

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Parte 9

### Rivelatori di traccia e misura della quantità di moto

# Introduzione ai rivelatori di particelle

---

## rivelatori di traccia

- I rivelatori di traccia sono usati per
  - la misura della quantità di moto delle tracce cariche
    - dalla deflessione in campo magnetico
  - misure di topologia dell'evento
    - misure di precisione del vertice di interazione e di vertici secondari
    - identificazione delle tracce cariche in eventi densi
  - misure di  $dE/dx$
  - trigger
    - non sempre è possibile un trigger veloce
      - lunghi tempi di deriva in rivelatori a gas
      - grande numero di canali in rivelatori a semiconduttore
    - spesso usati in trigger di secondo e terzo livello

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## misure di quantità di moto

- Curvatura in campo magnetico
  - costante, ortogonale alla velocità

$$R = \frac{p}{qB}$$

con  $p$  in GeV/c e carica unitaria

$$p = p[\text{GeV}/c] \times \frac{10^9 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8}$$

$$R = \frac{p \cdot \frac{10^9 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot B} = \frac{10}{3} \frac{p}{B}$$

$$p \approx 0.3RB$$

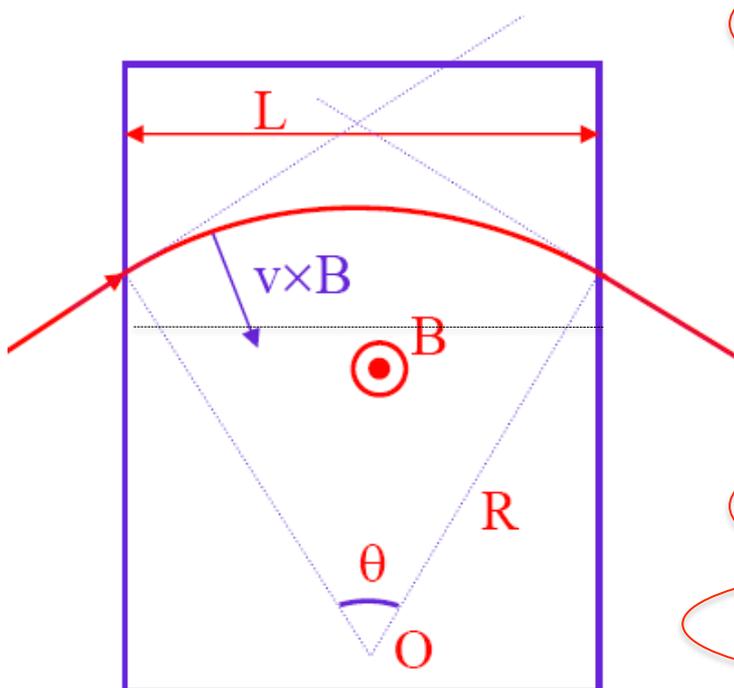
$L \approx R\theta$  per angoli non troppo grandi

$$\theta = \frac{L}{R} = 0.3 \frac{BL}{p}$$

$$\theta = \frac{0.3}{p} \int Bdl \text{ (se } B \text{ non è uniforme)}$$

$$p = \frac{0.3}{\theta} \int Bdl$$

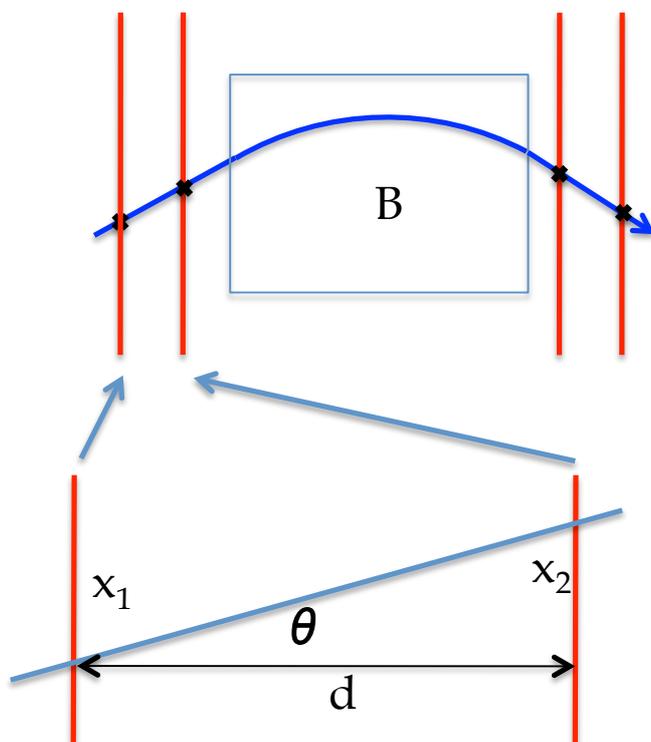
$$\frac{\sigma(p)}{p} = \frac{\sigma(\theta)}{\theta} = \frac{p}{0.3 \int Bdl} \sigma(\theta)$$



