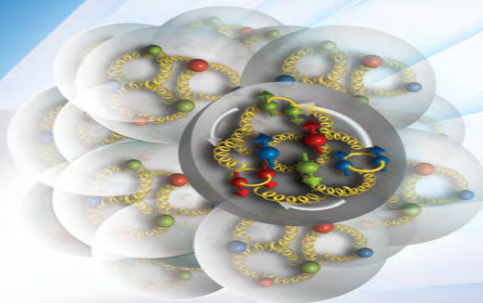


# Le Collisionneur Electrons-Ions

# EIC



Franck Sabatié  
CEA Saclay - Irfu/SPhN  
03/07/2013



du 1<sup>er</sup> au 5 Juillet 2013  
MARSEILLE

FACULTÉ DES SCIENCES  
AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ  
CAMPUS SAINT CHARLES

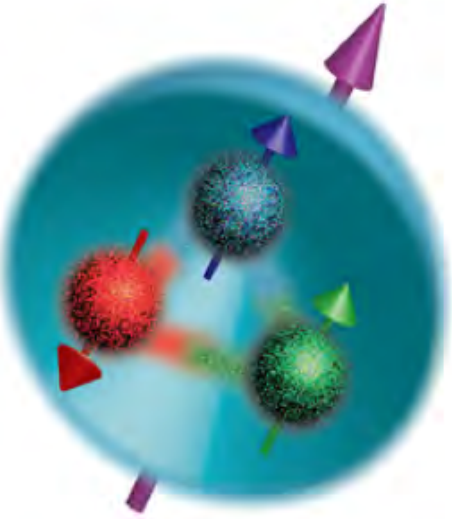


22<sup>ème</sup> CONGRÈS GÉNÉRAL  
de la Société  
Française  
de Physique



SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE  
MARSEILLE  
2013

# Le début de l'histoire : une découverte importante !



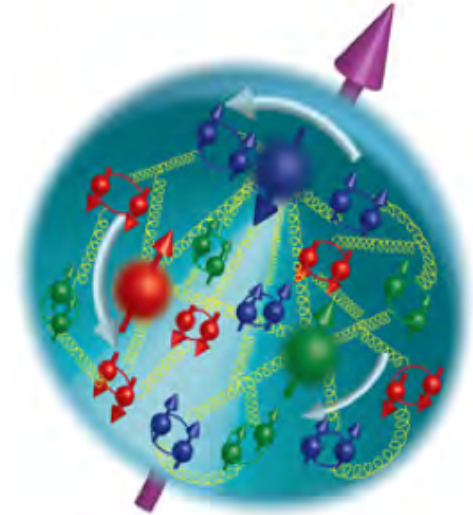
**Particle physics**

## **And you're glue**

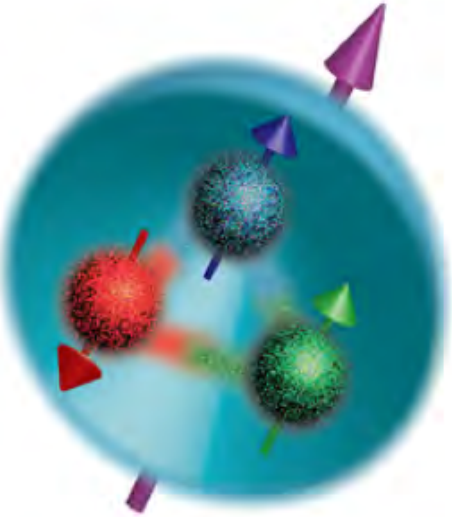
**Frank Wilczek (Nobel 2004)**

It's a widely believed half-truth that protons and neutrons are made out of quarks. Actually, physicists are increasingly discovering that it's considerably less than half the truth.

NATURE | VOL 400 |



# Le début de l'histoire : une découverte importante !



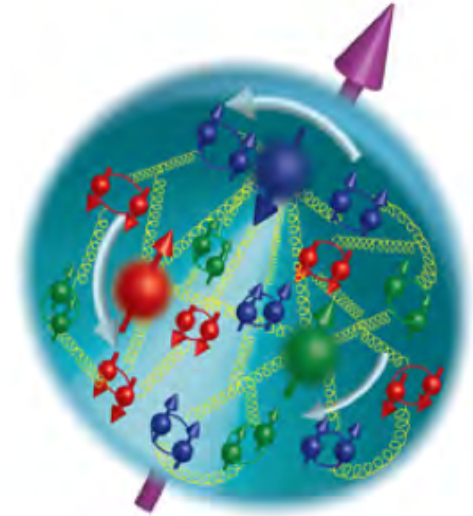
Particle physics

## And you're glue

Frank Wilczek (Nobel 2004)

It's a widely believed half-truth that protons and neutrons are made out of quarks. Actually, physicists are increasingly discovering that it's considerably less than half the truth.

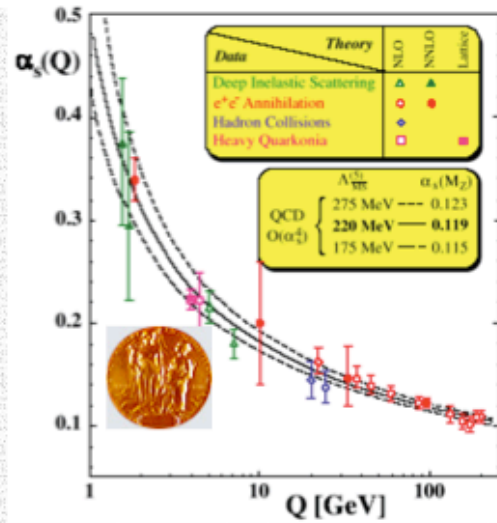
NATURE | VOL 400 | 1 JULY 1999



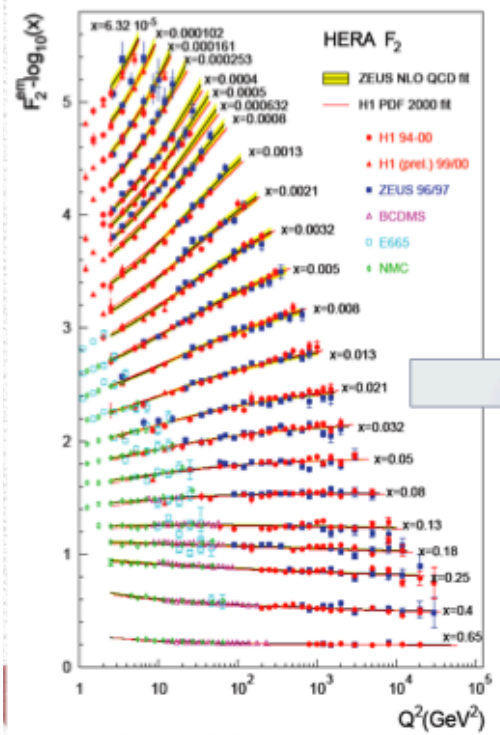
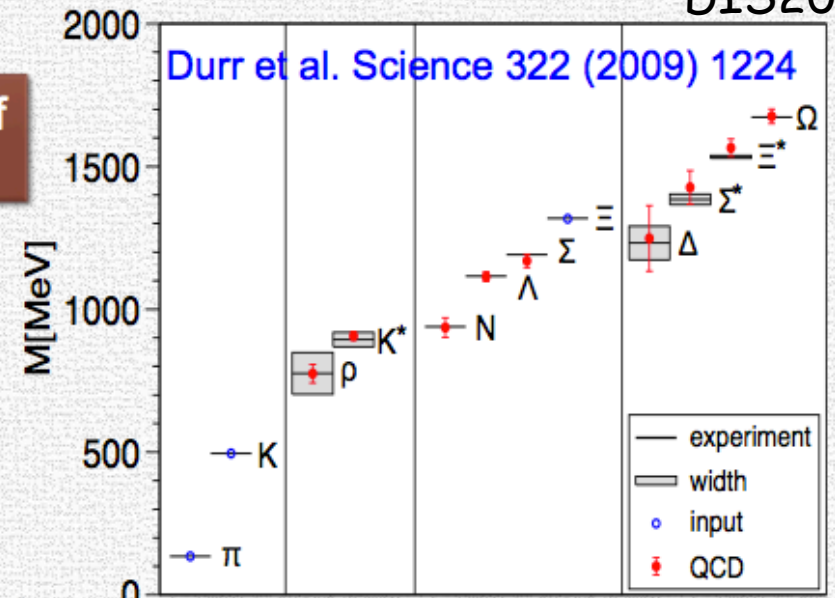
Mais de toute évidence, ce n'est pas nouveau  
... **qu'a-t-on appris depuis ?**

# SLAC, HERA, RHIC, LHC, ... : en 2013, on connaît QCD !

DIS2013

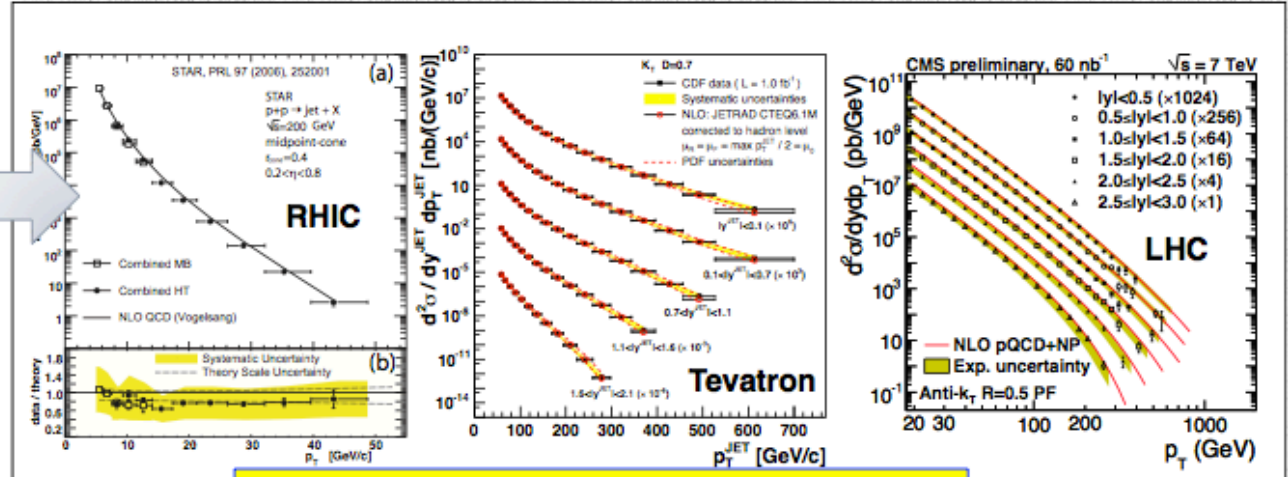


Successes of QCD



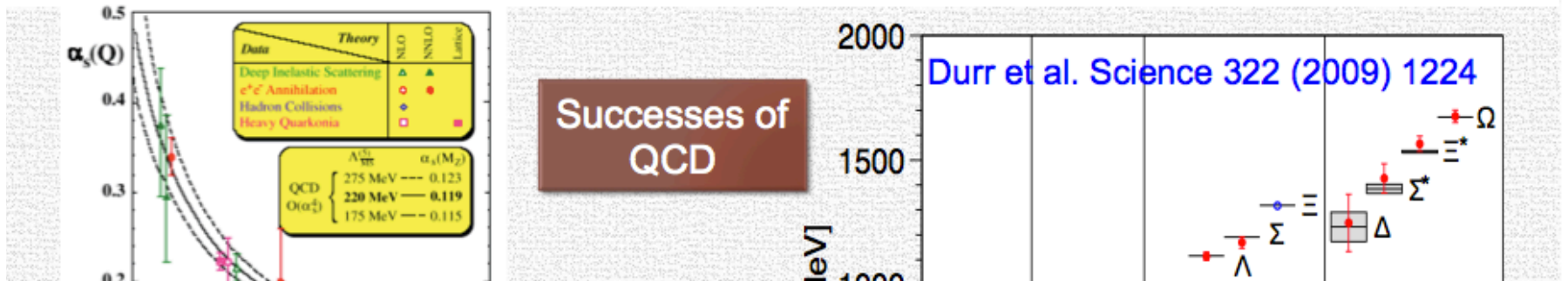
Measure e-p 0.3 TeV:

→ Use pQCD Calculate p-p, p-pbar Jet x-sctn at 0.2, 2, 7 TeV



Precision QCD: Talks by O. Behnke, P. Lenzi

SLAC, HERA, RHIC, LHC, ... : en 2013, on connaît QCD !



