

# Session physique hadronique et interaction forte

*Cynthia Hadjidakis*  
*Institut de Physique Nucléaire d'Orsay*  
*JRJC 2011, Annecy*



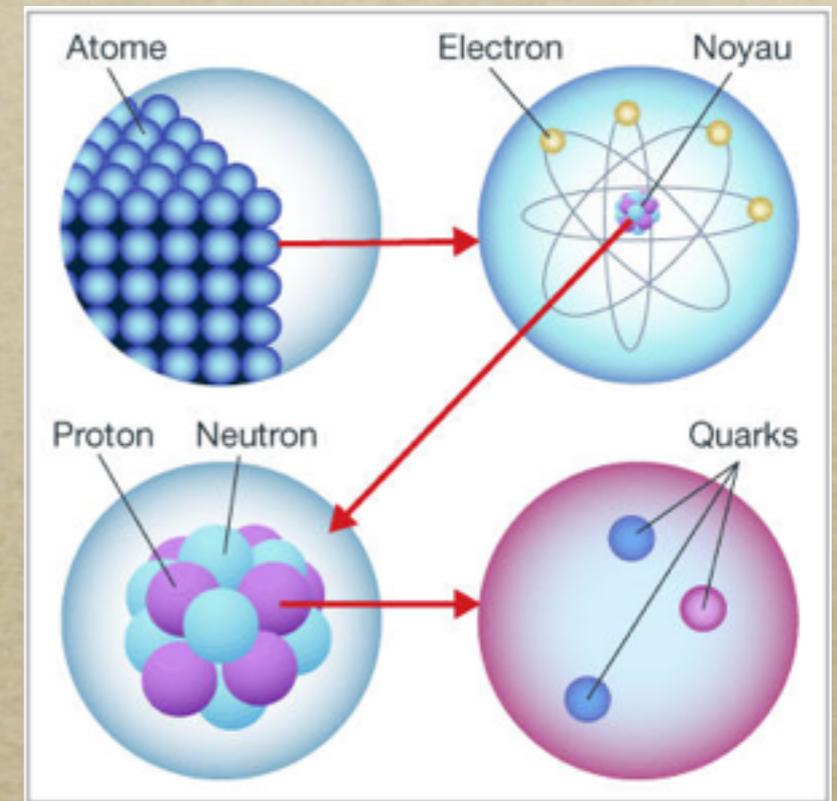
*Interaction forte*

*Déconfinement et QCD perturbative*

*Plasma de Quarks et de Gluons*

# L'interaction forte

- Une des 4 interactions fondamentales
- $\sim 100$  x plus forte que int. elm.
- 1-3 fm: protons/neutrons dans les noyaux
- $< 1$  fm: quarks dans les hadrons

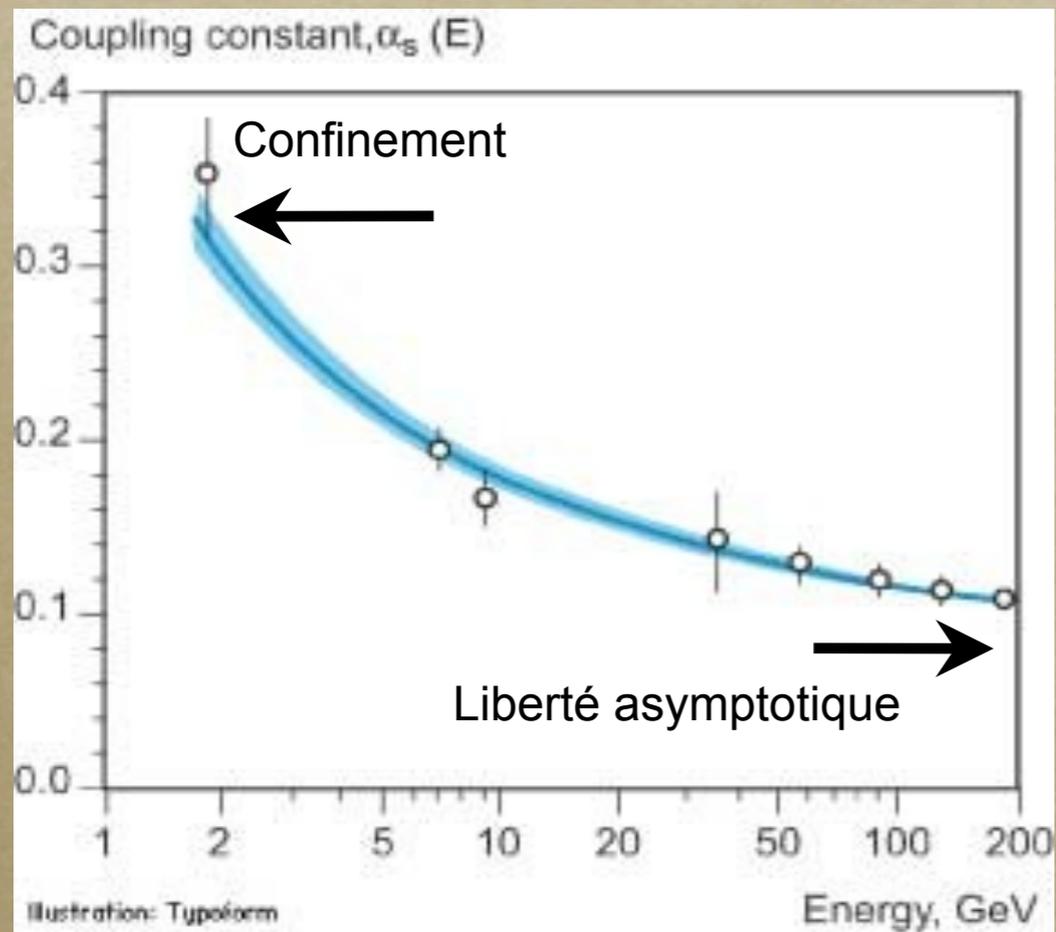


- Zoologie de hadrons découverts dans les années 50: classification des hadrons en fonction de leur masse, isospin, charge, ...: les hadrons sont composés de quarks (up, down, étrange, charme, beauté, top)

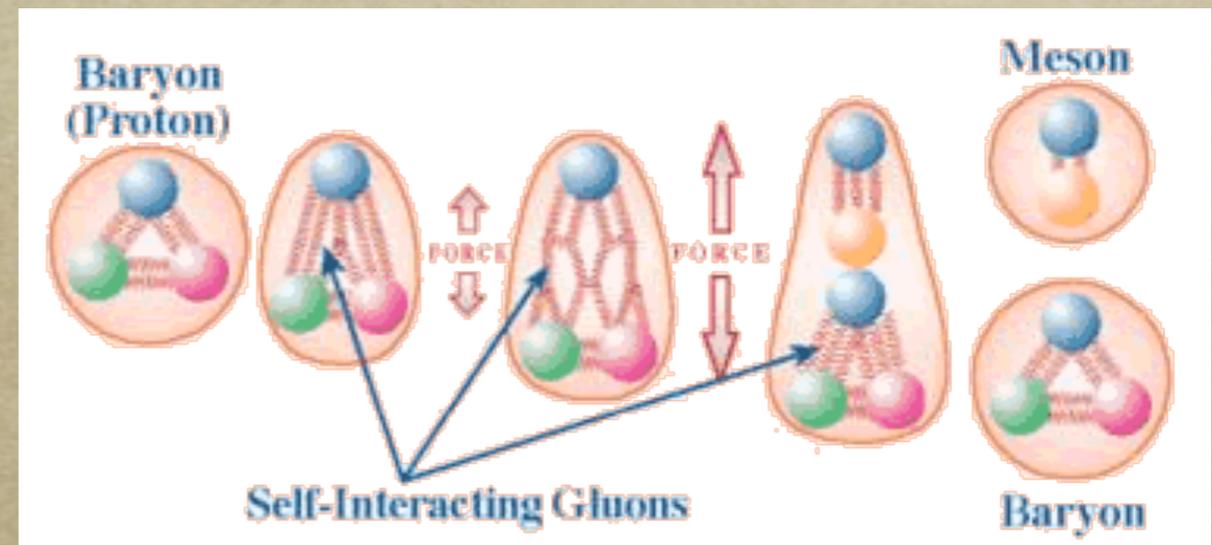
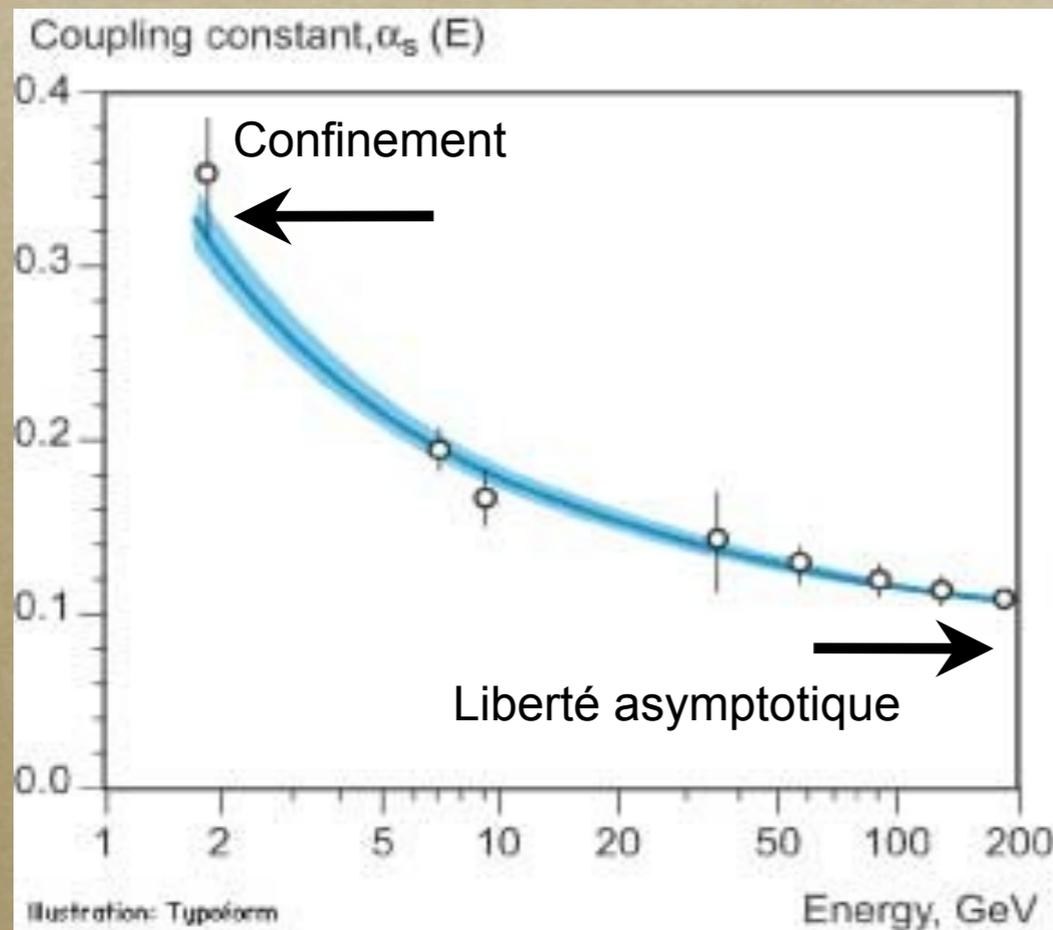
# L'interaction forte

