

*IV- Quel « degré » de
thermalisation ?
Des effets de la viscosité...*

Quelques désaccords théorie / expérience

Deux hypothèses :

1 - Système thermalisé donc l'hydro idéale :

- Peut-on trouver un scaling universel par certaines grandeurs macroscopiques ?
- Pourquoi l'hydro idéale ne reproduit pas parfaitement toutes les observables expérimentales dans son domaine de validité en impulsion y compris et surtout v_2 même si l'accord à 200 GeV est encourageant ?

2 - Thermalisation non complète :

- Cela peut expliquer les petits/grands désaccords avec l'hydro idéale.
- Dans ce cas, y a-t-il moyen d'estimer où l'on se trouve par rapport à la thermalisation complète du système ?
- Comment modifier l'hydro idéale pour bien reproduire les données ?

A la recherche d'un scaling universel

- Les propriétés de scaling relient des observables macroscopiques à des propriétés propres et microscopiques du système étudié
- En physique des ions lourds, elles peuvent permettre de trouver des lois simples pour relier l'anisotropie mesurée aux propriétés du système et/ou aux degrés de liberté
- Différents tests :
 - p_t/m scaling
 - scaling par rapport à l'excentricité
 - scaling par rapport à la taille du système
 - scaling en masse et quarks constituants
- Que peut-on apprendre de ces propriétés de scaling ?

Collisions centrales
mi-rapiditéPrédictions générales pour un **fluide idéal** :

➤ Distinction :

- particules lentes : $p_T/m < u_{\max}(\pi/2)$: les particules se
déplacent ensemble avec le fluide. $v_{\text{part}} \sim v_{\text{fluid}}$ Spectres $\sim p_T/m$ - particules rapides : $p_T/m > u_{\max}(0)$: les particules se
déplacent plus vite que le fluide.Les particules arrivent de l'endroit où
le fluide est le plus rapide le long de la
direction de sa vitesse.

M. Estienne

Borghini, Ollitrault
Nucl-th/0506045

Prédictions générales pour un **fluide idéal** :

➤ Distinction :

- particules lentes :

$p_T/m < u_{\max}(\pi/2)$: les particules se **déplacent ensemble** avec le fluide.

$v_{\text{part}} \sim v_{\text{fluid}}$

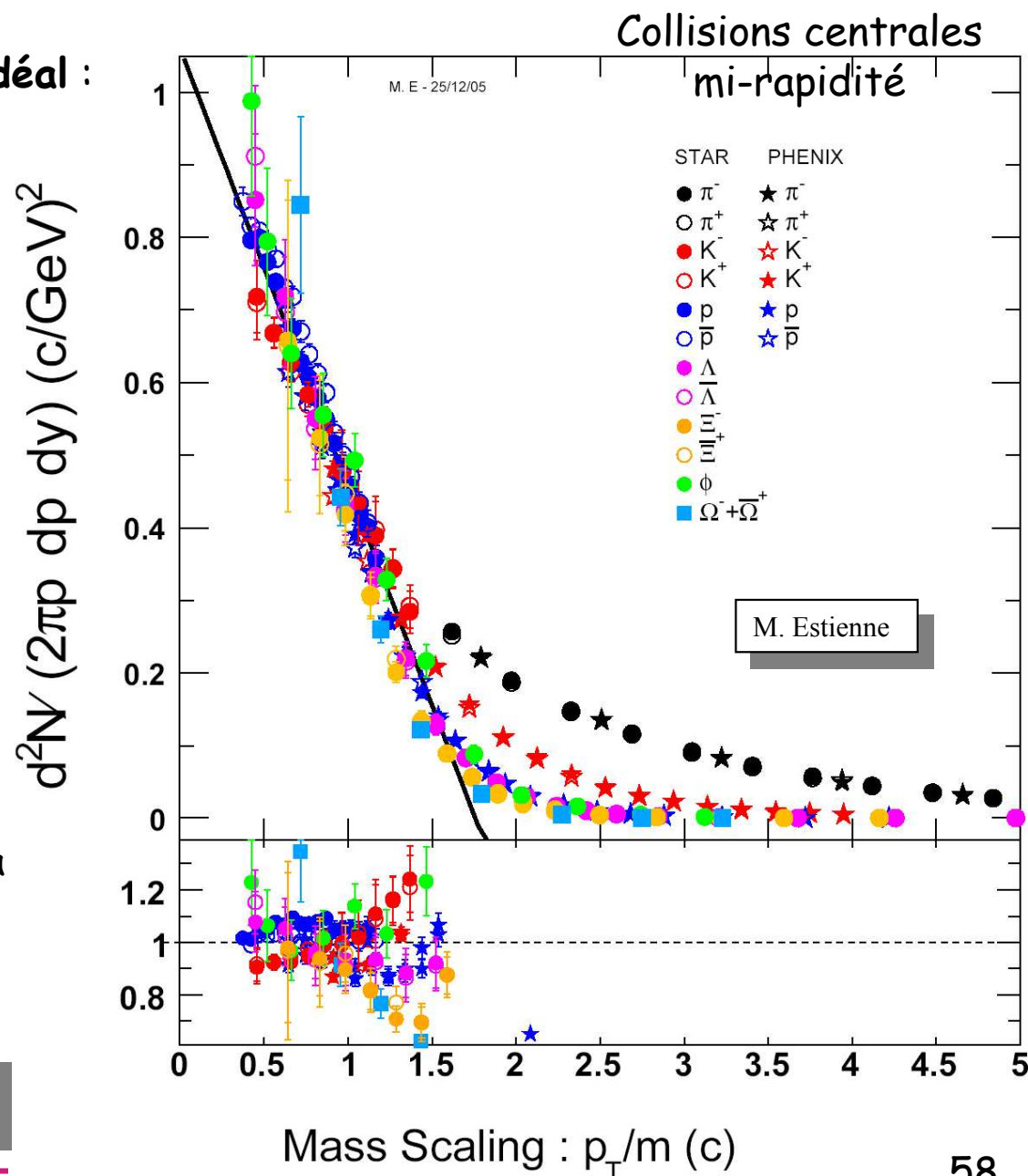
Spectres $\sim p_T/m$

- particules rapides :

$p_T/m > u_{\max}(0)$: les particules se **déplacent plus vite** que le fluide.

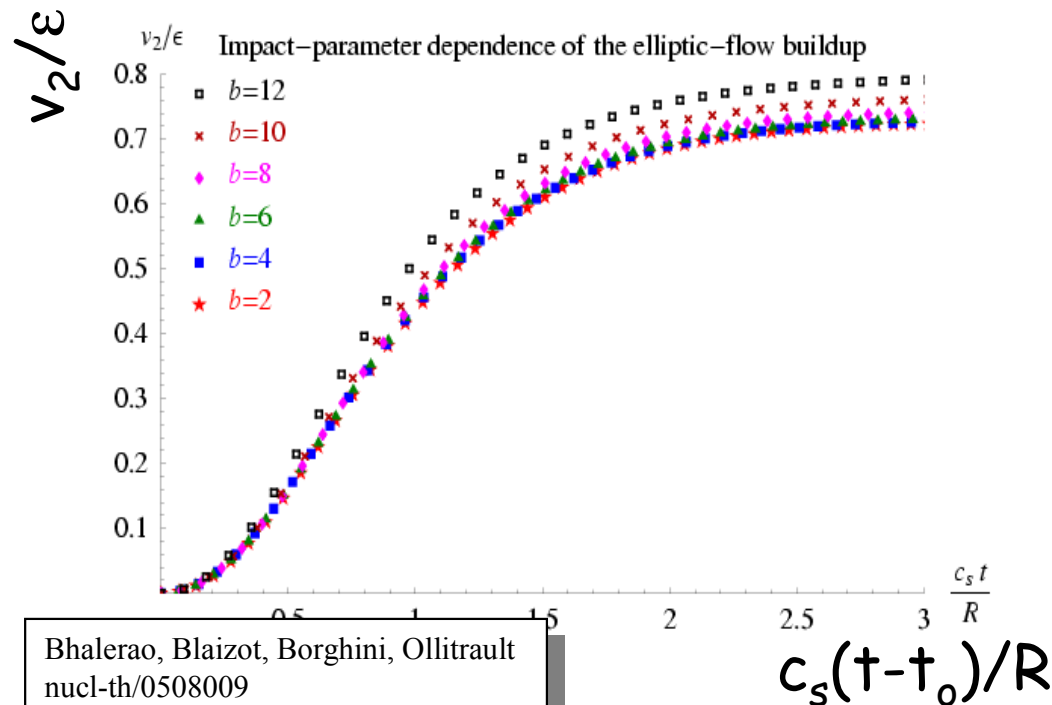
Les particules arrivent de l'endroit où le fluide est le plus rapide le long de la direction de sa vitesse.

Borghini, Ollitrault
Nucl-th/0506045



Scaling avec l'excentricité ?

- Peut-on trouver d'autres observables qui montrent la thermalisation de la matière lors des collisions ? Scaling par l'excentricité ?
- L'hydro idéale est un invariant d'échelle. Si la matière se comporte hydrodynamiquement et est thermalisée, v_2 devrait être indépendant de la taille du système.



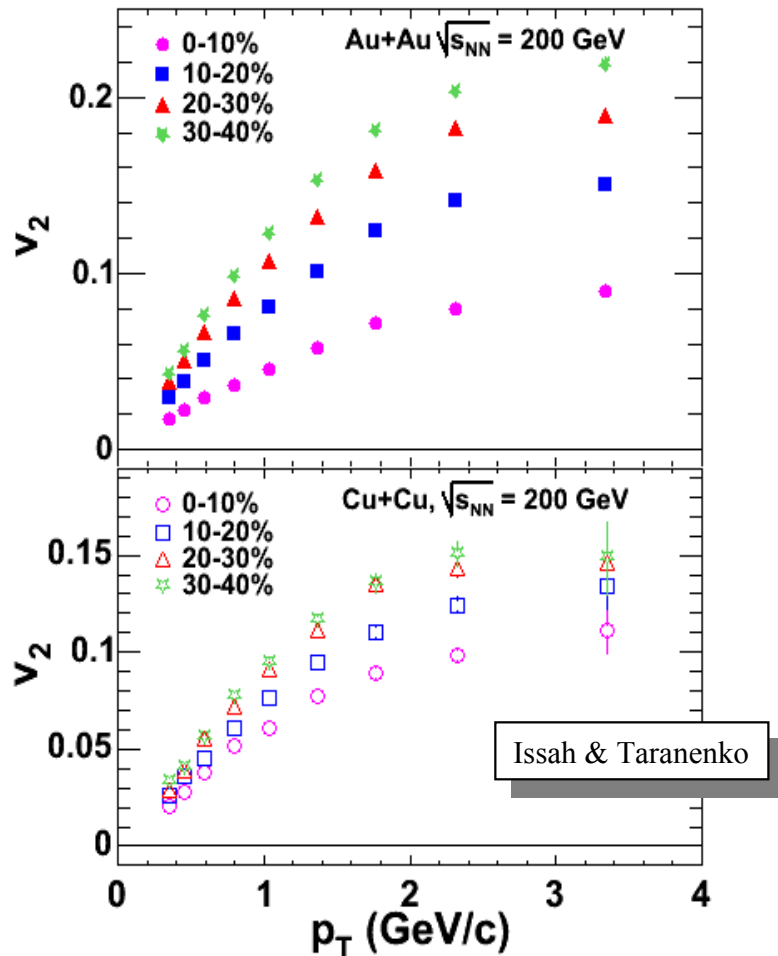
$$\epsilon = \frac{\langle y^2 - x^2 \rangle}{\langle y^2 + x^2 \rangle}$$

Le flot elliptique se développe sur $R/\langle c_s \rangle$
 t_0 = temps de thermalisation
 Valable tant que $t_0 \ll R/\langle c_s \rangle$

v_2/ϵ varie très peu pour différentes valeurs de b excepté pour les collisions les plus périphériques.

