

Kaléidoscope de l'interaction forte

Samuel Wallon

Laboratoire de Physique Théorique

CNRS / Université Paris Sud

Orsay

et

Université Pierre et Marie Curie

Colloque de Recherche Inter Ecoles Centrales et CentraleSupélec

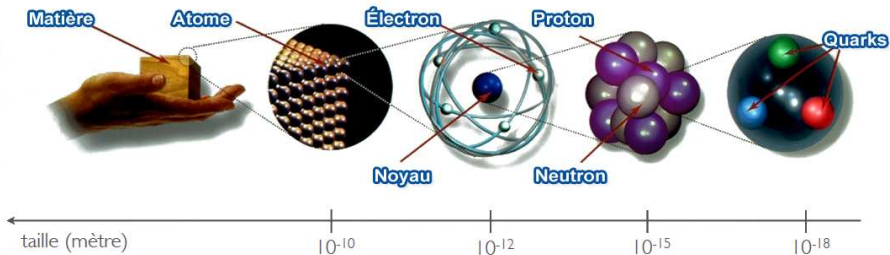
CRIEC

15 juin 2016

Chatenay-Malabry

Introduction

Voyage vers l'infiniment petit



Introduction

Le modèle standard: une belle zoologie!

Particules de matière

boson
vecteurboson
Brout-Englert-Higgs

Quarks
(int. forte, faible,
électromagnétique)

mass →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS					
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS					
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Leptons chargés
(int. faible,
électromagnétique)

Leptons neutres
(int. faible)

Introduction

Quelques outils expérimentaux modernes

SLAC 1968-1969



découverte des quarks dans les expériences de diffusion profondément inélastique d'un faisceau d'électron sur une cible de proton (cible fixe d'hydrogène gazeux)

Introduction

Quelques outils expérimentaux modernes

HERA 1992-2007



collisionneur de 6,3 km de circonférence:

collisions ultra-relativistes de protons d'énergie 920 GeV et d'électrons (ou de positrons) de 27,5 GeV.

Introduction

Quelques outils expérimentaux modernes

LHC 2008-



collisionneur de 27 km de circonférence:

- collisions ultra-relativistes proton-proton d'énergie 6,5 TeV chacun
- collisions ultra-relativistes proton-noyau et noyau-noyau

L'interaction forte

QCD

Le cadre théorique: QCD

La **chromodynamique quantique (QCD)** est LA théorie de l'interaction forte, une des quatre interactions élémentaires de l'univers: décrit l'interaction entre **quarks** et **gluons** = **partons "colorés"**

- **c'est une théorie des champs quantiques relativistes**
 - un champ quantique est un opérateur dont les valeurs sont des champs classiques
 - ex: le champ électromagnétique dans le cas de l'électrodynamique quantique (QED)
- **c'est une théorie de jauge du type Yang-Mills**
 - QED est une théorie de jauge *abélienne*
groupe de jauge $U(1)$ = phases complexes
 - QCD est une théorie de jauge *non abélienne*
groupe de jauge $SU(3)$ = matrices unitaires à coefficient dans \mathbb{C} de dét. 1
- QCD décrit l'interaction entre **quarks**, **fermions de spin 1/2** dont la charge forte est appelée "couleur" (3 valeurs possibles), transmise par les **gluons bosons de spin 1** (qui possèdent 8 couleurs possibles et interagissent entr'eux)

L'interaction forte

QCD

Diagrammes de Feynman



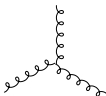
propagateur du quark



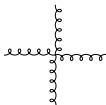
propagateur du gluon



vertex quark-quark-gluon



vertex à 3 gluon



vertex à 4 gluon

LEGOs qui permettent (en principe seulement!) de calculer toute *observable*, en partant des quarks et gluons jusqu'à la physique nucléaire

ex: amplitude de probabilité pour la transition $i \rightarrow f$

L'interaction forte

Le confinement

Les hadrons

les quarks sont **confinés** dans les hadrons, états liés **neutres de couleur**:

- mésons ($\pi, \eta, f_0, \rho, \omega \dots$)

$$|q\bar{q}\rangle + |q\bar{q}g\rangle + |qqq\bar{q}\rangle + \dots$$



comme en électromagnétisme:
couleur + anticouleur = blanc

- baryons ($p, n, N, \Delta \dots$)

$$|qqq\rangle + |qqqg\rangle + |qqqq\bar{q}\rangle + \dots$$

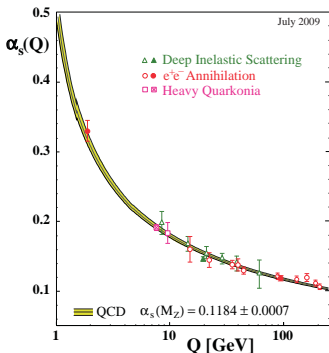


comme pour la TV couleur:
rouge + bleu + vert = blanc

L'interaction forte

La liberté asymptotique

Liberté asymptotique et confinement



$$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi}$$

g = charge de couleur,

analogue de la charge électrique

couplage $\alpha_s(Q) \ll 1$ (Q = énergie typique)

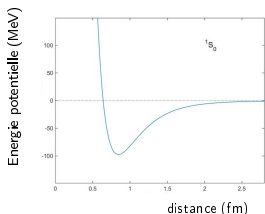
pour $Q \gg \Lambda_{QCD} \simeq 200 \text{ MeV}$ soit distance $\sim 1/Q \ll 1 \text{ fm}$

L'interaction forte

Origine des masses

Pourquoi suis-je *beaucoup* plus lourd que les quarks qui me constituent?!?

- Le mécanisme de **Brout-Englert-Higgs (BEH)** explique la masse des leptons et des quarks
- Mais environ 95 % de la masse de l'univers visible est due à QCD!
 $m_{\text{electron}} \ll m_{\text{quarks u,d}} \sim 1/200 m_{\text{proton}}$
- Physique nucléaire:



$$\Rightarrow m_{\frac{A}{Z}X} < Z m_{\text{proton}} + (A - Z) m_{\text{neutron}}$$

- QCD: $E_p \sim -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$: **terme linéaire** (confinement) à grande distance
Les gluons jouent ici un rôle essentiel
 $\Rightarrow m_{\text{proton}} \gg m_{\text{quarks u,d}}$

L'interaction forte

QCD est partout...

QCD joue un rôle central en physique des particules

- L'étude du secteur du boson BEH (découvert en 2012 au LHC)
- La physique de la saveur
ex: pourquoi $m_u \sim m_d \ll m_s \ll m_c \ll m_b \ll m_t$?
- L'étude des rayons cosmiques d'ultra haute énergie
- La recherche de physique au-delà du modèle standard
ex: supersymétrie fermions/bosons ?

exigent un contrôle précis des effets de QCD

L'interaction forte

QCD est partout... et mal comprise!

De nombreuses questions en QCD restent ouvertes

QCD est une théorie très non-linéaire, à la phénoménologie très riche

- physique nucléaire

de l'interaction quark-quark à l'interaction nucléon-nucléon?

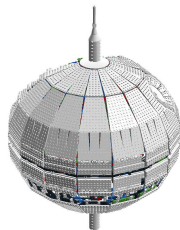
- analogue des forces de London entre molécules neutres électriquement
- ici les hadrons sont neutres de couleur
- force résiduelle?
- hors de portée analytiquement et même numériquement

- physique du plasma quark-gluon

- si l'on chauffe suffisamment noyau, peut-on créer un état déconfiné?
- collision noyau-noyau (LHC)
- quels sont les signaux de formation?

- physique hadronique: comprendre les caractéristiques des hadrons

- Masse
- Spin
- Charge
- ...



L'interaction forte

QCD est partout... et mal comprise!

De nombreuses questions en QCD restent ouvertes

QCD est une théorie très non-linéaire, à la phénoménologie très riche

- physique nucléaire

de l'interaction quark-quark à l'interaction nucléon-nucléon?

