

Bien avant que la philosophie et la physique ne se séparent pour suivre deux carrières distinctes, les philosophes naturels de la Grèce antique spéculaient à propos des composants de base à partir desquels toute chose est faite. D'après Platon, tout ce qui se trouvait sur Terre était constitué de quatre particules fondamentales. Il y avait les particules stables de la terre, en forme de cubes; les particules du feu pointues, tranchantes et en forme de tétraèdres; les particules de l'air, moins pointues et octaédriques; et les particules d'eau, raisonnablement rondes et icosaédriques, c'est-à-dire à 20 côtés. Platon pensait que ces particules pouvaient être créées et détruites. Par exemple, une particule d'air à huit faces pouvait résulter de la combinaison de deux particules de feu à quatre faces comme on peut imaginer que cela se produit lorsqu'un feu de camp s'éteint. Cette vision a vécu, et l'on sait désormais que la matière est constituée d'atomes, eux-mêmes faits de particules plus fondamentales.

Désormais, les philosophes qui souhaitent élucider le mystère de la composition de toute chose cherchent des réponses dans la physique contemporaine. Cependant, lire des manuels universitaires ne suffit pas. Les physiciens alternent astucieusement entre différentes visions du réel (relativité générale, mécanique quantique) selon la tâche à accomplir. Les manuels sont rédigés pour apprendre à employer les outils mathématiques avec efficacité, et non pour dire ce que les équations décrivent vraiment. Comprendre ce qui se passe dans la nature à partir des mathématiques exige un grand labeur. Ce genre de recherche relève de la «philosophie de la physique» lorsqu'il est mené par des philosophes,

— En bref —

> Le modèle standard n'indique pas clairement si les briques élémentaires qui constituent le réel sont des particules quantiques, des champs quantiques ou une combinaison des deux.

> Pour Albert Einstein, les électrons étaient des particules et des champs; pour Walther Ritz, seulement des particules; pour Michael Faraday, seulement des champs.

> Un argument en faveur de la théorie «tout champ», sans particule, est qu'elle concilie certaines observations sur les propriétés du spin.

et de l'étude des «fondements de la physique» quand il est conduit par des physiciens.

Ces derniers ont sans cesse perfectionné le modèle standard, une sorte de tableau périodique des composants fondamentaux de la matière et des forces qu'elle subit. Malgré ses lacunes, il n'est pas près d'être balayé. Tout comme la théorie de la gravité d'Isaac Newton ou la théorie de l'électrodynamique de James Clerk Maxwell, il restera un édifice important de la physique, quoi qu'il arrive.

Malheureusement, ce qui correspond dans le modèle standard aux atomes du tableau périodique n'est pas très bien défini. Les briques fondamentales qui constituent la réalité sont-elles des particules quantiques, des champs quantiques ou une combinaison des deux? Afin de s'attaquer à cette question difficile, considérons le débat entre particules et champs dans le contexte d'une théorie classique (non quantique): celle de l'électrodynamique de Maxwell.

CE QUE LES ÉLECTRONS PERÇOIENT

C'est en s'engageant dans la recherche fondamentale sur l'électrodynamique qu'Albert Einstein en est arrivé à formuler sa chère théorie de la relativité en 1905. Par la suite, il a débattu avec le physicien théoricien suisse Walther Ritz de la bonne manière de formuler et de comprendre l'électrodynamique classique. D'après cette théorie, deux électrons placés près l'un de l'autre flottent dans des directions opposées. Ils se repoussent, car ils ont tous deux une charge négative.

Selon Walther Ritz, il y a interaction directe entre les deux électrons – chacun poussant

→ Dans le *Timée*, Platon développe une théorie de la matière inspirée d'Empédocle. Elle postule l'existence de quatre états : la terre sous forme de cubes (6 faces) ; le feu, de tétraèdres (4 faces) ; l'air, d'octaèdres (8 faces) ; et l'eau, d'icosaèdres (20 faces).



l'autre, alors même qu'ils ne se touchent pas. Cette interaction agit à travers le vide séparant les deux électrons. Elle agit aussi à travers un trou dans le temps. Pour être plus précis : chaque électron répond au comportement passé de l'autre, et non à son état actuel. Einstein, opposé à ce genre d'action à distance, comprenait cette interaction différemment. Pour lui, les particules ne sont pas les seuls acteurs en scène. Il y a aussi les champs. Chaque électron produit un champ électromagnétique qui s'étend dans l'espace. Les électrons s'écartent les uns des autres non pas parce qu'ils interagissent directement à travers un vide, mais parce qu'ils perçoivent une force venant du champ de l'autre.

