

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.

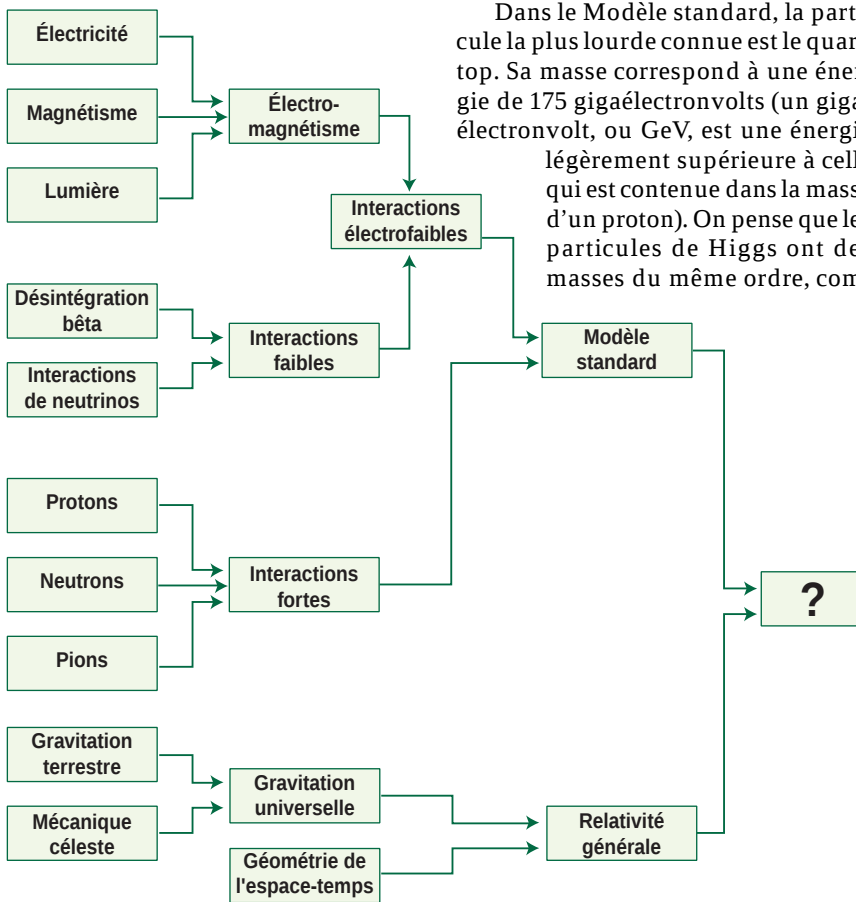
Dans le Modèle standard, la particule la plus lourde connue est le quark top. Sa masse correspond à une énergie de 175 gigaélectronvolts (un gigaélectronvolt, ou GeV, est une énergie légèrement supérieure à celle qui est contenue dans la masse d'un proton). On pense que les particules de Higgs ont des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

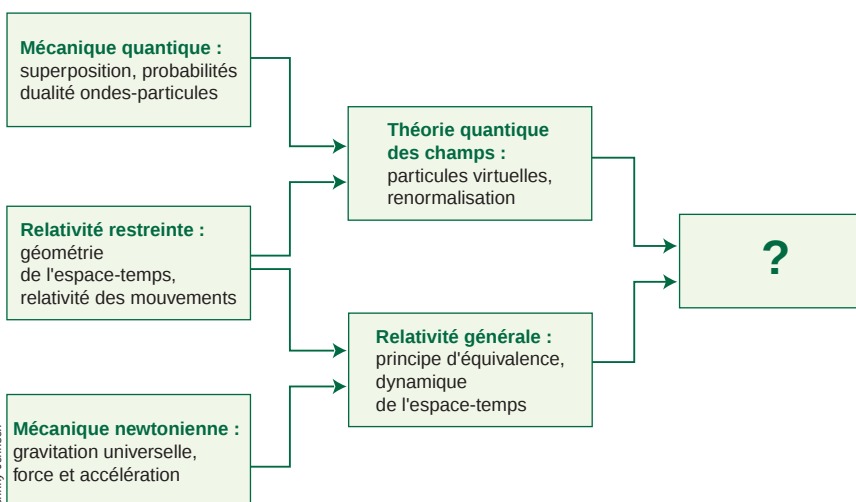
Au-delà du quark top

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.

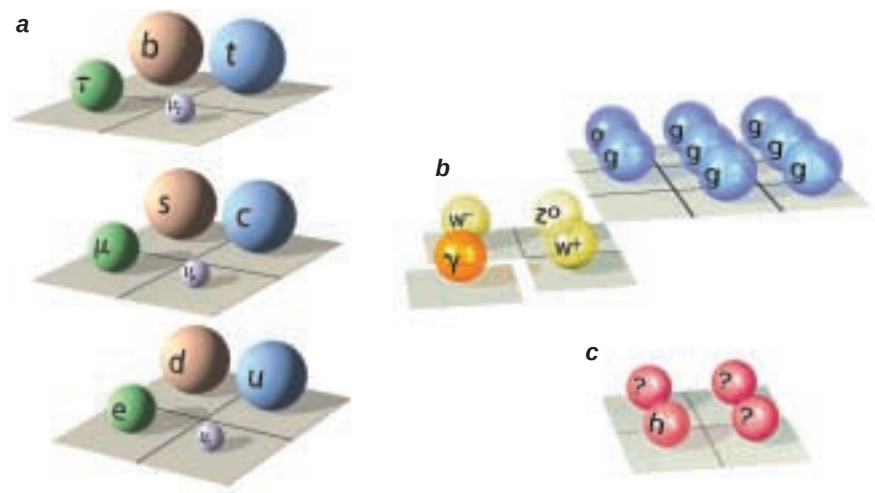
Et ensuite ? On voit mal comment on étudierait expérimentalement les phénomènes à des énergies de l'ordre de 10^{16} GeV. Avec les techniques actuelles, le diamètre d'un accélérateur de particules est proportionnel à l'énergie qu'il communique ; pour donner à des particules une énergie de 10^{16} GeV,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

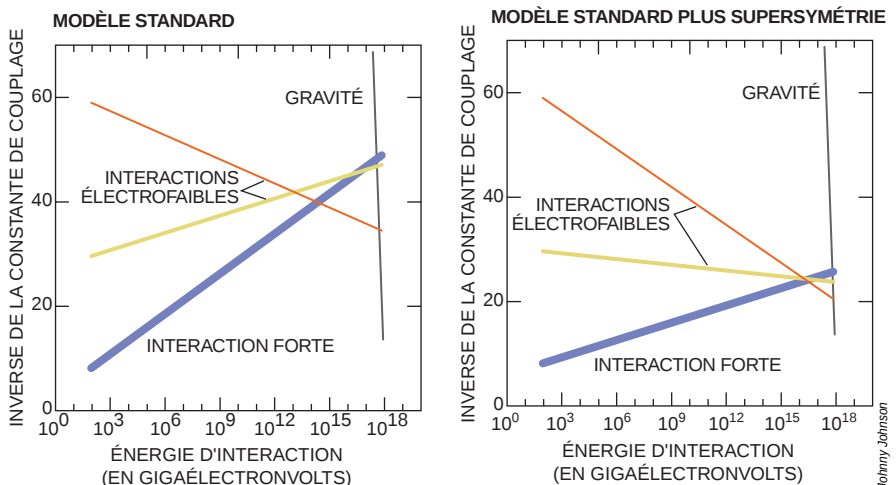
Des théories de champ

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.