

INTERNATIONAL

**MASTERCLASSES**

hands on particle physics

# *Alla ricerca di particelle strane in ALICE*

*ALICE: a journey to discovery*



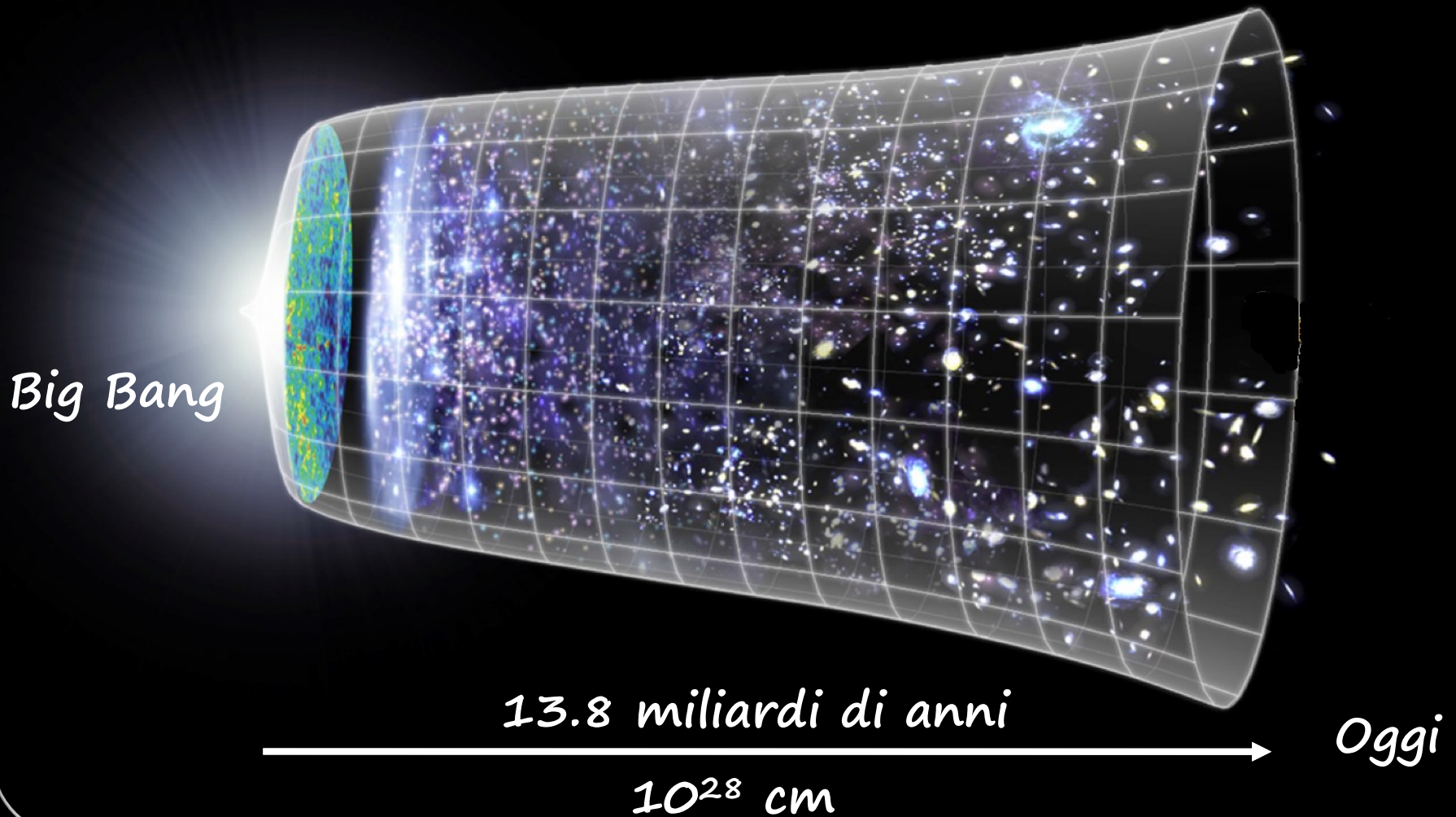
*ALICE International Masterclass*

*Pavia, 23 febbraio 2024*

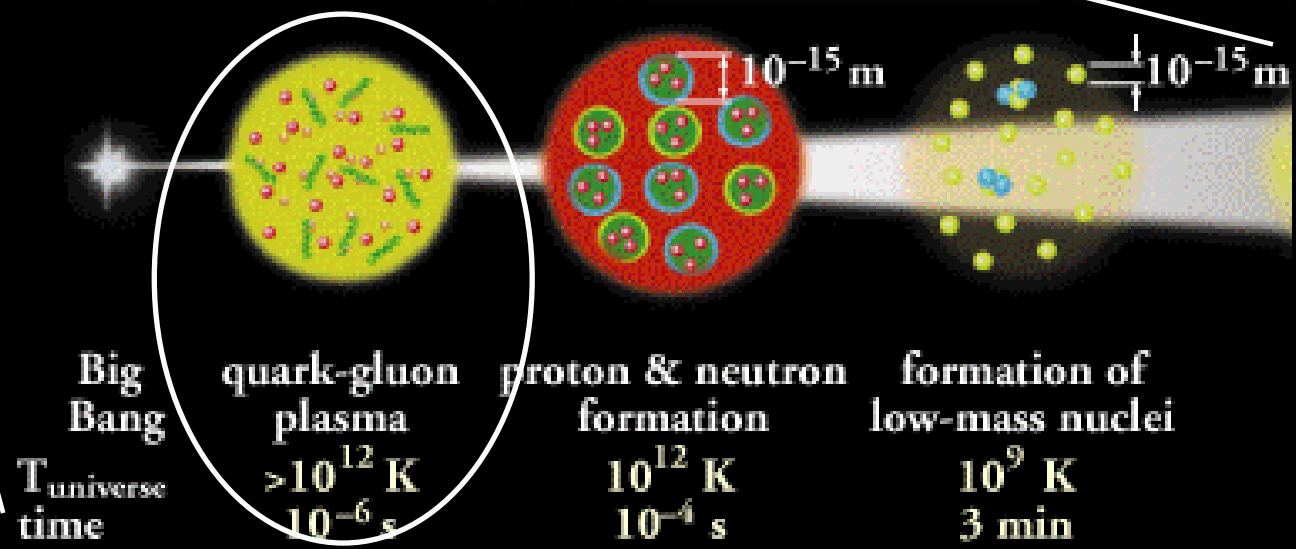
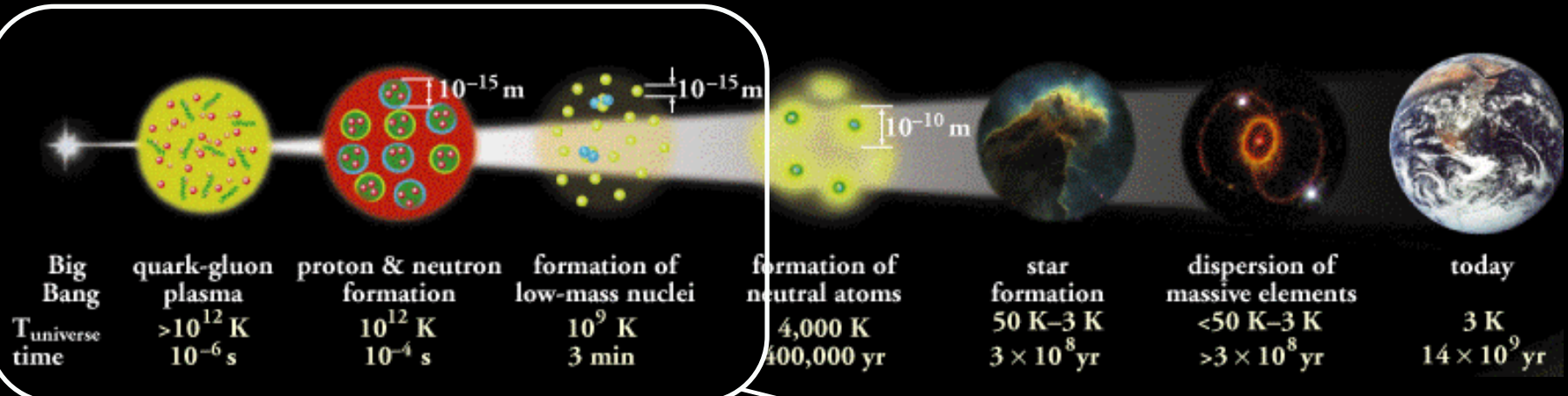


# Un'importante sfida scientifica

Comprendere i primissimi istanti di vita del nostro Universo



# Storia dell'Universo

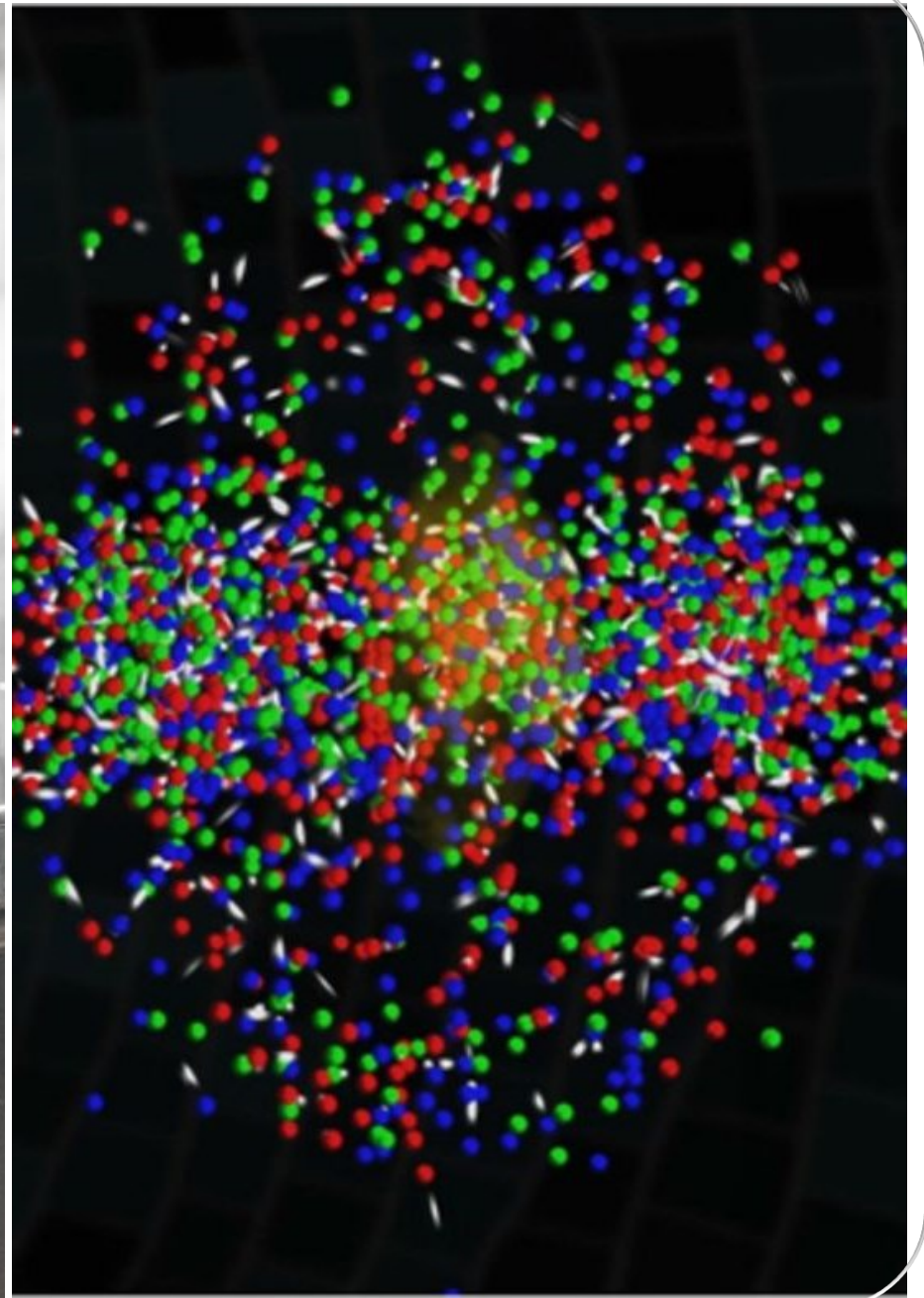


# La «zuppa» primordiale

Fino a circa un centomillesimo di secondo dal Big Bang ( $10^{-37}$  –  $10^{-5}$  s) l'Universo era formato da una «zuppa» di quark e gluoni:  
il Quark Gluon Plasma (QGP)



- ❑ Come facciamo a studiare il QGP?
  - Possiamo cercare di **ricrearlo**, o quantomeno di riprodurne una sua approssimazione
- ❑  $T_{\text{sole}} = 15$  milioni K  
 $T_{\text{QGP}} > 1000$  miliardi K
- ❑ È possibile ricreare un tale sistema in laboratorio???



# La «zuppa» primordiale

Fino a circa un centomillesimo di secondo dal Big Bang ( $10^{-37}$  –  $10^{-5}$  s) l'Universo era formato da una «zuppa» di quark e gluoni:  
il Quark Gluon Plasma (QGP)



- ❑ Come facciamo a studiare il QGP?
  - Possiamo cercare di **ricrearlo**, o quantomeno di riprodurne una sua approssimazione
- ❑  $T_{\text{sole}} = 15$  milioni K  
 $T_{\text{QGP}} > 1000$  miliardi K
- ❑ È possibile ricreare un tale sistema in laboratorio???
  - **Sì!!!!** Al CERN, presso l'acceleratore LHC

# Un Mini-Bang al CERN

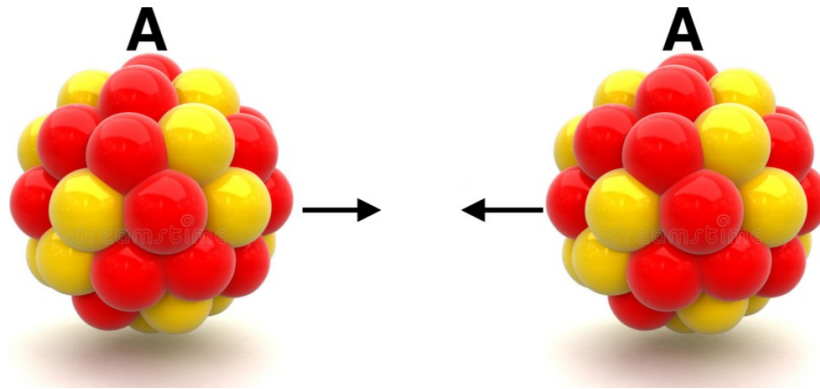
## Come riproduciamo un mini Big-Bang?

- Le **altissime temperature** sono generate attraverso collisioni di nuclei atomici accelerati fino a quasi la velocità della luce.

# Un Mini-Bang al CERN

## Come riproduciamo un mini Big-Bang?

- Le **altissime temperature** sono generate attraverso collisioni di nuclei atomici accelerati fino a quasi la velocità della luce.
- Per riprodurre il blob primordiale si fanno collidere l'uno contro l'altro, a **energie elevatissime (5 TeV/NN)**, due ioni piuttosto grossi: con gli **ioni  $^{208}\text{Pb}$**  si hanno in ogni urto 416 nucleoni!



<<Contrariamente a quanto si possa pensare, la sorgente di piombo è più costosa di quella dell'oro poiché isotopicamente pura. Quella utilizzata in LHC è composta al 99,57% dal piombo con numero di massa 208. Un milligrammo di piombo così purificato costa 1000 euro, ma in due settimane di operazioni se ne consuma più di 1 g, per un totale di più di un milione di euro!>> **Asimmetrie, n. 64**

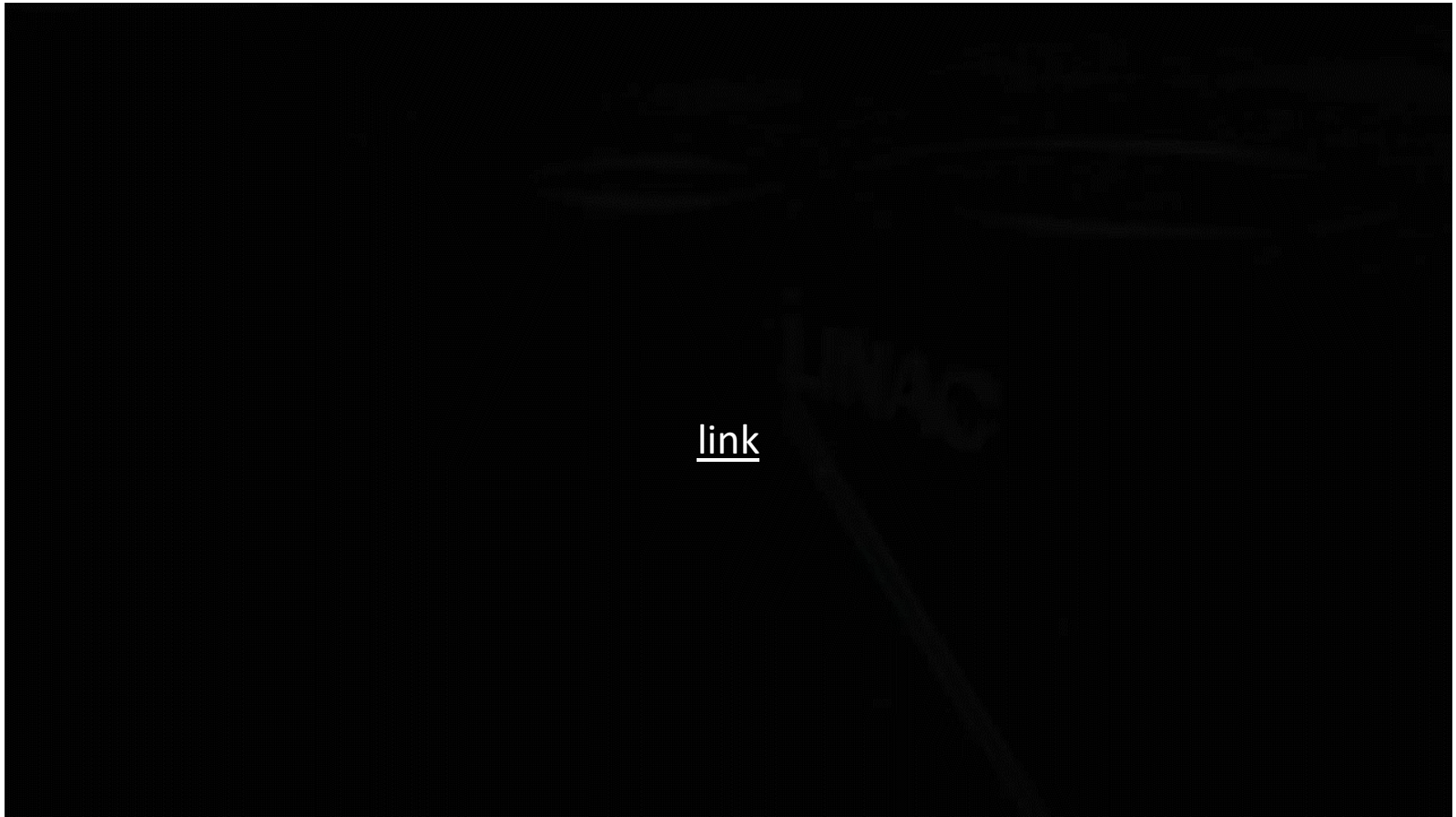


# Un Mini-Bang al CERN

## Come riproduciamo un mini Big-Bang?

- Le **altissime temperature** sono generate attraverso collisioni di nuclei atomici accelerati fino a quasi la velocità della luce.
- Per riprodurre il blob primordiale si fanno collidere l'uno contro l'altro, a **energie elevatissime (5 TeV/NN)**, due ioni piuttosto grossi: con gli **ioni  $^{208}\text{Pb}$**  si hanno in ogni urto **416** nucleoni!
- L'energia della collisione è concentrata in un volume delle dimensioni di un nucleo atomico:
  - 100 miliardi di volte più piccolo della capocchia di uno spillo!
  - sufficientemente piccolo da creare una enorme densità di energia e sufficientemente grossa per creare una gocciolina di materia.
  - **densità d'energia  $\epsilon$  simile a quella dell'universo** pochi  $\mu\text{s}$  dopo la formazione (decine di  $\text{GeV}/\text{fm}^3$ )

