

*Production d'étrangeté du SIS au  
RHIC. Prévisions pour le LHC.*

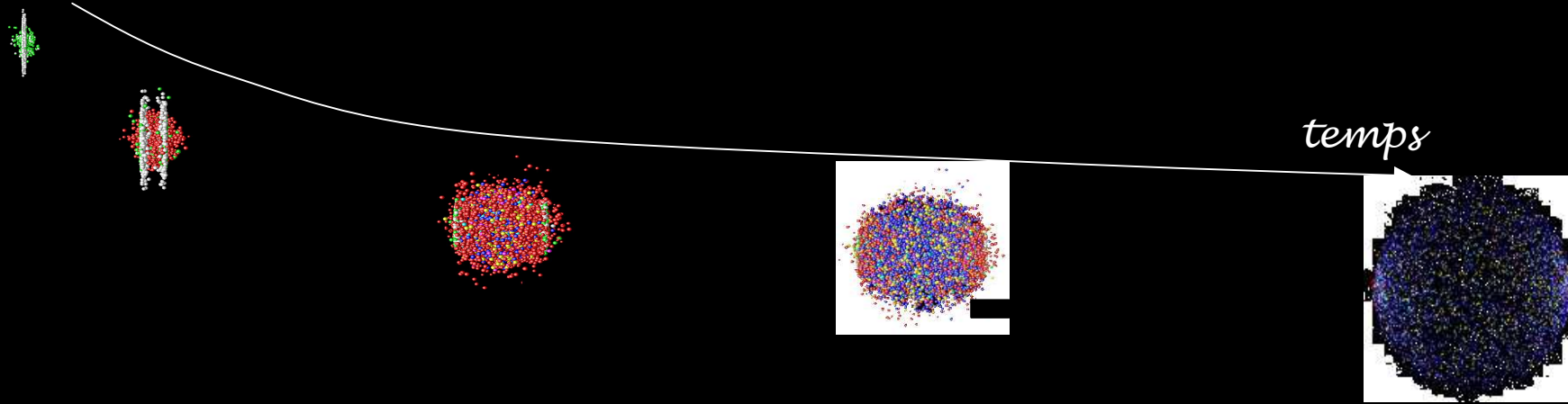
**Magali Estienne**

Mardi 4 juillet 2006



Journées QGP France : l'étrangeté  
Etretat - Juillet 2006

# Exploiter l'étrangeté

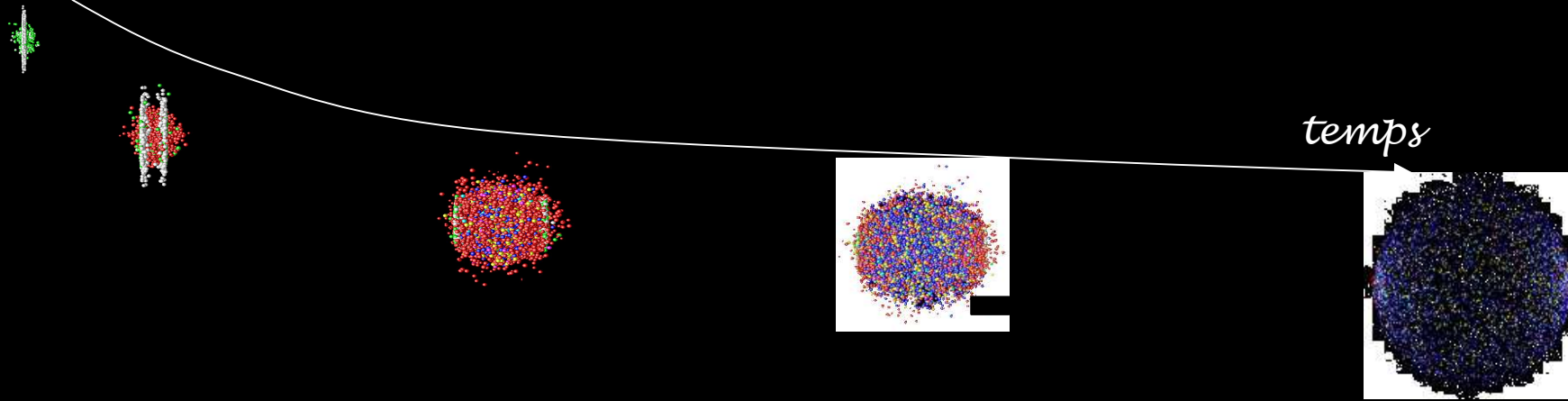


Exploiter l'étrangeté pour faire parler la matière créée :

- Chimie du système
- Dynamique du système

[http:// polywww.in2p3.fr/wikiil](http://polywww.in2p3.fr/wikiil)

# Exploiter l'étrangeté



## - Chimie du système :

Production du SIS au RHIC

Rapports de particules

Etrangeté et volume du système } Scaling universel

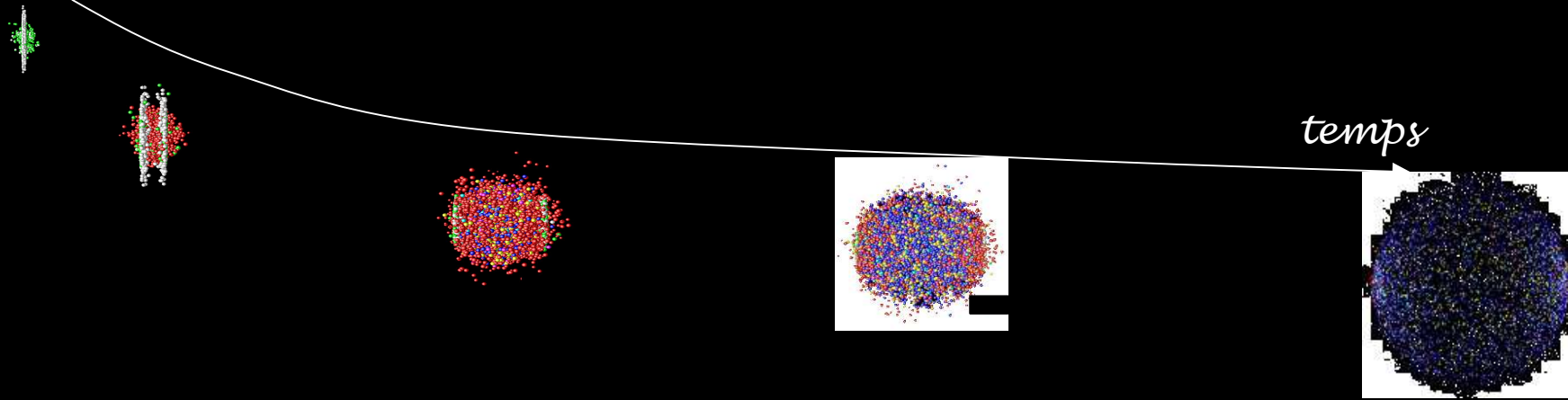
Etrangeté et entropie

Prédictions pour le LHC

## - Dynamique du système :

<http://polywww.in2p3.fr/wikiil>

# Exploiter l'étrangeté



## - Chimie du système :

Production du SIS au RHIC

Rapports de particules → Hélène Ricaud, Denis Jouan

Etrangeté et volume du système } Scaling universel

Etrangeté et entropie

Prédictions pour le LHC

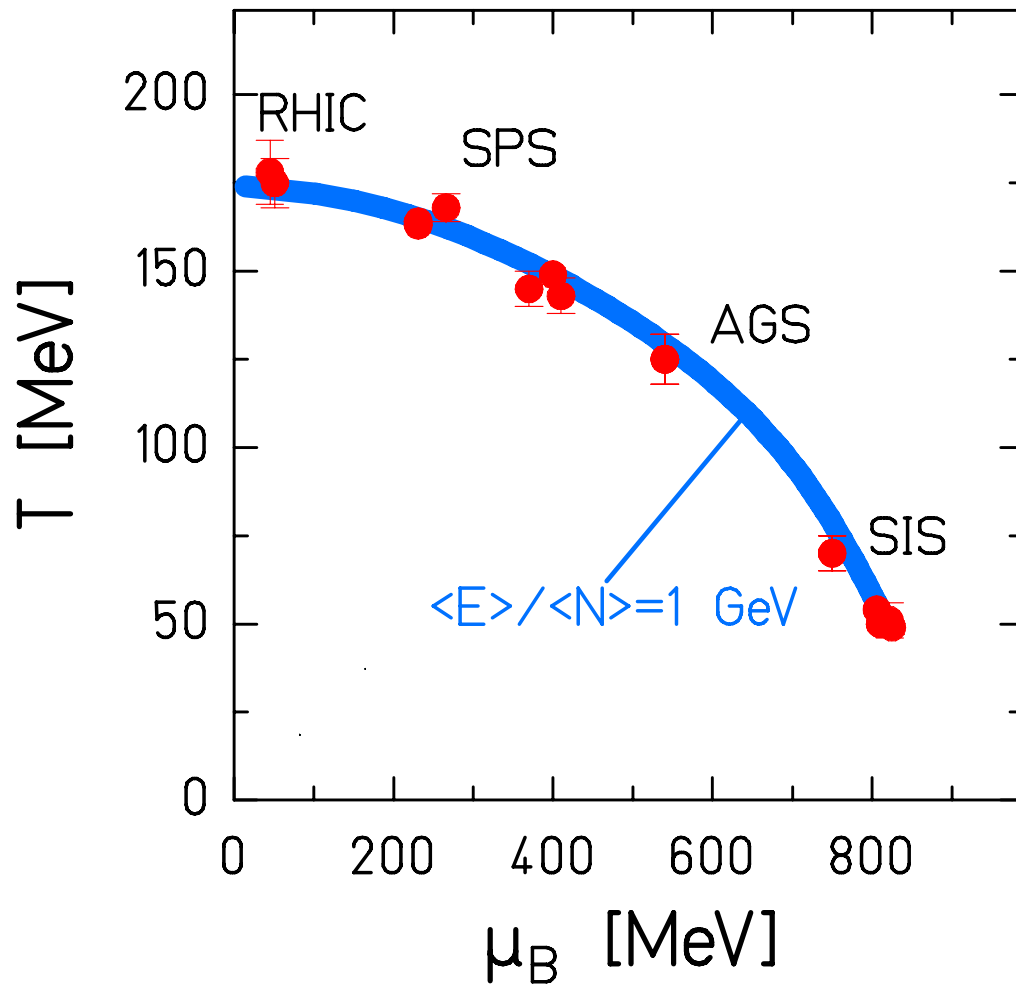
- Dynamique du système : → Jeff Speltz

<http://polywww.in2p3.fr/wikiil>

# *Production du SIS à RHIC*

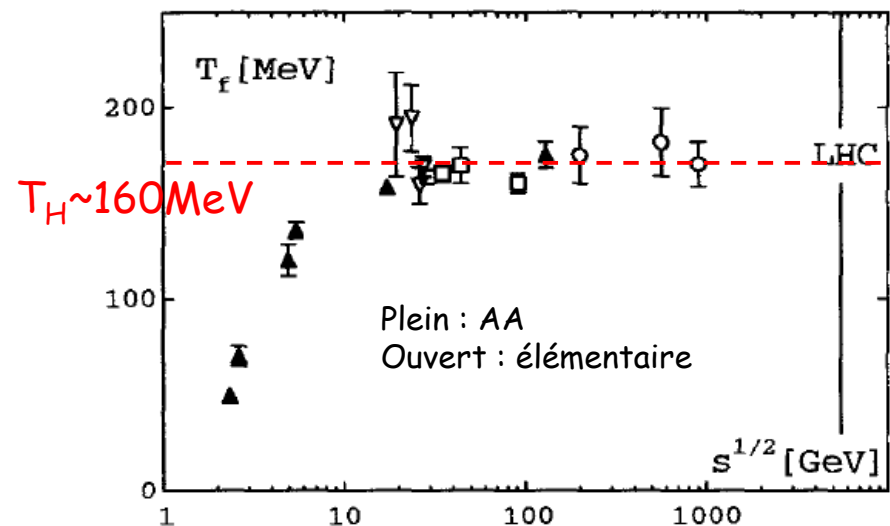
*Rapports de particules...*

# Au freeze-out chimique...



Hagedorn (1965) :

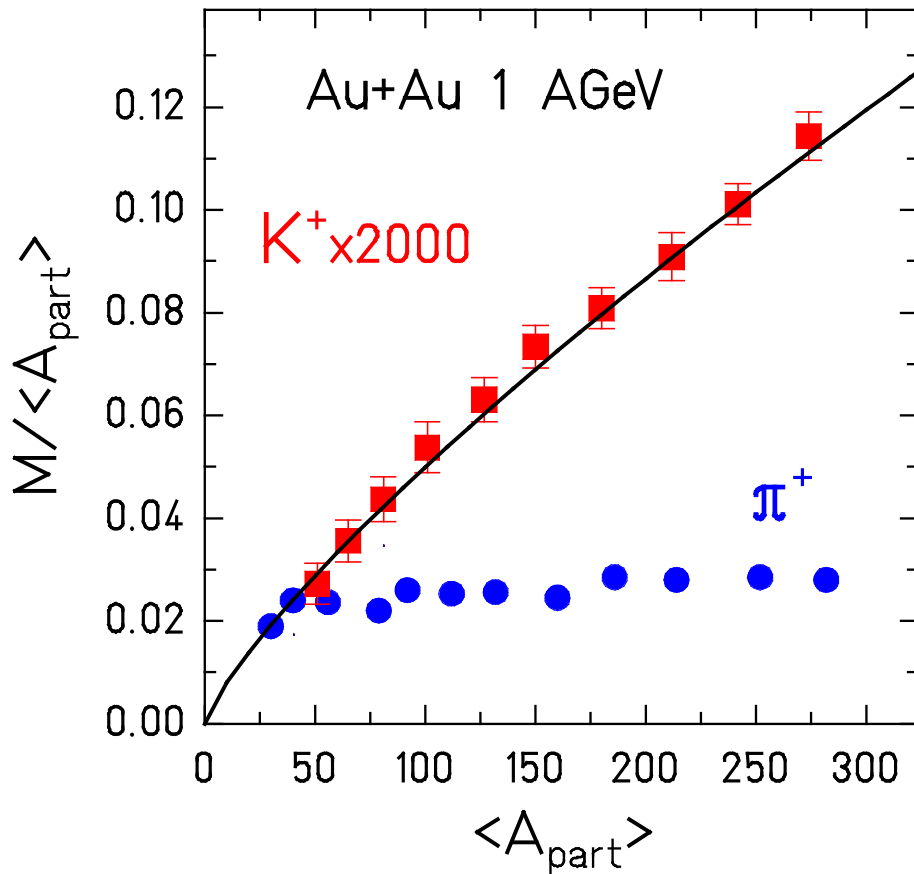
- Augmenter  $\sqrt{s_{NN}}$  en p+p :
- ⇒ augmentation du nombre de particules produites
- ⇒ augmentation de l'entropie  $S$  du milieu
- ⇒ pas d'augmentation de température



Satz: Nucl.Phys. A715  
(2003) 3c

# Une des premières mesures de l'étrangeté

## Collaboration KaoS



➤  $K^-$  et  $K^+$  sont liés par échange d'étrangeté

➤ Loi d'action de masse

✘ A 1 A.GeV, pions produits par collisions N-N directes, le seuil pour les Kaons est de 1.58 A.GeV  $\Rightarrow$  effets collectifs pour accumuler l'énergie nécessaire à leur production

✘ Dépendance linéaire de la densité de  $K^+$  avec la taille du système.

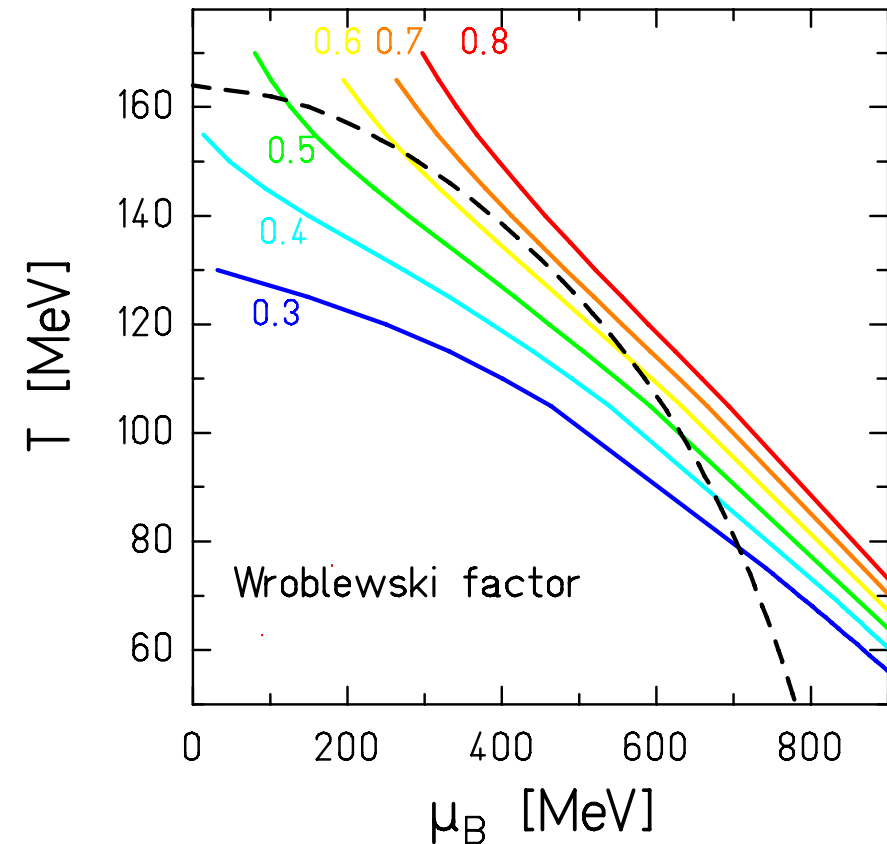
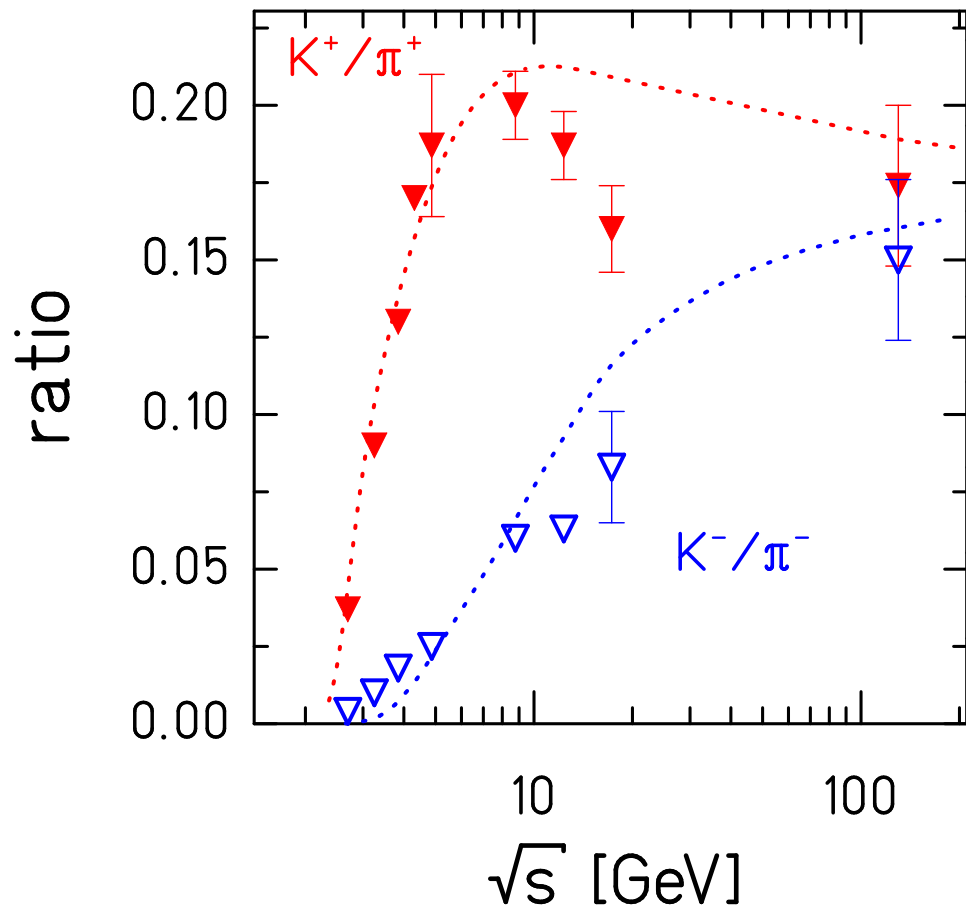
✘ Parce que la température est faible et le nombre de particules produites est faible, l'étrangeté doit être conservée totalement

