

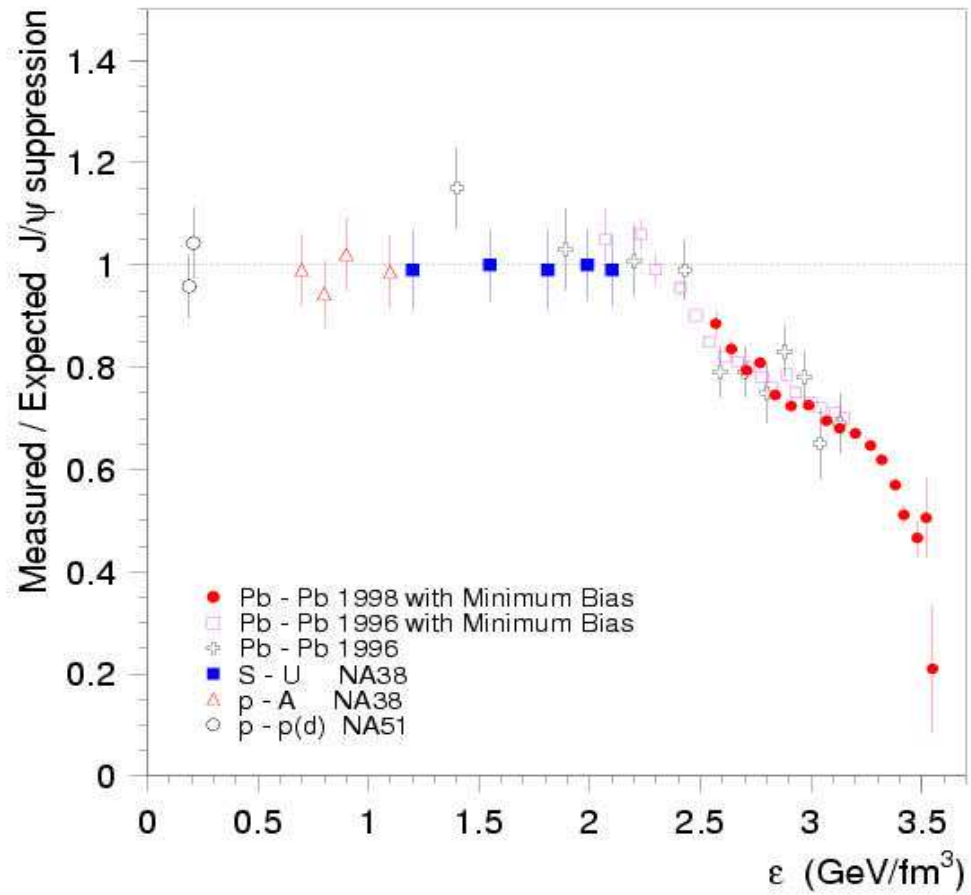
Effets nucléaires dans la production de J/ψ

François Arleo

CERN

Motivations

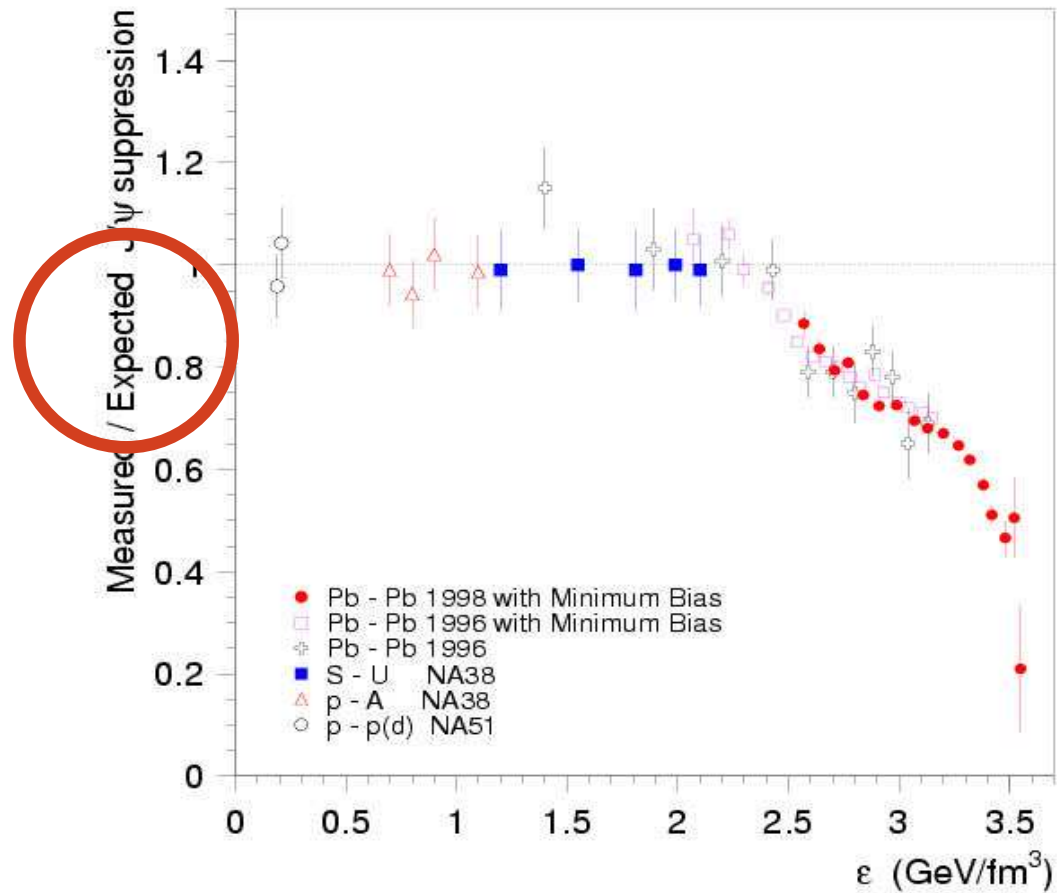
- Introduction
- Motivations
- Suppression
- Interaction inélastique
- Shadowing
- Perte d'énergie
- Conclusions
- Charme intrinsèque



[NA50 2000]

Motivations

- Introduction
- Motivations
- Suppression
- Interaction inélastique
- Shadowing
- Perte d'énergie
- Conclusions
- Charme intrinsèque



[NA50 2000]

Que signifie “expected” ?



Suppression

Expérimentalement

$$R \equiv \frac{\sigma(p A \rightarrow J/\psi X)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi X)}$$

Introduction

● Motivations

● Suppression

Interaction inélastique

Shadowing

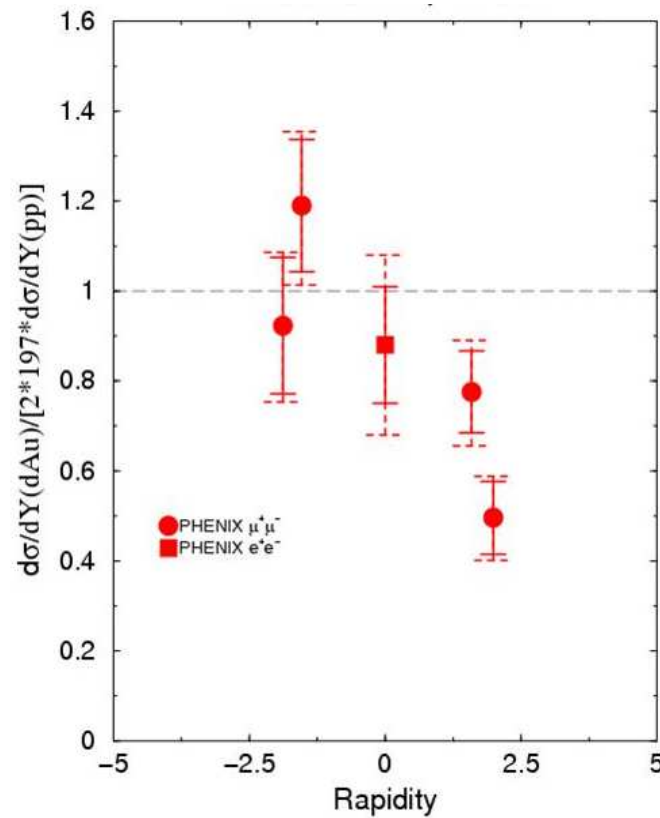
Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Expérimentalement

$$R \equiv \frac{\sigma(pA \rightarrow J/\psi X)}{A \sigma(pp \rightarrow J/\psi X)} < 1$$



[PHENIX 2004]

Introduction

● Motivations

● Suppression

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Suppression

Expérimentalement

$$R \equiv \frac{\sigma(p A \rightarrow J/\psi X)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi X)} < 1$$

Pourquoi $R \neq 1$?

Quelques hypothèses ...

- interaction inélastique
- shadowing
- perte d'énergie
- ...

Introduction

● Motivations

● Suppression

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

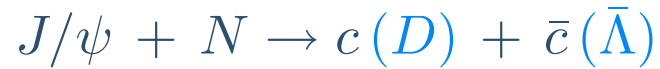
Charme intrinsèque

Interaction inélastique



Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau



Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

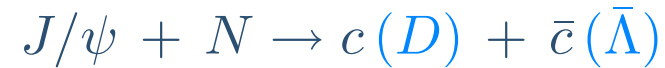
Conclusions

Charme intrinsèque



Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau



Modèle de Glauber

$$R = \frac{1}{A \sigma_{J/\psi N}} \int d\mathbf{b} \left(1 - e^{-T_A(\mathbf{b}) \sigma_{J/\psi N}} \right)$$
$$\simeq \exp(-\rho \sigma_{J/\psi N} L) \quad (L \sim A^{1/3})$$

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

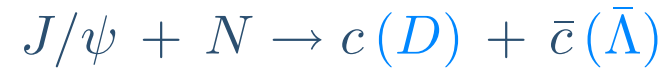
Conclusions

Charme intrinsèque



Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau



Modèle de Glauber

$$R = \frac{1}{A \sigma_{J/\psi N}} \int d\mathbf{b} \left(1 - e^{-T_A(\mathbf{b}) \sigma_{J/\psi N}} \right)$$
$$\simeq \exp(-\rho \sigma_{J/\psi N} L) \quad (L \sim A^{1/3})$$

Que vaut $\sigma_{J/\psi N}$?

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Théorie

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● **Théorie**

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

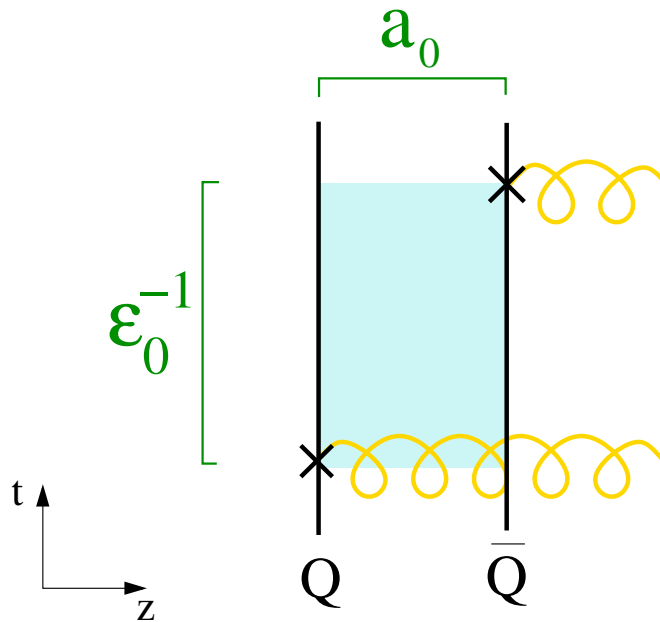
Charme intrinsèque

■ Nombreuses approches théoriques

■ Nombreuses approches théoriques

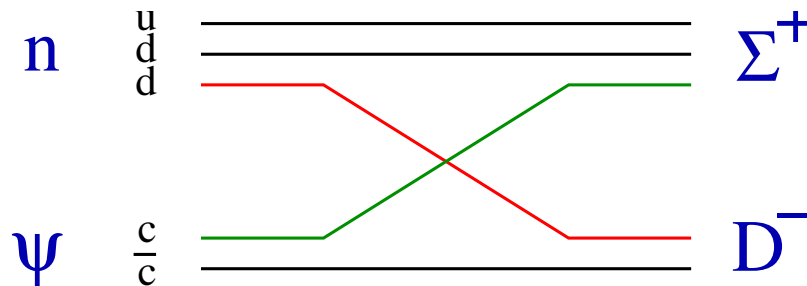
◆ QCD à petite distance

[Bhanot, Peskin 1979]



