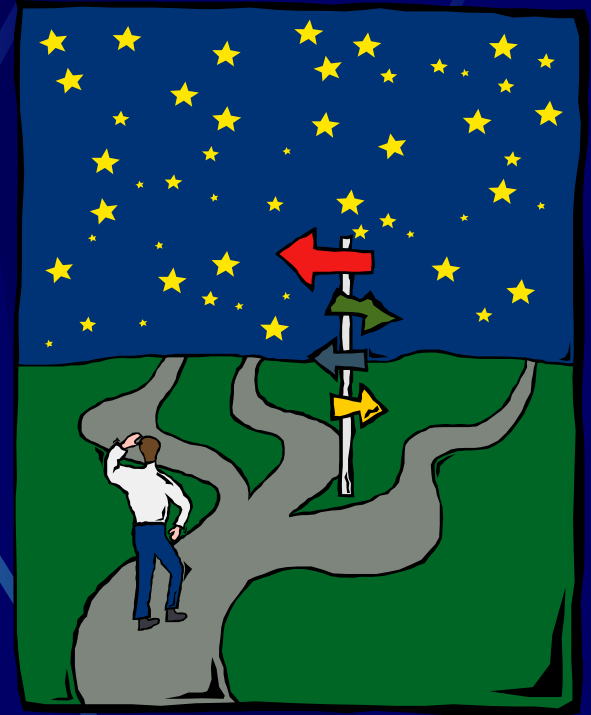


Sur la piste du plasma de quarks et de gluons...

● Le contexte

- La prédiction théorique
- Quelques jalons historiques
- RHIC et ses expériences



● Les collisions Or-Or à 200 GeV/nucléon

- Les conditions initiales - Sont-elles réunies ?
- Les premiers instants - Plasma or not plasma ?
- L'explosion finale - Que dire de toutes ces particules ?

La prédiction QCD

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

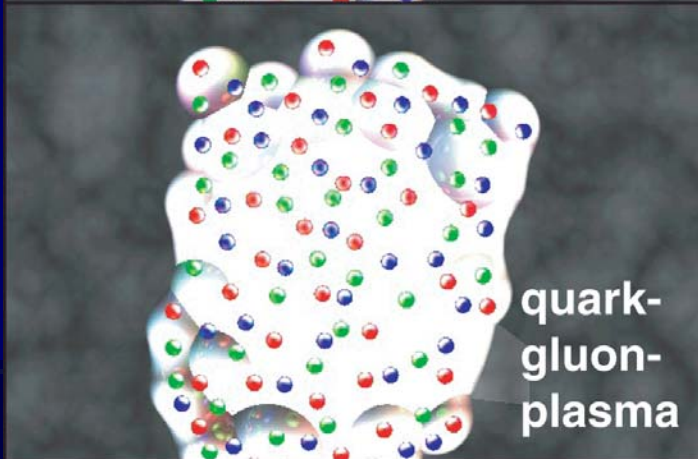
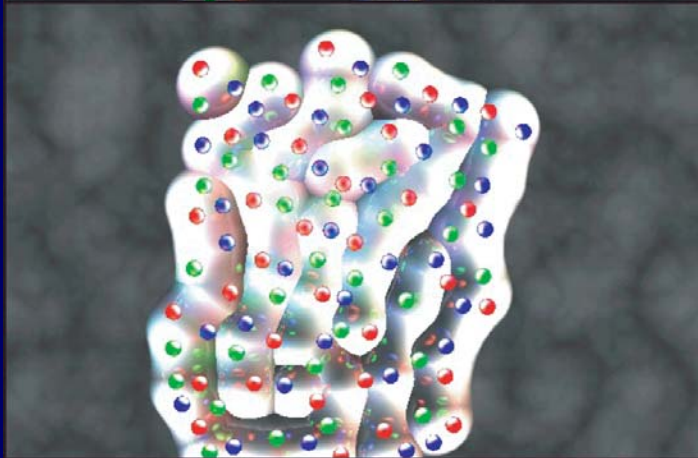
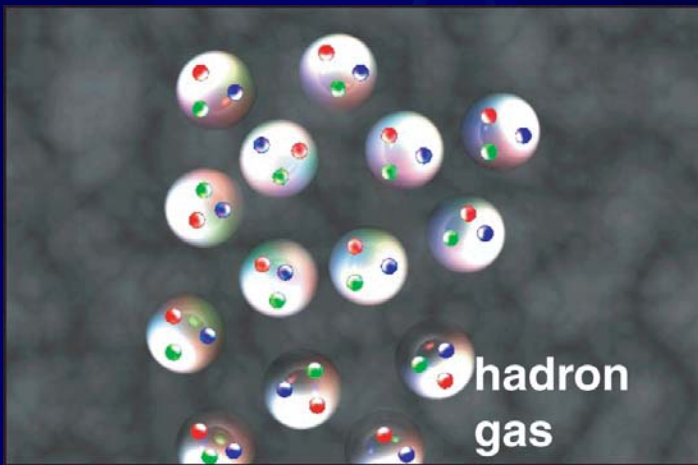
Mais ils paraissent libres à haute énergie...

« liberté asymptotique »

- Partons 1968
- Renormalisation de α_s

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

« déconfinement »



Gaz de hadrons



Plasma de quarks et de gluons

Soyons quantitatifs...

- Calcul de chromodynamique quantique

- Sur réseau
- À $n_B = 0$!

- Transition de phase

- Confinement
- Déconfinement

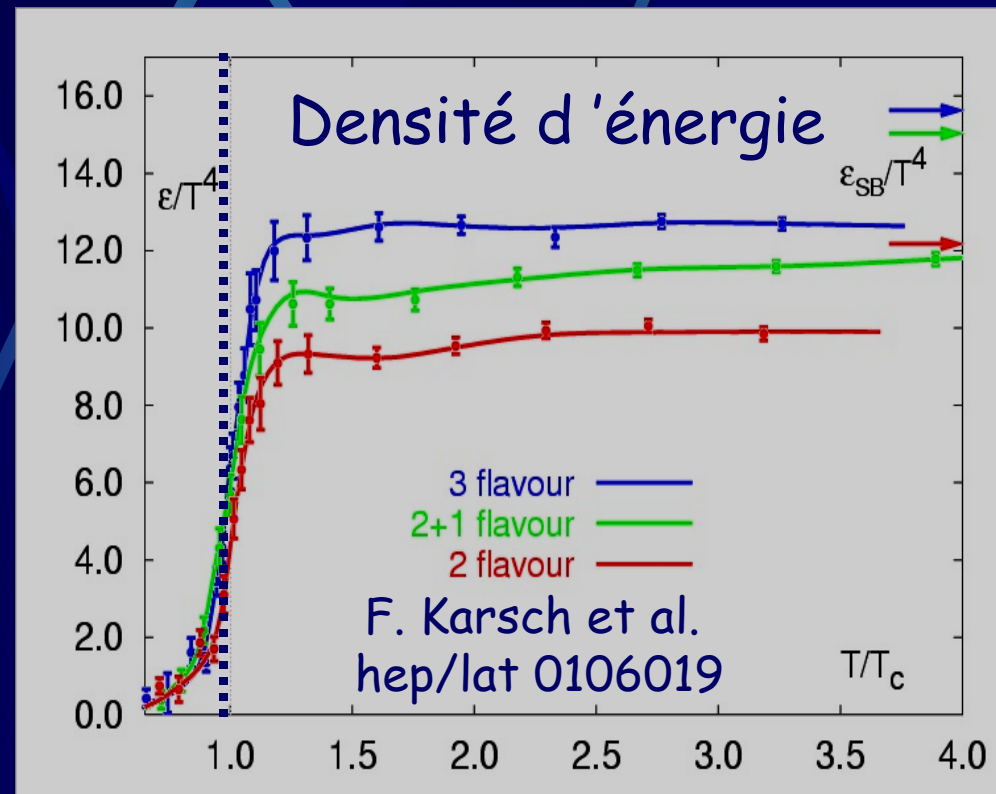
- @ $T_c = 154 \pm 8$ MeV

- @ $T_c = 173 \pm 8$ MeV

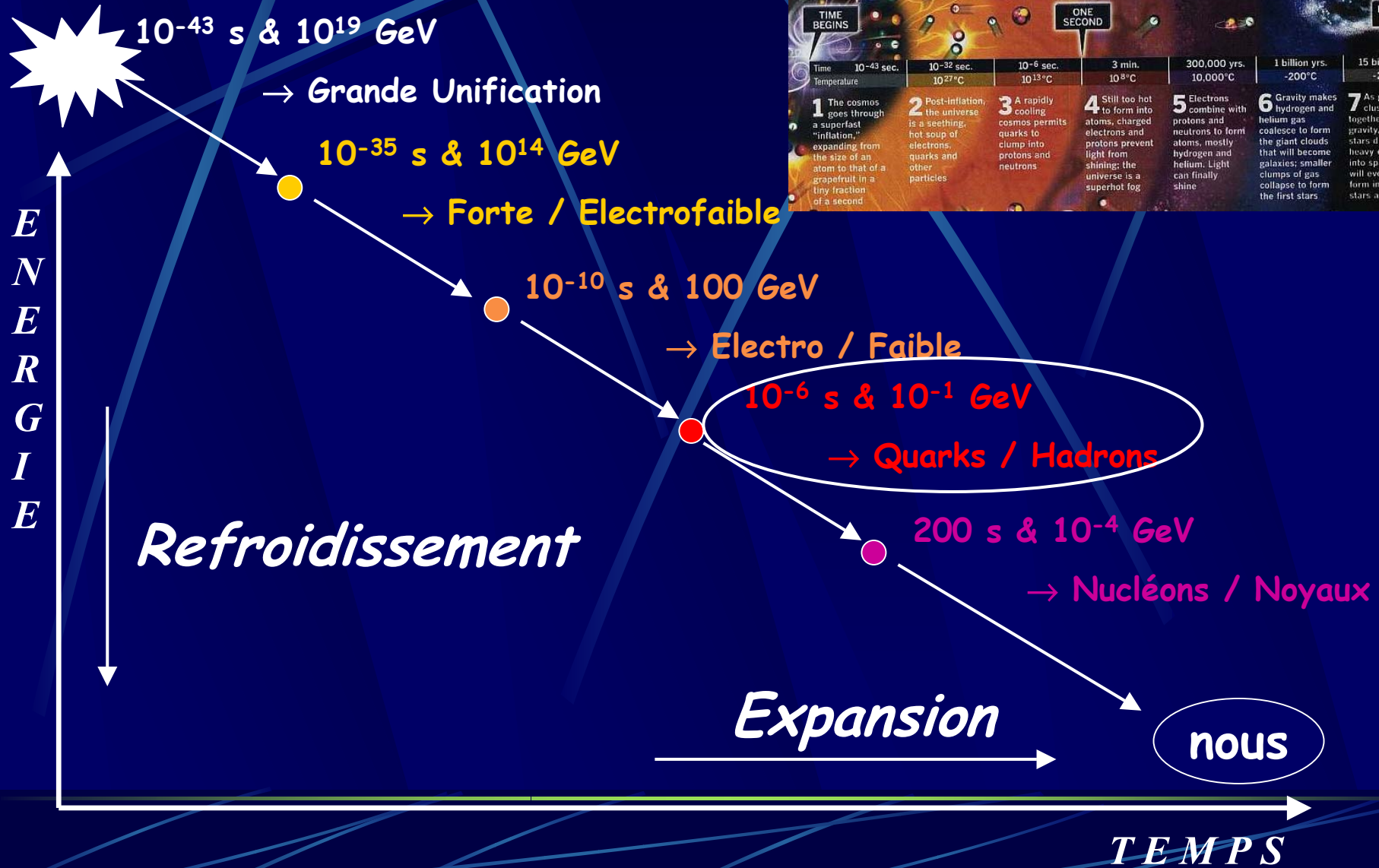
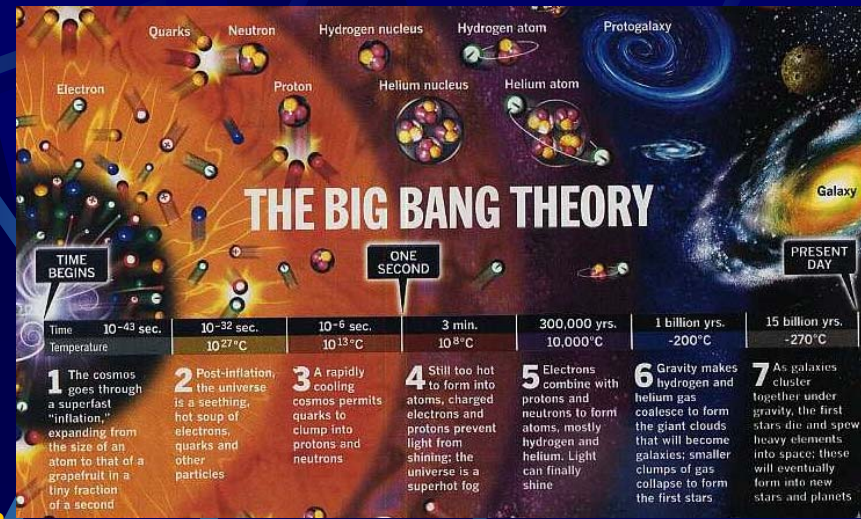
- $T_c \sim 10^{13}$ K

- ($T_{\text{soleil}} \sim 10^8$ K)

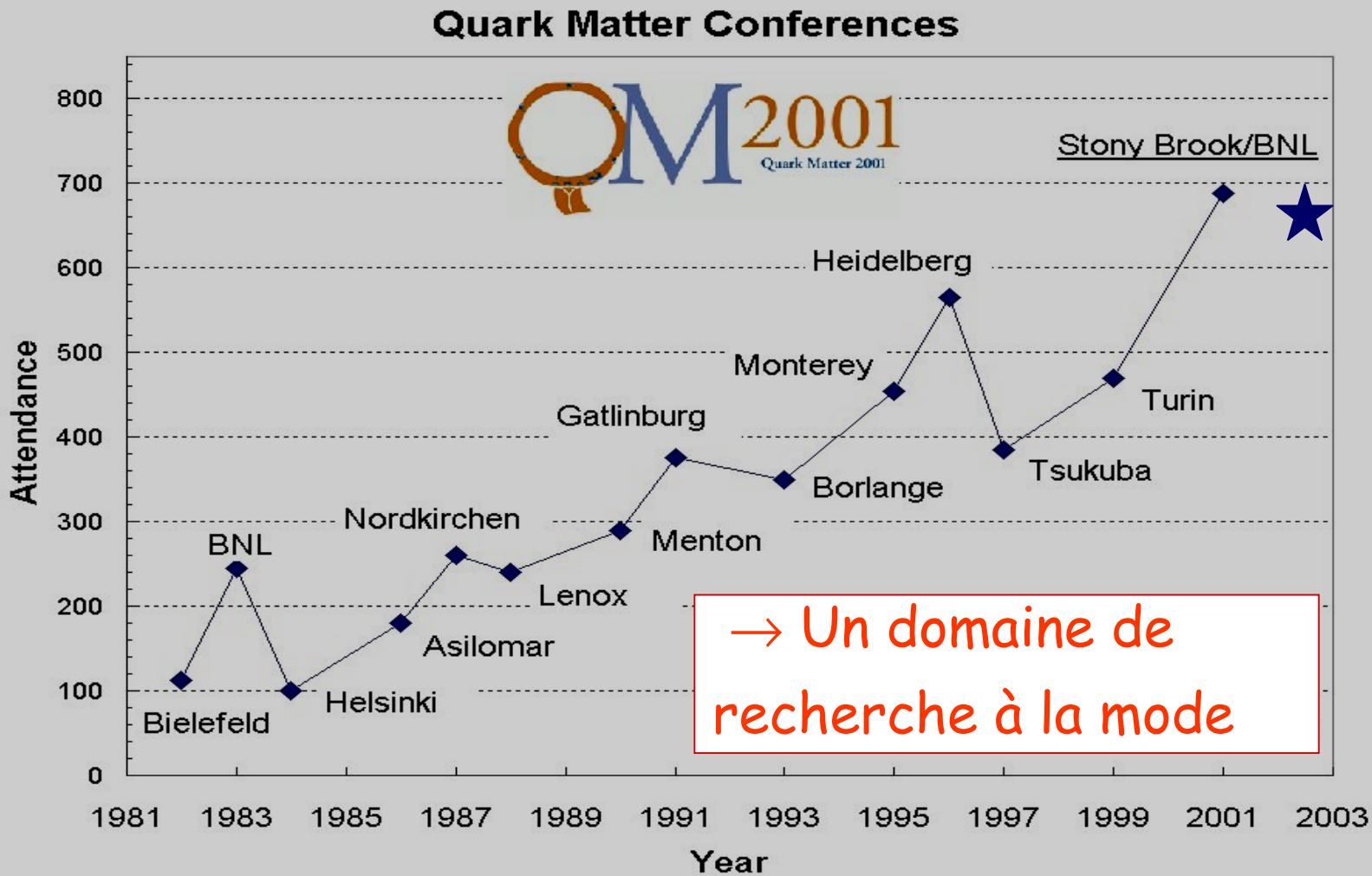
- @ $\varepsilon_c = (6 \pm 2)T_c^4 = 0,7 \pm 0,3 \text{ GeV} / \text{fm}^3$



Jalons historiques



Jalons historiques (II)



Quark Matter²⁰⁰²
Nantes

Jalons historiques (III)

