

# Corrélations $\gamma - \pi^0$ dans les collisions d'ions lourds

François Arleo

CERN



# Sommaire

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Sondes colorées vs. sondes aveugles
- Corrélations  $\gamma - \pi^0$ 
  - ◆ pourquoi
  - ◆ comment
- Phénoménologie à RHIC et LHC

[ FA, Aurenche, Belghobsi, Guillet JHEP 2004 ]

[ FA, prochainement ]



# Sondes dures

## Schématiquement

### 1. Sondes colorées

### 2. Sondes aveugles

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives



# Sondes dures

## Schématiquement

### 1. Sondes colorées

- interaction avec le milieu dense
  - ◆ pertes d'énergie, écrantage de Debye

### 2. Sondes aveugles

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives





# Sondes dures

## Schématiquement

### 1. Sondes colorées

- interaction avec le milieu dense
  - ◆ pertes d'énergie, écrantage de Debye
- jets, pions durs, quarkonia lourds

### 2. Sondes aveugles

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives



# Sondes dures

## Schématiquement

### 1. Sondes colorées

- interaction avec le milieu dense
  - ◆ pertes d'énergie, écrantage de Debye
- jets, pions durs, quarkonia lourds

### 2. Sondes aveugles

- étalonnage des effets "nucléaires"
  - ◆ shadowing / saturation, effet Cronin

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives



# Sondes dures

## Schématiquement

### 1. Sondes colorées

- interaction avec le milieu dense
  - ◆ pertes d'énergie, écrantage de Debye
- jets, pions durs, quarkonia lourds

### 2. Sondes aveugles

- étalonnage des effets "nucléaires"
  - ◆ shadowing / saturation, effet Cronin
- Drell-Yan,  $W^\pm$  / Z, photons prompts

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives



# Sondes dures

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

## Schématiquement

### 1. Sondes colorées

- interaction avec le milieu dense
  - ◆ pertes d'énergie, écrantage de Debye
- jets, pions durs, quarkonia lourds

### 2. Sondes aveugles

- étalonnage des effets "nucléaires"
  - ◆ shadowing / saturation, effet Cronin
- Drell-Yan,  $W^\pm$  / Z, photons prompts

Comparons sondes colorées et sondes aveugles !



# Sondes dures

## Deux possibilités

### 1. Production simple colorée vs. production simple aveugle

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

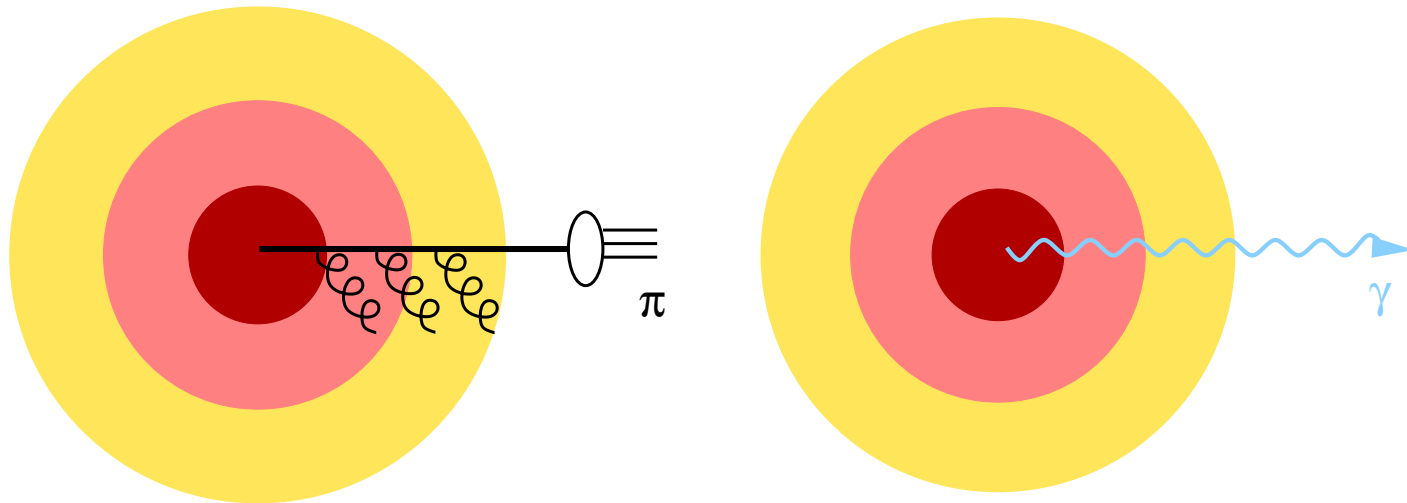
Résultats

Résumé

Perspectives

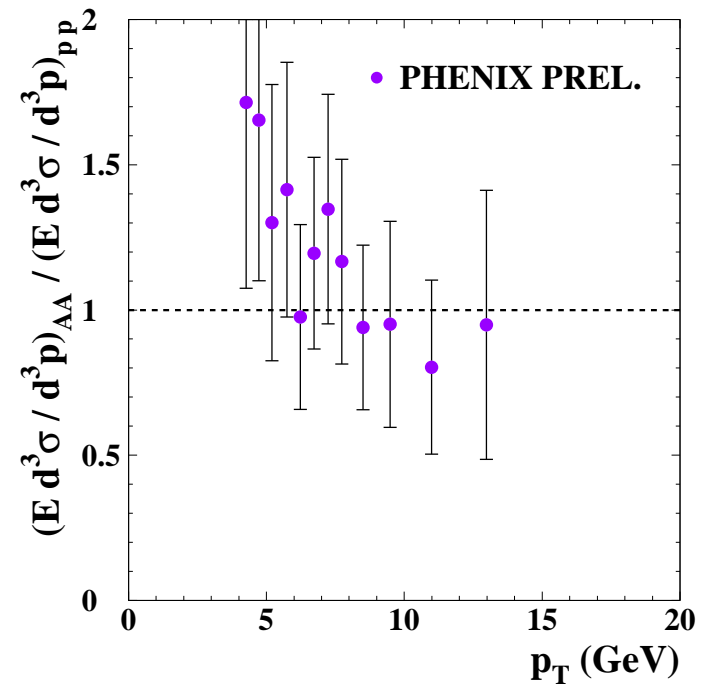
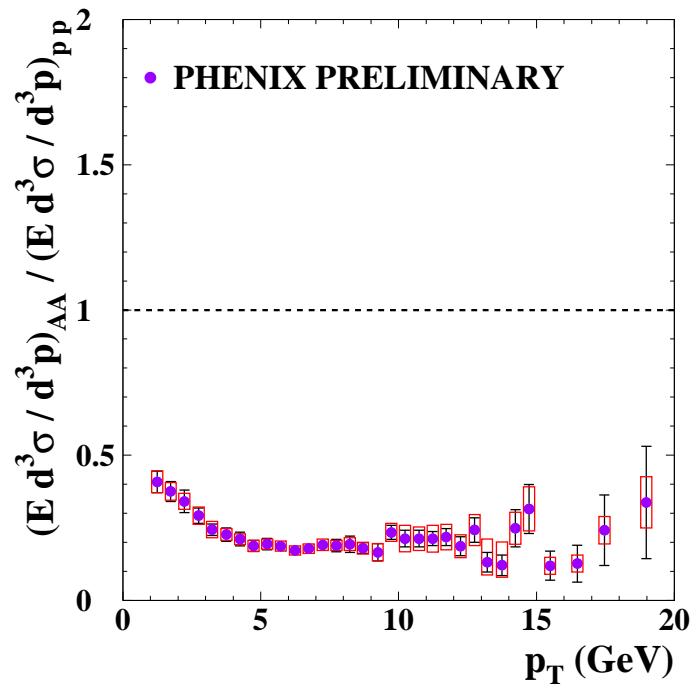
## Deux possibilités

### 1. Production simple colorée vs. production simple aveugle



## Deux possibilités

### 1. Production simple colorée vs. production simple aveugle



Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives



# Sondes dures

## Deux possibilités

1. Production simple colorée vs. production simple aveugle
2. Production double colorée - aveugle

Introduction

● Sommaire

● Sondes dures

Production simple

Corrélations

Résultats

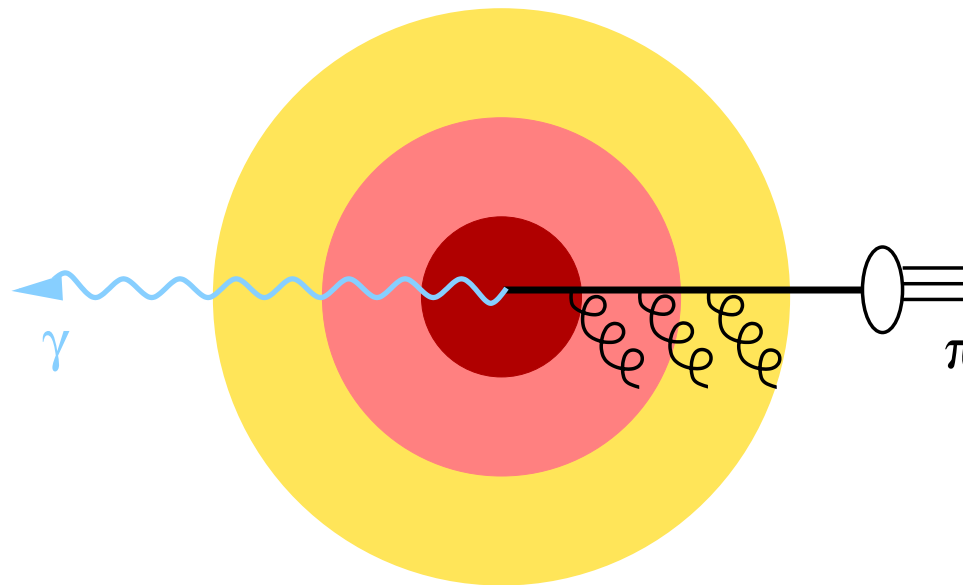
Résumé

Perspectives



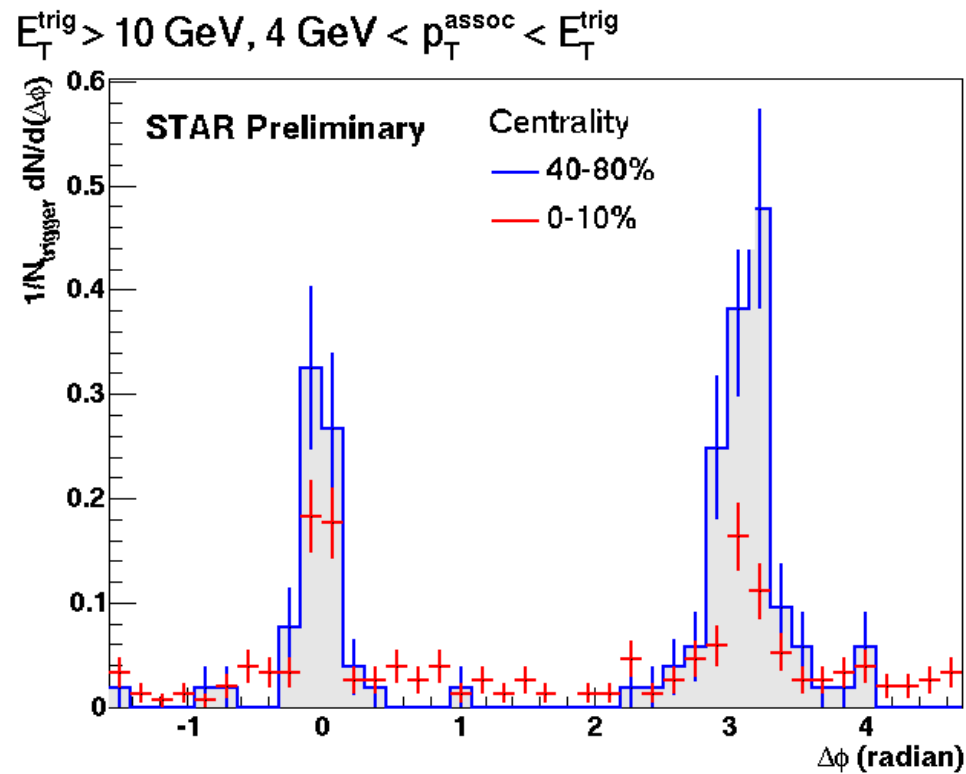
## Deux possibilités

1. Production simple colorée vs. production simple aveugle
2. Production double colorée - aveugle



## Deux possibilités

1. Production simple colorée vs. production simple aveugle
2. Production double colorée - aveugle





# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

## ■ Du côté expérimental

[ cf. D. d'Enterria ]



# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)



# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)
  - ◆ Facteur de quenching pour les photons prompts



# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)
  - ◆ Facteur de quenching pour les photons prompts
- Du côté de la phénoménologie [ cf. U. Wiedemann ]



# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)
  - ◆ Facteur de quenching pour les photons prompts
- Du côté de la phénoménologie [ cf. U. Wiedemann ]
  - ◆ Nombreuses analyses



# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)
  - ◆ Facteur de quenching pour les photons prompts
- Du côté de la phénoménologie [ cf. U. Wiedemann ]
  - ◆ Nombreuses analyses
  - ◆ Extraction des paramètres du milieu:  $\hat{q}$ ,  $dN_g/dy$ ,  $\epsilon$ , ...





# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)
  - ◆ Facteur de quenching pour les photons prompts
- Du côté de la phénoménologie [ cf. U. Wiedemann ]
  - ◆ Nombreuses analyses
  - ◆ Extraction des paramètres du milieu:  $\hat{q}$ ,  $dN_g/dy$ ,  $\epsilon$ , ...

Succès de la production simple inclusive en  $pp$ ,  
d Au, et Au Au depuis plusieurs années



# Succès

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

- Du côté expérimental [ cf. D. d'Enterria ]
  - ◆ Facteur de quenching pour différents hadrons ( $\pi$ , K, ...)
  - ◆ Facteur de quenching pour les photons prompts
- Du côté de la phénoménologie [ cf. U. Wiedemann ]
  - ◆ Nombreuses analyses
  - ◆ Extraction des paramètres du milieu:  $\hat{q}$ ,  $dN_g/dy$ ,  $\epsilon$ , ...

Succès de la production simple inclusive en  $pp$ ,  
d Au, et Au Au depuis plusieurs années

cependant ...