- $\Delta^{++}$  trois quarks up de même spin (impossible d'après le principe d'exclusion de Fermi): introduction de la charge de couleur et du vecteur de la force  $\rightarrow$  gluons (3 couleurs)
- Mais pas d'observation de quarks ou gluons à l'état libre... sont ils de simples objets mathématiques ?
- Prédiction et découverte des partons / quarks dans le proton en diffusion profondément inélastique  $ep \rightarrow e'X$  (DIS en 1969)
- Mise en évidence des gluons avec  $pp \rightarrow 3$  jets (1979)
- La théorie de l'interaction forte, c'est la QCD !

# Confinement et liberté asymptotique

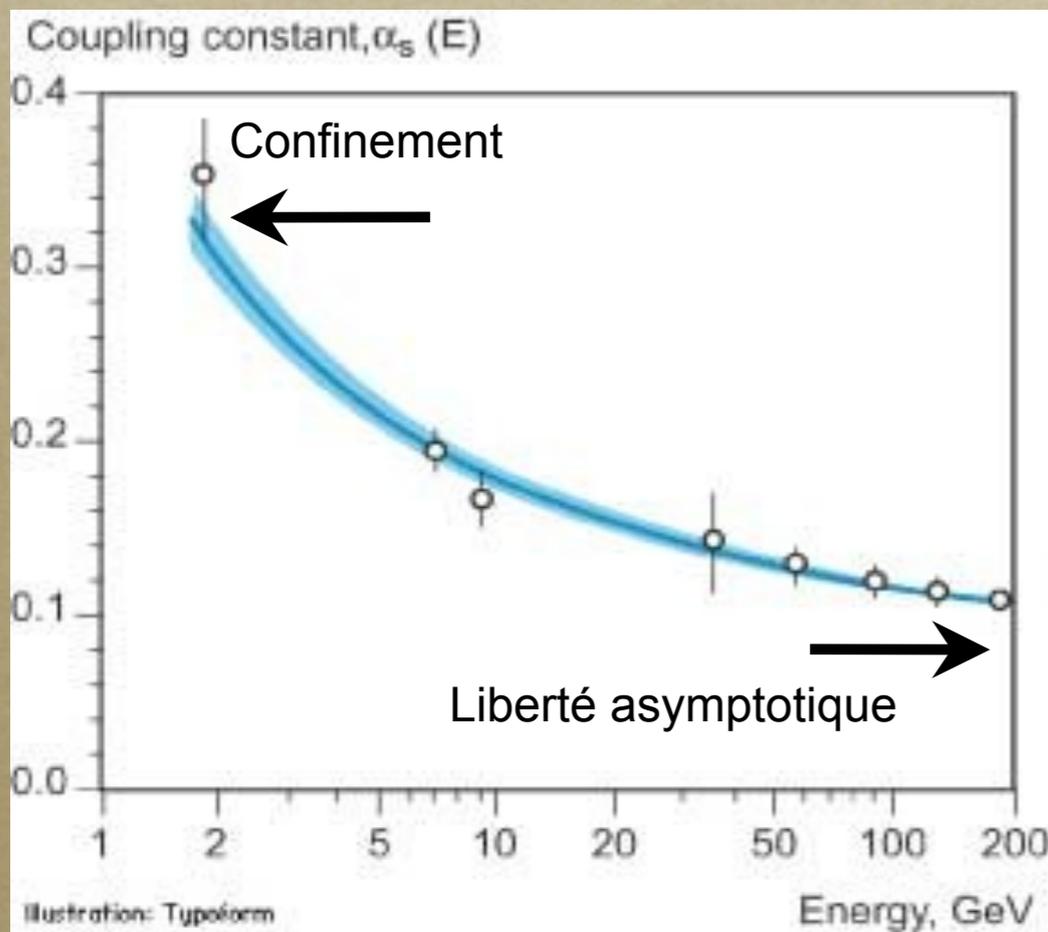


# Confinement et liberté asymptotique



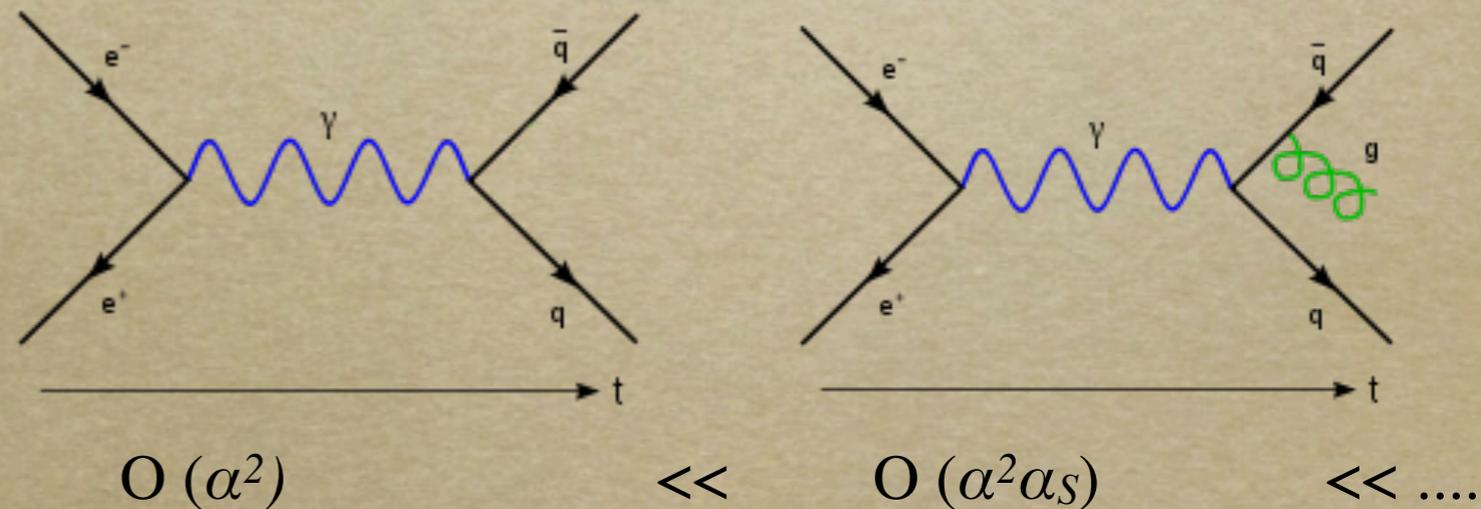
→ les quarks et les gluons ne sont pas visibles à l'état libre, ils sont confinés dans les hadrons (preuve analytique ?)

