



Suppression de quarkonia lourds en collisions proton-noyau

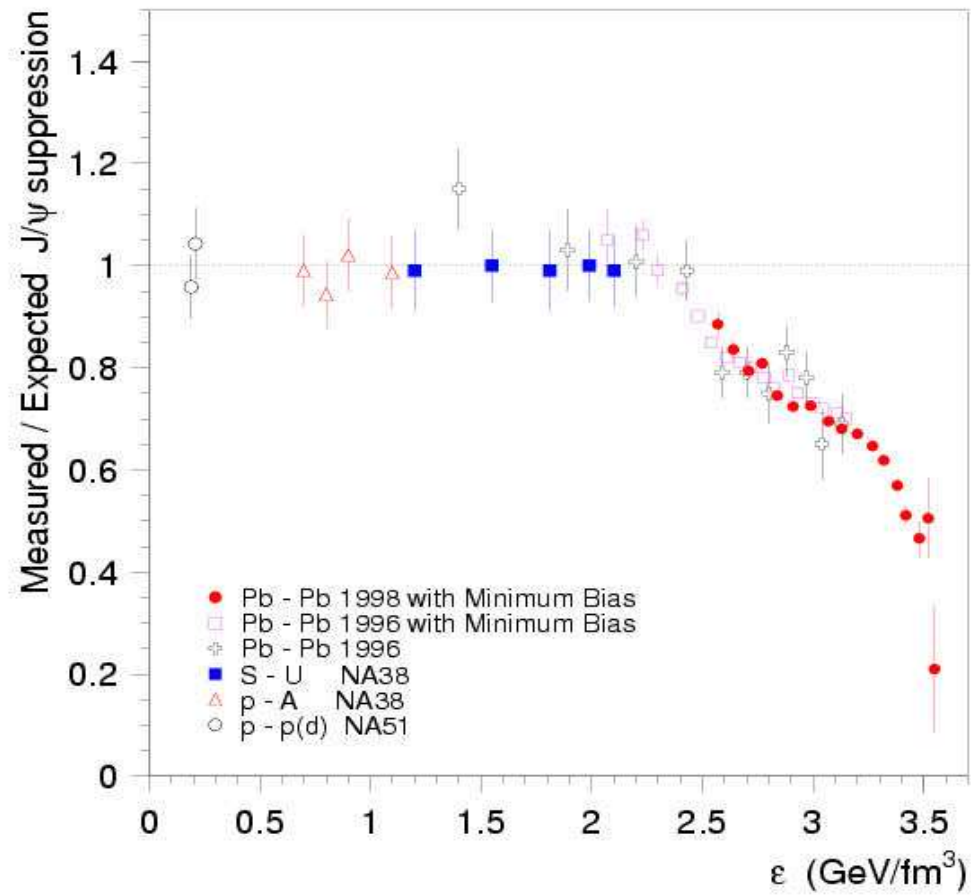
François Arleo

LPTHE, Jussieu

Orsay – Avril 2005

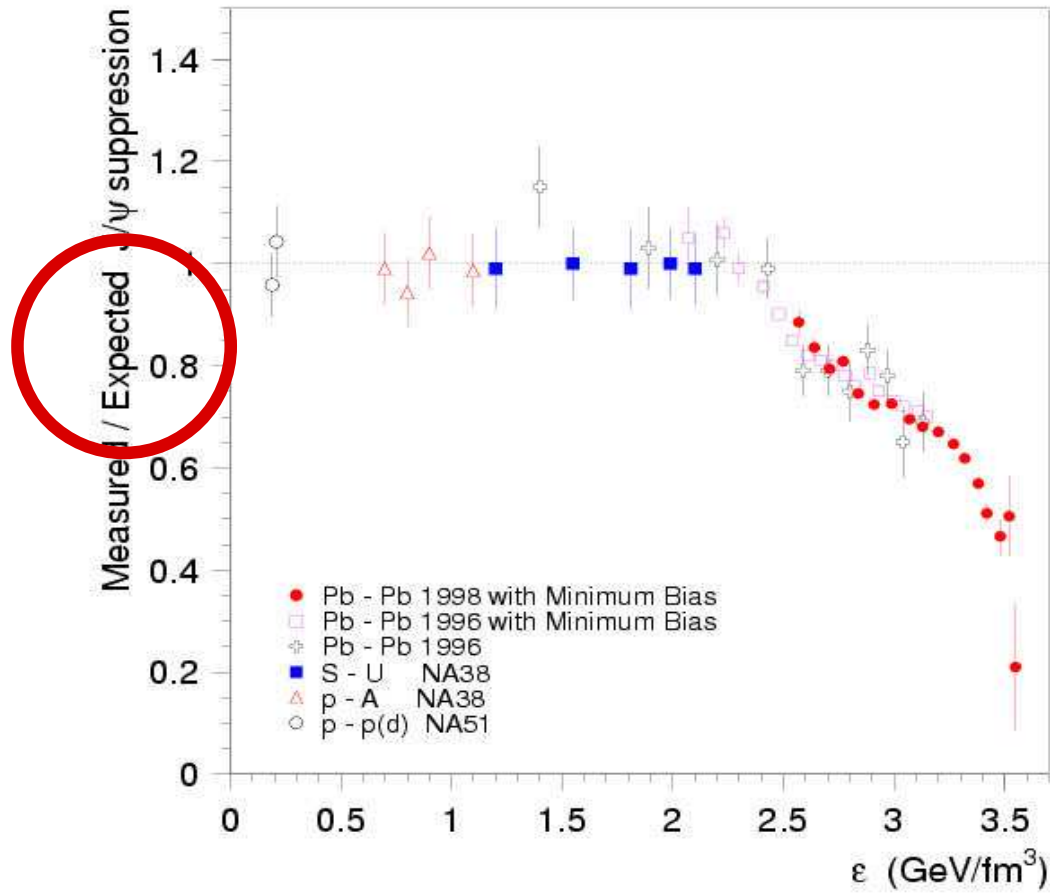


Motivations



[NA50 2000]

Motivations



[NA50 2000]

Que signifie “expected” ?