- Il valore di  $p$  si può ricavare dall'angolo di deviazione
- a parità di errore sull'angolo  $\sigma(p)/p$  aumenta linearmente con  $p$

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## misura della deflessione



- la misura di bending richiede due misure di direzione
- almeno due punti prima e dopo il magnete

$$\theta \approx \frac{x_2 - x_1}{d}$$

$$\sigma(\theta) = \frac{1}{d} \sqrt{\sigma^2(x_1) + \sigma^2(x_2)} = \frac{\sqrt{2}}{d} \sigma(x)$$

$$\theta_{bending} = \theta_1 - \theta_2$$

$$\sigma(\theta_{bending}) = \sqrt{2} \sigma(\theta) = \frac{2}{d} \sigma(x)$$

$$\frac{\sigma(p)}{p} = \frac{p}{0.3 \int B dl} \sigma(\theta) = \frac{2p}{0.3d \int B dl} \sigma(x)$$

**Esempi**

$$\int B dl = 1 Tm \quad d = 1m \quad \sigma(x) = 200 \mu m$$

$$\frac{\sigma(p)}{p} = 1.3 \cdot 10^{-3} p \quad \text{con } p \text{ in } GeV/c$$

$$p = 1 GeV / c \rightarrow \sigma(p)/p = 1.3 \cdot 10^{-3} \approx 0.1\%$$

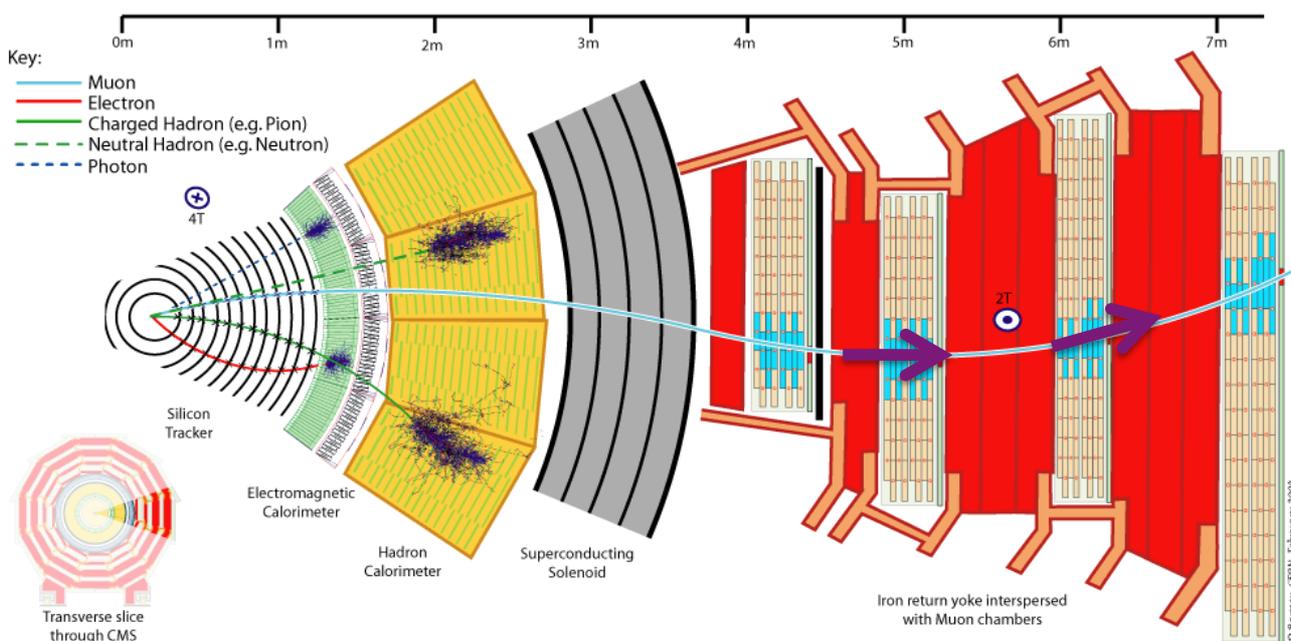
$$p = 10 GeV / c \rightarrow \sigma(p)/p = 1.3 \cdot 10^{-2} \approx 1\%$$

$$p = 100 GeV / c \rightarrow \sigma(p)/p = 1.3 \cdot 10^{-1} \approx 10\%$$

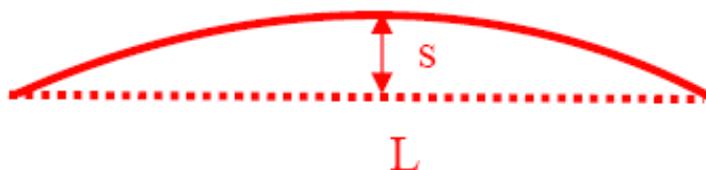
# Introduzione ai rivelatori di particelle

