



Pions et photons durs à RHIC

François Arleo

LPTHE, Jussieu

Etretat – Juin 2005



Plan de l'exposé

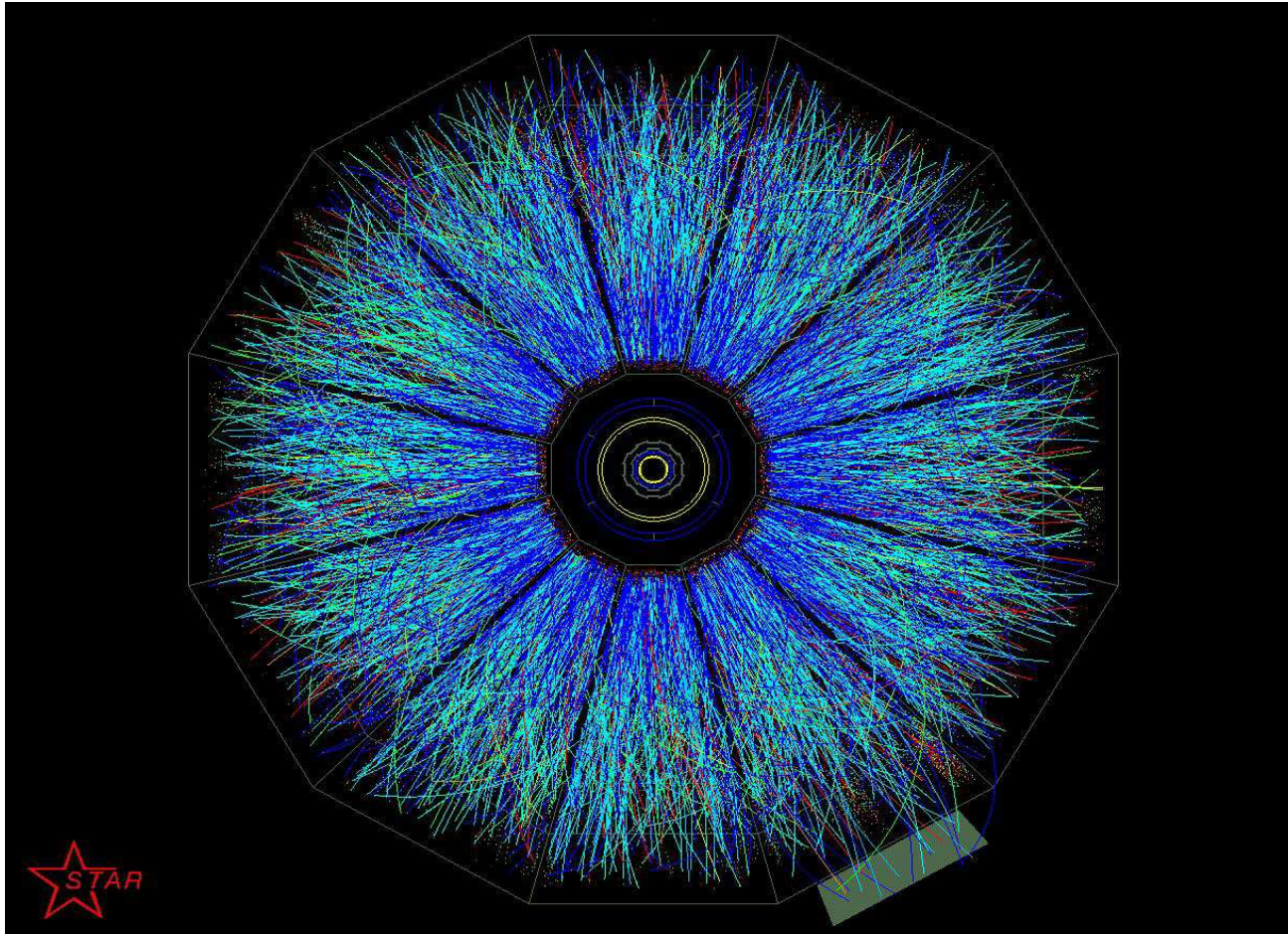


- Motivations
 - Pertes d'énergie et déconfinement
- Modèle
 - Distribution de probabilité
 - Fonctions de fragmentation modifiées
- Phénoménologie
 - Pions durs
 - Photons prompts
- Discussion

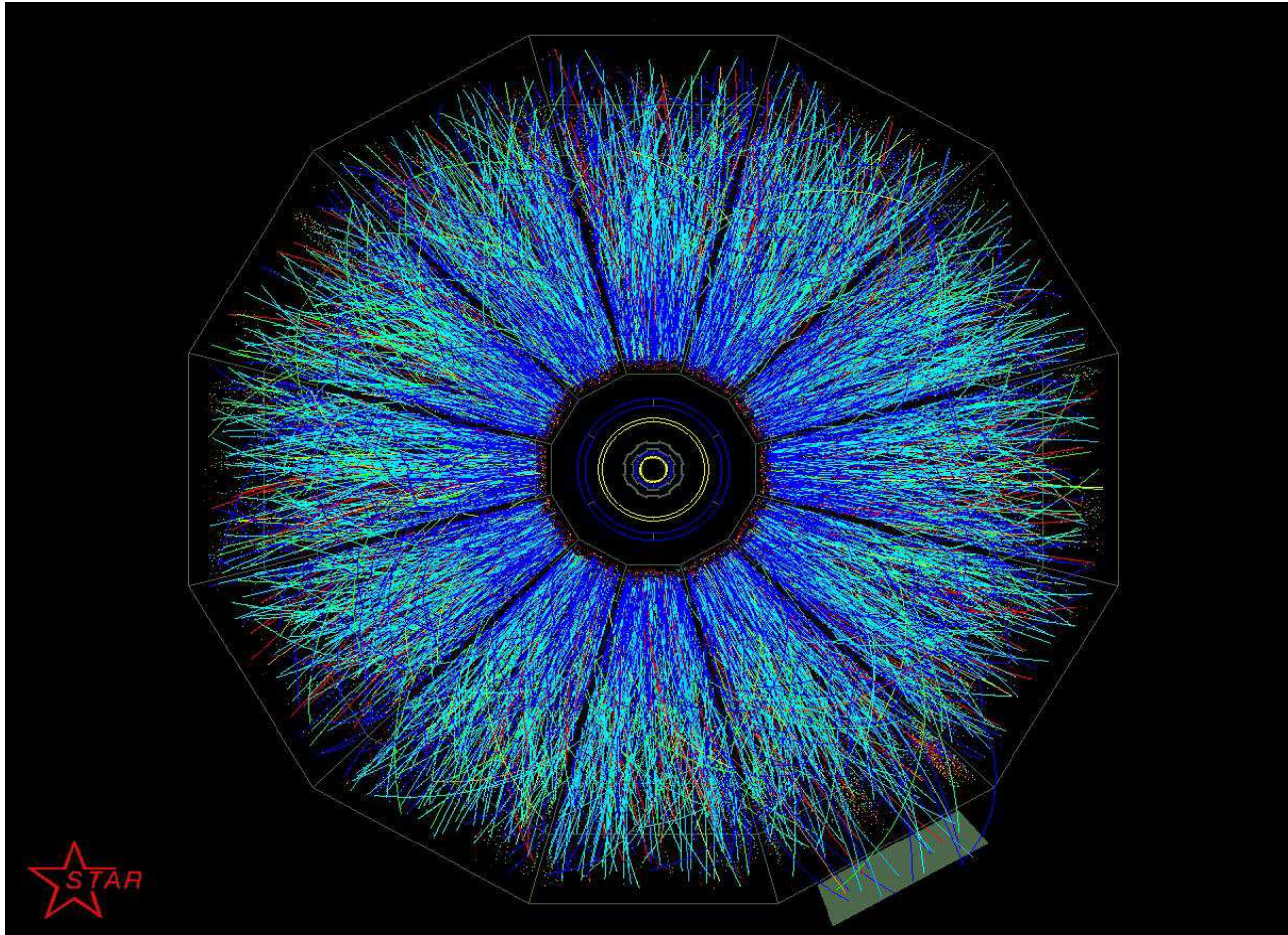


[travail en cours]

Motivations



Motivations

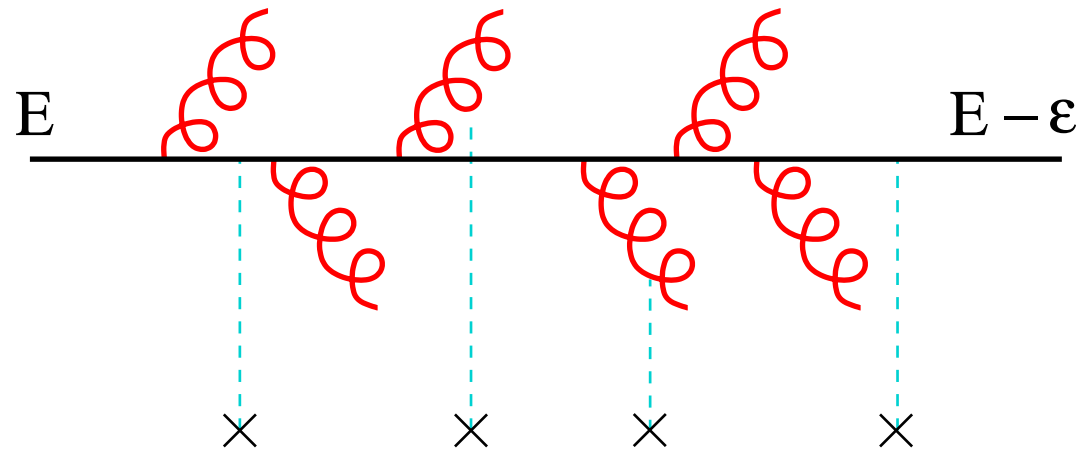


Comment – dans ce désordre – sonder le déconfinement ?

Pertes d'énergie des partons

Nombreuses collisions molles du parton dur

- Rayonnement de gluons $dI/d\omega$ proportionnel à la **densité** du milieu



[Baier, Dokshitzer, Mueller, Peigné, Schiff 1996, 1997]

[Gyulassy, Wang 1994; Gyulassy, Lévai, Vitev 2000]

[Zakharov 1996 1997 1998 ; Wiedemann 2000 2001]

Pertes d'énergie des partons

Nombreuses collisions molles du parton dur

- Rayonnement de gluons $dI/d\omega$ proportionnel à la **densité** du milieu
- Pertes d'énergie **très importantes** dans le plasma quarks gluons



Pertes d'énergie des partons

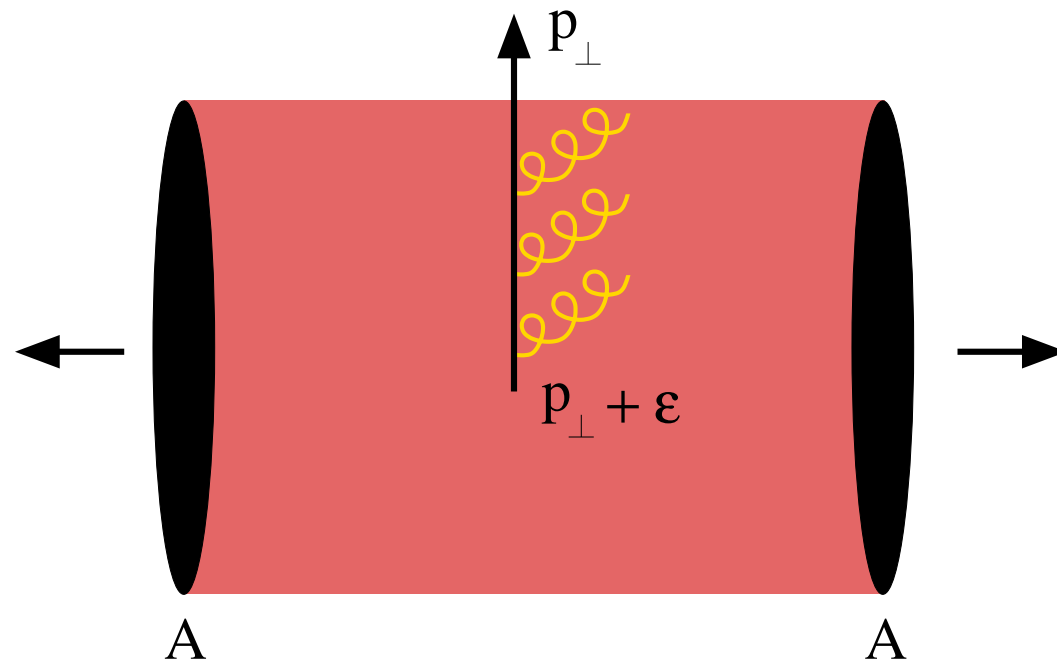
Nombreuses collisions molles du parton dur

- Rayonnement de gluons $dI/d\omega$ proportionnel à la **densité** du milieu
- Pertes d'énergie **très importantes** dans le plasma quarks gluons

Comment les mettre en évidence ?



