



# Pions et photons durs à RHIC

François Arleo

LPTHE, Jussieu

Etretat – Juin 2005



# Plan de l'exposé

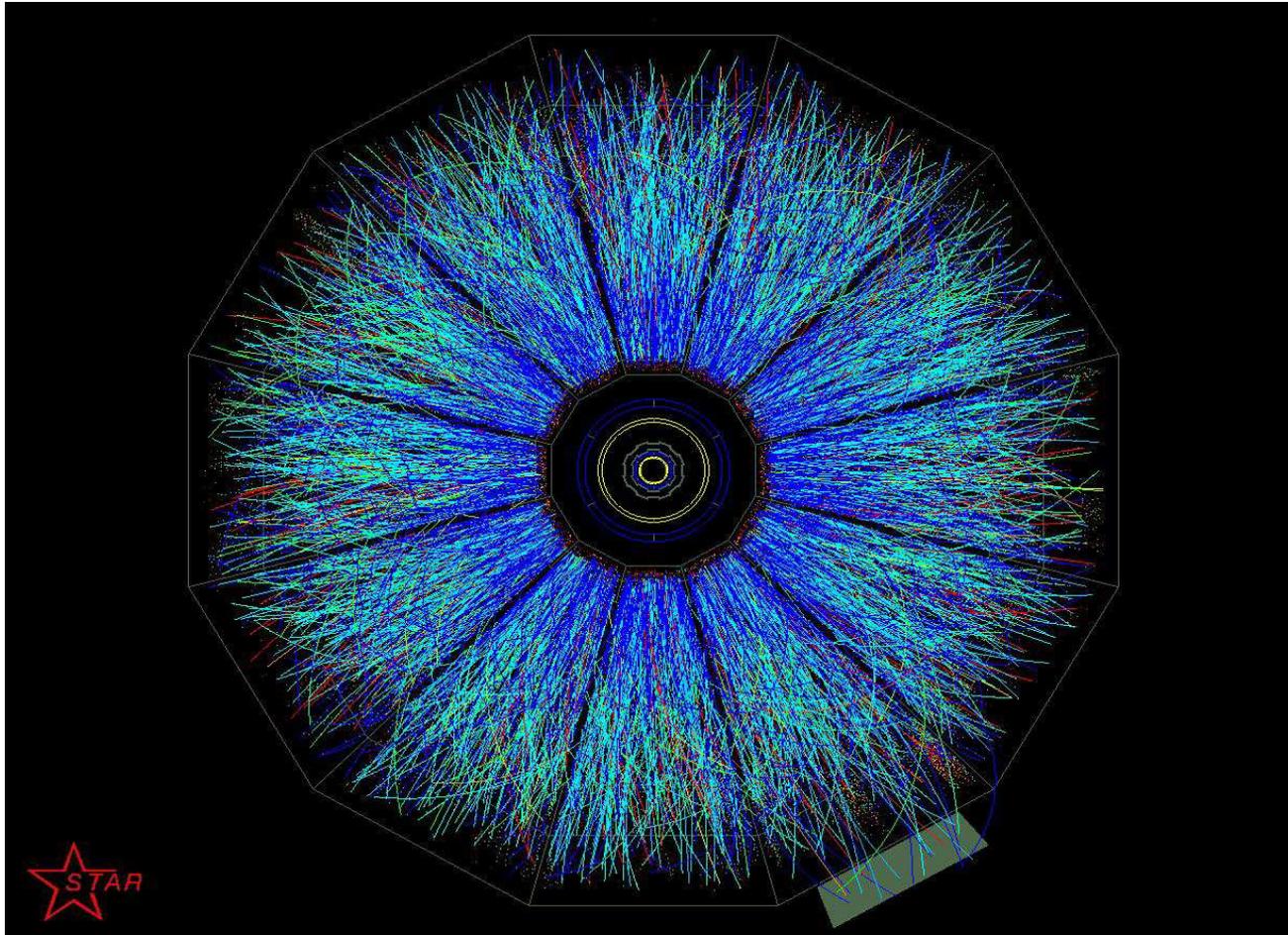


- Motivations
  - Pertes d'énergie et déconfinement
- Modèle
  - Distribution de probabilité
  - Fonctions de fragmentation modifiées
- Phénoménologie
  - Pions durs
  - Photons prompts
- Discussion

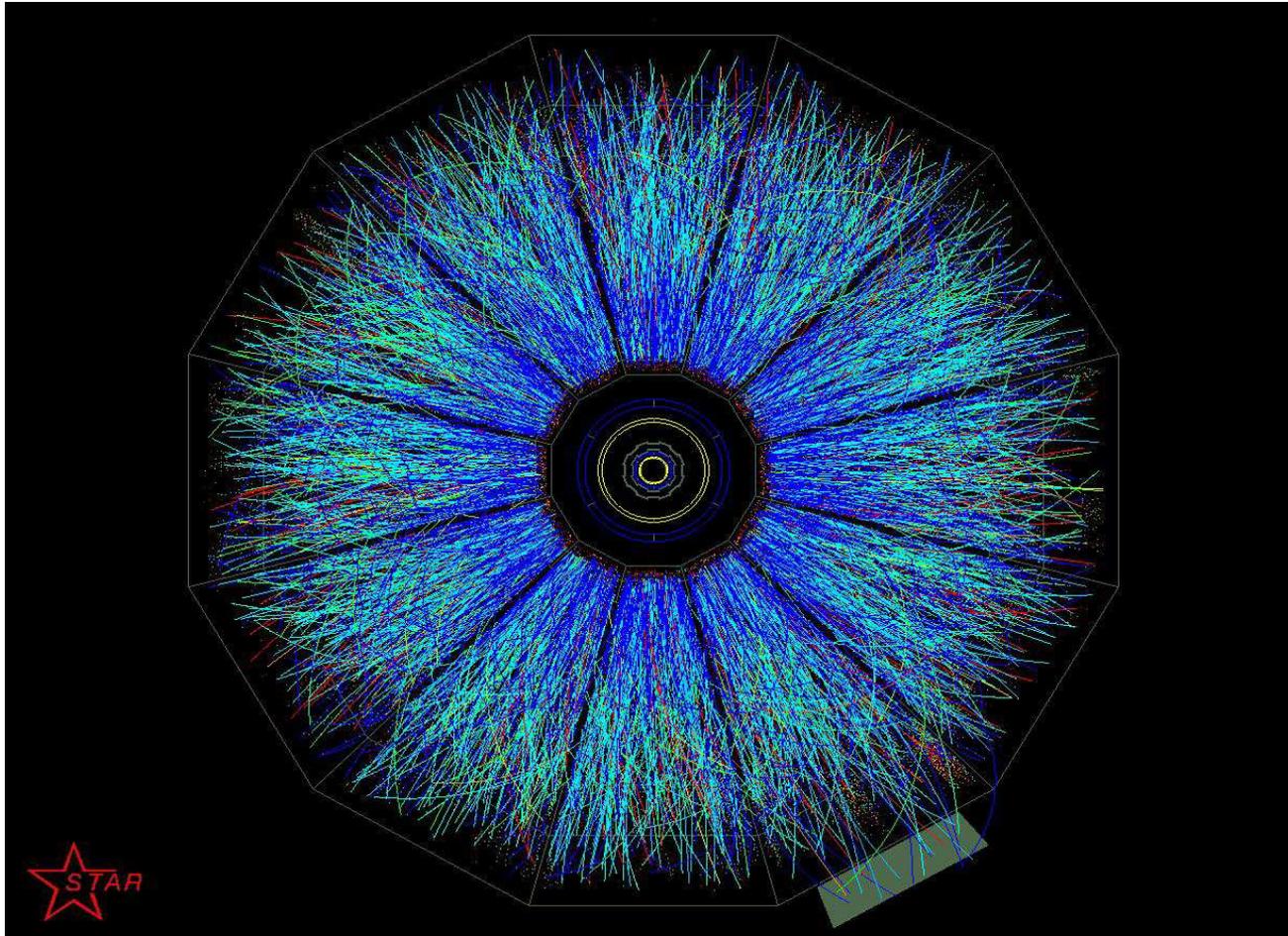


[ travail en cours ]

# Motivations



# Motivations

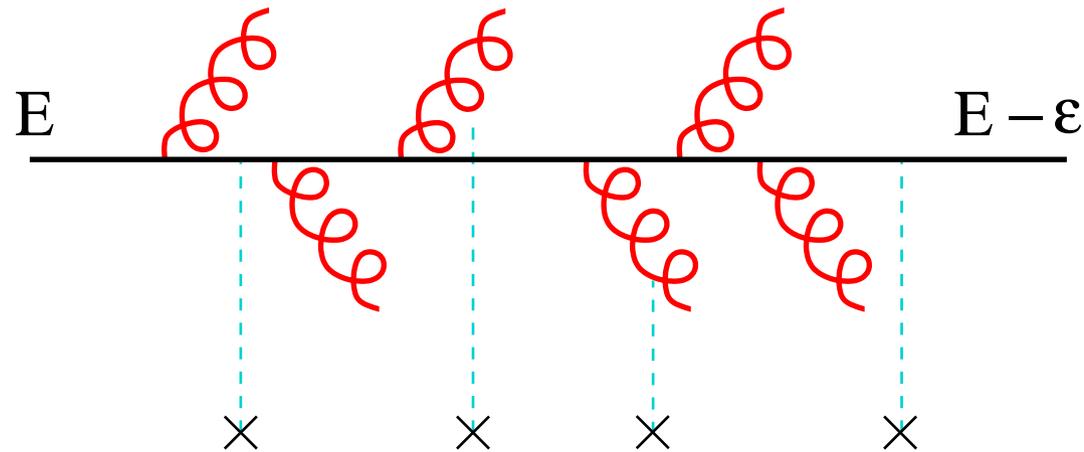


Comment – dans ce désordre – sonder le déconfinement ?

