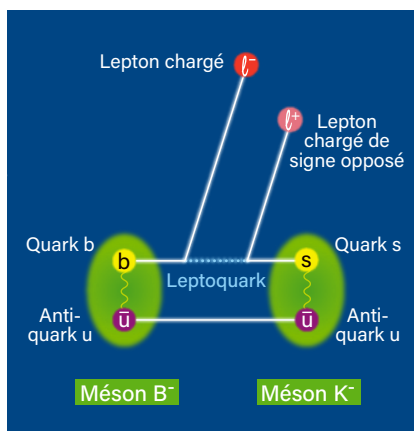
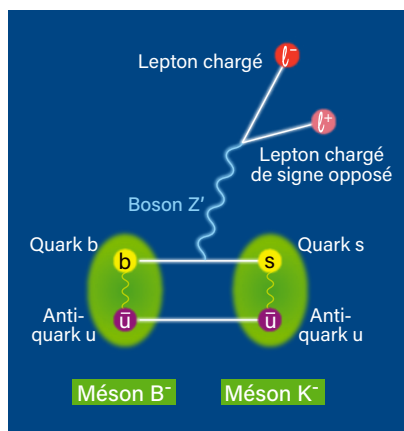




← Les anomalies constatées sur les désintégrations de type 1 ou 2 pourraient s'expliquer par l'existence soit d'une nouvelle interaction portée par des bosons inédits (à gauche), soit par des particules nouvelles, les leptoquarks (à droite).

matière noire, la grande diversité des masses de particules ou les causes de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers.

Les paramètres de ces modèles étendus commencent d'ailleurs à être très contraints. Ces nouvelles particules ne peuvent pas être trop massives : on veut que le quark b puisse passer par leur intermédiaire pour se désintégrer, ce qui serait impossible si elles étaient très lourdes. Elles ne peuvent pas non plus être trop légères, car, au fil de décennies de recherche dans des collisions à des énergies toujours plus élevées, on les aurait déjà observées. On sait aussi que ces nouvelles particules et interactions engendrent bien souvent des désintégrations interdites par le modèle standard, par exemple une désintégration de type 2, mais avec deux leptons de charges opposées issus de familles différentes (comme un électron et un antimuon). On cherche activement ces événements prohibés dans les données de *BaBar*, *Belle* et *LHCb*, sans succès pour le moment.

Si les derniers résultats de *LHCb* sont encourageants, les physiciens concernés restent prudents sans claironner trop tôt que leur quark favori a mis en échec le modèle standard. Ils souhaitent encore accumuler des données, améliorer la précision des mesures, affiner les calculs théoriques et renforcer leurs outils d'analyse statistique avant de conclure définitivement sur la nature des déviations observées. Le récent redémarrage du LHC après trois ans d'arrêt va permettre à *LHCb* de modifier ses méthodes de sélection des données et ainsi d'accumuler davantage d'informations pertinentes. Bien qu'elles ne soient pas spécifiquement conçues pour l'étudier, les expériences *Atlas* et *CMS* se sont

elles aussi lancées dans des programmes d'études du quark b , tout en continuant à chercher si de nouvelles particules, W , Z' ou leptoquarks, n'apparaissent pas dans leurs détecteurs.

Enfin, l'expérience *Belle II* qui vient de démarrer au Japon devrait d'ici quelques années livrer ses premiers résultats sur ces désintégrations, dans un contexte expérimental très différent, où l'identification des divers leptons chargés sera facilitée. Il est donc clair qu'expérimentateurs et théoriciens vont continuer à suivre de près ce quark b décidément rétif à la discipline du modèle. Va-t-il se résoudre à rentrer dans le rang, ou mènera-t-il sa rébellion jusqu'à renverser le modèle standard ?

— L'auteur —

> **Sébastien Descotes-Genon** est directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint du Laboratoire de physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie (IJCLab, Cnrs/université Paris-Saclay).

— À lire —

> **D. Becirevic et al.**, Universalité de la saveur leptonique : les trois leptons ont-ils réellement les mêmes propriétés ? *Reflets de la physique*, n°66, Juillet-août 2020.