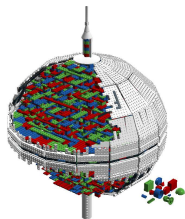
- analogue des forces de London entre molécules neutres électriquement
- ici les hadrons sont neutres de couleur
- force résiduelle?
- hors de portée analytiquement et même numériquement

- physique du plasma quark-gluon

- si l'on chauffe suffisamment noyau, peut-on créer un état déconfiné?
- collision noyau-noyau (LHC)
- quels sont les signaux de formation?

- physique hadronique: comprendre les caractéristiques des hadrons

- Masse
- Spin
- Charge
- ...

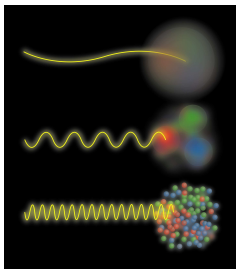


En termes des briques élémentaires colorées:
quark, gluons

L'interaction forte

Comment sonder l'intérieur d'un proton

Voir l'intérieur d'un proton avec une sonde électromagnétique

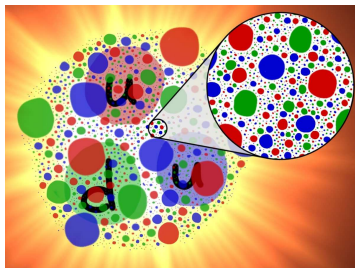


les détails visibles sont directement reliés à la longueur d'onde de la sonde utilisée

L'interaction forte

Comment sonder l'intérieur d'un proton

Voir l'intérieur d'un proton avec une sonde électromagnétique

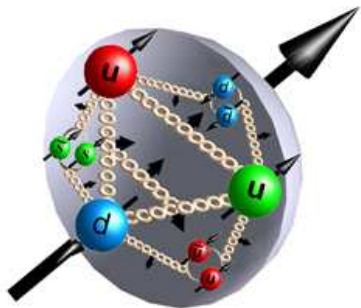


comme l'électron, les quarks et les gluons n'ont pas de taille caractéristique
(en l'état actuel des connaissances, *i.e.* jusqu'à $\sim 10^{-18}$ m)

L'interaction forte

Et le spin?

Le puzzle du spin du proton



Le proton est de spin $1/2$

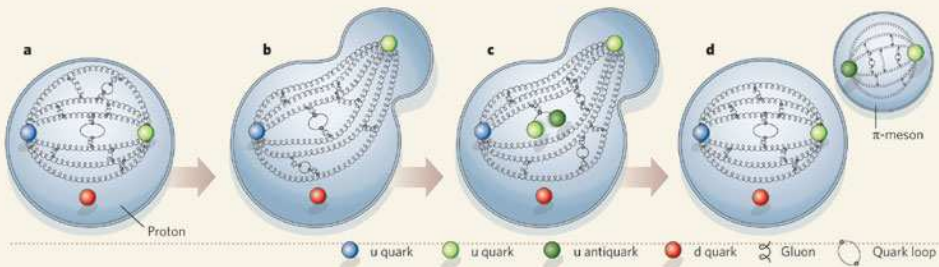
- Les quarks sont de spin $1/2$
- Les gluons sont de spin 1
- Les quarks et les gluons ont un moment orbital
- Quelle est la contribution de chacune de ces composantes au spin total?

L'interaction forte

Le confinement à l'œuvre dans les processus élémentaires

Rappel: on ne peut isoler un quark

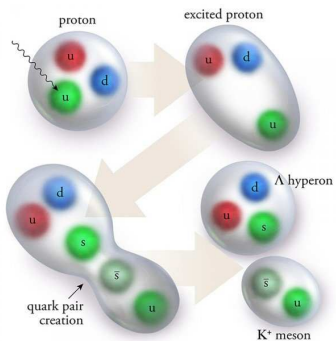
voilà ce qui arrive si l'on tire trop fort sur l'un des quarks d'un proton...:



L'interaction forte

Le confinement à l'œuvre dans les processus élémentaires

Un exemple de processus

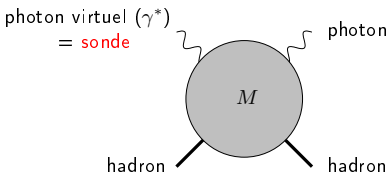


Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

Que faire avec QCD?

