

houle longue en plein océan le soulèvera considérablement. Puisqu'un neutrino de grande longueur d'onde voit le noyau atomique comme un tout et non comme une collection de petites parties, la probabilité qu'il interagisse est bien plus grande.

UN MINUSCULE FLASH DE LUMIÈRE

Contrairement aux neutrinos de haute énergie, un neutrino de basse énergie rebondit donc sur le noyau tout entier. Cette diffusion est dite «cohérente» parce que la longueur d'onde du neutrino est comparable à la taille du noyau. Le noyau subit alors un recul. Et si cette interaction a lieu dans le matériau adéquat, le recul de l'atome produit un minuscule flash de lumière, tandis que le neutrino continue sa route dans une nouvelle direction. En captant le flash lumineux à l'aide d'un détecteur à tubes photomultiplicateurs, on peut déterminer où et quand le neutrino a été diffusé par l'atome ainsi que l'énergie cinétique de ce dernier. Même si la diffusion cohérente ne permet pas de révéler la saveur d'un neutrino donné, elle permet de mesurer le nombre total de neutrinos des trois saveurs qui ont interagi avec le détecteur. Ce point est très important : si cette somme ne correspond pas au nombre de neutrinos attendus, il se peut que des neutrinos stériles indétectés – parce qu'ils ne pourraient pas interagir avec les atomes d'argon et ne produiraient donc pas de flash lumineux – soient impliqués.

Puisque les chances qu'un neutrino soit diffusé par un noyau entier sont supérieures à celles de le voir interagir avec un seul de ses nucléons, on peut se permettre d'utiliser des détecteurs plus petits que les gros appareillages autrefois nécessaires à la plupart des détecteurs de neutrinos (il en est de même avec les détecteurs placés près de réacteurs nucléaires, le flux de neutrinos étant alors très intense).

Le détecteur de CCM contient 10 tonnes d'argon liquide, à comparer à la cuve de 800 tonnes d'huile minérale du détecteur de l'expérience *MiniBooNE*. Et comme il est compact, on peut le déplacer d'un endroit à un autre afin de détecter les neutrinos à différentes distances de leur source. Si les neutrinos oscillent assez fréquemment sur les quelques dizaines de mètres disponibles dans le hall d'expériences du LANSCE, nous observerons une variation du nombre total de détections en fonction de la distance. Un tel résultat indiquerait qu'il se produit effectivement des oscillations vers la saveur stérile : en effet, s'il n'existe que trois

saveurs seulement, nous ne devrions pas observer d'oscillation sur de si courtes distances.

Il est bien sûr possible que CCM ne détecte rien de tel. Dans ce cas, le nombre de neutrinos normaux observé diminuera simplement à mesure que nous éloignerons le détecteur de la cible en tungstène, exactement comme l'éclat apparent d'une lampe diminue à mesure que l'on s'en éloigne.

Bien que décevant, un tel résultat n'exclurait pas l'existence d'un ou plusieurs neutrinos stériles, mais il permettrait de fixer des limites à leurs propriétés potentielles. Comme les oscillations des neutrinos dépendent de leurs masses relatives et d'un paramètre nommé «angle de mélange», le fait de ne pas trouver de signe du neutrino stérile nous permettra de mettre le doigt sur les valeurs que ces masses et ces angles de mélange ne peuvent en aucun cas avoir, réduisant ainsi la plage de paramètres que les chercheurs devront considérer.

Les expérimentateurs qui présentent des résultats en désaccord avec le modèle standard sont **présumés coupables jusqu'à ce qu'ils prouvent leur innocence**, pour la bonne raison que, historiquement, les scientifiques qui ont remis en cause le modèle standard ont eu tort. Néanmoins, l'existence d'une physique au-delà du modèle est certaine ; à elle seule, l'oscillation des neutrinos en est une preuve. Si le sujet reste controversé, les nouvelles expériences sont désormais sur le point de résoudre le problème – d'une façon ou d'une autre.

— Les auteurs —

> William Charles Louis

est physicien au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis.

> Richard Van de Water

est physicien au Laboratoire national de Los Alamos (LANL), dans le Nouveau-Mexique, aux États-Unis.

— À lire —

> B. Dasgupta et J. Kopp, Sterile neutrinos, *Physics Reports*, vol. 928, 15 pp. 1-63, 2021.

> S. V. Demidov et al., Bounds of non-standard interactions of neutrinos from IceCube DeepCore data, *Journal of High Energy Physics*, vol. 2020(3), article 105, 2020.