Pertes d'énergie des partons



Une observable expérimentale claire

Atténuation des jets dans les collisions d'ions lourds

[Bjorken 1982; Gyulassy & Wang 1992]

Atténuation des jets

Ce que l'on connaît



Atténuation des jets

Ce que l'on connaît

- Théorie
 - spectre de gluons rayonnés

$$\frac{dI}{d\omega}(\omega) = \frac{\alpha_s C_R}{\pi\omega} \ln \left[\cosh^2 \sqrt{\frac{\omega_c}{2\omega}} - \sin^2 \sqrt{\frac{\omega_c}{2\omega}} \right]$$

Atténuation des jets

Ce que l'on connaît

- Théorie

- spectre de gluons rayonnés

$$\frac{dI}{d\omega}(\omega) = \frac{\alpha_s C_R}{\pi\omega} \ln \left[\cosh^2 \sqrt{\frac{\omega_c}{2\omega}} - \sin^2 \sqrt{\frac{\omega_c}{2\omega}} \right]$$

- Expérience

- facteur de suppression

$$R_{AA}(p_{\perp}) = \frac{d\sigma_{AA}(p_{\perp})}{dp_{\perp}^2} \bigg/ \frac{A^2 d\sigma_{pp}(p_{\perp})}{dp_{\perp}^2}$$



Atténuation des jets

Ce que l'on connaît

- Théorie

- spectre de gluons rayonnés

$$\frac{dI}{d\omega}(\omega) = \frac{\alpha_s C_R}{\pi\omega} \ln \left[\cosh^2 \sqrt{\frac{\omega_c}{2\omega}} - \sin^2 \sqrt{\frac{\omega_c}{2\omega}} \right]$$

- Expérience

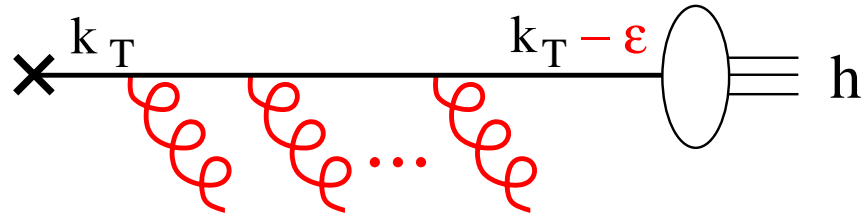
- facteur de suppression

$$R_{AA}(p_{\perp}) = \frac{d\sigma_{AA}(p_{\perp})}{dp_{\perp}^2} \bigg/ \frac{A^2 d\sigma_{pp}(p_{\perp})}{dp_{\perp}^2}$$

Comment relier $dI/d\omega$ à R_{AA} ?

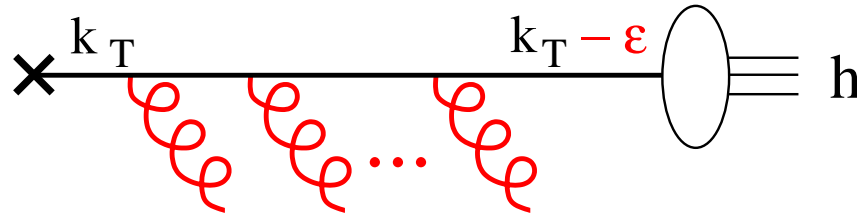
Modèle

Diffusions multiples diminuent l'énergie de k_{\perp} à $k_{\perp} - \epsilon$



Modèle

Diffusions multiples diminuent l'énergie de k_{\perp} à $k_{\perp} - \epsilon$



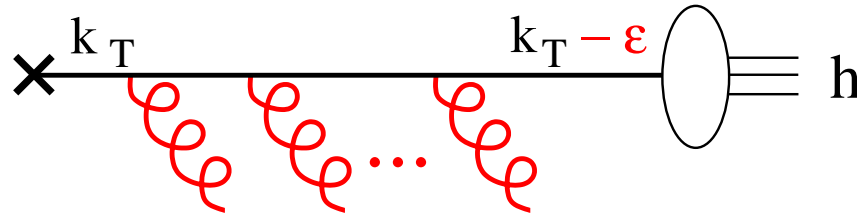
Modèle simple pour les fonctions de fragmentation

[Wang, Huang, Sarcevic PRL 1996]

$$z D_{h/k}^{med}(z, \mu) = \int_0^{(1-z)E} d\epsilon \mathcal{P}(\epsilon, E) z^* D_{h/k}(z^*, \mu)$$
$$\text{avec } z^* = \frac{E_h}{\nu - \epsilon} = \frac{z}{1 - \epsilon/\nu}$$

Modèle

Diffusions multiples diminuent l'énergie de k_{\perp} à $k_{\perp} - \epsilon$



Modèle simple pour les fonctions de fragmentation

[Wang, Huang, Sarcevic PRL 1996]

$$z D_{h/k}^{med}(z, \mu) = \int_0^{(1-z)E} d\epsilon \mathcal{P}(\epsilon, E) z^* D_{h/k}(z^*, \mu)$$

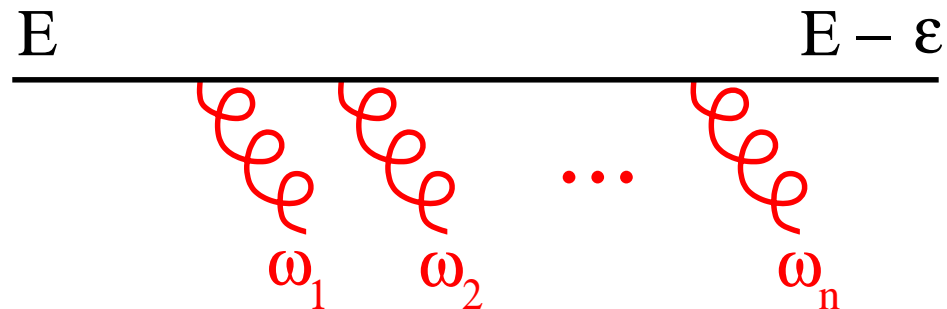
$$\text{avec } z^* = \frac{E_h}{\nu - \epsilon} = \frac{z}{1 - \epsilon/\nu}$$

Comment calculer $\mathcal{P}(\epsilon, E)$?

Distribution de probabilité $\mathcal{P}(\epsilon)$

[Baier, Dokshitzer, Mueller, Schiff JHEP 2001]

Rayonnement indépendant \rightarrow approximation de Poisson



$$\mathcal{P}(\epsilon) \propto \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left[\prod_{i=1}^n \int d\omega_i \frac{dI(\omega_i)}{d\omega} \right] \delta \left(\epsilon - \sum_{i=1}^n \omega_i \right)$$

- Unique ingrédient: le spectre de gluons $dI/d\omega$

Distribution de probabilité $\mathcal{P}(\epsilon)$

[Baier, Dokshitzer, Mueller, Schiff JHEP 2001]

Echelle pertinente du spectre de gluons $dI/d\omega$

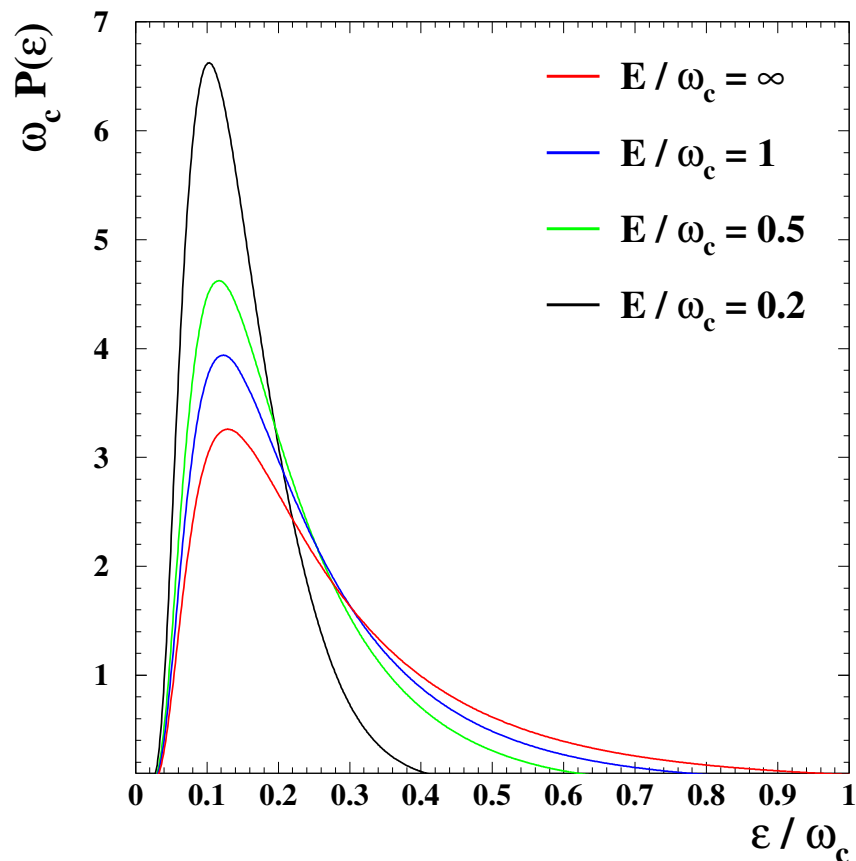
$$\omega_c = \frac{1}{2} \hat{q} L^2$$

- \hat{q} : coefficient de transport
- “pouvoir de diffusion” du milieu $\hat{q} = \mu^2/\lambda$
- L : longueur parcourue par le parton dans le milieu

