

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Parte 8 Identificazione delle particelle (PID)

# Introduzione ai rivelatori di particelle

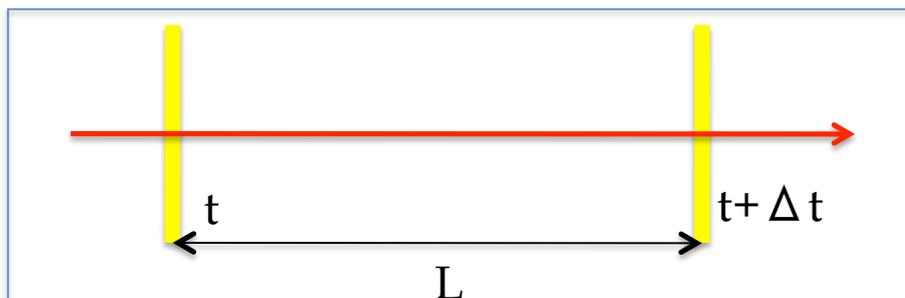
## Particle Identification

- **Metodi basati sulla misura del momento  $p$  e di un'altra variabile cinematica**
  - $p = \gamma m_0 \beta c$
  - se conosco  $p$ , misurando  $\beta$  o  $\gamma$  ricavo  $m_0$
  - Tempo di volo (TOF)
  - Ionizzazione specifica ( $dE/dx$ )
  - Cherenkov
  - Transition radiation
- **Altri metodi**
  - topologia dello sciame in un calorimetro
    - elettroni/adroni
  - passaggio attraverso un assorbitore spesso
    - muoni
  - analisi cinematica dei decadimenti
    - vertici e prodotti di decadimento secondari
    - massa invariante

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Identificazione con tempo di volo (TOF)

- TOF



L=base di volo  
 $\Delta t = \text{TOF}$

$$\frac{L}{\Delta t} = \beta c = \frac{pc^2}{E} = c^2 \frac{p}{\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}} = c \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2 c^2}}$$

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{p^2 + m^2 c^2}{p^2}} = \frac{1}{c} \sqrt{1 + \frac{m^2 c^2}{p^2}}$$

per  $\frac{m^2 c^2}{p^2} \ll 1$  vale  $\sqrt{1 + \frac{m^2 c^2}{p^2}} \approx 1 + \frac{m^2 c^2}{2p^2}$

- se ho due particelle con lo stesso momento e masse diverse  $m_1$  e  $m_2$  ottengo:

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{L}{c} \left( 1 + \frac{m_1^2 c^2}{2p^2} - 1 - \frac{m_2^2 c^2}{2p^2} \right)$$

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{Lc}{2p^2} (m_1^2 - m_2^2)$$

- Il tempo di volo dipende dalla differenza dei quadrati delle masse

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Identificazione con tempo di volo (TOF)

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = L \frac{c (m_1^2 - m_2^2)}{2 p^2}$$

- misurando il tempo  $\Delta t$  in ns, L in metri, le masse in  $\text{GeV}/c^2$ , i momenti in  $\text{GeV}/c$  e ricordando che  $c \approx 0.3\text{m/ns}$ :

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = L \frac{1}{2c} \frac{(m_1^2 - m_2^2)}{p^2} \approx L \frac{5}{3} \frac{(m_1^2 - m_2^2)}{p^2}$$

- la separazione in tempo tra due particelle diverse dipende da  $1/p^2$ , al crescere del momento la base L deve crescere con  $p^2$  a parità di separazione in tempo.
  - **Esempio:** supponiamo di avere una risoluzione in tempo  $\sigma_t = 100$  ps e voler considerare distinte le particelle con una distanza  $\Delta t \geq 4\sigma_t$ . Quale è la distanza tra gli scintillatori per distinguere pioni da k di  $1\text{GeV}/c$ ?

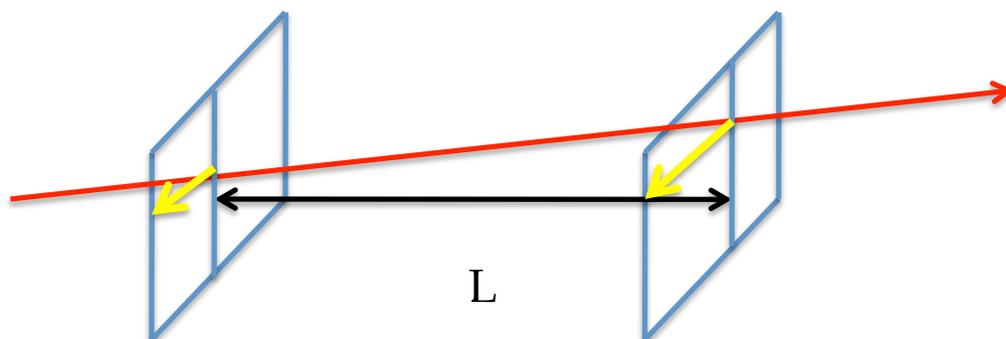
$$m_k \approx 0.5\text{GeV}/c^2 \quad m_\pi \approx 0.14\text{GeV}/c^2$$

$$\frac{\Delta t_k - \Delta t_\pi}{L} \approx \frac{5}{3} \frac{(m_k^2 - m_\pi^2)}{p^2} \approx 0.4\text{ ns/m}$$

- si ottiene una separazione di 400ps con una base di un metro.
- chiaramente separazioni con il metodo di misura del TOF sono utili con momenti relativamente bassi, o con differenze di massa grandi

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Misure di TOF con scintillatori