## misura della deflessione

- misura di momento attraverso la deflessione
  - adatta a misure di fasci
  - misure in esperimenti a bersaglio fisso
  - misure di muoni
    - misure multiple di bending in ferro magnetizzato

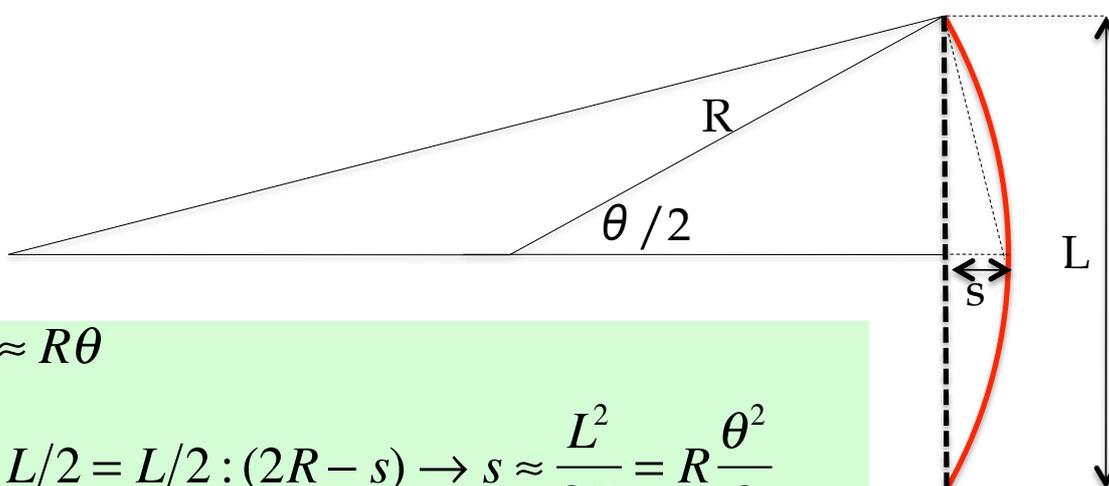


- alternativa
  - misura della sagitta



# Introduzione ai rivelatori di particelle

## misura della sagitta



$$L \approx R\theta$$

$$s : L/2 = L/2 : (2R - s) \rightarrow s \approx \frac{L^2}{8R} = R \frac{\theta^2}{8}$$

$$s = 0.3 \frac{BL^2}{8p} \quad (\text{se } B \text{ è uniforme, } p \text{ in GeV}/c)$$

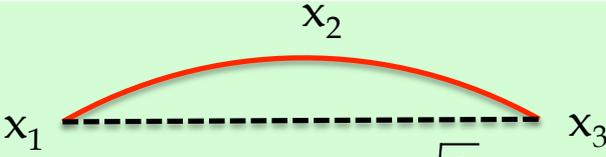
$$\frac{\sigma(p)}{p} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{8\sigma(s)}{0.3BL^2} p$$

- di nuovo  $\sigma(p)/p$  cresce con  $p$ 
  - misura della traccia all'interno del campo magnetico
  - si può migliorare l'errore misurando in più punti
    - oltre che, ovviamente, aumentando  $B$ ,  $L$  e la risoluzione del singolo punto

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## misura della sagitta

- La misura della sagitta deve essere fatta con almeno 3 punti


$$s = x_1 - \frac{x_2 + x_3}{2}$$
$$\sigma(s) = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x) \rightarrow \frac{\sigma(p)}{p} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{8\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)}{0.3BL^2} p$$

- Se si misura con più punti la traccia all'interno del campo magnetico, si arriva alla seguente relazione:

$$\frac{\sigma(p)}{p} = \sqrt{720/(N+4)} \frac{\sigma(x)}{0.3BL^2} \cdot p$$

**Esempi**

$$B = 1.4T \quad L = 1.5m \quad \sigma(x) = 200\mu m \quad N = 100$$

$$\frac{\sigma(p)}{p} = 5.6 \cdot 10^{-4} p \quad \text{con } p \text{ in } GeV/c$$

$$p = 2GeV/c \rightarrow \sigma(p)/p = 1.1 \cdot 10^{-3} \approx 0.1\%$$

$$p = 20GeV/c \rightarrow \sigma(p)/p = 1.1 \cdot 10^{-2} \approx 1\%$$

$$p = 200GeV/c \rightarrow \sigma(p)/p = 1.1 \cdot 10^{-1} \approx 10\%$$

$$\sigma(p)/p = 100\% \rightarrow p \approx 2TeV$$

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## effetti del multiple scattering

