



IFAE 2017



*XVI Incontri di Fisica della Alte Energie, 19-21
Aprile, Trieste*

*Stato dell'arte e prospettive della
fisica degli ioni pesanti alle alte
energie*

Giacomo Volpe*

**Università e INFN, Bari*

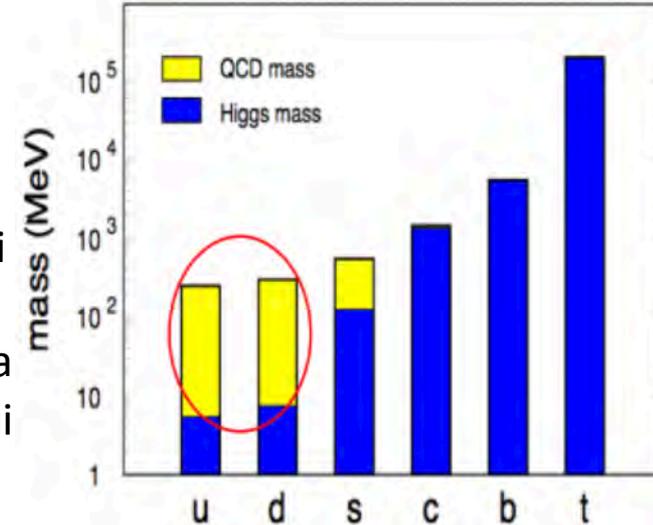
Sommario

- Introduzione
- Panoramica dei risultati ad LHC (**selezione personale**)
 - **Sonde a bassa energia**
 - Molteplicità e densità di energia
 - Flusso radiale
 - Meccanismi di adronizzazione (rapporti adronici).
 - Flusso ellittico
 - **Sonde ad alta energia**
 - Jet quenching (R_{AA})
 - Stati di quarkonio
 - Quark pesanti
- Prospettive future e *upgrade* apparati sperimentali (ALICE)
- conclusioni

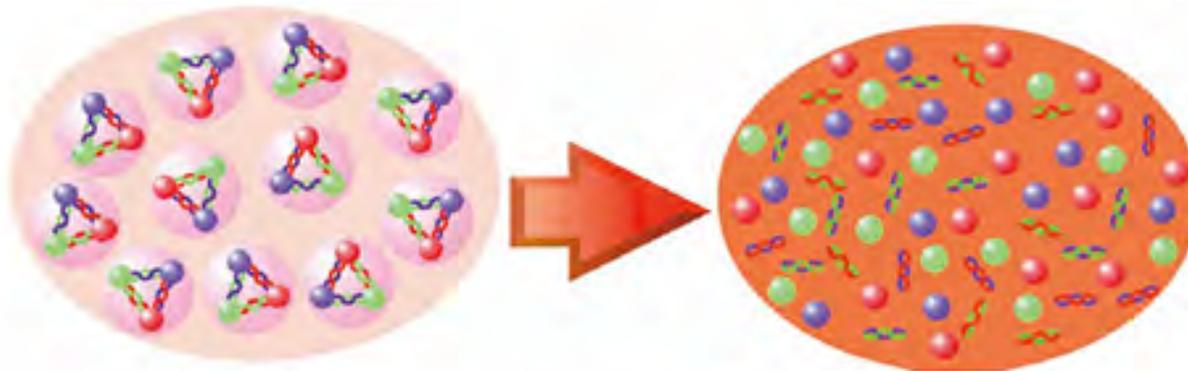
Collisioni tra nuclei pesanti: perché?

- La cromodinamica quantistica (QCD) è la teoria delle interazioni forti
 - Quark e gluoni confinati negli adroni
 - Simmetria chirale spontaneamente rotta: **contributo maggiore alla massa dei nucleoni.**
- Questioni aperte:
 - Transizione di fase adrone-partone.
 - Comportamento della materia adronica in condizioni di altissima temperatura e densità di energia.
- Ad alte temperature e densità di energia la materia adronica si trova sotto forma di plasma di quark e gluoni (QGP), in cui i quark e gluoni non sono confinati negli adroni.
 - Ripristino della simmetria chirale.
 - Da calcoli di QCD su reticolo → valori critici transizione di fase: $T_c \approx 170 \text{ MeV}$, $\varepsilon_c \approx 1 \text{ GeV/fm}^3$.

Nucl. Phys. A750 (2005) 84–97



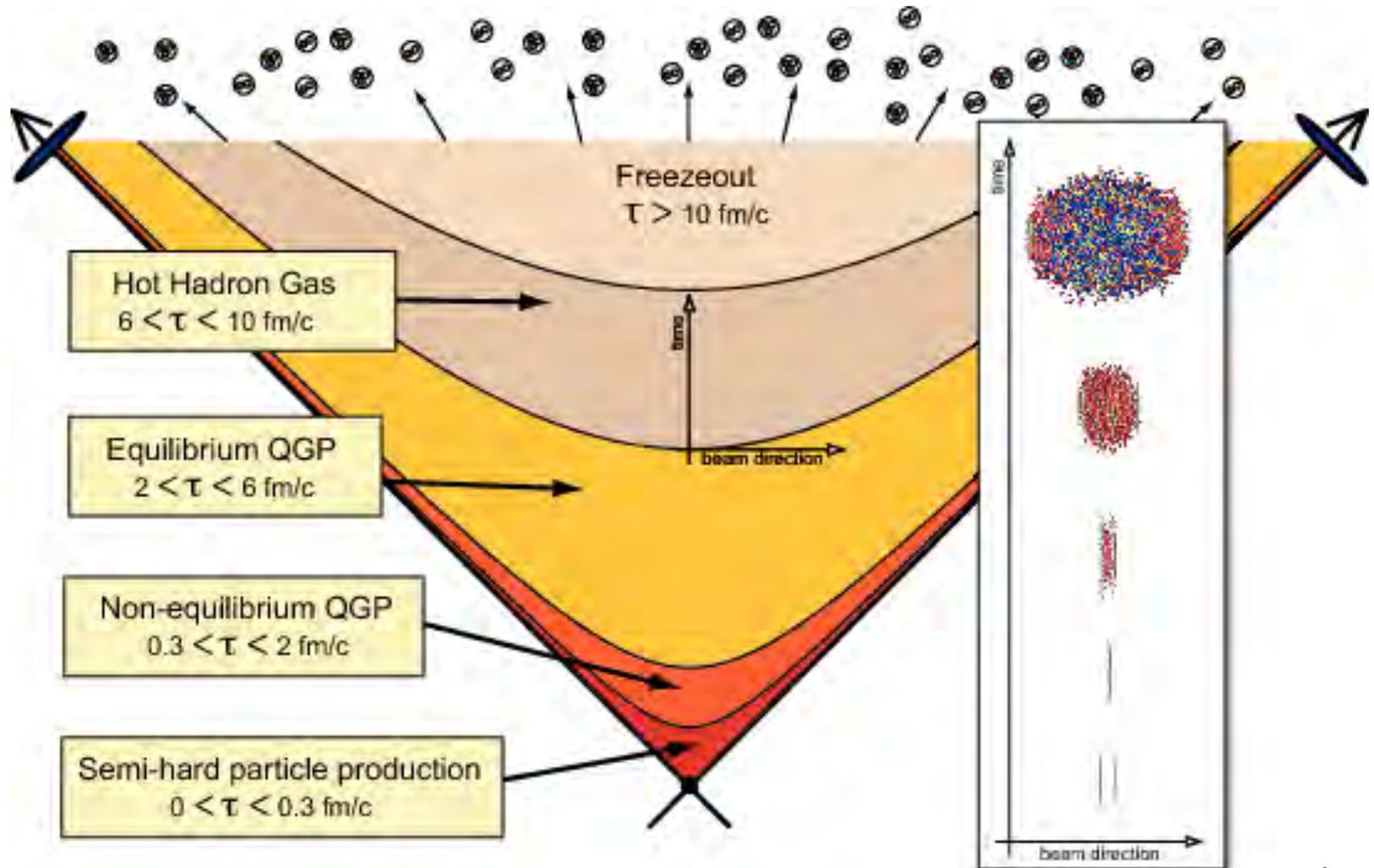
Materia nucleare ordinaria: quark confinati nei nucleoni



QGP: quark e gluoni deconfinati sono liberi di muoversi

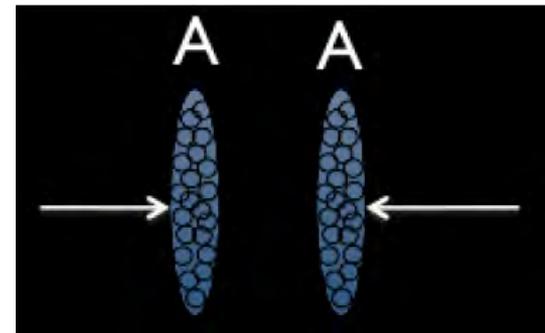
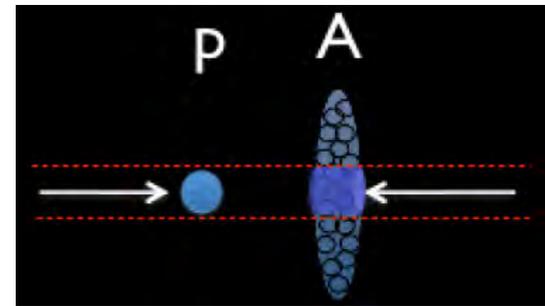
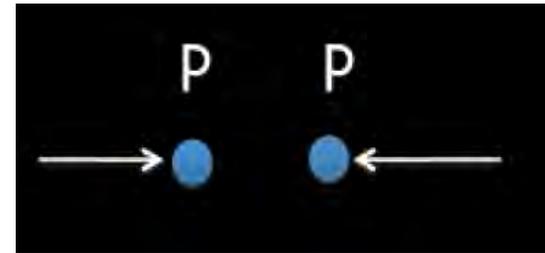
Collisioni tra nuclei pesanti: perché?

- Per studiare in laboratorio questo stato della materia si fanno collidere nuclei pesanti ad energie relativistiche



Scenario sperimentale

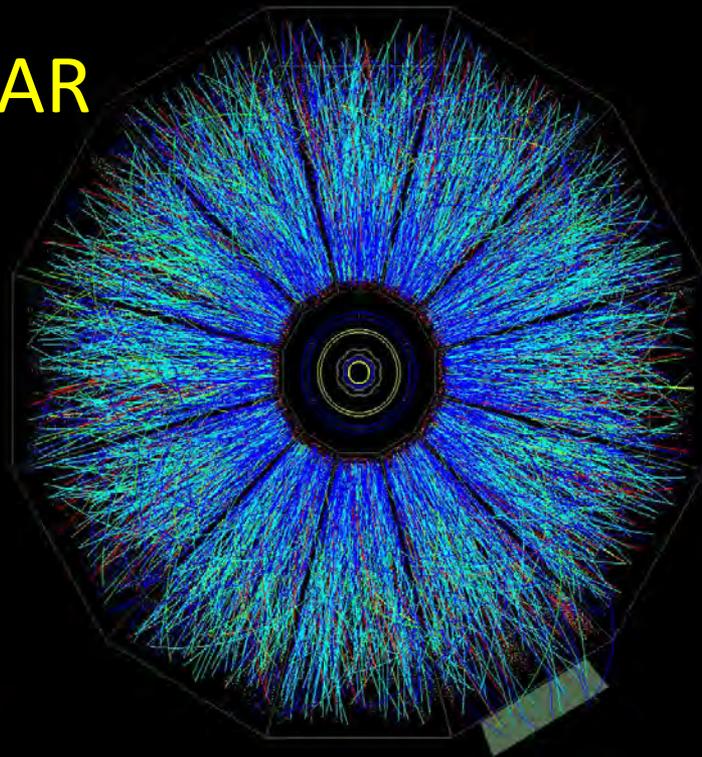
- Collisioni protone-protone:
 - riferimento di QCD ad alta energia.
 - ad LHC pp a $\sqrt{s} = 0.9 \text{ TeV}, 2.76 \text{ TeV}, 7 \text{ TeV}, 8 \text{ TeV}, 13 \text{ TeV}$ (2009, 2010, 2011, 2012, 2015, 2016)
- collisioni protone-nucleo:
 - effetti di stato iniziale/materia nucleare fredda.
 - a LHC p-Pb at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}, 8 \text{ TeV}$ (2012, 2013, 2016)
- collisioni nucleo-nucleo:
 - dove si forma il QGP!
 - ad LHC Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}, 5.02 \text{ TeV}$ (2010, 2011, 2015)
 - a RHIC Au-Au $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



$L_{\text{int}} (\text{Pb-Pb}) \approx 1 \text{ nb}^{-1}$ in Run-1 and Run-2 (2010-18)

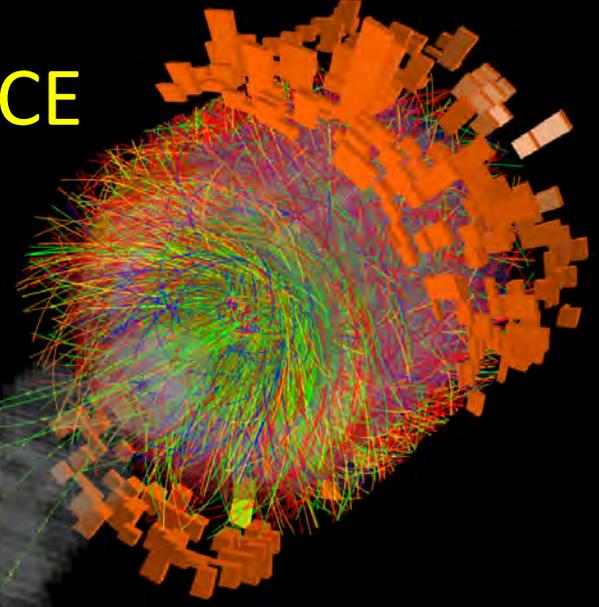
QGP anche nei piccoli sistemi collidenti?! (si veda talk di L. Bianchi)

