



L'esperienza ALICE (II parte)

F. Noferini

P. Antonioli

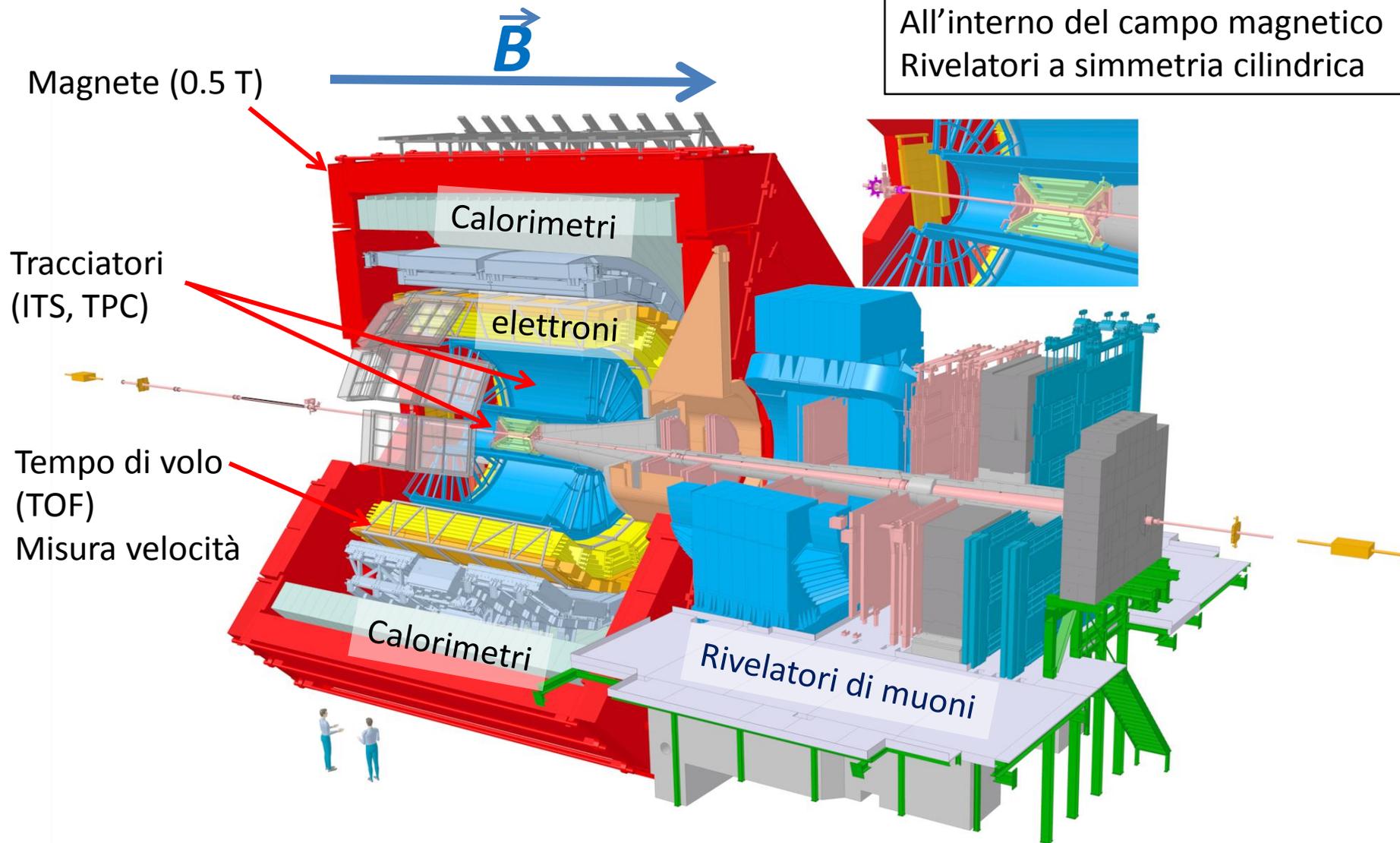
F. Ercolessi

N. Rubini



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Rivelatore alice



L'impulso delle particelle ricostruite

Alcune definizioni

Per «impulso» intendiamo la quantità di moto di una particella che a livello classico è equivalente a $\vec{p} = m\vec{v}$. Quando però $v = \|\vec{v}\|$ è vicino alla velocità della luce c gli effetti relativistici non sono più trascurabili e la formula corretta è $\vec{p} = m\vec{v}/\sqrt{1 - (v/c)^2}$. Esiste una velocità limite ma non un impulso limite.

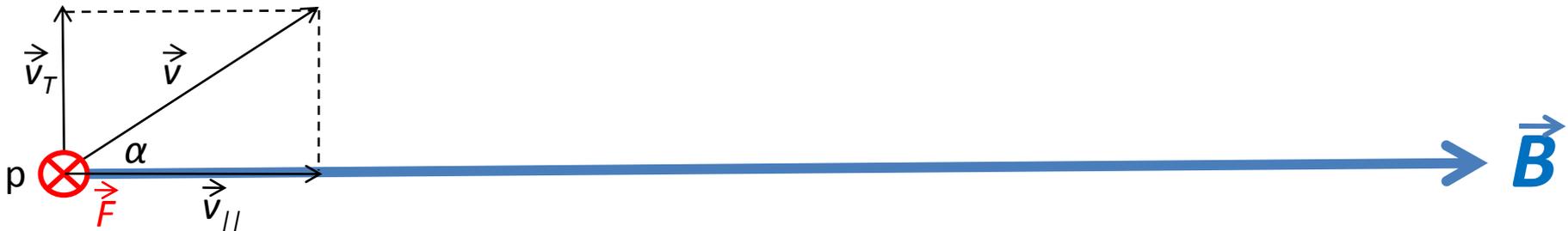
Per semplicità lavoriamo utilizzando un'unità di misure «comode» per il nostro caso.

Energia = espressa in eV o suoi multipli (keV, MeV, **GeV**)

Impulso = Energia / Velocità = eV/c

Massa = Energia / Velocità² = eV/c²

Particella *carica* in campo magnetico



Una particella *carica* (per esempio un protone) che si muove all'interno di un campo magnetico è soggetta alla Forza di Lorentz $\rightarrow \vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$

Il modulo della forza è: $F = q v B \sin\alpha = q v_T B$

N.B. La forza è sempre ortogonale al campo magnetico e alla velocità:

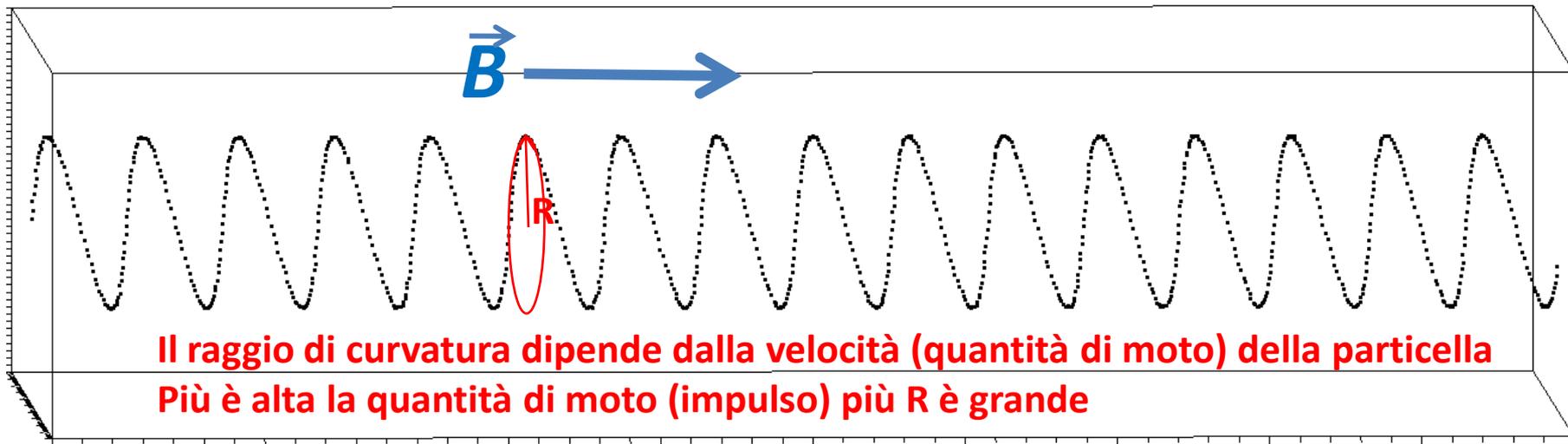
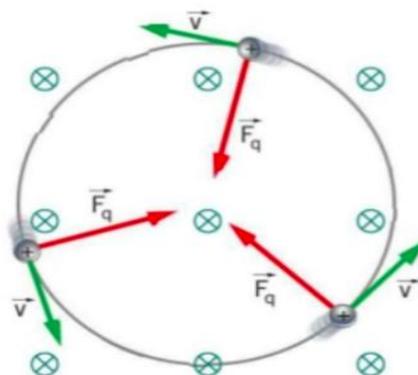
- non compie lavoro (il modulo della velocità rimane costante)
- modifica in direzione la componente della velocità perpendicolare a \vec{B} (v_T)

L'effetto finale è un moto elicoidale:

- la particella ruota intorno al campo magnetico con velocità costante
- e intanto si propaga lungo di esso

Il moto elicoidale

- moto circolare uniforme nella proiezione perpendicolare a \vec{B}
- moto uniforme lungo \vec{B}



Misura dell'impulso della particella

Particelle cariche all'interno di un campo magnetico vengono deflesse secondo la legge di Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

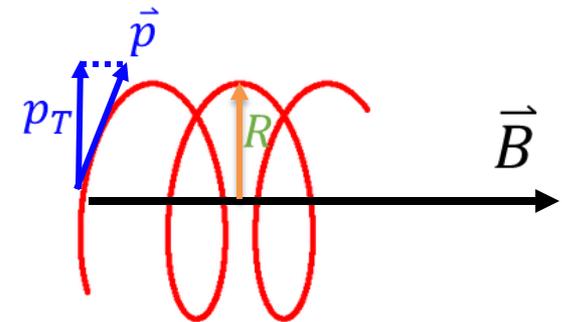
La traiettoria di una particella carica è elicoidale: moto rettilineo uniforme lungo la direzione di B e circolare uniforme sul piano perpendicolare a \vec{B} .

Il raggio di curvatura del moto circolare dovuto alla forza di Lorentz si ricava dalla relazione:

$$\text{Forza centripeta} \rightarrow \frac{mv^2}{R} \hat{r} = \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \leftarrow \text{Forza di Lorentz}$$

$$\text{Se misuro ...} \rightarrow \textcircled{R} = \frac{\textcircled{p_T}}{0.3B} \leftarrow \text{... ricavo}$$

Con p_T espresso in GeV/c, B in Tesla.



Particelle nel rivelatore

NB-1 ||
normalmente le particelle prodotte nella collisione hanno impulsi elevati $\rightarrow R$ di curvatura ($\gg 1$ m) maggiore delle dimensioni del rivelatore (qualche metro) \rightarrow percorrono solo un arco all'interno del rivelatore.

NB-2 ||
Particelle **positive** e **negative** si distinguono facilmente perché curvano in direzioni opposte.

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Il segno della carica decide il verso della forza.