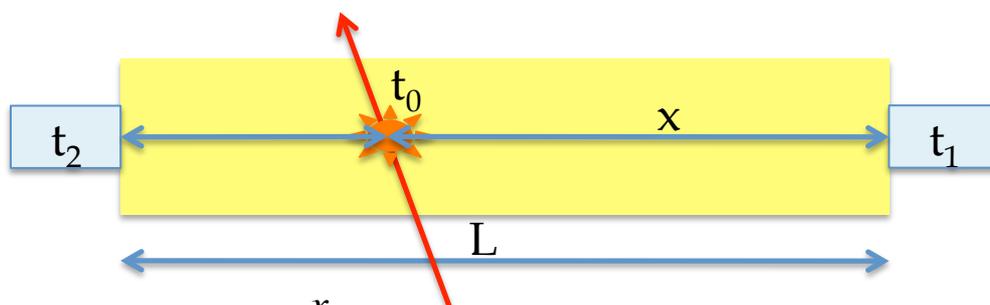


- Il tempo misurato dal rivelatore di TOF:
  - dipende dalla distanza tra gli scintillatori e dalla velocità della particella
  - ma dipende anche dal tempo di estrazione del segnale dallo scintillatore (velocità di propagazione della luce nel rivelatore)
    - In particolare se gli scintillatori sono grandi e la traccia è inclinata l'effetto può essere rilevante
- Si usano sistemi di “mean-timer” per ovviare a questo inconveniente

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## mean timer e tempo di volo (TOF)

- propagazione della luce nello scintillatore
  - $v$  = velocità della luce nello scintillatore



$$t_1 = t_0 + \frac{x}{v}$$

$$t_2 = t_0 + \frac{L - x}{v}$$

$$t_1 + t_2 = 2t_0 + \frac{L}{v} \rightarrow t_0 = \frac{t_1 + t_2 - \frac{L}{v}}{2}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{L}{v} - \frac{2x}{v} \rightarrow x = \frac{v}{2} \left( \frac{L}{v} + t_1 - t_2 \right)$$

- misurando il tempo da entrambi i lati si possono calcolare sia la posizione della traccia che il tempo di passaggio

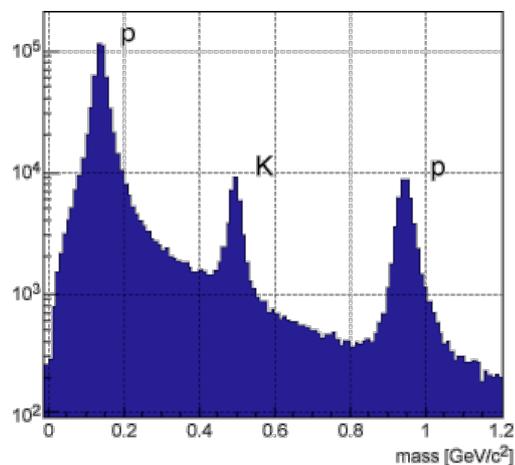
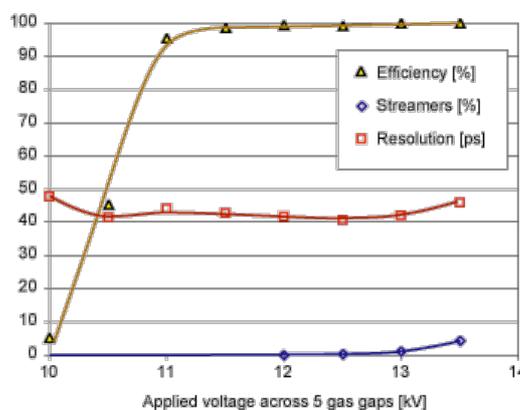
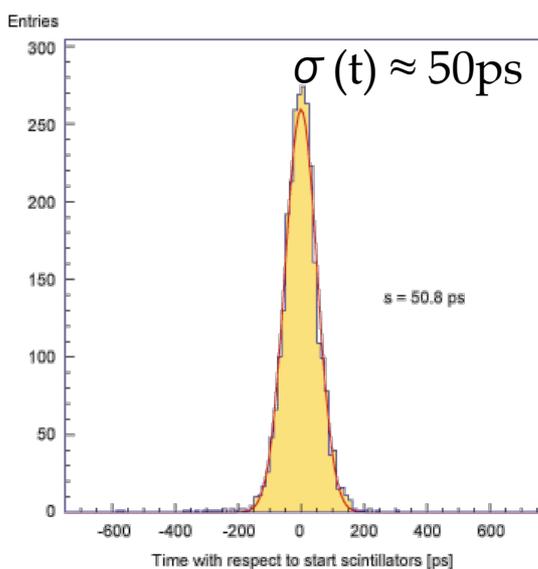
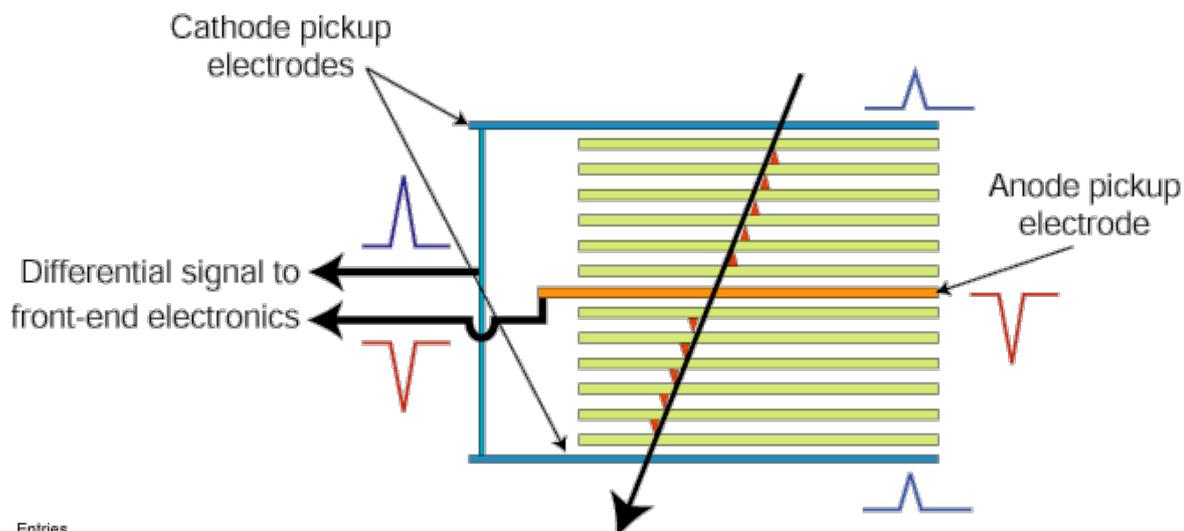
$$\sigma(t) = 100 \text{ ps} \rightarrow \sigma(t_1 - t_2) = 150 \text{ ps}$$

$$\sigma(x) = \frac{v}{2} \sigma(t_1 - t_2) = \frac{c}{4} \times 0.15 \cdot 10^{-9} \approx 1 \text{ cm}$$