Distribution de probabilité $\mathcal{P}(\epsilon)$

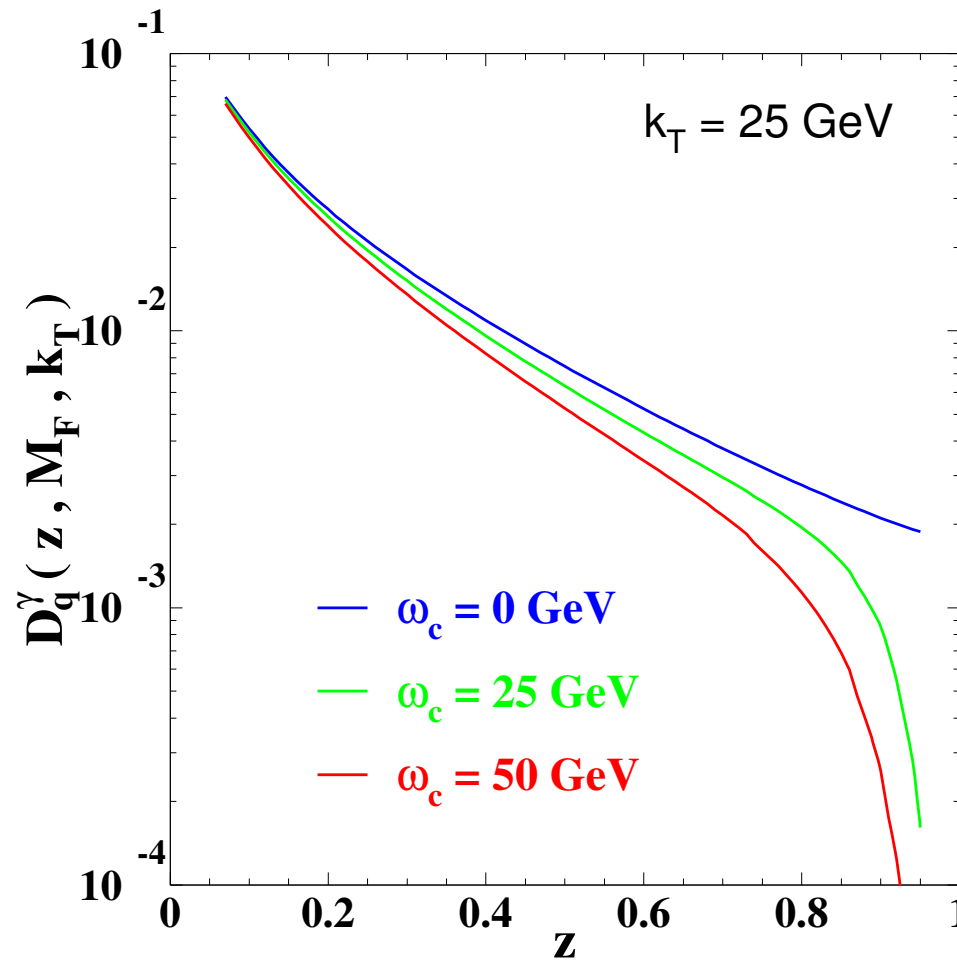
[FA JHEP 2002]

[Salgado, Wiedemann PRL 2002]



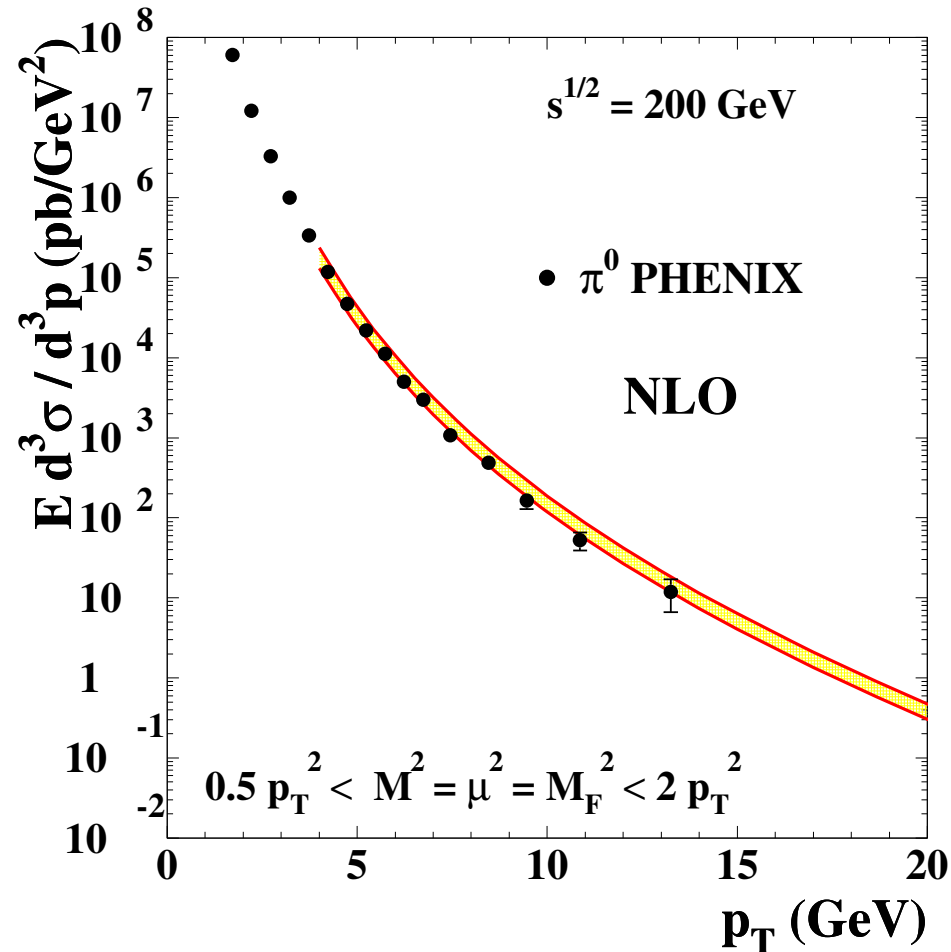
- Distribution asymétrique
- Calculée pour différents spectres $dI/d\omega$

Fonctions de fragmentation



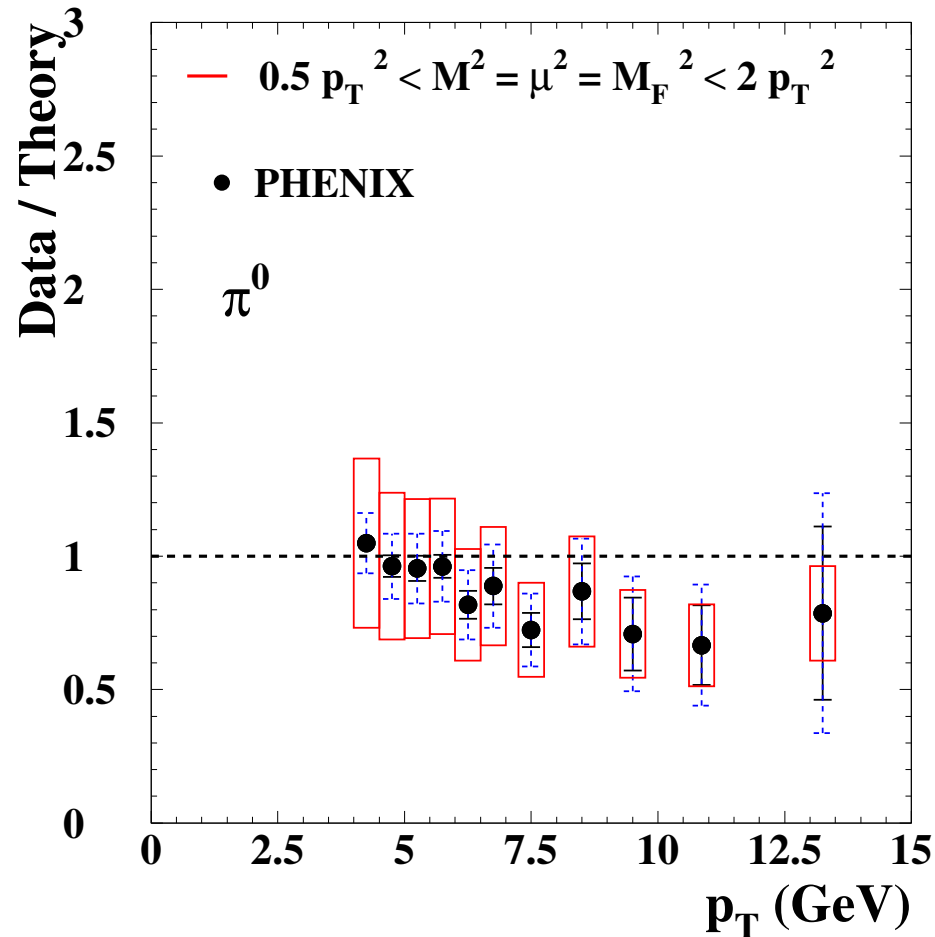
  Forte suppression à grand z

Spectre p p



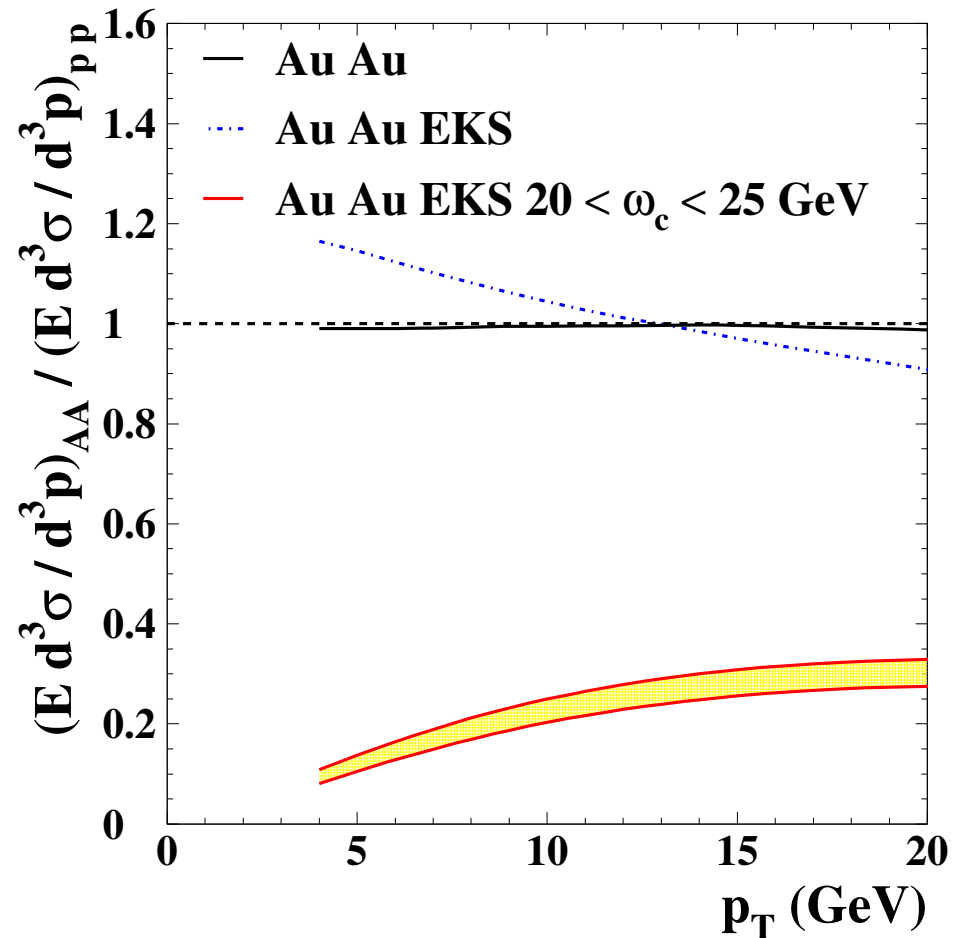
- Très bon accord avec les données de PHENIX
- contraintes possibles sur les FF