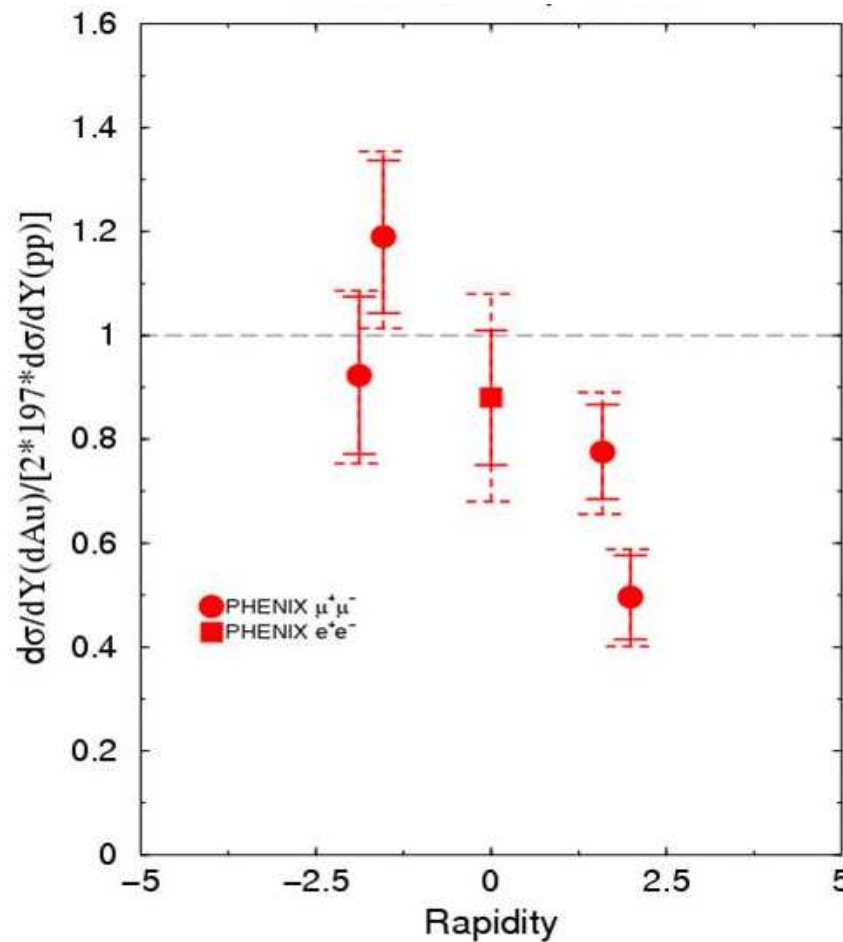
Suppression

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



Suppression

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



[PHENIX 2004]

Suppression

Pourquoi $R \neq 1$?



Suppression



Pourquoi $R \neq 1$?

- isospin
- interaction inélastique
- shadowing / saturation
- perte d'énergie
- mécanisme de production
- ...



Isospin

Le noyau est (aussi) composé de neutrons

$$R \equiv \frac{Z \sigma(p p \rightarrow J/\psi) + (A - Z) \sigma(p n \rightarrow J/\psi)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi)}$$



Isospin

Le noyau est (aussi) composé de neutrons

$$R \equiv \frac{Z \sigma(p p \rightarrow J/\psi) + (A - Z) \sigma(p n \rightarrow J/\psi)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi)}$$

- basse énergie $\sqrt{s_{NN}} \gtrsim M_{J/\psi}$ ($x_2 \lesssim 1$)
- $\bar{u}^n(x_2) \gtrsim \bar{u}^p(x_2)$ $R \gtrsim 1$

Isospin





Le noyau est (aussi) composé de neutrons

$$R \equiv \frac{Z \sigma(p p \rightarrow J/\psi) + (A - Z) \sigma(p n \rightarrow J/\psi)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi)}$$

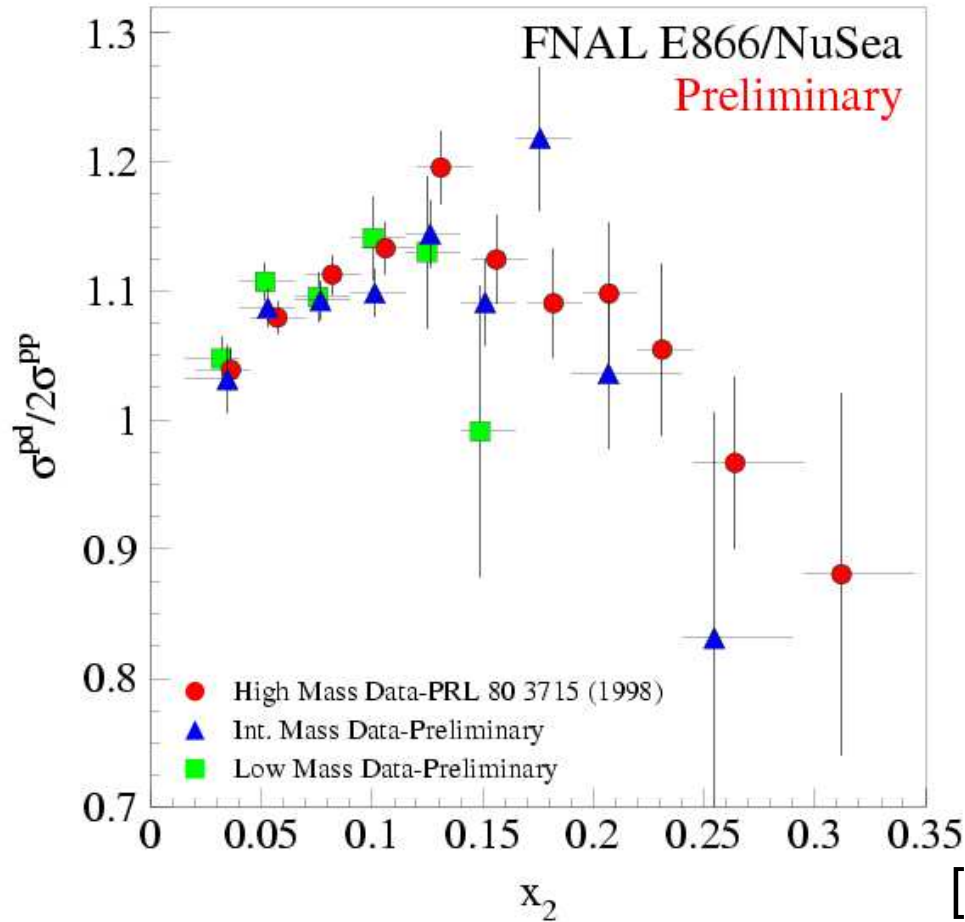
- basse énergie $\sqrt{s_{NN}} \gtrsim M_{J/\psi}$ ($x_2 \lesssim 1$)
 - $\bar{u}^n(x_2) \gtrsim \bar{u}^p(x_2)$ $R \gtrsim 1$
- Drell-Yan
 - proportionnel à e_q^2

Isos

Le noy

-  $b\bar{a}$
- 
-  $D\bar{r}$
- 

$$\sigma^{pd} / 2\sigma^{pp}$$



$\approx 2 \lesssim 1)$

Isospin

Le noyau est (aussi) composé de neutrons

$$R \equiv \frac{Z \sigma(p p \rightarrow J/\psi) + (A - Z) \sigma(p n \rightarrow J/\psi)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi)}$$

- basse énergie $\sqrt{s_{NN}} \gtrsim M_{J/\psi}$ ($x_2 \lesssim 1$)
 - $\bar{u}^n(x_2) \gtrsim \bar{u}^p(x_2)$ $R \gtrsim 1$
- Drell-Yan
 - proportionnel à e_q^2 [E866/NuSea]
- $\bar{p}, \pi^\pm + A \rightarrow J/\psi$
 - fusion de deux quarks de valence

