

25.05.1999

# Uniwersalne detektory cząstek elementarnych

- Pomiar pędu
  - rozpraszanie wielokrotne
  - nowe detektory śladowe
  - magnesy
- Budowa detektora uniwersalnego
- Systemy wyzwalania i zbierania danych

Grzegorz Wrochna

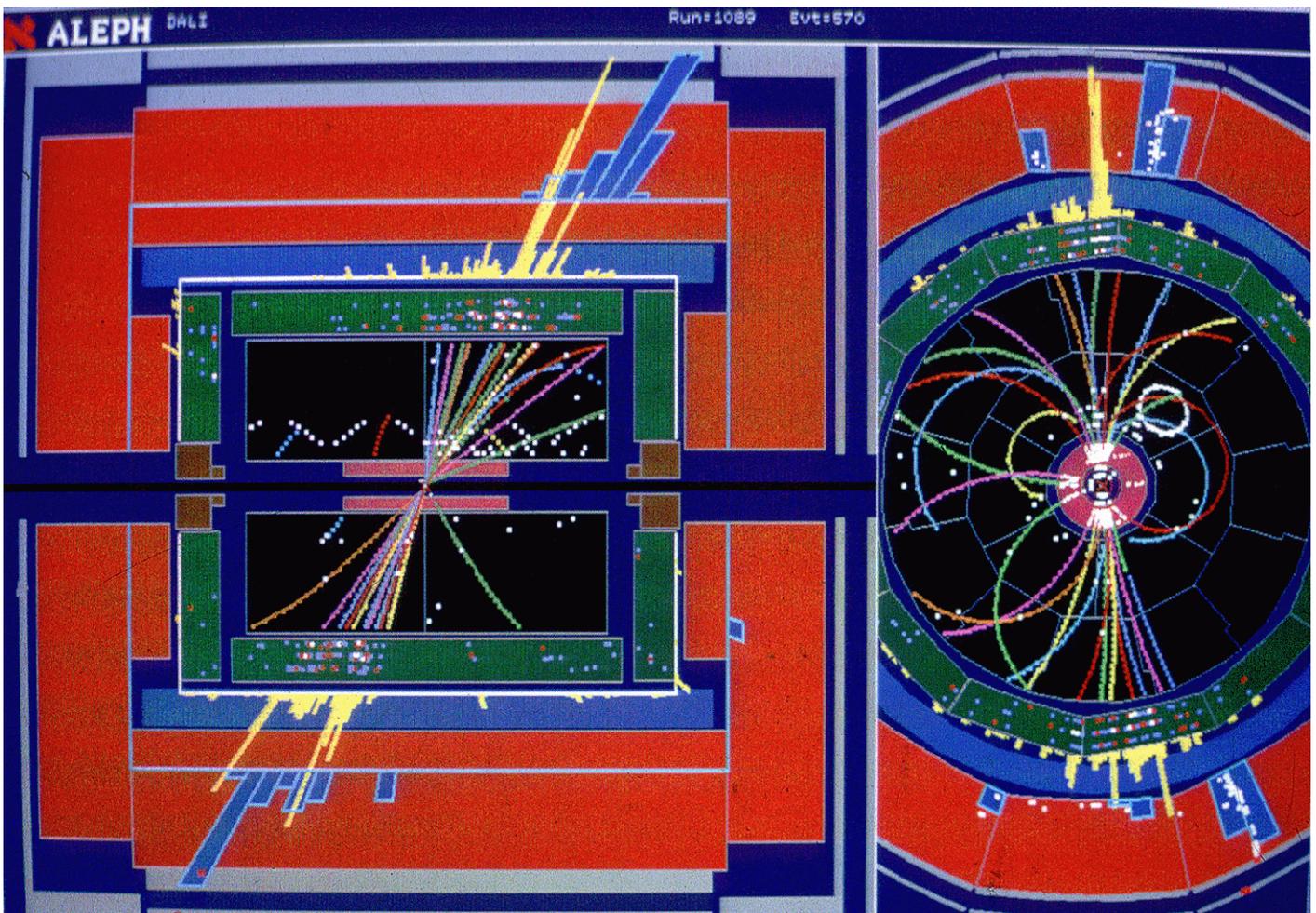
Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana

wrochna@fuw.edu.pl

<http://cmsdoc.cern.ch/~wrochna>

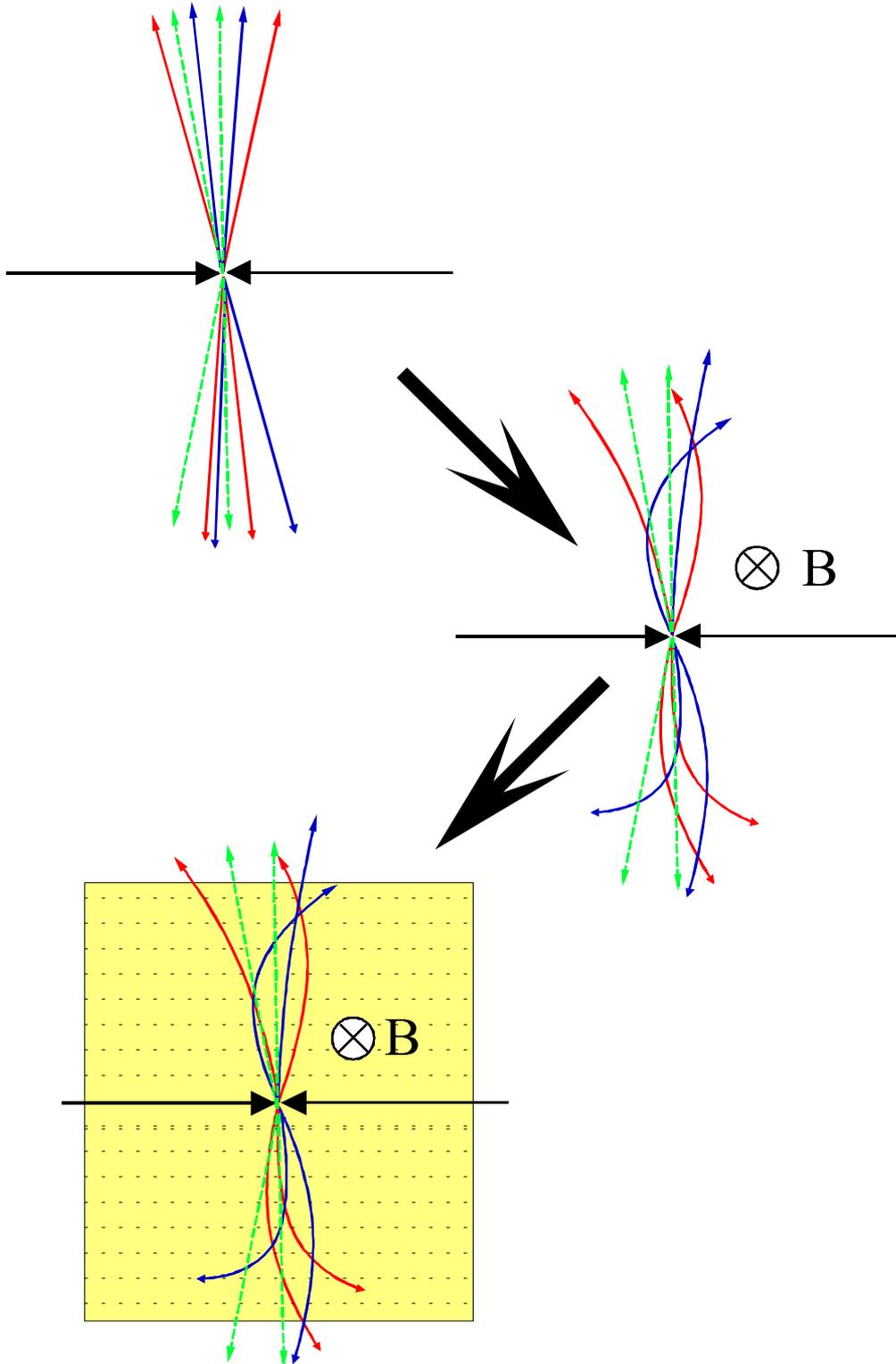
# Detektory uniwersalne

- pomiar energii
  - kalorymetr
- pomiar pędu
  - zakrzywienie toru w polu magnetycznym
- identyfikacja cząstek
  - różne oddziaływanie z materią



