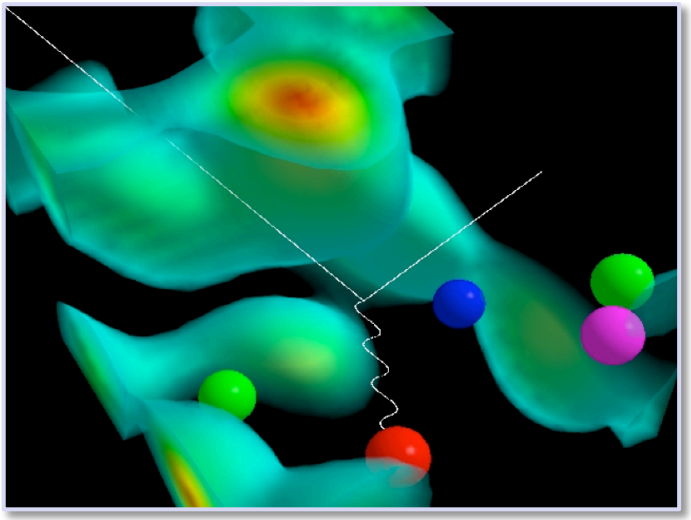
Prospective en Physique Hadronique à l'horizon 2025

Franck Sabatié
CEA Saclay



- Introduction : QCD à l'horizon 2025
- AFTER: A Fixed Target ExpeRiment @ CERN
- EIC : Electron-Ion Collider @ BNL/JLab
- Conclusion

Groupe de travail 8: A. Ferrero (Irfu/SPhN), M. Guidal (IPNO), C. Hadjidakis (IPNO), N. d'Hose (Irfu/SPhN), T. Hennino (IPNO), J.-P. Lansberg (IPNO), B. Pire (CPHT), C. Royon (Irfu/SPP), F. Sabatié (Irfu/SPhN), E. Voutier (LPSC)

AFTER @ LHC

Quelles questions en suspens à l'horizon 2025

Ce qu'on saura de l'interaction forte dans le nucléon d'ici là :

- Bonne connaissance des distributions de partons
- Bonne connaissance des facteurs de forme
- Estimation de la polarisation des gluons
- Premières mesures de Distributions de Partons Généralisées
- Premiers moments de ces distributions via QCD sur réseau
- Premières images 3D du nucléon dans la région de valence et de la mer
- …

A REMETTRE EN FORME OU RETIRER ?

Ce qu'il restera à investiguer :

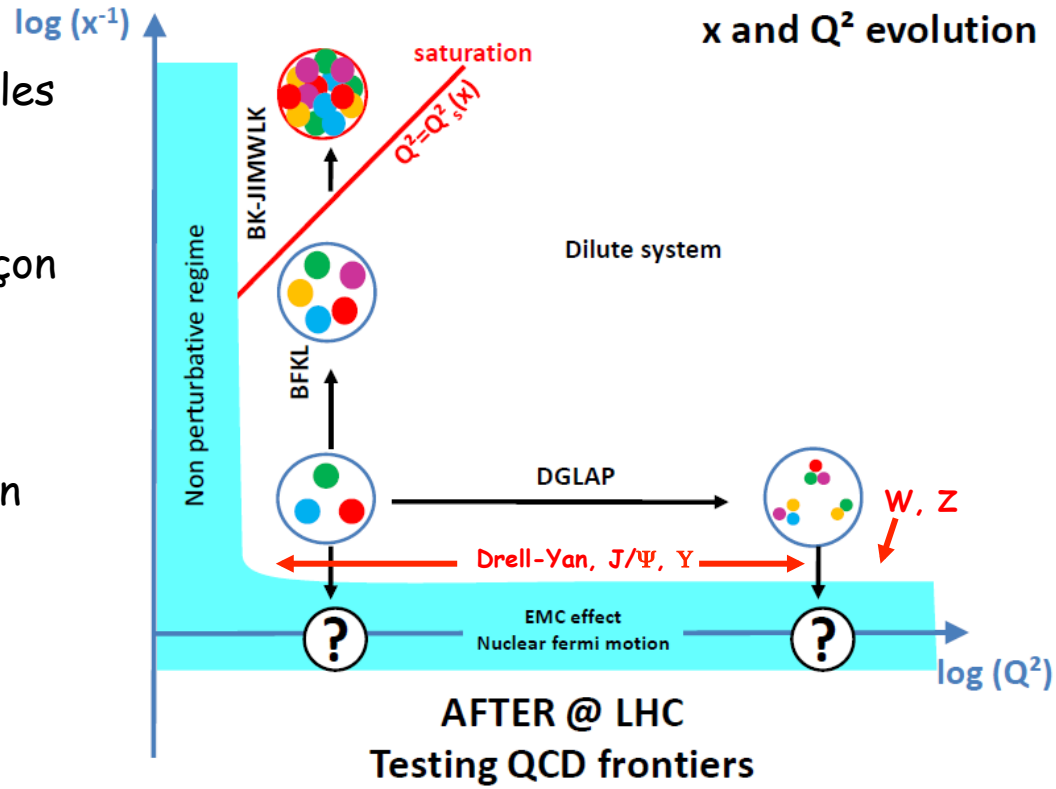
- Polarisation des gluons dans le nucléon (une réponse définitive !)
- Images 3D précises du nucléon dans la région de la mer et des gluons
- Etude du moment transverse des partons dans le nucléon
- Etude de la saturation en gluon (Color Glass Condensate, …)
- Etude du rôle des gluons dans les interactions nucléaires à courte distance

- Etude des gluons dans le nucléon à très grande fraction d'impulsion
- Mesure des distributions de partons nucléaires
- Etude fine des effets nucléaires du Plasma de Quarks et de Gluons

AFTER : A Fixed Target ExpeRiment @ LHC

L'interaction forte dans tous ses états

- Le domaine perturbatif est décrit par les équations d'évolution DGLAP et BFKL
- La région des bas x_B est étudiée de façon précise par les expériences auprès de collisionneurs (ep, pp, pA)
- A très bas x_B : domaine de la saturation



La région des x_B~1 est essentiellement inexplorée

Comment le proton se comporte-t'il quand l'essentiel de son impulsion longitudinale est portée par un seul parton ?

AFTER : principe et intérêt

Physics Opportunities of a Fixed-Target Experiment using the LHC Beams

S.J. Brodsky[1], F. Fleuret[2], C. Hadjidakis[3], J.P. Lansberg[3]

[1]*SLAC National Accelerator Laboratory, Theoretical Physics, Stanford University, Menlo Park, California 94025, USA*
[2]*Laboratoire Leprince Ringuet, Ecole polytechnique, CNRS/IN2P3, 91128 Palaiseau, France*
[3]*IPNO, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, 91406 Orsay, France*

arXiv:1202.6585

- Faisceau de protons de 7 TeV ($\sqrt{s}$~115 GeV)
  - p+p, p+d, p+A
- Faisceau de Pb de 2.75 TeV ($\sqrt{s}$~72 GeV)
  - Pb+A, Pb+p
- Grand boost et haute luminosité pour accéder à un programme étendu :
  - QCD à haut x_B and ultra-haut x_B
  - nPDF et "shadowing" nucléaire
  - Plasma Quark Gluon (voir groupe 7)
  - Physique du spin (cible polarisée)
  - Production de W/Z en p+A

ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE DIRECT®

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 234 (2005) 31–39

NIM B Beam Interactions with Materials & Atoms

www.elsevier.com/locate/nimb

Strong crystalline fields – a possibility for extraction from the LHC

E. Uggerhøj, U.I. Uggerhøj *

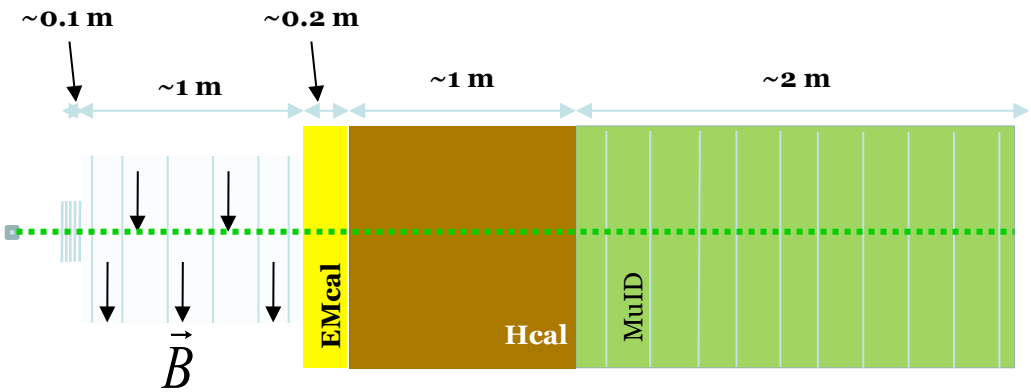
The idea is to put a bent, single crystal of either ...Si or Ge (W would perform slightly better but needs substantial improvements in crystal quality) at a distance of $\simeq 7\sigma$ to the beam where it can intercept and deflect part of the beam halo by an angle similar to the one the foreseen dump kicking system will apply to the circulating beam.

