

Fizyka cząstek: detektory

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

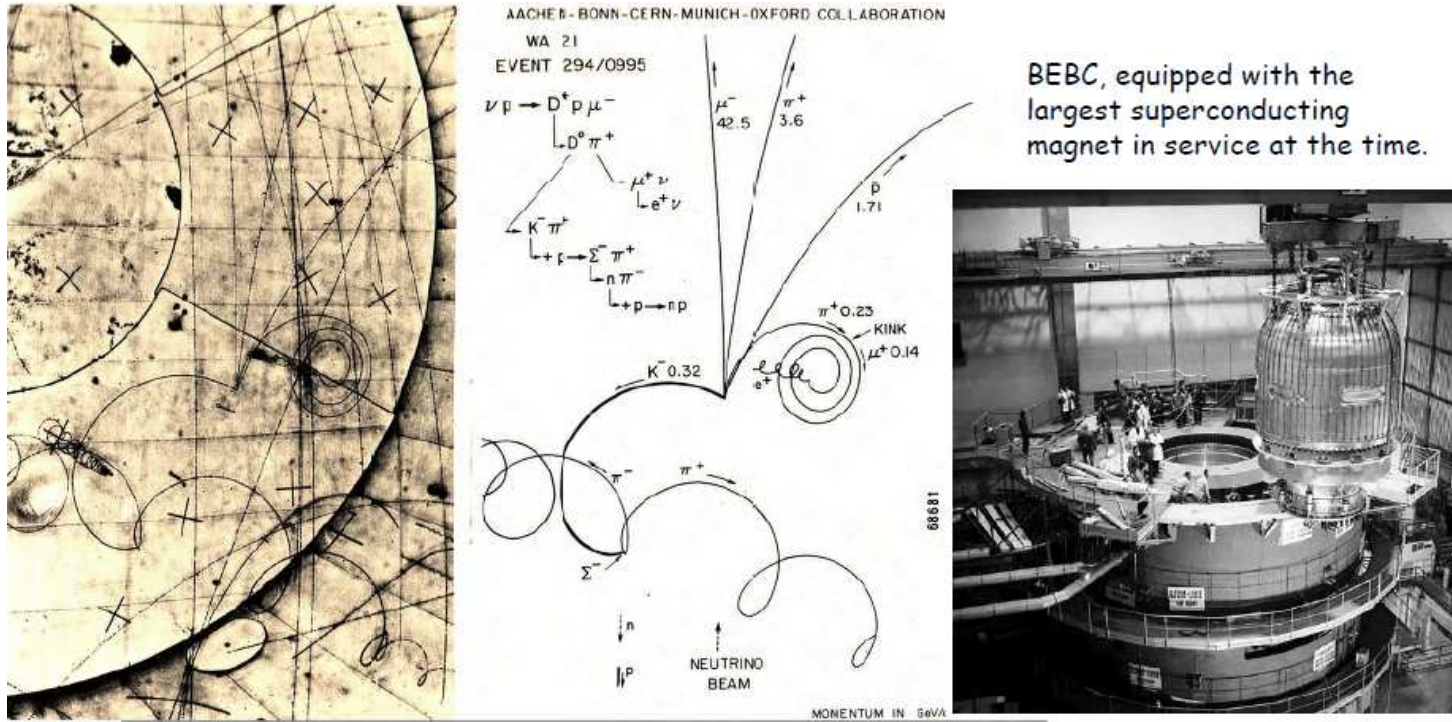
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład VII

- Detektory przy kolajderach

Wprowadzenie

Ideałem jest pełna rekonstrukcja przypadku:



BEBC, equipped with the largest superconducting magnet in service at the time.

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)

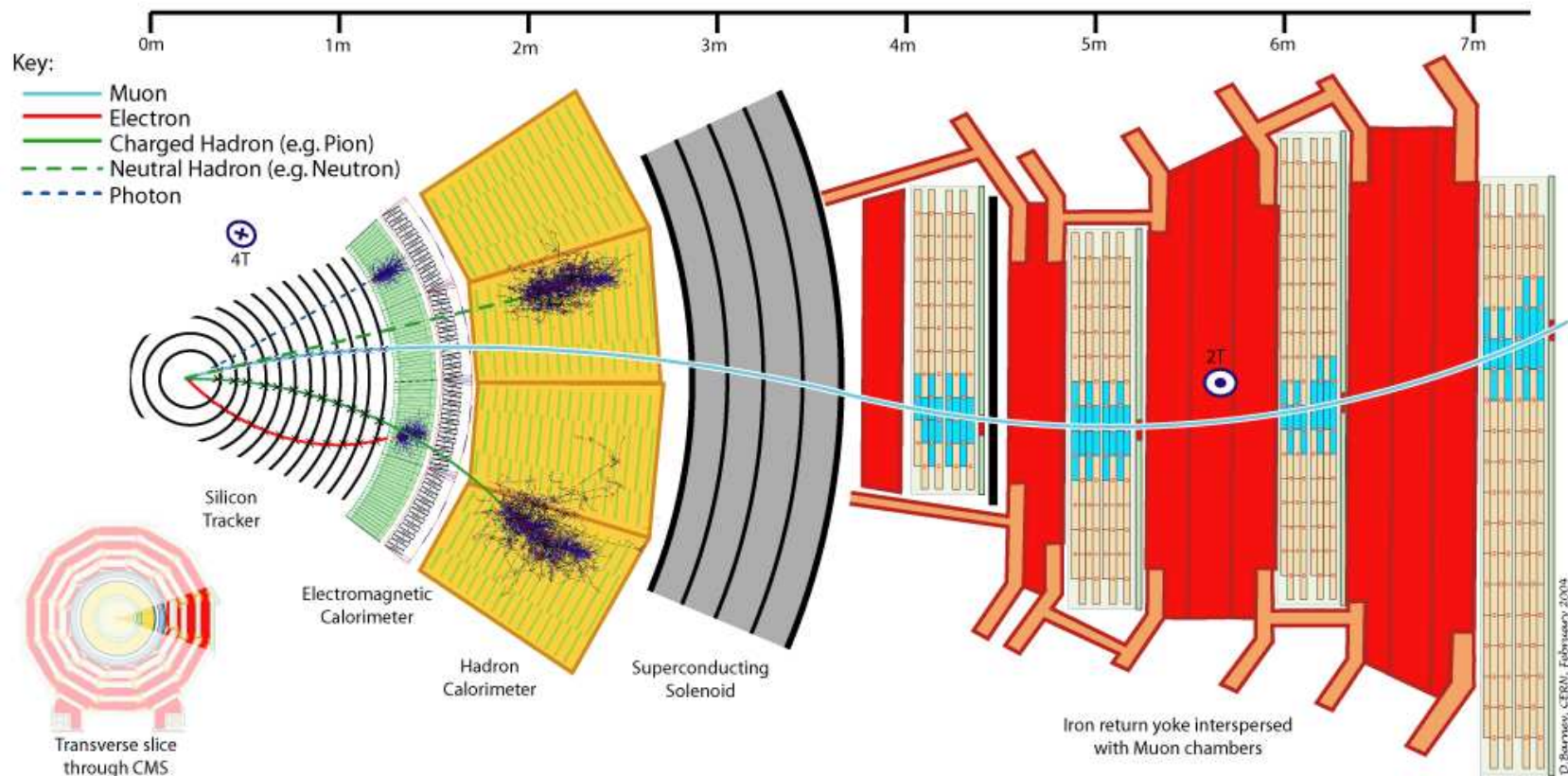
Na tej podstawie jesteśmy często w stanie zaklasyfikować cząstkę, ale naogół tylko w ograniczonym zakresie kinematycznym i/lub nie jest to pełna identyfikacja (np. wiemy, że naładowany hadron, ale nie konkretnie czy π^+ , K^+ czy p)

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	$\sigma_{Zh h}, \sigma_{\nu\nu h h}, M_{hh}$	$\delta g_{hhh} = 20/10\%$	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
$\gamma\gamma \rightarrow h^0 \rightarrow b\bar{b}$	SM or $MSSM$ Higgs, $M_{h^0} < 160$ GeV
$\gamma\gamma \rightarrow h^0 \rightarrow WW(WW^*)$	SM Higgs, $140 \text{ GeV} < M_{h^0} < 190$ GeV
$\gamma\gamma \rightarrow h^0 \rightarrow ZZ(ZZ^*)$	SM Higgs, $180 \text{ GeV} < M_{h^0} < 350$ GeV
$\gamma\gamma \rightarrow H, A \rightarrow b\bar{b}$	$MSSM$ 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 W interactions, extra dimensions
$\gamma e^- \rightarrow W^- \nu_e$	anomalous W couplings
$\gamma\gamma \rightarrow WWWW, WWZZ$	strong WW scatt., quartic anomalous W, Z couplings
$\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$	anomalous top quark interactions
$\gamma e^- \rightarrow \bar{t} b \nu_e$	anomalous Wtb coupling
$\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons}$	total $\gamma\gamma$ cross section
$\gamma e^- \rightarrow e^- X$ and $\nu_e X$	\mathcal{NC} and \mathcal{CC} 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!

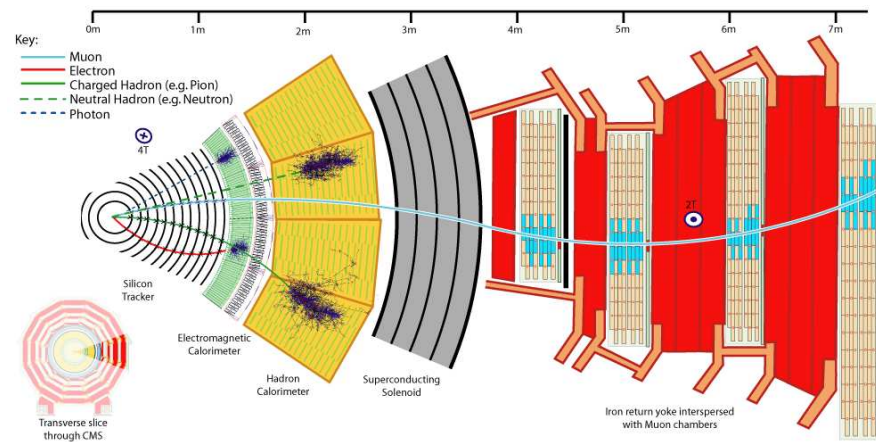
Trudne wyzwania pozwalają przyciągnąć najlepszych!

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".



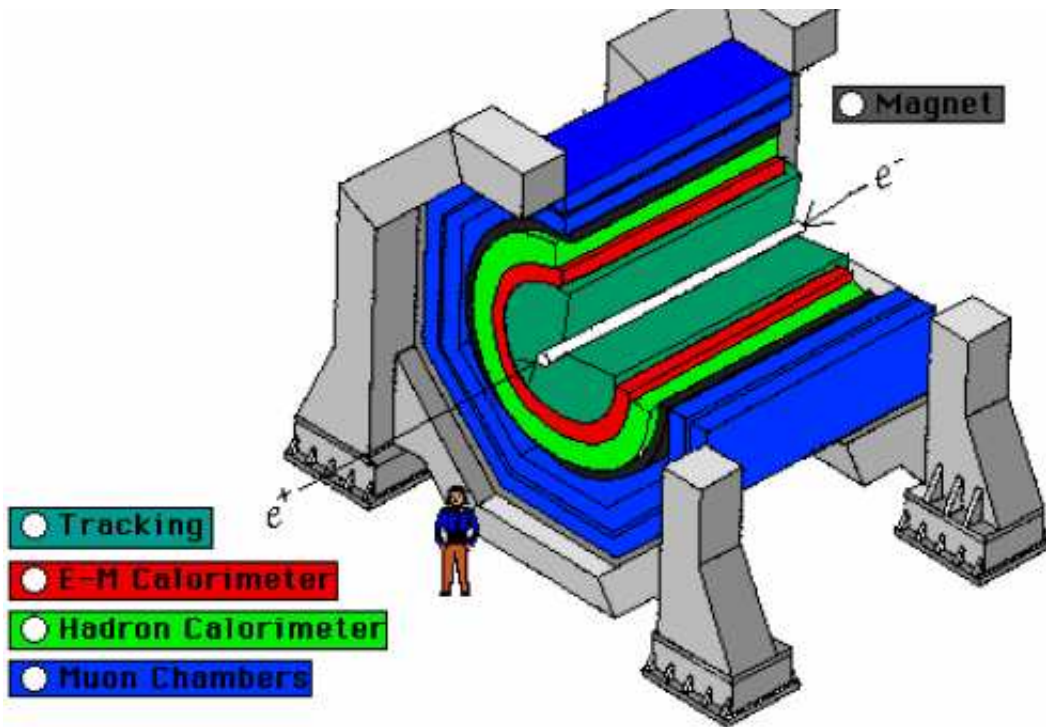
Jakie są ogólne zasady budowy detektorów?

Z jakich elementów powinien się składać detektor przy kolajderze?

Jak powinny być rozmieszczone?

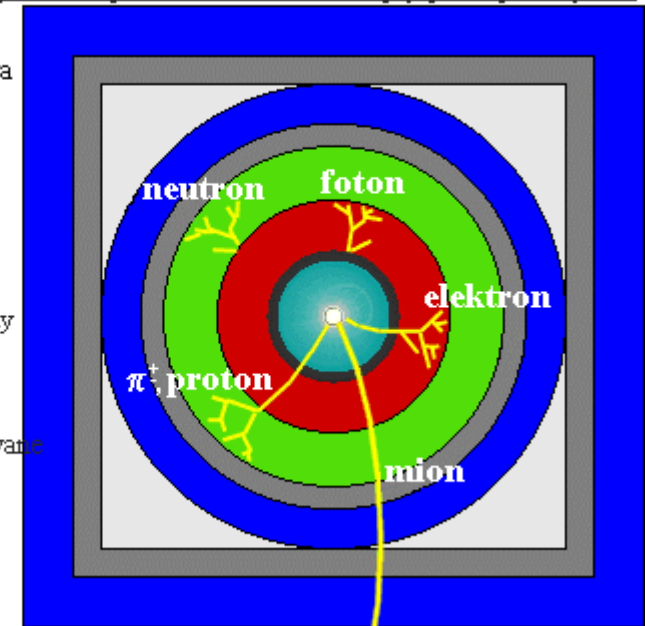
Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa



Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

- rura dryfowa
- komora trackera
- solenoid magnesu
- kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy
- namagnesowane żelazo
- komory mionowe



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)

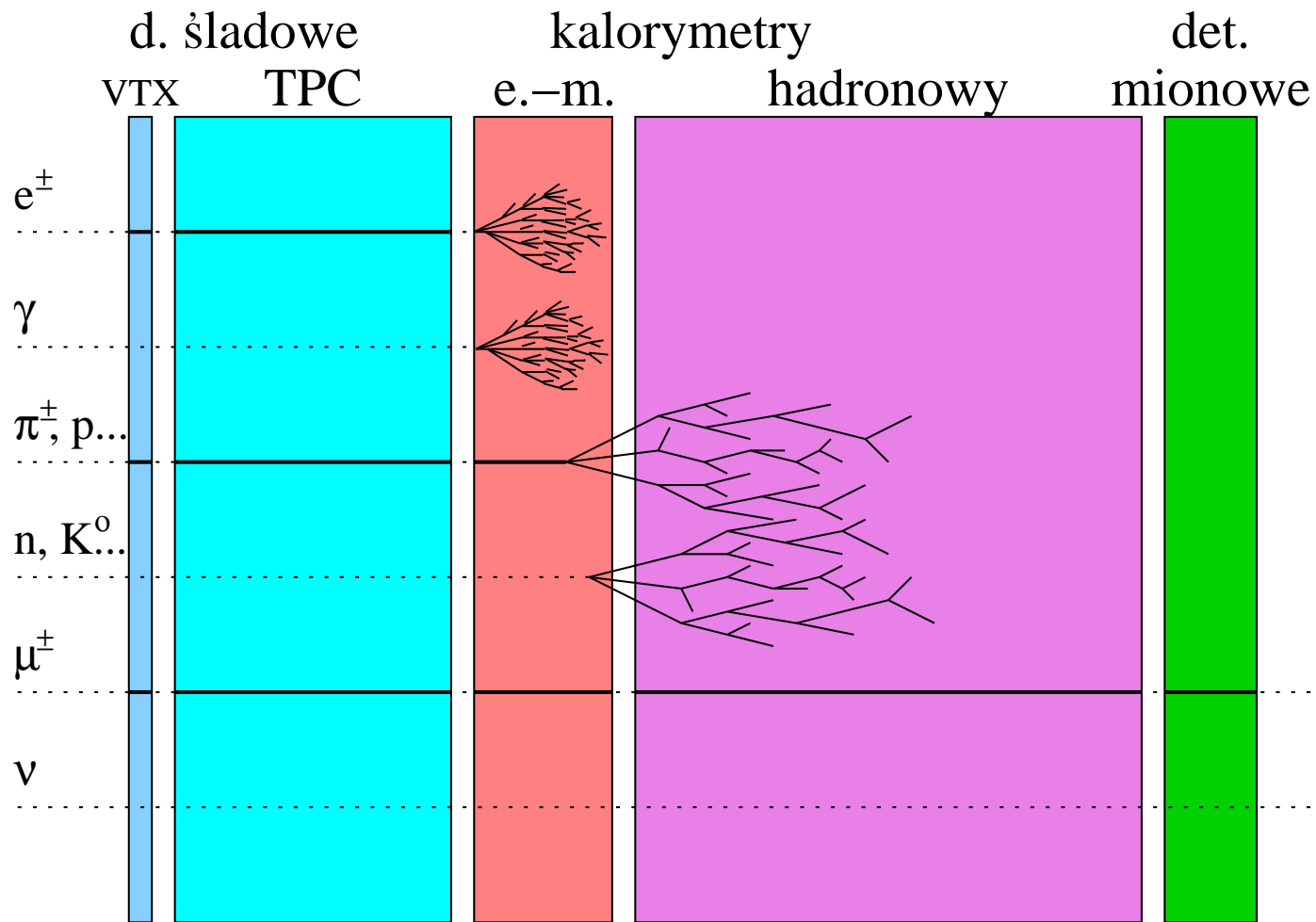
Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa

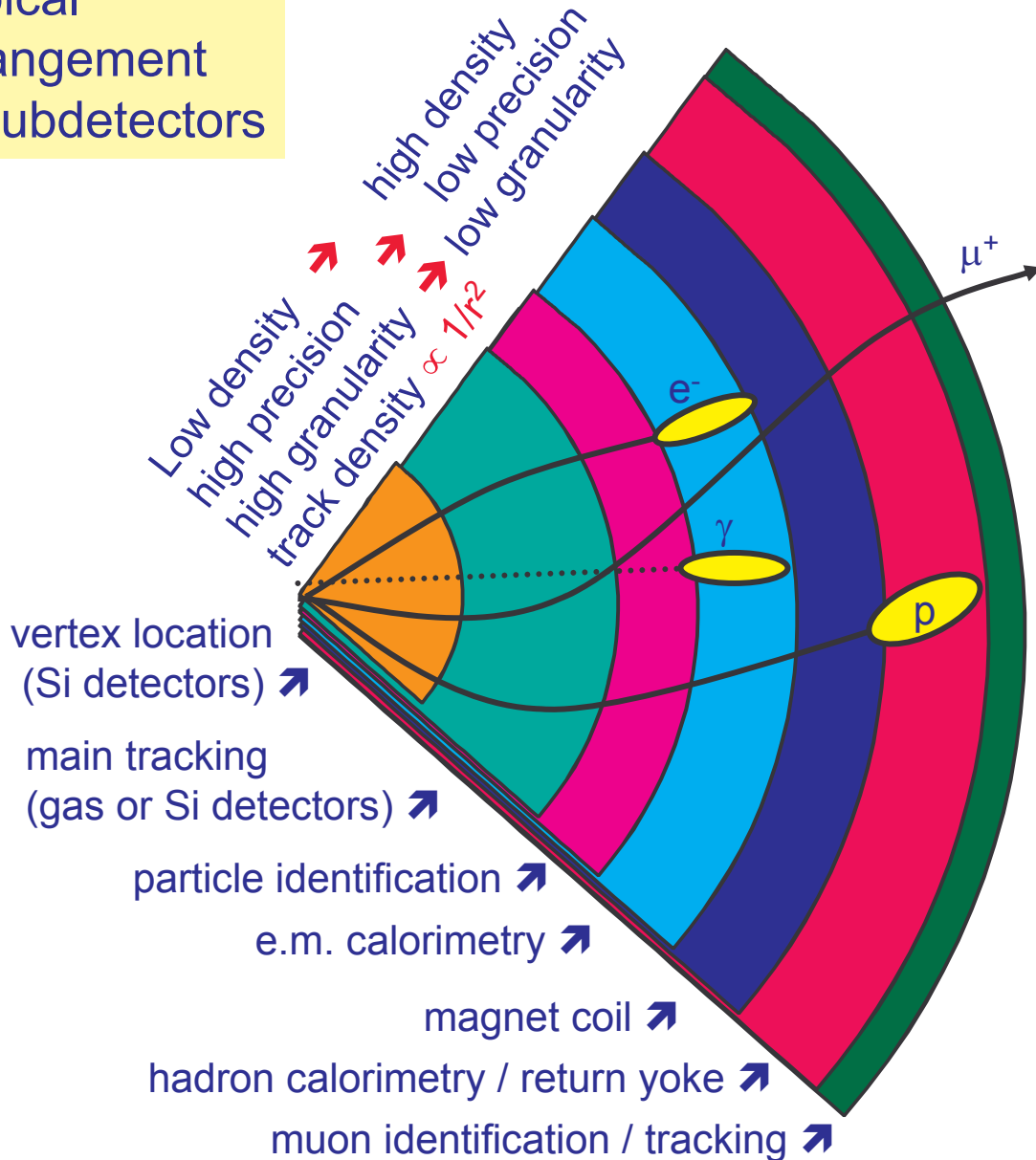
- kalorymetr elektromagnetyczny
pomiar energii elektronów i fotonów
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek
(międz, ołów, wolfram)
- kalorymetr hadronowy
pomiar energii hadronów (protony, neutrony, piony, kaony)
gęsty materiał absorbujący lawinę cząstek;
lawina hadronowa jest wielokrotnie dłuższa od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