- buona risoluzione spaziale

# Introduzione ai rivelatori di particelle

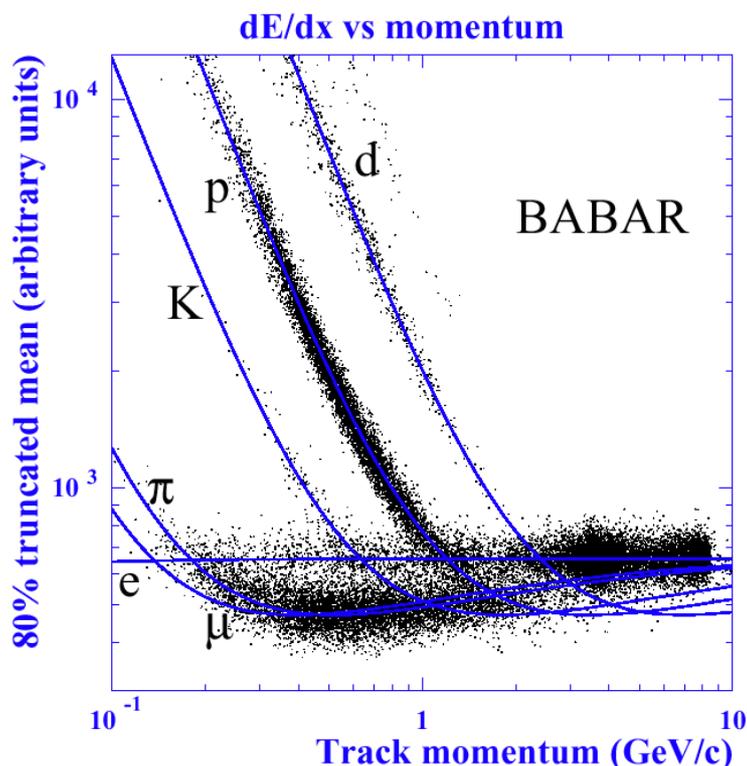
## Esempio:ALICE ad LHC: TOF con multigap RPC



separazione in massa per  
momenti fino a 3GeV/c  
(simulazione)

# Introduzione ai rivelatori di particelle

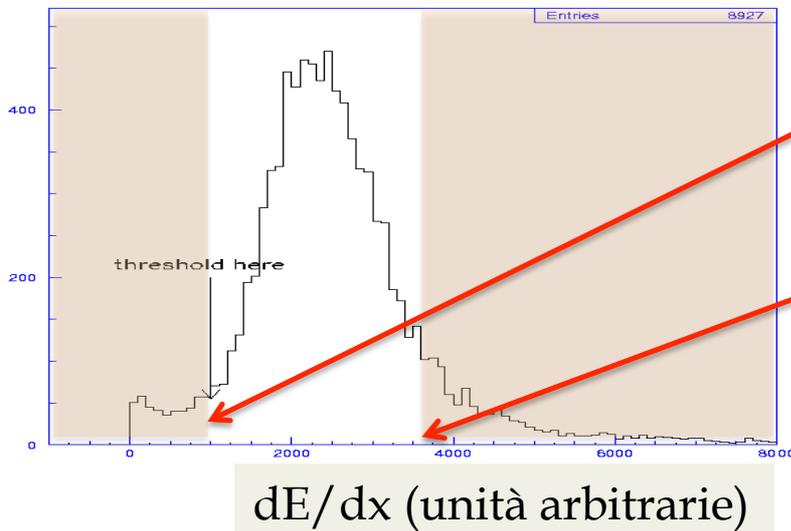
## Identificazione con $dE/dx$



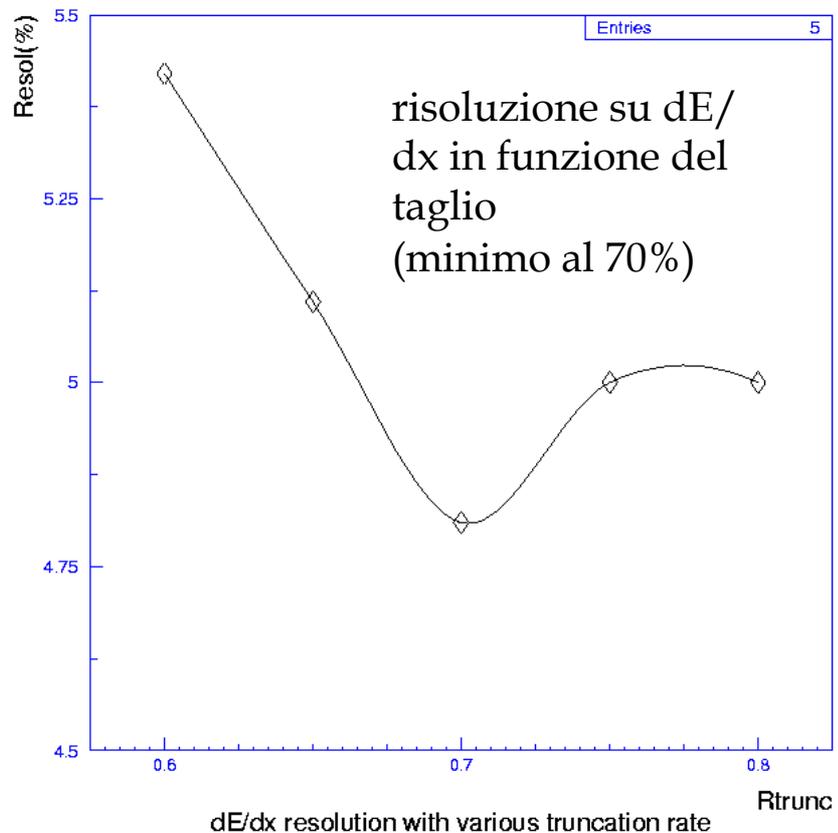
- In generale come “sottoprodotto” della misura del momento in un rivelatore di tracce
  - molti campioni sottili ( $\approx 1\text{cm Ar}$ )
    - media di molte misure per traccia
    - ma grandi fluttuazioni statistiche dovuta alle emissioni di elettroni  $\delta$  (distribuzione di Landau)
  - “truncated mean”: si migliora la risoluzione tagliando gli eventi sulle code
    - 20÷40% dei campioni a più alta ionizzazione
    - risoluzioni dell'ordine del 2÷3%