# Un Mini-Bang al CERN

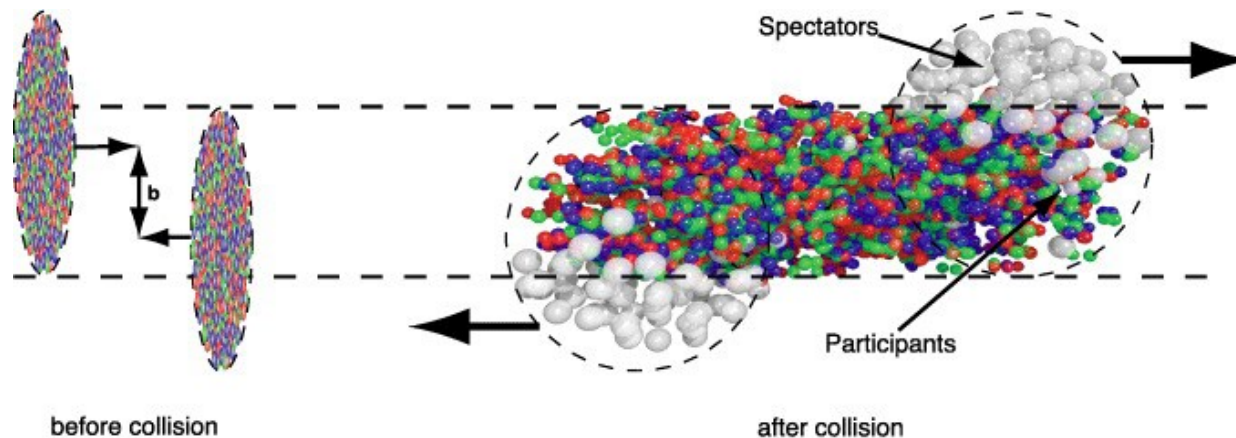


*Per ottenere un grosso numero di collisioni, i pacchetti di nuclei di piombo si scontrano 3 milioni di volte al secondo, 7 giorni a settimana, 4 settimane l'anno*

# Un Mini-Bang al CERN

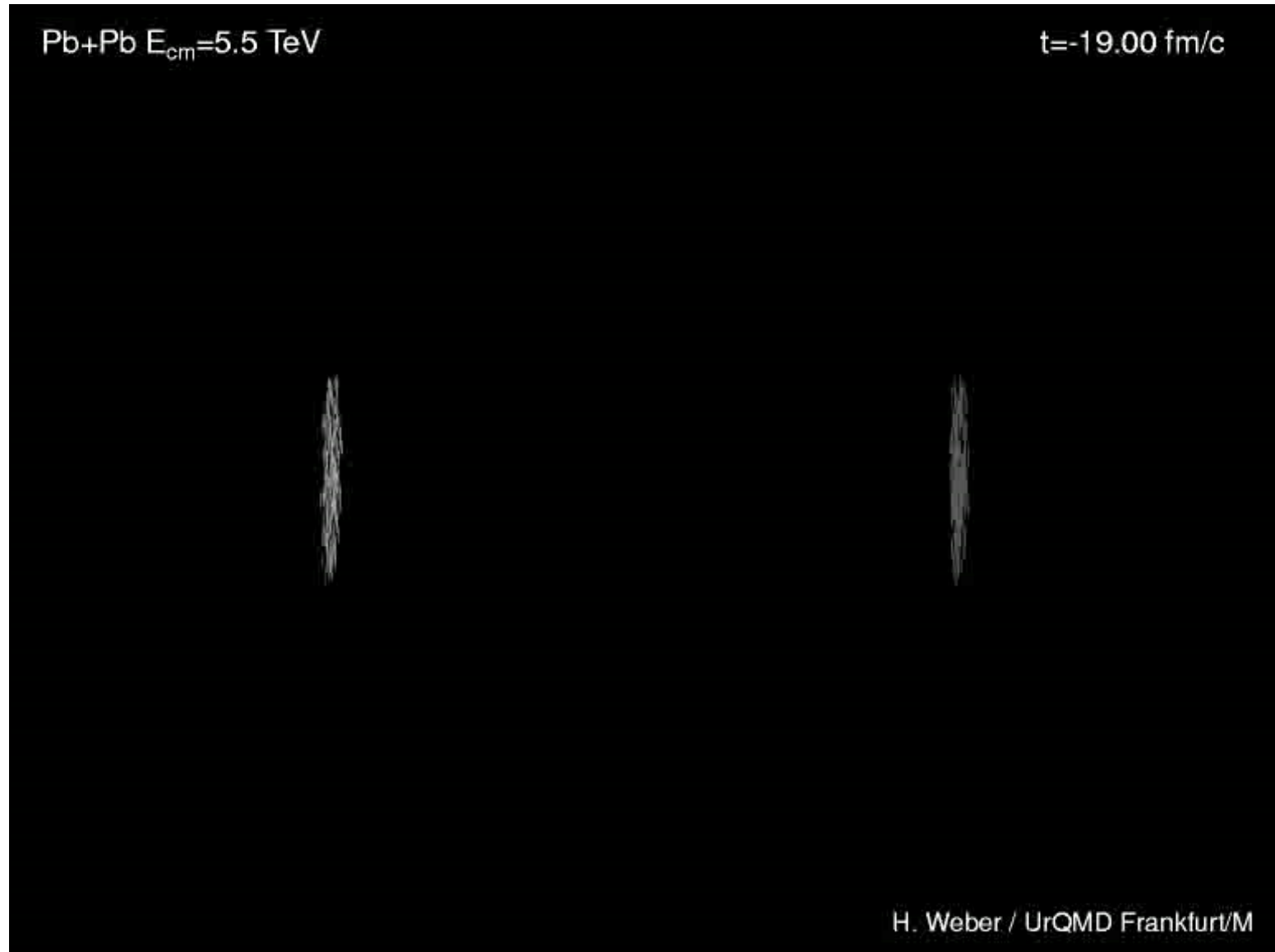
## Come riproduciamo un mini Big-Bang?

- Gli adroni costituenti i due nuclei di Pb si fondono così nella *fireball*, plasma di quark e gluoni (QGP) che riproduce in piccolo il blob primordiale

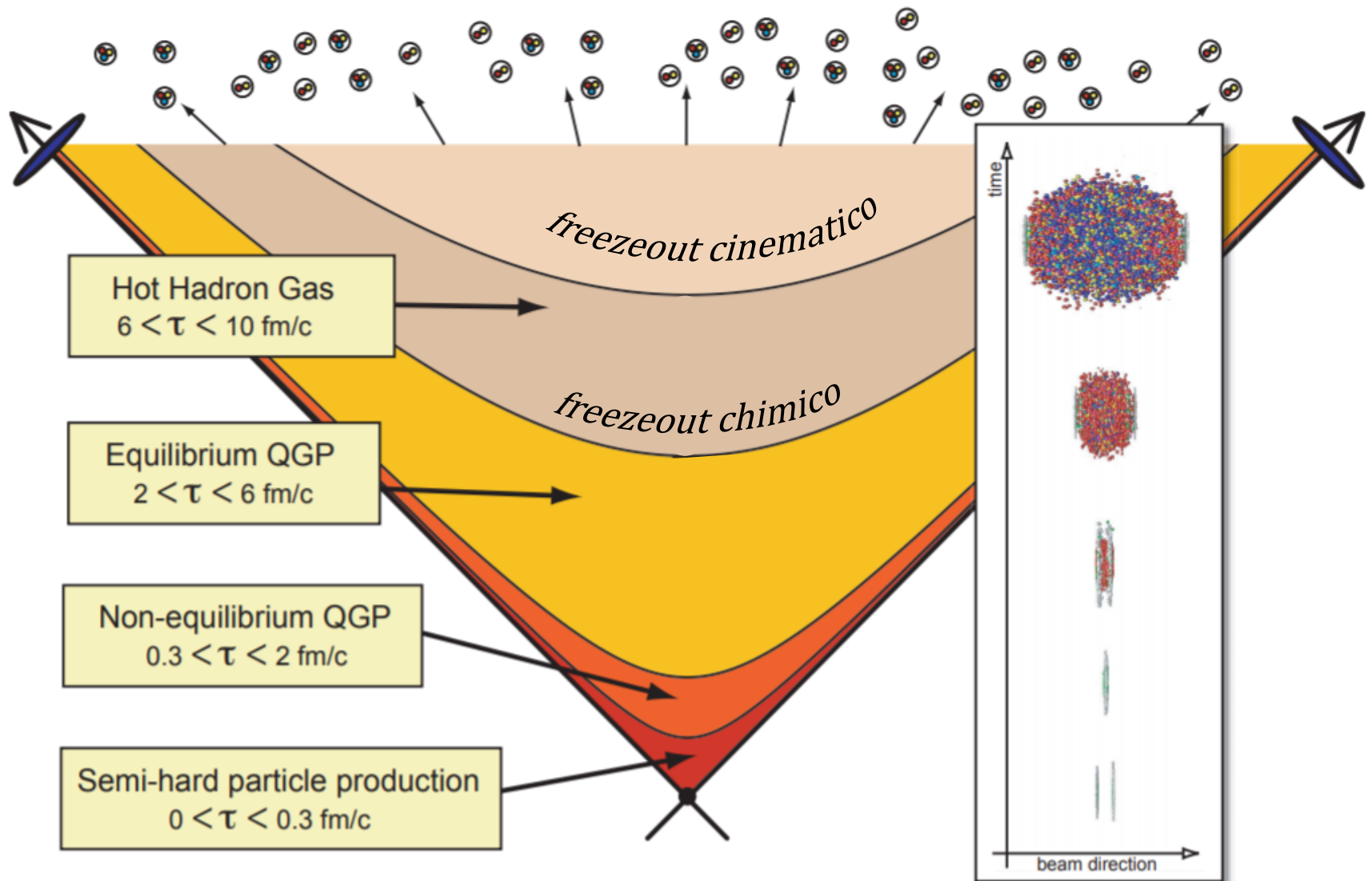


Studiarne l'evoluzione è quindi come andare a guardare l'universo nelle sue primissime fasi non con un telescopio, ma con un "microscopio"!

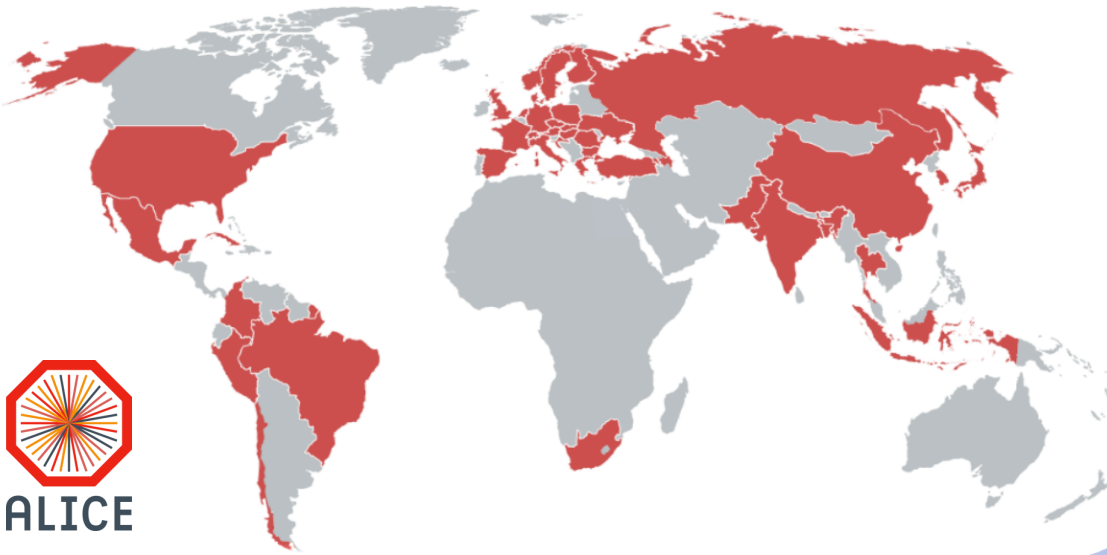
# Collisioni Pb-Pb



# Evoluzione spazio-temporale dell'urto

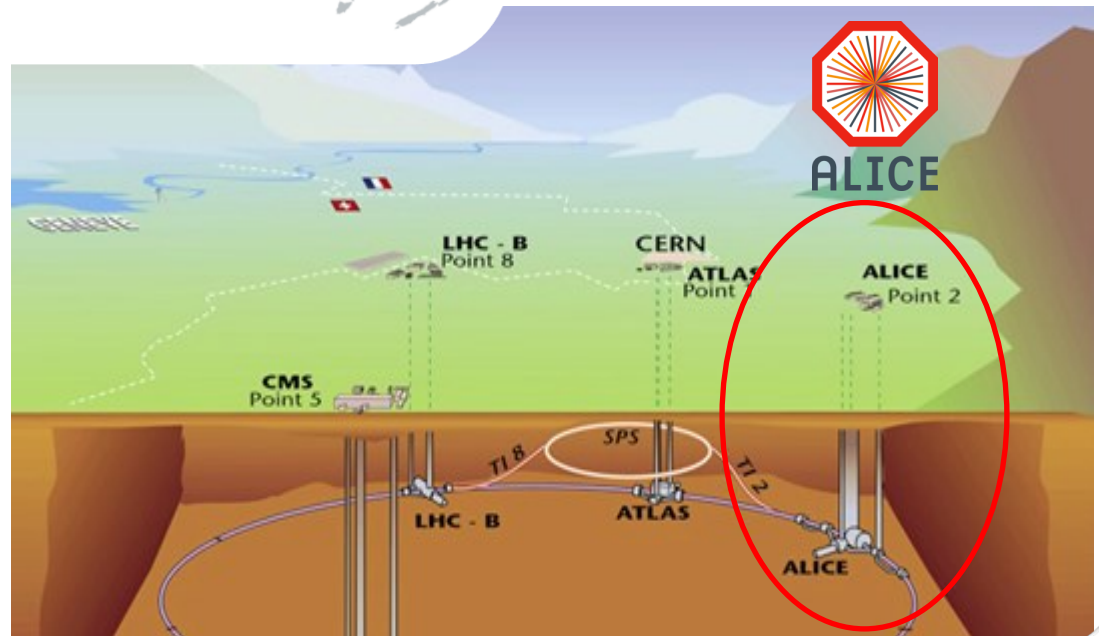


# La Collaborazione ALICE



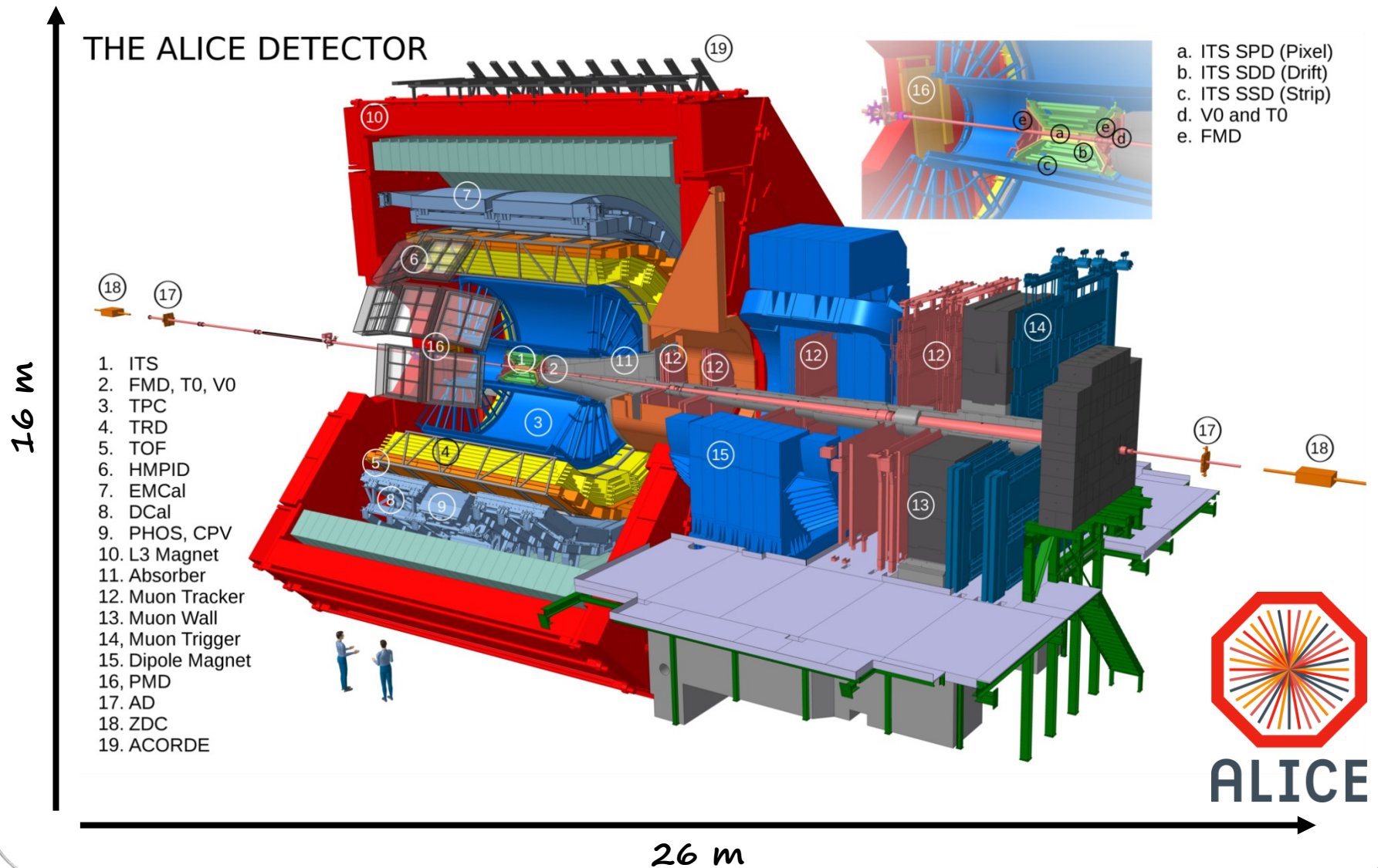
39 nazioni,  
174 istituti,  
1900 membri!

