

l'énergie sombre... Après cette plaisanterie, je me suis imaginé que nous trouverions bientôt la matière noire, et que l'énergie sombre était le seul véritable mystère qui vaille la peine de s'y intéresser. Erreur...

La matière noire a le don de vous attirer irrésistiblement, et pour moi cette attraction est passée par les axions. Aujourd'hui, mes collègues du monde entier voient en moi un spécialiste de cette particule. Pour comprendre comment j'ai été captivée par une particule qui n'a peut-être aucune réalité, il importe de revenir à ses origines, en l'occurrence le problème CP (charge-parité) fort.

DES FAILLES DANS LE MODÈLE STANDARD

L'axion a fait ses débuts comme solution à un problème du modèle standard de la physique, et plus précisément de la partie qui repose sur la chromodynamique quantique (QCD), qui gouverne les particules fondamentales que sont les quarks et les gluons : comment interagissent-elles ? Se regroupent-elles ? Etc. La QCD est très efficace, mais elle prédit pour le neutron, constitué de quarks, des propriétés qui n'ont jamais été observées. Pour mieux saisir, quelques notions des mathématiques qui se cachent derrière l'édifice complexe du modèle standard sont utiles.

Il existe une recette spéciale pour transcrire de nouvelles idées en physique des particules. Nous utilisons pour cela un objet mathématique, le lagrangien, censé caractériser les propriétés d'une particule, et à partir duquel on



Tout comme les galaxies, les amas de galaxies (ici, MACS J0416.1-240) baignent dans un nuage de matière noire, indispensable pour conserver leur cohésion, mais impossible à observer directement. Sur cette image, sa présence correspond au halo bleuté.

peut prédire le comportement de cette particule dans l'espace et dans le temps. Les ingrédients de base sont les composantes qui décrivent les différents types d'énergie que peut prendre une particule. À cela s'ajoute une pincée d'« épices », qui correspondent, par exemple, à la manière dont la particule interagit avec d'autres particules. Comme en pâtisserie, des règles très précises dictent comment doser ces composantes et s'assurer que leur effet n'est ni trop faible ni trop fort. Beaucoup de ces règles reposent sur l'attente que chaque terme du lagrangien restera inchangé après une opération mathématique associée à une symétrie.

Cela peut sembler complexe, mais nous avons l'habitude des symétries dans notre vie

quotidienne. Un cercle, par exemple, est symétrique : quelle que soit la rotation qu'on lui fait subir, chaque point du cercle est identique à tous les autres points. En d'autres termes, quand vous faites tourner un cercle autour de son centre, il ne change pas. Cette propriété est une symétrie de rotation. La symétrie peut être brisée si, entre autres, je dessine un point de couleur sur le cercle. Il y a maintenant un point particulier sur le cercle, et, en le faisant tourner, cela change l'emplacement de ce point particulier.

Un exemple de symétrie attendu dans le modèle standard serait une invariance par translation dans le temps : décaler l'intervalle de temps mis dans l'équation ne change pas la solution. La gravité de la Terre est la même de jour comme de nuit : elle est invariante par translation dans le temps. Si un terme que nous envisageons d'ajouter à l'équation ne respecte pas une symétrie que nous savons ou supposons importante, nous le rejeterons. Si notre hypothèse contient une équation indiquant que la gravitation change de temps à autre, c'est

perdu d'avance. D'un point de vue physique, ces symétries impliquent l'existence de lois de conservation, garantissant, par exemple, que nous ne créons pas une charge électrique à partir de rien.

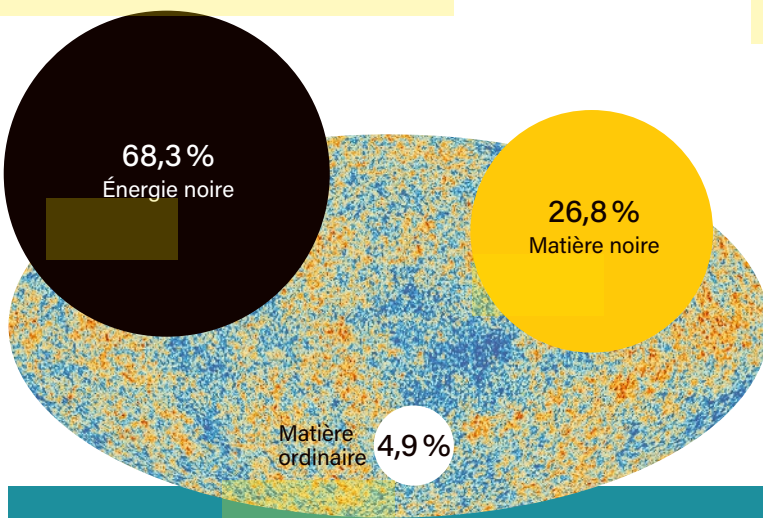
PETIT COLMATAGE, GRANDES IMPLICATIONS

Comme nous l'avons déjà écrit, dans une perspective mathématique, le modèle standard est un long lagrangien avec de nombreux termes, décrivant toutes les particules observées. Les scientifiques l'ont formalisé progressivement, par essais et erreurs théoriques et expérimentaux. Quand les expériences suggéraient la nécessité de nouveaux termes, les théoriciens écrivaient des modèles avec des symétries hypothétiques et vérifiaient leur compatibilité avec les données. Parfois ces modèles s'accordaient avec les données, mais au prix d'autres particules non encore détectées et venant enrichir le modèle. L'axion a émergé de ce ping-pong entre théorie et expériences. Et ce n'était pas le premier...

Un exemple est la découverte du quark top, prédit dans les années 1970, mais observé en 1995 seulement. À partir des années 1960, des expériences avec une particule spéciale nommée « kaon » indiquaient que sa désintégration s'accompagnait de violations de la symétrie CP. Cette symétrie a deux composantes : avec la symétrie de conjugaison de charge, la physique du système reste la même si le signe de la charge de la particule passe de positif à négatif, ou *vice versa*. Un phénomène ou un objet présente une symétrie de parité si on a le même résultat physique en cas d'inversion de signe de ses coordonnées spatiales (correspondant à un retournement gauche-droite ou haut-bas). Prises ensemble, les symétries de conjugaison de charge et de parité forment la symétrie CP. Chose importante, cette symétrie CP signifie que matière et antimatière doivent se comporter pareillement.

La désintégration des kaons montrait des signes de violation de la symétrie CP, ce qui suggérait qu'il manquait des quarks dans la formulation originale de la QCD. Les quarks sont des particules fondamentales qui composent d'autres particules, notamment les protons et les neutrons. À l'époque des expériences de désintégration du kaon, seuls quatre

40



↑ Les études sur l'axion entrent dans le champ plus global des recherches sur la matière noire, laquelle représente environ de 27 % des constituants l'Univers. C'est un sujet connexe mais distinct de l'énergie sombre, qui compte pour quelque 68 % de l'Univers.