



ALICE



International Particle
Physics Outreach Group



Alla ricerca di particelle strane nei dati dell'esperimento ALICE

Sara Pucillo
UniTO & INFN Torino



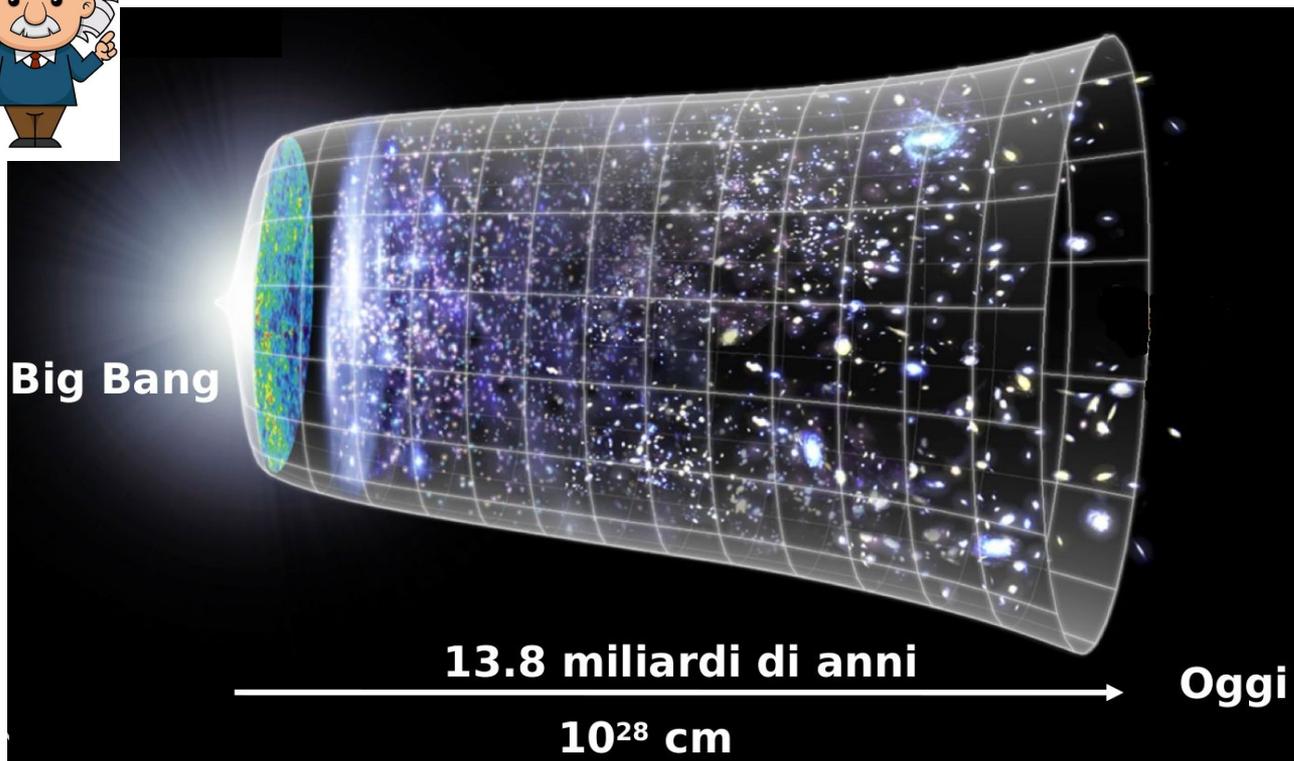
ALICE International Masterclass

Torino, 23 Febbraio 2024





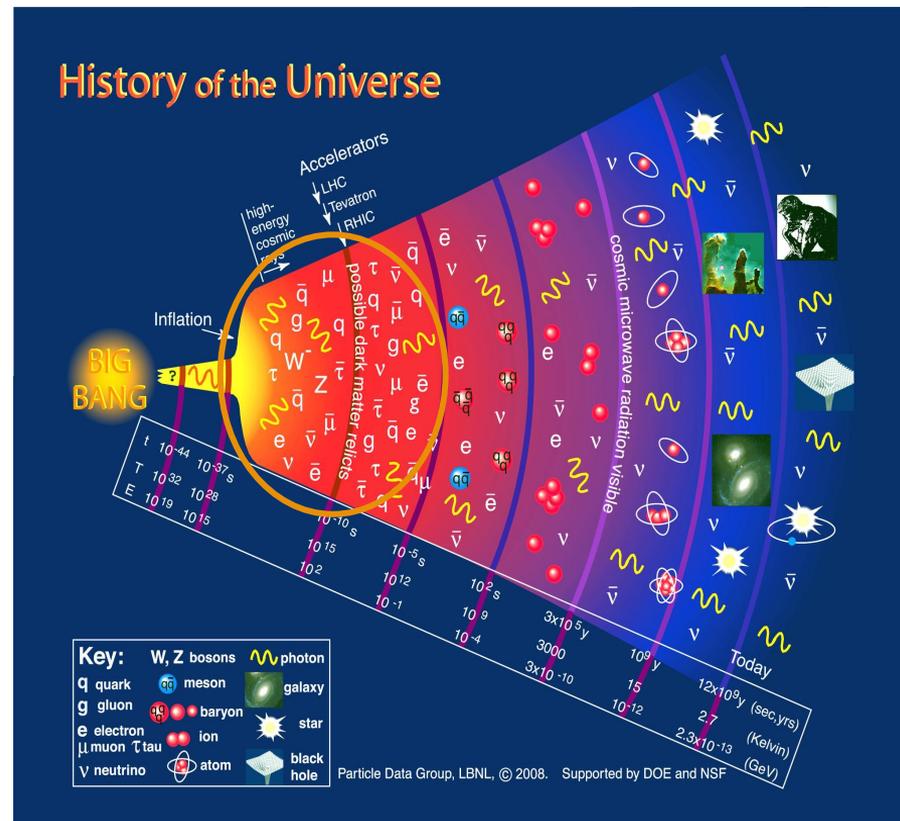
Una delle più importanti sfide scientifiche di oggi!



12-14 miliardi di anni fa, l'Universo:

- era concentrato in una **piccolissima regione di spazio**
- aveva una **temperatura T_u** (densità di energia) **altissima**: 10^{20} volte $> T_{\text{attuale}}$

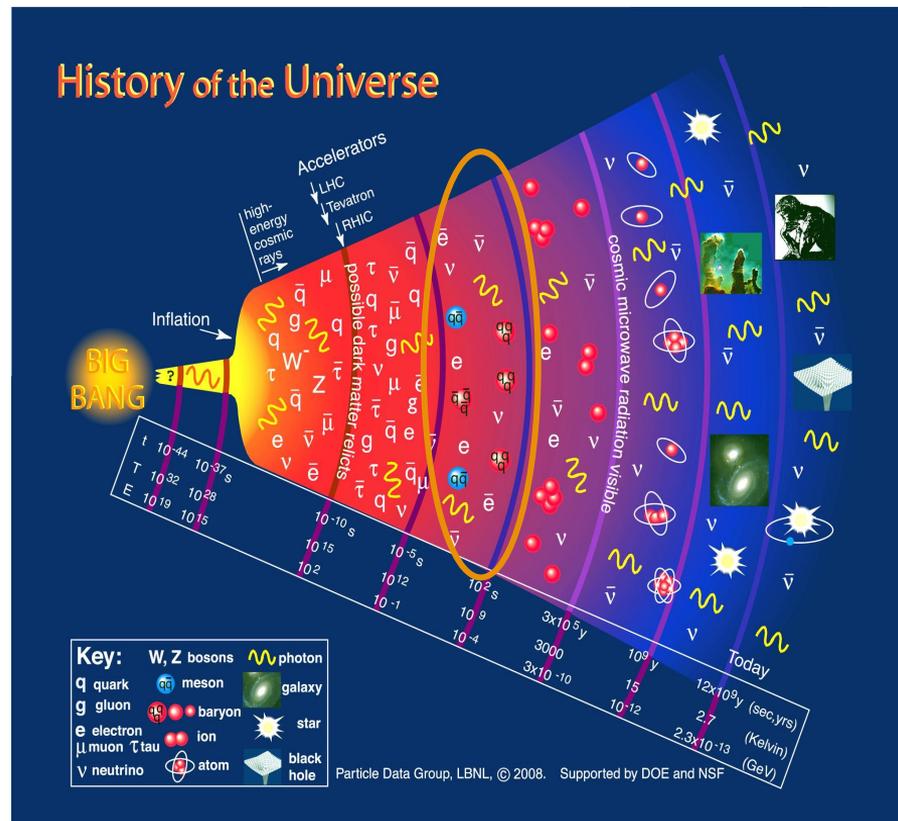
→ quark e gluoni sono liberi di muoversi in in fase di plasma: **Quark-Gluon Plasma**