Dans ce cas, les électrons perçoivent-ils les forces de leur propre champ électromagnétique ? Chaque réponse possible amène à un problème. Supposez que l'on réponde oui. Le champ électromagnétique d'un électron est de plus en plus fort à mesure qu'on s'en approche. Si vous imaginez l'électron comme une bille, chaque partie de cette bille ressentira une énorme force dirigée vers l'extérieur, en provenance du champ électromagnétique. Elle devrait donc exploser. Henri Poincaré conjecturait qu'il devait y avoir d'autres forces qui résistaient à cette autorépulsion et qui maintenaient l'intégrité de l'électron – ce qu'on appelle le stress de Poincaré. Si vous considérez que l'électron a la taille d'un point, le problème s'aggrave : champ et force seraient infinis à la position de l'électron.

Maintenant, supposons à l'inverse que l'électron ne perçoive pas le champ qu'il produit. Le problème ici, c'est qu'il y a des preuves montrant que l'électron a « conscience » de son champ. Les

particules chargées comme les électrons produisent des ondes électromagnétiques quand elles sont accélérées et, ce faisant, perdent de l'énergie. Si les électrons interagissent avec leur propre champ, nous pouvons correctement calculer le taux auquel ils perdent de l'énergie. Mais dans le cas contraire, la raison pour laquelle ils perdent de l'énergie n'est pas claire du tout.

Dans la proposition de Walther Ritz, fondée uniquement sur les particules et dénuée de champs, l'électron n'interagit pas avec son propre champ parce qu'un tel champ n'existe pas. Chaque électron ne perçoit que les forces venues d'autres particules. Mais, si l'électron n'interagit pas avec lui-même, comment expliquer la perte d'énergie ? Que vous pensiez, comme Einstein, qu'il y a des particules et des champs, ou, comme Ritz, qu'il n'y a que des particules, vous vous retrouvez face à un problème d'auto-interaction.

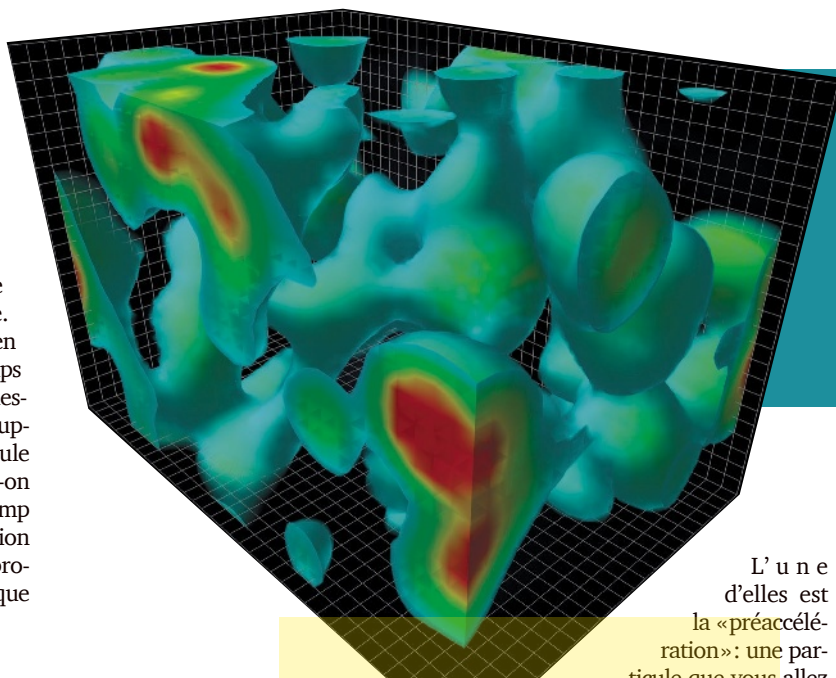
Ritz et Einstein incarnent deux faces d'un problème qui en comporte en réalité trois : peut-être n'y a-t-il pas de particules, mais seulement des champs. En 1844, Michael Faraday a exploré cette option dans un manuscrit resté inédit, et dans

