

Fisica alla frontiera dell' energia: LHC

Fisica con ioni pesanti



referenze

<http://aliceinfo.cern.ch/>

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration/>

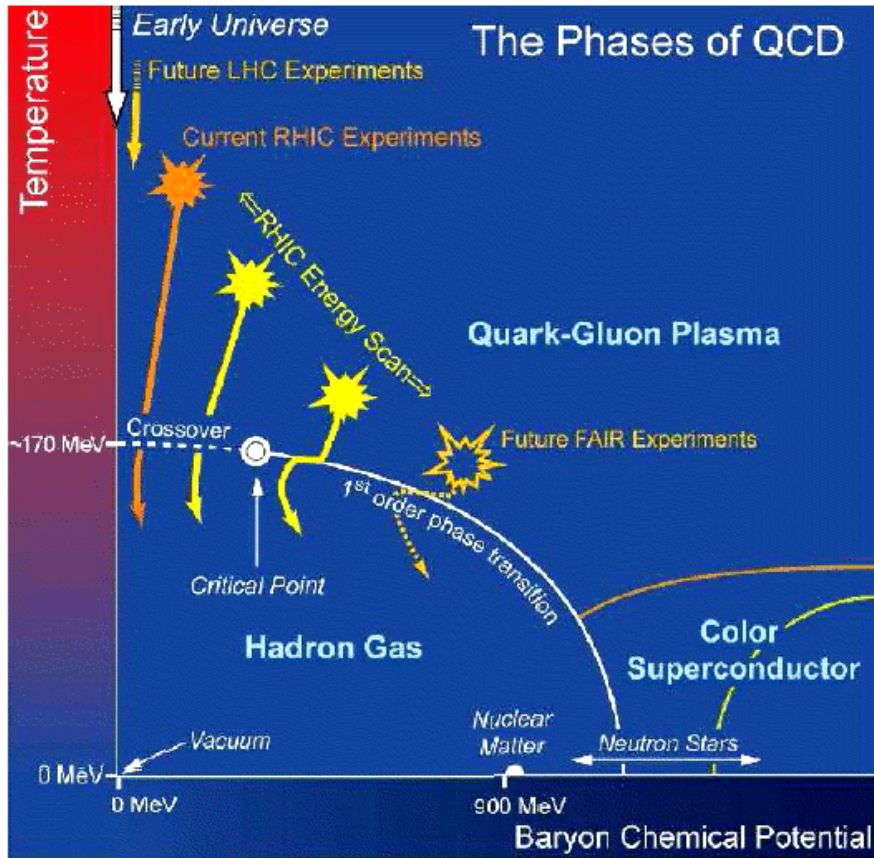
<http://cms.web.cern.ch/cms/index.html>

<http://qm2011.in2p3.fr/node/12>



Praticamente tutte le mie slides sui risultati
sperimentali vengono di qui

QCD phase diagram



Little Bang: ricreare in laboratorio le condizioni (la materia) esistenti nell' universo primordiale

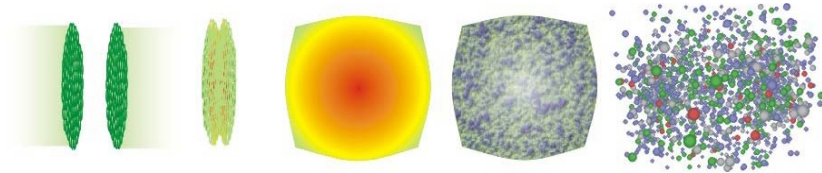
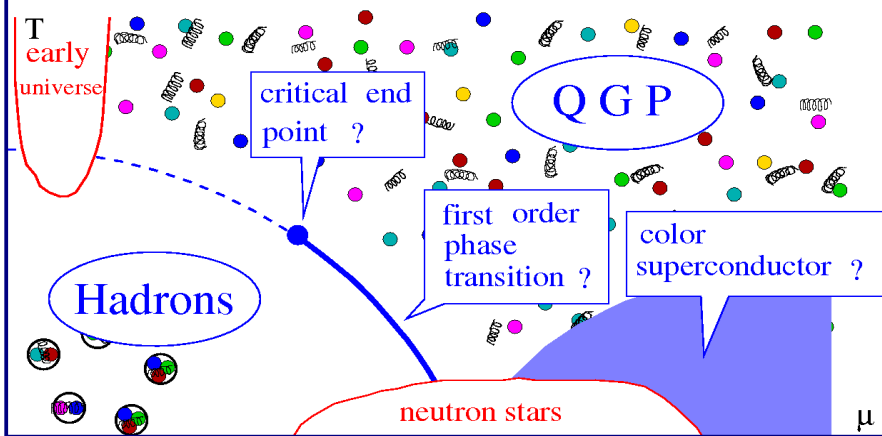
In che modo fenomeni collettivi e proprietà macroscopiche della materia fortemente interagente emergono dalle interazioni fondamentali ?

- Qual'è l' equazione di stato della QCD ?
- Quali sono le proprietà della materia in condizioni estreme di densità e di temperatura ?
 - gradi di libertà
 - viscosità
 - conducibilità termica
 - trasporto dei numeri quantici conservati
- Quali sono i meccanismi microscopici della dinamica di non-equilibrio e della termalizzazione ?
 - perdita di energia dei partoni
 - instabilità di plasma
- Come procede l' adronizzazione ? Come cambia nella materia densa ?

Theory: Predictions & Tools

Predizioni dalla QCD:

- metodi non perturbativi
 - Lattice
 - Effective lagrangians
 - Chiral lagrangians
 - Heavy quark effective theories
 - AdS/CFT correspondence
 -
 - QCD sum rules
 - Potential models (quarkonium)
- metodi perturbativi
 - Basati sulla asymptotic freedom

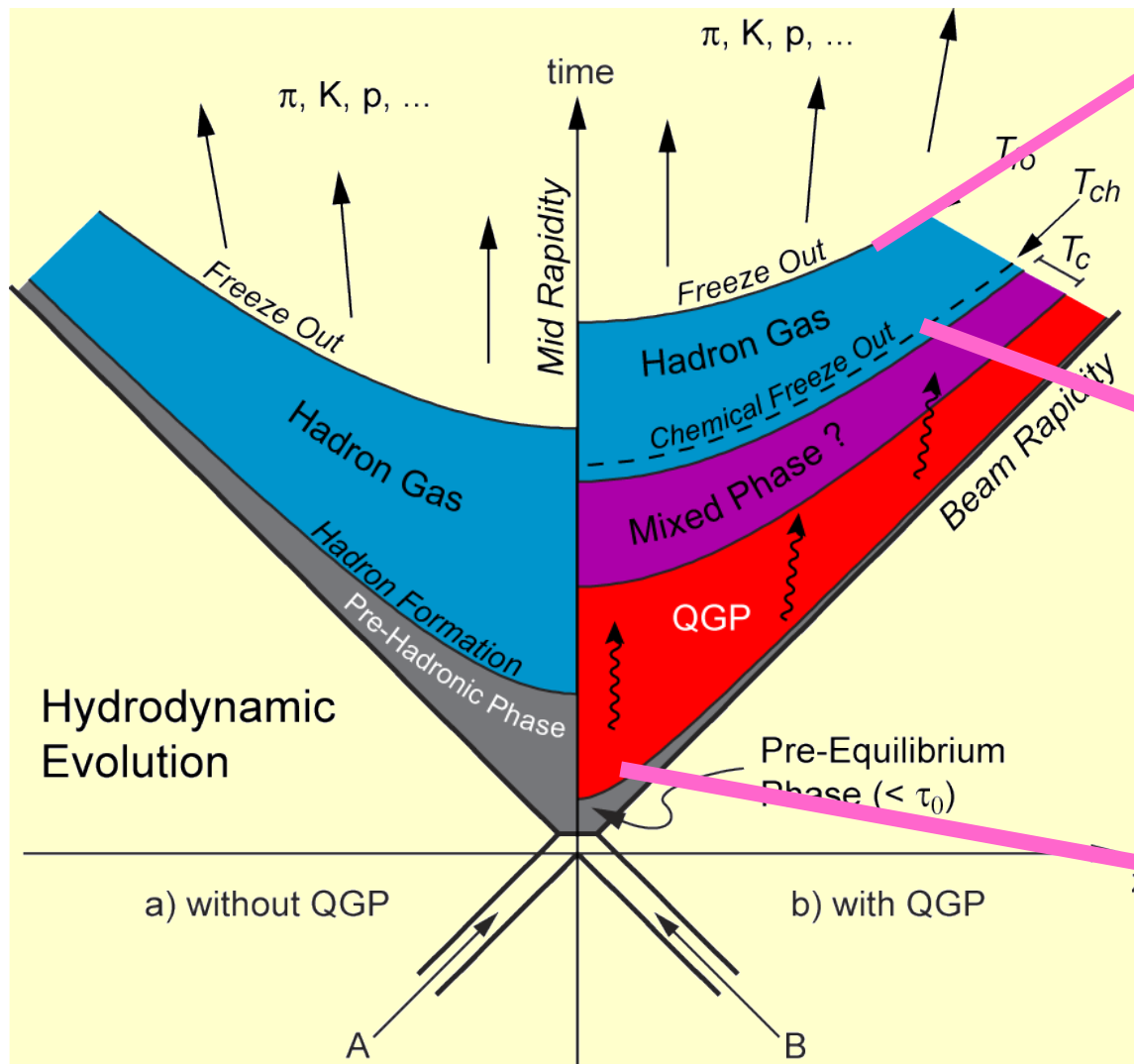


Idrodinamica per descrivere l' espansione del sistema:

- Precursore: Fermi
- Successore: Landau
- Prototipo : Bjorken
- Attualmente : **Idrodinamica** viscosa

Una teoria effettiva dove il parametro che è “piccolo” è il tempo di termalizzazione rispetto all' evoluzione macroscopica del sistema. Gli “ingredienti” (EoS, coefficienti di trasporto) sono calcolabili dalla termodinamica di equilibrio.

HI physics: space-time evolution of the collision (I)



● Thermal freeze-out

- Elastic interactions cease
- Particle dynamics (“momentum spectra”) fixed

T_{fo} (RHIC) ~ 110-130 MeV

● Chemical freeze-out

- Inelastic interactions cease
- Particle abundances (“chemical composition”) are fixed (except maybe resonances)

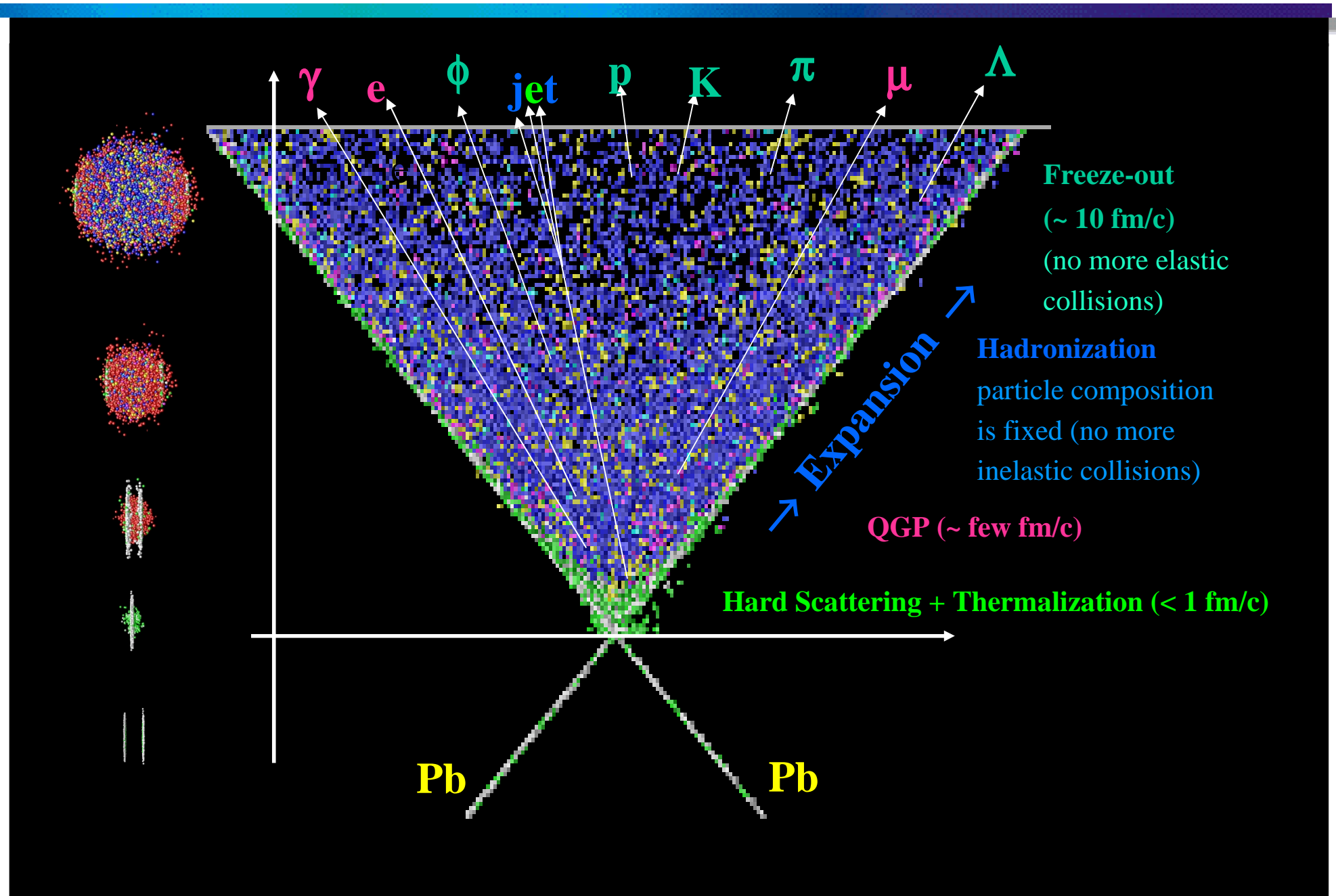
T_{ch} (RHIC) ~ 170 MeV

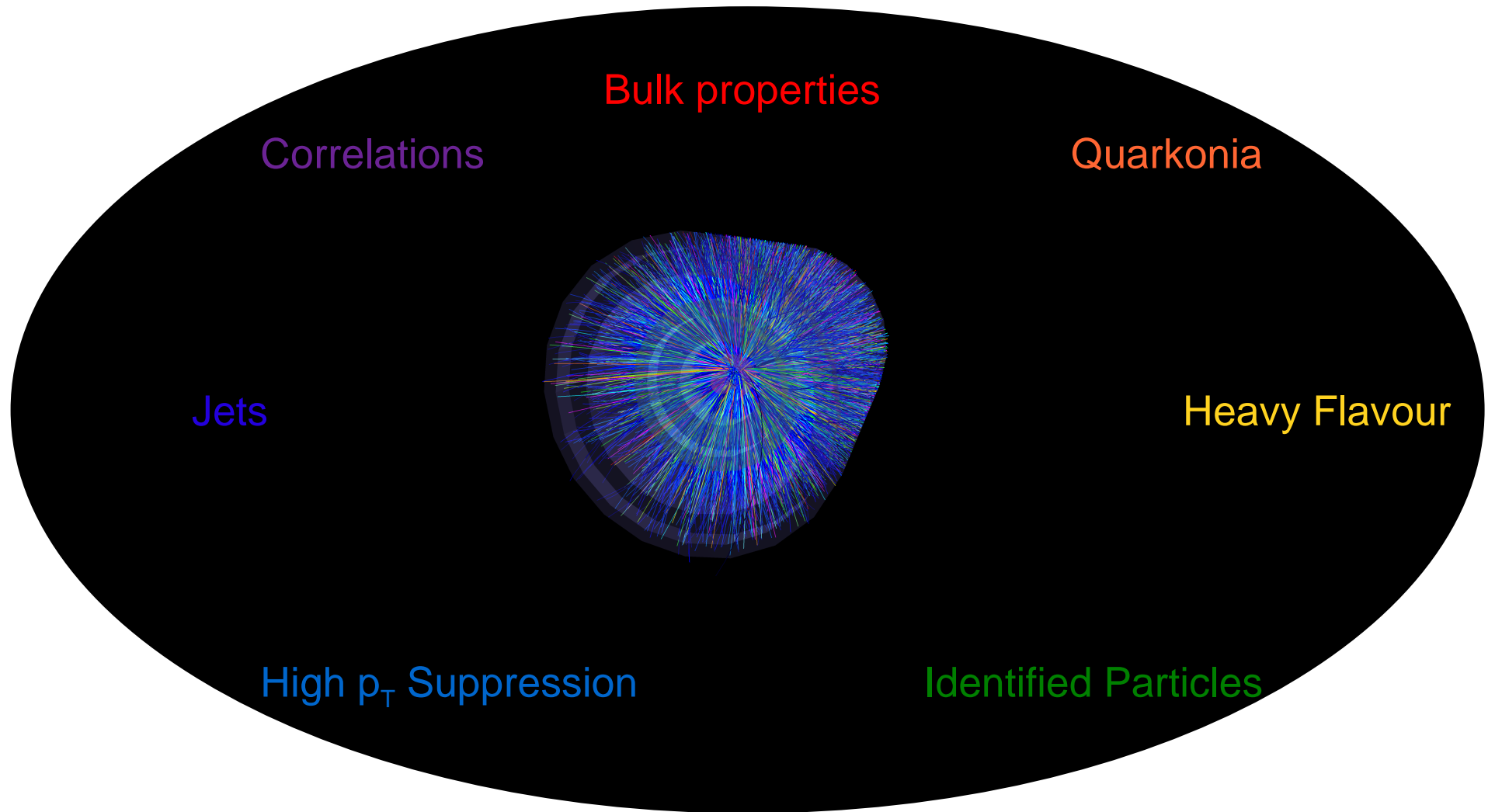
● Thermalization time

- System reaches local equilibrium

t_{eq} (RHIC) ~ 0.6 fm/c

HI physics: space-time evolution of the collision (II)





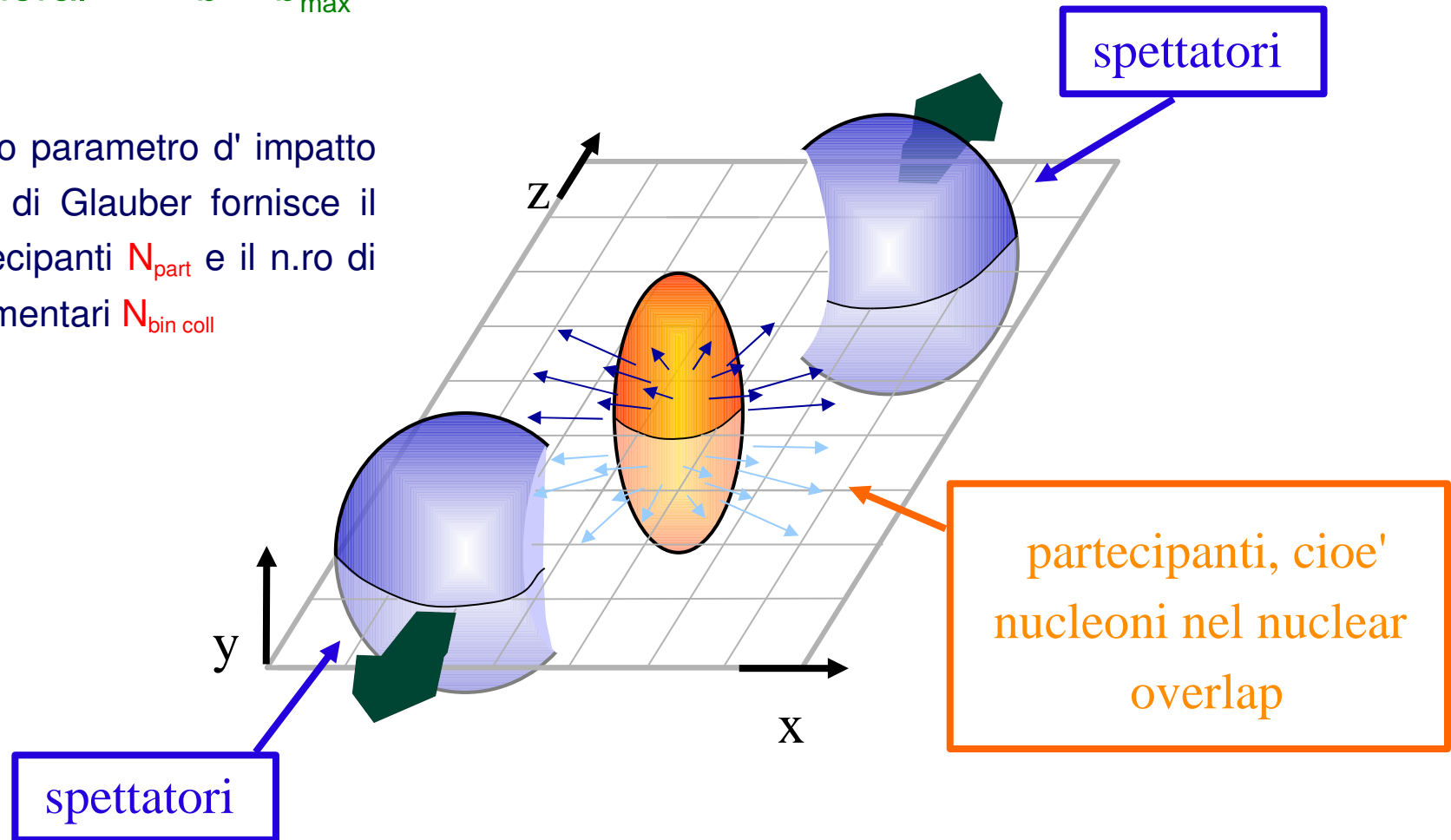
HI physics: collision geometry (I)

Centralità → parametro d' impatto (b)