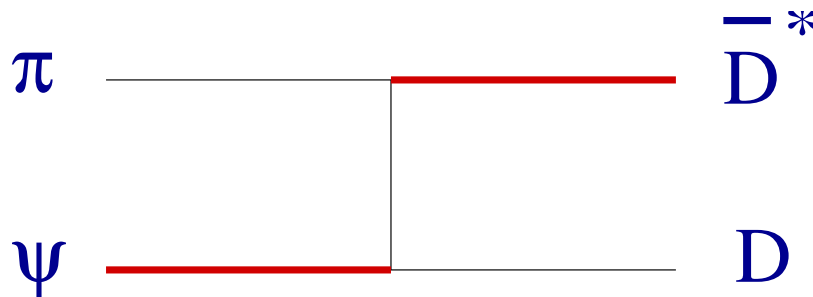
■ Nombreuses approches théoriques

- ◆ QCD à petite distance [[Bhanot, Peskin 1979](#)]
- ◆ Echange de quarks [[Martins, Blaschke, Quack 1995](#)]



■ Nombreuses approches théoriques

- ◆ QCD à petite distance [[Bhanot, Peskin 1979](#)]
- ◆ Echange de quarks [[Martins, Blaschke, Quack 1995](#)]
- ◆ Echange de mésons D [[Matinyan, Müller 1998](#)]





Théorie

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● **Théorie**

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

■ Nombreuses approches théoriques

- ◆ QCD à petite distance [[Bhanot, Peskin 1979](#)]
- ◆ Echange de quarks [[Martins, Blaschke, Quack 1995](#)]
- ◆ Echange de mésons D [[Matinyan, Müller 1998](#)]
- ◆ Règle de somme de QCD [[Navarra, Nielsen, Marques de Carvalho, Krein 2002](#)]



Théorie

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● **Théorie**

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

■ Nombreuses approches théoriques

- ◆ QCD à petite distance [[Bhanot, Peskin 1979](#)]
- ◆ Echange de quarks [[Martins, Blaschke, Quack 1995](#)]
- ◆ Echange de mésons D [[Matinyan, Müller 1998](#)]
- ◆ Règle de somme de QCD [[Navarra, Nielsen, Marques de Carvalho, Krein 2002](#)]

$\sigma_{J/\psi N}$ environ quelques mbs ...



Théorie

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● **Théorie**

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

■ Nombreuses approches théoriques

- ◆ QCD à petite distance [[Bhanot, Peskin 1979](#)]
- ◆ Echange de quarks [[Martins, Blaschke, Quack 1995](#)]
- ◆ Echange de mésons D [[Matinyan, Müller 1998](#)]
- ◆ Règle de somme de QCD [[Navarra, Nielsen, Marques de Carvalho, Krein 2002](#)]

$\sigma_{J/\psi N}$ environ quelques mbs ...

... mais dépend (fortement) de l'énergie

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● **Prédictions**

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

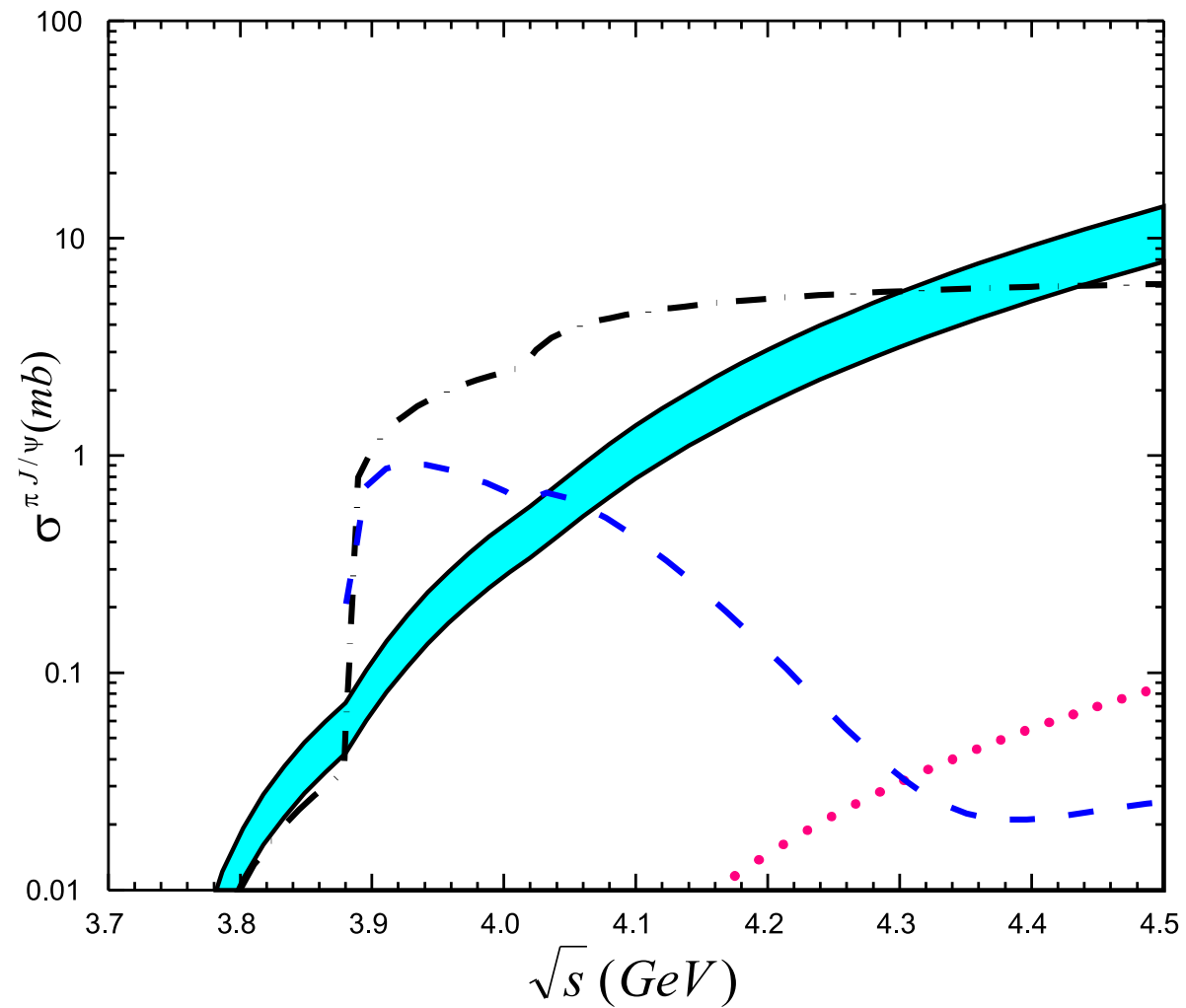
● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



[Rapp, Grandchamp 2003]



Expérimentalement

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédictions

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

■ Nombreuses données

- ◆ E537, NA3, NA38, NA50, NA60, NMC, E672, E772, E866, HERA-B, PHENIX ...



Expérimentalement

[FA, Tram en préparation]

Exp.	$\sigma_{J/\psi N}$	χ^2 / ndf	$\sigma_{J/\psi N}^{\text{sh}}$	χ^2 / ndf
E537	7.1 ± 0.8	2.3	7.5 ± 0.8	2.4
NA3	3.2 ± 0.4	0.4	3.2 ± 0.4	0.4
NMC	$0.0^{+1.0}$	0.7	$0.0^{+0.9}$	0.8
NA50	4.7 ± 0.3	1.4	4.7 ± 0.3	1.5
E672	14.1 ± 9.4	0.2	13.2 ± 9.2	0.2
E866	3.3 ± 0.3	1.1	2.9 ± 0.3	0.7
HERA-B	$0.0^{+8.2}$	0.3	$0.0^{+8.2}$	0.3
PHENIX	$2.6 \pm 0.9^{+2.0}_{-1.7}$	2.4	$2.4 \pm 0.9^{+2.0}_{-1.7}$	2.0
All	3.8 ± 0.2	1.1	3.6 ± 0.2	1.1

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédictions

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Expérimentalement

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

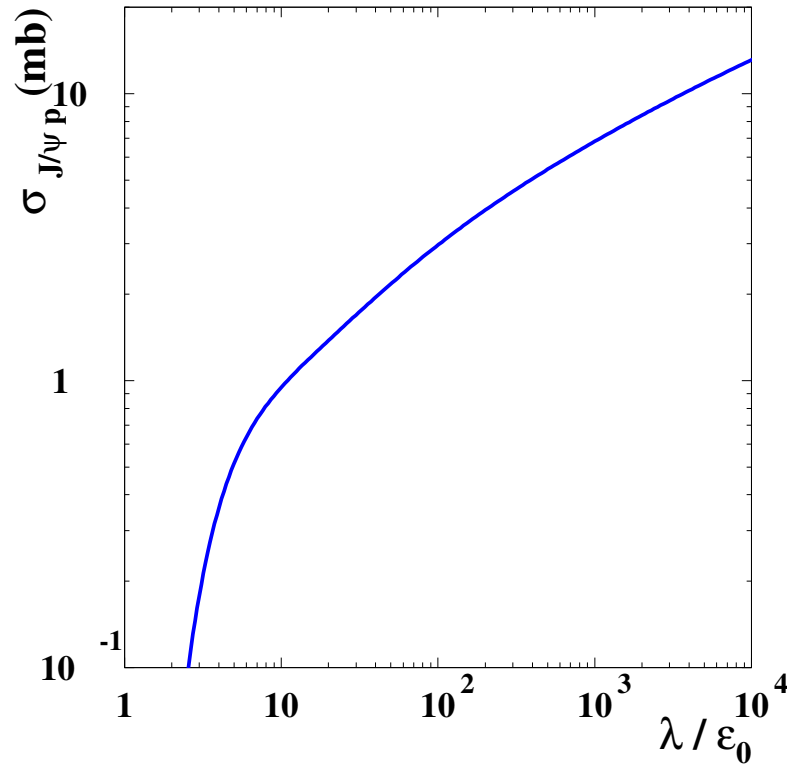
■ Nombreuses données

- ◆ E537, NA3, NA38, NA50, NA60, NMC, E672, E772, E866, HERA-B, PHENIX ...

$$\sigma_{J/\psi N} \simeq 3 - 4 \text{ mb}$$

Accord qualitatif théorie – expérience

En QCD perturbative



En supposant

$$x G(x) \sim x^{-\delta}$$

$$(\delta \simeq 0.25)$$

$$\sigma(\sqrt{s_{J/\psi N}}) \propto \sqrt{s_{J/\psi N}}^{2\delta}$$

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

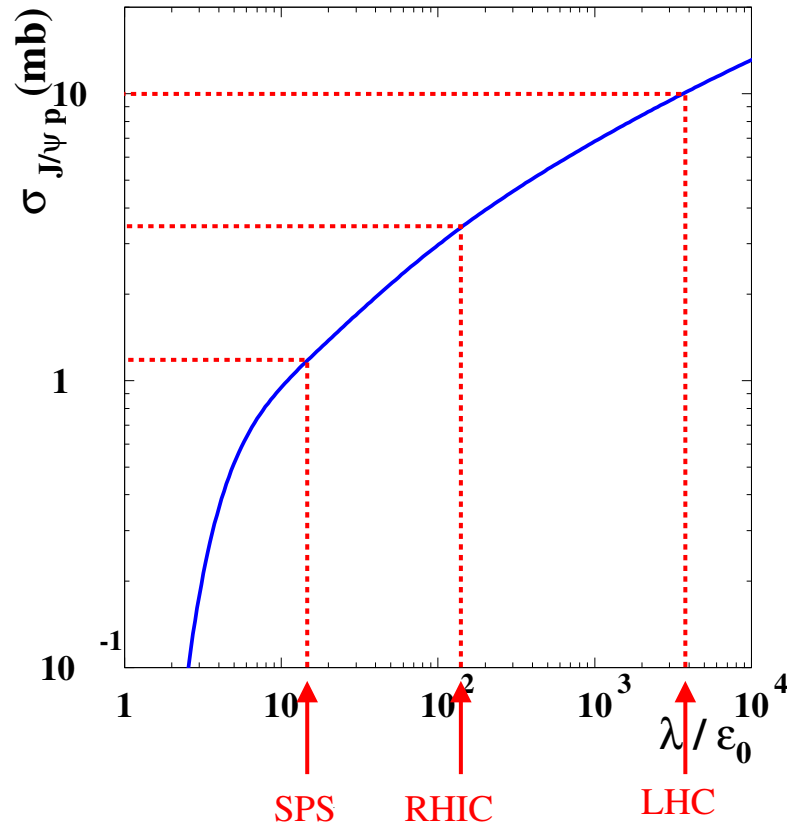
Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

