Production de résonnances lourdes et de saveurs lourdes dans des collisions p+p, d-A et A-A à RHIC

Hugo Pereira Da Costa, CEA Saclay

SFP 2008, 13 Mai 2008

Introduction

Ce que l’on cherche à mesurer

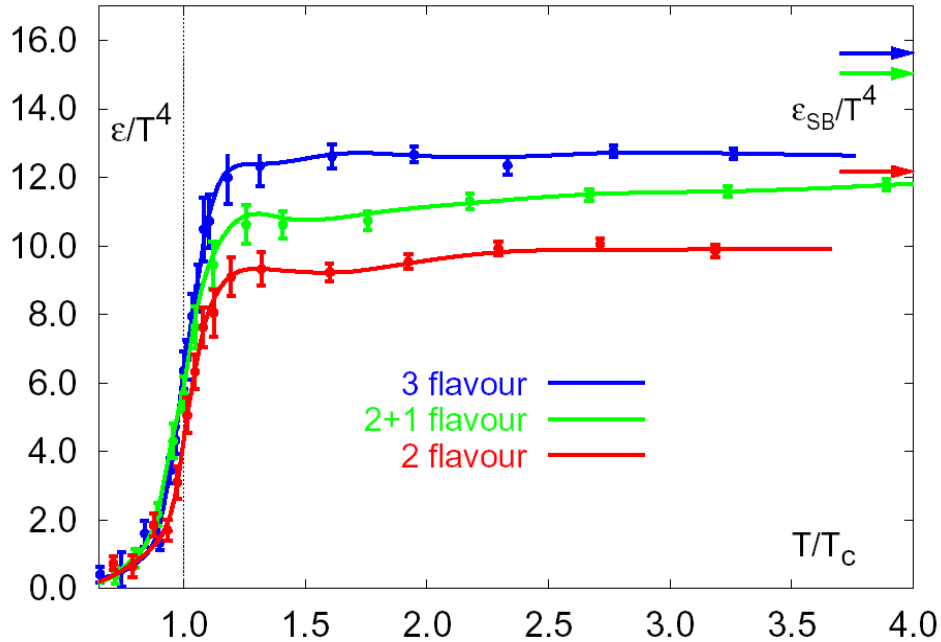
Pourquoi l’étude des résonnances lourdes

Comment on les mesure.

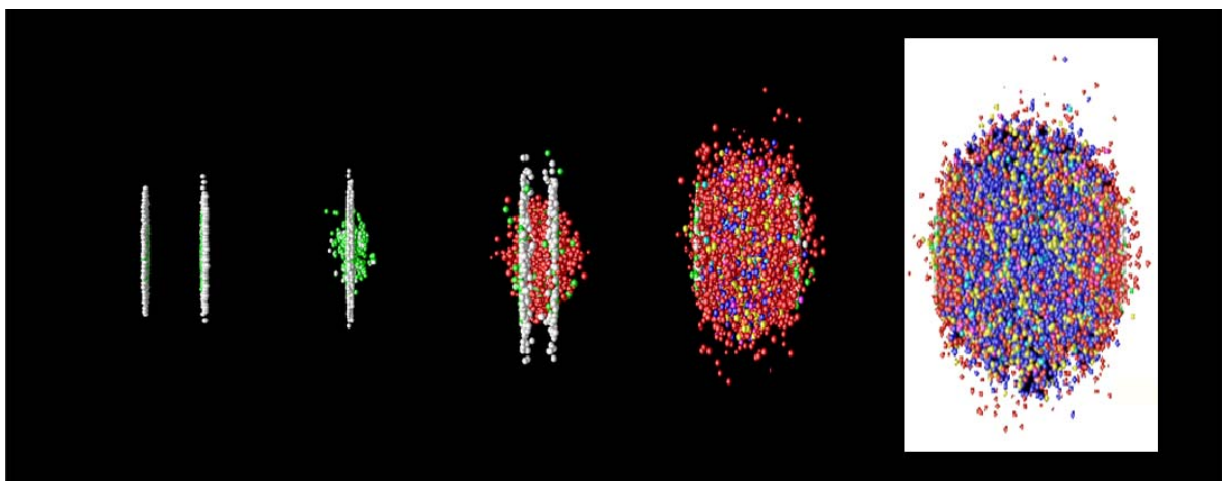
Le Plasma de Quarks et de Gluons (PQG)

RHIC étudie la formation d'un plasma de quarks et de gluons (PQG) au sein de la matière nucléaire à haute température et haute densité d'énergie.

Le PQG est un état déconfiné de quarks et de gluons prédit par les calculs de QCD sur réseau.



Collision d'ions lourds ultra-relativistes:



Caractérisation d'une collision A-A

- **centralité de la collision**:
  collisions périphériques = peu de recouvrement entre les noyaux;
  collisions centrales = recouvrement maximal.
- **nombre de participants N_{part}:**
  nombre de nucléons présents dans la zone de recouvrement des noyaux
- **nombre de collisions nucléon-nucléon N_{coll}:**
  nombre de collisions nucléon-nucléon équivalent à une collision AA, à centralité donnée.

Les résonnances lourdes comme sonde du PQG

Les états liés de quarks lourds (charme et beauté) sont de bons candidats pour l'étude de la formation du PQG parce que:

- ils ont une masse élevée et sont produits principalement aux premiers instants de la collision, par diffusion inélastique de gluons.
- ils sont fortement liés, ont un faible rayon, et interagissent peu avec les mésons légers (pions, kaons).

	masse	rayon
ψ'	3.68 GeV	0.90 fm
χ_c	3.53 GeV	0.72 fm
J/ψ	3.1 GeV	0.50 fm
Υ	9.5 GeV	0.28 fm

Caractérisation des particules produites:

- impulsion transverse p_T
- rapidité $y = \frac{1}{2}\log\left(\frac{E + p_z}{E - p_z}\right)$ (relié à l'angle entre la particule et le faisceau)
- angle azimutal φ (dans le plan perpendiculaire au faisceau)

BNL et RHIC

longueur: 3.83 km

Energie:

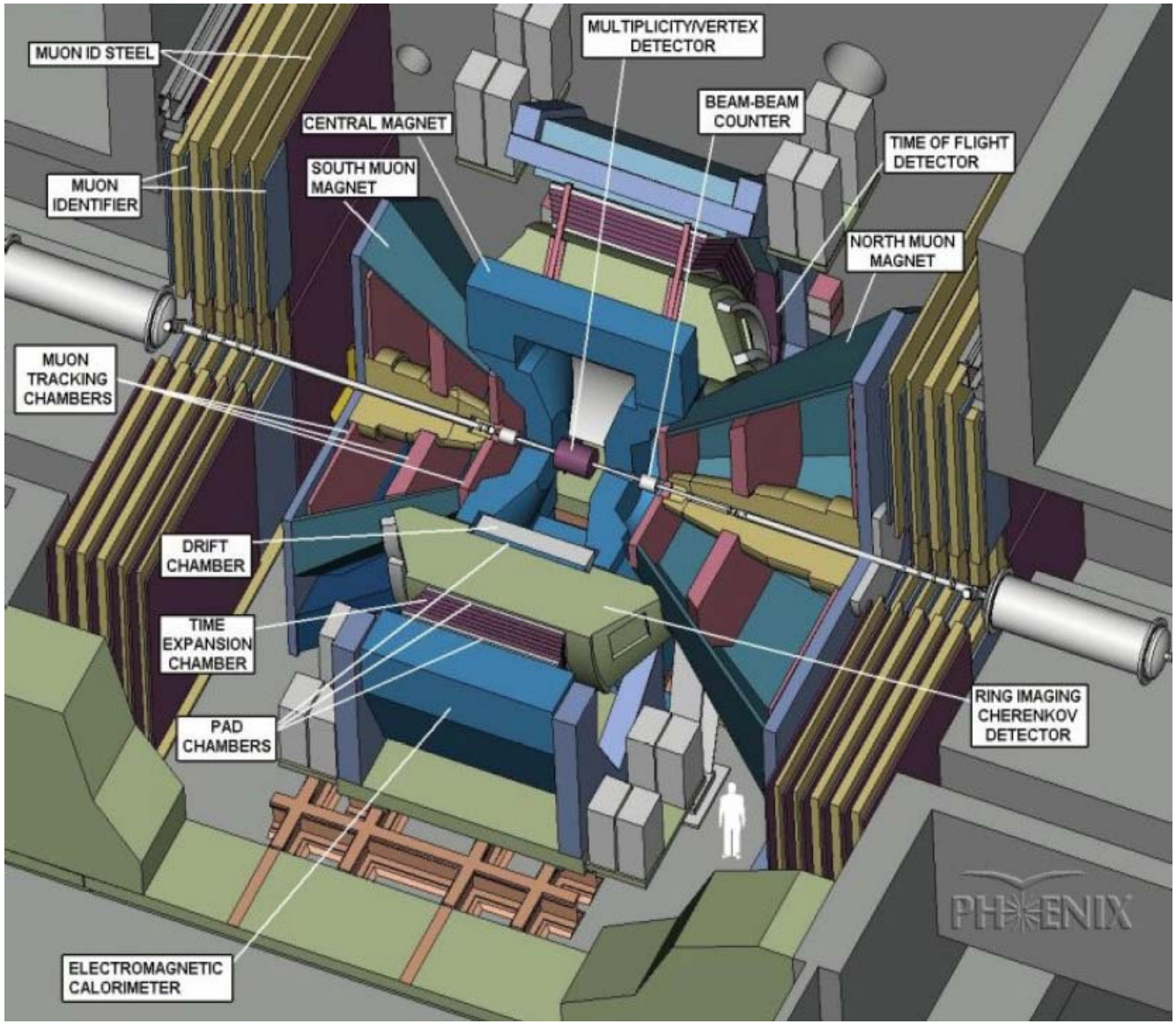
p-p: 500 GeV

A-A: 200 GeV (par collision nucléon-nucléon)

Deux expériences sont encore en fonctionnement à ce jour:

STAR et PHENIX

L'expérience PHENIX



Bras central:

$J/\Psi \rightarrow e^+e^-$

$p>0.2$ GeV/c

$|y|<0.35$

$\Delta\Phi=\pi$

Bras muons:

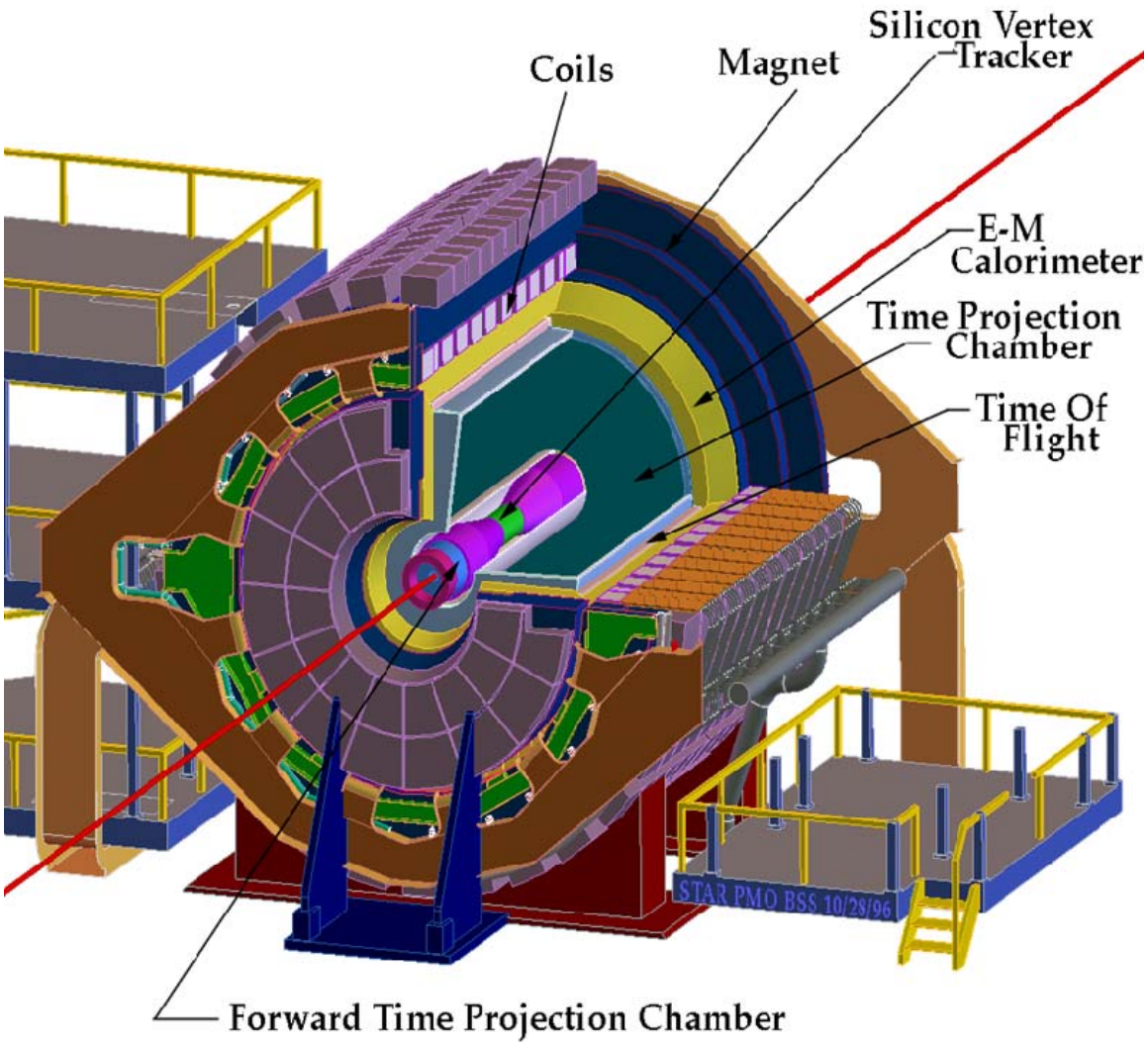
$J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$

$p>2$ GeV/c

$|y|$ E [1.2,2.4]

$\Delta\Phi=2\pi$

L'expérience STAR



$J/\Psi \rightarrow e^+e^-$
$|y| < 1$
$\Delta\Phi = 2\pi$

Les électrons sont mesurés avec une TPC et un calorimètre électromagnétique (EMCal)

Observables

- Section efficace versus p_T et y (dans des collisions p+p, pour référence)

- Facteur de modification nucléaire R_{AA} vs p_T, y et centralité (N_{part}, N_{coll})

$$R_{AA} = \frac{\text{taux de production en A-A (ou d-A)}}{N_{coll}.\ \text{taux de production en p+p}}$$

