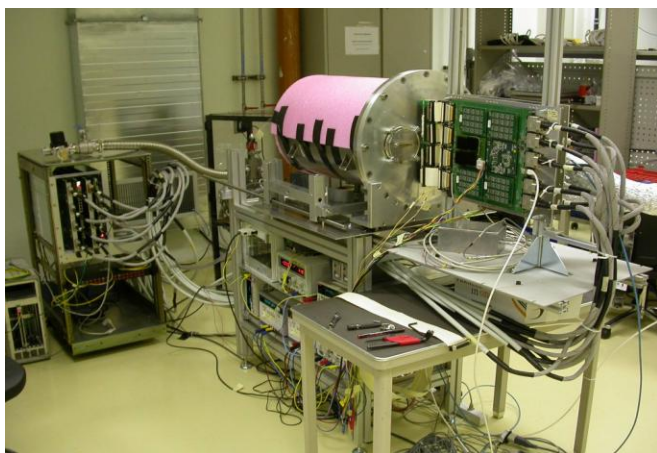
Moduł VELO



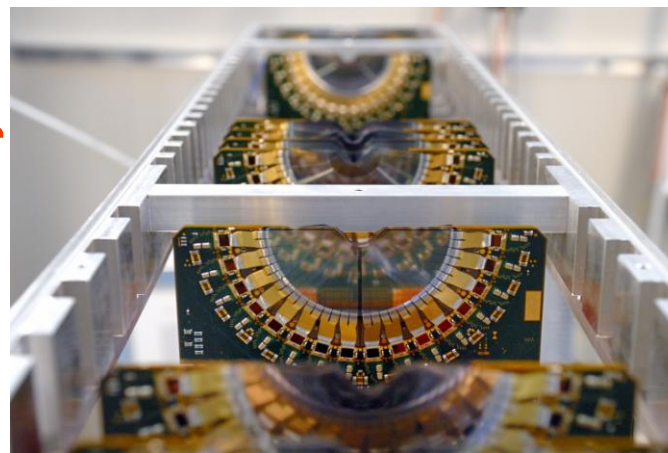
Produkcja



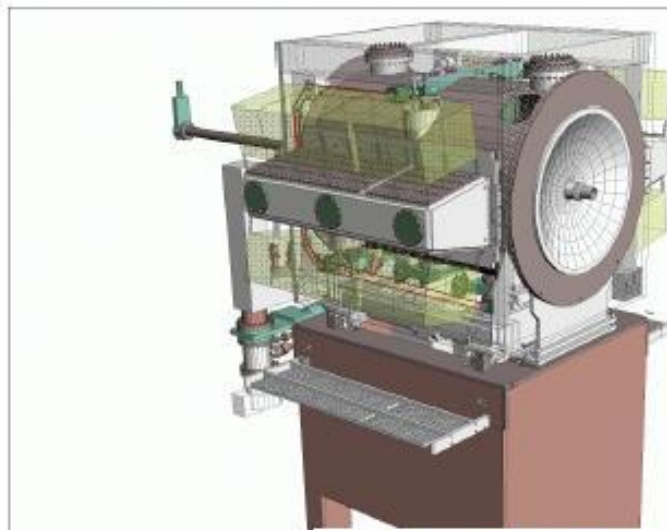
Testy



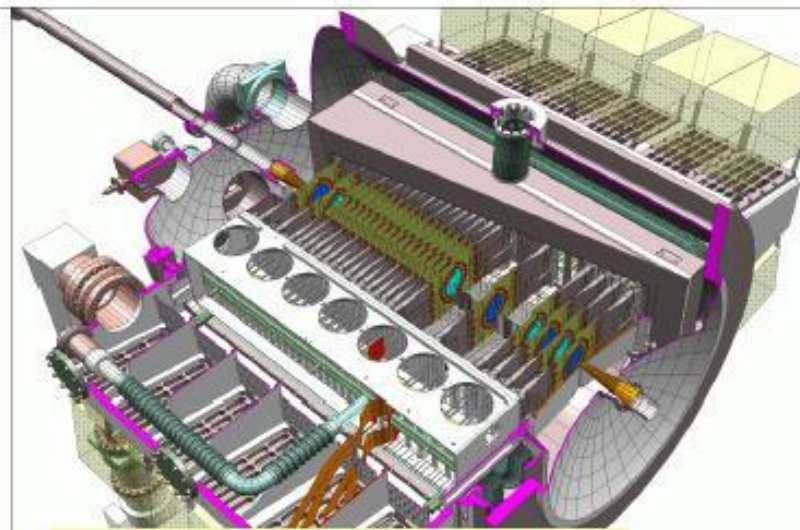
Instalacja



VELO Setup



Vacuum Vessel
L = 1.7m, D = 1m

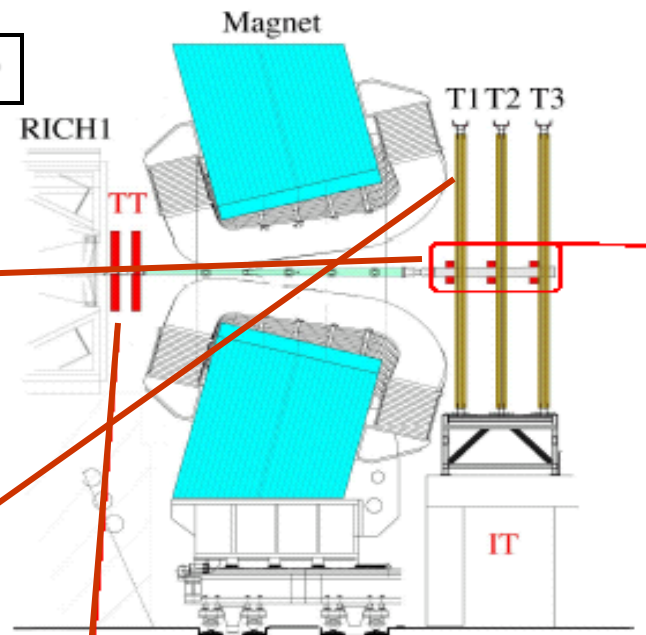
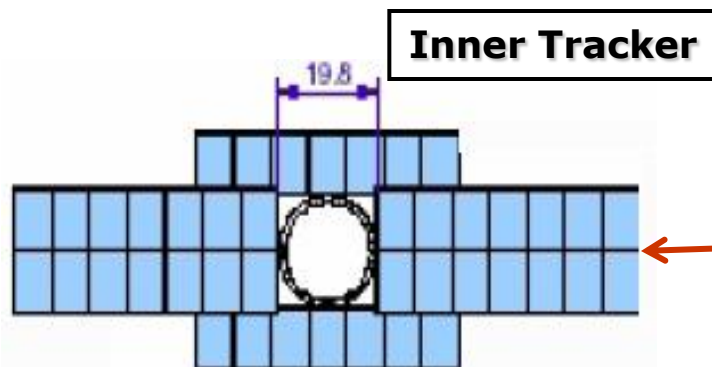


Number of silicon sensors: 88
Area of silicon: 0.47m²
Number of channels: 180,000
Vacuum feed-throughs: 416

- ◆ Silicon sensors, 7mm close to the LHC beams, are placed in a secondary vacuum for minimizing material
- ◆ The two detector halves are retracted during injection

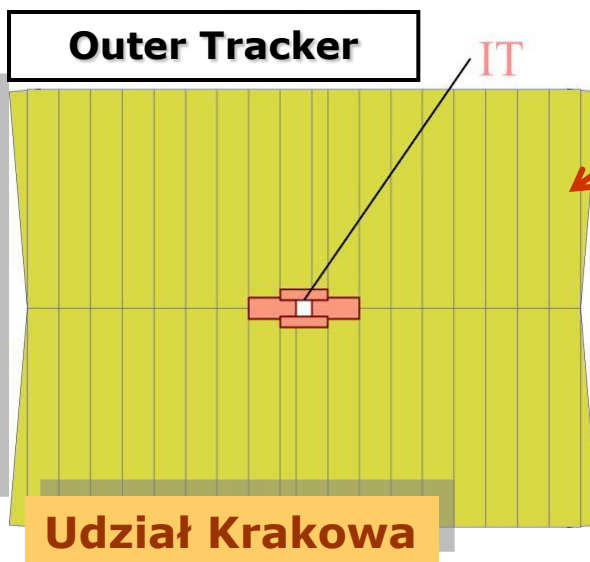