Isospin

Le noyau est (aussi) composé de neutrons

$$R \equiv \frac{Z \sigma(p p \rightarrow J/\psi) + (A - Z) \sigma(p n \rightarrow J/\psi)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi)}$$

- basse énergie $\sqrt{s_{NN}} \gtrsim M_{J/\psi}$ ($x_2 \lesssim 1$)
 - $\bar{u}^n(x_2) \gtrsim \bar{u}^p(x_2)$ $R \gtrsim 1$
- Drell-Yan
 - proportionnel à e_q^2 [E866/NuSea]
- $\bar{p}, \pi^\pm + A \rightarrow J/\psi$
 - fusion de deux quarks de valence [NA3, E537]

Isospin

Le noyau est (aussi) composé de neutrons

$$R \equiv \frac{Z \sigma(p p \rightarrow J/\psi) + (A - Z) \sigma(p n \rightarrow J/\psi)}{A \sigma(p p \rightarrow J/\psi)}$$

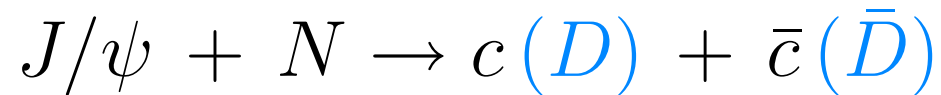
$$p A \rightarrow J/\psi$$

Faible correction à SPS ($\sqrt{s} \simeq 15 - 20$ GeV),
négligeable à RHIC (200 GeV) et LHC (5.5 TeV)



Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau



Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau

$$R \simeq \frac{1 - \exp(-2\rho \sigma_{J/\psi N} L)}{2\rho \sigma_{J/\psi N} L} \quad (L \sim A^{1/3})$$

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

- Théorie pQCD, éch. de quarks/mésons ...
- quelques mbs

Interaction inélastique

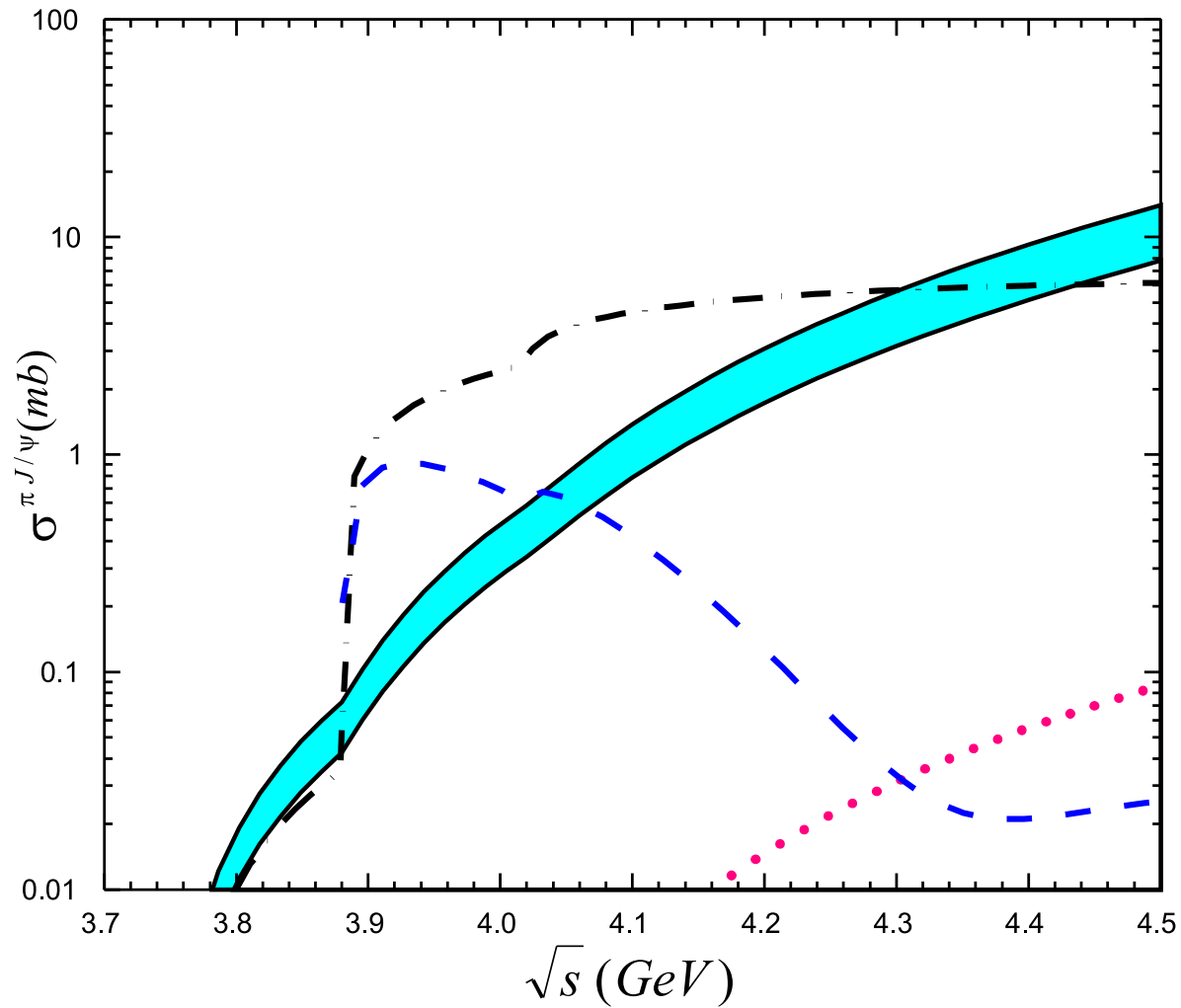
Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau

$$R \simeq \frac{1 - \exp(-2\rho \sigma_{J/\psi N} L)}{2\rho \sigma_{J/\psi N} L} \quad (L \sim A^{1/3})$$

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

- Théorie pQCD, éch. de quarks/mésons ...
- quelques mbs ... mais dépend de l'énergie

Interaction inélastique



[Rapp & Grandchamp 2003]

Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau

$$R \simeq \frac{1 - \exp(-2\rho \sigma_{J/\psi N} L)}{2\rho \sigma_{J/\psi N} L} \quad (L \sim A^{1/3})$$

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

- Théorie pQCD, éch. de quarks/mésons ...
 - quelques mbs
- Données NA38, NA50, E866/NuSea ...
 - 3 – 4 mb

Interaction inélastique

Dissociation du J/ψ par les nucléons du noyau

$$R \simeq \frac{1 - \exp(-2\rho \sigma_{J/\psi N} L)}{2\rho \sigma_{J/\psi N} L} \quad (L \sim A^{1/3})$$

