

REMARQUES SUR LE FUTUR DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES AU CERN

Marc Winter – Directeur de Recherches Emérite – IJCLab (Orsay)/CNRS

(31 août 2026)

Avant-Propos :

Les grandes orientations de la recherche européenne en physique des particules font l'objet d'une mise à jour régulière, typiquement tous les 5 à 7 ans, en concertation avec toutes les communautés concernées dans le monde. Un processus de mise à jour, initié en 2024, est en cours pour définir quel programme scientifique devrait prendre le relais de l'accélérateur LHC du CERN dans les années 2040. Les discussions font consensus sur la priorité à donner à l'approfondissement de notre connaissance du boson de Higgs et des phénomènes physiques qui l'impliquent, et cela en produisant un maximum de bosons à l'aide de collisions entre électrons et positons. Cet objectif, qui s'était déjà dégagé lors des précédentes mises à jour de la stratégie européenne (2019-2021 et 2011-2013, voire 2006), demeure la pierre d'angle des objectifs de la discipline. Le tunnel du LEP-LHC, qui aura in fine été exploité pendant plus de 50 ans, ne permet pas d'atteindre l'énergie de collision des particules requise pour ce programme scientifique. Il faudra donc réaliser un nouvel accélérateur exploitant un nouveau tunnel.

Plusieurs options technologiques de collisionneur électron-positon adapté à l'étude du boson de Higgs sont en développement depuis plusieurs décennies, inspirées par le succès des mesures de précision réalisées dans les années 1990 au LEP (CERN) et avec le collisionneur linéaire SLC (Stanford, USA), visant à déterminer les paramètres du boson Z^0 . Ces options diffèrent par l'énergie maximale qu'elles permettent d'atteindre et par le taux d'interaction des faisceaux en fonction de l'énergie de collision. Elles diffèrent aussi par le nombre d'expériences qu'on peut y installer et, de là, par le nombre de chercheurs que peut accueillir le collisionneur. Le degré d'innovation technologique est un autre facteur qui varie d'une option à l'autre, de même que les retombées attendues pour la société. Leur impact environnemental peut être sensiblement différent (e.g. par la longueur du tunnel abritant l'accélérateur), de même que la voie qu'elles ouvrent vers les accélérateurs potentiels qui leur succéderaient dans le dernier quart du siècle. Globalement, cette nouvelle infrastructure sera emblématique de la recherche européenne et de ses capacités technologiques; elle influencera la visibilité de l'Europe sur l'échiquier international, d'où son intérêt stratégique.

L'ensemble des éléments précités ont été appréciés par des groupes de réflexion chargés de faire ressortir l'infrastructure lui paraissant la plus adaptée pour la proposer aux états-membres du CERN. C'est le collisionneur FCCee qui a été privilégié parmi toutes les options examinées. Le texte qui suit aborde quelques points cardinaux qui sont intervenus dans le débat et ont conduit au choix du FCC pour succéder au LHC du CERN. Certains des points abordés renvoient en fin de texte (Annexes) pour plus d'information.

SOMMAIRE

- ❖ **Positionnement de l'intervention dans le Débat Public de la CNDP**
- ❖ **Rappel sur le CERN et sa recherche**
- ❖ **Boson de Higgs et Modèle Standard des particules élémentaires**
- ❖ **Objectifs du prochain collisionneur**
- ❖ **Comparaisons entre les différentes options technologiques**
- ❖ **Influence des objectifs scientifiques à long terme sur le choix de l'option technologique du collisionneur HF**
- ❖ **Prochaines étapes du processus de mise à jour de la stratégie européenne**
- ❖ **Références**
- ❖ **Annexes :**
 - 1) **Expériences en laboratoire versus observations**
 - 2) **Boson de Higgs**
 - 3) **Etude du boson Z et Modèle Standard des particules élémentaires**
 - 4) **Etude du quark top**
 - 5) **Transferts de technologies et de savoirs vers la société**
 - 6) **Questions diverses :**
 - **Avantages de la région genevoise pour accueillir le FCC**
 - **Quels sont les projets poursuivis ailleurs dans le Monde ?**
 - **Programme envisagé pour la mandature 2026-2030 du CERN**

Positionnement de l'intervention dans le Débat Public de la CNDP

Physicien des particules expérimentateur, aujourd'hui directeur de recherches émérite du CNRS, j'ai effectué la première moitié de ma carrière au CERN. J'y ai notamment participé pendant près de 15 ans à l'une des 4 expériences installées auprès du collisionneur électron-positon LEP pour étudier le boson Z^0 , dont les résultats scientifiques font encore référence aujourd'hui. Dans le cadre du Modèle Standard des Particules Élémentaires, ces résultats ont notamment permis de prédire un intervalle de masse du boson de Higgs compatible avec l'ensemble des mesures (essentiellement) faites au LEP, bien avant la découverte du boson au LHC.

C'est ainsi que vers la fin du programme d'exploitation du LEP, je me suis engagé dans le projet d'un nouveau collisionneur électron-positon (en l'occurrence linéaire) optimisé pour une étude approfondie du boson de Higgs et du quark top (qui venait d'être découvert aux USA avec la masse prédite à l'aide des résultats du LEP). J'ai consacré plus de 25 ans de mes activités de recherches à ce projet, en m'investissant plus particulièrement dans le développement d'une nouvelle génération de détecteurs de particules que nécessiteront les expériences auprès d'un collisionneur électron-positon du futur.

