

de la gravitation et la mécanique quantique, elle modifiera notre conception des particules élémentaires. Elle dotera le temps et l'espace d'une sorte de structure microscopique, dont l'échelle sera si petite qu'elle ne pourra être sondée par aucun accélérateur existant ou en projet. Aujourd'hui, cependant, aucune donnée expérimentale ne conforte cette hypothèse ; soyons patients.

Nous nous plaisons à penser que le rythme des découvertes s'accélère, mais, dans certains domaines scientifiques, les objectifs ne semblent accessibles que lentement et au prix d'un énorme travail collectif. Par exemple, les engins spatiaux qui explorent le Système solaire sont en général conçus une dizaine d'années avant leur lancement. La sismologie, un siècle après sa naissance, dispose enfin de techniques de mesure et d'analyse assez sensibles pour élaborer une carte de l'intérieur de la Terre. Celle-ci montrera les panaches ascendants de roches du manteau qui régissent les mouvements des plaques tectoniques à la surface de la Terre. Depuis les années 1960, les biologistes moléculaires se sont efforcés de comprendre le mécanisme de régulation des gènes dans les organismes vivants, mais ils n'ont pas encore réussi, même avec la plus simple des bactéries. Nous serons heureux si les manifestations neuronales de la pensée sont identifiées au cours du prochain demi-siècle. Les applications de ce que nous savons déjà apparaîtront dans les prochaines décennies, mais nous aurons beaucoup de mal à résoudre de nombreux problèmes essentiels.

Nous ne sommes pas non plus au bout de nos surprises. La découverte d'autres êtres vivants dans la Galaxie bouleverserait notre perception de la place que nous occupons dans la nature. D'autres découvertes moins retentissantes, mais dont la nature est complètement imprévisible, jalonnent sans doute aussi le prochain demi-siècle, passionnant les spécialistes de toutes les disciplines et changeant la vie de chacun d'entre nous.

John MADDUX a été professeur de physique théorique à l'Université de Manchester jusqu'en 1956, puis il a été rédacteur en chef de la revue *Nature* jusqu'en 1995.

Vers l'unification de la physique

STEVEN WEINBERG

Les expériences en cours au CERN et dans d'autres laboratoires de physique des particules devraient confirmer le Modèle standard de la physique des particules. La construction d'une théorie unifiée de toutes les interactions physiques nécessitera probablement des idées nouvelles.

De nombreux physiciens cherchent une compréhension unifiée de la diversité de la nature. Les réalisations les plus grandioses de la physique sont celles qui nous ont approchés de cet objectif. Ainsi, au XVII^e siècle, Isaac Newton a unifié les mécaniques terrestre et céleste ; au XIX^e siècle, James Clerk Maxwell s'est fondé sur les idées de Michael Faraday pour unifier l'optique et les théories de l'électricité et du magnétisme ; entre 1905 et 1916, Albert Einstein a regroupé la théorie géométrique de l'espace-temps et la théorie de la gravitation ; enfin, au cours des années 1920, la mécanique quantique a rapproché la chimie et la physique atomique (voir les figures 2 et 3).

Pendant les 30 dernières années de sa vie, Einstein chercha sans succès une «théorie unifiée des champs», qui aurait réuni dans un même formalisme la relativité générale – sa théorie de l'espace et de la gravitation – et la théorie électromagnétique. La recherche de cette unification a récemment progressé, mais dans une direction différente de celle qu'entrevoyait Einstein. La théorie actuelle des particules élémentaires et de leurs interactions, le «Modèle standard de la physique des particules», a unifié l'électromagnétisme et la théorie des interactions faibles (responsables des transformations mutuelles des neutrons en protons, lors des désintégrations radioactives). Le Modèle standard décrit séparément l'interaction forte, qui assure la cohésion des quarks à l'intérieur des protons et des

neutrons, ou la cohésion des protons et des neutrons à l'intérieur des noyaux atomiques.

On comprend assez bien comment la théorie des interactions fortes peut être unifiée à celle des interactions faibles et électromagnétiques (c'est la «grande unification»), mais le travail ne sera mené à bien que si l'on inclut la gravitation, ce qui semble très difficile. Les physiciens pensent que les différences apparentes entre les diverses interactions résultent d'événements survenus lors des tout premiers instants de l'Univers. Pour décrire ces premiers instants, nous manquons d'une meilleure théorie de la gravitation et des autres interactions. Il n'est pas exclu que l'on obtienne l'unification pour 2050, mais le succès n'est pas assuré.

Champs quantiques

Le Modèle standard est une théorie quantique des champs : ses ingrédients de base sont des champs, tels les champs magnétique et électrique de l'électromagnétisme. Les variations de ces champs véhiculent l'énergie et la quantité de mouvement d'un point de l'espace à un autre ; la mécanique quantique stipule que ces variations se présentent par paquets, ou «quanta», qui apparaissent dans les expériences sous la forme de particules élémentaires. Par exemple, le quantum de champ électromagnétique est le photon.

Le Modèle standard inclut un champ pour chaque type de particules élémentaires observées dans les labo-

ratoires de physique des hautes énergies (voir la figure 4). Certains champs correspondent aux leptons : leurs quanta correspondent à l'électron, à des particules analogues, mais plus lourdes, nommées muons et tauons, et à des particules électriquement neutres, les neutrinos. Des champs sont associés aux divers types de quarks, dont certains se trouvent associés à l'intérieur des protons et des neutrons qui constituent les noyaux des atomes. Les interactions de ces particules sont dues à l'échange de photons et de particules élémentaires analogues : les bosons W^+ , W^- et Z^0 transmettent les interactions faibles, et huit types de gluons transmettent les interactions fortes.

Ces particules ont des masses variées, qui ne semblent pas réparties de façon ordonnée : l'électron est 350 000 fois plus léger que le quark le plus lourd, et les neutrinos sont encore plus légers. Le Modèle standard n'indique pas pourquoi les particules ont les masses que l'on mesure, sauf si l'on ajoute des champs supplémentaires, «scalaires». Le terme «scalaire» signifie que ces champs ne sont pas orientés, contrairement aux champs électriques et magnétiques, ou aux autres champs du Modèle standard. L'omniprésence éventuelle de ces

1. LA NATURE QUANTIQUE de l'espace et du temps est décrite par une théorie unifiée, que les physiciens cherchent encore. Aux très courtes distances, l'espace pourrait être composé de cordes ou de membranes qui se connectent et se déconnectent sans cesse.