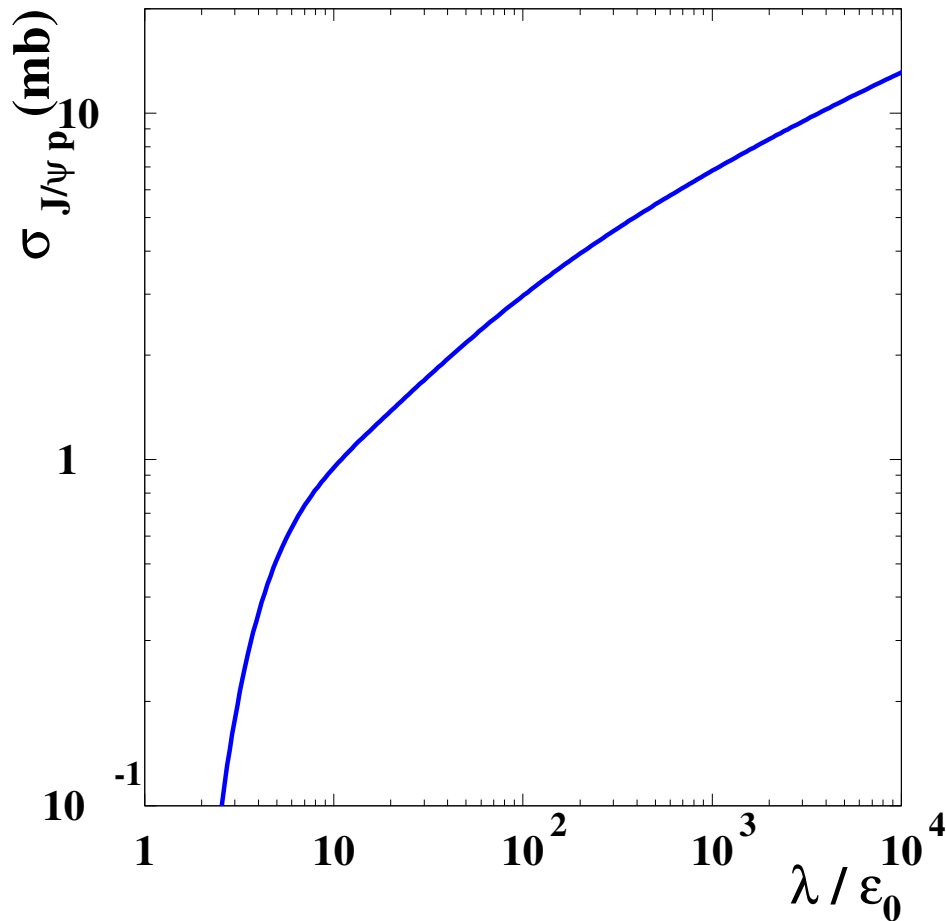
Que vaut $\sigma_{J/\psi N}$?

- Théorie pQCD, éch. de quarks/mésons ...
 - quelques mbs
- Données NA38, NA50, E866/NuSea ...
 - 3 – 4 mb

(assez) bon accord

Interaction inélastique

De SPS à LHC



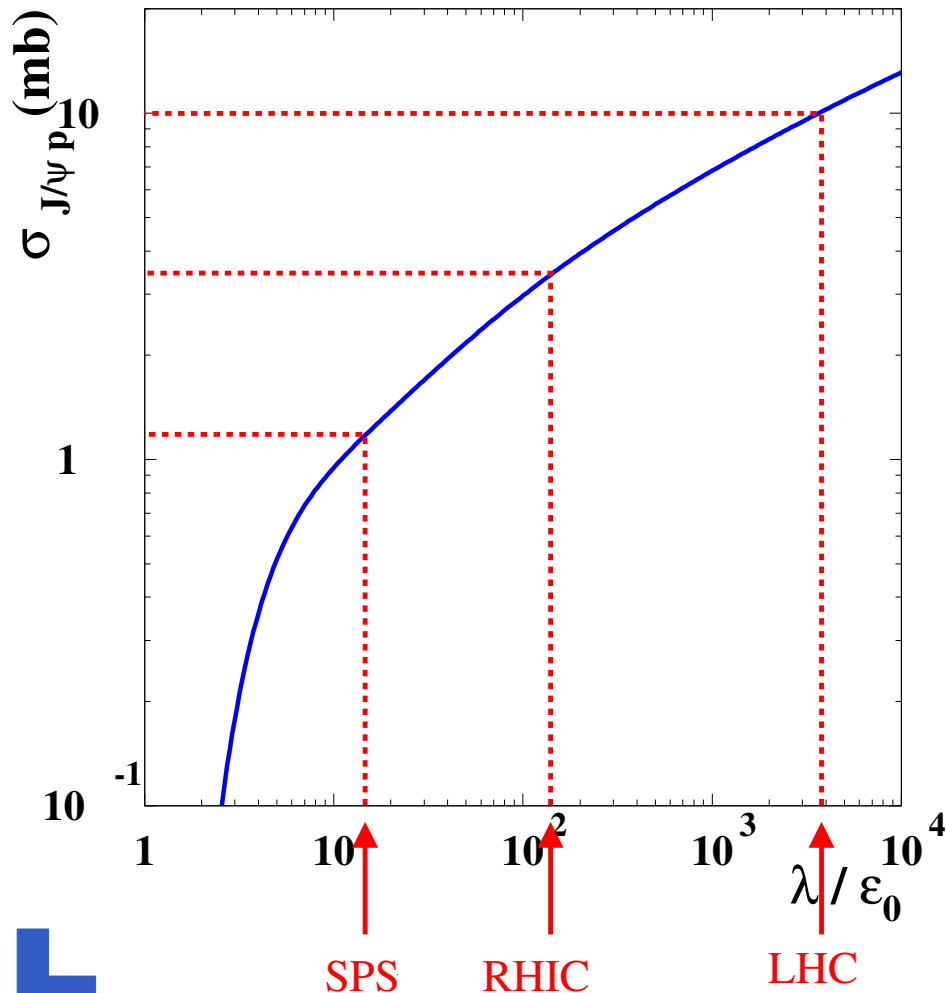
$$\sigma(\sqrt{s_{J/\psi N}}) \propto \sqrt{s_{J/\psi N}}^{2\delta}$$

$$\delta \simeq 0.25$$

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

Interaction inélastique

De SPS à LHC



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

$$\delta \simeq 0.25$$

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

Interaction inélastique

De SPS à LHC

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



Interaction inélastique

De SPS à LHC

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



Interaction inélastique

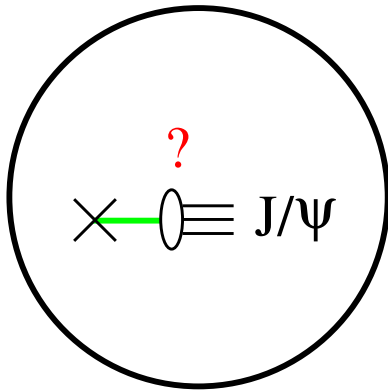
De SPS à LHC

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

mais à haute énergie ...

