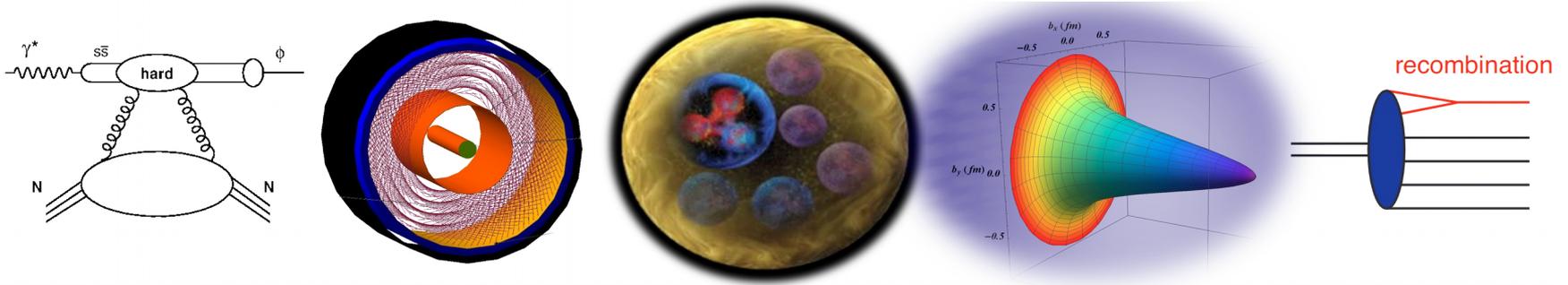


Structure des Nucléons et des Noyaux



Revue Expérimentale

Raphaël Dupré

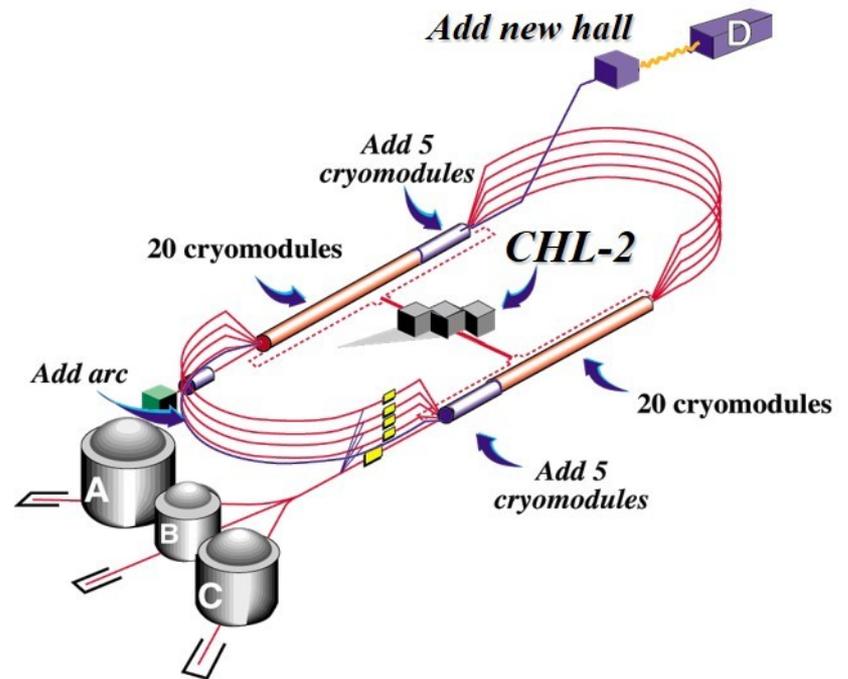
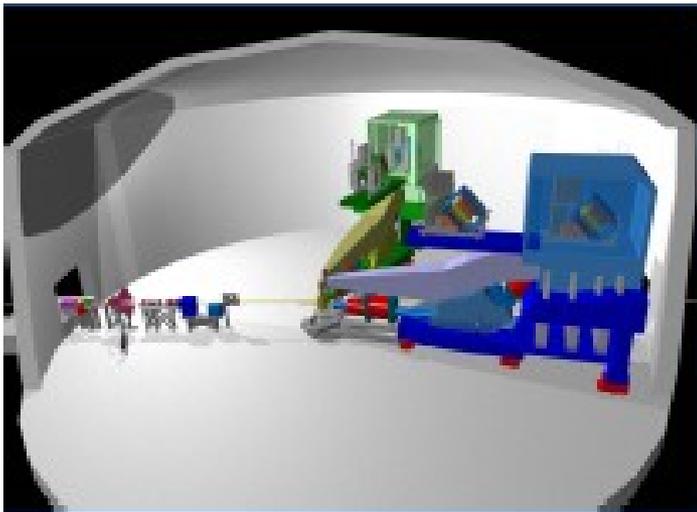
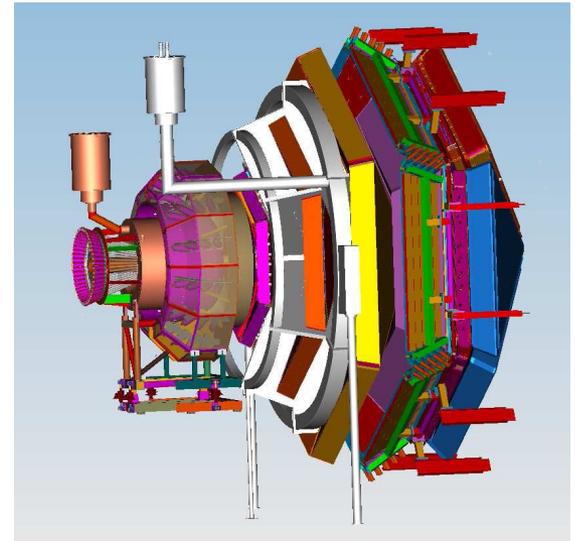
Part 1 : Jefferson Lab

Activité française historique sur les distributions de partons généralisées (GPD)

- Mesures de la diffusion Compton profondément inélastique (DVCS) sur le proton et le neutron
- Production de mésons (pions et rho) profondément virtuelle (DVMP)
- Phénoménologie des GPD
- Activité concentrée à Orsay dans les 10 dernières années
- Contributions IN2P3 et CEA Saclay