Spectre $p p$



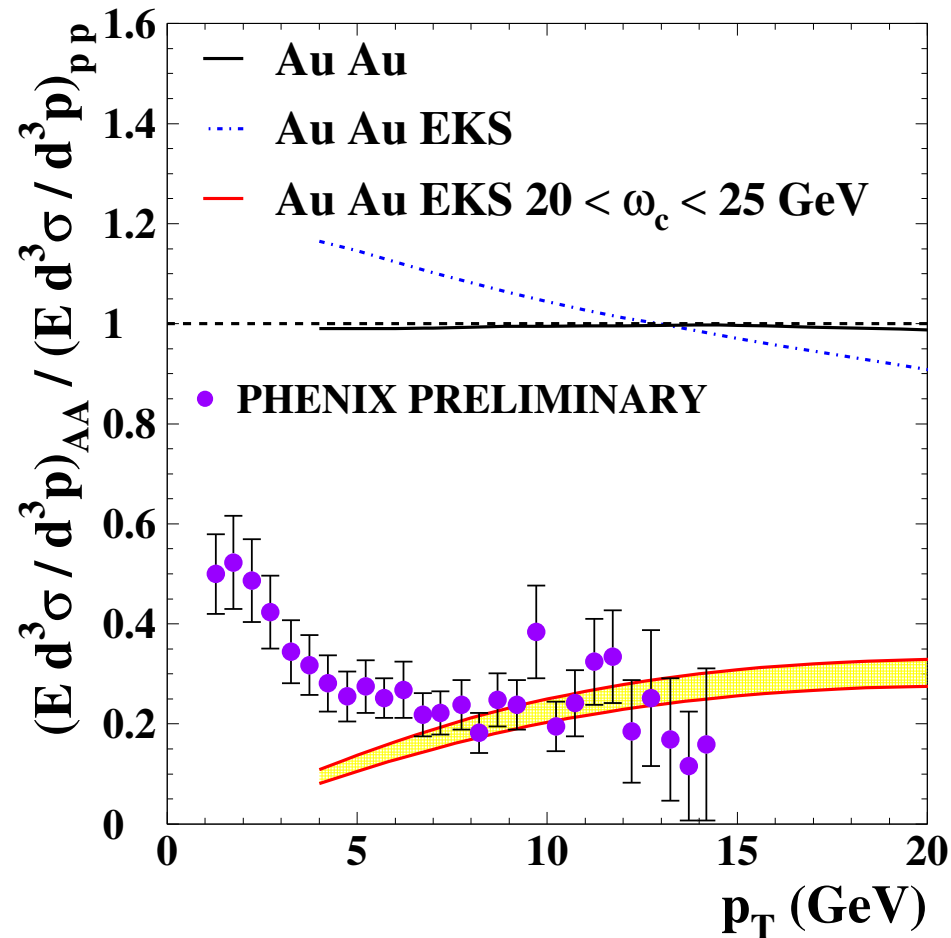
- Très bon accord avec les données de PHENIX
- contraintes possibles sur les FF

Spectre Au Au



● Forte suppression dans le canal π^0

Spectre Au Au



● Forte suppression dans le canal π^0

● Bon accord à grand p_{\perp} pour $\omega_c \simeq 20 - 25$ GeV

Photons prompts



Terminologie

- Photons prompts

$$p_{\perp} \gg \Lambda_{QCD}$$

- produits dans les collisions NN

- Photons thermiques

$$p_{\perp} = \mathcal{O}(T)$$

- rayonnement du plasma quarks-gluons

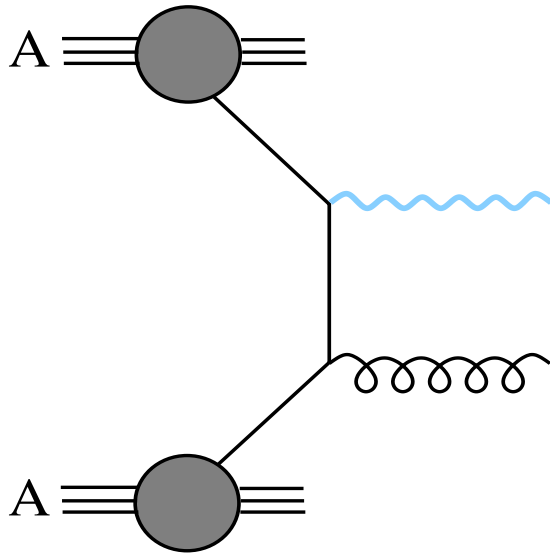
- Photons de décroissance

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$

- décroissances radiatives



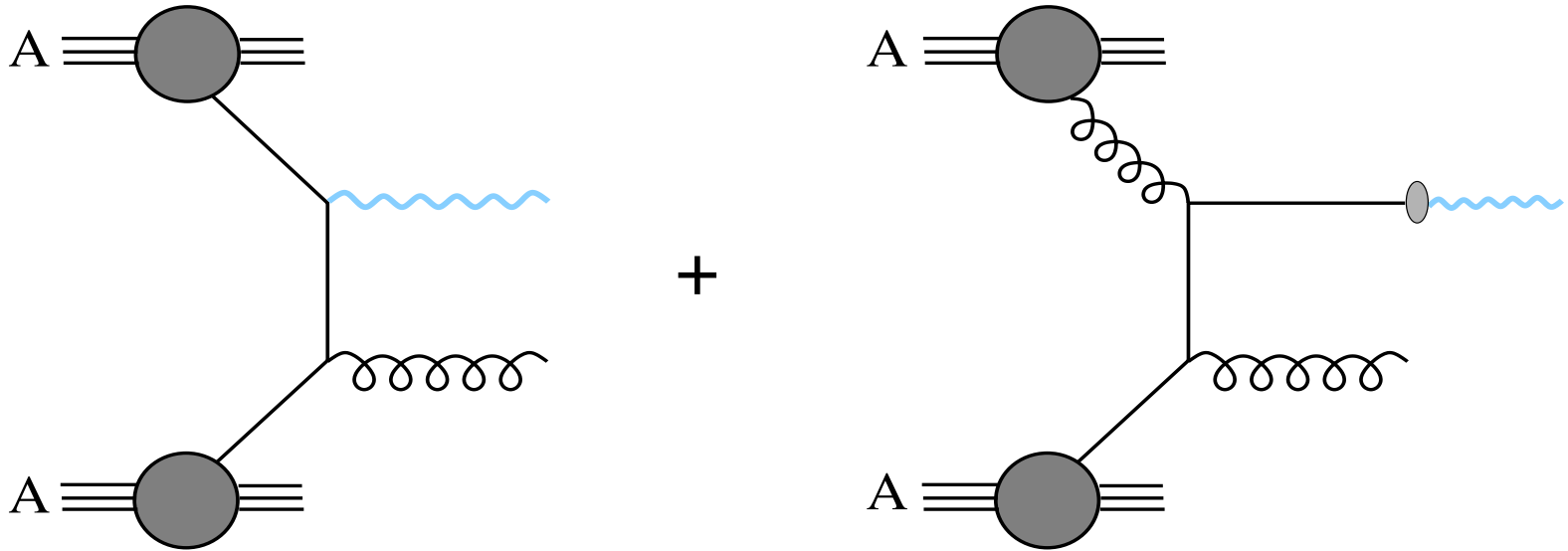
Photons prompts



$$\frac{d\sigma}{d\vec{p}_T d\eta} \simeq \sum_{i,j=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{d\vec{p}_T d\eta}$$



Photons prompts

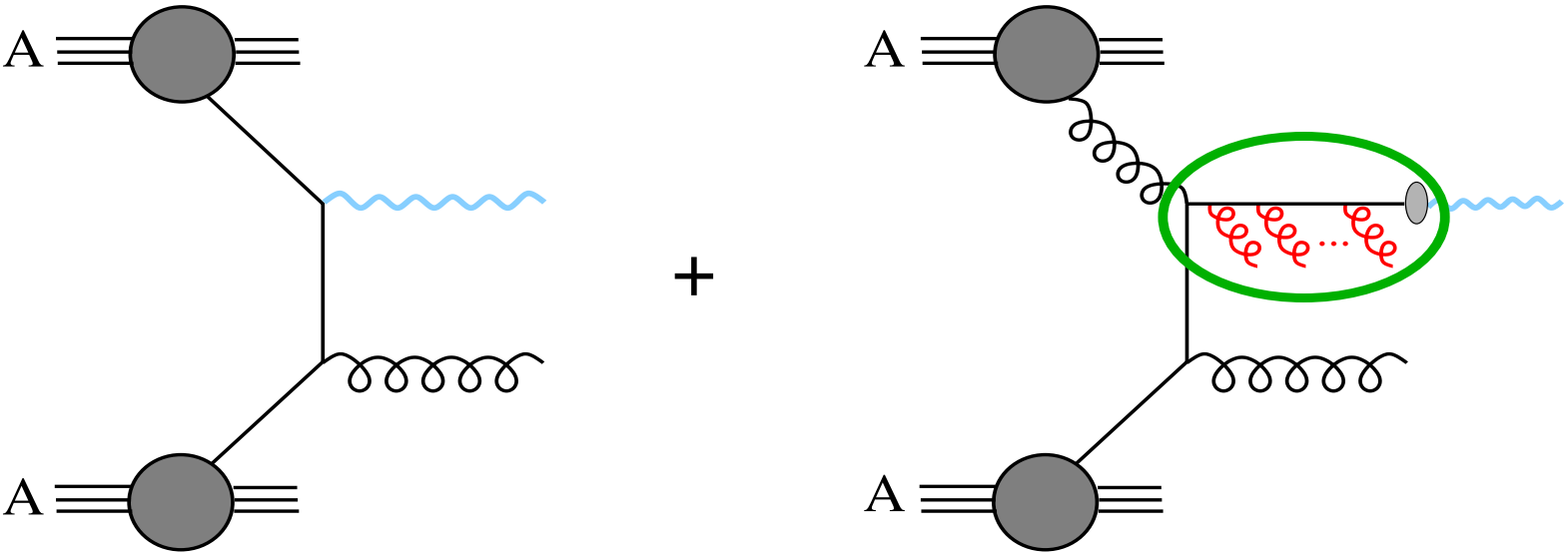


$$\frac{d\sigma}{d\vec{p}_T d\eta} \simeq \sum_{i,j=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{d\vec{p}_T d\eta}$$

$$+ \sum_{i,j,k=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{dz}{z^2} D_{\gamma/k}(z, \mu) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}^k}{d\vec{p}_T d\eta}$$



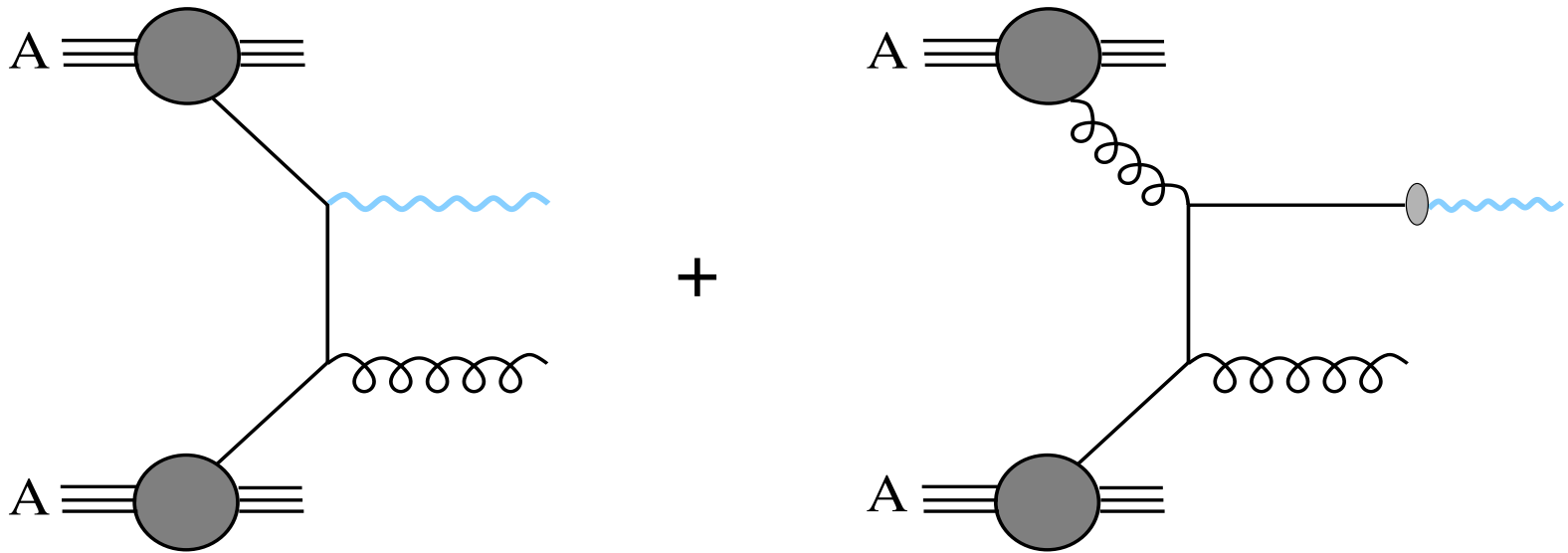
Photons prompts



$$\frac{d\sigma}{d\vec{p}_T d\eta} \simeq \sum_{i,j=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{d\vec{p}_T d\eta}$$

$$+ \sum_{i,j,k=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{dz}{z^2} D_{\gamma/k}^{\text{med}}(z, \mu) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}^k}{d\vec{p}_T d\eta}$$

Photons prompts



- Photons directs
 - similaires au Drell-Yan
- Photons de bremsstrahlung
 - similaires aux jets

Photons prompts

Schématiquement

- **Sondes colorées** (modifiées par le milieu dense)
 - jets
 - quarkonia lourds
 - ...
- **Sondes aveugles** (non-modifiées)
 - Drell-Yan
 - W^\pm , Z
 - ...