# Confinement et liberté asymptotique



À grande énergie transférée dans la réaction, la constante de couplage de l'interaction forte est faible

$e^+e^-$  annihilation



→ lorsque  $\alpha_s$  est petit, les calculs de la QCD perturbative deviennent possibles

# Factorisation et QCD perturbative

- Factorisation d'un processus: partie hard  $\otimes$  partie soft
- **Partie hard** = calculable en QCD perturbative
- **Partie soft** = distributions universelles

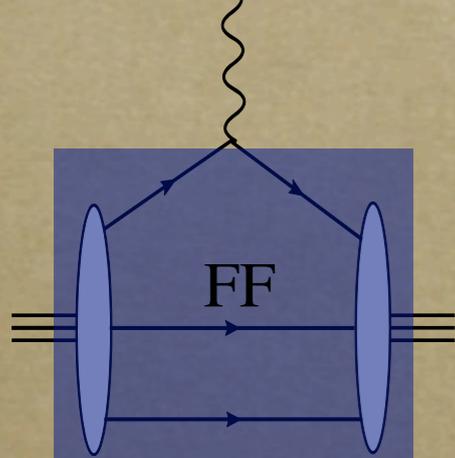
# Factorisation et QCD perturbative

- Factorisation d'un processus: partie hard  $\otimes$  partie soft
- **Partie hard** = calculable en QCD perturbative
- **Partie soft** = distributions universelles

## Cas du proton

*Diffusion élastique*

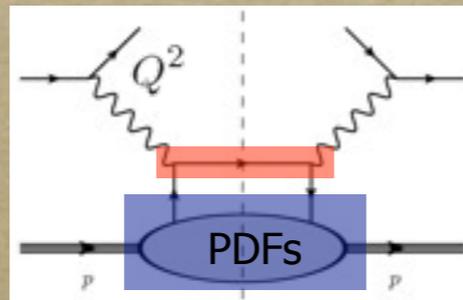
$$ep \rightarrow e'p'$$



*Facteur de forme*

*Diffusion profondément inélastique*

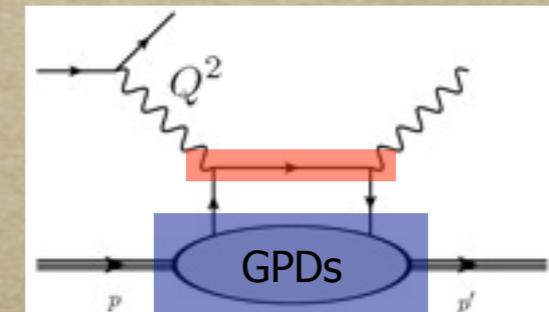
$$ep \rightarrow e'X$$



*Distributions de partons*

*Diffusion profondément exclusive*

$$ep \rightarrow e'p'\gamma$$



*Distributions de partons généralisées*

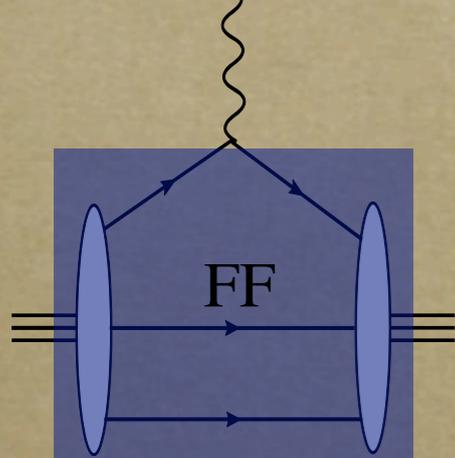
# Factorisation et QCD perturbative

- Factorisation d'un processus: partie hard  $\otimes$  partie soft
- **Partie hard** = calculable en QCD perturbative
- **Partie soft** = distributions universelles

## Cas du proton

*Diffusion élastique*

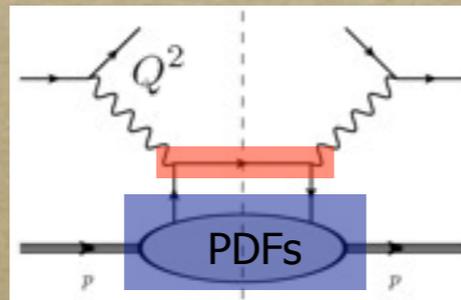
$$ep \rightarrow e'p'$$



*Facteur de forme*

*Diffusion profondément inélastique*

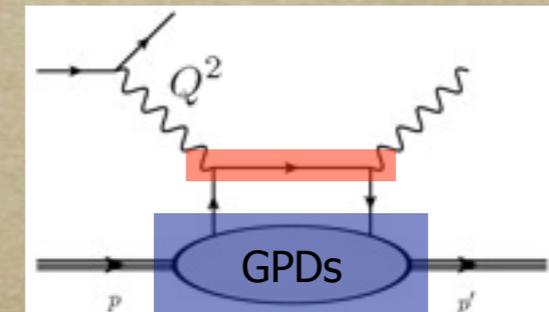
$$ep \rightarrow e'X$$



*Distributions de partons*

*Diffusion profondément exclusive*

$$ep \rightarrow e'p'\gamma$$

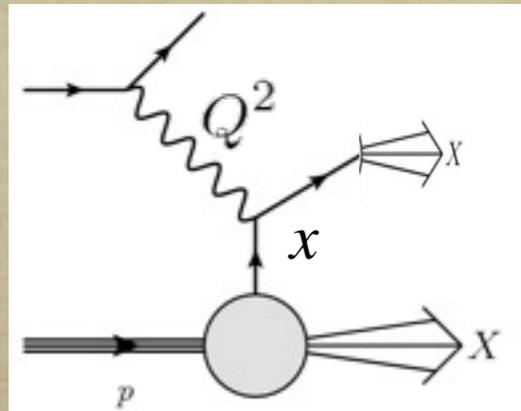
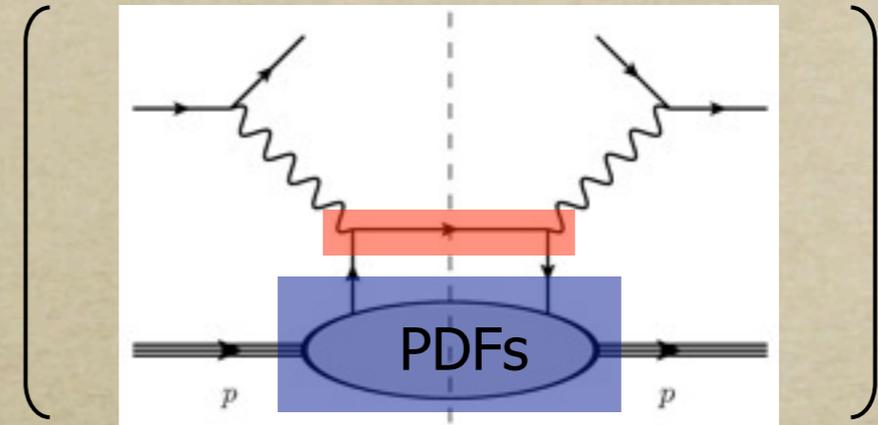


*Distributions de partons généralisées*

**Connexion entre ces différentes distributions  $\rightarrow$  description universelle du proton**

# Cas de la diffusion profondément inélastique (DIS)

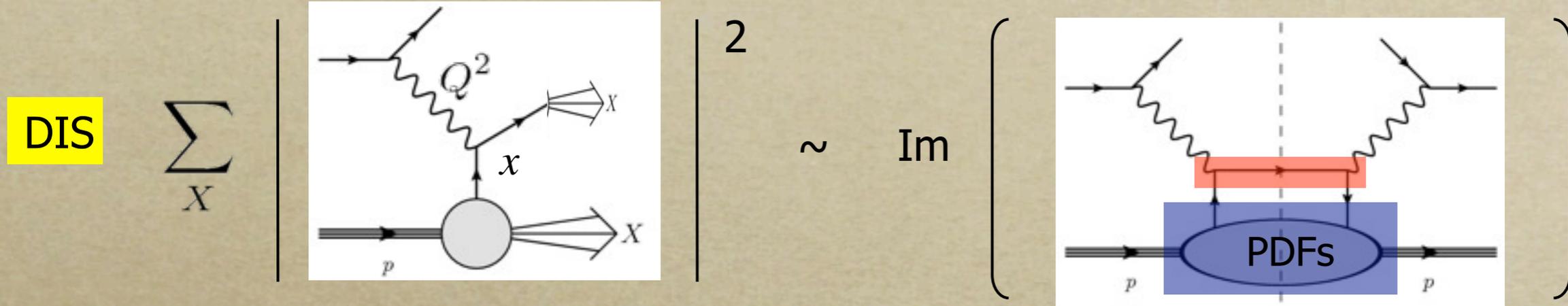
DIS

$$\sum_X$$

$$^2$$
$$\sim$$
$$\text{Im}$$


$Q^2$  : énergie transférée dans la réaction, énergie du photon virtuel

$x$  : fraction d'impulsion du proton portée par le quark interagissant avec le photon virtuel

# Cas de la diffusion profondément inélastique (DIS)

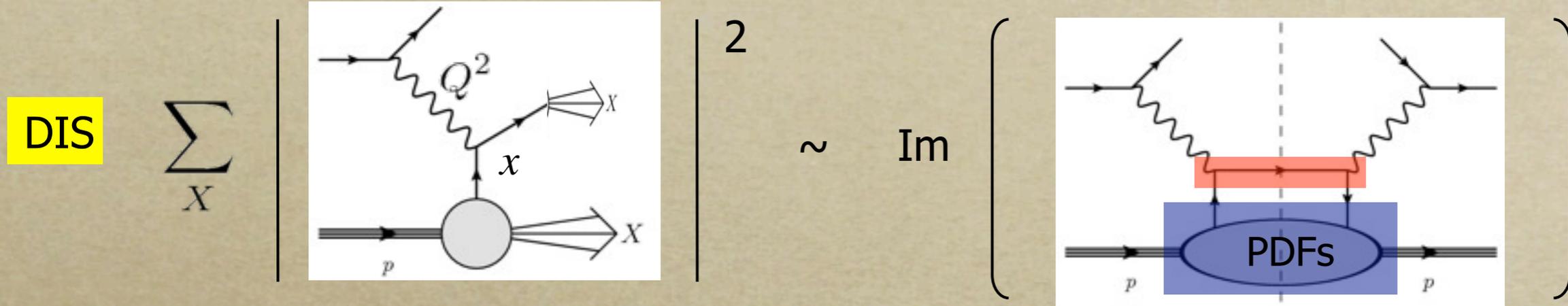


$Q^2$  : énergie transférée dans la réaction, énergie du photon virtuel  
 $x$  : fraction d'impulsion du proton portée par le quark interagissant avec le photon virtuel