> A. A. Aguilar-Arevalo et al., Significant excess of electronlike events in the MiniBooNE short-baseline neutrino experiment, *Physical Review Letters*, vol. 121(22), article 221801, 2018.



Un vibrant plaidoyer pour l'innovation et la science, piliers de nos démocraties.

« Un vademecum indispensable
pour comprendre les enjeux
d'un lendemain qui ne passe pas
par la décroissance, mais
par l'innovation responsable. »

Les Échos

« Une réflexion brûlante sur la place
de la science et du progrès technique
dans nos sociétés. »

Challenges



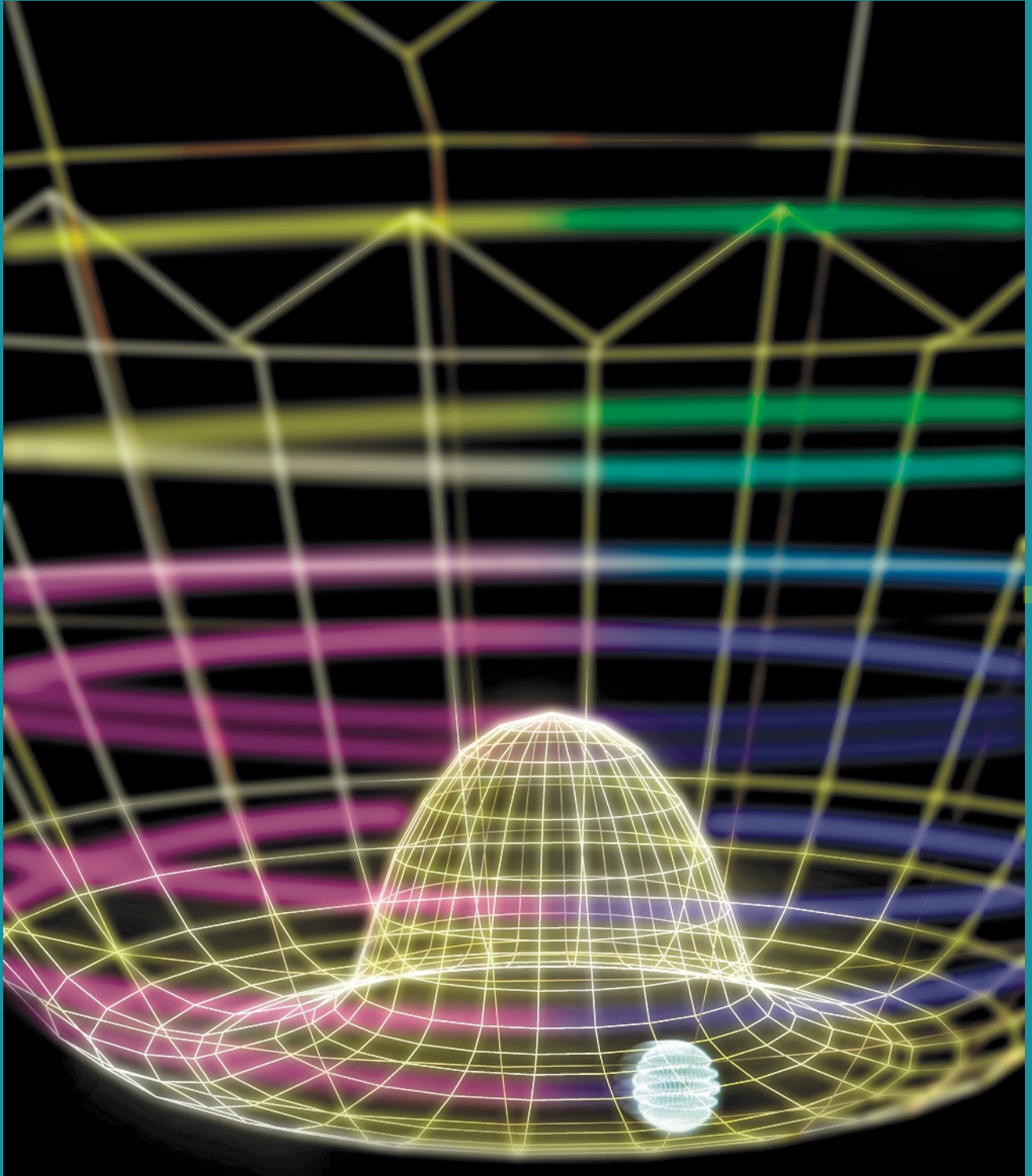
Inventé pour régler un problème crucial de symétrie dans le modèle standard, l'axion est désormais l'une des particules les plus en vue pour occuper le poste de matière noire. Encore faut-il qu'elle existe...