Detektory śladowe (TT, IT, OT)

- gęstość prod. cząstek:
 $3 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 3 stacje po 4 warstwy
każda
- liczba kanałów odczytu:
220 tys.
- dokładność pomiaru
punktu na torze: $65 \mu\text{m}$



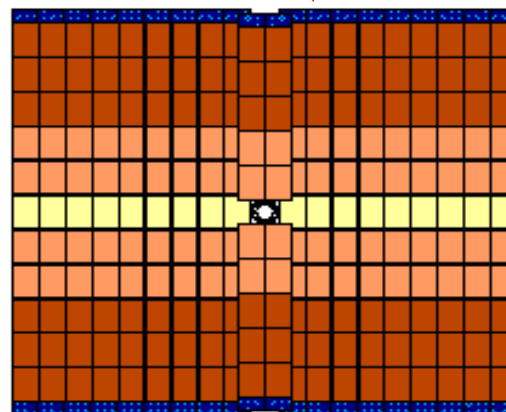
Outer Tracker

- 3 stacje $6 \times 5 \text{ m}^2$
- 4×2 warstwy
(8 warst słomek)
- średnica słomek:
5 mm
- liczba kanałów
odczytu: 50 tys.
- dokładność pomia-
ru punktu na to-
rze: $200 \mu\text{m}$



Trigger Tracker

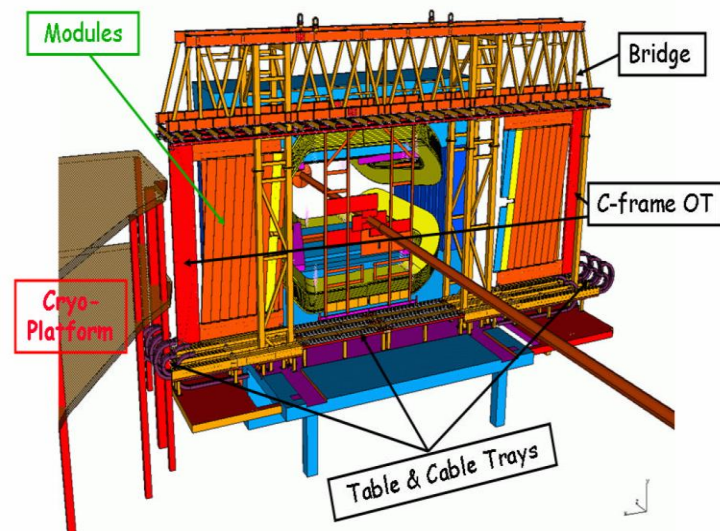
- $1.4 \times 1.2 \text{ m}^2$
- 2×2 warstwy
- liczba kanałów od-
czytu: 144 tys.
- dokładność pomia-
ru punktu na torze:
 $60 \mu\text{m}$