Factorisation 
$$d\sigma^{lp \rightarrow lX} \sim \sum_i \int_x^1 \frac{dy}{y} C_i \left( \frac{x}{y}, \frac{Q^2}{\mu_F^2}; \alpha_S(\mu_R^2) \right) f_i(y, \mu_F^2) \quad i = q_f, \bar{q}_f, g$$

pQCD                      universelle

# Cas de la diffusion profondément inélastique (DIS)



$Q^2$  : énergie transférée dans la réaction, énergie du photon virtuel

$x$  : fraction d'impulsion du proton portée par le quark interagissant avec le photon virtuel

Factorisation

$$d\sigma^{lp \rightarrow lX} \sim \sum_i \int_x^1 \frac{dy}{y} C_i \left( \frac{x}{y}, \frac{Q^2}{\mu_F^2}; \alpha_S(\mu_R^2) \right) f_i(y, \mu_F^2) \quad i = q_f, \bar{q}_f, g$$

pQCD                      universelle

Equations d'évolution DGLAP

$$\mu_F \frac{d}{d\mu_F} C_i \left( x, \frac{Q^2}{\mu_F^2}; \alpha_S(\mu_R^2) \right) = - \sum_j \int_x^1 \frac{dy}{y} C_j \left( y, \frac{Q^2}{\mu_F^2}; \alpha_S(\mu_R^2) \right) P_{ji} \left( \frac{x}{y}; \alpha_S(\mu_R^2) \right)$$

$$\mu_F \frac{d}{d\mu_F} f_i(y, \mu_F^2) = \sum_j \int_y^1 \frac{dz}{z} P_{ij} \left( \frac{y}{z}; \alpha_S(\mu_R^2) \right) f_j(z, \mu_F^2)$$

NB: in practice

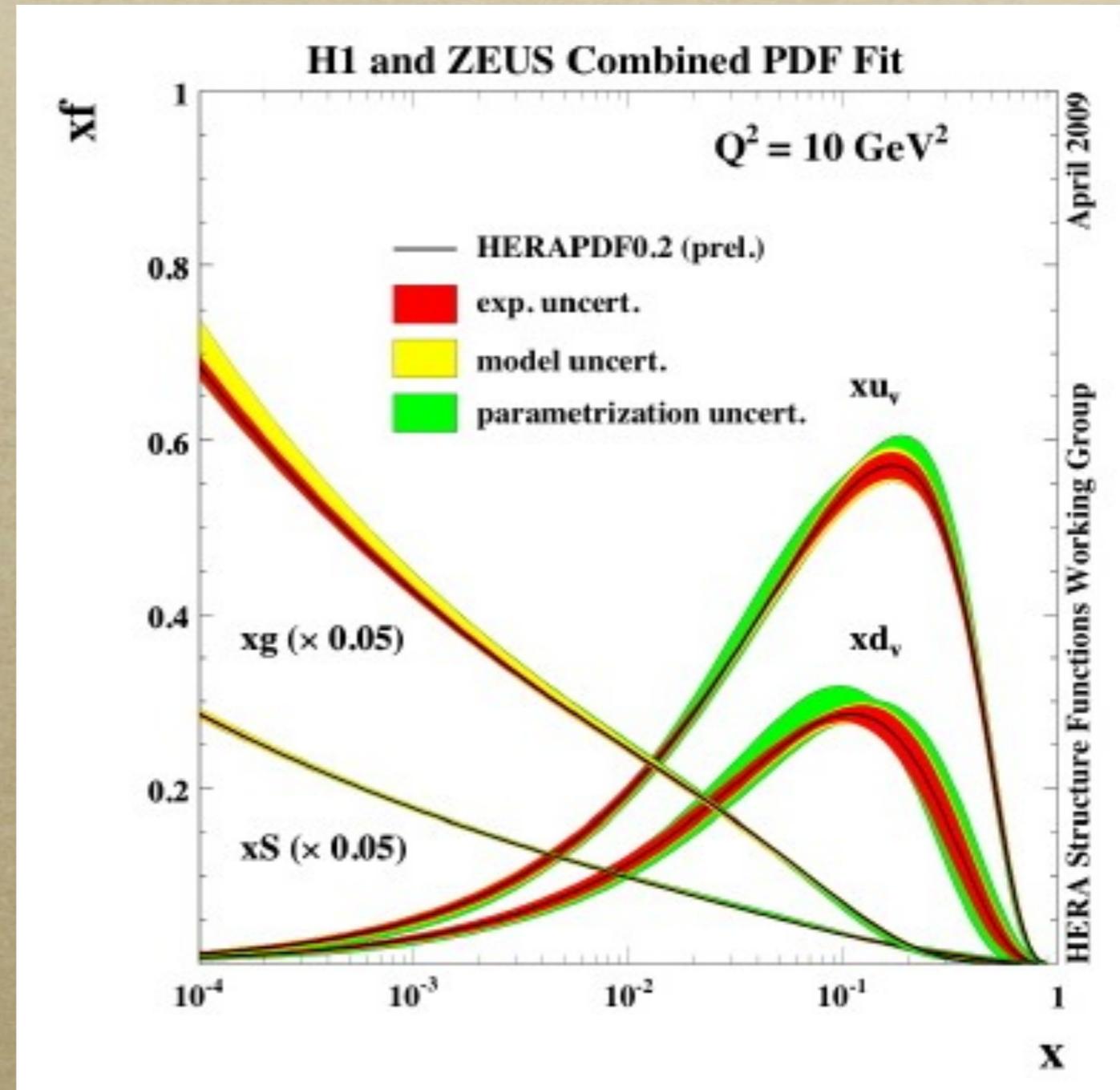
$$\mu_F^2 = \mu_R^2 = Q^2$$

# Mesure des distributions universelles du proton

15 années de mesures à HERA  
(DESY)

$$ep \rightarrow e'X$$

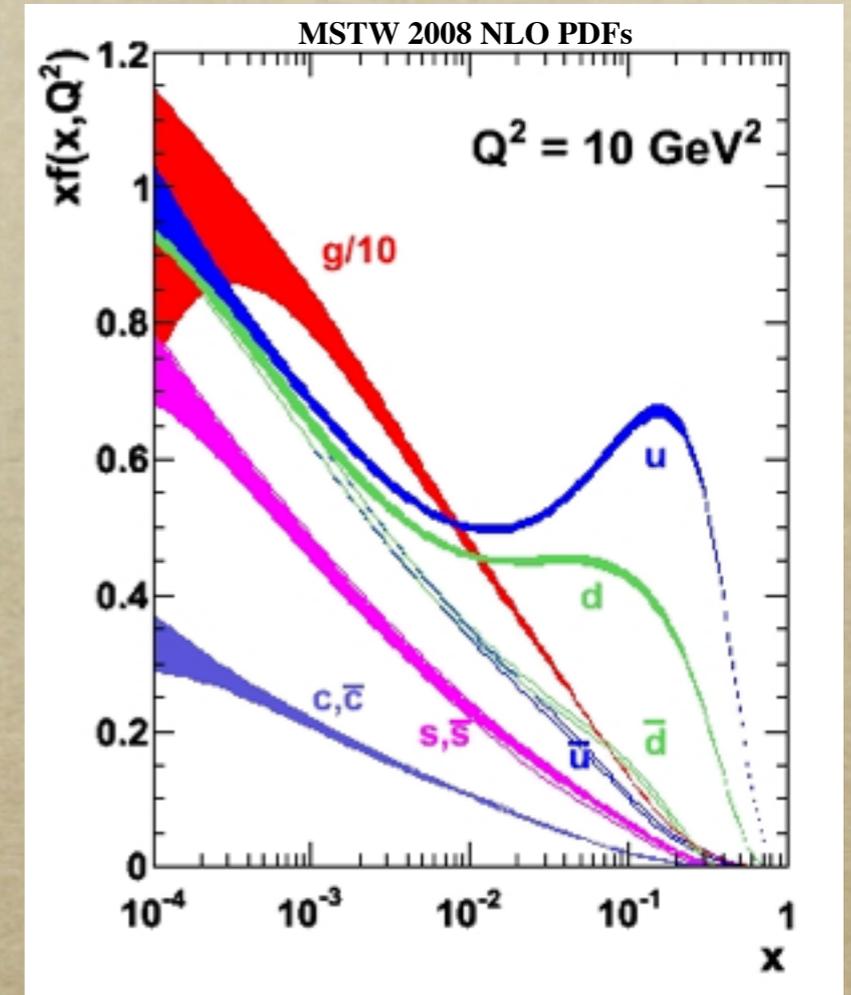
très bonne précision pour les pdfs des  
quarks u,d,s et des gluons



# Résultats précis en pQCD mais...

Distribution des partons à petit  $x$ , grand  $x$  ?  
Saturation en gluons à petit  $x$  ?  
Modifications des distributions dans la matière nucléaire ?  
Mesures des GPDs, TMDs, ...

