

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

Aurélien Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

© 2013 France Culture

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.

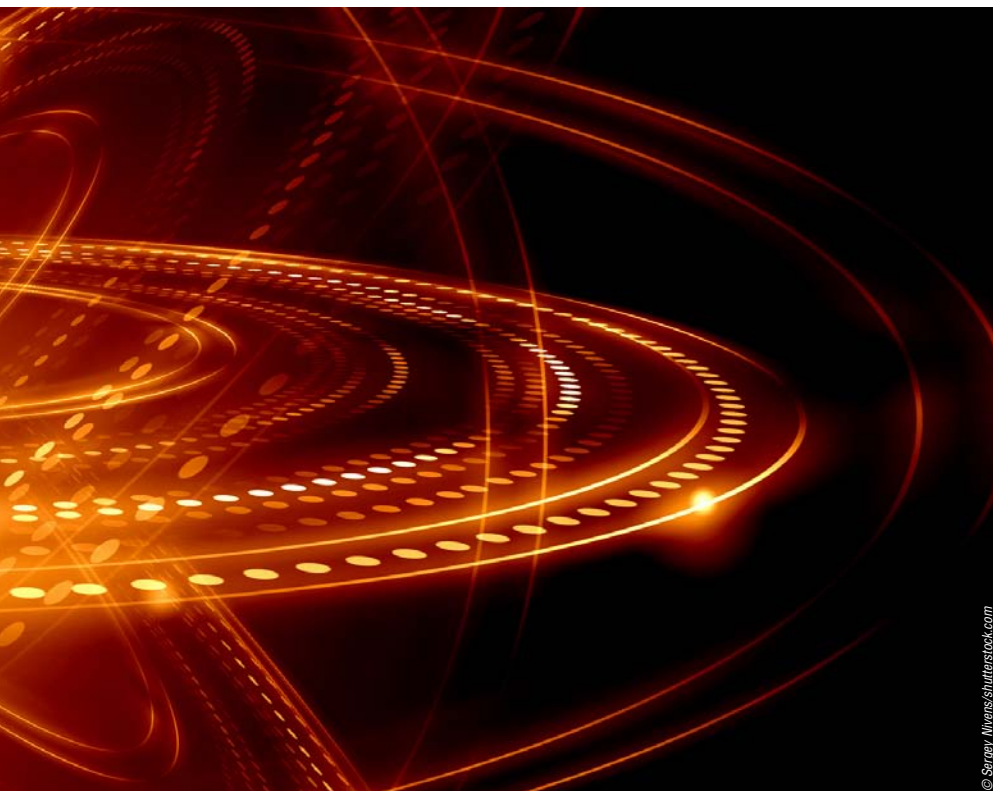
■ Selon de nombreux physiciens, les particules ne sont pas des objets, mais des excitations d'un champ quantique. Toutefois, cette notion soulève elle aussi des difficultés.

■ 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 relient 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

Il est tout naturel de penser que la physique des particules traite de particules. Cependant, il s'avère que les «particules» décrites par la théorie quantique ne correspondent pas au sens habituel du terme, qui désigne des constituants de matière individualisés et localisés. Il leur manque notamment les quatre attributs détaillés ci-dessous.

Ce que l'on voit/calculé/faît

Ce que l'on infère

Pourquoi c'est faux

Les particules sont localisées

Une particule occupe une position déterminée, qui varie continûment au cours du temps. Mais la théorie quantique, telle qu'on la comprend généralement, ne permet à aucun objet d'avoir une telle trajectoire.



Des traces dans une chambre à bulles



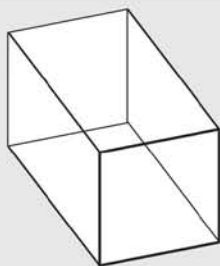
Des particules traversent la chambre en laissant des traces



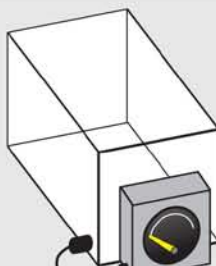
Tout ce que l'on voit est une succession de bulles : les relier est une erreur

En l'absence de particules, rien ne peut se produire

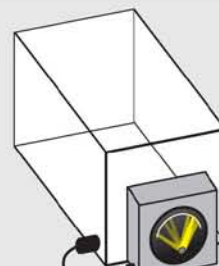
Si la matière est faite de particules, le vide, défini comme un état à zéro particule, ne devrait présenter aucune activité. Mais la théorie quantique prédit qu'un détecteur placé dans le vide enregistre quand même une activité.



