

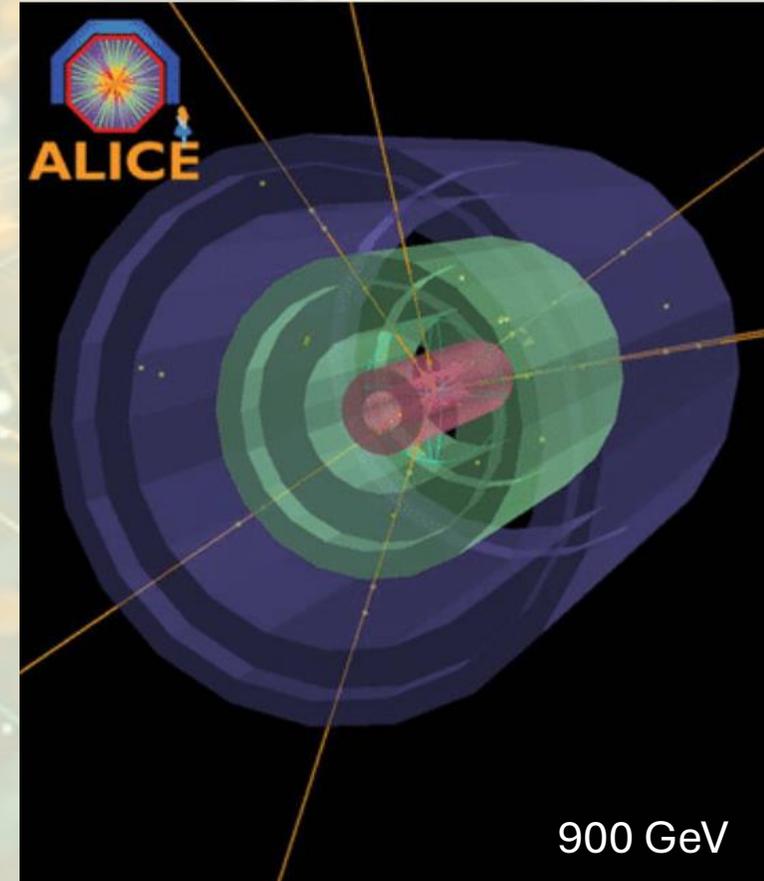
L'ESPERIMENTO ALICE AL CERN ALICE MASTERCLASS 2025



I prodotti di una collisione ad LHC

Collisioni protone-protone

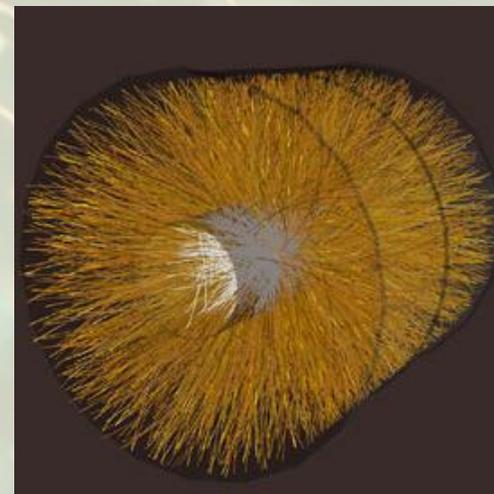
- Vengono prodotte in media diverse **decine di particelle cariche per evento**



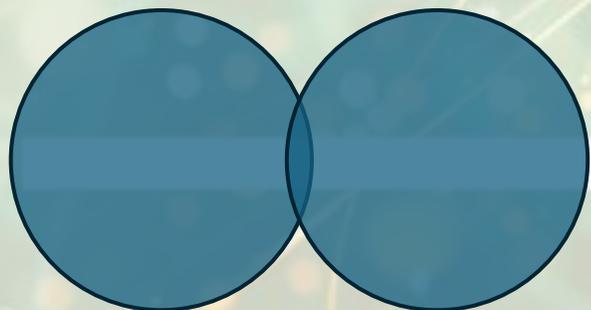
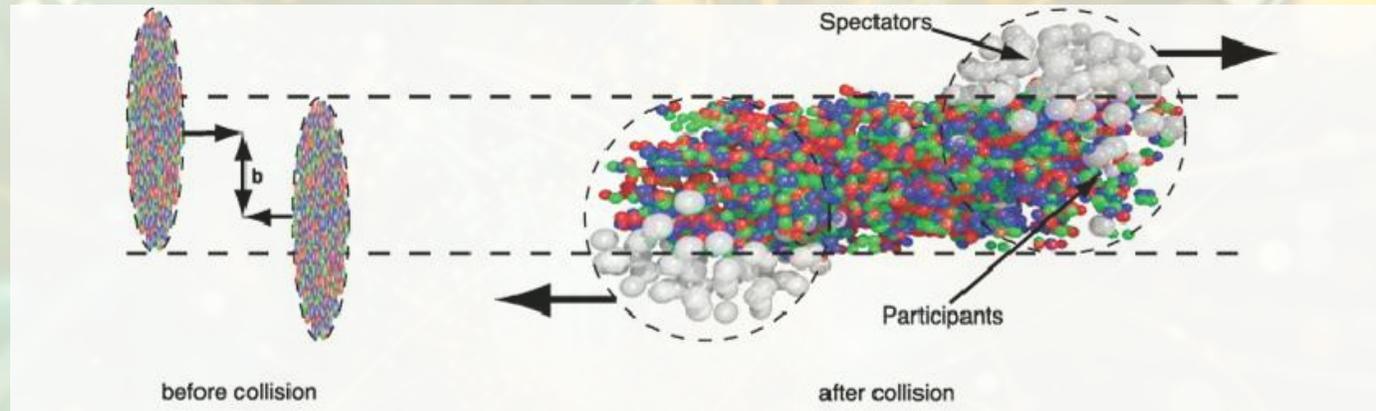
I prodotti di una collisione ad LHC

Collisioni piombo-piombo

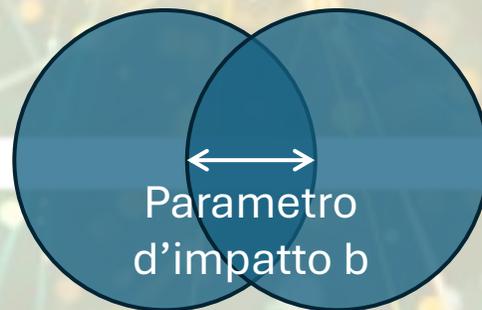
- Possono essere prodotte **decine di migliaia di particelle cariche per evento**
- Dipende dalla **centralità** della collisione



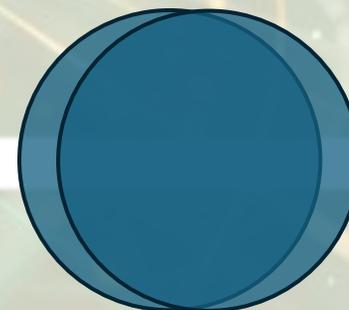
Centralità di una collisione tra ioni



Collisione periferica



Parametro
d'impatto b



Collisione
centrale

CENTRALITÀ

Centralità di una collisione tra ioni

- Valutata sulla base di quante particelle cariche vengono prodotte in ogni collisione oppure sul numero di nucleoni partecipanti alla collisione
- Le collisioni vengono divise in **classi di centralità**:



Collisioni **CENTRALI**

- Parametro d'impatto piccolo
- Molte particelle cariche prodotte
- Molti nucleoni partecipanti

Collisioni **PERIFERICHE**

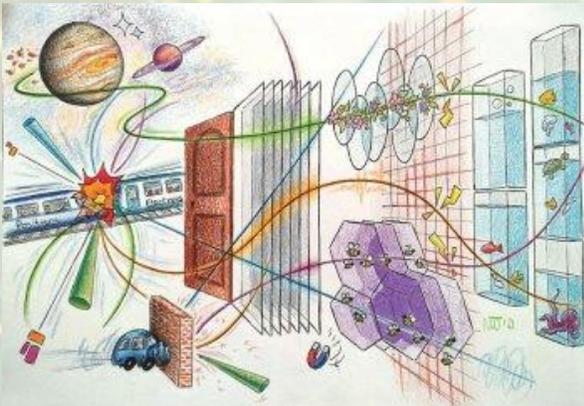
- Parametro d'impatto grande
- Poche particelle cariche prodotte
- Pochi nucleoni partecipanti

Rivelare particelle

Per rivelare una particella bisogna che **interagisca** con il materiale del rivelatore

Un **RIVELATORE** è uno strumento usato per rivelare, tracciare e identificare particelle

- PARTICELLE CARICHE Interazione elettromagnetica o adronica
- FOTONI Interazione elettromagnetica
- NEUTRINI Interazione debole (bassissima probabilità di interagire)



CONTARE ⇒ contare numero particelle in un rivelatore

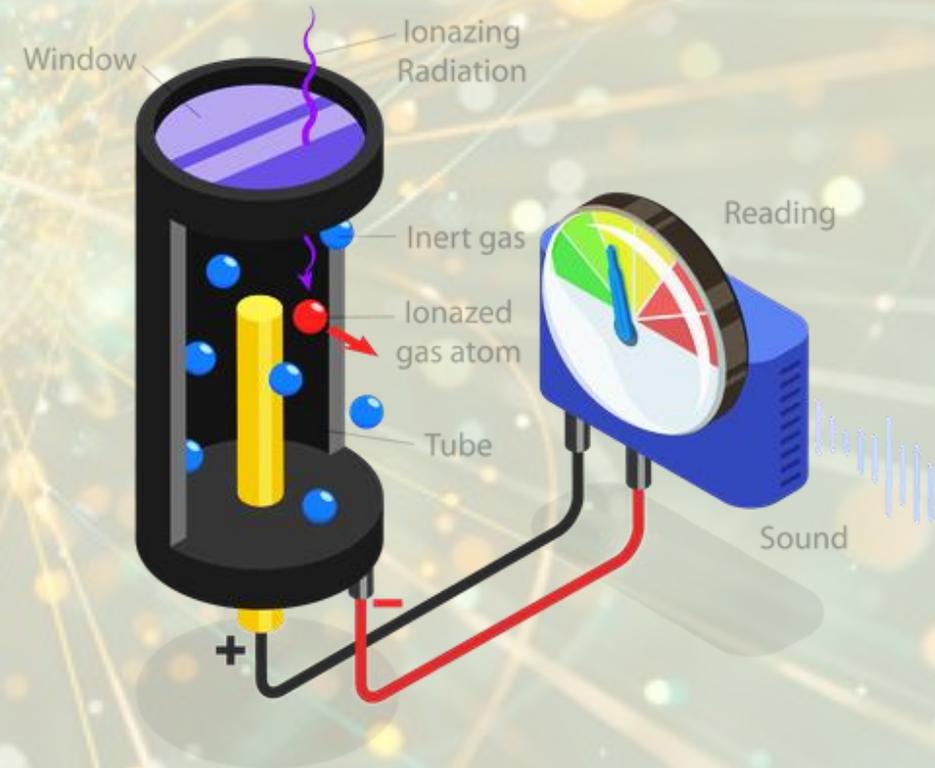
TRACCIARE ⇒ ricostruire le tracce delle particelle nel rivelatore

