

CGC et saturation au RHIC ?

François Gelis

CEA / DSM / SPhT

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

- Recyclage de vieilles idées
 - ◆ Modèle des partons
 - ◆ Saturation des distributions de partons
- Le “Color Glass Condensate”
- Phénoménologie du CGC
- Situation expérimentale actuelle
- Quelques prédictions pour les quarks lourds

Basé sur :

“ Searching evidence for the color glass condensate at RHIC”,
J-P. Blaizot, FG, Nucl. Phys. A 750, p148 (2005)

A quoi sert le CGC ?

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

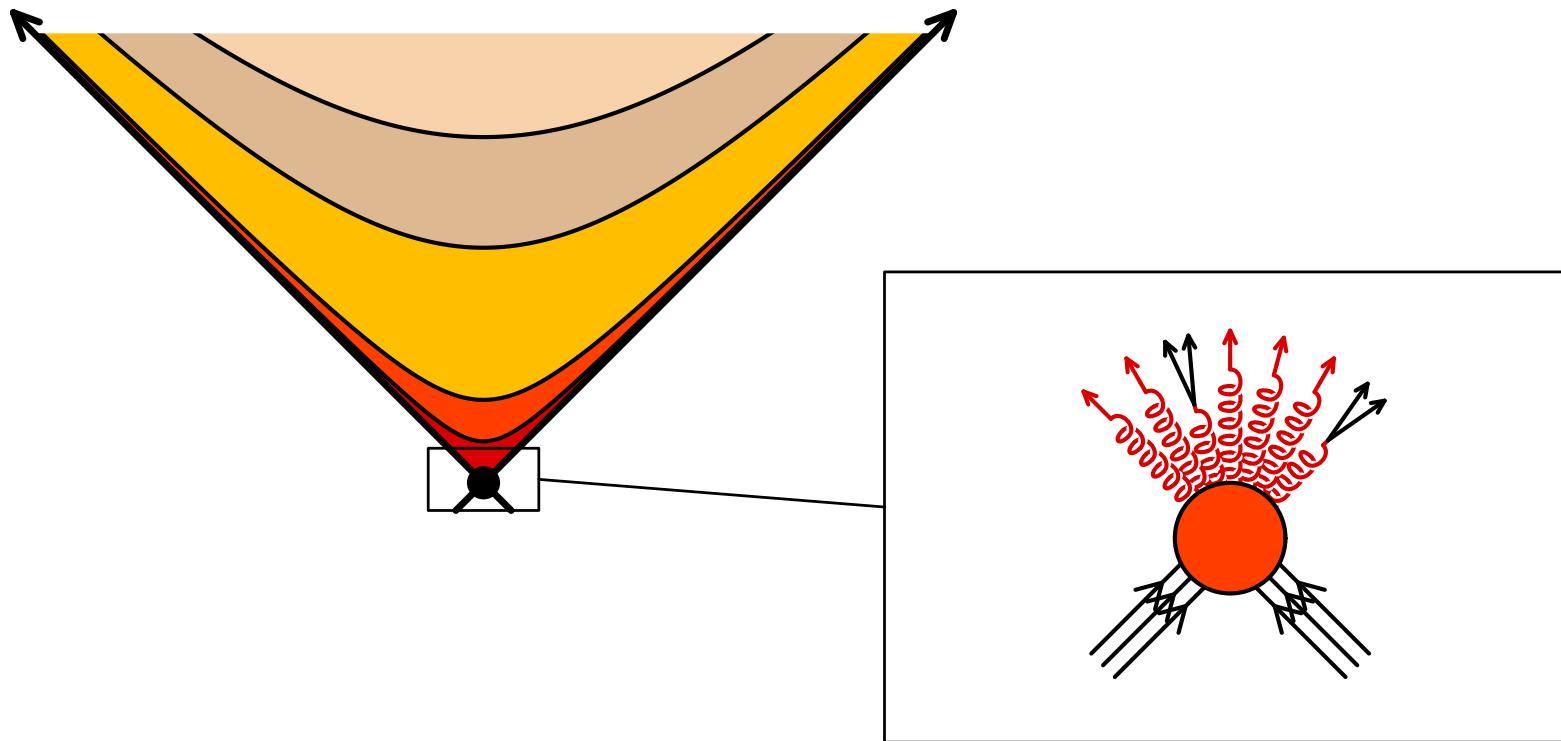
Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

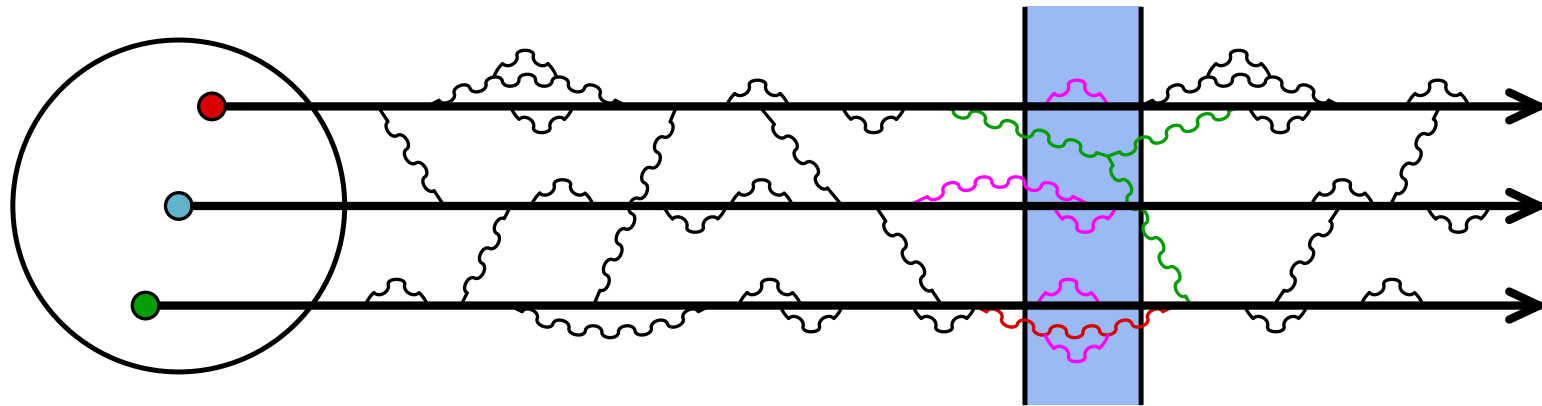
CGC et quarks lourds

Conclusions



- décrit le contenu des nucléons ou des noyaux à petit x
- permet de calculer la production de particules semi-dures
- fournit les conditions initiales pour la suite de l'évolution

Nucléon au repos



- Objet **non-perturbatif** très compliqué...
- Contient des **fluctuations à toutes les échelles d'espace-temps** plus petites que sa propre taille
- Seules les fluctuations qui vivent plus longtemps que la sonde externe interviennent dans les processus d'interaction
- Le seul rôle des fluctuations de courte durée est de renormaliser les masses et couplages
- Les interactions sont très compliquées si les constituants du nucléon ont une dynamique non triviale durant le laps de temps caractéristique de la sonde

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

● Nucléon au repos

● Nucléon à haute énergie

● Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

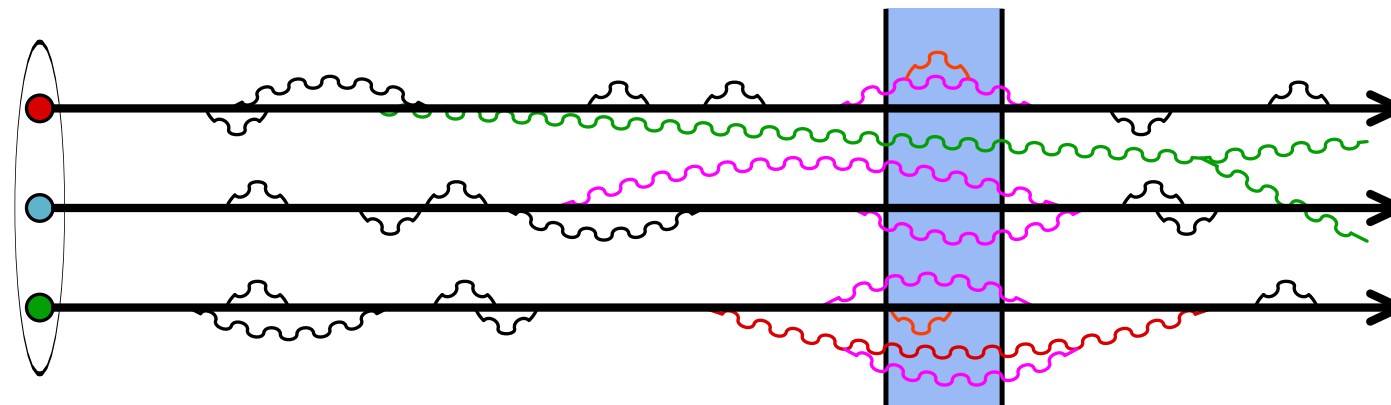
Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

Nucléon à haute énergie



- Dilatation des échelles de temps internes du nucléon
- Les interactions entre constituants ont lieu sur des échelles de temps bien plus grandes que celle de la sonde externe
 - ▷ les constituants se comportent comme s'ils étaient libres
- Beaucoup de fluctuations vivent assez longtemps pour être visibles par la sonde. Le nucléon est plus dense à haute énergie (il contient plus de gluons)
- Les fluctuations qui préexistaient sont gelées sur les échelles de temps de la sonde, et jouent le rôle de sources statiques produisant de nouveaux partons

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

● Nucléon au repos

● Nucléon à haute énergie

● Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

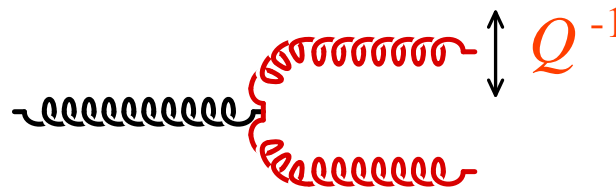
Situation expérimentale

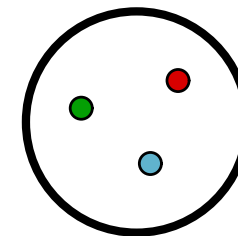
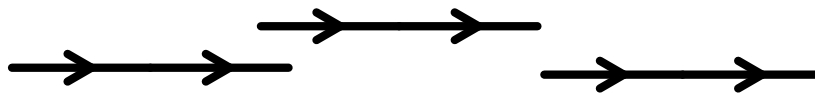
CGC et quarks lourds