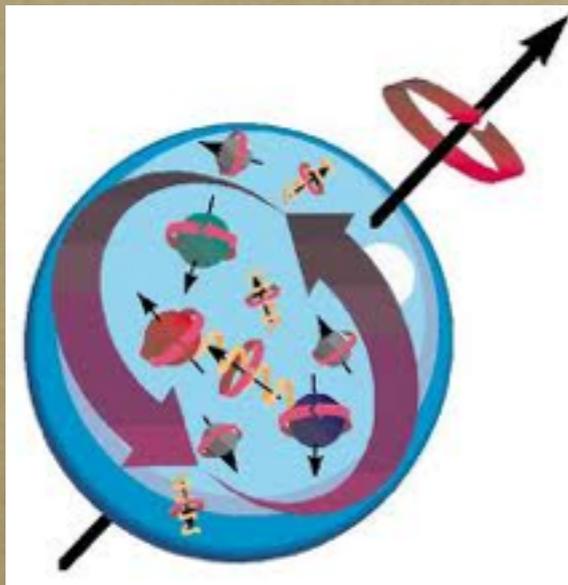
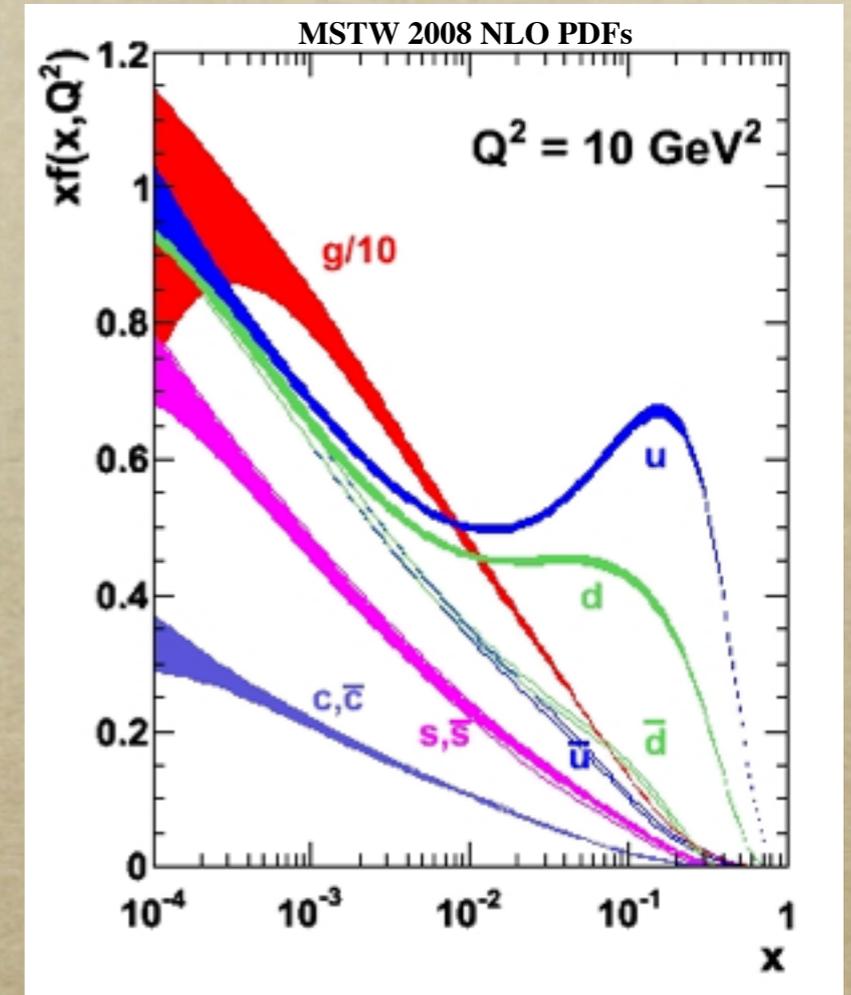
Transition entre quarks constituants et quarks de QCD ?  
Origine de la masse du proton ?



# Résultats précis en pQCD mais...

Distribution des partons à petit  $x$ , grand  $x$  ?  
Saturation en gluons à petit  $x$  ?  
Modifications des distributions dans la matière nucléaire ?  
Mesures des GPDs, TMDs, ...

Transition entre quarks constituants et quarks de QCD ?  
Origine de la masse du proton ?



Origine du spin du proton (crise du spin) ?  
Distribution du moment angulaire ?

Etats exotiques (boules de glu, tétraquarks, pentaquarks) ?

# Processus exclusifs

*Experimental observables in  $p\bar{p}$  decay into two heavy leptons*

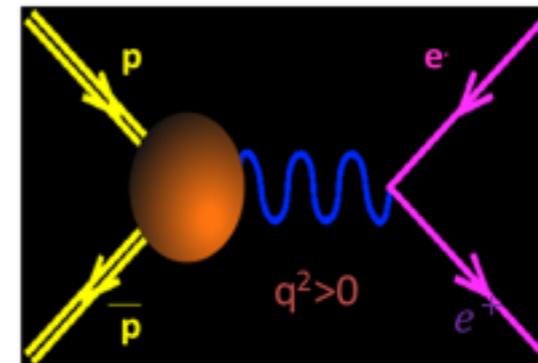
**Alaa DBEYSSI**

Étude des facteurs de forme avec production de  $\mu$  ou  $\tau$   
→ pas de corrections radiatives (pas si évident pour le cas des électrons), nouvelles observables de polarisation

**PANDA (GSI)**

**Time-like**

$$\bar{p} + p \leftrightarrow e^+ + e^-$$



FFs are complex

# Processus exclusifs

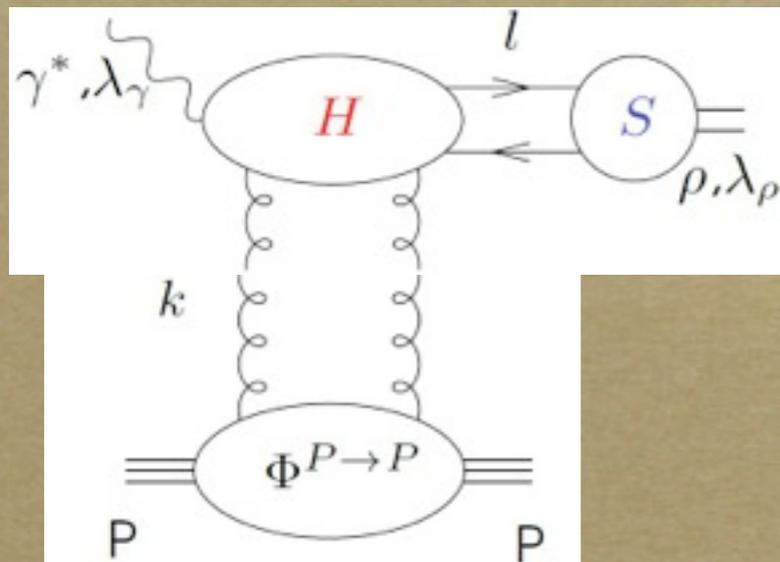
*Experimental observables in  $p\bar{p}$  decay into two heavy leptons*

**Alaa DBEYSSI**

Étude des facteurs de forme avec production de  $\mu$  ou  $\tau$   
 → pas de corrections radiatives (pas si évident pour le cas des électrons), nouvelles observables de polarisation

**PANDA (GSI)**

$$ep \rightarrow e' p \rho^0$$



*A phenomenological study of helicity amplitudes of high energy exclusive leptonproduction of the rho meson*

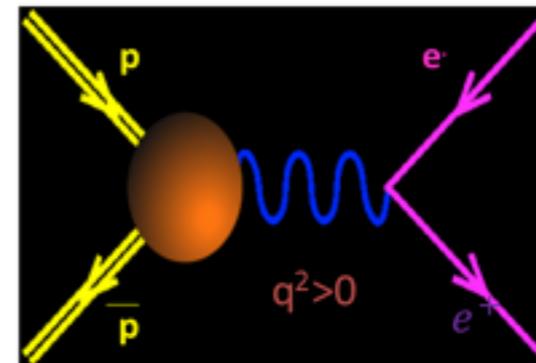
**Adrien BESSE**

Factorisation en  $k_T$  du gluon (à suffisante grande énergie), calcul des amplitudes de polarisation du  $\rho^0$ .

**HERA (DESY)**

**Time-like**

$$\bar{p} + p \leftrightarrow e^+ + e^-$$



FFs are complex

# QCD à haute énergie

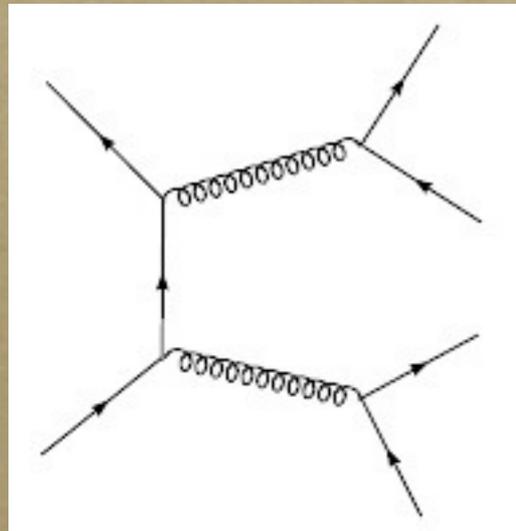
*Calcul des boucles dans les théories de jauge*

**Mohamed Sadok ZIDI**

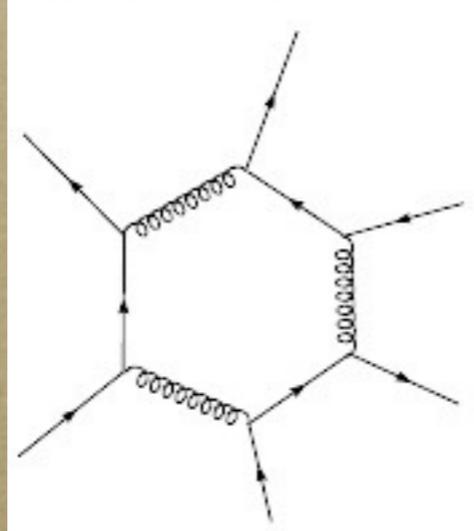
Calcul de précision pour décrire le «bruit de fond»  
QCD dans la recherche de nouvelles physiques.

