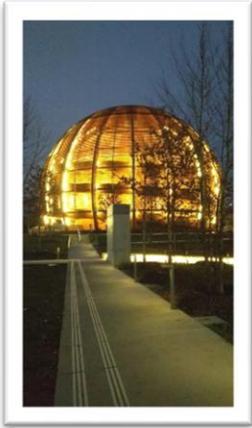


70ème anniversaire de CERN à Genève



Un extrait de cet article a été publié dans le numéro 21 du Bulletin de l'AITPF. Ici nous publions la totalité de l'article de prof. Mieczysław Witold Krasny, Directeur de Recherche CNRS, Sorbonne University Paris, Senior Visiting Scientist, CERN, BE-division, Geneva.



1Photo provenant du site du CERN

En 1954, 12 pays européens ont signé la Convention de Paris, créant le Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN, dont le siège est à Genève. Son objectif initial a été formulé dans l'article II de la Convention : L'Organisation assure la coopération entre les États européens dans le domaine de la recherche nucléaire de nature purement scientifique et fondamentale et d'autres recherches qui y sont étroitement liées.

Le programme « recherche nucléaire » du CERN a évolué naturellement, au cours des 70 années d'existence de l'organisation, vers la recherche puis l'étude des composants primaires de la matière : les particules élémentaires.

Les accélérateurs sont les outils de base de cette recherche. Ils sont utilisés pour l'accélération d'électrons, positrons, protons, antiprotons et noyaux atomiques. Chaque étape ultérieure du progrès technologique dans le domaine de la construction des accélérateurs a permis la découverte de nouvelles particules élémentaires et de nouveaux phénomènes. Le point culminant de ce processus a été la création du « Modèle standard ».

Ce modèle est une description mathématique des particules élémentaires et de leurs interactions. Les expériences réalisées avec les accélérateurs construits au CERN ont joué ici un rôle fondamental, notamment dans la compréhension des interactions faibles et de leur unification avec les interactions électromagnétiques.

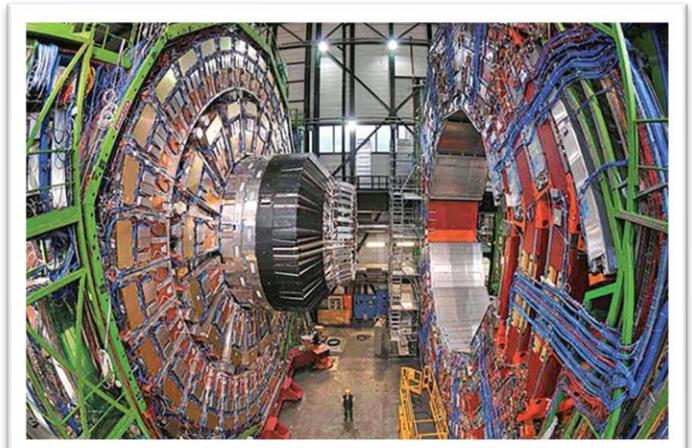
La convention initiale créant le CERN prévoyait la construction du premier accélérateur de protons d'une énergie supérieure à 10 gigaélectronvolts (GeV).

Après avoir terminé ce projet, le CERN est devenu l'un des nombreux centres (principalement américains) étudiant les collisions de particules élémentaires de haute énergie. Elle a maintenu cette position pendant les 70 années suivantes de son existence. Les projets d'accélérateurs uniques du CERN comprennent : le SPS

(Super Proton Synchrotron - 1976), le LEP (Large Electron Positron Collider - 1989) et le LHC (Large Hadron Collider - 2010), dans lesquels les protons sont accélérés à des niveaux records, actuellement, énergie 6500 GeV.

Les recherches menées au CERN couvrent de nombreux domaines scientifiques. Le rôle principal est joué ici par quatre expériences étudiant les collisions de protons et de noyaux accélérées dans l'accélérateur LHC. Les expériences utilisant des protons et des noyaux de plus faible énergie sont tout aussi importantes. Ils sont accélérés par des accélérateurs : « SPS », « PS » et « Booster ». Le programme scientifique de ces expériences est très vaste et comprend, entre autres, des recherches sur la symétrie entre matière et antimatière, la recherche de matière noire, des recherches sur les isotopes radioactifs et des recherches climatologiques.