Un champ dans son état de vide



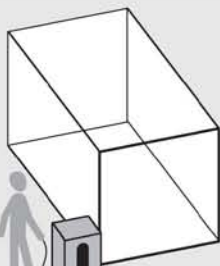
Un appareil de mesure tel qu'un compteur Geiger ne détectera rien



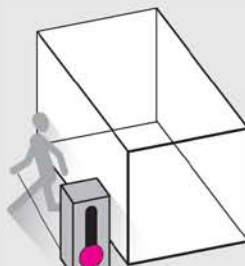
Un compteur Geiger grésillera

Soit une particule existe, soit elle n'existe pas

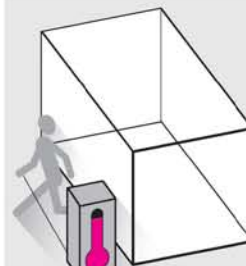
Un objet est réel si tous les observateurs sont capables de s'accorder sur l'existence de cet objet. Les «particules» échouent à ce test : si un observateur voit un vide, un observateur accéléré par rapport à lui voit un gaz chaud de particules.



Un observateur voit un vide froid



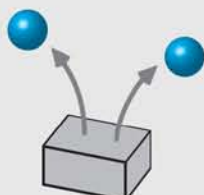
Un autre observateur verra aussi un vide froid



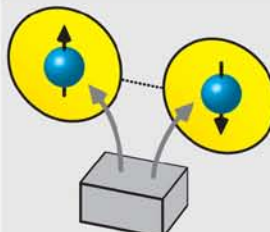
Un observateur accéléré voit un gaz chaud de particules

Les particules ont des propriétés déterminées

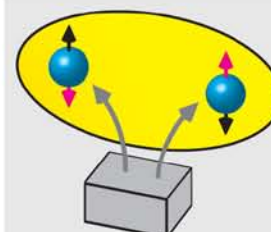
Une particule a une énergie, une quantité de mouvement, etc. Mais chaque membre d'une paire de «particules» intriquées n'a plus de propriétés définies ; seul le système dans son ensemble en a.



Production d'une paire de particules intriquées



Chacune des particules a un spin bien défini



Seul le système dans son ensemble a un spin bien défini

classique de particule ? Il vaudrait mieux franchir le pas et abandonner complètement le concept.

Certains physiciens considèrent ces difficultés comme des preuves indirectes en faveur d'une interprétation de la théorie quantique des champs en termes de champs purs. Selon cette conception, les particules sont des ondulations d'un champ qui emplit l'espace comme un fluide invisible. Mais comme nous allons le voir, on ne peut pas non plus interpréter facilement en termes de champs la théorie quantique des champs.

L'expression « théorie quantique des champs » évoque naturellement une théorie qui traite de versions quantiques des champs classiques, tels le champ électrique et le champ magnétique. Mais qu'est-ce qu'une « version quantique » ? Le terme de « champ » évoque le champ magnétique qui aligne la limaille de fer autour d'un barreau aimanté et le champ électrique qui fait dresser les cheveux sur la tête, mais un champ quantique est tellement différent d'un champ classique que même les physiciens théoriciens avouent qu'ils ont du mal à se le représenter.

Un champ classique fait correspondre à chaque point de l'espace et à chaque instant une quantité physique, par exemple la température, la pression

ou l'intensité du champ électrique. Un champ quantique, quant à lui, fait correspondre à chaque point de l'espace-temps non pas une quantité physique, mais une entité mathématique abstraite, qui représente le type de mesure que l'on peut effectuer plutôt que le résultat qu'on obtiendrait.