Unico esperimento a  
LHC dedicato alla  
fisica con fasci di ioni





# ALICE: A Large Ion Collider Experiment

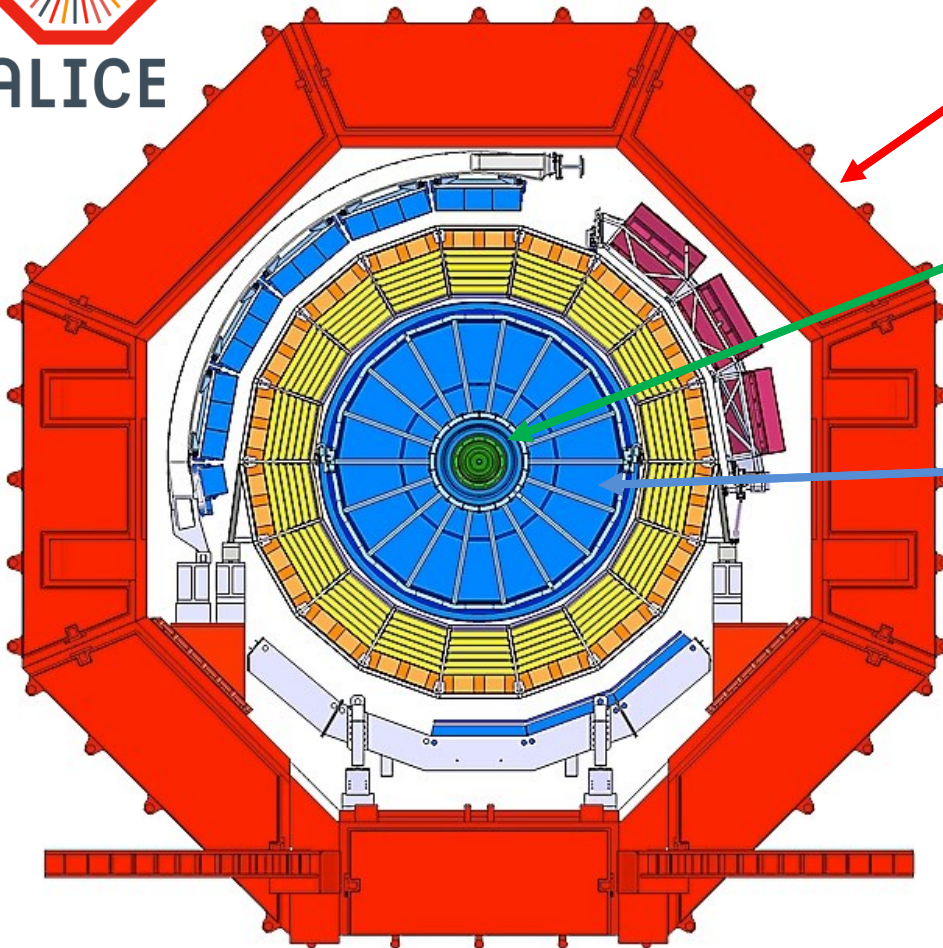




# ALICE: A Large Ion Collider Experiment



ALICE



**Magnete:** crea un campo magnetico solenoidale di 0.5 T

**Tracciatore interno (Inner Tracking System, ITS):** 6 strati di rivelatore al silicio

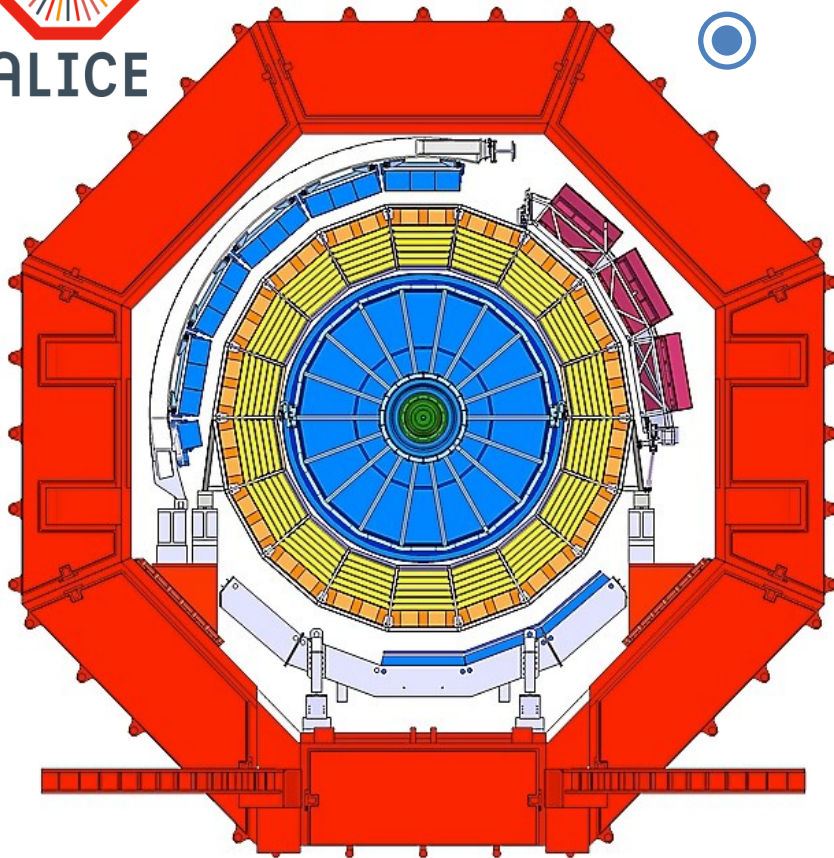
**Camera a proiezione temporale (Time Projection Chamber, TPC):** rivelatore a gas che funziona come un tracciatore e viene utilizzato anche per identificare le particelle

# Misure di impulso e carica elettrica

*Elettroni, muoni e adroni carichi*



ALICE



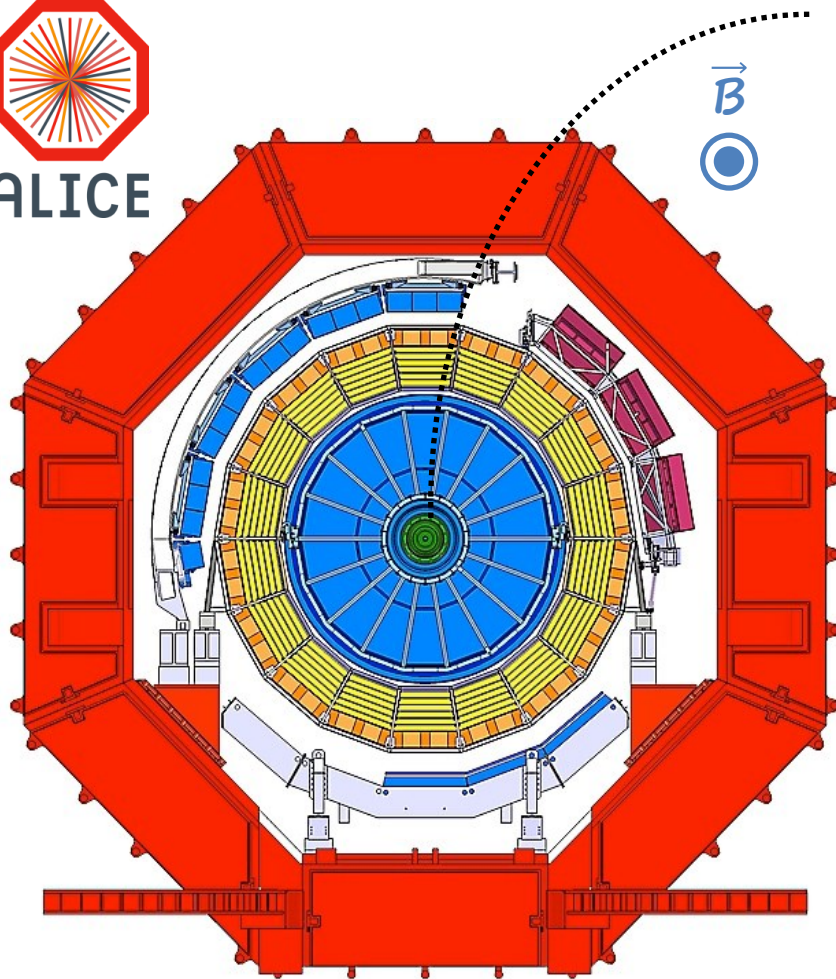
Per misurare il momento e la carica di elettroni, muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:

# Misure di impulso e carica elettrica

## Elettroni, muoni e adroni carichi



ALICE



Per misurare il momento e la carica di elettroni, muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:

- una particella carica, attraversando un campo magnetico  $B$ , percorre una **traiettoria curva**; se  $B$  è uniforme e perpendicolare alla direzione della particella, la traiettoria è una **circonferenza di raggio  $R$  proporzionale al momento  $p$** :

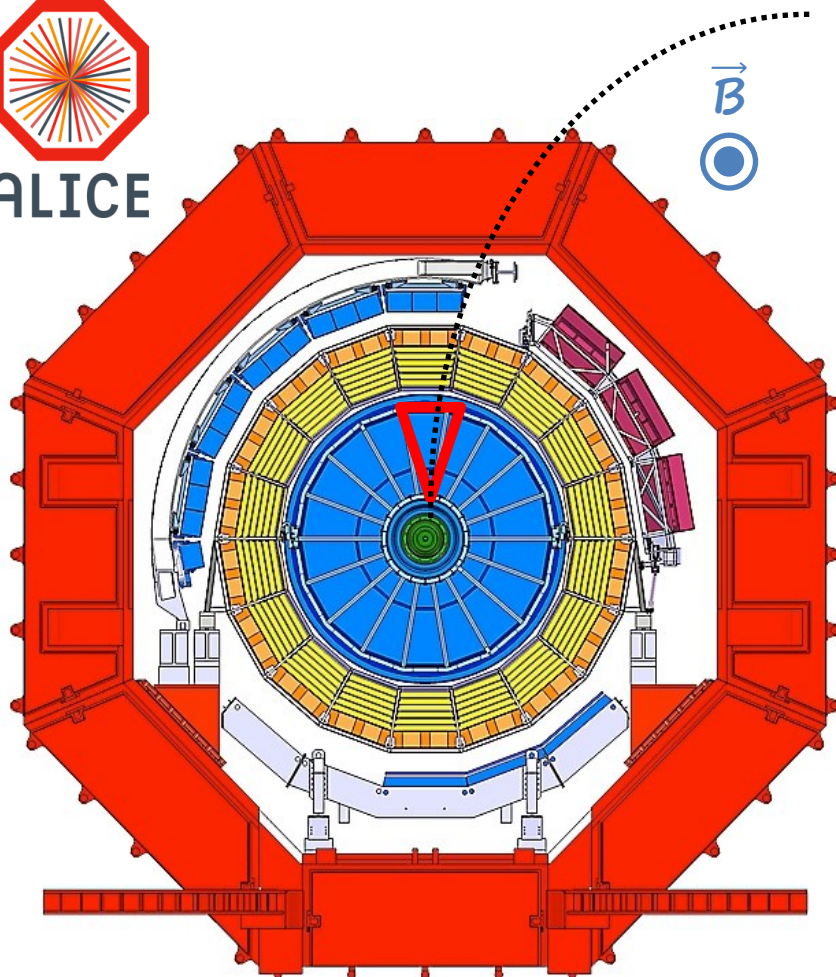
$$p = 0.3 \cdot B \cdot R$$

# Misure di impulso e carica elettrica

## Elettroni, muoni e adroni carichi



ALICE



Per misurare il momento e la carica di elettroni, muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:

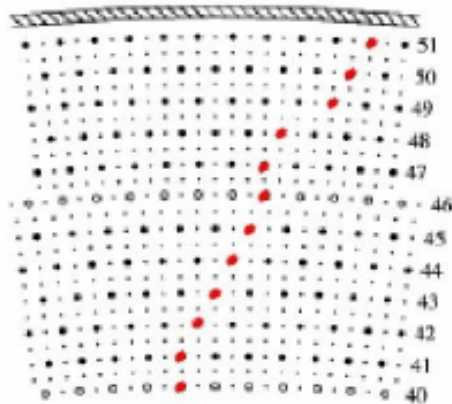
- una particella carica, attraversando un campo magnetico  $B$ , percorre una **traiettoria curva**; se  $B$  è uniforme e perpendicolare alla direzione della particella, la traiettoria è una **circonferenza di raggio  $R$  proporzionale al momento  $p$** :

$$p = 0.3 \cdot B \cdot R$$

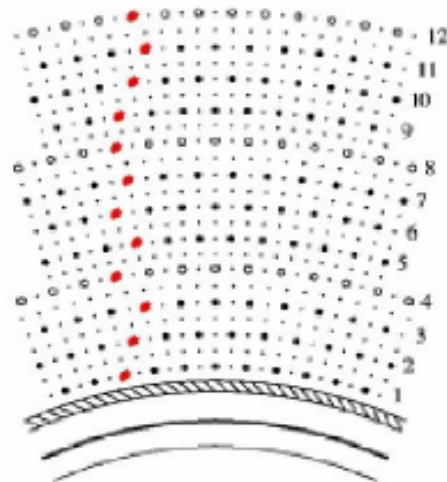
- Attraversando materiali non troppo densi, le particelle cariche rilasciano lungo il percorso **piccole quantità di energia**, che possono essere rivelate

# Misure di impulso e carica elettrica

## Elettroni, muoni e adroni carichi

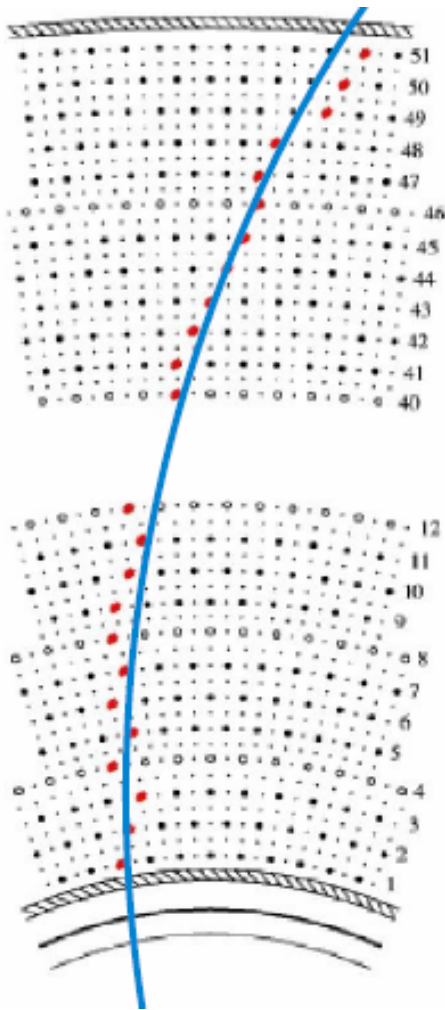


- Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne **ricostruiamo la traiettoria (o «traccia»)**: una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione («tracciatori») indicano dove la particella carica è passata



# Misure di impulso e carica elettrica

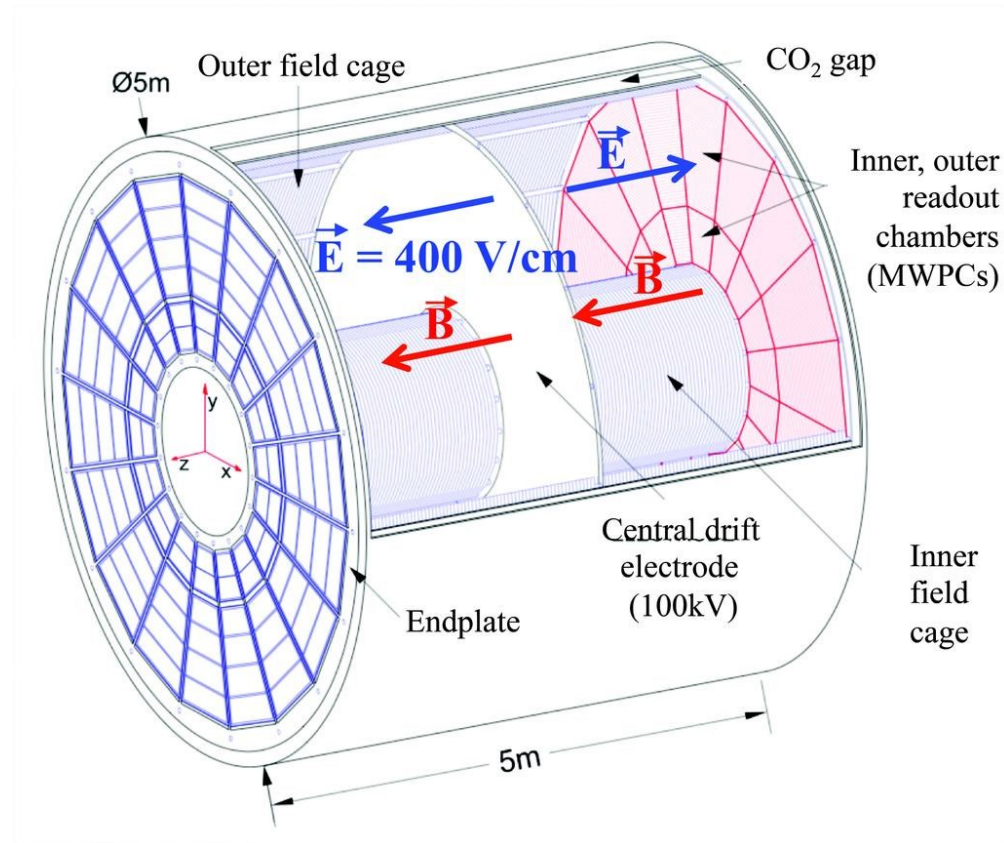
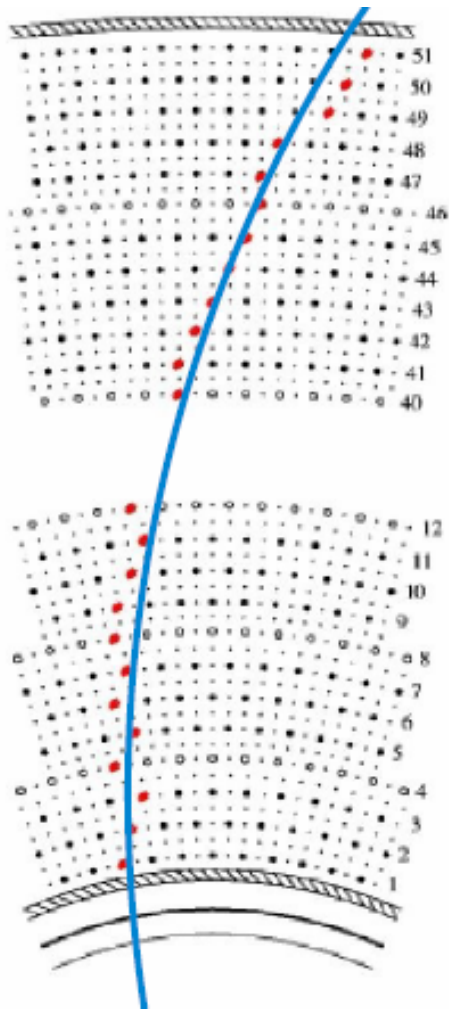
## Elettroni, muoni e adroni carichi



- Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne **ricostruiamo la traiettoria** (o «traccia»): una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione («tracciatori») indicano dove la particella carica è passata
- Cerchiamo **l'arco di circonferenza** che meglio approssimi i punti misurati e ne determiniamo il raggio
- La carica della particelle è data dal verso di **curvatura della traiettoria**, orario o antiorario