Ma contribution au Débat Public sur le projet FCCee vise à porter un éclairage sur le choix du FCCee plutôt que l'une de ses alternatives, contextualisé par quelques aspects saillants de la recherche en physique des particules, dont l'objectif spécifique est d'étudier les lois fondamentales de la physique, telles qu'elles apparaissent sous-jacentes au fonctionnement de l'Univers présent et passé.

Ce document complète ma présentation au Webinaire organisé par la CNDP le 23 juin dernier, qui visait à interroger les manières alternatives au FCCee de progresser sur les grandes questions scientifiques de la physique des particules. Ce faisant, il rappelle la place centrale du CERN dans le Monde au sein d'un réseau de laboratoires d'Europe et d'ailleurs, ainsi que la pluralité des retombées sociétales de la recherche en physique des particules qui y sont menées.

Rappel sur le CERN et sa recherche (voir aussi Annexe 1)

Le CERN est devenu l'épicentre mondial de la physique des particules. Sa recherche ambitionne de comprendre l'Univers au travers des lois fondamentales qui en régissent le fonctionnement au niveau sub-microscopique ainsi que son histoire. Fer de lance de la recherche exploitant des accélérateurs, il accueille chaque année environ douze mille chercheurs et utilisateurs de plus de 110 pays. Sans équivalent dans le Monde, il est un fleuron de la recherche européenne et joue un rôle central pour notre compréhension des lois fondamentales de la Nature et de l'histoire de l'Univers dans ses tout premiers instants, précédant le « Big Bang » accessible aux approches observationnelles (spatiales notamment). Les expériences qui y sont menées imposent une coopération mondiale intensive et une capacité d'organisation particulièrement poussée. Le CERN agit comme point focal de cette mutualisation à la fois européenne et transcontinentale pour le progrès de la connaissance.

Organisme à but non-lucratif, le CERN a pour mission de réaliser une recherche de classe mondiale en physique fondamentale et de mettre à la disposition des scientifiques un ensemble unique d'accélérateurs de particules permettant de mener cette recherche. Il est aussi un acteur sociétal de premier plan par ses avancées technologiques et ses formations de haut niveau. Les développements conceptuels et techniques que nécessitent ses programmes de recherche occupent une place centrale dans le spectre des activités qui y sont menées et sont à l'origine de nombreux transferts vers l'industrie, le monde médical et d'autres domaines de recherche (voir Annexe 5). C'est tout particulièrement le cas pour les accélérateurs en usage dans le Monde (plusieurs dizaines de milliers), secteur de pointe dans lequel l'expertise provenant des développements pour la physique des particules est sans équivalent. C'est aussi le cas pour une multitude de systèmes de détection de rayonnement innovants en constante évolution.

Les grandes questions au cœur des recherches poursuivies au CERN incluent celle de l'Energie Noire et son lien potentiel avec l'expansion de l'Univers et la gravitation, celle de la Matière Sombre invoquée pour justifier - par influence gravitationnelle - les aspects inexpliqués du mouvement des objets stellaires, celle de la domination de la matière sur l'anti-matière, celle de l'origine de la masse des particules élémentaires qui constituent la matière, etc. Ces questions se posent depuis des décennies et comptent toujours encore parmi les aspects les plus mystérieux du fonctionnement de la Nature. Ultimement, la recherche en physique des particules est en questionnement perpétuel sur le fondement des concepts dont elle se saisit et se confronte à la question à connotation philosophique ancienne (logos): pourquoi y a-t-il « quelque chose » plutôt que « rien » ?

Boson de Higgs et Modèle Standard des Particules Élémentaires (voir aussi Annexe 2)

Les 35 dernières années ont été marquées par la mise en évidence expérimentale d'une théorie à fondement géométrique (dérivé du concept de symétrie), qui décrit la quasi-totalité des observations sub-microscopiques réalisées jusqu'ici: le Modèle Standard des Particules Élémentaires. La vérification expérimentale détaillée de cette théorie très prédictive avec le LEP du CERN (1989-2000), renforcée des résultats obtenus aux USA (SLC/Stanford, FermiLab/Chicago), a permis de prédire l'existence et certaines propriétés du boson de Higgs, découvert comme attendu au LHC en 2012. Ce boson constitue la clef de voûte de la théorie. Ses propriétés quantiques intègrent des aspects qui dépassent a priori le cadre du Modèle Standard. C'est pourquoi elles constituent le sujet d'étude cardinal des décennies à venir pour trouver des éléments de réponse aux grandes questions mentionnées plus haut. Cela, quelles que soient les découvertes éventuelles à venir au LHC ou ailleurs.

Alors que le LHC entame la jouvence que nécessite sa phase ultime d'exploitation, censée s'étendre jusqu'au début des années 2040, le moment est venu de préparer l'avenir post-LHC de ce domaine de recherche stratégique pour l'Europe. Cette prochaine étape, qui interviendra après plus de 50 ans d'exploitation du tunnel du LEP-LHC, nécessitera la construction d'un nouvel accélérateur électron-positon autorisant de plus grandes énergies de collision que celles accessibles avec les infrastructures existantes.