Conclusions

Modèle des partons

- Au moment de l'interaction, le nucléon peut être vu comme une collection de **constituants libres**, appelés **partons**
- Il est décrit par des **distributions de partons**, qui dépendent de la fraction d'impulsion x du parton
- Il suffit de calculer la **section efficace** entre la sonde externe et les partons. Si la densité de partons est faible, un seul d'entre eux interagit
- On peut séparer la **diffusion dure, perturbative**, des **distributions de partons, non-perturbatives**, car les interactions fortes responsables des effets non-perturbatifs agissent sur des échelles de temps beaucoup plus grandes ("**factorisation**")
- Note: les distributions de partons dépendent aussi d'une "**échelle de résolution transverse**", Q :





▷ à basse énergie, un nucléon contient essentiellement des quarks de valence

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

- Evolution linéaire
- Evolution non linéaire
- Critère de saturation
- Domaine de saturation

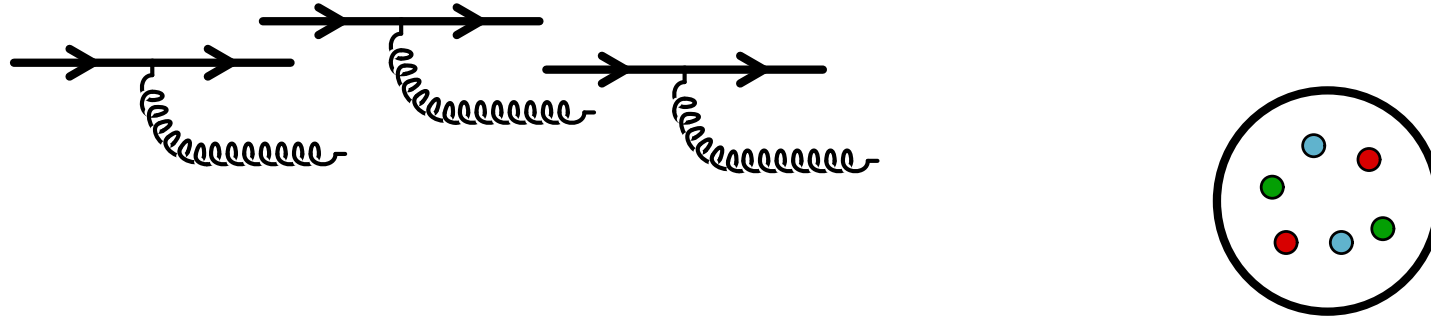
Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions



▷ lorsque l'énergie augmente, de nouveaux partons sont produits

▷ la probabilité d'émission est $\alpha_s \int \frac{dx}{x} \sim \alpha_s \ln\left(\frac{1}{x}\right)$, où x est la fraction d'impulsion longitudinale du gluon produit

▷ à petit x (i.e. grande énergie), ces corrections doivent être resommées

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

● Evolution linéaire

● Evolution non linéaire

● Critère de saturation

● Domaine de saturation

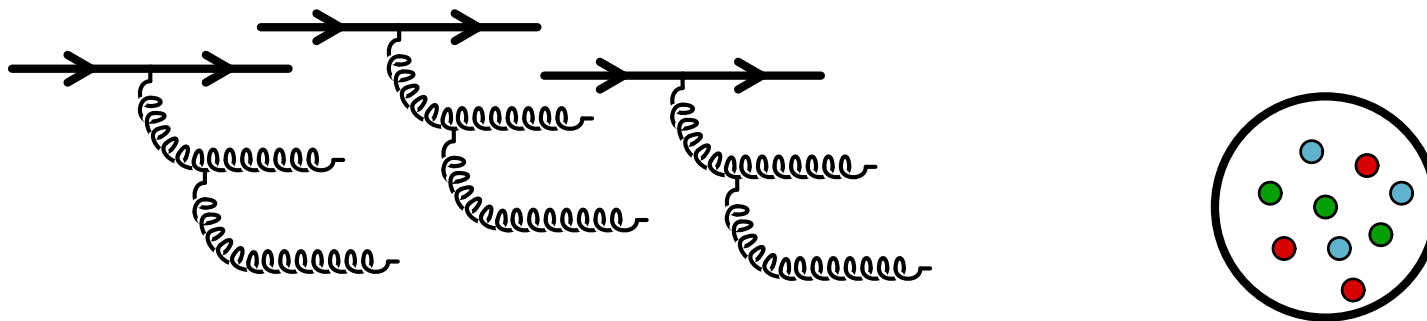
Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions



▷ tant que la densité de partons reste faible, son évolution avec l'énergie est **linéaire**: le nombre de partons produits à une étape donnée dépend linéairement du nombre de partons à l'étape précédente (BFKL)

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

● Evolution linéaire

● Evolution non linéaire

● Critère de saturation

● Domaine de saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

● Evolution linéaire

● Evolution non linéaire

● Critère de saturation

● Domaine de saturation

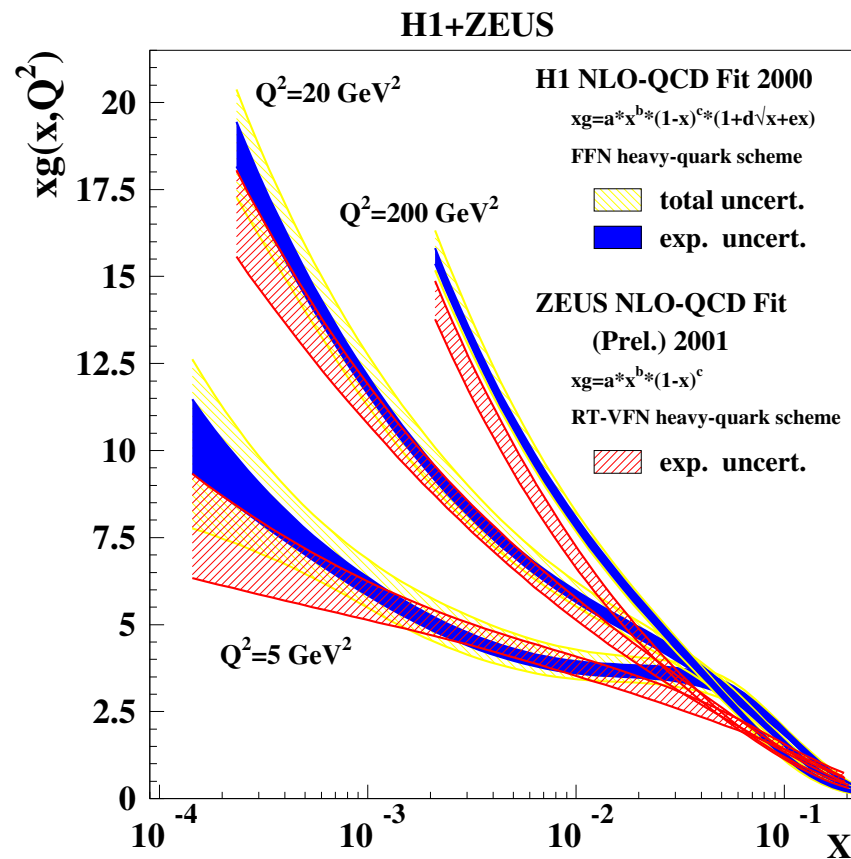
Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

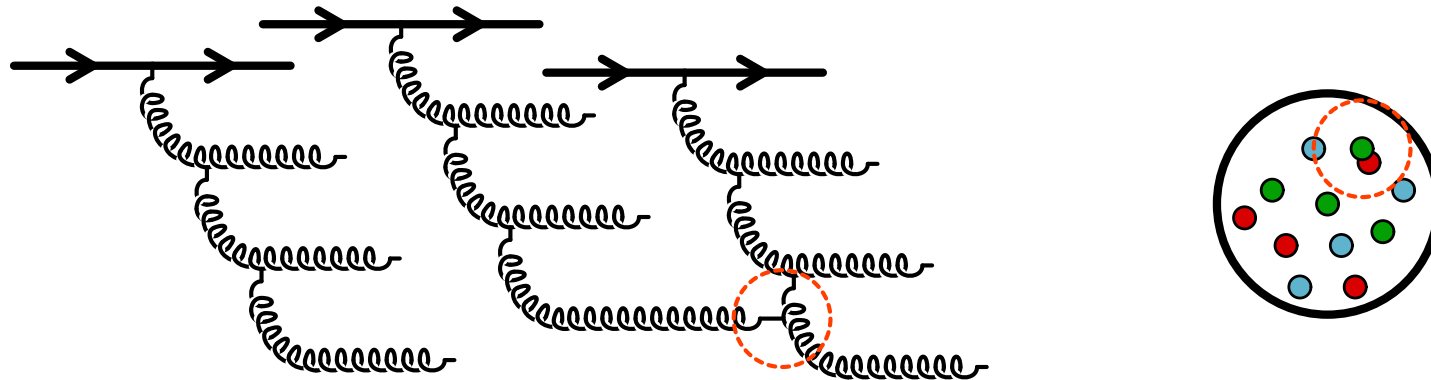
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions



- La distribution de gluons augmente fortement lorsque $x \rightarrow 0$
- ...mais la croissance de $xG(x, Q^2)$ ne peut pas se poursuivre indéfiniment sous peine de violer l'unitarité



- ▷ la densité de partons finit par être assez grande pour qu'ils se superposent
- ▷ la recombinaison des partons devient favorable
- ▷ à partir de là, l'évolution est **non linéaire**:
le nombre de partons produits à une étape donnée dépend non-linéairement du nombre de partons présents à l'étape précédente

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

- Evolution linéaire
- Evolution non linéaire
- Critère de saturation
- Domaine de saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

Gribov, Levin, Ryskin (1983)

- Nombre de gluons par unité de surface:

$$\rho \sim \frac{xG(x, Q^2)}{\pi R^2}$$

- Section efficace de recombinaison:

$$\sigma_{gg \rightarrow g} \sim \frac{\alpha_s}{Q^2}$$

- La recombinaison a lieu si $\rho \sigma_{gg \rightarrow g} \gtrsim 1$, i.e. $Q^2 \lesssim Q_s^2$, avec:

$$Q_s^2 \sim \frac{\alpha_s xG(x, Q_s^2)}{\pi R^2} \sim A^{1/3} \frac{1}{x^{0.3}}$$