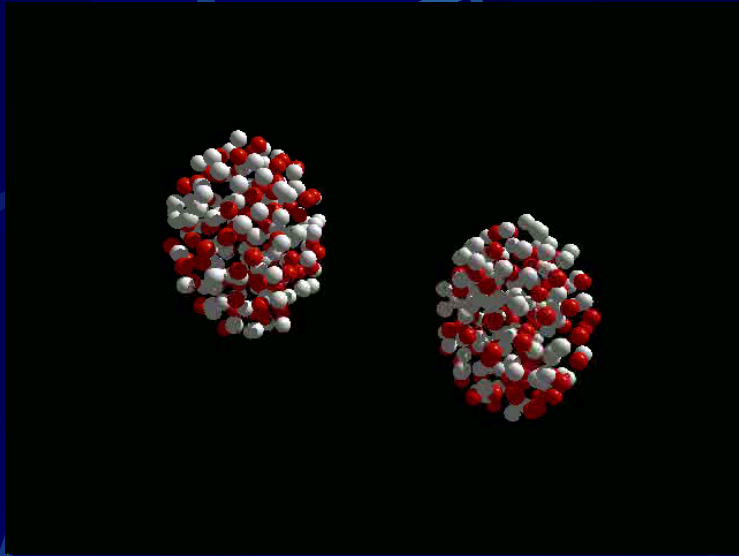
© RQMD

1986 BNL - AGS 4 GeV

1994 CERN - SPS 20 GeV

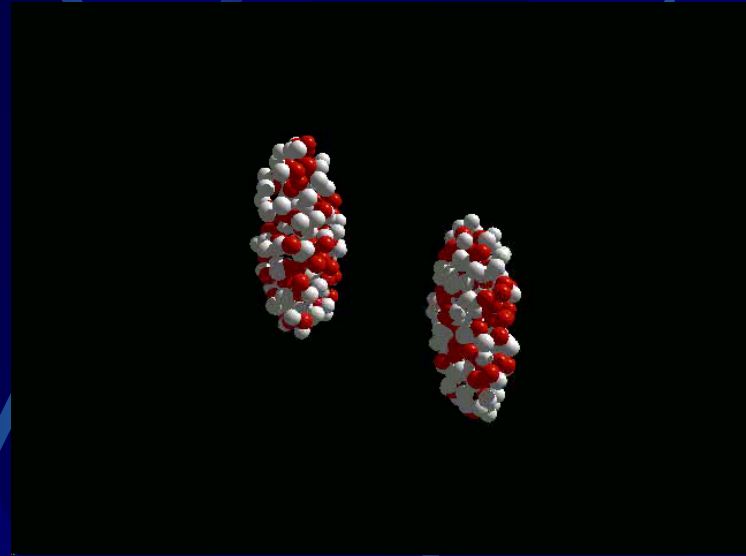
C
I
B
L
E

F
I
X
E



C
I
B
L
E

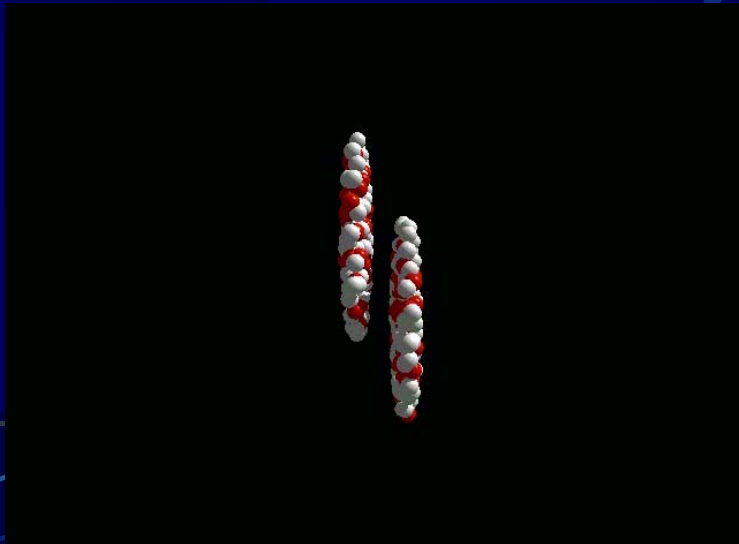
F
I
X
E



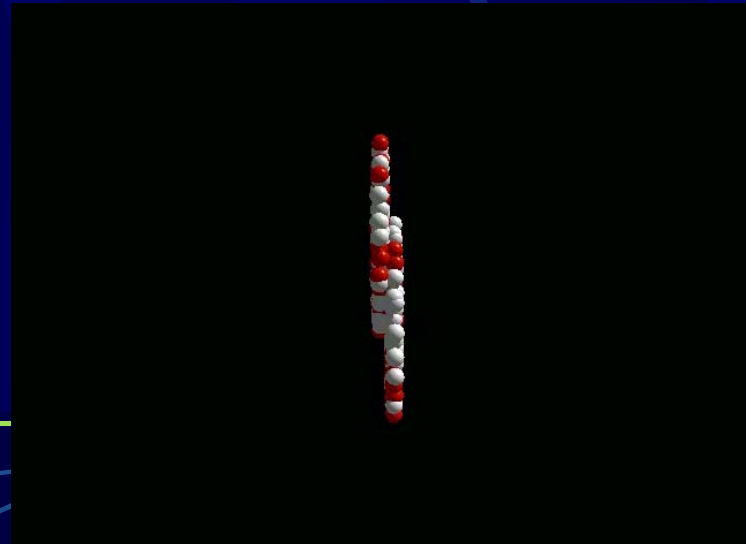
2000 BNL - RHIC 200 GeV

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



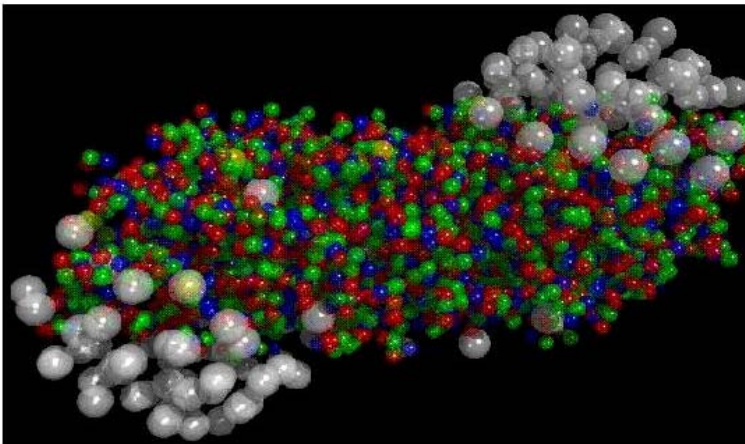
Résumé de l'épisode 2



Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
European Organization for Nuclear research
Laboratoire Européen pour la Physique des Particules
European Laboratory for Particle Physics
Europäisches 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...
- Mais le consensus n'est pas général...

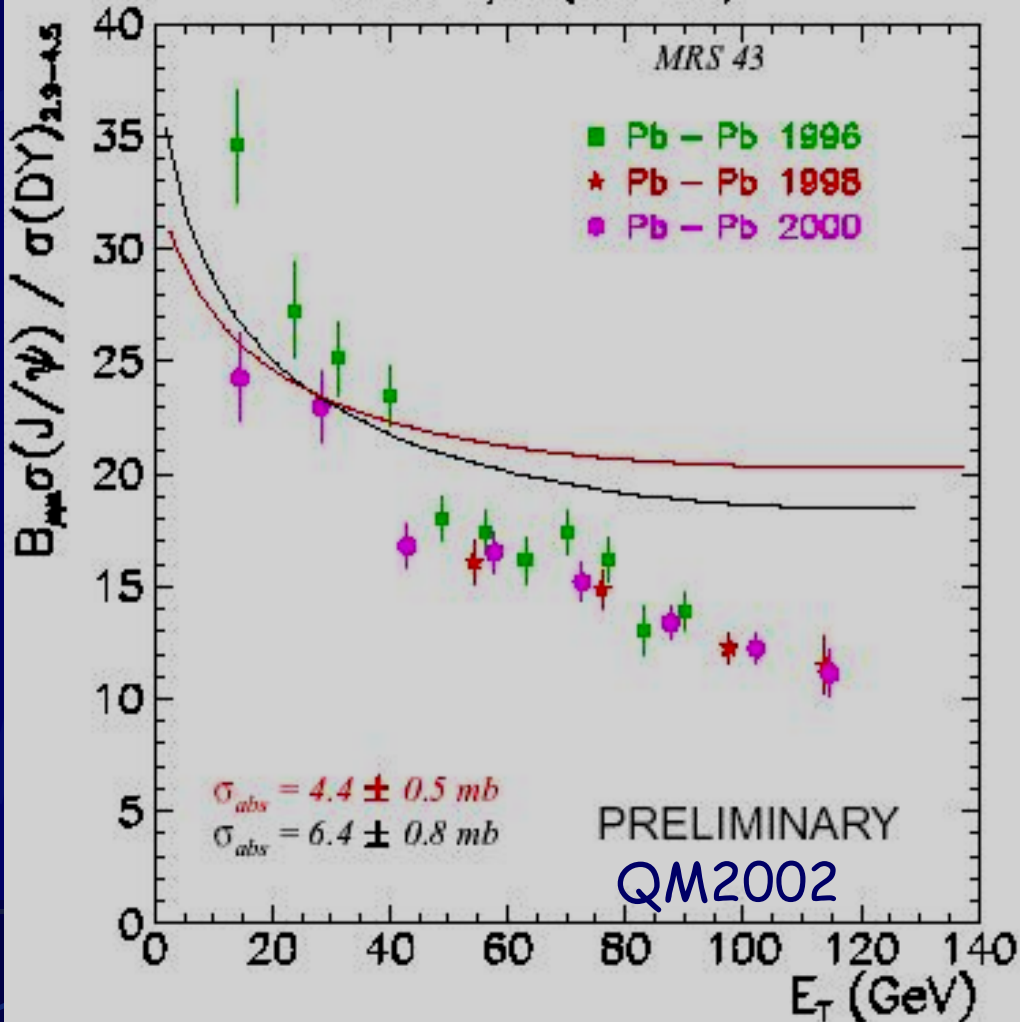
Suppression du J/ψ dans NA50



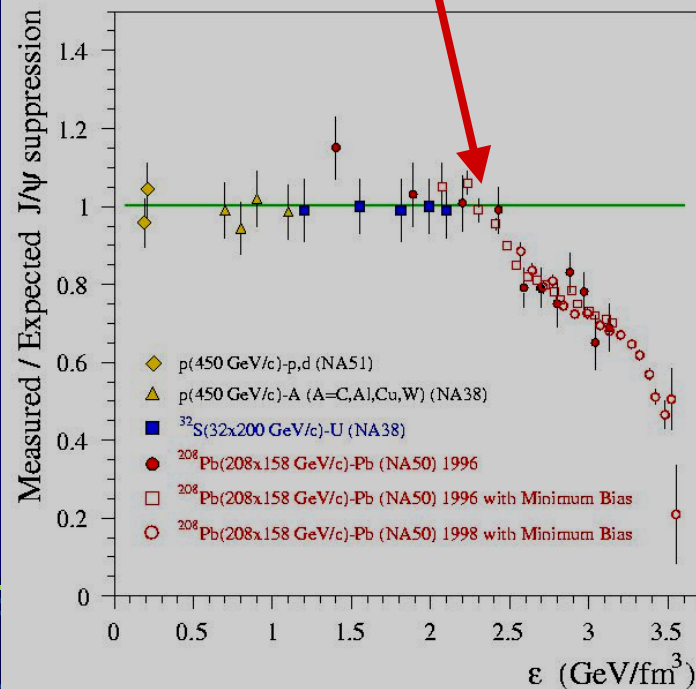
NA50 $\psi/\text{DY}(2.9-4.5)$

MRS 43

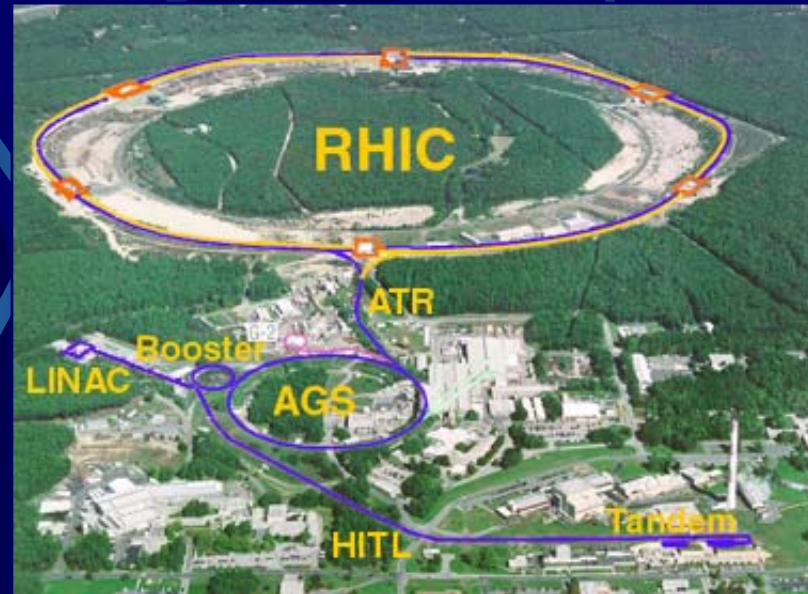
■ Pb - Pb 1996
 ★ Pb - Pb 1998
 ● Pb - Pb 2000



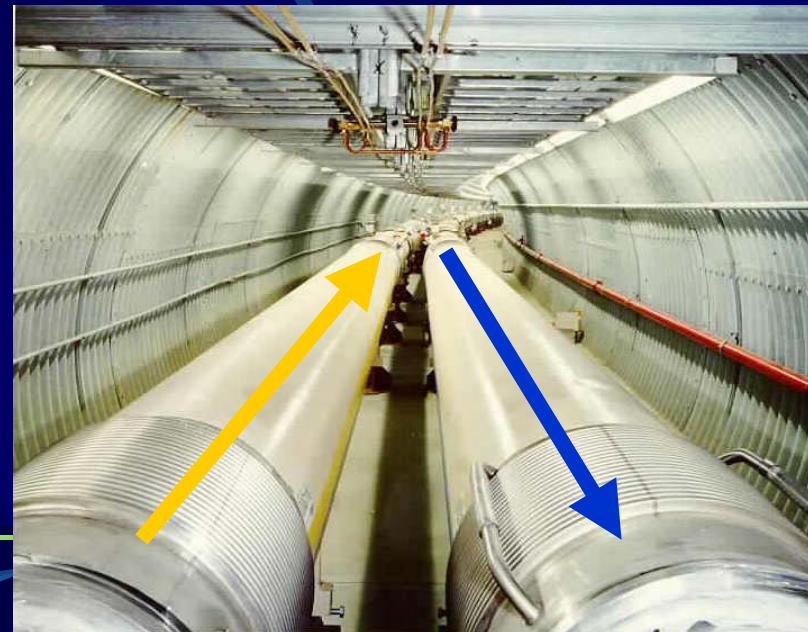
- Paires $c\bar{c}$ se dissocient dans le PQG
- J/ψ supprimés @ $\epsilon > 2,5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$



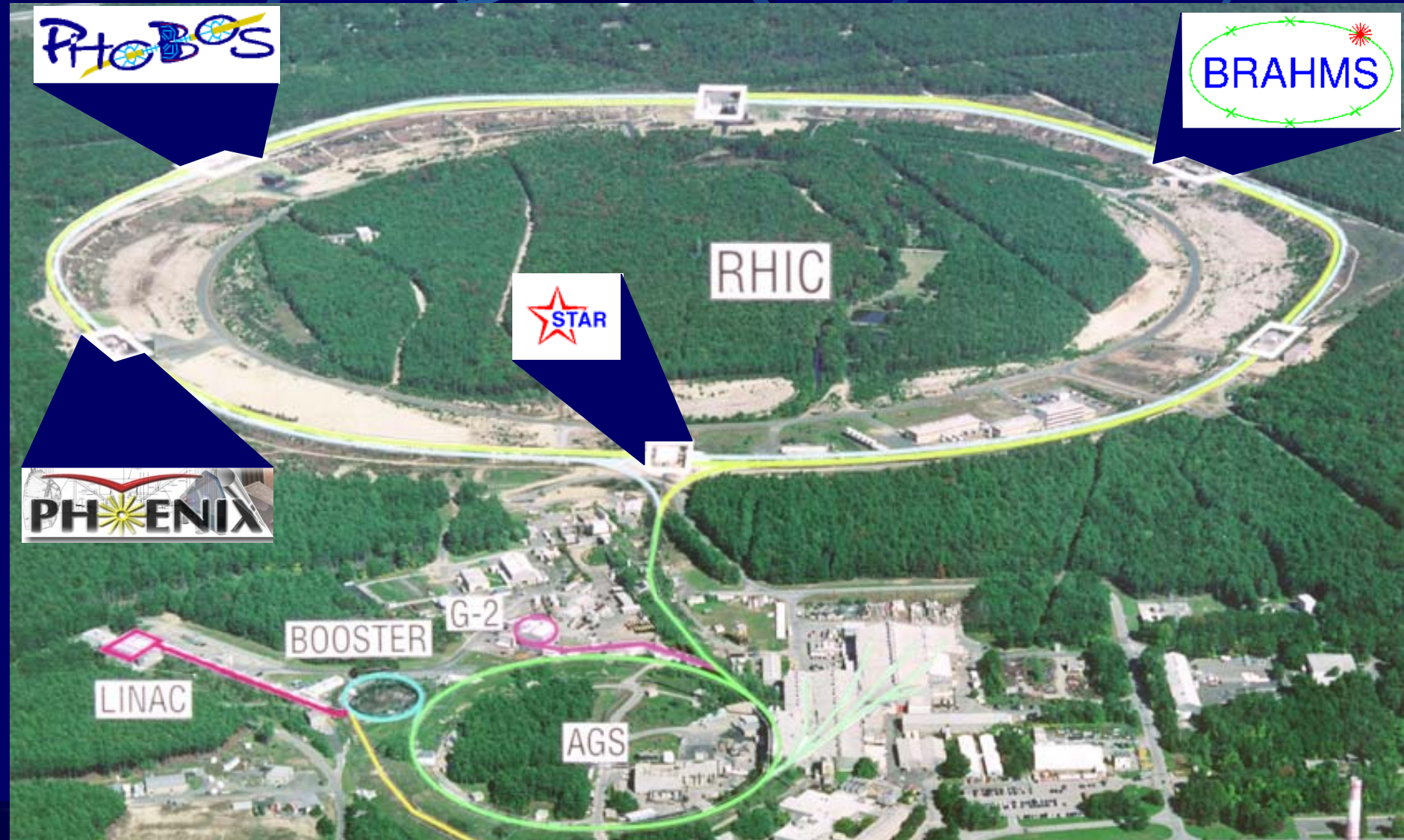
Épisode 3 : RHIC



- Relativistic Heavy Ion Collider
- 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/nucleon



Quatre expériences

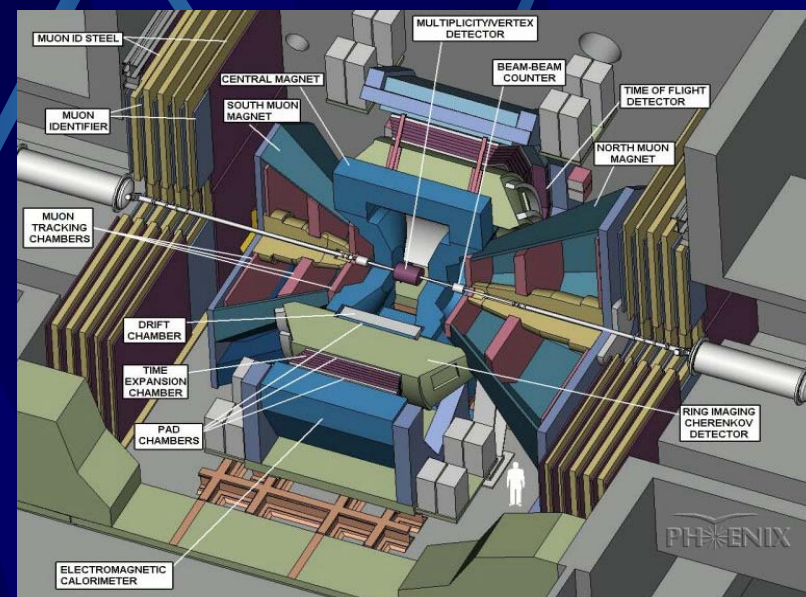
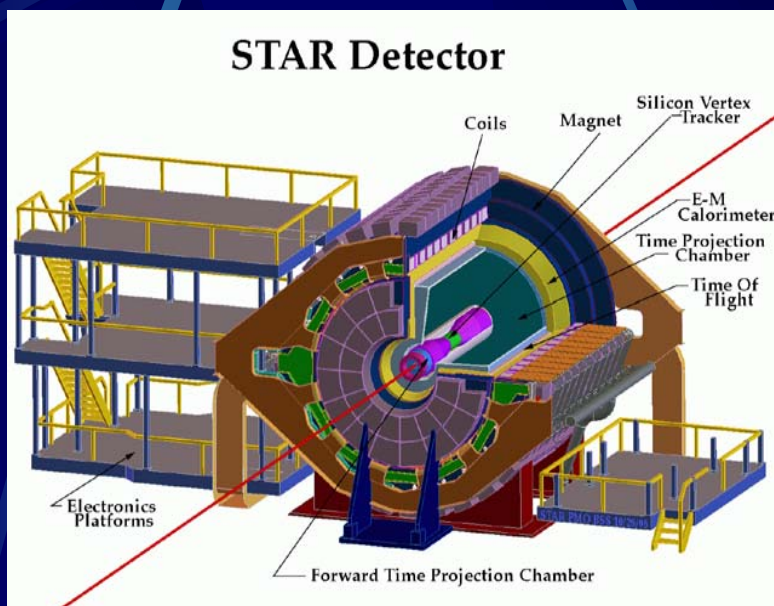


Deux grosses expériences



Une grande TPC
Si-Vertex Tracking
RICH, EM Cal, TOF

High Resolution & Rates
2 bras avant (μ) + 2 bras centraux
(TEC, RICH, EM Cal, TOF)



- **Observables hadroniques**
- **Grande acceptance, jets**
- **Event-by-Event Analyses**

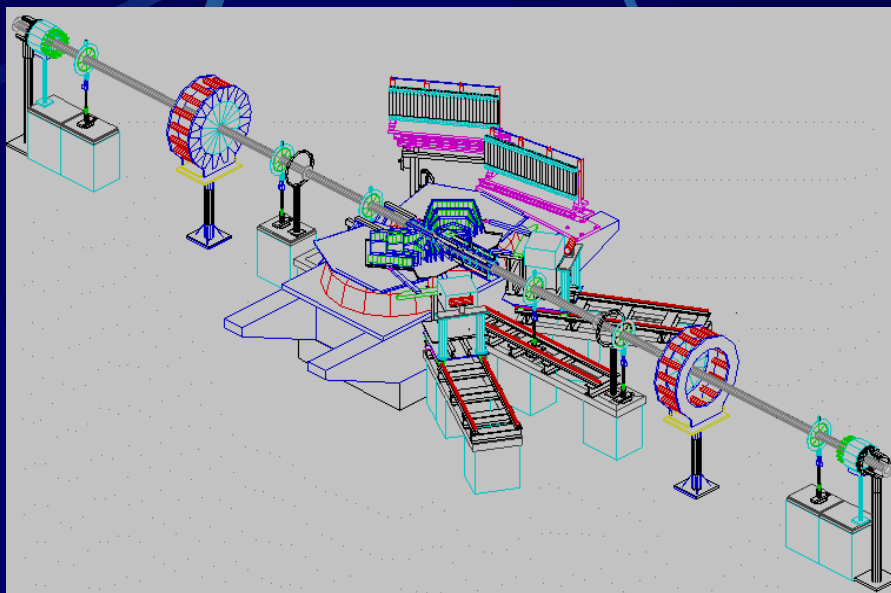
- **Muons, électrons, photons...**
- **Détection simultanée des sondes durs (PQG)**

Deux plus petites...



