

Les groupes « théorie » de SUBATECH (Nantes) et de l'Université de Catane ouvrent un poste pour une durée de 3 ans.

**Poste de doctorat en cotutelle sur "Production de saveurs lourdes dans les petits et grands systèmes hadroniques ultrarelativistes dans le cadre des systèmes quantiques ouverts".**

Le contexte : L'interprétation des données sur les collisions d'ions lourds ultra-relativistes (URHIC) recueillies au CERN (LHC) et au collisionneur RHIC est le centre d'intérêt du groupe de théorie des hautes énergies de Subatech et du groupe de Catane. On pense que dans ces collisions, un nouvel état de la matière est atteint, le plasma quark-gluon (QGP), où les quarks et les gluons habituellement confinés dans les protons et les neutrons sont déconfinés et libres de se propager sur de grandes distances pendant un court laps de temps avant de se refroidir et d'être transformés en matière hadronique habituelle. Nos deux groupes ont développé ces dernières années une expertise complémentaire sur la production de saveur lourde, sous la forme de hadrons ouverts de saveur lourde et de mésons de charme ou de beauté cachés, qui est l'une des sondes dures les plus pertinentes du QGP, mais aussi sur la modélisation globale des collisions, notamment avec le générateur d'événements EPOS4 du côté de Nantes (<https://klaus.pages.in2p3.fr/ePOS4/>), ce qui permet d'étudier la physique douce en corrélation avec la production de saveur lourde pour les petits et les grands systèmes. De son côté, Catane a apporté une contribution importante aux conséquences de la phase initiale de l'URHIC, où les champs électromagnétiques transitoires et l'interaction avec le Glasma (dominée par des champs de gluons forts) pourraient affecter la production de HF. Ils ont mis en œuvre un code simulant le stade précoce des collisions basé sur l'image de Glasma avec des conditions initiales réalistes pour les collisions AA et pA, ainsi que l'évolution des HF dans le stade précoce et dans le plasma de quarks et de gluons en vertu de la théorie cinétique relativiste dans le but de déterminer phénoménologiquement les coefficients de transport des HF. En particulier, ils ont également développé un schéma de hadronisation basé sur la fragmentation et la coalescence qui a permis de prédire avec succès l'augmentation des baryons par rapport aux mésons dans les collisions pp, pA et AA par rapport aux collisions  $e^+e^-$ ,  $e^-p$ .

L'un des mécanismes les plus intrigants associés à ce domaine de la physique est le processus de (re)hadronisation lui-même : comment les quarks émanant du QGP seront dynamiquement convertis en hadrons et quelles propriétés du QGP seront imprimées sur ces hadrons. Cette question est cruciale pour pouvoir interpréter la multitude de données mesurées par les expériences RHIC et LHC. Au cours des dernières années, nous (parmi d'autres chercheurs) avons commencé à étudier la faisabilité de l'hadronisation des quarks lourds (quarks c et b) avec leur partenaire antiquark - dans ce que l'on appelle un quarkona - en adoptant le point de vue et les concepts de ce que l'on appelle le "système quantique ouvert" (voir notamment les références [1-3]), qui semble être le cadre dynamique adéquat pour une telle situation. En particulier, nous avons pu traiter le cas quelque peu plus simple de la production de bottomonia au grand collisionneur de hadrons (LHC), où seule une paire beauté-antibéauté est considérée, avec des perspectives prometteuses. Plus récemment, nous avons étudié la question des systèmes quantiques ouverts en recourant à des équations de type Linblad agissant sur l'opérateur-densité, simplifiées en recourant à des approximations semi-classiques [4]. Cette approche pourrait être

tout à fait pertinente pour traiter la production de charmonia dans les collisions AA, un processus qui semble être dominé par la recombinaison de paires exogènes se produisant lorsque le QGP se refroidit, où les approximations semi-classiques peuvent être pertinentes. Ces méthodes pourraient également être appliquées à la recombinaison d'un quark lourd avec un antiquark léger afin de développer un schéma dynamique complétant l'image de coalescence instantanée [5] qui est l'approche la plus utilisée dans le domaine.