**pp  $\rightarrow$  b bbar bbar**

LO



NLO



Comment simplifier les boucles à 6 pattes ?

**Golem project**  
**Tevatron et LHC**

# QCD à haute énergie

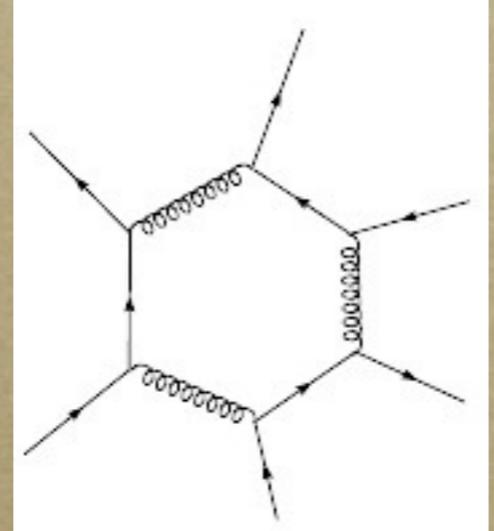
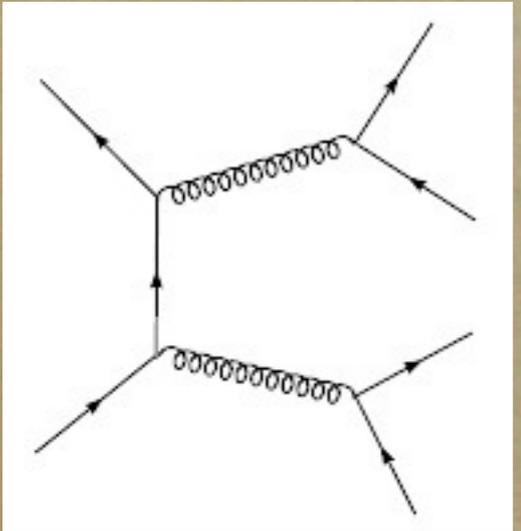
Calcul des boucles dans les théories de jauge  
**Mohamed Sadok ZIDI**

Calcul de précision pour décrire le «bruit de fond»  
QCD dans la recherche de nouvelles physiques.

$pp \rightarrow b \bar{b} \bar{b} b$

LO

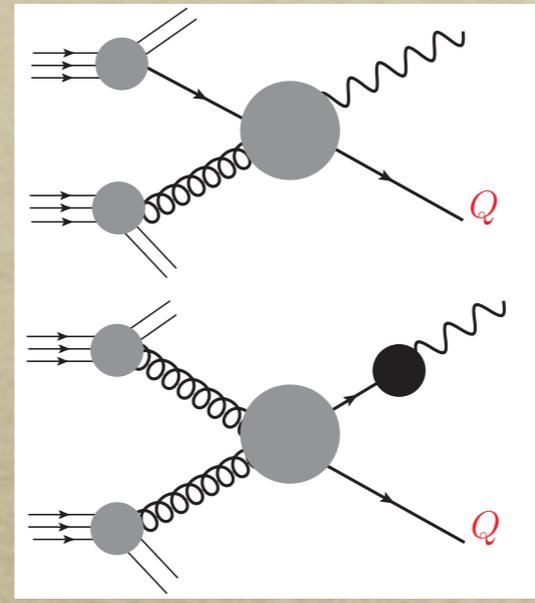
NLO



Comment simplifier les boucles à 6 pattes ?

**Golem project**  
**Tevatron et LHC**

$pp \rightarrow \gamma$  heavy-quark jet

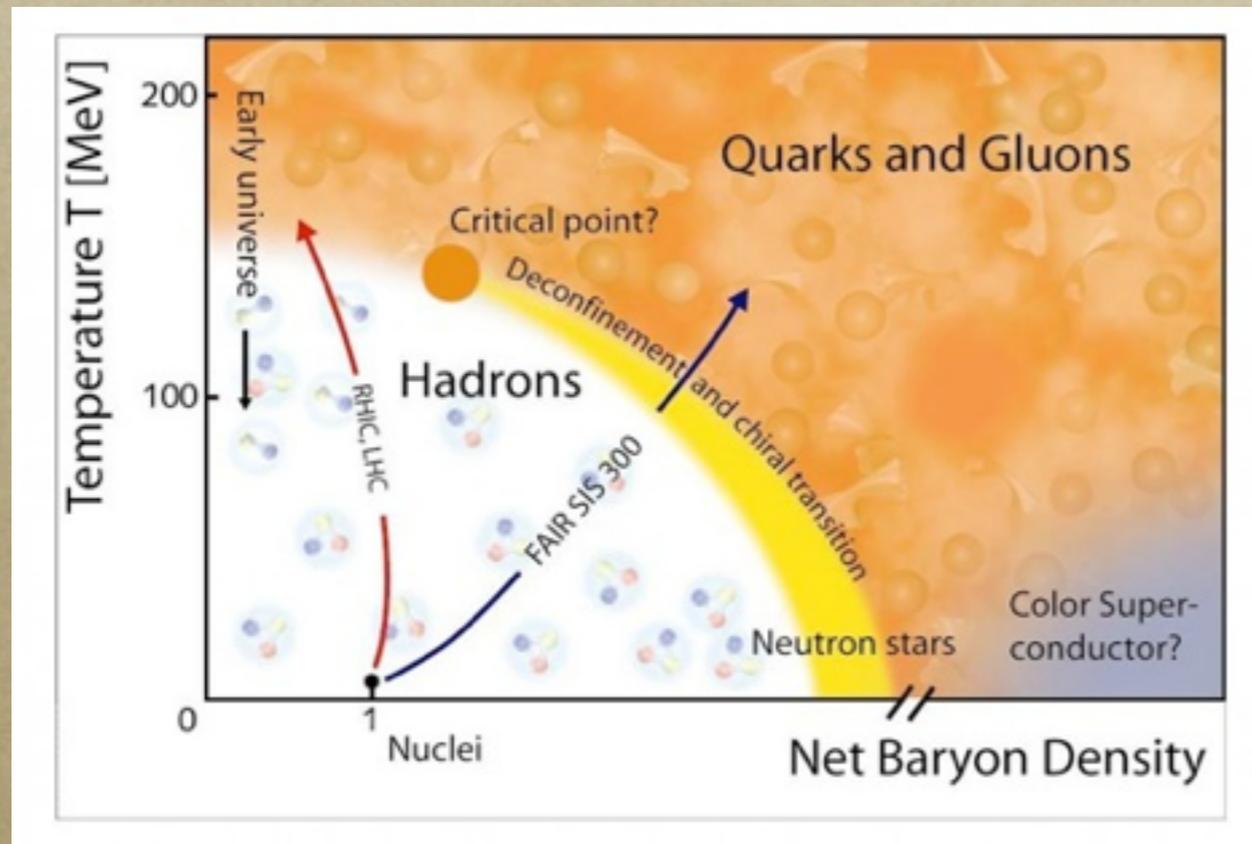


**Tevatron et LHC**

*Photon + heavy-quark jet production at NLO  
for hadronic colliders*  
**Chi Linh NGUYEN**

Ajout de la production de jets de quark lourds dans  
le générateur d'événements JETPHOX et fonction  
de fragmentation de quarks lourds

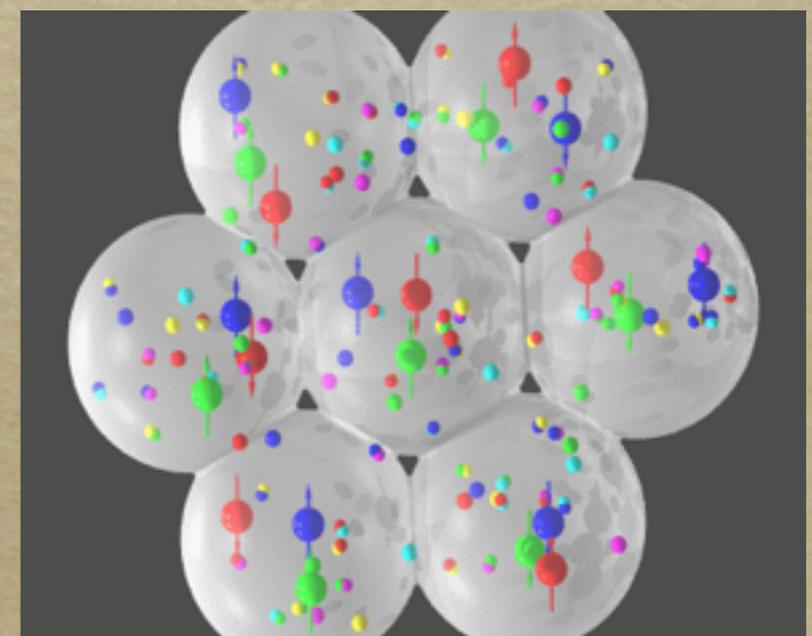
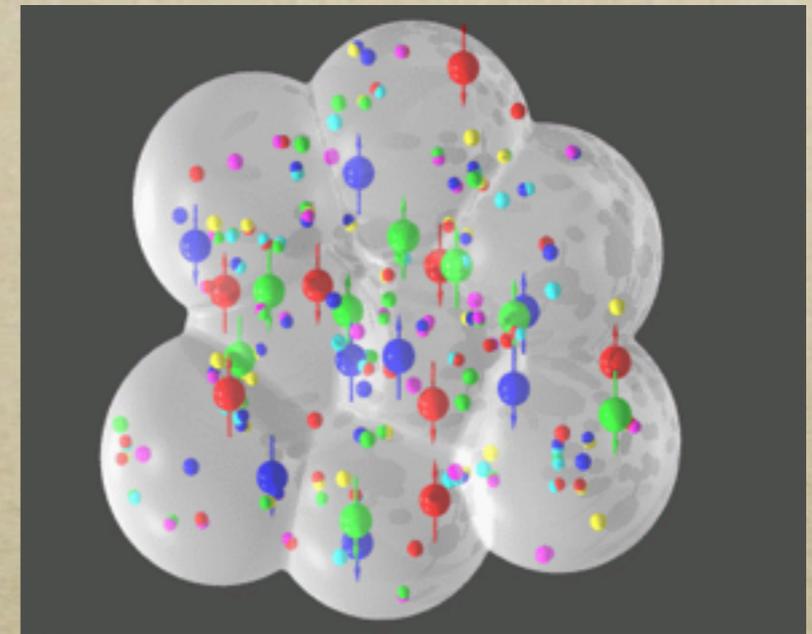
# QCD à haute température et/ou densité