Detektor zewnętrzny OT - udział grupy krakowskiej

■ *Konstrukcja detektora zewnętrznego OT*

- opracowanie ultralekkiej technologii konstrukcji paneli
(rohacel + kompozyt na bazie tkaniny węglowej)
- badania technologiczne, budowa prototypu, technologia produkcji masowej
- produkcja **1000 m²** paneli
- projekt mechanicznej konstrukcji nośnej
- udział w projektowaniu elektroniki odczytu
- oprogramowanie detektorowe

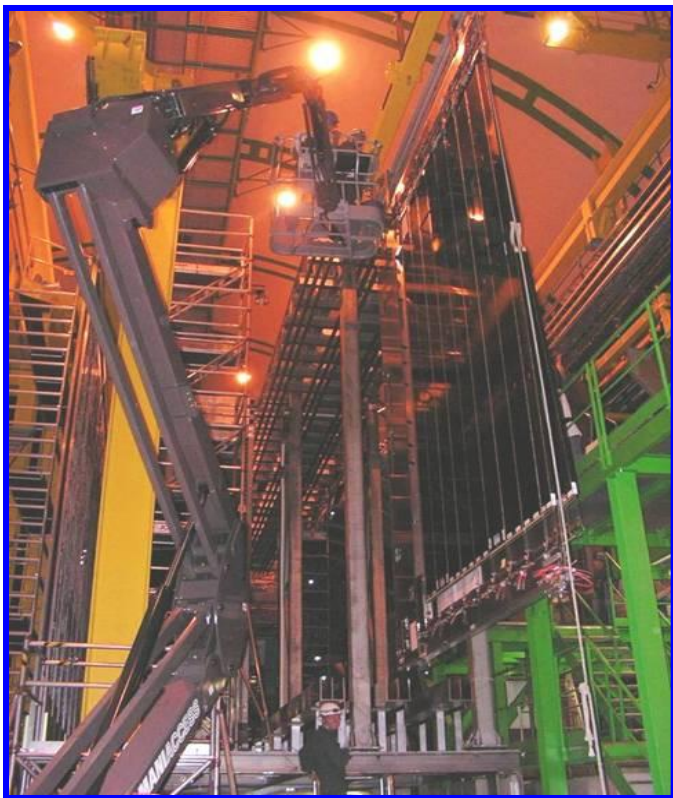


Produkcja modułów w IFJ



Detektor zewnętrzny OT

- Ukończono instalację struktury nośnej oraz paneli
- Rozpoczęto instalację modułów detektora (produkcja ukończona w 2006)

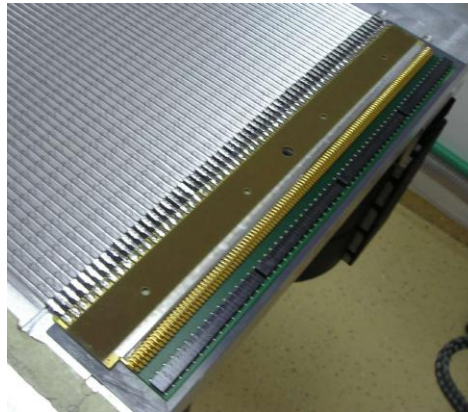


OT - produkcja modułów

Komora dryfowa



Złącza elektroniczne



Testy



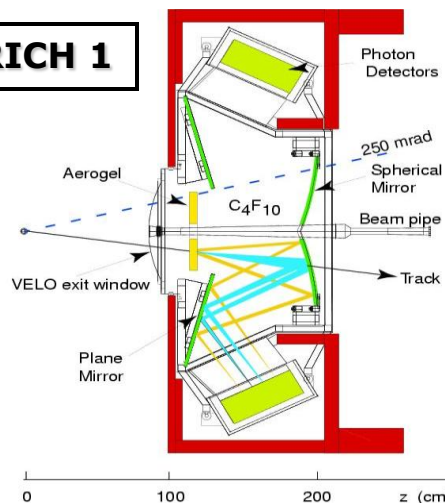
Moduł OT



Detektory Czerenkowa

- identyfikacja cząstek (π , K, p) w zakresie pędów 2 - 100 GeV/c
- dwa detektory Czerenkowa **RICH1** i **RICH2**
prędkości cząstek bliskie prędkości granicznej w ośrodku $\rightarrow$ promienie Czerenkowa zbliżają się do wartości granicznej $\rightarrow$ identyfikacja niemożliwa

