

Dernières nouvelles du plasma de quarks et de gluons

Séminaire au CPPM - le 7 novembre 2005

Raphaël Granier de Cassagnac

Laboratoire Leprince-Ringuet

Expérience PHENIX



Sur les traces du plasma de quarks et de gluons

● Le contexte (en deux mots)

- La prédiction théorique
- RHIC et ses expériences

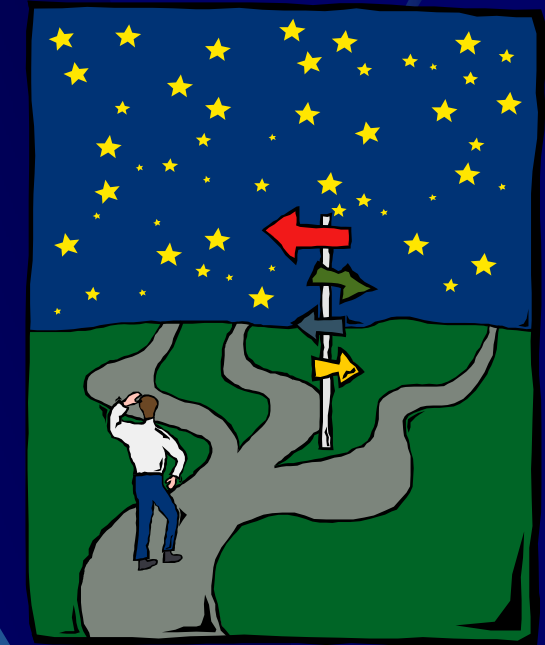
● Les collisions Or+Or (et d+Or) à 200 GeV

I. Globalement, les conditions sont-elles réunies ?

II. La production de quarkonia

III. Les photons thermiques

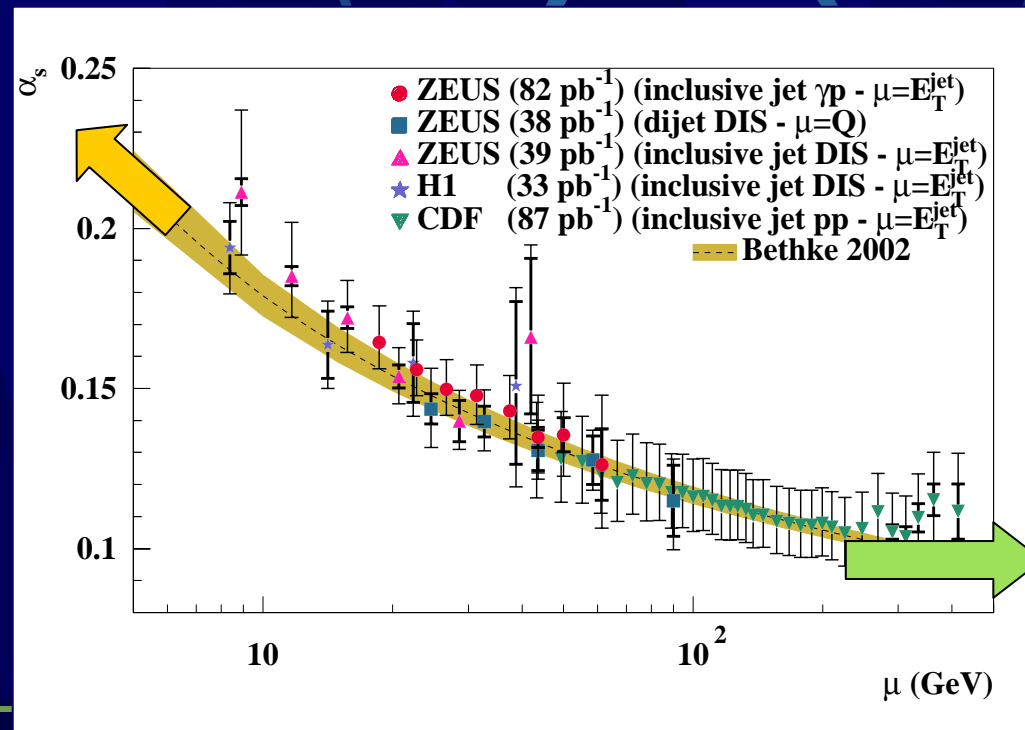
IV. Le jet quenching



3 sondes dures
pour signer /
caractériser
le PQG

La chromodynamique quantique

- SU(3) de couleurs produit une interaction...
 - ... « forte » à basse énergie (confinement)
 - ... « faible » à haute énergie (liberté asymptotique)

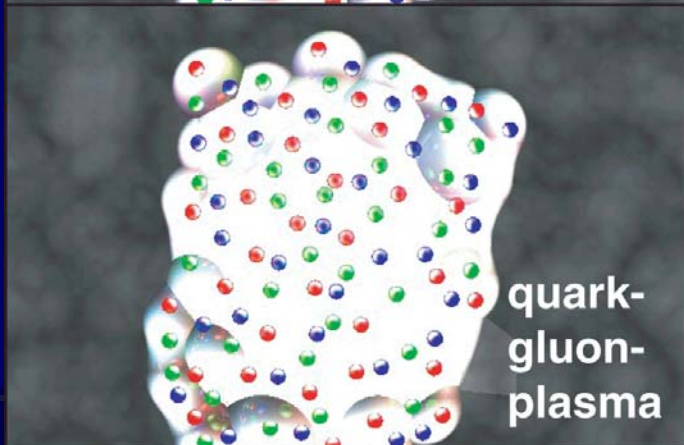
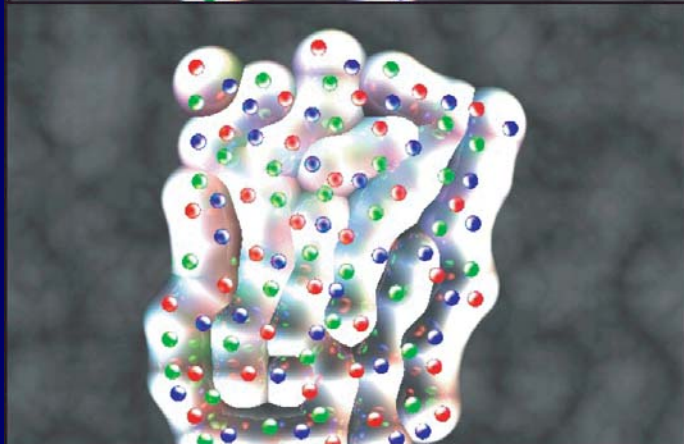
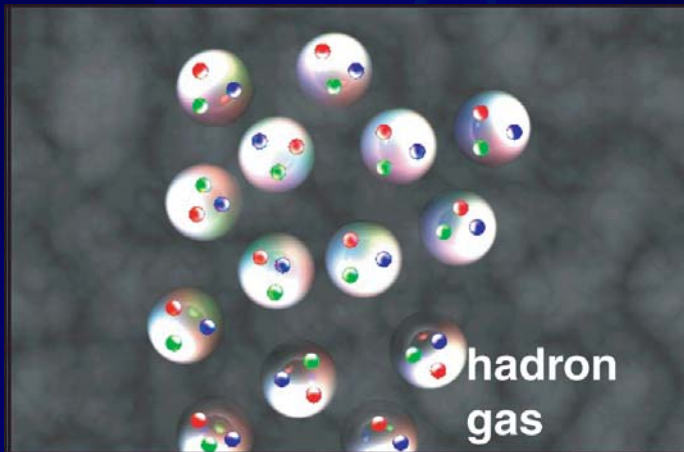


La QCD prédit...

Les quarks et les gluons sont confinés dans les hadrons...

Mais ils paraissent libres à haute énergie...
« liberté asymptotique »

Ils doivent se libérer dans un milieu de haute densité d'énergie...
« déconfinement »



Gaz de hadrons



Plasma de quarks et de gluons

Un exemple quantitatif...

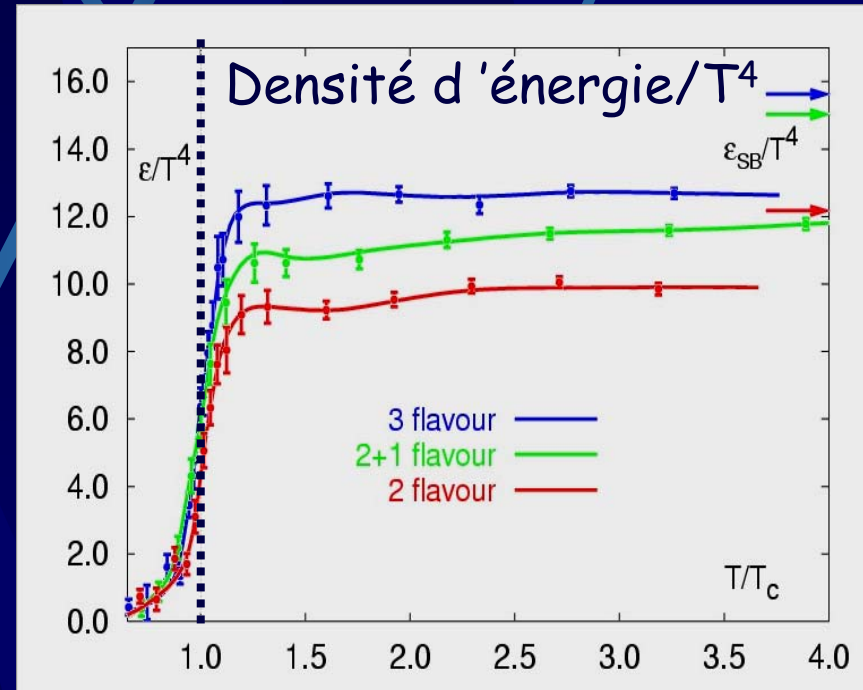
● Transition de phase → Déconfinement

- Ordre mal connu, mais transition rapide

● Calcul QCD sur réseau

- À $n_{\text{Baryons}} = 0$!
- @ $T_c = 154 \pm 8 \text{ MeV}$
- @ $T_c = 173 \pm 8 \text{ MeV}$
- $\sim T_c \sim 10^{13} \text{ K}$ ($T_{\odot} \sim 10^8 \text{ K}$)

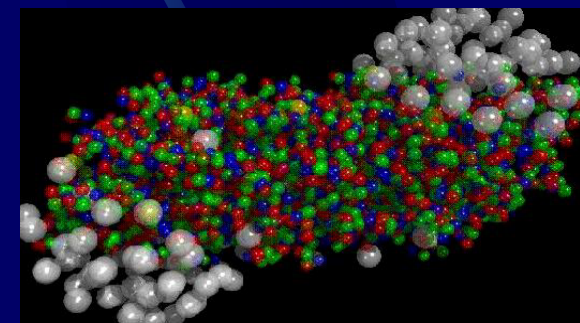
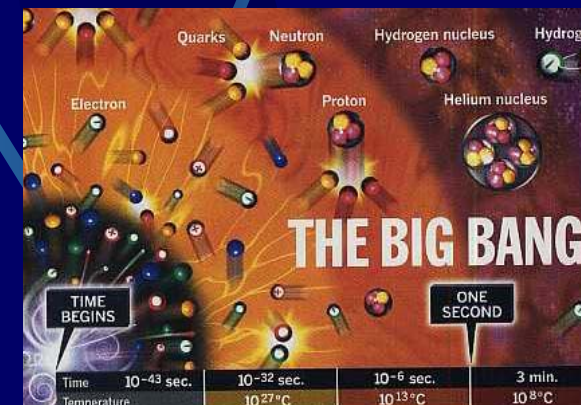
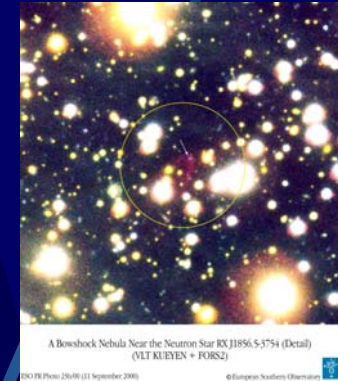
● @ $\varepsilon_c = (6 \pm 2)T^4 = 0,7 \pm 0,3 \text{ GeV} / \text{fm}^3$



Karsch et al, hep-lat/0106019
Lect. Notes Phys.583 (2002) 209

Où observer ce plasma ?

- Au cœur de certaines étoiles ?
 - Un candidat incertain...
- Au début de l'univers
 - Pendant les premières microsecondes du big bang
- Au laboratoire ?
 - En faisant entrer en collision des noyaux lourds
 - Temps de vie $\sim 10^{-23}$ s



Programmes expérimentaux

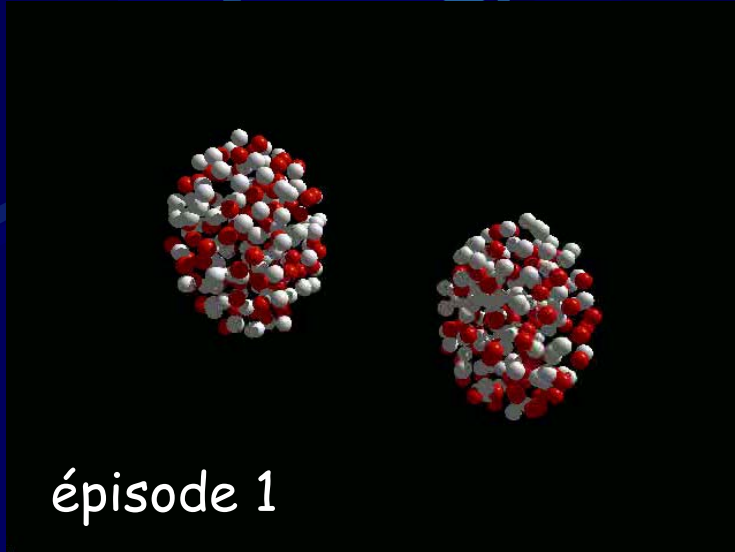
$\sqrt{s_{nn}}$
↙
↘

1986 BNL - AGS 4 GeV

1994 CERN - SPS 20 GeV

C
I
B
L
E

F
I
X
E



C
I
B
L
E

F
I
X
E

2000 BNL - RHIC 200 GeV

2007? CERN - LHC 5 TeV

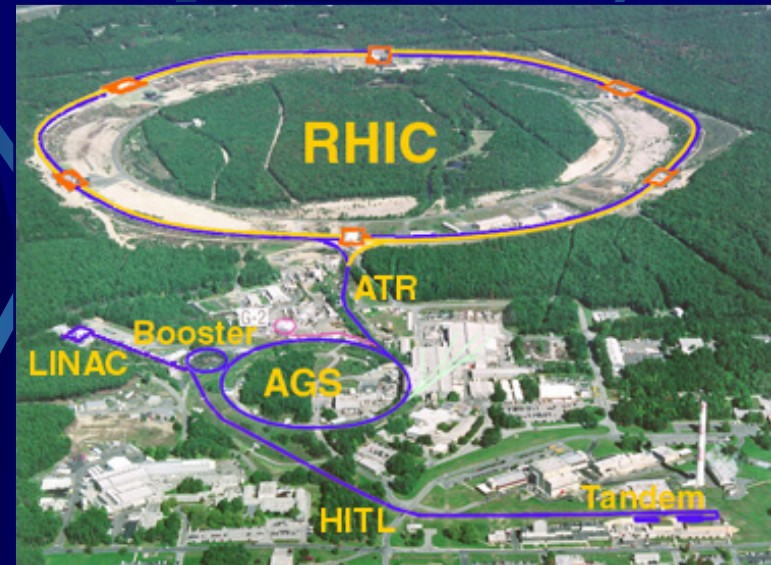
C
O
L
L
I
S
I
O
N
S



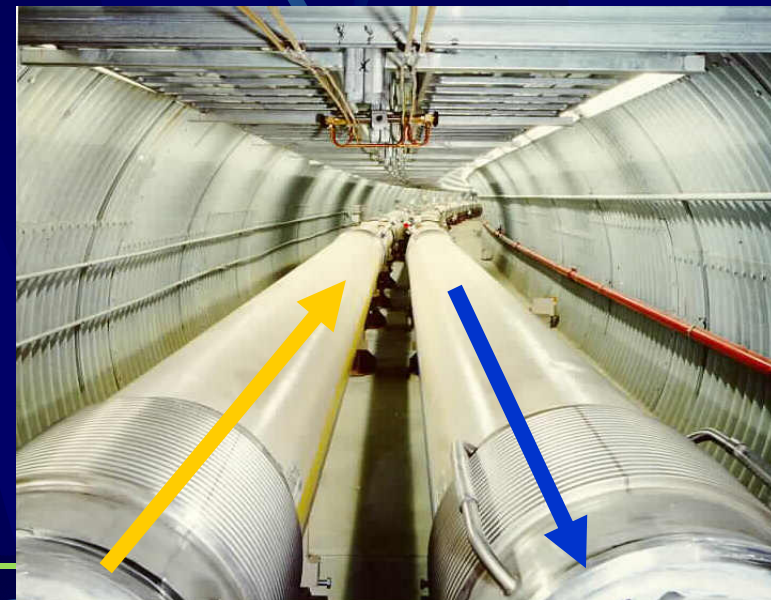
C
O
L
L
I
S
I
O
N
S

(simulations © RQMD)

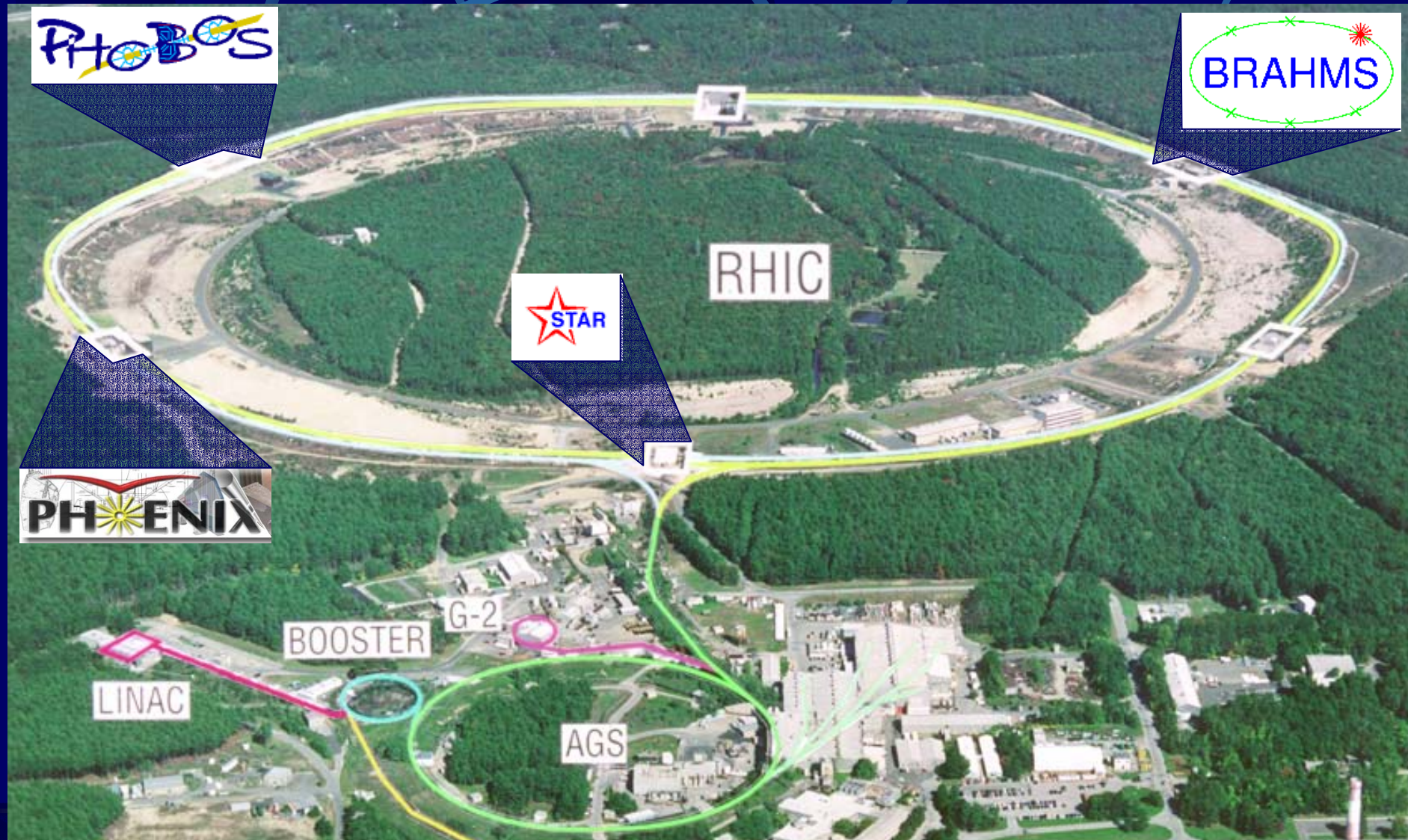
Épisode 3 : RHIC



- 3,9 km de circonférence
- de p + p (polarisés)
 - $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 500 GeV
- jusqu'à Or + Or
 - $2 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 200 GeV/nucléons

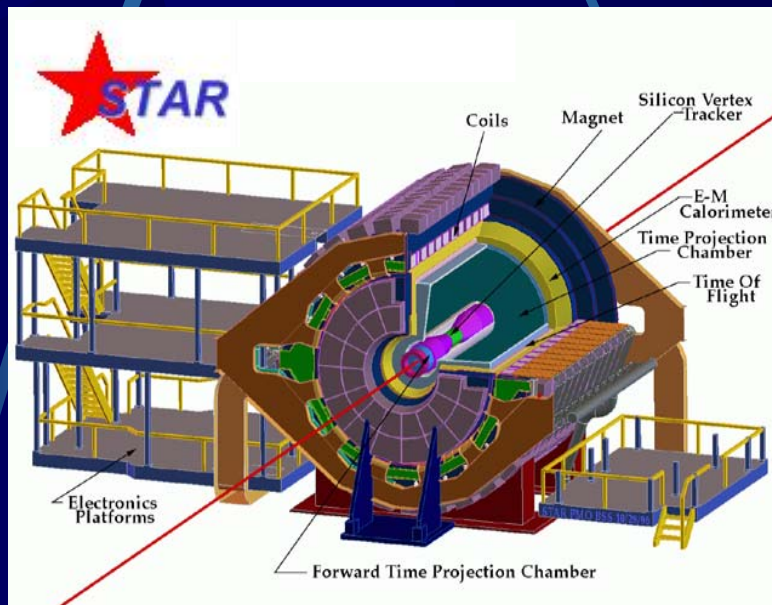


2 petites + 2 grosses expériences



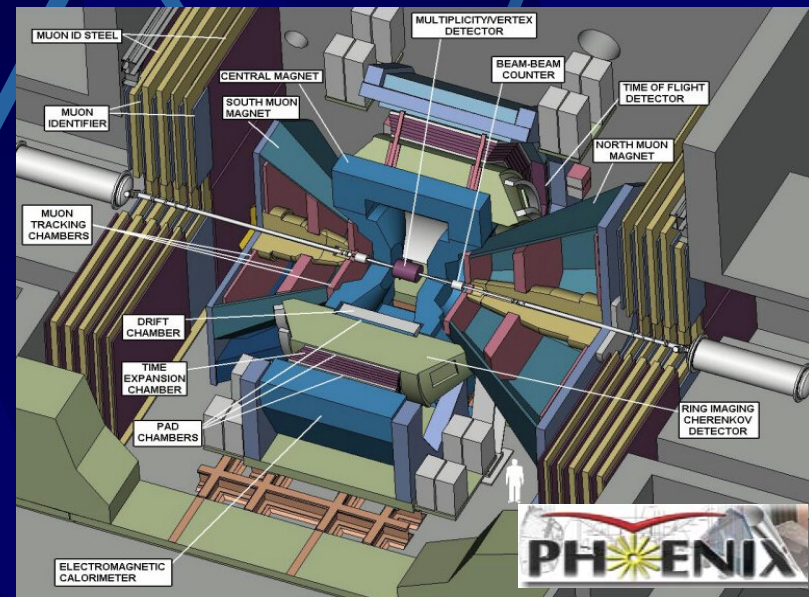
Deux grosses expériences

Une grande TPC
Si-Vertex Tracking
RICH, EMCal, TOF



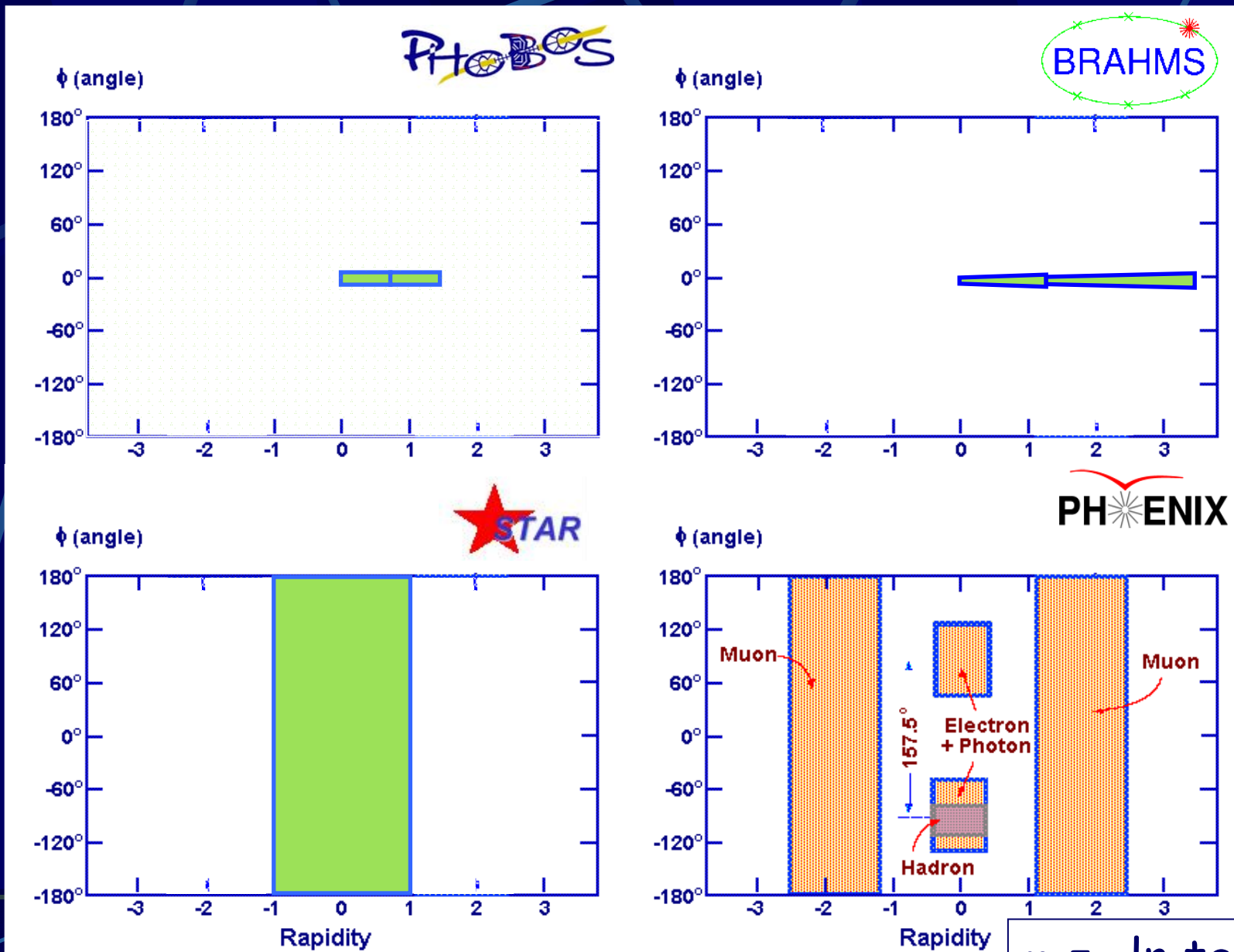
- Observables hadroniques
- Grande acceptance, jets
- Analyse "event-by-event"