La construction, la collecte de données et l'analyse des résultats des expériences menées au CERN nécessitent une coopération étroite de grands groupes de scientifiques et d'ingénieurs, actuellement au nombre de plusieurs milliers, travaillant dans des institutions mères dispersées à travers le monde. Dans les années 1980, pour relever les défis de ce type de coopération, le CERN a créé le concept de toile d'araignée mondiale "WWW" (World Wide Web), qui a révolutionné la technologie traditionnelle ("Gutenberg") de flux d'informations. Il est intéressant de noter que des



2Photo provenant du site du CERN

physiciens de l'Université de Varsovie associés au CERN ont créé « Donosy » en 1989, le premier journal distribué exclusivement en ligne.

Les sources fondamentales du succès du CERN sont : sa culture technique unique de construction d'accélérateurs, son financement stable et le caractère international des projets mis en œuvre.

Le budget annuel du CERN, en 2024, de 1 400 millions de francs suisses (CHF), est soutenu à environ 85 % par les contributions régulières des 23 pays actuellement membres du CERN. La contribution de chaque pays est proportionnelle à son revenu national. Chaque pays membre dispose d'une voix égale au Conseil du CERN, quel que soit le montant de sa contribution budgétaire.

Contribution de la Pologne

Les scientifiques et ingénieurs polonais participent à l'ensemble des recherches menées au CERN. La contribution de la Pologne, membre à part entière du CERN depuis 1991, à son budget annuel en 2024 s'élève à 38 millions de francs. Il convient d'ajouter ici que la contribution budgétaire polonaise est partiellement récupérée lors de l'achat d'équipements et de services fournis par l'industrie polonaise et les institutions scientifiques polonaises. Le détenteur du record est ici la société "KrioSystem" de Wrocław avec des commandes en 2023 pour un montant total de CHF 3'253'000.

Fin 2023, parmi les 2 666 membres du personnel employés par le CERN, 94 étaient polonais (dont 45 sous contrat à durée indéterminée). Par ailleurs, actuellement, 100 jeunes scientifiques et ingénieurs polonais (dont 15 doctorants et 15 étudiants en stage) travaillent au CERN sous contrat temporaire. Cela représente - en pourcentage - une part plus importante dans le nombre total de 1.525 contrats de ce type proposés par le CERN que la contribution polonaise au budget du CERN. Les employés du CERN ne représentent qu'une petite partie d'une communauté mondiale d'environ 17 500 scientifiques et ingénieurs de 110 pays (dont 580 de Pologne) menant des recherches à l'aide de l'infrastructure du CERN.

CERN – pionnier du modèle de coopération internationale.

La combinaison de la créativité de scientifiques de nombreuses nationalités, issus d'institutions de recherche très diverses et représentant un large éventail de domaines scientifiques et technologiques, a fait du CERN, 70 ans après sa fondation, le premier centre mondial de recherche sur les interactions des éléments élémentaires, particules. Il convient également de souligner que c'est le CERN qui a créé la « matrice » d'organisation et de financement de la coopération scientifique internationale, suivi par d'autres organisations européennes s'occupant de recherche fondamentale : ESO (Observatoire européen austral), ESA (Agence spatiale européenne), EMBL (Observatoire européen Laboratoire de Biologie Moléculaire), l'ESRF (Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron) et par le consortium de recherche sur les ondes gravitationnelles actuellement en formation "Einstein Telescope".

Le succès évolutif actuel du modèle scientifique du CERN suggère naturellement les prochaines étapes de son développement : la construction de nouveaux (nouveaux) accélérateurs qui accélèrent les particules élémentaires jusqu'à des énergies encore plus élevées. Cela permettrait de maintenir le « modus operandi » actuel du CERN, ainsi que la stabilité de l'organisation et de la méthodologie des recherches menées par la communauté mondiale déjà bien organisée des physiciens des particules élémentaires.

Est-il technologiquement possible de poursuivre cette direction d'évolution ? A-t-elle une justification scientifique suffisante, compte tenu du coût élevé de la construction de nouveaux accélérateurs et, ce qui est tout aussi important, cette forme d'évolution serait-elle suffisamment attractive pour que les jeunes scientifiques deviennent le moteur essentiel des 70 prochaines années de recherche ? menée au CERN ?

