

Plasma de Quarks & de Gluons

Sondes prédites &
étudiées au SPS...
(première partie)

Plasma de quarks & de gluons

- Introduction

- Une prédiction théorique
- Les collisions d'ions lourds, l'indispensable outil...

- Les signatures du plasma...

- Violentes au SPS (Raphaël)
- Violentes à RHIC (Christelle)
- Prévues au LHC (Pascal)

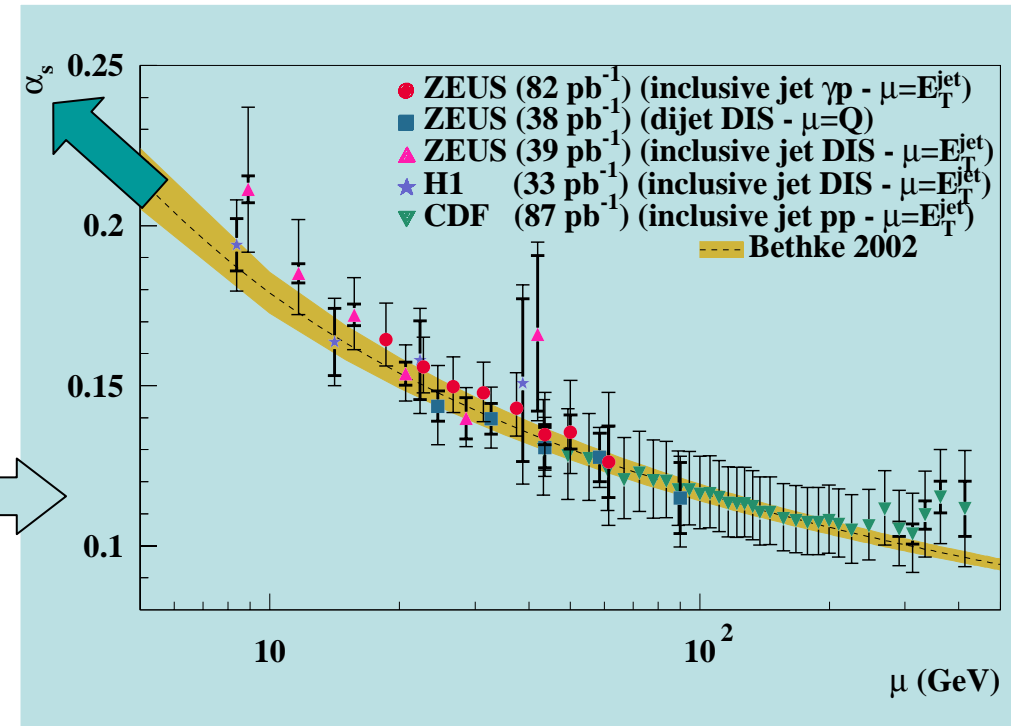
Voir aussi Philippe, Alexandre, Fabien, Andry, Catherine, Zaida, Renaud, Vincent, Jonathan, Alexandre,...

- Avertissements :

- Pour les aspects expérimentaux, voir Pascal
- Plein d'aspects théoriques (par et pour les nuls)
- Je n'ai pas travaillé au SPS, ni sur l'étrangeté...

La chromodynamique quantique

- Cf. Patrick et Olivier
- Une théorie quantique des champs
 - SU(3) de couleurs
 - 8 gluons
 - α_s renormalisable
 - « force de l'interaction »



Interaction...

... « forte » à basse énergie (confinement)

... « faible » à haute énergie (liberté asymptotique)

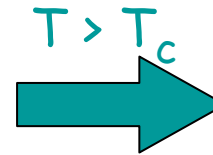
La prédiction QCD

Les quarks et les gluons sont confinés dans les hadrons

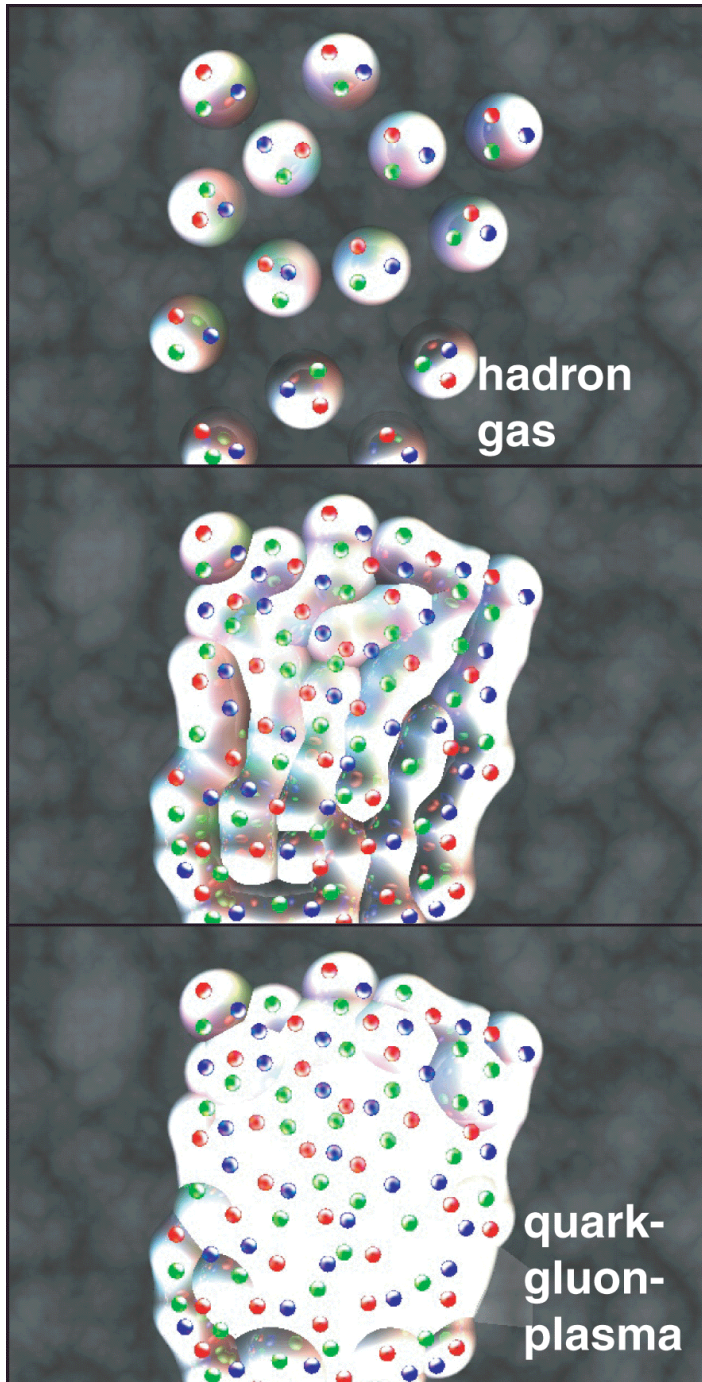
Mais ils apparaissent libres à haute énergie

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

Gaz de hadrons



Plasma de quarks et de gluons



Exemple quantitatif...

- Transition de phase (Cf. Francesca et Olivier)

-> Déconfinement

- Ordre mal connu,
mais transition rapide

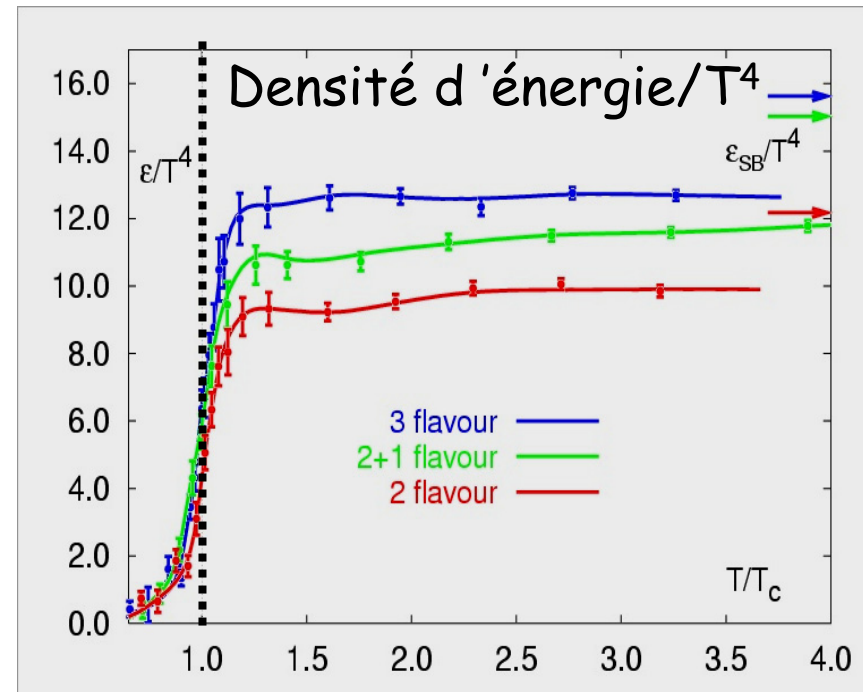
- Calcul QCD sur réseau

- À $n_{\text{Baryons}} = 0$!

- @ $T_c = 154 \pm 8 \text{ MeV}$

- @ $T_c = 173 \pm 8 \text{ MeV}$

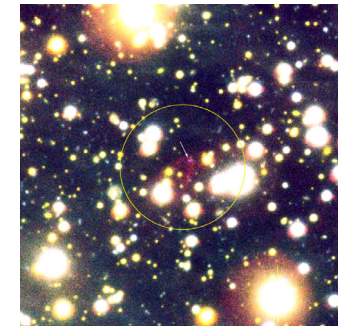
$\sim T_c \sim 10^{13} \text{ K}$ ($T_{\odot} \sim 10^8 \text{ K}$)



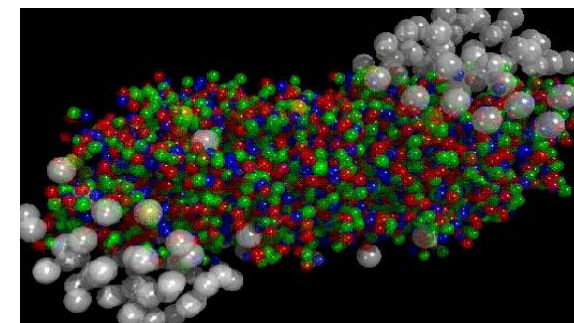
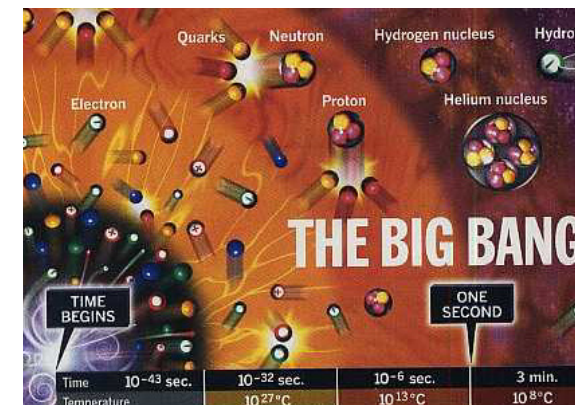
- @ $\varepsilon_c = (6 \pm 2)T^4 = 0,7 \pm 0,3 \text{ GeV} / \text{fm}^3$

Où l'observer ?