# 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

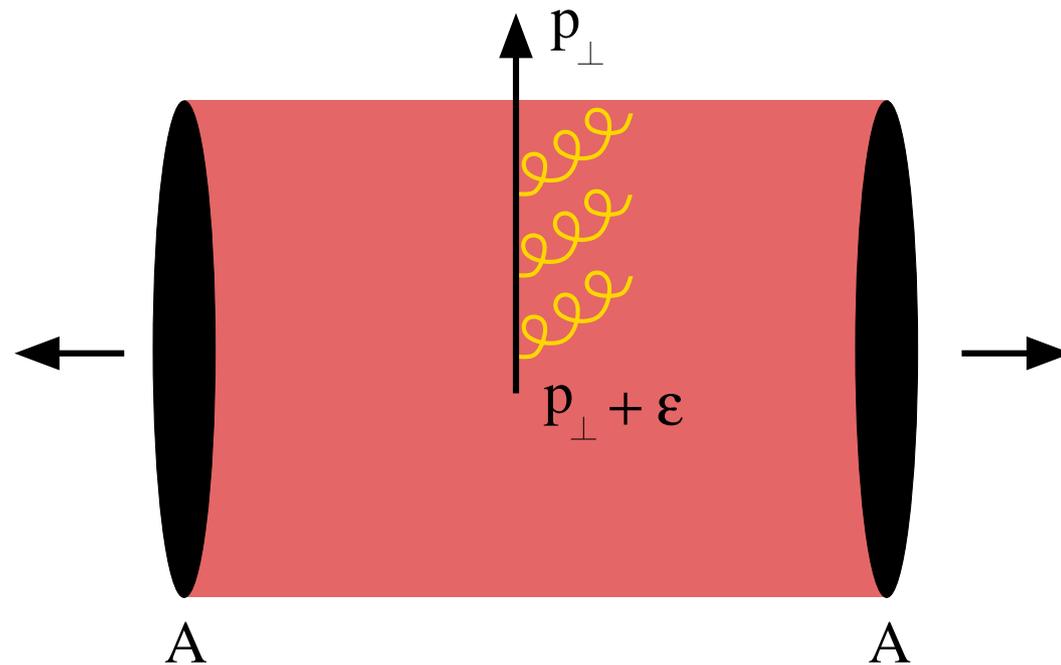
## Nombreuses collisions molles du parton dur

- 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

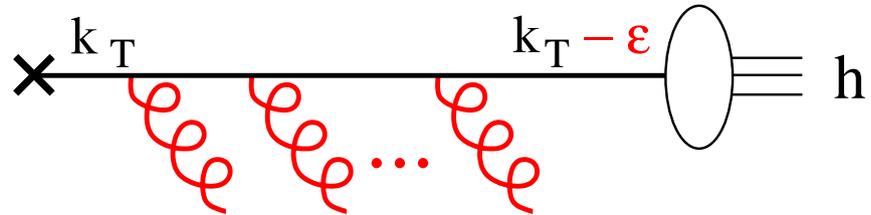
- facteur de suppression

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

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

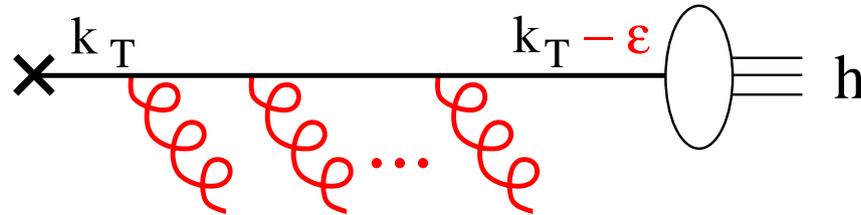
# Modèle

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

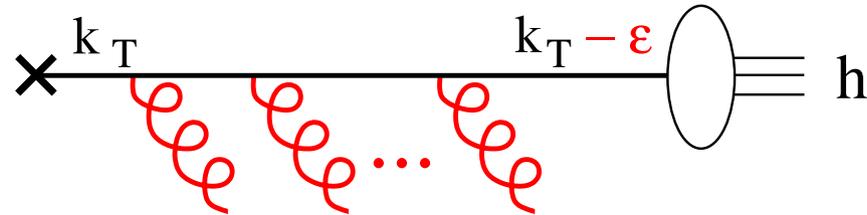
[ Wang, Huang, Sarcevic PRL 1996 ]

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

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 ]

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

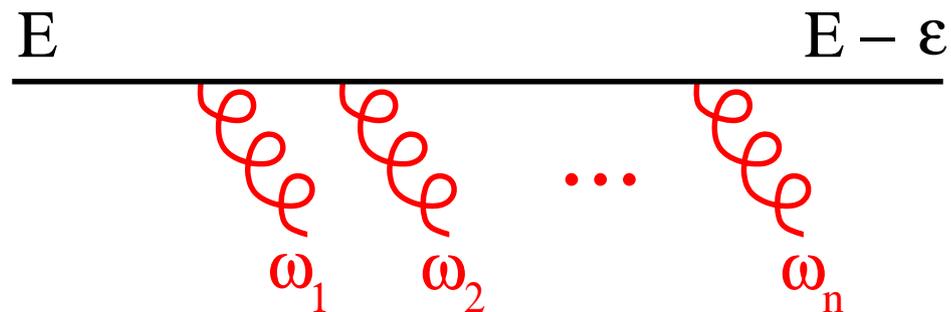
avec  $z^* = \frac{E_h}{\nu - \epsilon} = \frac{z}{1 - \epsilon/\nu}$

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  $dI/d\omega$

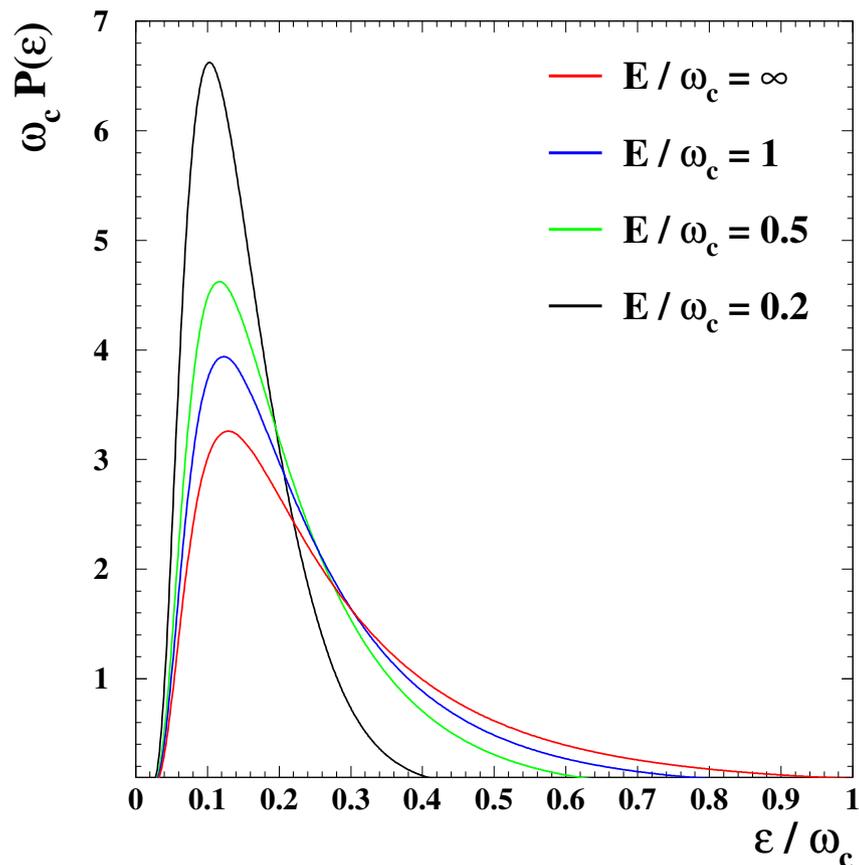
$$\omega_c = \frac{1}{2} \hat{q} L^2$$

- $\hat{q}$  : 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 $\mathcal{P}(\epsilon)$

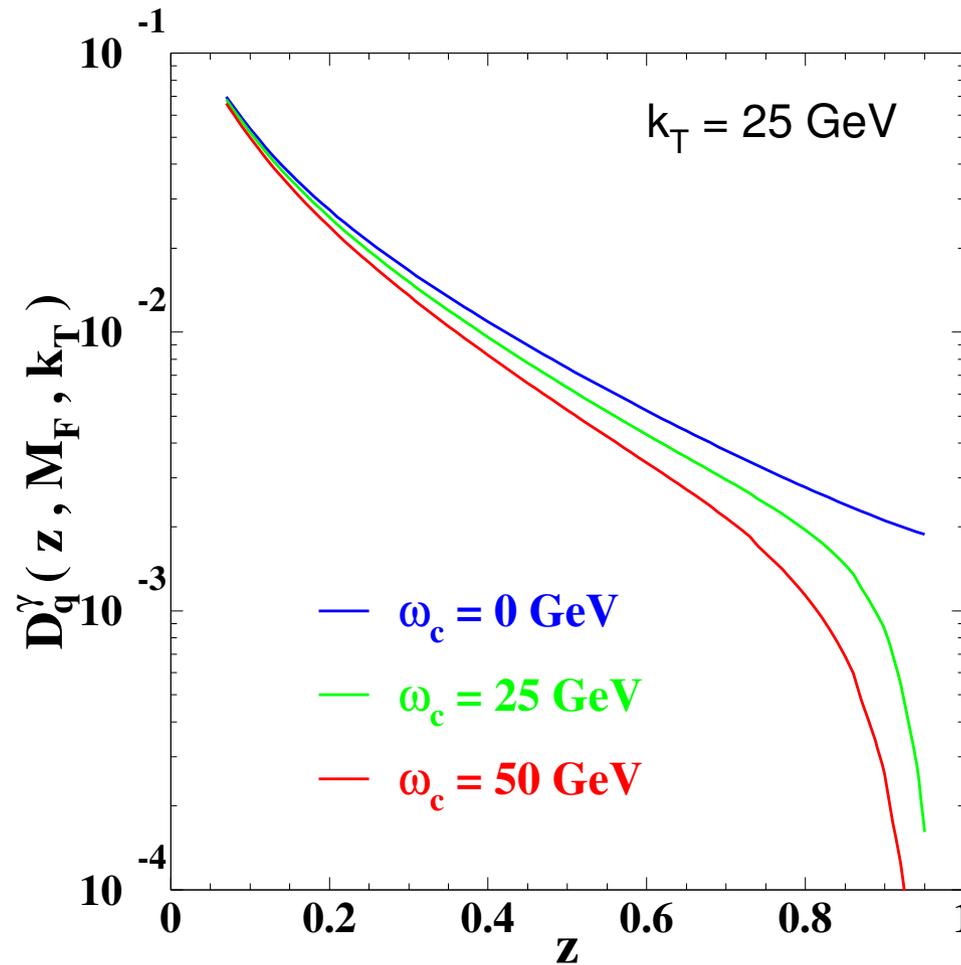
[ FA JHEP 2002 ]