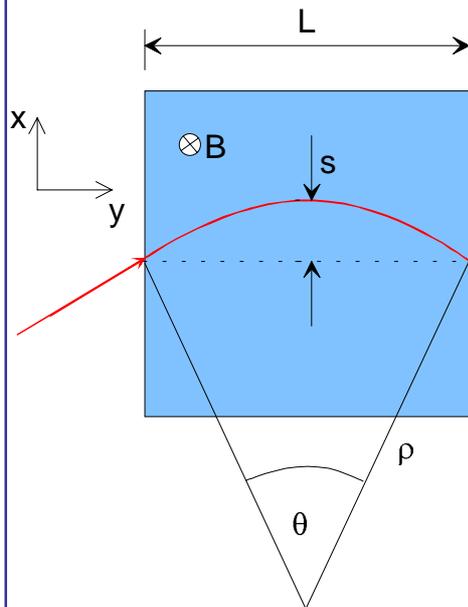


# Momentum measurement





## Momentum measurement



$$p_T = qB\rho$$

$$p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3B\rho \quad (\text{T} \cdot \text{m})$$

$$\frac{L}{2\rho} = \sin \theta/2 \approx \theta/2 \rightarrow \theta \approx \frac{0.3L \cdot B}{p_T}$$

$$\Delta p_T = p_T \sin \theta \approx 0.3L \cdot B$$

$$s = \rho(1 - \cos \theta/2) \approx \rho \frac{\theta^2}{8} \approx \frac{0.3}{8} \frac{L^2 B}{p_T}$$

the sagitta  $s$  is determined by 3 measurements with error  $\sigma(x)$ :

$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}$$

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x) \cdot 8p_T}{0.3 \cdot BL^2}$$

for  $N$  equidistant measurements, one obtains

(R.L. Gluckstern, NIM 24 (1963) 381)

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} = \frac{\sigma(x) \cdot p_T}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{720/(N+4)} \quad (\text{for } N \geq \approx 10)$$

ex:  $p_T=1\text{GeV/c}$ ,  $L=1\text{m}$ ,  $B=1\text{T}$ ,  $\sigma(x)=200\mu\text{m}$ ,  $N=10$

$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{meas.} \approx 0.5\% \quad (s \approx 3.75 \text{ cm})$$

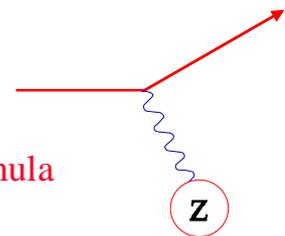


# Scattering

An incoming particle with charge  $z$  interacts with a target of nuclear charge  $Z$ . The cross-section for this e.m. process is

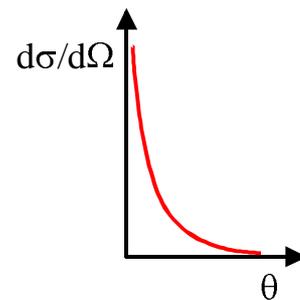
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 4zZr_e^2 \left( \frac{m_e c}{\beta p} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$

Rutherford formula



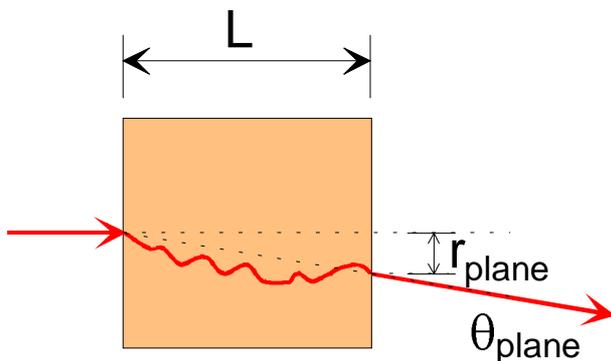
Average scattering angle  $\langle \theta \rangle = 0$

Cross-section for  $\theta \rightarrow 0$  infinite !



# Multiple Scattering

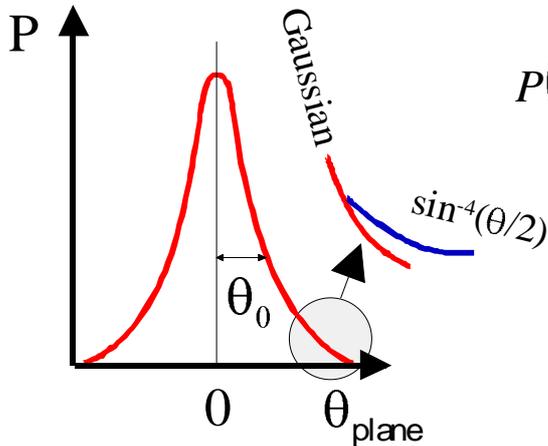
Sufficiently thick material layer → the particle will undergo multiple scattering.



$$\theta_0 = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \theta_{plane}^{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \theta_{space}^{RMS}$$



## Multiple Scattering



$$P(\theta_{plane}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} \exp\left\{-\frac{\theta_{plane}^2}{2\theta_0^2}\right\}$$

Approximation

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{L}{X_0}} \left\{ 1 + 0.038 \ln\left(\frac{L}{X_0}\right) \right\}$$

$X_0$  is radiation length of the medium

(accuracy  $\leq 11\%$  for  $10^{-3} < L/X_0 < 100$ )

The lateral displacement can also be approximated by a Gaussian distribution with width  $r_{plane}^{RMS} = L \theta_{plane}^{RMS} = L \theta_0$



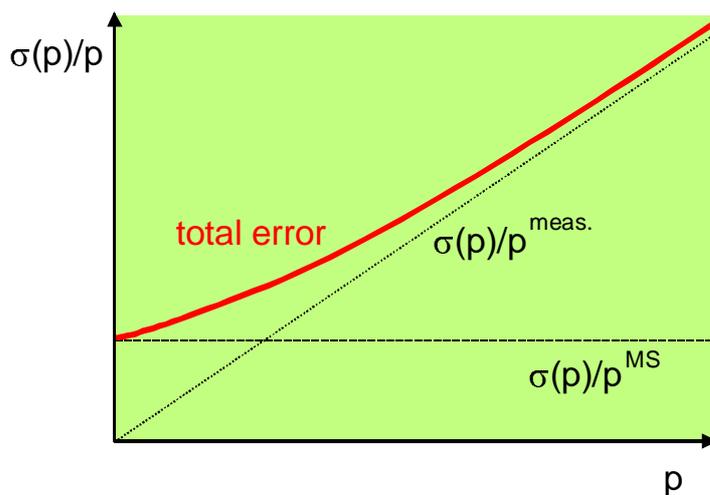
## Momentum measurement



Back to momentum measurements:  
contribution from multiple scattering

$$\Delta p^{MS} = p \sin \theta_{RMS}^{plane} \approx p \cdot 0.0136 \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

$$\frac{\sigma(p)}{p_T} \Big|^{MS} = \frac{\Delta p^{MS}}{\Delta p_T} = \frac{0.0136 \sqrt{\frac{L}{X_0}}}{0.3BL} = 0.045 \frac{1}{B\sqrt{LX_0}} \quad \text{independent of } p!$$