$\Rightarrow$  traitement canonique !

$$n_{K^+} \sim \exp\left(-\frac{E_{K^+}}{T}\right) \left[ g_{\Lambda} V \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \exp\left(-\frac{(E_{\Lambda} - \mu_B)}{T}\right) \right]$$

$$n_{K^-} \sim \exp\left(-\frac{E_{K^-}}{T}\right) \left[ g_{K^+} V \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \exp\left(-\frac{(E_{K^+})}{T}\right) \right]$$

# Maximum d'étrangeté à 30 GeV/A

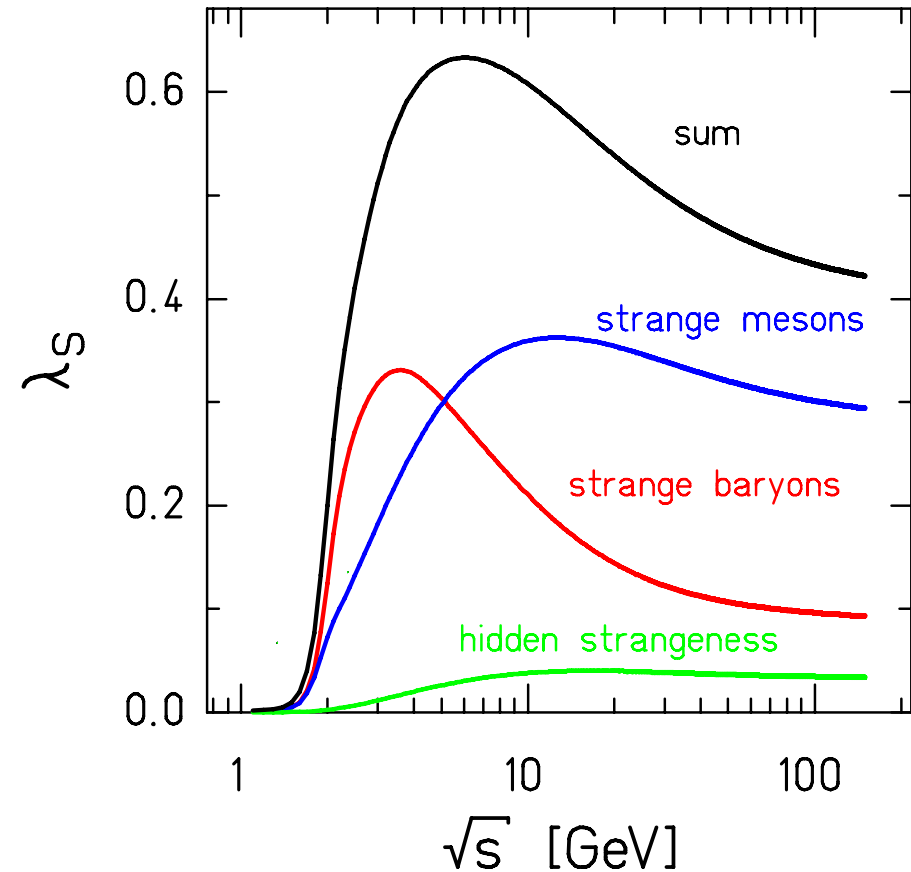
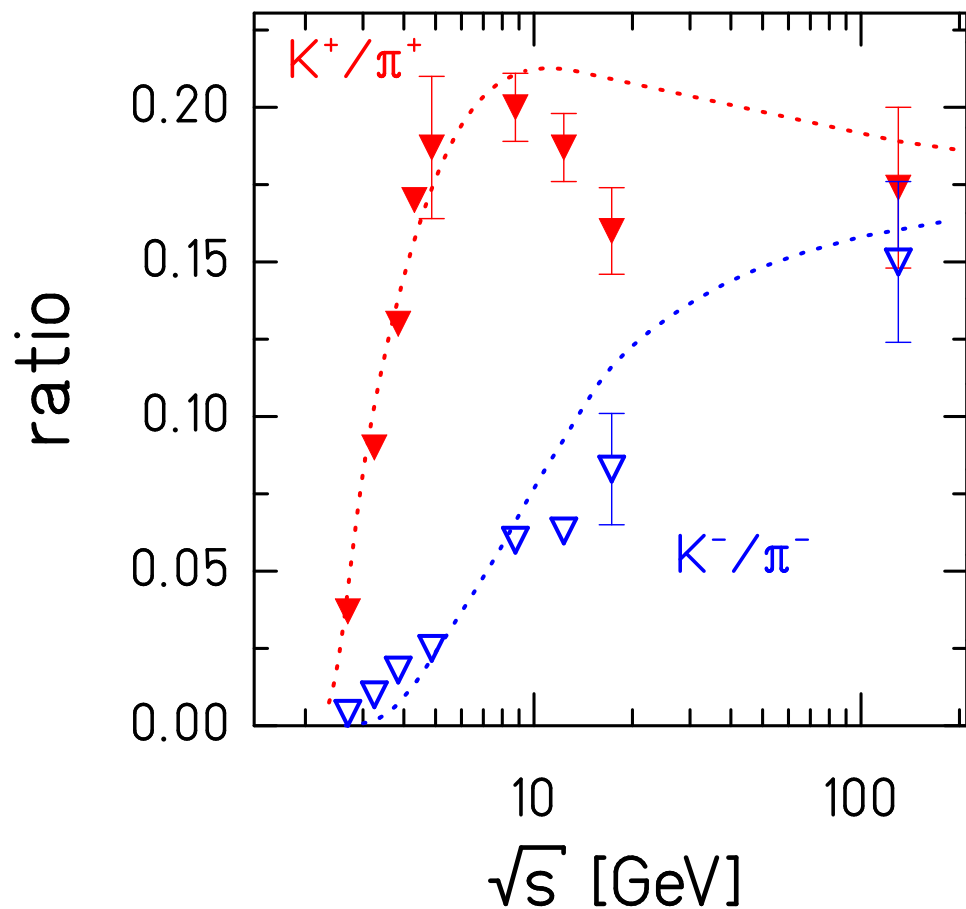


$$\lambda_S = 2 s\bar{s} / (u\bar{u} + d\bar{d})$$

- ✘ Au SPS et au delà : production de  $K^+$  et  $K^-$  par création de paire  $K^+K^-$
- ✘ Maximum des rapports autour de 30 GeV/A
- ✘ Bien reproduits par les modèles statistiques



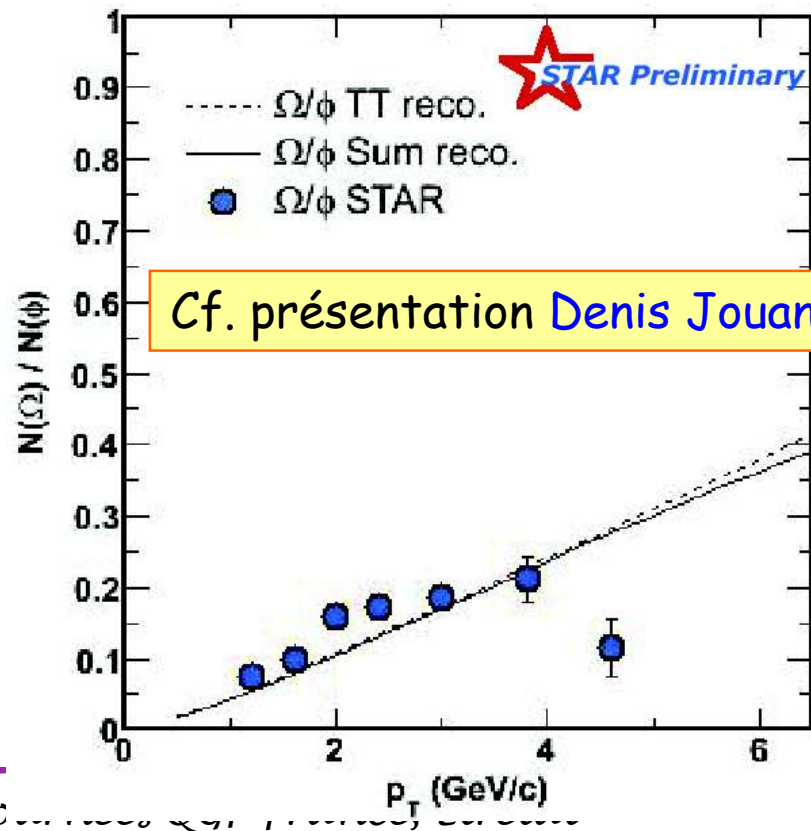
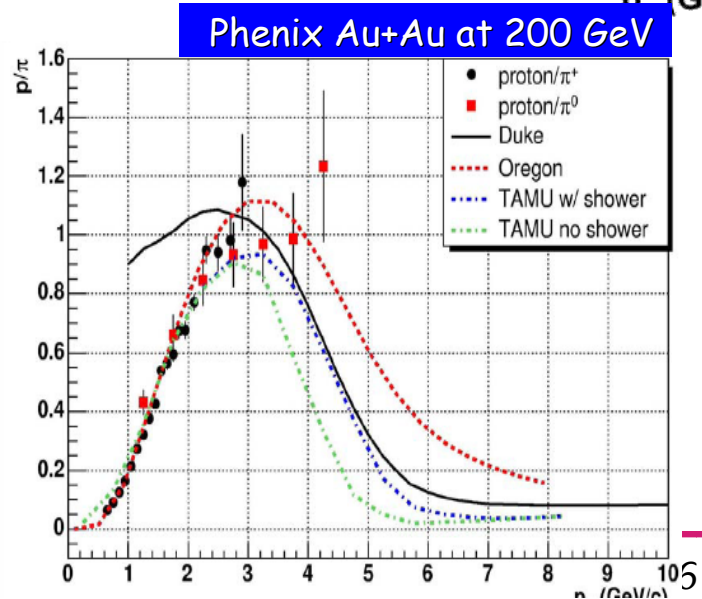
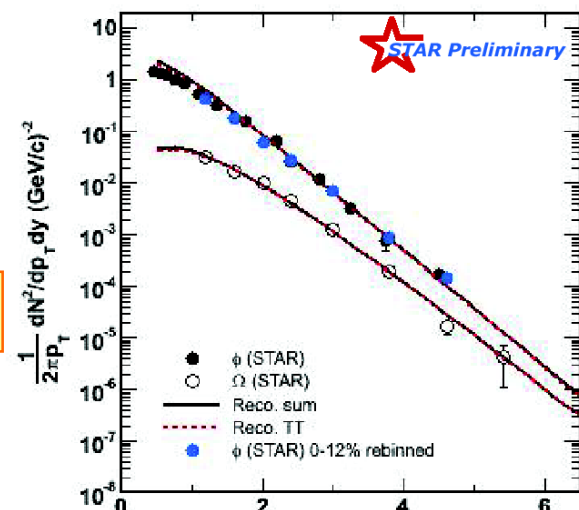
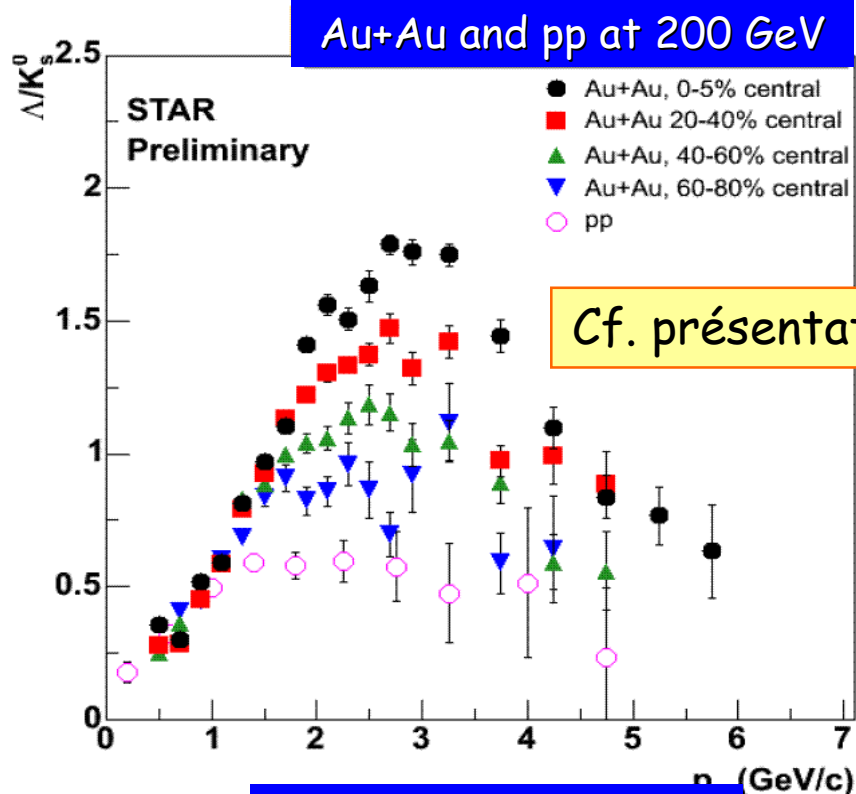
# Maximum d'étrangeté à 30 GeV/A



$$\lambda_S = 2 s\bar{s} / (u\bar{u} + d\bar{d})$$

- ✘ Au SPS et au delà : production de K<sup>+</sup> et K<sup>-</sup> par création de paire K<sup>+</sup>K<sup>-</sup>
- ✘ Maximum des rapports autour de 30 GeV/A
- ✘ Bien reproduits par les modèles statistiques

# Dépendance baryons/mésons et coalescence



# *Etrangeté et volume de corrélation*

*Quel scaling pour les observables expérimentales ?*

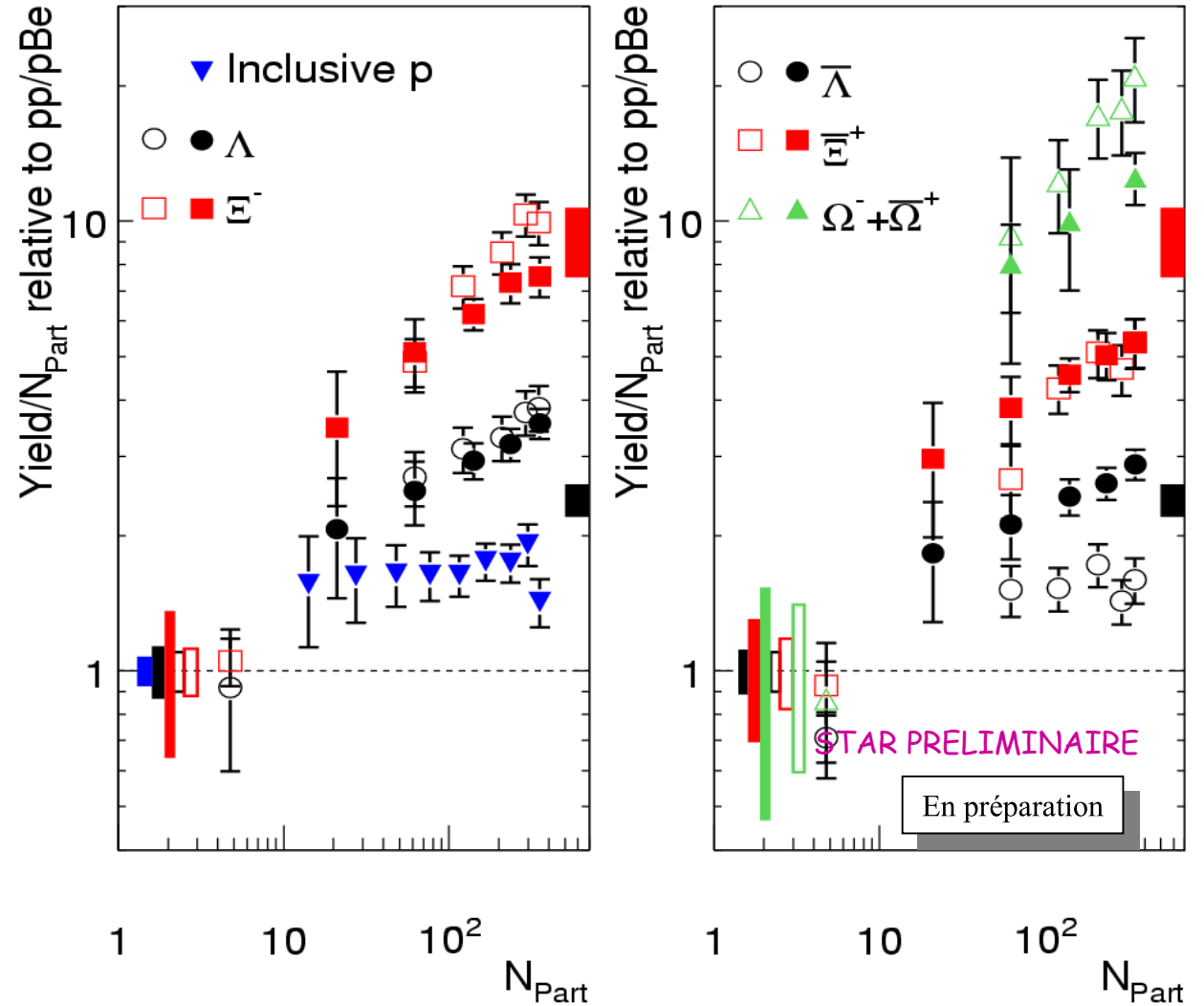
# Augmentation d'étrangeté

✖ Étude du double rapport d'augmentation d'étrangeté vs centralité :

$$E(i) = \frac{(dN/dy)_{AA} / N_{part}}{(dN/dy)_{pp/pBe} / 2}$$

- 1 - E plus grand quand s et centralité augmentent
- 2 - E non linéaire avec  $N_{part}$
- 3 - Données SPS ~ RHIC

Symboles pleins - STAR Au-Au  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV  
Symboles vides - NA57 Pb-Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$  GeV