- Il momento di una particella che attraversa un materiale risente del multiple scattering

$$\theta_{RMS}(L) \approx \frac{14 \text{ MeV}}{p \cdot c \beta} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

considerando  $\beta \approx 1$

$$\Delta p_T^{MS} \approx p \theta_{RMS} \approx 14 \sqrt{\frac{L}{X_0}} \text{ MeV} / c$$



$$\left. \frac{\sigma(p)}{p} \right|^{MS} = \frac{\Delta p_T^{MS}}{\Delta p_T^{Bending}} = \frac{14 \sqrt{\frac{L}{X_0}} \text{ MeV} / c}{p \theta_{bending}} = \frac{14 \sqrt{\frac{L}{X_0}} \text{ MeV} / c}{0.3 \int B dl}$$

- il contributo del MS a  $\sigma(p)/p$  è un termine costante che non dipende dal momento, e che quindi limita la risoluzione a bassi momenti
  - molto importante se il bending è in ferro (muon detectors)

Fe:  $X_0 = 1.76 \text{ cm}$   $B = 1.8 \text{ T}$

**Esempio**

$$\left. \frac{\sigma(p)}{p} \right|^{MS} = 0.19 \frac{1}{\sqrt{L[m]}}$$

$$L = 3 \text{ m} \rightarrow \left. \frac{\sigma(p)}{p} \right|^{MS} = 11\%$$

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## effetti del multiple scattering

- effetto molto meno importante se il bending è in aria

$$\text{Air: } X_0 \approx 300m \quad B = 1.8T$$

- central detectors

$$\left. \frac{\sigma(p)}{p} \right|^{MS} = 1.4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\sqrt{L[m]}}$$

- in generale la risoluzione relativa in momento è data da un termine costante e un termine che cresce linearmente con  $p$

- per ex il rivelatore centrale di ZEUS aveva una risoluzione

$$\frac{\sigma(p)}{p} = 0.005 p \oplus 0.007$$

- a seconda del range di momento indagato si possono adottare strategie diverse

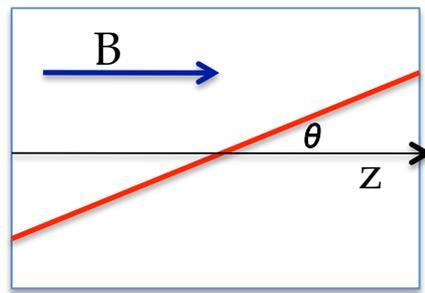
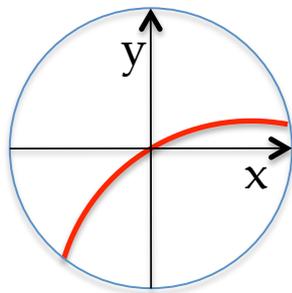
- per bassi momenti, domina il termine costante
  - minimizzare la lunghezza di radiazione
  - camere "leggere" (per esempio BaBar ha usato He come gas nobile)

- per alti momenti domina il termine crescente, è necessario aumentare il braccio di leva (dimensioni) ed avere la massima risoluzione
  - CMS ha adottato un rivelatore centrale tutto a silicio che certamente non ottimizza il materiale, ma la risoluzione

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## misura nei solenoidi

- Misure di momento in un solenoide
  - campo magnetico è longitudinale
  - il bending è nel piano trasverso  $xy$  ( $r\phi$ )
    - si misura  $p_T$
  - la traiettoria è un elica



$$p = \frac{p_T}{\sin\theta} \rightarrow \frac{\sigma(p)}{p} = \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \oplus \frac{\sigma(\theta)}{\tan\theta}$$

$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = \sqrt{\frac{720}{(N+4)} \frac{\sigma(x)}{0.3BL^2}} \cdot p_T \oplus \left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{MS}$$