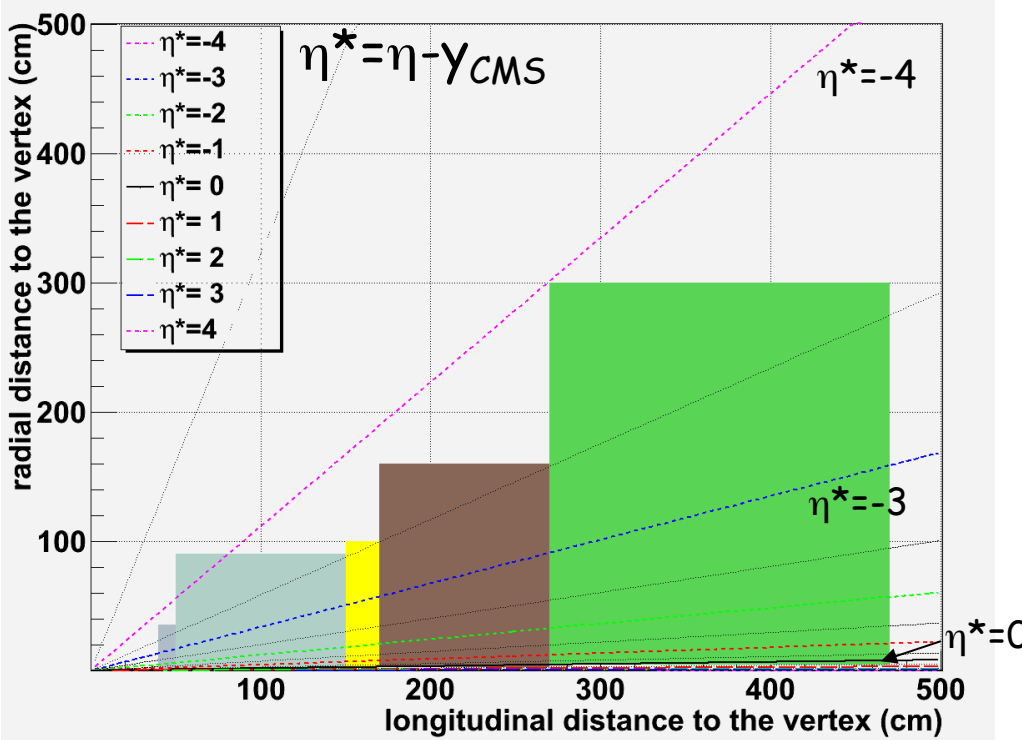
Faisceau extrait: 5 x 10^8 protons/s

AFTER : un détecteur compact mais générique

- **Détecteur générique**
  - Vertex
  - Trajectographie
  - Calorimétrie
  - Muons
  - PID (hadrons chargés) ?

- **Détecteur compact**
  - Nécessaire à cause du grand boost
  - Nécessité d'employer des technologies ultra-granulaires
  - CHIC en tant que démonstrateur de AFTER ?





AFTER : un observatoire à quarkonium

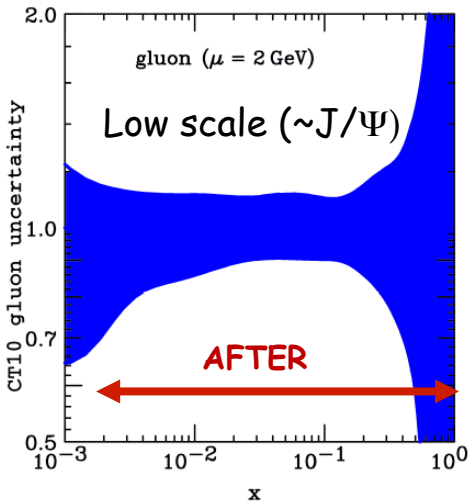
Production de J/Ψ et de Υ en p+p et p+d

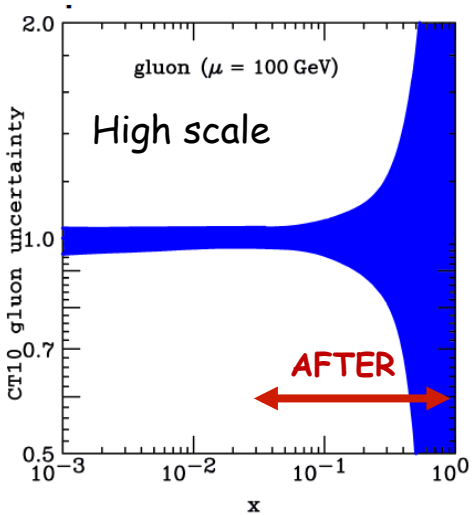
- Haute luminosité

AFTER

Target	$\int \mathcal{L}$ (fb^{-1}.yr^{-1})	N(J/Ψ) yr^{-1} = $A\mathcal{L}\mathcal{B}\sigma_{\Psi}$	N(Υ) yr^{-1} =$A\mathcal{L}\mathcal{B}\sigma_{\Upsilon}$
1 m Liq. H_2	20	4.0 10^8	8.0 10^5
1 m Liq. D_2	24	9.6 10^8	1.9 10^6
LHC pp 14 Tev (low pT)	0.05 (ALICE) 2 LHCb	3.6 10^7 1.4 10^9	1.8 10^5 7.2 10^6
RHIC pp 200GeV	1.2 10^{-2}	4.8 10^5	1.2 10^3

Incertitudes sur les PDFs de gluons:





AFTER : un observatoire à quarkonium

J/Ψ and Υ studies in p+A

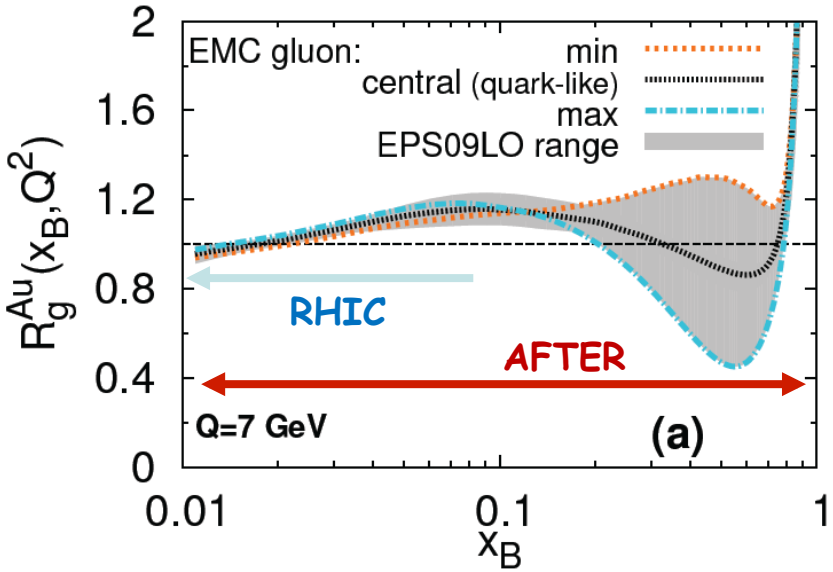
- Très haute luminosité

AFTER

Target	A	$\int \mathcal{L}$ (fb^{-1}.yr^{-1})	N(J/Ψ) yr^{-1} = $A\mathcal{L}\mathcal{B}\sigma_{\Psi}$	N(Υ) yr^{-1} =$A\mathcal{L}\mathcal{B}\sigma_{\Upsilon}$
1cm Be	9	0.62	1.1 10^{8}	2.2 10^{5}
1cm Cu	64	0.42	5.3 10^{8}	1.1 10^{6}
1cm W	185	0.31	1.1 10^{9}	2.3 10^{6}
1cm Pb	207	0.16	6.7 10^{8}	1.3 10^{6}
LHC pPb 8.8 TeV	207	10^{-4}	1.0 10^{7}	7.5 10^{4}
RHIC dAu 200GeV	198	1.5 10^{-4}	2.4 10^{6}	5.9 10^{3}
RHIC dAu 62GeV	198	3.8 10^{-6}	1.2 10^{4}	18

Mesures précises de l'anti-shadowing et l'effet EMC pour les PDF de gluon dans les noyaux.