Detektor uniwersalny

Struktura warstwowa



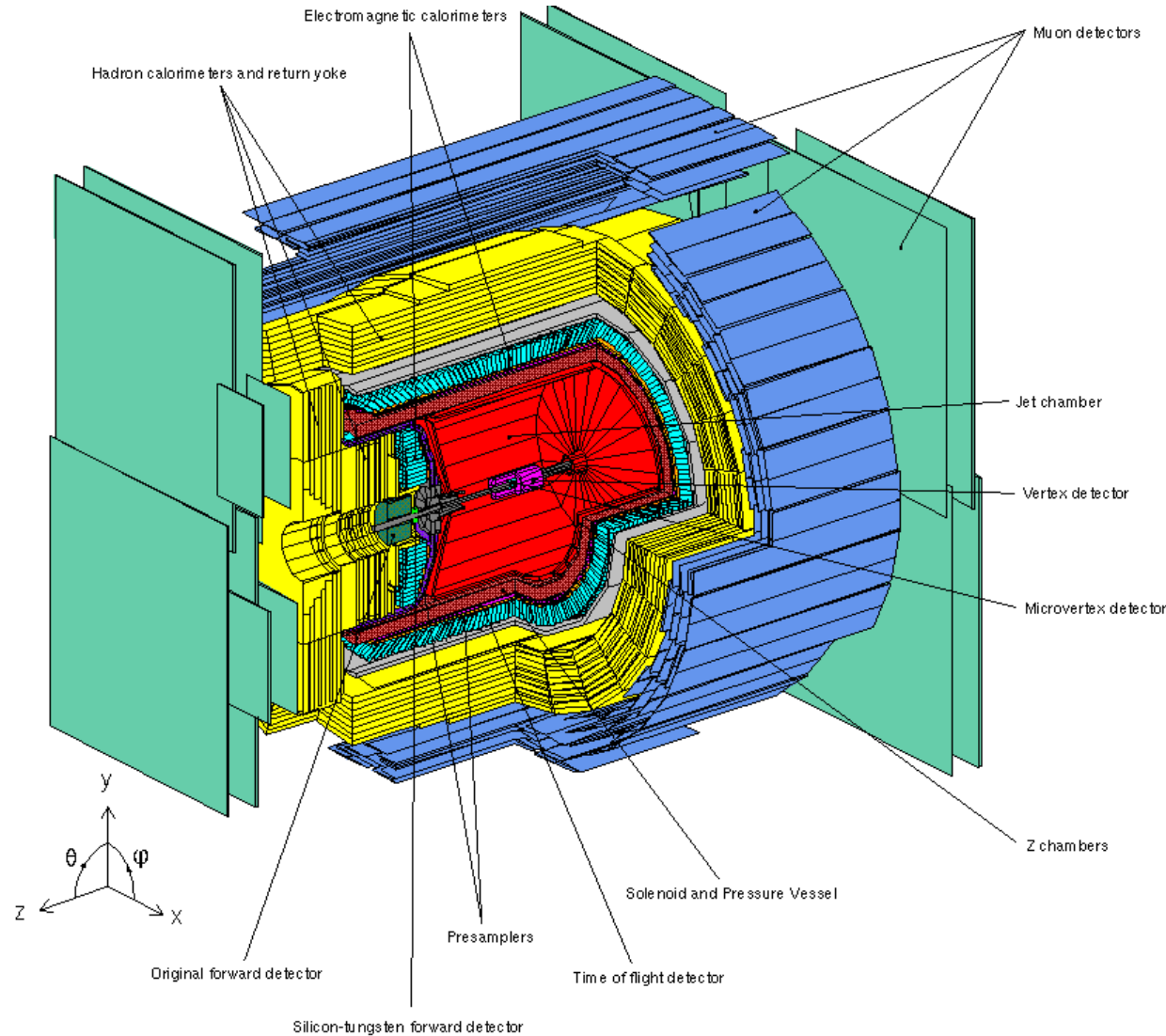
Typical arrangement of subdetectors

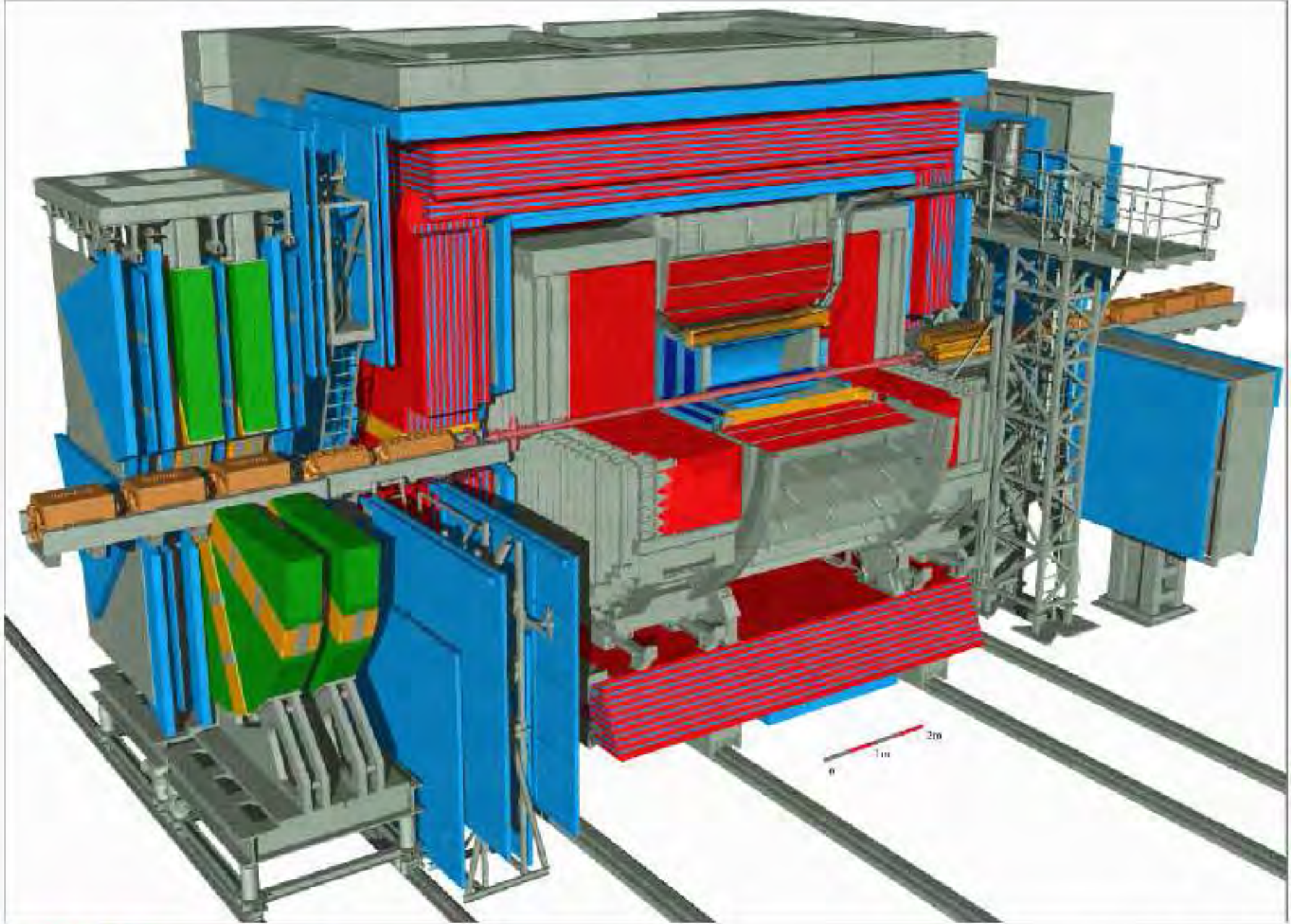


OPAL



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

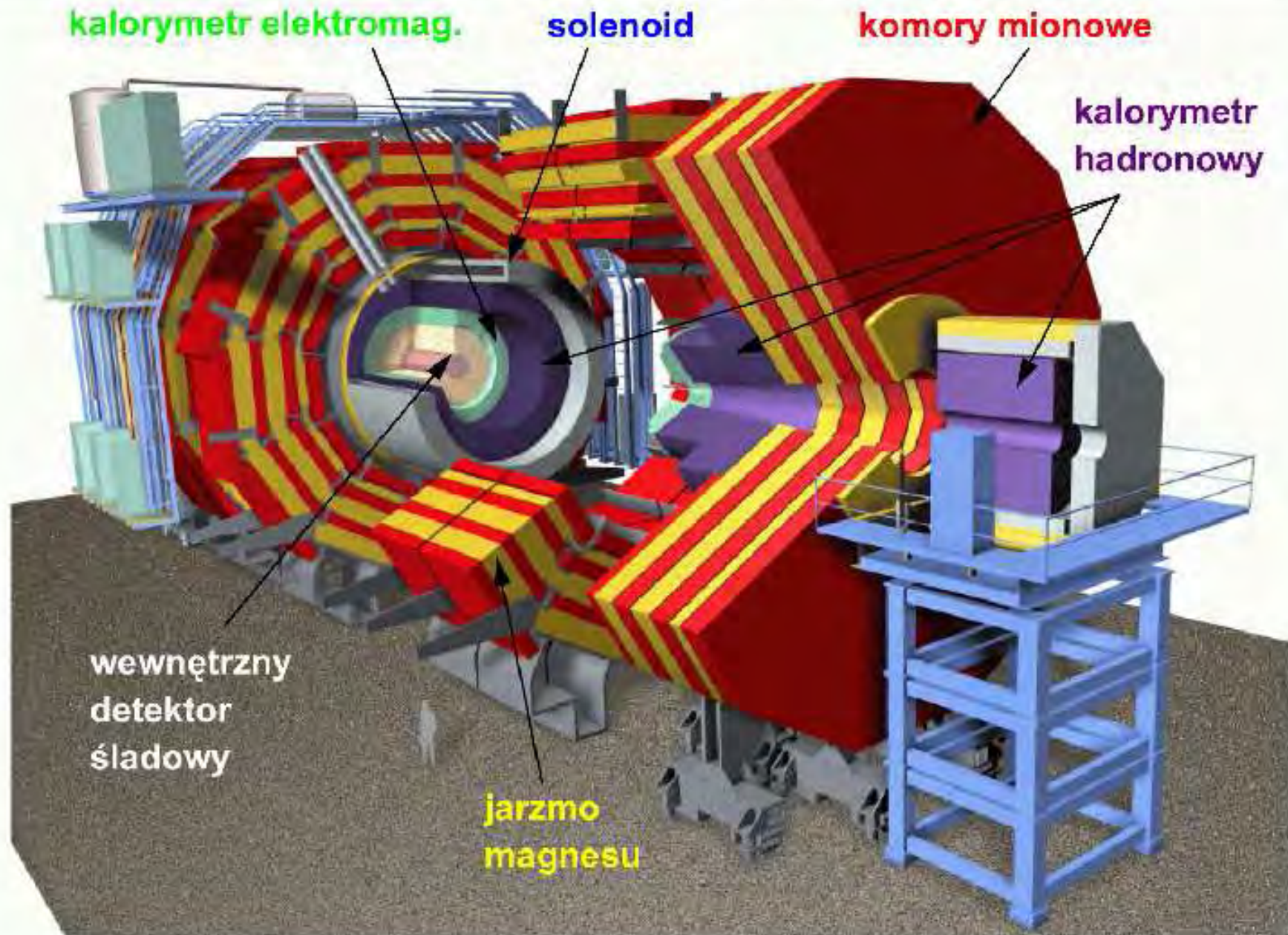




ZEUS (HERA) 

Software: SORC-IDEAS level V1 i
Performed by: Carsten Hartmann
Status: October 1993

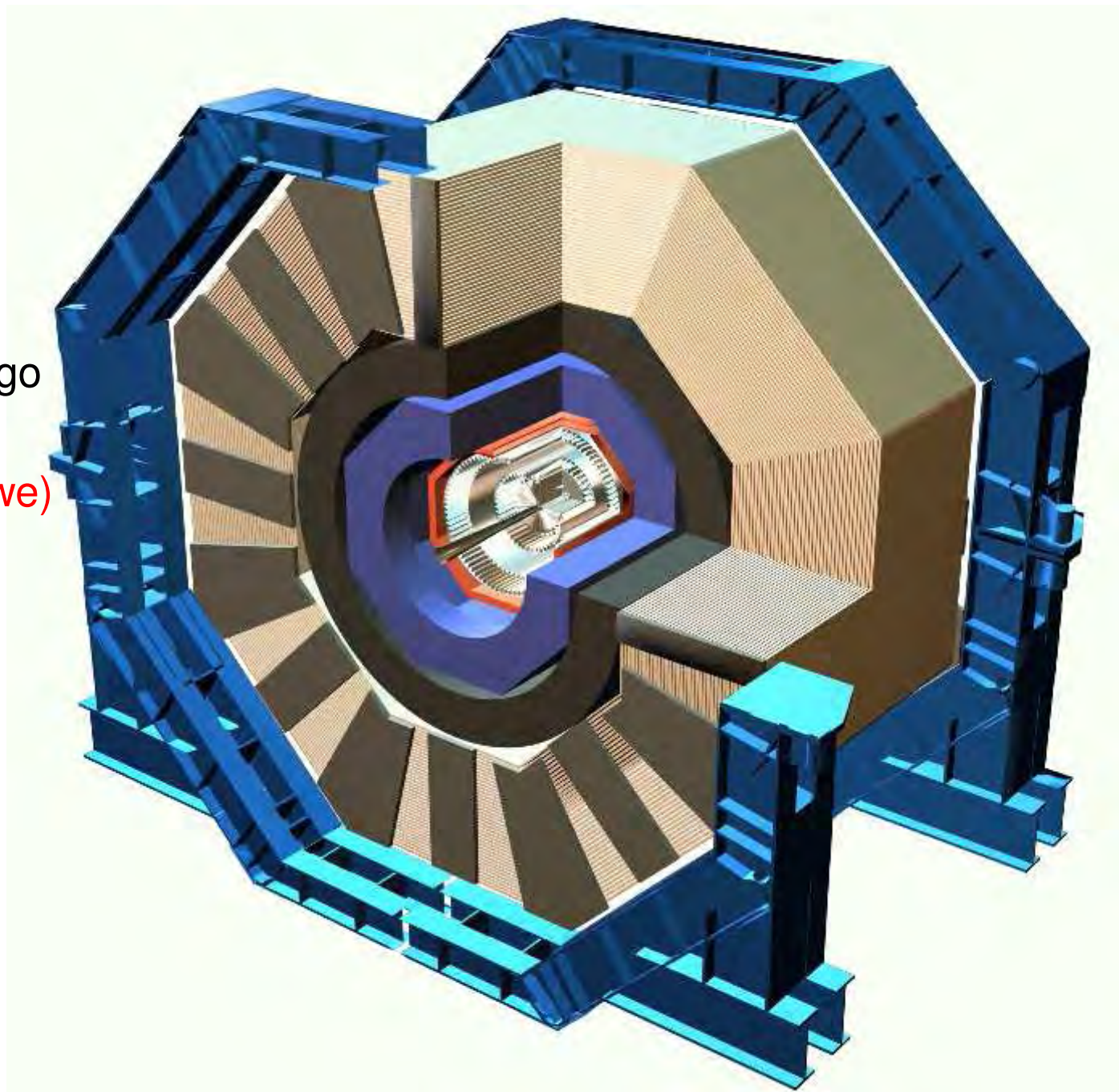
Compact Muon Solenoid




















SiD

Projekt detektora dla
eksperymentu przy ILC

Koncepcja detektora opartego
w całości o detektory
półprzewodnikowe (krzemowe)



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)

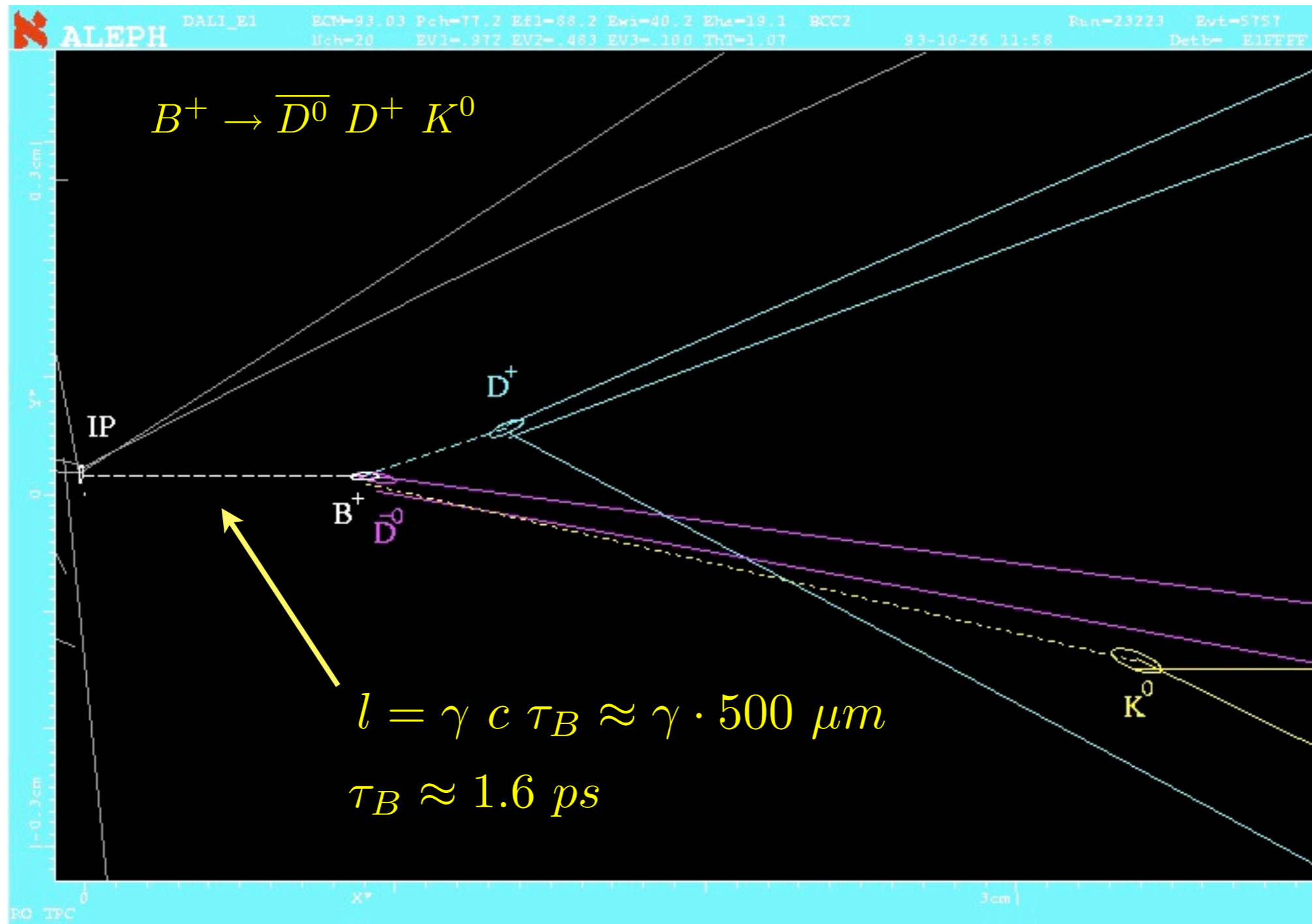
MIP = Minimum
Ionizing Particle

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!**

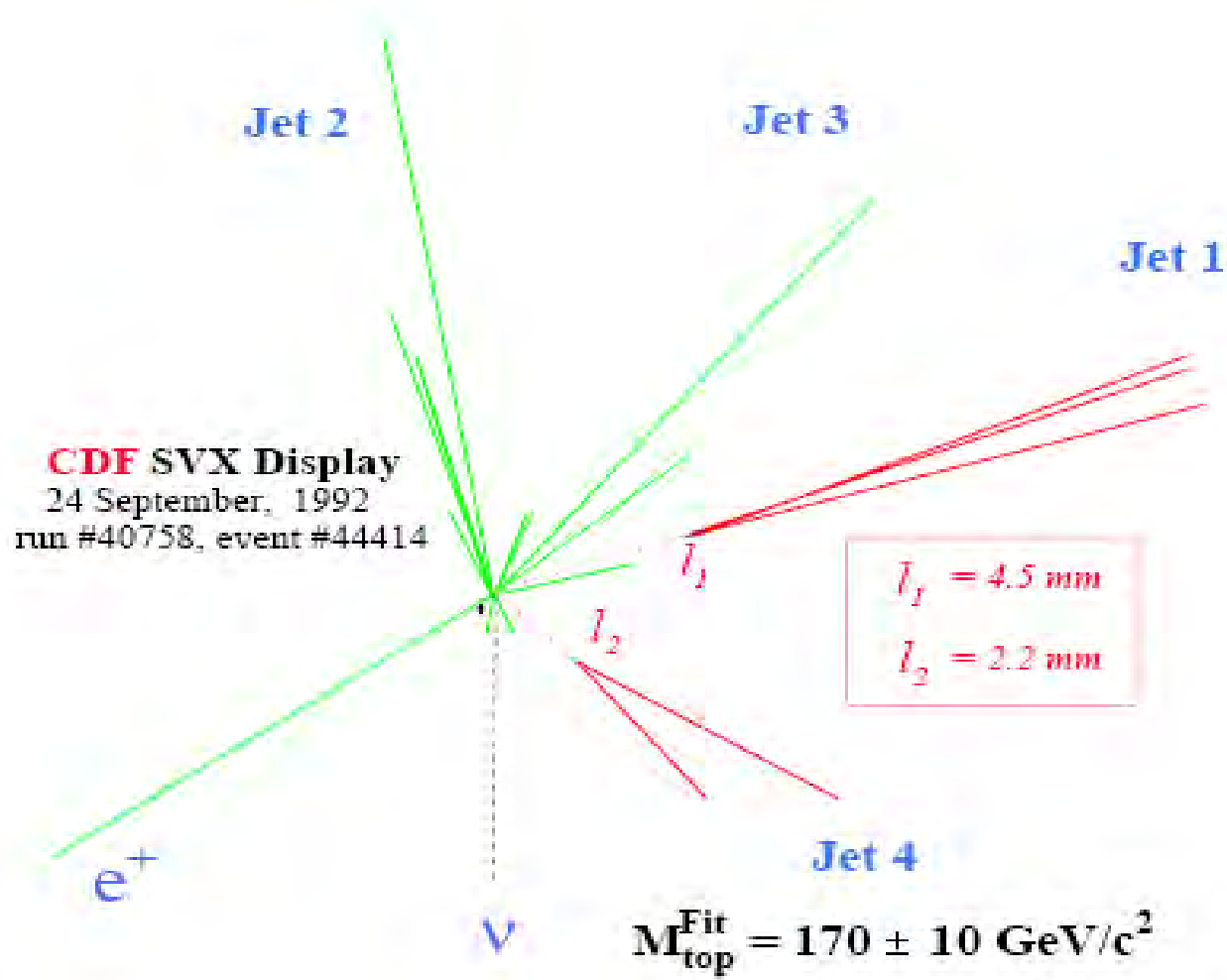
Detektor wierzchołka

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)



Impact parameter resolution (simplified)

Diagram illustrating the impact parameter resolution in a detector. The detector consists of two layers, L1 and L2, separated by a beam pipe. The particle path is shown as a dashed line, and the impact parameter σ_b is indicated by a bracket at the bottom of the particle path. The detector layers are at radii r_1 and r_2 from the particle path.

Top diagram (L1): Particle path is above the beam pipe. The impact parameter σ_b is the distance from the particle path to the beam pipe. The detector layer L1 is at radius r_1 . The angle subtended by the beam pipe at the detector layer is σ_1 . The angle subtended by the detector layer at the particle path is σ_2 . The impact parameter resolution is given by $\frac{\sigma_b}{\sigma_1} = \frac{r_2}{r_2 - r_1}$. The angle σ_2 is zero.

Bottom diagram (L2): Particle path is below the beam pipe. The impact parameter σ_b is the distance from the particle path to the beam pipe. The detector layer L2 is at radius r_2 . The angle subtended by the beam pipe at the detector layer is σ_2 . The angle subtended by the detector layer at the particle path is σ_1 . The impact parameter resolution is given by $\frac{\sigma_b}{\sigma_2} = \frac{r_1}{r_2 - r_1}$. The angle σ_1 is zero.

The total impact parameter resolution is given by the equation:

$$\sigma^2 = \left(\frac{r_1}{r_2 - r_1} \sigma_2 \right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_2 - r_1} \sigma_1 \right)^2 + \sigma_{MS}^2$$

where $\sigma_{MS} \sim \frac{1}{p} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$ is the multiple scattering contribution. The terms $\frac{r_1}{r_2 - r_1} \sigma_2$ and $\frac{r_2}{r_2 - r_1} \sigma_1$ are noted as being "small!".