IDENTIFICARE ⇒ misurare massa, carica, velocità, energia

Contare le particelle

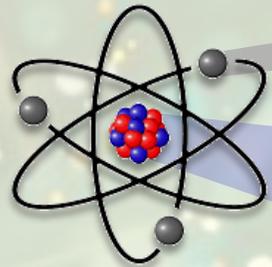
Esempio: contatore Geiger (schema semplificato)

- IONIZZAZIONE del gas lungo la traccia della particella
- Gli elettroni liberati dagli atomi di gas ionizzati sono attratti dall'elettrodo positivo
- 1 suono = 1 particella entrata nel rivelatore



Tracciare le particelle

Le particelle non sono visibili a occhio nudo... sono necessari i rivelatori!
Se l'atomo avesse le dimensioni di uno stadio, il nucleo sarebbe grande quanto una biglia, protoni e neutroni come formiche (gli elettroni come pulci)



ATOMO
 $\sim 10^{-10}$ m



NUCLEO
 $\sim 10^{-14}$ m
10.000 volte più piccolo dell'atomo



PROTONE/NEUTRONE $\sim 10^{-15}$ m
100.000 volte più piccolo dell'atomo



ELETTRONE
 10^{-18} m

100 milioni più piccoli dell'atomo



QUARK
 10^{-18} m

Tracciare le particelle

Si ricostruiscono le **TRACCE** delle particelle partendo dai “punti” lasciati sui rivelatori

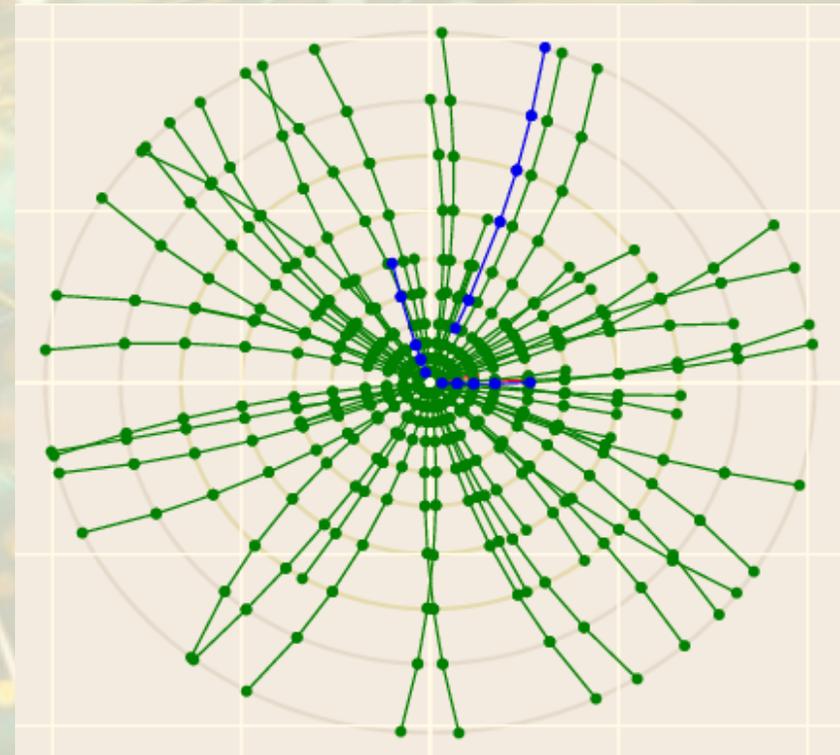


Tracciare le particelle

Si ricostruiscono le **TRACCE** delle particelle partendo dai “punti” lasciati sui rivelatori

A hard job!

- In una singola collisione possono essere prodotte decine di migliaia di particelle

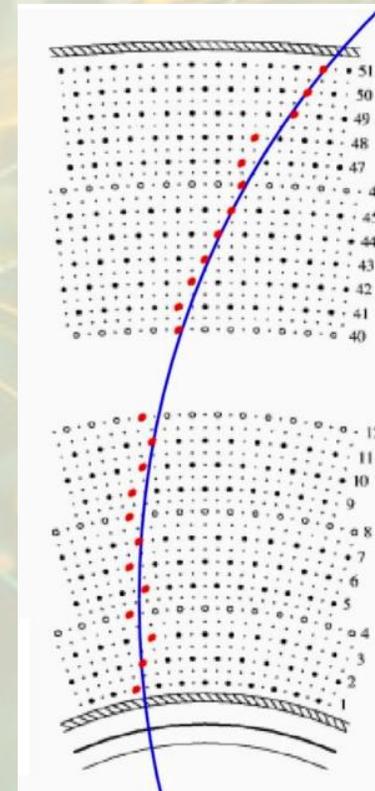


Tracciare le particelle

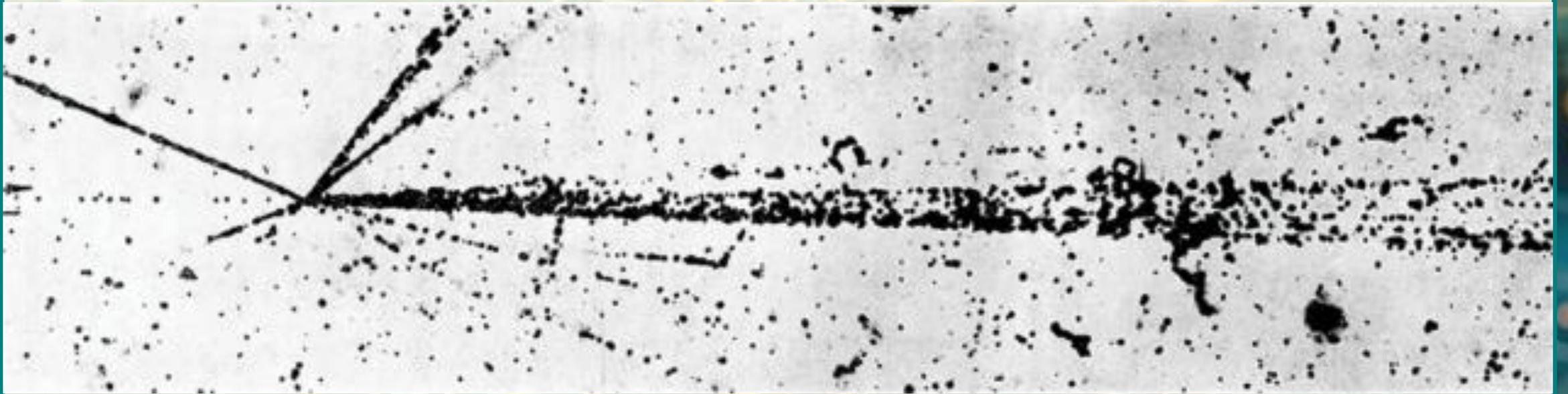
Si ricostruiscono le **TRACCE** delle particelle partendo dai “punti” lasciati sui rivelatori

A hard job!

- In una singola collisione possono essere prodotte decine di migliaia di particelle
- A causa delle «imperfezioni» dei rivelatori i «punti» si possono discostare dalla traccia ideale



Tracciare le particelle



EMULSIONI NUCLEARI

Tracciare le particelle



CAMERA A NEBBIA

Tracciare le particelle



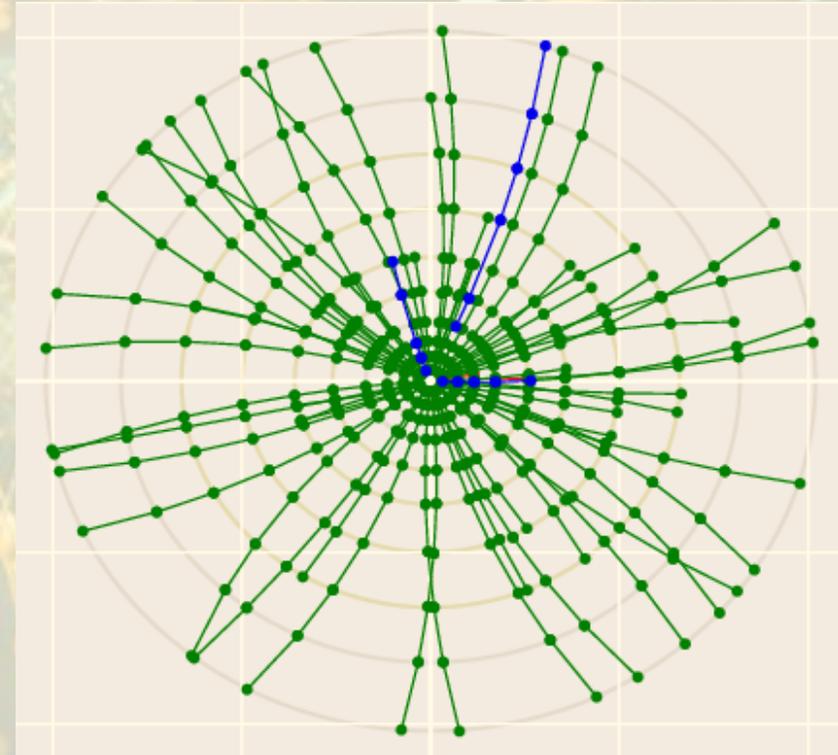
RIVELATORI A PIXEL

Tipo di Rivelatore	Risoluzione Spaziale (μm)
Emulsioni nucleari	~ 0.1
Camera a proiezione di bolle	~ 100
Camere a deriva	$\sim 50-100$
Camere proporzionali multi-fili (MWPC)	$\sim 100-300$
TPC (Time Projection Chamber)	$\sim 50-200$
Camere a microstrip di silicio	~ 10
Pixel detector al silicio	~ 5

ma anche tanti altri rivelatori...