Utilisation de cibles nucléaires variées
→ **Etude des effets nucléaires en fonction de *A***



AFTER : où en est-on ?

- arXiv:1202.6585 soumis à publication

Physics Opportunities of a Fixed-Target Experiment using the LHC Beams

S.J. Brodsky[1], F. Fleuret[2], C. Hadjidakis[3], J.P. Lansberg[3]

[1]*SLAC National Accelerator Laboratory, Theoretical Physics, Stanford University, Menlo Park, California 94025, USA*
[2]*Laboratoire Leprince Ringuet, Ecole polytechnique, CNRS/IN2P3, 91128 Palaiseau, France*
[3]*IPNO, Université Paris-Sud, CNRS/IN2P3, 91406 Orsay, France*

- 3ème meeting en mai à Grenoble

- Etudes financées par le France-Stanford Center for Interdisciplinary Studies

- Projet soumis à l'ANR-SIMI5:
  - Contributions françaises : IPN-Orsay, LLR-Palaiseau, SPhN-Saclay
  - Contributions étrangères : Torino-Italy, SLAC-Stanford, Aarhus-Denmark

- En recherche d'autres partenaires

- Connexion avec le projet CHIC sur une R&D commune pour les technologies de détection ultra-granulaires (cf. groupe de travail 7)

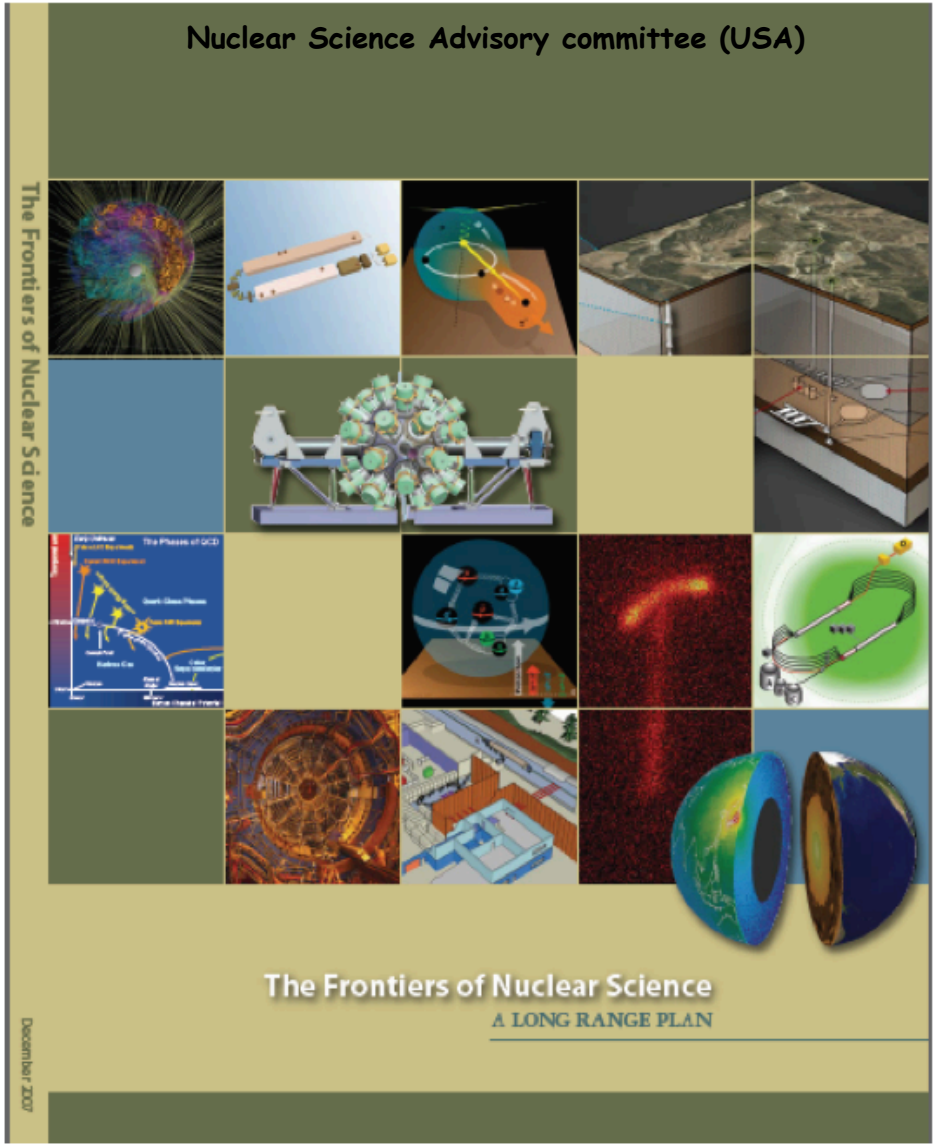
- Démarrage possible auprès du LHC en 2025

EIC : Electron-Ion Collider

NSAC 2007 Long Range Plan

"An **Electron-Ion Collider (EIC)** with polarized beams has been **embraced by the U.S. nuclear science community** as embodying the vision for **reaching the next QCD frontier**. EIC would provide unique capabilities for the study of QCD well beyond those available at existing facilities worldwide and complementary to those planned for the next generation of accelerators in Europe and Asia. In support of this new direction:

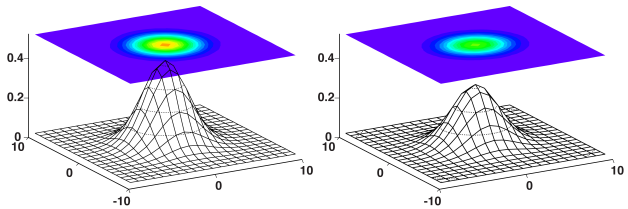
We recommend the allocation of resources to develop accelerator and detector technology necessary to lay the foundation for a polarized Electron Ion Collider. The EIC would explore the new QCD frontier of strong color fields in nuclei and precisely image the gluons in the proton."



« The new QCD Frontier »

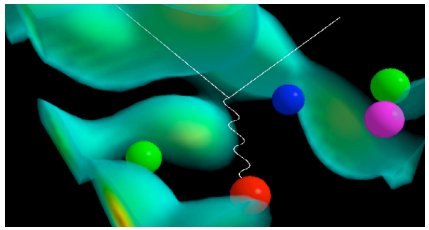
Un collisionneur électrons-ions permettra d'explorer de manière inédite certaines des plus grandes énigmes de la physique nucléaire :

La structure de la matière visible



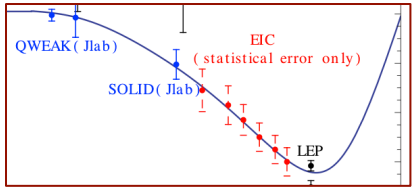
Distributions de quarks
polarisées (L/T) ou non
Images 3D du nucléon (GPD)
Distributions en moment transverse

