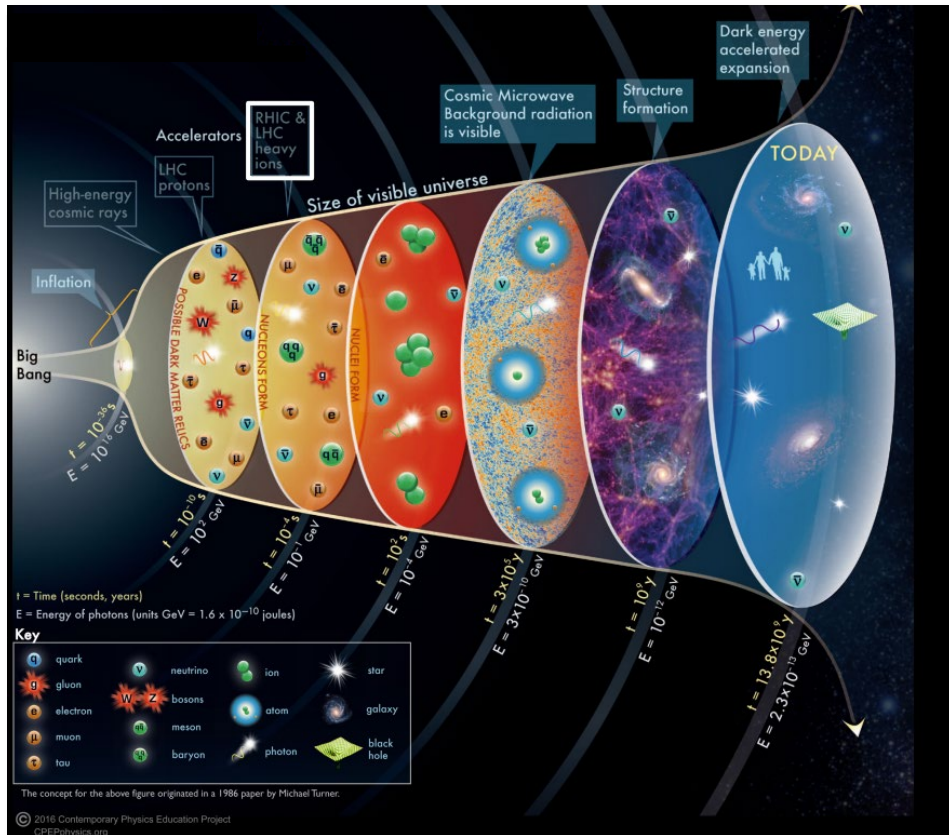


# La Fisica di ALICE

The image shows the interior of the ALICE detector at the Large Hadron Collider (LHC). The central feature is a large, cylindrical structure with a complex internal framework of metal beams and scaffolding. The structure is surrounded by orange-colored support structures and numerous bundles of cables. A person in a red jacket and blue pants stands in the center of the structure, providing a sense of scale. The lighting is bright, highlighting the metallic surfaces and the intricate details of the detector's construction. Two small white labels with the text "AREA B" are visible on the orange support structures on either side of the central structure.

**Fabio Colamaria – INFN Bari**  
**Con la collaborazione del gruppo ALICE**

# EVOLUZIONE TEMPORALE DELL'UNIVERSO

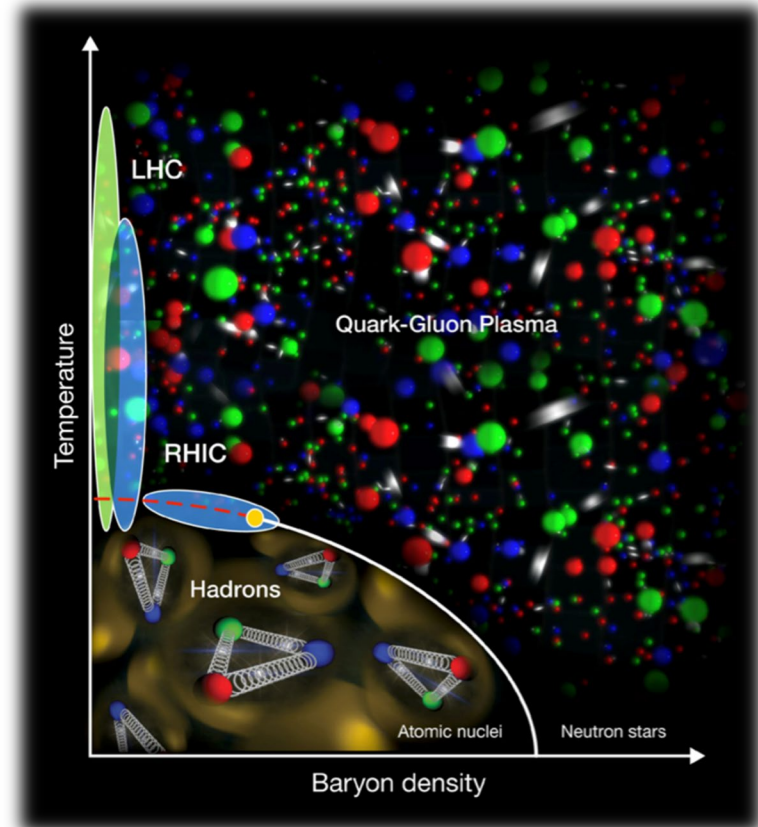


- La materia adronica ordinaria è formata da costituenti elementari (i **quark**) legati insieme da **gluoni** per formare protoni e neutroni.
  - **Non esistono quark liberi in natura!**
- Nei primi istanti di vita dell'Universo i quark ed i gluoni erano allo stato libero, «**deconfinati**» in uno stato della materia chiamato **quark-gluon plasma**
- Dopo alcuni microsecondi, la temperatura dell'Universo è diminuita abbastanza da causare una **transizione di fase** alla materia adronica
  - Quark e gluoni **confinati** all'interno di **adroni**, come nella materia «odierna»

