

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

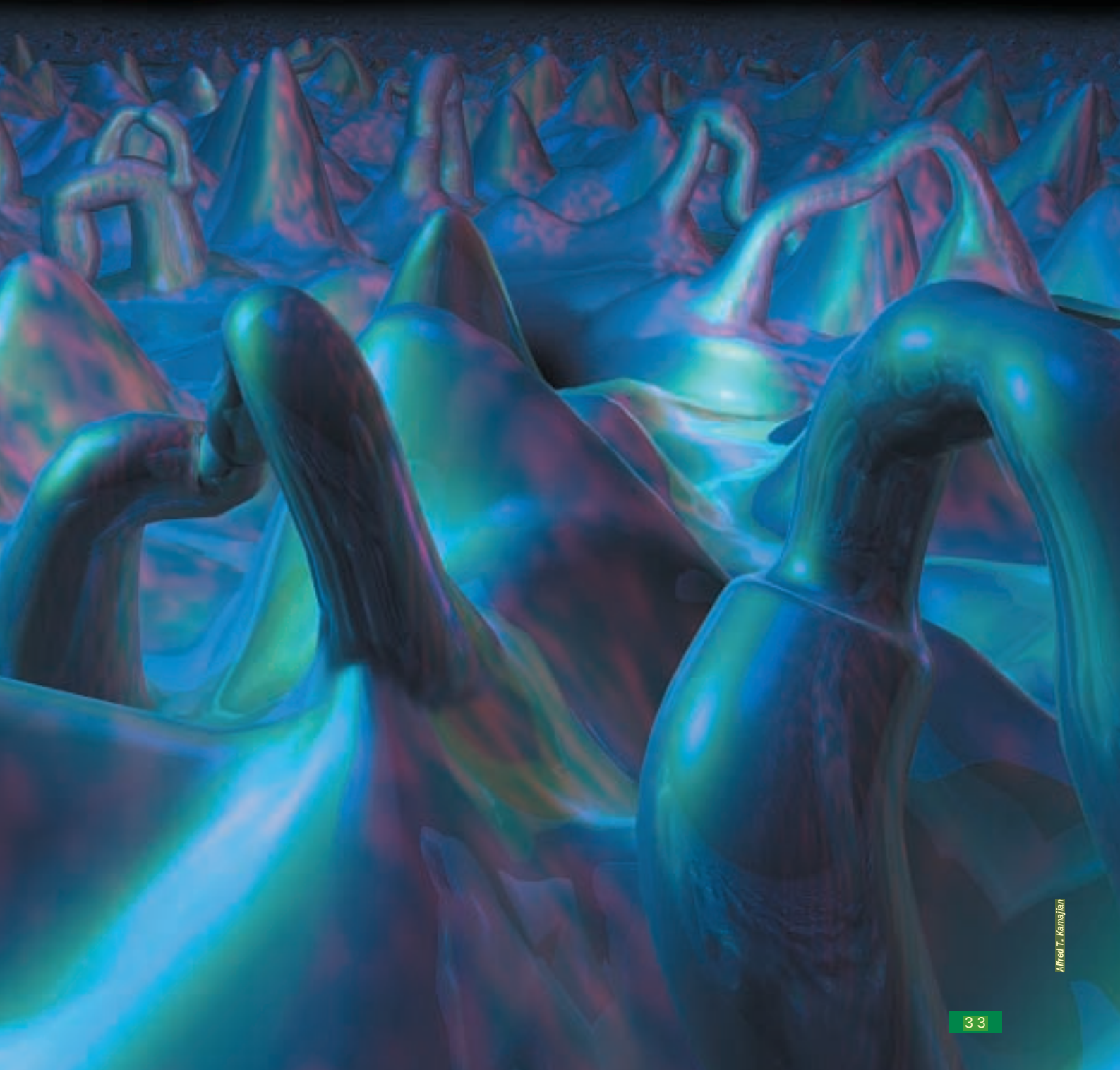
1. LA NATURE QUANTIQUE de l'espace et du temps est décrite par une théorie unifiée, que les physiciens cherchent encore. Aux très courtes distances, l'espace pourrait être composé de cordes ou de membranes qui se connectent et se déconnectent sans cesse.

champs scalaires dans l'espace ne contredirait pas l'un des principes physiques le plus solidement établis, à savoir que l'espace a la même apparence dans toutes les directions ; en revanche, si l'on trouvait un champ magnétique notable en tout point de l'espace, par exemple, une boussole discernerait une direction privilégiée

de l'espace, qui ne serait plus isotrope. L'interaction des champs du Modèle standard et de ces champs scalaires omniprésents donnerait leurs masses aux particules du Modèle standard.