Objectifs du Prochain Collisionneur

La Recherche-et-Développement (R&D) de cette nouvelle génération d'accélérateurs est en cours depuis une trentaine d'années en perspective d'un programme scientifique complémentaire au LHC. L'objectif principal de cette nouvelle infrastructure est de produire des bosons de Higgs à profusion dans des conditions expérimentales particulièrement favorables aux études précises de ses propriétés. Accessoirement, cette infrastructure permettrait aussi une étude poussée du quark top (la particule élémentaire la plus lourde connue) et de reprendre l'étude du boson Z^0 avec une précision surpassant largement celle obtenue au LEP et au SLC (voir Annexes 3 et 4).

Ce nouvel accélérateur (abrégé HF pour « Higgs Factory » dans la suite) nécessitera un nouveau tunnel, celui du LEP-LHC n'autorisant qu'une augmentation modeste de l'énergie de collision. L'option d'une HF dans le tunnel du LEP-LHC, de moindres coût et performances, a néanmoins été considérée comme option de repli ultime si aucune des options technologiques les plus pertinentes ne pouvait voir le jour.

De nombreux laboratoires européens, américains et asiatiques se sont investis dans la R&D requise pour un collisionneur électron-positon de nouvelle génération. Plus d'un millier de chercheurs et d'ingénieurs ont ainsi étudié plusieurs options technologiques possibles, les unes pour un collisionneur de forme circulaire (comme un grand LEP), les autres pour une version alternative de géométrie linéaire. Chacune de ces deux approches conceptuelles présente des avantages par rapport à son alternative, de même que certaines performances plus modestes et des risques spécifiques.

Comparaisons entre les options technologiques

Pour atteindre l'énergie de collision requise, **l'option circulaire** exige un tunnel de plus grand rayon que celui du LEP afin de contenir les pertes d'énergie par rayonnement synchrotron causées par la nécessité de courber la trajectoire des faisceaux de particules. De 2021 à 2025, une étude de faisabilité très complète a été conduite, qui s'est soldée par un dessin détaillé de l'accélérateur FCCee, hébergé dans un tunnel long de 91 km. Celui-ci pourrait accueillir ultérieurement un collisionneur de protons similaire au LHC, mais d'une énergie de collision au moins quatre à six fois supérieure, ce qui constituerait la frontière en énergie ultime à laquelle pourraient se dérouler les expériences de la fin du siècle.

Le concept d'un **collisionneur circulaire** offre une puissance statistique maximale à cause de la recirculation des faisceaux après interaction et – conséquemment – de la répétition des collisions des faisceaux. Cet avantage statistique est renforcé par la présence de 4 expériences réparties entre quatre sites où les faisceaux sont mis en collision, ce qui offre simultanément la possibilité d'accueillir la majeure partie de la communauté mondiale des physiciens des particules et d'accroître la diversité des dispositifs expérimentaux installés aux points d'interaction. Cet avantage d'un collisionneur circulaire est particulièrement utile pour répéter les études réalisées au LEP avec une précision statistique potentiellement au moins cent fois meilleure. Il est moins prononcé aux énergies plus élevées, elles-mêmes limitées par le rayonnement synchrotron.

Alternativement, **l'option linéaire** échappe aux contraintes du rayonnement synchrotron précitées et permet ainsi d'atteindre des énergies au moins deux à quatre fois plus élevées que l'option circulaire dans un premier temps. D'où la possibilité d'étudier plusieurs processus physiques fondamentaux impliquant le boson de Higgs, le quark top, et les interactions multiples de bosons, essentiellement inaccessibles directement avec l'option circulaire. Ces processus sont néanmoins supposés perceptibles de manière indirecte dans l'étude poussée du boson Z^0 réalisable avec un collisionneur circulaire grâce à la quantité gigantesque (plusieurs trillions, cf Réf-1) de bosons Z^0 produits.

Pour un tunnel d'une longueur donnée, l'énergie maximale atteignable avec **un collisionneur linéaire** est principalement dictée par les performances des systèmes d'accélération des faisceaux; leurs limites sont progressivement repoussées grâce à la R&D innovante poursuivie par les experts en accélérateurs au sein de nombreux laboratoires dans le Monde, avec les retombées sociétales récurrentes évoquées précédemment.

La longueur de tunnel envisagée ultimement pour un collisionneur linéaire est d'une trentaine de kilomètres (la longueur du tunnel du LEP-LHC), soit environ trois fois moins qu'un collisionneur circulaire. Contrairement à ce dernier, les faisceaux d'un collisionneur linéaire n'interagissent qu'une fois. Ils ne peuvent pas être réutilisés, ce qui limite la puissance statistique, sensiblement inférieure à celle de l'option circulaire aux énergies les plus basses, néanmoins très supérieure à celle du LEP. Cet écart avec l'option circulaire s'estompe à plus haute énergie et devient marginal à l'énergie maximale du collisionneur circulaire. C'est ainsi qu'on prévoit que le nombre de bosons de Higgs produits avec l'option circulaire (FCCee) s'élèverait à 2.7 millions pour une exploitation de 15 ans (dont 8 consacrés à la production directe du boson de Higgs) et 4 expériences [cf Réf-1], contre 2.3 millions pour l'option linéaire (dénommée LCF/ILC) en 20 ans d'exploitation (dont 15 ans consacrés à cette production directe) [cf Réf-2]. Pour comparaison, l'option fondée sur le réemploi du tunnel du LEP-LHC conduirait à au moins 400,000 bosons de Higgs produits en 6 ans d'exploitation [cf Réf-3]. Les sources de ces nombres sont indiquées dans la partie « Références » du document.

