

par l'acidification, qui réduit considérablement la disponibilité des minéraux nécessaires à leurs coquilles. Bien que de tels organismes aient enduré des changements environnementaux durant des centaines de millions d'années, l'augmentation du dioxyde de carbone est aujourd'hui si importante qu'ils ne seront peut-être pas capables de s'y adapter assez rapidement.

La perte de ces organismes renforcerait le réchauffement. Aujourd'hui, les efflorescences du coccolithophoridé *Emiliania huxleyi* peuvent couvrir des surfaces supérieures à 100 000 kilomètres carrés (voir la figure 2). Elles produisent des quantités notables de sulfure de diméthyle qui, passé dans l'atmosphère, déclenche la formation de nuages. Ces derniers, en réfléchissant la lumière du Soleil vers l'espace, refroidissent la planète. Sans les coccolithophoridés, la Terre absorberait plus d'énergie solaire qu'elle ne le fait déjà.

Le phytoplancton calcifiant qui se développe au sein des récifs sera doublement pénalisé par le dioxyde de carbone anthropogénique. Non seulement l'eau

acidifiée pourrait dissoudre leur squelette, mais le réchauffement de l'eau risque de dépasser leur seuil de tolérance et de les faire disparaître.

Des bouleversements à venir ?

Les émissions de dioxyde de carbone ne sont pas la seule menace que les hommes font peser sur le phytoplancton. L'érosion des sols due à la déforestation et d'autres activités humaines inonde les systèmes côtiers d'éléments nutritifs, conduisant à un développement excessif et à une décomposition importante de végétaux marins. L'équilibre actuel des récifs pourrait s'effondrer et mettre en péril la biodiversité.

En se réchauffant, les océans pourraient se stratifier de plus en plus : l'eau chaude en surface agit comme un couvercle sur l'eau froide, entravant ainsi les courants verticaux et la circulation de l'eau. Ces conditions favorisent les dinoflagellés et risquent d'augmenter les efflorescences toxiques dans les milieux côtiers.

L'étude des bouleversements du passé montre que l'équilibre des populations de phytoplancton est assez fragile et que les changements ont eu des répercussions importantes. Aujourd'hui, des chercheurs étudient, par exemple, les conséquences de la baisse d'oxygénation de l'eau dans le delta du Mississippi ou certains lacs sur le phytoplancton et, *via* un effet de domino, sur les animaux qui s'en nourrissent.

De tels travaux pourraient aider à mieux prévoir comment le phytoplancton et les espèces qui en dépendent se comporteront dans le futur. Ceux qui nient le changement climatique affirment souvent que la vie s'est régulièrement adaptée aux changements environnementaux dans le passé et qu'elle peut ainsi supporter de futures fluctuations ; cette façon de penser est inappropriée. Les activités humaines modifient les conditions océaniques à une vitesse inégalée dans l'histoire de la planète. Nous sommes donc malgré nous en train de mener une expérience inédite, dont l'issue ne sera pas connue avant qu'elle n'arrive à son terme. ■

france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélié Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

Particules et / champs sont-ils

REELS ?

Les physiciens nous présentent un monde constitué de particules et de champs de force. Mais ces notions posent d'importantes difficultés d'interprétation. D'après certains chercheurs, le monde serait plutôt fait de propriétés, telles que la couleur ou la forme.

Les physiciens qui étudient la matière dans ses aspects les plus fondamentaux décrivent souvent l'Univers comme étant constitué de minuscules particules, plus petites que les atomes, qui s'attirent et se repoussent par l'intermédiaire de champs de force. Ils nomment « physique des particules » leur domaine de recherche et « accélérateurs de particules » ou « détecteurs de particules » leurs instruments. Ils se conforment à un modèle du monde rappelant les constructions d'un jeu de Lego. Mais cette vision passe sous silence un fait méconnu : en physique quantique, les notions de particule et de champ sont tellement distordues par rapport aux notions classiques que beaucoup pensent que le monde pourrait être formé de quelque chose d'entièrement différent.

Le problème n'est pas que les physiciens ne disposeraient pas de théorie valable du monde subatomique. Ils en ont une : la théorie quantique des champs. Les physiciens l'ont élaborée entre la fin des années 1920 et le début des années 1950, en cherchant à marier la mécanique quantique avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. La théorie quantique des champs fournit les fondements conceptuels du modèle

Meinard Kuhlmann

L'ESSENTIEL

■ On imagine souvent les particules élémentaires comme de petites billes. Mais cette image perd son sens en physique quantique.

