

CERN/3997
Original : anglais
22 mai 2026

ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE
CERN **EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH**

CONSEIL RESTREINT

227^e session

22 mai 2026

RÉSOLUTION DU CONSEIL
RELATIVE À
LA MISE À JOUR 2026 DE LA STRATÉGIE EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE DES
PARTICULES

RÉSOLUTION DU CONSEIL

RELATIVE À

LA MISE À JOUR 2026 DE LA STRATÉGIE EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES

LE CONSEIL,

EU ÉGARD

- (1) à la Convention pour l'établissement du CERN, en date du 1^{er} juillet 1953, modifiée le 17 janvier 1971, et en particulier son article II-2 (b), en vertu duquel la mission de l'Organisation comprend l'organisation et l'encouragement de la coopération internationale dans la recherche nucléaire (physique des particules), à l'intérieur comme à l'extérieur du Laboratoire ;
- (2) à l'article 12 c) du Règlement intérieur du Conseil du CERN ([CERN/3388/Rév.4](#)), en vertu duquel les décisions ayant une importance majeure pour l'Organisation peuvent être prises sous la forme de résolutions ;

CONSIDÉRANT

- (3) son intention déclarée en 2003 « *de développer, dans le cadre de la Convention du CERN, le rôle de coordination de l'Organisation pour la définition de la politique européenne dans le domaine de la physique des particules* » ([CERN/2538/Rév.](#), annexe 4) ;
- (4) que, en 2006, il a approuvé la première stratégie européenne pour la physique des particules, dans le cadre de laquelle il a reconnu que, du fait de la mondialisation croissante et de l'ampleur des projets de physique des particules, les orientations stratégiques de l'Europe se doivent d'être bien coordonnées, et a décidé que, en vertu de l'article II-2 (b) de la Convention du CERN, et en qualité de conseil pour la physique européenne des particules, il définirait et mettrait à jour les orientations stratégiques sur la base de propositions et d'observations émanant d'un comité scientifique spécial qu'il créerait à cet effet ([CERN-Conseil-S/002](#)) ;
- (5) le cadre procédural qu'il a mis spécialement en place en 2007/2008 pour les mises à jour périodiques de la stratégie européenne pour la physique des particules ([CERN/2732/Rév.](#) et [CERN/2779](#)), et qu'il a confirmé en 2013 ([CERN/3092/AR/Rév.](#)) et 2018 ([CERN/3092/Rév.2](#) et [CERN/3092/Rév.3](#)), selon lequel, entre autres, le Groupe sur la stratégie européenne (ESG) a été établi en tant que groupe de travail intermittent du Conseil ayant pour mandat d'élaborer périodiquement des propositions de mises à jour de la stratégie, à partir des contributions soumises par la communauté scientifique, pour approbation par le Conseil ;
- (6) que, sur cette base, en mai 2013, il a approuvé la première mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, élaborée par le Groupe sur la stratégie européenne, et a expressément confirmé qu'il convient de poursuivre des mises à jour

de la stratégie dans l'avenir en suivant la procédure susmentionnée ([CERN-Conseil-S/106](#)) ;

- (7) que, par la suite, en juin 2020, il a décidé de « *mettre à jour la stratégie sous la forme proposée par le Groupe sur la stratégie européenne [...], en tant que vision scientifique de la communauté de la physique des particules en Europe* » et a invité la Direction du CERN à utiliser cette mise à jour « *comme contribution à son plan à moyen terme et comme base sur laquelle élaborer une vision et un plan pour l'avenir du Laboratoire en tenant compte des contraintes financières d'un budget constant, tout en recherchant des sources de financement supplémentaires* », et « *à fournir chaque année un rapport sur la mise en œuvre des priorités recommandées par la stratégie mise à jour, y compris sur les résultats de l'étude de faisabilité d'un futur collisionneur circulaire, ainsi que sur les activités de R&D sur les accélérateurs ciblant d'autres options, de sorte que le Conseil soit en mesure de décider, au vu des avancées réalisées, du meilleur moment pour lancer la prochaine mise à jour de la stratégie* » ([CERN/3493/Rév.](#)) ;
- (8) sa décision de novembre 2025 concernant les résultats de l'étude de faisabilité du Futur collisionneur circulaire (FCC) par laquelle il a conclu que « *l'étude de faisabilité du FCC constitue une base pour la poursuite des études sur le FCC, et que les scénarios de financement présentés et les promesses de financement obtenues jusqu'à présent constituent une base pour la poursuite des efforts visant à obtenir tous les engagements financiers requis pour l'approbation du projet FCC* » et « *[a] réaffirm[é] son objectif de parvenir si possible en 2028 à une décision définitive concernant la réalisation du projet FCC* » ([CERN/3947/Rév.](#)) ;

CONSIDÉRANT EN OUTRE

- (9) qu'en mars 2024, le Conseil a approuvé le calendrier pour la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules, en vue de mettre à jour la stratégie en juin 2026, ainsi que les modifications proposées concernant la composition du Groupe sur la stratégie européenne ([CERN/3802/AR](#)) ;
- (10) qu'en juin 2024, il a nommé le secrétaire de la stratégie et mis sur pied le Secrétariat de la stratégie ([CERN/3837/C](#)), et approuvé le mandat du Groupe sur la stratégie européenne ([CERN/3834/Rév.2](#)), à savoir « *élaborer une proposition de mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules et la soumettre au Conseil pour approbation* », la mise à jour de la stratégie ayant pour objectif de « *développer un plan visionnaire et concret qui permette de faire avancer de manière importante la connaissance humaine dans le domaine de la physique fondamentale par la réalisation du prochain projet phare du CERN* », précisant que ce plan « *devra susciter et valoriser la collaboration internationale, et permettre à l'Europe de continuer de jouer un rôle de premier plan dans la discipline* » ;
- (11) que ce faisant, il a rappelé que le Groupe sur la stratégie européenne prendra en considération « *les contributions de la communauté de la physique des particules [,] l'état de l'exécution de la mise à jour 2020 de la stratégie [,] les progrès accomplis ces dernières années, notamment les résultats obtenus au LHC et dans d'autres expériences et installations dans le monde, la progression de la construction du LHC à haute luminosité, les conclusions de l'étude de faisabilité du Futur collisionneur circulaire, ainsi que les récentes avancées technologiques réalisées dans les domaines des accélérateurs, des détecteurs et de l'informatique[, et] la situation de la discipline sur le plan international* » ;
- (12) qu'il a précisé que « *la mise à jour de la stratégie devra indiquer quelle est l'option privilégiée pour un nouveau collisionneur au CERN, et hiérarchiser les autres options* » ;

