

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

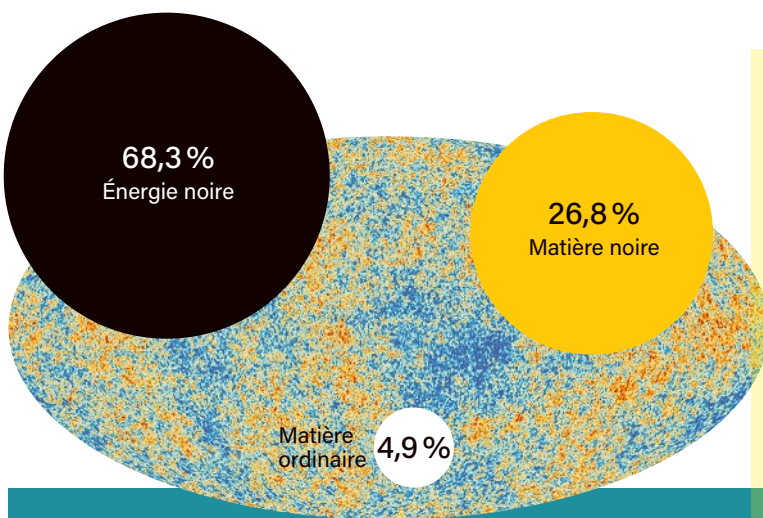
perdu d'avance. D'un point de vue physique, ces symétries impliquent l'existence de lois de conservation, garantissant, par exemple, que nous ne créons pas une charge électrique à partir de rien.

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.

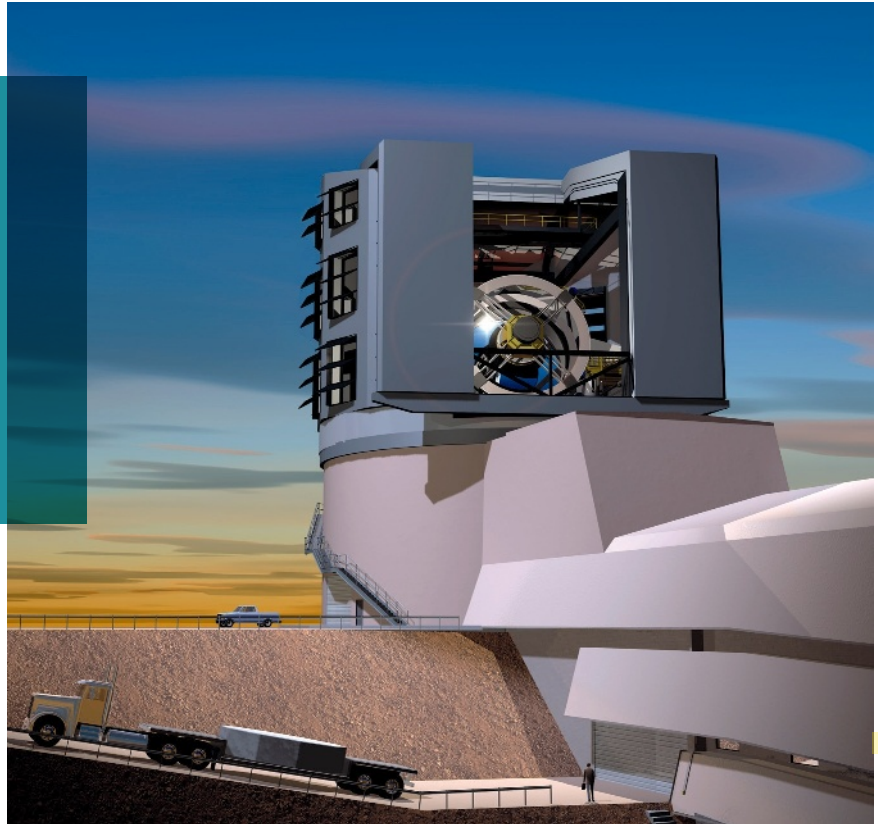
La désintégration des kaons montrait des signes de violation de la symétrie CP, ce qui suggérait qu'il manquait des quarks dans la formulation originale de la QCD. Les quarks sont des particules fondamentales qui composent d'autres particules, notamment les protons et les neutrons. À l'époque des expériences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



↑ 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.



En construction au Chili, l'observatoire *Vera-C.-Rubin* sera, pour une décennie, l'un des plus grands instruments dédiés à la recherche sur la matière noire et l'énergie sombre. En trois nuits, il sera capable de couvrir l'intégralité du ciel.



41

types de quarks étaient connus. Sur la base de résultats expérimentaux, Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa, de l'université de Kyoto, ont proposé l'existence de deux quarks supplémentaires, les quarks top («dessus») et bottom («dessous»). Prédit en 1973, le quark top n'a été observé que vingt ans plus tard parce qu'il était trop lourd pour être vu avec les technologies des années 1970.

Quel rapport avec les axions ? J'y viens. Dans le lagrangien de la chromodynamique quantique (QCD), l'un des termes rend possible la violation de symétrie CP. Cela devient un souci quand nous considérons les implications expérimentales : le terme supplémentaire confère au neutron un moment dipolaire électrique, ce qui signifie que certaines parties d'un neutron auraient une charge locale positive ou négative mesurable. C'est un peu étrange, parce que le neutron est censé être... neutre, c'est-à-dire avoir une charge nulle.

Hélas, aucun indice expérimental ne plaide dans le sens d'un moment dipolaire électrique pour le neutron ; et depuis 2020, les contraintes expérimentales sur cette particule sont tellement bonnes que l'on n'imagine guère qu'il en aille autrement. En résumé, la théorie suggère qu'il devrait y avoir une violation de la symétrie CP, mais nulle trace expérimentale n'en existe dans le «secteur fort» du modèle standard, la partie où l'interaction forte domine. C'est donc le «problème CP fort». En partie à cause de lui, le modèle standard reste incomplet en dépit de tous ses succès. L'axion est apparu en réponse à cette difficulté.

Roberto Peccei et Helen Quinn ont développé la meilleure solution actuelle au problème CP fort à l'université Stanford dans les années 1970. Le mécanisme de Peccei-Quinn, comme on l'appelle aujourd'hui, remplace une variable constante dans le terme qui viole la symétrie CP par une variable dynamique qui «se relaxe» à