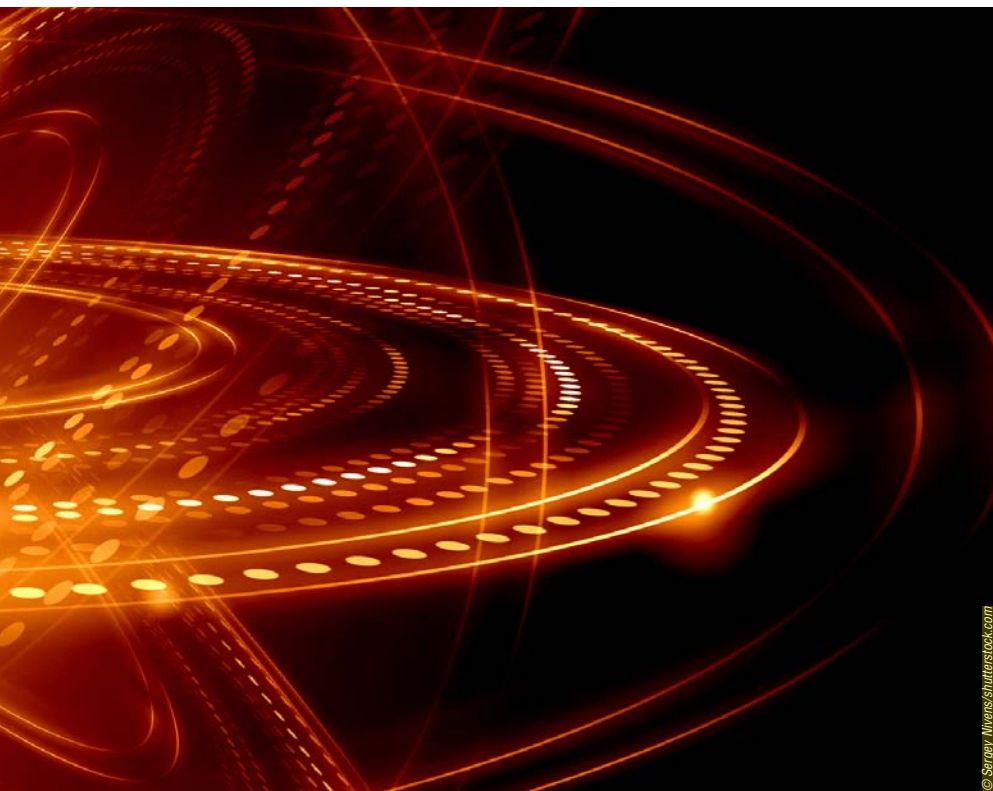
■ Selon de nombreux physiciens, les particules ne sont pas des objets, mais des excitations d'un champ quantique. Toutefois, cette notion soulève elle aussi des difficultés.

■ Pour surmonter ces obstacles conceptuels, certains pensent que le monde n'est pas formé d'entités matérielles, mais de relations ou de propriétés telles que la masse, la charge et le spin.

standard de la physique des particules, qui décrit dans un cadre commun les constituants de la matière et trois de leurs quatre interactions fondamentales. En termes de précision empirique, c'est la théorie qui a été le plus couronnée de succès de toute l'histoire de la science. Les physiciens s'en servent quotidiennement pour calculer les résultats des collisions de particules, la synthèse des éléments au cours du Big Bang, les conditions extrêmes à l'intérieur des noyaux atomiques et bien d'autres choses encore.

Dans ces conditions, il peut paraître surprenant que les physiciens ne soient même pas sûrs du tableau fondamental et des concepts premiers que dépeint la théorie, autrement dit de son « ontologie ». Cet embarras est distinct des mystères largement débattus de la mécanique quantique (tel celui de savoir si un chat, dont le sort dépend d'une fiole de poison actionnée par un dispositif quantique, peut être à la fois mort et vivant).

Le fait que l'interprétation de la théorie quantique des champs soit une question non encore réglée entrave les progrès de ceux qui cherchent à sonder la physique au-delà du modèle standard de la physique des particules : il est risqué de formuler une



© Sergey Nivens/Shutterstock.com

nouvelle théorie quand on ne comprend pas bien celle que l'on a déjà !

Au premier abord, le contenu du modèle standard semble évident. Il comporte en premier lieu des groupes de particules élémentaires, tels les quarks et les électrons, et en second lieu quatre types de champs de force, qui sont les médiateurs des interactions de ces particules. C'est le tableau que l'on voit sur les murs des salles de cours et dans des articles de *Pour la Science*. Mais il a beau être convaincant, il est très insatisfaisant.