possibles au cas où la première s'avérerait non réalisable ou non compétitive » et « aussi indiquer des domaines prioritaires pour des études complémentaires aux études menées auprès de collisionneurs et pour d'autres expériences susceptibles d'être envisagées au CERN et dans d'autres laboratoires en Europe, ainsi que pour une participation à des projets hors d'Europe » ;

- (13) qu'il a déterminé que le Groupe sur la stratégie européenne « *devra examiner et mettre à jour la stratégie, et y intégrer d'autres éléments jugés pertinents dans ce contexte, tels que : la R&D sur les accélérateurs, les détecteurs et l'informatique, les nouveaux horizons de la théorie, les mesures permettant de limiter l'impact sur l'environnement et d'améliorer la durabilité de la physique des particules s'appuyant sur des accélérateurs, la stratégie et les initiatives permettant d'attirer, de former et de retenir les jeunes générations, ainsi que les actions de communication et de sensibilisation auprès du grand public* » ;
- (14) que le Groupe sur la stratégie européenne a ensuite élaboré sa proposition pour la mise à jour de la stratégie, à partir d'une analyse rigoureuse et approfondie des contributions soumises par la communauté scientifique ;

RECONNAISSANT

- (15) l'ample processus de coordination, d'évaluation et de recherche de consensus ayant conduit à cette proposition, qui constitue une contribution essentielle à l'avenir de la physique des particules et une vision cohérente pour la physique des particules en Europe, et, à ce titre, fournit de précieuses lignes directrices à toutes les parties prenantes ;
- (16) que cette mise à jour de la stratégie proposée est une vision scientifique et, en tant que telle, ne constitue pas une décision en matière de politique de recherche ou de financement de la part des États membres ;
- (17) que la mise en œuvre de la proposition suppose de la part des parties prenantes concernées une prise de décision ultérieure ; et
- (18) que, pour ce qui concerne le CERN, toute réalisation de projets recommandés dans la mise à jour de la stratégie suppose des décisions distinctes de la part du Conseil, conformément aux procédures énoncées dans la Convention et dans le Règlement financier et les modalités d'application du Règlement financier de l'Organisation ;

DÉCIDE

- (19) de mettre à jour la stratégie européenne pour la physique des particules, sous la forme proposée par le Groupe sur la stratégie européenne et énoncée à l'annexe 1, en tant que vision scientifique de la communauté de la physique des particules en Europe ;

ET INVITE LA DIRECTION DU CERN

- (20) à utiliser cette mise à jour comme contribution à son plan à moyen terme et aux études en cours visant à faire du FCC-ee le prochain projet phare au CERN ;
- (21) à entamer des discussions avec les autorités et entités compétentes des États membres et États membres associés, ainsi que des États non-membres et de l'Union européenne, en vue d'obtenir des promesses de contributions supplémentaires en espèces ou en

nature, ou les deux, au coût de construction et d'exploitation du FCC-ee, et à partir de là, d'élaborer un plan de financement réaliste pour la réalisation éventuelle du projet FCC-ee ;

- (22) à fournir chaque année un rapport sur la mise en œuvre de la stratégie mise à jour, ainsi que les informations requises pour éclairer les processus de décision au niveau national ; et
- (23) à faire en sorte que le Conseil soit en mesure, en 2028, de prendre une décision sur le projet FCC-ee, compte tenu d'éléments tels que la faisabilité scientifique, technique et financière du projet.