> **S. Bifani et al.**, Review of Lepton universality tests in B decays, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol.46, n°2, 2018.

> **Y. Grossman et al.**, Just a Taste: Lectures on flavor physics, in : *Anticipating the next discoveries in particle physics*, <https://arxiv.org/abs/1711.03624>, 2016.

Accélérons les accélérateurs

Chandrashekhar Joshi

80

© F. Tsung, W. An/UCLA and SLAC National Accelerator Laboratory

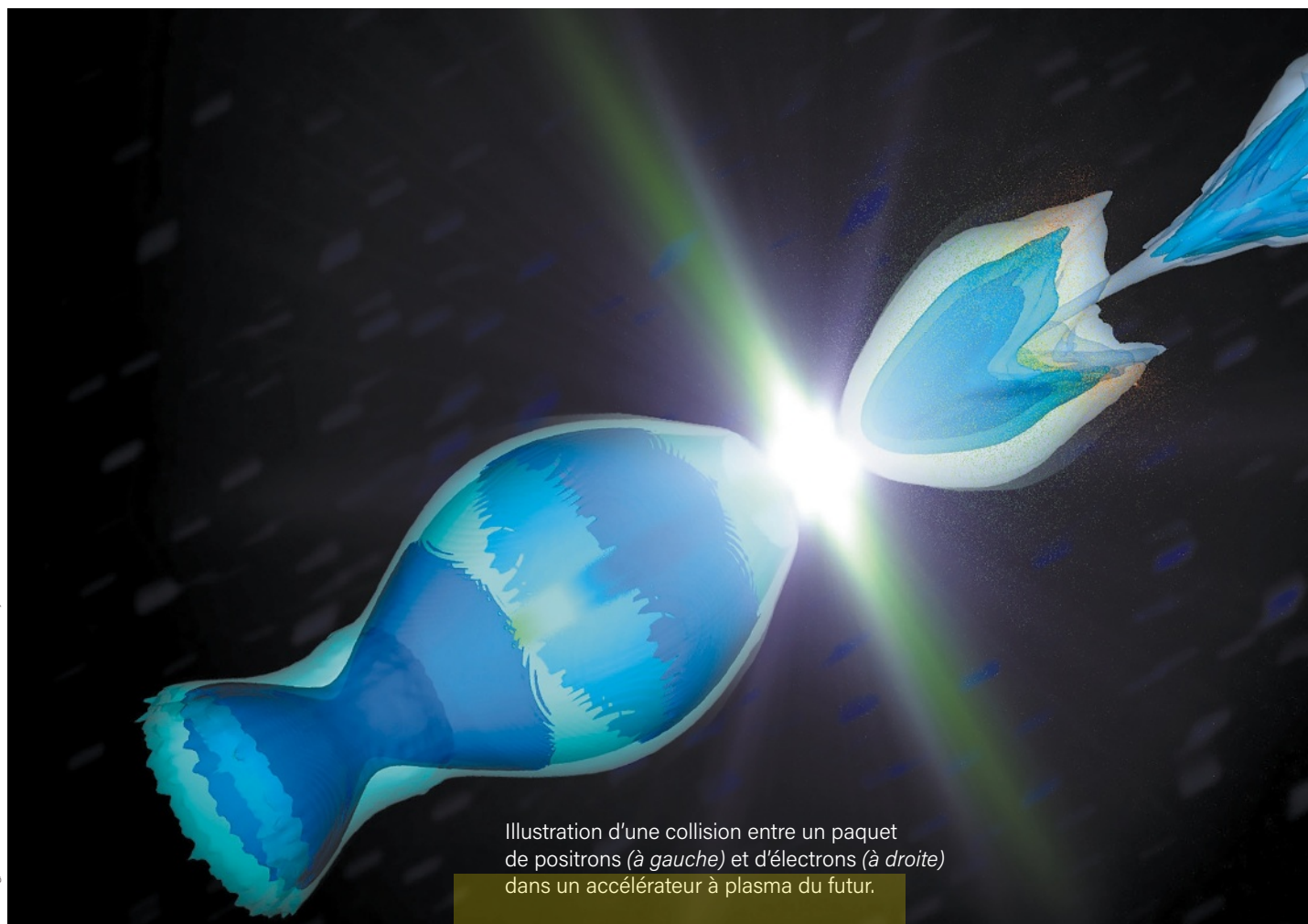


Illustration d'une collision entre un paquet de positrons (à gauche) et d'électrons (à droite) dans un accélérateur à plasma du futur.

