

GrAHal : un projet d'Haloscope à Grenoble pour détecter la Matière Noire axionique

Auteur principal :

Thierry Grenet
Institut Néel - CNRS - Grenoble
Thierry.grenet@neel.cnrs.fr
04 76 88 74 61

Co-auteurs expérience :

Rafik Ballou (Institut Néel – Grenoble)
Philippe Camus (Institut Néel – Grenoble)
Pierre Pognat (LNCMI – Grenoble)
Nicolas Roch (Institut Néel – Grenoble)
Stefen Krämer (LNCMI – Grenoble)

Co-auteurs théorie :

Christopher Smith (LPSC – Grenoble)
Jérémy Quevillon (LPSC – Grenoble)

Résumé

Que ce soit dans les domaines des champs/flux magnétiques intenses, des ultra-basses températures ou des amplificateurs supraconducteurs, le potentiel expérimental grenoblois offre une opportunité unique pour réaliser un haloscope permettant de sonder en laboratoire la possible présence de particules de matière noire de type Axion, avec une sensibilité sans précédent. Le projet GrAHal (Grenoble Axion Haloscope), issu d'une collaboration entre le LNCMI, l'Institut Néel et le LPSC, est en cours de développement. Il doit permettre de surpasser les expériences passées et récentes (UF, RBF, ADMX, HAYSTAC, ORGAN ...) et compléter au meilleur niveau celles en construction dans le monde (ADMX+, CULTASK, MADMAX...).

Motivation scientifique

L'axion est une particule hypothétique introduite [1] pour résoudre le problème CP fort. Théoriquement, l'interaction forte n'a aucune raison de respecter la symétrie CP. Pourtant, expérimentalement, une telle violation semble exclue par la non observation du moment dipolaire électrique du neutron [2]. Cette absence de signal est d'autant plus étonnante que selon Sakharov [3], la symétrie CP doit être brisée dans la nature pour expliquer l'asymétrie baryonique de l'univers, c'est-à-dire la prédominance de la matière sur l'antimatière. L'axion permet d'automatiquement rendre l'interaction forte symétrique sous CP, ce qui explique les mesures sur les moments dipolaires, et ce sans en interdire la violation par

d'autres interactions. Avec une masse comprise dans l'intervalle 1-1000 meV/c², l'axion est également un candidat sérieux pour constituer la matière noire, introduite pour expliquer entre autres les anomalies dynamiques de la plupart des galaxies et amas de galaxies qui ont été détectées dès les années '30 et abondamment confirmées depuis. De nombreuses expériences ont tenté de détecter l'axion, mais en vain jusqu'à présent. Une des difficultés majeures réside dans l'absence de prédiction théorique précise de sa masse, ce qui laisse un large domaine de l'espace des paramètres à explorer.

Notons que des extensions du modèle standard de la physique des particules prévoient également pléthore de particules de type axion (axion-like particles) et qu'un projet expérimental de recherche de l'axion devrait également contraindre ces théories et améliorer les domaines d'exclusions obtenus par d'autres expériences similaires ou complémentaires, comme par exemple OSQAR au CERN [4].

Dans ce cadre nous développons un projet de détection de la matière noire axionique à Grenoble, basé sur la technique de l'haloscope, qui est à ce jour la plus prometteuse pour mettre en évidence l'existence de l'axion QCD. Il s'agit du projet **GrAHal** (Grenoble Axion Haloscope).

Méthode de détection : Principe de l'haloscope

En 1983, P. Sikivie [5] a montré que si l'axion est le constituant majoritaire du halo de matière noire de notre galaxie, et sa masse comprise dans l'intervalle précité, alors il est possible de le détecter en utilisant sa conversion en photon radiofréquence (RF) en présence d'un champ magnétique statique intense. L'utilisation d'une cavité RF permet d'amplifier le signal en puissance qui s'écrit dans ce cas :

