

Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

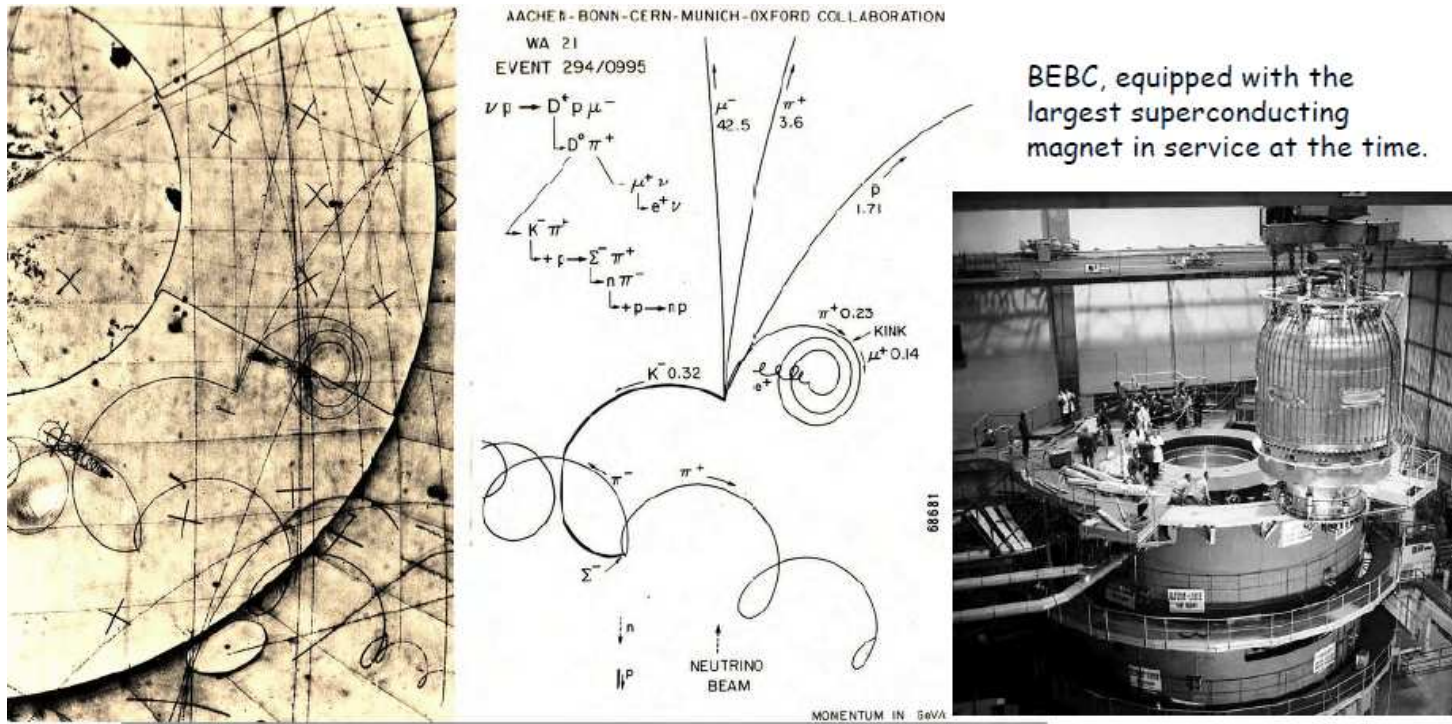
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IX

- Detektory przy kolajderach

Wprowadzenie

Ideałem jest pełna rekonstrukcja przypadku:



D^* (excited D-meson, carrying the "charm" quantum number): production and decay during a wide band exposure in experiment WA21, in the BEBC liquid hydrogen bubble chamber.

©. Ullaland/2006

Ale we współczesnych eksperymentach przy kolajderach nie jest to możliwe.

Wprowadzenie

Pojedyncze detektory pozwalają bardzo precyzyjnie zmierzyć:

- **pozycję cząstki** (detektory krzemowe, detektory śladowe)
- **pozycję wierzchołka** oddziaływania (detektor wierzchołka)
 - ⇒ identyfikacja ciężkich kwarków...
- **tor cząstki** (detektory śladowe)
 - ⇒ w polu magnetycznym: pęd cząstki
- **prędkość cząstki** (TOF, detektory Czerenkowa)
- **energię cząstki** (kalorymetry)
- **typ cząstki** (TRD, na podstawie dE/dx i oddziaływania w materii)

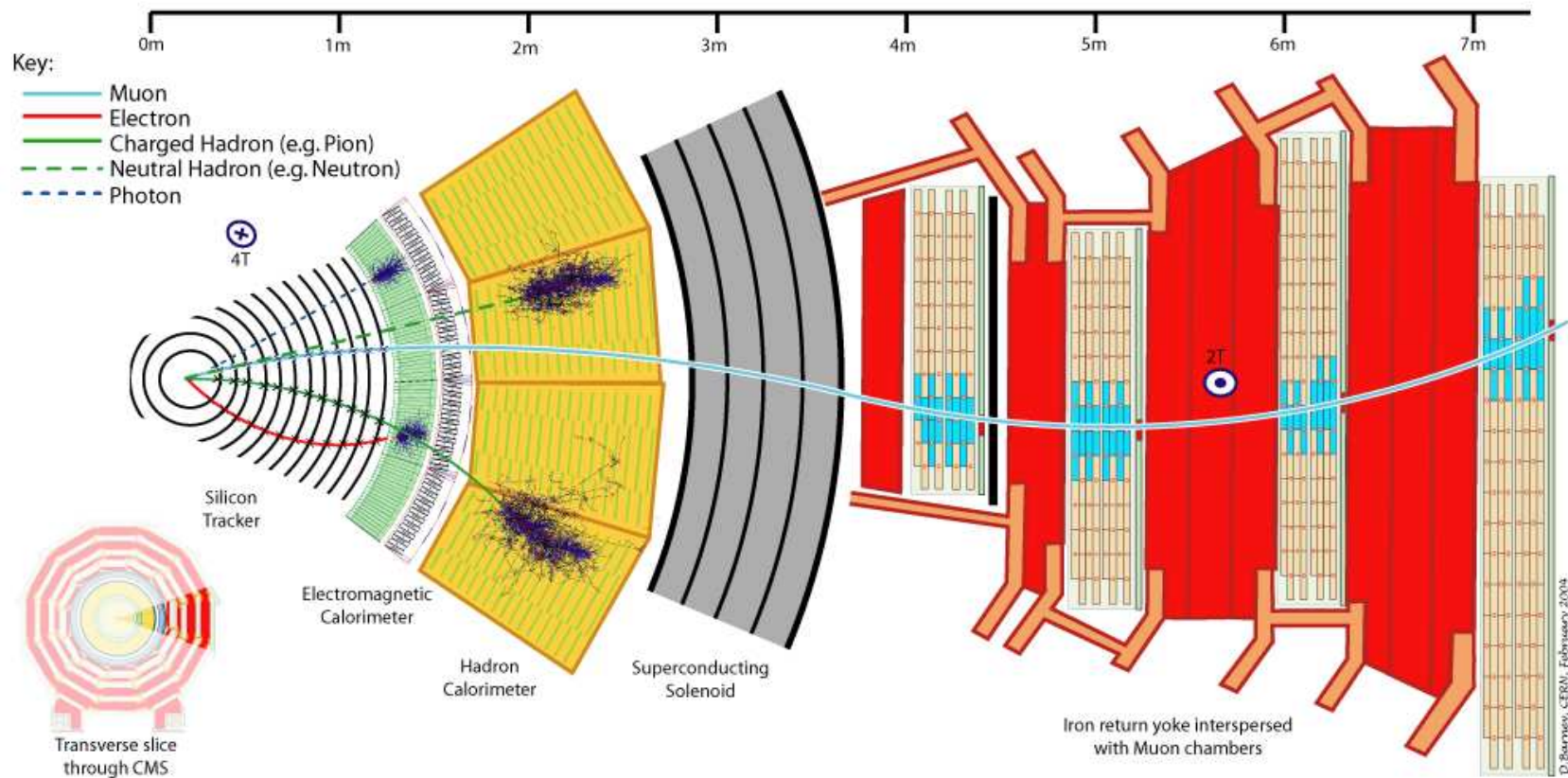
Na tej podstawie jesteśmy często w stanie zaklasyfikować cząstkę, ale naogół tylko w ograniczonym zakresie kinematycznym i/lub nie jest to pełna identyfikacja (np. wiemy, że naładowany hadron, ale nie konkretnie czy π^+ , K^+ czy p)

Wprowadzenie

Jak zaprojektować detektor?

Co decyduje o ostatecznym wyborze konstrukcji?

Jakie są ograniczenia?



Wprowadzenie

Fizyka

Projektując detektor trzeba sobie przede wszystkim odpowiedzieć na pytania:

- Jakie procesy chcemy badać/poszukiwać?

$$\text{np. } pp \rightarrow H, \quad e^+e^- \rightarrow \tilde{\mu}^+\tilde{\mu}^-$$

Przygotowywana jest lista “procesów referencyjnych”

- Z jakimi stanami końcowymi będziemy mieli do czynienia?

$$\text{np. } H \rightarrow \gamma\gamma, \quad H \rightarrow ZZ, \quad q^* \rightarrow q'W^\pm$$

- Jak możemy mierzyć wybrane stany końcowe?

Jakie parametry detektora są istotne?

fotony \Rightarrow kalorymetr EM \Rightarrow rozdzielczość energetyczna i przestrzenna (tło π^0)

μ^\pm \Rightarrow detektory śladowe i mionowe + pole magnetyczne

ciężkie kwarki \Rightarrow detektor wierzchołka, det. śladowe

bilans energii i pędu \Rightarrow kalorymetria, “hermetyczność” detektora

- Jaka precyzja pomiaru wymagana jest w pomiarze danego procesu?

Physics, Signatures and Triggers

Some physics and their experimental signatures:

- Higgs
 - $\gamma\gamma$, $b\bar{b}$, WW , ZZ (peak)
- Supersymmetry
 - multi-leptons or same-sign lepton pairs
 - jets and Missing E_T
- Z'
 - di-electron, di-muon (peak)
- W'
 - electron or muon and Missing E_T
- Large Extra dimensions
 - jet + Missing E_T (mono-jet)
 - di-fermion, di-boson
- Compositeness
 - di-jet (hi mass tail)
 - lepton and jet (LeptoQuark)

Corresponding "primary" triggers:

- di-photon
- di-electron
- di-muon
- di-jet
 - with b-tagging
- Inclusive leptons, either:
 - higher threshold
 - Isolation cut
 - Pre-scale applied
- Missing E_T .
 - Jet(s)
 - leptons
- "mixed" or "composite" triggers
 - ...

TABLE II: Benchmark reactions for the evaluation of ILC detectors

	Process and Final states	Energy (TeV)	Observables	Target Accuracy	Detector Challenge	Notes
<i>Higgs</i>	$ee \rightarrow Z^0 h^0 \rightarrow \ell^+ \ell^- X$	0.35	$M_{\text{recoil}}, \sigma_{Zh}, \text{BR}_{bb}$	$\delta\sigma_{Zh} = 2.5\%, \delta\text{BR}_{bb} = 1\%$	T	{1}
	$ee \rightarrow Z^0 h^0, h^0 \rightarrow b\bar{b}/c\bar{c}/\tau\tau$	0.35	Jet flavour, jet (E, \vec{p})	$\delta M_h = 40 \text{ MeV}, \delta(\sigma_{Zh} \times \text{BR}) = 1\%/7\%/5\%$	V	{2}
	$ee \rightarrow Z^0 h^0, h^0 \rightarrow WW^*$	0.35	$M_Z, M_W, \sigma_{qqWW^*}$	$\delta(\sigma_{Zh} \times \text{BR}_{WW^*}) = 5\%$	C	{3}
	$ee \rightarrow Z^0 h^0/h^0\nu\bar{\nu}, h^0 \rightarrow \gamma\gamma$	1.0	$M_{\gamma\gamma}$	$\delta(\sigma_{Zh} \times \text{BR}_{\gamma\gamma}) = 5\%$	C	{4}
	$ee \rightarrow Z^0 h^0/h^0\nu\bar{\nu}, h^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$	1.0	$M_{\mu\mu}$	5σ Evidence for $M_h = 120 \text{ GeV}$	T	{5}
	$ee \rightarrow Z^0 h^0, h^0 \rightarrow \text{invisible}$	0.35	σ_{qqE}	5σ Evidence for $\text{BR}_{\text{invisible}} = 2.5\%$	C	{6}
	$ee \rightarrow h^0\nu\bar{\nu}$	0.5	$\sigma_{bb\nu\nu}, M_{bb}$	$\delta(\sigma_{\nu\nu h} \times \text{BR}_{bb}) = 1\%$	C	{7}
	$ee \rightarrow t\bar{t}h^0$	1.0	σ_{tth}	$\delta g_{tth} = 5\%$	C	{8}
	$ee \rightarrow Z^0 h^0 h^0, h^0 h^0\nu\bar{\nu}$	0.5/1.0	$\sigma_{Zh h}, \sigma_{\nu\nu h h}, M_{hh}$	$\delta g_{h h h} = 20/10\%$	C	{9}
<i>SSB</i>	$ee \rightarrow W^+W^-$	0.5		$\Delta\kappa_\gamma, \lambda_\gamma = 2 \cdot 10^{-4}$	V	{10}
	$ee \rightarrow W^+W^- \nu\bar{\nu}/Z^0 Z^0 \nu\bar{\nu}$	1.0	σ	$\Lambda_{*4}, \Lambda_{*5} = 3 \text{ TeV}$	C	{11}
<i>SUSY</i>	$ee \rightarrow \tilde{e}_R^+ \tilde{e}_R^-$ (Point 1)	0.5	E_e	$\delta M_{\tilde{\chi}_1^0} = 50 \text{ MeV}$	T	{12}
	$ee \rightarrow \tilde{\tau}_1^+ \tilde{\tau}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$ (Point 1)	0.5	$E_\pi, E_{2\pi}, E_{3\pi}$	$\delta(M_{\tilde{\tau}_1} - M_{\tilde{\chi}_1^0}) = 200 \text{ MeV}$	T	{13}
	$ee \rightarrow \tilde{t}_1 \tilde{t}_1$ (Point 1)	1.0		$\delta M_{\tilde{t}_1} = 2 \text{ GeV}$		{14}
<i>-CDM</i>	$ee \rightarrow \tilde{\tau}_1^+ \tilde{\tau}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$ (Point 3)	0.5		$\delta M_{\tilde{\tau}_1} = 1 \text{ GeV}, \delta M_{\tilde{\chi}_1^0} = 500 \text{ MeV},$	F	{15}
	$ee \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$ (Point 2)	0.5	M_{jj} in $jj\cancel{E}, M_{\ell\ell}$ in $jj\ell\ell\cancel{E}$	$\delta\sigma_{\tilde{\chi}_2\tilde{\chi}_3} = 4\%, \delta(M_{\tilde{\chi}_2^0} - M_{\tilde{\chi}_1^0}) = 500 \text{ MeV}$	C	{16}
	$ee \rightarrow \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^- / \tilde{\chi}_i^0 \tilde{\chi}_j^0$ (Point 5)	0.5/1.0	$ZZ\cancel{E}, WW\cancel{E}$	$\delta\sigma_{\tilde{\chi}\tilde{\chi}} = 10\%, \delta(M_{\tilde{\chi}_3^0} - M_{\tilde{\chi}_1^0}) = 2 \text{ GeV}$	C	{17}
	$ee \rightarrow H^0 A^0 \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$ (Point 4)	1.0	Mass constrained M_{bb}	$\delta M_A = 1 \text{ GeV}$	C	{18}
<i>-alternative SUSY breaking</i>	$ee \rightarrow \tilde{\tau}_1^+ \tilde{\tau}_1^-$ (Point 6)	0.5	Heavy stable particle	$\delta M_{\tilde{\tau}_1}$	T	{19}
	$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma + \cancel{E}$ (Point 7)	0.5	Non-pointing γ	$\delta c\tau = 10\%$	C	{20}
	$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \pi_{soft}^\pm$ (Point 8)	0.5	Soft π^\pm above $\gamma\gamma$ bkgd	5σ Evidence for $\Delta\tilde{m} = 0.2\text{-}2 \text{ GeV}$	F	{21}
<i>Precision SM</i>	$ee \rightarrow t\bar{t} \rightarrow 6 \text{ jets}$	1.0		5σ Sensitivity for $(g-2)_t/2 \leq 10^{-3}$	V	{22}
	$ee \rightarrow f\bar{f}$ ($f = e, \mu, \tau; b, c$)	1.0	$\sigma_{f\bar{f}}, A_{FB}, A_{LR}$	5σ Sensitivity to $M_{Z_{LR}} = 7 \text{ TeV}$	V	{23}
<i>New Physics</i>	$ee \rightarrow \gamma G$ (ADD)	1.0	$\sigma(\gamma + \cancel{E})$	5σ Sensitivity	C	{24}
	$ee \rightarrow KK \rightarrow f\bar{f}$ (RS)	1.0			T	{25}
<i>Energy/Lumi Meas.</i>	$ee \rightarrow ee_{fwd}$	0.3/1.0		$\delta M_{top} = 50 \text{ MeV}$	T	{26}
	$ee \rightarrow Z^0 \gamma$	0.5/1.0			T	{27}

Table 3

Gold-plated processes at photon colliders.

Reaction	Remarks
$\gamma\gamma \rightarrow h^0 \rightarrow b\bar{b}$	<i>SM</i> or <i>MSSM</i> Higgs, $M_{h^0} < 160$ GeV
$\gamma\gamma \rightarrow h^0 \rightarrow WW(WW^*)$	<i>SM</i> Higgs, $140 \text{ GeV} < M_{h^0} < 190$ GeV
$\gamma\gamma \rightarrow h^0 \rightarrow ZZ(ZZ^*)$	<i>SM</i> Higgs, $180 \text{ GeV} < M_{h^0} < 350$ GeV
$\gamma\gamma \rightarrow H, A \rightarrow b\bar{b}$	<i>MSSM</i> heavy Higgs, for intermediate $\tan\beta$
$\gamma\gamma \rightarrow \tilde{f}\tilde{f}^*, \tilde{\chi}_i^+ \tilde{\chi}_i^-, H^+ H^-$	large cross sections, possible observations of FCNC
$\gamma\gamma \rightarrow S[\tilde{t}\tilde{t}]$	$\tilde{t}\tilde{t}$ stoponium
$\gamma e \rightarrow \tilde{e}^- \tilde{\chi}_1^0$	$M_{\tilde{e}^-} < 0.9 \times 2E_0 - M_{\tilde{\chi}_1^0}$
$\gamma\gamma \rightarrow W^+ W^-$	anomalous <i>W</i> interactions, extra dimensions
$\gamma e^- \rightarrow W^- \nu_e$	anomalous <i>W</i> couplings
$\gamma\gamma \rightarrow WWWW, WWZZ$	strong <i>WW</i> scatt., quartic anomalous <i>W</i> , <i>Z</i> couplings
$\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$	anomalous top quark interactions
$\gamma e^- \rightarrow \bar{t} b \nu_e$	anomalous <i>Wtb</i> coupling
$\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$	total $\gamma\gamma$ cross section
$\gamma e^- \rightarrow e^- X$ and $\nu_e X$	<i>NC</i> and <i>CC</i> structure functions (polarized and unpolarized)
$\gamma g \rightarrow q\bar{q}, c\bar{c}$	gluon distribution in the photon
$\gamma\gamma \rightarrow J/\psi J/\psi$	QCD Pomeron

Wprowadzenie

Fizyka

- Jaka jest częstość przypadków, których szukamy?
A jaka jest częstość przypadków tła?
- Czy potrafimy wyodrębnić poszukiwane przypadki na poziomie “triggera” (układu wyzwalania)? ⇒ Które detektory muszą to zapewnić?

Są też pytania wspólne dla wszystkich rozważanych procesów (choć z nich wynikające):

- Jaka duży będzie strumień danych? Jak go przetworzyć i zapisać?
- Jak dokładnie musimy kalibrować nasz detektor?
- Jak dokładnie musimy pozycjonować nasz detektor?
- Jak dokładnie musimy znać efektywności detektorów i układu wyzwalania?

Wprowadzenie

Idealny detektor

- Obejmuje pełen kąt bryłowy (4π), bez dziur, obszarów martwych itp.
- Dokładny pomiar pędów i energii, oraz pozycji (duża segmentacja)
- Pełna identyfikacja cząstek
- Jednorodność, idealna kalibracja i 100% efektywność (brak czasu martwego)

Taki detektor można naszkicować na kartce papieru,
a nawet wstawić do programu symulacji...

Ale taki detektor nie istnieje!