# Augmentation d'étrangeté

✗ Étude du double rapport d'augmentation d'étrangeté vs centralité :

$$E(i) = \frac{(dN/dy)_{AA} / N_{part}}{(dN/dy)_{pp/pBe} / 2}$$

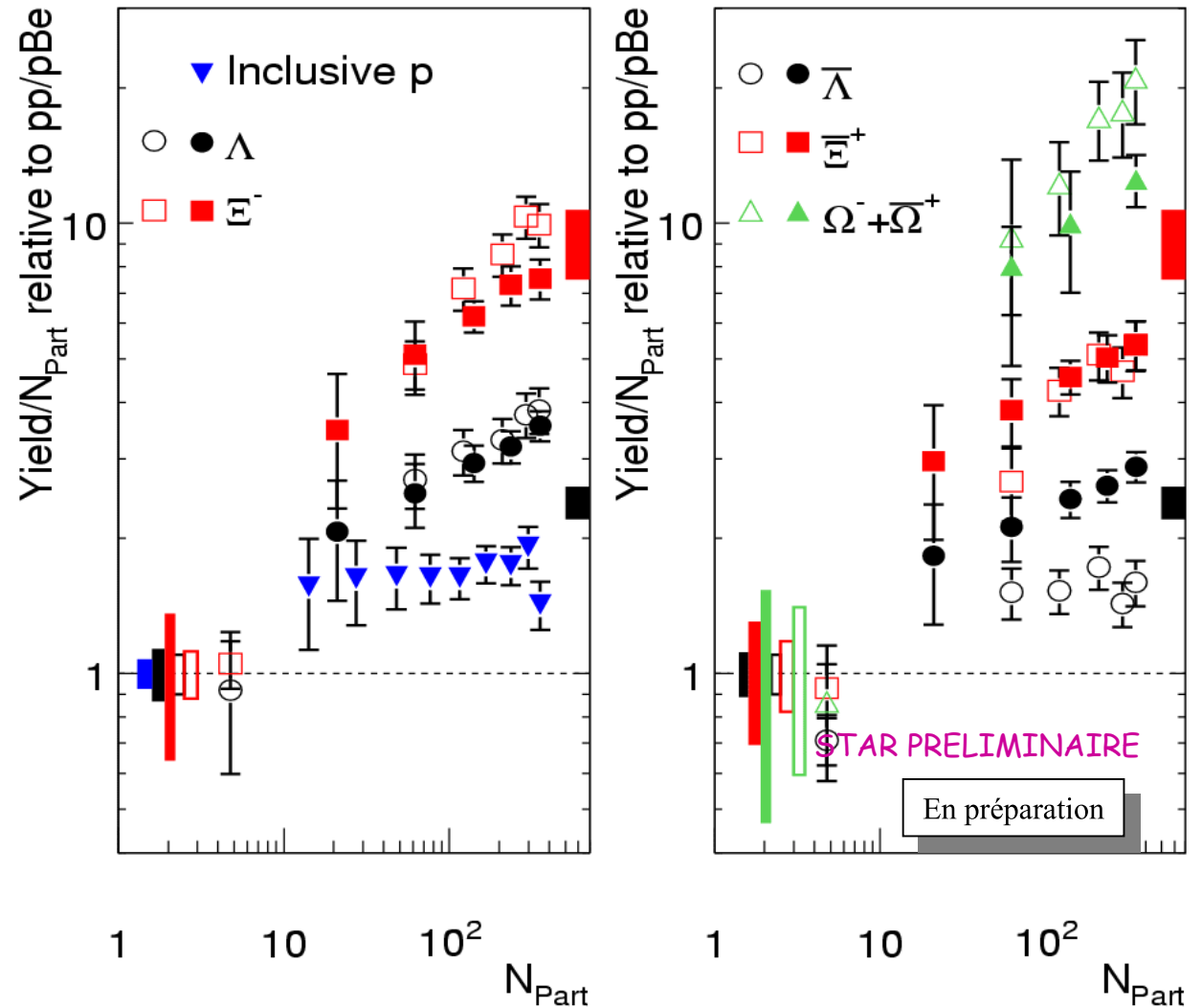
- 1 - E plus grand quand s et centralité augmentent
- 2 - E non linéaire avec  $N_{part}$
- 3 - Données SPS ~ RHIC

✗ Suppression de l'espace des phases en p+p :

- p+p : description canonique  
L'étrangeté est supprimée  
⇒ **Suppression canonique**

- Au+Au central : description grand-canonique  
L'étrangeté sature  
⇒ **Plateau vs  $N_{part}$**

Symboles pleins - STAR Au-Au  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV  
Symboles vides - NA57 Pb-Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$  GeV



# Comparaison au modèle de suppression canonique

✗  $T=165-170\text{MeV}$

On suppose la même température pour p+p et Au+Au

✗ Volume de corrélation :

$$V = (A_{NN}) \cdot V_0$$

$$A_{NN} = N_{\text{part}}/2$$

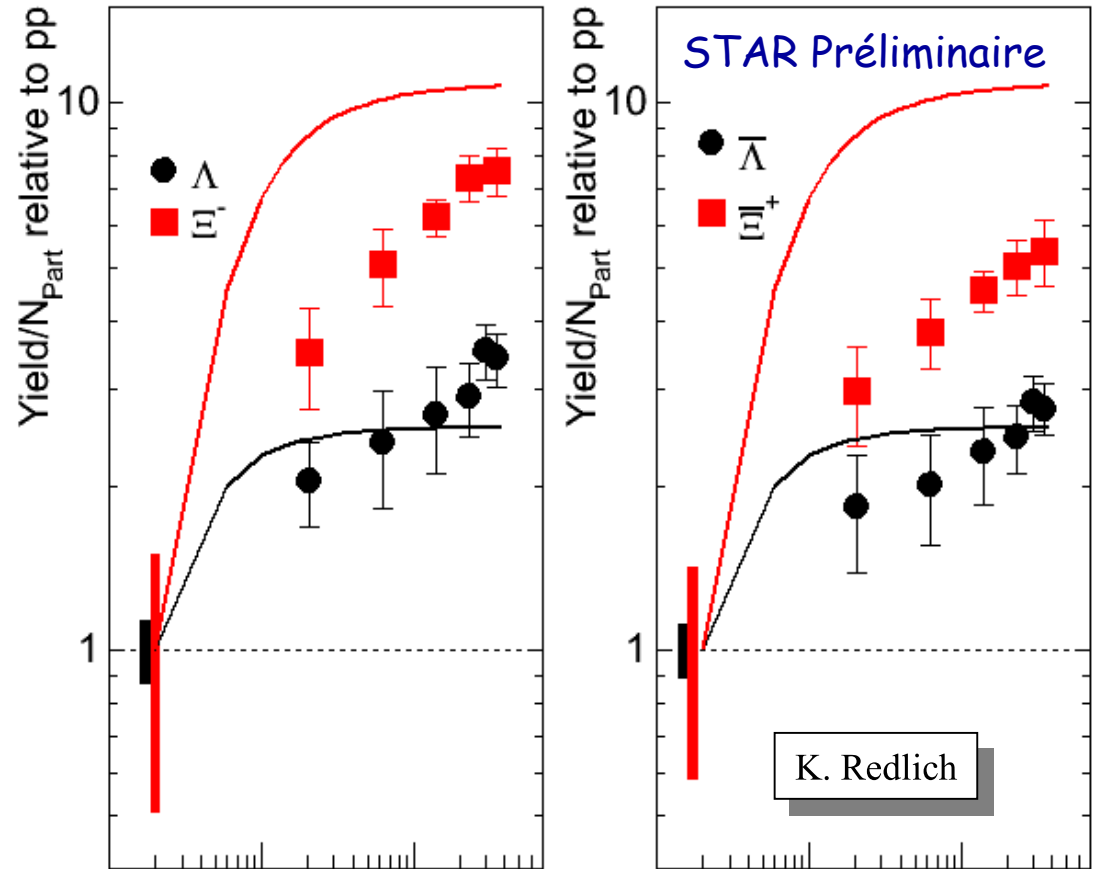
$$V_0 = 4/3 \pi \cdot R_0^3$$

$$R_0 = 1.1 \text{ fm}$$

rayon du proton

$$T = 165 \text{ MeV}$$

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



✗ Il semblerait que  $T=170 \text{ MeV}$  reproduise mieux l'amplitude des données mais pas leur forme

✗ Plusieurs désaccords avec la théorie

# Comparaison au modèle de suppression canonique

✗ T=165-170MeV

On suppose la même température pour p+p et Au+Au

✗ Volume de corrélation :

$$V = (A_{NN}) \cdot V_0$$

$$A_{NN} = N_{part}/2$$

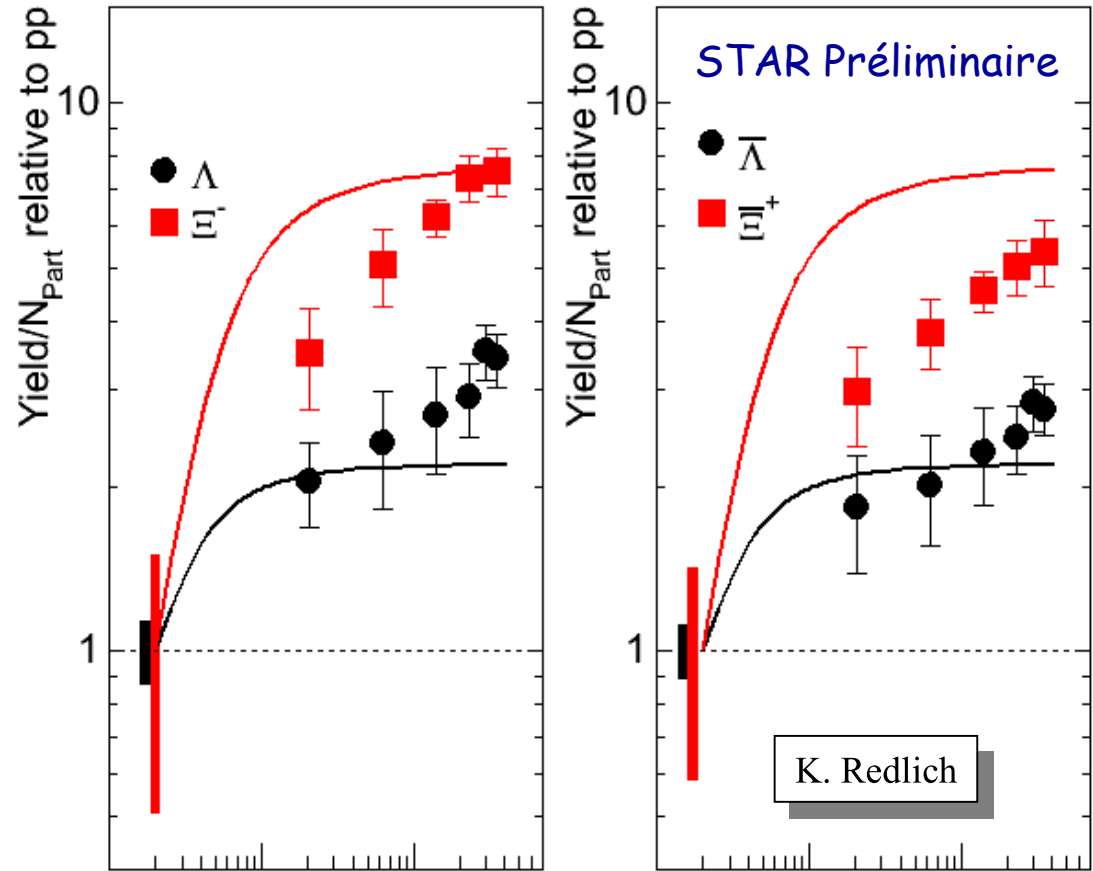
$$V_0 = 4/3 \pi \cdot R_0^3$$

$$R_0 = 1.1 \text{ fm}$$

rayon du proton

$$T = 170 \text{ MeV}$$

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



✗ Il semblerait que T=170 MeV reproduise mieux l'amplitude des données mais pas leur forme

✗ Plusieurs désaccords avec la théorie

# Variations des paramètres

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

Volume de corrélation :

$$V = (A_{NN})^\alpha \cdot V_0$$

$$A_{NN} = N_{\text{part}}/2$$

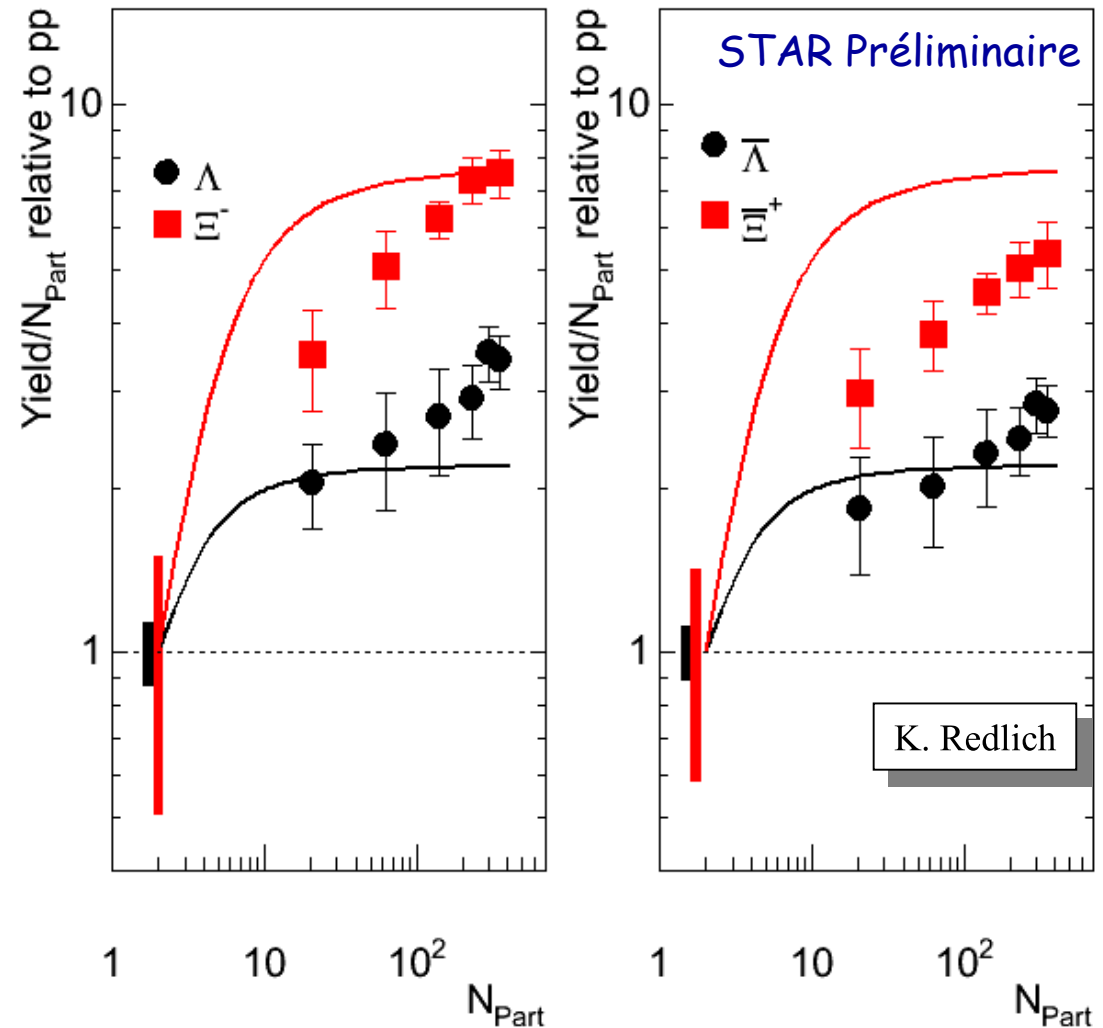
$$V_0 = 4/3 \pi \cdot R_0^3$$

$$R_0 = 1.2 \text{ fm}$$

rayon du proton /  
fortes interactions

$$T = 170 \text{ MeV}$$

$$\alpha = 1/3$$



Une dépendance linéaire avec la géométrie de la collisions ?



# Variations des paramètres

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

Volume de corrélation :

$$V = (A_{NN})^\alpha \cdot V_0$$

$$A_{NN} = N_{\text{part}}/2$$

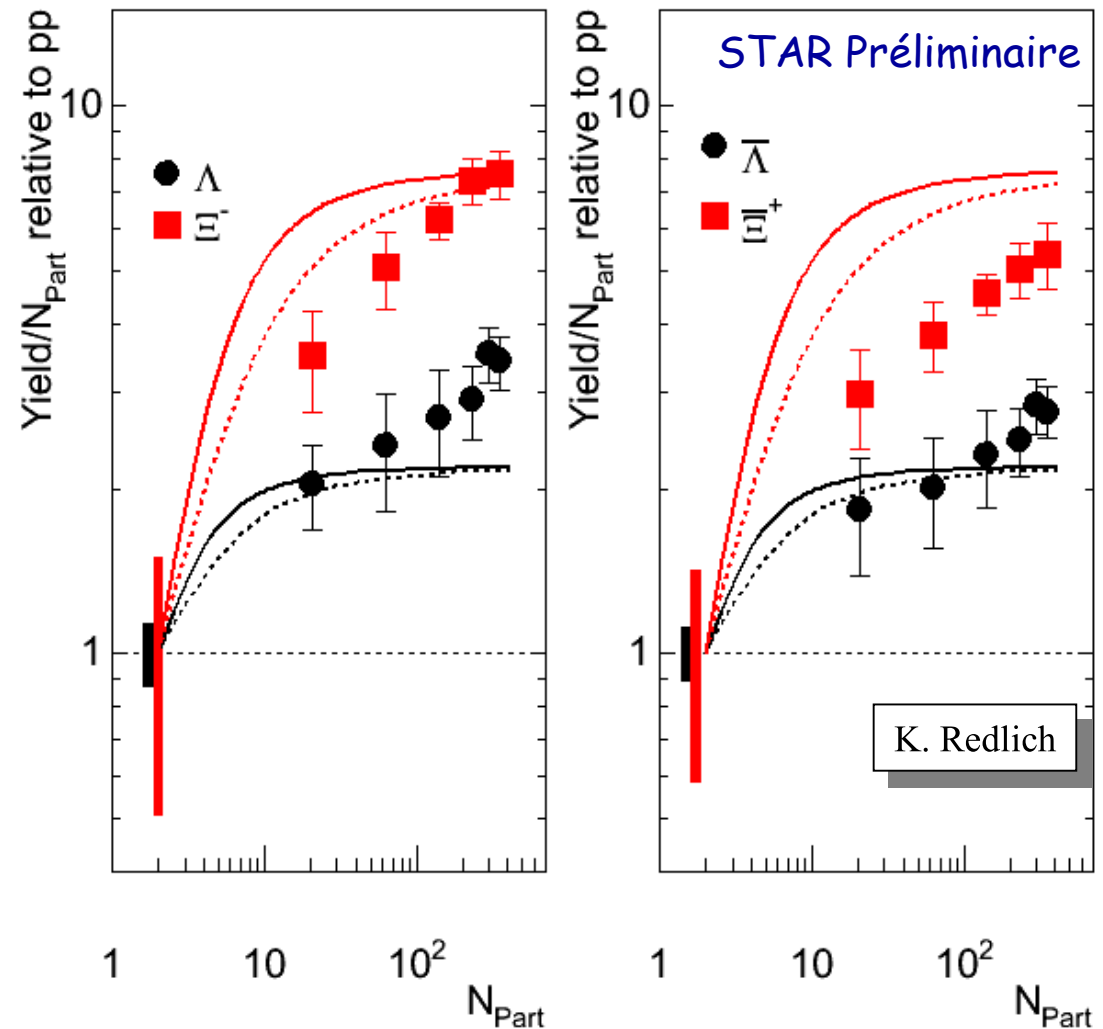
$$V_0 = 4/3 \pi \cdot R_0^3$$

$$R_0 = 1.2 \text{ fm}$$

rayon du proton /  
fortes interactions

$$T = 170 \text{ MeV}$$

$$\alpha = 1/3$$



Une dépendance linéaire avec la géométrie de la collisions ?