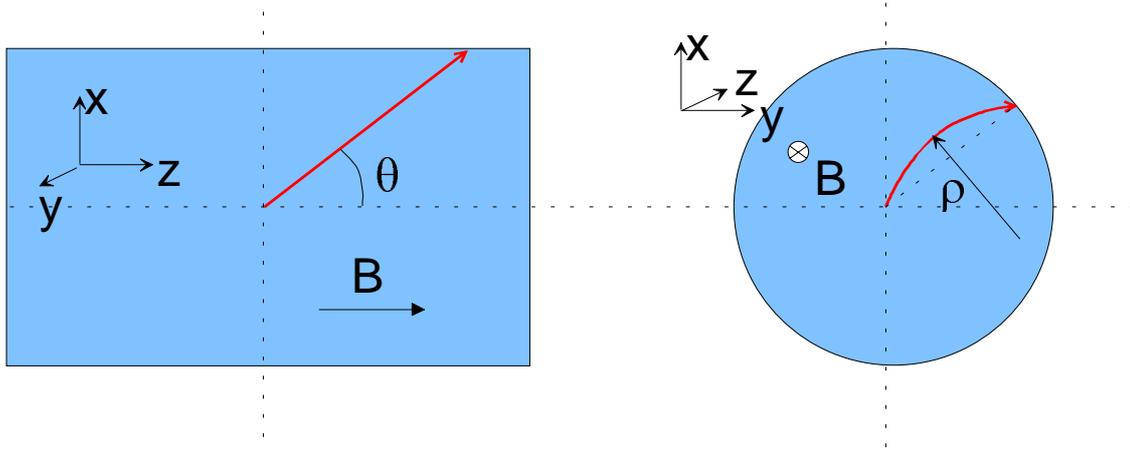


ex: Ar ( $X_0=110\text{m}$ ),  $L=1\text{m}$ ,  $B=1\text{T}$

$$\frac{\sigma(p)}{p_T} \Big|^{MS} \approx 0.5\%$$



Momentum measurement in experiments with solenoid magnet:



$$p_T = p \sin \theta$$

polar angle has to be determined from a straight line fit  $x=x(z)$ .

N equidistant points with error  $\sigma(z)$

$$\sigma(\theta)|^{meas.} = \frac{\sigma(z)}{L} \sqrt{12(N-1)/(N(N+1))} \quad \left. \vphantom{\frac{\sigma(z)}{L}} \right\} \text{normally small}$$

+ multiple scattering contribution....

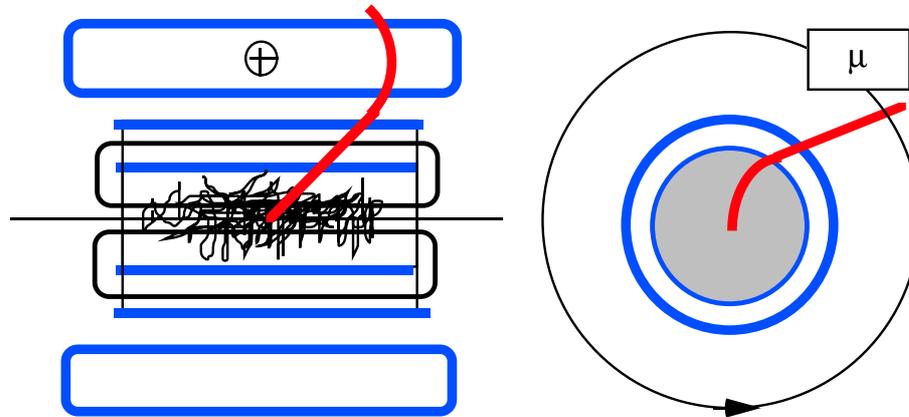
*In practical cases:*  $\frac{\sigma(p)}{p} \approx \frac{\sigma(p_T)}{p_T}$

*In summary:*

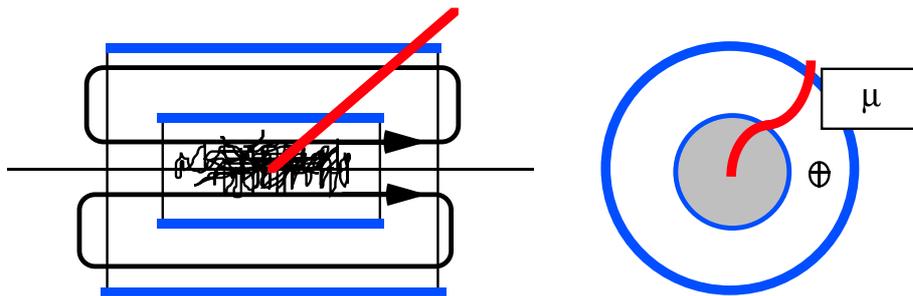
$$\frac{\sigma(p)}{p} |^{meas.} \propto \frac{\sigma(x) \cdot p}{BL^2} \frac{1}{\sqrt{N}}$$

# Magnes

## ATLAS A Toroidal LHC ApparatuS



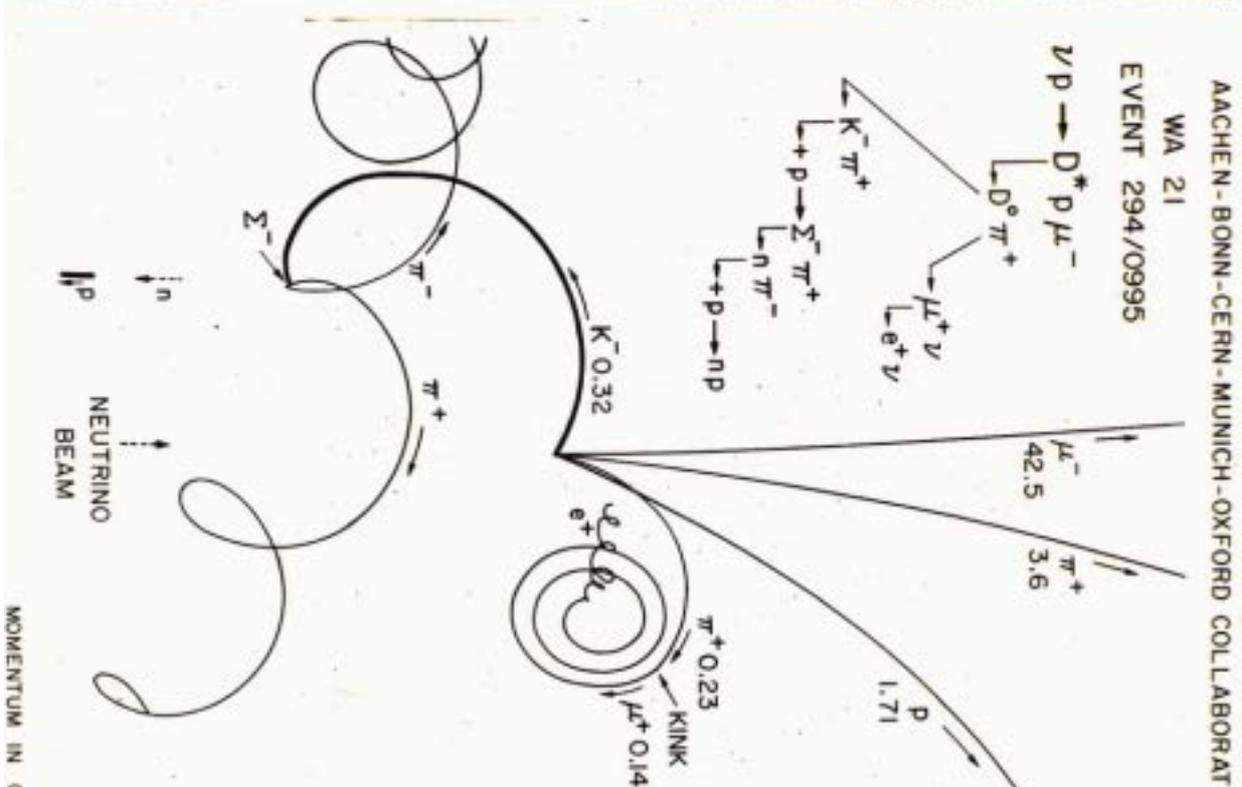
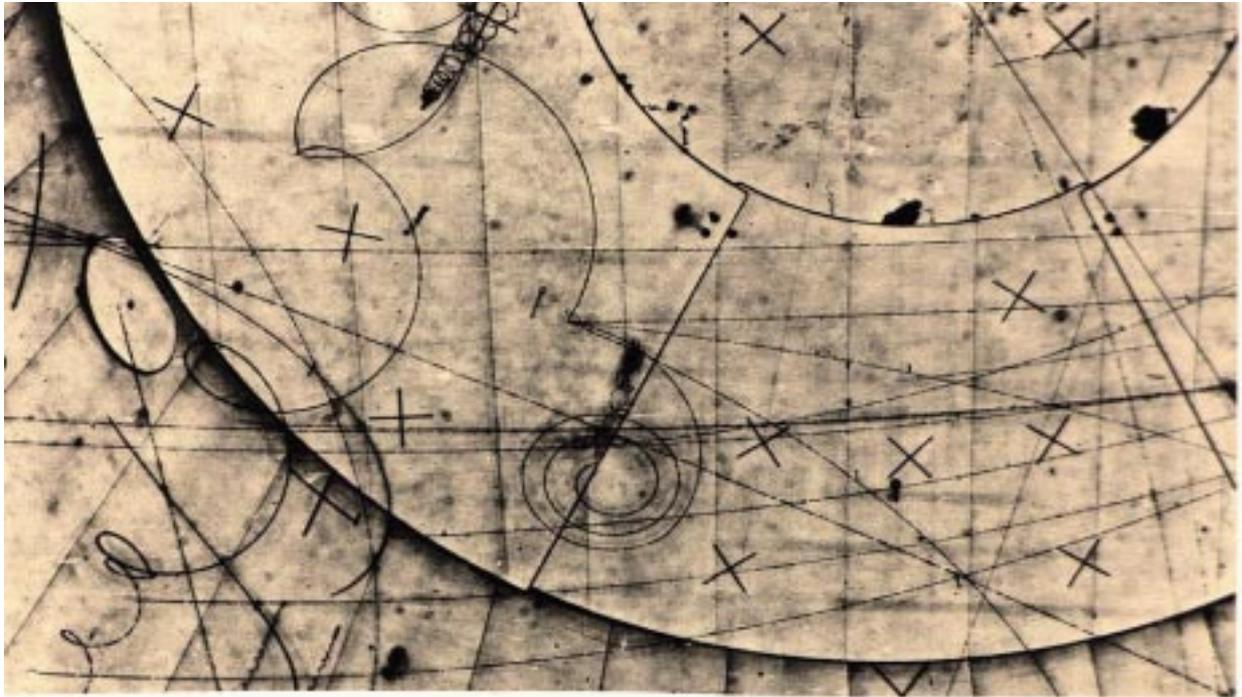
## CMS Compact Muon Solenoid