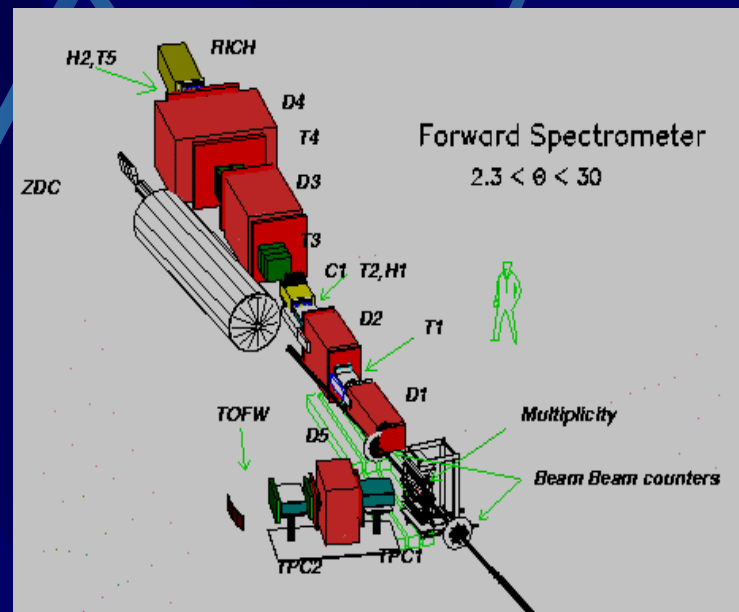
Silicium : sur « 4π »

+ spectromètre « de table »



- Correlations de particules
- Multiplicité sur η [-5.4 ; 5.4]

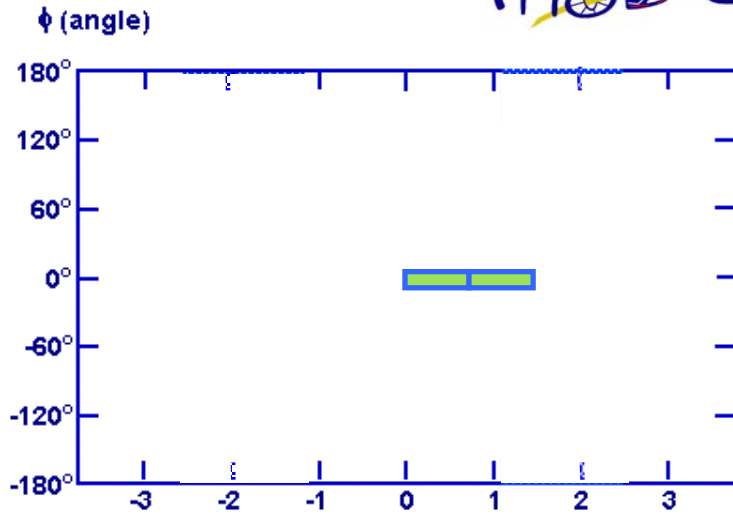
2 spectromètres
ajustables



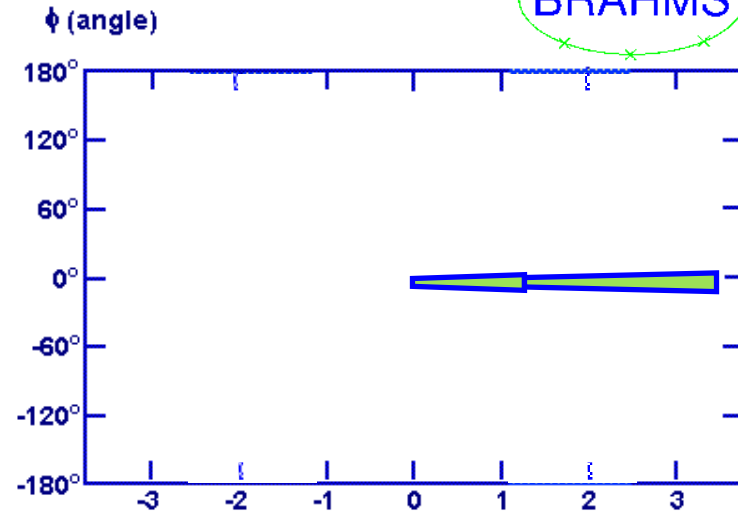
- Bonne identification sur
couverture rapidité [0,4]

Acceptances des particules identifiées

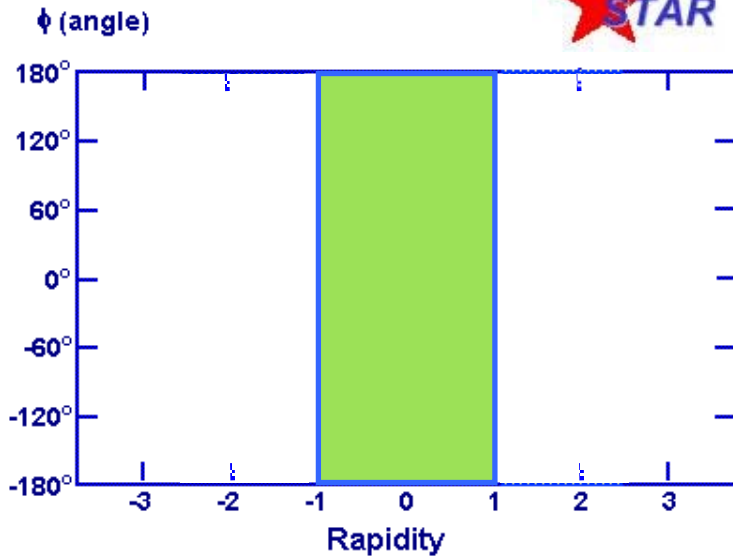
PHOBOS



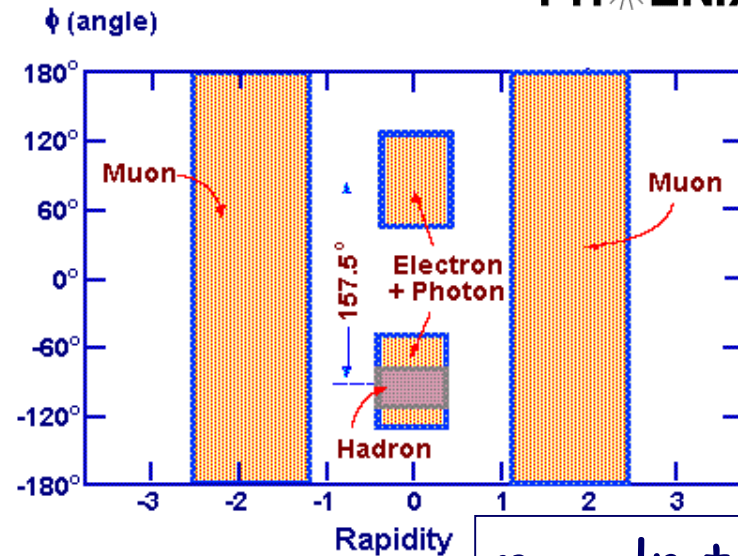
BRAHMS



STAR



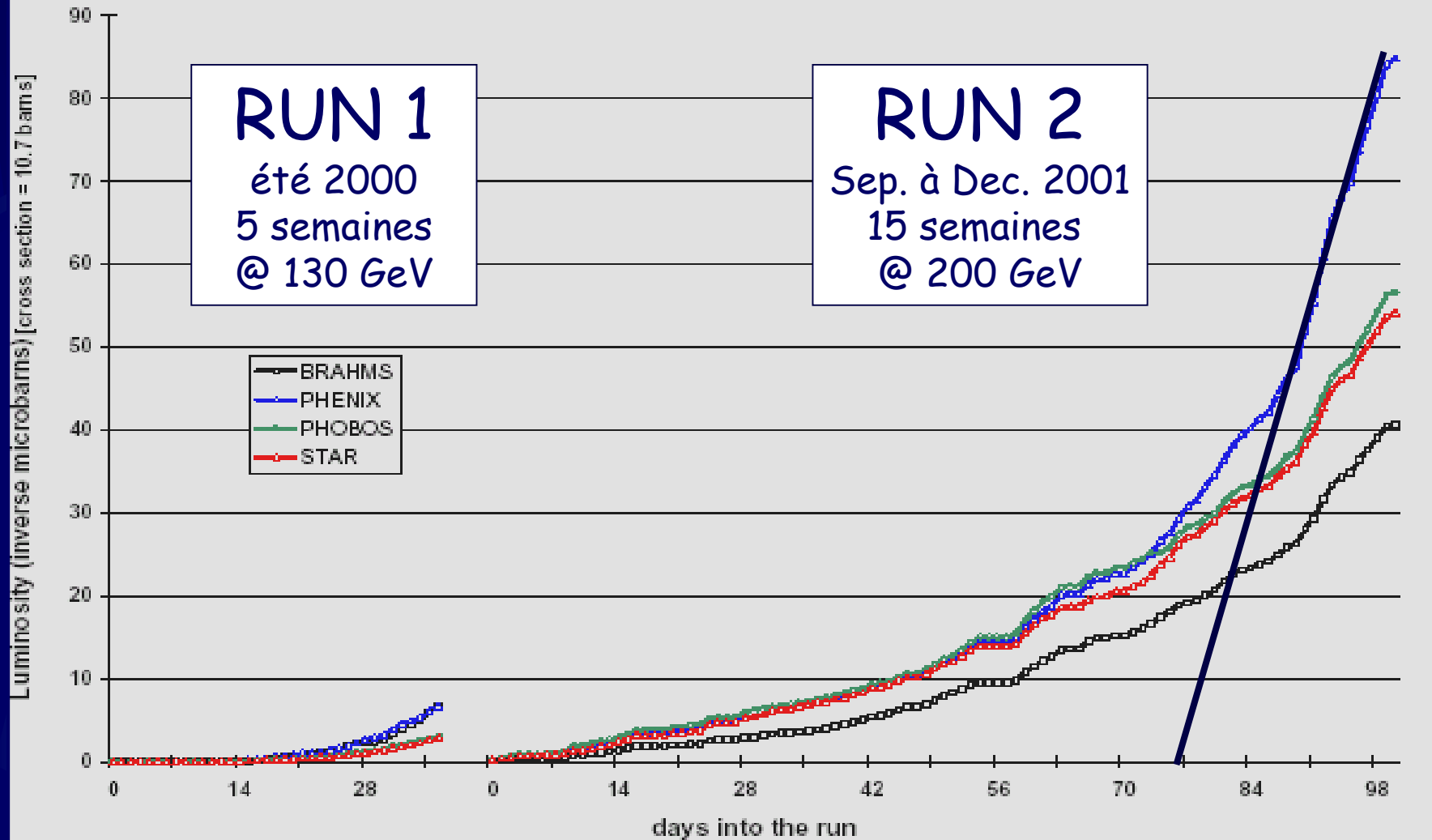
PHENIX



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

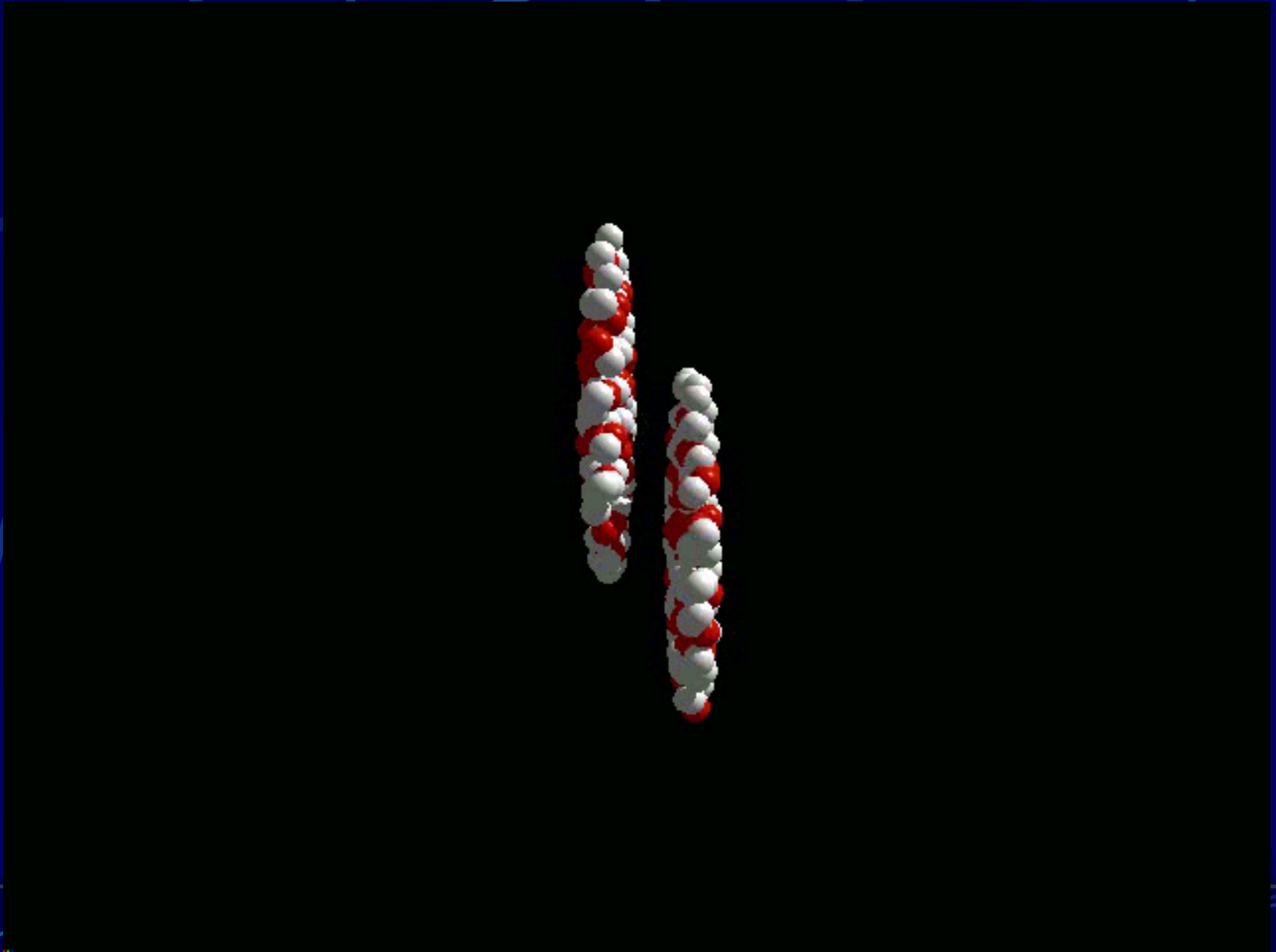
Luminosité Or + Or

RHIC Experiment Integrated Luminosity – Gold Ion Operations
fy'00, & fy01-02

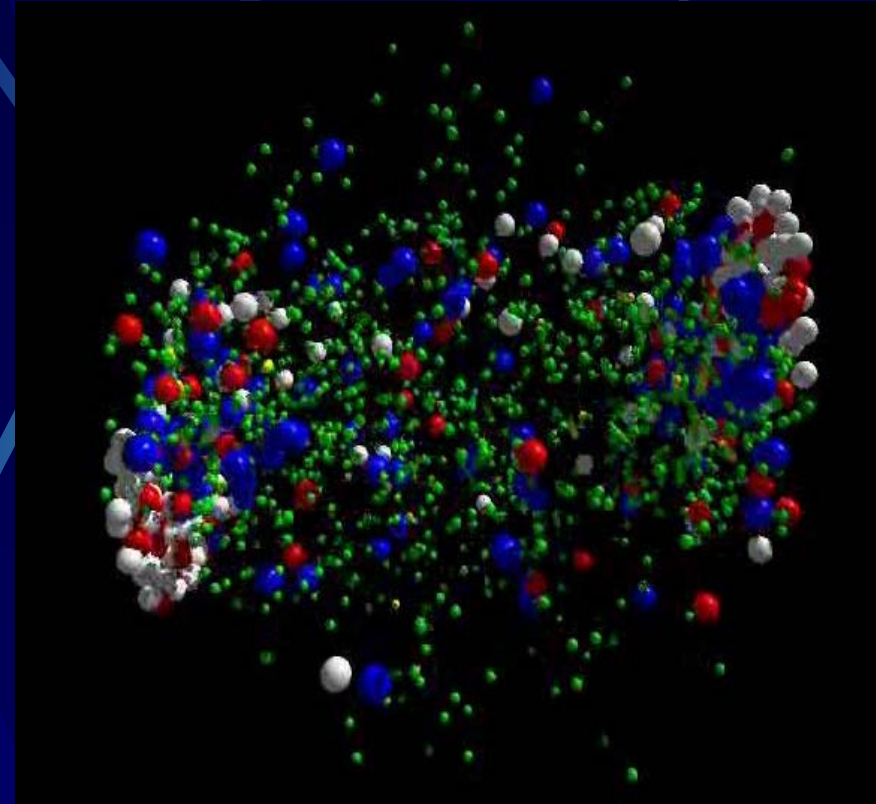
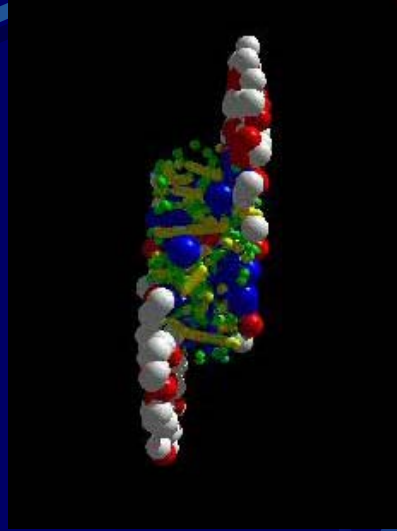
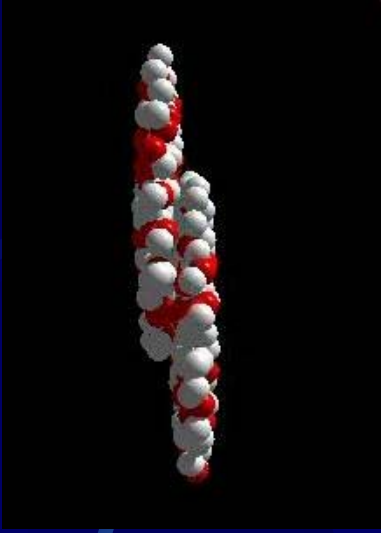


+1 jour or+or @ 19.6 GeV / 5 semaines p+p @ 200 GeV

Collisions Or+Or @ 200 GeV/nucléon

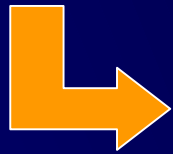


Le petit bang...



I. Conditions initiales

- Transparence baryonique
- Densité d'énergie




II. Premiers instants

- Jet quenching
- Plasma ?