exemple: diffusion Compton

source de γ^* = faisceau d' e^\pm , de μ^- 

- Objectif: décrire M (amplitude de diffusion) en séparant:
 - des quantités non-calculables perturbativement $\alpha_s \sim 1$
principal outil disponible:
discrétisation de QCD sur un réseau 4-d: simulations numériques
 - des quantités calculables perturbativement $\alpha_s \ll 1$

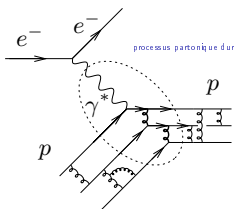
Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

Factorisation

- Objectif: réduire le processus à l'interaction d'un petit nombre de *partons* (quarks, gluons), malgré le confinement
- Ceci est possible si le processus est gouverné par des phénomènes à courte distance ($d \ll 1 \text{ fm}$)
 $\implies \alpha_s \ll 1$: **méthodes perturbatives**
- Il faut pour cela heurter un hadron suffisamment violemment

Exemple: facteur de forme du proton (collision élastique $e^- p \rightarrow e^- p$)



τ interaction électromagnétique $\sim \tau$ temps de vie du parton après l'interaction
 $\ll \tau$ temps caractéristique de l'interaction forte

on parle alors de processus **dur**.

Les outils théoriques

Aparté

Au fait, quelle est la taille d'un proton?

Si l'on se contente de heurter le proton un peu moins violemment (mais on perd alors le contrôle théorique...): on a accès à sa distribution de charge, sans voir le détail de ses constituants.

- Dès 1953 (**Robert Hofstadter** à **Stanford**) mesure le rayon de charge du proton.
Valeur actuelle:
 $R = 0.8768 \text{ fm}$
- Problème! 2010: une mesure du Lamb shift dans l'atome d'hydrogène muonique ($p\mu^-$) conduit à
 $R = 0.84184(67) \text{ fm}$
- Ces deux valeurs sont contradictoires!

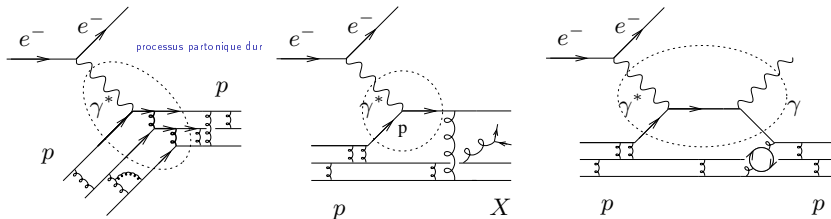
A suivre...

Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

Factorisation

- Il faut pour cela une échelle dure:
 - **virtualité de la sonde électromagnétique**
diffusion élastique $e^\pm p \rightarrow e^\pm p$
diffusion profondément inélastique (DIS) $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$
diffusion Compton virtuelle (DVCS) $e^\pm p \rightarrow e^\pm p \gamma$
 - **Energie totale dans le centre de masse** en annihilation $e^+e^- \rightarrow X$
 - Production d'un méson lourd
- amplitude = **convolution** du contenu partonique du hadron avec une amplitude perturbative



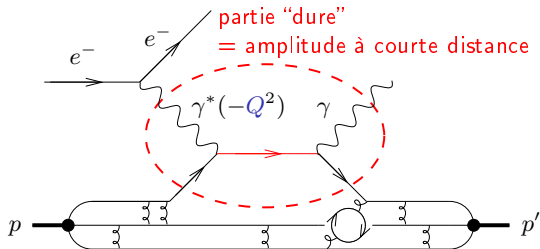
Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

factorisation "colinéaire" de l'amplitude de diffusion du processus DVCS

 $M = \text{amplitude courte distance} \otimes \text{contenu non-perturbatif du hadron}$
 convolution

Diffusion Compton profondément virtuelle:

photon virtuel γ^* = sonde
 $1/Q = \text{résolution spatiale}$
 (inégalité d'Heisenberg)

 $M_{\gamma^* p \rightarrow \gamma p'}$

corrections perturbatives

resummation ?