**FAUX !**

Nous tentons de contrôler la QCD *perturbative*  
et on mesure/calcule le reste (quand on peut)

Et après des dizaines d'années d'études ...

Nous sommes encore loin de **comprendre** QCD !  
(et en particulier ses gluons)

# Que peut-on y faire ...

---

... l'**expérience ultime**, mais laquelle ?

Il nous faut un collisionneur : l'étude des **bas  $x_B$**  est la clé pour les gluons

Quelles particules : p-p, p-A, e-p, e-A ?

# Que peut-on y faire ...

... l'**expérience ultime**, mais laquelle ?

**Il nous faut un collisionneur** : l'étude des **bas  $x_B$**  est la clé pour les gluons

**Quelles particules** : p-p, p-A, e-p, e-A ?

**Faire confiance aux gens intelligents** : « Scattering of hadrons on hadrons is like colliding Swiss watches to find out how they are built »

R. Feynman

**Quelle énergie ?** Besoin du plus grand domaine cinématique possible, aller **le plus bas possible en  $x_B$ , le plus haut possible en  $Q^2$** , la difficulté principale est financière, il faut faire confiance aux politiques ;)

# Que peut-on y faire ...

... l'**expérience ultime**, mais laquelle ?

Il nous faut un collisionneur : l'étude des **bas  $x_B$**  est la clé pour les gluons

Quelles particules : p-p, p-A, e-p, e-A ?

Faire confiance aux gens intelligents : « Scattering of hadrons on hadrons is like colliding Swiss watches to find out how they are built »

R. Feynman

Quelle énergie ? Besoin du plus grand domaine cinématique possible, aller **le plus bas possible en  $x_B$ , le plus haut possible en  $Q^2$** , la difficulté principale est financière, il faut faire confiance aux politiques ;)

Où le construire ?

**Peu importe !**

Cependant, c'est plus simple et moins couteux de ne pas partir de zéro :  
Un accélérateur d' $e^-$  polarisés ou un accélérateur de p/A... **JLab ou RHIC**

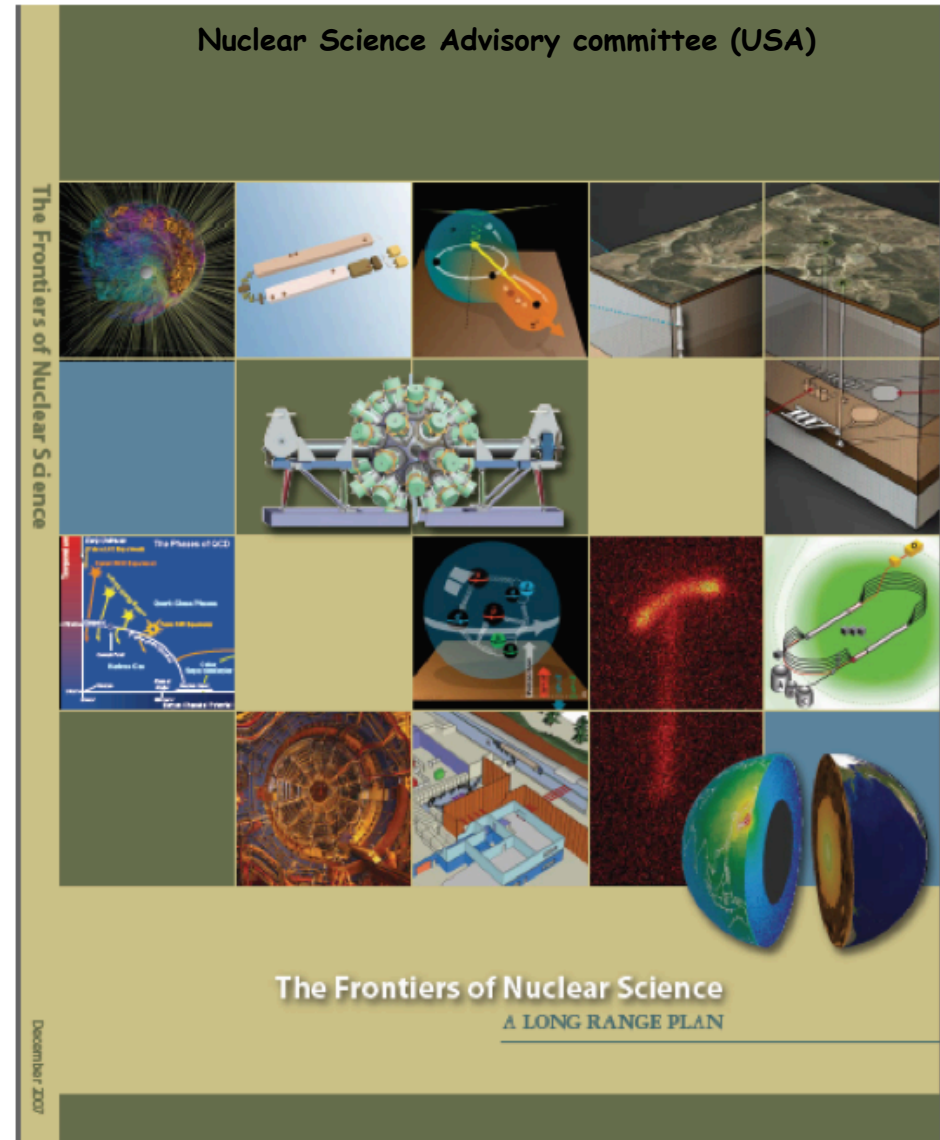


# EIC : Electron-Ion Collider

## 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:

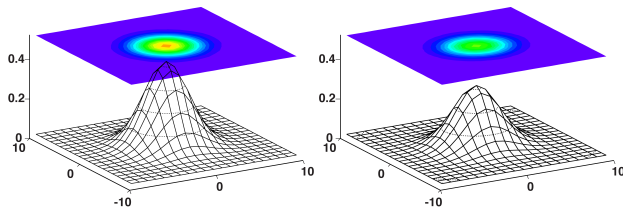
We recommend the allocation of resources to develop accelerator and detector technology necessary to lay the foundation for a **polarized Electron Ion Collider**. The EIC would explore the **new QCD frontier** of strong color fields in nuclei and **precisely image the gluons in the proton.**"



# « The new QCD Frontier »

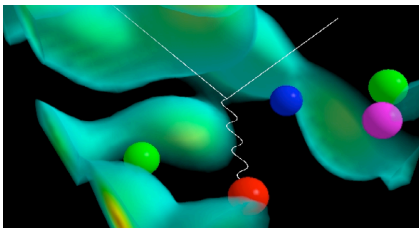
Un collisionneur électrons-ions permettra d'explorer de manière inédite certaines des plus grandes énigmes de la physique nucléaire :

## La structure de la matière visible



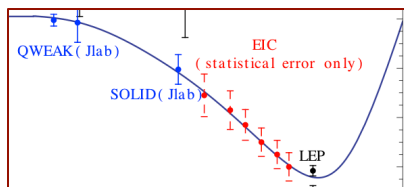
Distributions de quarks polarisées (L/T) ou non  
Images 3D du nucléon (GPD)  
Distributions en moment transverse

## Le rôle des gluons dans la matière hadronique



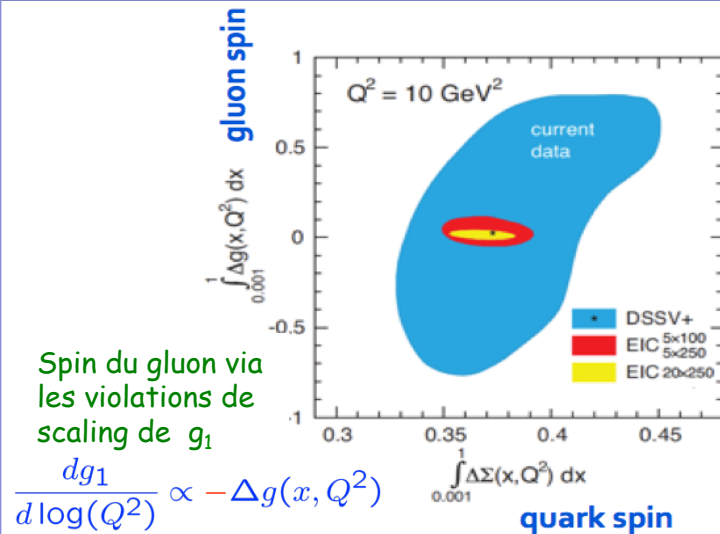
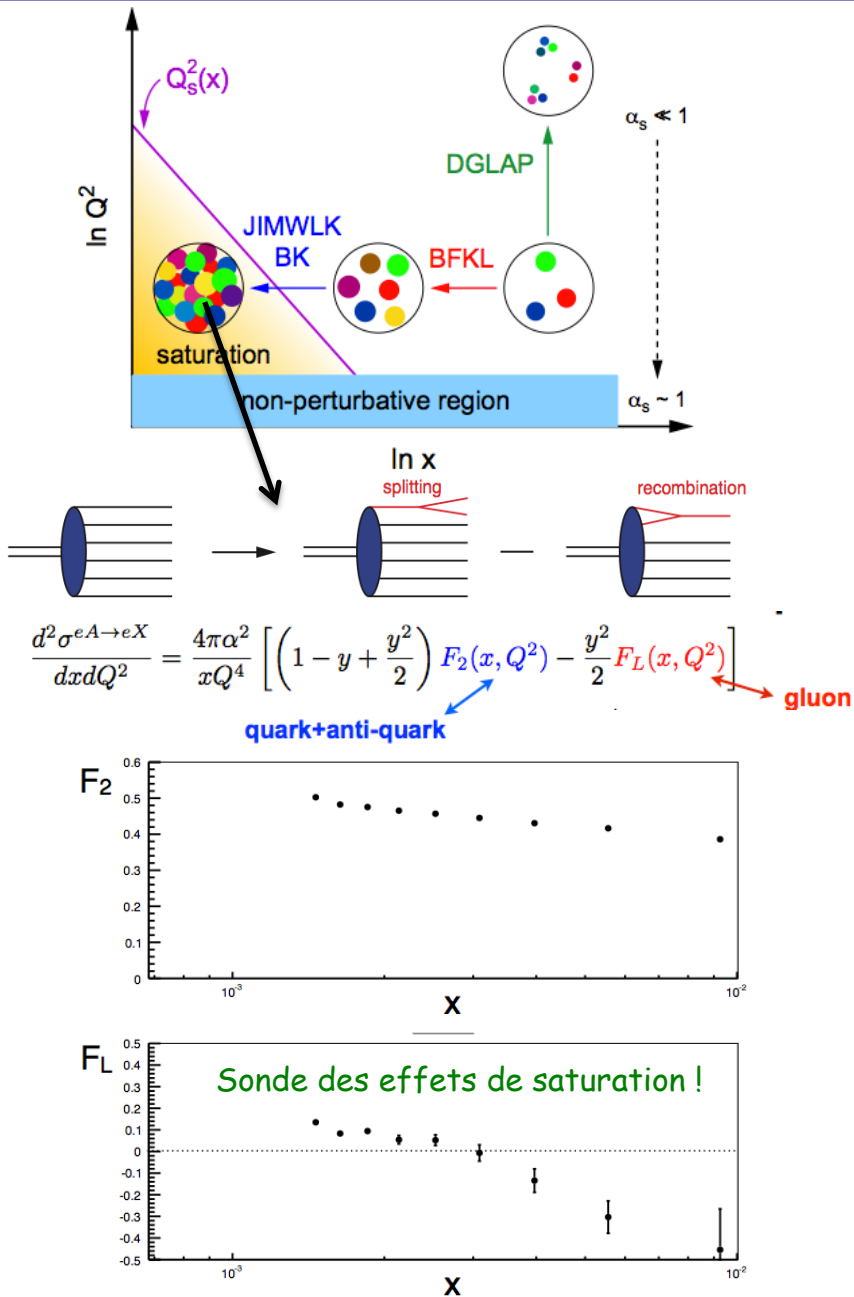
Distributions des gluons polarisées ou non  
Mesure de  $F_2$  et  $F_L$  dans les noyaux  
Etude de la saturation en gluon (CGC)