Vertex Resolution

x_1, x_2 = measurement planes

y_1, y_2 = measured points, with errors δy

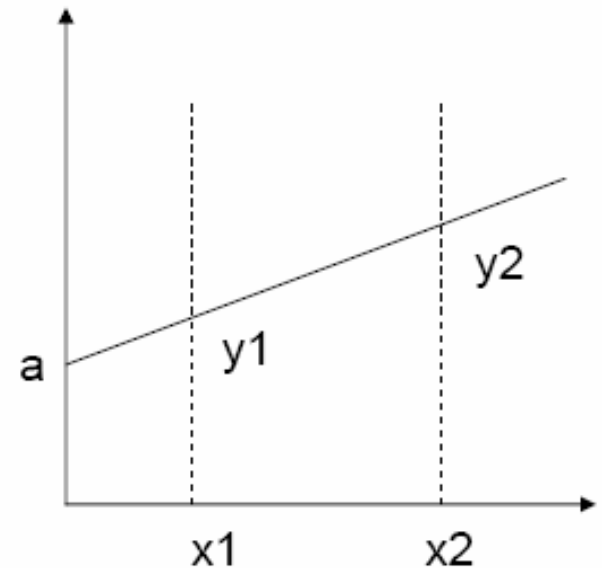
$$y = a + bx$$

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

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

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

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



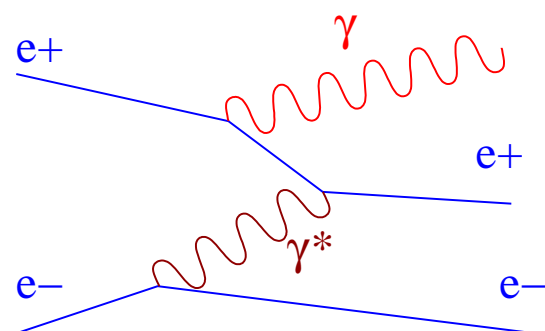
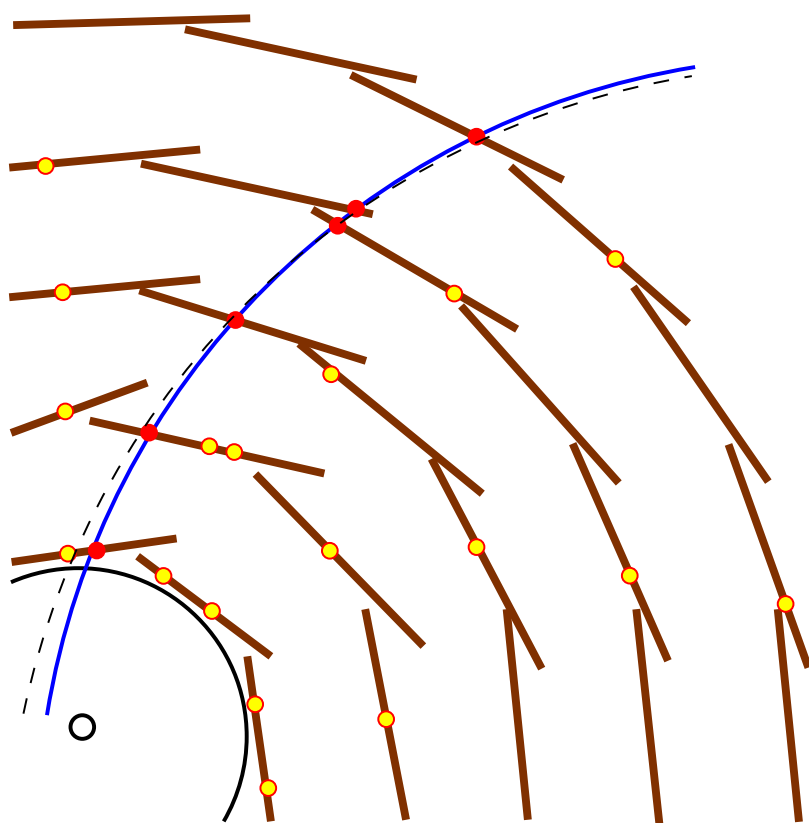
for good resolution on angles (ϕ and θ) and intercepts (d, z_0)

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

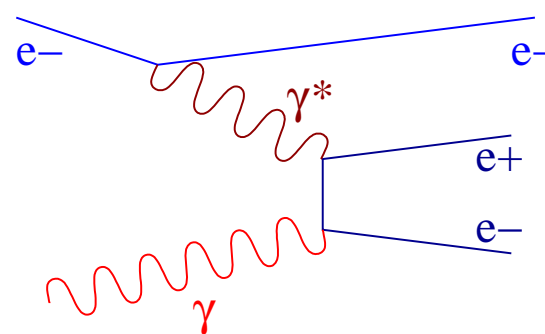
Detektor wierzchołka

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

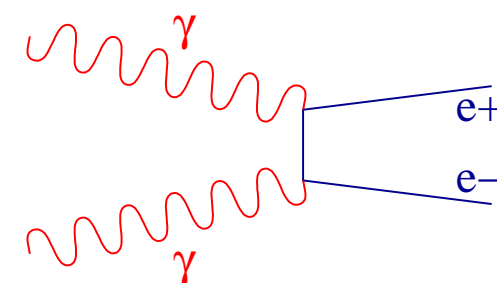
W oddziaływaniu pomiędzy wiązkami powstają pary e^+e^- o małych pędach poprzecznych, z których część zostawia ślady (ang. "hit") w detektorze wierzchołka utrudniając rekonstrukcję innych torów. W pięciowarstwowym detektorze oczekuje się około 60 000 dodatkowych "hitów".



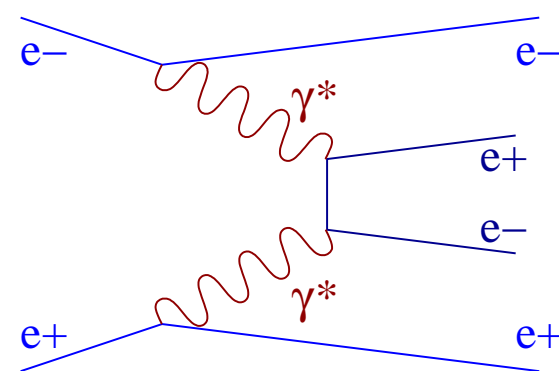
Beamstrahlung



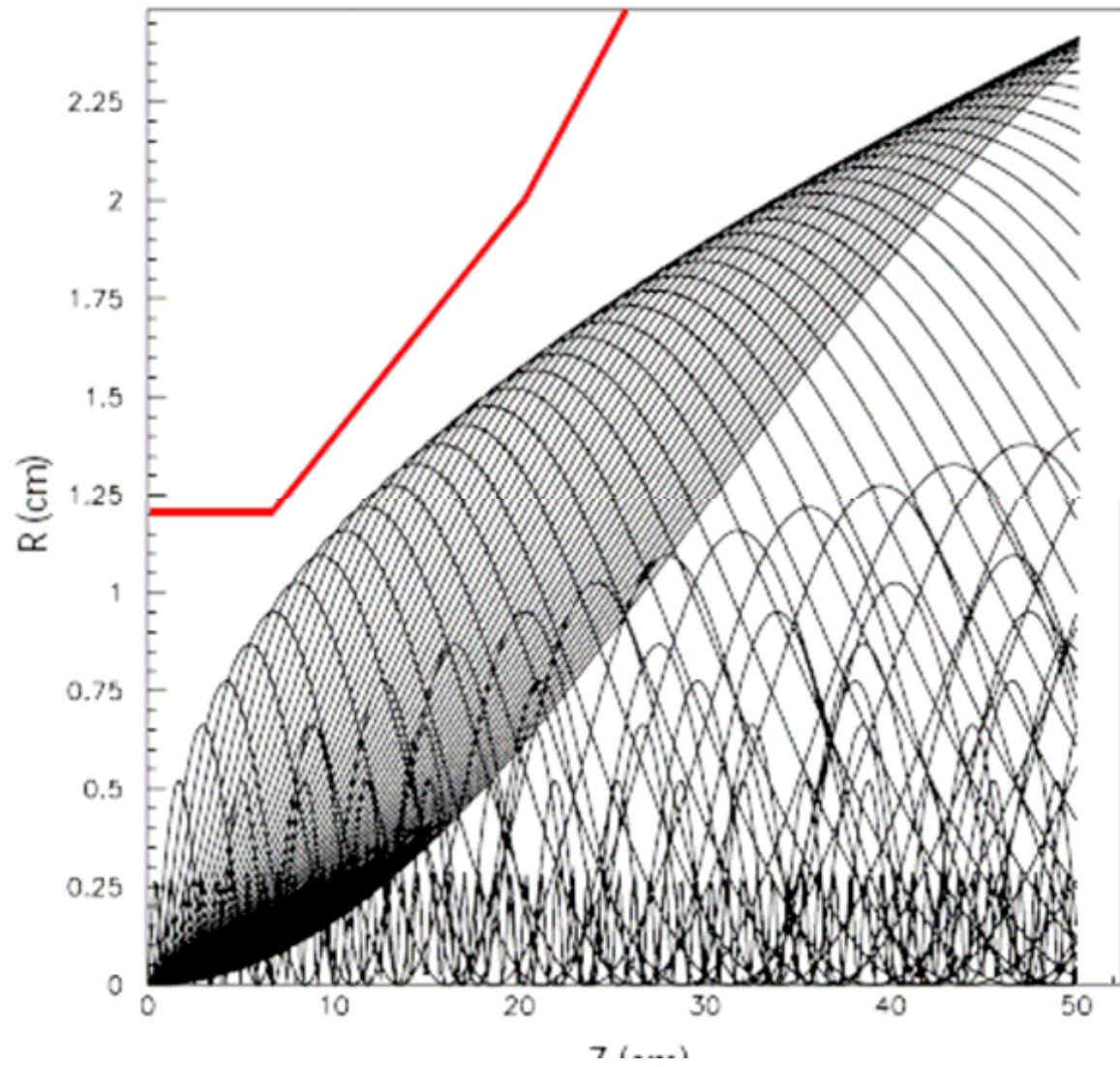
Bethe – Heitler



Breit – Wheeler

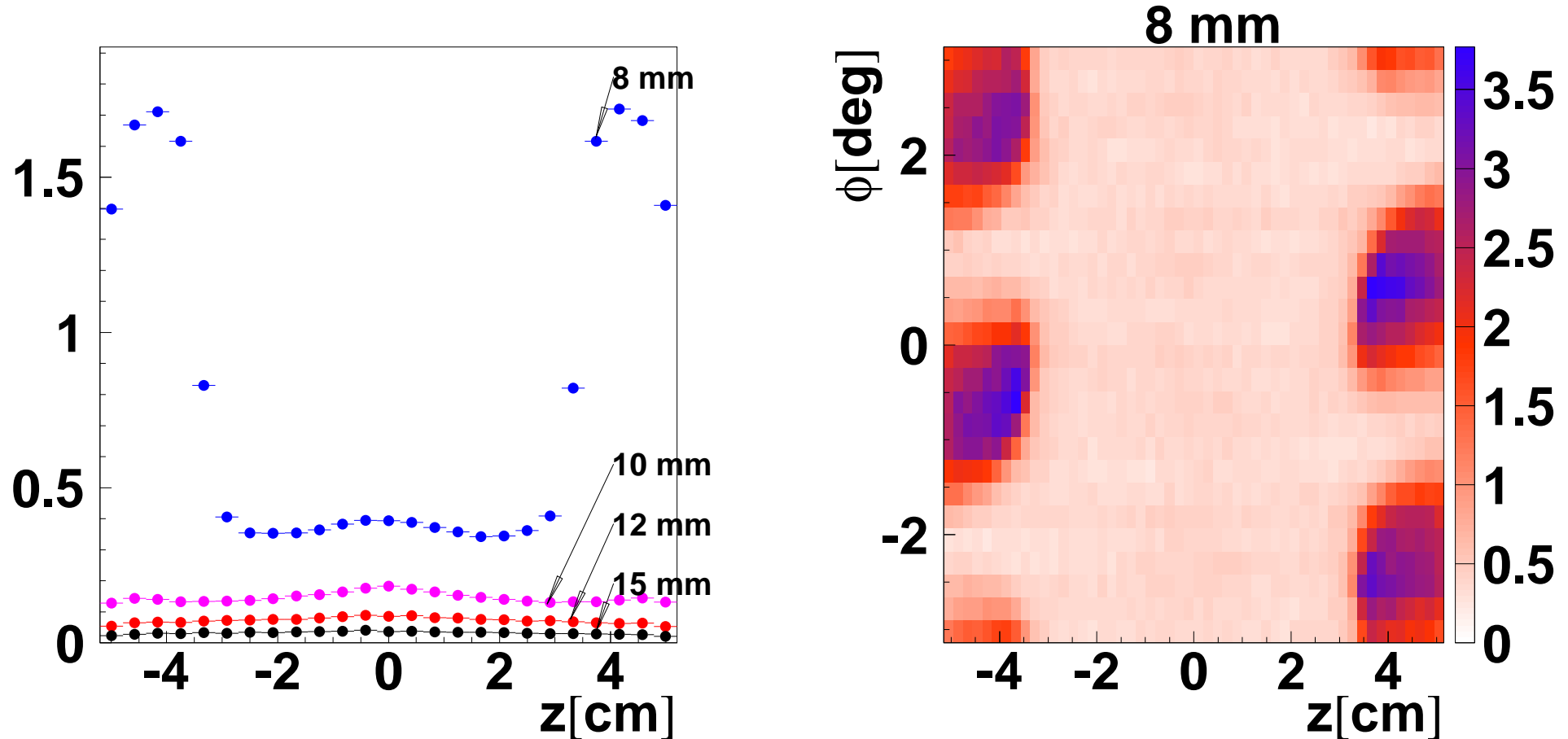


Landau–Lifshitz



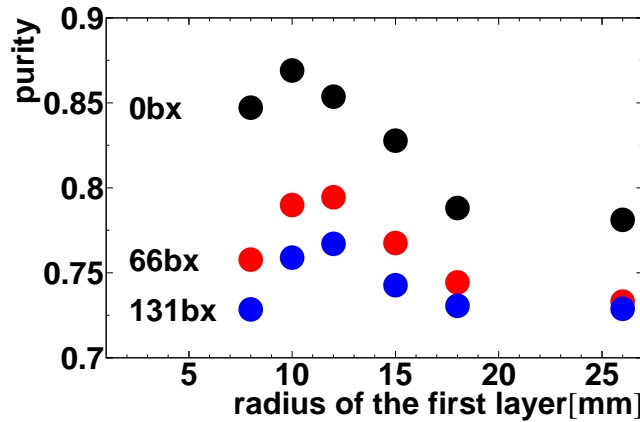
Gęstość śladów w pierwszej warstwie [$1/\text{mm}^2/\text{BX}$]

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



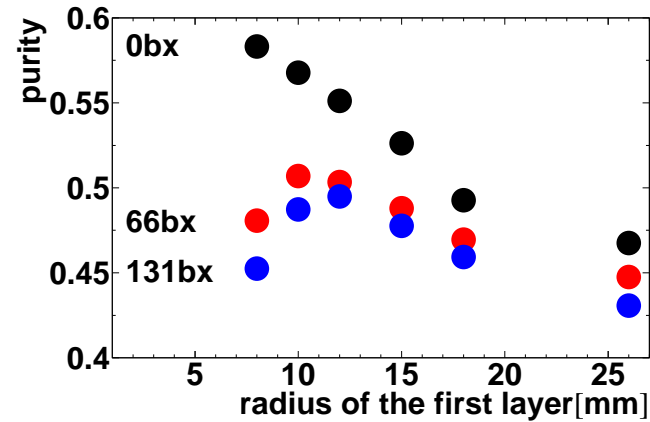
Jet flavour tagging performance

b selection

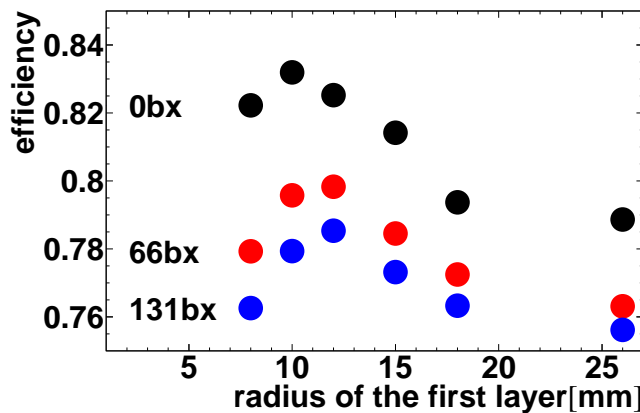


Efficiency 0.8

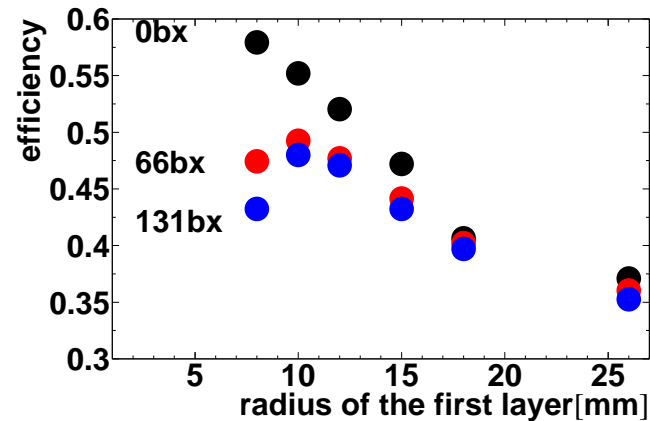
c selection



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

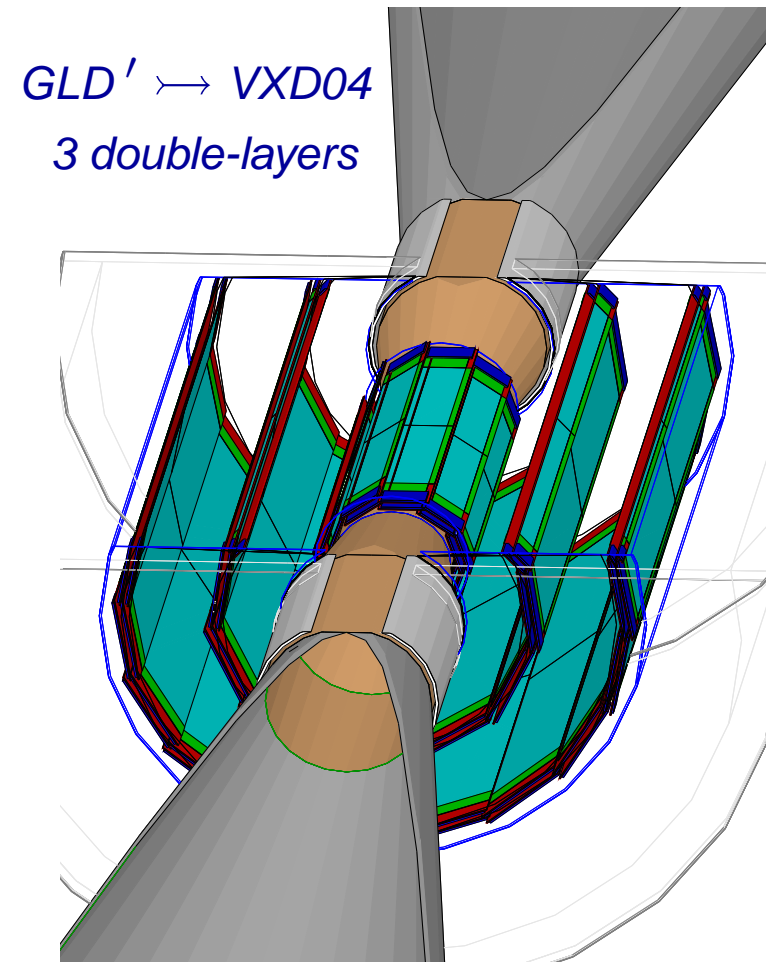
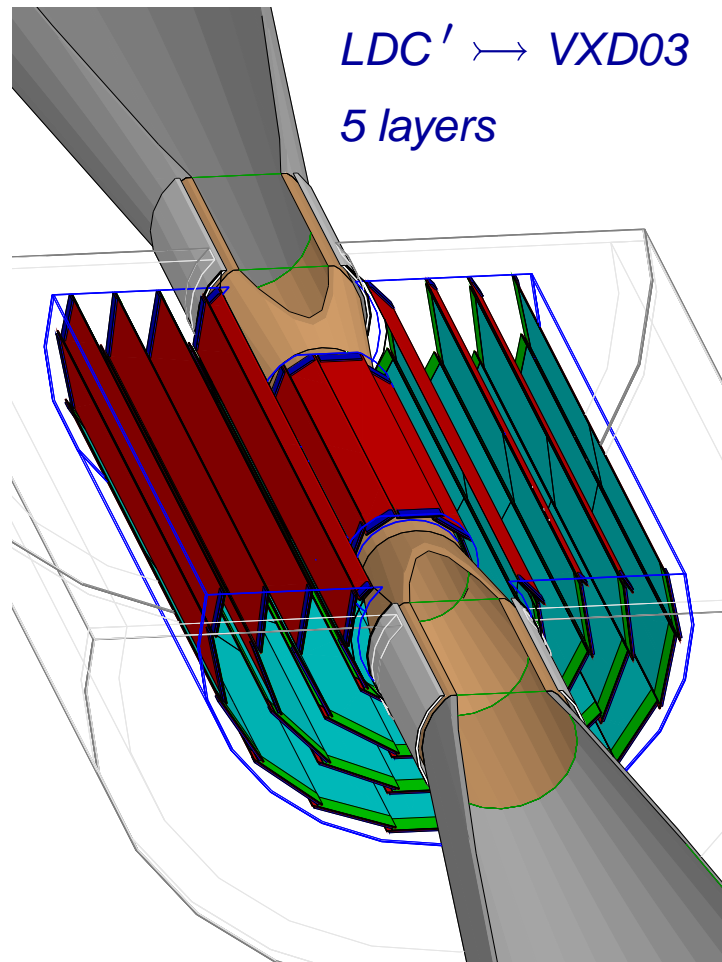
Technologia:

odporność radiacyjna vs koszt, szybkość odczytu

Grubość detektora:

rozpraszanie vs stabilność mechaniczna

- Maintain 2 alternative long-barrel approaches :



- Two read-out modes considered :

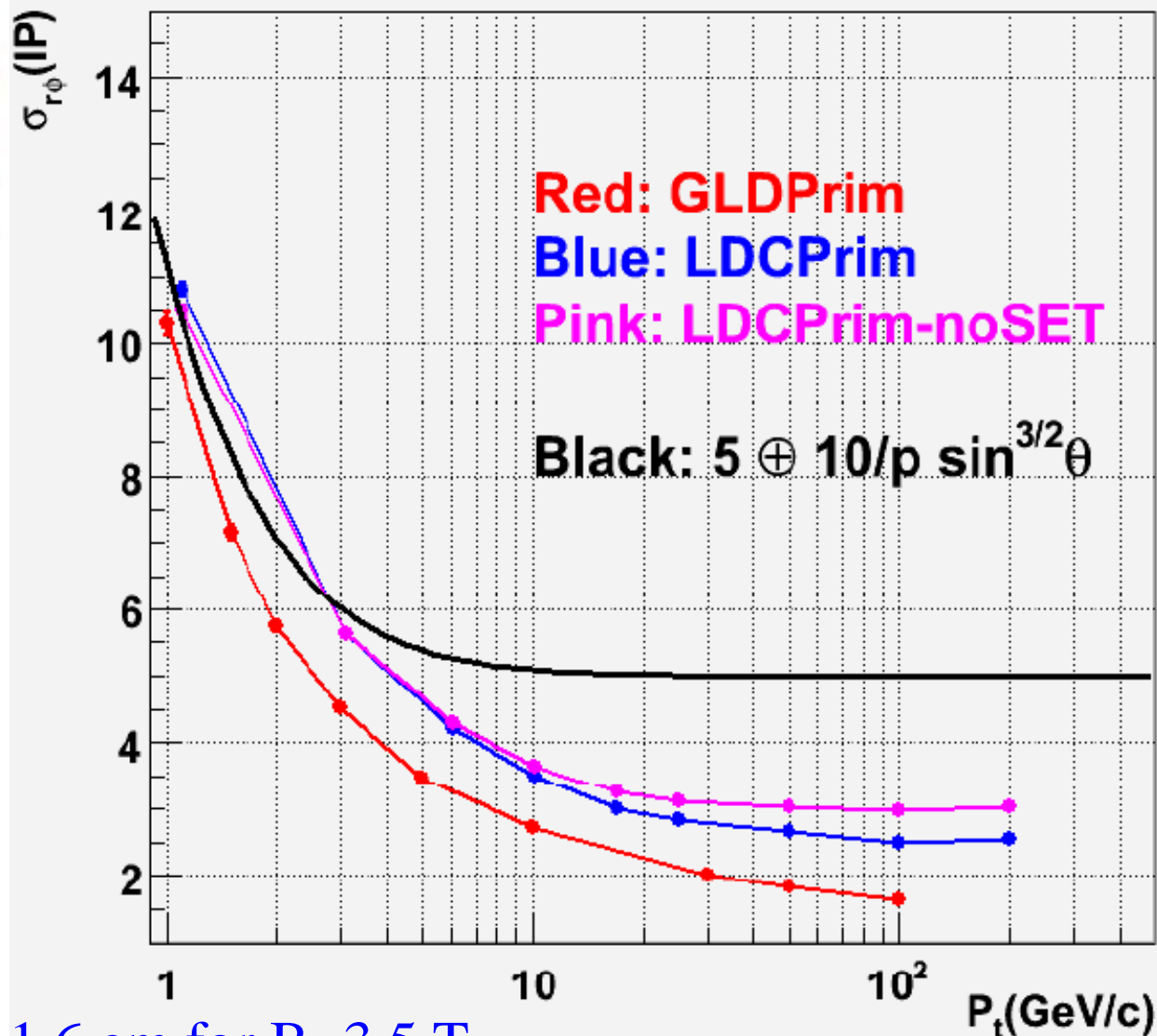
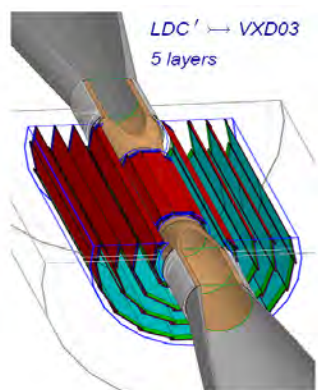
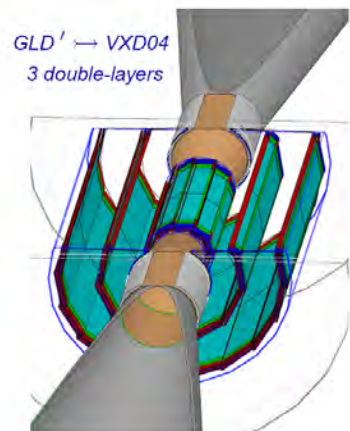
⊕ **continuous** read-out

