

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

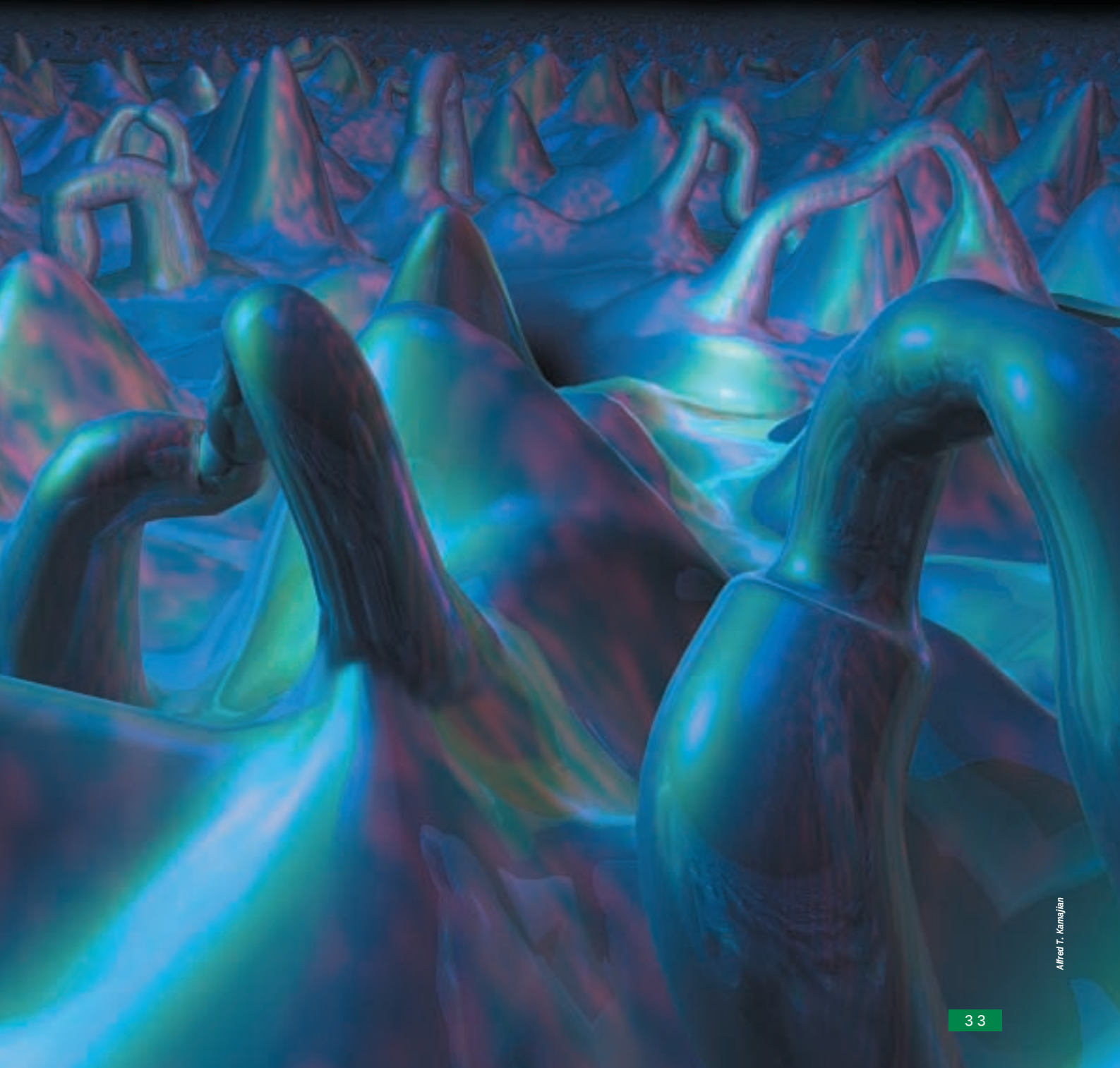
1. LA NATURE QUANTIQUE de l'espace et du temps est décrite par une théorie unifiée, que les physiciens cherchent encore. Aux très courtes distances, l'espace pourrait être composé de cordes ou de membranes qui se connectent et se déconnectent sans cesse.