eksperyment	koszt	magnes	koszt
ATLAS	475 M CHF	toroid	200 M CHF
CMS	475 M CHF	solenoid	120 M CHF

Wybór konfiguracji pola magnetycznego decyduje o specyfice całego eksperymentu.

# Rekonstrukcja zdarzenia





# ***Nobel dla Charpaka***

---



**Do lat 60-tych cząstki elementarne badano głównie rejestrując ich oddziaływania w emulsjach i na kliszach fotograficznych. Analiza takiego zdjęcia wymagała ręcznego pomiaru współrzędnych wielu punktów na torze każdej cząstki. Gigantycznym nakładem pracy można było przeanalizować ~10 000 zdjęć z trwającego kilka lat eksperymentu.**

**Przełomowym momentem było wynalezienie w 1968 r. komory wielodrutowej.**

**Detektor ten pozwolił na całkowicie automatyczną, elektroniczną rejestrację oddziaływań cząstek.**

**Pozwoliło to na pełną, komputerową ich analizę, co dało możliwość przebadania milionów interesujących przypadków z jednego eksperymentu.**

**Georges Charpak, Polak z pochodzenia, ur. w 1924 r. w Dąbrowicy. Ukończył studia na College de France w Paryżu. Od 1959r pracuje w CERNie. W 1992 r. został uhonorowany nagrodą Nobla za prace nad detektorami cząstek elementarnych, a w szczególności za wynalezienie komory wielodrutowej.**

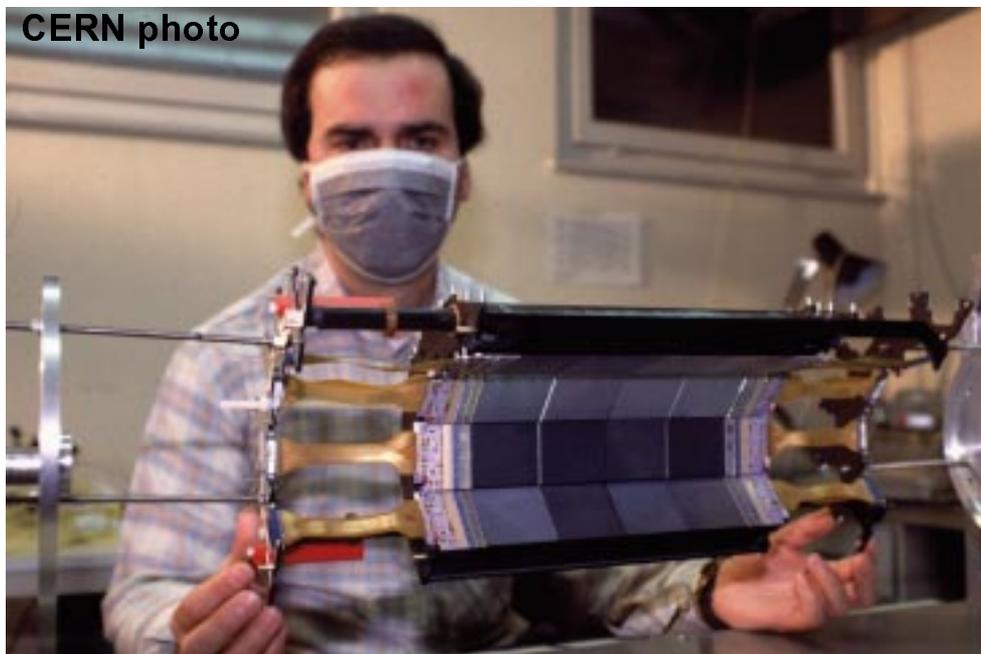
# ***Detektory półprzewodnikowe***

---

Cząstka przechodząca przez półprzewodnik tworzy pary elektron-dziura. Powoduje to przepływ rejestrowalnego prądu.

## ***Detektory mikropaskowe***

Położenie cząstki określone jest przez elektrodę odczytową w kształcie paska o szerokości rzędu  $100\mu\text{m}$  i długości rzędu  $10\text{cm}$ .



## ***Detektory mozaikowe (pixel detectors)***

Położenie cząstki określone jest przez elektrodę odczytową w kształcie prostokąta o bokach rzędu  $10\mu\text{m}$ .

# Pomiar toru

---

## Detektory półprzewodnikowe

(mikropaskowe, mozaikowe)

- bardzo wysoka precyzja:  $\sim 10-20\mu\text{m}$
- niezbyt duże powierzchnie:  $\sim 1-10\text{m}^2$

## Detektory gazowe (komory drutowe)

- bardzo duże powierzchnie:  $\sim 100-1000\text{m}^2$
- umiarkowana precyzja:  $\sim 100-200\mu\text{m}$

## Nowe trendy

### Detektory mikro-gazowe

(MSGC, MGC, GEM, Micromegas)

- dość duże powierzchnie:  $\sim 10-100\text{m}^2$
- dobra precyzja:  $\sim 30-60\mu\text{m}$



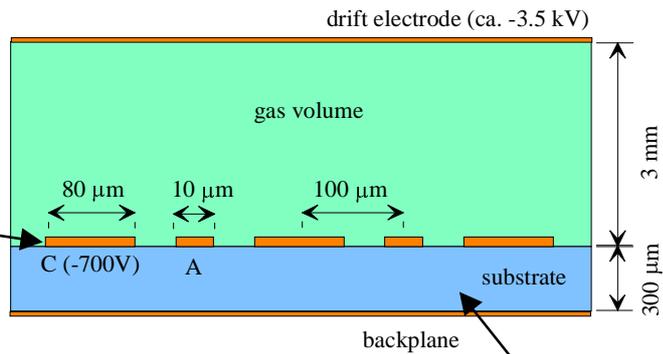
Faster and more precision ? → smaller structures

### ◆ Microstrip gas chambers

(A. Oed, NIM A 263 (1988) 352)