Récente augmentation de l'énergie du faisceau à JLab

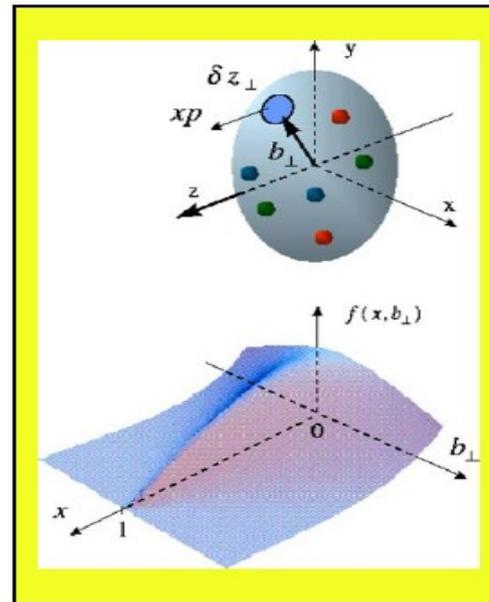
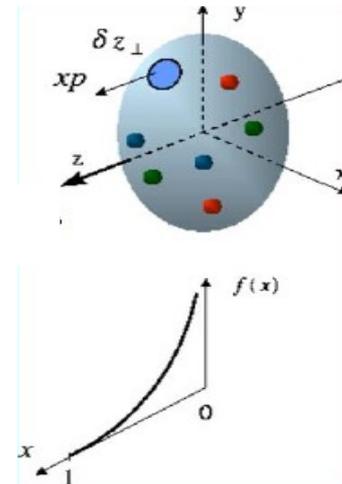
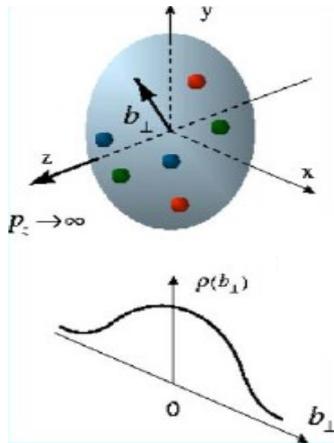
- Nous sommes au début du programme 12 GeV
- Forte participation française à la construction de nouveaux détecteurs



Les Distributions de Partons Généralisées

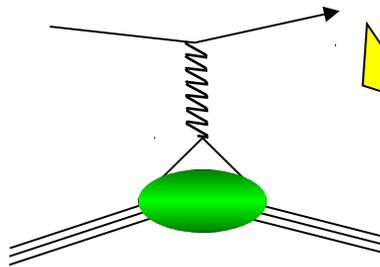
GPDs: $H, E, \tilde{H}, \tilde{E}$

**Distributions des corrélations
entre position et impulsion pour
les quarks et les gluons**



Facteurs de forme :
**Distributions des
positions transverses
des quarks**

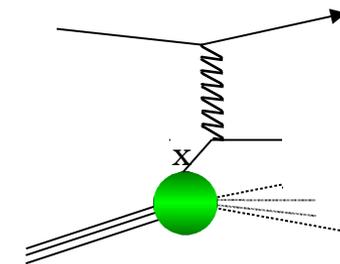
$F_1(t), F_2(t)$



Diffusion élastique $ep \rightarrow e'p'$
(Hofstadter, prix Nobel 1961)

Distributions des partons :
**Distributions de
l'impulsion longitudinale
des quarks**

$q(x), \Delta(x)$



Diffusion profondément inélastique (DIS) $ep \rightarrow e'X$
(Friedman, Kendall, Taylor, prix Nobel 1990)

La mesure du DVCS

La diffusion Compton profondément virtuelle

- Production exclusive d'un photon (tous les produits sont détectés)

Principaux challenges expérimentaux

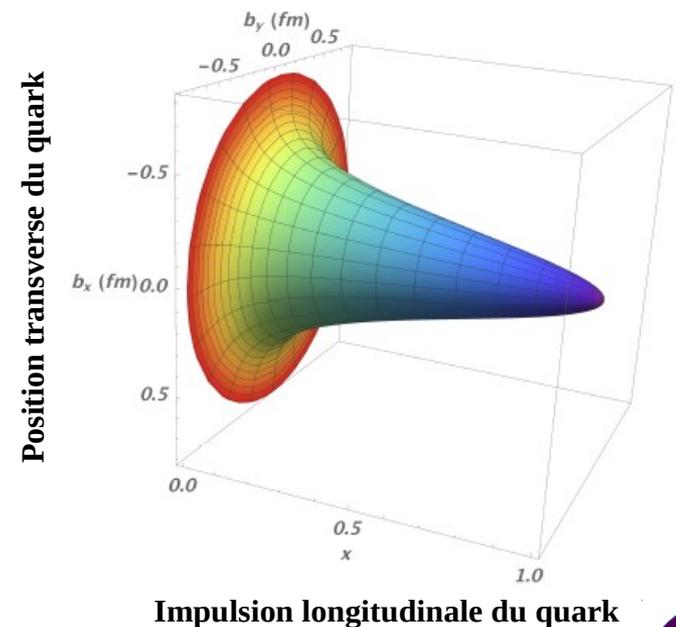
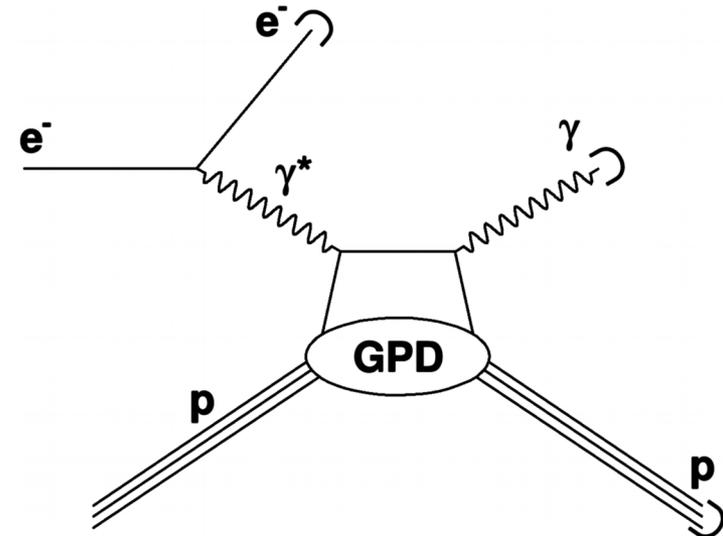
- Émission d'un photon de haute énergie à petit angle
- Faible section efficace ($\sim \text{pb}$)
- Extraction des GPDs à partir des données