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.

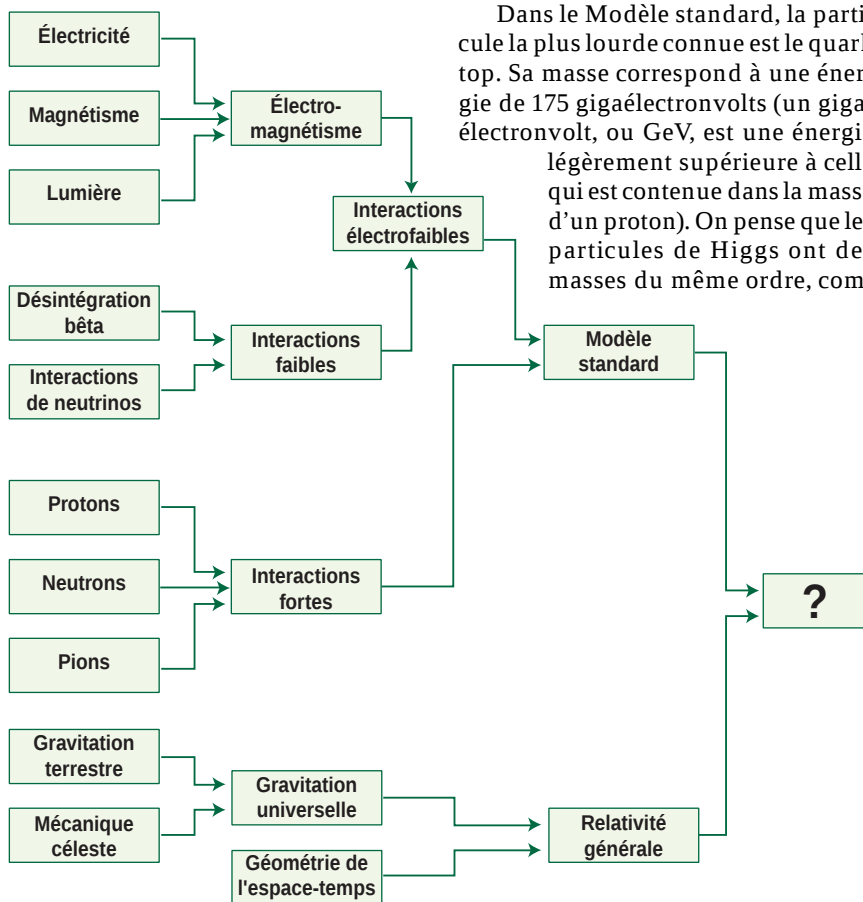
Dans le Modèle standard, la particule la plus lourde connue est le quark top. Sa masse correspond à une énergie de 175 gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt, ou GeV, est une énergie légèrement supérieure à celle qui est contenue dans la masse d'un proton). On pense que les particules de Higgs ont des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

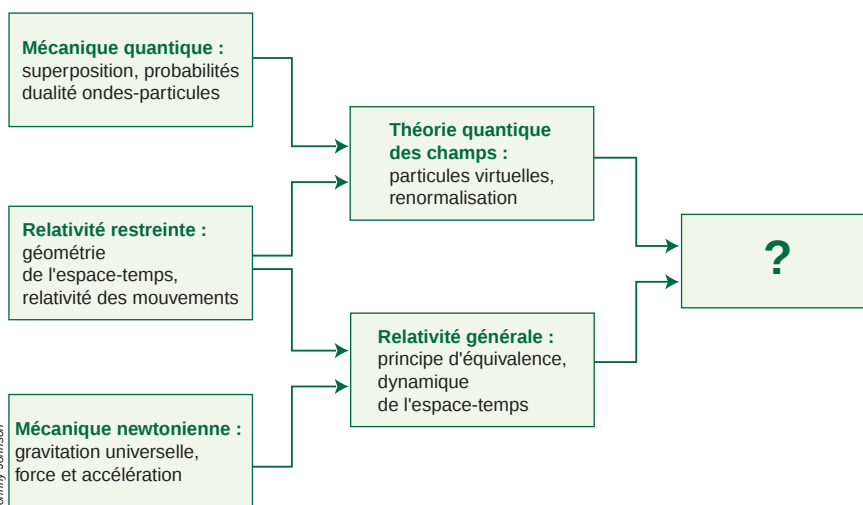
Au-delà du quark top

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.