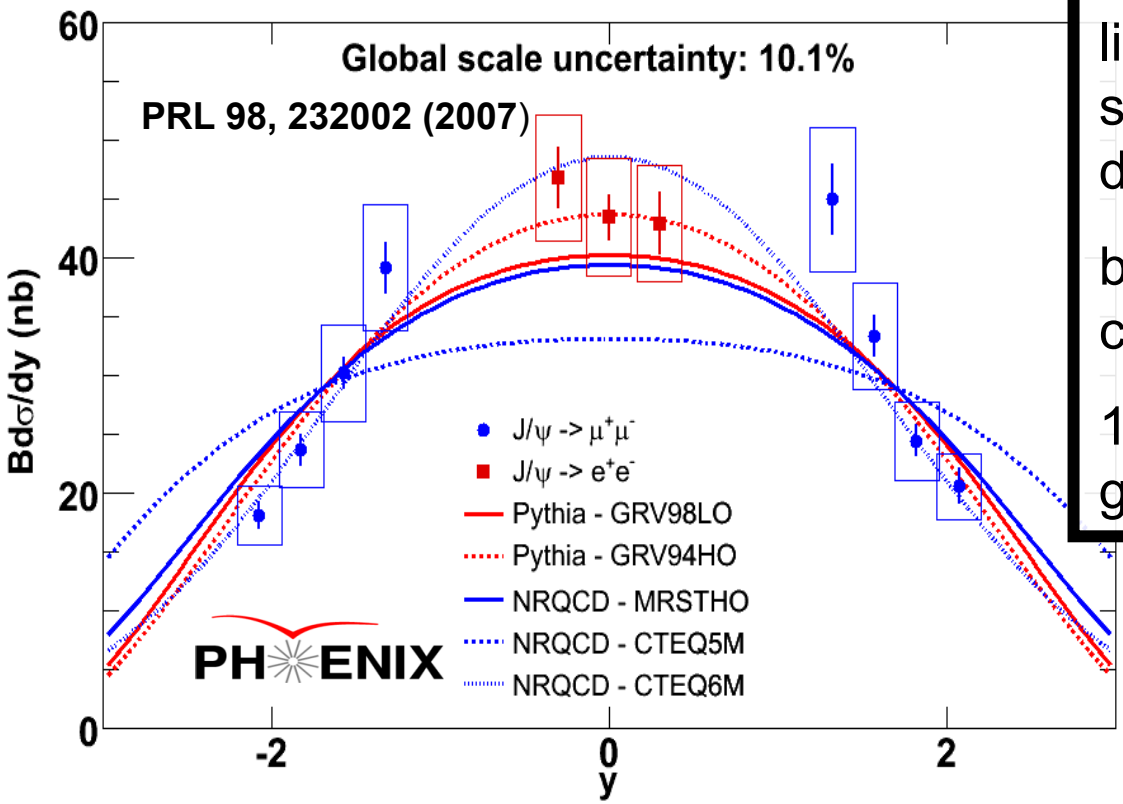
Pour des processus durs (i.e. à grand transfert d'énergie), et si tout se passe pour A-A comme pour p-p, $\mathbf{R_{AA}=1}$

Plan de l'exposé

- collisions p+p: étude des mécanismes de production et référence pour les ions lourds
- collisions d+Au: effets de la matière nucléaire *froide*
- Cu+Cu and Au+Au: effets de la matière nucléaire *chaude*
- Charme ouvert, beauté ouverte et autres états liés de quarks lourds
- Autres observables: flot elliptique

1. collisions p+p

Section efficace de production du J/Ψ vs *y*



lignes verticales: erreurs statistique et systématiques décorrélées

boites: erreurs systématiques corrélées

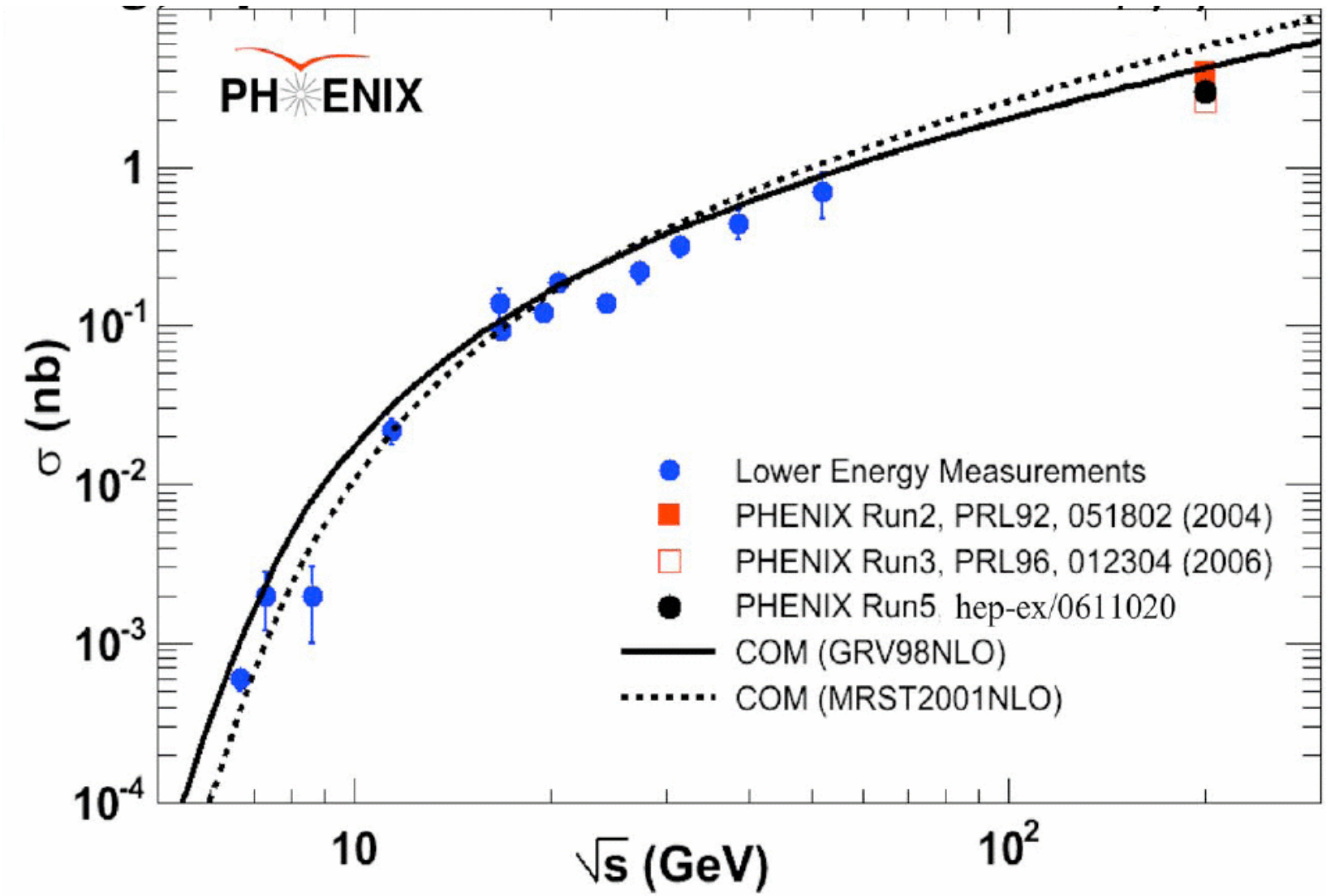
10% d'erreur systématique globale

La mesure inclut à la fois les J/Ψ directs et les J/Ψ produits de la décroissance des Ψ', χ_c et B

Plusieurs prédictions et fonctions empiriques sont ajustées sur les données. L'intégrale est utilisée pour calculer la section efficace totale:

$$B_{ll}\,\sigma_{J/\Psi} = 178 \pm 3\ (stat) \pm 53\ (sys) \pm 18\ (norm)\ nb$$

Section efficace de production du J/Ψ vs énergie



2. collisions d+Au:
Effets nucléaires *froids*
Section efficace de dissociation

Effets nucléaires froids

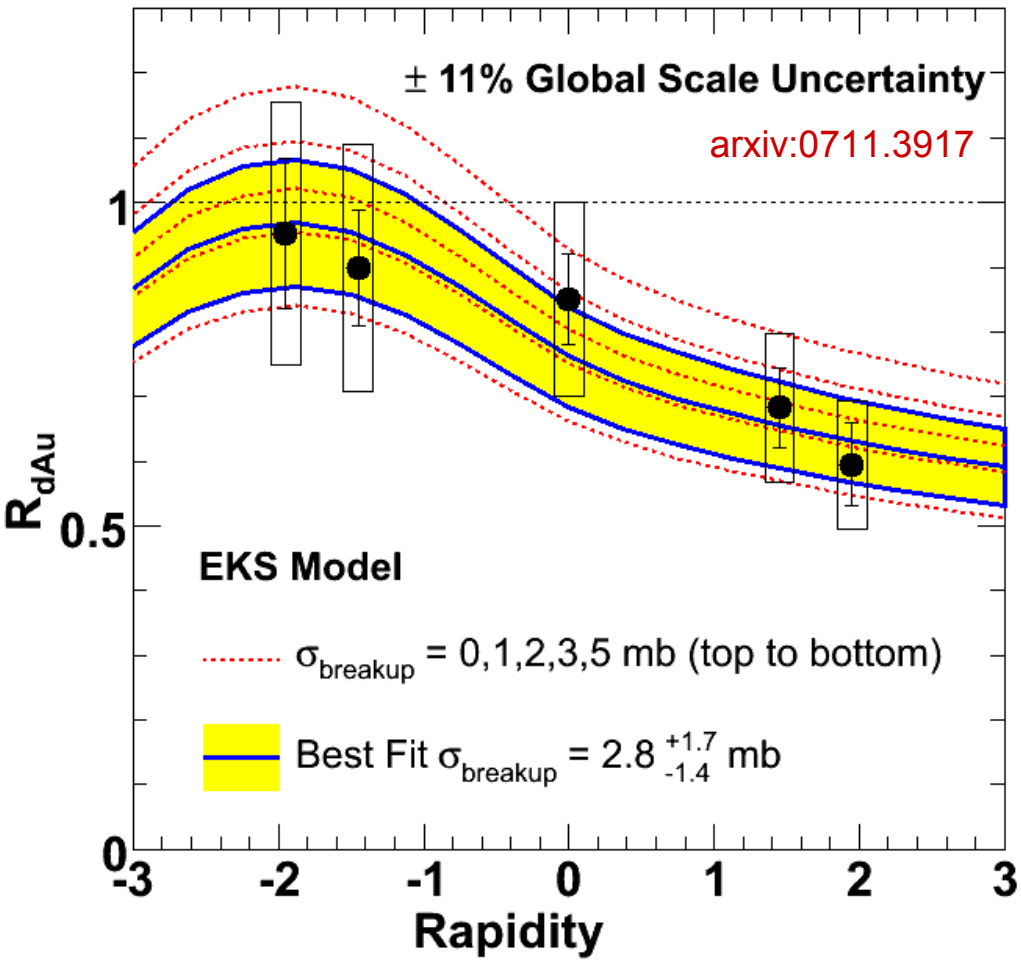
Modification de la production de J/Ψ par rapport aux collisions p+p dans la matière nucléaire *normale* (c'est a dire: en l'absence de plasma de quarks et de gluons)

- **Modification des fonctions de distribution des partons (pdf):**
  shadowing, anti-shadowing
  saturation (à petit *x*, la fraction de l'impulsion du nucléon portée par le parton)

- **Diffusion élastique des précurseurs du J/Ψ (effect Cronin)**
  Modifie la distribution en p_T du J/Ψ mais pas la section efficace totale

- **Diffusion inélastique des précurseurs du J/Ψ et absorption nucléaire**
  induisent une diminution de la section efficace totale de production du J/Ψ
  Effets modélisés au moyen d'un section efficace de dissociation et ajustés sur les données

J/Ψ R_{dA} vs rapidité dans des collisions d+Au



y<0 correspond aux grands x dans le noyau d'or.

y>0 correspond aux petits x dans le noyau d'or, là où le shadowing est attendu.

La dépendance en rapidité est prise en compte par un modèle de shadowing (ici EKS).

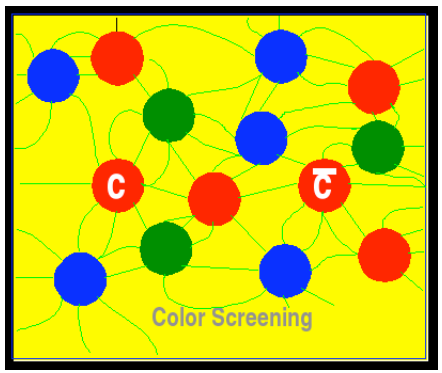
L'amplitude de l'effet est prise en compte par une section efficace de dissociation, ajustée aux données.

Une fois choisi le modèle de shadowing et mesurée la section efficace de dissociation correspondante, les effets nucléaires froids peuvent être extrapolés aux collisions A-A, pour mettre en évidence d'éventuels effets supplémentaires (effets chauds).

3. Collisions Cu+Cu and Au+Au : effets nucléaires *chauds*

Effets nucléaires chauds

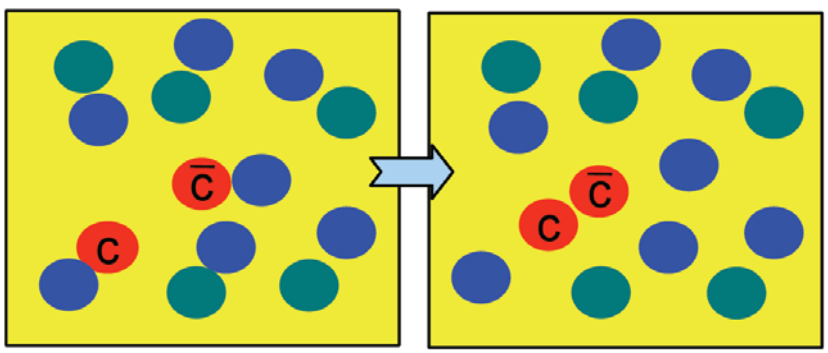
- **Ecrantage de Debye dans la matière colorée**



Mécanisme proposé initialement par Matsui & Satz, validé par des calculs QCD sur réseau, permettant de prédire une température de dissociation du J/Ψ:

state	$J/\psi(1S)$	$\chi_c(1P)$	$\psi'(2S)$	$\Upsilon(1S)$	$\chi_b(1P)$	$\Upsilon(2S)$	$\chi_b(2P)$	$\Upsilon(3S)$
T_d/T_c	2.10	1.16	1.12	> 4.0	1.76	1.60	1.19	1.17

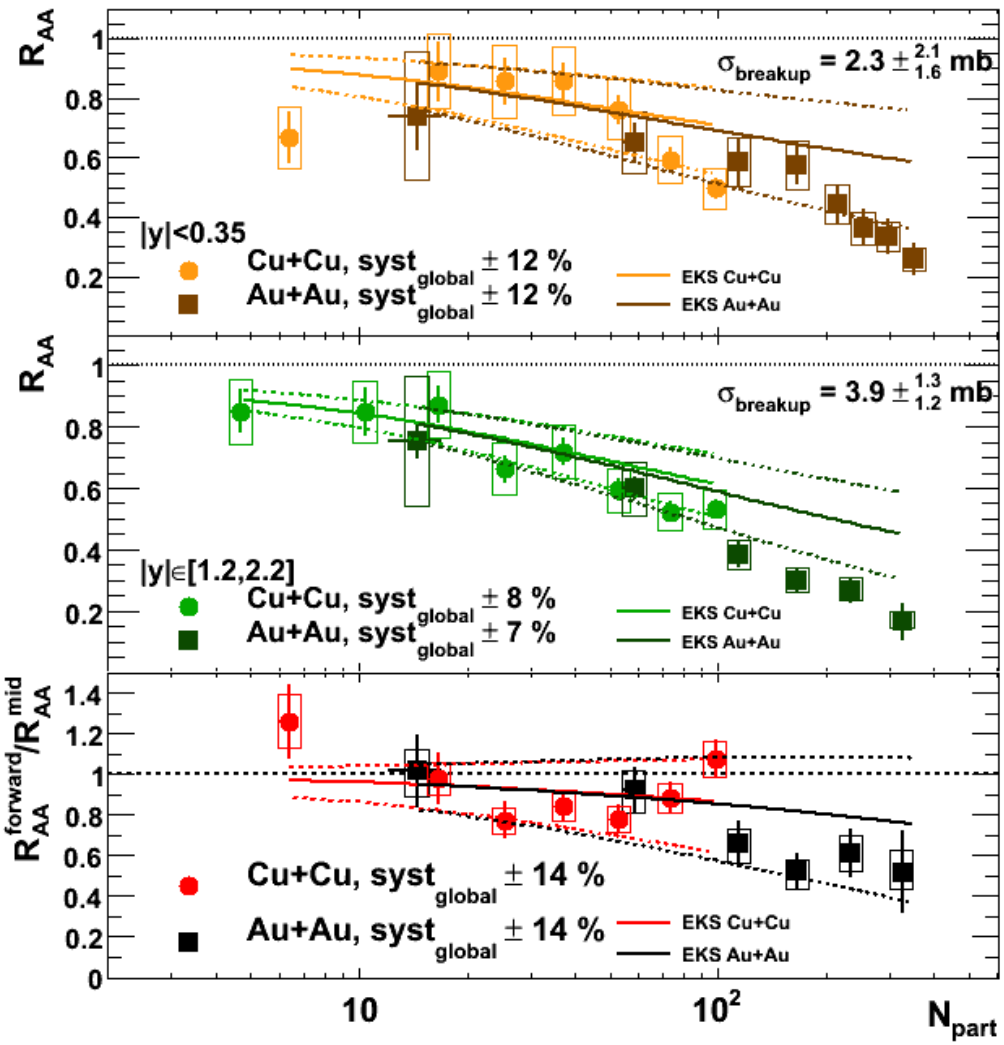
- **Dissociation par interaction avec les constituants du milieu (partons, mésons)**
- **Recombinaison de paires de quarks décorrélées (cad: provenant d'interaction partoniques différentes)**



La recombinaison augmente comme N_{cc}^2. Il y a entre 10 et 20 paires c,cbar par événement dans les collisions Au+Au centrales.