## Force électrofaible et physique au delà du MS



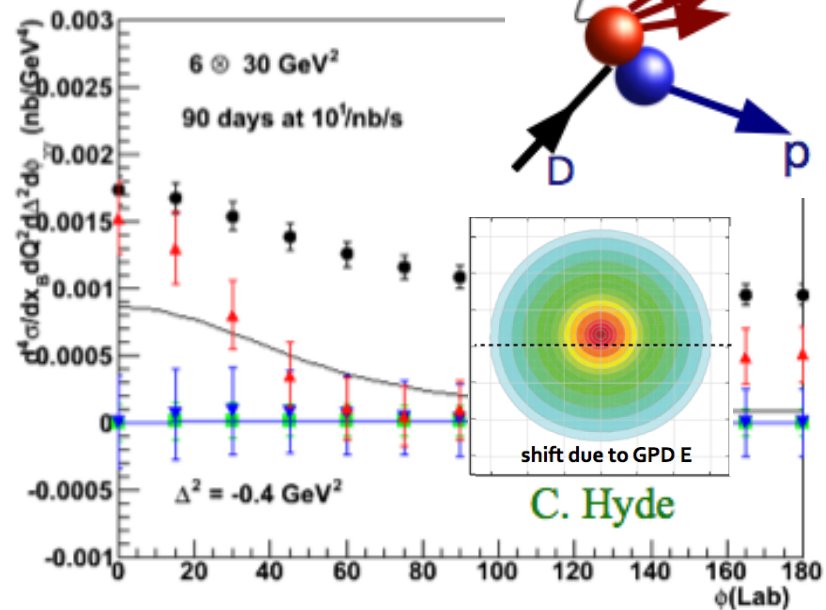
Mesure précise de  $\sin^2\theta_w$   
Conversion e- $\tau$

# Trois exemples de résultats attendus

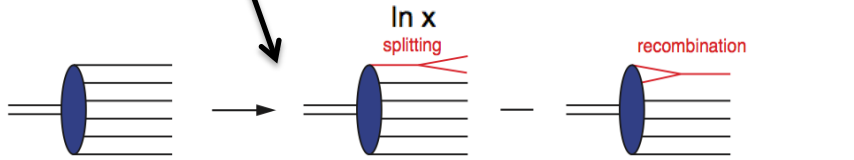
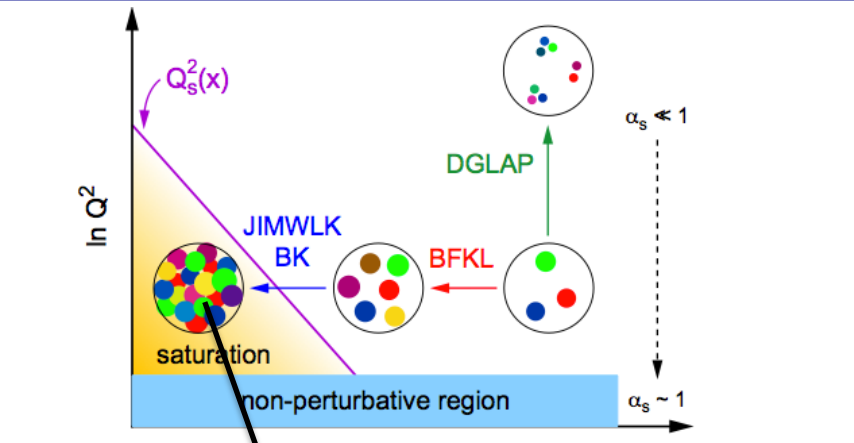


## Spectator tagging with polarized deuterium

DVCS sur un neutron T-polarisé

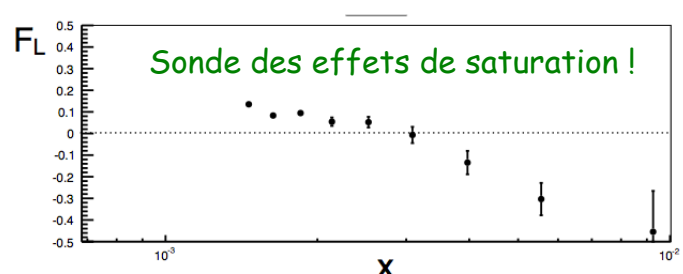
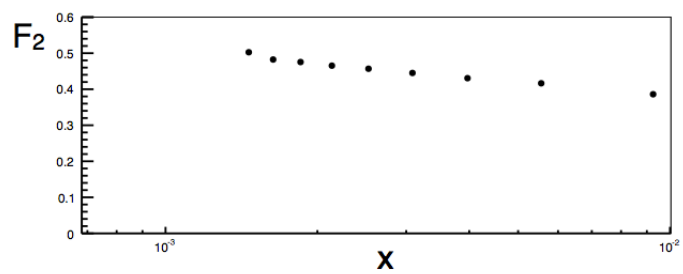


# Trois exemples de résultats attendus

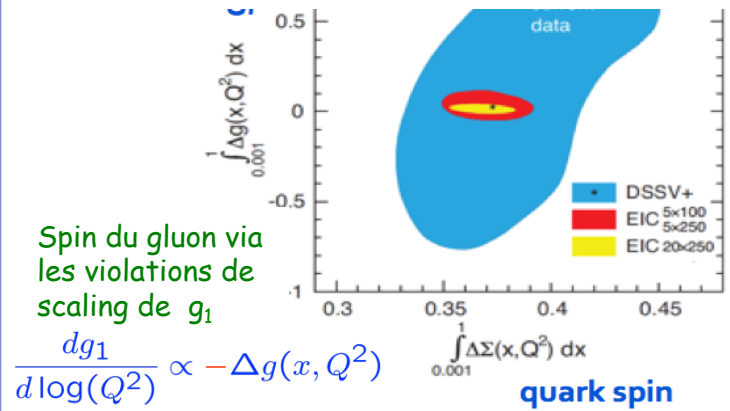


$$\frac{d^2\sigma^{eA \rightarrow eX}}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{xQ^4} \left[ \left(1 - y + \frac{y^2}{2}\right) F_2(x, Q^2) - \frac{y^2}{2} F_L(x, Q^2) \right]$$

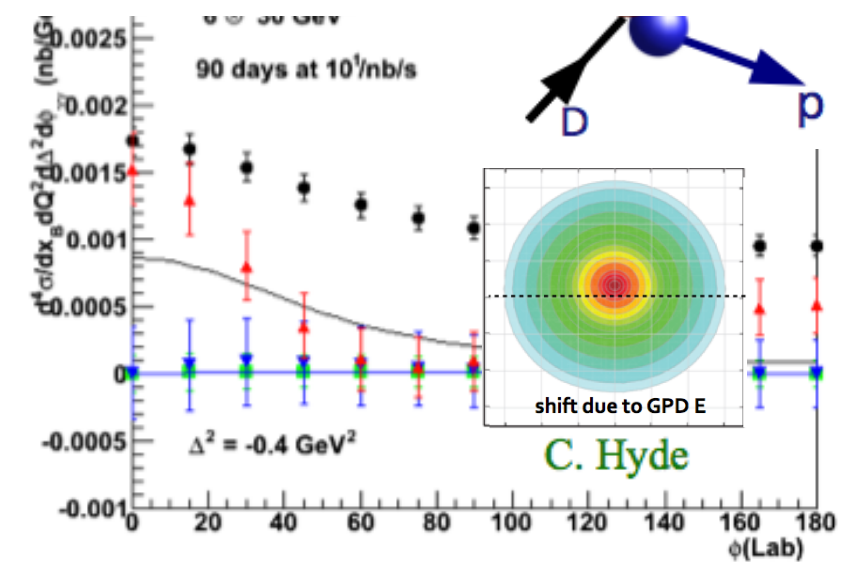
quark+anti-quark gluon



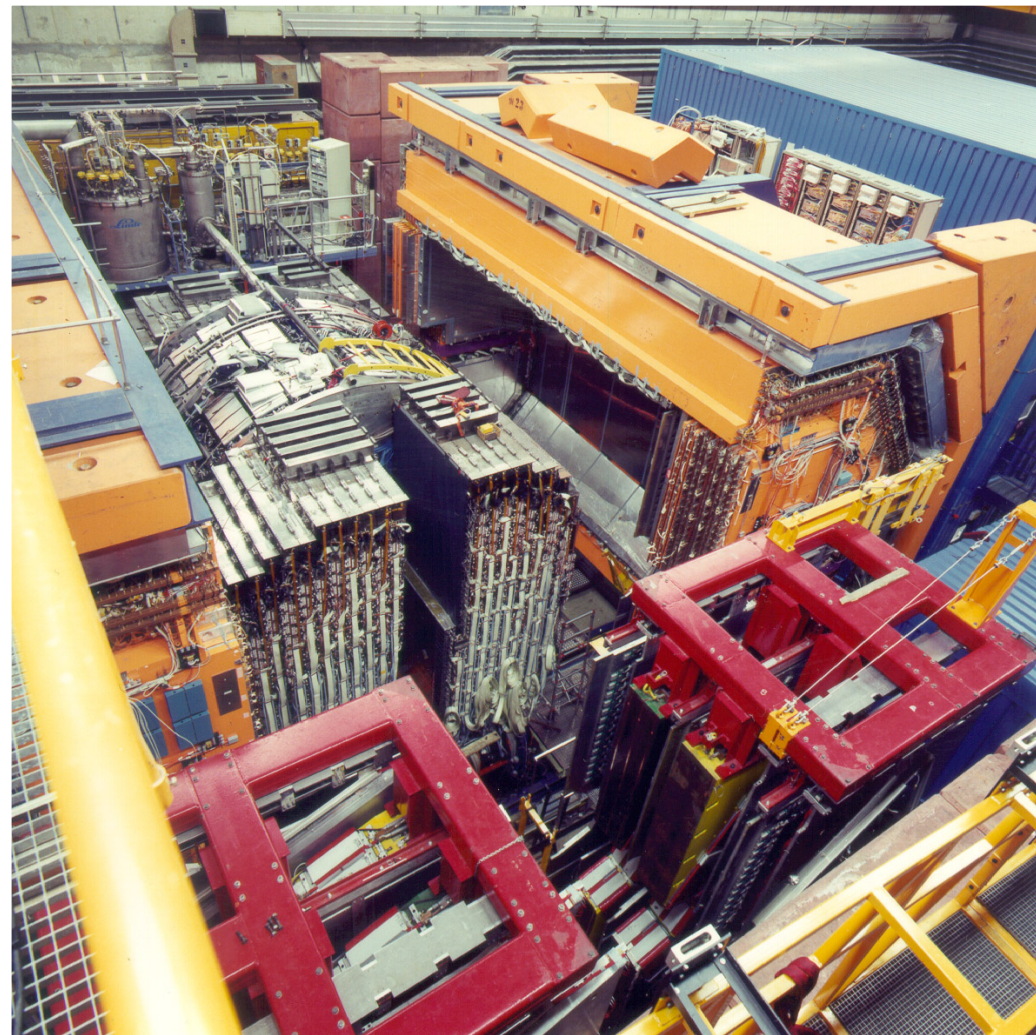
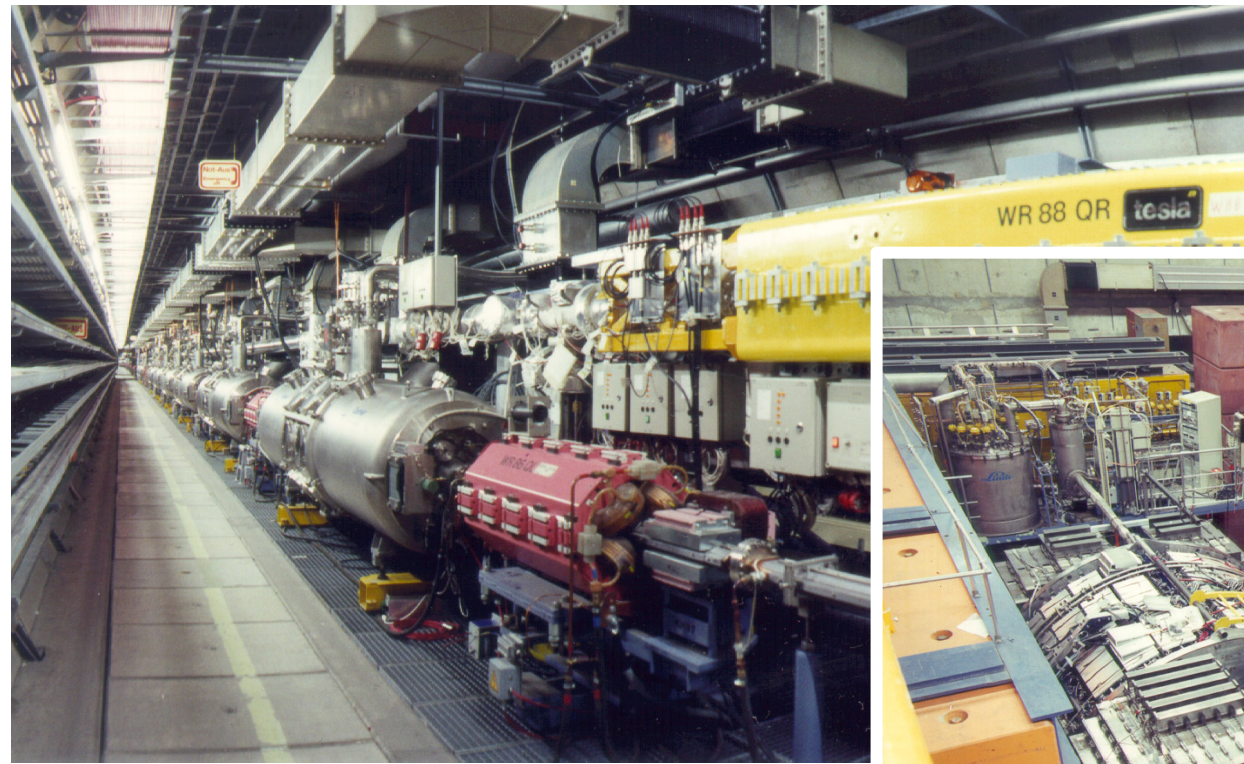
## Plus d'infos sur les mesures de $\Delta G$ : A. Ferrero, Session MC02f vendredi matin