ALICE



Event display (pp)

Un evento come visto dal nostro rivelatore:

- in **rosso** i segnali misurati dal tracciatore interno (ITS, inner tracking system)
- in **verde** i segnali misurati dal tracciatore principale (TPC, time projection chamber)

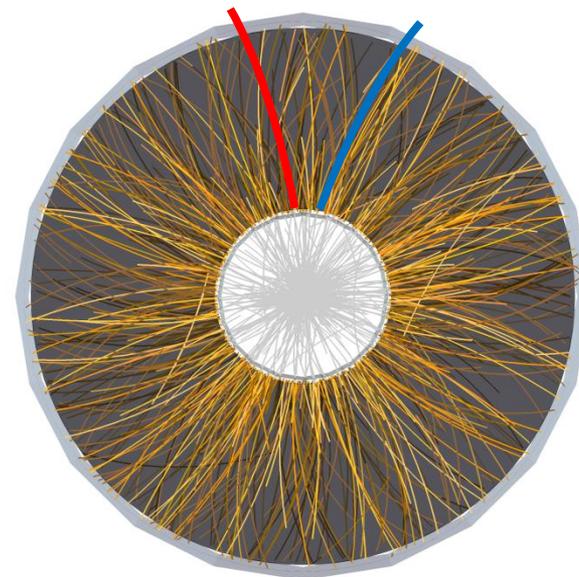
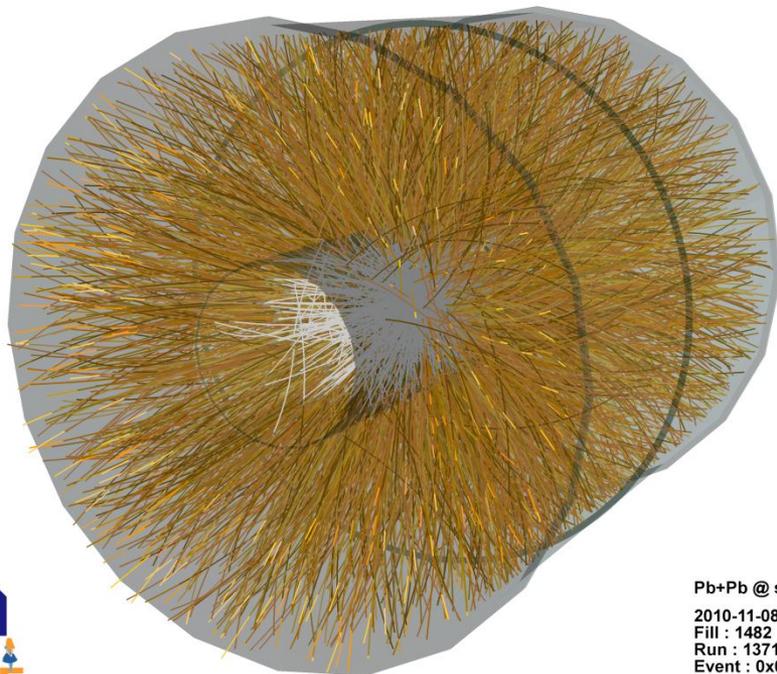
Osservazioni

- ci sono archi che puntano all'interno (dove è avvenuta la collisione) → particelle primarie
- ci sono archi che partono più esternamente → particelle secondarie

Alcune particelle secondarie hanno impulsi molto bassi → elica completamente contenuta

Event display (Pb-Pb)

ALICE è costruito per essere in grado di distinguere singole particelle in un ambiente molto denso

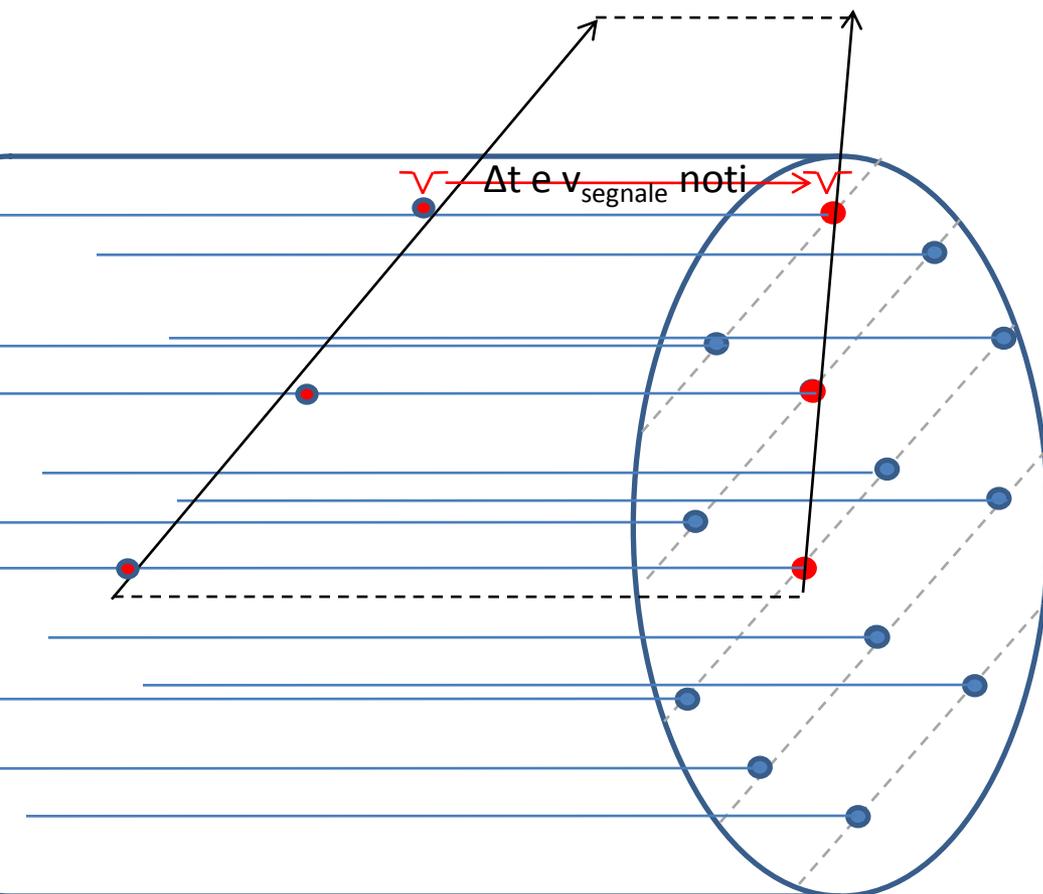


Pb+Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV
 2010-11-08 11:30:46
 Fill : 1482
 Run : 137124
 Event : 0x00000000D3BBE693

Il segnale prodotto è ricostruito attraverso algoritmi che dai singoli punti (cluster) misurati ricavano le tracce (archi) associate alle particelle prodotte (mostrate in questo event display).

In Pb-Pb parliamo di migliaia di tracce ricostruite e distinte in un singolo evento.

Ricostruzione impulso (I)



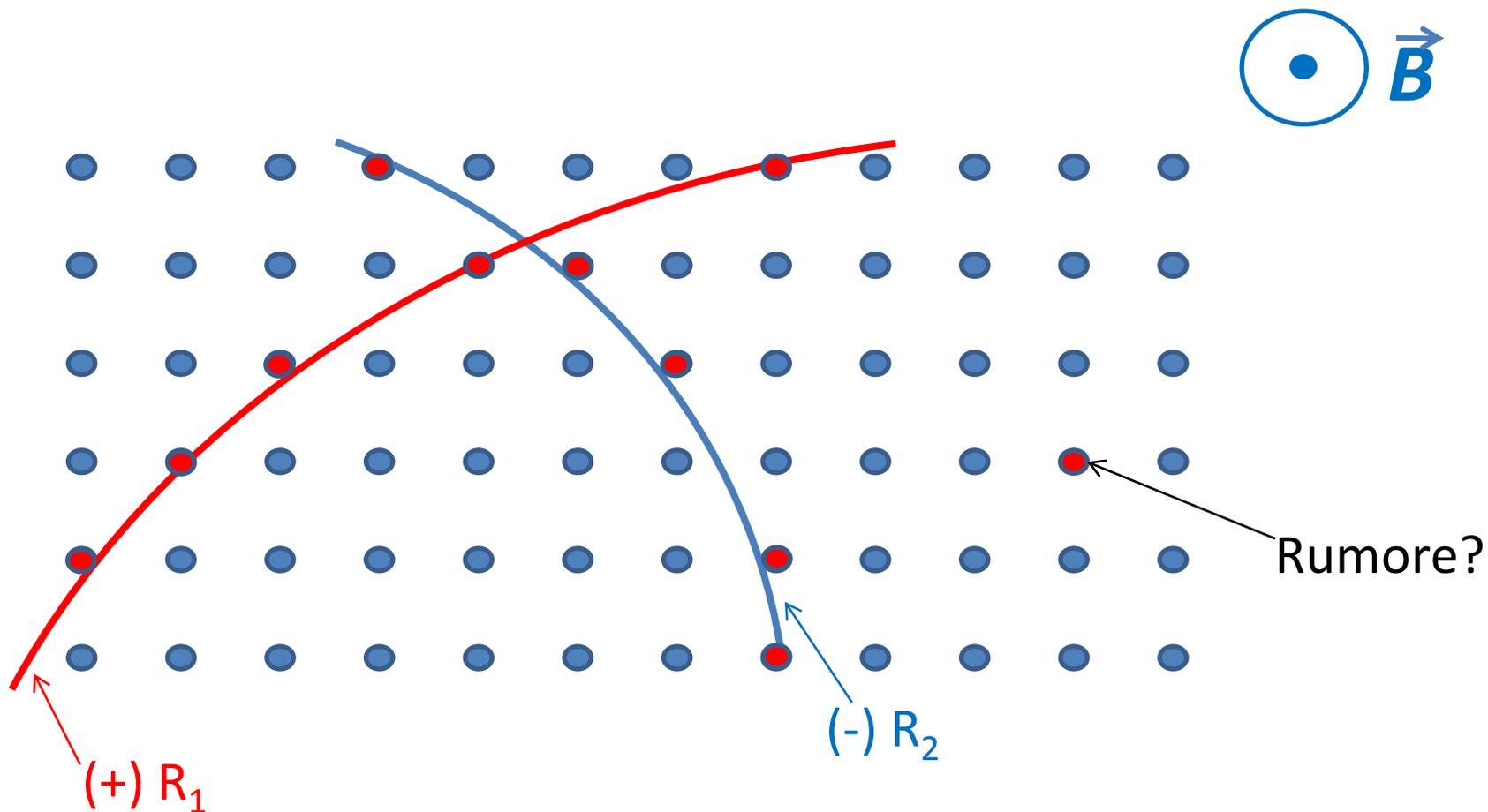
La TPC (camera a proiezione temporale) è una camera a fili con alto voltaggio che sfrutta la ionizzazione delle particelle cariche all'interno di un gas.

Gli elettroni prodotti in prossimità di un filo vengono fortemente accelerati verso il filo producendo ulteriori ionizzazione

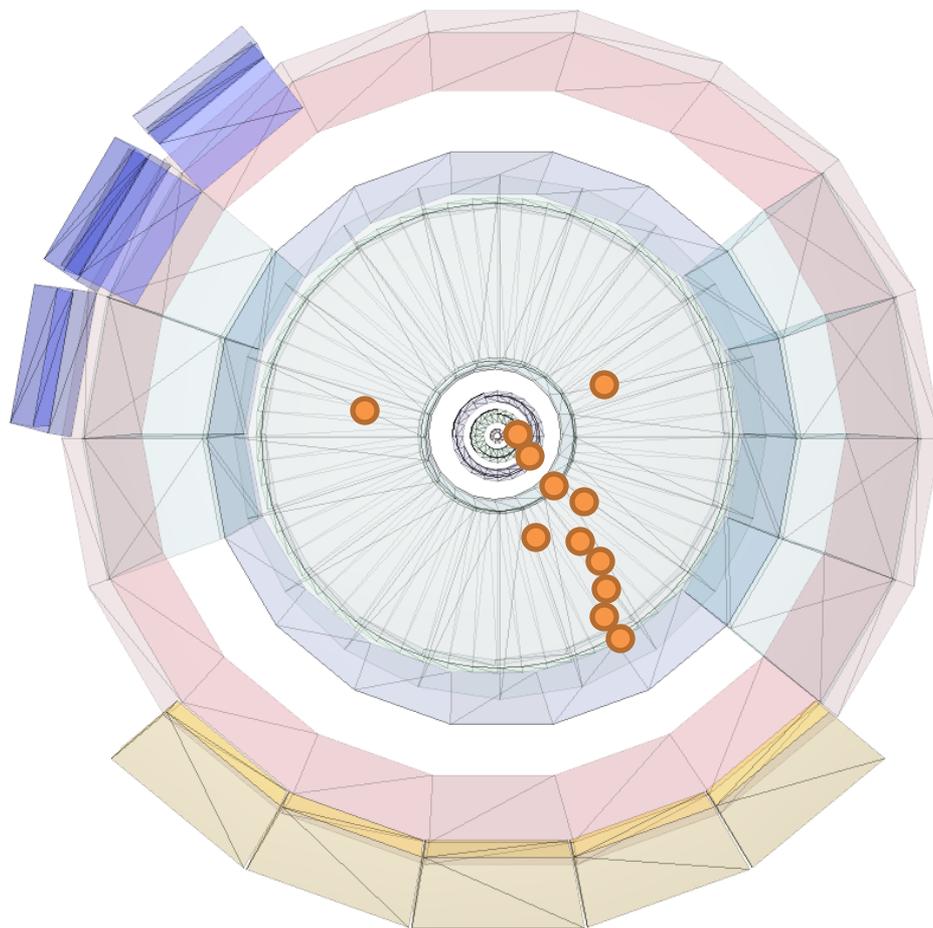
→ Se una particella carica passa in prossimità di un filo produce una carica misurabile sul filo stesso (segnale)