Le rôle des gluons dans la matière hadronique



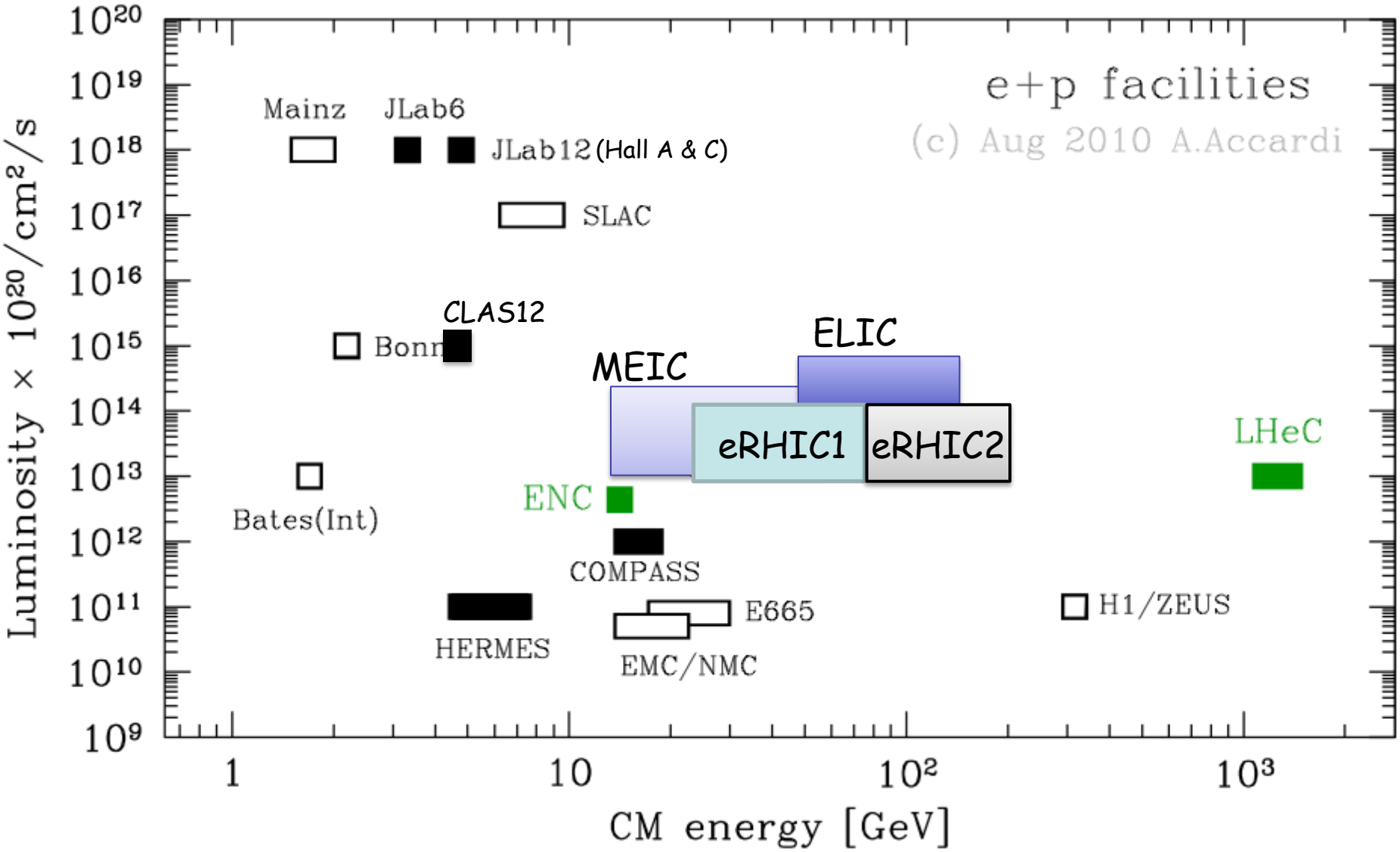
Distributions des gluons
polarisées ou non
Mesure de F_2 et F_L dans les noyaux
Etude de la saturation en gluon (CGC)

Force électrofaible et physique au delà du MS



Mesure précise de $\sin^2\theta_W$
Conversion e-τ

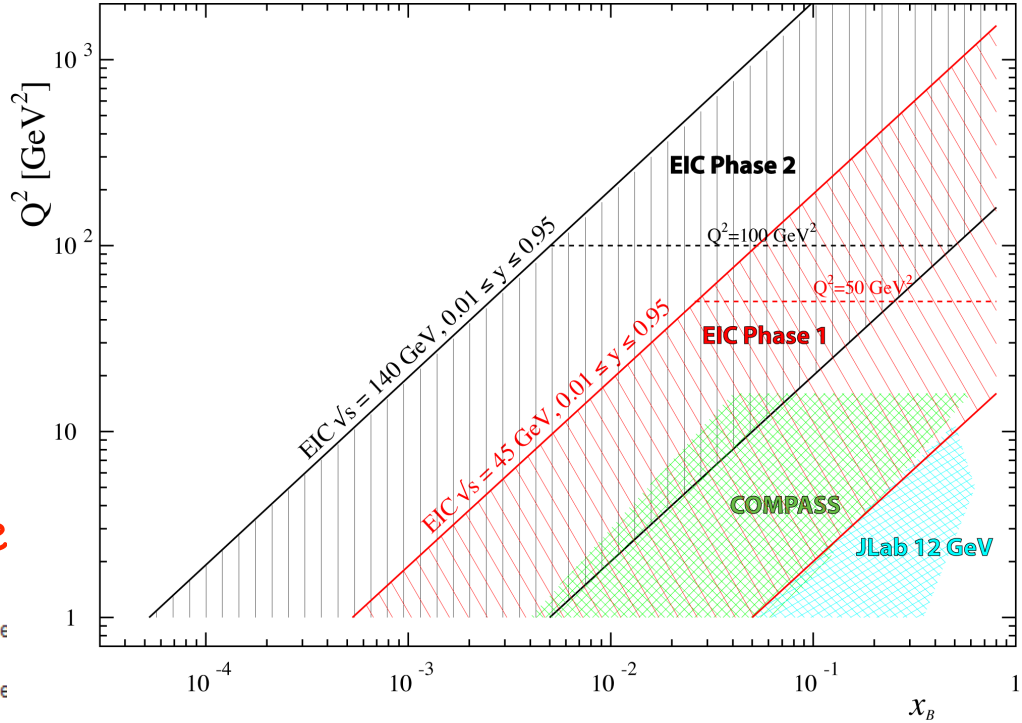
Accélérateurs Leptons-Protons/Ions dans le monde

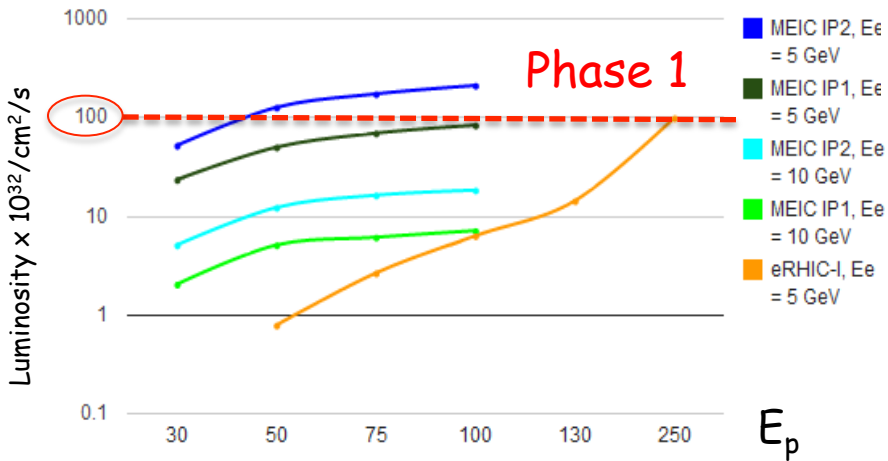


Spécifications pour le collisionneur EIC

Telles que définies dans le
Executive Summary INT Report :