STAR



ALICE

ALICE

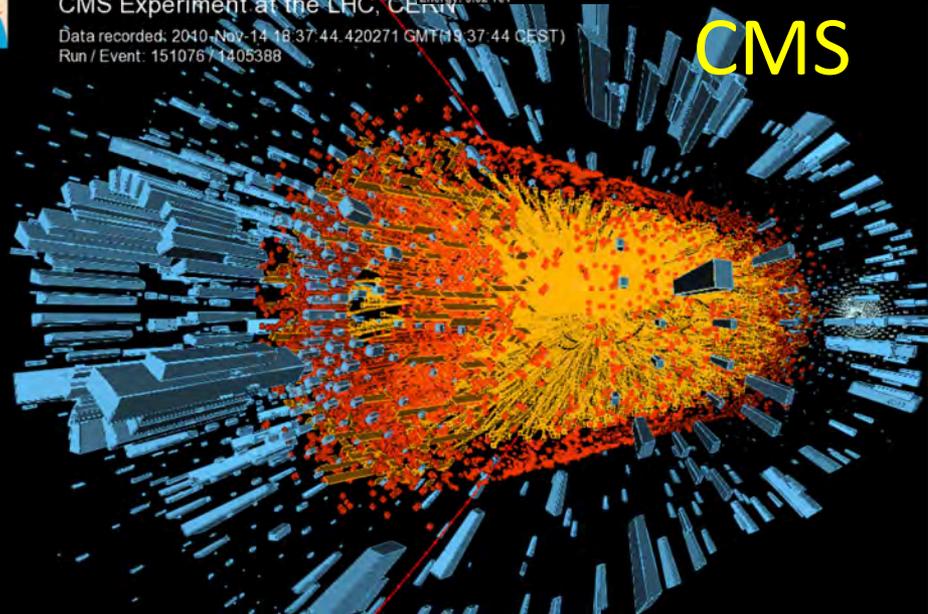


Run:244918
Timestamp:2015-11-25 11:25:36(UTC)
System: Pb-Pb
Energy: 5.02 TeV



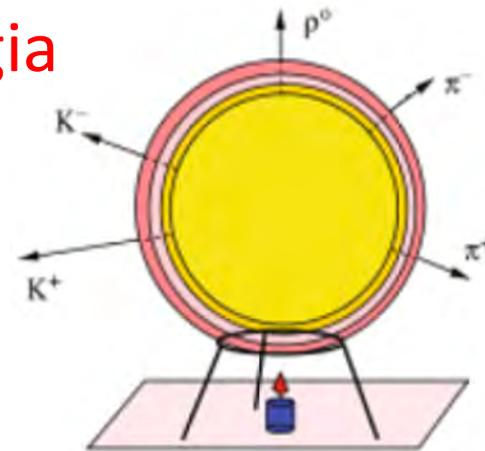
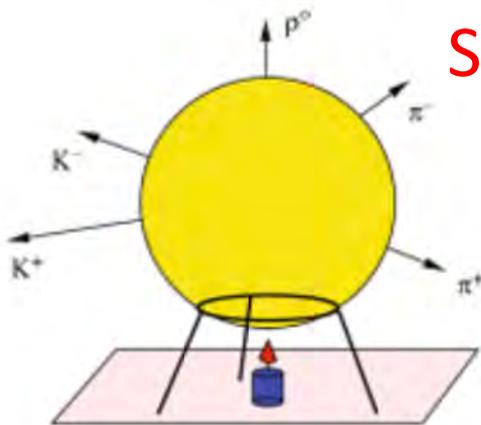
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2010-Nov-14 18:37:44.420271 GMT(19:37:44 CEST)
Run / Event: 151076 / 1405388

CMS



Come studiamo il QGP

Sonde a bassa energia

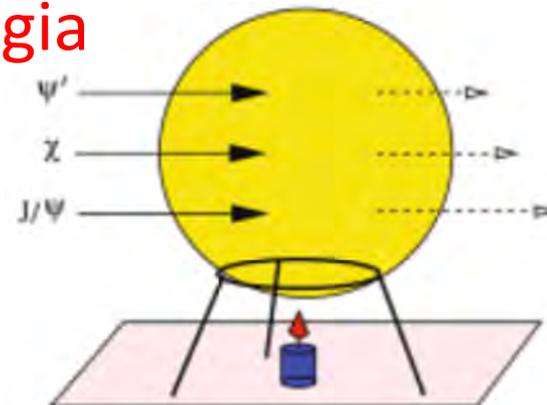
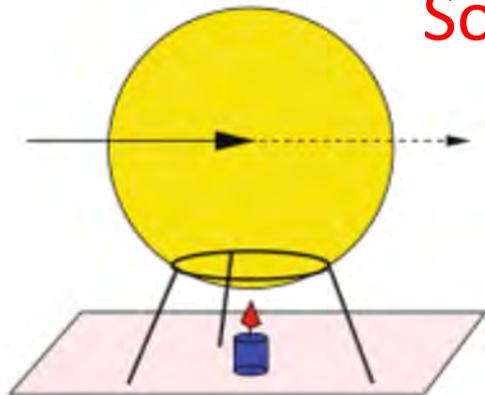


Radiazione di adroni e fotoni

- *Molteplicità, spettri d'impulso, composizione di particelle.....*

Flusso radiale e asimmetria azimutale

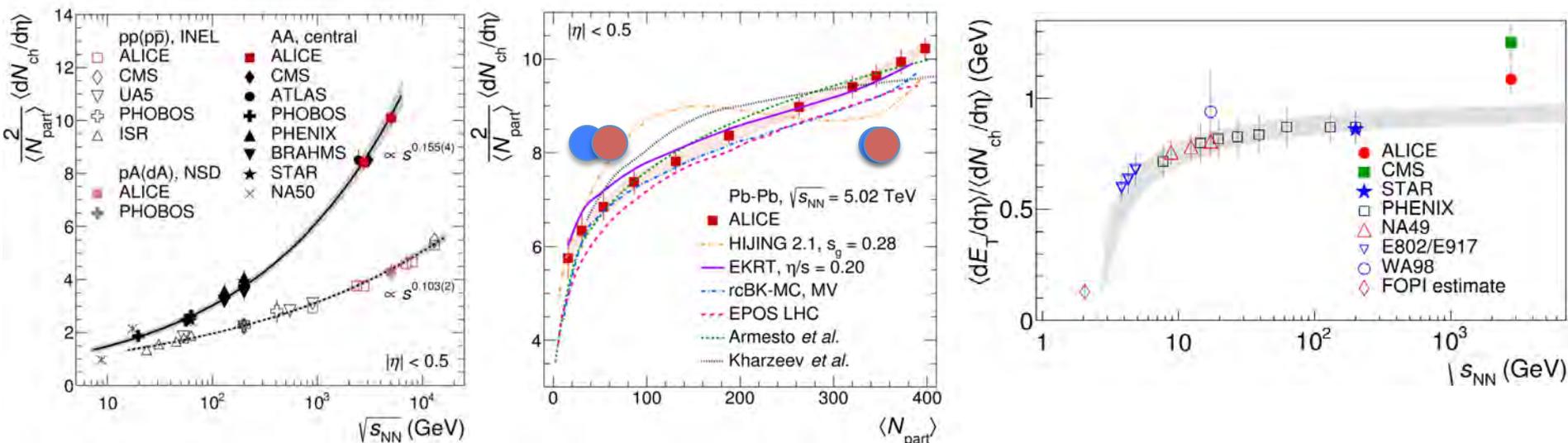
Sonde ad alta energia



Perdita di energia di quark e gluoni

Quark pesanti, soppressione stati di quarkonio

Molteplicità di particelle cariche e densità di energia



• $dN_{ch}/d\eta / (N_{part}/2)$ aumenta con l'energia nel centro di massa

– pp: $\approx s^{0.103}$

– centrali A+A: $\approx s^{0.155}$

• Stessa dipendenza dalla centralità come a RHIC

**Si veda talk
di V. Zaccolo**

**Formula di Bjorken
(Phys. Rev. D27, (1983) 140)**

$$\varepsilon = \frac{dE_T / dy}{\tau_0 \pi R^2} \approx \frac{3}{2} \langle m_T \rangle \frac{dN_{ch} / d\eta}{\tau_0 \pi R^2} \longrightarrow \varepsilon \approx 15 \text{ GeV/fm}^3$$

Densità di energia iniziale ben al di sopra della densità critica ε_c , sia ad LHC che a RHIC

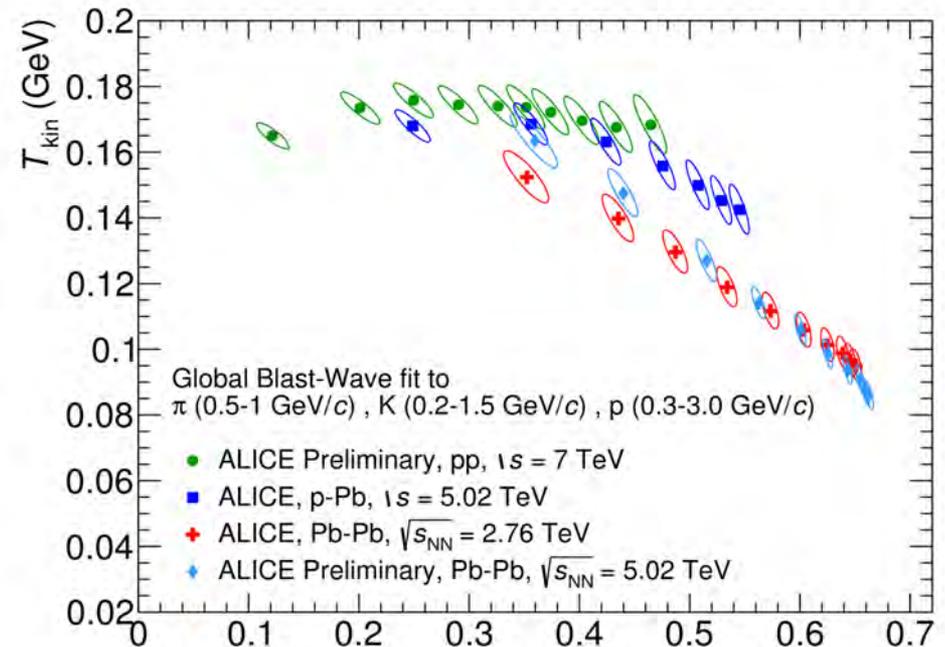
Espansione radiale

- Le distribuzioni di impulso trasverso risultano la combinazione del **moto di agitazione termica** (T) e dell'**espansione collettiva radiale** (β) al freeze-out (descrizione idrodinamica, Phys. Rev. C48, 2462 (1993))
- Velocità di espansione maggiore nelle collisioni centrali ($\beta \approx 0.67$).
- Temperatura di freeze-out in collisioni Pb-Pb minore **di 100 MeV**.

$$m_T = \sqrt{m^2 + p_T^2}$$

$$\frac{d^2 N_j}{m_T dy dm_T} = \int_0^{R_G} A_j m_T \cdot K_1 \left(\frac{m_T \cosh \rho}{T} \right) \cdot I_0 \left(\frac{p_T \sinh \rho}{T} \right) r dr$$