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

\Rightarrow mini-vectors

Vertex Detector

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



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

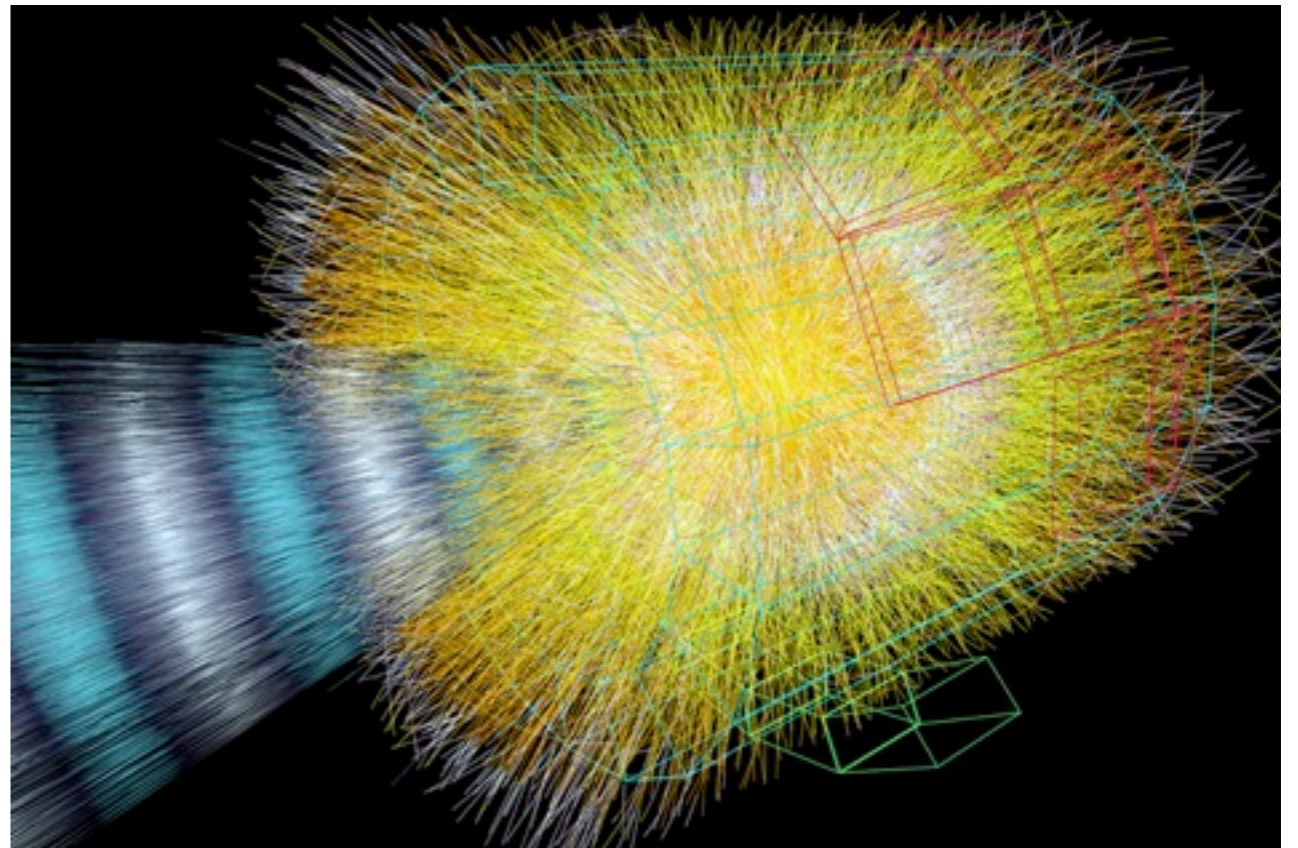
Centralny detektor śladowy

6. ALICE TPC

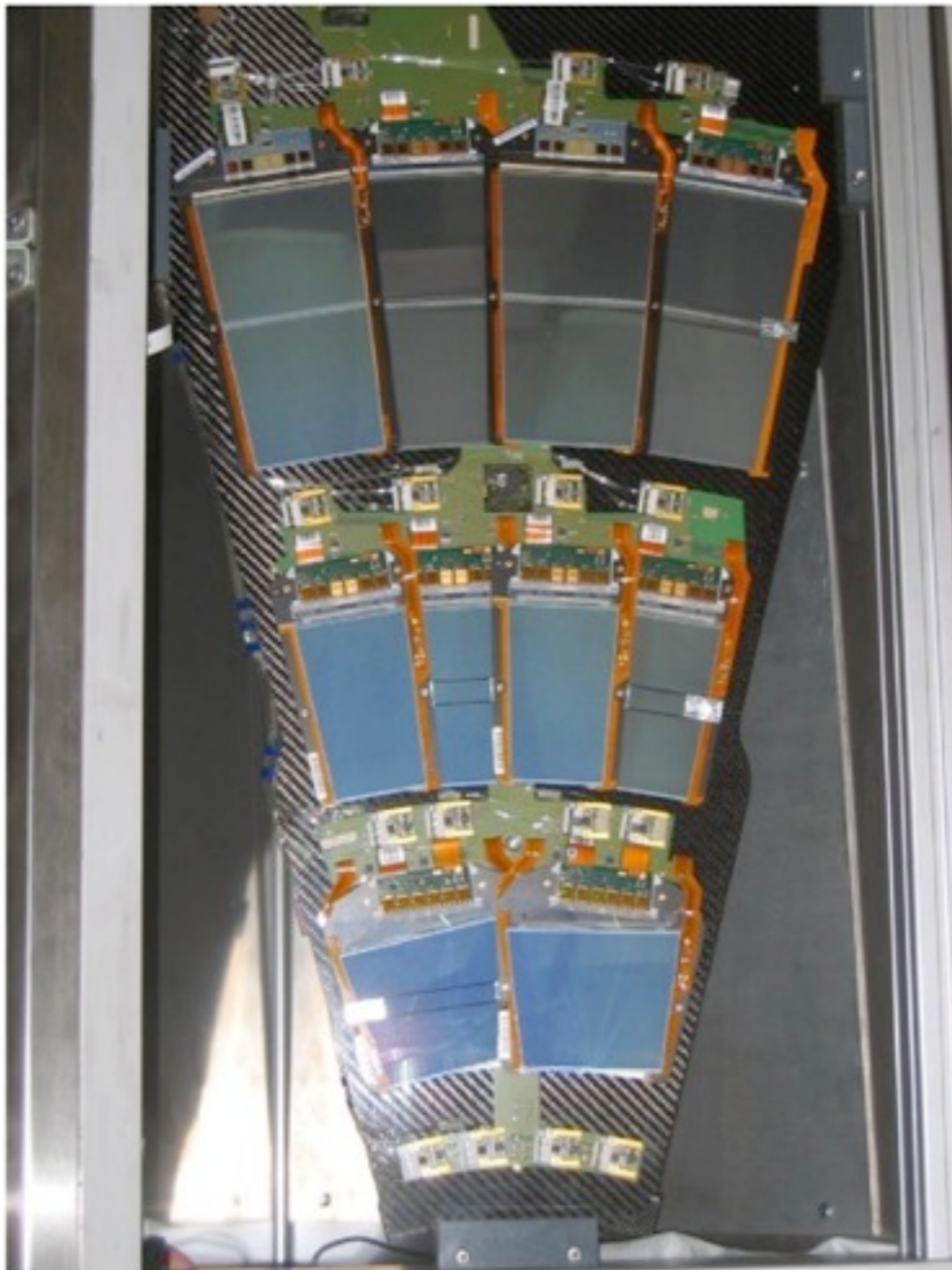


View inside the ALICE TPC

Simulated heavy ion collision in the ALICE TPC.

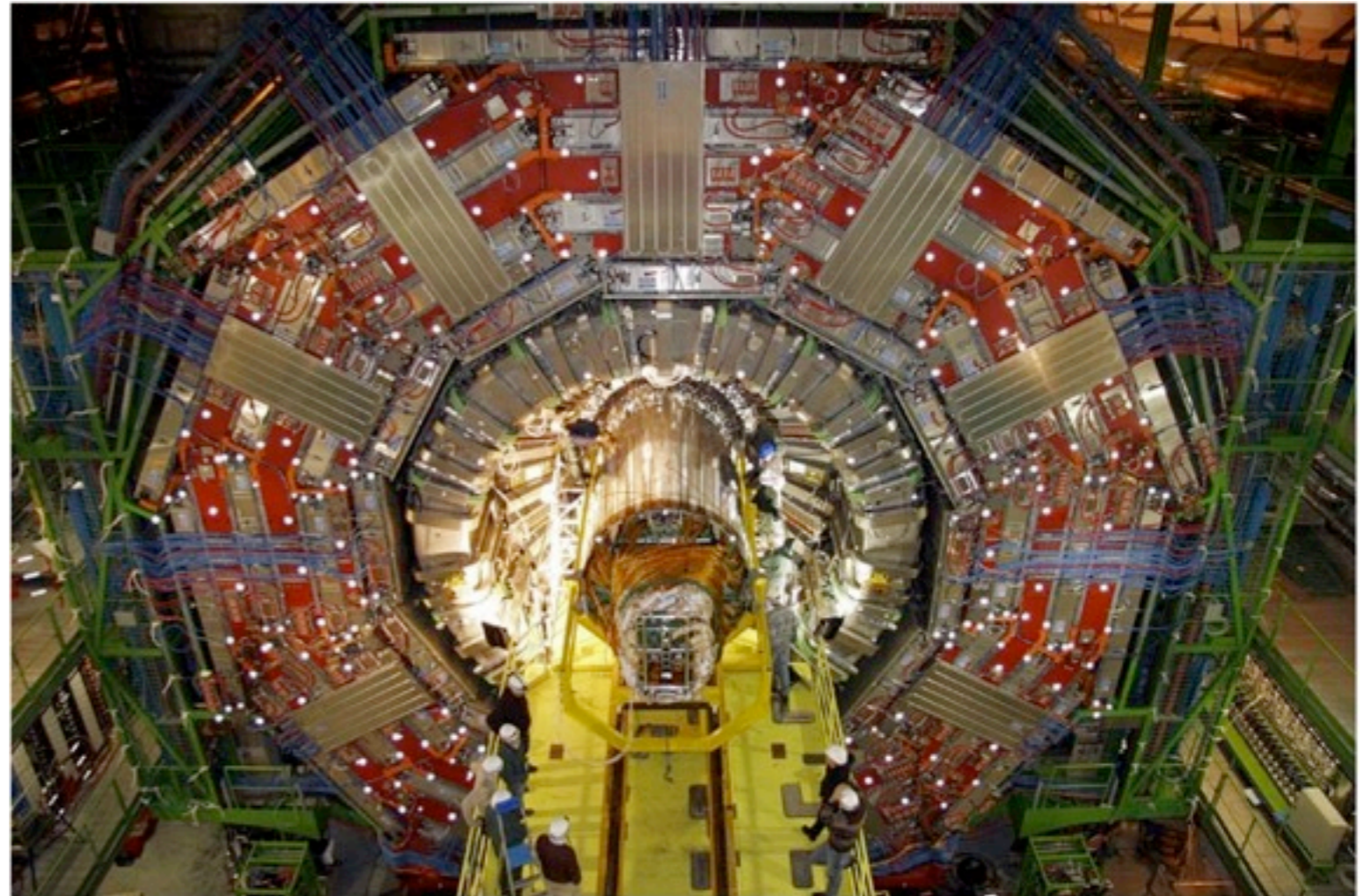


I4. CMS Silicon Tracker



Micro Strip:

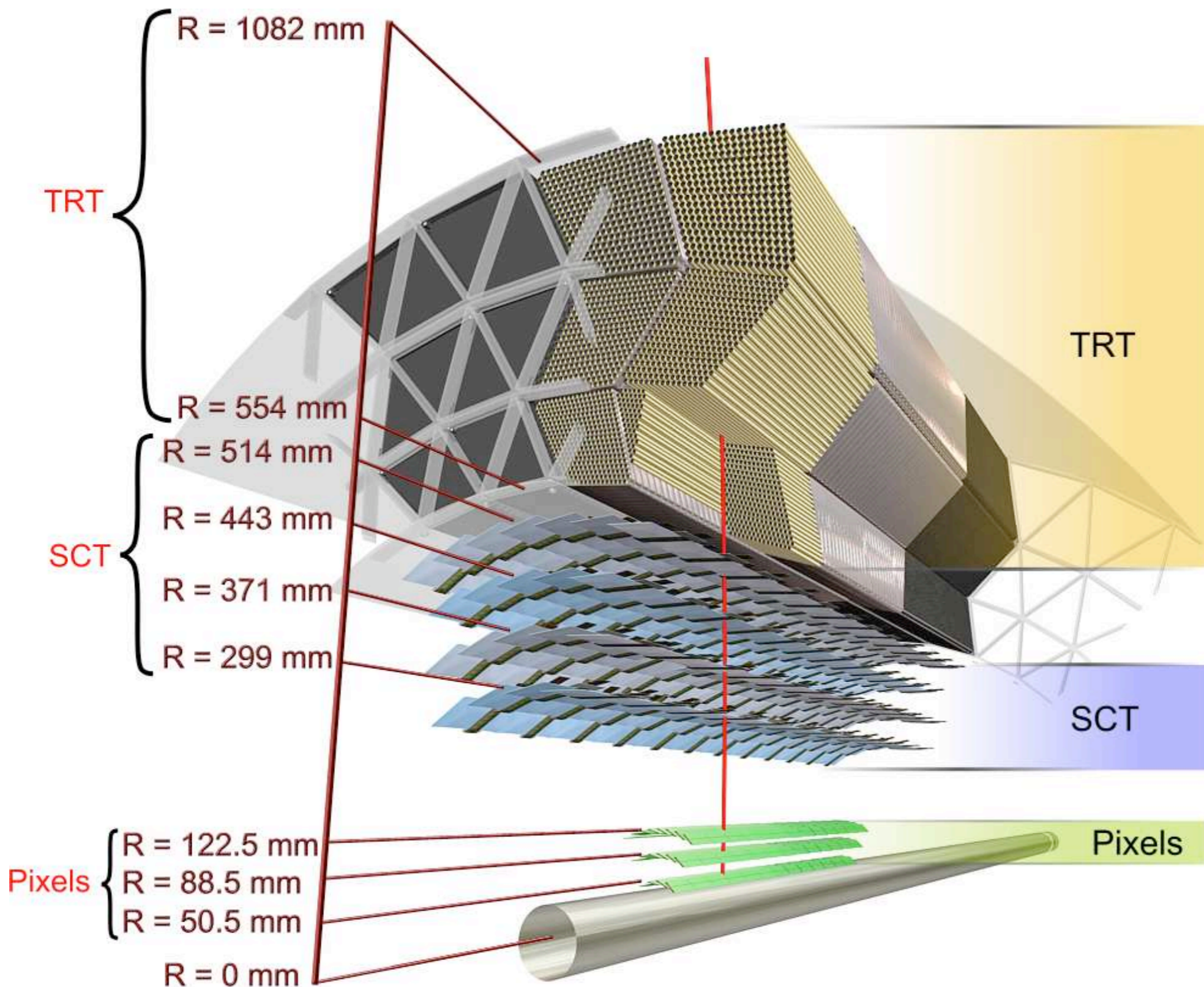
- 214 m² of silicon strip sensors
- 11.4 million strips
- Diameter: 2.4 m



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

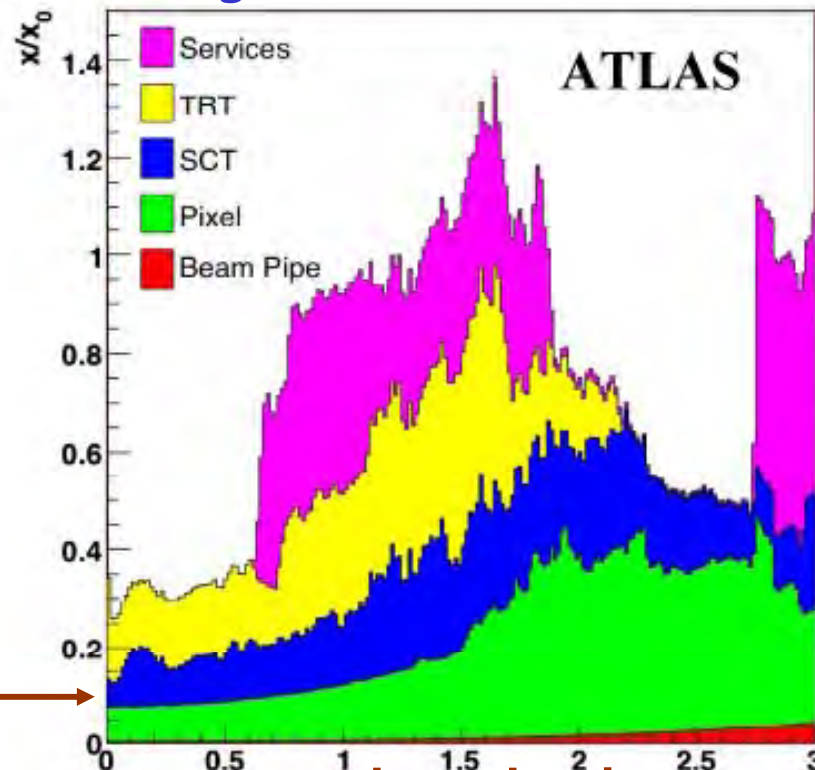
Każda ma swoje **zalety** i **wady**. Wszystko należy uwzględnić:

- + 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)
- + gwielokrotne rozpraszanie/**bilans materiału przed kalorymetrem**

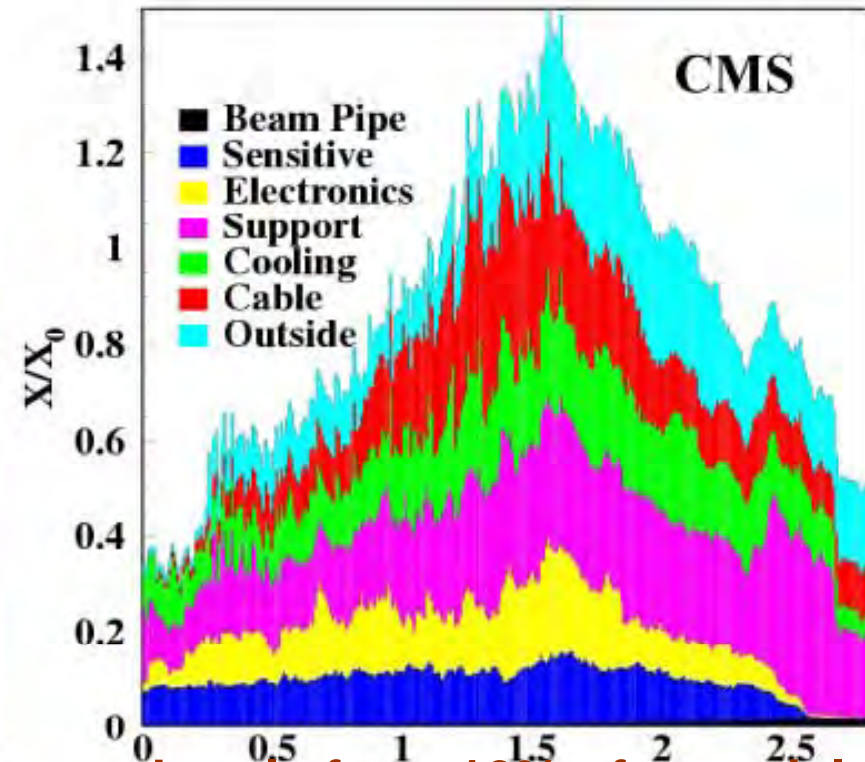
ATLAS/CMS: from design to reality

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

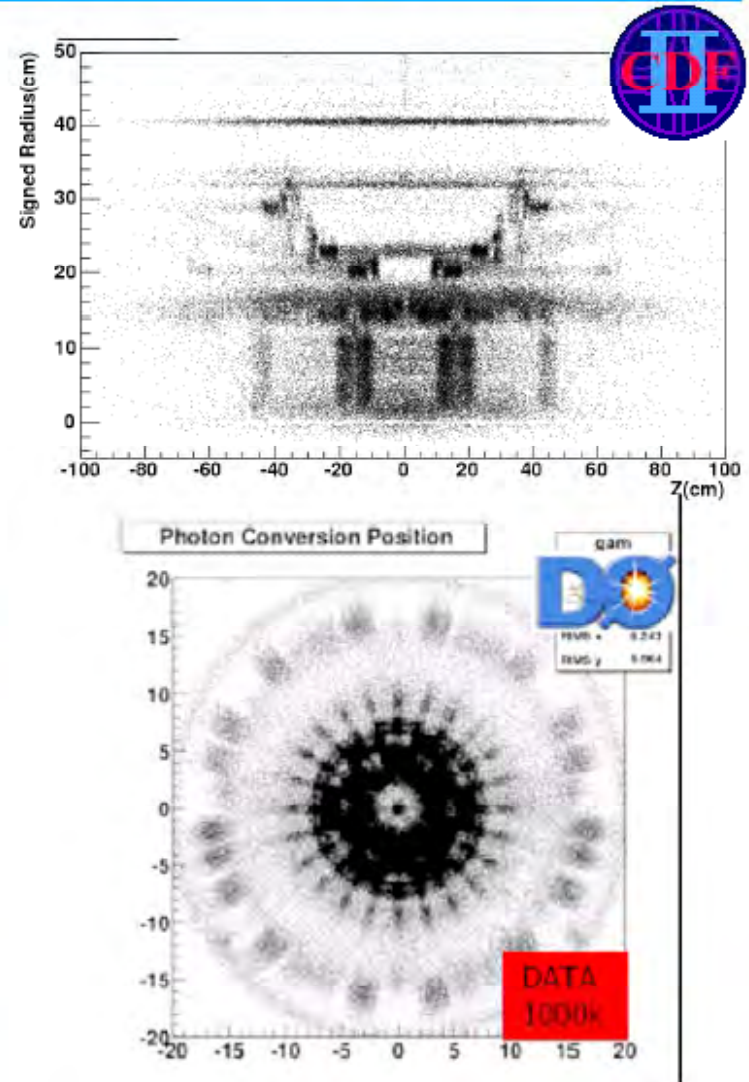
Can lessons be learned from Tevatron?