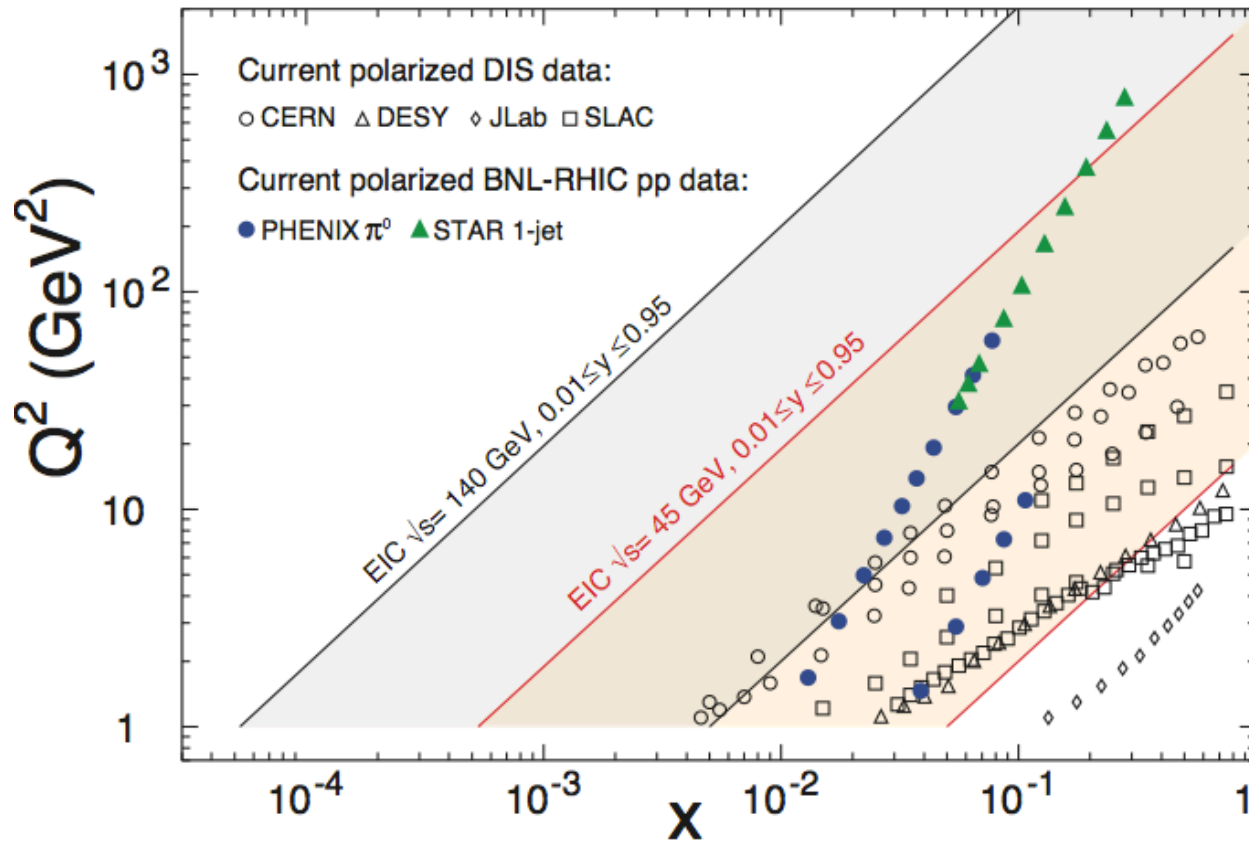
## Plus d'infos sur l'imagerie 3D du nucléon: H. Moutarde, C. Munoz-Camacho, Session MC02f vendredi matin



# Réalisation ...



# Cinématiques e-N et e-A



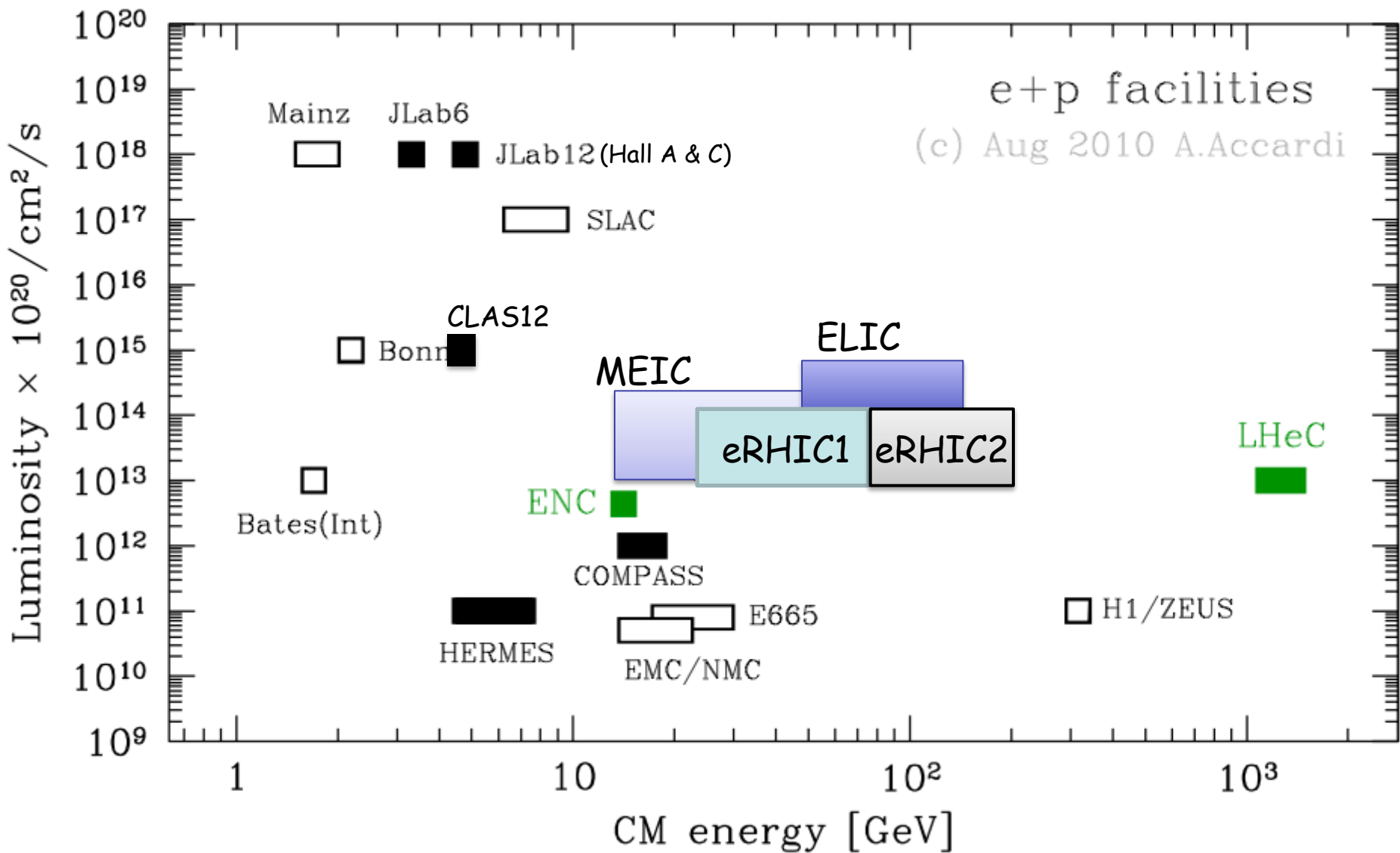
Pour des collisions e-N :

- ✓ Faisceaux polarisés :  $e^-$ , p, d/He3
- ✓ Luminosité 100-1000x HERA ( $10^{33}$ - $10^{34}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
- ✓ Energie dans le centre de masse variable

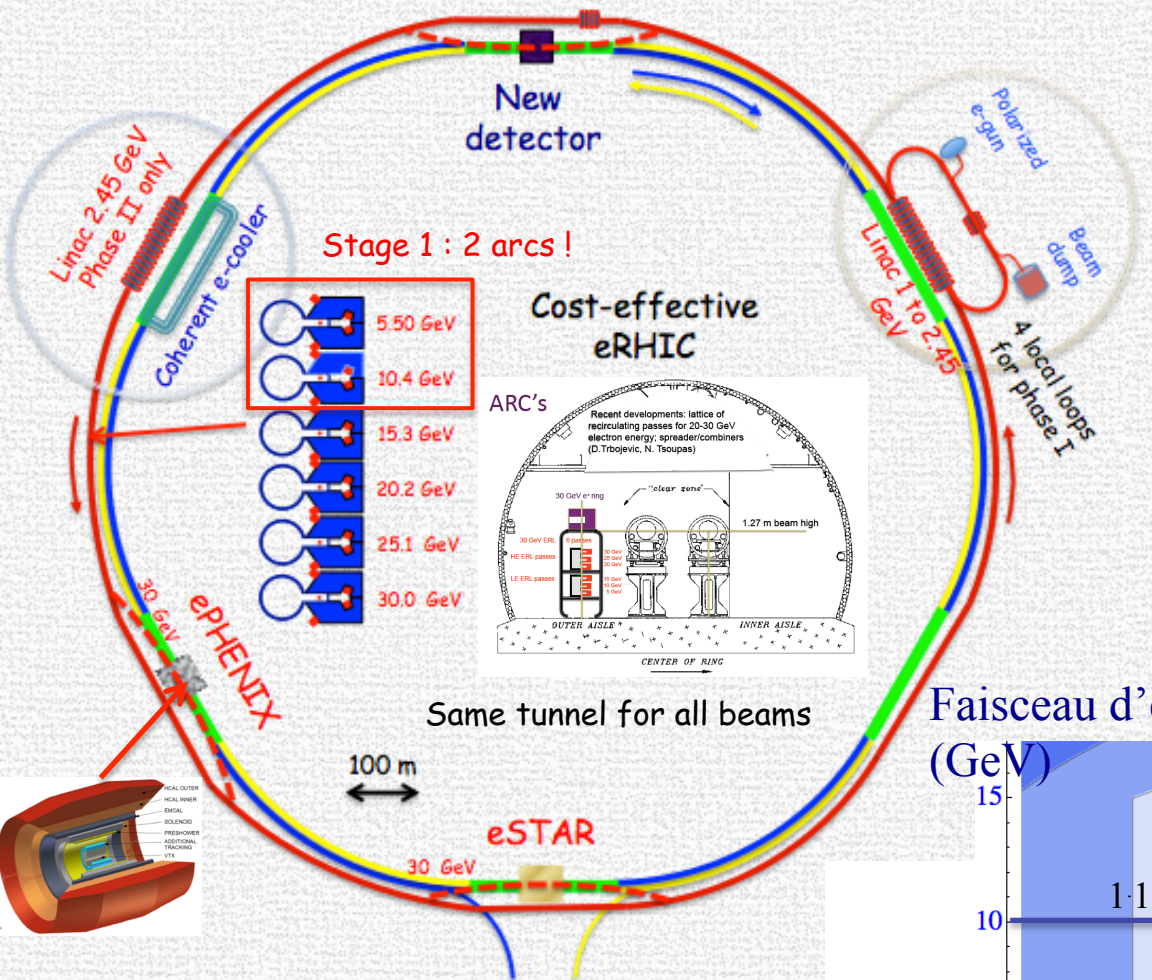
Pour les collisions e-A :