- 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



A Bowshock Nebula Near the Neutron Star RX J1856.5-3754 (Detail)
(VLT KUYEN + FORSZ)
ISO PR Photo 28/00 (11 September 2000) ©European Southern Observatory

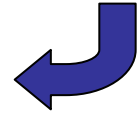


Programmes expérimentaux

$\sqrt{s_{nn}}$

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

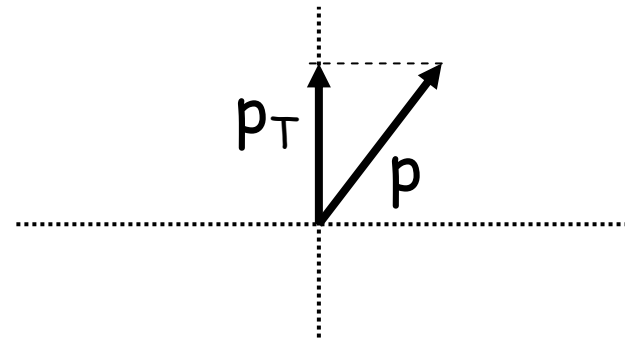


Variables cinématiques

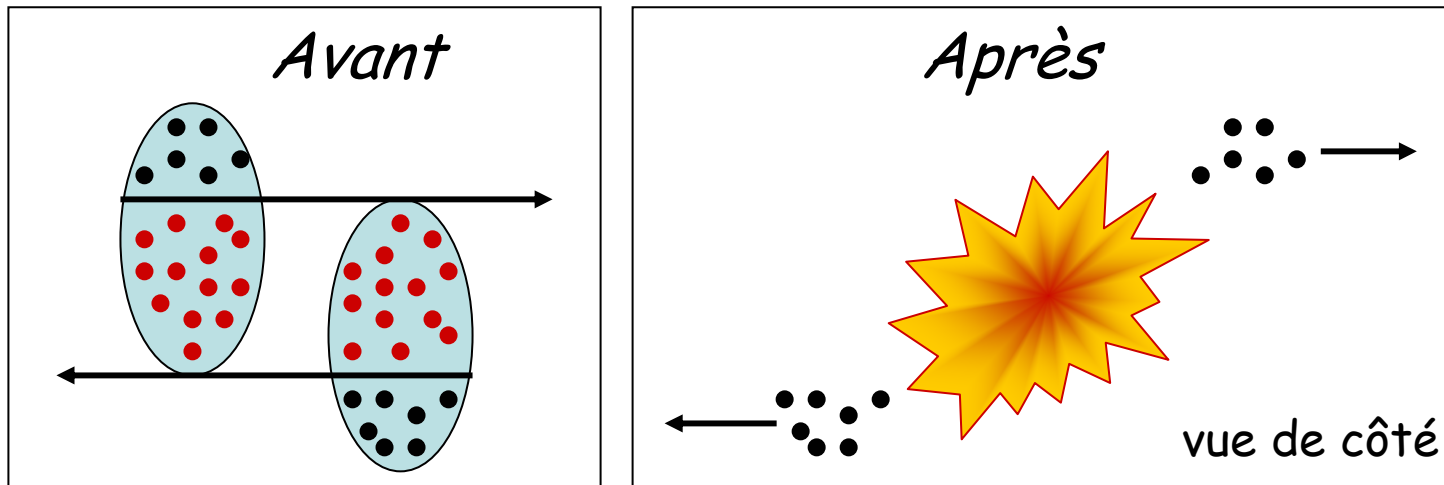
- La rapidité
 - Vitesse relativiste longitudinale
- Pseudo-rapacité
 - Expérimentale
 - = rapidité si $p \gg m$
- Impulsion transverse
 - $p_T^2 = p_x^2 + p_y^2$

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \beta_l}{1 - \beta_l}$$

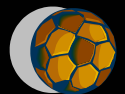
$$\eta = - \ln \tan \frac{\theta}{2}$$



Déterminer la centralité



- Plusieurs techniques :
 - Spectateurs mesurés à zéro degré
 - Participants redistribuent leur énergie dans 4π
- Définit des classes de centralités
« 20% des événements les plus centraux »



: 50 000 spectateurs, 22 participants

Déduire l'impact

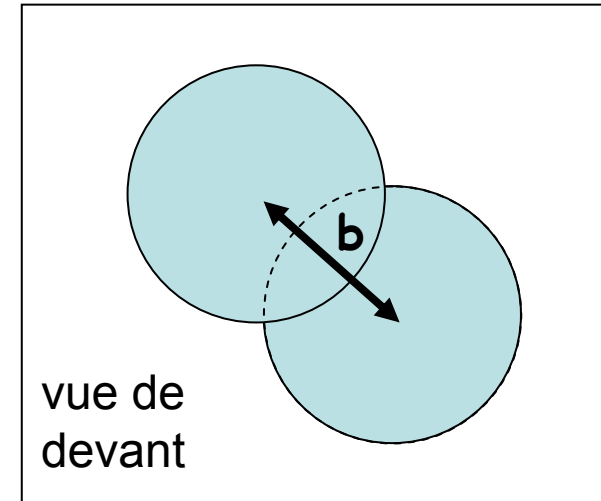
- **Modèle de Glauber**

Géométrie de la collision (b)

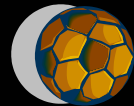
+ Densité de nucléons
(Woods-Saxon)

+ Section efficace inélastique
= $N_{\text{collisions}}$, $N_{\text{participants}}^*$,

et autres paramètres géométriques
(longueur moyenne traversée, etc.)

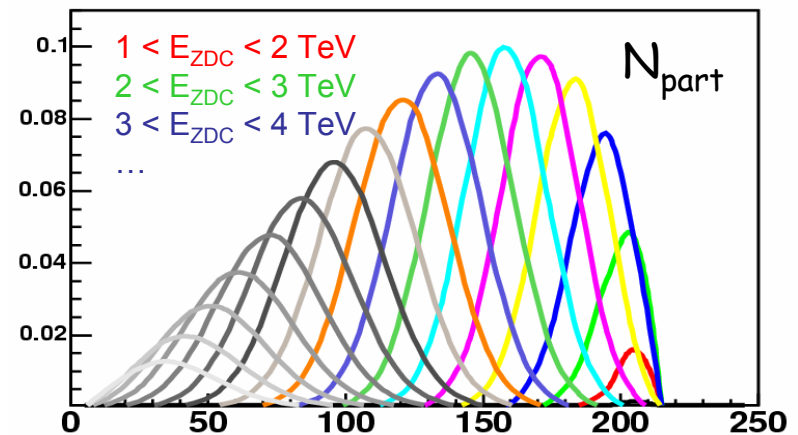
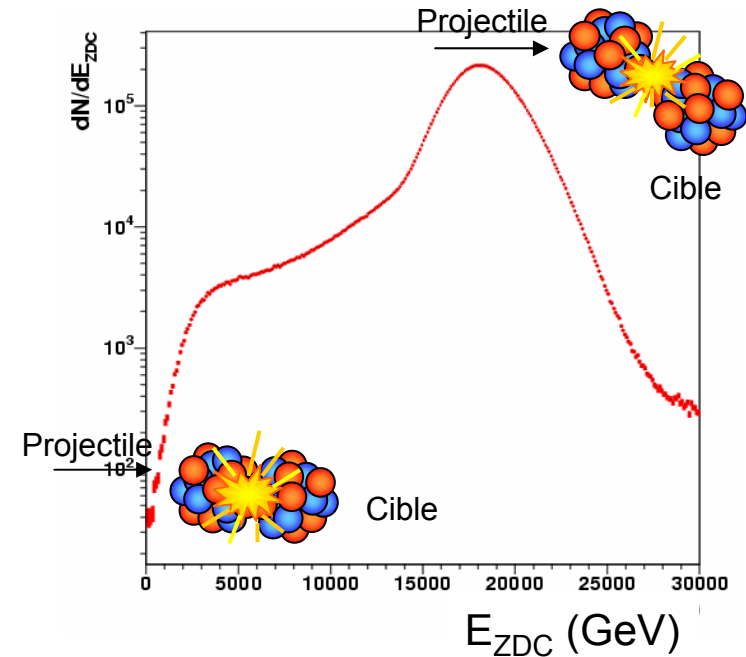


* le nombre de « blessés » dans le vocabulaire européen « N_{wounded} »

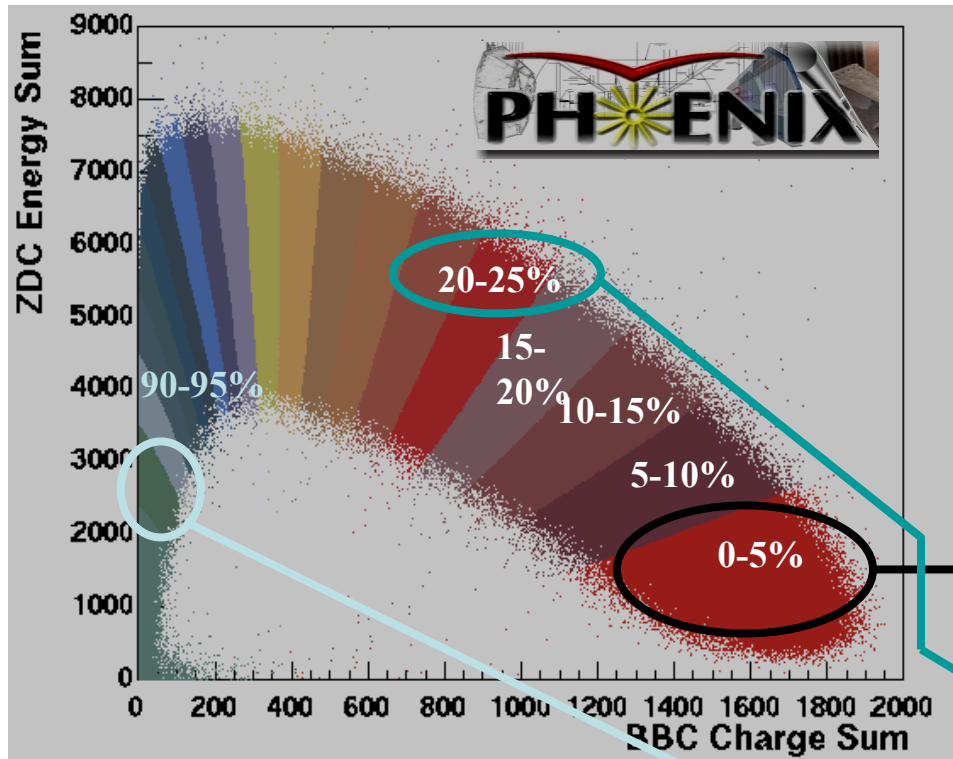


Un exemple @ SPS

- NA60 mesure l'énergie à zéro degré
- Tranches
 - $1 < E_{ZDC} < 2 \text{ TeV}$
 - $2 < E_{ZDC} < 3 \text{ TeV} \dots$
- Glauber \rightarrow distribution des nombres de participants dans chaque tranche
- $\langle N_{part} \rangle$, $\langle N_{coll} \rangle$, L, \dots



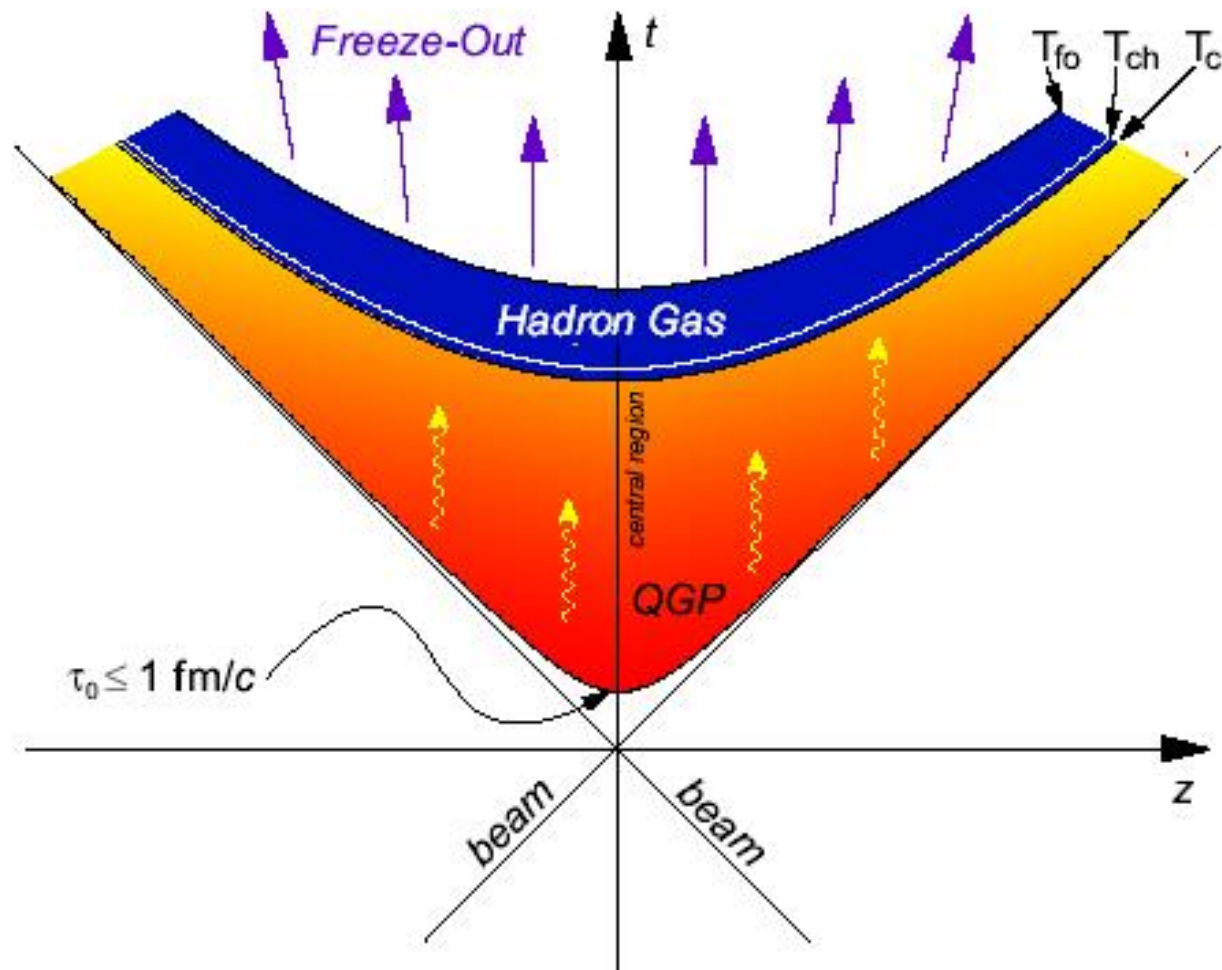
Un exemple @ RHIC



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

Le scénario de Bjorken



Mesurer la densité d'énergie

- Besoin d'un modèle physique...
 - Scénario de Bjorken
- ε proportionnel à l'énergie transverse émise lors de la collision @ $y=0$
- Pour collisions centrales au SPS :