Tracciare le particelle

Perché le tracce appaiono curvate?

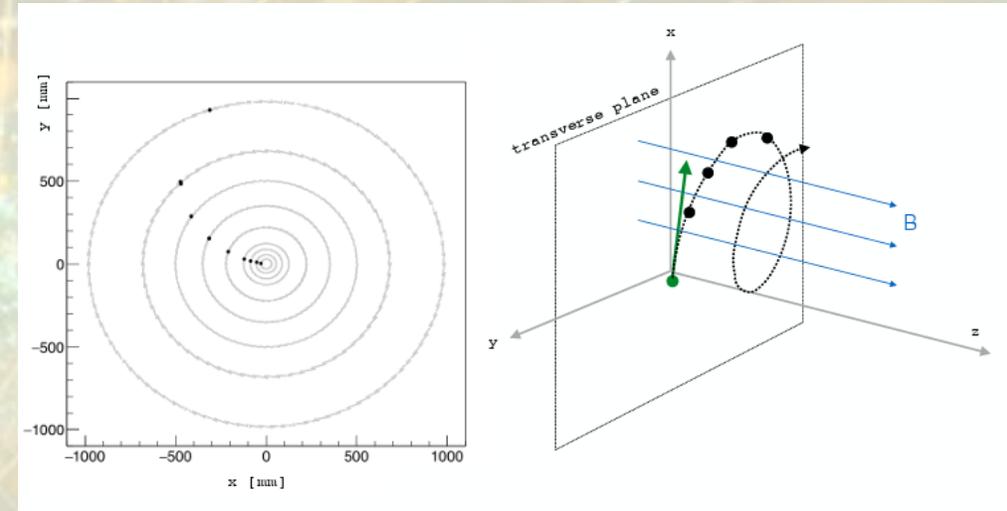
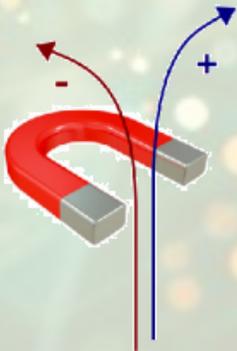


Tracciare le particelle

Perché le tracce appaiono curvate?

Molti rivelatori lavorano in presenza di un campo magnetico

- Il segno della **CARICA** si deduce dal verso di curvatura della traiettoria



- Il **MOMENTO** (= massa x velocità) si misura in campo magnetico:

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

$$\text{Se } \vec{v} \perp \vec{B}$$

$$\rightarrow ma = qvB$$

$$mv^2/R = qvB$$

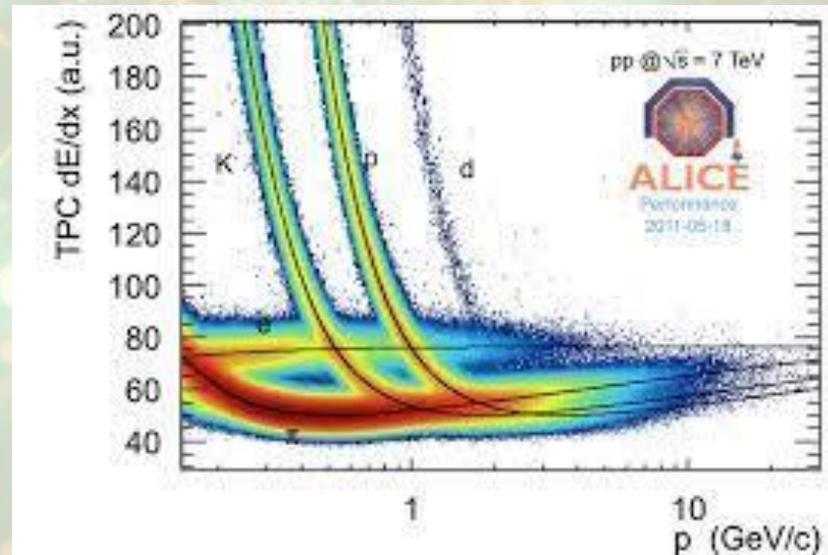
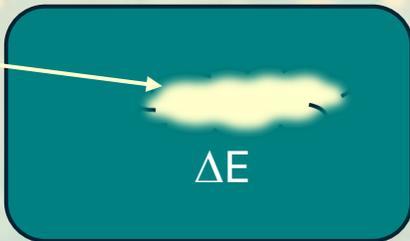
$$p = mv = qBR$$

Identificare le particelle

Esistono diverse tecniche per identificare le particelle.

Alcuni esempi:

PERDITA DI ENERGIA (particelle cariche)



Identificare le particelle

Esistono diverse tecniche per identificare le particelle.

Alcuni esempi:



TEMPO DI VOLO



Tempo per percorrere uno spazio L ad una velocità β :

$$\Delta t = L / \beta c \rightarrow \beta = L / (\Delta t c)$$

Misurati impulso e velocità si ricava la massa

$$m = p / (\gamma \beta c)$$

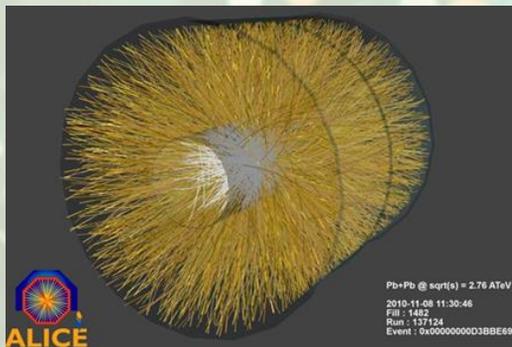
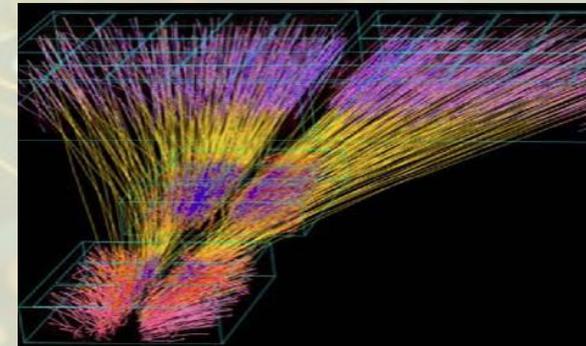
dove $\beta (=v/c)$ e $\gamma = 1 / \sqrt{1 - \beta^2}$

Rivelatori presso gli acceleratori

Molto spesso, negli esperimenti di fisica delle particelle, **non basta un solo rivelatore** con un solo tipo di misura

Serve il **maggior numero possibile di informazioni** su cosa è successo durante la collisione delle particelle!

- **Esperimenti a bersaglio fisso**: il proiettile «attraversa» il bersaglio, e tutti i prodotti della reazione vanno in avanti (rispetto al bersaglio) → **rivelatori in avanti**

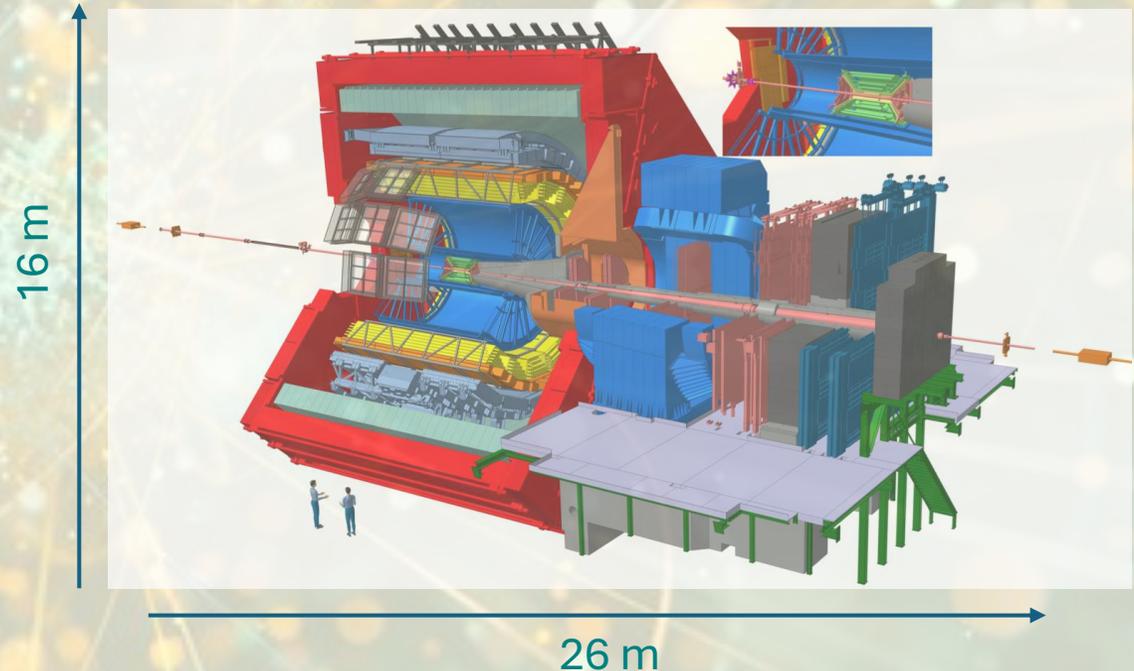


- **Esperimenti ai collider**: le particelle possono andare da tutte le parti → servono **rivelatori a 4π** , cioè che coprano tutto l'angolo solido attorno al punto di collisione (struttura a cipolla)