J/Ψ R_{AA} vs centralité (N_{part}) pour Au+Au et Cu+Cu

arxiv:0801.0220



Données prises en 2005 (Cu-Cu) et 2004 (Au-Au). Les lignes correspondent aux effets froids, extrapolés depuis d-Au (2003)

A centralité donnée, les R_{AA} Cu-Cu et Au-Au sont similaires.

En Au-Au, une suppression plus grande que les effets froids est observée, pour les collisions centrales.

Une suppression plus grande est observée à y>0 que à y=0

4. Charme ouvert, beauté ouverte et autres résonances lourdes (Ψ', χ_c, Υ)

Motivations

- Le charme ouvert et la beauté ouverte sont bien décrits par QCD perturbatif. Ils permettent de tester les mécanismes de perte d'énergie dans le milieu créé, en complément des quarks légers.

- La mesure du charme est également nécessaire pour contraindre les modèles de recombinaison du J/Ψ.

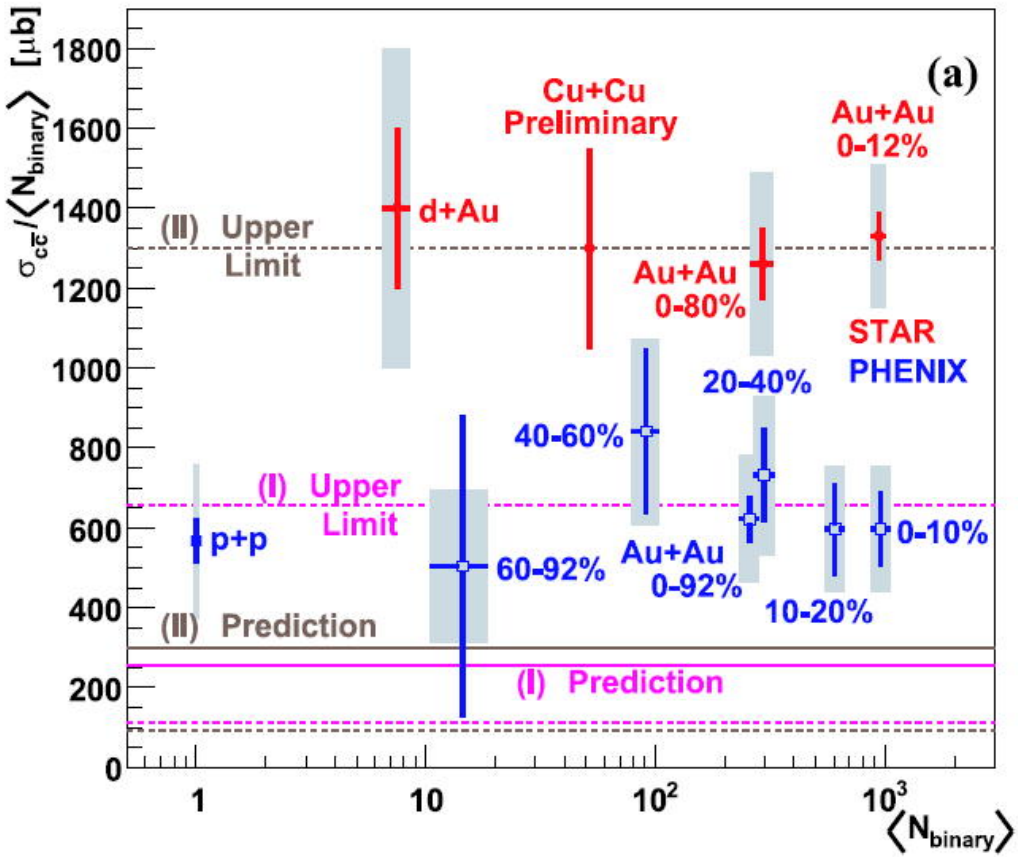
- La mesure directe du Ψ',χ_c et B permet de séparer les J/Ψ directs des J/Ψ issus de décroissances.

- Une mesure du upsilon fournit une référence à une énergie intermédiaire par rapports aux futures mesures du LHC.

Section efficace de production de D et B

Mesure directe de la production de D via décroissance K+π

Mesure indirecte via l'étude du spectre des électrons, muons ou di-électrons

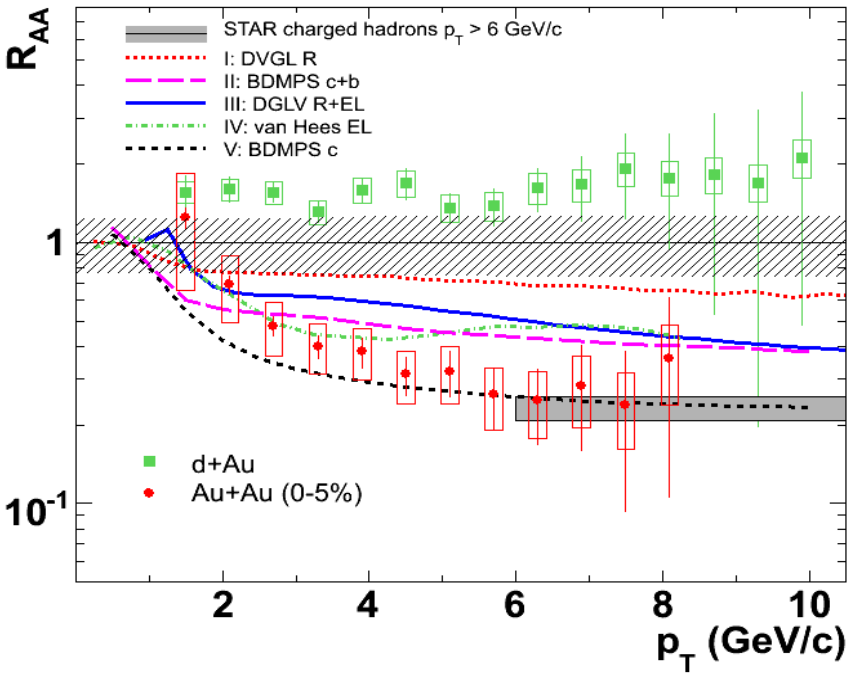


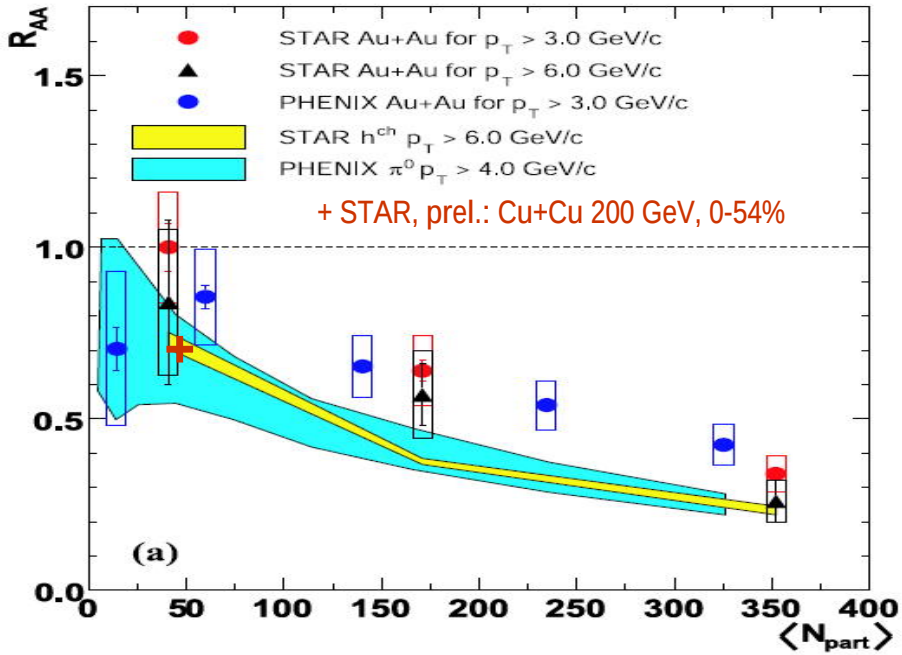
Facteur ~2 de désaccord entre les deux expériences.

Toutes les mesures de chaque expérience sont compatibles entre elles.

La section efficace totale augmente proportionnellement à N_{coll}

R_{AA} de B et D dans des collisions A-A



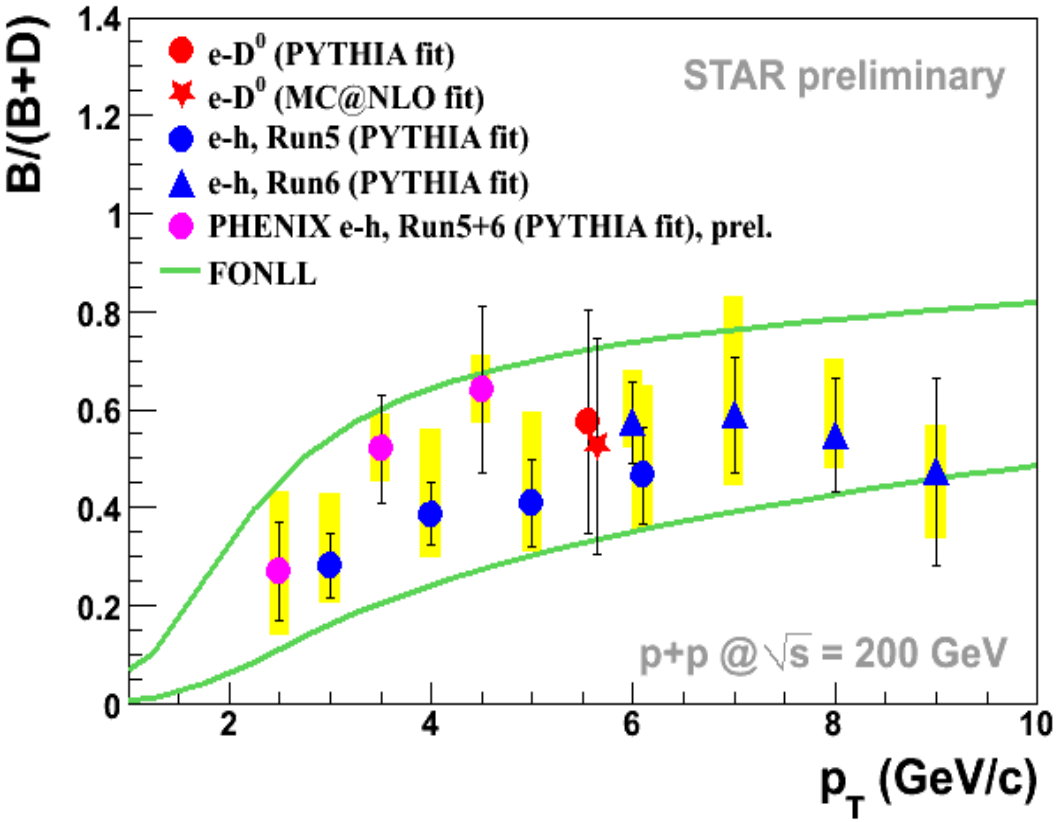


Bon accord entre les deux expériences.

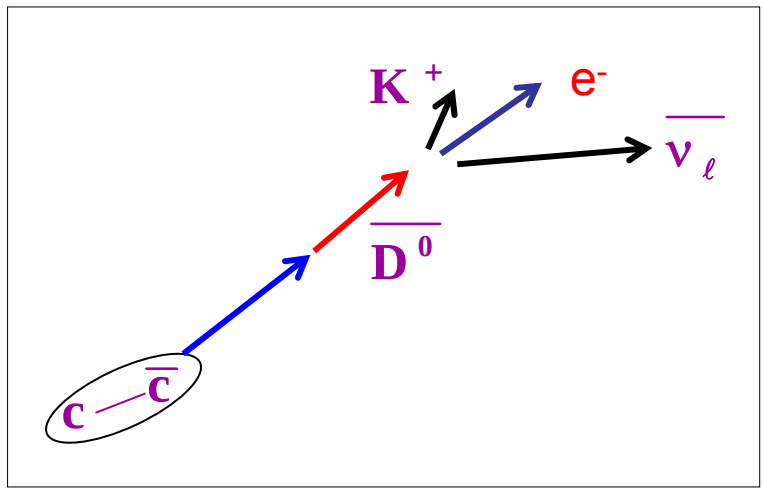
La suppression est plus grande que celle attendue par simple radiation de gluons (Bremmstrahlung), et nécessite l'intervention d'autres mécanismes:

- perte d'énergie par collision dans le milieu
- fragmentation des quarks lourds, puis dissociation, dans le milieu

Séparation entre contributions du B et du D au spectre en électrons



Mesure basée sur l'étude de corrélations entre électrons et hadrons + fit PYTHIA



Bon accord

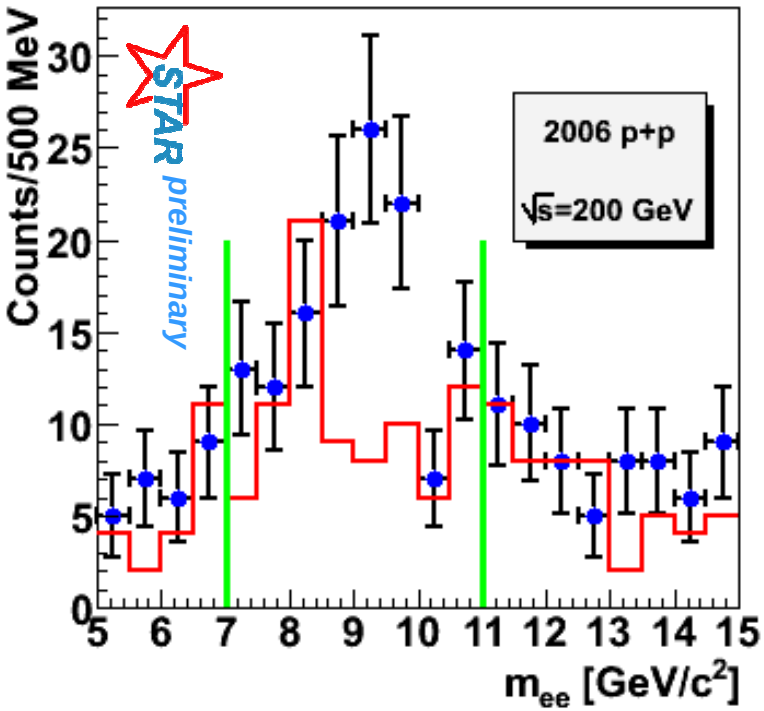
- entre les différentes méthodes
- entre les deux expériences
- avec les calculs FONL (mais grandes incertitudes théoriques)