ces théories contiennent des interactions supplémentaires, qui s'unifient aux interactions électromagnétiques, faibles et fortes à une énergie d'environ 10^{16} GeV. Ces interactions deviennent notables à des énergies bien inférieures à 10^{16} GeV, mais on ne peut les observer directement, parce qu'elles n'agissent pas sur les particules connues du Modèle standard ; elles n'agissent que sur des particules trop massives pour être créées en laboratoire. Ces particules «très lourdes» ont toutefois une masse bien inférieure à 10^{16} GeV, parce qu'elles doivent leur masse aux nouvelles interactions. Selon cette théorie, les particules aujourd'hui connues interagiraient avec les particules très lourdes, et leurs masses seraient une conséquence de ces interactions assez faibles. Ce mécanisme résoudrait le problème de la hiérarchie : les particules connues seraient plus légères que les particules très lourdes, qui seraient elles-mêmes plus légères que 10^{16} GeV.

Toutes ces idées ont une autre caractéristique en commun : elles supposent l'existence de nouvelles particules, de masse légèrement supérieure à 1 000 GeV. Certaines de ces particules devraient donc être découvertes par le LHC ou, auparavant, au Fermilab ou au CERN. Si ces particules sont découvertes, on devra probablement construire de nouveaux accélérateurs pour explorer leurs propriétés. C'est seulement alors que nous saurons si certaines ont survécu aux premiers instants de l'Univers pour composer la «matière sombre» intergalactique qui constituerait l'essentiel de la masse actuelle de l'Univers. Au total, vers 2050, nous comprendrons vraisemblablement les raisons du gigantesque rapport d'énergies observé en physique.

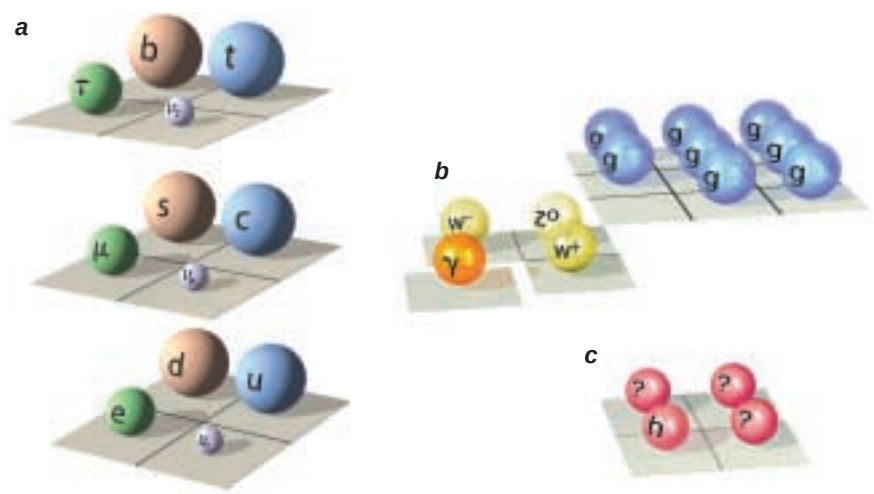
Et ensuite ? On voit mal comment on étudierait expérimentalement les phénomènes à des énergies de l'ordre de 10^{16} GeV. Avec les techniques actuelles, le diamètre d'un accélérateur de particules est proportionnel à l'énergie qu'il communique ; pour donner à des particules une énergie de 10^{16} GeV, un accélérateur devrait avoir un diamètre équivalent à celui de notre Galaxie. Même si l'on trouvait un autre moyen de concentrer des quantités d'énergie considérables, les phénomènes qui ont lieu à ces énergies seraient bien trop rares pour que l'on obtienne des informations utiles. Tou-

tefois, même si nous ne pouvons étudier directement les phénomènes à des énergies de 10^{16} GeV, des effets sont probablement apparents à des énergies accessibles parce qu'ils ne sont pas décrits par le Modèle standard.