$$P = g_{A\gamma\gamma}^2 (\rho_{\text{halo}}/m_A) B^2 V C Q/2 \quad (1)$$

avec $g_{A\gamma\gamma}$ le couplage axion-diphoton, $\rho_{\text{halo}} \approx 450 \text{ MeV}/(c^2 \text{ cm}^3)$ la densité de matière noire, m_A la masse de l'axion, $B^2 V$ le carré du champ magnétique multiplié par le volume de la cavité, $C \approx 0.5$ le facteur de couplage du mode électromagnétique considéré et $Q \approx 10^5$ - 10^6 le facteur de qualité de la cavité. L'enjeu instrumental réside dans la faiblesse du signal attendu de l'ordre de 10^{-23} W par rapport à l'émission thermique de la cavité. Le rapport signal sur bruit peut sous certaines conditions s'approcher par la formule des radiomètres de Dick :

$$S/B = (P/k_B T_{\text{syst}})(\Delta t/\Delta f)^{1/2} \quad (2)$$

avec P la puissance détectée, k_B la constante de Boltzmann, $T_{\text{syst}} = T + T_N$, i.e. la somme de la température du détecteur et du bruit de l'amplificateur T_N , Δt le temps d'intégration et Δf la bande passante. S/B peut être maximisé en abaissant T_{syst} , ce qui implique de refroidir la cavité à ultra-basse température et d'utiliser des amplificateurs fonctionnant à la limite quantique du bruit voire en deçà.

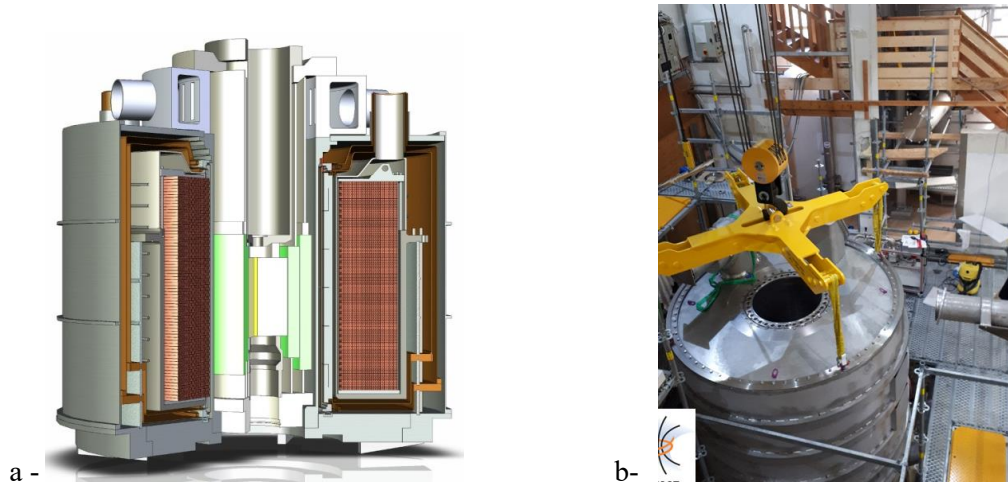
Les résultats les plus sensibles ont été obtenus à ce jour par l'expérience ADMX aux Etats-Unis [6]. Ce type de recherche a retrouvé un net regain d'intérêt récemment tout particulièrement du fait de l'absence de découverte de particule supersymétrique au LHC, dont l'une d'entre elles est un autre candidat sérieux à la matière noire.

Le projet GrAHal d'haloscope à Grenoble

Le projet GrAHal s'appuie sur le savoir-faire expérimental Grenoblois, reconnu à l'international, sur les quatre aspects clefs du projet [7] : 1/ Champs et flux magnétiques intenses, 2/ Ultra-basses températures, 3/ Détecteurs quantiques à ultra bas bruit et 4/ Expertise en physique des particules à ultrabasse énergie acquise avec l'expérience OSQAR au CERN [4].

1/ Les champs et flux magnétiques intenses fournis par le LNCMI et en particulier la nouvelle bobine

hybride modulable qui est en cours de montage, fournira des valeurs de B^2V inégalées, notamment dans la gamme des 9 T où le volume utile est un cylindre de 800 mm de diamètre sur 1.4 m de long, ainsi que des champs très élevés (au moins 43 Teslas) dans de plus petits volumes [8] (cf. Figure 1 ci-dessous).