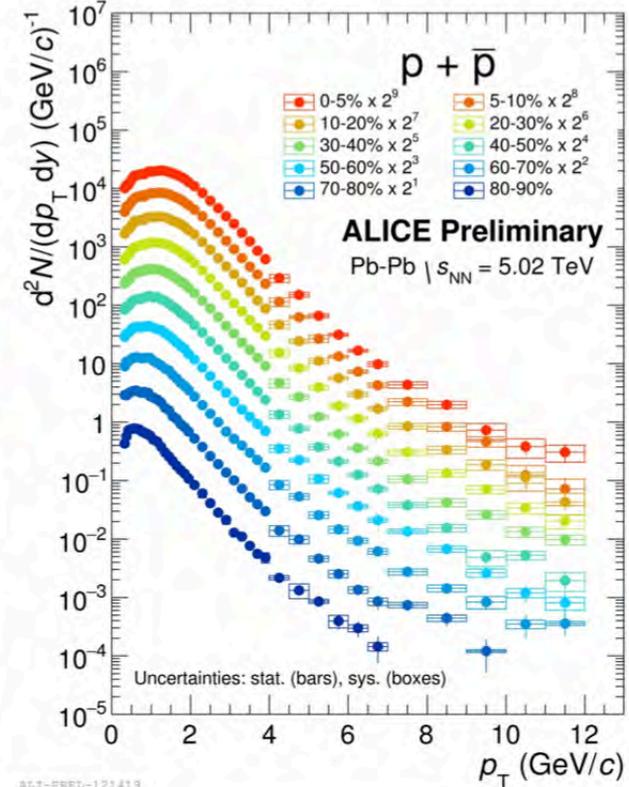
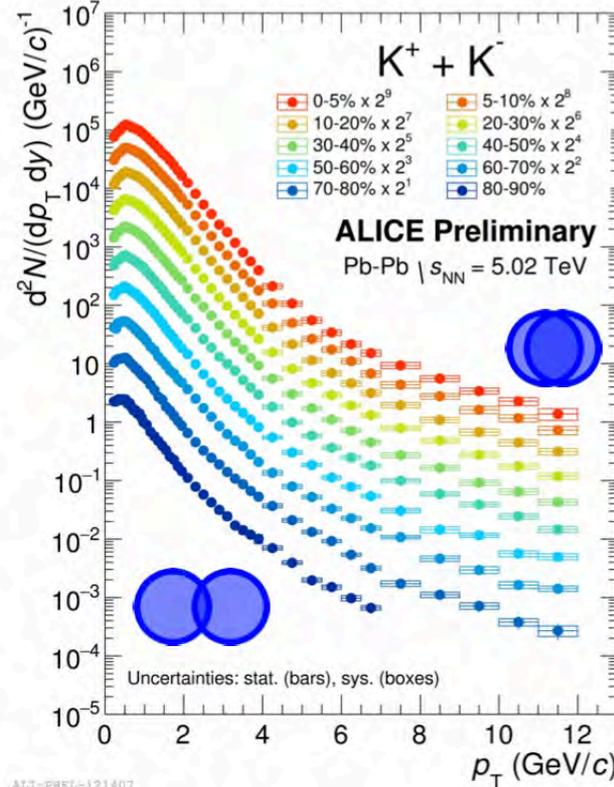
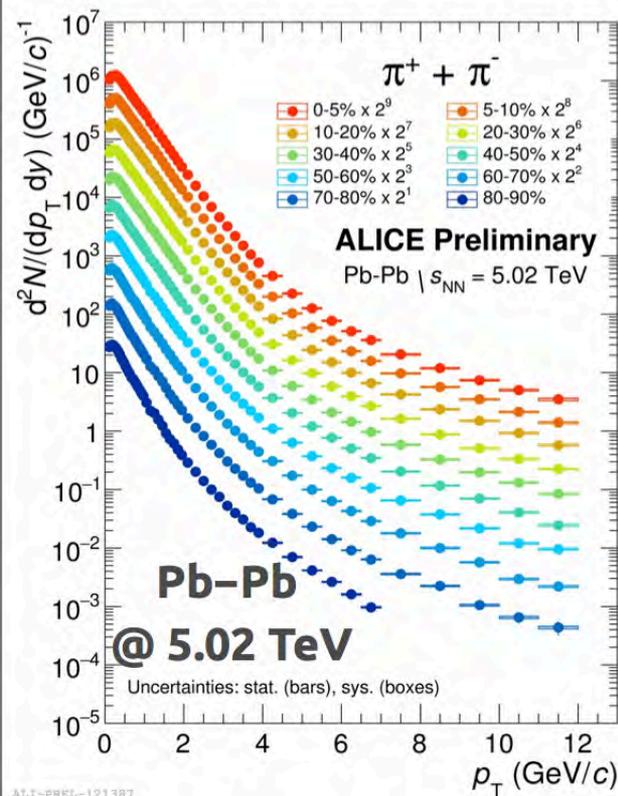
$$\rho(r) = \tanh^{-1} \beta_{\perp}(r) \quad \beta_{\perp}(r) = \beta_s \left[\frac{r}{R_G} \right]^{n(=1)} \quad r \leq R_G$$



ALI-PREL-122512



Spettri di impulso di particelle cariche

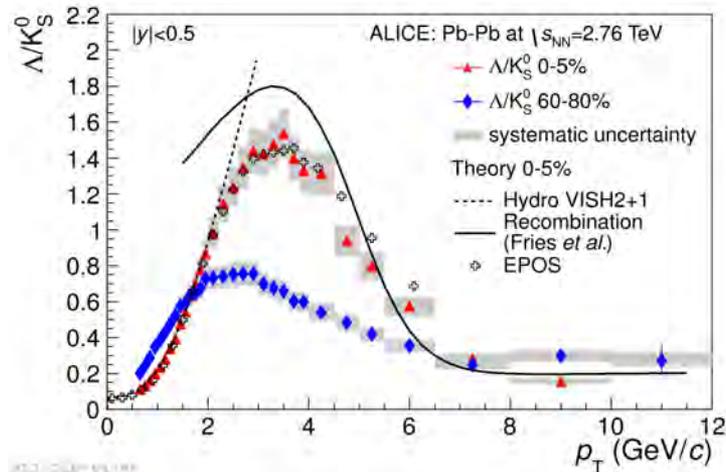
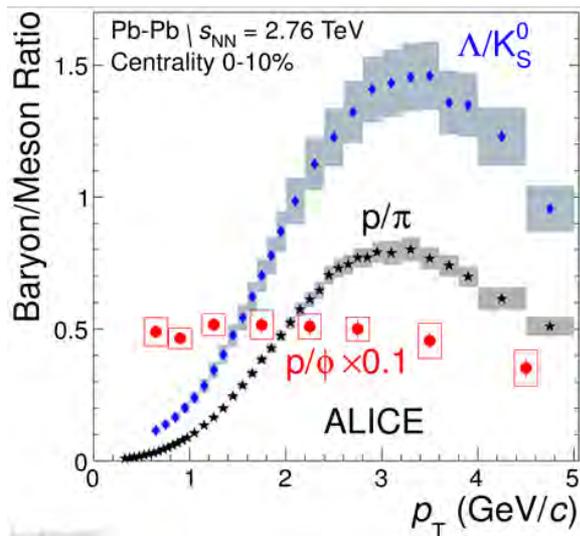
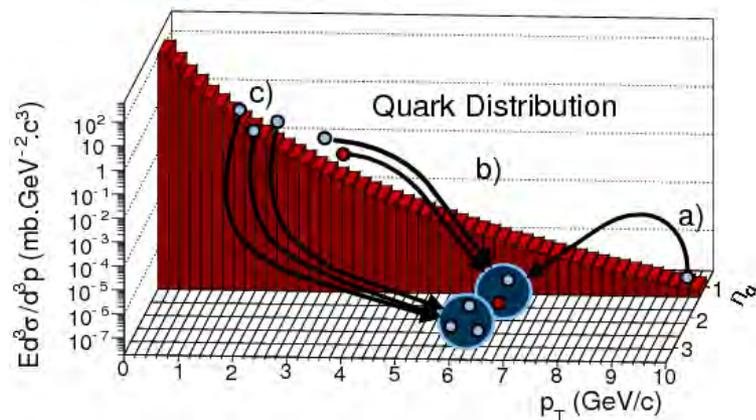


- Pendenza degli spettri diminuisce all'aumentare della centralità.
- L'effetto è maggiore per le particelle più pesanti.
- In accordo con la descrizione idrodinamica.
 - A parità di velocità particelle più pesanti hanno impulso maggiore.

Rapporto barioni/mesoni

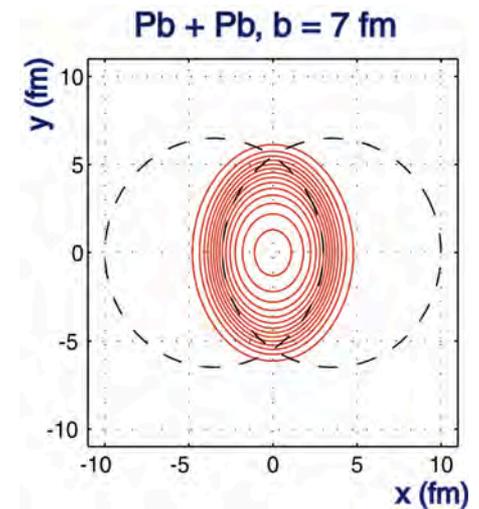
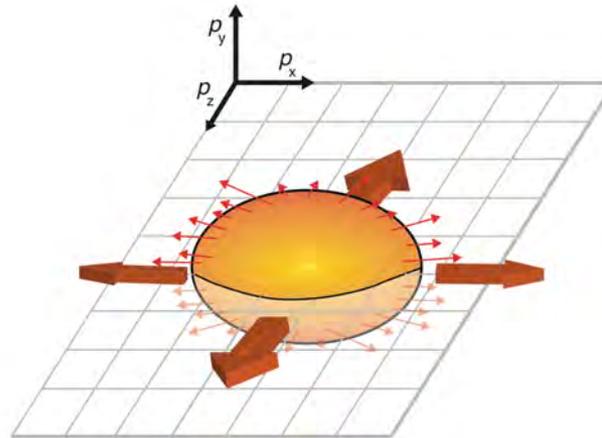
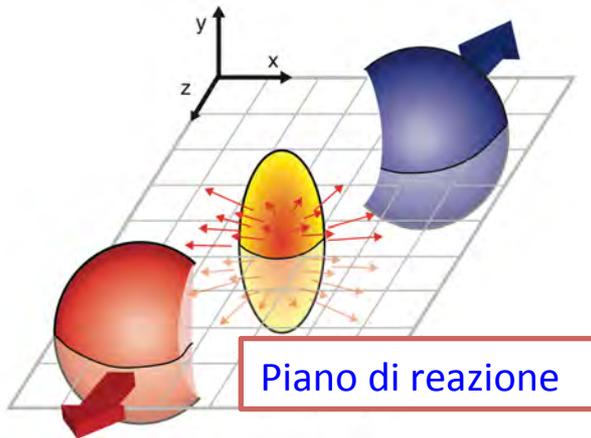
Modelli di produzione di particelle:

- Frammetazione partonica → barioni soppressi
- Ricombinazione/coalescenza: quark vicini nello spazio delle fasi, si combinano per formare mesoni e barioni [Phys. Rev. Lett. 90,202303,Phys. Rev. Lett. 90, 202302].
→ incremento barionico



- L'idrodinamica descrive solo la risalita $p_T < 2$ GeV/c
 - Il modello di ricombinazione riproduce l'effetto ma con una sovrastima
 - EPOS [PRL 109, 102301 (2012)] fornisce una buona descrizione dei dati (con flusso)
- p/ϕ può essere spiegato dall'idrodinamica: masse simili, simili forme spettrali
→ Può essere anche spiegata da modelli basati sulla ricombinazione [e.g.: arXiv:1502.06213]

Flusso ellittico



Le collisioni non centrali presentano un'anisotropia spaziale



La pressione della "fireball" calda influenza la distribuzione d'impulso delle particelle emesse



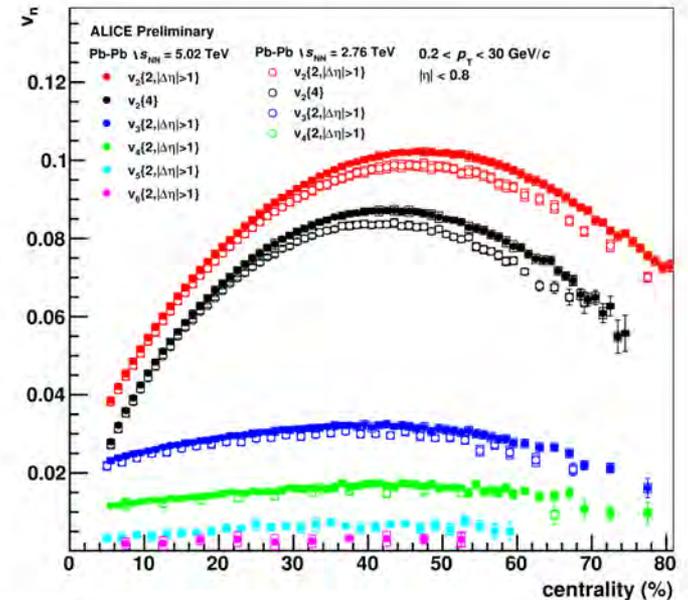
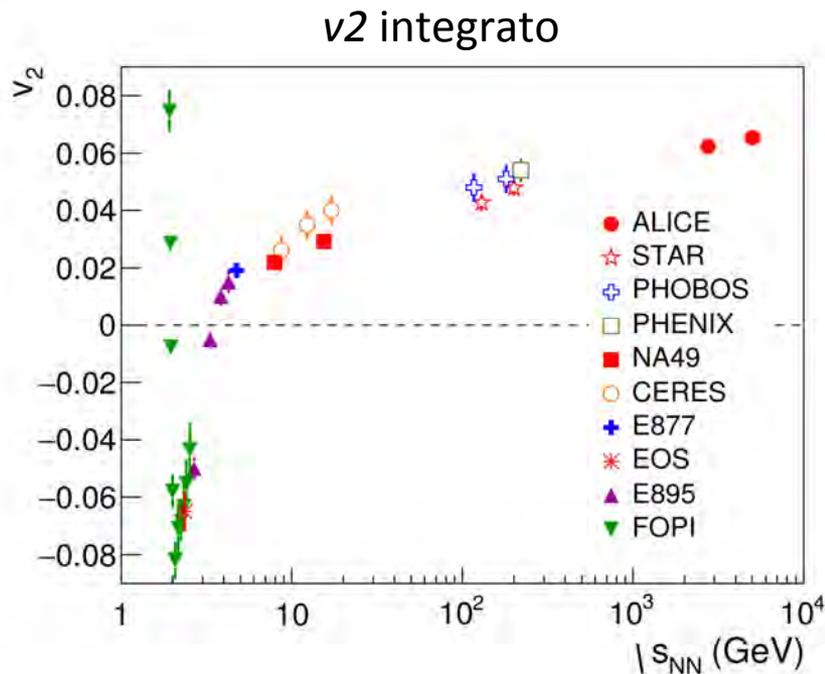
Anisotropia nella spazio degli impulsi

$$\frac{dN}{d(\varphi - \psi_{RP})} \propto 1 + 2 \sum_{n=1} v_n \cos(n[\varphi - \psi_{RP}])$$

$$v_2 = \langle \cos[2(\varphi - \psi_{RP})] \rangle$$

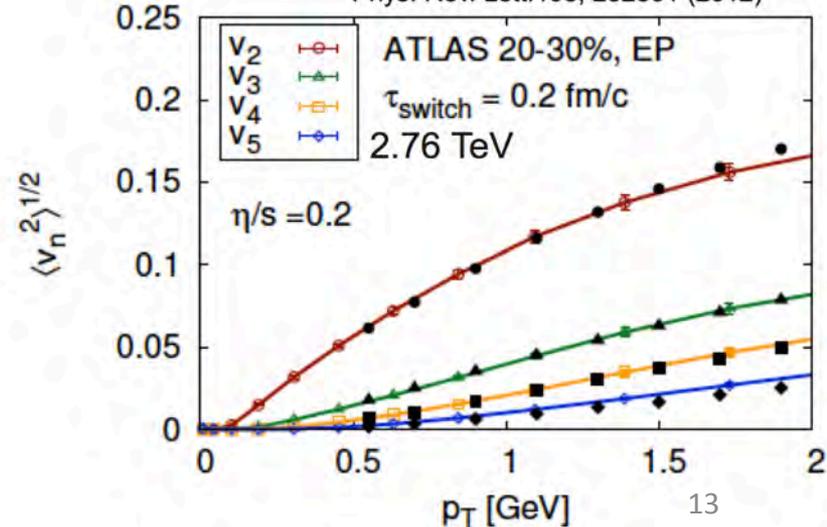
- L'anisotropia viene quantificata in termini dei **coefficienti di Fourier dello spettro d'impulso trasverso**.
- Il termine di secondo grado **v_2** domina, è chiamato flusso ellittico.