Indispensables à la recherche, les accélérateurs de particules actuels toucheront prochainement leurs limites. Si leurs successeurs sont déjà à l'étude, les physiciens rêvent d'une technologie de rupture. Et si c'était l'accélération à plasma ?



Vers 1900, les scientifiques en savaient peu sur les briques fondamentales qui constituent notre monde physique. Un siècle plus tard, ils ont découvert non seulement tous les éléments à la base de toute matière observable, mais aussi un éventail de particules encore plus fondamentales qui font le tissu de notre cosmos, notre planète et nous-mêmes. Un outil a rendu possible cette révolution : l'accélérateur de particules.

Pour ces machines, la consécration est arrivée en 2012, quand, au Cern, le Grand collisionneur de hadrons (LHC) a mis au jour le boson de Higgs, depuis longtemps recherché. Le LHC, un anneau de 27 kilomètres de longueur où circulent et se percutent des faisceaux de protons très énergétiques est le plus grand, le plus complexe et le plus cher équipement de ce type jamais construit. Néanmoins, comme l'illustre ce hors-série, nombre d'énigmes demeurent en physique. Pour les résoudre, nous aurons certainement besoin d'un accélérateur encore plus puissant que le LHC. Est-ce réaliste ?

De nombreux scientifiques soutiennent la construction d'un Collisionneur linéaire international (ILC), en forme de ligne droite, qui produira des énergies de collision à hauteur de 250 milliards (giga) d'électronvolts (GeV). Il ne serait pas aussi puissant que le LHC (qui atteint 14 000 GeV, soit 14 TeV), mais l'ILC ferait entrer en collision des électrons avec leur équivalent d'antimatière, les positrons – tous deux des particules fondamentales desquelles on attend des données bien plus « propres » que celles produites par les collisions proton-proton du LHC. Malheureusement, la conception de l'ILC nécessite une infrastructure d'environ 20 kilomètres de longueur et devrait

coûter plus de 10 milliards de dollars, un montant si élevé qu'aucun pays ne s'est engagé à l'accueillir.

En même temps, des plans sont établis pour faire croître l'énergie du LHC jusqu'à 27 TeV en augmentant la force des aimants supraconducteurs utilisés pour infléchir la course des protons. Au-delà, le Cern propose un collisionneur électron-positron, puis proton-proton de 100 kilomètres de circonférence, appelé le Futur collisionneur circulaire (FCC). Une telle machine pourrait atteindre le niveau d'énergie sans précédent de 100 TeV pour les collisions proton-proton. Mais son coût égalera, voire surpassera sans doute celui de l'ILC. Même s'il voyait le jour, il n'entrerait pas en service avant que le LHC ne cesse d'être exploité, après 2035.

Mais toutes ces machines gargantuesques ne sont pas les seules options. Depuis les années 1980, les physiciens en ont développé d'autres. Parmi elles, un accélérateur à plasma très prometteur. Les énergies atteintes seraient de l'ordre du TeV, de manière bien plus compacte et bien moins chère que les machines fondées sur la technologie actuelle.

LE ZOO DES PARTICULES

L'histoire des accélérateurs à particules a commencé en 1897, au laboratoire Cavendish de physique de l'université de Cambridge. Là, Joseph John Thomson a créé la première version d'un accélérateur de particules en utilisant un tube cathodique comme ceux de la plupart des télévisions avant l'arrivée des écrans plats. Il a alors découvert une particule chargée négativement – l'électron.

