

d'abord, s'il décrit les phénomènes observés avec une précision parfois extraordinaire, il n'intègre pas la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui relie les forces de gravitation et les déformations de l'espace-temps. Or la relativité, également bien confirmée expérimentalement, est une bonne description de la quatrième force de la nature : la gravitation. Le Modèle standard est une théorie purement quantique, ce qui n'est pas le cas de la relativité générale, et les deux théories ne devraient se rejoindre qu'à des échelles bien inférieures à celles qui sont accessibles expérimentalement. En l'absence d'une description quantique de la gravitation, le Modèle standard demeure incomplet.

De surcroît, malgré sa simplicité et sa puissance, le Modèle standard présente de nombreuses particularités qui semblent arbitraires. Les physiciens pensent qu'il est trop «baroque» et trop «byzantin» pour être la représentation complète de l'Univers. Il n'explique pas pourquoi le nombre de quarks et de leptons est égal à six, ni pourquoi ces deux nombres sont égaux : est-ce une coïncidence ? Les physiciens ont élaboré diverses théories qui lient intimement les quarks et les leptons, mais aucune expérience n'indique encore quelle théorie est préférable.

Troisièmement, le test expérimental du Modèle standard n'est pas achevé, et les prévisions invérifiées sont capitales : elles concernent le mécanisme qui donne leur masse aux particules. La masse est un paramètre crucial : si l'on changeait celle de l'électron, par exemple, toute la chimie serait bouleversée ; la masse des neutrinos, elle, détermine l'expansion de l'Univers (la masse des neutrinos est inférieure à quelques millièmes de la masse de l'électron, mais des expériences récentes indiquent qu'elle n'est pas tout à fait nulle).

Le mécanisme de Higgs

Les physiciens pensent que la masse de chaque particule est engendrée par des interactions avec un champ qui emplit tout l'espace : plus cette interaction est forte, plus la masse est élevée (voir l'encadré de la page 79). Cependant la nature exacte de ce champ reste inconnue. Soit c'est un nouveau champ élémentaire, nommé «champ de Higgs» (d'après le nom du physicien britannique Peter Higgs) ; soit il correspond à un ensemble de

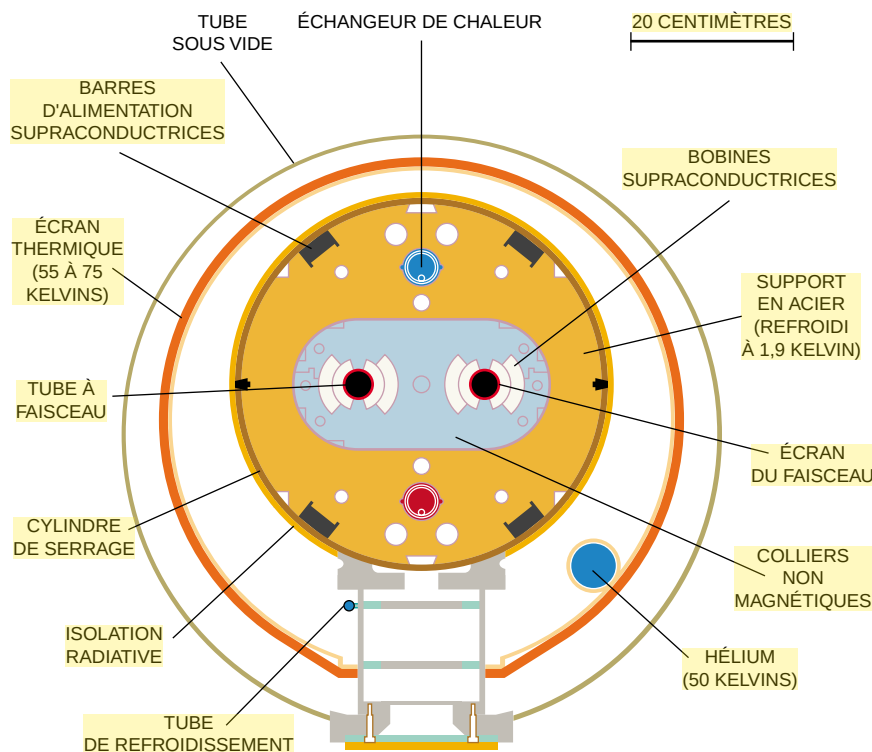
particules, les «techniquarks», associées à une interaction nouvelle, la «technicouleur». Même la théorie de Higgs admet des variantes : il pourrait exister plusieurs champs de Higgs, dont on ignore les propriétés.