Hautes résolutions et taux
2 bras avant (μ) + 2 bras centraux
(TEC, RICH, EMCal, TOF)



- Muons, électrons, photons...
- Détection simultanée des sondes durs (PQG)

Acceptances des particules identifiées



$$\eta = -\ln \tan \theta/2$$

Les prises de données à RHIC

Year	Run Plan	Sample	Physics
2000	Au-Au at 130 GeV/A	20 μb^{-1} (6 wks)	First look at RHIC collisions
2001	Au-Au at 200 GeV/A	260 μb^{-1} (16wks)	Global properties; particle spectra; first look at hard scattering.
– 2002	Comm./run pp at 200 GeV Au-Au at inj. E: 19 GeV/A	1.4 pb^{-1} (5 wks) 0.4 μb^{-1} (1 day)	Comparison data and first spin run Global connection to SPS energy range
2003	d-Au at 200 GeV/A pp at 200 GeV	74 nb^{-1} (10wks) 5 pb^{-1} (6 wks)	Comparison data for Au-Au analysis; low-x physics in cold nuclear matter Spin Development & Comparison data
2004	Au-Au at 200 GeV/A Au-Au at 62 GeV/A pp at 200 GeV	3740 μb^{-1} (12wks) 67 μb^{-1} (3wks) 100 pb^{-1} (7wks)	“Long Run” for high statistics, rare events Energy Scan Spin Development: Commission jet target First measurements with longitudinal spin pol.
2005	Cu-Cu at 200 GeV/A Cu-Cu at 62 GeV/A Cu-Cu at 22 GeV/A pp at 200 GeV pp at 410 GeV	42 nb^{-1} 8wks 1.5 nb^{-1} 12 days 18 μb^{-1} 39 hrs 30 pb^{-1} 10 wks 0.1 pb^{-1} 1 day	Comparison studies: surface/volume & impact parameter effects; Energy Scan Spin Development: Lum., Polarization First long data run for spin

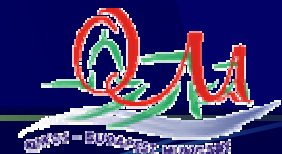
Sam Aronson, Quark matter 2005

Mes sources

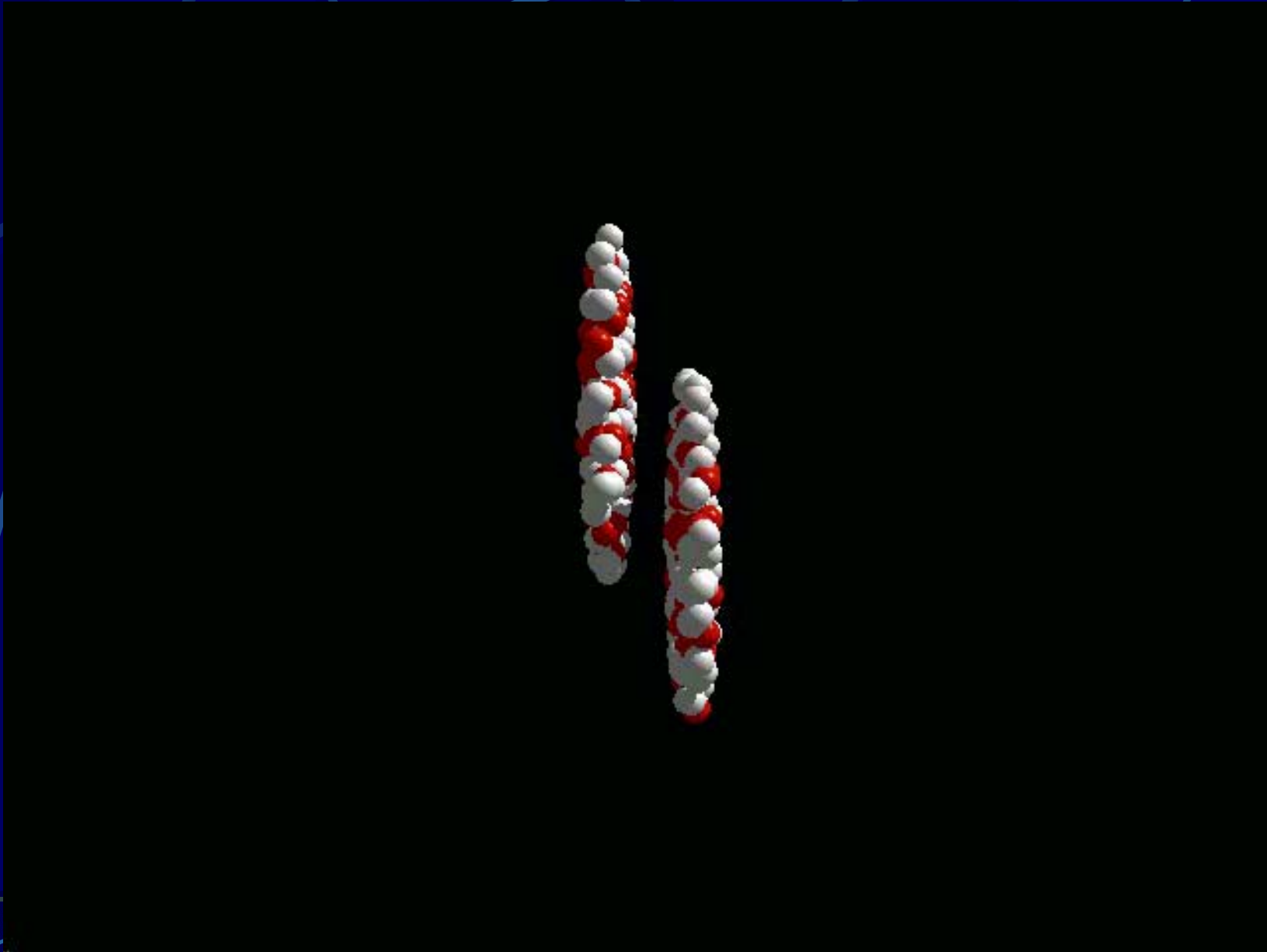
- Les quatre expériences ont publié des « conclusions » sur les trois premières années : les « papiers blancs »
 - PHENIX : « Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration »

White papers in Nucl. Phys. A757 (2005), PHENIX : nucl-ex/0410003

- Mises à jour et nouveautés à la conférence Quark Matter 2005 (août 2005, Budapest)
 - <http://qm2005.kfki.hu/>

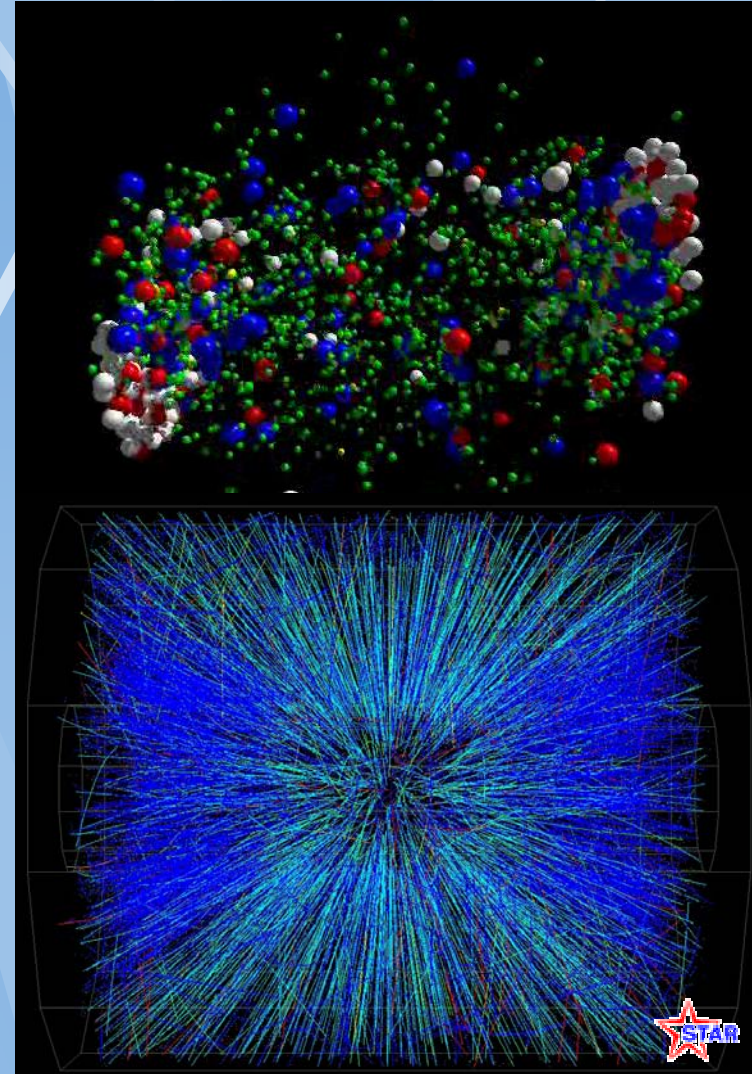


Collisions or+or @ 200 GeV/nucléon

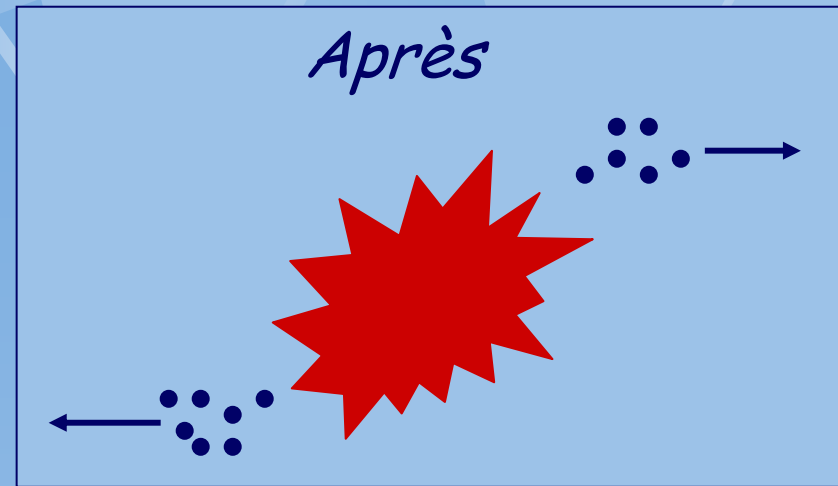
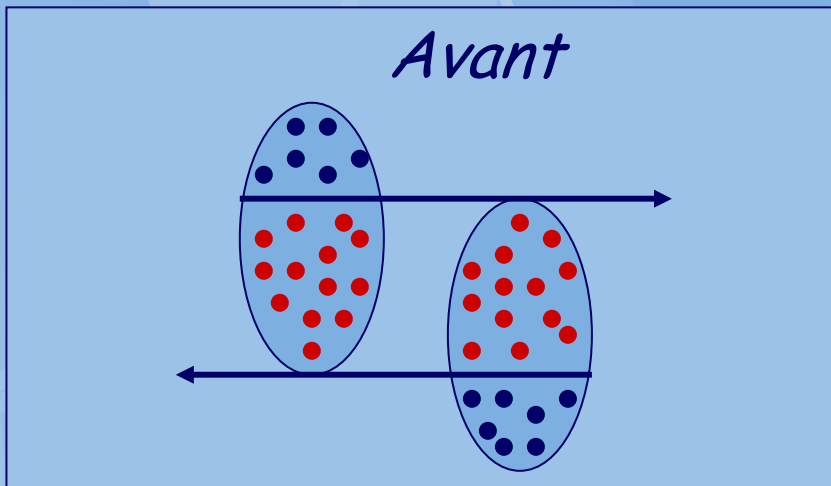


I. Les observables globales

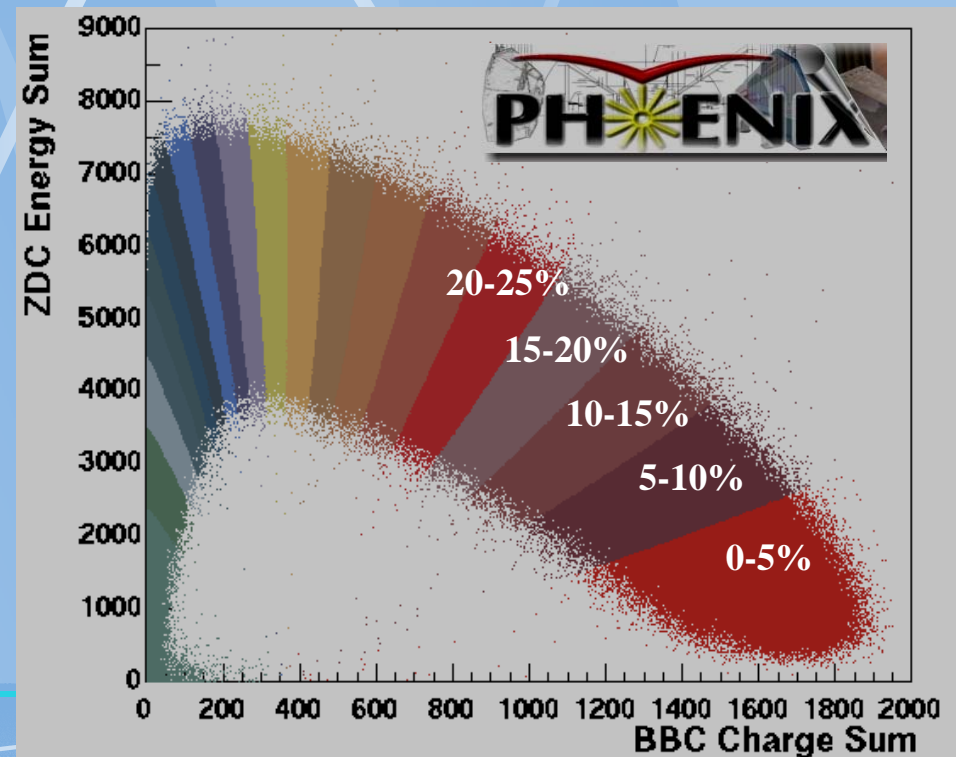
- Regarder l'événement dans son ensemble nous renseigne sur la violence de la réaction, la densité d'énergie, sa thermalisation...
- Les conditions (théoriques) de création du plasma sont-elles remplies ?



Déterminer la centralité...



- Les spectateurs (neutres) sont mesurés par 2 calorimètres à zéro degré (communs aux 4 exp.)
- Les **participants** redistribuent leur énergie dans tous les autres détecteurs, par exemple les Beam-Beam Counters (PHENIX)



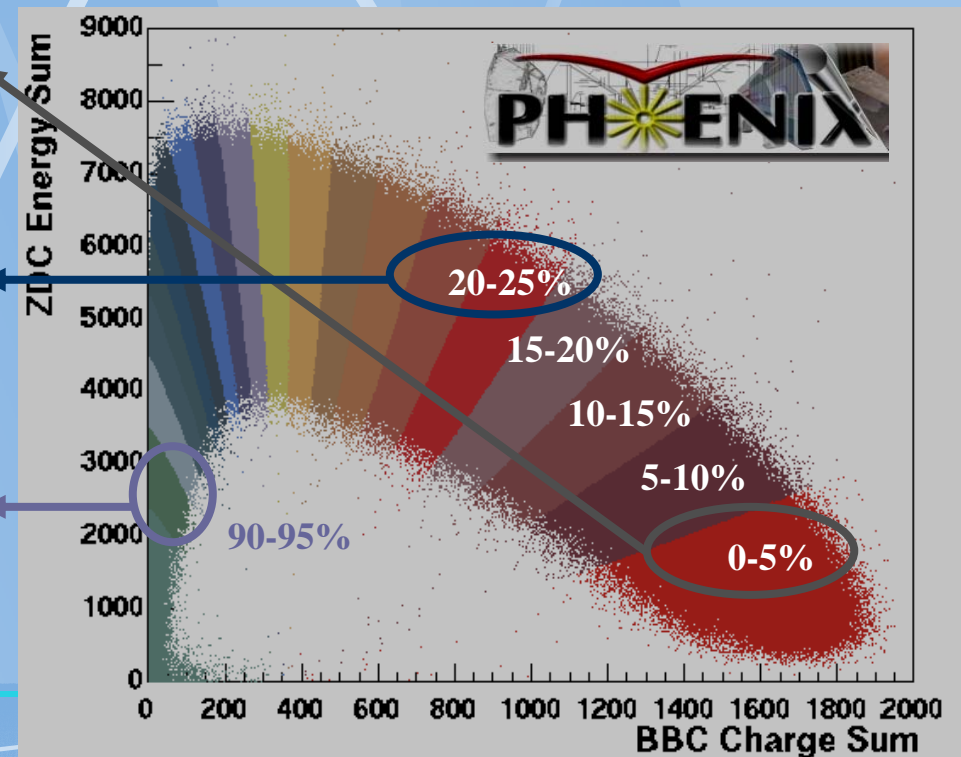
➤ Classes de centralités

... les participants & les collisions

Modèle de Glauber

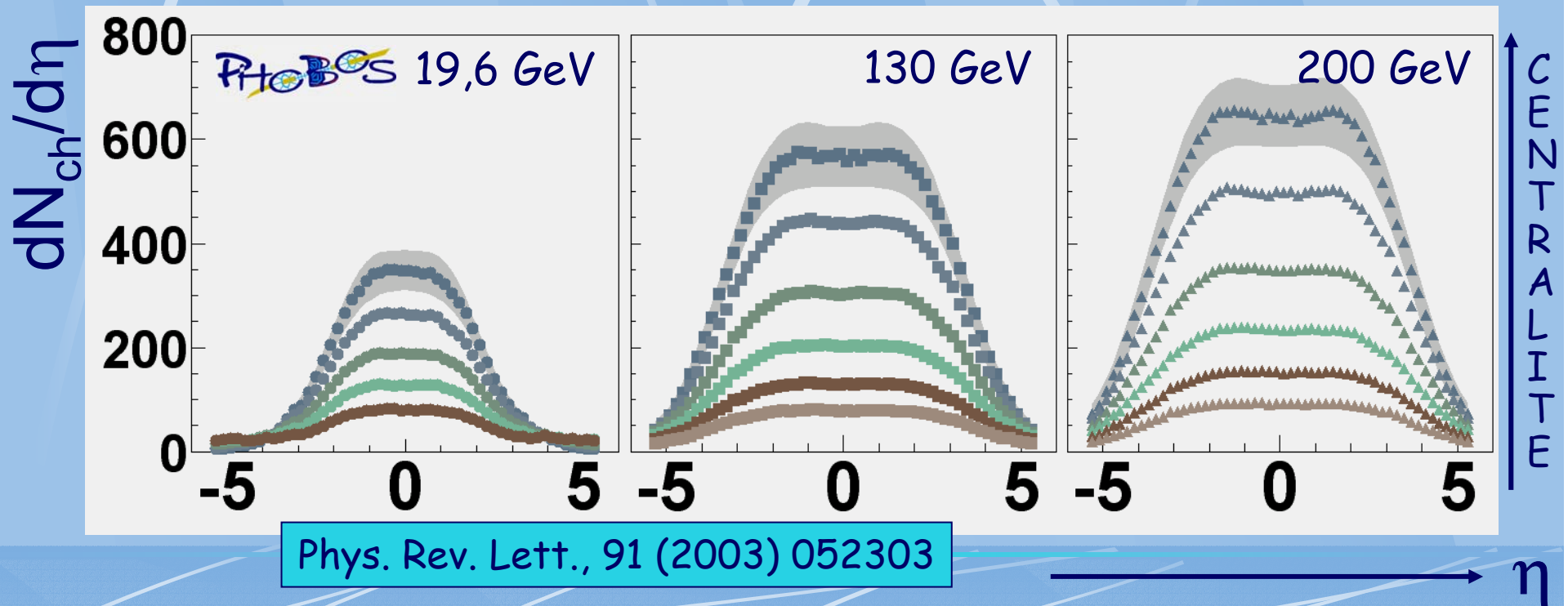
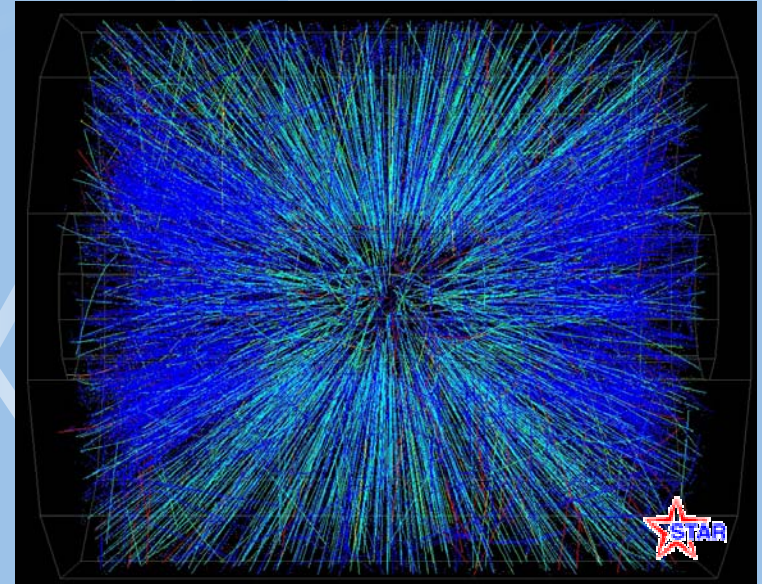
- Géométrie, densité nucléaire, σ_{NN} ...
- Paramètre d'impact
 - Nombre de nucléons participants
 - Nombre de collisions binaires
 - ...

B (fm)	N_{part}	N_{coll}
2,3 ± 0,9	353 ± 19	1091 ± 102
7,1 ± 0,5	181 ± 16	422 ± 65
14,5 ± 0,3	4.1 ± 2.5	2.8 ± 2.2



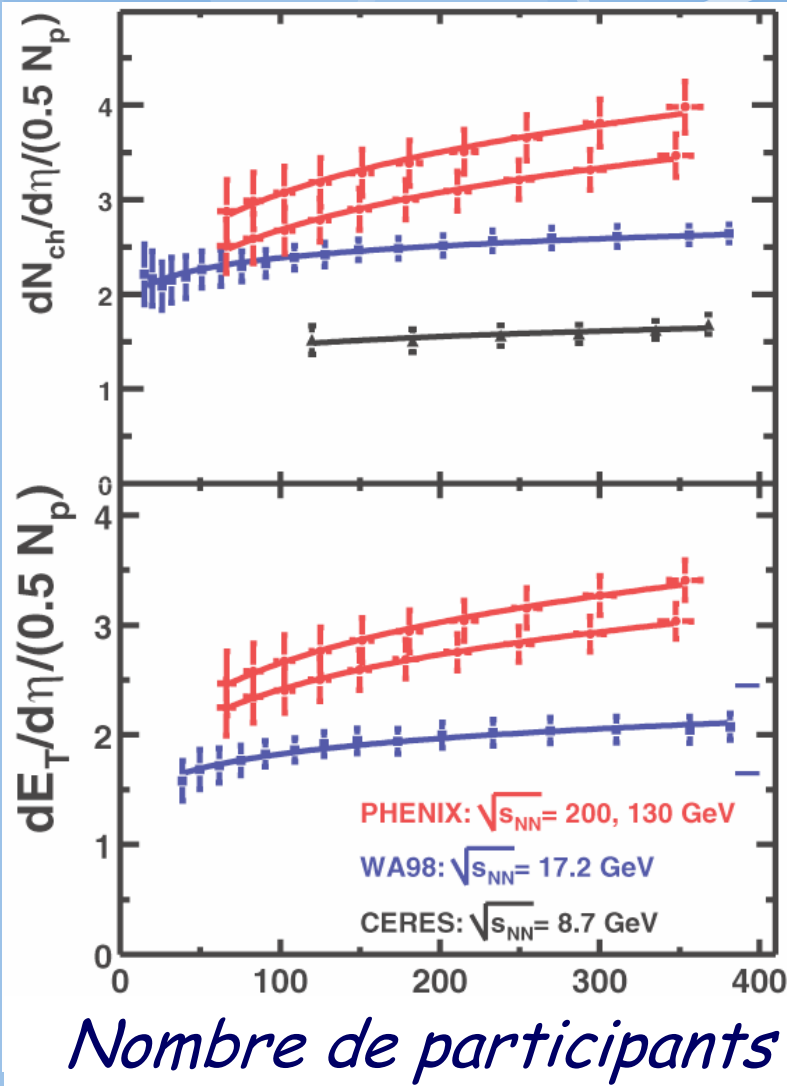
La multiplicité

- $dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0} \rightarrow 670$
(mesures dans 4 expériences)
- $N_{total} \sim \underline{6000}$ particules !



