

potentielles sont moins nombreuses. Les axions ultralégers, par exemple, pourraient avoir une large gamme d'interactions avec le champ électromagnétique et une fourchette de masses plus étendue que l'axion de la QCD. Davantage de liberté élargit le terrain de jeu et le rend encore plus stimulant pour les théoriciens, mais constitue aussi un défi expérimental. Rechercher des « particules de type axion » sur tout l'espace des paramètres est un travail de longue haleine.

Quand j'ai commencé à travailler sur les axions en 2014, c'est de la part de mes collègues d'Europe et d'Asie que j'ai constaté le plus d'intérêt. La situation est très différente aujourd'hui. On dirait que tout le monde parle d'axions, et qu'ils sont omniprésents dans la recherche... et peut-être autour de nous. Nous les cherchons partout, sur Terre et dans l'espace.

CES NOUVEAUX INSTRUMENTS PLEINS DE PROMESSES

ADMX continue à chasser l'axion. Outre ADMX, les expériences *Abracadabra* (*A broadband/resonant approach to cosmic axion detection with an amplifying B-field ring apparatus*) au MIT et plusieurs autres au CAPP (Center for Axion and Precision Physics Research), en Corée du Sud, utilisent des instruments comparables à base d'aimants pour trouver des preuves directes de son existence. D'autres chercheurs, parmi lesquels mon groupe à l'université du New Hampshire, en collaboration avec des collègues de l'université Stanford, en Californie, et du Fermilab, dans l'Illinois, incorporent des axions et des particules de type axion dans les simulations numériques qui modélisent la formation des galaxies. Nous comparons ensuite ces simulations aux observations des galaxies réelles pour voir si la matière noire constituée d'axions conduit aux bonnes structures.

Nos efforts d'investigation vont énormément se développer dans la prochaine décennie, quand de nouvelles installations, au premier rang desquelles l'observatoire Vera-C.-Rubin (en l'honneur de celle qui découvrit les premières preuves concluantes de la matière noire), commenceront à collecter des données. Ces installations cartographieront la structure de l'Univers et la distribution inférée de la matière noire cosmique avec une précision sans précédent. Sur le

modèle d'ADMX, nous pouvons également sonder le ciel à la recherche de systèmes célestes à fort champ magnétique : des étoiles à neutrons, ces objets compacts et denses qui se forment en fin de vie des étoiles massives. À cause de leur structure effondrée, elles ont souvent des champs magnétiques extrêmement puissants. En théorie, les axions interagiraient avec ces champs et produiraient des émissions inattendues d'ondes radio. Un groupe de recherche a récemment rapporté les possibles traces de telles émissions, mais je reste sceptique quant à leur validité.

Ces initiatives sont faciles à ranger dans la catégorie « recherche de matière noire », mais il y a bien plus que cela en jeu. L'axion QCD est un produit dérivé du mécanisme de Peccei-Quinn, et le problème CP fort reste non résolu. Autrement dit, la quête des axions est également celle d'un modèle standard de la physique des particules plus complet, et, *in fine*, d'une compréhension élargie de la complexité mathématique qui décrit notre Univers.

— L'autrice —

> **Chanda Prescod-Weinstein**
est professeure assistante
de physique à l'université du
New Hampshire, aux États-Unis.

— À lire —

> **N. Glennon et al.**, Using PyUltraLight to model scalar dark matter with self-interactions, *Physical Review D*, à paraître, <https://arxiv.org/abs/2011.09510>, 2021.

> **L. Hui**, Wave dark matter, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, à paraître, <https://arxiv.org/abs/2101.11735>, 2021.

> **T. Braine et al.**, Extended search for the invisible axion with the axion dark matter experiment, *Physical Review Letters*, 124, 2020.

> **K. Kirkpatrick et al.**, Relaxation times for Bose-Einstein condensation in axion miniclusters, *Physical Review D*, 102, 103012, 2020.

> **A. H. Guth et al.**, Do dark matter axions form a condensate with long-range correlation ?, *Physical Review D*, vol. 92, 2015.