# Variations des paramètres

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

Volume de corrélation :

$$V = (A_{NN})^\alpha \cdot V_0$$

$$A_{NN} = N_{\text{part}}/2$$

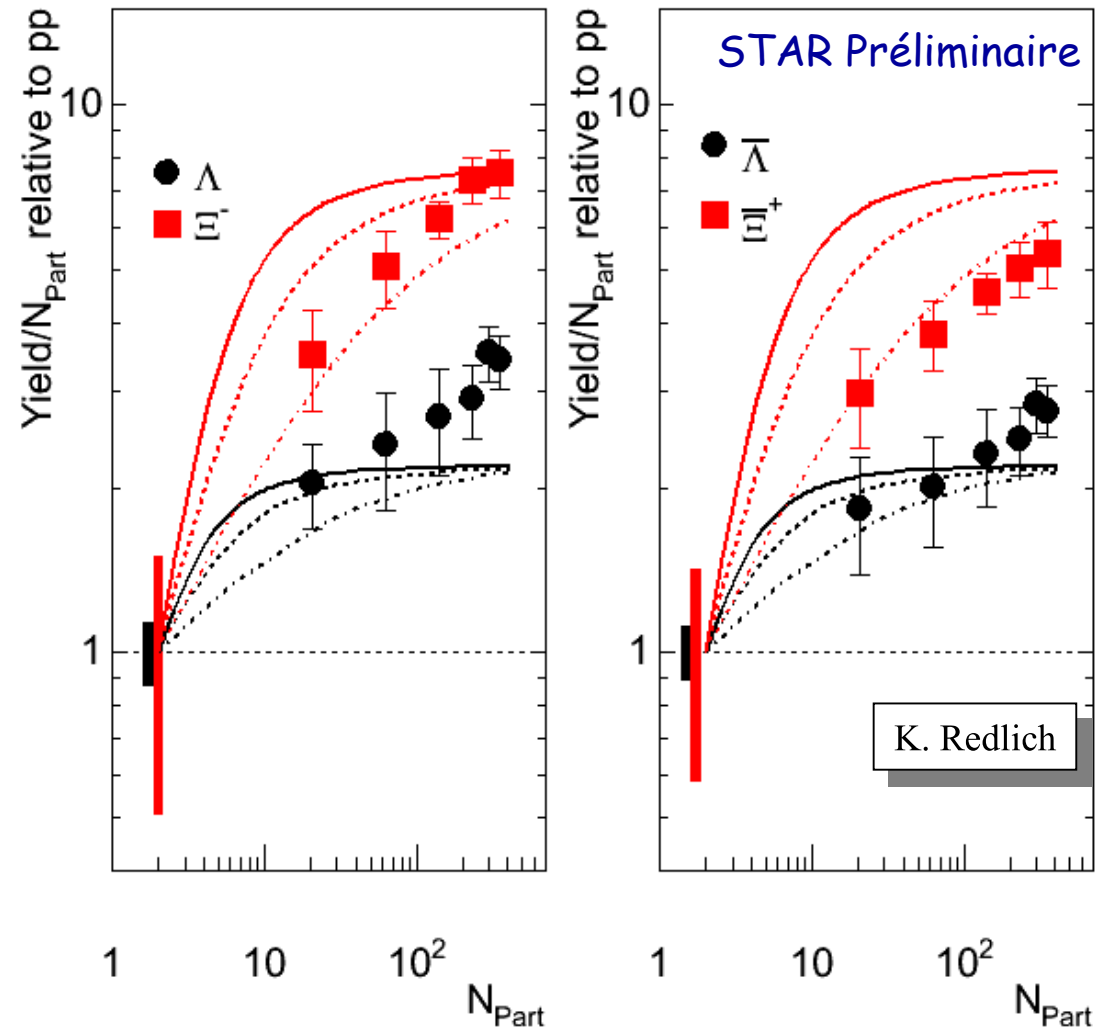
$$V_0 = 4/3 \pi \cdot R_0^3$$

$$R_0 = 1.2 \text{ fm}$$

rayon du proton /  
fortes interactions

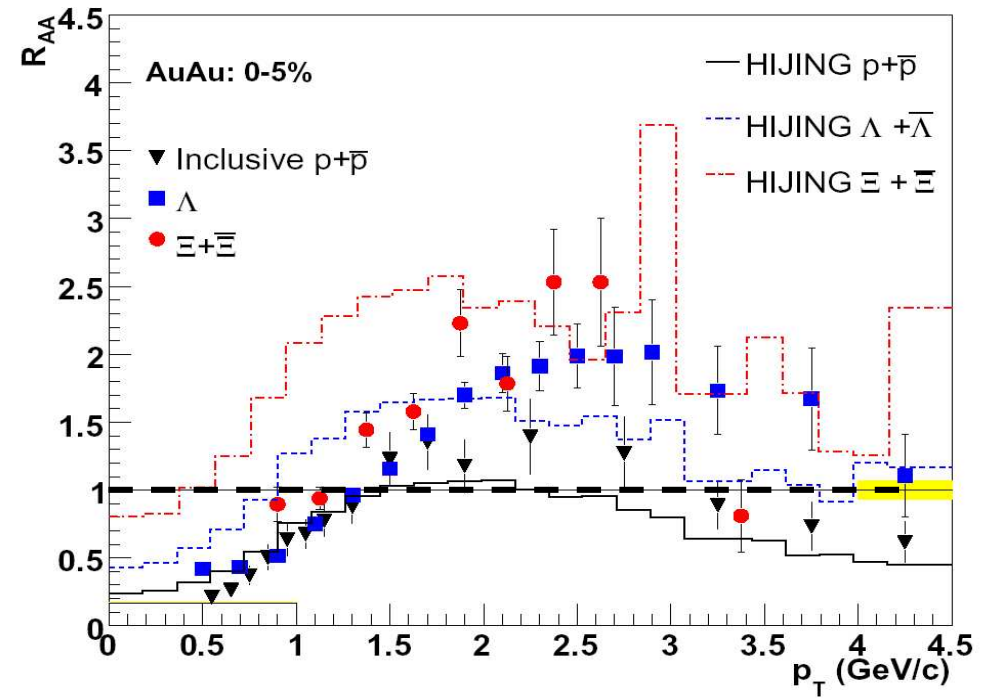
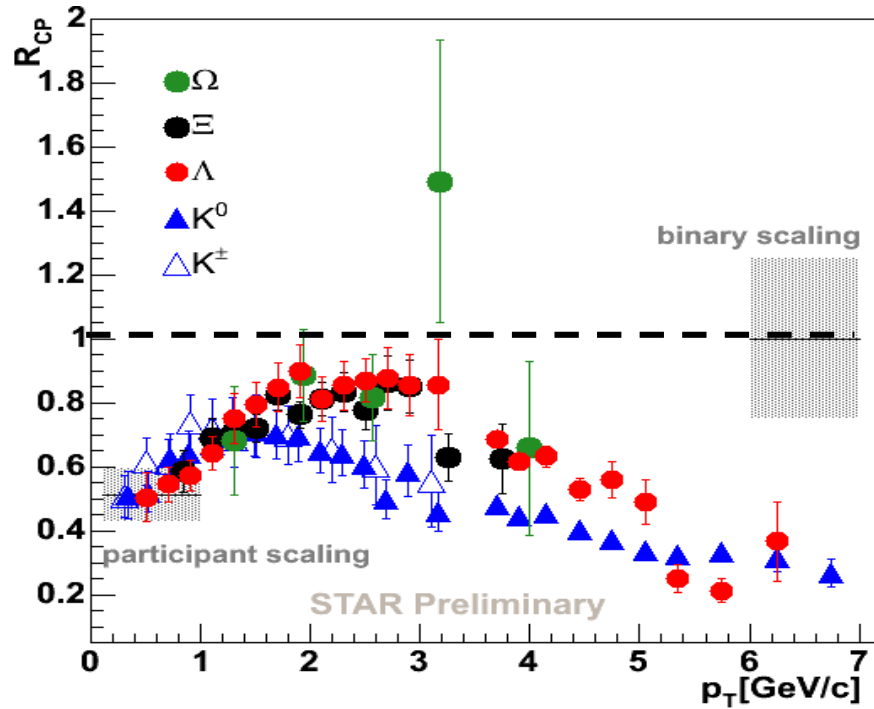
$$T = 170 \text{ MeV}$$

$$\alpha = 1/3$$

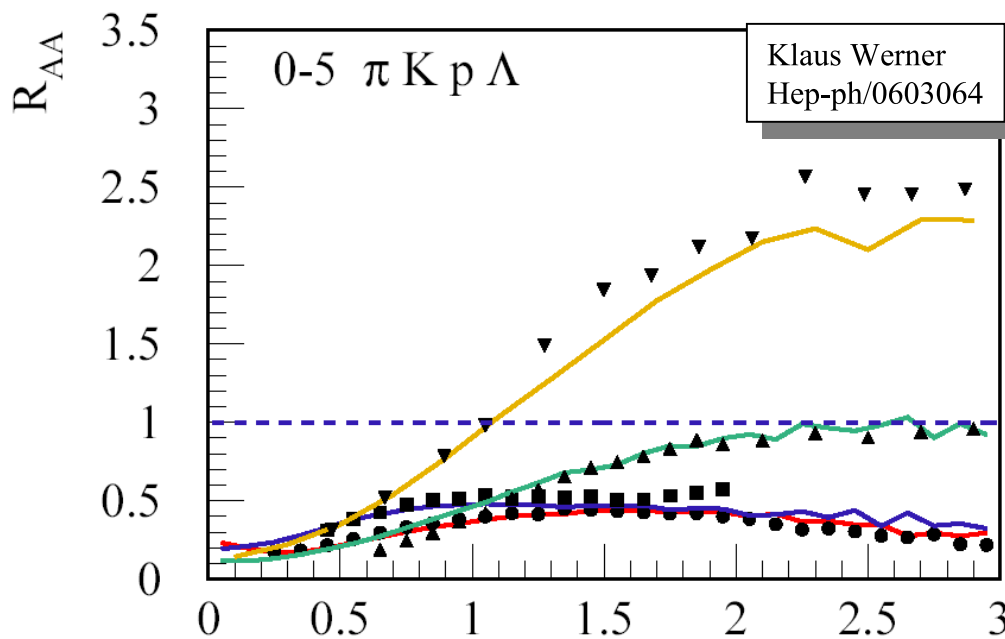
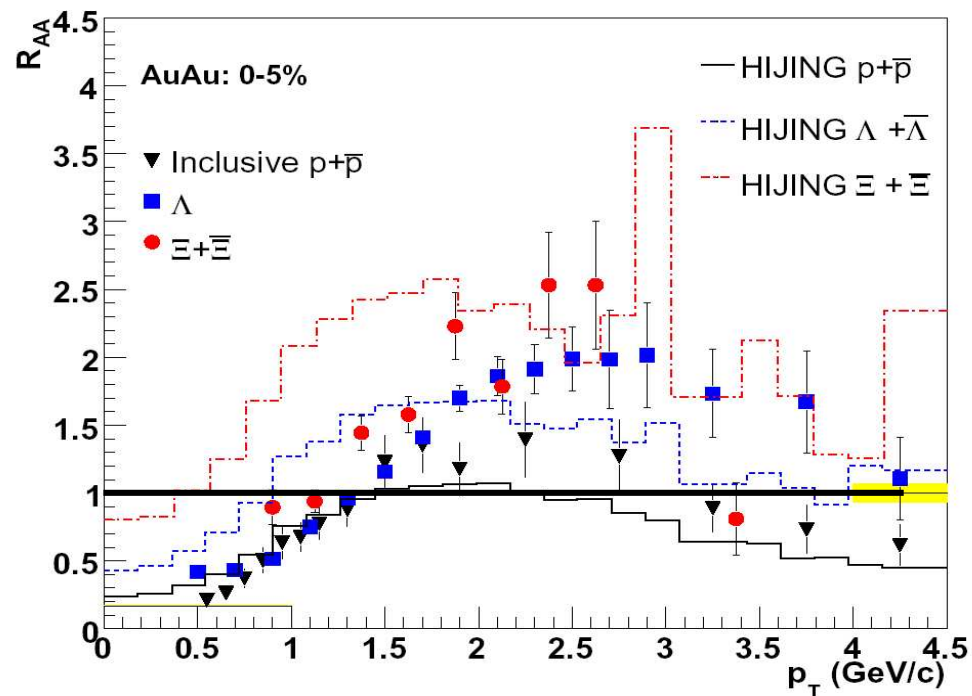
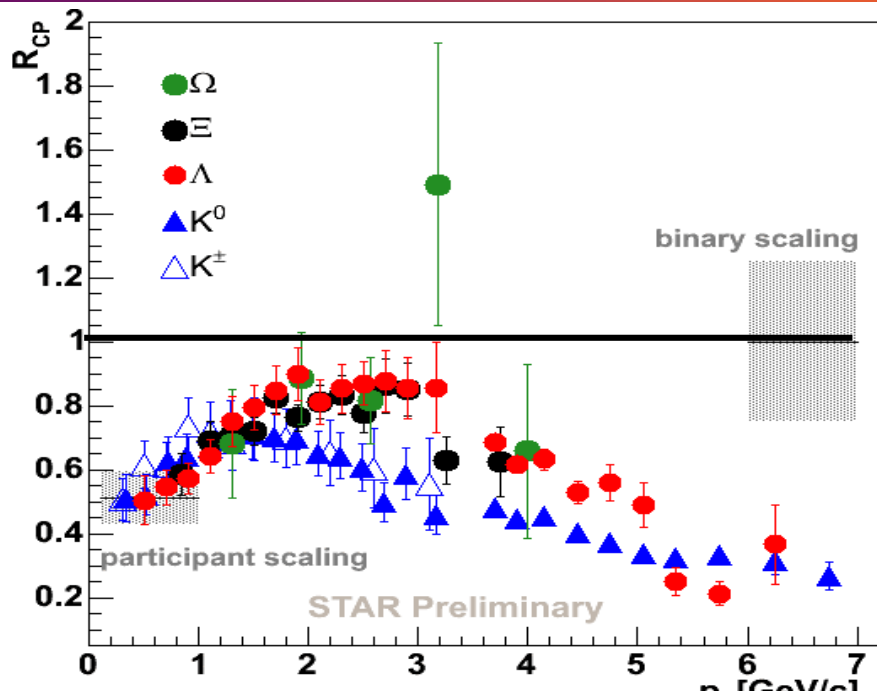


Une dépendance linéaire avec la géométrie de la collisions ?

# RAA et suppression canonique



# RAA et suppression canonique



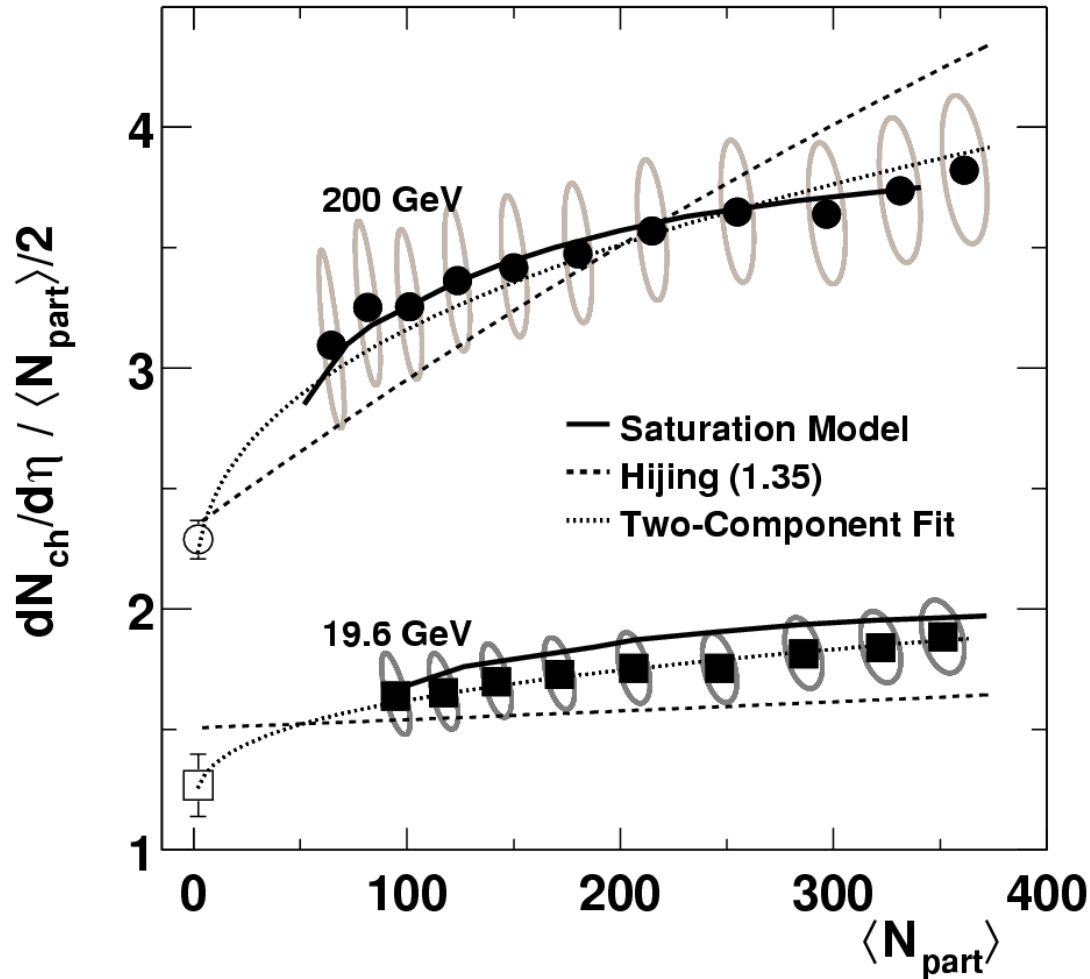
# Que dire de la dépendance en saveur ?