La densité d'énergie

~ Énergie transverse émise lors de la collision @ $y=0$



Formule de Bjorken

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi R^2 \tau_0} \times \left. \frac{dE_T}{dy} \right|_{y=0}$$

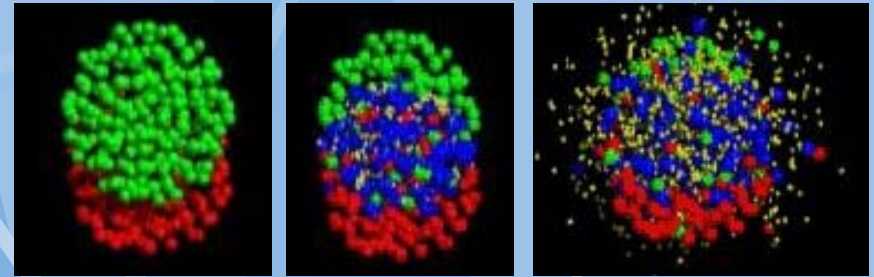
τ_0 temps de formation de 0,35 à 1 fm/c

R = rayon nucléaire
1,18 $A^{1/3}$ fm

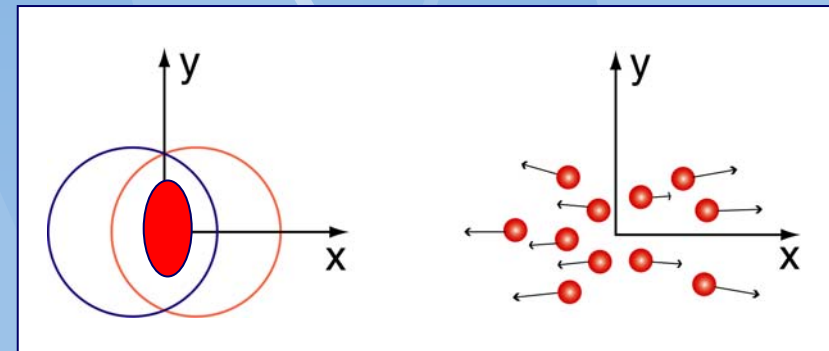
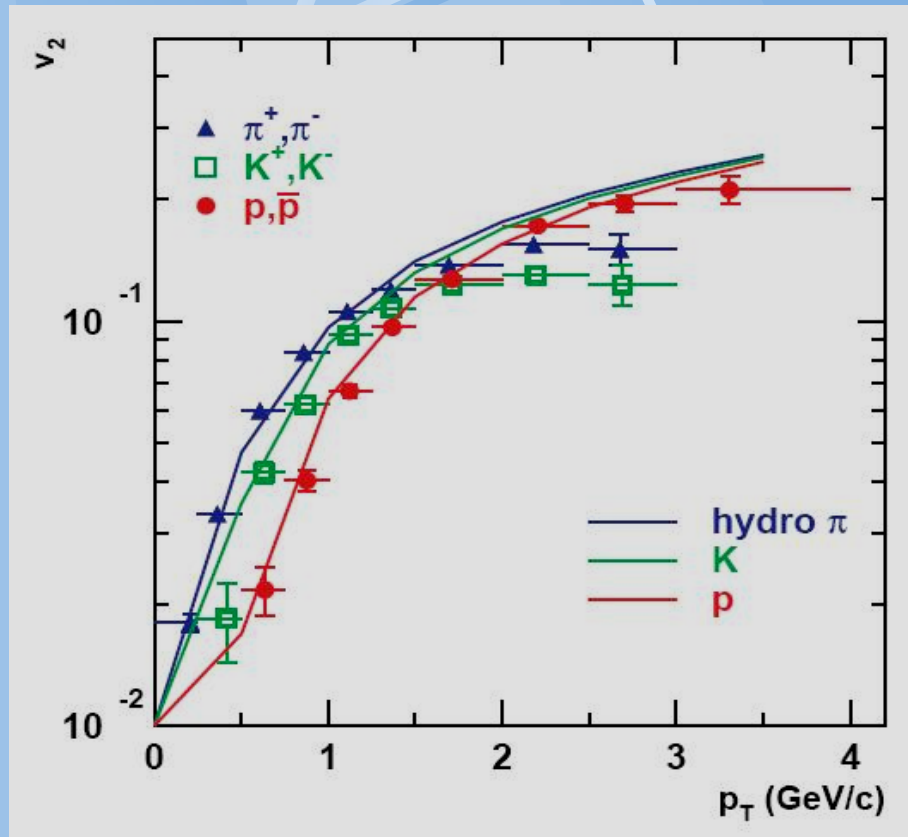
$$\varepsilon > 6 \text{ GeV}/\text{fm}^3$$

Bjorken, Phys. Rev. D27 (1983) 140

Flux elliptique



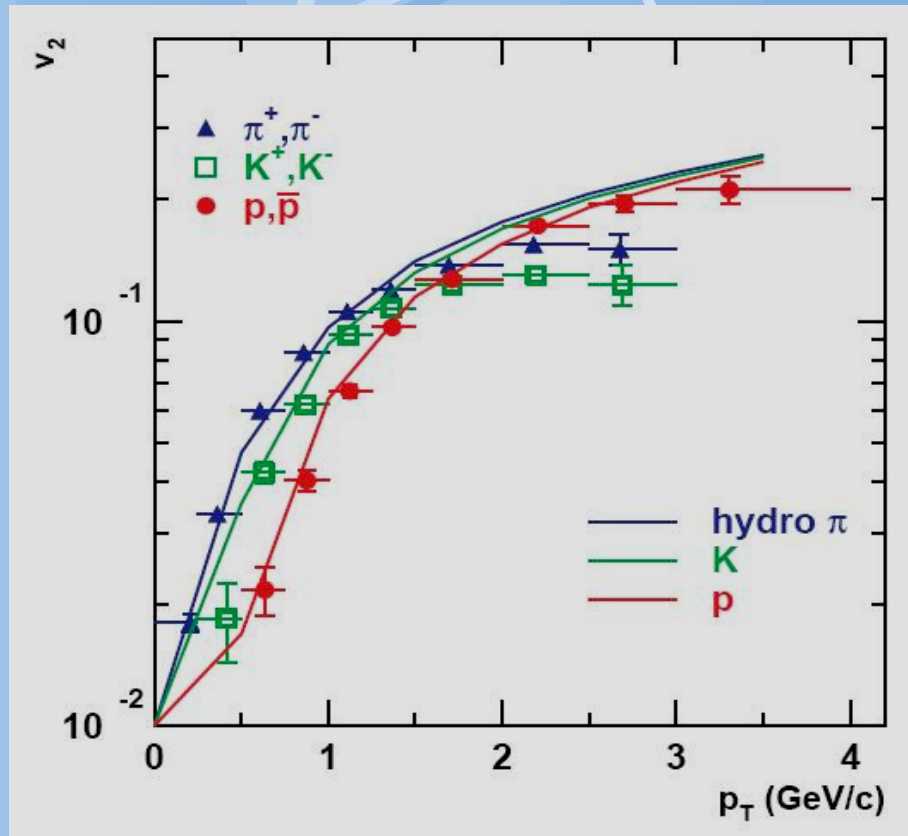
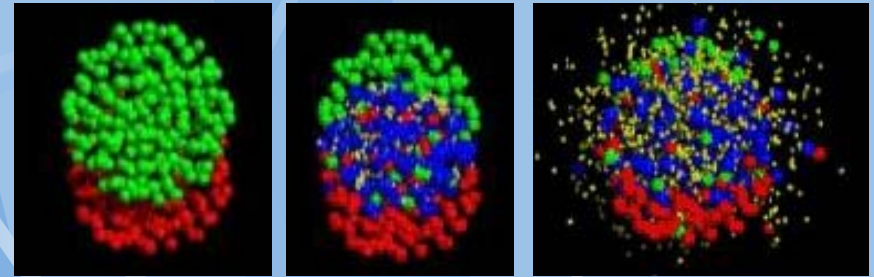
- Gradient de pression
- Anisotropie dans collisions mi-centrales



$$v_2 = \langle \cos 2\phi \rangle$$

PHENIX, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 182301
Huovinen & al, Phys. Lett. B503 (2001) 58

Flux elliptique



● Des comparaisons avec modèles hydro-dynamiques suggèrent

- $\epsilon_{\max} \sim 20 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ (au cœur de la collision)
- $\tau_{\text{therm}} \sim 0,6 \text{ à } 1 \text{ fm}/c$
- Viscosité faible

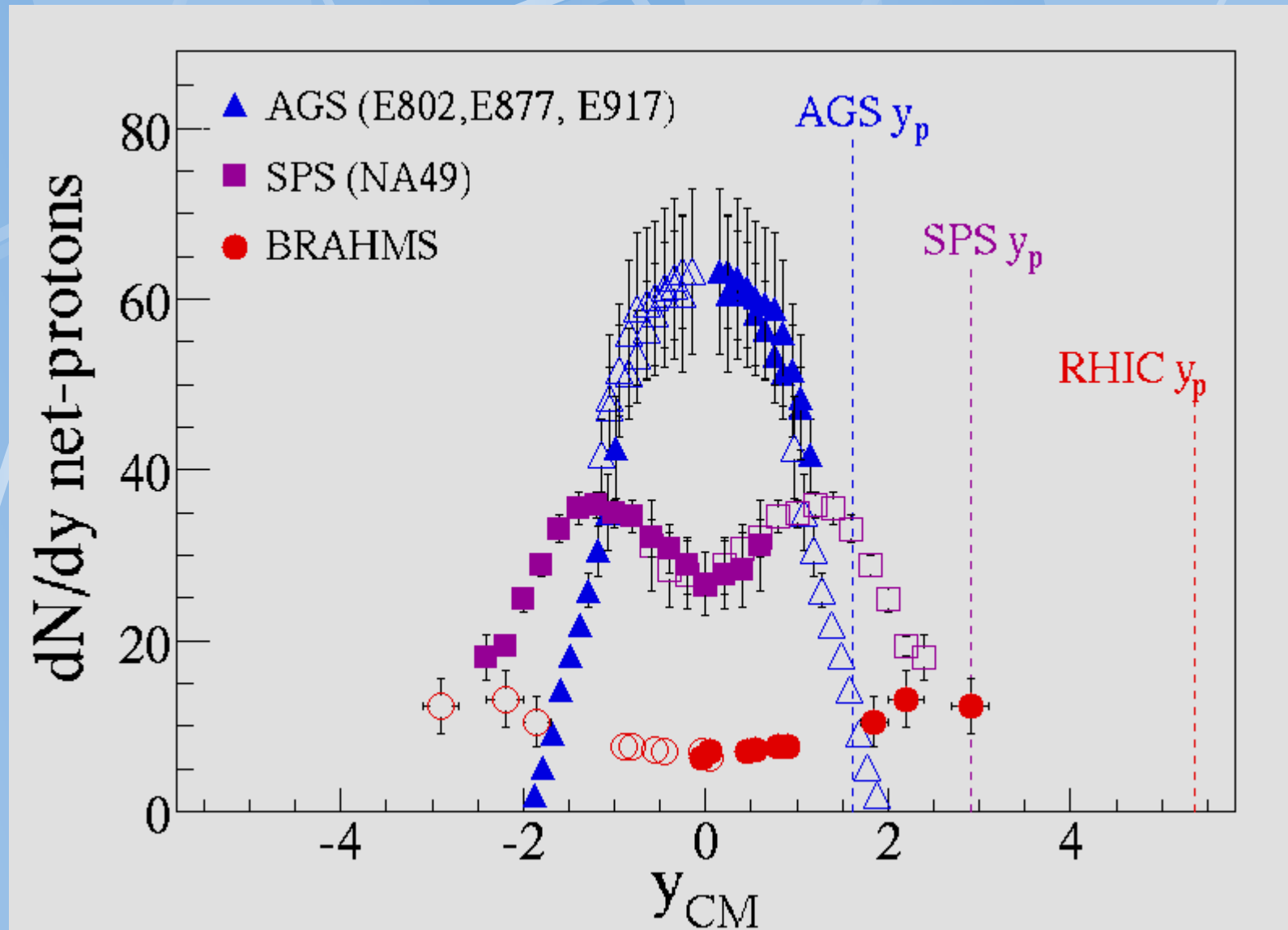
● Mais pas de modèles parfaits (reproduisant toutes observables...)

PHENIX, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 182301

Huovinen & al, Phys. Lett. B503 (2001) 58

→ (un exemple hydro parmi autres)

Nombre baryonique



Ajustement thermodynamique

- Traitement statistique des multiplicités

$$\langle n_j \rangle = \frac{(2J_j + 1)V}{(2\pi)^3} \int d^3p \left[e^{\sqrt{p^2 + m_j^2} T - \mu \cdot \mathbf{q}_j / T} \pm 1 \right]^{-1}$$

- Toutes les multiplicités fonction de 3 paramètres :
Volume, température, μ_B ?
- Instantané de la « boule de feu » au gel chimique (T_{chim})
- Besoin d'ajouter un paramètre de non-équilibre pour les particules étrangères : γ_S

$$\exp[\mu \cdot \mathbf{q}_j / T] \rightarrow \exp[\mu \cdot \mathbf{q}_j / T] \gamma_S^{n_B}$$

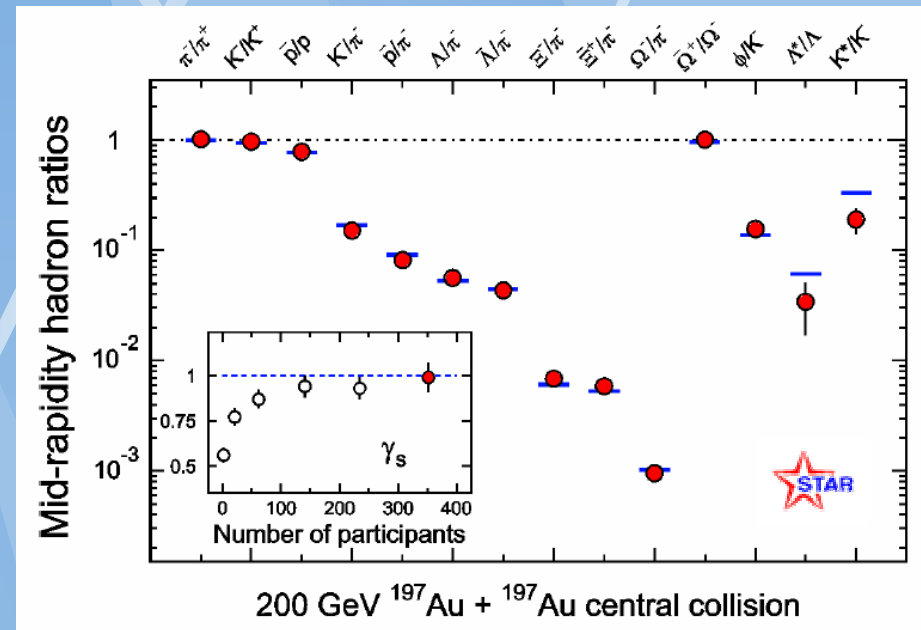
- Traitement **simultané** des conservations du nombre baryonique et de l'étrangeté.

Ex : Becattini & al, PRC69 (2004) 024905
Mais aussi Braun-Munzinger, Stock, Rafelski, ...

Thermalisation

- Ajustement global des abondances relatives
- Pure thermodynamique
- Trois paramètres :
 - Température de gel = température critique !
 - Potentiel baryonique faible (% SPS)
 - Équilibre de l'étrangeté dans les collisions de plus en plus centrales

Rapport d'abondances



$$T_{\text{chim}} = 165 \pm 10 \text{ MeV} \sim T_{\text{crit}}$$

$$\mu_B = 24 \pm 4 \text{ MeV} \rightarrow 0$$

$$Y_S = 0,99 \pm 0,07 \rightarrow 1$$

STAR white paper : NPA757 (2005) 102

En résumé, les observables globales :

- n_{Baryon} proche de zéro (calcul sur réseau QCD)
- Thermalisation rapide
- Gel chimique $\sim T_{\text{crit}}$
- Équilibre de l'étrangeté
- $\varepsilon > 6 \text{ GeV} / \text{fm}^3 > \varepsilon_{\text{Critique}}$
- Les conditions sont plus que réunies !
- Alors, plasma or not plasma ?
- Trois sondes durs :
 - II. Suppression des quarkonia ?
 - III. Photons thermiques ?
 - IV. Jet quenching ?

Intermède

- Avant le SPS (et même l'AGS) :

« There was a general feeling that if the quark-gluon plasma was indeed produced, it would manifest itself in a variety of unknown but dramatic ways, including... the end of the world »

H. Satz @ Lattice 2000 hep-ph/0009099

- De nombreuses phénomènes prédits pour le PQG furent observés... (↗ étrangeté, ↘ J/ψ ,...)

- Y compris en $p+A$!

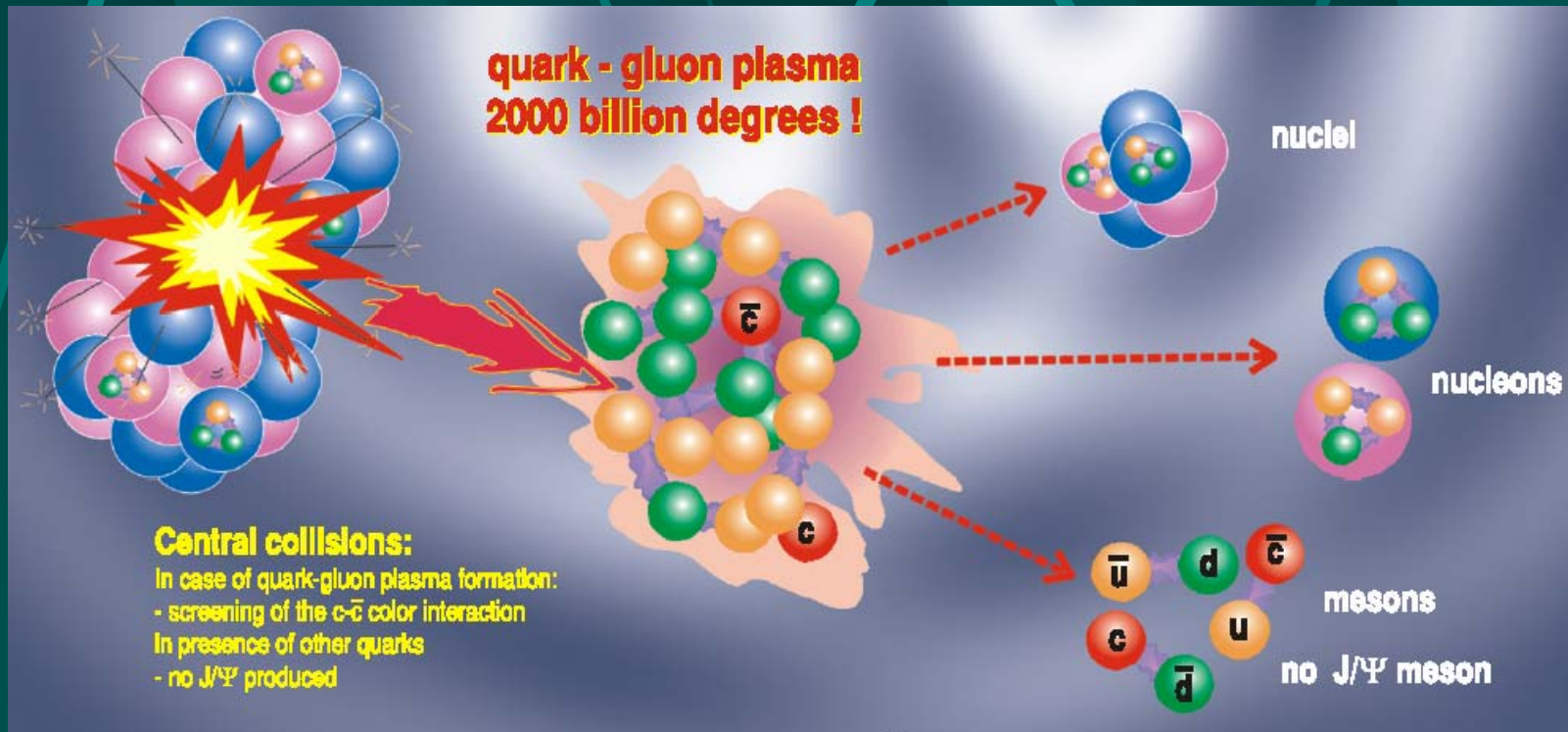
- Règle d'or ions lourds :

- Référence $p+p$
- Référence $p+A$
- Physique $A+A$!



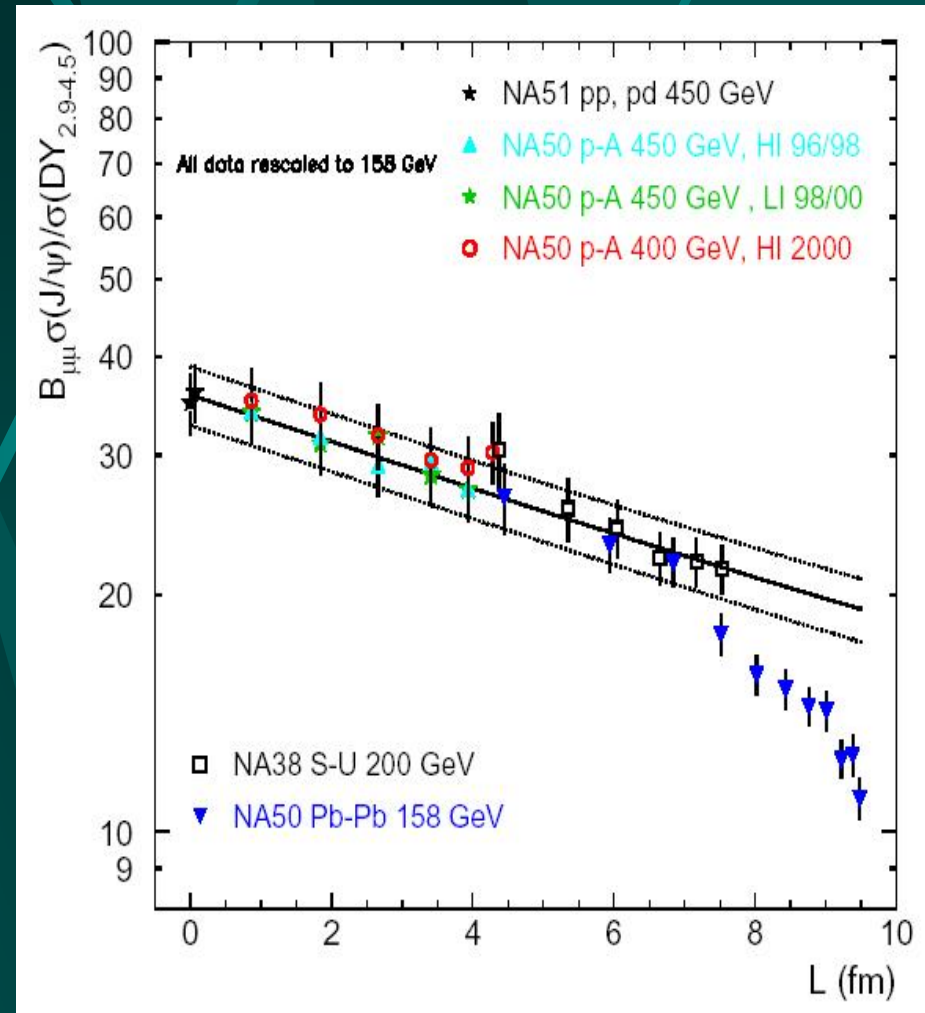
II. Suppression quarkonia

- Peu de paires $c\bar{c}$, tendance à se lier $\rightarrow J/\psi$
- Pourraient fondre dans le plasma ?



Suppression du J/ψ vue au SPS

- J/ψ / Drell-Yan
 - $DY = q\bar{q} \rightarrow \text{gamma} \rightarrow \mu\mu$
- en fonction de L
 - la longueur de matière nucléaire traversée par le J/ψ
- Raccordement p+p, p+A, S+U et Pb+Pb périphérique = absorption nucléaire
 - $4,18 \pm 0,35 \text{ mb}$
- Suppression anormale en Pb+Pb centrale



NA50, Eur. Phys. Journ. C39 (2005) 335

Résumé de l'épisode SPS

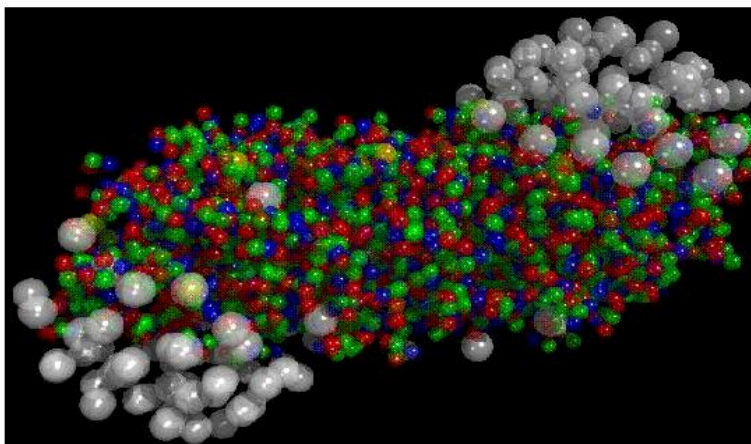


Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
European Organization for Nuclear research

Laboratoire Européen pour la Physique des Particules
European Laboratory for Particle Physics
Ευρωπαϊκό Laboratorium für Teilchenphysik
Laboratorio europeo per la fisica delle particelle

PRESS RELEASE

New State of Matter created at CERN



At a special seminar on 10 February, spokespersons from the experiments on CERN's Heavy Ion programme presented compelling evidence for the existence of a new state of matter in which quarks, instead of being bound up into more complex particles such as protons and neutrons, are liberated to roam freely.