Lien fort avec l'instrumentation

- Construction de NPS pour le Hall-C de JLab
 - *Neutral Particle Spectrometer*
- Projet de chambre à fil pour ALERT
 - *A Low Energy Recoil Tracker*

Objectifs à JLab

- La tomographie du proton en termes de quarks
- Comprendre l'origine du spin dans le nucléon
- Comprendre les effets nucléaires au niveau des quarks



DVCS sur le neutron

Objectifs

- La séparation de saveurs des GPDs
- Accès à la GPD E, plus simple que sur le proton
 - Lié au facteur de forme électrique très petit
 - Nécessaire à l'accès au moment orbital

Détecteur de neutron dans CLAS

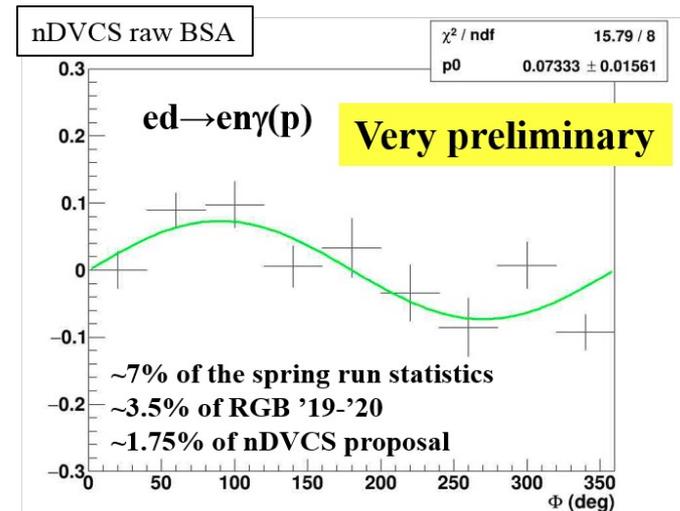
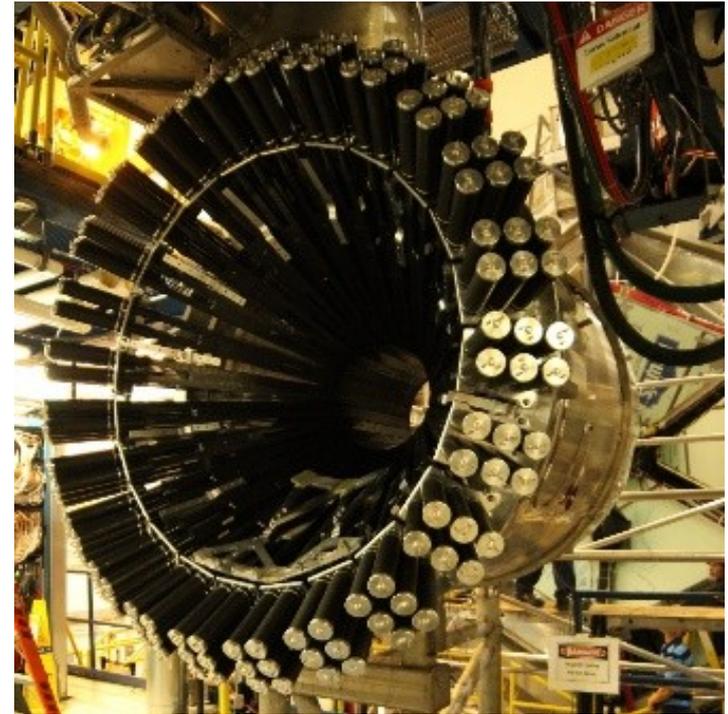
- Construit entièrement à Orsay
- Place la France dans une position unique sur le sujet

Premières mesures réalisées

- En 2019 dans le Hall-B de JLab (Collab. CLAS)
- Analyse de données en cours

Mesures sur une cible longitudinalement polarisée

- Prévus pour fin 2021
- Donnent accès à de nouvelles observables pour l'extraction des GPDs



DVCS sur le proton

Objectifs

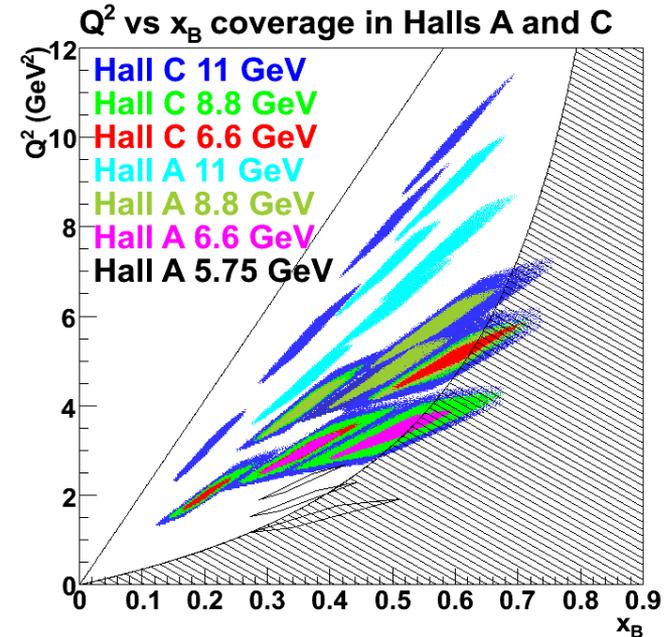
- Base pour l'extraction des GPDs
- Étude des effets de higher twist grâce à la couverture large en Q^2

Construction du calorimètre NPS

- Neutral Particle Spectrometer
- Pour une mesure de haute précision du DVCS dans le Hall-C
 - *C'est la suite des expériences de DVCS dans le Hall-A largement initiés en France*
- Financée par NSF, JLab et IN2P3
- Assemblage prévue en 2020

Prise de données

- Expérience prévue en 2022-23
- Analyse à suivre ensuite



DVCS sur les noyaux

Objectifs

- Cartographier les noyaux légers
- Comprendre pourquoi les nucléons sont modifiés dans le milieu nucléaire