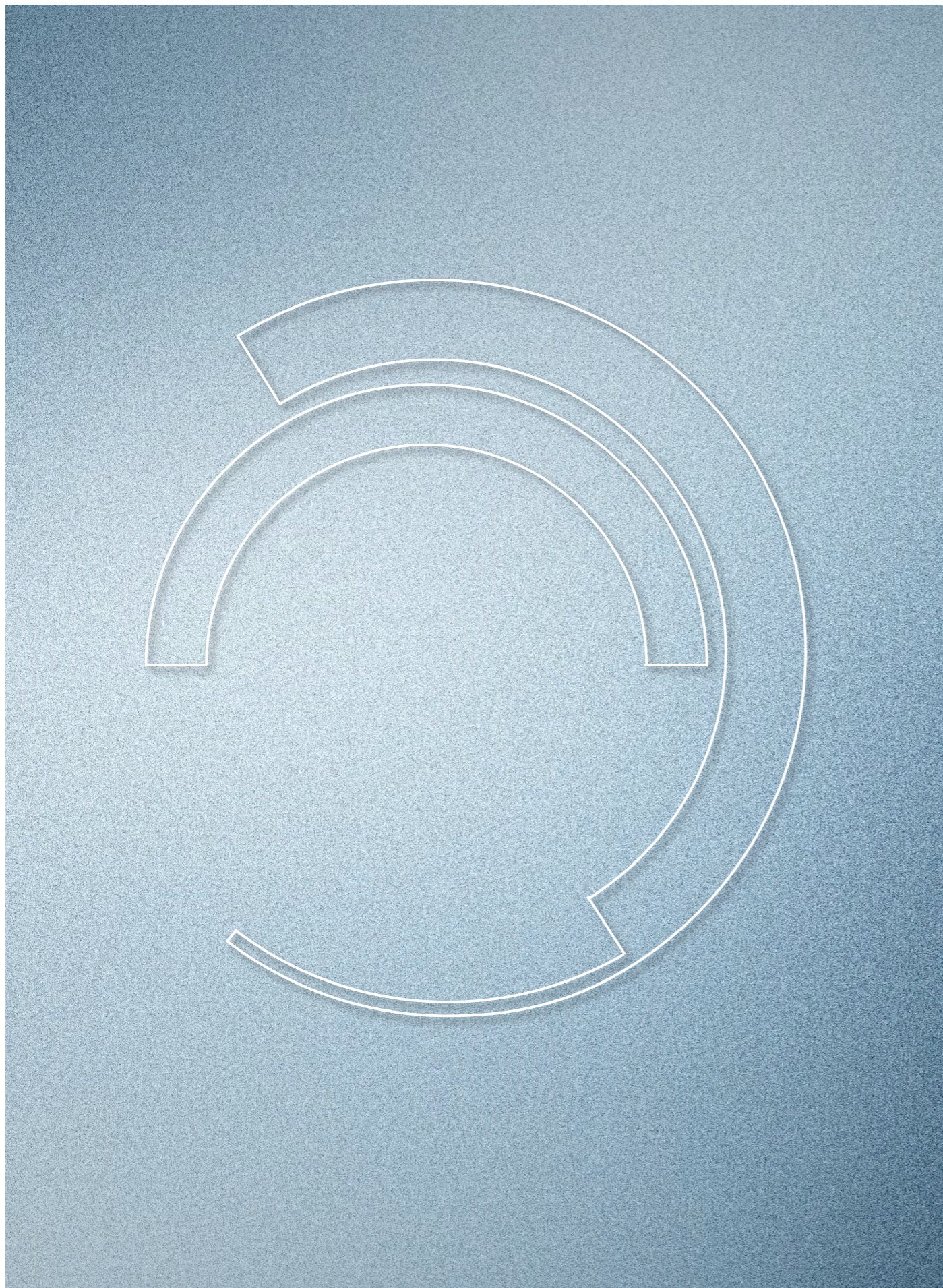
ANNEXE



STRATÉGIE EUROPÉENNE POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES
MISE À JOUR 2026

**RECOMMANDATIONS
DU GROUPE SUR LA STRATÉGIE EUROPÉENNE**





_Table des matières

Avant-propos	5
1. Principales évolutions depuis la stratégie de 2020	6
2. Considérations générales concernant la mise à jour 2026	7
3. Prochain projet de collisionneur phare au CERN	8
4. Autres pistes de recherche en physique des particules	10
5. Théorie	11
6. Technologies	12
7. Mise en œuvre de projets, coopération avec de grands laboratoires de physique des particules en Europe	15
8. Synergies avec les disciplines voisines	16
9. Durabilité et impact environnemental	17
10. Dialogue avec le public, éducation, communication et aspects socioprofessionnels	18



Avant-propos

La physique des particules étudie les constituants fondamentaux de la matière et les forces qui les unissent. La mise au point de technologies visant à explorer l'infiniment petit à des énergies de plus en plus élevées, avec des mesures de plus en plus précises, a ouvert la voie à des découvertes qui ont révolutionné notre compréhension des lois de la physique qui régissent l'Univers. L'observation du boson de Higgs a représenté un immense pas en avant. Cependant, en dépit de tous ces progrès, nombre de mystères, tels que la nature de la matière noire, la prédominance de la matière sur l'antimatière et les caractéristiques observées des masses des particules fondamentales, n'ont toujours pas été élucidés. C'est là un argument de poids en faveur de la poursuite des explorations selon différentes approches. Les collisionneurs de haute énergie restent l'unique moyen d'étudier directement le boson de Higgs, lequel pourrait apporter des réponses à certaines de ces questions.

Le boson de Higgs étant une particule unique en son genre, des arguments scientifiques convaincants ont été avancés, dans le cadre de la mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules, en faveur de la construction d'un nouveau collisionneur électron-positon fonctionnant comme une usine à Higgs, suivie d'une exploration plus poussée au moyen d'un collisionneur proton-proton exploité au niveau d'énergie le plus élevé possible. Le Conseil du CERN a ainsi lancé une étude visant à déterminer la faisabilité d'un futur collisionneur circulaire (FCC), avec comme première phase éventuelle une usine à Higgs et de production électrofaible sous la forme d'une machine électron-positon. Cette étude s'est achevée en 2025.

Au cours des dix dernières années, les expériences menées au Grand collisionneur de hadrons (LHC) ont accompli des avancées importantes concernant la mesure des propriétés du boson de Higgs et l'exploration des interactions entre particules à l'échelle d'énergie du TeV.

Lorsqu'il fonctionnera à haute luminosité, le LHC restera le principal instrument dans le monde pour l'exploration à la frontière des hautes énergies, la collecte de données devant se poursuivre jusqu'au début des années 2040. Pour pouvoir répondre aux questions de physique des particules hors de la portée du LHC à haute luminosité (HL-LHC), des avancées considérables seront nécessaires, tant sur le plan de la précision que sur le plan de l'énergie.

Le mandat donné au Groupe sur la stratégie européenne par le Conseil du CERN aux fins de la présente mise à jour est d'élaborer un plan concret qui permette de faire avancer de manière importante la connaissance dans le domaine de la physique fondamentale par la réalisation d'un nouveau projet phare au CERN. Ce plan devra susciter et valoriser la collaboration internationale, et permettre à l'Europe de continuer de jouer un rôle de premier plan dans la discipline.