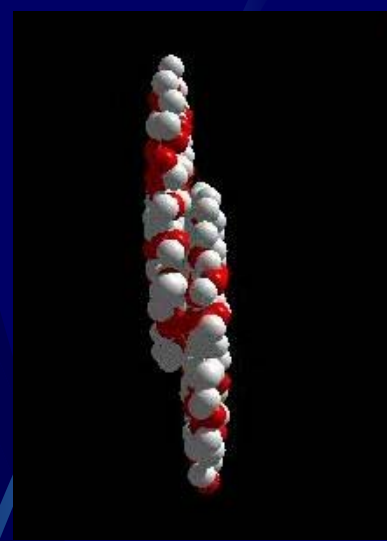
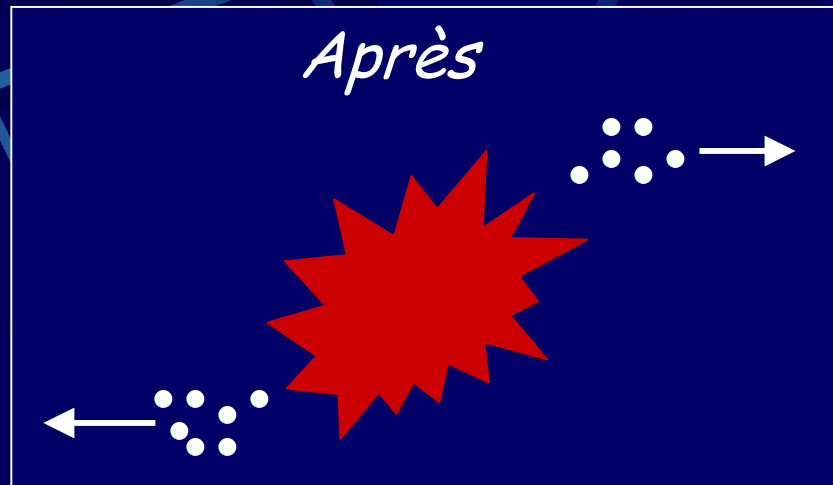
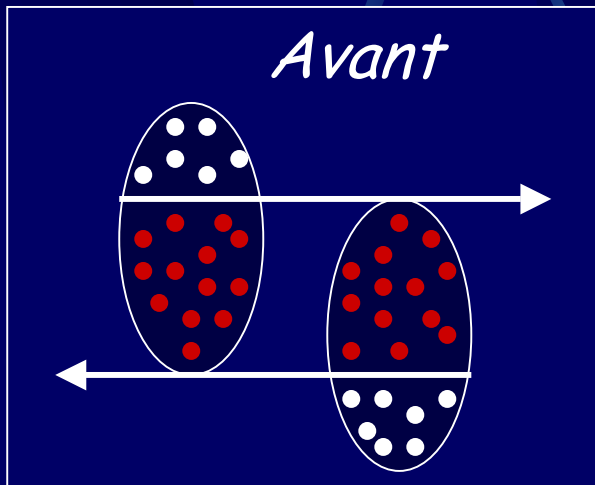


III. Hadronisation & refroidissement

Avertissements

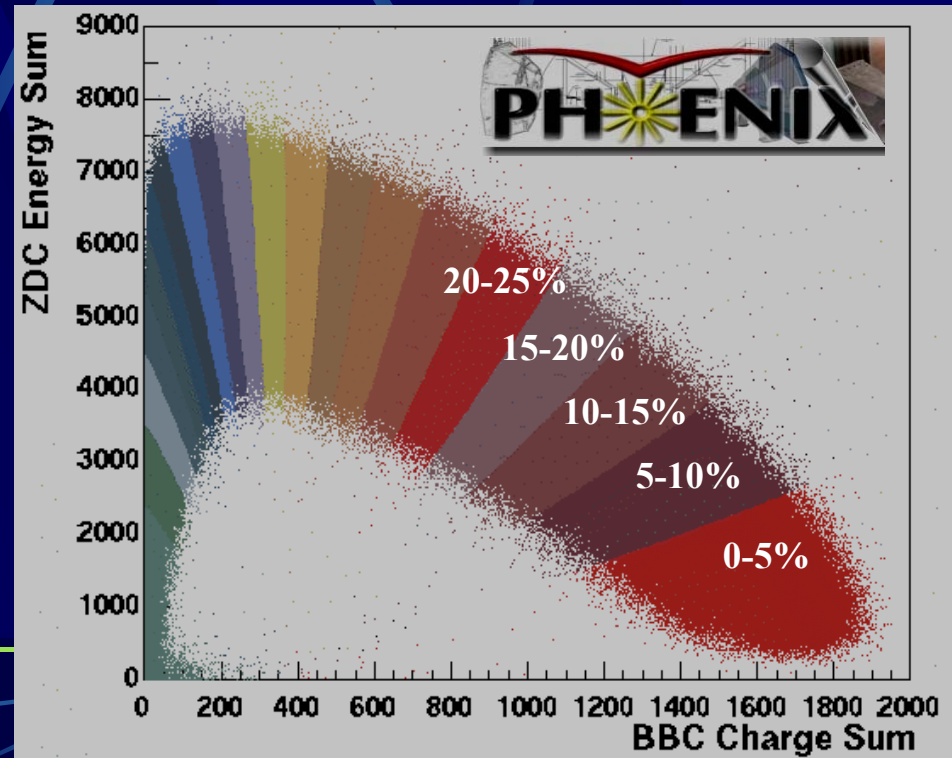
- Une (petite) sélection de résultats...
- La plupart des résultats sont préliminaires !
 - Signalés par le logo : 
- Votre séminariste est biaisé !
 - Biais personnels (je ne comprends pas tout...)
 - d'expérimentateur (surtout pas la théorie)
 - de rhicard et de phenixien...
- Mais j'ai essayé de faire de mon mieux...
 - Insister sur les premiers indices du PQG...

Déterminer la centralité

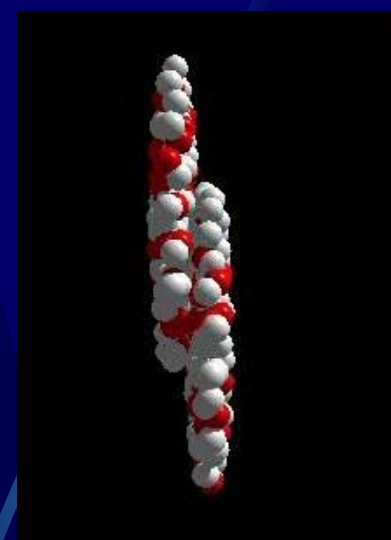


- Les spectateurs (neutres) sont mesurés par 2 calorimètres à zéro degré (communs aux 4 exp.)
- Les participants redistribuent leur énergie dans tous les autres détecteurs, par exemple les Beam-Beam Counters (PHENIX)

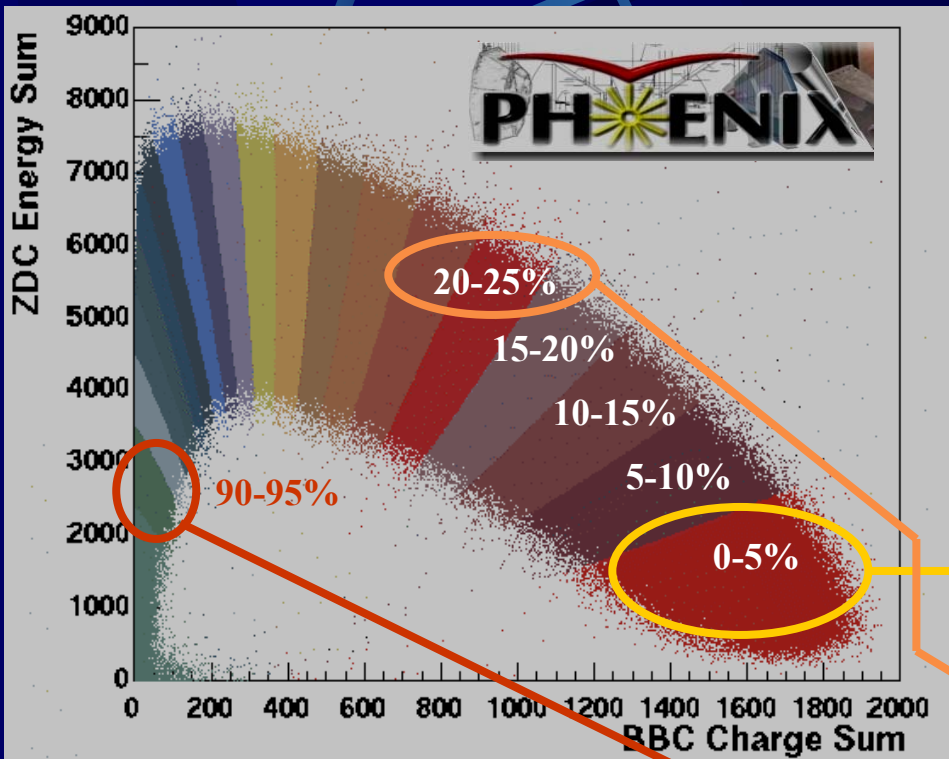
➤ Classes de centralités



Déterminer les nombres de participants et de collisions



Paramètre d'impact



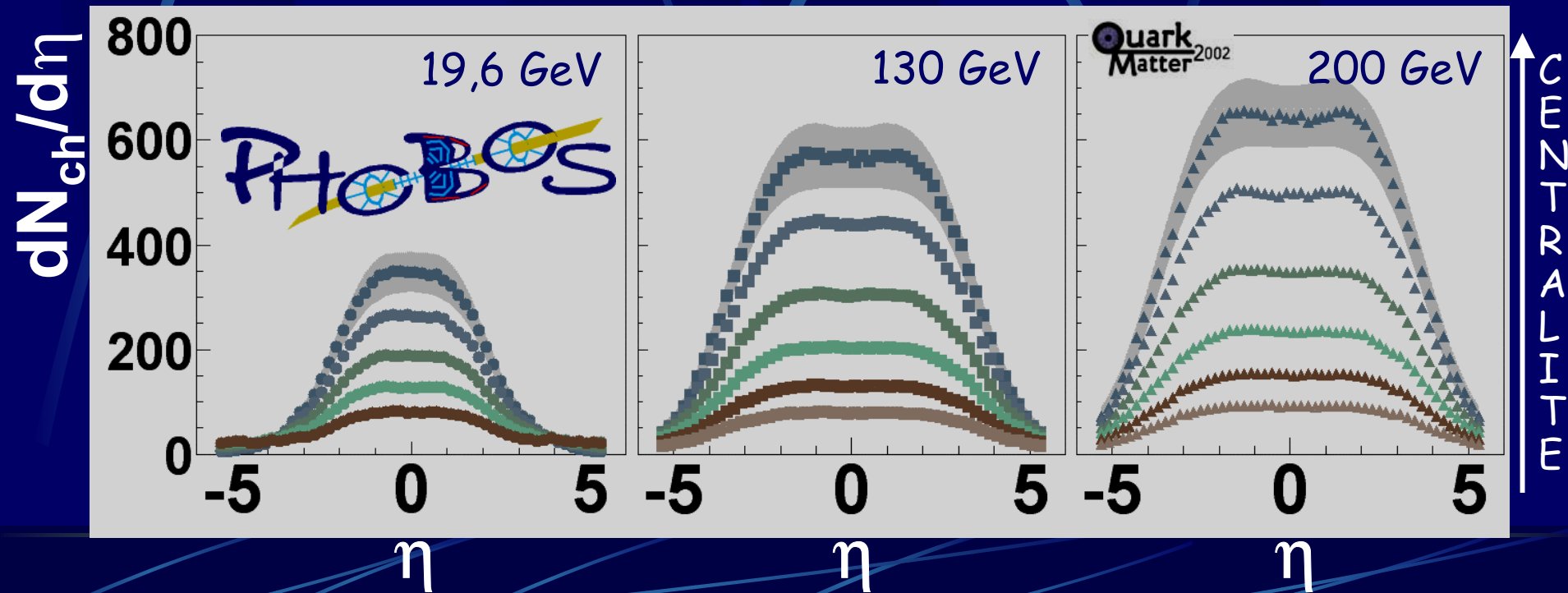
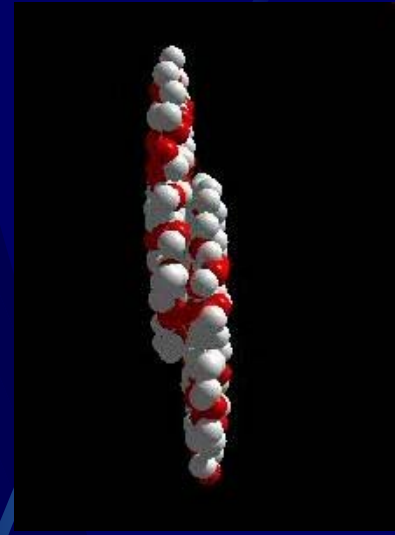
B (fm)	N_{part}	N_{coll}
2,3 $\pm 0,9$	353 ± 19	1091 ± 102
7,1 $\pm 0,5$	181 ± 16	422 ± 65
14,5 $\pm 0,3$	4.1 ± 2.5	2.8 ± 2.2

+ Modèle de Glauber (géométrie, densité nucléaire, σ_{NN} ...)

- Paramètre d'impact
- Nombre de participants
- Nombre de collisions...

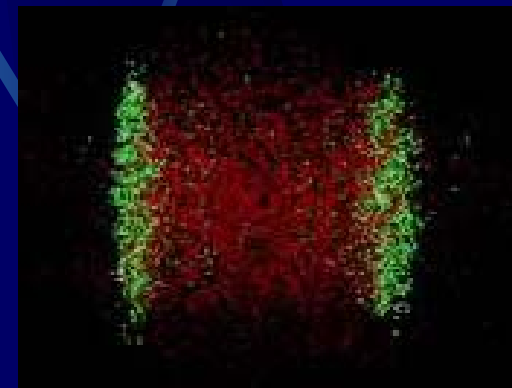
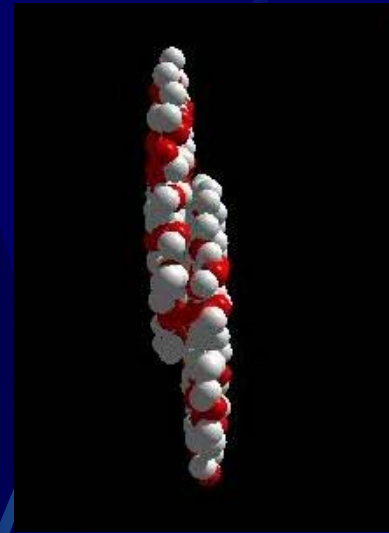
Multiplicité

- $dn_{ch}/d\eta|_{\eta=0} \rightarrow 670$
(mesurés par les 4 expériences)
- $N_{total} \sim 6000$ particules !

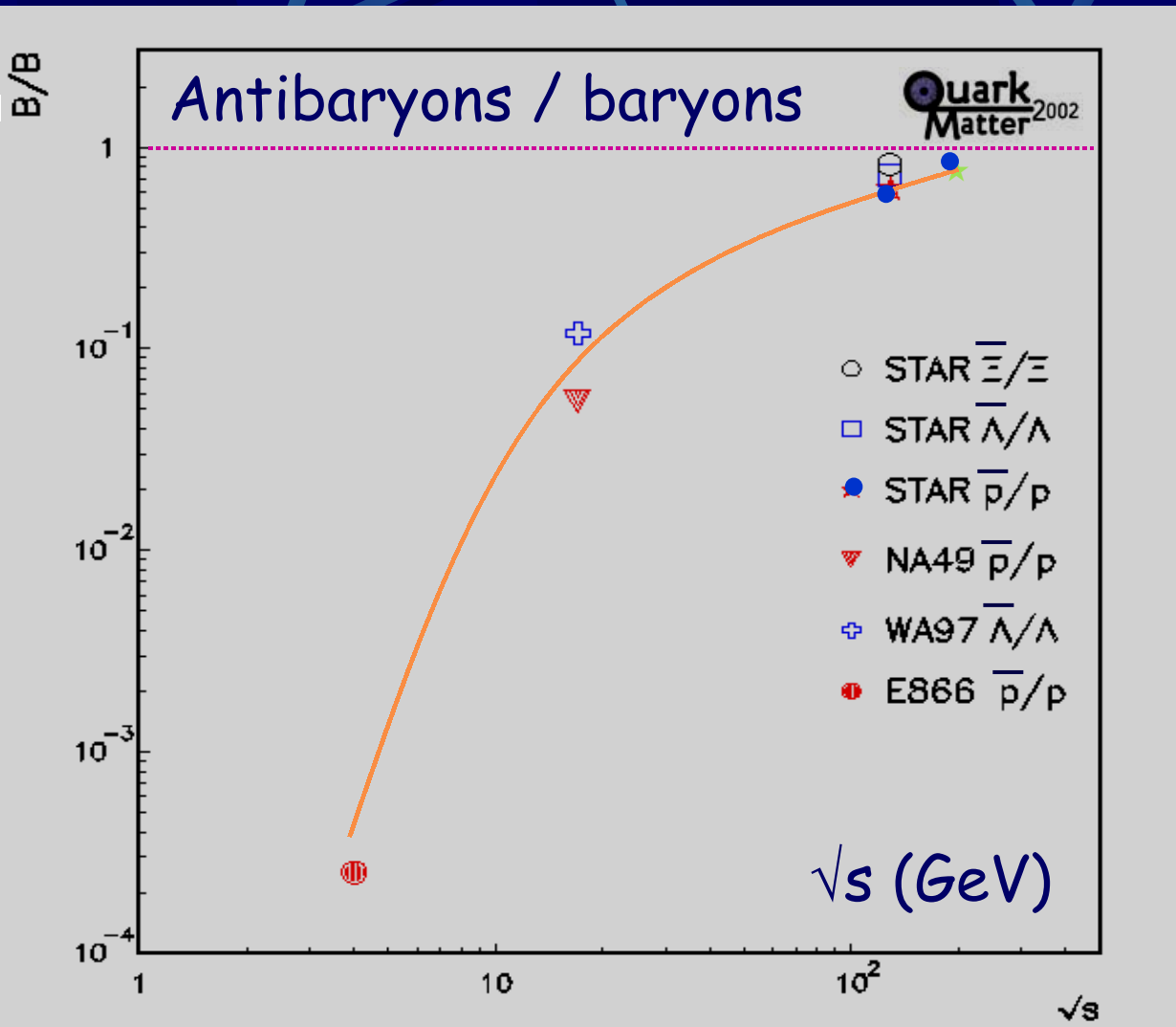


Nombre baryonique

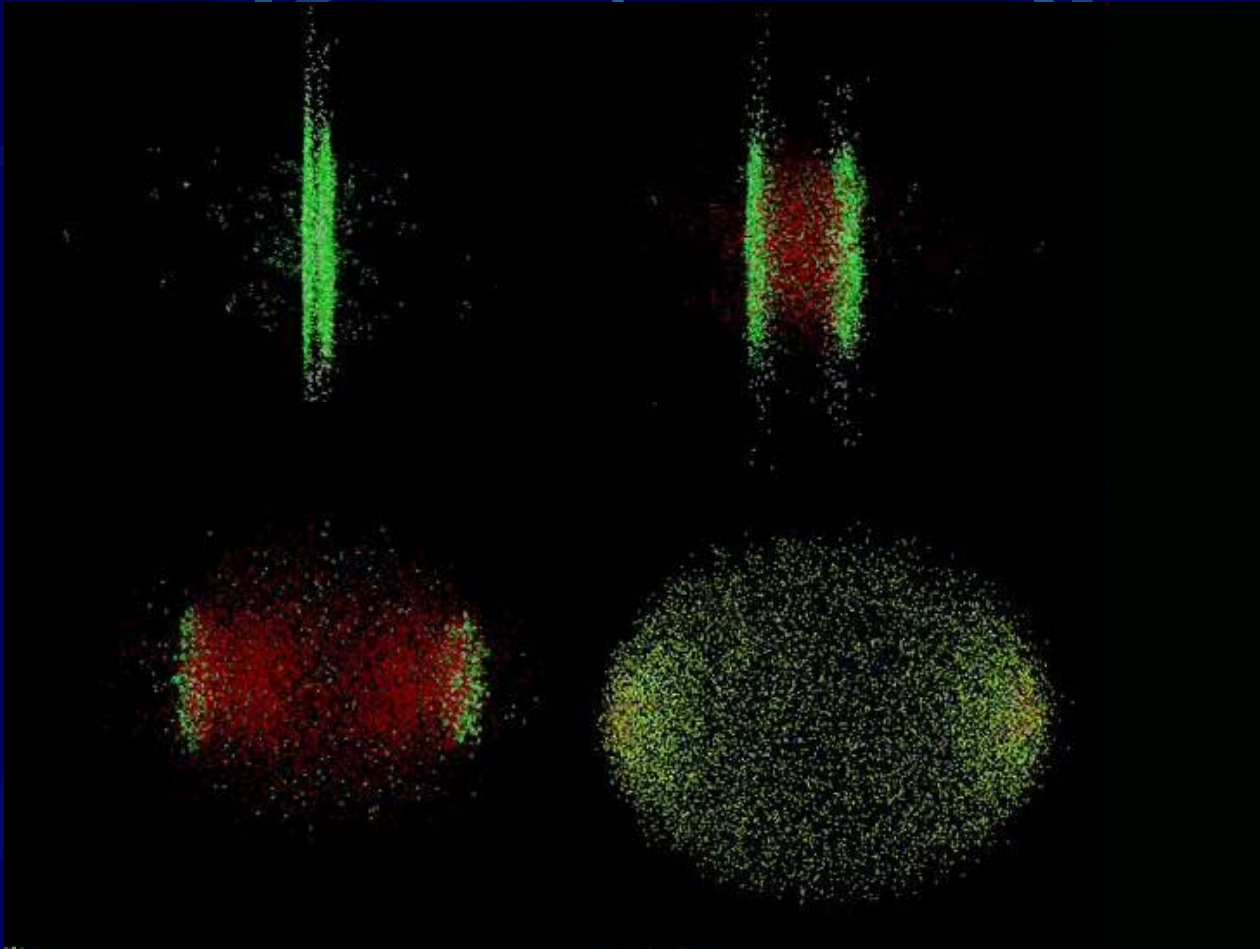
80 % des protons proviennent de paires $p+\bar{p}$



« Transparence »
baryonique $n_B \rightarrow 0$
Bons pour les
théoriciens !