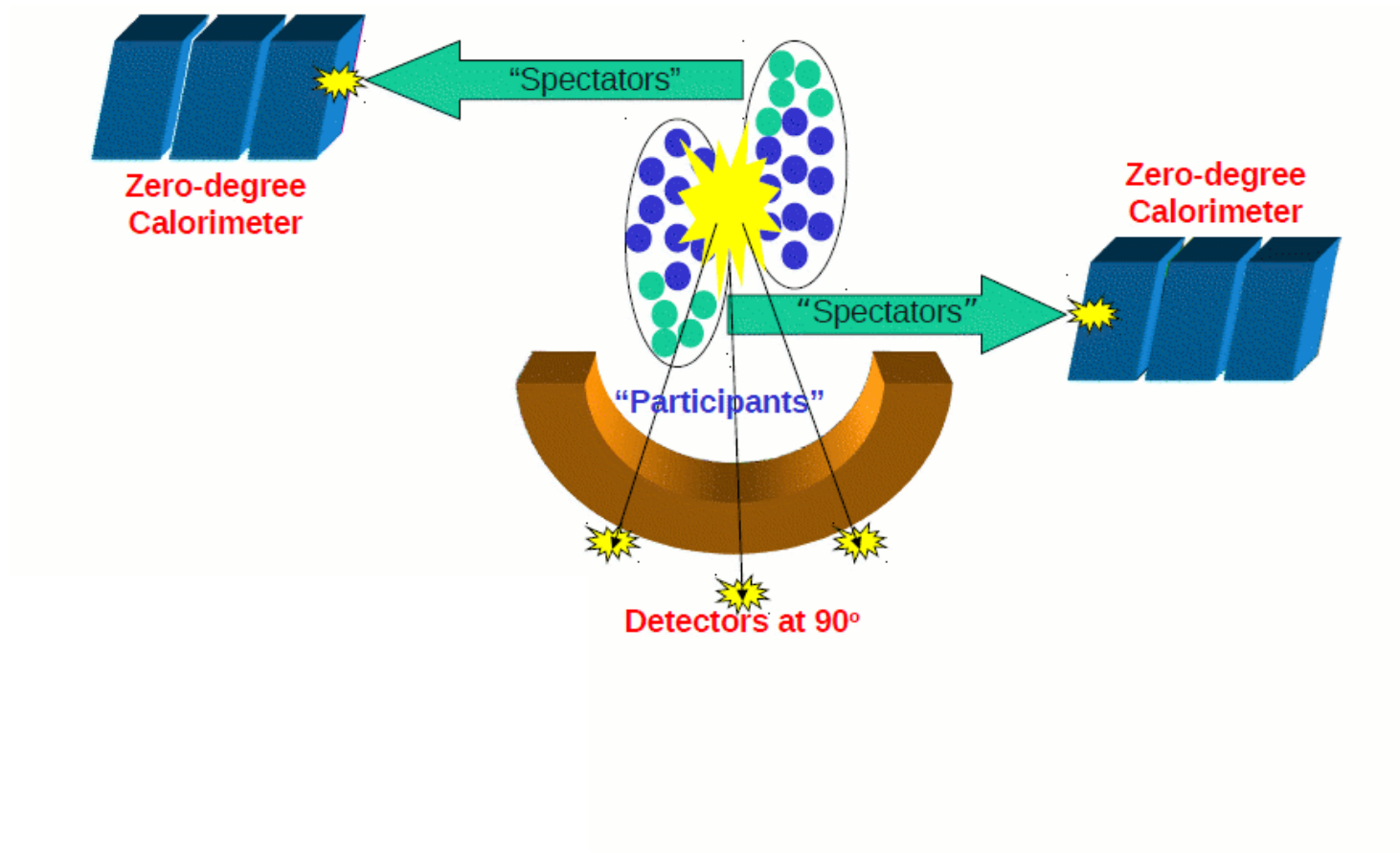
“central” $\Rightarrow b \sim 0$

“peripheral” $\Rightarrow b \sim b_{\max}$

Dato un certo parametro d' impatto b il modello di Glauber fornisce il n.ro di partecipanti N_{part} e il n.ro di collisioni elementari $N_{\text{bin coll}}$



HI physics: collision geometry (II)



Bulk properties

$$N_{ch}, E_T$$

⇒ Informazioni sulle condizioni iniziali e sulla dinamica delle collisioni

- densita' di energia del sistema
- gluon saturation
-

⇒ Meccanismi di produzione delle particelle

- Soft: $N_{ch} \sim N_{part}$
- Hard: $N_{ch} \sim N_{coll}$

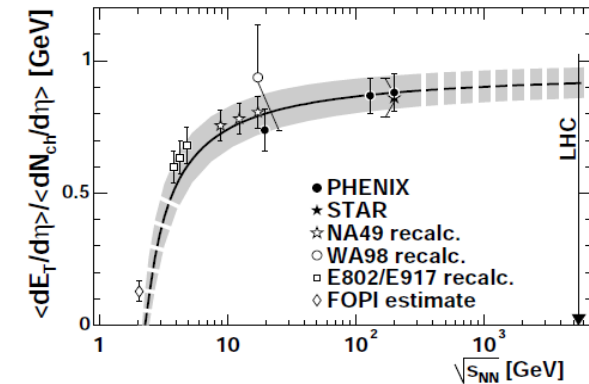
$$\left. \frac{dN_{ch}^{AA}}{d\eta} \right|_{\eta=0} = \left. \frac{dN_{ch}^{NN}}{d\eta} \right|_{\eta=0} \left[\frac{1-x}{2} N_{part} + x N_{coll} \right]$$

- Ncoll scaling ($x=1$) for Collinear factorization
- Npart scaling ($x \rightarrow 0$) for shadowing, non-linear QCD dynamics, saturation, collectivity

At RHIC, approximate participant scaling

Steep increase
Incident energy
goes in $\langle mT \rangle$

Slow increase
Incident energy
converted in N_{ch}

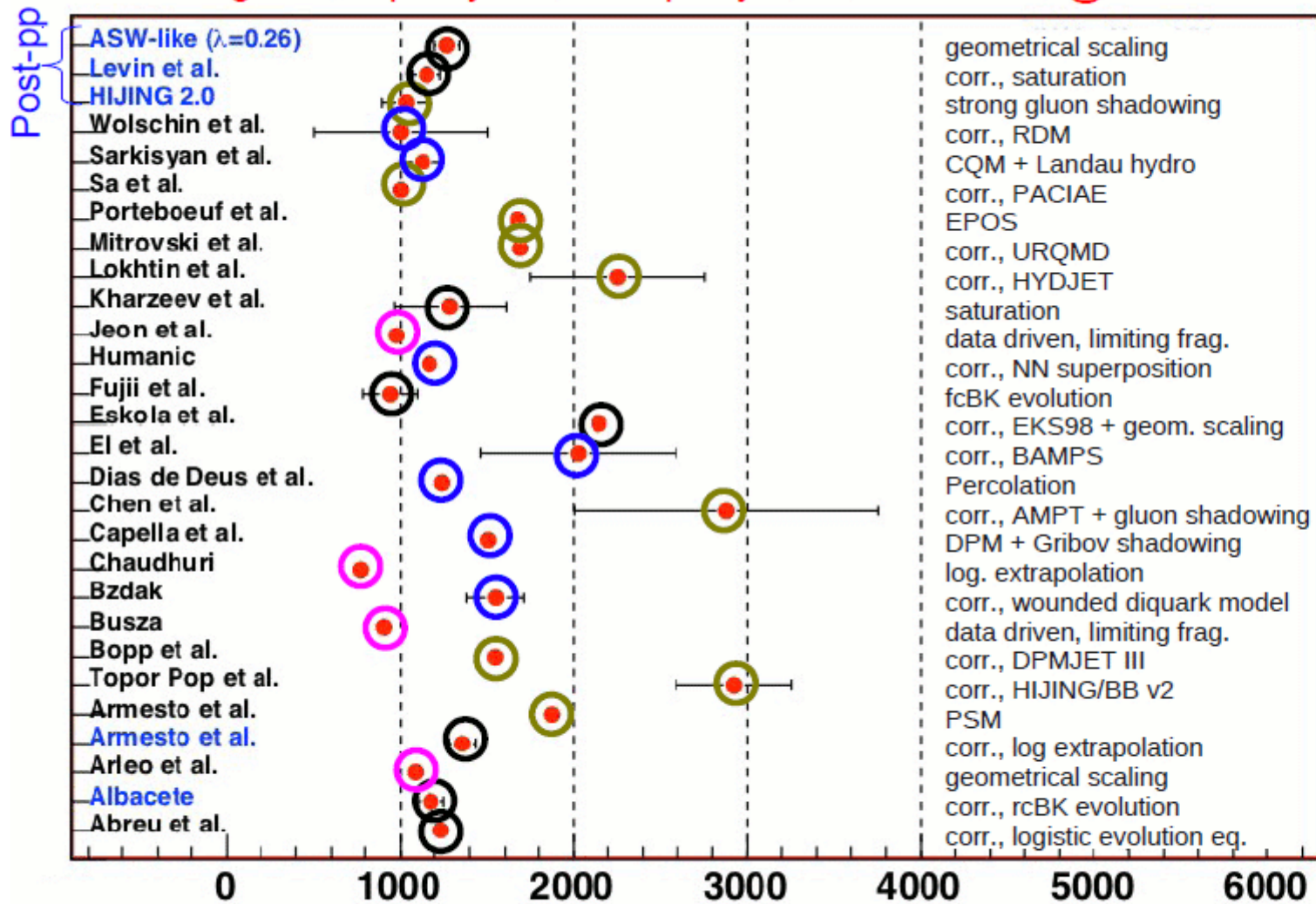


pre-LHC

⇒ Constraint sulle predizioni teoriche

- Dipendenza dalla centralita'
- Dipendenza da \sqrt{s}

Charged multiplicity for mid-rapidity in central Pb+Pb @ 2.76 TeV



Monte Carlo,
 coherence via
 collectivity,
 strong gluon
 saturation

Saturation
 ideas

Data driven,
 limiting frag.

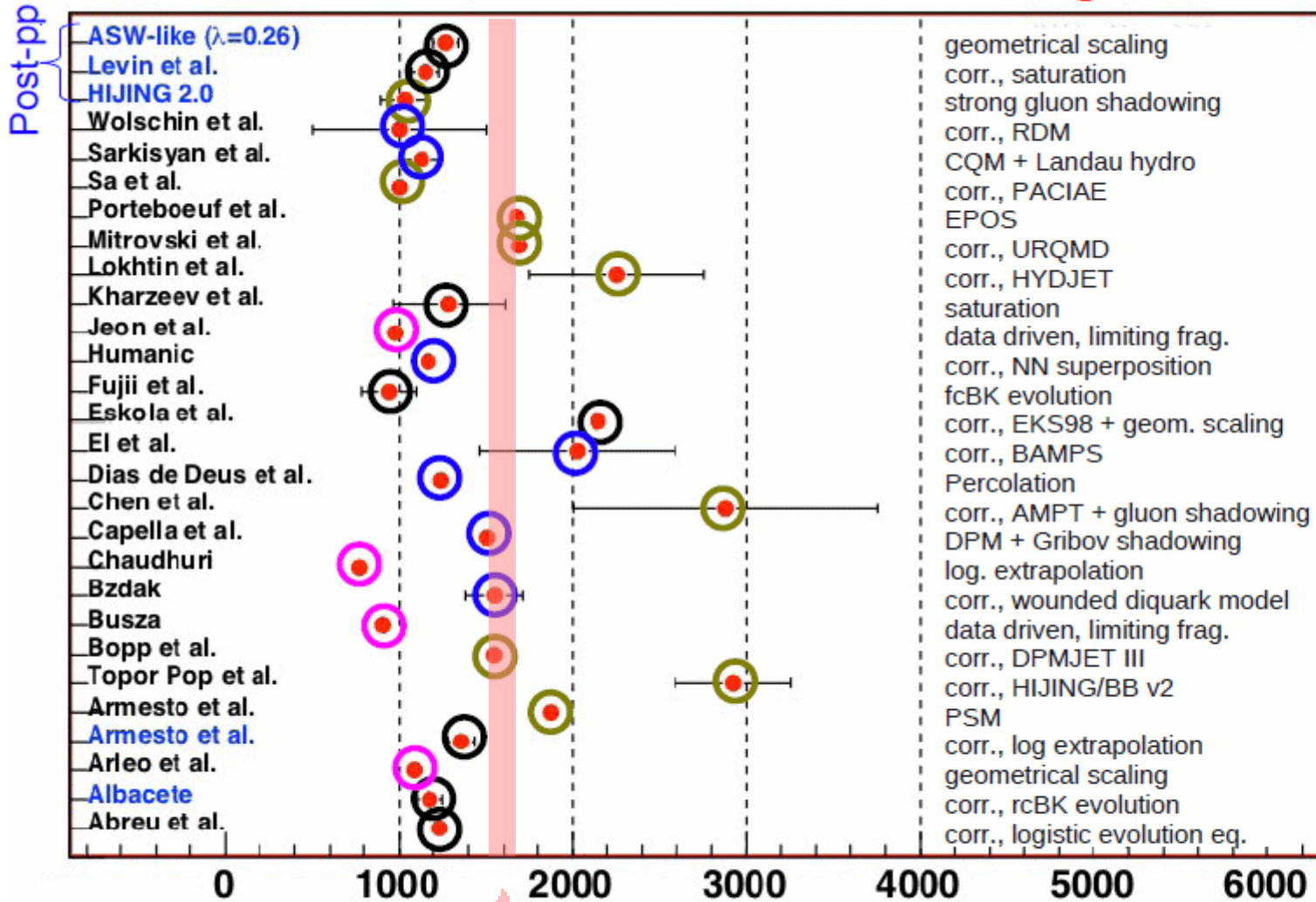
Miscellaneous:
 superposition,
 WNM, diffusion
 eqs., DPM +
 shadowing/
 percolation

Blue are unscaled model results

Compilation from N.Armesto
 (Talk@CERN, 03 Sep 2010)

Bulk properties – constraint a modelli

Charged multiplicity for mid-rapidity in central Pb+Pb @ 2.76 TeV



Monte Carlo,
 coherence via
 collectivity,
 strong gluon
 saturation

Saturation
 ideas

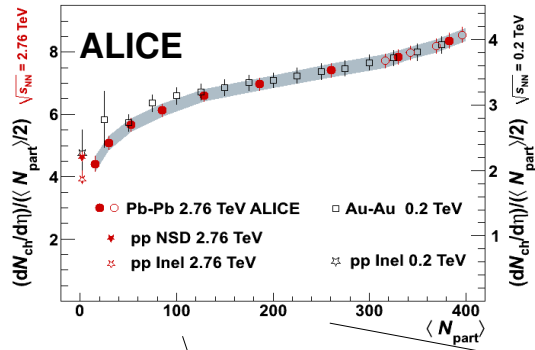
Data driven,
 limiting frag.

Miscellaneous:
 superposition,
 WNM, diffusion
 eqs., DPM +
 shadowing/
 percolation

molteplicita' misurata @LHC

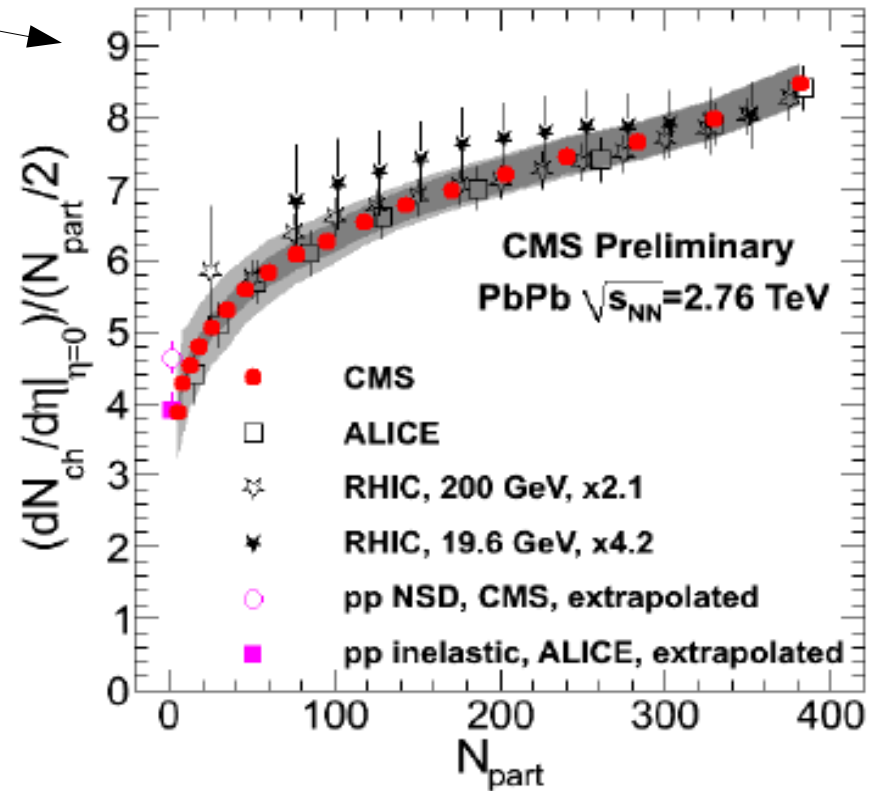
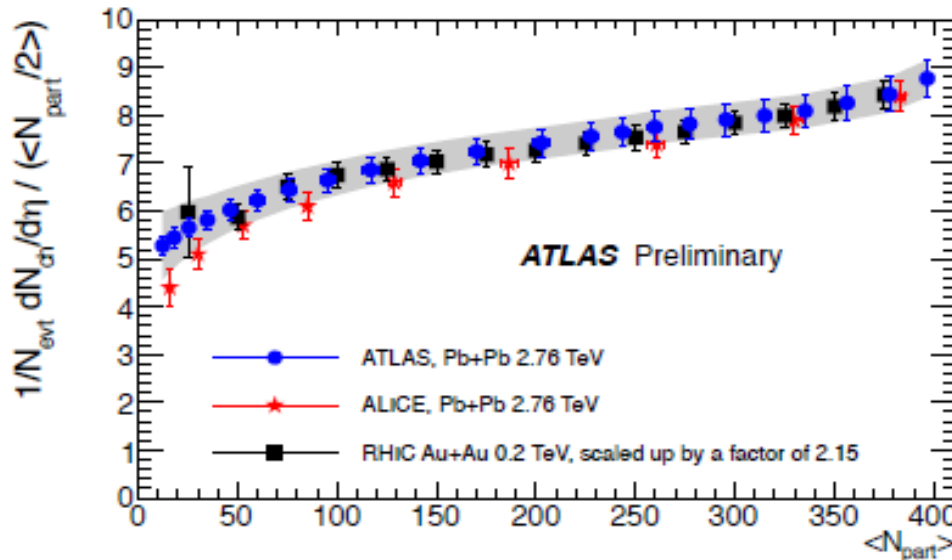
Compilation from N.Armesto
 (Talk@CERN, 03 Sep 2010)

Bulk properties – $dN_{ch}/d\eta$ – dipendenza dalla centralita'

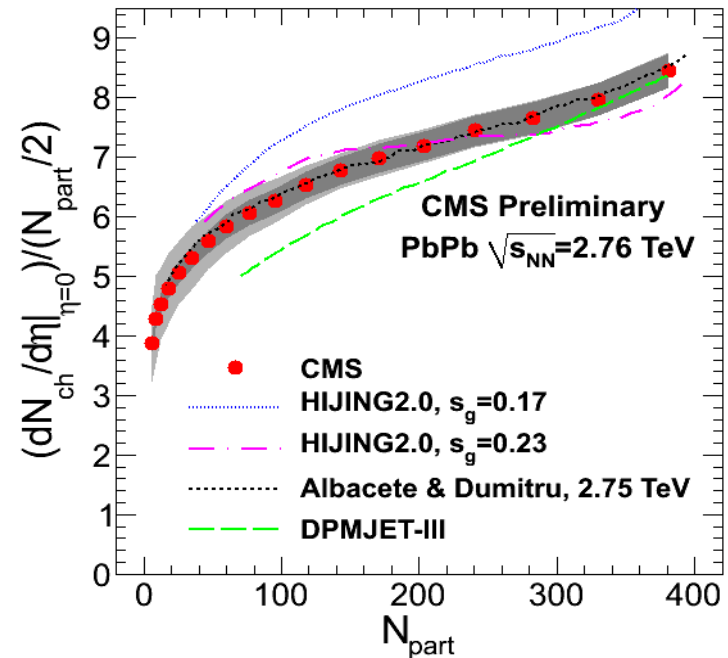
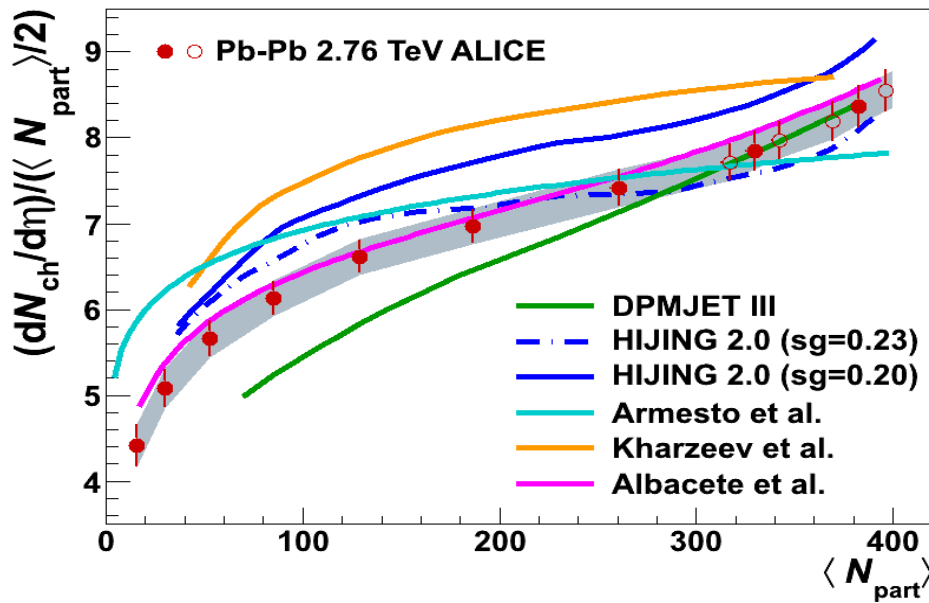


Da RHIC a LHC

- $dN_{ch}/d\eta \sim 1600$ per 0-5% (aumento di ~ 2.1 rispetto a RHIC)
- dipendenza dalla centralita' simile a 0.2 e 2.76 TeV
- buon "matching" al punto pp



Non si vede un' influenza crescente dell' hard scattering (N_{coll}) passando da 0.2 a 2.76 TeV



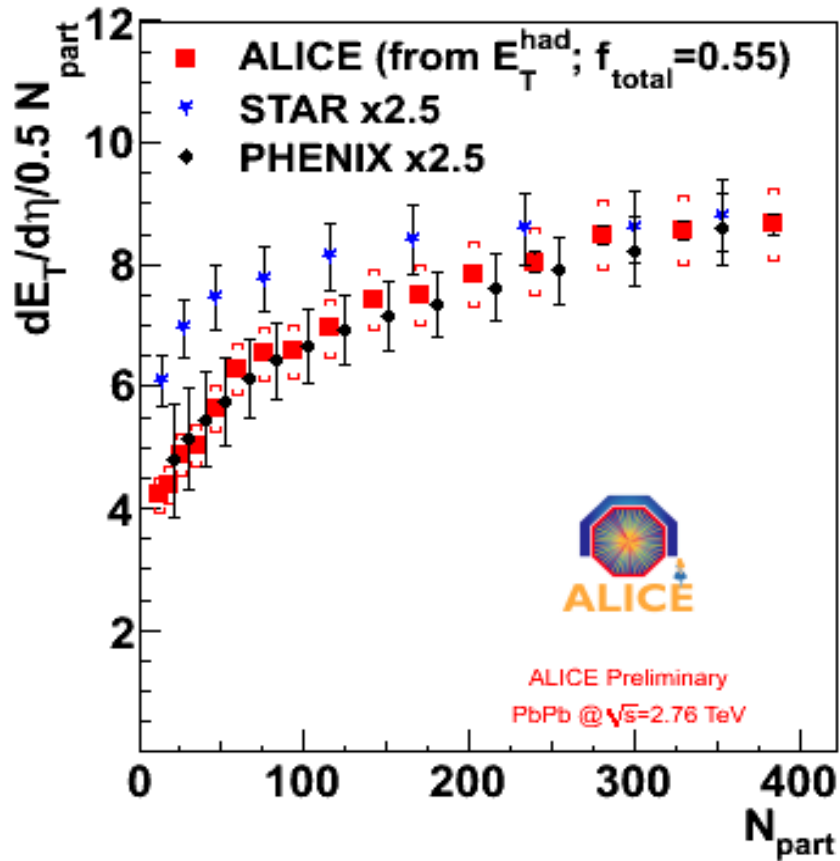
Le conclusioni vanno da

a

Seems to require moderation mechanism
(saturation, shadowing,...)