En QCD perturbative



En supposant

$$x G(x) \sim x^{-\delta}$$

$$(\delta \simeq 0.25)$$

$$\sigma(\sqrt{s_{J/\psi N}}) \propto \sqrt{s_{J/\psi N}}^{2\delta}$$

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



De SPS à LHC

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

	$\sigma_{J/\psi N}$ (mb)	R ($L = 5$ fm)
SPS	3	
RHIC	5.5	
LHC	12	



De SPS à LHC

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

	$\sigma_{J/\psi N}$ (mb)	R ($L = 5$ fm)
SPS	3	0.8
RHIC	5.5	0.6
LHC	12	0.4



De SPS à LHC

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

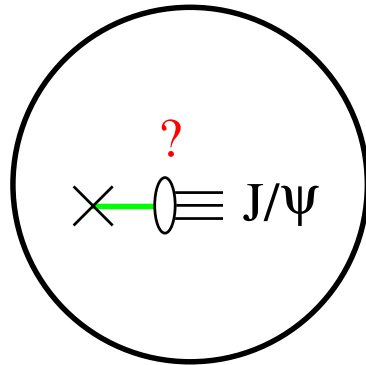
Charme intrinsèque

	$\sigma_{J/\psi N}$ (mb)	R ($L = 5$ fm)
SPS	3	0.8
RHIC	5.5	0.6
LHC	12	0.4

mais à haute énergie ...

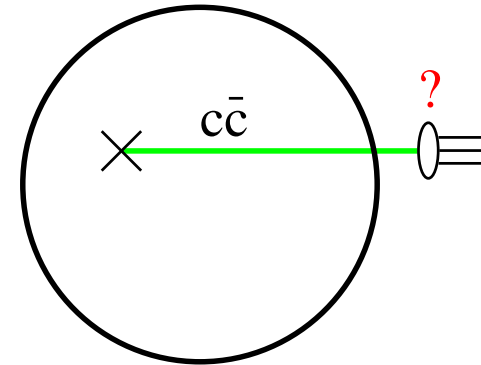
Temps de formation

Basse énergie



$$t_f = \gamma(x_2) \tau_f \ll R$$

Haute énergie



$$t_f = \gamma(x_2) \tau_f \gg R$$

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

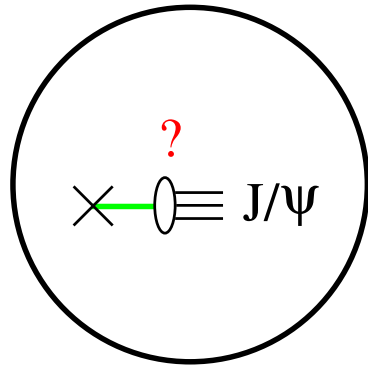
Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

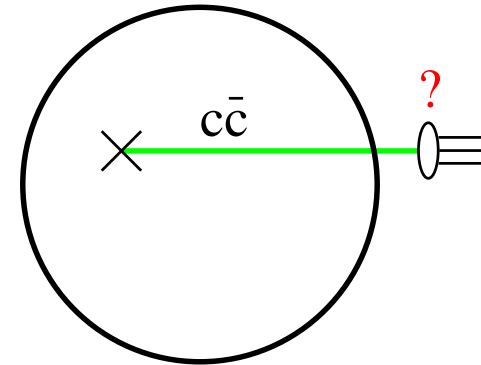
Temps de formation

Basse énergie



$$t_f = \gamma(x_2) \tau_f \ll R$$

Haute énergie



$$t_f = \gamma(x_2) \tau_f \gg R$$

■ Un dipole compact interagit peu

- ◆ naïvement, $\sigma_{c\bar{c}} \rightarrow 0$ à très haute énergie

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

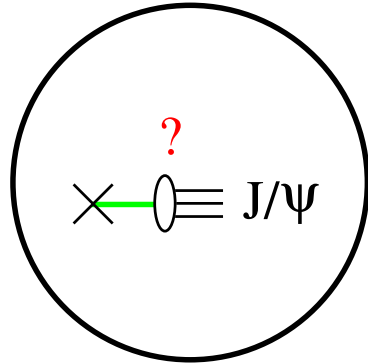
Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

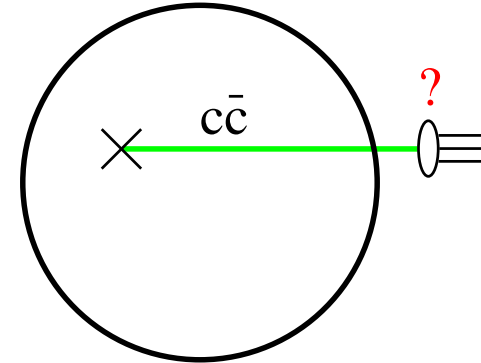
Charme intrinsèque

Basse énergie



$$t_f = \gamma(x_2) \tau_f \ll R$$

Haute énergie



$$t_f = \gamma(x_2) \tau_f \gg R$$

- Un dipole compact interagit peu
 - ◆ naïvement, $\sigma_{c\bar{c}} \rightarrow 0$ à très haute énergie
- $\sigma_{J/\psi N}(s \rightarrow \infty) \rightarrow \infty$ mais $\sigma_{c\bar{c}}(t_f \rightarrow \infty) \sim 0$
 - ◆ “qui” l’emporte à haute énergie ?



Interaction à haute énergie

Temps de formation

- Transparence de couleur $\sigma_{c\bar{c}} \sim r_{c\bar{c}}^2$
- Taille $r_{c\bar{c}} \sim \sqrt{\tau}$ avec τ temps passé dans le noyau

$$\sigma_{c\bar{c}} \sim \tau \sim \frac{R}{\gamma} \sim x_2$$

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Interaction à haute énergie

Temps de formation

- Transparence de couleur $\sigma_{c\bar{c}} \sim r_{c\bar{c}}^2$
- Taille $r_{c\bar{c}} \sim \sqrt{\tau}$ avec τ temps passé dans le noyau

$$\sigma_{c\bar{c}} \sim \tau \sim \frac{R}{\gamma} \sim x_2$$

Dépendance en énergie

- pQCD

$$\sigma_{J/\psi N} \sim s_{J/\psi N}^{\delta} \sim x_2^{-\delta}$$

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation

● Interaction à haute énergie

- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Temps de formation

- Transparence de couleur $\sigma_{c\bar{c}} \sim r_{c\bar{c}}^2$
- Taille $r_{c\bar{c}} \sim \sqrt{\tau}$ avec τ temps passé dans le noyau

$$\sigma_{c\bar{c}} \sim \tau \sim \frac{R}{\gamma} \sim x_2$$

Dépendance en énergie

- pQCD $\sigma_{J/\psi N} \sim s_{J/\psi N}^\delta \sim x_2^{-\delta}$

Très naïvement

$$\sigma \sim \sigma_{c\bar{c}}(t_f) \times \sigma_{J/\psi N}(s_{J/\psi N}) \sim x_2^{1-\delta}$$

A mi-rapacité ($x_2 \sim 1/\sqrt{s_{NN}}$)

$$\sigma \sim \sqrt{s_{NN}}^{\delta-1}$$



Interaction à haute énergie

Conséquences phénoménologiques

■ De Fermilab à RHIC

$$\frac{\text{RHIC}}{\text{E866}} \sim \left(\frac{200}{38.1} \right)^{\delta-1} \simeq 0.3$$

■ Pas d'absorption nucléaire au LHC

■ Interaction inélastique scale avec x_2

Introduction

Interaction inélastique

● Interaction inélastique

● Théorie

● Prédications

● Expérimentalement

● De SPS à LHC

● Temps de formation

● Interaction à haute énergie

● Comovers

● Pion ou gluon ?

● Comovers à SPS

● Comovers à RHIC

● Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

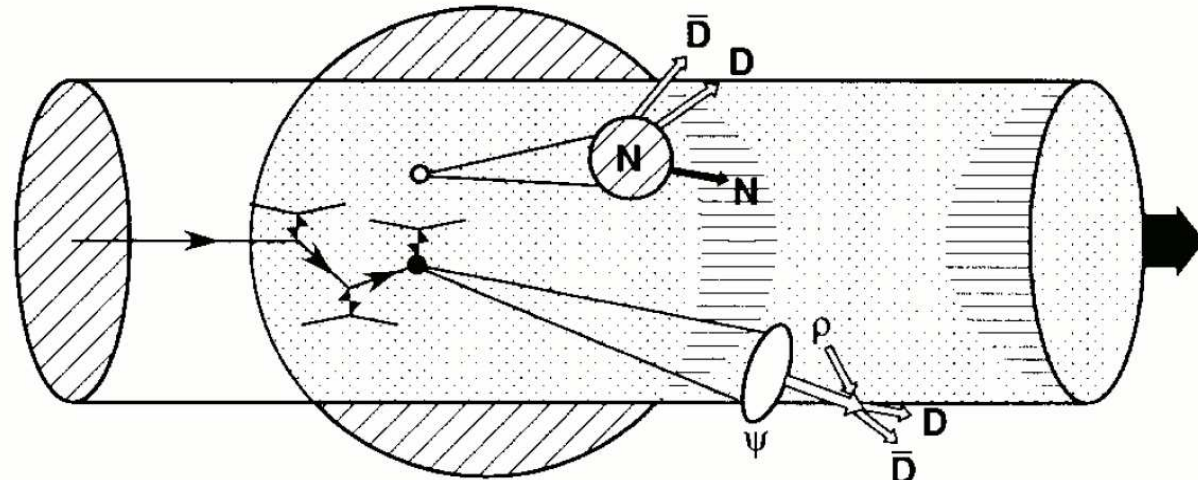
Conclusions

Charme intrinsèque

Interaction inélastique avec les partons / hadrons produits dans la collision

[Gavin, Vogt 1990-1996]

[Armesto, Capella, Ferreiro, Kaidalov, Sousa 1995-]



Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie

● Comovers

- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Comovers

Interaction inélastique avec les partons / hadrons produits dans la collision

[Gavin, Vogt 1990-1996]

[Armesto, Capella, Ferreiro, Kaidalov, Sousa 1995-]

- Collisions d'ions lourds
- Collisions h -A à haute énergie

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie

● Comovers

- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Comovers

Interaction inélastique avec les partons / hadrons produits dans la collision

[Gavin, Vogt 1990-1996]

[Armesto, Capella, Ferreiro, Kaidalov, Sousa 1995-]

- Collisions d'ions lourds
- Collisions h -A à haute énergie

Suppression due aux comovers

$$R \simeq \exp \left[-\frac{\langle \sigma_{co} v \rangle}{\pi R^2} \ln \left(\frac{\tau_f}{\tau_0} \right) \frac{dN}{dy} \right]$$

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Comovers

Interaction inélastique avec les partons / hadrons produits dans la collision

[Gavin, Vogt 1990-1996]

[Armesto, Capella, Ferreiro, Kaidalov, Sousa 1995-]

- Collisions d'ions lourds
- Collisions h -A à haute énergie

Suppression due aux comovers

$$R \simeq \exp \left[- \frac{\langle \sigma_{co} v \rangle}{\pi R^2} \ln \left(\frac{\tau_f}{\tau_0} \right) \frac{dN}{dy} \right]$$

σ_{co} : interaction charmonium-pion (gluon) à basse énergie

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Pion ou gluon ?