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## truncated mean



- taglio inferiore per rimuovere il rumore
- taglio superiore per rimuovere le fluttuazioni



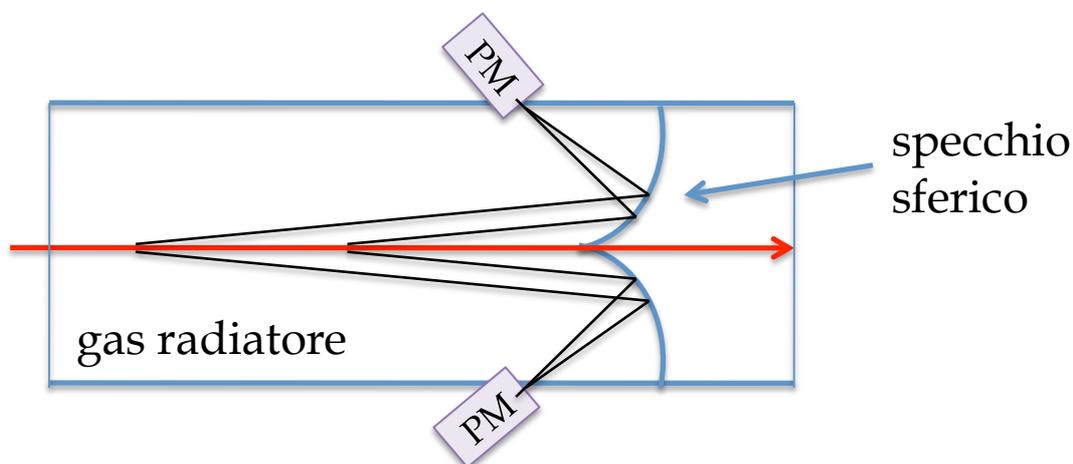
# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Cherenkov

- Cherenkov a soglia
  - fissato l'indice di rifrazione  $n$ , danno segnale le particelle con  $\beta > \beta_{\min} = 1/n$ 
    - vetro, plexiglass:  $n=1.5$ 
      - »  $\beta_{\min}=0.67$ ,  $\gamma_{\min}=1.37$
    - acqua:  $n=1.33$ 
      - »  $\beta_{\min}=0.75$ ,  $\gamma_{\min}=1.52$
    - aerogel  $n=1.007 \div 0.13$ 
      - »  $\beta_{\min}=0.993 \div 0.884$ ,  $\gamma_{\min}=8.5 \div 2.1$
    - aria STP:  $n=1.0003$ 
      - »  $\beta_{\min}=0.9997$ ,  $\gamma_{\min}=41.2$
  - in generale interessano particelle con  $\beta$  grande
    - gas
      - nei gas  $n$  dipende dalla pressione
        - »  $n \approx 1 + \alpha p$
      - posso usare diversi gas e diverse pressioni per determinare la soglia in  $\beta$
    - aerogel di silicio
      - struttura porosa con moltissima aria
      - $n$  dipende dalla densità
        - »  $n \approx 1 + 0.21 \rho$

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## schema Cherenkov a soglia



$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \cdot \sin^2 \theta_C \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

$$\text{per } z = 1, \lambda_1 = 400\text{nm}, \lambda_2 = 700\text{nm}$$

$$\frac{dN}{dx} = \frac{490}{\text{cm}} \cdot \sin^2 \theta_C$$

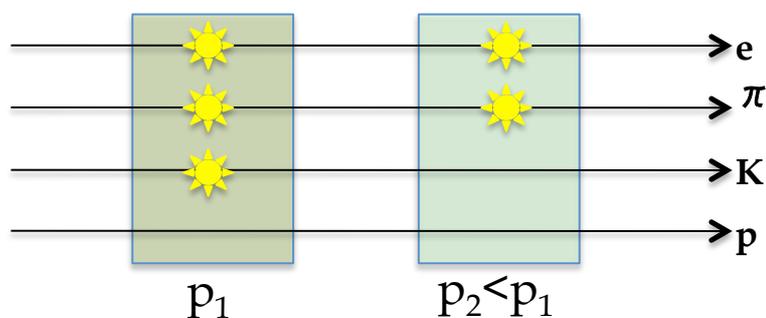
il numero di fotoni emessi dipende da  $\sin^2 \theta_C$ ,  
l'emissione è maggiore per particelle molto  
sopra soglia

- si può aumentare il numero di fotoni andando in UV, ma l'indice di rifrazione diminuisce con la frequenza

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Cherenkov a soglia

- a parità di momento, hanno  $\beta$  più grande le particelle con massa più piccola
  - raggiungono la soglia di emissione Cherenkov prima gli elettroni, poi i  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $K$ ,  $p$
  - un rivelatore a soglia misura tutte le particelle sopra soglia