- ✓ Grande variété de noyaux
- ✓ Luminosité par nucléon idem que e-p
- ✓ Energie dans le centre de masse variable

# Situation mondiale des machines e/p



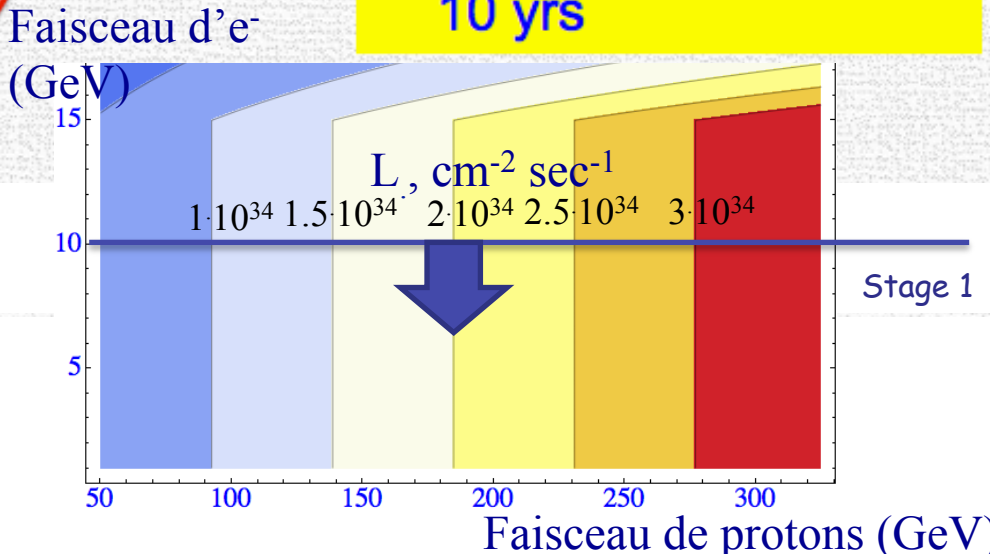
# eRHIC @ Brookhaven National Laboratory



Stage I:  
 $\sqrt{s} \sim 60-100 \text{ GeV}$

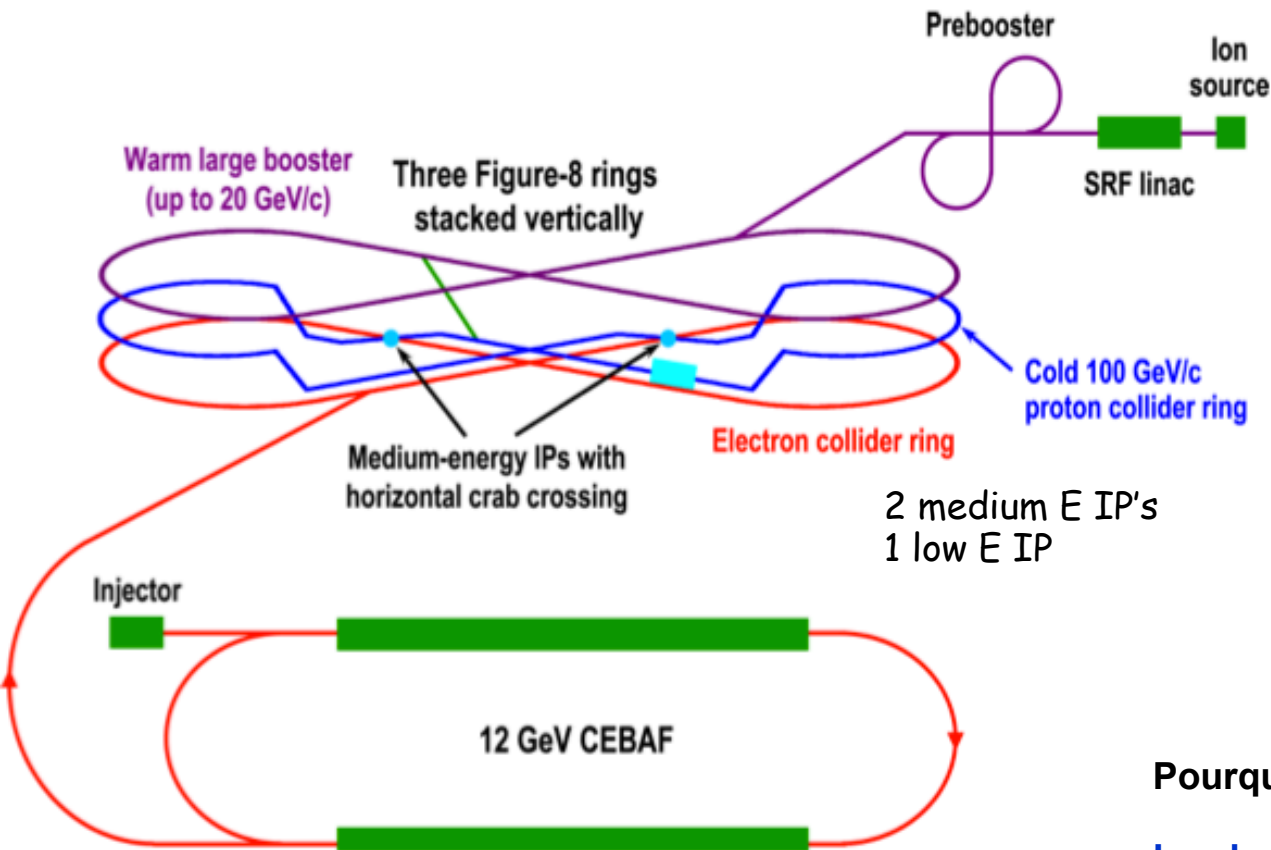
Stage II:  
 $\sqrt{s} > 100 \text{ GeV}$

$L = 10^{33-34} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$   
 100-1000 times HERA  
 $\rightarrow 50-500 \text{ fb}^{-1}$   
 integrated luminosity in 10 yrs

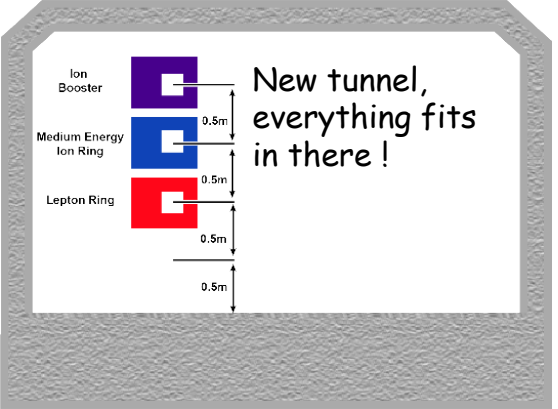




# MEIC/ELIC @ Jefferson Laboratory



$L = 10^{33-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$   
 100-1000 x HERA  
 → 50-500  $\text{fb}^{-1}$  en 10 ans



Pourquoi les 2 anneaux en forme de 8

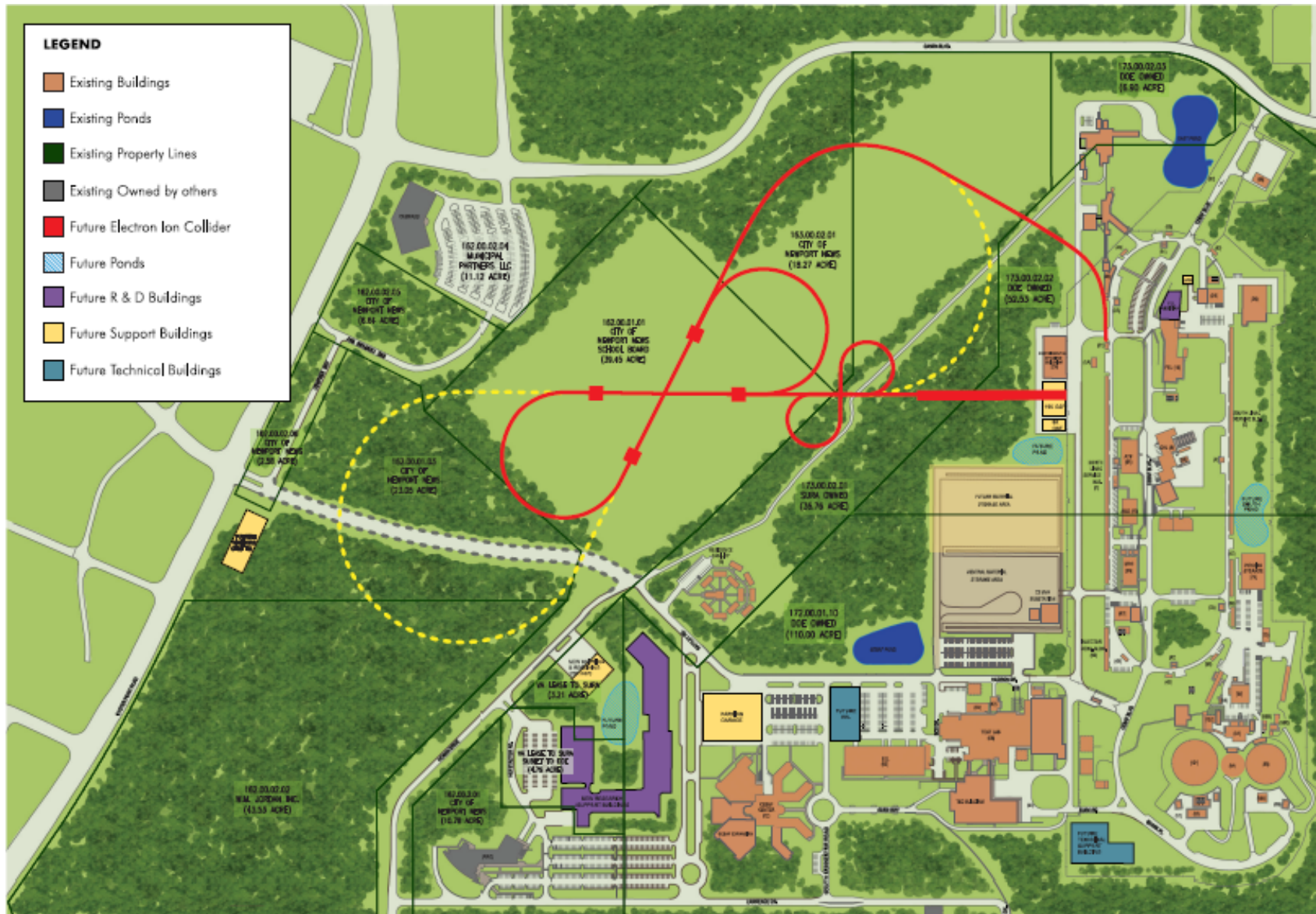
Le plus simple(en principe)

- Compensation des précessions de spin
- Pas d'effet en énergie du réglage du spin
- Conservation et manipulation du spin plus aisés

et deutons polarisés possibles !

| Stage  | Max. Energy (GeV/c) |    | Ring Size (m) | Ring Type |      | sqrt(s) (GeV) |
|--------|---------------------|----|---------------|-----------|------|---------------|
|        | p                   | e  |               | p         | e    |               |
| Medium | 100                 | 11 | 1400          | Warm/Cold | Warm | ~50           |
| High   | 250                 | 20 | 2500+         | Cold      | Warm | >100          |