Développement ALERT

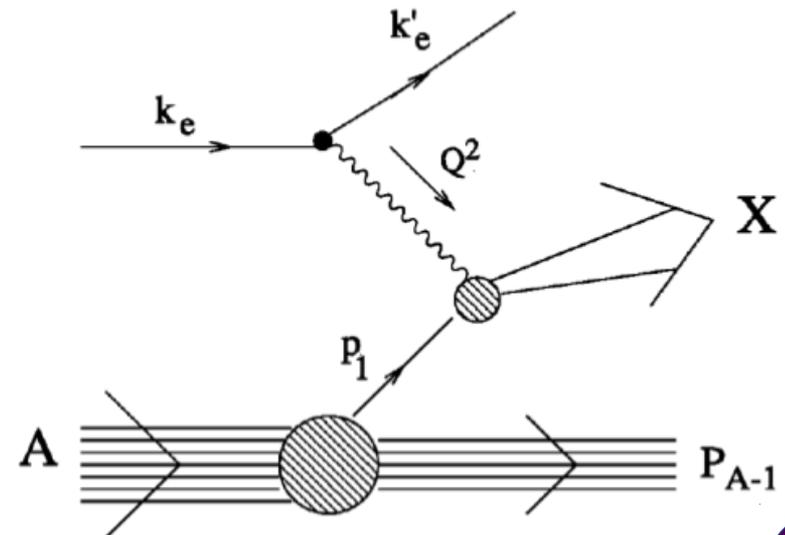
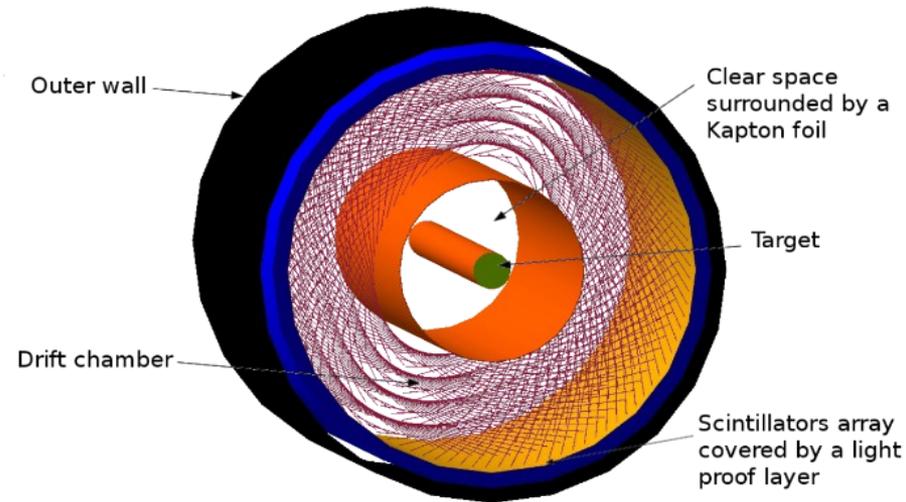
- A Low Energy Recoil Tracker
- Détecteur de recul des noyaux
- Finalisation prévue en 2021

Prise de données

- Expérience prévue en 2022-23
- Analyse de données ensuite

Sujets de physique hors DVCS

- Capacité à mesurer les fragments nucléaires en plus du noyau de recul
- Étude des processus *tagged*



Autres activités à JLab

Diffusion Compton de genre temps, double DVCS, production de mésons exclusive

- Les autres processus permettant d'accéder aux GPDs
- Opportunité de contribuer significativement à l'analyse de ces canaux expérimentaux
- A l'exception du double DVCS, pas de nouvelle instrumentation nécessaire

Source de positrons polarisés

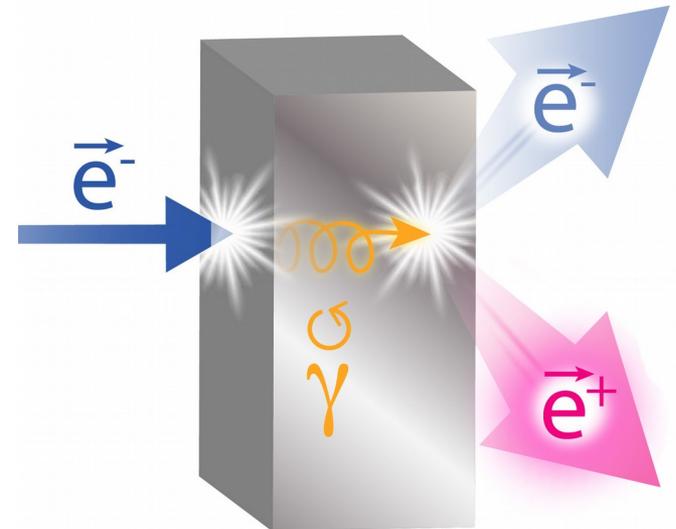
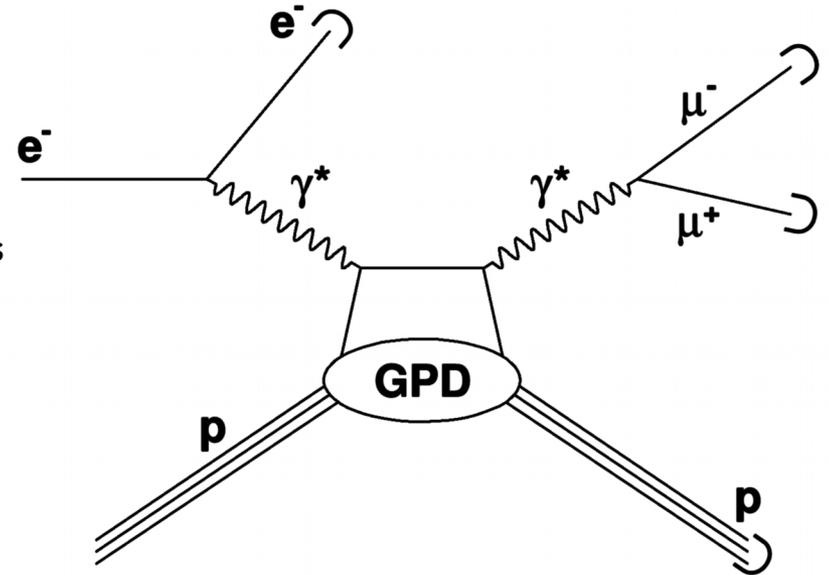
- Contribution française importante
- Donne un accès unique aux parties réelles des CFF à travers les asymétries de charge

Cible polarisée transversalement

- Projet de moyen terme porté par JLab dans lequel nous pouvons avoir des contributions naturelles
- Les observables associées sont particulièrement intéressantes pour la GPD E

Phénoménologie

- Activité historique en pause, se pose la question d'une reprise lors de la publication des données DVCS du 12 GeV



Overview JLab

A court terme, plusieurs expériences prévues à JLab

- 2021 Longitudinally polarized neutrons in CLAS
- 2022-23 Proton DVCS with NPS in Hall-C
- 2022-23 Nuclear DVCS with ALERT

Attention, le calendrier de JLab n'est officiel qu'à 18 mois !