Néanmoins, les physiciens ont une certitude quasi absolue : quel que soit le mécanisme réel, il produira de nouveaux phénomènes aux énergies qui seront communiquées aux particules par le LHC ; par exemple, on espère l'apparition des particules de Higgs (qui correspondraient à des ondes dans le champ de Higgs) ou la découverte des «techniparticules».

Avec le LHC, les physiciens testeront également les théories qui étendent ou qui complètent le Modèle standard. Ainsi, une théorie complète doit probablement être «supersymétrique» : les relations entre les particules et les interactions seraient considérablement resserrées. En outre, la «supersymétrie locale» inclurait la gravitation ; inversement, la théorie des cordes, la seule qui unifie la mécanique quantique et la relativité générale, est supersymétrique. De ce fait, si la supersymétrie s'applique effectivement, les physiciens espèrent que le LHC révélera les particules qu'elle prédit.

Les phénomènes et particules attendus pourraient arriver avant la mise en fonctionnement du LHC, car on augmente aujourd'hui l'énergie du LEP à plus de 100 giga-électronvolts, et, en 2001, le Tevatron projettera des protons contre des antiprotons, après une remise à niveau qui s'est achevée en 1999 (aujourd'hui, le Fermilab explore d'autres domaines de la physique en projetant ses protons sur des cibles fixes). Un de ces accélérateurs devancera-t-il le LHC ? C'est possible, mais il ne pourrait que montrer la partie émergée d'un iceberg que seul le LHC explorera.

Si le LEP et le Tevatron ne détectent aucun phénomène nouveau, le LHC donnera des indications inédites à des échelles inexplorées : il permet d'étudier tous les phénomènes qu'explorent les accélérateurs actuels, avec un systématisme qui ne laisse pas de zones d'ombre. De surcroît, les mesures faites depuis sept ans au LEP, à l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) et au Fermilab ont certifié que le LHC détectera le boson de Higgs s'il existe. Avec le LHC, les physiciens seront fixés : soit on découvrira le boson de Higgs, soit on trouvera un autre mécanisme qui expliquera la masse des particules.



3. UN DES AIMANTS DE L'ACCÉLÉRATEUR du LHC est représenté ici en coupe transversale. Les bobines supraconductrices seront parcourues par un courant de 12 000 ampères et ils seront refroidis à une température inférieure à deux kelvins ($-271,15^{\circ}\text{C}$). Chaque tube à faisceau sera parcouru par un faisceau de protons. D'autres aimants focaliseront les faisceaux et les dévieront dans les zones de collision, au centre des détecteurs.