Principales évolutions depuis la stratégie de 2020

Après l'installation et la mise en service des éléments relevant de la première phase des améliorations des détecteurs des expériences LHC, le LHC a entamé en 2022 sa troisième période d'acquisition de données, avec des collisions proton-proton et des collisions d'ions lourds. L'accélérateur, les expériences et l'infrastructure de calcul décentralisée ont affiché des performances exceptionnelles, la quantité de données de physique obtenue ayant plus que doublé. Grâce à cette augmentation du volume de données, à la mise au point de techniques d'expérimentation innovantes et aux avancées de la théorie, les expériences LHC ont produit quantité de résultats de physique remarquables.

Le LHC sera mis à l'arrêt en 2026 afin que commence l'installation de nouveaux éléments pour la machine à haute luminosité, dont des systèmes d'aimants reposant sur une technologie qui n'existait pas encore lors de la construction du LHC. En parallèle, les activités menées dans le cadre des programmes de mise à niveau des détecteurs en vue de l'exploitation à haute luminosité du LHC continuent de bien progresser. À terme, le HL-LHC produira plus de cinq fois plus de données que le LHC, ce qui permettra de faire un bond en avant sur le plan de la précision et du potentiel de découverte d'une nouvelle physique. Le LHC à haute luminosité devrait être exploité de 2030 à 2041. Il est crucial que le programme du HL-LHC soit mené à bien selon le calendrier prévu pour que la construction du futur collisionneur phare puisse débuter dans les temps.

La réalisation de l'étude de faisabilité du FCC au CERN, qui faisait partie des recommandations de la mise à jour de la stratégie en 2020, est un autre accomplissement notable. Une conception de référence cohérente pour le programme FCC, accompagnée d'un scénario d'implantation territoriale bien avancé, a été élaborée. La faisabilité technique de collisions électron-positon au FCC a été démontrée et des scénarios de financement plausibles ont été échafaudés.

Des progrès considérables ont également été accomplis dans le domaine de la physique hors collisionneurs. Des expériences menées au CERN et dans d'autres instituts européens ont aussi grandement contribué à l'importante diversité du programme de physique des particules. Le programme neutrino dans son ensemble a enregistré d'importantes avancées en ce qui concerne la détermination de la masse des neutrinos et du mélange leptonique, et la construction de la prochaine génération d'expériences sur les neutrinos utilisant des accélérateurs progresse rapidement. La plateforme neutrino du CERN est un élément central de la participation européenne au programme neutrino longue distance mondial. En particulier, les engagements pris en faveur du projet LBNF/DUNE ont été décisifs et restent une priorité pour le CERN.

D'importants progrès ont été faits concernant la durabilité des infrastructures de recherche en physique des particules et l'atténuation de leur impact sur l'environnement. La réutilisation de l'énergie et la R&D sur des systèmes de refroidissement et des gaz pour détecteurs plus écologiques en sont quelques exemples.



Considérations générales concernant la mise à jour 2026

L'Europe doit au CERN sa position de leader dans le domaine de la physique des particules s'appuyant sur des accélérateurs, et dans celui des technologies associées. L'avenir de la discipline, en Europe et au-delà, repose sur la poursuite de projets scientifiques à fort impact menés par le Laboratoire et la communauté de la physique des particules dans les universités et les centres de recherche.

A. La pleine exploitation du potentiel de physique du LHC et du HL-LHC et la transformation du LHC en machine de haute luminosité restent les priorités absolues de la physique des particules en Europe. Tout doit être fait pour que la mise à niveau du LHC en HL-LHC se fasse selon le calendrier fixé.

Conformément au mandat défini par le Conseil du CERN, l'objectif de la mise à jour 2026 de la stratégie européenne pour la physique des particules est d'élaborer un plan visionnaire et concret qui permette de faire considérablement avancer la connaissance dans le domaine de la physique fondamentale par la réalisation du prochain projet phare du CERN, lequel devra susciter et valoriser la collaboration internationale, et permettre à l'Europe de continuer de jouer un rôle de premier plan dans la discipline. La mise à jour de la stratégie devra indiquer quelle est l'option privilégiée pour le prochain collisionneur au CERN, et hiérarchiser les autres options possibles au cas où la première s'avérerait non réalisable ou non compétitive. Elle devra aussi indiquer des domaines prioritaires pour des approches complémentaires des collisionneurs, pour d'autres expériences susceptibles d'être envisagées au CERN et dans d'autres laboratoires en Europe, ainsi que pour une participation à des projets hors d'Europe.

Le modèle actuel de collaboration entre le CERN et les instituts nationaux, les laboratoires et les universités de ses États membres et États membres associés est essentiel pour l'avenir de la discipline. Le fait qu'un grand nombre d'instituts d'États non-membres participent au programme du CERN et apportent des contributions notables démontre le succès de ce modèle.

B. L'écosystème unique des centres de recherche en physique des particules et des universités en Europe devrait être encore renforcé afin que les objectifs fixés dans cette stratégie soient atteints.

Le vaste éventail de questions fondamentales en physique des particules et la complexité des diverses installations requises pour les traiter, ainsi que la nécessité d'utiliser les ressources de manière efficace, ont conduit à l'émergence d'une communauté mondiale de la physique des particules ayant des intérêts et des objectifs communs. La stratégie européenne pour la physique des particules 2026 prend en compte les programmes de physique riches et complémentaires entrepris par les partenaires de l'Europe partout dans le monde, ainsi que les développements scientifiques et technologiques réalisés dans les disciplines voisines et l'industrie.

C. La mise en œuvre de la stratégie devrait s'effectuer en collaboration étroite avec les partenaires mondiaux et les disciplines voisines.

La communauté de la physique des particules et la Commission européenne ont une solide expérience de collaboration mutuelle.