- À la saturation, la densité dans l'espace des phases est:

$$\frac{dN_g}{d^2 \vec{x}_\perp d^2 \vec{p}_\perp} \sim \frac{\rho}{Q^2} \sim \frac{1}{\alpha_s}$$

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

- Evolution linéaire
- Evolution non linéaire
- Critère de saturation
- Domaine de saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

- Evolution linéaire
- Evolution non linéaire
- Critère de saturation
- **Domaine de saturation**

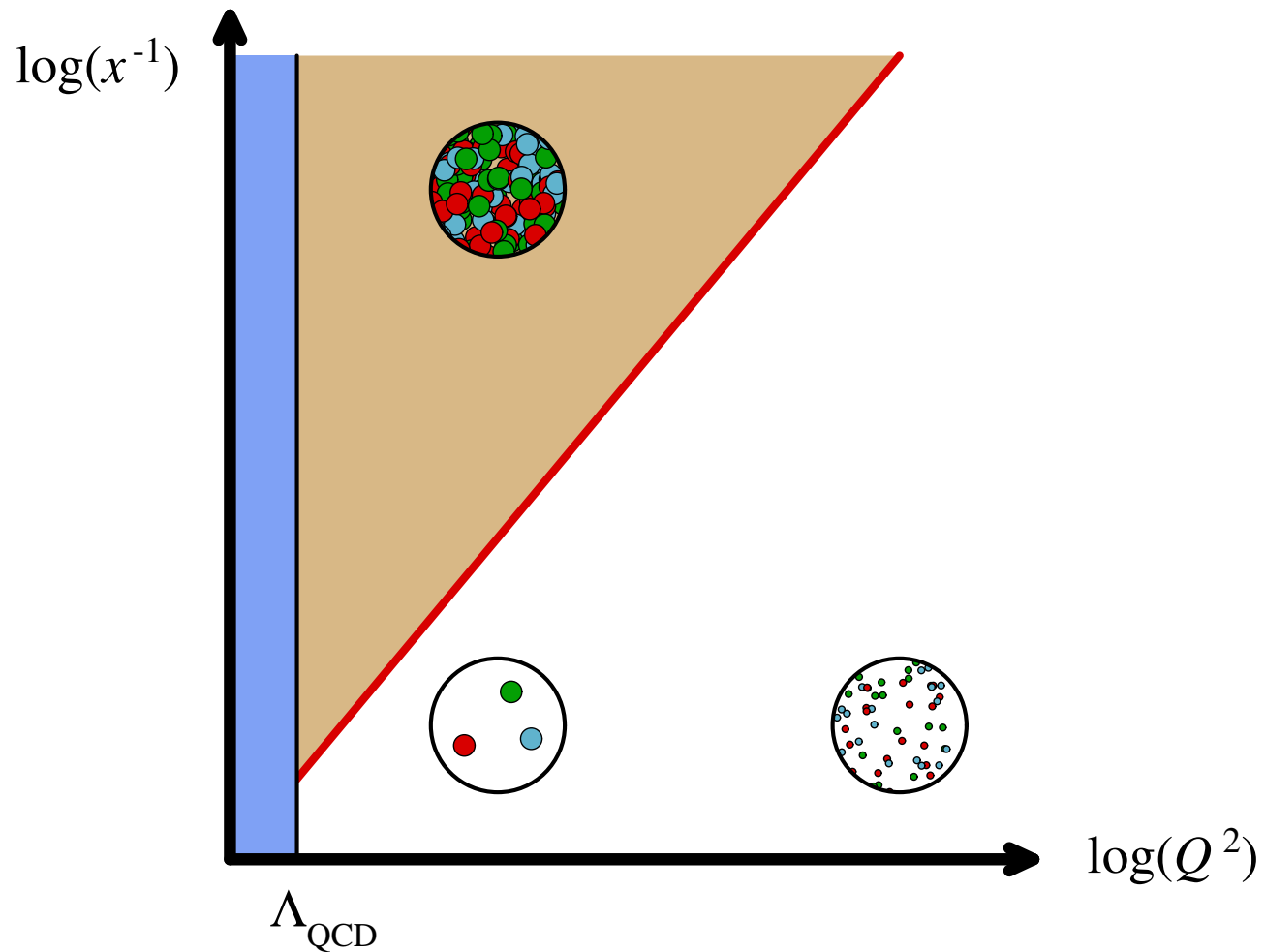
Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions



- Frontière définie par $Q^2 = Q_s^2(x)$

McLerran, Venugopalan (1994)

Iancu, Leonidov, McLerran (2001)

- Les modes à petit x ont un grand nombre d'occupation
 - ▷ ils peuvent être décrits par un **champ de couleur classique** A^μ
- Les modes à grand x , ralentis par la dilatation des durées, sont décrits comme des **sources de couleur statiques** ρ
- Le champ classique obéit aux équations de Yang-Mills :

$$D_\nu F^{\nu\mu} = J^\mu = \delta^{\mu+} \delta(x^-) \rho(\vec{x}_\perp)$$

- Les sources de couleur ρ sont **aléatoires**, et décrites par une **distribution statistique** $W_{x_0}[\rho]$, où x_0 est la séparation entre “petit x ” et “grand x ”
- Une équation d'évolution (JIMWLK) contrôle le changement de $W_{x_0}[\rho]$ avec x_0 (généralise BFKL au régime saturé)

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

● Degrés de liberté

● Modèle MV

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

● Degrés de liberté

● Modèle MV

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

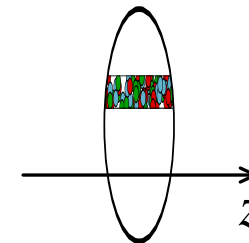
McLerran (mi 2000)

- **Color** : à peu près évident...
- **Glass** : le système a des degrés de liberté dont les échelles de temps sont beaucoup plus grandes que les échelles de temps pour les processus d'interaction. De plus, ces degrés de liberté sont stochastiques, comme dans les “verres de spin”
- **Condensate** : les modes à petit x sont aussi densément peuplés que possible (la densité reste finie, de l'ordre de $1/\alpha_s$, à cause d'interactions répulsives entre gluons)

Modèle de McLerran-Venugopalan

- L'équation JIMWLK doit être complétée par une condition initiale, donnée à un certain x_0
- Comme pour DGLAP, la condition initiale est en général non-perturbative
- Le modèle de **McLerran-Venugopalan** est souvent utilisé comme condition initiale à des x_0 modérés pour un **noyau** :

- ◆ distribution aléatoire de partons
- ◆ nombreux partons dans chaque "tube"
- ◆ pas de corrélations à des \vec{x}_\perp différents

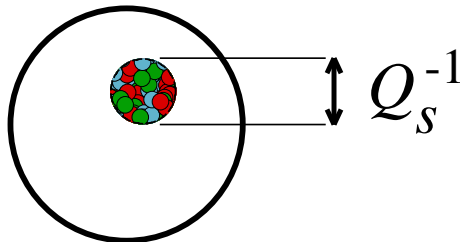


- Le modèle MV suppose que la densité de charges de couleur $\rho(\vec{x}_\perp)$ a une distribution **gaussienne** :

$$W_{x_0}[\rho] = \exp \left[- \int d^2 \vec{x}_\perp \frac{\rho(\vec{x}_\perp) \rho(\vec{x}_\perp)}{2\mu^2(\vec{x}_\perp)} \right]$$

Longueur de corrélation

- Dans un nucléon à basse énergie, la longueur de corrélation entre charges de couleur est de l'ordre de la taille du nucléon, i.e. $1/\Lambda_{QCD} \sim 1 \text{ fm}$. En effet, l'écrantage de la couleur vient du confinement, qui est contrôlé par l'échelle non-perturbative Λ_{QCD}
- À haute énergie (petit x), les partons sont empilés bien plus densément, et la neutralisation de la couleur a lieu sur des distances de l'ordre de $1/Q_s \ll 1/\Lambda_{QCD}$



- Cela implique que tous les hadrons et noyaux se comportent de la même façon à haute énergie. Dans ce sens, le régime à petit x décrit par le CGC est universel

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

● Longueur de corrélation

● Shadowing

● Collisions multiples

● Scaling géométrique

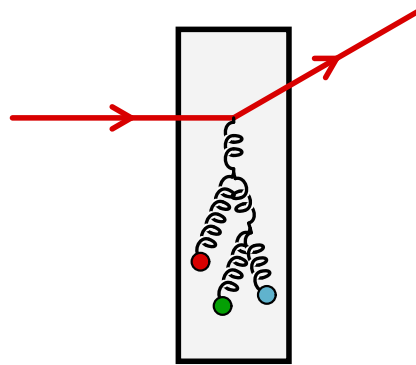
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

Leading twist shadowing

- Interactions mutuelles entre les partons de la cible :



- ◆ Ces interactions sont les mêmes que celles qui sont responsables de la saturation
- ◆ À petit x , la fonction d'onde d'un parton "déborde" du nucléon qui le contient, de sorte qu'il peut aussi interagir avec les partons des autres nucléons. Cela entraîne :

$$xG_{\text{noyau}}(x, Q^2) < A xG_{\text{nucleon}}(x, Q^2)$$

- ◆ À petit x , on observe une suppression des sections efficaces :

$$d\sigma_{pA}/d^2\vec{p}_\perp \sim A^\alpha \quad \text{avec} \quad \alpha < 1$$

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

● Longueur de corrélation

● Shadowing

● Collisions multiples

● Scaling géométrique

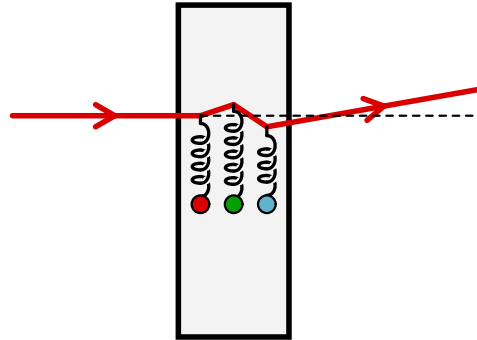
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

Collisions multiples

- À cause de la grande densité de partons à petit x dans la cible, la sonde externe peut interagir plusieurs fois :