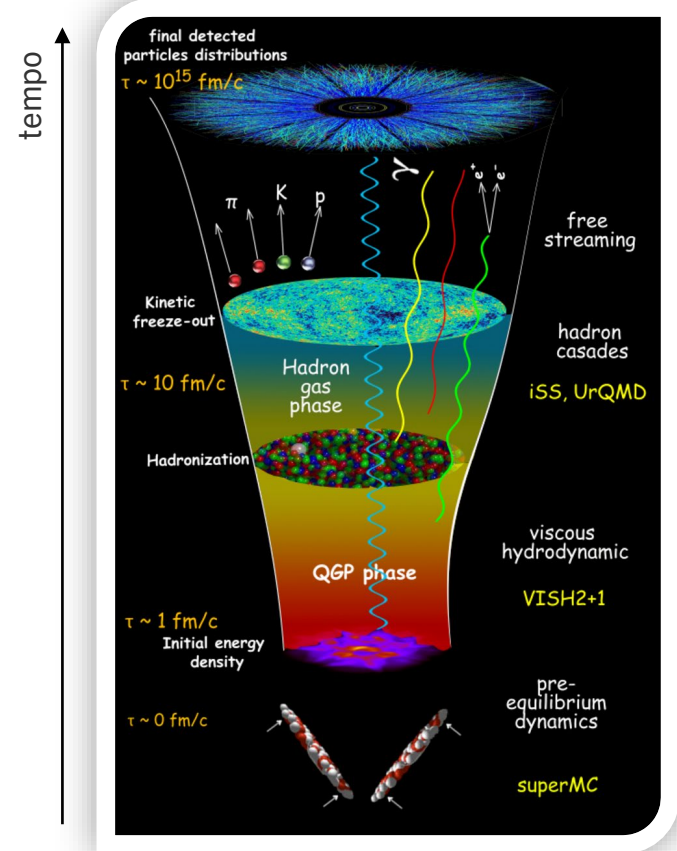
# IL QUARK-GLUON PLASMA

- Prodotto solo in condizioni di **temperature e densità di energia estreme** ( $T > 1.8 \cdot 10^{12}$  K)
  - 100000 volte maggiore della temperature all'interno del Sole
- Come ricreare lo stato di quark-gluon plasma in **laboratorio**, per poterlo studiare?
- L'unico modo conosciuto è far collidere ioni pesanti ad altissime energie
  - **Collisioni ultra-relativistiche tra ioni di piombo all'acceleratore LHC del CERN**

*Diagramma di fase della materia adronica*



# EVOLUZIONE DI UNA COLLISIONE Pb-Pb



1. Due nuclei si avvicinano ad una velocità prossima a quella della luce
2. I nuclei collidono. La temperatura estrema generata nella collisione permette di liberare i quark e i gluoni
3. I quark e i gluoni interagiscono fra loro, raggiungendo l'equilibrio termodinamico, e dando origine ad un **plasma di quark e gluoni (QGP)**
4. Il plasma si espande e si raffredda fino alla temperatura ( $\sim 2 \times 10^{12}$  gradi) alla quale i quark e i gluoni si ricombinano per formare materia ordinaria (adronizzano), in un tempo di  $\approx 10^{-23}$  secondi dalla collisione.
5. Le migliaia di particelle create nella collisione continuano a subire reciproche collisioni elastiche fino al “freeze-out”
6. Da quel momento in poi, ‘viaggiano’ fino a raggiungere i detector, dove possono essere rivelate

**Studiando le proprietà delle particelle dello «stato finale» (misurate dai rivelatori), otteniamo informazioni su quanto accaduto nella fase di QGP (sperimentalmente inaccessibile)**

**Proviamo a ricollegare questi obiettivi al vostro esercizio!**

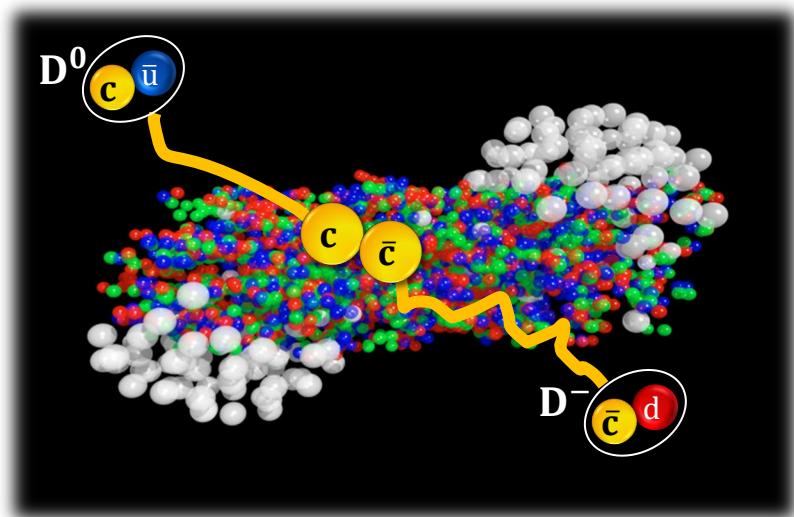
# QUARK PESANTI (CHARM E BEAUTY) E QGP

Nell'ambito delle collisioni di ioni pesanti, i quark pesanti, o di heavy flavour (**charm** e **beauty**) hanno caratteristiche peculiari:

- Sono prodotti su scale di tempi molto brevi, prima della formazione del QGP
- Attraversano, preservando la loro identità, tutte le fasi dell'evoluzione della collisione
- Portano traccia delle modifiche dovute al QGP alle particelle nello stato finale (adroni con charm/beauty, come la  $D^0$ )

Per tale motivo, sono **ottime sonde** per studiare le proprietà del quark-gluon plasma

	I	II	III
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

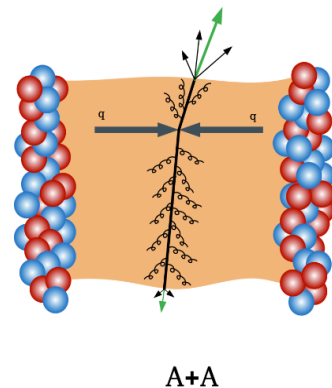
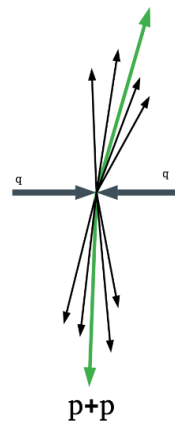


# QUARK PESANTI (CHARM E BEAUTY) E QGP

Gli effetti e le modifiche alle proprietà dei quark pesanti dovute alla presenza del QGP sono molteplici

