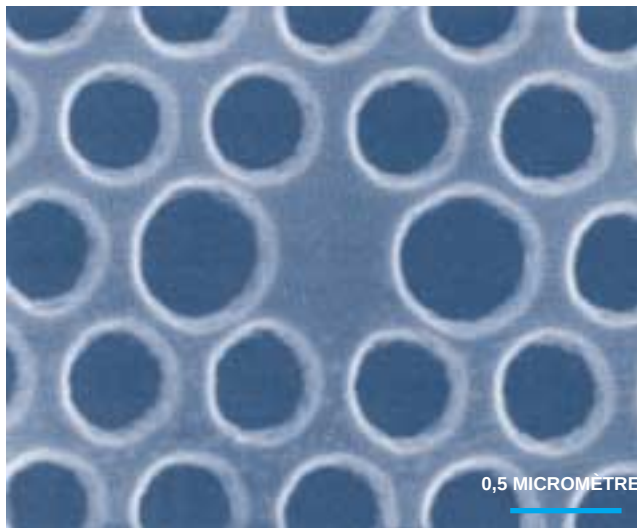


ne permettent encore qu'une modélisation partielle.

Le domaine des cristaux photoniques est en plein essor, et les physiciens rivalisent d'imagination dans la conception de nouvelles structures et de nouvelles applications. Toutefois, il convient d'être prudent : les recherches dans un domaine en pleine exploration débouchent parfois dans des directions inattendues. Nous avons souligné qu'une motivation importante de ces recherches concernait les sources optiques à l'état solide. À ce titre, la mise au point d'un microlaser à cristal photonique est encourageante, mais le chemin est encore long avant que ce type de source puisse être utilisé dans un système optoélectronique plus élaboré.

Les physiciens rêvent également de pouvoir faire émettre ces sources, photon par photon, en plaçant au centre de la cavité un minuscule émetteur de lumière en matériau semi-conducteur, nommé boîte quantique. Le contrôle du flux de lumière, photon par photon, ouvrirait des perspectives sans précédent dans le domaine de la cryptographie quantique et des communications optiques. Dans cette veine, l'application la plus concrète, avant même l'émission de lumière, est le filtrage en longueur d'onde à l'entrée et à la sortie des fibres optiques. Nous avons vu que les cristaux photoniques creusés de cavités permettraient, grâce à leur sélectivité, de filtrer la lumière en transmission ou en réflexion. On pourrait alors réduire d'un facteur 100 l'encombrement des composants utilisés pour le filtrage des longueurs d'onde.

À plus court terme, les études des cristaux photoniques débouchent peut-être sur des applications dans le domaine des micro-ondes, domaine où le premier cristal photonique a été mis au point. Comme les échelles de longueur en jeu sont plus grandes (du millimètre à quelques centimètres), la fabrication de structures à ces échelles est facilitée. Or, ces longueurs d'onde sont aussi celles des télécommunications, civiles ou militaires, les signaux se propageant le plus souvent dans l'air et non plus dans des fibres. Pour les téléphones portables notamment, les réflecteurs



10. UN RÉSEAU HEXAGONAL DE TROUS percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre, est le premier laser obtenu à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. La microcavité est bordée des deux trous d'un diamètre supérieur à ceux du reste du réseau.

à cristaux photoniques ont certainement leur rôle à jouer. Des ingénieurs pensent les utiliser pour éliminer, par réflexion, le rayonnement de l'antenne des téléphones portables qui n'est pas directement utilisé pour la communication, ce qui réduirait des risques potentiels pour l'utilisateur.

Le champ d'application qui s'ouvre aujourd'hui aux cristaux photoniques est vaste. À cet égard, il est étonnant de pouvoir réunir autour d'un thème unique les études sur les antennes et les recherches sur les sources optiques ultimes. D'une certaine façon, cette vision tridimensionnelle de l'optique ressemble aux architectures à trois dimensions qui apparaissent dans les mémoires de nos ordinateurs sous la forme d'empilements de circuits micro-électroniques séparés par des plans métalliques. Au-delà du matériau à bande interdite photonique et des dispositifs élémentaires qu'il permet de réaliser, les physiciens envisagent de véritables circuits optiques ou optoélectroniques à deux ou à trois dimensions. Des microcanaux de lumière, plus communément nommés guides d'onde électromagnétique, y remplaceraient les conducteurs métalliques : les parois du guide seraient formées de cristaux photoniques réflecteurs à tous les angles d'incidence. Cette conception pose bien évidemment de redoutables problèmes de modélisation et de fabrication, et beaucoup d'efforts seront nécessaires avant d'aboutir à une application pratique.