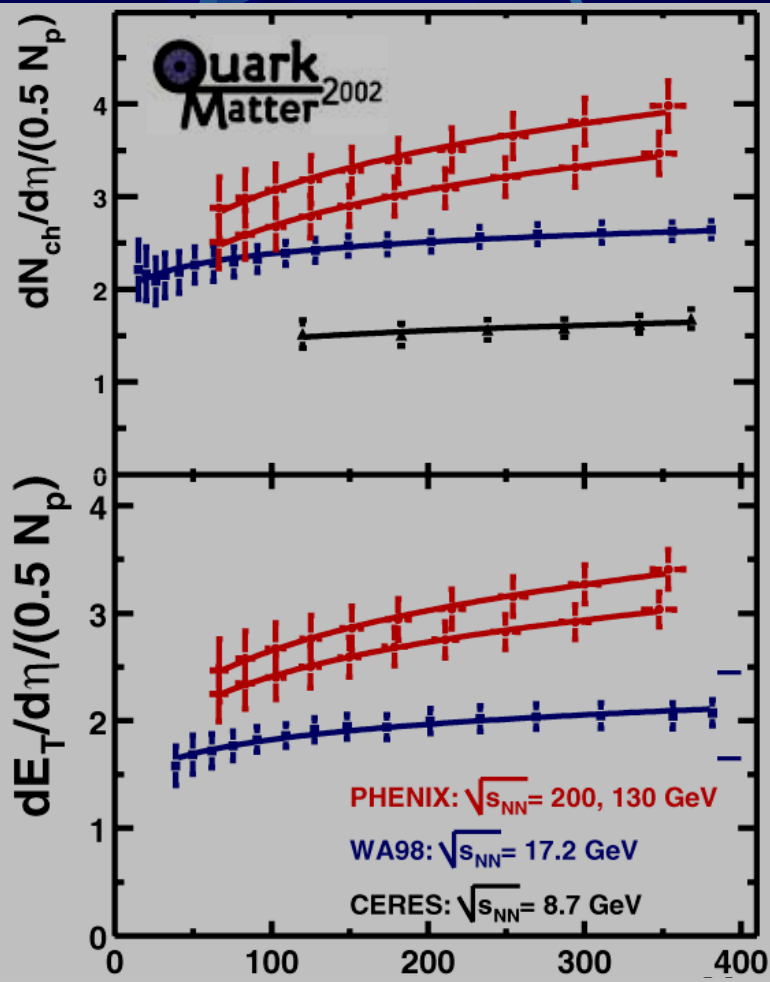
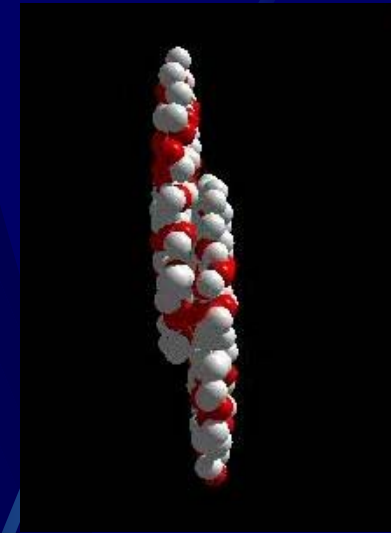


Transparence baryonique



Densité d'énergie

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



Nombre de participants

Formule de Bjorken

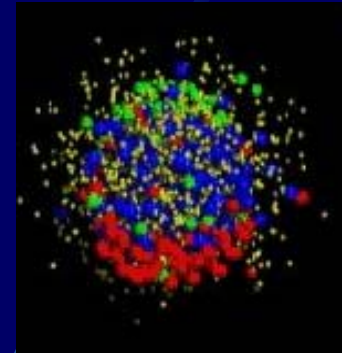
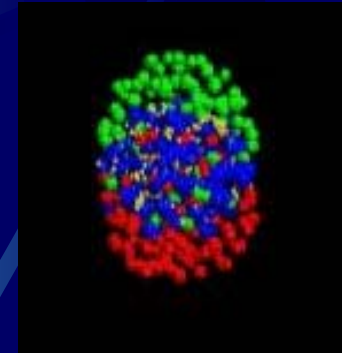
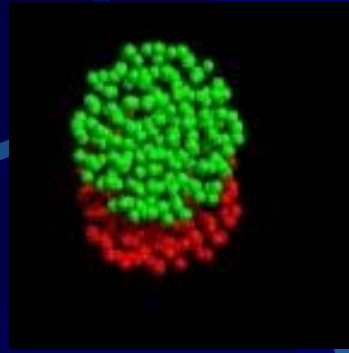
$$\varepsilon = \frac{1}{\pi R^2 \tau_0} \times \left. \frac{dE_T}{dy} \right|_{y=0}$$

τ_0 temps de formation
de 0.1 à 1 fm/c

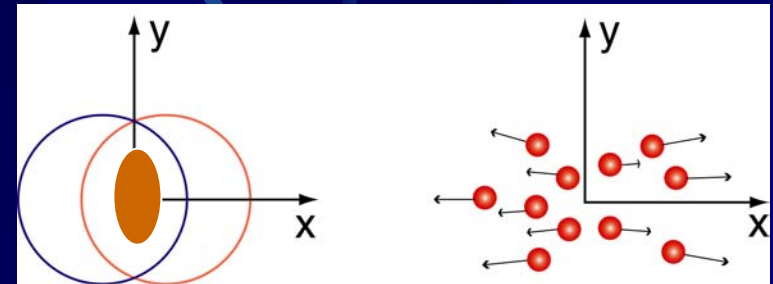
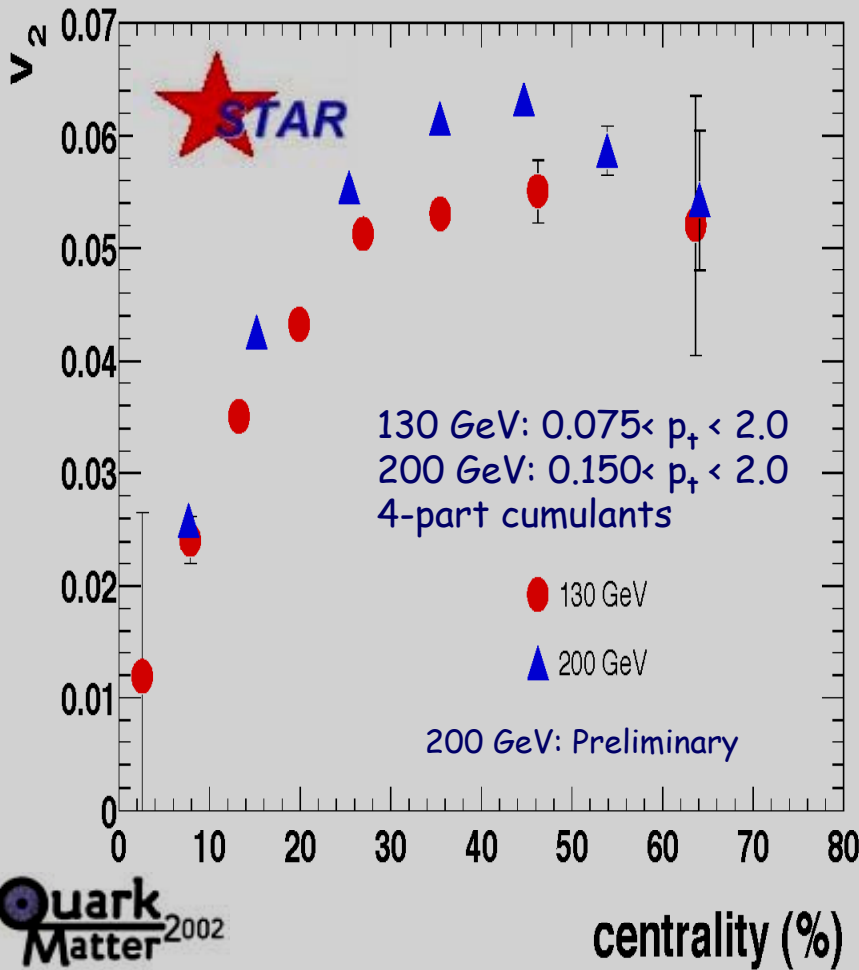
R = rayon nucléaire
1.18 $A^{1/3}$ fm

$\varepsilon > 5.5$ GeV/fm³

Flux elliptique



Gradient de pression
→ Flux anisotropique

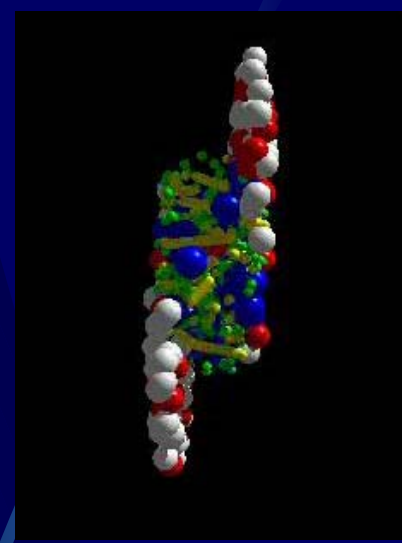


$$v_2 = \langle \cos 2\phi \rangle$$

$$\phi = \text{atan} \frac{p_y}{p_x}$$

Les premiers instants

- Plasma or not plasma ?
- 3 sondes durs :
 - Photons directs ?
 - Aperçu au SPS ? Bientôt à RHIC ?
 - Suppression des quarkonia ?
 - Vu au SPS, bientôt à RHIC ?
 - Jet quenching ?
 - Pas assez d'énergie au SPS, vu à RHIC !



Jet quenching ?

● Grandes impulsions transverses

- Particules produites dans des processus durs (calculables) et sensibles au milieu traversé

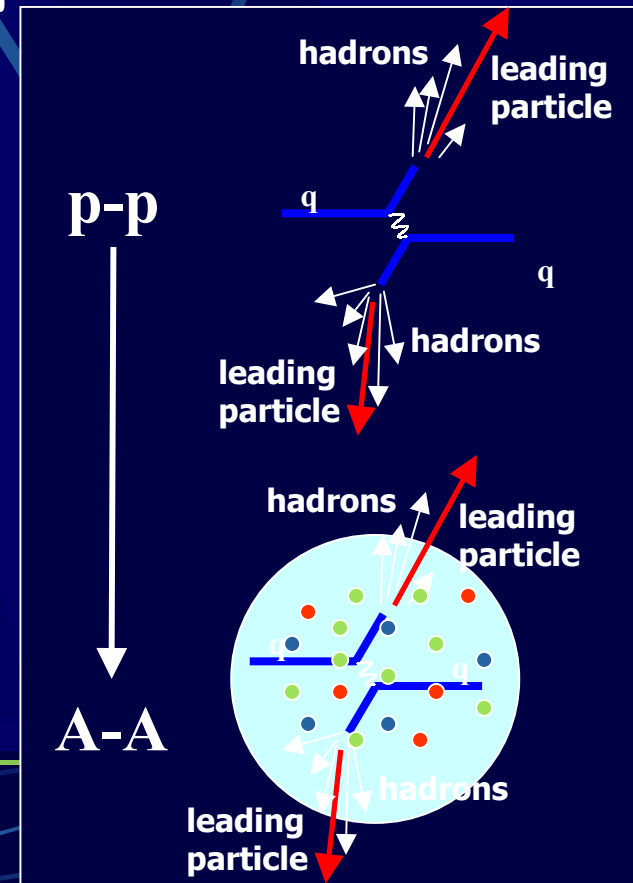
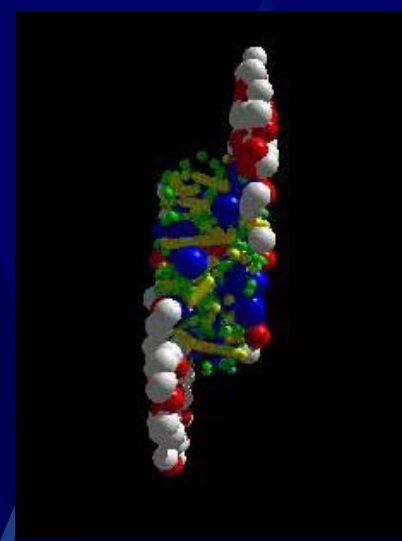
- $p_{\perp} > 2 \text{ GeV}$ de fragmentation

« leading particles »

- Comparer (or+or) avec (p+p)

x nombre de collisions (Glauber)

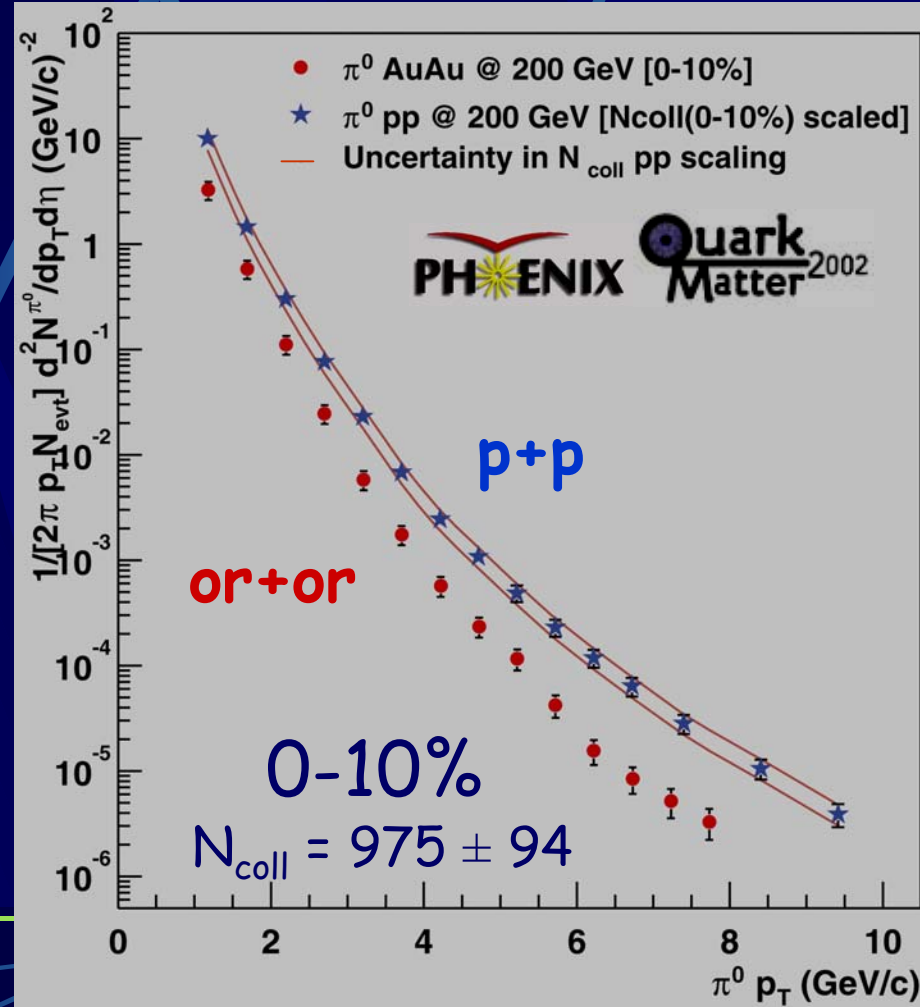
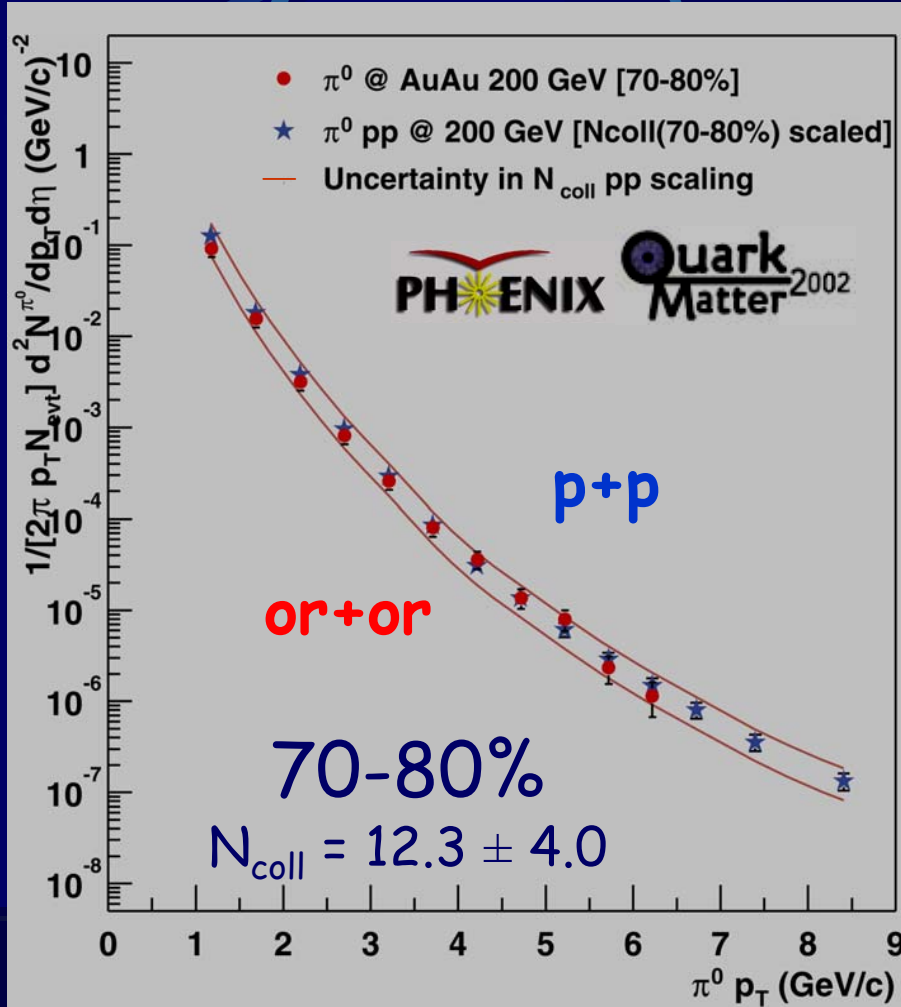
$$R_{AA} = \frac{d^2N^{AuAu}/dydp_T}{d^2N^{pp}/dydp_T \times \langle N_{coll} \rangle}$$



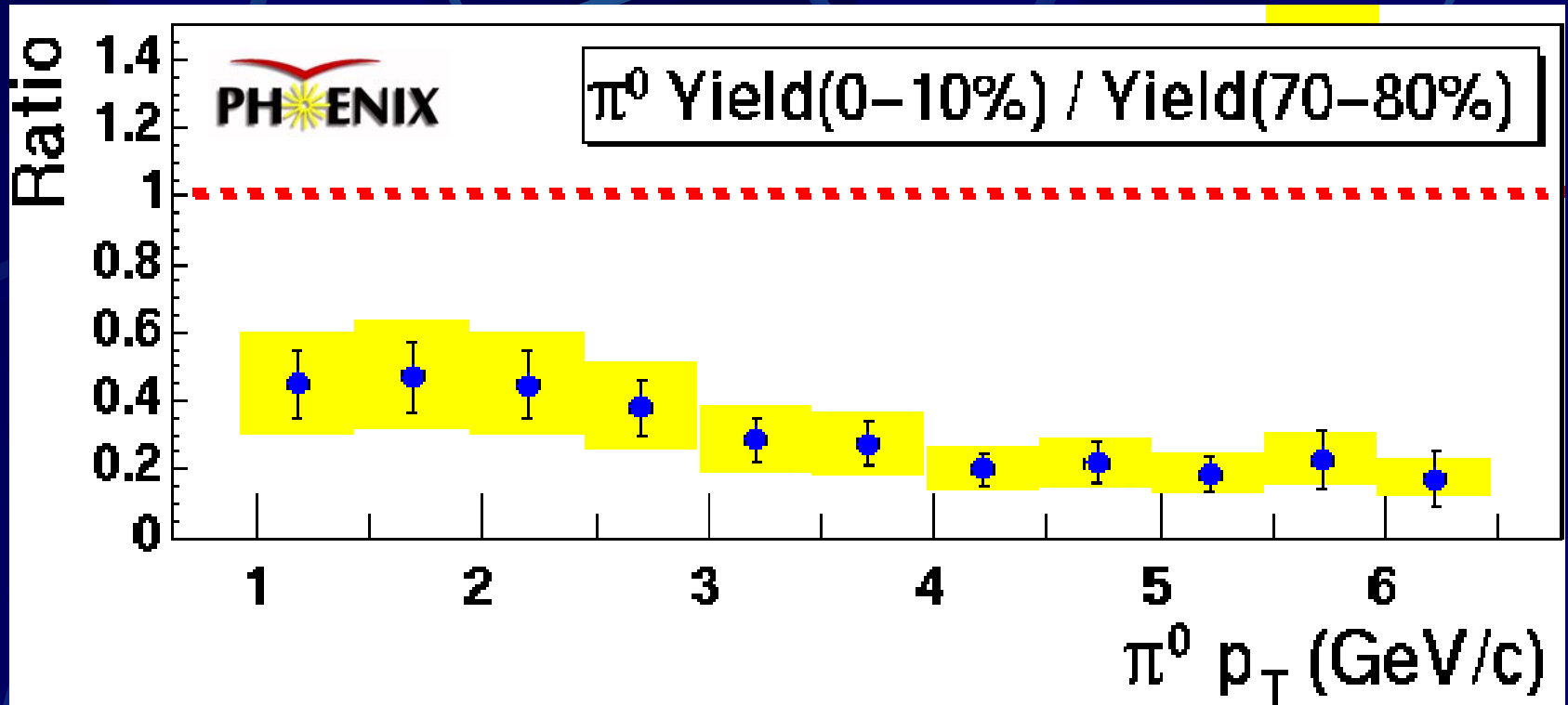
Spectre de π^0

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

Fortement supprimés
 en collisions centrales !