Esempio più importante:

- Attraversando il QGP, i quark pesanti **perdono gradualmente energia**, tramite interazioni coi suoi costituenti
- La quantità di energia persa dipende dalle **proprietà del QGP** (es. densità, coefficienti di trasporto)
- Effetto finale (**misurabile**): produzione di un minor numero di adroni di HF ad alto  $p_T$ , rispetto a collisioni senza QGP ( $\rightarrow$  protone-protone)



Dunque:

Deduciamo informazioni sul QGP

Il QGP modifica le proprietà cinematiche dei quark pesanti

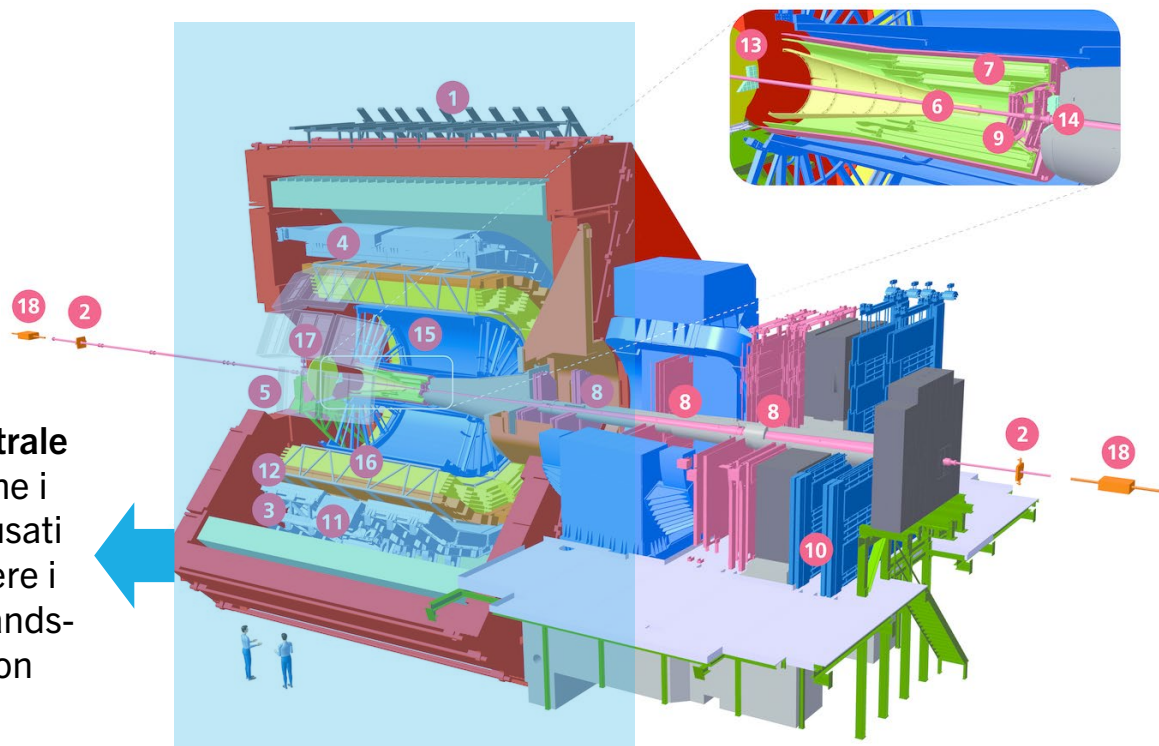
Misuriamo le modifiche degli adroni finali

Effetti propagati agli adroni finali di HF

Come ricostruire gli adroni finali?

# L'ESPERIMENTO ALICE

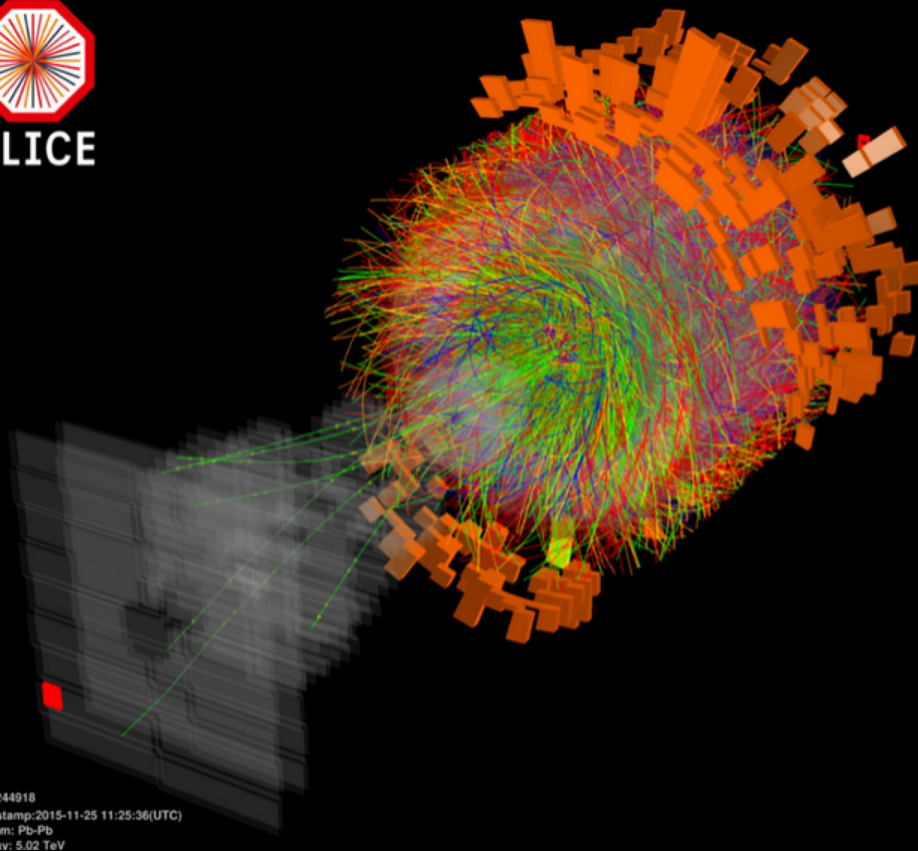
- Uno dei 4 esperimenti principali di LHC, composto da 18 rivelatori, ottimizzati per lo studio di collisioni Pb-Pb