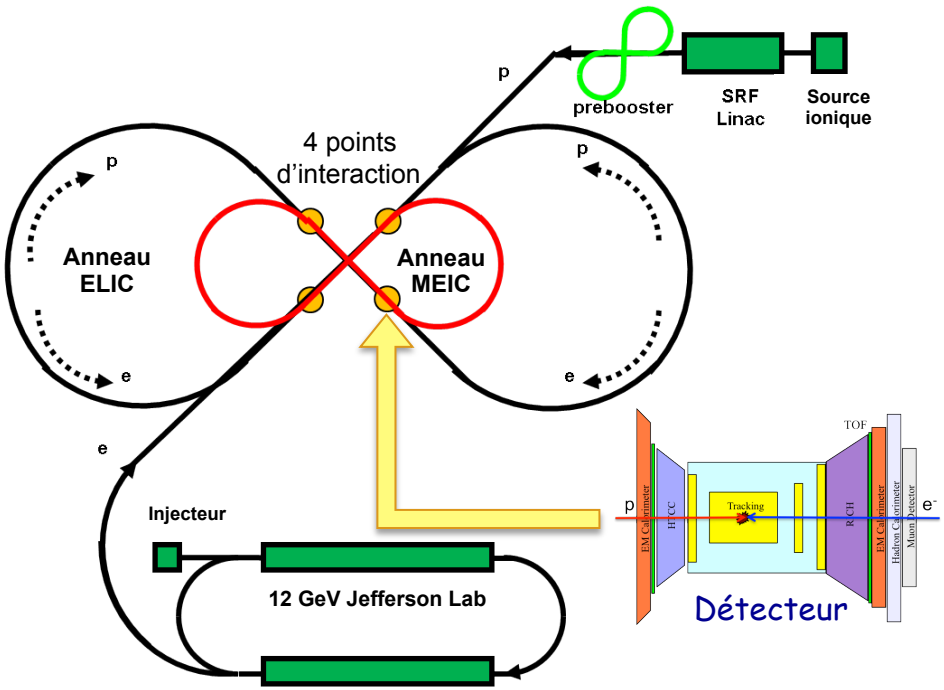
- Energie dans le CM **$\sqrt{s}$~20-70** & variable
- **e** et **p** **polarisés** (>70%), longitudinal and transverse (p)
- Ions jusqu'à A ~ 200
- Haute luminosité: **environ 10^{34}** cm^{-2} s^{-1}
- Plusieurs régions d'interaction
- Possibilité d'augmenter l'énergie





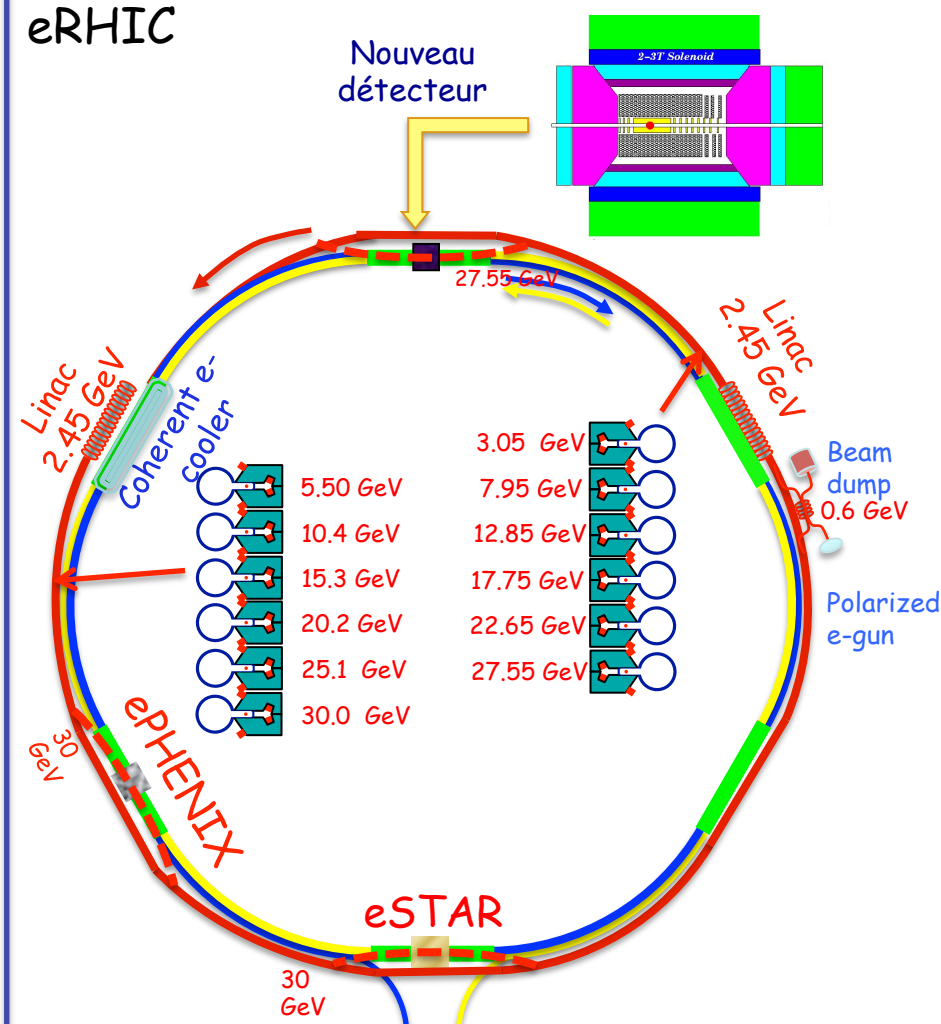
Deux solutions à l'étude : EIC @ JLab ou BNL

MEIC/ELIC



Phase	Energies max (GeV)		Taille (m)	Type d'aimants		IP #
	p	e		p	e	
1	96	11	1000	Froid	Chaud	3
2	250	20	2500	Froid	Chaud	4

eRHIC

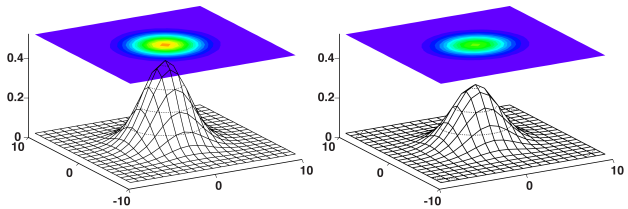


Electrons \ Protons	100 GeV	130 GeV	250 GeV	325 GeV
5 GeV	$0.62 \cdot 10^{33}$	$1.4 \cdot 10^{33}$	$9.7 \cdot 10^{33}$	$15 \cdot 10^{33}$
10 GeV	$0.62 \cdot 10^{33}$	$1.4 \cdot 10^{33}$	$9.7 \cdot 10^{33}$	$15 \cdot 10^{33}$
20 GeV	$0.62 \cdot 10^{33}$	$1.4 \cdot 10^{33}$	$9.7 \cdot 10^{33}$	$1.5 \cdot 10^{33}$
30 GeV	$0.12 \cdot 10^{33}$	$0.3 \cdot 10^{33}$	$1.9 \cdot 10^{33}$	$3 \cdot 10^{33}$

« The new QCD Frontier »

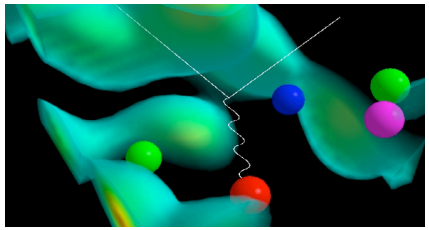
Un collisionneur électrons-ions permettra d'explorer de manière inédite certaines des plus grandes énigmes de la physique nucléaire :

La structure de la matière visible



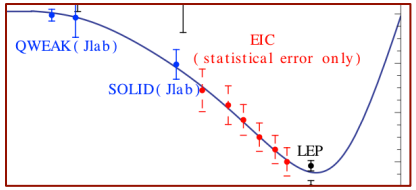
Distributions de quarks
polarisées (L/T) ou non
Images 3D du nucléon (GPD)
Distributions en moment transverse

Le rôle des gluons dans la matière hadronique



Distributions des gluons
polarisées ou non
Mesure de F_2 et F_L dans les noyaux
Etude de la saturation en gluon (CGC)