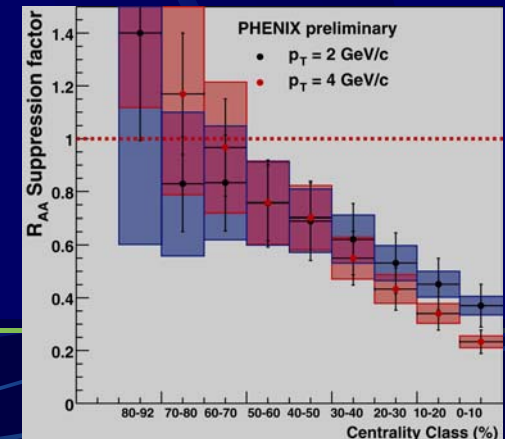
Spectre de π^0 vs centralité



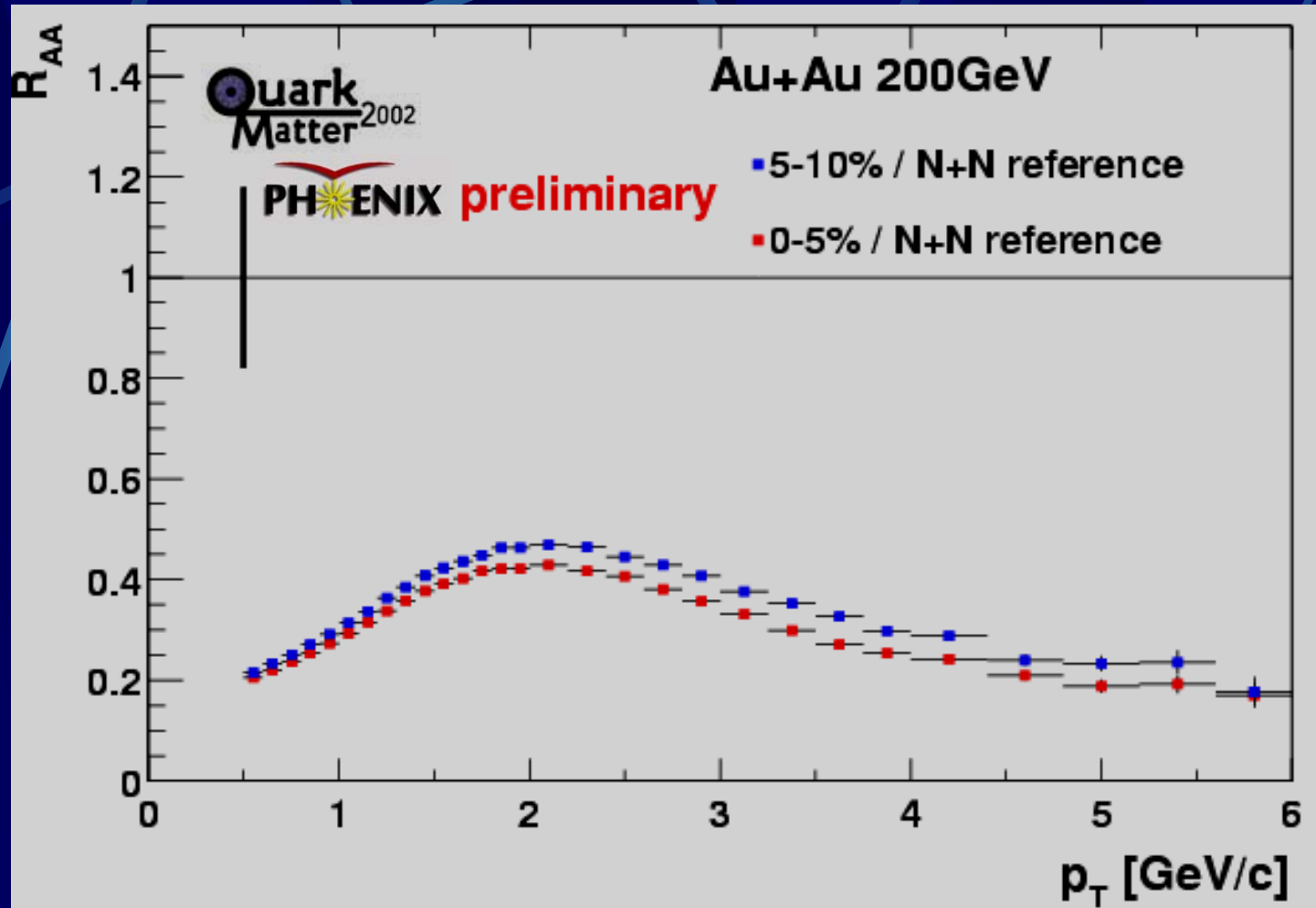
- **Suppression graduelle**

- Avec la centralité...
- Plus forte à grand p_T

- **Pas d'effet de seuil...**



Spectre de hadrons chargés



- Référence p+p déduite de la mesure des π^0
- Même comportement ! Jet Quenching !

Comparaisons expérimentales

Suppression des π^0

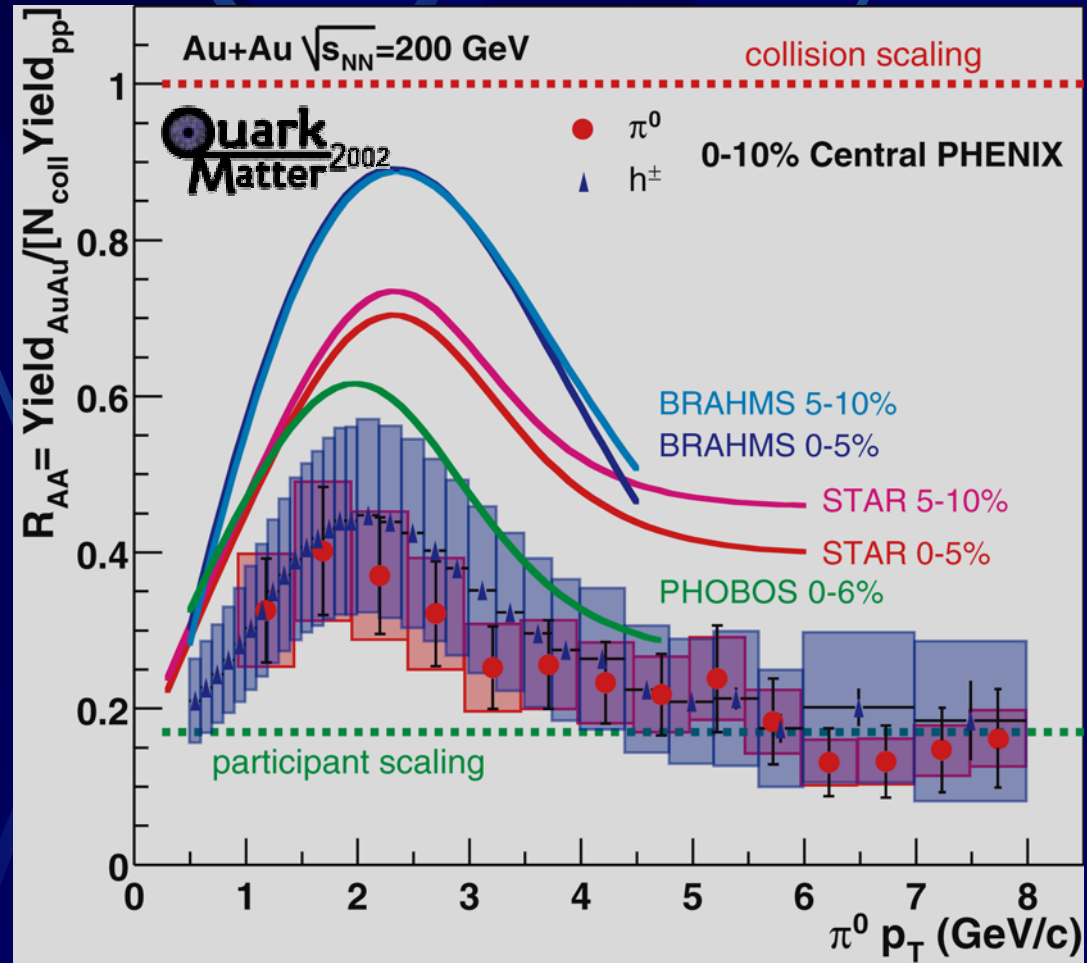
Facteur 6 @ 6 GeV

Suppression des
hadrons chargés

- Accord avec π^0
- dans PHENIX...

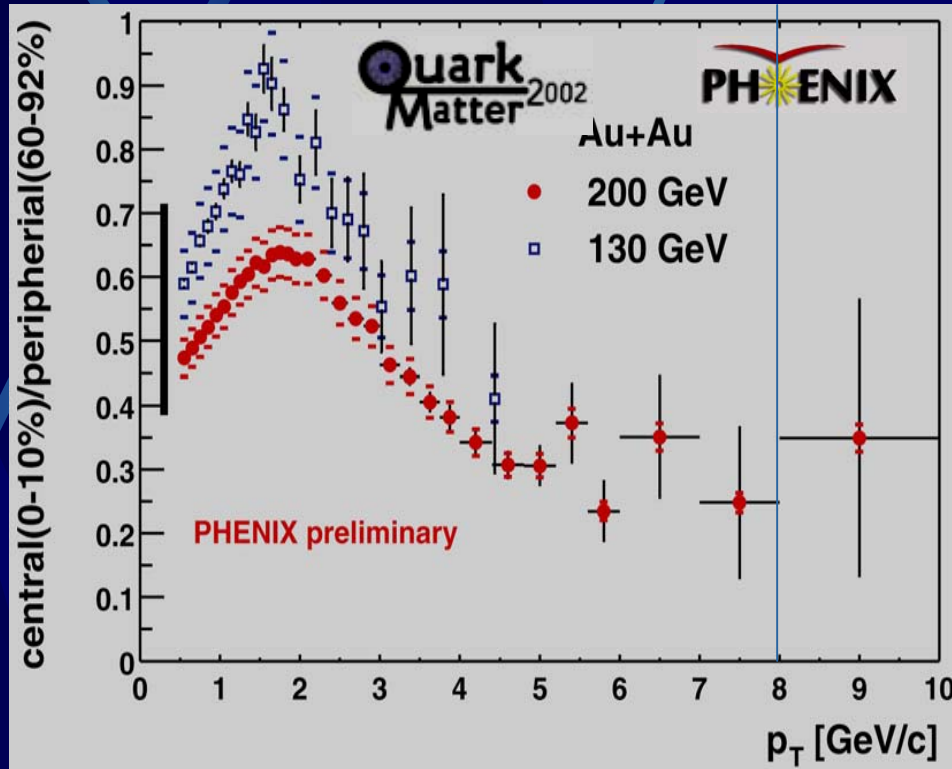
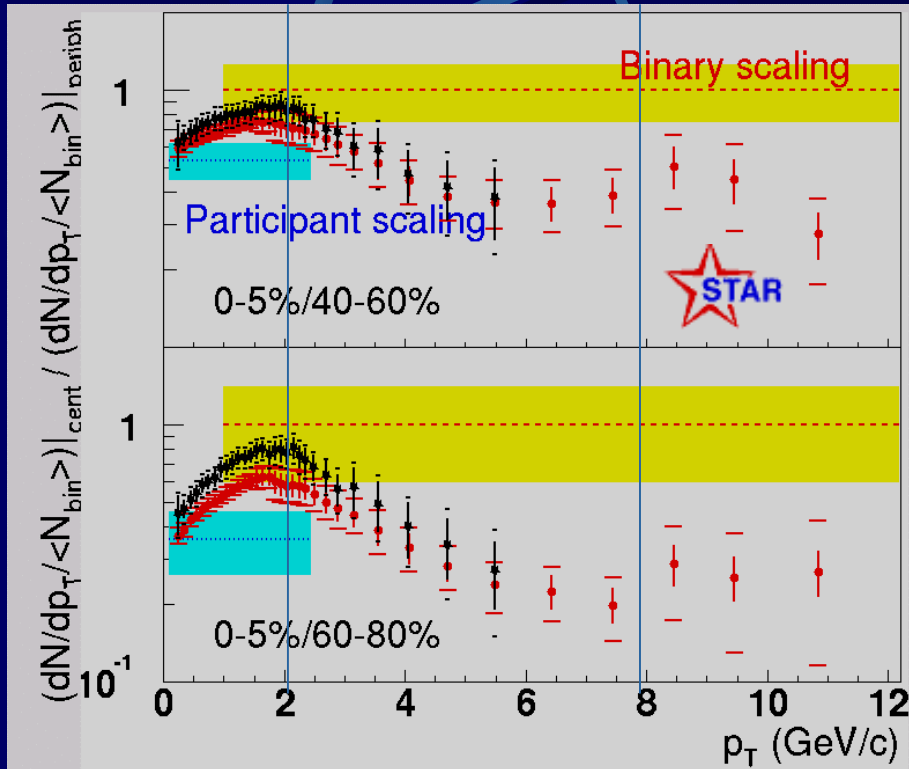
Désaccord des 4
expériences !

- Référence p+p ?
- Glauber ?



- Pour l'instant phenix est seule à se normaliser au run p+p (via les π^0)
- Périphérique/centrales Phenix = Star

Périphériques / centrales



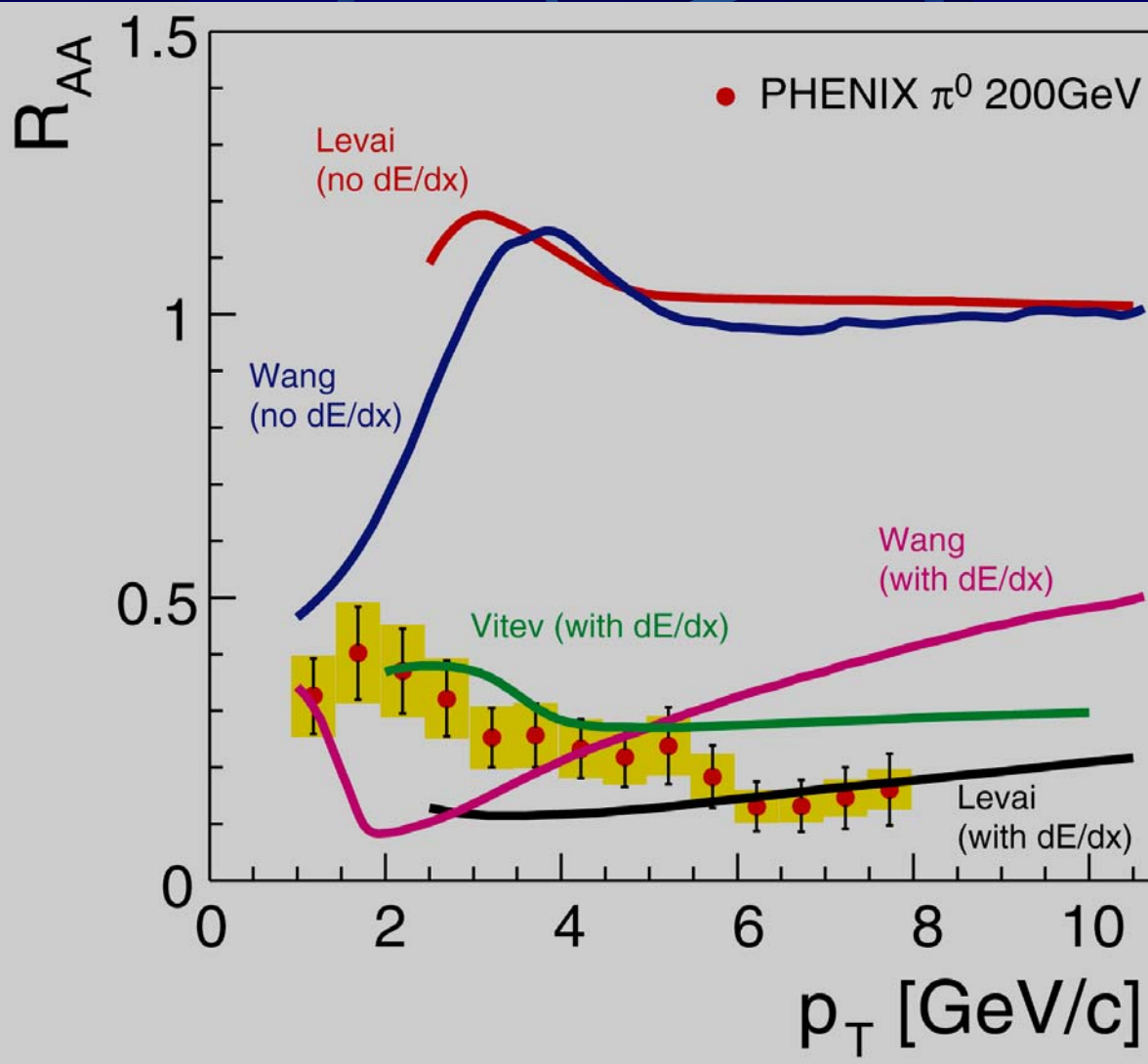
● Accord star / phenix ?

~ 0.6 @ 2 GeV

~ 0.3 @ 8 GeV

Affaire à suivre...

Comparaisons théoriques



@ 130 GeV

$dE/dx \sim 7,3$ GeV/fm
(in Wang & Wang
hep-ph/0202105)

@ 200 GeV

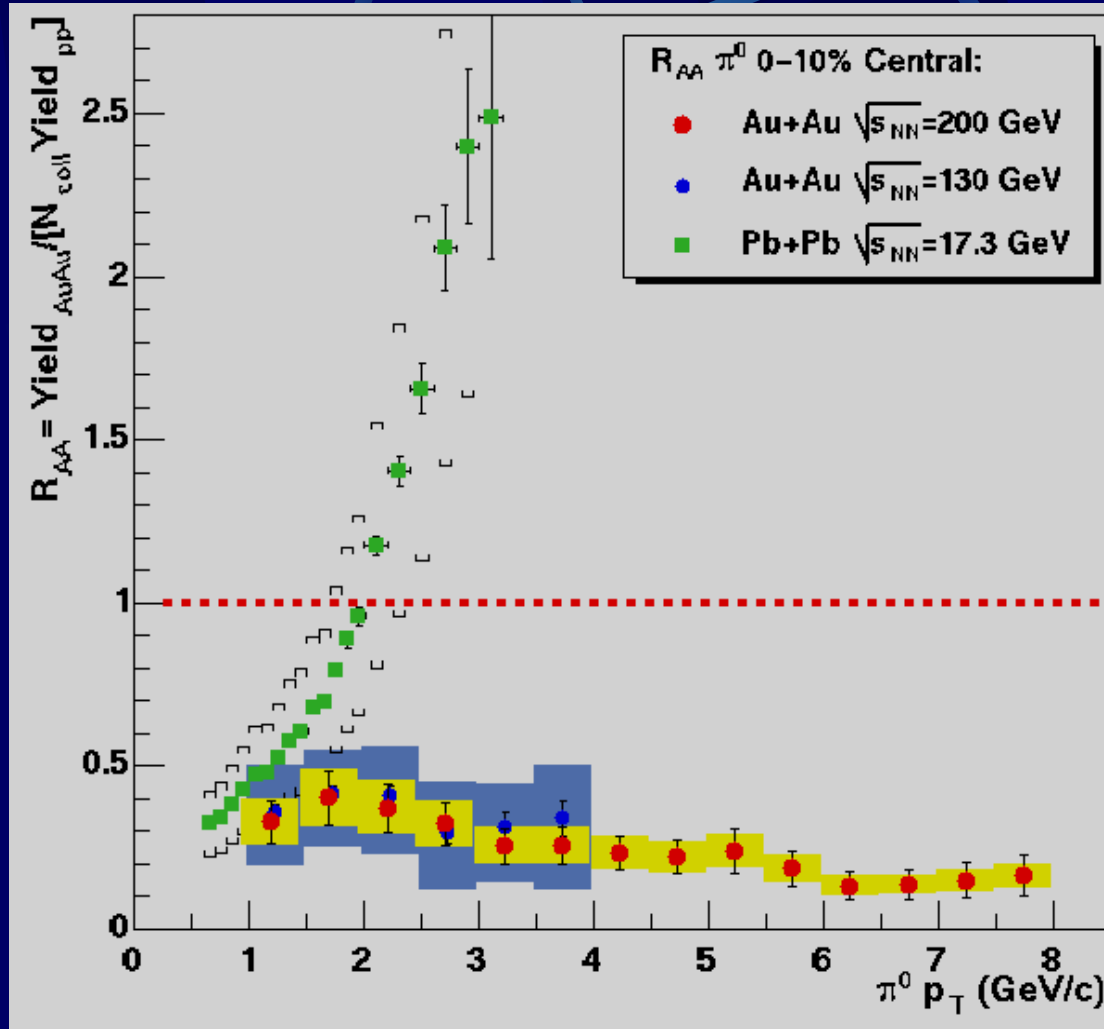
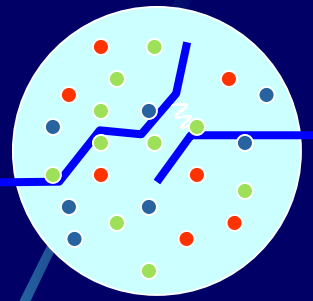
Comparaisons
quantitatives
décevantes...