Le projet de thèse : Le projet de thèse visera à réaliser des développements théoriques dans le domaine de la production de saveurs lourdes dans les collisions URHIC en s'appuyant sur l'expertise des deux groupes, offrant une certaine flexibilité en fonction des compétences et des motivations du candidat. Une piste naturelle serait de poursuivre l'étude de la production de quarkonia dans les collisions URHIC en recourant aux concepts et méthodes des systèmes quantiques ouverts (OQS). En particulier, il s'agirait de concentrer les recherches sur le confinement dynamique Q-Qbar qui est restauré pendant le refroidissement du QGP, qui sera traité dans l'approche des systèmes quantiques ouverts, en prenant en compte les différentes étapes de l'évolution. Une autre opportunité consisterait à étendre la méthode pour aborder la question de l'hadronisation des quarks lourds en mésons de saveur ouverte (et en hadrons) afin de viser une description universelle,... Enfin, la combinaison des méthodes de l'OQS avec la production HF au stade initial de la collision peut permettre de gagner en précision et en prédictivité [6-7] et pourrait également être intéressante pour comparer l'image résultant d'un traitement basé sur l'OQS avec celle basée sur les simulations statistiques classiques du stade initial ainsi que sur les théories cinétiques relativistes effectives.

Outre les développements théoriques, une partie du doctorat devrait être consacrée à des études phénoménologiques sur l'URHIC étudié expérimentalement aux collisionneurs RHIC et LHC, dans les cadres numériques les plus appropriés (EPOS4, théorie cinétique effective relativiste, simulations classiques statistiques). Ces études pourraient être étendues au cas des collisions réalisées avec des noyaux de petite et de grande taille, étant donné que les propriétés du QGP qui en résultent dépendent de la taille du système.

Ce projet offre la possibilité de réaliser des progrès significatifs dans ce domaine hautement débattu qui consiste à sonder l'un des états de la matière les plus intrigants jamais découverts par l'humanité. Il aidera le candidat à développer des compétences à la fois dans le domaine de la physique nucléaire théorique et de la physique des particules, ainsi que dans celui de la physique statistique, tout en étant équilibré entre les développements théoriques et les investigations numériques en fonction des compétences du candidat. Il peut donc être considéré comme un véritable tremplin pour la future carrière du candidat.

Le candidat : Nous attendons du candidat une solide formation en physique théorique, en particulier sur les différents aspects de la QCD, ainsi que des connaissances de base en physique numérique. Les candidats ayant une bonne connaissance des systèmes quantiques ouverts sont encouragés à postuler également, même s'ils ont une formation moins étendue en QCD. Outre les connaissances disciplinaires, les compétences attendues sont les suivantes : capacité à réaliser des tâches longues et complexes en mettant en œuvre des processus de contrôle, esprit d'initiative, imagination, curiosité, capacité à travailler en équipe.

Il est important de noter que l'on attend du candidat qu'il passe généralement le même temps sur les sites de Catane et de Nantes au cours de son doctorat.

Les groupes : Le groupe théorique de SUBATECH est composé de 14 chercheurs seniors permanents (dont 9 orientés vers la physique des hautes énergies), 2 postdocs et 6 doctorants. De plus amples informations générales sont disponibles sur notre site web <http://www-subatech.in2p3.fr>. Le groupe théorique de l'université de Catane est composé de 9 chercheurs seniors permanents (dont 6 orientés vers la physique des hautes énergies), de 3 jeunes chercheurs, de 3 postdocs et de 4 étudiants en doctorat ; en outre, il a une collaboration directe avec des chercheurs de l'INFN.

Les directeurs de thèse : La thèse sera supervisée conjointement par les Professeurs P.- B. Gossiaux et J. Aichelin pour Nantes et par V. Greco et M. Ruggieri pour Catane.

### Références :

1. " The Schrödinger-Langevin equation with and without thermal fluctuations ", R. Katz and P.B. Gossiaux ; Annals Phys. 368 (2016) 267-295, arXiv:1504.08087
2. "Upsilon suppression in the Schrödinger-Langevin approach", Pol Bernard Gossiaux, Roland Katz ; Nucl.Phys. A956 (2016) 737-740
3. "Dynamical bottomonium-suppression in a realistic AA background ", P.B. Gossiaux et R. Katz, Journal of Physics : Conf. Series 779 (2017) 012041
4. "Quarkonium dynamics in the quantum Brownian regime with non-abelian quantum master equations ", Stéphane Delorme et al, <https://arxiv.org/abs/2402.04488>
5. Charmed Hadrons from Coalescence plus Fragmentation in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC and LHC , S. Plumari, V. Minissale, S. K. Das, G. Coci and V. Greco, Eur. Phys. J. C78, (2018) 348
6. "Diffusion of heavy quarks in the early stage of high-energy nuclear collisions at energies available at the BNL "Relativistic Heavy Ion Collider and at the CERN Large Hadron Collider", J. H. Liu, S. Plumari, S. K. Das, V. Greco and M. Ruggieri, Phys. Rev. C 102 (2020) 044902
7. " Impact of Glasma on heavy quark observables in nucleus-nucleus collisions at LHC ", Y. Sun, G. Coci, S.K. Das, S. Plumari, M. Ruggieri and V. Greco, Phys. Lett. B798 (2019)134933