



## Tomographie du nucléon : le proton en 3D

**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 de stage se concentre sur l'analyse des données d'une expérience récente au Jefferson Laboratory (JLab) aux Etats-Unis, dans laquelle un faisceau d'électrons de 11 GeV a été diffusé sur une cible de protons. La mesure est sensible à la structure interne du proton en trois dimensions.

### 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. Ce thème de recherche fait l'objet d'expériences dans un certain nombre d'accélérateurs à travers le monde, dont JLab [1].

JLab abrite un accélérateur d'électrons de 12 GeV, à partir duquel le faisceau est tiré sur des cibles fixes dans quatre halls expérimentaux. 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].

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 la mesure d'un processus de diffusion sensible aux GPD à partir d'une analyse de données expérimentales récentes acquises dans le hall B de JLab, qui abrite le détecteur CLAS12. Plus précisément, il s'agira d'utiliser des programmes informatiques pour reconstruire des particules à partir de leurs traces dans les détecteurs, extraire des événements d'intérêt et analyser les distributions avec des applications de techniques statistiques. Il s'agira également d'exécuter et d'analyser des simulations informatiques de l'expérience. Le projet donnera au candidat une compréhension unique du fonctionnement des expériences modernes de physique nucléaire et hadronique, en lui présentant les étapes principales, depuis les traces dans un détecteur jusqu'à la mesure d'une quantité physique d'intérêt.

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] <https://www.jlab.org/research/science>

[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

## **Compétences**

Le projet s'agira d'utiliser des programmes informatiques pour reconstruire des particules à partir de leurs traces dans les détecteurs, extraire des événements d'intérêt et analyser les distributions (ROOT) avec des applications de techniques statistiques. Il s'agira également d'exécuter et d'analyser des simulations (GEANT4) informatiques de l'expérience.

## **Logiciels**

C++, Python.

---

## Nucleon tomography: the proton in 3D

### Summary

The internship project will focus on data analysis from a recent experiment at Jefferson Lab, in which an 11 GeV electron beam was scattered from a proton target. The measurement is 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. It is the focus of experiments at a number of accelerators around the world, including Jefferson Lab (JLab) in Virginia, USA [1].

JLab is home to a 12 GeV electron accelerator, from which the beam is fired at fixed targets in four experimental halls. 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 pairs). 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].

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 analysing data for a measurement of a GPD-sensitive scattering process from a recent experiment in Hall B of JLab, which houses the CLAS12 detector array. Specifically, it will involve using computer programs to reconstruct particles from hits in the detectors, extract events of interest and analyse the distributions with the applications of statistical techniques. It will also involve running and analysing computer simulations of the experiment. The project will give the candidate a unique understanding of the functioning of modern nuclear and hadron physics experiments, introducing them to the main stages, from hits in a detector to the measurement of a physics quantity of interest.

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] <https://www.jlab.org/research/science>

[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

## **Skills**

The project will involve using computer programs to reconstruct particles from hits in detectors, extract events of interest and analyse the distributions (ROOT) with the applications of statistical techniques. It will also involve running and analysing computer simulations (GEANT4) of the experiment.

## **Softwares**

C++, Python.