(Levai in NP A698 631

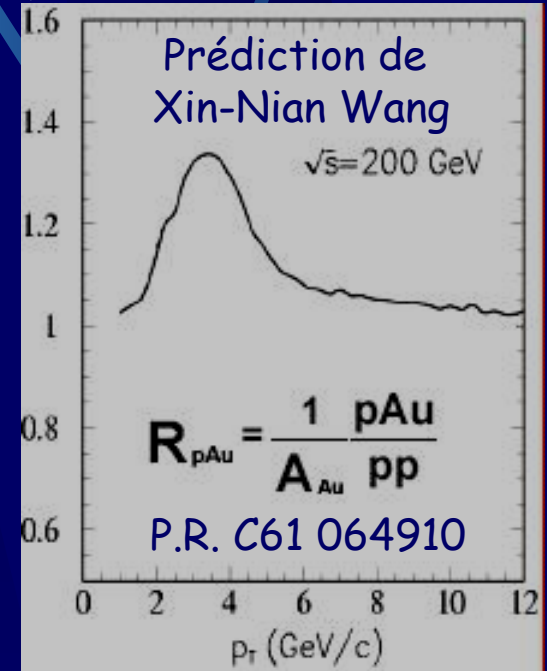
Wang in PR C61 064910

Vitev @ QM02)

Comparaisons avec le SPS



Effet « Cronin » :
Multiples diffusions
du parton initial



L'effet Cronin devrait être négligeable à $p_T > 6 \text{ GeV}$
Le vérifier dans des collisions p+Au !

Autres effets pervers ?

● Fonctions de structure modifiées dans les noyaux !

- Réduite à petit x : « shadowing »

- Typiquement :

$$x \sim 2p_T / \sqrt{s} \sim 0,01 \text{ à } 0,1$$

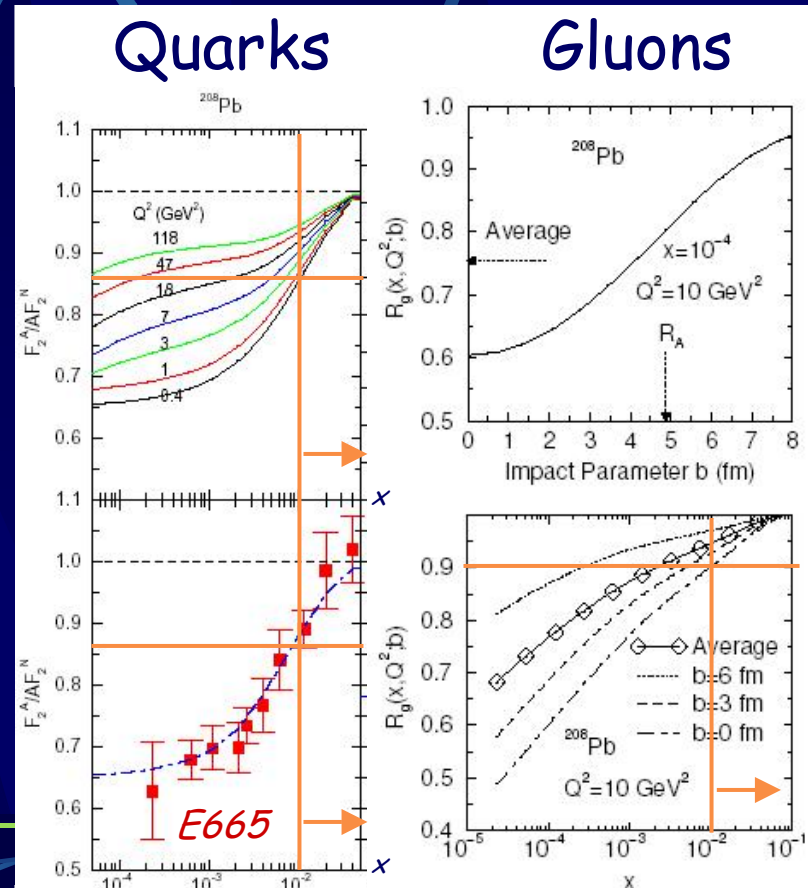
- $F(\text{noyau}) / F(\text{nucléon}) \sim 0,9$

- Mais (x, Q^2) mal couvert...

● Pour être sûr :

- Données p+Au à 200 GeV !

- Run 3 de RHIC !



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... (augmentation de l'étrangeté...)

● Y compris en p+A !

● Règle d'or ions lourds :

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



Cf. histoire du J/ψ au CERN

- Mesure de la section efficace
- Effets nucléaires « froids »
- Suppression anormale

July 18 1999

BRITAI



Ready for blastoff: a Brookhaven engineer puts finishing touches to the ion collider

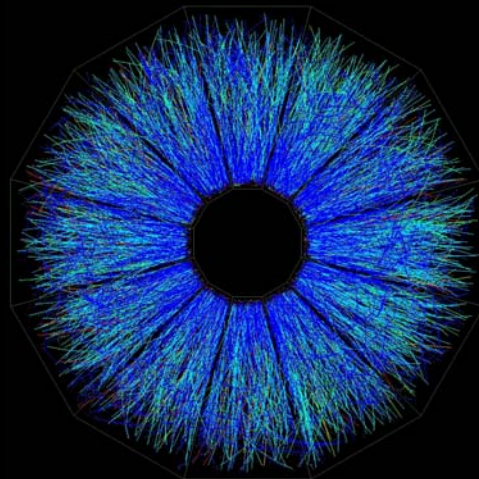
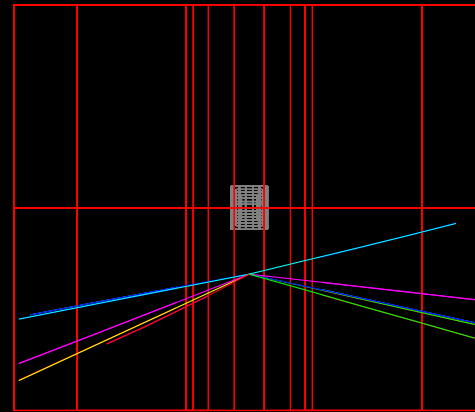
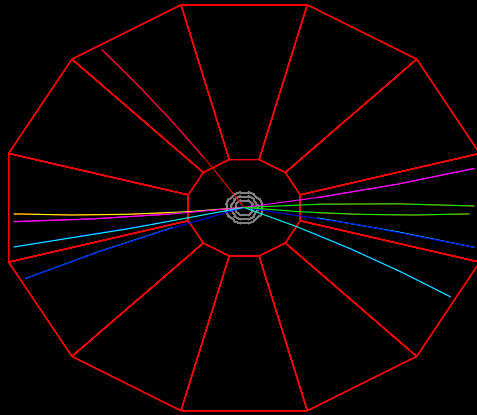
Big Bang machine could destroy Earth

by Jonathan Leake
Science Editor

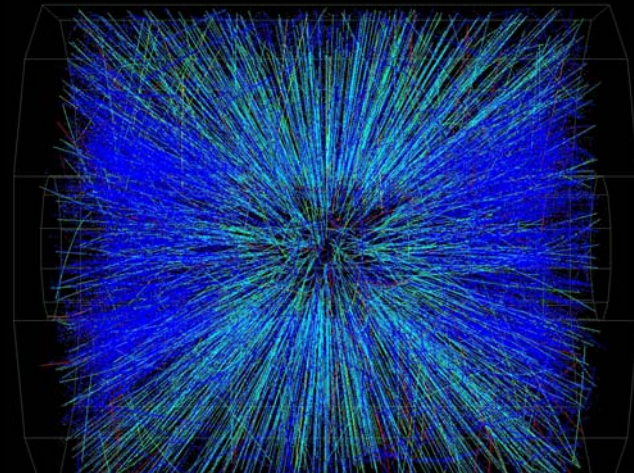
A NUCLEAR accelerator designed to replicate the Big Bang is under investigation by international physicists because of fears that it might cause "perturbations of the universe" that could destroy the Earth. One theory even suggests that it could create a black hole.

Voir des jets...

Facile en proton + proton @ 200 GeV



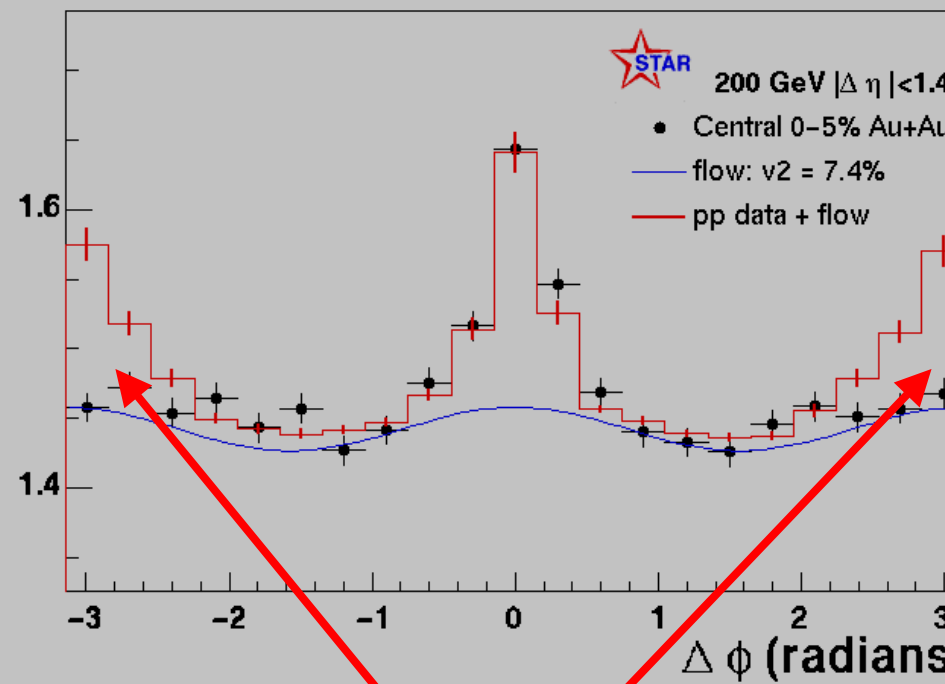
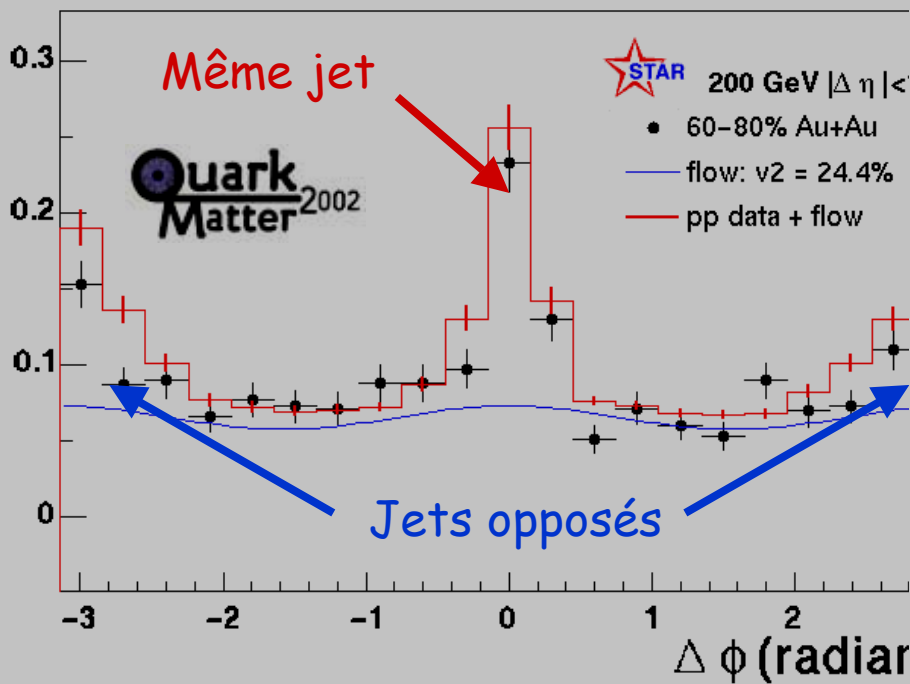
?



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

... et mourir

$1/N \frac{dN}{d(\Delta\phi)}$



Corrélation angulaire entre
une particule de $p_T > 4 \text{ GeV}$
et les autres ($p_T > 2 \text{ GeV}$)

Accord or+or avec p+p (+ flow)
en collisions périphériques...

En collisions centrales, les
jets ne sont plus opposés !

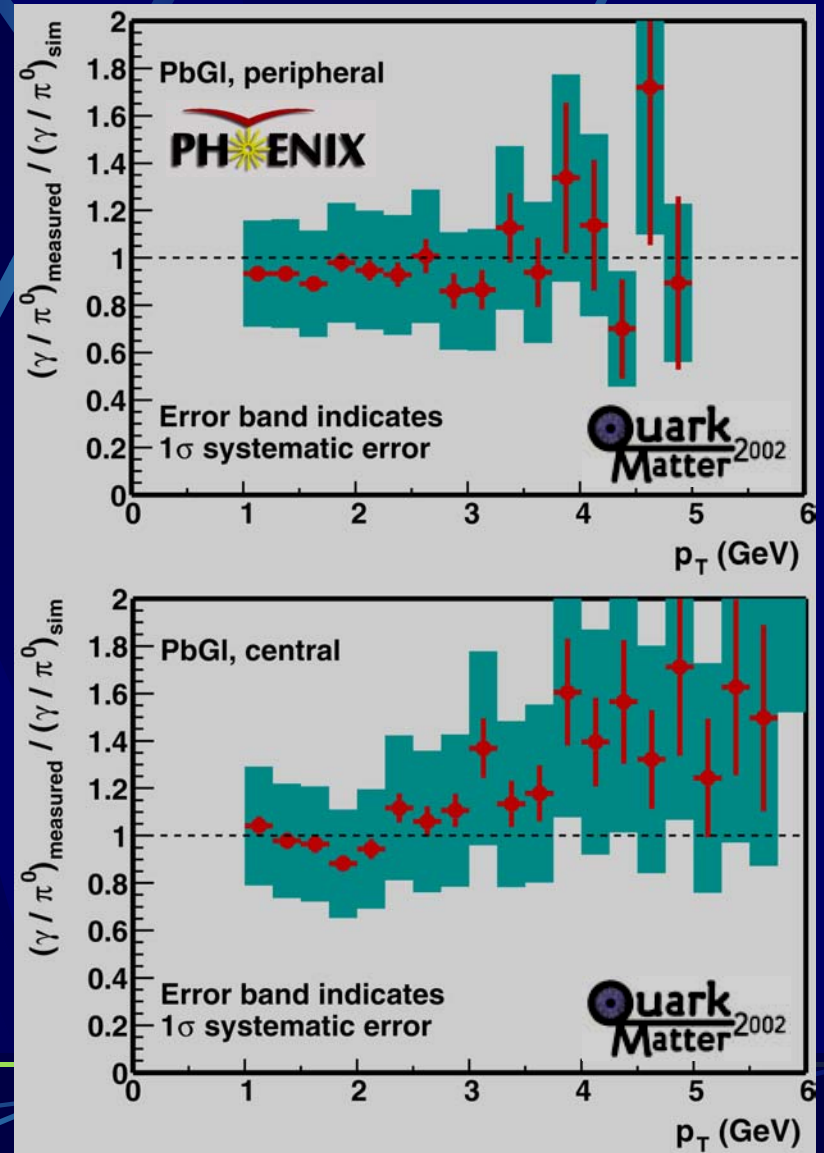
Jet quenching !

(Vu aussi dans phenix)

Et les autres signatures ?

● Les photons

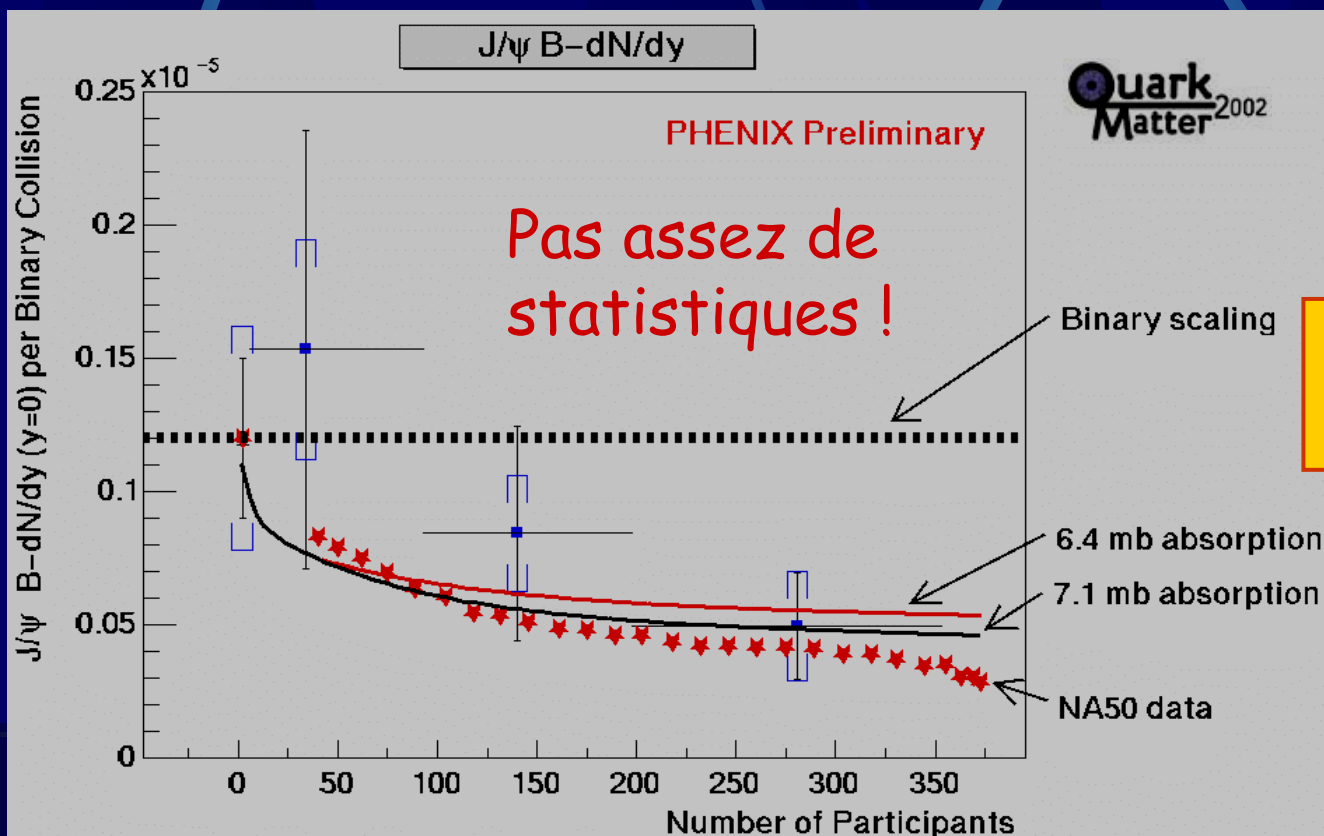
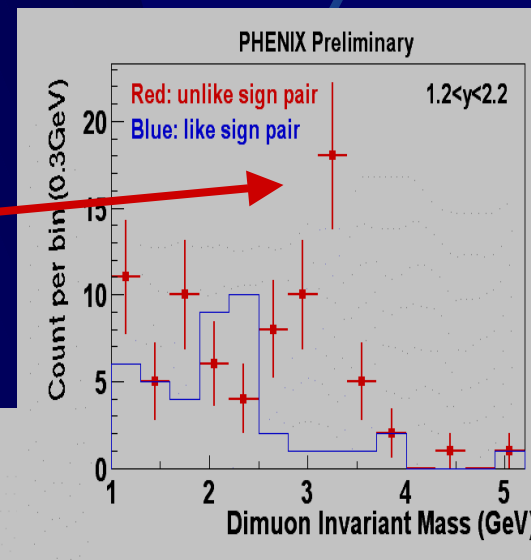
- Donne accès à la température du PQG
- Analyse difficile...
- Premiers résultats @ 130 GeV
- Pas d'excès...
- Réduire les systématiques !
- (conversion dans star)



Et les autres signatures ?