[ Salgado, Wiedemann PRL 2002 ]



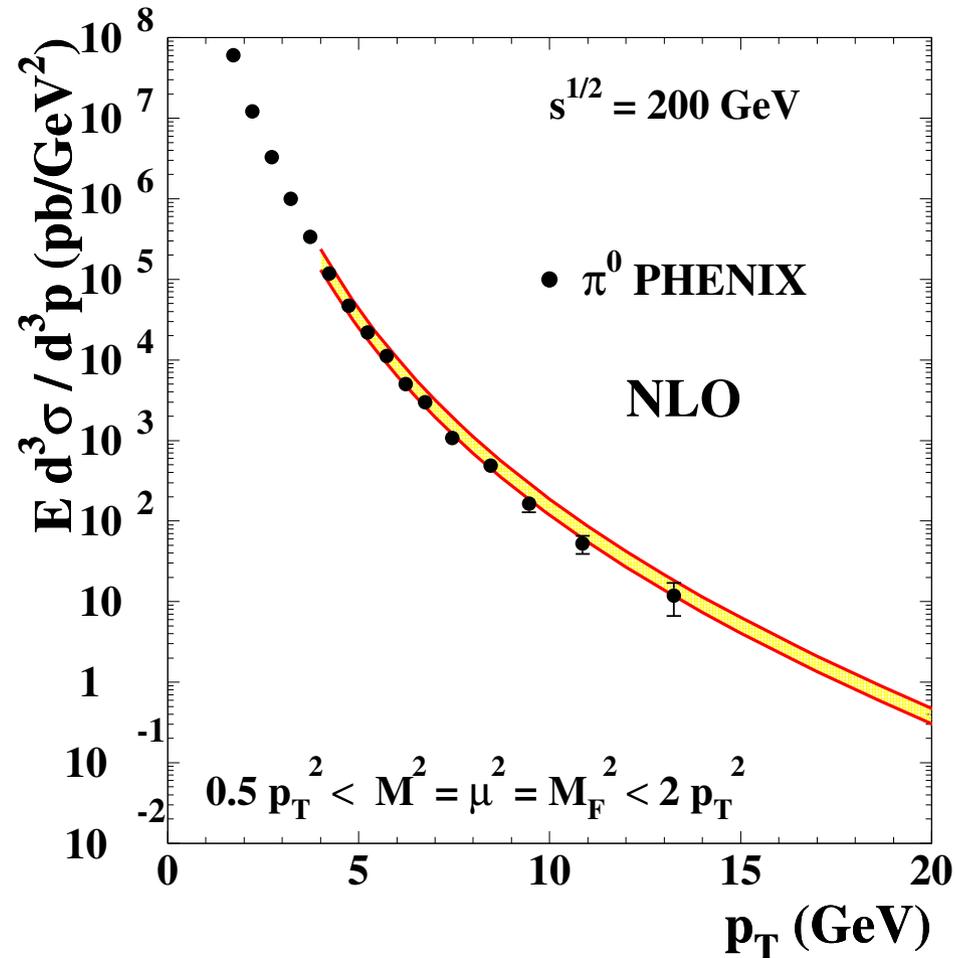
- Distribution asymétrique
- Calculée pour différents spectres  $dI/d\omega$

# Fonctions de fragmentation



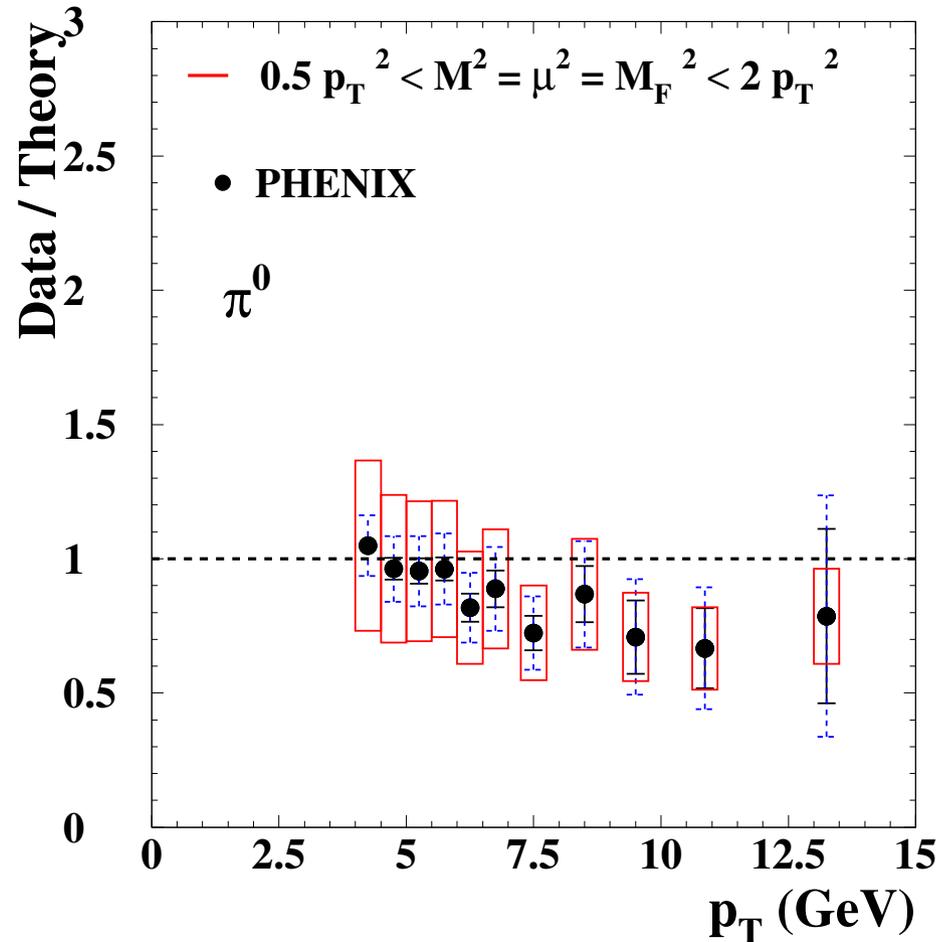
  Forte suppression à grand  $z$

# Spectre p p



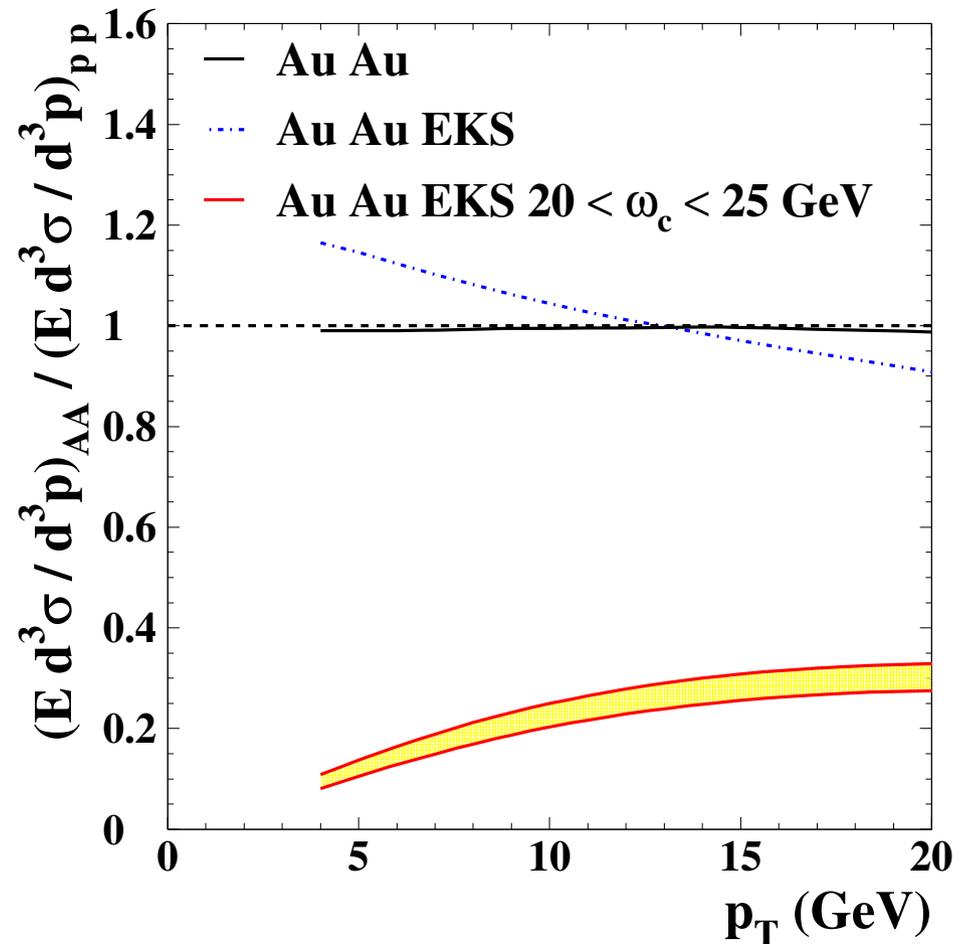
- Très bon accord avec les données de PHENIX
- contraintes possibles sur les FF