- ◆ L'une des collisions "produit" l'état final, et les autres ne font que changer son impulsion ("higher twist shadowing")
- ◆ Chaque collision additionnelle est une correction $\alpha_s A^{1/3} \mu^2 / p_{\perp}^2$
 - ▷ effet important à petit p_{\perp} , malgré la suppression en α_s
- ◆ À l'ordre dominant, les collisions multiples affectent seulement la distribution en impulsion des particules finales, pas leur nombre total. La suppression à petit p_{\perp} est compensée par un accroissement à plus grand p_{\perp} (**effet Cronin**)

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

● Longueur de corrélation

● Shadowing

● Collisions multiples

● Scaling géométrique

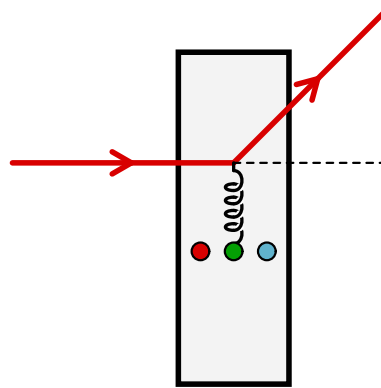
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

Collisions multiples

- À grand p_{\perp} , la diffusion est dominée par une seule collision :



- ◆ Résultat standard pour une marche aléatoire dans un potentiel externe, lorsque le potentiel ne décroît pas très vite à grande impulsion (“intermittence”)
 - ◆ Les sections efficaces différentielles varient comme le nombre atomique A à grand p_{\perp}
- Note : le modèle MV décrit bien les collisions multiples, mais ne contient pas de “leading twist” shadowing (ce dernier arrive par l’évolution vers les petits x - JIMWLK)

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

● Longueur de corrélation

● Shadowing

● Collisions multiples

● Scaling géométrique

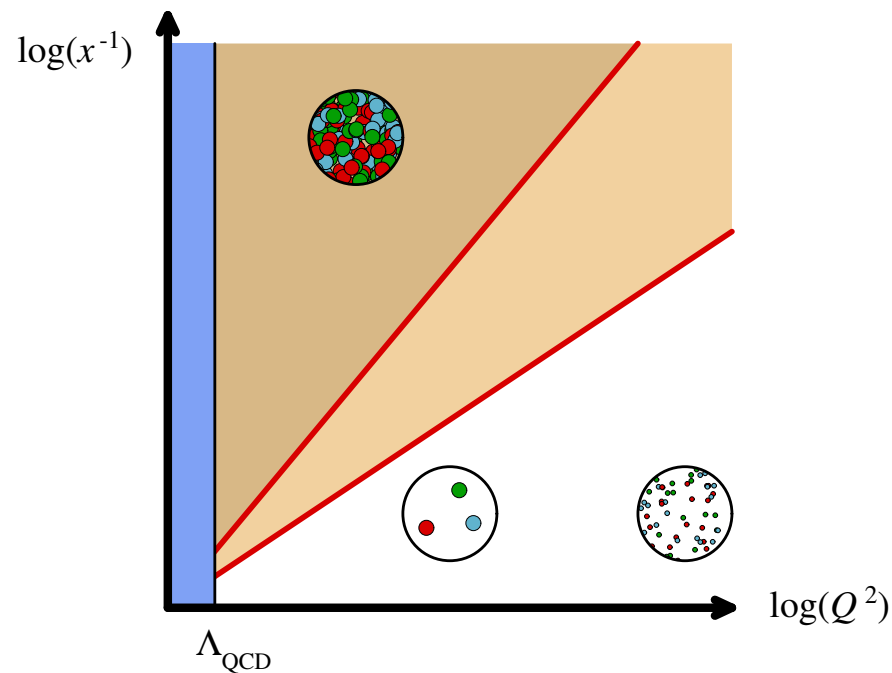
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions

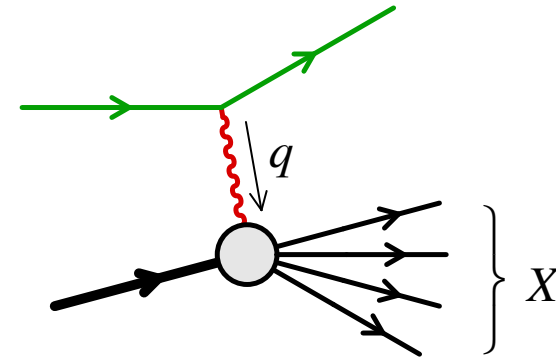
Scaling géométrique

- A priori, les sections efficaces dépendent de deux quantités : le k_{\perp} échangé avec le noyau et la fraction d'impulsion x
- Dans la région de saturation ($k_{\perp} \lesssim Q_s(x)$), elles ne dépendent plus que du rapport $k_{\perp}/Q_s(x)$
- Cette invariance d'échelle est en fait valide dans une région qui s'étend au delà du domaine de saturation: $k_{\perp} \lesssim Q_s^2(x)/\Lambda$

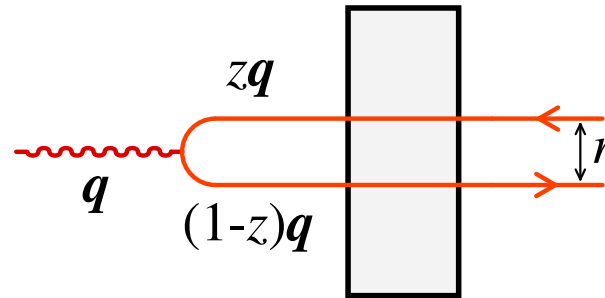


Deep Inelastic Scattering

- La sonde est parfaitement connue :



- Dans un référentiel où le photon virtuel possède une grande énergie :

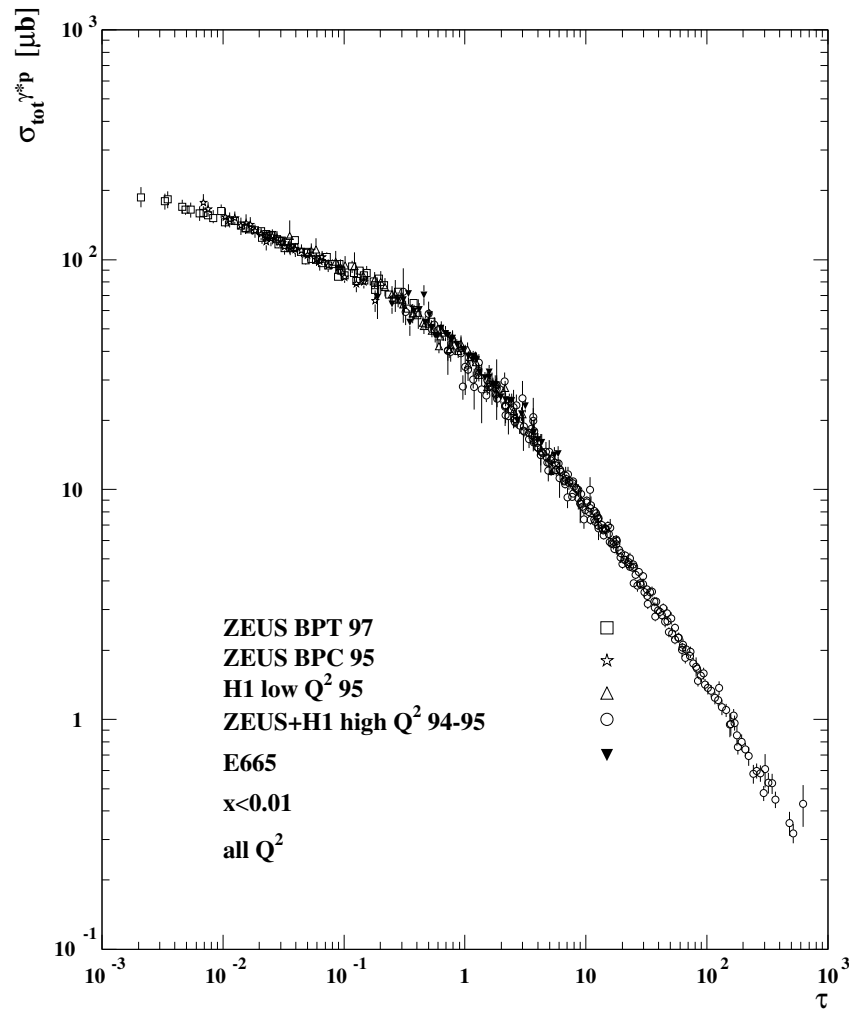


- La fonction de structure F_2 est déterminée par la section efficace d'un "dipole" $q\bar{q}$ avec la cible :

$$F_2 \sim \sigma_{\gamma^* p}(x, Q^2) = \int_0^\infty r dr \int_0^1 dz |\psi(z, r, Q^2)|^2 \sigma_{\text{dipole}}(x, r)$$