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

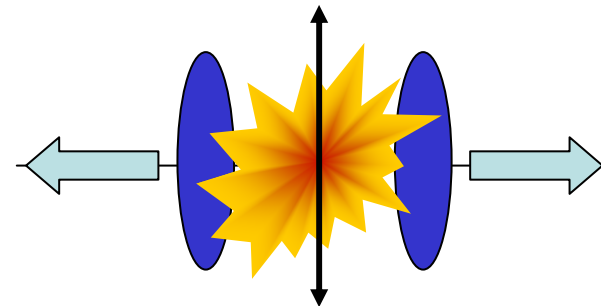
Bjorken, PRD27 (1983) 140
Par ex : NA49, PRL75 (1995) 3814

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 $\sim 1 \text{ fm}/c$

R = rayon nucléaire
 $1,18 A^{1/3} \text{ fm}$



$$\varepsilon \rightarrow 3 \text{ GeV/fm}^3 ?$$

Mais, c'est bien au dessus de la
prédiction de QCD pour un
plasma de quarks et de gluons !
@SPS (et peut-être @AGS)

Les signatures...

*« 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 ! »*





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.

La démarche

- a. Choisir une signature prédite théoriquement et en déduire une observable expérimentale
- b. La mesurer dans des collisions p-p
- c. La mesurer dans des collisions p-A (d-A)
- d. La mesurer dans des collisions A-A 
- e. Essayer d'expliquer hadroniquement 
- f. Aller-retour d-e en variant les ions et en regardant des distributions (y , p_t , ...)
- g. Échec de e \rightarrow Plasma de quarks et de gluons ?
(avec la difficulté de détecter la transition de phase vers de modèles irréalistes 😊)

Les signatures

- I. Augmentation de l'étrangeté
- II. Modification des résonances (ρ, ω, \dots)
- III. Suppression des quarkonia ($J/\psi, \dots$)
- Atténuation des jets (jet quenching)
- Photons (ou dileptons) directs
- Effets collectifs, flot
- Strangelets,...
- Corrélation à deux particules (HBT)
- ...

} Raphaël
~ SPS

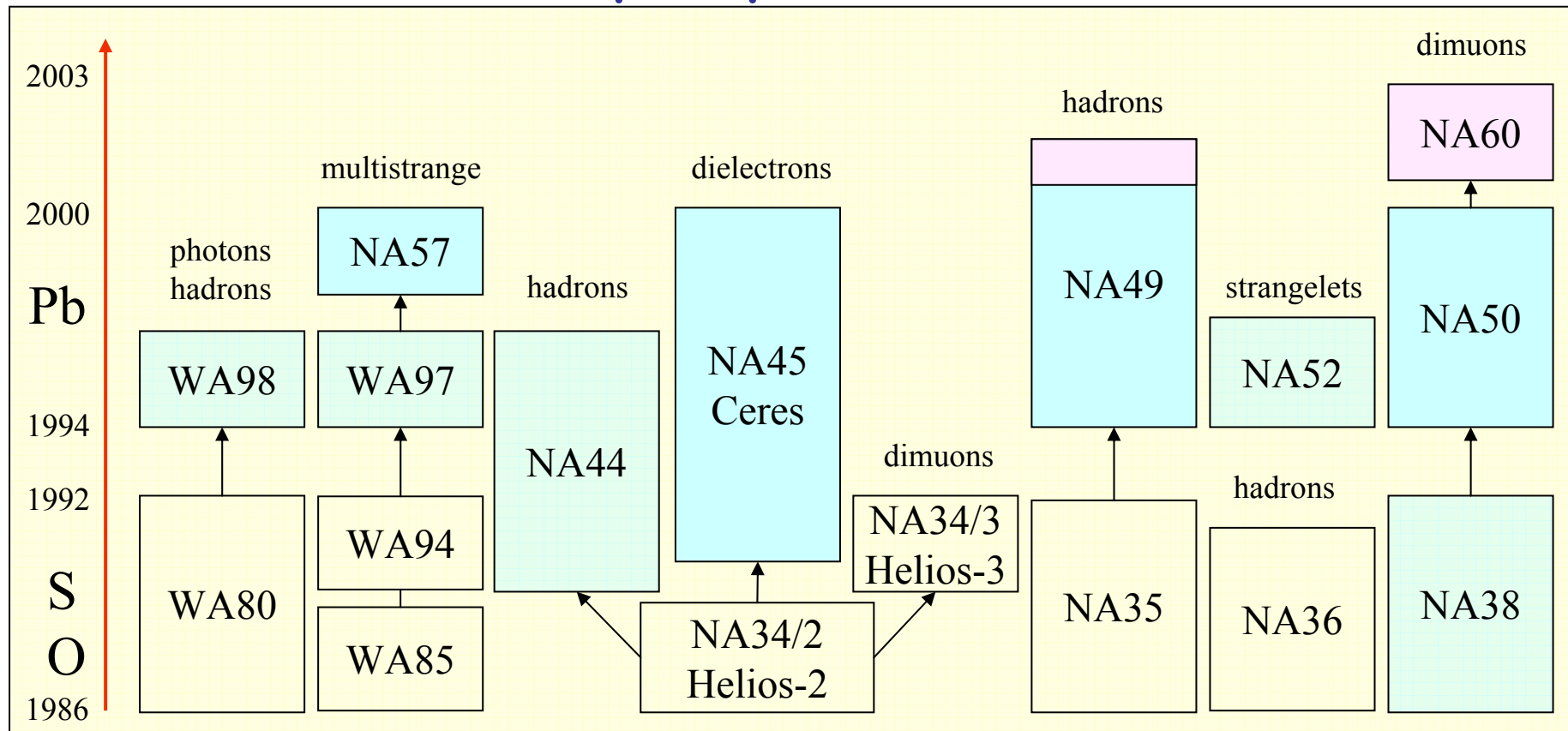
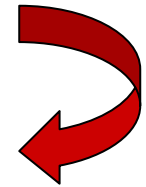
} Christelle
~ RHIC

} Personne

Programme expérimental SPS

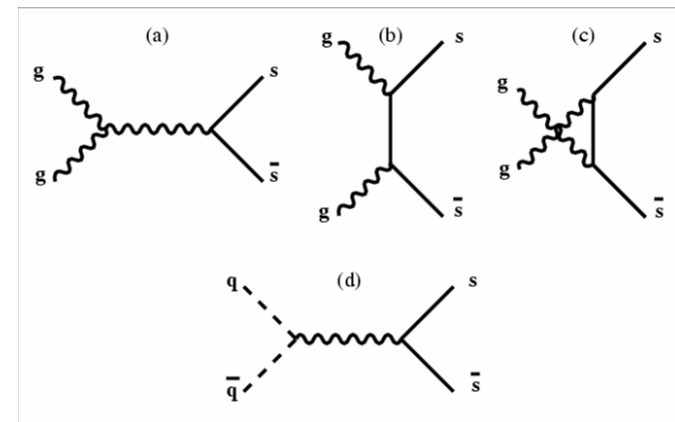
Énergie max : Pb de 158 GeV/nucléons

$\leftrightarrow \sqrt{s} = 17,3 \text{ GeV}$ par paire de nucléons...



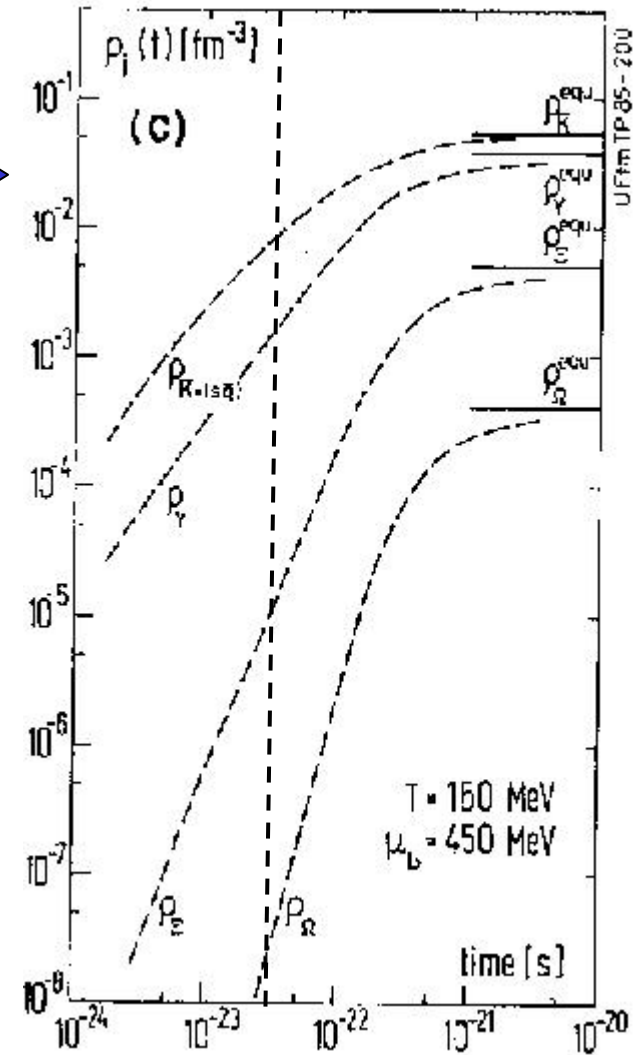
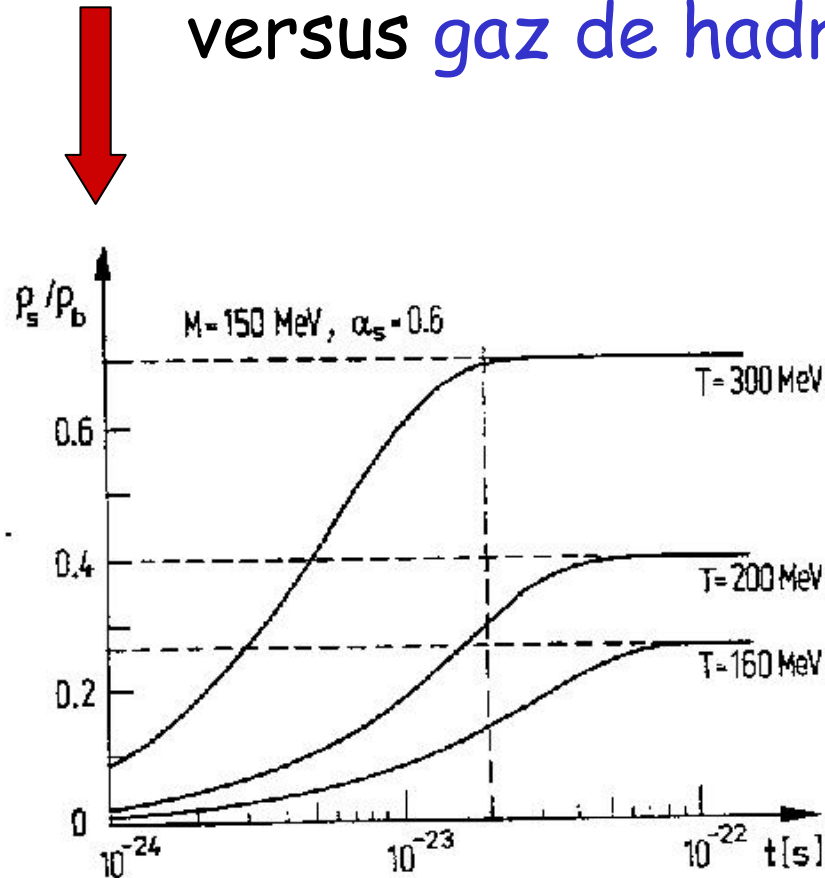
I. Suppression étrangereté

- Au niveau des hadrons
 - Un quark s pèse 500 MeV (au minimum dans un K)
 - Seuil de réaction élevé (530 MeV pour $\pi + N \rightarrow K + \Lambda$)
 - Très élevé pour multi-étranges (ou très long si réactions successives)
- Au niveau des partons
 - Un quark s pèse 150 MeV
 - $\sigma(gg \rightarrow s\bar{s})$ élevée !
 - Les multi-étranges peuvent être créés avec des quarks étranges non-corrélés.