# Spectre p p



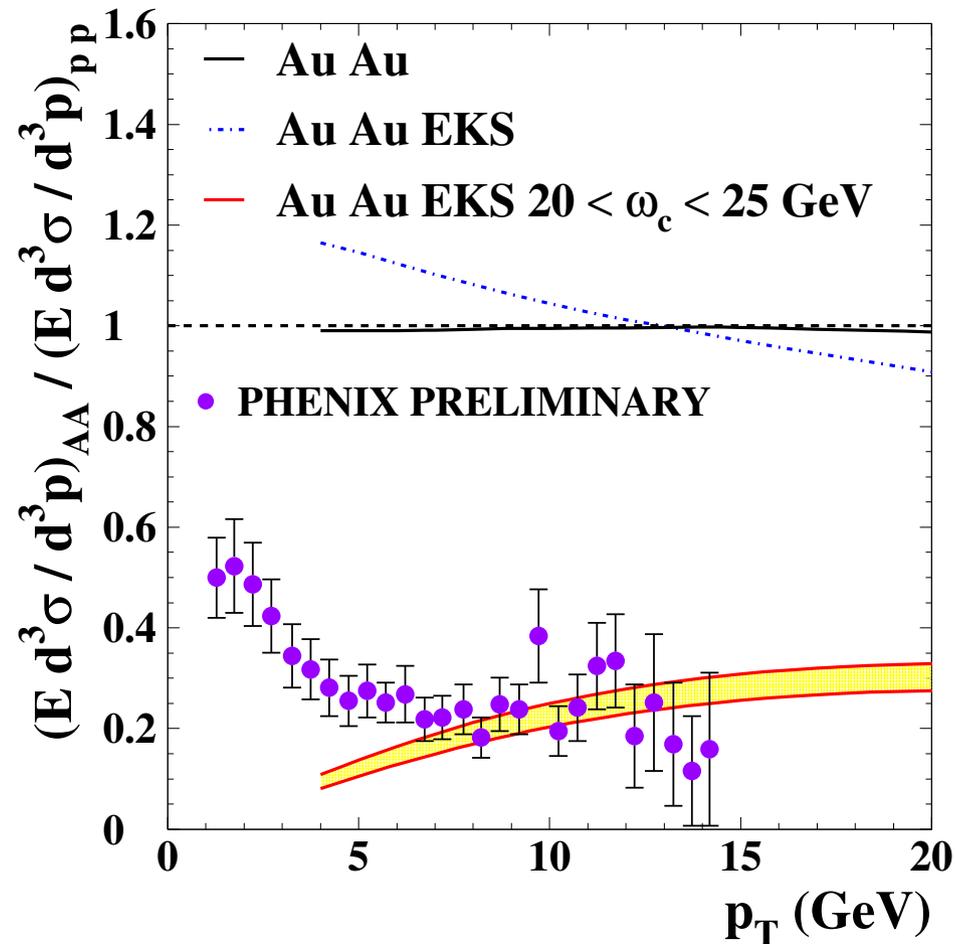
- Très bon accord avec les données de PHENIX
- contraintes possibles sur les FF

# Spectre Au Au



- Forte suppression dans le canal  $\pi^0$

# Spectre Au Au



● Forte suppression dans le canal  $\pi^0$

● 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

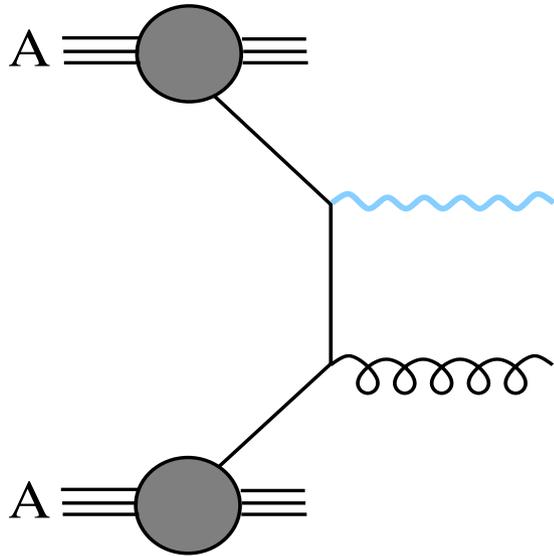
- Photons de décroissance

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

- décroissances radiatives



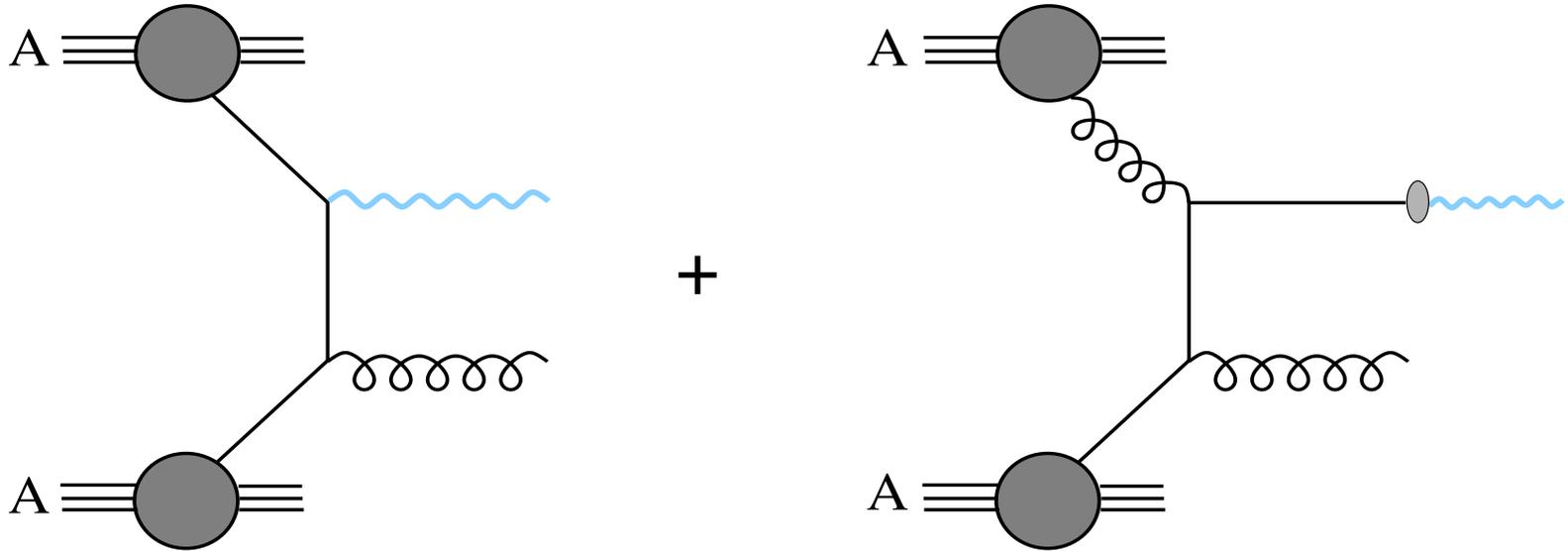
# Photons prompts



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



# Photons prompts

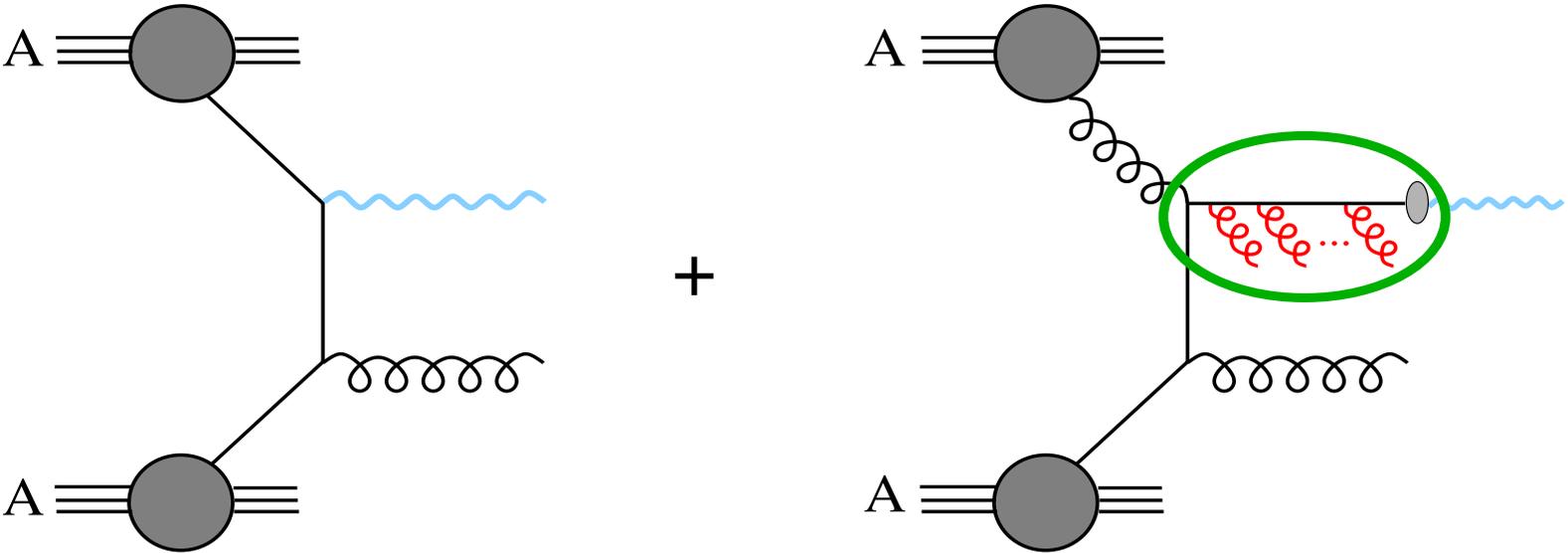


$$\frac{d\sigma}{d\vec{p}_T d\eta} \simeq \sum_{i,j=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{d\vec{p}_T d\eta}$$