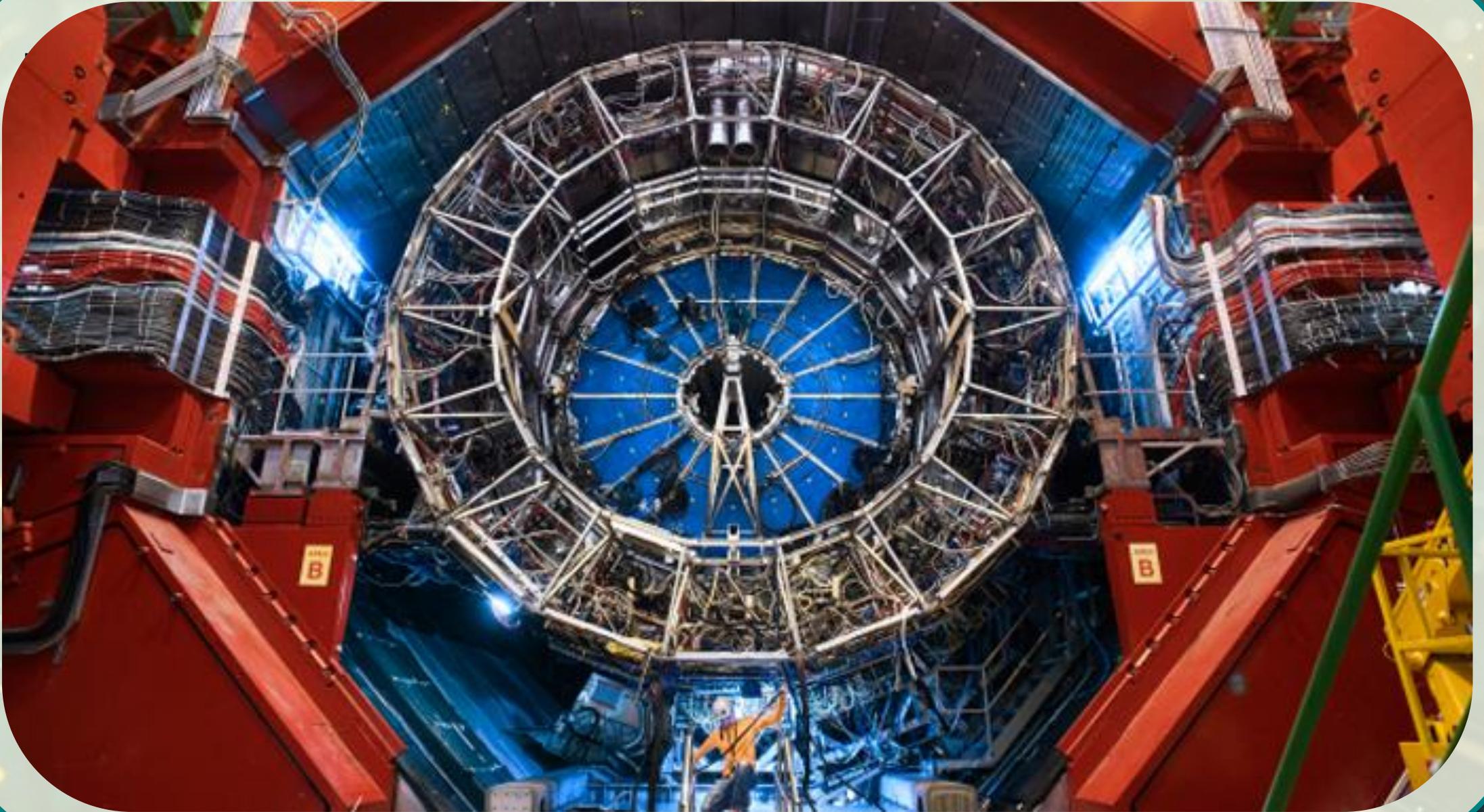
L'esperimento ALICE

I numeri di ALICE:

- Altezza 16 m (palazzo di 4 piani)
- Lunghezza 26 m (~ 1 campo da basket)
- Peso 10.000 t (circa 5000 auto)
- Installato a 50 m di profondità
- Prende dati presso l'acceleratore Large Hadron Collider (**LHC**) al CERN
- 18 rivelatori diversi
- Collaborazione ~ 2000 persone (da ~ 40 paesi diversi)
- In presa dati dal 2009 (fino al 2033)
- Costo ~500 milioni di Euro (maggiore della massima vincita al superenalotto)



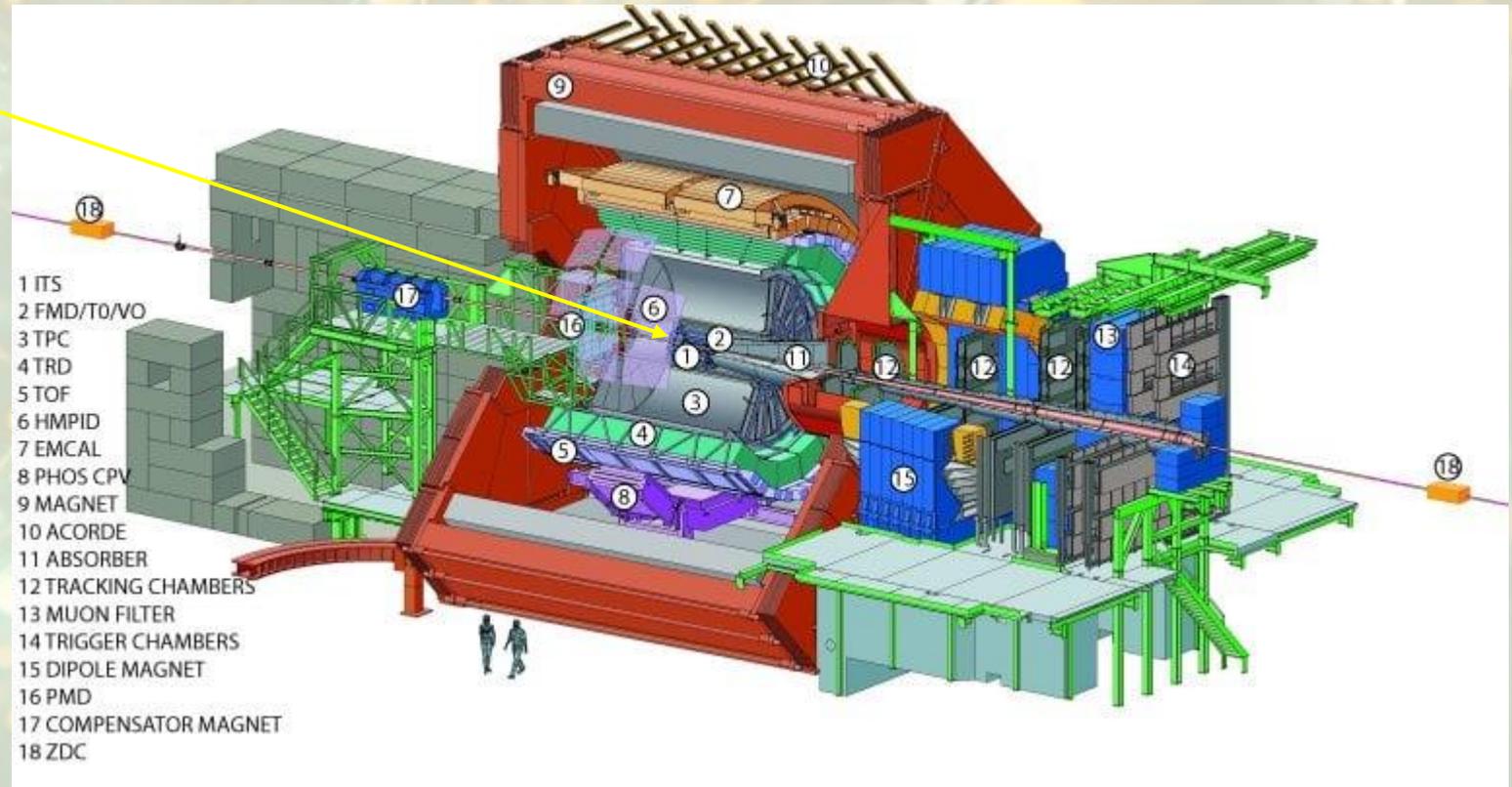
PROGETTATO PER LO STUDIO DEL QGP



L'esperimento ALICE

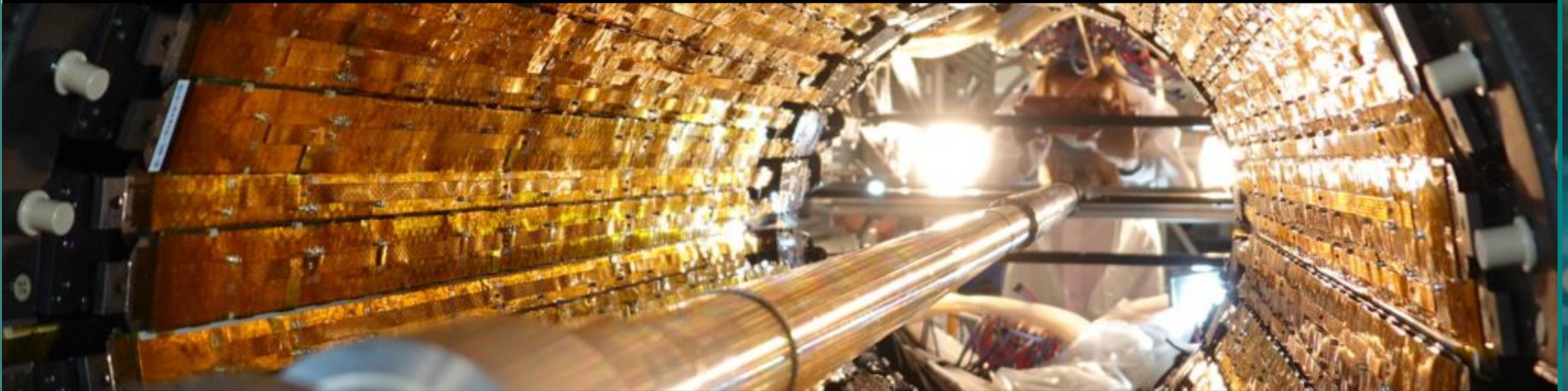
ITS (Inner Tracking System):

- Usato per il tracciamento
- Interamente in pixel di Silicio (10 m^2)
- Rivelatore più vicino al punto d'interazione (ITS 3.9 cm, ITS2 2.2 cm)
- Corrisponde a una fotocamera da 13 Gpixel
- Risoluzione spaziale $5 \mu\text{m}$