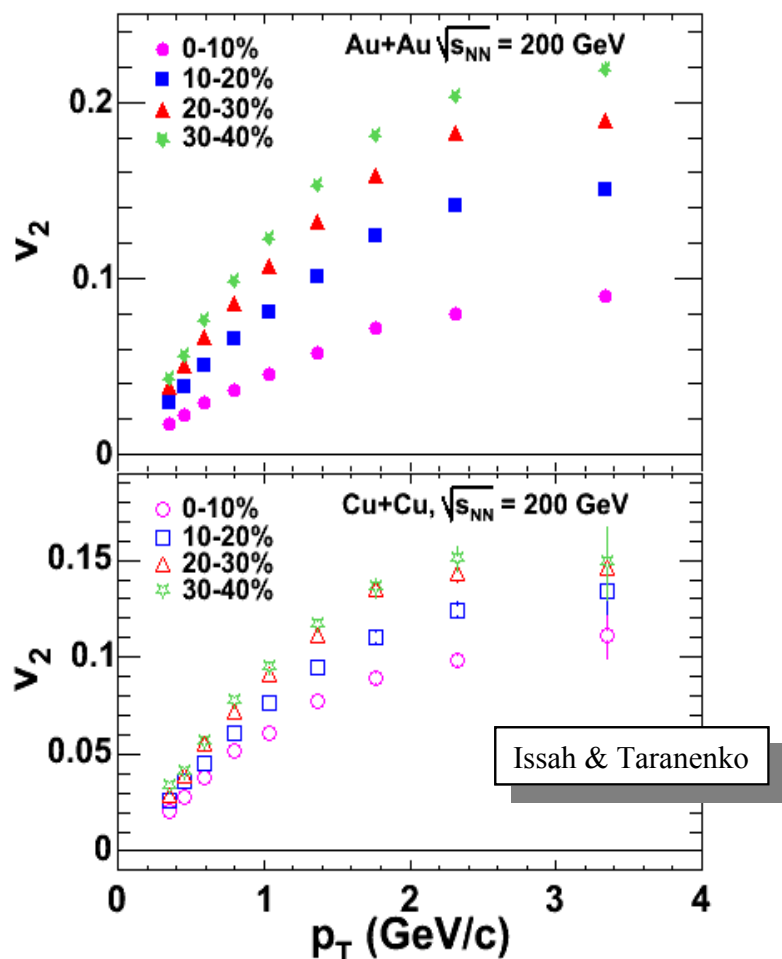
● La valeur finale de v_2 est indépendante de la taille du système (R) pour une forme donnée (ϵ).

PHENIX Au+Au et Cu+Cu @ 200 GeV



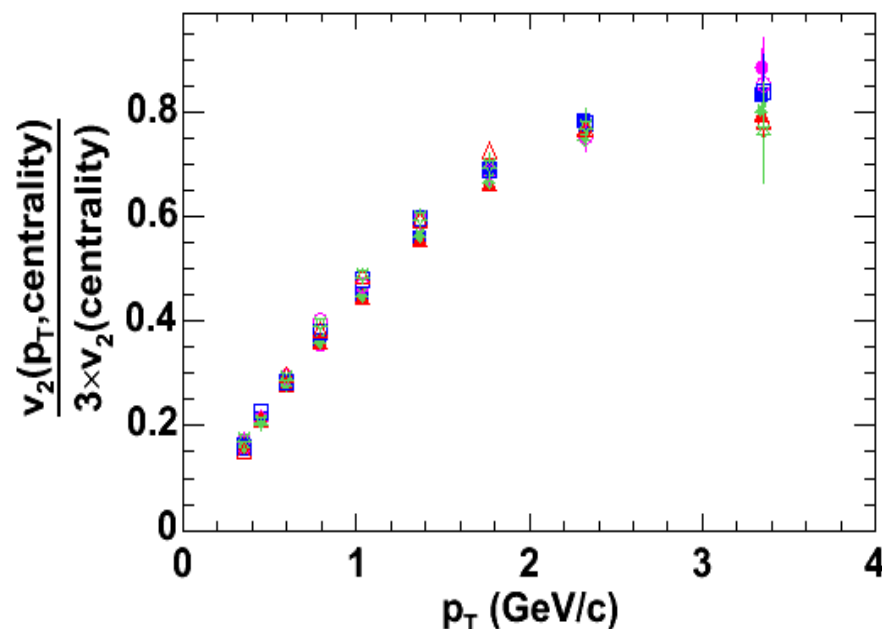
▪ "Integrated v_2 reflects momentum anisotropy of bulk matter and saturates within the first 3-4 fm/c just after collision" (Gyulassy, Hirano nucl-th/050604)

PHENIX Au+Au et Cu+Cu @ 200 GeV



En considérant que v_2 (intégré en p_T) évolue à peu près linéairement avec la centralité de la collision $\Rightarrow \varepsilon \propto k \times v_2$ ($k=3$ glauher)

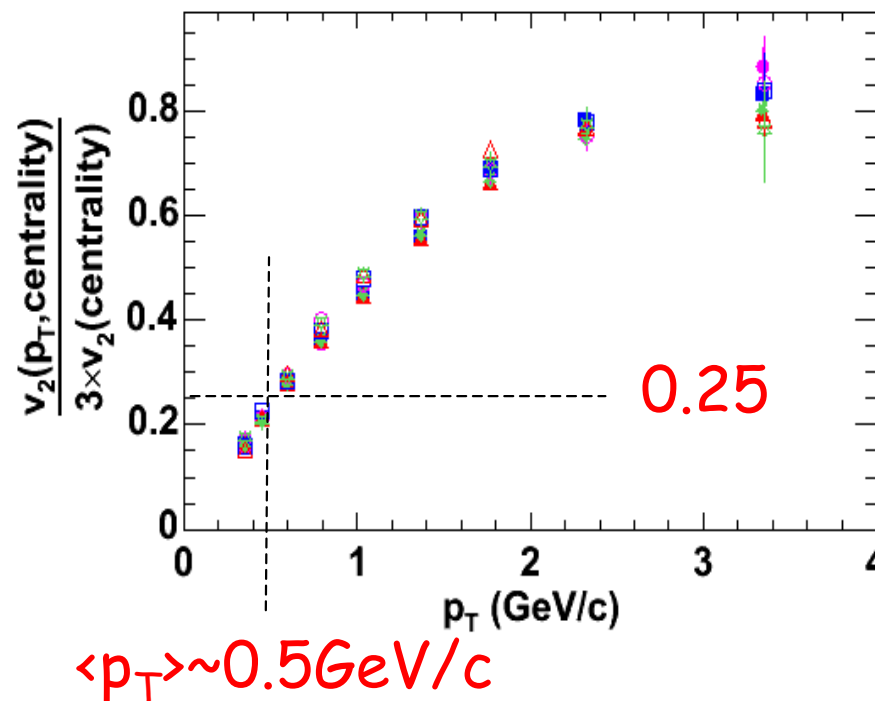
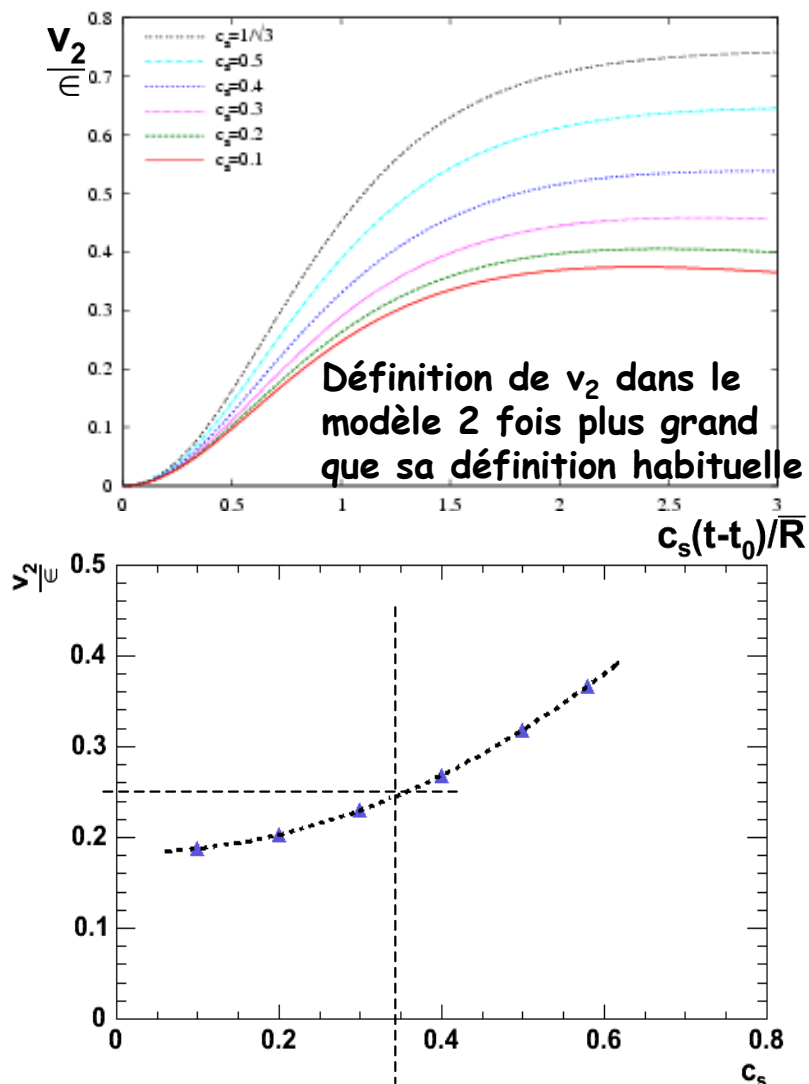
▪ "Integrated v_2 reflects momentum anisotropy of bulk matter and saturates within the first 3-4 fm/c just after collision" (Gyulassy, Hirano nucl-th/050604)



- Scaling en excentricité prédit par l'hydro idéale
- Indépendance avec le taille des systèmes collisionnant

Estimation de c_s ?