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



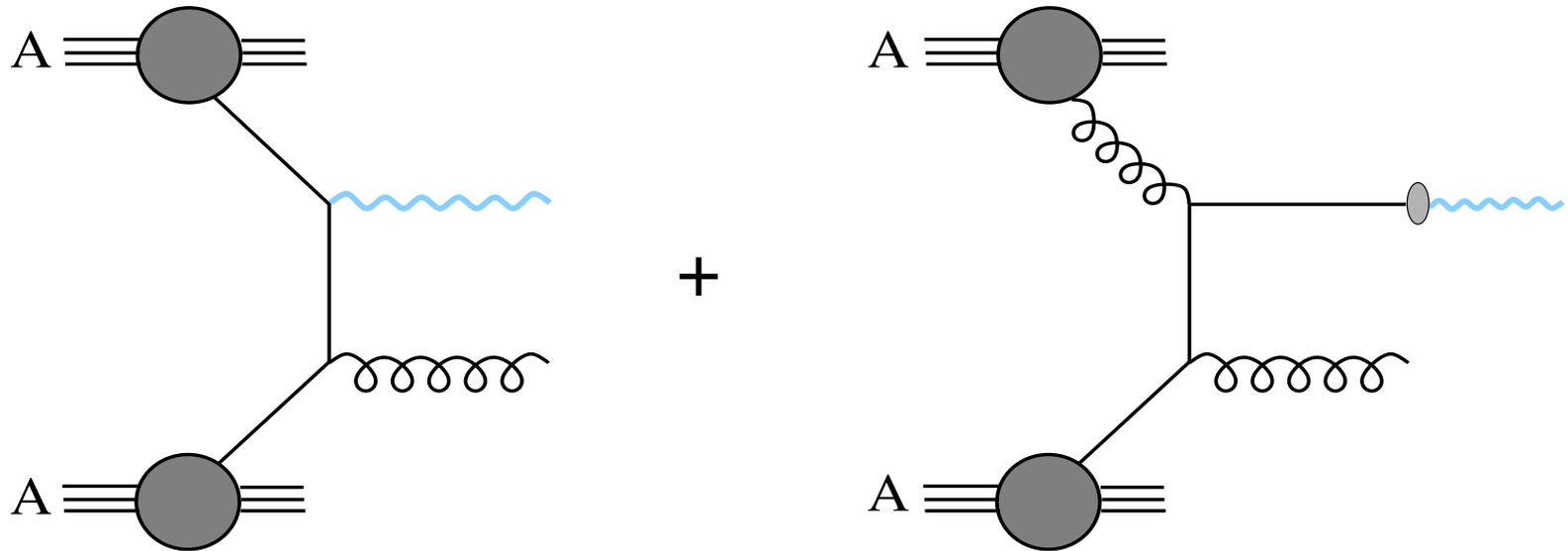
# Photons prompts



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

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

# 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
  - ...



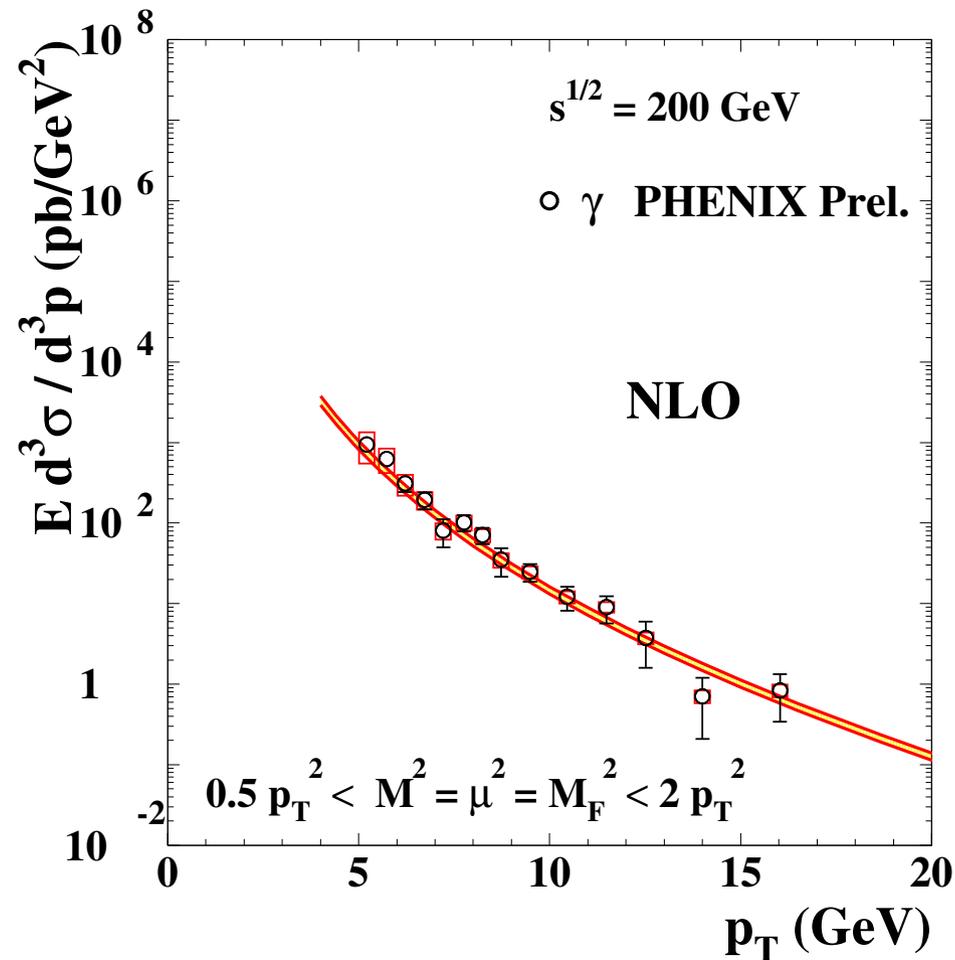
# Photons prompts

## 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 !

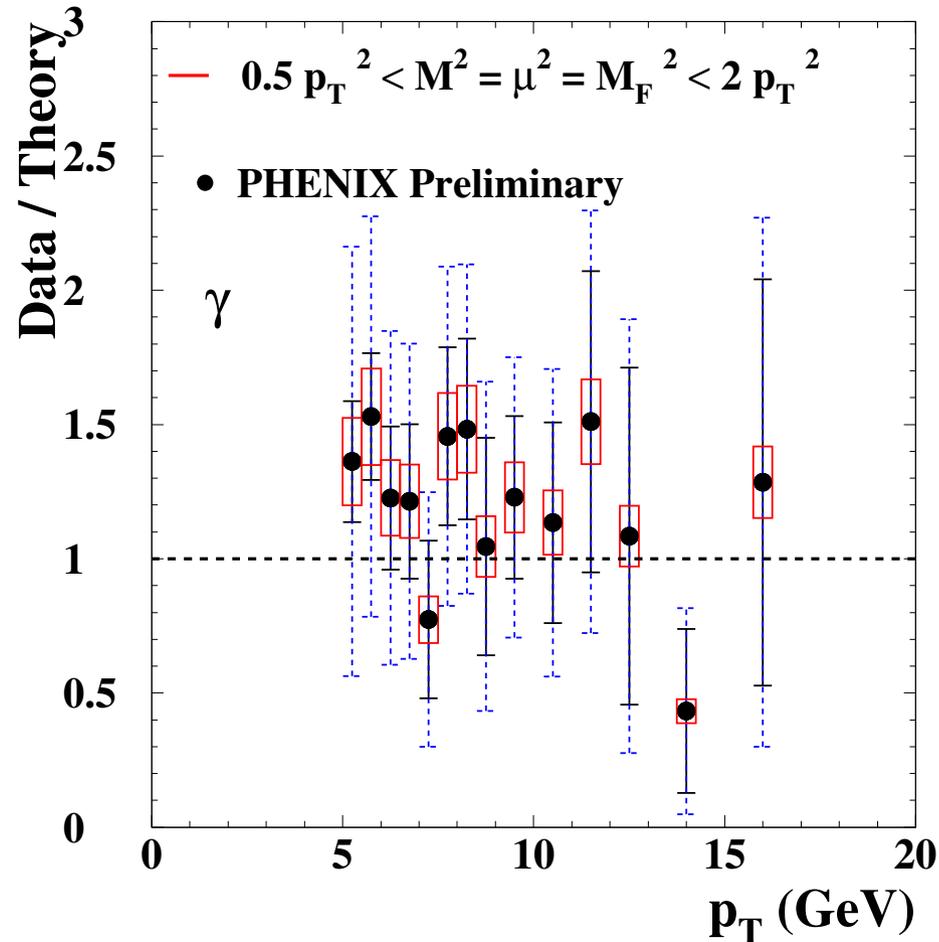
# Spectre p p



● Bon accord avec les données de PHENIX

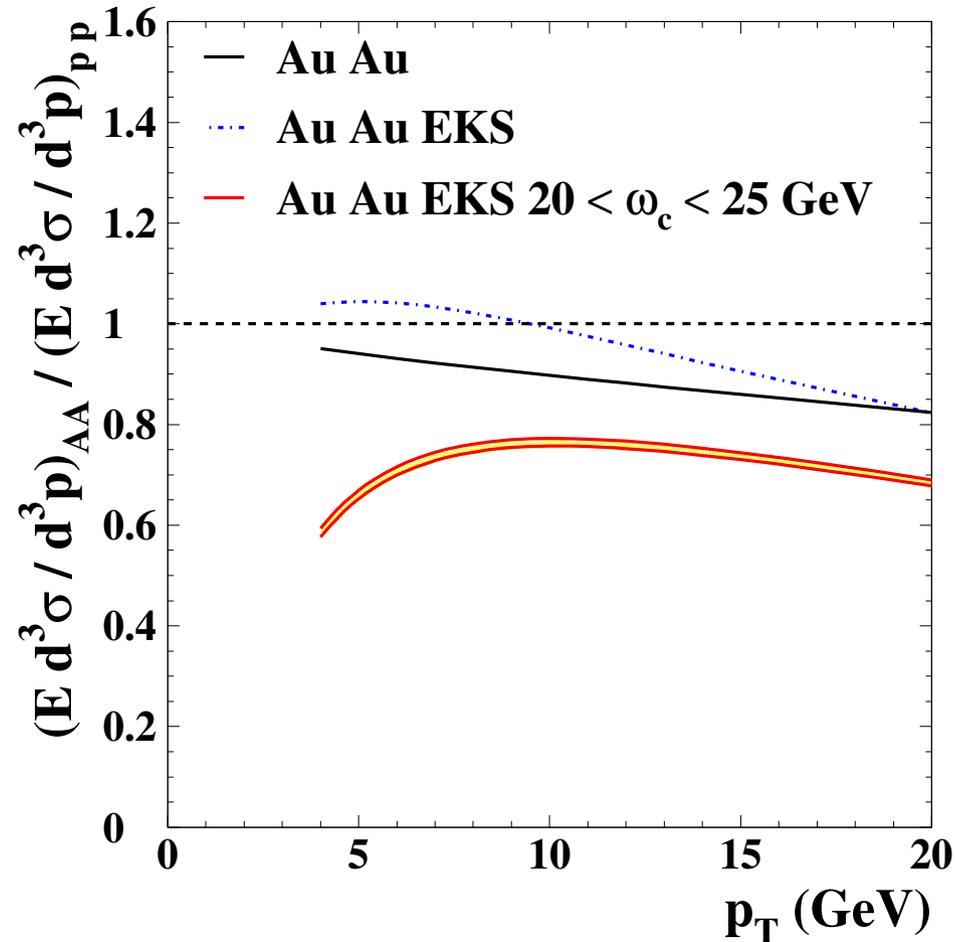
● nouvelles contraintes !

