

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.

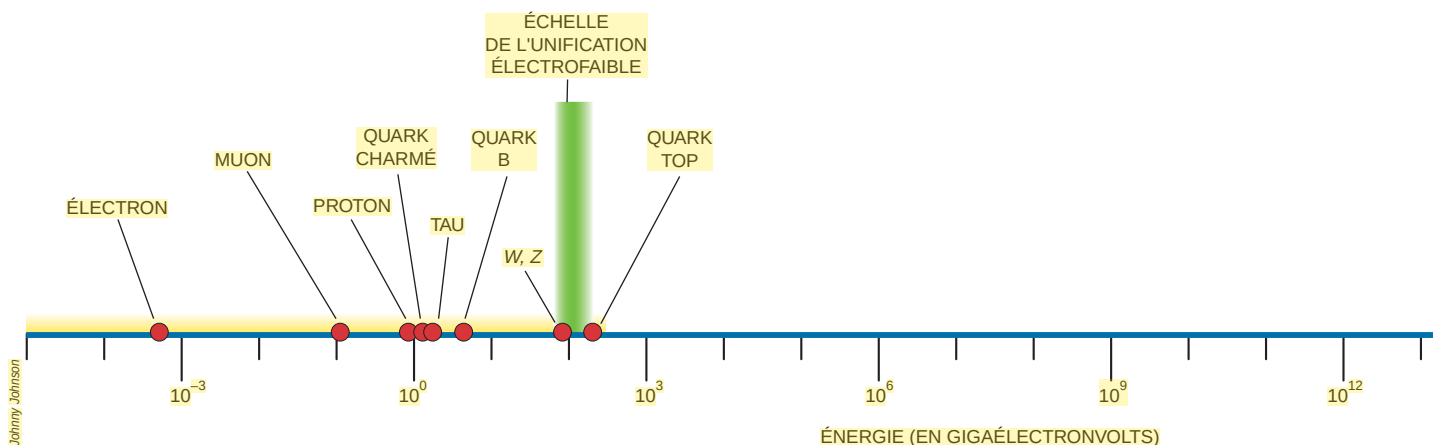
La gravitation elle-même est une de ces interactions non renormalisables limitées. Son intensité (ou plutôt sa faiblesse) aux faibles énergies indique que son échelle d'énergie fondamentale se situe aux alentours de 10^{18} GeV. Une autre interaction non renormalisable, mais limitée, rendrait le proton 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.



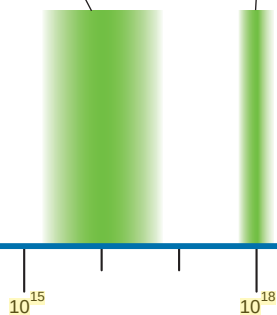
6. LE PROBLÈME DE LA HIÉRARCHIE est lancinant, en physique moderne. Les expériences (bande jaune) ont sondé la matière jusqu'à une énergie de 200 GeV et ont révélé l'existence de par-

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 ?

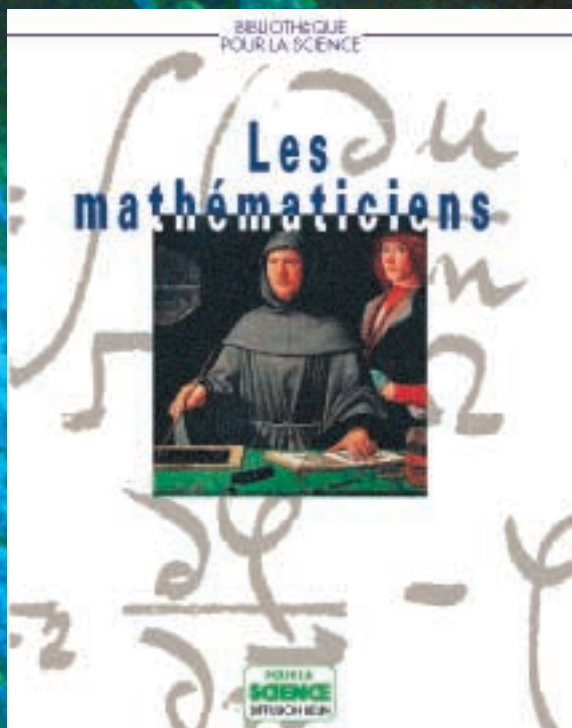
D'autre part, même si nous pouvions formuler une théorie fondamentale, nous ne saurions probablement pas l'utiliser pour faire des prévisions réfutables par des expériences. La plupart des prévisions vérifiées du Modèle standard ont reposé sur une méthode de calcul nommée théorie des perturbations. En 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^{16} GeV ?