*Figure 1 : a - Bobine hybride LNCMI 43T/34mm - 27T/120mm - 9T/800mm ;
b – photographie de l’installation en cours de montage (septembre 2019)*

2/ Les ultra-basses températures : Pour augmenter le rapport S/B (2) sur des temps d’intégrations raisonnables, il est nécessaire de refroidir l’ensemble de la (ou des) cavité(s) RF, ainsi que le premier étage d’amplification, aux plus basses températures possibles, idéalement au-dessous de 50 mK avec des réfrigérateurs à dilution. La réputation des équipes de l’Institut Néel n’est plus à faire dans le domaine de la conception et réalisation de système cryogéniques performants à très basse température et à forte puissance de refroidissement (voir par exemple [9]).

3/ Les détecteurs quantiques : Dans un premier étage d’amplification, il sera indispensable d’utiliser des amplificateurs paramétriques à base de jonctions Josephson (JPA) fonctionnant à la limite du bruit quantique. De tels amplificateurs sont actuellement développés à l’Institut Néel [10].

4/ L’expérience acquise depuis plus de 14 ans dans le domaine émergent de la physique des particules aux ultra-basses énergies avec l’expérience OSQAR au CERN (P. Pugnât, Initiateur, leader et porte-parole de la collaboration & R. Ballou, Membre de la collaboration), ainsi que **l’expertise du LPSC dans la physique de l’axion**, tant expérimentale (G. Pignol, D. Santos) que théorique avec J. Quevillon et C. Smith [11].

Déploiement du projet

GrAHal-1 : la première phase du projet démarre à l’automne 2019. Il s’agit d’explorer avec une sensibilité inédite la fenêtre de masse $m_a \geq 17 \mu\text{eV}/c^2$ (fréquence de cavité $f \geq 4\text{GHz}$). Les mesures vont être effectuées à très basse température ($T \leq 50\text{mK}$) sous un champ magnétique de 14 Teslas. L’ensemble des éléments de l’expérience (source de champ magnétique, cryostat à dilution et appareils de mesure) sont disponibles à l’Institut Néel (Figure 2).



Figure 2 : système de refroidissement à dilution qui va être utilisé pour la phase GrAHal-1.

Les premiers prototypes de cavités sont en cours de fabrication en septembre 2019, l'amplificateur quantique JPA va être fabriqué à l'Institut Néel. Comme le montre la figure 3 ci-dessous la sensibilité de GrAHal-1 dans cette gamme sera nettement supérieure à celle qui a été atteinte à ce jour au niveau mondial. Les premières prises de données sont prévues pour courant 2020.

GrAHal-2 : la seconde phase du projet visera un domaine de masse beaucoup plus large. La bobine hybride en cours de montage au LNCMI, dans ses différentes configurations de champ et de diamètre utile, offrira une source de champ magnétique unique au monde et permettra de concurrencer les meilleurs haloscopes en opération ou en construction dans le monde [7], [12]. Elle permettra de se placer dans n'importe quelle fenêtre du domaine de masse 1-100 $\mu\text{eV}/c^2$ et d'y effectuer des mesures suffisamment précises pour tester l'hypothèse de la matière noire axionique.