Flusso ellittico

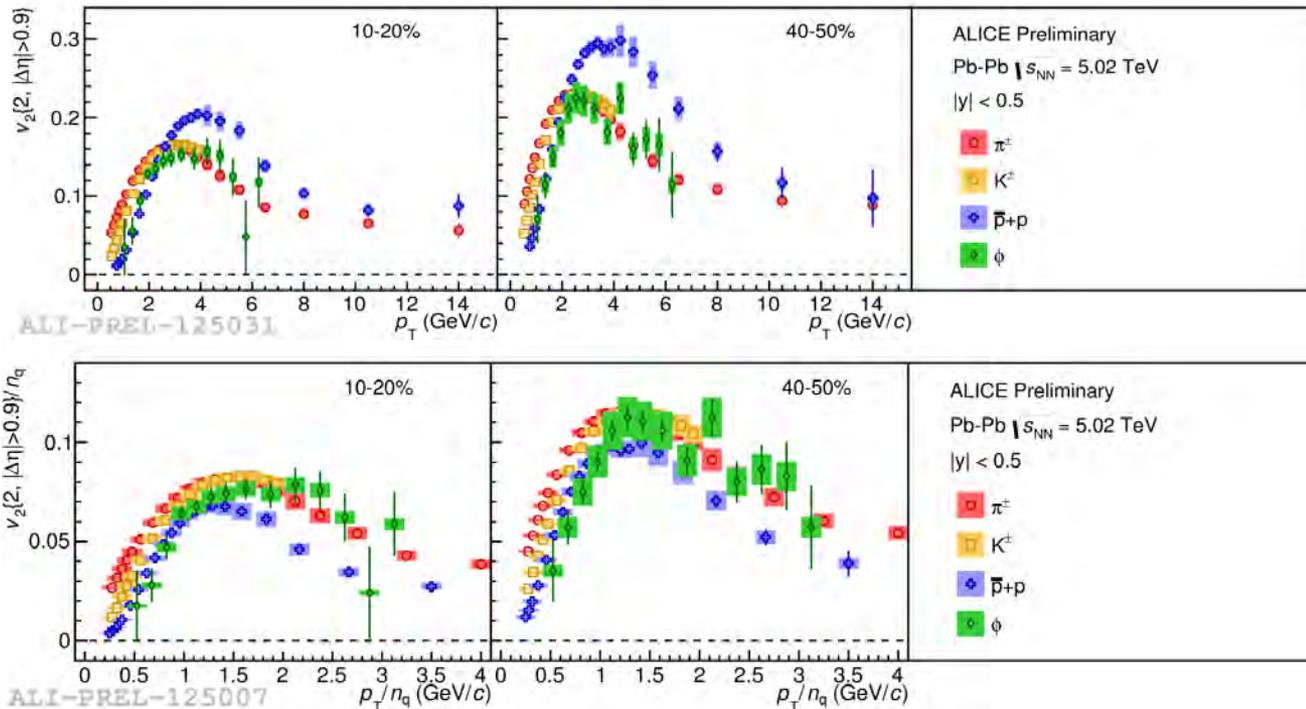


- Il flusso ellittico ad **LHC** è $\approx 30\%$ maggiore che a **RHIC**
- Il trasferimento della asimmetria delle coordinate agli impulsi porta informazioni circa la viscosità del fluido η .
 - η/s è il parametro rilevante nella teoria idrodinamica (s densità di entropia).
 - Il sistema prodotto ad LHC possiede una viscosità molto bassa $\eta/s = 0.2$ (liquido perfetto).

B.Schenke, P.Tribeedy and R.Venugopalan, Phys. Rev. Lett.108, 252301 (2012)



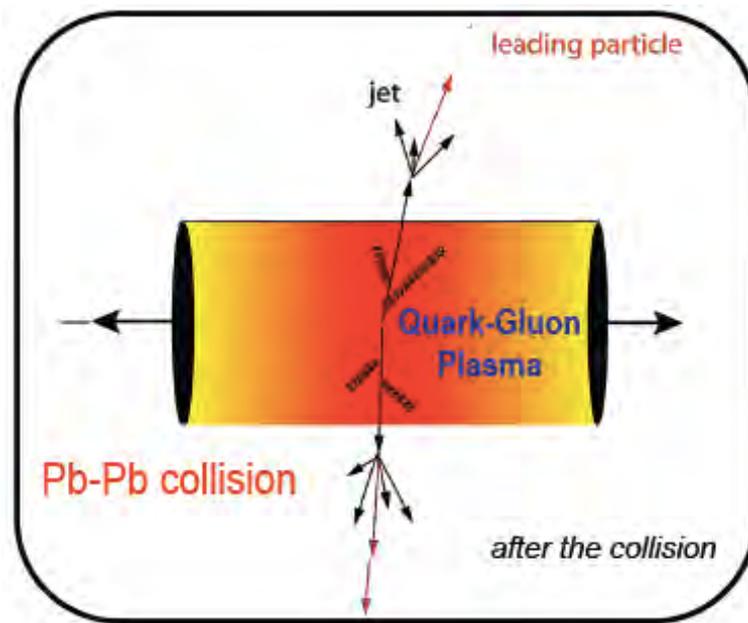
Flusso ellittico



- Per $p_T < 2$ GeV/c: ordinamento per massa \rightarrow interazione tra flusso radiale e ellittico che modifica il $v_2(p_T)$ secondo le massa delle particelle.
 - Pioni e kaoni descritti bene dai modelli idrodinamici.
- Per $3 < p_T < 8$ GeV/c:
 - ordinamento per tipo (mesoni, barioni)
 - Φ è un mesone si massa simile a quella del protone.
 - Il v_2 del mesone segue quello del protone a bassi p_T , quello del pioni a p_T intermedi
 - A RHIC osservato **“scaling” con il numero di quark costituenti** [e.g.:Phys. Rev. C 75 (2007)] \rightarrow produzione di particelle per **ricombinazione**
 - Ad LHC deviazione dallo **scaling** del $\approx \pm 20$ %

Sonde ad alta energia

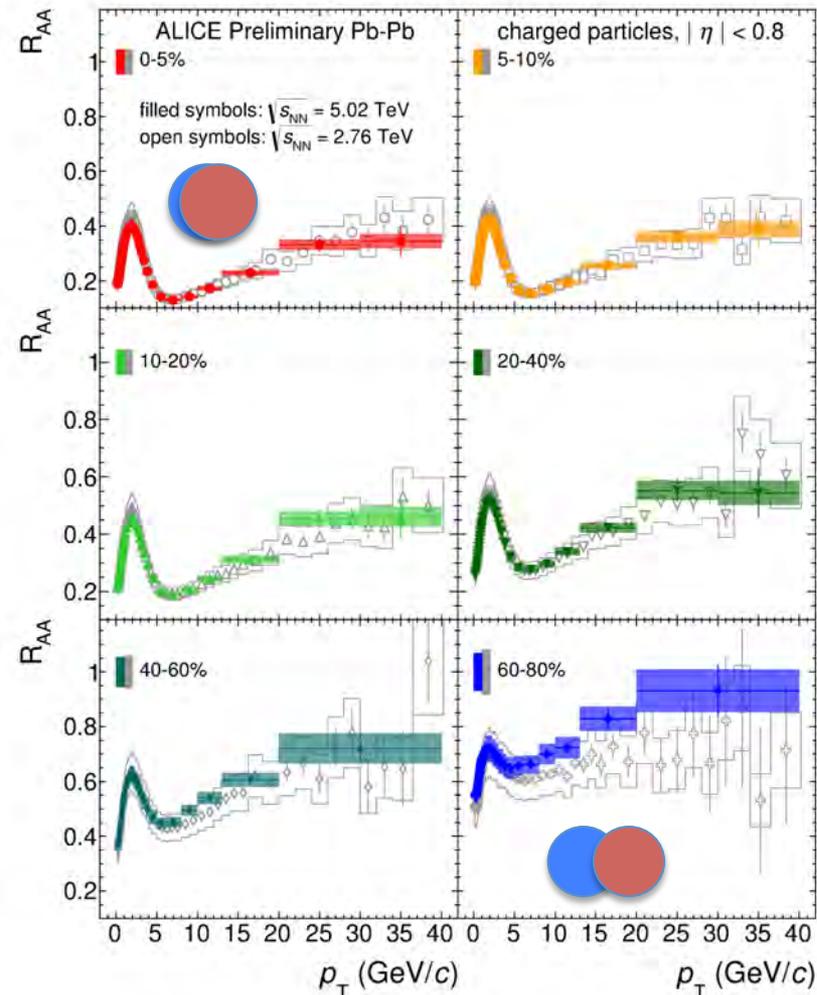
- Adroni o partoni caratterizzati da una scala *dura* (massa o impulso)
- prodotti nei primi istanti della collisione in *scattering* tra partoni ad alto impulso trasferito
 - particelle ad alto p_T
 - Stati di quarkonio
 - quark pesanti (charm e beauty)
 - *jet*
- I processi ad alta energia servono come calibrazione (seguono QCD perturbativa)
- Attraversano il mezzo e interagiscono attraverso l'interazione forte
- La soppressione fornisce indicazioni sulla densità del mezzo attraversato.
- Scenario generale: la perdita di energia avviene attraverso emissione di gluoni (*gluonstrahlung*) e per collisione.



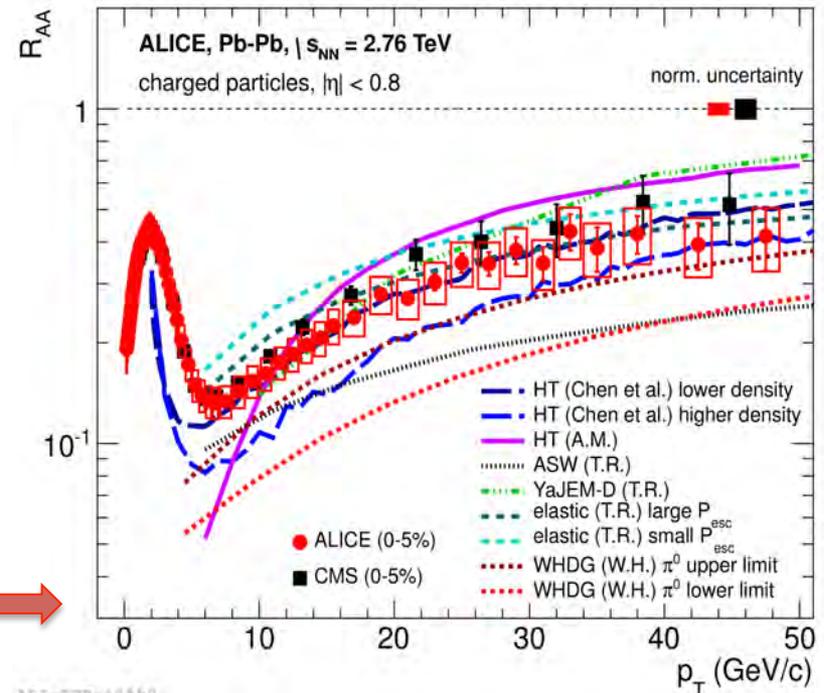
Semplice osservabile: **fattore di modificazione nucleare (R_{AA}) della *leading particle* dei *jet***

$$R_{AA}(p_T) = \frac{d^2 N^{AA} / dy dp_T}{\langle N_{coll} \rangle d^2 N^{pp} / dy dp_T}$$