**Barile centrale**  
→ contiene i rivelatori usati per ottenere i dati dell'handson session

- 1 ACORDE | ALICE Cosmic Rays Detector
- 2 AD | ALICE Diffractive Detector
- 3 DCal | Di-jet Calorimeter
- 4 EMCal | Electromagnetic Calorimeter
- 5 HMPID | High Momentum Particle Identification Detector
- 6 ITS-IB | Inner Tracking System - Inner Barrel
- 7 ITS-OB | Inner Tracking System - Outer Barrel
- 8 MCH | Muon Tracking Chambers
- 9 MFT | Muon Forward Tracker
- 10 MID | Muon Identifier
- 11 PHOS / CPV | Photon Spectrometer
- 12 TOF | Time Of Flight
- 13 TO+A | Tzero + A
- 14 TO+C | Tzero + C
- 15 TPC | Time Projection Chamber
- 16 TRD | Transition Radiation Detector
- 17 V0+ | Vzero + Detector
- 18 ZDC | Zero Degree Calorimeter

# COLLISIONE TIPICA Pb-Pb RICOSTRUITA DA ALICE



Run: 244918  
Timestamp: 2015-11-25 11:25:36(UTC)  
System: Pb-Pb  
Energy: 5.02 TeV

- Fino a **parecchie migliaia di tracce** ricostruite a partire dalle informazioni fornite dai detector
- Impulso trasverso ( $p_T$ ) delle tracce misurato dalla loro curvatura

$$p = 0.3 q R B$$

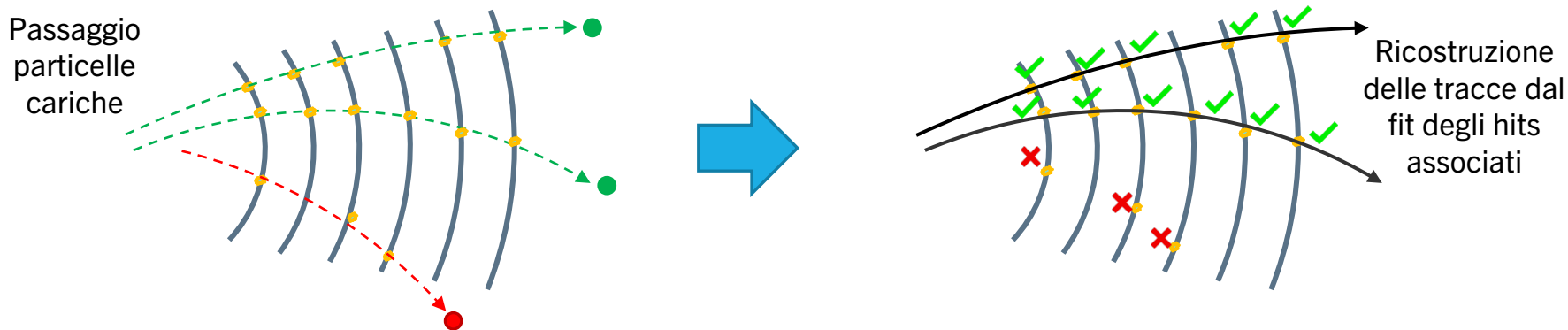
Sono «direttamente» ricostruibili:

- Solo **particelle cariche**
- Solo particelle ad **elevata vita media** ( $\rightarrow$  'viaggiano' fino ai detector)



# RICOSTRUZIONE DELLE TRACCE

- Rilascio di energia al **passaggio di una particella** nel volume sensibile dei detector, e conversione di tale carica in un **segnale elettrico** (es. creazione di coppie  $e^+e^-$  in rivelatori a gas e raccolta delle cariche generate)
- **Localizzazione spaziale** del punto in cui è avvenuto tale rilascio → «**Hit**»

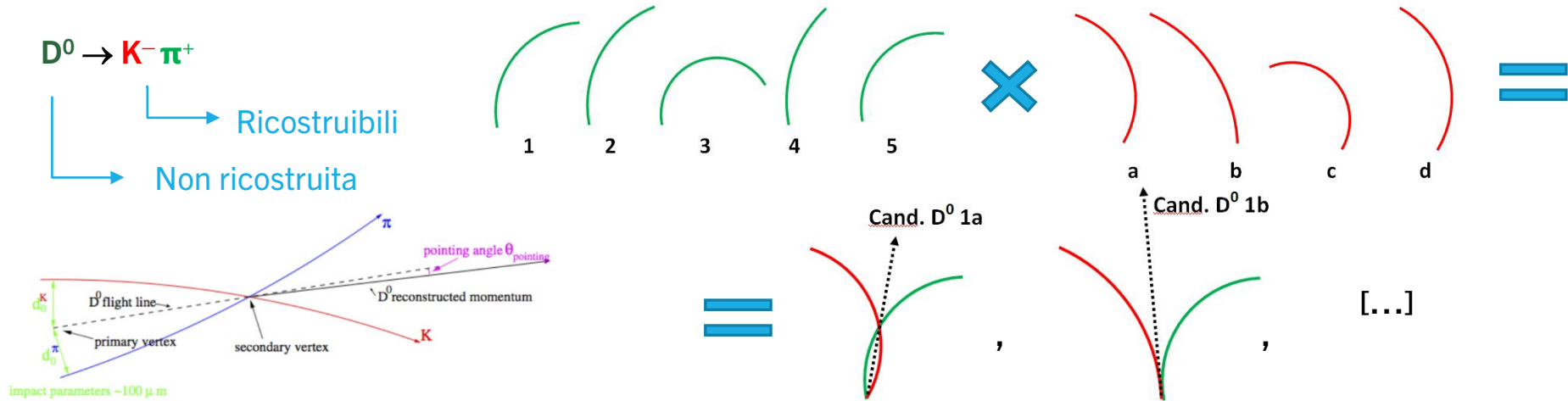


- Algoritmo di **associazione degli hit** su più «strati» di detector, o più detector, ad un'unica particella e **fit** con una funzione elicoidale (es. Kalman Filter)
  - Ricostruzione di una **traccia**, che ricalca, a meno delle incertezze di misura, la **traiettoria della particella** nel detector
  - Per selezionare la traccia come «valida», verifica della qualità della sua ricostruzione (N. hit associati,  $\chi^2/\nu$  del fit, ...)