Introduction

Interaction inélastique

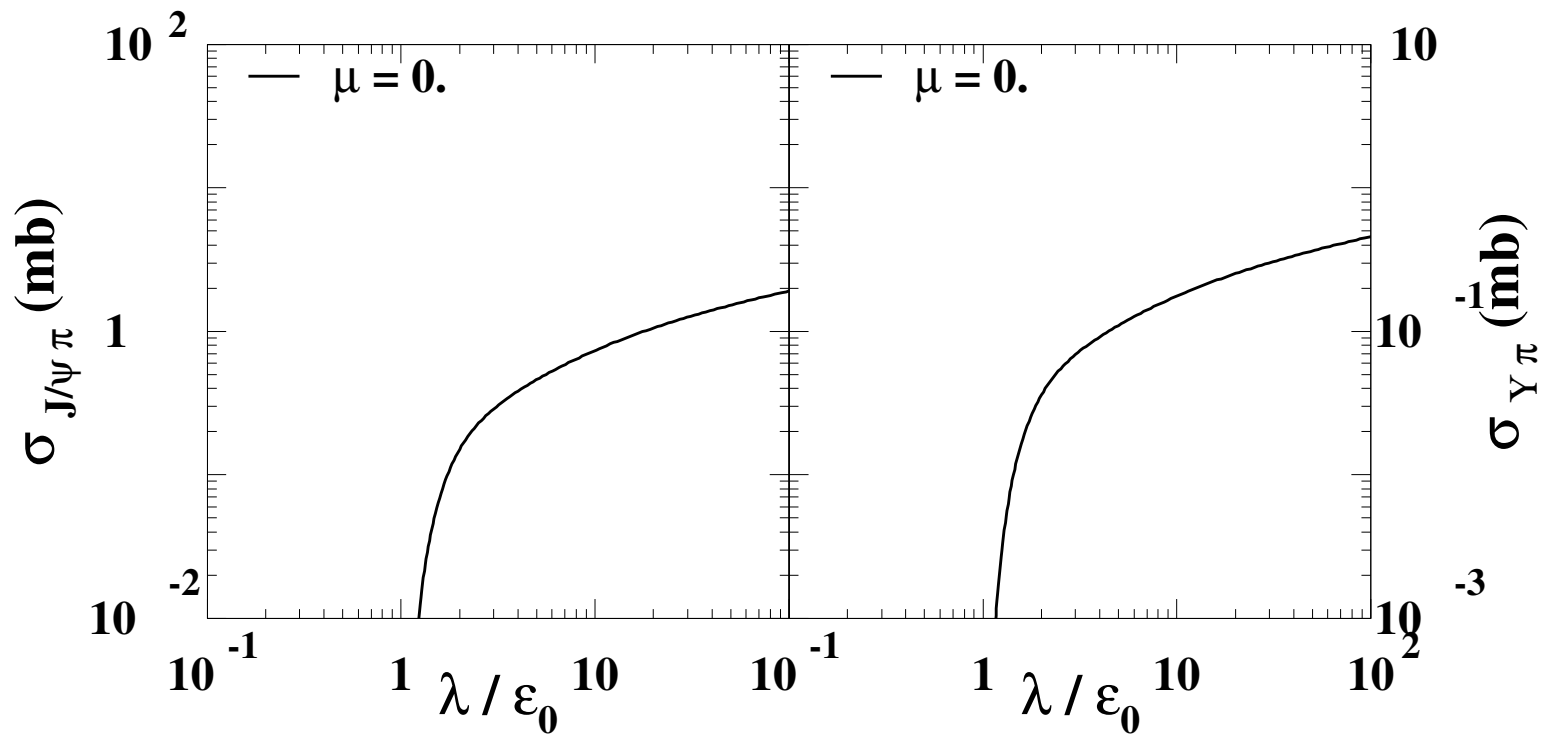
- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Pion ou gluon ?

Introduction

Interaction inélastique

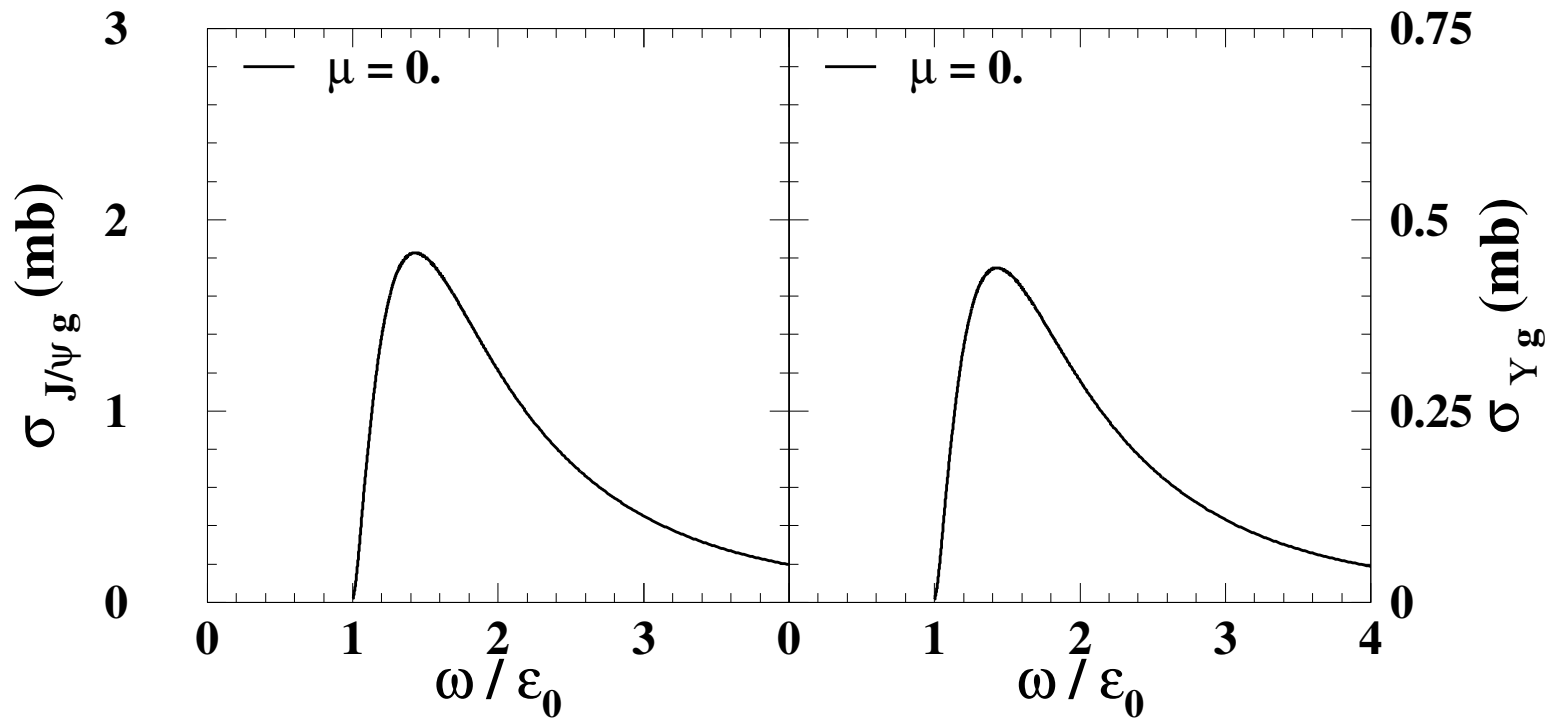
- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Près du seuil, dissociation par les **gluons** favorisée

Comovers à SPS

Introduction

Interaction inélastique

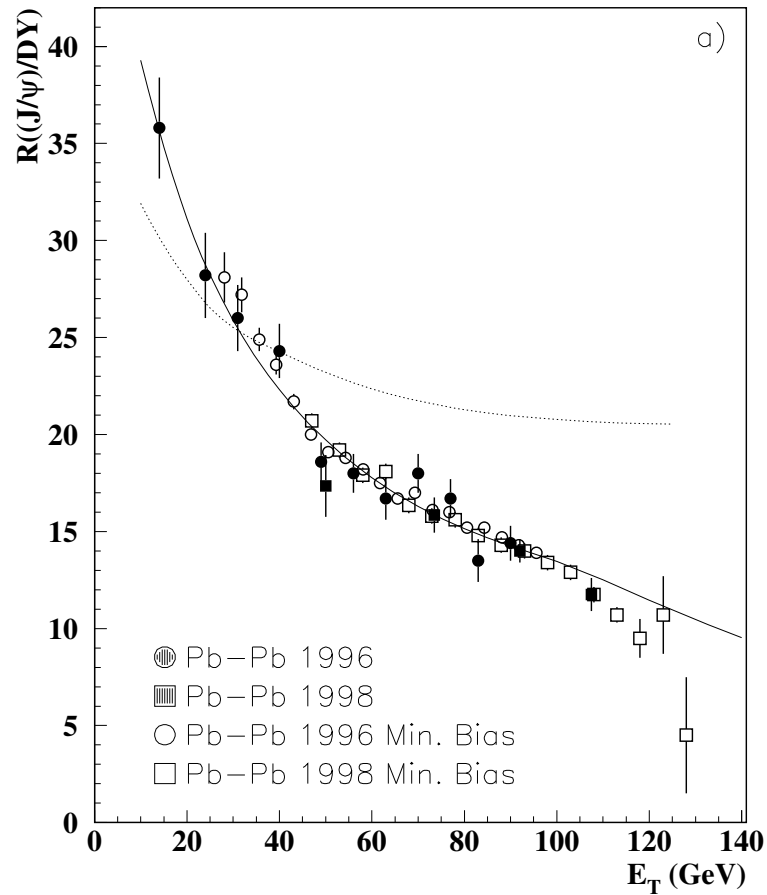
- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Bonne description des données NA50 avec $\sigma_{co} \simeq 0.5$ mb

Comovers à RHIC

Introduction

Interaction inélastique

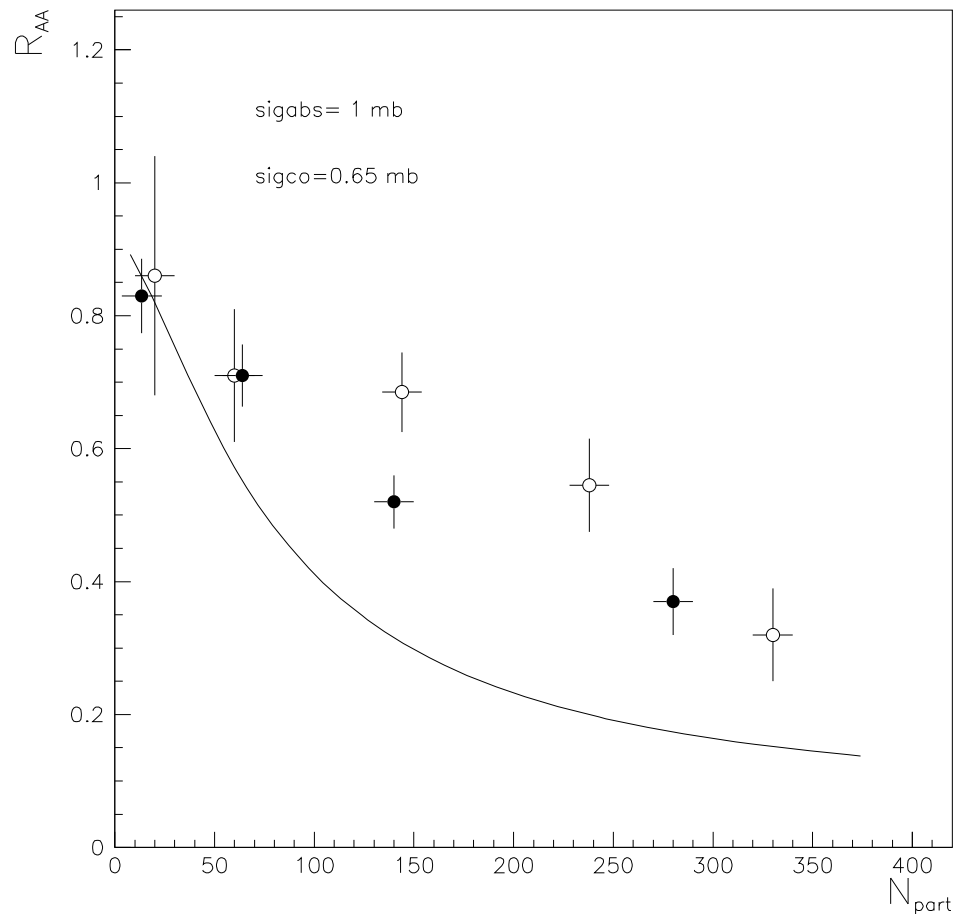
- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Suppression trop forte par rapport aux données PHENIX