# Limites

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

## 1. Energie du parton

## 1. Energie du parton

Spectres simples inclusifs en pQCD à l'ordre dominant

$$\frac{d\sigma^\pi}{d\mathbf{p}_\perp d\eta} = \sum_{i,j,k=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/p}(x_1, M) F_{j/p}(x_2, M) \times \left( \frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} \right)^2 \frac{d\hat{\sigma}_{ij}^k}{d\mathbf{p}_\perp d\eta} \frac{dz}{z^2} D_{\pi/k}(z, M_F)$$

## 1. Energie du parton

Spectres simples inclusifs en pQCD à l'ordre dominant

$$\frac{d\sigma^\pi}{d\mathbf{p}_\perp d\eta} = \sum_{i,j,k=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/p}(x_1, M) F_{j/p}(x_2, M) \times \left( \frac{\alpha_s(\mu)}{2\pi} \right)^2 \frac{d\hat{\sigma}_{ij}^k}{d\mathbf{p}_\perp d\eta} \frac{dz}{z^2} D_{\pi/k}(z, M_F)$$

ne permettent pas de déterminer

- l'énergie  $k_\perp$  du parton donc la variable  $z = p_{\perp\pi} / k_\perp$
- les fonctions de fragmentation modifiées par le milieu



# Limites

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

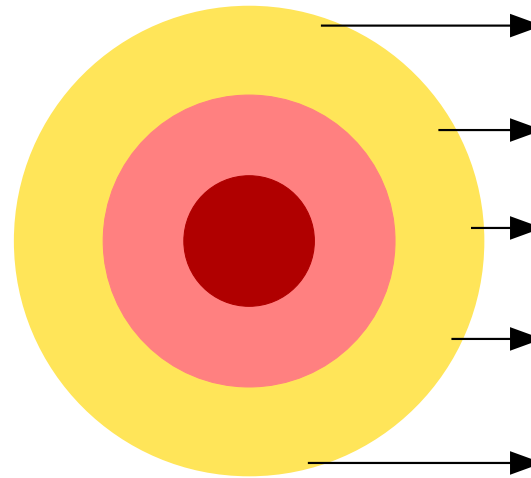
1. Energie du parton

2. Emission en surface

1. Energie du parton

2. Emission en surface

Biais du trigger

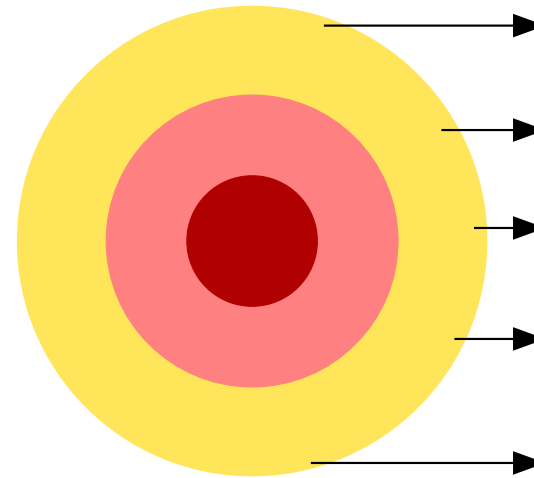


Dans un milieu très opaque, les particules observées  
proviennent toutes de la surface [ Eskola et al. 2004 ]

1. Energie du parton

2. Emission en surface

Biais du trigger



L'information sur le profil de densité d'énergie est perdue !





# Limites

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

Nécessité d'aller au-delà de la production simple inclusive afin de mieux comprendre:

- la dynamique de fragmentation modifiée par le milieu
- le profil de densité d'énergie



# Limites

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

Nécessité d'aller au-delà de la production simple inclusive afin de mieux comprendre:

- la dynamique de fragmentation modifiée par le milieu
- le profil de densité d'énergie

Corrélations photon prompt — pion dur



# Limites

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

Nécessité d'aller au-delà de la production simple inclusive afin de mieux comprendre:

- la dynamique de fragmentation modifiée par le milieu
- le profil de densité d'énergie

## Corrélations photon prompt — pion dur

- Corrélations azimutales
- Corrélations en impulsion



# Limites

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

Nécessité d'aller au-delà de la production simple inclusive afin de mieux comprendre:

- la dynamique de fragmentation modifiée par le milieu
- le profil de densité d'énergie

## Corrélations photon prompt — pion dur

- Corrélations azimutales
- Corrélations en impulsion



# Terminologie

Introduction

Production simple

● Succès

● Limites

● Terminologie

Corrélations

Résultats

Résumé

Perspectives

## Nombreuses sources de photons

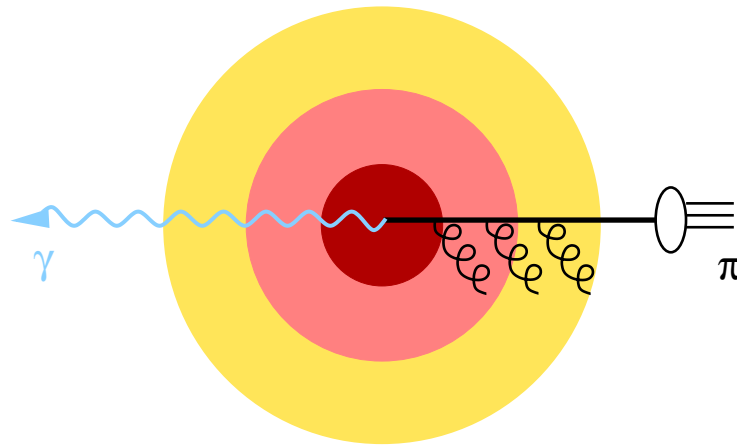
- Photons prompts
  - ◆ produits dans les collisions NN
- Photons thermiques
  - ◆ rayonnement du plasma quarks-gluons
- Photons de décroissance
  - ◆ décroissances radiatives

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

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

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

## ■ A l'ordre dominant en $\alpha_s$



$$\mathbf{k}_\perp \simeq -\mathbf{p}_{\perp\gamma}$$

Introduction

Production simple

Corrélations

● Corrélations

● Calcul perturbatif

● Ingrédients

● Modèle

● Distribution de probabilité

● Fonctions de fragmentation  
modifiées

● Coupures cinématiques

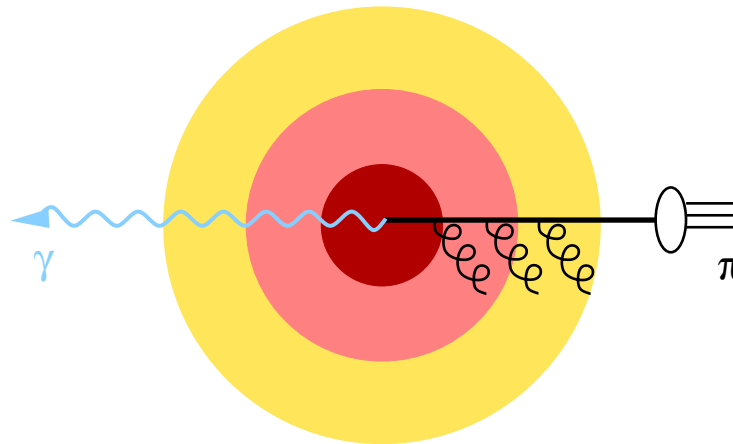
● Variables

Résultats

Résumé

Perspectives

## ■ A l'ordre dominant en $\alpha_s$



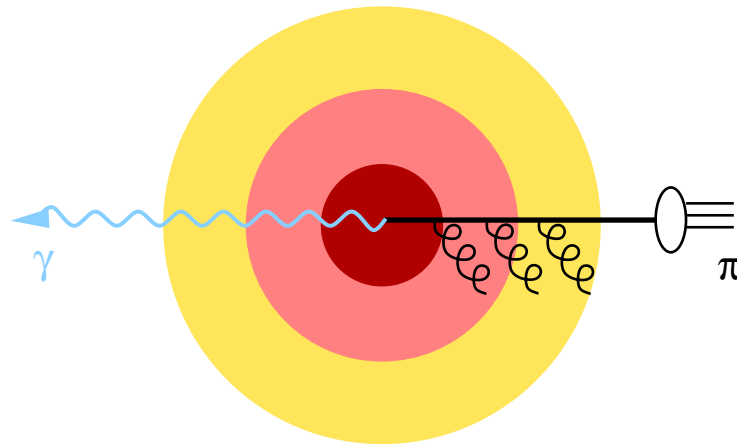
$$\mathbf{k}_\perp \simeq -\mathbf{p}_{\perp\gamma}$$

## ■ La balance d'impulsion

$$z_{\gamma\pi} \equiv -\frac{\mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma}}{|\mathbf{p}_{\perp\gamma}|^2} \simeq z$$

permet d'estimer la variable de fragmentation  $z$

■ A l'ordre dominant en  $\alpha_s$



$$\mathbf{k}_\perp \simeq -\mathbf{p}_{\perp\gamma}$$

Calcul perturbatif des distributions de corrélation  
dans les collisions  $pp$  et  $AA$  à RHIC et LHC

Introduction

Production simple

Corrélations

● Corrélations

● Calcul perturbatif

● Ingrédients

● Modèle

● Distribution de probabilité

● Fonctions de fragmentation  
modifiées

● Coupures cinématiques

● Variables

Résultats

Résumé

Perspectives



Introduction

Production simple

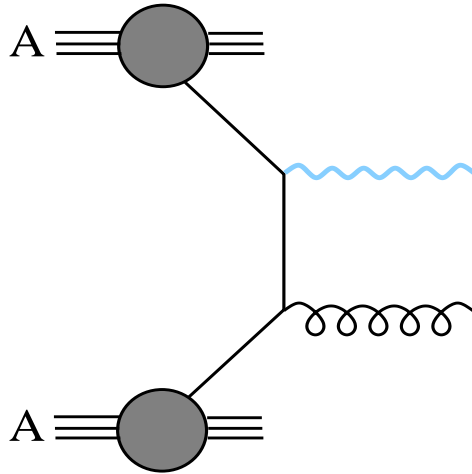
Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

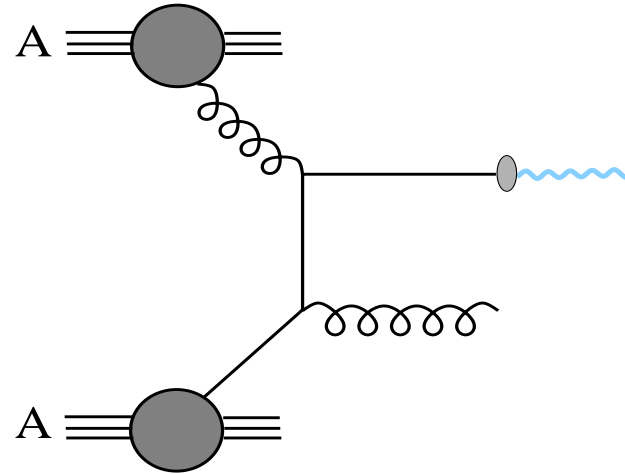
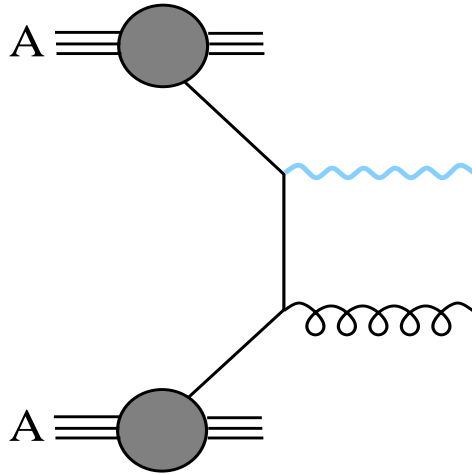
Résumé

Perspectives



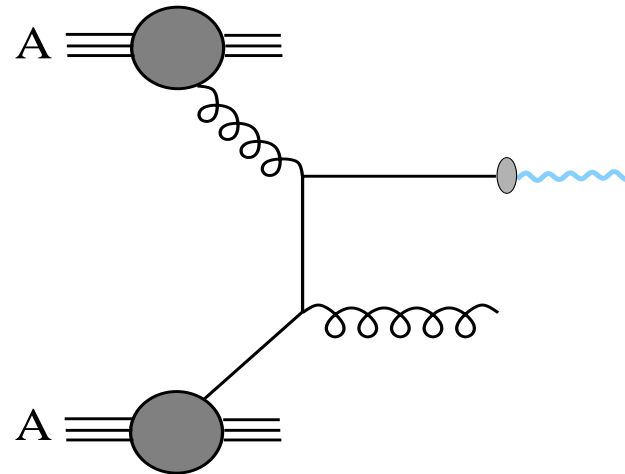
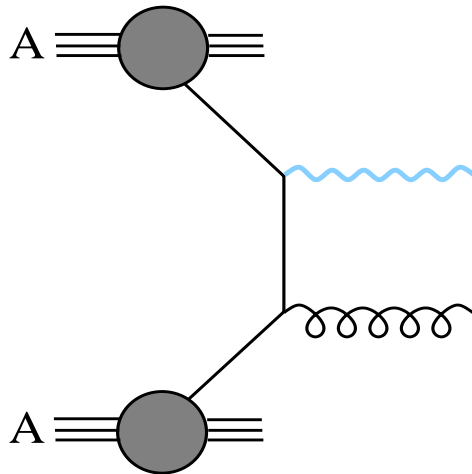
$$\frac{d\sigma}{d\vec{p}_T d\eta} \simeq \sum_{i,j=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{d\vec{p}_T d\eta}$$

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

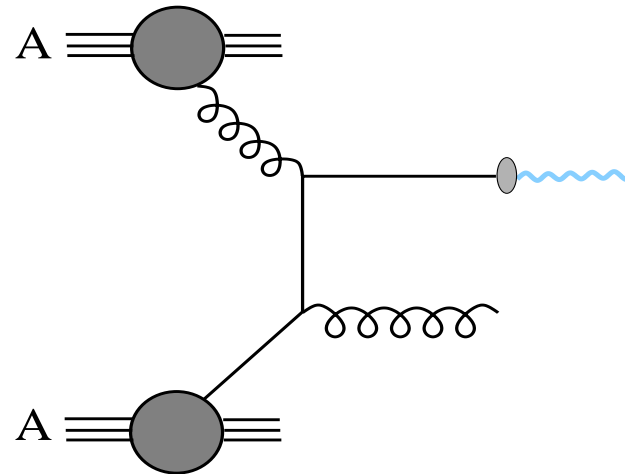
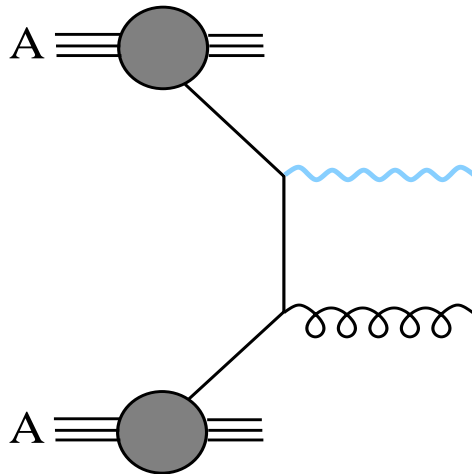


$$\frac{d\sigma}{d\vec{p}_T d\eta} \simeq \sum_{i,j=q,g} \int dx_1 dx_2 F_{i/h_1}^A(x_1) F_{j/h_2}^A(x_2) \frac{d\hat{\sigma}_{ij}}{d\vec{p}_T d\eta}$$

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



- Photons directs
  - ◆ “type Drell-Yan”
- Photons de fragmentation
  - ◆ “type jet”



- Distinction arbitraire: dépend de l'échelle !
  - ◆ seule la somme directe + fragmentation est pertinente
- Possibilité de différencier expérimentalement
  - ◆ critères d'isolement (activité hadronique ou non)
  - ◆ cinématique



# Ingrédients

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives

- Calcul perturbatif
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s \alpha)$  en  $p p$  et  $A A$
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s^2 \alpha)$  en  $p p$