D. La relation entre la communauté de la physique des particules et la Commission européenne devrait être encore renforcée, afin que soient examinés de possibles financements pour la réalisation de projets d'infrastructures et de programmes de R&D, en coopération avec d'autres domaines de la science et de l'industrie.

3 !

Prochain projet de collisionneur phare au CERN

A. Le futur collisionneur circulaire électron-positon (FCC-ee) est l'option privilégiée recommandée pour le prochain projet de collisionneur phare au CERN.

Le FCC-ee fournirait le programme de haute précision en physique des particules le plus vaste du monde, avec un potentiel de découverte exceptionnel dans les secteurs électrofaible, du Higgs, des saveurs et du quark top, ainsi que des avancées dans le domaine de la chromodynamique quantique. Sa faisabilité technique a été démontrée par une étude de faisabilité complète du FCC, et son périmètre et son coût sont bien définis. Des scénarios de financement plausibles ont également été élaborés, et le calendrier établi permettrait de voir circuler les premiers faisceaux cinq à sept ans après la fin de l'exploitation du LHC à haute luminosité. Le FCC-ee conforterait l'Europe dans son rôle de leader dans le domaine de la physique des particules de haute énergie, ferait progresser la technologie et générerait des retombées sociétales importantes.

Le projet FCC-ee ouvrirait également la voie à un collisionneur d'hadrons qui réutiliserait le tunnel et une grande partie de l'infrastructure, étendant la portée des découvertes bien au-delà des 10 TeV, l'échelle d'énergie des partons, conformément à l'ambition de la communauté de mener des explorations aux énergies les plus élevées possible. L'appui massif de la communauté de la physique des particules des États membres et États membres associés du CERN en faveur du FCC-ee conforte sa position d'option privilégiée.

B. Une machine FCC-ee redimensionnée est l'option de rechange privilégiée pour le prochain projet phare au CERN.

Les scénarios de redimensionnement prévoient notamment la suppression de la campagne de production de quarks top, la construction de deux régions d'interaction et expériences au lieu de quatre et l'abaissement de la puissance du système de radiofréquence (RF). Ces mesures permettraient de réduire le coût de construction d'environ 15 %. Même si ce redimensionnement aurait une incidence notable sur l'étendue du programme de physique et sur le niveau de précision, le FCC-ee redimensionné permettrait toujours d'avoir un programme de physique solide et constituerait une option viable pour atteindre les hautes énergies, contrairement à d'autres options proposées. En outre, ces scénarios de redimensionnement seraient réversibles en cas d'obtention de ressources supplémentaires.

De nombreuses autres options, présentées ci-après par ordre alphabétique, ont également été examinées. Elles sont associées à des programmes de physique d'une précision largement inférieure à celle du projet FCC-ee et ne sont pas compétitives face à un collisionneur tel que le FCC-ee. En outre, en leur état actuel, elles ne permettent pas d'atteindre un niveau d'énergie de 10 TeV. À ce stade, en l'absence de raisons rendant l'option FCC-ee infaisable, les options de rechange ne sont pas classées.

Le CLIC et le LCF, des collisionneurs linéaires exploités à deux niveaux d'énergie et jusqu'à 550 GeV, offriraient des programmes compétitifs pour la physique du Higgs et du quark top. En revanche, leur luminosité est considérablement inférieure à des énergies plus faibles par rapport aux collisionneurs circulaires, ce qui conduirait à une précision limitée dans le domaine de la physique électrofaible, et à des programmes de physique des saveurs non compétitifs. Globalement, le potentiel de recherche en

physique est donc moindre par rapport à celui du FCC-ee. Les deux collisionneurs nécessitent un tunnel d'une longueur d'au maximum un tiers de celle du FCC-ee pour atteindre leur énergie maximale, qui serait respectivement de 1,5 TeV et de 550 GeV. Le passage à des collisions à 10 TeV nécessiterait une accélération par champ de sillage plasma, technologie dont il n'a pas encore été prouvé qu'elle était viable.

Au début, le CLIC serait exploité à 380 GeV. Le coût de construction du collisionneur à 550 GeV est estimé à environ 60 % de celui du FCC-ee, et le coût total du collisionneur à 1,5 TeV serait équivalent à celui du FCC-ee. La technologie du CLIC est bien avancée, mais moins que celle du LCF.

Le LCF, quant à lui, serait dans un premier temps exploité à 250 GeV, et pourrait être poussé jusqu'à 550 GeV. Le coût de construction du collisionneur à 550 GeV serait équivalent à celui du FCC-ee. La technologie du LCF est déjà avancée.

Le LEP3 et le LHeC sont des collisionneurs qui réutiliseraient le tunnel du LHC, offrant un programme de physique intermédiaire moyennant un coût de construction considérablement moins élevé que celui des autres options. Aucune de ces deux machines ne pourrait être considérée, à elle seule, comme un collisionneur phare. Pour permettre la réalisation d'un programme de physique à long terme, elles devraient être complétées par une machine aux frontières des hautes énergies, telle qu'un collisionneur d'hadrons.

Le LEP3, collisionneur électron-positon pouvant être exploité jusqu'à 230 GeV, apporterait des améliorations à la physique du Higgs par rapport au LHC à haute luminosité et permettrait la réalisation de solides programmes de physique électrofaible et des saveurs, mais pas d'une campagne de production de quarks top.

Le LHeC, collisionneur électron-proton qui combinerait un accélérateur linéaire d'électrons à récupération d'énergie et le LHC, offrirait un solide programme de chromodynamique quantique et élargirait considérablement la connaissance de la structure du proton. Cependant, même s'il apporterait des améliorations dans le domaine de la physique du Higgs par rapport au LHC à haute luminosité, son programme global de physique de précision est limité.

En conclusion, l'option privilégiée pour être le futur collisionneur phare du CERN est le FCC-ee, qui offre un programme de physique exceptionnel.

