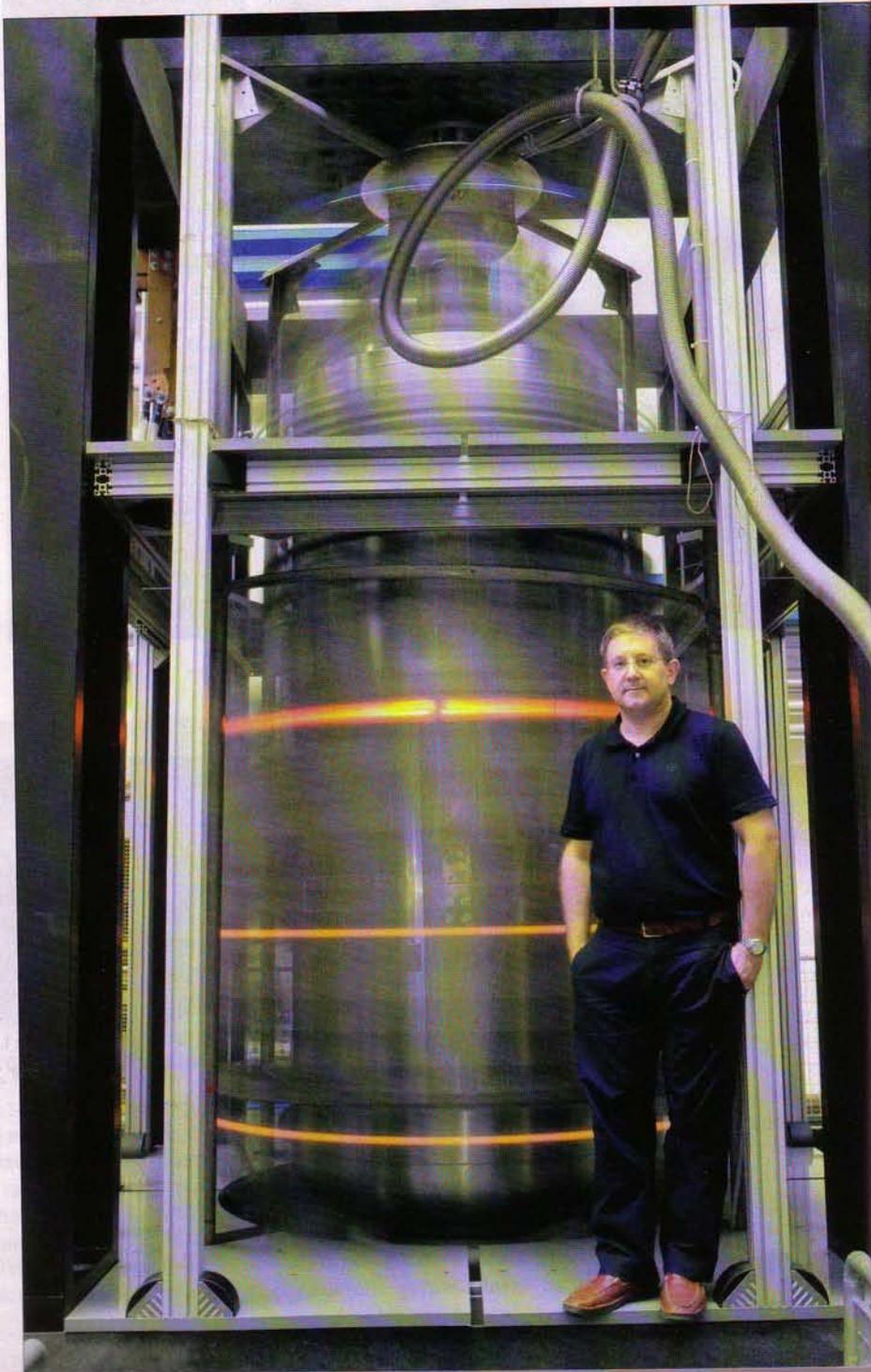


Traque à l'axion en Italie

C'est la première particule élémentaire découverte depuis 1995. Un trublion qui pourrait aider à résoudre les mystères de la masse manquante de l'Univers et de la disparition de l'antimatière.