RICH 1



RICH1

- aerożel (pianka krzemiankowa) + C_4F_{10}

$$n(\text{aerożelu}) = 1.03$$

$\rightarrow$ 2 - 10 GeV - najwolniejsze cząstki

$$n(C_4F_{10}) = 1.0014$$

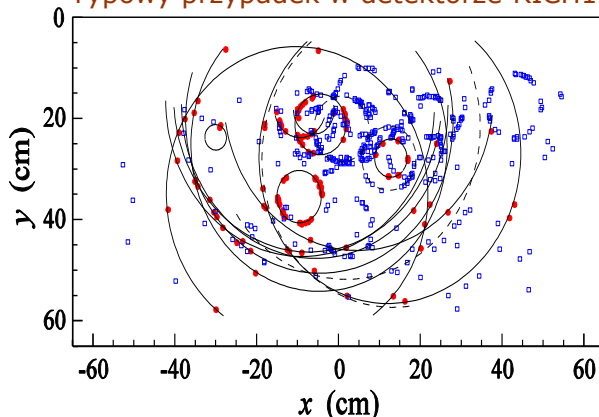
$\rightarrow$ 10 - 60 GeV

RICH2

- czterofluorek węgla CF_4

$$n(CF_4) = 1.0005 \rightarrow 16 - 100 \text{ GeV}$$

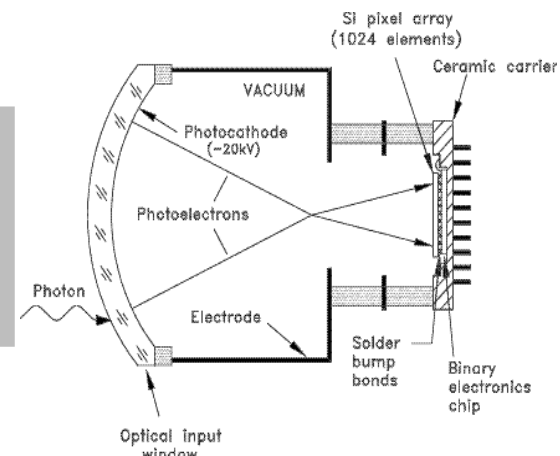
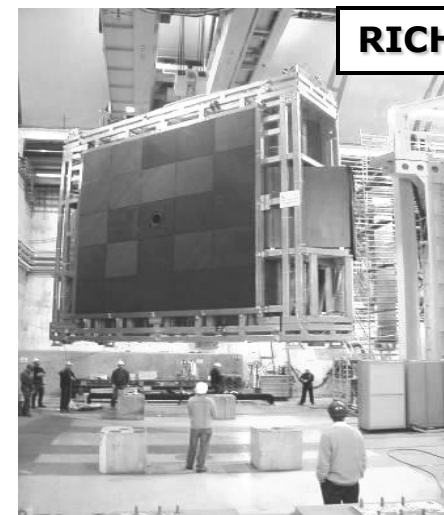
Typowy przypadek w detektorze RICH1



Detektory fotonów Czerenkowa

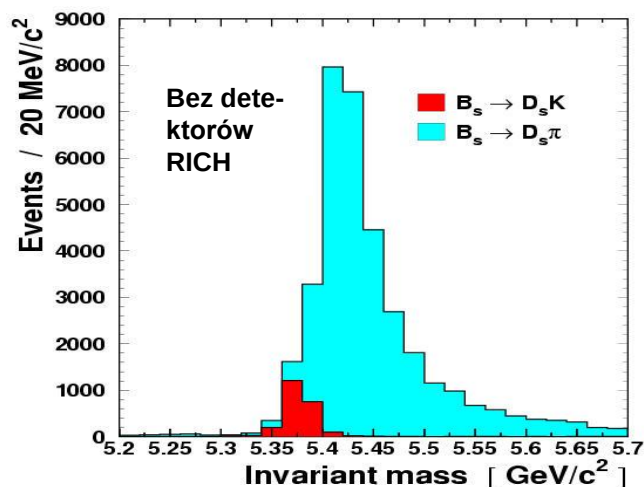
- fotodiody hybrydowe, 168 (RICH1), 262 (RICH2)
- ogniskowanie fotoelektronów
- 1024 piksele - diody krzemowe

RICH 2

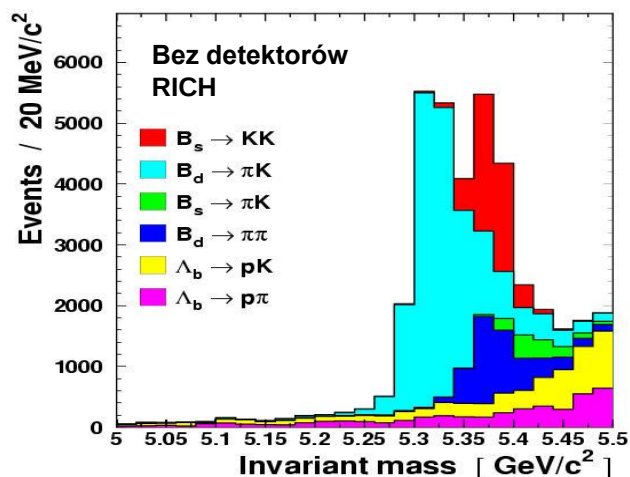
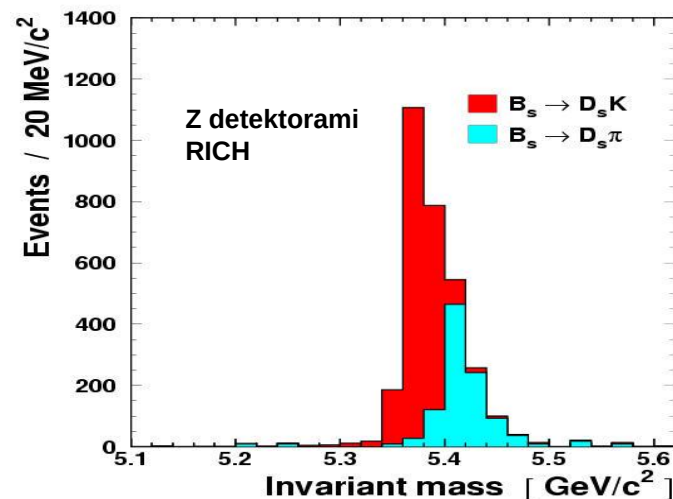