L'engouement pour les cristaux photoniques tient aussi à l'analogie fascinante entre la propagation de la lumière et celle des ondes électroniques dans un cristal solide. En science, l'analogie est courante, car elle stimule l'imagination et entraîne souvent une vision nouvelle des objets étudiés. Des travaux récents explorent plus avant cette analogie, en évoquant notamment les concepts de cristal photonique non linéaire en optique et de cristal sonique en acoustique.

Dans le premier cas, on imagine des alternances périodiques de matériaux dont les propriétés optiques sont altérées par un flux lumineux intense. La struc-

ture apparente du matériau se modifiera en conséquence avec l'intensité de l'éclairement, et ce qui était une bande de transmission pourra, par exemple, devenir une bande interdite photonique. Autrement dit, on disposera d'un système susceptible de nous protéger contre les flux lumineux intenses, tels ceux des lasers de puissance, à des longueurs d'onde données. Dans le cas du cristal sonique, on sait que le son est une onde de vibration des milieux matériels dont les équations de propagation sont très proches des équations de propagation de la lumière. Il n'y a qu'un pas à franchir pour élaborer des matériaux ou des objets qui empêchent la propagation des sons dans des plages de fréquence et des directions de l'espace choisies à l'avance (bandes interdites soniques). De la lumière au son, le pas est presque franchi.

Jean-Michel LOUTIOZ est chercheur à l'Institut d'électronique fondamentale de l'Université d'Orsay. Daniel MAYSTRE est chercheur au Laboratoire d'optique électromagnétique de la Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, à Marseille.

J.D. JOANNOPOULOS, R.D. MEADE et J.N. WINN, *Photonic crystals*, Princeton University Press, 1995.

J. RARITY et C. WEISBUCH, *Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1996.

Le Grand Collisionneur de hadrons

CHRIS LLEWELLYN SMITH

Cet accélérateur de particules, d'une puissance inégalée, sera construit par des chercheurs et des ingénieurs de tous les pays du monde.

Les physiciens l'utiliseront pour tester les théories actuelles de physique des particules.

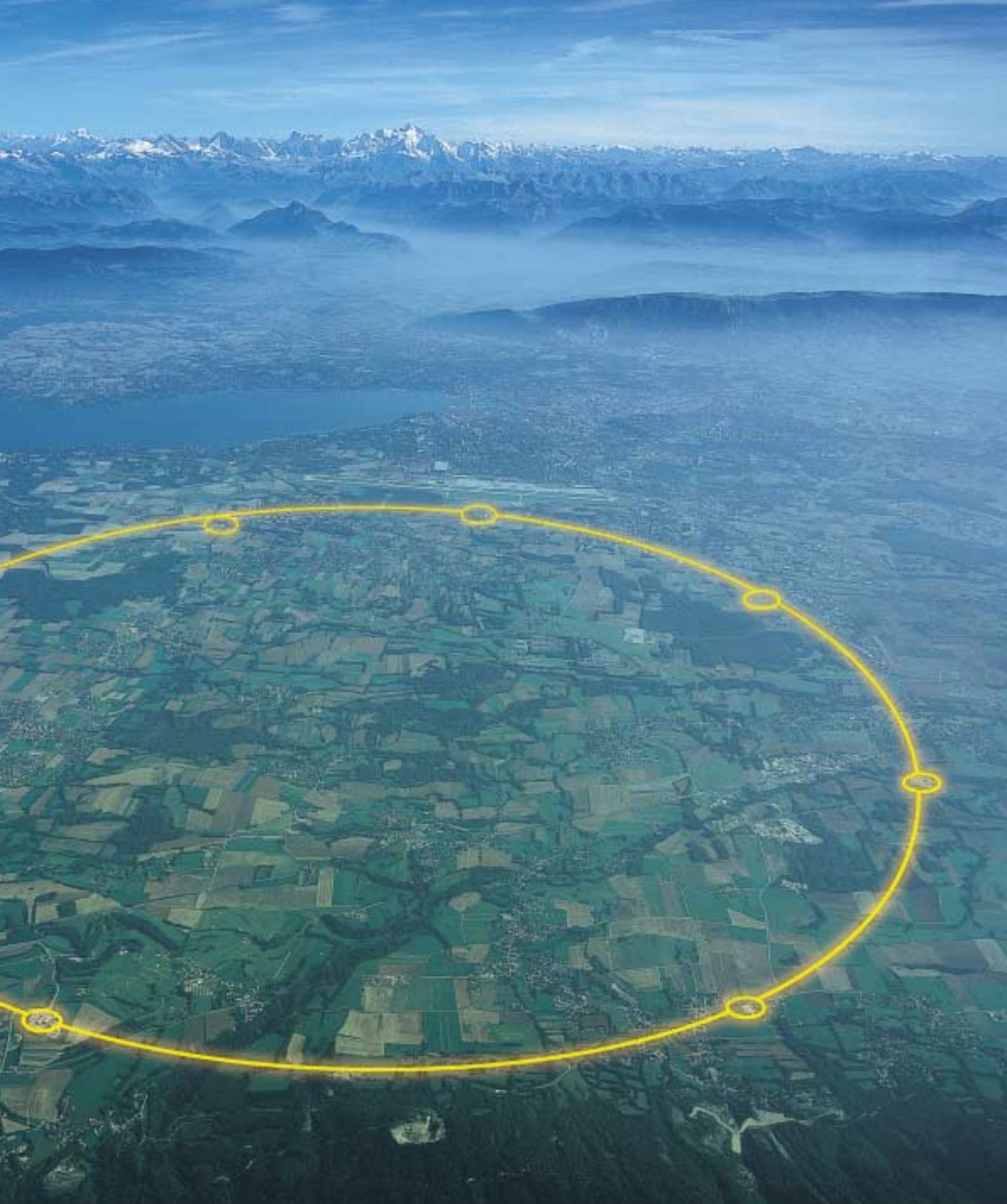
Avec le gigantesque accélérateur de particules qui se construit sous la frontière franco-suisse, les physiciens accéléreront des protons jusqu'à une vitesse égale à 99,999999 pour cent de la vitesse de la lumière, afin de provoquer ensuite des collisions frontales de ces particules : le choc libérera 14 téraélectronvolts (TeV), soit 14 000 milliards d'électronvolts. Cette énergie, 14 000 fois supérieure à celle qui est stockée dans un proton au repos (par la célèbre relation $E = mc^2$), se partagera entre les particules qui composent le proton : les quarks, et les gluons qui lient les quarks. La plupart de ces particules se disperseront, et une gerbe de particules sera émise tangentielle-ment à l'axe de la collision. Cependant, parfois, deux quarks se heurteront de front avec une énergie qui atteindra deux téraélectronvolts. Les physiciens prévoient que des nouveautés les attendent, soit sous forme de particules que l'on a nommées «bosons de Higgs», soit en manifestant une propriété merveilleuse nommée «supersymétrie», soit par un phénomène imprévu qui bouleversera toute la physique des particules.