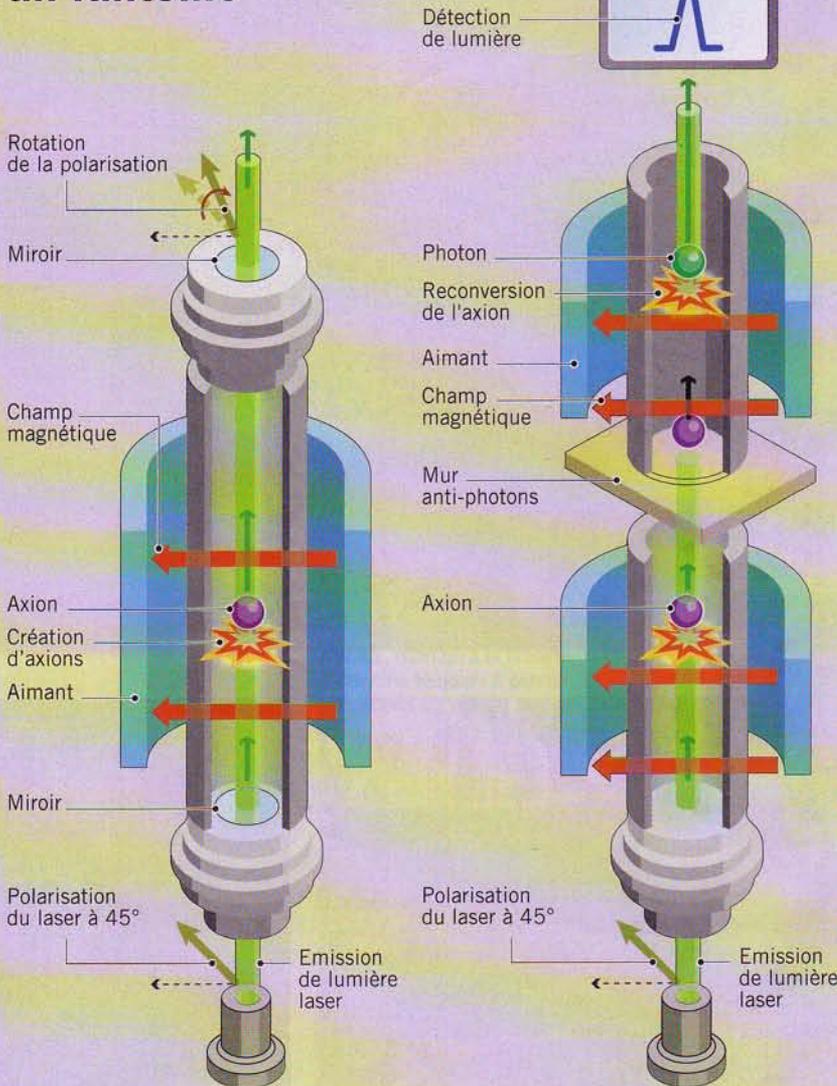
« C'est là ! », pointe Giovanni Cantatore en agitant la main devant un long tube d'acier vertical, posé sur une lourde table rectangulaire en granit. C'est là, dans un hangar du prestigieux Institut national de physique nucléaire à Legnaro (Vénétie), que l'équipe de ce chercheur volubile d'une quarantaine d'années aurait détecté une nouvelle particule élémentaire. La première depuis le « quark top », découvert en 1995 ! Et même pas dans un accélérateur ! Au bout des doigts de Giovanni, peut-être une révolution. Avec un nom, axion, qui claque comme un slogan. Le programme assigné à cette nouvelle particule est, en tout cas, très ambitieux. D'abord, c'est un excellent candidat pour combler le déficit de masse de l'Univers. Un problème qui agace les astronomes depuis de soixante-dix ans (*lire l'interview d'Hubert Reeves p. 52*) ! Ensuite, il pourrait expliquer un autre mystère de la physique : la disparition de l'antimatière au profit de la matière dans le cosmos.