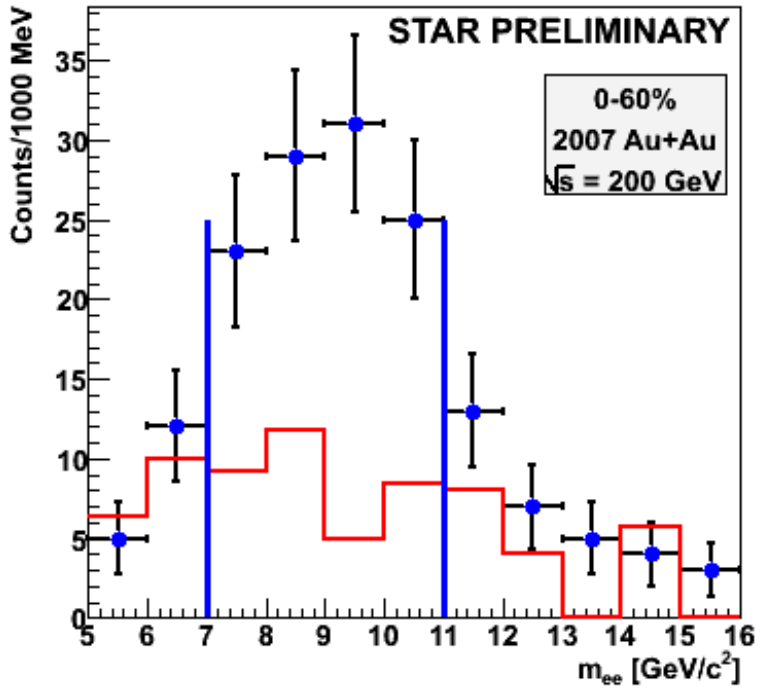
J/Ψ issus de la décroissance d'autres résonances

Mesures réalisées dans des collisions p-p à 200 GeV

	PHENIX	Théorie
$B \rightarrow J/\Psi$	0.036 ± 0.025	0.02 ± 0.01 (extrapolation NLO pQCD)
$\Psi' \rightarrow J/\Psi$	0.086 ± 0.025	0.08 Digal et al., Phys. Rev. D 64 (2001) 94015
$\chi_c \rightarrow J/\Psi$	< 0.42 (90% CL)	0.30 Digal et al., Phys. Rev. D 64 (2001) 94015

Upsilon





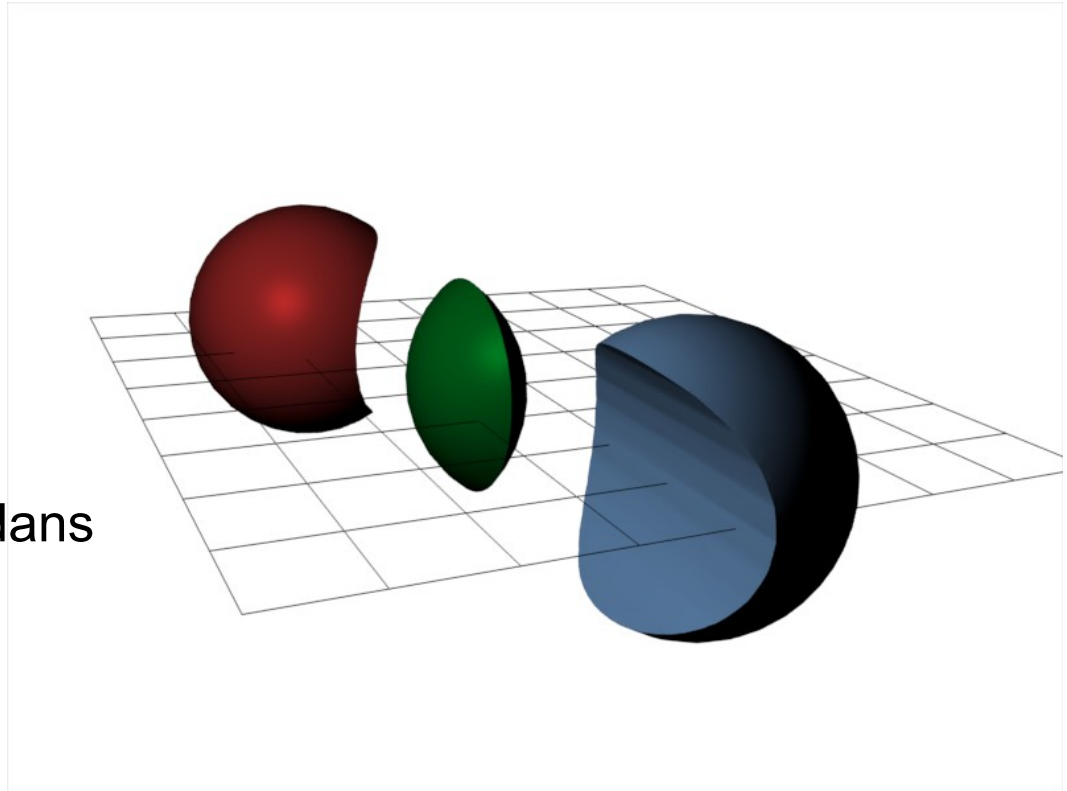
Première mesure du upsilon dans des collisions A-A.

Ces résultats permettront de calculer une section efficace totale (p+p) et un facteur de modification nucléaire (Au+Au)

5. Flot elliptique

Flot elliptique (principe)

Le flot elliptique, v_2, caractérise l'anisotropie azimutale d'émission de particules par rapport au plan de réaction d'une collision d'ions *non centrale*.
Il a pour origine l'anisotropie du gradient de pression présente dans la zone de recouvrement des noyaux.



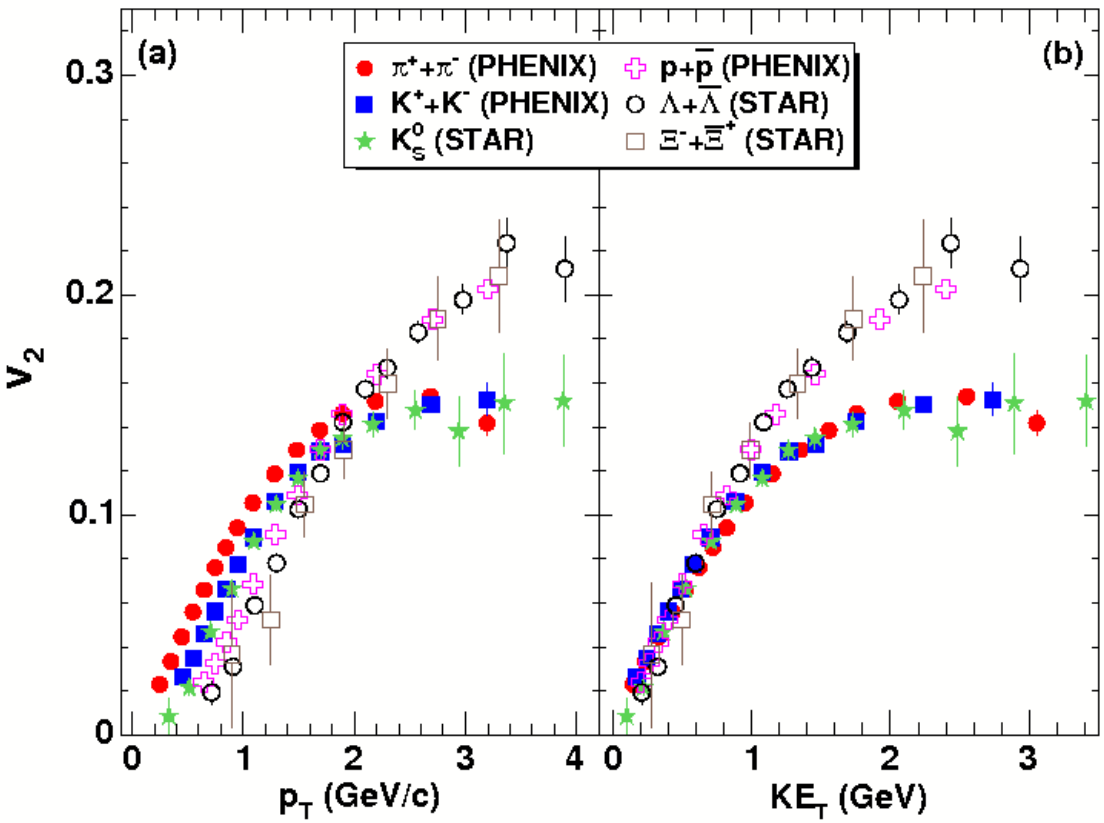
La mesure d'un flot elliptique positif est interprété comme une indication d'une thermalisation rapide du milieu créé.

Flot elliptique des hadrons légers

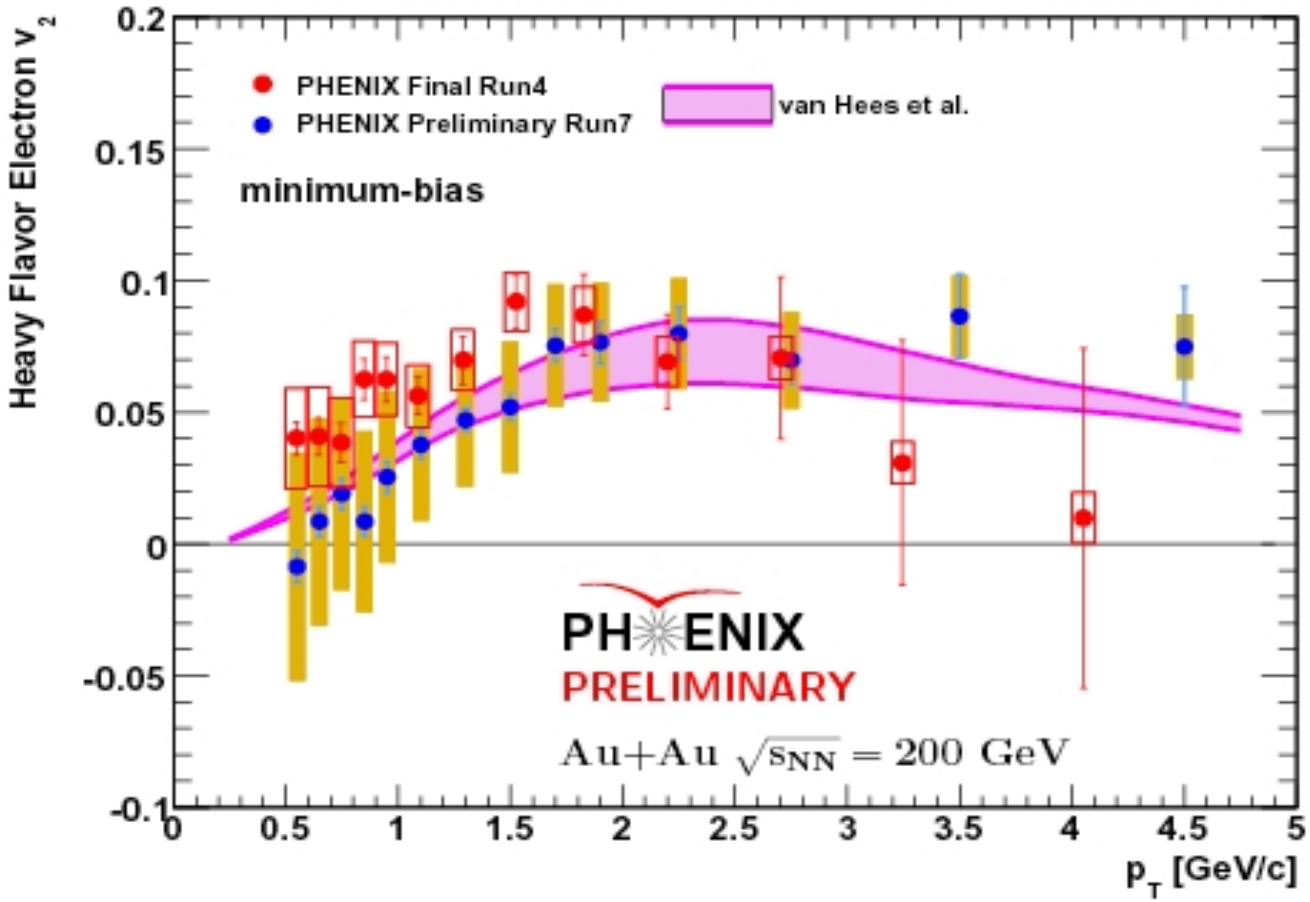
Le flot elliptique (v2) a été mesuré pour les hadrons légers.

L'observation de certaines propriétés d'invariance est interprétée comme une mise en évidence de degrés de liberté pré-hadroniques (partons ?) dans le milieu formé.

Phys. Rev Lett. 98, 162301 (2007)



Flot elliptique des saveurs lourdes (D,B)



Une valeur positive de v_2 a également été mesurée pour les hadrons lourds (D,B). Charme et beauté sont également thermalisés.

Les J/Ψ produits par recombinaison de paires décorrélées devraient également posséder un $v_2>0$, contrairement aux J/Ψ directs.