Opportunités à moyen terme

- Développement d'un faisceau de positrons polarisés
 - *Possiblement utilisé sur EIC à plus long terme*
- Setup pour le double DVCS
- Des analyses sur plusieurs années
 - *Il faut compter 5 ans pour compléter toutes les analyses*
 - *Certains canaux vont bénéficier de nouvelles prises de données*

Une équipe de 5 permanents regroupés au IJCLab

- Renforcement à 6 à partir d'octobre en principe
- Non permanents 5 PhD et 2 postdocs
- Une équipe CEA de 2 permanents

L'activité JLab doit donc se prolonger intensivement jusqu'à 2030 et avec une réduction d'intensité à partir de 2025

Part 2 : Electron Ion Collider

Collisionneur Électron-Ion

- Energie dans le centre de masse de 20 à 140 GeV
- Faisceau d'électrons polarisés en collision avec des protons polarisés, des ions légers polarisés ou des ions lourds

Statut du projet

- US DOE a annoncé le lancement du projet et le choix du site en janvier 2020
 - Coût de 1.6 à 2.6 G\$
 - Construction à BNL sur la base du RHIC : eRHIC
- Le User Group d'EIC a lancé plusieurs efforts
 - la rédaction d'un Yellow Report pour préparer la création des détecteurs
 - La mise en place d'un comité pour permettre l'émergence d'une ou plusieurs collaborations scientifiques

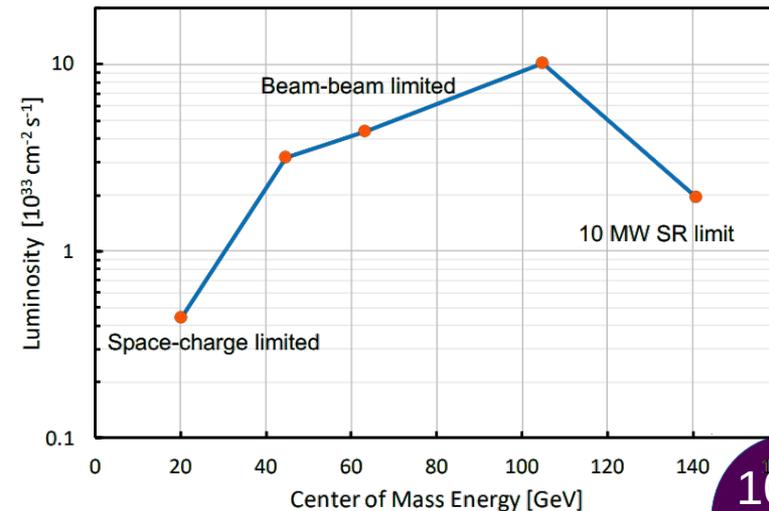
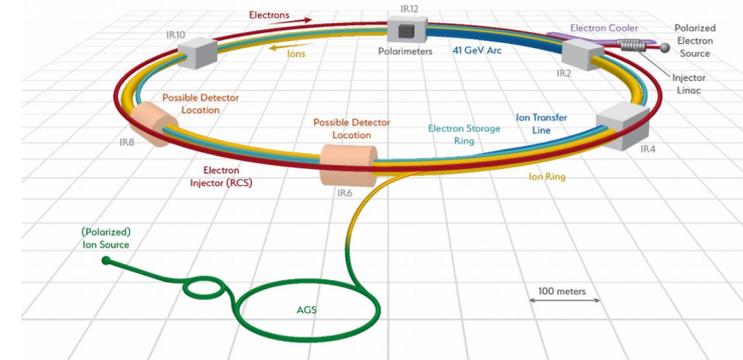
EIC User Group

- 1033 members, from 211 institutions in 31 countries

Department of Energy

U.S. Department of Energy Selects Brookhaven National Laboratory to Host Major New Nuclear Physics Facility

JANUARY 9, 2020



Structure @ EIC

Mesures des fonctions de distribution des partons (PDF)

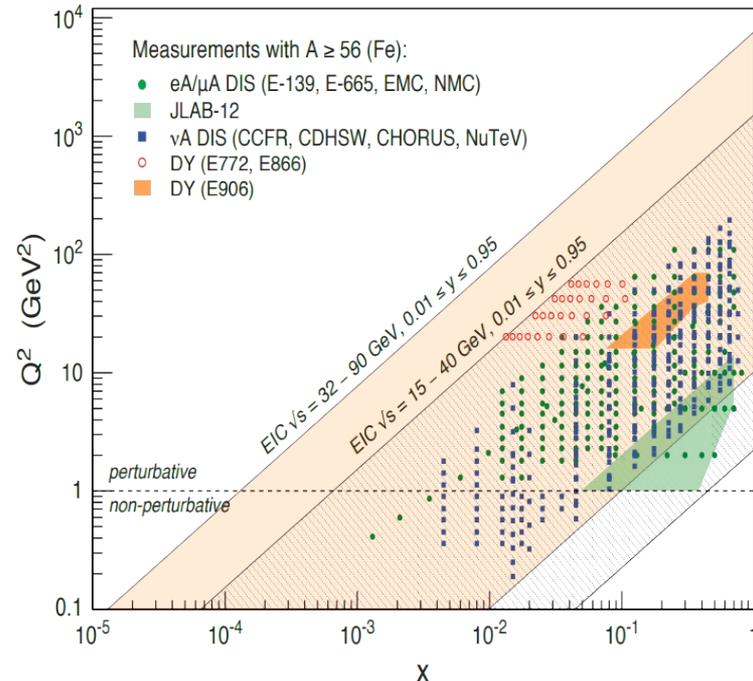
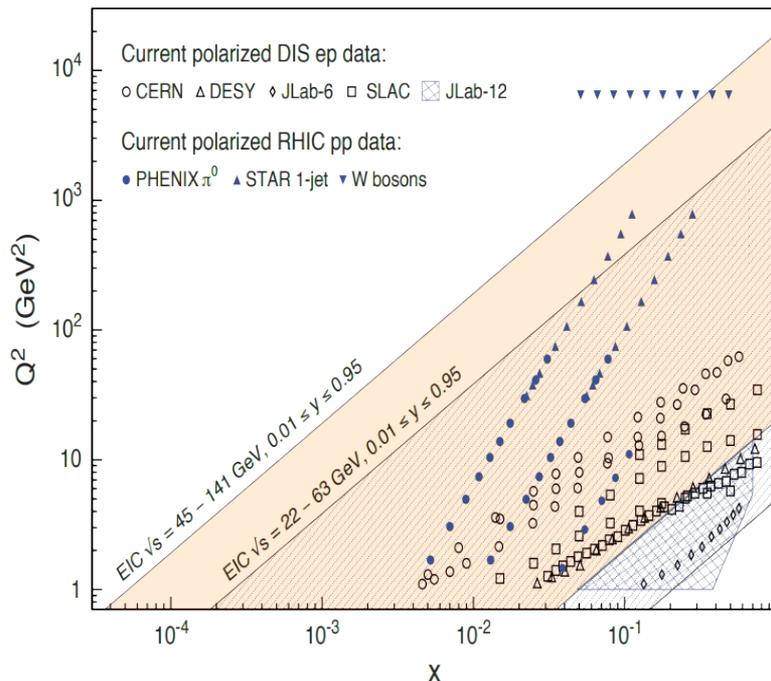
- Au-delà de DESY grâce à une meilleure luminosité et à la double polarisation
- Mesures des PDFs nucléaires dans des domaines très mal connus