# Ingrédients

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

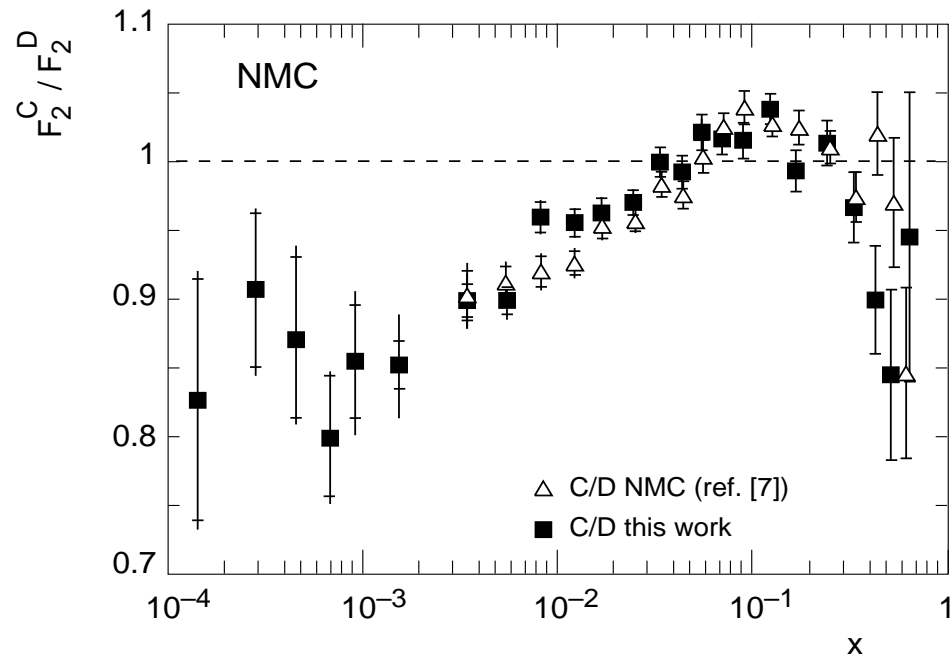
Résultats

Résumé

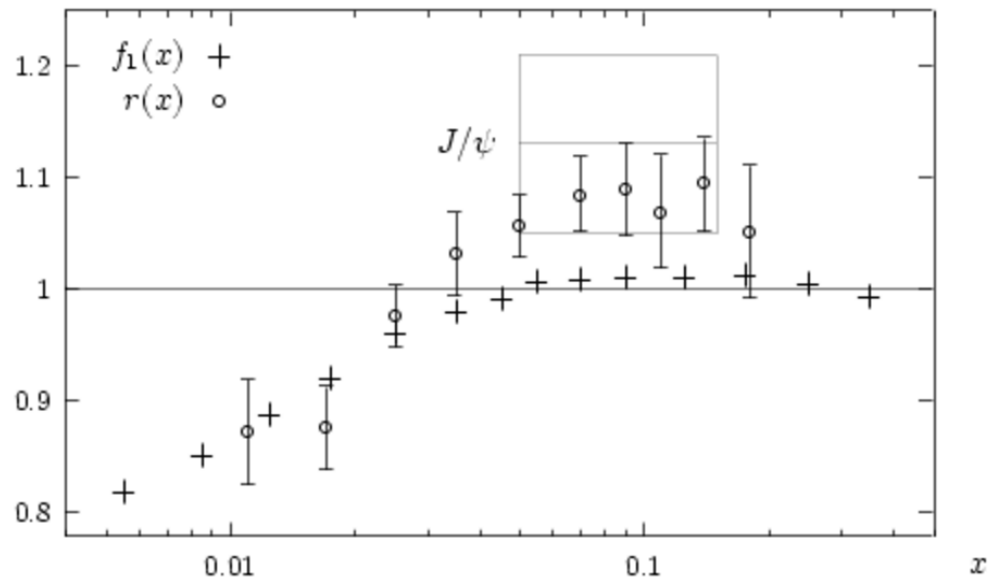
Perspectives

- Calcul perturbatif
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s \alpha)$  en  $p p$  et  $A A$
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s^2 \alpha)$  en  $p p$
- Distribution de partons CTEQ6L
  - ◆ avec / sans shadowing (EKS98)

- Calcul perturbatif
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s \alpha)$  en  $pp$  et  $AA$
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s^2 \alpha)$  en  $pp$
- Distribution de partons CTEQ6L
  - ◆ avec / sans shadowing (EKS98)



- Calcul perturbatif
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s \alpha)$  en  $p p$  et  $A A$
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s^2 \alpha)$  en  $p p$
- Distribution de partons CTEQ6L
  - ◆ avec / sans shadowing (EKS98)







# Ingrédients

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

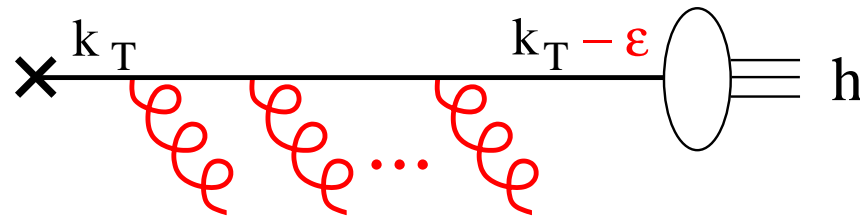
Résumé

Perspectives

- Calcul perturbatif
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s \alpha)$  en  $p p$  et  $A A$
  - ◆ ordre  $\mathcal{O}(\alpha_s^2 \alpha)$  en  $p p$
- Distribution de partons CTEQ6L
  - ◆ avec / sans shadowing (EKS98)
- Fonctions de fragmentation KKP ( $\pi^0$ ) et BFG ( $\gamma$ )
  - ◆ avec / sans pertes d'énergie

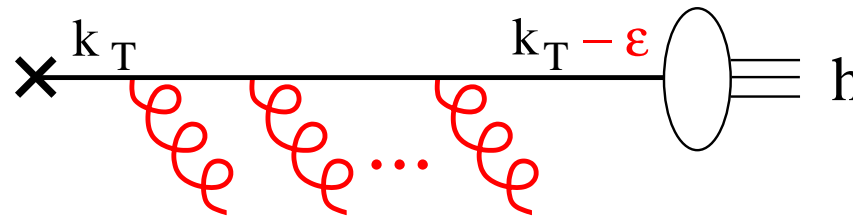
- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- **Modèle**
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Diffusion multiple diminue l'énergie du parton de  $k_{\perp}$  à  $k_{\perp} - \epsilon$



- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- **Modèle**
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Diffusion multiple diminue l'énergie du parton de  $k_{\perp}$  à  $k_{\perp} - \epsilon$



Modèle simple de fonctions de fragmentation modifiées

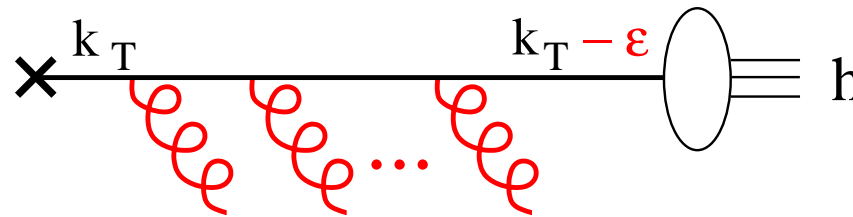
[ Wang, Huang, Sarcevic 1996 ]

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

$$\text{with } z^* = \frac{E_h}{k_{\perp} - \epsilon} = \frac{z}{1 - \epsilon/k_{\perp}}$$

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- **Modèle**
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Diffusion multiple diminue l'énergie du parton de  $k_{\perp}$  à  $k_{\perp} - \epsilon$



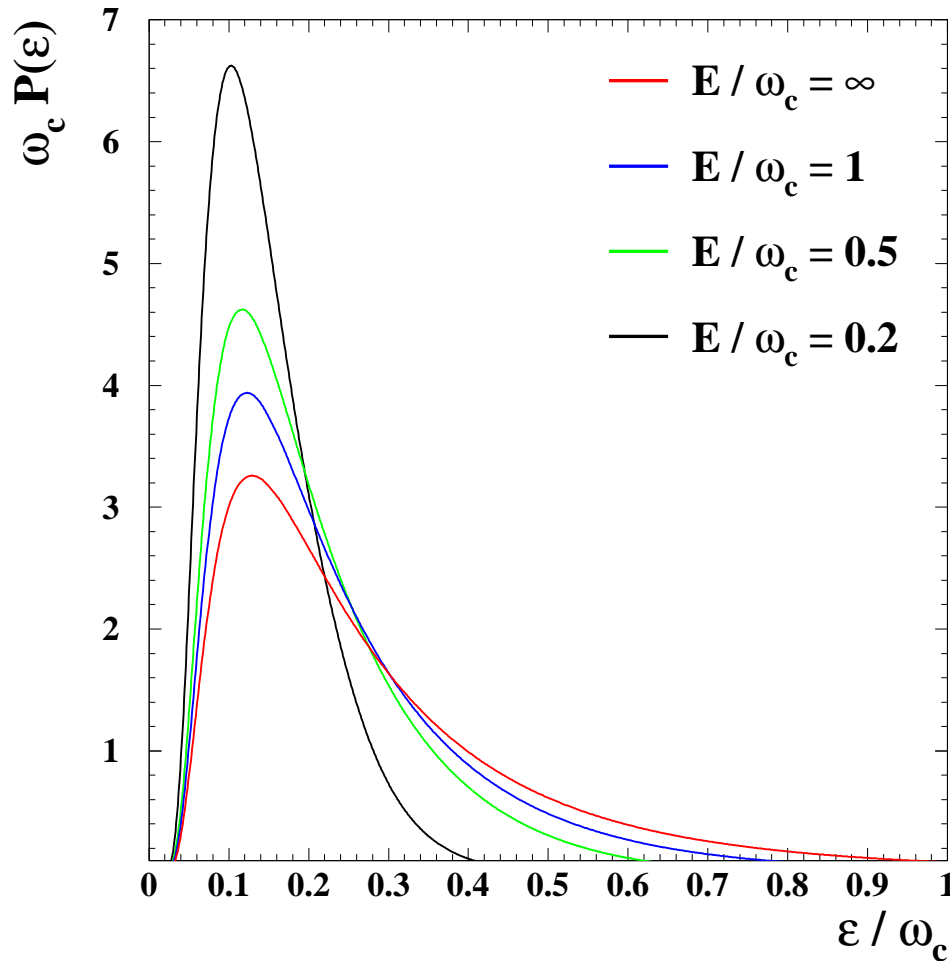
Modèle simple de fonctions de fragmentation modifiées

[ Wang, Huang, Sarcevic 1996 ]

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

$$\text{with } z^* = \frac{E_h}{k_{\perp} - \epsilon} = \frac{z}{1 - \epsilon/k_{\perp}}$$

[ Baier, Dokshitzer, Mueller, Schiff JHEP 2001 ]  
 [ FA JHEP 2002 ]



Echelle

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

- $\hat{q}$ : coeff. transport
- ◆ diffusion  $\mu^2 / \lambda$
- $L$ : longueur

Introduction

Production simple

Corrélations

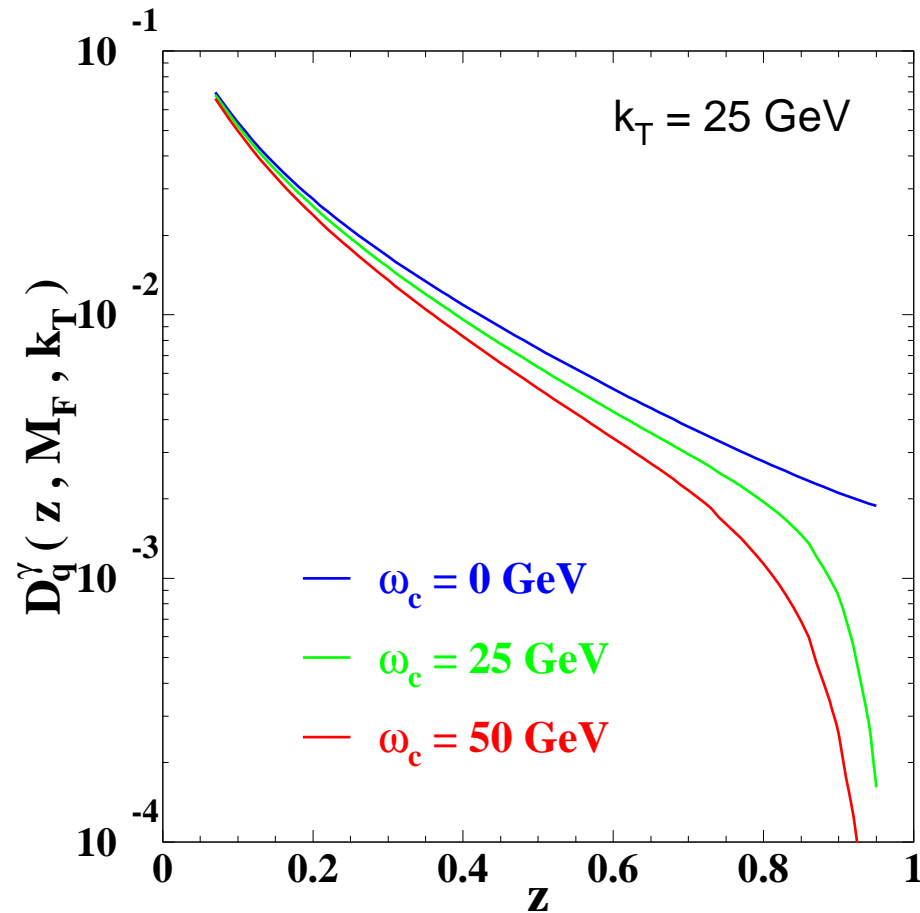
- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- **Fonctions de fragmentation modifiées**
- Coupures cinématiques
- Variables



- Forte suppression à grand  $z$
- Effets prononcés pour des partons  $k_\perp \lesssim \omega_c$



# Coupures cinématiques

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$

Introduction

---

Production simple

---

Corrélations

---

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

---

Résumé

---

Perspectives

---



# Coupures cinématiques

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives





# Coupures cinématiques

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$
- Taux raisonnables

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives



# Coupures cinématiques

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$
- Taux raisonnables
  - ◆  $p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives



# Coupsures cinématiques

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$
- Taux raisonnables
  - ◆  $p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$
- pQCD à l'œuvre

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives



# Coupages cinématiques

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$
- Taux raisonnables
  - ◆  $p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$
- pQCD à l'œuvre
  - ◆  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \gg \Lambda_{\text{QCD}}$

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupages cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$
- Taux raisonnables
  - ◆  $p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$
- pQCD à l'œuvre
  - ◆  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \gg \Lambda_{\text{QCD}}$

$$\Lambda_{\text{QCD}} \ll p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$$

## Contraintes

- Domaine étendu dans la variable  $z_{\gamma\pi}$ 
  - ◆ coupures assymétriques:  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}}$
- Taux raisonnables
  - ◆  $p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$
- pQCD à l'œuvre
  - ◆  $p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \gg \Lambda_{\text{QCD}}$

$$\Lambda_{\text{QCD}} \ll p_{\perp\pi}^{\text{cut}} \ll p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} \ll \sqrt{s}/2$$

## RHIC

$$p_{\perp\pi}^{\text{cut}} = 3 \text{ GeV} \quad p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} = 10 \text{ GeV}$$

## LHC

$$p_{\perp\pi}^{\text{cut}} = 5 \text{ GeV} \quad p_{\perp\gamma}^{\text{cut}} = 25 \text{ GeV}$$



# Variables

## ■ Balance $z_{\gamma\pi}$

$$z_{\gamma\pi} \equiv - \frac{\mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma}}{|\mathbf{p}_{\perp\gamma}|^2}$$

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives



# Variables

## ■ Balance $z_{\gamma\pi}$

$$z_{\gamma\pi} \equiv - \frac{\mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma}}{|\mathbf{p}_{\perp\gamma}|^2}$$

## ■ Impulsion transverse de la paire $q_{\perp}$

$$q_{\perp} = |\mathbf{p}_{\perp\pi} + \mathbf{p}_{\perp\gamma}|$$

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives





# Variables

Introduction

Production simple

Corrélations

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

Résultats

Résumé

Perspectives

## ■ Balance $z_{\gamma\pi}$

$$z_{\gamma\pi} \equiv - \frac{\mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma}}{|\mathbf{p}_{\perp\gamma}|^2}$$

## ■ Impulsion transverse de la paire $q_{\perp}$

$$q_{\perp} = |\mathbf{p}_{\perp\pi} + \mathbf{p}_{\perp\gamma}|$$

## ■ Masse invariante

$$m_{\pi\gamma}^2 = 2 \left[ p_{\perp\pi} p_{\perp\gamma} \operatorname{ch}(y_{\pi} - y_{\gamma}) - \mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma} \right]$$