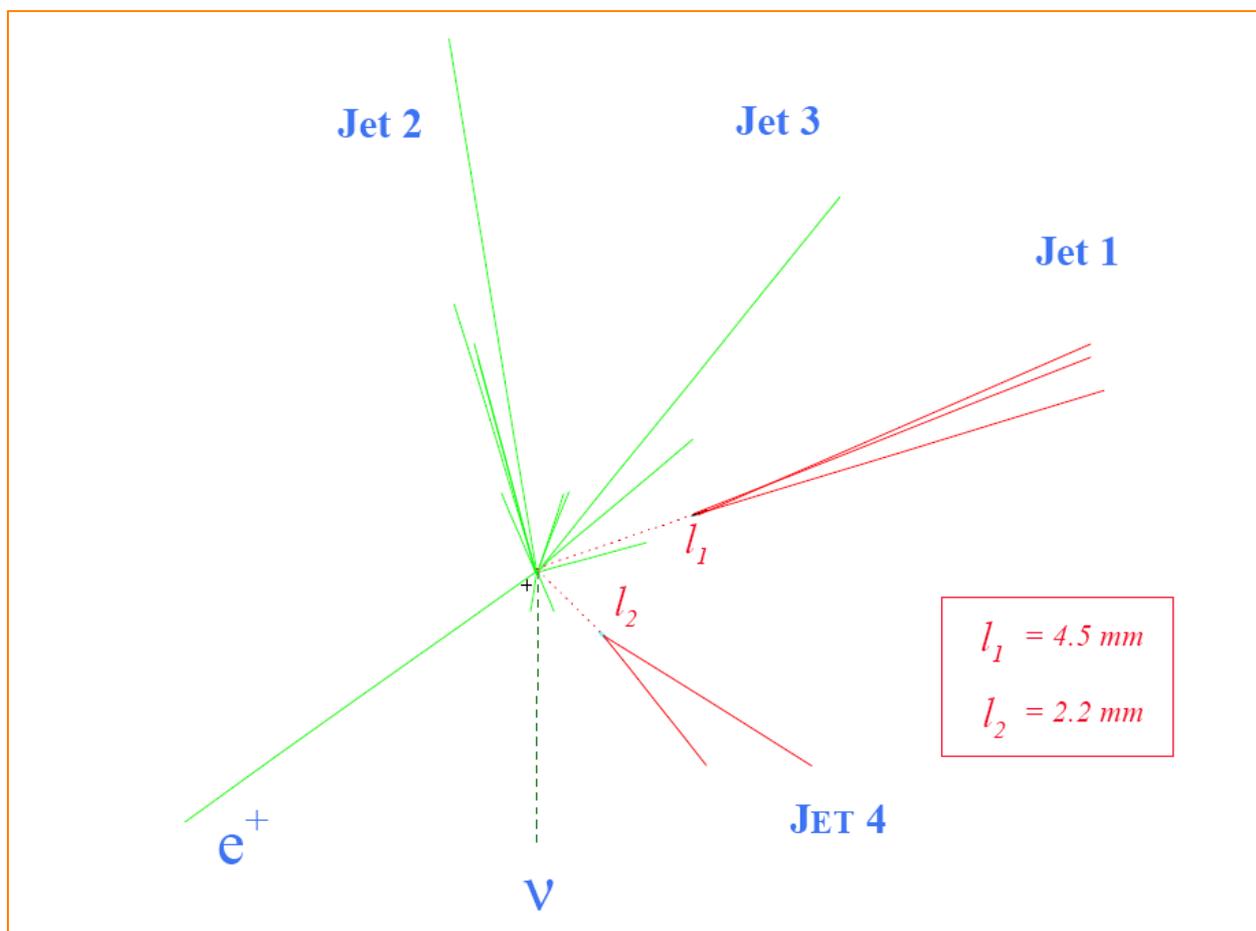
$$\sigma(\theta) \approx \sqrt{\frac{12(N-1)}{N(N+1)} \frac{\sigma(z)}{L}} \Big|^{track} \oplus \frac{14.1\sqrt{L/X_0}}{\sqrt{3}p[MeV/c]} \Big|^{MS}$$

- In generale nei rivelatori centrali l'effetto del MS è piccolo
  - serve grande  $BL^2$  (campi magnetici intensi e grande raggio)
  - la risoluzione migliora linearmente con la risoluzione sul punto, e come la radice del numero di punti di misura

# Introduzione ai rivelatori di particelle

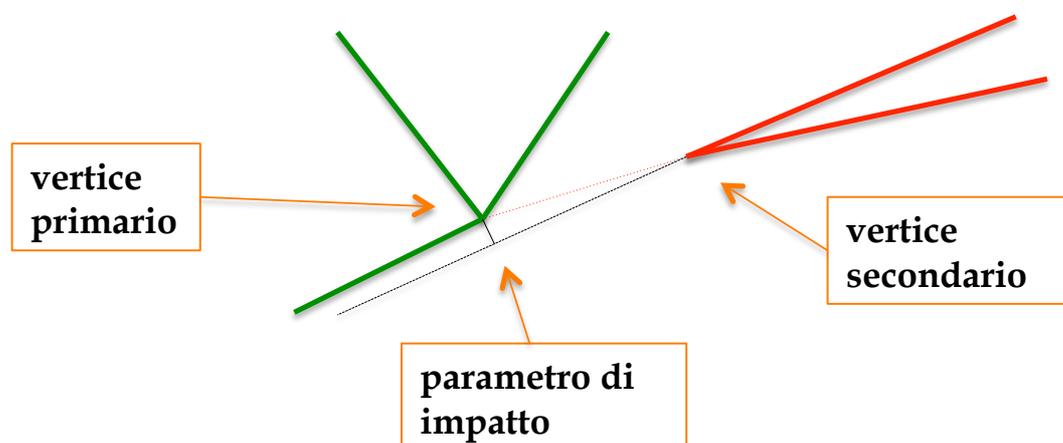
## rivelatori di vertice

- **misura precisa del vertice di interazione**
  - distinguere eventi di interazione da eventi secondari
    - interazioni con la “beam pipe”
  - distinguere particelle da eventi sovrapposti
    - in LHC ci saranno decine di interazioni per “bunch crossing”
  - misurare precisamente la cinematica dell’evento
    - vincolando precisamente il vertice di interazione
- **misura di vertici secondari**
  - identificazione di quark pesanti (b,c)