4



Autres pistes de recherche en physique des particules

L'exploration du secteur des neutrinos, la recherche de particules du secteur sombre, les mesures de précision dans le secteur des saveurs et la mise à l'épreuve des symétries fondamentales sont des éléments cruciaux de la physique des particules. D'importants progrès dans ces domaines sont attendus au cours de la prochaine décennie, avec la réalisation d'un vaste programme d'expériences, de petite à grande échelle, grâce à des installations utilisant des accélérateurs, des laboratoires souterrains et d'autres infrastructures spécialisées, et à un travail théorique conséquent.

L'origine de la masse des neutrinos est l'une des questions en suspens les plus importantes en physique des particules. Les expériences longue distance DUNE et Hyper-K, ainsi que d'autres expériences neutrino, seront cruciales pour déterminer les caractéristiques des neutrinos. Les recherches de processus rares, tels que la désintégration des protons et la double désintégration bêta sans émission de neutrino, pourraient apporter des indices d'une nouvelle physique à des énergies très élevées, alors que les études portant sur les interactions des neutrinos élargissent le potentiel de découverte. Il devient de plus en plus important, à l'ère de la cosmologie de haute précision, d'améliorer les mesures de l'échelle des masses absolues du neutrino en laboratoire.

Les indices indirects de la matière noire indiquent depuis longtemps l'existence d'une physique au-delà du Modèle standard. La matière noire pourrait se manifester de différentes manières, d'où l'importance de diversifier les recherches. Les recherches en physique des particules incluent à la fois des expériences avec accélérateur et des expériences hors accélérateur, associées à des détecteurs à bruit de fond faible faisant appel à diverses technologies innovantes. Le complexe de laboratoires souterrains d'excellence en Europe est essentiel à cet égard.

La compétitivité européenne en ce qui concerne la recherche de matière noire et de la double désintégration bêta sans émission de neutrino dépend de manière cruciale de la disponibilité de matériaux rares et spécialisés. Il est important que l'Europe développe sa capacité souveraine à produire de tels matériaux.

- A. Les contributions européennes aux expériences sur les neutrinos et la matière noire avec ou sans accélérateur sont essentielles et devraient être soutenues.
- B. Le CERN devrait continuer d'apporter un appui au programme neutrino longue distance mondial via la plateforme neutrino. La collaboration entre le CERN et les expériences n'utilisant pas d'accélérateur sur des technologies d'intérêt mutuel devrait être poursuivie.

Les tests portant sur les symétries fondamentales sont une manière unique de sonder de potentielles nouvelles dynamiques, en complément des collisionneurs de haute énergie. Les mesures de haute précision des prédictions du Modèle standard et la recherche de moments électriques dipolaires et de processus interdits dans le Modèle standard ont des implications importantes. Elles sont effectuées aussi bien dans des laboratoires universitaires que dans des expériences avec accélérateur. Les laboratoires européens de physique des particules offrent des possibilités uniques de mener des expériences de rang mondial avec des neutrons, des pions, des kaons, des muons, des antiprotons et des isotopes radioactifs, fournissant un environnement fertile pour ces travaux.

- C. L'écosystème des laboratoires européens de physique des particules devrait continuer de soutenir un large éventail d'expériences de précision en physique des particules.

5



Théorie

La physique théorique est un aspect essentiel de la physique des particules, qui fournit les cadres conceptuels, les modèles et les outils de calcul nécessaires pour interpréter les données, découvrir de nouveaux phénomènes et orienter les futures expériences.

- A. L'Europe devrait faire en sorte que la physique des particules théorique reste robuste et diversifiée, à la fois sur le plan formel et sur le plan phénoménologique, tout en renforçant et en exploitant davantage les liens avec les disciplines voisines.

Les décennies à venir seront marquées par le programme LHC à haute luminosité et l'avènement d'une nouvelle installation phare au CERN. Le succès de ces projets dépend très fortement de la réalisation de prédictions théoriques à un niveau de précision inédit. Il repose sur une interaction étroite, dans la phénoménologie des collisionneurs, entre théorie et expérience. Des efforts collaboratifs dans les domaines de la théorie quantique perturbative des champs et des calculs de chromodynamique quantique sur réseau, ainsi que le développement d'outils théoriques pour l'analyse expérimentale, seront essentiels.

- B. Les efforts collaboratifs visant à améliorer la précision des prédictions théoriques devraient être reconnus et soutenus. L'Europe joue un rôle de premier plan au niveau mondial dans ces domaines et devrait s'efforcer de continuer en ce sens en attirant, en encourageant et en fidélisant les jeunes talents du monde entier. Le CERN devrait continuer de faire partie intégrante de cette démarche.

6



Technologies

La science et les technologies à l'appui des accélérateurs, des détecteurs et du calcul, ainsi que des infrastructures connexes, apportent les fondements nécessaires pour répondre aux grandes questions de la physique des particules. Elles sont profondément ancrées dans la communauté internationale de la physique des particules et sont essentielles à la réussite des projets actuels et futurs. Leurs synergies avec les autres domaines de la science et l'industrie sont nombreuses et permettent également des applications aux conséquences sociétales importantes, notamment dans les domaines de la médecine, de l'industrie, de la sécurité et de l'énergie de fusion.

- A. Afin que l'Europe reste à l'avant-garde des technologies pour la physique des particules, la R&D en collaboration avec les partenaires internationaux et l'industrie doit continuer d'être soutenue de manière prioritaire, de façon à renforcer la durabilité et les répercussions sociétales de la discipline.