Pour l'instant, notre star est des plus étonnantes. L'axion fuit les regards, presque insaisissable : pas de charge électrique, très léger (des milliards de fois moins qu'un électron), interagissant très peu avec la matière... Il traverse les murs sans encombre. Mais il est séduisant : pour le faire apparaître, pas besoin de ces immenses accélérateurs qu'affectionnent les particules élémentaires. Des lasers, des aimants, des pompes à vide suffisent. Comme pour marquer cette différence, l'expérience italienne PVLAS (Polarisation of the Vacuum by Laser, « polarisation du vide par laser »), délimitée par des grilles jaunes, n'occupe qu'un quart du hangar. Les trois autres quarts sont envahis par les installations de mise au point d'un élément d'un des détecteurs du futur accélérateur de particules du Cern, le LHC. Toujours enthousiaste, Giovanni poursuit la visite. Le dispositif évoque une fusée à



A Legnaro, Giovanni Cantatore, responsable de l'expérience de polarisation du vide par laser (PVLAS), pose devant l'aimant où serait apparu l'axion.

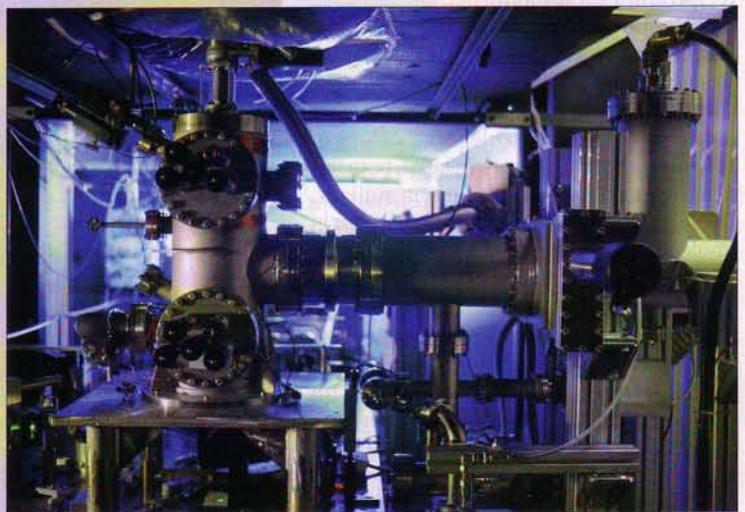
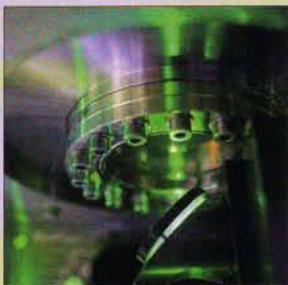
Deux expériences pour un fantôme



Dans l'expérience italienne PVLAS – ainsi que dans les autres en cours de montage qui visent elles aussi à créer des axions –, un laser est envoyé dans une cavité vide, plongée dans le champ magnétique d'un puissant aimant. Dans ces conditions, une nouvelle particule, l'axion, peut jaillir et perturber la lumière en faisant tourner sa polarisation à la sortie de la cavité.

Une seconde expérience, menée entre autres par l'équipe de PVLAS, vise à reconvertir l'axion en photon. Un mur bloque les photons, mais laisse passer un éventuel axion. Celui-ci est retransformé en lumière à l'aide d'un deuxième aimant. Les photons créés sont détectés en sortie.

Ci-contre : détails des instruments optiques servant à l'expérience italienne.



plusieurs étages d'un peu moins de dix mètres de haut. Au sous-sol, assez sombre et protégé par d'épais rideaux en plastique, un laser infrarouge trône sur une table de granit noir. Un jeu de miroirs envoie le rayon vers le plafond au travers d'un cylindre de six mètres de haut environ. Là, un dispositif identique recueille et analyse la lumière. Entre les deux, un aimant, des tuyaux de refroidissement remplis d'hélium liquide, le vide. Et peut-être, l'axion... Giovanni remonte quelques marches depuis le sous-sol. Au mur, aux côtés de plans, de photos, d'articles scientifiques, est punaillée une feuille blanche. L'enseignant de l'université de Trieste poursuit avec passion ses explications en y traçant de petits schémas très pédagogiques et en y inscrivant quelques équations simples. Il est à son affaire mais en tant que responsable de l'expérience PVLAS, il tient à conserver prudence et rigueur : « Nous ne pouvons pas affirmer avoir trouvé une nouvelle particule car nos preuves ne sont pas suffisantes. Nos résultats publiés en mars rendent compte d'une anomalie expérimentale que nous interprétons par cette particule. »