Very good description of the data by
a parton saturation approach

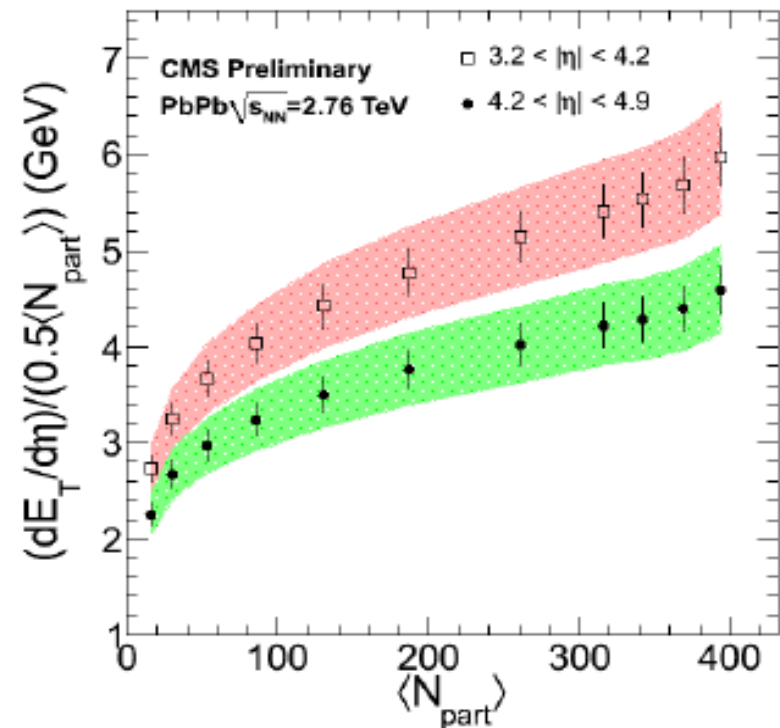
Bulk properties – $dE_T/d\eta$ – dipendenza dalla centralita'



Aumento ~ 2.5 di $dE_T/d\eta / (0.5 \cdot N_{\text{part}})$ rispetto a RHIC

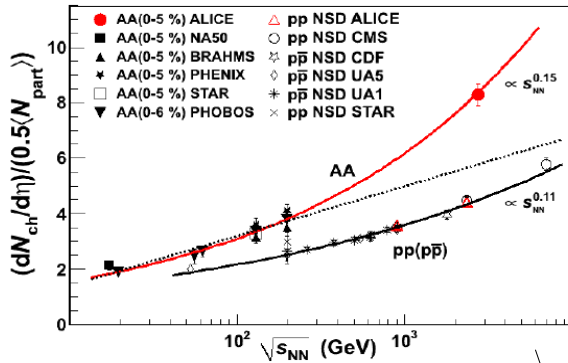
diminuzione di un fattore 2 da $\eta=0$ a $\eta=4$

densita' di energia (Bjorken) $\varepsilon \sim 16 \text{ GeV}/(\text{fm}^2\text{c})$
 @RHIC: $\varepsilon = 5.4 \pm 0.6 \text{ GeV}/(\text{fm}^2\text{c})$



$$\varepsilon = \frac{1}{\pi R^2 \tau} \frac{dE_t}{dy} \quad R = 1.12 A^{1/3} \text{ fm}$$

Bulk properties – $dN_{ch}/d\eta$ – dipendenza da \sqrt{s}



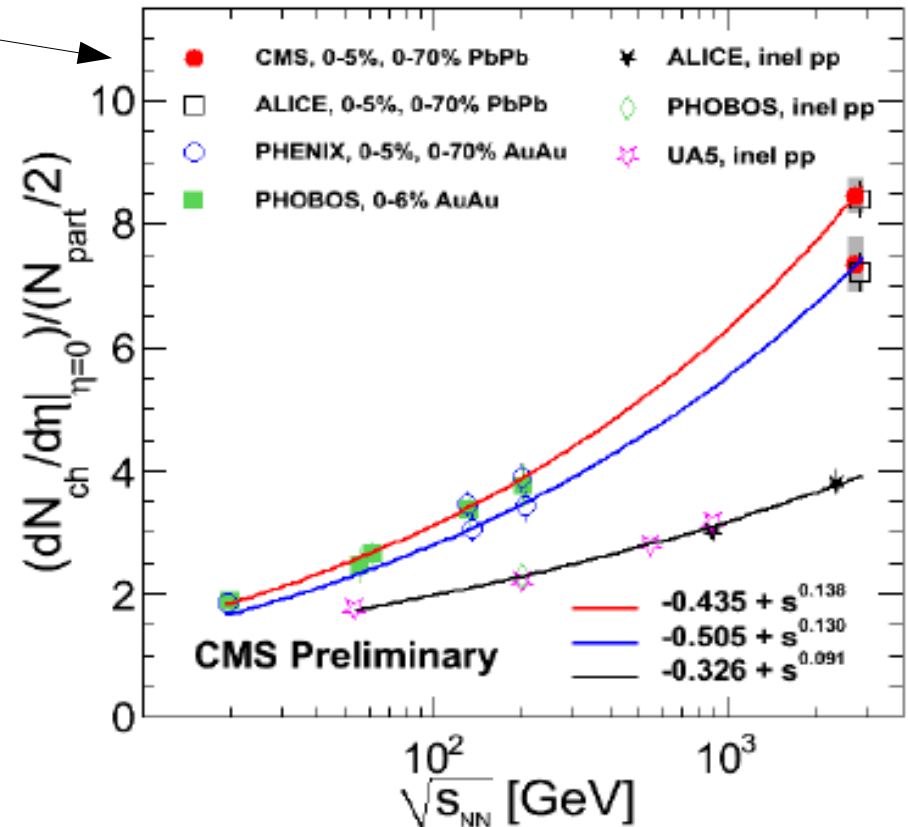
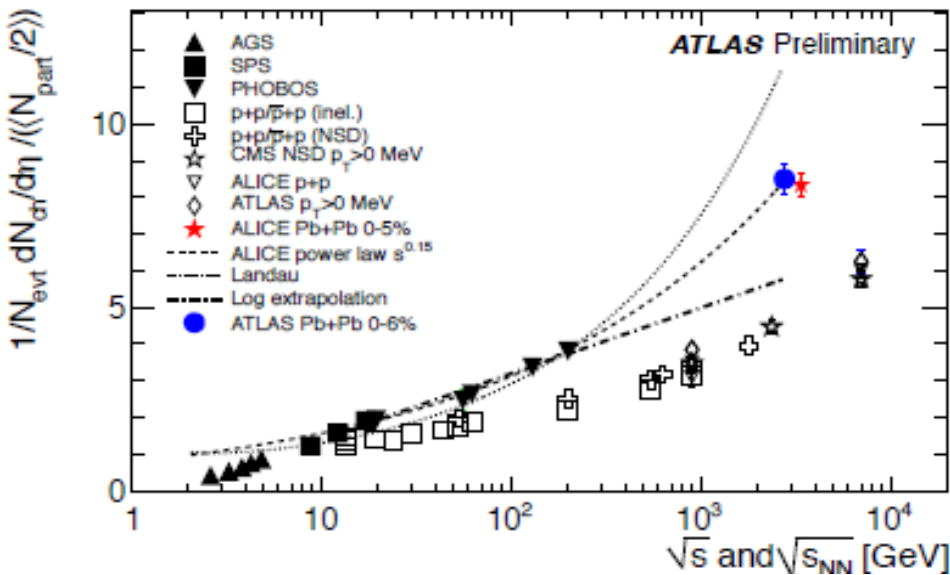
$$dN_{ch}/d\eta/(0.5*N_{part}) \sim 8$$

2.1 x RHIC

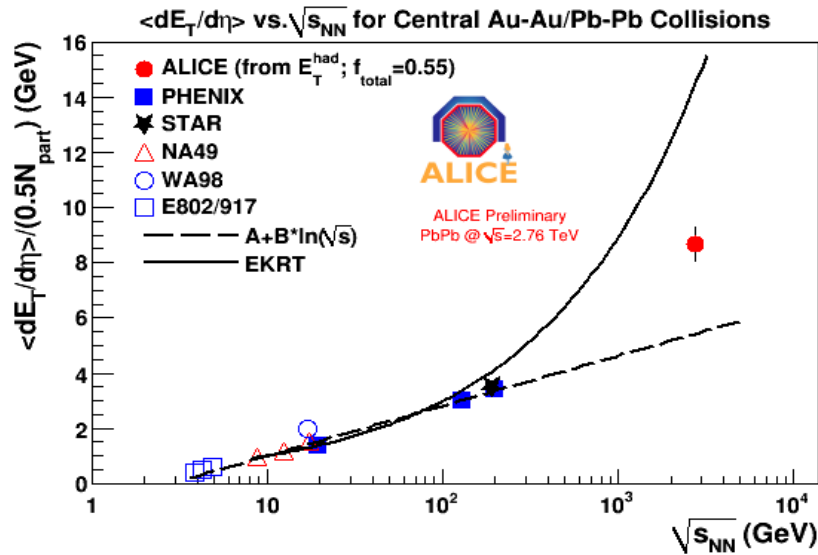
1.9 x pp (NSD) at 2.36 TeV

Crescita con \sqrt{s} piu' rapida in AA che in pp

Un semplice scaling logaritmico estrapolato da energie piu' basse non funziona



Bulk properties – $dE_T/d\eta$ – dipendenza da \sqrt{s}

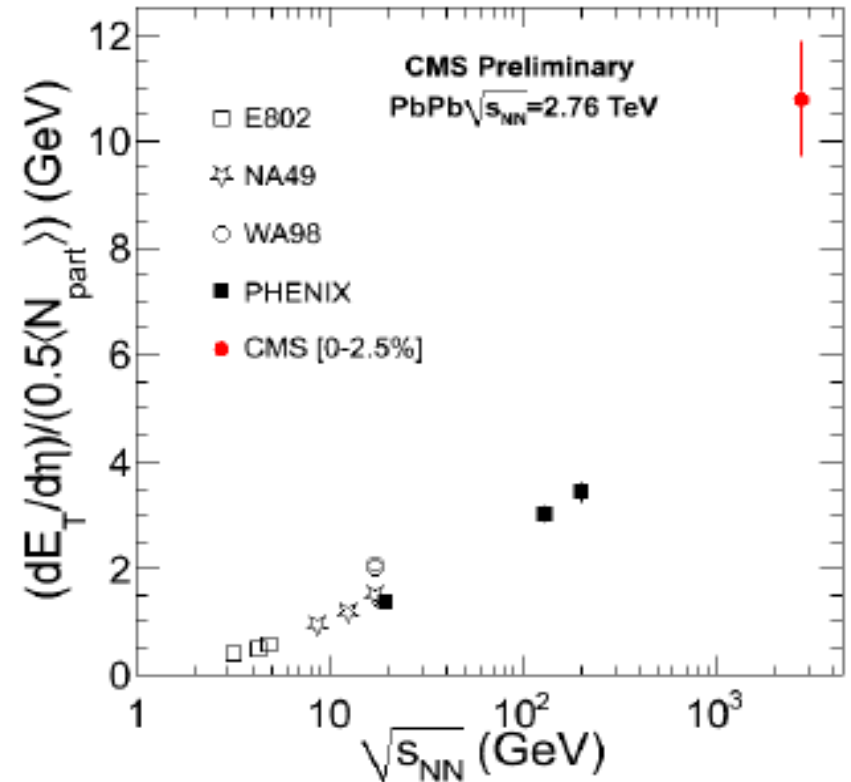


$dE_T/d\eta / (0.5 \cdot N_{part}) \sim 9$ in 0-5%

~5% aumento di N_{part} (353 \rightarrow 383)

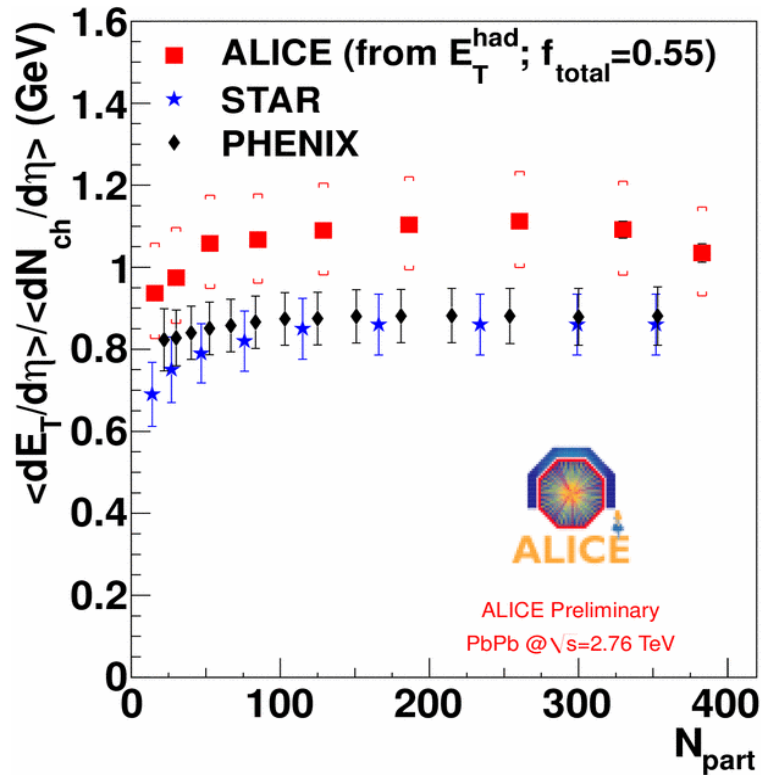
$\rightarrow 2.7 \times$ RHIC

(consistente con un 20% di aumento di $\langle p_T \rangle$)

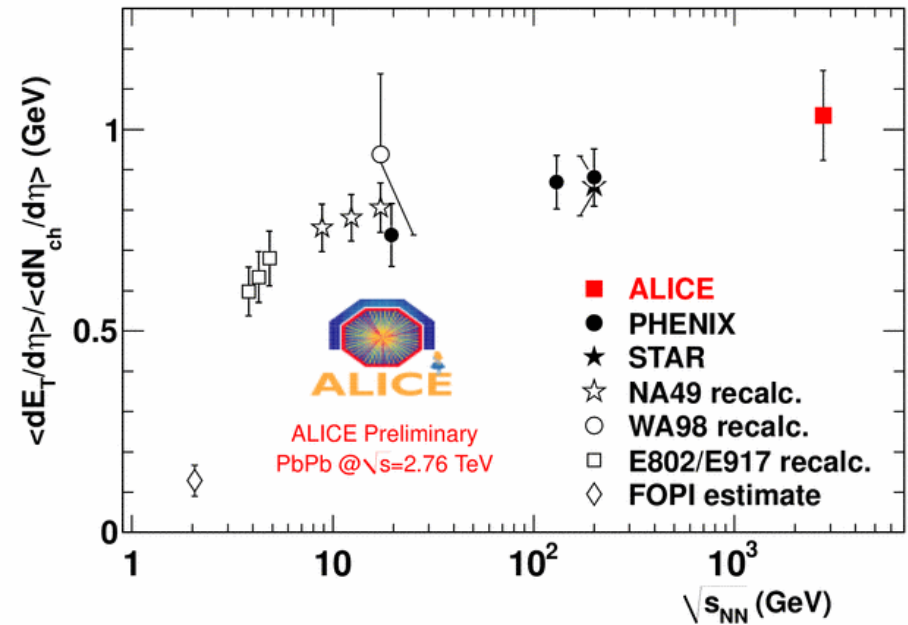


Rispetto a RHIC, aumento di 3.4 ± 0.4 ;
confrontare con 2.2 ± 0.1 per la molteplicità'

Bulk properties – E_T/N_{ch}



ALI-PREL-4395



ALI-PREL-4265

Comportamento consistente di E_T e N_{ch}

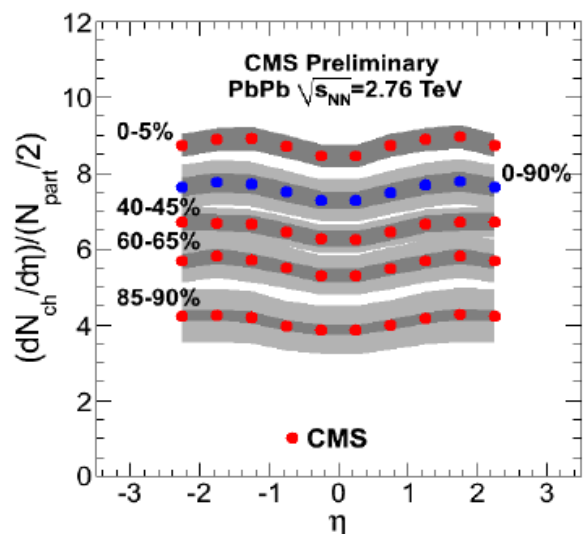
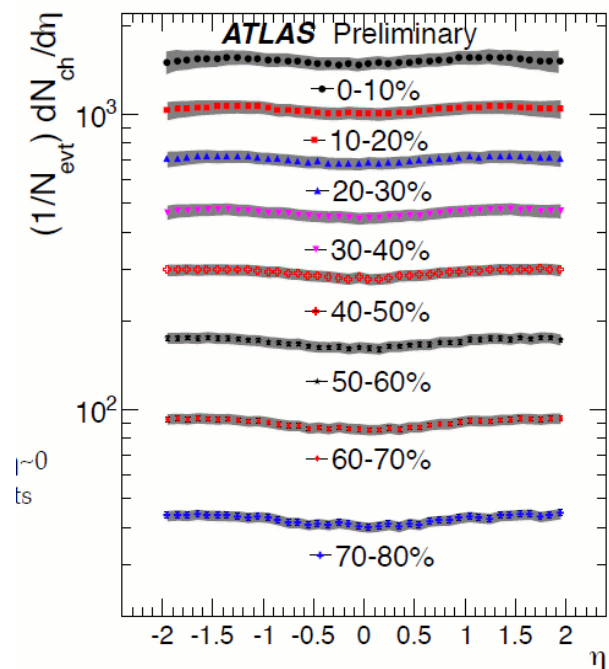
Entrambe aumentano con l' energia

Entrambe crescono da periferiche a centrali

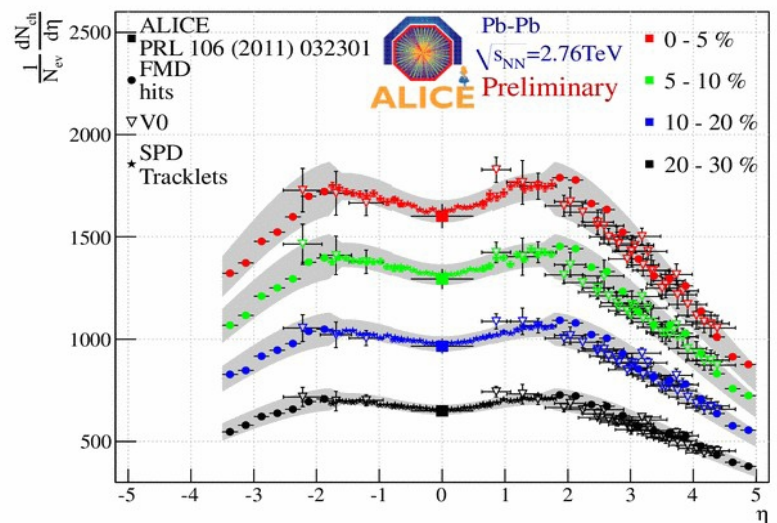
E_T/N_{ch} indipendente dalla centralita'