- la posizione del filo identifica le coordinate x, y del segnale
- Il tempo impiegato dal segnale ad arrivare all'elettrodo ci permette di ricostruire la coordinata z

Ricostruzione dell'impulso (II)

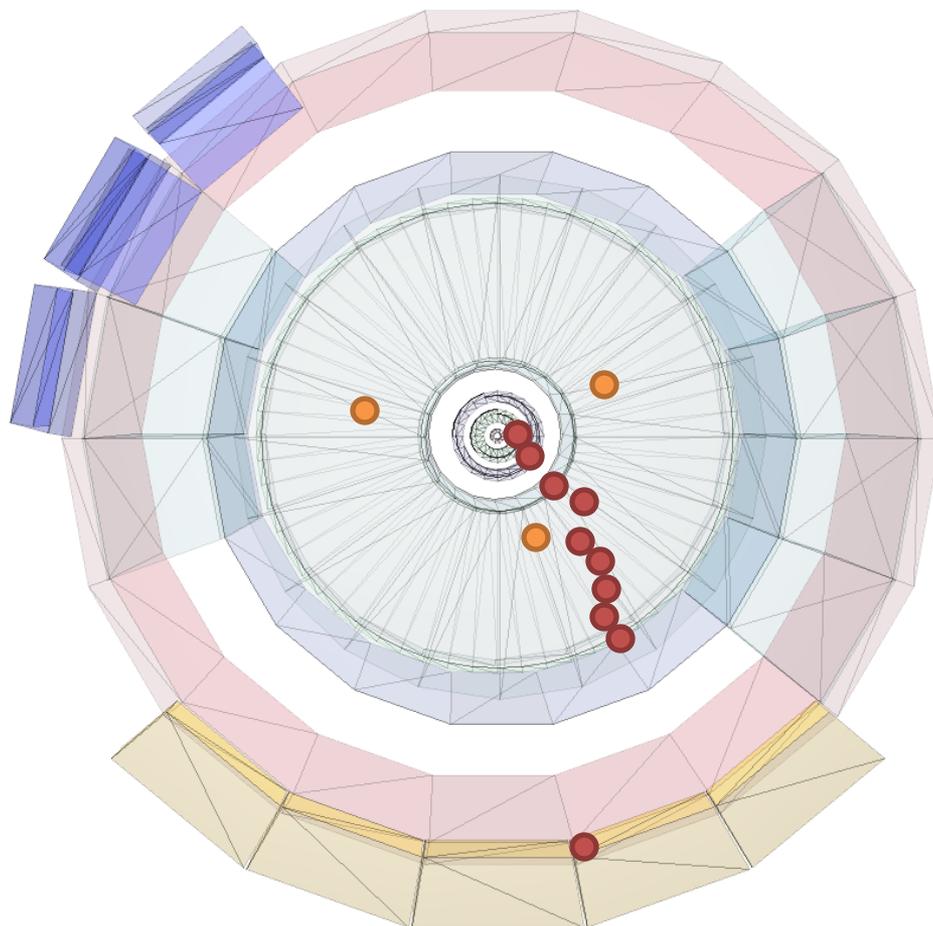


Ricostruzione tracce in ALICE



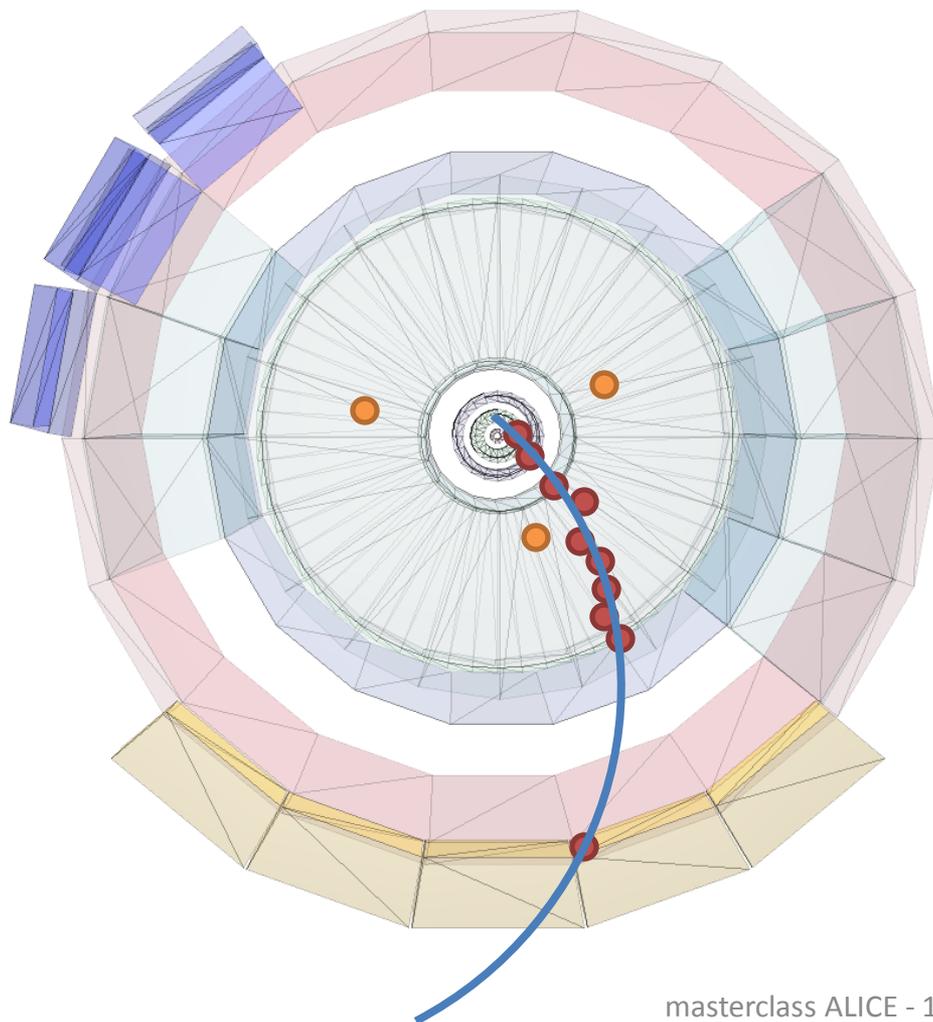
1. Diversi segnali sono stati rilasciati nel rivelatore

Ricostruzione tracce in ALICE



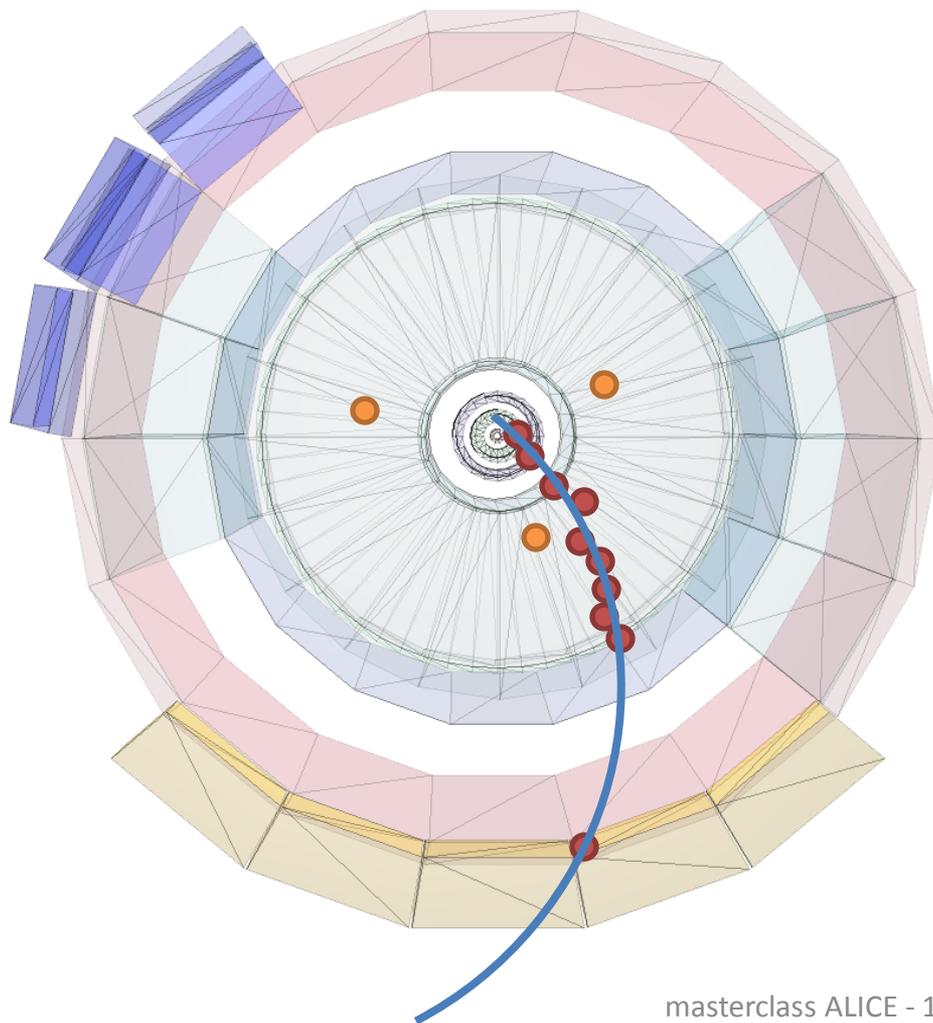
1. Diversi segnali sono stati rilasciati nel rivelatore
2. Alcuni segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi...