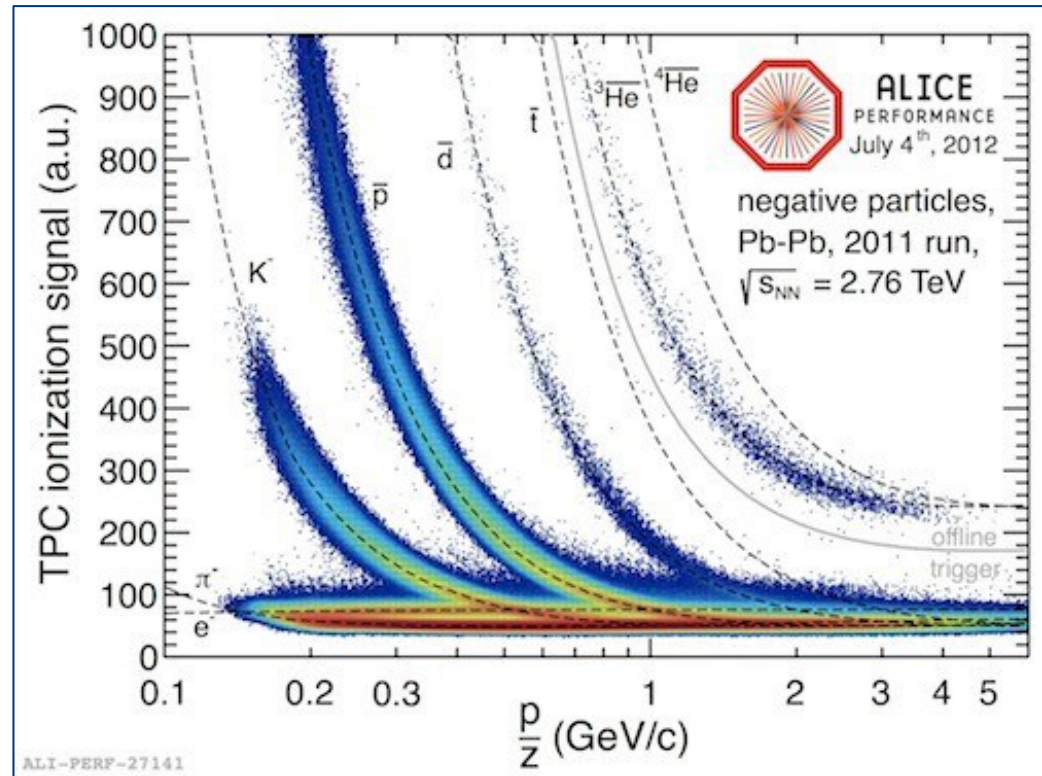
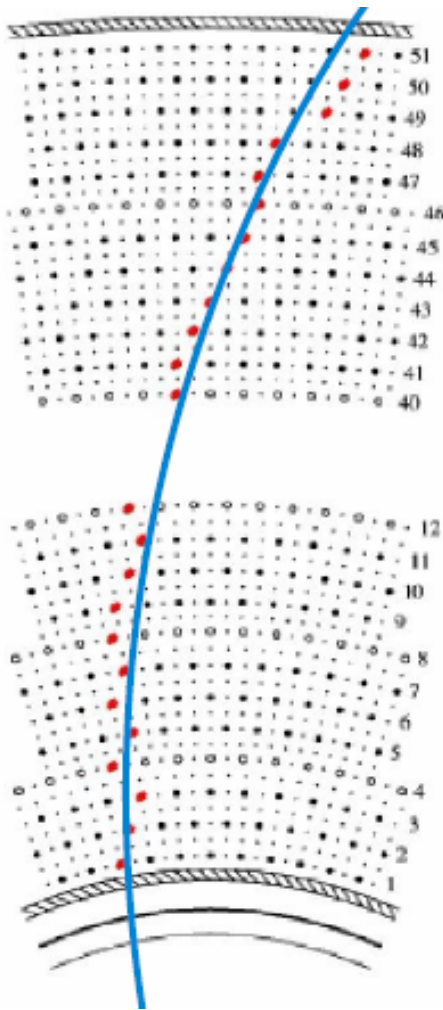
# Identificazione di particella

Elettroni, muoni e adroni carichi



# Identificazione di particella

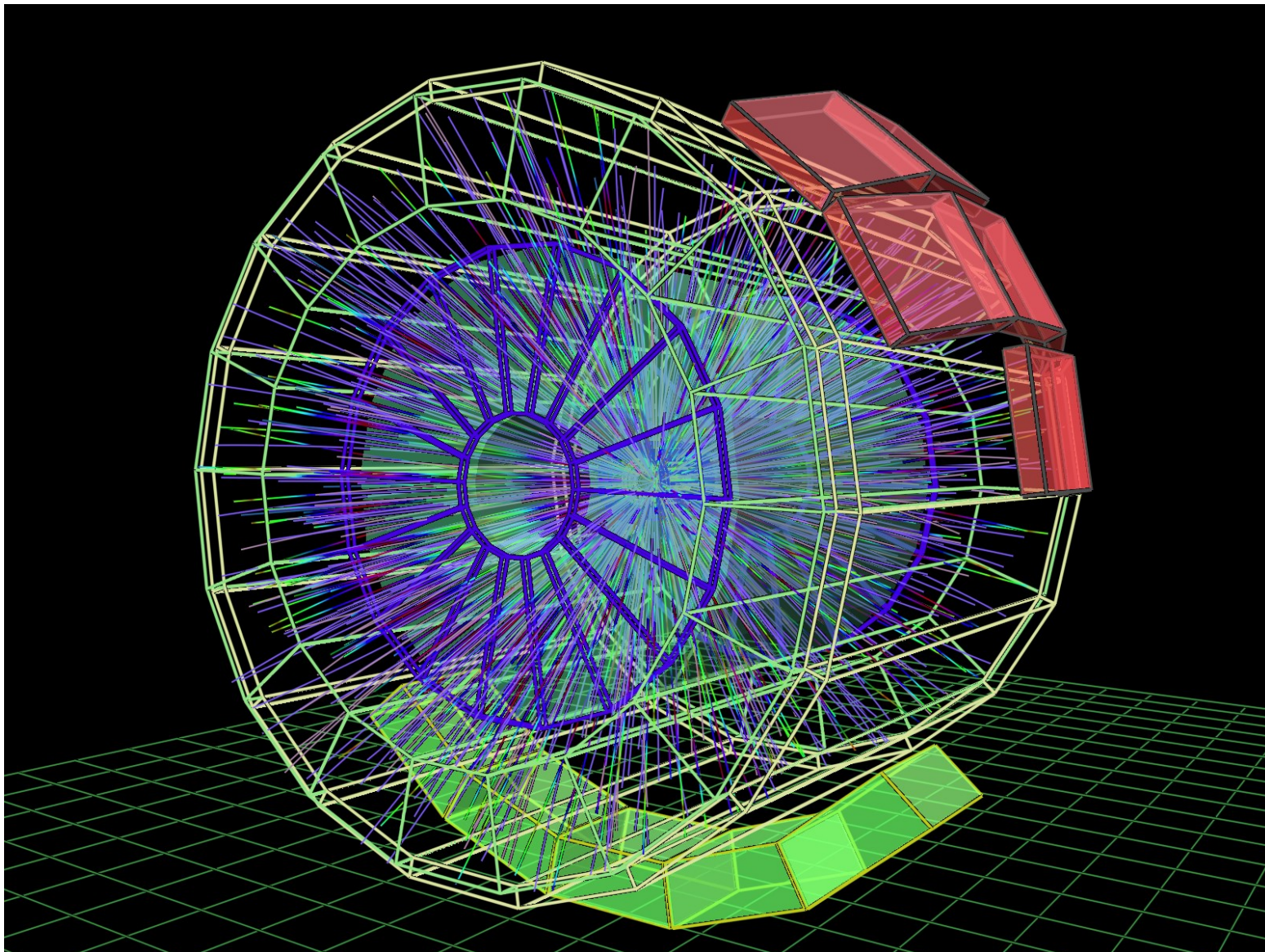
Elettroni, muoni e adroni carichi



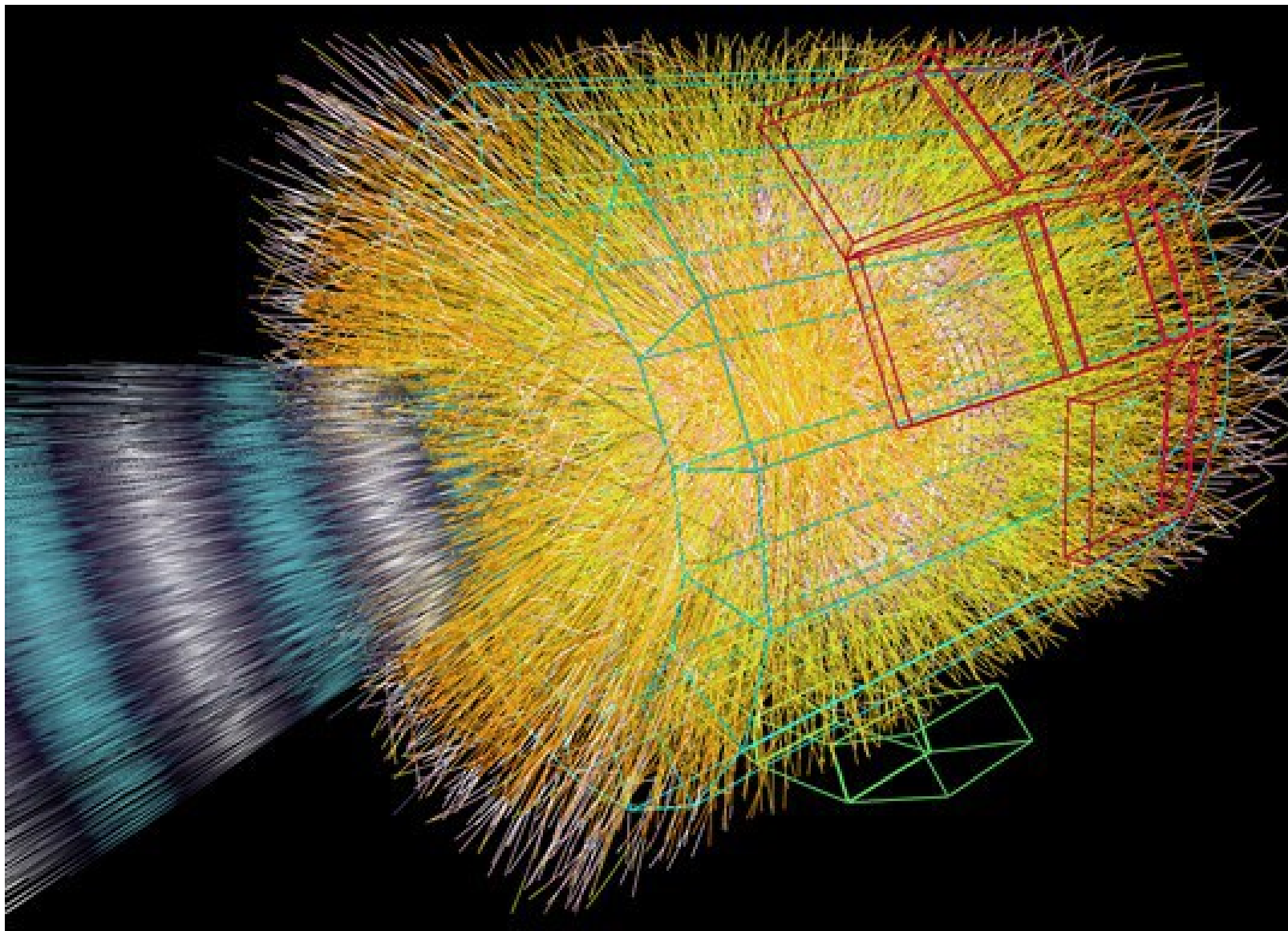
- L'energia rilasciata dalla particella può essere usata anche per identificare il tipo di particella: *particelle differenti perdono energia in modo differente!*



# Eventi pp in ALICE



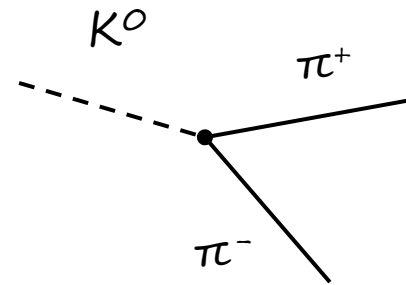
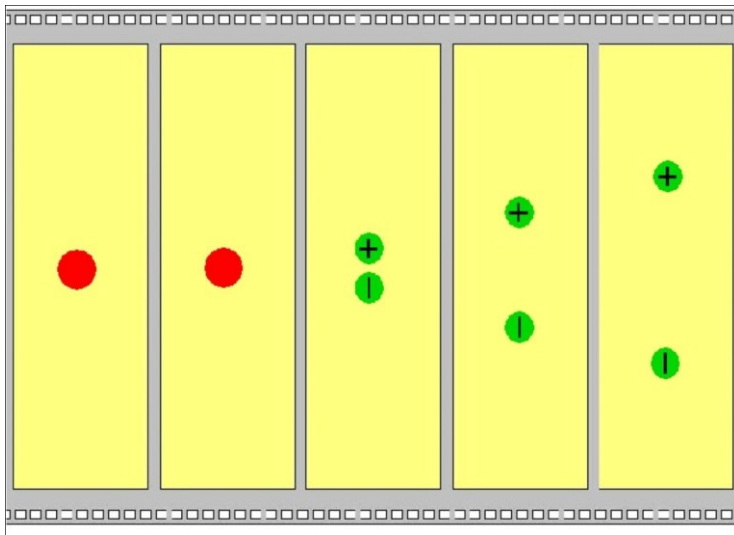
# Eventi PbPb in ALICE



# E le particelle instabili?

- Le **particelle instabili** decadono (quasi) immediatamente in particelle più leggere («particelle figlie») prima di poter essere rivelate
- Sfruttando le leggi di conservazione nei processi di decadimento (momento, energia, carica elettrica ...), è possibile **determinare le caratteristiche della particella instabile a partire dalle particelle figlie**

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



carica della  $K^0$ :  $Q = 0$

carica delle figlie:  $Q = +1 - 1 = 0$

massa  $M$  della  $K^0$ :

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

# Cosa cerchiamo?

Nel rivelare i prodotti dell'interazione degli ioni piombo, cerchiamo effetti previsti dai modelli teorici che ipotizzano il QGP

...cioè...

le «firme» del QGP!

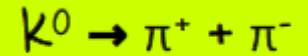
- La soppressione degli stati  $c\bar{c}$  e  $b\bar{b}$  (quarkonia)
- Aumento della stranezza
- Presenza di open charm e beauty
- Soppressione della correlazione back-to-back
- Soppressione ad alto  $p_T$
- Produzione di fotoni e leptoni diretti

# Le particelle strane

Le particelle strane sono particelle che contengono almeno un quark strano (il quark  $s$ ).

Hanno quindi un numero quantico detto *stranezza*, che misura il numero di quark strani.

Il mesone ( $q\bar{q}$ ) strano più leggero è la  $K^0$  ( $\bar{d}s$ )



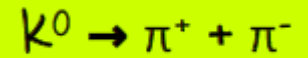
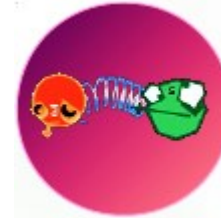
Il barione ( $3q$ ) strano più leggero è la  $\Lambda^0$  ( $uds$ )

# Le particelle strane

Le particelle strane sono particelle che contengono almeno un quark strano (il quark  $s$ ).

Hanno quindi un numero quantico detto *stranezza*, che misura il numero di quark strani.

Il mesone ( $q\bar{q}$ ) strano più leggero è la  $K^0$  ( $\bar{d}s$ )

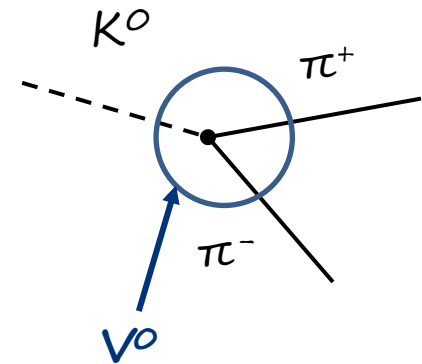


Il barione ( $3q$ ) strano più leggero è la  $\Lambda^0$  ( $uds$ )

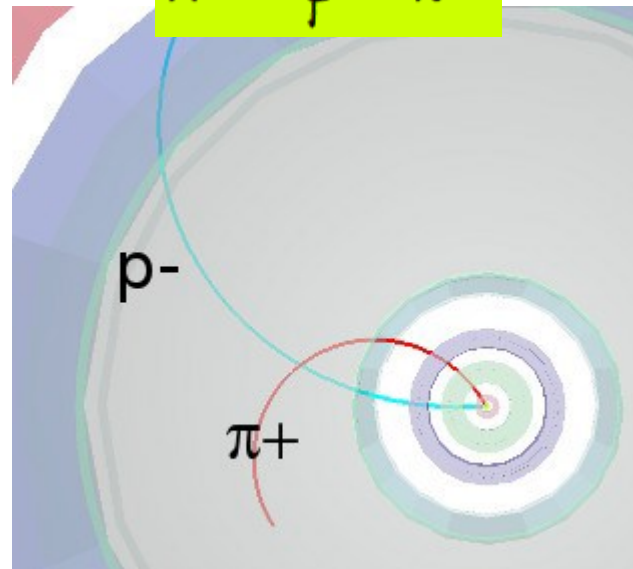
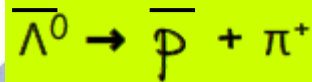
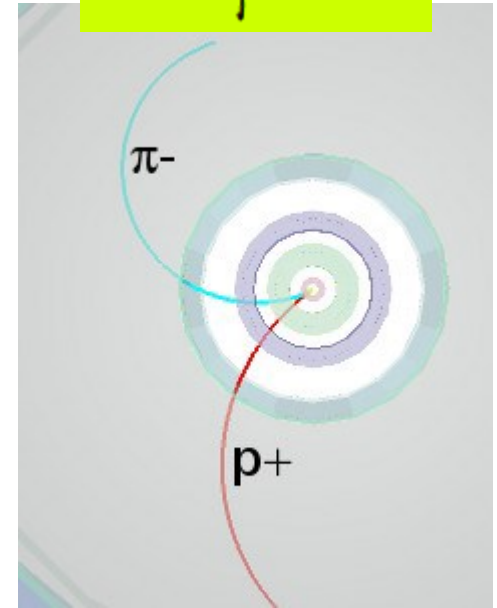
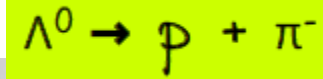
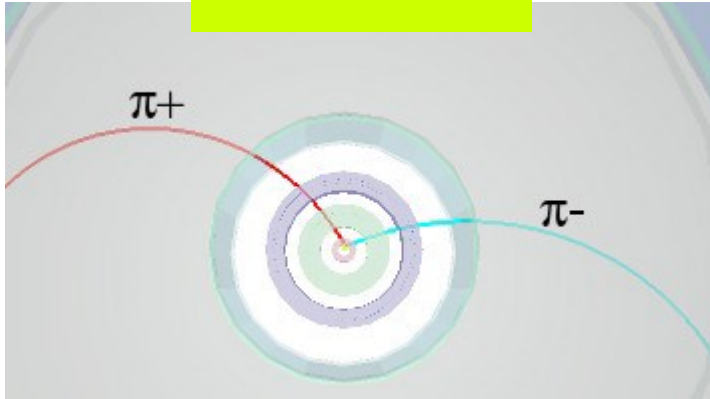
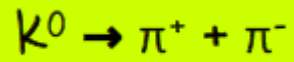
In questi decadimenti, la *stranezza* non si conserva: i prodotti di decadimenti non contengono il quark  $s$ .