Par ailleurs, le nombre de bosons de Higgs (ou de Z^0) produits avec un collisionneur linéaire n'est pas seulement fonction du taux d'interaction des faisceaux. Il est renforcé par la possibilité d'orienter le spin (grandeur quantique qui s'apparente à un moment cinétique de rotation) des particules en collision, ce qui permet aussi de renforcer la sensibilité des interactions à des phénomènes nouveaux.

Deux alternatives conceptuelles de collisionneur linéaire ont été développées, l'une fondée sur une technologie accélératrice supra-conductrice (dénommée ILC) et l'autre sur une technologie fonctionnant à température ambiante (dénommée CLIC). Les deux options sont susceptibles de passer par une étape intermédiaire d'énergie de collision inférieure à la valeur ultime possible, accessible avec un tunnel plus court, de 12 ou 20 km de long (resp. pour CLIC ou ILC). Le projet ILC est arrivé à maturité technologique depuis plusieurs années et a eu comme première application concrète la source de lumière Eu-XFEL à Hambourg inaugurée en 2017, suivie d'autres sources de lumière aux USA et en Chine. La technologie du CLIC est un peu moins avancée mais permet a priori d'atteindre des énergies de collision plus élevées. Dans les deux cas, deux expériences seulement y seraient installées, signifiant l'implication d'une communauté de physiciens moins étendue qu'avec les quatre expériences prévues auprès d'un collisionneur circulaire.

Impact du programme scientifique à long terme sur le choix de l'option technologique du collisionneur HF

On peut dresser un bilan comparatif condensé où le collisionneur circulaire FCCee prévaut en termes de nombre de bosons Z^0 et – dans une bien moindre mesure (env. 20 %) - de bosons de Higgs produits, ainsi que par la taille de la communauté scientifique que ses 4 expériences impliqueront et l'apport afférent en diversité des mesures et études réalisables. De plus, son tunnel préfigure l'accélérateur qui lui succéderait, un collisionneur de protons atteignant la frontière en énergie ultime de ce siècle.

En comparaison, les collisionneurs linéaires se distinguent par leur capacité à fournir des énergies de collision sensiblement supérieures et par les études fondamentales directes qu'elles autorisent. Leurs infrastructures sont de moindre taille, et leur implémentation peut s'étaler dans le temps pour épouser un calendrier de financement progressif du projet. Enfin, ils se distinguent par leur degré d'innovation technologique, avec un impact sociétal prévisible, et n'engagent pas le choix de l'accélérateur qui pourrait leur succéder pour la fin du siècle. Cet aspect soulève la critique que si le FCChh s'avérait être l'infrastructure la plus pertinente après l'exploitation du collisionneur linéaire, il faudrait construire son tunnel ab initio, occasionnant entre autres un surcoût de plusieurs milliards et l'abandon éventuel de la machine électron-positon, qui se révélerait ainsi avoir été un investissement conséquent pour une exploitation nominale de durée essentiellement limitée à 20-30 ans. Par ailleurs, contrairement au FCCee, les besoins en infrastructures amont d'un collisionneur linéaire (sources, pré-injection, ...) sont assez spécifiques et n'autorisent qu'un réemploi sélectif des infrastructures existantes du CERN. A contrario, l'option linéaire sous-entend qu'un programme de R&D mené en parallèle de l'exploitation de la HF permettra d'atteindre une énergie (e.g. 10 fois celle du FCCee) et un taux de collisions de plus en plus élevés, offrant un accès privilégié à d'éventuels phénomènes manifestant des signes de physique nouvelle. Il s'agit d'une perspective à long terme naturelle pour l'option linéaire, qui peut aussi être converti en collisionneur de photons ou photon-électron de haute énergie.

L'objectif d'un accélérateur de protons pour la fin du siècle (le FCChh) plaide pour le FCCee comme étape intermédiaire naturelle, mais fige le programme scientifique du CERN pour au moins 70 ans, bien avant que tous les résultats du LHC (et d'ailleurs) ne soient connus. L'hypothèse que ces derniers ne pourront en aucun cas invalider un choix précoce du FCChh s'appuie essentiellement sur l'affirmation que la physique au-delà du Modèle Standard directement accessible au LHC aurait déjà dû se manifester dans les données analysées. En l'absence de tels signes, les principes fondamentaux de la théorie plaident pour que l'échelle d'énergie à laquelle se situe la physique nouvelle soit forcément plus élevée, sans pour autant en indiquer une valeur. Il faut donc ambitionner l'énergie la plus élevée possible, ce qui plaide pour un collisionneur de protons de haute énergie. En effet, les approches alternatives pour atteindre la frontière en énergie, comme un collisionneur de muons, sont technologiquement sensiblement moins avancées, ce qui rend leur véritable potentiel incertain et sans doute long à déterminer.