Deep Inelastic Scattering

- Scaling “géométrique” : $F_2(x, Q^2) = F_2(\tau \equiv Q^2/Q_s^2(x))$



A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

● Deep Inelastic Scattering

● Collisions noyau-noyau

● Collisions proton-noyau

CGC et quarks lourds

Conclusions

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

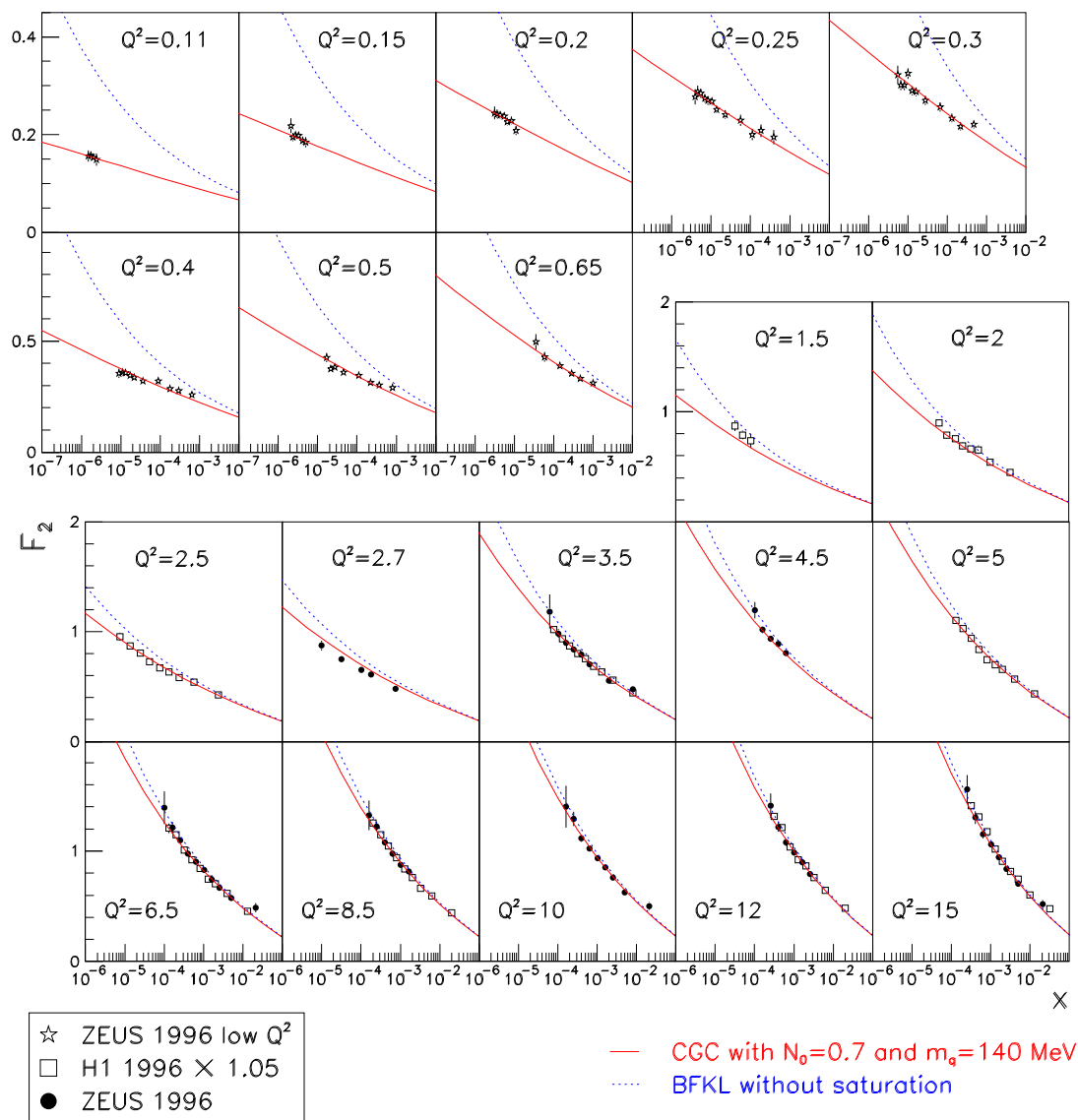
● Deep Inelastic Scattering

● Collisions noyau-noyau

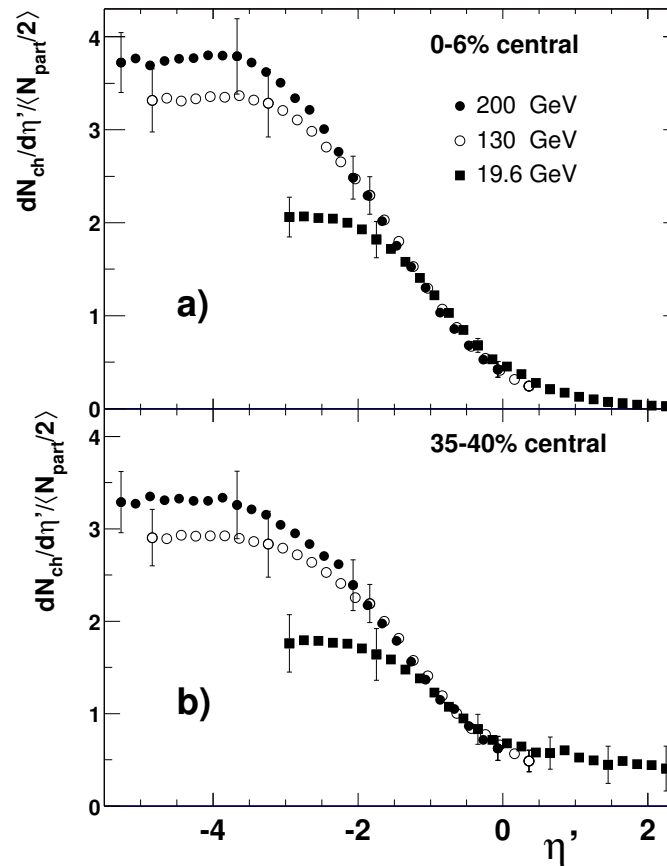
● Collisions proton-noyau

CGC et quarks lourds

Conclusions



- Le problème majeur est que le CGC décrit seulement les premiers instants après la collision ($\tau \lesssim 0.2$ fm/c), alors que la plupart des quantités observables subissent d'importantes modifications du fait des interactions avec le plasma
- En fait, par définition, la **thermalisation** (si elle a lieu) implique que le système "oublie" tous les détails de ses conditions initiales...
- Seules des quantités globales, comme la multiplicité, peuvent rester inchangées jusqu'à la fin de la collision
- La dépendance de la multiplicité totale à RHIC en fonction de l'énergie dans le centre de masse \sqrt{s} et de la centralité de la collision est correctement prédite par le CGC
- Le CGC a également été utilisé afin de fournir les conditions initiales dans une description hydrodynamique de l'évolution du système



- Illustre l'idée selon laquelle booster un hadron crée de nouveaux partons à petit x , sans changer la distribution aux plus grandes valeurs de x

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

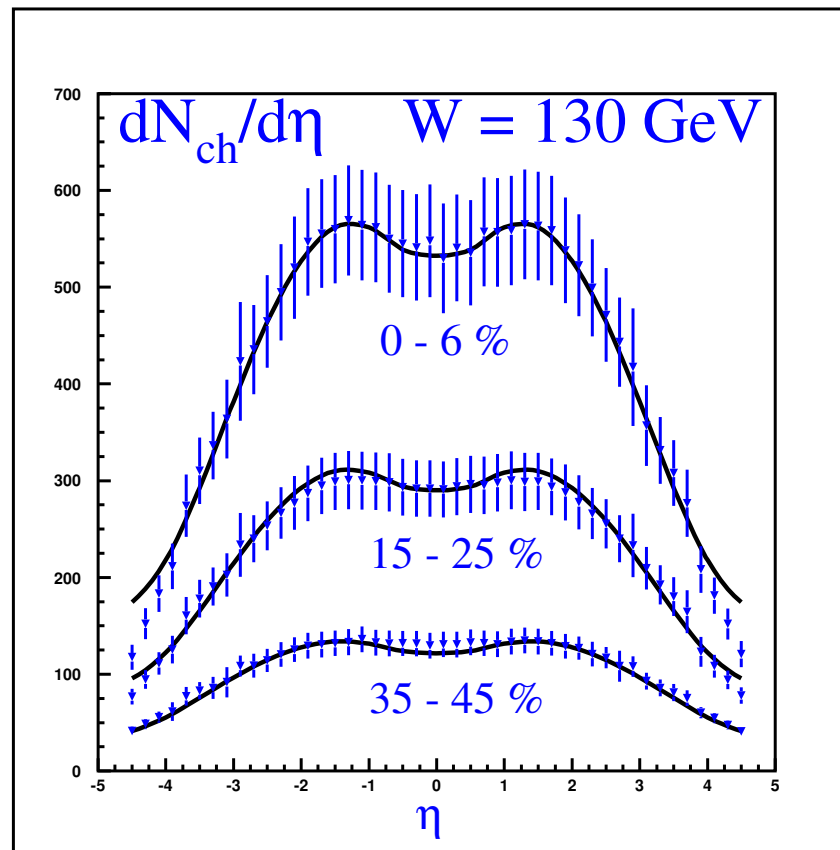
● Deep Inelastic Scattering

● Collisions noyau-noyau

● Collisions proton-noyau

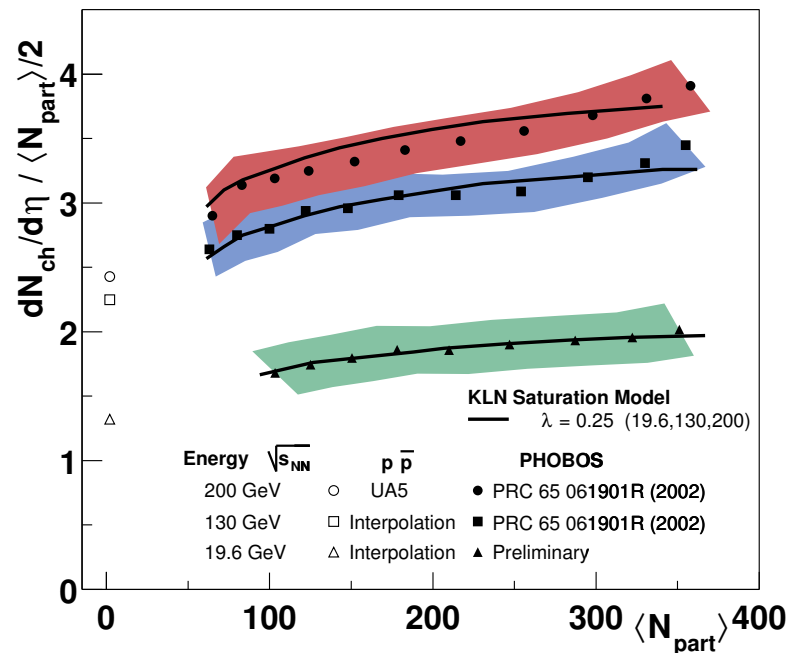
CGC et quarks lourds

Conclusions



- Kharzeev, Levin, Nardi (2001)
- Les régions de fragmentation ne sont pas décrites par le CGC
- Une masse est donnée au gluon (pour la transformation $y \rightarrow \eta$)

