

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).

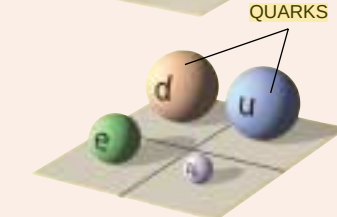
Les particules qui constituent la matière forment trois familles de quatre membres, chaque famille ne se distinguant des autres que par la masse de ses membres. Toute la matière que nous voyons autour de nous est composée par les particules les plus légères : ce sont les deux quarks « up » et « down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

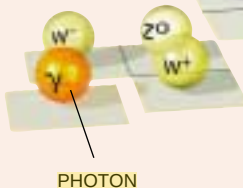
FERMIONS (MATIÈRE)



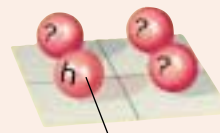
QUARKS

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.

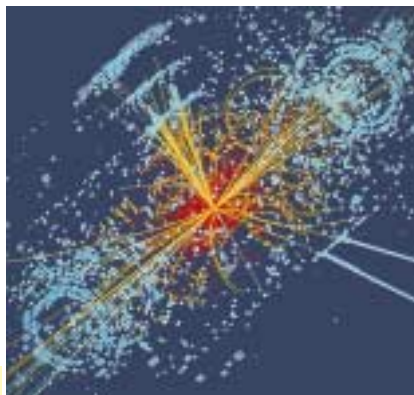
Certains des détecteurs de CMS seront des cristaux qui émettent de la lumière lorsque des électrons ou des photons les traversent. La fabrication de ces cristaux est très difficile, mais on bénéficie de l'expérience acquise lors de la construction du détecteur L3,

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

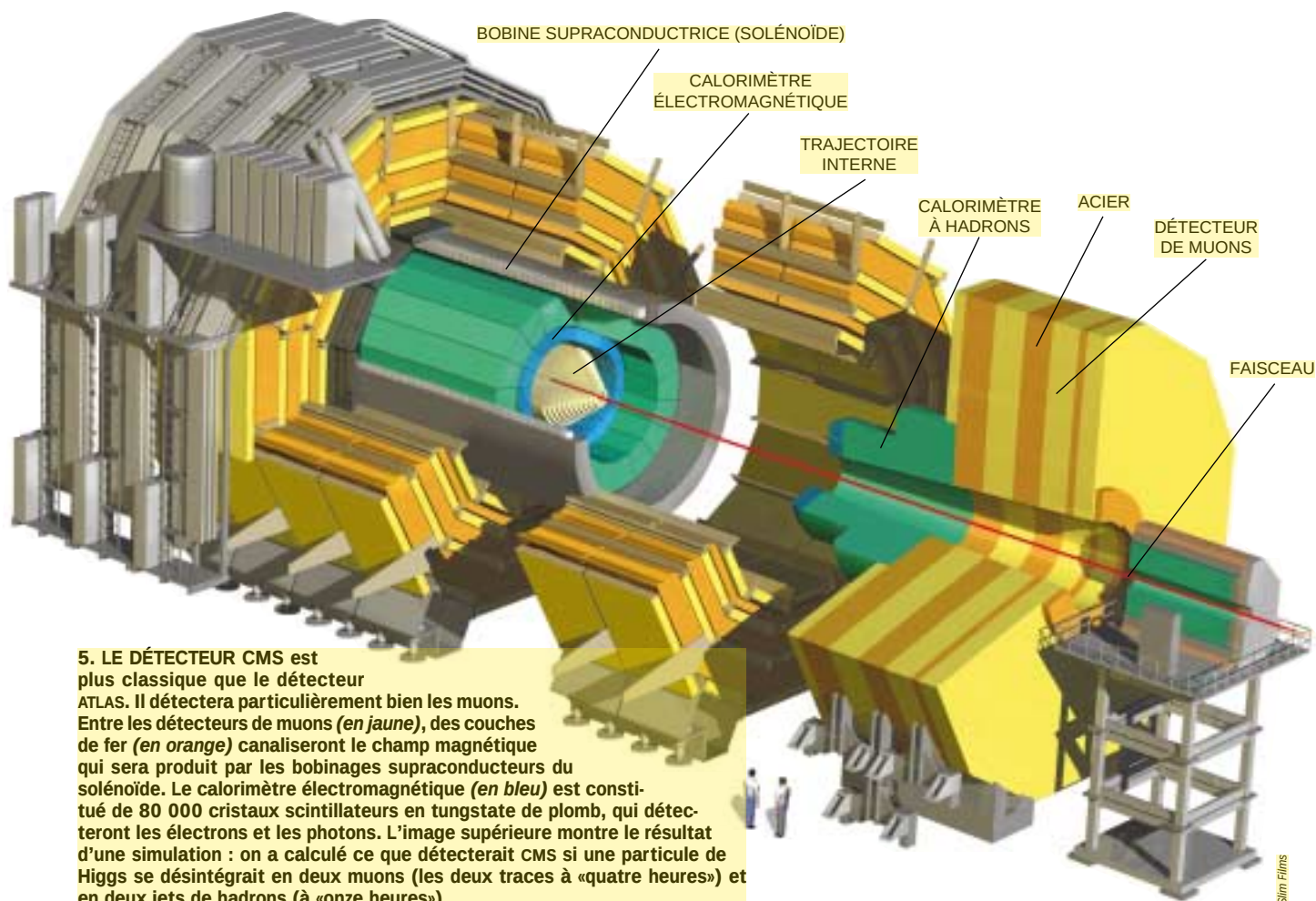
nécessaires à leur réalisation feront également progresser la médecine.

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



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.