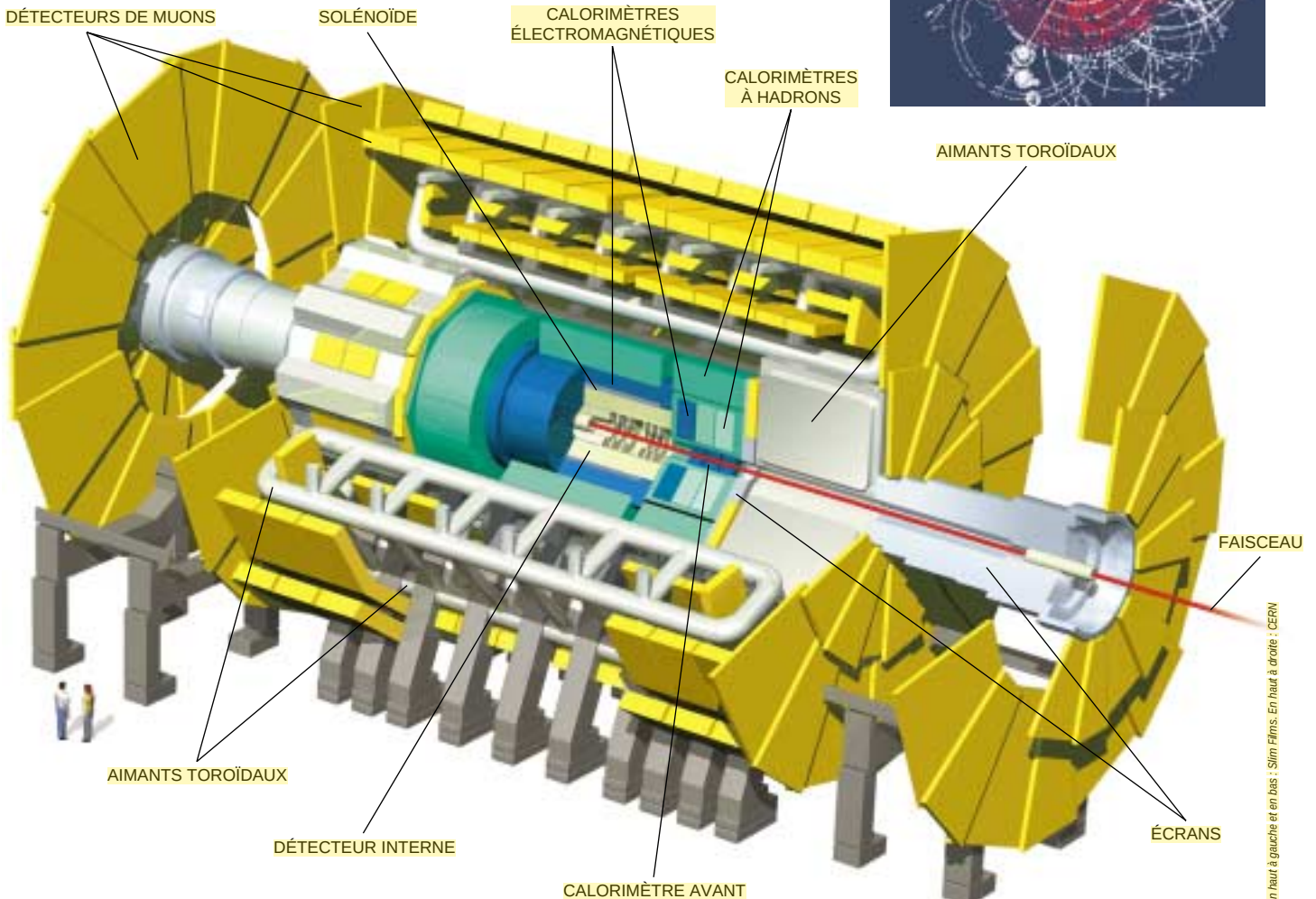
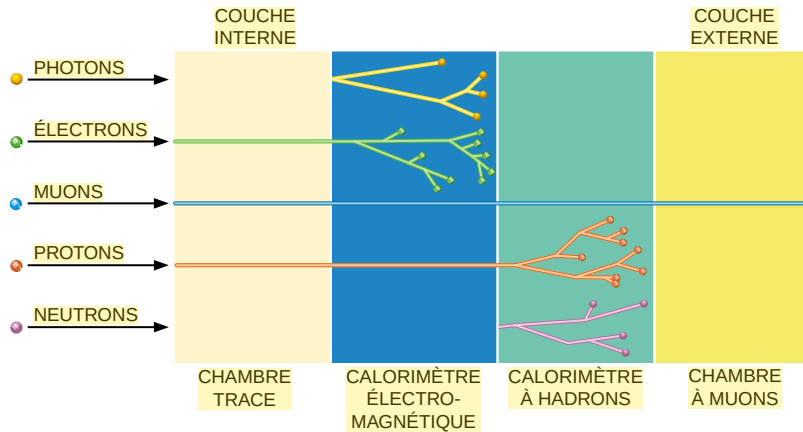
Imiter le Big Bang