Temps d'équilibration...

Plasma de quarks et de gluons
versus gaz de hadrons



Koch, Müller & Rafelski, PR142 (1986) 167

Étrangeté : trois observables

1. Rapport étrange / non-étrange

- $K/\pi, \Lambda/\pi, \dots$

2. Modèle thermique global

- Ajustement simultané des taux de production

3. Taux de production des baryons (anti)étrange

- Rapport AA/pp de Λ, Ξ, Ω

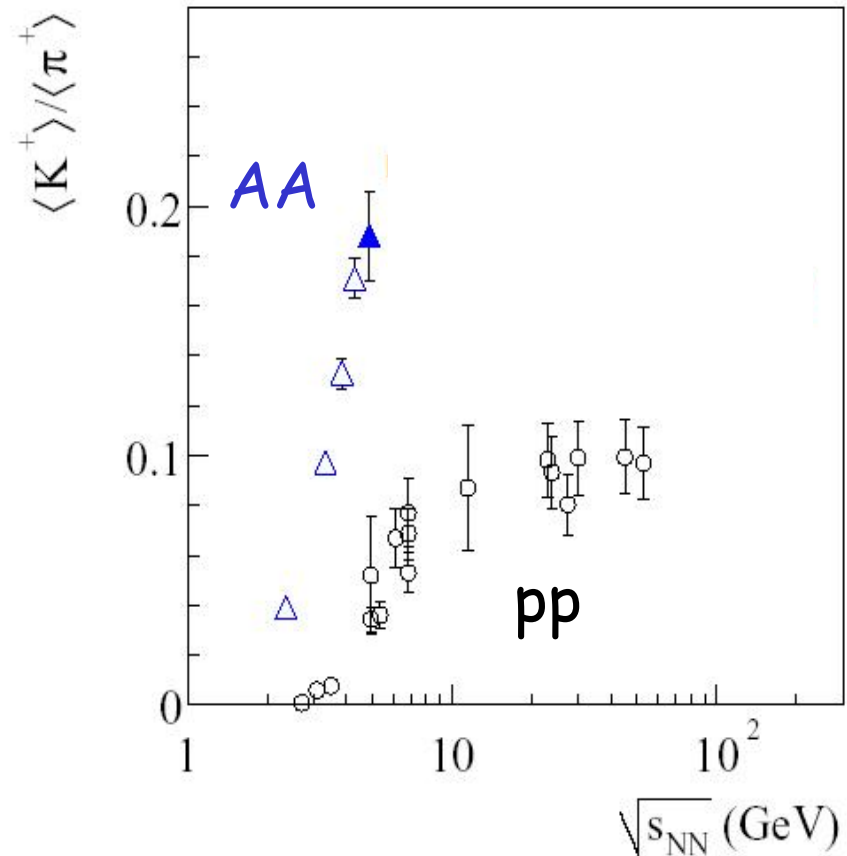
= trois façons très liées de regarder l'étrangeté

1. Rapport K^+/π^+ à l'AGS

- Augmentation AA versus pp dès AGS
- K^+ ($u\bar{s}$) / π^+ ($u\bar{d}$)
- Forte production d'étrangeté ?

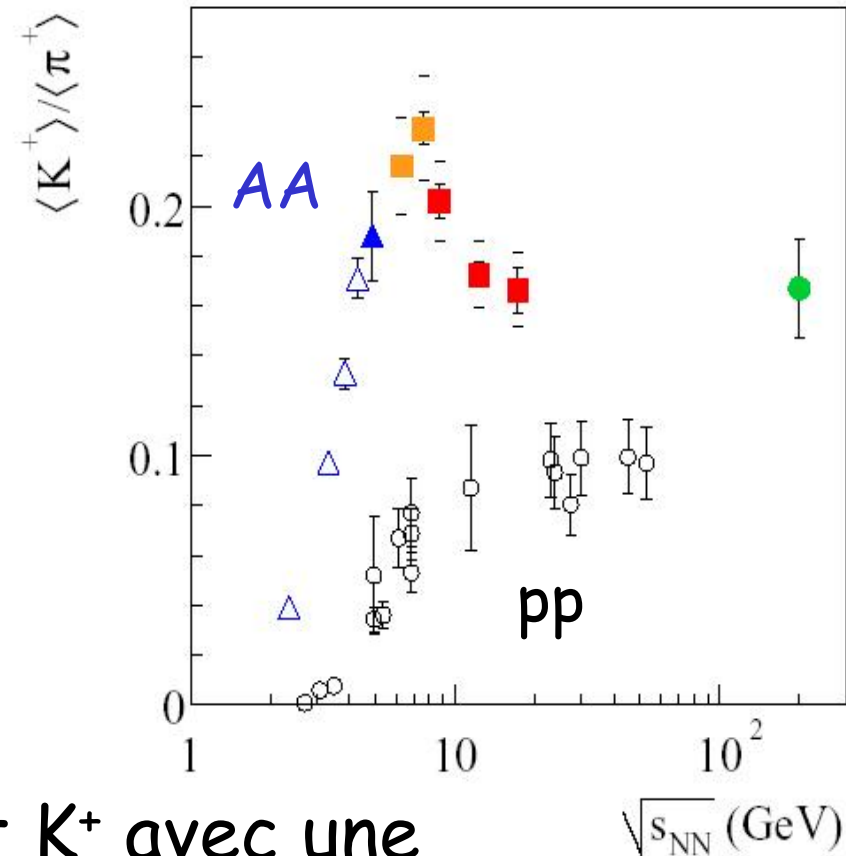
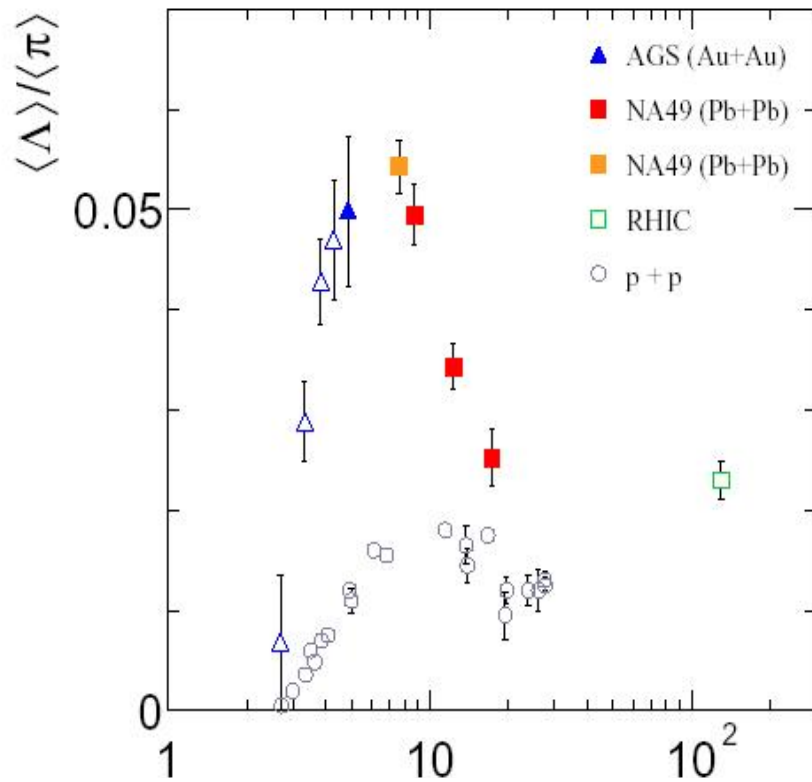


? Plasma ?



K^+/π^+ et Λ/π jusqu'au RHIC...

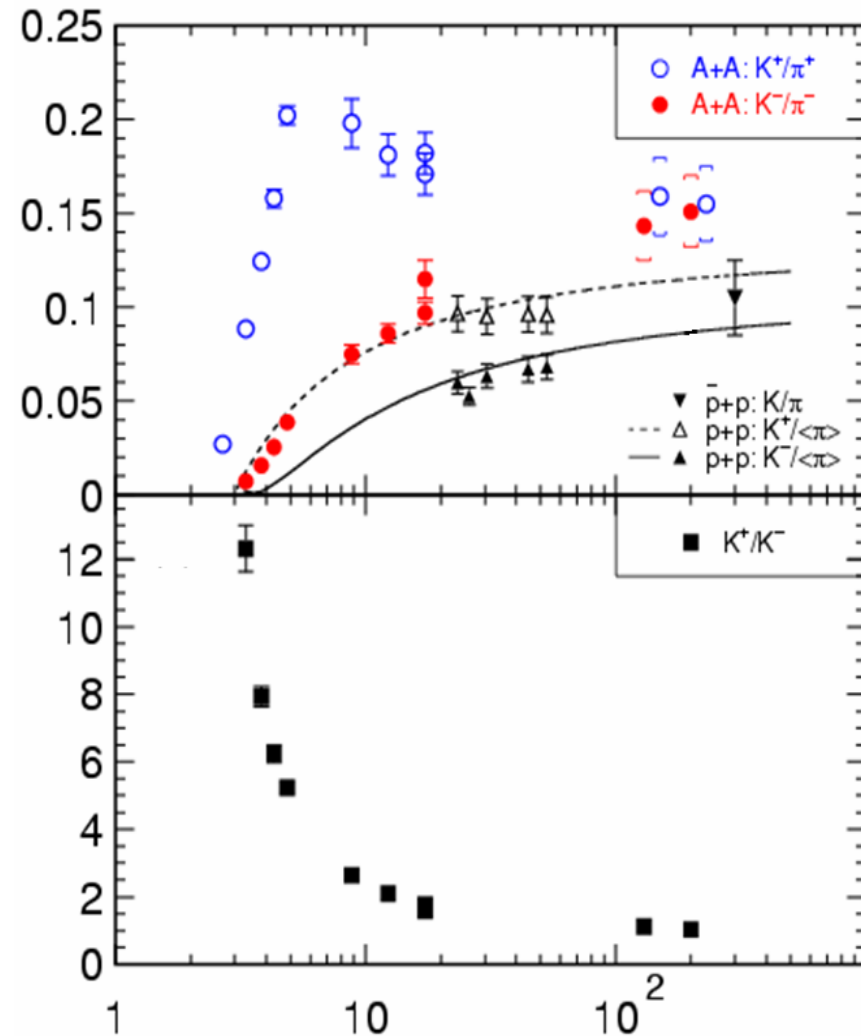
Λ (uds) et K^+ ($u\bar{s}$) \rightarrow forte production $s\bar{s}$!