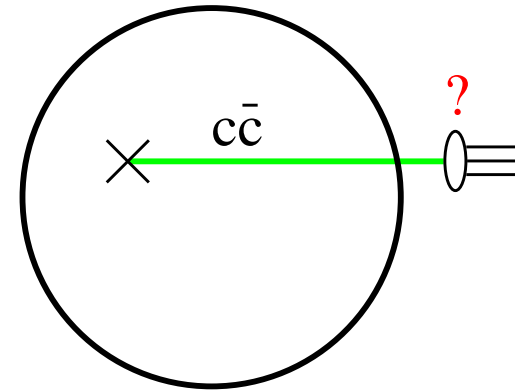
Interaction inélastique

Basse énergie



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

Haute énergie



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

● importance de la dynamique

● $\sigma_{J/\psi N}(x_2), t_f(x_2) \rightarrow R = R(x_2)$

● importance du mécanisme de production

● crucial en vue du LHC

Interaction inélastique

Résumé

- loi d'échelle $R = R(x_2)$
- deux régimes cinématiques
 - $x_2 \sim 0.1$: interaction $J/\psi - N$ ($R \simeq 0.7 - 0.8$)
 - $x_2 \ll 0.1$: interaction $c\bar{c} - N$ ($R \simeq 1 ?$)
- suppression constante de SPS à FNAL et RHIC
- plus faible dans le cas du Υ
- n'affecte pas le charme ouvert D, \bar{D}
- AA: interaction avec pions et gluons
 - cinématique très différente