- L'amplitude de v_2 dépend aussi des propriétés du système et en particulier de la vitesse du son.
- Peut-on en tirer une information sur la « dureté » de l'EOS ?



$c_s \sim 0.35 \pm 0.5$
 $c_s^2 \sim 0.12$, EOS douce

Scaling avec l'énergie cinétique transverse

Vitesse d'une particule dans un fluide parfait non relativiste :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\text{flow}} + \mathbf{V}_{\text{th}}$$

Ollitrault, NPA638

- Energie cinétique moyenne d'une particule :

$$KE = KE_{\text{coll}} + KE_{\text{th}}$$

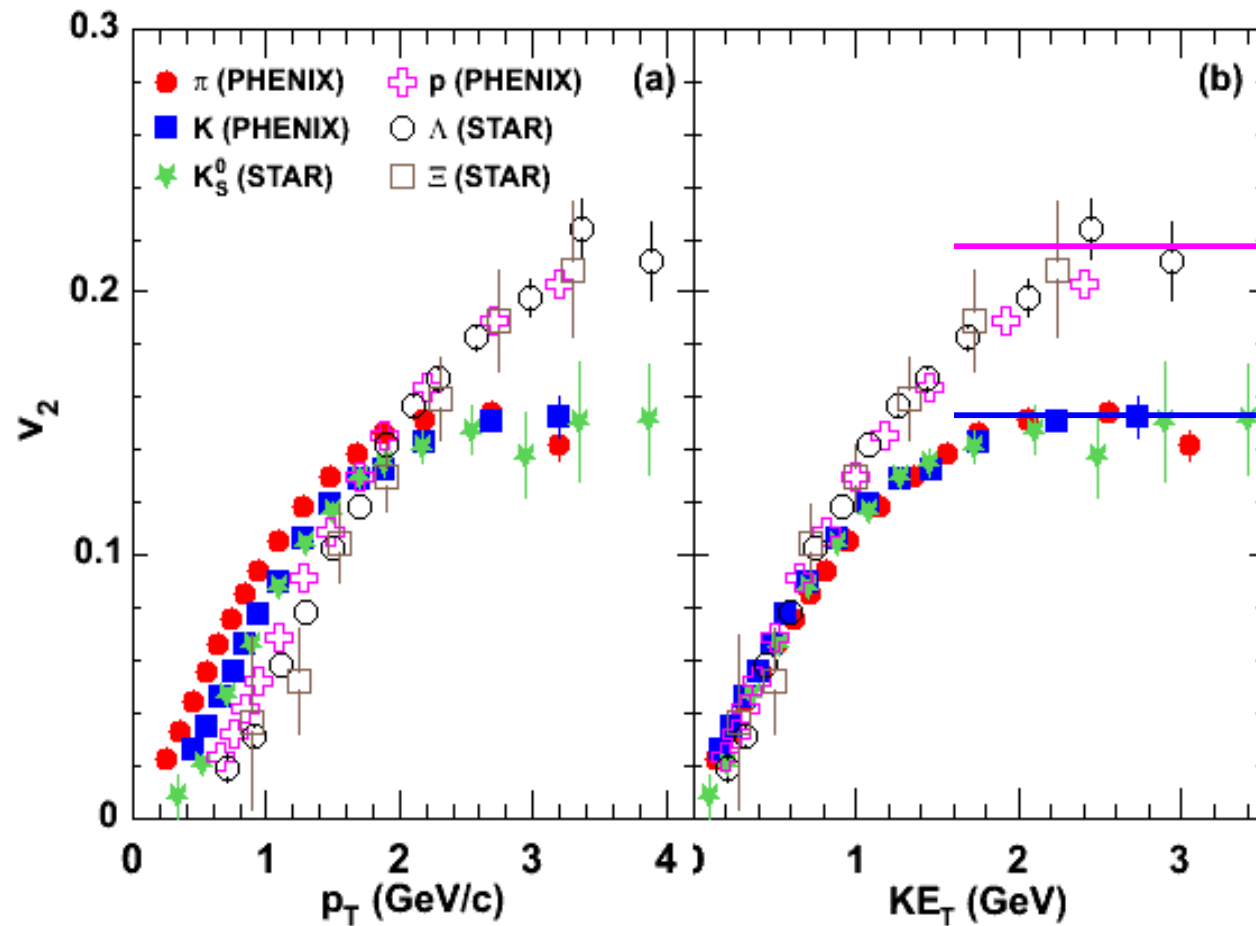
- La pression est une mesure de l'énergie cinétique moyenne. Le **flot elliptique** créé par les gradients de pression devrait être **sensible à l'énergie cinétique collective transverse**.

- Energie cinétique transverse d'une particule dans un fluide relativiste

$$KE_T = m (\gamma_T - 1)$$

- 1^{er} scaling a avoir exploité cette idée mais avec une expression non relativiste de l'énergie transverse : le **buda lund model** nucl-th/0310040 et résultats QM 2005 : R. Lacey