L'esperimento ALICE

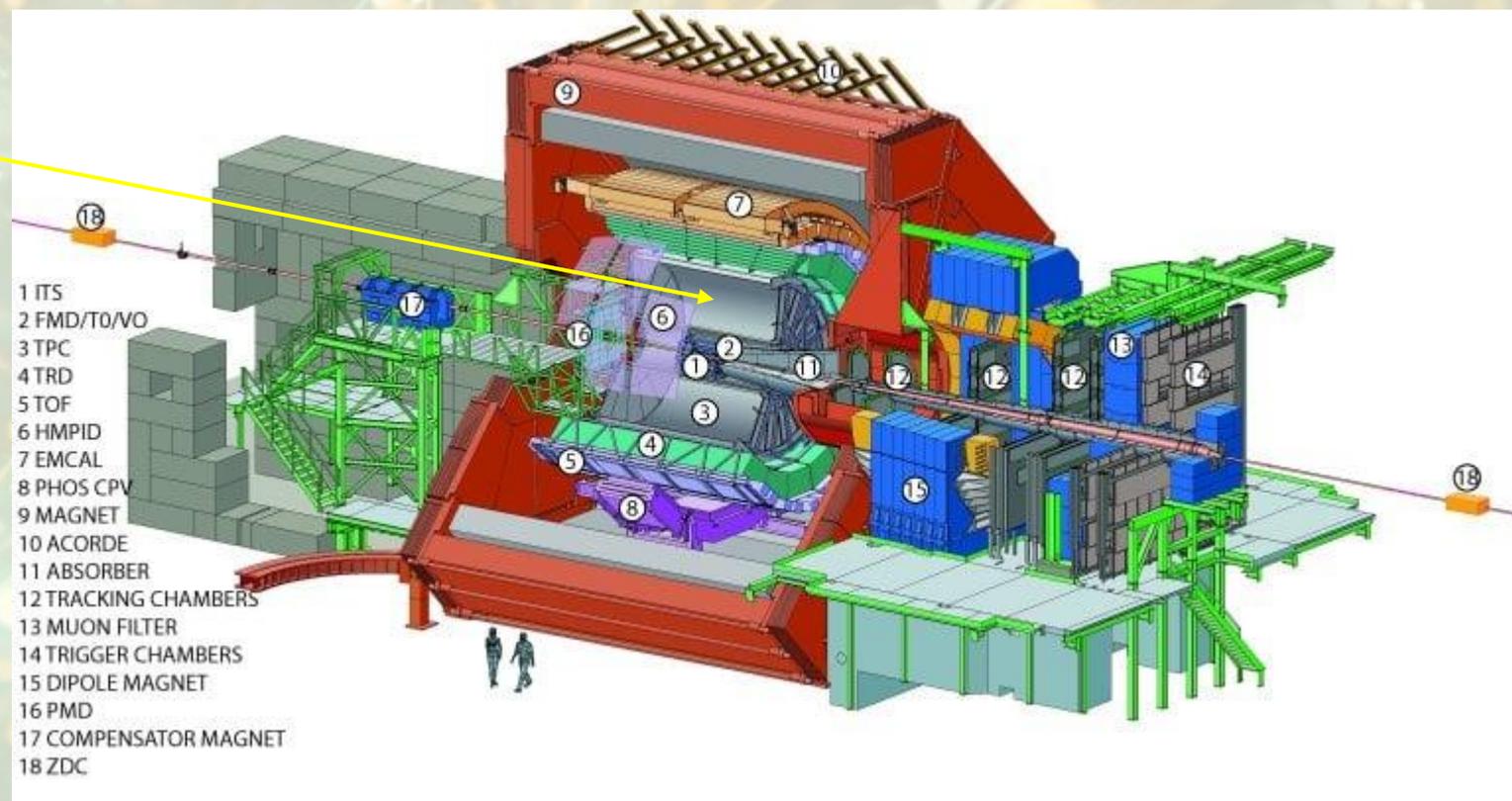
ITS (Inner Tracking System)



L'esperimento ALICE

TPC (Time Projection Chamber):

- Tracciamento e identificazione (perdita di energia)
- Rivelatore a gas (90 m³)



L'esperimento ALICE

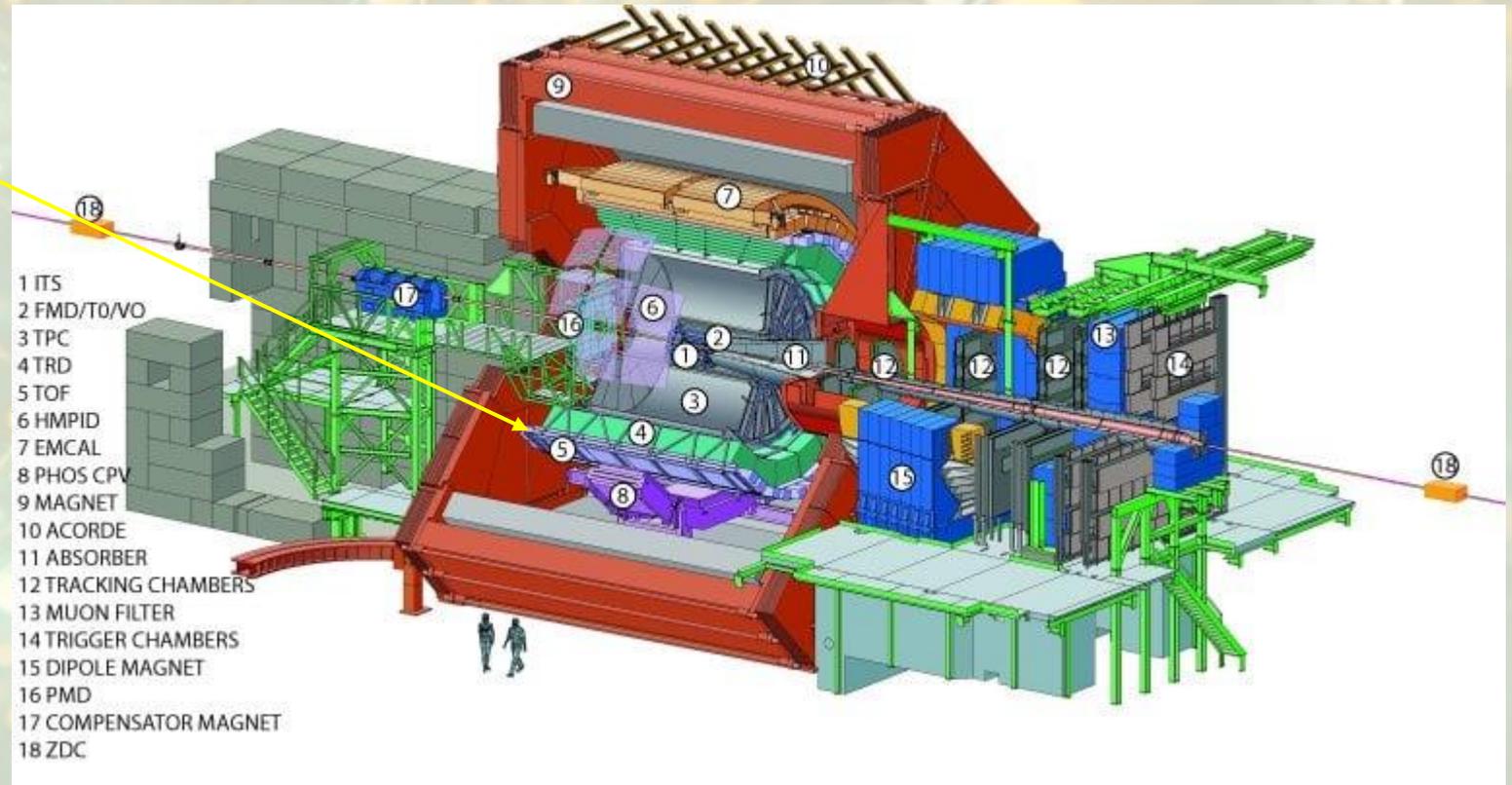
TPC
(Time Projection Chamber)



L'esperimento ALICE

TOF (Time of Flight):

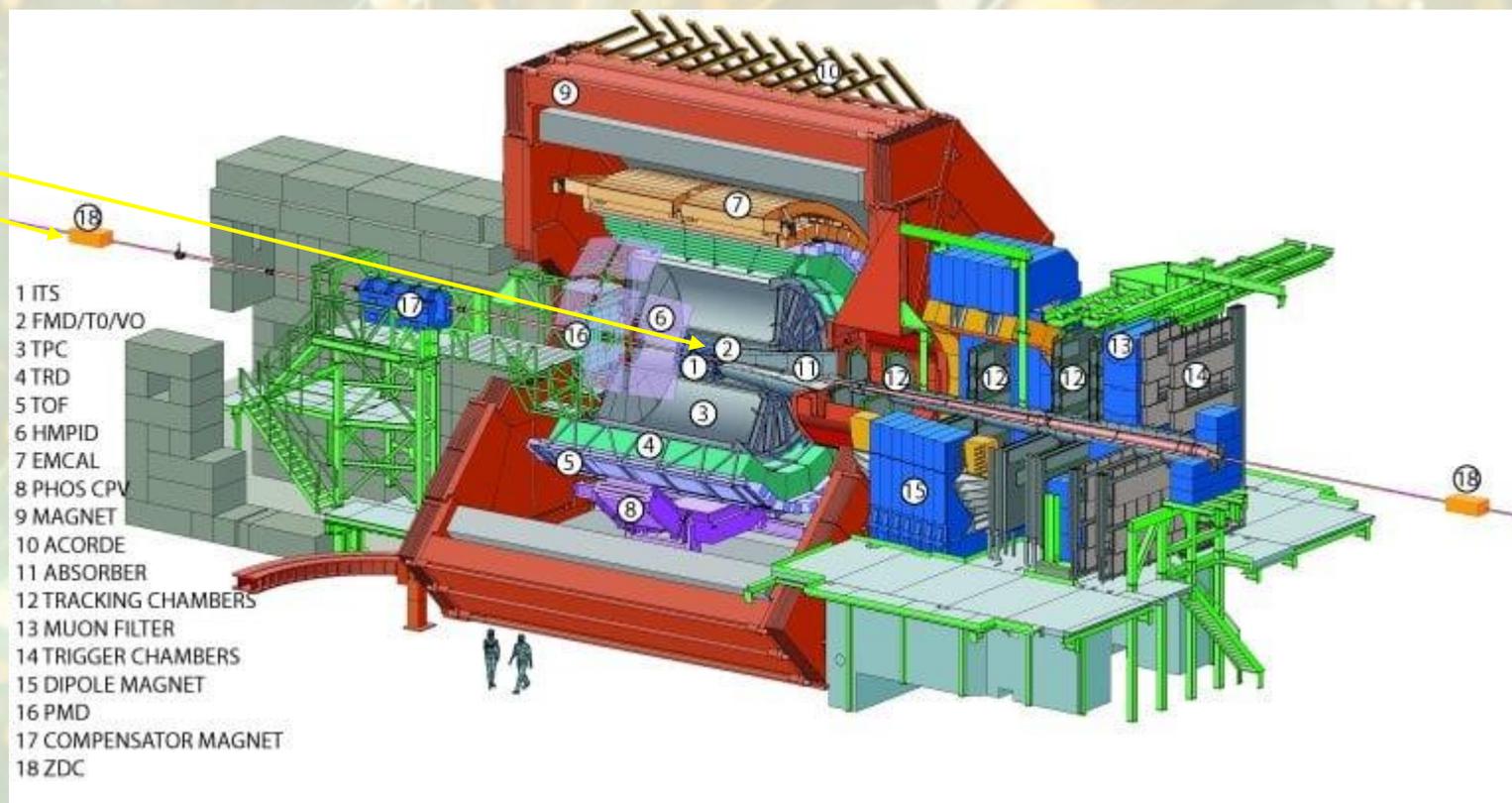
- Tracciamento e identificazione (tempo di volo)
- Rivelatore a gas (160 m²)