Con il passare del tempo, l'Universo si espande

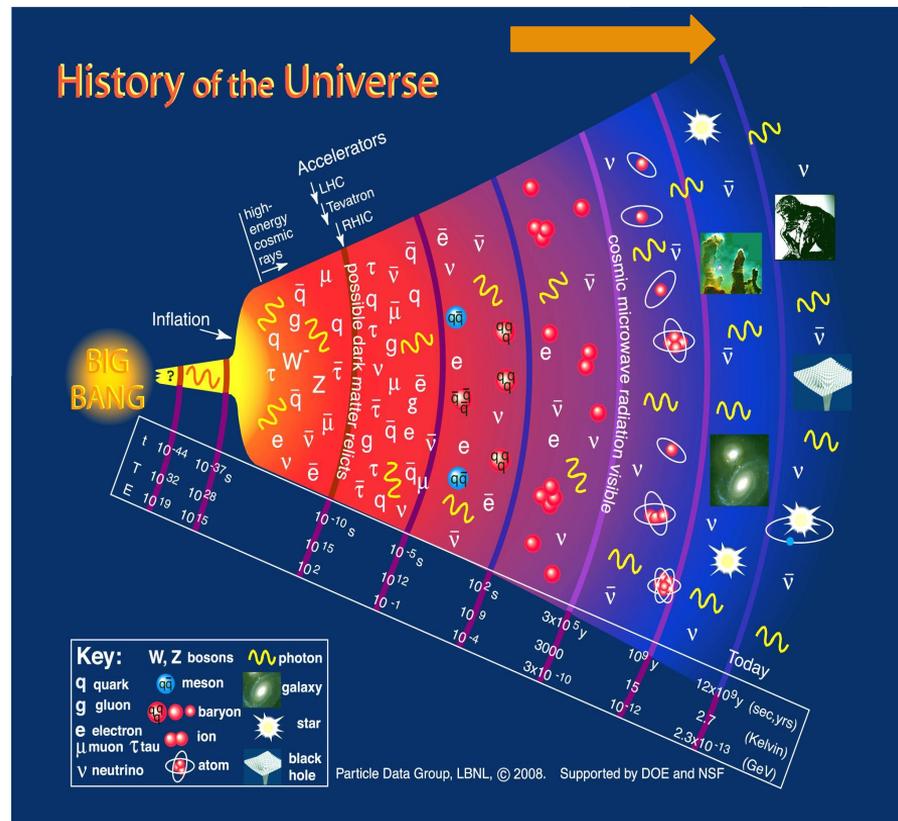
- la **temperatura T_u** (densità di energia) diminuisce

→ quando T_u raggiunge $T_{critica}$: quark e gluoni vengono confinati negli adroni → **adronizzazione**



In seguito all'adronizzazione:

- tutte le particelle instabili decadono tranne il **neutrone**, che ha una **vita media di ~ 15 minuti!**
- parte dei neutroni si sono aggregati ai protoni → **nuclei** (H, ^2H , ^3H , ^3He , ^4He , Li, ...)
- gli elettroni si legano ai nuclei → **atomi**
- il resto lo fa la gravità → l'attrazione fa sì che si creino le **stelle, pianeti ...**



Fino a ~ 1 centomillesimo di secondo dal Big-Bang (10^{-37} - 10^{-5} s)

- l'universo era formato da quark e gluoni sono liberi di muoversi in in fase di plasma:
Quark-Gluon Plasma



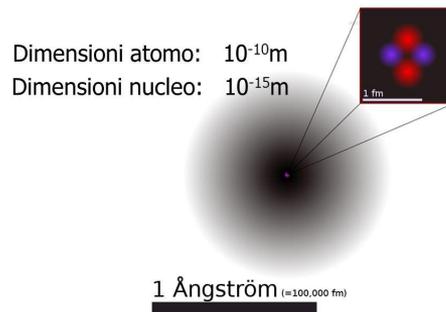
Come facciamo a studiare il QGP?



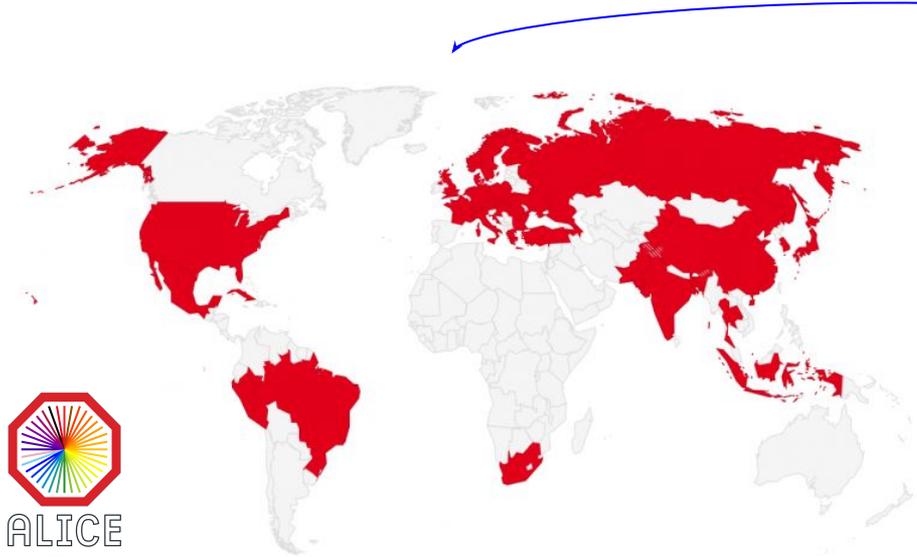
Ricreandolo in laboratorio e questo è quello che succede al CERN, presso l'acceleratore LHC

Ingredienti “necessari”:

- **temperatura altissima** → generata attraverso la collisione di nuclei atomici
 - accelerati fino a $v \sim c$
 - si fanno collidere ad energie elevatissime
- **piccolissima regione di spazio** → l'energia della collisione è concentrata in un volume delle dimensioni di un nucleo atomico