# Spectre p p



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

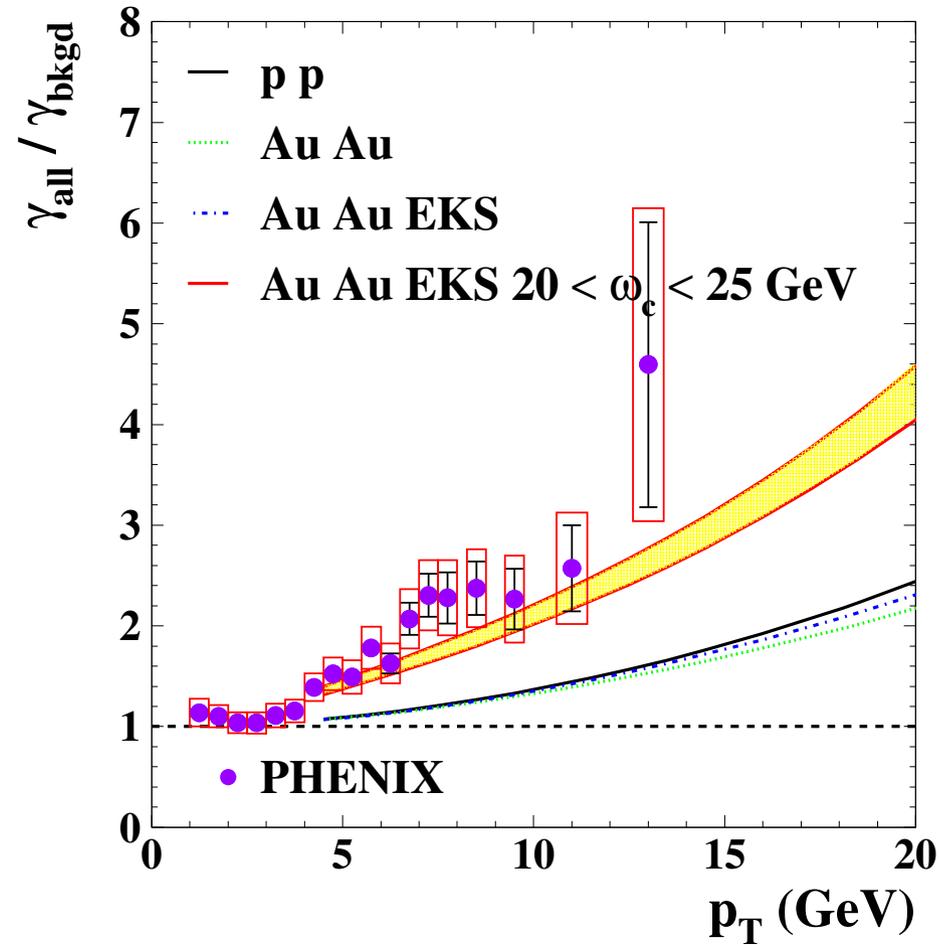
# Spectre Au Au



● Suppression beaucoup plus faible que les  $\pi^0$

● 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 quelque chose ? (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

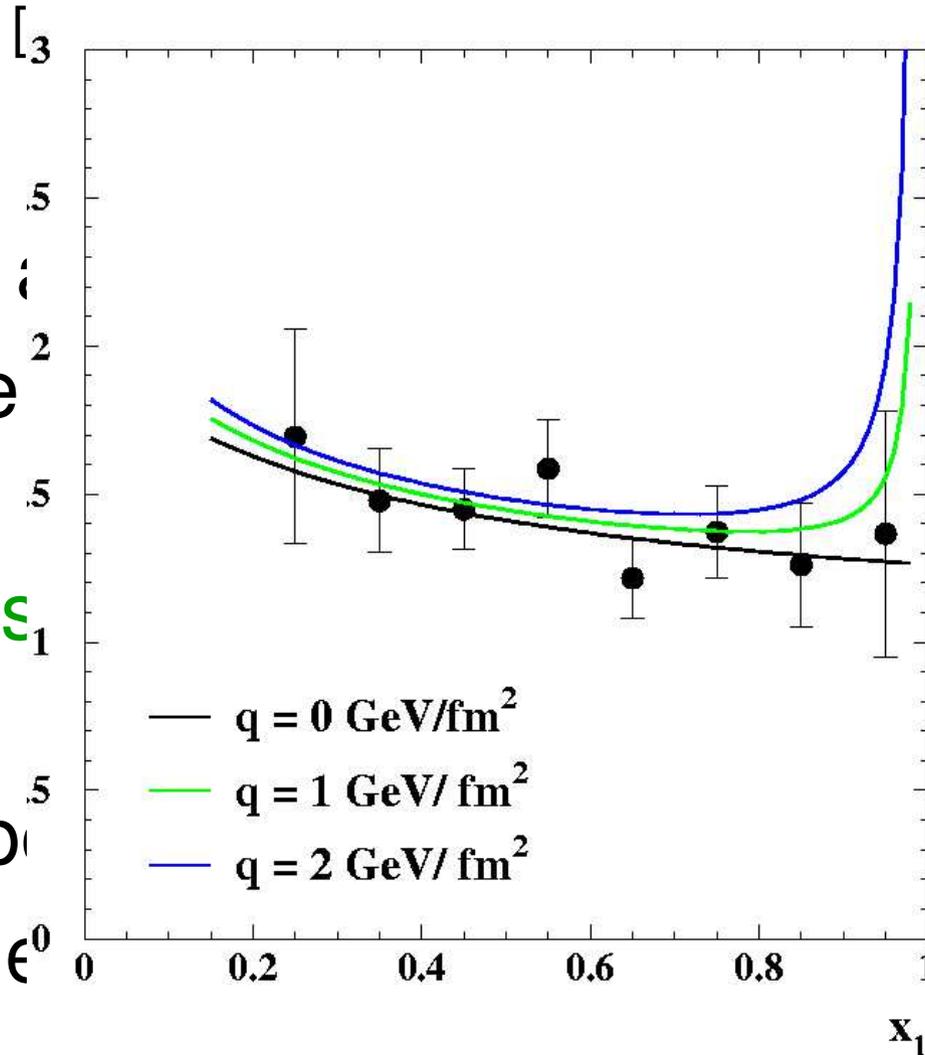
[FA PLB 2002]