*Le plasma de quarks et de gluons*

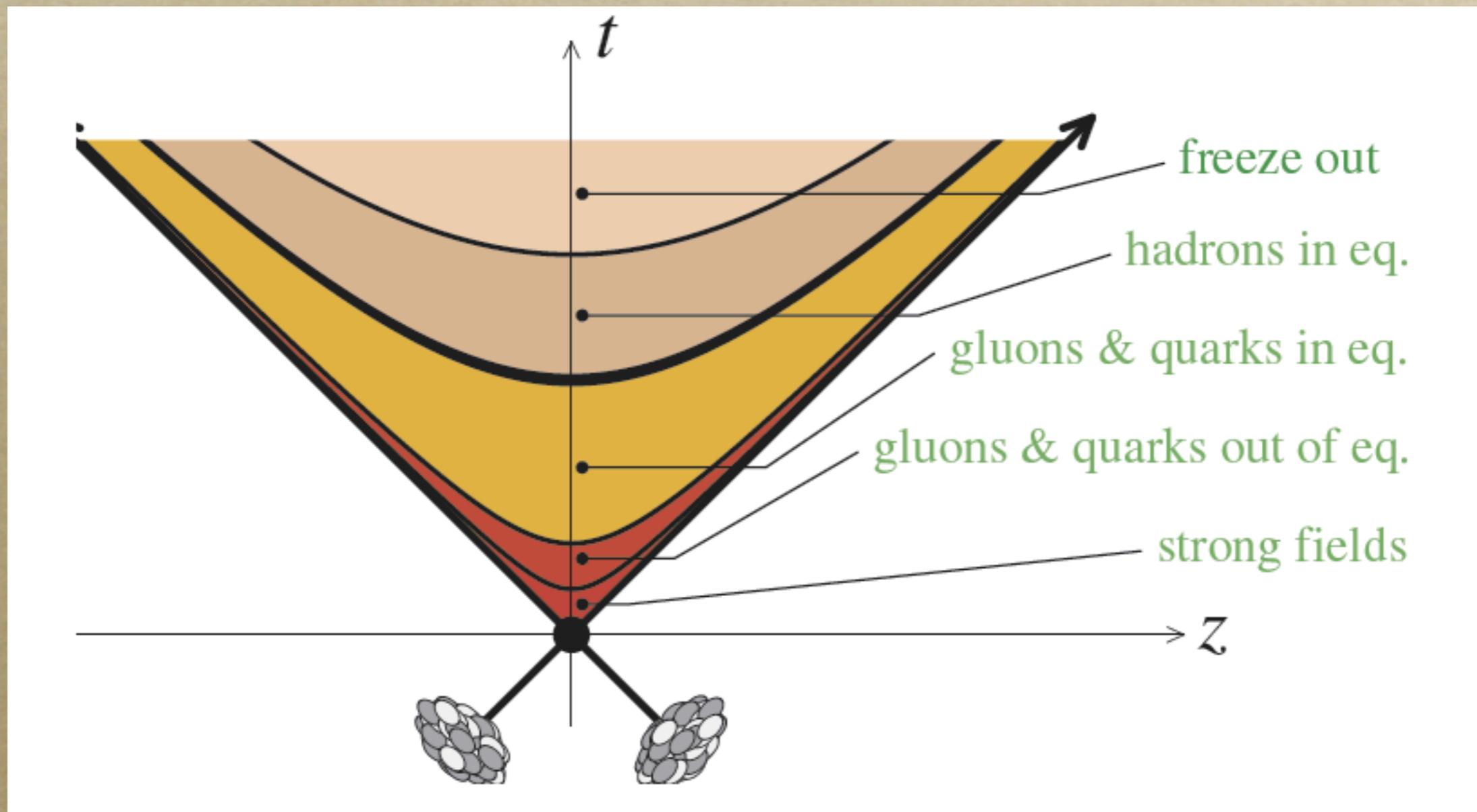
Quelques microsecondes après le Big-Bang  
Au coeur des étoiles à neutrons

Température, densité

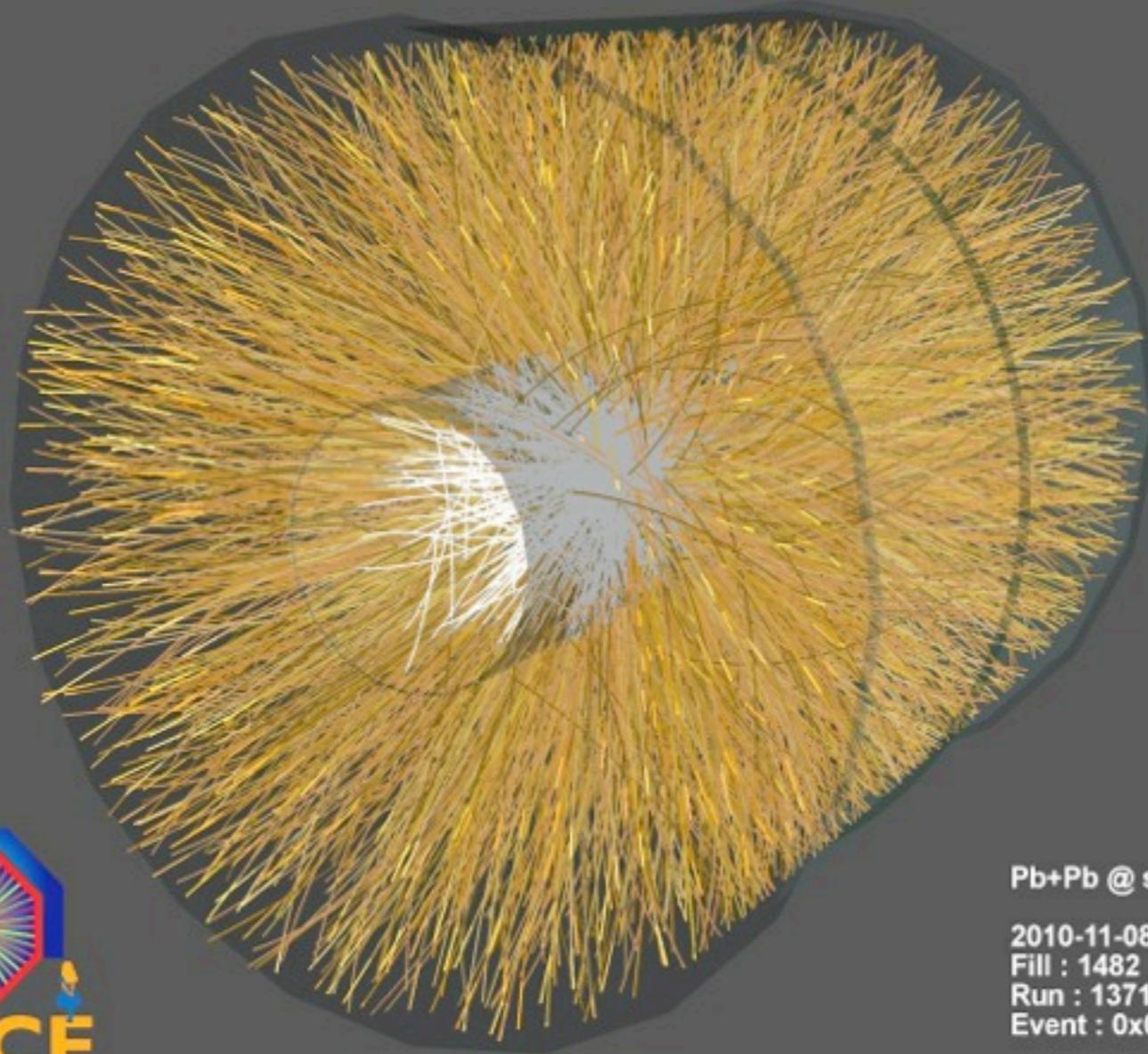


# Étude expérimentale du QGP

- Collisions d'ions lourds ultra-relativistes



# Étude expérimentale du QGP



Pb+Pb @  $\sqrt{s} = 2.76$  ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x0000000D3BBE693