Historiquement, les physiciens ont développé la théorie quantique des champs en « quantifiant » la théorie des champs classiques. Dans cette procédure, les théoriciens partent de l'équation classique à laquelle obéit le champ et remplacent ce dernier (représenté par une fonction de la position et du temps) par un « opérateur » dépendant de la position et du temps. Un opérateur est un objet mathématique représentant une opération telle que la différentiation ou l'extraction de la racine carrée (certains opérateurs peuvent correspondre à des processus physiques particuliers tels que l'émission et l'absorption de lumière).

Les opérateurs ajoutent une couche d'abstraction entre la théorie et la réalité. Un champ classique est analogue à

une carte météorologique indiquant la température en tout lieu d'une région. Sa version quantique est analogue à une carte qui n'indiquerait pas « 40 °C » sur un lieu donné, mais, par exemple, « $\sqrt{\quad}$ ». Pour obtenir la température, il faudrait passer par l'étape supplémentaire consistant à appliquer l'opérateur « $\sqrt{\quad}$ » à une autre entité mathématique, nommée vecteur d'état et qui représente la configuration du système en question.

Pas d'image mentale pour le champ quantique

À certains égards, cette particularité des champs quantiques ne paraît pas surprenante. La physique quantique (la théorie générale sur laquelle est bâtie la théorie quantique des champs) ne gère pas non plus des valeurs bien déterminées, mais seulement des probabilités. Cependant, à y regarder de plus près, la situation est nettement plus bizarre avec un champ quantique. En effet, ce dernier ne spécifie même pas des probabilités ; il doit pour cela être combiné avec le vecteur d'état.

La nécessité d'appliquer le champ quantique, opérateur variant dans l'espace et le temps, au vecteur d'état, entité globale décrivant le système dans son ensemble et ne se référant à aucune position particulière, rend la théorie très difficile à interpréter, à traduire en quelque chose de physique que l'on peut imaginer et manipuler mentalement.

Un champ classique permet de visualiser des phénomènes tels que la lumière comme des ondes qui se propagent dans l'espace. Le champ quantique efface ce tableau et nous laisse bien en peine de dire comment fonctionne le monde.

Il est clair, dès lors, que le tableau usuel constitué des particules élémentaires et des champs de force médiateurs n'est pas une ontologie satisfaisante du monde physique : on ne sait même pas ce qu'est au juste une particule ou un champ. Une réponse courante consiste à dire qu'il faudrait envisager les particules et les champs comme des aspects complémentaires de la réalité. Mais cette caractérisation ne résout pas la difficulté : même dans les cas où nous sommes censés voir l'un seulement des deux aspects, aucune de ces notions ne fonctionne.

Heureusement, les notions de particule et de champ n'épuisent pas les ontologies possibles pour la théorie quantique des

LE TABLEAU USUEL CONSTITUÉ
des particules élémentaires et des champs
de force médiateurs n'est pas une ontologie
satisfaisante du monde physique.

champs. De l'avis d'un nombre croissant de personnes, ce qui compte vraiment, ce ne sont pas les objets, mais les relations qu'ils entretiennent. Cette vision rompt avec les conceptions atomistes et pointillistes du monde matériel encore plus radicalement que ne pourraient le faire les modifications les plus draconiennes des ontologies à particules et champs.

Initialement, cette position connue sous le nom de réalisme structurel a été introduite dans une version assez modérée, le « réalisme structurel épistémique ». Selon ce dernier, nous ne pourrions jamais connaître la véritable nature des choses, mais seulement leurs liens les unes avec les autres. Prenons l'exemple de la masse. Perçoit-on ou mesure-t-on la masse elle-même ? Non. On ne perçoit ou mesure que ce qu'elle signifie pour d'autres entités ou, concrètement, comment un corps massif est attiré par un autre corps massif par gravitation. La structure du monde, qui traduit comment les choses dépendent les unes des autres, est la composante la plus stable des théories physiques. De nouvelles théories pourraient bouleverser notre conception des briques élémentaires du monde, mais elles tendent à préserver les structures.

Le réalisme structurel à la rescousse ?

Et maintenant se pose la question suivante : pour quelle raison ne pouvons-nous connaître que les relations entre les choses et non les choses elles-mêmes ? La réponse la plus directe consiste à affirmer que les relations sont tout ce qui existe. Ce saut fait du réalisme structurel une proposition plus radicale, nommée réalisme structurel ontologique.