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

## ■ Balance $z_{\gamma\pi}$

$$z_{\gamma\pi} \equiv - \frac{\mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma}}{|\mathbf{p}_{\perp\gamma}|^2}$$

## ■ Impulsion transverse de la paire $q_{\perp}$

$$q_{\perp} = |\mathbf{p}_{\perp\pi} + \mathbf{p}_{\perp\gamma}|$$

## ■ Masse invariante

$$m_{\pi\gamma}^2 = 2 \left[ p_{\perp\pi} p_{\perp\gamma} \text{ch}(y_{\pi} - y_{\gamma}) - \mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma} \right]$$

## Contraintes additionnelles

- ordre dominant en  $\alpha_s$
- production à mi-rapacité:  $y_{\gamma} = y_{\pi} = 0$
- photon produit directement:  $p_{\perp\gamma} = k_{\perp}$

- Corrélations
- Calcul perturbatif
- Ingrédients
- Modèle
- Distribution de probabilité
- Fonctions de fragmentation modifiées
- Coupures cinématiques
- Variables

## ■ Balance $z_{\gamma\pi}$

$$z_{\gamma\pi} \equiv -\frac{\mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma}}{|\mathbf{p}_{\perp\gamma}|^2} = \frac{k_{\perp}}{p_{\perp\pi}} \equiv z$$

## ■ Impulsion transverse de la paire $q_{\perp}$

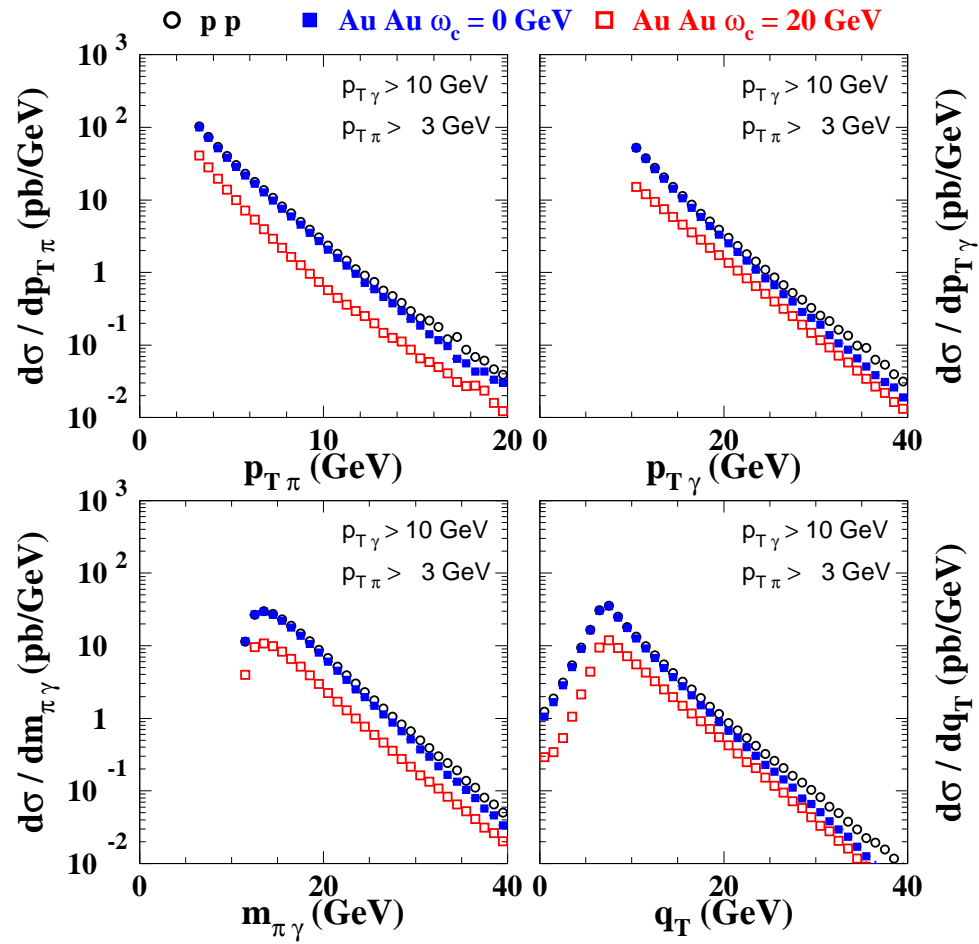
$$q_{\perp} = |\mathbf{p}_{\perp\pi} + \mathbf{p}_{\perp\gamma}| = k_{\perp} |1 - z|$$

## ■ Masse invariante

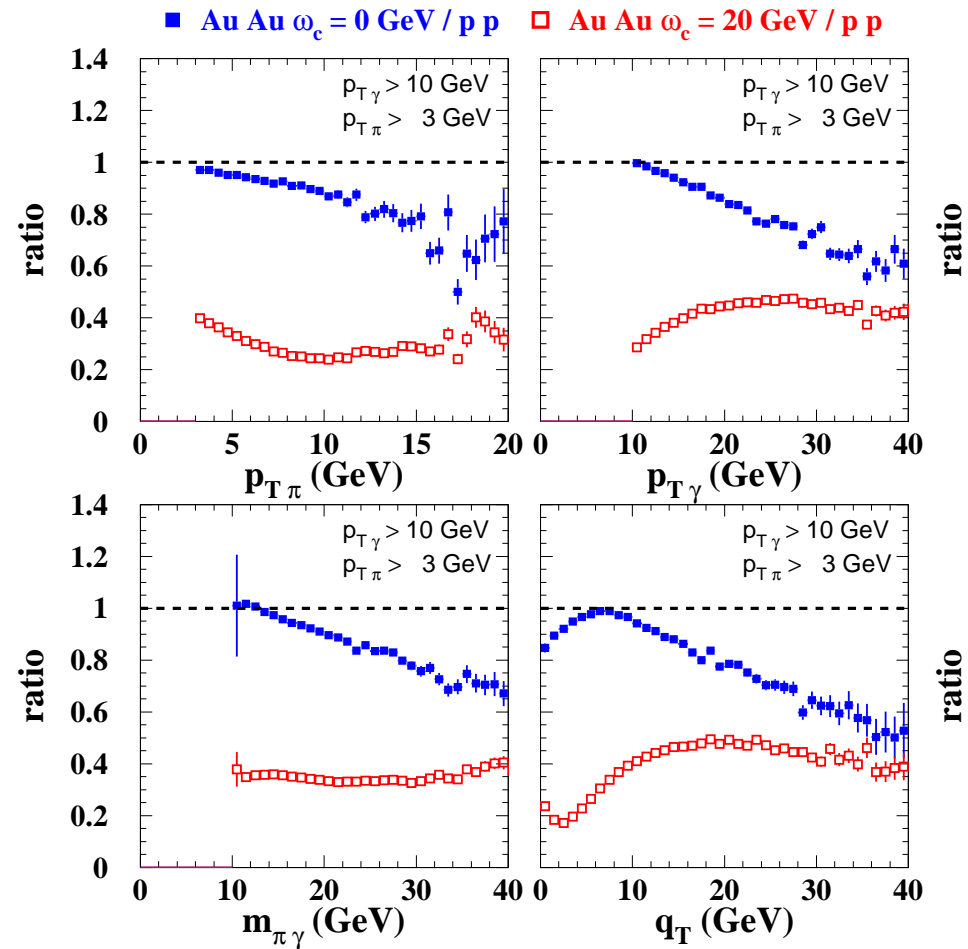
$$m_{\pi\gamma}^2 = 2 \left[ p_{\perp\pi} p_{\perp\gamma} \text{ch}(y_{\pi} - y_{\gamma}) - \mathbf{p}_{\perp\pi} \cdot \mathbf{p}_{\perp\gamma} \right] = 4 k_{\perp}^2 z$$

Combinaison des variables  $k_{\perp}$  et  $z$  uniquement

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

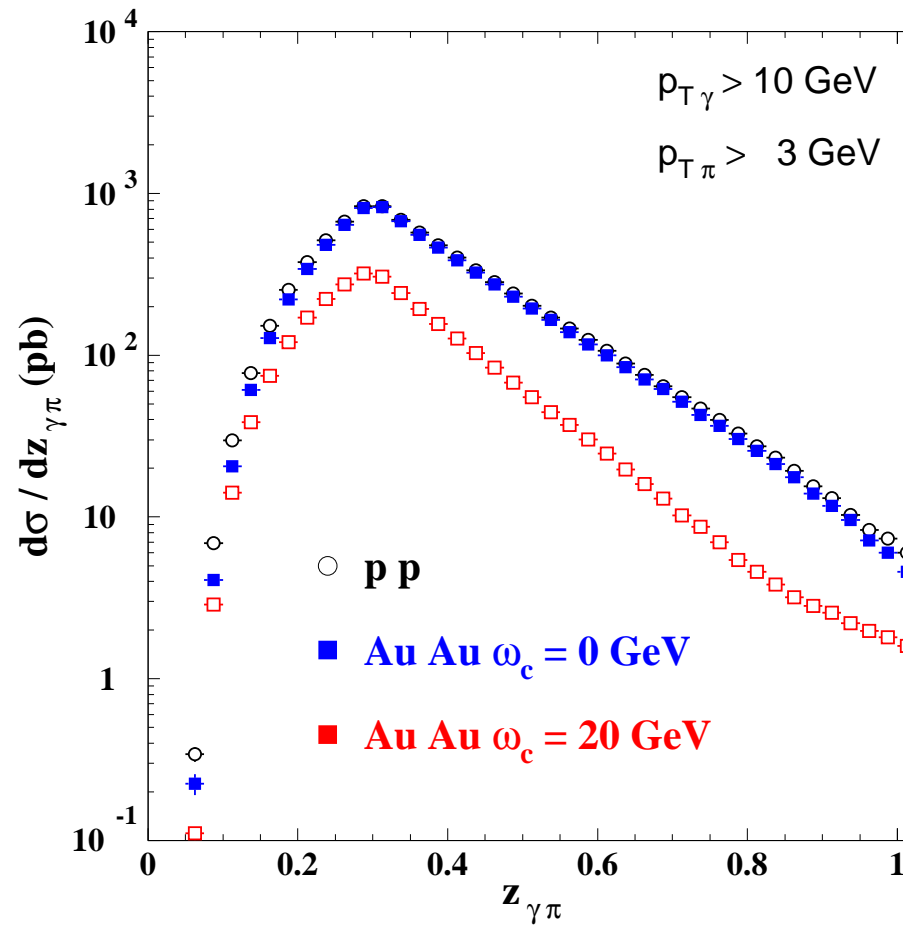


- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



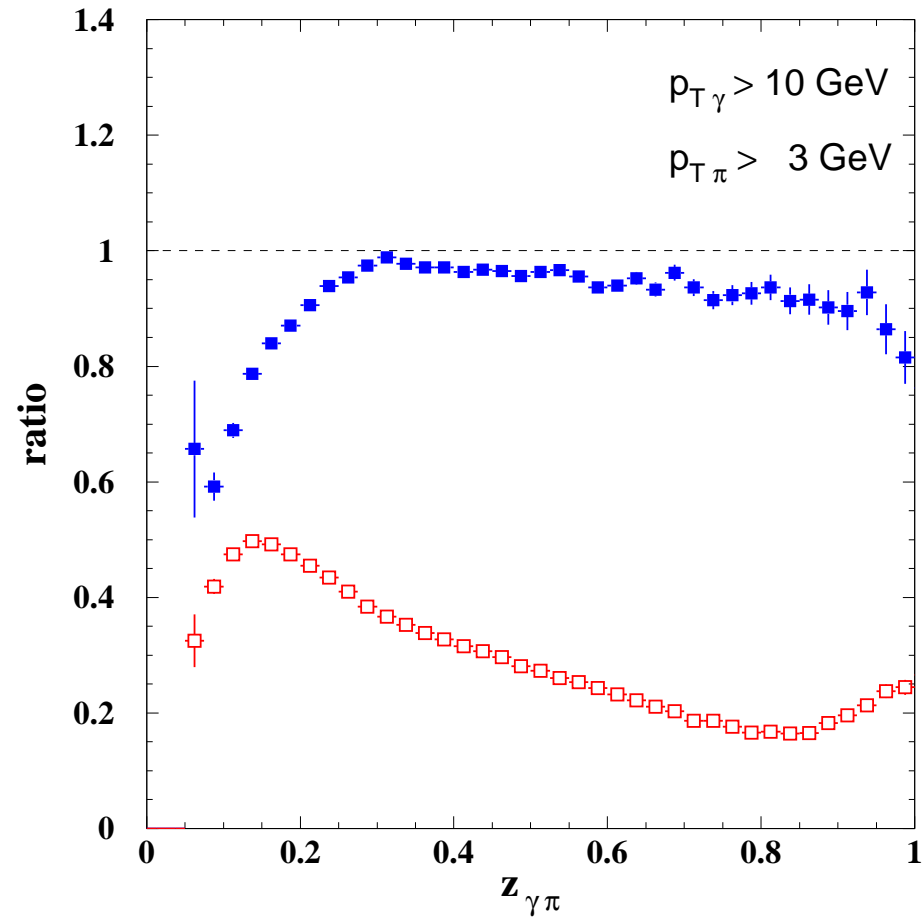
- Effet significatif à RHIC
- Pertes d'énergie et shadowing très différents

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



- Reflète les fonctions de fragmentation
- Effets très prononcés à grand  $z$

■ Au Au  $\omega_c = 0$  GeV / p p    □ Au Au  $\omega_c = 20$  GeV / p p



- Reflète les fonctions de fragmentation
- Effets très prononcés à grand  $z$

Introduction

Production simple

Corrélations

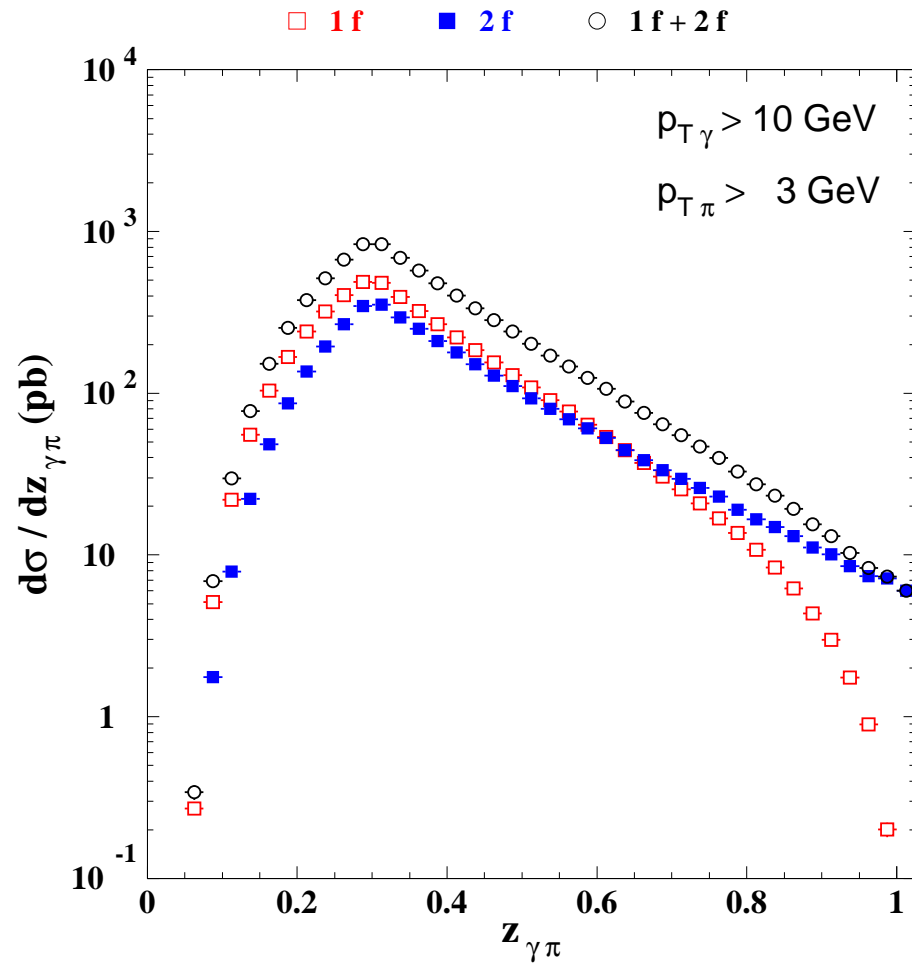
Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives

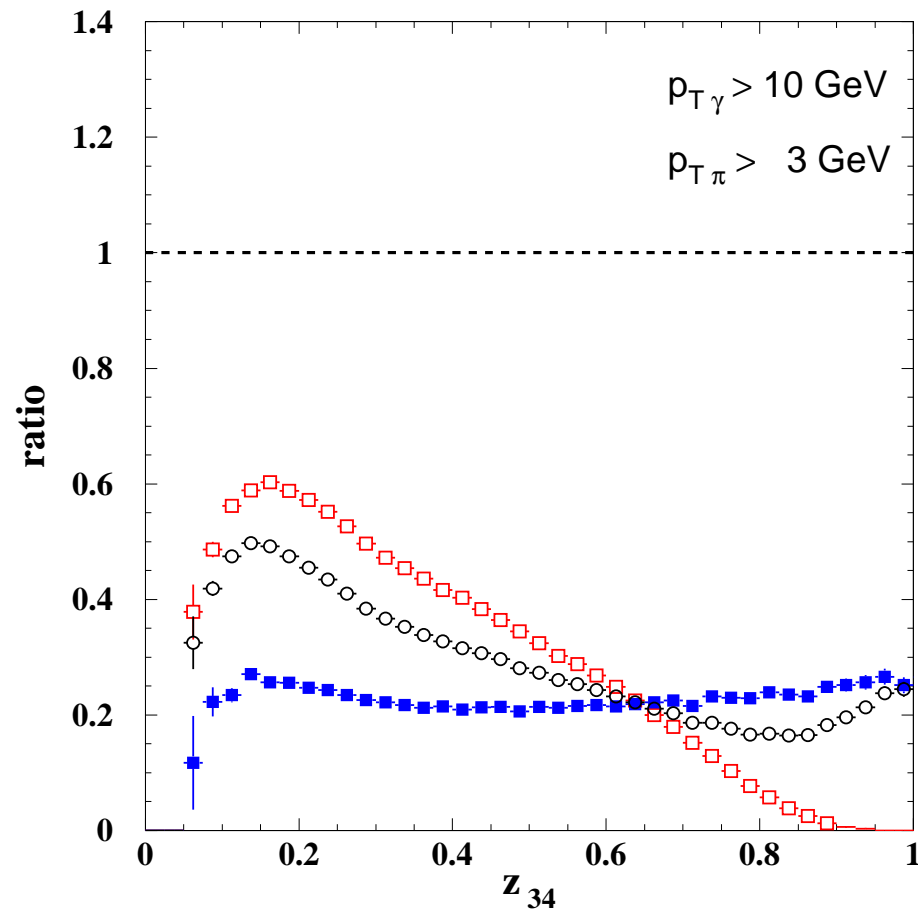
- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



- Double fragmentation  $\gtrsim$  simple fragmentation à RHIC
- Importance de la dynamique dans la suppression

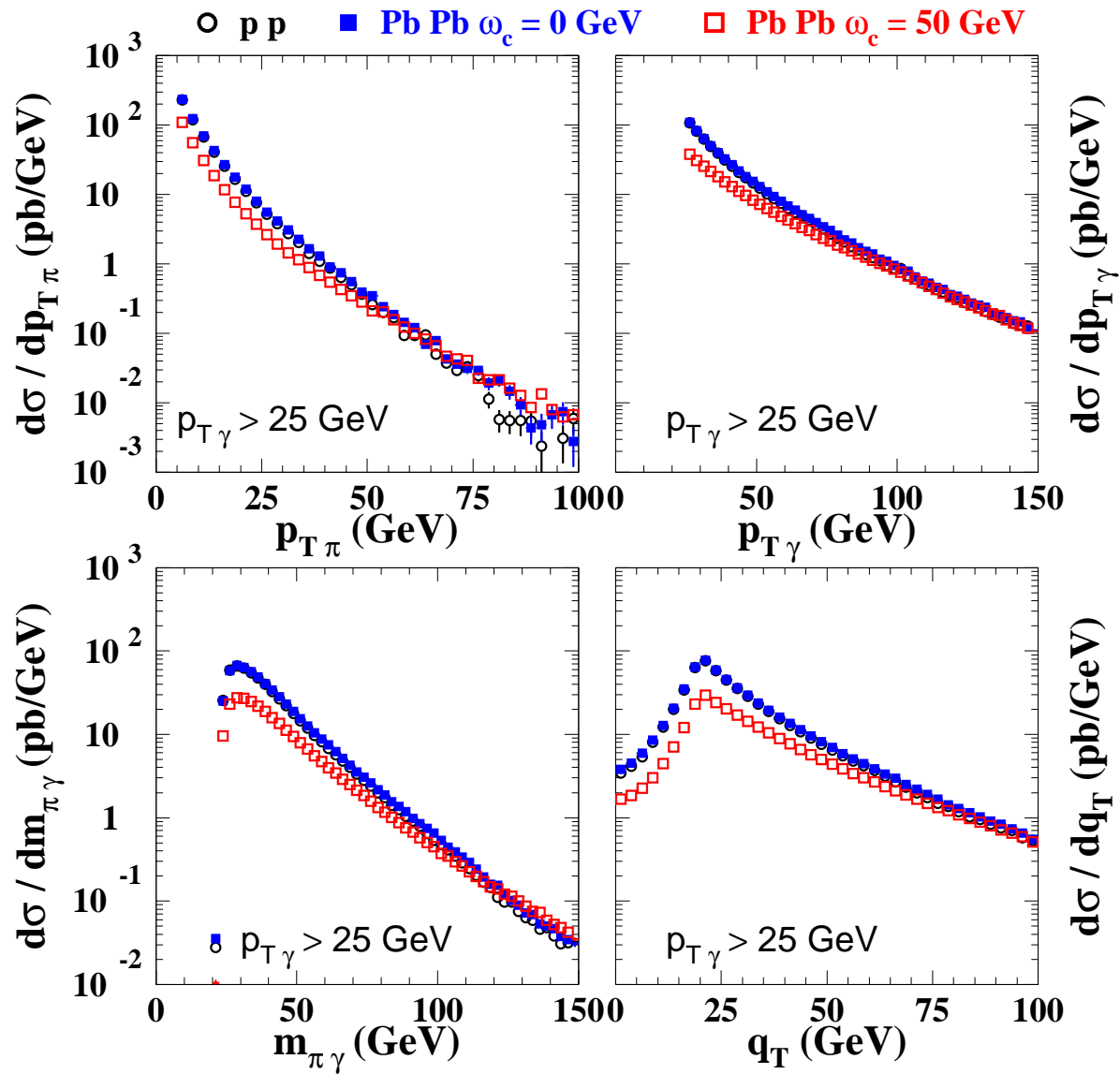


- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

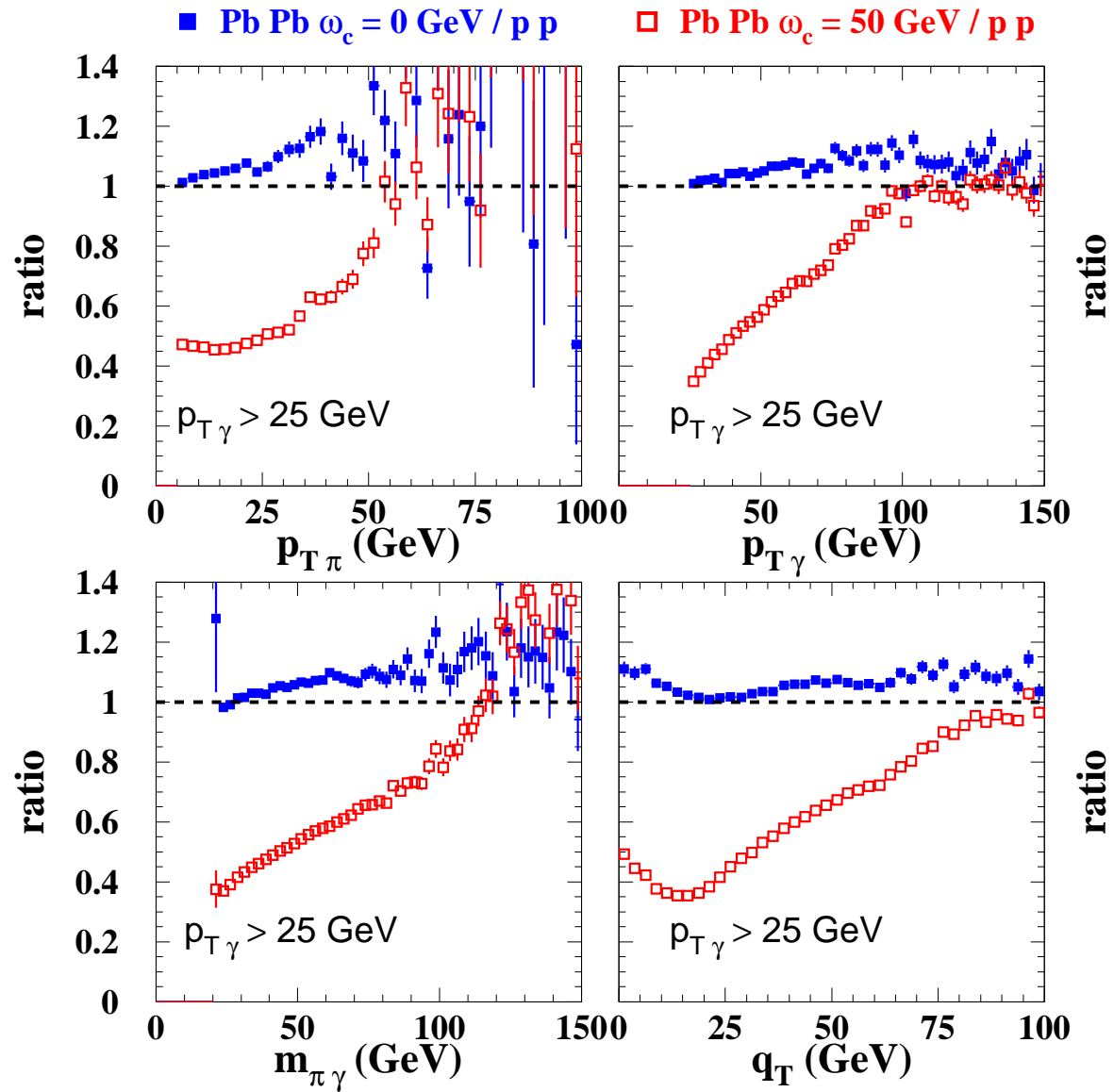


- Double fragmentation  $\gtrsim$  simple fragmentation à RHIC
- Importance de la dynamique dans la suppression

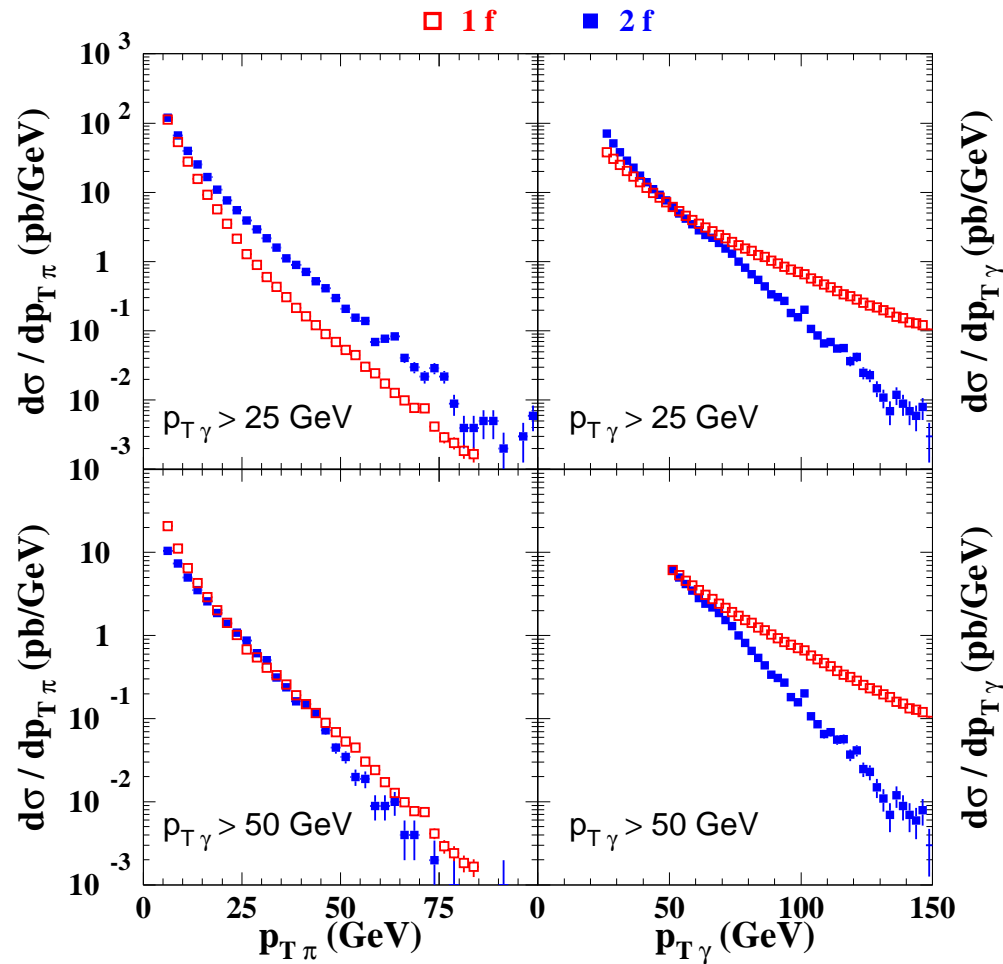
- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