une brève note. On peut imaginer qu'il s'agit là de décrire une physique de corps durs et solides, de tailles et formes diverses, entrant en collision et rebondissant entre eux. Cependant, quand deux particules chargées (comme les électrons) interagissent par une attraction ou une répulsion électrique, elles ne se touchent pas vraiment. Chacune ne fait que réagir au champ électromagnétique de l'autre. Les tailles et formes des particules sont sans lien avec l'interaction, sauf si elles modifient les champs entourant les particules. Faraday pose donc la question : « Quelle véritable raison y a-t-il, alors, de supposer qu'il existe un tel noyau dans une particule de matière ? » Autrement dit, pourquoi devrait-on penser qu'il y a un cœur solide au centre du champ électromagnétique d'une particule ? L'interprétation moderne est que Faraday a tout simplement proposé d'éliminer les particules en ne conservant que les champs électromagnétiques.

DES CAS MODERNES

22 En 2019, au Congrès international de logique, méthodologie et philosophie des sciences et de la technologie, à Prague, j'ai rejoint quatre autres philosophes de la physique pour un débat – laconiquement intitulé « Particules, champs ou les deux ? ». Mathias Frisch, de l'université Gottfried-Wilhelm-Leibniz de Hanovre, a ouvert notre session avec une présentation du débat entre Einstein et Ritz. Puis, les trois autres intervenants ont défendu des opinions opposées – des versions mises à jour des positions d'Einstein, de Ritz et de Faraday.

Le second orateur, Mario Hubert, de l'institut de technologie de Californie, cherchait à délivrer de leur problème d'auto-interaction les particules et champs de la taille d'un point imaginés par Einstein. L'une de ses idées venait de Paul Dirac. Dans un papier de 1938, ce sorcier des mathématiques s'est écarté de la physique quantique pour étudier le problème d'auto-interaction en électrodynamique classique. Il suggérait une modification des lois de l'électrodynamique, qui changerait la façon dont les champs exercent des forces sur les particules. Pour une particule de la taille d'un point, sa nouvelle équation élimine toute interaction avec son propre champ électromagnétique, et inclut un nouveau terme pour imiter le genre d'auto-interaction que nous observons effectivement – le genre qui cause une perte d'énergie chez la particule lorsqu'elle produit des ondes. Toutefois, l'équation que propose Paul Dirac possède d'étranges caractéristiques.



L'une d'elles est la « préaccélération » : une particule que vous allez frapper avec une force

peut se mettre à bouger avant que vous la touchiez.

Dans les années 1930 et 1940, une stratégie différente a été suivie par quatre physiciens célèbres : Max Born, Leopold Infeld, Fritz Bopp et Boris Podolsky. Ces physiciens proposaient des moyens de changer les lois spécifiant comment les particules produisent des champs électromagnétiques, de sorte que ceux créés par des particules de la taille d'un point ne deviennent jamais infiniment forts.

Quand vous touchez à ces lois, vous changez beaucoup de choses. Comme Mario Hubert l'expliquait dans sa présentation, nous ne comprenons pas totalement les conséquences de ces changements. En particulier, nous ne savons pas avec certitude si les propositions de Born-Infeld et de Bopp-Podolsky seront capables de résoudre le problème d'auto-interaction et de prédire précisément les mouvements des particules.

Vous pourriez penser que toute cette discussion de physique classique nous a bien écartés du sujet. Ne sommes-nous pas supposés tenter de comprendre ce que le modèle standard de physique quantique nous dit à propos de la composition de toute chose ?

La partie du modèle standard qui décrit les électrons et le champ électromagnétique est l'électrodynamique quantique, puisque c'est la version quantique de l'électrodynamique classique. Les fondements des deux sujets sont étroitement liés.