RICH - eliminacja tła

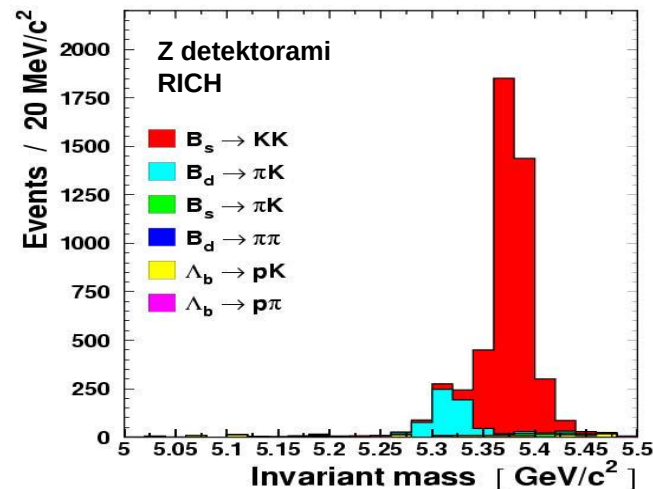
- Wyniki symulacji rozpadów B pokazujące konieczność identyfikacji mezonów π i K



$B_s \rightarrow D_s K$



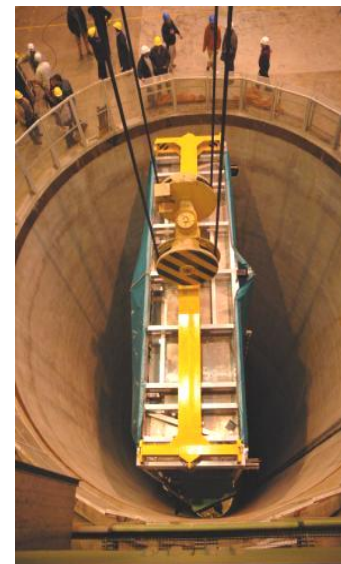
$B_s \rightarrow KK$



RICH2

- Przetransportowany pod ziemię pod koniec 2005
- Dokładność wykonania luster sferycznych: $50\ \mu\text{m}$