Résumé

Introduction

Interaction inélastique

- Interaction inélastique
- Théorie
- Prédications
- Expérimentalement
- De SPS à LHC
- Temps de formation
- Interaction à haute énergie
- Comovers
- Pion ou gluon ?
- Comovers à SPS
- Comovers à RHIC
- Résumé

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

■ deux régimes cinématiques

- ◆ $x_2 \sim 0.1$: interaction J/ψ - N ($R \simeq 0.7 - 0.8$)
- ◆ $x_2 \ll 0.1$: interaction $c\bar{c}$ - N ($R \simeq 1 ?$)

■ suppression \sim constante de SPS à FNAL

■ plus faible dans le cas du Υ

■ n'affecte pas le charme ouvert

■ AA: interaction avec pions et gluons

- ◆ cinématique très différente
- ◆ données Pb-Pb à SPS bien décrites par les comovers

Shadowing



Shadowing

Production de saveurs lourdes

$$p p \quad \frac{d\sigma_{pp \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i, i' = q, \bar{q}, g} f_i^p(x_1) f_{i'}^p(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

● Shadowing

● Dépendance en x

● Expérimentalement

● x intermédiaire

● Petit x

● Données NMC

● Données PHENIX

● Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque



Shadowing

Production de saveurs lourdes

$$p p \quad \frac{d\sigma_{pp \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i,i'=q,\bar{q},g} f_i^p(x_1) f_{i'}^p(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

$$p A \quad \frac{d\sigma_{pA \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i,i'=q,\bar{q},g} f_i^p(x_1) f_{i'}^A(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

● Shadowing

● Dépendance en x

● Expérimentalement

● x intermédiaire

● Petit x

● Données NMC

● Données PHENIX

● Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Production de saveurs lourdes

$$p p \quad \frac{d\sigma_{pp \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i,i'=q,\bar{q},g} f_i^p(x_1) f_{i'}^p(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

$$p A \quad \frac{d\sigma_{pA \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i,i'=q,\bar{q},g} f_i^p(x_1) f_{i'}^A(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

Les gluons dominent à haute énergie

$$x_1 \sim x_2 \ll 1$$

$$R = \frac{f_g^A(x_2)}{A f_g^p(x_2)}$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

● Shadowing

● Dépendance en x

● Expérimentalement

● x intermédiaire

● Petit x

● Données NMC

● Données PHENIX

● Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Production de saveurs lourdes

$$p p \quad \frac{d\sigma_{pp \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i,i'=q,\bar{q},g} f_i^p(x_1) f_{i'}^p(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

$$p A \quad \frac{d\sigma_{pA \rightarrow Q\bar{Q}}}{dx_1 dx_2} \propto \sum_{i,i'=q,\bar{q},g} f_i^p(x_1) f_{i'}^A(x_2) \hat{\sigma}_{ii' \rightarrow Q\bar{Q}}$$

Les gluons dominent à haute énergie

$$x_1 \sim x_2 \ll 1$$

$$R = \frac{f_g^A(x_2)}{A f_g^p(x_2)} = R(x_2)$$

ne dépend que de x_2 !

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

● Shadowing

● Dépendance en x

● Expérimentalement

● x intermédiaire

● Petit x

● Données NMC

● Données PHENIX

● Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

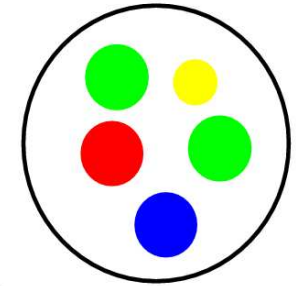
Charme intrinsèque

Dépendance en x

■ $x_2 \gtrsim 0.1$

$$\sqrt{s_{NN}} \gtrsim M_{J/\psi}, \quad y \simeq 0$$

$$\frac{Af_g(x_2, Q^2)}{R^2} \simeq Q_s^2 \ll Q^2$$



$$f_g^A(x_2, Q^2) \simeq Af_g(x_2, Q^2) \quad \rightarrow \quad R(x_2 \lesssim 1) \simeq 1$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

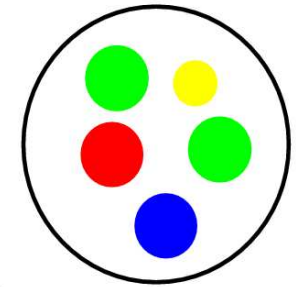
Charme intrinsèque

Dépendance en x

■ $x_2 \gtrsim 0.1$

$$\sqrt{s_{NN}} \gtrsim M_{J/\psi}, \quad y \simeq 0$$

$$\frac{Af_g(x_2, Q^2)}{R^2} \simeq Q_s^2 \ll Q^2$$

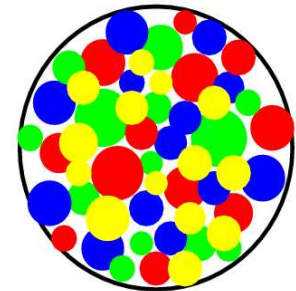


$$f_g^A(x_2, Q^2) \simeq Af_g(x_2, Q^2) \quad \rightarrow \quad R(x_2 \lesssim 1) \simeq 1$$

■ $x_2 \ll 0.1$

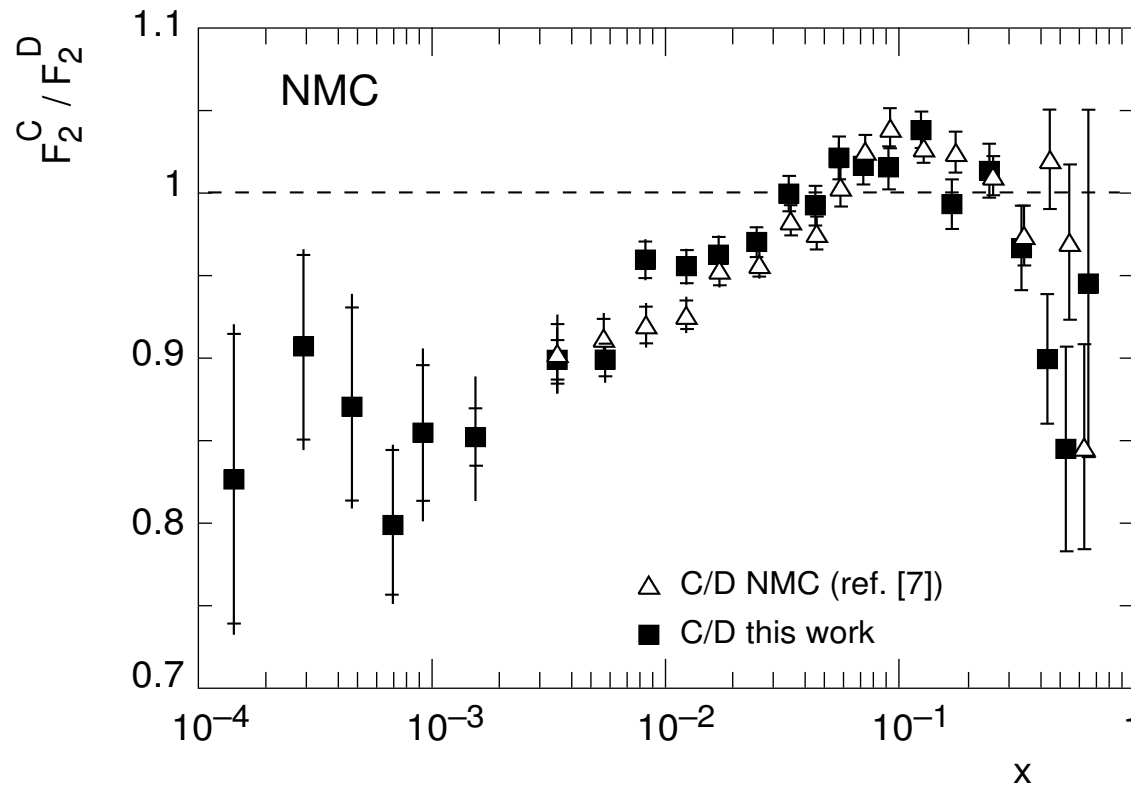
$$\sqrt{s_{NN}} \gg M_{J/\psi}, \quad y \gg 1$$

$$\frac{Af_g(x_2, Q^2)}{R^2} \gg Q^2$$



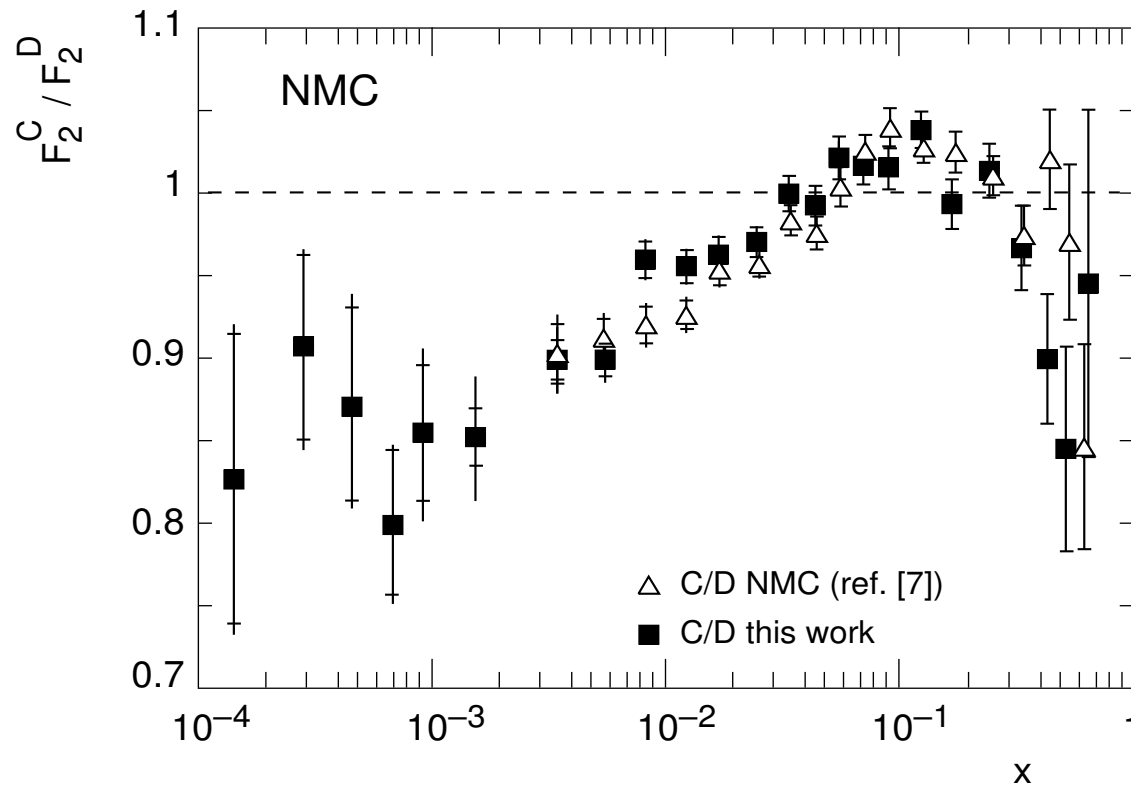
$$f_g^A(x_2, Q^2) \ll Af_g(x_2, Q^2) \quad \rightarrow \quad R(x_2 \ll 1) \ll 1$$

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé



[NMC 1992]