Theory predicts that this state must have existed at about 10 microseconds after the Big Bang, before the formation of matter as we know it today, but until now it had not been confirmed experimentally. Our understanding of how the universe was created, which was previously unverified theory for any point in time before the formation of ordinary atomic nuclei, about three minutes after the Big Bang, has with these results now been experimentally tested back to a point only a few microseconds after the Big Bang.

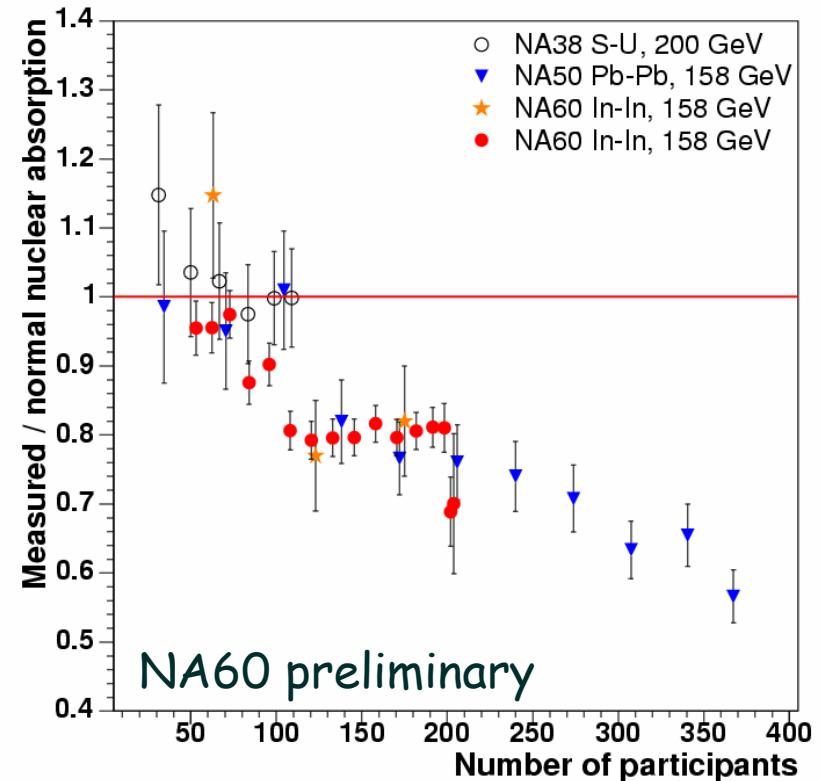
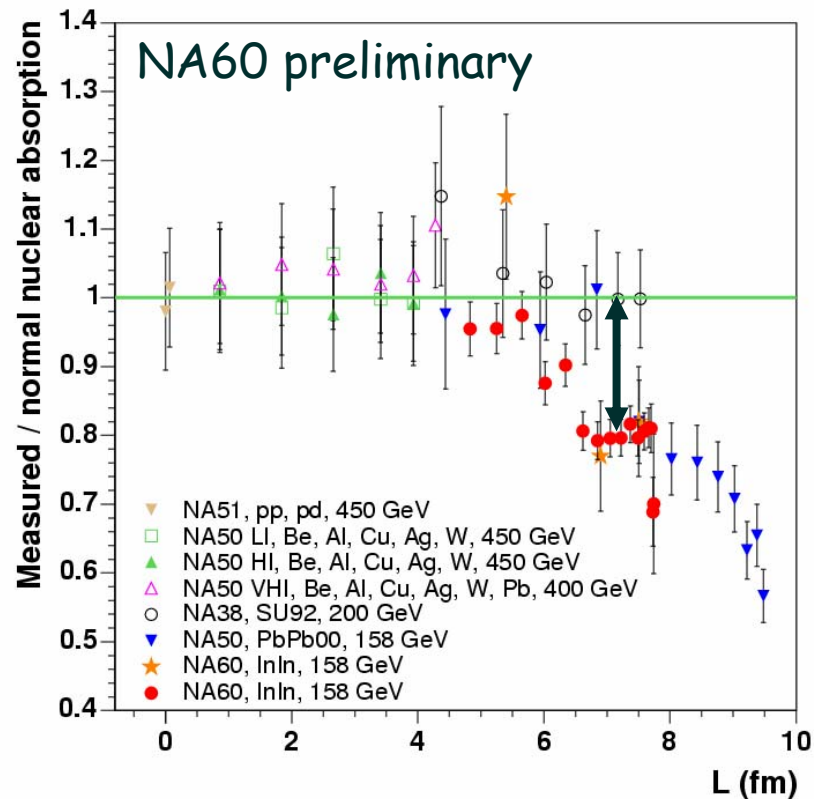
- Annonce faite le 10 février 2000
- Résultats combinés de plusieurs expériences...
- En particulier suppression du J/ψ

NA60 : collisions In+In



Pas de recouvrement versus L
Absorption normale / anormale

Assez bon accord
versus N_{part}

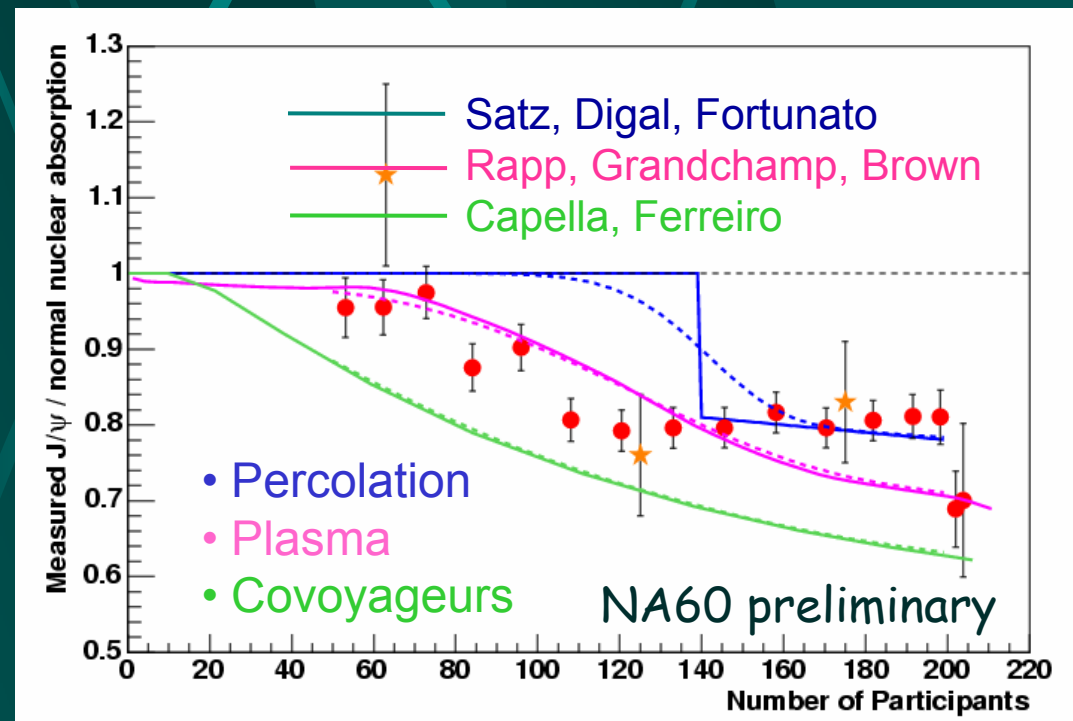


Arnaldi, Quark Matter 2005

NA60 : comparaison théorique

- Modèles qui marchaient pour NA50 ne marchent pas pour NA60...
- En particulier absorption par des covoyageurs hadroniques
- Déconfinement !

À suivre...

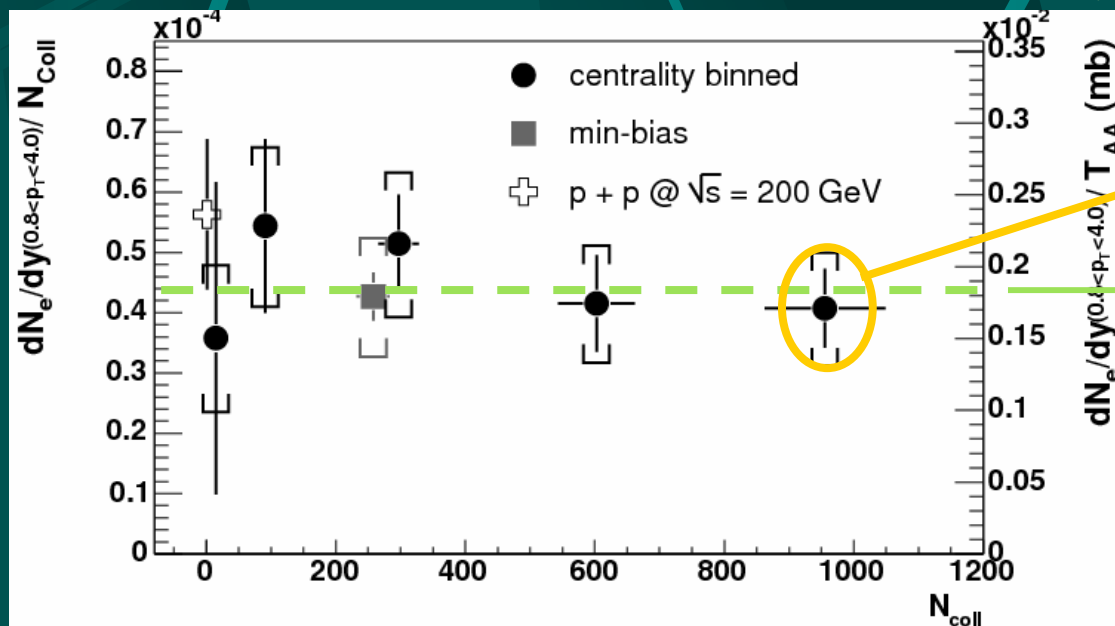


Intermède : N_{part} ou N_{coll} ?

- En absence d'effets nucléaires :
- Processus mous $\propto N_{\text{part}}$
 - Multiplicités,
 - Bas p_{T} ,
 - ...
- Processus durs $\propto N_{\text{coll}}$
 - Processus rares
 - Haut p_{T} ,
 - Saveurs lourdes,
 - ...

À RHIC : référence pour J/ψ ?

- Pas de Drell-Yan auquel se référer !
- À terme : charme ouvert ($c\bar{c} \rightarrow DD$)



10 à 20 paires $c\bar{c}$!

Le charme ouvert
va comme N_{coll}

25% de systématiques
(besoin de détecteur
de vertex)

- Pour l'instant : R_{AB}

$$R_{AB} = \frac{N_{\psi}^{AB}}{N_{\psi}^{PP} \times \langle N_{coll} \rangle}$$

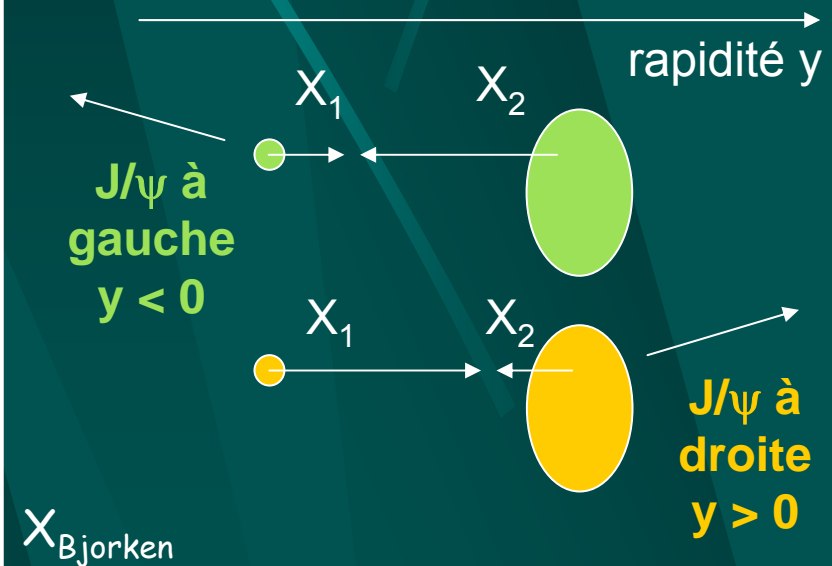
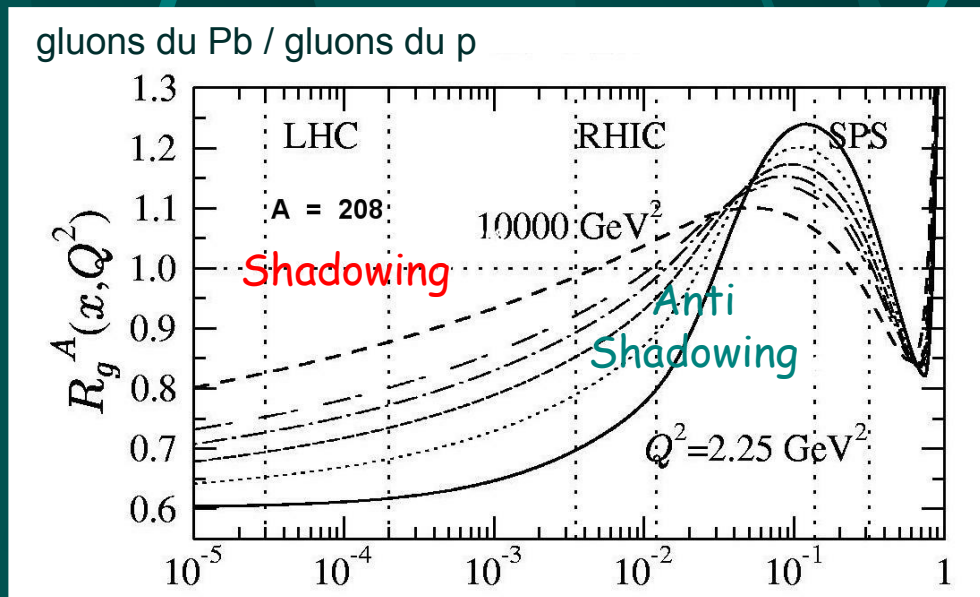
PHENIX, Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 082301

Effet nucléaire froid : le shadowing...

Nouvel effet : le shadowing

- Partons dans un noyau \neq partons dans nucléons
- Modification des fonctions de structure

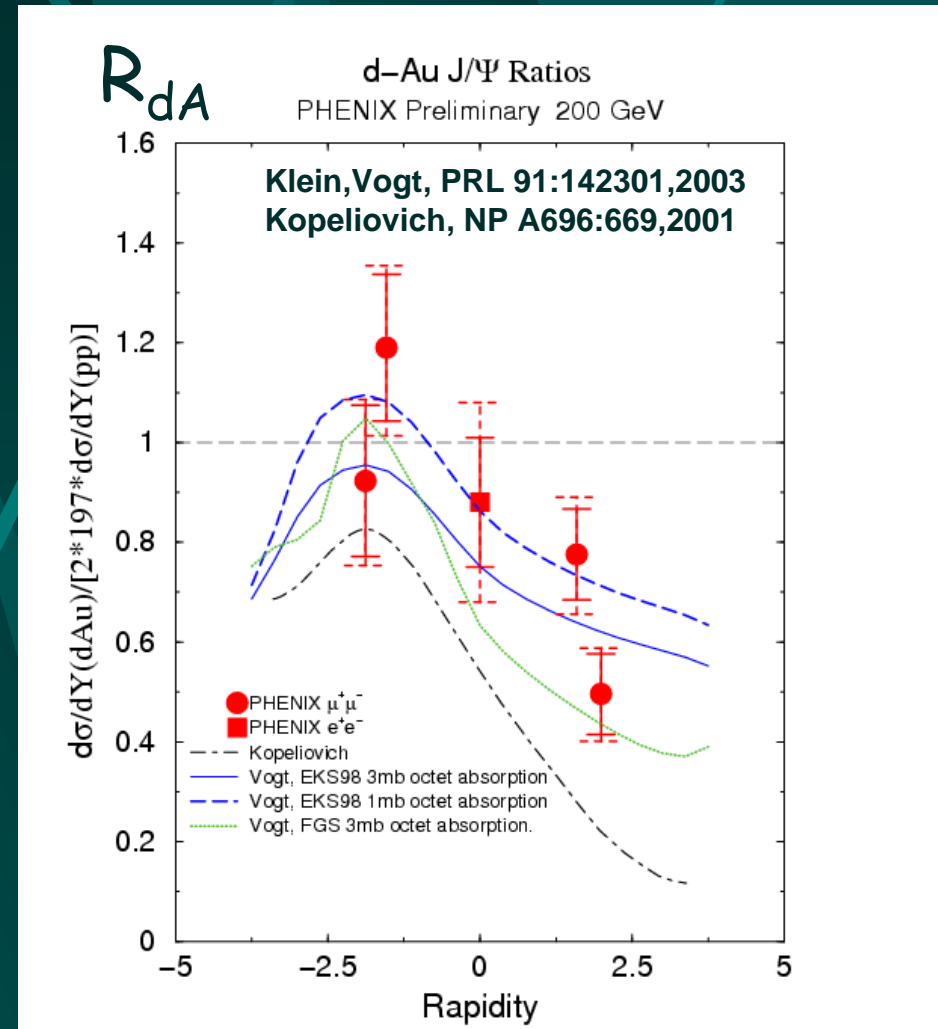
Exemple de shadowing des gluons



Eskola, Kolhinen, Vogt, Nucl. Phys. A696 (2001) 729

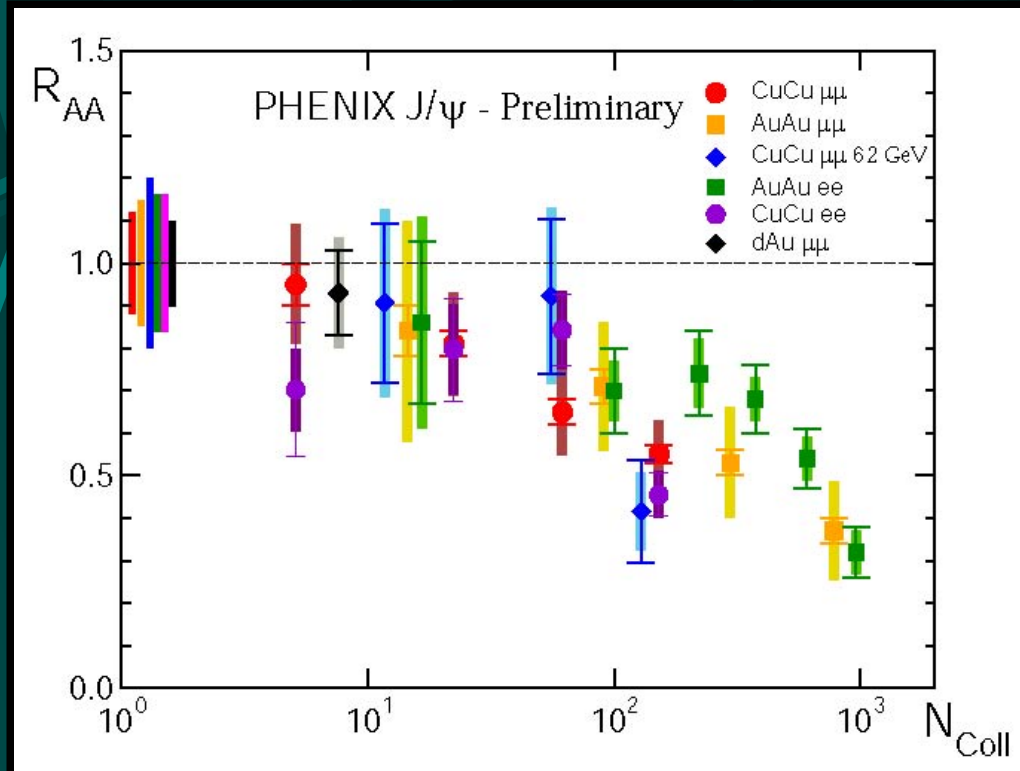
J/ ψ en collisions d+Au @ RHIC

- On voit un peu de shadowing à RHIC...
- et un peu d'absorption
 - Entre 1 et 3 mb



PHENIX, nucl-ex/0507032

J/ψ en collisions Au+Au @ RHIC



J/ψ → μμ
muon arm
1.2 < |y| < 2.2

J/ψ → ee
Central arm
-0.35 < y < 0.35

dAu
 ○○
 200 GeV/c

AuAu
 ○○
 200 GeV/c

CuCu
 ○○
 200 GeV/c

AuAu
 ee
 200 GeV/c

CuCu
 ee
 200 GeV/c

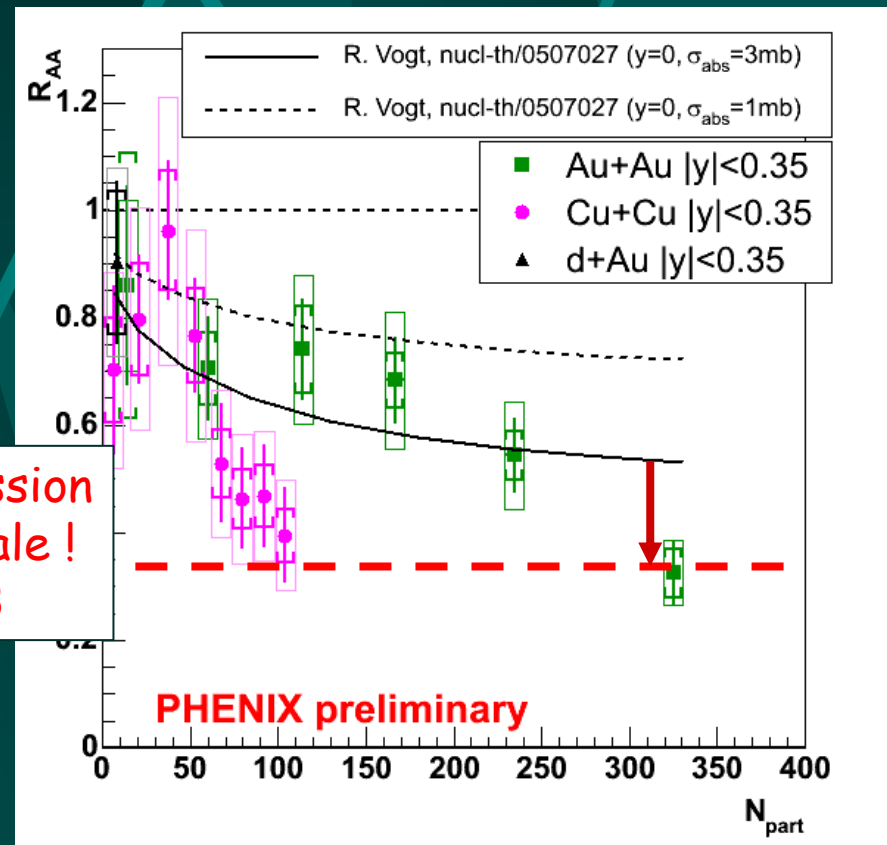
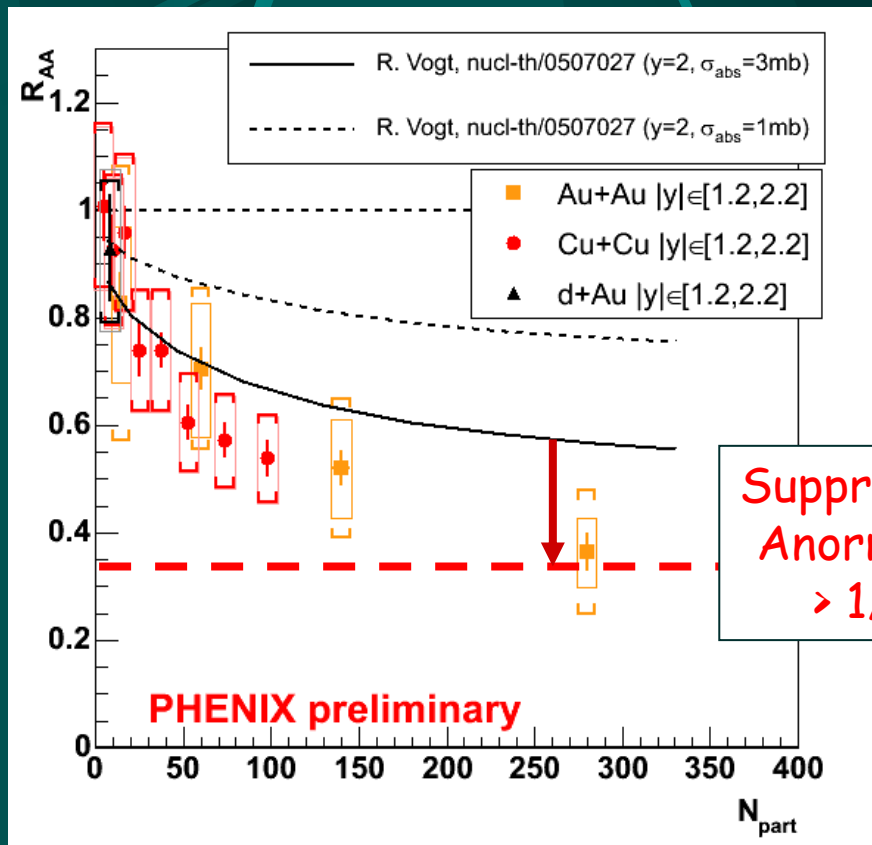
CuCu
 ○○
 62 GeV/c

Pereira da Costa, Quark Matter 2005



Les effets froids sur le J/ψ @ RHIC...