# Introduzione ai rivelatori di particelle

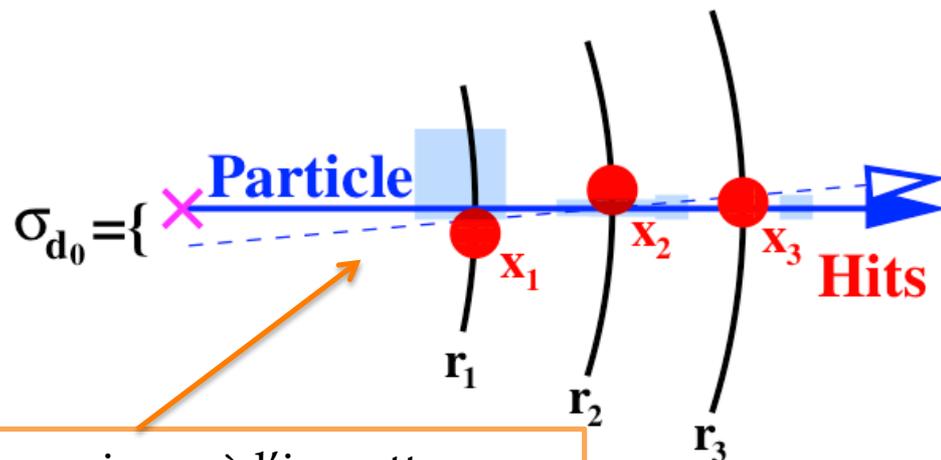
## rivelatori di vertice



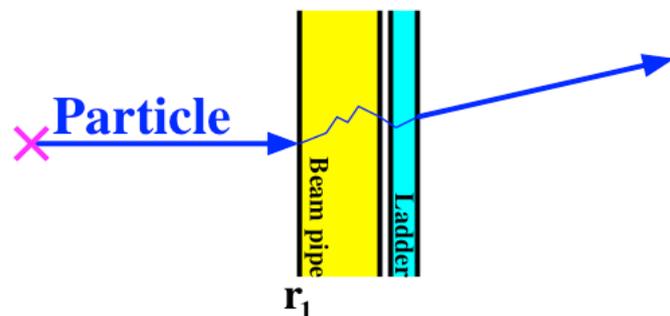
- **Misure di precisione**
  - **parametro di impatto tipico**
    - $300 \mu\text{m}$  per decadimenti di  $b$
    - $100 \mu\text{m}$  per decadimenti di  $c$
  - **richieste**
    - alta precisione  $\approx 10 \mu\text{m}$ 
      - inevitabile l'uso di rivelatori a semiconduttore
    - in un collider, "beam pipe" più sottile e leggera possibile
      - un punto di misura il più vicino possibile al vertice per minimizzare il braccio di leva dell'errore
      - minimo materiale per limitare la diffusione Coulombiana

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## rivelatori di vertice



più piccolo è  $r_1$  minore è l'impatto dell'errore di misura di  $x_1, x_2, x_3$  su  $d_0$



- tubo del fascio sottile e leggero
  - uso di Be o BeAl
- un punto di misura immediatamente fuori dalla beam pipe
  - per minimizzare l'effetto del multiple scattering
- numero di strati limitato per non introdurre eccessivo materiale