R_{AA} delle particelle cariche

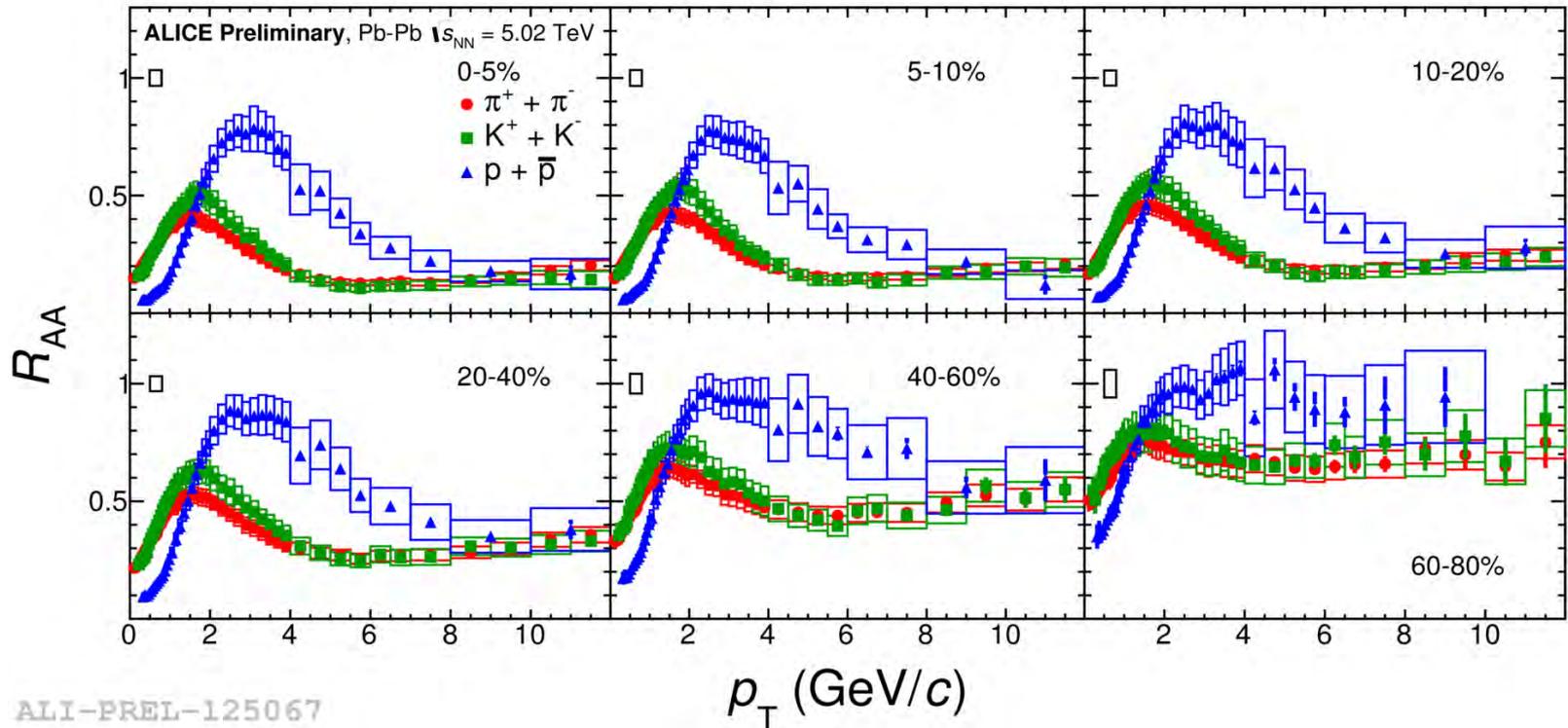


- La soppressione delle particelle ad alto impulso aumenta con la centralità (**jet quenching**).
- Non c'è una evoluzione significativa con l'energia
- Minimo a 6-8 GeV/c
- Risalita e appiattimento ad alti p_T



Vincolo per i modelli teorici →

R_{AA} delle particelle identificate



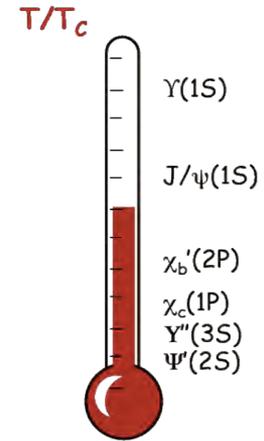
ALI-PREL-125067

- per $p_T < \approx 8 - 10$ GeV/c: R_{AA} di π and K compatibili fra loro e minori R_{AA} del p.
- Ad alti p_T : R_{AA} delle tre specie simile fra loro. Le tre specie ugualmente sopresse ad alti p_T e per tutte le centralità.

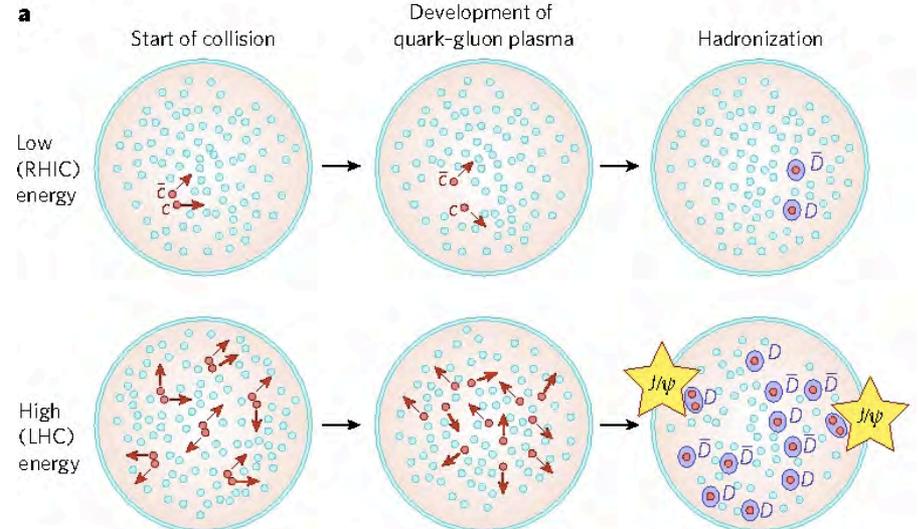
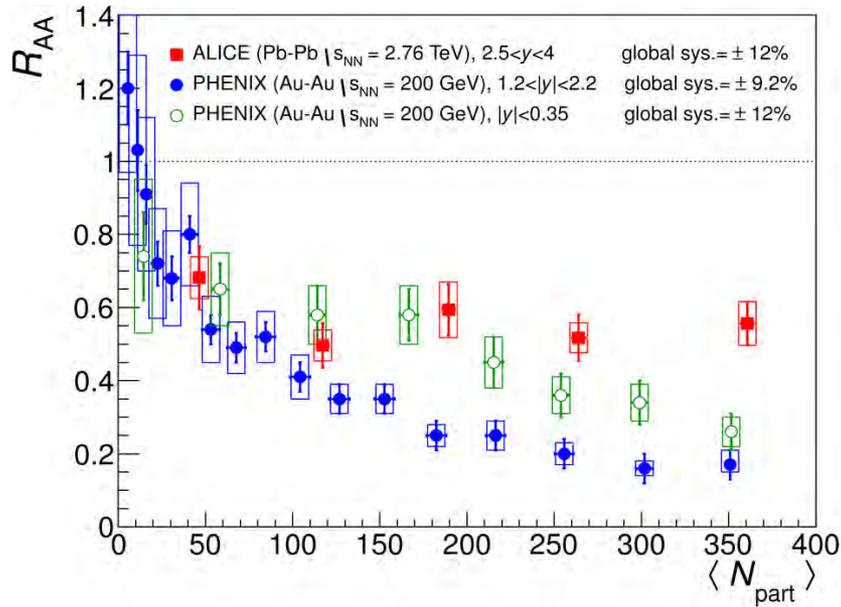
Stati di quarkonio come segnale di QGP

- Soppressione del charmonio
 - Lo schermo di colore nella materia de-confinata indebolisce il legame c anti-c (b anti-b)
 - La temperatura di dissociazione dipende dall'energia di legame \rightarrow termometro del QGP
- **Rigenerazione** del charmonio:
 - J/ ψ da ricombinazione di quark?

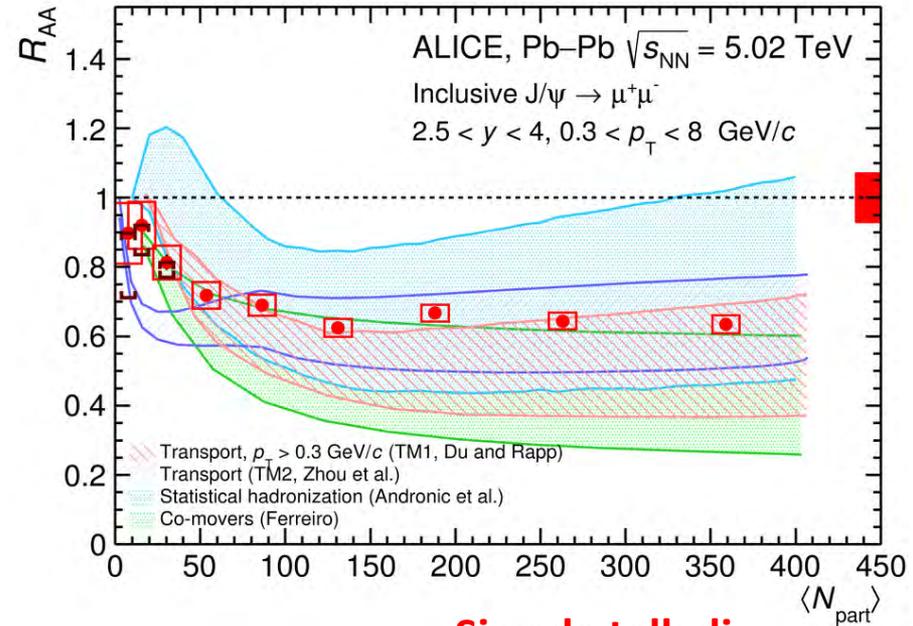
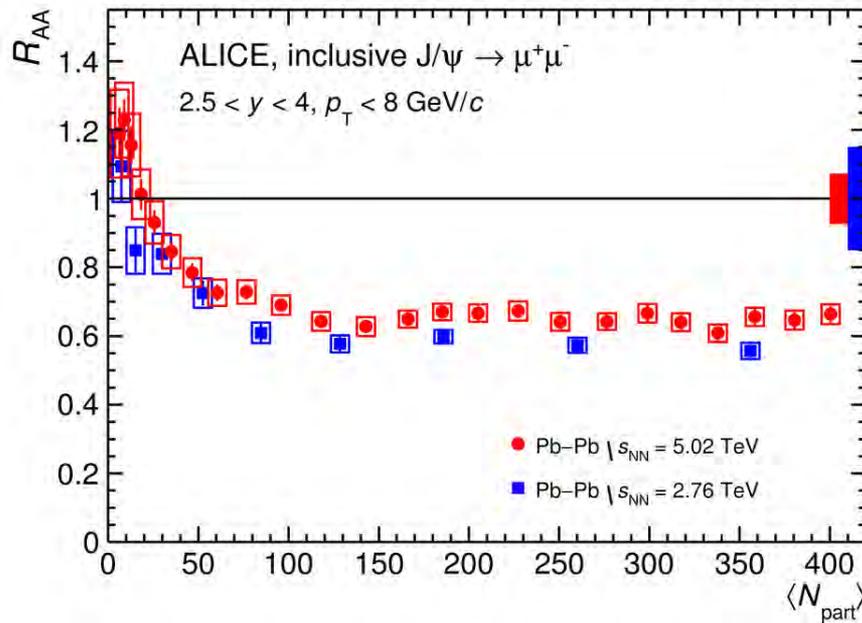
Si veda talk di G.G. Fronzè



Soppressione ad LHC minore di quella a RHIC



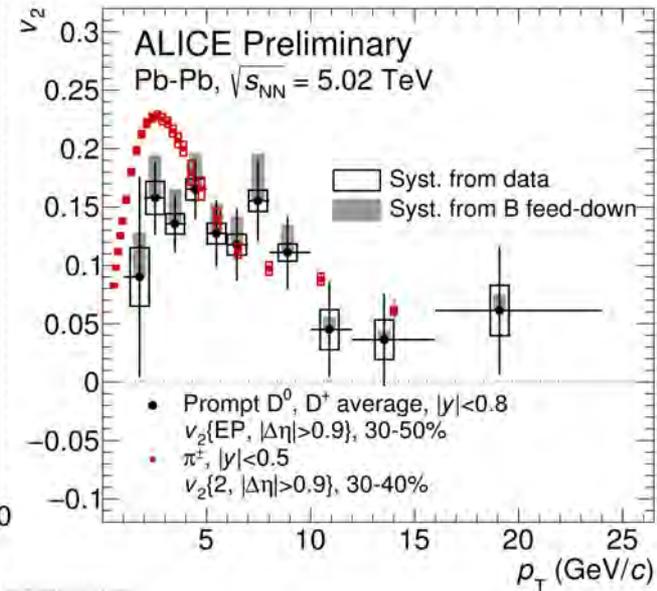
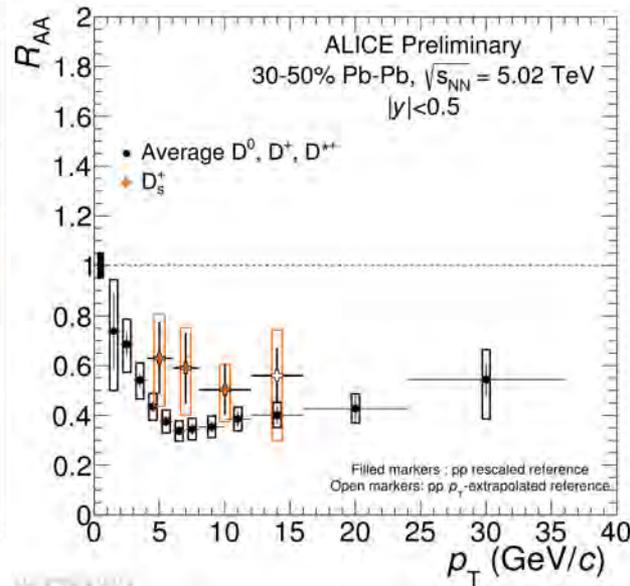
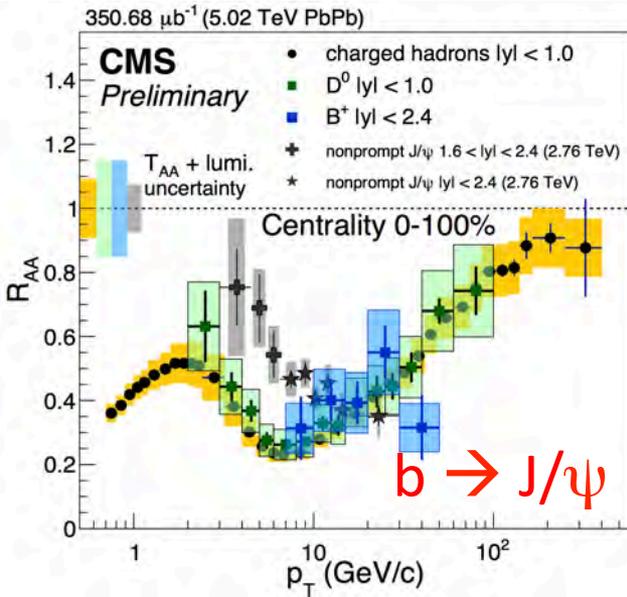
Soppressione della J/Ψ