Pour compléter le Modèle standard, nous devons confirmer l'existence de ces champs scalaires et les dénombrer. Cela revient à chercher

de nouvelles particules élémentaires, les particules de Higgs, qui seraient les quanta de ces champs. On pense que cette quête s'achèvera avant 2020, après une dizaine d'années de fonctionnement du LHC, l'accélérateur en construction au CERN (pour *Large Hadron Collider*, soit «Grand Collisionneur de hadrons»). Au pire, on



devrait découvrir avant 2020 une seule particule, scalaire et électriquement neutre. Ce serait un désastre si la quête se limitait à cette particule, car les phy-

siciens n'auraient plus d'indications pour les guider vers la solution du «problème de la hiérarchie», relatif aux énergies caractéristiques rencontrées en physique.

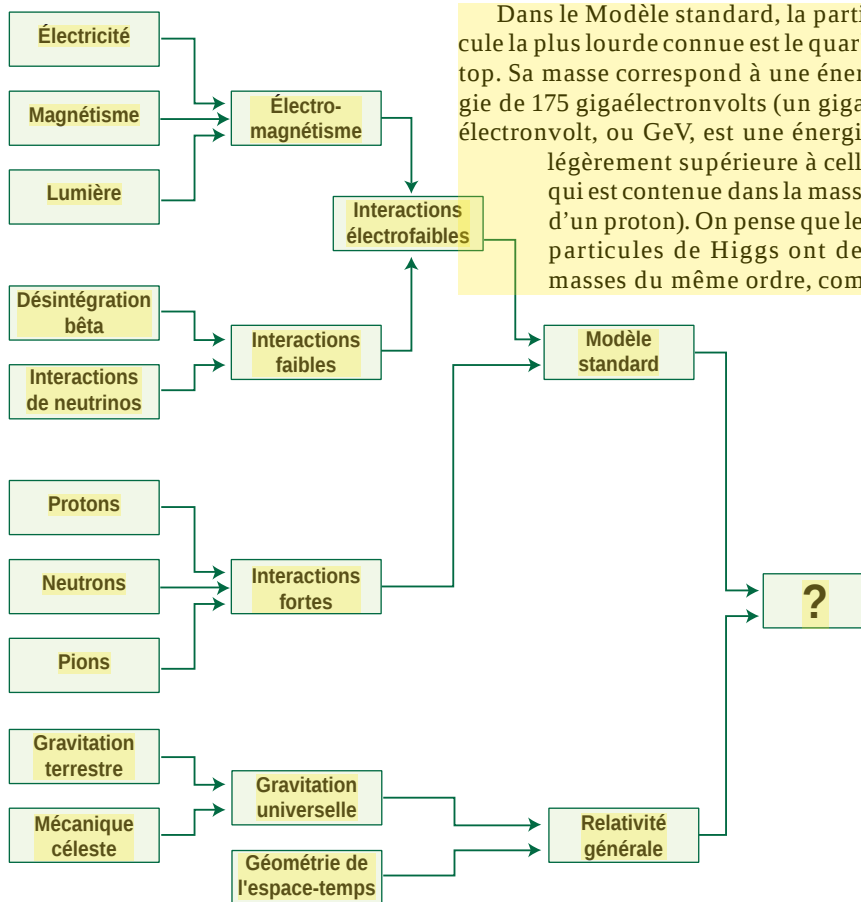
Dans le Modèle standard, la particule la plus lourde connue est le quark top. Sa masse correspond à une énergie de 175 gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt, ou GeV, est une énergie légèrement supérieure à celle qui est contenue dans la masse d'un proton). On pense que les particules de Higgs ont des masses du même ordre, com-

prises entre 100 et plusieurs centaines de GeV. Diverses observations indiquent toutefois que les équations de la future théorie unifiée contiendront un éventail de masses bien plus large. Dans le Modèle standard, les champs des gluons, des bosons W et Z, et ceux des photons ont, avec les autres champs, des interactions d'intensités bien différentes ; c'est la raison pour laquelle, dans les conditions ordinaires, les interactions qui interviennent lors des échanges de gluons sont environ 100 fois plus intenses que les autres. La gravitation est considérablement plus faible : l'attraction gravitationnelle entre un électron et un proton, dans un atome d'hydrogène, est environ 10^{39} fois moins intense que leur attraction électrique.