● Suppression du J/ψ

- Vus en p+p en ee et en $\mu\mu$
- Vus en or+or en ee (11 evts)



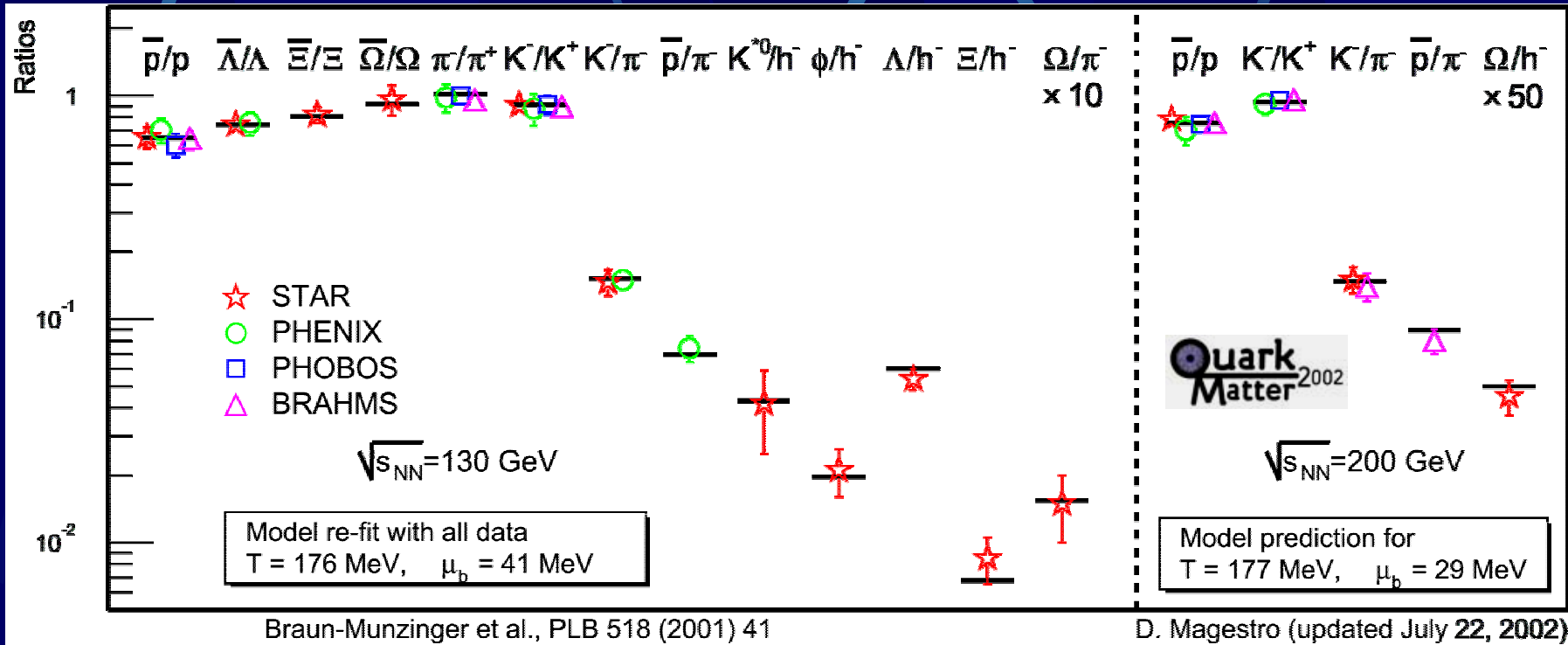
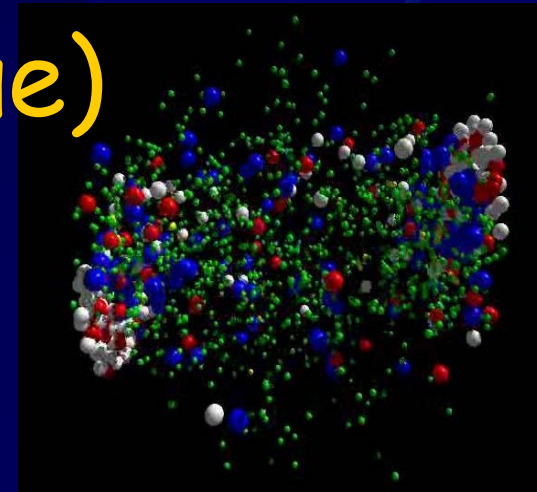
(36 evts)

Analyse en cours...
or+or → J/ψ → $\mu\mu$

L'explosion finale (chimique)

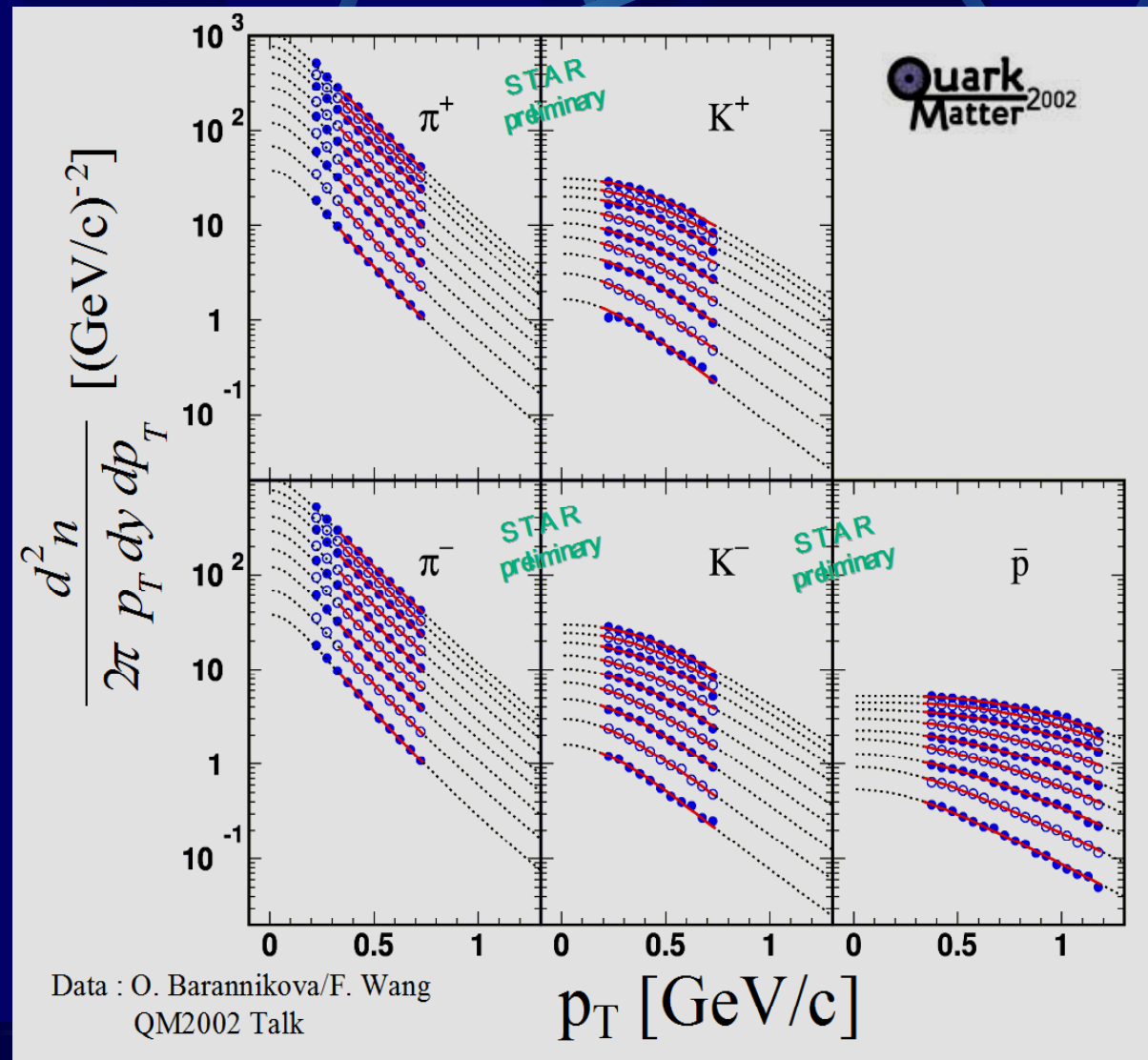
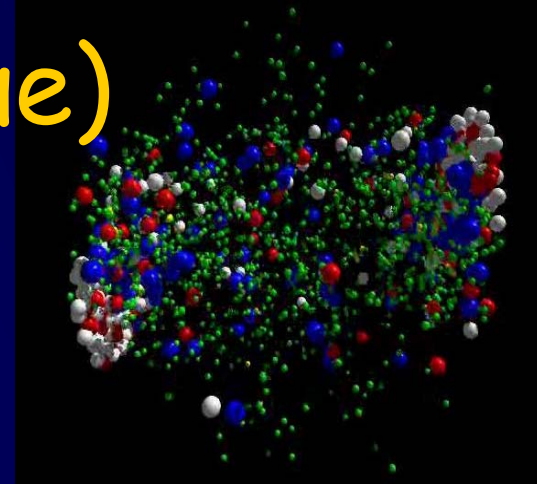
- Modèle hydrodynamique relie les abondances des hadrons :

- Température de gel chimique
- Potentiel chimique baryonique



- Ça marche ! il y a équilibre chimique, température proche de celle du SPS et de la température critique...

L'explosion finale (cinétique)



Spectre en (petite)
impulsion transverse

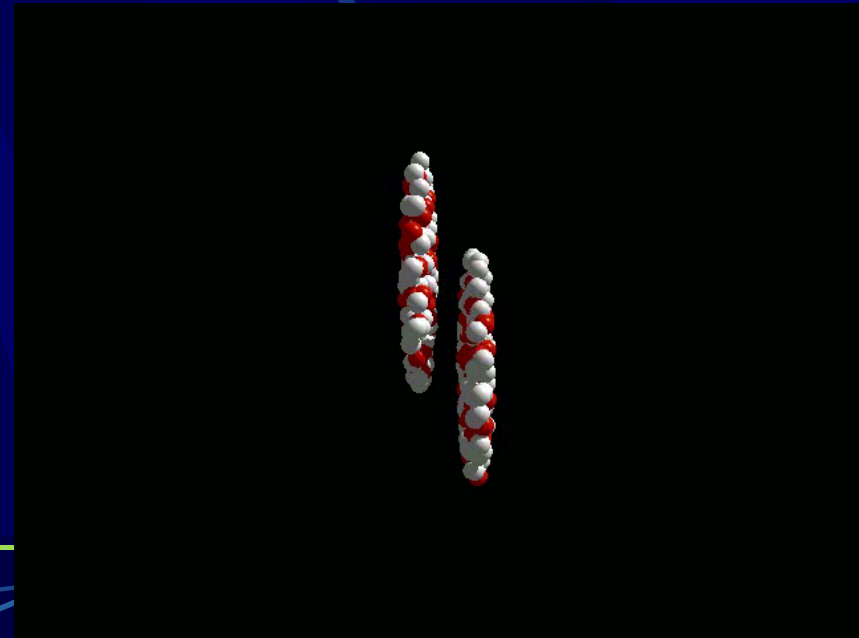
↓
Dynamique

$\langle p_T \rangle$ augmente
avec la masse

↓
Flot collectif

Beaucoup d'autres résultats...

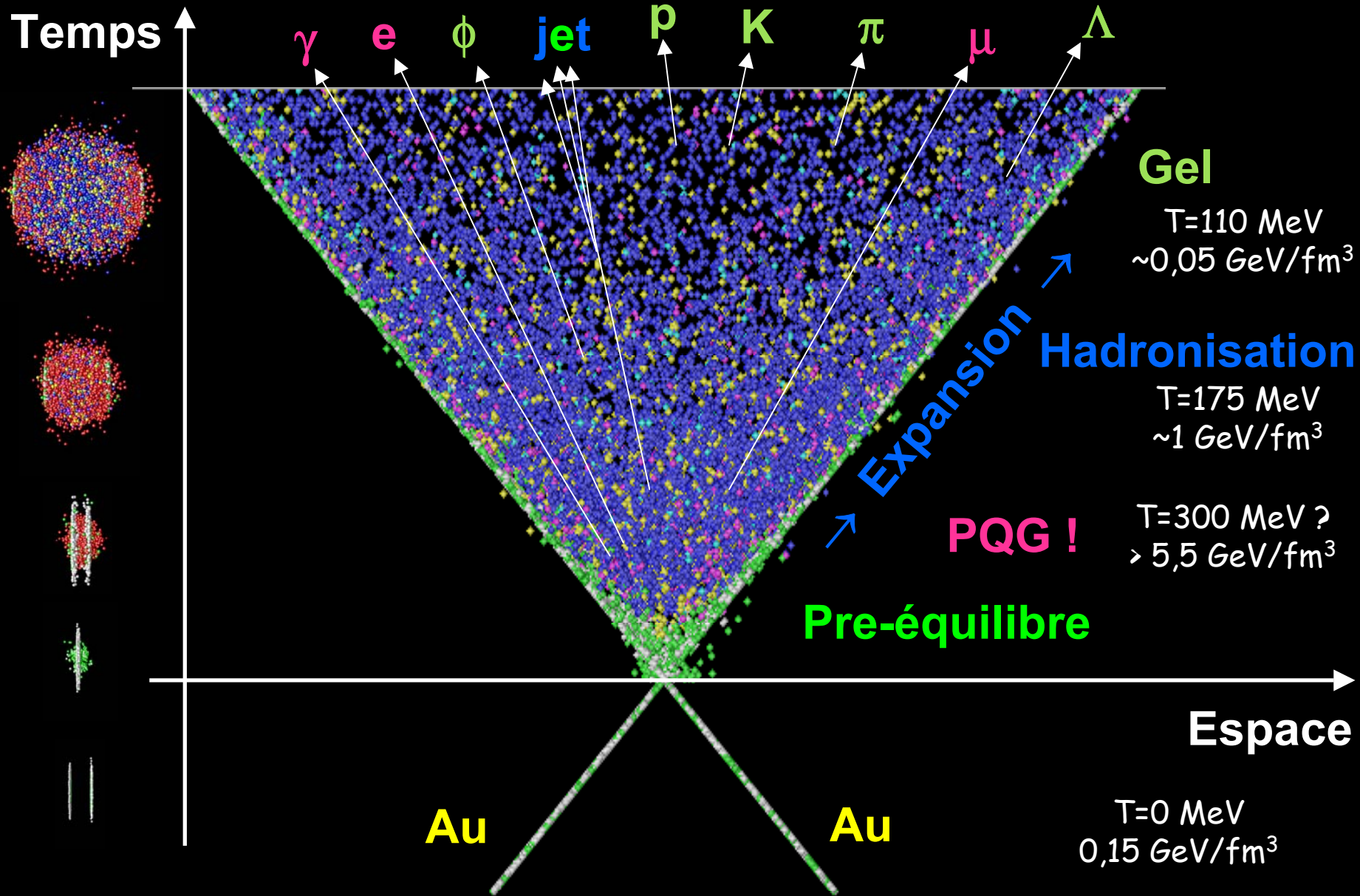
- La production de charme
- Les mésons légers
- L'augmentation de l'étrangeté
- Les corrélations HBT
- Le flux elliptique vs
 - centralité, rapidité,
 - particules, p_T , ...
- ...



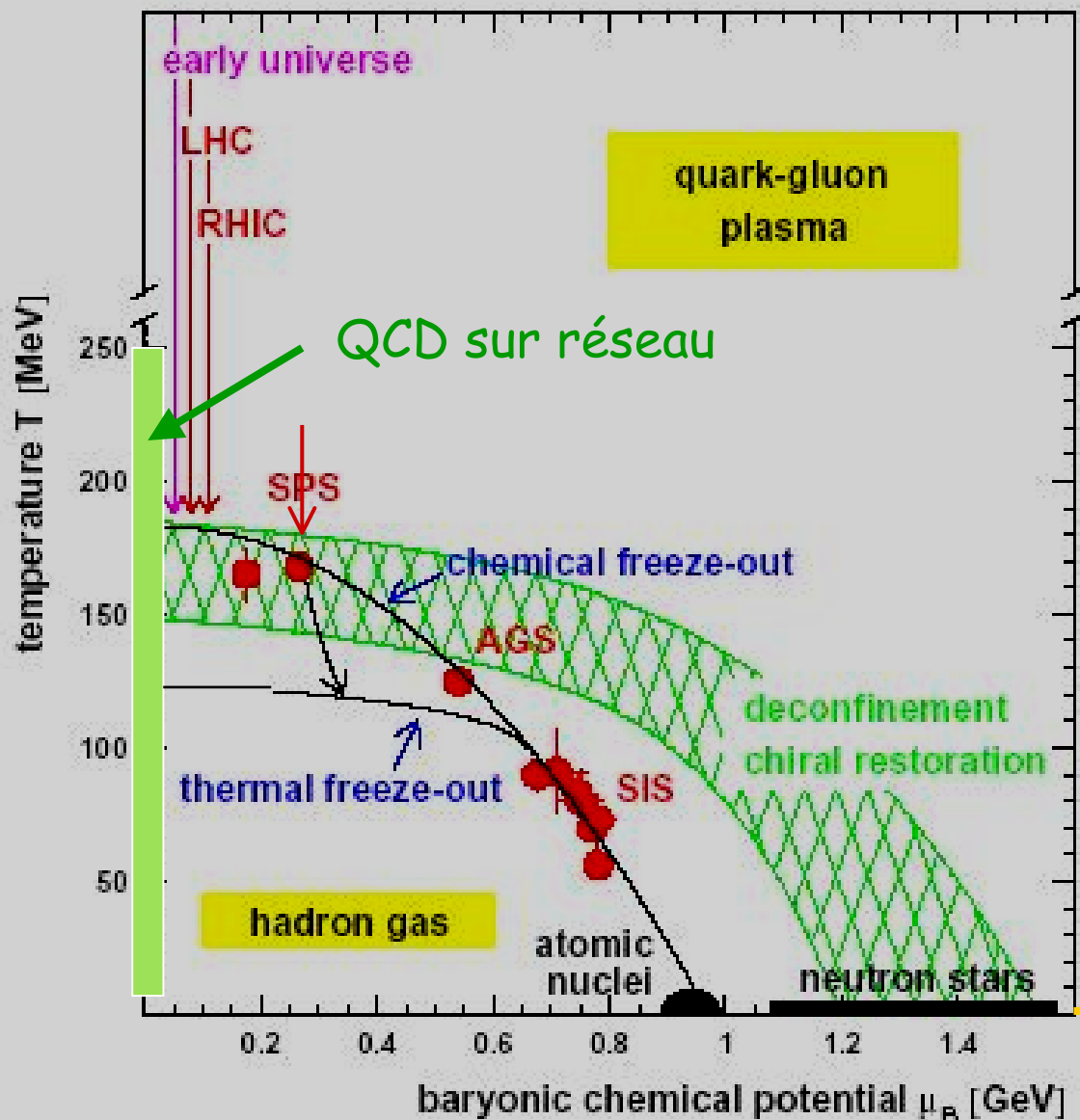
Résumons-nous...

	AGS	SPS	RHIC
\sqrt{s}	4 GeV	20 GeV	200 GeV
Densité d'énergie	$\sim 1 \text{ GeV/fm}^3$	$\sim 3 \text{ GeV/fm}^3$	$\sim 6 \text{ GeV/fm}^3$
Antibaryons p/p	0 %	10 %	80 %
$\mu_{\text{baryonique}}$	$\sim 550 \text{ MeV}$	$\sim 250 \text{ MeV}$	$\sim 30 \text{ MeV}$
T_{chimique}	$\sim 120 \text{ MeV}$	$\sim 165 \text{ MeV}$	$\sim 175 \text{ MeV}$
Expansion (β)	$\sim 0,4$	$\sim 0,45$	$\sim 0,6$
$T_{\text{cinétique}}$	$\sim 120 \text{ MeV}$	$\sim 120 \text{ MeV}$	$\sim 110 \text{ MeV}$
Plasma ?	pas vu...	Suppression J/ψ	Jet quenching

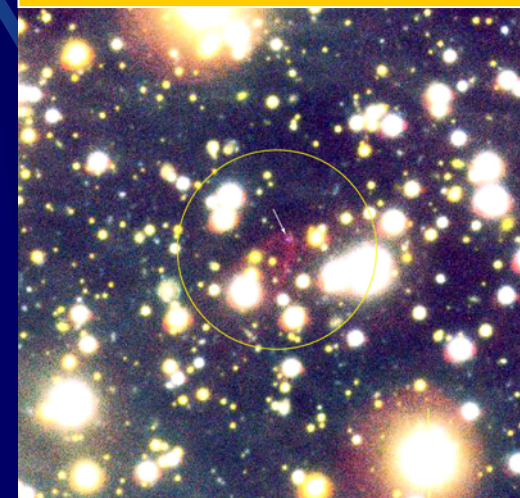
Évolution spatio-temporelle



Sur le diagramme de phase



La toute dernière mode...



*Étoile à quarks ?
RXJ J185635-375
Astro-ph/0204159*

Conclusions

- Il semble que le PQG ait été vu à RHIC...
 - Jet quenching !
- Mais il est encore permis de douter !
- Le run 3 (d+Au) devraient asseoir ce résultat
- Le run 4 (et les suivants) devrait le confirmer
 - Suppression du J/ψ et des bottomia
 - Photons directs
 - Surprise ?