E_T/N_{ch} cresce leggermente con l' energia

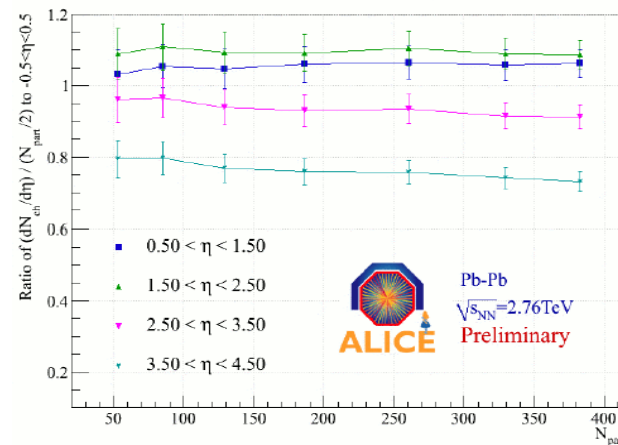
Bulk properties – $dN_{ch}/d\eta$ – dipendenza da η



ad alta rapidita':
 proprieta' dello stato iniziale (CGC, densita' di gluoni)
 energy and baryon stopping



same trend in all η intervals



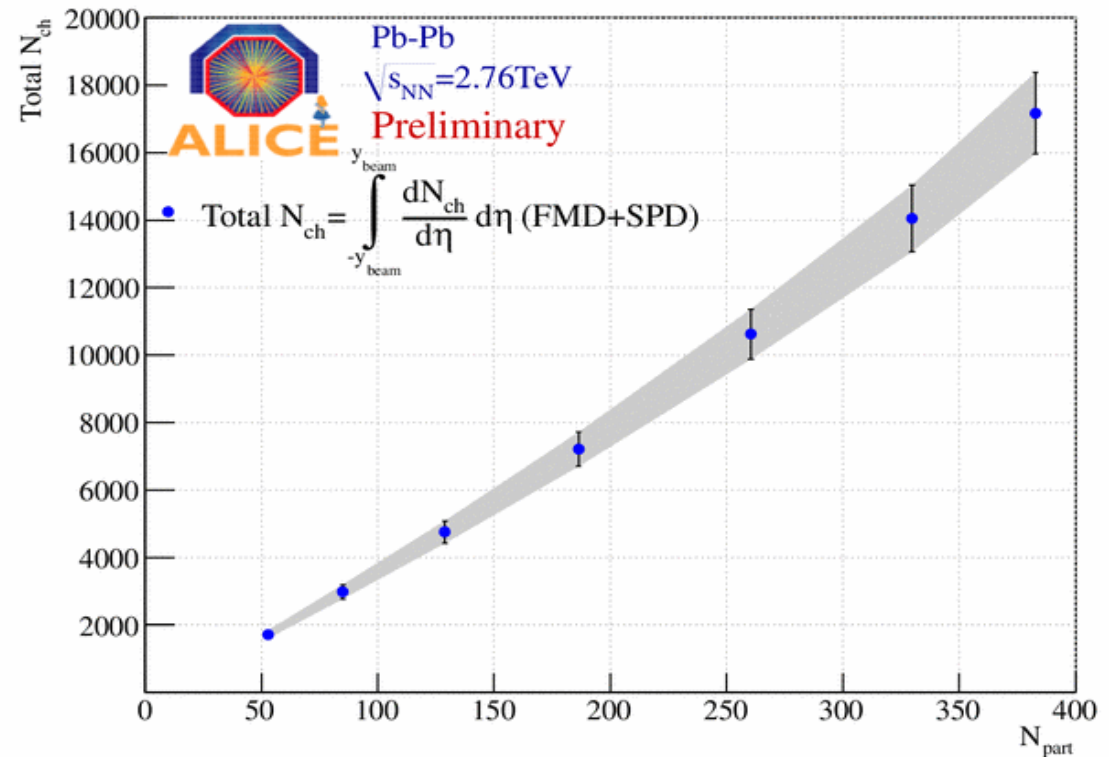
Bulk properties – N_{total}

Misurata con estrapolazione in η - $y_{\text{beam}} > -3$ (linear e double Gaussian)

La **molteplicita' totale** cresce in modo pressochè **lineare** con N_{part}

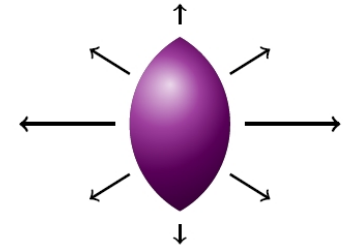
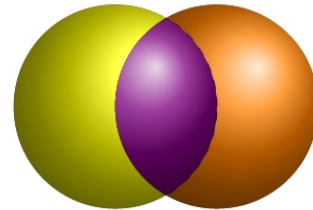
la distribuzione di pseudorapidita' diventa piu' stretta per eventi centrali
→ la maggior produzione di particelle avviene a mid-rapidity

@RHIC: $N=4630$ in $|\eta|<4.7$



ALI-PREL-2332

Quando i nuclei collidono a parametro d' impatto diverso da zero, la **regione di overlap** e' **asimmetrica** e quindi la distribuzione iniziale della materia nel piano perpendicolare alla direzione dei fasci e' asimmetrica (c'e' un **gradiente di pressione anisotropo**).



In caso di **materia (fortemente) interagente** => l' asimmetria spaziale viene convertita via collisioni multiple in una **distribuzione anisotropa dei momenti**. La **viscosita'** diminuisce l' efficienza della conversione.

Il momento secondo della distribuzione azimutale finale degli adroni viene chiamato **flusso ellittico**:

$$\text{Elliptic flow coefficient } dn/d\phi \sim 1 + 2 v_2(p_T) \cos(2\phi) + \dots$$

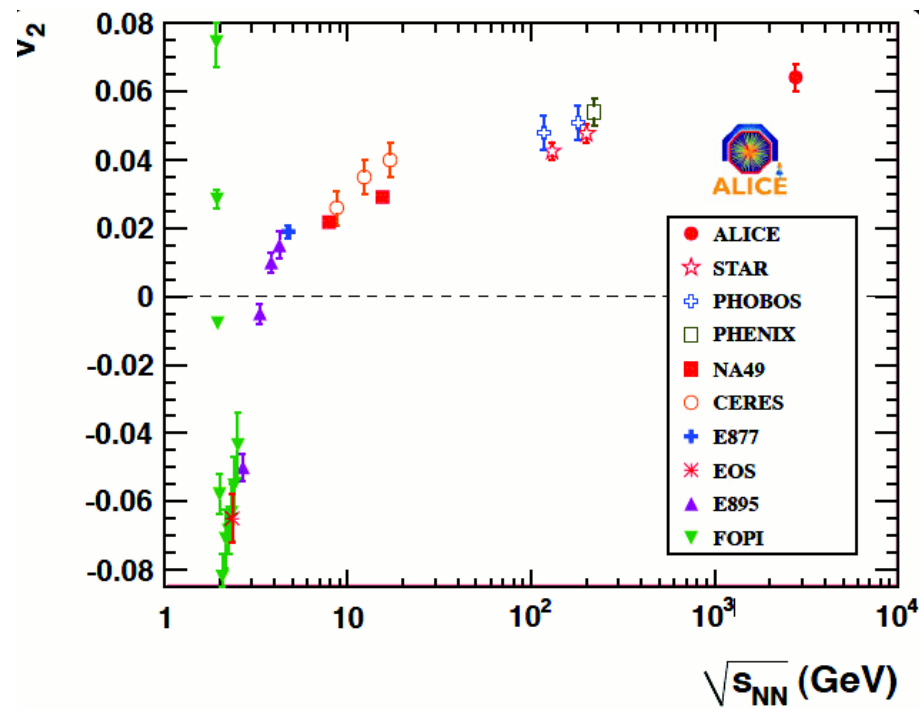
(angolo di azimuth misurato rispetto al piano d' interazione)

Date delle condizioni al contorno, **il profilo del "flow" dipende dalla EoS e dalla viscosita η del fluido.**

N.B. Nell' idrodinamica del liquido perfetto: $\eta = 0$ (viscosita nulla).

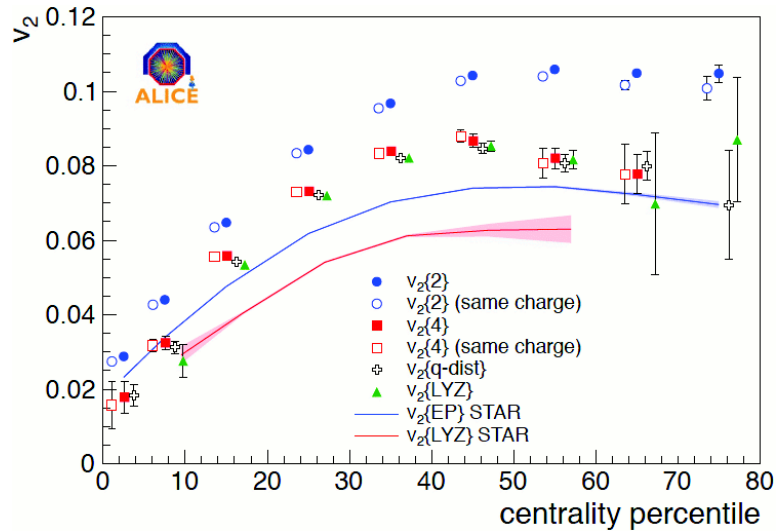
RHIC Scientists Serve Up “Perfect” Liquid

New state of matter more remarkable than predicted - raising many new questions - April 18, 2005

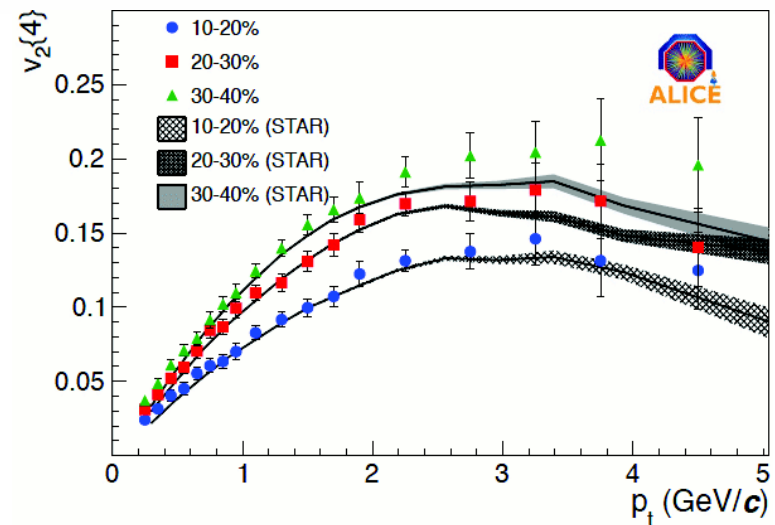
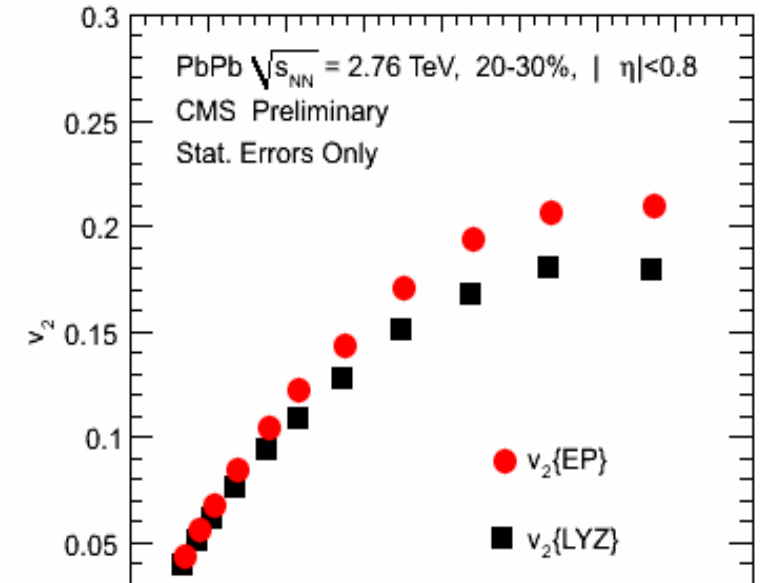


Il sistema prodotto a LHC si comporta come un fluido con viscosita' molto bassa

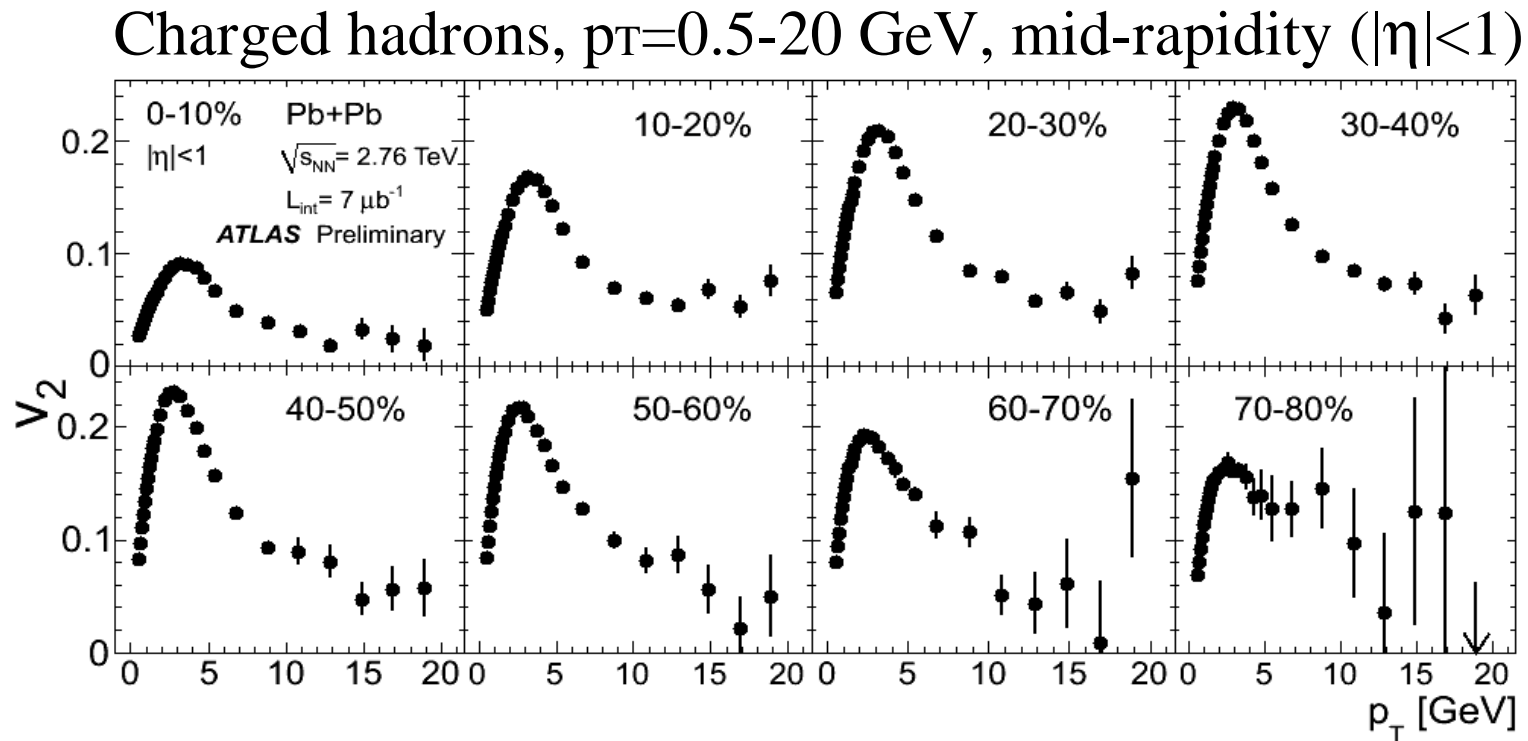
v_2 aumenta fino al 30% per collisioni piu' periferiche



v_2 in funzione di p_T non cambia molto da RHIC a LHC



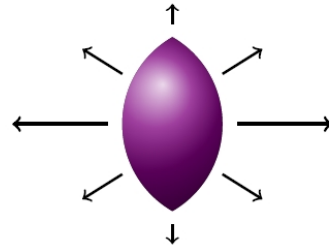
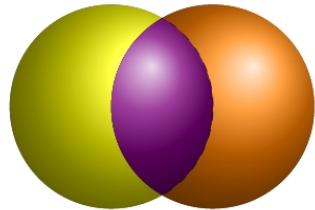
v_2 misurato fino ad un p_T di 20 GeV/c



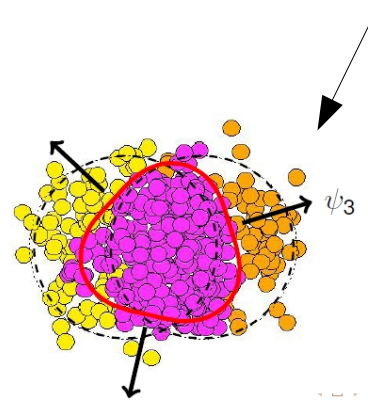
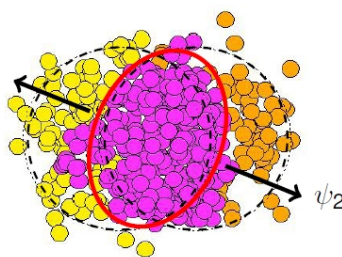
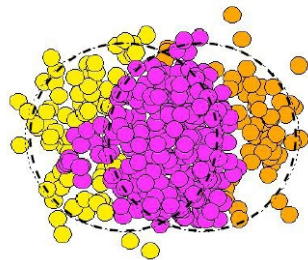
la dipendenza da p_T e' debole tra 8-10 e 20 GeV/c

@alto p_T : opacita' del mezzo \Rightarrow **constraint sui modelli per jet quenching**

HI physics: flow fluctuations

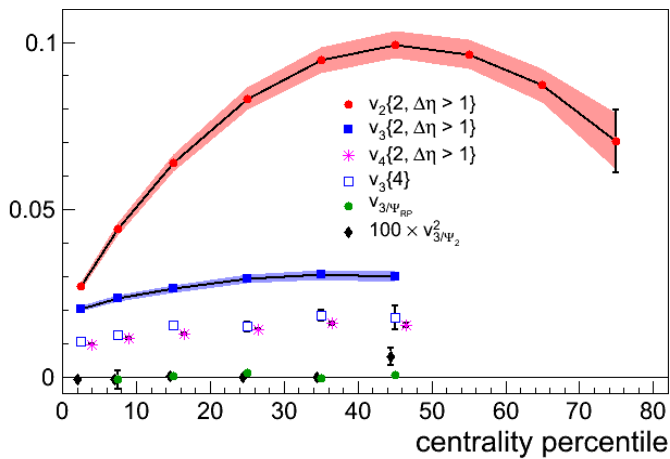


Le fluttuazioni rompono la simmetria $\phi \rightarrow -\phi$
e $\phi \rightarrow \pi - \phi$: le armoniche dispari $v_1, v_3 \neq 0$

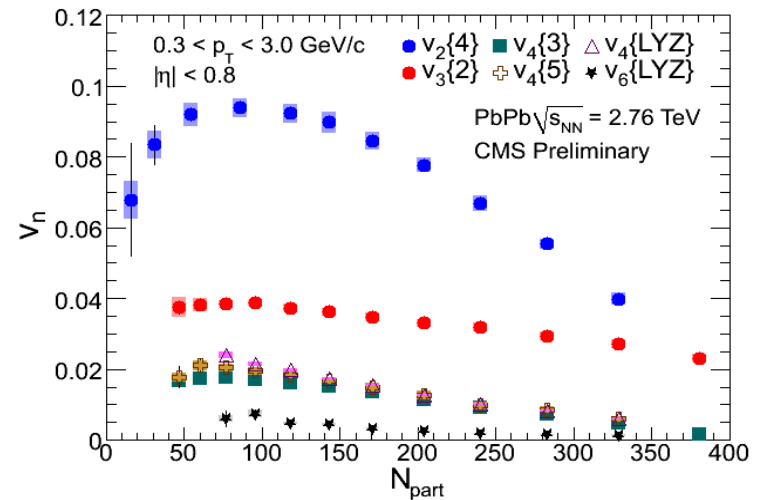
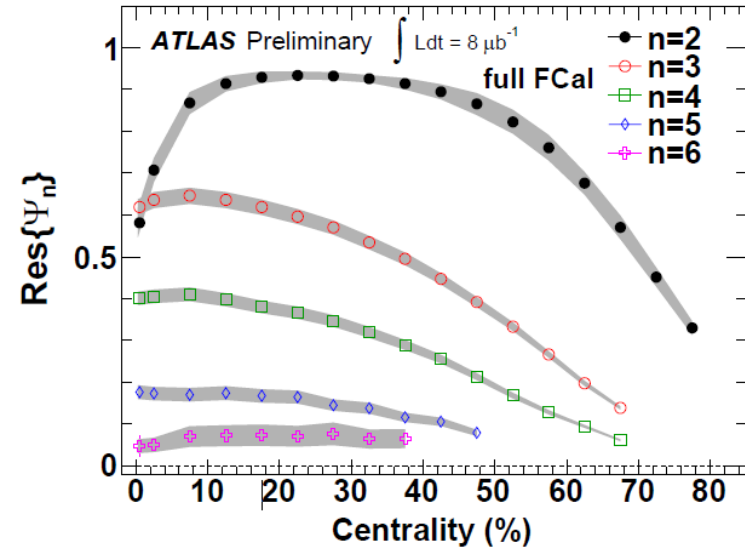


