

Fonctions d'onde du cône de lumière et structure 3D du nucléon

Spécialité Physique théorique, mécanique quantique

Niveau d'étude Bac+5

Formation Master 2

Unité d'accueil [DPhN/LSN](#)

Candidature avant le 09/05/2021

Durée 3 mois

Poursuite possible en thèse oui

Contact [MEZRAG Cédric](#)

+33 1 69 08 87 19

cedric.mezrag@cea.fr

Résumé

Le but du stage est de comprendre comment est-ce que les fonctions d'onde de valence du nucléon (i.e. décrivant un nucléon composé de trois quarks habillés) génèrent la densité de présence 3D de quarks à l'intérieur du nucléon.

Sujet détaillé

L'étude expérimentale et théorique de la structure du nucléon en termes de ses composants élémentaires, les quarks et les gluons, est un axe de recherche au cœur des programmes expérimentaux actuellement menés au Jefferson Lab (États-Unis) ou au CERN. C'est l'une des justifications majeures de la construction d'un futur collisionneur électron-ion (EIC). Ce thème, au confluent de la relativité spéciale et de la mécanique quantique, bénéficie d'un cadre théorique bien établi (la Chromo-Dynamique Quantique, QCD), et de perspectives expérimentales bien définies. Les distributions généralisées des partons (GPDs) offrent une nouvelle perspective sur le nucléon : elles donnent accès, pour la première fois, à des informations tridimensionnelles complémentaires sur la structure du nucléon.

Outre la structure tridimensionnelle du nucléon, les GPDs encodent des informations supplémentaires, particulièrement pertinentes pour notre compréhension du nucléon. Elles sont par exemple liées au tenseur énergie-momentum, ce qui nous permet d'extraire la décomposition du spin du nucléon en termes de spins et de moment angulaire orbital de ses constituants, et également de calculer une carte 3D de la distribution de masse et de la distribution de charge. Les mécanismes à l'origine de ces propriétés émergentes du nucléon sont encore pour la plupart inconnus et sont activement explorés tant sur le plan théorique qu'expérimental.

Les GPDs sont accessibles grâce à certains processus exclusifs (toutes les particules à l'état final sont détectées) tels que la diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS) ou la production de méson profondément virtuelle (DVMP). En fait, la mesure de ces processus pour accéder aux GPD constitue une part importante des motivations scientifiques des installations expérimentales actuelles (Jefferson Lab, COMPASS@CERN...) et futures (collisionneur électron-ion américain). Cependant, en raison de la nature complexe des systèmes liés de QCD, aucun calcul *ab initio* n'a encore été effectué, ce qui empêche toute compréhension de la dynamique sous-jacente générant la structure 3D du nucléon. Un pont entre nos connaissances fondamentales de l'interaction des quarks et des gluons et la structure 3D des hadrons reste à construire.

Le stagiaire se concentrera sur la description des GPDs à l'aide des fonctions d'onde de front de lumière (LFWFs). Dans la théorie quantique des champs, les LFWFs jouent le même rôle que la fonction d'onde de Schrödinger en mécanique quantique non relativiste. Chaque LFWF a la particularité de décrire une fluctuation spécifique du nucléon en termes de nombre de constituants et de nombres quantiques. Dans le cas présent, nous nous concentrerons sur le plus petit nombre possible de constituants, c'est-à-dire trois quarks. Les LFWFs décrivant les états à trois quarks sont appelés LFWFs de valence. Elles sont au nombre de six et portent des quantités variables de moment angulaire orbital. Une telle approximation devrait être bonne dans le domaine cinématique de "valence", où les quarks transportent environ $1/3$ du moment cinétique du proton.

Les objectifs du stage sont les suivants :

1. comprendre comment les LFWFs de valence contribuent aux GPDs et, à travers eux, à la structure 3D des hadrons ;
2. évaluer l'impact de chacun d'eux, en utilisant un modèle algébrique simple.

En cas de succès, ces premières études permettront au candidat d'entamer un doctorat à l'automne 2021, avec déjà suffisamment de matériel scientifique pour produire un article.

Mots clés

Physique hadronique, QCD

Compétences

Théorie quantique des champs, chromodynamique quantique, recouvrement de fonction d'ondes, outils numériques.

Logiciels

Mathematica, C++

Lightfront Wave Functions studies of the 3D structure of the nucleon

Summary

The aim of the internship is to understand how the nucleon's valence wave functions (i.e. describing a nucleon composed of three dressed quarks) generate the 3D presence density of quarks inside the nucleon.

Full description

The experimental and theoretical study of the structure of the nucleon in terms of its elementary components, quarks and gluons, is a research focus at the heart of experimental programs currently being conducted at Jefferson Lab (US) or CERN. This is one of the major justifications for the construction of a future electron-ion collider (EIC). This theme, at the confluence of special relativity and quantum mechanics, benefits from a well-established theoretical framework (Quantum Chromo-Dynamics, QCD), and well-defined experimental perspectives. Generalized parton distributions (GPD) offer a new perspective on the nucleon: they provide access, for the first time, to complementary three-dimensional information on the nucleon structure.

On top of the 3D structure of the nucleon, GPDs encode additional pieces of information, particularly relevant for our understanding of the nucleon. They are for instance related to the energy-momentum tensor, allowing us to extract the decomposition of the nucleon spin in terms of the spins and orbital angular momentum of its constituents, and also to compute a 3D map of the mass distribution and of the charge distribution. The mechanisms behind these emergent properties of the nucleon are still mostly unknown and are actively explored both theoretically and experimentally.

GPDs are accessible through certain exclusive processes (all particles in the final state are detected) such as deeply virtual Compton scattering (DVCS) or deeply virtual meson production (DVMP). In fact, measuring these processes to access GPDs is a significant part of the physics case of current (Jefferson Lab, COMPASS@CERN...) and future (US electron-ion collider) experimental facilities. However, because of the complex nature of QCD-bounded systems, no ab-initio computation has been performed yet, precluding any understanding of the underlying dynamics generating the 3D structure of the nucleon. A bridge between our basic ideas of quarks and gluons interaction and the 3D structure of hadron remains to be built.

The internee will focus on the description of the GPDs using the so-called lightfront wave functions (LFWFs). In quantum field theory, the LFWFs plays the same role than the Schrödinger wave function in non-relativistic quantum mechanics. Each LFWF has the specificity to describe one specific fluctuation of the nucleon in terms of number of constituents and quantum numbers. In the present case, we will focus on the lowest possible number of constituents, i.e. three quarks. The LFWFs describing the three-quarks states are called the valence LFWFs. They are six of them, carrying various amount of orbital angular momentum. Such an approximation is expected to be good in the "valence" kinematical domain, where quarks carry roughly $1/3$ of the proton momentum.

The goals of the internship are:

1. understanding how the valence LFWFs contributes to the GPDs, and through them to the 3D structure of hadrons;
2. assessing the impact of each of them, using a simple algebraic model.

If successful, these first studies will allow the candidate to start a Ph.D. in autumn 2021, with already sufficient scientific material to produce a paper.

Keywords

Hadron Physics, QCD

Skills

Quantum field theory, Quantumchromodynamics, overlap of wave functions, numerical tools.

Softwares

Mathematica, C++