# Et en plus ça tient à JLab ! (tout juste)



# MEIC, eRHIC : deux solutions qui paraissent différentes



mais bcp de R&D commune

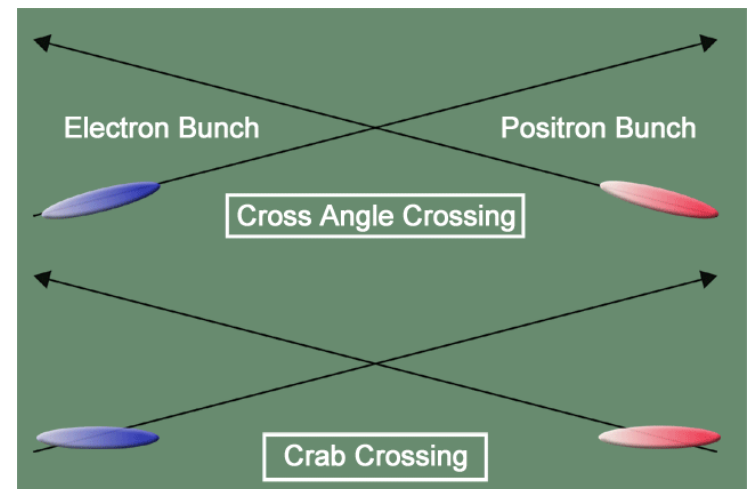
## Crab Crossing 101

Marcher dans une direction et regarder dans une autre

... appliqué aux bunchs dans un collisionneur :

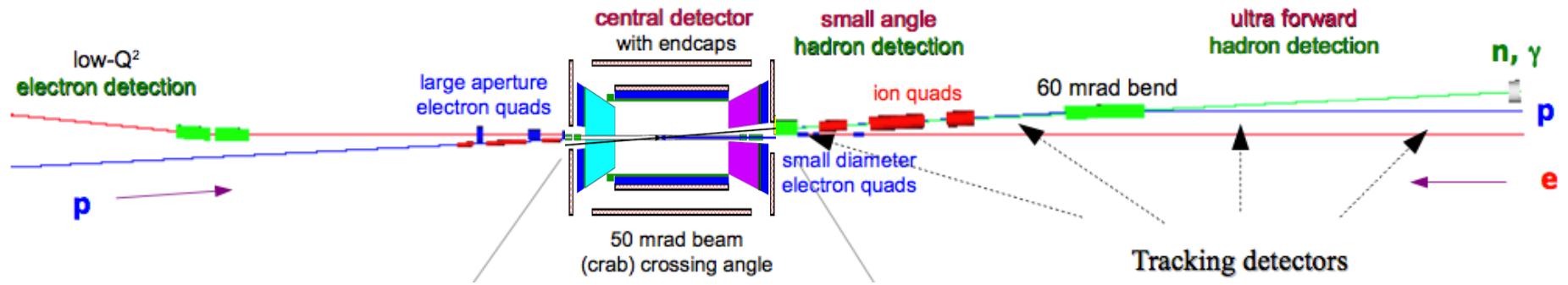
**Une façon d'augmenter la luminosité**  
(à un coût technique modeste)

**Cette technique est utilisée pour MEIC et eRHIC**



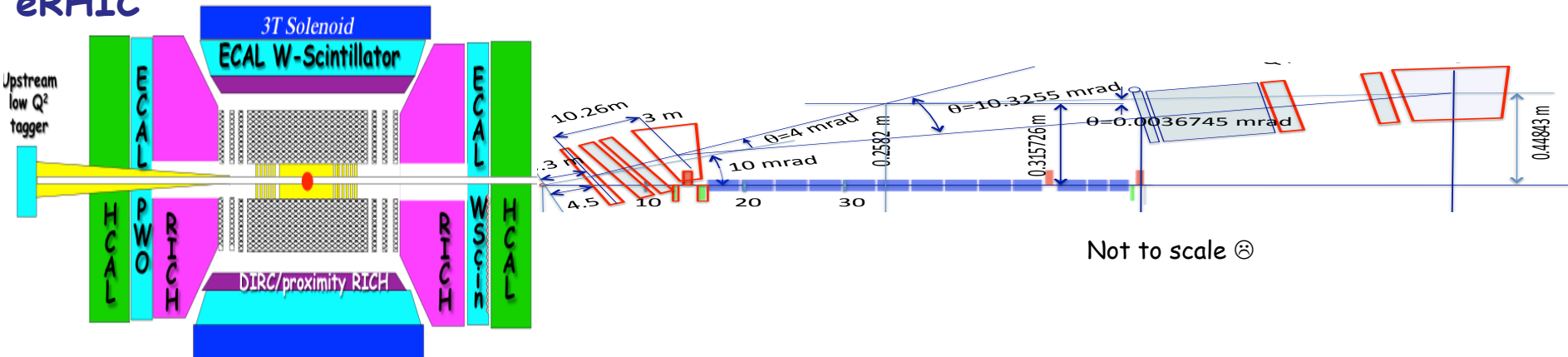
# Un autre exemple: intégration de la région d'interaction (IR) avec les détecteurs

## MEIC



Dans les deux cas: il est **critique** de coordonner les développements des détecteurs et de la ligne de faisceau, le résultat : **acceptance quasi-totale à  $10^{33}$ - $10^{34}$  Lumi**

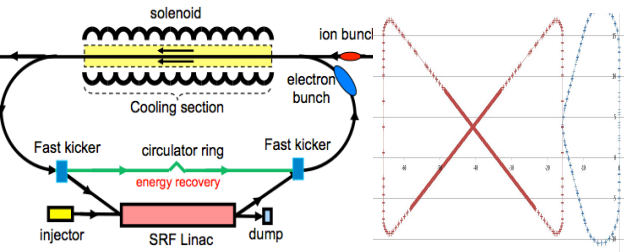
## eRHIC



# R&D Accélérateur

## JLab R&D

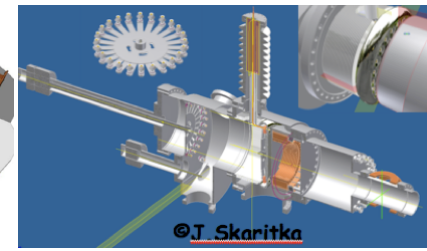
Y. Zhang



- **Electron cooling**
  - of medium energy ion beam
  - ERL circulator
  - Cooling with bunched electrons
- **Interaction region**
  - Optimization of detector integration
- **Beam Synchronization**
  - Study is in progress
- **Polarization**
  - Demonstrator of figure-8 ring
  - Electron spin matching
- **Collective beam effects**
  - Space charge effects in pre-booster
  - Electron cloud in the ion rings and mitigation
- **Ion Injector complex optimization**

## RHIC R&D

A. Aschenauer

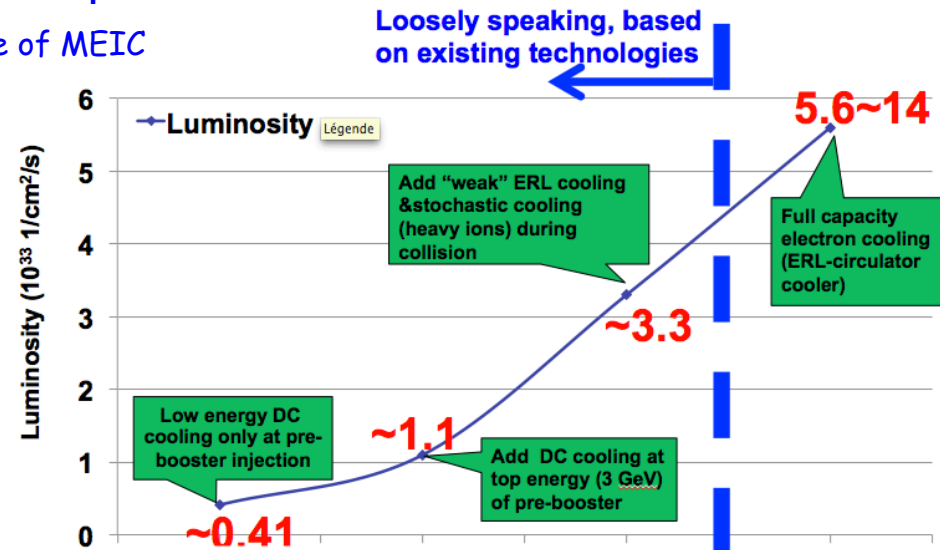
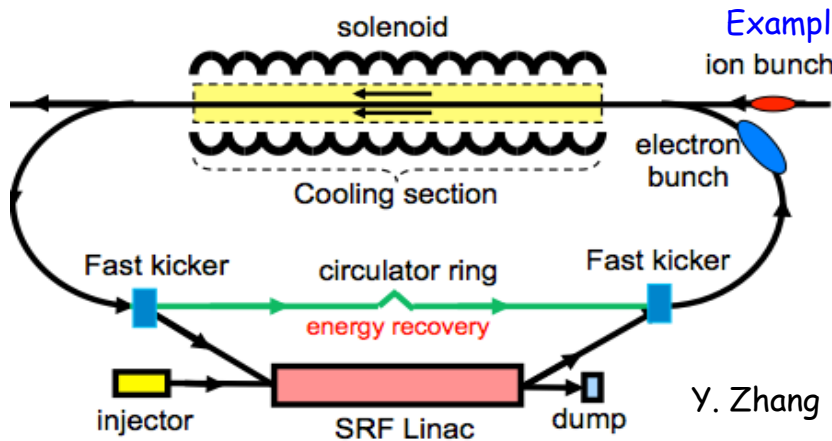


- Polarized gun for e-p program - LDRD at BNL + MIT
  - prototype under construction
- Development of compact magnets - LDRD at BNL → first prototypes
- SRF R&D ERL - TF ongoing
- Beam-beam effects, beam disruption, kink instability suppression, etc.
- Polarized He<sup>3</sup> source
- Coherent **Electron Cooling**: TF for PoP by ~2016

# Electron Cooling : Qu'est-ce que c'est, comment s'y prendre ?

L'électron cooling est utilisé pour réduire la taille/divergence/spread en énergie du faisceau d'ions

La compression du bunch d'ions est **essentielle** pour attendre de hautes luminosités



## La méthode:

On fait circuler le faisceau d'ions avec un faisceau d'électrons au même  $\beta$

Les ions subissent de la diffusion Coulombienne avec le "gas" d'électrons jusqu'à atteindre l'équilibre thermique.

**R&D principale d'EIC dans les deux labos**

# Au niveau détecteurs, les spécifications sont

pour la plupart, définies par la physique **exclusive** (i.e. DVCS)

- Hermiticité (aussi pour reconstruction hadronique dans le DIS)
- Identification des particules (aussi SIDIS)
- Résolution en impulsion
- Détection vers l'avant des baryons de recul
- Détection de muons ( $J/\Psi$ )
- Détection de photons (DVCS,  $\pi^0$ )
- Détection très à l'avant (tagging spectateur, mécanismes diffractifs, nucléaire cohérent, etc)
- Résolution de vertex (vertex déplacé, i.e. charme)
- Calorimétrie hadronique (jet)

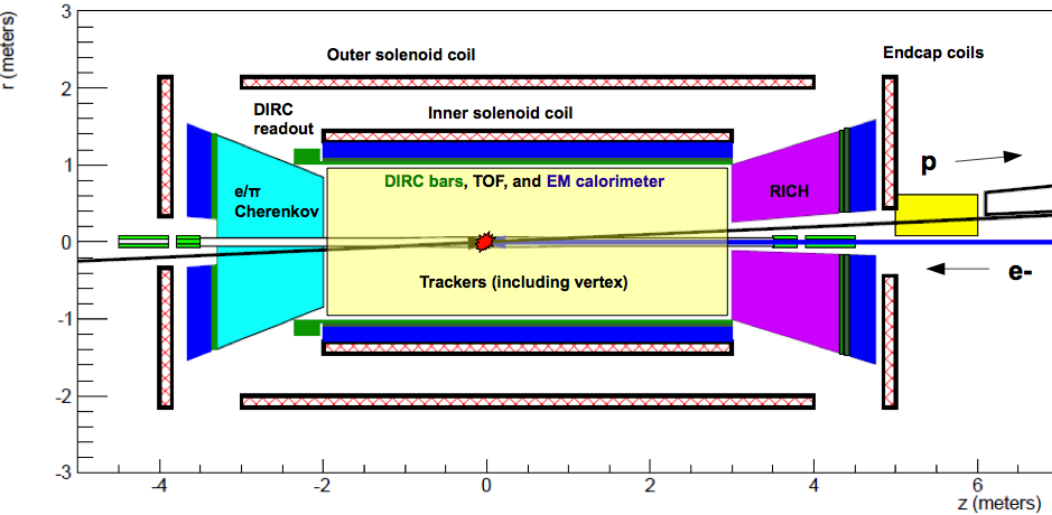
D'une importance fondamentale : **savoir ce qu'il advient du faisceau d'ions !**

**Les quarks spectateurs ou les restes nucléaires de la collision vont continuer dans la direction du faisceau d'ions: besoin de détecteurs très à l'avant !**