L'esperimento ALICE

ZDC (Zero Degree Calorimeter) e VZERO:

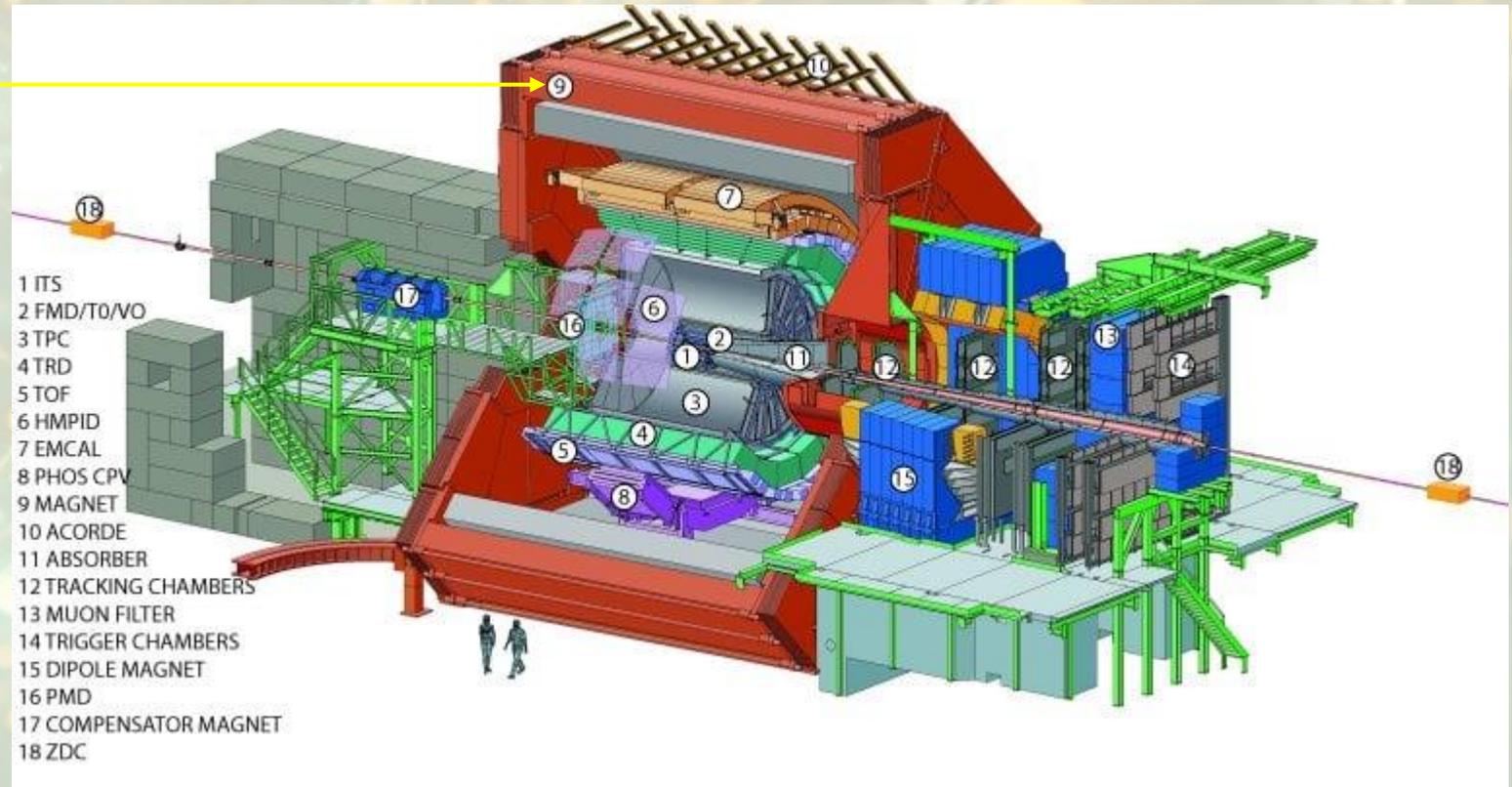
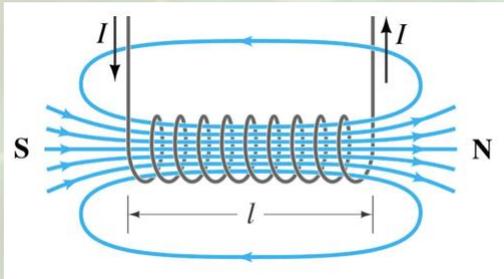
- Misurano la centralità della collisione



L'esperimento ALICE

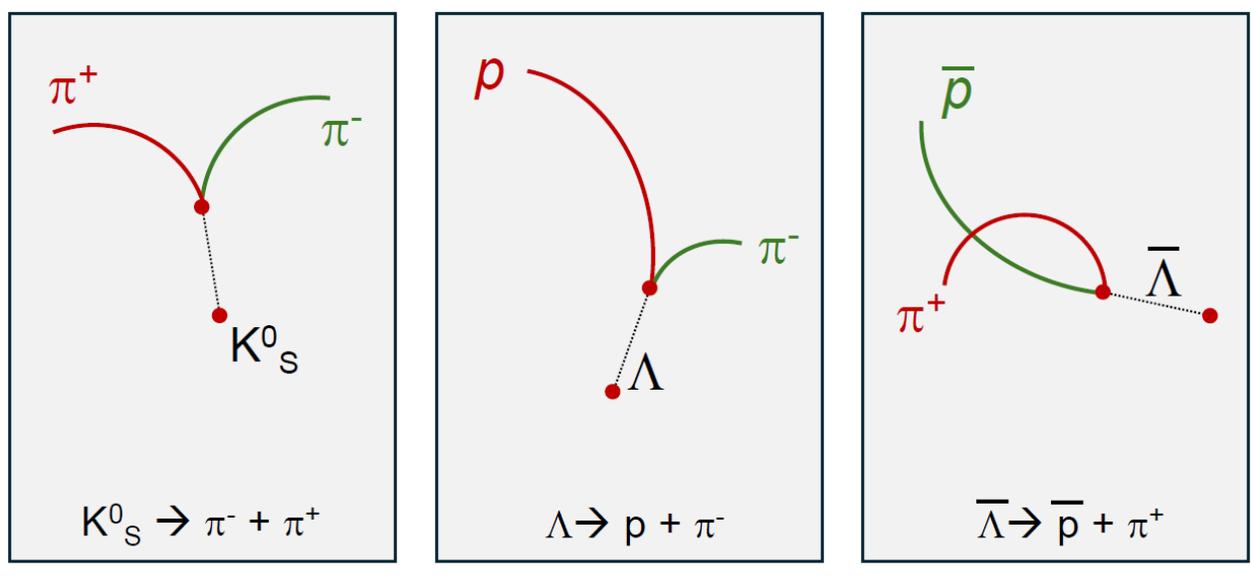
Magnete L3:

- Campo solenoidale da 0.5 T (10 000 maggiore del campo magnetico terrestre)



Dalla particella al segnale

Le particelle **INSTABILI** possono decadere in particelle STABILI prima di raggiungere i rivelatori
Vite medie dell'ordine di 10^{-20} s, viaggiando alla velocità della luce, decadono in $\sim 10^{-12}$ m!



K^0 short (neutro)

Vita media 8.96×10^{-11} s

Lunghezza di decadimento ~ 2.7 cm

Lambda e anti Lambda (neutro)

Vita media 2.63×10^{-10} s

Lunghezza di decadimento ~ 7.9 cm

Come possiamo rivelare le particelle instabili?

Massa invariante

La massa invariante è così chiamata perché è una grandezza che non cambia in sistemi di riferimento diversi



Conservazione dell'energia: $E = E_1 + E_2$

Conservazione del momento: $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$

Conservazione della carica: $Z = Z_1 + Z_2$

Dalla relatività: $E^2 = p^2 + m^2$

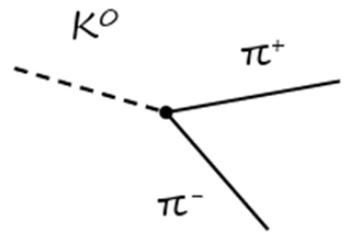
Supponendo $c=1$

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

Massa invariante – esempio K^0

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$K^0: E, m, \vec{p}$$

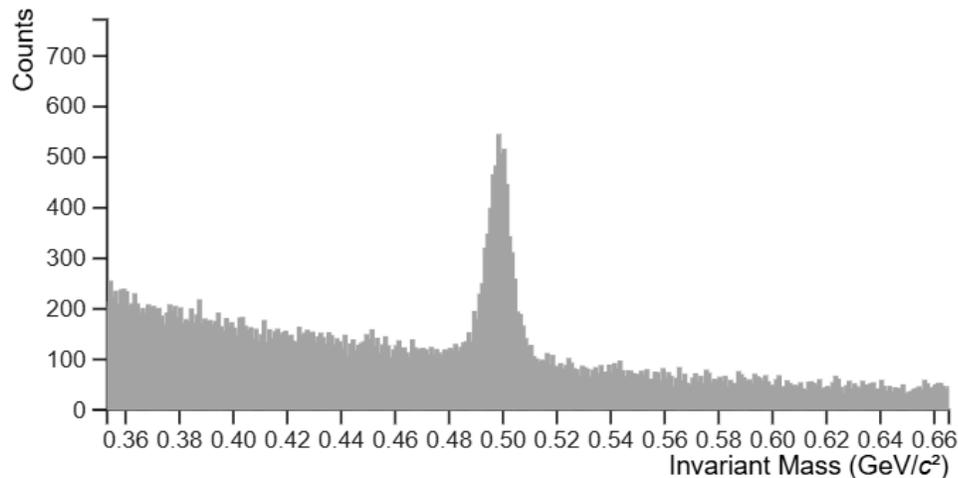


$$\pi^+: \text{particella-figlia 1} \\ E_1, m_1, \vec{p}_1$$

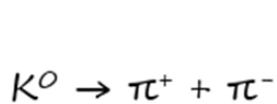
$$\pi^-: \text{particella-figlia 2} \\ E_2, m_2, \vec{p}_2$$

Ma se tutto è «noto»... perché vedo una distribuzione e non un numero??

