

► l'existence de ces particules, les physiciens de l'université Stanford et d'ailleurs se sont mis à les rechercher dans les collisions des accélérateurs de particules. Mais les propriétés mêmes qui font de l'axion un candidat intéressant au titre de matière noire (ses faibles interactions avec la matière ordinaire et le rayonnement) signifiaient qu'il était insaisissable et que sa recherche semblait vaine. Il était frustrant de savoir que nous baignons peut-être dans un océan de particules impossibles à mettre en évidence en laboratoire.

C'est alors que Pierre Sikivie, de l'université de Floride, a eu l'idée salvatrice de changer d'approche : au lieu d'essayer de créer les axions dans des accélérateurs, nous pourrions tenter de détecter les axions cosmiques qui constituent le vaste océan omniprésent de matière noire dans lequel nous sommes plongés en permanence. L'idée de Pierre Sikivie était d'utiliser une cavité cylindrique vide de tout sauf des axions cosmiques censés inonder l'espace. Un champ magnétique intense régnant dans l'enceinte inciterait des axions à se transformer en photons, qui seraient faciles à détecter. Une telle réaction se produirait avec une probabilité d'autant plus grande que la fréquence de résonance de la cavité (qui dépend de ses dimensions, du matériau qui la compose, etc.) est proche de la fréquence du photon produit par l'axion.

Comme la masse des axions est petite, et que ceux qui sont proches de nous se déplacent à des vitesses comparables au reste de la Voie lactée, leur énergie est minuscule. Dès lors, la fréquence du photon produit se situerait dans la gamme des microondes. Mais pour la définir exactement, il faudrait connaître la masse de l'axion, ce qui n'est pas le cas. C'est pourquoi les expérimentateurs devront changer en permanence la fréquence résonante de la cavité expérimentale afin de « balayer » la plage possible, dans l'espoir de tomber sur la fréquence qui correspond à la masse de l'axion.

Le signal résultant serait très faible, peut-être 10^{-21} watt ou moins, et accompagné d'un bruit à peu près du même ordre de grandeur. Mais des détecteurs de microondes très sensibles, collectant un signal sur un temps assez long, devraient être à la hauteur de la tâche.

J'ai obtenu mon doctorat quand j'étais à l'université Stanford dans les années 1980, alors que l'influence d'Helen Quinn et de Roberto Peccei y était encore forte, et l'idée des axions m'a fait grande impression. Ils semblaient résoudre deux grands mystères de la physique : le problème CP fort et la question de la matière noire. Et d'après l'article de Pierre Sikivie, il existait peut-être un moyen de les détecter malgré tout.

Après ma thèse, j'ai eu le privilège, à l'université de Chicago, de travailler sous la

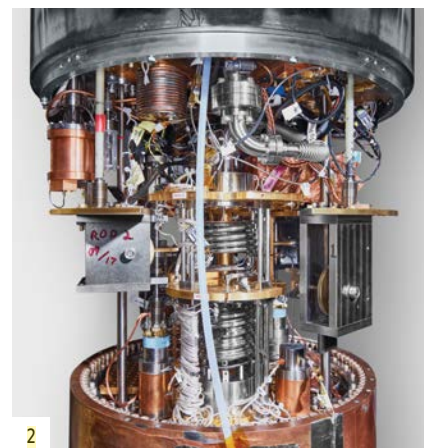


1

houlette de James Cronin (lauréat du prix Nobel en 1980 pour avoir mis en évidence, avec Val Fitch, la violation de la symétrie CP dans la désintégration de certaines particules). C'est là que j'ai pris connaissance des 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. Bien que toutes deux vouées à l'échec du fait d'une sensibilité insuffisante, elles ont permis de développer le matériel qui sert depuis à toutes les expériences portant sur les axions.

UNE GRANDE CAVITÉ, UN FORT CHAMP MAGNÉTIQUE...

Tandis que j'étais à Chicago, j'ai eu l'occasion de discuter régulièrement avec Karl von Bibber, alors au laboratoire Lawrence Livermore, et avec David Tanner, de l'université de Floride, et nous avons remarqué que nous pourrions 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 : ce sont eux qui seraient la clé pour détecter le signal microondes extrêmement faible attendu des axions. Mais les amplificateurs de microondes à transistors disponibles à l'époque produisaient beaucoup trop de bruit. Nous rêvions d'amplificateurs limités uniquement par le bruit inévitable



2

Les scientifiques installent des détecteurs dans le dispositif expérimental d'ADMX (1). La cavité entourée de cuivre est surmontée d'un réservoir d'hélium liquide et de l'électronique de l'expérience (2).