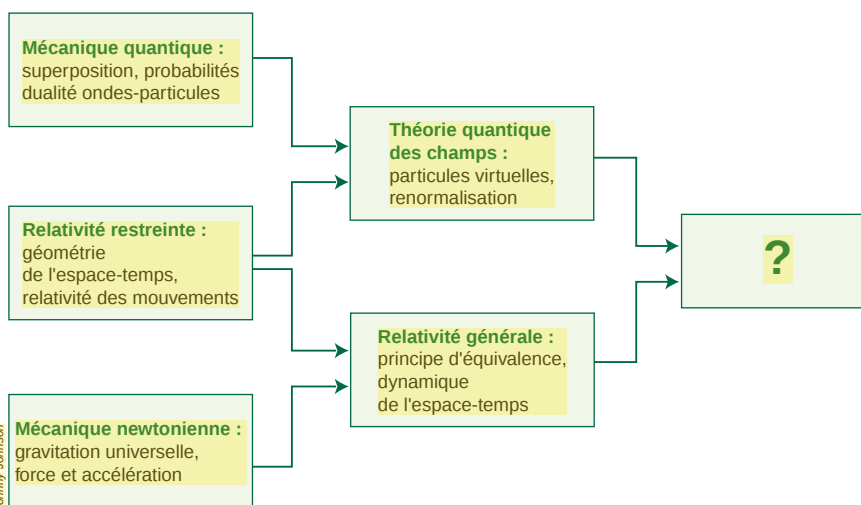
Au-delà du quark top

Cependant toutes ces intensités d'interaction dépendent de l'énergie à laquelle elles sont mesurées (voir la figure 5). N'est-il pas étonnant, alors, que les interactions des champs aient toutes la même intensité à une énergie légèrement supérieure à 10^{16} GeV? Et que la force de gravitation ait cette même intensité à une énergie à peine supérieure, voisine de 10^{18} GeV (avec certaines améliorations de la théorie de la gravitation, la gravitation deviendrait aussi intense que les autres interactions aux énergies où ces interactions deviennent de même intensité, vers 10^{16} GeV)? Si les physiciens sont habitués à des rapports de masse élevés (par exemple, le rapport est égal à 350 000 pour le quark top et l'électron), ils restent étonnés par le rapport considérable entre l'énergie de l'unification fondamentale et les énergies de 100 GeV que considère le Modèle standard (voir la figure 6). Pourquoi ce rapport gigantesque, pourquoi ce saut immense dans les énergies de la physique? C'est le problème de la hiérarchie. On ne le résoudra pas en ajustant simplement les constantes de la théorie, mais en cherchant de nouveaux principes fondamentaux.

Des théoriciens ont ainsi proposé diverses idées intéressantes : certains ont introduit un nouveau principe de symétrie, la supersymétrie (grâce auquel, de surcroît, les intensités des interactions convergent mieux vers 10^{16} GeV); d'autres ont proposé de nouvelles interactions fortes, nommées technicolor (voir la figure 7). Toutes



2. L'UNIFICATION des diverses descriptions théoriques en une seule théorie est une recherche en cours depuis longtemps. Le Modèle standard de la physique des particules décrit correctement trois des quatre interactions fondamentales de la nature : les interactions électromagnétiques, les interactions fortes et les interactions faibles. Cependant on n'a pas encore unifié cette théorie avec la théorie de la relativité générale, qui décrit les forces de gravitation et la nature de l'espace-temps.



3. LES PROGRÈS les plus fondamentaux surviennent en physique quand les principes de diverses théories sont regroupés dans un cadre unique. Nous ne savons pas encore quels principes directeurs sous-tendent l'unification de la théorie quantique des champs, décrite par le Modèle standard, et la relativité générale.