Questi tipi di decadimenti sono detti «deboli»: sono processi «lenti» ( $10^{-8} - 10^{-10}$  s)

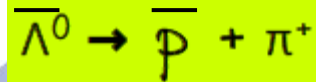
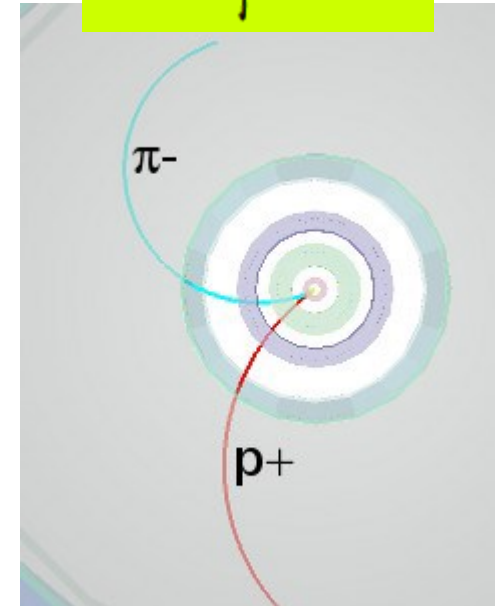
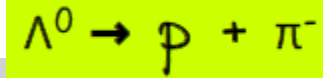
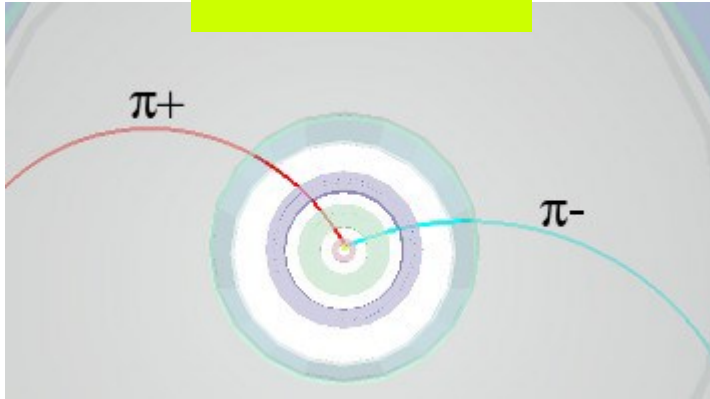
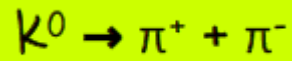
→ le particelle possono viaggiare qualche cm dal vertice di produzione prima di decadere. Il vertice di decadimento è chiamato  $V^0$



# Particelle strane: come si vedono?



# Particelle strane: come si vedono?

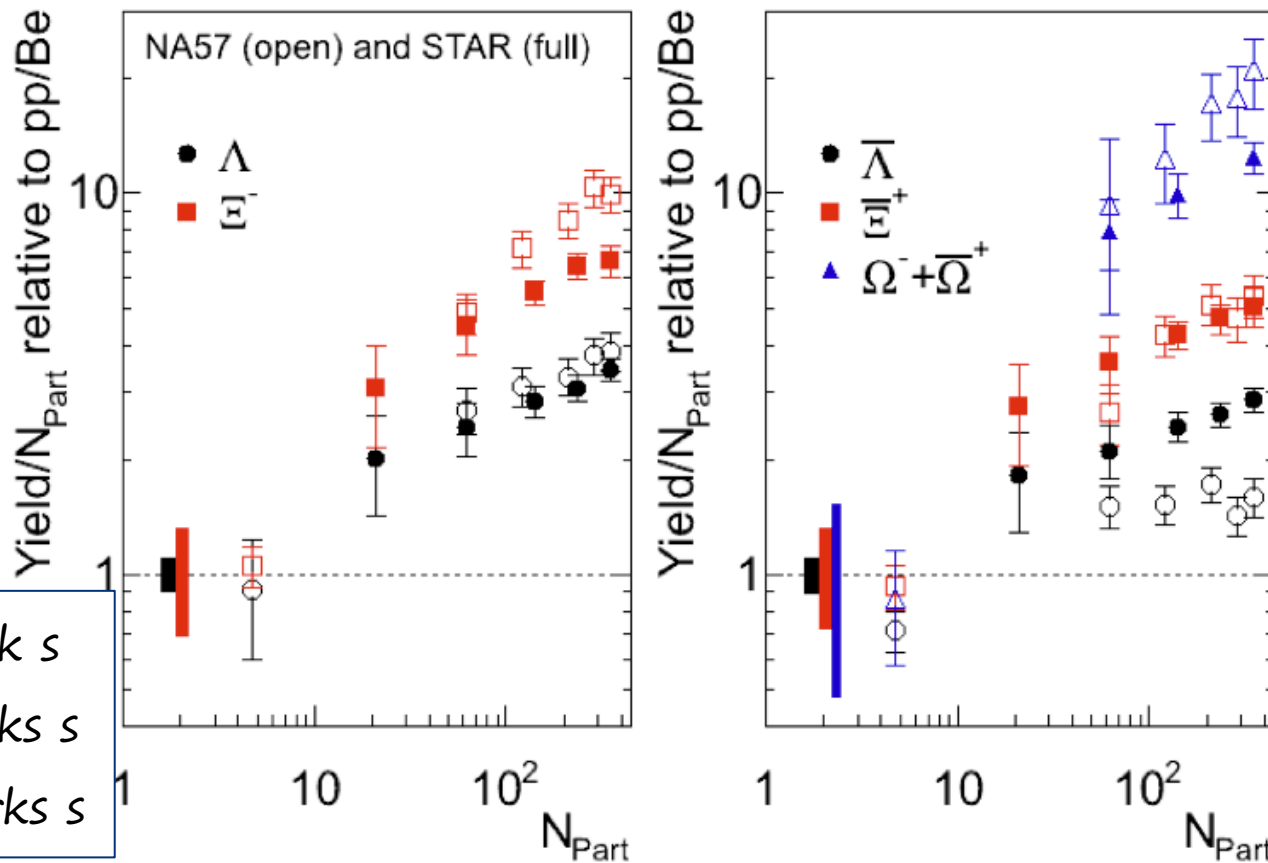


Ma perché proprio le particelle strane?



# Particelle strane: perché?

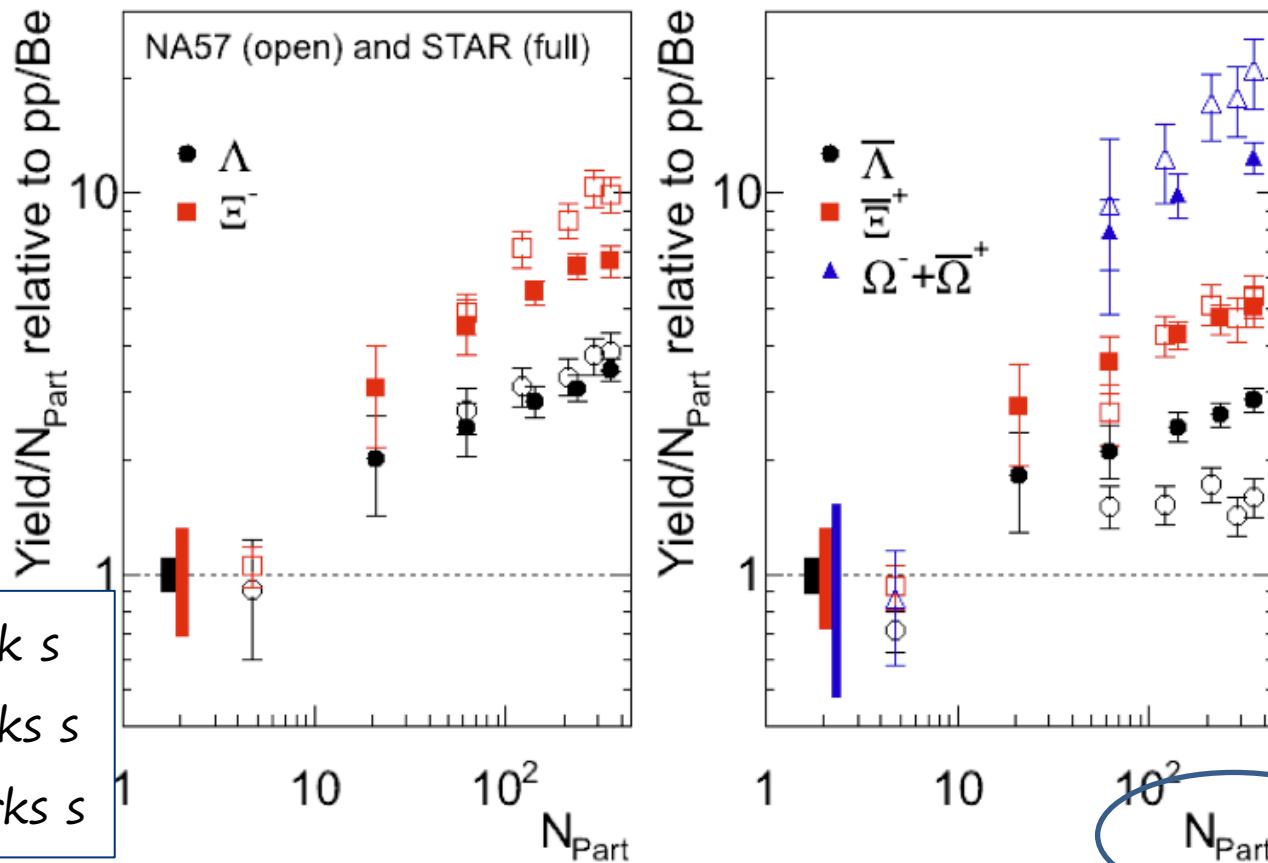
L'aumento di stranezza in collisioni A-A rispetto a collisioni pp è stata una delle prime «firme» della produzione del QGP in collisioni A-A



$\Lambda$ : 1 quark s  
 $\Xi$ : 2 quarks s  
 $\Omega$ : 3 quarks s

# Particelle strane: perché?

L'aumento di stranezza in collisioni A-A rispetto a collisioni pp è stata una delle prime «firme» della produzione del QGP in collisioni A-A

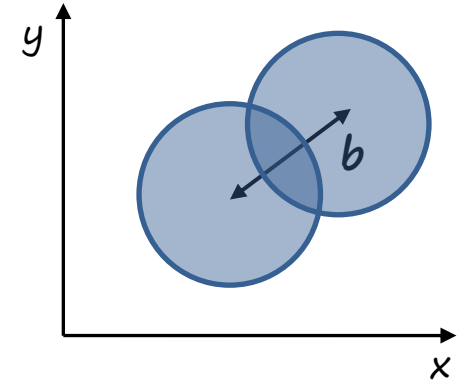


$\Lambda$ : 1 quark s  
 $\Xi$ : 2 quarks s  
 $\Omega$ : 3 quarks s

# Parametro di impatto

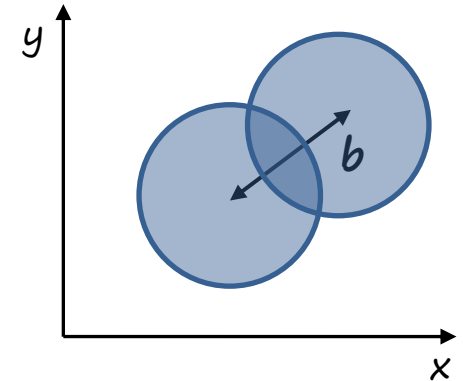
Parametro di impatto  $b$ : vettore nel piano trasverso definito dai centri dei due nuclei

Il parametro di impatto  $b$  determina la centralità della collisione



# Parametro di impatto

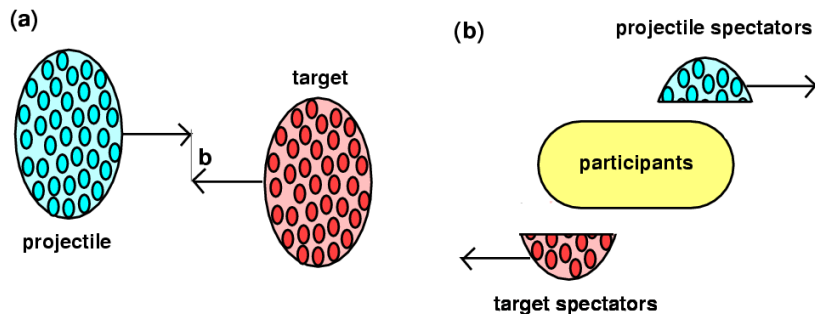
Parametro di impatto  $b$ : vettore nel piano trasverso definito dai centri dei due nuclei



Il parametro di impatto  $b$  determina la centralità della collisione

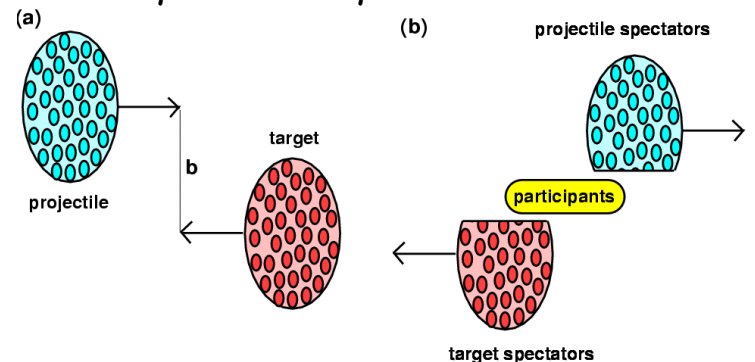
## Collisioni con PICCOLO parametro di impatto (CENTRALI)

- Molti nucleoni coinvolti nell'interazione
- Molte collisioni tra nucleoni
- Grande volume di interazione
- Molte particelle prodotte



## Collisioni con GRANDE parametro di impatto (PERIFERICHE)

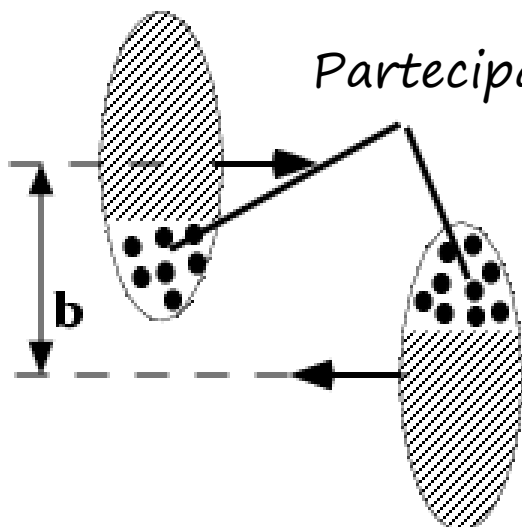
- Pochi nucleoni coinvolti nell'interazione
- Poche collisioni tra nucleoni
- Piccolo volume di interazione
- Poche particelle prodotte



# Regioni di centralità

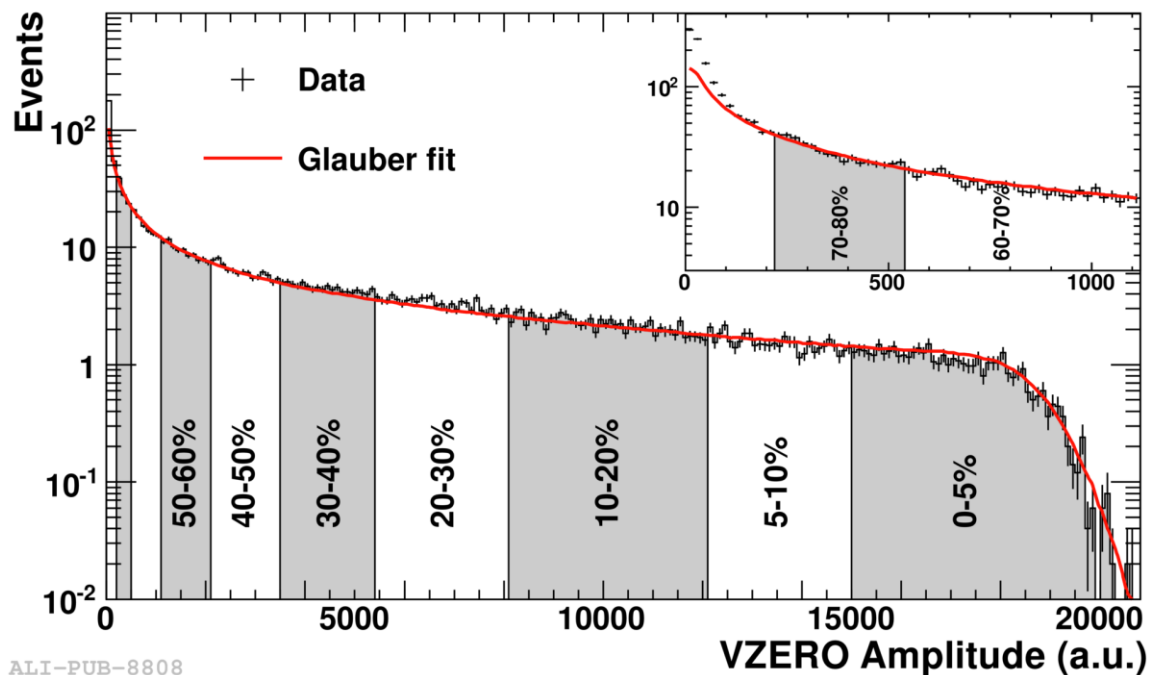
Spettatori

Partecipanti



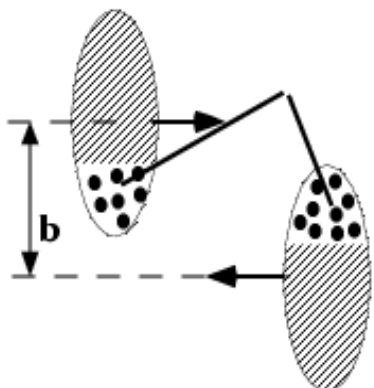
Il parametro di impatto  $b$  non è misurabile direttamente

ALICE determina la centralità degli eventi dall'ampiezza del segnale nel rivelatore VZERO