LE DISPOSITIF D'ADMX

Si les axions sont partout autour de nous, l'expérience ADMX (*Axion Dark Matter eXperiment*) pourrait les mettre en évidence quand, exceptionnellement, un axion se désintègre en un 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 par les axions, 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

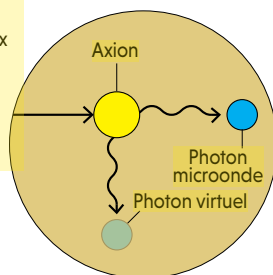
Cet aimant plus petit annule, ou « compense », le champ magnétique de l'aimant principal au voisinage de l'amplificateur à squid, qui doit détecter le minuscule champ magnétique dû aux photons.

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.

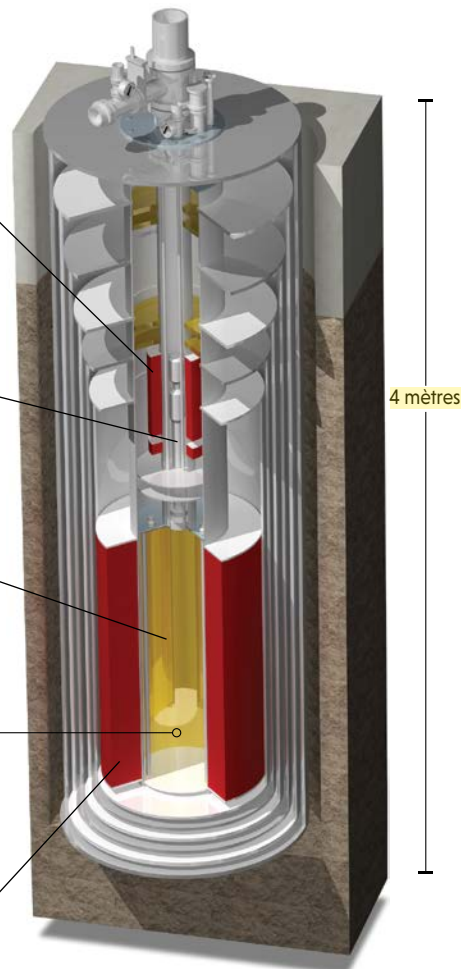
Cavité à microondes

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

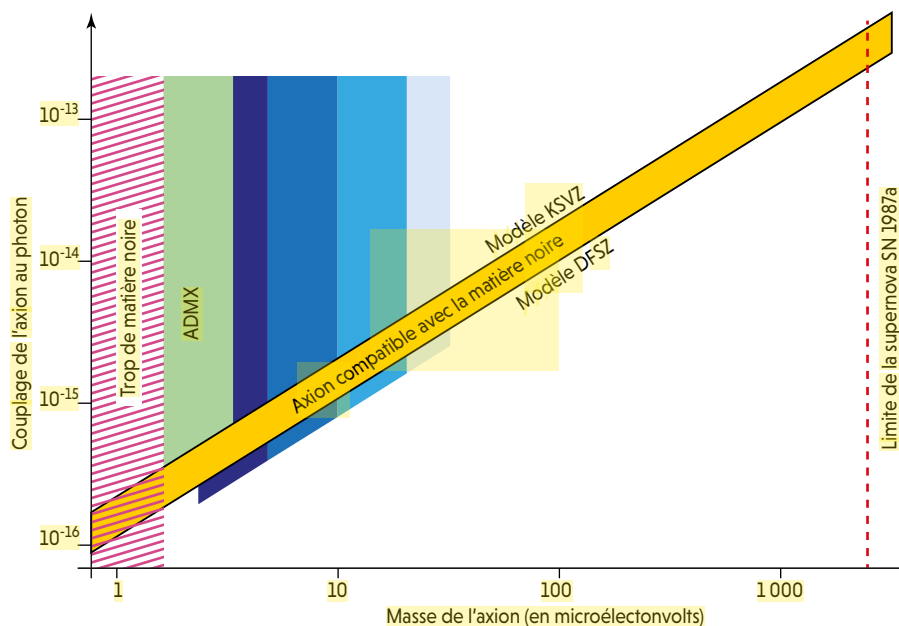
L'aimant principal de l'expérience emplit la cavité d'un champ magnétique qui stimule la désintégration des axions en photons.



d'origine quantique. Mais cela n'existait 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 », système qui refroidirait la cavité et les amplificateurs à des températures d'environ 100 millikelvins, ce qui réduirait encore plus le bruit. C'était un programme ambitieux, dont chaque phase durerait une dizaine d'années. Heureusement, nous avons le soutien de la division de la physique des hautes énergies du département américain de l'Énergie, et une vision porteuse.

En 1993, j'ai déménagé au MIT où j'étais nommé à un poste d'enseignant-chercheur. Avec mes collègues, nous avons alors 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'avons pas trouvé ces particules si fugaces, mais nous partions sur de bonnes bases. ➤



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