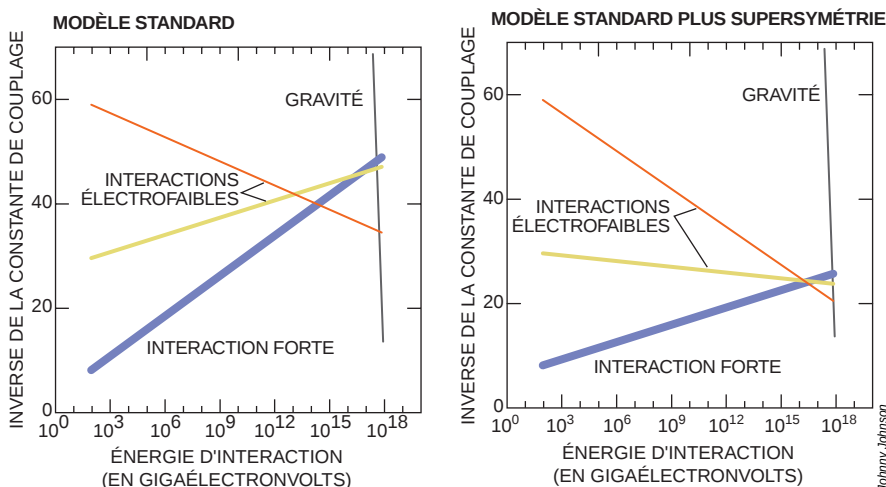
Des théories de champ

Le Modèle standard est une théorie quantique des champs d'un type particulier : elle est «renormalisable». Cet adjectif apparut dans les années 1940, lorsque les physiciens apprirent à utiliser les premières théories quantiques des champs pour calculer de petits décalages des niveaux d'énergie ato-

miques : ils constatèrent que leurs calculs conduisaient régulièrement à des valeurs infinies, et ils interprétèrent l'apparition de ces quantités infinies comme le signe d'une grave imperfection ou d'une utilisation des théories dans des conditions où elles ne s'appliquent pas. Progressivement, les physiciens apprirent à traiter ces quantités infinies en les absorbant dans une redéfinition, une «renormalisation», d'un petit nombre de constantes physiques telles que la charge et la masse de l'électron (la version minimale du Modèle standard, à une seule particule scalaire, contient 18 constantes de ce type). Les



4. LE MODÈLE STANDARD de la physique des particules décrit chaque particule constituant la matière et chaque force par un champ quantique. Les particules fondamentales de la matière sont les fermions ; on connaît trois «générations» de fermions (a). Les particules de chaque génération ont le même type de propriétés. Les interactions fondamentales sont assurées par l'échange de bosons (b), qui s'organisent d'après trois symétries. En outre, une ou plusieurs particules de Higgs (c) engendrent la masse des autres champs.



5. LES EXTRAPOLATIONS THÉORIQUES montrent que les trois interactions du Modèle standard (l'interaction forte, et les interactions électrofaibles, obtenues par unification des interactions faibles et des interactions électromagnétiques) ont la même intensité à très haute énergie (a). La convergence théorique semble encore meilleure quand on utilise ce que l'on nomme la supersymétrie (b). L'épaisseur des courbes indique l'incertitude sur les constantes de couplage.

théories pour lesquelles cette procédure fonctionna – les théories renormalisables – avaient une structure plus simple que les théories non renormalisables.