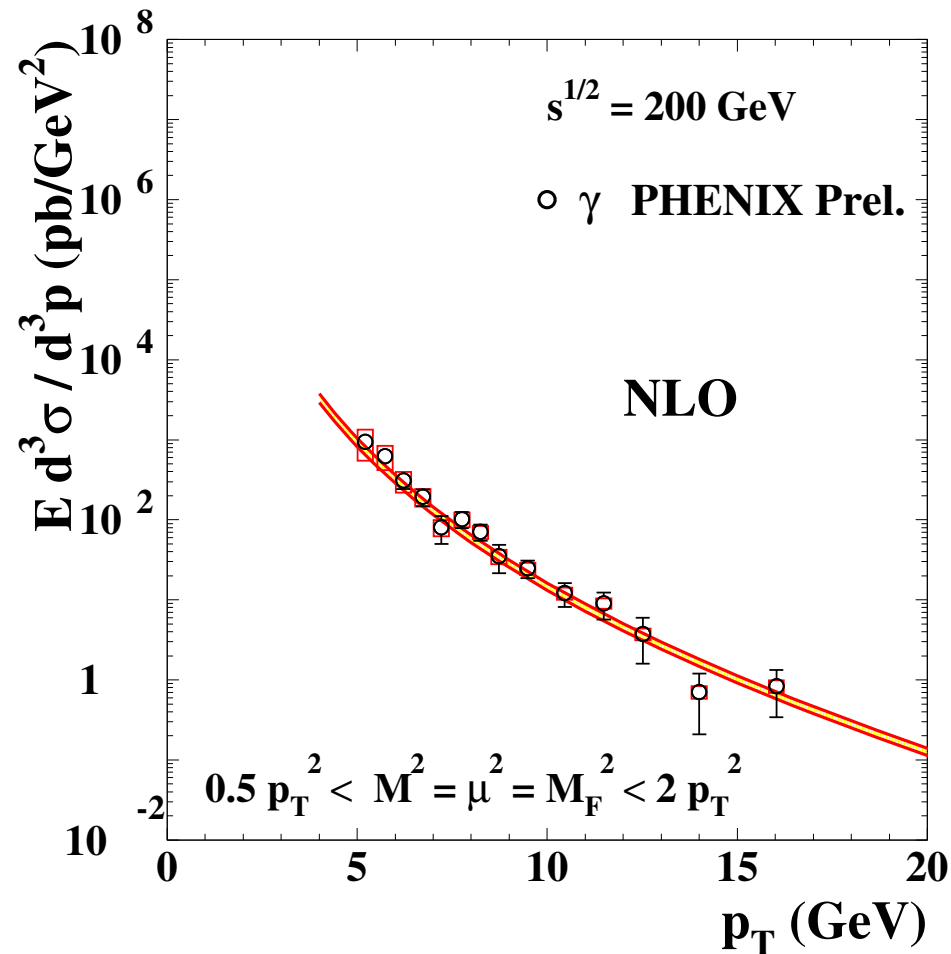
Photons prompts

Schématiquement

- **Sondes colorées** (modifiées par le milieu dense)
 - jets
 - quarkonia lourds
 - photons prompts
- **Sondes aveugles** (non-modifiées)
 - Drell-Yan
 - W^\pm , Z
 - photons prompts

Appartiennent aux deux catégories !

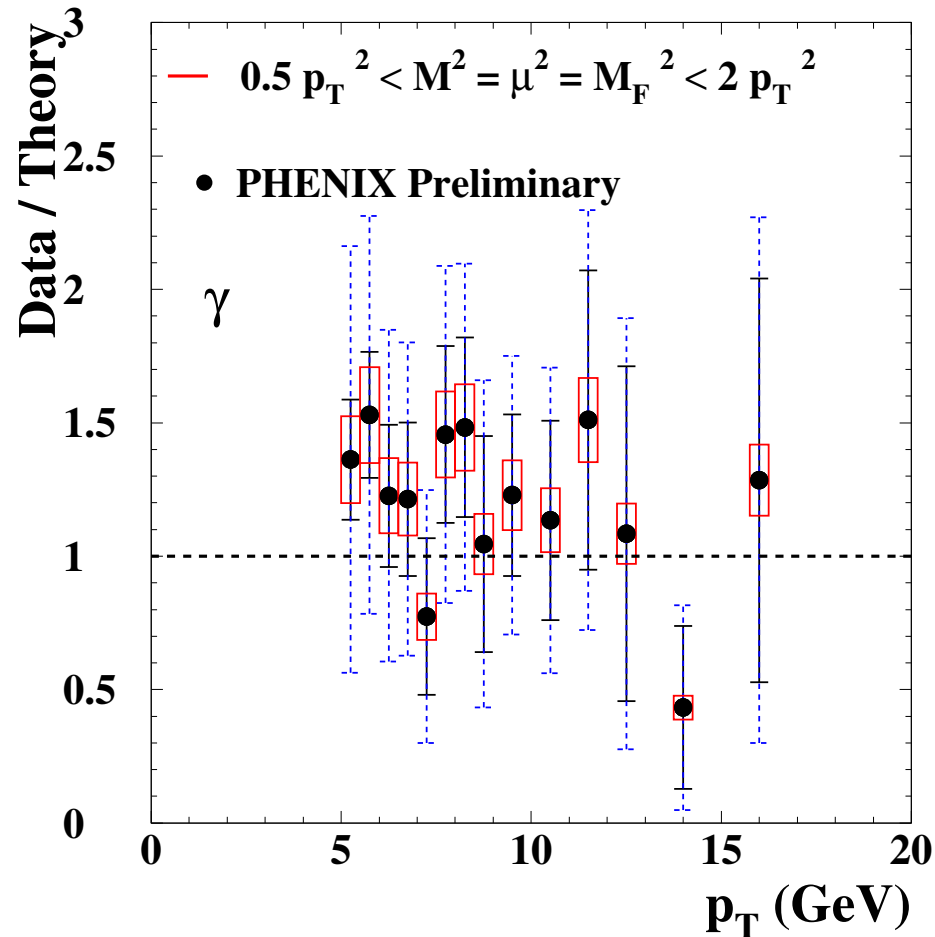
Spectre p p



● Bon accord avec les données de PHENIX

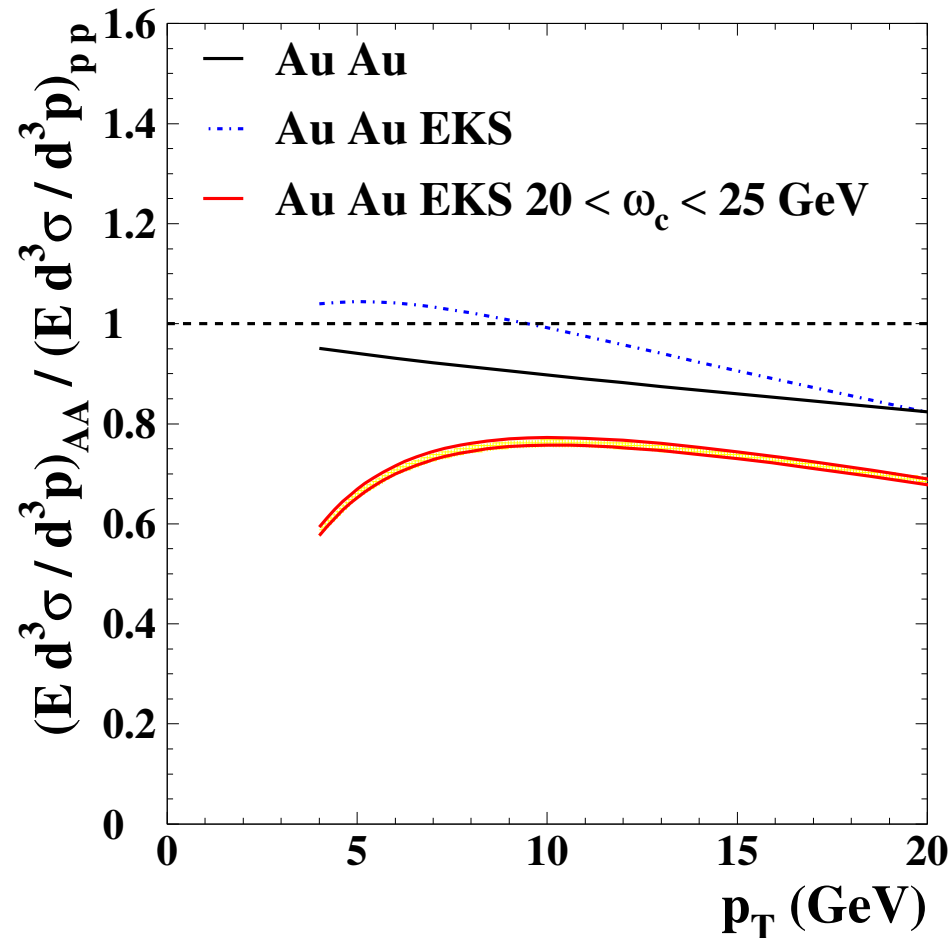
● nouvelles contraintes !

Spectre p p



- Bon accord avec les données de PHENIX
- nouvelles contraintes !