La dernière collision frontale de quarks avec une énergie de deux téraélectronvolts date de tout premiers moments de l'Univers : une picoseconde (10^{-12} seconde, soit un millionième de millionième de seconde) après le Big Bang, l'Univers était si chaud et

si dense que les quarks étaient encore indépendants. La prochaine collision de ce type aura probablement lieu en 2005, dans le tunnel circulaire qui est creusé sous la frontière franco-suisse, près de Genève. À cette date, des milliers de chercheurs et d'ingénieurs, venus de dizaines de pays différents, auront sans doute achevé la construction des détecteurs géants du Large Hadron Collider (LHC), ou Grand Collisionneur de hadrons, et les expériences commenceront. Ce projet extraordinaire, coordonné par le CERN (le laboratoire européen de physique des particules), est déjà bien entamé.

Le LHC communiquera aux particules des énergies sept fois supérieures à celles qui sont obtenues dans le Tevatron du Laboratoire Fermi, dans l'Illinois, lequel a révélé le quark «top», prévu théoriquement depuis longtemps. Le LHC sera construit dans un tunnel long de 27 kilomètres, qui abrite aujourd'hui le grand collisionneur d'électrons et de positrons, le LEP. Celui-ci a déjà précisé les paramètres de la physique des particules pour des énergies environ 100 fois inférieures à celles qui seront accessibles au LHC. La construction du LHC dans le tunnel du LEP est évidemment avantageuse : on économise les coûts considérables de creusement d'un nouveau tunnel, de construction des préaccélérateurs d'injection, et d'une infrastructure générale. Toutefois, pour faire suivre à des

CERN



1. UN TUNNEL de 27 kilomètres de circonférence, à cheval sur la frontière franco-suisse, abritera le Grand Collisionneur de hadrons, ou LHC (en jaune). Les petits cercles indiquent les emplacements des

salles souterraines (à 100 mètres sous terre) où seront placés les détecteurs et les divers équipements nécessaires au fonctionnement de l'accélérateur et des détecteurs.

particules rapides la trajectoire qui leur est dévolue dans le tunnel, les ingénieurs devront produire des champs magnétiques plus intenses que tous ceux qui ont été appliqués jusqu'à ce jour. Ces champs seront produits par 1 232 aimants de 15 mètres de long chacun, occupant 85 pour cent de la longueur de l'accélérateur. Des câbles supraconducteurs, refroidis par de l'hélium superfluide, à la température de deux kelvins (deux degrés au-dessus du zéro absolu, soit $-271,15^{\circ}\text{C}$), transporteront les 12 000 ampères nécessaires à l'alimentation des aimants.