Cet argument a compté dans les débats qui ont cours depuis l'année 2024 dans le cadre de la mise à jour de la feuille de route européenne de la physique des particules, pour faire du projet FCCee l'option prioritaire présentée aux états-membres du CERN en début d'année. En dehors de l'étape importante qu'il constitue vers la frontière en énergie escomptée du FCChh, la physique des bosons Z^0 qu'il produirait en abondance, la profusion de bosons de Higgs qu'il promet et la taille de la communauté scientifique qu'il pourrait accueillir avec 4 expériences, ont été considérés comme déterminants pour privilégier cette option plutôt que ses alternatives aux technologies plus innovantes et délivrant des énergies de collision électron-positon plus élevées.

Prochaines étapes du processus de mise à jour de la stratégie européenne

Le choix du FCCee comme accélérateur post-LHC a été exposé aux représentants des états-membres au Conseil du CERN au printemps 2026, dans la perspective d'une discussion finale en 2028, après quoi une décision devra être prise quant à l'acceptation définitive du projet. Si celle-ci rencontrait des difficultés susceptibles de la retarder considérablement, les options alternatives initialement écartées pourraient être reconsidérées au regard de la nature des difficultés rencontrées par le projet FCC. Une nouvelle mise à jour de la stratégie européenne serait entreprise, centrée sur ces alternatives.

En attendant, la stratégie de la nouvelle Direction du CERN a intégré le projet FCC comme première priorité après la montée en puissance du LHC en cours. La poursuite des études portant sur les alternatives technologiques est sensiblement ralentie, ne disposant que de ressources très modestes (voir Annexe 6).

Références :

Les nombres de bosons de Higgs attendus pour chacune des 3 options de collisionneur HF proviennent des documents mis à disposition du groupe de réflexion sur la stratégie européenne ayant conduit au choix du FCCee comme option préférée. Certains documents ont donné lieu à une publication dans un journal spécialisé, consultée pour produire le document présent.

Réf-1 (FCCee) : M. Selvaggi et al, *Prospects in Electroweak, Higgs and Top physics at FCC* ; Contribution to the European Strategy for Particle Physics Update 2025-2026

Réf-2 (LCF) : C. Balasz et al., *The Linear Collider Facility (LCF) at CERN* ; arXiv:2503.24049 [hep-ex] 19.06.25 ; H. Abramowicz et al., *A Linear Collider Vision for the Future of Particle Physics* ; arXiv:2503.19983v5[hep-ex] 23.12.25

Réf-3 (LEP-3) : C. Anastopoulos et al., *LEP3: a high-luminosity e^+e^- Higgs and electroweak factory in the LHC tunnel* ; J. Phys.G: Nucl. Part. Phys. 53 (2026) 040501

ANNEXES :

1. Expériences en laboratoire versus Observations

La physique des particules a pour ambition de révéler les lois fondamentales de la Nature présentes et passées avec une approche expérimentale où des hypothèses explicatives des observations réalisées sont testées de manière critique et complète. Les accélérateurs sont utilisés à cette fin car ils permettent de définir les conditions (initiales) dans lesquelles un phénomène se produit sans avoir à les conjecturer, contrastant ainsi avec les approches essentiellement observationnelles du fonctionnement de l'Univers. Plus élevée est l'énergie mise en jeu dans les collisions, plus granulaire est la sensibilité des interactions (pouvoir résolvant) et plus haute est la densité d'énergie mise en jeu, que l'on peut assimiler à celles qui ont présidé aux tout premiers instants de l'expansion de l'Univers.

Au fur et à mesure de l'évolution des connaissances, les lois établies sont confrontées à leurs hypothèses de base, leurs limites et leurs incohérences profondes éventuelles, pour les mettre en perspective d'une compréhension de la Nature plus globale. L'origine des lois fondamentales établies fait partie du questionnement inhérent à la discipline, notamment pour trouver des explications satisfaisantes de l'histoire de l'Univers à l'échelle sub-microscopique et quantique, dans ses tout premiers instants, inaccessibles à l'observation directe.

Les accélérateurs jouent un rôle central dans cette démarche. En faisant entrer en collision des particules dans des conditions connues et variables à dessein, ils créent des conditions physiques qui ont pu présider au tout début de l'histoire de l'Univers (e.g. depuis la première picoseconde) en restituant la densité d'énergie et les conditions quantiques qui y régnaient. Ces premiers instants sont inaccessibles à l'observation directe du cosmos, par exemple parce que les premières émissions lumineuses perceptibles de l'Univers ne surviennent que lorsqu'il atteint un âge de 380 000 ans (origine du rayonnement fossile). De même, l'observation des astres les plus lointains nous livre des images de l'Univers âgé de 200 millions d'années (ex. du télescope spatial James Web).

On s'intéresse ainsi à des étapes de l'évolution qui mettent en jeu des lois fondamentales conduisant à des phénomènes susceptibles d'expliquer des questions essentielles relatives à l'expansion de l'Univers, la prédominance de la matière sur l'anti-matière, le lien entre physique quantique et gravitation, etc. La question « pourquoi y'a-t-il quelque chose plutôt que rien ? » est ainsi abordée de manière heuristique, une « théorie du tout » étant hors de portée dès lors qu'elle nous inclue.