$$= (\# + \# \alpha_s + \dots)$$

$$+ \frac{1}{Q} (\# + \# \alpha_s + \dots)$$

 \nwarrow corrections en puissances

$$+ \dots$$

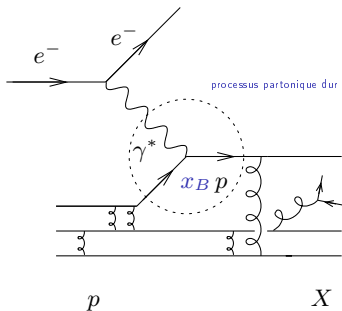
Distribution de Partons Généralisée (GPD)

HERA (H1, ZEUS, HERMES), JLab, COMPASS ... LHC (avec e^- remplacé par p)

Le contenu en quark et gluon du proton

Retour sur l'expérience historique: DIS

La diffusion profondément inélastique



$$s_{\gamma^* p} = (q_\gamma^* + p_p)^2 = 4 E_{\text{c.m.}}^2.$$

$$Q^2 \equiv -q_\gamma^2 > 0$$

$$x_B = \frac{Q^2}{2 p_p \cdot q_\gamma^*} \simeq \frac{Q^2}{s_{\gamma^* p}}$$

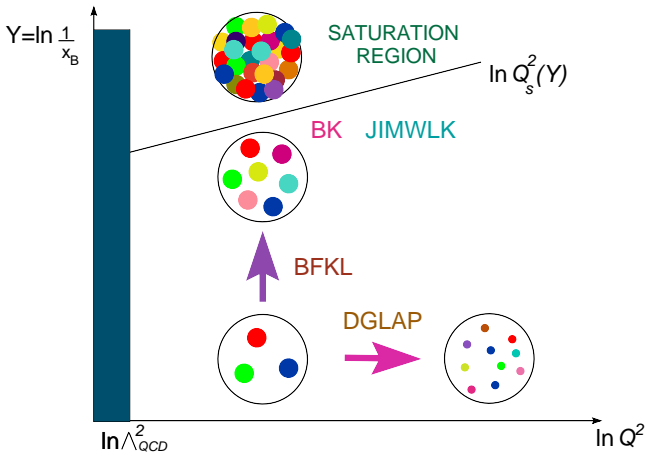
modèle de Bjorken-Feynman 1969

- x_B = fraction de l'énergie-impulsion du proton transportée par le quark
- $1/Q$ = résolution transverse de la sonde électromagnétique $\ll 1/\Lambda_{QCD}$

Le contenu en quark et gluon du proton

DIS

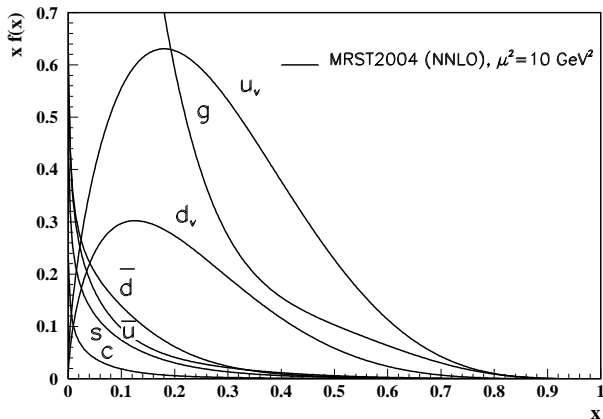
Les différents régimes gouvernant le contenu perturbatif du proton



Le contenu en quark et gluon du proton

DIS

Le contenu partonique du proton

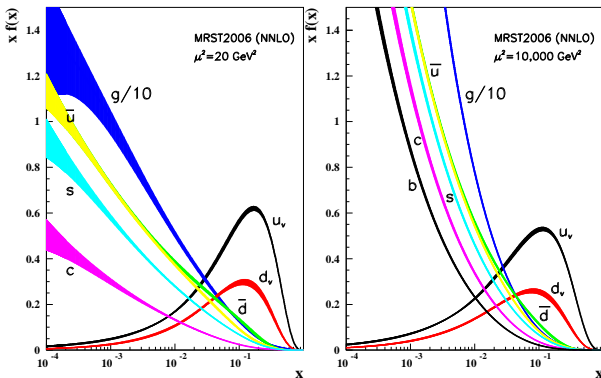


Distributions partoniques $x f(x)$, basées sur la paramétrisation **MRST 2004 NNLO**, à l'échelle $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$ (*PDG 2007*).