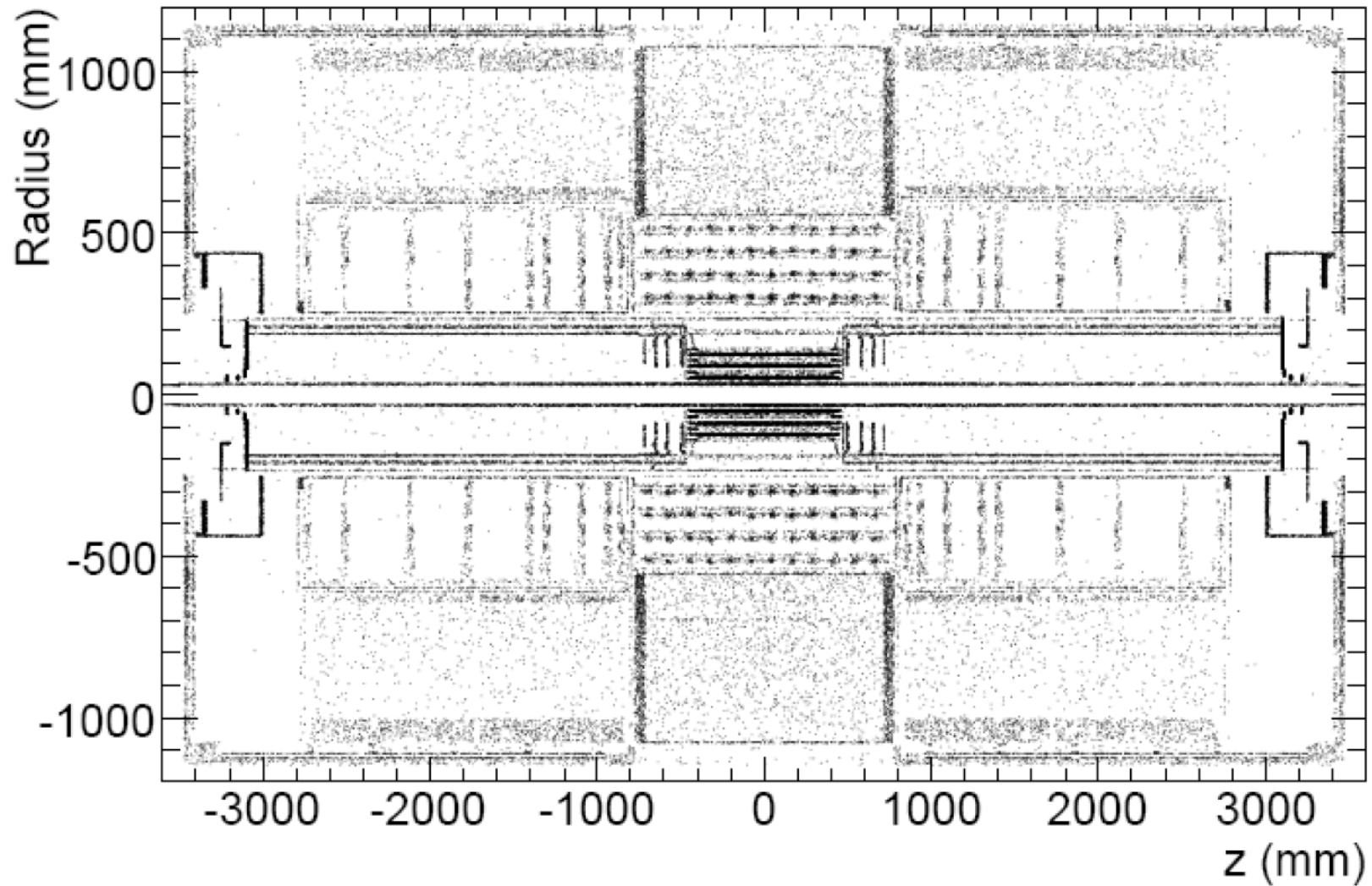
Material: X-raying the detector



- 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

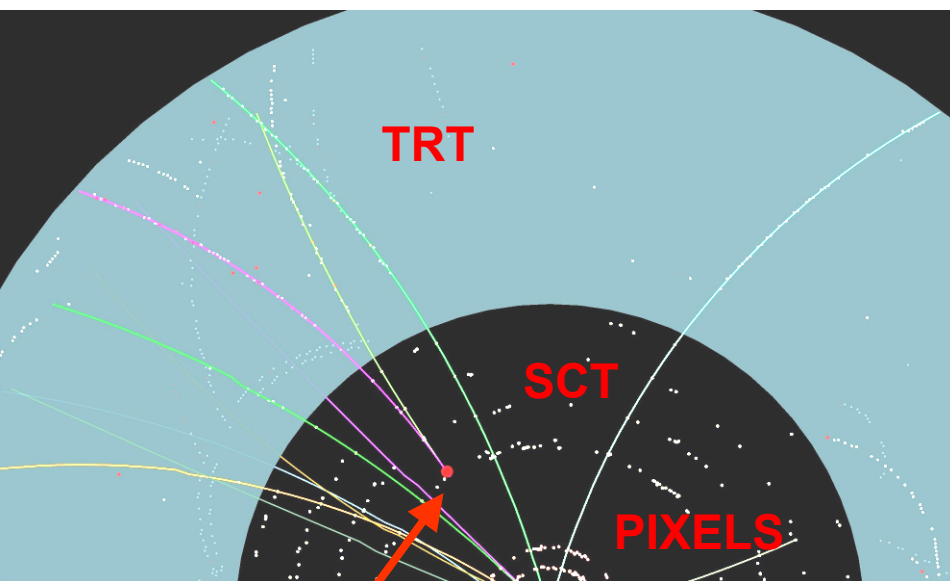




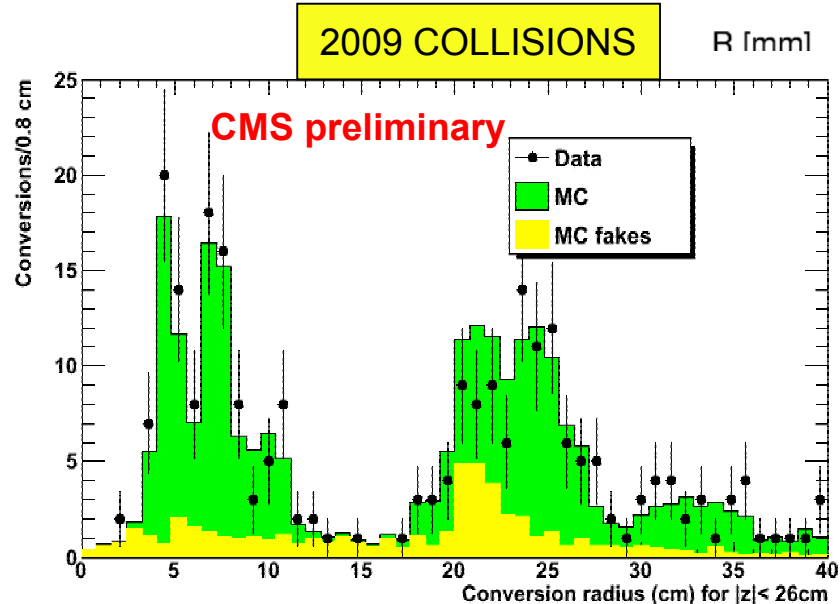
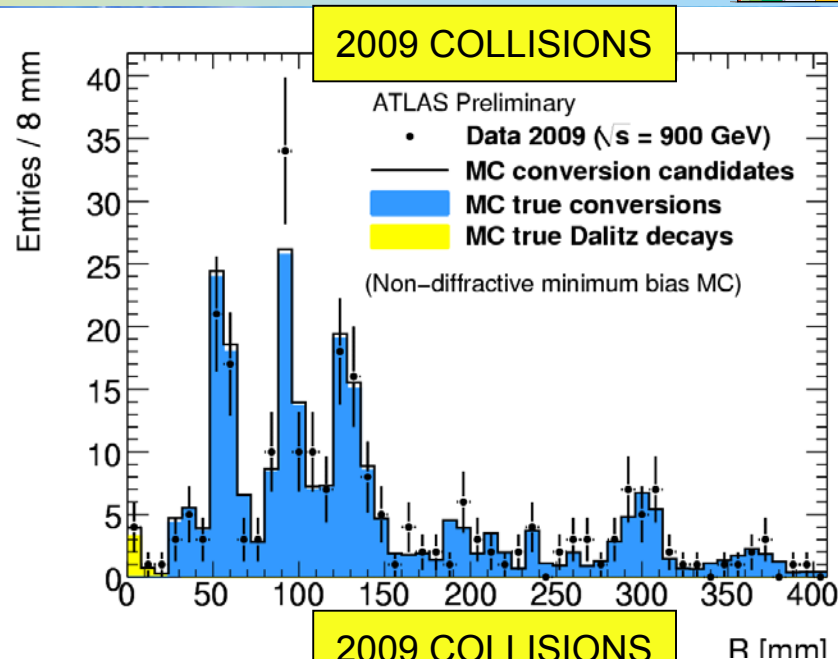
The material budget in front: photon conversions



ATLAS



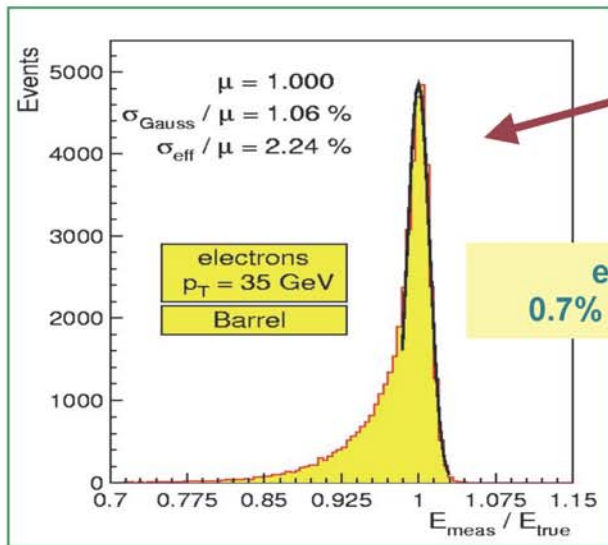
Photon conversion in first Silicon Tracker Layer



Electrons are affected too

Effects of material in front

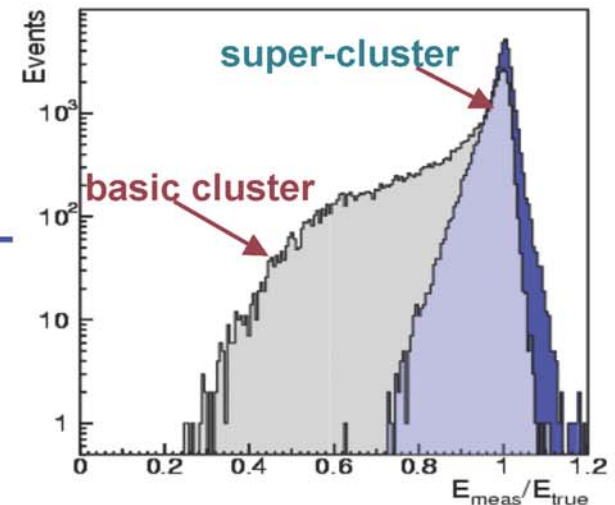
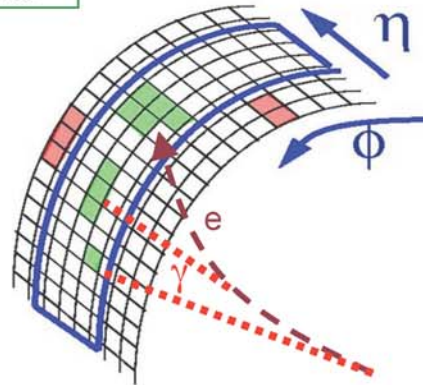
CMS



50% electrons undergo non-negligible bremsstrahlung

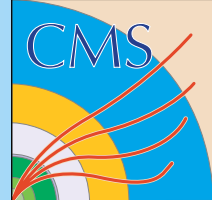
effect on resolution at p_T 35 GeV:
0.7% \rightarrow 1.06% (gauss) \rightarrow 2.2% (effective)

dynamic clustering algorithms (superclusters) can resum photon energies



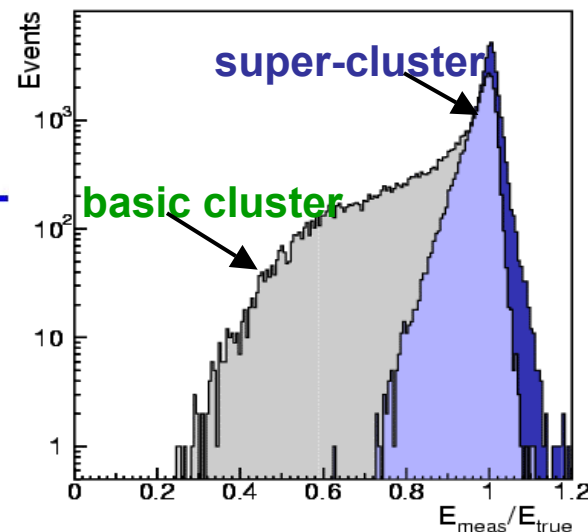
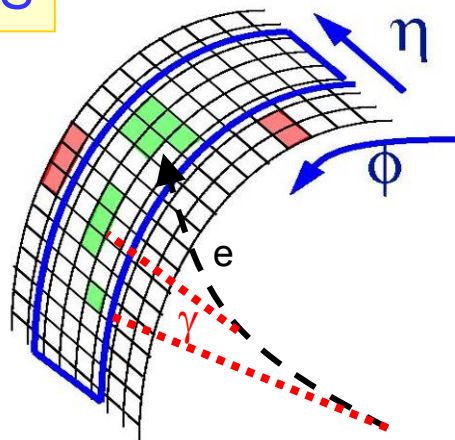
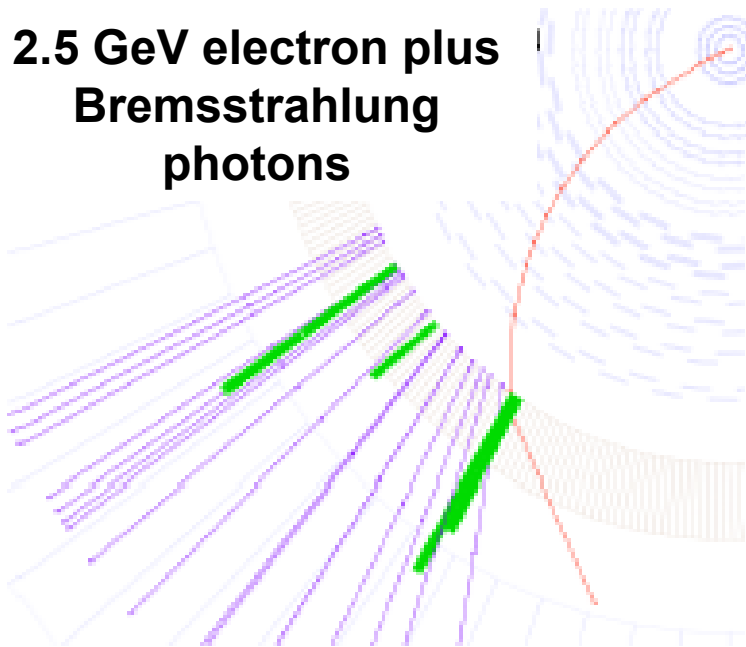


The material budget in front: electron Bremsstrahlung

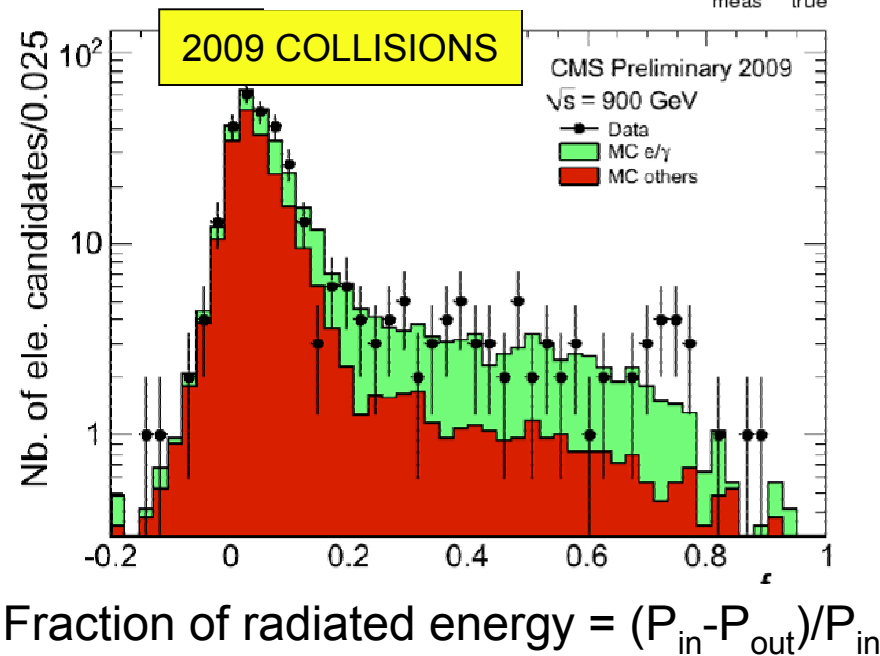


EFFECT on electrons IN CMS

2.5 GeV electron plus
Bremsstrahlung
photons



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



Kalorymetry

Projektując kalorymetr chcielibyśmy zoptymalizować:

- dokładność pomiaru energii (w rozważanym zakresie)
- dokładność rekonstrukcji pozycji (pęd poprzeczny, matching toru)
- możliwość pomiaru kierunku i/lub czasu
- możliwość rekonstrukcji profilu kaskady (identyfikacja)

Niestety nie można wszystkich tych parametrów polepszyć jednocześnie

Pomiar energii: kalorymetr jednorodny, minimalna segmentacji

Pomiar pozycji: duża segmentacja poprzeczna

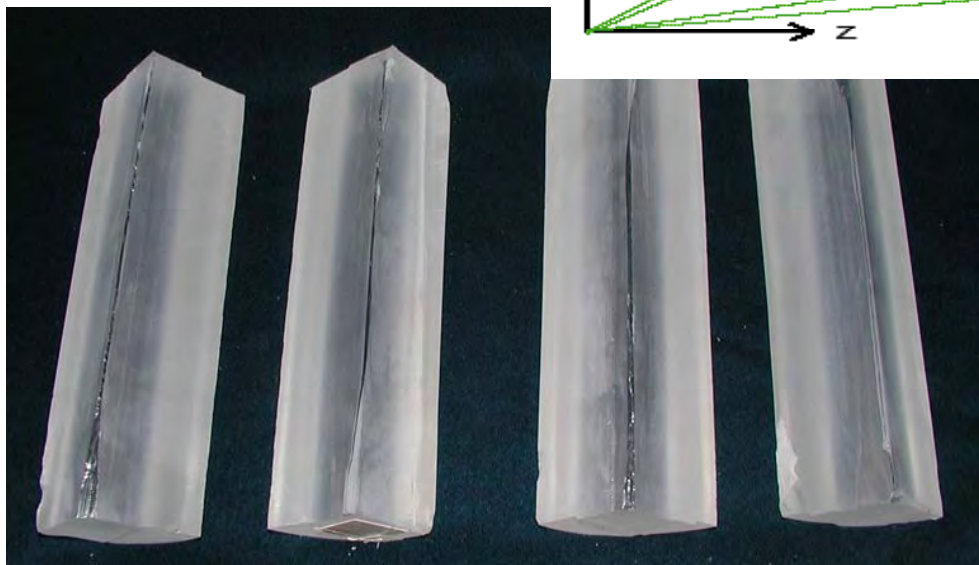
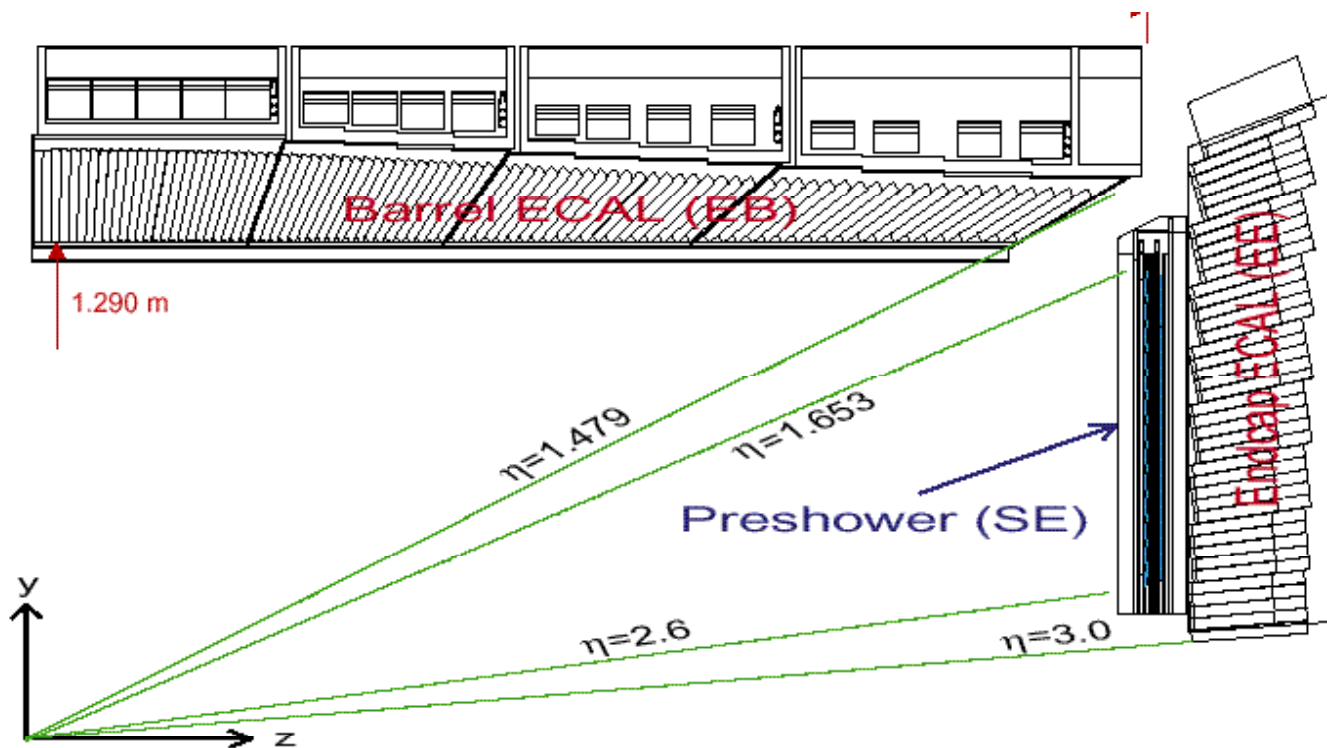
Pomiar kierunku i profilu kaskady: duża segmentacja podłużna

Trzeba optymalizować pod kątem fizyki: procesy "wzorcowe"

Koszt ogranicza wybór materiałów, rozmiary i liczbę kanałów...

