

de la surface du globe serait démesuré. Neutraliser une poignée d'espèces clés dans des zones particulières est ce que nous pouvons espérer de mieux.

Je pense que cet objectif est atteignable. Un tel scénario envisageable en Haïti, par exemple, serait de tuer les espèces qui transmettent le paludisme grâce à la technique des mâles stériles, tout en protégeant la population des autres moustiques vecteurs de maladies à l'aide de pièges placés dans les ouvertures d'aération ou des appâts sucrés. Il faudrait aussi suivre les patients humains et les populations de moustiques de façon préventive afin de détecter les signes de flambées épidémiques et de prendre immédiatement les mesures qui s'imposent pour les contrecarrer. Grâce à un éventail de stratégies de ce type, il n'est pas unimaginable d'assister à la disparition du parasite responsable du paludisme de l'île entière en l'espace de cinq ans.

DES RISQUES DE RÉSURGENCE

Même dans un tel scénario, il resterait le danger d'une réintroduction. L'histoire l'a montré: si un bateau rempli de personnes ou de moustiques infectés par le parasite accoste dans

BIBLIOGRAPHIE

G. Duvallet et al. (dir.), **Entomologie médicale et vétérinaire**, Quæ-IRD Éditions, 2017.

B. G. J. Knols et al., **Eave tubes for malaria control in Africa : An introduction**, *Malaria Journal*, vol. 15, article 404, 2016.

D. O. Carvalho, **Suppression of a field population of *Aedes aegypti* in Brazil by sustained release of transgenic male mosquitoes**, *PLoS Neglected Tropical Diseases*, vol. 9(7), article e0003864, 2015.

une zone où la maladie est absente, une épidémie peut se déclencher. Même si la maladie a disparu de nombreux pays où elle a été présente, il existe au moins 68 cas documentés de résurgence du paludisme, dans des régions où les mesures de lutte antivectorielle ont été réduites. Ce fut le cas en Inde lorsque les pulvérisations de DDT ont été interrompues à cause notamment de stocks insuffisants, ainsi qu'au Brésil dans les années 1980, où la dengue a refait son apparition, suivie plus récemment de la fièvre jaune, du chikungunya et de la fièvre Zika.

Jamais autant de moyens qu'aujourd'hui n'avaient été investis dans la lutte contre les moustiques. Au total, les fondations privées telles que la nôtre, les agences gouvernementales et l'OMS dépensent environ 500 millions d'euros chaque année pour des recherches sur le paludisme. En 2002, les dépenses annuelles ne dépassaient pas 20% de ce montant. Cependant, même si nous sommes aujourd'hui mieux armés pour combattre les moustiques, nous ne résoudrons jamais définitivement les problèmes. Comme pour d'autres risques de santé publique, le contrôle des populations de moustiques continuera d'exiger une vigilance de tous les instants. ■

**Commandez
votre reliure**
POUR LA
SCIENCE



BON DE COMMANDE

À retourner accompagné de votre règlement à :
Pour la Science – Service VPC
19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex
e-mail : pourlascience@abopress.fr

☒ OUI, je commande :

- ☐ 1 reliure *Pour la Science* au prix unitaire de 18,90 €*
- ☐ 2 reliures *Pour la Science* au prix de 37,80 €*
- ☐ 3 reliures *Pour la Science* au prix de 56,70 €*

Une reliure peut contenir 12 numéros.

***Les prix affichés incluent les frais de port.**

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
CEDEX 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311797393 – Siret: 31179739300023 – APE 5814 Z

1 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal [][][][][][] Ville :

Téléphone [][][][][][][][][][][][][][][][]

Mon e-mail :

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science
et de ses partenaires