Suppression d'interactions

Cette structure simple et renormalisable du Modèle standard a conduit à des prévisions quantitatives précises, dont la vérification expérimentale a confirmé la théorie. Notamment le principe de renormalisation, combiné à divers principes de symétrie propres au Modèle standard, exclut certains phénomènes qui n'ont pas été observés, telle la désintégration des protons, et prévoit que les neutrinos doivent avoir une masse nulle. De nombreux physiciens ont pensé que toute théorie quantique des champs devait être renormalisable ; cette condition les guida dans leur formulation du Modèle standard. Ils furent donc très ennuyés de découvrir que, pour des raisons fondamentales, les théories quantiques du champ de gravitation ne pouvait apparemment pas être renormalisables.

La situation a changé. Les théories de la physique des particules apparaissent différemment en fonction de l'énergie des phénomènes et des réactions considérés. Notamment l'intensité des interactions assurées par l'échange d'une particule très massive est très faible aux énergies qui sont faibles par rapport à la masse de la particule. D'autres effets pouvant être pareillement limités, on se retrouve, aux faibles énergies, avec une théorie des champs, dite efficace, où ces interactions sont négligeables. Les théoriciens ont découvert que toute théorie

quantique fondamentale, compatible avec la théorie de la relativité restreinte, ressemble à une théorie quantique des champs renormalisable, aux basses énergies. Toutefois, bien qu'éliminant les infinis, les théories efficaces n'ont pas la structure simple des théories renormalisables au sens classique. Apparaissent des interactions supplémentaires qui, au lieu d'être totalement exclues, sont simplement limitées aux énergies inférieures à une énergie caractéristique.

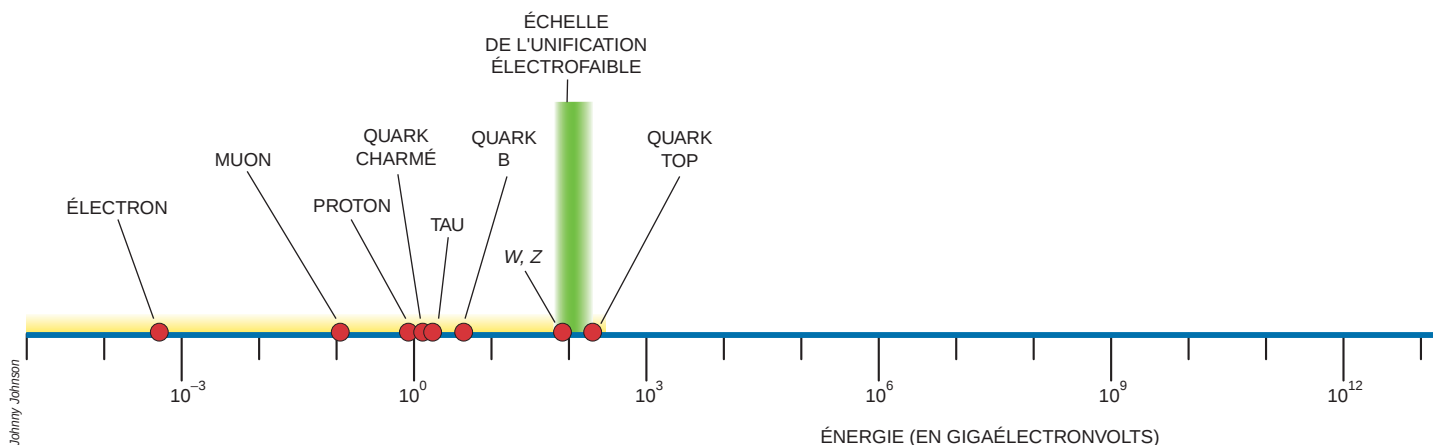
La gravitation elle-même est une de ces interactions non renormalisables limitées. Son intensité (ou plutôt sa faiblesse) aux faibles énergies indique que son échelle d'énergie fondamentale se situe aux alentours de 10^{18} GeV. Une autre interaction non renormalisable, mais limitée, rendrait le proton instable, avec une demi-vie (le temps après lequel la moitié des protons d'un groupe est désintégrée) comprise entre 10^{31} et 10^{34} ans, trop longue pour que sa désintégration ait des chances d'être observée, même en 2050. Une autre interaction non renormalisable limitée donnerait aux neutrinos une masse infime, d'environ 10^{-11} GeV. Certaines expériences semblent avoir détecté une masse de cet ordre ; ce point devrait être définitivement réglé bien avant l'an 2050.