Sauf que cette interprétation a été distillée lors de conférences et que la communauté scientifique, tout excitée, ne rêve plus que de passer à l'axion, à sa traque du moins ! A Taiwan, Hambourg, Newport (Virginie), Toulouse, et à Genève, au Cern, temple de la physique des particules, des expériences se montent à cet effet. A peine celles-ci sur pied, d'autres propositions fleurissent. Les modèles théoriques affluent. La course est lancée. Comme l'expérience PVLAS, conçue étape par étape en une douzaine d'années, est quasi unique au monde (*lire l'encadré p. 62*), il est impératif d'en imaginer de nouvelles pour confirmer ou infirmer ses résultats. « S'ils sont corrects, il ●●●

●●● s'agit d'une découverte révolutionnaire », insiste Pierre Sikivie, de l'université de Floride, responsable d'une expérience complémentaire. « L'axion est une particule fantastique. C'est comme un photon qui traverserait les murs et qu'on pourrait voir dans une expérience de laboratoire! », s'enthousiasme Konstantin Zioutas, du Cern et de l'université de Patras (Grèce), responsable également d'une expérience et initiateur des deux premières réunions internationales sur le sujet en quelques mois. « J'aimerais bien réutiliser les centaines d'aimants de l'accélérateur Hera de Hambourg pour faire une usine à axions! », complète Andreas Ringwald, mi-sérieux, mi-ironique. Ce théoricien allemand espère disposer de sa propre expérience en 2007 sur la machine Hera. D'autres rêvent de communiquer avec l'axion sur de longues distances. D'ailleurs, aux Etats-Unis, la Navy soutient une expérience sur ce thème...

Si les photons marchaient sur deux pattes, une patte serait alourdie d'un boulet, l'axion

Dans la communauté des physiciens et astrophysiciens, le passe-muraille joue les électrochocs. Et pourtant, à l'origine, il fut secondaire. « Notre but était d'étudier les propriétés du vide », rappelle l'Italien Emilio Zavattini, chercheur à l'origine de PVLAS et dont les idées ont inspiré la plupart des autres expériences. « Pourquoi le vide ne pourrait-il pas s'aimer comme n'importe quel matériau ou même un gaz? », se demande-t-il. C'est d'ailleurs la signification même du sigle de l'expérience : polarisation du vide par laser. Bien qu'à la retraite, Zavattini est toujours actif et ses yeux pétillent devant les derniers résultats.

Le vide des physiciens, rappelons-le, n'est pas vraiment vide. Il y a matière à études! Comme l'indique la physique quantique, dans le vide, des particules sont créées et détruites en permanence. Ce qu'on pourrait visualiser comme un magma grouillant, fluctuant et éphémère. L'équivalent, pour la lumière, d'une modification permanente de l'indice de réfraction du milieu qui perturberait sa propagation. Dès 1936, l'un des pères de la mécanique quantique, Werner Heisenberg, avait pressenti qu'une lumière polarisée selon un axe et traversant un champ magnétique ressortirait avec une polarisation elliptique. Un effet quasi indétectable. « Nous faisons des mesures de haute précision. La polarisation du vide est le dernier phénomène de l'électrodyna-



L'axion sauve la théorie

C'est dans les années 1970 que les théoriciens ont inventé l'axion. Ils se sont ainsi sortis d'un délicat problème lié à l'interaction forte, la force qui maintient les protons et les neutrons. Cette force aurait dû violer une certaine loi (dite de symétrie) mais aucune expérience ne l'a confirmé jusqu'à aujourd'hui. « La physique était comme une salle au sol plat dans laquelle, dans un coin, la table d'un billard avait l'air

incliné », explique Pierre Sikivie, auteur d'un remarquable article pédagogique développant cette analogie*. L'axion serait comme une cale déposée sous le pied du billard pour le remettre droit. Mathématiquement, le processus « annule » des paramètres, d'où le nom de lessive donné par Frank Wilczek à cette particule (lire aussi p.63).