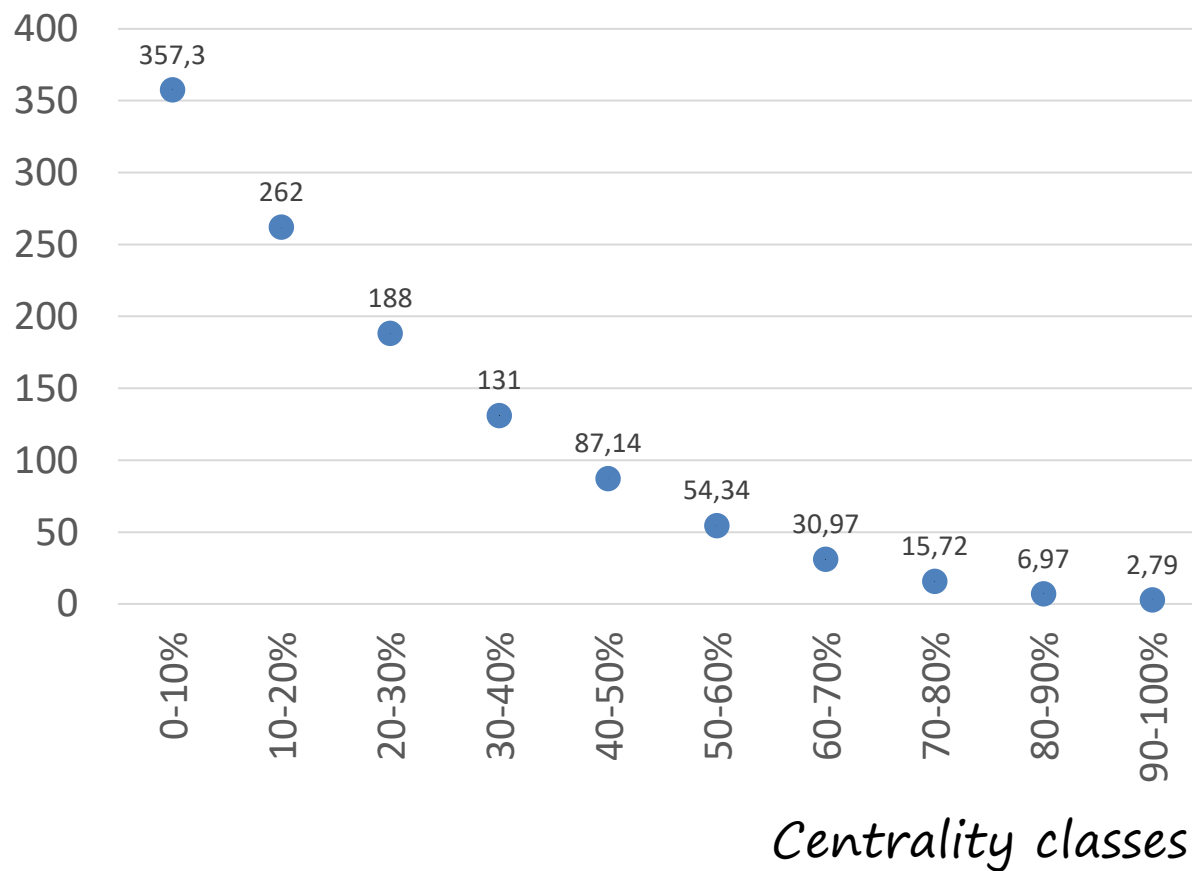
ALI-PUB-8808

# Regioni di centralità

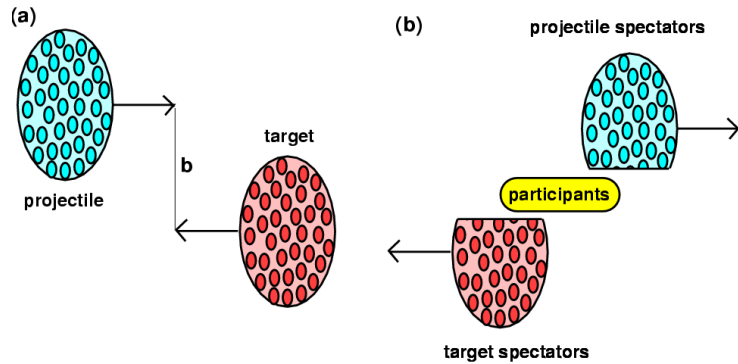


Average number of participants

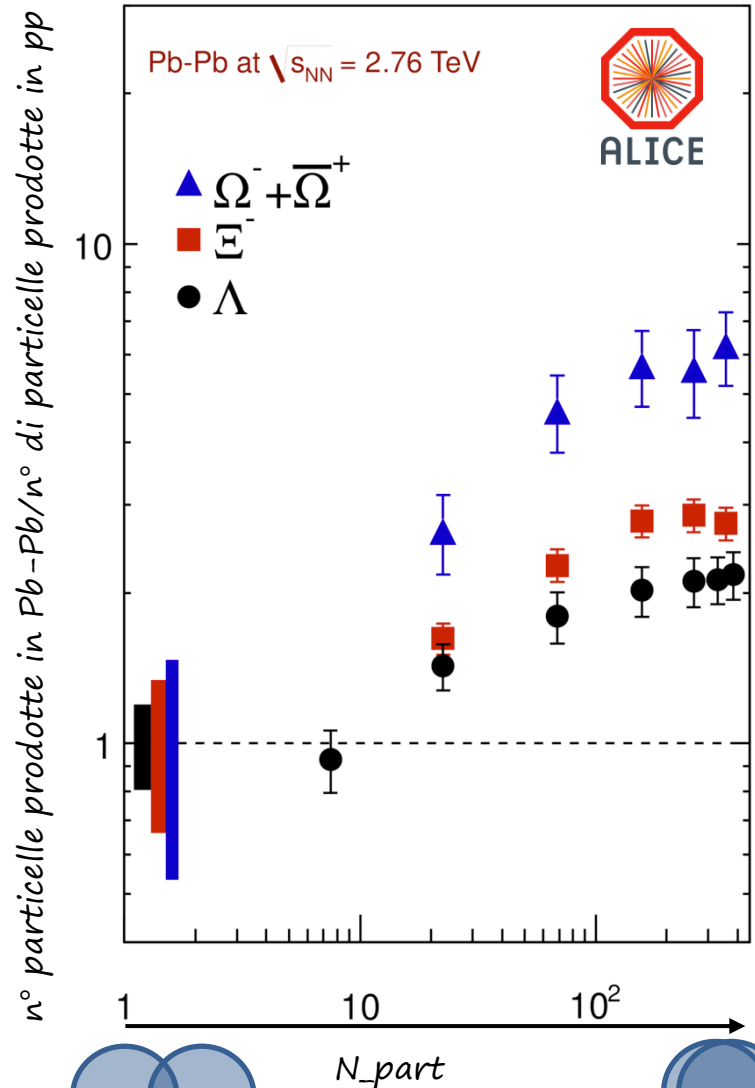
Pb-Pb collisions at 5 TeV



# Cos'è stato osservato nei dati?

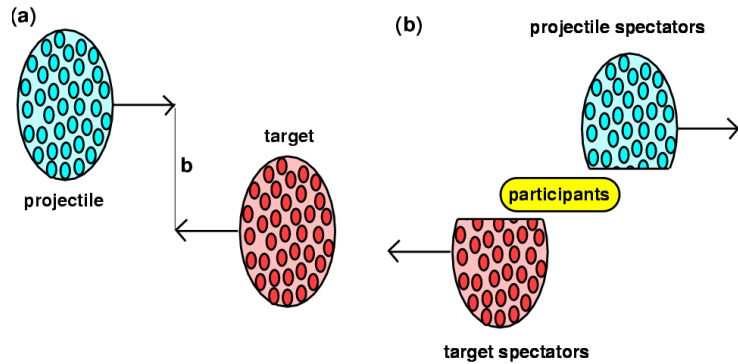


$$\frac{\text{Num. Kaoni per ogni collisione Pb - Pb}}{\text{Numero di nucleoni partecipanti}}$$



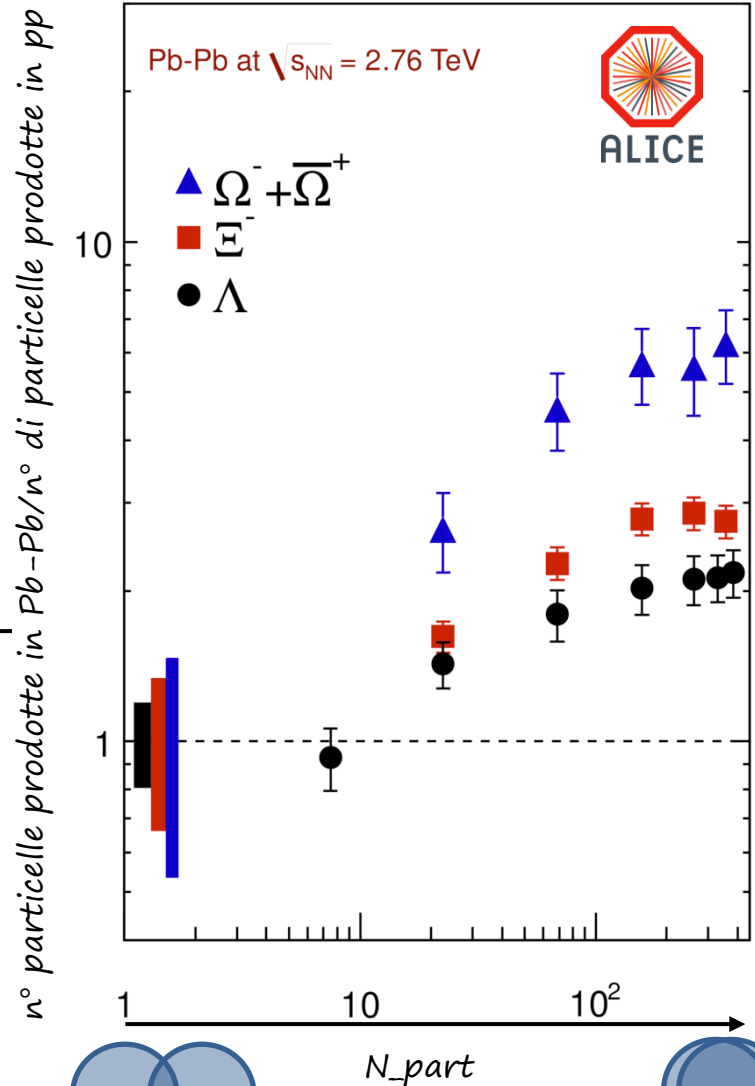
ALI-HER-2018-0680

# Cos'è stato osservato nei dati?



$$\frac{\text{Num. Kaoni per ogni collisione Pb - Pb}}{\text{Numero di nucleoni partecipanti}}$$

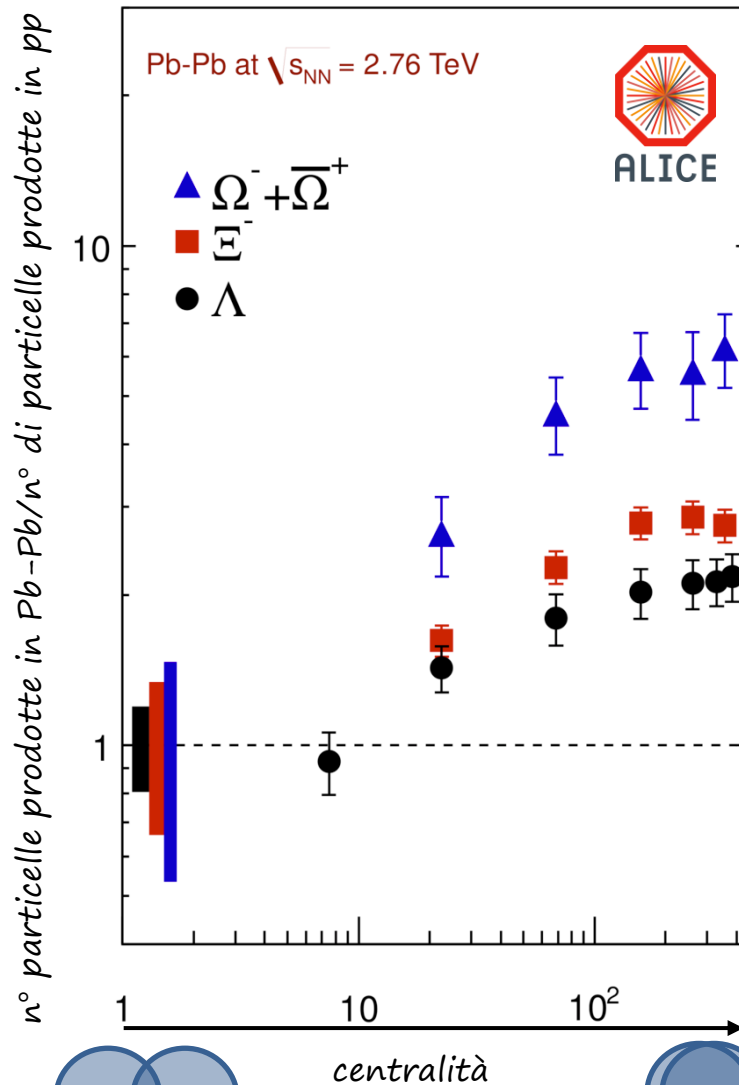
$$\frac{\text{Num. Kaoni per ogni collisione p - p}}{2}$$



ALI-HER-2018-0680



# Cos'ha osservato ALICE nei dati?



In laboratorio  
cercherete di  
riprodurre  
questo  
risultato!

ALI-DEP-00680

# *In laboratorio*

---

*Analizzeremo dati veri di collisioni pp e PbPb!!*

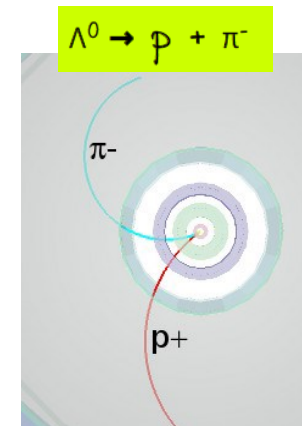
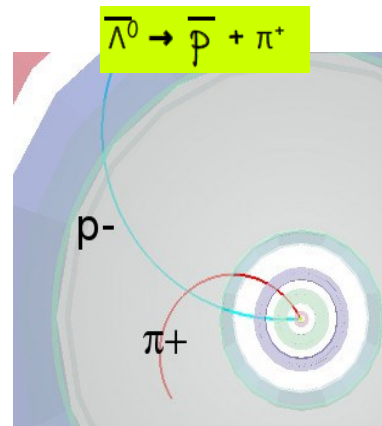
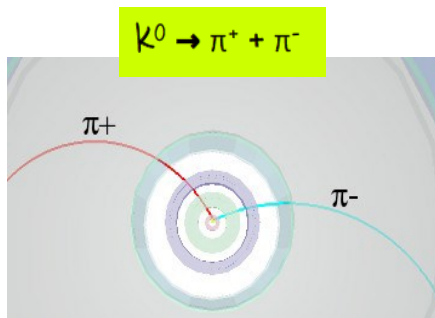
# In laboratorio

Analizzeremo dati veri di collisioni pp e PbPb!!

□ L'esercizio è diviso in due parti:

1. Identificazione e conteggio delle particelle strane in un dato campione di eventi:

- analizzerete una serie di eventi pp (raccolti nel 2011) con almeno una particella strana ( $K^0$ ,  $\Lambda$ , anti  $\Lambda$ )
- identificherete visivamente i  $V^0$  guardando la topologia dell'evento

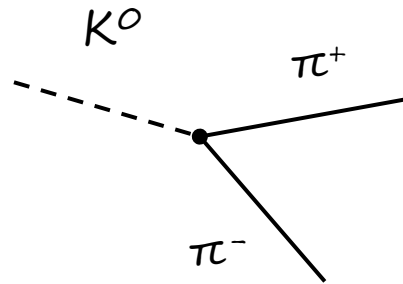


- calcolerete la **massa invariante** delle particelle-figlie per identificare la particella madre

# Massa invariante

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

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



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

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

Conservazione dell'energia:	$E = E_1 + E_2$
Conservazione dell'impulso:	$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$
Conservazione della carica:	$Z = Z_1 + Z_2$
Dalla relatività:	$E^2 = p^2 + m^2$

Ricaviamo:

Supponendo  $c = 1$

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

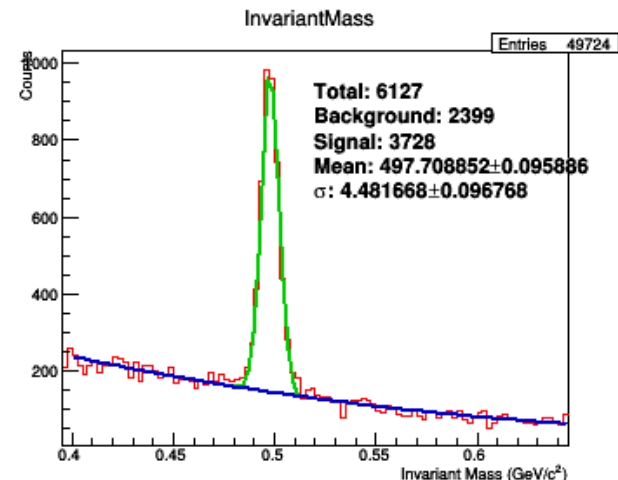
# In laboratorio

## Analizzeremo dati veri di collisioni pp e PbPb!!

□ L'esercizio è diviso in due parti:

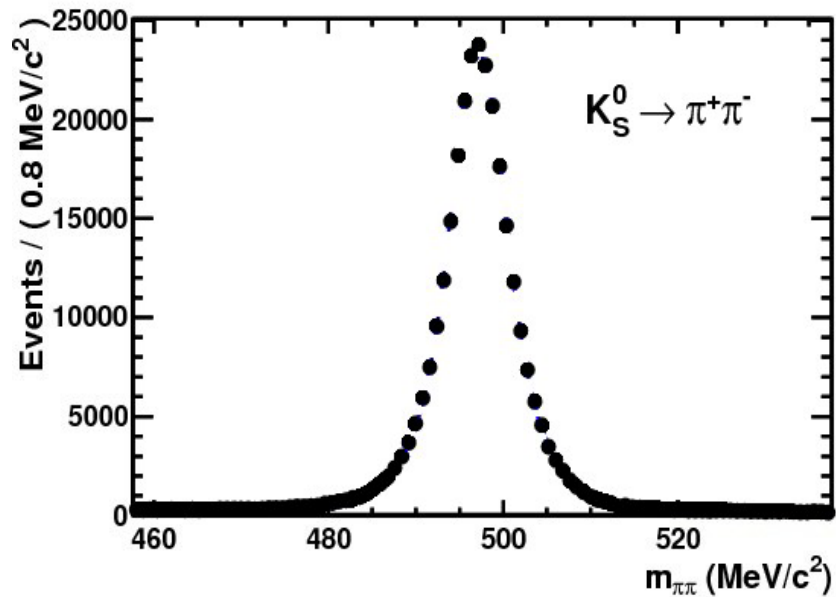
### 2. Calcolo dell'innalzamento di stranezza nelle collisioni PbPb rispetto alle collisioni pp

- analizzerete un campione di migliaia di eventi provenienti da collisioni PbPb, per diverse **regioni di centralità**
- farete dei **fit** alle distribuzioni di massa invariante delle distribuzioni fornite
- ricaverete il numero di  $K^0$ ,  $\Lambda$ , anti  $\Lambda$  nelle diverse regioni di centralità
- insieme, valuteremo l'innalzamento di produzione di stranezza nel campione di eventi



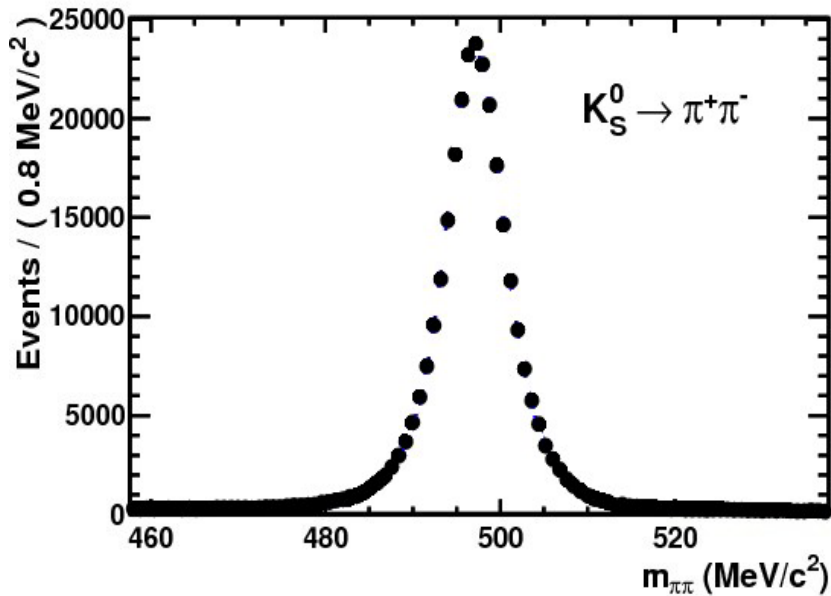
# Massa invariante: esempio

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



# Massa invariante: esempio

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



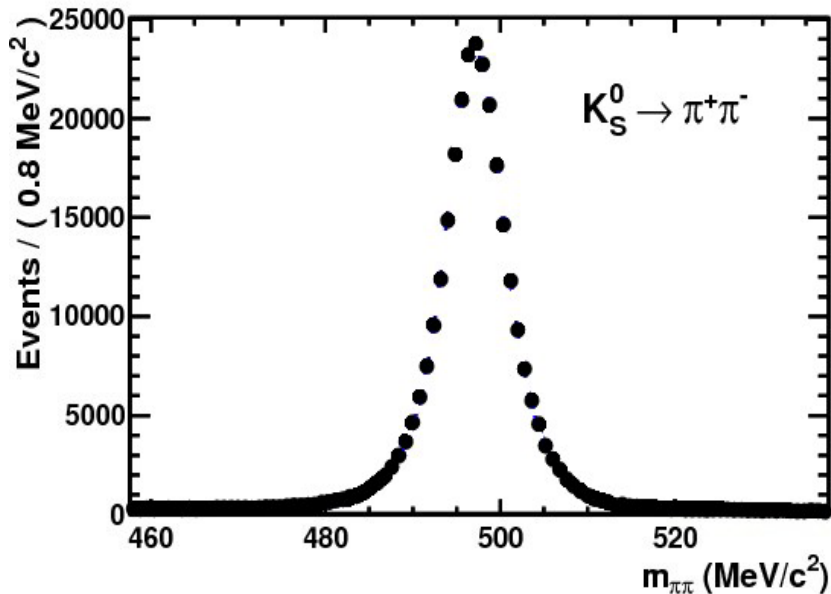
Perché abbiamo un rivelatore «vero»!  
La quantità di moto non è quella «vera» ma quella ricostruita dal rivelatore, che è un po' imprecisa...

→ 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

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



Perché abbiamo un rivelatore «vero»!  
La quantità di moto non è quella «vera» ma quella ricostruita dal rivelatore, che è un po' imprecisa...

→ Otteniamo una distribuzione a campana (detta gaussiana).

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

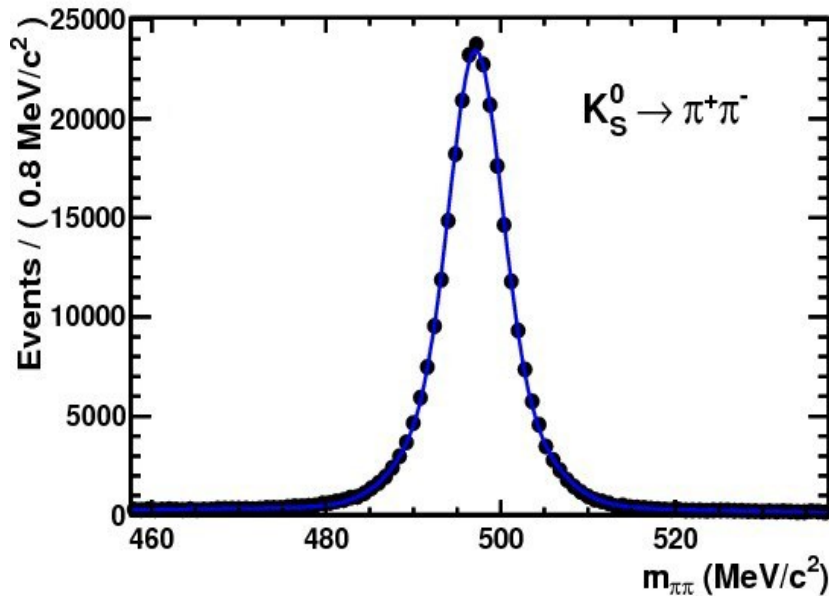
Quella che abbiamo trovato è davvero la particella che stiamo cercando?