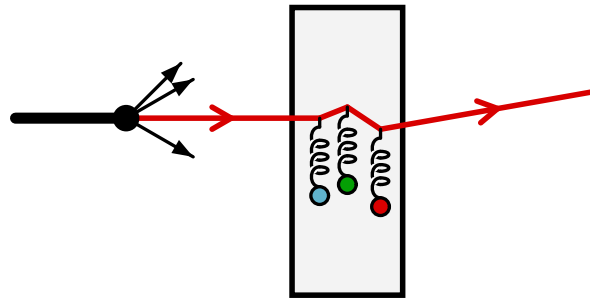
Dépendance en centralité



- Kharzeev, Levin, Nardi (2001)
- Après normalisation par N_{part} , la dépendance résiduelle vient des variations de $1/\alpha_s(Q_s^2)$ avec $Q_s^2 \sim N_{part}^{1/3}$
- Note : le CGC ne contient pas de corrections NLO, et elles doivent être mises “à la main”

Collisions proton-noyau

- Les particules produites s'échappent sans avoir à traverser un milieu dense étendu
 - ▷ les phénomènes prédits par le CGC peuvent être mesurés de manière assez directe
- Le proton incident est beaucoup moins dense que le noyau, et peut être décrit avec les fonctions de structure standard :



- Les éléments de matrice qui entrent dans la section efficace sont directement calculables dans le cadre du CGC (ils sont connus pour la production de gluons ou de paires de quarks)
- Note : contrairement au DIS, on ne connaît pas exactement l'impulsion du parton incident

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

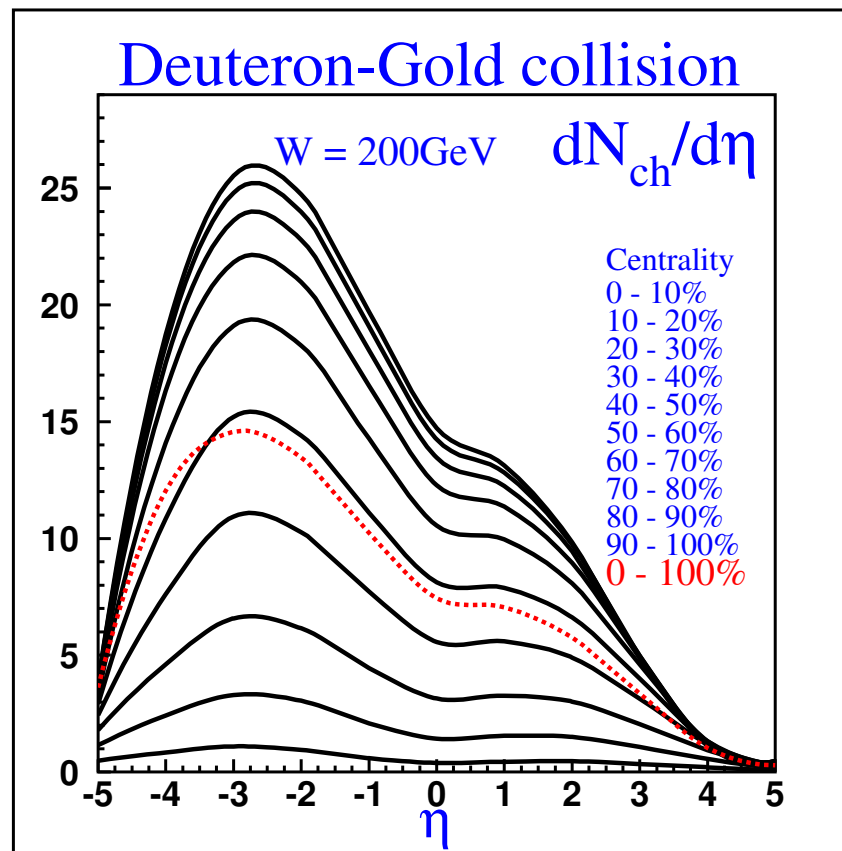
● Deep Inelastic Scattering

● Collisions noyau-noyau

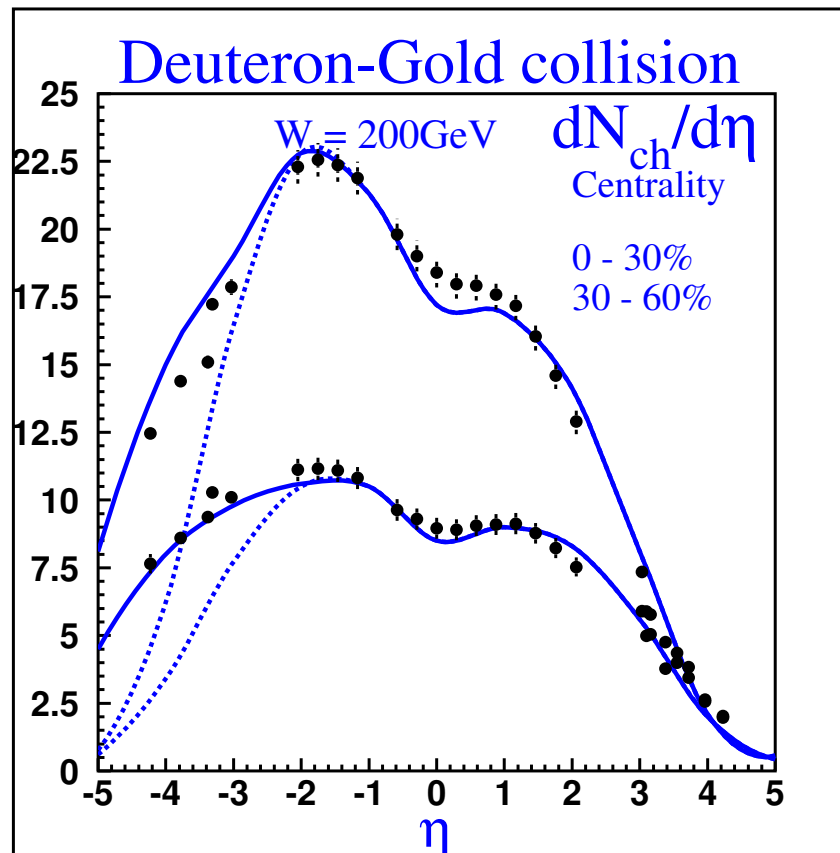
● Collisions proton-noyau

CGC et quarks lourds

Conclusions



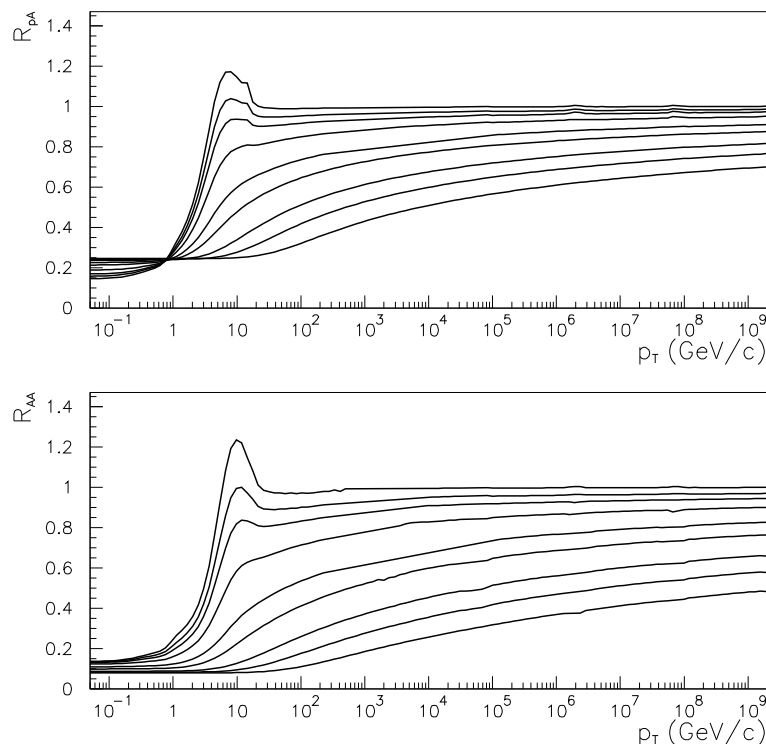
- Kharzeev, Levin, Nardi (2004)



- Kharzeev, Levin, Nardi (2004)
- A peu près OK, mais comme dans certains restaurants, il vaut mieux ne pas visiter les cuisines...

Evolution vers les petits x

- **Kharzeev, Levin, McLerran (2002)**. Partant d'une condition initiale comme le modèle MV, l'évolution vers les petits x entraîne une suppression du rapport R_{pA} due au shadowing



- **Albacete, Armesto, Kovner, Salgado, Wiedemann (2003)**. Même résultat obtenu par résolution numérique de l'équation BK

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

● Deep Inelastic Scattering

● Collisions noyau-noyau

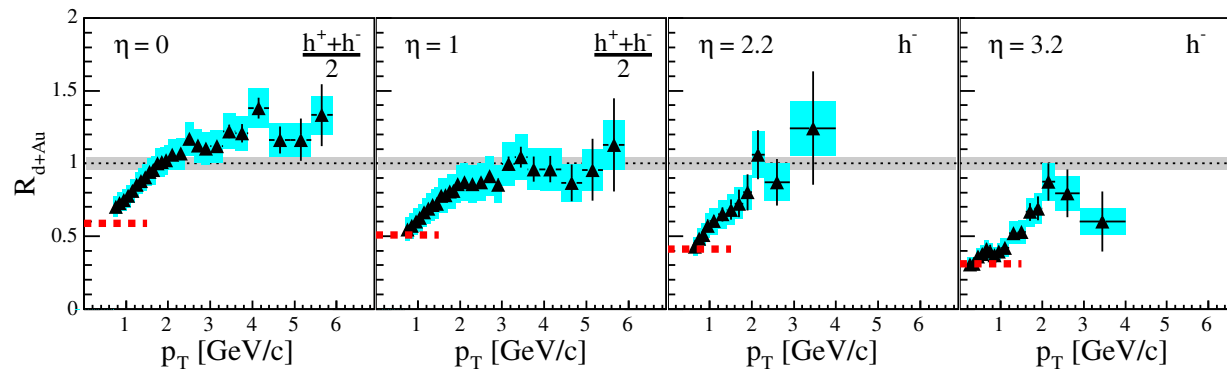
● Collisions proton-noyau

CGC et quarks lourds

Conclusions

- Résultats de l'expérience BRAHMS à RHIC pour les collisions deutéron-noyau :

$$R_{dAu} \equiv \frac{1}{N_{\text{coll}}} \frac{\left. \frac{dN}{dp_{\perp} d\eta} \right|_{dAu}}{\left. \frac{dN}{dp_{\perp} d\eta} \right|_{pp}}$$