Les observations de ce type fourniront des indications précieuses pour la construction d'une théorie qui unifiera toutes les interactions, mais la découverte de cette théorie sera probablement impossible sans l'introduction de concepts radicalement nouveaux. Certaines idées prometteuses ont déjà vu le jour. Cinq théories différentes mettent ainsi en jeu des

entités infimes et unidimensionnelles nommées «cordes». Aux faibles énergies, les divers modes de vibration de ces cordes correspondent à divers types de particules. En outre, ces cordes semblent fournir, dans un espace-temps à dix dimensions, des théories parfaitement finies de la gravitation et des autres interactions. Certes, nous ne vivons pas dans un espace à dix dimensions, mais six de ces dimensions pourraient être si étroitement enroulées sur elles-mêmes qu'on ne pourrait les observer lors des phénomènes aux énergies inférieures à 10^{16} GeV par particule. Selon des indications récentes, ces cinq théories de cordes (ainsi qu'une théorie quantique des champs à onze dimensions) seraient des approximations différentes d'une même théorie fondamentale, nommée «théorie M». Personne ne sait encore écrire les équations de cette théorie.

Hors de l'espace-temps

La recherche de ces équations se heurte à deux obstacles majeurs. Tout d'abord, nous ignorons les principes physiques qui gouvernent la théorie fondamentale. Lorsqu'il élaborait sa théorie de la relativité générale, Einstein fut guidé par un principe qu'il avait déduit des propriétés connues pour la gravitation, à savoir le principe d'équivalence entre les forces gravitationnelles et les forces d'inertie. Puis le développement du Modèle standard fut guidé par un principe nommé symétrie de jauge, qui généralise la propriété selon laquelle seules importent les différences de potentiel électrique, et non les potentiels électriques eux-mêmes.



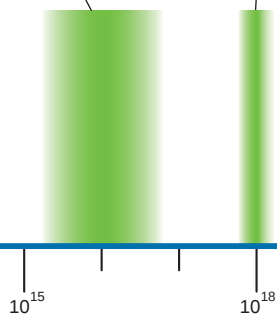
6. LE PROBLÈME DE LA HIÉRARCHIE est lancinant, en physique moderne. Les expériences (bande jaune) ont sondé la matière jusqu'à une énergie de 200 GeV et ont révélé l'existence de par-

ticules (en rouge) et de champs (en vert) qui sont bien décrits par le Modèle standard de la physique des particules. Pourquoi existe-t-il toutefois cet écart considérable entre les plus massives

Toutefois nous n'avons pas encore découvert le moindre principe fondamental qui gouvernerait la théorie M. Les diverses approximations de cette théorie ressemblent à des théories des cordes ou de champs dans des espaces-temps de diverses dimensions, mais la théorie fondamentale ne semble pas formulable dans l'espace-temps. La théorie quantique des champs est fortement déterminée par des principes liés à la nature de l'espace-temps quadridimensionnel et contenus dans la théorie de la relativité restreinte. Comment alors trouver les idées dont nous avons besoin pour formuler une théorie réellement fondamentale, alors que cette théorie est censée décrire un domaine où toutes les intuitions déduites de la vie dans l'espace-temps deviennent inapplicables ?