Dobbiamo definire una regione di «confidenza» che dipende dalla risoluzione del nostro rivelatore. Ma come ricaviamo la risoluzione?



# Massa invariante: esempio

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



Perché abbiamo un rivelatore «vero»!  
La quantità di moto non è quella «vera» ma quella ricostruita dal rivelatore, che è un po' imprecisa...

→ Otteniamo una distribuzione a campana (detta gaussiana).

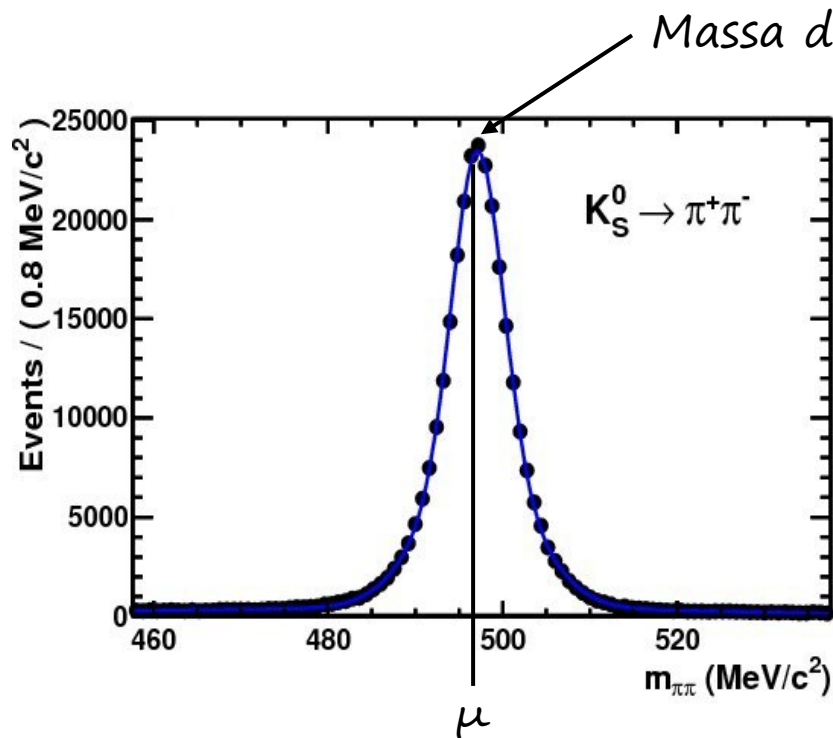
La larghezza della campana è la «risoluzione» del rivelatore (= quanto bene funziona il nostro rivelatore).

Quella che abbiamo trovato è davvero la particella che stiamo cercando?

Dobbiamo definire una regione di «confidenza» che dipende dalla risoluzione del nostro rivelatore. Ma come ricaviamo la risoluzione?

Dobbiamo trovare una funzione che descriva i nostri dati nel modo migliore: dobbiamo fare un «fit».

# Massa invariante: esempio



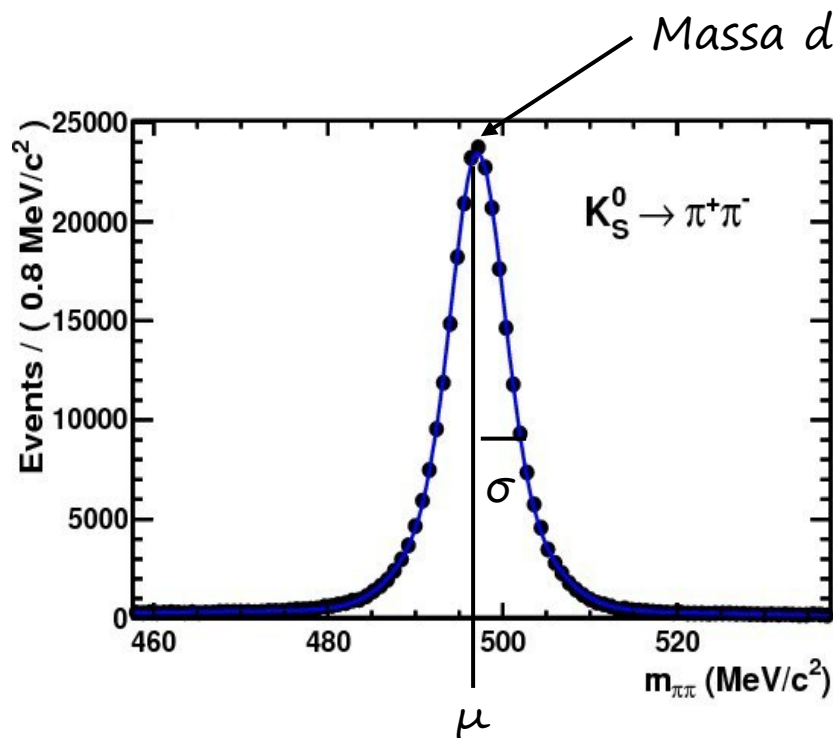
Il fit ci da:

- il valore centrale della distribuzione (= il valor medio della gaussiana), che corrisponde (se siamo stati bravi) alla massa della particella che stiamo cercando:

→ nel nostro caso (per la  $K^0$ ) dal fit otteniamo :

$$\mu = (497.3 \pm 0.7) \text{ MeV}/c^2$$

# Massa invariante: esempio



Il fit ci da:

- il valore centrale della distribuzione (= il valor medio della gaussiana), che corrisponde (se siamo stati bravi) alla massa della particella che stiamo cercando:

→ nel nostro caso (per la  $K^0$ ) dal fit otteniamo :

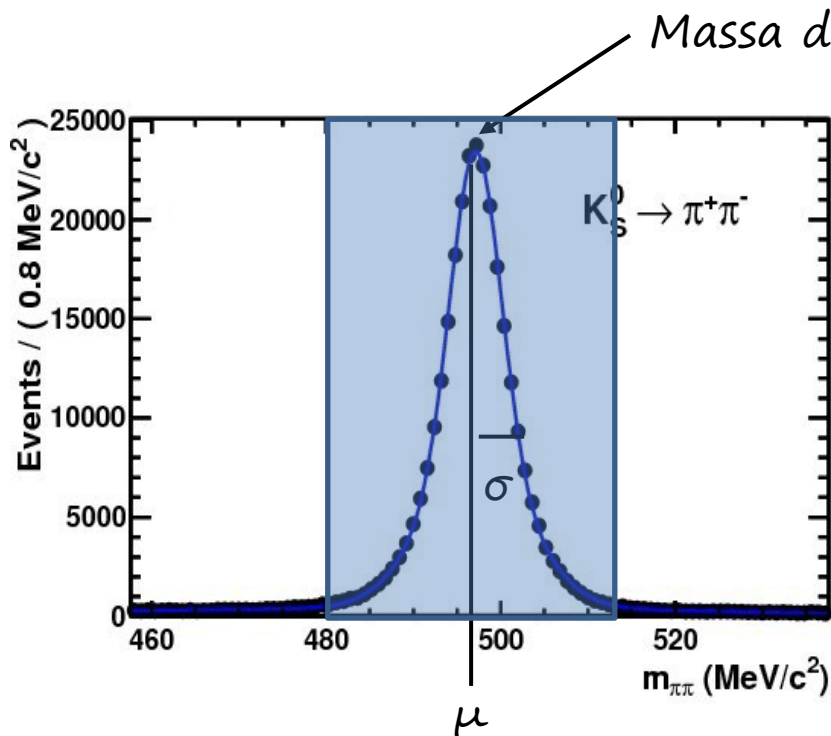
$$\mu = (497.3 \pm 0.7) \text{ MeV}/c^2$$

- La larghezza della gaussiana (la risoluzione): ci dice quanto bene «funziona» il rivelatore:

→ nel nostro caso :

$$\sigma = (5.2 \pm 0.08) \text{ MeV}/c^2$$

# Massa invariante: esempio



Il fit ci da:

- il valore centrale della distribuzione (= il valor medio della gaussiana), che corrisponde (se siamo stati bravi) alla massa della particella che stiamo cercando:

→ nel nostro caso (per la  $K^0$ ) dal fit otteniamo :

$$\mu = (497.3 \pm 0.7) \text{ MeV}/c^2$$

- La larghezza della gaussiana (la risoluzione): ci dice quanto bene «funziona» il rivelatore:

→ nel nostro caso :

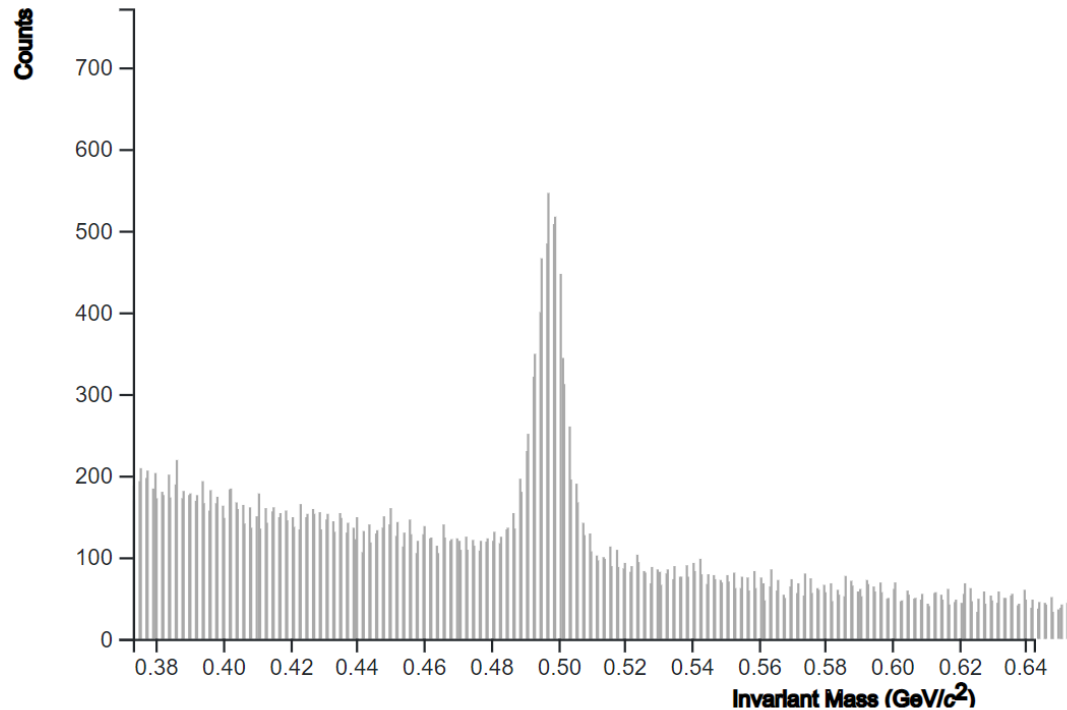
$$\sigma = (5.2 \pm 0.08) \text{ MeV}/c^2$$

In genere si definisce la regione di confidenza uguale a 3 volte il valore della  $\sigma$ . Nel nostro caso avremo una regione di confidenza che va da 482 a 513 MeV/c<sup>2</sup>.

E quello che c'è fuori? Semplicemente non è quello che stiamo cercando... Non lo contiamo!

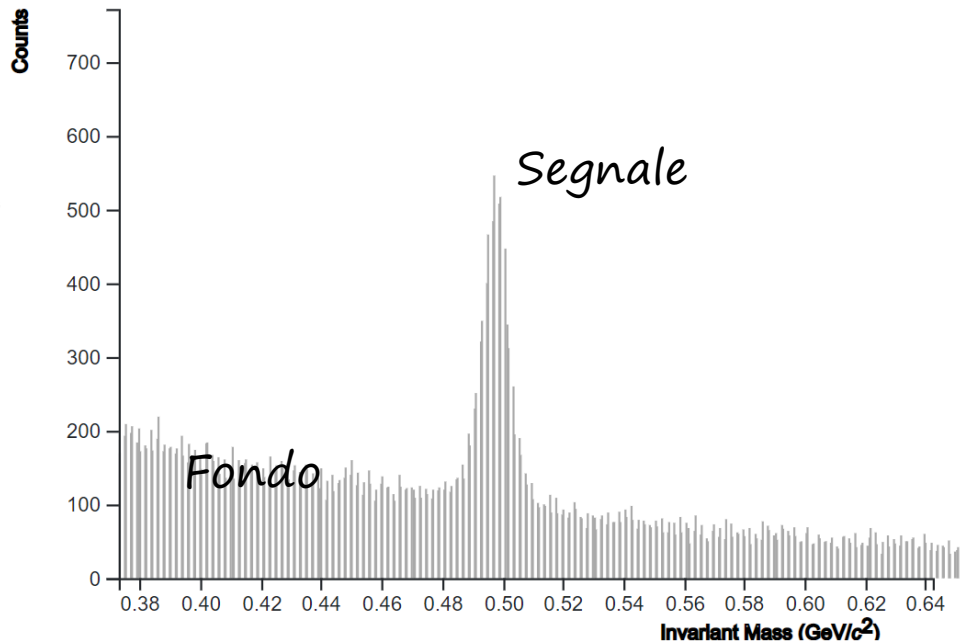
# Massa invariante: esempio 2

Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?



# Massa invariante: esempio 2

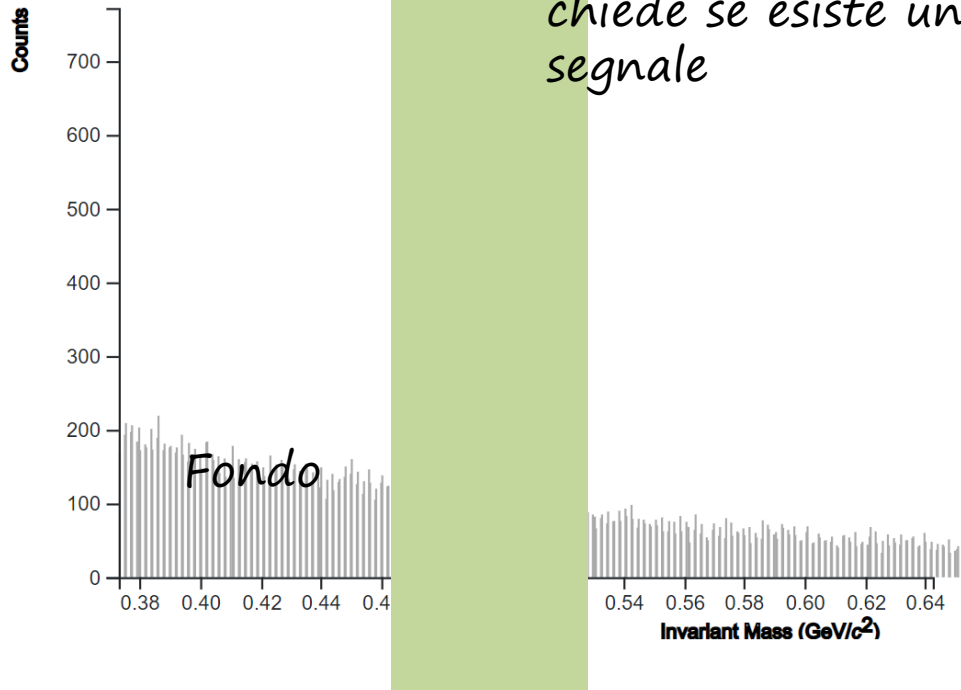
Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?



- Il picco corrisponde alle  $K^0$
- La regione piatta sottostante è il «fondo» originato da combinazioni casuali di pioni che sono stati identificati male.

# Massa invariante: esempio 2

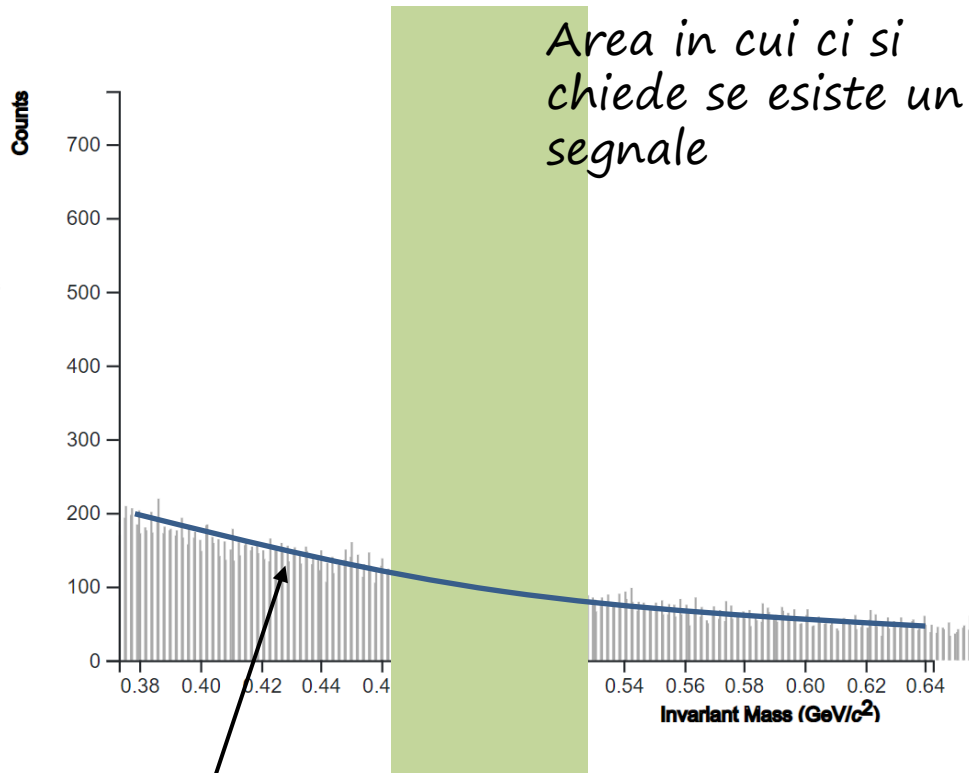
Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?



- Come capire se c'è un segnale?
- Come misurare quanto è intenso?
- Nell'ipotesi di assenza di segnale si fa una previsione del numero di eventi atteso intorno alla massa del Kaone

# Massa invariante: esempio 2

Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?



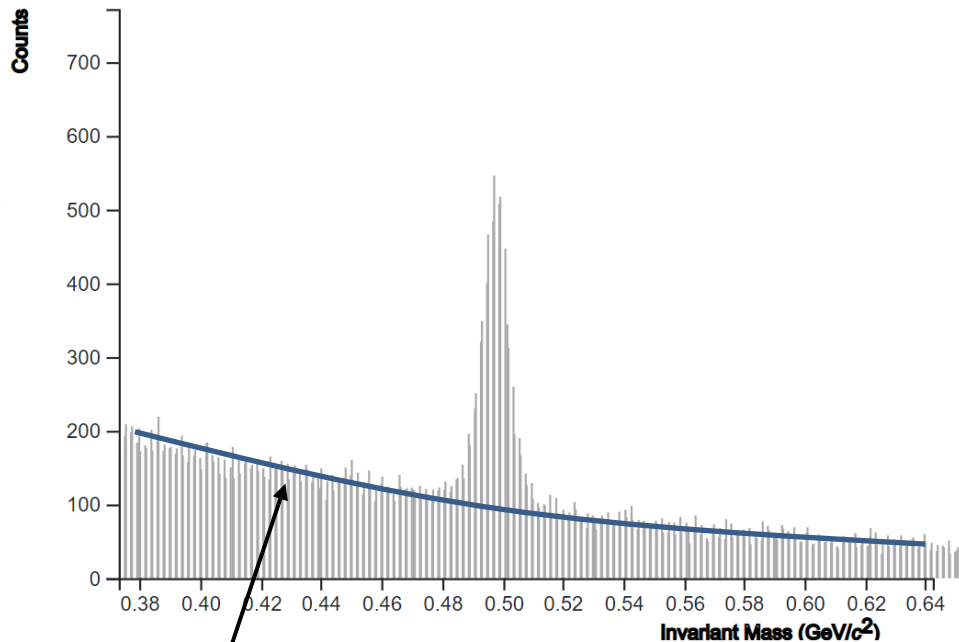
Fit del fondo

- Come capire se c'è un segnale?
- Come misurare quanto è intenso?
- Nell'ipotesi di assenza di segnale si fa una previsione del numero di eventi atteso intorno alla massa del Kaone



# Massa invariante: esempio 2

Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?