Electrons and photons in ATLAS/CMS

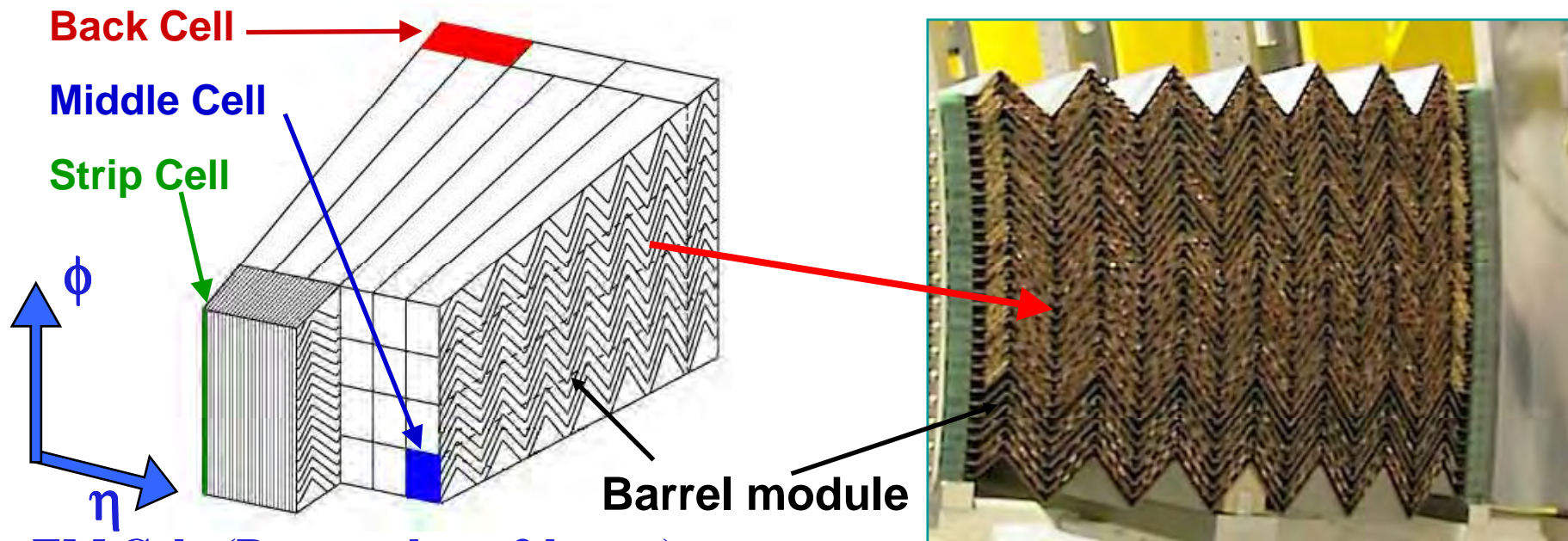
**CMS PbWO₄
crystal
calorimeter**



- Barrel: 62k crystals 2.2 x 2.2 x 23 cm
- End-caps: 15k crystals 3 x 3 x 22 cm

Electrons and photons in ATLAS/CMS

ATLAS LAr EM Calorimeter description



EM Calo (Presampler + 3 layers):

- **Presampler** 0.025×0.1 ($\eta \times \phi$)
⇒ *Energy lost in upstream material*
- **Strips** 0.003×0.1 ($\eta \times \phi$)
⇒ *optimal separation of showers in non-bending plane, pointing*
- **Middle** 0.025×0.025 ($\eta \times \phi$)
⇒ *Cluster seeds*
- **Back** 0.05×0.025 ($\eta \times \phi$)
⇒ *Longitudinal leakage*

- LAr-Pb sampling calorimeter (barrel)
- Accordion shaped electrodes
- Fine longitudinal and transverse segmentation
- EM showers (for e^\pm and photons) are reconstructed using calorimeter cell-clustering

LHC benchmark: SM $H \rightarrow \gamma\gamma$

- 1) Irreducible background from $qq \rightarrow \gamma\gamma$ and $gg \rightarrow \gamma\gamma$ (box)
- 2) Reducible background from $\pi^0, \eta (\rightarrow \gamma\gamma)$ in jet fragmentation:
 - final states with many photons \rightarrow look for single photons
 - non-isolated photons inside jets \rightarrow look for isolated photons
 - Very difficult problem: at $p_T \approx 50$ GeV, jet-jet / $\gamma\gamma \approx 10^7$
 \rightarrow need to reject each jet by a factor 10,000 to bring the reducible background well below the irreducible one
 - However, at $p_T \approx 50$ GeV, $\pi^0/\text{jet} \approx 10^{-3}$
 \rightarrow separate isolated photons from π^0 decays at 50 GeV
 \rightarrow photons from π^0 decays will be distant by ≈ 1 cm
 \rightarrow need granular position detector after $\sim 4-5 \lambda_c$ in

SM $H \rightarrow \gamma\gamma$

Energy resolution

CMS EM calorimeter
(crystals):

$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{3-5\%}{\sqrt{E}}$$

ATLAS EM calorimeter

(liquid-argon/lead sampling calorimeter):

$$\frac{\sigma(E)}{E} \approx \frac{10\%}{\sqrt{E}}$$

Module zero test beam data



Mass resolution

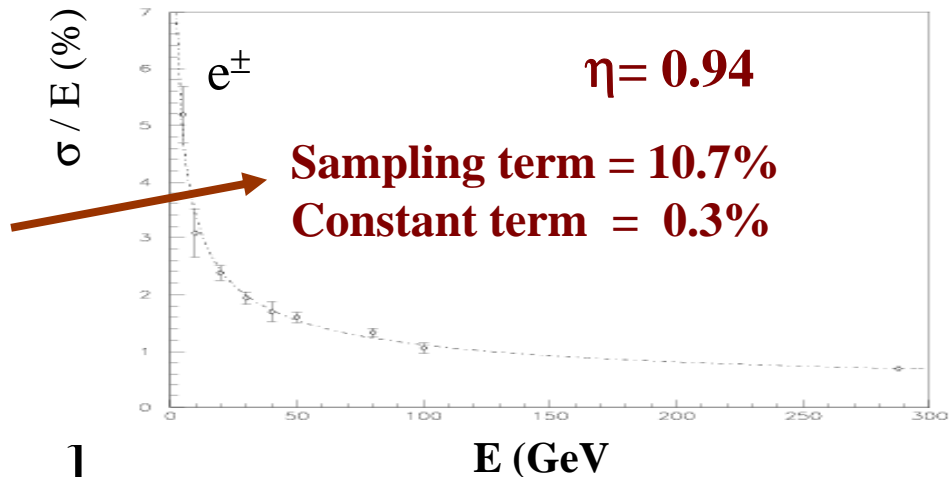
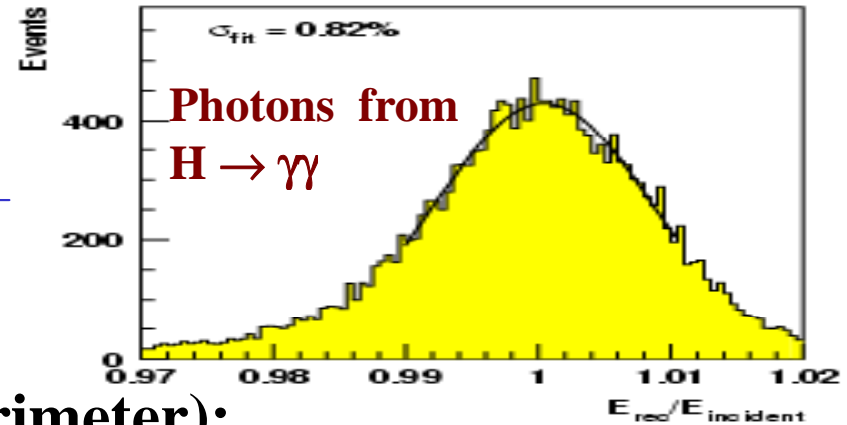
($m_H=100$ GeV, low L):

ATLAS : 1.1 GeV

CMS : 0.6 GeV

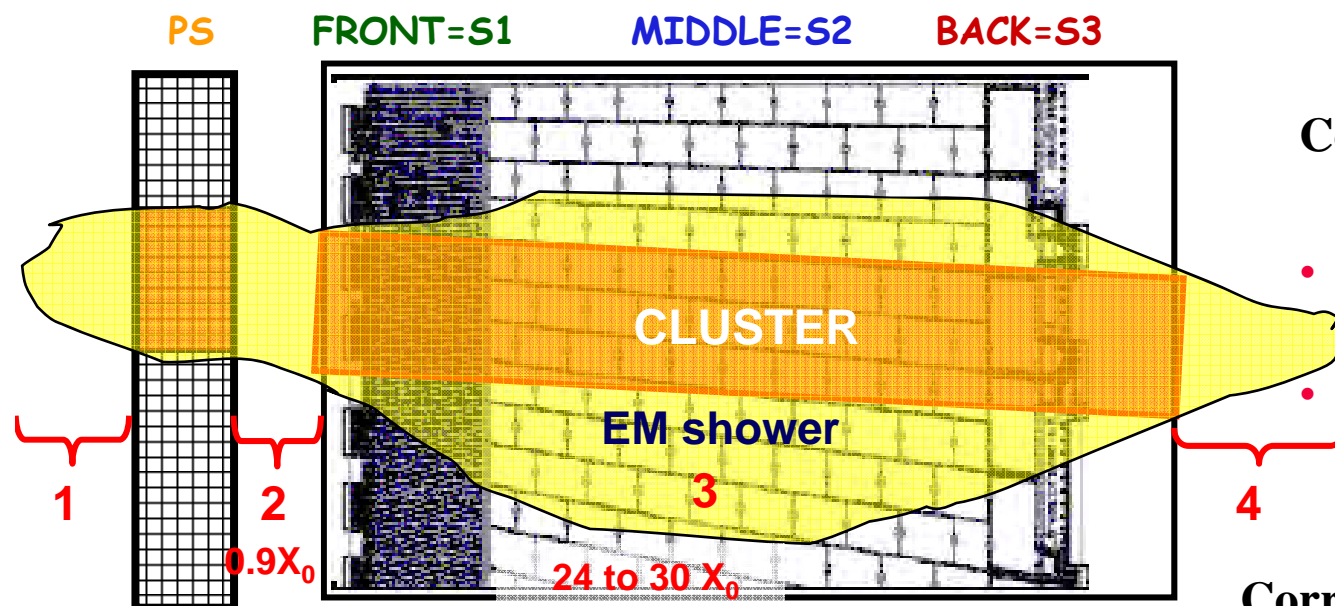
$$\frac{S}{\sqrt{B}} \sim \frac{1}{\sqrt{\sigma_m}}$$

CMS, full simulation high L



Electrons and photons in ATLAS/CMS

ATLAS EM Calorimeter energy reconstruction



Corrections due to cluster position:

- $\Delta\eta$ (S-shape modulation) ± 0.005
- $\Delta\phi$ (offset in accordion) ± 0.001

Corrections for energy losses:

1. Before PS
2. Between PS & Calo
3. Outside cluster: depends on clustering method
4. After calorimeter:
~ Energy in BACK

2-7% overall energy correction
>7% at low energy, high η

Two main clusterization methods:

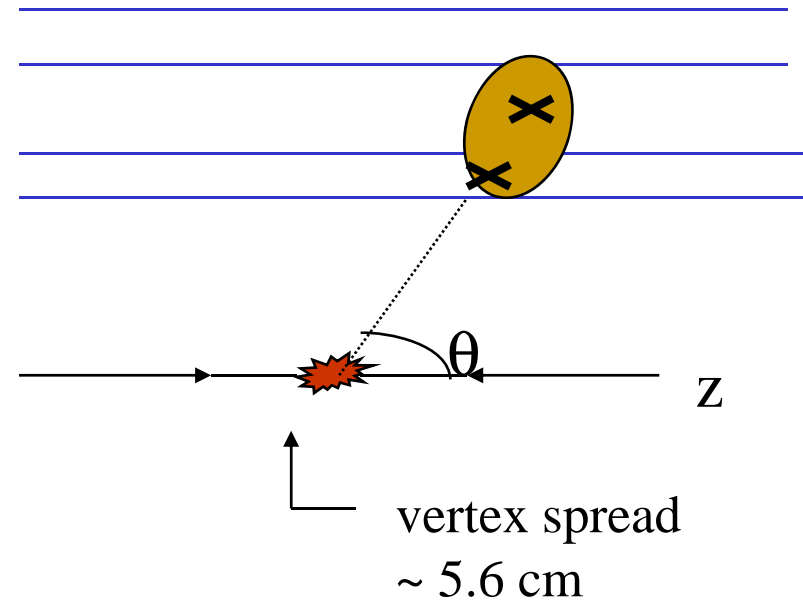
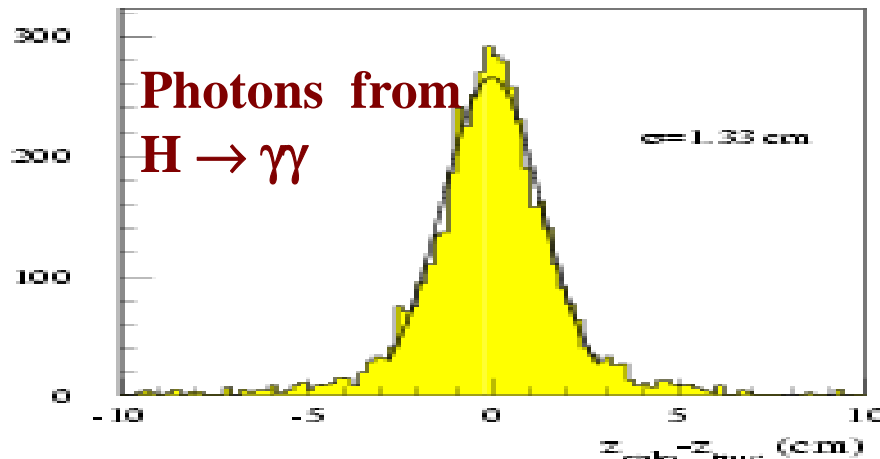
- Fixed size sliding window:
 - 3x3, 3x7... cells, 2nd sampling $\eta \times \phi$;
 - Some energy left out, especially for small sizes.
- Topological clusters:
 - Variable size cluster, minimize noise impact;
 - Additional splitting algorithm is also provided.

SM $H \rightarrow \gamma\gamma$

Angular resolution and acceptance

- ATLAS calorimeter has longitudinal segmentation
→ can measure γ direction

**ATLAS, full simulation
Vertex resolution using EM
calo longitudinal segmentation**



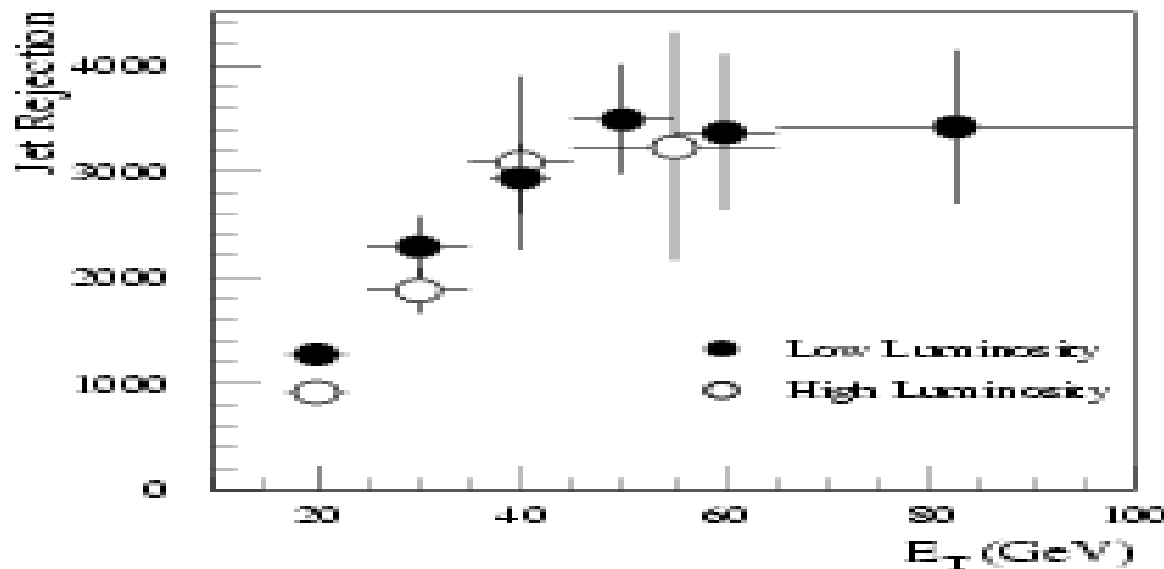
$$\sigma(\theta) \approx \frac{50 \text{ mrad}}{\sqrt{E}}$$

CMS has no longitudinal segmentation (and no preshower in barrel)

- vertex measured using secondary tracks from underlying event
- often pick up the wrong vertex
- smaller acceptance in the Higgs mass window

SM $H \rightarrow \gamma\gamma$

Rejection of QCD jet background



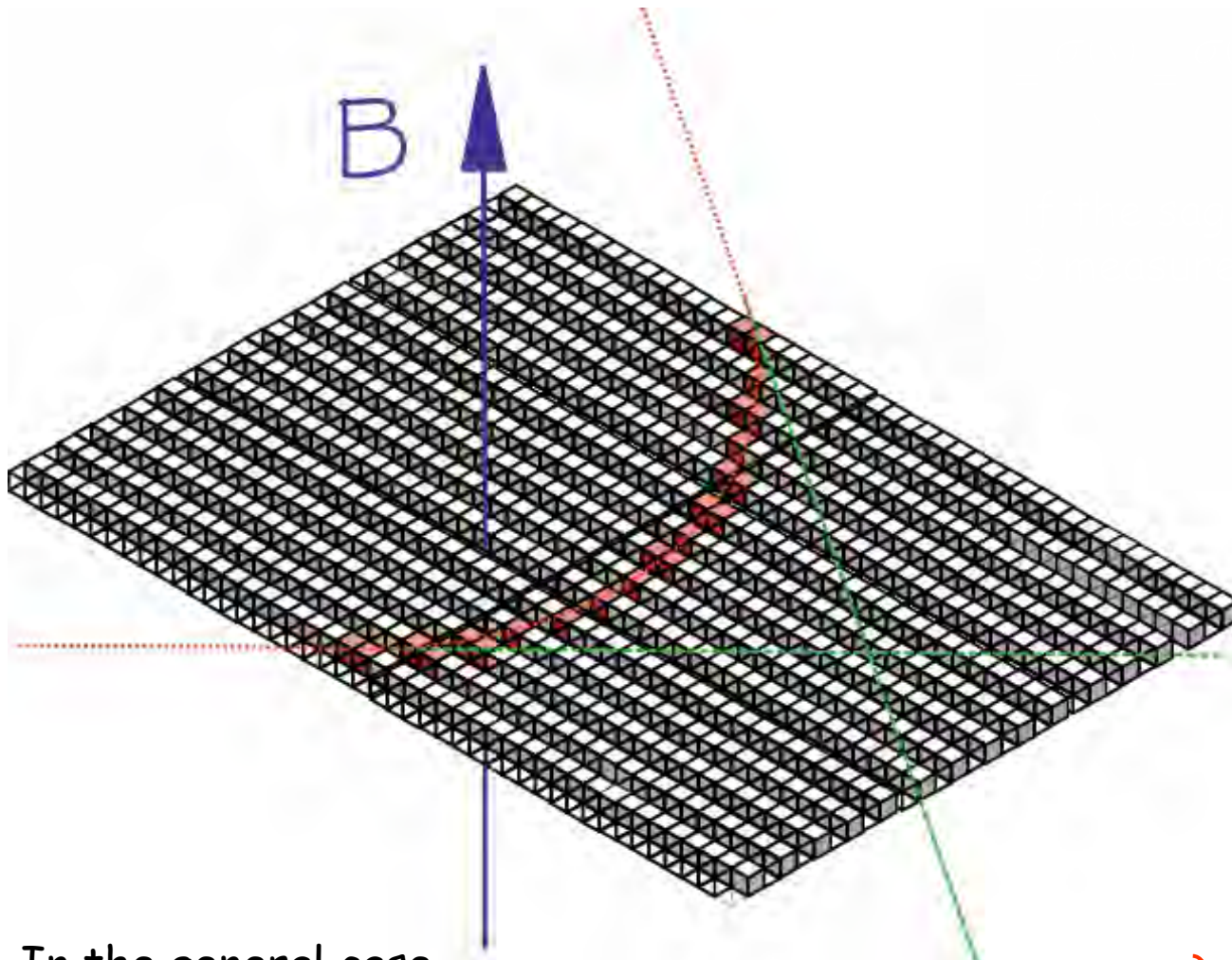
ATLAS EM calo :
full simulation

$$\epsilon_{\gamma} = 80\%$$

Most rejection from longitudinal calo
segmentation and **4 mm η -strips in first
compartment (γ / π^0 separation)**

Spektrometr mionowy

Error in momentum measurement



In the general case,
for N equidistant measurements:

$$\left. \frac{\sigma(p_{\perp})}{p_{\perp}} \right|_{\text{measured}} = \frac{1}{0.3} \frac{\sigma(x) \cdot p_{\perp}}{BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

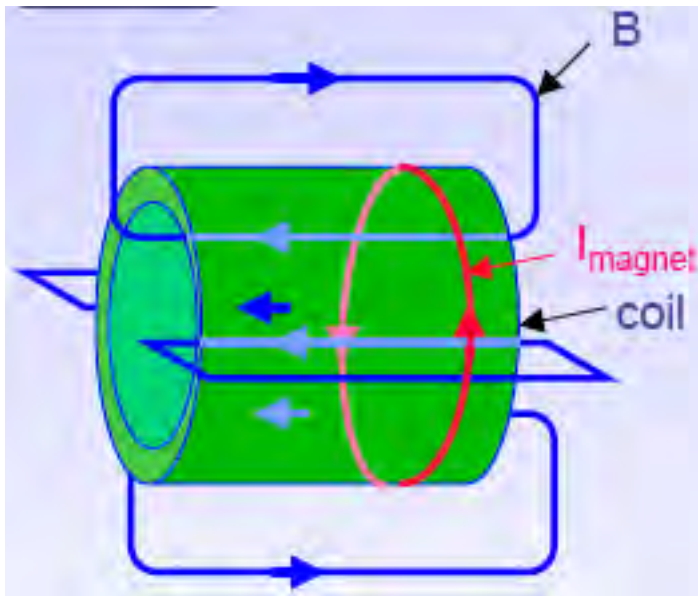
for $N \geq \sim 10$

In short $\frac{\sigma(p_{\perp})}{p_{\perp}^2} = \text{const.}$

Magnets for 4π Detectors

Solenoid

- + Large homogeneous field inside
- Weak opposite field in return yoke
- Size limited by cost
- Relatively large material budget

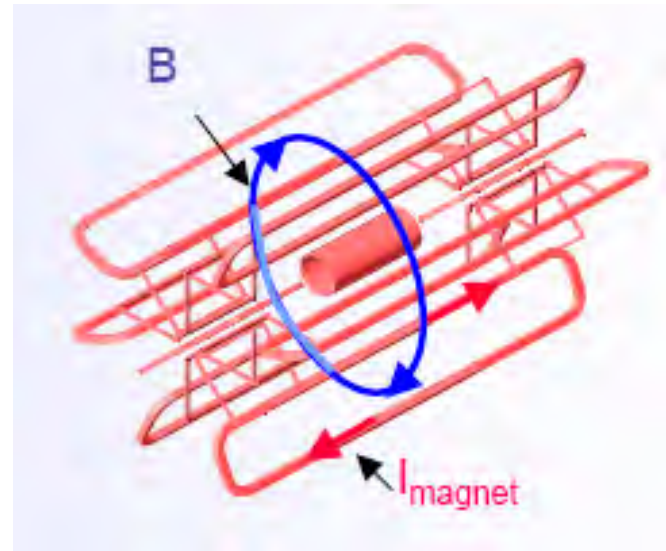


Examples:

- Delphi: SC, 1.2 T, 5.2 m, L 7.4 m
- CDF: SC, 1.4T, 2 m, L 6m
- CMS: SC, 4 T, 5.9 m, L 12.5 m

Toroid

- + Field always perpendicular to p
- + Rel. large fields over large volume
- + Rel. low material budget
- Non-uniform field
- Complex structural design

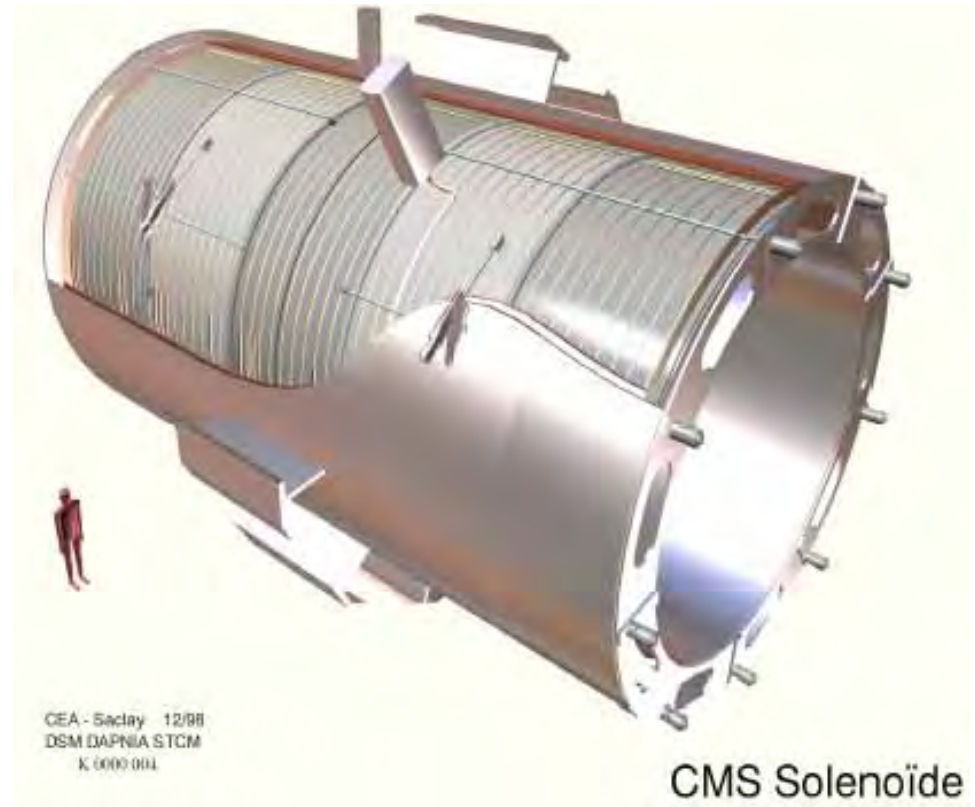


Example:

- ATLAS: Barrel air toroid, SC, ~1 T, 9.4 m, L 24.3 m

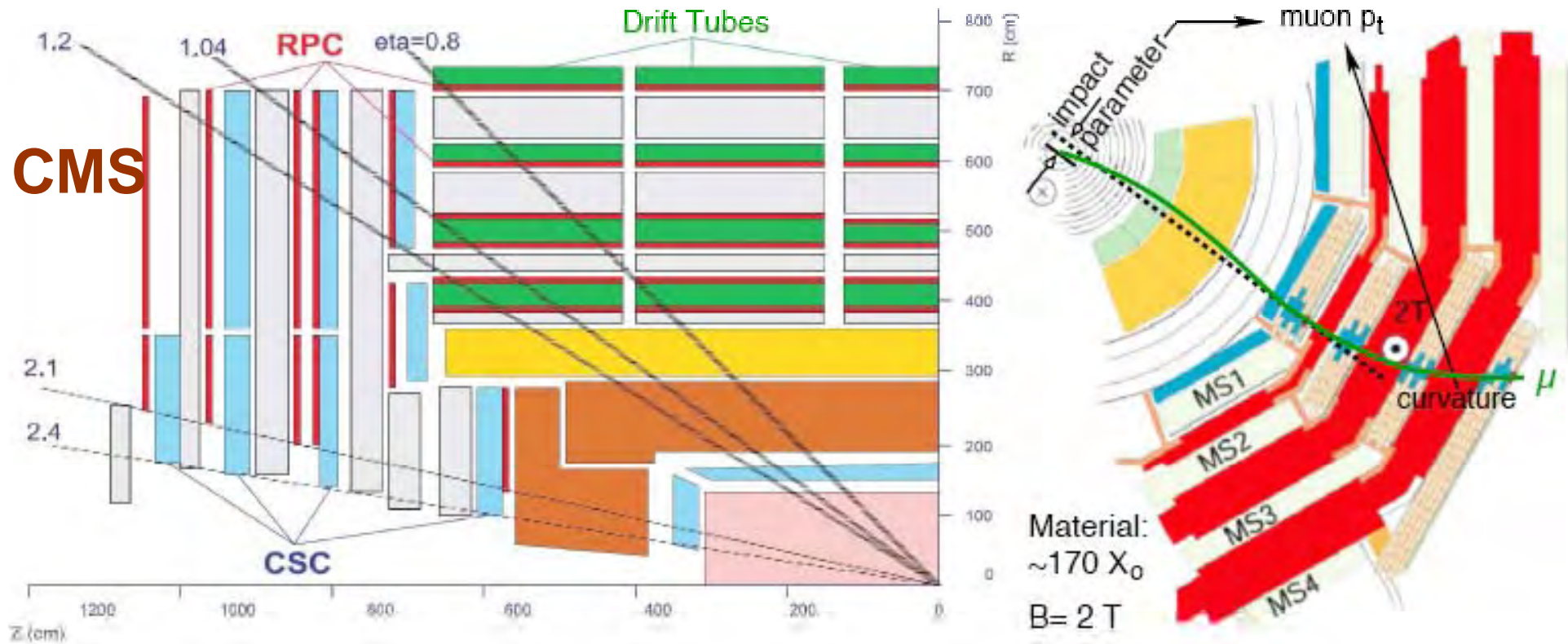
Charge and Momentum

Two ATLAS toroid coils



Superconducting CMS Solenoid Design

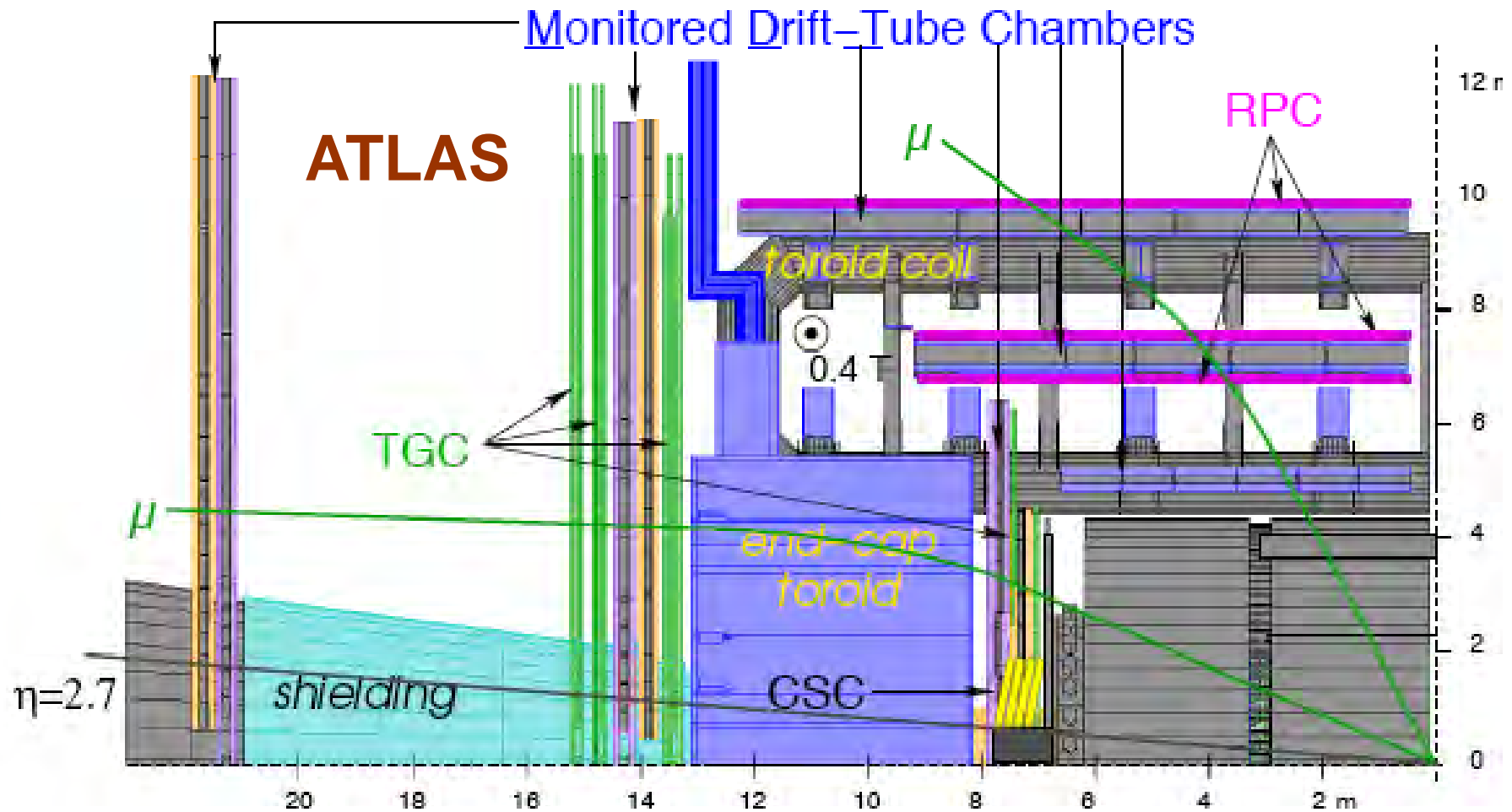
ATLAS/CMS: muon measurements



CMS muon spectrometer

- Superior combined momentum resolution in central region
- Limited stand-alone resolution and trigger (at very high luminosities) due to multiple scattering in iron
- Degraded overall resolution in the forward regions ($|\eta| > 2.0$) where solenoid bending power becomes insufficient

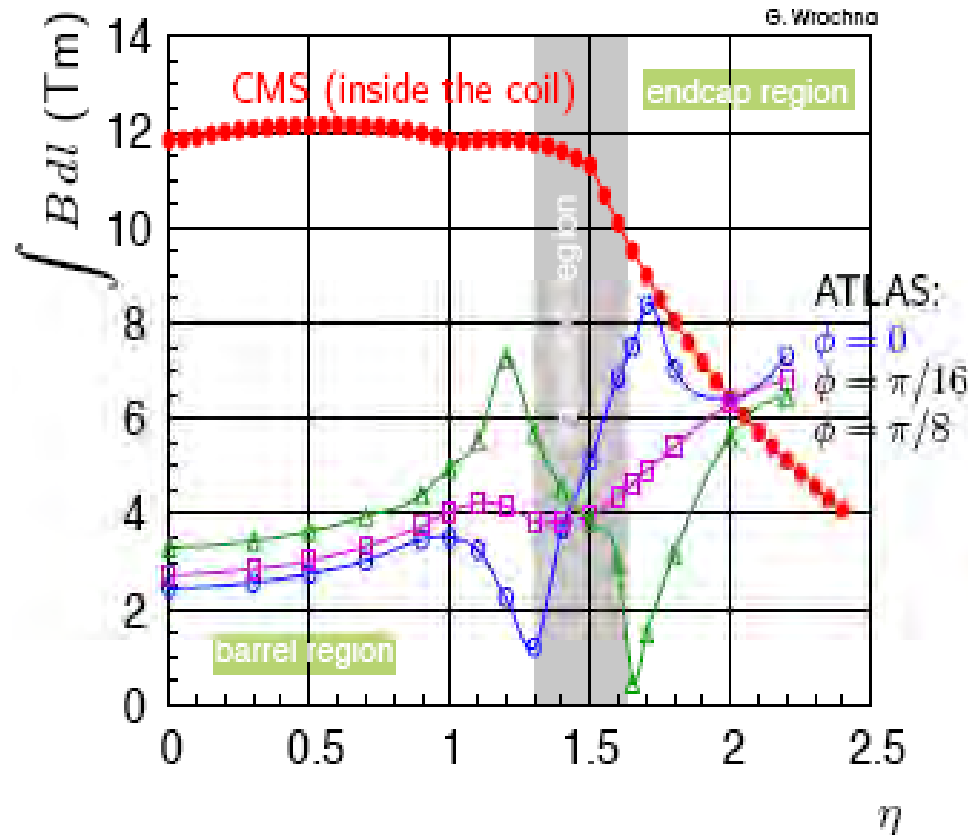
ATLAS/CMS: muon measurements



ATLAS muon spectrometer

- Excellent stand-alone capabilities and coverage in open geometry
- Complicated geometry and field configuration (large fluctuations in acceptance and performance over full potential $\eta \times \phi$ coverage ($|\eta| < 2.7$))

ATLAS/CMS: muon measurements



Barrel: $\approx 5\times$ higher bending power in CMS, **but** $\approx 14\times$ larger multiple scattering.

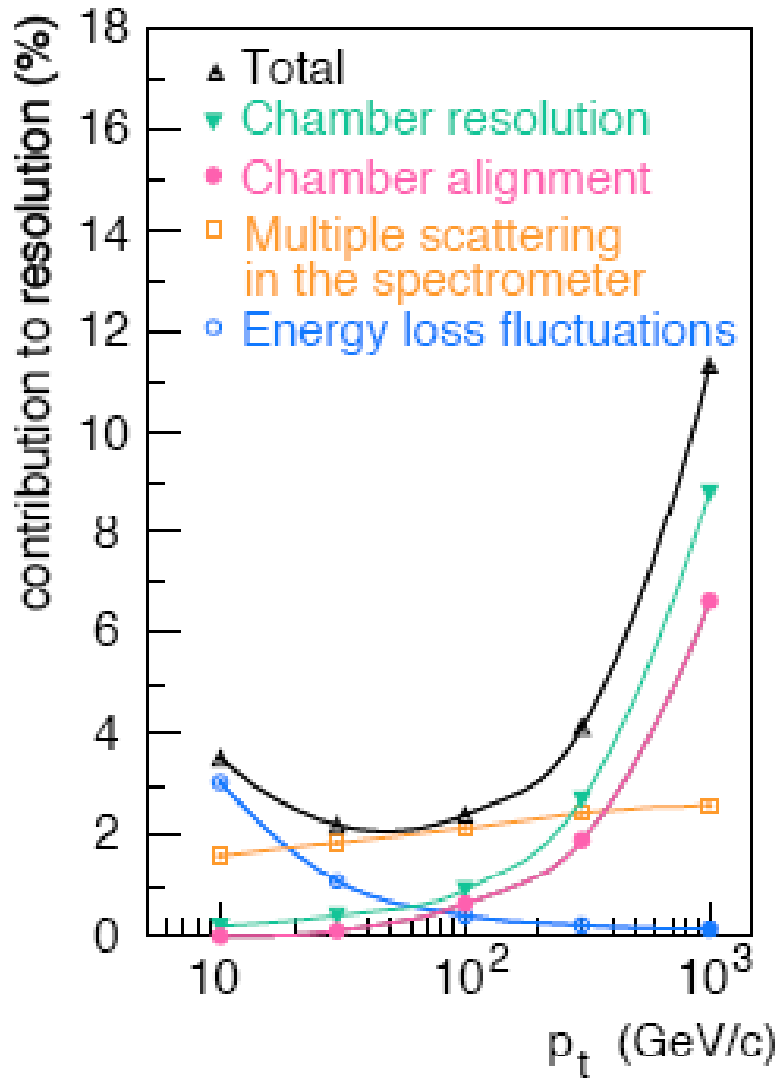
$\rightarrow \approx 3\times$ worse p_t resolution in CMS.

Endcap: similar bending powers, $\approx 10\times$ large multiple scattering.

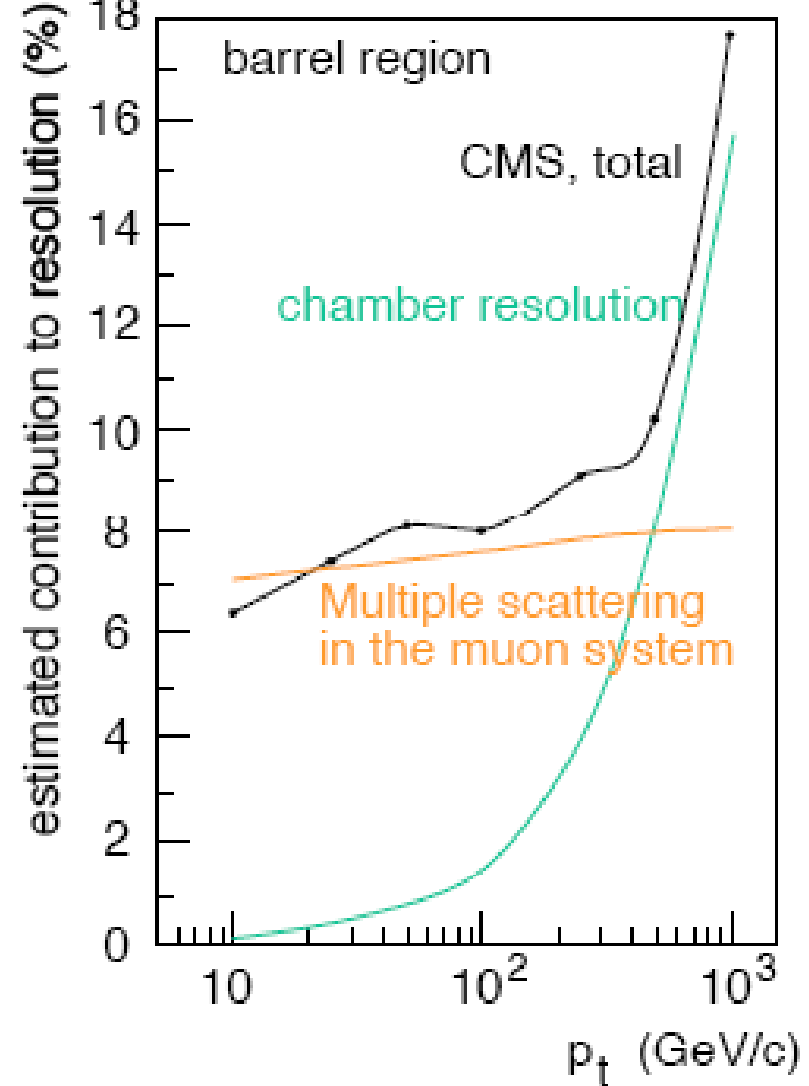
$\rightarrow \approx 5\times$ worse p_t resolution in CMS.

ATLAS/CMS: muon measurements

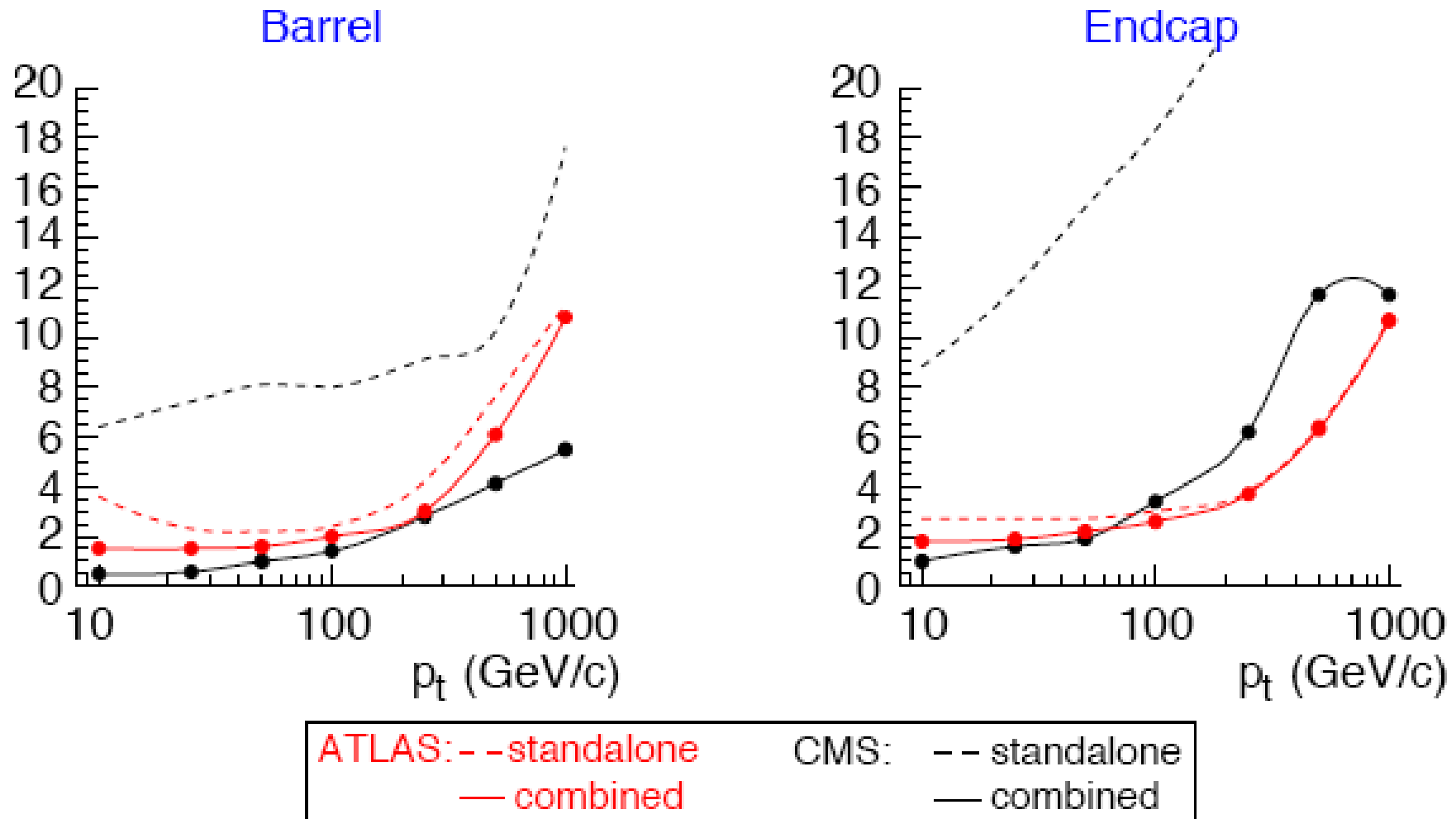
ATLAS barrel standalone



CMS barrel standalone



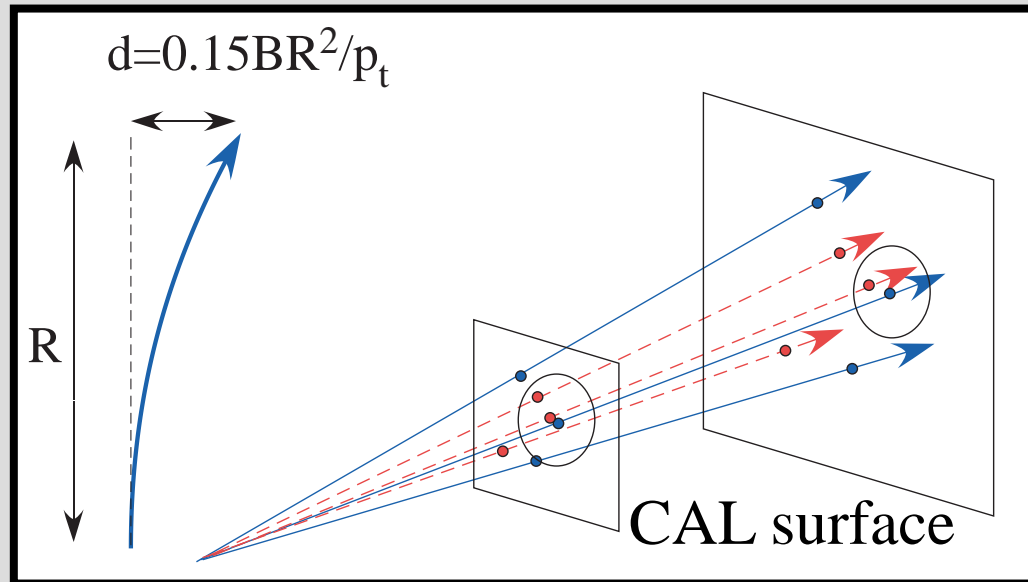
ATLAS/CMS: muon measurements



Optymalizacja pomiaru energii jetów

Particle Flow Algorithm

- In order to get good energy resolution by PFA, separation of particles is important. → Reduce the density of charged and neutral particles at calorimeter surface.



Often quoted “Figure of Merit”

$$\frac{BR^2}{\sqrt{\sigma^2 + R_M^2}}$$

B : Magnetic field

R : CAL inner radius

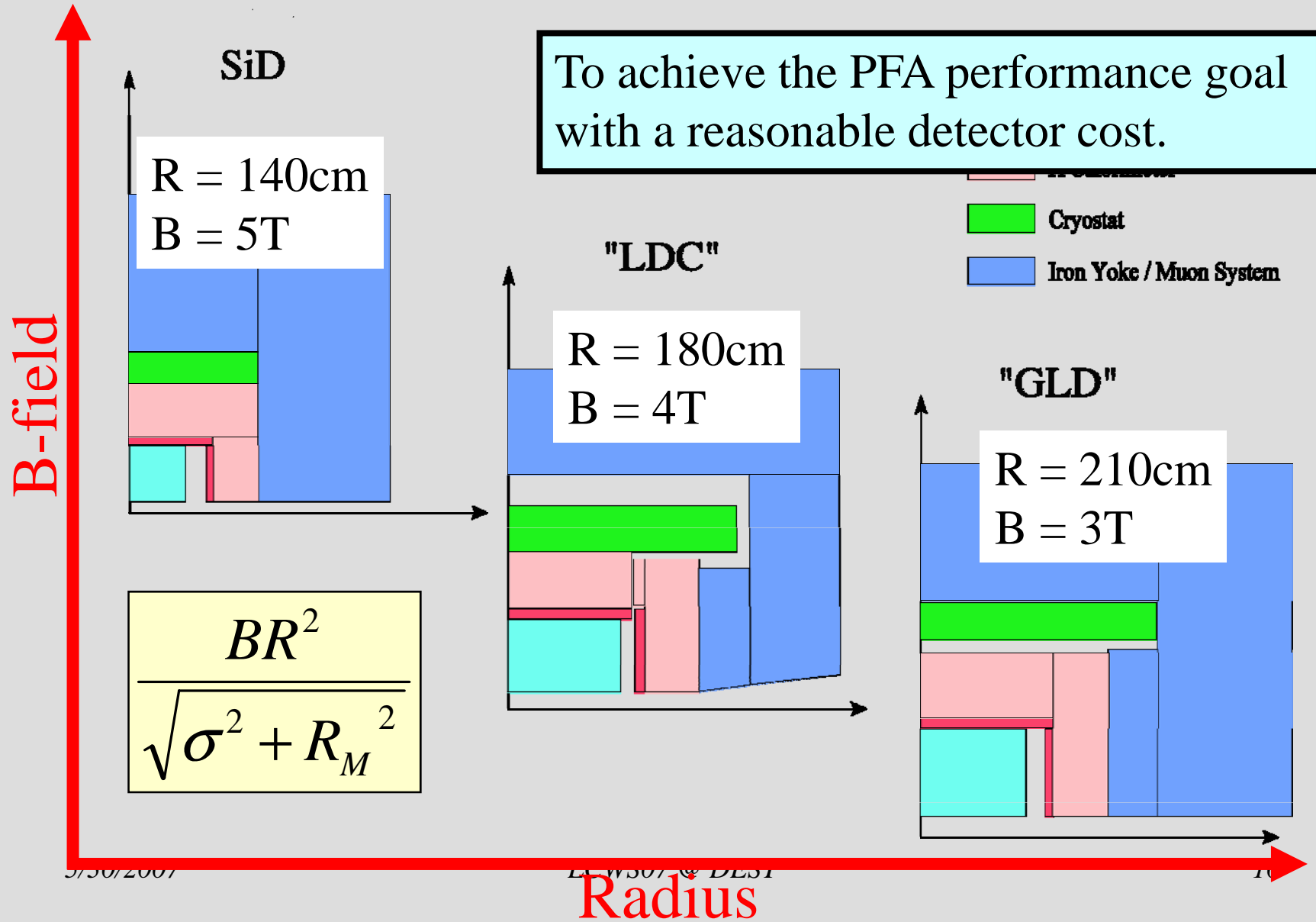
σ : CAL granularity

R_M : Effective Moliere length

- For transverse separation of particles at the ECAL surface, stronger B-field and/or large ECAL radius are preferable.