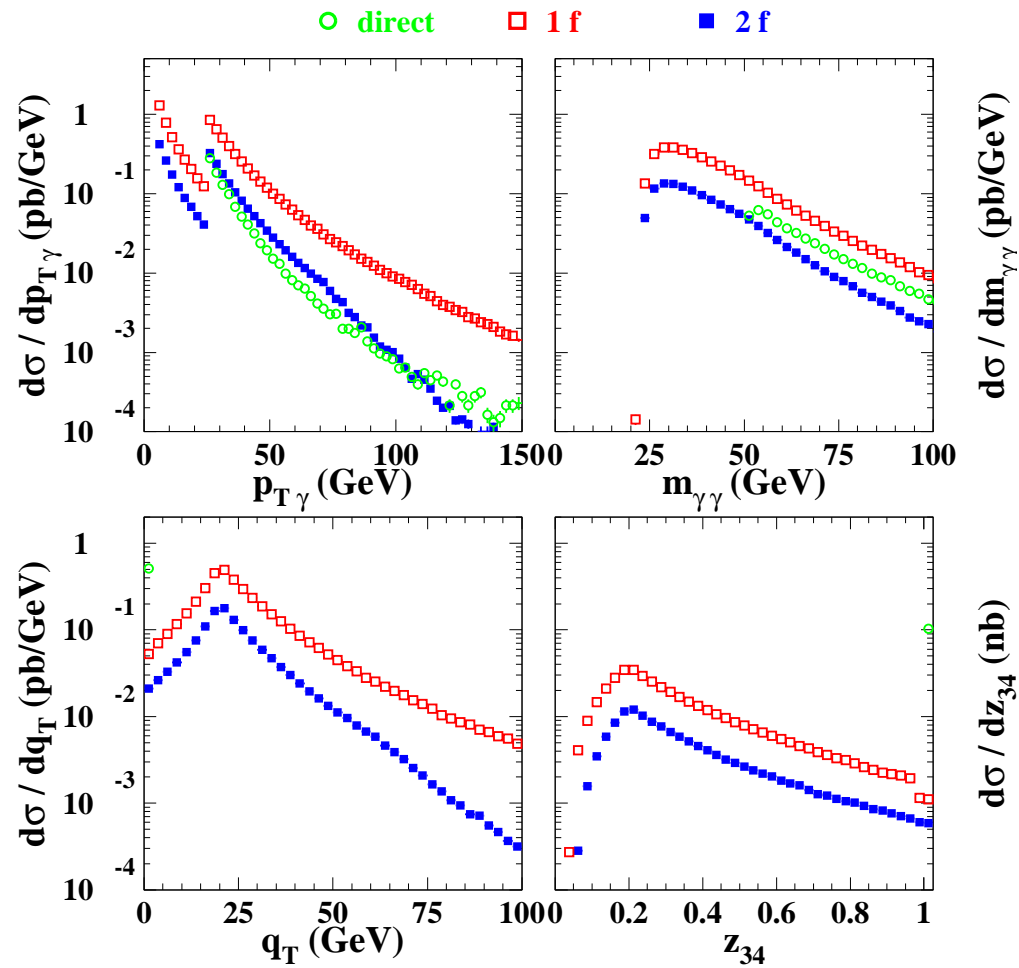


- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



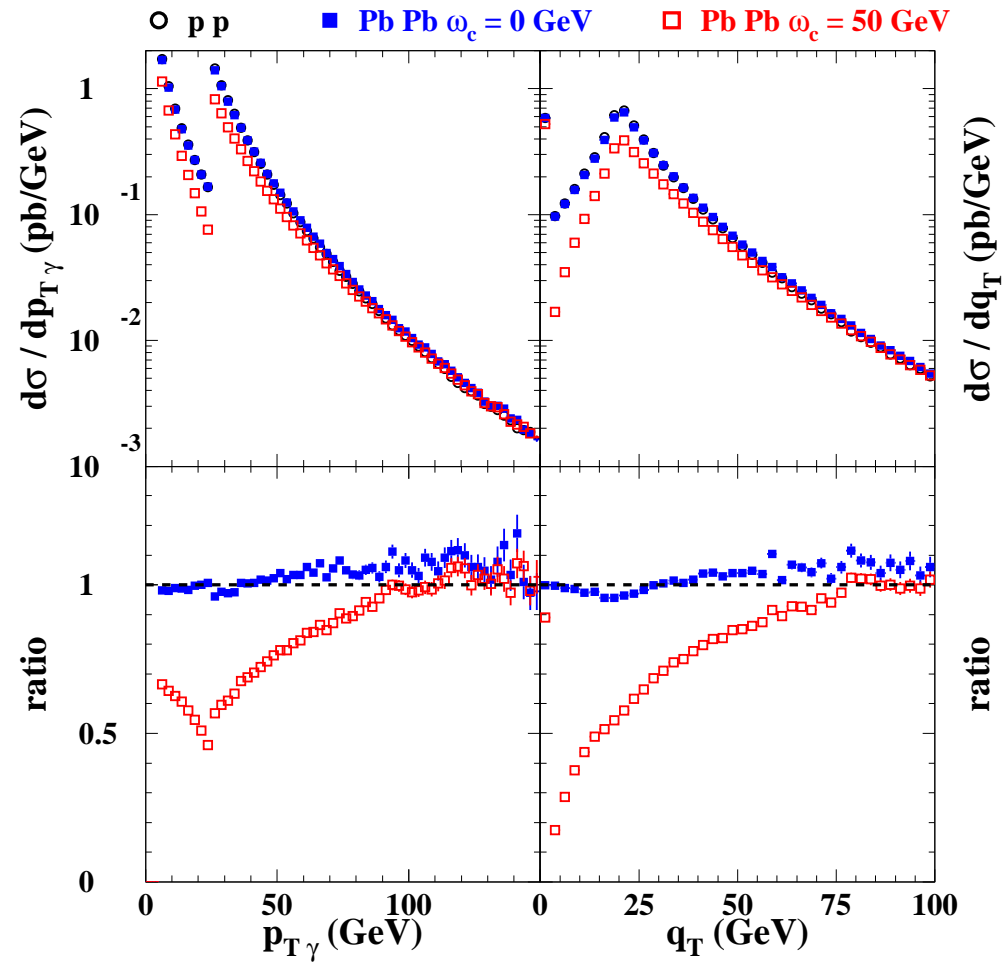
- Production  $\gamma - \pi^0$  dominée par la double fragmentation
- Coupures cinématiques cruciales

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



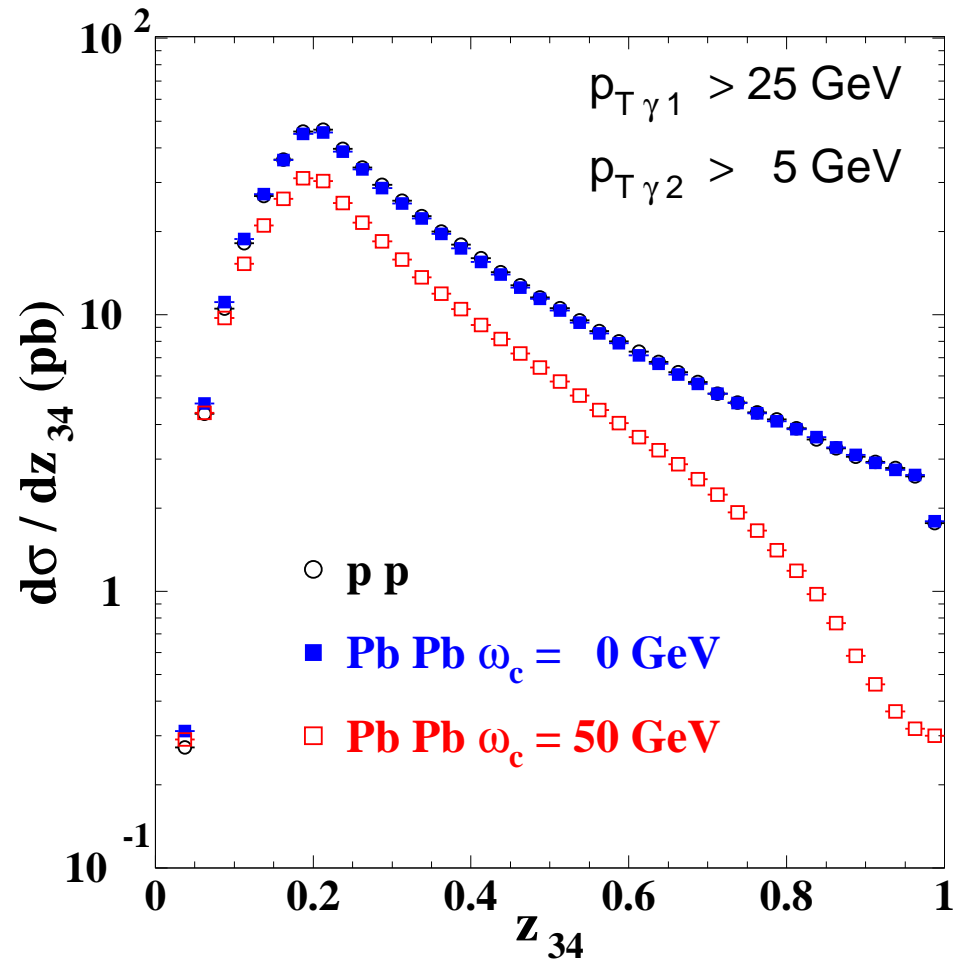
■ Différence importante de  $\gamma - \pi^0$  à  $\gamma - \gamma$

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



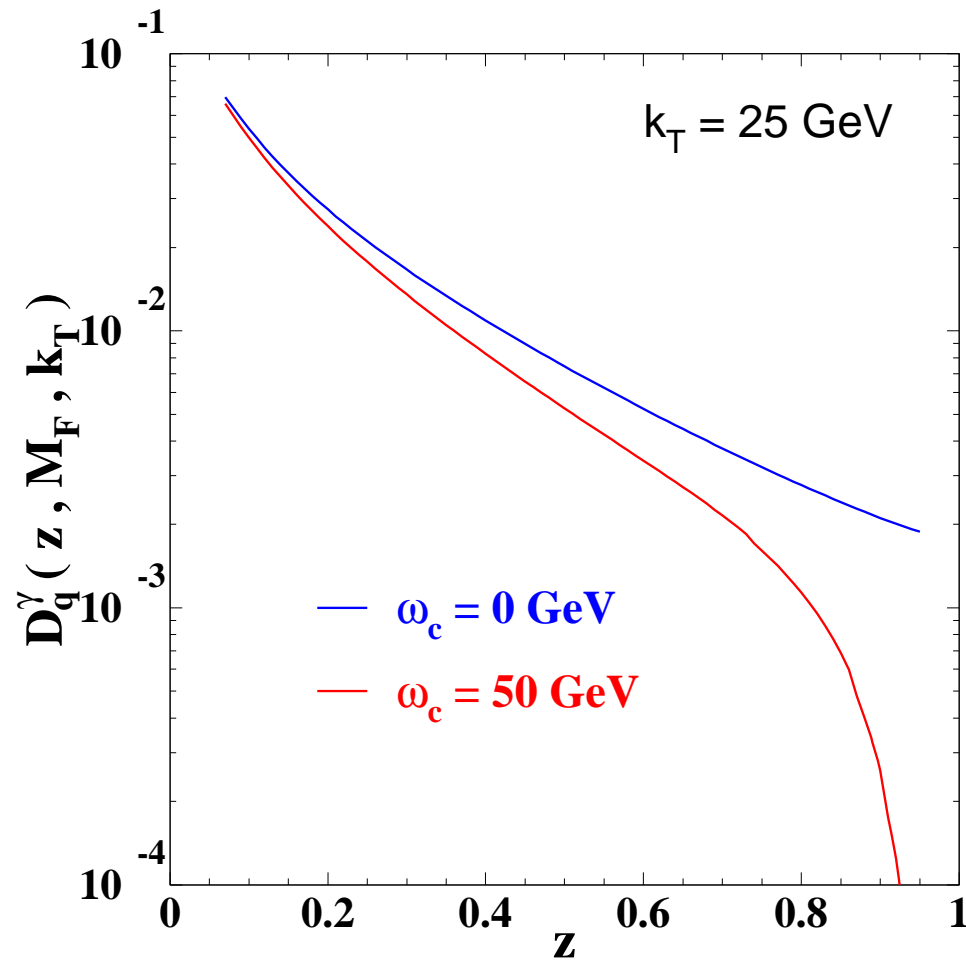
## ■ Structures intéressantes de la suppression

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



- Rappelle les fonctions de fragmentation  $D_{\gamma/k}^{\text{med}}(z, \mu)$

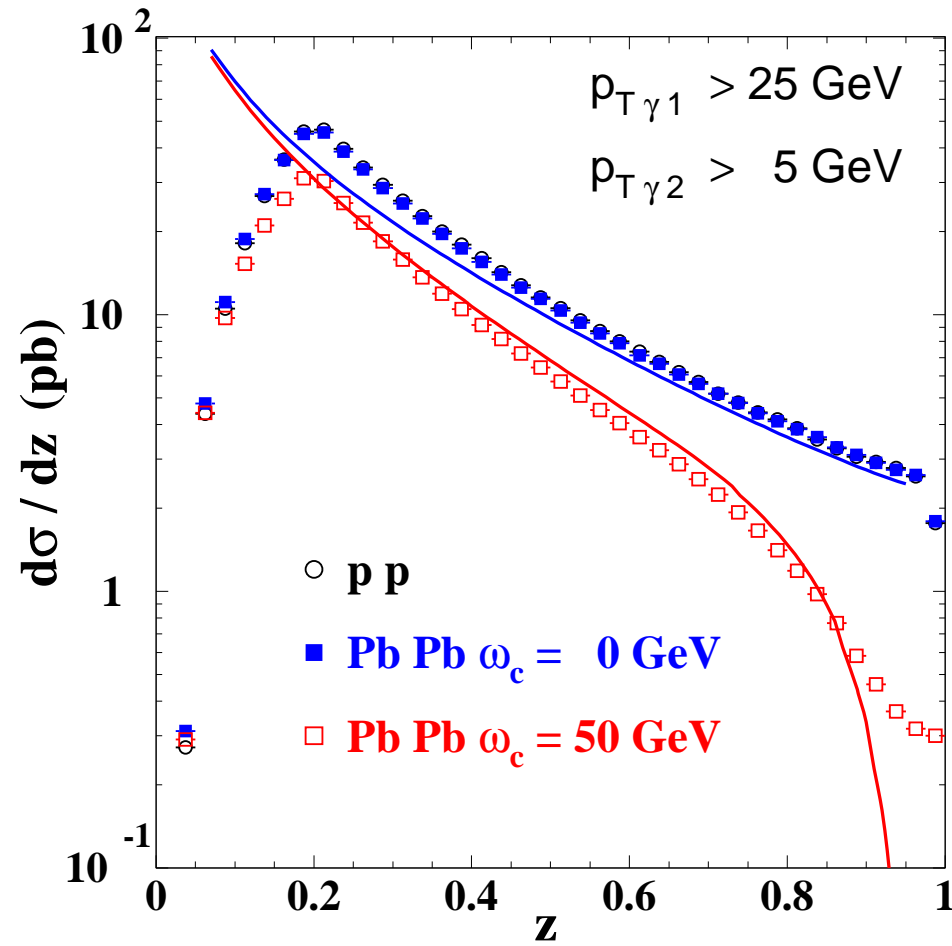
- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



