



On a cru un temps que le télescope spatial *XMM-Newton* avait détecté de la matière noire via la désintégration de particules la composant. Mais non.

matière noire sont sans doute dotées d'une vitesse faible, on s'attend que leur annihilation mutuelle donne naissance à des photons situés dans une bande d'énergie relativement étroite. C'est à la recherche d'une sorte de raie d'émission plus ou moins marquée que se consacrent de nombreux astrophysiciens, mais là encore, la difficulté est d'extraire un signal de matière noire du «bruit» de haute énergie produit par des processus astrophysiques bien plus conventionnels.

On s'attend que le signal dû à de la matière noire soit relativement homogène en direction du centre galactique, puisque la distribution de matière noire a des chances de l'être également. À l'inverse, une origine astrophysique de photons de haute énergie serait plus probablement un ensemble de sources individualisées comme les pulsars. Distinguer entre ces deux hypothèses nécessite donc de pouvoir cartographier un éventuel excès de photons de haute

énergie avec une bonne résolution angulaire, mais malheureusement les télescopes qui pourraient convenir comptent parmi les plus myopes qui soient, même pour le plus performant d'entre eux, le télescope spatial américain *Fermi*. La recherche d'un excès de photons de haute énergie est à ce jour elle aussi une succession d'espoirs plus ou moins lucides douchés les uns après les autres. Depuis le début des années 2010, plusieurs annonces ont été faites, principalement par l'américain Dan Hooper. Si sa première annonce fut accueillie avec un prudent enthousiasme, son invalidation, suivie de plusieurs autres annonces toutes aussi infondées ont peu à peu convaincu la communauté que Dan Hooper ne voyait probablement que ce qu'il avait envie de voir.

PLUSIEURS ESPOIRS DOUCHÉS

Plus récemment, un autre résultat a été obtenu dans une bande d'énergie jusque-là assez peu explorée, dans le domaine du kiloelectronvolt. Là encore un possible excès à une énergie précise (3,5 keV) avait, pensait-on, été détecté par plusieurs télescopes X, l'europpéen *XMM-Newton* puis le japonais *Hitomi*, entre 2014 et 2016. Était-ce dû à des particules de matière noire de faible masse ou bien à des processus atomiques faisant intervenir du phosphore, du soufre ou du chlore fortement ionisés? Les analyses ont depuis tranché... pas de matière noire.

Qu'en est-il des potentielles paires particule-antiparticule nées de la collision entre deux particules de matière noire? Là encore, n'oublions pas que de l'antimatière peut être produite en faibles quantités par des processus conventionnels. Comme pour la détection de photons énergétiques, celle de l'antimatière ne peut se faire que dans l'espace. En quelques occasions, avec le détecteur PAMELA puis plus récemment avec l'expérience AMS, un début de semblant d'excès d'antimatière sembla se manifester, mais l'information ne fut pas plus confirmée que les autres.

Que penser de tous ces résultats négatifs? Du temps où les wimps apparaissaient, de loin, comme le candidat le plus prometteur, chercher la matière noire s'apparentait à chercher une aiguille dans une botte de foin. Avec la diversification des candidats et des méthodes de détection, il s'agit désormais de chercher une aiguille dans plusieurs bottes de foin, et sans avoir d'idée précise sur la forme, la taille, la composition et la couleur de l'aiguille... et sans même savoir s'il y en a vraiment une à trouver. Une quête vaine et sans espoir? L'optimisme est certainement moins de mise qu'il y a dix ou quinze ans. Que ce soit là un simple passage à vide ou les prémices de l'abandon d'une quête trop ardue pour notre époque reste une question ouverte. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. POUNDS ET AL., An ultrafast inflow in the luminous Seyfert PG1211+143, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 481(2), pp. 1832-1838, 2018.

L'ESSENTIEL

● Parmi les candidats à la «matière noire», ce composant invisible de l'Univers, l'axion est une particule hypothétique 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 tente de détecter cet axion *via* les photons microondes issus de leur désintégration.

● Ce dispositif a récemment atteint un niveau de sensibilité suffisant pour tester les versions les plus plausibles des axions.

L'AUTEUR



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

L'axion, une idée qui a la cote

Imagines pour résoudre un conflit entre la théorie et les expériences en physique des particules, les axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire. Reste à les détecter. C'est le sens de l'expérience ADMX, dont la sensibilité permet désormais de traquer ces particules invisibles.