Prochaines étapes ?

En février de cette année, le Conseil du CERN a évalué l'état d'avancement des travaux examinant la faisabilité de la mise en œuvre du projet "FCC" (Future Circular Collider), qui pourrait constituer la prochaine étape dans le développement de l'infrastructure des accélérateurs du CERN. Ces études ont démarré en 2021 et devraient se

terminer en 2025. Leurs résultats constitueront un élément important du processus décisionnel multithread des pays membres du CERN. Ce processus doit s'achever en 2028 avec l'acceptation de la mise en œuvre ou le rejet du projet.

Le projet FCC comprendrait, dans une première phase, la construction d'un collisionneur d'électrons et de positons, "FCC-ee", et dans la phase suivante, la construction d'un collisionneur de protons et de nucléaires, "FCC-hh". L'achèvement prévu de la construction du premier aurait lieu en 2048 et du second en 2074. Des expériences utilisant ces collisionneurs seraient réalisées respectivement en 2048-2063 et 2074-2094. Les énergies maximales prévues des positons et des électrons entrant en collision dans FCC-ee (182,5 GeV) seraient « seulement » deux fois supérieures aux énergies atteintes il y a plus de vingt ans. Néanmoins, grâce à sa haute luminosité, FCC-ee permettrait d'augmenter significativement la précision des études des interactions de toutes les particules élémentaires connues du Modèle Standard, même la plus lourde d'entre elles, le quark "top".

Doubler l'énergie des collisions dans un accélérateur circulaire tel que le FCC-ee nécessite de quadrupler sa circonférence. Ceci est nécessaire pour maintenir la consommation d'électricité à un niveau acceptable. Son coût représentera une charge importante et difficile à prévoir pour le budget du CERN. L'alimentation des accélérateurs actuels du CERN nécessite l'achat d'environ 1,3 TWh d'électricité. Cela représente près de 50% des besoins énergétiques de l'ensemble du canton de Genève. Afin de ne pas augmenter la demande, le tunnel souterrain de l'accélérateur FCC-ee devrait avoir une longueur de 91 km. Par conséquent, une grande partie du coût de construction de l'accélérateur, actuellement estimé à environ 15 milliards de francs suisses (GCHF), serait le coût du forage du tunnel (environ 5 GCHF). Le coût du tunnel pourrait être partiellement amorti en l'utilisant pour la construction du collisionneur FCC-hh, dans lequel les protons et les noyaux seraient accélérés à une énergie environ 9 fois supérieure à celle obtenue dans l'accélérateur LHC actuellement en service.

La technologie nécessaire à la construction du collisionneur FCC-ee est prête. FCC-hh nécessite de nouveaux progrès technologiques dans la construction d'aimants supraconducteurs. Les deux collisionneurs seraient complémentaires : FCC-ee assurerait la précision des mesures, et FCC-hh rechercherait de nouveaux phénomènes à des énergies bien supérieures à celles réalisées jusqu'à présent.

Compétition internationale

Le CERN n'est pas le seul centre de recherche en physique des particules. En décembre de l'année dernière, des scientifiques chinois ont présenté un rapport technique sur la construction du collisionneur "CEPC", dont les paramètres sont très similaires à ceux du FCC-ee, dont la construction pourrait être achevée dès 2036, soit environ 10 ans avant la construction de FCC-ee.

Les physiciens des particules américains ont également présenté une stratégie de recherche pour les 10 à 20 prochaines années, promouvant la recherche sur un nouveau type d'accélérateur. Dans cet accélérateur, les particules accélérées seraient des muons. Le muon est une copie presque parfaite de l'électron : il n'est que 200 fois plus lourd. Grâce à cela, les muons, contrairement aux électrons, ne perdent qu'une petite partie de leur énergie lorsqu'ils sont « forcés » de se déplacer sur la circonférence d'un cercle. En conséquence, un tunnel accélérateur accélère les muons jusqu'à une énergie jusqu'à 25 fois supérieure. à partir de l'énergie des électrons du FCC-ee, il ne pourrait pas être plus long que les tunnels des accélérateurs existants, et le coût du collisionneur de muons serait similaire à celui du LHC.