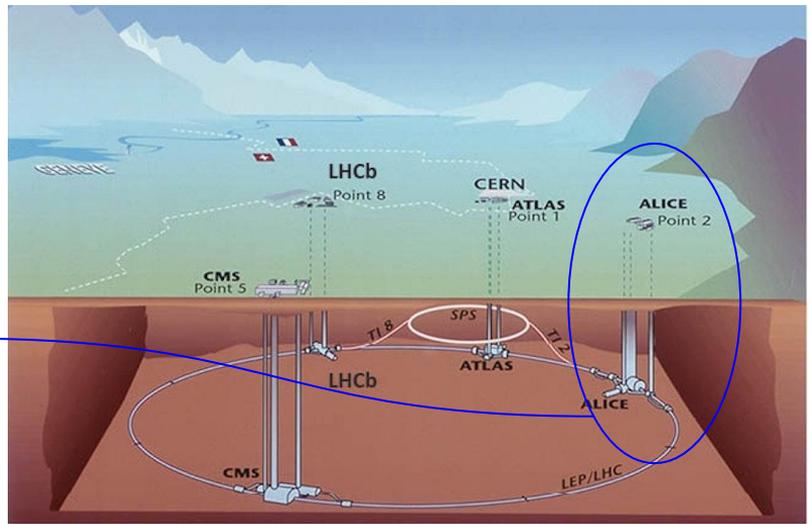


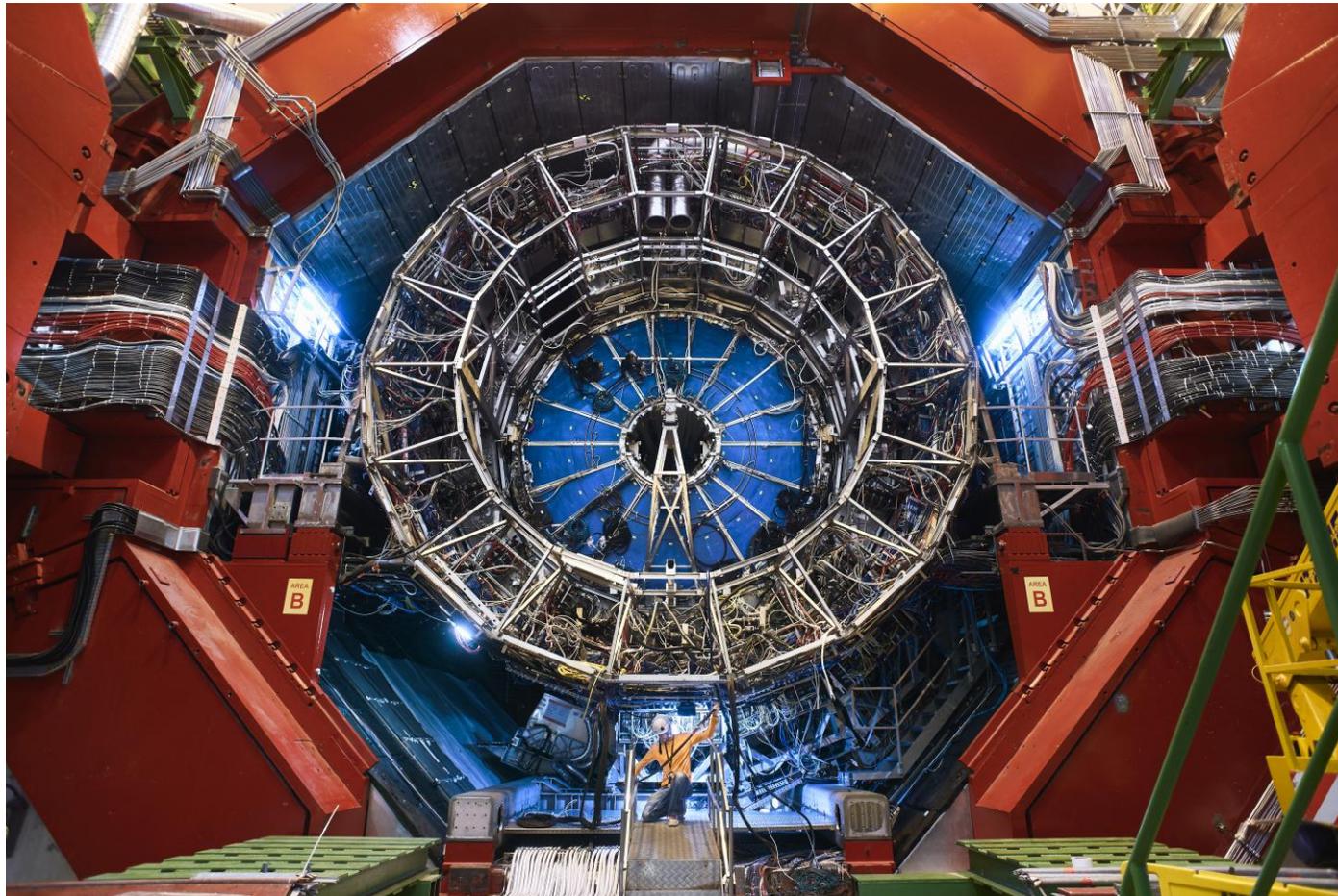
→ densità di energia simile a quella dell'universo pochi 10^{-6} s dopo il Big-Bang