Augmentation des Λ et K^+ avec une forme en « corne » caractéristique

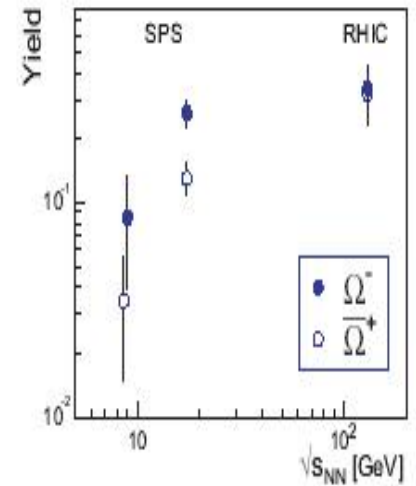
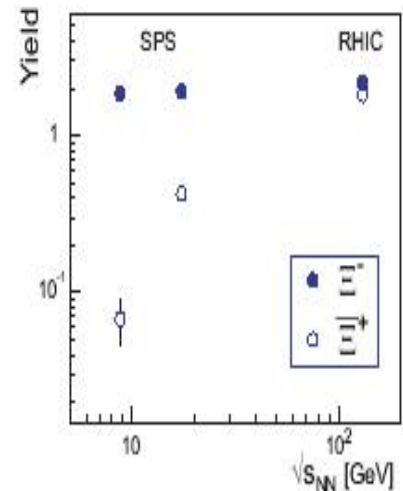
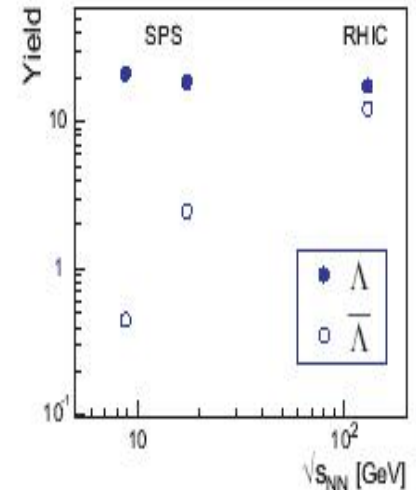
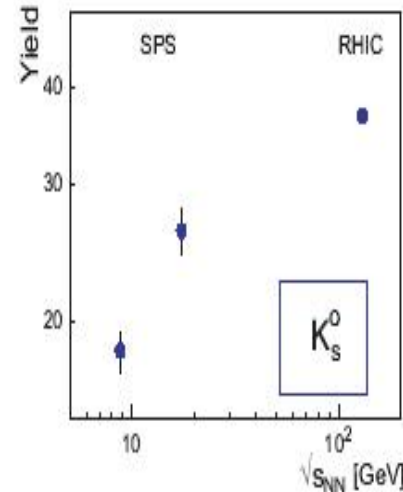
K^+/π^+ et K^-/π^-

- Peu d'augmentation des K^- (us) à AGS & SPS
- K^+ et K^- de plus en plus semblable avec énergie (= au RHIC)
- À quoi est due l'augmentation des K^+ et des Λ ?



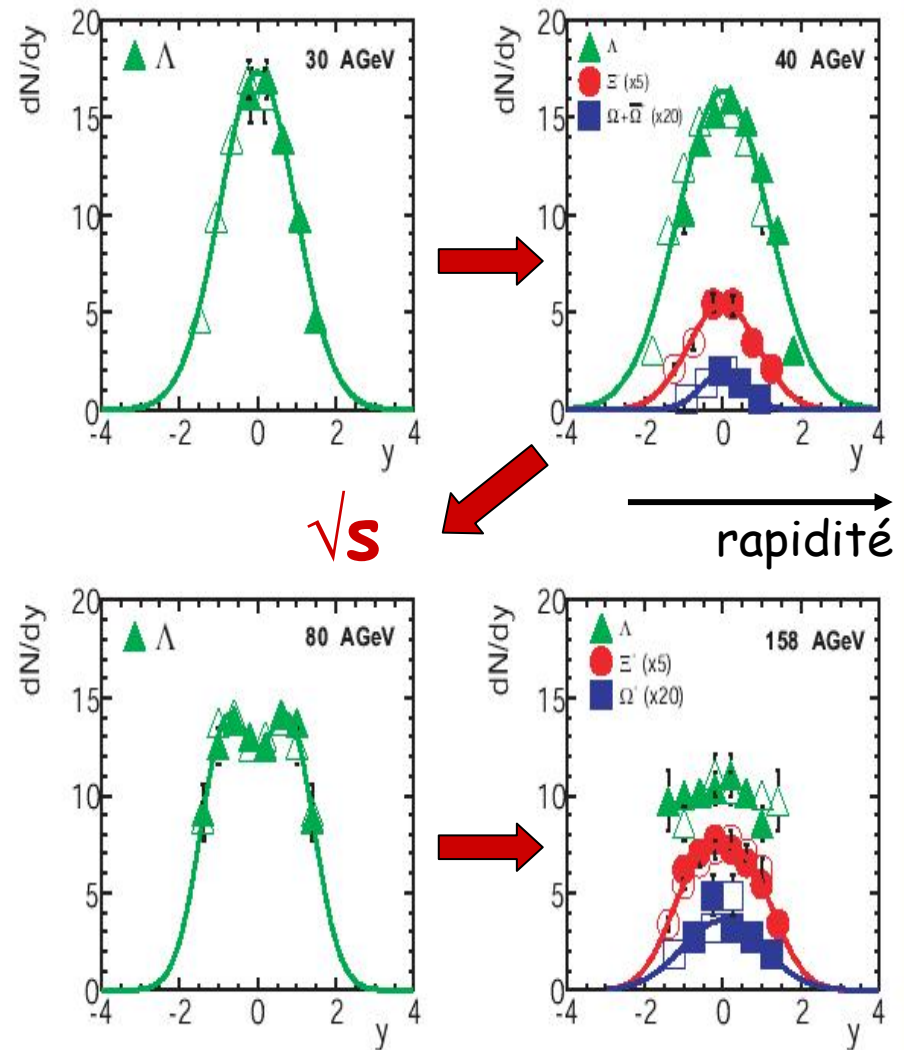
Baryon versus antibaryon

- Baryons $>$ Antibaryons
 $\sim K_S$
- Faible dépendance
 avec l'énergie



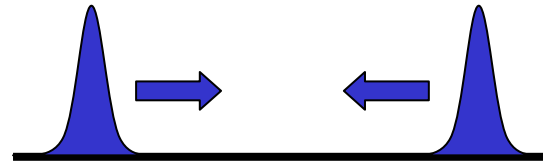
Où sont les hyperons ?

- Distributions en rapidité vont de gaussiennes à un plateau en passant par un chameau.
- Baryons induits par les baryons initiaux des faisceaux
- « arrêt » → « transparence »

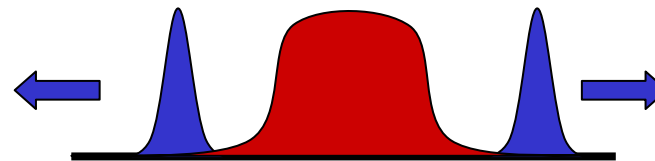


Arrêt / transparence (super-naïf)

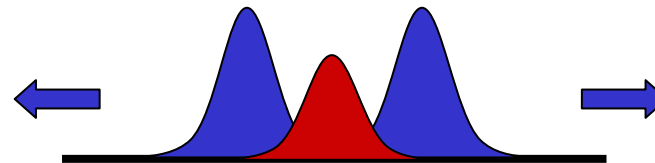
État initial



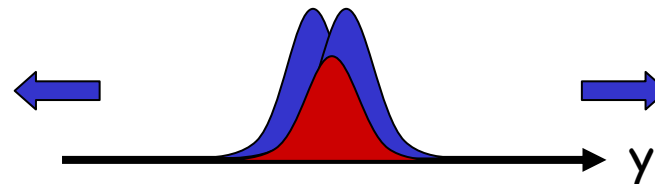
Transparence



Intermédiaire



Stopping



K^+/K^- et nombre baryonique

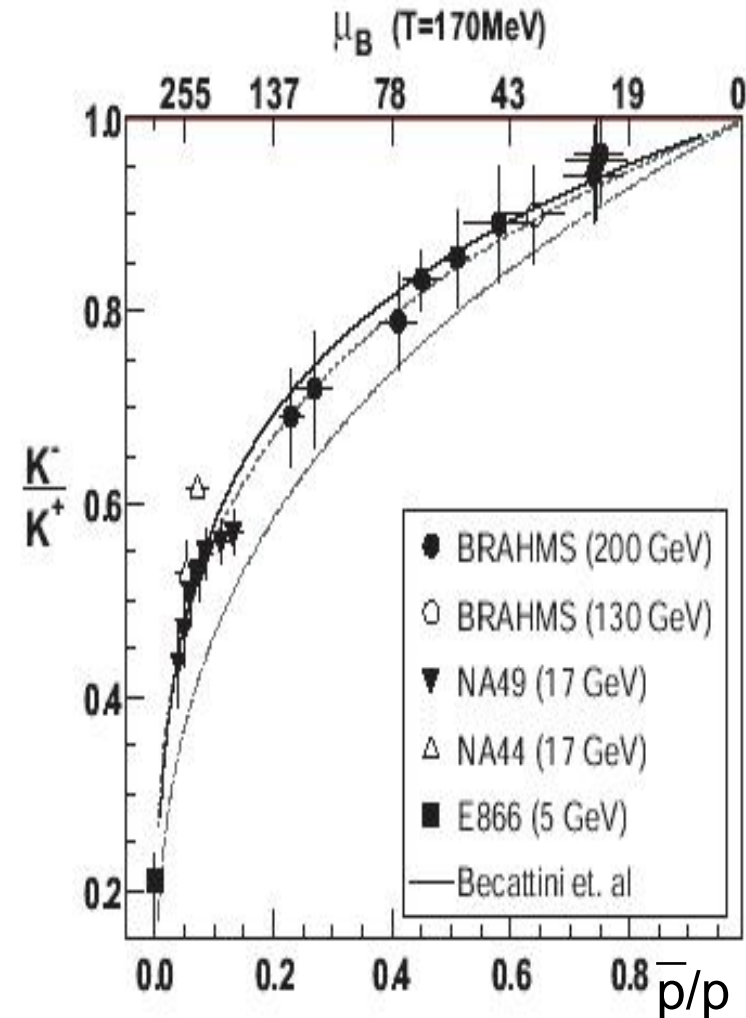
- Les baryons étranges sont produits pour conserver le nombre baryonique !
- Pareil pour le K^+ !
 - Méson mais contient des quarks u , comme les nucléons.

Corrélation \rightarrow

- « Mémoire » des faisceaux
 - (moins à RHIC)

Augmentation supplémentaire ?

- Qui serait un signe du plasma...



Explications de la corne ?

- Plusieurs idées :

- Ressemble à la densité baryonique
 - Arrêt \rightarrow transparence
- Transition gaz hadronique dominé par baryons \rightarrow mésons
- Modèle thermique hors équilibre

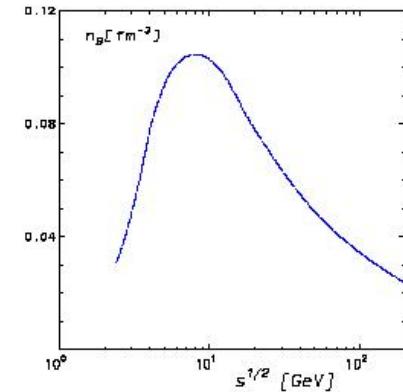
Rafelski, Letessier, hep-ph/0506011

- Prédiction et preuve du plasma

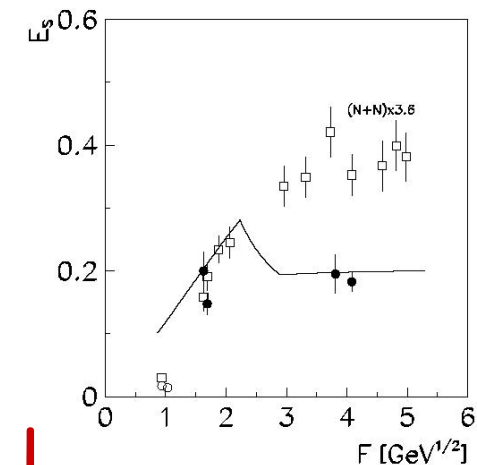
Gaździcki, Gorenstein, APPol B20 (1999) 2705

- Pas de conclusion ferme !

- Traitement baryon \sim étrangeté !