On n'observera pas de phénomènes physiques nouveaux si l'on se contente d'accélérer quelques protons, car leur énergie se répartit au hasard entre leurs constituants, les quarks et les gluons. Pour observer les rares collisions frontales de quarks, on devra augmenter considérablement l'intensité des faisceaux de protons. L'intensité produite par le LHC, ce que l'on nomme sa «luminosité», sera 100 fois supérieure à celle du Tevatron. La luminosité supérieure du LHC augmentera la difficulté des expériences, car les grandes intensités de faisceau défocalisent les protons.

Un milliard de collisions par seconde seront produites en quatre endroits du LHC ; chacune engendrera une centaine de particules secondaires. De gigantesques détecteurs – le plus grand est haut comme un immeuble de six étages –, assemblages de milliers de composants, suivront à la trace toutes ces particules secondaires. Des programmes d'ordinateur élaborés cribleront toutes les données, afin de sélectionner les quelques événements (de 10 à 100 par seconde) qui devront être mieux analysés.

Des questions sans réponse

Sonder la nature à de hautes énergies, c'est explorer la structure fine de la matière : les gigantesques accélérateurs de particules sont, en fait, des microscopes très puissants. Les accélérateurs actuels ont sondé la matière à l'échelle du milliardième de milliardième de mètre (10^{-18} mètre). Avec le LHC, on verra des structures dix fois plus petites. Cette avancée seule intéresserait déjà les physiciens, mais ceux-ci sont surtout impatients d'accéder à des domaines nouveaux de la physique.

Lors des 30 dernières années, les physiciens des particules ont élaboré une représentation concise de la réalité, qui décrit correctement la matière jusqu'aux échelles de 10^{-18} mètre : ce «Modèle standard» (voir l'encadré de la page 79) décrit les caractéristiques des particules connues, ainsi que trois des quatre forces qui s'exercent entre les particules. La matière est formée à partir de six quarks et de six leptons distincts. L'interaction «forte» lie les quarks en particules nommées hadrons, tels le proton et le neutron, et un effet résiduel de cette interaction forte regroupe les hadrons dans les noyaux atomiques. Les deux autres types de forces sont les interactions électromagnétique et faible. Cette dernière s'exerce seulement à très courte portée ; elle est responsable de la désintégration bêta et joue ainsi un rôle essentiel dans le fonctionnement des étoiles et, notamment, du Soleil. Le Modèle standard donne une description unifiée des interactions faible et électromagnétique, sous la forme d'une interaction «électrofaible».

Plus de 20 physiciens qui ont contribué à l'élaboration du Modèle standard ont été récompensés par le prix Nobel. Cependant, le Modèle standard présente des insuffisances. Tout



Laurent Guiraud, CERN

2. LE TRONÇON D'ESSAI d'un aimant supraconducteur a été réalisé dans le hall d'assemblage ; 1 232 aimants de ce type dévieront les deux faisceaux de protons accélérés par le LHC et leur feront suivre une trajectoire circulaire dans le tunnel de l'accélérateur.

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

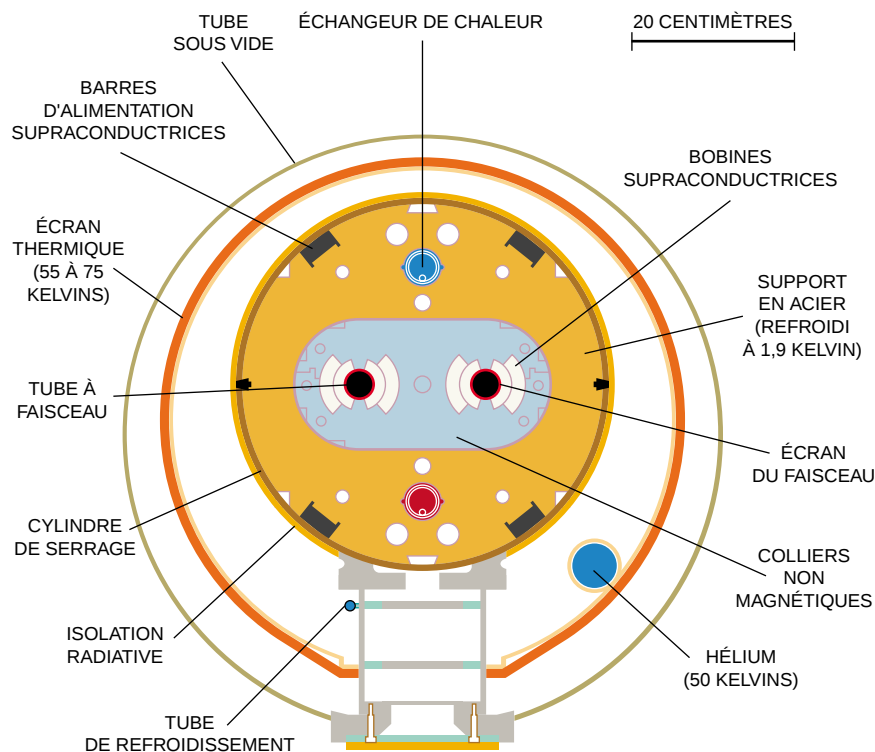
particules, les «techniquarks», associées à une interaction nouvelle, la «technicouleur». Même la théorie de Higgs admet des variantes : il pourrait exister plusieurs champs de Higgs, dont on ignore les propriétés.