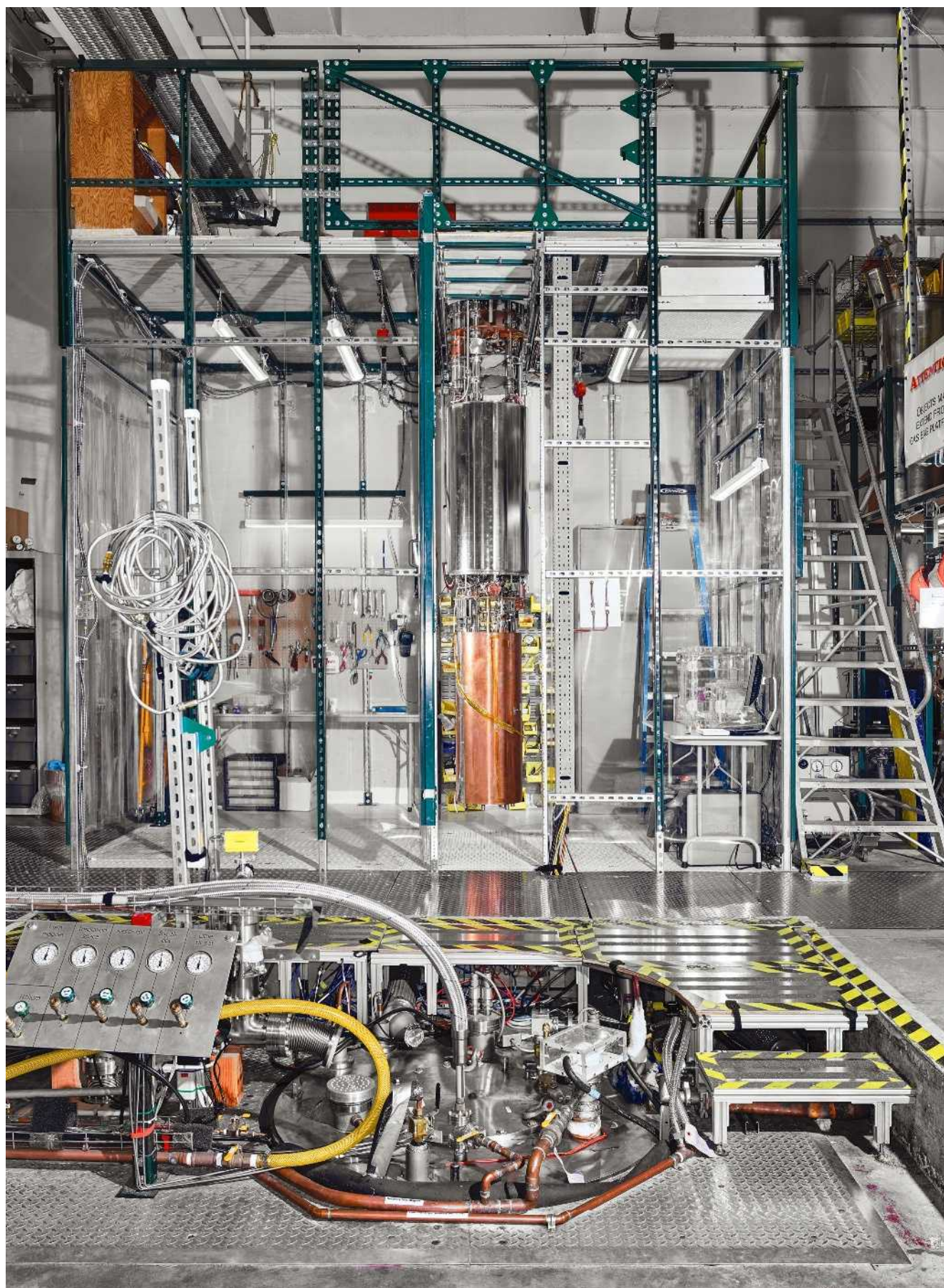
Le cosmos est constitué en majeure partie de quelque chose que nous ne pouvons pas voir. Telle est la conclusion qui s'est imposée aux astronomes depuis les années 1930 et les premières observations d'amas de galaxies dont la cohésion ne pouvait être assurée que par un supplément de matière qui échappait à la détection. L'idée de «matière noire» s'est renforcée à partir des années 1970, quand les astronomes qui étudiaient la rotation des galaxies sont parvenus à la même conclusion.

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, au terme de plusieurs décennies de recherche aucune trace de ces wimps n'a été trouvée. 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 d'eux 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, nous baignerions dans un océan de ces particules à raison de dizaines, voire de centaines de billions par centimètre cube. Leur seul effet sur le reste de l'Univers >

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.



➤ 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