Transport



Stan obecny detektora LHCb

- Rozpoczęcie zbierania danych: listopad 2008



**Komory
mionowe**

**ECAL
HCAL**

RICH2

**OT
IT**

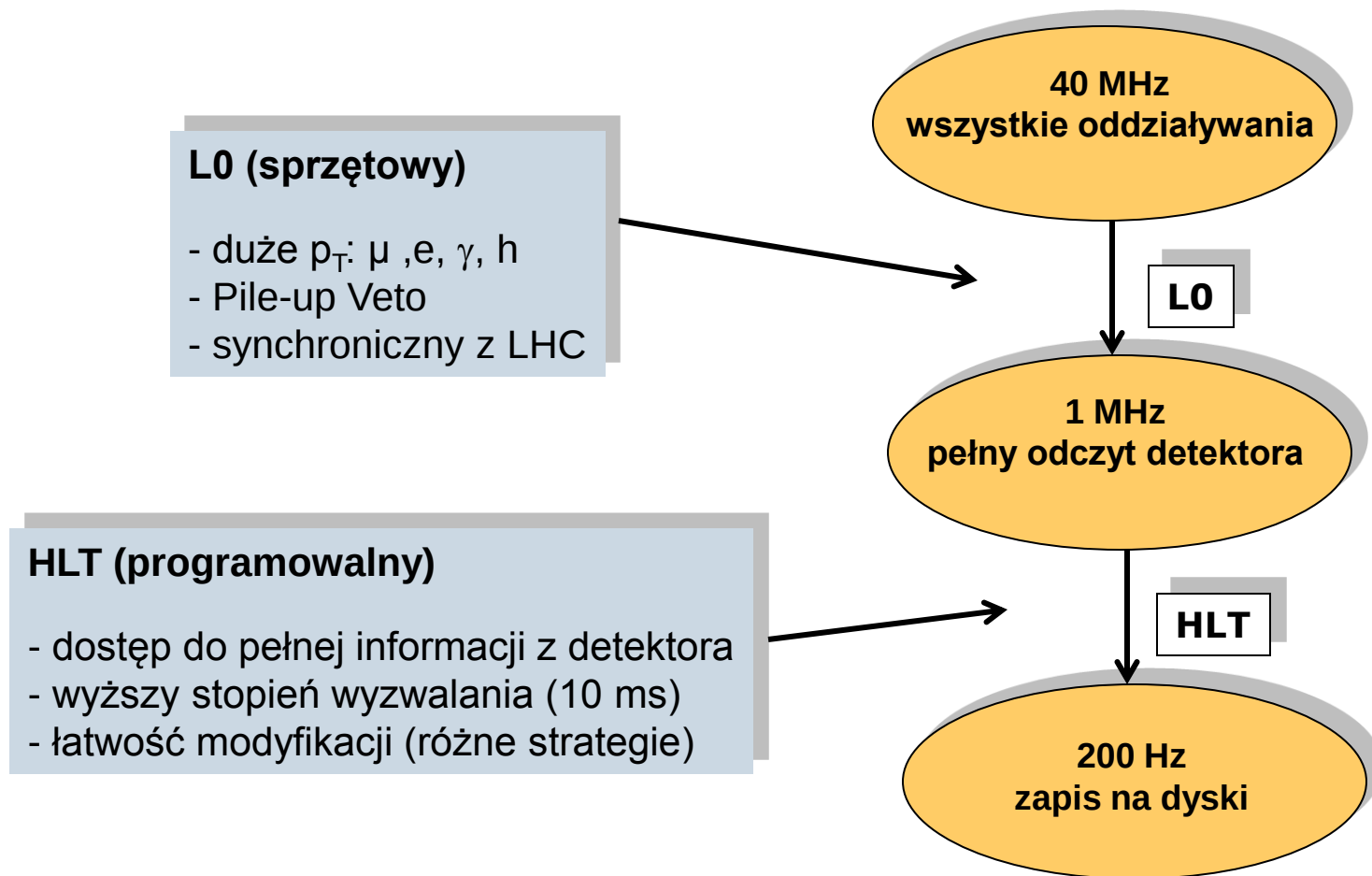
Magnes

RICH1

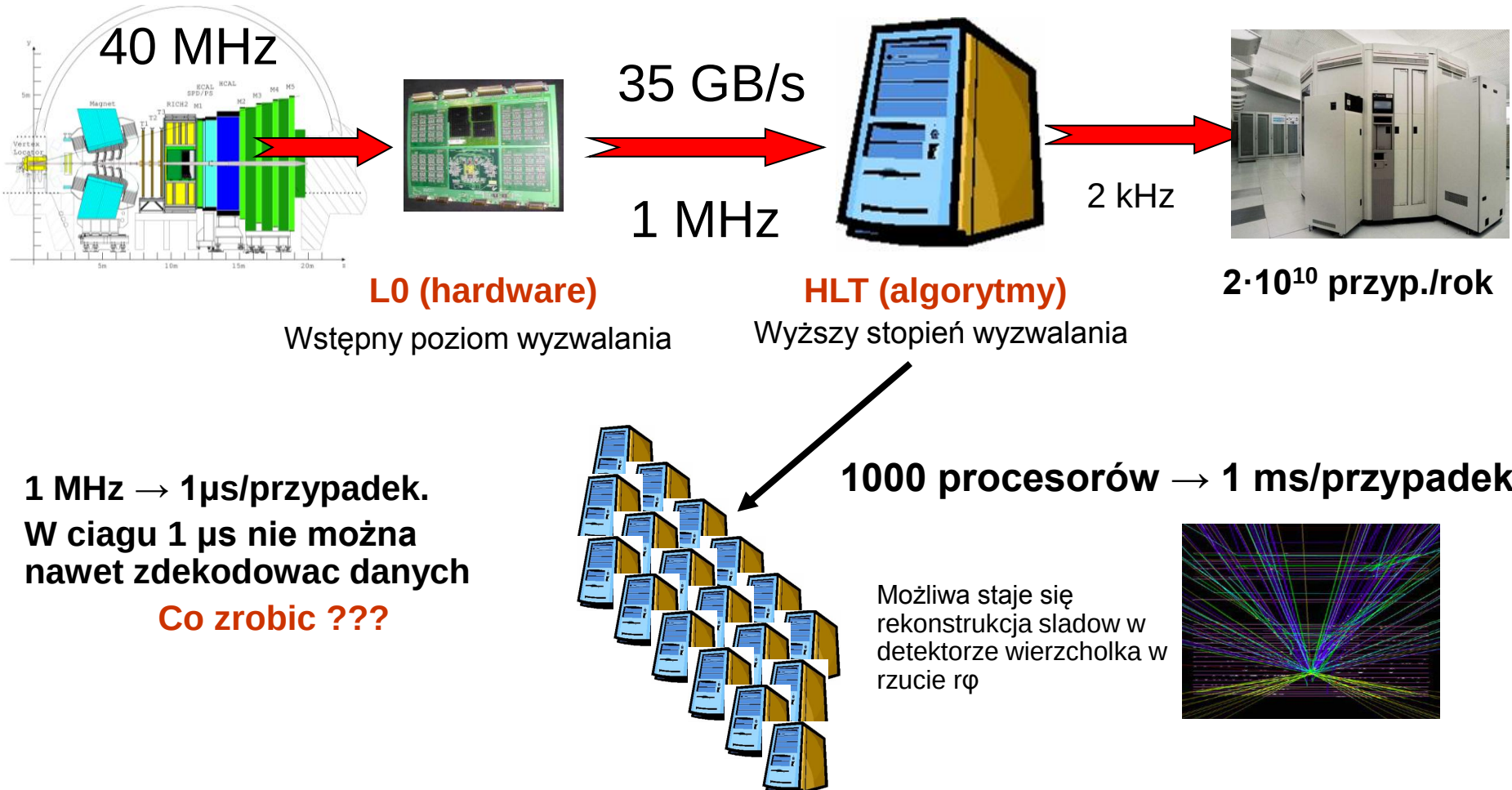
VELO

Stopnie trygera: L0, HLT

- **duży przekrój czynny na zderzenia nieelastyczne proton-proton** → redukcja tła od kwarków lekkich
→ redukcja „tła” od produkcji $b\bar{b}$
- **pomiar łamania CP wymaga redukcji danych o 6 rzędów wielkości**