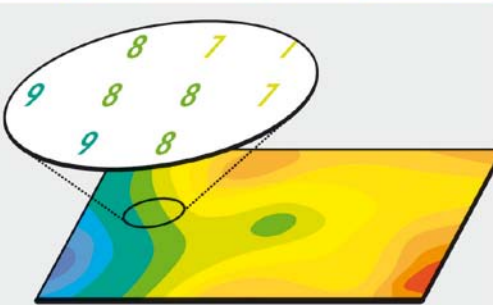
Les nombreuses symétries que l'on a découvertes en physique moderne étayent le réalisme structurel ontologique. En physique quantique comme dans la théorie de la gravitation d'Einstein (la théorie de la relativité générale), certains changements de configuration du monde, connus sous le nom de transformations de symétrie, n'ont pas de conséquences empiriques. Ces transformations échangent les éléments individuels dont le monde est constitué, mais laissent leurs relations inchangées. Par analogie, considérez un visage symétrique vu dans un miroir. Le miroir échange l'œil droit avec l'œil gauche, la narine droite

DES CHAMPS SEMÉS D'EMBÔCHES

Les physiciens nomment leur théorie de la matière « théorie quantique des champs ». Cela sonne comme une théorie des champs. Mais les champs supposément décrits par cette théorie ne sont pas ce que les physiciens entendent classiquement par le terme de « champ ».

Champ classique

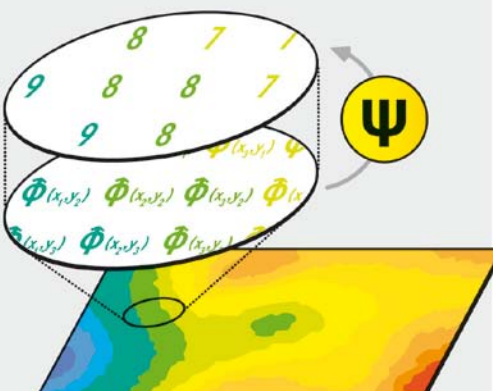
Par définition, un champ est analogue à un fluide qui emplit l'espace. En chaque point, sa valeur est mesurable. Un exemple est le champ électrique : l'amplitude du champ électrique au point où se trouve une particule chargée détermine l'intensité de la force électrique exercée sur cette particule.



À chaque point est associée une valeur mesurable

Champ quantique

Les champs décrits par la théorie quantique ne correspondent pas à cette définition. À chaque point de l'espace n'est pas associée une quantité physique mesurable, mais un opérateur. Les probabilités de mesurer telle ou telle valeur d'une grandeur physique s'obtiennent en appliquant les opérateurs au « vecteur d'état » ψ , l'objet mathématique qui représente l'état du système entier.



À chaque point (x, y) est associé un opérateur $\hat{\phi}(x, y)$

avec la gauche, et ainsi de suite. Pourtant, toutes les positions relatives des traits du visage sont préservées. Ces relations sont ce qui définit véritablement un visage, alors que les qualificatifs « droite » et « gauche » dépendent de votre point de vue. Les objets que nous nommons particules et champs possèdent des symétries plus abstraites, mais l'idée est la même.

Selon le principe du rasoir d'Occam, les physiciens et les philosophes préfèrent les idées qui expliquent les phénomènes en utilisant le moins possible d'hypothèses. Dans le cas présent, on peut construire une théorie parfaitement valable en postulant l'existence de relations particulières sans avoir à supposer en plus des entités individuelles. Ainsi, les partisans du réalisme structurel ontologique affirment que nous ferions aussi bien de nous dispenser des

objets et de supposer que le monde est constitué uniquement de structures, ou de réseaux de relations.

On rencontre dans la vie quotidienne de nombreuses situations où seules les relations comptent, et où décrire les objets en relation serait une complication inutile. Dans un réseau de métro, par exemple, il est crucial de savoir comment sont connectées les différentes stations. À Paris, la station Odéon est directement connectée à la station Mabillon, alors que depuis la station Saint-Germain-des-Prés vous devez changer de ligne au moins une fois, bien que Saint-Germain-des-Prés soit plus proche de Mabillon que Odéon. C'est la structure des connexions qui importe. Le fait que la station de métro Saint-Germain-des-Prés ait été ou non récemment rénovée est anecdotique pour celui qui doit emprunter le système.