* Paru dans *Physics Today* en décembre 1996 et en ligne sur arxiv.org/abs/hep-ph/9506229



En direct de Vénétie

- 1 Guiseppe Ruoso règle les lasers au pied de l'installation qui abrite l'expérience.
- 2 Quelques chercheurs contemplant le sommet de l'installation, à dix mètres du sol.
- 3 Edoardo Milotti étudie les données recueillies, tandis qu'Alberto Simoncig 4 supervise les derniers aménagements.
- 5 Le chercheur Emilio Zavattini est à l'origine de PVLAS. Bien qu'à la retraite, il cherche toujours à percer les secrets du vide.



mique quantique [EDQ, lire lexique ci-dessus] à ne pas avoir été sondé aussi profondément », précise le chercheur Carlo Rizzo, du laboratoire Collisions, agrégats, réactivité à l'université Paul-Sabatier de Toulouse, qui lance son propre projet au Laboratoire national des champs magnétiques pulsés, après avoir participé à PVLAS jusqu'en 1999. Mais pour espérer titiller cet effet, il faudra aux expériences futures une précision 10 000 à 100 000 fois plus grande qu'aujourd'hui.

L'axion redonne du lustre à cette quête assez ingrate. Et pas seulement parce que ses inventeurs lui ont donné le nom d'une lessive (lire l'interview p. 63) ! Des théori-

ciens l'ont introduite dans l'univers de la physique pour résoudre un épineux problème dans le domaine dit de l'interaction forte, celle qui régit les quarks au cœur des noyaux d'atome (lire l'encadré p. 60), et ayant peu à voir avec l'EDQ. C'est plus tard, en cadeau bonus, que l'axion est apparu comme un excellent candidat à la masse manquante. Et une explication à la disparition de l'antimatière dans l'Univers. A condition de le peser. Autant dire, peser un fantôme ! Le capturer n'est pas aisé.

Dans les années 1970-1980, les accélérateurs de particules ont échoué. Aujourd'hui, de très forts champs magnétiques et des lumières intenses l'auraient engendré spontanément à partir du vide ! « L'axion a une masse mais pas le photon. Tout se passe alors comme si la création d'axions ralentissait une partie de la lumière, ce qui modifie sa polarisation », explique Carlo Rizzo. Si les photons marchaient sur deux pattes, une patte se retrouverait alourdie d'un boulet, l'axion. Difficile de marcher droit. Cette particule a alors deux effets sur la lumière. Comme dans le vide quantique, elle peut transformer une polarisation linéaire en polarisation elliptique et d'une façon plus radicale. En plus, elle peut faire pivoter légèrement une polarisation linéaire.

La lumière, le magnétisme et le vide sont donc les trois clés d'une chasse ●●●

LEXIQUE

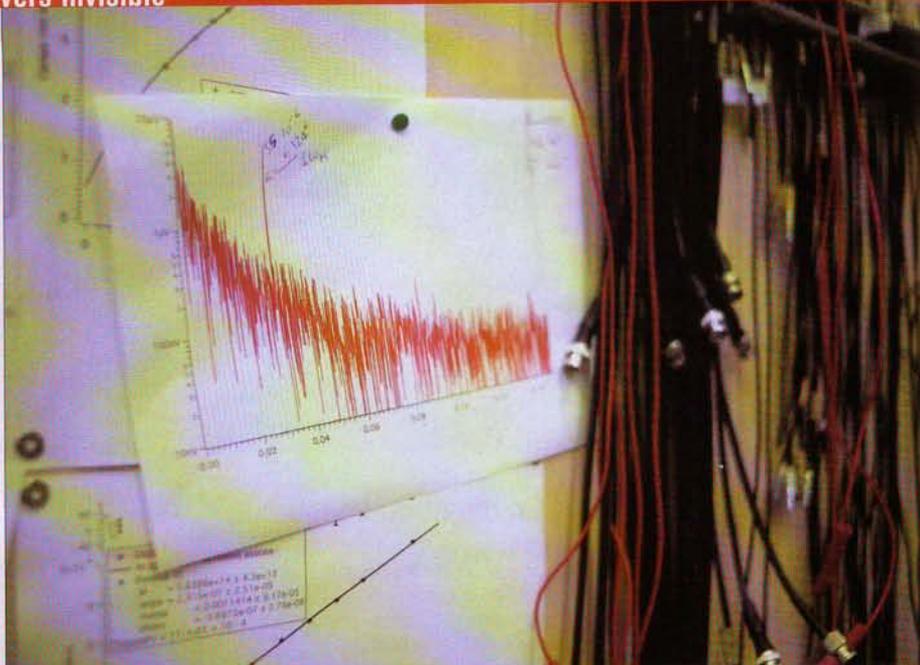
POLARISATION. La lumière est une onde. A la manière d'une corde vibrante, elle se propage dans une direction mais peut osciller dans un plan. On dit alors qu'elle est polarisée linéairement. Si elle vibre en même temps dans deux directions perpendiculaires, la polarisation est elliptique (ou circulaire).

ELECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (EDQ). Cette théorie marie l'électromagnétisme et la mécanique quantique. Elle permet de calculer les propriétés de particules élémentaires.

CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE. Elle décrit l'une des quatre forces fondamentales, l'interaction forte. Cette force explique la cohésion des protons ou des neutrons.

ANTIMATIÈRE. Toute particule admet une antiparticule de même masse et de charge opposée. Particule et antiparticule s'annihilent immédiatement. Pourtant la matière existe, ce qui signifie qu'au début de l'Univers un petit excès de matière a dominé sur l'antimatière. Mais le mécanisme exact n'est pas encore connu.

●●● réussie. Dans le hangar de Legnaro, la cavité mesure près de six mètres (pour un mètre « effectif ») et la lumière parcourt par ses allers-retours plusieurs dizaines de kilomètres. L'aimant est énorme, près de cinq tonnes et son champ est d'un peu plus de 5 teslas (cent mille fois le champ magnétique terrestre). « L'effet est très ténu. C'est comme si on voulait détecter un point lumineux dans une grande ville la nuit. Pour augmenter nos chances, nous faisons clignoter cette lumière en "allumant" et "éteignant" le phénomène », explique Giovanni Cantatore. Alors l'aimant de cinq tonnes tourne ! Pas vite, un tour en trois secondes environ, mais assez pour sentir un petit vent près de l'expérience. Comme une bouffée d'axions... Mille précautions ont été prises pour que les vibrations mécaniques ne perturbent pas les miroirs et l'optique. « L'expérience a marché tout de suite. A la fin 2000, nous avons un signal. La polarisation de la lumière tourne ! C'était tellement étonnant que nous avons ensuite passé toutes ces années à vérifier notre dispositif. Mais l'effet est toujours là », rappelle Cantatore. Tout y est passé : ils ont changé la lumière du laser, ajouté des gaz différents dans les tubes pour étalonner l'expérience. Lors de notre visite, ils changeaient même la structure en fer par une autre en aluminium pour voir si des fuites magnétiques n'étaient pas perturbatrices... « Il s'agit peut-être d'un biais expérimental mais si c'est le cas, il est très subtil », conclut Cantatore.



Il a fallu une douzaine d'années pour mettre au point l'expérience de Legnaro.

« L'équipe est de première classe », confirme Konstantin Zioutas. « Ils semblent avoir tout regardé. A chaque critique, ils ont répondu, complète Andreas Ringwald. J'étais sceptique au début. Maintenant, je suis optimiste. »

N'empêche, le doute subsiste. Plutôt que refaire la même « manip », à quelques variations près, une autre expérience, a priori plus facile, a été privilégiée à Legnaro pour trancher si, oui ou non, un axion a bien été créé. Le principe est d'inverser la première

expérience, autrement dit reconverter l'axion en lumière. Pour ce faire, deux tubes plongés dans un champ magnétique sont placés de chaque côté d'un mur. L'une des extrémités du premier tube est obstruée par le mur. Au bout du deuxième tube, est installé un détecteur de lumière (voir le schéma p. 59). Comme les axions, contrairement aux photons, traversent les murs, ceux qui parviendront dans le second aimant auront une chance non négligeable de se retransformer en lumière, ce qui n'échappera pas aux dé-

Y a-t-il un axion dans l'espace ?

