

# Doctorat de 3 ans à Subatech (France, Nantes) à partir de l'automne 2024 **Approche de systèmes quantiques ouverts pour le rayonnement de gluons induits par le milieu dans un milieu QCD dense**

Mots-clés : Plasma de quarks et de gluons, théorie, jets, systèmes quantiques ouverts

## 1 Contexte scientifique et motivations

En 2022, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN a entamé son troisième cycle d'exploitation, à une énergie de centre de masse de 13,6 TeV. Outre les études emblématiques du boson de Higgs et la recherche d'une nouvelle physique au-delà du modèle standard, un autre objectif de ce programme expérimental est l'étude du plasma de quarks et de gluons (QGP), une nouvelle phase de la matière nucléaire qui existe à haute température ou densité, et dans laquelle les quarks et les gluons sont déconfinés (alors qu'ils sont confinés à l'intérieur des hadrons dans des conditions normales). Cet état de la matière n'a existé que quelques microsecondes dans l'univers primitif et est aujourd'hui recréé en laboratoire dans des collisions noyau-noyau à haute énergie. Cependant, ce plasma n'a qu'une durée de vie très courte, de l'ordre de  $10 \text{ fermi}/c$  (environ  $10^{-23}$  secondes), avant de se refroidir et de s'hadroniser en une myriade de hadrons, qui sont finalement mesurés par les détecteurs. En pratique, il est très difficile d'extraire les propriétés de la phase éphémère du plasma à partir de la distribution mesurée des particules dans l'état final.

Pour sonder les propriétés du plasma quark-gluon, une classe d'observables très utile concerne la propagation des jets énergétiques. Un jet est une gerbe collimatée de particules générées par des embranchements successifs de partons, à partir d'un quark ou d'un gluon virtuel produit par la collision. Lorsqu'un tel jet est produit dans l'environnement dense d'une collision noyau-noyau, ses interactions avec le milieu environnant conduisent à une modification de ses propriétés, phénomène connu sous le nom de jet quenching. La QCD étant asymptotiquement libre, la grande énergie de ces objets permet de s'appuyer sur des techniques de QCD perturbative de premier principe pour calculer leurs propriétés physiques, qui sont bien comprises dans les collisions  $pp$  et peuvent donc servir de référence pour leurs modifications dans les collisions noyau-noyau.

Cependant, malgré de nombreux efforts théoriques au cours des dernières années, les extractions quantitatives des propriétés physiques de la PQG à partir des observables de la trempe du jet font toujours défaut, contrairement à l'extraction des coefficients de transport de la PQG à partir d'observables en vrac correspondant à des calculs hydrodynamiques. Cela est principalement dû aux grandes incertitudes théoriques dans la simulation de la désintégration d'une particule hautement virtuelle dans un milieu dense. Une particule hautement virtuelle produite dans le vide rayonne principalement des gluons doux et colinéaires (processus de Bremsstrahlung), mais ce phénomène est affecté par ses interactions avec les constituants du plasma et l'émission de gluons induits par le milieu. Comme ce processus est le fondement de toute l'évolution du jet, la réduction des incertitudes théoriques sur les observables du jet exige une compréhension précise des effets concurrents entre le Bremsstrahlung et les radiations induites par le milieu. . .

## 2 Objectifs et méthodologie

**Afin d'aborder la question de la réduction des incertitudes théoriques affectant les observables des jets, l'objectif général de cette thèse est de formuler le problème du rayonnement d'une particule virtuelle dans un milieu QCD dense dans une approche de système quantique ouvert.** Une telle formulation s'est avérée très fructueuse pour la propagation des quarks lourds dans le plasma quark-gluon, mais n'a jamais été envisagée jusqu'à présent pour un parton virtuel irradiant un jet. La méthodologie proposée est la suivante

1. *Établir l'équation d'évolution quantique (ou équation maîtresse) d'un quark ou d'un gluon hautement virtuel couplé à un grand système représentant le plasma dense de quarks et de gluons.*

Il faut d'abord reformuler le problème bien connu du spectre de rayonnement des partons à coquille dans un plasma de quarks et de gluons à l'aide de techniques de systèmes quantiques ouverts. Des formulations similaires existent déjà pour l'évolution des quarks lourds ou l'élargissement du moment transverse des particules à enveloppe. L'un des principaux défis consistera alors à mettre en œuvre la virtualité du parton en évolution dans ce cadre.