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

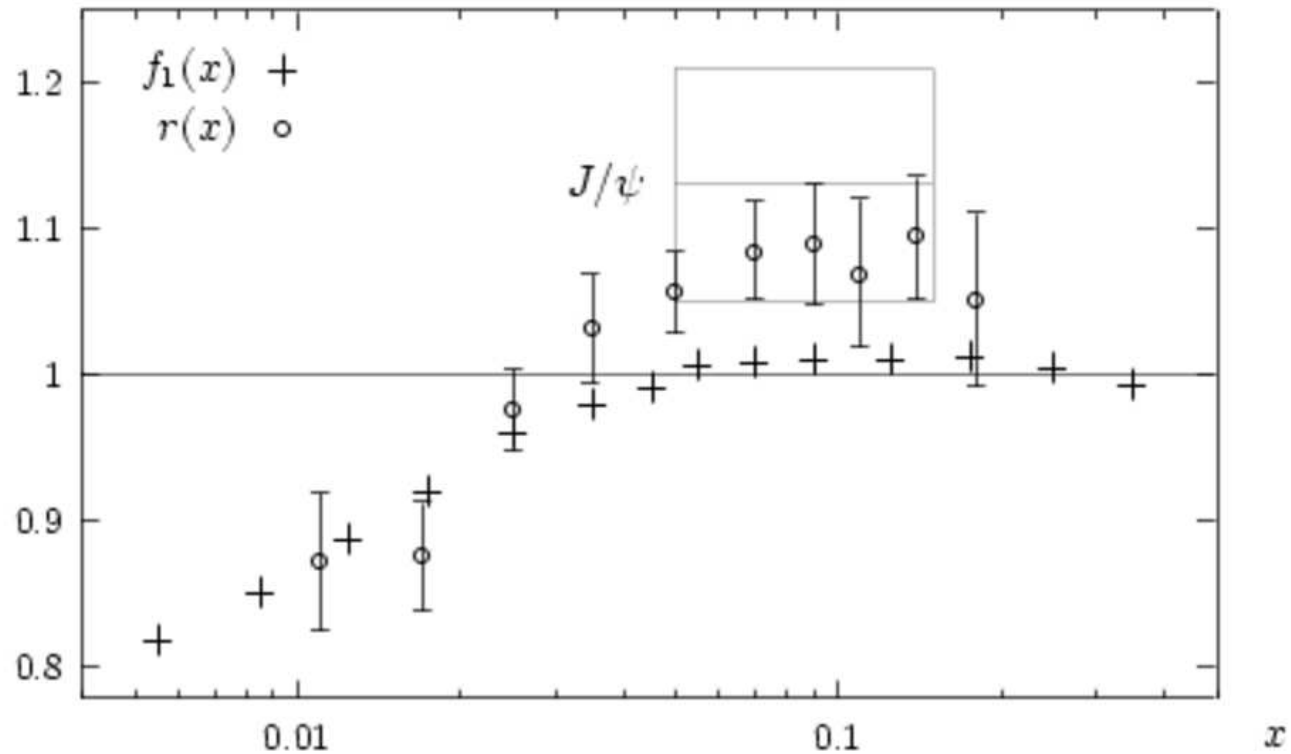


[NMC 1992]

Pourquoi ne pas extraire $f_g^A(x_2)$ des données ?

Extractions des PDF nucléaires

$x \simeq 0.1$



[Gousset, Pirner 1996]

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

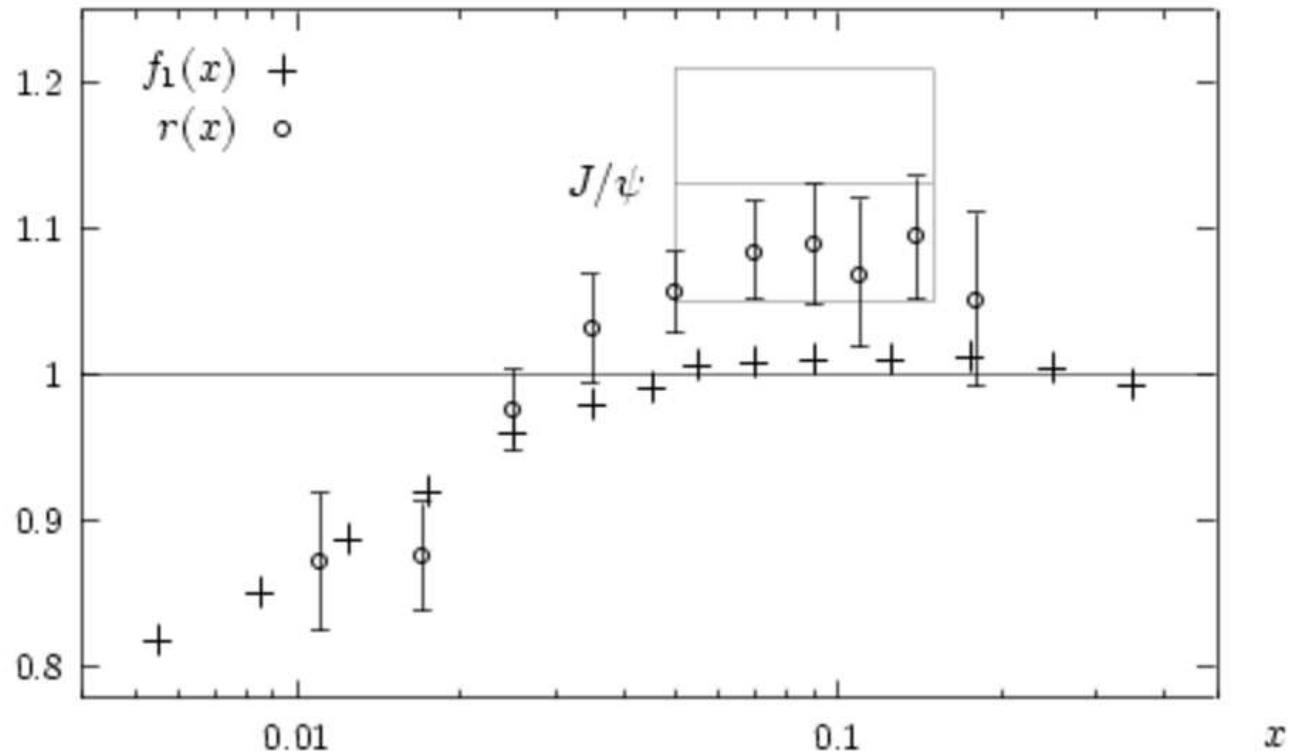
Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Extractions des PDF nucléaires

$x \simeq 0.1$



[Gousset, Pirner 1996]

(anti) shadowing modéré à $x \simeq 0.1$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

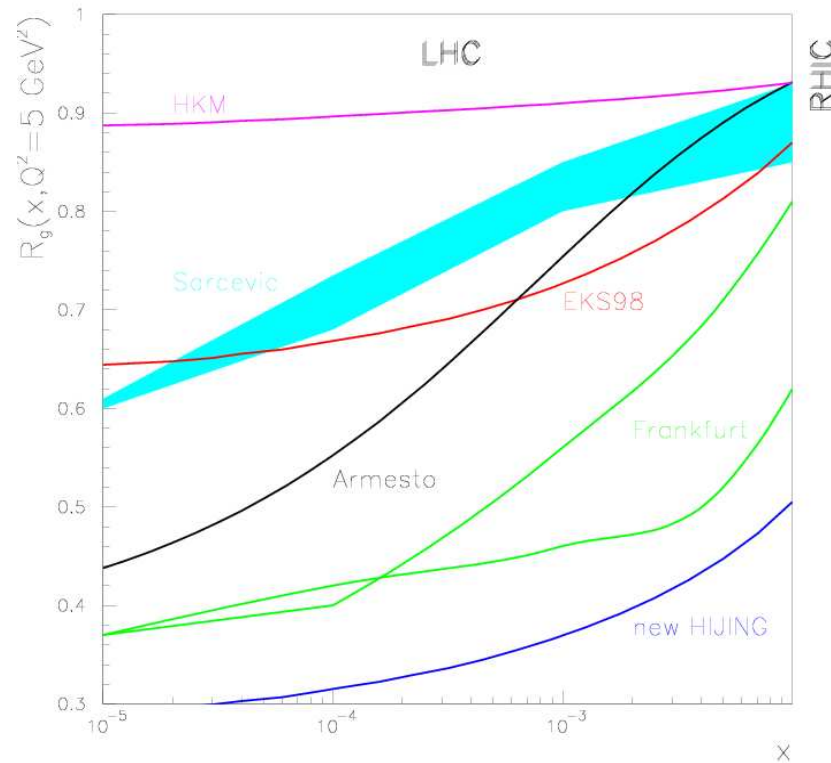
Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Extractions des PDF nucléaires

$x \ll 0.1$



[Armesto, Salgado 2003]

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

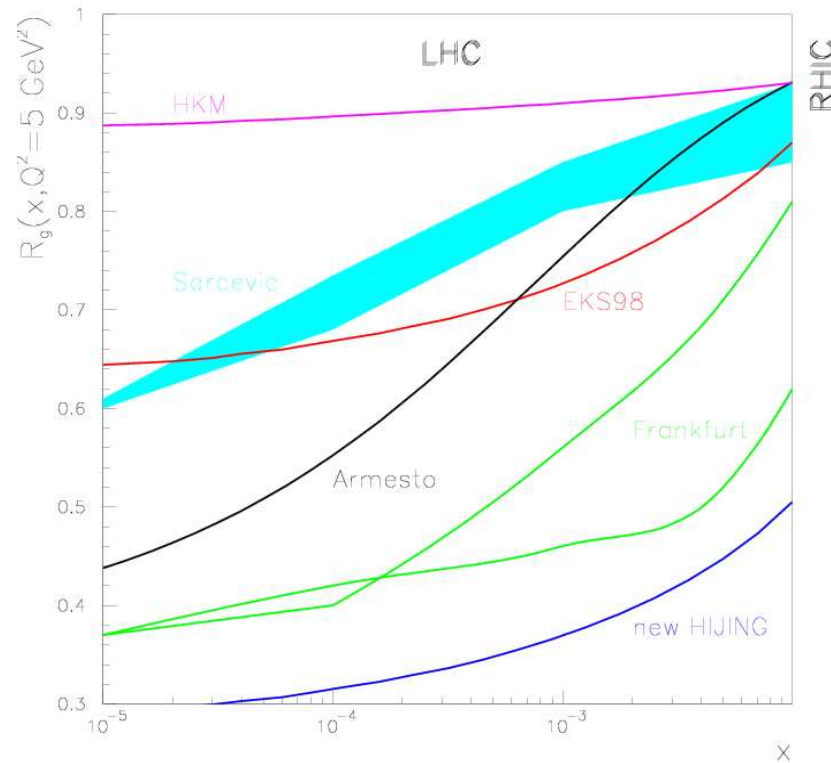
Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Extractions des PDF nucléaires

$x \ll 0.1$



[Armesto, Salgado 2003]