Shadowing / saturation

Production de saveurs lourdes

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



Shadowing / saturation

Production de saveurs lourdes

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

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



Shadowing / saturation

Production de saveurs lourdes

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

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

A haute énergie

$$x_1 \sim x_2 \ll 1$$

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

Shadowing / saturation

Production de saveurs lourdes

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

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

A haute énergie

$$x_1 \sim x_2 \ll 1$$

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

loi d'échelle x_2

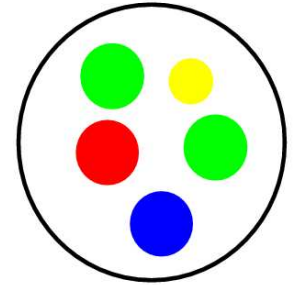
Shadowing / saturation



$$\bullet \quad x_2 \lesssim 0.1$$

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

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



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



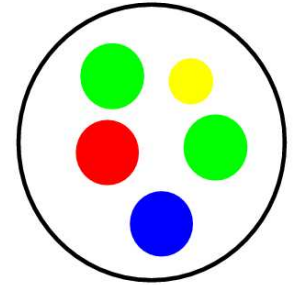
Shadowing / saturation



• $x_2 \lesssim 0.1$

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

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

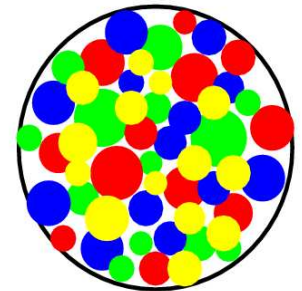


$$f_g^A(x_2, Q^2) \simeq Af_g(x_2, Q^2) \rightarrow R(x_2 \lesssim 1) \simeq 1$$

• $x_2 \ll 0.1$

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

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

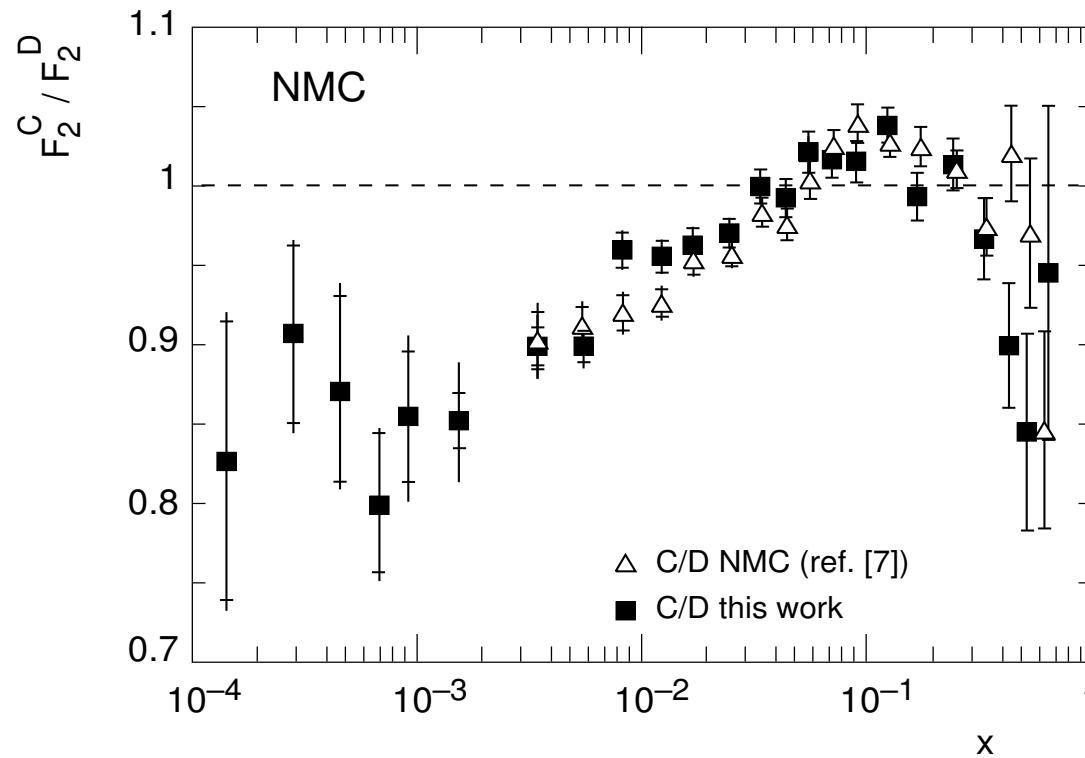


$$f_g^A(x_2, Q^2) \ll Af_g(x_2, Q^2) \rightarrow R(x_2 \ll 1) \ll 1$$



Shadowing / saturation

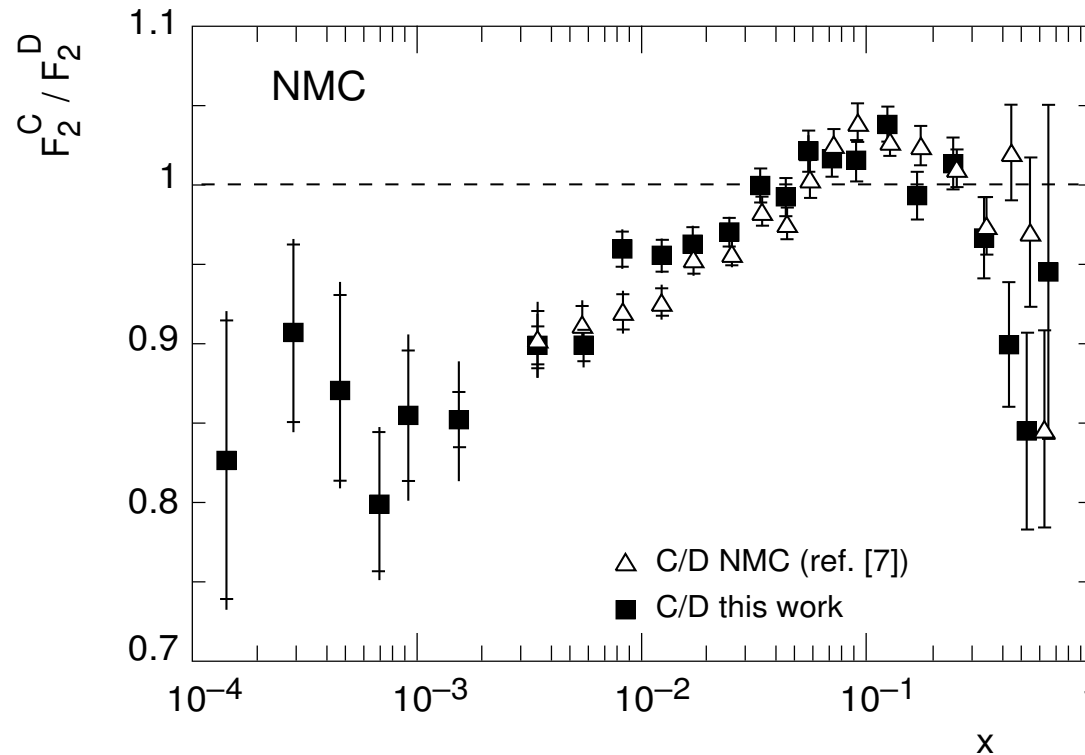
Expérimentalement



[NMC 1992]

Shadowing / saturation

Expérimentalement



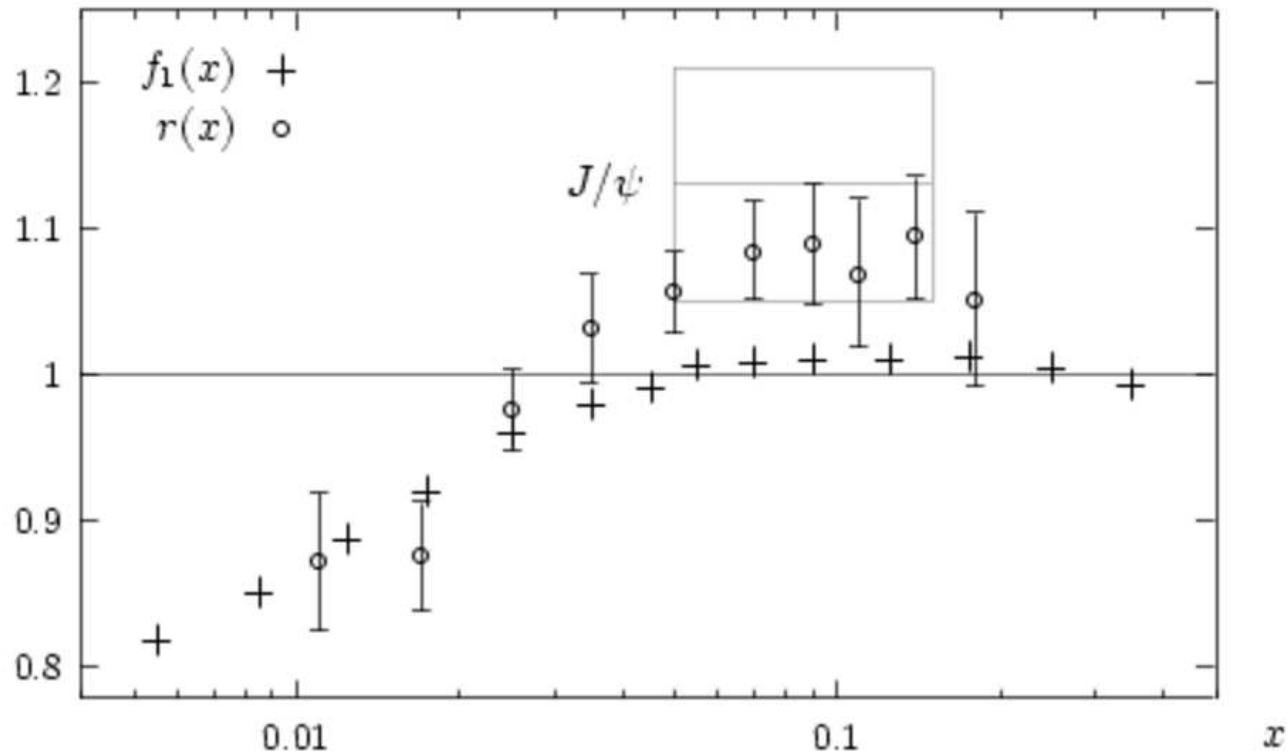
[NMC 1992]

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

Shadowing / saturation

Extractions des PDF nucléaires

$x \simeq 0.1$



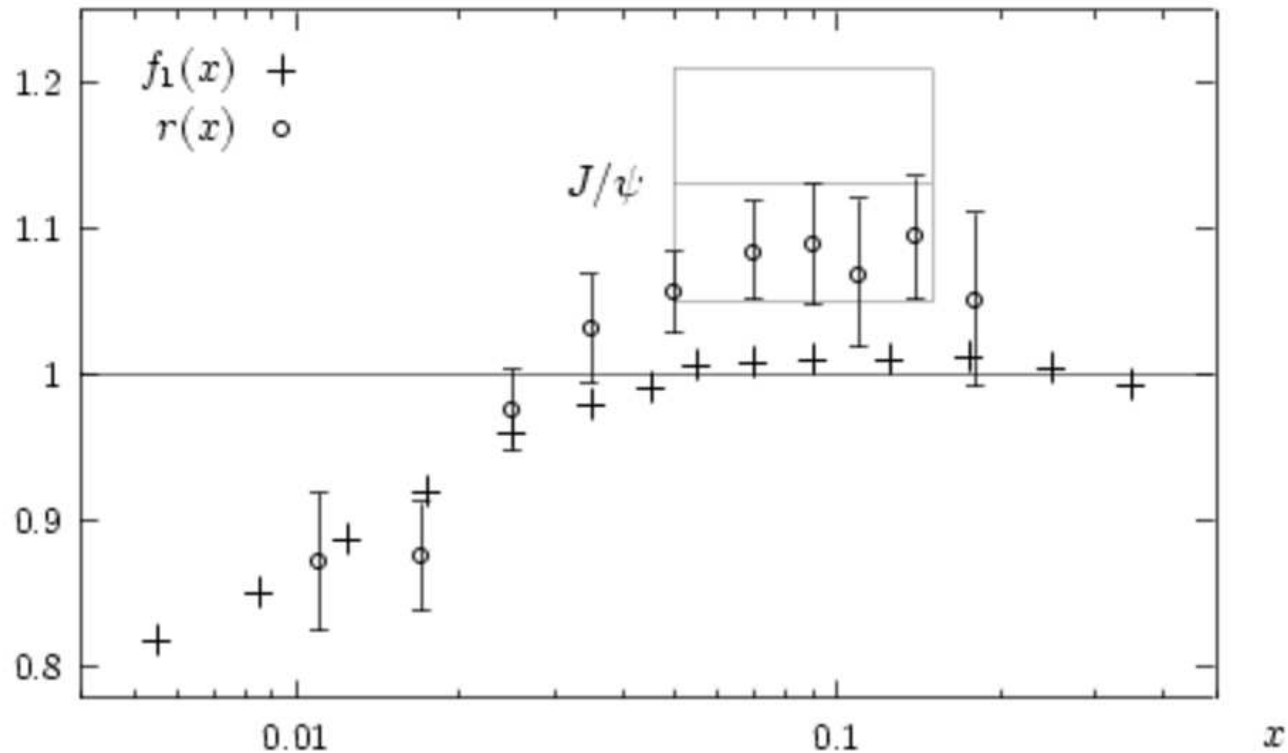
[Gousset & Pirner 1996]