Science et technologie des accélérateurs

Les accélérateurs de pointe reposent sur des modèles détaillés de physique des faisceaux, des simulations puissantes et des technologies clés telles que les aimants à champ élevé, les systèmes d'accélération RF résistifs ou supraconducteurs à gradient élevé, l'accélération par champ de sillage plasma à gradient élevé, les faisceaux de muons de forte brillance et les linacs à récupération d'énergie. Plusieurs approches technologiques répondent directement à la nécessité d'une plus grande durabilité pour les futures installations avec accélérateur. Il s'agit notamment d'aimants supraconducteurs et de résonateurs exploités à une température cryogénique plus élevée, de liaisons supraconductrices, de l'utilisation d'aimants permanents et de sources de puissance RF plus efficaces, associés à une utilisation accrue de la robotique et de l'intelligence artificielle.

- B. Pour que l'ambitieux plan présenté se concrétise, la priorité absolue doit être la mise au point et l'industrialisation de technologies clés : structures RF supraconductrices ou résistives de pointe, sources de puissance RF efficaces et aimants de qualité accélérateur ayant un champ compris entre 14 et 20 T, y compris ceux reposant sur des supraconducteurs à haute température critique.
- C. La démonstration de la récupération d'énergie multi-tours à haute intensité dans des linacs constitue un grand pas vers des accélérateurs de leptons à haut rendement énergétique utilisables dans un vaste éventail d'applications, et ce travail devrait être poursuivi.
- D. Le développement de technologies de pointe à plus long terme, telles que l'accélération par champ de sillage à gradient élevé et d'autres technologies à l'appui des faisceaux de muons de forte brillance, devrait bénéficier d'un soutien adapté. Il conviendrait de tirer parti des synergies avec l'initiative de R&D sur les collisionneurs de muons (États-Unis).

Développement de détecteurs

La R&D sur les détecteurs est essentielle à la réalisation de futurs programmes de recherches expérimentales. Ce travail est renforcé par les collaborations pour la R&D sur les détecteurs, qui ont récemment été mises en place conformément à la feuille de route de l'ECFA concernant la R&D sur les détecteurs, à la suite de la mise à jour 2020 de la stratégie. Cette feuille de route présentait dix recommandations stratégiques générales, parmi lesquelles l'apport d'un appui durable aux installations de R&D, telles que les installations de tests avec faisceaux et d'irradiation, tout en promouvant les activités de R&D décentralisées et la science ouverte et en conservant l'appui à l'ingénierie et les investissements dans la R&D pure.

- E. Pour que les collaborations pour la R&D sur les détecteurs puissent répondre aux exigences des projets phares futurs, elles doivent bénéficier de financements adéquats. De nouveaux domaines et initiatives de R&D devraient être intégrés au système de collaborations pour la R&D sur les détecteurs. Les recommandations stratégiques générales de la feuille de route doivent être pleinement mises en œuvre dans le cadre d'initiatives spécifiques coordonnées entre les collaborations pour la R&D sur les détecteurs.
- F. Une approche cohérente et stratégique et des ressources suffisantes pour soutenir une coopération étroite avec l'industrie sont nécessaires pour faire face à l'augmentation des coûts et à la complexité croissante de l'ingénierie, en particulier de la microélectronique.
- G. Pour gagner en efficacité et faire en sorte que les évolutions suivent les tendances technologiques mondiales dans d'autres domaines, priorité devrait être donnée, lorsque cela est possible, aux solutions normalisées et génériques plutôt qu'aux conceptions sur mesure.

Calcul

Le système de calcul pour la physique des particules a largement surpassé sa conception initiale, permettant des flux puissants et une importante réduction des ressources, grâce à un investissement technologique et humain soutenu. Les besoins en calcul peuvent être modélisés sur 50 ans, bien que les défis futurs ne puissent être anticipés uniquement sur la base d'une augmentation des volumes, les contraintes économiques devant également être prises en compte. Alors que la physique des particules et les disciplines connexes deviennent plus complexes et que les initiatives mondiales s'élargissent, celles-ci doivent nécessairement collaborer pour que leur réussite soit durable.

Les principaux domaines de R&D sont l'utilisation optimale des processeurs graphiques (GPU), les dispositifs logiques programmables (FPGA), l'intelligence artificielle (IA) et les technologies émergentes, telles que l'informatique quantique.

L'exploitation continue de la Grille de calcul mondiale pour le LHC (WLCG) sera cruciale pour le LHC à haute luminosité et les futures expériences. La Grille de calcul mondiale pour le LHC doit s'adapter aux évolutions technologiques tout en garantissant des synergies avec les initiatives mondiales similaires.



Mise en œuvre de projets, coopération avec de grands laboratoires de physique des particules en Europe

- H. Un soutien adapté et continu aux logiciels et au calcul et la coordination de ceux-ci doivent être assurés pour que les objectifs des projets de physique des particules, à commencer par le LHC à haute luminosité, puissent être atteints. La planification des futurs projets devrait englober dès le départ les aspects liés au calcul et aux logiciels, en tenant compte de l'efficacité énergétique et de la durabilité.
- I. Afin de répondre aux besoins théoriques et expérimentaux, tels que ceux liés à la CDQ sur réseau, aux flux de travail utilisant de grandes quantités de données via la Grille de calcul mondiale pour le LHC, ainsi qu'à la préservation et la réinterprétation des données sur le long terme, la communauté de la physique des particules devrait davantage s'engager et contribuer à modérer l'évolution de l'entreprise commune EuroHPC, des usines d'IA et d'autres initiatives mondiales.

L'IA est une technologie révolutionnaire qui joue déjà un rôle crucial dans le domaine de la physique des particules, laquelle contribue de son côté à faire évoluer l'IA grâce à ses compétences spécifiques.

- J. La communauté européenne de la physique des particules doit intensifier ses activités liées à l'IA et y consacrer des ressources adéquates. Une feuille de route, coordonnée conjointement par le CERN et des laboratoires, instituts et universités nationaux, devrait être élaborée afin d'établir des priorités entre les activités liées à l'IA, en tenant compte des synergies avec les partenaires internationaux et les autres communautés.