Wprowadzenie

Ograniczenia

- Wiązka: rozmiary i tło
- Przewody: zasilanie i wyprowadzanie sygnałów, chłodzenie, kalibracja
- Konstrukcja mechaniczna
- Dostępne technologie detektorów, czas odczytu, segmentacja...
- Dostępne technologie dla elektroniki odczytu, transferu i przetwarzania danych
Tu trzeba przewidzieć rozwój technologii na wiele lat naprzód!
- Wymagany nakład pracy i kwalifikacje personelu
- Ogólne rozmiary i waga detektora, sposób montowania, dostęp serwisowy.
- Potrzebna infrastruktura
- Planowany termin uruchomienia
- **PIENIĄDZE** - liczą się na każdym kroku

Wprowadzenie

Ryzyko

Projektując detektor, który ma być uruchomiony za 0(10) lat musimy przewidywać rozwój technologii produkcji komponentów, elektroniki, procesorów, itp.

Gdybyśmy opierali się wyłącznie na komercyjnie dostępnych rozwiązaniach -
- eksperyment byłby przestarzały w chwili uruchomienia.

Szereg wyborów jest więc obarczonych ryzykiem, zarówno jeśli chodzi o docelowe parametry detektora (czy uda się je uzyskać) jak i koszt.

Ale bez podejmowania tego ryzyka nie byłoby rozwoju technik detekcyjnych!

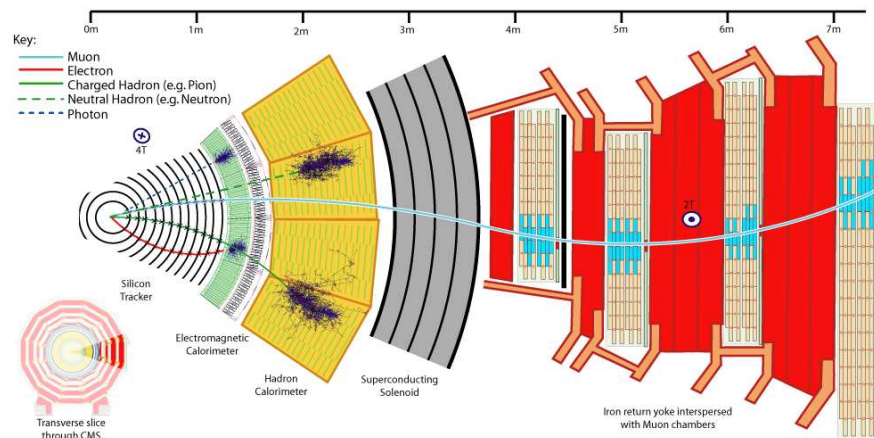
Trudne wyzwania pozwalają przyciągnąć najlepszych!

Wprowadzenie

Nie istnieje jedno, najlepsze rozwiązanie!

Nie jest możliwa globalna optymalizacja - za dużo niewiadomych (poczynając od fizyki, np. co będzie najważniejszym pomiarem)

Każdy eksperyment znajduje swoje “minimum”.



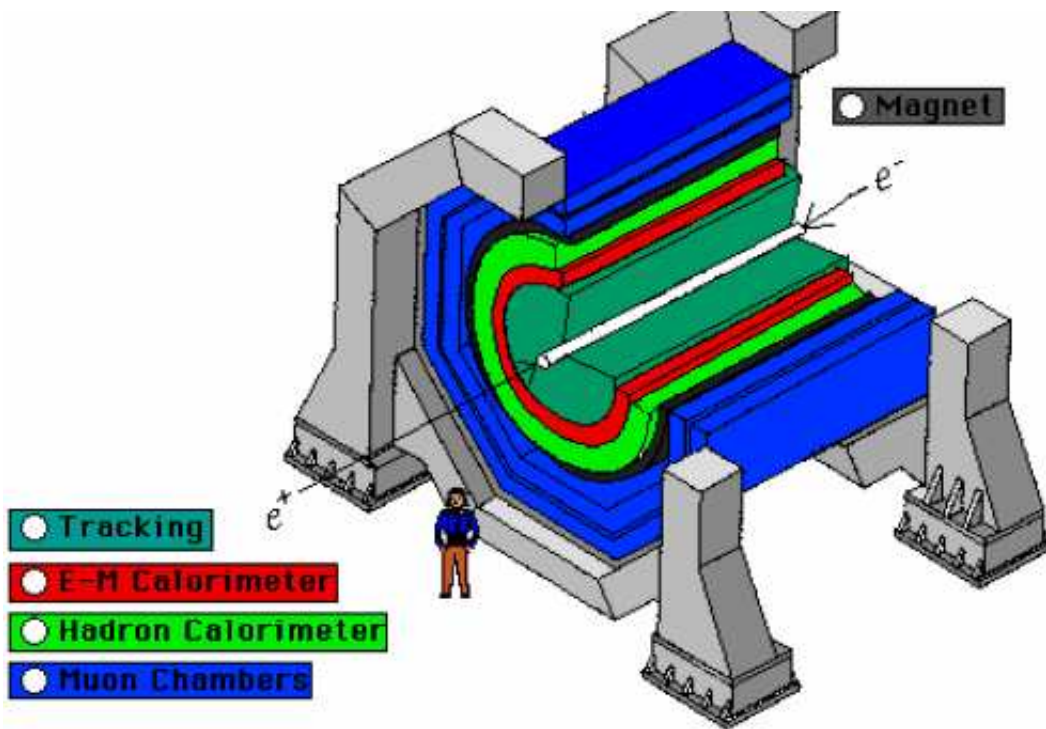
Jakie są ogólne zasady budowy detektorów?

Z jakich elementów powinien się składać detektor przy kolajderze?

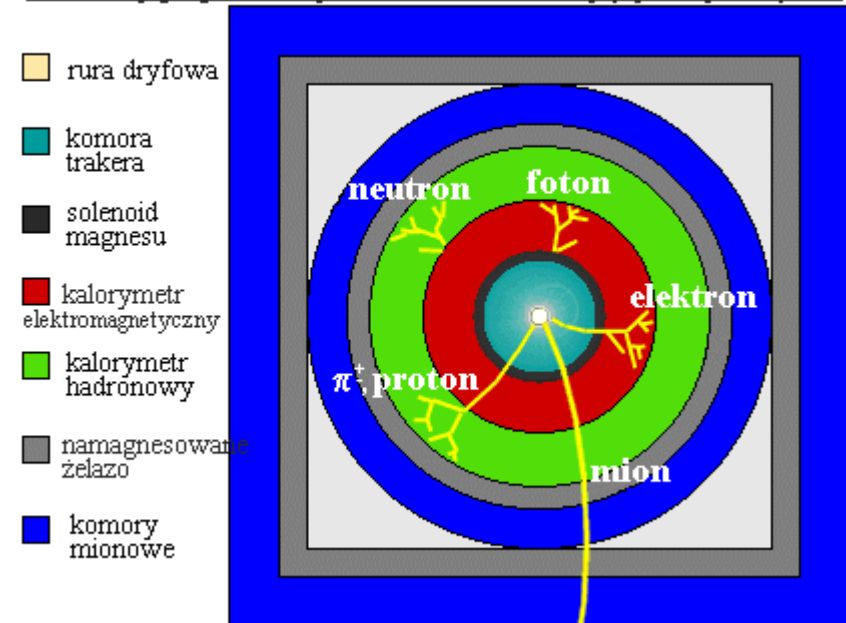
Jak powinny być rozmieszczone?

Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa



Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek



Ułożone **jeden za drugim** detektory umożliwiają optymalny pomiar **wszystkich rodzajów cząstek** i ich (zwykle częściową) identyfikację.

Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa

Ten schemat opisuje większość współczesnych eksperymentów przy kolajderach (LEP, HERA, Tevatron, LHC, ILC):

Kolejno od środka detektora:

- detektor wierzchołka
jak najbliżej osi wiązki, określa gdzie zaszło zderzenie, identyfikuje rozpady cząstek krótkożyciowych
(tzw. wierzchołki wtórne)
najczęściej detektor półprzewodnikowy
- detektory śladowe
pomiar torów cząstek naładowanych, wyznaczenie pędów cząstek z zakrzywienia w polu magnetycznym
najczęściej detektory gazowe
(minimalizuje oddziaływania cząstek w detektorze)

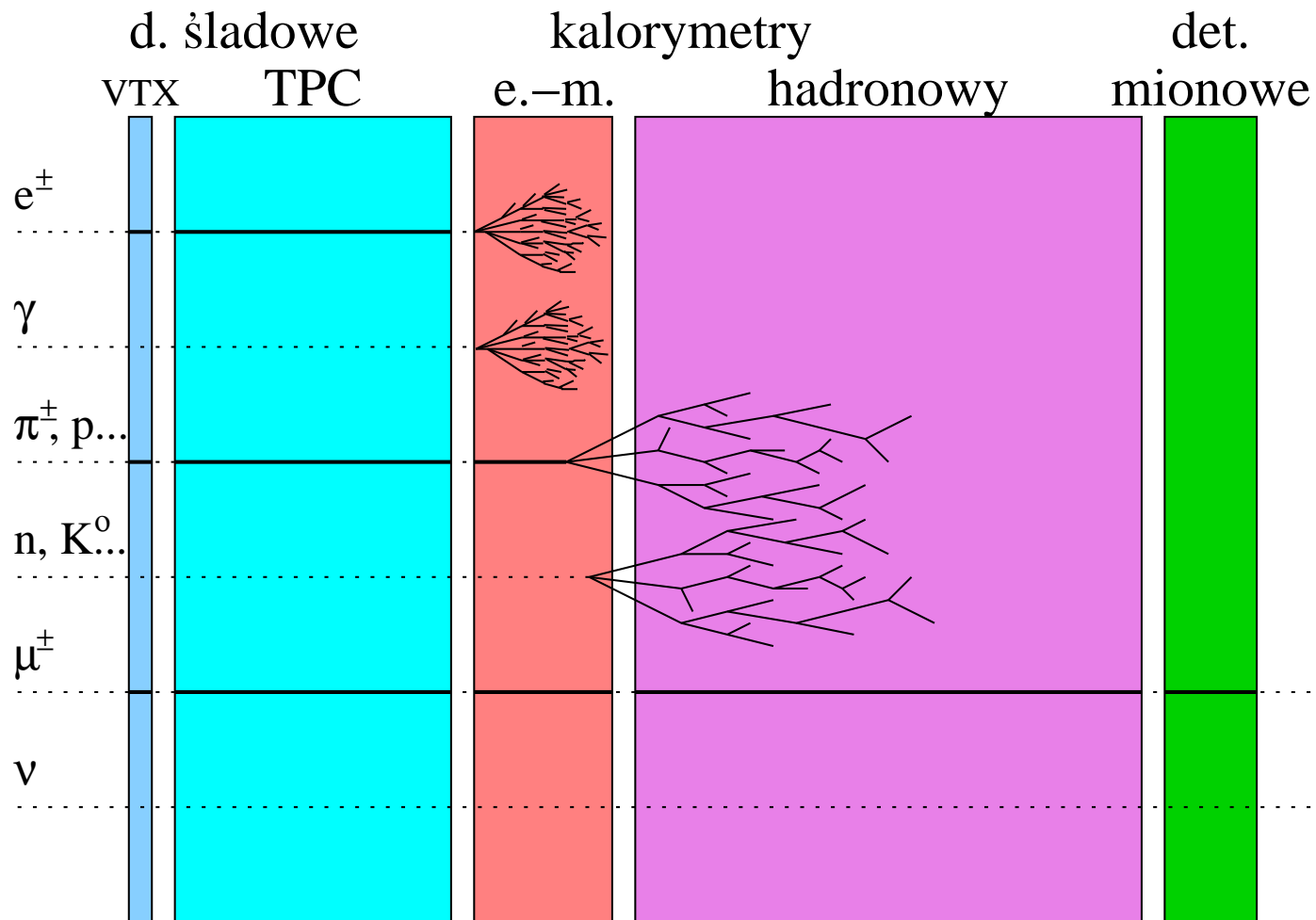
Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa

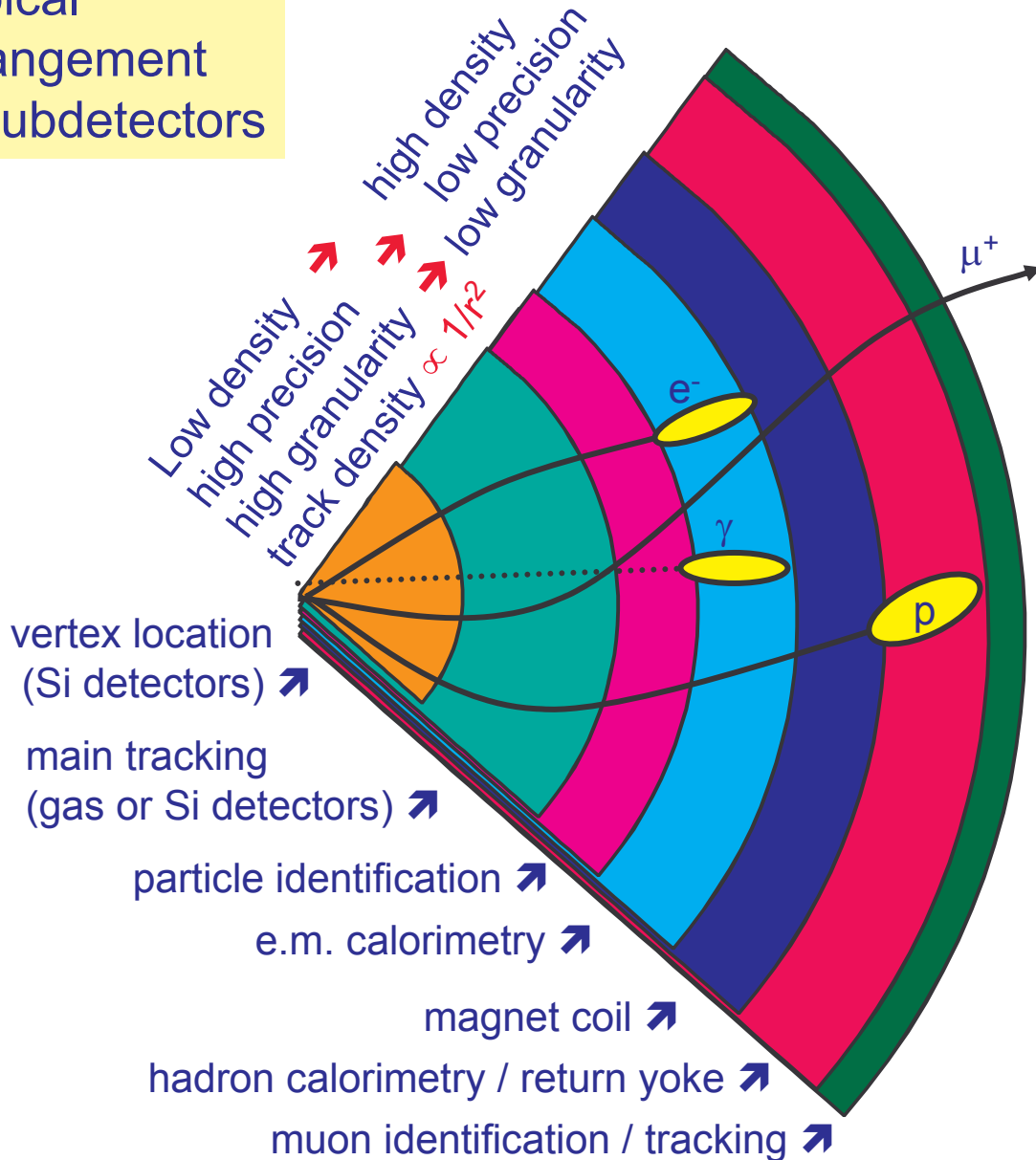
- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(międz, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek;
lawina hadronowa jest wielokrotnie dłuższa od elektromagnetycznej.
- detektory mionowe
identyfikacja mionów - jedyne cząstki naładowane, które mogą przejść przez kalorymetry bez dużych strat energii

Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa



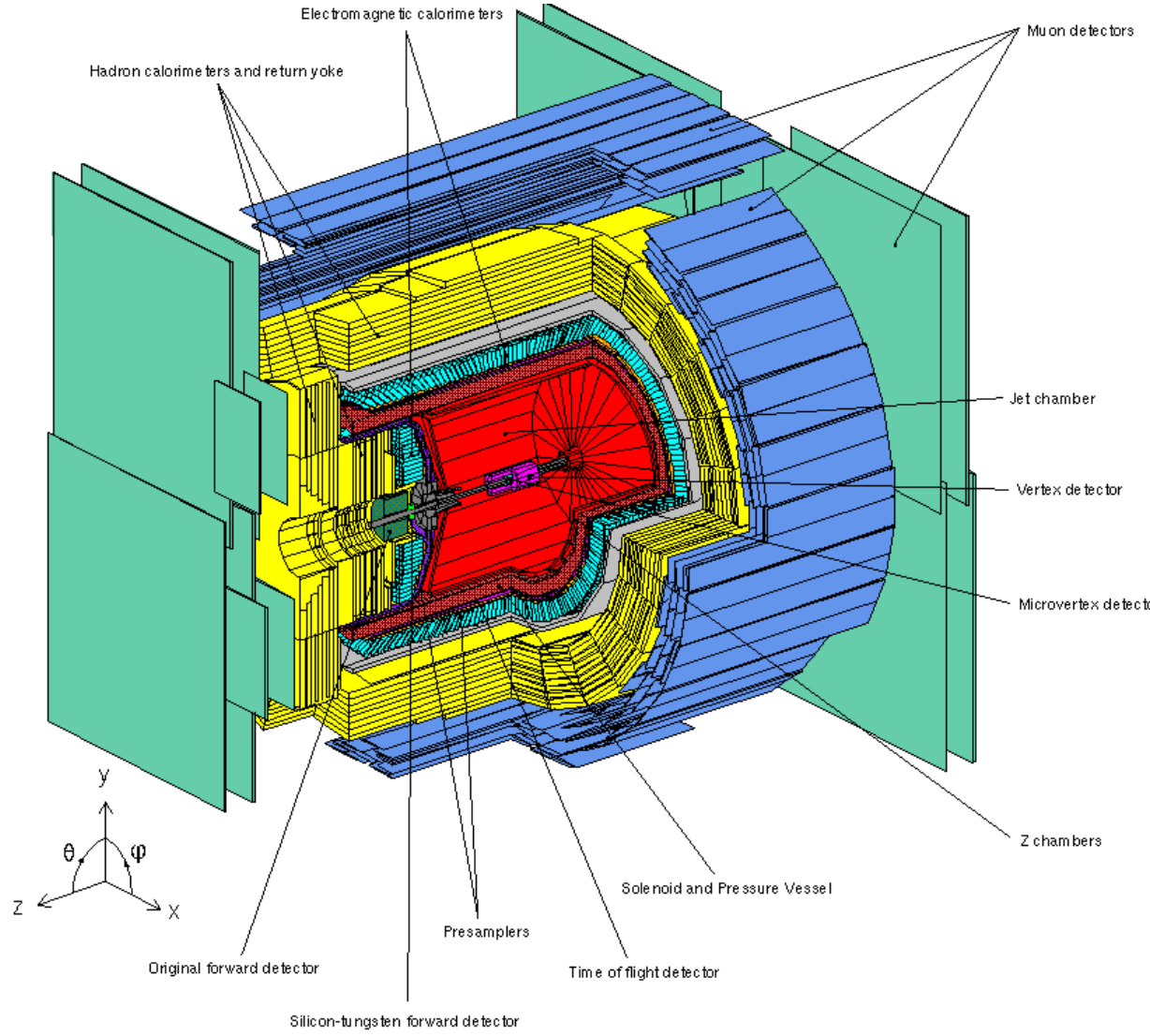
Typical arrangement of subdetectors



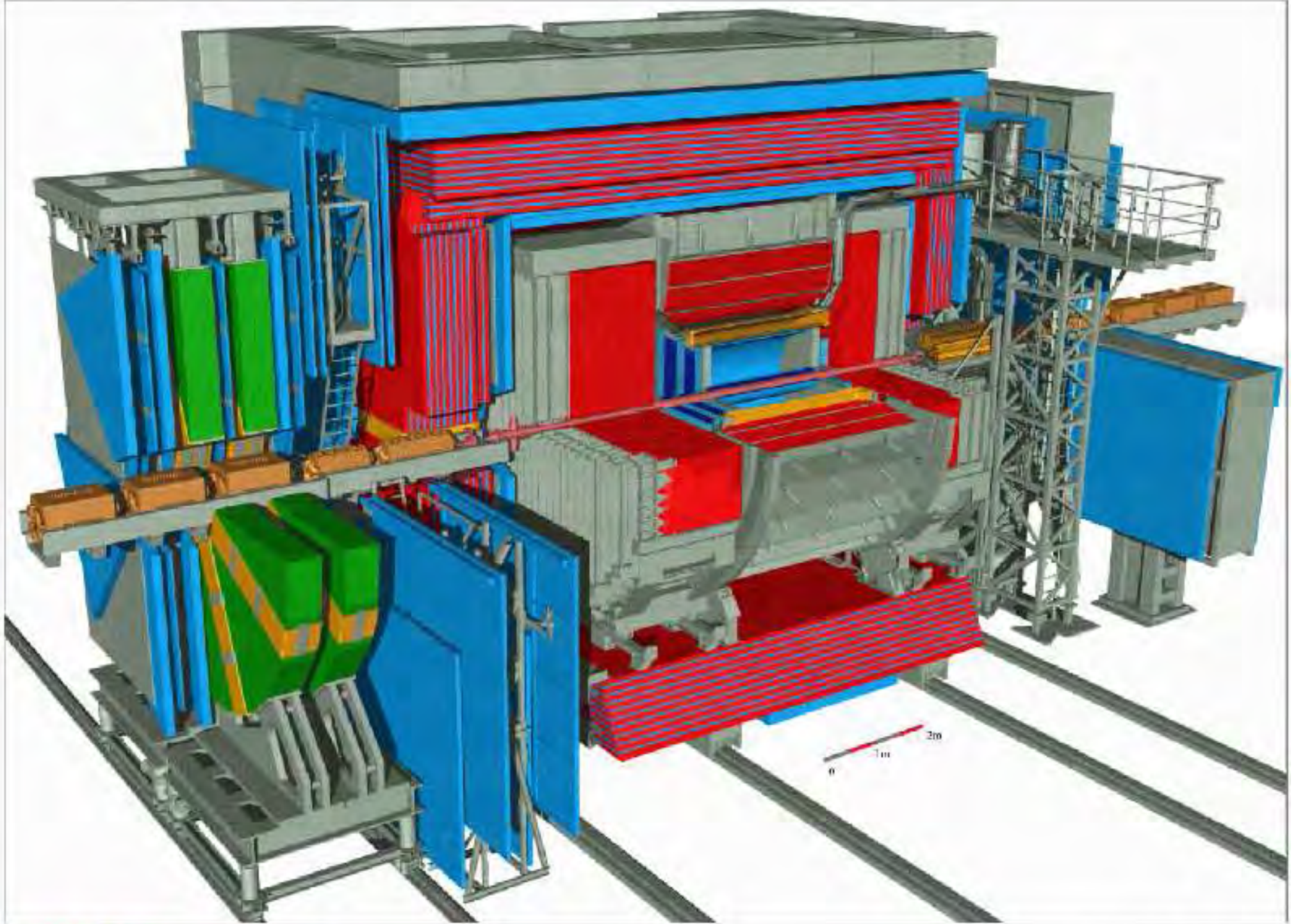
OPAL



Detektor **OPAL**,
akcelerator **LEP**,
zderzenia wiązek
przeciwbieżnych
 e^+e^-



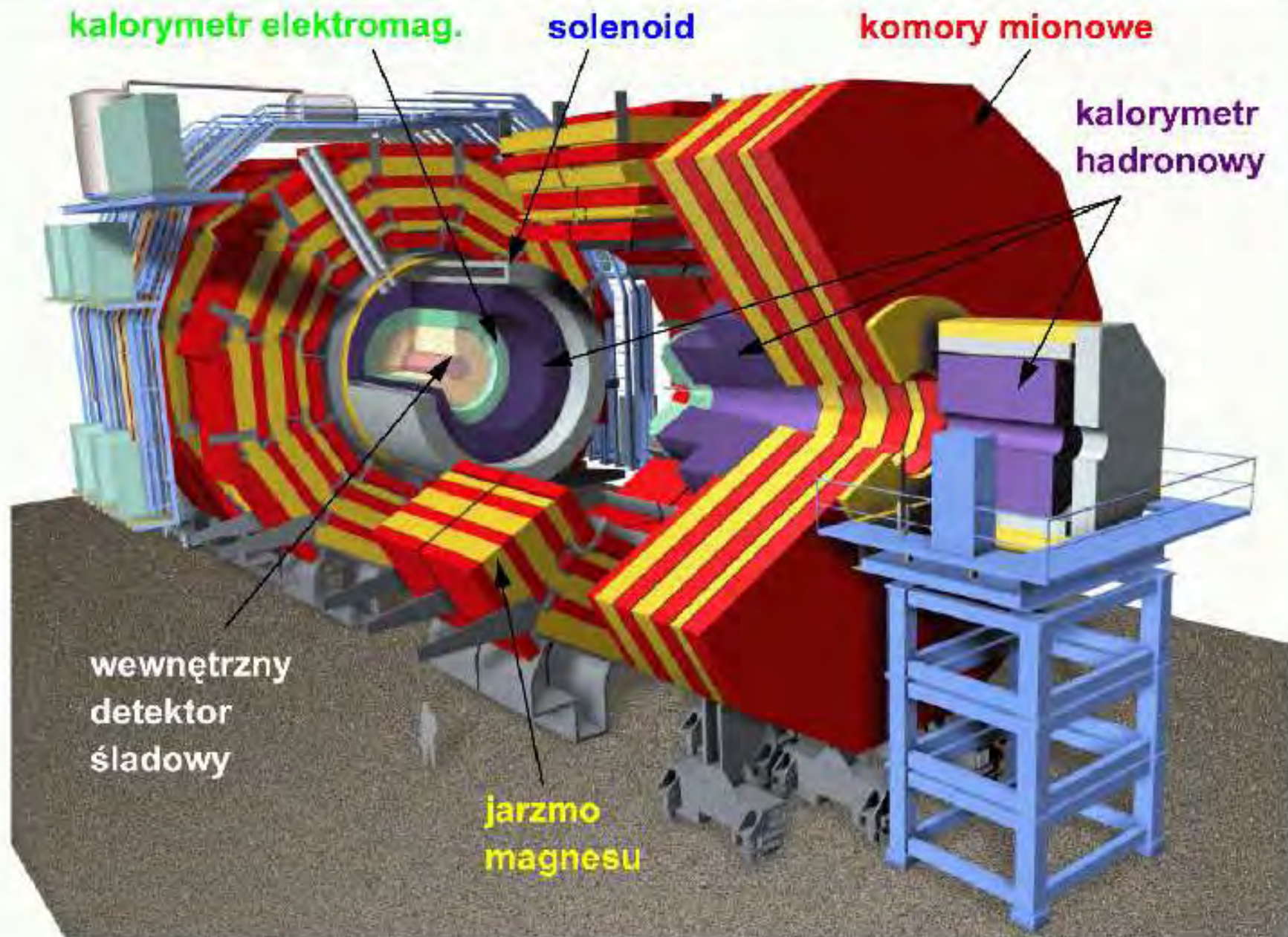
Silicon-tungsten forward detector



ZEUS (HERA) 

Software: SORC-IDEAS level VI i
Performed by: Carsten Hartmann
Status: October 1993

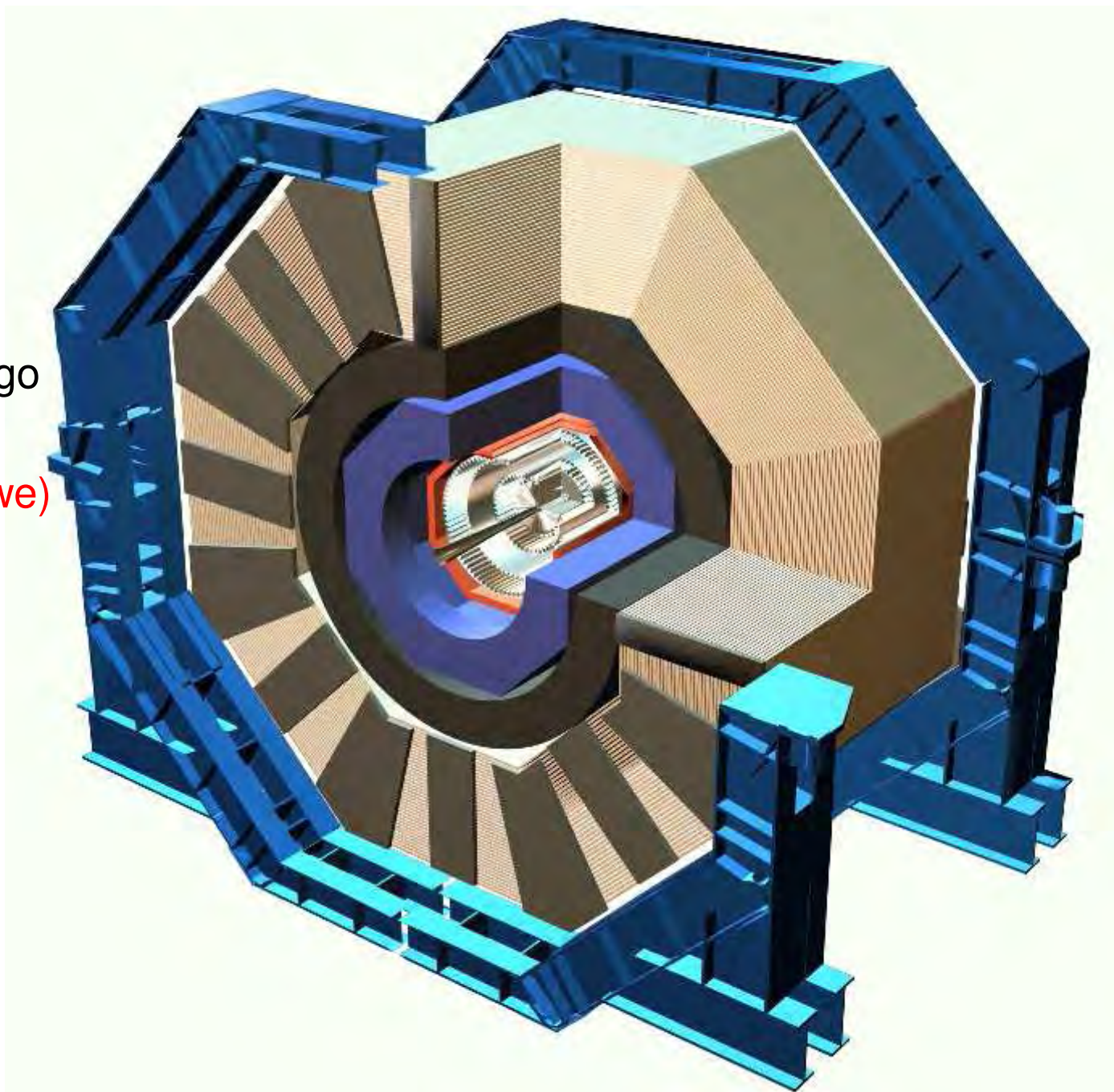
Compact Muon Solenoid



SiD

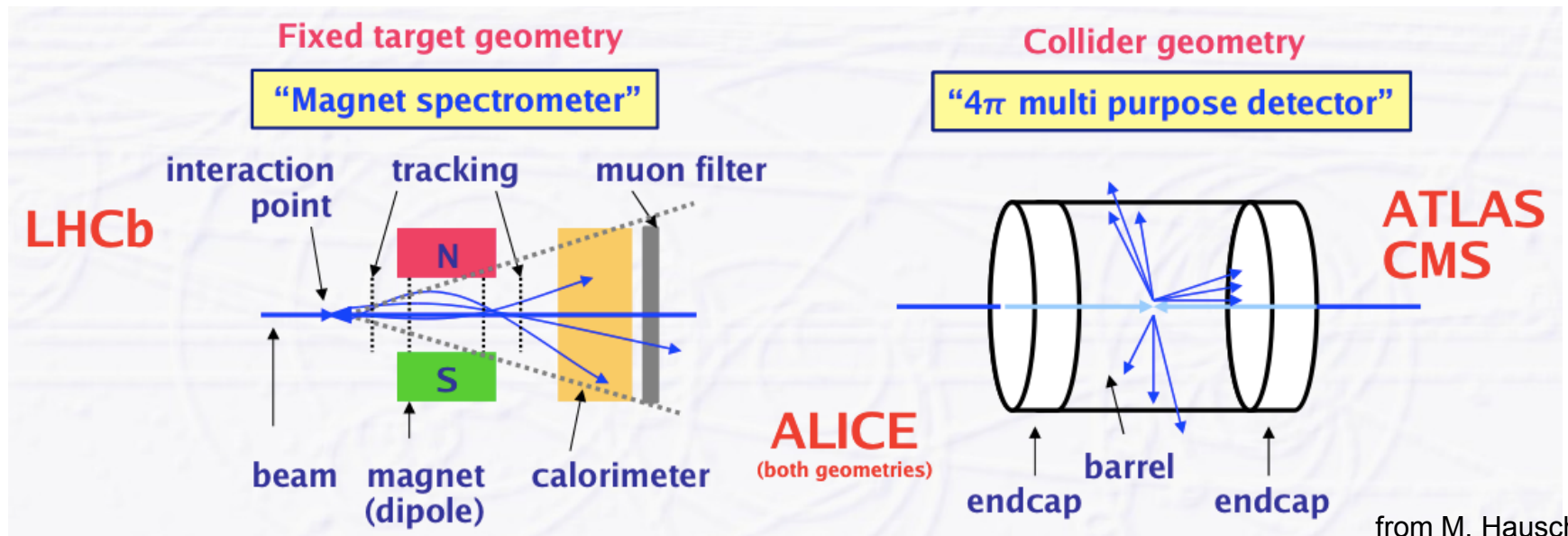
Projekt detektora dla
eksperymentu przy ILC

Koncepcja detektora opartego
w całości o detektory
półprzewodnikowe (krzemowe)




















Collider detectors

- Central tracker
 - Locate primary interactions and secondary vertices
 - Measure momentum of charged particles
- Calorimeters
 - Fully absorb most particles and measure their energy
- Muon spectrometer
 - Measure momentum of muons which pass through the calorimeter



from M. Hauschild

Particle Identification Methods

Constituent	Si Vertex	Track	PID	Ecal	Hcal	Muon
electron	primary				—	—
Photon γ	primary	—	—		—	—
u, d, gluon	primary		—			—
Neutrino	-	—	—	—	—	—
s	primary					—
c, b, τ	secondary					—
μ	primary		—	MIP	MIP	

PID = Particle ID
(TOF, \tilde{C} , dE/dx)

MIP = Minimum
Ionizing Particle

Generic features required of ATLAS and CMS

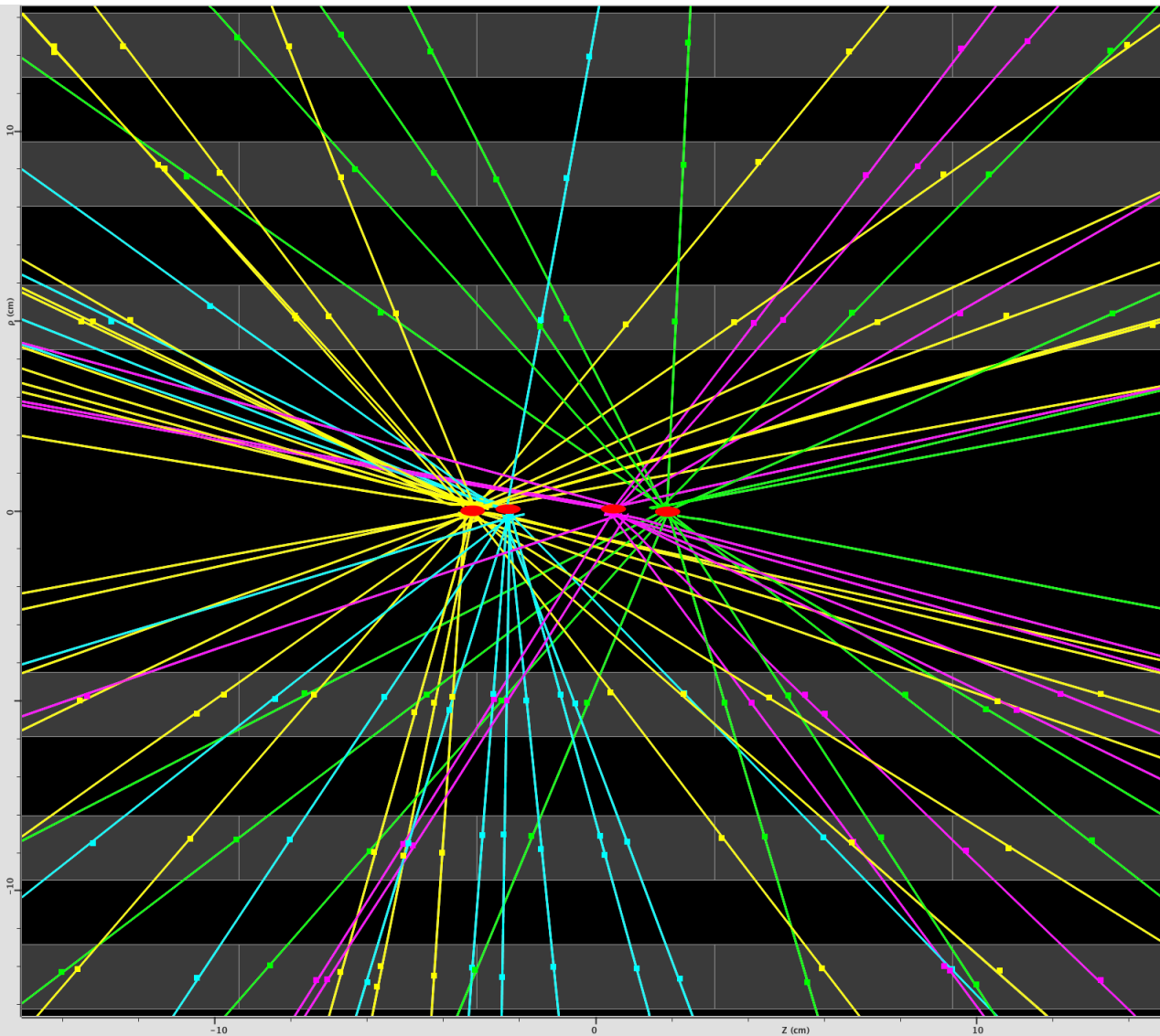
- Detectors must survive for 10 years or so of operation
 - Radiation damage to materials and electronics components
 - Problem pervades whole experimental area (neutrons): **NEW!**
- Detectors must provide precise timing and be as fast as feasible
 - 25 ns is the time interval to consider: **NEW!**
- Detectors must have excellent spatial granularity
 - Need to minimise pile-up effects: **NEW!**
- Detectors must identify extremely rare events, mostly in real time
 - Lepton identification above huge QCD backgrounds (e.g. /jet ratio at the LHC is $\sim 10^{-5}$, i.e. ~ 100 worse than at Tevatron)
 - Signal X-sections as low as 10^{-14} of total X-section: **NEW!**


Detektor wierzchołka

Role of trackers at the LHC

- Extrapolate back to the point of origin. Reconstruct:
- Primary vertices
 - → distinguish **primary vertices** and identify the vertex associated with the interesting “hard” interaction
- Secondary vertices
 - Identify tracks from tau-leptons, b and c-hadrons, which decay inside the beam pipe, by **lifetime tagging**
 - Reconstruct strange hadrons, which decay in the detector volume
 - Identify photon conversions and nuclear interactions
- Measure the trajectory of charged particles
 - Fit curve to several measured points (“hits”) along the track.
 - → **measure the momentum of charged particles from their curvature in a magnetic field.**