Shadowing / saturation

Extractions des PDF nucléaires

$x \simeq 0.1$



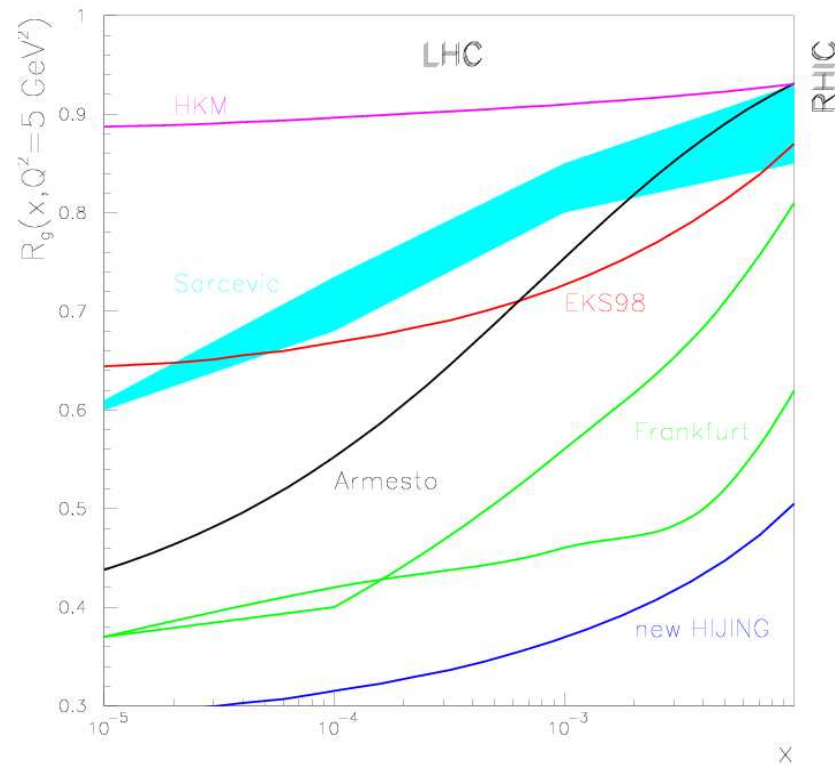
[Gousset & Pirner 1996]

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

Shadowing / saturation

Extractions des PDF nucléaires

$x \ll 0.1$

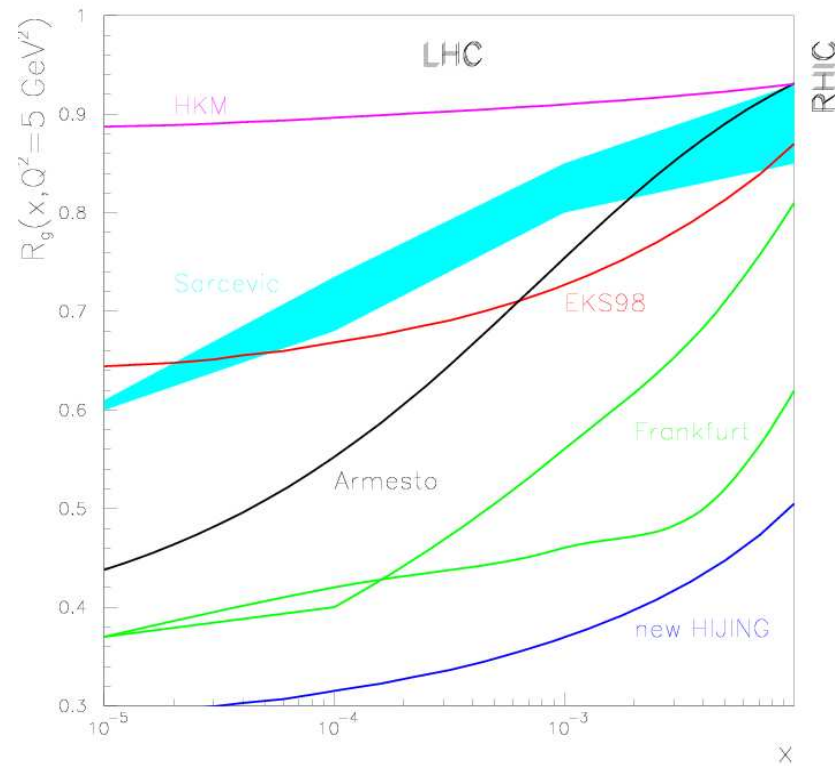


[Armesto & Salgado 2003]

Shadowing / saturation

Extractions des PDF nucléaires

$x \ll 0.1$



[Armesto & Salgado 2003]

Distributions très peu connues à petit x_2

Shadowing / saturation

Résumé

- 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 D, \bar{D}
- plus faible dans le cas du Υ