# Introduzione ai rivelatori di particelle

---

## rivelatori di vertice

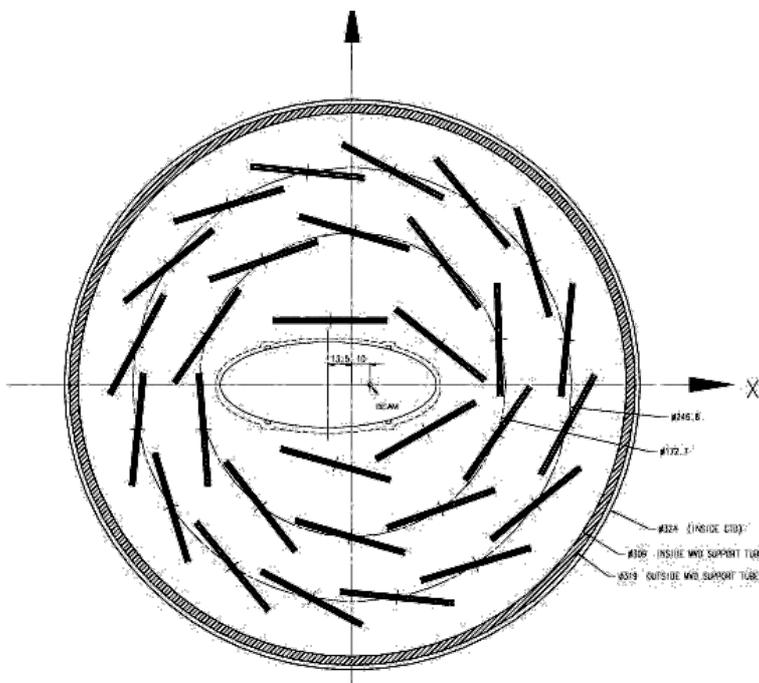
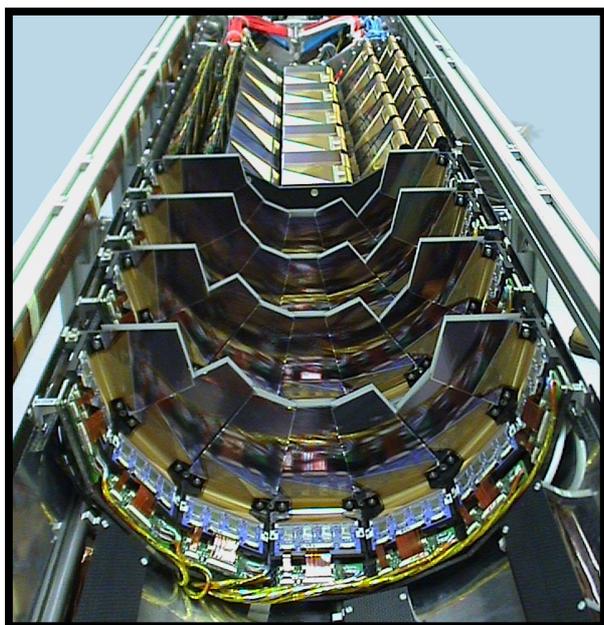
- Riassunto:
  - Richieste:
    - risoluzione spinta
    - massima vicinanza al punto di interazione
  - Problemi in un collider:
    - uso di rivelatori a semiconduttore
      - difficile minimizzare materiale
      - grandissimo numero di canali in una regione molto piccola
        - » difficoltà di estrarre i segnali
    - locazione molto vicino al fascio
      - danneggiamento da radiazione nell'uso
      - possibilità di danni catastrofici in caso di perdite di fascio
      - spesso i layer più interni devono essere sostituiti dopo qualche anno

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Esempio: microvertice di ZEUS



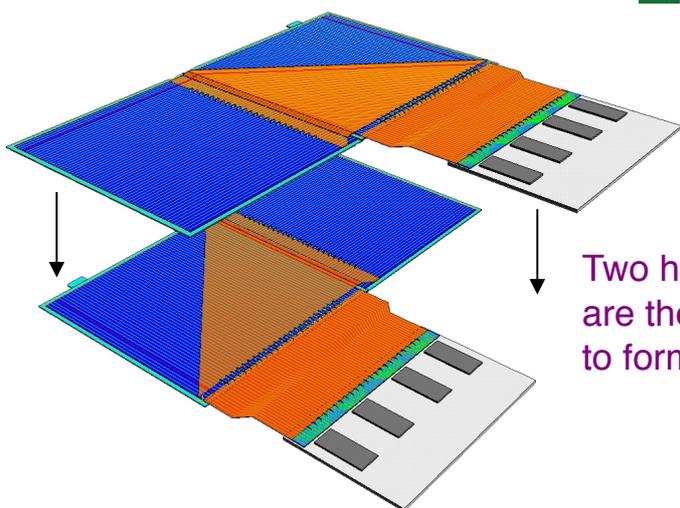
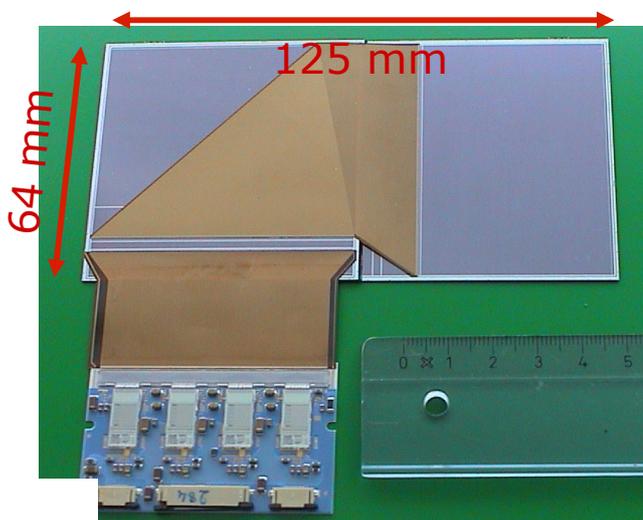
- 3 strati nel barrel, 4 “wheels” in avanti
  - diametro medio del layer esterno  $\approx 25$  cm
- beam pipe ellittica
  - spazio per la radiazione di sincrotrone nel piano orizzontale
  - minima dimensione nel piano verticale
- risoluzione  $\approx 15 \mu\text{m}$  per tracce ortogonali al sensore
- materiale:  $\approx 3\% X_0$  per layer ( $9.2\% X_0$  totale)