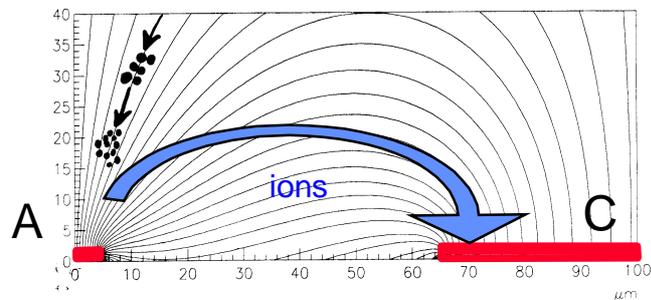
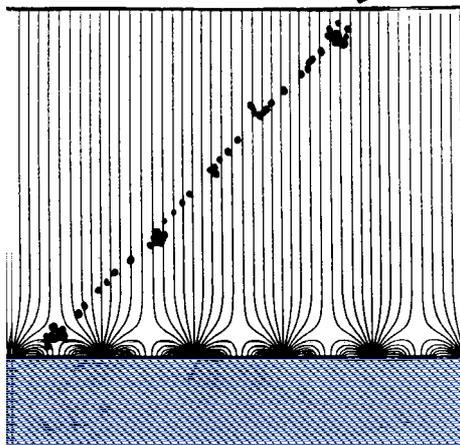
geometry and typical dimensions (CMS standard)

Gold strips + Cr underlayer



Glass DESAG AF45 + S8900 semiconducting glass coating,  $\rho=10^{16} \Omega/\square$

Field geometry



Fast ion evacuation → high rate capability  $\approx 10^6 /(\text{mm}^2\cdot\text{s})$

Gas: Ar-DME, Ne-DME (1:2), Lorentz angle  $14^\circ$  at 4T, Gain  $\leq 10^4$

CMS

Passivation: non-conductive protection of cathode edges

Resolution:  $\approx 30..40 \mu\text{m}$

Aging: Seems to be under control.

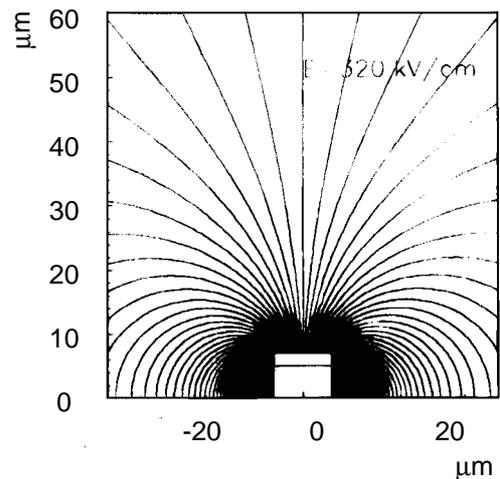
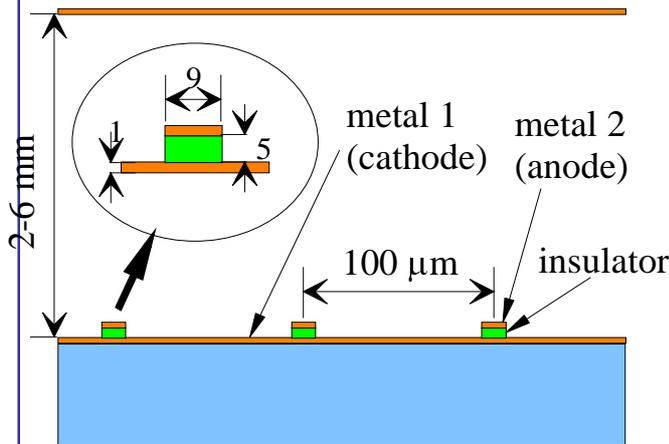
10 years LHC operation  $\approx 100 \text{ mC/cm}$



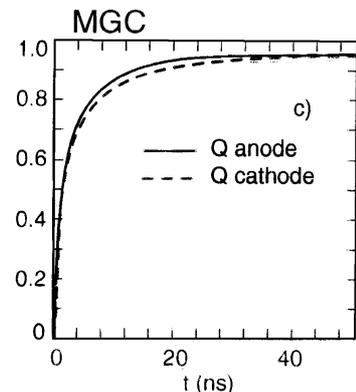
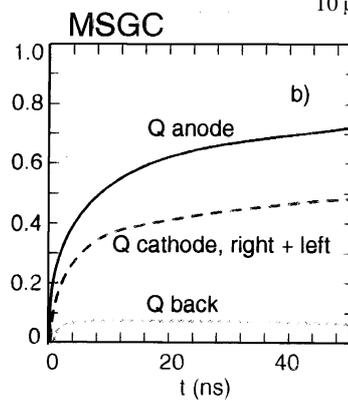
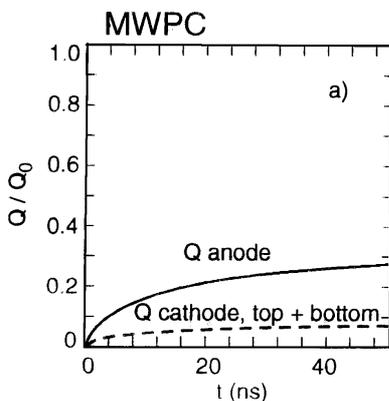
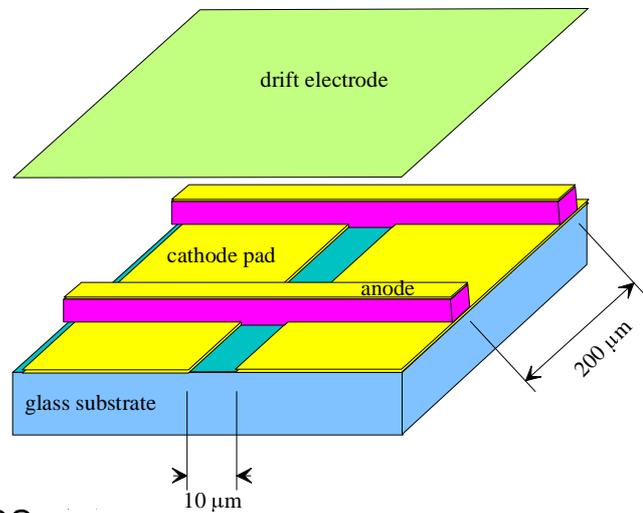
# Micro gap chambers

F. Angelini, NIM A 335 (1993) 69

INFN Pisa



## 2-dimensional readout with MGC (Bellazini)



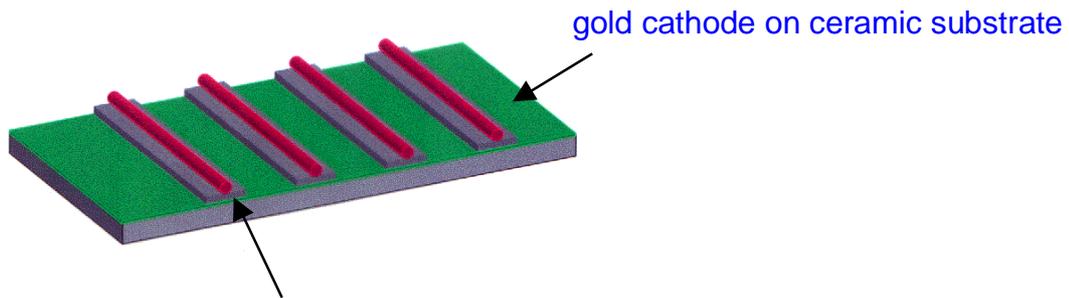


## Micro gaseous detectors



### ◆ Micro Gap Wire Chamber

(E. Christophel et al., NIM A 398 (1997) 195)

