

## Tomographie du nucléon : imager les gluons à l'intérieur du proton

**Spécialité** Physique nucléaire

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DPhN/LSN](#)

**Candidature avant le** 30/06/2022

**Durée** 3 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [SOKHAN Daria](#)

+33 1 69 08 56 27

[daria.sokhan@cea.fr](mailto:daria.sokhan@cea.fr)

### Résumé

Le projet se concentre sur des simulations de diffusion d'électrons au collisionneur électron-ion, la prochaine grande installation mondiale de physique des hadrons, qui sera construite aux États-Unis. Les processus de diffusion d'électrons étudiés sont sensibles à la structure interne du proton.

### Sujet détaillé

La diffusion d'électrons de haute énergie sur un proton est l'une des techniques expérimentales les plus performantes dans l'étude de sa structure. Des expériences à l'accélérateur linéaire SLAC dans les années 1950 et 1960, utilisant un faisceau d'électrons et une cible fixe d'hydrogène, ont montré que le proton avait une extension spatiale et possédait des centres de diffusion ponctuels à l'intérieur, appelés partons. L'identification ultérieure de ces centres de diffusion comme quarks a conduit à la compréhension du proton comme un état lié de quarks, confinés par l'interaction forte via l'échange de gluons. La théorie de la chromodynamique quantique (QCD) décrit ces interactions, mais ses équations ne peuvent pas être résolues analytiquement pour calculer les propriétés du proton. Notre compréhension de la structure du proton repose donc fortement sur son étude expérimentale.

Bien que de nombreux progrès aient été réalisés au cours des 65 dernières années, de nombreuses questions fondamentales demeurent : quelle est la composition du spin du proton, comment sa masse est-elle générée à partir de quarks presque sans masse, quelle est la nature du confinement des quarks dans les états liés appelés hadrons ? Caractériser les distributions des quarks et des gluons à l'intérieur du proton apporte des éléments de réponse à ces questions et permet ainsi de mieux comprendre la matière qui constitue plus de 99% de la masse visible de l'univers.

Un certain nombre d'expériences sont actuellement en cours dans différents accélérateurs autour du monde, mais leurs énergies dans le centre de masse les spécialisent à l'étude de la région des quarks de valence du proton, c'est-à-dire celle où trois quarks constitutifs partagent également la quantité de mouvement du proton. Cependant, à des énergies de centre de masse plus élevées, il est possible d'accéder à la mer de quarks et de gluons, où le proton semble plutôt se composer de paires quark anti-quark de saveurs différentes et d'un ensemble dense de gluons. Cette région dominée par les gluons a été très peu explorée en diffusion d'électrons, mais un nouvel accélérateur pour

---

l'étudier avec une précision inégalée sera bientôt construit au Brookhaven National Laboratory aux États-Unis : l'Electron-Ion Collider (EIC) [1].

L'EIC, qui devrait entrer en opération en 2032, collisionnera des faisceaux d'électrons polarisés de haute intensité avec des faisceaux de protons polarisés, d'ions légers et de noyaux lourds non polarisés. Si le transfert de quantité de mouvement dans l'interaction est suffisamment élevé, l'électron diffuse sur un quark à l'intérieur du proton et peut entraîner la production d'autres particules, comme un photon ou un méson de haute énergie (une paire de quark anti-quark). La reconstruction de ces interactions et la mesure des distributions des particules diffusées et produites peuvent donner accès aux distributions en position et en quantité de mouvement des quarks à l'intérieur du proton. En particulier, certains processus sont sensibles aux distributions de partons généralisées (GPD), qui peuvent être interprétées comme reliant la position spatiale transversale des quarks à leur quantité de mouvement longitudinale [2]. Celles-ci, à leur tour, fournissent des informations sur la composition des distributions de spin et de pression à l'intérieur du proton [3] et peuvent être utilisées pour construire des images tomographiques 3D de la structure du proton [4]. Aux énergies accessibles à l'EIC, cela fournira une cartographie du proton dans la région dominée par les gluons. La conception des détecteurs permettant ces mesures est actuellement en cours.

Le stage se déroulera au Laboratoire de Structure du Nucléon (LSN) de l'Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers (IRFU). Il se concentrera sur l'étude des processus de diffusion sensibles aux GPD à l'EIC et sur l'optimisation des détecteurs. Plus précisément, il s'agira d'utiliser des programmes informatiques pour exécuter des simulations de processus de diffusion à l'EIC avec différentes configurations de détecteurs et d'analyser, à l'aide de techniques statistiques, les données produites dans une simulation d'expérience. Le projet offre au candidat l'opportunité de participer à la conception des détecteurs du nouveau collisionneur et de contribuer à l'évaluation de son potentiel physique.

Une connaissance préalable de la relativité restreinte et de la mécanique quantique est requise. Une expérience préalable en programmation est un avantage, notamment en C++ ou Python. Ce stage s'adresse à des étudiants de niveau master ou Grande École d'Ingénieurs. Sa durée peut être adaptée aux exigences académiques du candidat et peut aller de 3 à 6 mois ou plus. Ce projet de stage peut déboucher sur une thèse.

[1] The Electron-Ion Collider Yellow Report (2021). Executive summary: [http://www.eicug.org/web/sites/default/files/EIC\\_YR\\_Summary\\_v1.0.pdf](http://www.eicug.org/web/sites/default/files/EIC_YR_Summary_v1.0.pdf)

[2] Garçon, M. "An introduction to the Generalized Parton Distributions". Eur. Phys. J. A 18, 389–394 (2003).