$\hat{q}$  relié à  
densité de

Contraintes

Fortes p

d'énergie  $\epsilon^0$



# 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 ]

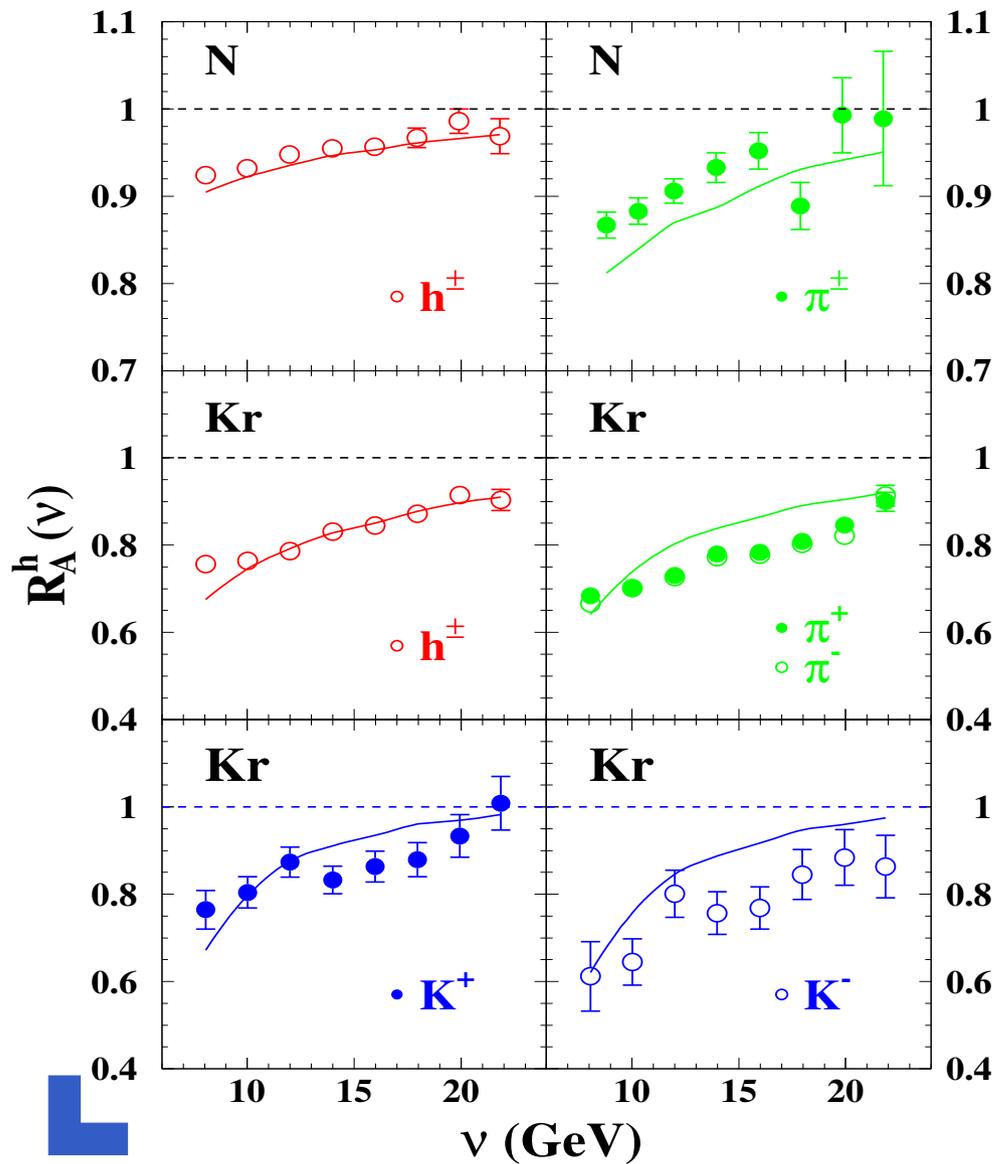
Fortes pertes  
d'énergie exclues

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

# Comparaison avec HERMES

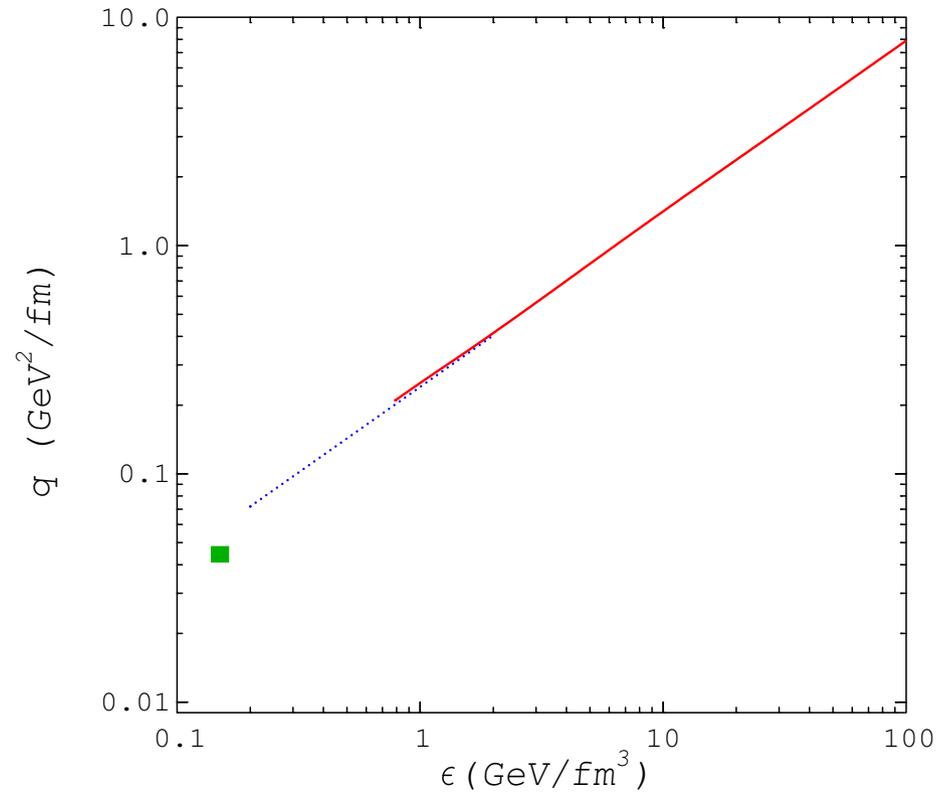


[ FA EPJ C 2003 ]



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

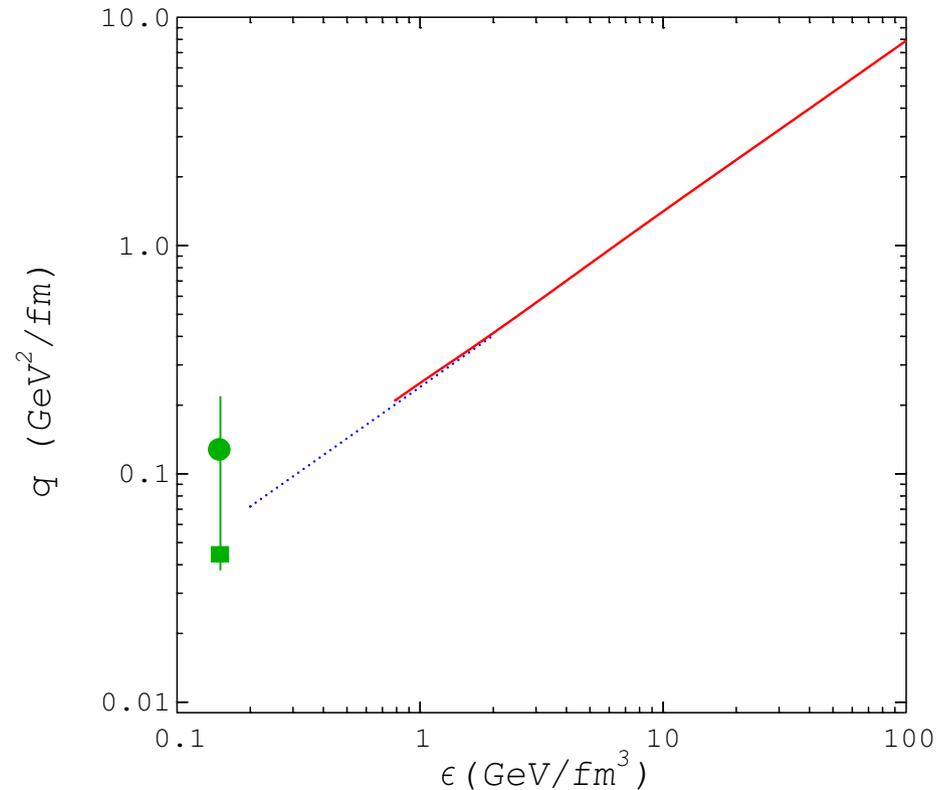
# Coefficient de transport



[ Baier NPA 2002 ]

- Matière froide
- pQCD

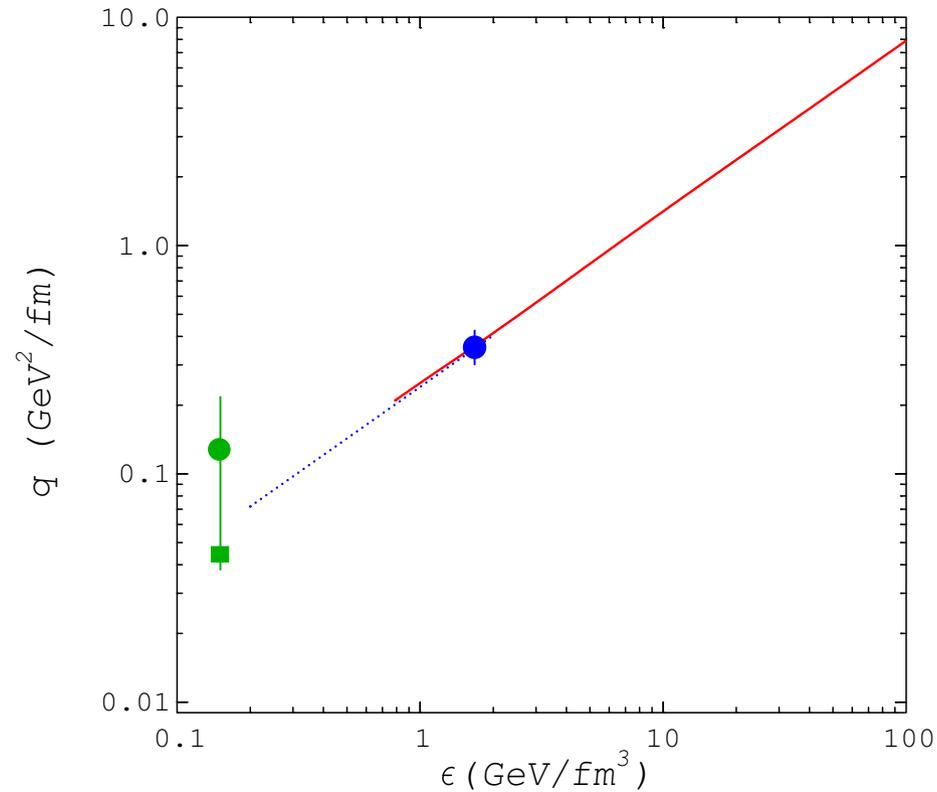
# Coefficient de transport



[ Baier NPA 2002 ]

- Matière froide
- pQCD
- Drell-Yan et DIS

# Coefficient de transport

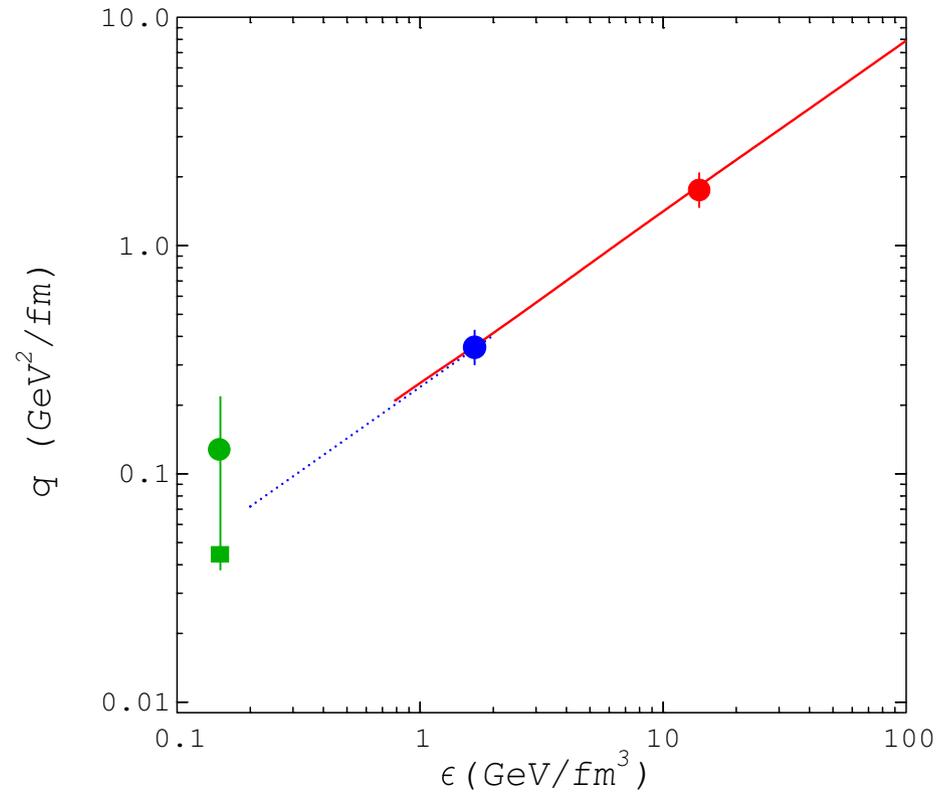


[ Baier NPA 2002 ]

 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 ...

