

Le modèle de Curci-Ferrari et ses applications au diagramme de phase de la Chromodynamique Quantique

Malgré les nombreux succès de la Chromodynamique Quantique (QCD), certaines des propriétés fondamentales les plus fascinantes de la théorie des interactions fortes sont encore mal comprises. Le phénomène énigmatique du confinement, qui lie les quarks à l'intérieur des hadrons, ou encore la brisure spontanée de la symétrie chirale, analogue à un phénomène de condensation de paires quark-antiquark et responsable pour une part importante de la masse des nucléons, restent des questions ouvertes majeures. Par ailleurs, dans des situations extrêmes de température et/ou de densité, d'intérêt pour la physique de l'Univers primordial ou pour l'étude des propriétés de corps stellaires denses comme les étoiles à neutrons, on s'attend à ce que la QCD présente une, voire plusieurs transitions de phase, avec, par exemple, la formation d'un plasma de quarks et de gluons déconfinés et/ou une restauration de la symétrie chirale. La compréhension du diagramme de phase de la matière nucléaire est ainsi un sujet de recherche très actif, qui fait l'objet de nombreux projets expérimentaux d'envergure, comme les programmes de collisions d'ions lourds ultra-relativistes au RHIC à Brookhaven, au CERN (SPS, LHC) à Genève, ainsi qu'au futur accélérateur FAIR à Darmstadt.

La description théorique de ces phénomènes est compliquée par le fait qu'ils se produisent à des échelles d'énergie pour lesquelles les méthodes habituelles de la QCD perturbative sont inapplicables. Il faut alors avoir recours à des approches non-perturbatives comme la simulation numérique sur réseau ou des méthodes fonctionnelles avancées (équations de Schwinger-Dyson, groupe de renormalisation non-perturbatif, etc.). La QCD sur réseau permet une résolution numérique complète de la théorie mais ne peut s'appliquer à tous les cas, notamment pas au régime de haute densité. Les approches fonctionnelles, quant à elles, si elles permettent d'étudier ces régimes en principe, reposent sur des approximations qu'il est souvent difficile de contrôler complètement.

Dans une série d'articles récents, U. Reinosa (CPHT, Institut Polytechnique de Paris), J. Serreau (APC, Université de Paris) et M. Tissier (LPTMC, Sorbonne Universités), ainsi que M. Peláez et N. Wschebor (Université de Montevideo, Uruguay) ont mis au point une approche novatrice basée sur une extension massive de la QCD en jauge fixée permettant de décrire notamment le phénomène de brisure spontanée de la symétrie chirale à température nulle, et ce dans un développement contrôlé par des petits paramètres à toute échelle d'énergie [1]. Cette extension tire son origine d'une procédure de fixation de jauge nouvelle, proposée par Serreau et Tissier en 2012, qui vise à traiter correctement la question des ambiguïtés de Gribov. Couplée à la méthode dite du champ de fond, l'approche peut facilement être généralisée à température et densité finies et, de façon remarquable, un calcul à l'ordre le plus bas permet de reproduire la transition de déconfinement des théories purement gluoniques [2] (dites de Yang-Mills) ou encore d'une version de QCD où tous les quarks sont lourds [3]. Des corrections d'ordre supérieur ont également été calculées avec pour effet celui d'affiner la description [4], avec des températures de transition plus proches de celles prédites dans les simulations.

La thèse proposée vise à étendre ces études au cas de la QCD à température et densités finies. Des calculs préliminaires, bien que d'un niveau de sophistication moindre que ceux menés dans le cas de température nulle, donnent déjà une image qualitative du diagramme de phases, avec notamment la présence d'un point critique à densité finie [5]. L'enjeu sera ici de déterminer plus précisément la localisation de ce point critique, ce qui passe par l'implémentation exacte du développement en petits paramètres. Un autre enjeu sera celui de comprendre l'interaction entre les deux transitions en jeu à haute température, la transition de déconfinement d'une part, et

la restauration de la symétrie chirale d'autre part. A ce sujet, il sera important de reconsidérer la méthode du champ de fond. Des travaux récents indiquent en effet que la mise en œuvre habituelle de cette méthode introduit un biais à tout ordre de développement. Une nouvelle implémentation a été proposée afin d'éviter cet écueil [6] et devra être testée dans un premier temps dans des cas simples avant de l'appliquer au cas de QCD. Ceci permettra au doctorant de se familiariser avec la physique du plasma de quarks-gluons ainsi qu'avec les concepts et les méthodes de la théorie quantique des champs à température finie.

La thèse sera dirigée par U. Reinosa (CPHT – Institut Polytechnique de Paris) et J. Serreau (APC – Université de Paris). Le doctorant partagera son temps entre ces deux laboratoires. Il prendra également part à la collaboration forte déjà existante avec M. Tissier du (LPTMC – Sorbonne Universités), ainsi qu'avec M. Peláez et N. Wschebor (Université de Montevideo, Uruguay).

Références

- [1] M. Peláez, U. Reinosa, J. Serreau, M. Tissier and N. Wschebor, [arXiv :2106.04526 [hep-th]].
- [2] U. Reinosa, J. Serreau, M. Tissier and N. Wschebor, Phys. Lett. B **742**, 61-68 (2015).
- [3] U. Reinosa, J. Serreau and M. Tissier, Phys. Rev. D **92**, 025021 (2015).
- [4] U. Reinosa, J. Serreau, M. Tissier and N. Wschebor, Phys. Rev. D **93**, no.10, 105002 (2016).
- [5] J. Maelger, U. Reinosa and J. Serreau, Phys. Rev. D **101**, no.1, 014028 (2020).
- [6] D. M. van Egmond, U. Reinosa, J. Serreau and M. Tissier, [arXiv :2104.08974 [hep-ph]].