Shadowing / saturation

Résumé

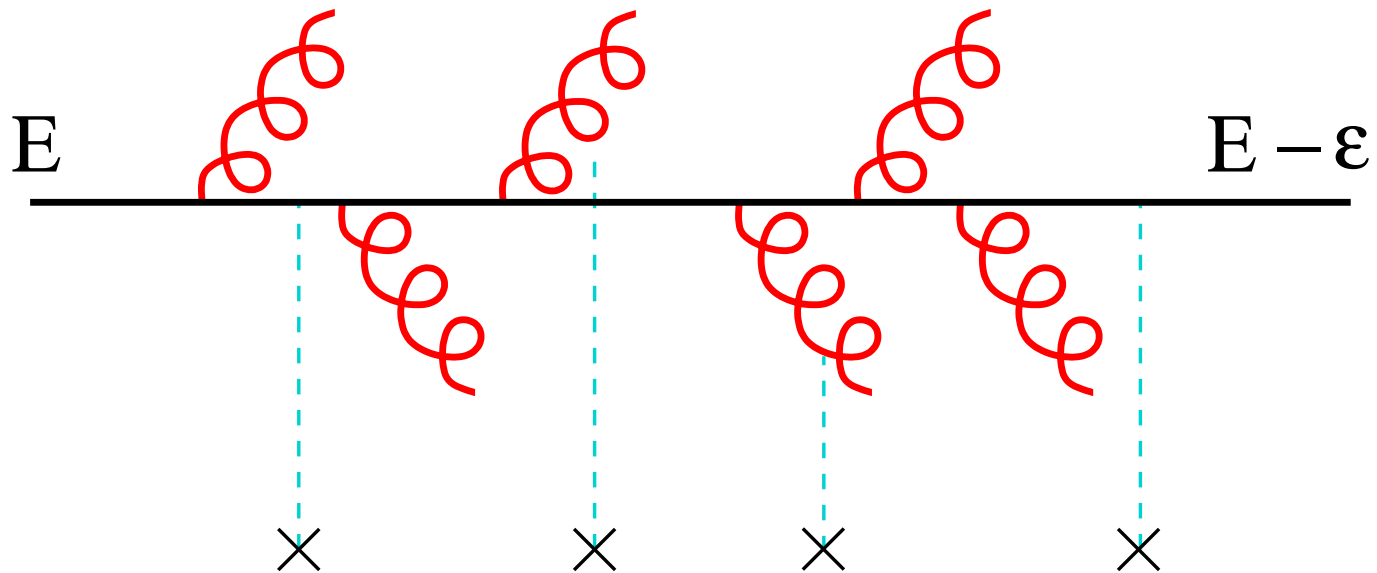
- loi d'échelle $R = R(x_2)$
- effet (très) important à petit x_2
 - haute énergie $\sqrt{s_{NN}} \gg M_{J/\psi}$
 - grande rapidité $y \gg 1$
- incertitudes grandes à petit x_2
- affecte également le charme ouvert D, \bar{D}
- plus faible dans le cas du Υ

Mécanisme de suppression

(probablement) dominant en p A à LHC

Perte d'énergie

Collisions molles du parton incident dans le noyau



Perte d'énergie

Vide

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

Milieu

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



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

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



Perte d'énergie

Vide

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

Naïvement

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

Suppression pour $\epsilon \simeq E_q$

Milieu

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

Perte d'énergie

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

• grands noyaux

• $\epsilon \propto \hat{q} L^2$

(\hat{q} contraint par DY)



Perte d'énergie

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

• grands noyaux

• $\epsilon \propto \hat{q} L^2$

(\hat{q} contraint par DY)

• basse énergie ou petit x_1

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



Perte d'énergie

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

- 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

$$\epsilon / E_q = \mathcal{O}_3$$

● grands n

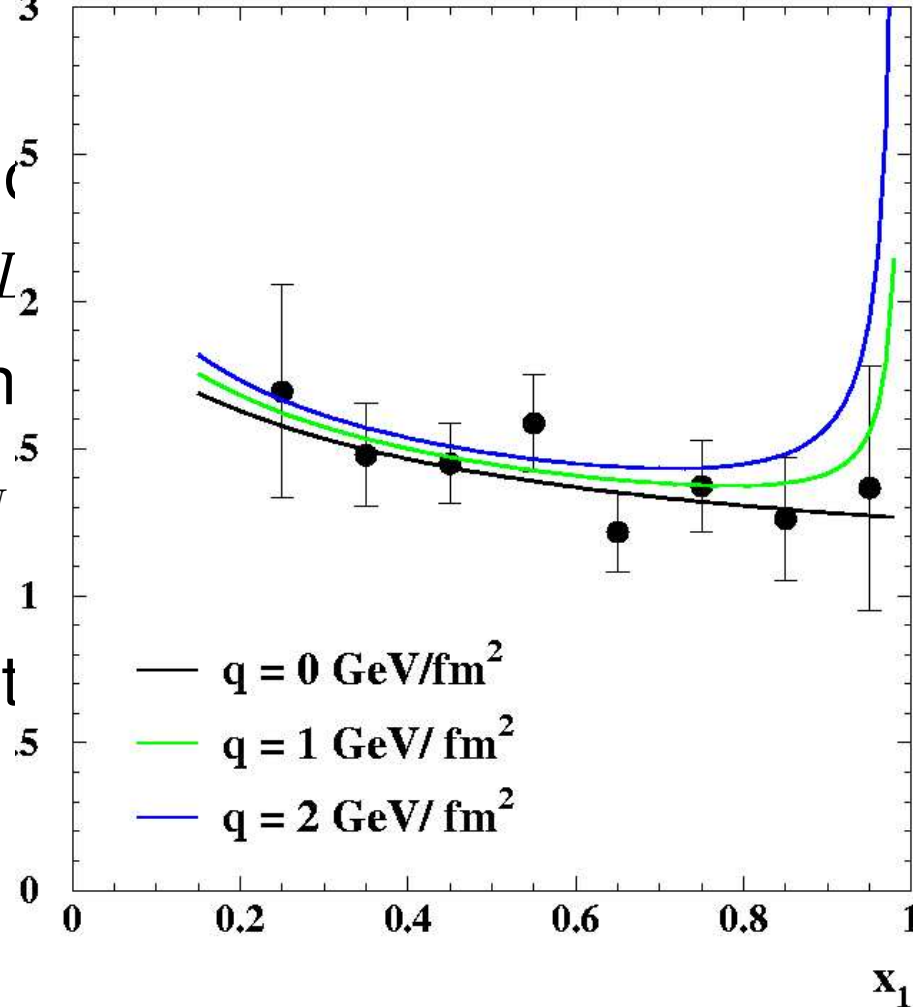
$$\epsilon \propto \hat{q} L^2$$

● basse én

$$x_1 S_{NN}$$

● grand x_1

● réduct



traint par DY)

[FA 2002]

Perte d'énergie

Résumé

- négligeable
 - 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 D, \bar{D}
- peu de perte d'énergie en voie finale (m_Q coupure IR)
- AA: heavy jet quenching
 - rapport D/π

Mécanisme de production

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

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



Mécanisme de production

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

Mécanisme de production

Comover enhancement scenario

[Hoyer & Peigné 1999]

- noyau filtre le champ de gluon
 - suppression de charmonium
- champ de plus en plus mou à grand x_1
 - suppression accrue
- loi d'échelle x_1 ($\sim x_F$)
- n'affecte pas le charme ouvert D, \bar{D}
- pas de suppression en leptoproduction

Résumé



Beaucoup d'effets pour quelque chose
qui aurait dû être si simple ...



Résumé

Beaucoup d'effets pour quelque chose
qui aurait dû être si simple ...

... d'où la nécessité de $p A \rightarrow J/\psi$ à LHC !



Résumé



Beaucoup d'effets pour quelque chose
qui aurait dû être si simple ...

... d'où la nécessité de $p A \rightarrow J/\psi$ à LHC !

néanmoins ...



Résumé



- interaction inélastique
 - photo- ou hadro- production de J/ψ près du seuil
 - $x_F < 0$ à SPS et FNAL [[HERA-B, E866/NuSea](#)]
- shadowing
 - charme ouvert à grand x_F à RHIC [[PHENIX](#)]
- perte d'énergie
 - $x_F < 0$ à SPS et FNAL [[HERA-B, E866/NuSea](#)]
- mécanisme de production
 - J/ψ vs. charme ouvert
 - lepto- vs. hadro- production