Force électrofaible et physique au delà du MS



Mesure précise de $\sin^2\theta_W$
Conversion e-τ

La saturation dans QCD

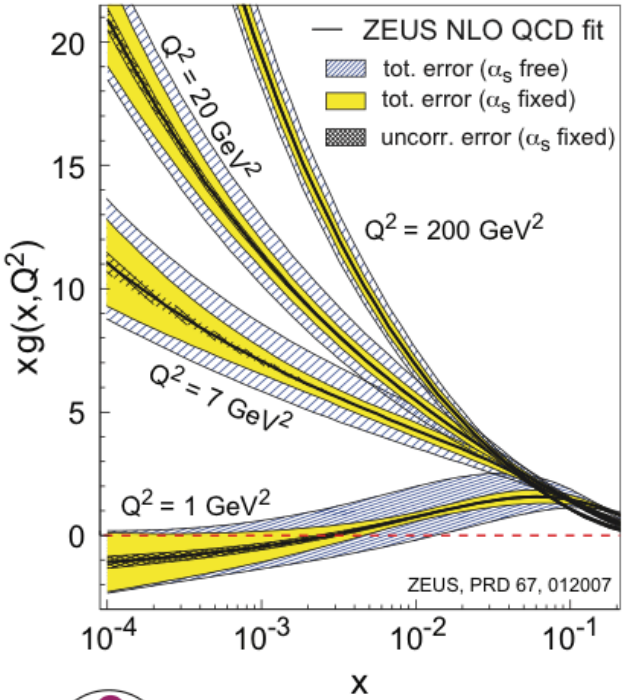
Notre compréhension actuelle de QCD est limitée :

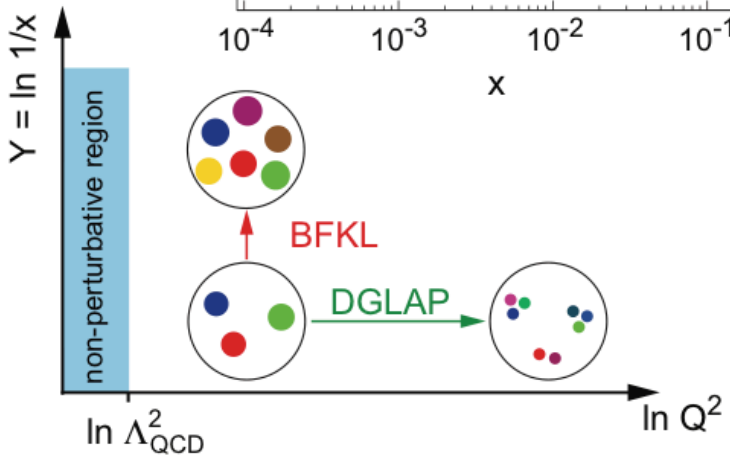
Région d'évolution linéaire DGLAP

- Comportements étranges de xg et F_L à petits x et Q^2 (HERA)
- (trop ?) grande section efficace diffractive
- Augmentation (trop ?) rapide de xg viole l'unitarité

Région d'évolution linéaire BFKL

- Densité et section efficace augmentent en puissance de l'énergie … jusqu'à où ???





La saturation dans QCD

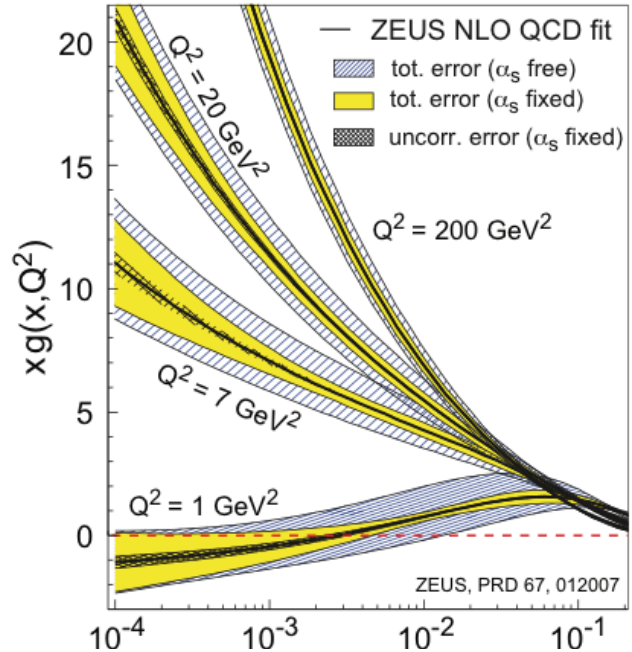
Notre compréhension actuelle de QCD est limitée :

Région d'évolution linéaire DGLAP

- Comportements étranges de xg et F_L à petits x et Q^2 (HERA)
- (trop ?) grande section efficace diffractive
- Augmentation (trop ?) rapide de xg viole l'unitarité

Région d'évolution linéaire BFKL

- Densité et section efficace augmentent en puissance de l'énergie … jusqu'à où ???



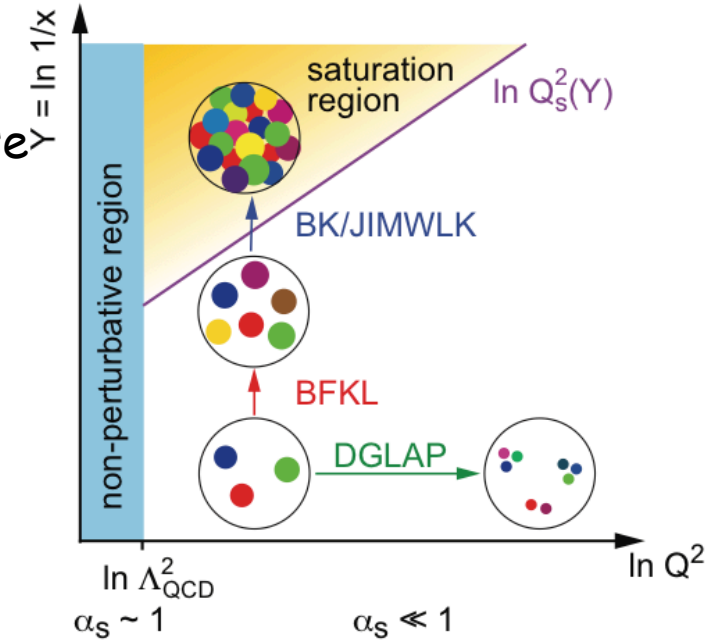
Evolution non-linéaire à petit x

- Les gluons sont « à l'étroit » dans le plan transverse
- La recombinaison limite le nombre de gluons

SATURATION

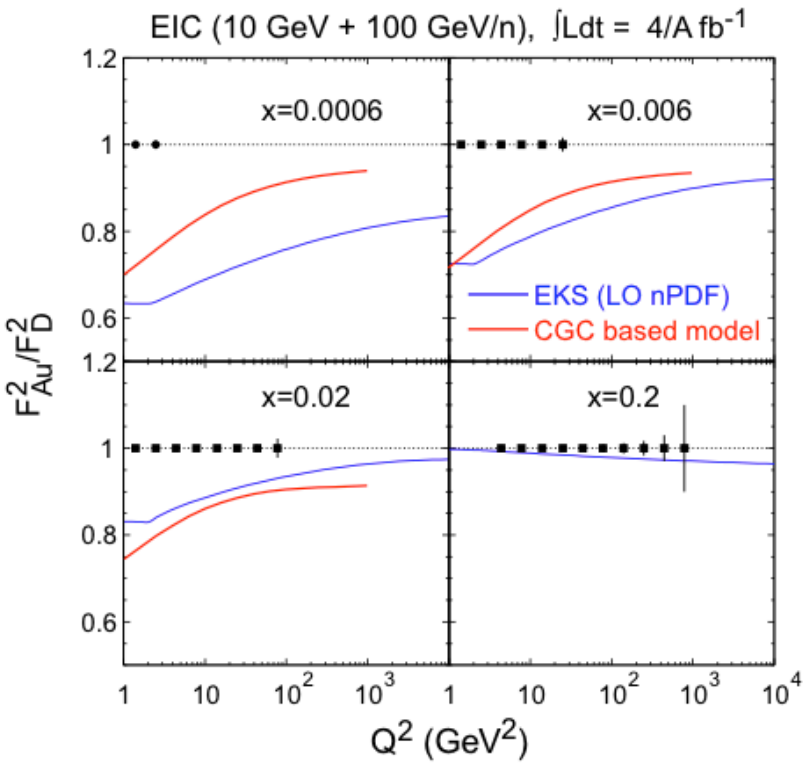
- La fonction d'onde est décrite par une théorie effective: le Color Glass Condensate