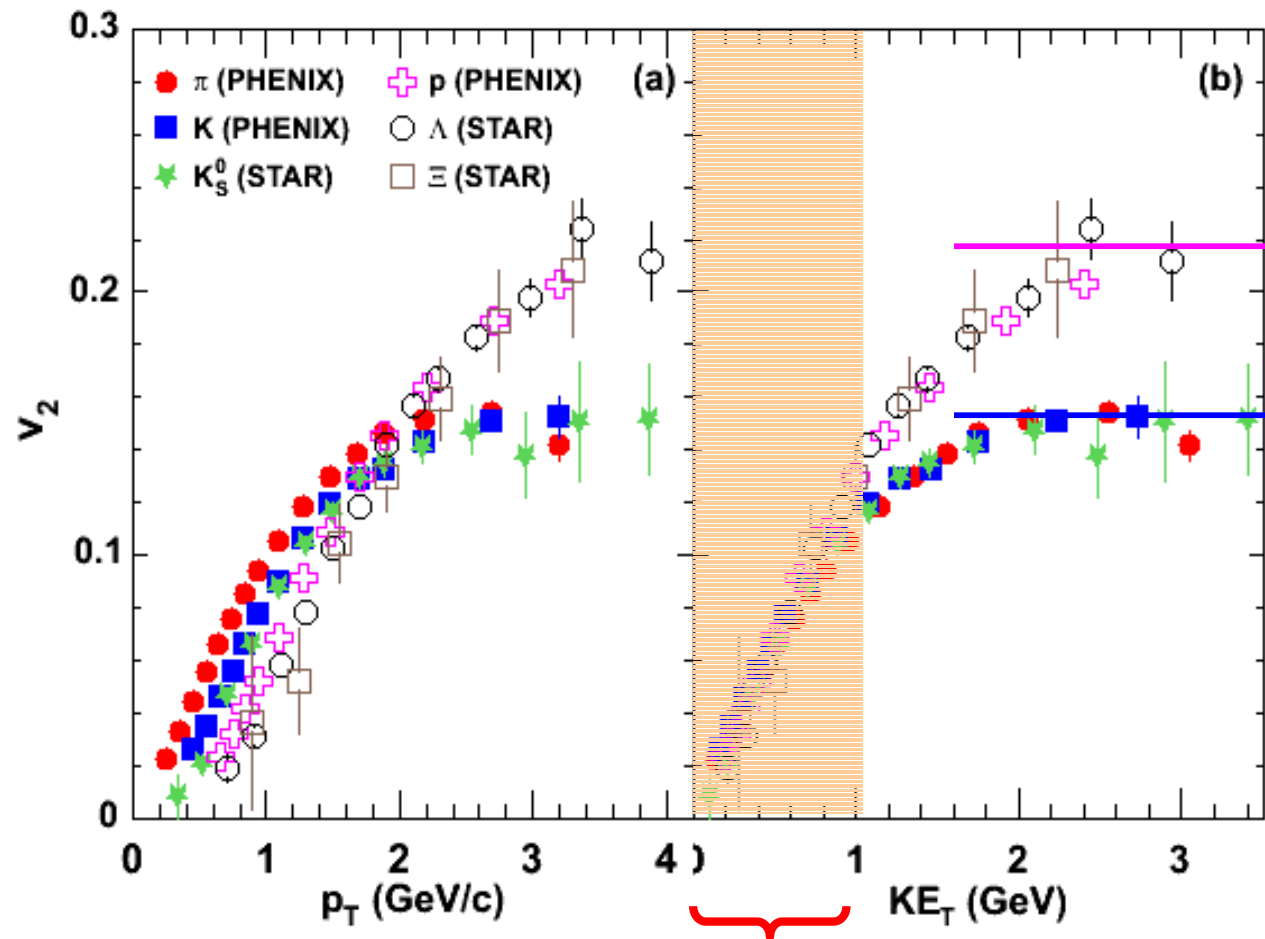
Masse transverse et n_q dépendances



Comportement similaire
pour les baryons

... et différent pour
les mésons mais
similaire entre eux
également

Masse transverse et n_q dépendances

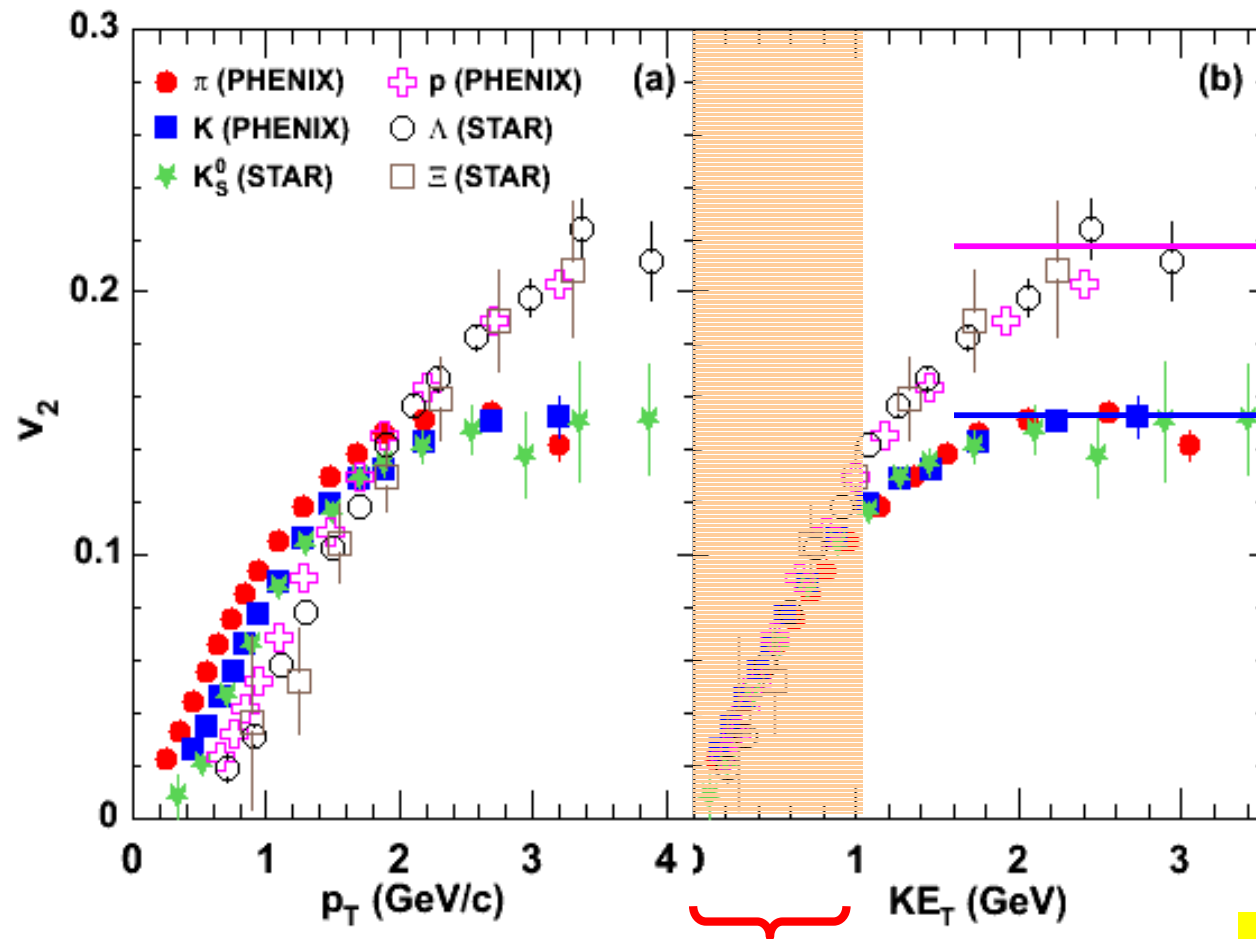


Comportement similaire pour les baryons

... et différent pour les mésons mais similaire entre eux également

Le scaling marche jusqu'à 1 GeV

Masse transverse et n_q dépendances



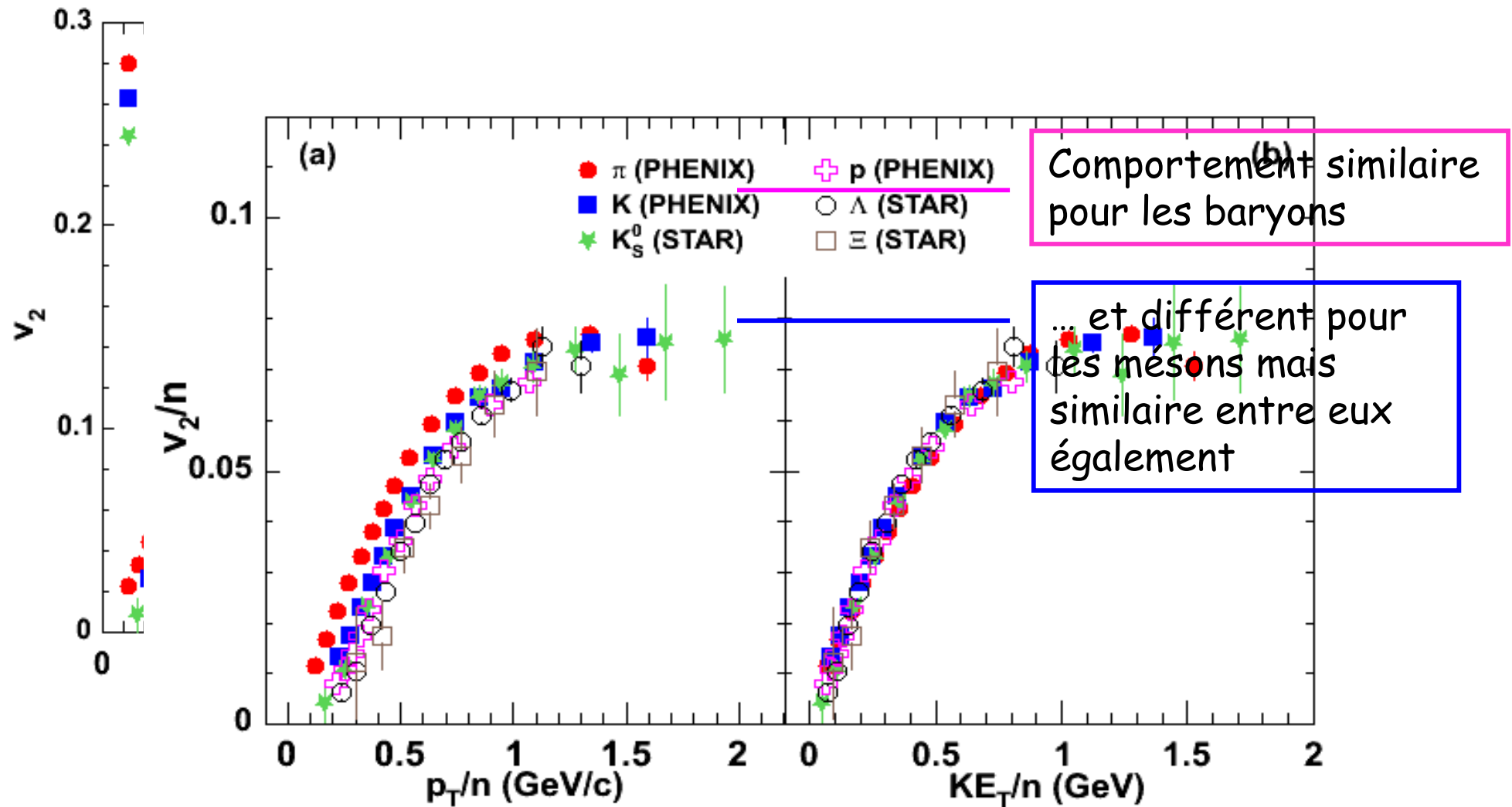
Comportement similaire pour les baryons

... et différent pour les mésons mais similaire entre eux également

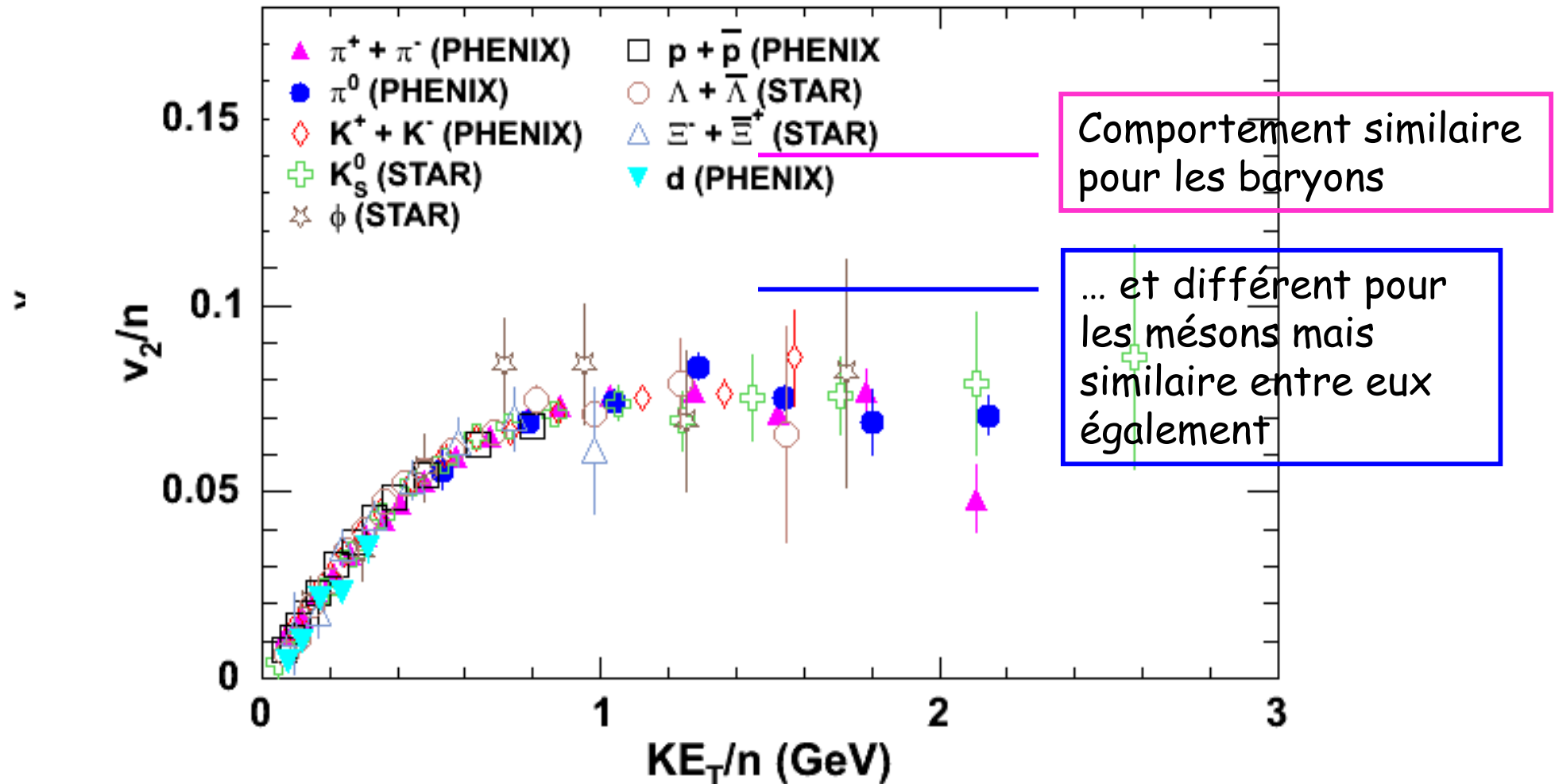
Le scaling marche jusqu'à 1 GeV

Une dépendance en quarks au delà de 1 GeV ?