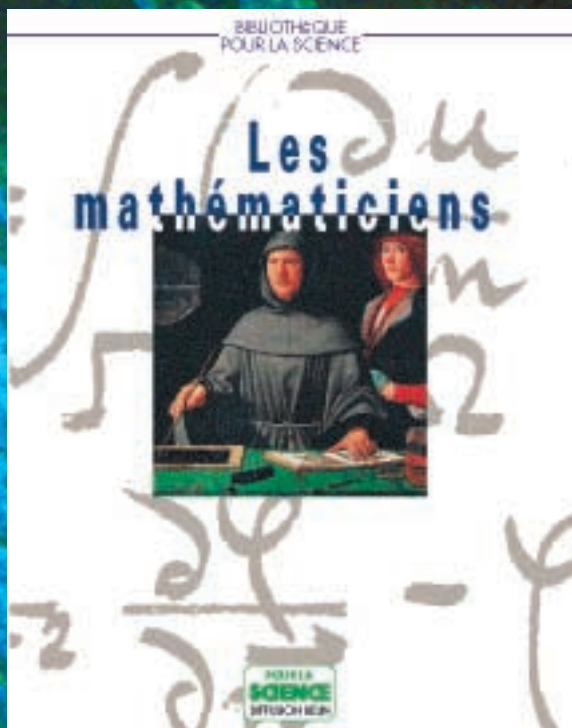
D'autre part, même si nous pouvions formuler une théorie fondamentale, nous ne saurions probablement pas l'utiliser pour faire des prévisions réfutables par des expériences. La plupart des prévisions vérifiées du Modèle standard ont reposé sur une méthode de calcul nommée théorie des perturbations. En mécanique quantique, la probabilité d'un phénomène physique se calcule à partir des probabilités des diverses étapes intermédiaires qui interviennent au cours du phénomène. Quand on utilise la théorie des perturbations, on considère dans un premier temps les étapes intermédiaires les plus simples, puis les étapes plus complexes, et ainsi de suite. Ce calcul n'est possible que si les étapes de plus en plus complexes contribuent de moins en moins à la probabilité totale, ce qui est habituellement le cas quand les interactions en

ÉCHELLE DE LA GRANDE UNIFICATION ÉCHELLE DE PLANCK



des particules et l'énergie à laquelle les diverses interactions semblent unifiées, vers 10^{18} GeV ?

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE



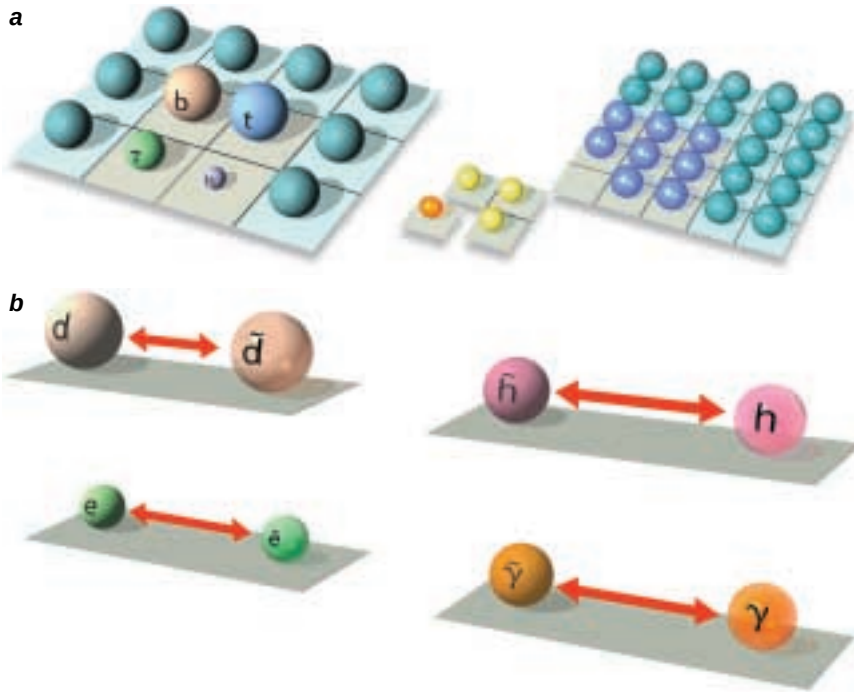
LES MATHÉMATICIENS

Pour comprendre le processus de la création mathématique, il faut saisir ce qui fait l'originalité d'un mathématicien. Cet ouvrage réunit les portraits de quinze grands mathématiciens. Leurs rapport avec leur époque, le regard qu'ils portent sur leur activité sont plus qu'anecdotiques : ils révèlent la genèse des idées nouvelles et mettent en lumière le caractère audacieux, dynamique et imaginatif de l'invention mathématique.

