

- serait gravitationnel – leur masse cumulée serait assez importante pour expliquer le mouvement des étoiles dans les galaxies ainsi que celui des galaxies dans les amas.

Depuis plus de vingt ans, je participe à la recherche de ces particules dans le cadre de l'expérience ADMX (*Axion dark matter eXperiment*) dont le détecteur est sans cesse amélioré. Le dispositif est désormais assez sensible pour être en mesure, d'ici cinq à dix ans, de détecter des axions ou d'exclure les scénarios d'axions les plus plausibles. Mais en quoi consiste plus précisément ces axions ?

UN PROBLÈME DE CP

Dans les années 1980, l'idée des axions a été émise pour répondre à un problème soulevé par la chromodynamique quantique (QCD). La QCD est la théorie de l'interaction forte, qui assure la cohésion des composants du noyau atomique et du noyau lui-même. Les expériences de physique des particules sont en accord remarquable avec les prédictions de cette théorie, sauf en ce qui concerne le « problème de la violation de CP pour l'interaction forte » (CP signifiant « charge-parité »).

Selon la QCD, si vous inversez la charge et la parité d'une particule (c'est-à-dire si vous inversez sa charge électrique et si vous la regardez dans un miroir), elle ne suivrait plus exactement les mêmes lois physiques. Pourtant, rien dans les résultats expérimentaux n'indique que c'est le cas. Ce conflit entre la théorie et les expériences constitue une fissure dans le bel édifice du modèle standard, notre meilleur modèle de la physique des particules. Cette énigme est le « problème CP fort ».

En 1977, alors à l'université Stanford, Helen Quinn et Roberto Peccei se sont rendu compte qu'ils pouvaient aborder le problème CP fort de façon simple et élégante en utilisant l'idée des symétries brisées. Ce concept, l'une des idées récurrentes de la physique, se résume ainsi : les lois de la nature ne sont parfois pas invariantes lorsqu'on applique certaines opérations de symétrie, alors qu'on pense qu'elles devraient l'être. Par exemple, si vous posez un crayon verticalement sur sa pointe, la symétrie de rotation fait qu'il a autant de chances de tomber dans une direction que dans une autre. Mais le crayon finit par tomber dans une direction particulière, et la symétrie est donc « brisée ». Quand une telle brisure se produit dans le contexte de la physique des particules, elle implique l'existence d'une particule qui préserve d'une certaine façon la symétrie sous-jacente, même si elle semble, en surface, avoir été brisée. La symétrie n'est pas nécessairement évidente ; il peut s'agir d'une symétrie mathématique abstraite.

Avec une intuition brillante, Helen Quinn et Roberto Peccei ont appliqué cette idée à

l'interaction forte. Ils ont supposé qu'une symétrie cachée liée à cette force a été brisée. Si tel était le cas, cela annulerait les effets de la symétrie CP attendus par la théorie et que l'on n'observait pas dans les expériences. Problème résolu. Peu après, grâce à une autre intuition brillante, Steven Weinberg, à l'université du Texas à Austin, et Frank Wilczek, à l'institut de technologie du Massachusetts, ont remarqué que le mécanisme de Peccei-Quinn implique l'existence d'une nouvelle particule : l'axion. D'après une légende, ce nom reprend celui d'une marque de lessive parce que la particule fait disparaître la tache que constitue le problème CP fort. Dès le milieu des années 1980, les physiciens ont suggéré que des axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire.

La théorie ne nous renseigne pas sur la masse des axions ni sur leur probabilité d'interagir avec la matière ordinaire. Mais nous savons qu'ils doivent très peu interagir avec la matière ordinaire, parce que les collisionneurs de particules et d'autres expériences n'en ont

LE NOM D'AXION REPREND CELUI D'UNE LESSIVE PARCE QUE LA PARTICULE FAIT DISPARAÎTRE LA TACHE QUE CONSTITUE LE PROBLÈME CP FORT

encore jamais repéré. S'ils sont extrêmement inertes, la théorie indique qu'ils sont aussi extrêmement légers.

En 1987, un événement cosmique majeur a fourni aux physiciens des contraintes sur la masse de l'axion : la supernova qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine voisine de la nôtre. Presque toute l'énergie de l'effondrement gravitationnel de l'étoile sur elle-même s'est échappée sous forme de neutrinos, dont certains ont été détectés. Si les axions avaient une masse d'au moins quelques milliélectronvolts, en unités d'énergie (un peu plus d'un milliardième de la masse de l'électron), ils auraient été produits en grandes quantités lors de l'explosion et auraient modifié le temps mis par les neutrinos pour s'échapper de l'astre. Mais puisque

les observatoires et les détecteurs de neutrinos n'ont enregistré aucune distorsion de ce genre, nous savons que les axions doivent être de masse inférieure.