☐ OUI ☐ NON
☐ OUI ☐ NON

2 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

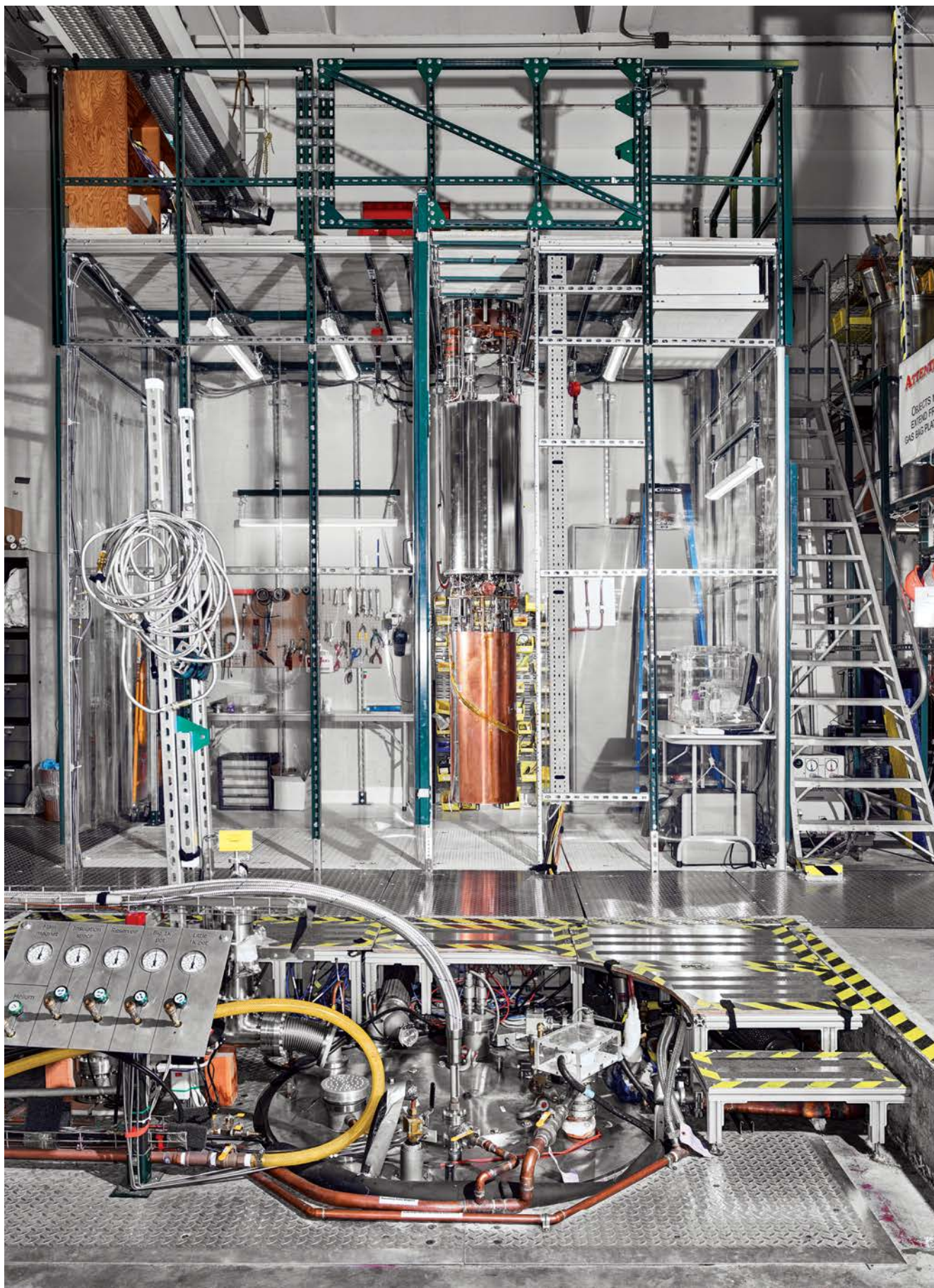
☐ Carte bancaire

N° [][][][][][][][][][][][][][][][]

Date d'expiration [][][][][][] Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) [][][]

Signature obligatoire :

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour l'export, merci de contacter le service VPC. Les prix affichés incluent les frais de port et frais logistiques. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science.



L'ESSENTIEL

> L'Univers contiendrait une grande part de particules invisibles, la « matière noire ». Celle-ci ne se manifesterait que par ses effets gravitationnels. Mais on ignore quelle est sa nature précise.

> L'axion désigne une particule hypothétique qui expliquerait la matière noire, et à laquelle

les physiciens s'intéressent de plus en plus. Son existence résoudrait aussi un problème lié à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques.

> L'expérience ADMX a récemment atteint un niveau de sensibilité suffisant pour tester les versions les plus plausibles des axions.