2. Boson de Higgs : production dans les collisions électron-positon et proton-proton

Le potentiel scientifique d'un collisionneur électron-positon a été évalué dans le cas de l'ILC, du CLIC et du FCCee. Il ressort de ces évaluations que le nombre de bosons de Higgs produits (2 à 3 millions) autoriserait la recherche de phénomènes physiques encore inconnus avec une sensibilité bien supérieure à celle du LHC. On exploiterait ainsi la propriété singulière du boson, découvert au CERN en 2012, d'être sensible – a priori – à toutes les particules élémentaires massives existantes, qu'elles soient connues ou non, parce qu'il serait à l'origine de leur masse.

Les propriétés quantiques du boson expriment cette influence indirecte qu'ont toutes les particules massives sur lui, si bien que leurs mesures précises recèlent intrinsèquement - a priori - des aspects de la Nature encore inconnus. D'où l'attrait qu'exerce la perspective de leur étude approfondie avec un

collisionneur dédié à la production en nombre du boson. Cela dans des conditions expérimentales particulièrement favorables pour des mesures de haute précision lorsqu'on choisit des collisions entre électrons et positons. Ces particules étant ponctuelles, elles présentent l'avantage sur les collisions proton-proton (particules composites) d'offrir des conditions initiales de collision particulièrement bien connues et modifiables à souhait, ainsi que des conditions finales où les particules créées dans les interactions peuvent être étudiées sans perturbations importantes provenant de phénomènes parasites.

La production du boson de Higgs dans les collisions électron-positon résulte essentiellement de deux processus physiques très différents, dont l'importance relative varie assez rapidement en fonction de l'énergie de collision et dont les signatures expérimentales diffèrent sensiblement. Près du seuil cinématique (énergie minimale nécessaire) de production du boson, le processus physique dominant génère simultanément un boson de Higgs et un boson Z^0 (processus dit **ZH**). A plus haute énergie, le processus dominant produit simultanément un boson de Higgs et deux neutrinos (processus dit **Hnn**).

Les effets de lois physiques encore inconnues sur chacun des deux processus peuvent être sensiblement différents, tant qualitativement que quantitativement. Avec un collisionneur linéaire, la sensibilité des mesures expérimentales à de tels effets est renforcée par la polarisation des faisceaux. De plus, comme un collisionneur linéaire autorise des énergies plus élevées qu'une option circulaire, il permet d'accumuler beaucoup plus de bosons provenant du processus Hnn (près d'un million), en plus du processus ZH (1.4 million de bosons). A contrario, un collisionneur circulaire tendra à produire majoritairement le processus ZH (e.g. 2.6 millions pour FCCee) et produirait environ 160,000 bosons issus du processus Hnn. Cependant, les deux processus produisent de subtils effets virtuels en-dessous du seuil cinématique. Ils affectent les propriétés du boson Z^0 sous forme de perturbations quantiques infinitésimales, que l'on espère pouvoir évaluer précisément avec les trillions de Z^0 attendus du collisionneur FCCee. L'ensemble des nombres ci-dessus sont extraits des publications citées dans la section « Références ».

3. Etudes du boson Z^0 et Modèle Standard des Particules Élémentaires:

Le boson Z^0 est un vecteur de la force nucléaire faible. Dans le Modèle Standard, ses paramètres quantiques ont des valeurs interdépendantes, reliées numériquement aux paramètres du boson de Higgs. Leur mesure expérimentale permet donc de tester la validité du Modèle Standard et d'en rechercher des défaillances ou des contraintes sur des paramètres encore inconnus. C'est ce qui a été fait au LEP (CERN) et au SLC (Stanford-USA) dans les années 1990.

La valeur mesurée de chacun des paramètres exprime l'influence de fluctuations de nature quantique provenant de processus virtuels impliquant des particules non visibles. Par exemple, un boson de Higgs virtuel peut être créé dans une collision électron-positon produisant un Z^0 , qui se couple à une paire virtuelle de quarks top, qui disparaissent dans le vide physique en un temps infinitésimal. La durée de vie du boson Z^0 s'en trouve affectée. Sa mesure précise peut en principe être exploitée pour estimer l'intensité du couplage du quark top au boson de Higgs. On peut ainsi espérer déterminer avec un accélérateur circulaire des paramètres régissant des phénomènes physiques qui ne sont pas accessibles directement à cause d'une énergie de collision insuffisante.

Le collisionneur FCCee est censé produire plusieurs centaines de milliers de fois plus de bosons Z^0 que le LEP; un collisionneur linéaire n'en produirait typiquement que 1000 à 10 000 fois plus. Cette différence de puissance statistique avec le FCCee est sensiblement atténuée par la polarisation des faisceaux (orientation majoritaire du spin des électrons) lors de leur collision, que l'on ne sait obtenir qu'avec un accélérateur linéaire. Par ailleurs, l'amélioration de la précision statistique par rapport au LEP ne sera

pleinement exploitable que si les précisions théoriques sur les paramètres du Modèle Standard seront du même ordre, ce qui est loin d'être le cas aujourd'hui et représente un défi.