A causa di fluttuazioni di stato iniziale, il flusso ellittico in realta' e' nel piano dei partecipanti e non nel piano della reazione

Si osserva un flusso triangolare v_3 (v_n) significativo
 La dipendenza dalla centralita' di v_2 e v_3 e' diversa



Il flusso triangolare v_3 misurato rispetto al piano di reazione e' consistente con zero $\leftarrow v_3$ dovuto a fluttuazioni della eccentricita' iniziale



Flusso ellittico integrato a LHC e' piu' grande che a RHIC di circa il **30%**, compatibile con stime dai modelli idrodinamici

La dipendenza da p_T del flusso ellittico e' simile a LHC e a RHIC => l' aumento del 30% del flusso integrato flow e' dovuto ad un **aumento del flusso radiale**

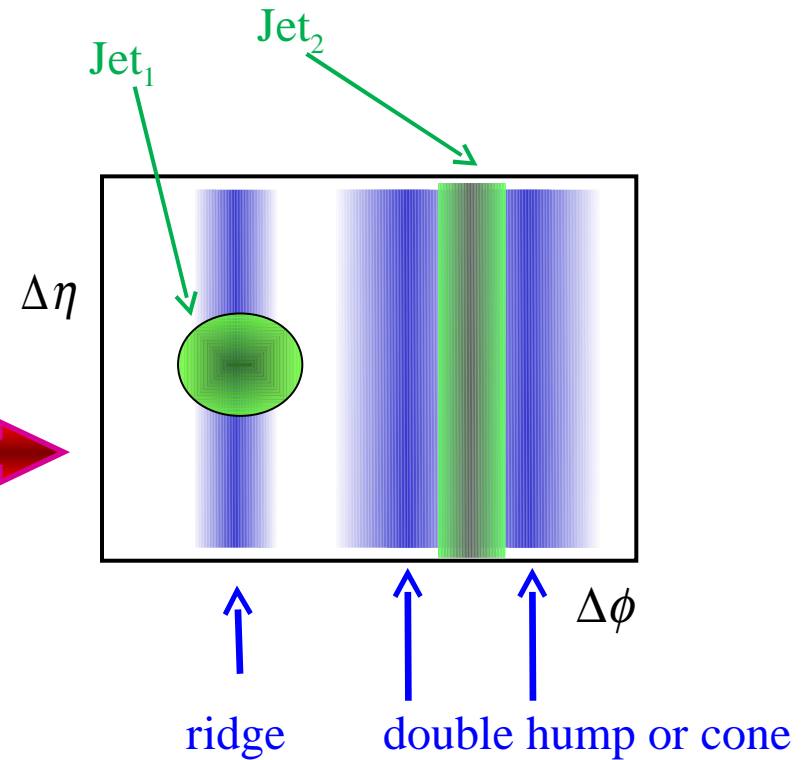
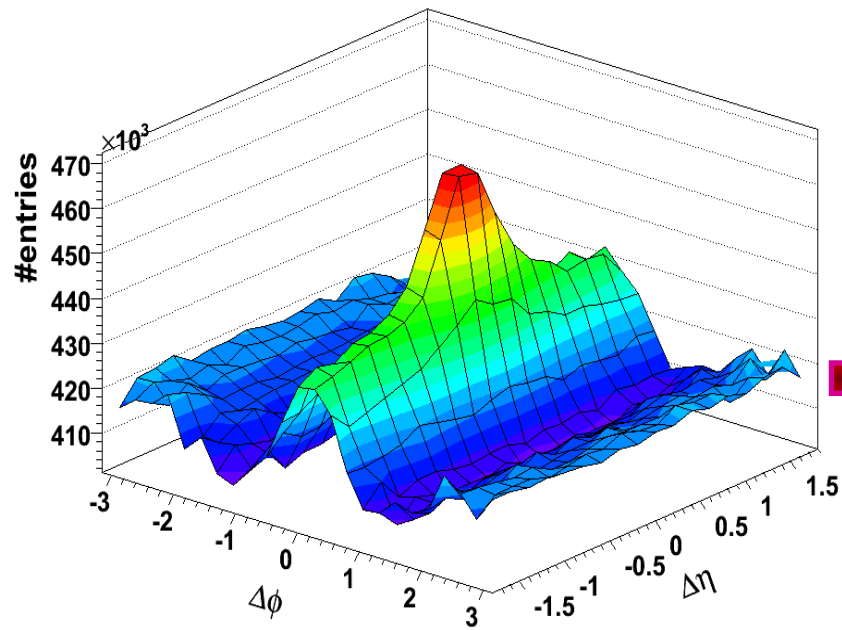
Il **flusso triangolare** e' significativo, la sua dipendenza dalla centralita' e' in accordo con le predizioni idrodinamiche

Ogni armonica ha il suo **piano dei partecipanti** lungo il quale si sviluppa; il piano dei partecipanti di v_2 e' diverso da quello di v_3

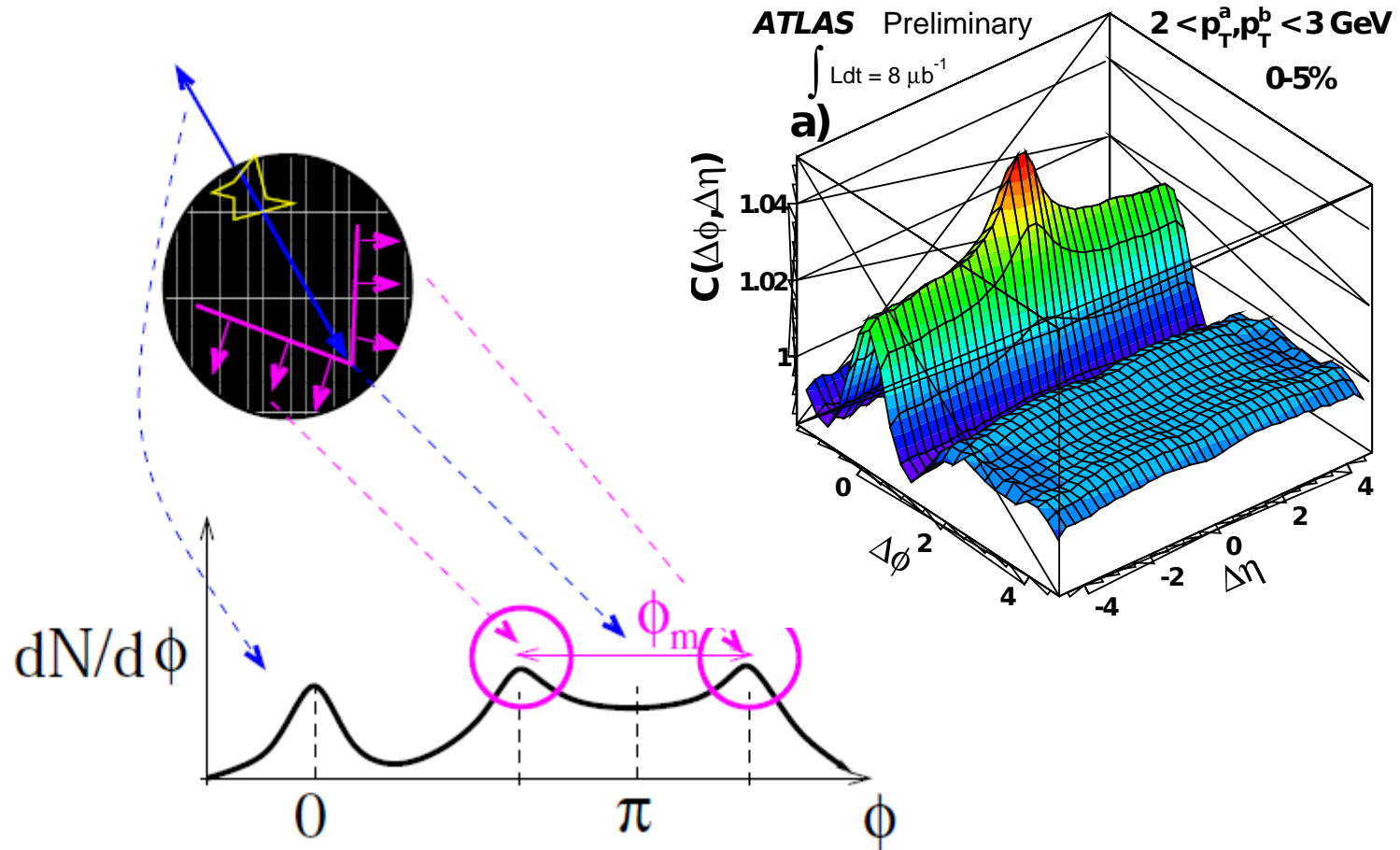
v_3 e' originata principalmente da **fluttazioni evento per evento della geometria** spaziale iniziale

Predizioni idrodinamiche con condizioni iniziali alla Glauber non descrivono simultaneamente i dettagli della dipendenza da p_T di v_2 e v_3 : $v_2(p_T)$ e' meglio descritto con $\eta/s = 0$, mentre per $v_3(p_T)$ $\eta/s = 0.08$

Long range structure at RHIC and LHC

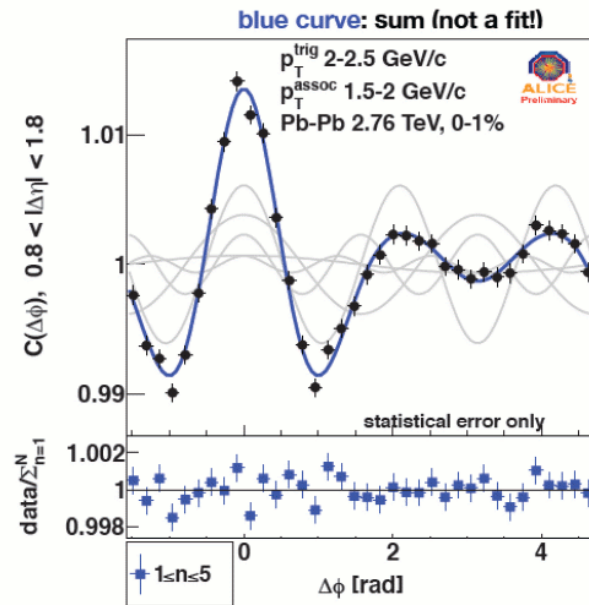


Sono dovute a interazioni “jet-mezzo” o a “fluttuazioni+flow”?
Qual'e' l' origine di “ridge” and “cone” nelle correlazioni di 2P ?

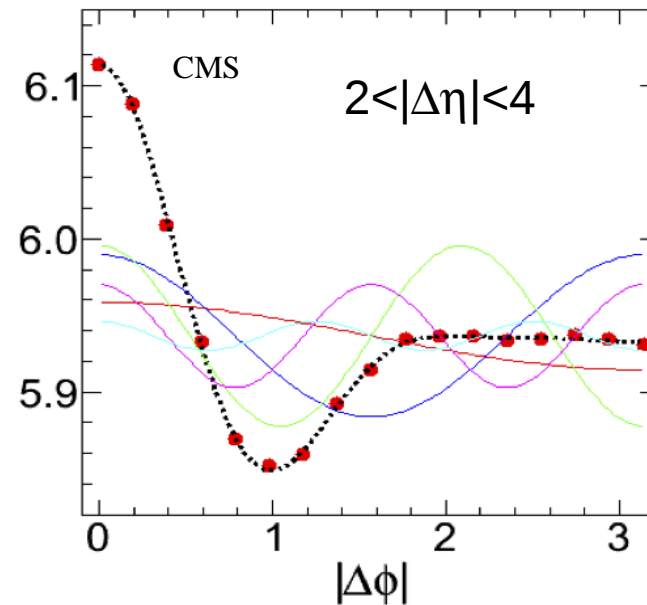
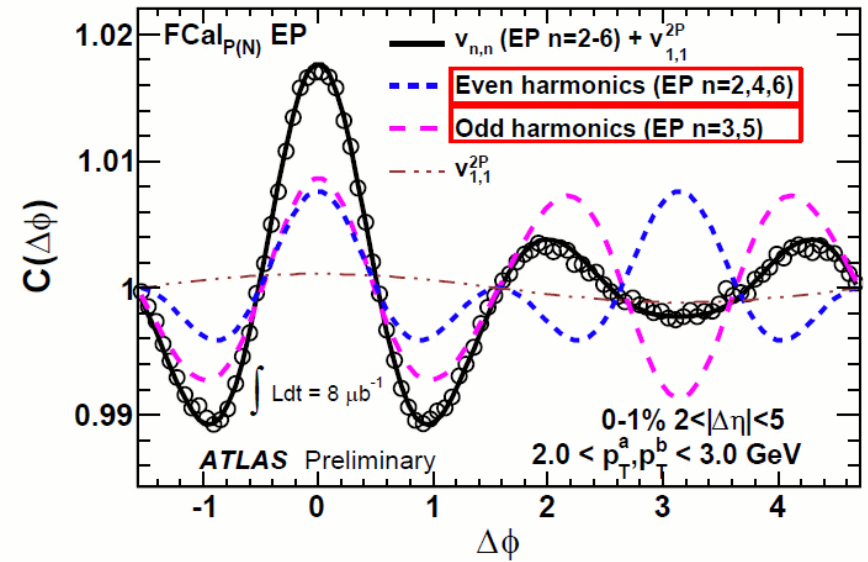


Mach cones in the fluid phase of the system are a generic prediction of a medium characterized by low viscosity and a high opacity to hard probes

Date fluttuazioni geometriche iniziali + piccola viscosita' del mezzo



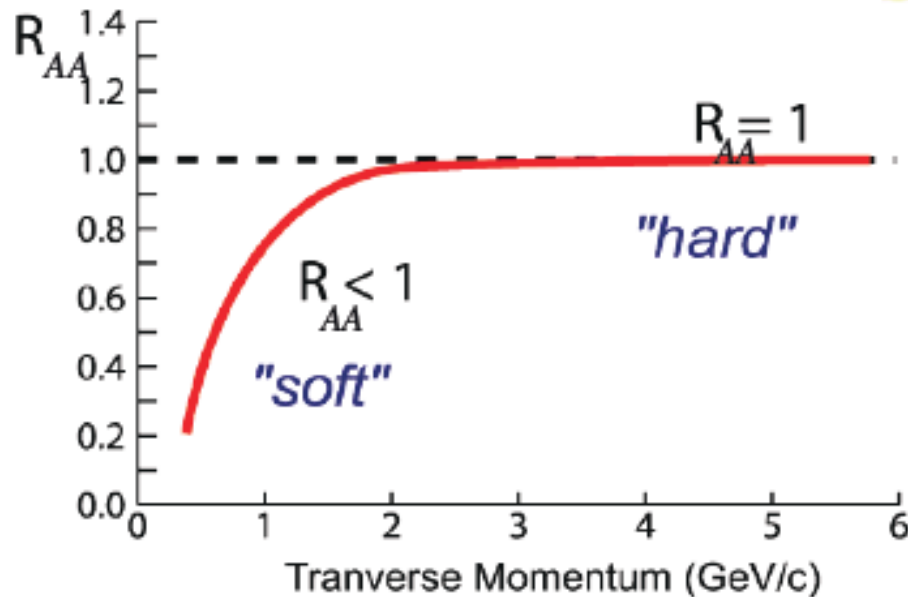
long range “ridge” e “cone” nelle correlazioni di 2P possono essere spiegate da v_n ($n=5-6$)



$$R_{AA} = \text{medium/vacuum}$$

$$R_{AA}(p_T) = \frac{d^2 N^{AA} / dp_T d\eta}{T_{AA} d^2 \sigma^{NN} / dp_T d\eta}$$

$$\langle N_{\text{binary}} \rangle / \sigma_{\text{inel}}^{p+p}$$



no medium effects:

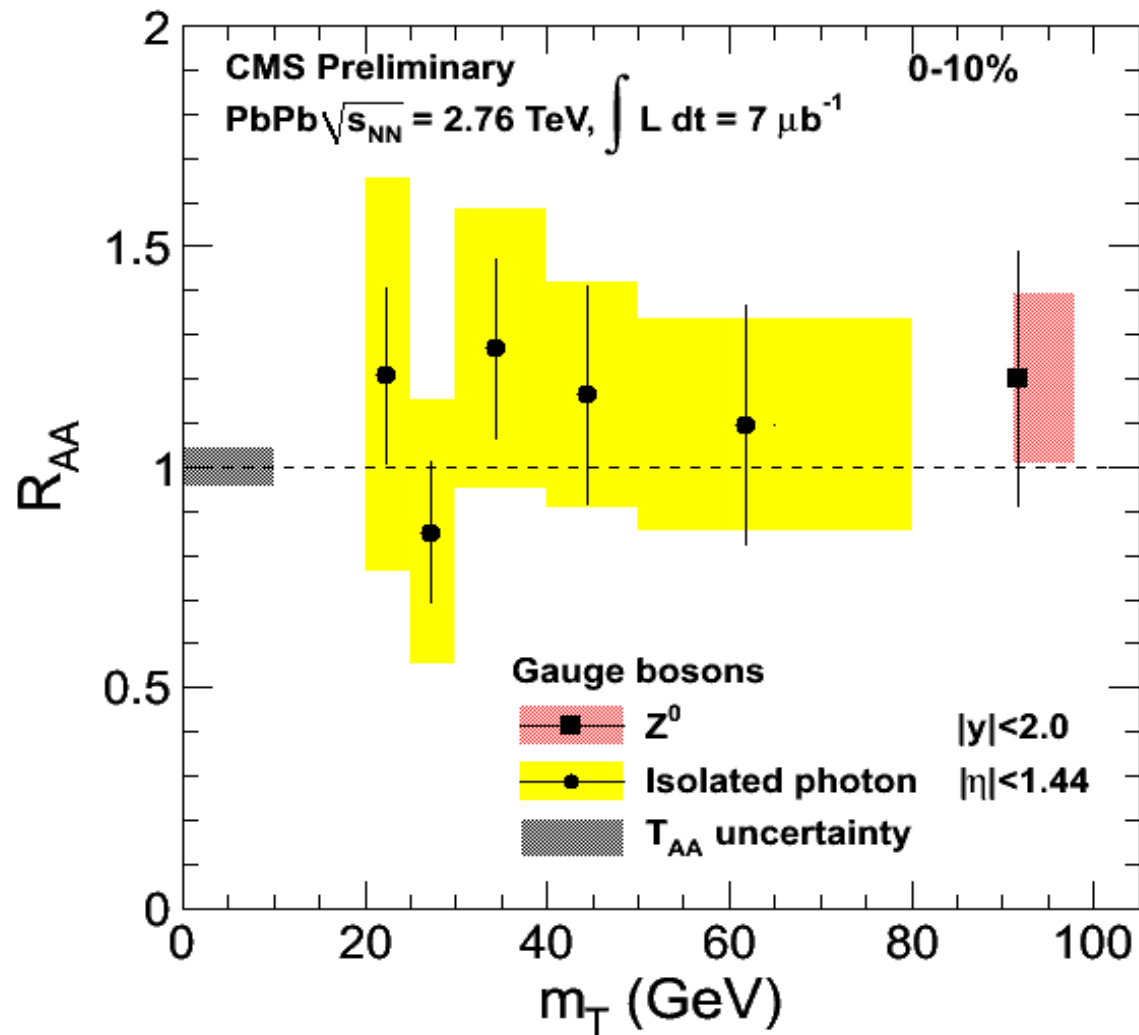
$R_{AA} < 1$ in regime of soft physics

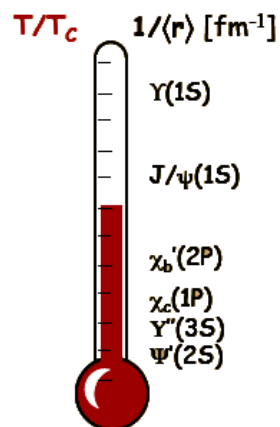
$R_{AA} = 1$ at high- p_T where hard scattering dominates

Suppression:

$R_{AA} \ll 1$ at high- p_T

PbPb 0-10% Central



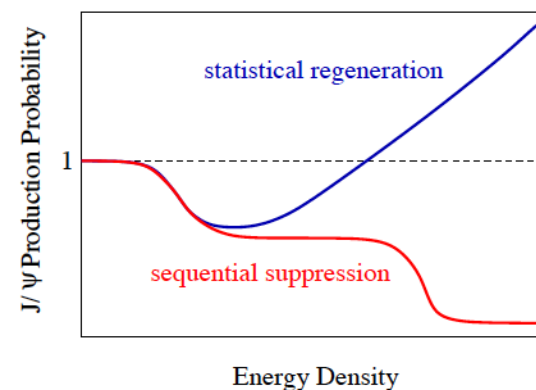
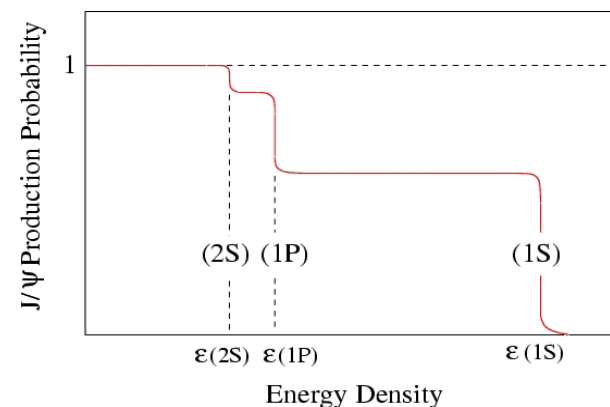


Debye screening nella fase deconfinata
 \Rightarrow melting

Differenti energie di legame per i vari
 stati + feed down \Rightarrow **melting sequenziale**

Puzzle:

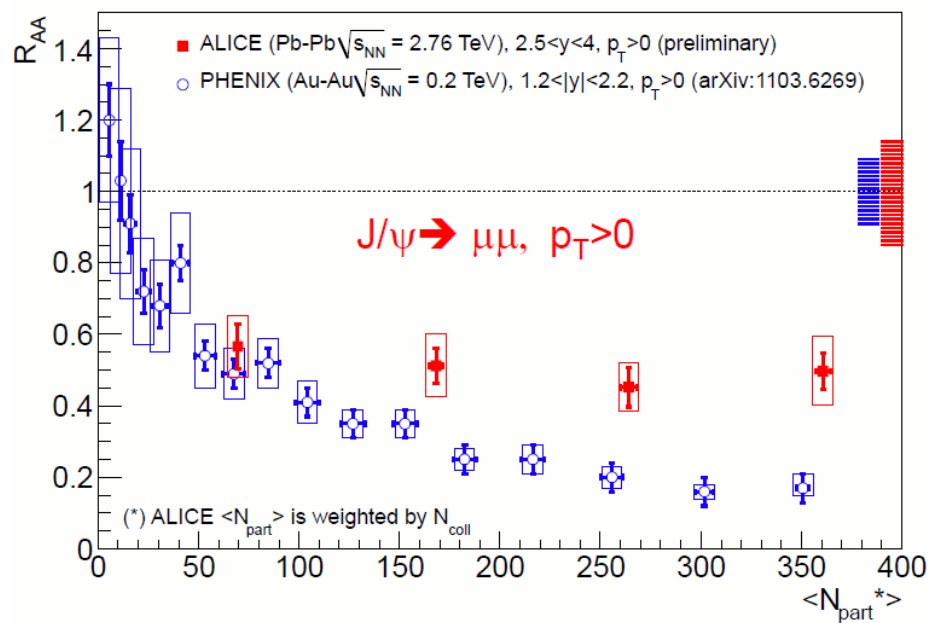
- Soppressione oltre quanto previsto per effetti di cold nuclear matter non molto grande a RHIC. **Rigenerazione ?**
- RHIC misura a rapidita' forward una soppressione maggiore che a rapidita' centrali



Quarkonia: J/ψ R_{AA} @LHC

ALICE: J/ψ R_{AA} a LHC ($2.5 < y < 4$) maggiore che a RHIC ($1.2 < |y| < 2.2$)

R_{AA} e' simile a RHIC ($|y| < 0.35$) tranne che nel bin piu' centrale

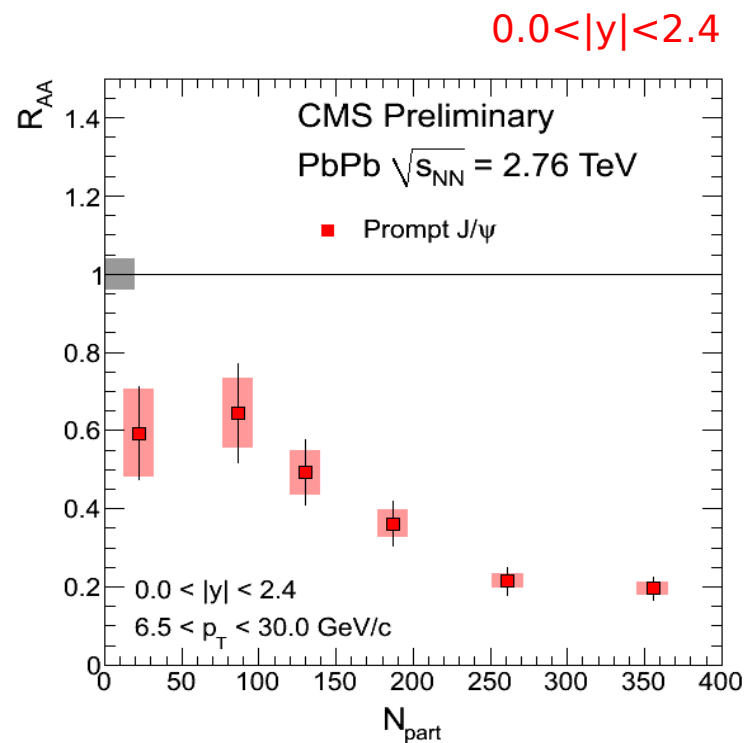


ALICE Low $p_T^{J/\psi}$

$$R_{AA} = 0.49 \pm 0.03 \pm 0.11$$

CMS for $p_T > 3$ GeV/c $1.6 < y < 2.4$

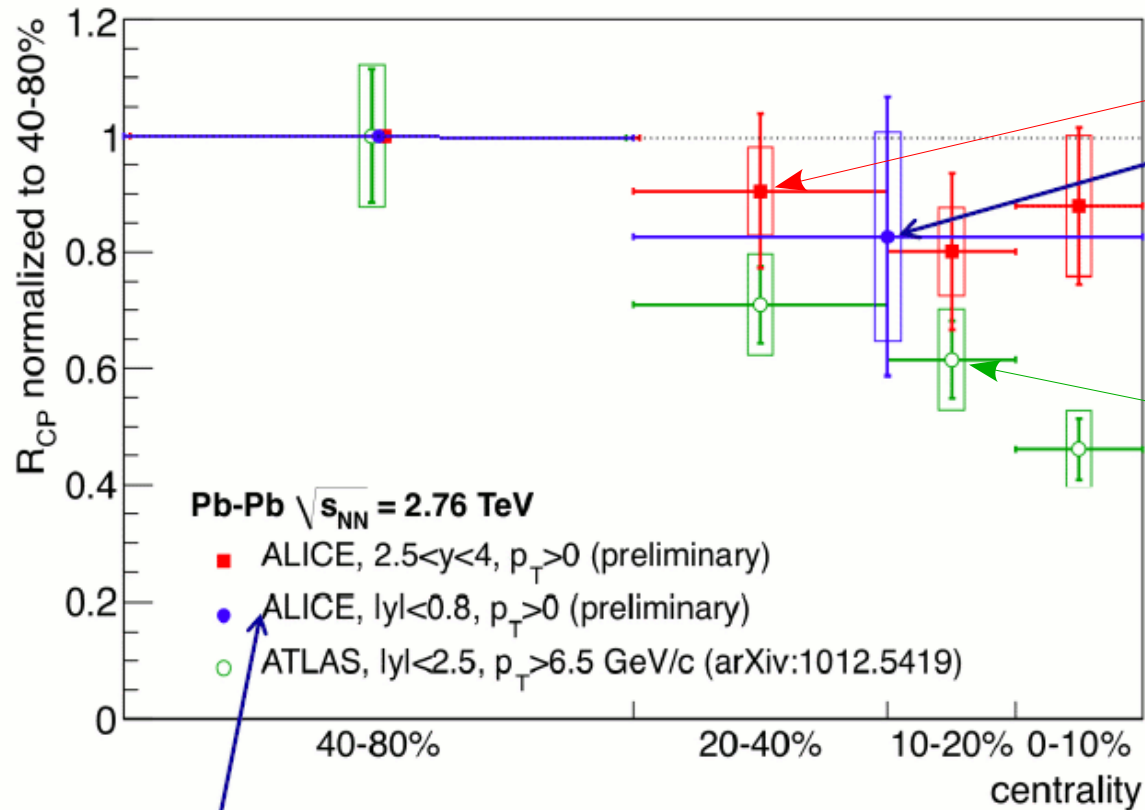
$$R_{AA} = 0.39 \pm 0.06 \pm 0.03$$



CMS: Central 0-10% $R_{AA} = 0.20 \pm 0.03 \pm 0.01$

Peripheral 50-100% $R_{AA} = 0.59 \pm 0.12 \pm 0.10$

« Peripheral » reference 40-80% centrality bin



ALICE:

- $2.5 < y < 4.0$;
- $|y| < 0.8$
- $p_T \geq 0$ GeV/c;

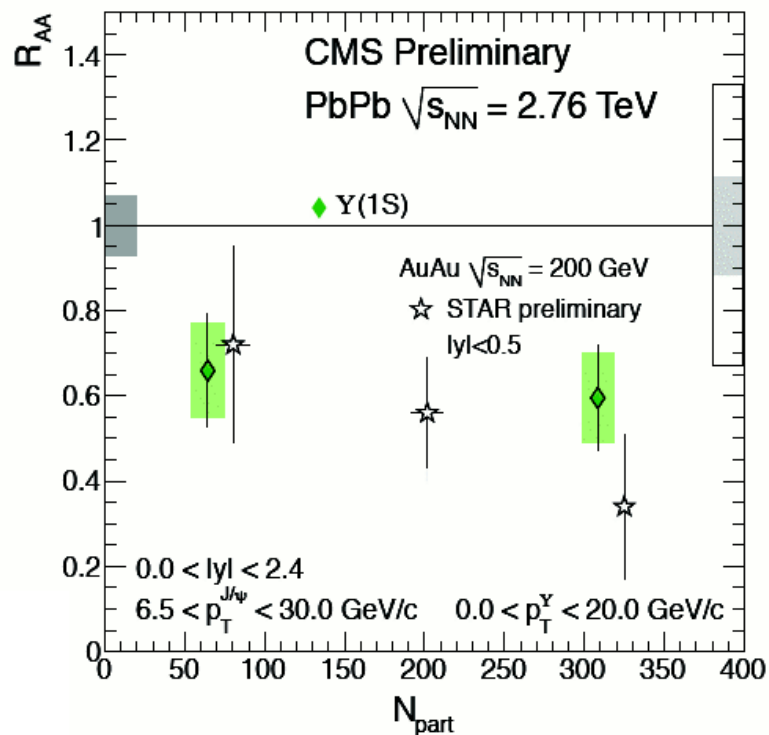
ATLAS:

- $|y| < 2.4$
- 80% J/ψ ,
- $p_T \geq 6.5$ GeV/c;
- Error in 40-80% centrality bin not propagated.

ALICE, misura problematica nel canale ee

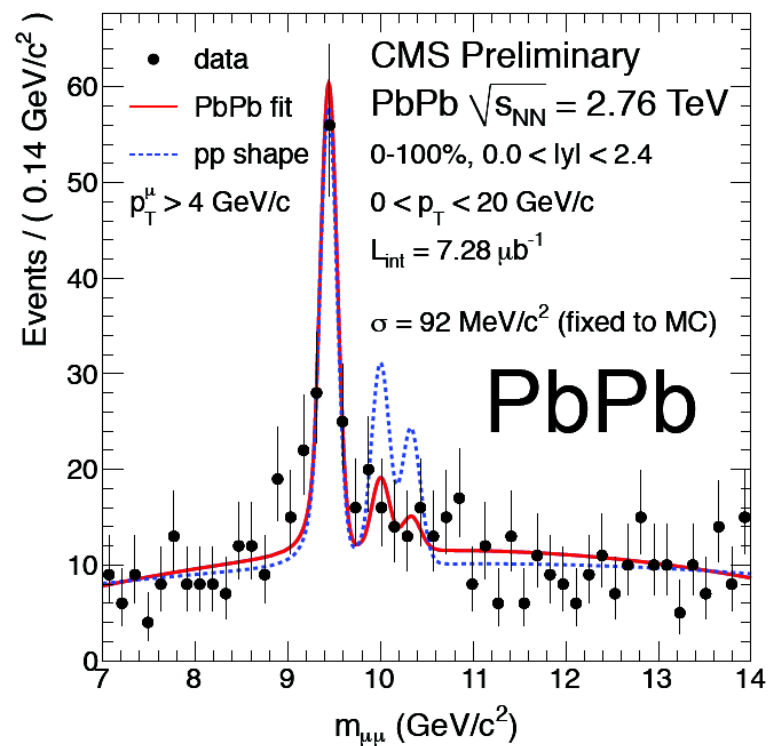
ALICE $2.5 < y < 4.0$ meno soppressione di ATLAS (high p_T , $|y| < 2.4$)

CMS: $\Upsilon(1S)$ $R_{AA} = 0.62 \pm 0.11 \pm 0.10$
 STAR: $\Upsilon(1+2+3S)$ $R_{AA} = 0.56 \pm 0.11^{+0.02}_{-0.10}$



L' osservazione e' forse consistente
 con il melting solo degli stati eccitati

Una gran parte della $\Upsilon(1S)$ viene da stati eccitati

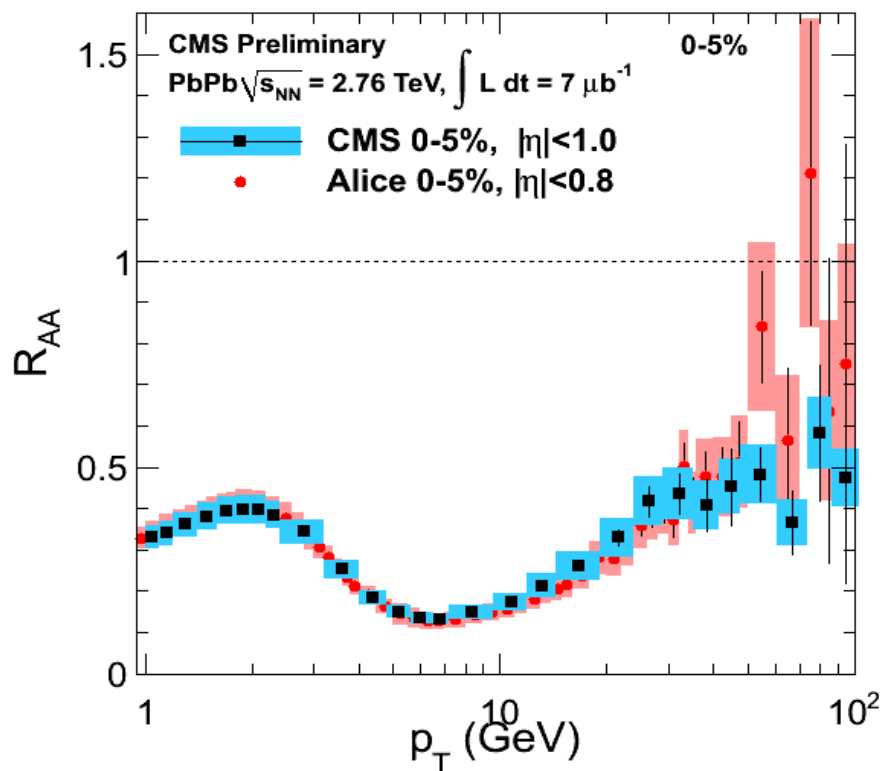


$$\frac{Y(2S+3S)/Y(1S)|_{PbPb}}{Y(2S+3S)/Y(1S)|_{pp}} = 0.31^{+0.19}_{-0.15} \pm 0.03$$

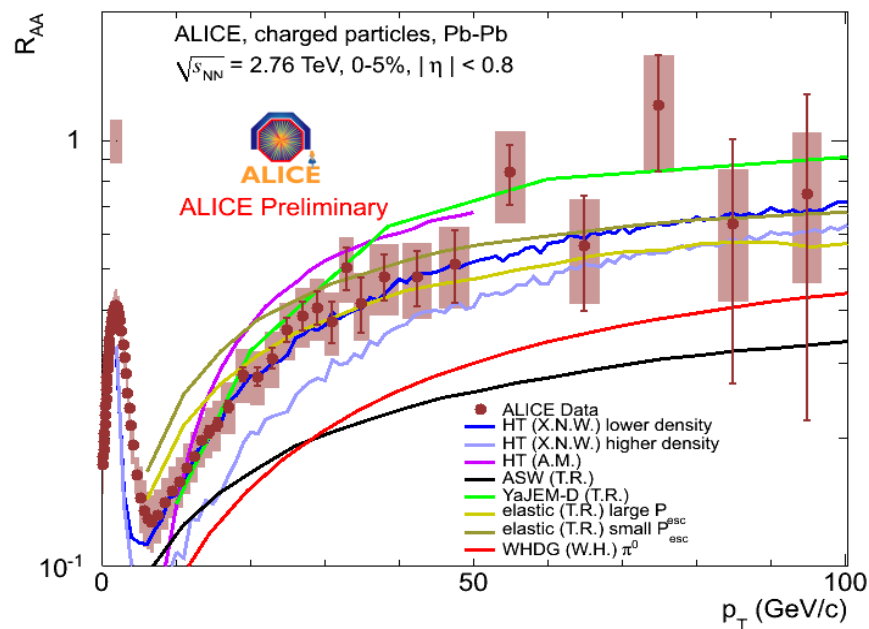
Significance of the suppression 2.4σ

High P_T suppression: hadron R_{AA} at LHC

Forte soppressione delle particelle cariche a $p_T < 50$ GeV/c



Pronunciata dipendenza di R_{AA} da p_T



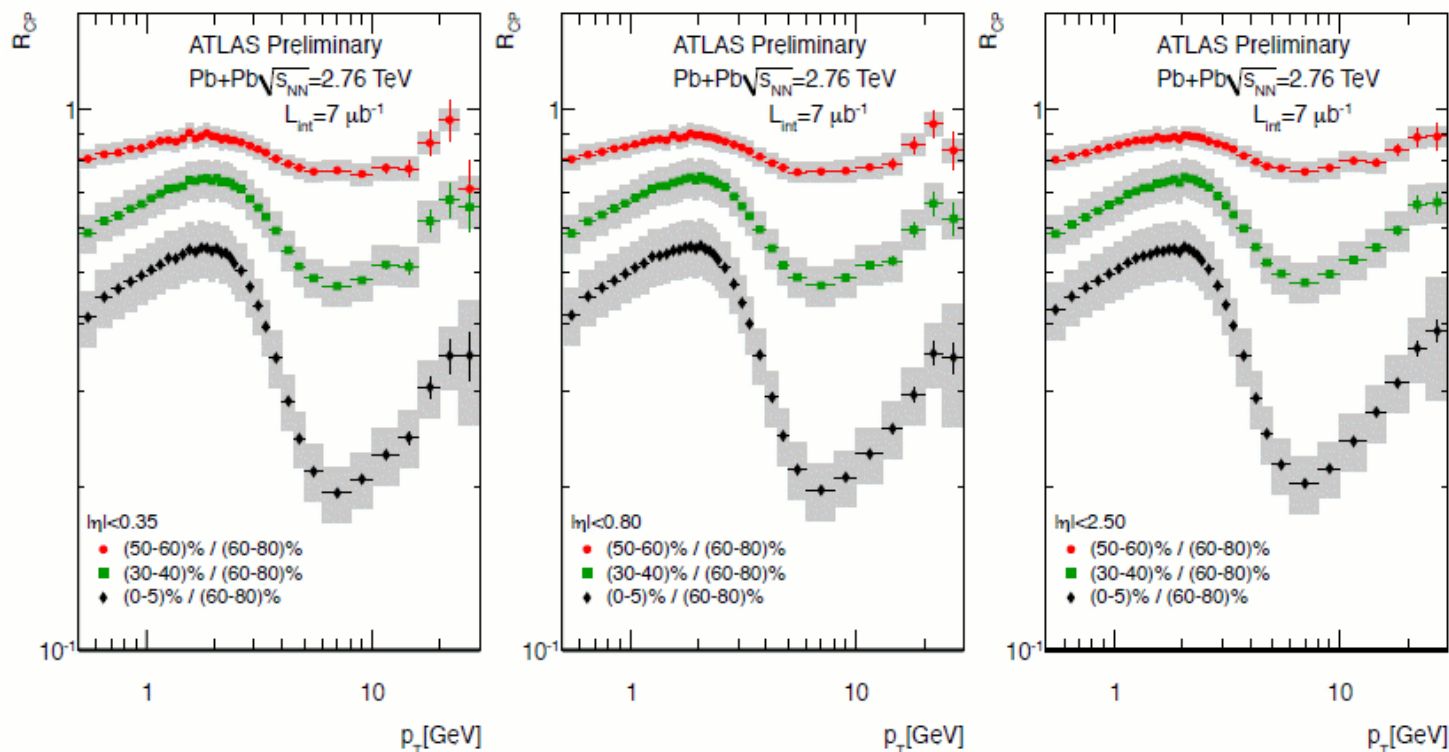
Sensibilita' ai dettagli della perdita di energia

utile studiare particelle identificate per studiare la perdita di energia dei quark e quella dei gluoni, i meccanismi di ricombinazione a p_T intermedi,

High P_T suppression: hadron R_{CP} at LHC

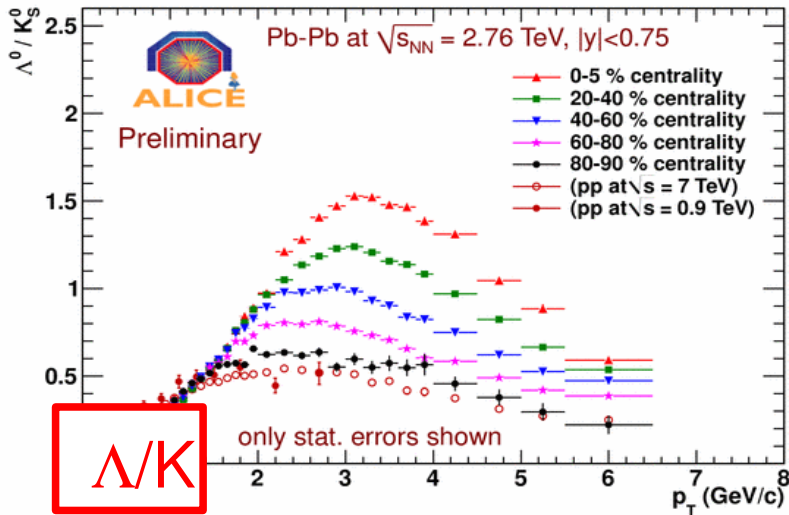
Piu' forte soppressione negli eventi piu' centrali, almeno a $p_T < 50$ GeV/c

Il confronto con RHIC suggerisce che la soppressione scali con la densita' di particelle cariche



Non si osserva una dipendenza della soppressione da η

$\pi^+\pi^-$, K^+ vs K_S^0 , p vs Λ , rapporti barioni/mesoni, ...