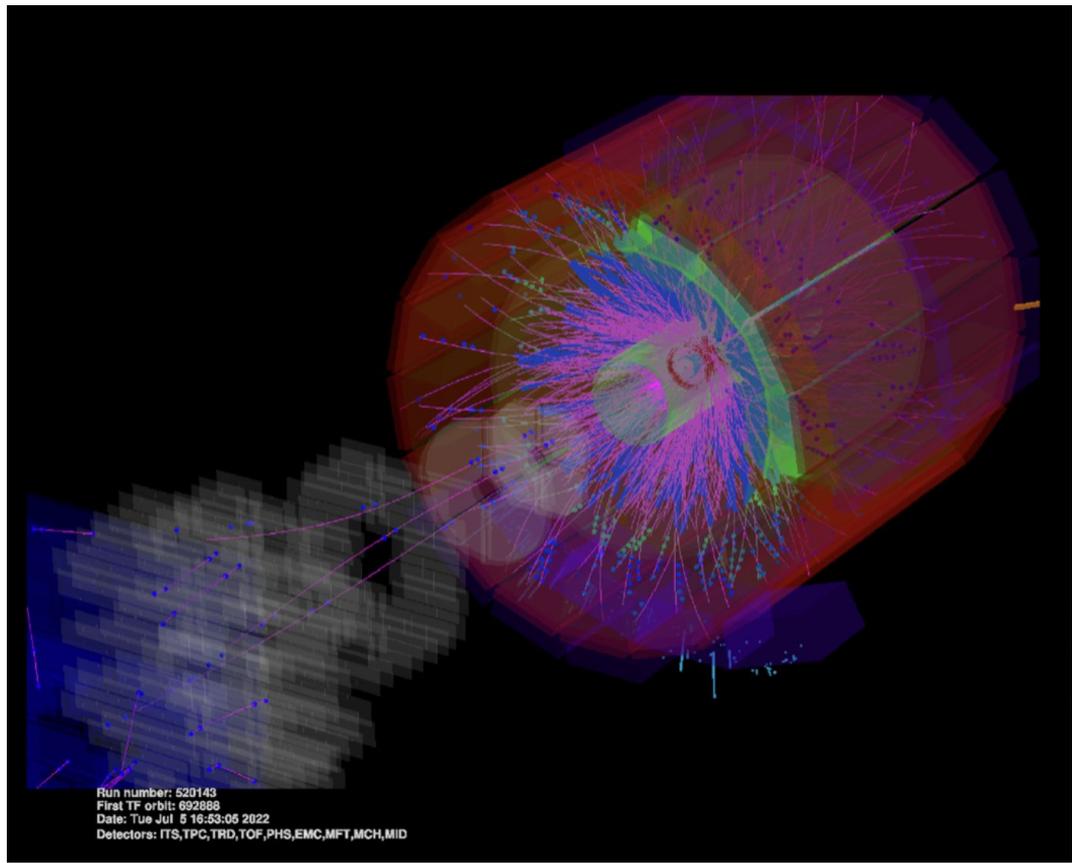


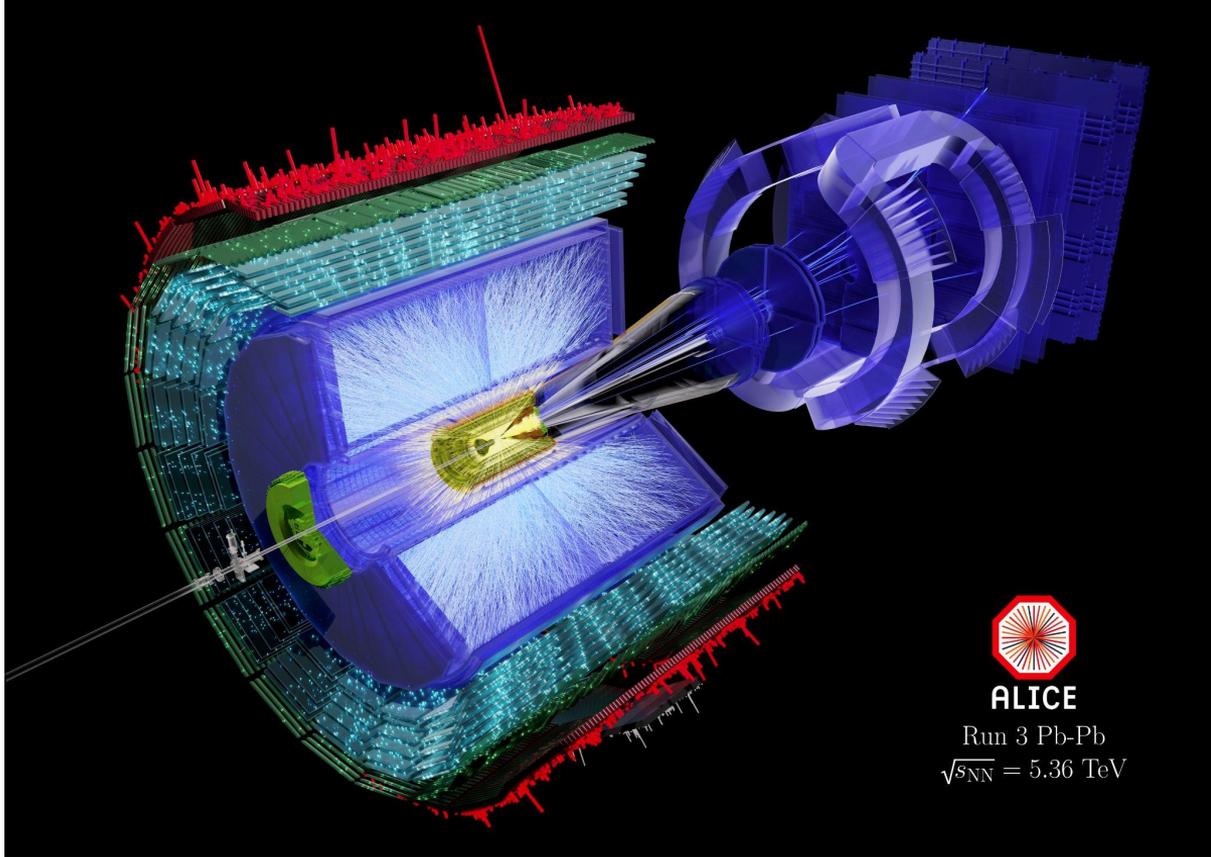
39 stati
174 istituti
1927 membri

- situato a ~ 60 m sotto terra
- unico esperimento a LHC dedicato alla fisica degli ioni





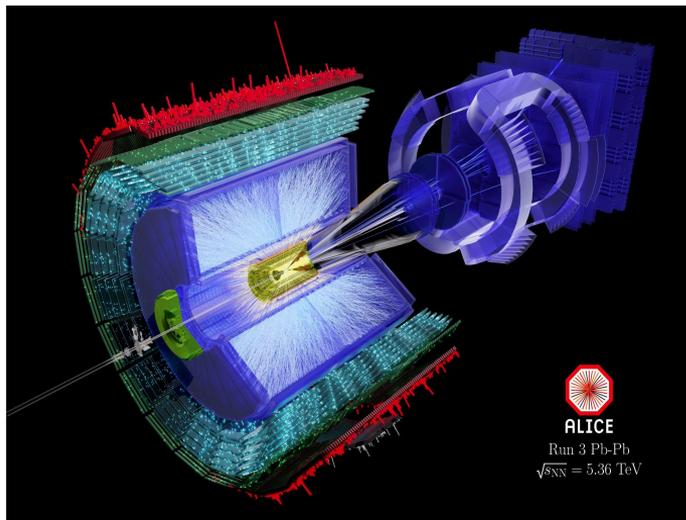




ALICE

Run 3 Pb-Pb
 $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ TeV

Nell'identificare i prodotti dell'interazione degli ioni Pb cerchiamo effetti che ci indicano la formazione del QGP



cerchiamo le “firme” del QGP

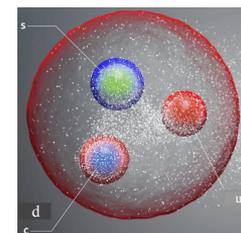
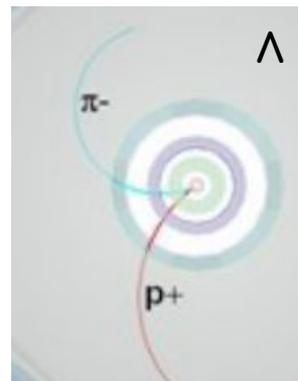
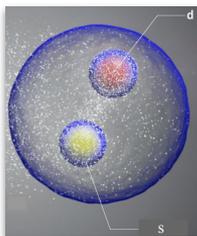
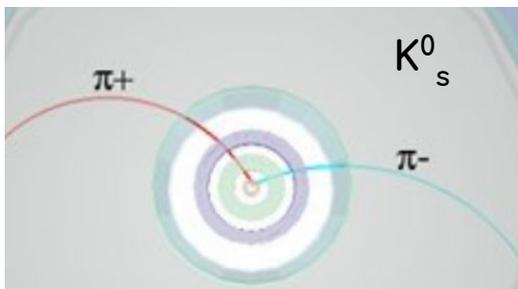


- aumento di stranezza
- soppressione degli stati $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$
- presenza di open charm e beauty
- soppressione ad alto p_T
-

- contengono almeno 1 quark di tipo “s” (strano)
- oltre al momento angolare, lo spin e la parità sono caratterizzate da un altro numero quantico: la **stranezza** → misura il numero di quark di tipo “s”
- sono instabili → **decadono in particelle più leggere** (“particelle figlie”) prima di poter essere rivelate
 - sfruttando le leggi di conservazione (momento, energia, carica elettrica ...) → determinazione delle caratteristiche della “particella madre”



NOTA: i prodotti di decadimento non contengono quark “s” (la stranezza non si conserva in questa tipologia di decadimenti)



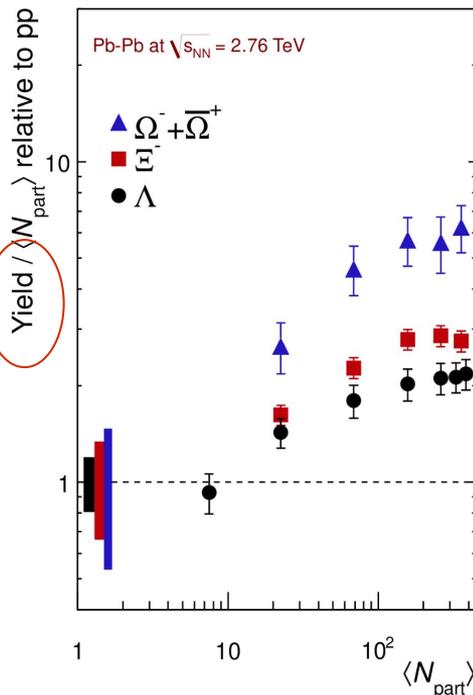
Le particelle strane: perchè si studiano?



L'aumento di stranezza in collisioni tra ioni pesanti rispetto a collisioni pp è stata una delle prime "firme" della formazione del QGP in collisioni tra ioni



numero medio di particelle prodotte in una collisione



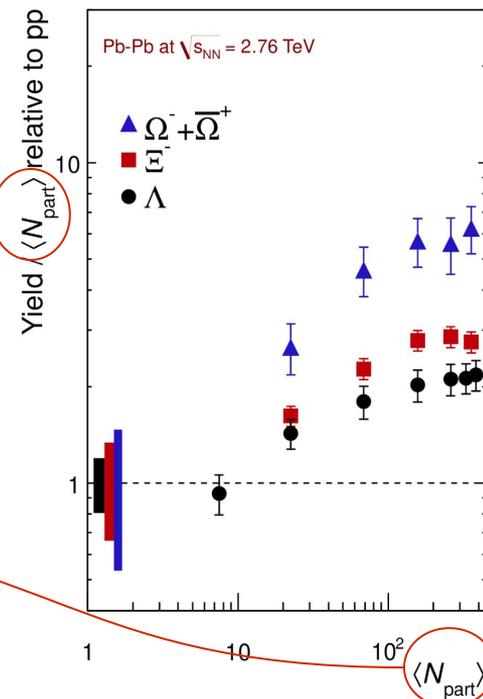
ALI-DER-80680

Le particelle strane: perchè si studiano?