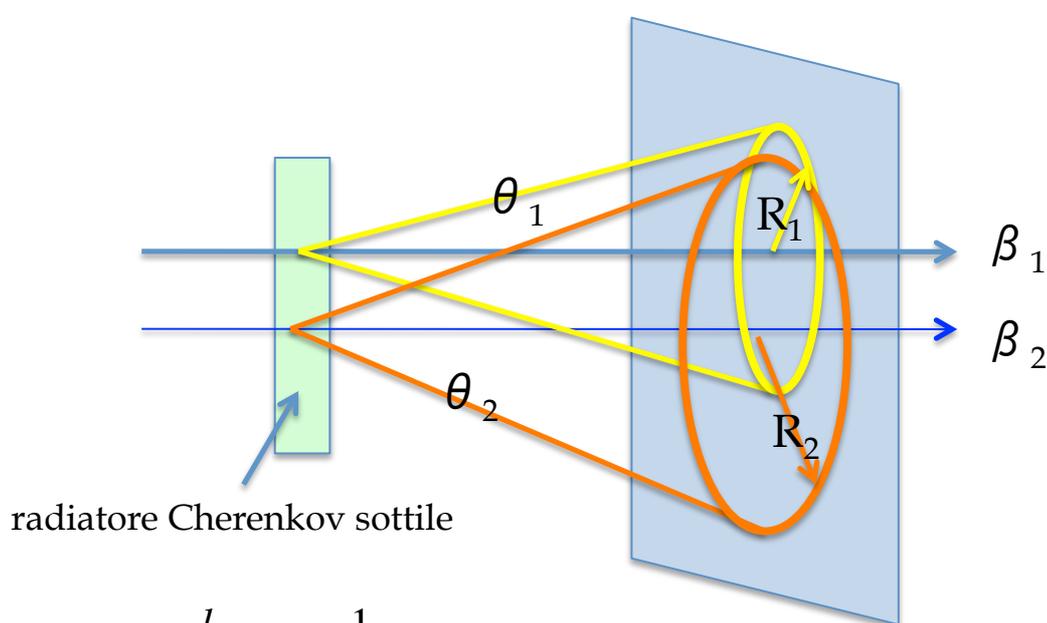


- esempio, posso mettere due rivelatori in cascata, uno sopra soglia per  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $k$  ed uno sopra soglia per  $e$ ,  $\mu$ ,  $\pi$ 
  - si può ottenere con gas a pressioni diverse
- se ottengo segnale dal primo ma non dal secondo ho identificato la particella come un  $K$ 
  - NB funziona bene per momenti definiti, per ex per determinare la composizione di un fascio di particelle selezionato in momento

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Imaging Cherenkov

- RICH (Ring Imaging Cherenkov)
  - si ricostruisce la posizione dei singoli fotoni emessi
  - dal raggio del cerchio e dalla distanza dal radiatore si risale all'angolo e quindi alla  $\beta$



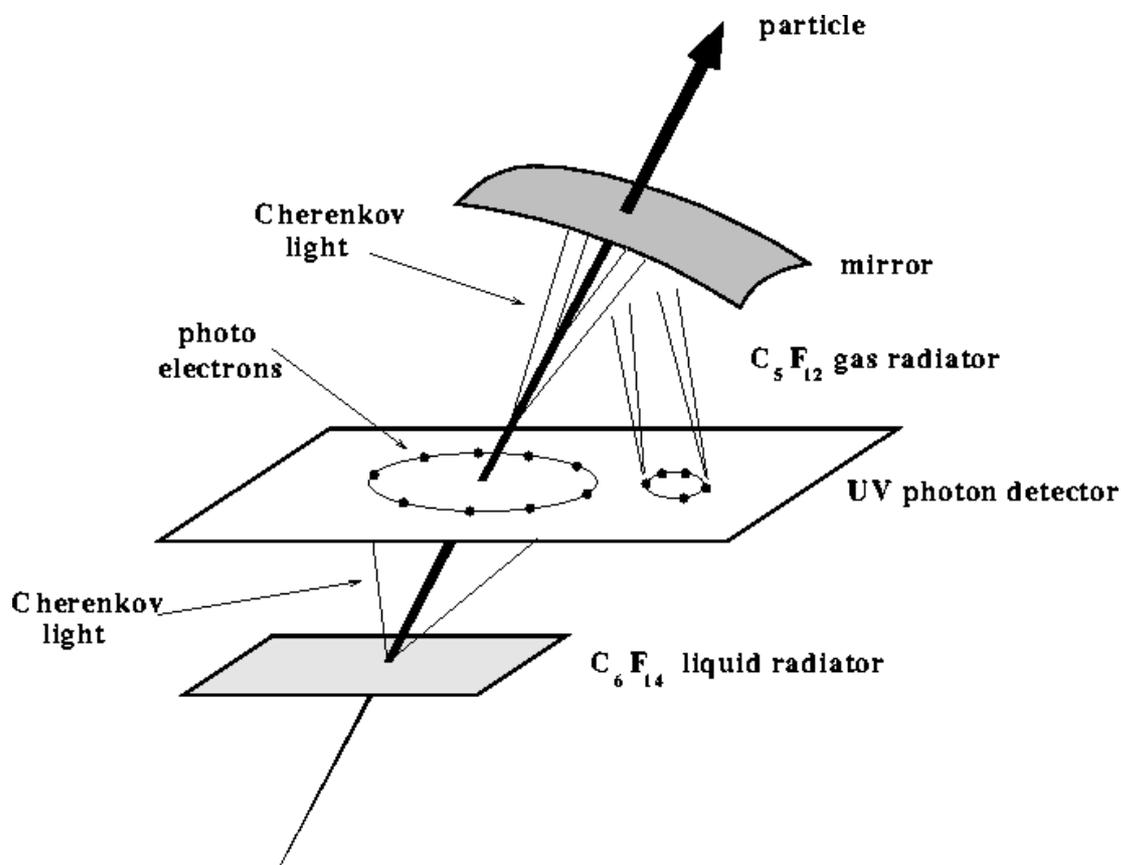
$$\cos \theta_c = \frac{l}{\sqrt{l^2 + R^2}} = \frac{1}{n\beta}$$

$$\beta = \frac{1}{n \cos \theta_c} = \frac{\sqrt{l^2 + R^2}}{ln}$$

- proximity focusing: radiatore deve essere relativamente sottile per produrre un cerchio focalizzato
  - piccolo numero di fotoni (tenendo conto anche dell'efficienza quantica del rivelatore)
  - possibile confusione tra i cerchi se la densità di particelle è alta