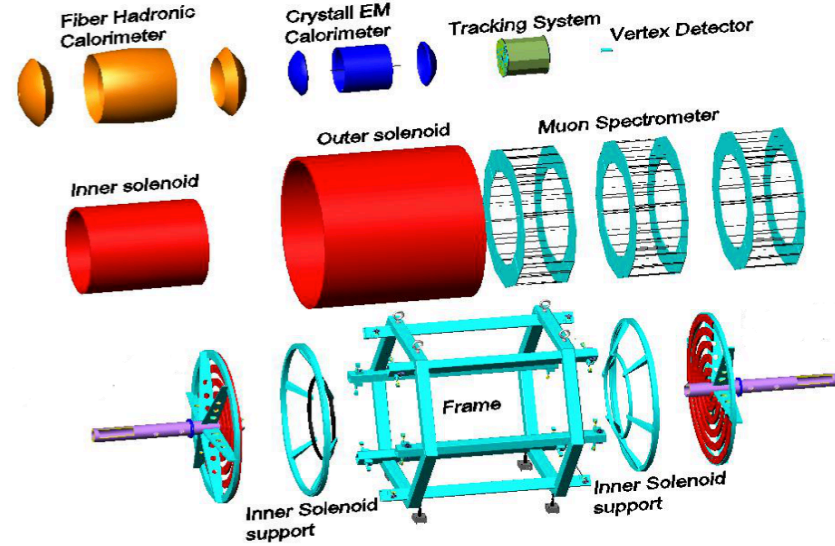
# Le détecteur central

JLab

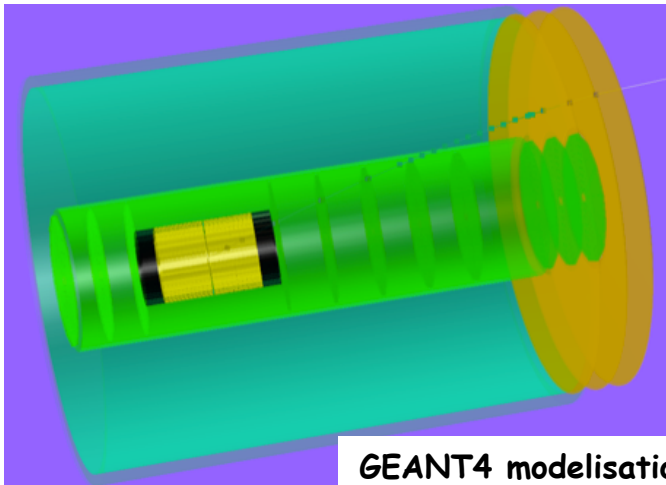
Iron-Free Detector (top view)



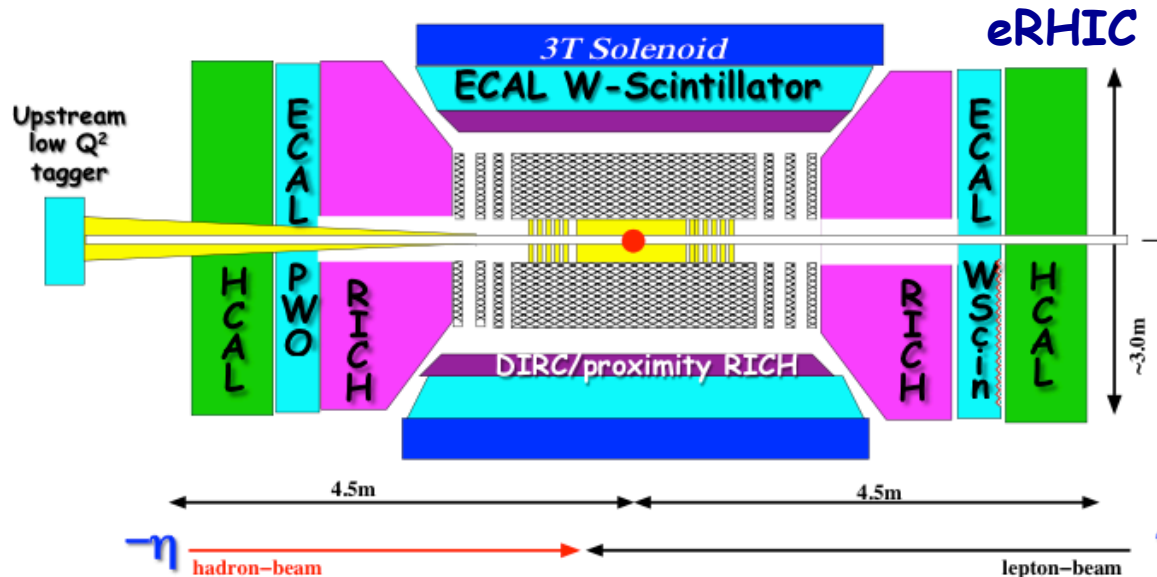
ILC „4th“ detector concept – components



Solutions similaires dans les 2 cas : idée original pour JLab (ILC v4)



GEANT4 modelisation has started





# Horizon 2025 : vers l'exploration précise de QCD avec un EIC

Le futur collisionneur électrons-ions **EIC** aura un **impact profond** sur notre compréhension de QCD grâce à sa **haute luminosité**, ses **particules polarisées** ainsi que sa **variabilité en énergie**.

**EIC** : 1<sup>er</sup> collisionneur polarisé dans le régime DIS, 1<sup>er</sup> collisionneur **nucléaire**.  
✓ **Etudes précises du rôle des quarks de la mer et des gluons de QCD.**

Historiquement, les collisions **p-p**, **e-e** et **p-p** ont joué un rôle complémentaire et essentiel dans le développement du modèle standard.

✓ **L'EIC** ajoute les mots « **spin** » et « **noyaux** » à cette liste.

**Jusqu'ici** : écriture du Science Case (2010), écriture du White Paper (2012)

**Prochain jalon** : Long Range Plan de NSAC en 2014/5 aux USA

**La suite** : R&D et simulation jusqu'en 2019, construction 2019-2024,



**Démarrage 2025 !**



# Pour plus d'infos sur le projet EIC ...

The EIC Science case:  
a report on the joint  
BNL/INT/JLab program

## Glucos and the quark sea at high energies: distributions, polarization, tomography

Institute for Nuclear Theory • University of Washington, USA  
September 13 to November 19, 2010



Editors:  
D. Boer  
Rijksuniversiteit Groningen, The Netherlands

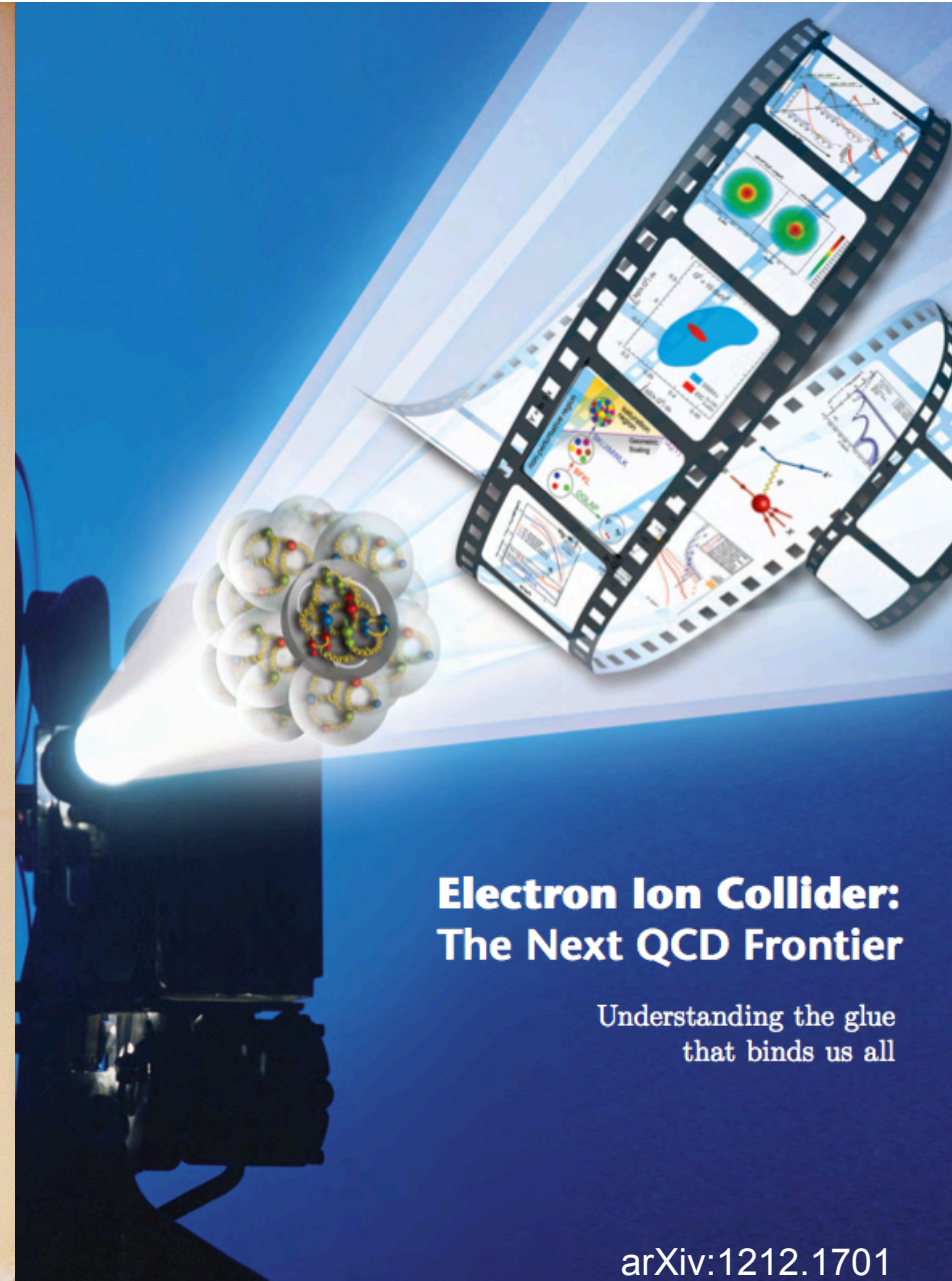
M. Diehl  
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Germany

R. Milner  
Massachusetts Institute of Technology, USA

R. Venugopalan  
Brookhaven National Laboratory, USA

W. Vogelsang  
Universität Tübingen, Germany

arXiv:1108.1713



## Electron Ion Collider: The Next QCD Frontier

Understanding the glue  
that binds us all

arXiv:1212.1701

---

BACKUP SLIDES

# La saturation dans QCD

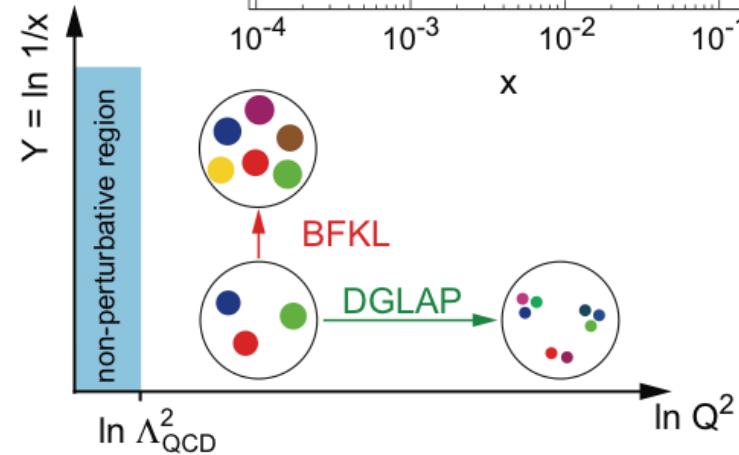
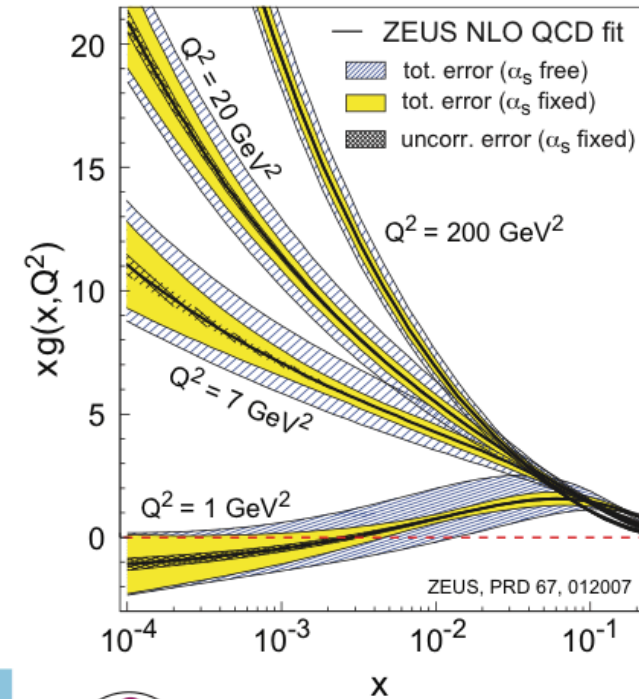
Notre compréhension actuelle de QCD est limitée :