Masse transverse et n_q dépendances



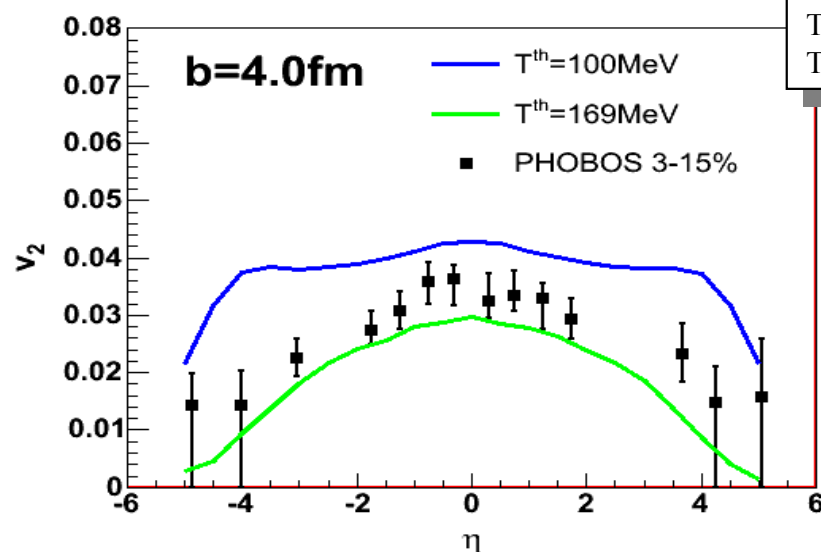
Masse transverse et n_q dépendances



Aussi vrai pour ϕ et d ...
 KE_T bon scaling pour le flot
 KE_T/n scaling universel ?

Au delà de l'hydro idéale...

● 3D hydro (T. Hirano) : reproduction de la dépendance du flot elliptique avec la rapidité ou pseudorapidité



T. Hirano, M. Gyulassy, nucl-th/0506049
T. Hirano, nucl-th/0601006

● Hydro + Cascade

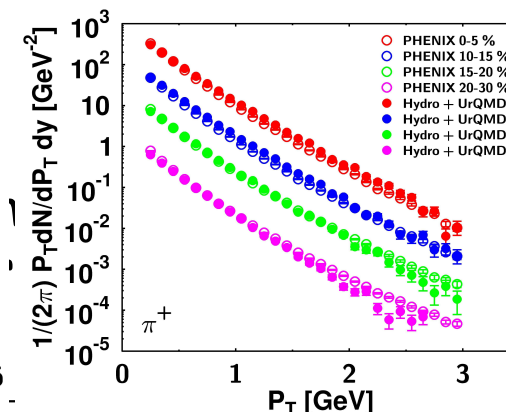
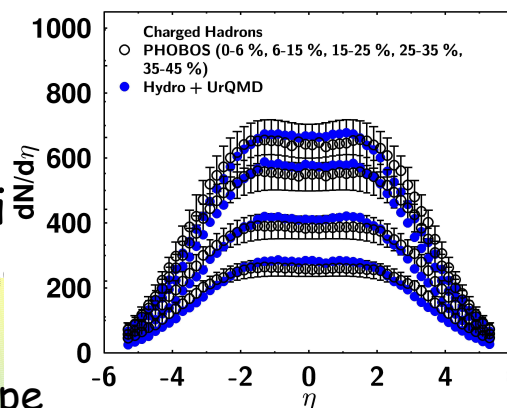
Supposer la thermalisation
génère trop de flot.

Idée : cascade

CE : chemi
PCE : parti
HC : reson

- Hydro = fluide parfait

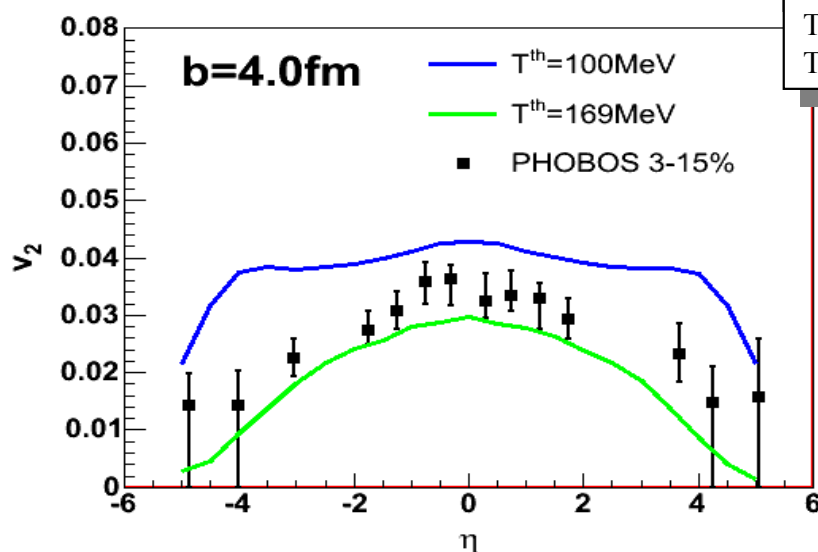
- A $T_{\text{ch}} = T_c$, un modèle microscopique de type hadron/parton cascade peut jouer le rôle de la viscosité et entraîner des effets dissipatifs dans la phase hadronique



S. Nonaka, S. A. Bass,
nucl-th/0510038

Au delà de l'hydro idéale...

● 3D hydro (T. Hirano) : reproduction de la dépendance du flot elliptique avec la rapidité ou pseudorapidité



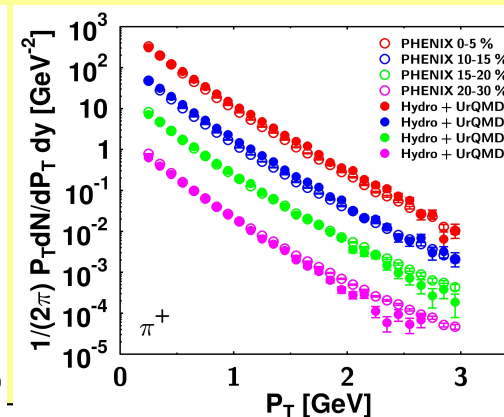
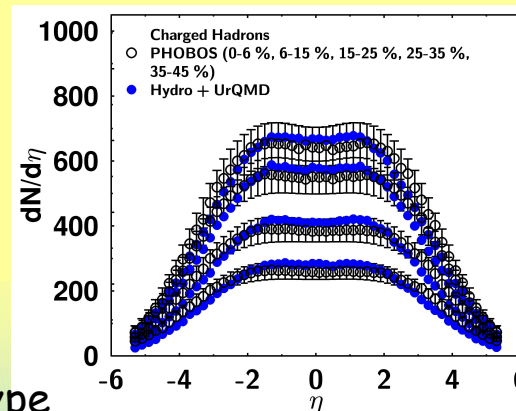
T. Hirano, M. Gyulassy, nucl-th/0506049
T. Hirano, nucl-th/0601006

● Hydro + Cascade

Supposer la thermalisation génère trop de flot.

Idée : cascade

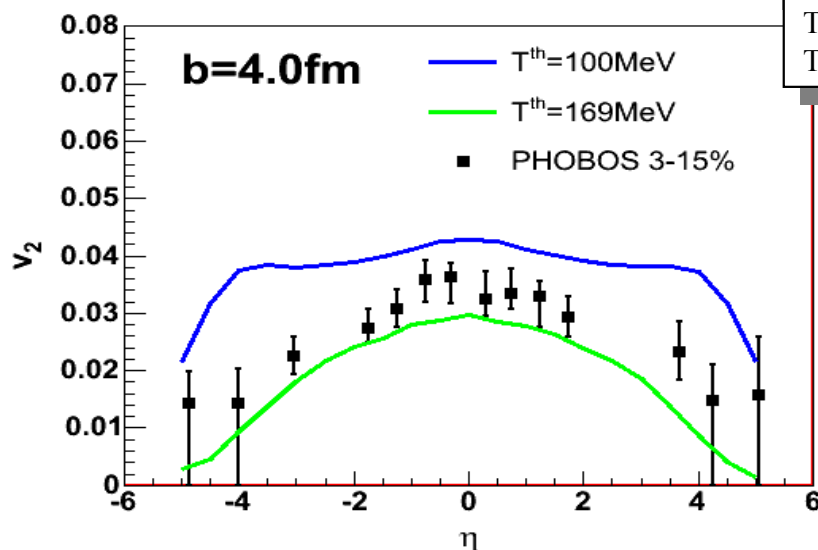
- Hydro = fluide parfait
- A $T_{\text{ch}} = T_c$, un modèle microscopique de type hadron/parton cascade peut jouer le rôle de la viscosité et entraîner des effets dissipatifs dans la phase hadronique



S. Nonaka, S. A. Bass,
nucl-th/0510038

Au delà de l'hydro idéale...

● 3D hydro (T. Hirano) : reproduction de la dépendance du flot elliptique avec la rapidité ou pseudorapidité



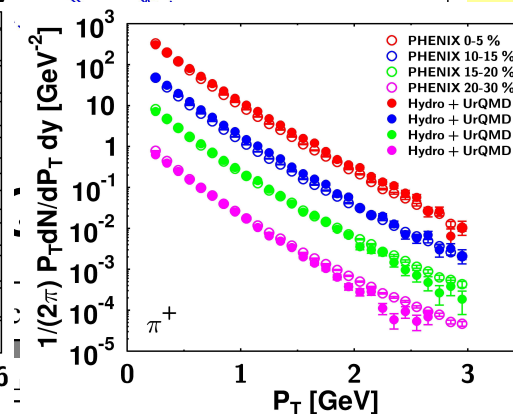
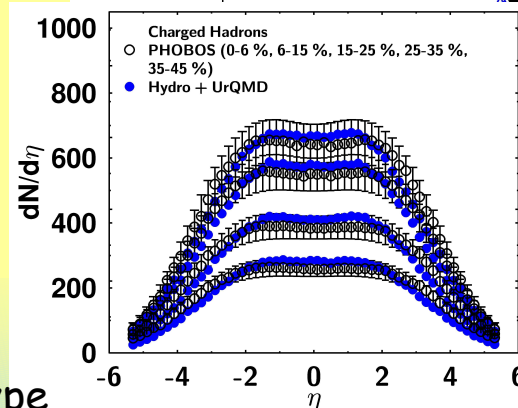
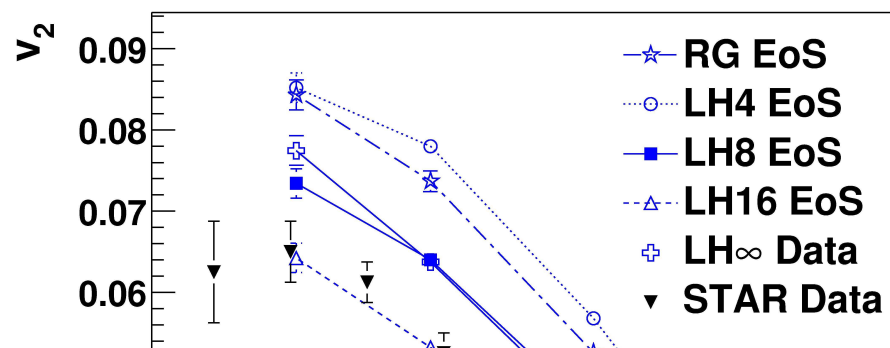
T. Hirano, M. Gyulassy, nucl-th/0506049
T. Hirano, nucl-th/0601006

● Hydro + Cascade

Supposer la thermalisation génère trop de flot.