q.  
q.  
q.  
ls

# Étude expérimentale du QGP

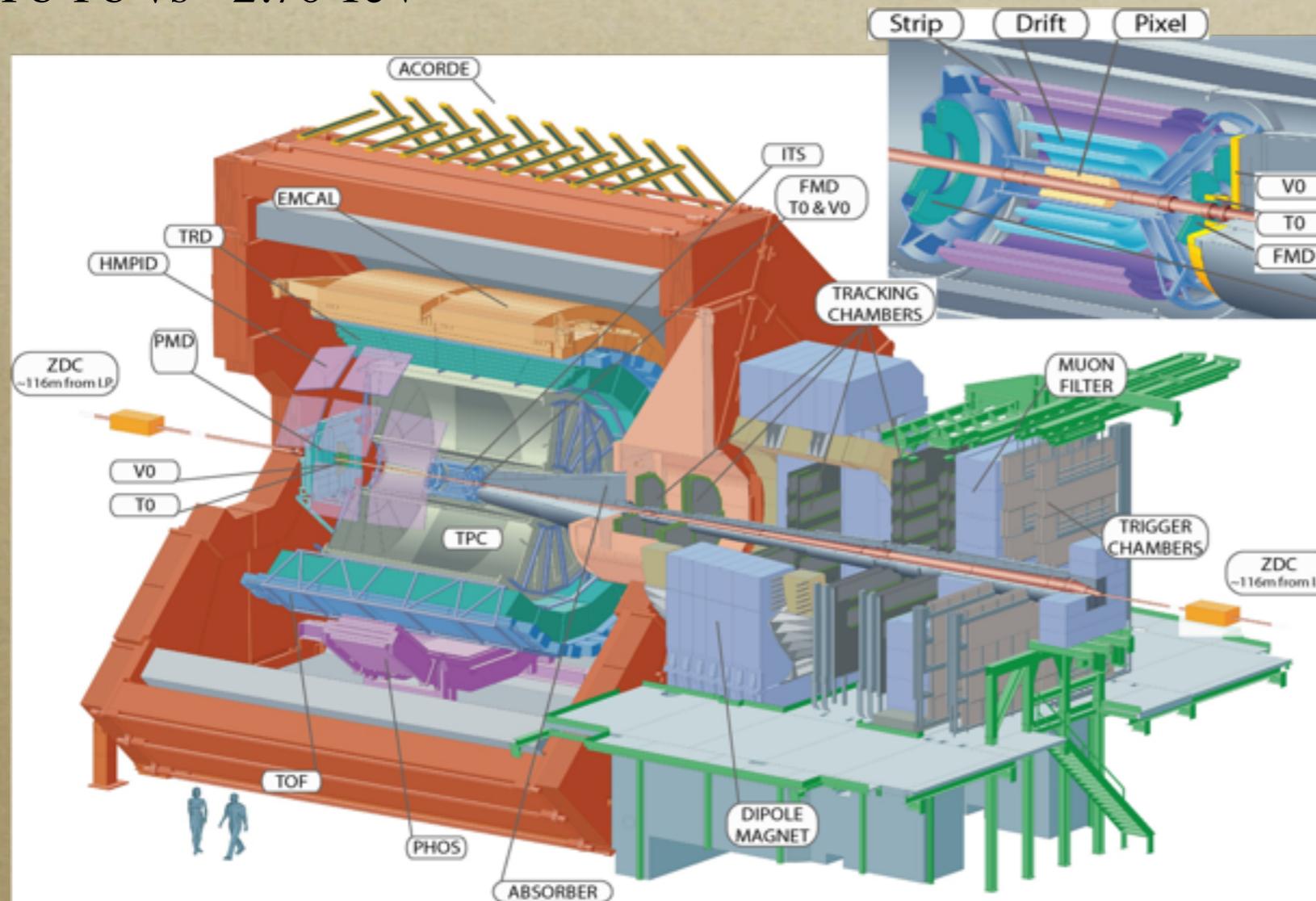
- Un «certain» nombre de signatures (soft / hard)
  - multiplicité de particules primaires produites
  - photons, leptons thermiques (de basse énergie)
  - saveurs lourdes: production de quarkonia, charme et beauté ouverts
  - production de jets (suppression de jet ou jet quenching)
  - ....

# Étude expérimentale du QGP

- Un «certain» nombre de signatures (soft / hard)
  - multiplicité de particules primaires produites
  - photons, leptons thermiques (de basse énergie)
  - saveurs lourdes: production de quarkonia, charme et beauté ouverts
  - production de jets (suppression de jet ou jet quenching)
  - ....
- SPS, RHIC: mise en évidence du QGP
- RHIC: le plasma crée à l'énergie du RHIC ( $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$  / collision binaire NN) est un fluide presque parfait qui interagit fortement
- LHC ( $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$  - 2010): le plasma est plus chaud, plus dense et existe plus longtemps qu'au RHIC (2010)!
- LHC 2011++: caractérisation du plasma (2011: 20x plus de statistiques)
- RHIC++: scan en énergie de collision pour étudier la formation de QGP

# Les collisions d'ions lourds ultrarelativistes au LHC

Pb-Pb  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV



**Maxime Guilbaud**

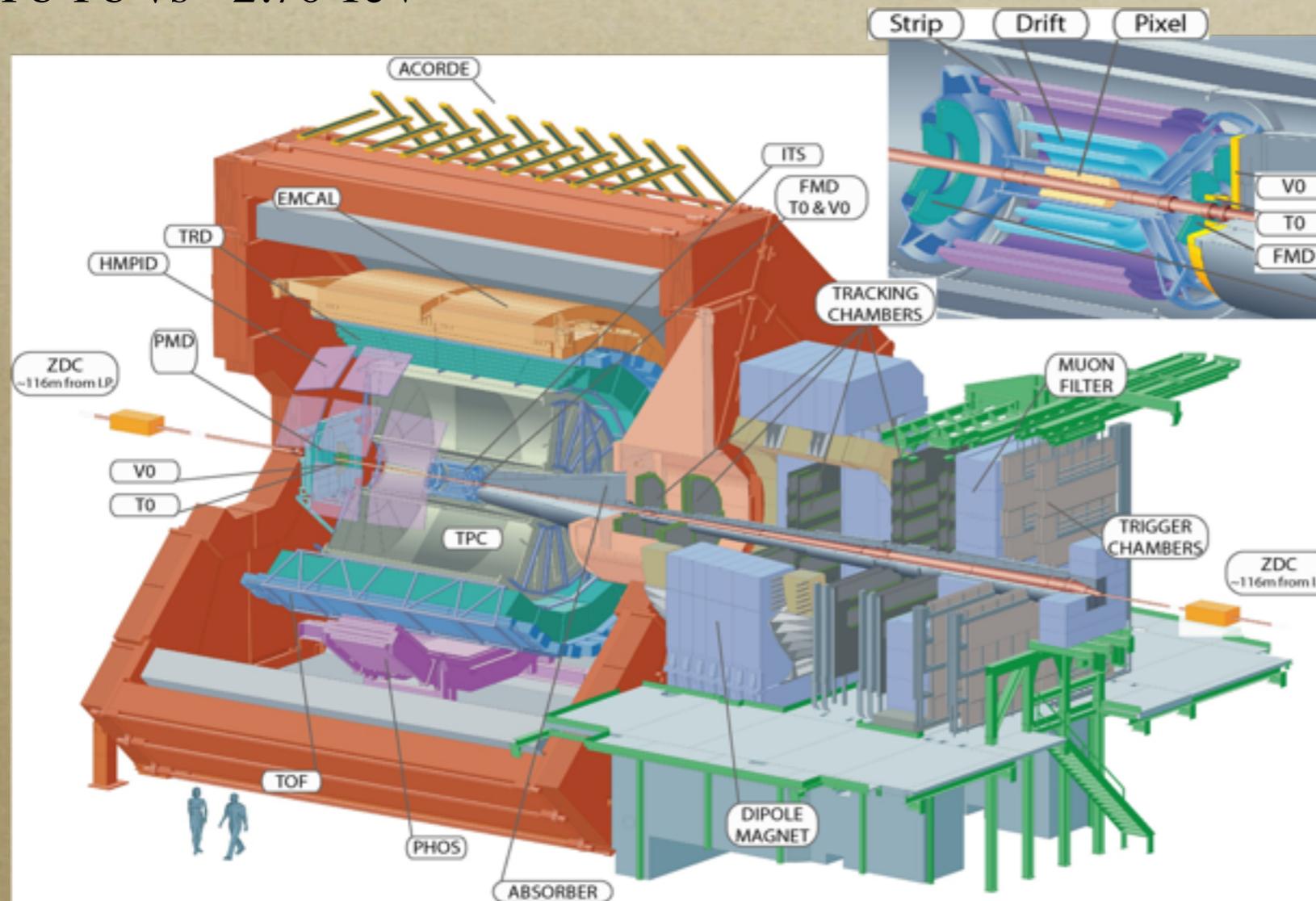
Mesure du nombre de particules primaires chargées avec les V0s

**Lizardo Valencia Palomo**

Mesure de la production de  $J/\Psi$  avec le spectromètre à muons

# Les collisions d'ions lourds ultrarelativistes au LHC

Pb-Pb  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV



**Maxime Guilbaud**

Mesure du nombre de particules primaires chargées avec les V0s

**Lizardo Valencia Palomo**

Mesure de la production de  $J/\Psi$  avec le spectromètre à muons

ATLAS et CMS (et LHCb!) ont aussi un (beau) programme d'ions lourds !

# Programme de la session

## *Maintenant:*

Alaa DBEYSSI (IPN Orsay)

Experimental observables in  $p\bar{p}$  decay into two heavy leptons

Adrien Besse (LPT Orsay)

A phenomenological study of helicity amplitudes of high energy exclusive lepton production of the rho meson

Maxime Guilbaud (IPN Lyon)

Primary charged-particle density at forward rapidity with ALICE experiment at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76$  TeV

Lizardo Valencia Palomo (IPN Orsay)

J/psi measurement in Pb-Pb collisions in the ALICE experiment at the LHC

## *Demain:*

Chi Linh NGUYEN (LAPTH)

Photon + heavy-quark jet production at NLO for hadronic colliders

Mohamed Sadok ZIDI (LAPTH)

Calcul des boucles dans les théories de jauge