Ricostruzione tracce in ALICE



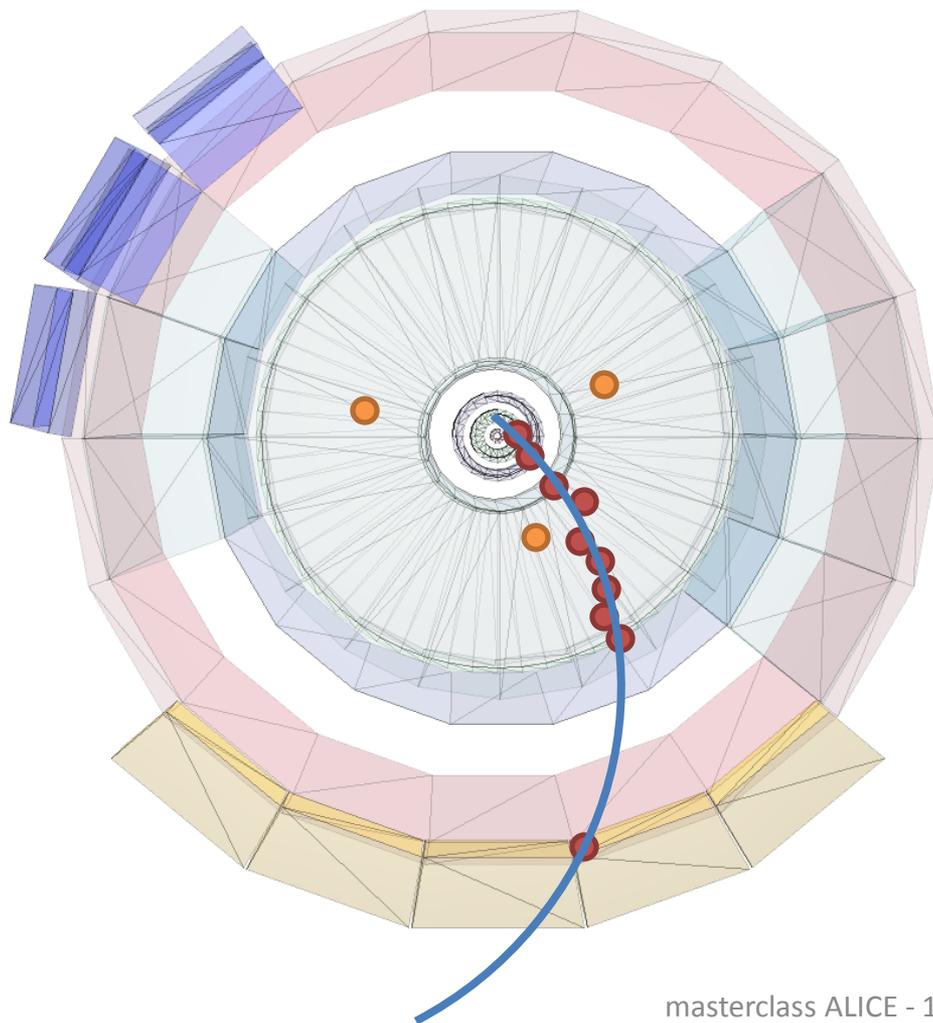
1. Diversi segnali sono stati rilasciati nel rivelatore
2. Alcuni segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi...
3. ... per esempio con una traiettoria curva

Ricostruzione tracce in ALICE



1. Diversi segnali sono stati rilasciati nel rivelatore
2. Alcuni segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi...
3. ... per esempio con una traiettoria curva
4. Una traccia ricostruita che viene dal vertice interno è associata ad una particella carica (positiva in questo caso)

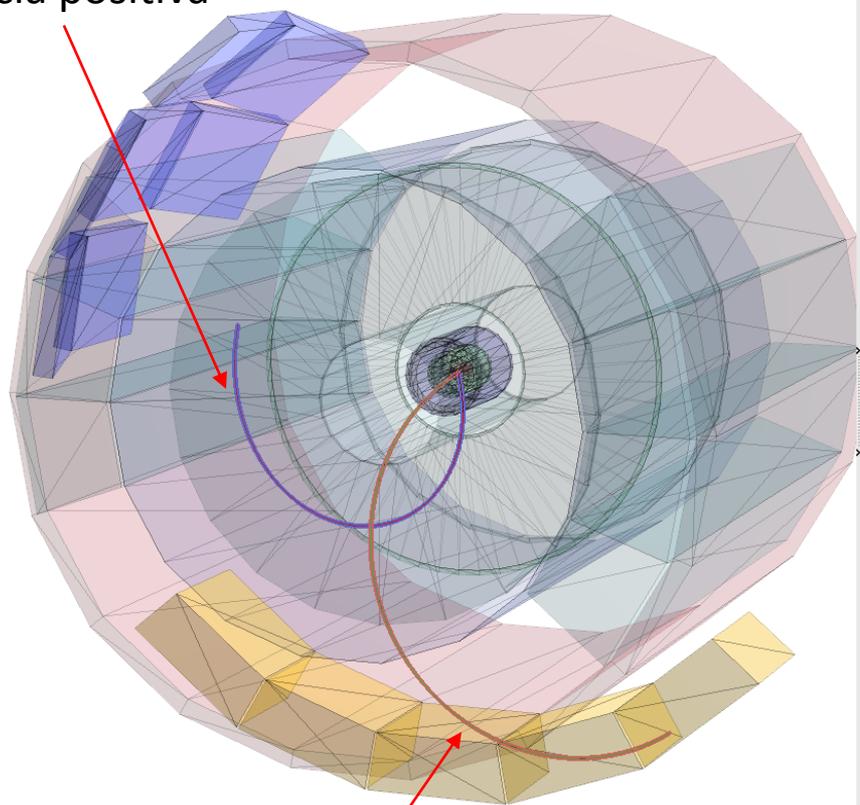
Ricostruzione tracce in ALICE



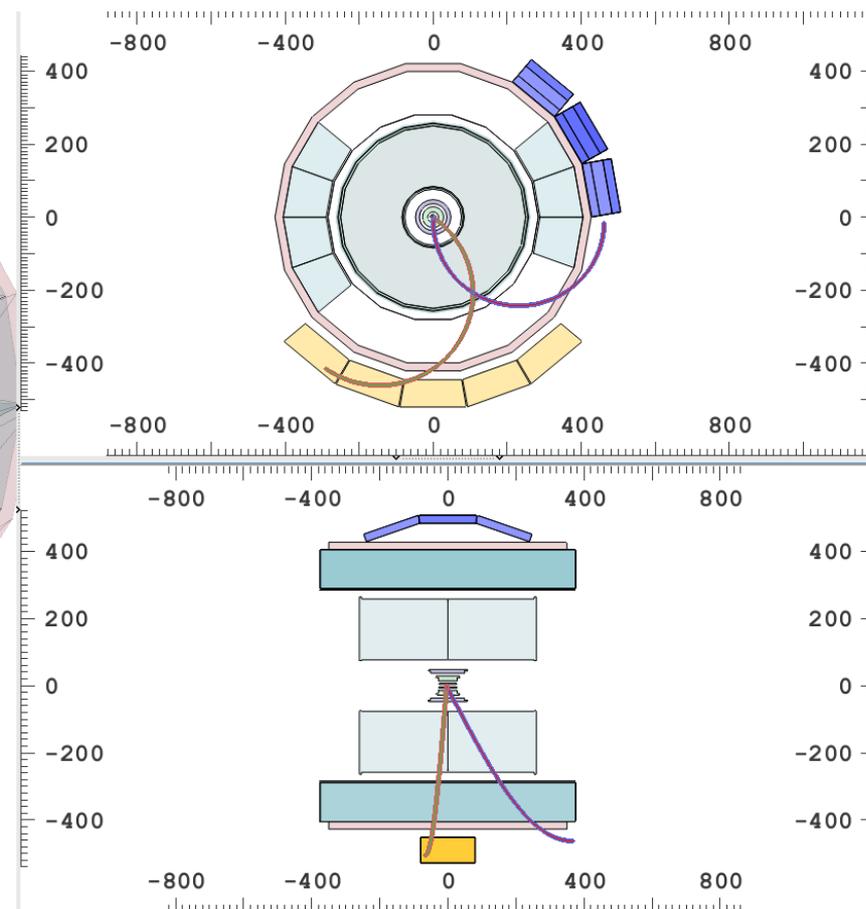
1. Diversi segnali sono stati rilasciati nel rivelatore
2. Alcuni segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi...
3. ... per esempio con una traiettoria curva
4. Una traccia ricostruita che viene dal vertice interno è associata ad una particella carica (positiva in questo caso)
5. Dal raggio di curvatura si ricava l'impulso

Ricostruzione tracce in ALICE

Traccia positiva



Traccia negativa



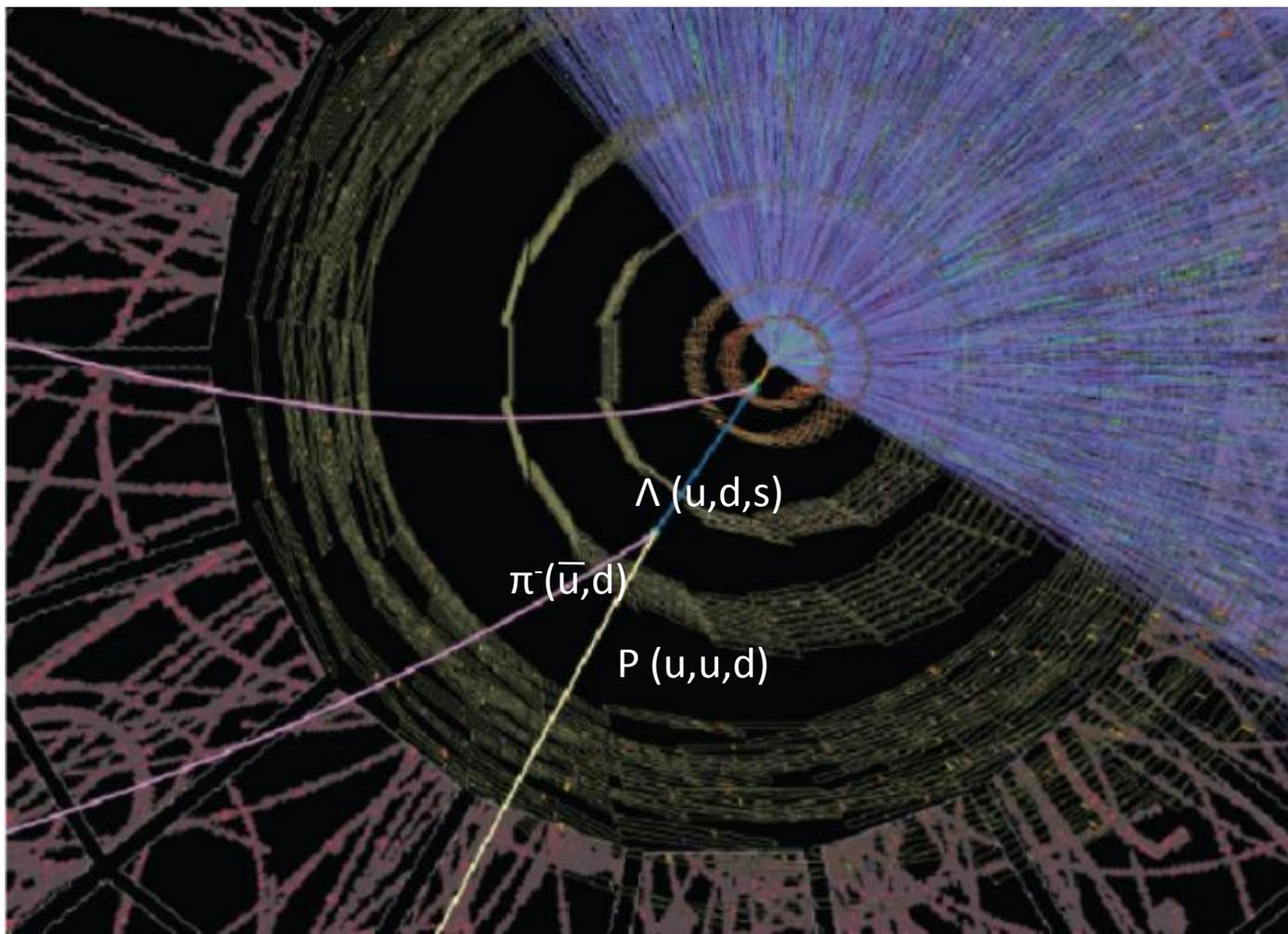


VIDEO UPGRADE ALICE

<https://videos.cern.ch/record/2747986>

7m 25s

Le V0 (Λ , K^0)