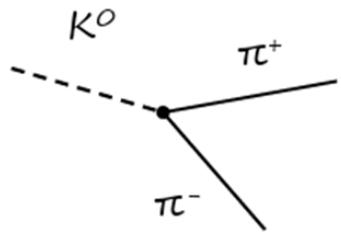
$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1\cdot\vec{p}_2$$



Massa invariante – esempio K^0



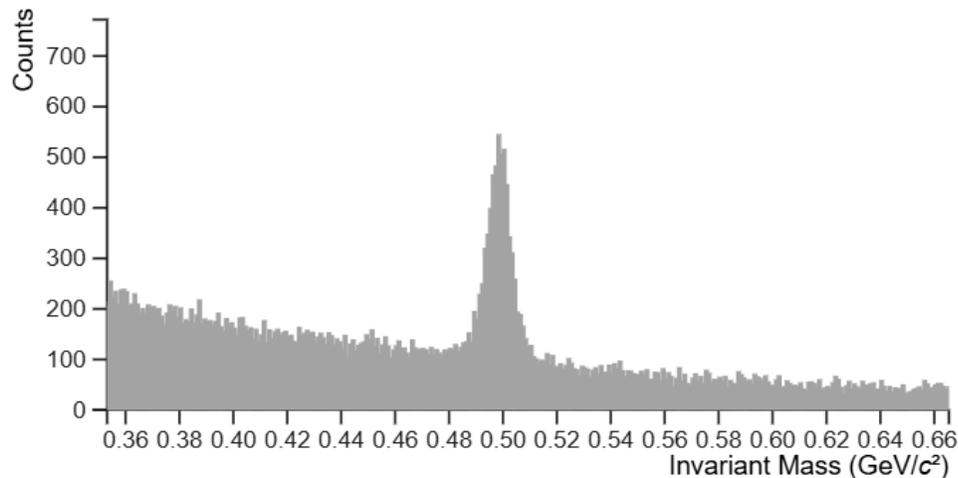
$$K^0: E, m, \vec{p}$$



$$\pi^+: \text{particella-figlia 1} \\ E_1, m_1, \vec{p}_1$$

$$\pi^-: \text{particella-figlia 2} \\ E_2, m_2, \vec{p}_2$$

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$



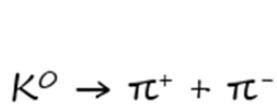
Perché abbiamo un rivelatore «vero»!

Il momento non è quello «vero» ma quello ricostruito dal rivelatore, che è un po' impreciso...

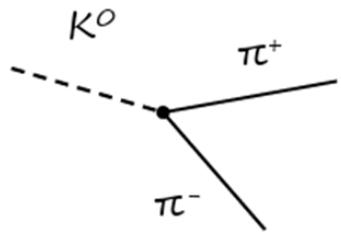
→ Otteniamo una distribuzione a campana (detta Gaussiana)

La larghezza della campana è la «**risoluzione**» del rivelatore (= quanto bene funziona il nostro rivelatore)

Massa invariante – esempio K^0



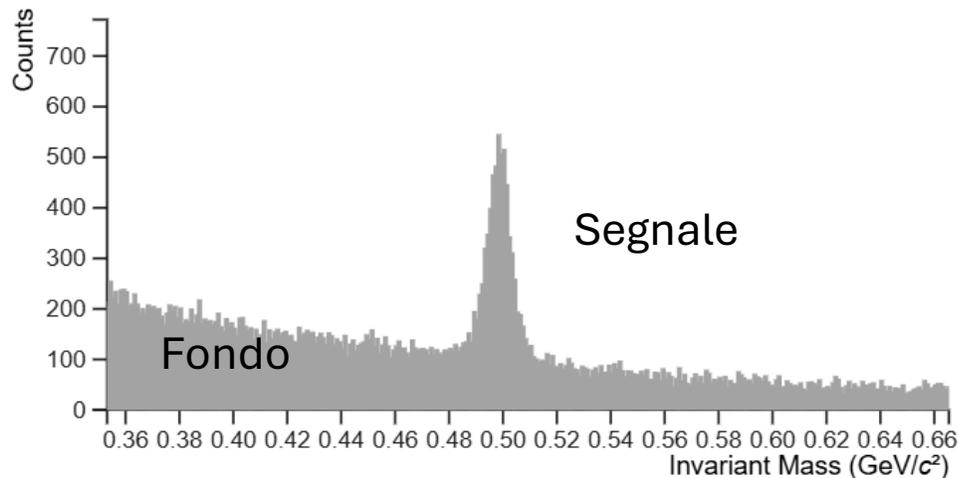
$K^0: E, m, \vec{p}$



π^+ : particella-figlia 1
 E_1, m_1, \vec{p}_1

π^- : particella-figlia 2
 E_2, m_2, \vec{p}_2

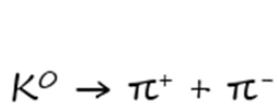
$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1\cdot\vec{p}_2$$



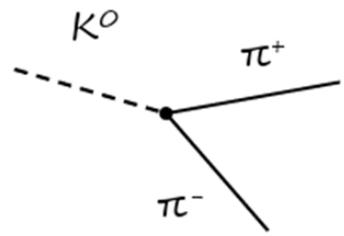
Segnale: coppie di particelle realmente figlie della stessa madre (picco)

Background: coppie di particelle che non derivano dal decadimento di una particella madre (fondo)

Massa invariante – esempio K^0



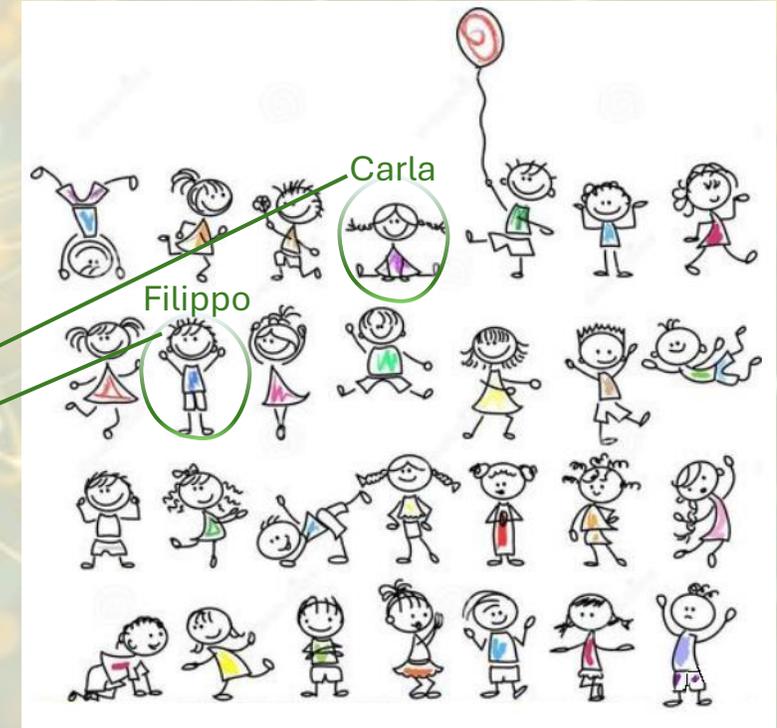
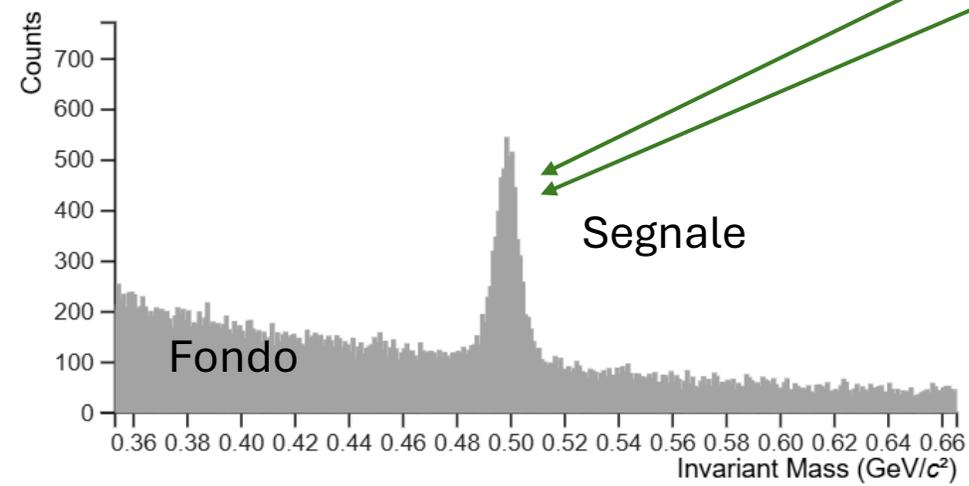
$K^0: E, m, \vec{p}$



π^+ : particella-figlia 1
 E_1, m_1, \vec{p}_1

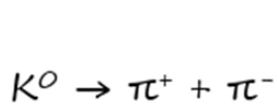
π^- : particella-figlia 2
 E_2, m_2, \vec{p}_2