# Introduzione ai rivelatori di particelle

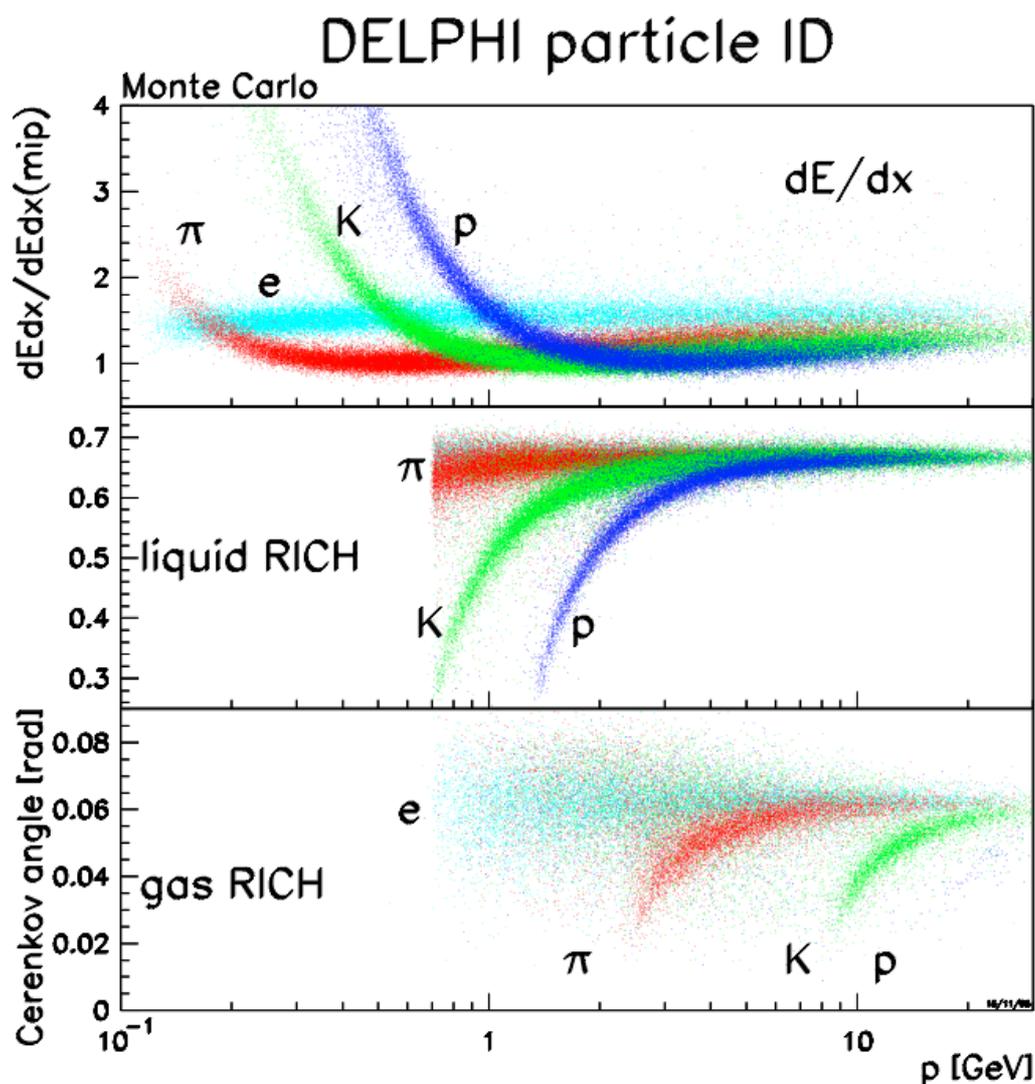
## imaging Cherenkov



- realizzazione di Delphi (LEP)
  - due assorbitori diversi (liquido/gas) con indici di rifrazione diversi
    - struttura proximity per il liquido e focusing per il gas
  - rivelatore di fotoni comune
    - in generale un convertitore fotoni → elettroni (sottile strato di CsI) con un rivelatore a fili per misurare la posizione

# Introduzione ai rivelatori di particelle

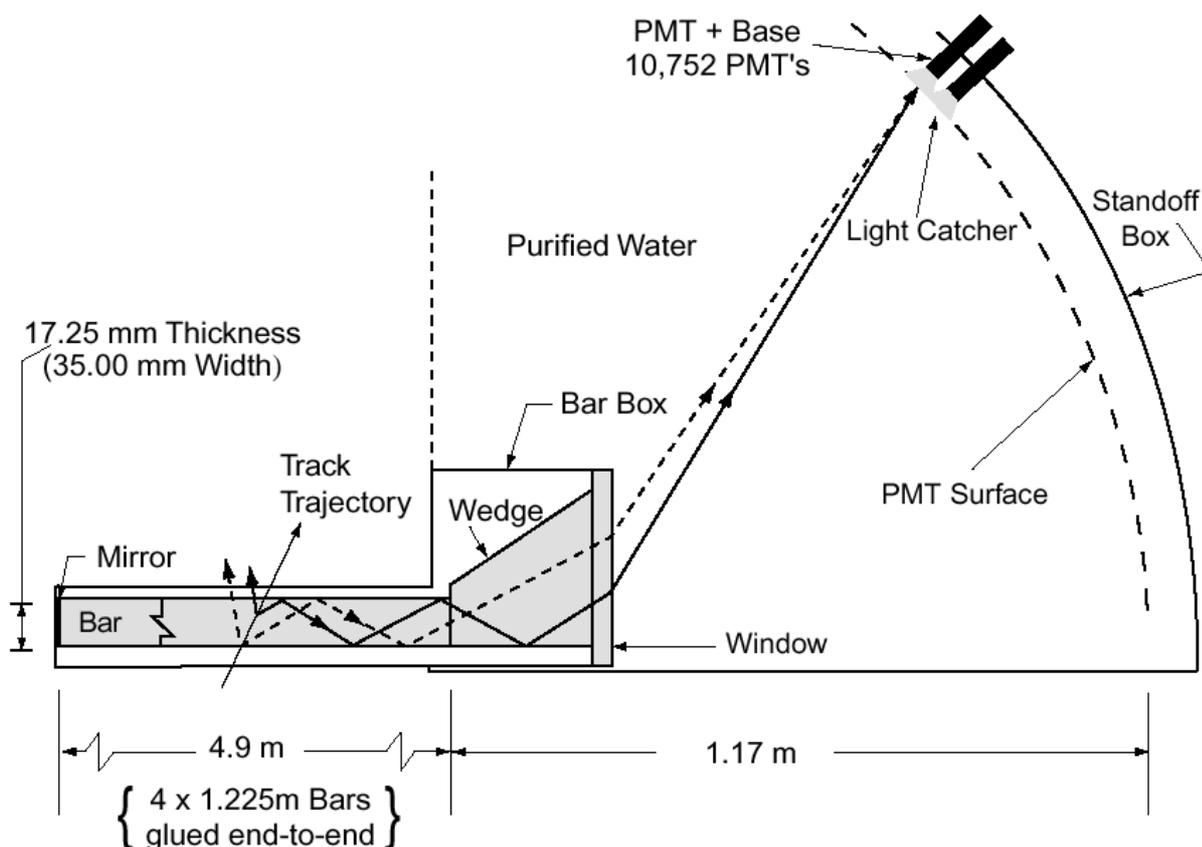
## PID in Delphi



- insieme delle misure di PID in Delphi (simulazione)
  - è evidente il diverso range di applicazione dei metodi
    - NB si è anche poi utilizzato il  $dE/dx$  nel silicio del rivelatore di vertice