Code 1899 – 208 pages – 141 F

Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN



Slim Films

7. QUE RESTE-T-IL À DÉCOUVRIR? Le Modèle standard pourrait être remplacé par plusieurs types de théories. Les théories technicolor (a) introduisent de nouvelles interactions, analogues aux trois interactions de couleurs qui lient les quarks. Des «générations» de particules encore inconnues accompagnent les interactions. La supersymétrie (b) relie les fermions aux bosons et fait correspondre des partenaires supersymétriques à chaque particule du Modèle standard. La théorie M (c) et les théories des cordes considèrent des entités nouvelles, telles de petites cordes, boucles ou membranes, qui se comportent comme des particules aux faibles énergies.

présence sont suffisamment faibles. Parfois des théories qui considèrent des interactions extrêmement fortes sont équivalentes à d'autres théories qui incluent des interactions extrêmement faibles : elles se prêtent donc à un traitement par perturbations. Une telle équivalence semble vérifiée pour certains couples de l'ensemble des cinq théories de cordes à dix dimensions et de la théorie de champ à onze dimensions précédemment mentionnés. Malheureusement, les interactions de la théorie fondamentale ne sont probablement ni très fortes ni très faibles, ce qui exclut tout recours à un traitement perturbatif.

On ignore quand ces problèmes seront résolus. Ils le seront peut-être demain, dans un article publié par un jeune théoricien. Ou peut-être ne le seront-ils pas avant 2050, voire 2150. Cependant une fois les solutions en main, nous n'aurons aucune difficulté pour identifier la bonne théorie de l'unification fondamentale : il suffira de regarder si la théorie proposée rend compte des valeurs mesurées pour les constantes physiques du Modèle standard, ainsi que d'autres effets, inexpliqués par le Modèle standard, que l'on aura alors éventuellement découverts.

Quand nous comprendrons enfin le comportement des particules et des interactions à des énergies atteignant 10^{18} GeV, nous rencontrerons peut-être de nouvelles énigmes, qui éloigneront à nouveau l'unification finale. Personnellement, j'en doute. Rien n'indique qu'il existe une échelle fondamentale d'énergie au-delà de 10^{18} GeV, et la théorie des cordes indique même que les énergies supérieures à cette valeur n'ont aucune signification physique.

La découverte d'une théorie unifiée décrivant la nature à toutes les énergies nous permettra de répondre aux questions les plus profondes de la cosmologie : l'expansion du nuage de galaxies que nous appelons Big Bang a-t-elle commencé à un instant précis dans le passé? Notre Big Bang n'est-il qu'un événement parmi d'autres, dans l'histoire d'un Univers bien plus vaste et où, de tous temps, se produisent de telles explosions primordiales, grandes et petites? Si oui, ce que nous appelons les constantes naturelles, voire les lois naturelles, varient-elles d'une explosion à une autre?

L'étude de ces questions ne marquera pas la fin de la physique. Elle

n'aidra même pas, probablement, à résoudre certains problèmes auxquels se heurte la physique actuelle, telle la compréhension de la turbulence ou de la supraconduction à haute température. En revanche, elle marquera la fin d'un certain type de physique, à savoir d'une physique à la recherche d'une théorie unifiée dont découlent tous les autres phénomènes de la nature.

Steven WEINBERG dirige le groupe de physique théorique de l'Université d'Austin.

Steven WEINBERG, *Unified Theories of Elementary-Particle Interaction*, in *Scientific American*, vol. 231, n° 1, pp. 50-59, juillet 1974.

Steven WEINBERG, *Dreams of a Final Theory*, Pantheon Books, 1992.

Edward WITTEN, *Reflections on the Fate of Spacetime*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 4, pp. 24-30, avril 1996.

Edward WITTEN, *Duality, Spacetime and Quantum Mechanics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 28-33, mai 1997.

Brian GREENE, *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999.