Flot elliptique du J/Ψ à y=0

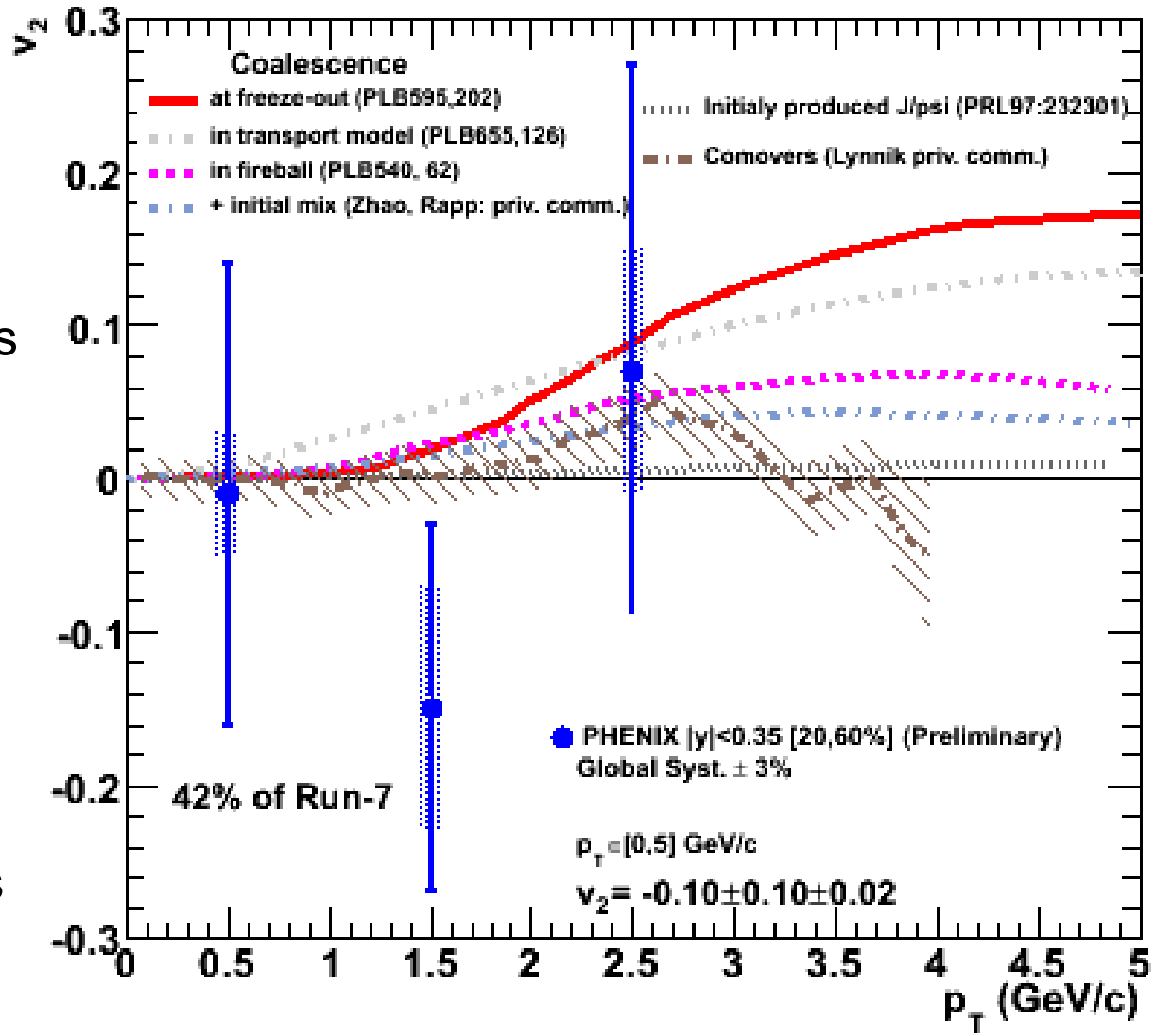
Première mesure à y=0.

Trop faible statistique pour pouvoir conclure.

Environ 50% des données 2007 doivent encore être analysées.

Les prochaines prises de données à RHIC (2009, 2010) devraient fournir plus de statistique.

Les résultats à y>0 devraient être disponibles prochainement.



Conclusions et perspectives

Collisions p+p

Référence précise pour le J/Ψ, cependant les mécanismes de production sont mal compris.

Une compréhension meilleure nécessite:

- plus de statistique (prise de donnée 2006, notamment)
- mesure de la contribution des J/Ψ issus de décroissances
- mesure d'autres observables (polarisation du J/Ψ)

Collisions d+Au

Trop peu de données pour estimer précisément les effets nucléaires froids et les extrapoler aux collisions AA. La prise de données 2008 fournit 30 fois plus de statistique et est en cours d'analyse.

Collisions Cu+Cu et Au+Au

Une suppression des saveurs lourdes et du J/Ψ est observée pour les collisions Au-Au centrales.

Pour le J/Ψ elle ne peut être expliquée entièrement par les effets nucléaires froids.

Le facteur de modification nucléaire R_{AA} peut être plus ou moins reproduit par des modèles qui incluent les effets suivants:

- effets nucléaires froids
- dissociation par interaction avec les partons du milieu et/ou écrantage de Debye
- régénération par recombinaison des quarks décorrélés

A ce jours certains de ces effets sont très peu contraints par les données, tout comme le poids relatifs des uns par rapport aux autres.

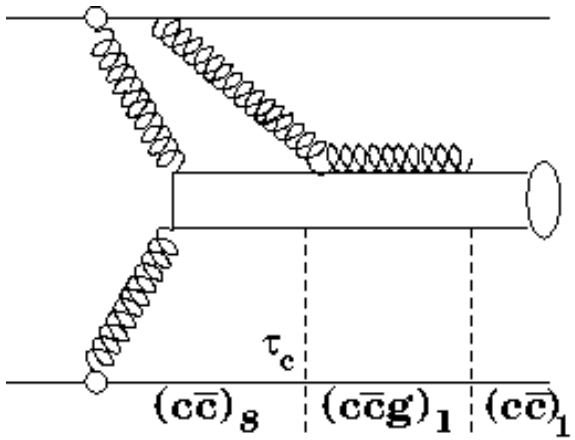
Collisions Cu+Cu et Au+Au (suite)

Une compréhension plus précise de ces mécanismes nécessite notamment:

- une mesure plus précise des effets froids (collisions d+Au)
- une mesure plus précise des hadrons charmés (D)
- la mesure d'autres observables (telles que le flot elliptique du J/Ψ)
- l'étude d'autres résonances (Ψ', χ_c, B et Y) en p+p, d-A et A-A.

Backup

Mécanisme de production du J/Ψ



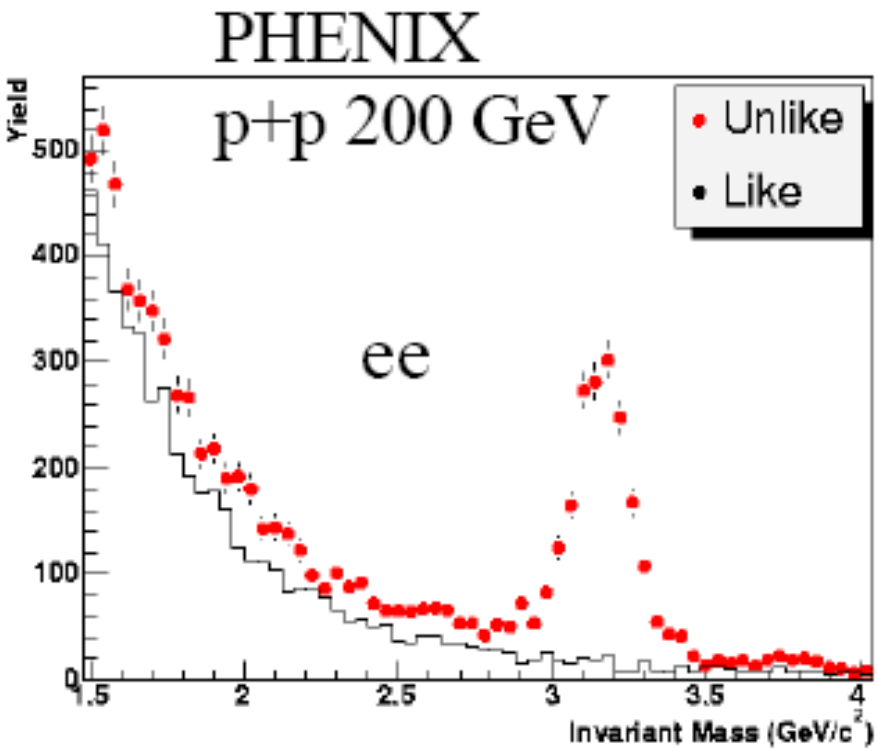
A RHIC, la production de paires c-cbar est dominée par la fusion gluon-gluon. Un troisième gluon (non-perturbatif) est nécessaire pour neutraliser la couleur du J/Ψ.

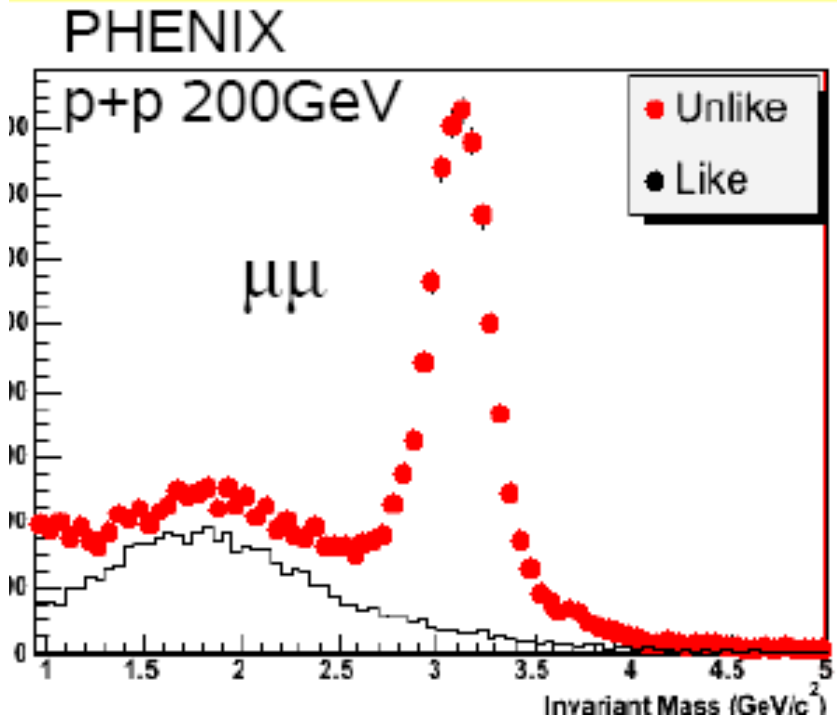
La fusion gluon-gluon peut être calculée par QCD perturabtif.

Différentes approches (non perturbatives) sont possibles pour traiter la neutralisation du J/Ψ :

- Color Singlet Model
- Color Octet Model
- Color Evaporation Model
- Factorisation KT

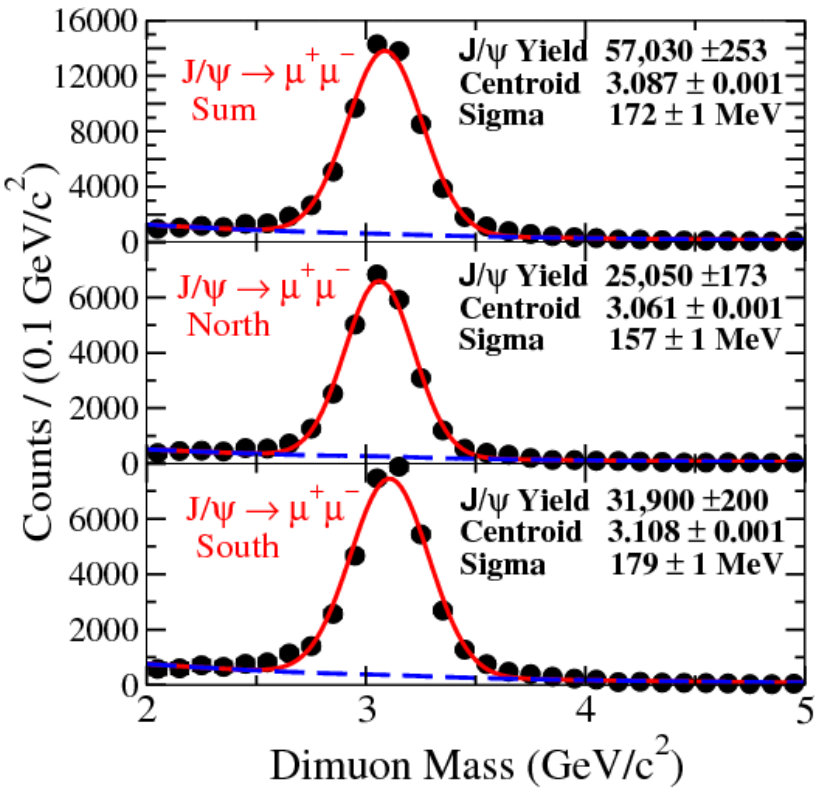
J/Ψ signal in p+p collisions @ PHENIX

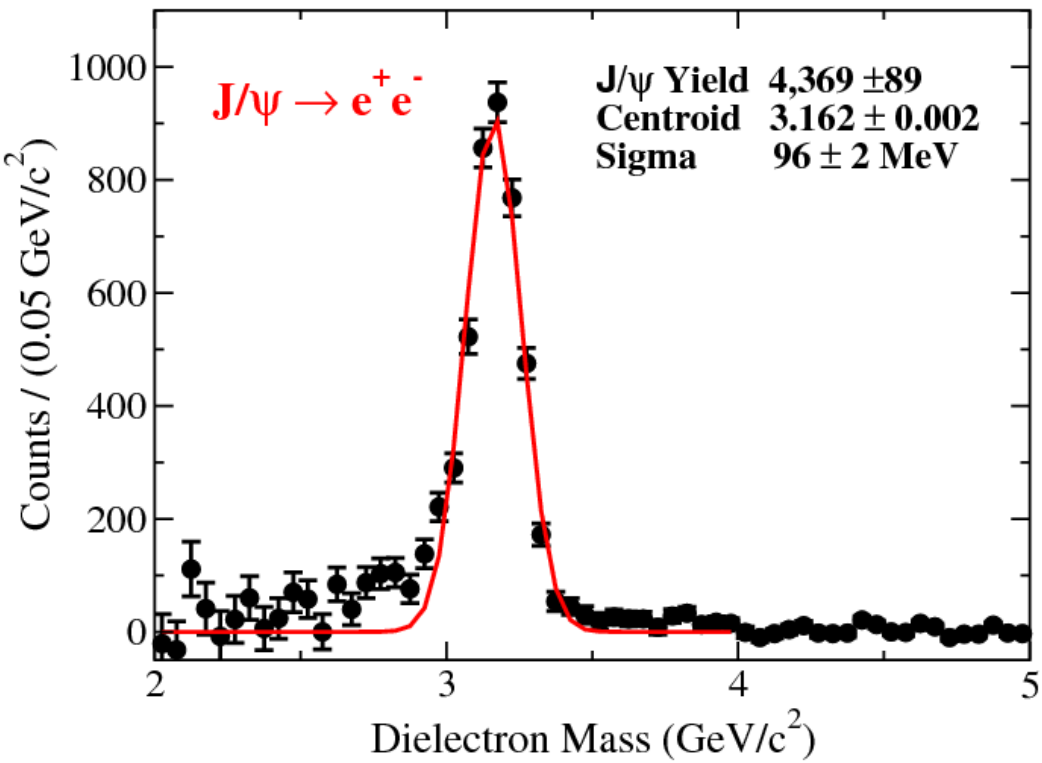




J/Ψ signal in d+Au collisions @ phenix (from 2008)

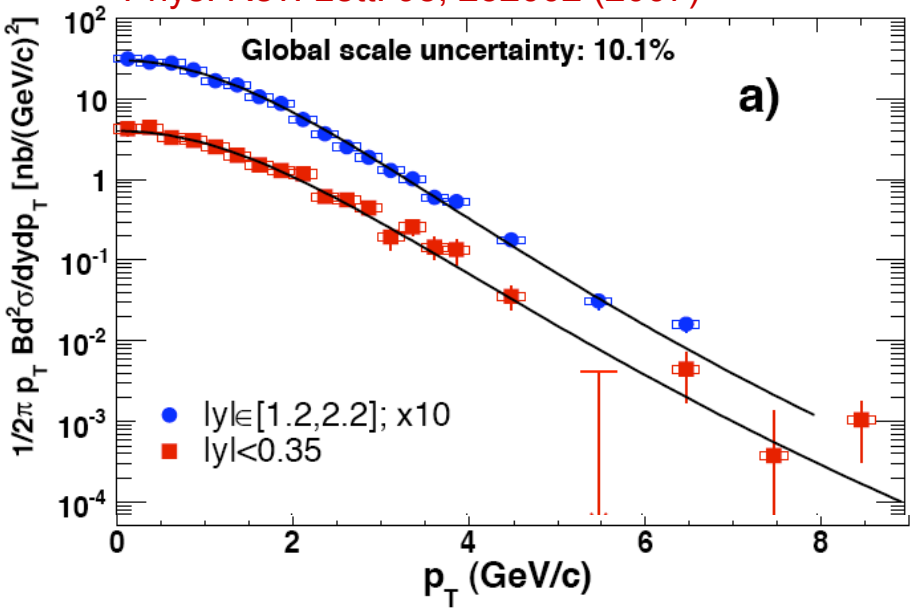
About 30x more statistics than published data.
Analysis in progress.
Will improve a lot constraints on cold nuclear matter effects.