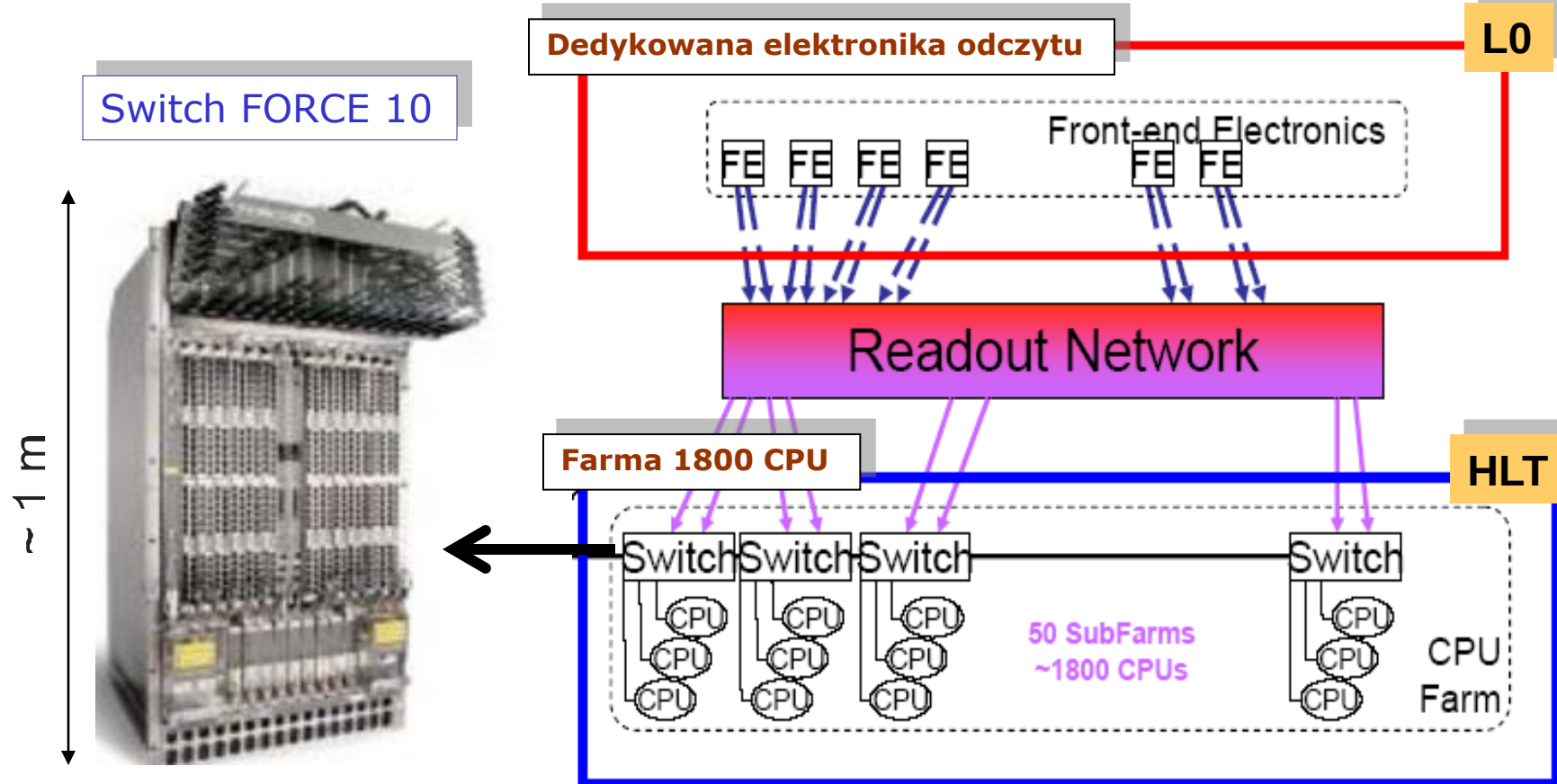


Zbieranie danych



Układ wyzwalań (tryger)

- częstotliwość zderzeń = 40 MHz → odczyt: 25 ns
- częstość zderzeń z co najmniej 1 oddziaływaniem p-p = 12 MHz → z tego przypadki z B: 100 KHz
- częstość produkcji przypadków z B bardzo duża → selekcja → układ wyzwalań



Technologie farm PC

- Początkowo CERN zdecydował zakupić komputery w formie zwykłych PC dostępnych w sklepach.
- W międzyczasie technologie RACK i BLADE osiągnęły konkurencyjne ceny.
- Obecnie w dużych ośrodkach wygrywają technologie specjalistyczne RACK i BLADE



Pierwsze klastry w CERN w standardowej technologii.