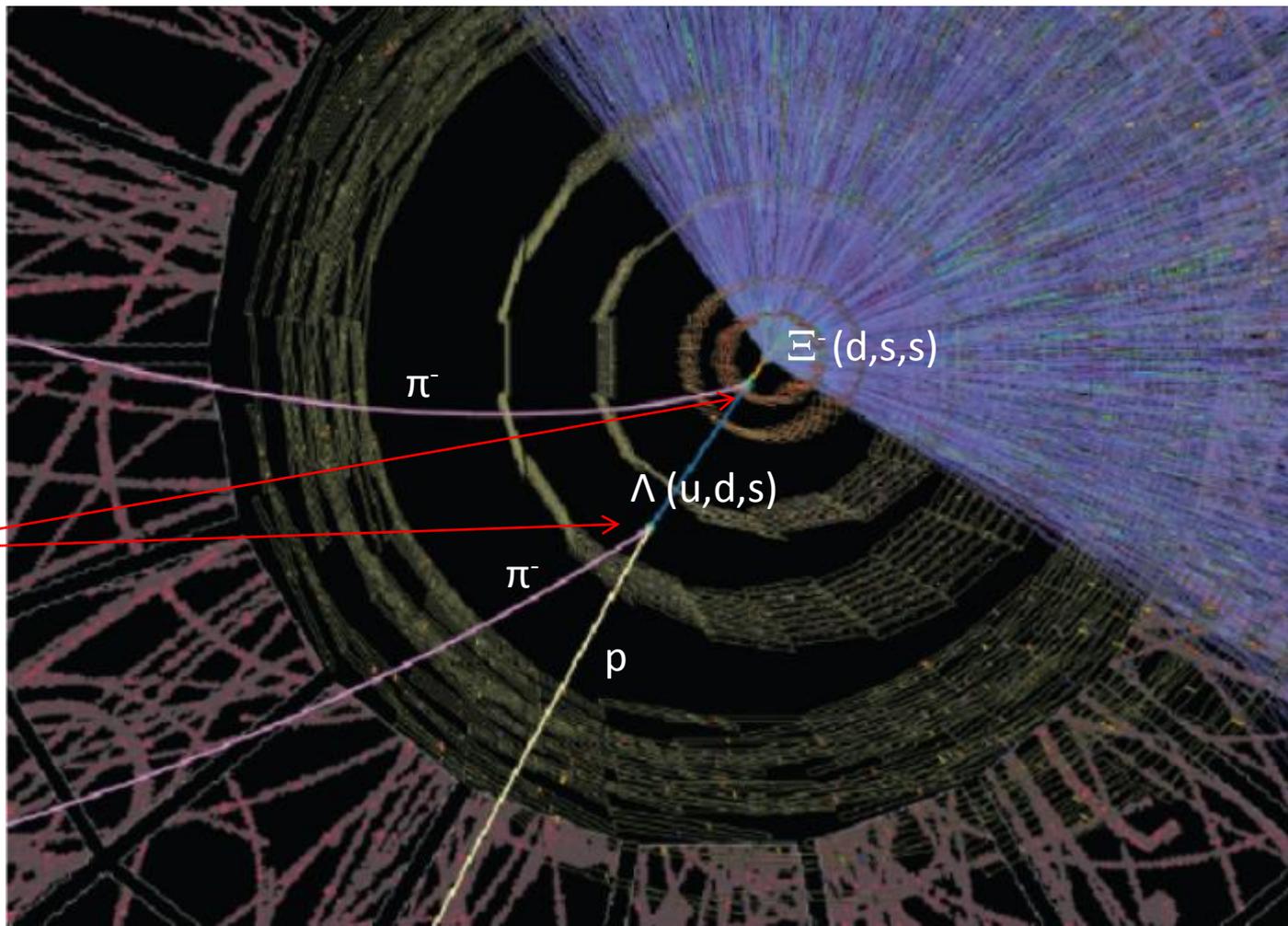
In questa masterclass siamo interessati alle particelle strane (Λ , K^0 , ...)

Queste particelle non sono stabili e decadono in altre particelle in tempi “relativamente” lunghi \rightarrow lontano dal vertice primario dell’interazione.

Le cascate ($\Xi(d,s,s)$, $\Omega(s,s,s)$)

Esistono anche particelle che contengono più di un quark strano (Ξ , Ω) che decadono in step successivi (a cascata).

Sono caratterizzati da due vertici di decadimento successivi

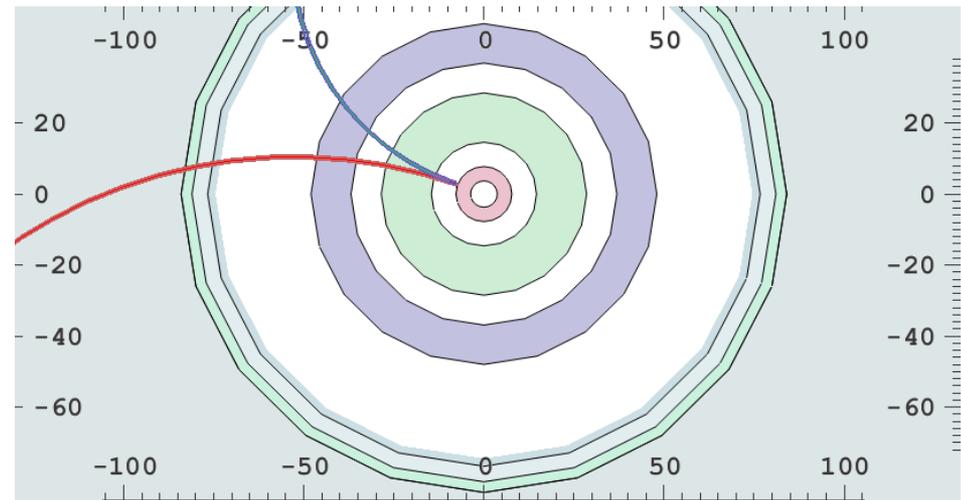


Ricostruzione del vertice delle tracce

I barioni e mesoni strani decadono in un tempo piccolo ma misurabile con un rivelatore di vertice come l'Inner Tracking System di ALICE.

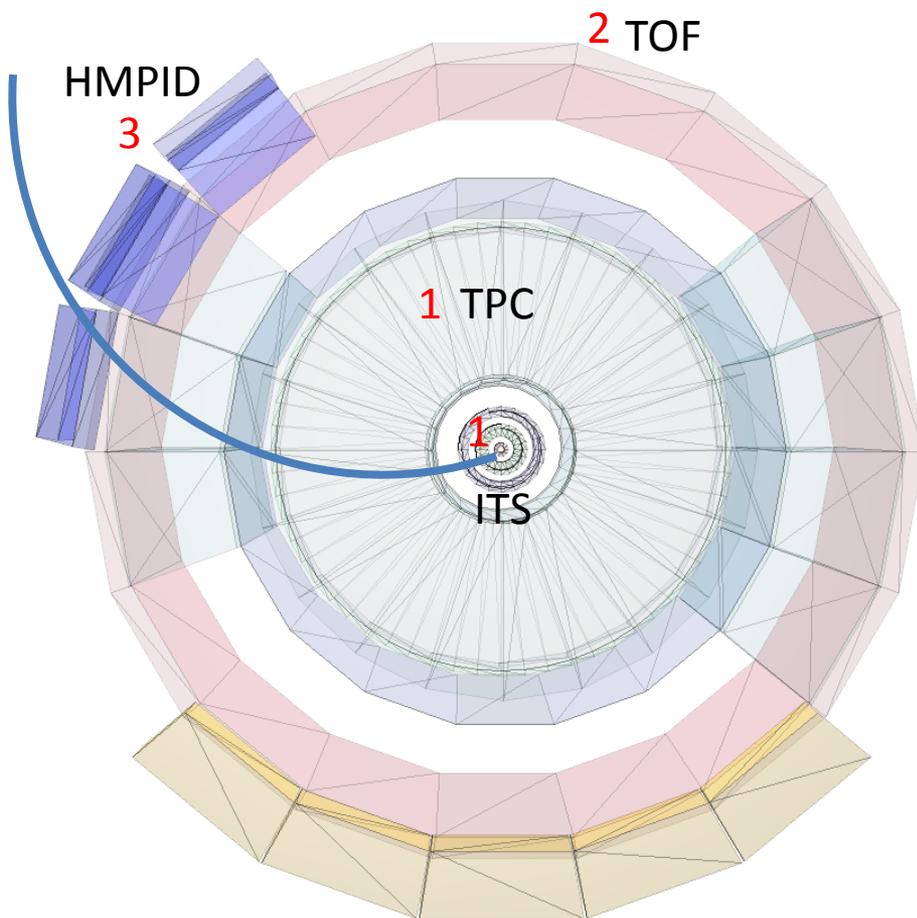
→ Riescono a percorrere diversi cm prima di decadere e si possono distinguere dal resto delle tracce

ZOOM nel rivelatore interno (ITS)



Due tracce che sono prodotte in un vertice comune distinto dal vertice primario sono candidate ideali provenienti dal decadimento di un mesone o un barione strano (neutro perché non si vede) → chiamate V0 per la tipica forma a V nel display dell'evento

Tecniche di identificazione in ALICE



ALICE utilizza diverse tecniche di identificazione per particelle.

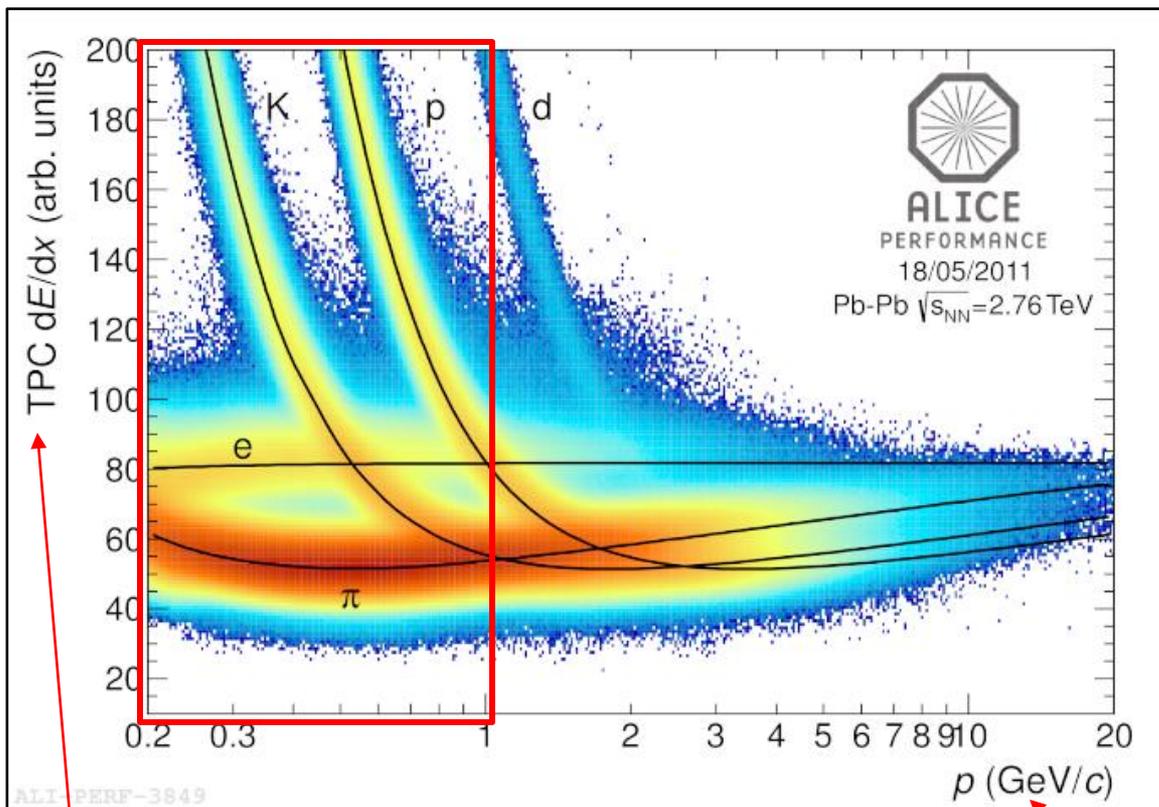
Tutte le tecniche sfruttano il fatto che a parità di impulso particelle diverse si muovono a velocità diversa

$$v = \frac{pc}{\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}}$$

Le principali sono:

1. Perdita di energia specifica nel materiale del rivelatore attraverso la misura rilasciata da una particella → dipende dalla velocità
2. Tempo di volo → misura diretta della velocità
3. La velocità della luce in un materiale dipende dall'indice di rifrazione (c/n con $n \geq 1$). Se la particella si muove più veloce di c/n emette un cono di luce (Cherenkov)

Identificazione nella TPC

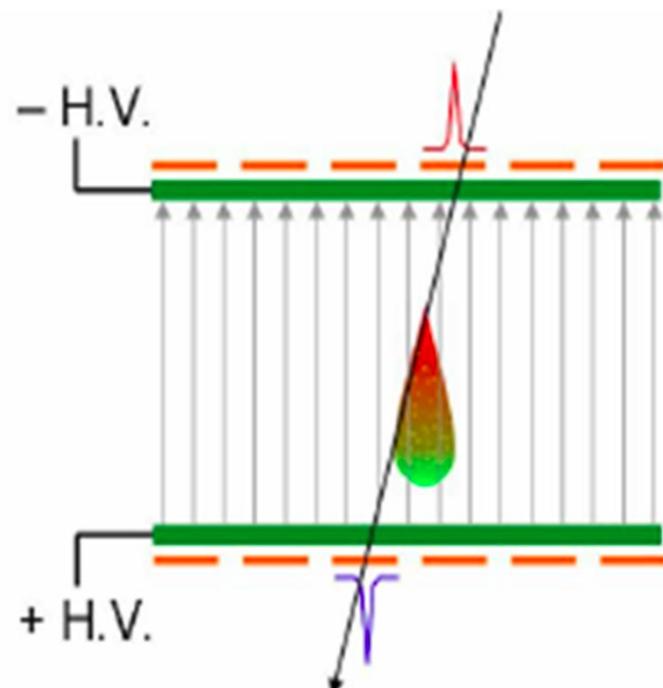


Fino a impulsi di 1 GeV/c la TPC è in grado di distinguere pioni da protoni.