- ◆ À faible rapidité, suppression à bas p_{\perp} et accroissement à haut p_{\perp} (collisions multiples – effet Cronin)
- ◆ À grande rapidité, suppression à tous les p_{\perp} (shadowing)

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

● Quarks lourds

● Paires de quarks

Conclusions

- Les quarks lourds sont moins sensibles à l'effet Cronin
- ...mais le leading twist shadowing les affecte tout autant
- Calcul de la section efficace de production de paires $Q\bar{Q}$
 - ◆ pA : Blaizot, FG, Venugopalan (2004)
 - ▷ brisure de la factorisation en k_{\perp}
 - ◆ AA : FG, Kajantie, Lappi (2004 + travail en cours)
- Pour les collisions pA à haute énergie, il n'y a pas de milieu étendu et l'hadronisation a lieu en dehors du noyau
 - ◆ Seule la **production** des quarks est modifiée par les effets de grande densité de partons
 - ◆ Il est important de comprendre ces effets car pA est la référence pour calibrer la suppression du J/ψ due au plasma en AA

RpA pour les quarks lourds à $\eta=0$

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

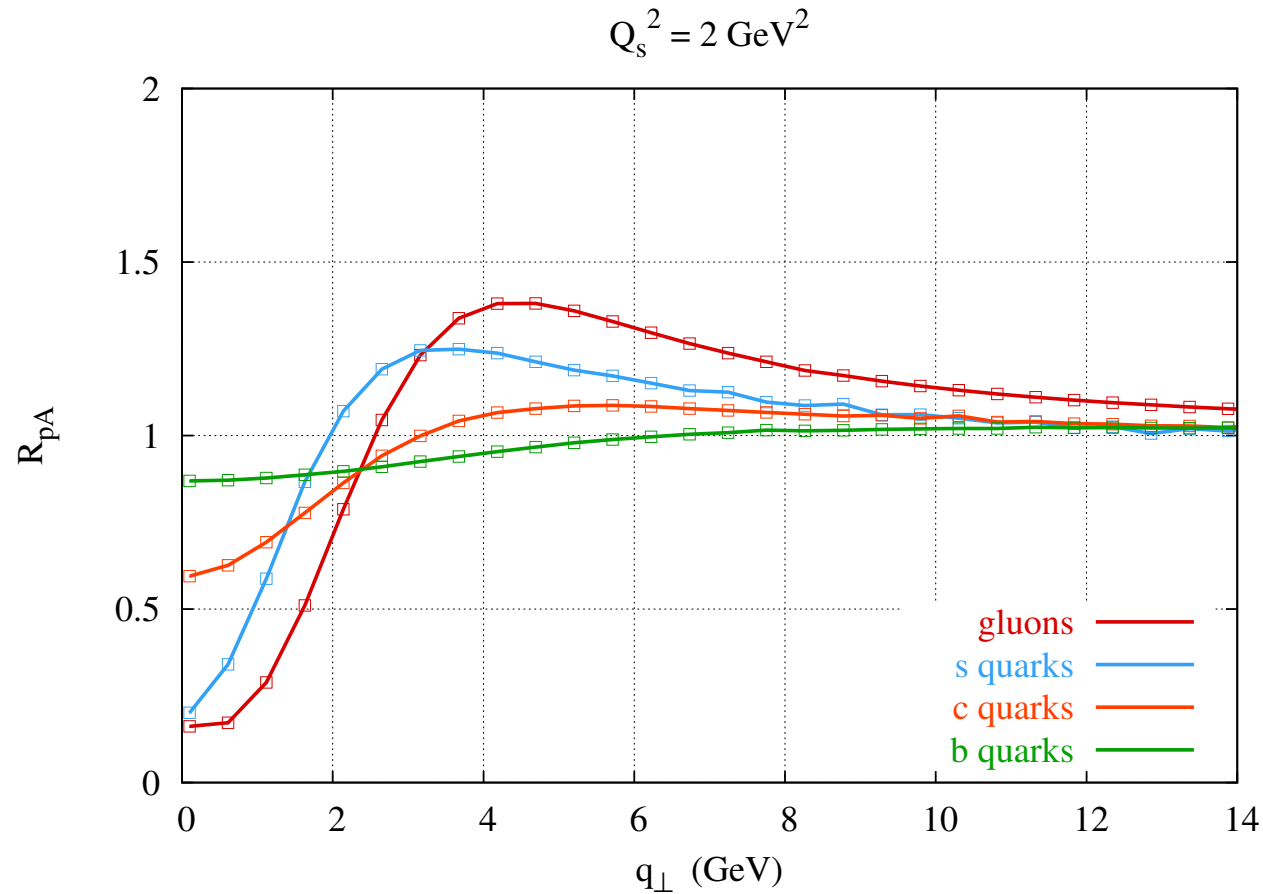
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

● Quarks lourds

● Paires de quarks

Conclusions



- Fujii, FG, Venugopalan (2005)
- L'effet Cronin est atténué si la masse des quarks augmente

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

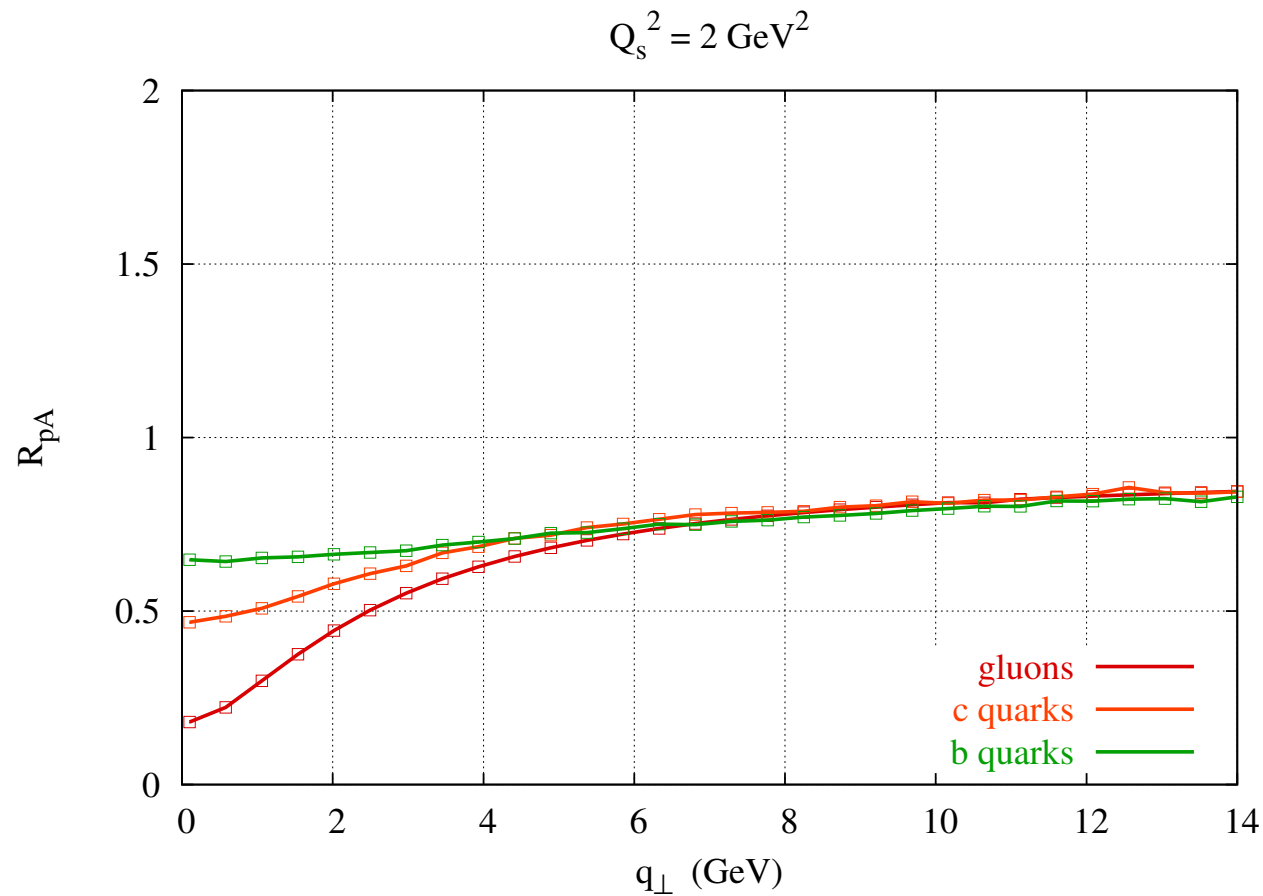
Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