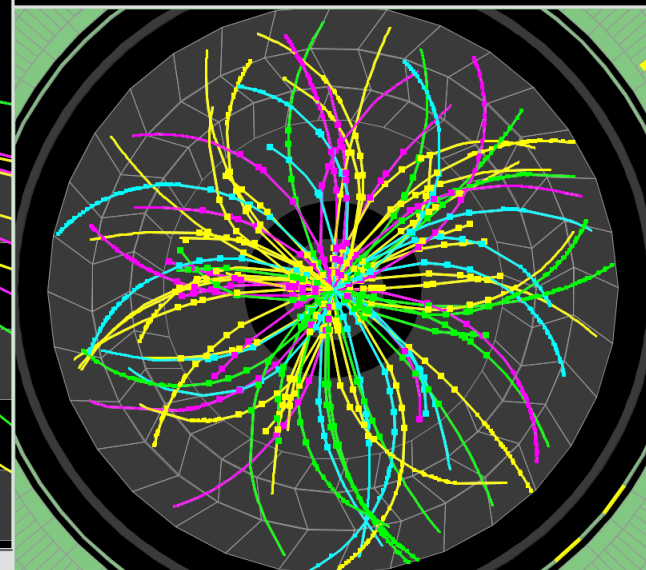
Primary vertices



 **ATLAS**
EXPERIMENT

Run Number: 153565, Event Number: 4487360
Date: 2010-04-24 04:18:53 CEST

**Event with 4 Pileup Vertices
in 7 TeV Collisions**

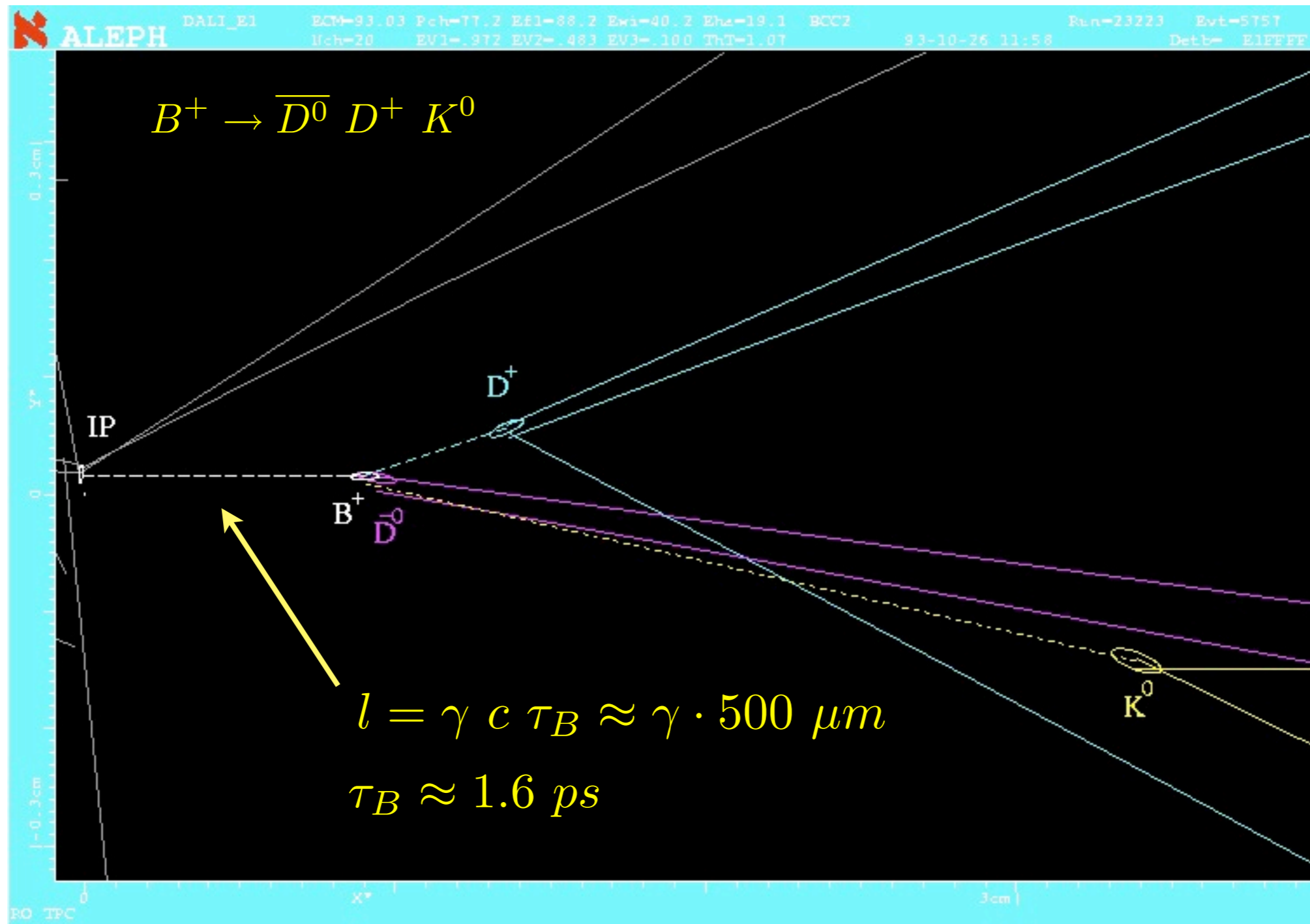


9 May 2011

Pippa Wells, CERN

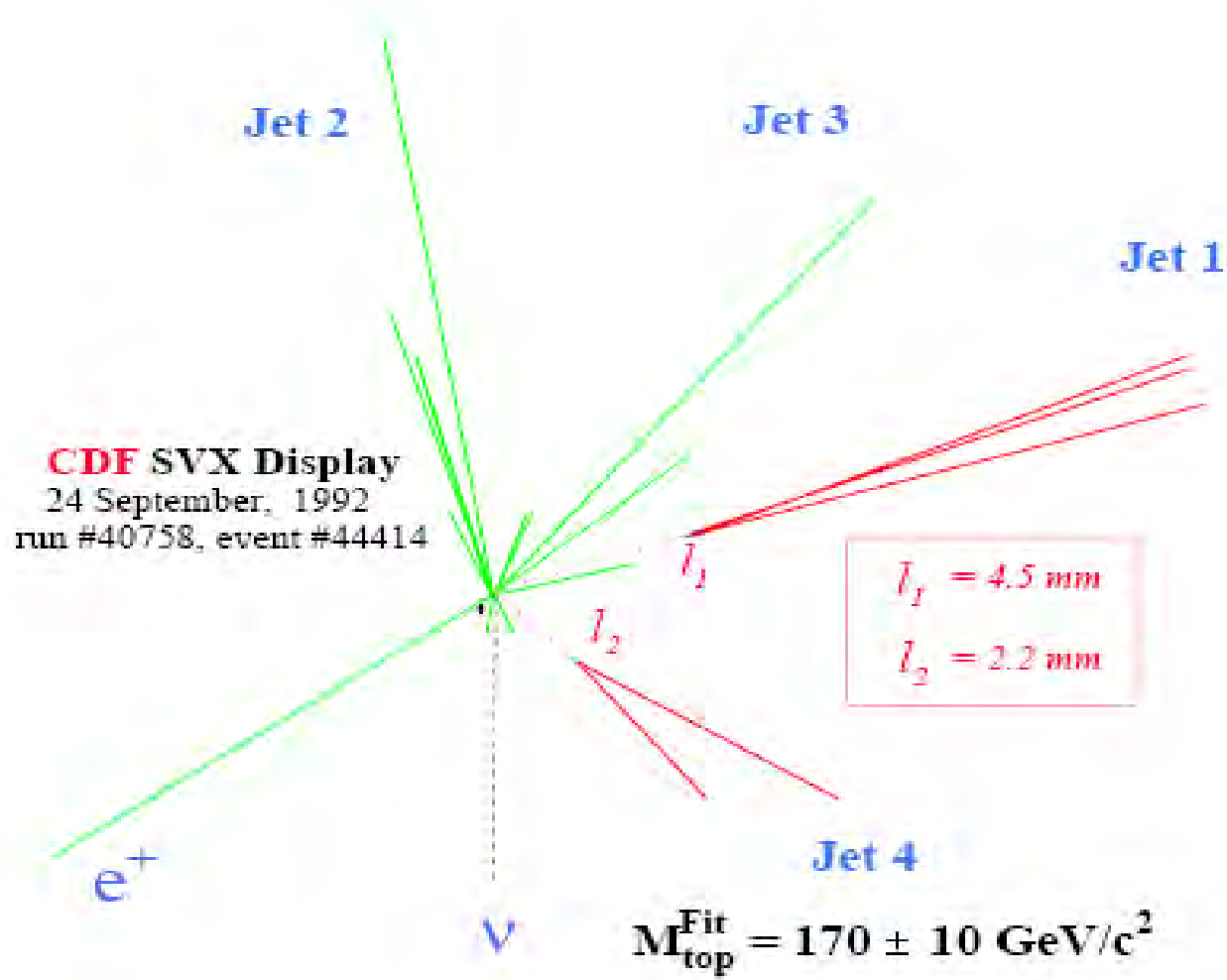
& curving tracks 10

9. Vertex Reconstruction



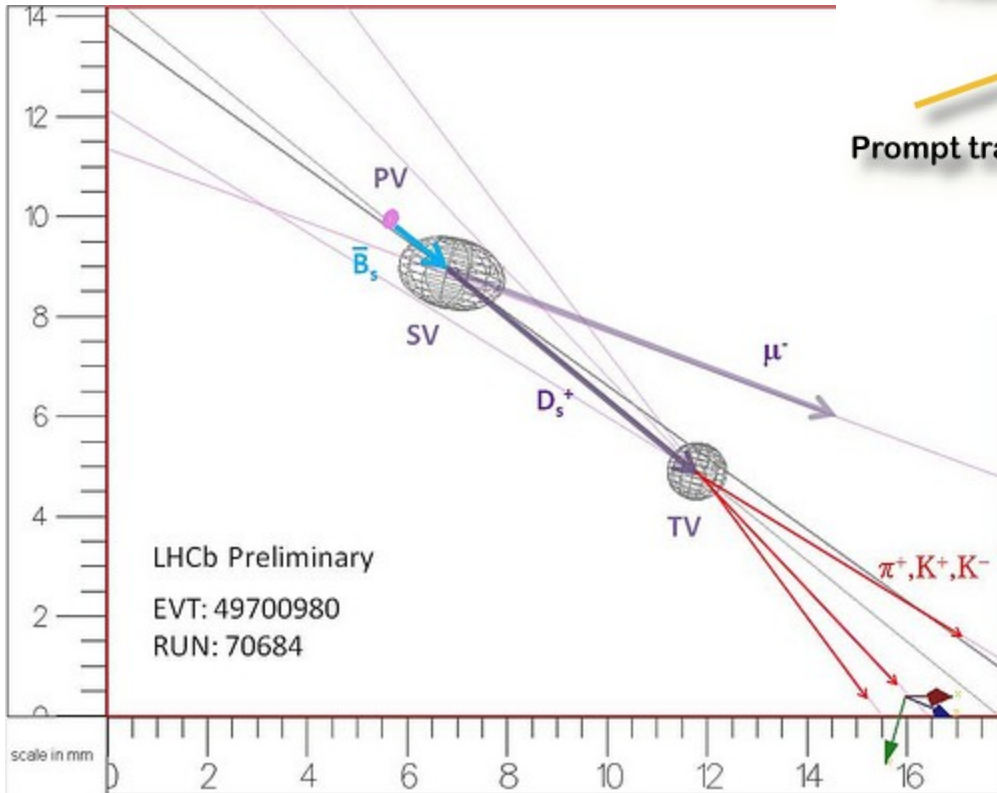
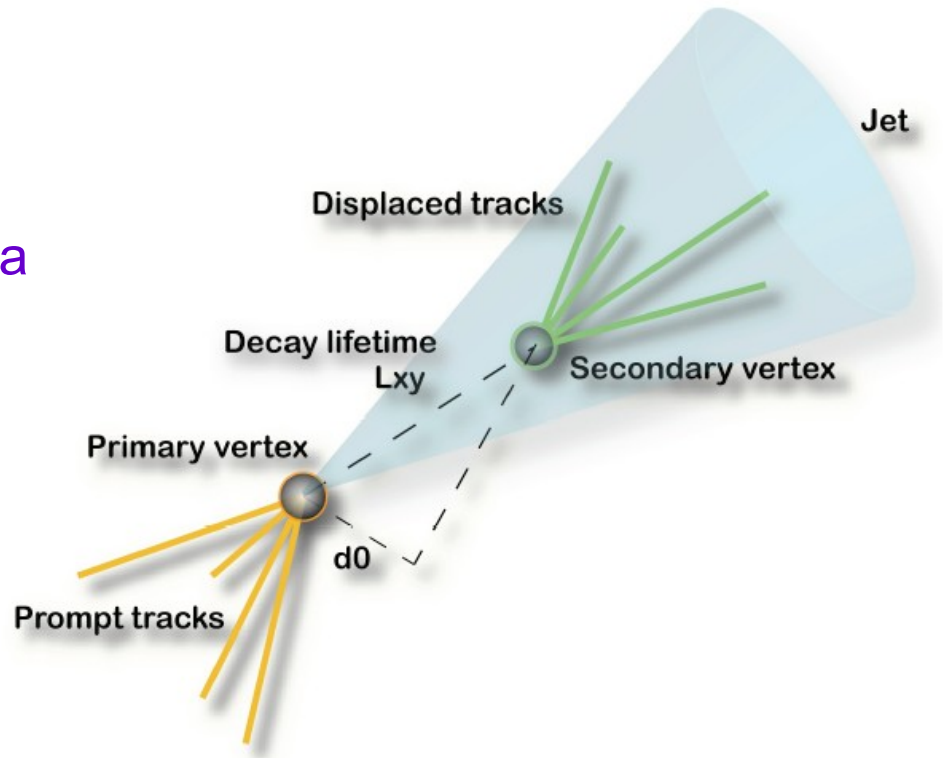
The life time of B-mesons can be measured from the decay length l , if the momentum of the B-meson (γ -factor) is measured as well.

CDF's 1st Top Event... (run 1)



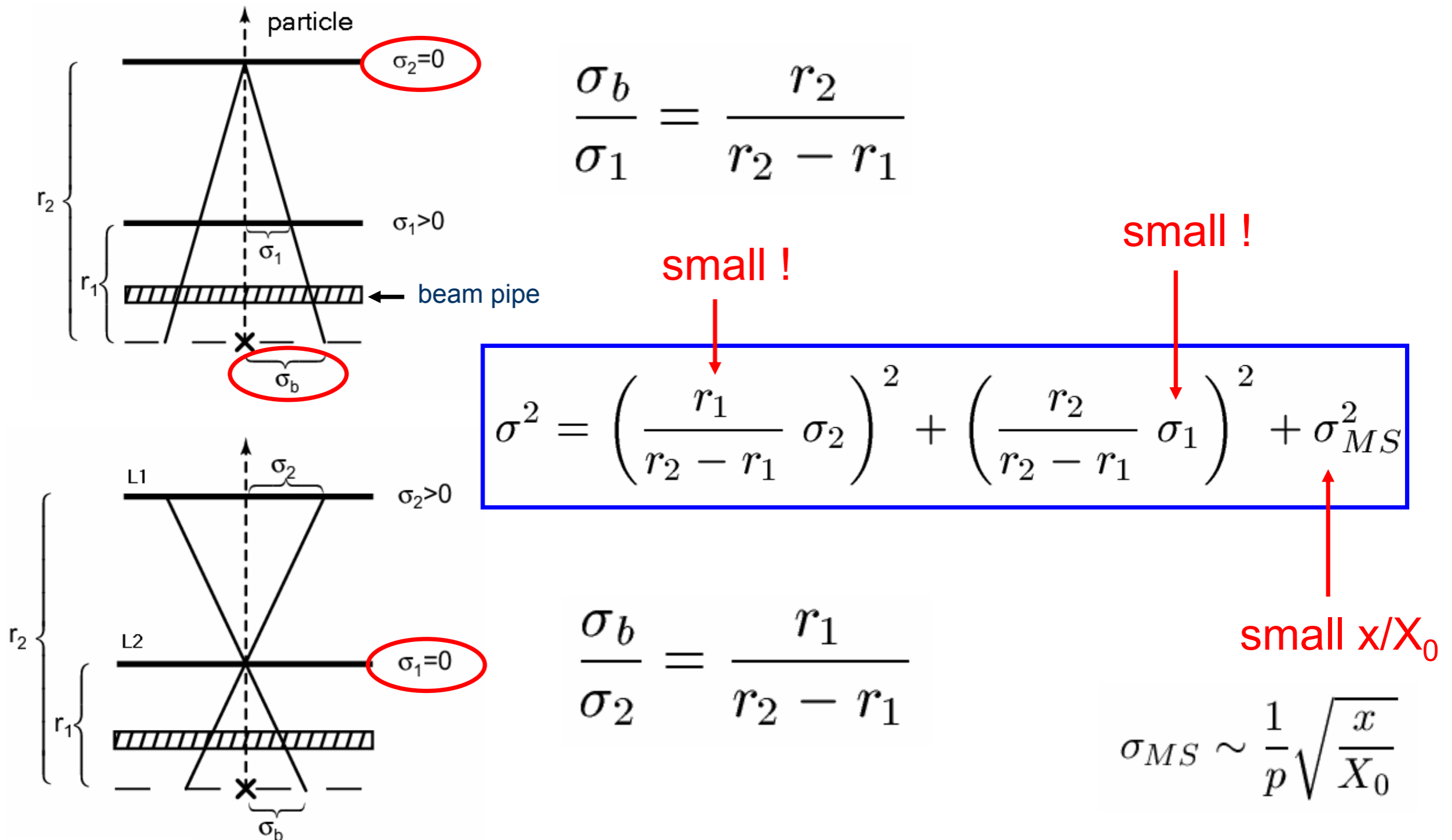
Lifetime tagging

Tracks have significant impact parameter, d_0 , and maybe form a reconstructed secondary vertex



Example of a fully reconstructed event from LHCb, with primary, secondary and tertiary vertex.

Impact parameter resolution (simplified)



Vertex Resolution

x_1, x_2 = measurement planes

y_1, y_2 = measured points, with errors δy

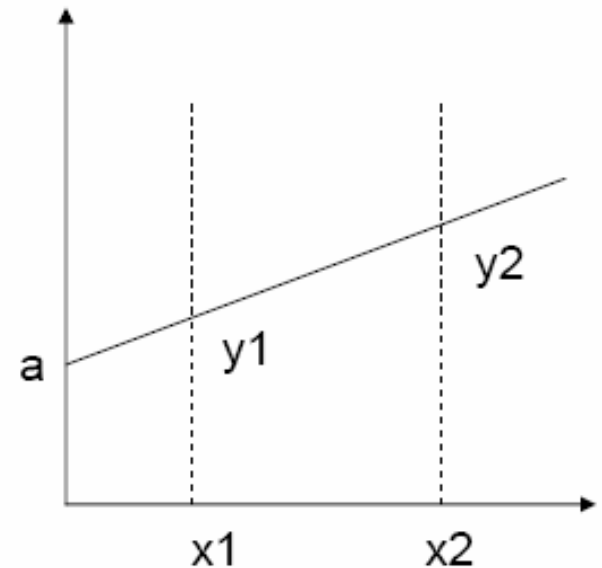
$$y = a + bx$$

$$b = \text{slope} = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = \frac{y_1 - y_2}{\Delta x}$$

$$a = \text{intercept} = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) - \frac{1}{2}(y_1 - y_2) \left(\frac{x_1 + x_2}{\Delta x} \right) = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$(\delta b)^2 = \left(\frac{\partial b}{\partial y_1} \right)^2 (\delta y)^2 + \left(\frac{\partial b}{\partial y_2} \right)^2 (\delta y)^2 \Rightarrow \delta b = \frac{\sqrt{2} \delta y}{\Delta x}$$

$$\delta a = \frac{\delta y}{2} \sqrt{1 + \frac{8\bar{x}}{\Delta x}}$$



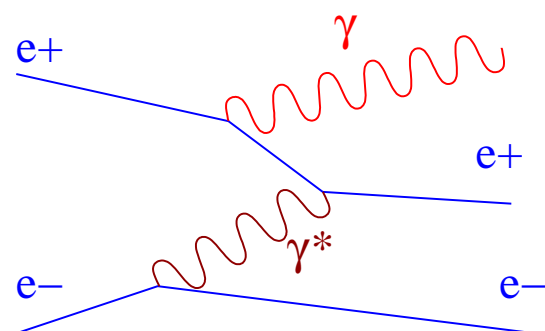
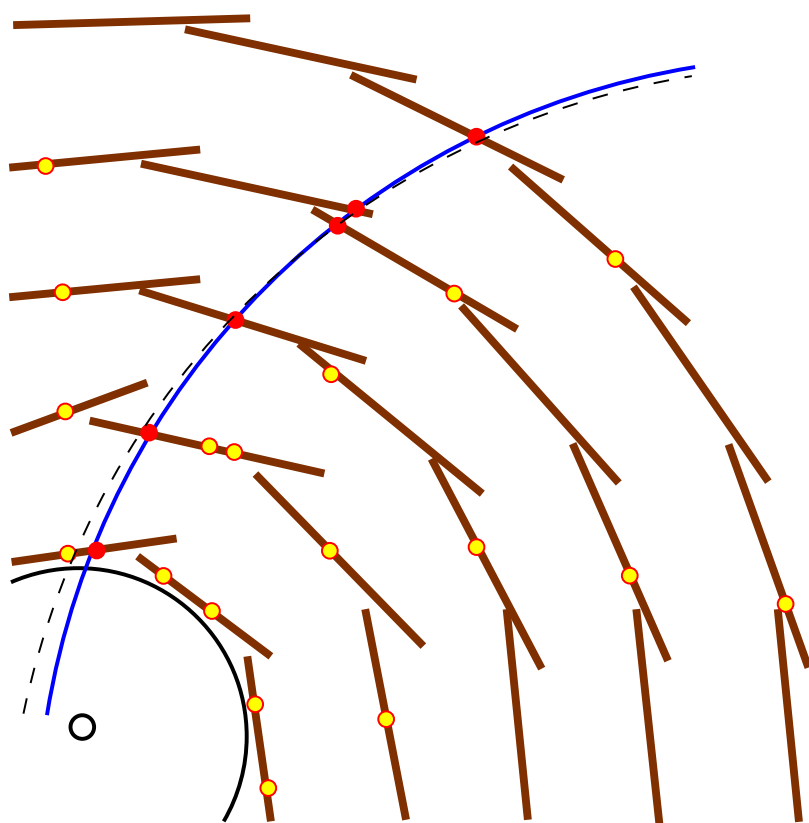
for good resolution on angles (ϕ and θ) and intercepts (d, z_0)

- Precision track point measurements
- Maximize separation between planes for good resolution on intercepts
- Minimize extrapolation - first point close to interaction

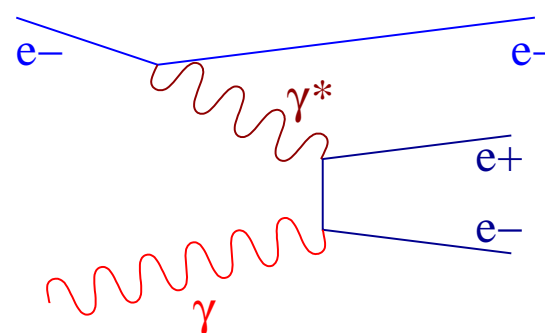
Detektor wierzchołka

Odległość od osi wiązki: kluczowa dla wyniku pomiaru
precyzja pomiaru vs profil/tło wiązki

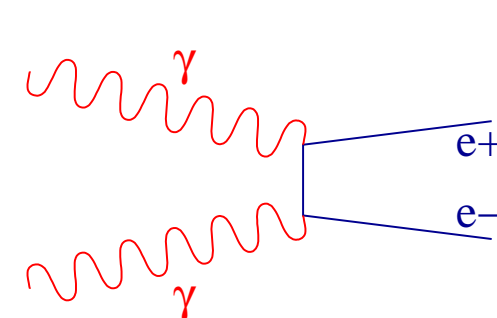
W oddziaływaniu pomiędzy wiązkami powstają pary e^+e^- o małych pędach poprzecznych, z których część zostawia ślady (ang. "hit") w detektorze wierzchołka utrudniając rekonstrukcję innych torów. W pięciowarstwowym detektorze oczekuje się około 60 000 dodatkowych "hitów".



