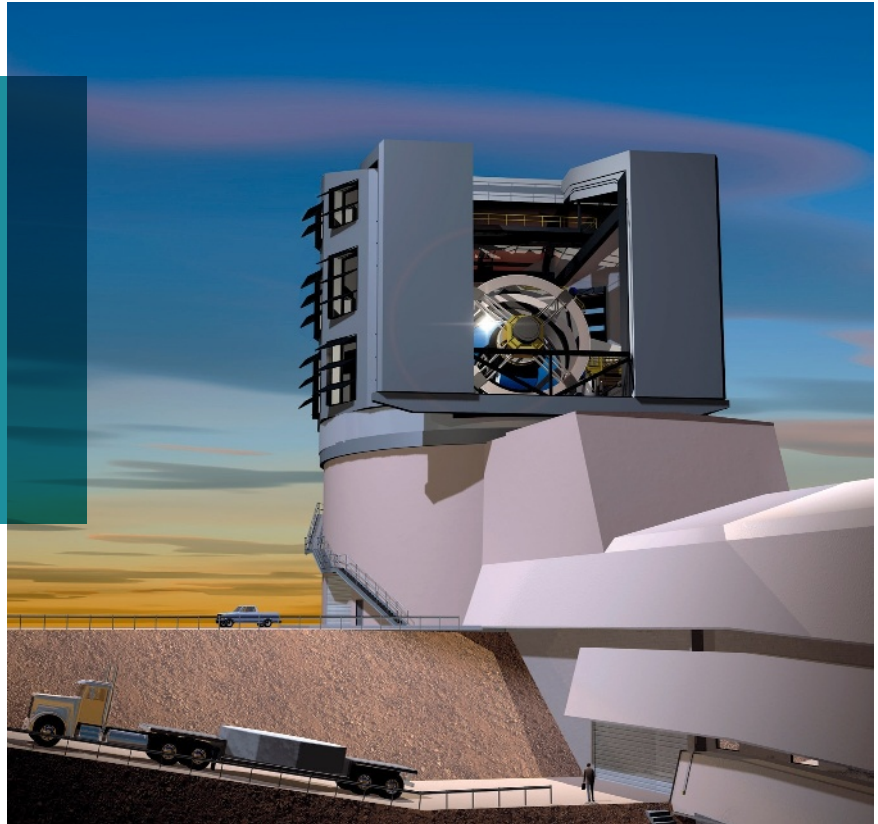


→ En construction au Chili, l'observatoire *Vera-C.-Rubin* sera, pour une décennie, l'un des plus grands instruments dédiés à la recherche sur la matière noire et l'énergie sombre. En trois nuits, il sera capable de couvrir l'intégralité du ciel.



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

Un terme de plus dans l'équation, et le neutron gagne une charge locale positive ou négative. Un peu étrange pour une particule supposée être neutre...

zéro, annulant le moment dipolaire électrique du neutron. On ne tarda pas à comprendre que ce mécanisme conduisait à la production d'une nouvelle particule hypothétique. Inspiré par une marque de lessive, le physicien théoricien Frank Wilczek l'a facétieusement nommée «axion», car elle «nettoie le problème».

42 Au début des années 1980, les articles sur les conséquences observationnelles potentielles de l'hypothétique axion ont proliféré. Parmi elles, la possibilité que l'axion ait exactement les bonnes propriétés pour résoudre le problème de la matière noire, comme le suggérait par exemple le théoricien Pierre Sikivie, de l'université de Floride. Grâce aux données observationnelles, nous savons que les particules de matière noire doivent être de faible masse, non chargées électriquement, d'une grande stabilité, et peu rapides. Idéalement, un mécanisme évident devrait aussi exister pour produire une grande partie de ces particules de matière noire au tout début de l'Univers. L'axion possède à peu près toutes les caractéristiques recherchées pour la matière noire. Un parfait candidat, à un détail près : nous ne l'avons encore jamais vu, et nous ne savons même pas s'il existe vraiment.

LES AXIONS COMME MATIÈRE NOIRE

En fin de compte, je suis venue au problème de la matière noire par le questionnement sur l'évolution cosmologique des axions. Au début des années 2010, les physiciens débattaient des types d'état quantique dans lesquels les axions pourraient se trouver, et une partie des

discussions tournait autour des calculs pour le déterminer. Je m'intéressais aux questions techniques concernant ces calculs, et c'est ainsi que j'ai commencé à travailler sur les axions. L'axion est un candidat à la matière noire à part, non seulement à cause de ses propriétés microphysiques spécifiques ou parce que nous en avons besoin indépendamment de sa relation avec le problème de la matière noire, mais aussi parce que ses propriétés peuvent se traduire en signatures astrophysiques distinctes de celles des autres candidats. Le débat fait encore rage sur l'étendue de ces différences entre les modèles de matière noire.

Avec un spin de valeur zéro, les axions font partie de la catégorie des bosons (très précisément, des bosons scalaires), alors que la plupart des autres candidats à la matière noire seraient plutôt des fermions. Une différence cruciale entre bosons et fermions est qu'en un même lieu, deux fermions ne peuvent pas partager le même état quantique. Cette règle explique pourquoi les électrons occupent des orbitales atomiques différentes. Les bosons, en revanche, n'ont aucune difficulté à partager un état. Un peu comme des majorettes, ils sont capables de se synchroniser complètement. Un résultat remarquable de cette propriété est le condensat de Bose-Einstein, dans lequel de nombreux bosons partagent le même état de basse énergie et se comportent comme un unique superboson. Nous savons que le condensat de Bose-Einstein existe, car nous en créons en laboratoire avec des atomes depuis près de vingt-cinq ans. Désormais, nous nous demandons si cela se produirait aussi dans