

> Les premières tentatives de mise en application de l'idée de Pierre Sikivie, comme l'expérience Rochester-Brookhaven-Fermilab et un projet à l'université de Floride, étaient vouées à l'échec du fait d'une sensibilité insuffisante. Elles ont néanmoins permis de développer le matériel utilisé depuis dans toutes les expériences portant sur les axions.

NAISSANCE D'UN PROGRAMME

À Chicago, avec Karl von Bibber, alors au laboratoire Lawrence Livermore, et avec David Tanner, de l'université de Floride, nous avons imaginé pousser plus loin ces premières expériences. Nous voulions d'abord construire une grande cavité où règne un champ magnétique intense pour augmenter la sensibilité. Il nous fallait ensuite de meilleurs amplificateurs de microondes : ils seraient la clé pour détecter le signal microonde extrêmement faible attendu des axions. Mais ceux disponibles à l'époque produisaient beaucoup trop de bruit. Nous rêvions d'amplificateurs limités uniquement par le bruit inévitable d'origine quantique. Mais ils n'existaient pas encore dans la gamme de fréquences qui nous intéressait.

C'est ainsi que le programme ADMX a vu le jour : nous commencerions avec un gros aimant, les meilleurs amplificateurs microondes disponibles et de l'hélium pour refroidir le dispositif à 4,2 kelvins afin de réduire le bruit. À moyen terme, nous nous concentrerions sur le développement d'amplificateurs microondes à limitation quantique. À long terme, nous ajouterions un «réfrigérateur à dilution», afin de refroidir la cavité et les amplificateurs à des températures d'environ 100 millikelvins, réduisant encore plus le bruit. C'était un programme ambitieux, dont chaque phase durerait une dizaine d'années.

En 1993, alors au MIT, nous avons mis sur pied une collaboration pour démarrer officiellement l'expérience. Le laboratoire Lawrence Livermore a fourni un gros aimant supraconducteur et le site de l'expérience. Notre collègue Wolfgang Stoeffl s'est chargé de la conception du système cryogénique initial, un dispositif que nous utilisons en grande partie encore aujourd'hui. David Tanner a conçu et développé les entrailles de l'expérience en s'inspirant du projet initial de l'université de Floride, et notre groupe du MIT a construit un détecteur de microondes ultrasensible. En 1998, nous avons publié les résultats initiaux de cette «phase zéro» d'ADMX, la première expérience sensible aux axions ayant une masse compatible avec le scénario de la matière noire. Nous n'avions pas trouvé ces particules si fugaces, mais nous partions sur de bonnes bases.

Pendant ce temps, nous avons continué à avancer dans la quête d'un amplificateur qui serait sensible au minuscule signal attendu des

axions. C'est à cette époque que j'ai assisté à une présentation de John Clarke, un spécialiste des dispositifs quantiques à l'université de Californie à Berkeley. Il travaillait sur des magnétomètres ultrasensibles, les squids (acronyme de *superconducting quantum-interference devices*), qui utilisent l'effet tunnel (un phénomène quantique par lequel une particule peut franchir une barrière de potentiel) et la supraconductivité (dans un matériau supraconducteur, la résistance électrique est nulle et le courant circule sans pertes). Si un photon passe à proximité d'un squid, son faible champ magnétique perturbe l'effet tunnel du détecteur de façon mesurable. Ces dispositifs sont extrêmement sensibles, mais ils n'existaient pas encore pour les signaux microondes. Grâce à une géométrie astucieuse, John Clarke a résolu le problème.

AVEC L'EXPÉRIENCE ADMX, NOUS SONDEONS DésORMAIS LES MASSES LES PLUS PLAUSIBLES POUR L'AXION

C'était prometteur, mais il restait des obstacles. Les minuscules champs magnétiques du squid allaient être perdus dans le champ plus intense régnant au sein de la cavité. Le département américain de l'Énergie, lors d'une évaluation de notre expérience, a souligné que l'utilisation des squids était «à haut risque». Nous avons décidé de diviser ADMX en deux phases : la «phase 1a» démontrerait que les squids fonctionnent correctement dans le fort champ magnétique de l'expérience. Une «phase 1b» ultérieure ajouterait alors le réfrigérateur à dilution dont nous avions besoin pour atteindre les basses températures requises.

Nous avons lancé la phase 1a en développant un système qui protège le squid du champ énorme régnant dans la cavité. Pour ce faire, nous avons utilisé une série de boucliers gigognes et d'aimants entourant le squid, destinée à annuler (ou «compenser») le champ magnétique principal. Au milieu des années 2000, nous avons démontré que le système fonctionnait, et nous avons commencé à travailler sur le réfrigérateur à dilution, le cœur de la phase 1b.