L'AUTEUR



LESLIE ROSENBERG
professeur de physique
à l'université de
Washington, à Seattle,
aux États-Unis

Matière noire

La cote de l'axion monte

Alors que le candidat favori pour expliquer la masse cachée de l'Univers est en perte de vitesse, celui qui porte le nom d'axion gagne en popularité. Dédiée à sa recherche, l'expérience ADMX a franchi une étape décisive : sa sensibilité lui permet désormais de traquer cette particule invisible.

Le cosmos est constitué en majeure partie de quelque chose que nous ne pouvons pas voir. Telle est la conclusion qui s'est peu à peu imposée aux astronomes à partir des années 1930. Les premiers indices sont venus de l'observation des amas de galaxies, dont la cohésion ne pouvait être assurée que par un supplément de matière qui échappait à la détection. Les scientifiques ont vraiment pris au sérieux l'idée de « matière noire » à partir des années 1970, quand les astronomes qui étudiaient la rotation des galaxies sont parvenus à la même conclusion. Les chercheurs ont rapidement compris que la matière noire n'est probablement pas constituée de matière ordinaire. Désormais, il est quasiment certain que plus de 90% de la matière qui s'aggrave sous l'effet de la gravité est un matériau exotique, probablement des particules vestiges du Big Bang et dont la nature reste à préciser.

Pendant longtemps, les physiciens avaient un candidat favori pour la matière noire : le wimp (acronyme de *Weakly Interacting Massive Particle*, particule massive interagissant faiblement), qui s'inscrit dans une théorie populaire mais spéculative, celle de la supersymétrie. Cependant, malgré une sensibilité toujours accrue, les expériences qui visaient à détecter les wimps n'en ont trouvé aucune trace au terme de plusieurs décennies de recherches. Il est trop tôt pour enterrer les wimps, mais ces résultats négatifs ont incité les physiciens à considérer d'autres candidats au titre de la matière noire.

L'un de ces candidats est l'axion, une particule hypothétique beaucoup moins massive que le wimp, mais qui interagirait aussi peu avec la matière ordinaire. Si la matière noire est effectivement constituée d'axions, il s'en trouverait partout en abondance : autour de vous, chaque centimètre cube en contiendrait des dizaines, voire des centaines de milliards. >

Le cœur de l'expérience ADMX est à l'abri dans une salle blanche (en arrière-plan), pour le protéger des poussières. Lors d'une prise de données, le dispositif est descendu dans un trou (ici recouvert et au premier plan) pour le protéger des perturbations extérieures.

> Leur seul effet sur le reste de l'Univers 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*). Et même si nous ne les avons pas encore trouvées, nous continuons d'améliorer notre détecteur. En 2016, ADMX a amorcé une nouvelle phase. Le dispositif est maintenant 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. Nous avons franchi un seuil important, et nous devrions avoir bientôt des nouvelles passionnantes, qu'elles aillent dans un sens ou dans l'autre.

DES AXIONS POUR RÉSOUDRE UN PROBLÈME DE LA QCD

Dans les années 1980, peu de temps avant le début de ma thèse, l'idée des axions avait été émise pour répondre à un problème soulevé par la QCD, la chromodynamique quantique. 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 présentent un accord remarquable avec les prédictions de cette théorie, sauf en ce qui concerne ce que l'on nomme le « problème de la violation de CP pour l'interaction forte » (CP signifiant « charge-parité »).

La QCD suggère que 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 énigme sérieuse, une fissure dans le bel édifice du modèle standard, notre meilleur modèle de la physique des particules. Cette fissure constitue le « problème CP fort ».

En 1977, alors qu'ils étaient tous deux 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 simplement ainsi : parfois les lois de la nature ne sont 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 que je qualifierais de 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, au MIT (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 le folklore de la physique, 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



Produits en nombre durant le Big Bang, les axions formeraient la matière noire



savons qu'ils doivent très peu interagir avec la matière ordinaire, parce que les collisionneurs de particules et d'autres expériences n'en ont encore jamais mis en évidence. 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 atteint les détecteurs ici sur (ou plutôt sous) Terre. 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 (par près de 35 ordres de grandeur). L'axion serait, parmi toutes les particules connues, celle qui interagit le moins avec les autres (et de loin).