L'aumento di stranezza in collisioni tra ioni pesanti rispetto a collisioni pp è stata una delle prime "firme" della formazione del QGP in collisioni tra ioni

numero medio di particelle prodotte in una collisione

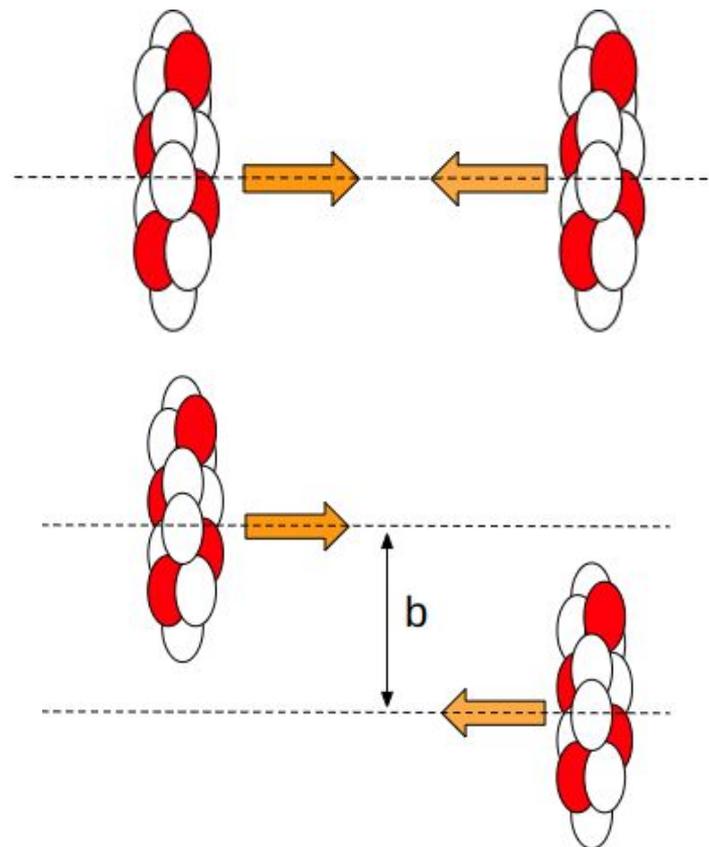
numero medio di nucleoni che partecipano alla collisione



ALI-DER-80680

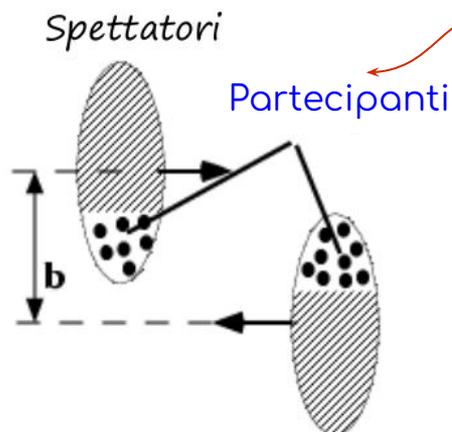
Gli ioni Pb sono oggetti estesi (con tanti nucleoni) →
quando collidono possono più o meno sovrapporsi

grado di sovrapposizione è legato alla
centralità della collisione

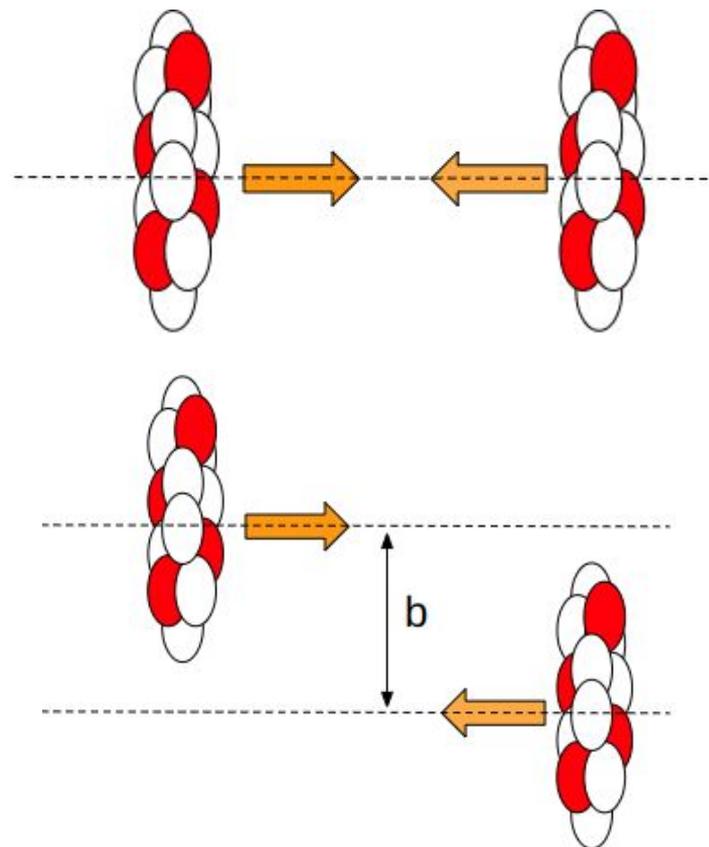


Gli ioni Pb sono oggetti estesi (con tanti nucleoni) → quando collidono possono più o meno sovrapporsi

grado di sovrapposizione è legato alla centralità della collisione

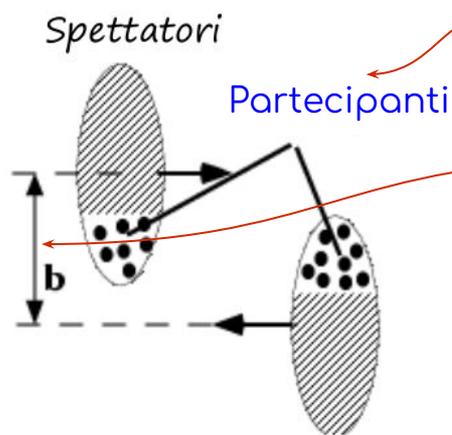


nucleoni che interagiscono



Gli ioni Pb sono oggetti estesi (con tanti nucleoni) → quando collidono possono più o meno sovrapporsi

grado di sovrapposizione è legato alla **centralità della collisione**

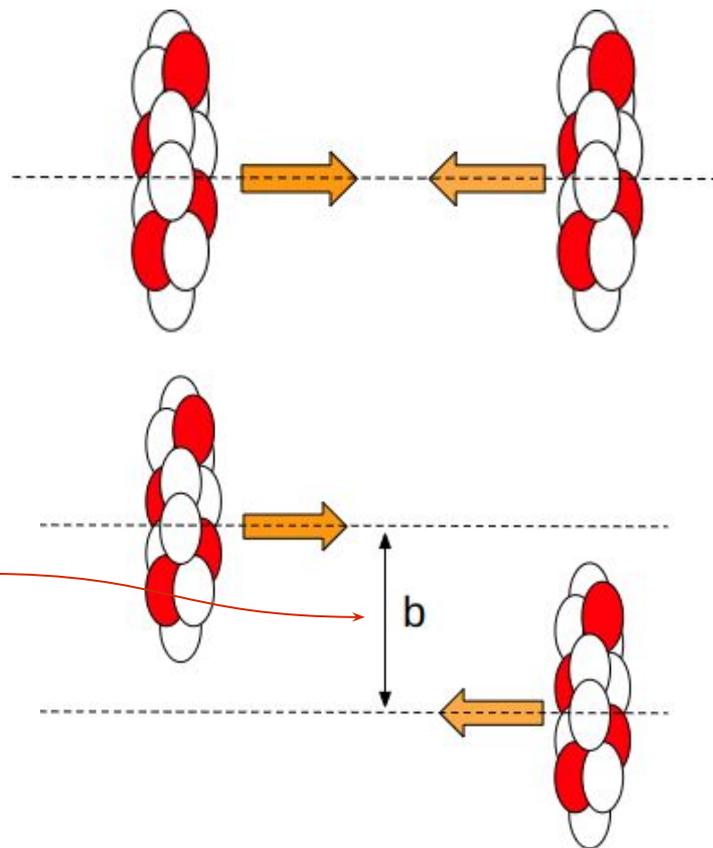


nucleoni che interagiscono

Parametro di impatto:
determina la centralità

b piccolo → collisione *centrale*
→ tanti nucleoni partecipanti

b grande → collisione *periferica*
→ pochi nucleoni partecipanti



Le particelle strane: perchè si studiano?