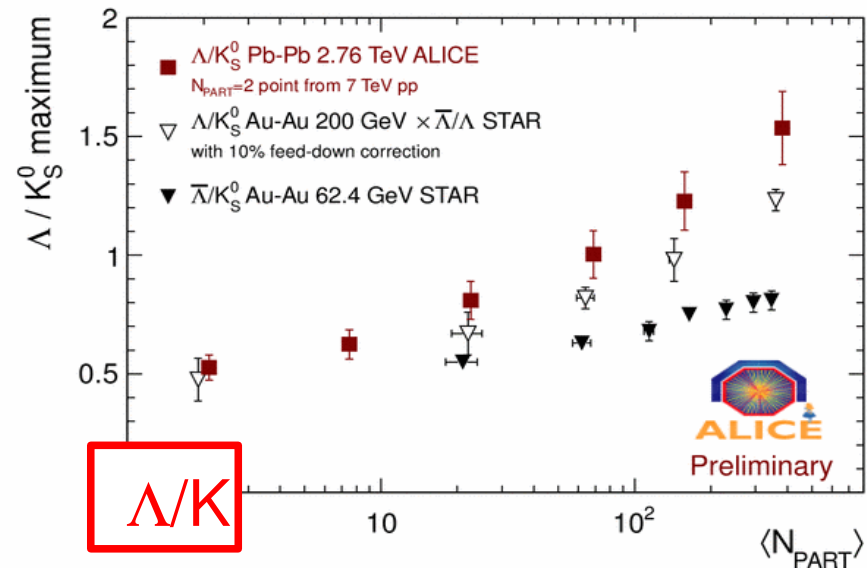


Massimo di Λ/K a $p_T > \text{RHIC}$: maggior flusso radiale ?

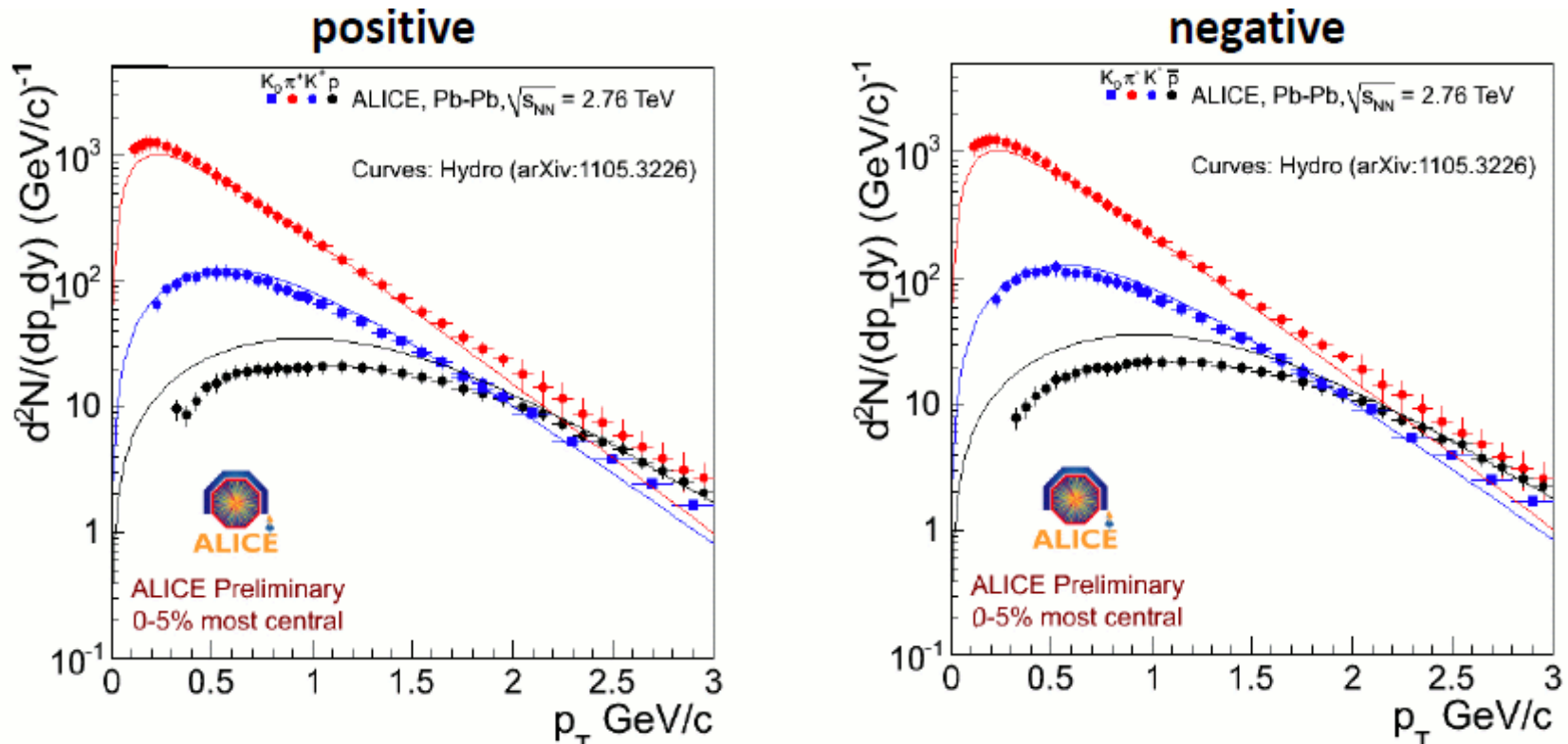
Tutti i rapporti +/- compatibili con 1 a tutte le centralita', come atteso alle energie di LHC

Barioni prodotti maggiormente a p_T intermedi

Rapporto barioni/mesoni aumenta con la centralita' \rightarrow ricombinazione ?



Spettro dei p molto piu' piatto a basso p_T → push sui p dovuto al flow radiale ???

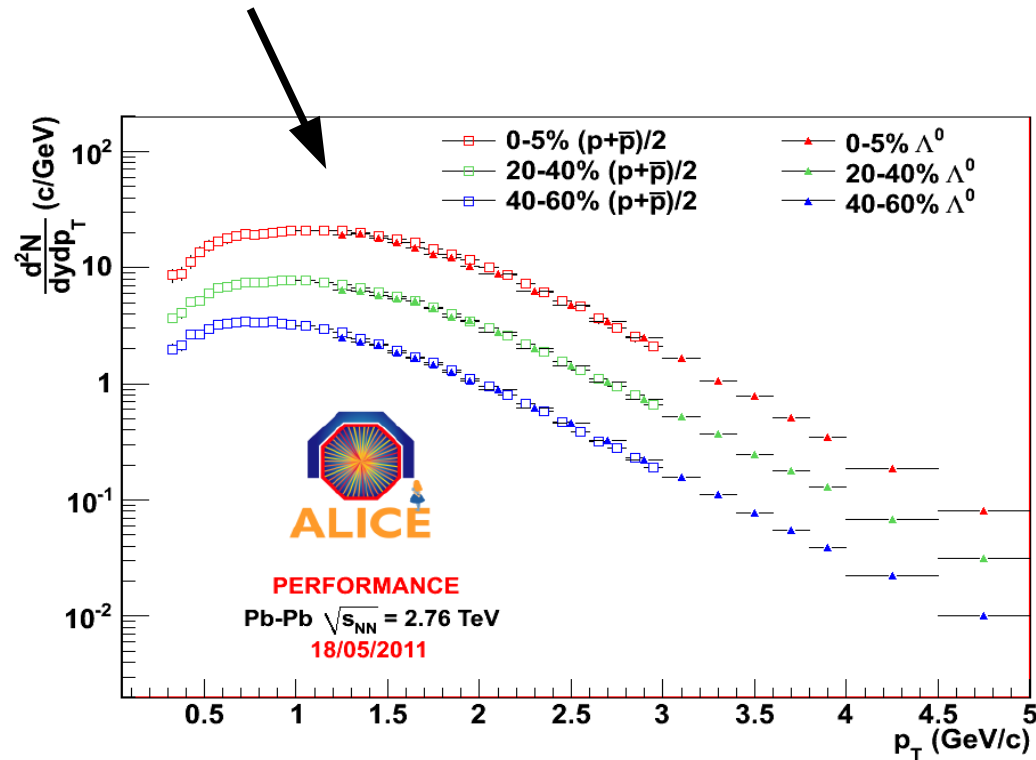


In generale, spettri piu' duri delle previsioni: flow maggiore ?

il p_T medio aumenta linearmente con la massa

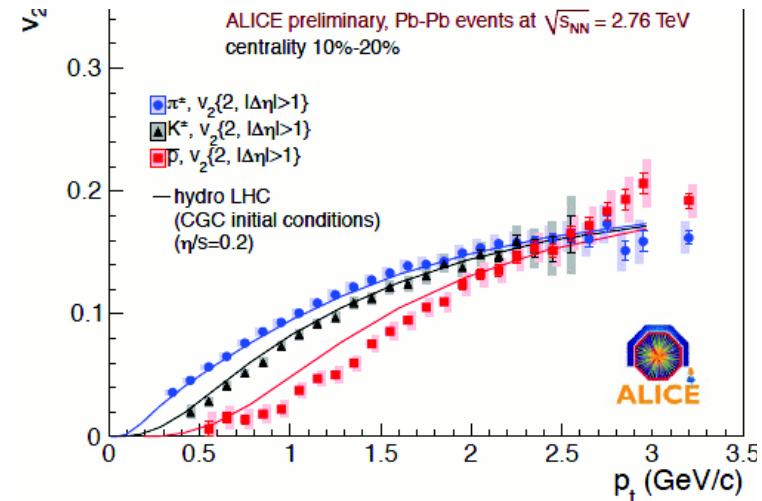
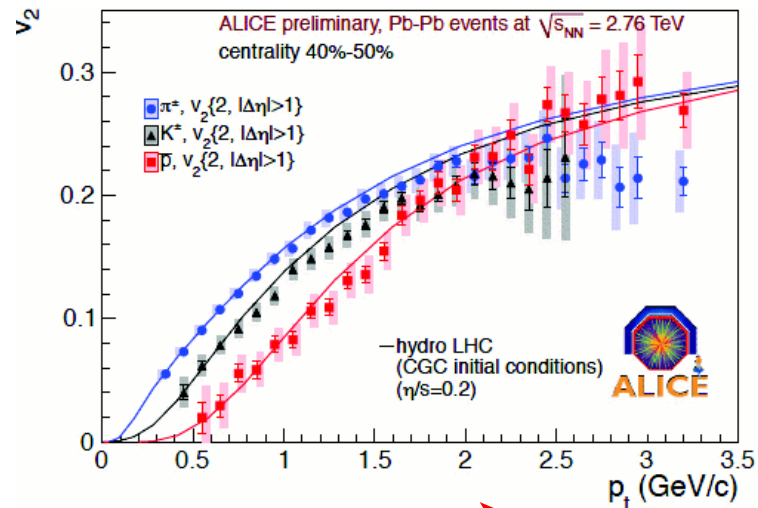
a parita' di $dN/d\eta$, il p_T medio e' maggiore che a RHIC

Lambda **molto simili** ai protoni in shape e yield (e p/π si comporta come Λ/K)



$p/\pi \approx 0.05$ in pp and PbPb (difficile da capire in modelli termici con $T = 160-170$ MeV)

v_2 for identified particles @LHC

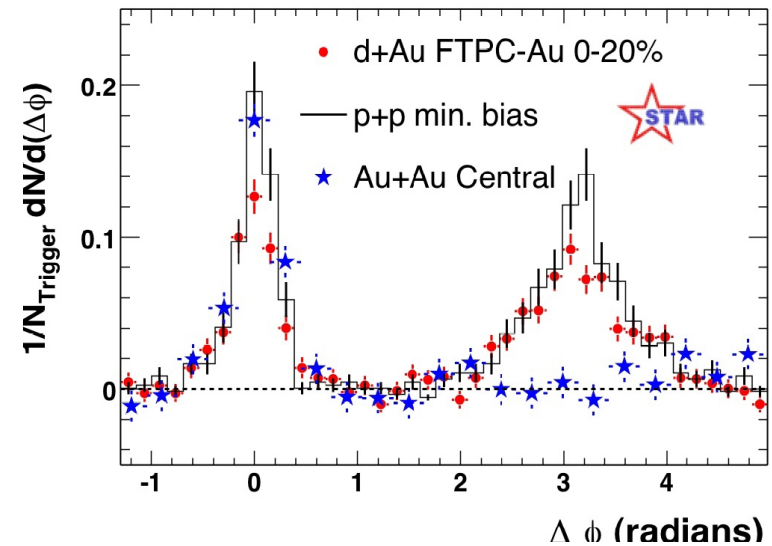
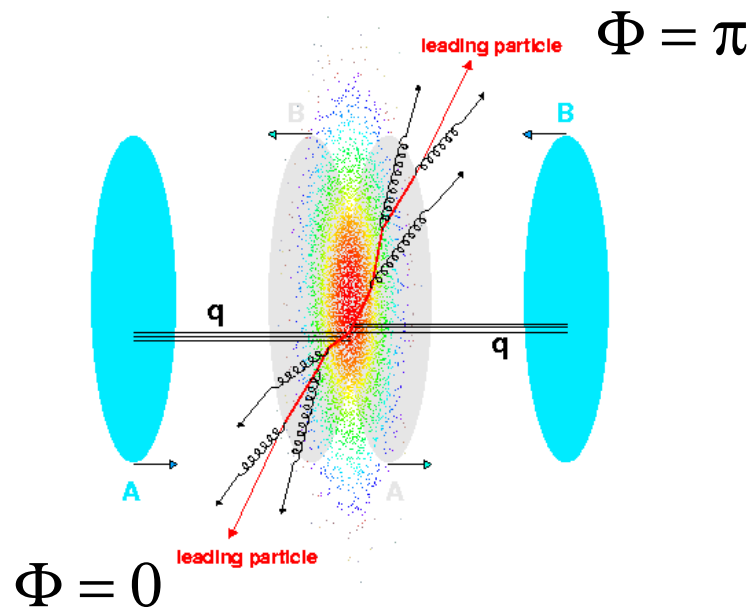


I modelli idrodinamici prevedono mass splitting

I dati mostrano mass splitting

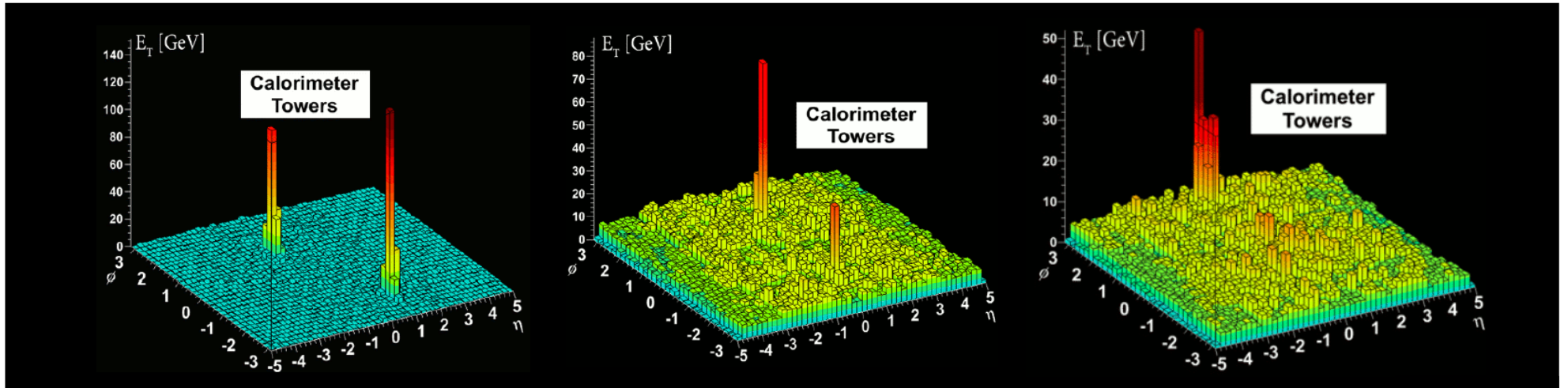
L' accordo coi modelli e' buono per collisioni semicentrali

Il flusso degli antiprotoni in collisioni piu' centrali non e' descritto dagli stessi modelli

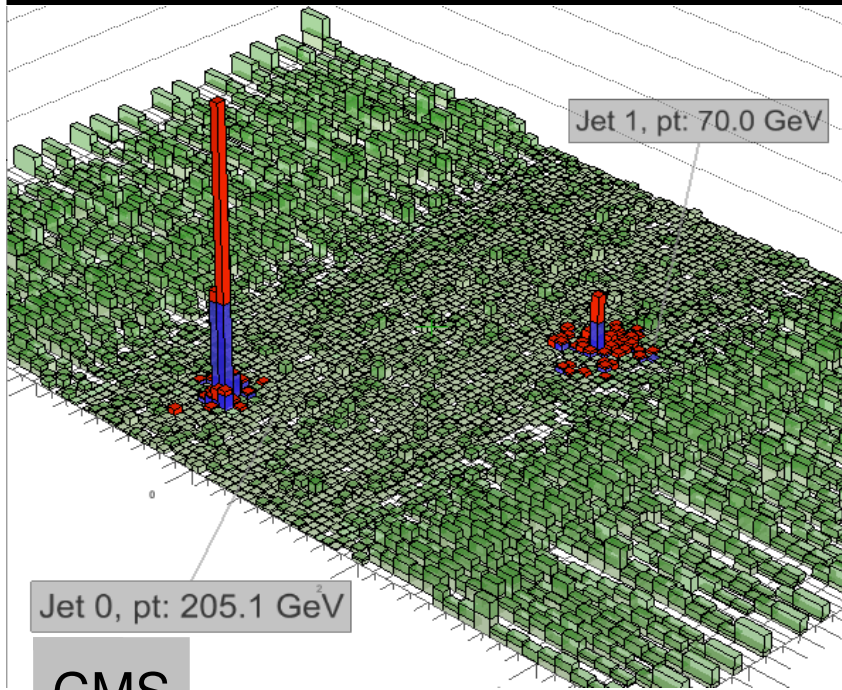


Eredita' da RHIC:

A causa della perdita di energia dei partoni, le particelle di alto p_T originano prevalentemente dalla superficie della regione di collisione. Il partner "away-side" del partone di "trigger" deve infatti attraversare tutto il "mezzo" creato nella collisione.



ATLAS



CMS

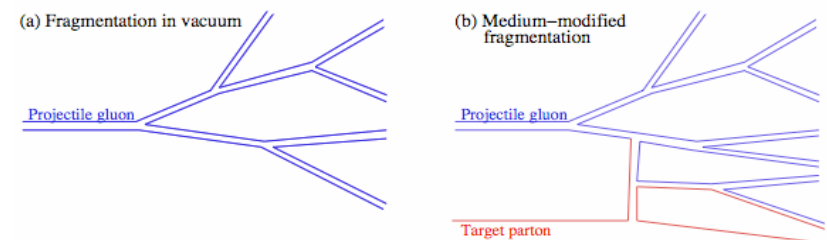
- ⇒ C'e' soppressione ? Di che entita' ?
- ⇒ La soppressione dipende dal raggio ?
- ⇒ La funzione di frammentazione cambia ?
- ⇒ La distribuzione angolare si allarga ?
- ⇒

Il numero di jet per N_{coll} diminuisce (fattore ~ 2) passando da collisioni periferiche a collisioni centrali; la soppressione e' indipendente dall' energia dei jet.

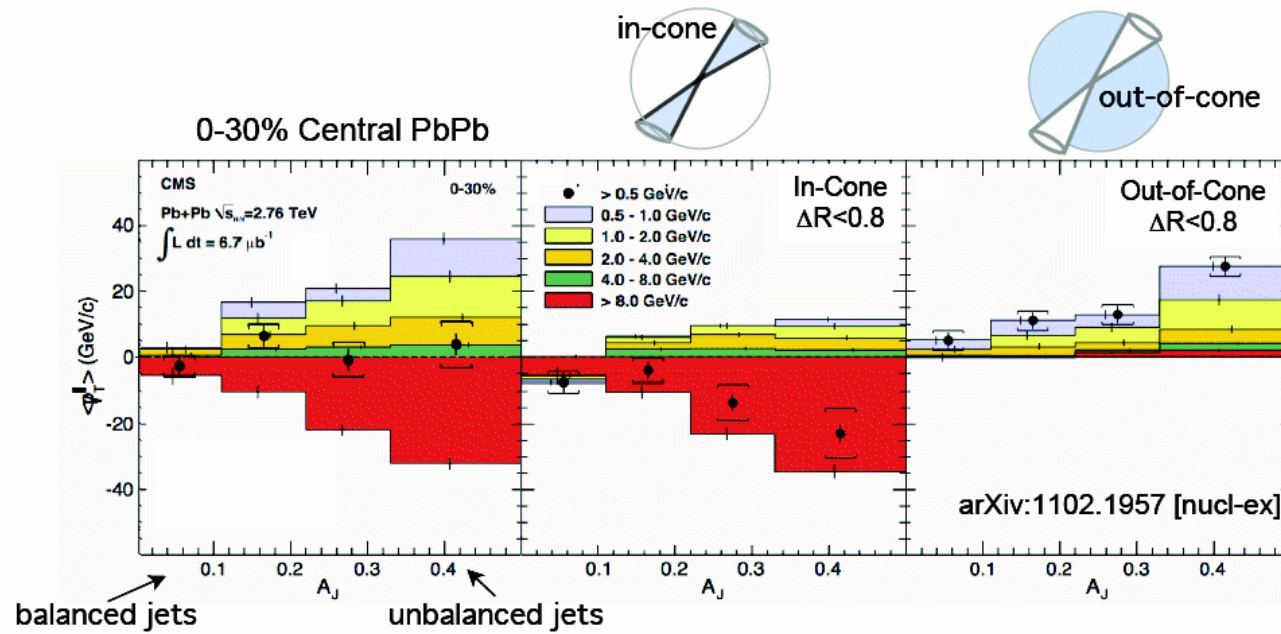
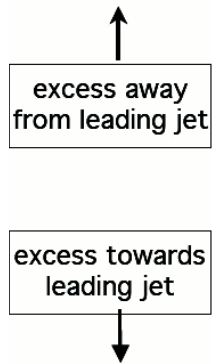
La perdita di energia dei partoni si riflette in uno SBILANCIAMENTO in energia dei dijet tanto piu' marcato quanto piu' la collisione e' centrale.