BIBLIOTHÈQUE POUR LA SCIENCE



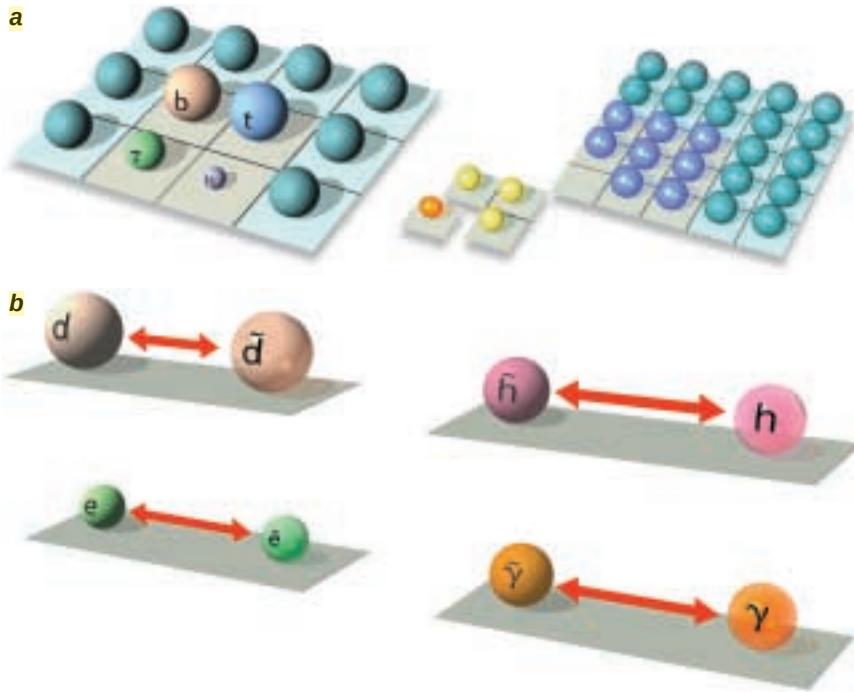
LES MATHÉMATICIENS

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 rapports 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 imaginaire 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.

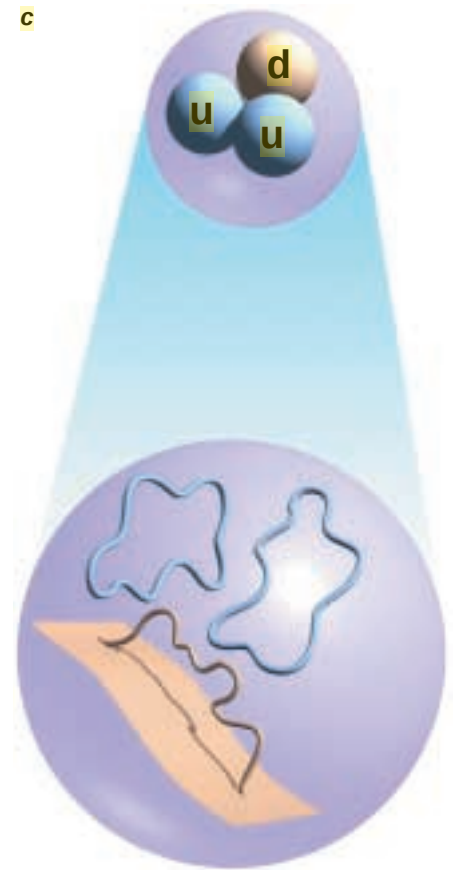
présence sont suffisamment faibles. Parfois des théories qui considèrent des interactions extrêmement fortes sont équivalentes à d'autres théories qui incluent des interactions extrêmement faibles : elles se prêtent donc à un traitement par perturbations. Une telle équivalence semble vérifiée pour certains 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'aidera 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.