# RICOSTRUZIONE DI PARTICELLE HF: LA $D^0$

Non è possibile ricostruire direttamente la  $D^0$ , particella neutra e con vita media molto ridotta ( $t = 4.1 \cdot 10^{-13} \text{ s} \rightarrow ct = 123 \mu\text{m}$ )

- «Candidate  $D^0$ » costruite dalla combinazione di una traccia **positiva** ed una **negativa** (cerchiamo il decadimento  $K^- \pi^+$ )



Calcolo della **massa invariante** delle candidate, per individuare quelle compatibili con l'essere vere  $D^0$ :

$$M(K\pi) = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2}$$

- Per le **vere**  $D^0$ , la massa invariante delle due particelle di decadimento è sempre la **massa della  $D^0$**  (a meno degli errori di misura), indipendentemente dai loro impulsi ed energie.
- Questo non è vero per candidate  $D^0$  **di fondo**, che hanno una distribuzione di massa invariante molto più larga

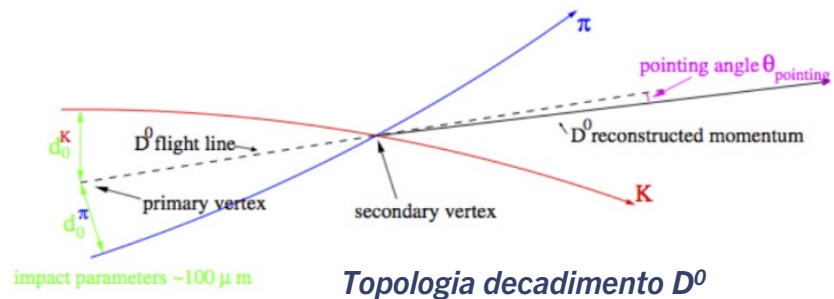
# RICOSTRUZIONE DI PARTICELLE HF: LA $D^0$

È necessario rimuovere il **fondo combinatorio** dal campione di  $D^0$  ricostruite

➤ Casi dove una o entrambe le tracce della coppia non corrispondono a figlie della  $D^0$ , ma sono particelle «casuali»

Per ogni candidata  $D^0$ , applichiamo selezioni su una serie di variabili che sfruttano la topologia peculiare del decadimento  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  (lista non esaustiva):

- ✓ Distanza vertice primario – secondario
- ✓ Impulso trasverso delle tracce figlie
- ✓ Parametro d'impatto ( $d_0$ ) tracce figlie da vertice primario
- ✓ Prodotto dei  $d_0$  delle tracce figlie da vertice primario
- ✓ Coseno dell'angolo di pointing



Negli ultimi anni, in ALICE utilizziamo tecniche di machine learning con modelli basati su BTD al posto di selezioni «rettangolari» come quelle usate nell'hands-on

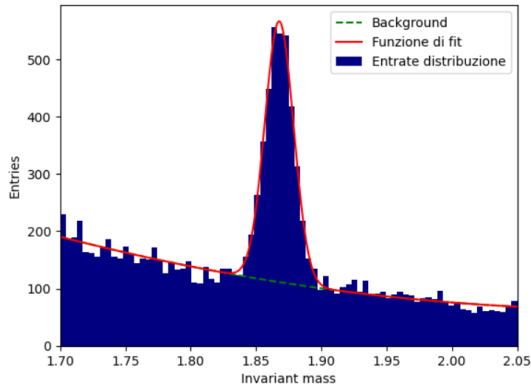
- Considerano anche le relazioni tra le variabili invece di trattarle come indipendenti
- Non così necessari per mesoni  $D^0$  (semplici da ricostruire), ma vitali per le performance di selezione di stati più rari/complessi (mesoni B, barioni charm, jet con c/b, ...)

# RICOSTRUZIONE DI PARTICELLE HF: LA D<sup>0</sup>

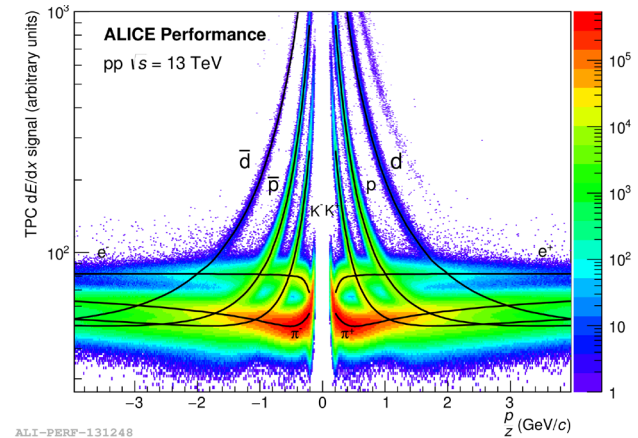
Inoltre, identifichiamo il **tipo di particelle** corrispondente alle figlie della D<sup>0</sup>, basandoci su **informazioni cinematiche** (tempo di volo (TOF), perdita energia specifica nel gas della TPC)

- ✓ Accettiamo solo candidate D<sup>0</sup> con una figlia compatibile con l'ipotesi di **K** ed l'altra compatibile con l'ipotesi di **π**

Invariant-mass distribution



$$M(K\pi) = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2}$$



La quantità di segnale nel picco di massa invariante, dopo le selezioni, è valutata applicando una adeguata funzione di fit alla distribuzione di massa invariante delle candidate selezionate

**Quanto precedentemente detto è ciò che avete fatto nella hands-on session**

- Estrazione del **segnale** (numero di «vere» D<sup>0</sup>) nel campione di dati a disposizione, dopo aver applicato una selezione

# DAL SEGNALE ESTRATTO AL TASSO DI PRODUZIONE DI $D^0$

Numero di mesoni  $D^0$  prodotti per collisione, nell'intervallo di impulso trasverso considerato, a rapidità centrale ( $\rightarrow$  grosso modo, prodotte perpendicolarmente ai fasci):

$$N^{D^0}/ev = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{N_{ev}} \cdot \frac{S_{raw}}{Acc \cdot Eff \cdot BR}$$

Segnale estratto da distribuzioni di massa invariante (nell'hands-on)

Nei dati ricostruiamo sia  $D^0$  che anti- $D^0$   
 $\rightarrow$  Fattore  $\frac{1}{2}$  per contare solo le  $D^0$

«**Branching Ratio**»  $\rightarrow$  Frazione di  $D^0$  con decadimento in  $K^-\pi^+$  (3.95%)

Correzioni di «**accettanza**» ed «**efficienza**», per considerare casi in cui le figlie non rilasciano un segnale pulito o finiscono all'esterno dei detector, e non sono ricostruite

$N^\circ$  collisioni analizzate

# FATTORE DI MODIFICAZIONE NUCLEARE $R_{AA}$

- Torniamo al problema di fisica originario: come collegare le **misure di produzione di una particella** (es. il mesone  $D^0$ ) alle **proprietà del QGP**?