EIC sera la machine des gluons

- Domaine à petit x largement dominé par les gluons
- Accès à F_L en variant les énergies de faisceau

Aussi des grands Q^2

- Jonction avec mesures de W du RHIC/LHC dans les grands x



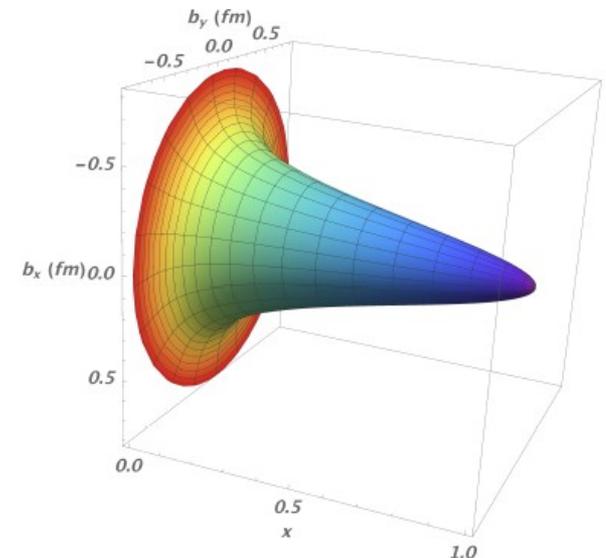
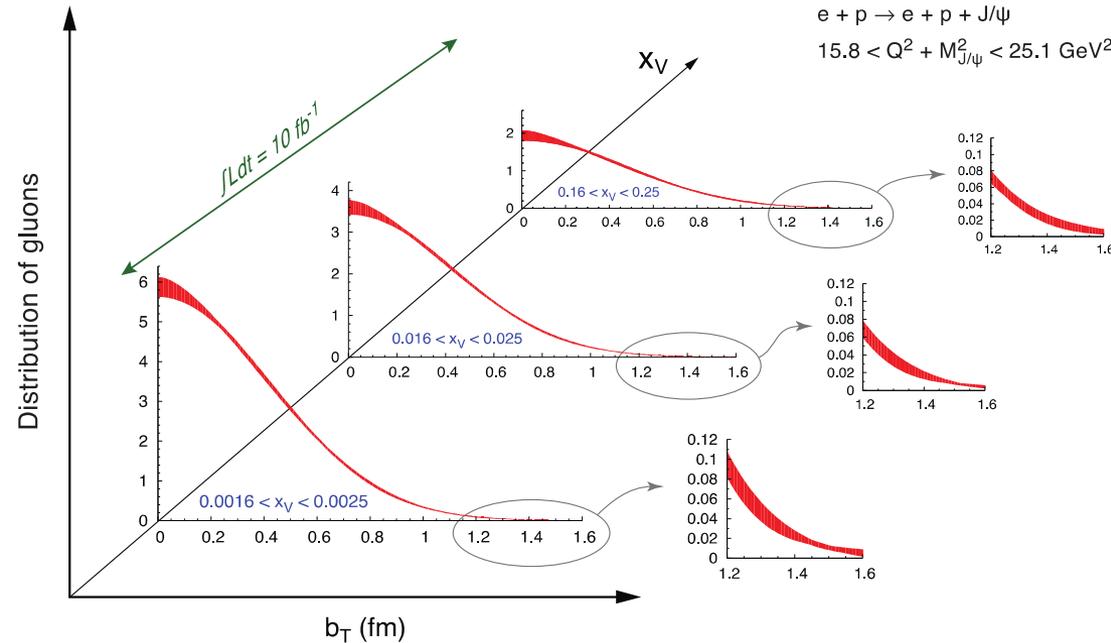
Structure 3D @ EIC

Suite logique des thèmes JLab

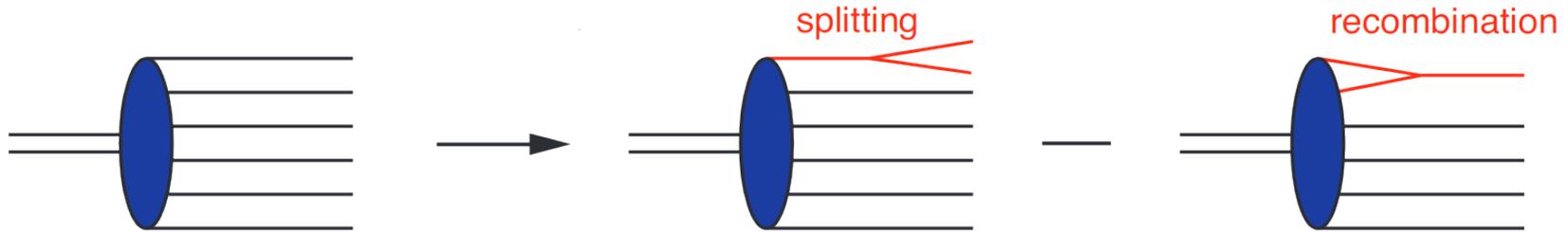
- **Évolution en Q^2 des GPDs**
 - Comprendre et quantifier les effets de higher twist
- **Étude des GPDs à petit x**
 - Quel étalement du nucléon à faible x ?
 - Les nucléons fusionnent-ils dans les noyaux à petit x ?
- **Étude des GPDs de gluons**
 - Utilisation de la production exclusive de ϕ et de J/ψ
 - Les quarks et gluons occupent-ils le même espace ?
- **Compléter l'espace de phase mesuré**
 - Mesurer les règles de sommes, en particulier de J_i