Le département américain de l'Énergie et la Fondation américaine pour la science (NSF) ont mené une vaste réflexion sur le développement de détecteurs de matière noire dits de deuxième génération et notés «Gen 2» ayant des sensibilités améliorées par rapport à celles

des expériences existantes. La plupart de leurs projets visaient les wimps, mais ils s'intéressaient aussi aux axions. Nos plans pour la phase 1b d'ADMX s'inséraient étroitement dans ce programme, et c'est ainsi que *ADMX Gen 2* est née.

L'expérience a été déplacée à l'université de Washington, à Seattle, sur un site plus moderne. Ainsi, *ADMX Gen 2* est entrée en service en 2016 et devrait durer jusqu'en 2021. Elle intègre le réfrigérateur à dilution qui, en diminuant le bruit, nous a fait gagner en sensibilité. Elle a plus que doublé le taux d'acquisition de données et l'ajout de nouveaux éléments a aussi contribué à améliorer la sensibilité de l'expérience. Le dispositif est en passe d'effectuer une recherche des axions pour des masses comprises entre 1 et 40 microélectronvolts.

En 2018, ADMX a publié un résultat intéressant. Jusque-là, l'expérience était capable d'exclure des axions de quelques microélectronvolts, mais elle n'était sensible qu'à des probabilités d'interaction de l'axion et du photon correspondant au modèle KSVZ, pour lequel le couplage de l'axion aux photons est 2,7 fois plus intense que dans le modèle DFSZ. Cependant, grâce aux améliorations du dispositif, pour la première fois, les chercheurs ont pu exclure des axions du modèle DFSZ pour des masses comprises entre 2,66 et 2,81 microélectronvolts. Cet intervalle de masse semble modeste, mais il illustre les capacités d'ADMX et nous encourage à poursuivre.

LE PROBLÈME DE LA MONTRE

L'expérience ADMX est constituée de nombreux systèmes complexes qui doivent fonctionner de concert, mais la plupart de ses éléments sont maintenant au point et leur fiabilité est confirmée. Au-delà de l'aspect technique de l'expérience, la collaboration a aussi connu des changements, elle s'est élargie et inclut désormais des physiciens de nombreux laboratoires et universités. Et une nouvelle équipe de direction d'ADMX a émergé, avec comme porte-parole Gray Rybka, de l'université de Washington, et Gianpaolo Carosi, du laboratoire Lawrence Livermore.

Nous sondons désormais la plage de masses les plus plausibles pour les axions candidats à la matière noire, mais la nature peut toujours nous surprendre. Rechercher dans une plage de masses légèrement plus faibles n'est pas très compliqué; en revanche, adapter notre expérience pour rechercher des masses supérieures reste un défi.

Quand la masse des axions augmente, la fréquence de résonance de la cavité doit aussi augmenter. Cela implique de diminuer le diamètre de la cavité, ce qui réduit d'autant le volume dans lequel on peut rechercher les axions. Nous ➤

LE DISPOSITIF ADMX

Si les axions sont partout autour de nous, l'expérience ADMX (*Axion Dark Matter eXperiment*) pourrait les mettre en évidence quand, exceptionnellement, l'un d'eux se désintègre en photon microonde. L'expérience met en jeu un champ magnétique intense et une cavité radiofréquence qui, quand elle est réglée sur la même fréquence que les photons produits, favoriserait leur transformation. En 2016, le projet est entré dans une nouvelle phase et a commencé sa recherche la plus sensible à ce jour.

AIMANT DE COMPENSATION

Cet aimant plus petit annule, ou « compense », le champ magnétique de l'aimant principal au voisinage de l'amplificateur à squid, qui doit détecter le minuscule champ magnétique dû aux photons.

AMPLIFICATEUR À SQUID

Ce magnétomètre utilise des effets quantiques pour détecter et amplifier le minuscule signal créé quand un axion se désintègre en un photon.

CAVITÉ À MICROONDES

Cœur de l'expérience, cette cavité vide de matière ordinaire est le lieu où les chercheurs s'attendent à ce que les axions ambiants, qui devraient être présents partout dans l'espace si ce sont bien eux qui constituent la matière noire, se transforment en photons microondes. L'axion interagit avec le champ magnétique de la cavité par l'intermédiaire d'un photon dit « virtuel » et se désintègre en un photon microonde.

AIMANT DE 8 TESLAS

L'aimant principal de l'expérience emplit la cavité d'un champ magnétique qui stimule la désintégration des axions en photons.