Pour commencer, les deux catégories d'objets, particules et champs, se brouillent. La théorie quantique des champs associe un champ à chaque type de particule élémentaire, si bien qu'il existe un champ électronique pour l'électron, un champ pour chaque type de quark, etc. En même temps, les champs de force ont eux aussi des particules associées. Par exemple, le photon est la particule associée au champ électromagnétique.

Ainsi, la distinction entre particules et champs semble artificielle, et dans le discours des physiciens, l'un ou l'autre ressort comme étant plus fondamental. Ce point a été beaucoup débattu : la théorie quantique des champs concerne-t-elle en fin de

compte les particules ou les champs ? Dès le départ, il y eut d'éminents physiciens et philosophes dans chaque camp. Même aujourd'hui, ces deux concepts sont encore utilisés à des fins d'illustration, bien que la plupart des physiciens admettent que les notions classiques de particule ou de champ ne correspondent pas à ce que décrit la théorie. Si les images mentales évoquées par les mots « particule » et « champ » ne correspondent pas à ce que décrit la théorie quantique des champs, les physiciens et les philosophes doivent trouver par quoi les remplacer.

Les deux options classiques conduisant à une impasse, certains philosophes et physiciens ont formulé des alternatives plus radicales. Ils suggèrent que les constituants les plus fondamentaux du monde matériel sont des entités intangibles telles que des relations et des propriétés. Une idée particulièrement radicale consiste à affirmer que tout se réduirait à des entités intangibles et à rien d'autre, sans aucune référence à des objets. C'est une idée révolutionnaire et contre-intuitive, mais certains soutiennent que la physique nous l'impose.

Quand la plupart des gens, experts compris, se représentent la réalité subatomique, ils imaginent des particules qui se comportent comme de petites boules de billard

rebondissant les unes sur les autres. Mais cette notion de particules est le prolongement d'une vision du monde qui remonte aux philosophes atomistes de la Grèce antique et qui a atteint son apogée dans les théories d'Isaac Newton. Plusieurs raisonnements montrent que les unités fondamentales de la théorie quantique des champs ne se comportent pas du tout comme des boules de billard.

Tout d'abord, le concept classique de particule sous-entend un objet qui existe en un lieu précis. Mais les « particules » de la théorie quantique des champs n'ont en général pas de position bien définie. Par exemple, une particule de votre corps n'est pas strictement localisée à l'intérieur de votre corps. Un observateur qui tenterait de mesurer sa position a une probabilité faible, mais non nulle, de la détecter dans les endroits les plus lointains de l'Univers. Cette contradiction était déjà évidente dans les premières formulations de la mécanique quantique, mais elle a empiré quand les théoriciens ont fusionné la mécanique quantique avec la théorie de la relativité restreinte. Les particules quantiques relativistes sont très insaisissables : elles ne se trouvent dans aucune région particulière de l'Univers !

Des particules problématiques

Ensuite, supposons qu'une particule soit localisée dans votre cuisine. Votre ami, qui regarde votre logement en passant devant en voiture, pourrait voir cette particule étalée sur l'Univers entier. Ce qui est localisé pour vous est délocalisé aux yeux de votre ami. Non seulement la position de la particule, mais aussi le simple fait que la particule ait une position, dépendent de votre point de vue. Dans ce cas, supposer que les entités fondamentales soient des particules localisées est absurde.

Troisièmement, même si vous renoncez à localiser les particules et que vous vous contentez de les compter, vous serez confronté à des difficultés. Supposez que vous cherchiez à connaître le nombre de particules chez vous. Vous faites le tour de l'appartement et trouvez trois particules dans la salle à manger, cinq sous le lit, huit dans le buffet de la cuisine, et ainsi de suite. Maintenant, additionnez-les. Vous aurez la surprise de constater que la somme ne sera pas égale au nombre total de particules. Ce

nombre, en théorie quantique des champs, est une propriété de l'appartenance dans son ensemble ; pour le déterminer, il vous faudrait faire l'impossible et mesurer tout l'appartenance d'un seul coup, plutôt que pièce par pièce.

Un cas extrême illustrant à quel point les particules sont insaisissables est celui du vide, qui a des propriétés paradoxales en théorie quantique des champs. Vous pouvez avoir globalement un vide (par définition, c'est un état à zéro particule) tout en observant dans chaque région finie quelque chose de très différent du vide. En d'autres termes, votre appartenance peut être complètement vide même si vous trouvez des particules dans tous les coins...