Plusieurs autres thèmes possibles

- Les études de TMDs sont possibles dans le même domaine cinématique
 - TMD = Transverse momentum dependent PDFs
- Des idées émergent pour l'accès aux fonctions de Wigner (5D) et une image complète du nucléon



Saturation @ EIC

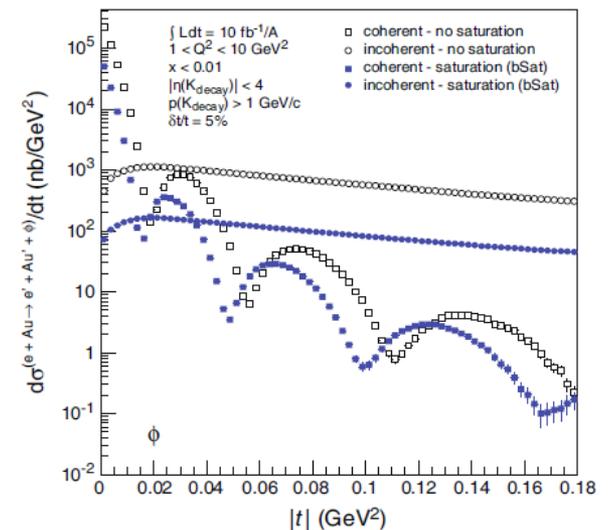
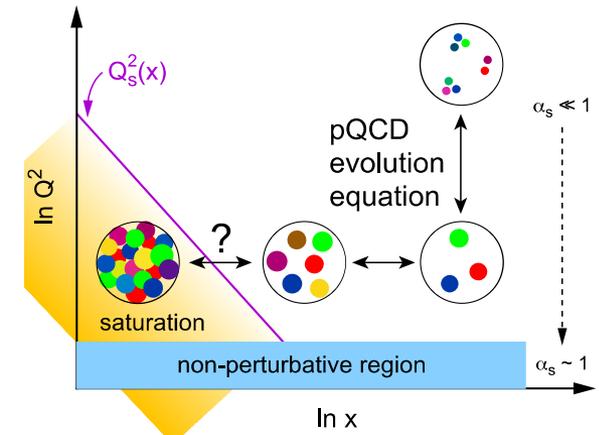


La saturation des gluons dans le nucléon

- Lorsque la densité devient très importante les diagrammes de recombinaison deviennent importants
- Fin du domaine d'application de DGLAP dans les PDFs

Accessible à l'EIC ?

- Pas observé clairement à DESY en ep, mais possible en utilisant les noyaux à EIC
- Mesure classique dans les PDFs, mais surtout par production exclusive de mésons vecteurs
- Nécessite un bon contrôle sur les modes de production et la séparation cohérent/incohérent



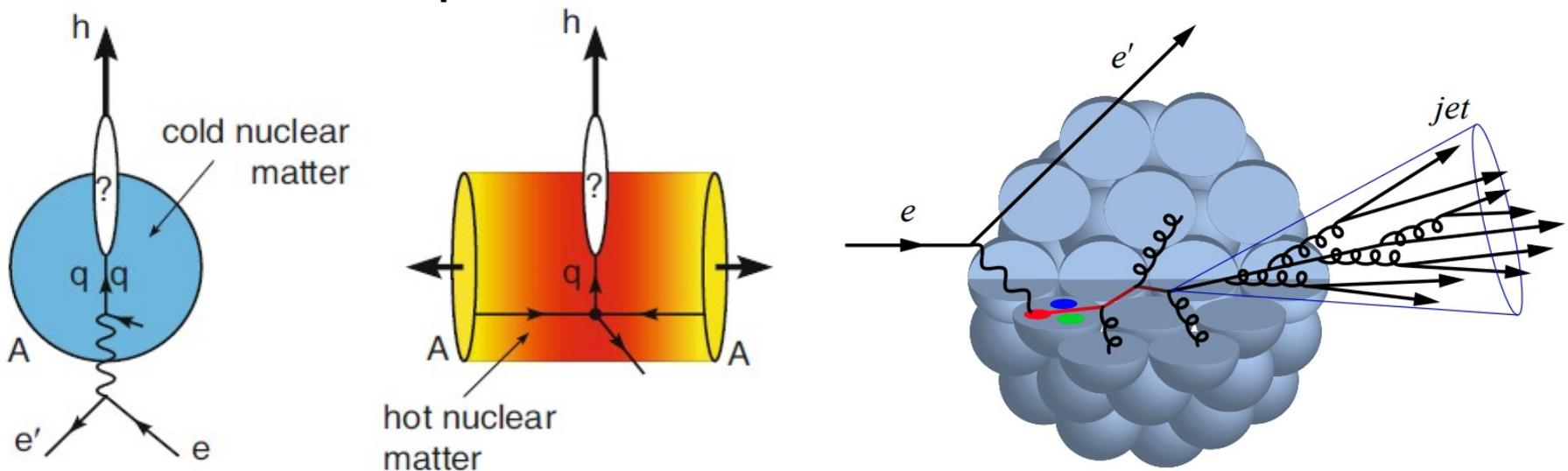
Hadronisation @ EIC

Hadronisation dans la matière froide

- L'utilisation d'ions lourds et la possibilité de mesurer une forme de centralité doivent permettre de faire des mesures précises d'hadronisation
- Fournit une référence pour les calculs de perte d'énergie dans la matière QCD avec un milieu peu dense mais connu et n'évoluant pas

Études de la modification des jets

- Pour la première fois en eA
- Permet d'étendre les possibilités en termes d'observables
- Directement comparables aux mesures en collisions d'ions