L'un des problèmes de PVLAS est que ses résultats ne collent pas bien avec des expériences antérieures et en cours. Dans les années 1990, Emilio Zavattini avait déjà monté, avec Carlo Rizzo, une première expérience, appelée BFRT, au laboratoire Brookhaven, aux Etats-Unis. Giovanni Cantatore les avait rejoints en cours de route. La technique était la même que PVLAS. BFRT n'a jamais trouvé trace d'axion, ni en version passe muraille, ni en version mesure fine des effets sur la lumière. Mais elle lui a fixé des bornes. Et l'axion de PVLAS est à la limite de ces bornes. En revanche, il est hors des clous définis par des expériences très différentes installées au Cern, mais aussi



Le télescope Cast du Cern, près de Genève, est pointé vers le Soleil et espère voir tomber un axion dans son tube.

au laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, qui guettent les axions venant de l'espace. Plus précisément, en Californie, ADMX, surveille les reliques du Big Bang depuis 1997 tandis qu'au Cern, Cast regarde le Soleil depuis 2002. Dans les étoiles, comme aux premiers instants de l'Univers, les températures sont telles

que les particules sont ionisées et les photons voient donc un environnement électromagnétique dans lequel ils peuvent se transformer en axions. Cet axion ne doit cependant pas être trop lourd ni surtout trop couplé à la lumière, sinon il emporterait toute l'énergie et ferait disparaître les étoiles. ADMX et Cast sont en fait de grandes cavités, plongées dans un champ magnétique qui tente de convertir l'axion en photon, mais plutôt dans la gamme micro-onde cette fois. Et ils n'ont rien vu depuis plusieurs années. Surtout, la plage de surveillance de Cast balaie largement celle de PVLAS. La particule de Legnaro n'aurait pas pu lui échapper. Cette incohérence pousse ADMX et Cast à poursuivre leur quête avec une sensibilité accrue.

tecteurs. C'est plus simple que d'observer une infime variation sur la polarisation. Accroupi sous la table en granit, Giovanni Cantatore nous montre par où passerait l'axion. On le verrait presque. Dans quelques semaines, l'équipe installera un gros aimant sous la table. « *Nous espérons un photon toutes les deux secondes environ*, précise le chercheur. *Le problème est que les détecteurs standards sont si bruités qu'ils enverraient cent signaux positifs toutes les secondes!* » Un détecteur spécial est donc prévu, mais sa mise au point ralentira d'autant le lancement de la nouvelle expérience.

Les concurrents espèrent bien profiter de ce répit. En travaillant tous avec de plus gros aimants et de plus grandes longueurs que PVLAS, ils attendent plus de métamorphoses axions/photons que n'en espère l'expérience italienne. Ils ont cependant d'autres problèmes. Les plus avancés, à Toulouse, attendent un créneau pour disposer d'un laser intense. A Hambourg, deux expériences sont prévues dans deux longueurs d'onde différentes mais les aimants ne sont pas encore disponibles. Au Cern, une demande de financement complémentaire auprès de l'Agence nationale de la recherche a été refusée. Dans la course, chacun a ses atouts.

A Toulouse, les miroirs sont ceux fabriqués par le Laboratoire des matériaux avancés (à Lyon) pour Virgo, l'expérience de haute précision de détection des ondes gravitationnelles, en Italie. Les aimants sont des bobines qui tiennent dans la main et qui envoient au rythme de 5 tirs par heure des impulsions de plusieurs dizaines de teslas pendant seulement quelque 10 millisecondes. « *Ils sont refroidis à l'azote liquide, moins cher que l'hélium. C'est comme comparer le prix du lait et du bordeaux* », plaisante Carlo Rizzo. Son équipe envisage en fait deux expériences, une de reconversion de l'axion et l'autre de haute précision pour sonder les prédictions de la mécanique quantique. Au Cern, les aimants sont les plus puissants du monde, plus de dix teslas, et possèdent deux canaux dans lesquels on peut mener les deux expériences simultanément. A Hambourg, où les aimants sont également très performants et longs, un laser à rayons X plus énergétique sera nécessaire. Chacun s'épie et y va de sa petite perfidie : « *Cela fait des mois qu'ils disent qu'ils sont prêts* » ; « *Ça ne marchera pas en faisant tourner les miroirs* » ; « *Leur détecteur n'est pas assez sensible* ». « *La nature se moque de qui sera le premier* », rappelle Andreas Ringwald, pour calmer les esprits.