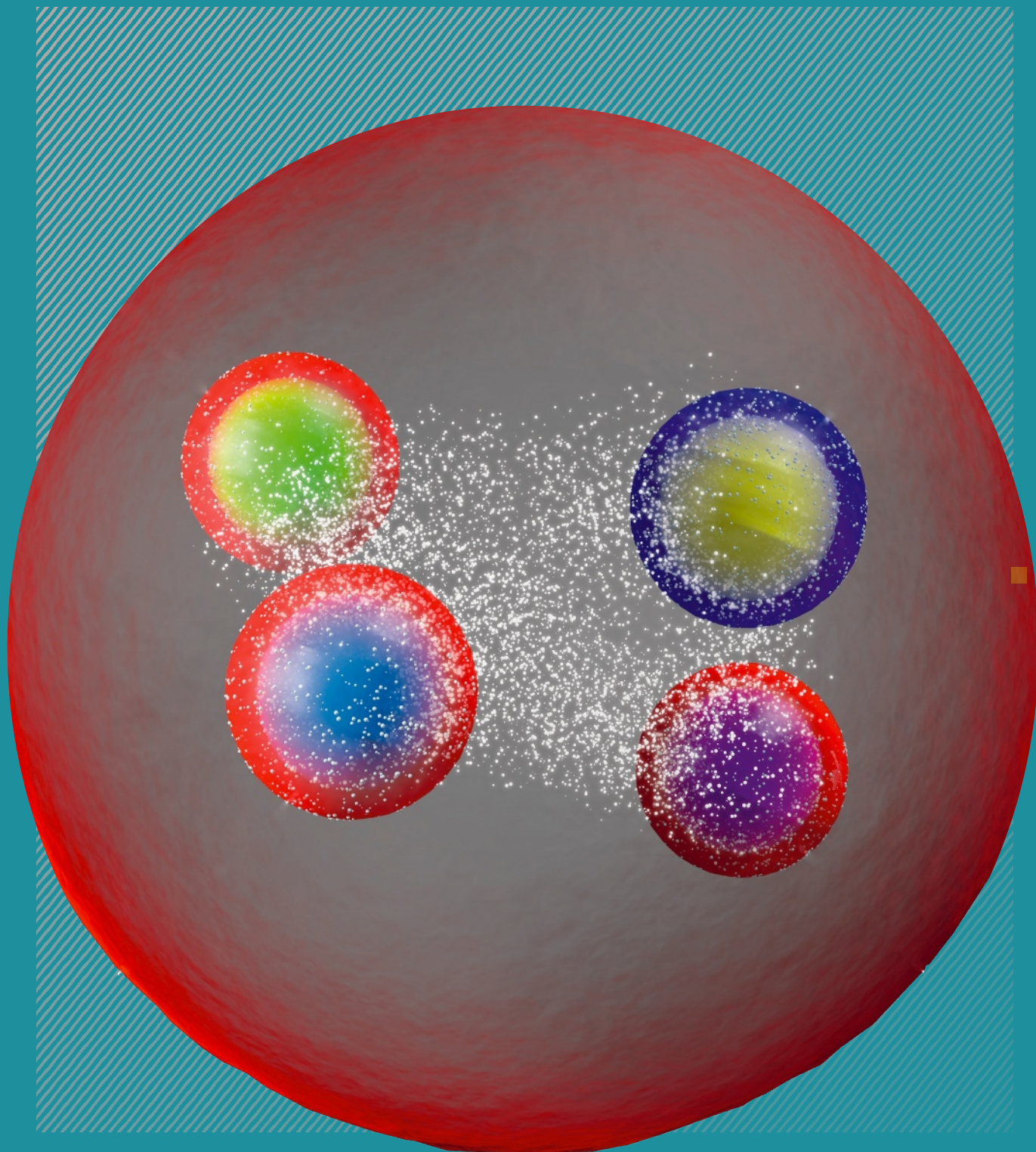
Toutes les particules découvertes ne sont pas élémentaires. En témoigne un rarissime assemblage de quatre quarks, le tétraquark, débusqué par le détecteur « LHCb ». Ce drôle de zèbre permettra de tester des théories sur l'interaction nucléaire forte.