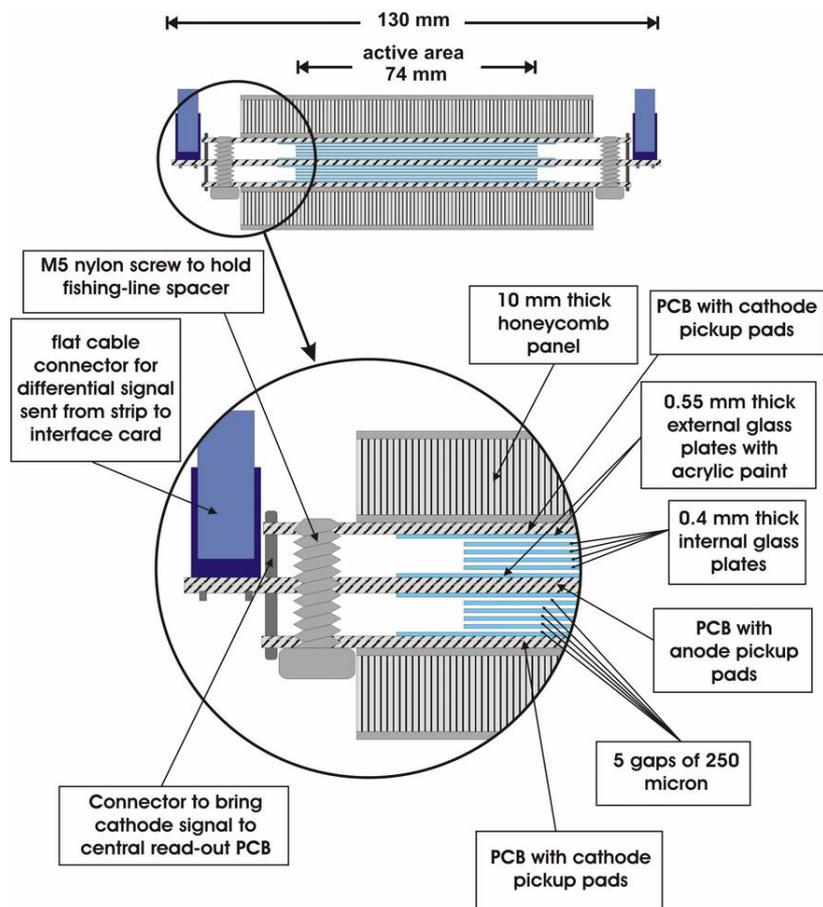
Perdita di energia specifica

Impulso della particella

Identificazione nel TOF



Identificazione nel TOF

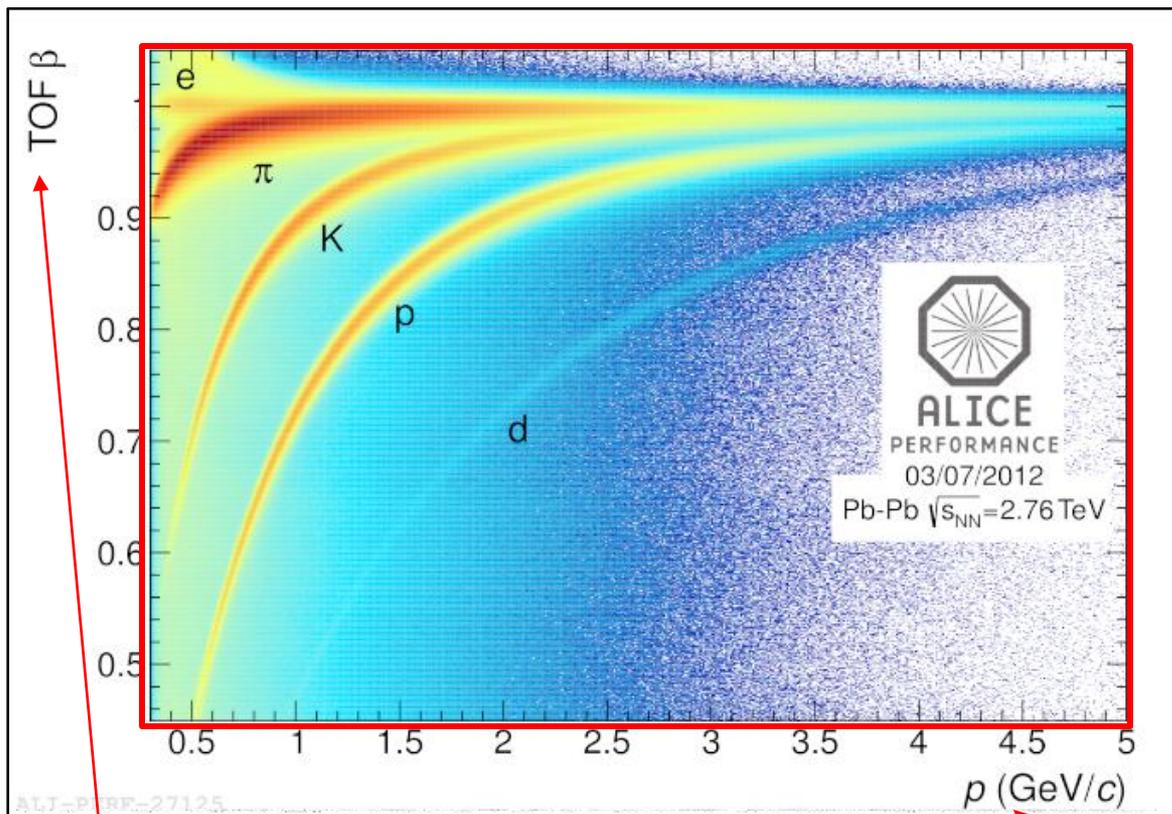


Multigap Resistive Plate Chamber



60 ps di risoluzione temporale
60 millesimi di miliardesimo di secondo

Identificazione nel TOF



Fino a impulsi di 5 GeV/c il TOF è in grado di distinguere pioni da protoni.

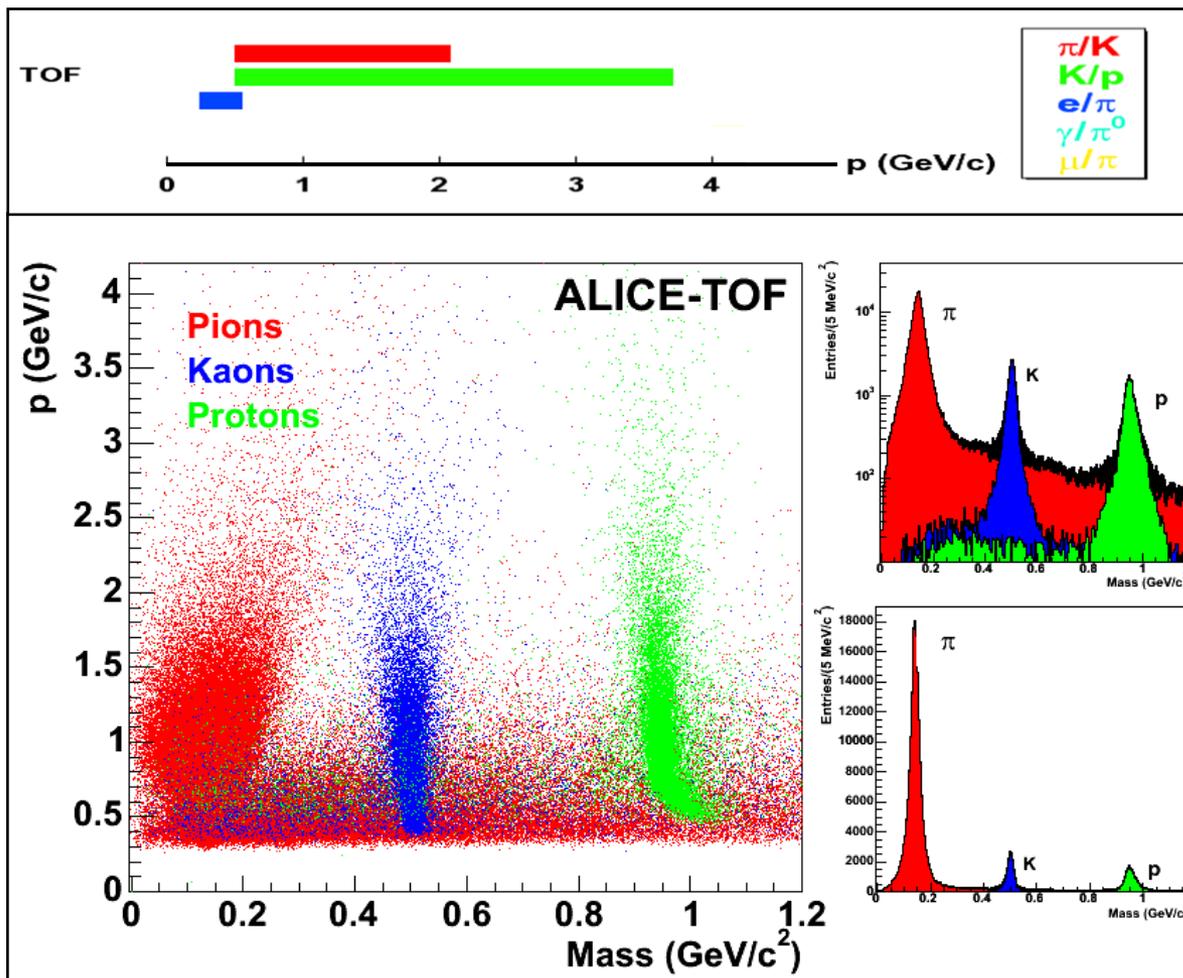
A impulsi bassi (< 1 GeV/c) non tutti gli eventi sono visti dal TOF \rightarrow si usa la TPC

Velocità della particella
 $\beta = v/c$

Impulso della particella

Time Of Flight (TOF)

– MRPC system –

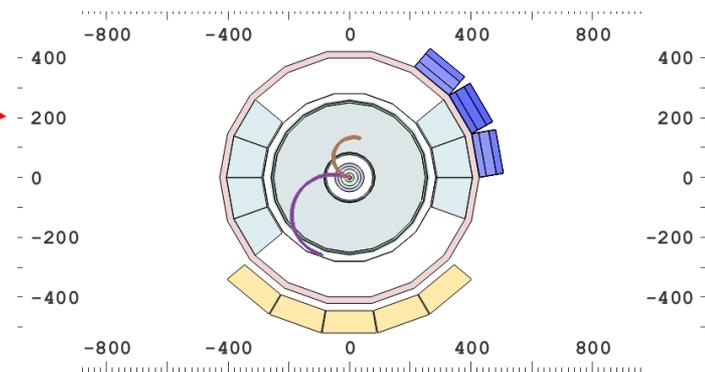


Applicazione nel 1 esercizio

1. Selezione delle tracce candidate per una V0:
 Le tracce si selezionano con un click.
 La selezione è visibile anche attraverso il riempimento della tabella in basso

2. Controllare che la tabella delle figlie candidate da V0 sia riempita:

- Impulso e carica derivante dalla ricostruzione della curvatura
- Massa determinata dall'identificazione della particella