Peu après, les physiciens ont identifié protons et neutrons en utilisant des particules radioactives comme projectiles pour bombarder des atomes. Puis, dans les années 1930, arriva le premier accélérateur circulaire de particules. De la taille de la paume d'une main, il fut inventé par Ernest Lawrence, baptisé «cyclotron», et accélérât les protons à environ 80 kilovolts. Par la suite, la technologie a évolué rapidement, et les scientifiques ont pu augmenter l'énergie des particules chargées accélérées pour sonder le noyau atomique. Ces avancées ont conduit à la découverte d'un zoo de centaines de particules subnucléaires, lançant l'ère de la physique des hautes énergies fondée sur les accélérateurs. Tandis que l'énergie des faisceaux d'accélérateur a rapidement augmenté dans le dernier quart du siècle, on s'est rendu compte que le zoo se réduisait à 17 particules élémentaires prédites par le modèle standard (*voir les Repères, page 6*). À l'exception du boson de Higgs, elles ont toutes été découvertes lors d'expériences d'accélération avant la fin des années 1990. La détection tant attendue du boson de Higgs au LHC a fait du modèle standard l'accomplissement de la physique des particules.

En plus de figurer parmi les instruments scientifiques les plus aboutis de l'histoire, les accélérateurs ont trouvé une multitude d'applications en médecine et dans nos vies quotidiennes. Ils sont utilisés dans les scanners à tomographie par émission de positons servant à la radiographie des os et pour les traitements de tumeurs malignes par radiothérapie. Ils sont vitaux pour la stérilisation des aliments et pour créer des isotopes radioactifs

— En bref —

> Les progrès de la physique fondamentale au xx^e siècle sont intimement liés à ceux des accélérateurs.

> La technologie actuelle par accélération dans des cavités à radiofréquence a touché ses limites.

> L'accélération par laser ou faisceaux d'électrons dans un plasma pourrait accélérer 1000 à 10 000 fois les particules, jusqu'à 1 TeV d'énergie.

> Cette technologie, baptisée «accélération à plasma», devra, pour s'imposer, surmonter d'importants obstacles techniques.

servant à une myriade de traitements et tests médicaux. Ils sont aussi à la base des lasers à électrons libres utilisés par des milliers de scientifiques et d'ingénieurs pour mener des recherches de pointe en sciences physiques et biologiques.

LES BASES DE L'ACCÉLÉRATEUR

Les accélérateurs existent sous deux formes : circulaire (synchrotron) et linéaire (linac). Tous sont alimentés par des ondes radio ou des microondes qui accélèrent les particules à une vitesse proche de celle de la lumière. Au LHC, par exemple, deux faisceaux de protons filant dans des directions opposées passent à plusieurs reprises par des «cavités à radiofréquence» espacées le long de l'anneau. Les ondes radio à l'intérieur de ces cavités créent des champs électriques qui oscillent entre positif et négatif pour assurer que les protons chargés positivement soient toujours attirés vers l'avant. Cette attraction accélère les protons et leur transfère de l'énergie. Une fois que les particules ont gagné assez d'énergie, des lentilles magnétiques concentrent les faisceaux de protons sur des points très précis de collision le long de l'anneau. Quand ils se percutent, on obtient des densités d'énergie extrêmement hautes, ce qui conduit à la naissance de nouvelles particules de masse plus importante.

Quand des particules chargées circulent dans un anneau, elles émettent un «rayonnement synchrotron». Pour tout rayon donné du cercle, la perte d'énergie est bien moindre pour les particules plus lourdes comme les protons ;

L'évolution rapide des technologies d'accélérateurs a conduit à la découverte d'un zoo de centaines de particules subnucléaires

c'est pourquoi le LHC est un collisionneur de protons. Mais pour les électrons, la perte devient trop grande, surtout quand leur énergie augmente. En conséquence, les futurs accélérateurs qui visent à entrechoquer électrons et positrons à très haute énergie devront soit être linéaires, soit avoir un rayon qui minimise la courbe et, par conséquent, le rayonnement synchrotron.