# Introduzione ai rivelatori di particelle

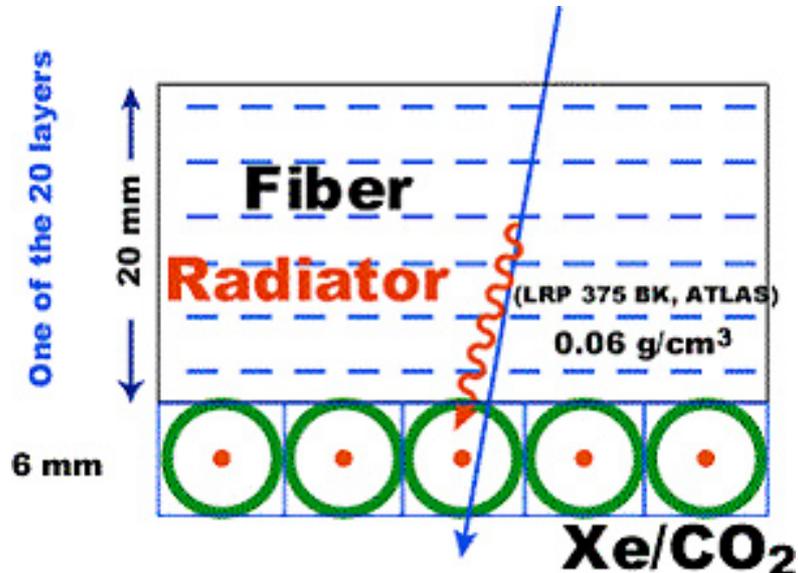
## imaging Cherenkov



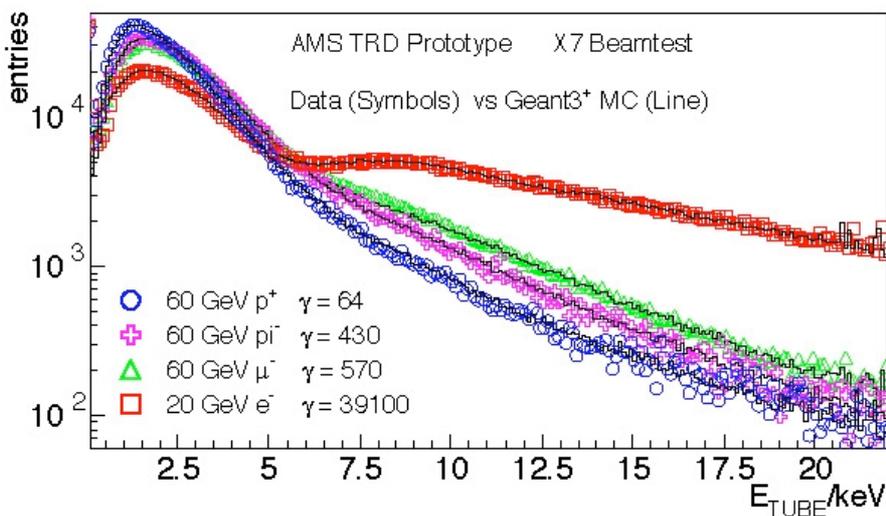
- DIRC: Detection of Internally Reflected Cherenkov light
  - usato in BaBar a SLAC
  - sfrutta la riflessione interna in guide di quarzo (radiatore) per conservare l'angolo Cherenkov
  - rivelatore esterno
    - 11000 fotomoltiplicatori convenzionali

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Transition Radiation Detectors



- Esempio di TRD (AMS)
  - radiatore con molti strati
    - molte transizioni di indice di rifrazione
    - maggiore probabilità di emissione di un fotone (in genere X)
  - rivelatore a gas con gas nobili pesanti
    - migliore efficienza di rivelazione di fotoni X per effetto fotoelettrico