Idée : cascade

- Hydro = fluide parfait
- A $T_{\text{ch}} = T_c$, un modèle microscopique de type hadron/parton cascade peut jouer le rôle de la viscosité et entraîner des effets dissipatifs dans la phase hadronique



S. Nonaka, S. A. Bass,
nucl-th/0510038

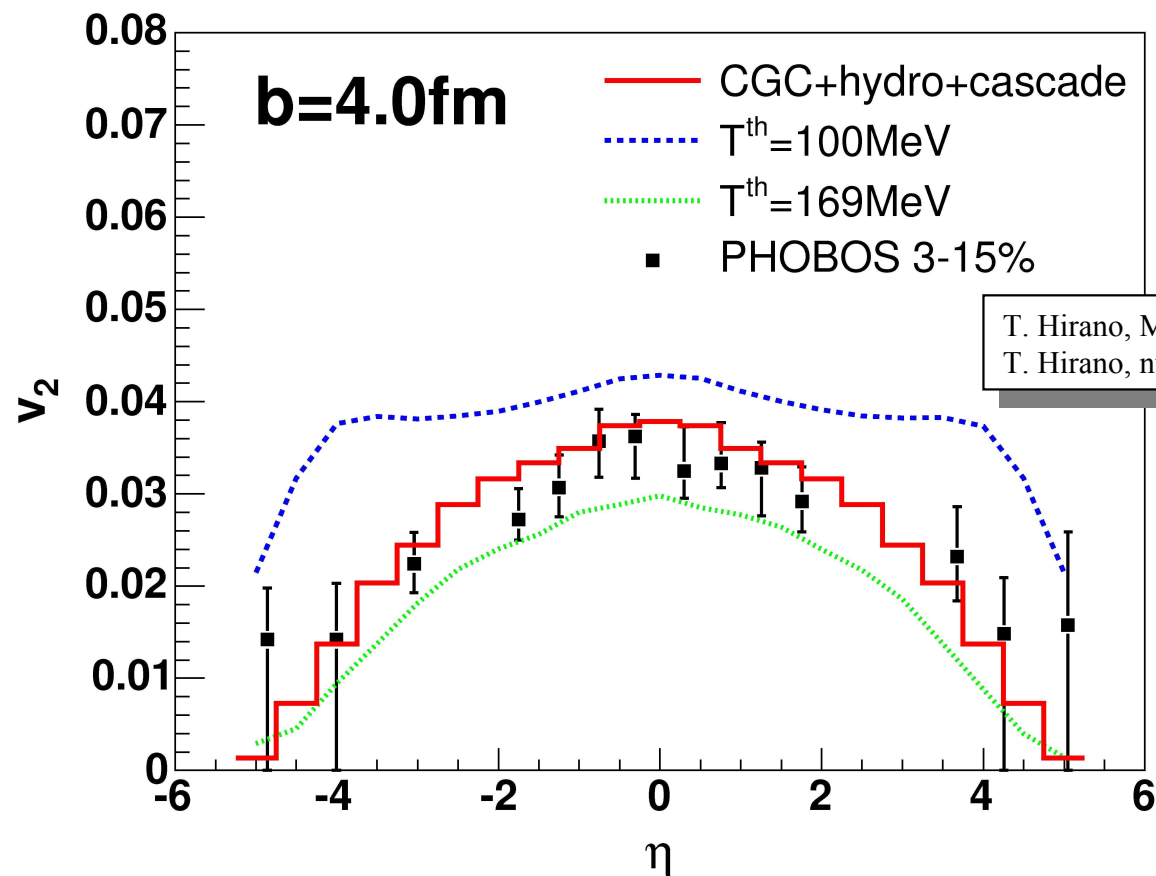
N_p/N_p^{max}

Au delà de l'hydro idéale...

● CGC + Hydro + Cascade

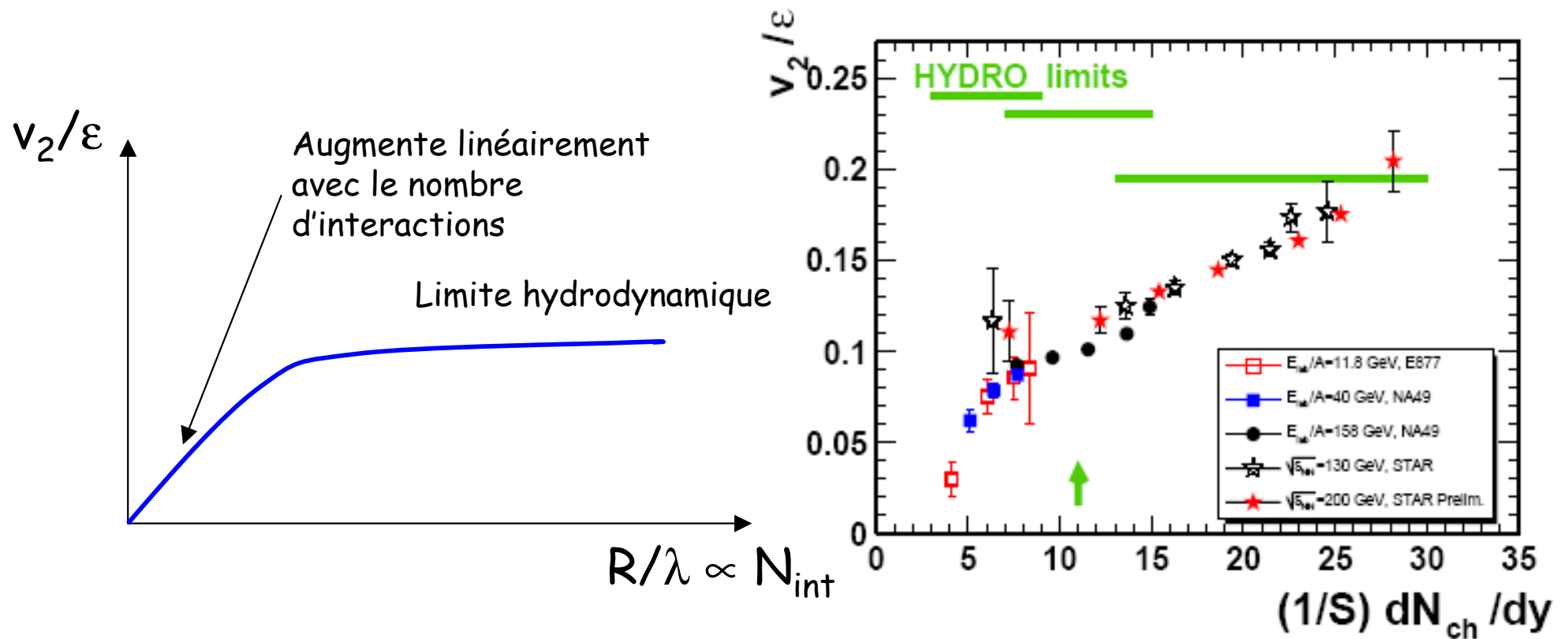
Modéliser une étape de plus de la collision : ces tous premiers instants avant l'étape de thermalisation : *CGC*