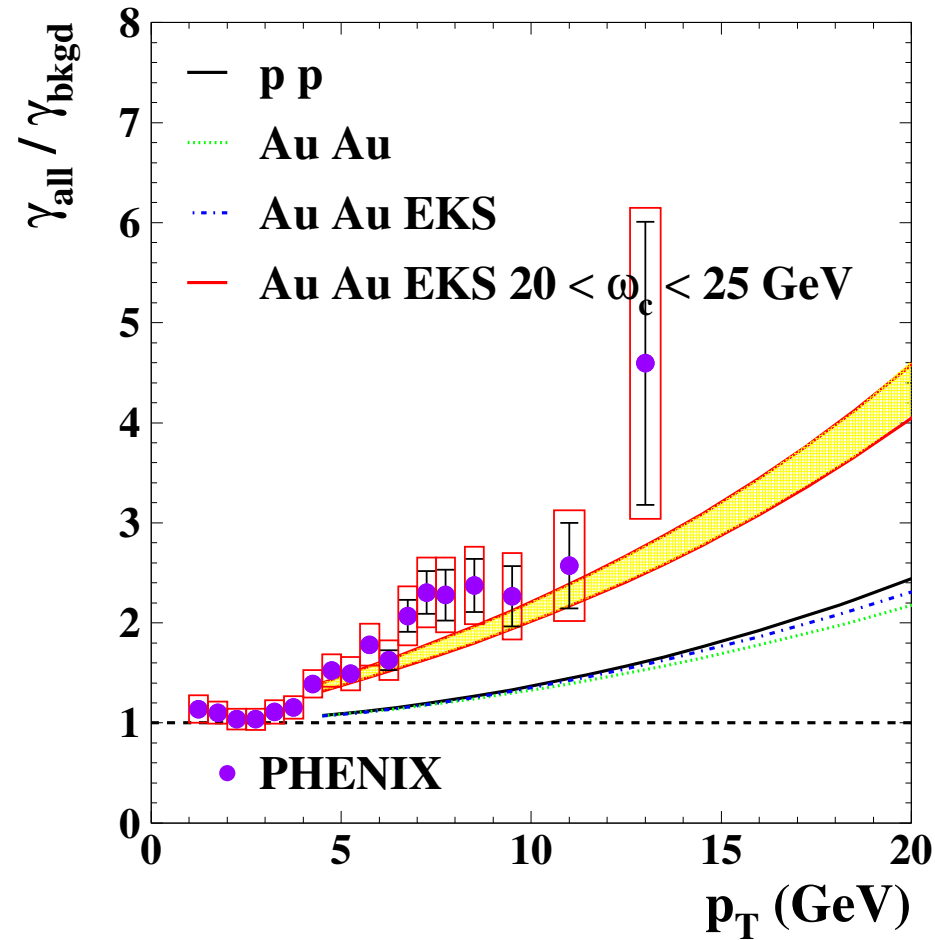
Spectre Au Au



● Suppression beaucoup plus faible que les π^0

● Effet d'isospin pas négligeable

$$\gamma/\pi^0$$



• Sous-estimation à grand p_{\perp}

Discussion



A-t'on appris quelquechose ? (et si oui, quoi)



Discussion

A-t'on appris quelquechose ? (et si oui, quoi)

- Données pp cohérentes avec QCD à NLO
 - pions et photons prompts
 - contraintes sur les FF



Discussion

A-t'on appris quelquechose ? (et si oui, quoi)

- Données pp cohérentes avec QCD à NLO
 - pions et photons prompts
 - contraintes sur les FF
- Modèle (simple) de pertes d'énergie
 - accord avec les données d-Au et Au-Au



Discussion

A-t'on appris quelquechose ? (et si oui, quoi)

- Données pp cohérentes avec QCD à NLO
 - pions et photons prompts
 - contraintes sur les FF
- Modèle (simple) de pertes d'énergie
 - accord avec les données d-Au et Au-Au
- Problèmes
 - photons prompts (légèrement) sous-estimés
 - décroissance de R_{AA} à faible p_{\perp}
 - systématique plus importante

Discussion

A-t'on appris quelquechose ? (et si oui, quoi)

- Données pp cohérentes avec QCD à NLO
 - pions et photons prompts
 - contraintes sur les FF
- Modèle (simple) de pertes d'énergie
 - accord avec les données d-Au et Au-Au

Admettons (par la suite) que les pertes d'énergie soient responsables de la suppression observée ...

Discussion

Données RHIC

$$\omega_c \simeq 20 - 25 \text{ GeV}$$



Discussion

Données RHIC

$$\omega_c \simeq 20 - 25 \text{ GeV}$$

Coefficient de transport moyen

(avec $\langle L \rangle = 5 \text{ fm}$)

$$\langle \hat{q} \rangle_{\text{RHIC}} = \frac{2\omega_c}{\langle L \rangle^2} \simeq 0.3 - 0.4 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$



Discussion

Données RHIC

$$\omega_c \simeq 20 - 25 \text{ GeV}$$

Coefficient de transport moyen

(avec $\langle L \rangle = 5 \text{ fm}$)

$$\langle \hat{q} \rangle_{\text{RHIC}} = \frac{2\omega_c}{\langle L \rangle^2} \simeq 0.3 - 0.4 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Coefficient de transport initial

(avec Bjorken et $t_0 = 0.5 \text{ fm}$)

$$\hat{q}_{\text{RHIC}}(t_0) \simeq \frac{\omega_c}{t_0 \langle L \rangle} \simeq 1.6 - 2 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Discussion

Données RHIC

$$\omega_c \simeq 20 - 25 \text{ GeV}$$

Coefficient de transport moyen

(avec $\langle L \rangle = 5 \text{ fm}$)

$$\langle \hat{q} \rangle_{\text{RHIC}} = \frac{2\omega_c}{\langle L \rangle^2} \simeq 0.3 - 0.4 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Coefficient de transport initial

(avec Bjorken et $t_0 = 0.5 \text{ fm}$)

$$\hat{q}_{\text{RHIC}}(t_0) \simeq \frac{\omega_c}{t_0 \langle L \rangle} \simeq 1.6 - 2 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Comparons avec la matière nucléaire froide ...

Matière froide

Estimation perturbative

[Baier, Dokshitzer, Mueller, Peigné, Schiff NPB 1997]

\hat{q} relié à la
densité de gluons

$$\begin{aligned}\hat{q} &= \frac{4 \pi^2 \alpha_s N_c}{N_c^2 - 1} \rho x G(x, Q^2) \\ &\simeq 0.05 \text{ GeV}^2/\text{fm}\end{aligned}$$

Matière froide

Estimation perturbative

[Baier, Dokshitzer, Mueller, Peigné, Schiff NPB 1997]

\hat{q} relié à la
densité de gluons

$$\hat{q} = \frac{4 \pi^2 \alpha_s N_c}{N_c^2 - 1} \rho x G(x, Q^2)$$
$$\simeq 0.05 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Contraintes à partir de la production de Drell-Yan

[FA PLB 2002]

Fortes pertes
d'énergie exclues

Matière froide

Estimation perturbative

[diff NPB 1997]

$$\rho x G(x, Q^2)$$

$$r^2 / \text{fm}$$

e Drell-Yan

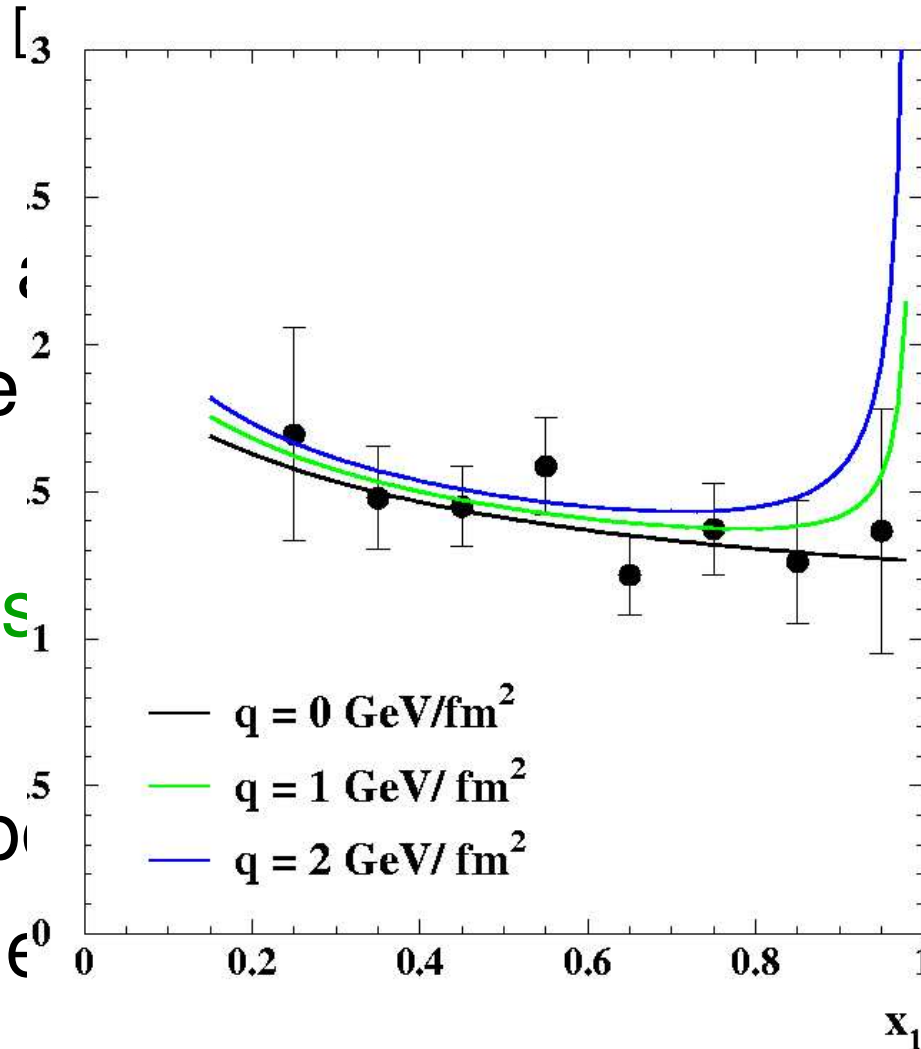
[FA PLB 2002]

\hat{q} relié à
densité de

Contraintes

Fortes p

d'énergie ϵ^0



Matière froide

Estimation perturbative

[Baier, Dokshitzer, Mueller, Peigné, Schiff NPB 1997]

\hat{q} relié à la
densité de gluons

$$\hat{q} = \frac{4 \pi^2 \alpha_s N_c}{N_c^2 - 1} \rho x G(x, Q^2) \\ \simeq 0.05 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Contraintes à partir de la production de Drell-Yan

[FA PLB 2002]