Pour mieux connaître la physique aux toutes petites distances, on doit recréer des conditions analogues à celles qui régnaient une picoseconde après le Big Bang. Comment reproduire

un tel environnement? Examinons trois des problèmes techniques les plus difficiles : la construction des aimants de l'accélérateur, l'acquisition des données et les détecteurs.

Pour confiner les protons de 7 téraélectronvolts sur leur trajectoire, on doit

appliquer un champ magnétique de 8,3 teslas, soit 100 000 fois le champ magnétique terrestre. Comme des bobinages classiques, en cuivre, ne produiraient pas une telle intensité, on devra utiliser des aimants supraconducteurs, dont les bobinages conduisent le courant sans résistance (voir la figure 3). Pour que l'état supraconducteur subsiste pendant toute la durée de fonctionnement, les conducteurs étant parcourus par un courant électrique d'intensité égale à 12 000 ampères, les 22,4 kilomètres d'aimants devront rester à une température de -271°C (deux kelvins seulement au-



4. DANS LE DÉTECTEUR ATLAS (en bas), les protons qui seront projetés les uns contre les autres engendreront des gerbes de particules. Les couches concentriques de composants détecteuront diverses sortes de particules ; certains composants suivront la trajectoire de ces particules, et d'autres mesureront leur énergie (les « calorimètres »). Le schéma montre le fonctionnement

de ces couches de détecteurs. Des aimants toroïdaux d'un type nouveau incurveront la trajectoire des particules, ce qui permettra la mesure de leur quantité de mouvement. L'image en haut à droite est une simulation d'une collision enregistrée par ce détecteur : une particule de Higgs se désintègre en quatre muons (trajectoires jaunes).

dessus du zéro absolu). Les systèmes cryogéniques n'ont encore jamais été si importants.

En décembre 1994, le CERN a testé pendant 24 heures le fonctionnement d'un tronçon d'essai complet du LHC : le succès de l'expérience a montré que le choix technique était pertinent. Depuis, les essais ont reproduit dix années de fonctionnement du LHC (voir la figure 2).

Depuis l'abandon du Supercollisionneur supraconducteur, qui aurait communiqué aux particules une énergie de 40 téraélectronvolts, la plupart des projets de recherche en physique des hautes énergies se fondent sur les 14 téraélectronvolts du LHC. Au début des années 1990, alors que s'achevait la conception du Supercollisionneur supraconducteur, la stratégie envisagée pour le LHC – l'utilisation de faisceaux de particules très intenses – paraissait osée, parce que l'on ignorait comment les détecteurs suivraient toutes les particules engendrées par les collisions et comment ils supporteraient les radiations correspondantes. Aujourd'hui la détection semble bien maîtrisée, au moins théoriquement.

Les grandes intensités de faisceau du LHC ont nécessité des conceptions nouvelles des systèmes d'acquisition de données. Les faisceaux sont constitués de bouffées de protons qui se succèdent à des intervalles de 25 nanosecondes. Aux points de collision, des bouffées circulant en sens inverse s'interpénètrent 40 millions de fois par seconde, donnant lieu, chaque fois, à une vingtaine de collisions entre deux protons : les collisions seront si fréquentes que les particules issues d'une collision traverseront encore les détecteurs quand la collision suivante se produira. Sur ces 800 millions de collisions par seconde, seule une par milliard provoquera un choc frontal de deux quarks. Pour analyser tous les événements, on devra envoyer l'information produite par chaque détecteur dans des « pipelines électroniques » qui stockeront les données de quelques milliers de collisions successives. Ainsi les circuits électroniques en aval auront le temps de sélectionner les événements intéressants et de les enregistrer avant que les données se perdent en fin de pipeline. Les détecteurs du LHC disposeront de dizaines de millions de canaux : le suivi de toutes les informations, pour reconstituer une collision entre deux protons, est un casse-tête.