- Shadowing + absorption nucléaire (1 à 3 mb)
 - Assez mal contraints...



Vogt, nucl-th/0507027 + com. privée

Comparaison avec théories (1)

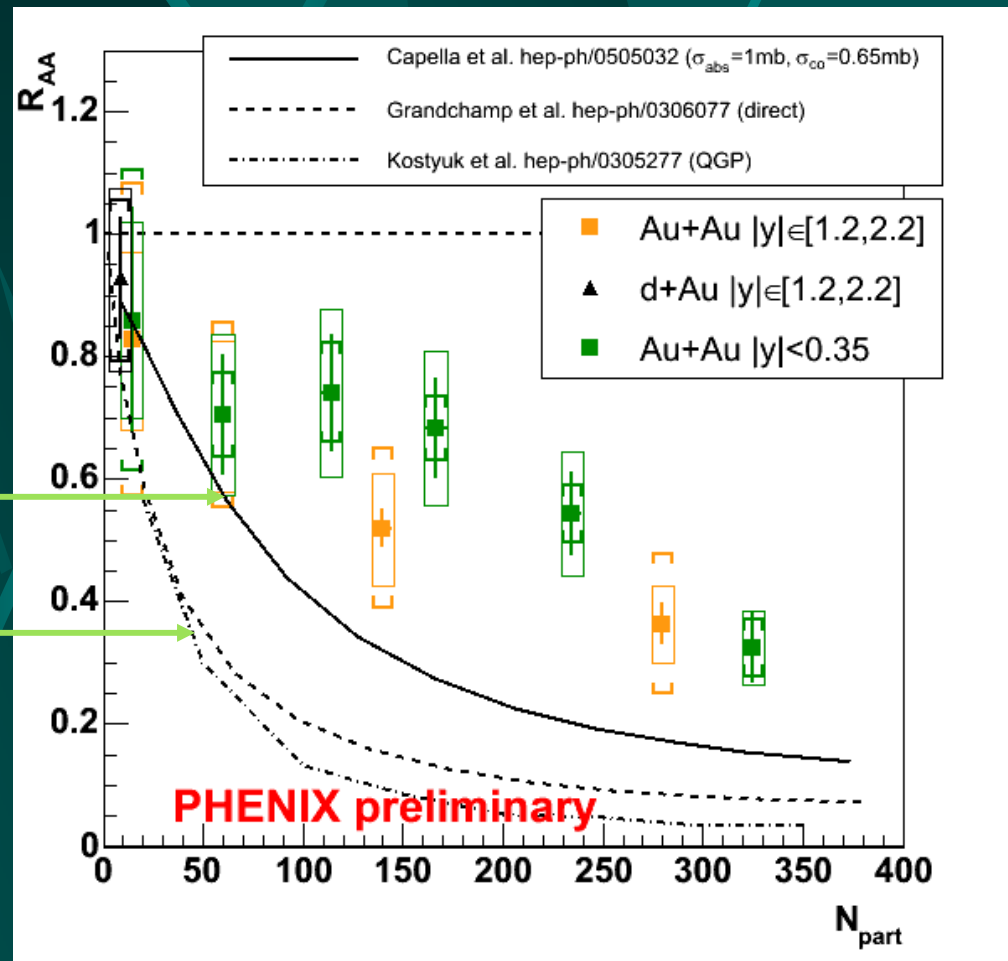
- Modèles incluant les effets du SPS

- Absorption normale

- + Comovers

- + Plasma

- Tous surestiment la suppression...



Preprints + communications privées

Comparaison avec théories (2)

Plusieurs modèles :

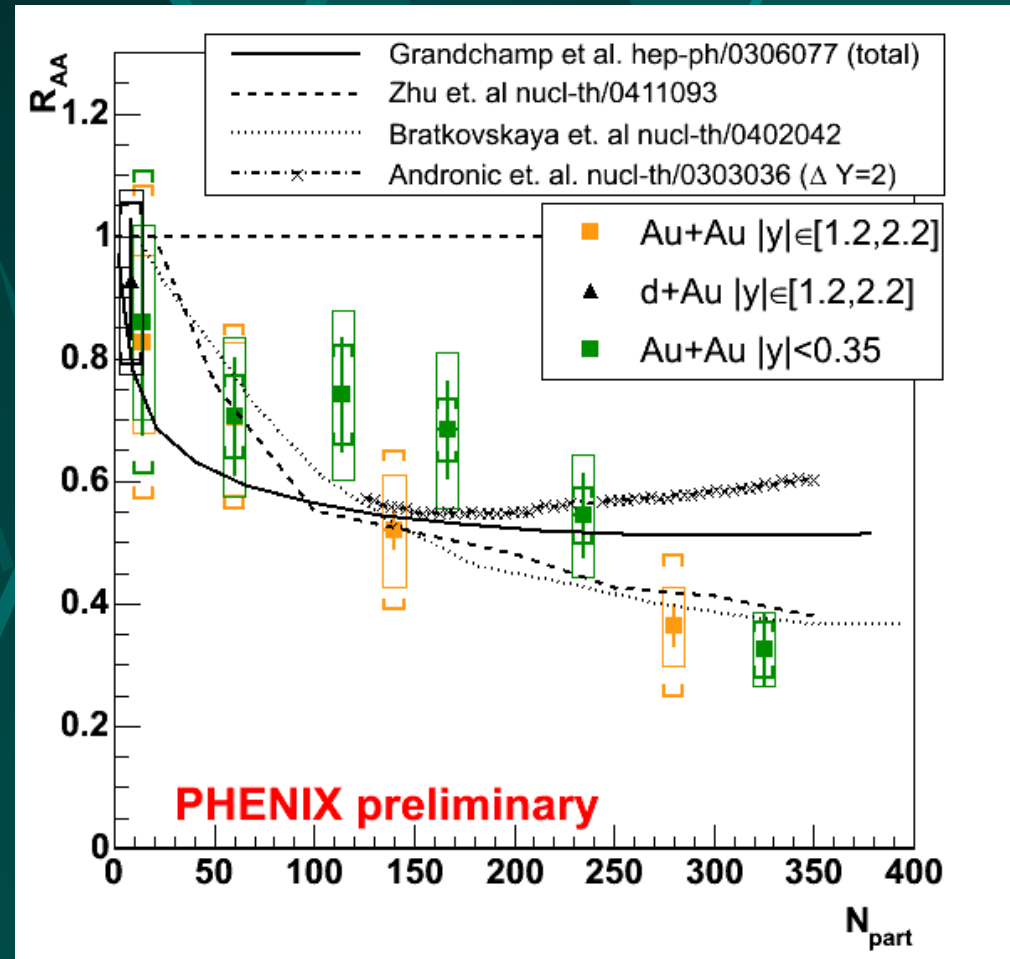
- Transport dans un plasma (Zhu et al)
- Recombinaison dans plasma (autres...)

$$c\bar{c} \rightarrow J/\psi$$

Mais prudence :

- N_{cc} initial mal connu...

À suivre...



Preprints + communications privées

Conclusions J/ψ

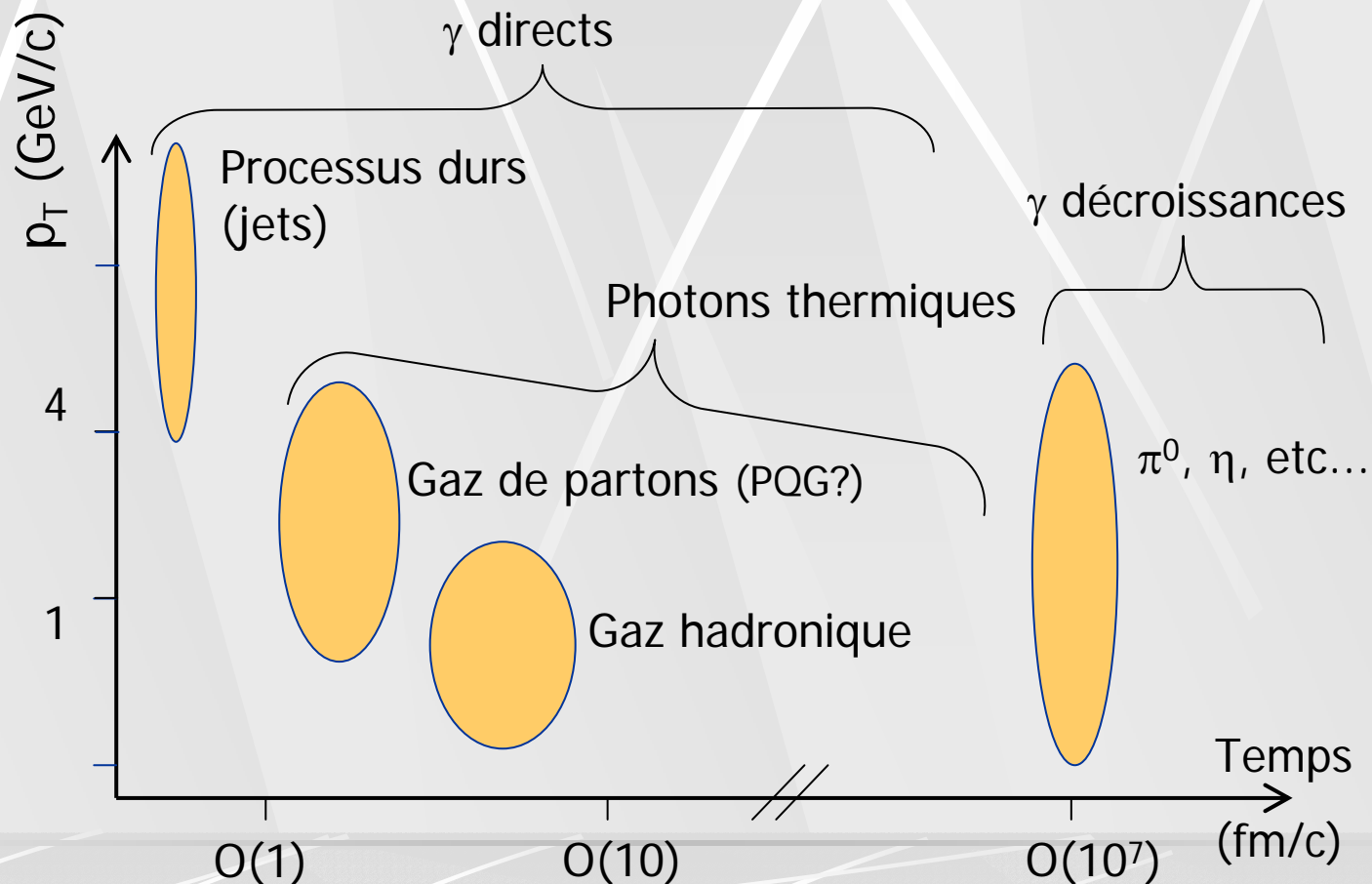
- Au SPS, les modèles hadroniques ne reproduisent pas la suppression (NA50+60)
 - Déconfinement
- À RHIC, il y a suppression mais moins forte que prédite
 - Recombinaison ?
 - Fuite des J/ψ de grand p_T ?
 - Fonte des χ_c et ψ' seuls ?
- En tous cas : déconfinement

Meilleure ref. pp !
Meilleure ref. dA ?
Études de p_T, γ, v_2

À suivre...

III. Les photons

- Photons de décroissance bien mesurés
- Photons directs, bien mesurés ($p_T > 5 \text{ GeV}/c$)

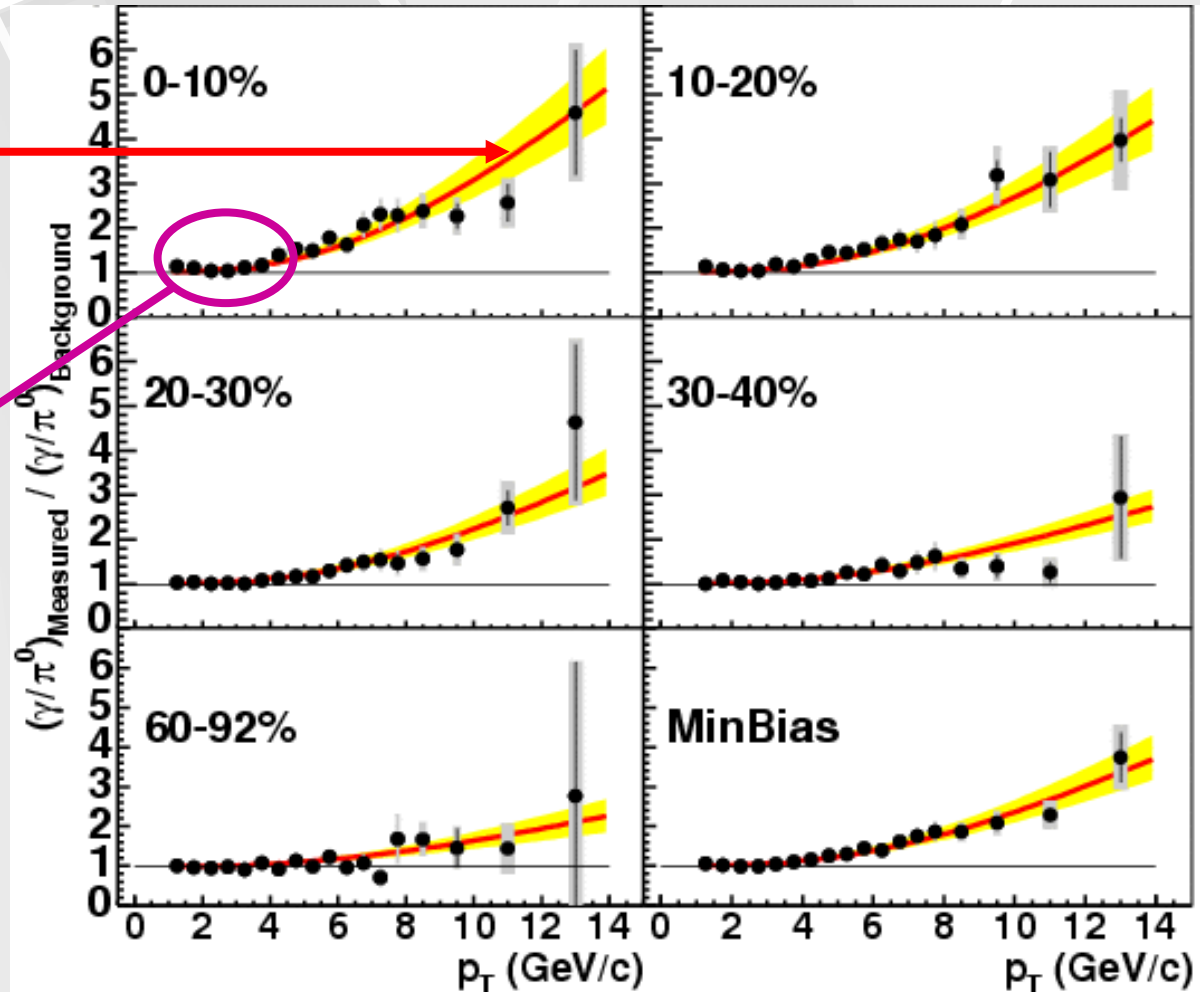


Photons directs $\sim N_{\text{coll}}$

- Prédiction

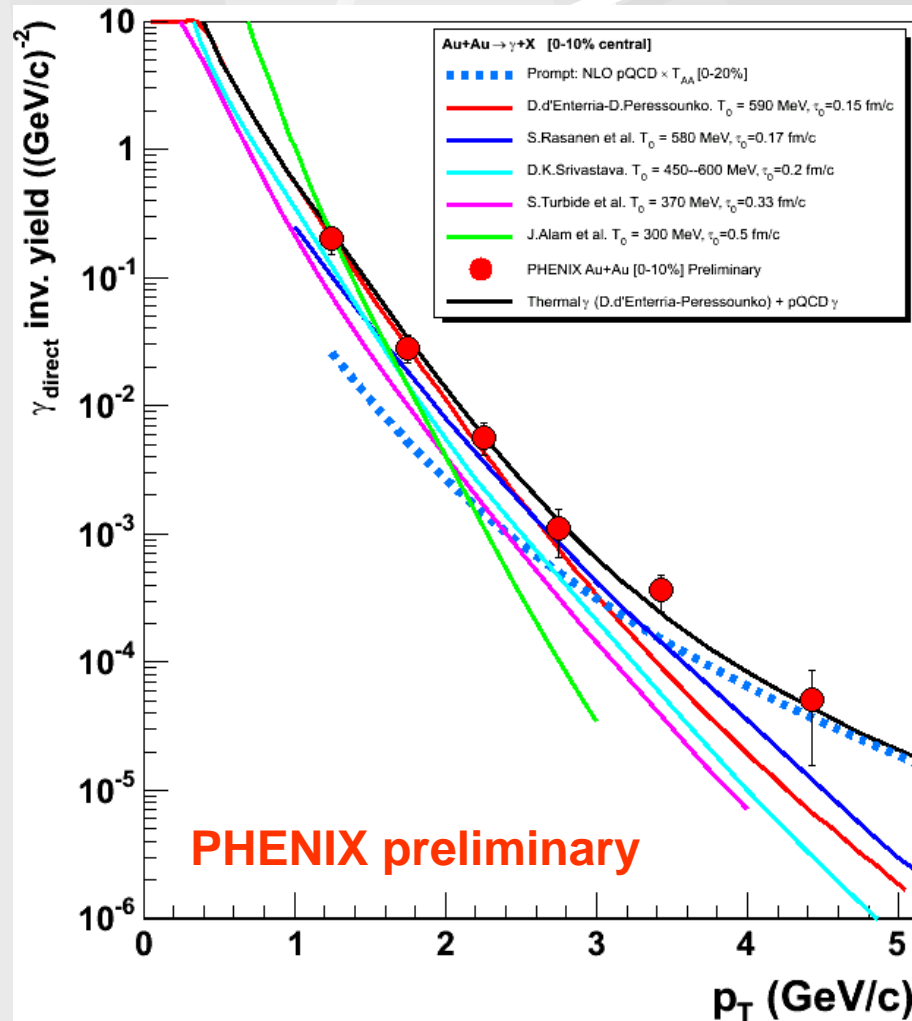
$$pp \times N_{\text{coll}}$$

- Photons thermiques ?



PHENIX, Phys. Rev. Lett. 94, 232301

Photons thermiques

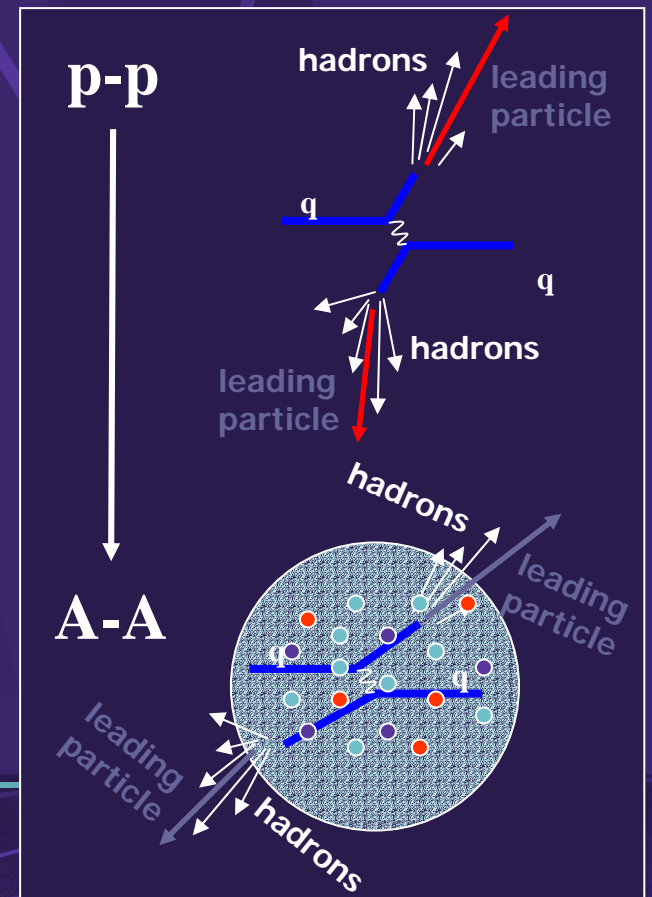


- Excès de photons à bas p_T
- Photons thermiques émis par le plasma
- Ajustements hydrodynamiques :
 - $T \sim 590 \text{ MeV}$
 - $\tau_0 \sim 0,15 \text{ fm/c}$

Stefan Bathe, Quark Matter 2005
Exemple fit hydro : d'Enterria & Perresounko nucl-th/0503054

IV. Le « Jet quenching »

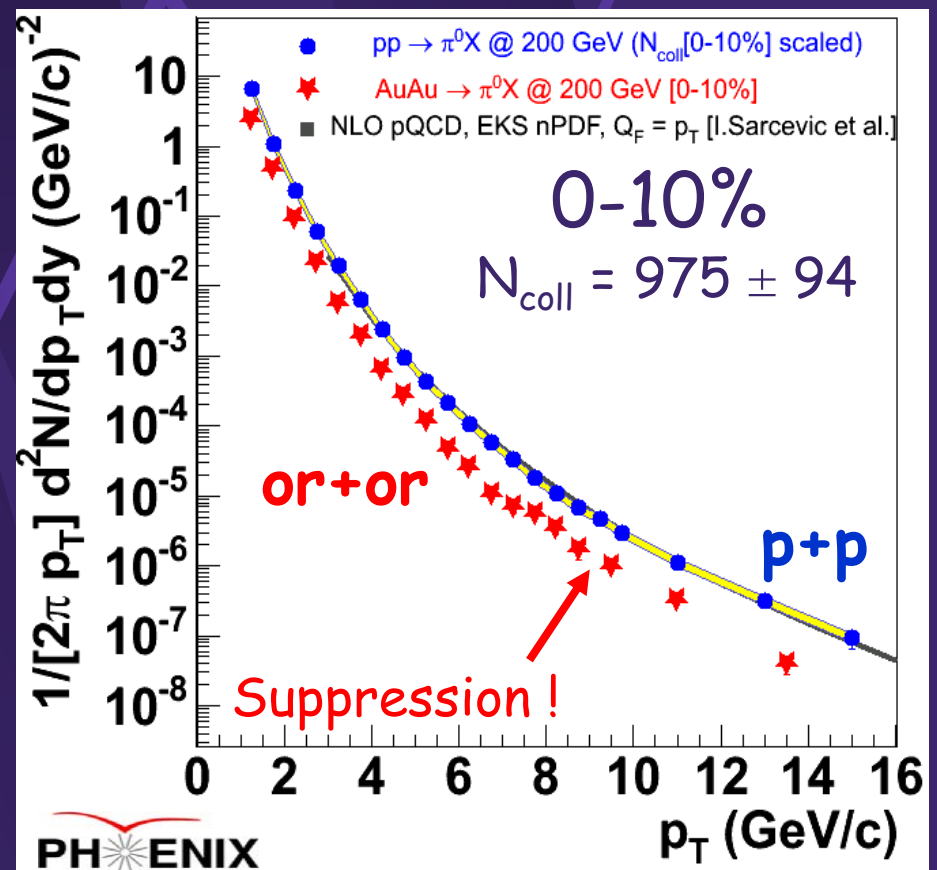
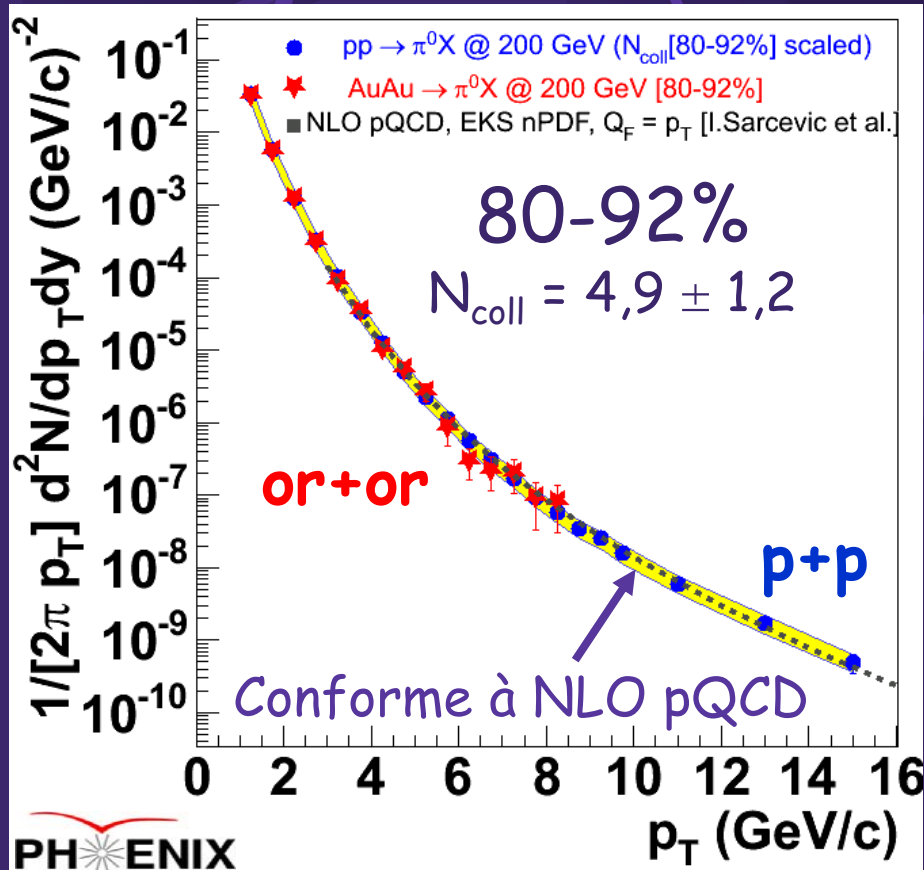
- Grandes impulsions transverses
 - Particules produites tôt dans des processus durs (calculables) sensibles au milieu traversé
 - $p_T > 2 \text{ GeV}$ de fragmentation « leading particles »
 - En traversant un milieu dense, le parton perd de l'énergie.
 - Le p_T est affaibli !
 - Comparer (or+or) avec (p+p)



Spectre de π^0

(or+or) = (p+p) \times N_{coll}
 en collisions périphériques

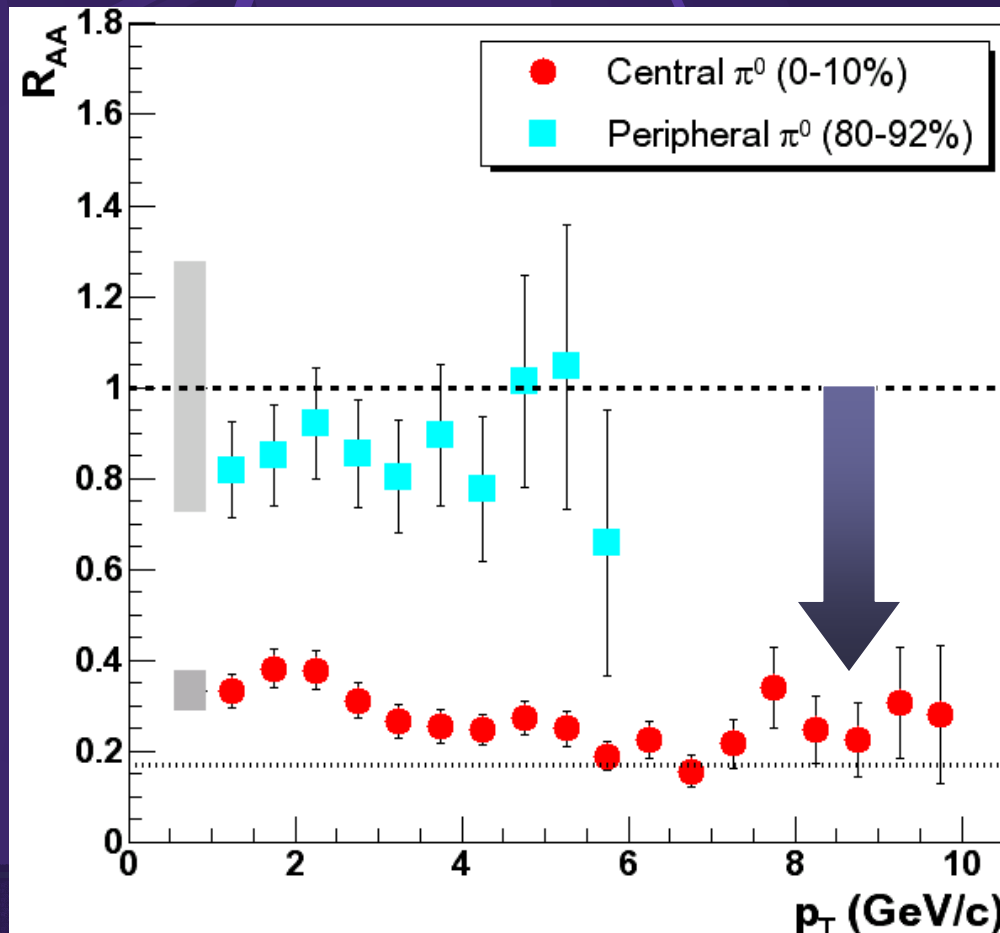
Fortement supprimés
 en collisions centrales !