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1\cdot\vec{p}_2$$

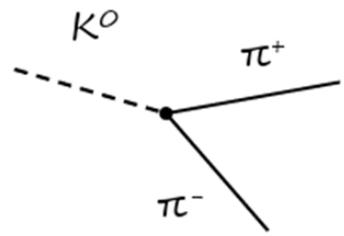


Madre: Maria
 Figli: Filippo e Carla

Massa invariante – esempio K^0



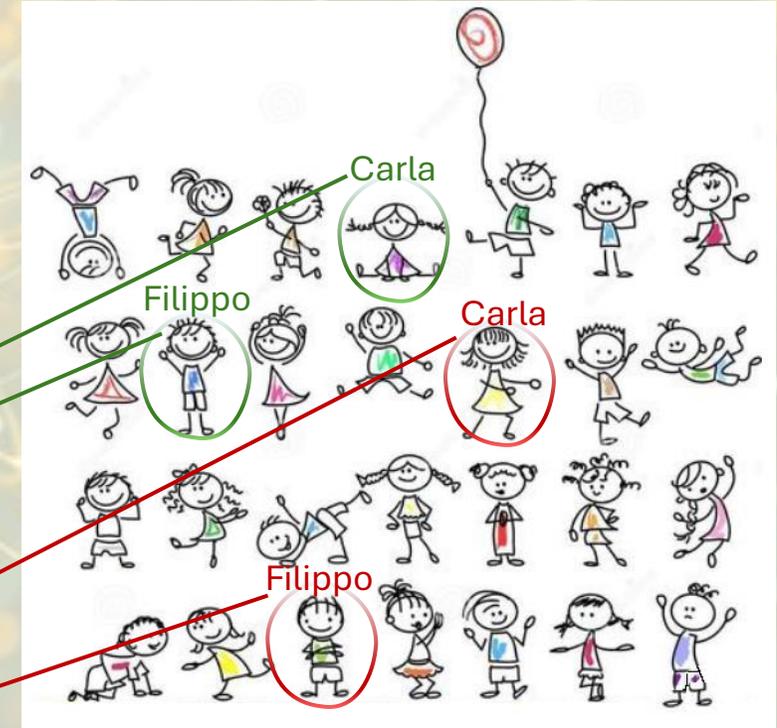
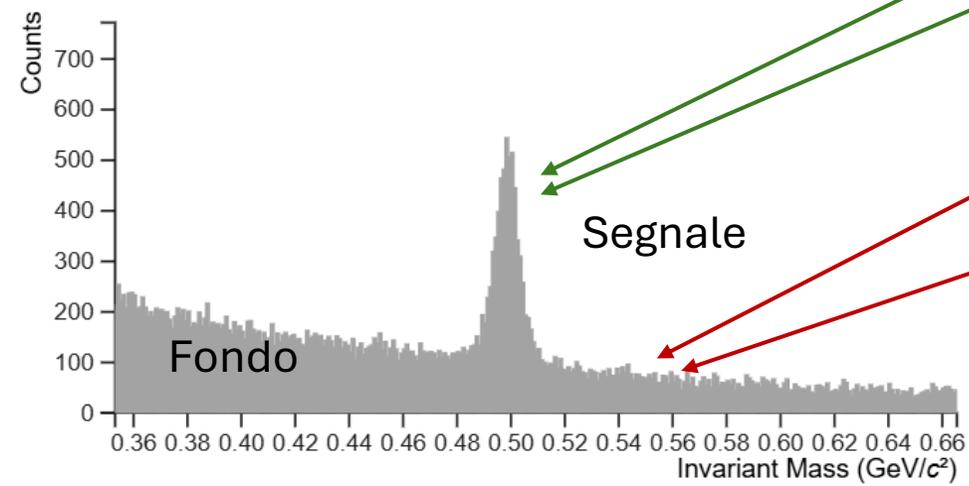
$K^0: E, m, \vec{p}$



π^+ : particella-figlia 1
 E_1, m_1, \vec{p}_1

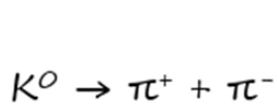
π^- : particella-figlia 2
 E_2, m_2, \vec{p}_2

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

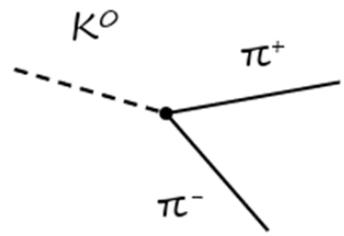


Madre: Maria
 Figli: Filippo e Carla

Massa invariante – esempio K^0



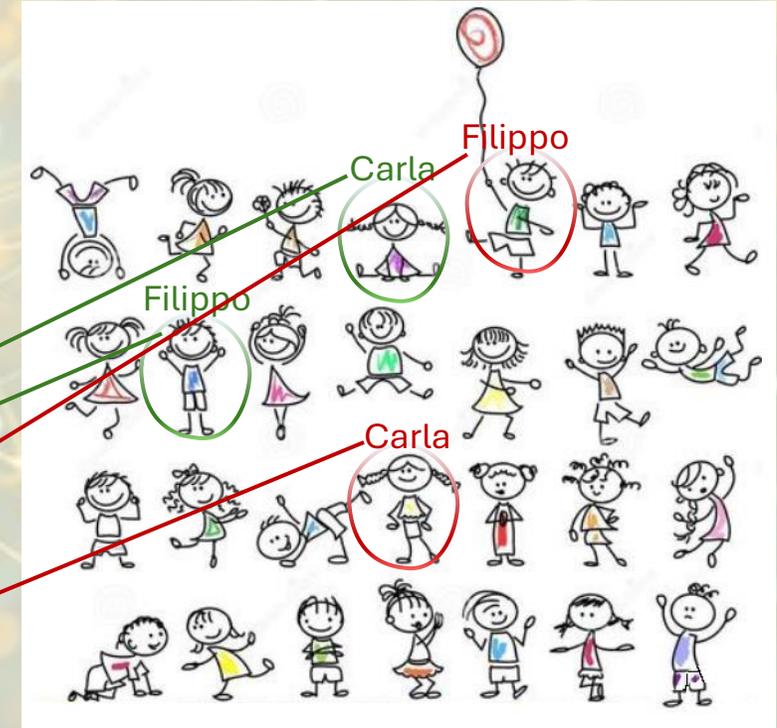
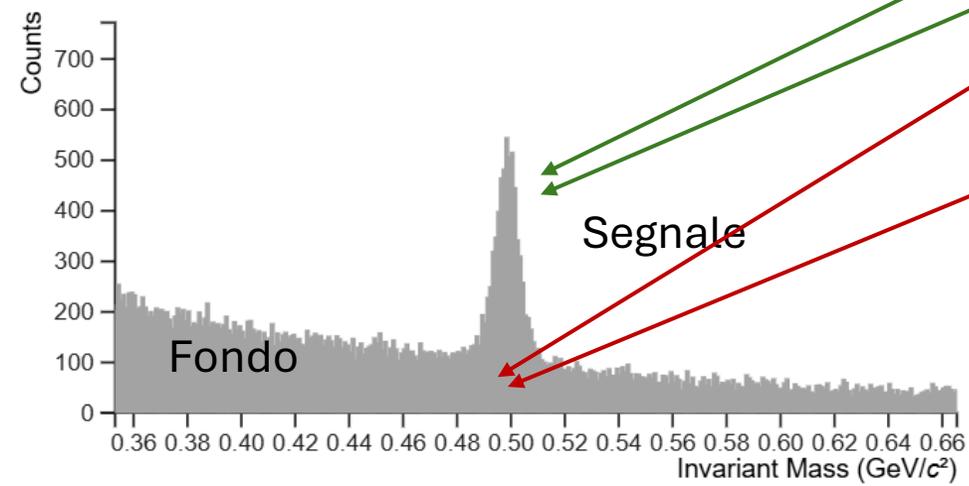
$K^0: E, m, \vec{p}$



π^+ : particella-figlia 1
 E_1, m_1, \vec{p}_1

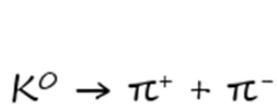
π^- : particella-figlia 2
 E_2, m_2, \vec{p}_2

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1\vec{p}_2$$

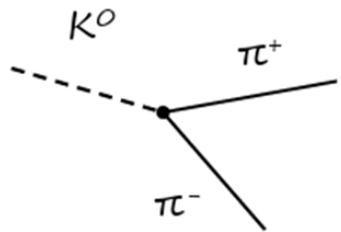


Madre: Maria
 Figli: Filippo e Carla

Massa invariante – esempio K^0



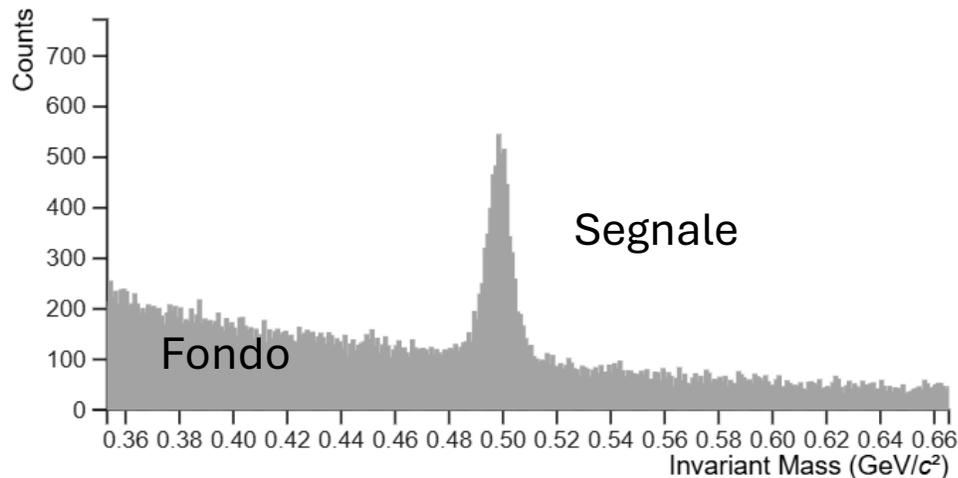
$K^0: E, m, \vec{p}$



π^+ : particella-figlia 1
 E_1, m_1, \vec{p}_1

π^- : particella-figlia 2
 E_2, m_2, \vec{p}_2

$$m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2\vec{p}_1\cdot\vec{p}_2$$



Il segnale ci fornisce un'idea del numero di particelle (K^0) prodotte in ogni collisione

N.B. Non tutte le particelle prodotte vengono rivelate!

→ **Efficienza del rivelatore**

Efficienza del rivelatore

Una particella potrebbe non essere rivelata:

- Perché non incide sul rivelatore o incide su una zona non attiva (efficienza geometrica)
- Perché il segnale che genera nel rivelatore non è sufficiente per la rivelazione (efficienza intrinseca)

Efficienza totale = efficienza geometrica x efficienza intrinseca (0-100%)



E adesso...

ENJOY THE MASTERCLASS!