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 bobinages supraconducteurs seront parcourus 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.

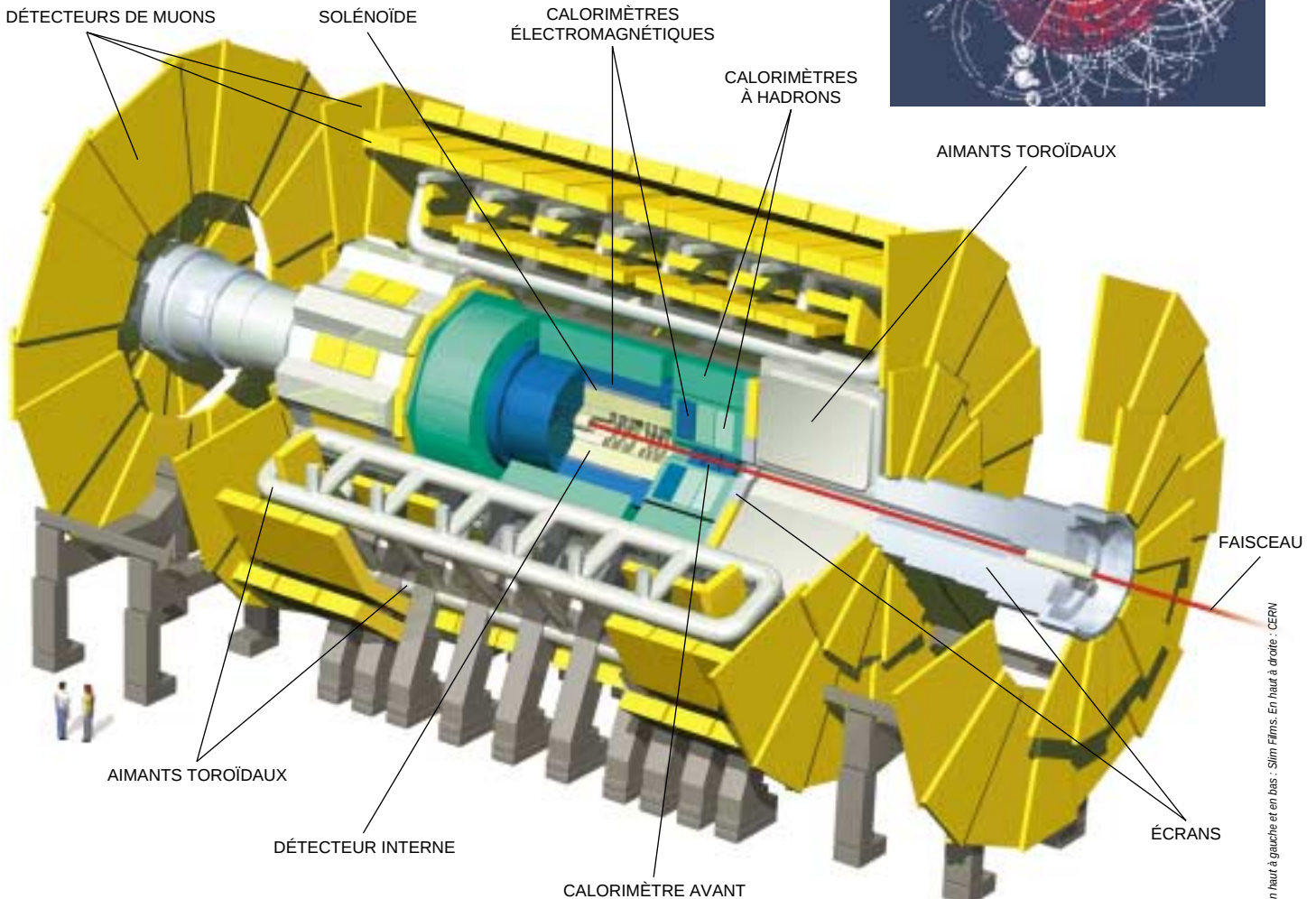
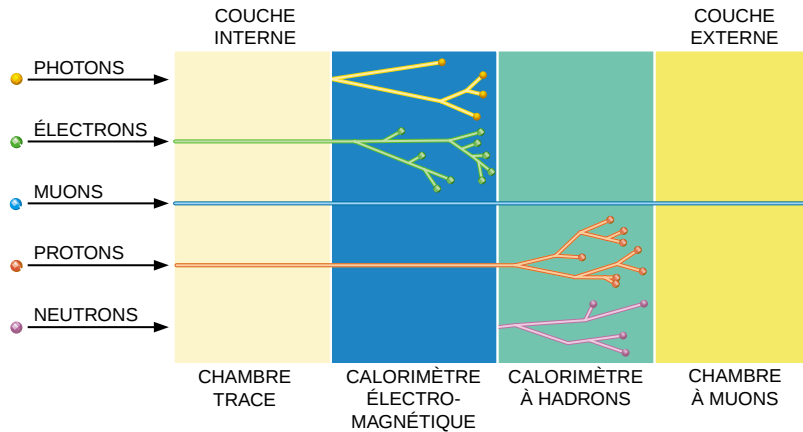
Imiter le Big Bang