Le contenu en quark et gluon du proton

DIS

Le contenu partonique du proton



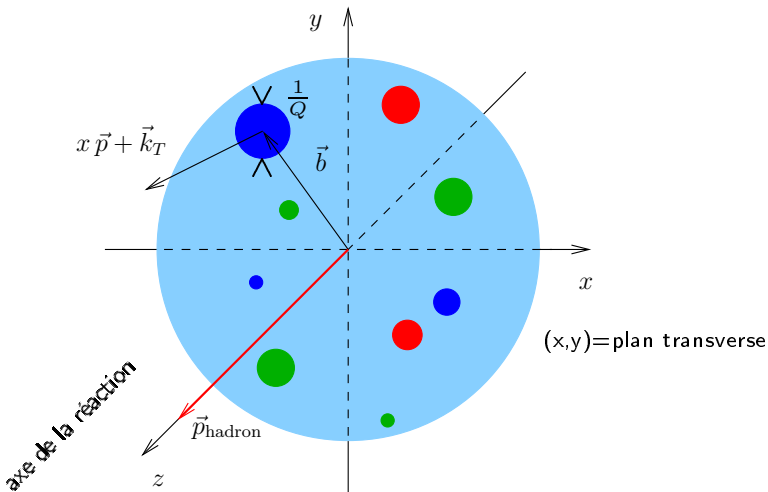
Distributions partoniques $x f(x)$ (u_v , d_v , \bar{u} , \bar{d} , s , c , b , g) avec leur incertitudes, basées sur les paramétrisations **MRST 2006 NNLO**, aux échelles $Q^2 = 20 \text{ GeV}^2$ et $Q^2 = 10000 \text{ GeV}^2$ (*PDG 2008*).

Le contenu en quark et gluon du proton

Au-delà de DIS

Accéder aux distributions multidimensionnelles en quark et gluons pour les hadrons?

Information 6-dimensionnelle



Le contenu en quark et gluon du proton

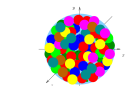
Le tableau ultime

6D

distributions de Wigner pour les hadrons

$$W(x, \vec{b}, k_T)$$

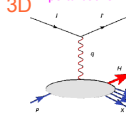
Expérimentalement inaccessible directement



uPDFs (gluons)