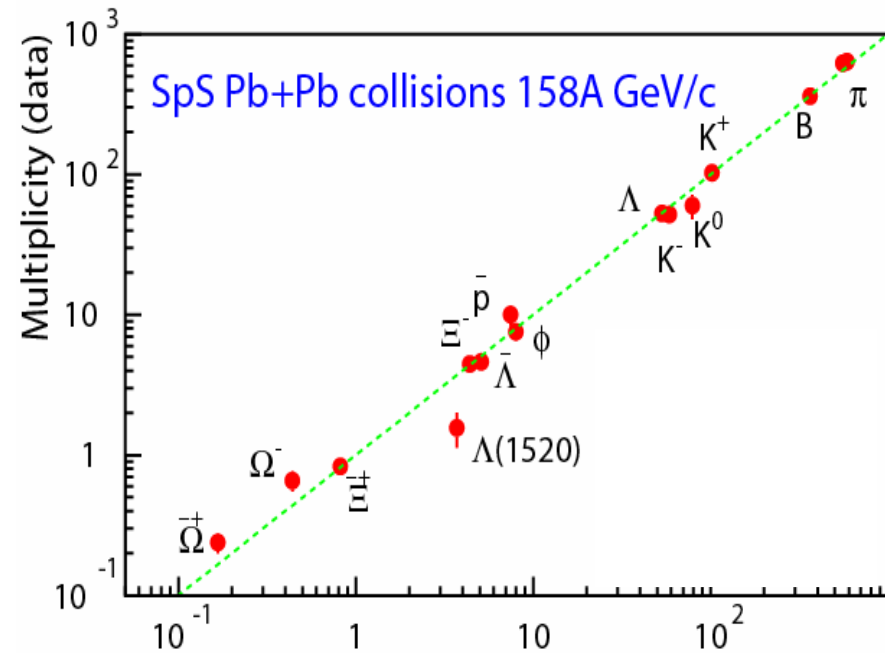


Cleymans & al, PLB615 (2005) 50



2. Qui sort d'une collision ?

- Mesures des multiplicité des particules (expérience NA49)



Diverses mesures de NA49 résumées par Becattini et al, PRC69 (2004) 024905

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

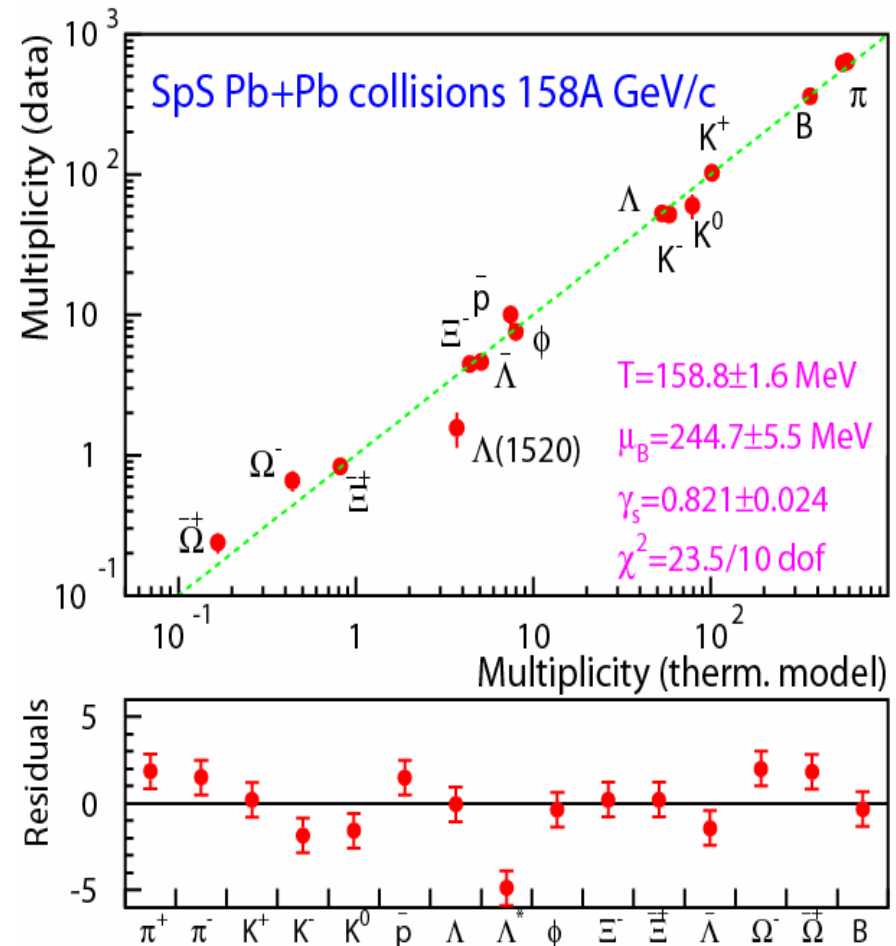
$$\exp[\mu \cdot \mathbf{q}_j / T] \rightarrow \exp[\mu \cdot \mathbf{q}_j / T] \gamma_S^{n_s}$$

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

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

Qui sort d'une collision ?

- T_{chim} proche de T_{crit} !
- $\mu_B \neq 0$
 - Il reste des baryons
- $\gamma_S < 1$
 - Quarks étranges ne sont pas à l'équilibre thermique...
- Volume : $(9,4 \text{ fm})^3$
- Ça marche plutôt bien !
 - 14 taux de production ! (exception du $\Lambda(1520)$...)

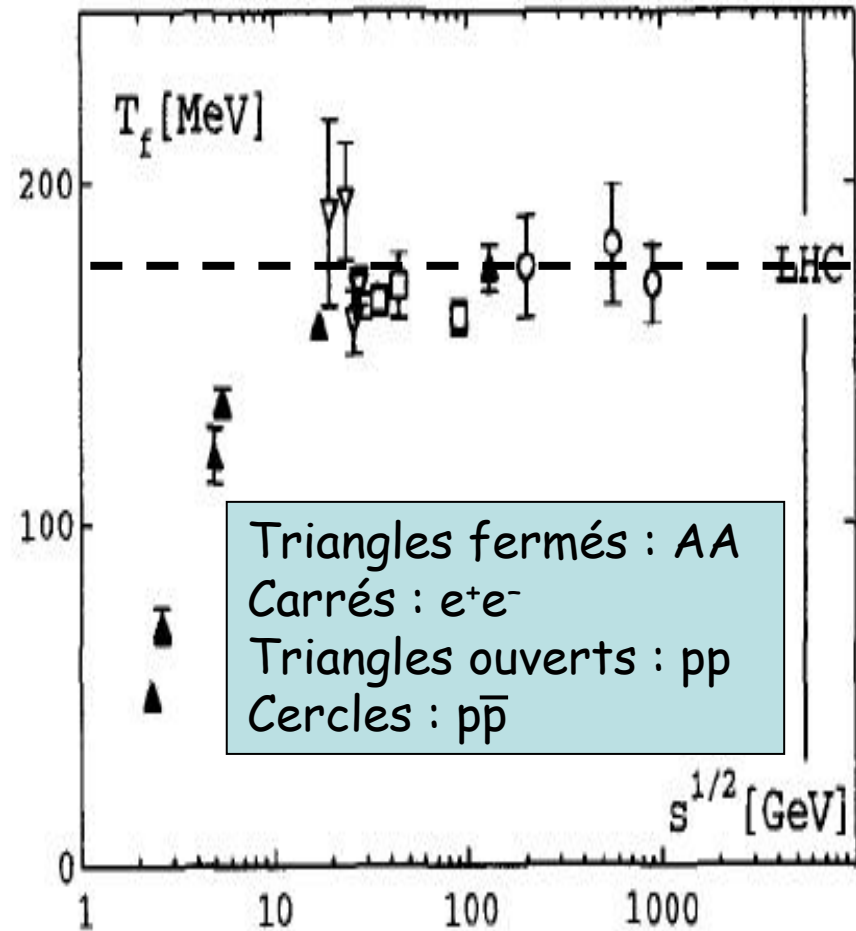


T_{chimique} versus \sqrt{s}

- Saturation de la température de gel chimique à une valeur proche de T_c



? Plasma ?

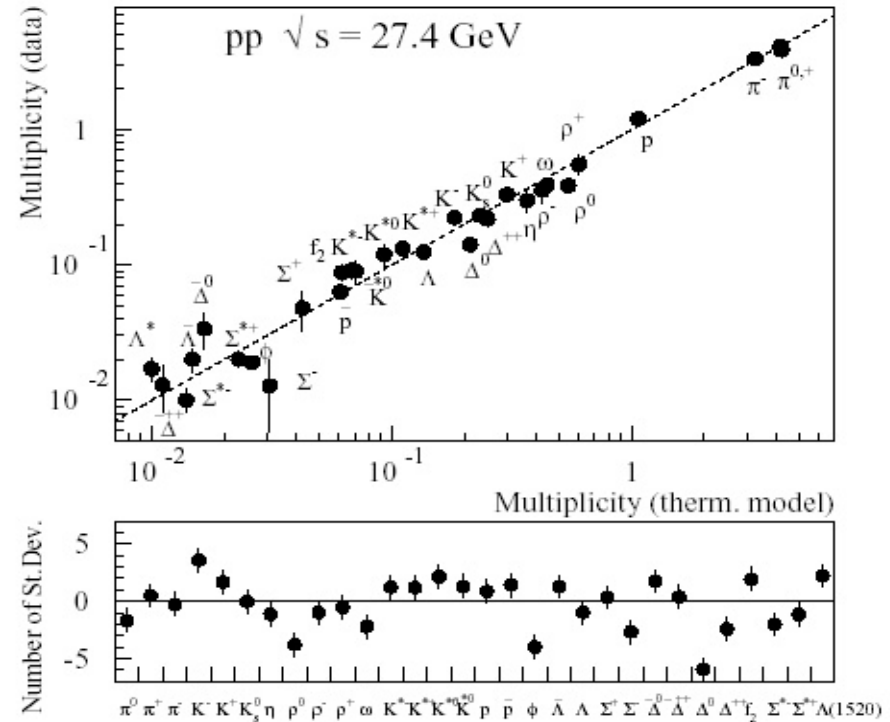


Ça marche aussi pour pp (et ee) !

- Mais traitement grand canonique pour AA
- Canonique pour pp



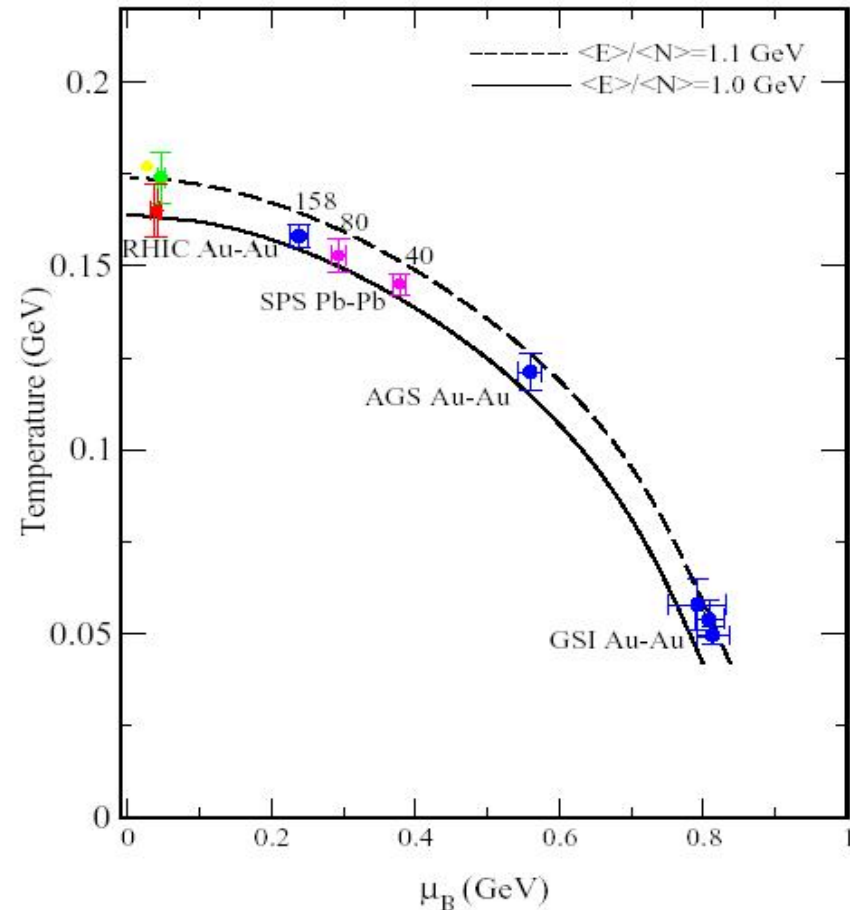
? Plasma ?