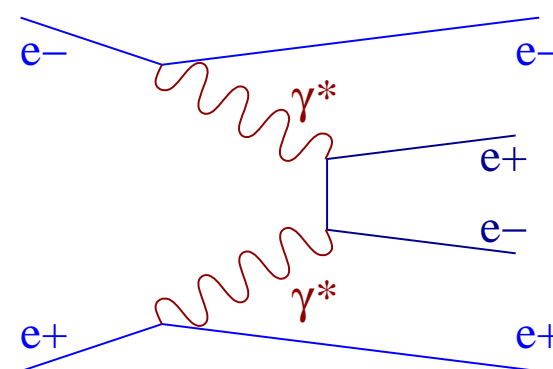
Beamstrahlung



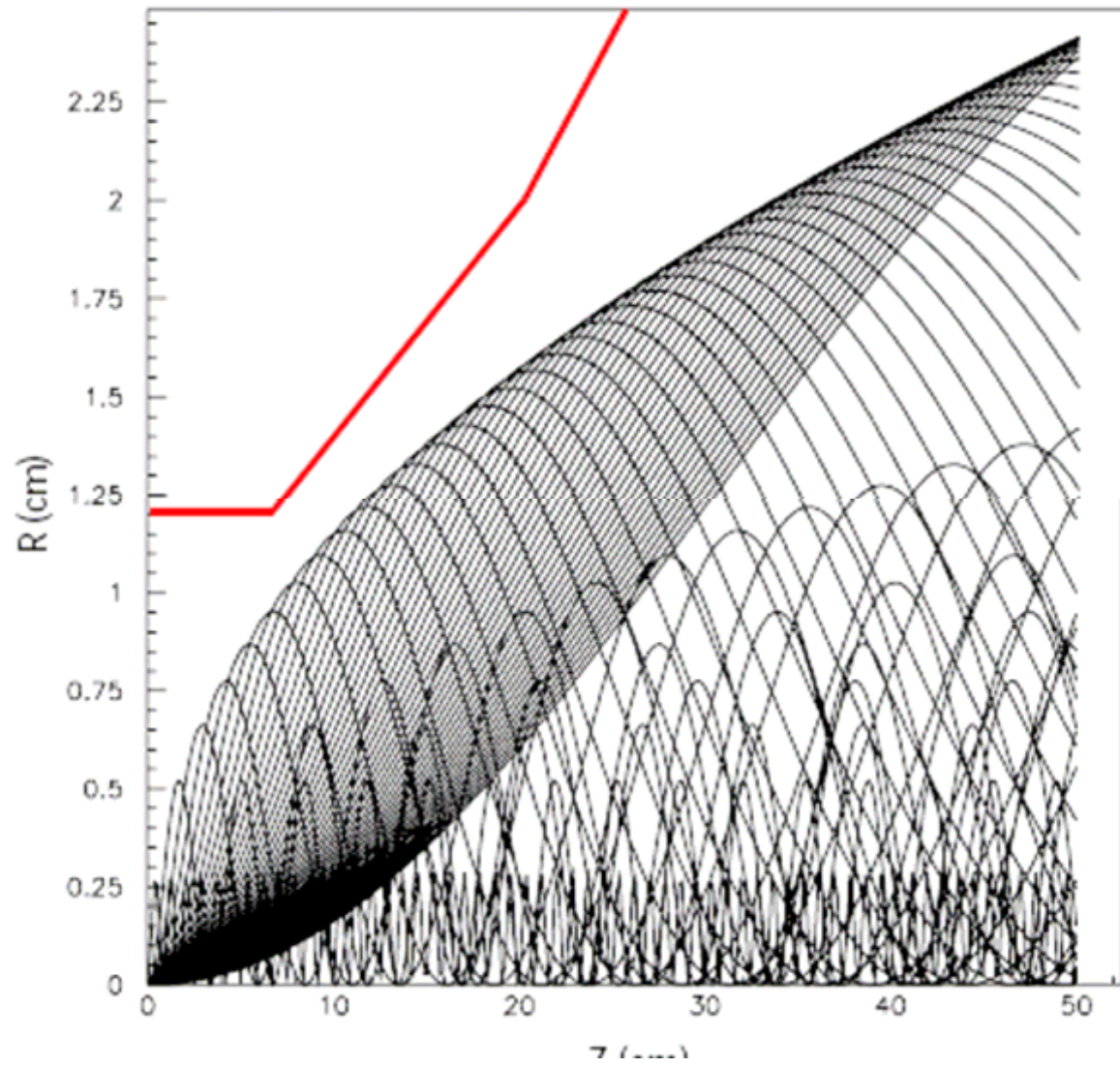
Bethe – Heitler



Breit – Wheeler

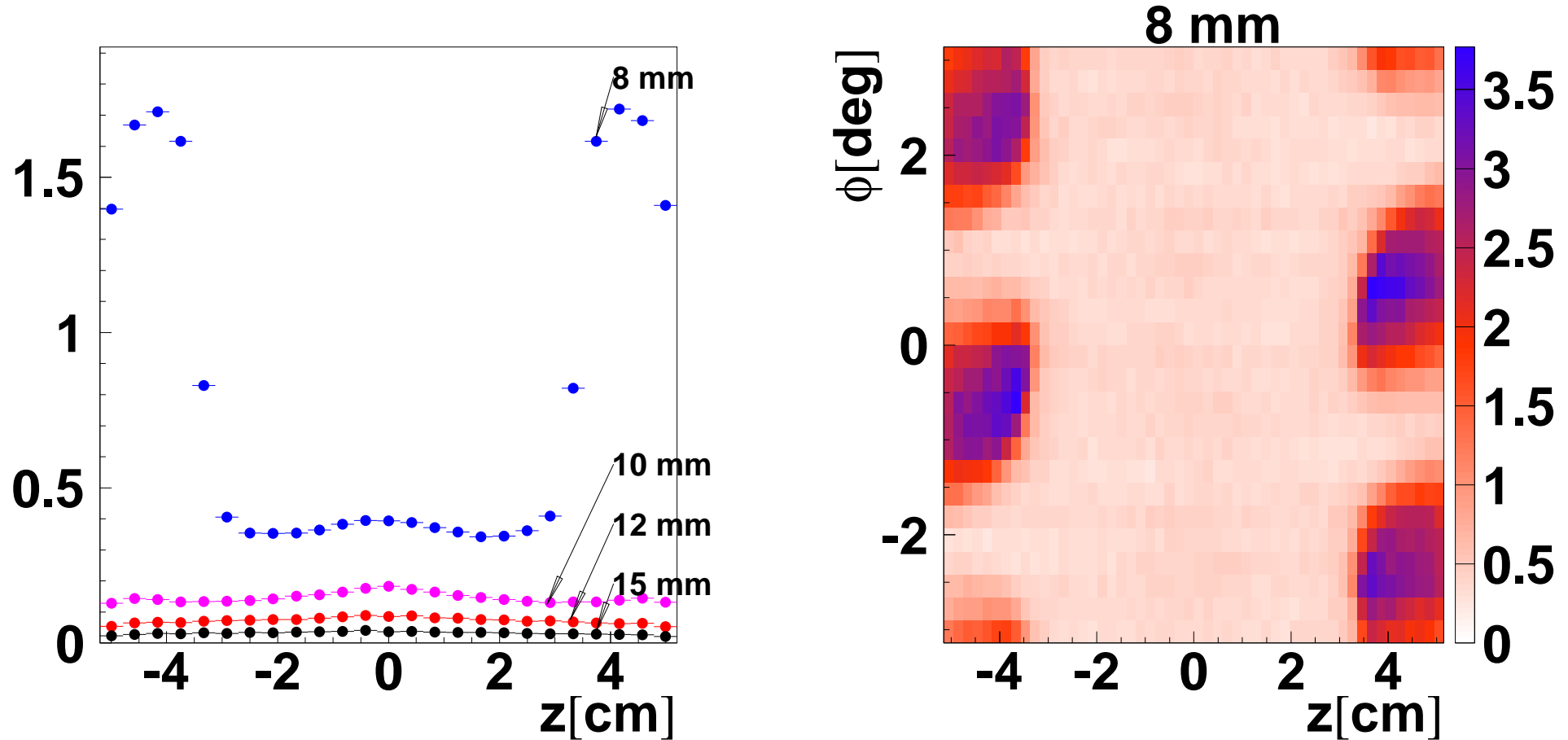


Landau–Lifshitz



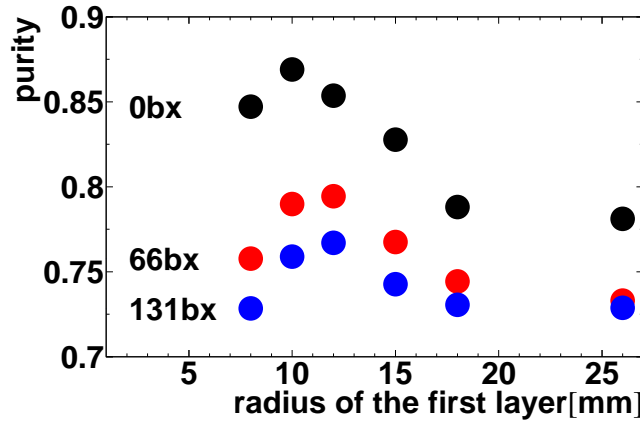
Gęstość śladów w pierwszej warstwie [$1/\text{mm}^2/\text{BX}$]

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



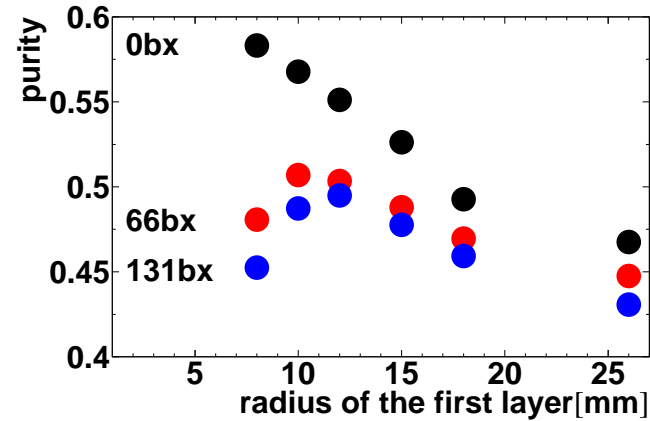
Jet flavour tagging performance

b selection

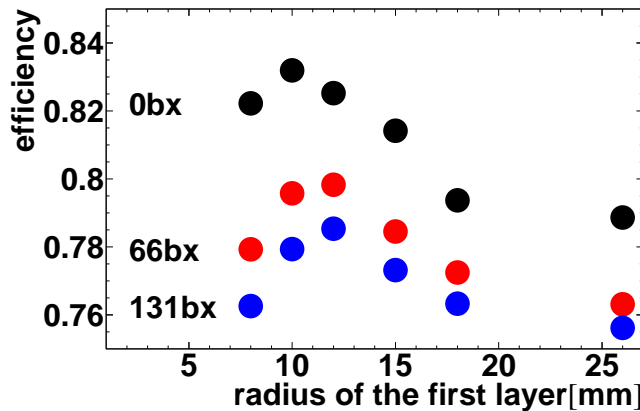


Efficiency 0.8

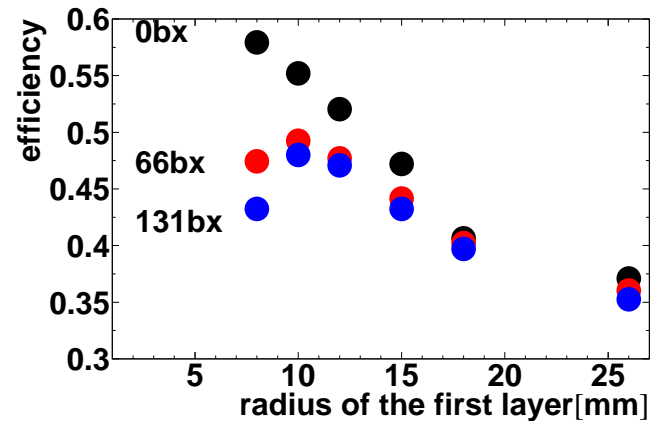
c selection



Efficiency 0.6



Purity 0.8



Purity 0.6

Spatial resolution $4 \mu\text{m}$, layer thickness $0.1\% X_0$. $R_1 = 26 \text{ mm}$ - only 4 layers.

Detektor wierzchołka

Odległość od osi wiązki:

precyzja pomiaru (ekstrapolacja) vs tło wiązki

Segmentacja (rozmiar piksela):

precyzja pomiaru vs objętość danych, straty mocy

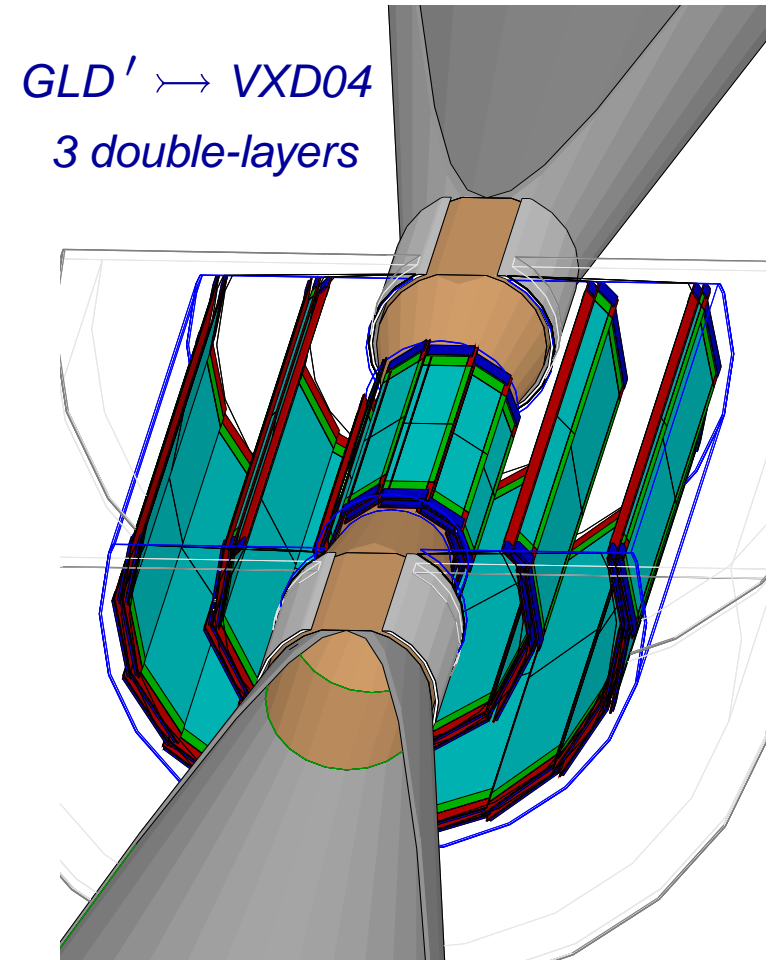
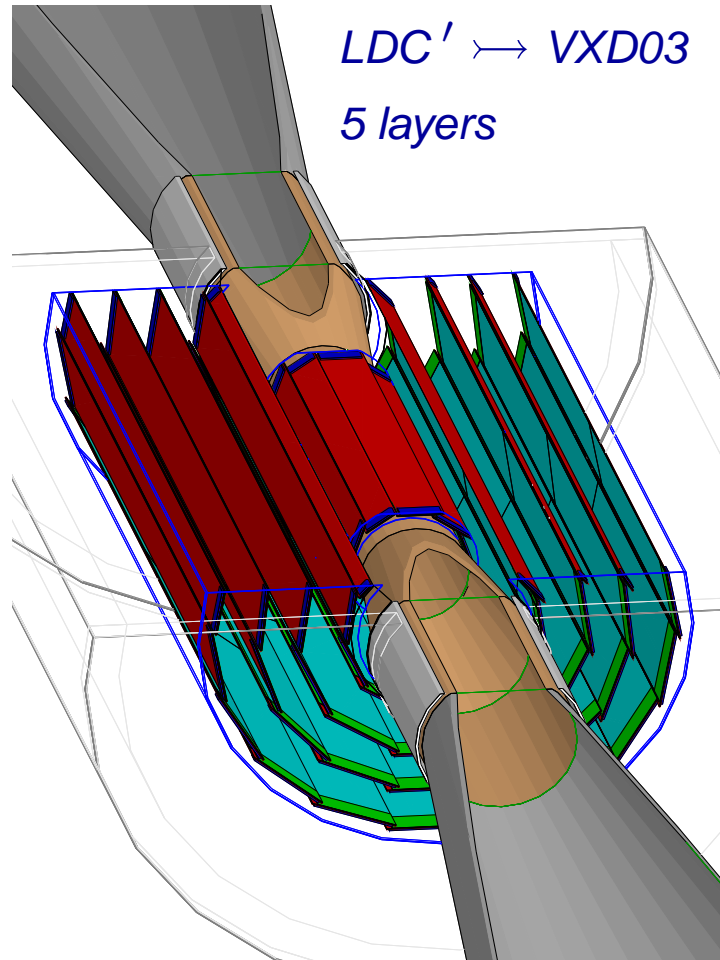
Technologia:

odporność radiacyjna vs koszt, szybkość odczytu

Grubość detektora:

rozpraszanie vs stabilność mechaniczna

- Maintain 2 alternative long-barrel approaches :



- Two read-out modes considered :

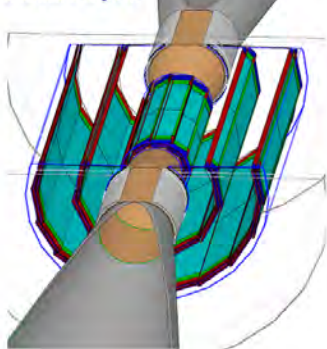
⊕ **continuous** read-out

⊕ **read-out delayed** after bunch-train \rightarrow 3 double layers expected to help