=> Meilleure description de la dépendance en rapidité

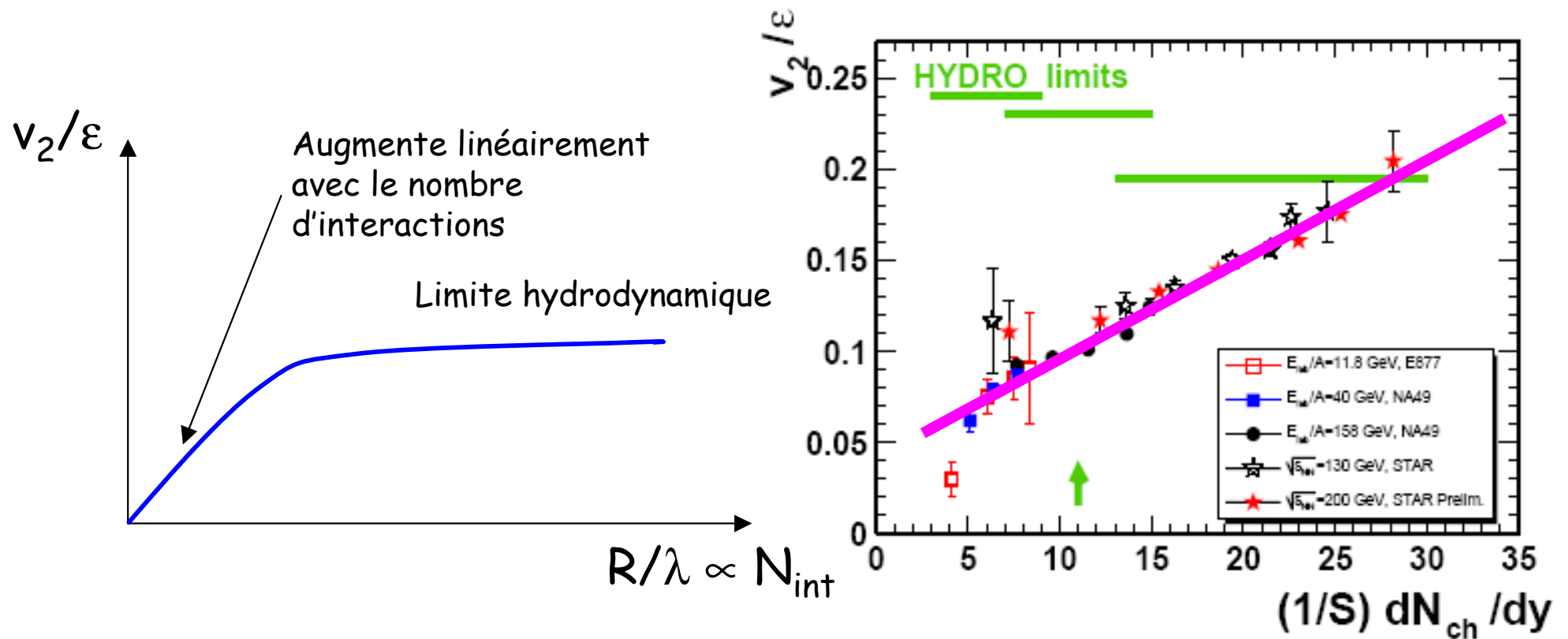


T. Hirano, M. Gyulassy, nucl-th/0506049
T. Hirano, nucl-th/0601006

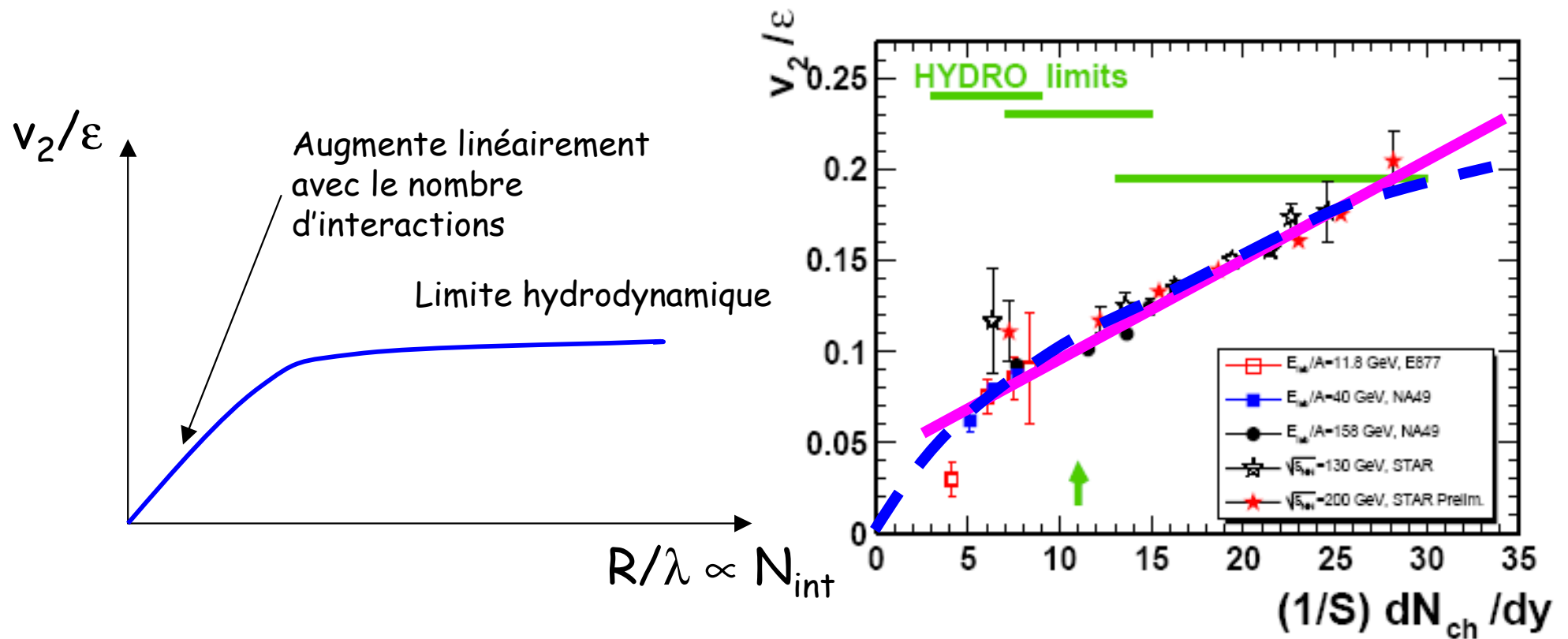
Thermalisation incomplète ?



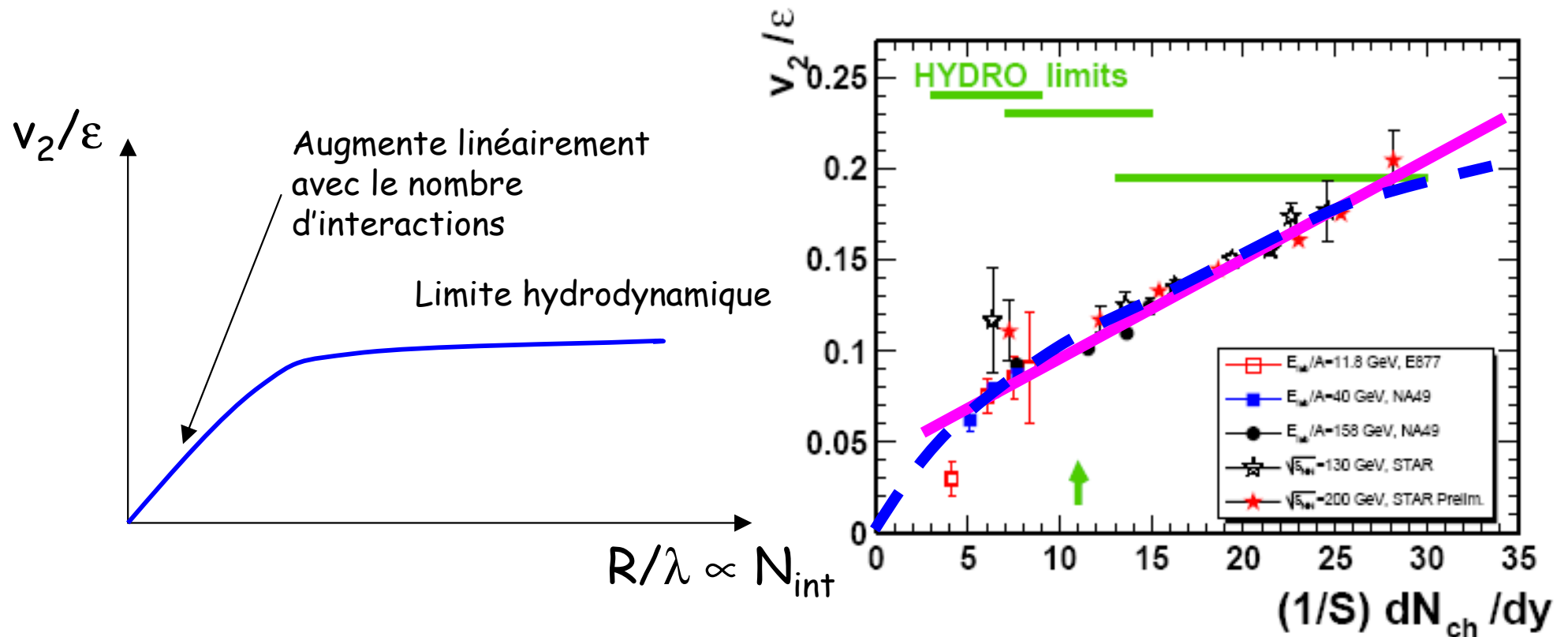
Thermalisation incomplète ?



Thermalisation incomplète ?

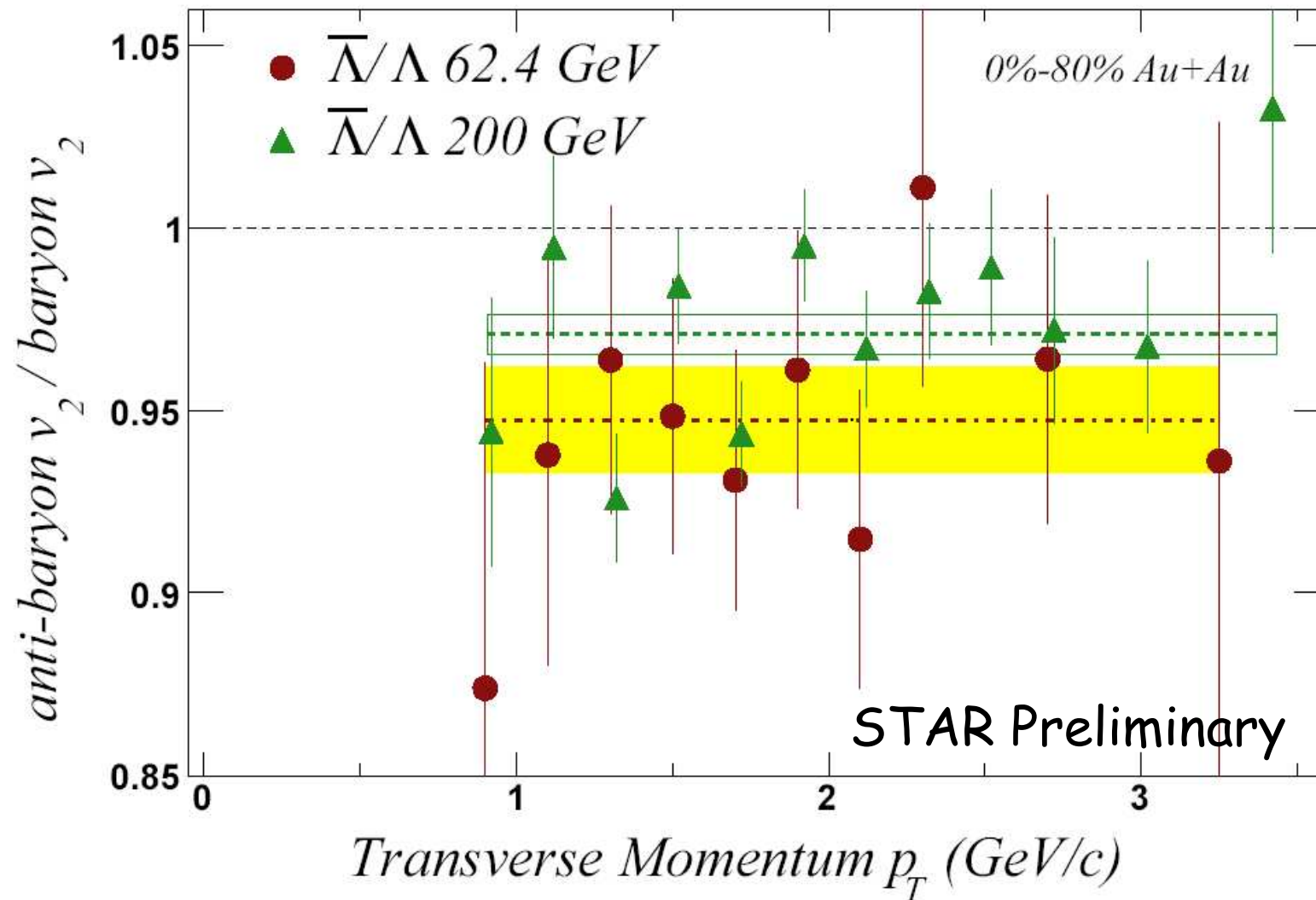


Thermalisation incomplète ?