Des axions aussi légers ont des interactions extrêmement faibles avec la matière ordinaire et la lumière. Par exemple, une particule relativement banale, le pion neutre, est instable et se désintègre en deux photons en environ 10^{-16} seconde. Un axion léger pourrait subsister 10^{45} ans avant de se désintégrer en deux photons, une durée bien supérieure à l'âge de l'Univers (un écart d'environ 35 ordres de grandeur). L'axion serait, parmi toutes les particules connues, celle qui interagit le moins avec les autres (et de loin).

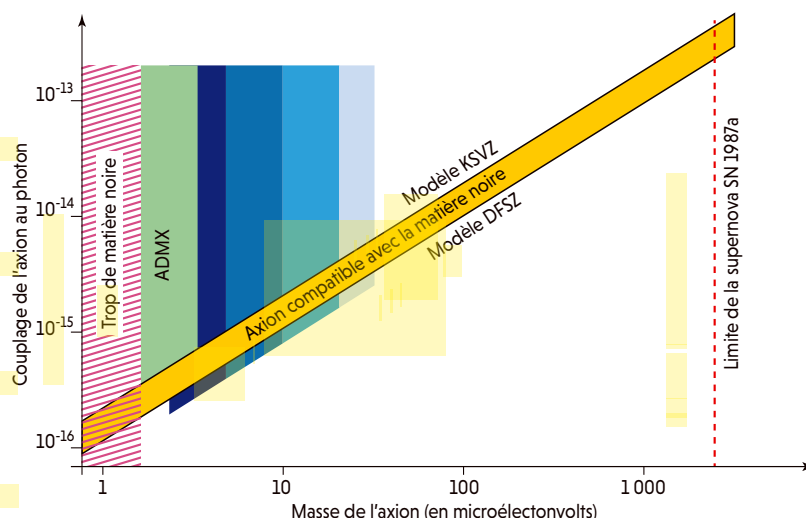
DES AXIONS INVISIBLES

Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions pendant le Big Bang montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité en axions qui en résulte est grande. Ainsi, pour des masses d'axions inférieures à un certain seuil, le Big Bang aurait produit beaucoup plus d'axions qu'il n'en faut pour rendre compte de la matière noire. Certes, d'importantes incertitudes pèsent sur le mécanisme de production des axions et les théoriciens ont proposé des astuces pour contourner le problème. Mais il est de plus en plus improbable que les axions aient une masse très inférieure à un microélectronvolt.

En résumé, les axions ne peuvent pas être trop lourds, sinon nous les aurions déjà détectés dans les collisionneurs de particules ou au travers de leurs effets sur l'évolution des autres étoiles. Et ils ne peuvent pas non plus être trop légers, sinon il y aurait trop de matière noire. On peut estimer que la plage raisonnable pour la masse de l'axion se situe entre un microélectronvolt et un milliélectronvolt.

Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky (DFSZ) du nom des physiciens qui les ont développés. Dans ces modèles, l'interaction des axions avec la matière est encore plus rare que dans le modèle initial. Ainsi, dans la gamme de masses des axions intéressante pour la matière noire, la probabilité d'interaction est si faible que l'on parle d'« axions invisibles ».

Alors comment détecter les axions ? Quand Helen Quinn et Roberto Peccei ont théorisé l'existence de ces particules, des physiciens se sont mis à les rechercher dans les collisions des



On synthétise les diverses contraintes pesant sur l'axion en 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 restreignent aussi les caractéristiques de l'axion. L'expérience ADMX explore une partie des masses possibles pour l'axion (en vert). Les futures améliorations permettront d'aller plus loin (en bleu).

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.

Pierre Sikivie, de l'université de Floride, a alors proposé de changer d'approche : au lieu d'essayer de créer les axions dans des accélérateurs, nous pourrions tenter de détecter les axions cosmiques. L'idée 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 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, des matériaux...) est proche de la fréquence du photon produit par l'axion.

Comme la masse des axions est petite, et que ceux qui environnent 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 faut connaître la masse de l'axion... 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. ➤

> 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