Jean-François Colonna (CMAP/École polytechnique, www.ladimie.polytechnique.fr)

UNE REPRÉSENTATION IMAGÉE DES FLUCTUATIONS QUANTIQUES DU VIDE. Bien que le vide soit, en moyenne, dépourvu de particules, des paires particule-antiparticule de toutes sortes se créent spontanément et s'annihilent aussitôt.

D'autres exemples de structures qui prennent le dessus par rapport à leur réalisation matérielle sont le Web, les réseaux neuronaux du cerveau et le génome d'une espèce. Toutes ces structures continuent à fonctionner même quand des ordinateurs, des neurones ou des individus disparaissent. Ces exemples ne sont pas des analogies très strictes, mais, dans l'esprit, elles sont assez proches des arguments techniques qui s'appliquent à la théorie quantique des champs.

Un raisonnement assez voisin utilise l'intrication quantique pour appuyer l'idée que les structures sont au fondement de la réalité. L'intrication de deux particules est un effet holistique. Toutes les propriétés intrinsèques des deux particules, telle la charge électrique, ajoutées à toutes leurs propriétés extrinsèques, telle la position, ne suffisent pas à déterminer l'état du système de deux particules intriquées. Le tout est ici plus que la somme de ses parties. Le tableau atomiste du monde, dans lequel tout est déterminé par les propriétés de ses briques les plus élémentaires et la manière dont elles sont reliées dans l'espace-temps, se délite. Au lieu de considérer les particules comme primaires et l'intrication comme secondaire, peut-être devrions-nous envisager les choses dans l'autre sens.

Il paraît étrange qu'il puisse y avoir des relations sans *relata*, en d'autres termes sans objets soumis à ces relations. C'est un peu comme si l'on imaginait un mariage sans époux. De nombreux physiciens et

philosophes trouvent eux aussi cela bizarre et pensent qu'il est impossible d'obtenir des objets tangibles simplement sur la base de relations.

Certains avocats du réalisme structurel ontologique essaient alors de proposer un compromis. Ils ne nient pas que les objets existent ; ils prétendent seulement que les relations, ou structures, priment sur le plan ontologique. Autrement dit, les objets n'ont pas de propriétés intrinsèques, seulement des propriétés dues à leurs relations avec d'autres objets. Mais cette position semble s'arrêter au milieu du gué. En effet, tout le monde est d'accord pour affirmer que les objets ont des relations ; la seule position nouvelle et intéressante serait que tout émerge purement sur la base des relations.

En fin de compte, le réalisme structurel est une idée qui a le mérite de bousculer nos *a priori*, mais qui a besoin d'être davantage développée avant que nous sachions si elle peut nous délivrer de nos problèmes d'interprétation.

Une autre alternative pour comprendre la théorie quantique des champs part d'une idée simple. Bien que les interprétations en termes de particules et en termes de champs soient d'habitude considérées comme radicalement différentes l'une de l'autre, elles ont quelque chose de crucial en commun. Toutes deux supposent que les unités fondamentales du monde matériel sont des entités individuelles persistantes auxquelles on peut attribuer des propriétés. Ces entités sont soit des particules, soit, dans le cas de la théorie

des champs, des points de l'espace-temps. Beaucoup de philosophes, dont je fais partie, pensent que cette division en objets et en propriétés pourrait être la raison profonde pour laquelle l'approche des particules et celle des champs se heurtent toutes deux à des difficultés. Nous pensons qu'il vaudrait mieux envisager les propriétés comme étant la seule et unique catégorie fondamentale.

Généralement, les gens supposent que les propriétés sont des « universels », en d'autres termes qu'elles appartiennent à une catégorie générale abstraite. Elles sont toujours possédées par des objets particuliers ; elles ne peuvent pas exister indépendamment (en fait, Platon se les représentait comme existant indépendamment, mais seulement dans un monde supérieur, pas dans le monde qui existe dans l'espace et le temps). Par exemple, quand vous pensez au rouge, vous pensez généralement à des objets rouges particuliers, et non à une entité désincarnée nommée « rougeur ».