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 téra-électronvolts 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 détecteront 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).

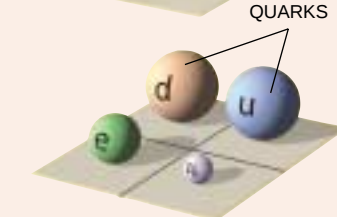
Les particules qui constituent la matière forment trois familles de quatre membres, chaque famille ne se distinguant des autres que par la masse de ses membres. Toute la matière que nous voyons autour de nous est composée par les particules les plus légères : ce sont les deux quarks « up » et « down », 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)



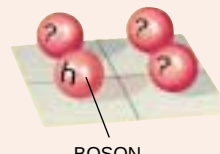
QUARKS

BOSONS (FORCES)

GLUONS



PHOTON



BOSON DE HIGGS

ATLAS et CMS détecteront surtout les muons, les électrons et les photons de haute énergie, qui semblent être révélateurs de la formation de nouvelles particules, tels les bosons de Higgs. Conçus différemment, ces deux détecteurs sont complémentaires. Des années de simulations ont montré qu'il détecteraient n'importe quel phénomène nouveau qui surviendrait lors d'une collision. Le détecteur ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*, soit «appareil toroïdal du LHC») contient un gigantesque aimant torique, truffé de détecteurs qui identifieront les muons au vol. Le détecteur CMS (*Compact Muon Solenoid*, soit «solénoïde compact à muons») est plus classique : des détecteurs de muons sont insérés dans le circuit magnétique d'un solénoïde extrêmement puissant.

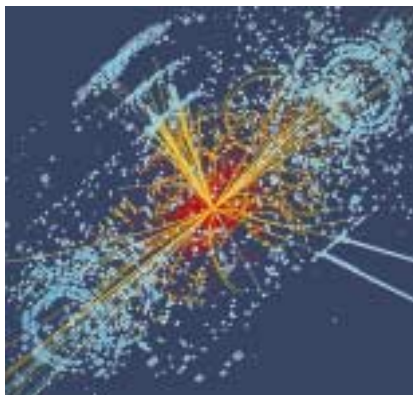
Certains des détecteurs de CMS seront des cristaux qui émettent de la lumière lorsque des électrons ou des photons les traversent. La fabrication de ces cristaux est très difficile, mais on bénéficie de l'expérience acquise lors de la construction du détecteur L3,

en fonctionnement au CERN (depuis 1989, L3 est un des quatre détecteurs du LEP). On n'avait jamais fabriqué de cristaux scintillateurs en grand nombre avant de construire le détecteur L3, qui en comporte 11 000. Toutefois ces cristaux élaborés pour L3 sont désormais d'un usage courant dans les dispositifs d'imagerie médicale. Le détecteur CMS du LHC aura besoin de plus de sept fois plus de cristaux que L3, et ces cristaux devront être plus robustes. On pense que les travaux