$$\begin{aligned} T &= 169,0 \pm 2,1 \pm 3,4 \text{ MeV} \\ VT^3 &= 11,0 \pm 0,7 \pm 1,4 \\ \gamma_S &= 0,510 \pm 0,011 \pm 0,025 \end{aligned}$$

T_{chimique} versus μ_B

- Au gel chimique :
 $\langle E \rangle / \text{hadron} = 1 \text{ GeV}$
Quelque soit l'énergie
(de 2 à 200 GeV)
L'état initial
- e^+e^- , pp, AA
- A RHIC $\mu_B \rightarrow 0$

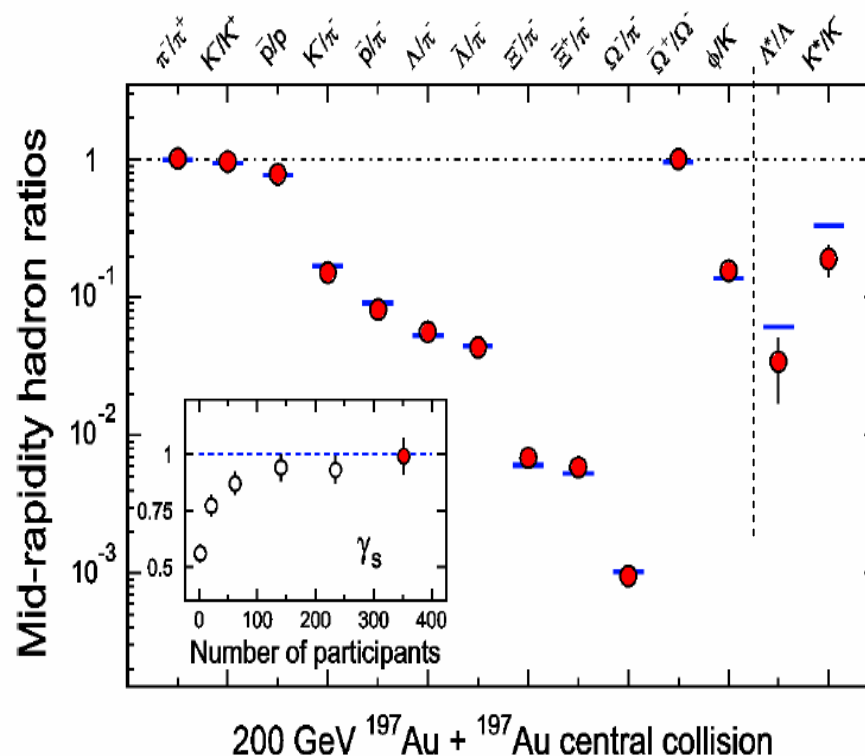


Ajustement thermique @ RHIC

- Plus besoin de γ_s ...
- Les quarks étranges se rapprochent de l'équilibre thermique



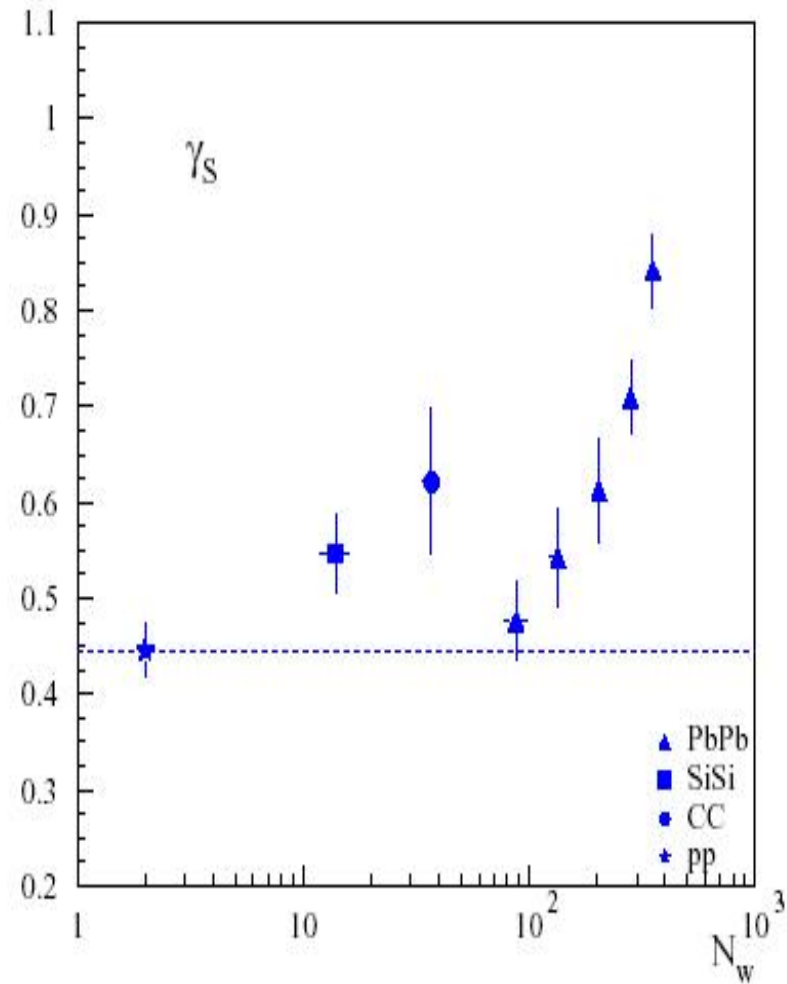
? Plasma ?



$$\begin{aligned}
 T_{\text{chim}} &= 165 \pm 10 \text{ MeV} \sim T_{\text{crit}} \\
 \mu_B &= 24 \pm 4 \text{ MeV} \rightarrow 0 \\
 \gamma_s &= 0,99 \pm 0,07 \rightarrow 1
 \end{aligned}$$

γ_S versus N_{part} ...

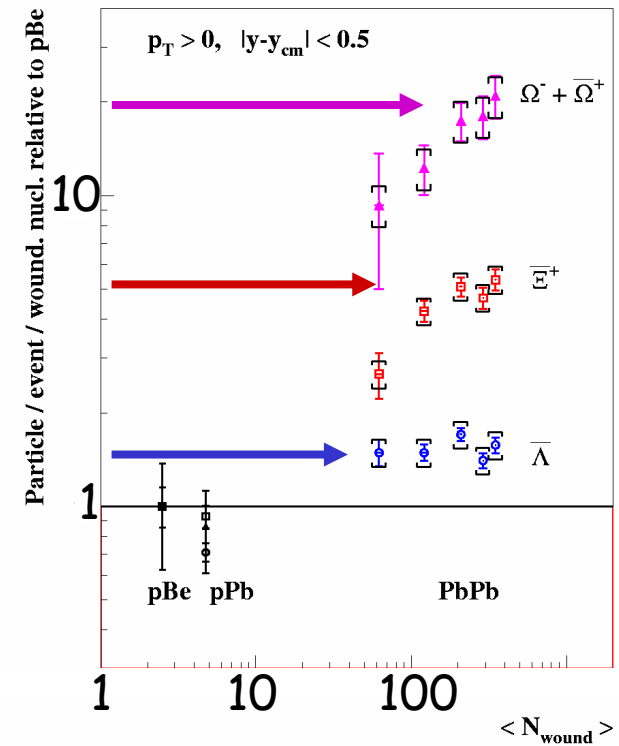
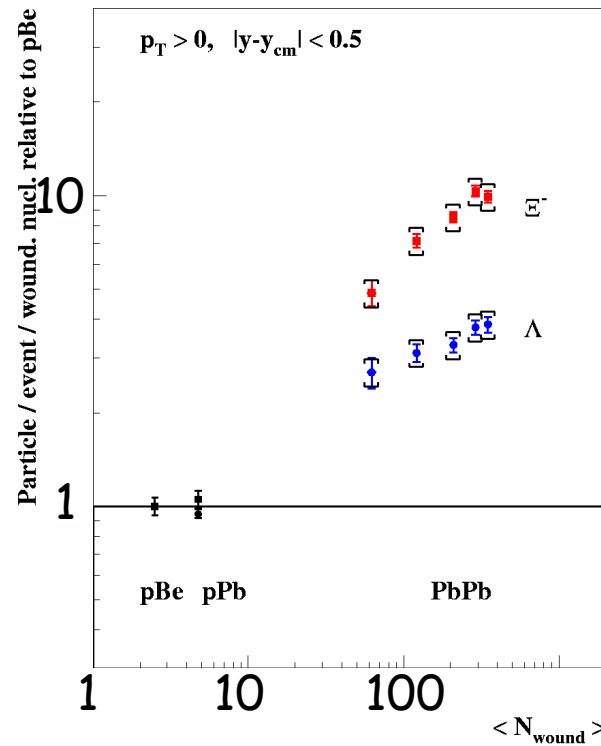
- Au SPS @ 158 AGeV
- A priori, difficile de conclure car γ_S non monotone...



3. Les baryons multiétranges

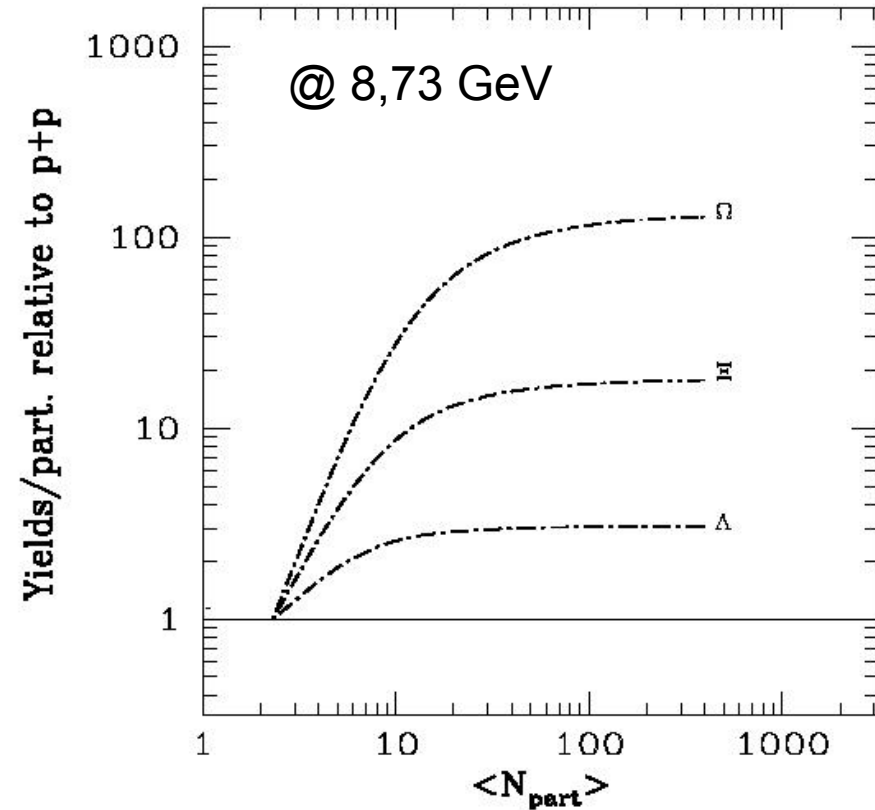
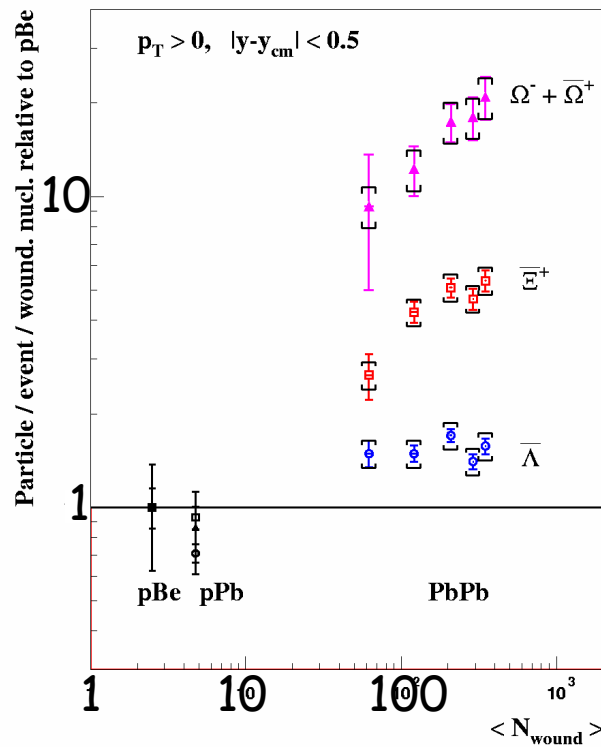
- Pas d'effet en pPb
- Effet croissant avec l'étrangeté !
- Baryons > antibaryons

$$\frac{(\text{Particules} / N_{\text{part}})_{\text{PbPb}}}{(\text{Particules} / N_{\text{part}})_{\text{pBe}}}$$