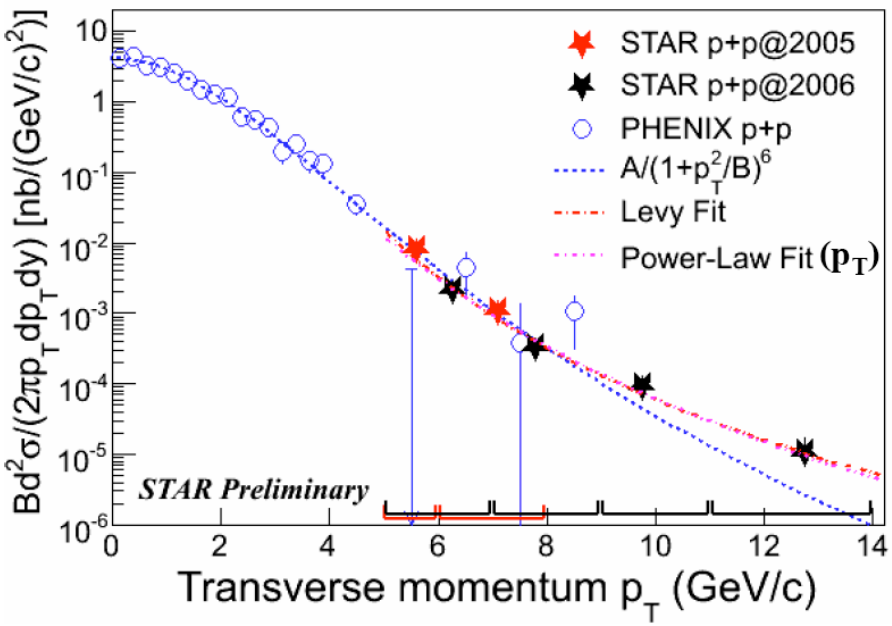




Section efficace de production du J/Ψ vs p_T

Phys. Rev. Lett. 98, 232002 (2007)





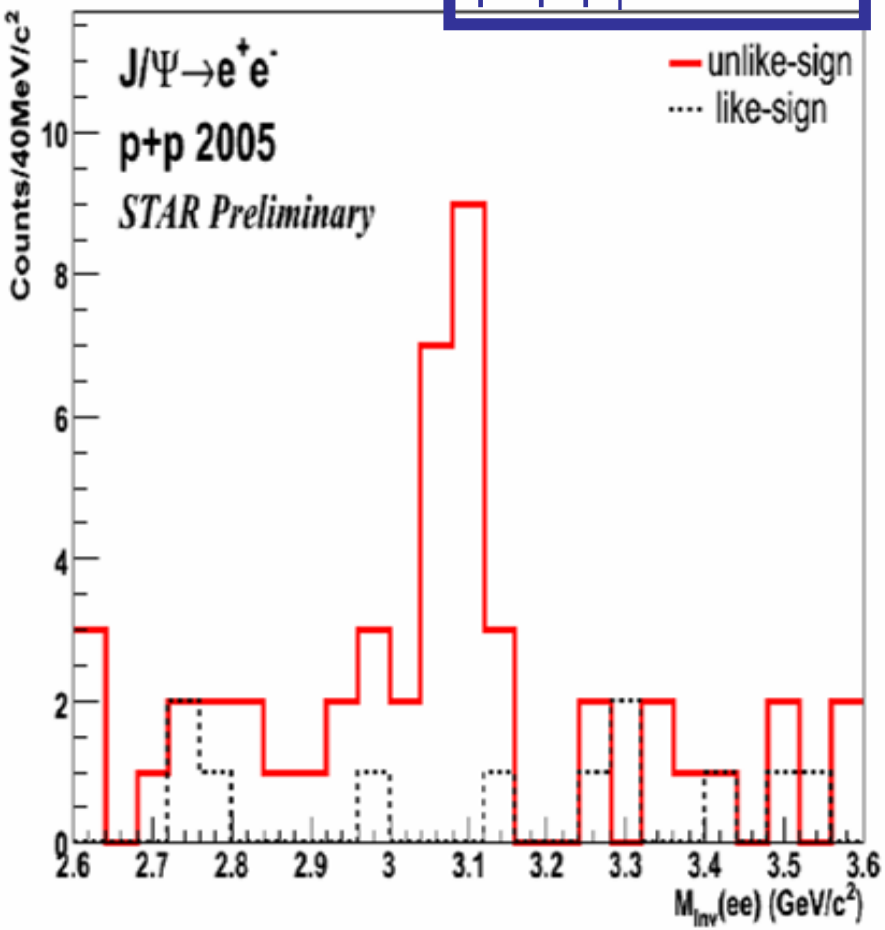
Utilisée pour calculer l'impulsion transverse carré moyenne $\langle p_T^2 \rangle$

$\|y\|<0.35$:	$\langle p_T^2 \rangle = 4.25 \pm 0.24 \pm 0.14$ (GeV/c)^2
$1.2< \|y\| <2.2$:	$\langle p_T^2 \rangle = 3.57 \pm 0.06 \pm 0.15$ (GeV/c)^2

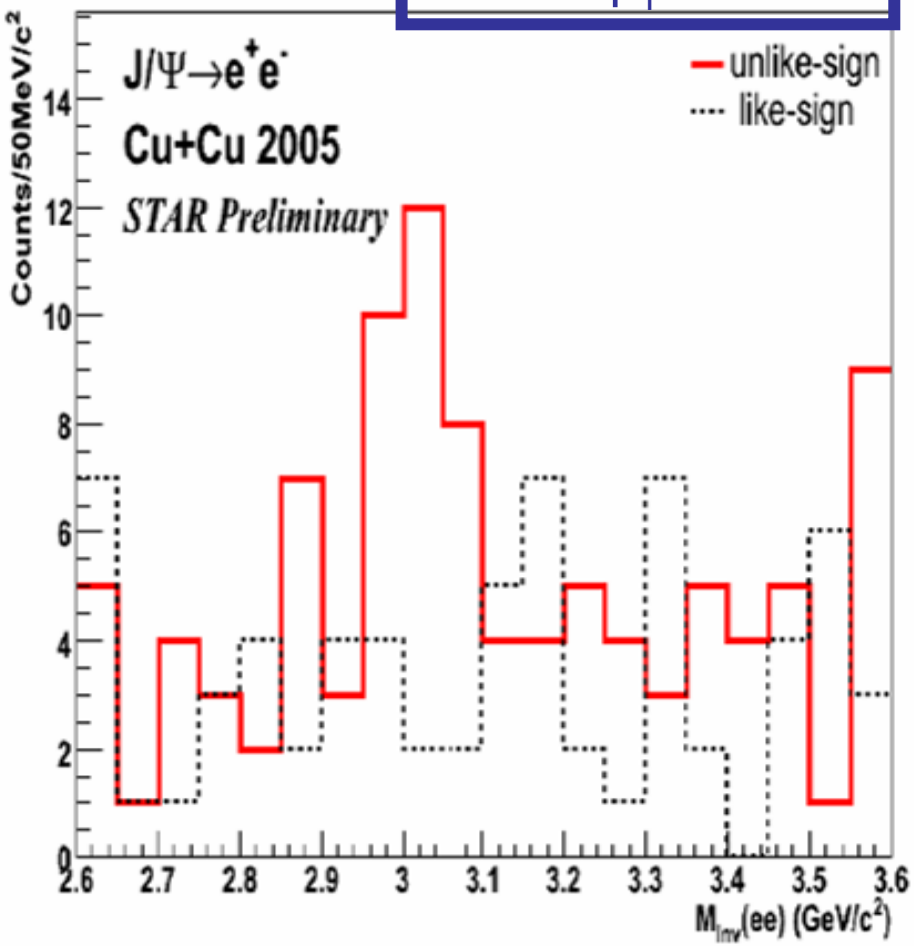
Egalement utilisée comme référence pour les collisions A-A.

J/Ψ signal in p+p and Cu+Cu collision @ STAR

p+p p_T>5GeV/c



Cu+Cu p_T>5GeV/c



Proton spin structure via heavy flavor

Proton spin structure is probed using longitudinally polarized proton beams. Beam polarization is flipped from bunch to bunch.

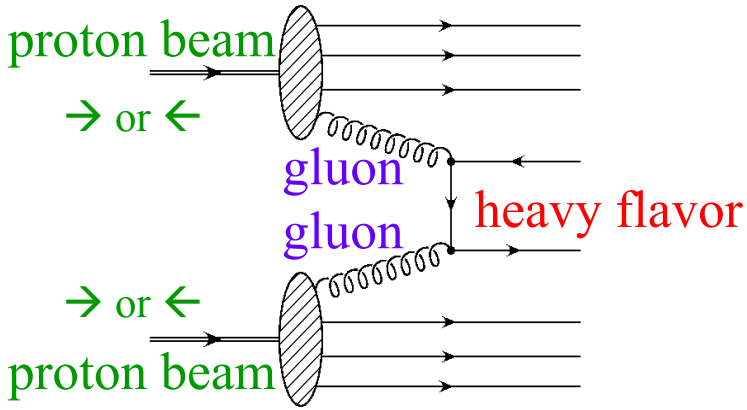
Measure J/Ψ yields in each configuration, since it is sensible to the underlying parton distribution function

Form asymmetries:

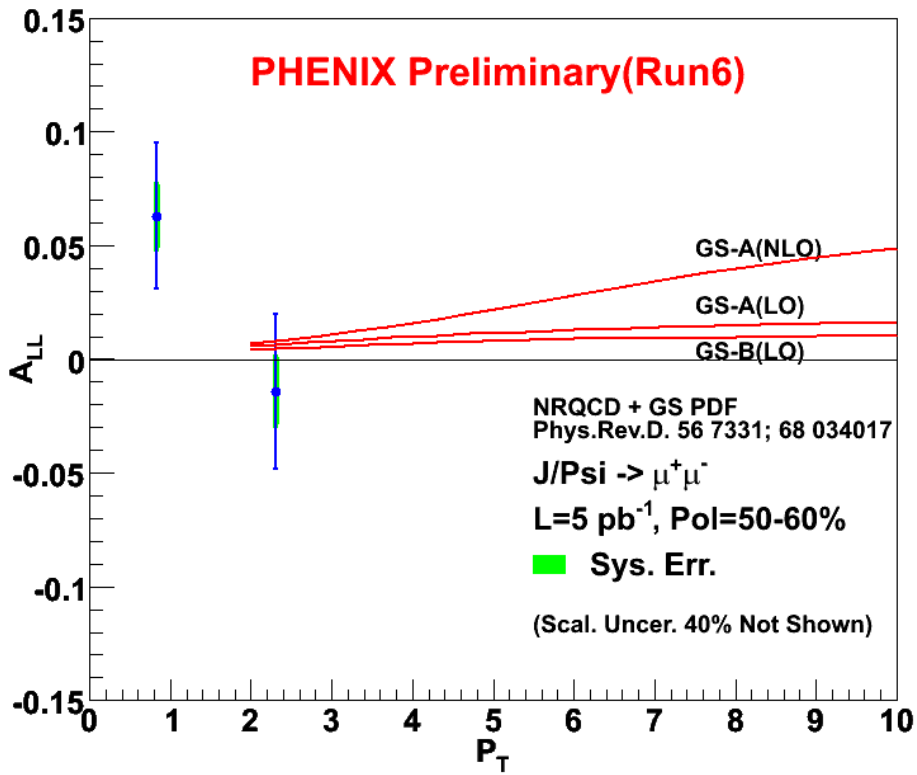
$$A_{LL}^{incl} = \frac{1}{< P_B >< P_Y >} \frac{N^{++} - R \cdot N^{+-}}{N^{++} + R \cdot N^{+-}}$$

$$A_{LL}^{J/Psi} = \frac{A_{LL}^{incl} - f_{BG} \cdot A_{LL}^{BG}}{1 - f_{BG}}$$

$$\approx \frac{\Delta g(x_1)}{g(x_1)} \frac{\Delta g(x_2)}{g(x_2)} a_{LL}^{gg \to Q\bar{Q}}$$



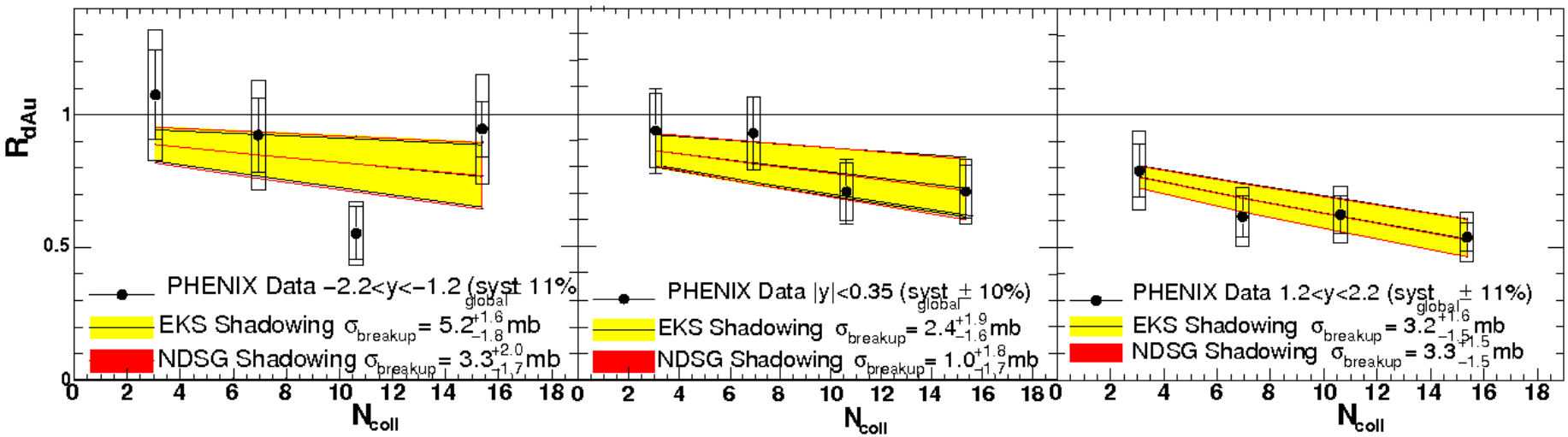
J/Psi: |y| = 1.2-2.4



J/Ψ R_{dA} vs centrality in d+Au collisions

Alternatively one can fit the centrality dependency of R_{dA} in each rapidity range with different break-up cross-sections.