Le nombre de particules, fonction de l'observateur

Une autre propriété frappante du vide en théorie quantique des champs est ce qu'on nomme l'effet Unruh. Supposons qu'un astronaute se trouve dans un vaisseau immobile, dans ce qu'il pense être le vide. On montre par la théorie, et c'est l'effet Unruh, qu'un astronaute à bord d'un vaisseau accéléré par rapport au premier aura une perception très différente du même milieu : ses mesures lui indiqueront qu'il est immergé dans un bain thermique d'innombrables particules. Ce désaccord entre points de vue se produit également aux abords des trous noirs et conduit à des conclusions paradoxales sur le sort de la matière qui tombe sur de tels astres.

Si un vide plein de particules semble absurde, c'est parce que la notion classique de vide nous induit en erreur ; ce que la théorie décrit doit être autre chose. Si le nombre de particules dépend de l'observateur, alors il semble illogique de supposer que ces particules sont fondamentales. Nous pouvons accepter que de nombreuses propriétés dépendent de l'observateur, mais pas le nombre même de briques élémentaires.

Enfin, la théorie quantique montre que les particules peuvent perdre leur individualité. Dans le phénomène déconcertant de l'intrication quantique, plusieurs particules peuvent constituer un système plus gros et perdre les propriétés individuelles qui les distinguent les unes des autres. Les particules présumées peuvent alors partager des propriétés telles que l'éventail de positions dans lesquelles elles sont susceptibles de se trouver. Quand deux particules sont intri-

■ L'AUTEUR



Meinard KUHLMANN est professeur de philosophie à l'Université de Bielefeld, en Allemagne. Il a une double formation, en physique et en philosophie.

Glossaire

Ontologie :

Explication ou étude de l'être, de l'essence des choses.

Structure :

Manière dont sont reliés entre eux des objets, concrets ou abstraits.

Réalisme :

Conception selon laquelle il existe un monde indépendant de soi.

Réalisme structurel :

Conception selon laquelle la réalité est caractérisée par des structures, où la nature des objets en relation importe peu.

Réalisme structurel épistémique :

Version du réalisme structurel qui considère que la nature des objets en relation est inaccessible à la connaissance.

Réalisme structurel ontologique (ou ontique) :

Version du réalisme structurel selon laquelle les structures ne sont définies que par des relations, les objets étant inexistantes.

quées, l'observateur n'a pas le moyen de les distinguer : à ce stade, peut-on vraiment encore parler de deux objets ?

Un théoricien pourrait simplement décréter que nos soi-disant deux particules sont deux individualités distinctes. Pour les philosophes, ce diktat est de l'«*eccité primitive*» (une individualité primitive, par essence). Par définition, cette *eccité* est non observable. La plupart des physiciens et philosophes sont très sceptiques à l'égard de telles approches *ad hoc*. Il semble plutôt que l'on n'ait plus affaire à deux particules : le système intriqué se comporte comme un tout indivisible et la notion de partie, et à plus forte raison de particule, perd son sens.

Ces problèmes théoriques soulevés par les particules défient l'expérience. Qu'enregistrent donc les «*détecteurs de particules*» s'il ne s'agit pas de particules ? En fait, la détection d'une particule est toujours une inférence. Tout ce qu'un détecteur enregistre, c'est un grand nombre d'excitations isolées produites dans le matériau détecteur. Les ennuis surgissent quand nous relions les points correspondant à ces excitations et que nous inférons l'existence de particules ayant des trajectoires continues dans l'espace et le temps (dans certaines interprétations minoritaires de la physique quantique, on raisonne en termes de trajectoires bien définies, mais ces interprétations ont leurs propres difficultés ; je me cantonne ici à l'interprétation habituelle de la physique quantique).

Faisons donc le point. Nous nous représentons les particules comme de minuscules boules de billard, mais les entités que les physiciens d'aujourd'hui nomment «*particules*» ne leur ressemblent en rien. Selon la théorie quantique des champs, les objets ne peuvent être localisés dans aucune région finie de l'espace, si grande ou floue soit-elle. Qui plus est, le nombre de particules putatives dépend de l'état de mouvement de l'observateur. Tous ces résultats, pris collectivement, sonnent le glas de l'idée d'un monde composé de particules qui seraient des sortes de petites billes.

Sur la base de ces considérations et d'autres, force est de conclure que la «*physique des particules*» est une expression impropre : bien que les physiciens passent leur temps à parler de particules, ces objets n'existent pas. On pourrait parler de «*particules quantiques*», mais comment justifier l'utilisation du mot «*particule*» s'il ne recouvre presque plus rien de la notion