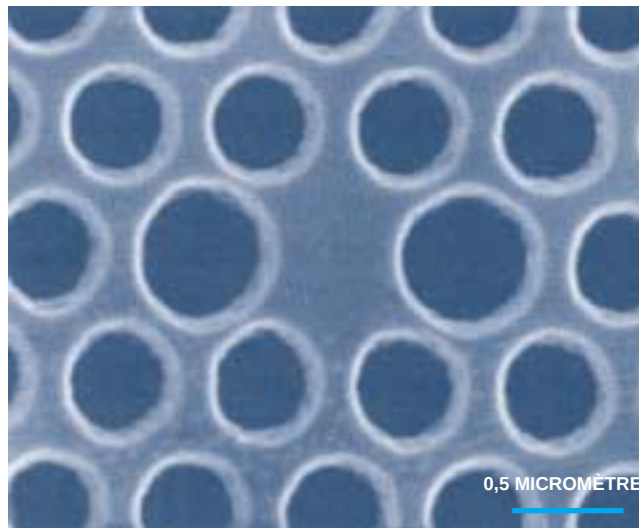


ne permettent encore qu'une modélisation partielle.

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 permettaient, 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.

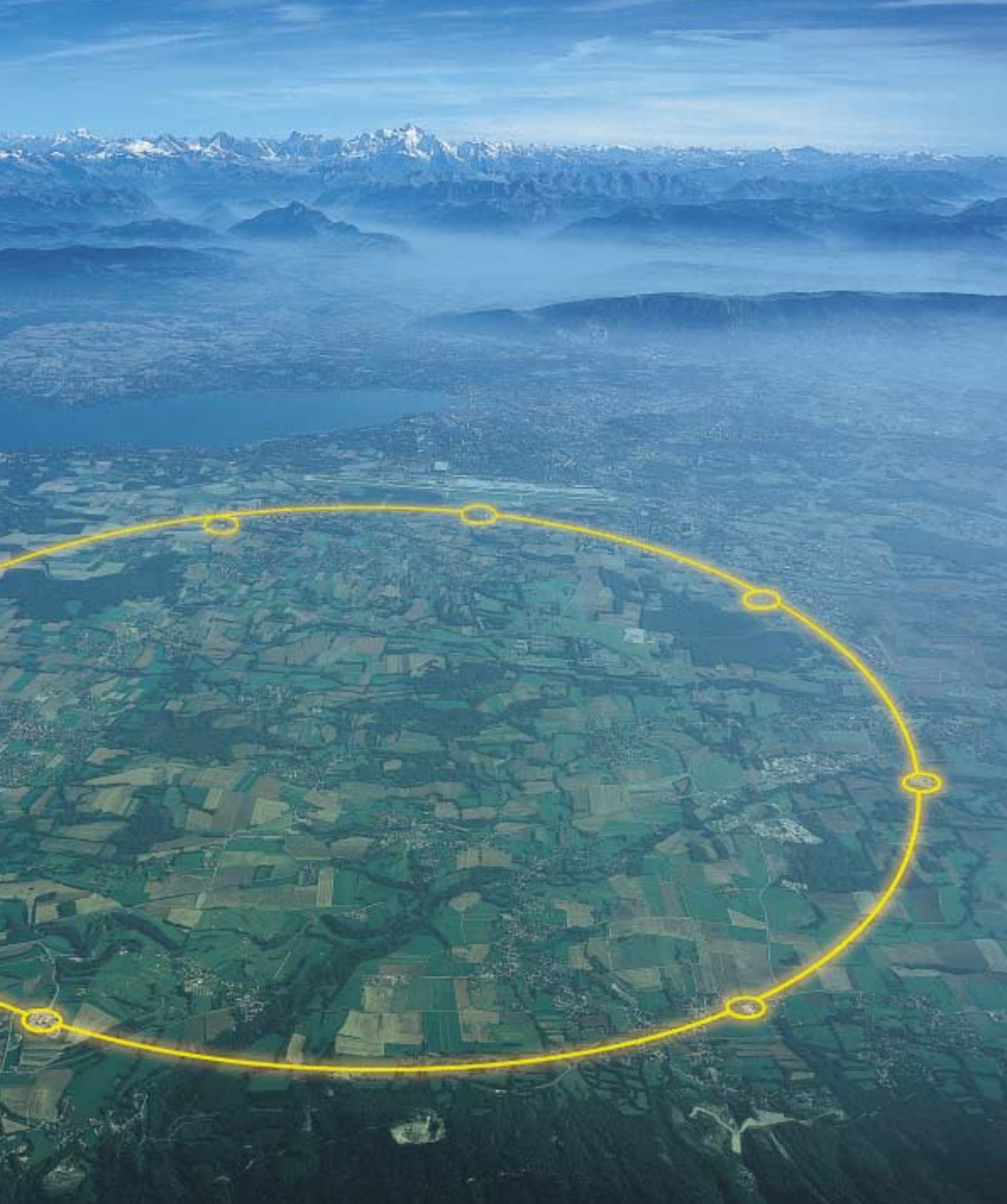
Avec le gigantesque accélérateur de particules qui se construit sous la frontière franco-suisse, les physiciens accéléreront des protons jusqu'à une vitesse égale à 99,999999 pour cent de la vitesse de la lumière, afin de provoquer ensuite des collisions frontales de ces particules : le choc libérera 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.