La structure du nucléon et des noyaux est aussi largement étudié au LHC

- En particulier à LHCb et à ALICE
- En collision classique, ultra périphérique (UPC) ou sur cible fixe
- Dans le domaine des petits comme des grands x
- Donne une opportunité de tester la saturation dans un domaine complètement différent
- Permet de préciser les PDF qui servent d'outils communs dans toute la physique hadronique

L'hadronisation sera un sujet majeur pour l'EIC

- Capacité d'étudier les productions de quarks lourds en eA
- Mesures eA à des énergies dans le domaine perturbatif directement comparables aux mesures de RHIC et LHC
- Donne une référence pour les calculs théoriques de perte d'énergie des partons dans la matière nucléaire

Détecteurs à EIC

Projets de détecteurs se précisent

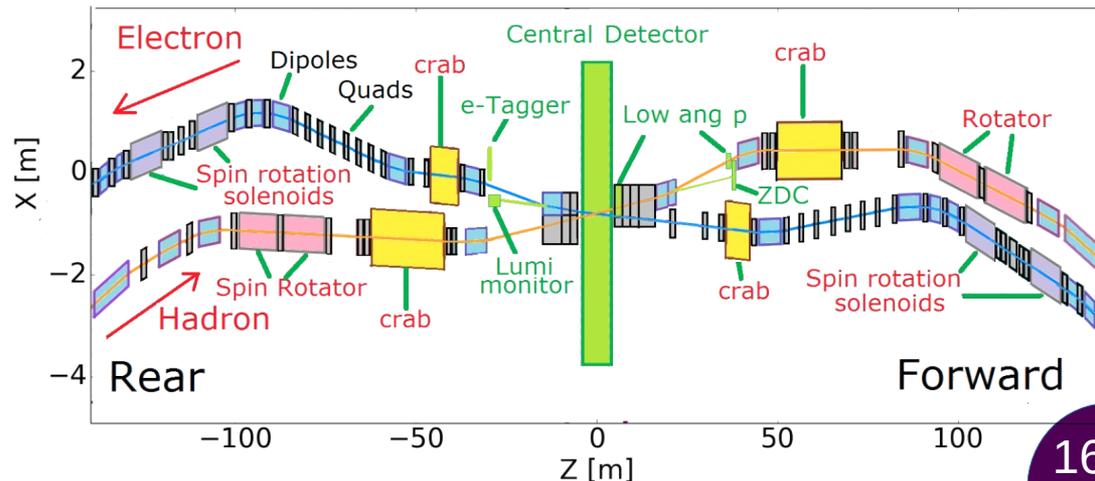
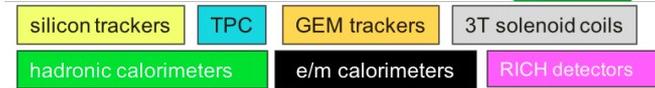
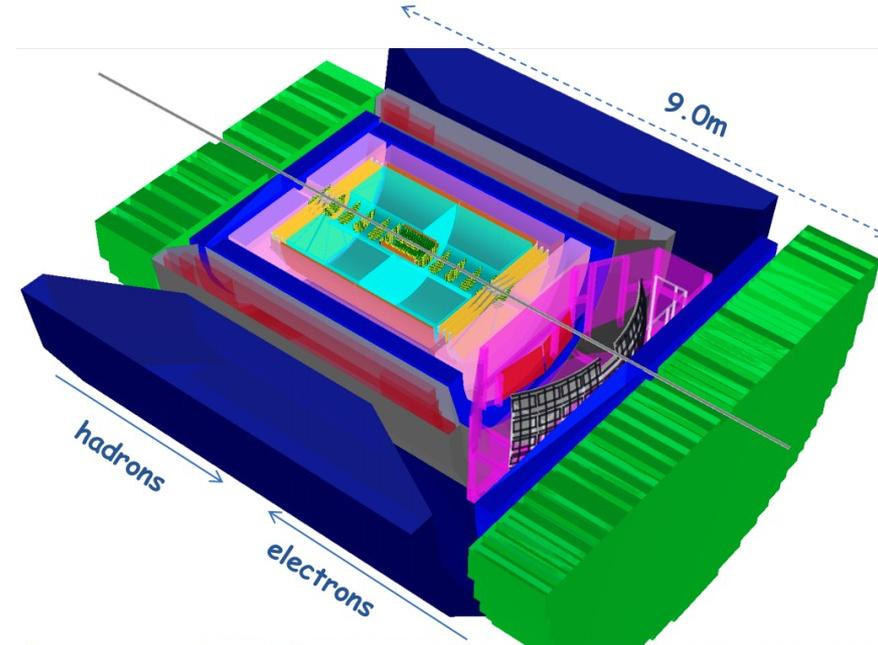
- Lancement du Yellow Report avec pour objectif de clarifier les besoins en détection de chaque type de physique
- Le EICUG se prépare à la création de collaborations scientifiques

Conception des points d'interactions

- Important pour la luminosité et la place disponible pour les détecteurs
- Va être fixé rapidement par la partie accélérateur du projet

Importante participation française dans ces activités

- IJCLab et CEA pour l'instant



Overview EIC

Prochaines étapes

- 2021 Appel pour des propositions de détecteurs et la création de collaborations
- 2023 Démarrage de la construction (machine et détecteurs)
- 2030 Démarrage de l'exploitation

A court terme

- Participation au Yellow Report de l'EIC
- Démarrage des discussions dans la communauté française
 - *En particulier entre IN2P3 et CEA qui supporte déjà clairement un effort sur le projet*

A moyen terme

- Effort technique important et contributions détecteurs à déterminer
- Positionner les forces dans une collaboration pour défendre une participation française ayant un impact fort

Moyens humains

- Contribution prospective signé par 26 personnes (9 théorie, 13 exp., 4 instru/accél.)
- Un groupe au CEA (effectifs non connus)

Conclusions

Programme à 12 GeV de JLab qui permet d'exploiter pleinement les investissements passés

- Projet scientifique focalisé autour des GPDs avec un impact fort
- Le projet devrait diminuer en intensité à partir de 2025 et arriver à une conclusion naturelle autour de 2030-35

L'EIC offre une perspective attractive pour rassembler une communauté bien plus large

- Le plus gros projet dédié à la physique hadronique au niveau international
- Une communauté regroupant les cibles fixes et les collisions d'ions
- La communauté européenne forme 1/3 du *user group*, l'occasion d'une contribution significative
- Un projet scientifique et technique français à définir au plus tôt
- Quelle montée en puissance en France pour arriver à une contribution significative?