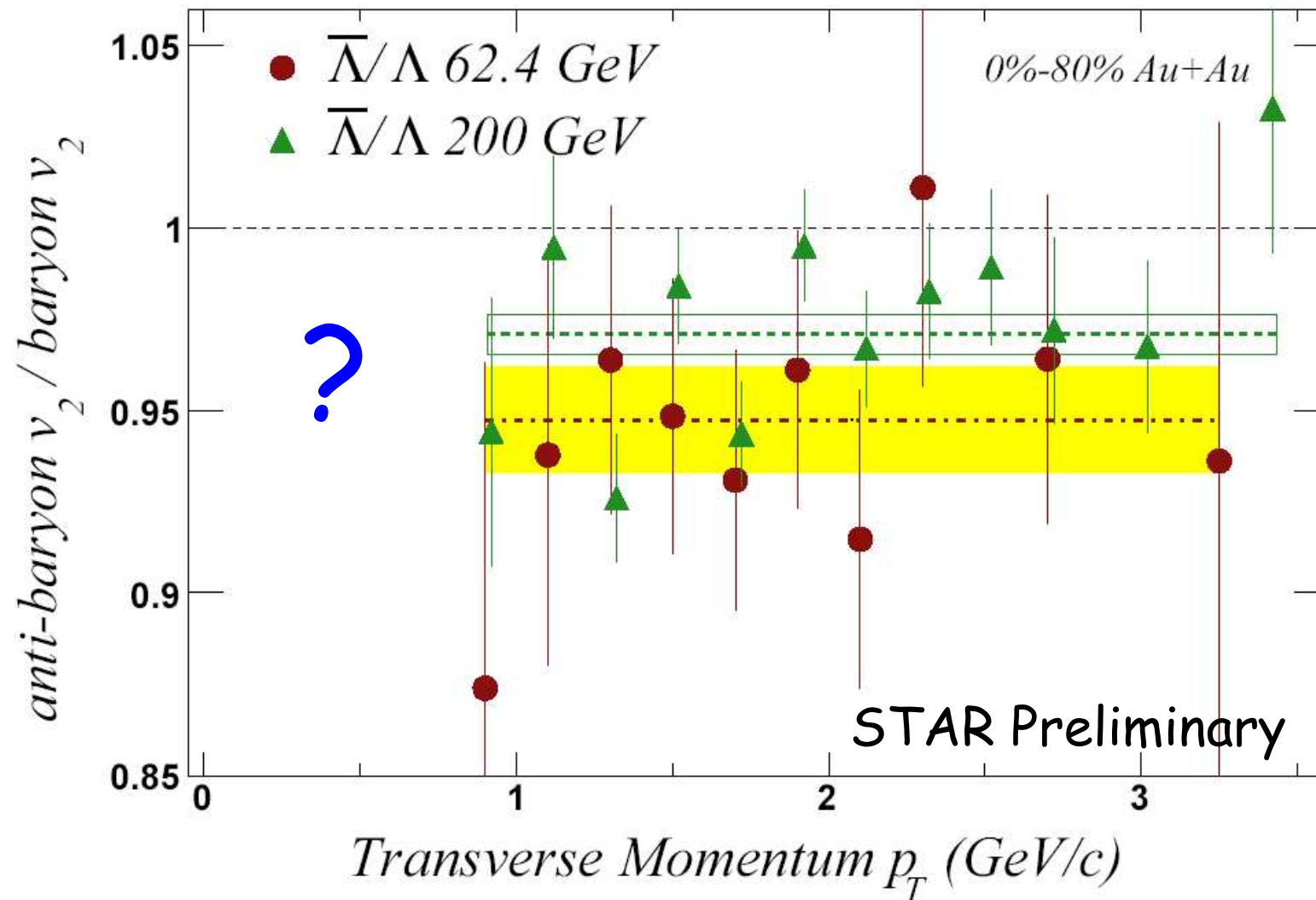


- Où est-on sur cette courbe ?
- Ça conduit plutôt à quelle dépendance avec la taille du système ?
- Si le milieu n'est pas totalement thermalisé, quel est l'effet de la viscosité sur ce dernier ?
- Jean-Yves ?

v_2 anti-baryon / v_2 baryon ?



v_2 anti-baryon / v_2 baryon ?

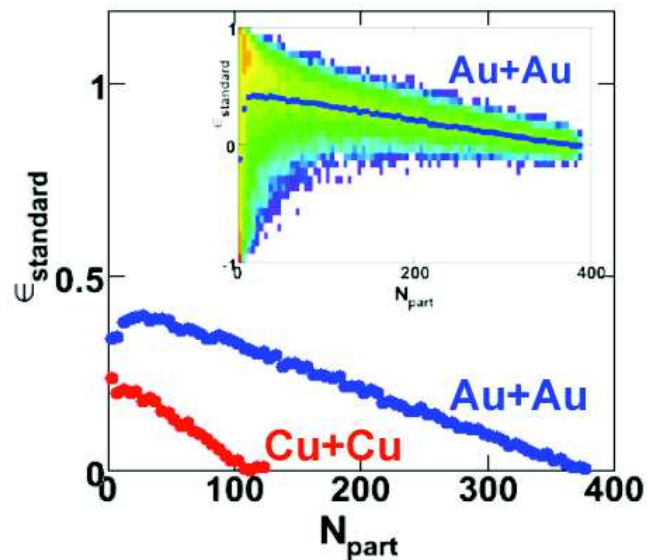
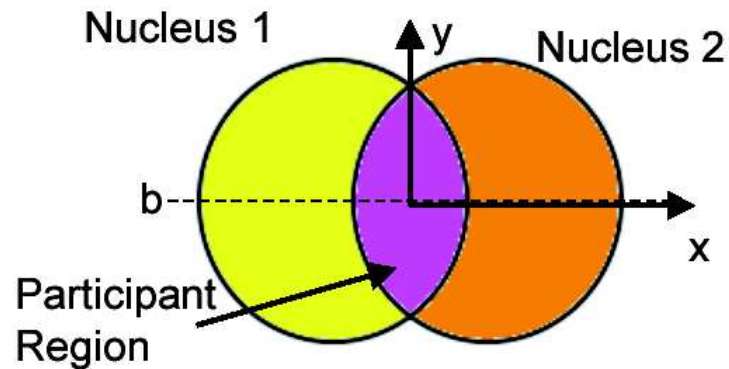


The logo features a horizontal bar at the top with a color gradient from purple on the left to orange on the right. Below this bar is a large black rectangle. The text "V-Backup" is centered within the black rectangle in a white, stylized script font.

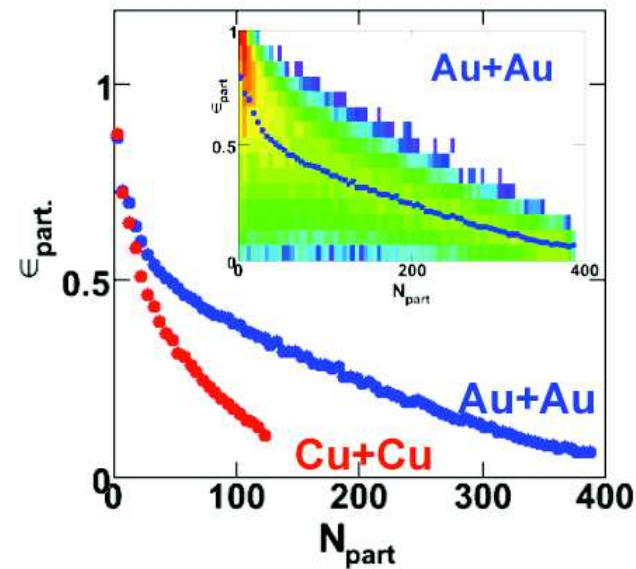
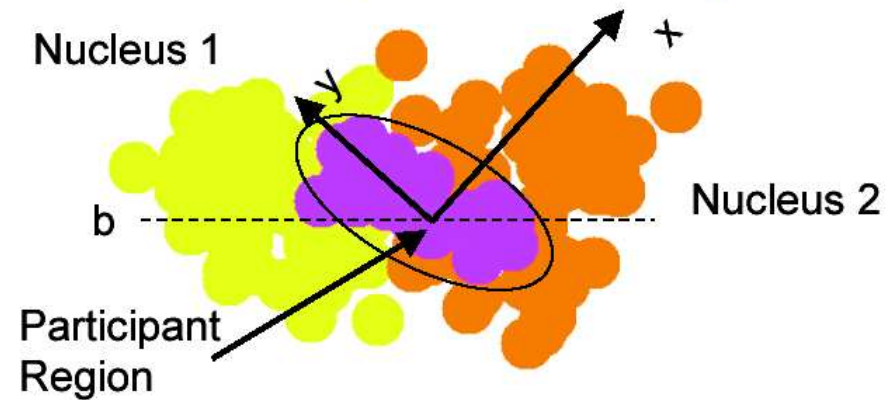
V-Backup

PHOBOS $\epsilon_{part} I$

Standard Eccentricity

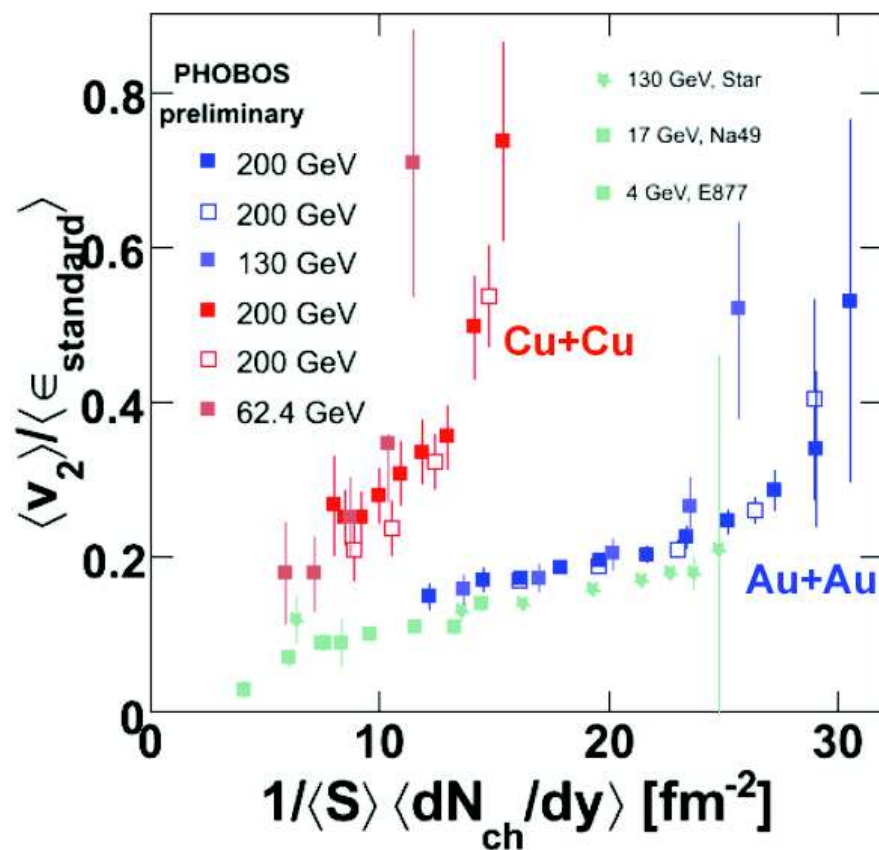


Participant Eccentricity



PHOBOS ϵ_{part} II

Standard Eccentricity



Participant Eccentricity

