

> 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

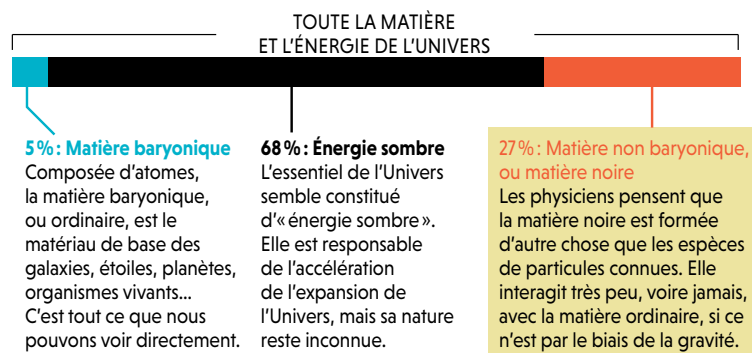
Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions aux débuts de l'Univers, pendant le Big Bang, montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité 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.

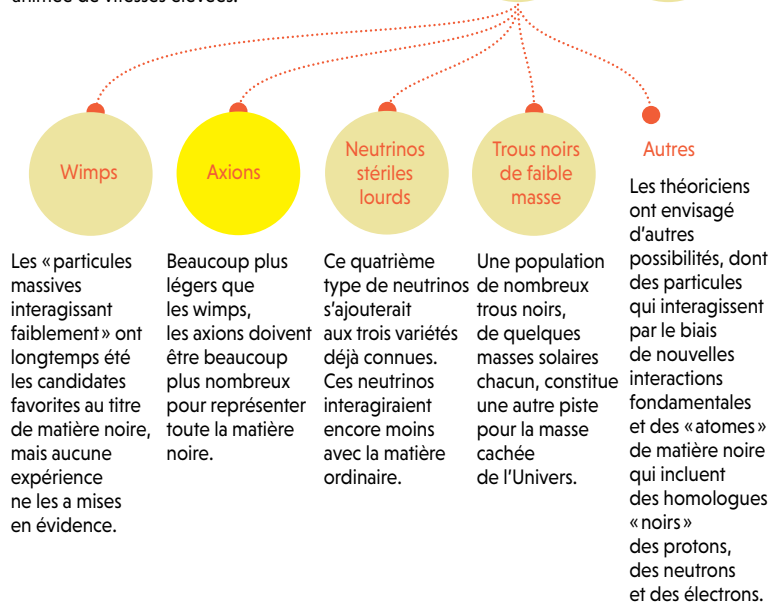
Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky

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 >