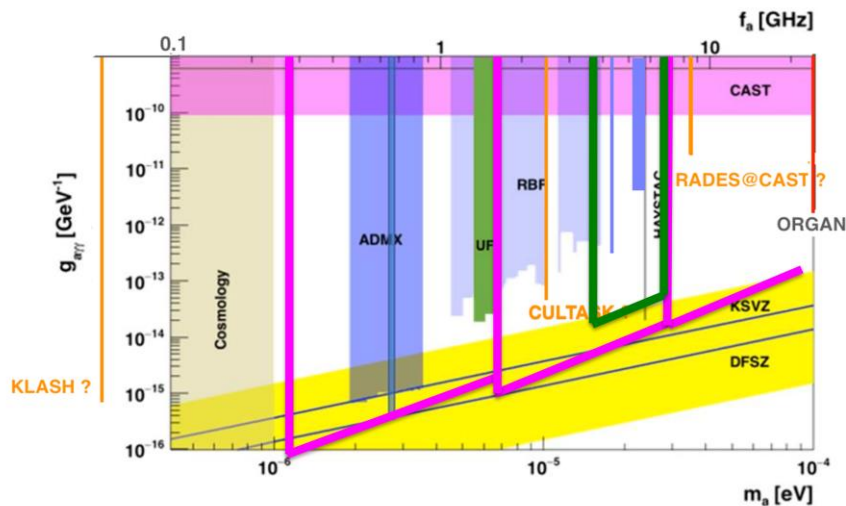


Figure 3 : Domaine de paramètres accessible à l'expérience GrAHal-1 (délimité par les traits verts, de 4 à 7 GHz), GrAHal-2 (délimités par les traits roses) et zones atteintes à ce jour par les autres haloscopes dans le monde (ADMX et ses précurseurs, HAYSTACK et ORGANA).

La bobine hybride est en phase finale d'assemblage (cf. Figure 1-b) et sera disponible au LNCMI courant 2021. La cryogénie et les cavités associées seront développées à Grenoble. Nous nous appuyerons sur les résultats acquis par GrAHal-1 pour financer ces développements.

Collaborations : Une collaboration avec le groupe Radio Fréquences du CERN est en discussions, en particulier avec Walter Venturini Delsolaro (BE-RF-SRF), ainsi qu'avec Fritz Casper maintenant à l'European Scientific Institute (ESI, Archamps, France). Enfin la formalisation d'une collaboration avec

l'équipe sud-coréenne du Prof. Y.K. Semertzidis (IBS/CAPP, KAIST) est en cours de discussions [13].

Le projet a été présenté au CERN dans le cadre du groupe de travail PBC (Physics Beyond Collider), pour être inscrit sur la nouvelle feuille de route de l'ESPP (European Strategy of Particle Physics). Des discussions sont également en cours pour soumettre ce projet à l'évaluation par le comité REC (Recognized Experiments Committee) et obtenir le statut d'expérience reconnue par le CERN.

Nota : GrAHal apparaîtra également dans la proposition plus générique concernant les « Axions et ALPs » que nous préparons pour le GT01 des perspectives.

Références

- [1] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **40**, 223 (1978); F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **40**, 279 (1978)
- [2] J. M. Pendlebury *et al.*, Phys. Rev. D **92**, 092003 (2015)
- [3] A. Sakharov, JETP Letters **5**, 24 (1967)
- [4] R. Ballou, P. Pugat *et al.* (OSQAR collaboration), Phys. Rev. D **92**, 092002 (2015) ; <https://arxiv.org/abs/1506.08082>
- [5] P. Sikivie, Phys. Rev. Lett, **51**, 1415 (1983); Phys. Rev. D **32** 2988 (1985)
- [6] <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-axions.pdf>
- [7] <https://indico.desy.de/indico/event/13889/contribution/11/material/slides/0.pdf>
- [8] P. Pugat *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, no. 3 (2018), 4300607; <https://snf.ieee-csc.org/sites/ieeesc.org/files/documents/snf/abstracts/hdrPugat-MT25-MoOr2-01.pdf>
- [9] E. Armengaud, P. Camus, *et al.* (Edelweiss collaboration), JCAP **05**, 019 (2016) ; P. A. R. Ade, *et al.* (Planck collaboration), Astronomy and astrophysics, **536**, A2 (2011); <https://arxiv.org/pdf/1101.2023.pdf>
- [10] N. Roch, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 147701 (2012); <https://arxiv.org/pdf/1907.10158.pdf>
- [11] <https://arxiv.org/pdf/1903.12559.pdf> (à paraître dans European Physical Journal C)
- [12] P. Pugat, R. Ballou, T. Grenet *et al.*, to be published; <https://bib-pubdb1.desy.de/record/395493/files/fulltext.pdf>
- [13] https://capp.ibs.re.kr/_prog/_board/common/download.php?code=capp_en_News&ntt_no=5166&atch_no=1