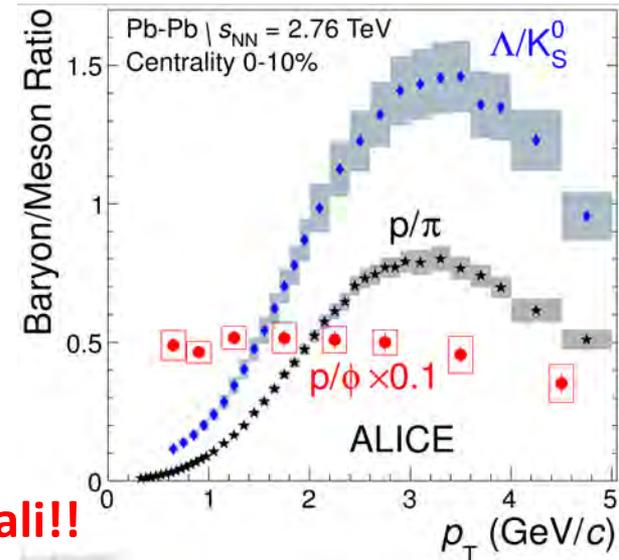
Si veda talk di
G.G. Fronzè

- La soppressione è indipendente dalla centralità.
- Misura a $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$ più precisa di quella a $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$.
- In accordo qualitativo con il modello di **rigenerazione**.
- Il maggior contributo all'incertezza dei modelli teorici viene dall'incertezza sulla quantità di charm totale →
 - **Importate misurare la sezione d'urto totale di produzione di charm fino a $p_T \approx 0 \text{ GeV}/c$!**

Quark pesanti (*charm e beauty*)



- Per una caratterizzazione più precisa del QGP risulta necessario studiare la termalizzazione e la perdita di energia dei quark pesanti **c** e **b**.
- CMS ha cominciato a misurare la soppressione del **beauty**
- Risultato importante misurare
 - il v_2 dei mesoni e barioni con charm e beauty fino a basso p_T
 - mesoni D fino a $p_T \approx 0$;
 - i rapporti barione/mesone per charm (Λ_c/D) e beauty (Λ_b/B).

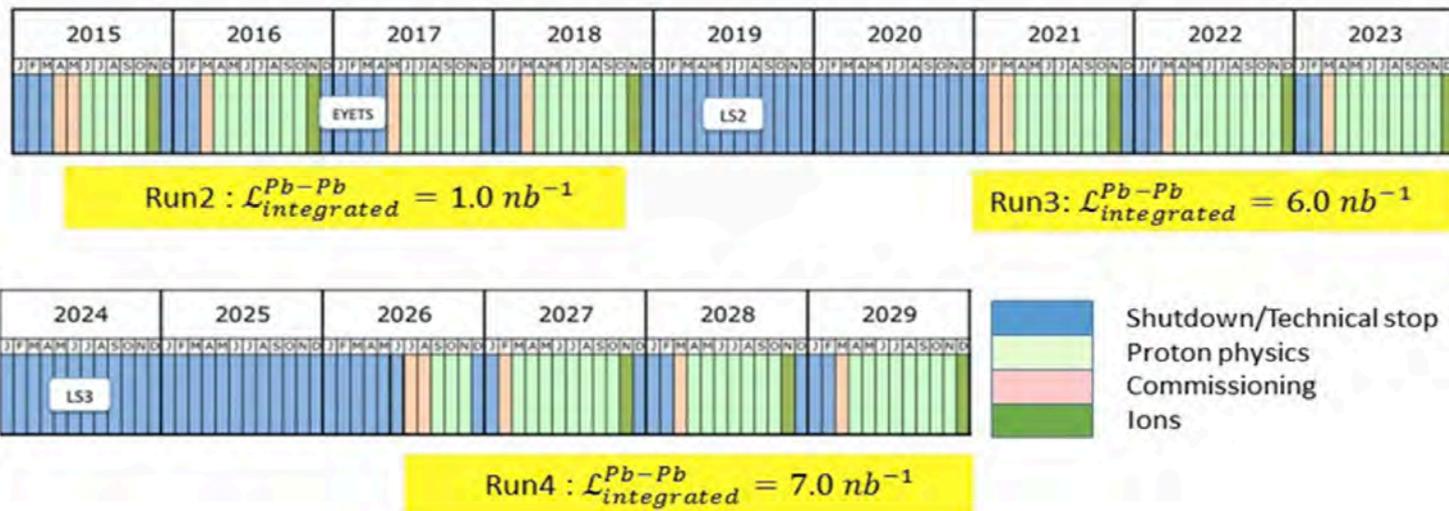


Quantità non misurabili con gli attuali apparati sperimentali!!

Scenario futuro: programma di ioni pesanti ad LHC

- Run3 e Run4: 2021- 2029
 - $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$
 - $L_{\text{int}} > 10 \text{ nb}^{-1}$
 - Upgrade degli esperimenti
- Miglioramento dell'acceleratore durante LS2 (2019-2020)
 - Collisioni Pb-Pb a *rate* d'interazione da 8 kHz \rightarrow 50 kHz

LHC roadmap: ion runs



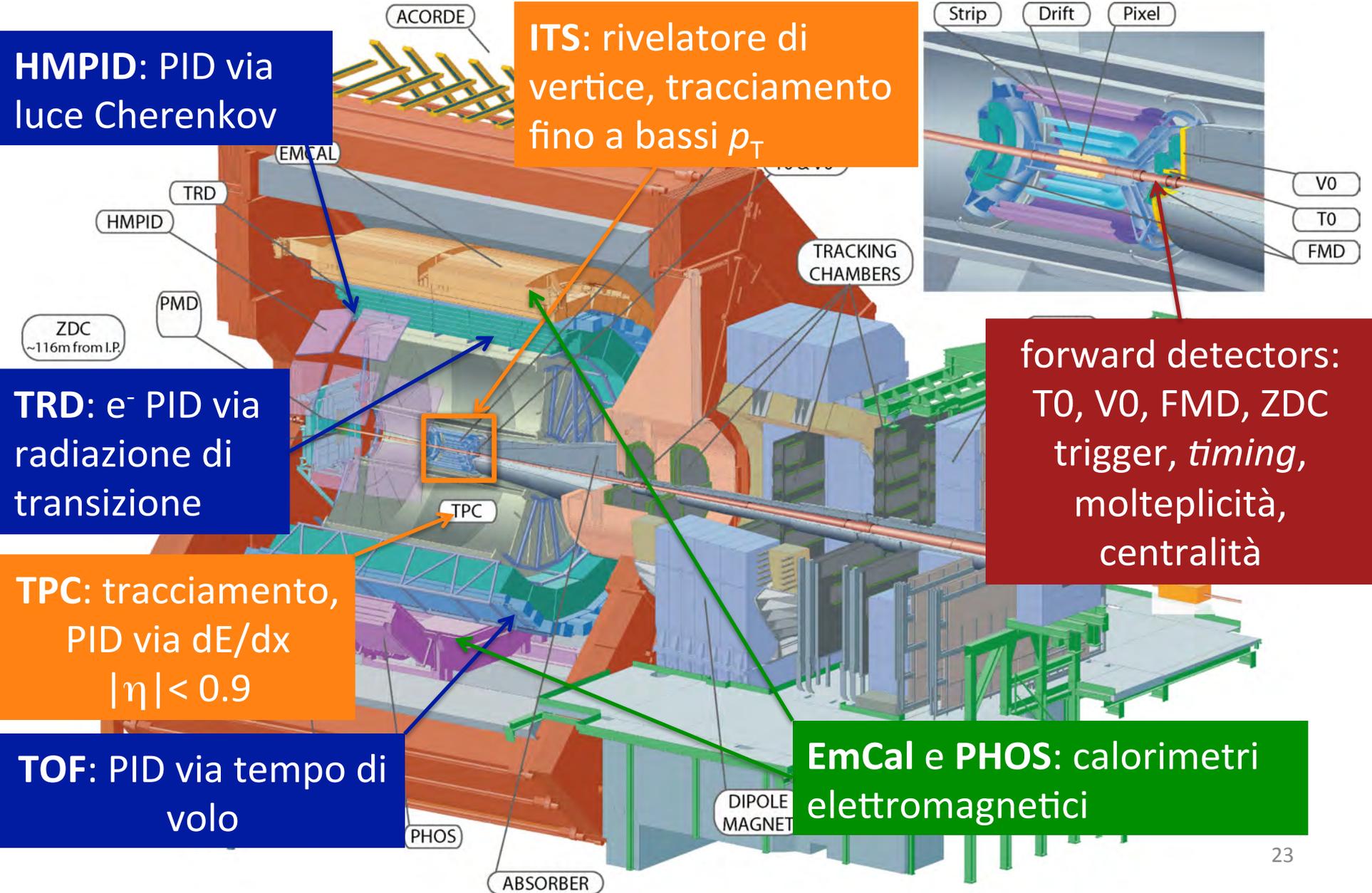
Upgrade di A Large Ion Collider Experiment (ALICE)

Upgrade di LHC → Nuove opportunità di fisica per ALICE (esperimento dedicato alla fisica degli ioni pesanti)

- Studiare la **termalizzazione dei partoni nel QGP**, con particolare attenzione **ai quark pesanti a basso p_T**
 - Ricostruzione vertici secondari
- **Dissociazione** (e **rigenerazione**) del charmonio a basso impulso per studiare il deconfinamento e la temperatura del mezzo.
- Produzione di **fotoni termici** e **di-leptoni emessi dal QGP** per studiare la temperatura iniziale e l'equazione di stato.

I processi di interesse non possono essere selezionati a livello di trigger →
Da 1 kHz di trigger *rate* a **data taking** continuo a **50 kHz** (registrando ogni evento)

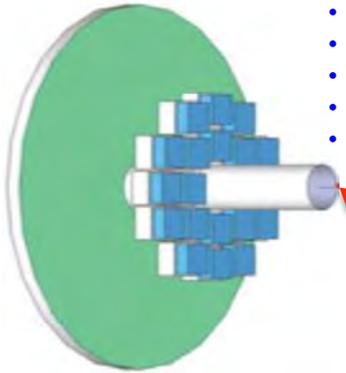
A Large Ion Collider Experiment (ALICE) a LHC



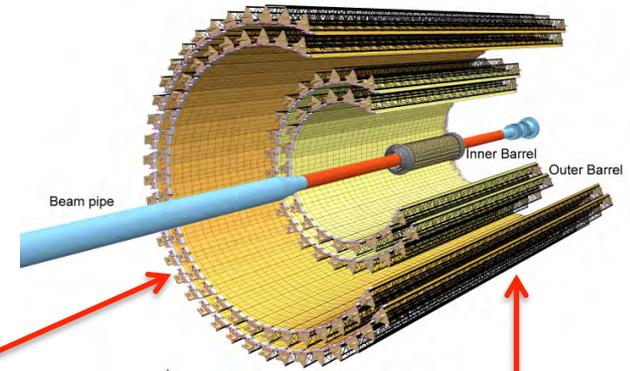
Upgrade di ALICE

Rivelatore Fast Interaction Trigger

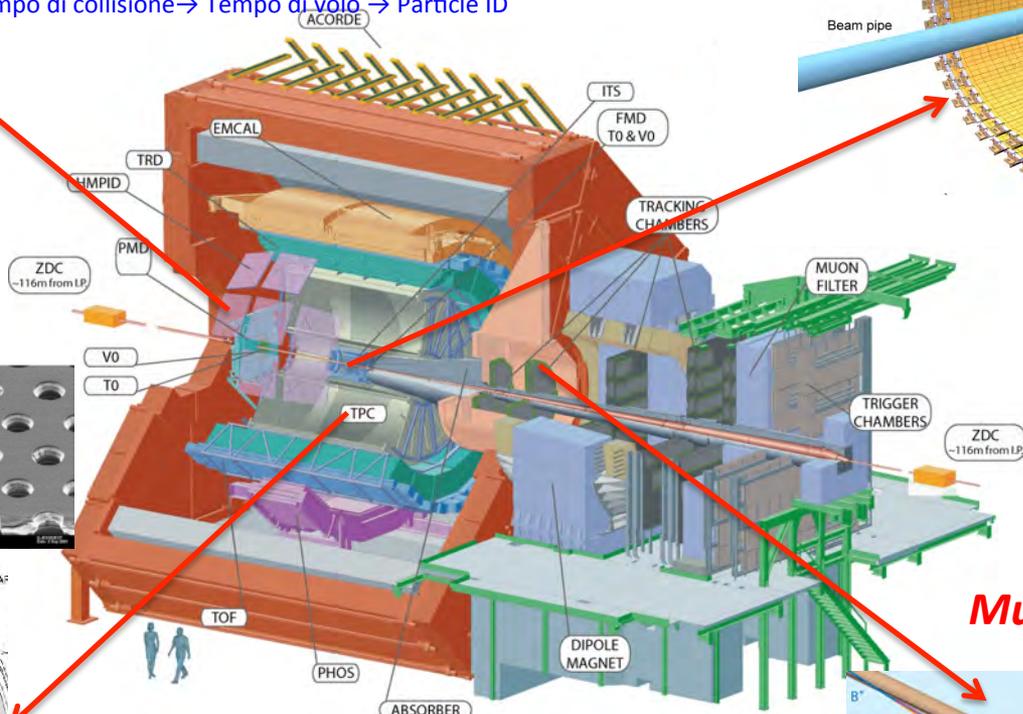
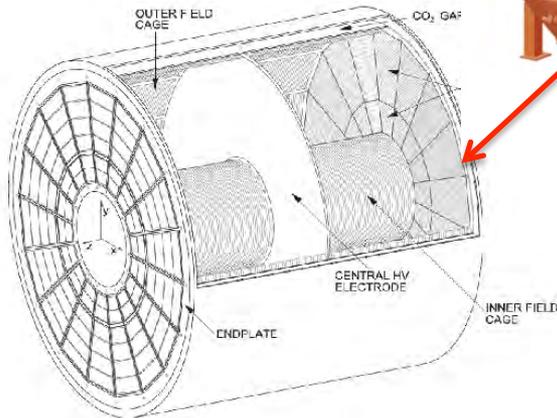
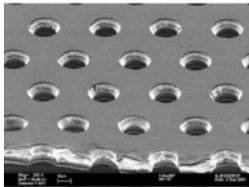
- Monitoraggio di luminosità
- Determinazione di vertice online
- Minimum Bias trigger
- Selezione di centralità
- Reiezione degli eventi beam/gas
- Veto per collisioni ultra periferiche
- Tempo di collisione → Tempo di volo → Particle ID