## 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 ???

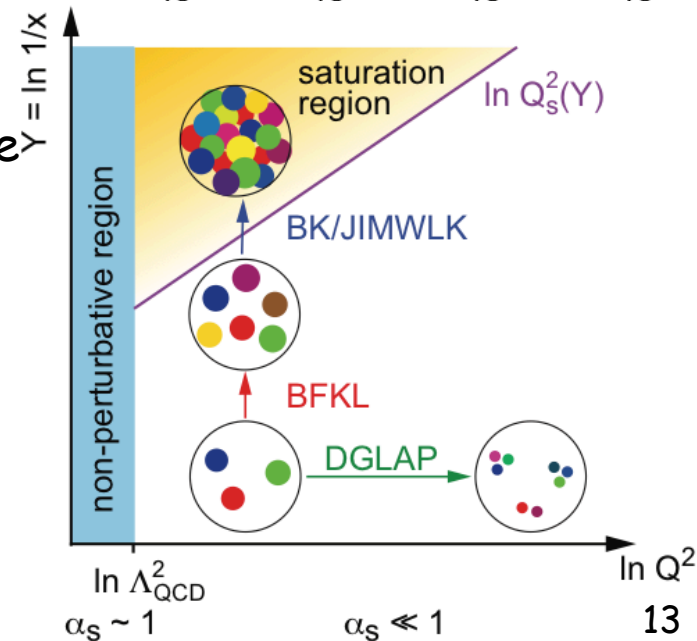
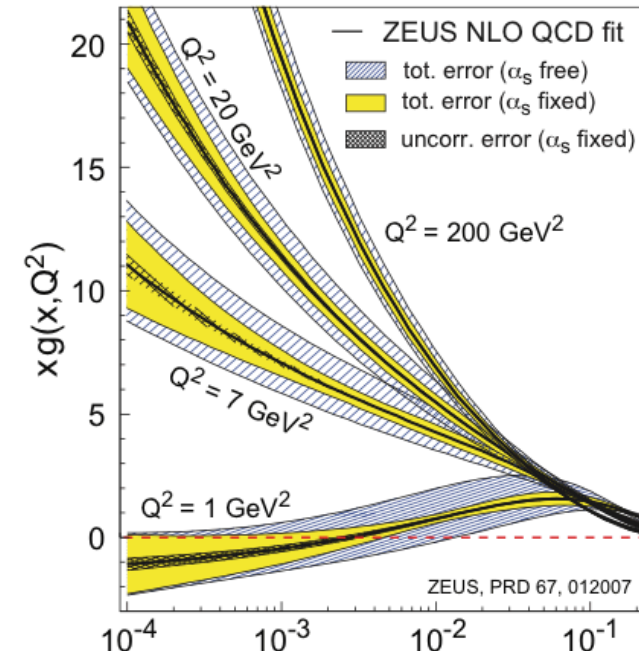
## Evolution non-linéaire à petit $x$

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

## SATURATION

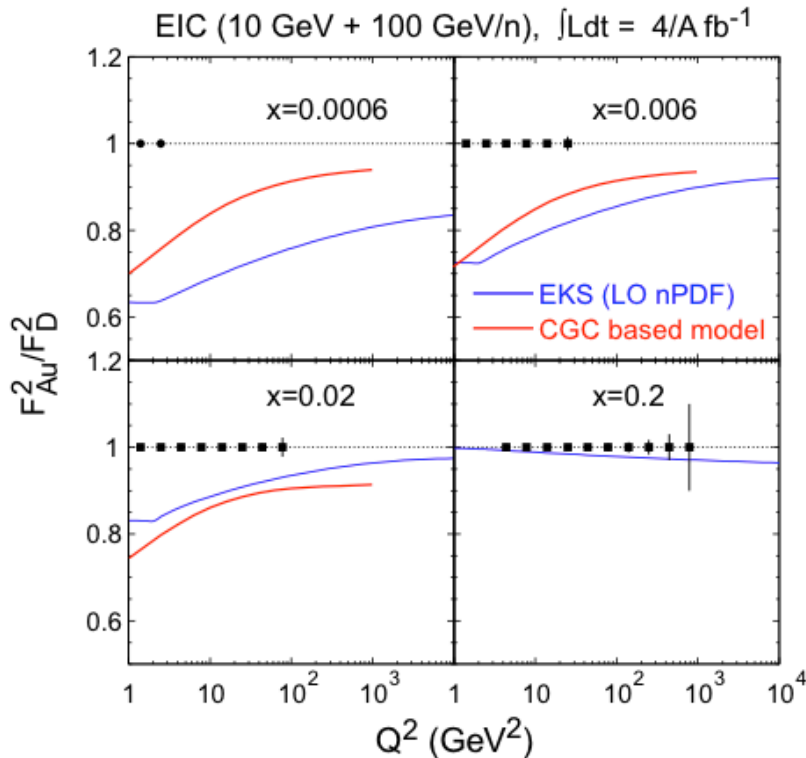
- La fonction d'onde est décrite par une théorie effective: le **Color Glass Condensate**

- Une région totalement inconnue de QCD !

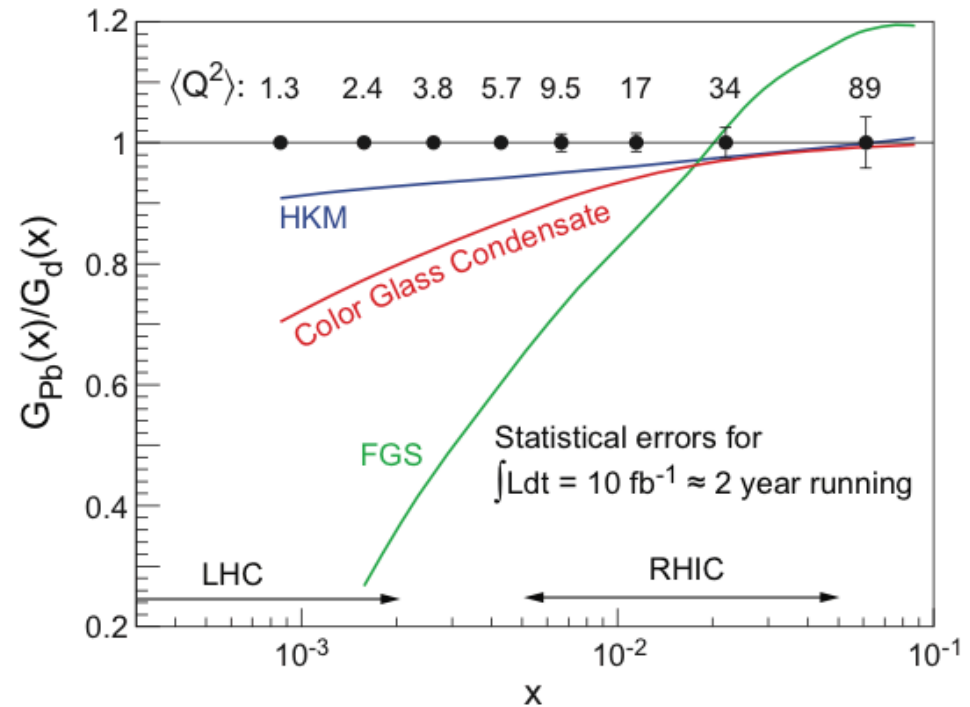


# Des mesures clés pour la saturation : $F_2$ et $F_L$

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



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



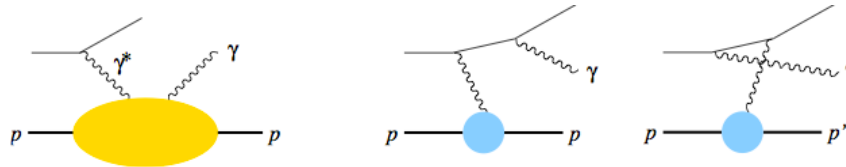
$F_L \sim \alpha_s G(x, Q^2)$  nécessite un scan en énergie  
Pour ce plot  $E_e \times E_p = 10 \times 100, 10 \times 50, 5 \times 50$

# Les processus exclusifs pour l'imagerie du nucléon

## Diffusion Compton Profondément Virtuelle (DVCS)

- Une théorie bien contrôlée: jusqu'à  $\alpha_S^2$ , 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** :

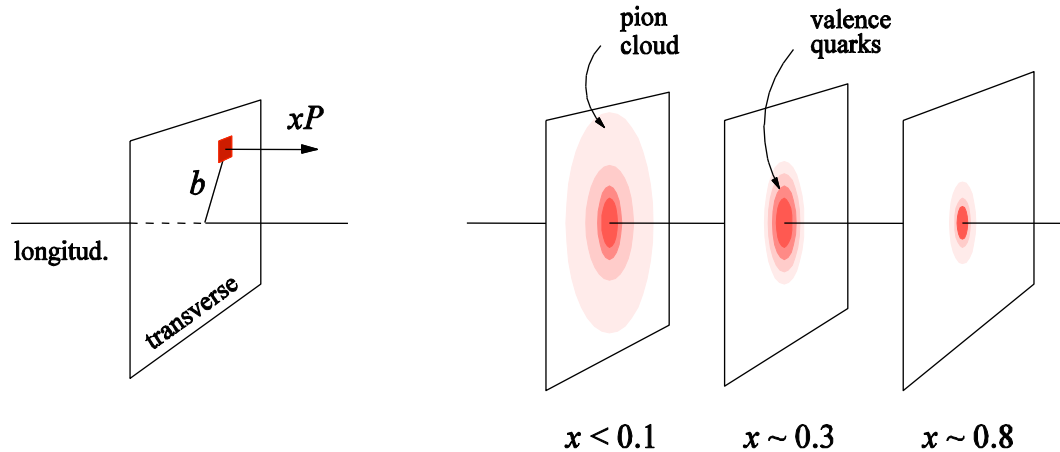


## Electroproduction dure de mésons

- Plusieurs canaux pour une séparation en saveur ( $\rho, \rho^+, \pi^0, \pi^+, \phi, \dots$ )
- Le  $J/\Psi$  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

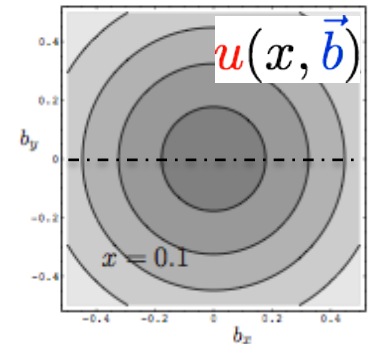
# Imagerie 3D avec les GPD

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



Pour la GPD H (section efficace DVCS):

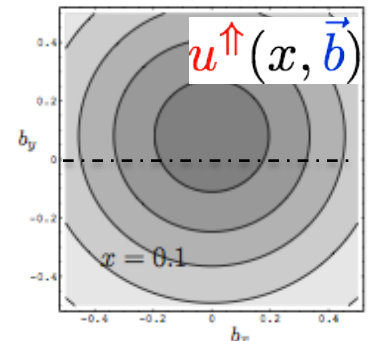
$$f(x, \vec{b}) = \int \frac{d^2 \vec{\Delta}_{\perp}}{(2\pi)^2} e^{i\vec{b} \cdot \vec{\Delta}_{\perp}} H(x, \xi = 0, -\Delta_{\perp}^2)$$



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

$$f^{\uparrow}(x, \vec{b}) = f(x, \vec{b}) - \frac{1}{2M} \frac{\partial}{\partial b_y} \int \frac{d^2 \vec{\Delta}_{\perp}}{(2\pi)^2} e^{i\vec{b} \cdot \vec{\Delta}_{\perp}} E(x, 0, -\Delta_{\perp}^2)$$

décalage (en  $y$ ) des partons à l'intérieur d'un proton polarisé (selon  $x$ )





# Simulation du DVCS pour EIC : Imagerie 3D du nucléon