46

2 + 2 font quark, et même tétraquark

Davide Castelvechi

→ Vue d'artiste du tétraquark T_{cc}^{++} : il contient deux quarks charm, un antiquark up et un antiquark down. Jusqu'alors, dans les tétraquarks détectés, deux quarks charm étaient toujours équilibrés par la présence d'antiquarks charm.



Au Cern, le Grand collisionneur de hadrons, ou LHC, est aussi un grand... découvreur de hadrons! Cet accélérateur de particules, enfoui sous la frontière franco-suisse, s'est rendu célèbre en 2012 en démontrant l'existence du boson de Higgs, la clé de voûte de la classification actuelle des particules élémentaires. Mais le LHC a aussi rapporté dans ses filets des dizaines de hadrons, c'est-à-dire des particules non élémentaires qui, comme les protons et les neutrons, sont composées de quarks.

Il y a peu, l'un des plus intrigants d'entre eux a fait son entrée dans le monde savant lors du congrès virtuel de la Société européenne de physique, le 29 juillet 2021. Le physicien Ivan Polyakov, de l'université de Syracuse, aux États-Unis, a dévoilé l'existence d'un hadron aussi inconnu qu'exotique, composé de quatre quarks. Au total, 62 hadrons nouveaux ont été épinglés par le LHC, d'après les comptes tenus par Patrick Koppenburg, de l'Institut national de physique subatomique d'Amsterdam, aux Pays-Bas. «Ce sont toutes des premières mondiales!», insiste ce physicien basé au Cern, le laboratoire européen de physique des particules qui abrite le LHC.

Le «panthéon» des particules, le modèle standard, décrit les briques fondamentales de la matière et les forces qui agissent sur elles. Il comprend six sortes de quarks, ainsi que leurs six contreparties en antimatière et quelques autres particules élémentaires, parmi lesquelles les électrons et les photons. Le modèle standard inclut aussi les règles d'après lesquelles les quarks forment des particules composites, les fameux hadrons. Les quarks sont maintenus

— En bref —

- > Quarks et antiquarks comptent parmi les briques fondamentales de la matière.
- > On les rencontre le plus souvent réunis à 2 ou 3 dans des hadrons, comme le proton.
- > Récemment découvert, le tétraquark T_{cc}^{++} se démarque en étant composé de deux quarks et deux antiquarks.
- > Cet authentique quadruplet, et d'autres encore sans doute, étaient plus abondants aux origines de l'Univers.

ensemble par l'interaction nucléaire forte – ou force forte –, l'une des quatre forces fondamentales. Les deux quarks les plus communs dans la nature sont le u (pour *up*, «haut») et le d (*down*, «bas»); leurs combinaisons possibles comprennent les neutrons (un u et deux d) et les protons (deux u et un d).

Dans l'état actuel des connaissances, les protons sont les seuls hadrons stables, même pris isolément – les neutrons ne le sont qu'une fois incorporés aux noyaux atomiques. Tous les autres hadrons ne se forment que fugacement, lors de la collision d'autres particules, et ils se désintègrent en une fraction de seconde. En somme, le LHC crée de nouvelles sortes de hadrons en fracassant frontalement, et à haute énergie, des faisceaux de protons.

QUARTET DE QUARKS

La plupart des hadrons nouveaux du LHC ont été détectés par *LHCb*, l'un des quatre détecteurs géants situés dans le tunnel circulaire de 27 kilomètres qui abrite le LHC, et la particule révélée par Ivan Polyakov n'a pas fait exception. En passant au crible les données relatives aux débris issus des collisions de protons, le physicien et son collaborateur Vanya Belyaev, de l'Institut de physique théorique et expérimentale à Moscou, ont trouvé la signature attendue d'un hadron à quatre quarks, un tétraquark donc, nommé T_{cc}^{++} (pour tétraquark à deux *charm* chargé positivement).

Cette configuration est extrêmement rare : la plupart des hadrons connus sont faits de deux ou trois quarks. Le premier tétraquark