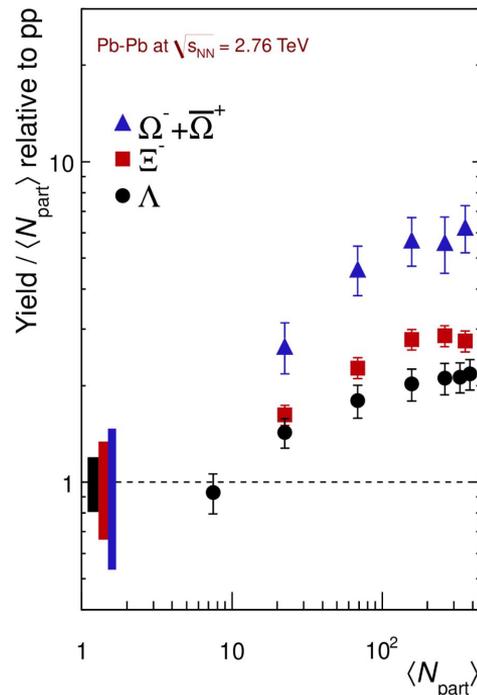
L'aumento di stranezza in collisioni tra ioni pesanti rispetto a collisioni pp è stata una delle prime "firme" della formazione del QGP in collisioni tra ioni

- tutti i rapporti sono maggiori di 1
 $\rightarrow \text{Yield} / \langle N_{\text{part}} \rangle_{\text{Pb-Pb}} > \text{Yield}_{\text{pp}} / 2$

- i rapporti crescono con $\langle N_{\text{part}} \rangle$

Λ	1 quark "s"
Ξ	2 quark "s"
Ω	3 quark "s"

l'aumento è proporzionale al numero di quark "s" contenuti nella particella



ALI-DER-80680

Le particelle strane: perchè si studiano?



L'aumento di stranezza in collisioni tra ioni pesanti rispetto a collisioni pp è stata una delle prime "firme" della formazione del QGP in collisioni tra ioni



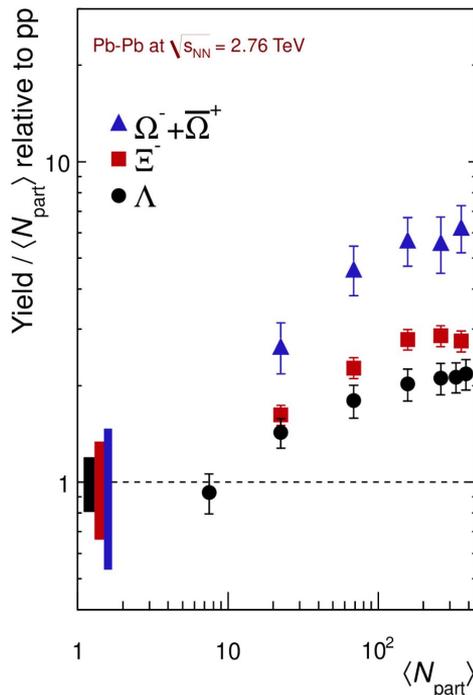
- tutti i rapporti sono maggiori di 1
 $\rightarrow \text{Yield} / \langle N_{\text{part}} \rangle_{\text{Pb-Pb}} > \text{Yield} / \langle N_{\text{part}} \rangle_{\text{pp}}$

- i rapporti crescono con $\langle N_{\text{part}} \rangle$

Λ	1 quark "s"
Ξ	2 quark "s"
Ω	3 quark "s"

l'aumento è proporzionale al numero di quark "s" contenuti nella particella

Oggi misureremo questo!



ALI-DER-80680



ALICE



International Particle
Physics Outreach Group



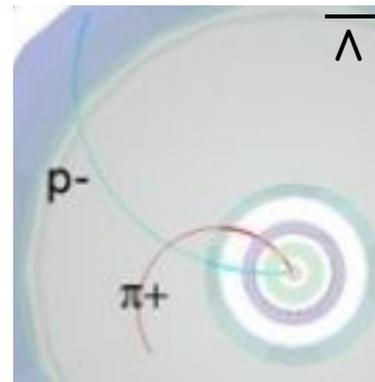
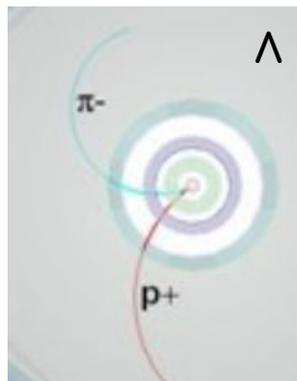
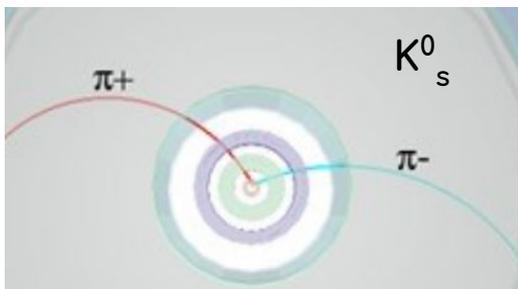
Sessione di hands-on

Parte 1: identificazione delle particelle

Parte 2: calcolo dell'aumento di stranezza
utilizzando dati veri di collisioni pp e
Pb-Pb presi dall'esperimento ALICE



1. analizzerete un gruppo di eventi pp (dataset) con almeno una particella strana
2. **identificherete visivamente le “particelle figlie”** in cui la particella strana è decaduta



3. sfruttando le leggi di conservazione di energia e impulso → **massa invariante della “particella madre”**

$$M = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2}$$

4. confrontando il risultato con i valori di massa noti dovrete **scegliere un'ipotesi per la particella madre** che ha prodotto le tracce

→ evento aggiunto automaticamente al corrispondente istogramma

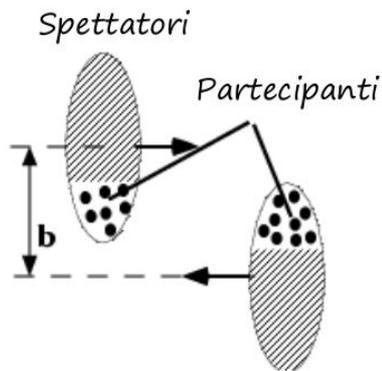
NOTA 1: tutte le coppie che non sono identificate come kaoni o barioni Λ sono da considerarsi "background" (fondo)

NOTA 2: una volta che tutti gli eventi sono stati analizzati → caricherete i risultati sul server condiviso

5. insieme **vedremo gli istogrammi popolati considerando tutti gli eventi** in tutti i dataset disponibili