La taille d'un accélérateur pour un faisceau d'énergie donné dépend *in fine* de la puissance en radiofréquences qui peut être injectée dans la structure accélératrice avant qu'elle ne subisse une panne électrique (ou « claquage »). Jusqu'à présent, les accélérateurs traditionnels utilisaient le cuivre pour cette structure accélératrice, et le seuil de claquage impliquait que l'énergie maximale pouvant être fournie s'échelonnait entre 20 et 50 millions d'électronvolts (MeV) par mètre. Les spécialistes de l'accélération ont expérimenté de nouvelles structures qui fonctionnent à de plus hautes fréquences, repoussant par conséquent le seuil de claquage. Ils ont aussi travaillé à améliorer la force des champs accélérateurs au sein des cavités supraconductrices qui sont maintenant utilisés systématiquement dans les synchrotrons et les linacs. Ces avancées essentielles sont et seront introduites avant qu'un concept révolutionnaire ne vienne bousculer les technologies des accélérateurs actuels.

D'autres approches seront peut-être nécessaires un jour. En 1982, aux États-Unis, le programme du Département de l'énergie sur la physique des hautes énergies a lancé une initiative modeste pour étudier de toutes nouvelles

façons d'accélérer les particules chargées. Ce programme a accouché de nombreuses idées ; trois d'entre elles paraissent particulièrement prometteuses.

La première est l'accélération à deux faisceaux. Ce procédé fait appel à un faisceau primaire d'électrons constitué d'impulsions de très forte charge afin de créer dans une cavité un rayonnement de très haute fréquence transféré ensuite vers une deuxième cavité pour accélérer une impulsion d'électrons secondaire. Ce concept est testé au Cern, sur une machine appelée Collisionneur linéaire compact (Clic).

Une autre idée consiste à percuter entre eux des muons, cousins des électrons, mais bien plus lourds. Leur masse plus élevée leur permet d'être accélérés dans un cercle sans perdre autant d'énergie que les électrons par le rayonnement synchrotron. Inconvénient : les muons sont des particules instables, avec une durée de vie de 2 milliardièmes de seconde. Ils sont produits durant la désintégration de particules appelées « pions », qui elles-mêmes doivent être produites par la collision d'un faisceau intense de protons avec une cible spéciale.

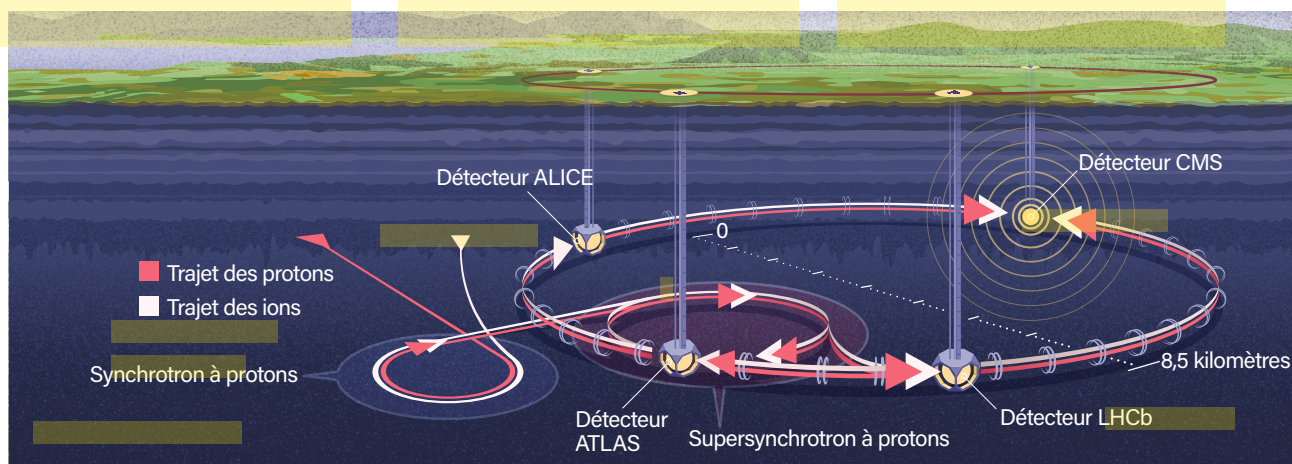
Enfin, il y a l'accélération à plasma. L'idée est née dans les années 1970, quand John Dawson, de l'université de Californie, à Los Angeles, proposa d'utiliser un champ de sillage plasma produit par une impulsion laser intense ou un paquet d'électrons pour accélérer un deuxième paquet de particules 1000 ou même 10000 fois plus rapidement que dans les accélérateurs conventionnels. Ce concept d'accélérateur à plasma a soulevé l'enthousiasme en faisant miroiter la possible miniaturisation de ces géants, de la même