Distributions très peu connues à petit x_2

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

Introduction

Interaction inélastique

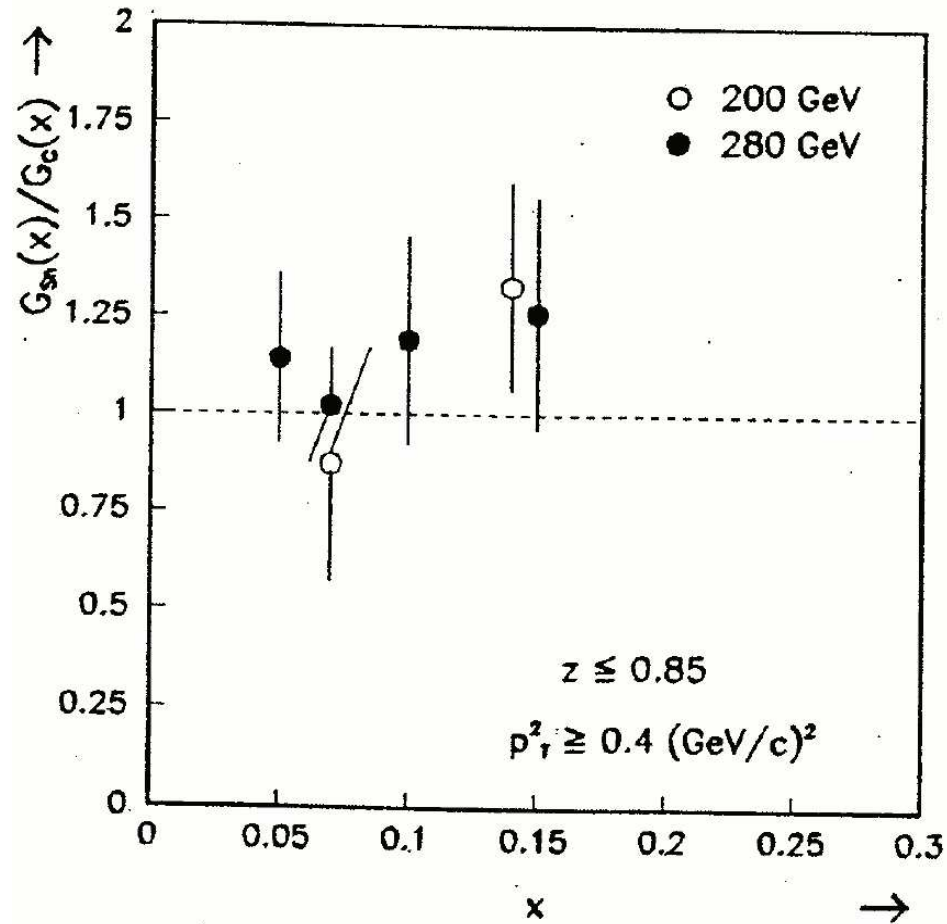
Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

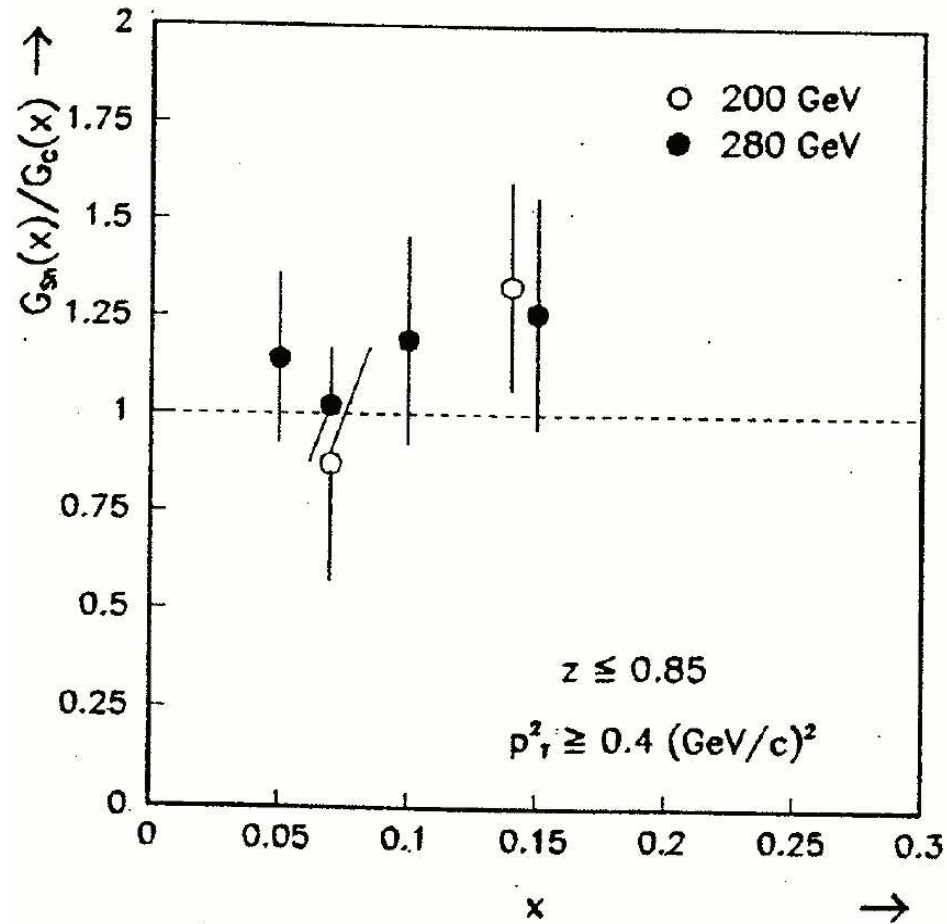
Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

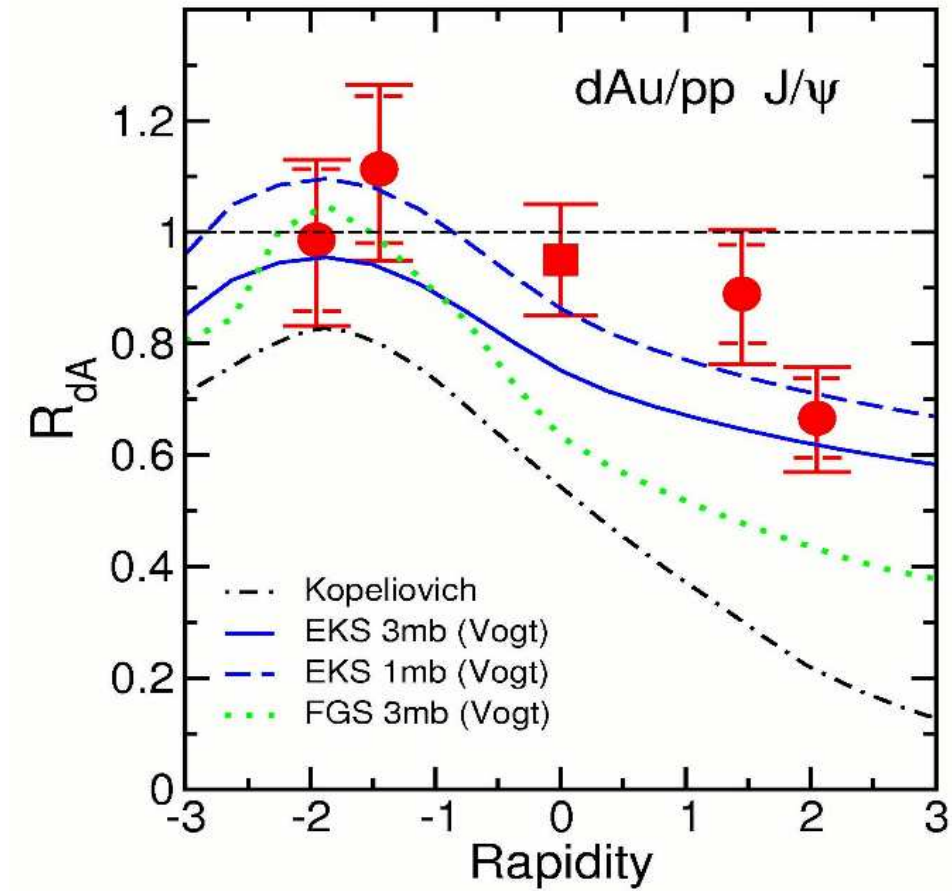


- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

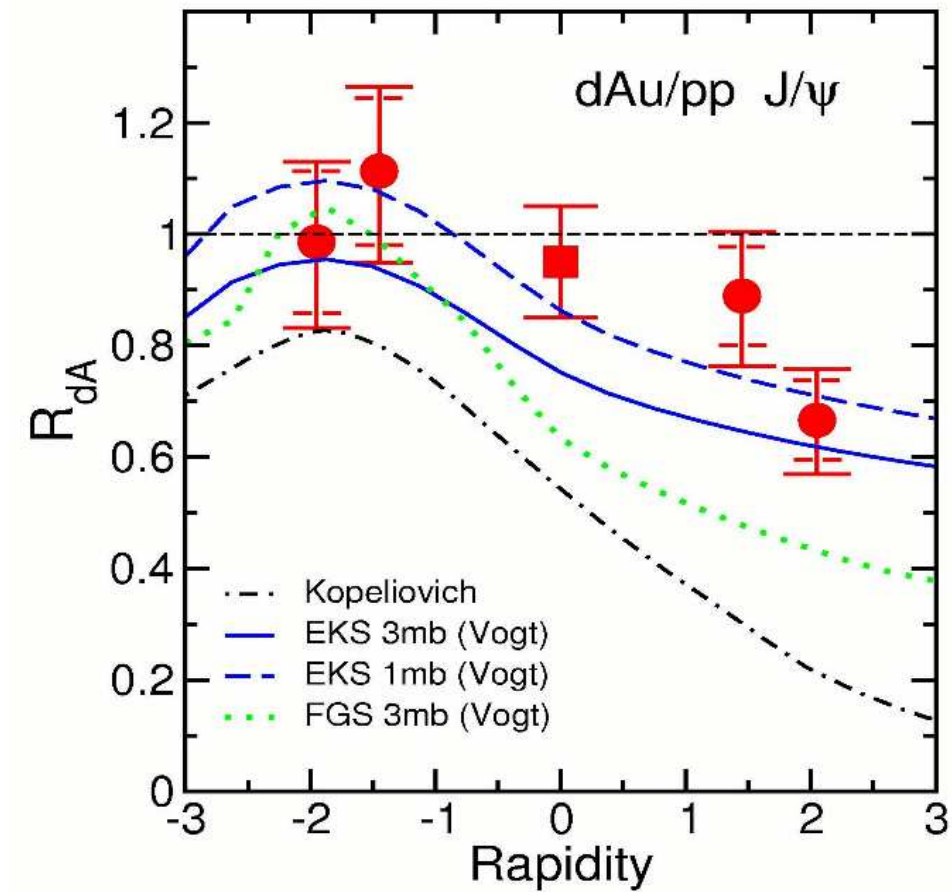


- Augmentation ($\sim 20\%$) de la production de J/ψ
 - ◆ mise en évidence de l'antishadowing de gluons (?)

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé



- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé



- Données cohérentes avec du shadowing et une légère absorption nucléaire



Résumé

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

- loi d'échelle $R = R(x_2)$
- effet (très) important à petit x_2
 - ◆ haute énergie $\sqrt{s_{NN}} \gg M_{J/\psi}$
 - ◆ grande rapidité $y \gg 1$
- incertitudes grandes à petit x_2
- affecte également le charme ouvert
- plus faible dans le cas du Υ



Résumé

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

- Shadowing
- Dépendance en x
- Expérimentalement
- x intermédiaire
- Petit x
- Données NMC
- Données PHENIX
- Résumé

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

- loi d'échelle $R = R(x_2)$
- effet (très) important à petit x_2
 - ◆ haute énergie $\sqrt{s_{NN}} \gg M_{J/\psi}$
 - ◆ grande rapidité $y \gg 1$
- incertitudes grandes à petit x_2
- affecte également le charme ouvert
- plus faible dans le cas du Υ

Mécanisme de suppression
(probablement) dominant au LHC

Perte d'énergie

Perte d'énergie

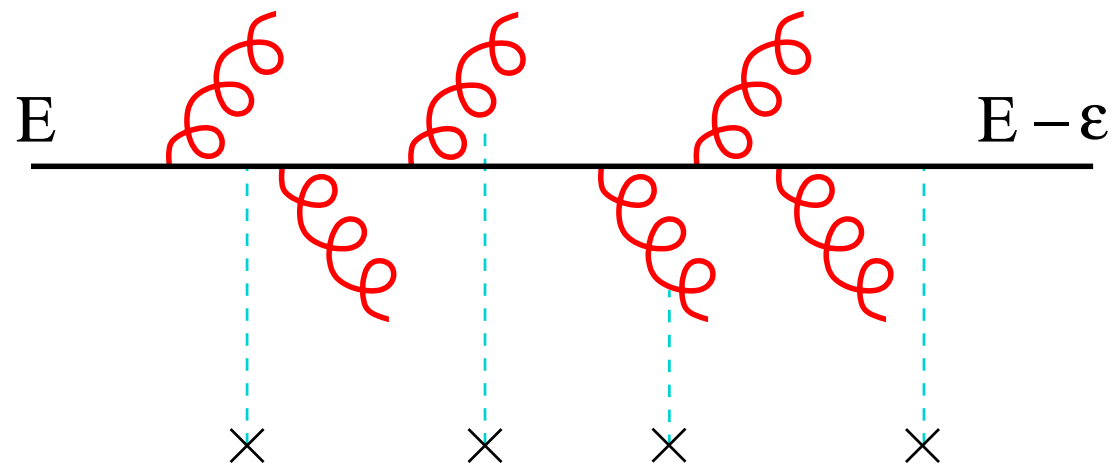
Collisions molles du parton incident dans le noyau