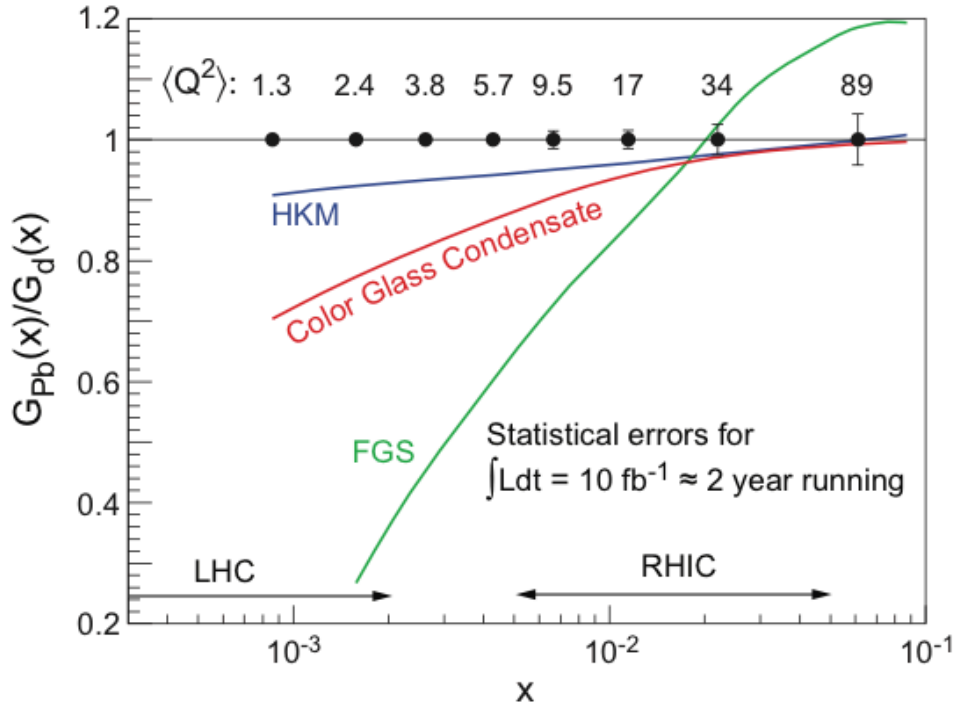
- Une région totalement inconnue de QCD !



Des mesures clés pour la saturation : F_2 et F_L

$$\frac{d^2\sigma^{ep\to eX}}{dxdQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4}\left[\left(1-y+\frac{y^2}{2}\right)F_2(x,Q^2) - \frac{y^2}{2}F_L(x,Q^2)\right]$$





L = 3,8 10^{33} $cm^{-2}s^{-1}$ (100x HERA)
4 semaines à 50% d'efficacité

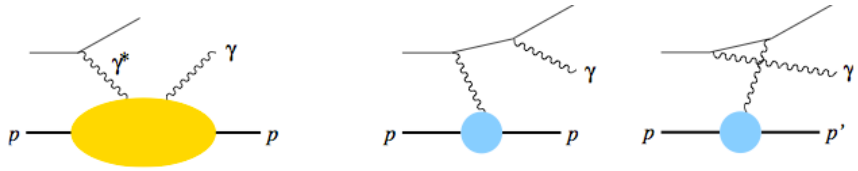
$F_L \sim \alpha_S\, G(x,Q^2)$ nécessite un scan en énergie
Pour ce plot $E_e x E_p$ = 10x100, 10x50, 5x50

Les processus exclusifs pour l'imagerie du nucléon

Diffusion Compton Profondément Virtuelle (DVCS)

- Une théorie bien contrôlée: jusqu'à α_S^2, twist-3, corrections de masse de cible, etc
- Sensible à la combinaison de quarks: $\frac{4}{9}u + \frac{1}{9}d + \frac{1}{9}s + \frac{4}{9}c$
- Aux énergies EIC, surtout sensible aux quarks de la mer.
- Sensible aux GPD de gluon via l'évolution en Q^2 au NLO et au delà.
- Accès direct à l'amplitude Compton via

l'interférence avec le Bethe-Heitler :



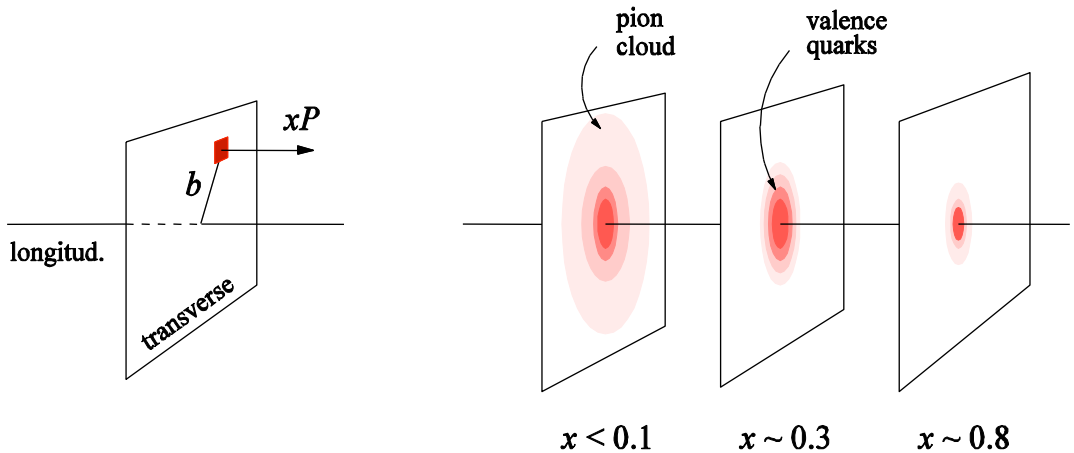
Electroproduction dure de mésons

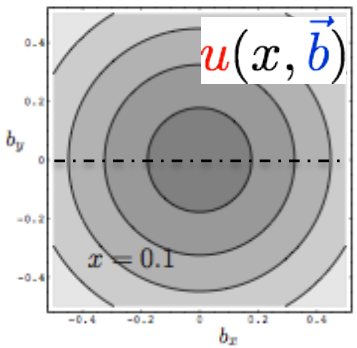
- Plusieurs canaux pour une séparation en saveur (ρ, ρ^+, π^0, π^+, ϕ, ...)
- Le J/Ψ est particulièrement intéressant pour les GPDs de gluon (H et E)
- Théorie moins maîtrisée: convolution avec la fonction d'onde du méson,

corrections (NLO, puissance) larges

Imagerie 3D avec les GPD

A ξ=**0**, une GPD est un « facteur de forme » des partons portant la fraction d'impulsion longitudinale x



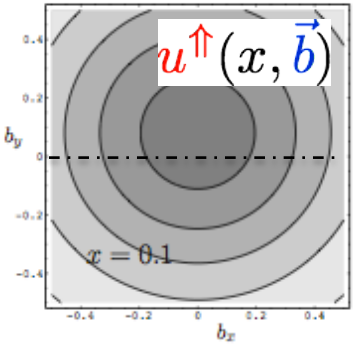


Pour la GPD H (section efficace DVCS):