- Introduciamo il **fattore di modificazione nucleare**, o  $R_{AA}$ :

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{\text{coll}} \rangle} \cdot \frac{dN_{AA}^{D^0/ev} / dp_T}{dN_{pp}^{D^0/ev} / dp_T}$$

→ Tasso produzione  $D^0$  in collisioni Pb-Pb

→ Tasso produzione  $D^0$  in collisioni pp (riferimento senza QGP)

↳ Fattore di scala tra collisioni Pb-Pb e pp

- Connessione con la fisica del QGP:
  - **$RAA = 1$**  → Nessun effetto da parte del QGP (o assenza di QGP)
  - **$RAA \neq 1$**  → Modifica della produzione di particelle dovuta a effetti nucleari (tra cui, effetti dell QGP)
- In caso di minor di produzione di particelle ad alto  $p_T$  in collisioni Pb-Pb, ci aspettiamo  $R_{AA} < 1$  in tale regione di impulso trasverso

# RISULTATI DI ALICE SULL' $R_{AA}$ DI MESONI D

Risultati ufficiali di ALICE per  $R_{AA}$  di mesoni D in collisioni Pb-Pb centrali a  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV

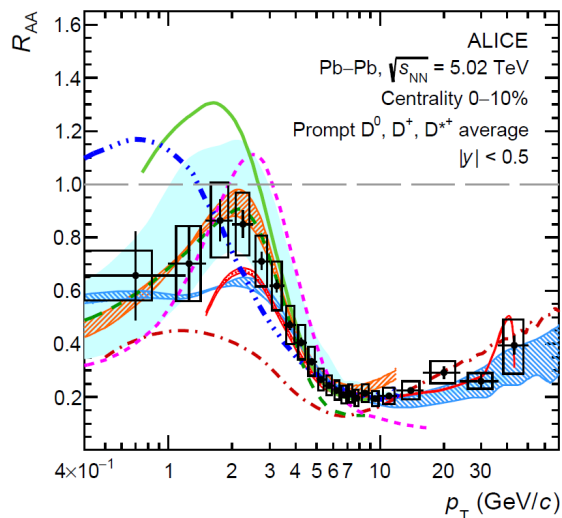
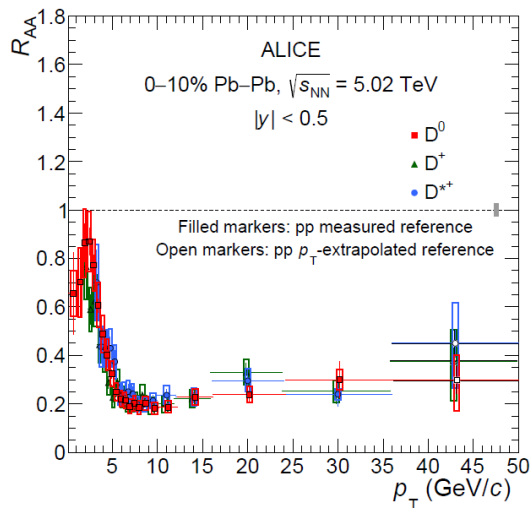
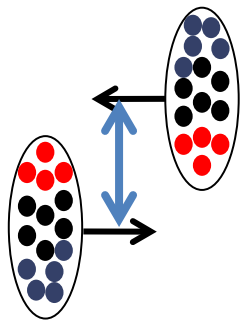


Figure da pubblicazione  
ALICE su JHEP 01 (2022) 174

- Osservata una **forte soppressione** della produzione di D oltre 5-6 GeV/c ( $R_{AA} \approx 0.2$ )
  - Come previsto per via della perdita di energia dei quark charm durante l'attraversamento del QGP
- Il confronto con **modelli teorici** che implementano diversi meccanismi per modellizzare le proprietà del QGP e l'interazione dei quark charm con i suoi costituenti ci permette di capire qual è la **descrizione più adeguata**

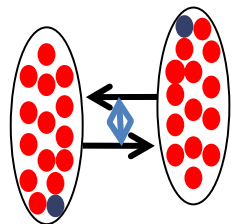
# CENTRALITÀ DI UNA COLLISIONE Pb-Pb

- Abbiamo parlato di collisioni centrali. Cosa significa?



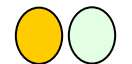
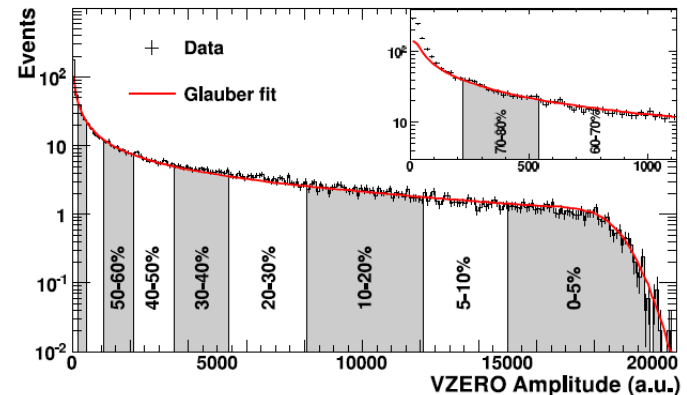
## Collisione periferica

- Grande distanza tra i centri dei nuclei
- Piccolo numero di nucleoni partecipanti
- Poche particelle cariche prodotte (bassa molteplicità)



