

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 relierons 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/fait

Ce que l'on infère

Pourquoi c'est faux

Les particules sont localisées

Une particule occupe une position déterminée, qui varie continuellement 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



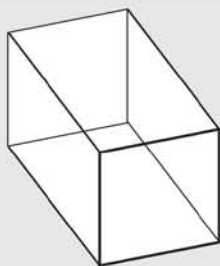
Des particules traversent la chambre en laissant des traces



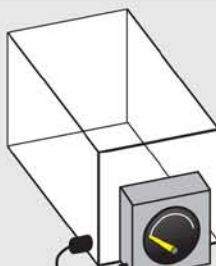
Tout ce que l'on voit est une succession de bulles : les relier est une erreur

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

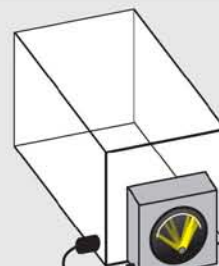
Si la matière est faite de particules, le vide, défini comme un état à zéro particule, ne devrait présenter aucune activité. Mais la théorie quantique prédit qu'un détecteur placé dans le vide enregistre quand même une activité.



Un champ dans son état de vide



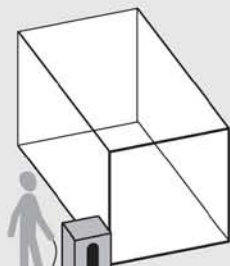
Un appareil de mesure tel qu'un compteur Geiger ne détectera rien



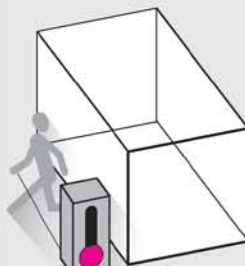
Un compteur Geiger grésillera

Soit une particule existe, soit elle n'existe pas

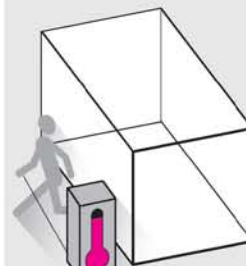
Un objet est réel si tous les observateurs sont capables de s'accorder sur l'existence de cet objet. Les « particules » échouent à ce test : si un observateur voit un vide, un observateur accéléré par rapport à lui voit un gaz chaud de particules.



Un observateur voit un vide froid



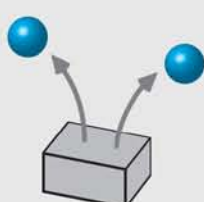
Un autre observateur verra aussi un vide froid



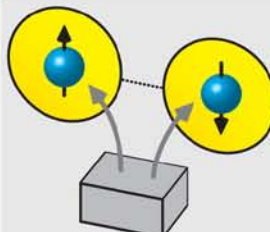
Un observateur accéléré voit un gaz chaud de particules

Les particules ont des propriétés déterminées

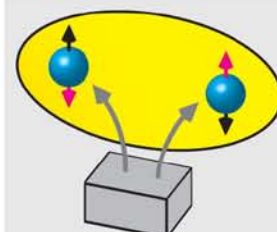
Une particule a une énergie, une quantité de mouvement, etc. Mais chaque membre d'une paire de « particules » intriquées n'a plus de propriétés définies ; seul le système dans son ensemble en a.



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.