arxiv:0711.3917



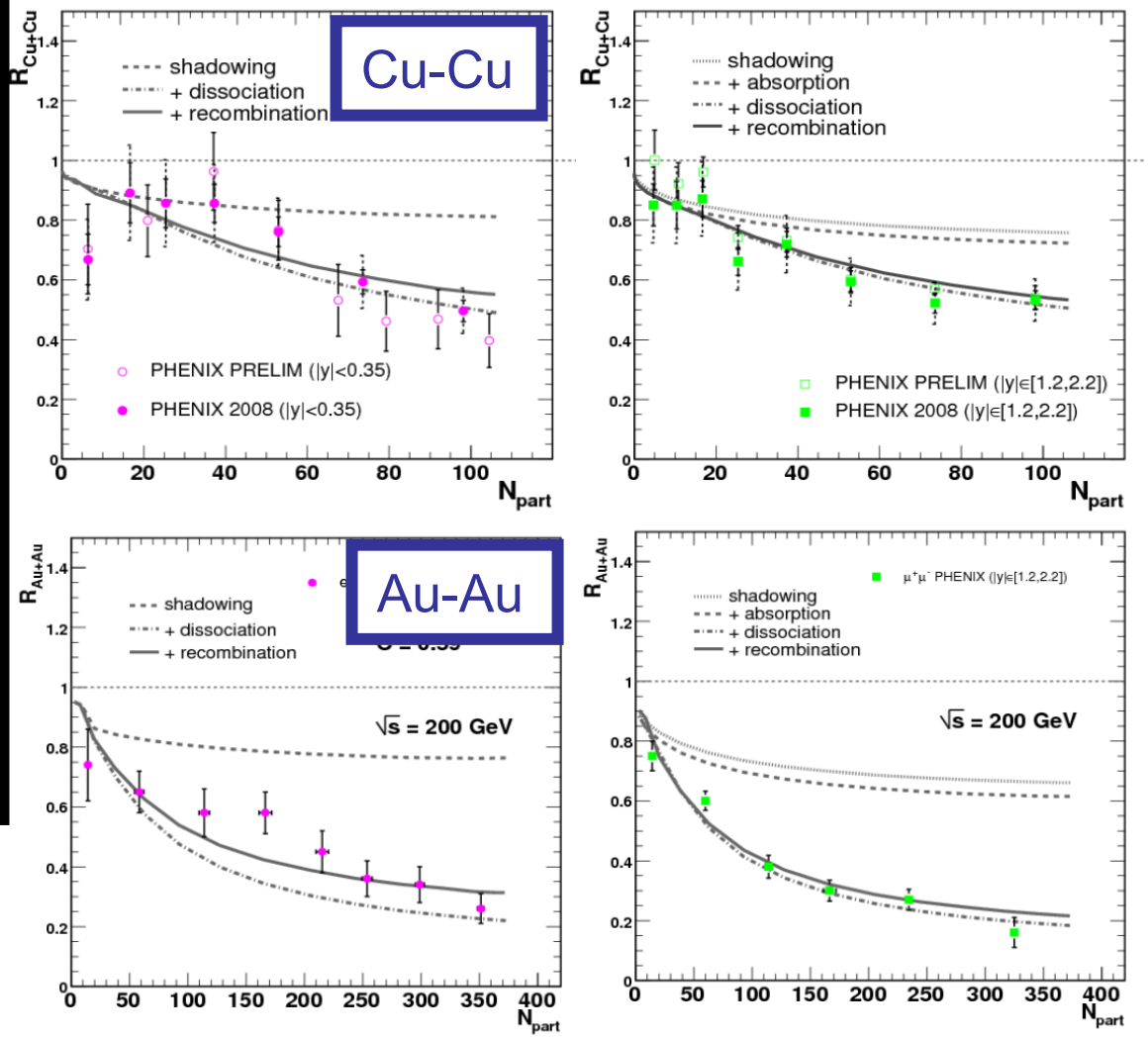
The underlying shadowing model is used to extrapolate from dA to AA collisions, but not to constrain the differences between the three rapidity ranges.

J/Ψ R_{AA} vs centralité (N_{part}) pour Au+Au et Cu+Cu

Une suppression plus grande à y>0 est inattendue, parce que la densité d'énergie est plus grande à y=0.

Explications possibles:

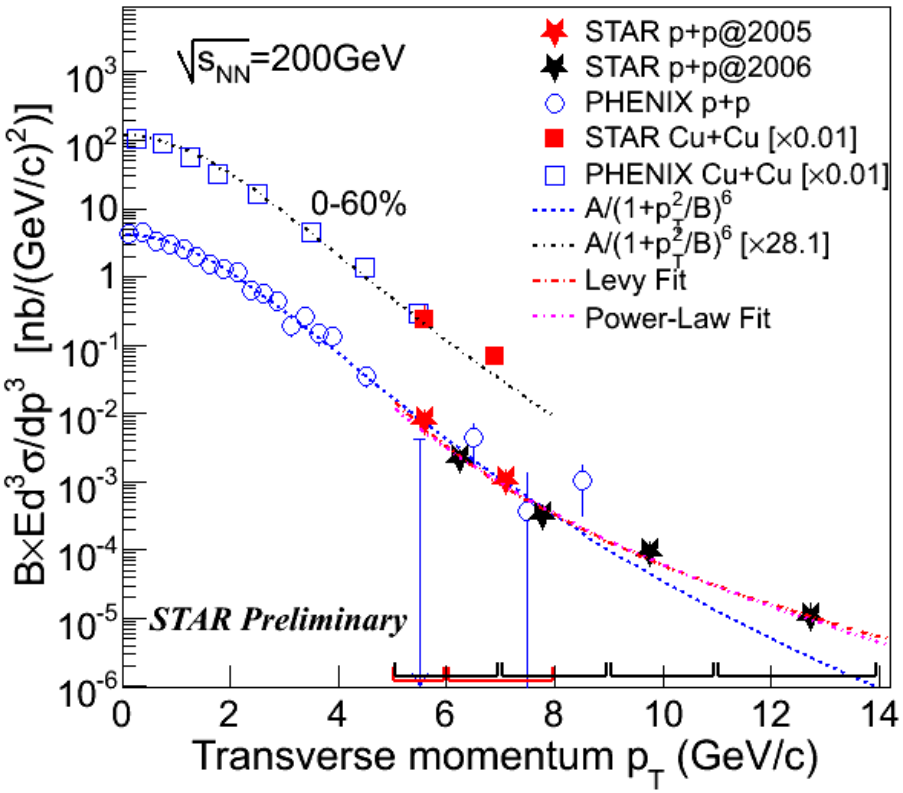
- plus de recombinaison à y=0;
- plus d'effets froids (dont effets de saturation des gluons) à y>0.

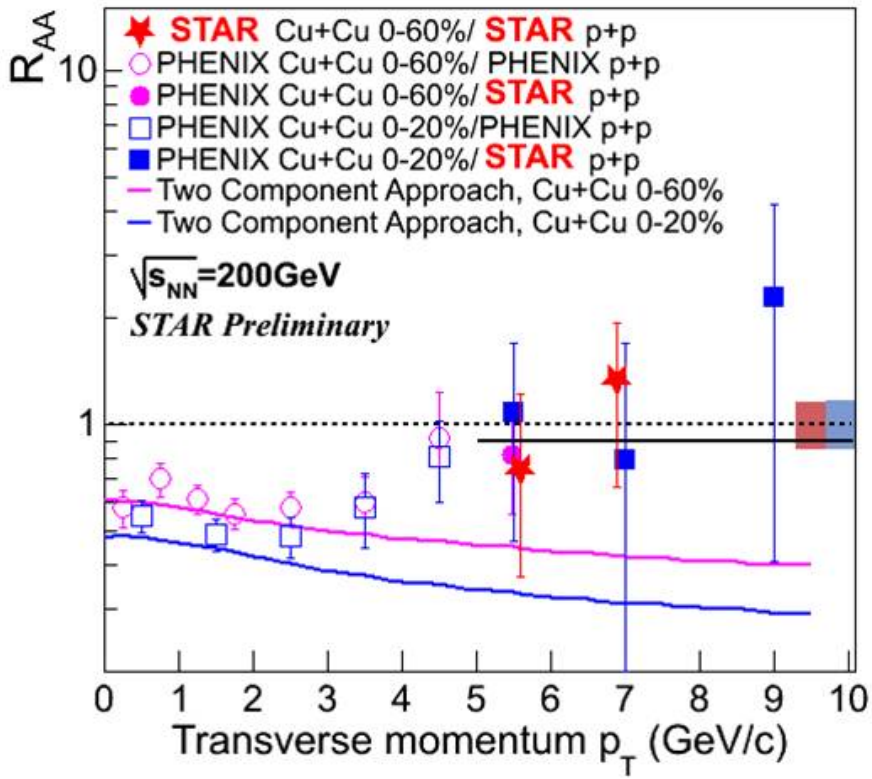


exemple de comparaison aux modèles:
Capella, Tywoniuk et al. reproduisent Cu+Cu, Au+Au, à y=0 et y>0

J/Ψ R_{AA} vs p_T

L'étude de modifications de la distribution du p_T du J/Ψ permet également de contraindre les mécanismes mis en jeu.





Les barres d'erreurs sont grandes.
Combiner les résultats de STAR et de PHENIX est délicat.

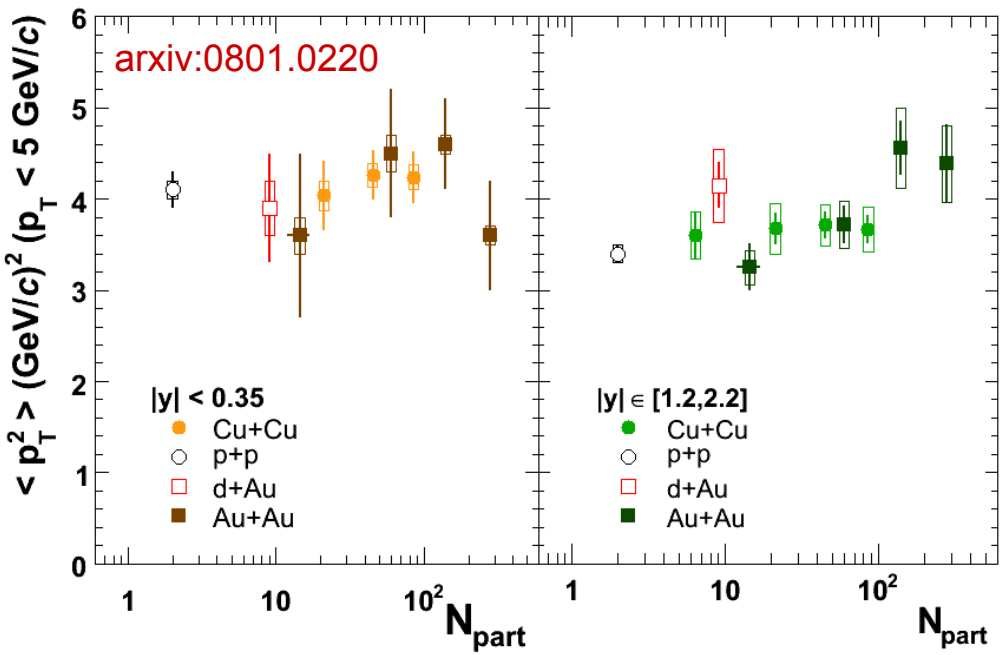
Modification of the p_T distribution with centrality

Study of the p_T spectrum (notably $\langle p_T^2 \rangle$ vs centrality) should give more hints of the mechanism at play.

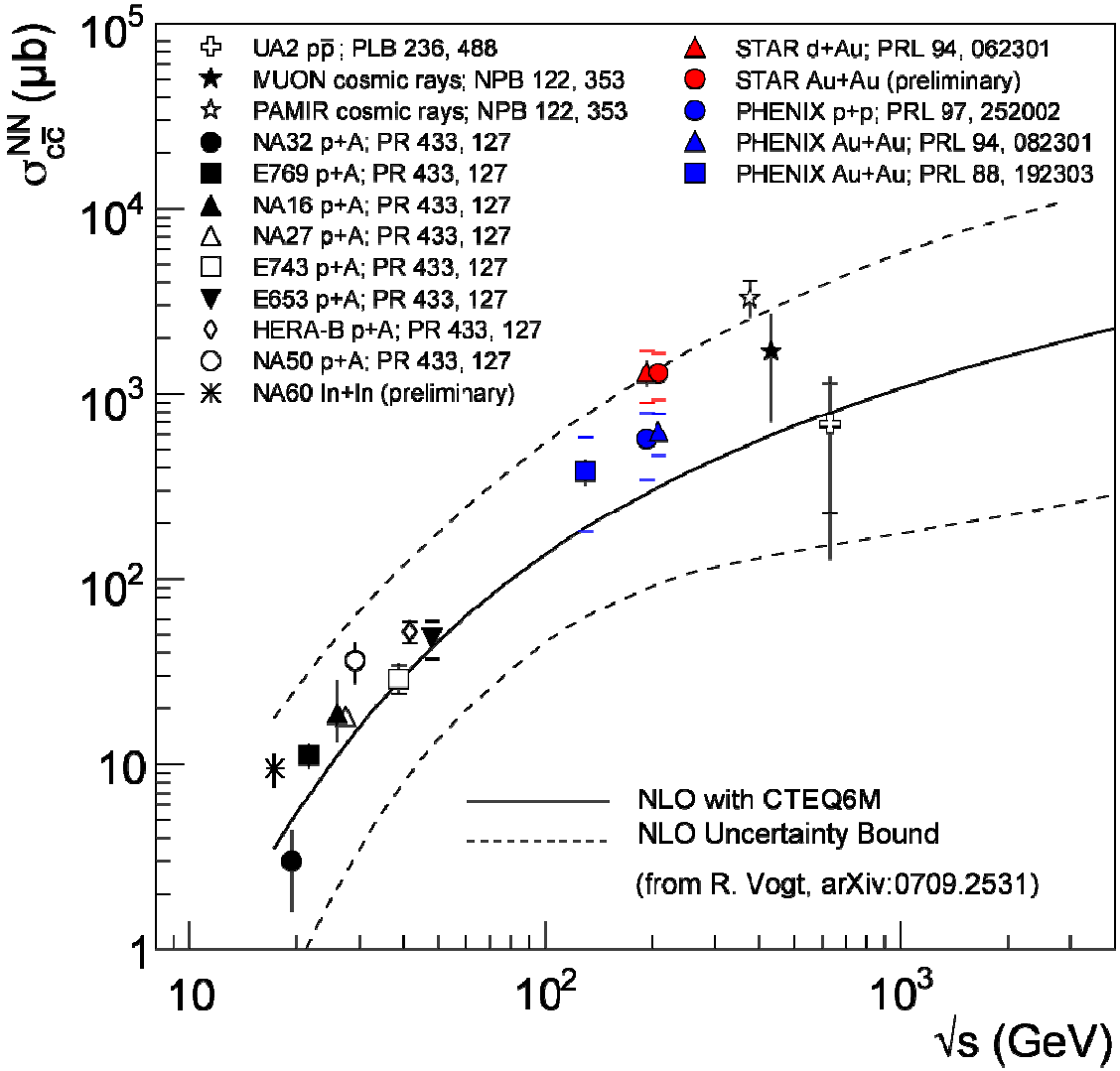
Cronin effect should increase the $\langle p_T^2 \rangle$ wrt N_{part}, but does not affect J/Ψs produced by recombination.

The measurement is difficult because of the poor constraints at high p_T.

