

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

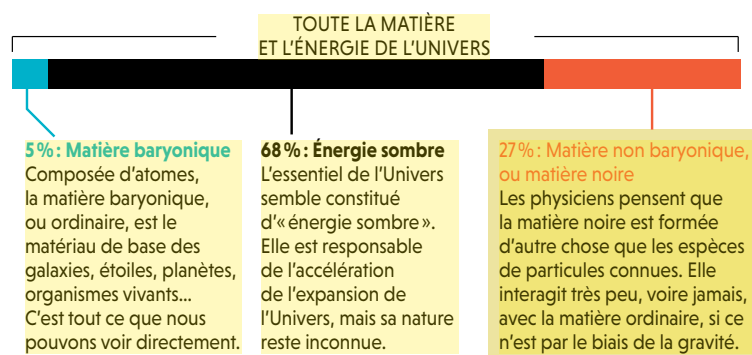
Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions aux débuts de l'Univers, pendant le Big Bang, montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité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

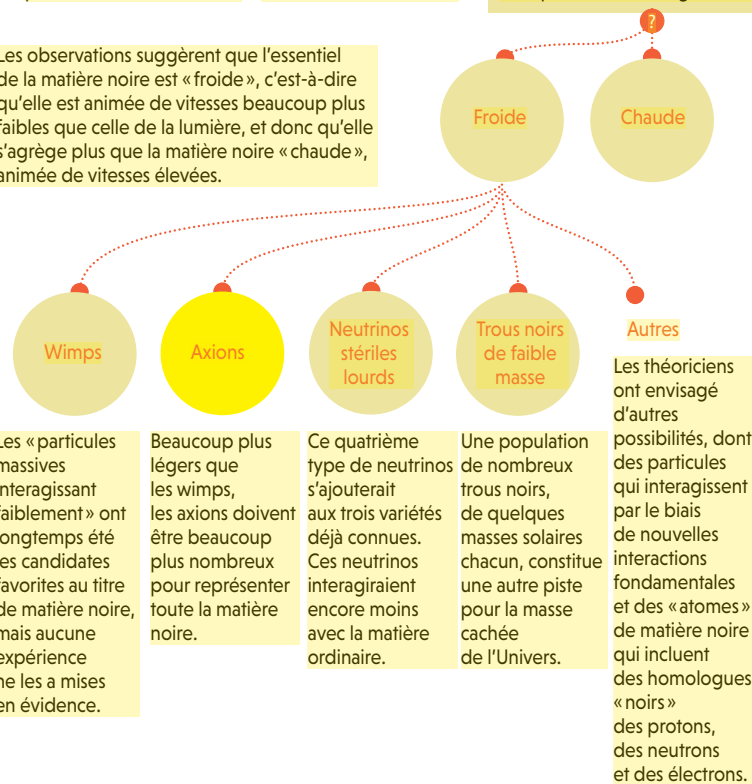
Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky

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

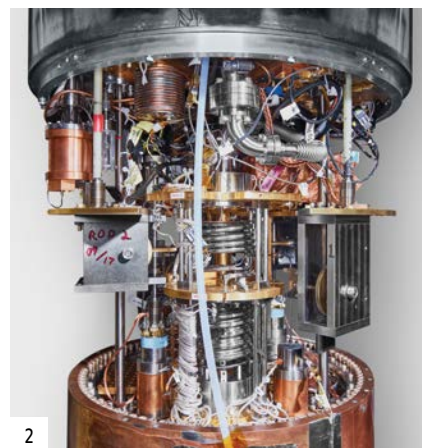


1

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).