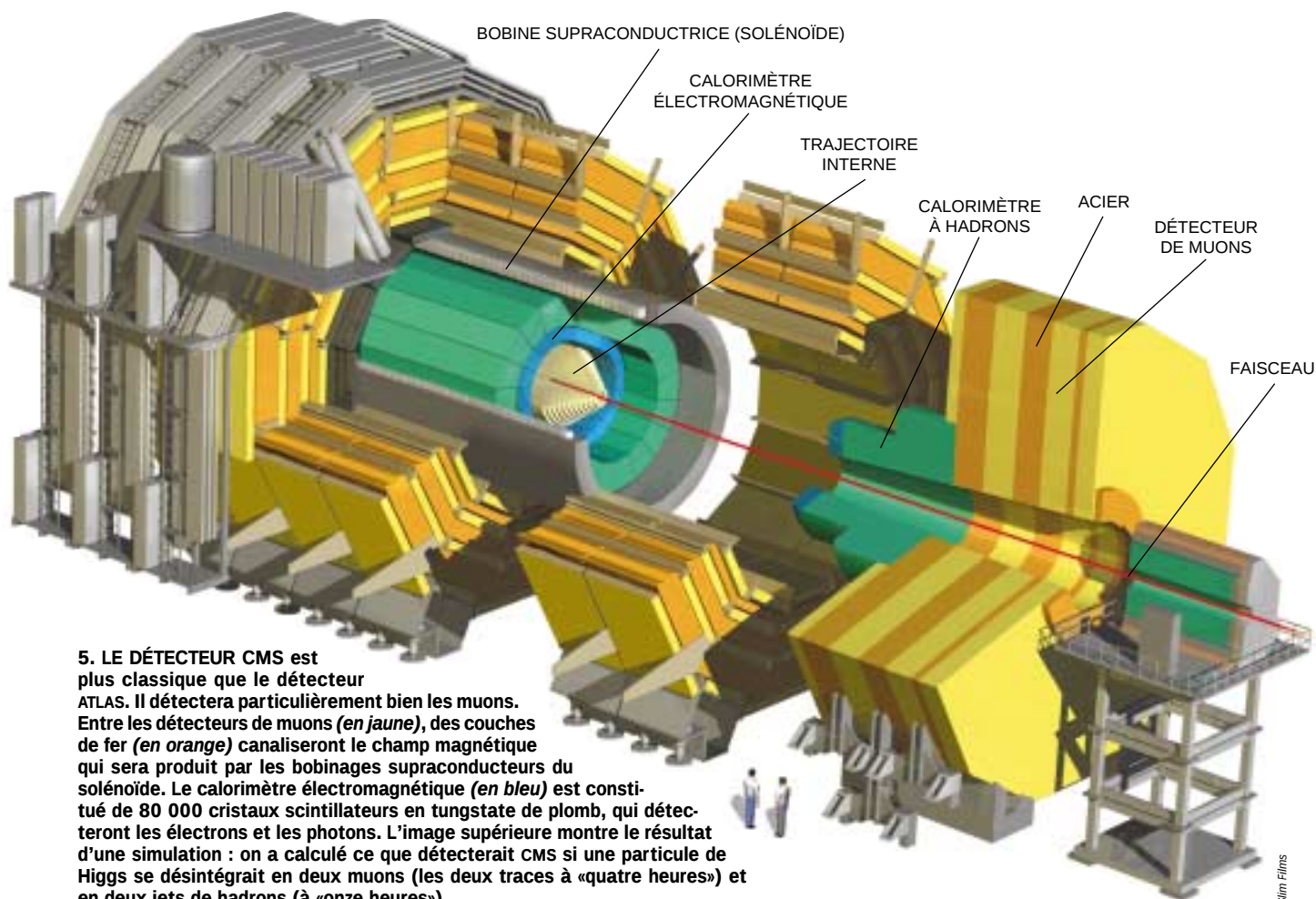
nécessaires à leur réalisation feront également progresser la médecine.

Le détecteur ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*, soit «expérience de collision d'ions lourds») sera utilisé pour une expérience plus limitée, qui commencera quand le LHC produira des collisions entre des noyaux de plomb accélérés : en se heurtant avec une énergie considérable (1 150 téraélectronvolts), les noyaux libéreront leurs 400 protons et neutrons, qui formeront un plasma de quarks et de gluons analogue à celui qui emplissait l'Univers dix microsecondes après le Big Bang. Le détecteur ALICE est construit à partir de l'aimant du détecteur L3 et équipé de dispositifs avec lesquels on sondera le plasma de quarks et de gluons.

Des expériences, au CERN, semblent avoir déjà créé des plasmas de quarks et de gluons. Dans les toutes prochaines années, le collisionneur relativiste d'ions lourds (RHIC), Brookhaven, étudiera mieux cet état de la matière, en communiquant dix fois plus d'énergie par nucléon que les programmes



CERN



5. LE DÉTECTEUR CMS est plus classique que le détecteur ATLAS. Il détectera particulièrement bien les muons. Entre les détecteurs de muons (*en jaune*), des couches de fer (*en orange*) canaliseront le champ magnétique qui sera produit par les bobinages supraconducteurs du solénoïde. Le calorimètre électromagnétique (*en bleu*) est constitué de 80 000 cristaux scintillateurs en tungstate de plomb, qui détecteront les électrons et les photons. L'image supérieure montre le résultat d'une simulation : on a calculé ce que détecterait CMS si une particule de Higgs se désintégrait en deux muons (les deux traces à «quatre heures») et en deux jets de hadrons (à «onze heures»).