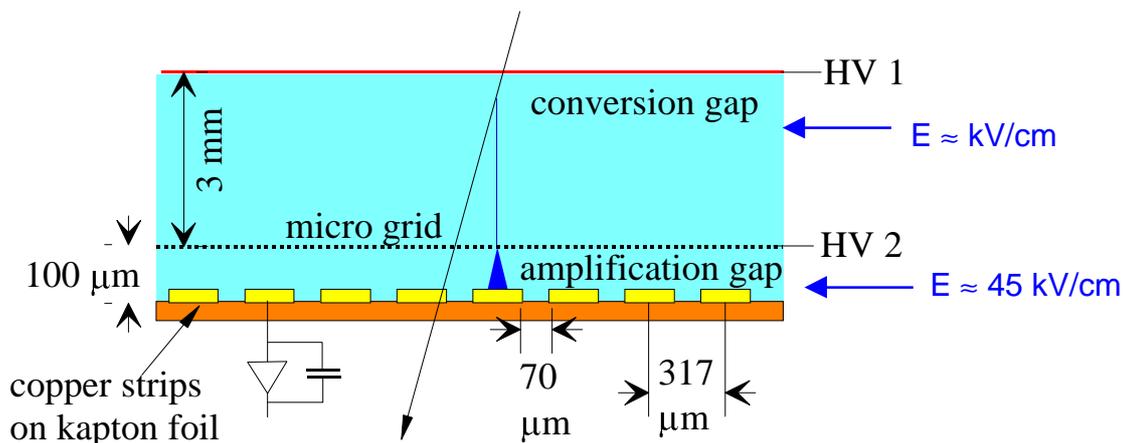


5  $\mu\text{m}$  wire on 40  $\mu\text{m}$  wide polyimide strips

Gain  $> 10^5$  (prototype 2.6 x 2.6  $\text{cm}^2$ )

### ◆ MICROME GAS

(G. Charpak et al., CERN-LHC/97-08)

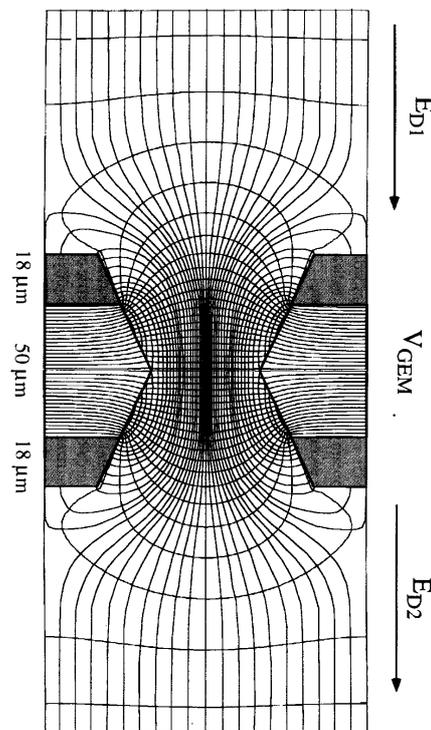
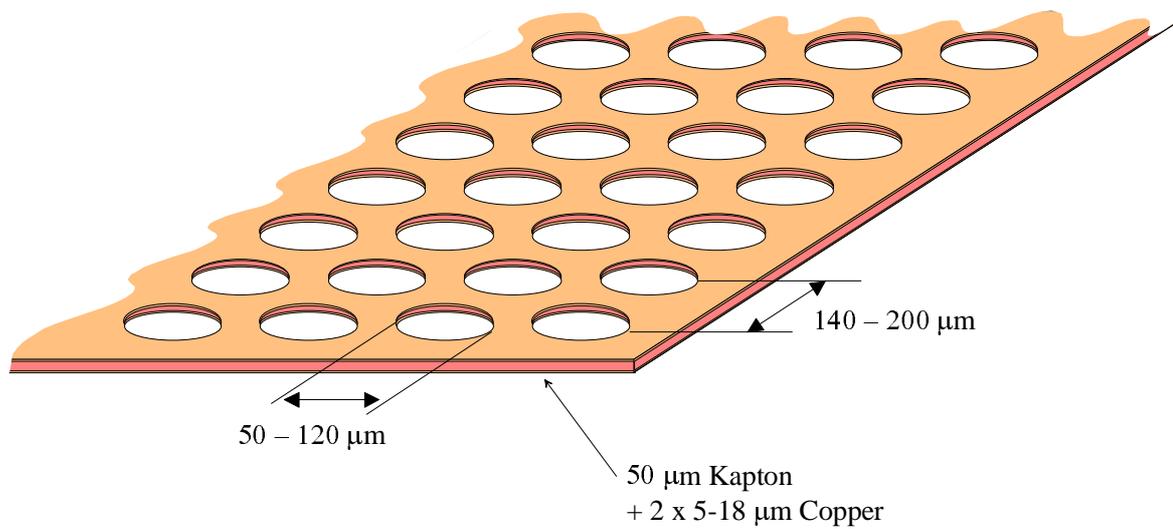


Gas: Ar-DME ( $\approx 80:20$ )

High rate capability ( $10^9 / (\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ ), prototype in test beam

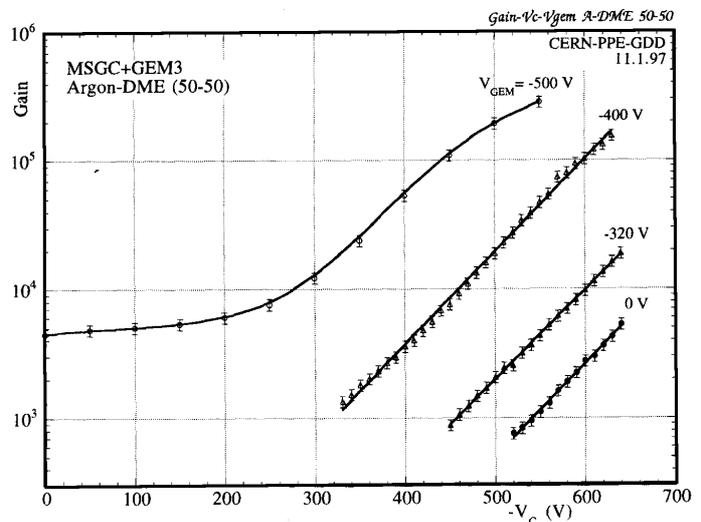
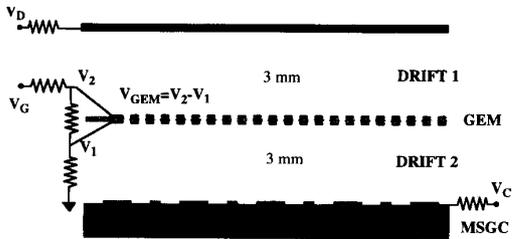
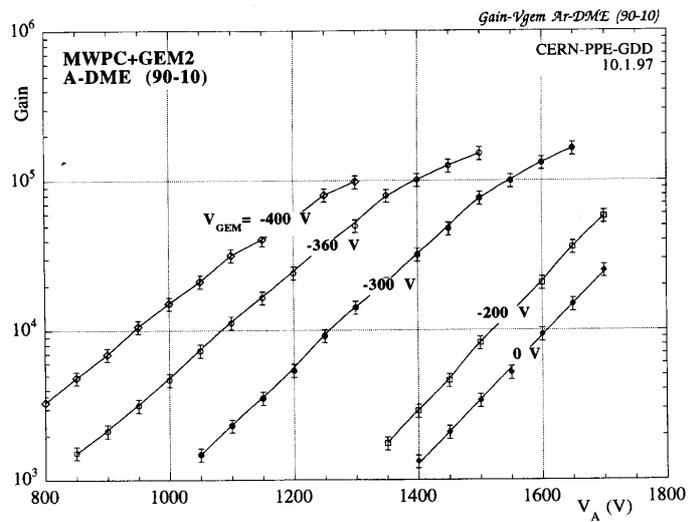
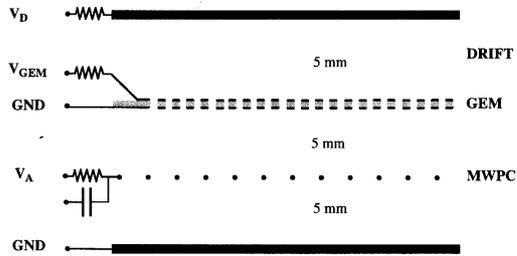
## ◆ GEM: The Gas Electron Multiplier

(R. Bouclier et al., NIM A 396 (1997) 50)