4. Etudes du quark top:

Le quark top est la particule élémentaire la plus lourde connue. De ce fait, on tend à lui prêter une sensibilité particulière à la physique nouvelle (c. à d. non explicable avec le Modèle Standard). Par ailleurs, sa masse élevée lui confère une influence substantielle sur les valeurs des paramètres du Modèle Standard attribuées au boson Z^0 et au boson de Higgs. Ces effets sont fonctions de la masse du quark, selon des expressions mathématiques inhérentes au Modèle Standard. Ils ont été mesurés au LEP et ont permis de prédire la valeur de la masse du quark top avant l'annonce de sa découverte. La même approche a permis de cerner la valeur de la masse du boson de Higgs et de prédire sa découverte au LHC. Dans les deux cas, la masse prédite à partir des mesures expérimentales des propriétés du boson Z^0 était en bon accord avec les valeurs mesurées directement par les expériences ayant mis en évidence la production de ces particules. Dans le cas contraire, le désaccord entre les valeurs prédites des masses et celles mesurées aurait été interprété comme témoin d'un effet virtuel de particules nouvelles modifiant les propriétés quantiques du boson Z^0 .

Un futur collisionneur électron-positon permettra de répéter ces mesures avec une précision telle que l'influence – même très faible - de particules encore inconnues pourrait être décelée. C'est particulièrement le cas avec un collisionneur circulaire, si la réduction ambitionnée des incertitudes sur les prédictions théoriques se révélera suffisante pour exploiter pleinement la puissance statistique des mesures expérimentales.

La valeur de la masse du quark top joue un rôle central dans le Modèle Standard parce qu'elle est étroitement liée à d'autres paramètres mesurables du modèle. Sa mesure directe précise auprès d'un futur collisionneur impose une énergie minimale (deux fois la valeur de la masse du quark), qui correspond à l'énergie de collision maximale prévue pour un collisionneur circulaire. A l'inverse, l'étude des propriétés quantiques du quark est facilitée aux énergies supérieures et avec des faisceaux polarisés, ce qui constitue une valeur ajoutée d'un collisionneur linéaire, d'autant que le processus physique mettant en jeu à la fois le boson de Higgs et le quark top y serait directement accessible.

5. Transfert de technologies et de savoirs vers la société :

Les bénéfices que retire la société de la recherche en physique des particules constituent un fait établi de longue date. Ils peuvent être de nature variée. Les domaines bénéficiaires sont typiquement ceux adossés à des accélérateurs, des systèmes de détection de rayonnements, des algorithmes informatiques, des tests de validation d'équipements complexes, la formation professionnelle technologique et scientifique, etc.

Selon les sources, on dénombre plus de 30,000 à 50,000 accélérateurs dans le Monde; Ce type d'instrument est donc devenu central pour la société. La plupart de ces machines sont utilisées dans les secteurs médical (radiothérapie, imagerie) et industriel (stérilisation alimentaire, implantation d'ions, science des matériaux, réacteurs nucléaires du futur, etc.), mais leur emploi s'étend à des domaines aussi divers que les arts (Louvre) ou l'inspection sécuritaire et douanière (e.g. contenu de containers). Comme dans ce dernier cas, les accélérateurs sont souvent associés à des systèmes de détection (e.g. recherche de micro-fissures dans les cheminées et les cuves d'usine, hadronthérapie avec imagerie 3D en ligne). La R&D réalisée pour la physique des particules est un moteur pour l'amélioration des performances (e.g.

précision, rapidité) de ces systèmes, la réduction de leur encombrement et de leur coût ainsi que pour l'émergence de systèmes innovants en rupture avec les concepts en usage.

Par ailleurs, le développement de détecteurs innovants, semi-conducteurs en particulier, toujours plus rapides, précis, « intelligents », compacts, légers et radio-résistants trouve un large spectre d'applications (e.g. dosimétrie et imagerie de toutes sortes, terrestres, spatiales ou sous-marines) qui ne sont pas toujours prévisibles. C'est par l'avancée technologique que s'ouvrent des opportunités nouvelles parfois inattendues.

Les algorithmes (y compris l'IA en ligne) utilisés à divers endroits en physique des particules, comme les suivis et corrections de trajectoires des faisceaux circulant à une vitesse proche de celle de la lumière dans un accélérateur, la recherche de phénomènes rares dans une foison de signaux, y compris dans l'espace, les développements de calculs théoriques impliquant des millions de termes interdépendants, etc., trouvent également des champs d'application sociétale très divers, dont certains inopinés.

La recherche en physique des particules se distingue par la complexité des instruments innovants et des algorithmes développés (accélérateurs et détecteurs, conception d'expériences, étude des particules produites dans les interactions des faisceaux). Chaque nouveau type d'expérience fait appel à des capacités nouvelles de toutes sortes, où l'existant est insuffisant, voire inexistant, au départ, et pour lesquelles il faut inventer et développer des solutions (c'est ainsi qu'est né le World Wide Web au CERN développé pour les expériences du LEP). De nombreux jeunes talents participent à cette aventure, à des âges et sur des durées très variables (quelques mois à plusieurs années). La plupart d'entre eux ne poursuivent pas leur carrière dans le domaine et vont répondre à une mosaïque de besoins de la société, pour lesquels l'expérience acquise au CERN tend à être particulièrement bénéfique, quel que soit le secteur d'activité concerné (e.g. de l'industrie à la finance, en passant par la formation académique, la médecine ou le secteur pharmaceutique).