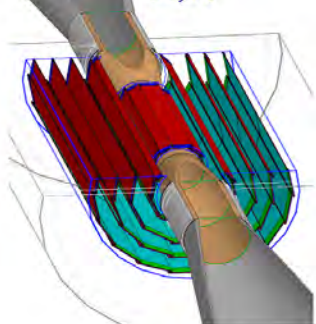
\Rightarrow mini-vectors

Vertex Detector

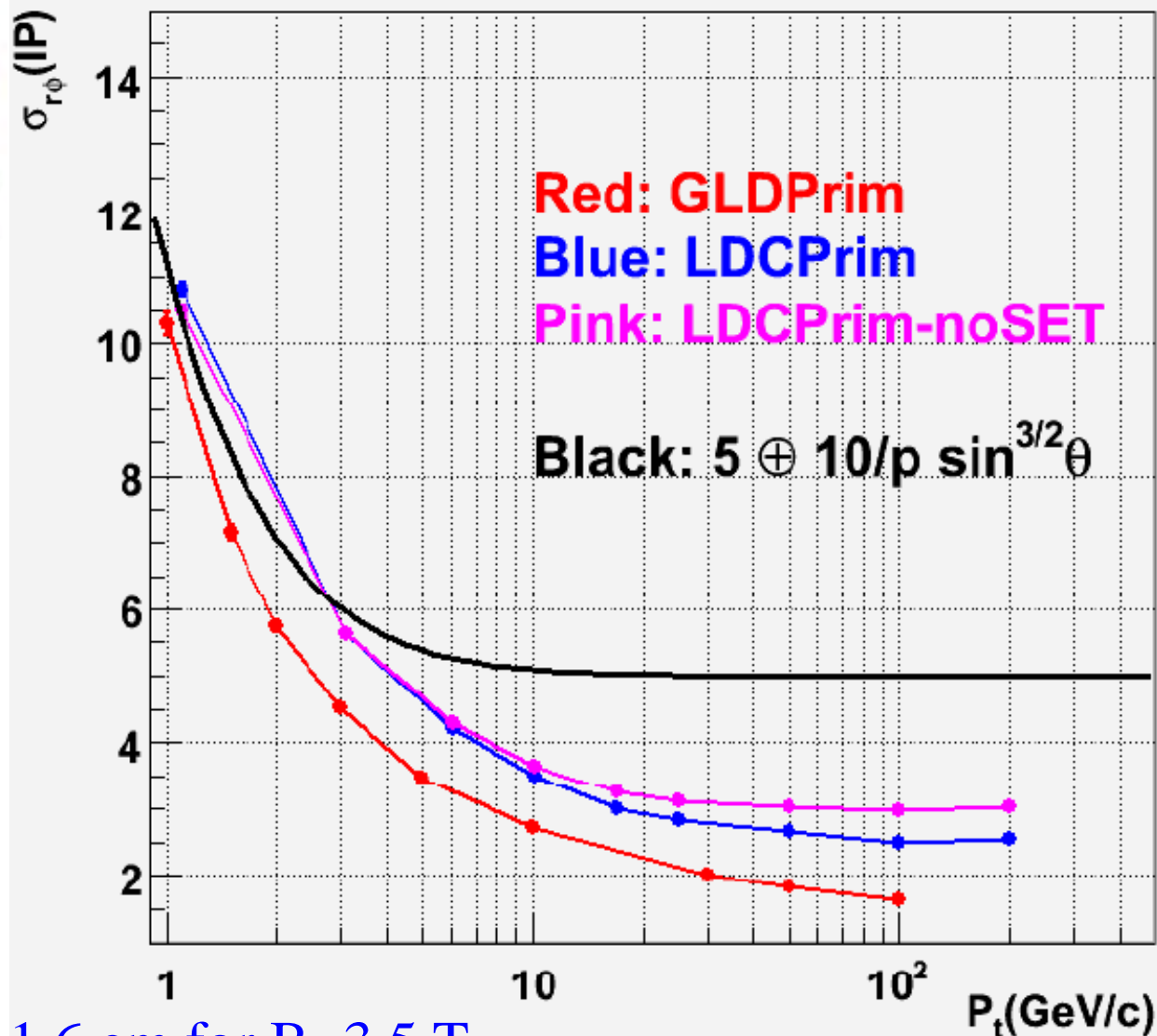
GLD' → VXD04
3 double-layers



LDC' → VXD03
5 layers



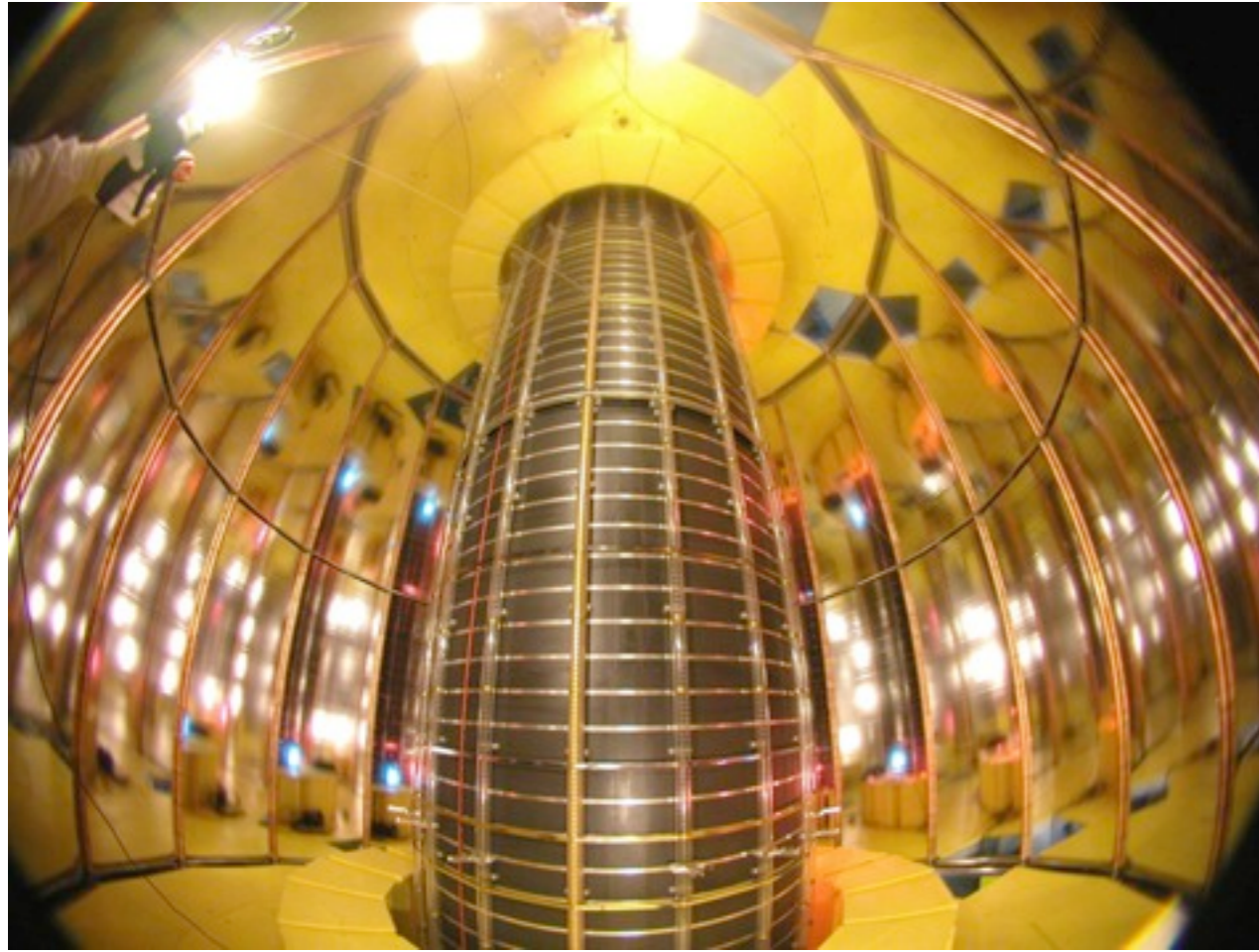
Impact Parameter Resolution ($\sigma_{r\phi}$) of muon



Inner layer at $r=1.6$ cm for $B=3.5$ T

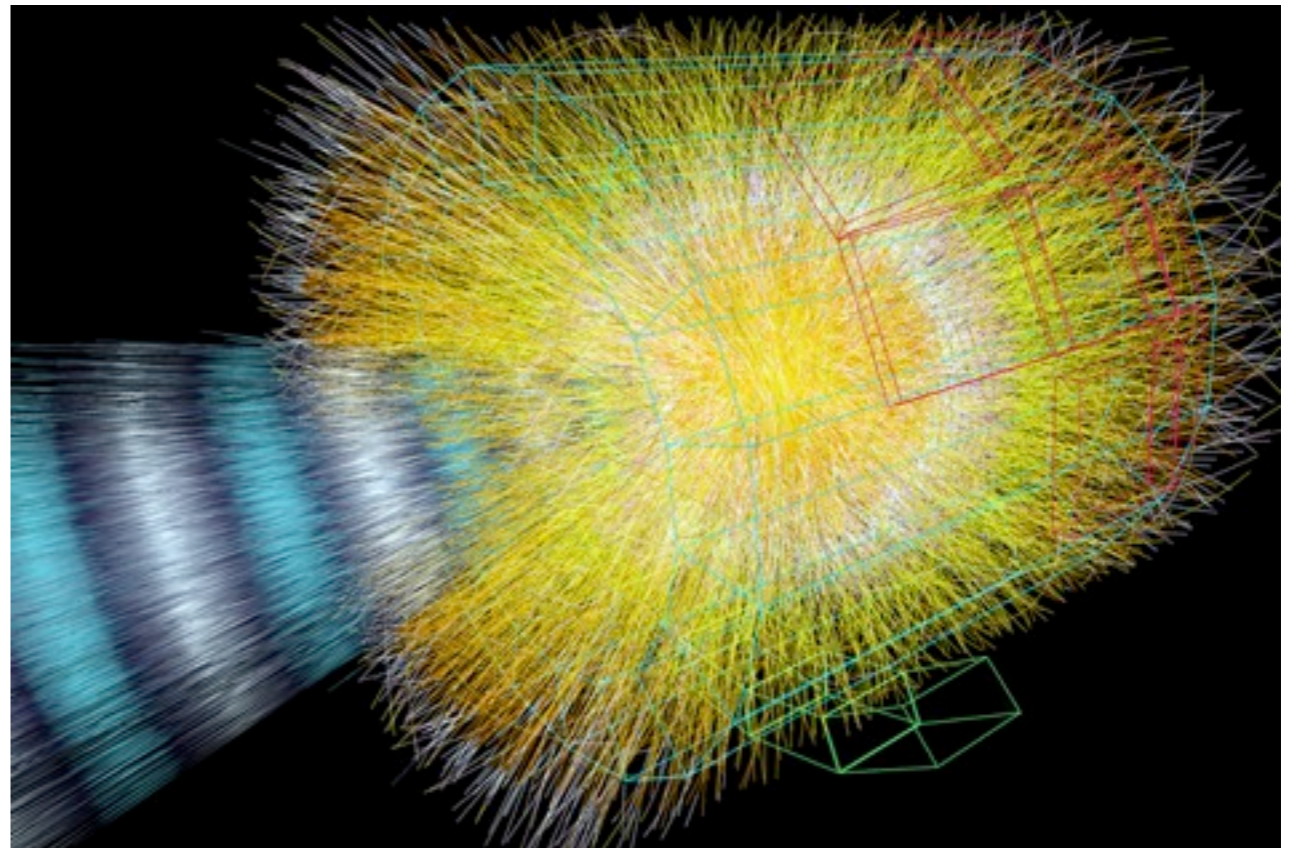
Centralny detektor śladowy

6. ALICE TPC

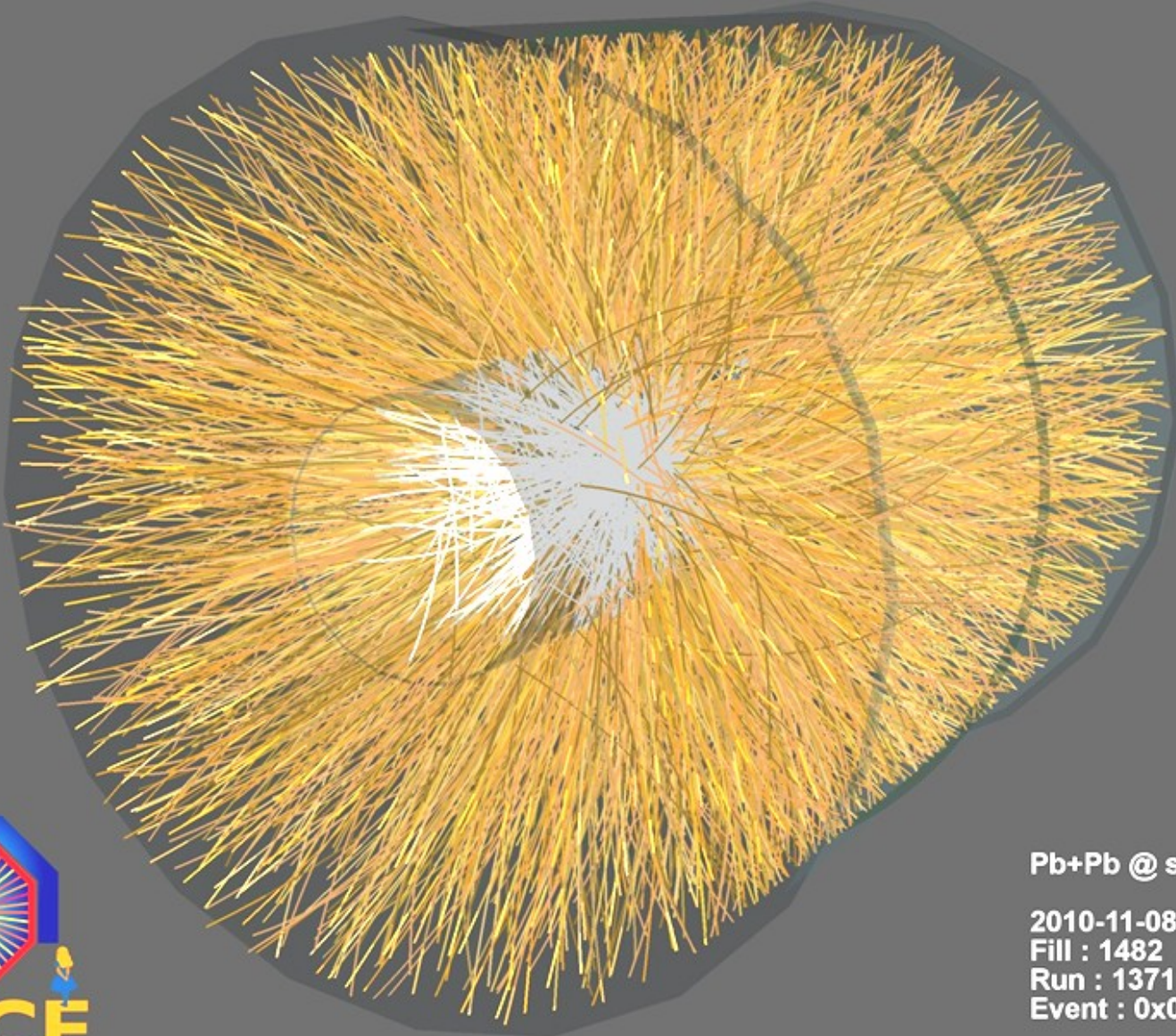


View inside the ALICE TPC

Simulated heavy ion collision in the ALICE TPC.



ALICE heavy ion event display



Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

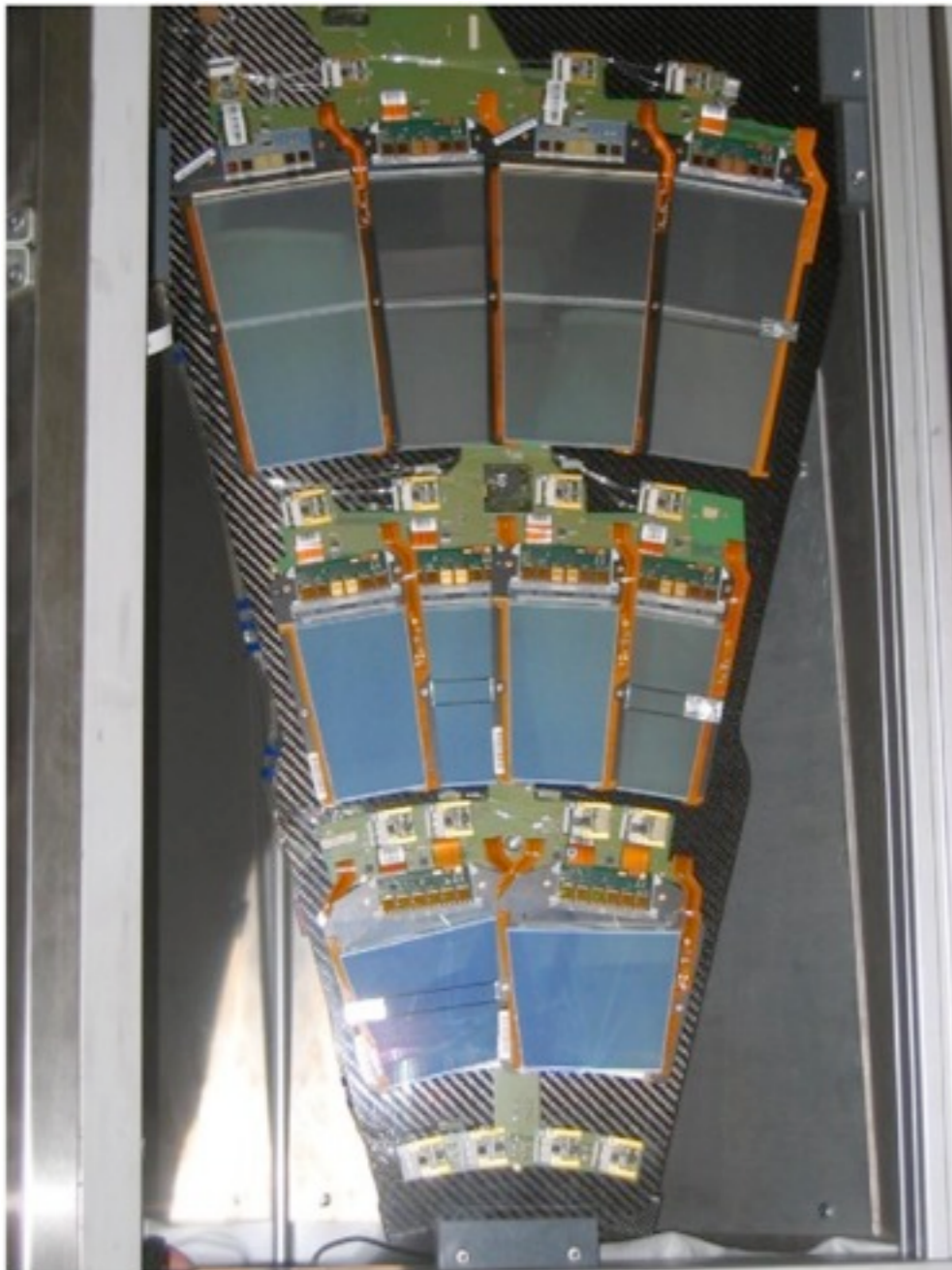
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

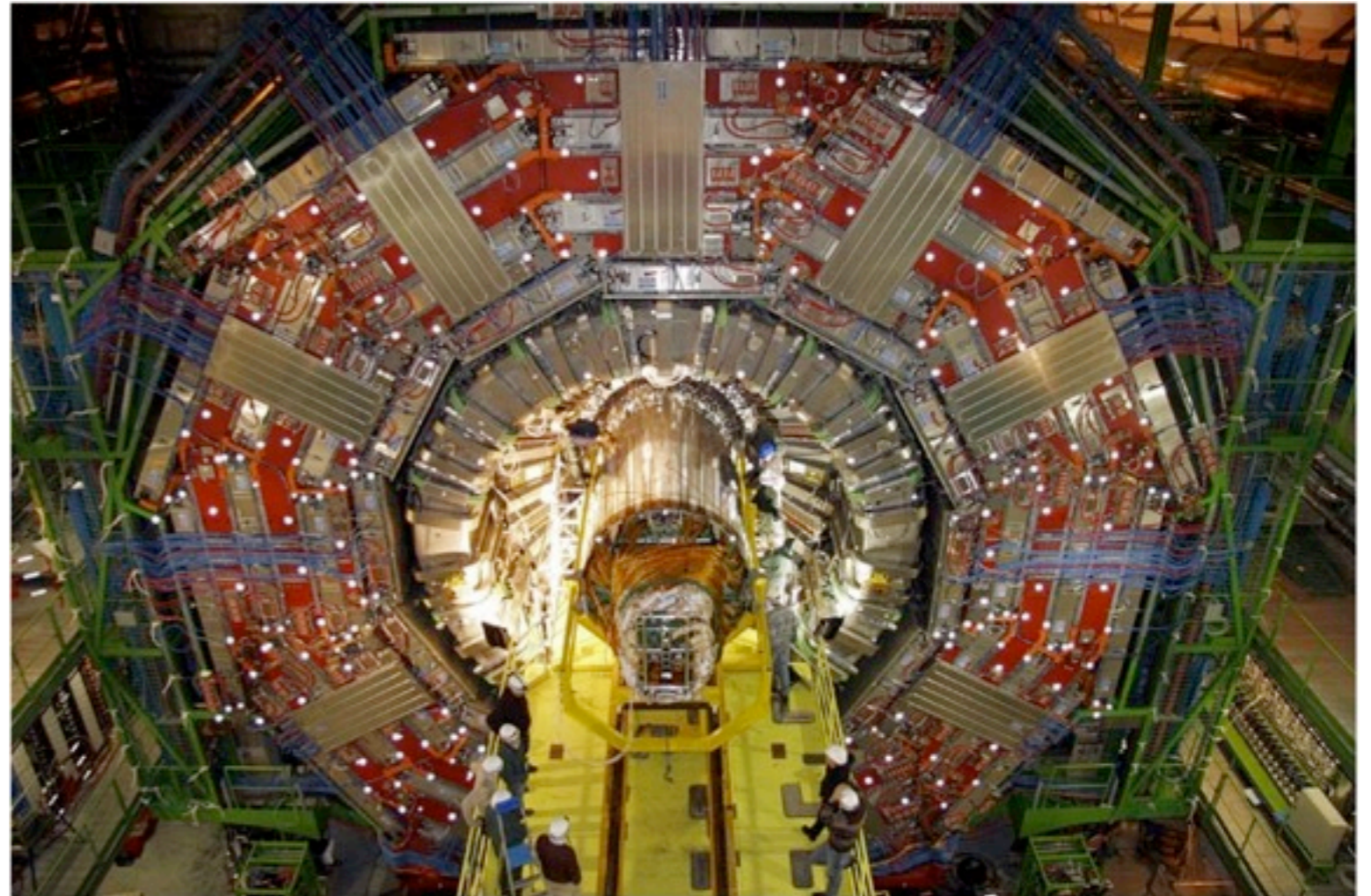
Event : 0x00000000D3BBE693

I4. CMS Silicon Tracker



Micro Strip:

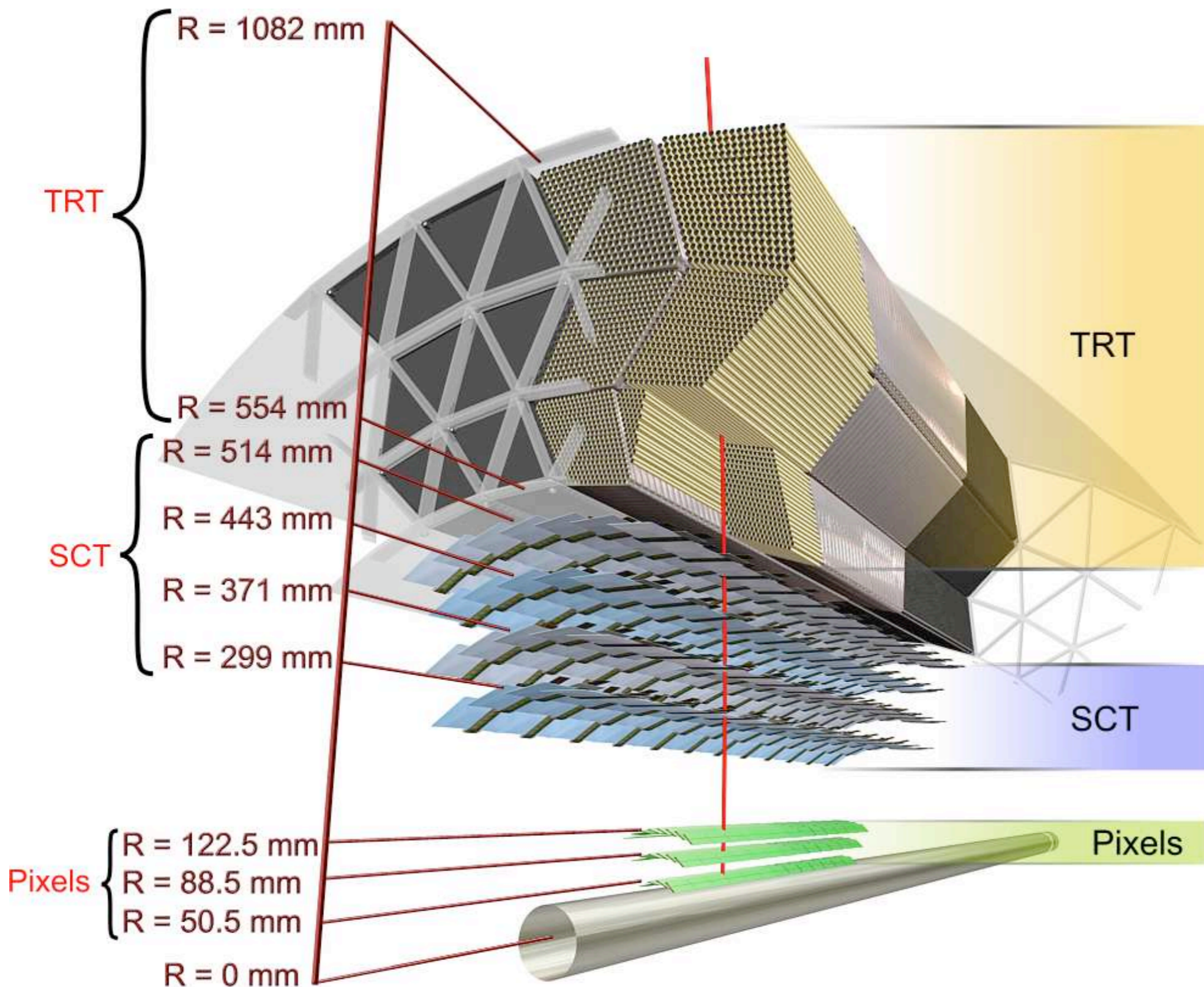
- 214 m² of silicon strip sensors
- 11.4 million strips
- Diameter: 2.4 m



Pixel:

- Inner 3 layers: silicon pixels (~ 1 m²)
- 66 million pixels (100x150 μm²)
- Preciso: $\sigma(r\phi) \sim \sigma(z) \sim 15 \mu\text{m}$

14. ATLAS - Sensors traversed by charged track



Charged track of $p_T = 10$ GeV at $\eta = 0.3$. traverses:

- beryllium beam pipe
- 3 pixel layers
- 4 double SCT layers
- about 36 TRT straws

Centralny detektor śladowy

Różne możliwe technologie:

- komora projekcji czasowej
- detektory półprzewodnikowe
- detektory gazowe

Każda ma swoje **zalety** i **wady**. Wszystko należy uwzględnić:

- + precyzja pomiaru położenia (**Si**, **gas**)
=> precyzja pomiaru pędu (geometria, rozmiar, pole magnetyczne)
- + precyzja pomiaru dE/dx (**TPC**, **Si**)
- + liczba punktów pomiarowych (**TPC**, **Si**)
- + czas odczytu (**Si**, **TPC**)
- + wpływ tła, nakładających się przypadków
- + tło kombinatoryczne
- + ew. inne funkcje (np. TRD)
- + wielokrotne rozpraszanie/**bilans materiału przed kalorymetrem**

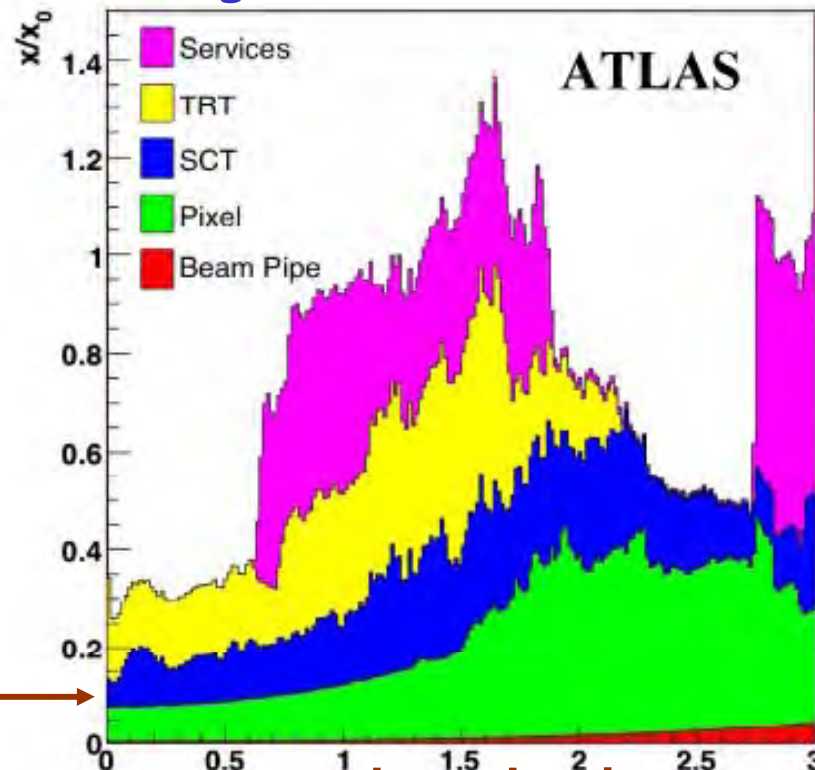
Summary - Precision of trackers

- Intrinsic space point resolution
 - Sensor design (pixels, strips, gas detectors...)
- Magnetic field
 - Strength, and precise knowledge of value
- Alignment
 - Assembly precision, survey, stability
 - Measure the positions of detector elements with the tracks themselves
 - Control systematic effects
- Multiple scattering and other interactions
 - Minimise the material
 - Measure the amount of material in order to simulate the detector and reconstruct tracks correctly
 - Also affects energy measurement in calorimeter

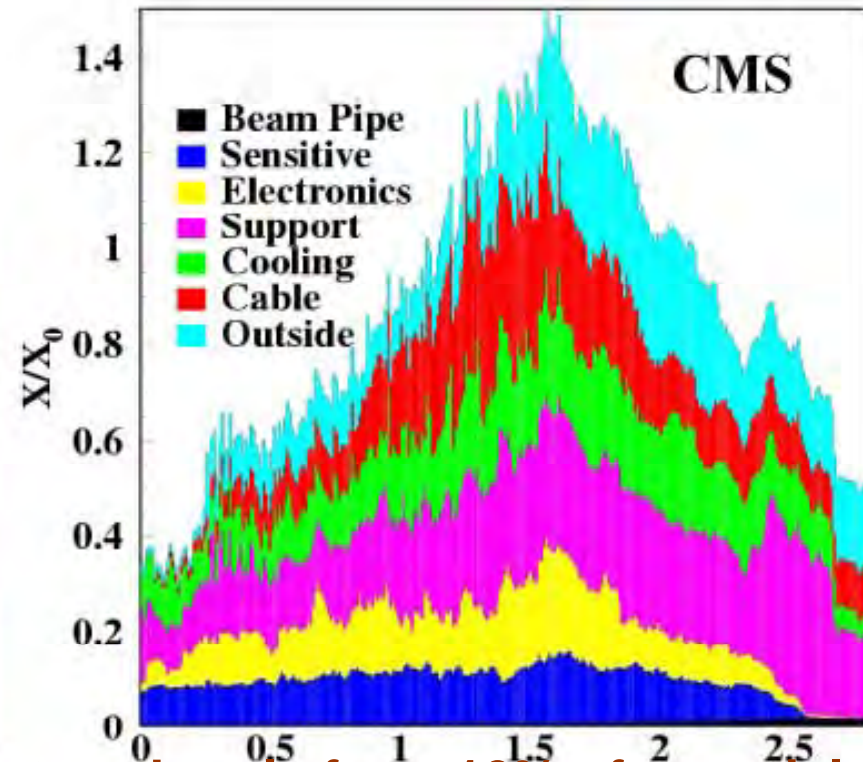
ATLAS/CMS: from design to reality

Amount of material in ATLAS and CMS inner tracker

Weight: 4.5 tons



Weight: 3.7 tons



LEP
detectors

- Active sensors and mechanics account each only for $\sim 10\%$ of material budget
- Need to bring 70 kW power into tracker and to remove similar amount of heat
- Very distributed set of heat sources and power-hungry electronics inside volume: this has led to complex layout of services, most of which were not at all understood at the time of the TDRs

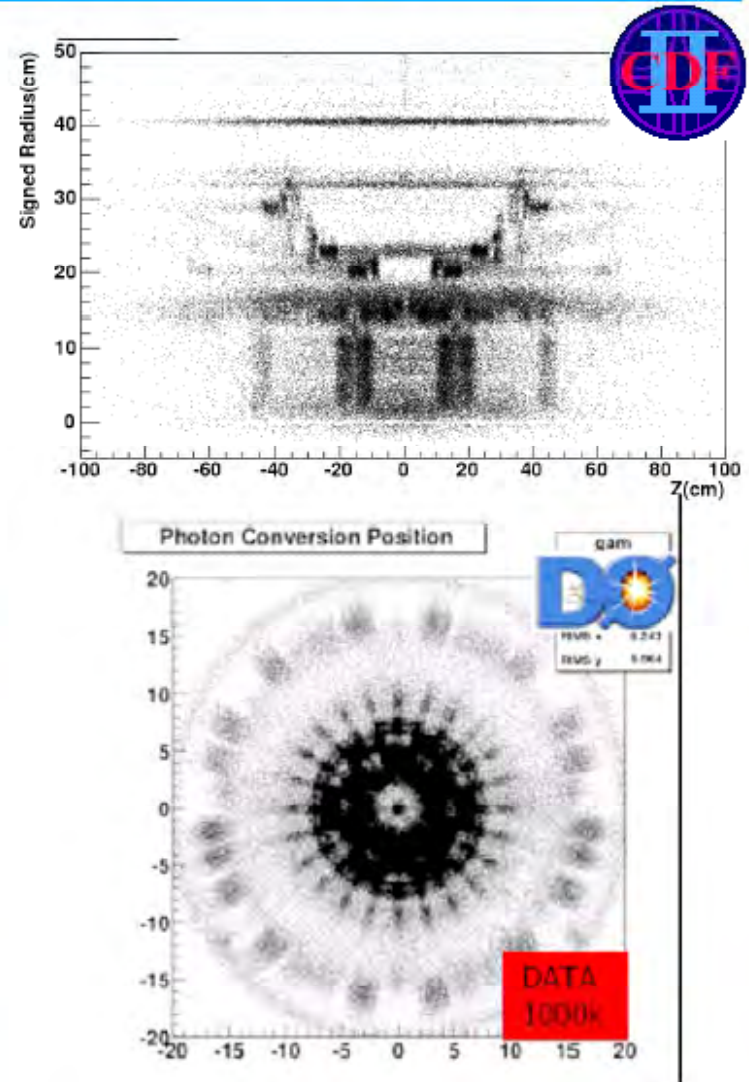
Can lessons be learned from Tevatron?



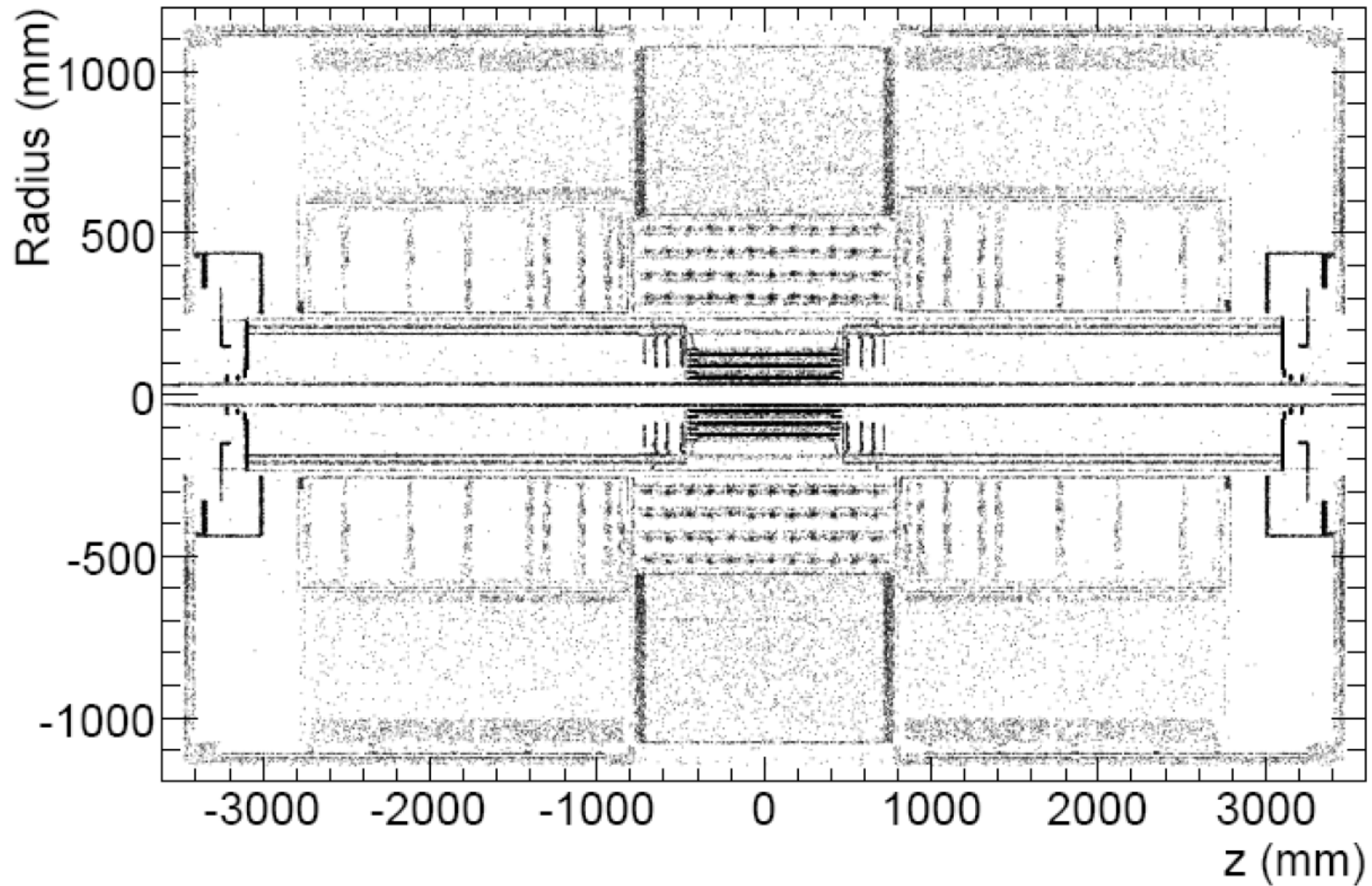
Material: X-raying the detector



- Conversions can indicate location of material in detector
 - Normalized to inner cylinder of tracking chamber
 - Overall normalization difficult
 - Acceptance and efficiency depend on r
- Useful to find missing (or misplaced!) pieces