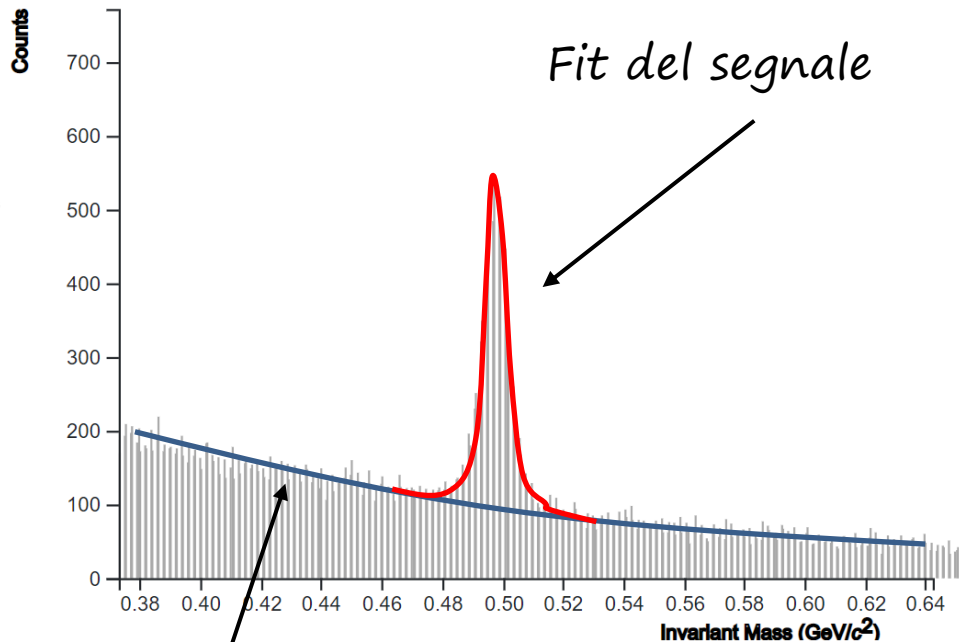


Fit del fondo

- Come capire se c'è un segnale?
- Come misurare quanto è intenso?
- Nell'ipotesi di assenza di segnale si fa una previsione del numero di eventi atteso intorno alla massa del Kaone

# Massa invariante: esempio 2

Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?



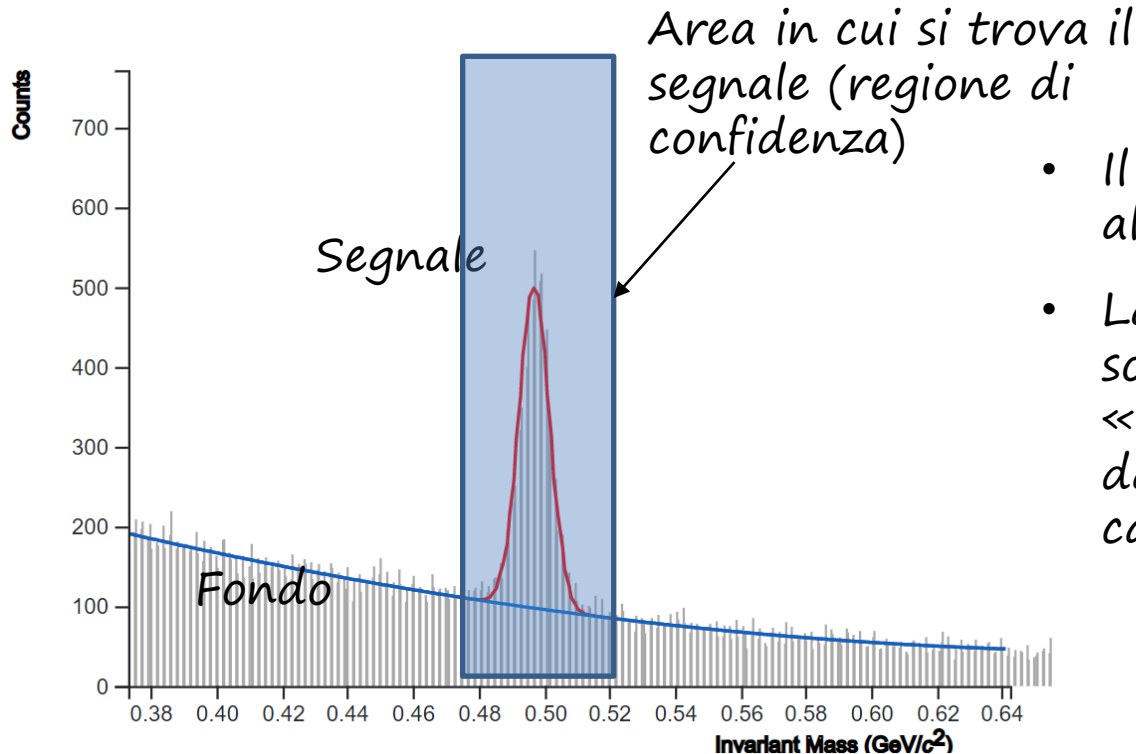
Fit del fondo

Fit del segnale

- Come capire se c'è un segnale?
- Come misurare quanto è intenso?
- Nell'ipotesi di assenza di segnale si fa una previsione del numero di eventi atteso intorno alla massa del Kaone

# Massa invariante: esempio 2

Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?

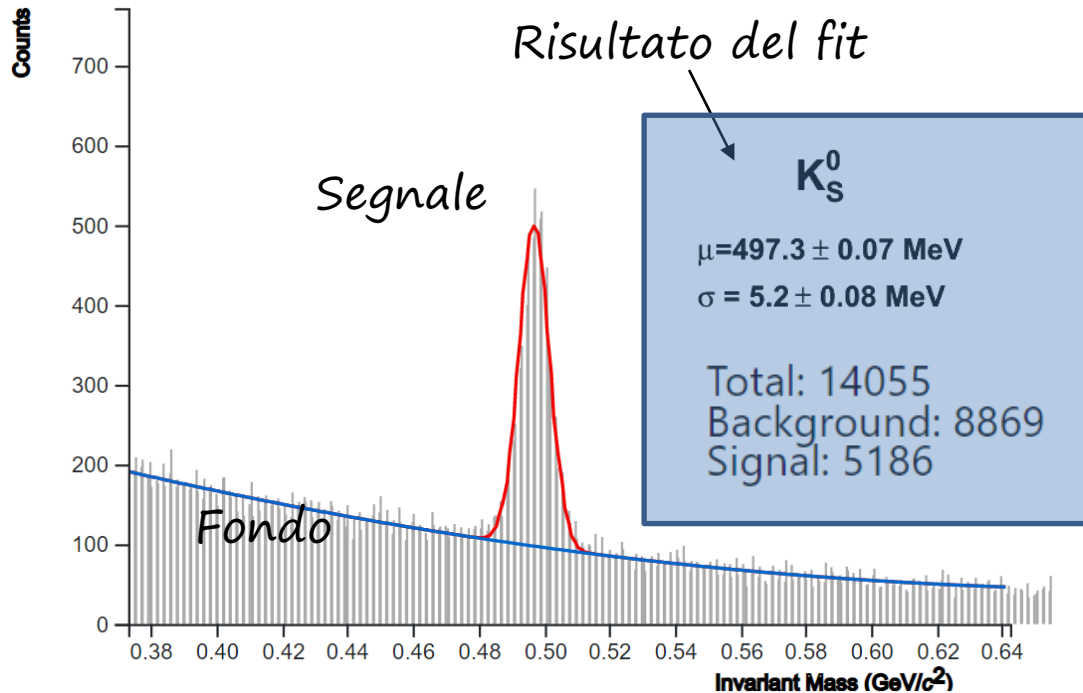


- Il picco corrisponde alle  $K^0$
- La regione piatta sottostante è il «fondo» originato da combinazioni casuali di pioni

In questo caso la distribuzione di massa invariante è descritta da una funzione somma di un polinomio di 2° grado (parabola) per descrivere il fondo, con una funzione a campana («gaussiana») per descrivere il segnale

# Massa invariante: esempio 2

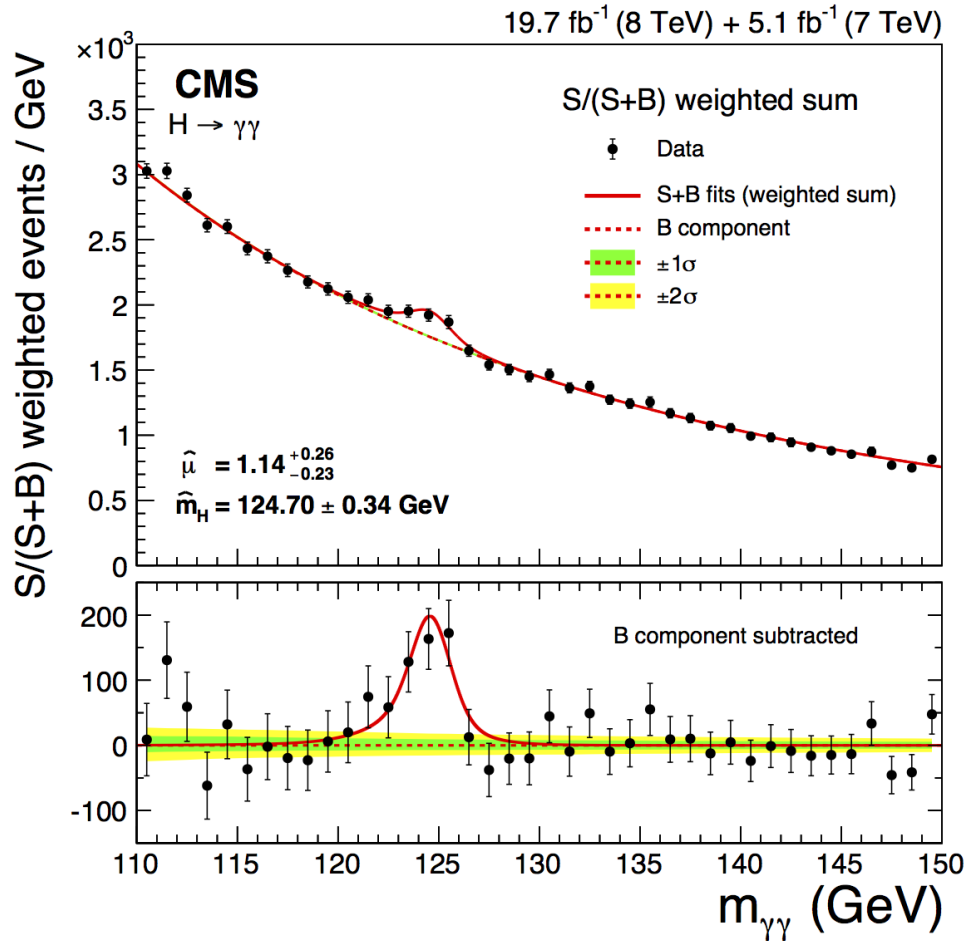
Perché possiamo ottenere una distribuzione di massa invariante fatta così?



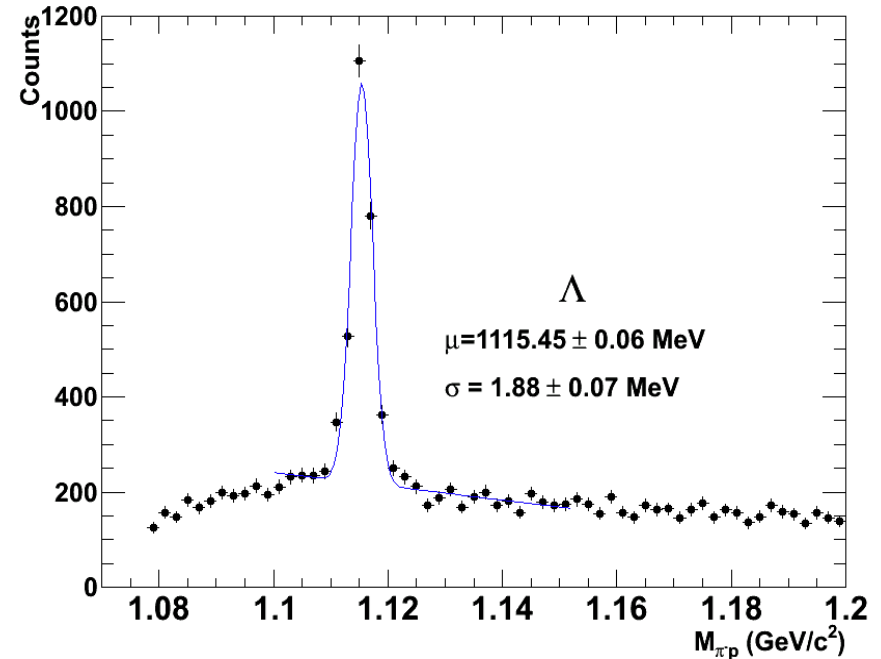
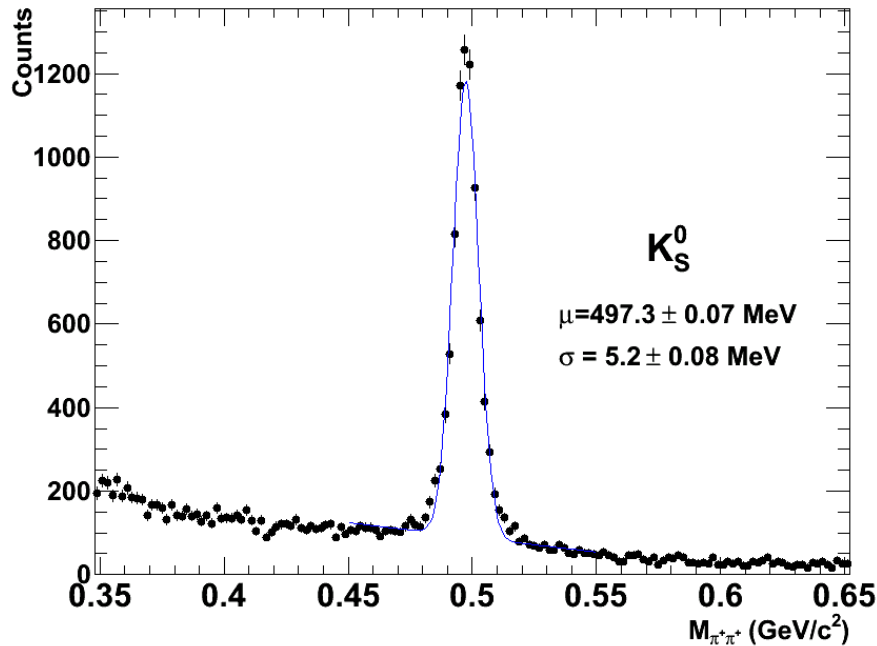
Dal fit di segnale+fondo si può misurare:

- 1) La massa della particella madre
- 2) La risoluzione dell'apparato sperimentale
- 3) L'intensità del segnale (numero di kaoni prodotti) e la sua incertezza...

# Massa invariante: esempio 2



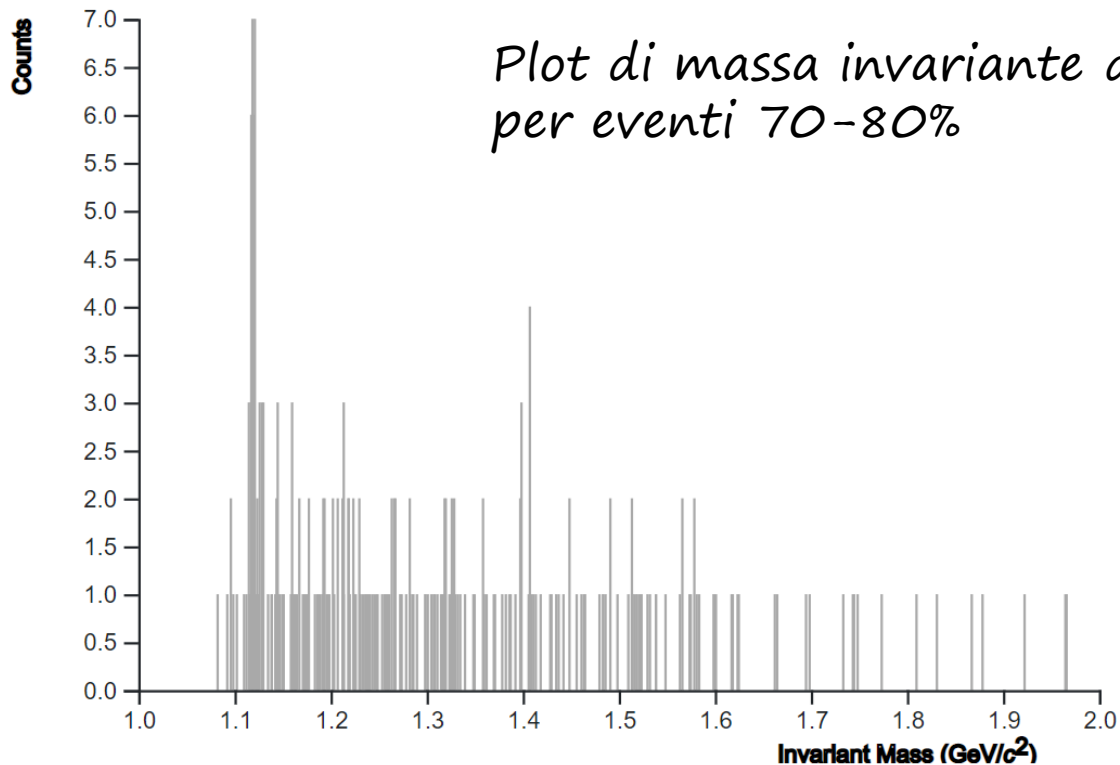
# Nel nostro campione di dati...



- Continuo: fondo «irriducibile» dovuto a combinazioni casuali di  $\pi^+\pi^-$  o  $\pi^-p$
- Fare un fit del fondo (polinomio di 2° grado) e del segnale (gaussiana)
- Trovare il numero di  $K^0$ ,  $\Lambda$  e anti- $\Lambda$  dopo la sottrazione del fondo

# Nel nostro campione di dati...

- Nelle collisioni periferiche solo pochi nucleoni sono coinvolti.
- Il segnale prodotto è molto debole





*Ora tocca a voi:  
buon divertimento!*





# Innalzamento di stranezza

- $\langle N_{part} \rangle$ : fornito: stima dal fit di Glauber
- **Nevents**: già fornito per ogni regione di centralità
- $NK_s$  (idem per le altre particelle strane): estratto dai nostri fit
- **Efficienza di ricostruzione delle singole particelle**: fornita
- **Yield**:  
 $NK_s / (\text{Nevents} \times \text{efficienza})$ ; idem per  $\Lambda$  e anti- $\Lambda$
- **Innalzamento di produzione di stranezza (enhancement)**:

$$\frac{\frac{\text{yield}}{\langle N_{part} \rangle} \Big|_{PbPb}}{\frac{\text{yield}}{\langle N_{part} \rangle} \Big|_{pp}}$$

Nel caso pp:  $\langle N_{part} \rangle = 2$

$$\text{yield}(K_s) = 0.25$$

$$\text{yield}(\Lambda, \text{anti-}\Lambda) = 0.0615$$