● Quarks lourds

● Paires de quarks

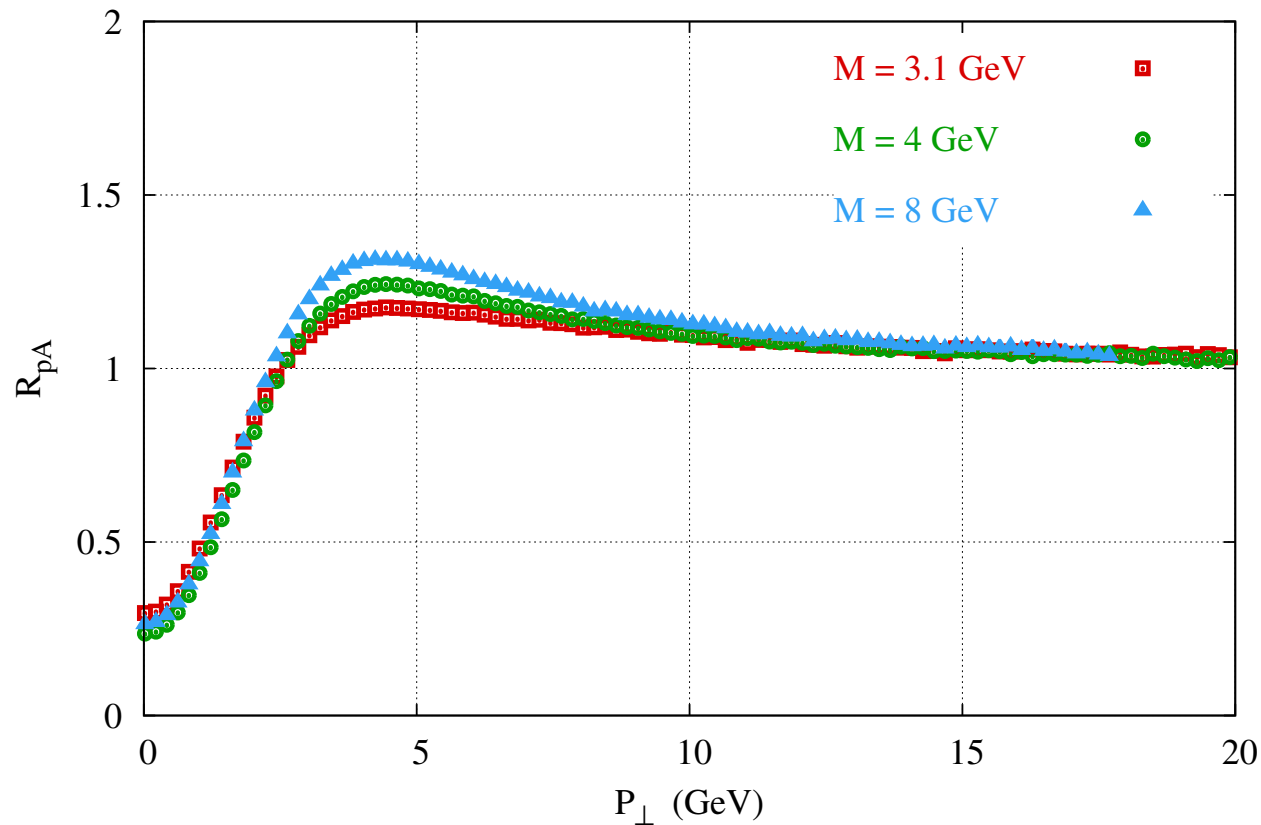
Conclusions



- Suppression du rapport R_{pA} due au shadowing

RpA pour les paires à $\eta=0$

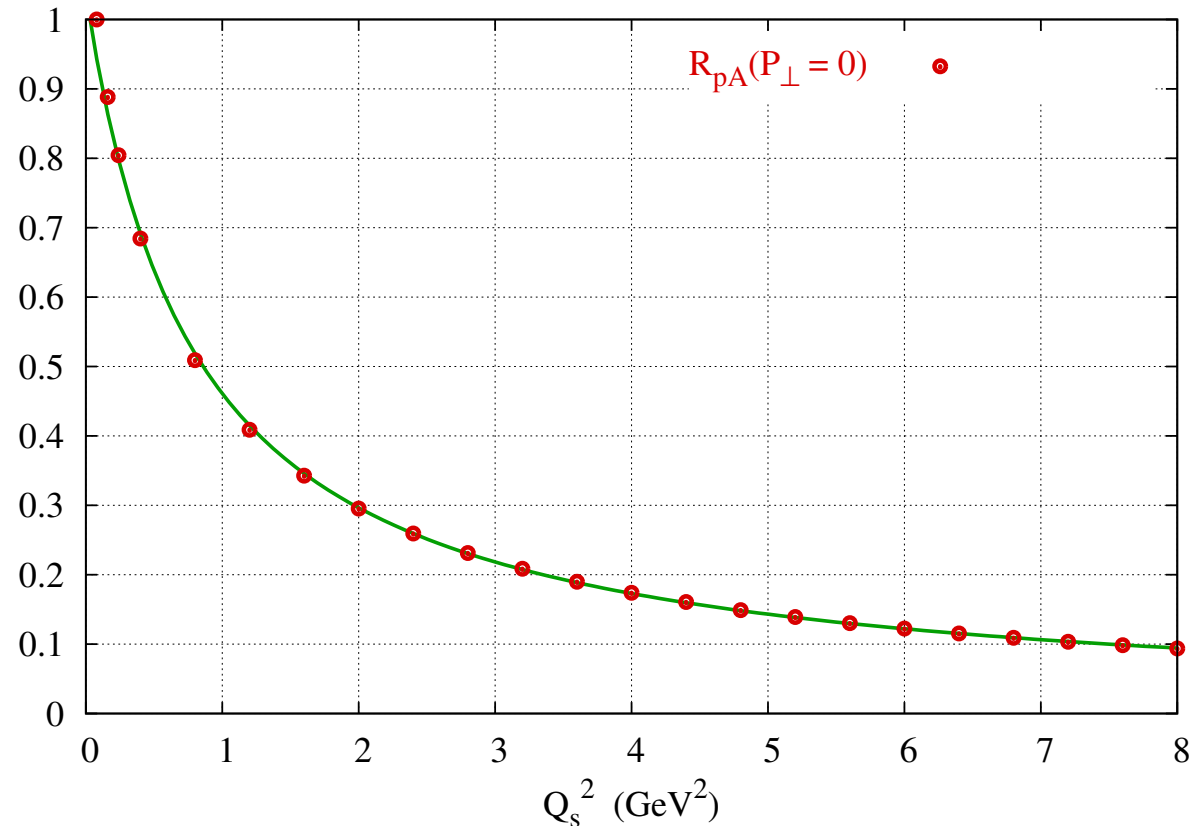
$$m = 1.5 \text{ GeV}, Q_s^2 = 2 \text{ GeV}^2$$



- L'effet Cronin existe aussi pour les paires (et donc pour le J/ψ)
- Plus marqué pour les grandes masses invariantes (transfert des petites vers les grandes masses dû aux collisions multiples)

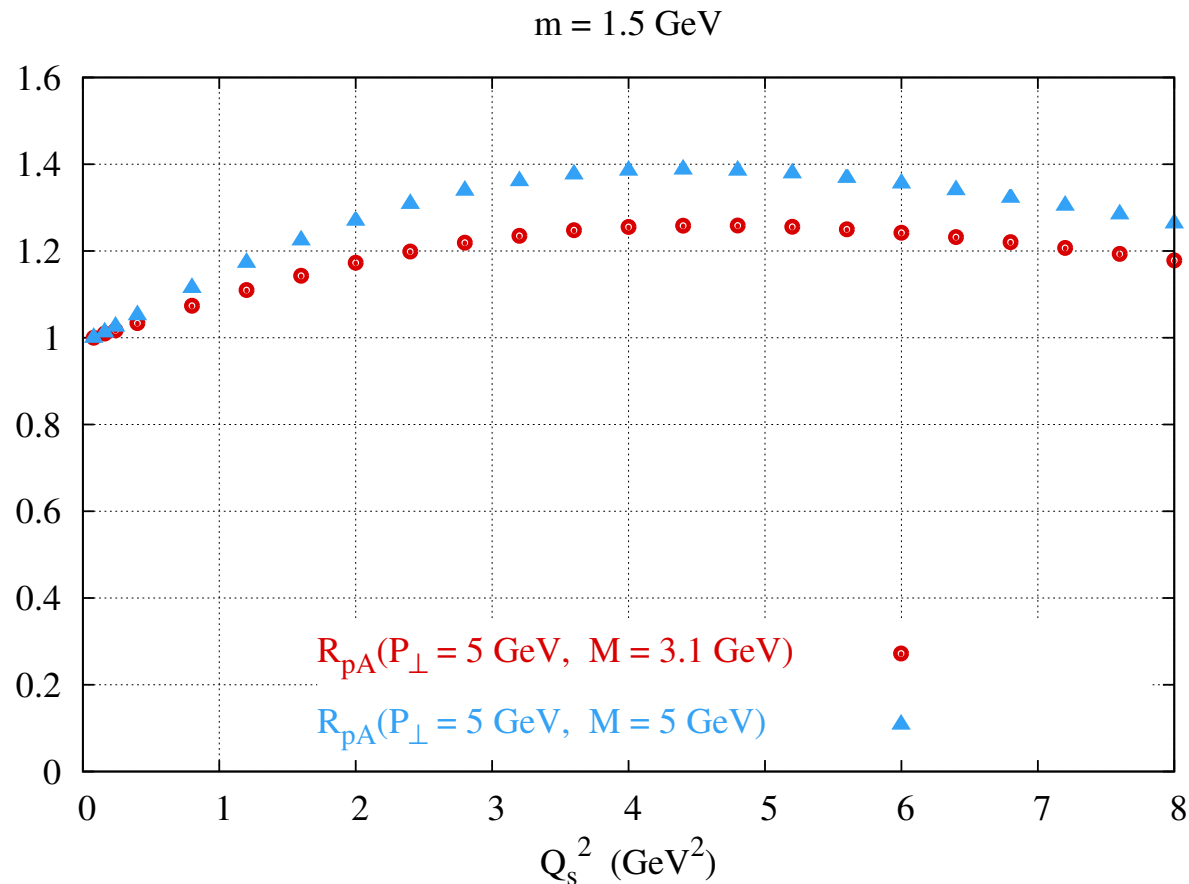
Suppression en fonction de Q_s

$m = 1.5 \text{ GeV}, M = 3.1 \text{ GeV}$



- A bas P_{\perp} , la suppression varie comme l'inverse de l'épaisseur traversée (au lieu d'une exponentielle), à cause d'effets de cohérence

Suppression en fonction de Q_s



- Aux P_\perp intermédiaires, la “suppression” est un accroissement...
- Il est donc préférable de **mesurer** la suppression nucléaire normale dans le même détecteur pour s’affranchir des effets d’acceptance

- Le CGC permet de décrire les nucléons/noyaux et leurs interactions lorsque la densité de constituants est grande
 - ◆ Principaux effets : collisions multiples et shadowing
- DIS
 - ◆ Scaling géométrique à petit x
 - ◆ Fits de F_2 à petit Q^2 basés sur le CGC
- Collisions noyau-noyau
pas idéal pour étudier les propriétés de l'état initial...
 - ◆ Dépendance en rapidité, en énergie et en centralité
- Collisions deutéron-noyau
 - ◆ Effet Cronin
 - ◆ Suppression à grande rapidité due au shadowing
- Futur : le LHC comme machine à étudier le CGC...
 - ◆ $A \eta = 0$, $x \sim 10^{-4}$, et peut descendre jusqu'à 10^{-7}
 - ◆ Les Q_s correspondants vont de 1 GeV à 3 GeV
 - ◆ La zone de scaling géométrique va jusqu'à 40 GeV

A quoi sert le CGC ?

Modèle des partons

Saturation

Color Glass Condensate

Phénoménologie du CGC

Situation expérimentale

CGC et quarks lourds

Conclusions