- Rappelle les fonctions de fragmentation  $D_{\gamma/k}^{\text{med}}(z, \mu)$



- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage



- Rappelle les fonctions de fragmentation  $D_{\gamma/k}^{\text{med}}(z, \mu)$

# Corrections d'ordre supérieur

Introduction

Production simple

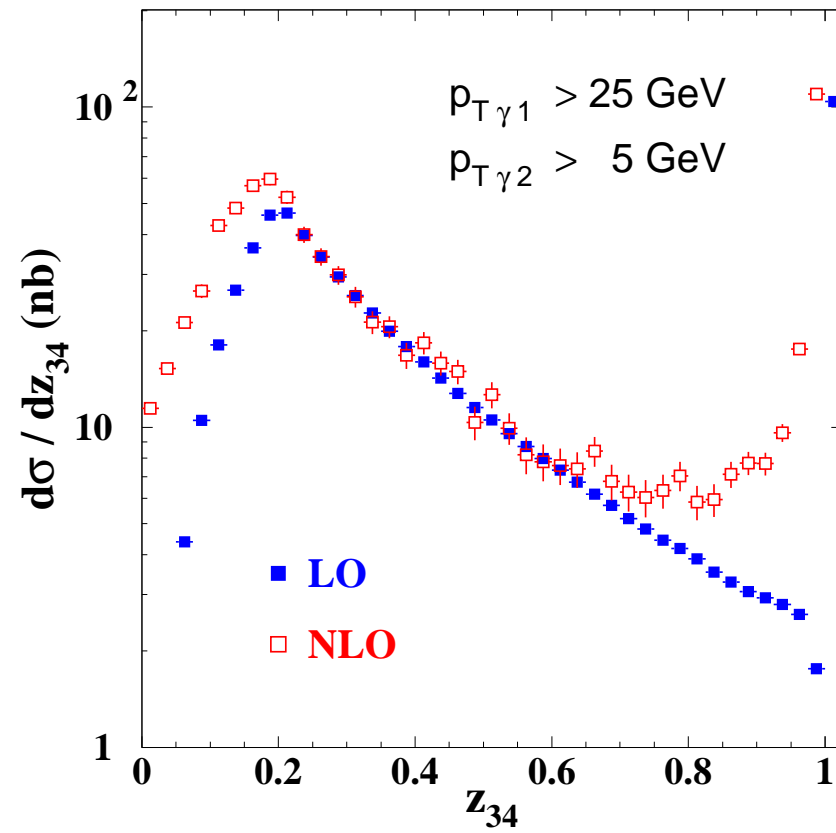
Corrélations

Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives



# Corrections d'ordre supérieur

Introduction

Production simple

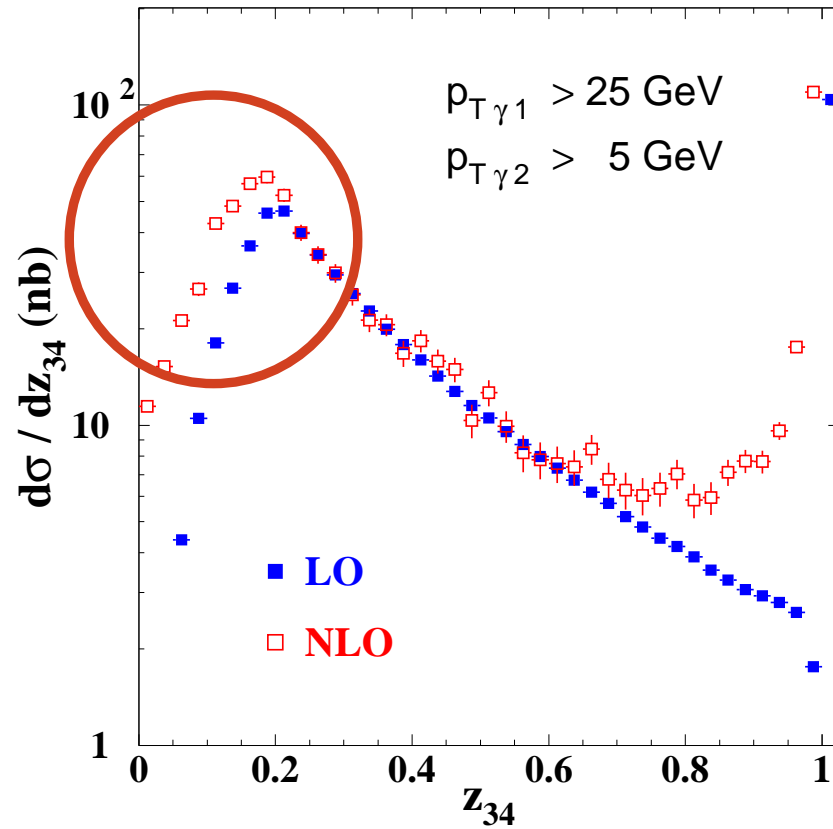
Corrélations

Résultats

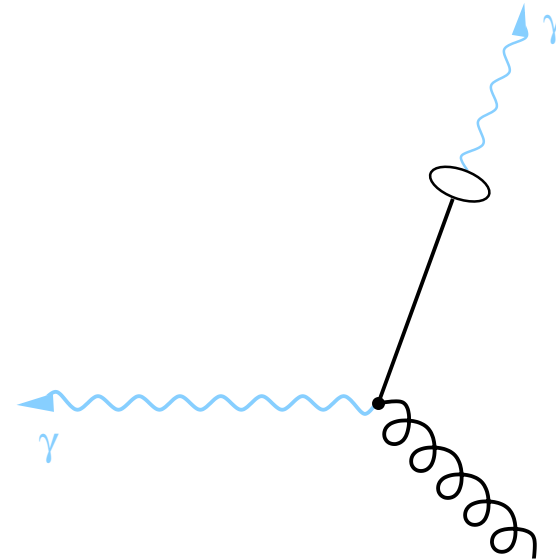
- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives



## ■ Nouvelles configurations



# Corrections d'ordre supérieur

Introduction

Production simple

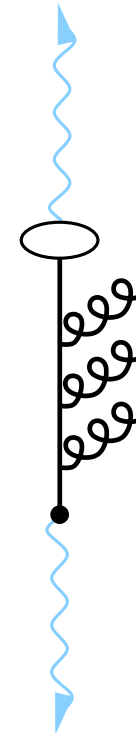
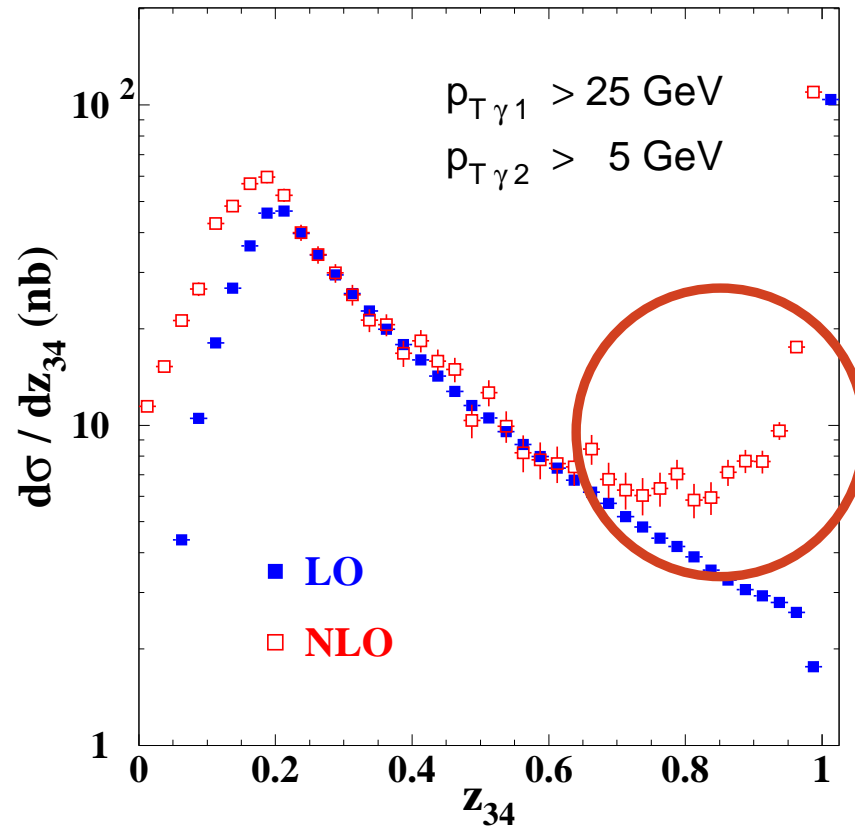
Corrélations

Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives



- Nouvelles configurations
- Sensibilité infrarouge à  $z_{\gamma\pi} \lesssim 1$

# Corrections d'ordre supérieur

Introduction

Production simple

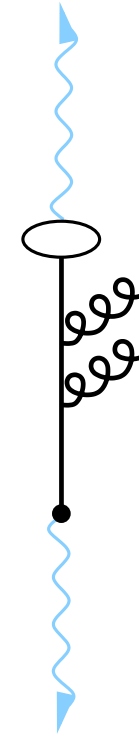
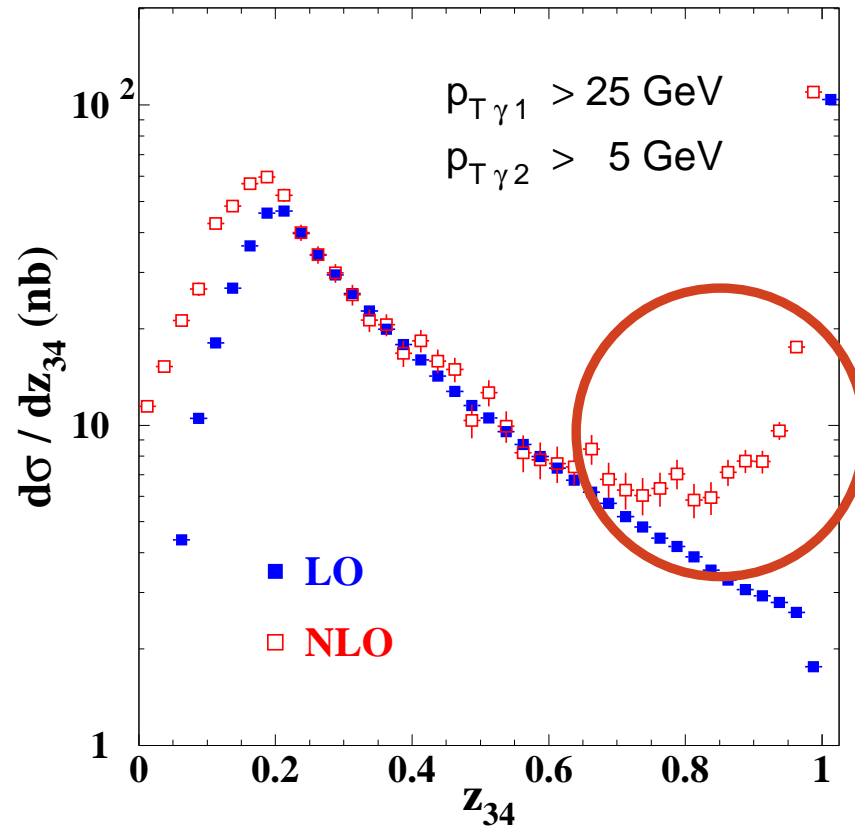
Corrélations

Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives



- Nouvelles configurations
- Sensibilité infrarouge à  $z_{\gamma\pi} \lesssim 1$

# Corrections d'ordre supérieur

Introduction

Production simple

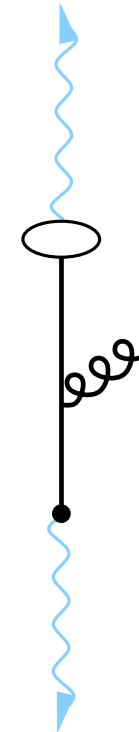
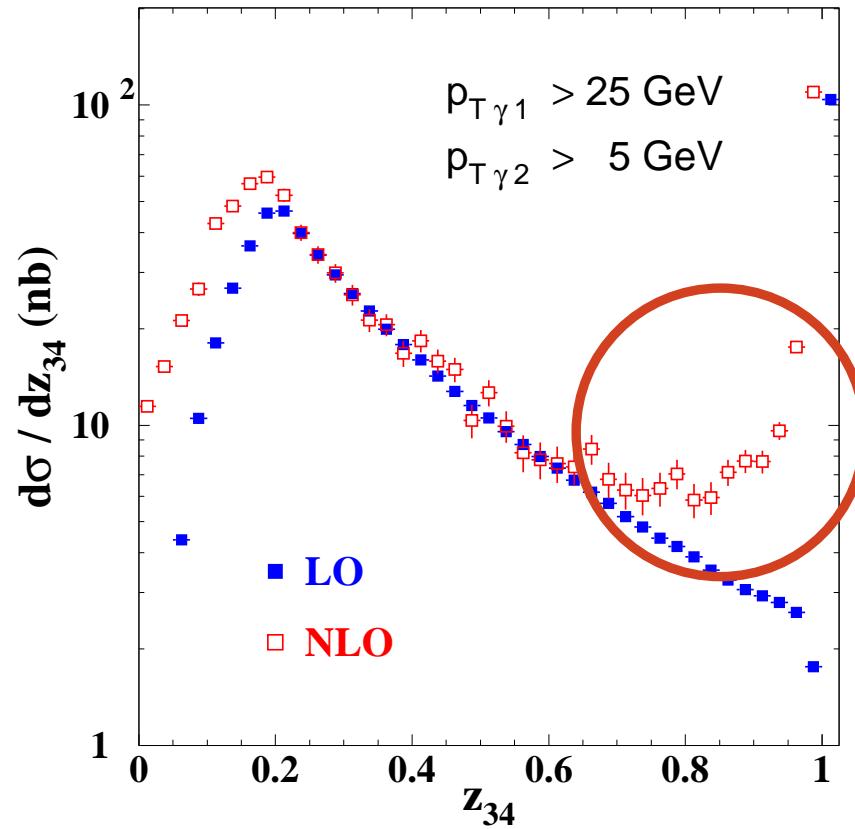
Corrélations

Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives



- Nouvelles configurations
- Sensibilité infrarouge à  $z_{\gamma\pi} \lesssim 1$



# Taux de comptage

$$d\mathcal{N}_{AA}^{\text{hard}}|_c = \mathcal{L}_{\text{int}} \langle N_{\text{coll}} \rangle|_c \times \frac{\sigma_{AA}^{\text{geo}}}{\sigma_{NN}} \times \sigma_{NN}^{\text{hard}} \times \mathcal{C}$$

Pour des collisions Au-Au  $\mathcal{C} \leq 20\%$  à  $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$

$$\langle N_{\text{coll}} \rangle|_c = 1558 \quad \sigma_{\text{AuAu}}^{\text{geo}} = 6900 \text{ mb} \quad \sigma_{NN} = 42 \text{ mb}$$

Luminosité RHIC (1-mois)

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 7.10^{32} \text{ cm}^{-2}$$

Introduction

Production simple

Corrélations

Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

$$d\mathcal{N}_{AA}^{\text{hard}}|_c = \mathcal{L}_{\text{int}} \langle N_{\text{coll}} \rangle|_c \times \frac{\sigma_{AA}^{\text{geo}}}{\sigma_{NN}} \times \sigma_{NN}^{\text{hard}} \times \mathcal{C}$$

Pour des collisions Au-Au  $\mathcal{C} \leq 20\%$  à  $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$

$$\langle N_{\text{coll}} \rangle|_c = 1558 \quad \sigma_{\text{AuAu}}^{\text{geo}} = 6900 \text{ mb} \quad \sigma_{NN} = 42 \text{ mb}$$

Luminosité RHIC (1-mois)

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 7.10^{32} \text{ cm}^{-2}$$

$\gamma - \pi^0$

$$d\sigma/dp_{\perp\gamma} \sim 1 - 10^2 \text{ pb/GeV} \quad \rightarrow \quad d\mathcal{N}/dp_{\perp\gamma} \sim 40 - 4.10^3 / \text{GeV}$$

$$d\sigma/dz_{34} \sim 10 - 10^3 \text{ pb} \quad \rightarrow \quad d\mathcal{N}/dz_{34} \sim 400 - 4.10^4$$





# Taux de comptage

$$d\mathcal{N}_{AA}^{\text{hard}}|_c = \mathcal{L}_{\text{int}} \langle N_{\text{coll}} \rangle|_c \times \frac{\sigma_{AA}^{\text{geo}}}{\sigma_{NN}} \times \sigma_{NN}^{\text{hard}} \times \mathcal{C}$$

Pour des collisions Pb-Pb  $\mathcal{C} \leq 20\%$  à  $\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$

$$\langle N_{\text{coll}} \rangle|_c = 2690 \quad \sigma_{\text{PbPb}}^{\text{geo}} = 7745 \text{ mb} \quad \sigma_{NN} = 72 \text{ mb}$$

Luminosité LHC (1-mois)

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 5.10^{32} \text{ cm}^{-2}$$