Hala w CERN przygotowana do montażu PC w szafach RACK



PC typu RACK i BLADE



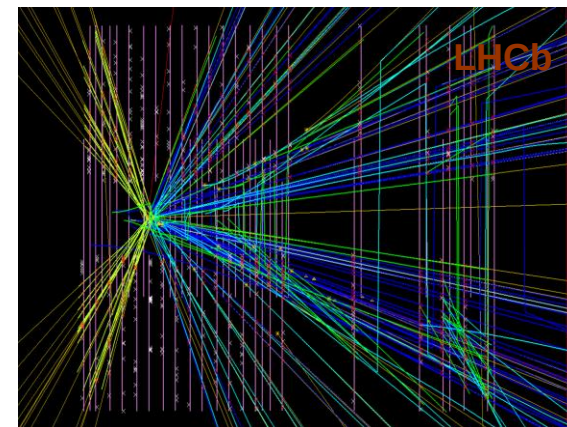
Hala w ośrodku obliczeniowym Tier-1 w Karlsruhe, Niemcy.

- LHCb jest detektorem dedykowanym precyzyjnemu badaniu zjawisk łamania symetrii CP
- Detektor jest gotowy do zbierania danych
- Istotny wkład grupy krakowskiej zarówno w budowę detektora, jak i rozwój oprogramowania służącego do rekonstrukcji oraz analizy danych

LHCb i fabryki B



Eksperyment	LHCb	Fabryki B
rodzaj zderzeń	proton-proton	elektron-pozyton
energia zderzenia	14 TeV	10 GeV
przekrój czynny σ_{bb}^-	500 μb	1 nb
przekrój czynny $\sigma_{\text{hadr.}}$	80 mb	5 nb
sygnał / tło	1:160	1:5
liczba $b\bar{b}$ / rok	10^{12}	10^7
dostępne cząstki piękne	$B_u B_d B_s B_c$ bariony piękne	$B_u B_d$

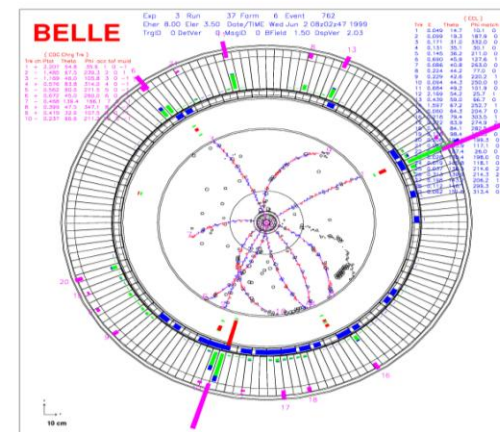


LHCb

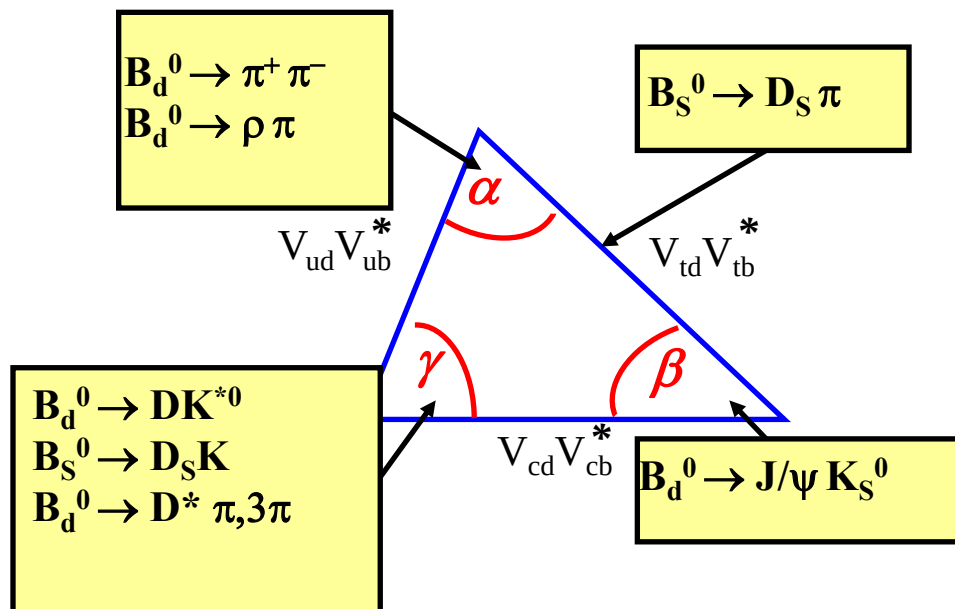
- duży przekrój czynny na produkcję $b\bar{b}$, ale znaczne tło od zderzeń nieelastycznych
- zderzenia hadronowe, dostępne mezony piękne o wyższych masach i wszystkie bariony piękne
- bezpośrednia rejestracja pierwotnych i wtórnych wierzchołków rozpadu B

Fabryki B

- duża czystość danych, zderzenia e^+e^- w rezonansie $Y(4S)$, niewielkie tło od kontinuum
- zderzenia elektron-pozyton, dostępne tylko mezony B_u i B_d
- krótka droga lotu mezonów B do momentu rozpadu



• różne warunki eksperymentalne
→ niezależne pomiary



$$A_{\text{mix}} = \frac{N_{\text{bez_mieszania}}(t) - N_{\text{mieszania}}(t)}{N_{\text{bez_mieszania}}(t) + N_{\text{mieszania}}(t)} = \frac{\cos(\Delta m_S t)}{\cosh((\Delta \Gamma_S / t) / 2)}$$