TROP DE MATIÈRE NOIRE SI L'AXION EST TRÈS LÉGER

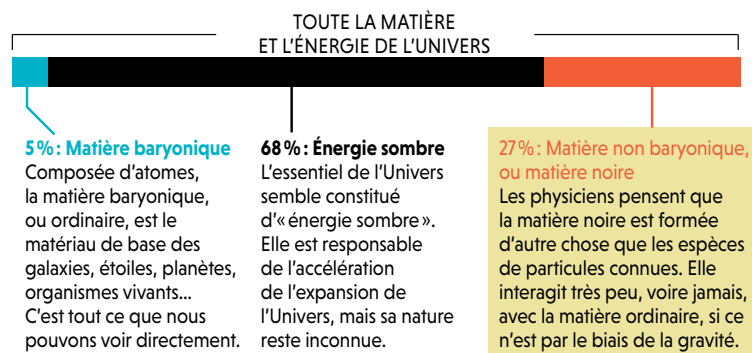
Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions aux débuts de l'Univers, pendant le Big Bang, montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité 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, à mon avis, il est de plus en plus improbable que les axions aient une masse inférieure de beaucoup 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. Déterminer ces contraintes de masse avec précision est très compliqué, mais on peut estimer que la plage raisonnable pour la masse de l'axion se situe entre un microélectronvolt et un milliélectronvolt.

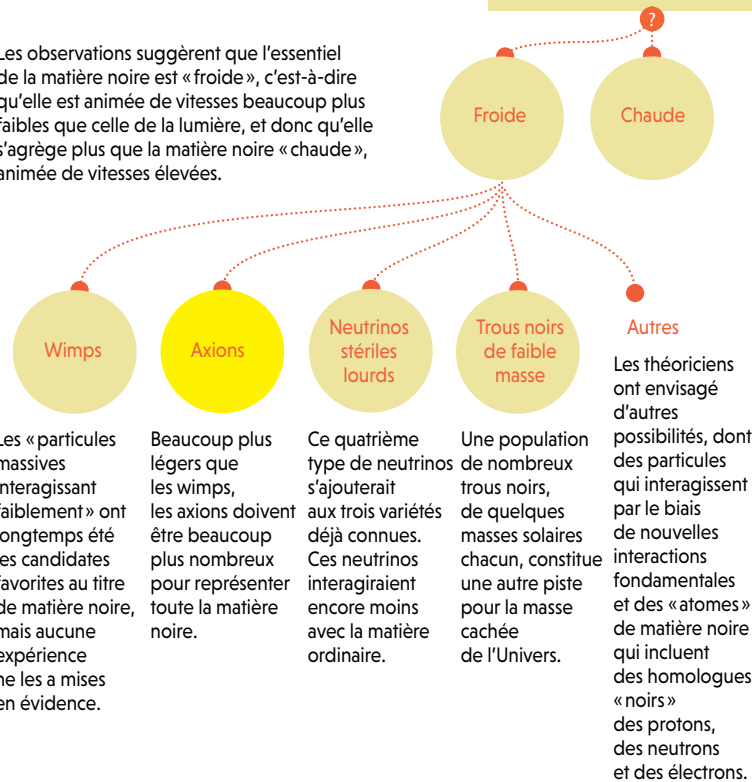
Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky

PLUSIEURS HYPOTHÈSES POUR LA MATIÈRE NOIRE

Dans l'Univers, une entité invisible semble exercer une attraction gravitationnelle sur la matière ordinaire dont sont constitués les galaxies et les amas de galaxies. Mais quelle est sa nature ? Les physiciens ont développé plusieurs théories pour expliquer de quoi est faite cette « matière noire », qui représenterait plus d'un quart du contenu de l'Univers en masse et en énergie.



Les observations suggèrent que l'essentiel de la matière noire est « froide », c'est-à-dire qu'elle est animée de vitesses beaucoup plus faibles que celle de la lumière, et donc qu'elle s'aggrave plus que la matière noire « chaude », animée de vitesses élevées.



(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 de « axions invisibles ».

Alors comment détecter les axions ? Quand Helen Quinn et Roberto Peccei ont théorisé >

► 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

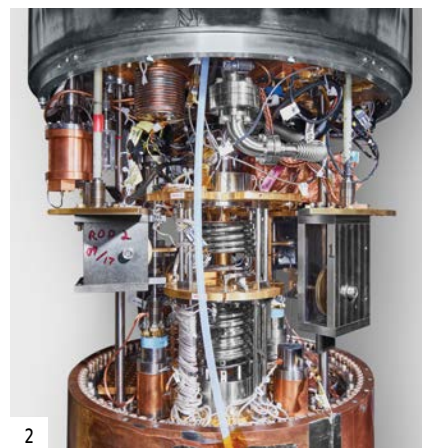


1

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

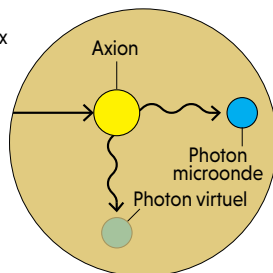
Cet aimant plus petit annule, ou «compense», le champ magnétique de l'aimant principal au voisinage de l'amplificateur à squid, qui doit détecter le minuscule champ magnétique dû aux photons.