2. *Résoudre numériquement l'équation maîtresse quantique.*

À moins d'utiliser des modèles simplifiés de l'interaction entre le parton hors coquille et le milieu environnant, l'équation maîtresse quantique ne peut pas être résolue analytiquement. Un aspect important du projet de thèse consistera à écrire un code numérique pour résoudre cette équation et à le comparer aux approximations analytiques connues. Des techniques de pointe pour la résolution de l'équation de Linblad associée seront utilisées.

3. *Clarifier quantitativement l'interaction entre le Bremsstrahlung et les radiations induites par le milieu.*

En particulier, le résultat attendu du calcul est la détermination de l'espace des phases pour les émissions de Bremsstrahlung dans un milieu QCD dense avec une précision améliorée par rapport aux estimations paramétriques utilisées jusqu'à présent dans les générateurs d'événements de Monte-Carlo. L'ensemble du cadre développé par le doctorant peut ensuite être utilisé pour comparer les générateurs d'événements Monte-Carlo développés dans le groupe théorique de Subatech et réduire leurs incertitudes théoriques.

## 3 Le candidat ou la candidate

Nous recherchons principalement des personnes titulaires d'un master en physique théorique (nucléaire et/ou particules), formées à différents aspects de la CDQ et ayant déjà acquis des connaissances de base en physique numérique. Les candidat.e.s ayant une bonne connaissance des systèmes quantiques ouverts sont encouragé.e.s à postuler également, même en ayant une formation moins étendue en QCD. Outre les connaissances disciplinaires mentionnées ci-dessus, les compétences non techniques que nous attendons sont les suivantes : capacité à effectuer des tâches longues et complexes en mettant en œuvre des processus de contrôle, esprit d'initiative, imagination et curiosité.

## 4 L'encadrement doctoral et le contexte local

Le doctorat sera réalisé sous la supervision conjointe de Paul Caucal (caucal@subatech.in2p3.fr) et de Pol Bernard Gossiaux (gossiaux@subatech.in2p3.fr) qui peuvent être contactés pour plus d'informations et pour des questions sur le processus de candidature. Le doctorat se déroulera au sein du groupe théorique de Subatech<sup>1</sup> (actuellement 10 chercheurs permanents, 4 post docs, 6

doctorants). Subatech est une unité mixte de recherche composée de 3 organismes de recherche : CNRS-IN2P3, IMT-Atlantique

---

<sup>1</sup><http://www-subatech.in2p3.fr/fr/recherche/equipes/theorie/presentation>

et l'Université de Nantes. Le poste, d'une durée de 3 ans, sera financé par IMT-Atlantique<sup>2</sup> et rattaché à l'école doctorale 3MG.<sup>3</sup>

## **5 Le processus de recrutement**

Le processus de recrutement se déroulera de la mi-avril 2024 jusqu'à ce qu'un candidat adéquat ait été trouvé. Les premiers entretiens sont prévus début mai. Les dossiers de candidature doivent être déposés sur le site internet suivant : <https://theses.doctorat-bretagneloire.fr/3mg/campagne-2024>, onglet "Laboratoire de physique subatomique et des technologies associées". Le dossier de candidature doit contenir au minimum les documents suivants :

Un curriculum vitae

Une lettre de motivation décrivant votre projet professionnel en relation avec le sujet du doctorat.

Les relevés de notes de "Bac+3" à "Bac+5" ou équivalent (pour les résultats d'un Master ou équivalent, veuillez joindre les documents en votre possession).

Le dossier de candidature peut être complété par tout document jugé pertinent par le candidat. Les candidats sélectionnés pour l'entretien devront fournir deux lettres de recommandation, dont une du tuteur du stage de master.

---

<sup>2</sup><https://www.imt-atlantique.fr/fr>

<https://ed-3mg.doctorat-paysdelaloire.fr/><sup>3</sup>