



Proposition de sujet de thèse, 2024

DÉTECTION DIRECTE DE MATIÈRE NOIRE PAR CONVERSION MAGNÉTIQUE D'AXIONS AVEC UN DÉTECTEUR HYPERFRÉQUENCE

Département de Physique des Particules, CEA/Université Paris-Saclay

Contexte théorique

Les interactions fortes, générées par la symétrie de jauge SU(3), sont décrites par la chromodynamique quantique (QCD). Inévitablement, le lagrangien de la QCD contient des termes qui violent la symétrie CP, ceci pour deux raisons. La première est que les interactions faibles ne conservent pas cette symétrie ; cela induit un effet similaire dans les interactions fortes *via* la matrice CKM. La seconde est que la structure topologique du vide QCD impose un terme qui n'est pas CP-invariant. Les mesures, elles, nous indiquent que les interactions fortes, et donc la QCD, respectent la symétrie CP avec un haut niveau de précision.

Tout se passe comme si deux paramètres n'ayant absolument aucun lien apparent entre eux (la violation de CP dans le secteur faible, et la topologie du groupe SU(3)) accordaient leurs valeurs de sorte que la différence soit nulle à au moins dix ordre de grandeur près. Il a été supposé dès 1977 qu'une nouvelle symétrie spontanément brisée à haute énergie pouvait être responsable de cet troublante coïncidence. En physique des particules, à une nouvelle symétrie peut être associée une nouvelle particule. La particule associée à cette symétrie hypothétique a été baptisée axion. L'existence de l'axion expliquerait donc la conservation de CP dans les interactions fortes. Cette particule est recherchée depuis, à la fois en laboratoire et dans les environnements astrophysiques ; elle échappe toujours à la détection. Les modèles d'axions sont assez prédictifs, en ce que la forme de son interaction avec le champ électromagnétique classique est donnée par le modèle. Ainsi, l'axion se couplerait à deux photons, avec une constante de couplage effective proportionnelle à sa masse. Dans la pratique, les recherches d'axions font intervenir un photon issu d'un champ magnétique intense, ou très étendu, alors que le second photon constitue le signal recherché.

Contexte observationnel

Les observations à toutes les échelles, des galaxies naines au rayon de Hubble, tendent à montrer qu'il existe dans l'univers une forme de matière inconnue, invisible et transparente, que l'on nomme communément matière noire. Non seulement nous ne connaissons pas sa nature, mais nous savons qu'elle ne peut pas être constituée d'éléments ou d'un assemblage d'éléments connus. Le problème de l'identification de la matière noire est une des questions les plus discutées en cosmologie et en physique des hautes énergies.

En plus de leurs liens avec la QCD, les axions pourraient constituer la matière noire, en partie ou en totalité. Ils seraient produits de façon non thermique, pendant une phase très primordiale de l'évolution de l'univers. Ainsi, malgré leur faible masse, ils peuvent être non relativistes, condition *sine qua non* pour déclencher la formation des structures de l'univers. Dans les modèles, imposer que les axions résolvent simultanément le problème CP de la QCD et celui de la masse manquante de l'univers conduit à préciser les valeurs de leurs paramètres libres. En particulier la masse de l'axion serait comprise entre 10 μeV et 1 meV , et la valeur de son couplage effectif aux photons serait plus ou moins fixée. Ceci présente un intérêt tout particulier pour les expérimentateurs, dans le sens où les axions constituent un modèle au coeur des problématiques les plus brûlantes de notre époque, qui de plus contient des prescriptions sur les paramètres à cibler.

Expérience et travail proposé

Dès lors que les objectifs en termes de couplage et de masse sont fixés, il est possible de concevoir des expériences dévolues. Au Département de Physique des Particules (DPhP) du CEA, nous bénéficions d'un financement du Conseil Européen pour la Recherche (ERC), nous permettant de construire un dispositif dont nous espérons qu'il pourrait convertir la matière noire présente autour de nous en photons potentiellement observables. À défaut d'une détection, nous pourrions publier des contraintes sur les paramètres de l'axion, lesquelles constituent des communications à très fort impact. L'expérience en cours de construction sur le site de Saclay consiste en l'utilisation d'aimants puissants, permettant la conversion des axions en une onde radio quasiment monochromatique dont la fréquence, qui dépend de la masse de l'axion pourrait être entre 2 GHz et 200 GHz. Les aimants utilisés seront des aimants permanent, opérés à 4 K dans une première phase, puis des supraconducteurs à haute température critique dans une seconde phase, également utilisés à 4 K. Ces convertisseurs d'axions seront placés face à un radiomètre permettant la recherche du signal d'axion, dont la signature spectrale est connue. Le dispositif expérimental consiste en un cryostat cylindrique de 2 m de diamètre et 5 m de long, refroidit à l'Hélium liquide. Il est en cours de construction dans un local expérimental situé sur le centre du CEA à Saclay, à côté des bureaux du Département de Physique des Particules.

Le/la doctorant.e intégrera l'équipe du projet au DPhP. Cette dernière est déjà constituée d'une dizaine de membres, ingénieurs, physiciens et techniciens appartenant aux DPhP, au Département Électronique, Détecteur et Instrumentation pour la Physique (DEDIP), au Département Accélérateurs, Cryogénie et Magnétisme, et au Département d'Ingénierie des Systèmes. Le travail proposé est essentiellement expérimental. La première partie consistera en la caractérisation du radiomètre, constitué d'une antenne cornet, d'une série d'amplificateurs bas bruit et d'un analyseur de spectre. Le premier objectif sera de pouvoir précisément calculer la sensibilité à un signal d'axion, et le niveau de contrainte qu'il sera possible de poser en l'absence de signal. Ce travail comportera majoritairement une partie hardware avec mise en place de bancs de tests cryogéniques, prises de données, et une partie traitement du signal et analyse de données. Il s'agira ensuite de travailler sur des améliorations et des optimisations au niveau de la chaîne d'amplification et de traitement du signal. La seconde partie du travail sera liée aux prises de données avec l'expérience complète, dont la construction sera aboutie pendant la période de la thèse. Les prises de données seront donc dédiées aux recherches directes d'axions, et à l'analyse des données correspondantes. Le/la doctorant.e participera donc aux deux phases de l'expérience complète, la première utilisant un convertisseur à aimants permanents, et la seconde bénéficiant de la mise en oeuvre d'aimants supraconducteurs à haute température critique.

Nous offrons une opportunité unique de participer à une expérience se construisant entièrement à Saclay, avec l'intégralité de l'équipe sur place. Il s'agit donc de la possibilité d'appréhender une expérience de physique de A à Z, de la construction à la publication, en passant par les toutes les étapes d'étalonnages, prises de données, analyses, et publication des résultats.

Formation et compétences requises

Un master 2 en physique des hautes énergies, astrophysique, physique théorique ou instrumentation est requis pour postuler à ce poste. Les compétences demandées sont variées, elles incluent : connaissances générales en physique, instrumentation, programmation, analyse de données. Il sera demandé un intérêt pour la physique expérimentale et une motivation importante à appréhender des domaines de la physique très variés, dans la mesure où l'expérience proposée aborde les techniques de télécommunication, le traitement du signal, le magnétisme, la physique des particules et la cosmologie, et l'analyse de données par des méthodes statistiques spécifiques.

Contacts

Pierre Brun, pierre.brun@cea.fr
Laurent Chevalier, laurent.chevalier@cea.fr