## Micro gaseous detectors





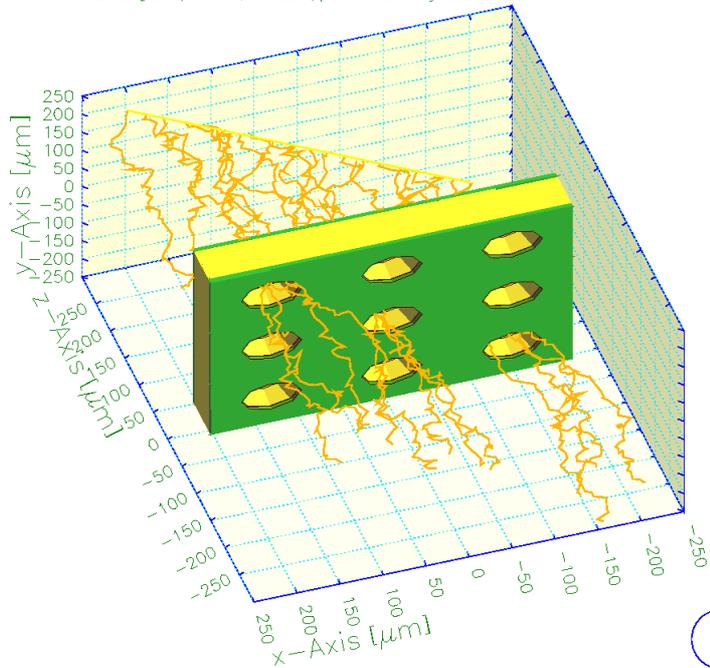
# Gas Detector Simulation



## Electron driftlines through a GEM like structure

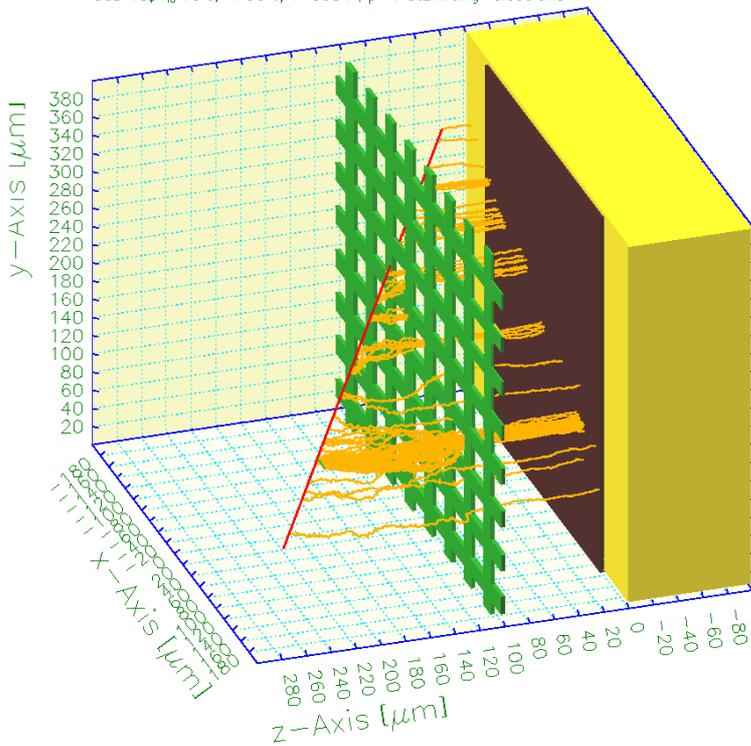
Drift lines from a track

Gas: CO<sub>2</sub> 30%, Ar 70%, T=300 K, p=1 atm  
Particle: 20 equally spaced points  
Drifting: electrons



Drift lines from a track

Cell: Micromegas  
Gas: iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 10%, Ar 90%, T=300 K, p=1 atm  
Particle: proton, E<sub>kin</sub>=10 MeV  
Drifting: electrons



Plotted at 03:26:25 on 15/02/99 with Garfield version 6.20.

the same for  
MICROMEGAS

# Cząstki długożyciowe

cząstka		czas życia $\tau$	$c \cdot \tau$
foton	$\gamma$	$\infty$	$\infty$
elektron	$e^-$	$\infty$	$\infty$
neutrino	$\nu$	$\infty$	$\infty$
proton	$p^+$	$>1.6 \cdot 10^{33}$ lat	$\infty$
neutron	$n$	887 s	$2.7 \cdot 10^8$ km
mion	$\mu^-$	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	659 m
pion	$\pi^+$	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	7.8 m
kaon	$K^+$	$1.2 \cdot 10^{-8}$ s	3.7 m
kaon	$K^0_L$	$5.2 \cdot 10^{-8}$ s	15.5 m
kaon	$K^0_S$	$0.9 \cdot 10^{-10}$ s	2.7 cm
$\Lambda^0 \Sigma^+ \Xi^0 \Omega^- \dots$		$\sim 10^{-10}$ s	$\sim 3$ cm
$D^{0+} B^{0+} \Lambda_c^+ \Lambda_b^0$		$\sim 10^{-12}$ s	$\sim 300$ $\mu\text{m}$
pion	$\pi^0$	$8.4 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
$\eta, \psi$ , rezonanse		$<10^{-19}$ s	—

W praktyce bezpośrednioj detekcji podlegają jedynie

$$\gamma, e^\pm, p^\pm, n, \mu^\pm, \pi^\pm, K^\pm, K^0_L.$$

Inne cząstki badamy obserwując produkty ich rozpadu.

# Identyfikacja cząstek

---

Cząstki długożyciowe identyfikujemy obserwując jak oddziałują z materią:

- cząstka naładowana — ślad
- elektron, foton — kaskada elektromagnetyczna
- hadron ( $p$ ,  $n$ ,  $\pi$ ,  $K$ ) — kaskada hadronowa

Detektor uniwersalny składa się więc zwykle z 4 części:

- wewnętrzny detektor śladowy (“traker”)
- kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy
- zewnętrzny detektor śladowy (det. mionowy)

	$\gamma$	$e$	$\nu$	$p,\pi,K$	$n$	$\mu$
traker	-	+	-	+	-	+
kalorymetr elektromag.	+	+	-	-	-	-
kalorymetr hadronowy	-	-	-	+	+	-
detektor mionowy	-	-	-	-	-	+

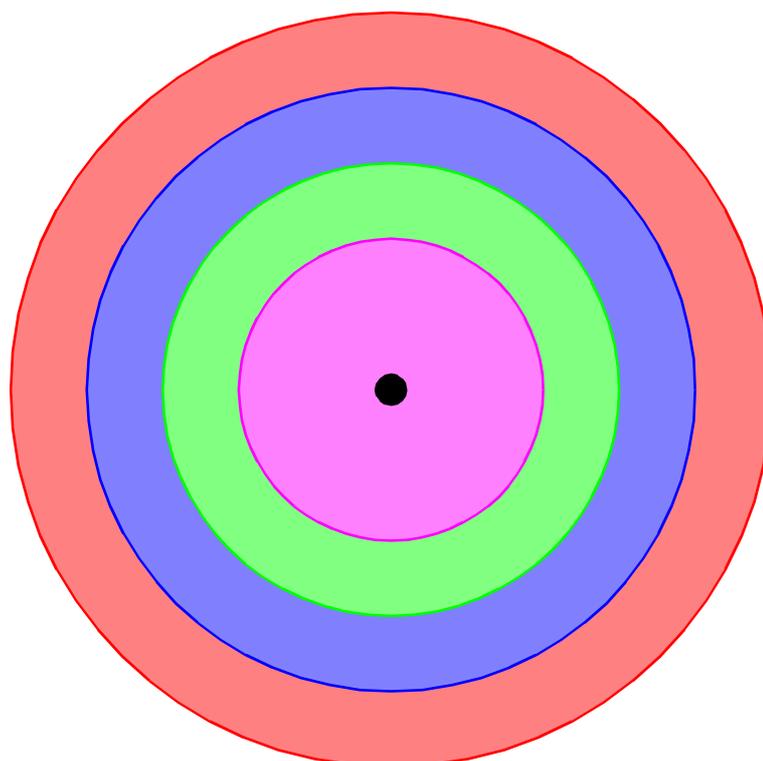
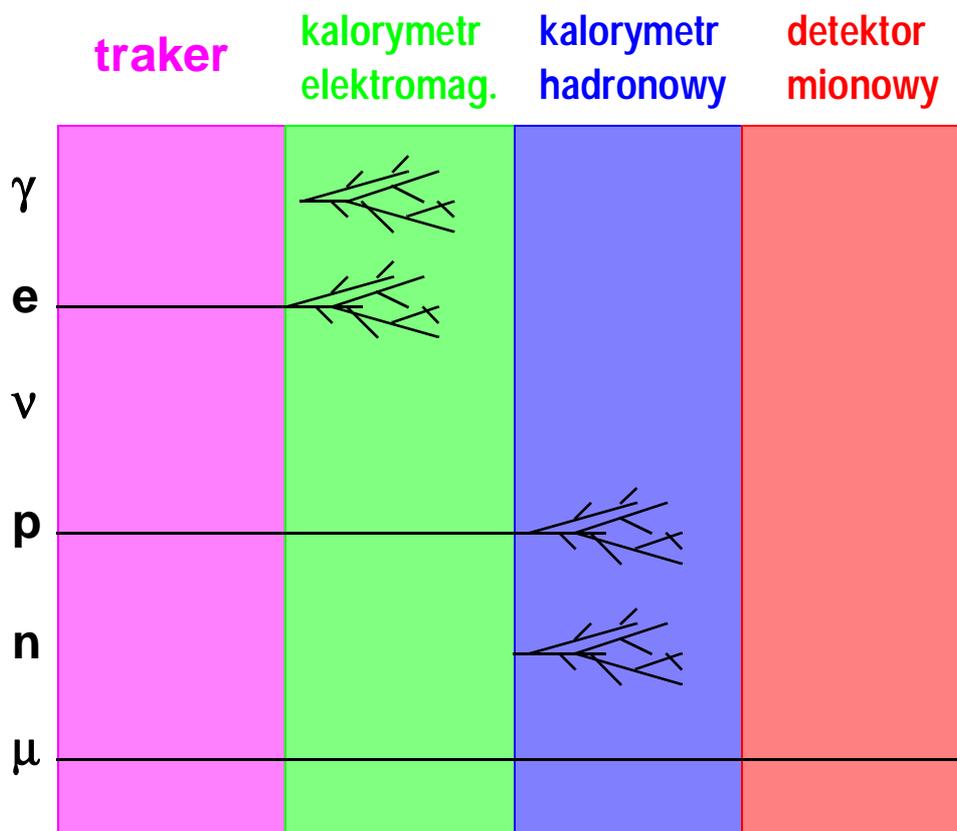
Obecność neutrina można rozpoznać jedynie po “brakującej energii” — pozornym złamaniu zasady zachowania.