## \* Multiplicité mesurée par PHOBOS :

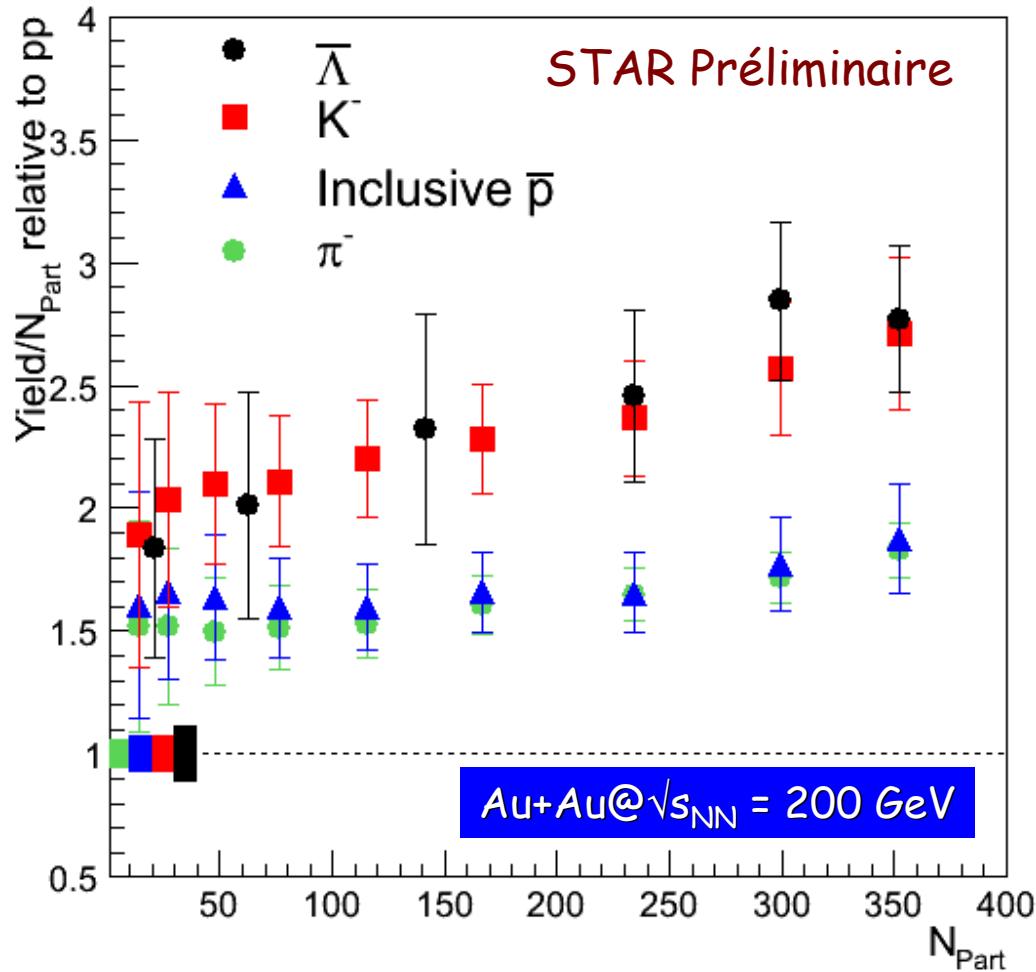
⇒ Mesure de  $E(\text{ch})$  pour  
19.6 et 200 GeV

⇒ Augmentation claire  
entre p+p et Au+Au

Est-ce valable pour  
toutes les particules ?



# Que dire de la dépendance en saveur ?



✗ Multiplicité mesurée par PHOBOS :

⇒ Mesure de  $E(\text{ch})$  pour  
19.6 et 200 GeV

⇒ Augmentation claire  
entre p+p et Au+Au

Est-ce valable pour  
toutes les particules ?

✗ Oui et non prédit par les  
modèles !

✗ Augmentation similaire  
pour les hadrons contenant  
un quark s

✗ Etudier l'augmentation des  
taux en Au+Au entre eux

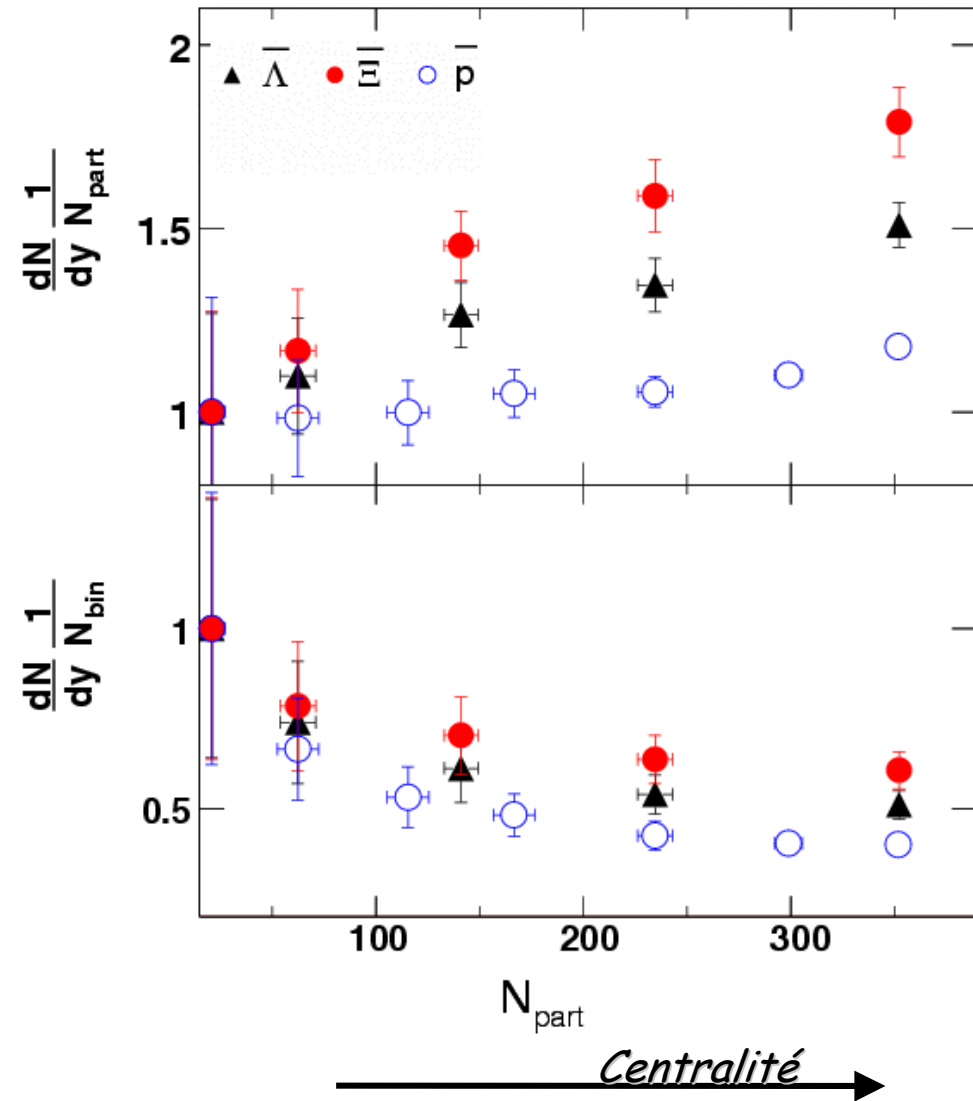
# Quel volume pour l'étrangeté ?

✗ Augmentation

✗  $\Xi$  s dévient du scaling par  $N_{part}$

✗ Plus on augmente l'étrangeté d'une particule, moins elle scale avec  $N_{part}$

✗ Compétition entre processus durs et mous sur différents domaines de  $p_T$  ?



# Quel volume pour l'étrangeté ?

## ✗ Augmentation

✗  $\Xi$  *dévient* du scaling par  $N_{part}$

✗ Plus on augmente l'étrangeté d'une particule, moins elle scale avec  $N_{part}$

✗ Compétition entre processus durs et mous sur différents domaines de  $p_T$  ?

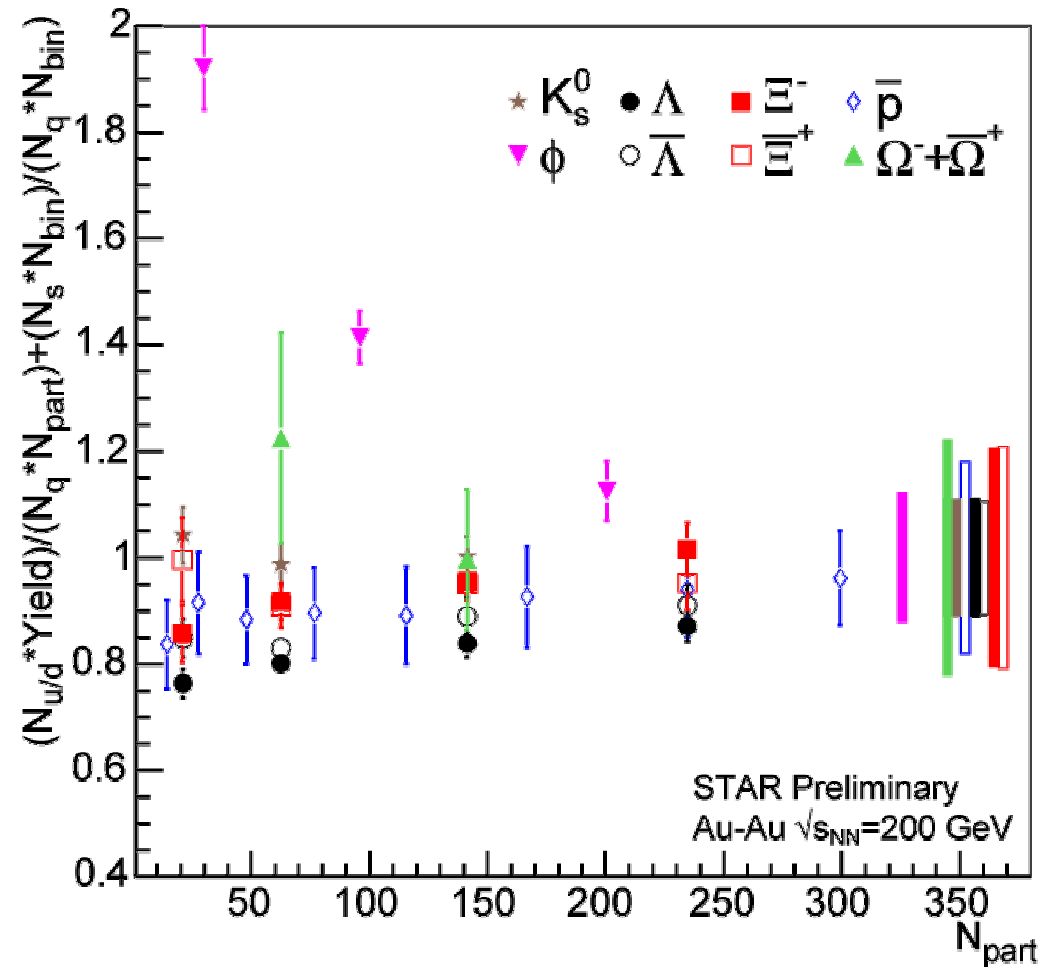
♣ Que dire d'un "scaling" par le contenu en quark ?

$u, d$  - "scalent" avec  $N_{part}$

- déjà observé.

$s$  - "scale" avec  $N_{bin}$

- semble meilleur pour les particules étranges.



Centralité →



# Quel volume pour l'étrangeté ?

## ✗ Augmentation

✗  $\Xi$  *dévient* du scaling par  $N_{part}$

✗ Plus on augmente l'étrangeté d'une particule, moins elle scale avec  $N_{part}$

✗ Compétition entre processus durs et mous sur différents domaines de  $p_T$  ?

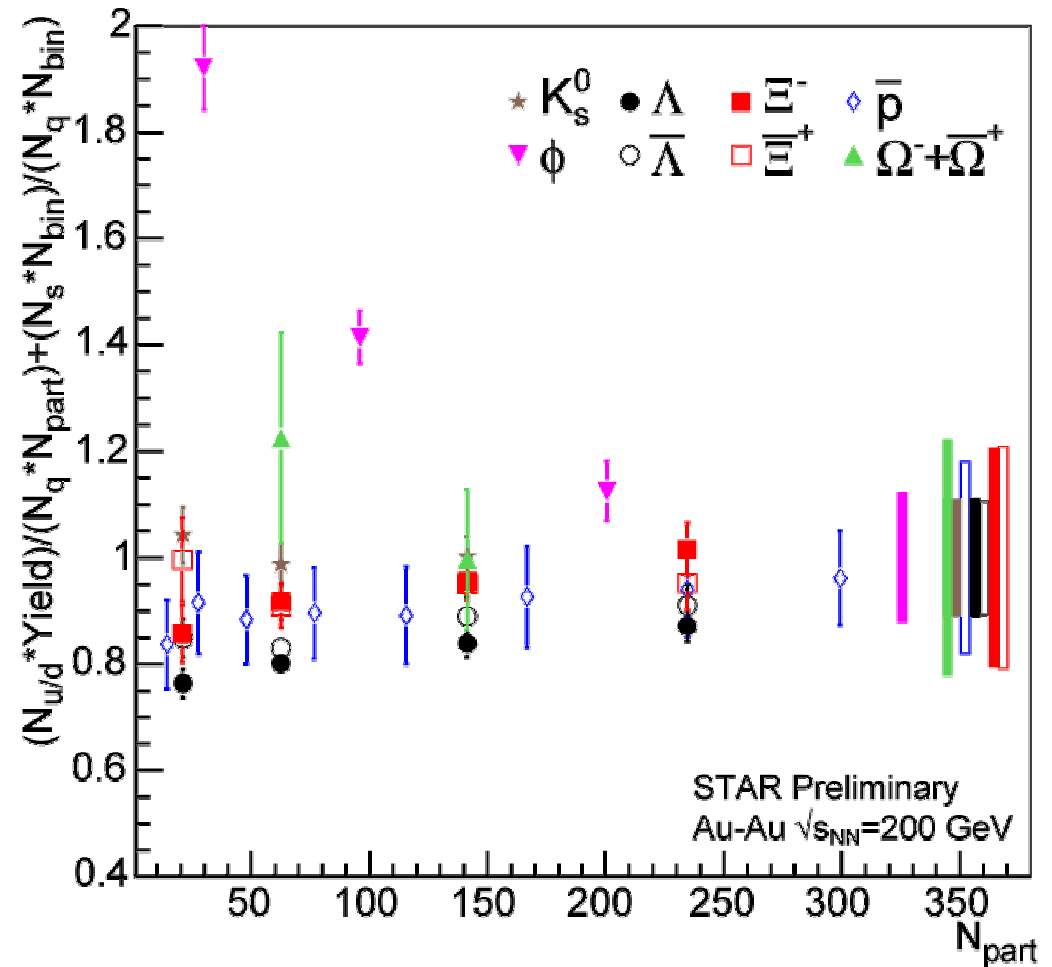
♣ Que dire d'un "scaling" par le contenu en quark ?

$u, d$  - "scalent" avec  $N_{part}$

- déjà observé.

$s$  - "scale" avec  $N_{bin}$

- semble meilleur pour les particules étranges.



✗ Est-ce que les quarks  $s$  voient un volume différent des quarks  $u$  et  $d$  ?

✗ A quel moment sont-ils formés ?

# *Etrangeté et entropie*

*Vers un scaling universel ?*

✗ **Modèle de Landau (1953) :**

- 1er modèle hydro
- Suppose que l'entropie est produite au début de la collision
- La matière thermalisée en forte interaction produite est supposée s'étendre adiabatiquement jusqu'au freeze-out
- Densité d'énergie disponible = énergie libérée par les noyaux lorsqu'ils collisionnent dans leur volume de recouvrement divisé par  $\gamma$ .

$$V \approx \frac{V_0}{\gamma} = \frac{2m_N V_0}{\sqrt{s_{NN}}}$$

$$\varepsilon = \frac{E}{V} \approx \frac{(\sqrt{s_{NN}} - 2m_N) \sqrt{s_{NN}}}{2m_N V_0}$$

Supposer une EOS d'un gaz de pions sans masse :

$$p = \frac{1}{3} \varepsilon$$

Corps noir relativiste ( $\varepsilon \sim T^4$ ), densité d'entropie et densité d'énergie sont reliées :

$$T\sigma = \varepsilon + p - \mu n = \frac{4}{3} \varepsilon$$

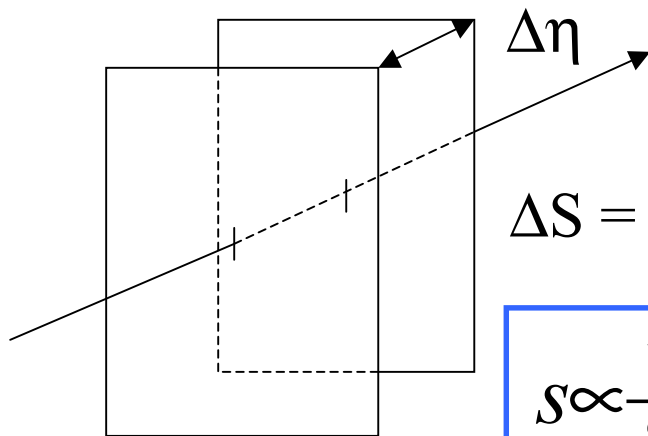
$$\sigma = \frac{S}{V} \sim \varepsilon^{3/4} \quad \text{soit}$$

$$\frac{S}{V} \approx \frac{(\sqrt{s_{NN}} - 2m_N)^{3/4}}{\sqrt{s_{NN}}^{1/4}} \equiv F$$

F, énergie de Fermi

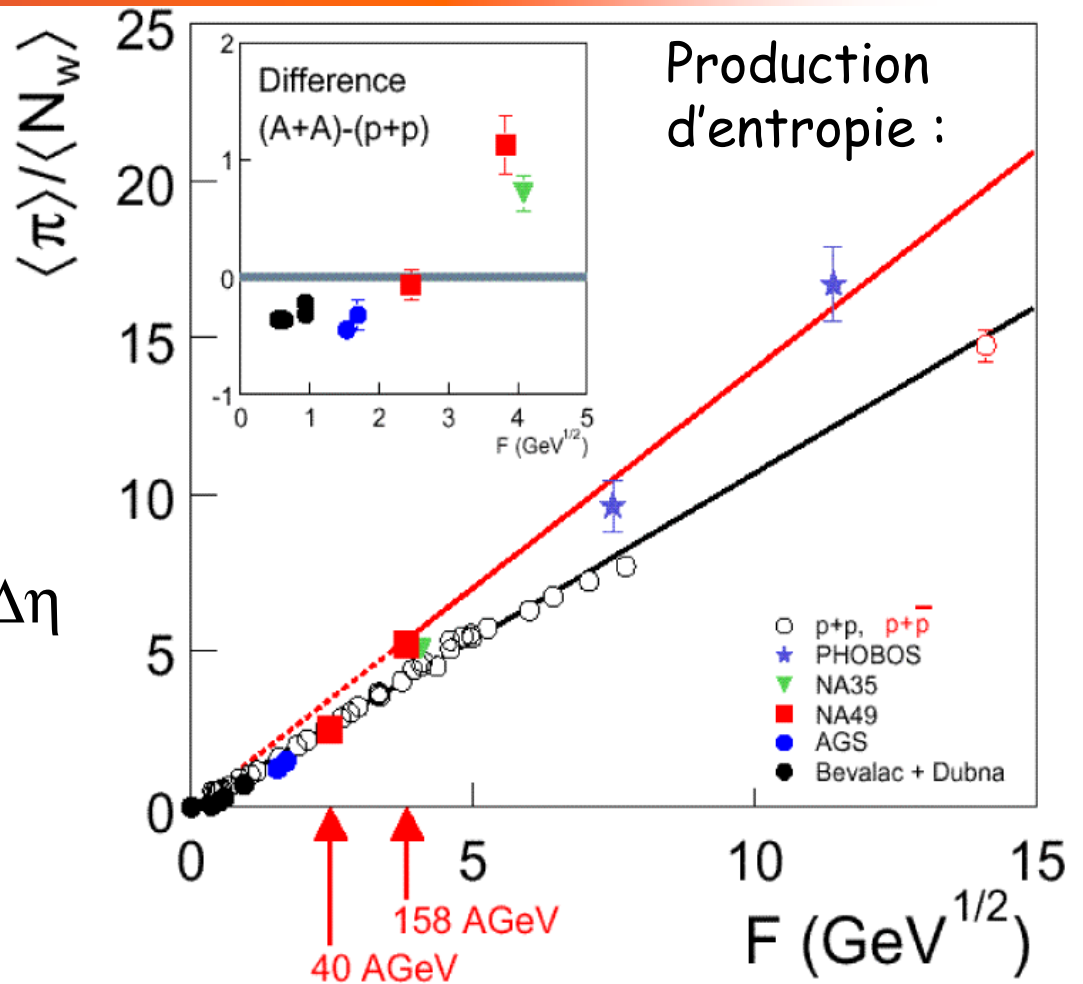
# $N_{ch}$ comme mesure d'entropie

$$\frac{S}{V} \sim \frac{\langle \pi \rangle}{\langle N_p \rangle} \sim F$$



$$\Delta S = \pi R^2 s(\tau_0) \tau_0 \Delta \eta$$

$$s \propto \frac{1}{S} \frac{dN_{ch}}{d\eta}$$



- ✘ Entropie : variable thermodynamique extensive idéale pour étudier une possible transition de phase
- ✘ Entropie en A+A > p+p
- ✘ Changement de phase ? Vers un QGP ?