* Fine segmentation of CAL is also important for pattern recognition.

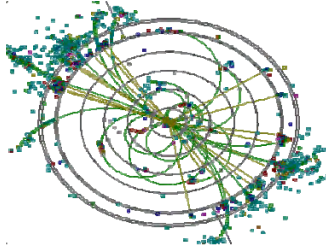
Radius vs. B-field



Optymalizacja detektora

Decydujące znaczenie mają, niestety, pieniądze...

Na przykładzie projektu SiD dla ILC.



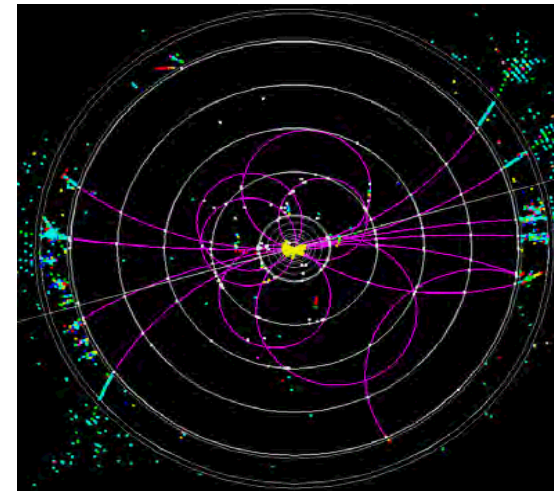
SiD (the Silicon Detector)

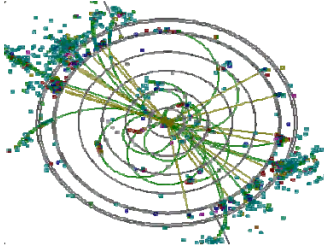


CALORIMETRY IS THE STARTING POINT IN THE SiD DESIGN

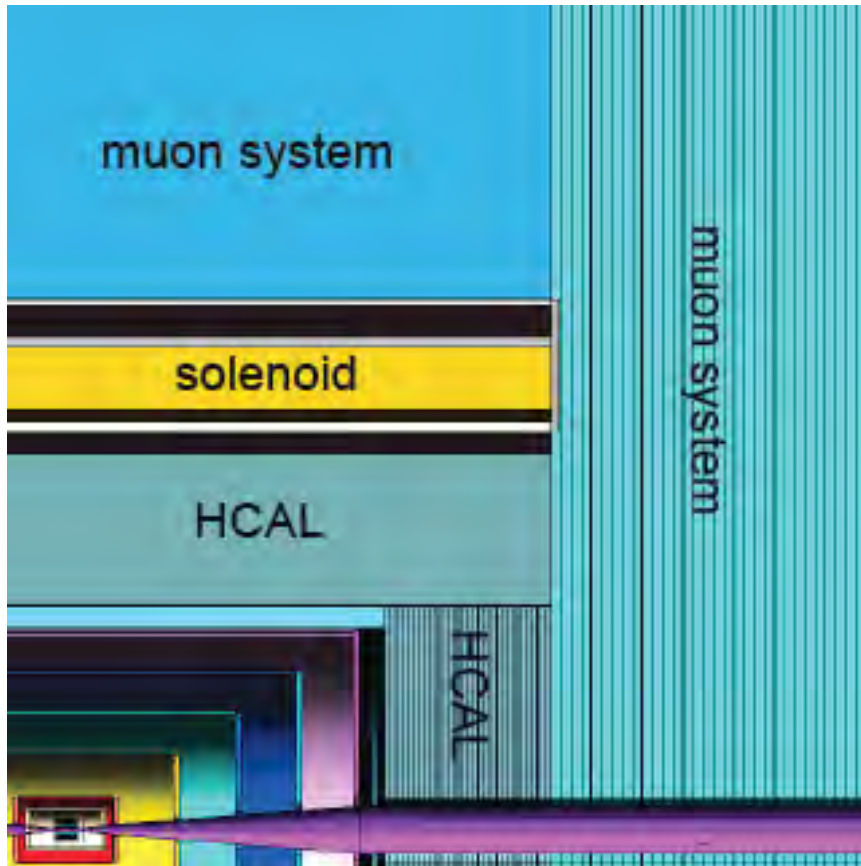
assumptions

- Particle Flow Calorimetry will result in the best possible performance
- Silicon/tungsten is the best approach for the EM calorimeter
- Silicon tracking delivers excellent resolution in smaller volume
- Large B field desirable to contain electron-positron pairs in beamline
- Cost is constrained

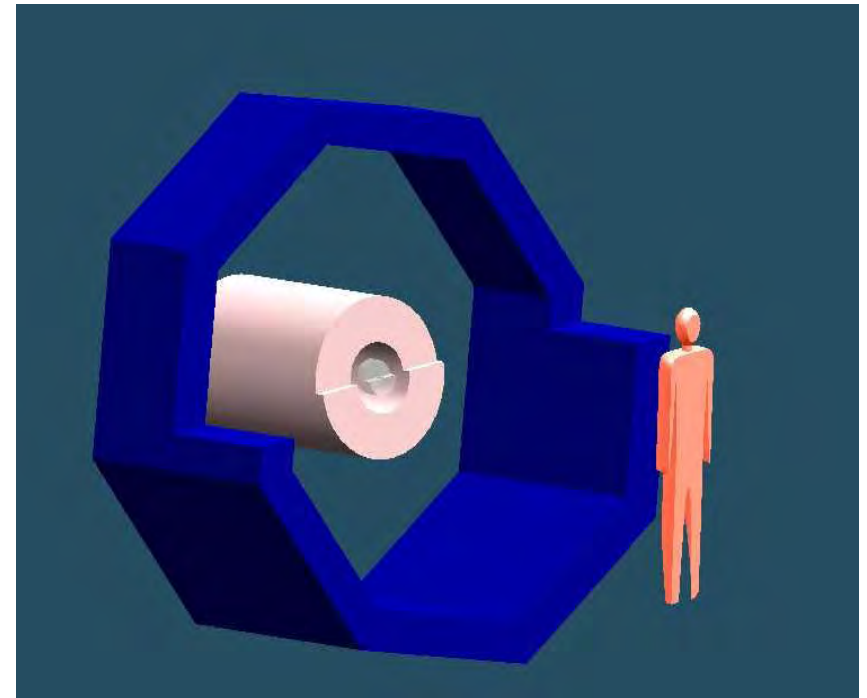




SiD Configuration



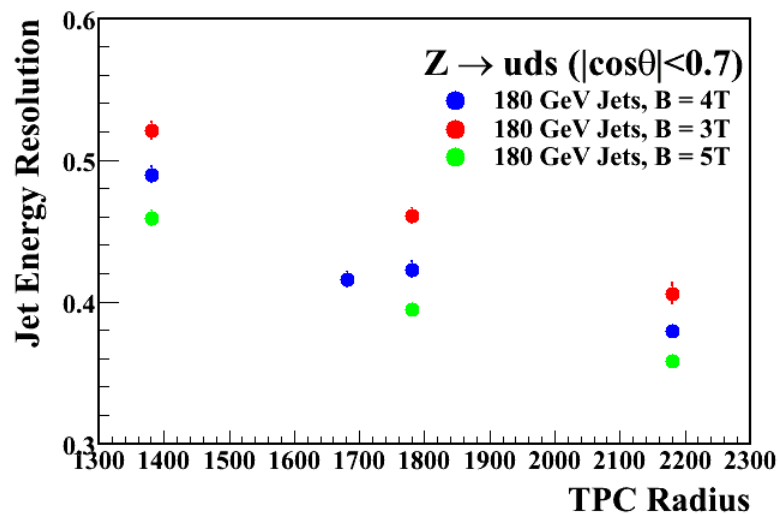
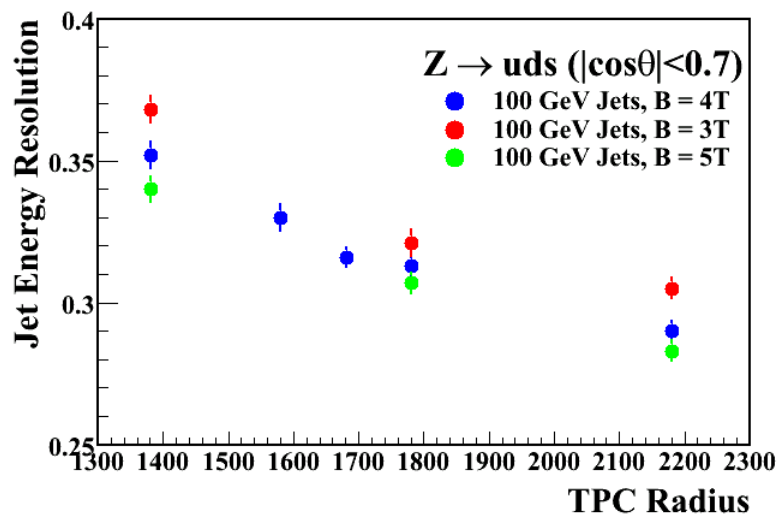
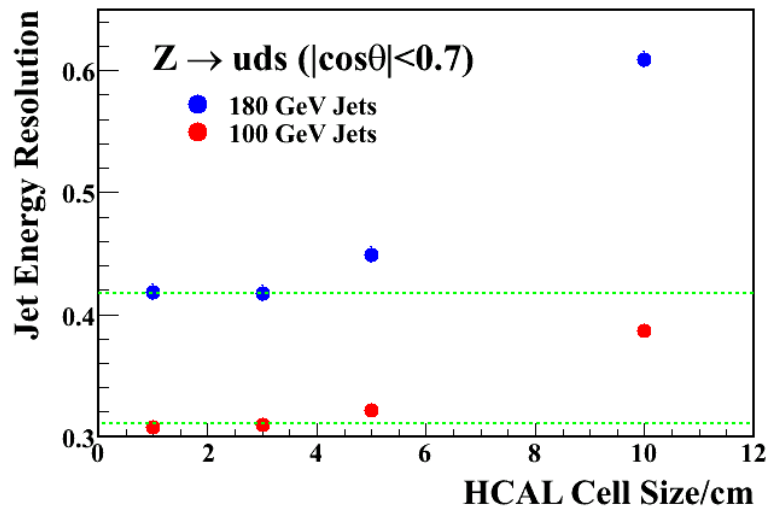
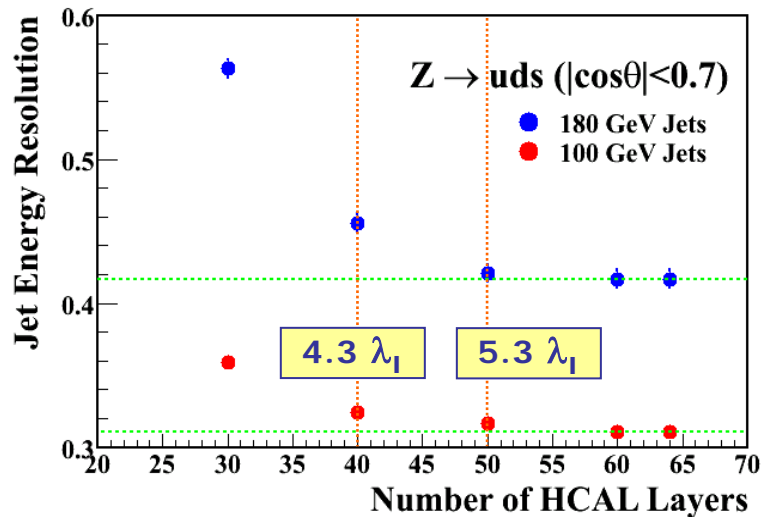
5 Tesla

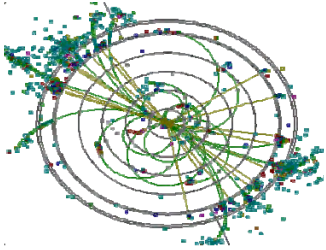


**Scale of EMCal
& Vertex Detector**

6 Detector Optimisation Studies

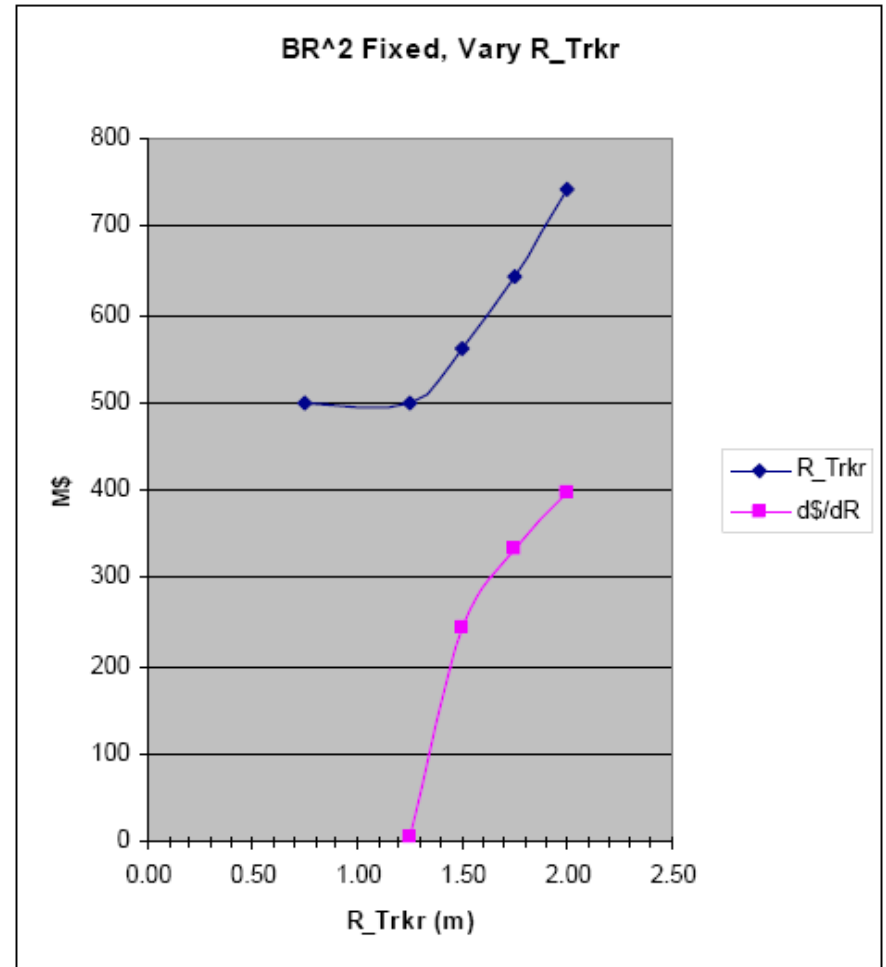
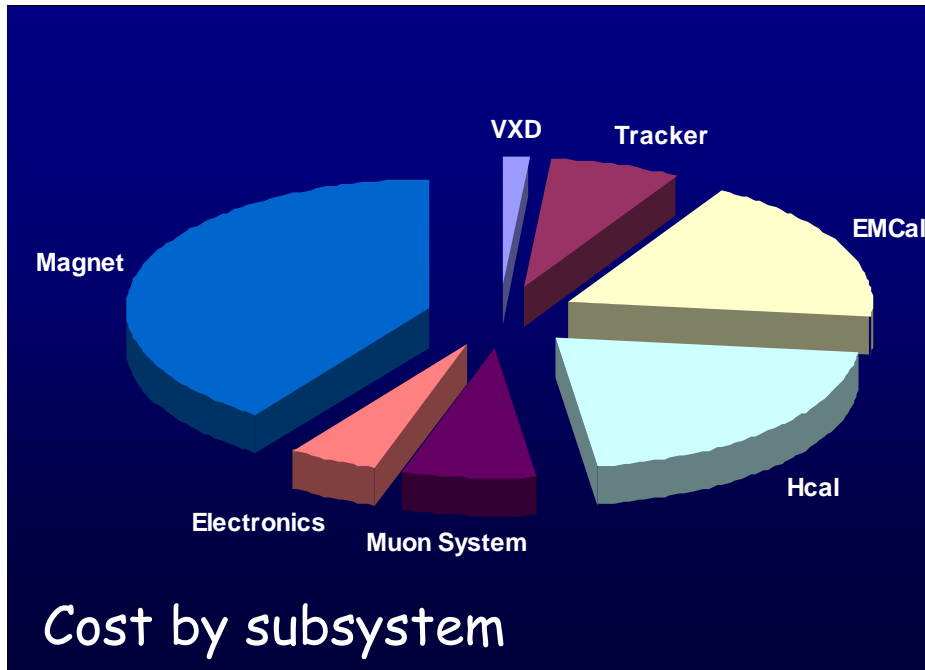
★ Lots of progress... ..no time





Parametric Cost Model

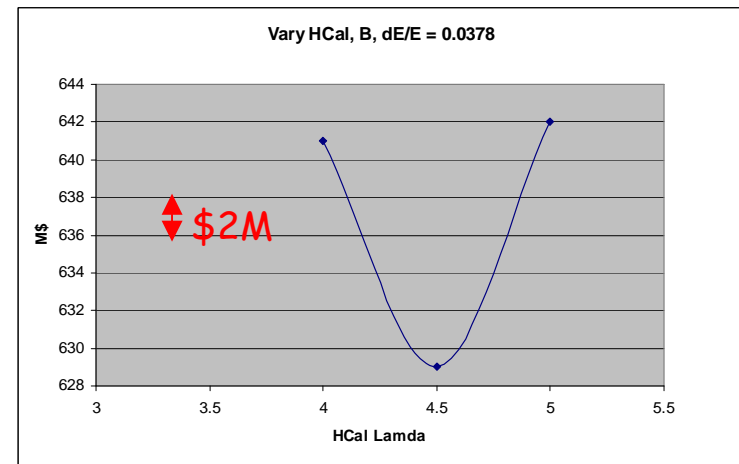
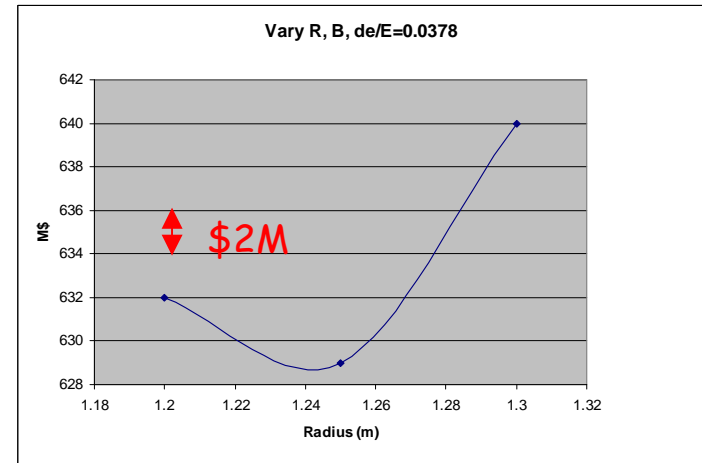
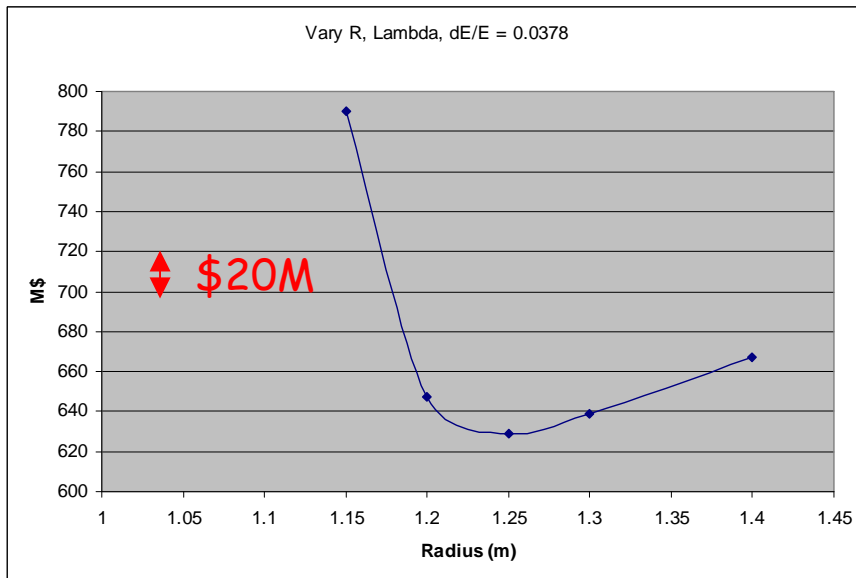
$$\text{Cost} = f(\text{B-field}, R_{\text{TRK}}, \dots)$$



Cost vs. tracker radius

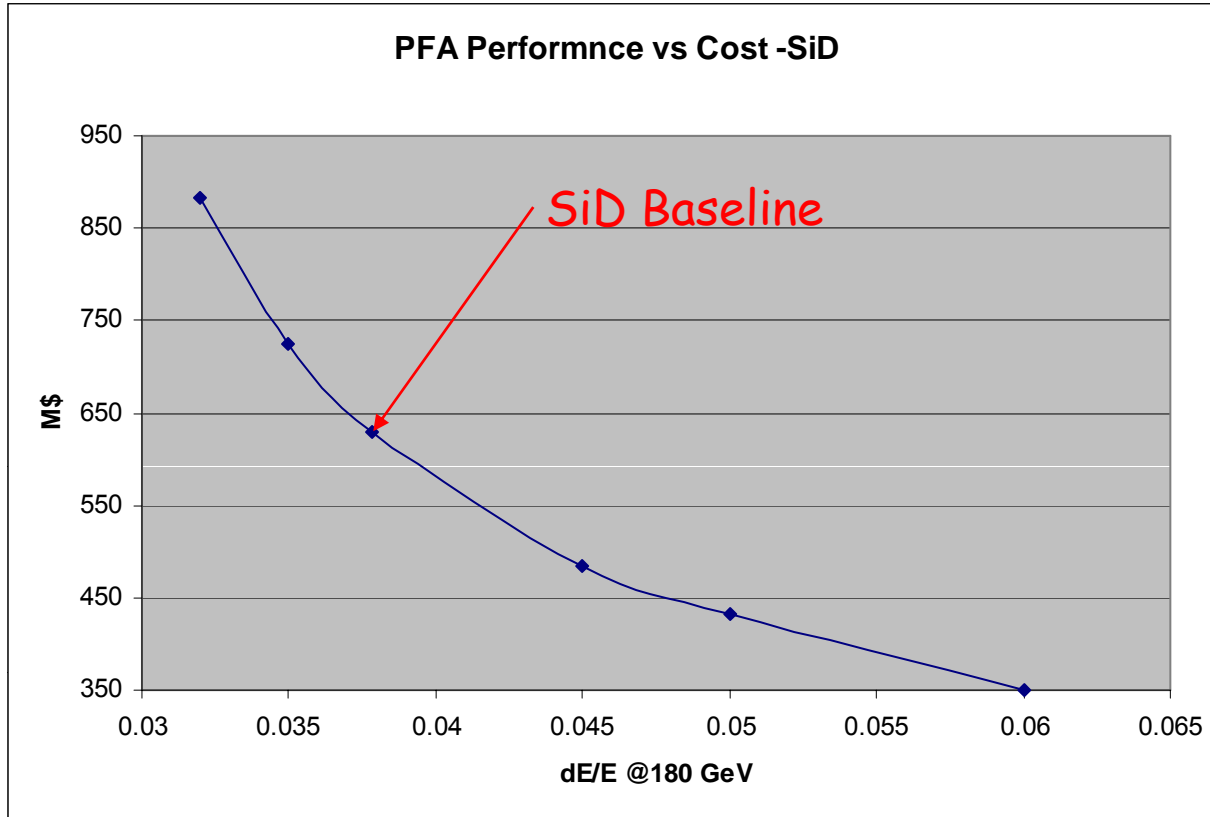
SiD "Baseline"

- $R_{trkr} = 1.25 \text{ m}$
- $B = 5 \text{ T}$
- $H_{Cal} \lambda = 4.5$
- $\Delta E/E(180 \text{ GeV}) = 0.0378$



SiD "Baseline" is optimal for this value of $\Delta E/E(180 \text{ GeV})$ (Pandora parameterization, Checked with Pandora version of SiD, SiD PFA)

A sequence of "Optimized SiD's"



Selected Physics Process Errors vs Cost