Rapport $or+or$ / $p+p$

$$R_{AA} = \frac{d^2N^{AuAu}/dydp_T}{d^2N^{PP}/dydp_T \times \langle N_{coll} \rangle}$$

Suppression d'un facteur
3 à 5 quelque soit p_T !

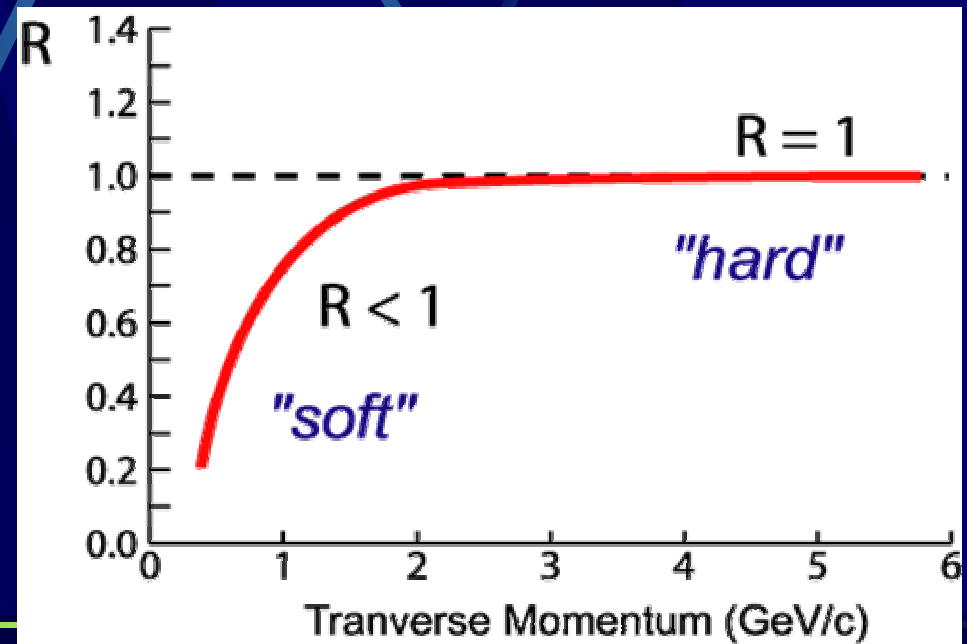


Intermédiaire : N_{part} ou N_{coll} ?

- En absence d'effets nucléaires :
- Processus mous $\propto N_{\text{part}}$
 - Multiplicités,
 - Bas p_{T} ,
 - ...
- Processus durs $\propto N_{\text{coll}}$
 - Processus rares
 - Haut p_{T} ,
 - Saveurs lourdes,
 - ...

- Par ex, rapport de modification nucléaire

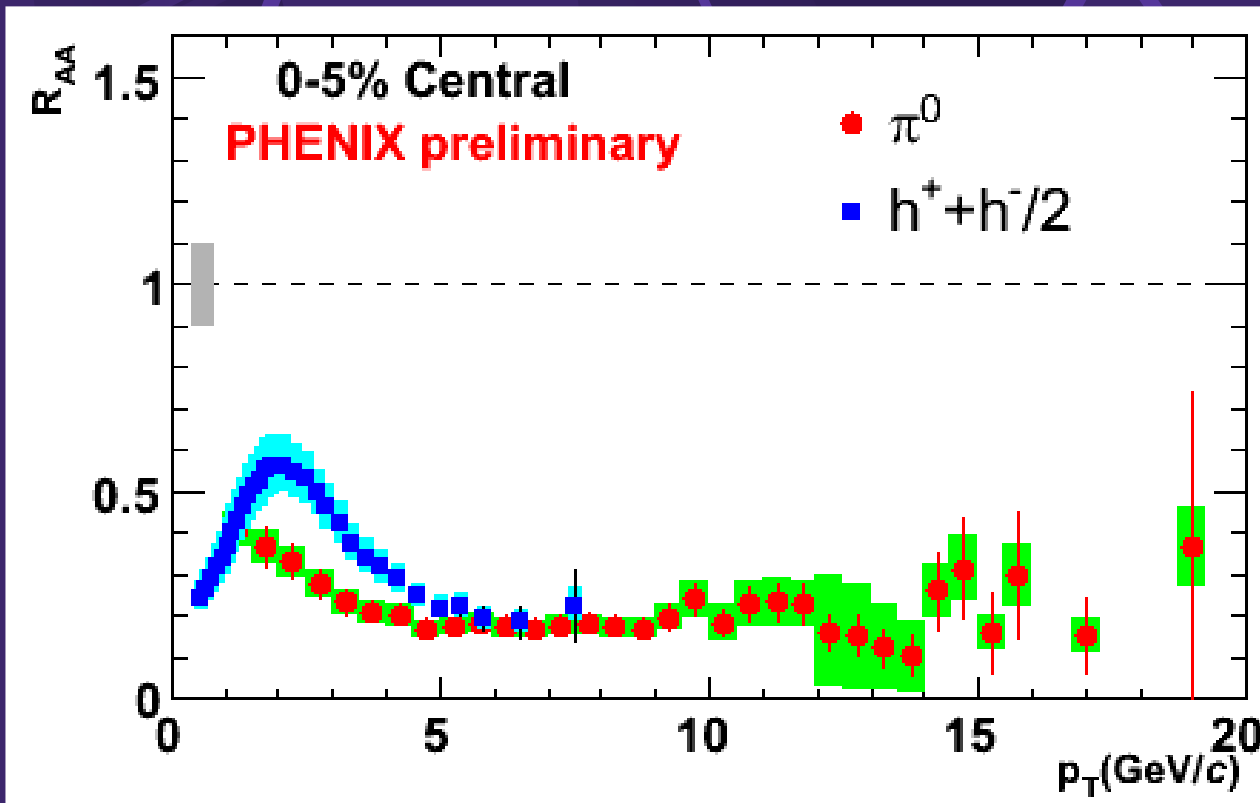
$$R_{AA} = \frac{d^2N^{\text{AuAu}}/dydp_{\text{T}}}{d^2N^{\text{PP}}/dydp_{\text{T}} \times \langle N_{\text{coll}} \rangle}$$



En fonction de la centralité

$$R_{AA} = \frac{d^2N^{AuAu}/dydp_T}{d^2N^{PP}/dydp_T \times \langle N_{coll} \rangle}$$

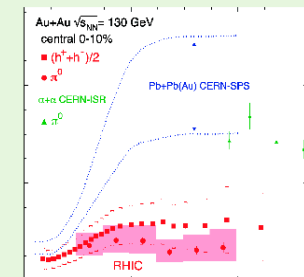
Suppression d'un facteur
3 à 5 jusqu'à $p_T = 20 \text{ GeV}/c$!



Premiers signes de quenching
Dés le run 2 @ 130 GeV

PHYSICAL
REVIEW
LETTERS

14 January 2002
Volume 88, Number 2



Member Subscription Copy
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2007

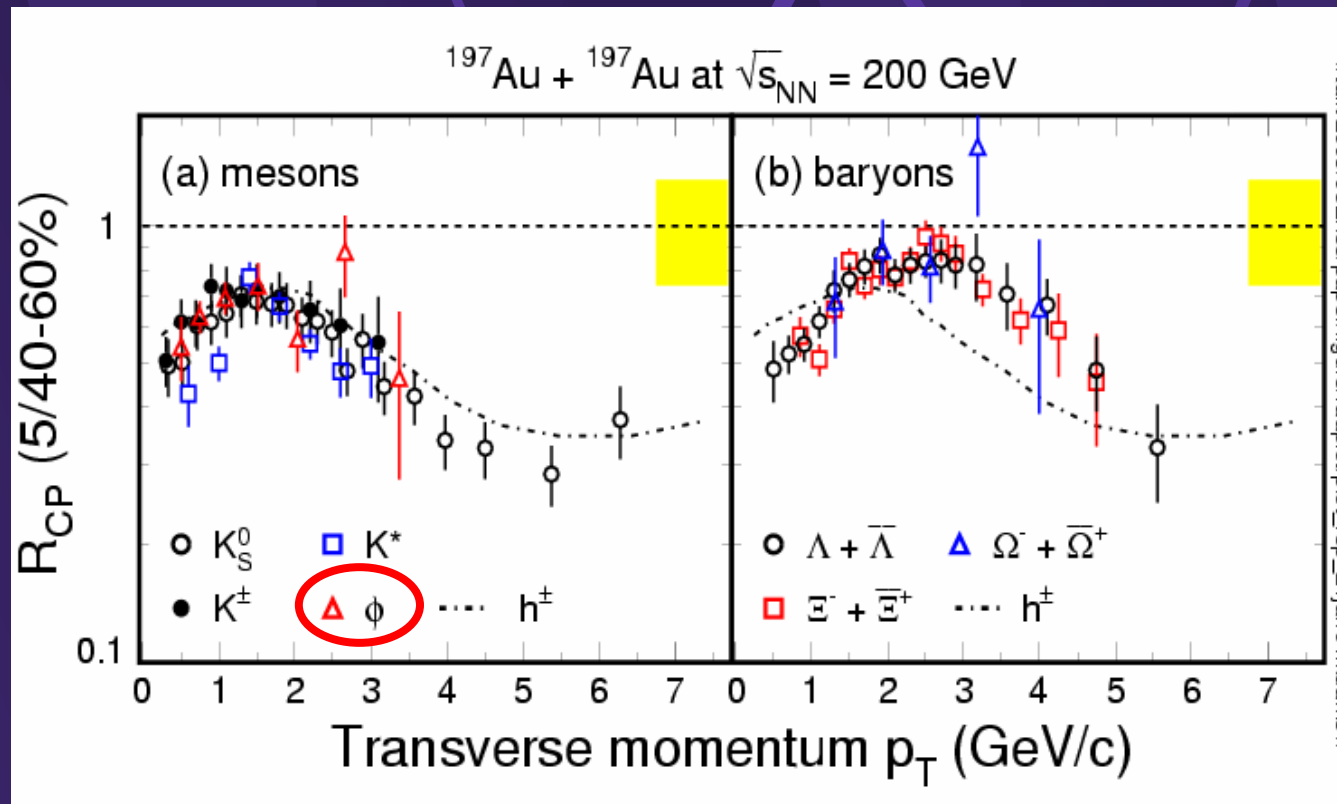
APS Published by The American Physical Society

Maya Shinomura, Quark Matter 2005



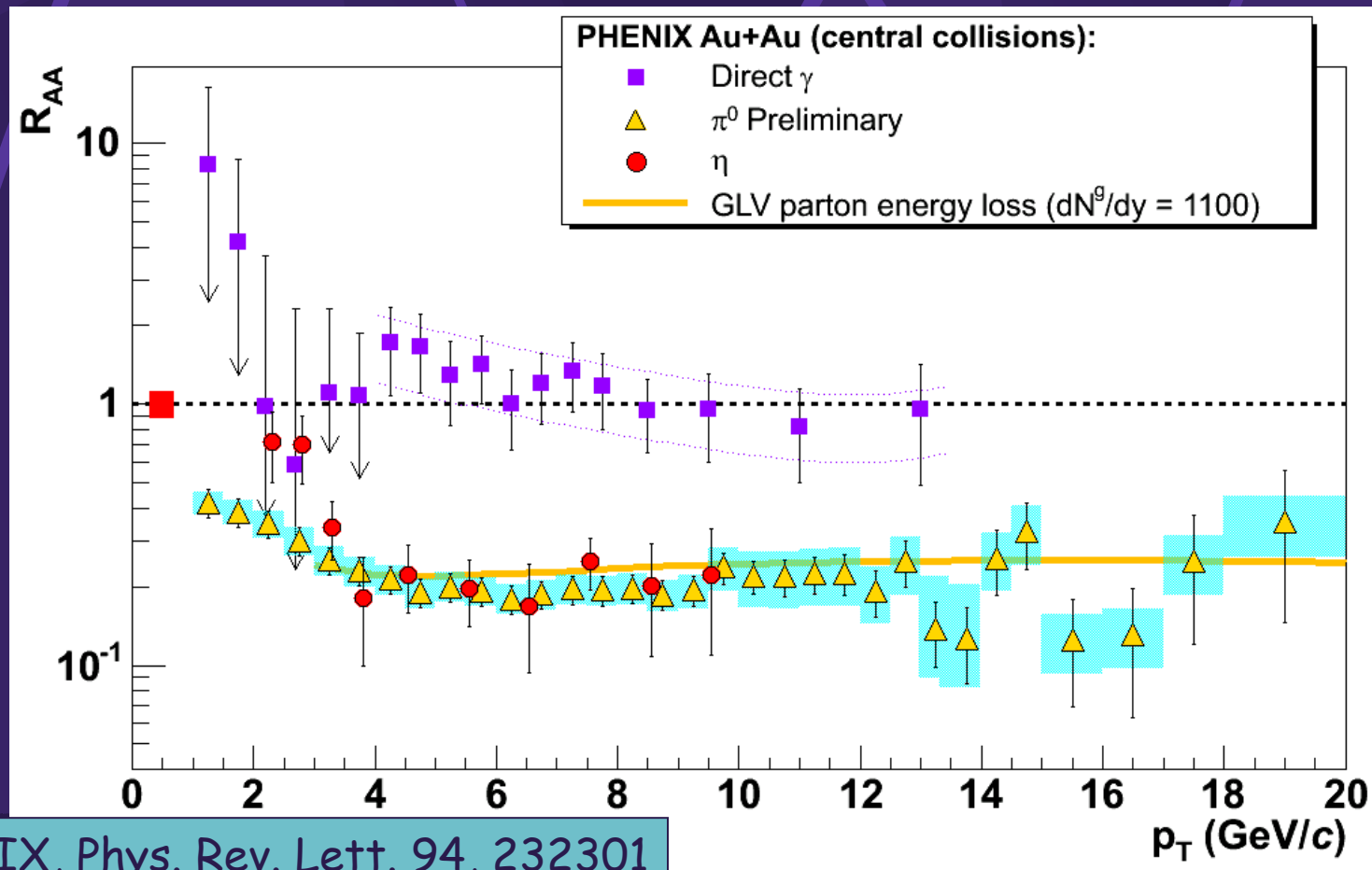
Différence baryons / mésons

- Favorise les modèles de coalescence
 - (également baryons/mésons dans v2)



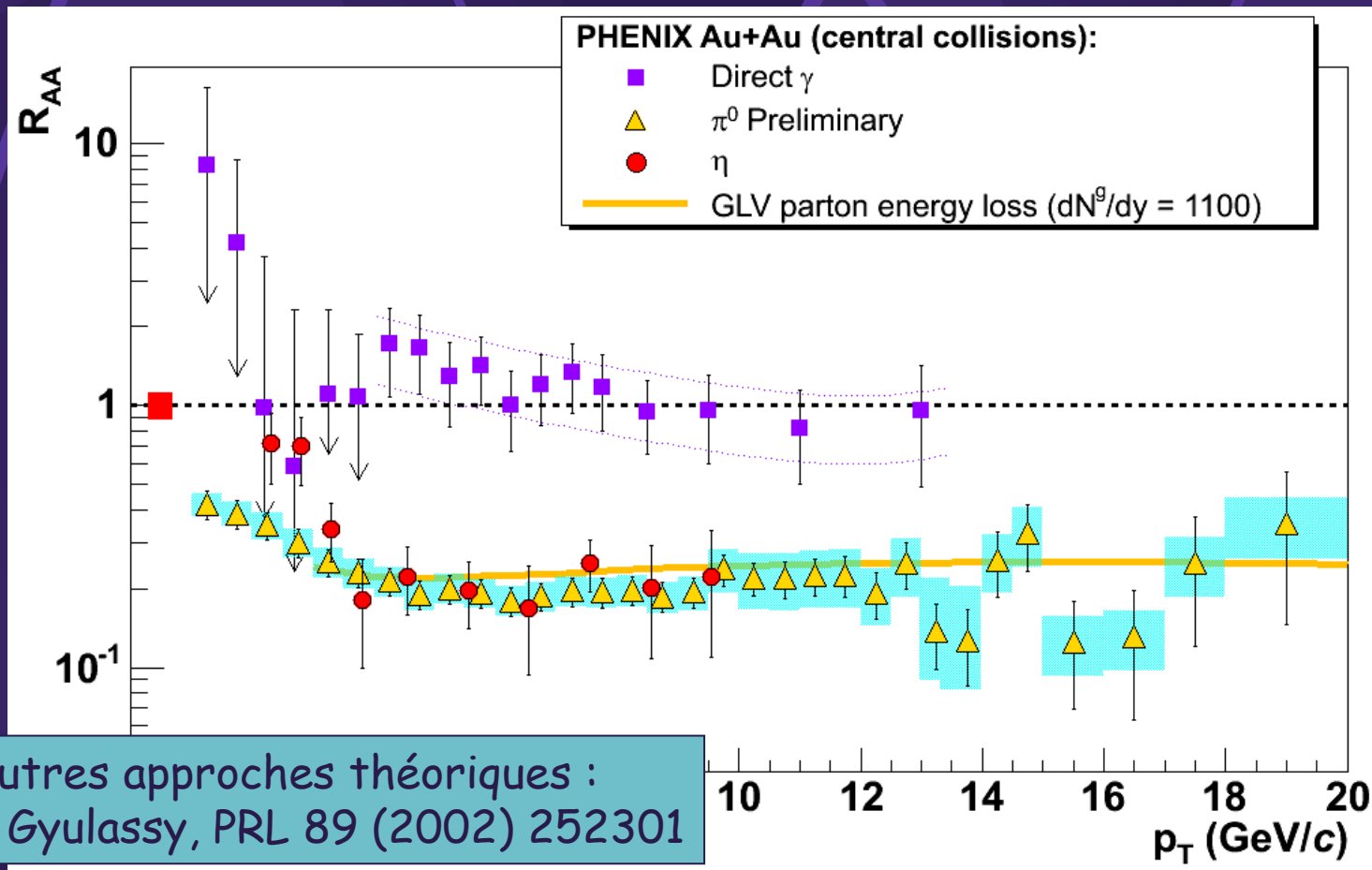
Comparaison avec photons directs

- Insensibles au milieu coloré...

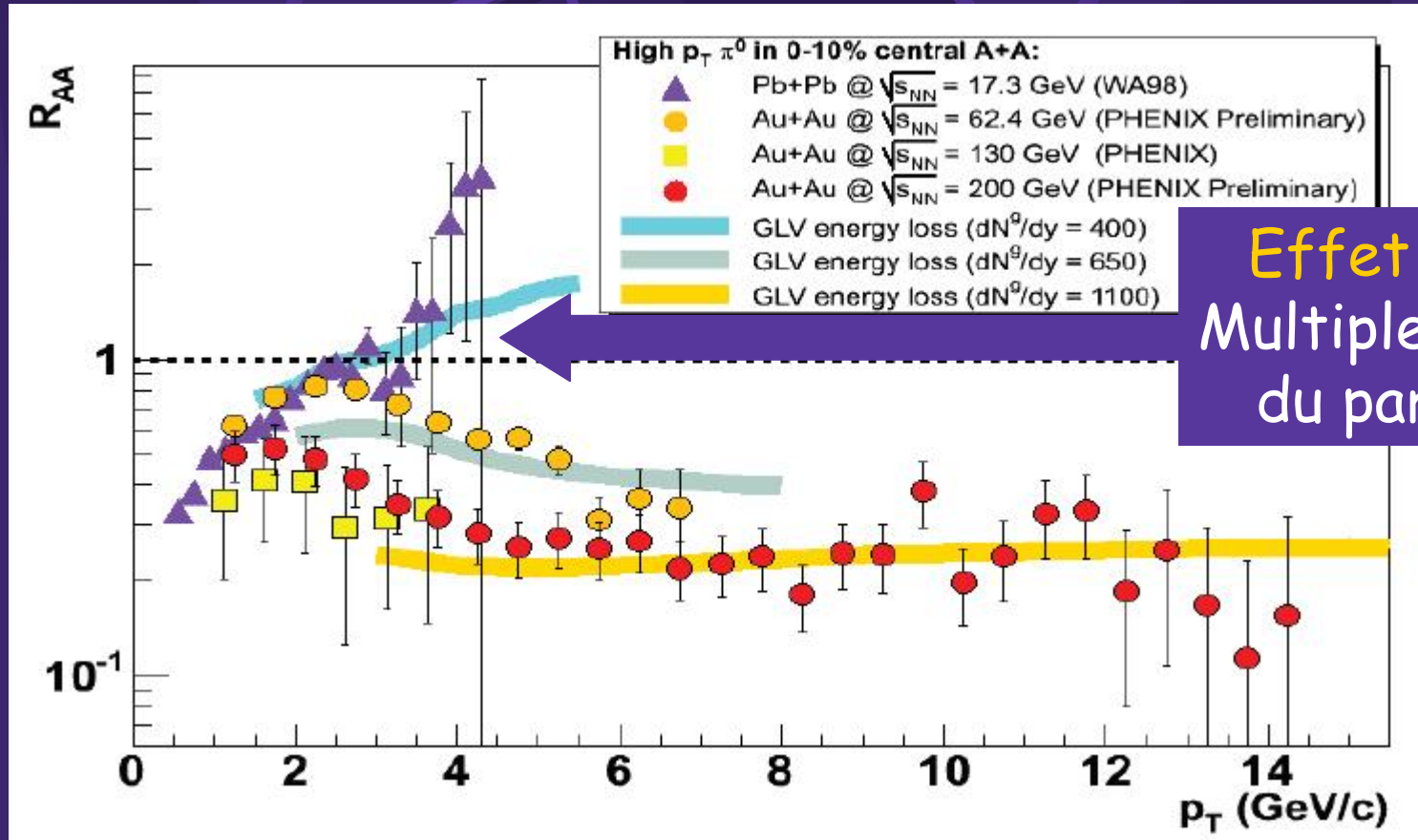
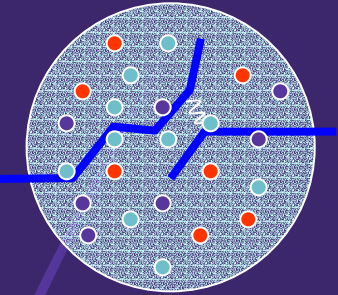


Comparaison avec théorie

- $dN_{\text{gluon}} / dy \sim 1000 \pm 200$ & $\varepsilon \sim 15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
 - (cohérent avec dN_{ch} / dn)



Comparaisons avec énergie



Effet « Cronin »
Multiples diffusions
du parton initial

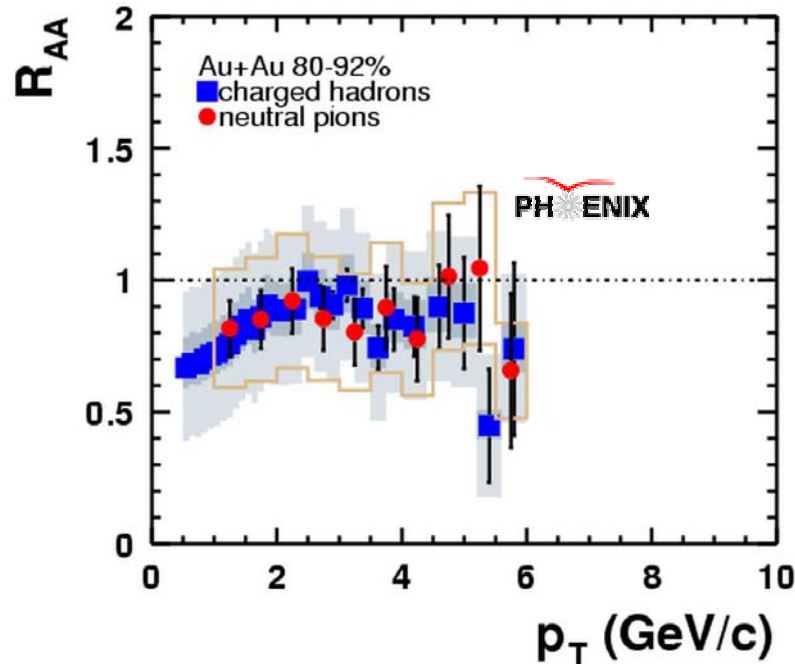
L'effet Cronin devrait être négligeable à $p_T > 6$ GeV

Le vérifier dans des collisions p+Au !