3. Selezionare la V0 o Cascade compatibile con le masse delle figlie candidate e premere «submit» per riempire l'istogramma

Calculator

Particles

| | px | py | pz | m |
|-----|---------|--------|---------|--------|
| (-) | -0.0955 | 0.0332 | -0.0396 | 0.1396 |
| (+) | -0.1941 | 0.0674 | -0.0855 | 0.9383 |
| (b) | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Operations

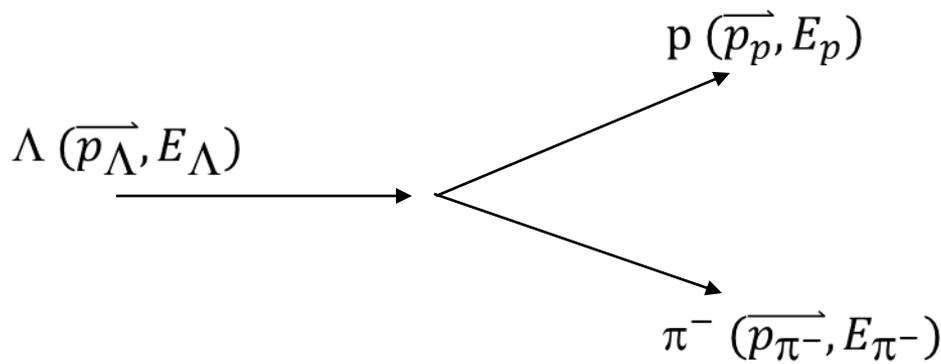
Instructions

Inv. mass

Choice

Calcolo della massa invariante

Consideriamo il decadimento di una Λ in $p+\pi^-$



Chiamata anche massa invariante perché questa grandezza non dipende dal sistema di riferimento (la massa di una particella è una proprietà universale della particella stessa), cioè è un invariante relativistico

Per la conservazione dell'energia e dell'impulso valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}\vec{p}_\Lambda &= \vec{p}_{\pi^-} + \vec{p}_p \\ E_\Lambda &= E_{\pi^-} + E_p\end{aligned}$$

Per la relatività ristretta la massa di una particella è data dalla relazione:

$$m_\Lambda = \frac{1}{c^2} \sqrt{E_\Lambda^2 - p_\Lambda^2 c^2}$$

Ne deriva che se un protone e un pione vengono dal decadimento di una Λ la massa invariante che si ricostruisce da:

$$\frac{1}{c^2} \sqrt{(E_{\pi^-} + E_p)^2 - |\vec{p}_{\pi^-} + \vec{p}_p|^2 c^2} = m_\Lambda$$

Ancora su massa invariante

Ciò che NON misuriamo

Ciò che misuriamo

Caso 1: decadimento Λ

$\Lambda (\vec{p}_\Lambda, E_\Lambda)$



$p (\vec{p}_p, E_p)$

$\pi^- (\vec{p}_{\pi^-}, E_{\pi^-})$

$$\frac{1}{c^2} \sqrt{(E_{\pi^-} + E_p)^2 - |\vec{p}_{\pi^-} + \vec{p}_p|^2 c^2} = m_\Lambda$$

Caso 2: produzione indipendente di p e π^-

$p (\vec{p}_p, E_p)$

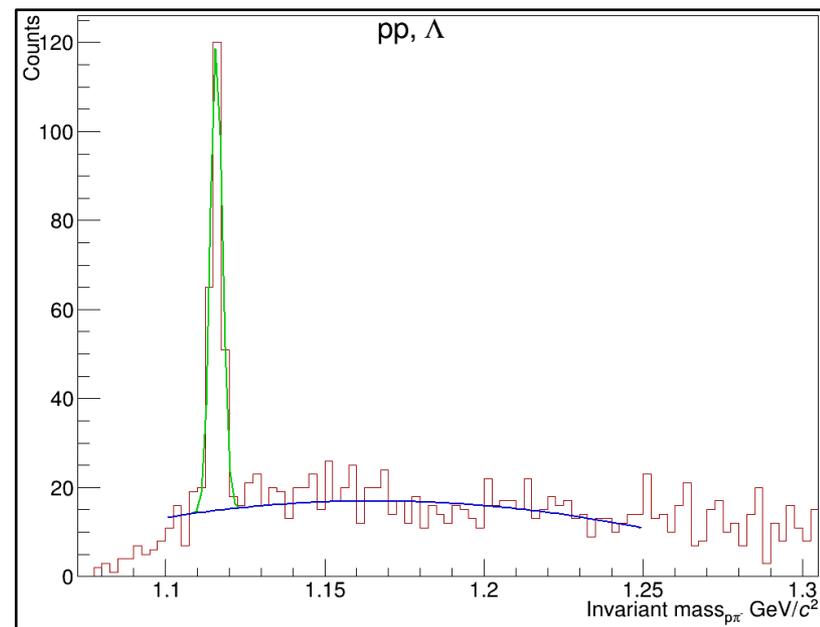
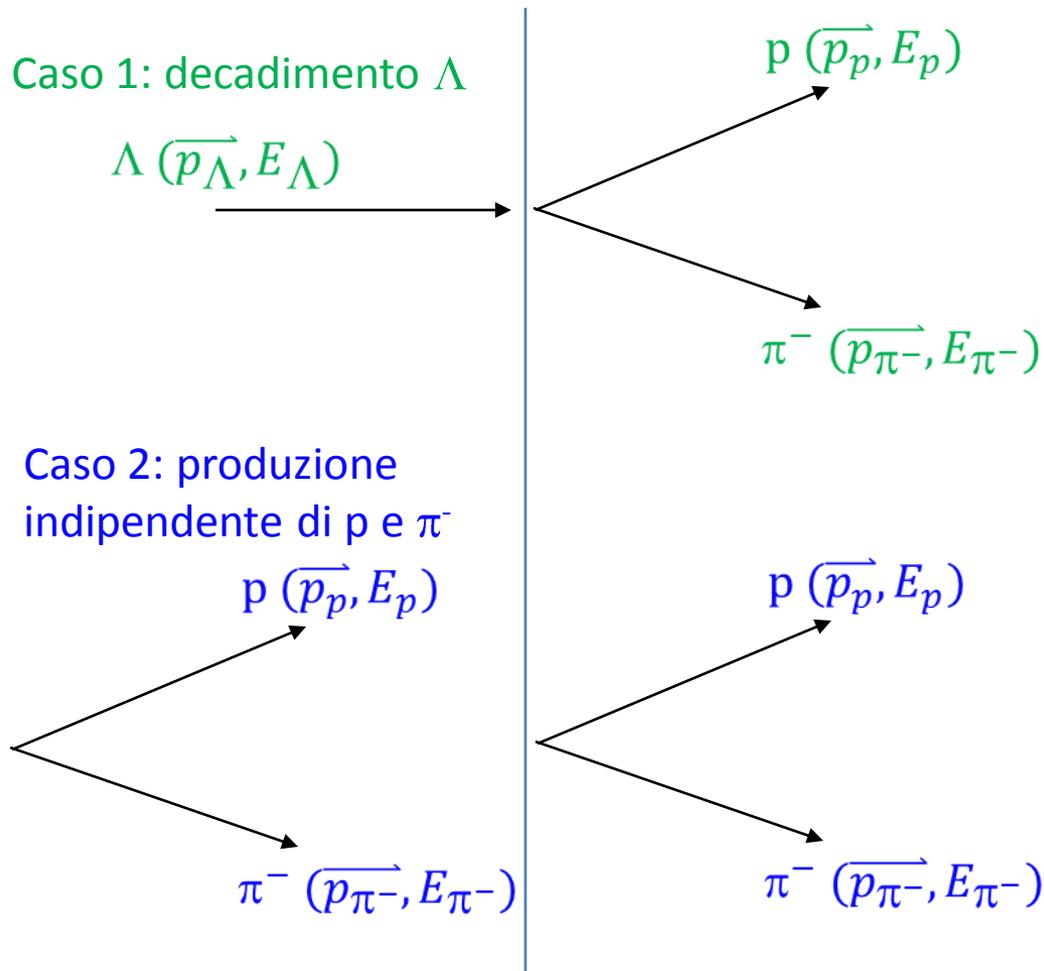
$\pi^- (\vec{p}_{\pi^-}, E_{\pi^-})$

$p (\vec{p}_p, E_p)$

$\pi^- (\vec{p}_{\pi^-}, E_{\pi^-})$

$$\frac{1}{c^2} \sqrt{(E_{\pi^-} + E_p)^2 - |\vec{p}_{\pi^-} + \vec{p}_p|^2 c^2} \neq m_\Lambda$$

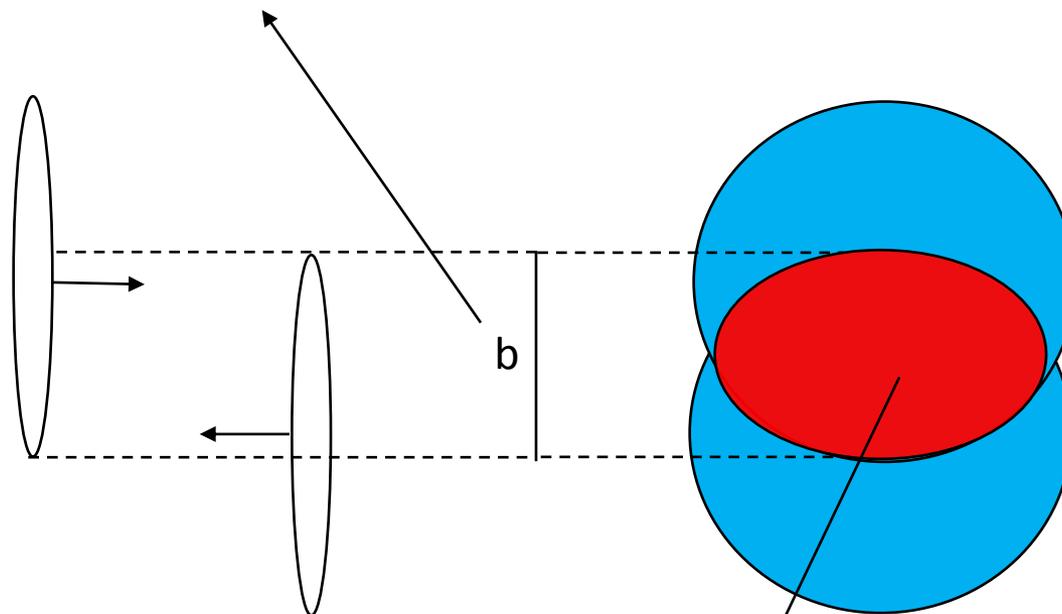
Applicazione nel 2 esercizio



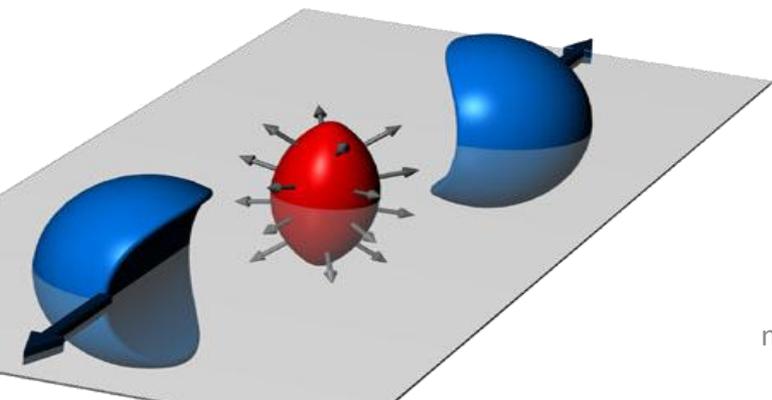
Facendo un fit alla distribuzione di massa invariante su molti candidati è possibile separare la componente che viene dal decadimento dal fondo di combinazioni spurie