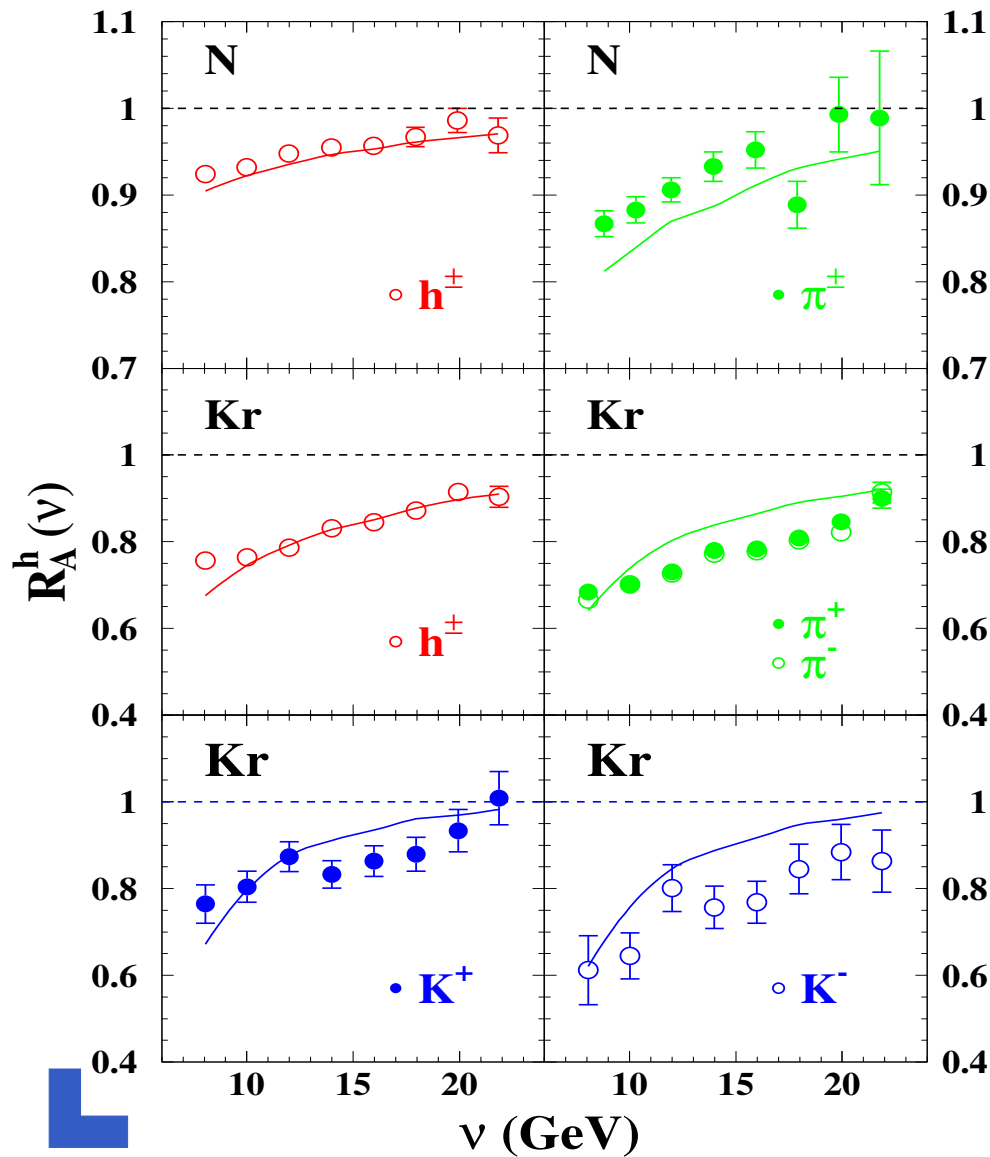
Fortes pertes
d'énergie exclues

$$\hat{q} = 0.15 \pm 0.10 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

Comparaison avec HERMES

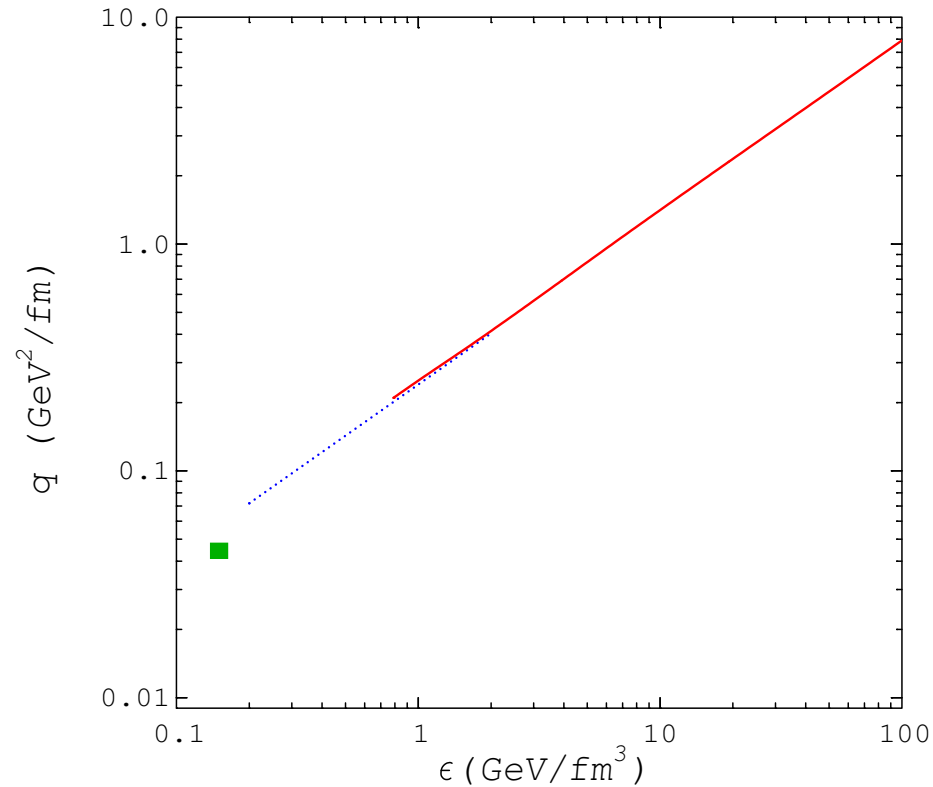


[FA EPJ C 2003]



● Données DIS décrites avec l'estimation de \hat{q} en DY

Coefficient de transport

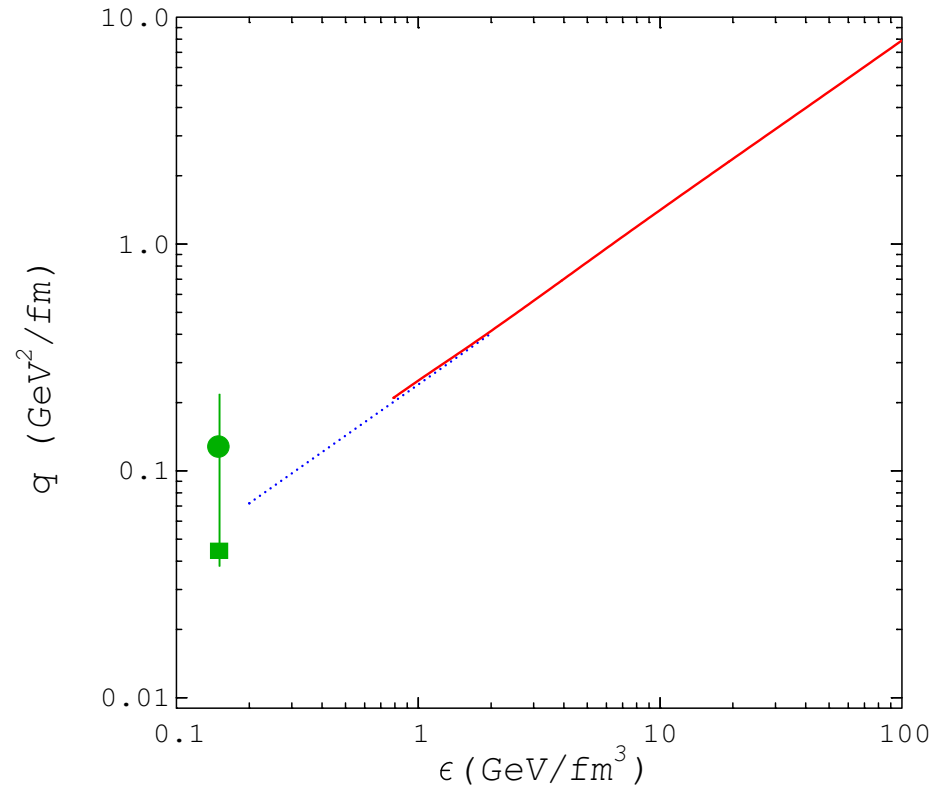


[Baier NPA 2002]

● Matière froide

● pQCD

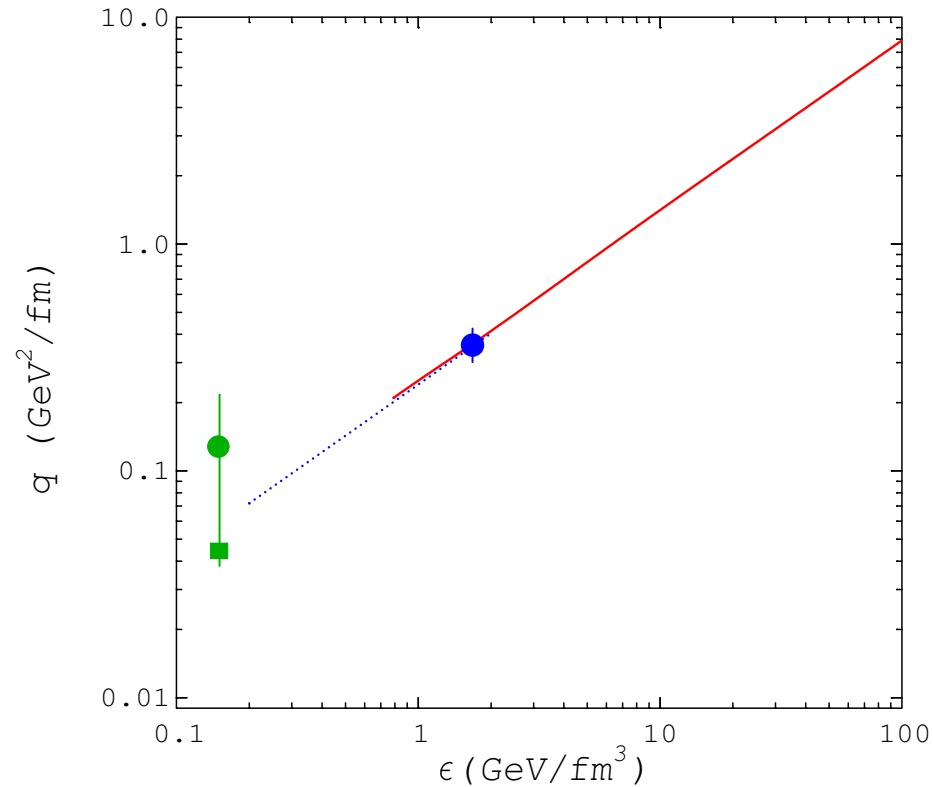
Coefficient de transport



[Baier NPA 2002]

- Matière froide
- pQCD
- Drell-Yan et DIS

Coefficient de transport

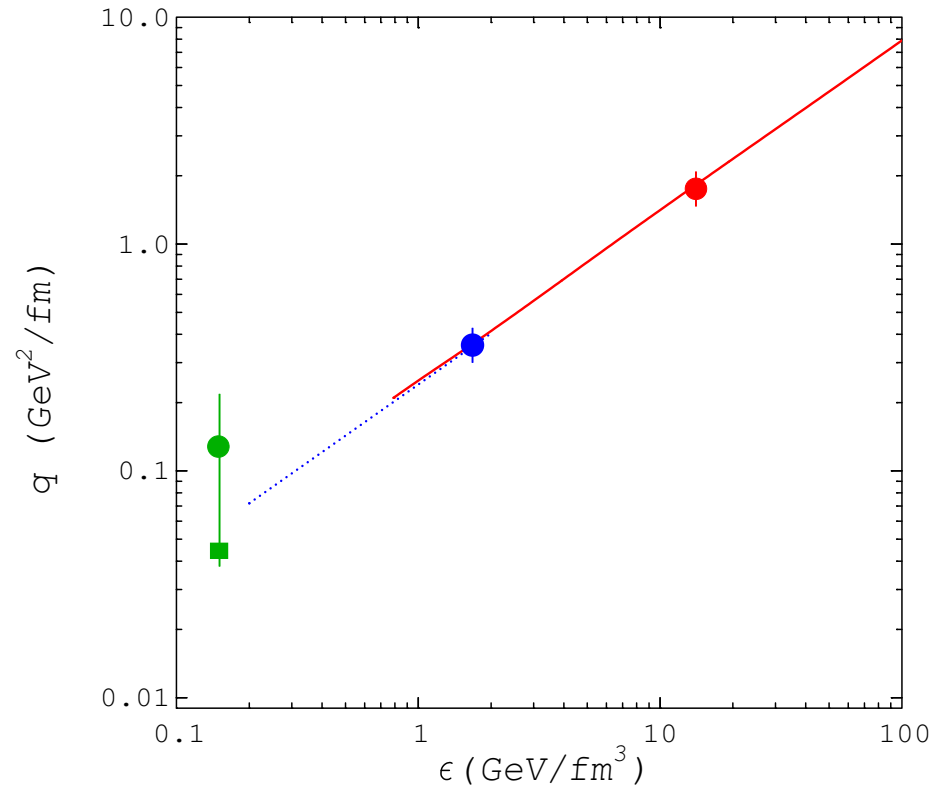


[Baier NPA 2002]

● Matière froide

● $\langle \hat{q} \rangle_{\text{RHIC}}$

Coefficient de transport



[Baier NPA 2002]