Prédiction modèle thermique

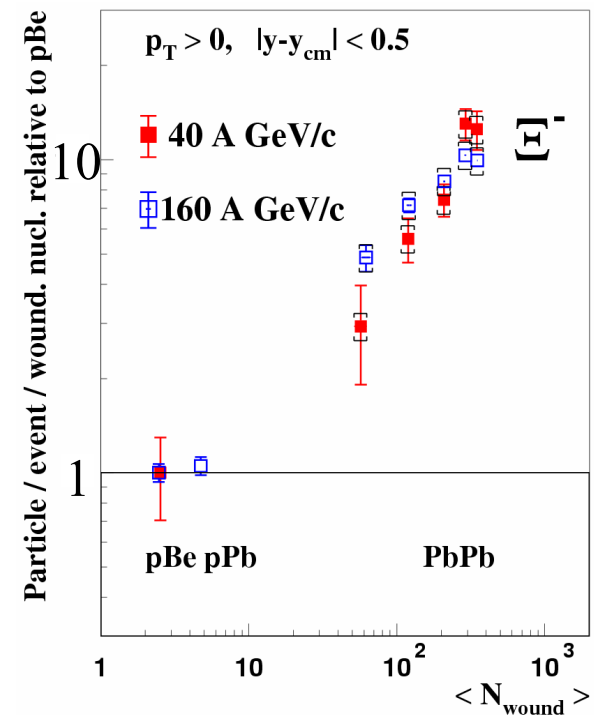
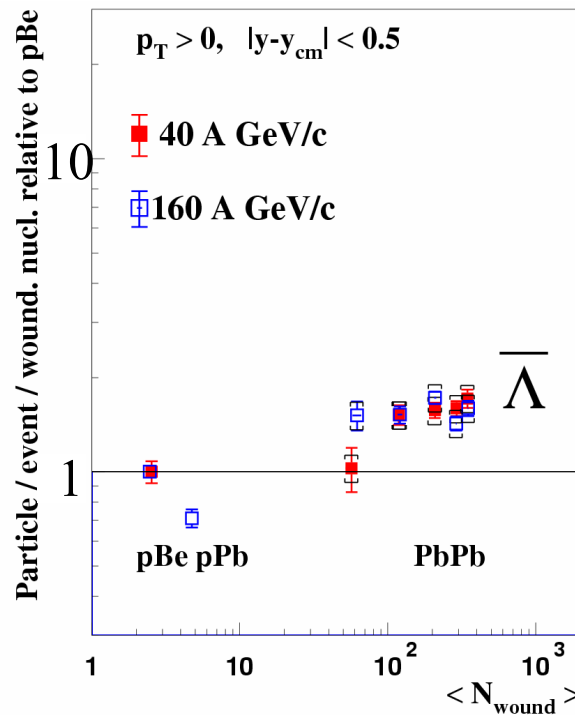
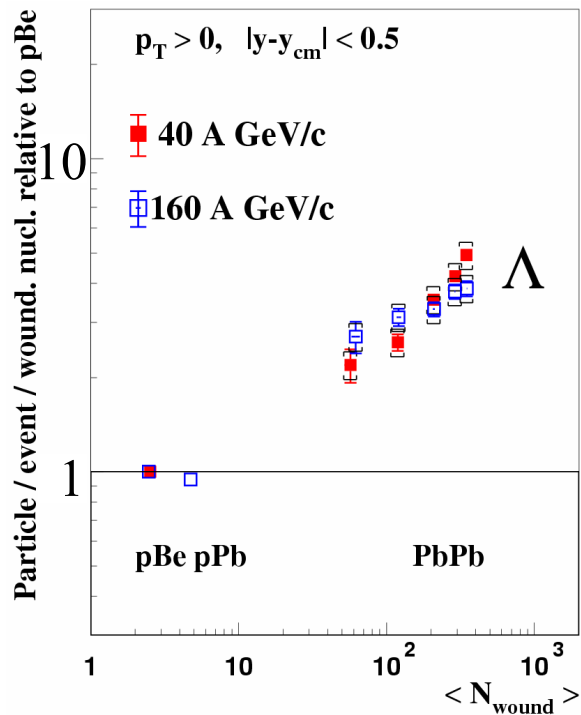
- Saturation...
- À 158 GeV, plutôt une augmentation...



Redlich et al, JPG28 (2002) 2095

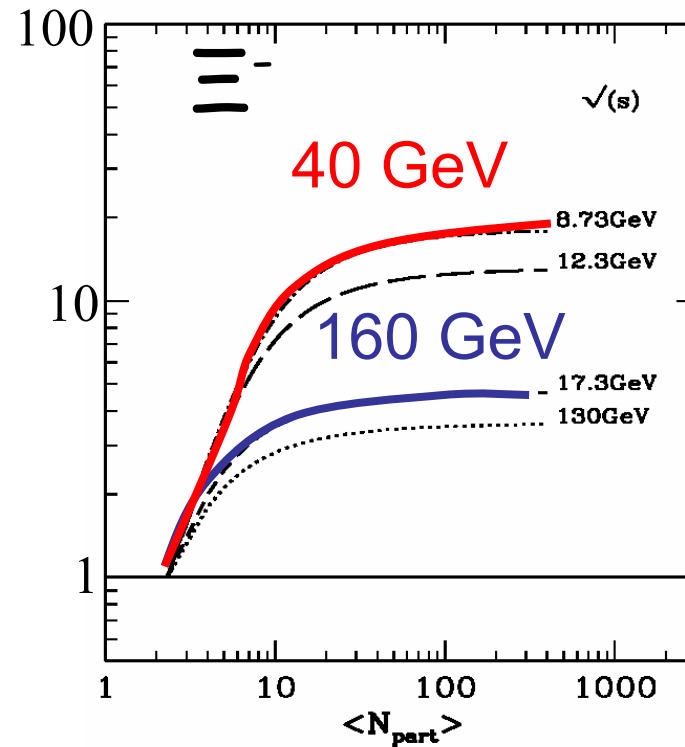
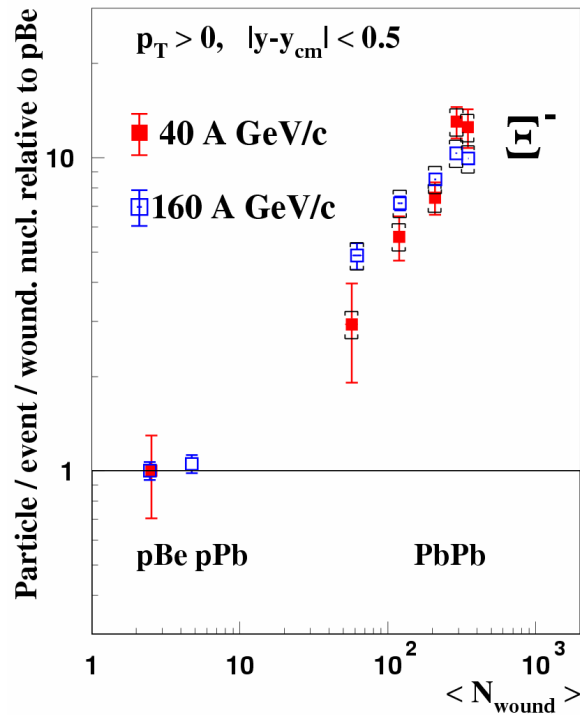
Dépendance avec énergie

- Nouvelles mesures à 40 GeV par WA57



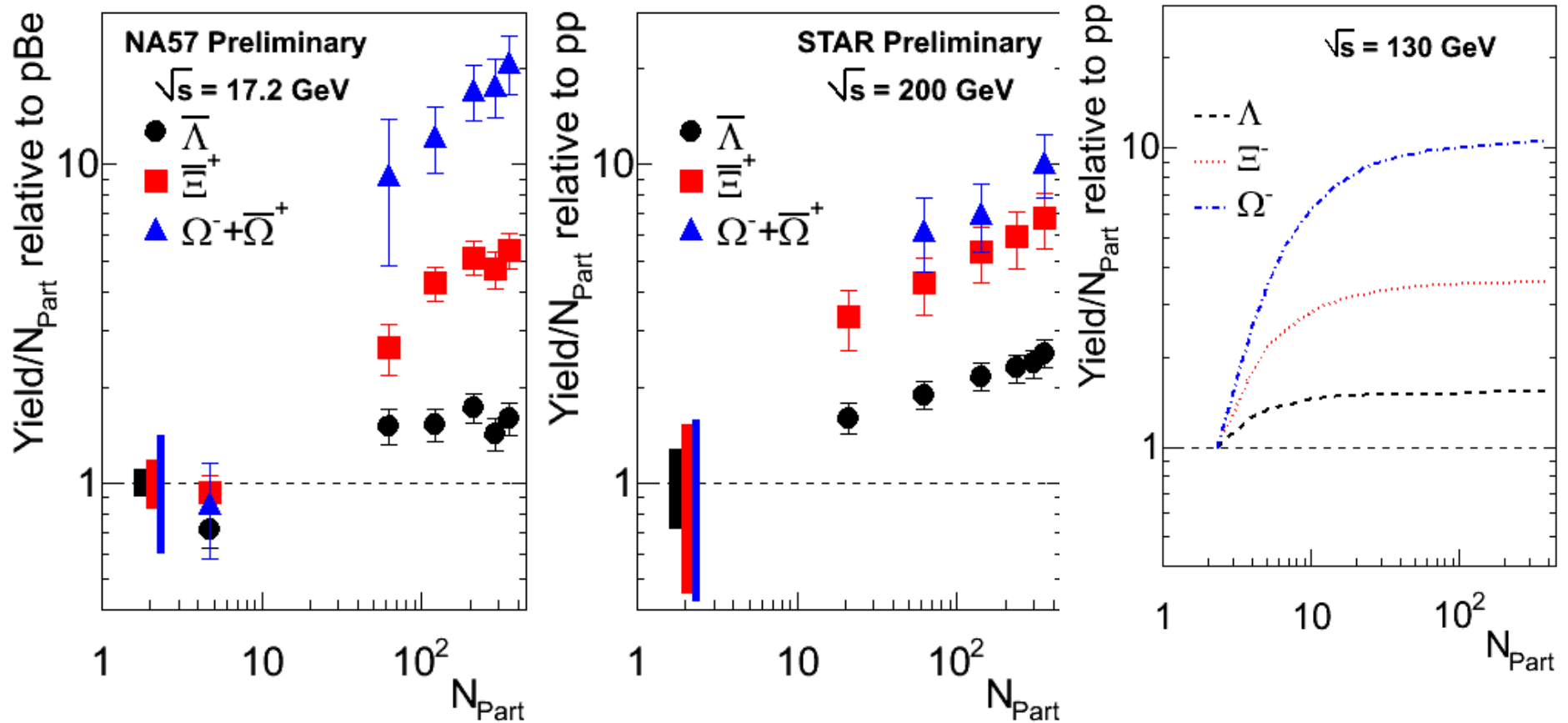
Prédiction modèle thermique

- Ça ne marche pas !
- Problème avec la modélisation du volume.



Comparaison avec RHIC

Un peu moins d'augmentation, moins de saturation...



Conclusions (étranges et vagues)

- Au SPS, l'étrangeté est augmenté conformément à une prédiction théorique.
 - Anti- Ω > Anti- Ξ > Anti- Λ = plasma ?
 - \exists modèles hadroniques qui s'arrangent de ça...
- Modèles thermiques prédisent bien les rappports de multiplicité, dans l'ensemble grand canonique, $\gamma_S \rightarrow 1$
 - Grand volume de corrélation = plasma ?
- Mais échouent à prédire la dépendance en énergie, centralité, ...
 - On ne comprend pas le volume d'interaction

À suivre...