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

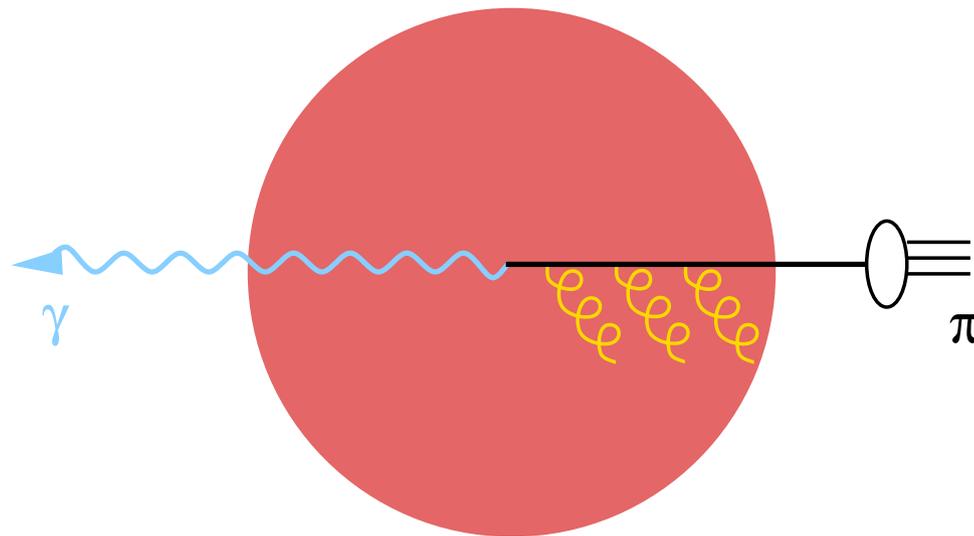
... mais nombreuses incertitudes théoriques

- 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 ]

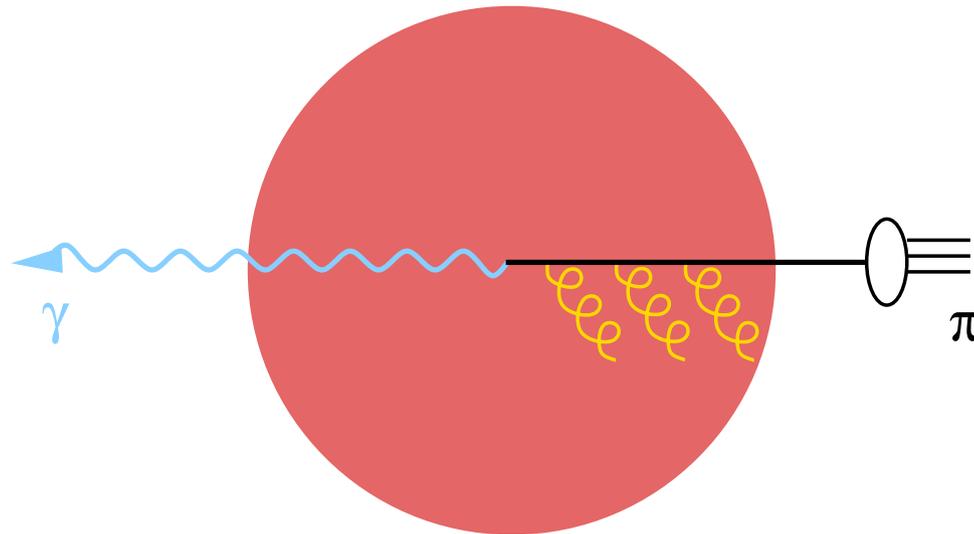
A l'ordre dominant en  $\alpha_s$



# Corrélations photon-pion

[ FA, Aurenche, Belghobsi, Guillet JHEP 2004 ]

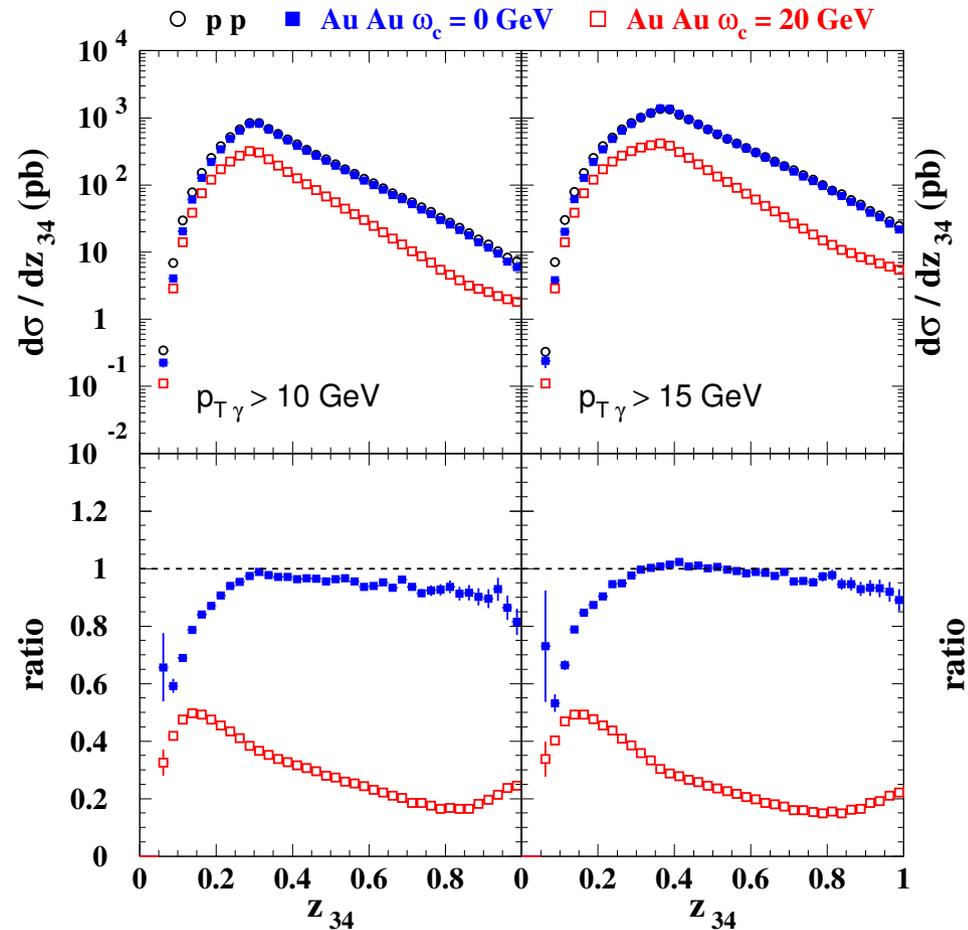
A l'ordre dominant en  $\alpha_s$



• Mesure “directe” de  $z$

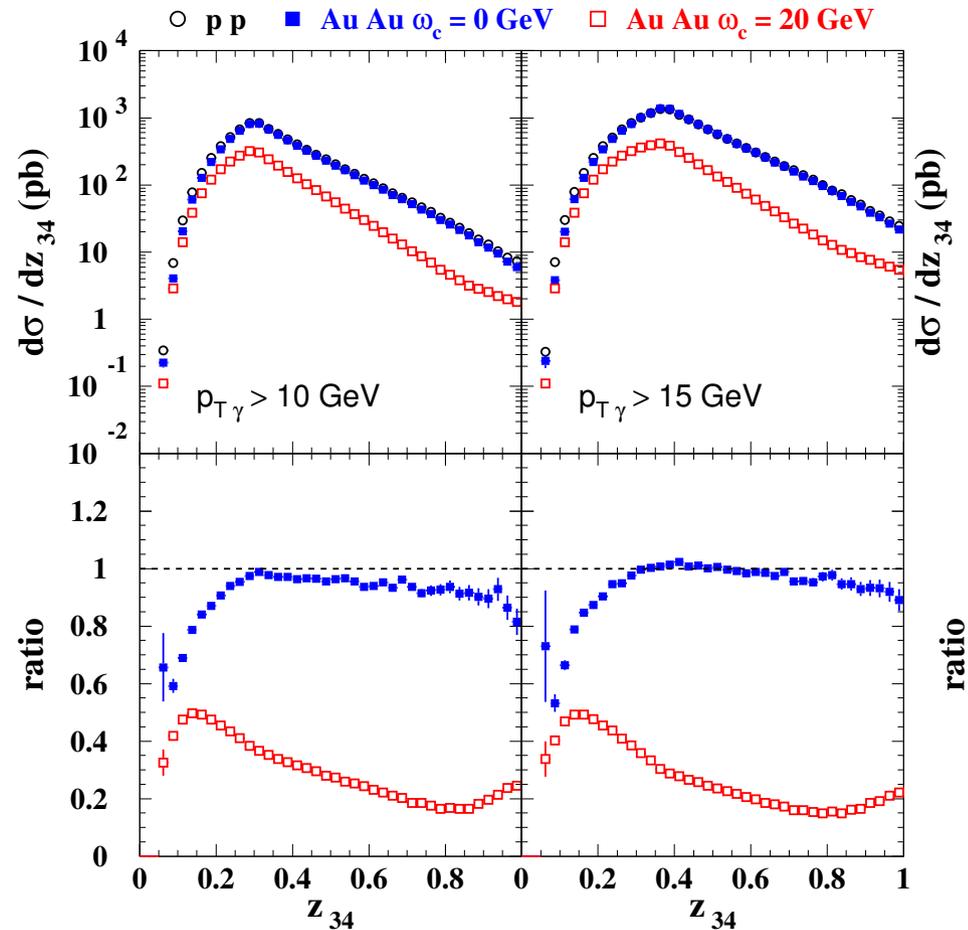
$$z_{34} \equiv -\frac{\vec{p}_{T3} \cdot \vec{p}_{T4}}{|\vec{p}_{T3}|^2} \simeq z$$

# 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  $\pi^0$  cohérentes avec les pertes d'énergie



# Résumé



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



# Résumé



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