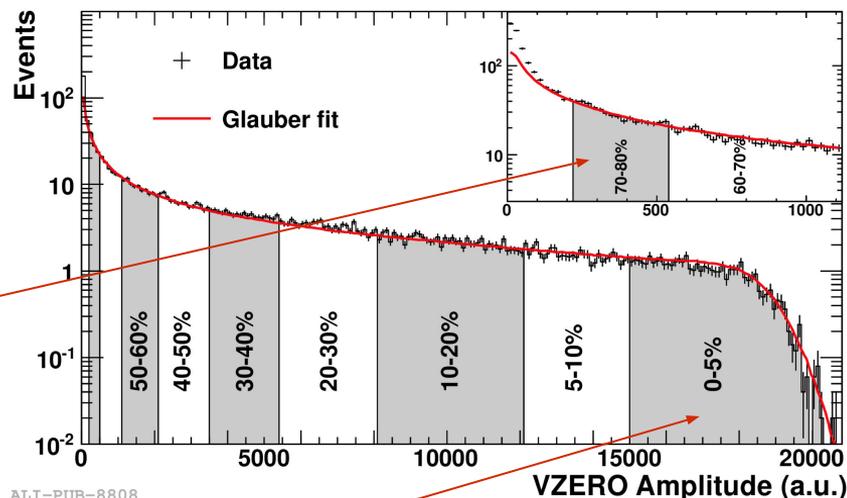


1. analizzerete un campione di eventi pp o Pb-Pb per **diverse classi di centralità**



b non è misurabile direttamente → ALICE determina la centralità a partire dall'ampiezza del segnale nel VZERO (scintillatori) \propto numero di particelle prodotte

collisione *periferica* → $\langle N_{part} \rangle$ minore

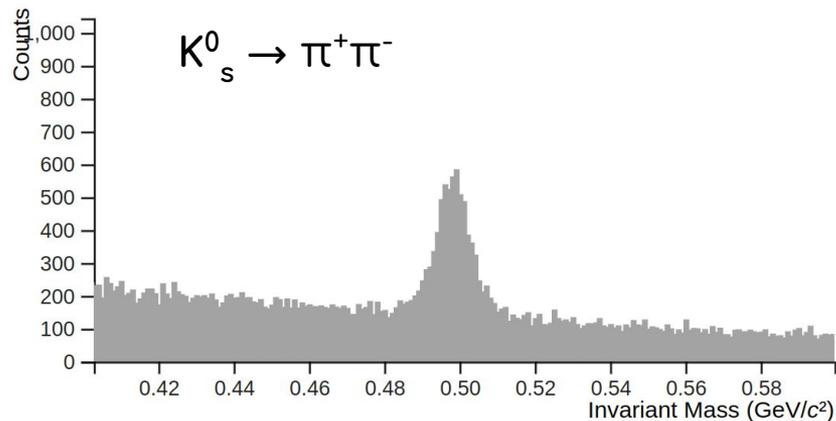


collisione *centrale* → $\langle N_{part} \rangle$ maggiore

ALI-PUB-8808

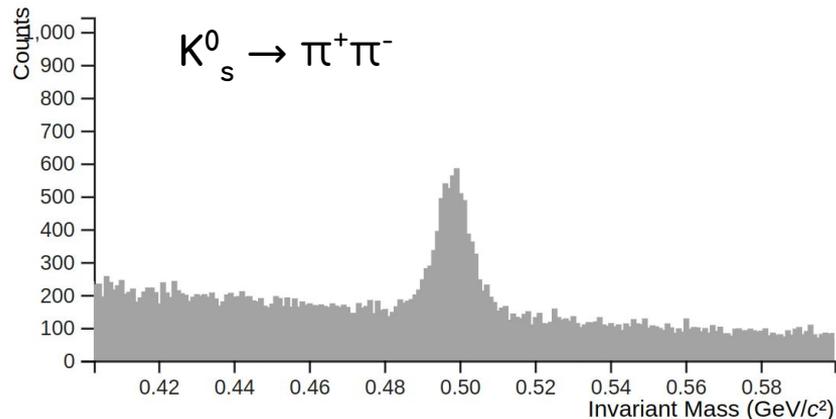
2. fare di **fit** alle distribuzioni di massa invariante fornite

→ trovare delle funzioni che descrivano i vostri dati



2. fare di **fit** alle distribuzioni di massa invariante fornite

trovare delle funzioni che descrivano i vostri dati



Ma perchè abbiamo delle distribuzioni?
Nella Parte 1 ci siamo ricavati la massa della particella ...



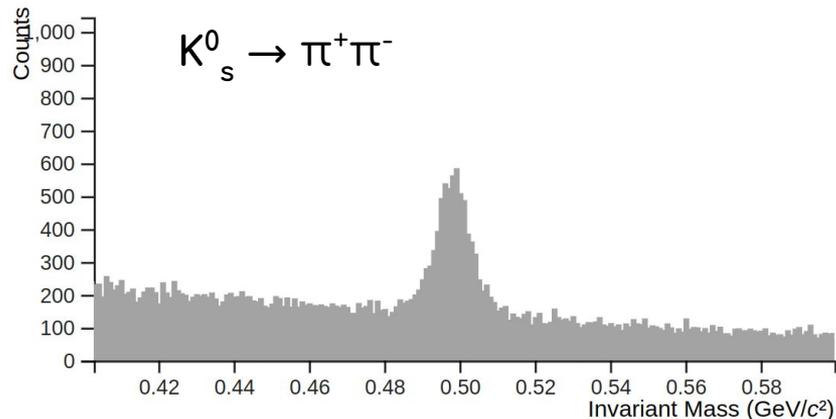
Perchè avete un **rivelatore vero** → p non è quella vera, ma quella misurata dal rivelatore, che ha una certa **risoluzione** (è un pò impreciso)



larghezza della distribuzione a “campana”

2. fare di **fit** alle distribuzioni di massa invariante fornite

trovare delle funzioni che descrivano i vostri dati



Ma perchè abbiamo delle distribuzioni?
Nella Parte 1 ci siamo ricavati la massa della particella ...



Perchè avete un **rivelatore vero** \rightarrow ρ non è quella vera, ma quella misurata dal rivelatore, che ha una certa **risoluzione** (è un pò impreciso)

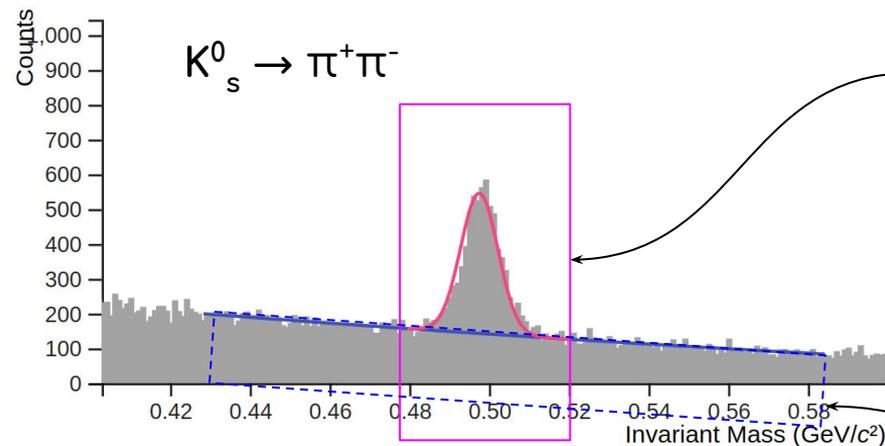


Per capirlo dovete **definire una regione** (di confidenza) in cui cercarla, che dipende dalla risoluzione .. e poi fare un fit

Ma quella che abbiamo trovato è davvero la particella che stavamo cercando?



2. fare di fit alle distribuzioni di massa invariante fornite



Regione di confidenza: area entro il quale si cerca il **segnale**
 → se avete scelto bene la regione e la funzione con cui fittare: valore centrale (picco) corrisponde alla massa del K_s^0

Regione sottostante: **fondo**
 → non è quello che stavate cercando, quindi non va contato

Funzioni che descrivono nel miglior modo i vostri dati

segnale: funzione a “campana” (gaussiana)

fondo: polinomio di 2° grado (parabola)

scegliendo opportunamente la regione di confidenza effettuerete un fit ($f_{\text{segnale}} + f_{\text{fondo}}$)



3. ricoverete il numero di K^0_s , Λ e anti- Λ (segnale di vostro interesse) nelle diverse classi di centralità

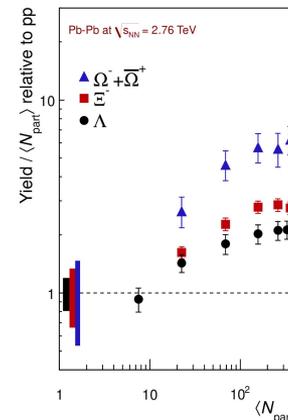
4. insieme quantificheremo l'aumento di stranezza per le diverse particelle strane analizzate

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

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

$$yield = \frac{N_{part.S} / Eff}{N_{eventi}}$$

5. otterremo insieme un grafico simile a quello pubblicato da ALICE!