Nuovo Inner Tracking System

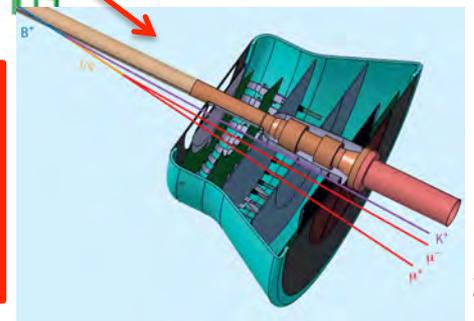


TPC con readout a GEM



Entrambi basati su Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS)

Muon Forward Tracker



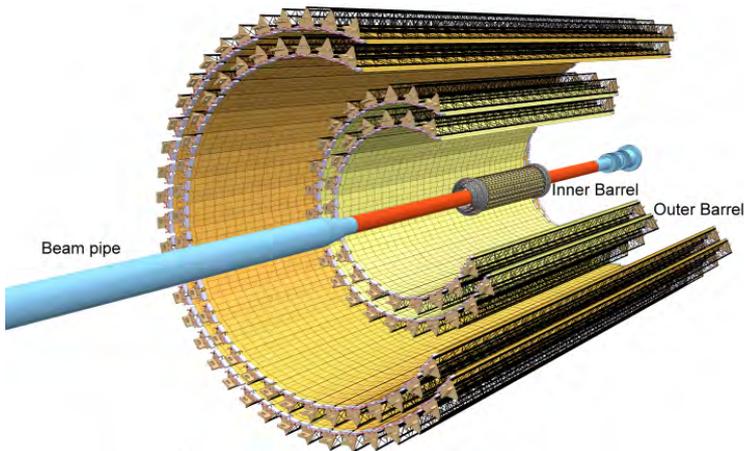
+ nuovo readout per TOF, ZDC, TRD, MUON ARM
 + nuovo Central Trigger Processor
 + nuova architettura per DAQ/offline

Upgrade di ALICE: ITS

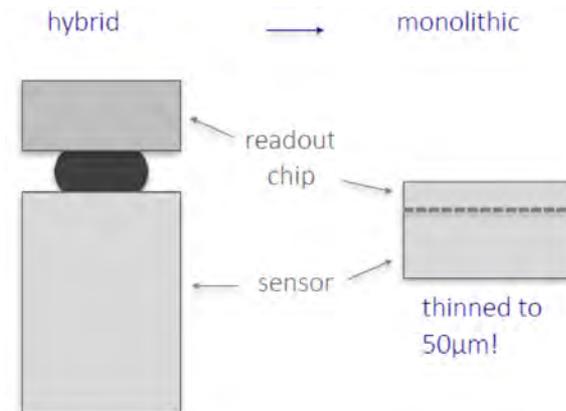
- Miglioramento della risoluzione del parametro d'impatto di un fattore 3 (5) in $r\phi(z)$ a $p_T = 500 \text{ MeV}/c$
 - Più vicino al punto d'interazione (posizione del primo strato): **39 mm \rightarrow 23 mm**
 - Ridotto x/X_0 /strato: \approx **1.14% \rightarrow 0.3%** (per i tre strati più interni)
 - Risoluzione spaziale: **attuale SPD 12mm x 100mm \rightarrow 5mm x 5mm.**
- Migliore efficienza di tracciamento e risoluzione di impulso a bassi p_T
 - Maggiore granularità:
 - **6 strati \rightarrow 7 strati**
 - Pixel, drift e strip \rightarrow **tutti pixel**

7 strati a geometria cilindrica, equipaggiati con MAPS (\approx 24000 chips)
Copertura radiale: **23 – 400 mm**; copertura in η : $|\eta| < 1.3$

**Si veda poster di
I. Ravasenga**



Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS)



Upgrade di ALICE: TPC

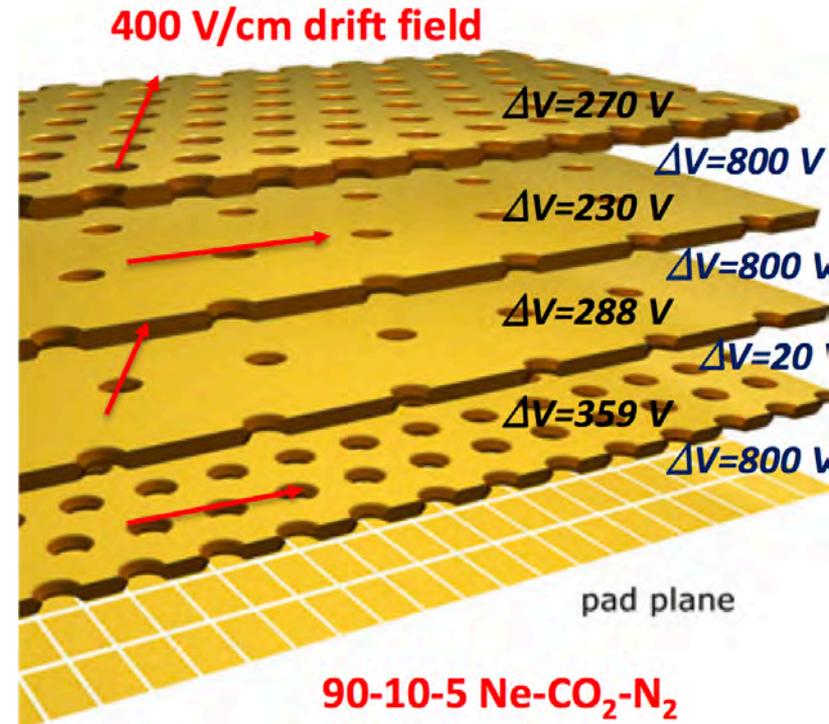
- **Obiettivo:** registrare dati a **50 kHz** e mantenere le prestazioni attuali
 - Risoluzione in impulso: $\sigma_{p_T}/p_T \leq 3.5\%$ a $p_T = 50 \text{ GeV}/c$; $\sigma_{p_T}/p_T \leq 1\%$ a $p_T = 1 \text{ GeV}/c$
 - Risoluzione dE/dx : 5% pp; 6% Pb-Pb centrali

Attuali limitazioni:

- Tempo di deriva degli elettroni $\approx 100 \mu\text{s}$
- Tempo di deriva degli ioni $\approx 160 \text{ ms}$
- Carica positiva nel volume di deriva \rightarrow distorsione delle linee di campo elettrico.

Soluzione: sostituire le camere proporzionali con una camera a 4 **GEM (Gas Electron Multipliers)**

- Differente schema di fori tra i vari strati per limitare il *backflow* degli ioni.
- Compromesso tra la risoluzione in energia (alto guadagno nel primo strato) e il *backflow* degli ioni (basso guadagno nel primo strato)



Conclusioni 1/2

- I risultati di RUN-1 e RUN-2 di LHC, hanno rappresentato un importante passo in avanti nella comprensione del QGP
 - molteplicità di particelle cariche: densità di energia iniziale $\varepsilon \gg \varepsilon_c$
 - il sistema creato nella collisione si comporta come un liquido perfetto (**bassi valori di η/s**) fortemente interagente.
 - Flusso ellittico v_2 ad LHC 30% maggiore che a RHIC.
 - scaling del v_2 con il numero di quark costituenti osservato a RHIC (coalescenza), non osservato ad LHC.
 - Soppressione minore degli stati di charmonio ad LHC rispetto a RHIC \rightarrow **dissociazione + ricombinazione.**

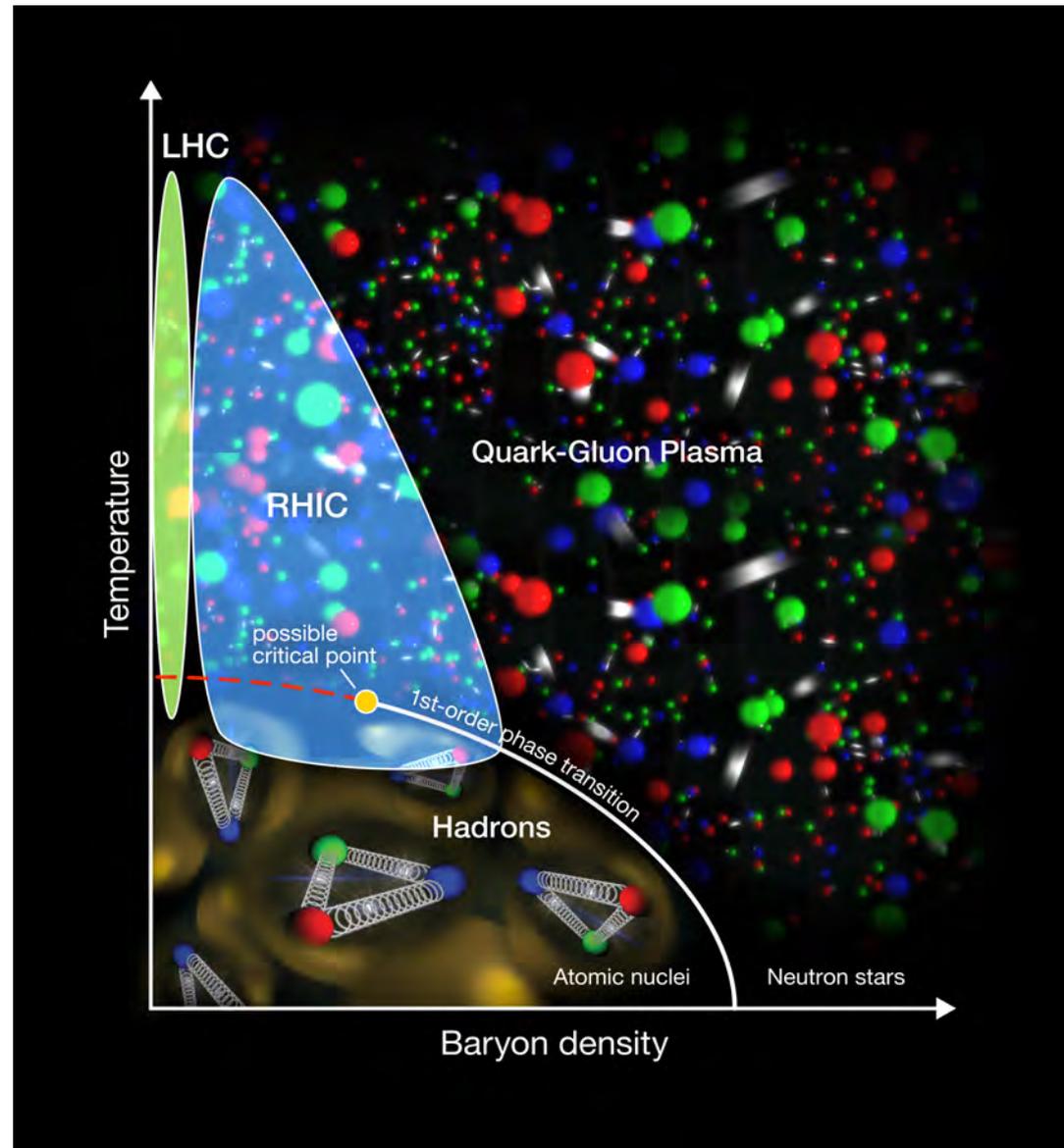
Conclusioni 2/2

- Una descrizione più dettagliata del QGP **necessità misure ad alta precisione della produzione di quark pesanti, stati di quarkonio, jet e di-leptoni su un largo intervallo d'impulso.**
- L'apparato di ALICE verrà modificato per la presa dati di Run-3 e Run-4, sfruttando le nuove potenzialità di LHC
 - **Miglioramento prestazioni di tracciamento** (precisione ed efficienza), in particolare per particelle a **basso p_T** ;
 - Aumento della **rate di readout a 50 kHz** per collisioni Pb-Pb (*minimum bias trigger*);
 - **Nuovo ITS**, un Moun Forward Tracker, **TPC con GEM**, un Fast Interaction Trigger (FIT);
 - Nuova elettronica di readout per i rivelatori TOF, MUON e YDC (50 kHz rate);
 - Nuova architettura DAQ/offline.

Backup

Diagramma di fase della materia adronica

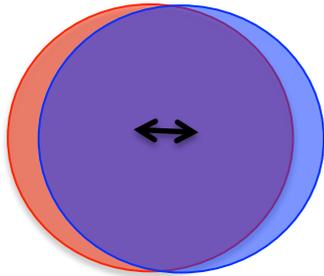
- Diagramma schematico della materia adronica per temperatura e potenziale bario-chimico.
- Alle energie di LHC la maggior parte delle particelle viene prodotta durante la collisione → potenziale bario-chimico molto basso.