distributions de partons non intégrées

limite de Regge perturbative



processus semi-inclusifs

TMDs

distributions en moment transverse

$$f(x, k_T)$$

$$\int d^2 k_T \int d b_T$$

distributions en paramètre d'impact

$$f(x, b_T)$$

$$H(x, 0, t)$$

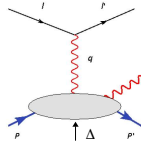
distributions de partons généralisées

$$\int d^2 k_T \int \text{Fourier}(\vec{b})$$

GPDs

$$H(x, \xi, t)$$

distributions de partons généralisées



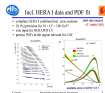
processus exclusifs

1D

PDFs

$$f(x)$$

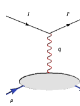
distribution de partons



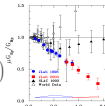
FFs

$$G_{E,M}(t)$$

facteurs de forme



diffusion élastique



GFFs

Facteurs de forme généralisés

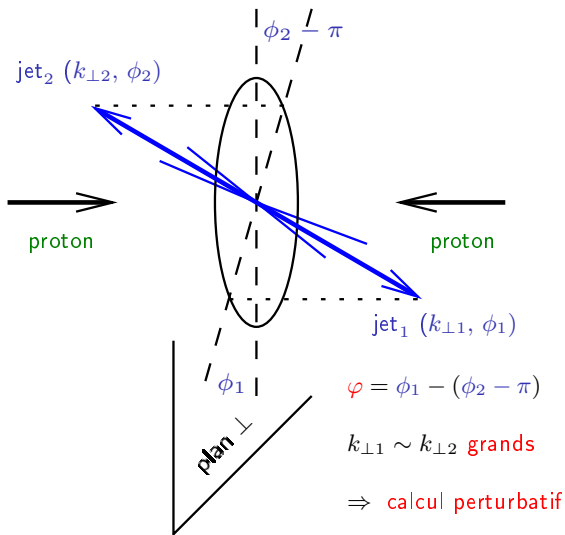
réseaux

$$\int dx x^{n-1}$$

Le contenu en quark et gluon du proton

Dynamique asymptotique au LHC

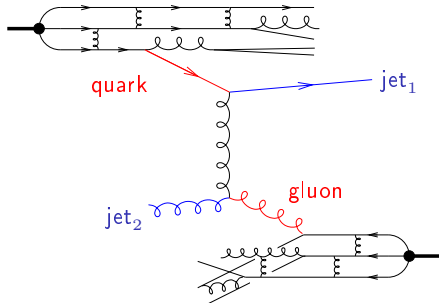
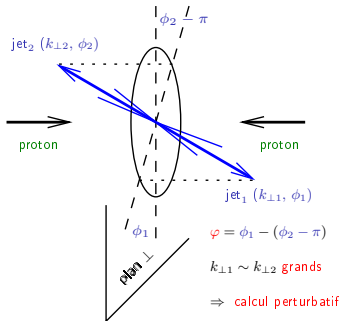
Jets Mueller-Navelet (1987) au LHC



Le contenu en quark et gluon du proton

Dynamique asymptotique au LHC

Jets Mueller-Navelet (1987) au LHC

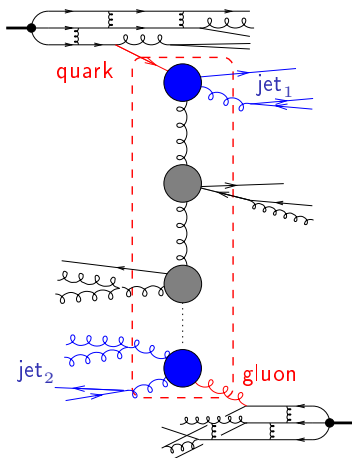
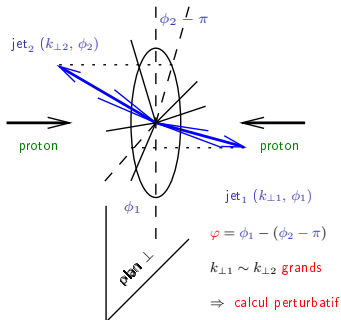


donc $\varphi = 0$

Le contenu en quark et gluon du proton

Dynamique asymptotique au LHC

Jets Mueller-Navelet (1987) au LHC



LHC: énergie disponible énorme!

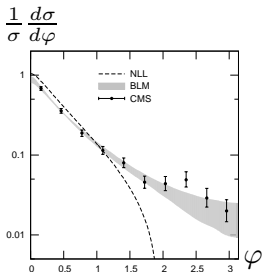
émettre **beaucoup** de partons mous coûte très peu d'énergie

\Rightarrow grandes sections efficaces + **décorrélation** (par conservation de l'impulsion)
 donc $\varphi \neq 0$

Le contenu en quark et gluon du proton

Dynamique asymptotique au LHC

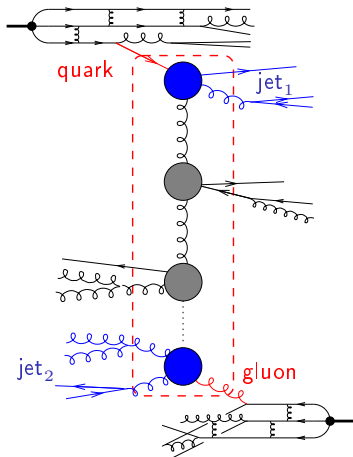
Jets Mueller-Navelet (1987) au LHC



données LHC

CMS 2016

arXiv:1601.06713 [hep-ex]



premier calcul complet à l'ordre des
logarithmes sous-dominants de l'énergie (NLL)
prédiction pour LHC: **décorrélacion angulaire faible**
Excellente description des données de CMS