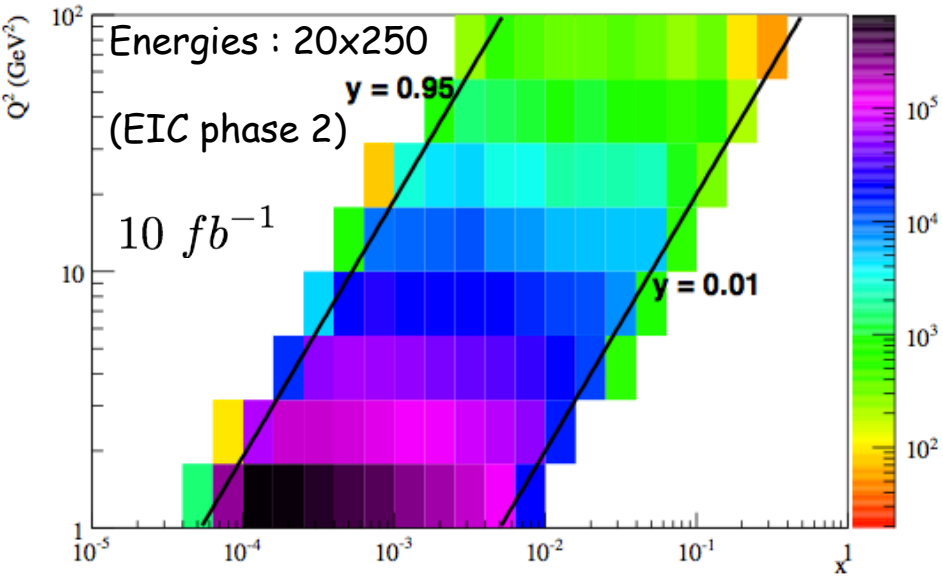
$$f(x,\vec{b}) = \int \frac{d^2\vec{\Delta}_\perp}{(2\pi)^2} e^{i\vec{b}\cdot\vec{\Delta}_\perp} H(x,\xi=0,-\Delta_\perp^2)$$

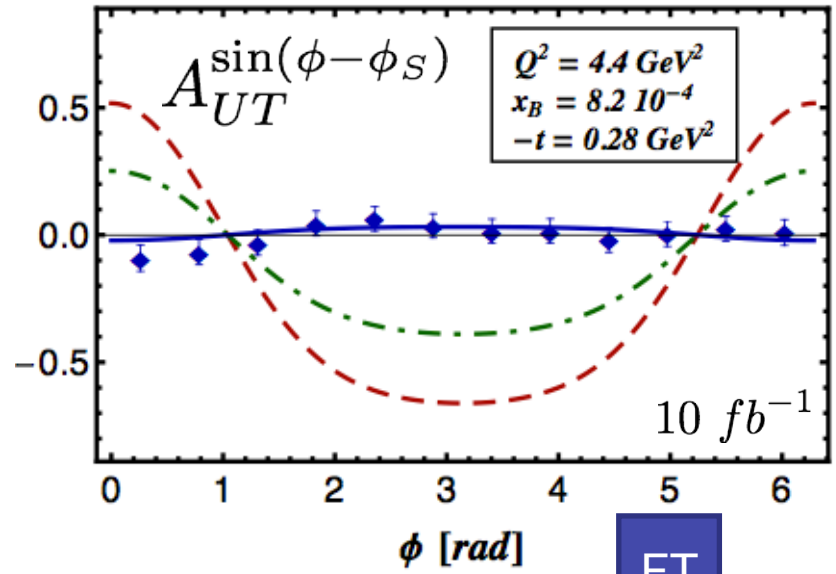
Pour la GPD E (asymétrie de cible transverse DVCS) :

$$f^{\Uparrow}(x,\vec{b}) = f(x,\vec{b}) - \underbrace{\frac{1}{2M}\frac{\partial}{\partial b_y}\int \frac{d^2\vec{\Delta}_\perp}{(2\pi)^2} e^{i\vec{b}\cdot\vec{\Delta}_\perp} E(x,0,-\Delta_\perp^2)}_{\text{décalage (en } y \text{) des partons à l'intérieur d'un proton polarisé (selon } x \text{)}}$$

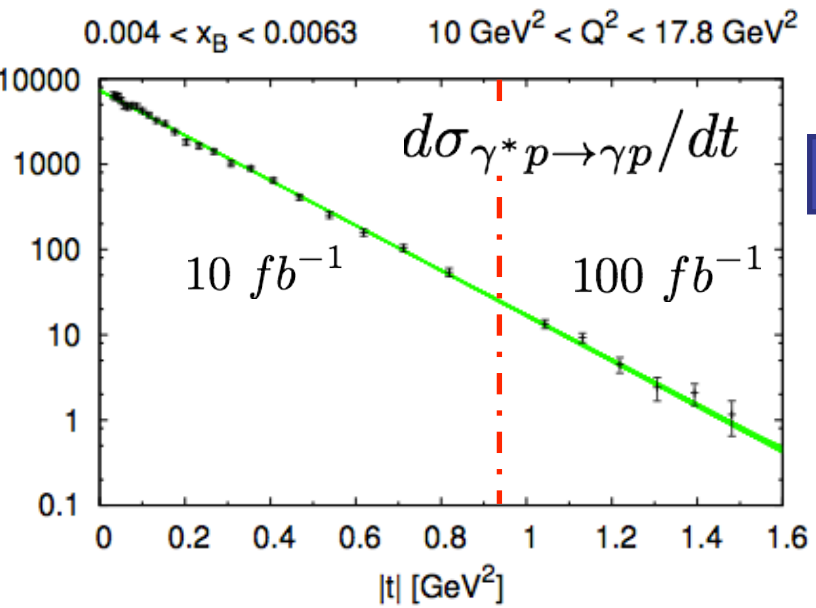


Simulation du DVCS pour EIC

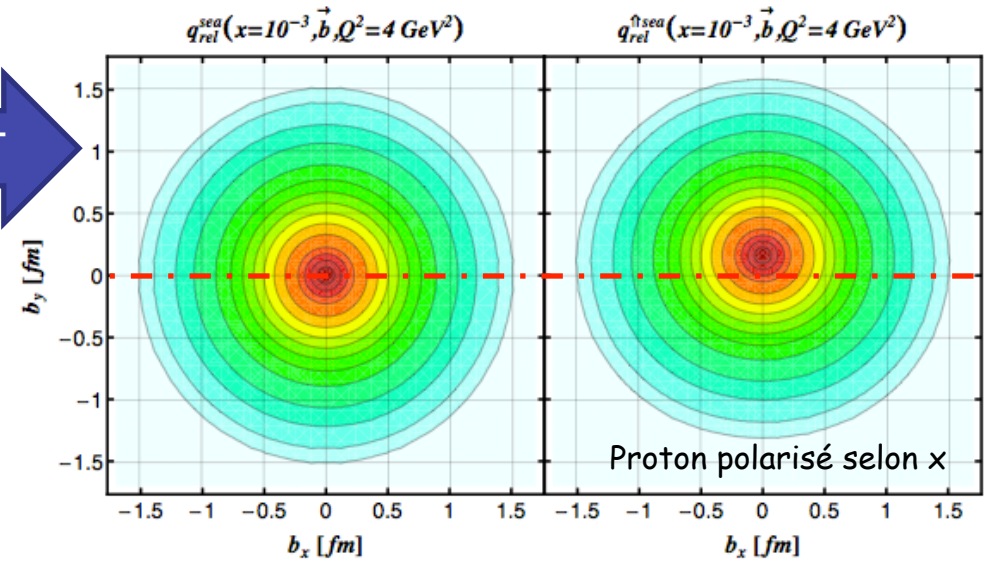




FT



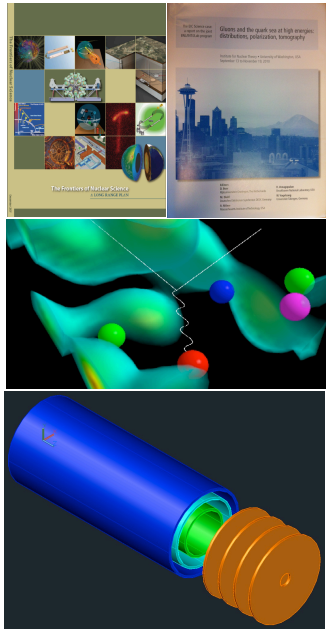
FT



EIC : où en est-on ?

Une collaboration active : 120 physiciens dans le monde entier, des workshops et meetings de collaboration fréquents.

Un projet poussé par 2 grandes communautés **JLab et BNL**



2013 : White Paper soumis au NSAC (en cours d'écriture)

2011-2019 : simulation, R&D accélérateur et détecteur

2019-2024 : construction

2025 : démarrage

Fort intérêt des communautés JLab et COMPASS en France, ainsi que des théoriciens de physique hadronique et des ions lourds à haute énergie

En recherche de collaborateurs français pour des simulations et de la R&D !

Conclusion

- A écrire !

AFTER @ LHC