Geometria di collisione

- Centralità: quantità di sovrapposizione tra i nuclei
- Parametro d'impatto: distanza tra il centro dei nuclei
- Il parametro d'impatto non si può misurare direttamente, si misura:
 - La molteplicità di particelle cariche (**per lo più π^\pm , K^\pm , p e anti-p**)
 - Numero dei neutroni spettatori
 - Si usano modelli per risalire da queste misure al parametro d'impatto.

Parametro d'impatto

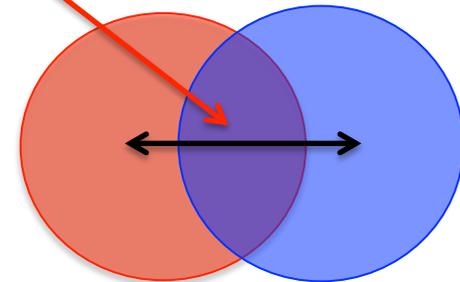


“Centrali”

Piccolo parametro d'impatto

Sistema di grande volume

Grande molteplicità di particelle cariche



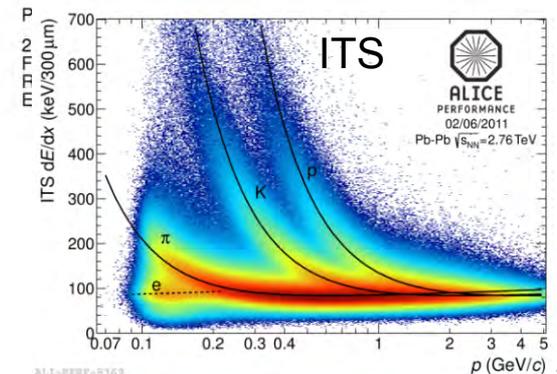
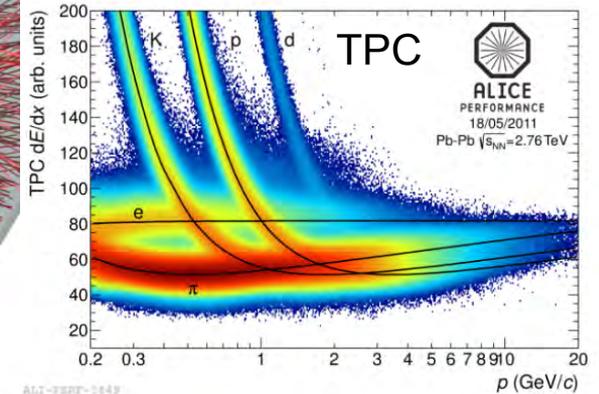
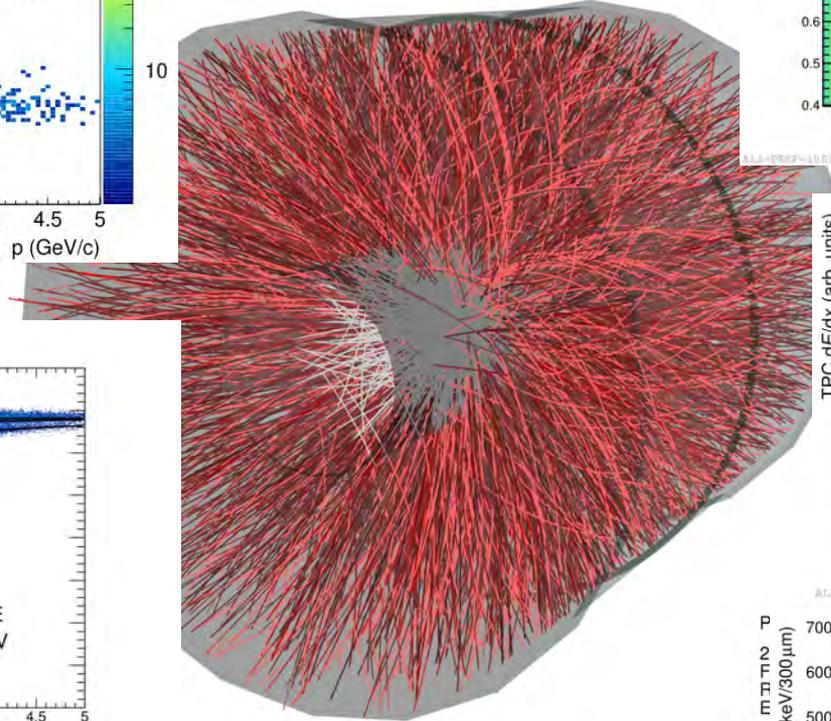
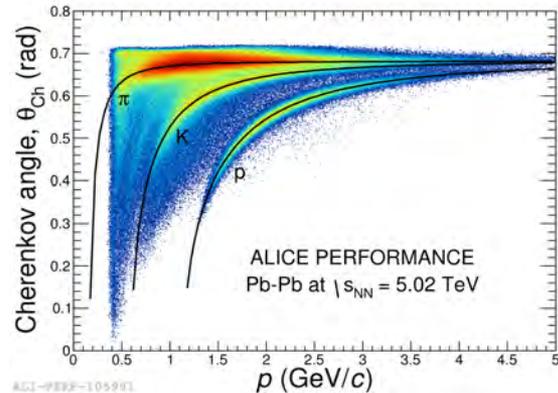
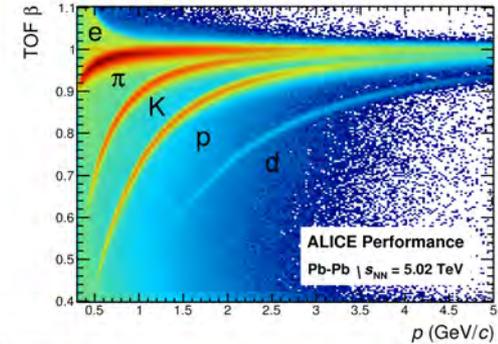
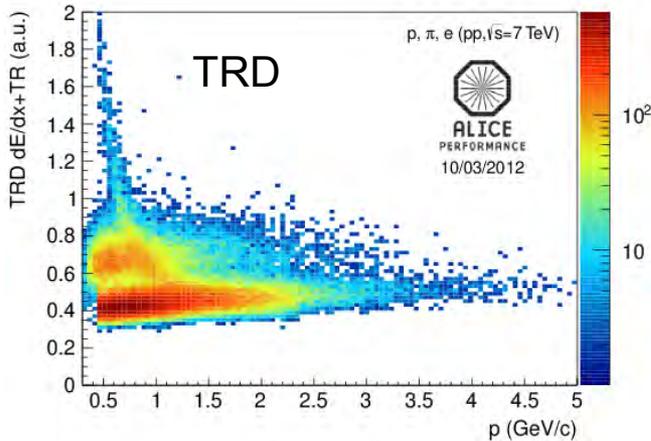
“Periferiche”

Grande parametro d'impatto

Sistema di piccolo volume

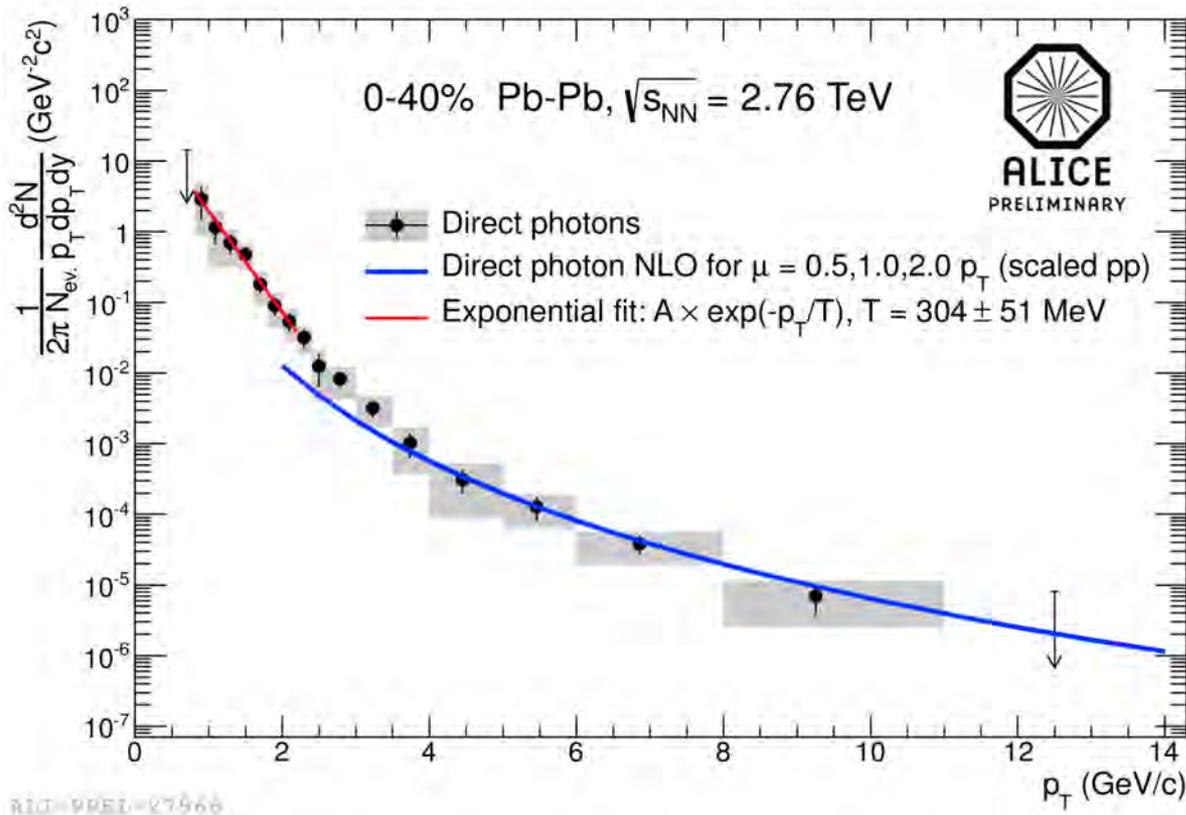
Bassa molteplicità di particelle cariche

PID di particelle cariche in ALICE (central barrel)



L'apparato sperimentale di ALICE è ottimizzato per il tracciamento delle particelle cariche e l'identificazione di adroni per $|\eta| < 0.8$

Temperatura iniziale: fotoni diretti



$$T_{\text{LHC}} = 304 \pm 51 \text{ MeV} \approx 1.4 \times T_{\text{RHIC}}$$

Modello EPOS 2.17-3

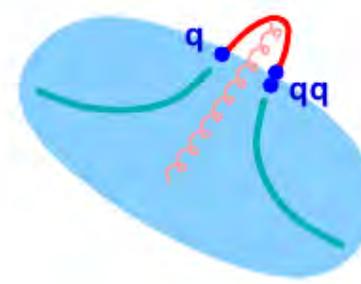
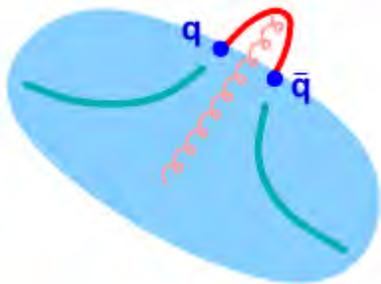
K. Werner, PRL 109, 102301 (2012) “fluid-jet interaction”

Hydrodynamical phase + hadronization processes at intermediate p_T where the interaction between bulk matter and jets is considered

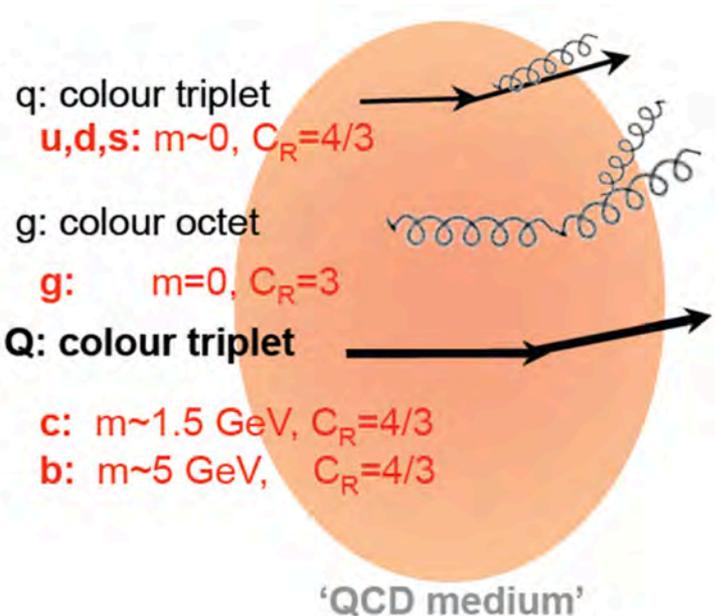


Baryon-meson effect where a quenched jet hadronizes with flowing medium quarks

“Considering transverse fluid velocities up to $0.7c$, and thermal parton momentum distributions, one may get a “push” of a couple of GeV/c to be added to the transverse momentum of the string segment. This will be a crucial effect for intermediate p_T jet hadrons.”



Perdita di energia dei quark pesanti



- La perdita di energia ΔE dipende da:
 - Proprietà del mezzo: densità, temperatura, cammino libero medio.
 - Lunghezza del cammino nel mezzo (L).
 - Proprietà del partone:
 - ✓ Fattore di Casimir (C_R)
 - ✓ Massa del quark (dead cone effect)



Probabilità di gluonstrahlung $\propto \frac{1}{[\theta^2 + (m_Q/E_Q)^2]^2}$



Dokshitzer and Kharzeev, PLB 519 (2001) 199

$$\Delta E_{\text{quark}} < \Delta E_{\text{gluone}} \quad , \quad \Delta E_{\text{quark pesante}} < \Delta E_{\text{quark leggero}}$$



$$R_{AA}(B) > R_{AA}(D) > R_{AA}(\pi)$$