$$dN_{ch}/d\eta = n_{pp}((1-x)N_{part}/2 + xN_{bin})$$

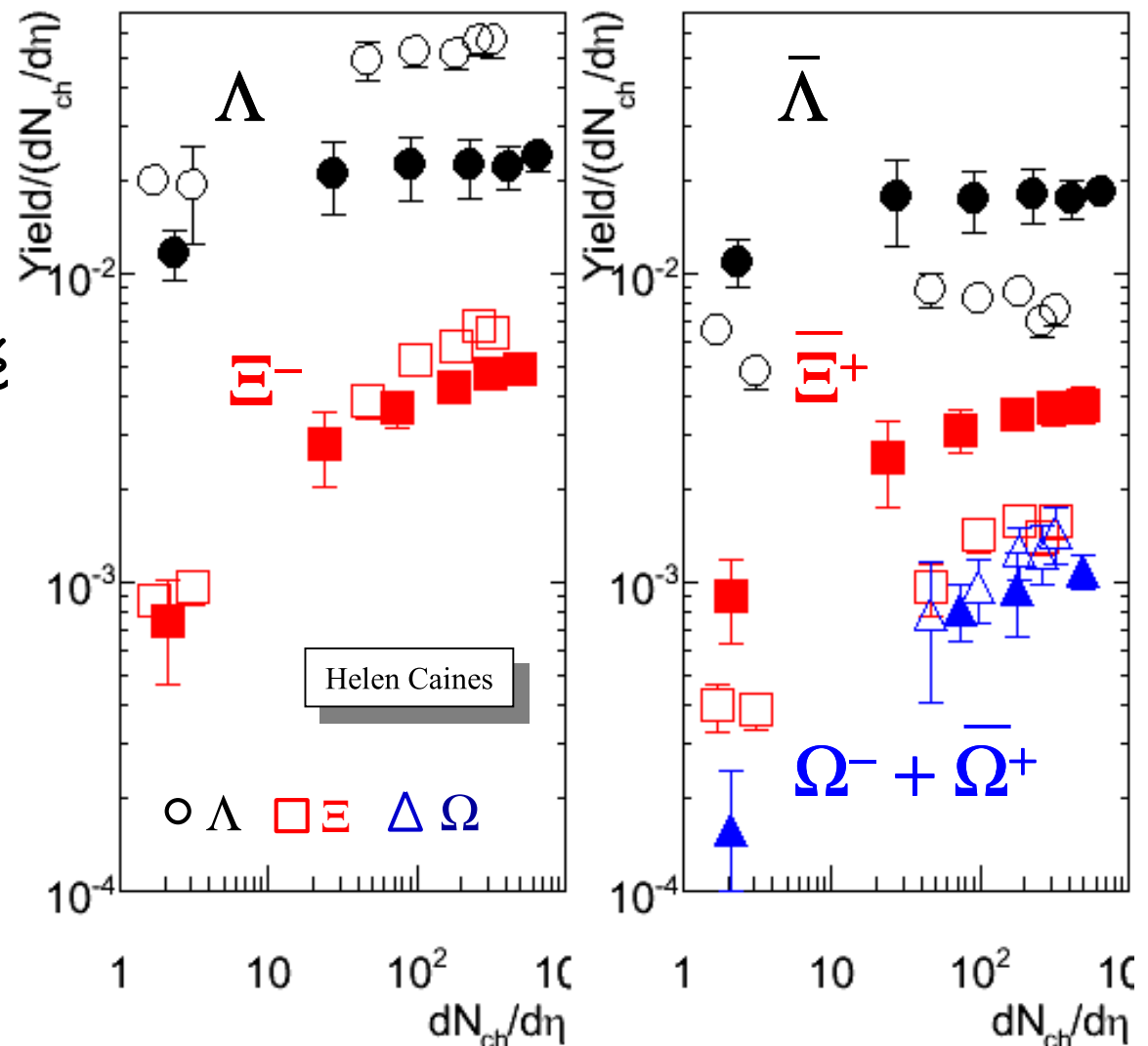
$$n_{pp} = \text{Yield in pp} \\ = 2.29 \text{ (1.27)}$$

$$x = 0.13$$

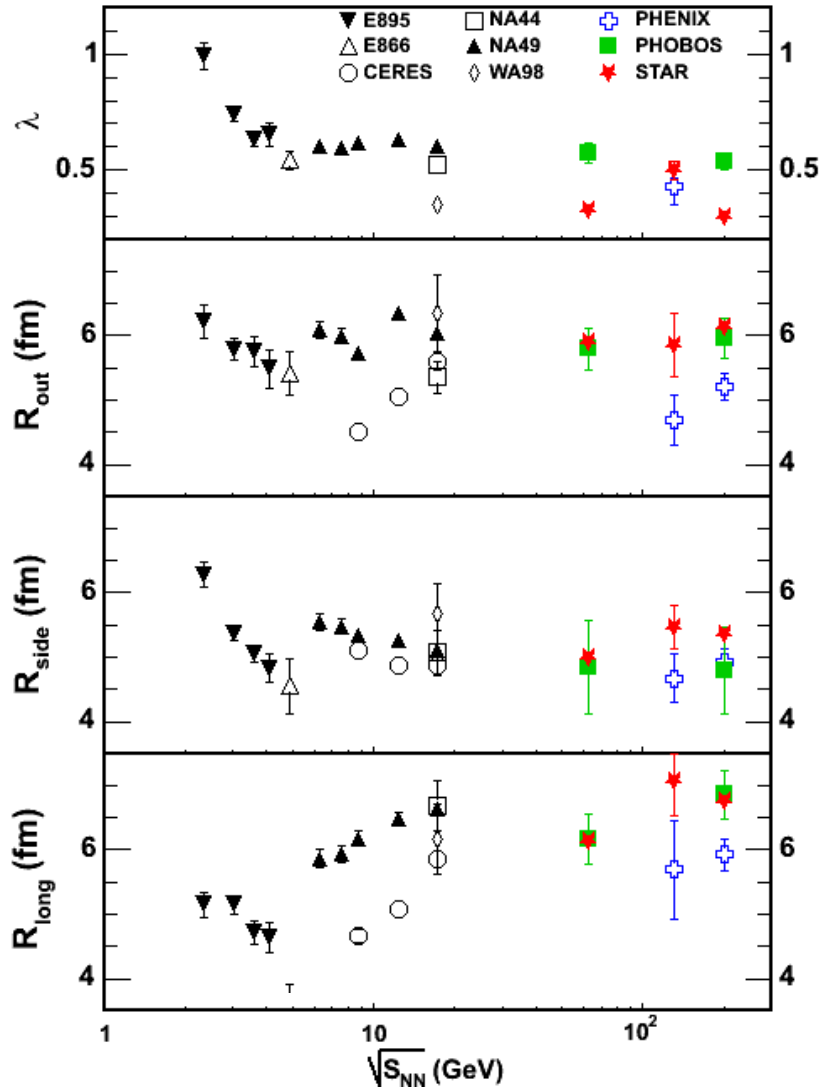
✘ Pas de proportionnalité particulière en fonction de l'énergie

✘ En revanche, les taux deviennent presque linéaires avec  $dN_{ch}/d\eta$  pour les grandes valeurs de ce dernier

Symbole plein - STAR Au-Au  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$   
Symbole vide - NA57 Pb-Pb  $\sqrt{s_{NN}} = 17.3 \text{ GeV}$



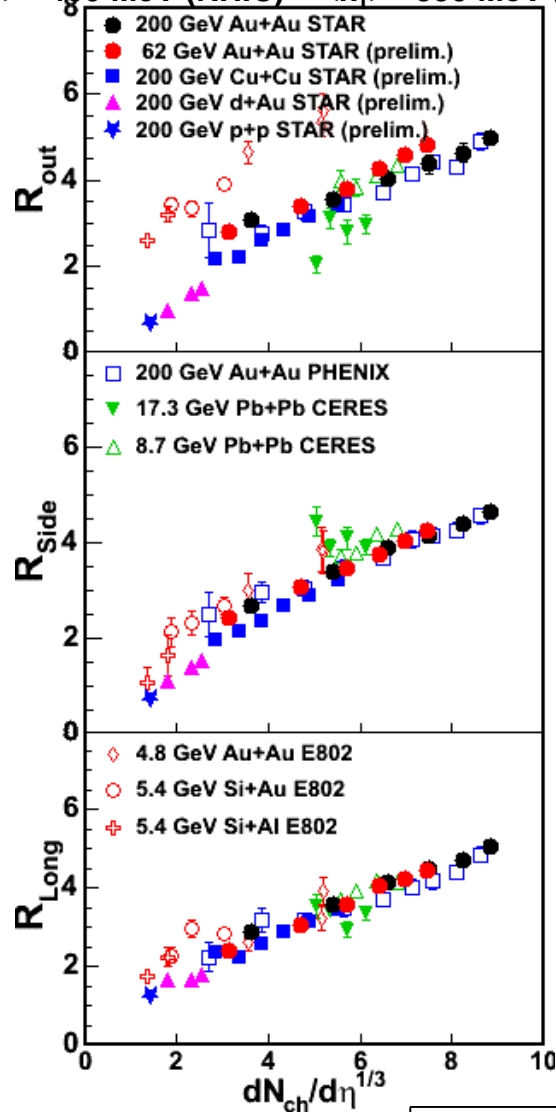
$\langle k_T \rangle \approx 400$  MeV (RHIC)     $\langle k_T \rangle \approx 390$  MeV (SPS)



✘ Pas de dépendance particulière en fonction de  $\sqrt{s_{NN}}$

L'entropie détermine les rayons ?

$\langle k_T \rangle \approx 400$  MeV (RHIC)     $\langle k_T \rangle \approx 390$  MeV (SPS)



Lisa et al.  
nucl-ex/0505014

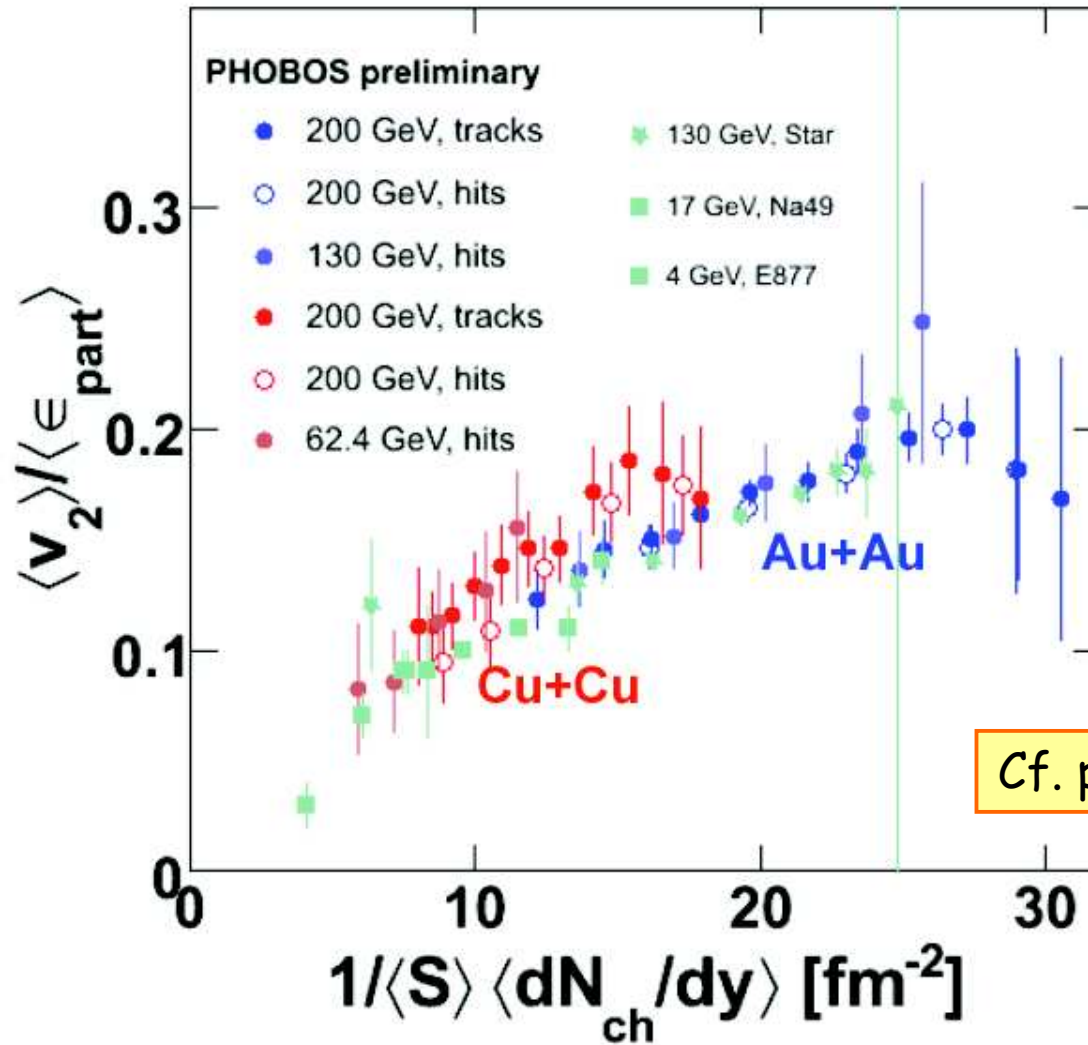
✗ Pas de dépendance particulière en fonction de  $\sqrt{s_{NN}}$

✗ Rayons  $\pi$  HBT pour différents systèmes et à différentes énergies sont proportionnels à  $(dN_{ch}/d\eta)^{1/3}$

✗ La puissance 1/3 donne approximativement une dépendance linéaire

L'entropie détermine les rayons ?

## Participant Eccentricity



PHOBOS  
QM2005

Cf. présentation Jeff Speltz

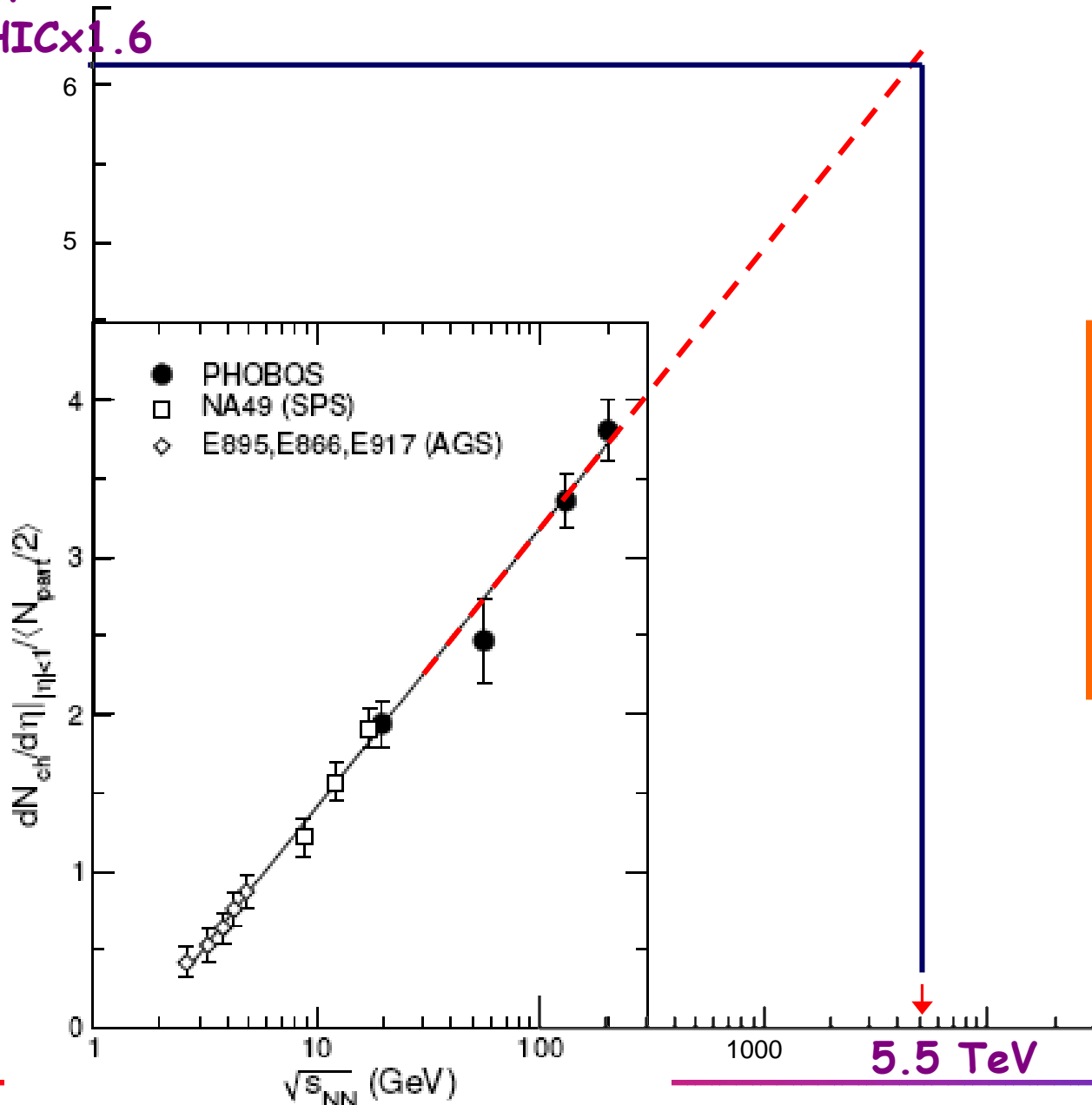


*Prédictions pour le LHC*

# I : multiplicité

6.4 =  
RHIC x 1.6

PHOBOS White Paper:  
Nucl. Phys. A 757, 28



Pour les événements  
les plus centraux @  
5.5 TeV :