Il n'y a qu'un seul problème fondamental : les muons ne vivent que 2 microsecondes et leurs faisceaux doivent se former et s'accélérer très rapidement pour qu'un nombre suffisant d'entre eux aient une chance d'entrer en collision avant de se désintégrer. La technologie permettant de produire des faisceaux de muons intenses et leur accélération rapide en est encore à ses balbutiements, mais le programme de recherche dans ce sens se développe rapidement, tant en Europe qu'aux États-Unis. Le collisionneur de muons, s'il est techniquement réalisable, combinerait les potentiels de recherche du FCC-ee et du FCC-hh, les élargissant ainsi considérablement.

Un saut important dans l'énergie des collisions de particules élémentaires est hautement souhaitable si nous voulons augmenter les chances de découvrir de nouveaux phénomènes et de nouvelles particules, et pas seulement la précision des mesures effectuées précédemment. Le langage du modèle standard est la « théorie quantique des

champs ». Cette théorie permet d'identifier des « annonces » de nouvelles particules et phénomènes qui seront directement observés à des énergies de collision élevées. Ces annonces sont mineures

écarts entre les résultats des mesures effectuées avec une énergie de collision plus faible et déjà disponible et les résultats de leurs prédictions théoriques. Jusqu'à présent, les nouveaux accélérateurs faisaient l'objet de découvertes « annoncées ». Par exemple : Tevatron au Fermilab - découverte du quark "top", et LHC - découverte d'un mécanisme brisant les symétries des interactions faibles et électromagnétiques.

Il n'y a actuellement aucune "annonce" de nouveaux phénomènes ou de nouvelles particules qui pourrait découvrir des accélérateurs à haute énergie de nouvelle génération. L'augmentation maximale de l'énergie est une condition souhaitable, mais - et cela doit être souligné - pour la première fois dans l'histoire du développement de la physique des particules élémentaires, elle n'est pas une condition suffisante pour découvrir de nouvelles particules et de nouveaux phénomènes.

Perspectives de comprendre la matière noire ...

La stratégie consistant à continuer d'augmenter l'énergie des particules accélérées est-elle la seule forme d'évolution possible du programme scientifique du CERN ?

L'un des défis les plus fascinants de la physique à l'heure actuelle consiste à découvrir la nature de la matière noire et de l'énergie noire, dont l'existence est postulée dans les modèles cosmologiques et astrophysiques. Si les masses des particules de matière noire étaient similaires à celles des particules de matière visible, augmenter les chances de les découvrir à l'aide d'accélérateurs nécessiterait une augmentation significative de l'intensité des faisceaux de particules accélérées plutôt qu'une augmentation de leur énergie. Le défi d'un saut technologique majeur dans l'intensité des faisceaux de particules élémentaires est relevé par le projet « Gamma Factory » développé au CERN. Ce projet, qui est en phase d'étude préliminaire, propose d'utiliser l'infrastructure d'accélérateurs existante du CERN, en la combinant, de manière innovante, avec les progrès de la technologie laser.

Quel avenir de « mégaprojets » ?

Le débat sur l'avenir du CERN, mené au sein des organes spécialement désignés des pays membres du CERN, est extrêmement important en raison du manque de signes clairs pour son développement ultérieur. Outre les critères scientifiques, il devra prendre en compte le contexte international actuel, les défis climatiques, l'autosuffisance énergétique des investissements en infrastructures et la possibilité d'étendre les recherches menées au CERN à d'autres domaines scientifiques. Ce qui sera important ici sera la convergence des stratégies à long terme des États membres concernant la répartition des fonds destinés à la construction de « méga-infrastructures » scientifiques internationales et à la recherche « locale » qui ne nécessite pas de telles structures. En outre, cette discussion devra répondre à une question fondamentale : les « mégaprojets » scientifiques mis en œuvre au cours de plusieurs décennies de travail acharné seront-ils attractifs pour les jeunes scientifiques ?

La Pologne, en tant que pays membre à part entière du CERN, aura une voix importante dans ce débat, qui sera d'autant plus audible qu'il sera le résultat d'une analyse approfondie des succès passés et des défis futurs du programme scientifique du CERN.

Mieczysław Witold Krasny

Directeur de Recherche CNRS, Sorbonne University Paris, Senior Visiting Scientist, CERN, BE-division, Geneva