$\langle p_T^2 \rangle$ vs N_{part} for p_T < 5 GeV/c

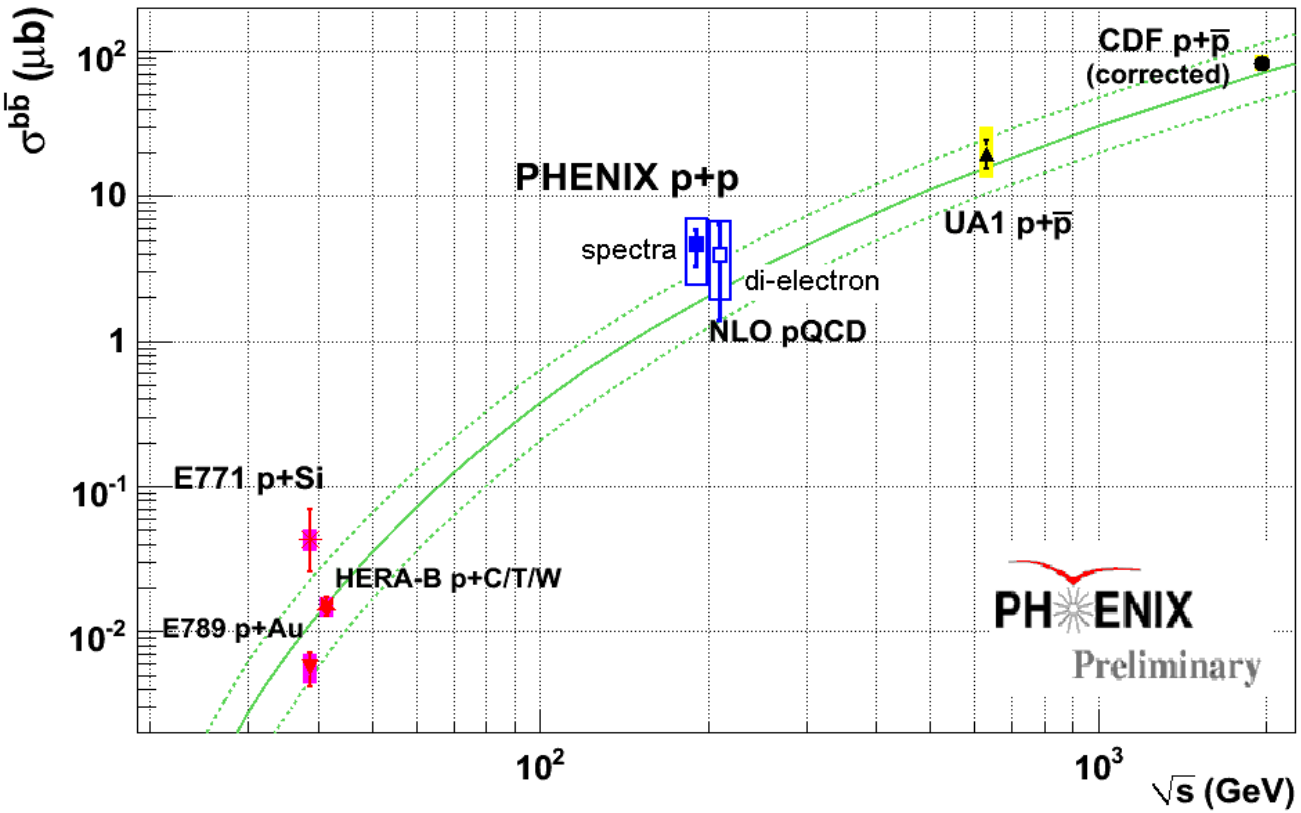


Section efficace de production de D et B



J/Ψ issus de la décroissance du B

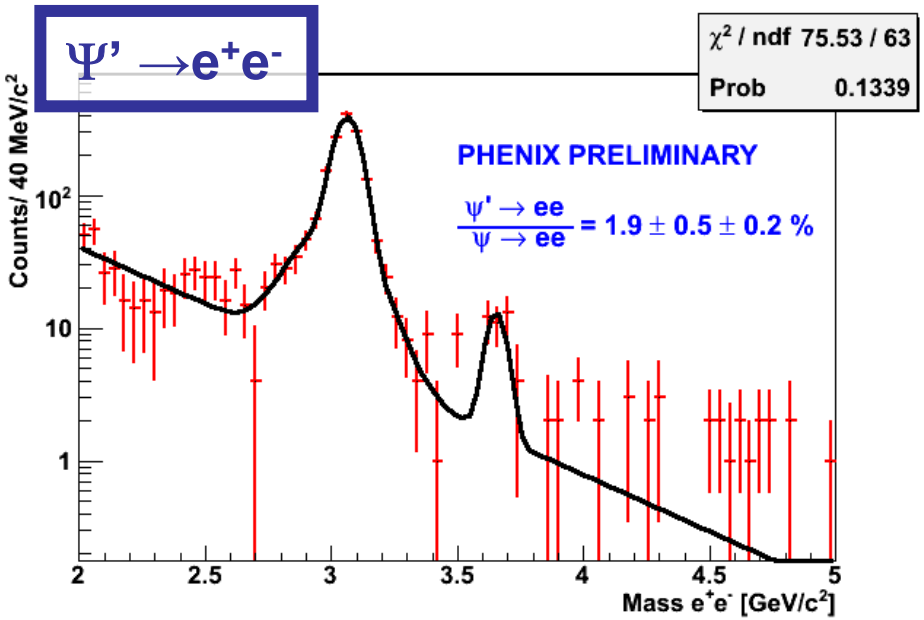
total cross section of bottom

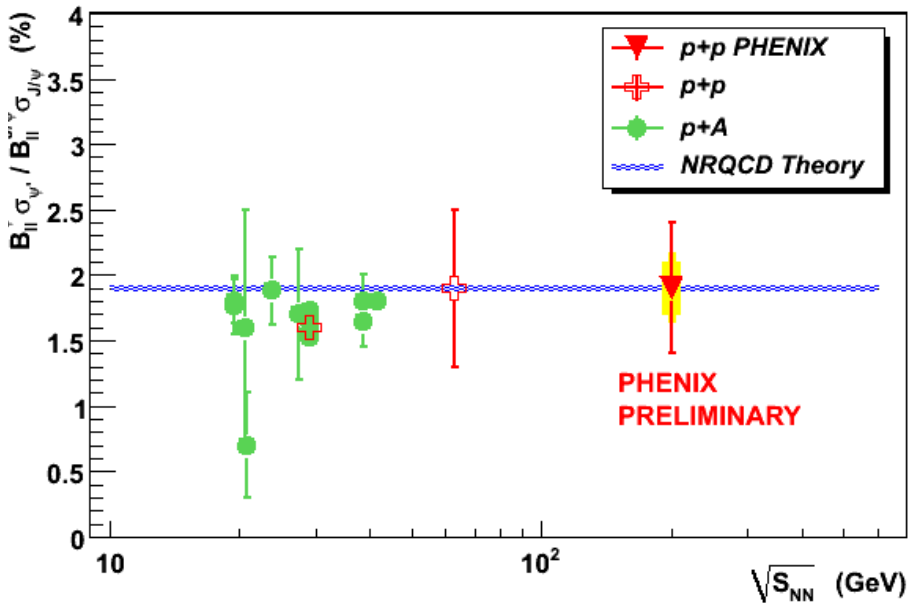


corrélations e-h
spectres di-électron

	PHENIX	Théorie
B → J/Ψ	0.036 ± 0.025	0.02 ± 0.01 (extrapolation NLO pQCD)

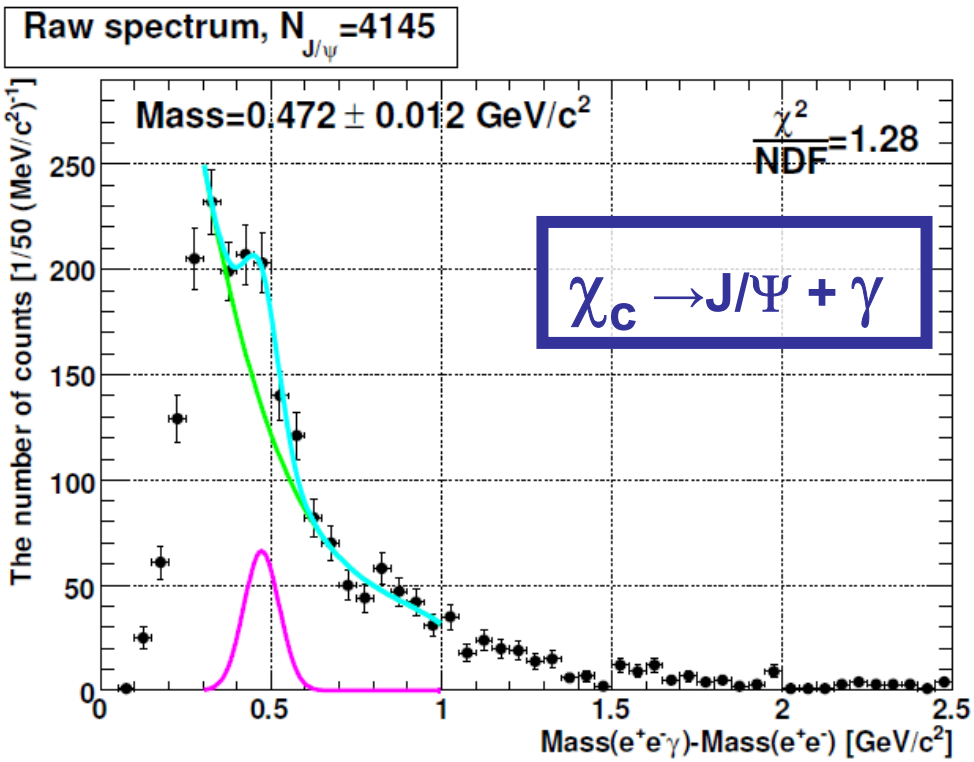
J/Ψ issus de la décroissance du Ψ'

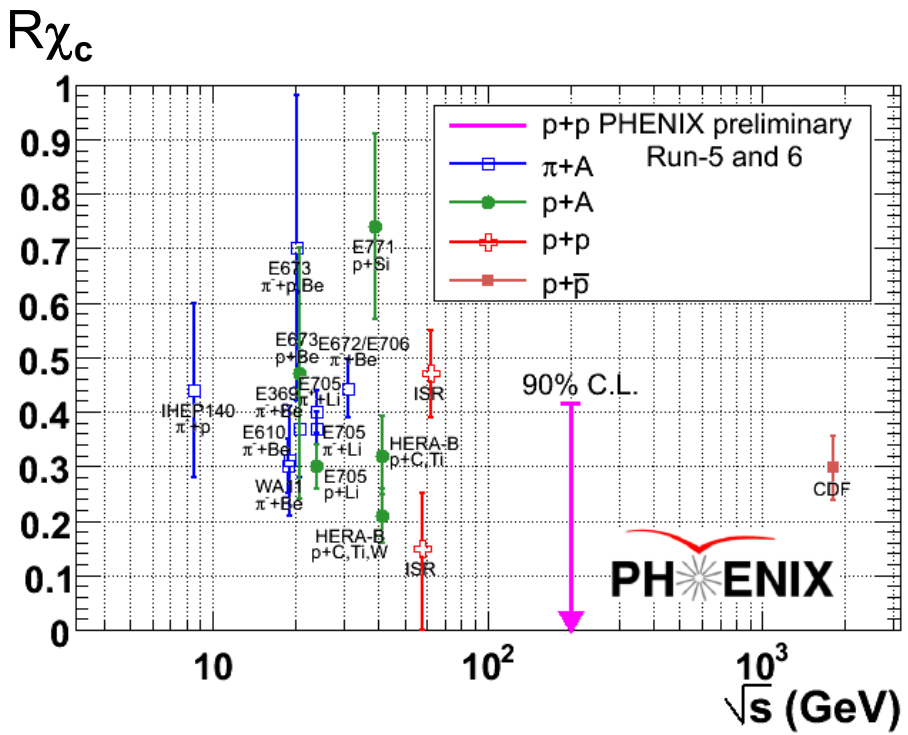




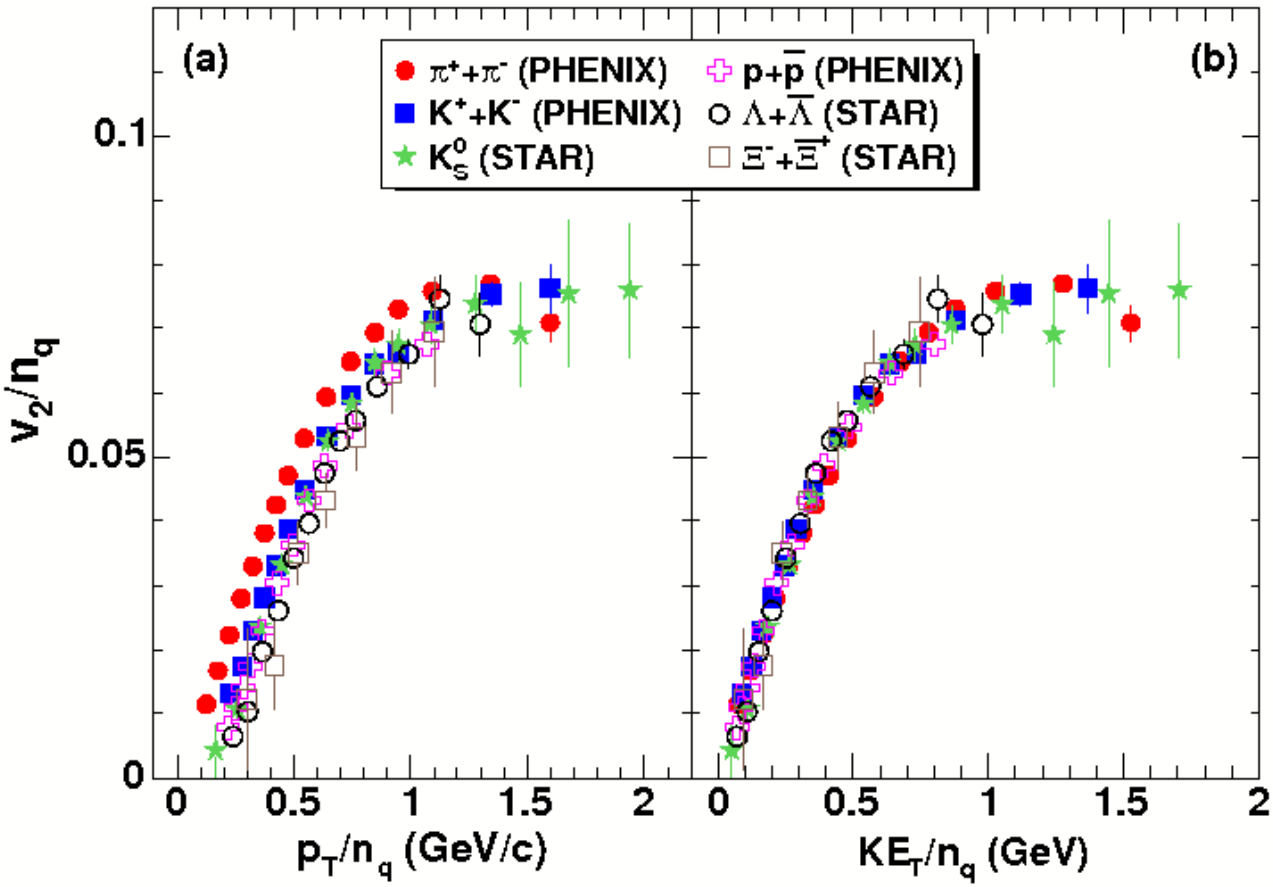
	PHENIX	Théorie
Ψ' → J/Ψ	0.086 ± 0.025	0.08 Digal et al., Phys. Rev. D 64 (2001) 94015

J/Ψ issus de la décroissance du χ_c





	PHENIX	Théorie
$\chi_c \rightarrow J/\Psi$	< 0.42 (90% CL)	0.30 Digal et al., Phys. Rev. D 64 (2001) 94015

Flot elliptique des hadrons légers

Phys. Rev Lett. 98, 162301 (2007)