## Collisione centrale

- Piccola distanza tra i centri dei nuclei
- Alto numero di nucleoni partecipanti
- Molte particelle cariche prodotte (alta molteplicità)
- Maggiori effetti dal QGP (più esteso e duraturo)



periferica



centrale

La centralità di una specifica collisione è valutata tramite **percentile** (rispetto all'intero sample di collisioni Pb-Pb)



# ALTRI APPROCCI PER STUDIARE IL QGP

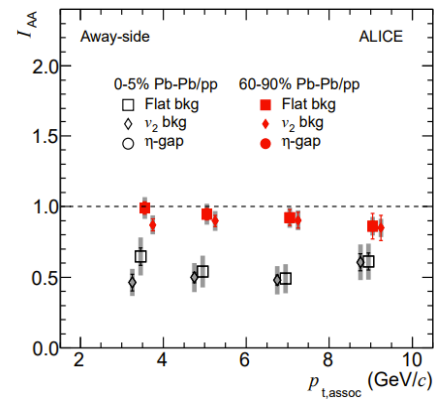
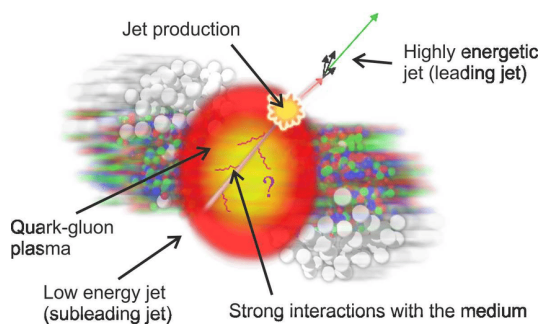
Numerosi altri effetti peculiari («**signature**») permettono di confermare la formazione di QGP in collisioni di ioni pesanti e di investigarne le caratteristiche:

Non li trattiamo per motivi di tempo, accenniamo solo qualche esempio nelle prossime 2-3 slide.

## Jet quenching

Quark (o gluoni) di alta energia producono, nello stato finale, fiotti di particelle collimate («**jet**»).

Se prodotti in coppia vicino alla superficie del QGP, il quark più vicino alla superficie produrrà regolarmente un jet, mentre il quark che deve attraversare l'intero QGP perderà abbastanza energia da non produrre alcun jet nello stato finale («**quenching**» del jet).



# ALTRI APPROCCICI PER STUDIARE IL QGP

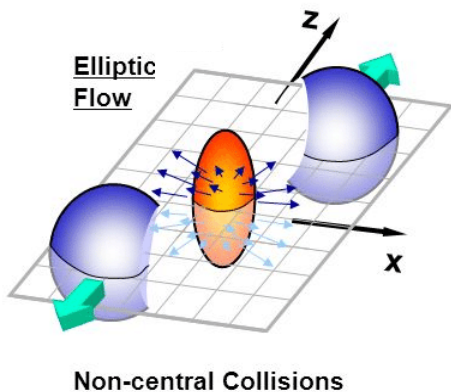
## Presenza di moti collettivi

Il comportamento di quark e gluoni all'interno del QGP segue le leggi dell'**idrodinamica** (come se il QGP fosse un fluido perfetto).

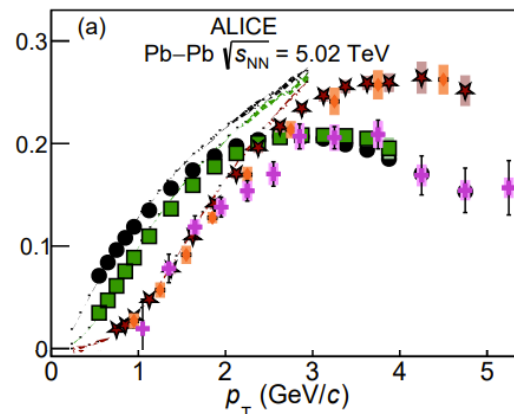
In particolare, in caso di collisioni non centrali, a causa della forma «a mandorla» della zona di interazione tra i nuclei, si producono dei **gradienti di pressione** che «spingono» i partoni lungo la direzione dove la pressione è maggiore.

Come conseguenza, le particelle dello stato finale sono emesse in **direzioni preferenziali** («flusso ellittico»).

L'effetto è quantificabile tramite il coefficiente del 2° ordine ( $v_2$ ) dello sviluppo di Fourier del tasso di produzione di particelle in funzione dell'angolo azimutale



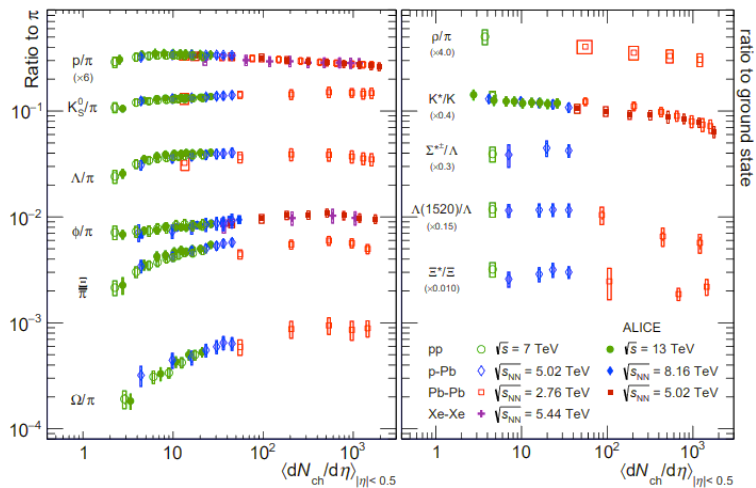
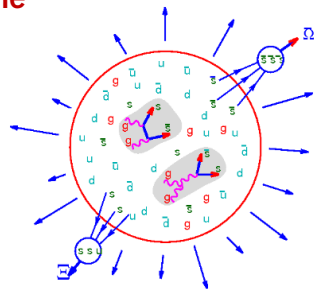
$$\frac{dN}{d\varphi} = \frac{N_0}{2\pi} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n(p_T) \cos [n(\varphi - \Psi_{RP})] \right\} \rightarrow v_2$$
$$v_n = \langle \cos [n(\varphi - \Psi_{RP})] \rangle$$