**$dN_{ch}/d\eta \sim 1400$**

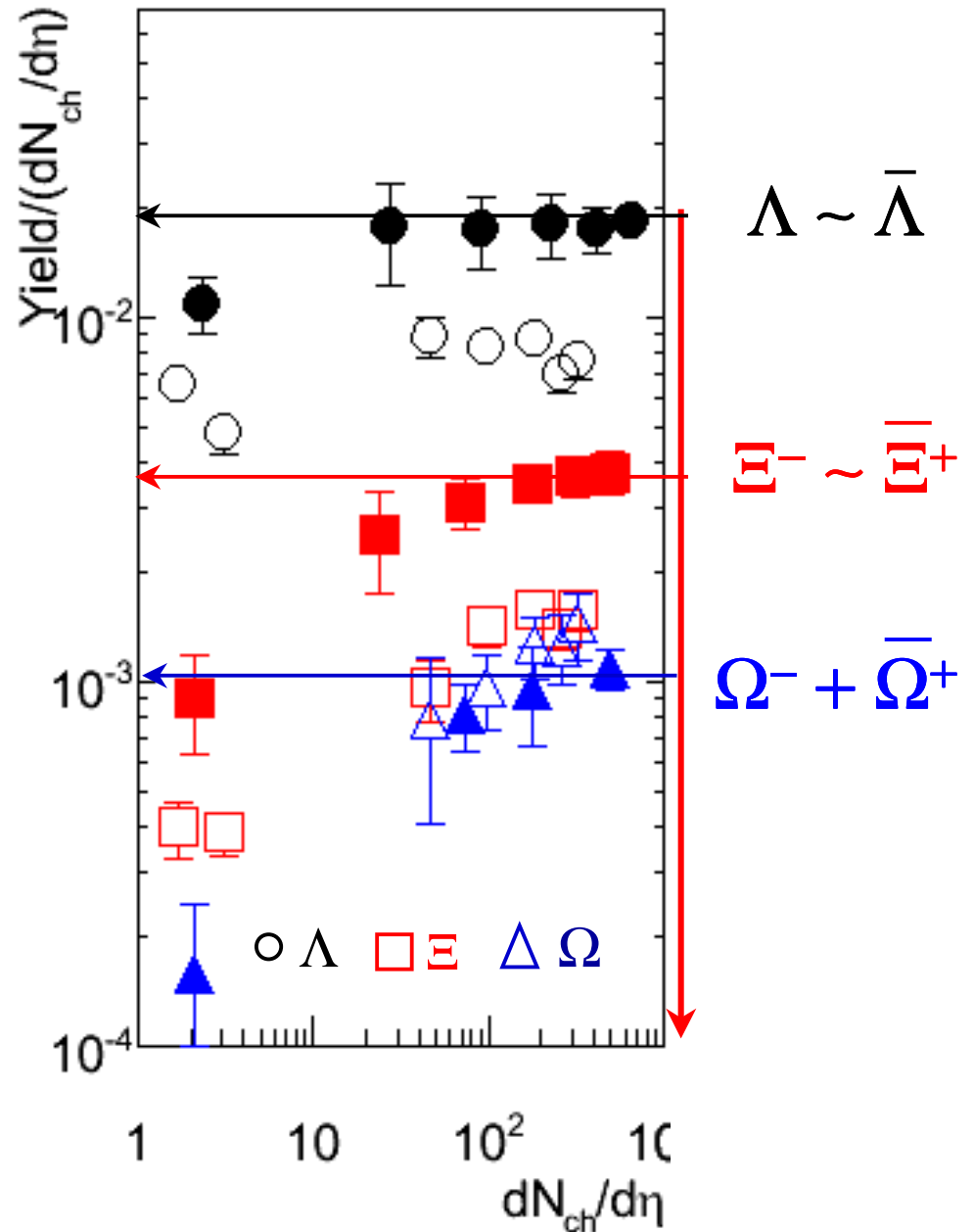
# II : étrangeté

Pour les événements  
les plus centraux :  
 $dN_{ch}/d\eta \sim 1400$

$$dN_{\Lambda}/dy = dN_{\bar{\Lambda}}/dy \sim 20-30$$

$$dN_{\Xi}/dy = dN_{\bar{\Xi}}/dy \sim 4-6$$

$$dN_{\Omega}/dy = dN_{\bar{\Omega}}/dy \sim 0.5-1$$



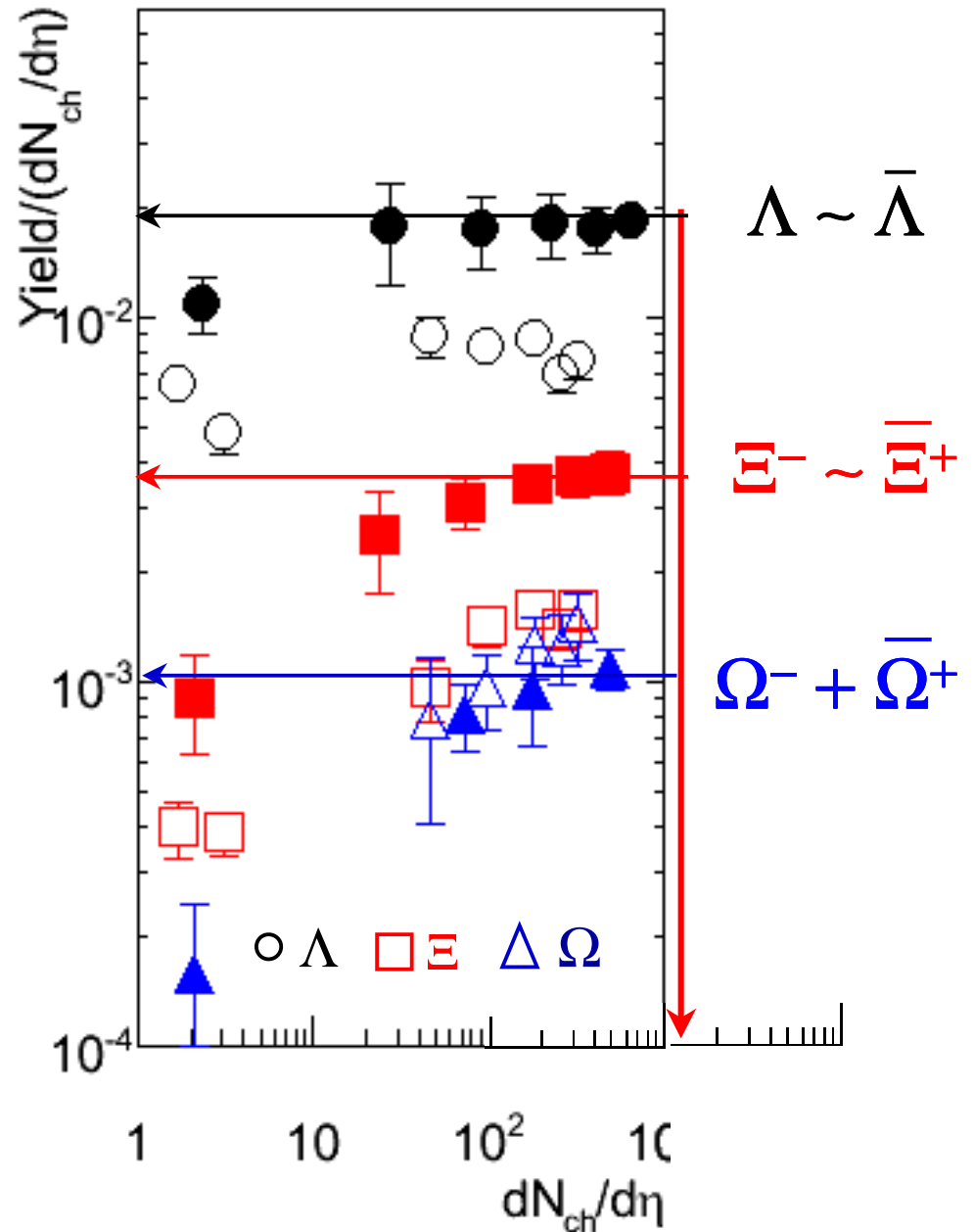
# II : étrangeté

Pour les événements  
les plus centraux :  
 $dN_{ch}/d\eta \sim 1400$

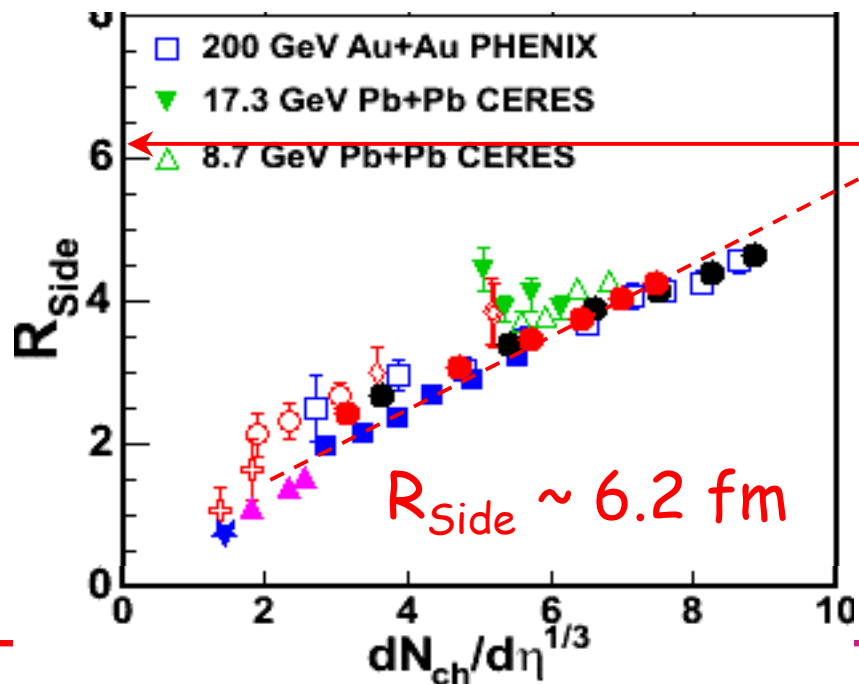
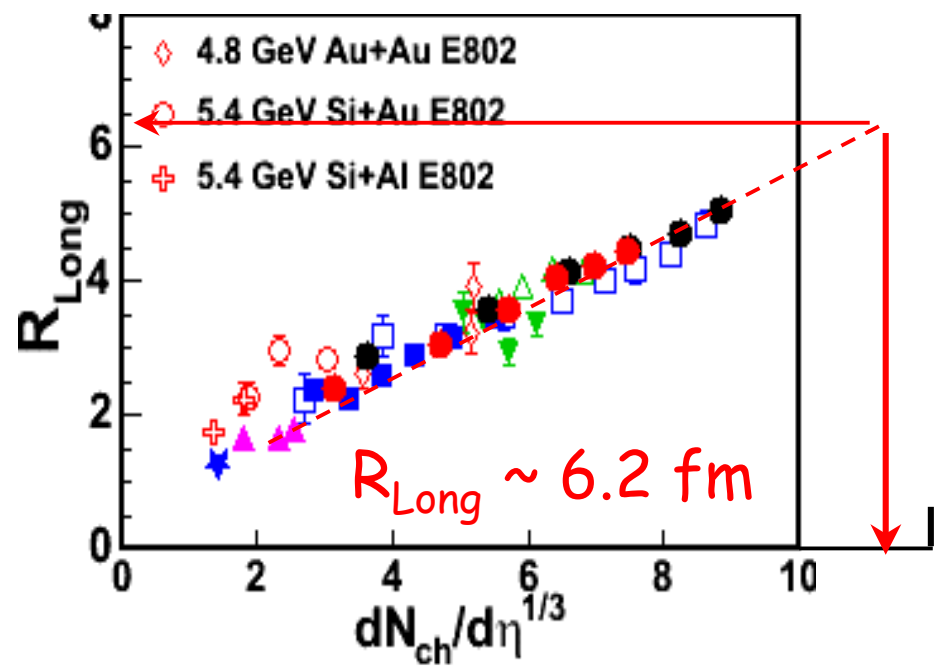
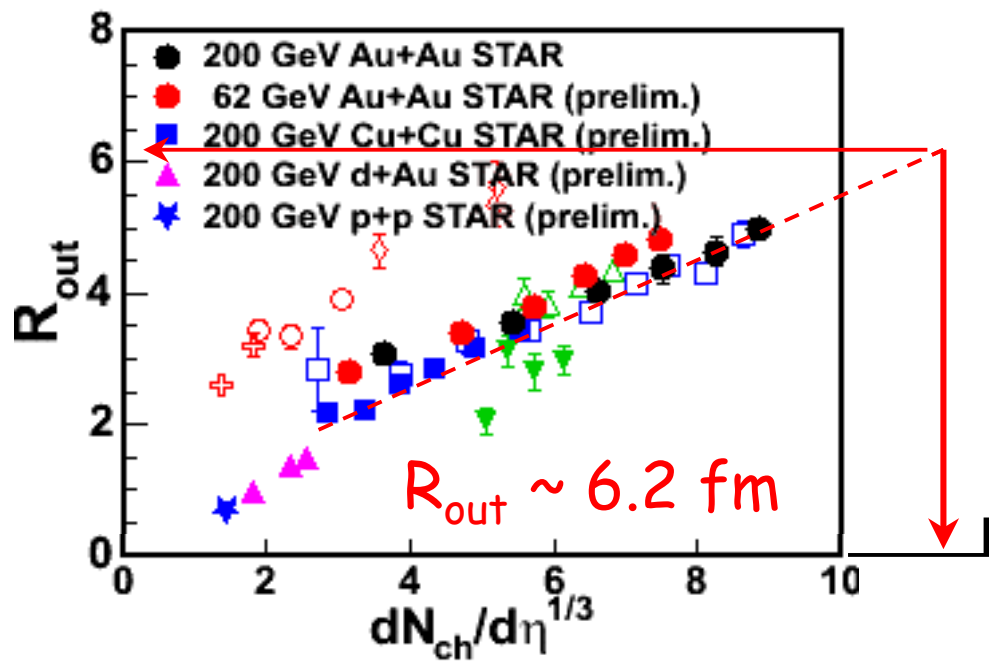
$$dN_{\Lambda}/dy = dN_{\bar{\Lambda}}/dy \sim 20-30$$

$$dN_{\Xi}/dy = dN_{\bar{\Xi}}/dy \sim 4-6$$

$$dN_{\Omega}/dy = dN_{\bar{\Omega}}/dy \sim 0.5-1$$



# III : rayons HBT



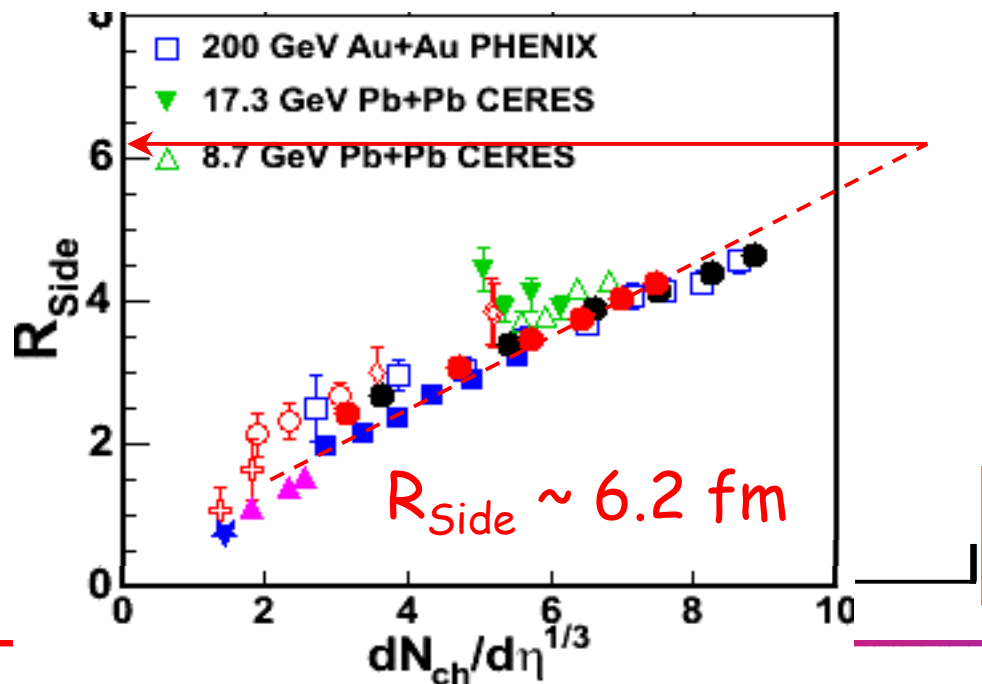
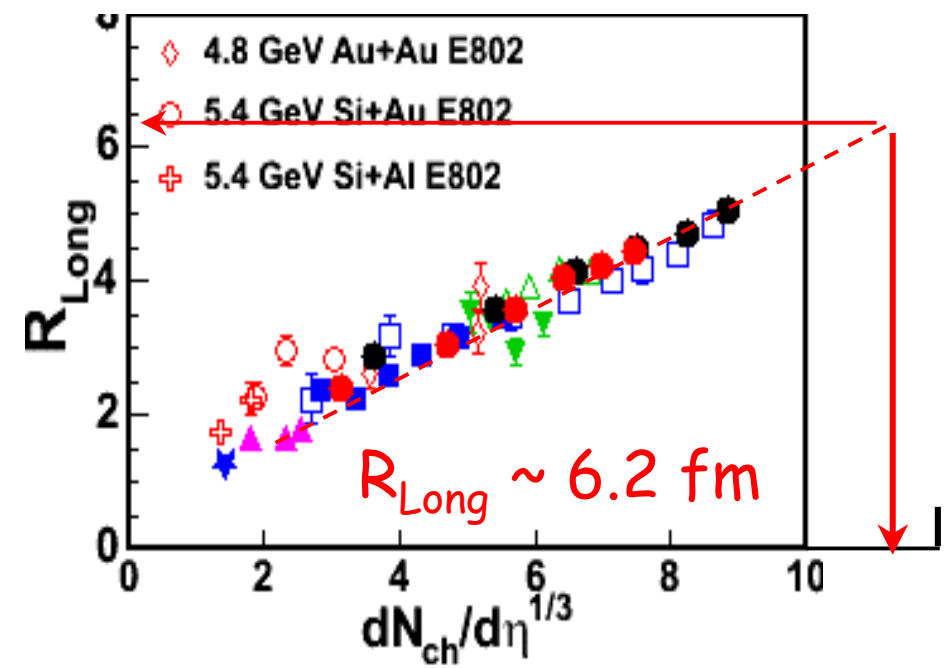
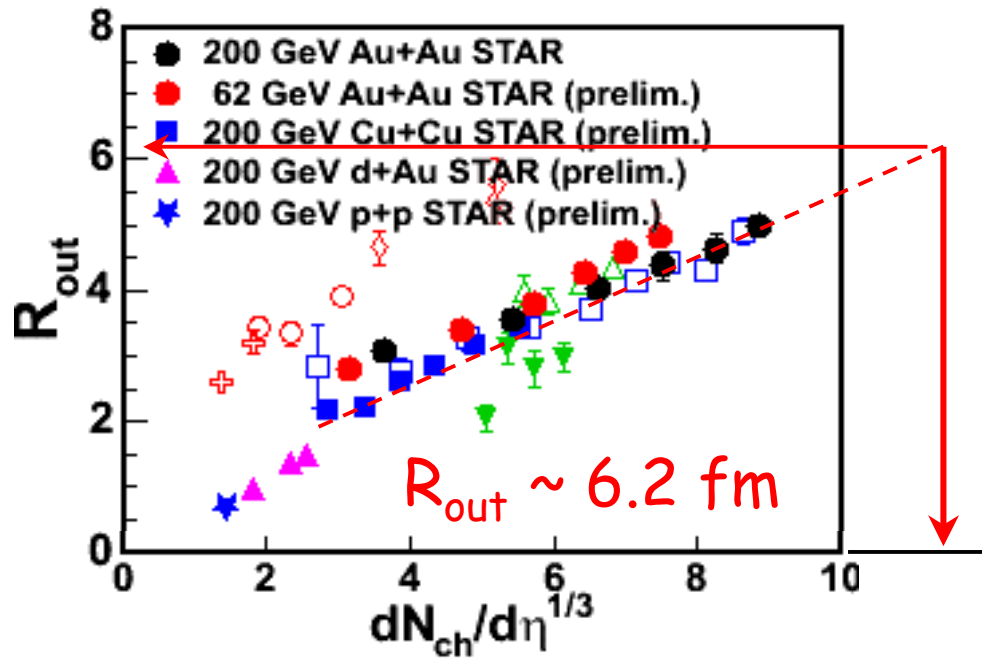
Pour les événements les plus centraux:

$$dN_{ch}/d\eta \sim 1400$$

$$dN_{ch}/d\eta^{1/3} \sim 11.5$$

$$R_{out} \sim R_{side} \sim R_{long} \sim 6.2 \text{ fm}$$

# III : rayons HBT



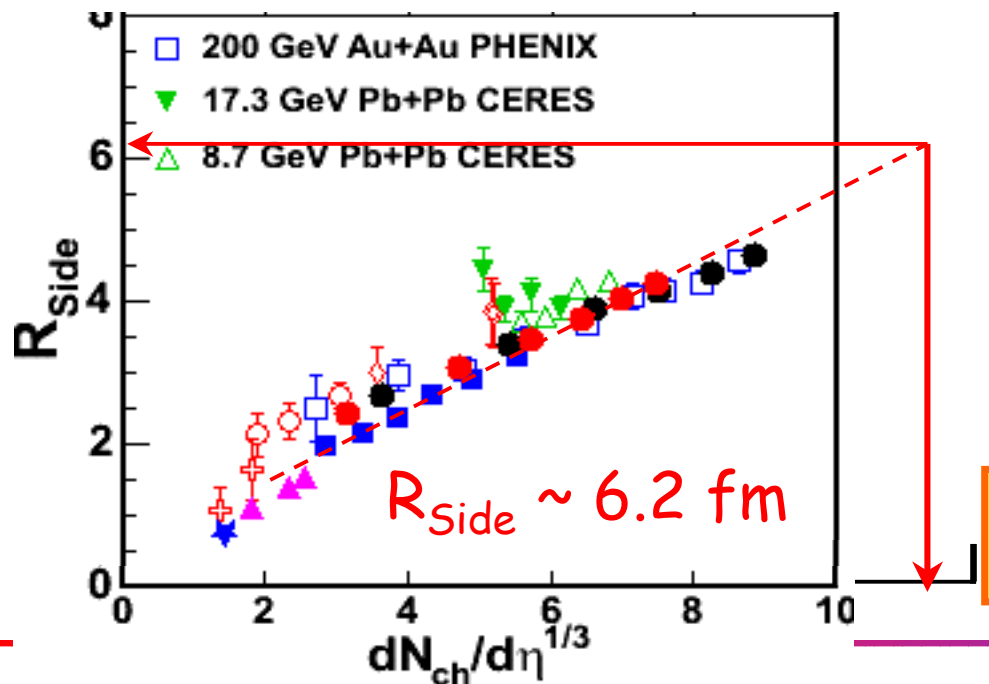
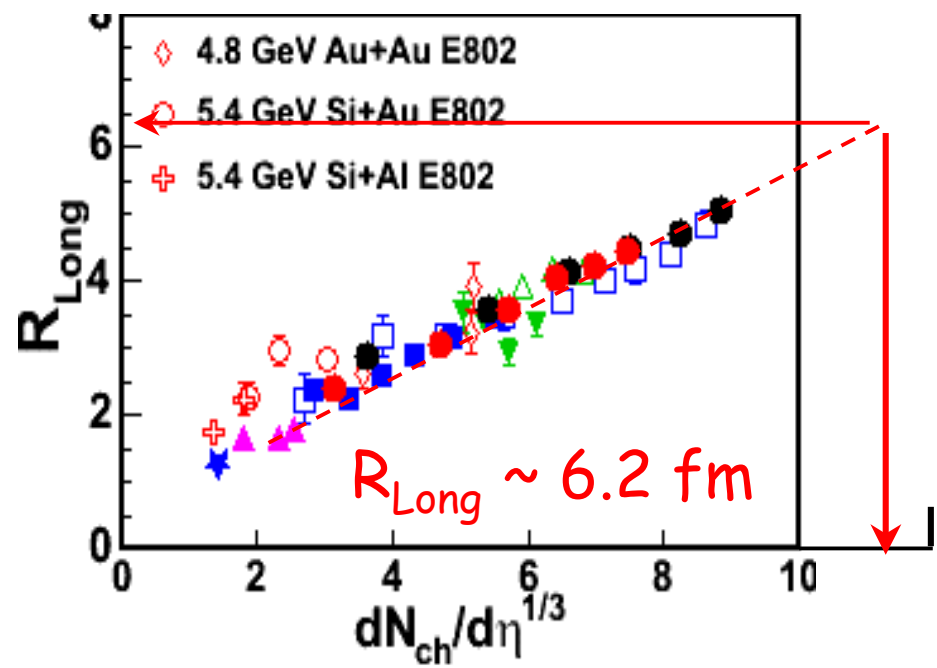
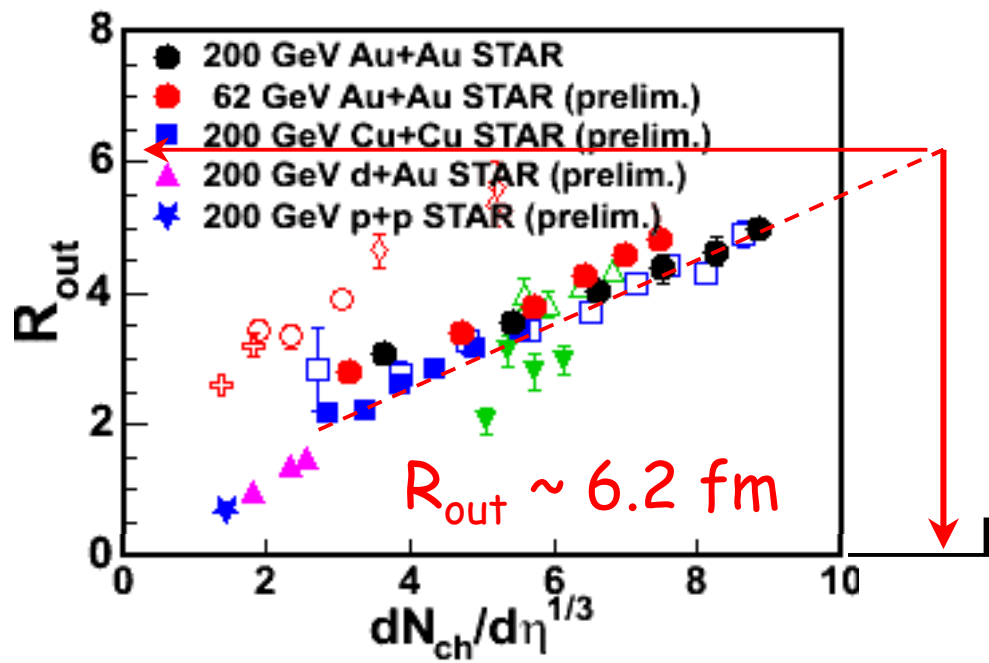
Pour les événements les plus centraux:

$$dN_{ch}/d\eta \sim 1400$$

$$dN_{ch}/d\eta^{1/3} \sim 11.5$$

$$R_{out} \sim R_{side} \sim R_{long} \sim 6.2 \text{ fm}$$

# III : rayons HBT



Pour les événements les plus centraux:

$$dN_{ch}/d\eta \sim 1400$$

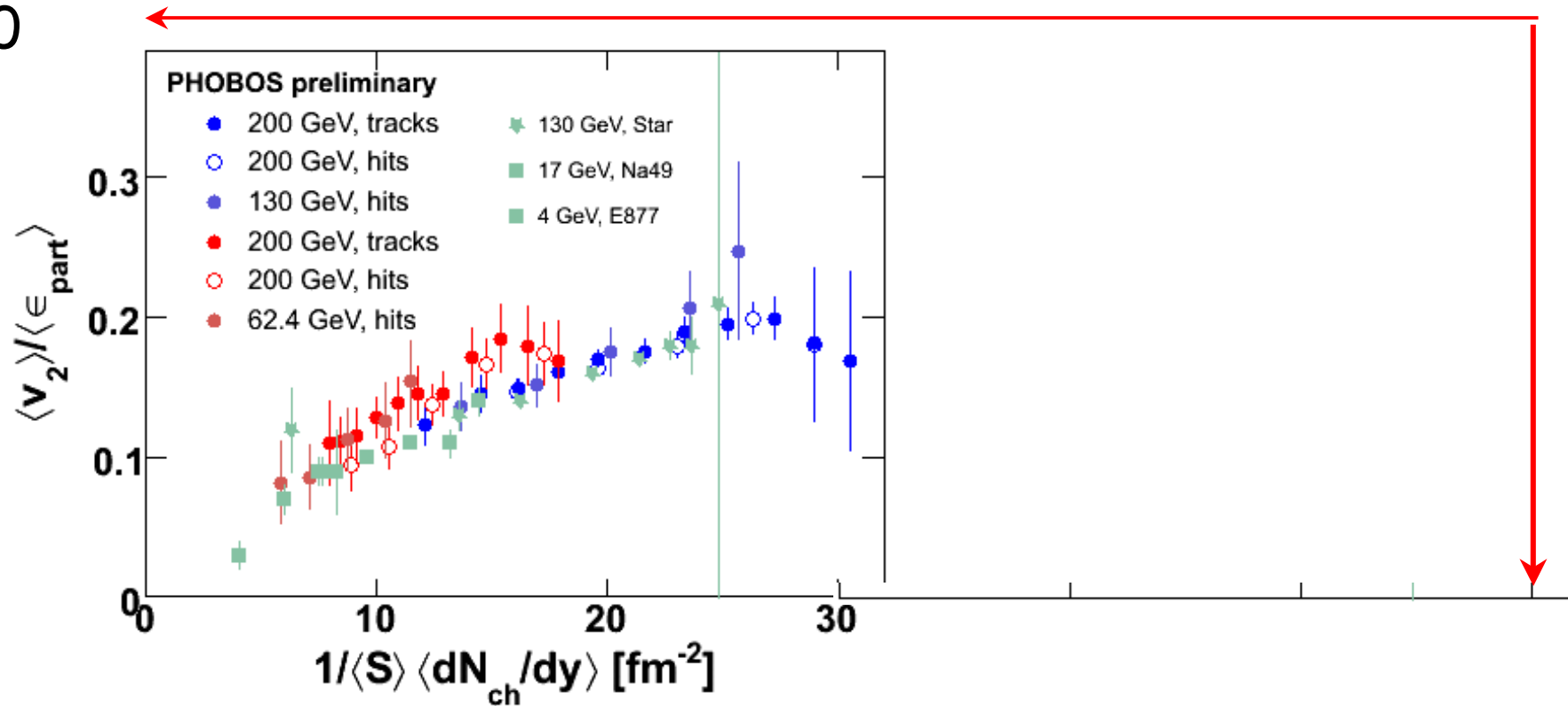
$$dN_{ch}/d\eta^{1/3} \sim 11.5$$

$$R_{out} \sim R_{side} \sim R_{long} \sim 6.2 \text{ fm}$$

Evénements les plus centraux :

$dN_{ch}/d\eta \sim 1400$

$S \sim 20$



Probablement plus dans la limite de basse densité au LHC...

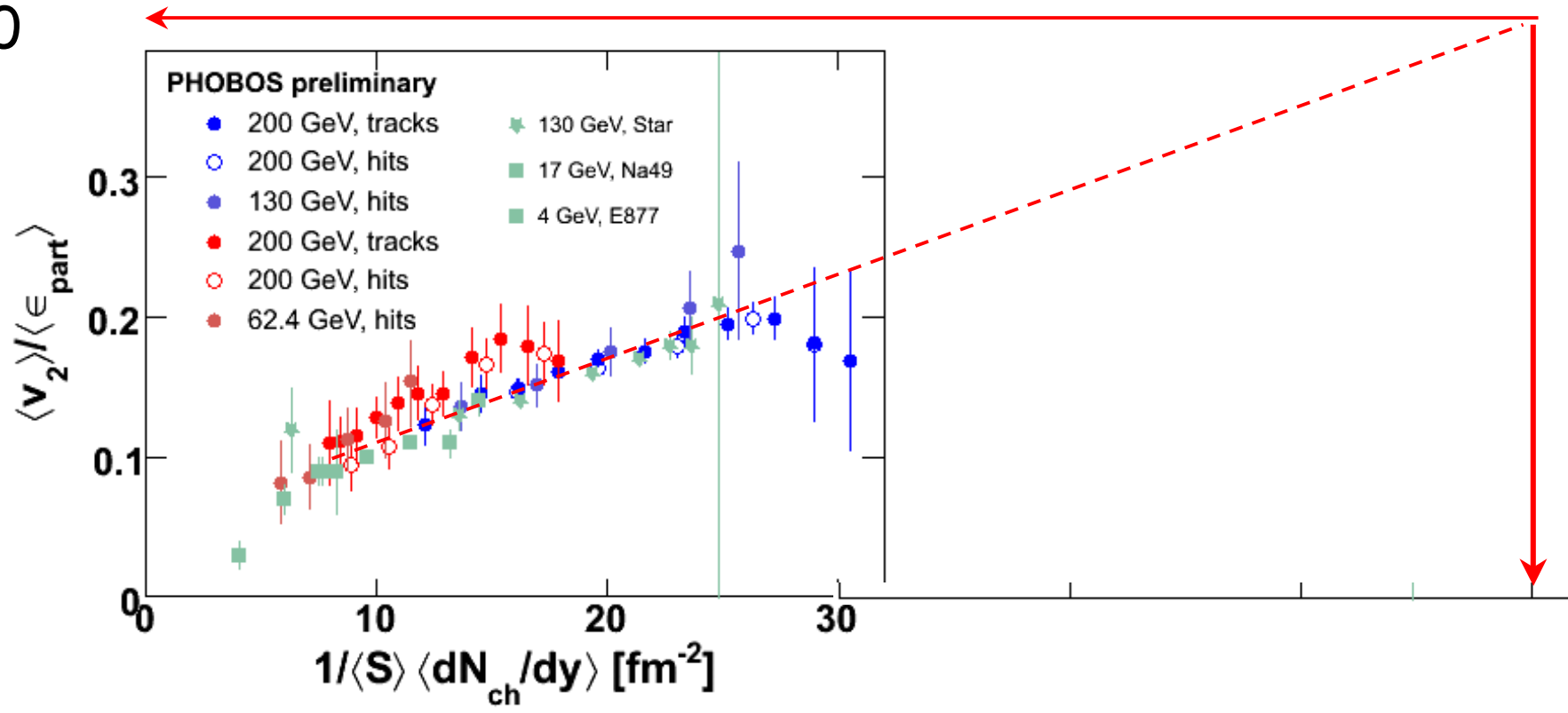
Thermalisation atteinte plus tôt ?

=> **saturation de  $v_2/\epsilon$**

**$v_2/\epsilon \sim 0.2-0.25$**



Evénements les plus centraux :  
 $dN_{ch}/d\eta \sim 1400$   
 $S \sim 20$



Probablement plus dans la limite de basse densité au LHC...  
 Thermalisation atteinte plus tôt ?  
 => **saturation de  $v_2/\epsilon$**

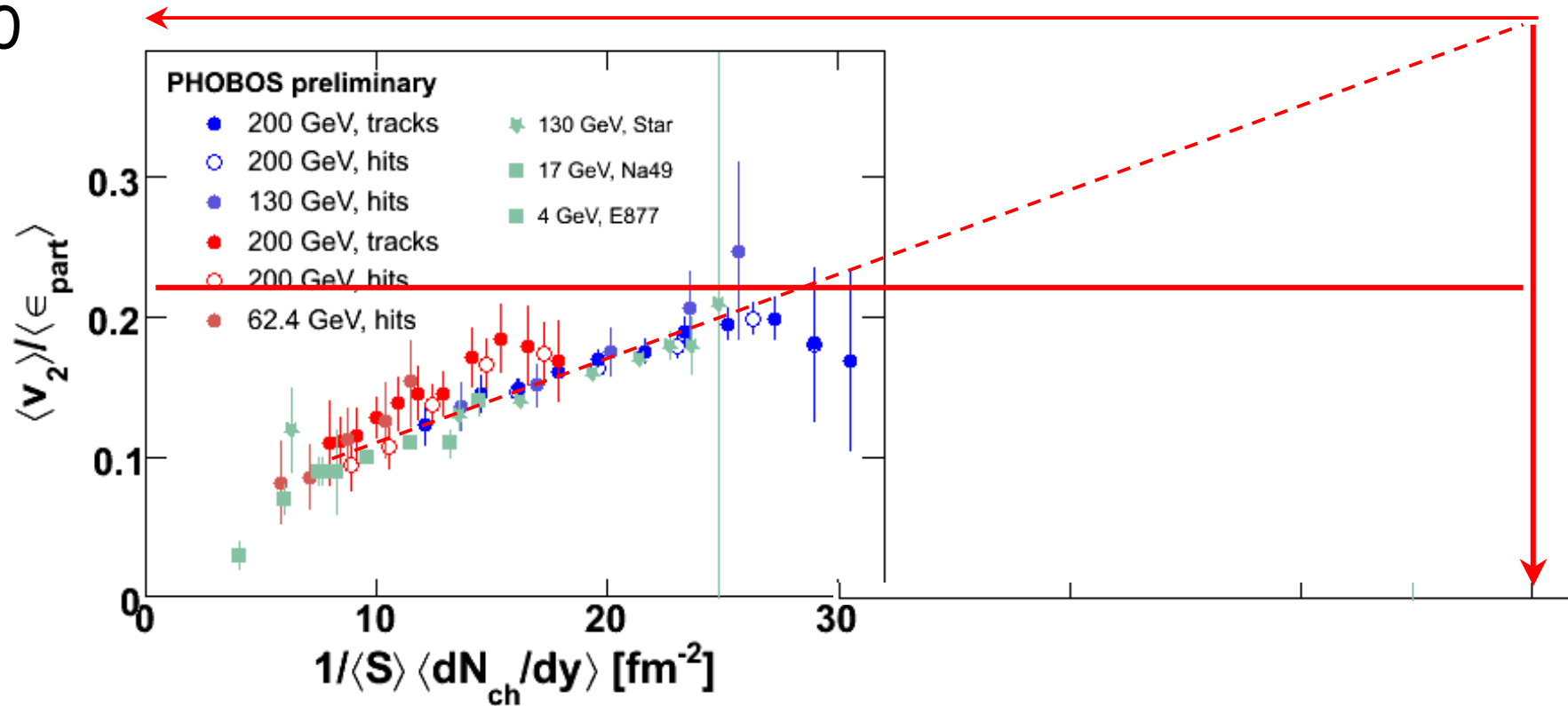
**$v_2/\epsilon \sim 0.2-0.25$**

$$IV : v_2/\epsilon$$

Evénements les plus centraux :

$$dN_{ch}/d\eta \sim 1400$$

$$S \sim 20$$



Probablement plus dans la limite de basse densité au LHC...

Thermalisation atteinte plus tôt ?

=> **saturation de  $v_2/\epsilon$**

$$v_2/\epsilon \sim 0.2-0.25$$

*Extra*