Proton, kaon i pion można odróżnić wyznaczając masę cząstki, zmierzwszy uprzednio jej energię i pęd:

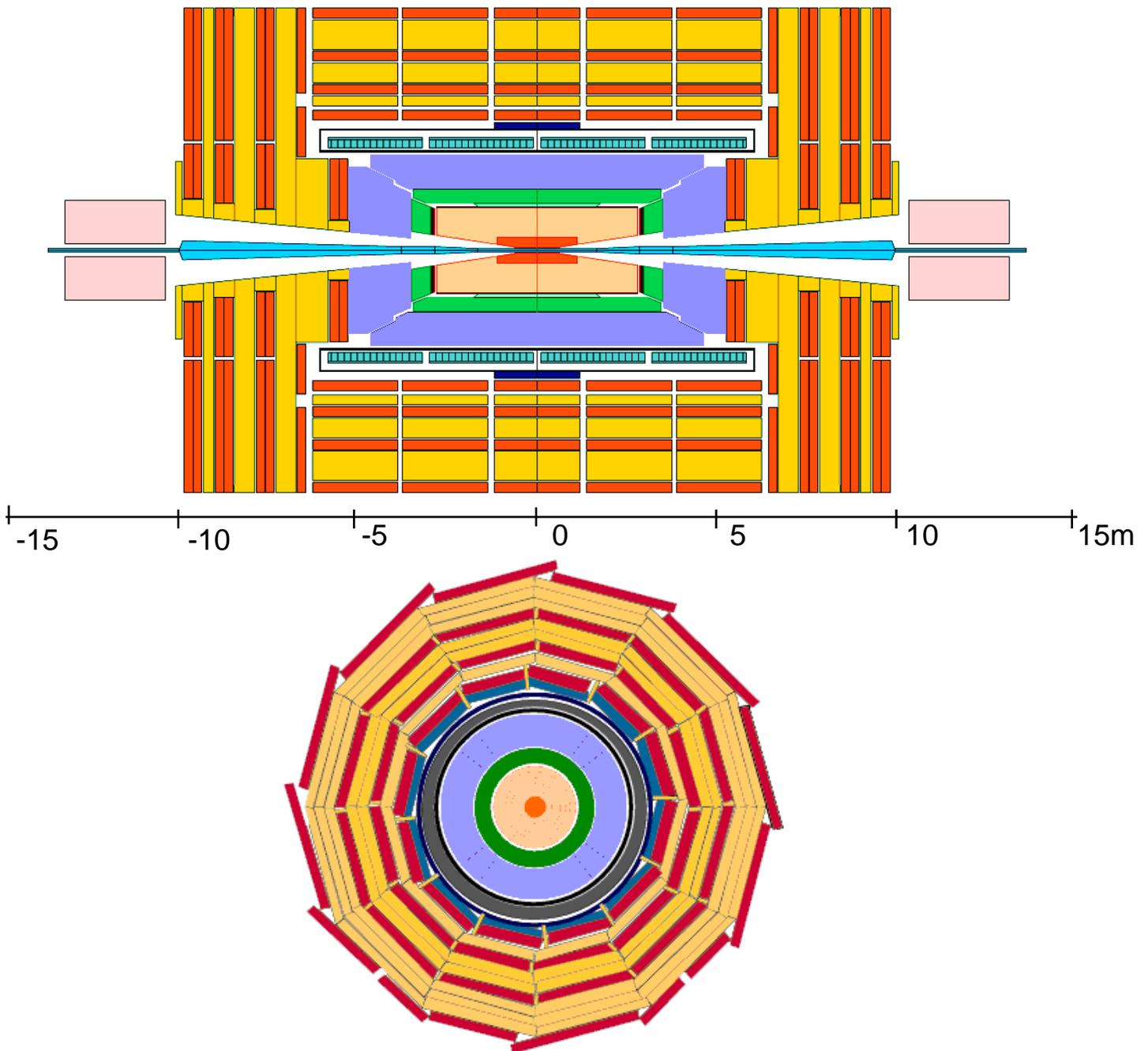
$$m^2 = E^2/c^4 - p^2/c^2$$

# Identyfikacja cząstek

---



# The Compact Muon Solenoid CMS experiment at CERN Large Hadron Collider LHC



The CMS detector will be built around a high-field superconducting solenoid (4 T) leading to a compact design for the muon spectrometer, hence the name Compact Muon Solenoid (CMS). In order to detect signatures of new physics efficiently, identification and precise measurement of muons, photons, and electrons have been emphasized in the design considerations of CMS.

The long solenoid allows efficient measurement of forward muons. Muons see the full bending power of the solenoid up to a rapidity of 1.5. For the rapidity range  $1.5 < |h| < 2.5$  they are still measured in the inner tracker and in the four forward muon stations (MF1 to MF4). There is enough bending power to maintain good resolution up to a rapidity of 2.5. The muon rate in the forward region is dominated by low pt muons from p/K decays in the inner tracking volume. The forward muon trigger system consists of small pads designed to reduce effectively the high rate of low pt muons.

The combined muon momentum resolution is better than 3% at 0.4 TeV in the central rapidity region  $|h| < 2.5$ , degrading to 5% at 2 TeV. Low-momentum ( $p < 100$  GeV) muons are measured before the absorber with a precision of about 1% up to a rapidity of 2.5.

# ***Eksperyment CMS***

---

**Compact Muon Solenoid - to detektor przeznaczony do badania zderzeń proton-proton w akceleratorze LHC.**

## *Podstawowe założenia projektowe:*

- 1. Bardzo dobry system mionowy**  
– precyzja pomiaru, hermetyczność, redundancja
- 2. Najlepszy możliwy kalorymetr elektromagnetyczny**  
– zdolność rozdzielcza, jednorodność, granularność
- 3. Wysokiej jakości detektor centralny**  
– gęstość próbkowania, precyzja pomiaru
- 4. Hermetyczny kalorymetr hadronowy**