La centralità in collisioni Pb-Pb

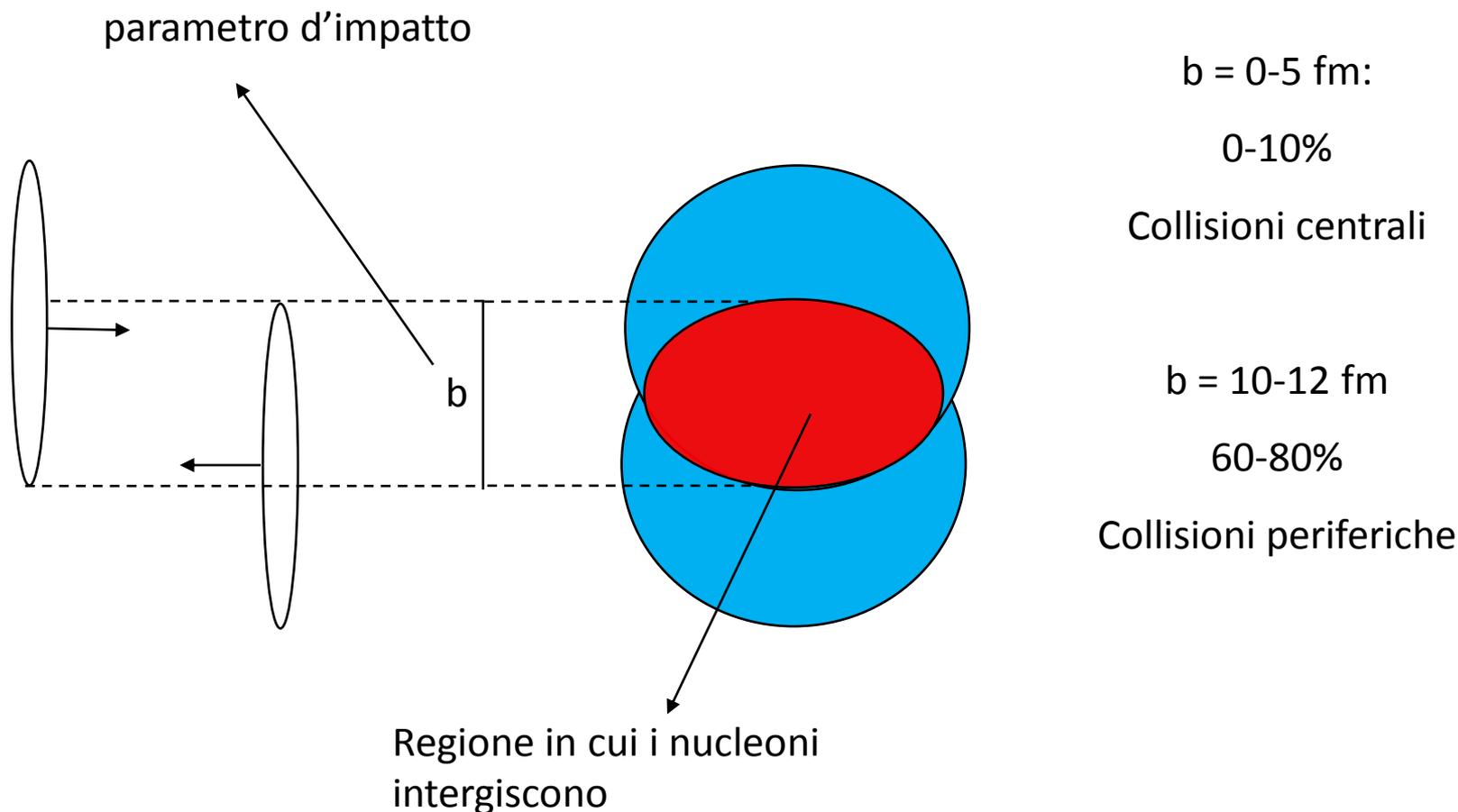
parametro d'impatto



Regione in cui i nucleoni interagiscono

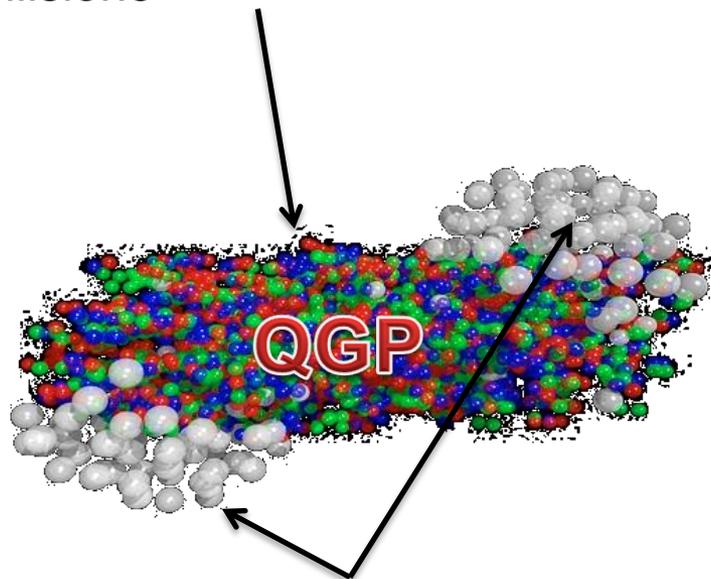


La centralità in collisioni Pb-Pb



Collisione tra due nuclei di piombo

Quark e gluoni prodotti nella collisione



Nucleoni spettatori (n,p)

$b = 0-5$ fm:

0-10%

Collisioni centrali

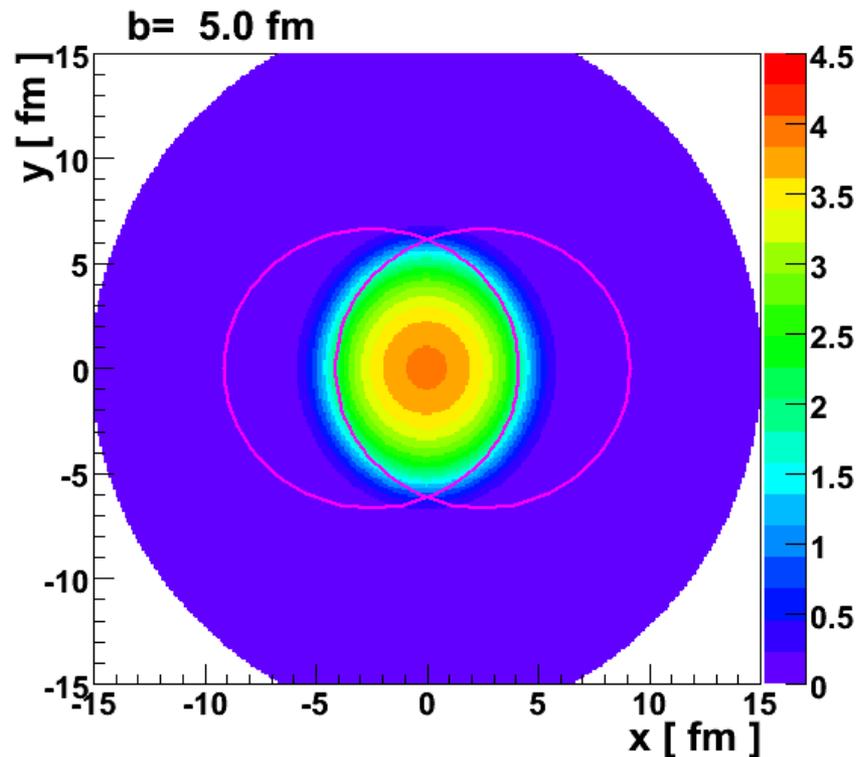
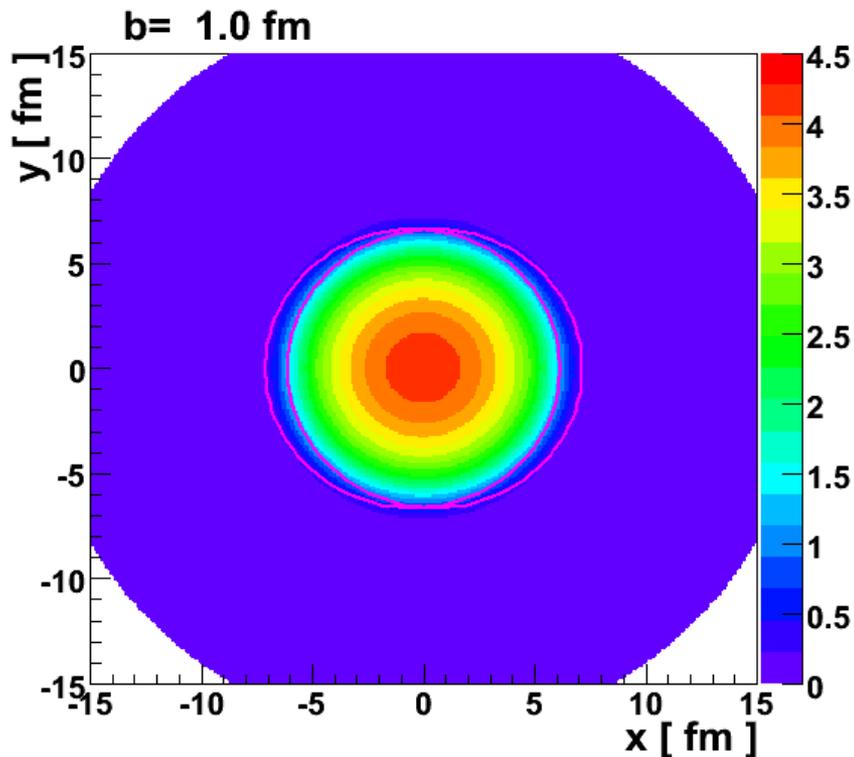
$b = 10-12$ fm

60-80%

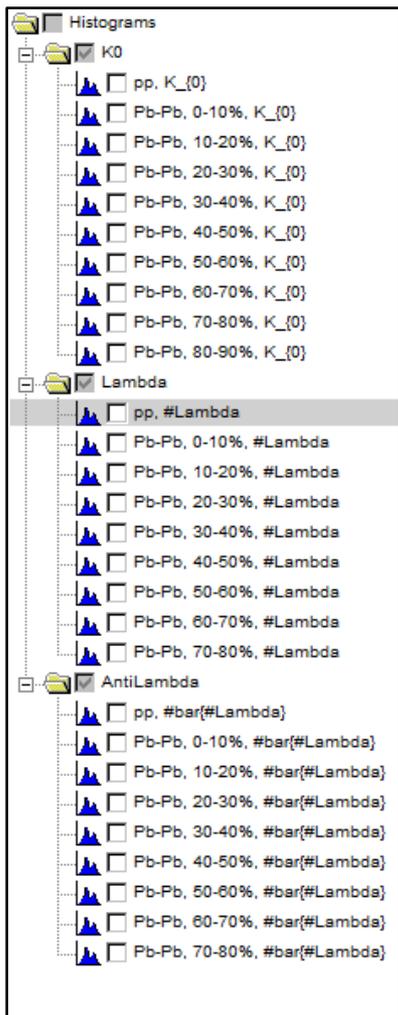
Collisioni periferiche

La centralità della collisione può essere espressa attraverso il numero di nucleoni che partecipano, N_{part} .

- Si può calcolare la densità dei nucleoni partecipanti = numero di partecipanti per unità di area nel piano trasverso
 - La densità di partecipanti (così come quella di collisioni e quella di energia depositata) è massima al centro della regione di overlap dei nuclei collidenti diminuisce man mano che si va verso i bordi



Applicazione nel 2 esercizio



Nel secondo esercizio vi è chiesto di estrarre il numero di V_0 prodotte in diversi sistemi di collisione (pp e Pb-Pb) e per le collisioni di nuclei a diverse centralità.

Lo scopo è quello di vedere come varia la produzione di queste particelle (N_X con $X=K^0_s, \Lambda, \bar{\Lambda}$) nelle diverse condizioni ed in particolare rispetto a N_{part} (per definizione in collisioni pp $N_{part}=2$).

Per confrontare quello che avviene in collisioni pp e Pb-Pb è conveniente guardare al rapporto

$$R = \frac{N_X(\text{Pb-Pb})}{N_X(pp)(N_{part}/2)}$$

per vedere come si confronta la produzione per coppia di nucleoni partecipanti.

Se questo rapporto cresce con la centralità delle collisioni Pb-Pb (con N_{part}) si può parlare di aumento di stranezza.