Quand des quarks se heurtent

Les détecteurs de particules sont les « yeux électroniques » des physiciens : ils scrutent chaque collision, à la recherche d'événements intéressants. Le LHC sera équipé de quatre détecteurs. Deux seront des poupées russes monstrueuses, composées de modules emboîtés, autour des points de collision.

Chaque module fera ses observations quand il sera traversé par les particules. Ces détecteurs à usage général, ATLAS et CMS, avec une hauteur de 22 mètres, chercheront les bosons de Higgs et les particules supersymétriques, ainsi que les particules inattendues, tirant le maximum de données des débris issus des collisions. Deux autres détecteurs, ALICE et LHCb, analyseront des phénomènes plus spécifiques.

Le Modèle standard

Le Modèle standard de la physique des particules est une théorie qui résume tout ce que l'on sait aujourd'hui sur les particules élémentaires et leurs interactions. Il distingue deux types de particules : celles qui constituent la matière, et celles qui assurent les interactions de particules. Par exemple, la force électromagnétique qu'exerce un proton sur un électron résulte de l'échange mutuel de photons (les particules de la lumière).

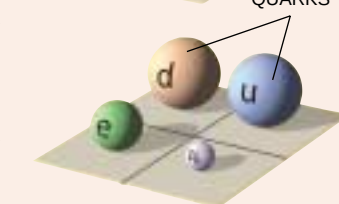
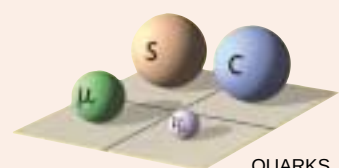
Les particules qui constituent la matière forment trois familles de quatre membres, chaque famille ne se distinguant des autres que par la masse de ses membres. Toute la matière que nous voyons autour de nous est composée par les particules les plus légères : ce sont les deux quarks « up » et « down », l'électron et le neutrino électronique. Les particules des deux autres familles n'apparaissent que lorsqu'elles sont produites par des collisions à haute énergie ; à l'exception des neutrinos, elles sont éphémères.

Les quarks sont liés en « hadrons » (du mot grec qui signifie « lourd ») par l'interaction forte, dont les vecteurs sont les gluons. Le proton et le neutron, qui constituent les noyaux atomiques, sont ainsi des hadrons. Les protons de ces noyaux attirent les électrons, grâce à la force électromagnétique, transmise par les photons, ce qui donne des atomes et des molécules. L'interaction faible, transmise par les bosons W et Z, contribue à l'émission d'énergie dans le Soleil et est à l'origine de la forme de désintégration radioactive où un noyau émet un électron et un neutrino.

La gravitation est l'interaction la plus faible, mais elle est familière parce qu'elle s'exerce sur tout objet possédant une masse, et que nous-mêmes vivons sur un objet massif, la Terre. Des particules nommées gravitons devraient transmettre cette interaction, mais les forces gravitationnelles sont si faibles qu'on n'a jamais détecté les gravitons. Aujourd'hui, le Modèle standard ne décrit pas le comportement des gravitons.

L'intégralité des comportements de la matière soumise aux diverses forces (sauf la gravitation) est décrite par un nombre limité d'équations élémentaires, construites à partir d'une fonction (un « lagrangien ») conçue selon un principe fondateur nommé « invariance de jauge ». Le Modèle standard n'explique pas pourquoi la nature a conçu trois familles de particules. Bien qu'il soit considéré comme l'une des plus belles constructions de la science du xx^e siècle, le Modèle standard pourrait ainsi n'être qu'un jalon vers une description encore plus fidèle des forces de la Nature.

FERMIONS (MATIÈRE)



QUARKS

BOSONS (FORCES)

GLUONS



PHOTON



BOSON DE HIGGS

Sim Films