COLLISIONNEURS: VERS UNE NOUVELLE GÉNÉRATION

Les collisionneurs en exercice utilisent des ondes électromagnétiques pour créer des champs électriques capables d'accélérer des faisceaux de particules chargées et de guider leur collision.

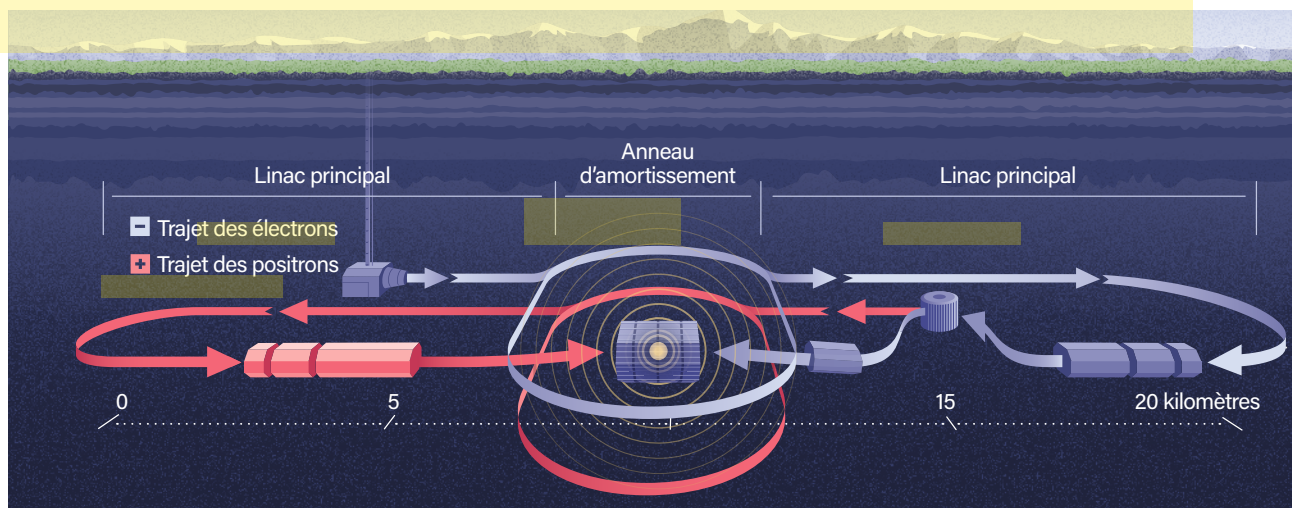
S'il fait figure de plus grosse machine jamais construite, et bien qu'il ait conduit avec succès la chasse au boson de Higgs, le LHC atteindra sans doute ses limites d'ici à 2035. Pour progresser,

la physique des particules aura besoin de nouveaux appareils, plus puissants et, idéalement, moins coûteux. Piste prometteuse: celle des accélérateurs à plasma.



LHC: un géant tout en courbes

Le Grand collisionneur de hadrons (Large Hadron Collider, ou LHC) héberge dans son anneau de 27 kilomètres de circonférence, enterré sous la frontière franco-suisse, des collisions entre protons à une énergie de 14 TeV. Les protons sont accélérés par des passages successifs dans des synchrotrons. Plus rarement, on y télescope aussi des ions de plomb.



ILC: un successeur droit dans ses bottes

Héritier possible du LHC au Cern, l'Accélérateur linéaire international (International Linear Collider, ou ILC) entrechoquera des électrons avec des positrons. Pour éviter les courbes qui font perdre de l'énergie aux particules chargées, il sera de conception linéaire. Selon certaines estimations, son coût pourrait être le double de celui du LHC.