[3] Kumeri?ki, K. "Measurability of pressure inside the proton." Nature 570, E1–E2 (2019).

[4] Moutarde, H., Sznajder, P. & Wagner, J. "Border and skewness functions from a leading order fit to DVCS data." Eur. Phys. J. C 78, 890 (2018).

## **Mots clés**

physique hadronique, diffusion d'électrons, structure du proton, quarks, gluons

## **Compétences**

Le projet s'agira d'utiliser des programmes informatiques pour exécuter des simulations de processus de diffusion à l'EIC avec différentes configurations de détecteurs (GEANT4) et d'analyser, à l'aide de techniques statistiques, les données produites dans une simulation d'expérience (ROOT).

## **Logiciels**

C++, Python

---

## Nucleon tomography: imaging the glue inside the proton

### Summary

The internship project will focus on simulations of scattering at the Electron-Ion Collider, the world's next main hadron physics facility, which will be built in the US. The electron scattering processes under study are sensitive to the internal structure of the proton.

### Full description

The scattering of high energy electrons from a proton is one of the most powerful experimental tools in the study of its structure. Experiments at the SLAC linear accelerator in the 1950s and 60s, using a beam of electrons and a fixed hydrogen target, showed that the proton had spatial dimensions and identified point-like scattering centers inside it, called partons. The later recognition of these scattering centers as quarks led to the understanding of the proton as a bound state of quarks, confined by the strong interaction which is mediated by the exchange of gluons. The theory of Quantum Chromodynamics (QCD) describes these interactions, but its equations cannot be solved analytically to calculate the proton's properties. Our understanding of the proton's structure is therefore strongly reliant on its experimental study.

While a lot of progress has been made in the past 65 years, many of the fundamental questions remain: what is the composition of proton spin, how exactly is its mass generated from the almost-massless quarks, what is the nature of quark confinement into bound states, called hadrons? Understanding the distributions of quarks and gluons inside the proton helps to address these questions and thus provide a deeper understanding of the matter which makes up over 99% of the visible mass of the universe.

A number of experiments are currently underway at different accelerators around the world, but they are mainly focused on the lower centre-of-mass energies which scan the valence quark region of the proton: where three constituent quarks share the proton momentum equally among them. At higher centre-of-mass energies, however, it is possible to access the quark-gluon sea, where the proton instead appears to consist of quark anti-quark pairs of different flavors and a dense sea of gluons. This glue-dominated region has been largely unexplored in electron scattering but a new accelerator to study it with unprecedented precision will soon begin construction at Brookhaven National Lab in the USA: the Electron-Ion Collider (EIC) [1].

The EIC, expected to start operation in 2032, will collide polarised, high intensity electron beams with beams of polarised protons, light ions and unpolarised heavy nuclei. If the transfer of momentum in the interaction is high enough, the scattering takes place from a quark inside the proton and may result in the production of other particles: such as a high energy photon and/or meson (quark anti-quark pair). Reconstructing these interactions and measuring the distributions of the scattered and produced particles can give access to the spatial and momentum distributions of quarks inside the proton. In particular, certain processes are sensitive to Generalised Parton Distributions (GPDs), which can be interpreted as relating transverse spatial position of quarks to their longitudinal momentum [2]. These, in turn, provide information on the composition of proton spin and pressure distributions [3] inside it and can be used to build tomographic 3D images of proton structure [4]. At the energies accessible at the EIC, this will provide a mapping of the gluon-dominated region of the proton. The design of the detectors to enable these measurements is currently underway.

The internship project will take place in the Laboratoire de Structure du Nucléon (LSN) at the Institut de Recherche sur le Lois Fondamentales de l'Univers (IRFU). It will focus on the study of GPD-sensitive scattering processes at the EIC and on detector optimisation. Specifically, it will involve using computer programs to run simulations of the processes at EIC with different detector configurations and analyse, using statistical techniques, the simulated data in a mock-experiment. The project offers the candidate an opportunity to participate in the design of the detectors for the new collider and contribute to the evaluation of its physics potential.

Prior knowledge of special relativity and quantum mechanics is mandatory. Prior programming experience is an advantage, especially in C++ or Python. This internship is aimed at the master level or at a student from the Grande

---

Ecole d'Ingénieurs. Its duration can be adapted to the academic requirements of the candidate and can last from 3 to 6 months or longer. It may also lead to a PhD thesis.

[1] The Electron-Ion Collider Yellow Report (2021). Executive summary:  
[http://www.eicug.org/web/sites/default/files/EIC\\_YR\\_Summary\\_v1.0.pdf](http://www.eicug.org/web/sites/default/files/EIC_YR_Summary_v1.0.pdf)

[2] Garçon, M. "An introduction to the Generalized Parton Distributions". Eur. Phys. J. A 18, 389–394 (2003).

[3] Kumeri?ki, K. "Measurability of pressure inside the proton." Nature 570, E1–E2 (2019).

[4] Moutarde, H., Sznajder, P. & Wagner, J. "Border and skewness functions from a leading order fit to DVCS data." Eur. Phys. J. C 78, 890 (2018).

### **Keywords**

hadron physics, electron scattering, proton structure, quarks, gluons

### **Skills**

The project will involve using computer programs to run simulations of the processes at EIC with different detector configurations (GEANT4) and analyse, using statistical techniques, the simulated data in a mock-experiment (ROOT).

### **Softwares**

C++, Python