# ALTRI APPROCCI PER STUDIARE IL QGP

## Aumento di produzione di particelle strane

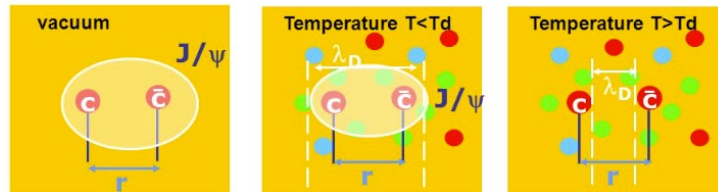
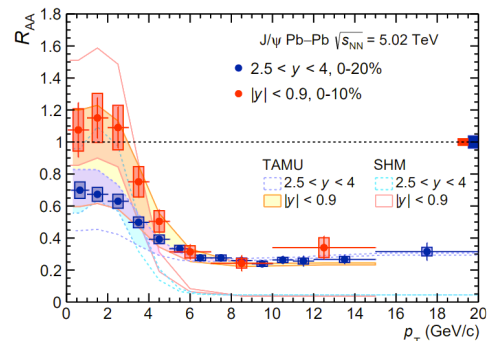
Per via dell'altissima temperatura del WGP, si ha una **produzione «termica»** di coppie di quark **strange-antistrange**, che si traduce, nello stato finale, in un'aumento dell'abbondanza di **adroni con quark strange**



## Soppressione (e rigenerazione) della $J/\psi$ (stato $c\bar{c}$ )

Il gran numero di quark e gluoni presenti nel QGP «schermo» il potenziale di colore che mantiene legati i quark  $c$  e  $\bar{c}$  negli adroni  $J/\psi$  e li libera, facendo **dissolvere** tali adroni.

A basso  $p_T$ , se sufficientemente abbondanti, parte di tali coppie si ricombina in  $J/\psi$  dopo la fase di QGP «**rigenerandole**»

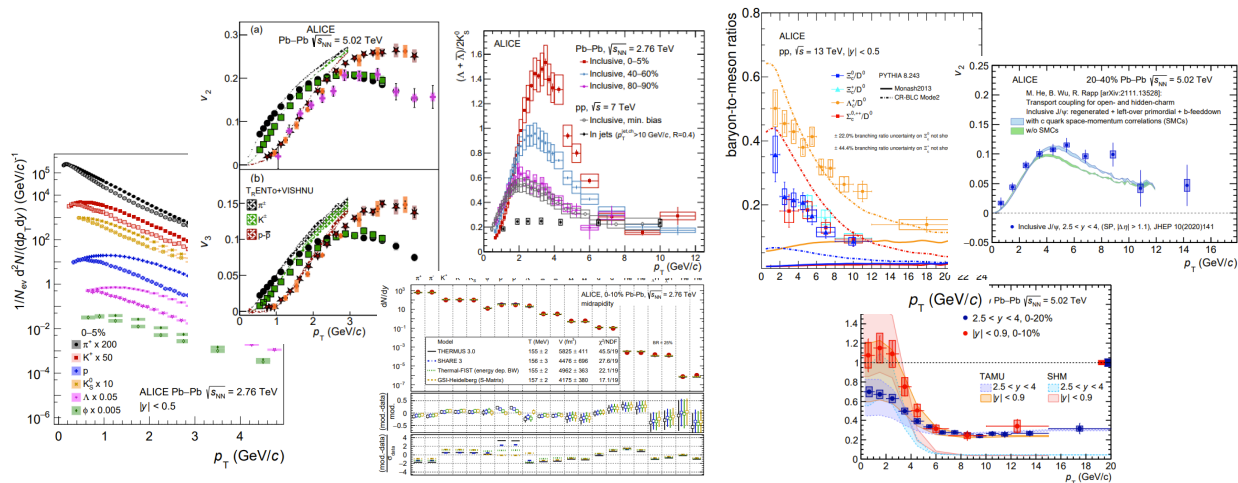


# ALICE REVIEW PAPER

Una rassegna completa dei **principali risultati di fisica** ottenuti da ALICE analizzando collisioni **pp, p-Pb, Pb-Pb** del Run 2 di LHC (2015-2018) è disponibile nel “**review paper**” pubblicato quest’anno:

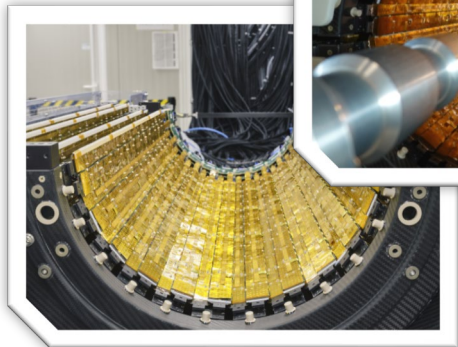
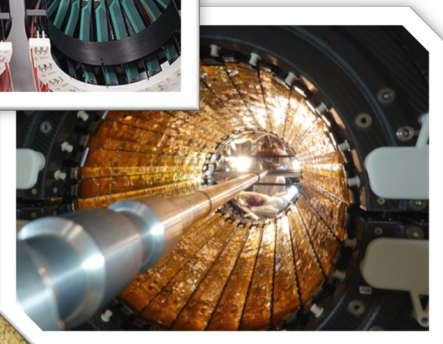
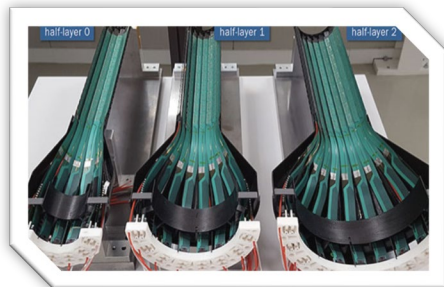
## The ALICE experiment -- A journey through QCD

Eur. Phys. J. C 84 (2024) 813



# L'UPGRADE DI ALICE PER IL RUN 3 DI LHC

- Nel frattempo, la raccolta e l'analisi delle collisioni del **Run 3** di LHC (iniziato nel 2022) è in corso
- Detector ampiamente rivisitato ed aggiornato rispetto al Run 2 (**ALICE 2**)



- Tra gli upgrade principali, **nuovo rivelatore di vertice (ITS 2)**
  - Precisione molto migliorata su parametro d'impatto e ricostruzione dei vertici di decadimento displaced
  - Grande boost per la fisica dell'heavy flavour
  - Assemblato in parte a Bari

