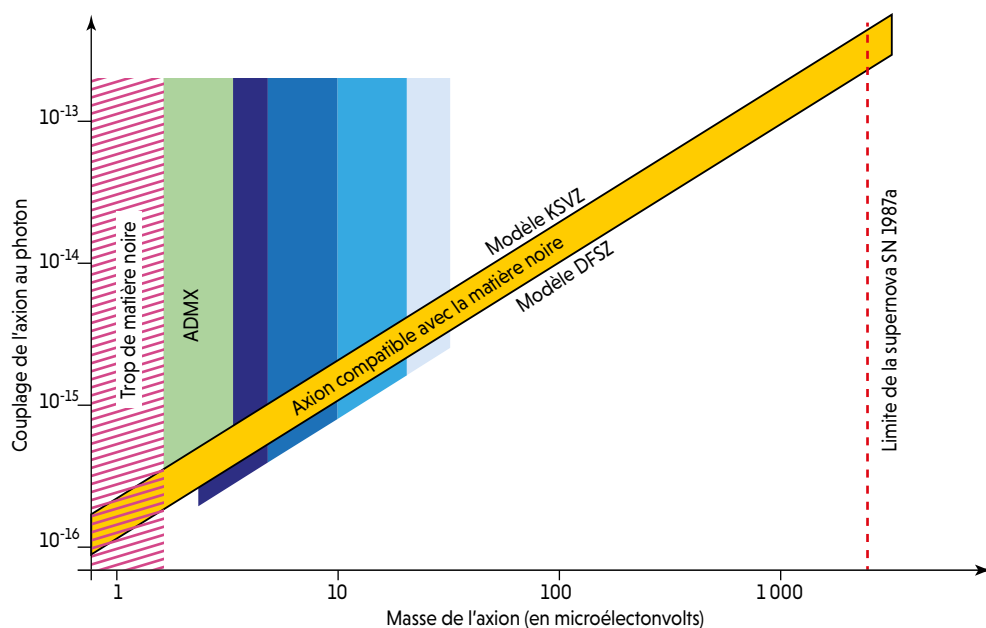




Dans leur recherche des axions, les physiciens synthétisent les diverses contraintes dans des graphiques représentant le couplage de l'axion au photon en fonction de la masse de l'axion. La zone colorée en jaune correspond aux conditions pour lesquelles l'axion est un bon candidat au titre de matière noire. Si la masse de l'axion est très faible, trop de ces particules sont produites durant le Big Bang et on obtient trop de matière noire. Au-delà de 1000 microélectronvolts, certaines observations astrophysiques, sur les supernovæ (en particulier celle de 1987, notée SN 1987a), restreignent aussi les caractéristiques de l'axion. L'expérience ADMX a déjà commencé à explorer une partie des masses possibles pour l'axion (en vert). Les futures améliorations permettront d'aller plus loin (dégradé de bleus).

> 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 alors développé des squids dédiés à cette application.

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». Mes collaborateurs et moi 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 avons 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 principal élément nécessaire pour la phase 1b.

L'EXPÉRIENCE ARRIVE À MATURITÉ

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 des projets qu'ils avaient en tête 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 sur cette voie.

Avec l'expérience ADMX, nous sondons désormais les masses les plus plausibles pour l'axion

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 la plus plausible 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 est un défi de taille.

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 pourrions entasser un grand nombre de cavités à l'intérieur d'un unique gros aimant pour conserver un volume appréciable, mais nous serions alors confrontés au «problème de la montre suisse»: la complexité d'un tel système devient très difficile à gérer. Nous

pourrions aussi nous contenter d'une petite cavité, à condition d'augmenter l'intensité du champ magnétique pour compenser. Cette solution est coûteuse, mais elle est actuellement à l'étude. Il est possible que d'ici cinq à dix ans, une intensité accrue du champ magnétique (jusqu'à 32, voire 40 teslas) élargira la plage des masses de notre recherche.

Pour des masses de l'axion beaucoup plus grandes (proches de un milliélectronvolt), les astrophysiciens auraient les moyens de contribuer à la traque. Si de tels axions existent et forment des halos de matière noire autour des galaxies, les radiotélescopes pourraient détecter des raies d'émission très faibles.

À terme, ADMX et d'autres projets parviendront à explorer l'intégralité de la fenêtre théorique des masses possibles de l'axion candidat à la matière noire. Le fait que la plage des masses plausibles soit limitée et entièrement accessible par des expériences fait de l'axion un candidat attrayant, par rapport à d'autres possibilités impossibles à tester complètement.

LA TRACE DES AXIONS DANS LA STRUCTURE DE L'UNIVERS?

Tandis que nos travaux expérimentaux se poursuivent, les théoriciens font eux aussi des progrès. Des modèles cosmologiques complexes simulés sur des supercalculateurs sont en passe de produire des prédictions plus fiables pour la masse de l'axion. Il est possible, par exemple, que les axions se soient accumulés au cours de l'histoire de l'Univers, sous l'effet de la gravité, selon une distribution différente de celle des wimps. Cela aurait des conséquences sur l'histoire de la formation des grandes structures cosmiques. Des programmes d'observations astrophysiques à venir, comme le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, grand télescope d'étude synoptique) qui sera opérationnel en 2019, établiront des cartes de la structure à grande échelle de l'Univers avec une précision suffisante pour permettre aux chercheurs de faire le tri entre les divers candidats à la matière noire.

Une autre possibilité encore est que les axions prédits par la chromodynamique quantique ne soient que la manifestation d'une théorie plus fondamentale œuvrant aux échelles énergétiques les plus hautes. L'une de ces théories en lice, la théorie des cordes, prédit des axions de masse beaucoup plus petite que celles qu'explore l'expérience ADMX. Mais la théorie des cordes est hautement spéculative, tout comme ses prédictions.

Il y a vingt ans, le consensus confortable était que la matière noire était constituée de wimps. Ces dernières années, les axions ont gagné en crédibilité. Dans un avenir pas trop lointain, nous devrions savoir si, oui ou non, ils sont la solution au mystère de la face invisible du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Du et al., **Search for invisible axion dark matter with the Axion Dark Matter Experiment**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, article 151301, 2018.

P. Sikivie, **Axions, domain walls, and the early Universe**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, pp. 1156-1159, 1982.

S. Weinberg, **A new light boson ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 223-226, 1978.

F. Wilczek, **Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 279-282, 1978.