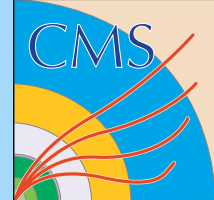


Photon Conversion Image of Material

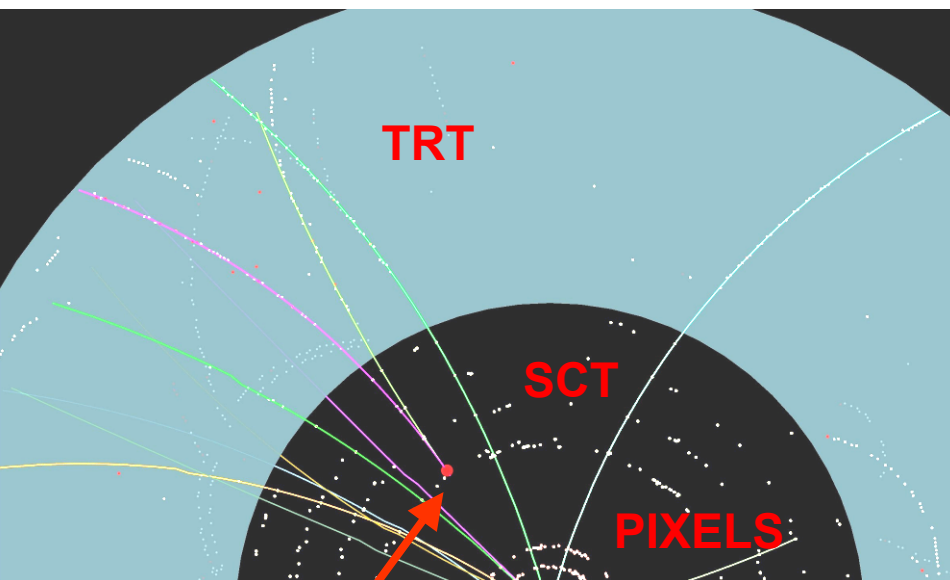




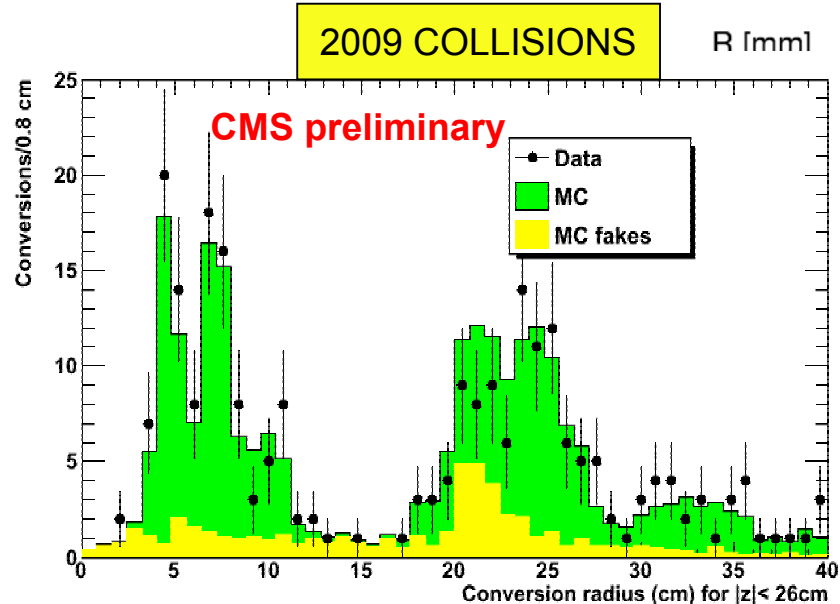
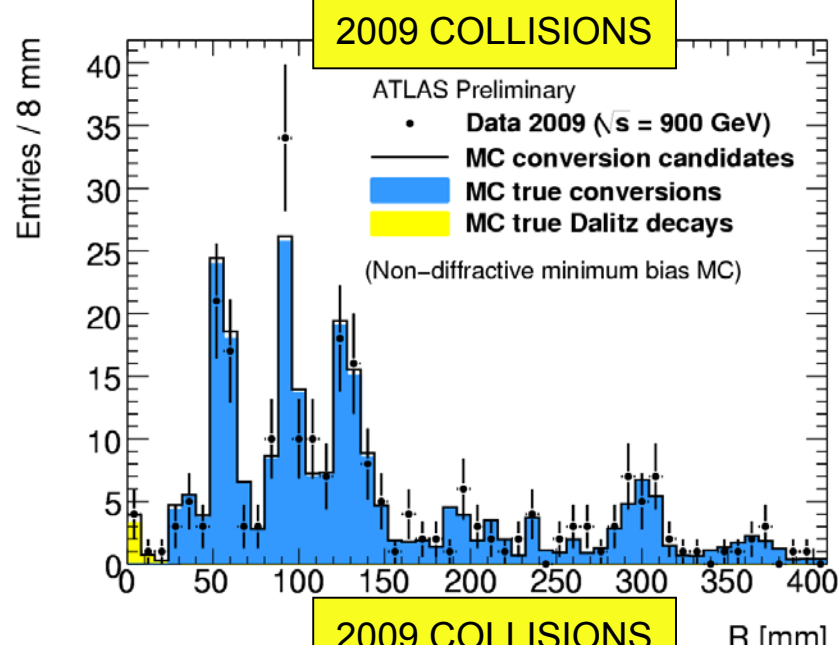
The material budget in front: photon conversions



ATLAS

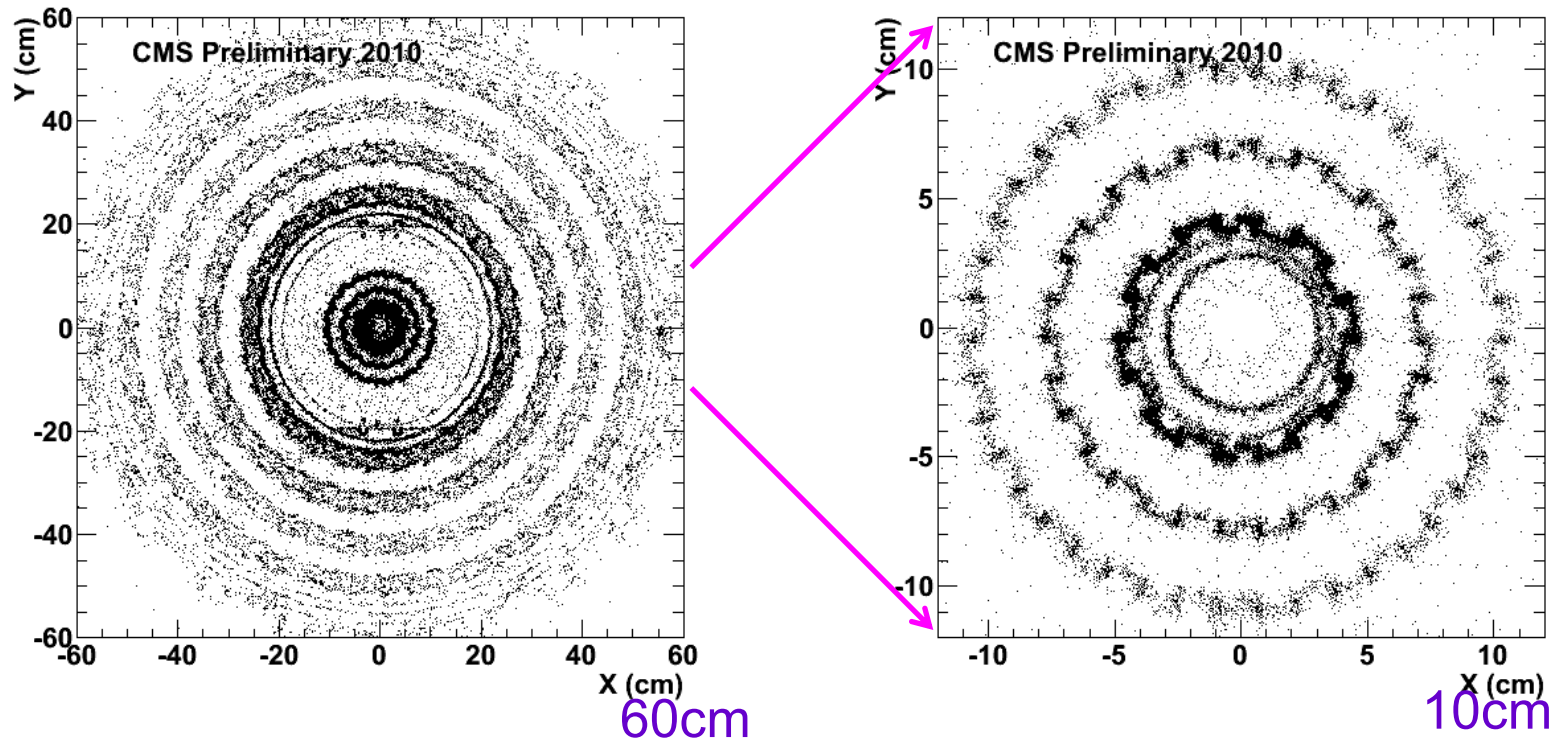


Photon conversion in first Silicon Tracker Layer



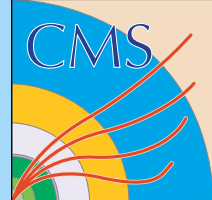
Photon conversions

- Conversions, $\gamma \rightarrow e^+e^-$, example from CMS
 - Two oppositely charged tracks
 - Consistent with coming from the same point
 - Consistent with fit to a common vertex, imposing zero mass



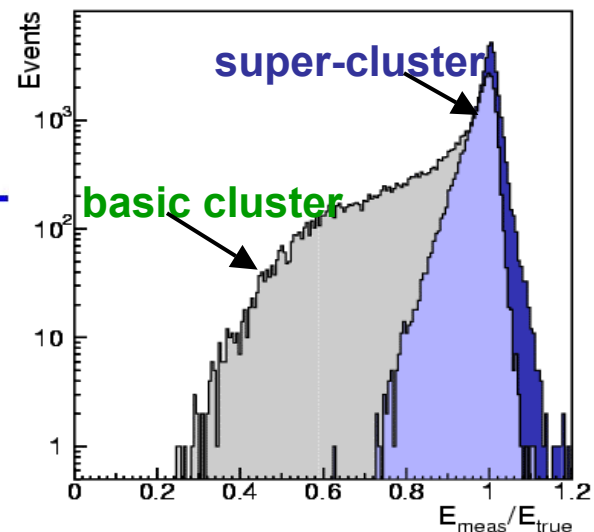
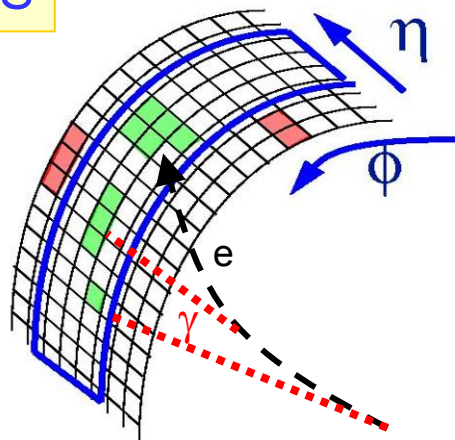
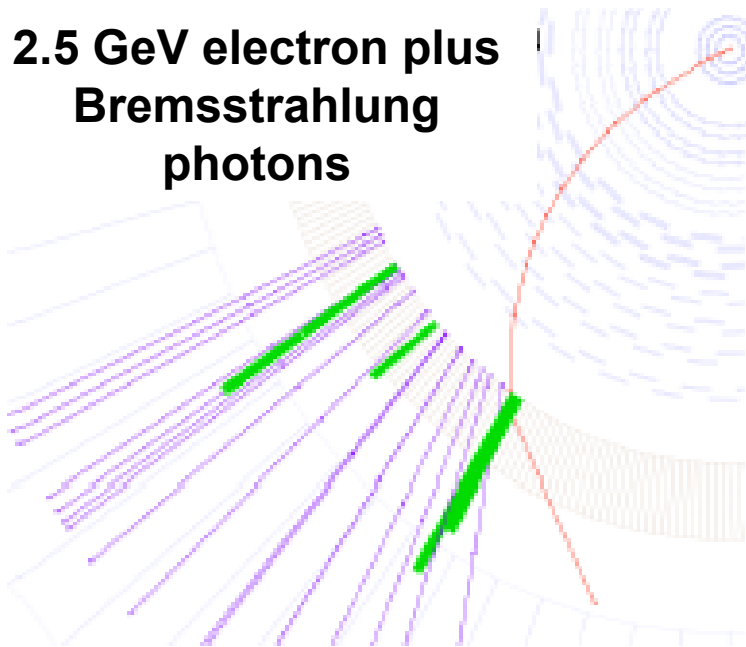


The material budget in front: electron Bremsstrahlung

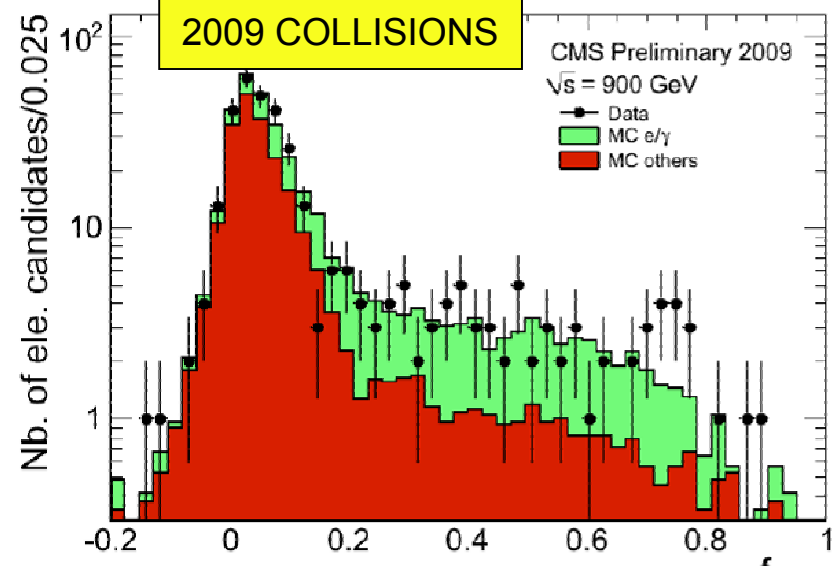


EFFECT on electrons IN CMS

2.5 GeV electron plus
Bremsstrahlung
photons



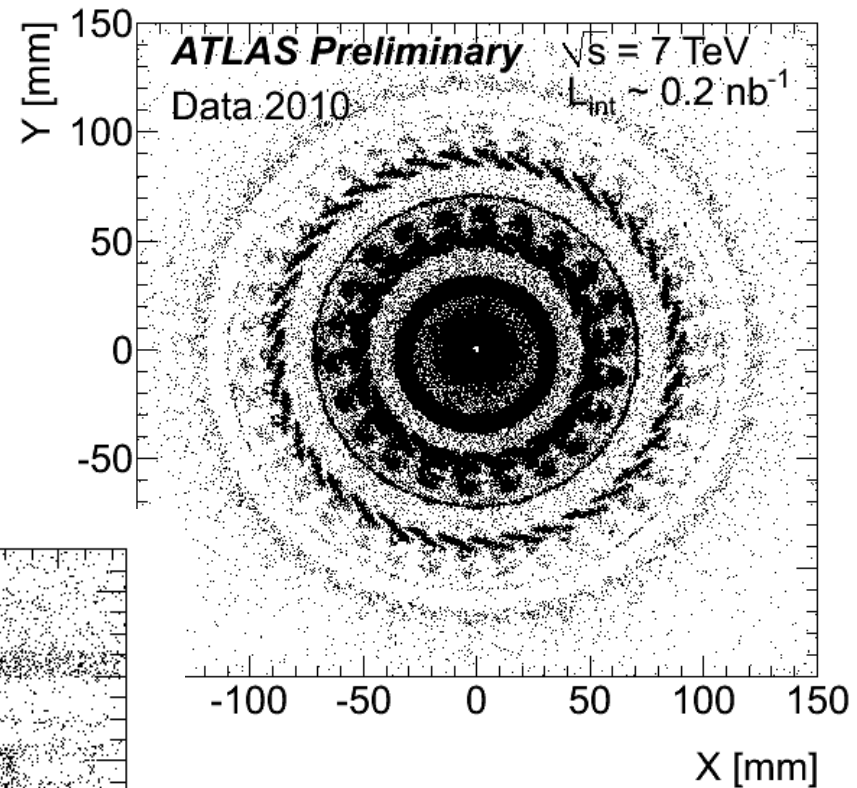
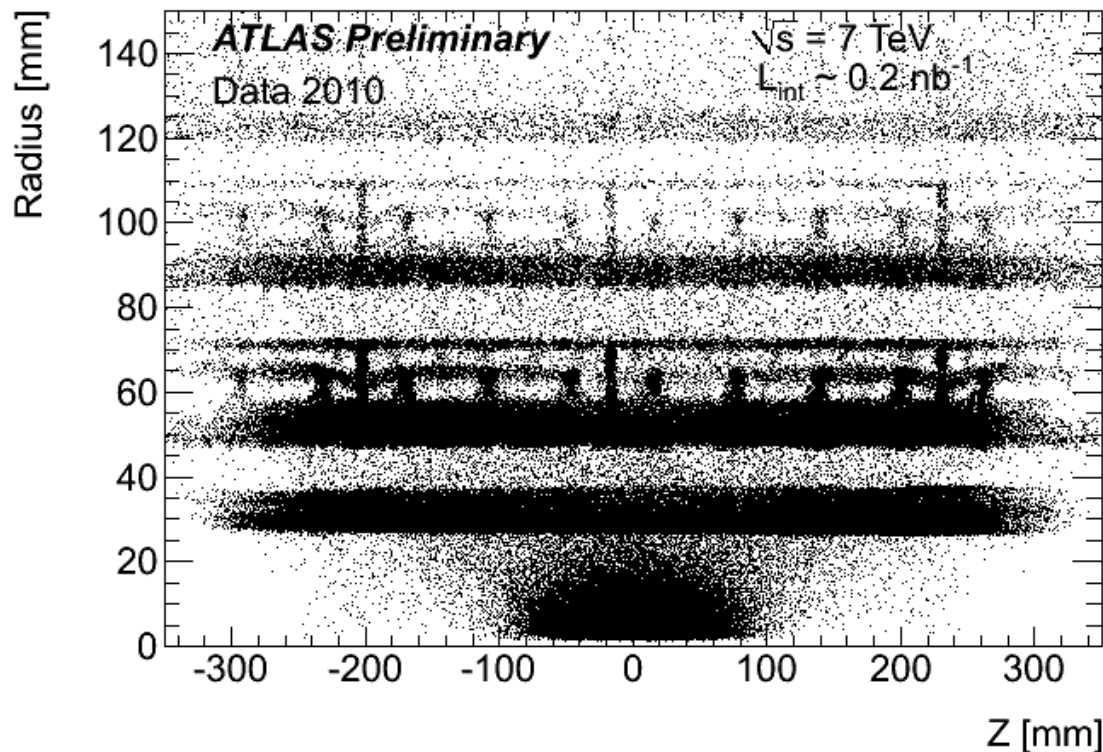
- 50% electrons give a non negligible brem
- special e track reconstruction
- special clustering algorithm



Fraction of radiated energy = $(P_{in} - P_{out})/P_{in}$

Nuclear interactions

- ATLAS example
 - Tracks with $d_0 > 2\text{mm}$ w.r.t PV
 - Form secondary vertices
 - Mass veto for γ , K^0_s , Λ

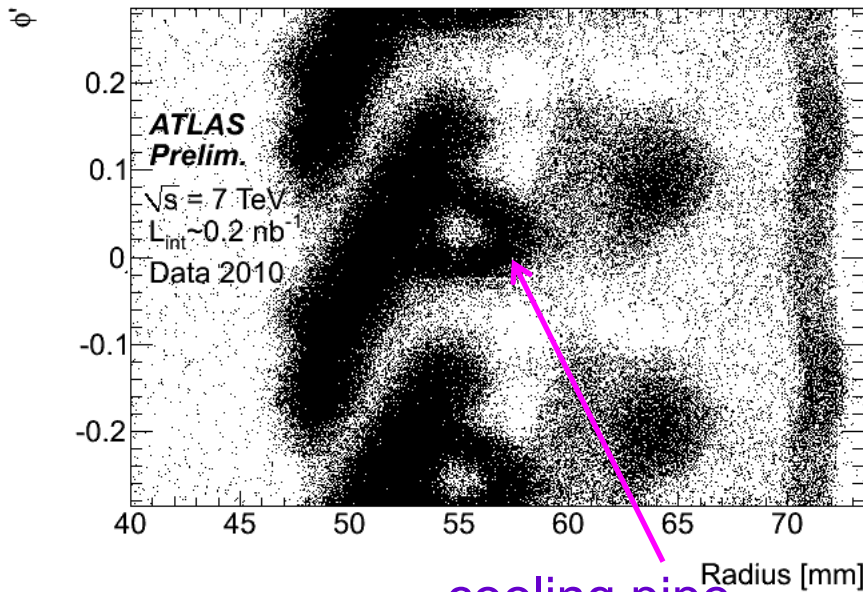
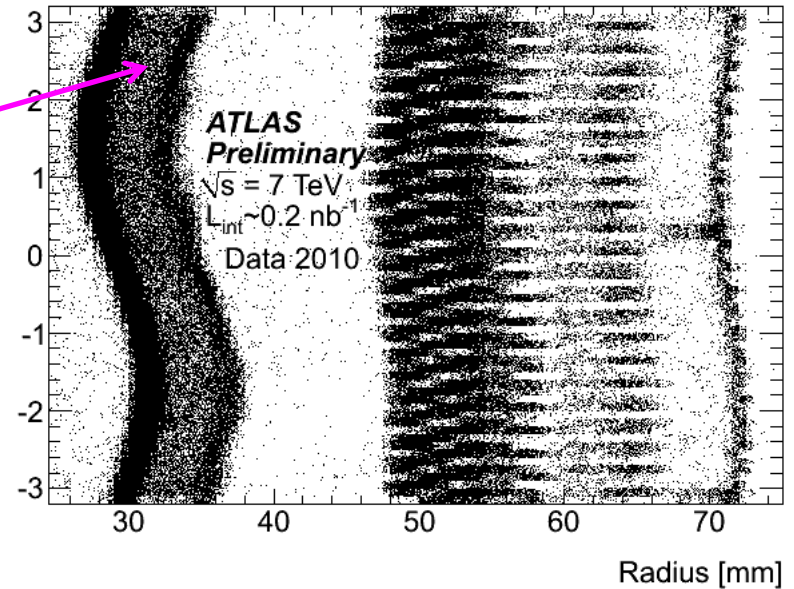


- x-y view for $|z| < 300\text{mm}$
- Sensitive to interaction lengths instead of radiation lengths

ATLAS-CONF-2010-058

Interactions $r\phi$ plots

- Full ϕ range shows displaced beam pipe (i.e. r varies with ϕ)
- Zoom in, and plot pixel inner layer local ϕ (i.e. pile all modules on one picture)
- Some features more spread out in data than MC.



cooling pipe