Introduction

Production simple

Corrélations

Résultats

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

Résumé

Perspectives

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

$$d\mathcal{N}_{AA}^{\text{hard}}|_c = \mathcal{L}_{\text{int}} \langle N_{\text{coll}} \rangle|_c \times \frac{\sigma_{AA}^{\text{geo}}}{\sigma_{NN}} \times \sigma_{NN}^{\text{hard}} \times \mathcal{C}$$

Pour des collisions Pb-Pb  $\mathcal{C} \leq 20\%$  à  $\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$

$$\langle N_{\text{coll}} \rangle|_c = 2690 \quad \sigma_{\text{PbPb}}^{\text{geo}} = 7745 \text{ mb} \quad \sigma_{NN} = 72 \text{ mb}$$

Luminosité LHC (1-mois)

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 5.10^{32} \text{ cm}^{-2}$$

$\gamma - \pi^0$

$$d\sigma/dp_{\perp\gamma} \sim 1 - 10^2 \text{ pb/GeV} \quad \rightarrow \quad d\mathcal{N}/dp_{\perp\gamma} \sim 30 - 3.10^3 / \text{GeV}$$

$$d\sigma/dz_{\gamma\pi} \sim 10^2 - 10^4 \text{ pb} \quad \rightarrow \quad d\mathcal{N}/dz_{\gamma\pi} \sim 10^3 - 10^5$$

- RHIC
- LHC
- Corrections d'ordre supérieur
- Taux de comptage

$$d\mathcal{N}_{AA}^{\text{hard}}|_c = \mathcal{L}_{\text{int}} \langle N_{\text{coll}} \rangle|_c \times \frac{\sigma_{AA}^{\text{geo}}}{\sigma_{NN}} \times \sigma_{NN}^{\text{hard}} \times \mathcal{C}$$

Pour des collisions Pb-Pb  $\mathcal{C} \leq 20\%$  à  $\sqrt{s} = 5.5 \text{ TeV}$

$$\langle N_{\text{coll}} \rangle|_c = 2690 \quad \sigma_{\text{PbPb}}^{\text{geo}} = 7745 \text{ mb} \quad \sigma_{NN} = 72 \text{ mb}$$

Luminosité LHC (1-mois)

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = 5.10^{32} \text{ cm}^{-2}$$

$\gamma - \gamma$

$$d\sigma/dp_{\perp\gamma} \sim 10^{-2} - 1 \text{ pb/GeV} \quad \rightarrow \quad d\mathcal{N}/dp_{\perp\gamma} \sim 0.3 - 30 / \text{GeV}$$

$$d\sigma/dz_{\gamma\pi} \sim 1 - 10^2 \text{ pb} \quad \rightarrow \quad d\mathcal{N}/dz_{\gamma\pi} \sim 30 - 3.10^3$$



# Conclusions

Introduction

Production simple

Corrélations

Résultats

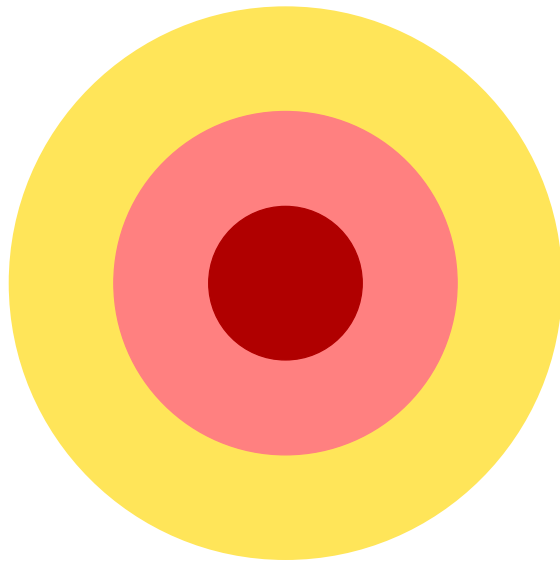
Résumé

● Conclusions

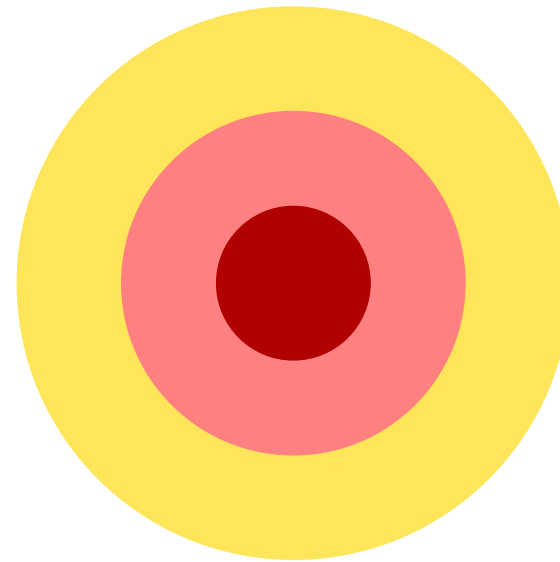
Perspectives

- Production simple inclusive
  - ◆ mise en évidence d'un milieu dense
  - ◆ importante phénoménologie
  - ◆ limites
  
- Corrélations  $\gamma - \pi^0$ 
  - ◆ subtil équilibre !
  - ◆ sonde efficacement le processus de fragmentation
  - ◆ phénoménologie à RHIC et LHC

Position du vertex en  $\pi^0 - \pi^0$  vs.  $\gamma - \pi^0$



$\pi^0$  tag



$\gamma$  tag

Introduction

Production simple

Corrélations

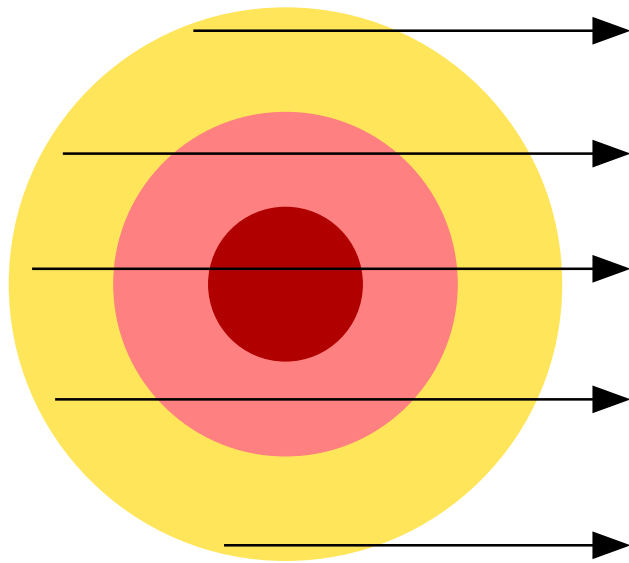
Résultats

Résumé

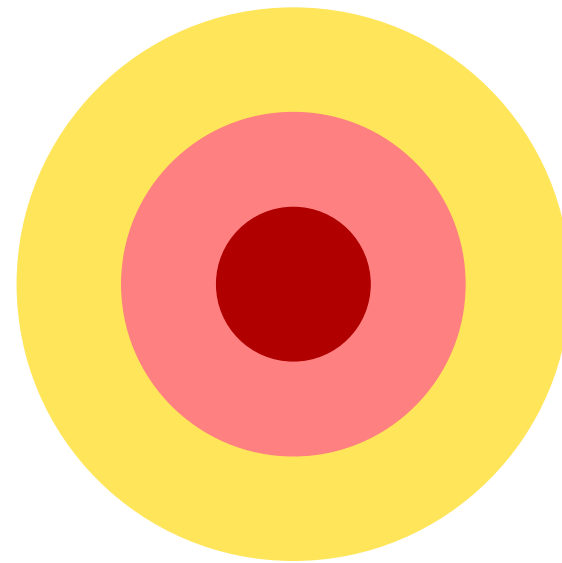
Perspectives

● Géométrie

## Position du vertex en $\pi^0 - \pi^0$ vs. $\gamma - \pi^0$



$\pi^0$  tag



$\gamma$  tag

Introduction

Production simple

Corrélations

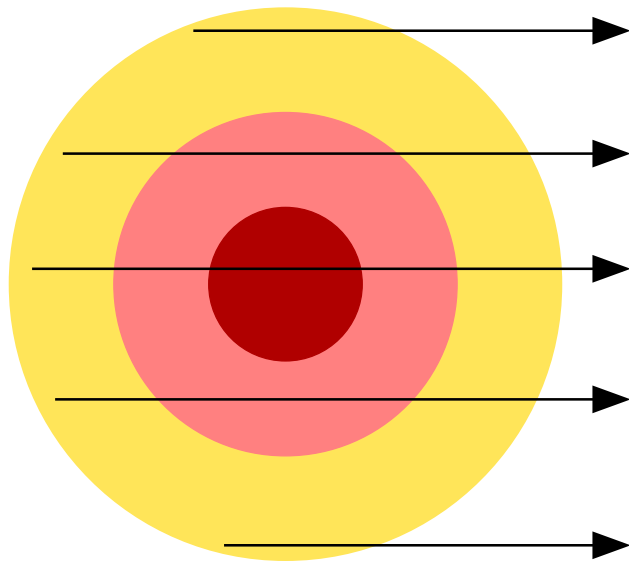
Résultats

Résumé

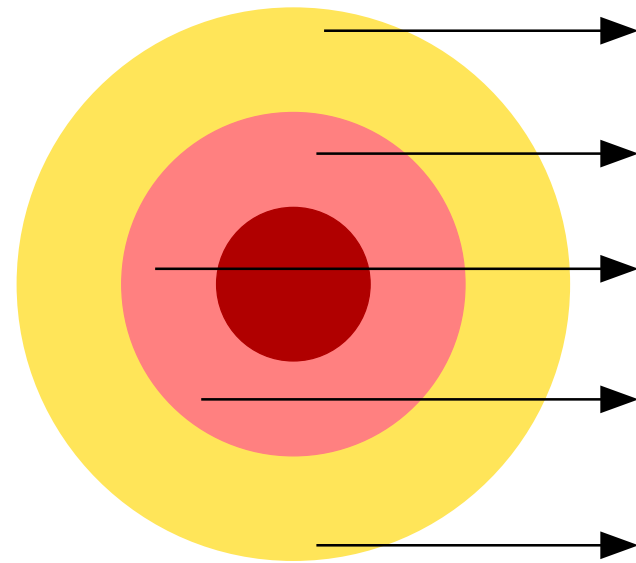
Perspectives

● Géométrie

## Position du vertex en $\pi^0 - \pi^0$ vs. $\gamma - \pi^0$

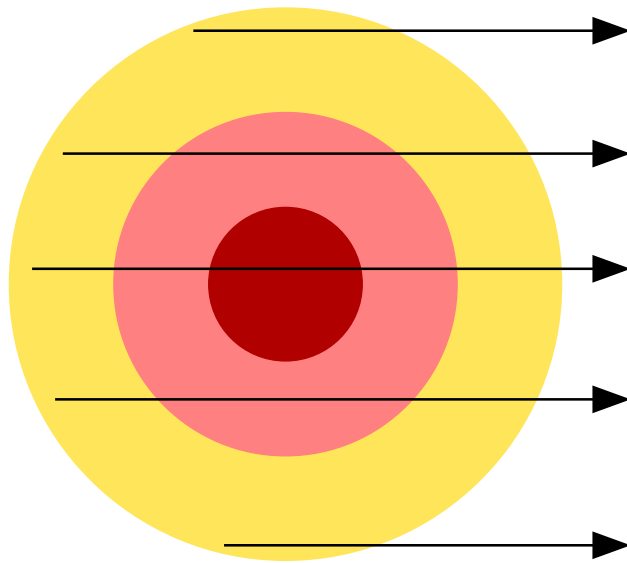


$\pi^0$  tag

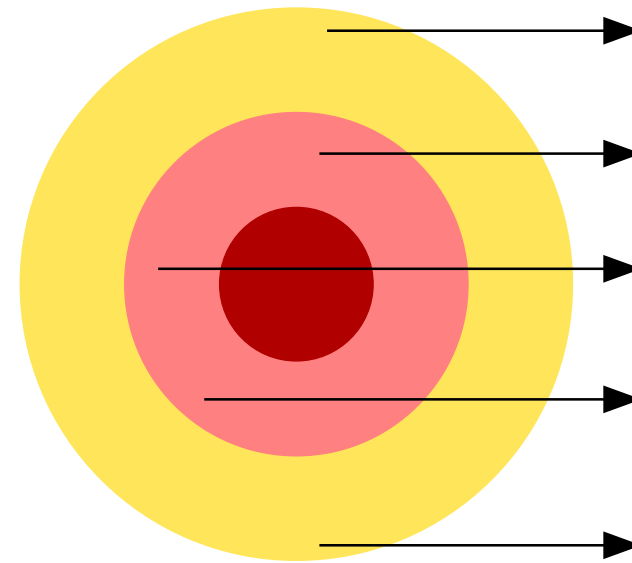


$\gamma$  tag

Position du vertex en  $\pi^0 - \pi^0$  vs.  $\gamma - \pi^0$



$\pi^0$  tag

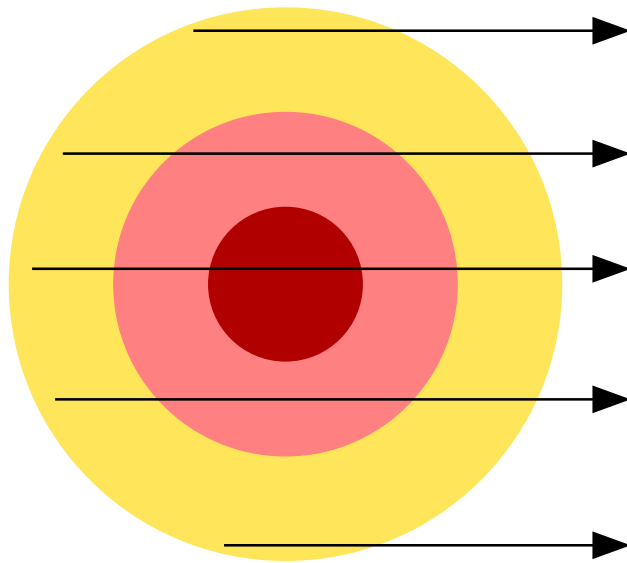


$\gamma$  tag

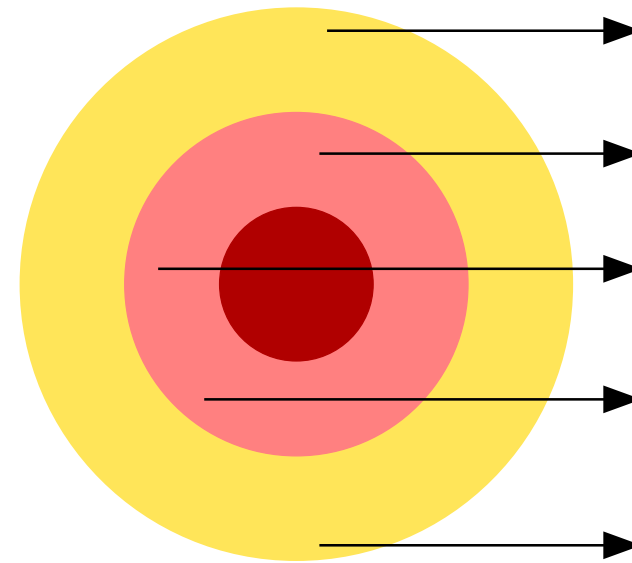
Permet de choisir où le jet est produit !



Position du vertex en  $\pi^0 - \pi^0$  vs.  $\gamma - \pi^0$



$\pi^0$  tag



$\gamma$  tag

Permet de choisir où le jet est produit !

... et de comparer le coefficient de transport