

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.

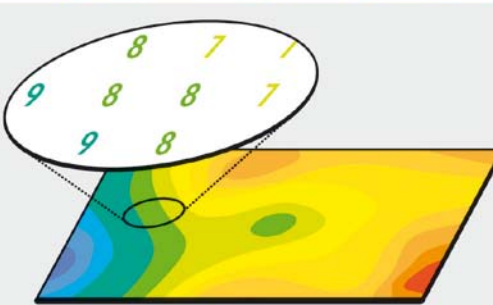
Les nombreuses symétries que l'on a découvertes en physique moderne étayent le réalisme structurel ontologique. En physique quantique comme dans la théorie de la gravitation d'Einstein (la théorie de la relativité générale), certains changements de configuration du monde, connus sous le nom de transformations 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

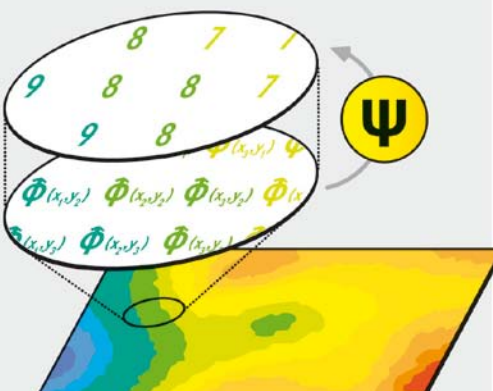
Par définition, un champ est analogue à un fluide qui emplit l'espace. En chaque point, sa valeur est mesurable. Un exemple est le champ électrique : l'amplitude du champ électrique au point où se trouve une particule chargée détermine l'intensité de la force électrique exercée sur cette particule.



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.