Slim Films

Comment le champ de Higgs produit la masse



L'espace «vide» où règne le champ de Higgs est comme une pièce emplies de personnes qui bavardent tranquillement.



Une particule qui traverse cet espace est comme une célébrité qui entre...



... provoquant autour d'elle un attroupement d'admirateurs qui ralentissent sa progression : elle acquiert de la «masse».

actuels du CERN. Puis, quand le LHC fonctionnera, une énergie encore 30 fois supérieure par nucléon donnera une idée plus précise de l'Univers quand il était dans une phase déterminante de son évolution.

Les études des mésons B, au LHC, devraient expliquer pourquoi l'Univers contient apparemment plus de matière que d'antimatière. Un tel déséquilibre ne s'explique que si les quarks et les antiquarks lourds se désintègrent à des vitesses différentes. Le Modèle standard rend compte de ce déséquilibre nommé «violation CP» (pour conjugaison, qui transforme la matière en antimatière, et parité, qui transforme un objet en son image dans un miroir), mais il en sous-estime probablement l'ampleur. Les physiciens ont étudié expérimentalement une violation CP, lors de la désintégration des quarks «étranges», mais ils ignorent si elle se produit aussi avec les quarks lourds de type bottom et avec leurs antiquarks, qui constituent le méson B. L'étude de ces désintégrations sera donc un test important du Modèle standard.

Des études des mésons B ont commencé en 1999, dans deux «usines à B», en Californie et au Japon : ces machines produisent annuellement plusieurs dizaines de millions de ces mésons. Avec sa luminosité importante, le LHC en fournira annuellement un million de milliards, ce qui augmentera notablement la précision des mesures et révélera éventuellement des modes de désintégrations inédits, indécryptables par les autres usines à B.

Le LHC est un accélérateur trop ambitieux – et trop coûteux – pour un seul pays. La collaboration internationale a toujours été active, en physique des particules, car les physiciens ont besoin d'équipements lourds, rarement proches de leur laboratoire ou de

La formation des particules de Higgs



L'énergie issue d'une collision de particules est comme une rumeur propagée dans la même pièce...



... créant encore un attroupement : c'est une particule de Higgs.

leur pays d'origine. Progressivement, la taille et le coût des détecteurs ont augmenté, les frais ont été partagés par un nombre croissant de pays, et les collaborations internationales se sont intensifiées (c'est pour rapprocher ceux qui collaboraient au projet du LEP que Tim Berners-Lee, du CERN, a inventé le Web).

Un laboratoire mondial

Initialement le projet du LHC a été décidé par 19 pays, qui étaient tous membres du CERN ; on envisageait alors une construction en deux tranches, avec un calendrier de travaux largement étalé dans le temps, ce qui était scientifiquement frustrant et financièrement moins avantageux qu'une construction en une seule fois. Grâce à des fonds supplémentaires accordés par d'autres pays, le projet sera amélioré et accéléré. Simultanément, les collaborations scientifiques seront renforcées. Notamment le Canada, les États-Unis, l'Inde, Israël, le Japon et la Russie participeront à la construction des composants de l'accélérateur (et aussi des détecteurs). Le laboratoire japonais KEK, par exemple, fournira 16 aimants de focalisation

spéciaux. Les États-Unis fabriqueront des parties de l'accélérateur (à Brookhaven, au Fermilab et à Berkeley).

Les détecteurs ATLAS et CMS occuperont quatre fois plus d'ingénieurs et de chercheurs que les détecteurs de la génération précédente. Au total, 5 000 chercheurs et ingénieurs, provenant de plus de 300 universités et plus de 50 pays, travailleront au LHC. Les composants seront, autant que possible, élaborés par les pays participants : leurs étudiants y travailleront, acquérant ainsi une expérience irremplaçable, et leurs industries seront sollicitées. Le travail d'analyse des données sera également réparti. Le CERN n'était naguère qu'un institut de recherche européen. Avec le LHC, il deviendra mondial. Déjà plus de la moitié des physiciens des particules y travaillent : 7 000 personnes !

Chris Llewellyn SMITH est doyen de l'Université de Londres. De 1994 à 1998, il a occupé le poste de directeur général du CERN.

The Particle Century, sous la direction de Gordon Fraser, Institute of Physics, 1998.

Gordon KANE, *Supersymmetry*, Perseus Publishing, 2000.