Mais on pourrait inverser cette façon de voir. On pourrait considérer les propriétés comme ayant une existence, indépendamment des objets qui les possèdent. Les propriétés pourraient être ce que les philosophes appellent des « particuliers » : des entités individuelles concrètes. Ce que nous appelons couramment un objet pourrait alors n'être en fait qu'un faisceau de propriétés : couleur, forme, consistance et ainsi de suite.

Un monde de propriétés et non d'objets

Parce que cette conception des propriétés comme des particuliers plutôt que comme des universels diffère de la vision habituelle, les philosophes ont introduit un nouveau terme pour les décrire : ce sont des « tropes ». Ce terme un peu bizarre véhicule malheureusement des connotations inappropriées, mais il est maintenant établi.

Interpréter les objets comme des faisceaux de propriétés n'est pas la manière habituelle de conceptualiser le monde, mais cela devient moins mystérieux si nous essayons de désapprendre notre représentation du monde et que nous nous replaçons dans les premières années de notre vie. Quand un enfant voit un ballon et en fait l'expérience pour la première fois, il ne perçoit pas à proprement parler un ballon. Ce qu'il perçoit est une forme ronde, d'une certaine teinte de rouge, avec une consistance un

expérimenter

observer

chercher

comprendre

inventer

découvrir

partager

jouer

explorer

de l'infiniment **grand** à l'infiniment petit

FÊTE[^] DE LA SCIENCE

9 - 13 octobre 2013

Retrouver toutes les animations dans votre région

www.fetedelascience.fr

www.facebook.com/fetedelascience

#FeteDeLaScience



Accès site mobile

peu élastique. Ce n'est que plus tard qu'il associe ce faisceau de perceptions à un objet cohérent d'un certain type, à savoir un ballon. La prochaine fois qu'il verra un ballon, il dira simplement « Tiens, un ballon! », et il oubliera l'appareil conceptuel qui intervient dans cette perception qui n'est immédiate qu'en apparence.

Dans l'ontologie des tropes, nous revenons aux perceptions directes de l'enfance. Ici-bas dans le monde, les choses ne sont que des faisceaux de propriétés. Nous ne commençons pas par voir un ballon, auquel nous attachons ensuite des propriétés. Au contraire, nous avons un ensemble de propriétés et ensuite seulement nous nommons cela un ballon. Un ballon n'est rien de plus que ses propriétés.

De la métaphysique pour guider la physique

Appliquons cette idée à la théorie quantique des champs : ce que nous nommons un électron est en fait un faisceau de diverses propriétés ou tropes : trois propriétés essentielles fixes (masse, charge et spin), ainsi que de nombreuses propriétés non essentielles changeantes (position, vitesse). Cette conception en termes de tropes aide à comprendre la théorie quantique des champs. Par exemple, cette théorie prédit que les particules élémentaires peuvent apparaître subitement et disparaître tout aussi rapidement. Le comportement du vide en théorie quantique des champs est particulièrement déconcertant : la valeur moyenne du nombre de particules est zéro, et pourtant le vide fourmille d'activité. D'innombrables processus y ont lieu en permanence, impliquant la création suivie de l'annihilation de toutes sortes de particules.

Dans une ontologie à base de particules, cette activité est paradoxale. Si les particules sont fondamentales, comment alors peuvent-elles se matérialiser ? À partir de quoi se matérialisent-elles ? Dans l'ontologie des tropes, la situation est naturelle. Le vide, bien que vide de particules, contient des propriétés. Une particule est ce que l'on obtient quand ces propriétés se regroupent d'une certaine façon.

Comment peut-il y avoir autant de controverse fondamentale sur une théorie aussi fructueuse, empiriquement, que la théorie quantique des champs ? La réponse est simple. Bien que la théorie nous dise ce que nous pouvons mesurer, elle parle en

énigmes dès lors qu'il est question de la nature des entités à l'origine de nos observations. La théorie rend compte de nos observations en termes de quarks, muons, photons et divers champs quantiques, mais elle ne nous dit pas ce qu'est véritablement un photon ou un champ quantique. Et elle n'a pas besoin de le faire, parce que les théories physiques peuvent être empiriquement valables en grande partie sans régler ces questions métaphysiques.