36

La physique passe à l'axion

Chanda Prescod-Weinstein

→ Vue d'artiste de l'énergie potentielle du champ qui correspond à l'axion (*boule blanche*). Prédite par la théorie, cette forme en bol détermine les propriétés de l'axion en tant que particule, notamment sa masse.



En bref

> Particules	> Ces particules	> Plusieurs	> Des mesures
hypothétiques, les	sont également des	expériences traquent	directes sont tentées
axions expliqueraient	candidats au titre	les axions, notamment	sur Terre, mais elles
une perturbante	de matière noire, ce	grâce à des études	n'ont pas encore
asymétrie au cœur	composant mystérieux	astronomiques, même	conclu à l'existence
du modèle standard.	qui explique la forme	si elles n'offrent que	des axions. De
	des grandes structures	des preuves indirectes	nouveaux instruments
	de l'Univers.	de leur existence.	sont en cours de
			développement
			pour y remédier.

38

Il y a deux façons de commencer un article sur l'axion. La première est d'expliquer que cette particule hypothétique serait la clé d'un problème majeur du modèle standard de la physique, qui décrit toutes les particules connues. Mais toute la beauté de l'axion est qu'un autre début est possible, tout aussi intéressant. Les physiciens le soupçonnent désormais d'être également la réponse à une des questions les plus importantes de la science : qu'est-ce que la « matière noire » ?

Ce terme désigne la substance invisible qui semble dominer la formation des structures cosmiques comme les galaxies et constituerait l'écrasante majorité de la matière palpable de l'Univers (voir la figure page 40). Présenter toutes les particules proposées pour l'expliquer serait un peu comme décrire tous les occupants d'une ménagerie gigantesque (voir *Beaucoup d'appelés, pas encore d'élu*, par M. Cirelli, p. 102). Pendant un temps, de nombreux chercheurs ont placé leurs espoirs dans des candidates inspirées de la théorie de la supersymétrie. Ces prétendants ont été recherchés dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern, sous la frontière franco-suisse, ou dans des détecteurs souterrains tels que LUX (*Large Underground Xenon*), aux États-Unis, et *Xenon1T*, en Italie. L'absence du moindre soupçon de découverte a renvoyé les physiciens à la case départ, à la recherche d'une nouvelle particule potentielle de matière noire à traquer. En conséquence, ces dernières années ont vu grandir la popularité d'un *outsider*, accessible par d'autres moyens, et qui avait jusqu'à présent peu fait parler de lui : l'axion.

Je l'avoue, je n'ai pas toujours cru que la matière noire était si importante que cela. En fait, je trouvais même que c'était un sujet ennuyeux et marginal de la physique, qui ne tarderait pas à être résolu. Pendant longtemps, le seul grand défi de notre époque me semblait être l'accélération de l'expansion de l'Univers, peut-être parce que les scientifiques l'ont découverte l'année où j'ai commencé mes études universitaires. Il est facile d'attribuer cette attitude à mon ignorance de jeunesse, mais le fait est que partout où je tendais l'oreille, des conversations passionnantes portaient sur l'« énergie sombre ».

En 2000, j'ai eu l'occasion de passer quelques mois à faire de la recherche en physique des particules. Dans ce cadre, j'ai visité le Fermilab, où j'ai assisté à une présentation donnée par un grand physicien théoricien, Edward « Rocky » Kolb. C'était deux ans après que les astronomes avaient publié que non seulement l'Univers était en expansion, mais que cette expansion accélérât. Les efforts pour concilier ces nouvelles données empiriques avec notre meilleur cadre théorique de la gravitation, la relativité générale, ont conduit à l'idée que l'espace est emplí d'une énergie invisible : l'énergie sombre (voir *Les cachotteries de l'énergie sombre*, par P. Brax, p. 112).

Edward Kolb a ouvert sa présentation en rappelant que les cosmologues avaient déterminé la composition de l'Univers. Soit, à cette époque, 5 % de matière « ordinaire », 20 % de matière noire, et 70 % d'énergie sombre (les réévaluations récentes donnent 26,8 % et 68,3 % pour ces deux dernières). Nous étions tout près du but, disait-il. Il restait « juste » à déterminer ce qu'étaient la matière noire et