

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.

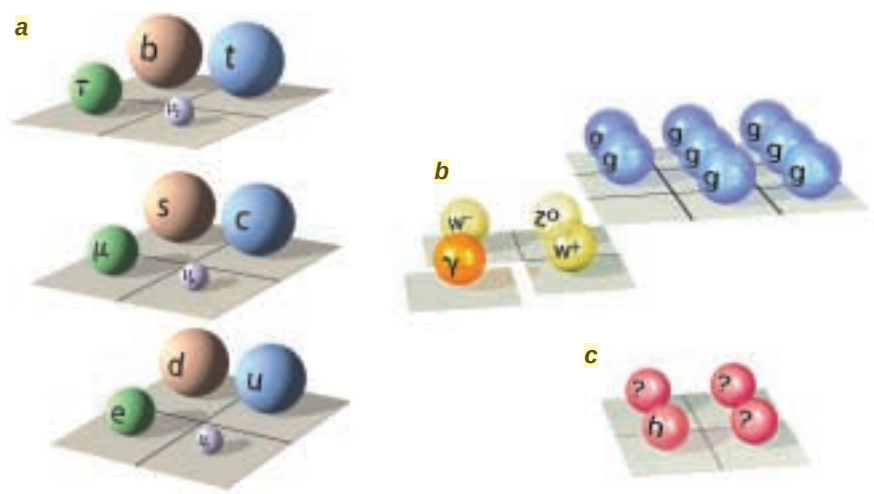
Et ensuite ? On voit mal comment on étudierait expérimentalement les phénomènes à des énergies de l'ordre de 10^{16} GeV. Avec les techniques actuelles, le diamètre d'un accélérateur de particules est proportionnel à l'énergie qu'il communique ; pour donner à des particules une énergie de 10^{16} GeV, 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.

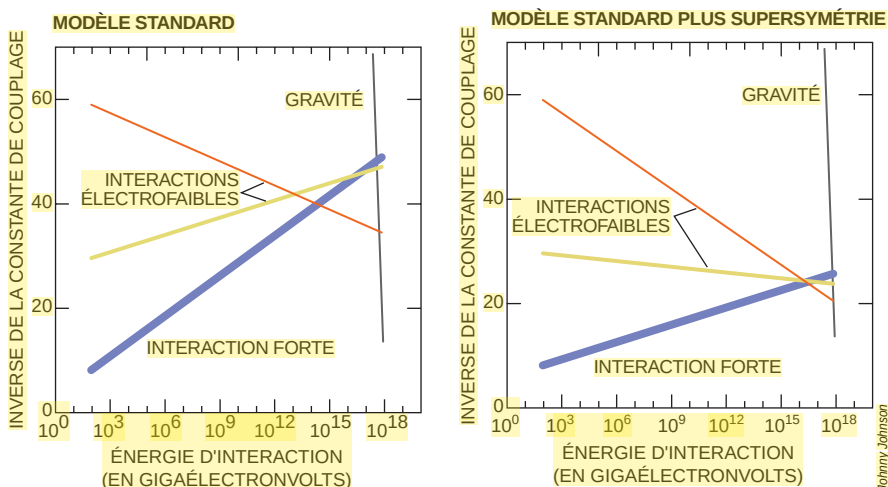
Des théories de champ

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.

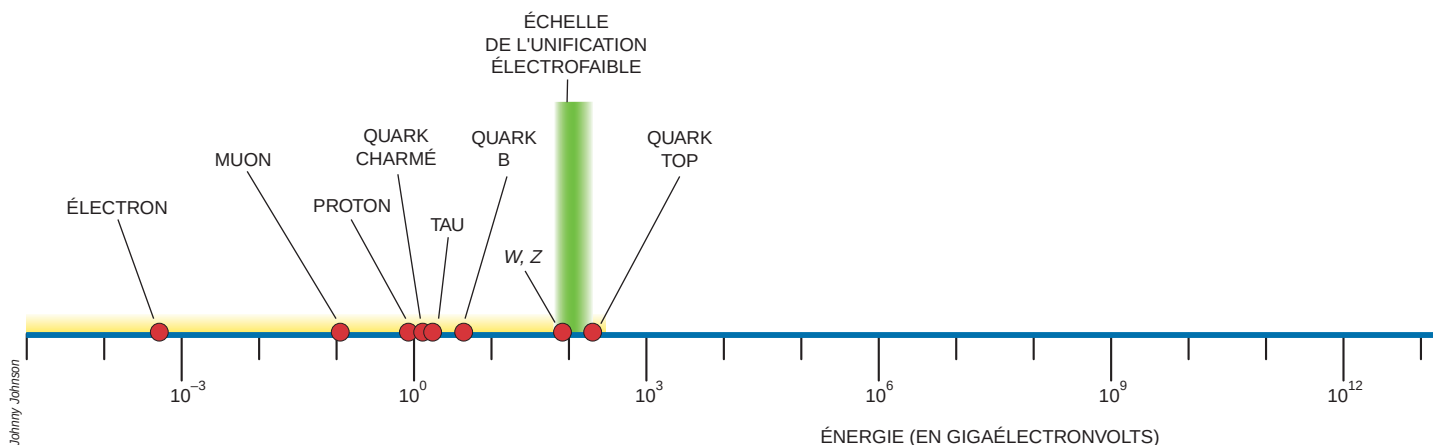
La gravitation elle-même est une de ces interactions non renormalisables limitées. Son intensité (ou plutôt sa faiblesse) aux faibles énergies indique que son échelle d'énergie fondamentale se situe aux alentours de 10^{18} GeV. Une autre interaction non renormalisable, mais limitée, rendrait le proton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