Tuttavia la propagazione di partoni di alto impulso nel mezzo nucleare denso NON conduce ad una visibile scorrelazione angolare dei due jet.

La frammentazione e' indipendente dall' energia persa nel mezzo e compatibile con la frammentazione di partoni NEL VUOTO



La differenza di momento tra i due jet viene bilanciata da particelle di basso impulso ad angoli GRANDI rispetto all' asse del jet “smorzato”



Missing $p_{T\parallel}$:
$$\cancel{p}_{T\parallel} = \sum -p_T^{\text{Track}} \cos(\phi_{\text{Track}} - \phi_{\text{Leading Jet}})$$

La perdita di energia dei partoni dipende sia dalle proprietà del mezzo attraversato (volume, densità di gluoni etc.) sia dal partone sonda (massa, carica di colore)

rivelare/misurare
charm & beauty

Parton Energy Loss by

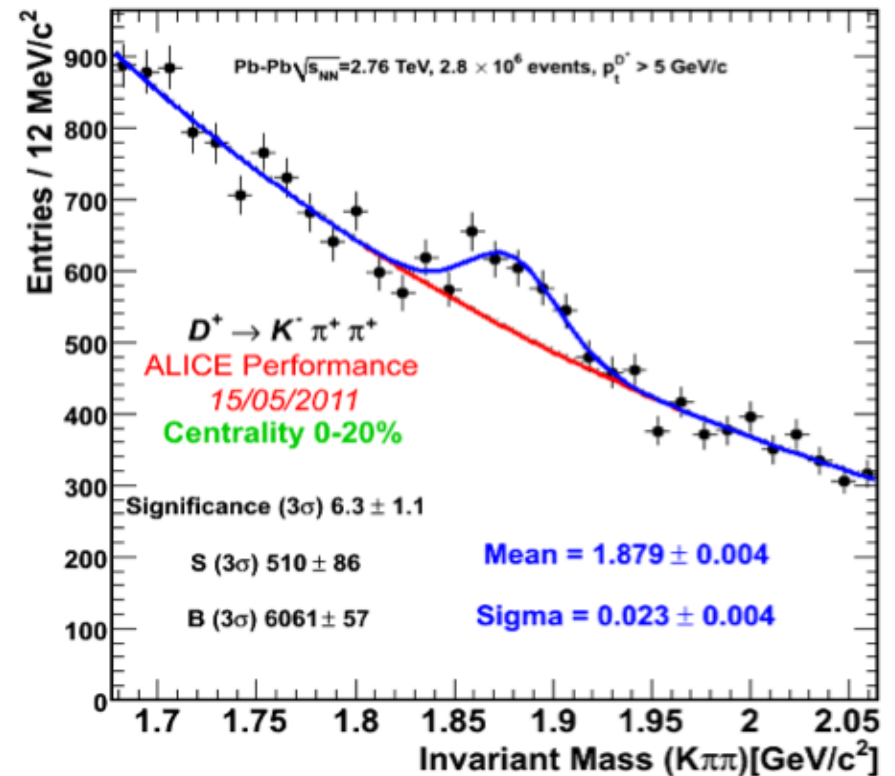
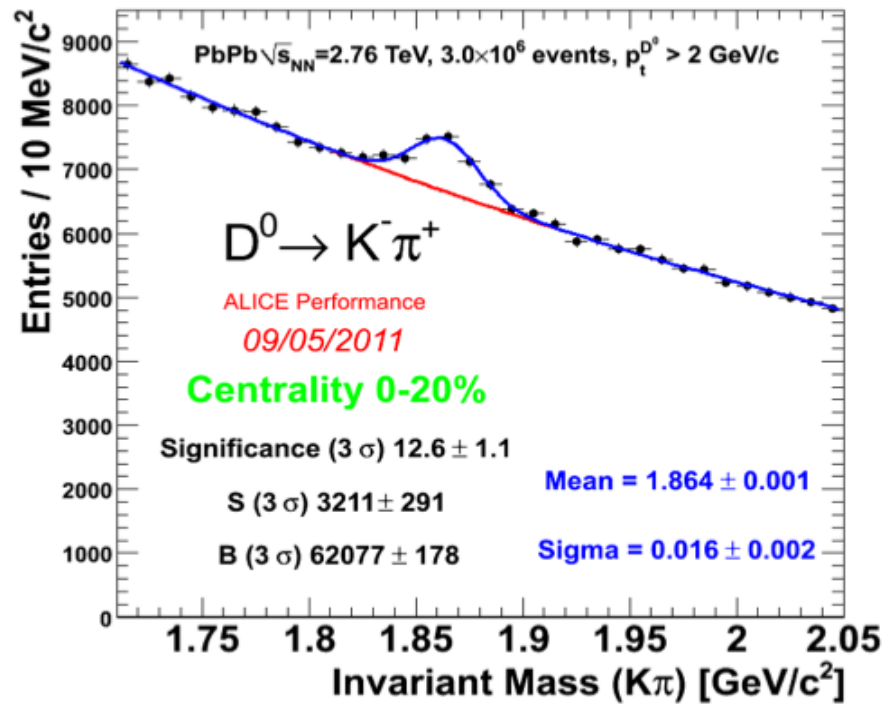
- medium-induced gluon radiation
- collisions with medium gluons

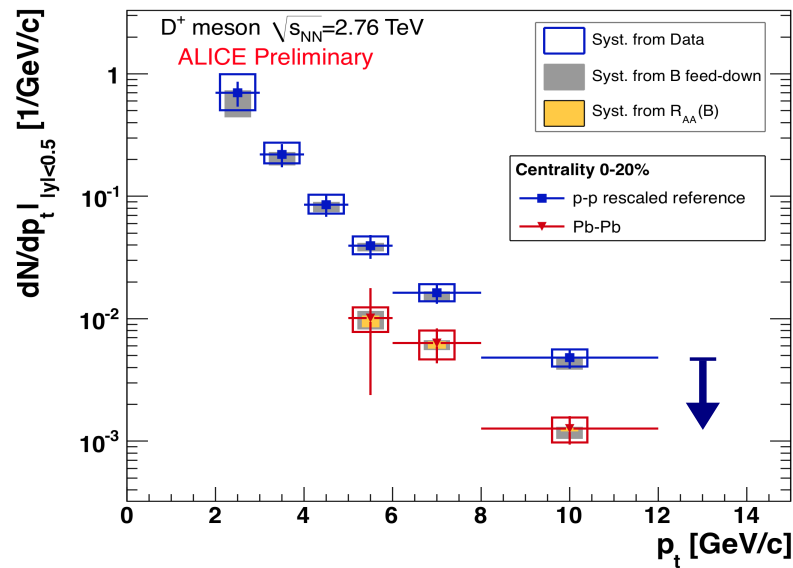
$$\Delta E(\varepsilon_{medium}; C_R, m, L)$$

pred: $\Delta E_g > \Delta E_{c=q} > \Delta E_b$

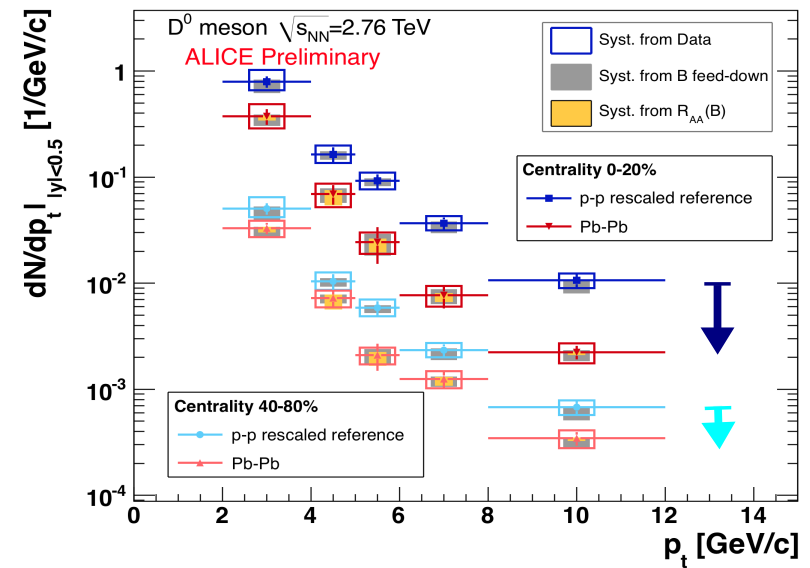
→ $R_{AA}^\pi < R_{AA}^D < R_{AA}^B$

$$R_{AA}(p_t) = \frac{1}{\langle T_{AA} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_t}{d\sigma_{pp}/dp_t}$$

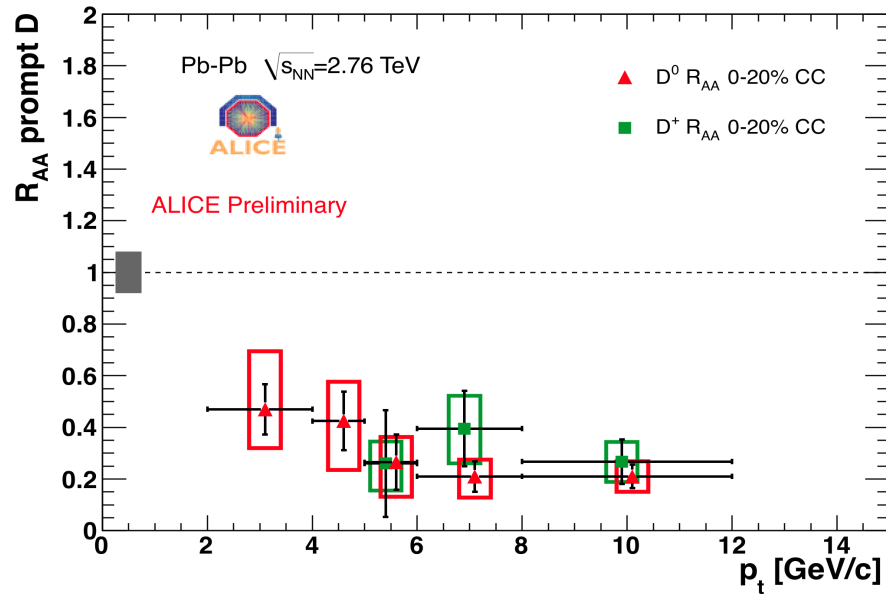




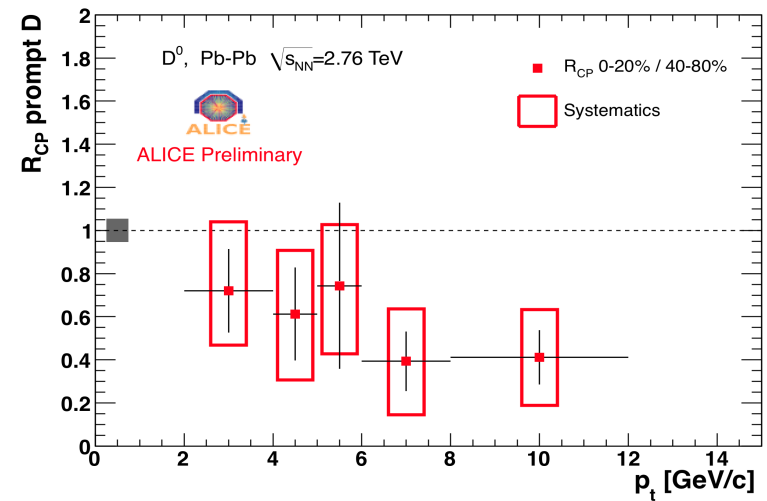
↓ Forte soppressione in collisioni centrali (0-20%) **PbPb** rispetto a **pp** – **fattore 4-5 sopra 5 GeV/c**

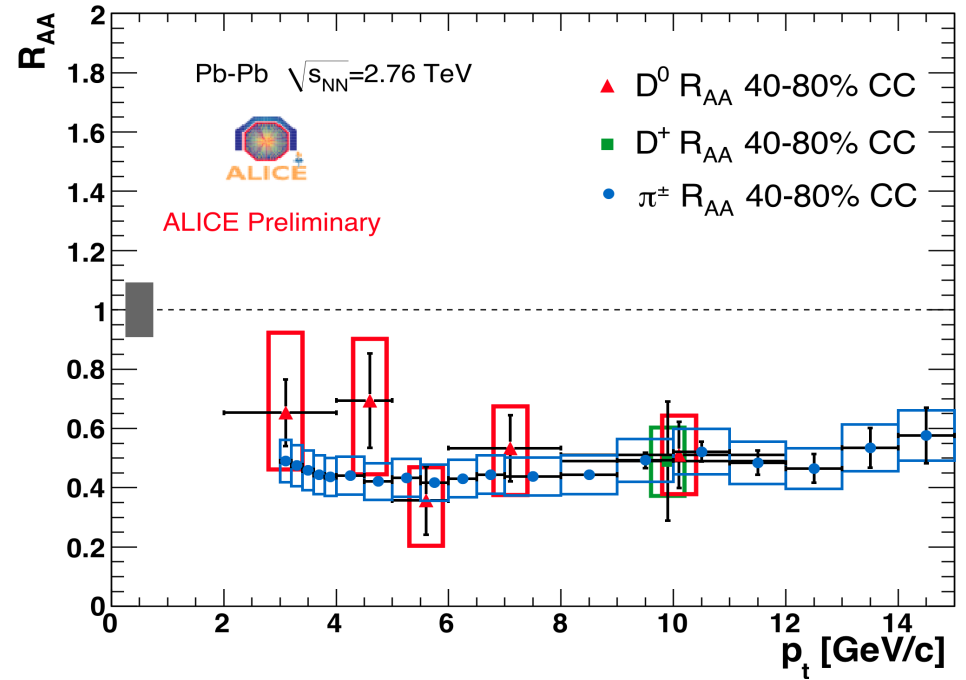
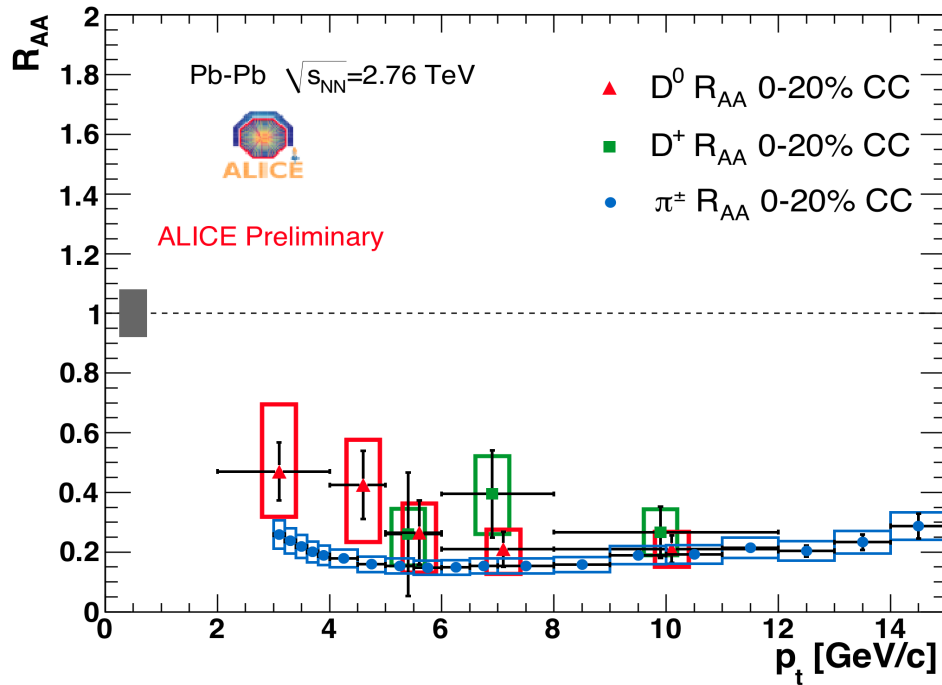


↘ Soppressione significativa anche in collisioni PbPb semiperiferiche (40-80%)



La soppressione del charm e' di un fattore 4-5 al di sopra dei 5 GeV/c

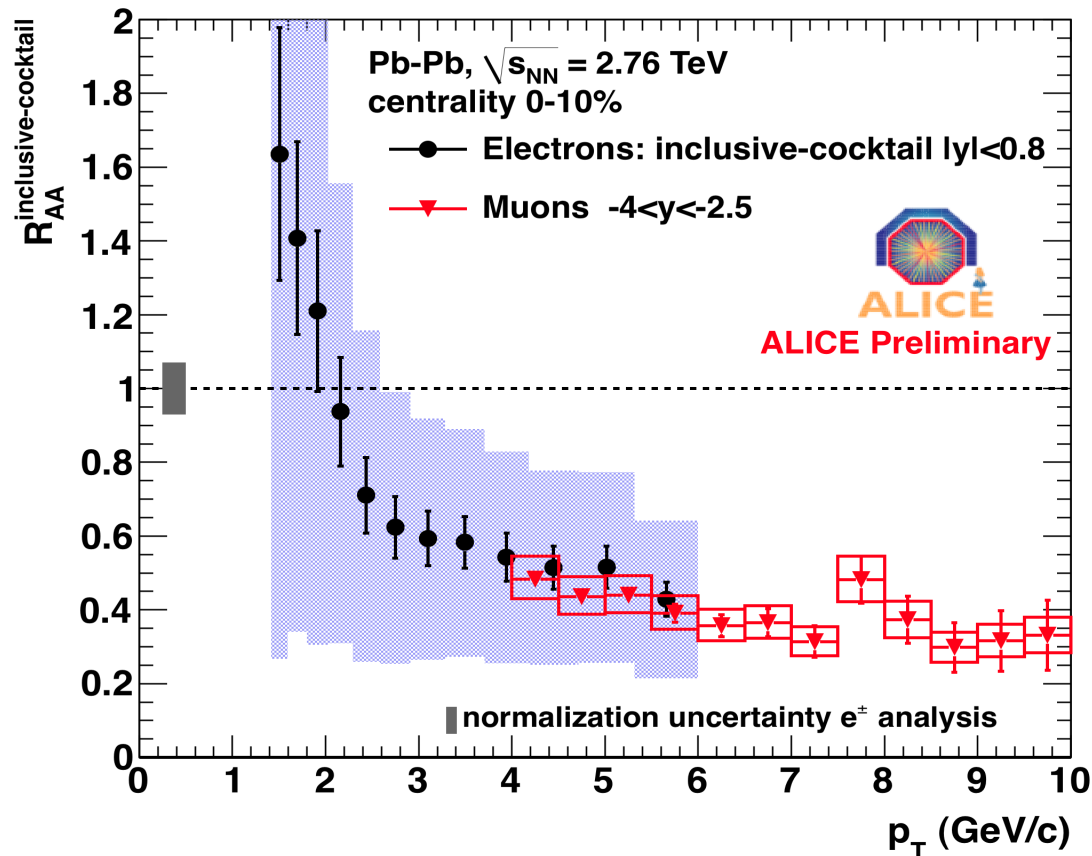




R_{AA} del charm e' compatibile con quello dei pioni ma

forse un' indicazione di $R_{AA}^D > R_{AA}^\pi$?

Al di la' di un hint di un eccesso di elettroni a piccolo p_T (fotoni termici ?)



Soppressione di un fattore ~ 3 a $p_T > 6$ GeV/c FONLL \rightarrow beauty dominante in questa regione

La dipendenza dalla centralita' dell' R_{AA} di elettroni ($p_T > 4.5$ GeV/c), muoni ($p_T > 6$ GeV/c) e D ($p_T > 6$ GeV/c) di Alice e' consistente ... c'e' una forte **soppressione in collisioni centrali**, soppressione che non e' presente nelle collisioni molto periferiche.

CMS ha misurato il **fattore di soppressione nucleare** per le J/ψ dal decadimento **del B** – per $p_T(J/\psi) > 6.5$ GeV/c:

Minimum bias : $R_{AA} = 0.37 \pm 0.07 \pm 0.03$

Central 0-20%: $R_{AA} = 0.36 \pm 0.08 \pm 0.03$

Da confrontare con la soppressione di elettroni e muoni di Alice

Qualche sorpresa ! In particolare: Mach cone & ridge ? Thermal yields, radiative Eloss ?

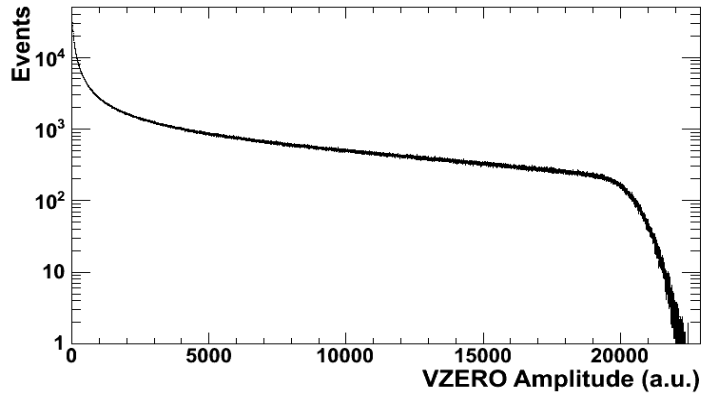


Ci aspetta una luminosita' $5\times$ in Pb-Pb nel 2011 e forse p-Pb nel 2012 ...

Ovviamente, usiamo tutte le variabili e grandezze che conoscete. Se parlo di impulso trasverso, tutti sanno di cosa sto parlando. Ma ci sono grandezze specifiche della fisica degli ioni:

- ▶ v_2 Fourier coefficient of azimuthal anisotropies, “flow”
- ▶ R_{AA} 1 if yield = perturbative value from initial parton-parton flux
- ▶ T Temperature (MeV)
- ▶ μ_B Baryon chemical potential (MeV) ~ net baryon density
- ▶ η Viscosity (MeV^3) *indirectly inferred from R_{AA} and v_2*
- ▶ s Entropy density ~ “particle” density
- ▶ ε Energy density (Bjorken 1983)

Centralita'



N_{part} from Glauber fits agree with geometrical values better than 1% except for peripheral (>70%) where the difference is 3.5%