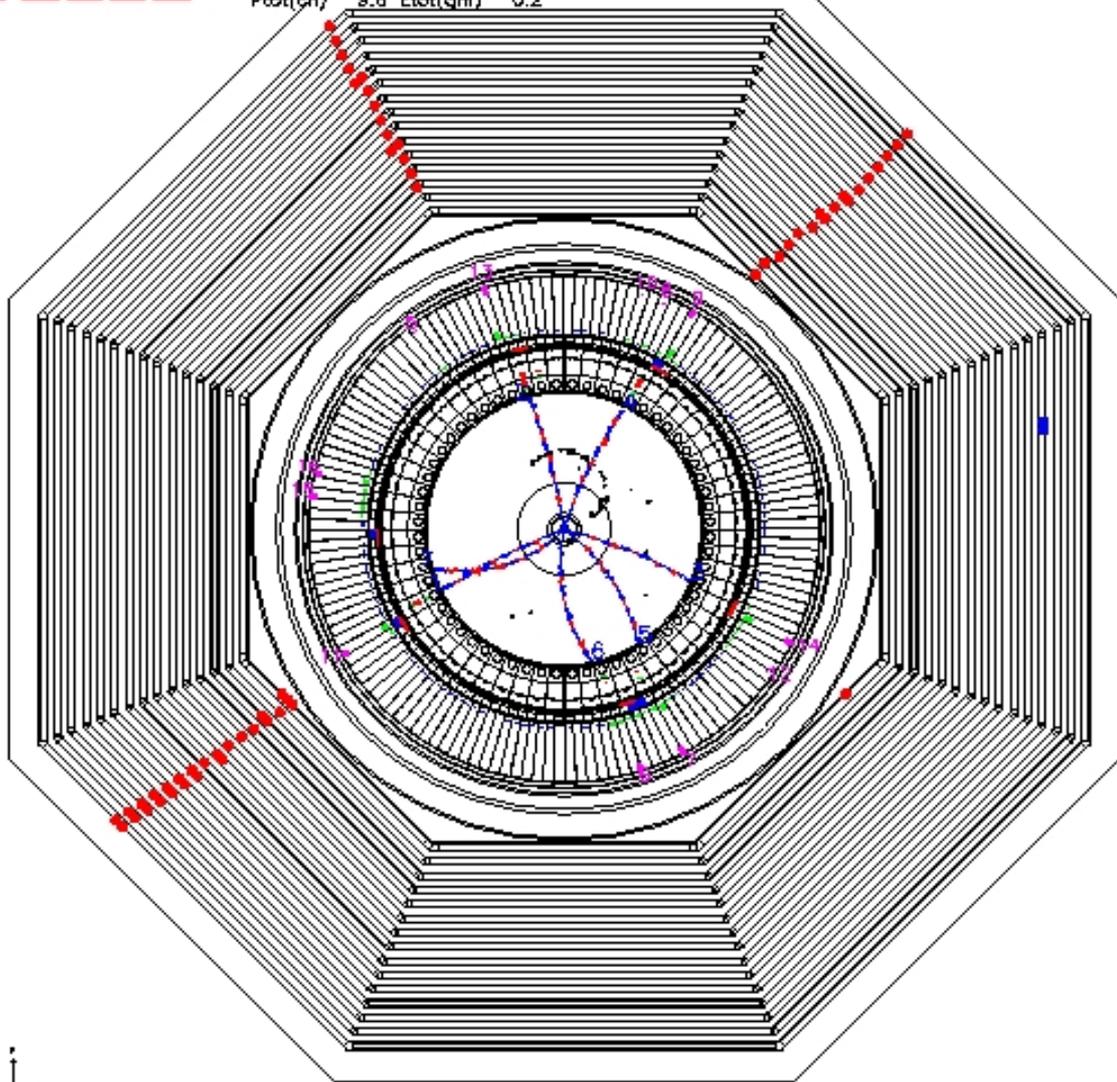
TRD sensibile a  $\gamma$   
→ adatto a discriminare elettroni veloci

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## identificazione dei muoni

**BELLE**

Exp 3 Run 452 Farn 6 Event 11846  
Eler 8.00 Eler 3.50 Sun Aug 1 03z10z51 1999  
TrgID 0-DetVer 0-MagID 0-BField 1.50-DetVer 4.01  
Ptot(ch) 9.6 Etot(qm) 0.2



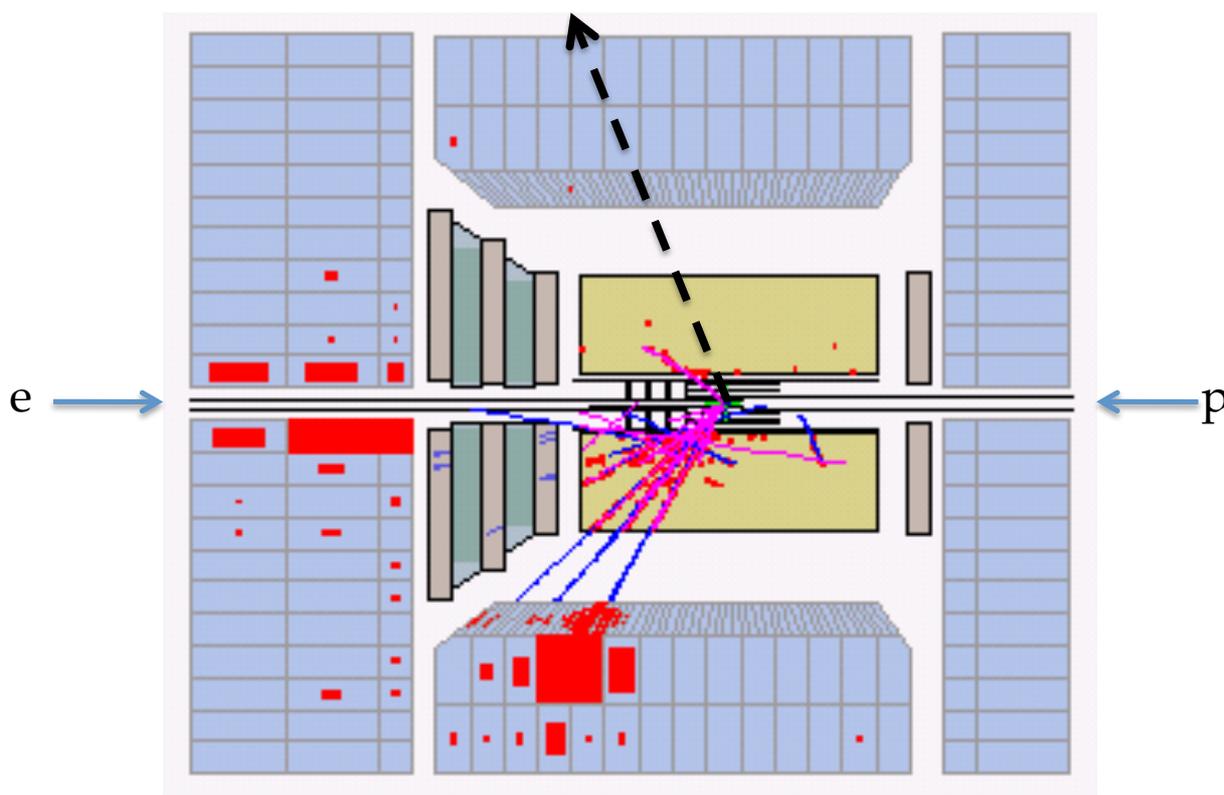
20 cm

- muoni identificati dalla penetrazione in spessi assorbitori
  - calorimetri
  - ferro di ritorno del campo magnetico
- associazione con tracce cariche nei rivelatori di traccia

# Introduzione ai rivelatori di particelle

## Altri metodi di identificazione

- elettroni/fotoni rispetto ad adroni
  - struttura dello sciame in un calorimetro
- neutrini
  - interazioni deboli con produzione di particelle cariche in rivelatori molto massicci
  - misura indiretta con la “missing energy”
    - Esempio, evento di “charged current” in ZEUS
    - $e+p \rightarrow \nu+\text{jet}$



- possibile in un rivelatore “ermetico”