PVLAS a cependant un autre problème que la concurrence. Plus grave sans doute. L'axion qu'elle aurait créé n'est pas du tout

INTERVIEW

FRANK WILCZEK, prix Nobel de physique en 2004 pour sa contribution à la compréhension de l'interaction forte.



« L'interprétation ne colle pas à la théorie standard »

Pourquoi ce nom d'axion donné à une particule ?

J'ai toujours pensé que le nom de cette lessive ferait un excellent nom de particules. En 1976, je l'ai proposé à quelques personnes en conférence. Steven Weinberg [prix Nobel en 1979] avait aussi avancé sur les mêmes idées avec le terme « higglet » puis il s'est rallié à axion dans un article distinct du mien. Les éditeurs des revues étaient et sont encore conservateurs et n'auraient jamais accepté une telle appellation, mais heureusement la particule est liée à un « courant axial de baryon », ce qui a permis de justifier ce terme. Je n'ai jamais demandé d'autorisation à la marque...

A quoi sert cette particule ?

Le problème à résoudre était qu'une loi majeure de la physique aurait dû être violée en théorie mais ne l'était pas en pratique. C'est le cas particulier de l'interaction forte qui lie les quarks entre

eux pour former les protons par exemple. Peccei et Quinn, en 1977, ont proposé qu'un certain champ fige des paramètres à des valeurs très très faibles de telle sorte que la loi [on parle de symétrie] ne soit plus violée dans l'interaction forte. Ce champ, c'est l'axion.

Que vous inspirent les résultats de PVLAS ?

Je suis intéressé et en entendant leur résultat positif, j'ai frissonné. Mais je ne suis pas surexcité, car l'interprétation ne colle pas à la théorie standard de l'axion. Cela conduit à un refroidissement trop rapide des étoiles; c'est interdit par l'astrophysique. J'ai réfléchi un peu à la façon de s'en sortir et comme je n'ai rien trouvé de prometteur, je laisse cela sur le coin du feu en attendant une confirmation. Mais si c'était vrai, ce serait un grand événement, comparable à la découverte de l'oscillation des neutrinos, voire plus, car ça heurte les idées standards.

Propos recueillis par D. L.

L'axion que l'expérience italienne aurait créé n'est pas celui attendu ! Il secoue trop la lumière

l'axion attendu ! Il secoue trop la lumière. La rotation de la polarisation est mille fois plus importante que prévu... « *Si c'était un axion, notre détecteur aurait dû exploser!* », s'amuse Konstantin Zioutas, responsable de l'expérience Cast. Car l'axion attendu a reçu des bornes à ne pas dépasser, lors d'expériences passées (*lire l'encadré p. 62*). Celui vu par PVLAS emporterait si bien l'énergie qu'il éteindrait le Soleil et toutes les étoiles ! Pour le coup, plus de problème de masse manquante, ni d'antimatière ! L'axion a vraiment tout nettoyé.

Un peu trop radical. Les théoriciens se sont donc mis à pied d'œuvre pour sauver le Soleil et réconcilier la particule italienne avec l'axion standard. Les spécialistes de théorie

des cordes, le modèle le plus à la mode et le plus abouti de la physique contemporaine, s'y mettent : c'est donc du sérieux. « *Notre mesure dit quelque chose mais nous ne savons pas trop quoi* », constate Zavattini qui souhaite voir de nombreux théoriciens sur le sujet. « *Il faut des jeunes prêts à changer les choses!* », lance-t-il en défi. Déjà, des modèles qui n'ont rien de simple ont l'air de marcher. Ces particules pourraient rester piégées dans le Soleil ou bien ne pas en sortir. Ou alors elles pourraient être composées de morceaux encore plus élémentaires. On ne sait plus. Tout le monde travaille dur. Personne n'a envie d'abandonner. Selon certains, même si l'expérience de reconversion axion/photon ne donnait rien, cela ne signifierait pas que l'axion n'existe pas ! La fièvre monte. Au deuxième congrès sur le sujet en Crète, en mai dernier, il paraît que les coudes se sont souvent levés en l'honneur de la nouvelle venue.

DAVID LAROUSSERIE, envoyé spécial en Italie
Reportage photo : MASSIMO BREGA/EURELIOS
pour Sciences et Avenir