[Gyulassy, Levai, Vitev, Wang]

[Baier, Dokshitzer, Mueller, Peigné, Schiff]

[Zakharov]

[Wiedemann]



Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

● Perte d'énergie

● Résumé

Conclusions

Charme intrinsèque



Perte d'énergie

Vide

$$x_1 = \frac{E_q}{E_p}$$

Milieu

$$x'_1 = \frac{E_q + \epsilon}{E_p}$$
$$\simeq x_1 \left(1 + \frac{\epsilon}{E_q} \right)$$

Naïvement

$$R \simeq \int d\epsilon \mathcal{P}(\epsilon) f_q(x'_1) / f_q(x_1)$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

● Perte d'énergie

● Résumé

Conclusions

Charme intrinsèque



Perte d'énergie

Vide

$$x_1 = \frac{E_q}{E_p}$$

Milieu

$$x'_1 = \frac{E_q + \epsilon}{E_p}$$
$$\simeq x_1 \left(1 + \frac{\epsilon}{E_q} \right)$$

Naïvement

$$R \simeq \int d\epsilon \mathcal{P}(\epsilon) f_q(x'_1) / f_q(x_1)$$

Suppression pour $\epsilon \sim E_q$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

● Perte d'énergie

● Résumé

Conclusions

Charme intrinsèque



Perte d'énergie

$$\epsilon / E_q = \mathcal{O}(1)$$

■ grands noyaux

$$\blacklozenge \epsilon \propto \hat{q} L^2$$

(\hat{q} contraint par DY)

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

● Perte d'énergie

● Résumé

Conclusions

Charme intrinsèque



Perte d'énergie

$$\epsilon / E_q = \mathcal{O}(1)$$

■ grands noyaux

$$\blacklozenge \epsilon \propto \hat{q} L^2$$

(\hat{q} contraint par DY)

■ basse énergie ou petit x_1

$$\blacklozenge x_1 s_{NN} \lesssim 2 m_N \epsilon$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

● Perte d'énergie

● Résumé

Conclusions

Charme intrinsèque

$$\epsilon / E_q = \mathcal{O}(1)$$

■ grands noyaux

◆ $\epsilon \propto \hat{q} L^2$

(\hat{q} contraint par DY)

■ basse énergie ou petit x_1

◆ $x_1 s_{NN} \lesssim 2 m_N \epsilon$

■ grand $x_1 \gtrsim 1 - \hat{q} m_N L^2 / s_{NN}$

◆ réduction espace de phase

$$\int_0^{E_q (1-x_1)} d\epsilon \mathcal{P}(\epsilon) \dots$$

Perte d'énergie

$$\epsilon / E_q = \mathcal{O}(1)$$

■ grands no

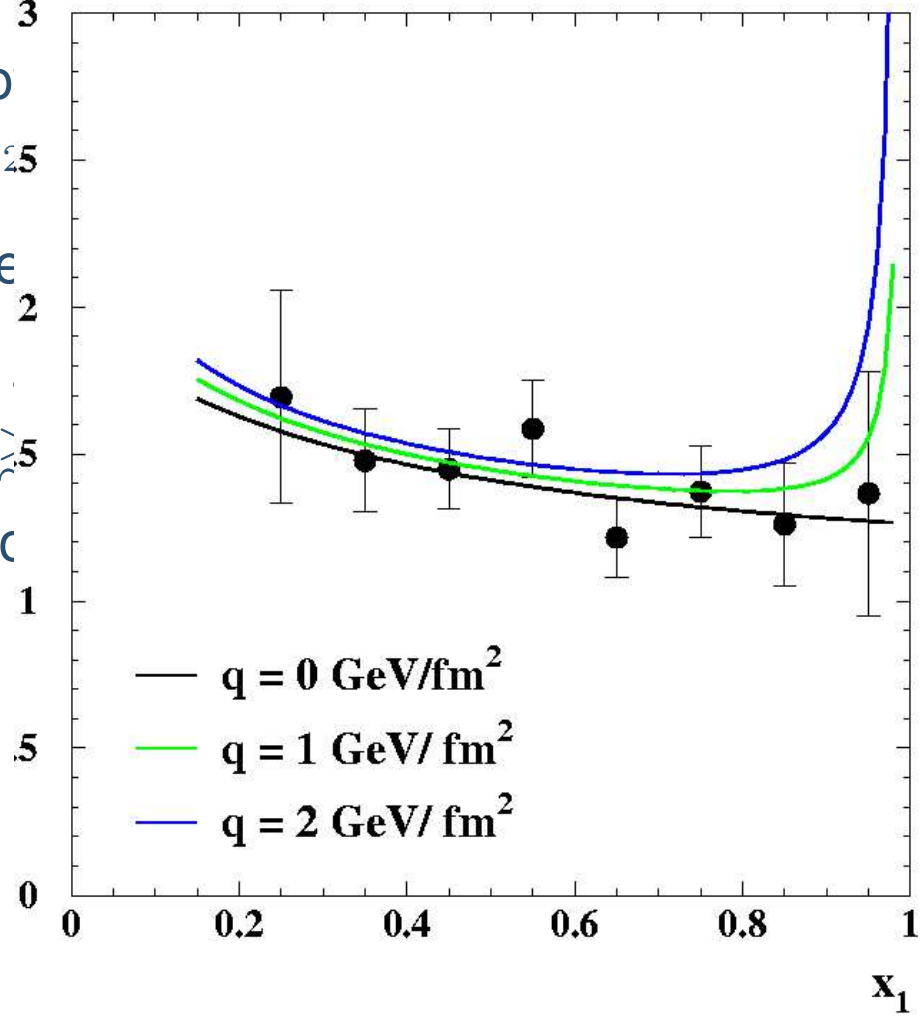
◆ $\epsilon \propto \hat{q} L^{2.5}$

■ basse éne

◆ $x_1 s_{NN}$

■ grand x_1

◆ réductic



(maint par DY)

[FA 2002]

- Introduction
- Interaction inélastique
- Shadowing
- Perte d'énergie
 - Perte d'énergie
 - Résumé
- Conclusions
- Charme intrinsèque



Résumé

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

● Perte d'énergie

● Résumé

Conclusions

Charme intrinsèque

- négligeable dans la matière nucléaire
 - ◆ à $x_F \simeq 0$ de SPS à LHC
- (potentiellement) importante
 - ◆ à $x_F < 0$ et $x_F \simeq 1$ de SPS à FNAL
- affecte également le charme ouvert
- peu de perte d'énergie en voie finale
- AA: heavy jet quenching
 - ◆ rapport D/π

(m_Q coupure IR)



Conclusions

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

● Conclusions

Charme intrinsèque

- Absorption, shadowing, . . . de nombreux mécanismes invoqués !
- Compréhension **quantitative** de la production de J/ψ à $x_F \simeq 0$
- Suppression du J/ψ à grand x_F encore **inexpliquée**

Conclusions

Introduction

Interaction inélastique

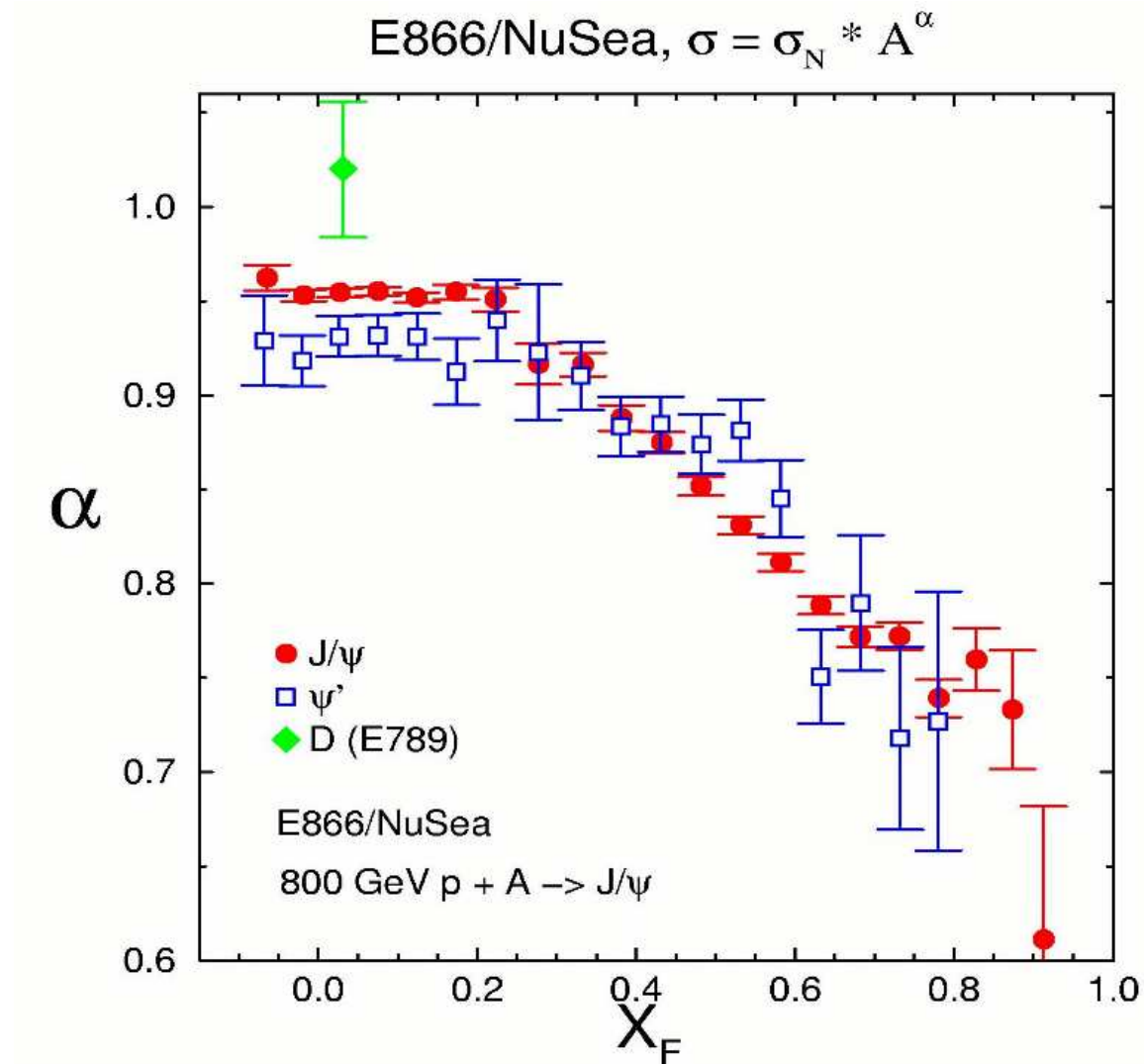
Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

● Conclusions

Charme intrinsèque



Charme intrinsèque



Charme intrinsèque

[Brodsky & Hoyer 1989]

$$|p\rangle = |uud\rangle + |uudg\rangle + \dots + |uudc\bar{c}\rangle + \dots$$

Paire $c\bar{c}$ du proton libérée sur la surface

$$R(x_F \rightarrow 1) \simeq A^{2/3-1}$$

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

● Charme intrinsèque



Charme intrinsèque

[Brodsky & Hoyer 1989]

$$|p\rangle = |uud\rangle + |uudg\rangle + \dots + |uudc\bar{c}\rangle + \dots$$

Paire $c\bar{c}$ du proton libérée sur la surface

$$R(x_F \rightarrow 1) \simeq A^{2/3-1}$$

- loi d'échelle x_F
- dépend de la quantité de charme du proton
- affecte également le charme ouvert

Introduction

Interaction inélastique

Shadowing

Perte d'énergie

Conclusions

Charme intrinsèque

● Charme intrinsèque