● Matière froide

● $\langle \hat{q} \rangle_{\text{RHIC}}$

● $\hat{q}_{\text{RHIC}}(t_0)$

Discussion

Très naïvement ...

$$\epsilon(t_0 \simeq 0.5 \text{ fm}) \gtrsim 10 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \text{ a RHIC}$$



Discussion

Très naïvement ...

$$\epsilon(t_0 \simeq 0.5 \text{ fm}) \gtrsim 10 \text{ GeV}/\text{fm}^3 \text{ a RHIC}$$

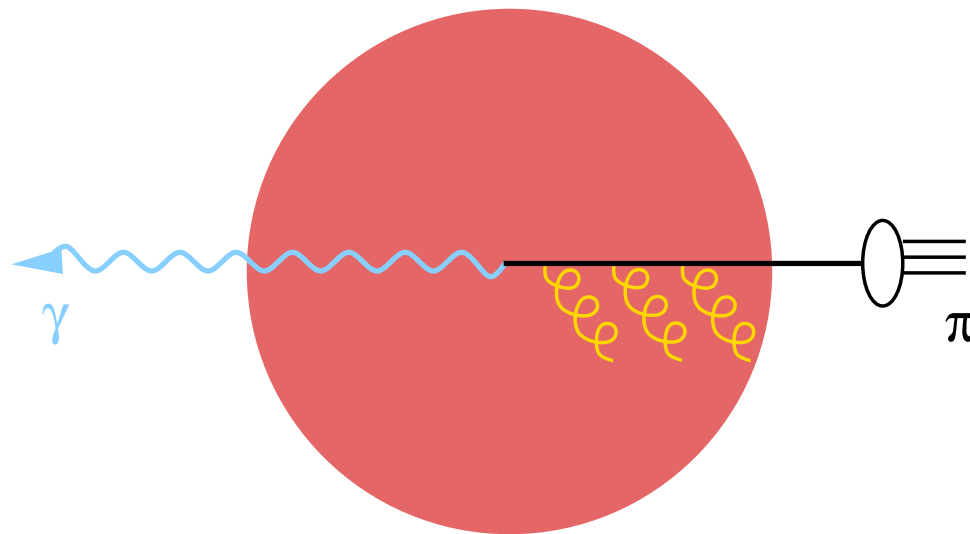
... mais nombreuses incertitudes théoriques

- suppose un milieu thermalisé (et à $t_0 = 0.5 \text{ fm}$!)
- \hat{q} dépend de
 - modélisation de la géométrie
 - hypothèse d'expansion longitudinale et transverse
- correspondance $\hat{q} - \epsilon$ indicative uniquement

Corrélations photon-pion

[FA, Aurenche, Belghobsi, Guillet JHEP 2004]

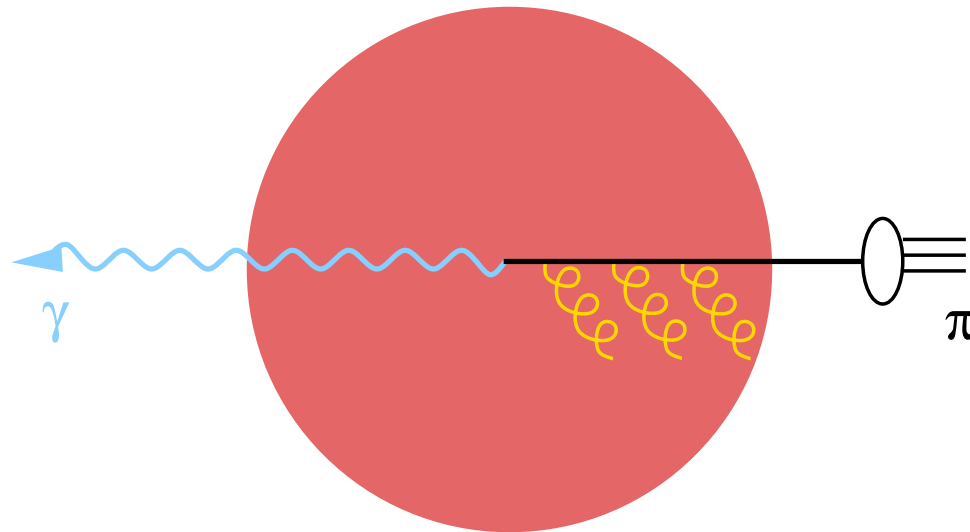
A l'ordre dominant en α_s



Corrélations photon-pion

[FA, Aurenche, Belghobsi, Guillet JHEP 2004]

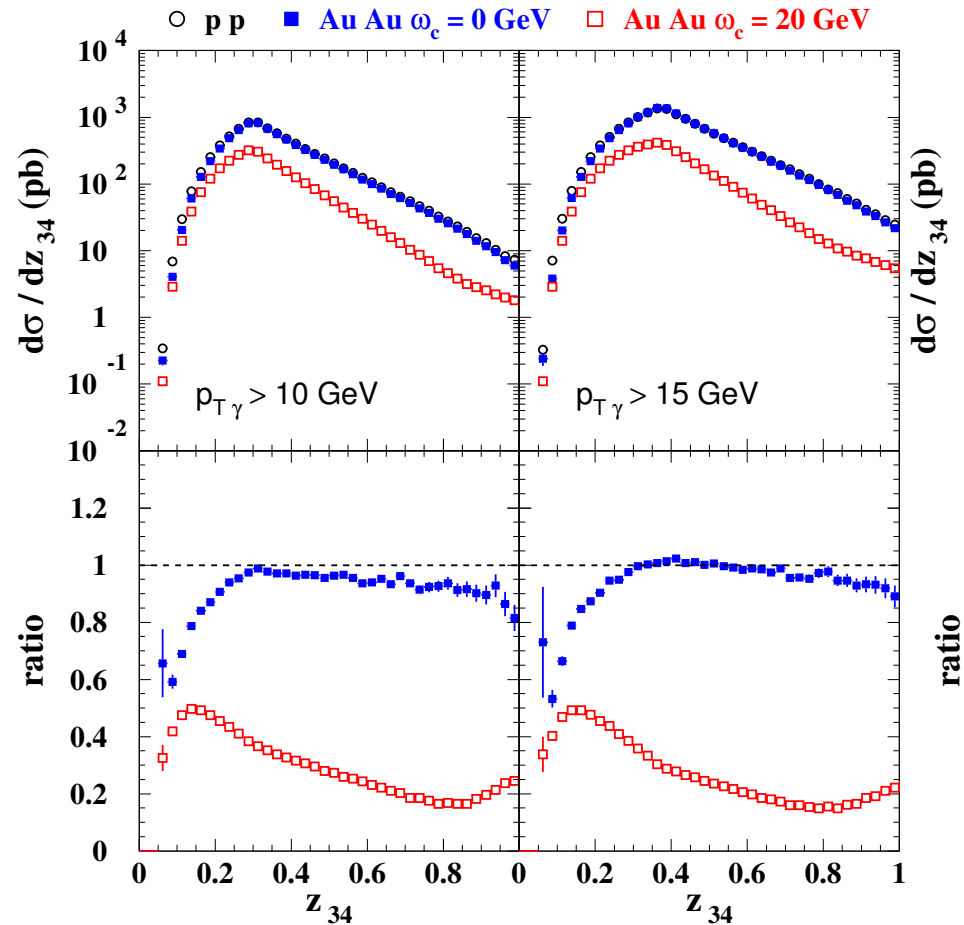
A l'ordre dominant en α_s



• Mesure “directe” de z

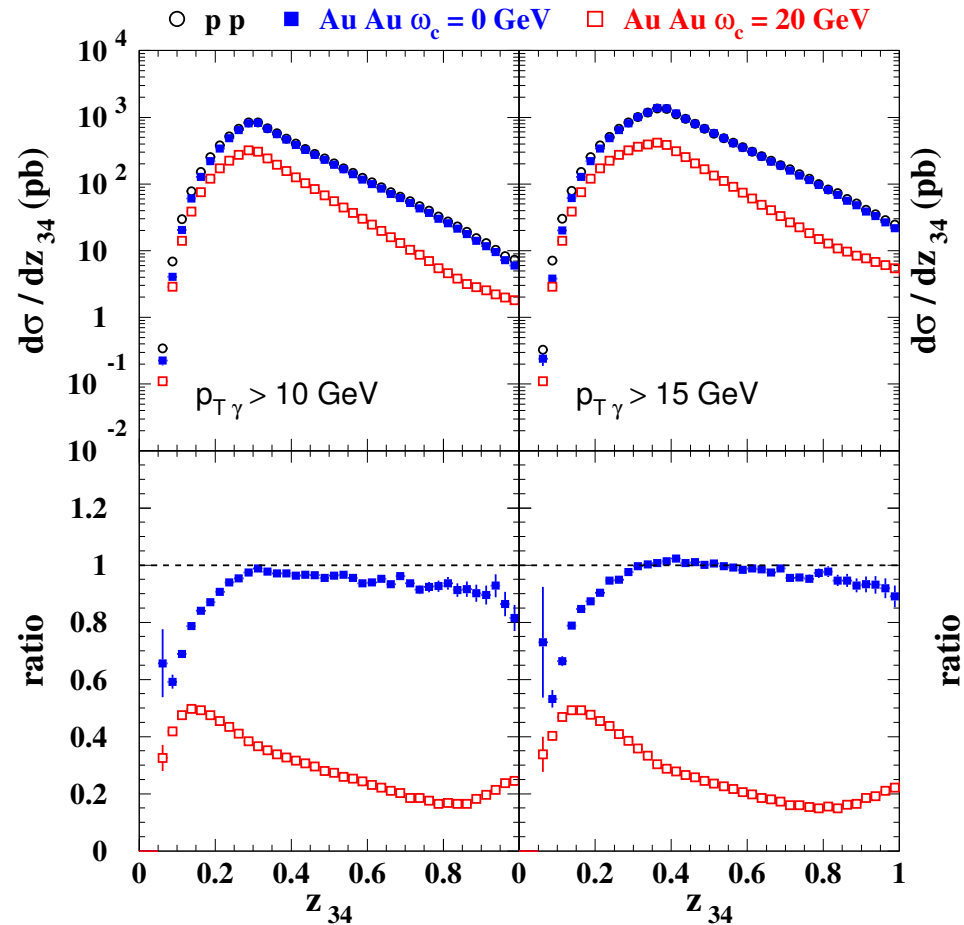
$$z_{34} \equiv -\frac{\vec{p}_{T3} \cdot \vec{p}_{T4}}{|\vec{p}_{T3}|^2} \simeq z$$

Corrélations photon-pion



● Réminiscent des fonctions de frag. $D_{\pi/k}^{\text{med}}(z, \mu)$

Corrélations photon-pion



● Réminiscent des fonctions de frag. $D_{\pi/k}^{\text{med}}(z, \mu)$

● Effets importants à RHIC

Limites



- “Bruit de fond”
 - photon produit par fragmentation



Limites



- “Bruit de fond”
 - photon produit par fragmentation
- Corrections NLO et resommation
 - pas de prédictivité à petit / grand z



Limites



- “Bruit de fond”
 - photon produit par fragmentation
- Corrections NLO et resommation
 - pas de prédictivité à petit / grand z
- (assez) Faibles taux de comptage
 - grande luminosité à RHIC ?



Résumé



Résumé



- Données π^0 cohérentes avec les pertes d'énergie



Résumé



- Données π^0 cohérentes avec les pertes d'énergie
- Coeff. de transport très supérieur à la matière froide



Résumé



- Données π^0 cohérentes avec les pertes d'énergie
- Coeff. de transport très supérieur à la matière froide
- Densité d'énergie atteinte $\epsilon_{\text{RHIC}} \simeq 50 \epsilon_{\text{noyau}}$