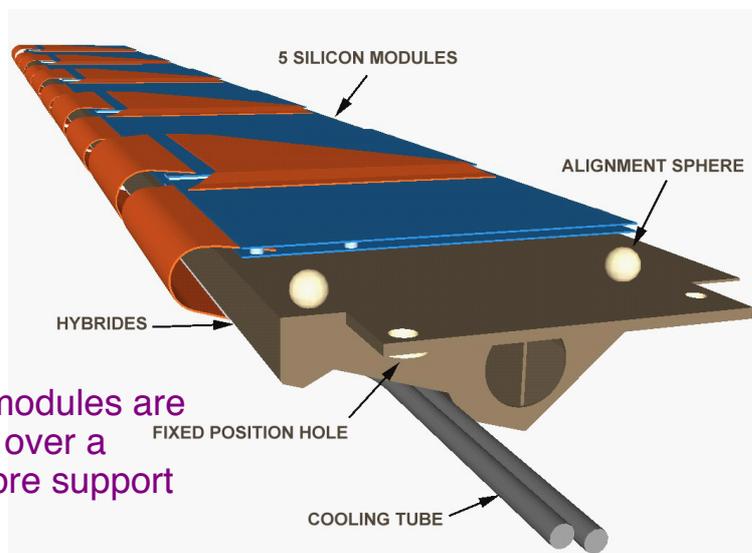
# Introduzione ai rivelatori di particelle

## esempio: microvertice di ZEUS

strips con passo da  $20 \mu\text{m}$   
lettura analogica ogni  $120 \mu\text{m}$   
 $\approx 200000$  canali di lettura



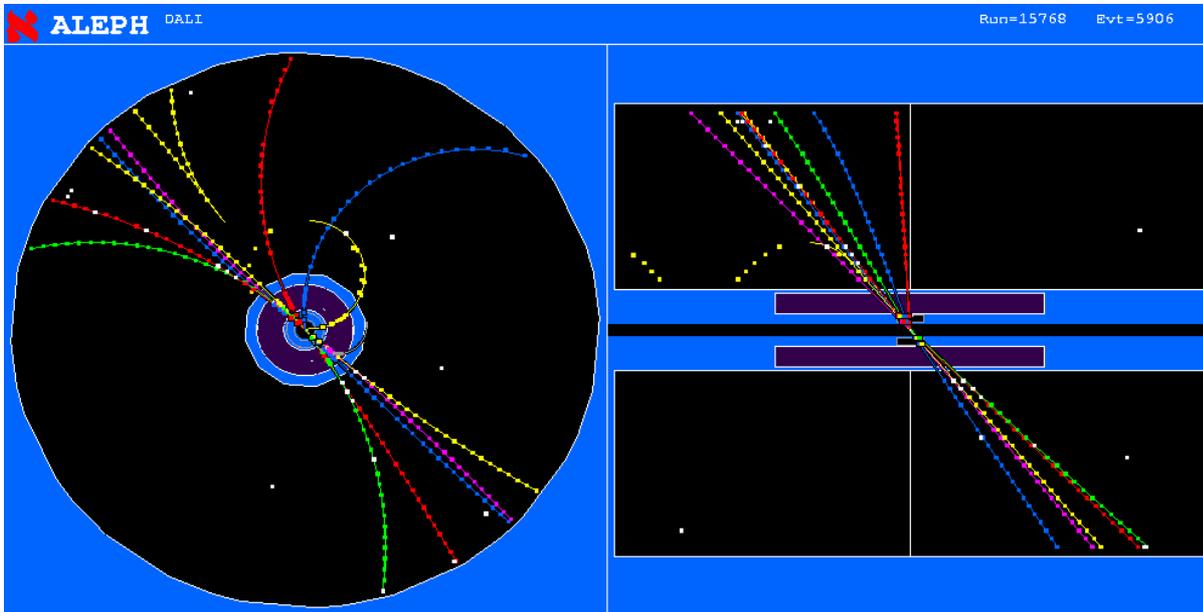
Two half modules  
are then glued together  
to form a full module



Five full modules are  
disposed over a  
carbon fibre support

# Introduzione ai rivelatori di particelle

altri problemi non discussi



- Pattern recognition
- Allineamento