Pour de nombreux physiciens, c'est suffisant. Ils adoptent une attitude dite instrumentaliste : selon eux, les théories scientifiques ne représentent pas nécessairement la réalité du monde. Pour eux, les théories ne sont que des outils pour faire des prédictions expérimentales. Cependant, de nombreux physiciens ont le sentiment que leurs théories décrivent au moins certains aspects de la nature telle qu'elle est avant qu'une mesure ne soit effectuée. Après tout, que fait la science, sinon tenter de comprendre le monde ?

Pour broser un tableau complet du monde physique, il est nécessaire de combiner la physique et la philosophie. Ces deux disciplines sont complémentaires. La métaphysique fournit divers cadres concurrents pour l'ontologie du monde matériel, même si, au-delà des questions de cohérence interne, elle n'est pas en mesure de trancher entre eux. Quant à la physique, il lui manque un exposé cohérent des questions fondamentales, telles que la définition de ses objets, le rôle de l'individualité, le statut des propriétés, la relation entre objets et propriétés, et la signification de l'espace et du temps.

La réunion des deux disciplines est particulièrement importante à certaines époques où les physiciens sont amenés à revisiter les fondements de leur domaine. La pensée métaphysique a guidé Isaac Newton et Albert Einstein, et elle influence beaucoup de ceux qui essaient d'unifier la théorie quantique des champs et la théorie de la gravitation d'Einstein. Les livres et articles écrits par des philosophes sur la physique quantique et la théorie de la gravitation remplissent des bibliothèques entières, alors que nous ne faisons que commencer à explorer la réalité sous-jacente à la théorie quantique des champs. Espérons que les alternatives aux visions classiques des particules et des champs que nous développons inspireront les physiciens dans leurs efforts pour réaliser enfin la grande unification. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Esfeld, *Ontic structural realism and the interpretation of quantum mechanics*, *European Journal for Philosophy of Science*, vol. 3(1), pp. 19-32, 2013.

M. Kuhlmann, *Quantum field theory*, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, hiver 2012, <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/quantum-field-theory>

M. Kuhlmann, *The Ultimate Constituents of the Material World : In Search of an Ontology for Fundamental Physics*, Ontos Verlag, 2010.

J. Bricmont et H. Zwirn (dir.), *Philosophie de la mécanique quantique*, Vuibert, 2009.

D. J. Baker, *Against field interpretations of quantum field theory*, *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 60(3), pp. 585-609, 2009, <http://philsci-archive.pitt.edu/4132/1/AgainstFields.pdf>

M. Kuhlmann et al. (éds.), *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, World Scientific, 2002.

Vient de paraître

Les sens trompés

Des anomalies du cerveau
aux comportements étranges

par Patrick Verstichel

Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstichel a publiés dans la rubrique « Le cas clinique » du magazine *Cerveau & Psycho*. En tant que médecin clinicien, il est confronté à des personnes qui présentent des symptômes inquiétants, surprenants, souvent inexpliqués. Après un examen clinique minutieux et les indispensables scanners IRM, il pose son diagnostic et propose une prise en charge adaptée.

Patrick Verstichel mène ses enquêtes médicales et scientifiques avec perspicacité. En nous présentant ces patients et leurs maladies sous forme de petites histoires, il nous fait comprendre comment fonctionne le cerveau, et pourquoi, parfois, il dysfonctionne. Un voyage étonnant au cœur du cerveau !

Éditions Belin/Pour la Science 2013
160 pages • 25 euros • ISBN 978-2-84245-111-0



BON DE COMMANDE

à découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

Cerveau & Psycho

☐ Oui je commande l'ouvrage *Les sens trompés* de Patrick Verstichel.

..... exemplaires × 25 € (Réf. 075111)

= €

Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)

+ €

TOTAL À REGLER

= €

J'indique mes coordonnées :

Nom :

Prénom :

Adresse :

C.P. : Ville :

Pays : Tél. :
Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ par carte bancaire

Numéro
.....

Date d'expiration
.....

Cryptogramme
.....

(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre.

E-mail pour recevoir la newsletter *Cerveau & Psycho* (à remplir en majuscules).

@

VERPL432
Offre valable jusqu'au 30.11.2013, dans la limite des stocks disponibles.