6. Questions diverses :

○ *Avantages du CERN et sa région pour accueillir le FCC :*

Construire un grand accélérateur nécessite un ensemble d'installations périphériques, à la fois en termes d'accélérateurs (sources de particules, accélération intermédiaire, etc.), de bâtiments (bureaux, salles de test, halls de montage, équipements de refroidissement, etc.), de voies de transport (routier, aérien, public), de sources d'eau (pour le refroidissement) et d'électricité. Cela dans un contexte où les considérations environnementales sont une priorité de premier ordre.

Plusieurs sites potentiels d'installation du FCC en Europe ont été considérés. Il ressort que le CERN et sa région offrent un environnement qui réduit considérablement les besoins additionnels propres au FCC. Par exemple, les besoins en voies d'accès aux bâtiments de surface se résument à quelques km de route, les besoins en électricité - similaires à ceux actuels du CERN – peuvent en principe être pourvus par le fournisseur actuel. Par ailleurs, la génération et la pré-accélération des électrons et des positons des faisceaux tire avantage des infrastructures existantes et l'accès au CERN est aisé depuis toutes les régions du Monde concernées. Les alternatives au site cernois se heurteraient à de nombreuses complications, conduiraient à une artificialisation des sols et un bilan carbone sensiblement plus élevés, tout en étant notoirement plus onéreuses.

○ ***Quels sont les projets poursuivis hors d'Europe ?***

Les Etats-Unis ont longtemps été le pays en concurrence directe avec l'Europe dans le domaine des accélérateurs de particules à la frontière technologique. Suite à la découverte des bosons Z^0 et $W^\pm$ au CERN en 1983/84, ils se sont progressivement retirés de la compétition après le succès de la montée en énergie du LEP, qui a manqué de peu la découverte du boson de Higgs. Après avoir découvert le quark top au milieu des années 1990, les Etats-Unis se sont engagés dans la recherche du boson de Higgs au Fermilab (Chicago) avant le démarrage du LHC. Cet effort s'est arrêté en 2008 avec la mise en service du LHC.

A l'heure actuelle, les Etats-Unis s'intéressent plutôt à la prochaine génération d'accélérateurs, avec une R&D ambitionnant de démontrer la faisabilité d'un collisionneur de muons, attrayant pour sa perspective d'énergies de collision très élevées, mais dont le véritable potentiel est encore en phase d'évaluation. Un programme de R&D est également engagé dans une nouvelle technologie d'accélération des électrons (projet C3), susceptible d'équiper l'ESRF (Grenoble) à terme (projet COLD), qui promet des gradients accélérateurs très élevés et une réduction sensible des besoins en énergie électrique et en capacité de refroidissement.

La Chine, quant à elle, est actuellement engagée dans un projet de grand accélérateur de particules, dénommé CEPC. Sa conception et ses objectifs scientifiques reprennent dans une large mesure les éléments constitutifs du FCC, avec des ambitions plus mesurées en termes de performances. Le projet n'a pas obtenu le soutien souhaité de la part des autorités chinoises dans le cadre de l'appel à projets du plan quinquennal qui démarre, mais il pourrait être resoumis dans 4-5 ans à l'occasion du prochain plan. Cette deuxième tentative interviendrait si le projet FCCee rencontrait des difficultés importantes d'ici 2030. Mais si le projet est accepté, les physiciens chinois ont annoncé qu'ils prévoyaient de rejoindre le projet FCCee et d'abandonner le projet CEPC.

○ ***Programme préliminaire de la mandature 2026-30 du CERN***

Une nouvelle équipe de Direction du CERN a pris ses fonctions au mois de janvier 2026. Le Directeur Général (M. Mark Thomson) a exposé les grandes lignes du programme de sa mandature. La phase ultime du LHC, dite de Haute Luminosité (HL-LHC), y figure en priorité maximale. La priorité suivante va à la poursuite des études de faisabilité et de mise en œuvre du projet FCCee. Les discussions sur ce projet et, plus généralement, sur la stratégie à mettre en œuvre après l'arrêt du LHC, devraient se poursuivre avec les états-membres jusqu'en 2028. L'objectif actuel est de conclure sur la nouvelle stratégie, adossée au projet FCCee, à ce moment-là.

D'ici là, les options alternatives continueront d'être examinées, mais la poursuite de leur développement disposera de très peu de moyens. Si le projet FCCee rencontrait des obstacles remettant sa réalisation sérieusement en cause, ces options alternatives seront considérées en premier lieu sous l'aspect combiné de leur coût et de l'énergie de collision maximale qu'elles permettent d'atteindre. Concrètement, si une option permet d'étudier le boson de Higgs mais pas le quark top (e.g. LEP-3), elle deviendrait une option viable si son coût est estimé à moins de 5 GCHF. Il est attendu des options qui coûteraient entre 5 et 10 GCHF (e.g. un collisionneur linéaire) de fournir une énergie maximale similaire à celle du FCCee, qui permet d'accéder à la production de quarks top. Ce précepte définit le programme à venir pour ces options de repli, où l'évaluation précise des coûts (ainsi que leur réduction et leur plan de financement) et l'optimisation de la longueur du tunnel (dans le cas d'un collisionneur linéaire) seront au cœur des études poursuivies. Cela avec la contrainte imposée par certains états-membres du CERN d'opter pour un projet-phare justifiant le budget annuel consenti à l'établissement.