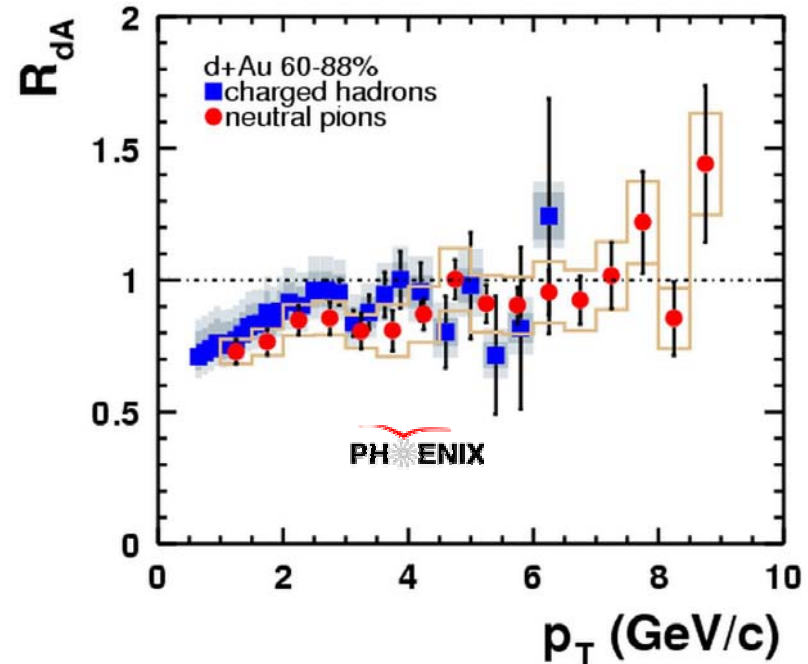
Comparaison avec d+or (1)

Collisions les plus périphériques (60-88% dAu)

Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



d+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

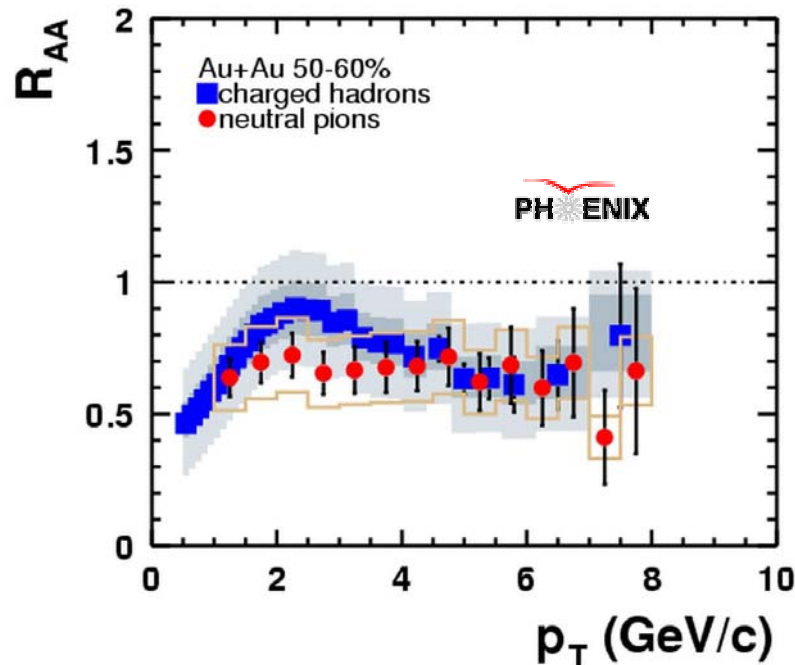


PHENIX, PRL 91 (2003) 072303

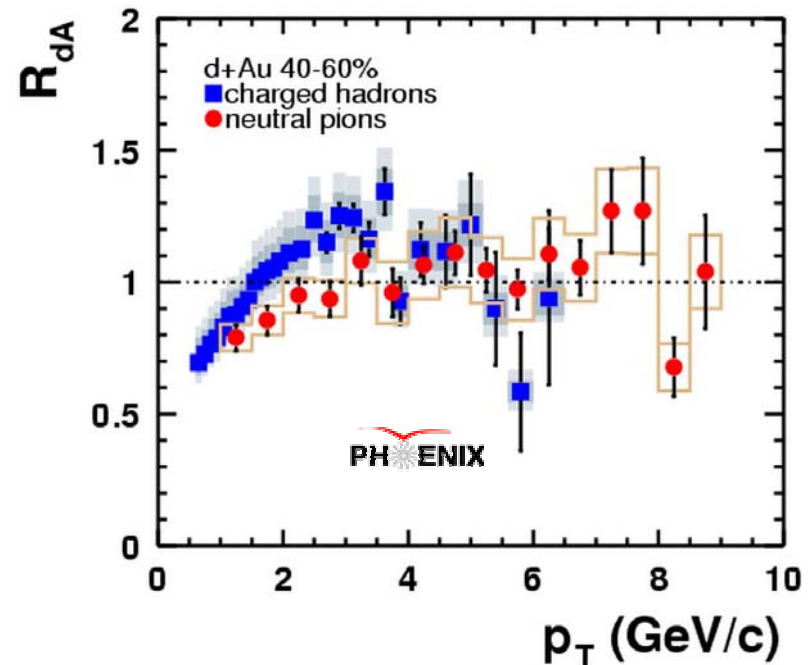
Comparaison avec d+or (2)

Collisions moins périphériques (40-60% dAu)

Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



d+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

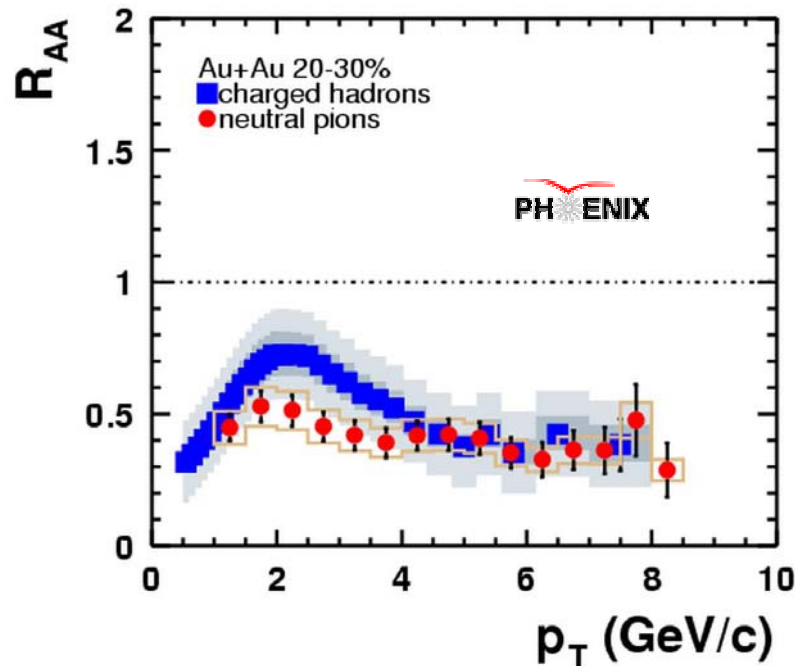


PHENIX, PRL 91 (2003) 072303

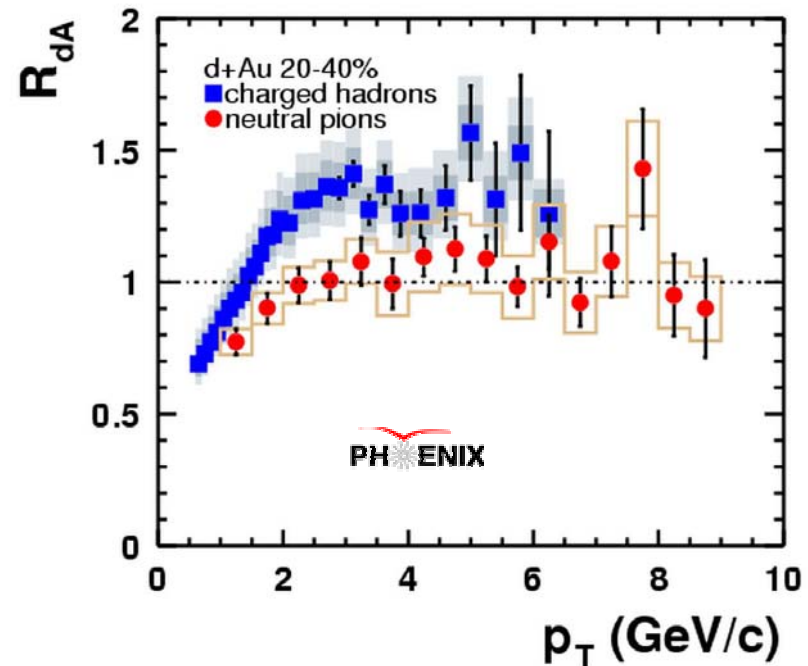
Comparaison avec d+or (3)

Collisions plus centrales (20-40% dAu)

Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

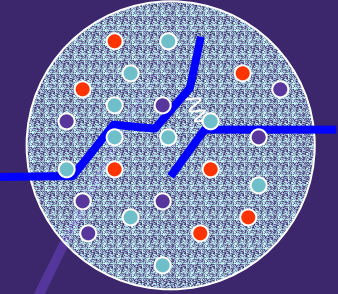


d+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



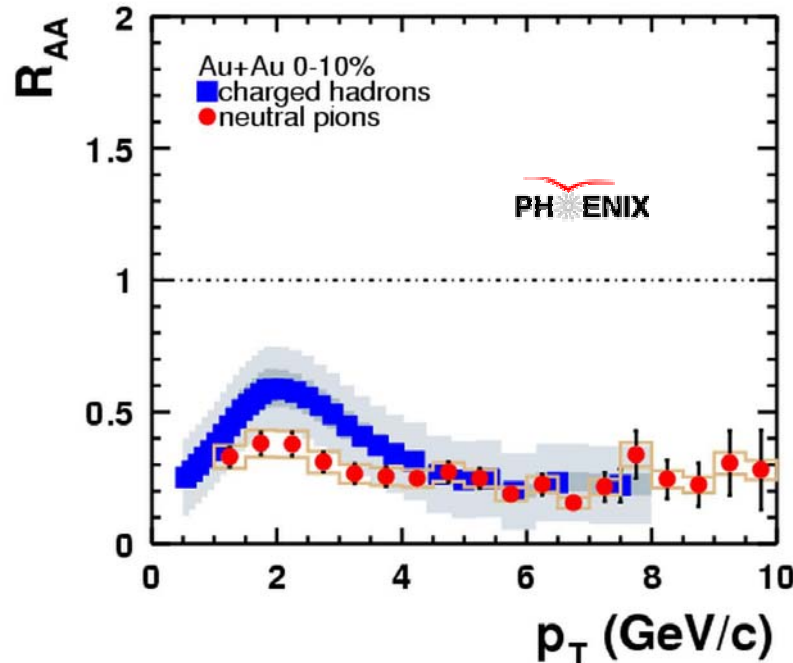
PHENIX, PRL 91 (2003) 072303

Comparaison avec d+or (4)

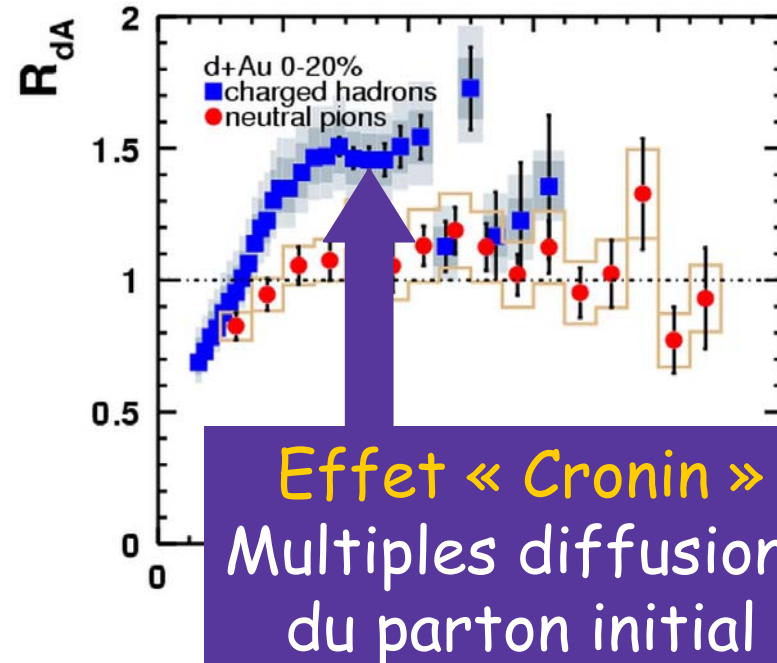


Collisions les plus centrales (0-20% dAu)

Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



d+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



Effet « Cronin »
Multiples diffusions
du parton initial

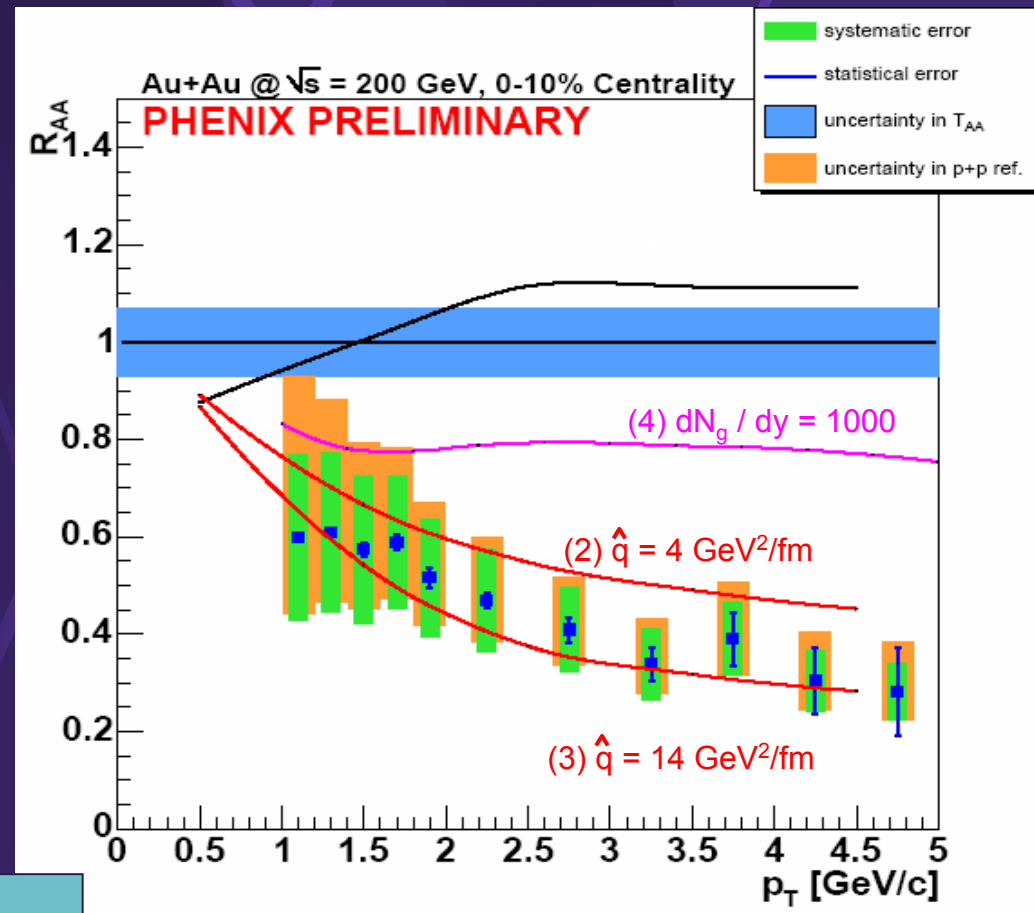
Suppression due à l'état final
Plasma de quarks et de gluons

PHENIX, PRL 91 (2003) 072303

Même le charme quenche !

- Électrons de désintégration du charme
- Plus difficile à reproduire théoriquement

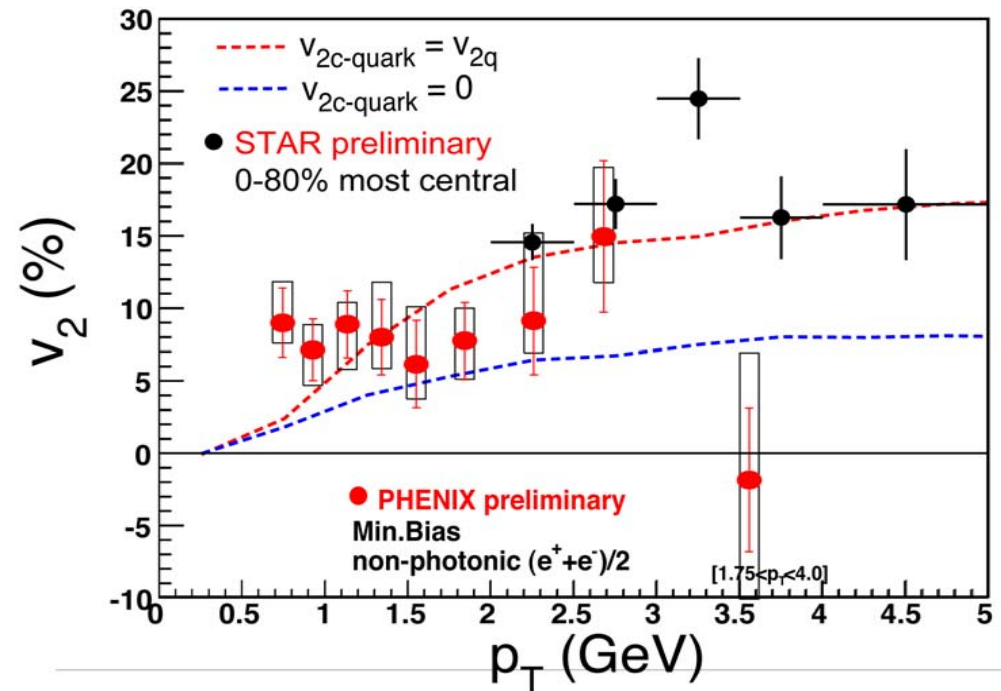
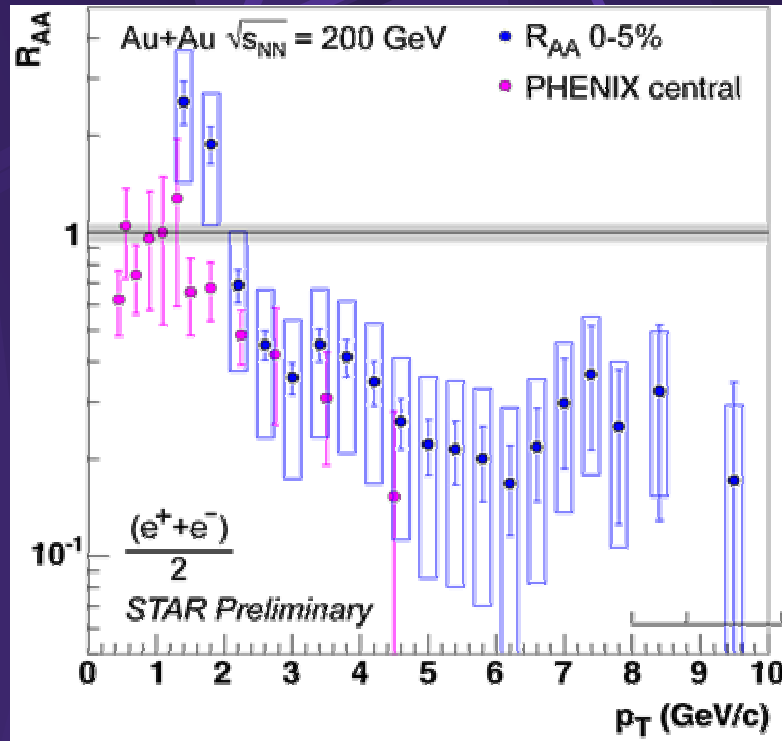
À suivre...



Butsyk @ Quark Matter 2005
(1-3) Armesto et al., PRD 71, 054027
(4) Djordjevic et al, PRL 94, 112301

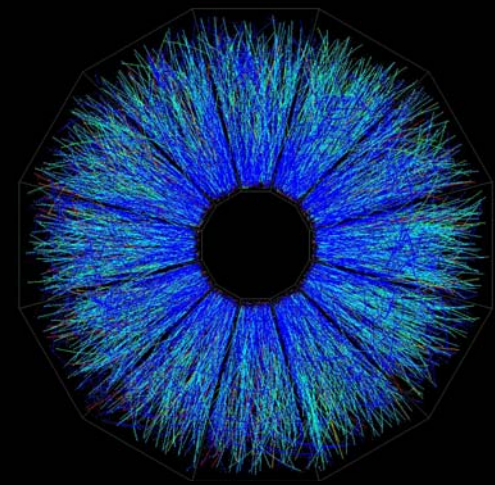
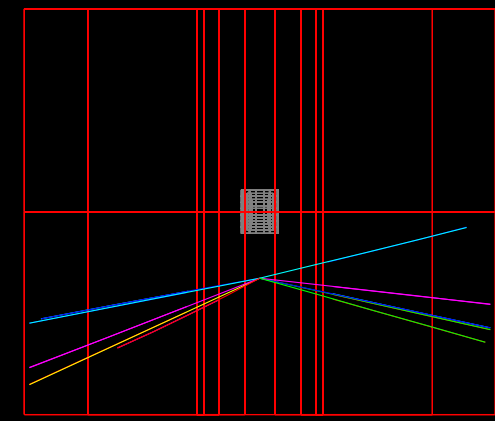
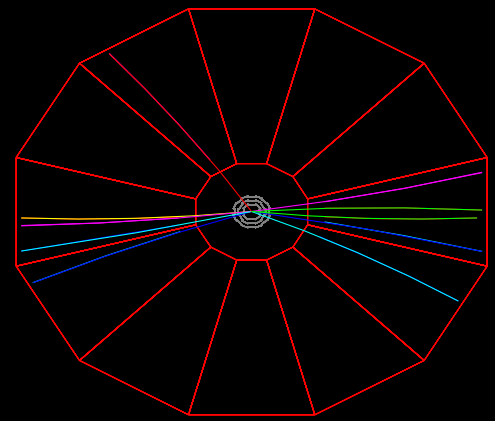


Suppression et flot du charme

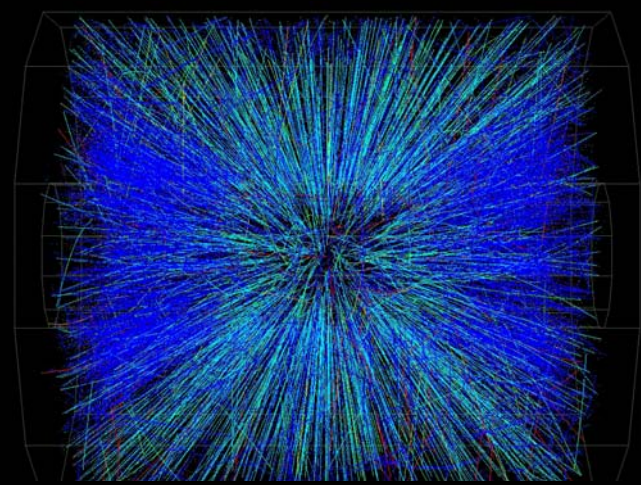


Voir des jets...