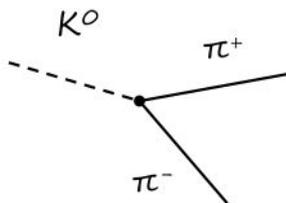
ALI-DER-80680

Adesso tocca a voi!



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

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



$$\pi^+: \text{particella-figlia 1}$$

$$E_1, m_1, \vec{p}_1$$

$$\pi^-: \text{particella-figlia 2}$$

$$E_2, m_2, \vec{p}_2$$

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:	$E^2 = p^2 + m^2$

Supponendo $c = 1$

Ricaviamo:

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

Dalle equazioni precedenti, ricaviamo:

$$\begin{aligned} m^2 &= E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 + (\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \end{aligned}$$

Prodotto scalare di due vettori:

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 = p_{1x}p_{2x} + p_{1y}p_{2y} + p_{1z}p_{2z}$$

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 = p_{1x}^2 + p_{1y}^2 + p_{1z}^2 = p_1^2$$

$$\vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 = p_{2x}^2 + p_{2y}^2 + p_{2z}^2 = p_2^2$$

Dalle equazioni precedenti, ricaviamo:

$$\begin{aligned} m^2 &= E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 + (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \end{aligned}$$

Prodotto scalare di due vettori: $\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 = p_{1x}p_{2x} + p_{1y}p_{2y} + p_{1z}p_{2z}$

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 = p_{1x}^2 + p_{1y}^2 + p_{1z}^2 = p_1^2$$

$$\vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 = p_{2x}^2 + p_{2y}^2 + p_{2z}^2 = p_2^2$$

$$m^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

Dalle equazioni precedenti, ricaviamo:

$$\begin{aligned}
 m^2 &= E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 + (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\
 &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2
 \end{aligned}$$

Prodotto scalare di due vettori:

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 = p_{1x}p_{2x} + p_{1y}p_{2y} + p_{1z}p_{2z}$$

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 = p_{1x}^2 + p_{1y}^2 + p_{1z}^2 = p_1^2$$

$$\vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 = p_{2x}^2 + p_{2y}^2 + p_{2z}^2 = p_2^2$$

$$m^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

Dalle equazioni precedenti, ricaviamo:

$$\begin{aligned}
 m^2 &= E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 + (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\
 &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 - 2 \cdot \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2
 \end{aligned}$$

Prodotto scalare di due vettori: $\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 = p_{1x}p_{2x} + p_{1y}p_{2y} + p_{1z}p_{2z}$

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 = p_{1x}^2 + p_{1y}^2 + p_{1z}^2 = p_1^2$$

$$\vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 = p_{2x}^2 + p_{2y}^2 + p_{2z}^2 = p_2^2$$

$$m^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2 \cdot \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

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

Dalle equazioni precedenti, ricaviamo:

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_1 + E_2)^2 + (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

$$= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

Prodotto scalare di due vettori: $\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 = p_{1x}p_{2x} + p_{1y}p_{2y} + p_{1z}p_{2z}$

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_1 = p_{1x}^2 + p_{1y}^2 + p_{1z}^2 = p_1^2$$

$$\vec{p}_2 \cdot \vec{p}_2 = p_{2x}^2 + p_{2y}^2 + p_{2z}^2 = p_2^2$$

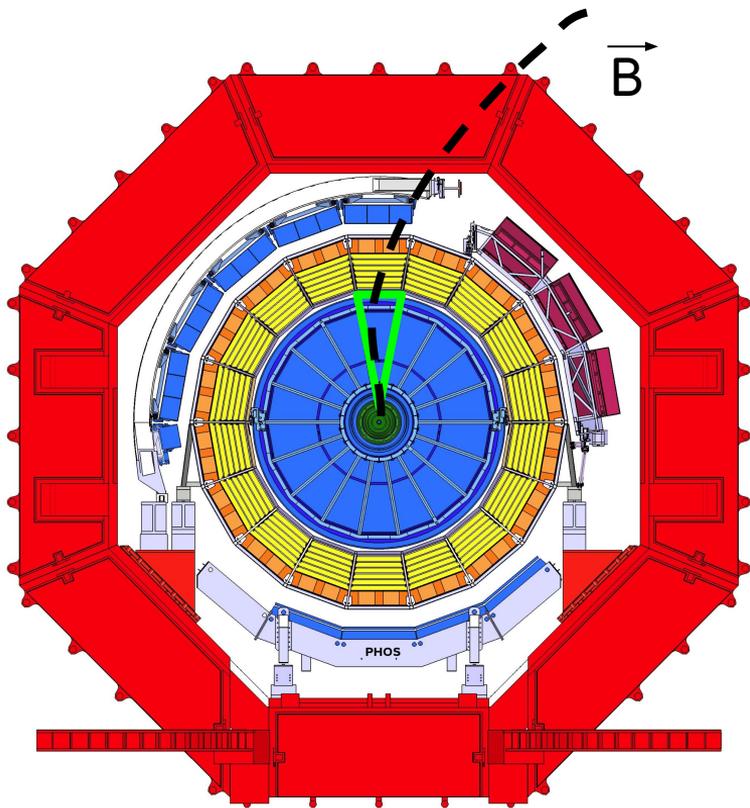
$$m^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2$$

Possiamo ricavare la massa m della particella decaduta a partire dalla massa e dalle componenti della quantità di moto delle particelle-figlie!

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

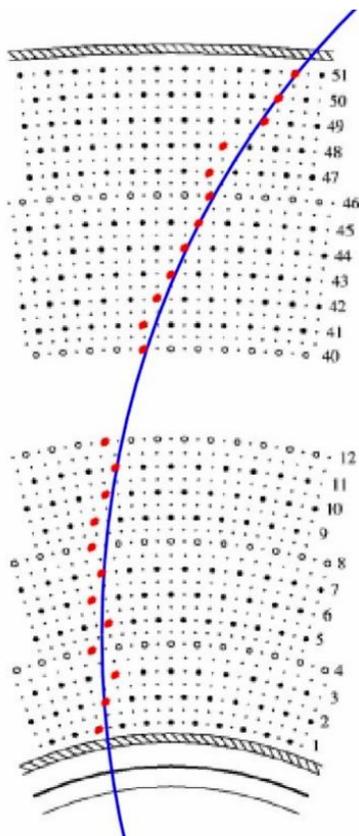
La massa delle particelle-figlie è nota!

Noti dalla curvatura della traiettoria nel campo magnetico



Per determinare la traiettoria di una particella carica (elettroni, muoni ...) devo misurare il momento e la carica elettrica. Sappiamo che:

1. una particella carica che attraversa un campo magnetico \vec{B} percorre una **traiettoria curva**
 - a. se \vec{B} è uniforme e perpendicolare alla direzione della particella: la traiettoria è una **circonferenza di raggio R proporzionale al momento p : $p = 0.3BR$**
2. una particella carica che attraversa un materiale non troppo denso perde **piccole quantità di energia** lungo il percorso



1. Facciamo passare le particelle cariche prodotte nella collisione in un campo magnetico B uniforme \rightarrow **traiettoria/traccia**
 - a. cerchiamo l'**arco di circonferenza** che meglio approssima i punti misurati \rightarrow **raggio**

NOTA: la **carica** della particella è data dal verso di curvatura della traiettoria (orario/antiorario)
2. Studiamo l'**energia persa** dalle particelle lungo la traiettoria \rightarrow identificazione della particella (particelle diverse perdono energia in modo differente)