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.

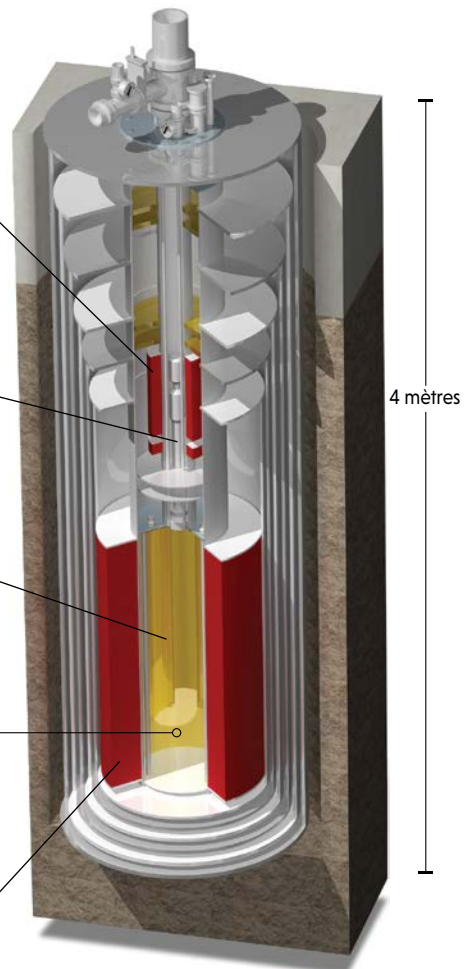
Cavité à microondes

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 Stoefl 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. ➤



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.

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

Nous avons lancé la phase 1a en développant un système qui protège le squid du champ

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.

Bientôt des mines

L'ESSENTIEL

> La demande en certains métaux augmente et les gisements terrestres s'épuisent, d'où l'idée d'exploiter ceux des grands fonds marins.

> À plus de 4 000 mètres de profondeur, sur le fond des océans, il existe d'immenses champs de nodules polymétalliques contenant des proportions importantes de nickel, de cuivre et de cobalt.

> L'utilisation de machines pour les ramasser disperserait des masses de sédiments en tous sens. Les navires d'exploitation feraient de même en surface après avoir trié le matériel dragué.

> Dès lors, avant que ne démarre cette nouvelle activité industrielle, il importe d'étudier comment minimiser son impact environnemental.

LES AUTEURS



THOMAS PEACOCK
professeur de génie
mécanique à l'institut
de technologie du
Massachusetts (MIT),
aux États-Unis



MATTHEW H. ALFORD
professeur
d'océanographie
physique
à l'institut Scripps,
aux États-Unis

Les grands fonds océaniques comportent de riches gisements de métaux. Mais leur exploitation, qui pourrait démarrer prochainement, aura des impacts environnementaux négatifs. Scientifiques et organismes régulateurs recherchent des solutions pour limiter les dégâts.

Février 2018, à 50 kilomètres au large de San Diego. Le navire océanographique *Sally Ride* flotte sur 1 000 mètres d'eau. À son bord, huit conteneurs grands comme une voiture familiale sont remplis de sédiments dragués au fond du Pacifique. Nous sommes en train de les mélanger avec de l'eau de mer dans un énorme réservoir. Puis nous ferons passer le contenu par une conduite d'évacuation plongeant depuis notre

bord jusqu'à 60 mètres sous la surface. L'objectif est de décrire la dynamique du nuage de boue créé. À l'aide de tout un réseau de capteurs reliés au navire, nous allons mesurer sa forme et suivre son évolution; nous mesurerons la concentration des particules de sédiment dans la colonne d'eau. Les données recueillies nous aideront à nourrir une réflexion générale sur l'exploitation minière en mer, une nouvelle industrie qui pourrait bientôt avoir un impact important sur l'océan. >