Facile en proton + proton @ 200 GeV



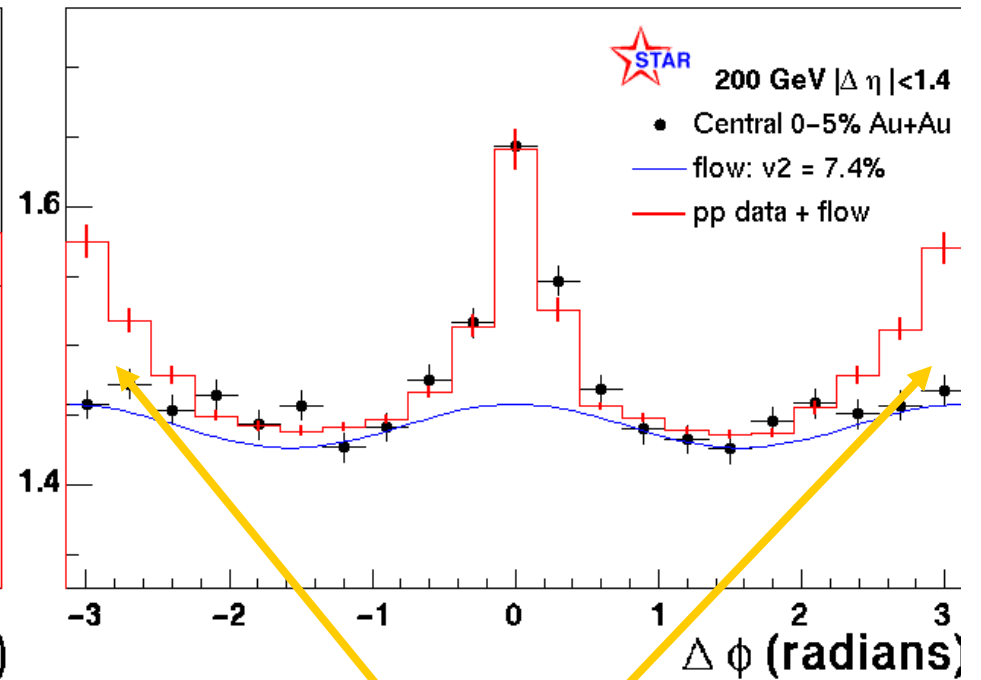
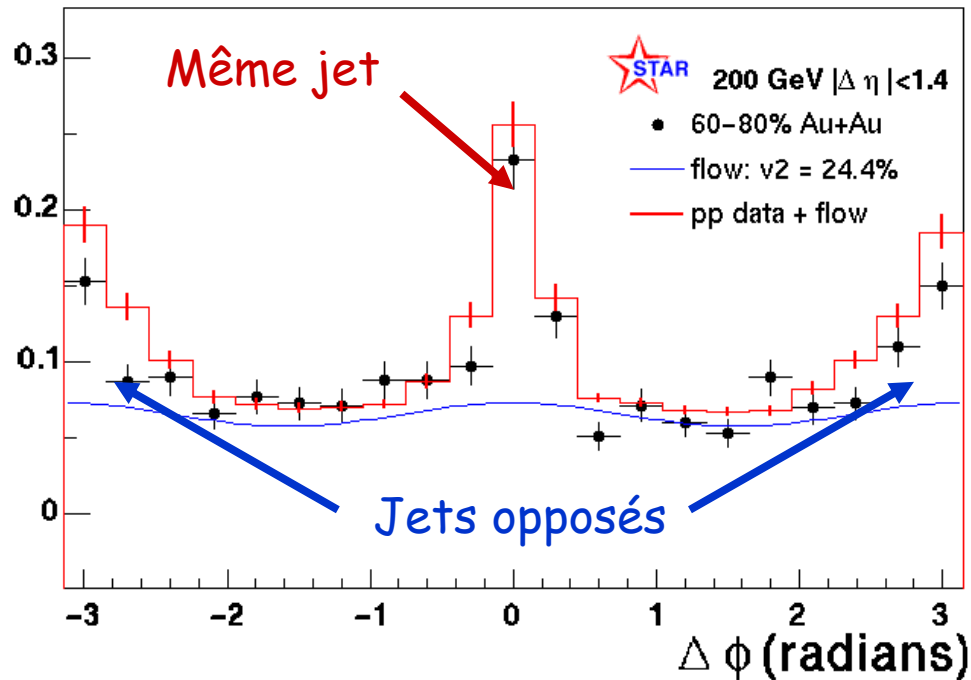
?



Moins en collisions centrales or + or @ 200 GeV...

... mourir

$1/N dN/d(\Delta\phi)$



Corrélation angulaire entre
une particule de $p_T > 4$ GeV
et les autres ($p_T > 2$ GeV)
Accord or+or avec p+p (+ flow)
en collisions périphériques...

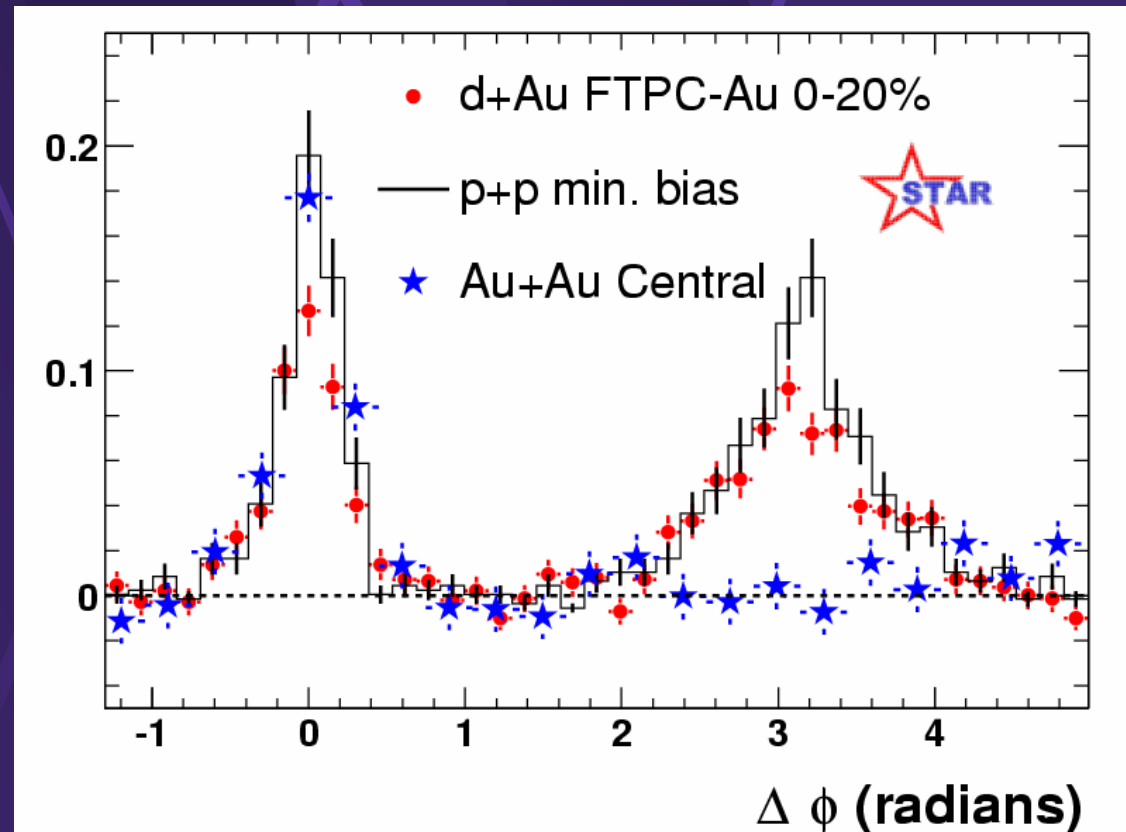
En collisions centrales, les
jets ne sont plus opposés !

Jet quenching !

(Vu aussi dans phenix)

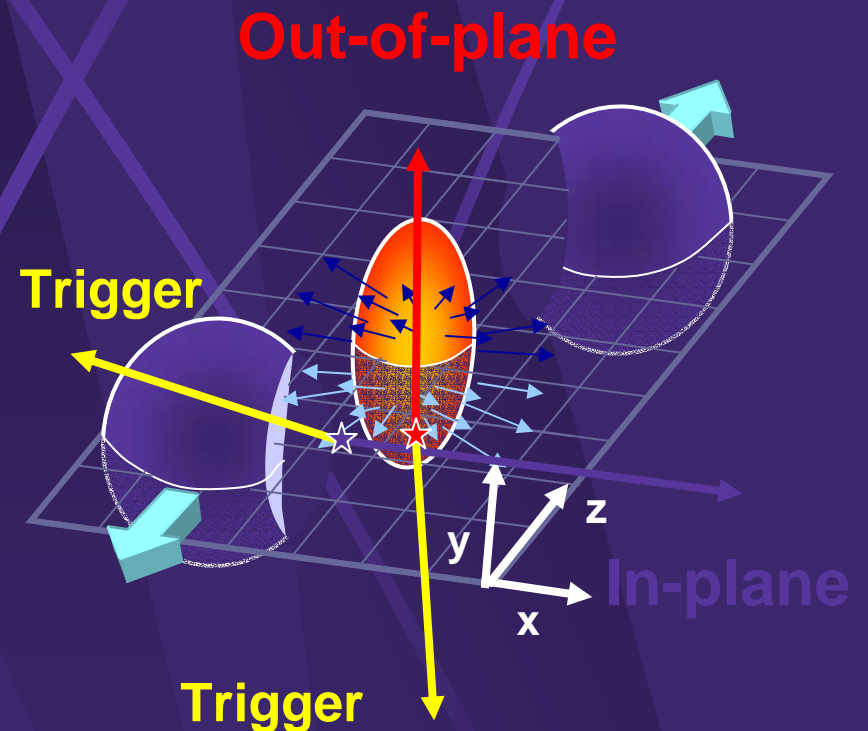
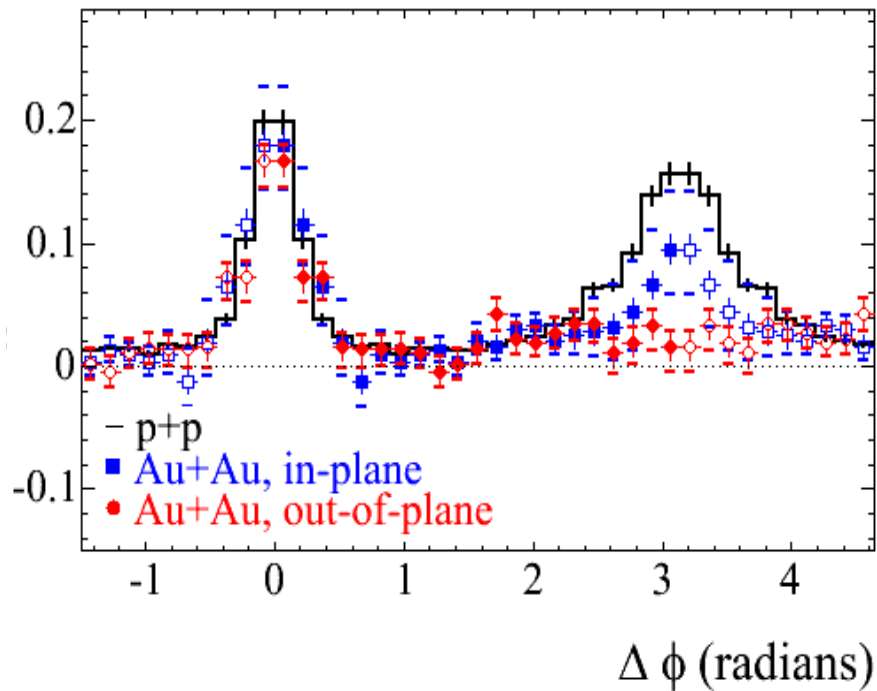
Qui a tué les jets ?

- Pas d'effet en collisions d+or
- C'est encore un coup du milieu dense de l'état final !
- Le plasma de quarks et de gluons ?...



STAR, PRL 91 (2003) 072304

Peut-on les épargner ?



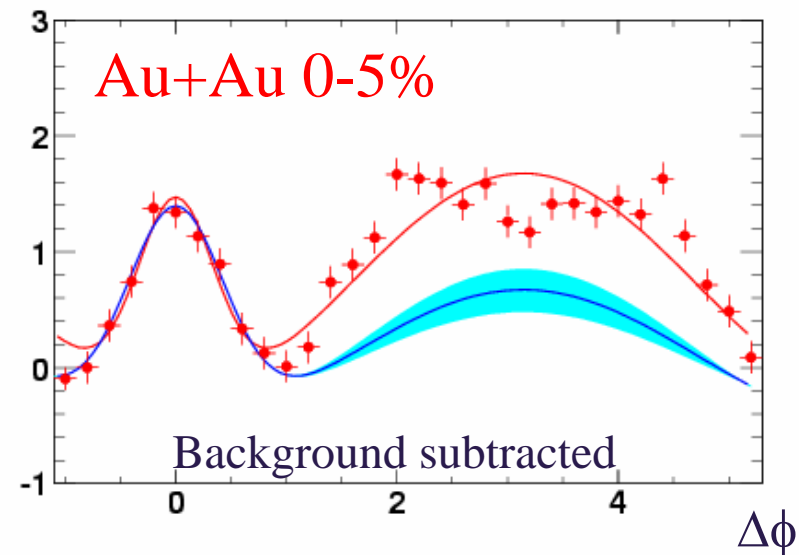
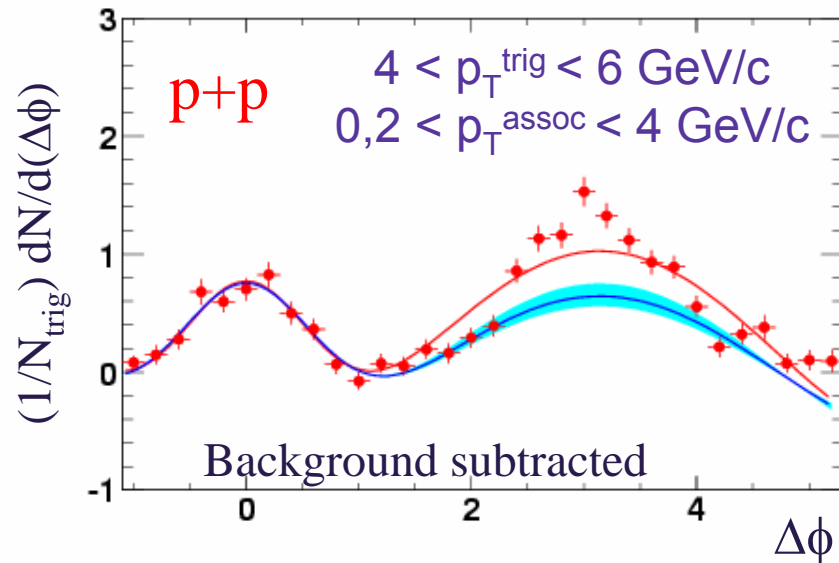
● Oui, ça dépend de l'épaisseur traversée !

$$p_T^{\text{trig}} = 4,0 \text{ à } 6,0 \text{ GeV}/c, |\eta| < 1,0$$

$$2,0 < p_T^{\text{assoc}} < p_T^{\text{trig}}$$

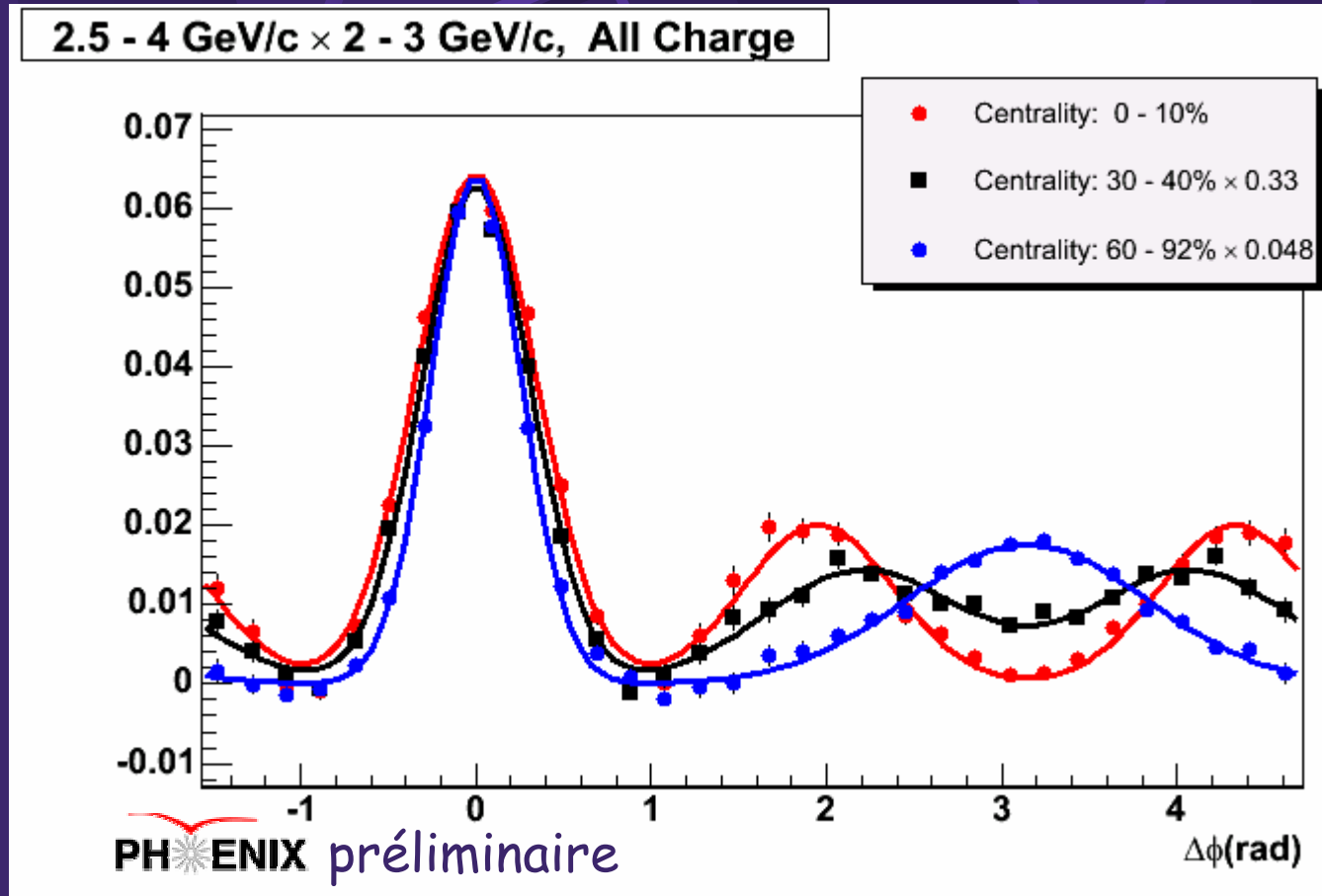
STAR, PRL93 (2004) 252301

Où est le corps ?



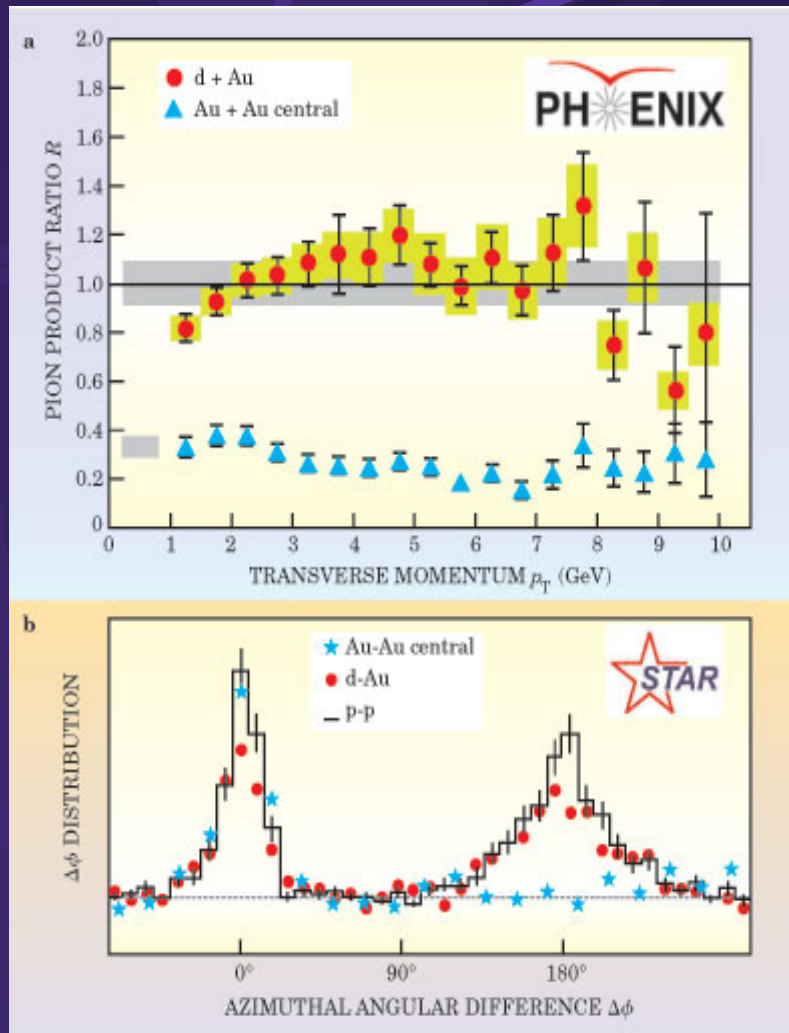
- En ouvrant la zone en impulsion transverse, on retrouve les jets...
- Peut-on encore parler de jets ?

Le boom supersonique...



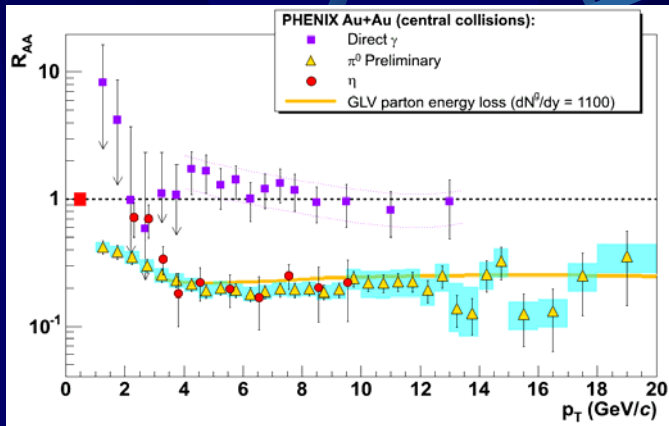
● Interprétation en terme de boom supersonique...

Le jet quenching en résumé !

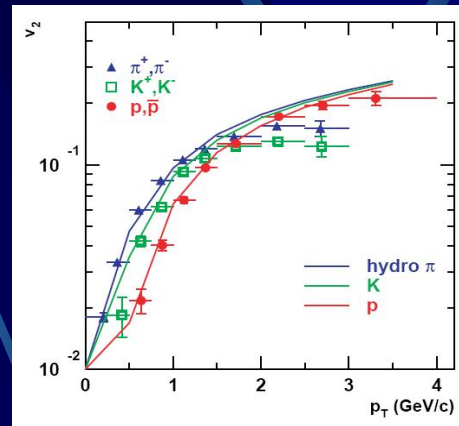


(vu par les 4 expériences)

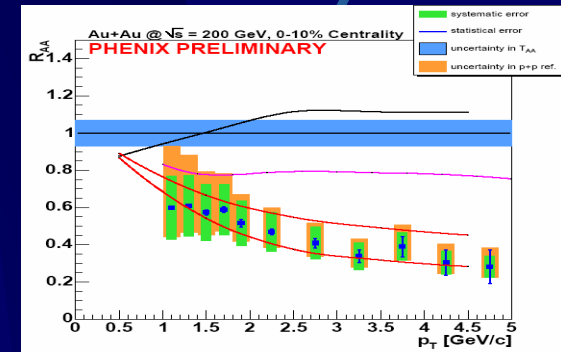
En résumé... la matière produite est...



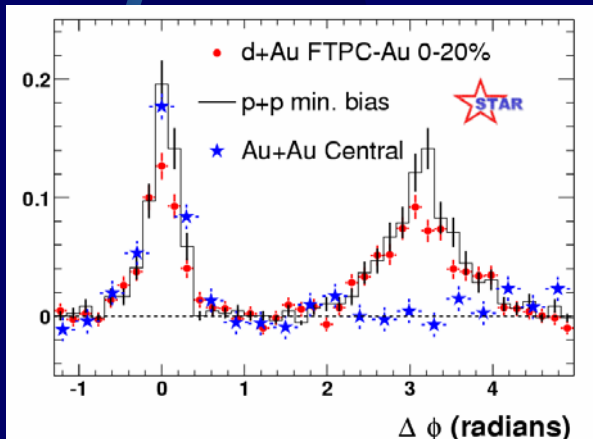
... dense



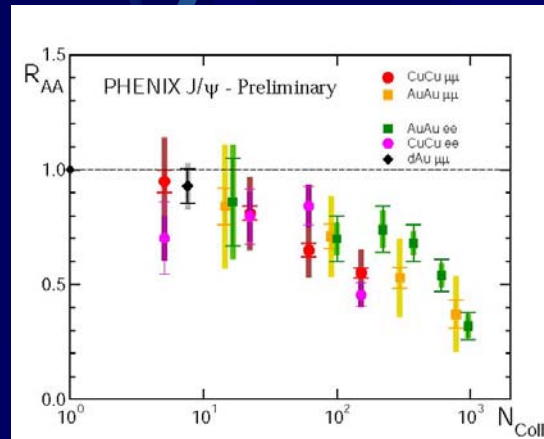
... en interaction forte



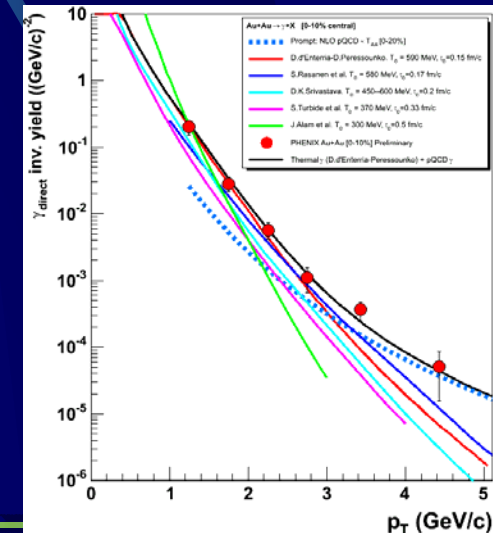
... même vu par saveur lourde



... opaque



...déconfinée



...chaude