Transfert de connaissances et de technologies

Les technologies mises au point en physique des particules ont un vaste potentiel d'applications à fort impact pour la société. Inversement, la physique des particules bénéficie à la fois des innovations et des progrès réalisés dans d'autres domaines de la science et dans l'industrie (transfert de connaissances et de technologies bidirectionnel).

Pour favoriser une culture du transfert de connaissances et de technologies, il est important de sensibiliser davantage aux méthodes et outils associés à travers l'éducation, la formation et la recherche. Le transfert de connaissances et de technologies relève de la responsabilité de toutes les parties qui contribuent à la physique des particules et doit être reconnu.

Ensemble, le CERN, des instituts de recherche et des universités ont créé des infrastructures, des instruments et des réseaux pour soutenir le transfert de connaissances et de technologies à différents niveaux ; ceux-ci constituent une base solide pour le transfert de connaissances et de technologies en physique des particules. Les solutions de transfert de connaissances et de technologies existantes doivent être adaptées, développées et documentées, afin de répondre aux besoins des projets de physique des particules. La discipline tirerait profit de l'existence d'un dépôt centralisé qui contiendrait les solutions actuelles en matière de transfert de connaissances et de technologies, des exemples de bonnes pratiques et d'autres paramètres et études.

- K. La communauté de la physique des particules devrait renforcer le transfert de connaissances et de technologies en tant que pilier de la recherche fondamentale lui permettant d'avoir un impact sur la société. Les concepts de transfert de connaissances et de technologies bidirectionnel et leur mise en œuvre devraient faire partie intégrante de tout projet de physique des particules, y compris des collaborations pour la R&D.

La collaboration entre le CERN et d'autres laboratoires de physique des particules est essentielle pour optimiser la mise en œuvre de la stratégie. Ces laboratoires qui, grâce à l'appui du CERN, obtiennent des ressources nationales, bénéficient d'une main d'œuvre qualifiée qui peut apporter des contributions d'un bon rapport coût-efficacité. Les activités des laboratoires de physique des particules liées aux développements technologiques alimentent des synergies interdisciplinaires, optimisant ainsi l'impact de l'Europe.

- A. Le prochain collisionneur phare du CERN devrait être mis au point sous la direction du Laboratoire, avec des contributions en nature coordonnées des laboratoires de physique des particules. La collaboration entre le CERN et d'autres laboratoires de physique des particules sur des développements technologiques stratégiques devrait être renforcée.

Une vaste exploration reposant sur le succès de l'initiative du CERN « Physique au-delà des collisionneurs » est nécessaire pour élaborer une vision européenne commune qui soutienne la diversité scientifique dans le domaine de la physique des particules, en promouvant la mise en commun des technologies, des infrastructures et des compétences.

- B. Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules devrait étudier la possibilité de lancer une nouvelle initiative qui favoriserait et renforcerait la mise en œuvre et la promotion de la diversité scientifique en physique des particules, autour d'une vision européenne commune.

Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules devrait d'abord réaliser une étude à l'échelle de la communauté concernant les capacités des installations, des projets et du personnel existants en Europe. Cette étude devrait couvrir la recherche en physique des particules en Europe au-delà du collisionneur phare du CERN, notamment les activités menées dans les laboratoires de physique des particules dans des disciplines voisines qui soutiennent la mise en œuvre de la stratégie pour la physique des particules.

L'Europe mène une politique de R&D sur les accélérateurs de premier plan, axée sur la mise au point de technologies pour la prochaine génération d'accélérateurs de particules.

- C. Le Groupe des directeurs de grands laboratoires de physique des particules doit poursuivre la coordination de la feuille de route pour la R&D sur les accélérateurs en intégrant des priorités stratégiques, en renforçant la collaboration entre les différents laboratoires de physique des particules et le CERN et en optimisant l'utilisation des ressources des laboratoires. En outre, les efforts de R&D visant à améliorer la durabilité et l'efficacité énergétique des accélérateurs à chaque étape de leur cycle de vie, de leur conception à leur mise hors service, devraient être soutenus.

8



Synergies avec les disciplines voisines

De précieuses synergies existent entre la physique des particules et les disciplines voisines que sont la physique nucléaire et l'astrophysique des particules.

De nombreux axes de recherche en physique nucléaire sont importants pour la physique des particules et dépassent souvent la frontière de la physique des hautes énergies. Les collisions d'ions lourds fournissent des informations uniques, essentielles pour comprendre les interactions fortes dans des conditions extrêmes. Les expériences neutrino nécessitent une bonne compréhension des effets nucléaires. Il existe un fort potentiel de progression de la recherche sur les symétries fondamentales et la physique au-delà du Modèle standard grâce à des expériences de physique nucléaire ultrasensibles.

L'astrophysique des particules et la cosmologie sont des partenaires clés de la physique des particules pour l'exploration de la physique fondamentale. L'astronomie multimessager, associée à des observations coordonnées de photons, de rayons cosmiques, de neutrinos et d'ondes gravitationnelles, donne une vision globale de l'Univers et de son évolution. Les ondes gravitationnelles fournissent également de précieuses informations sur les étoiles à neutrons. La prochaine génération d'instruments, allant des télescopes à neutrinos de grande échelle aux observatoires du fond cosmologique diffus et des ondes gravitationnelles, produira une multitude de résultats susceptibles de faire avancer considérablement la physique des particules, notamment en ce qui concerne la détermination de la masse des neutrinos, les tests de symétries fondamentales, l'observation indirecte de la matière noire et d'autres particules fossiles, et la nature de l'énergie sombre.

Le renforcement de la collaboration entre la physique des particules, la physique nucléaire, l'astrophysique et la cosmologie, associé à la mise en commun de développements technologiques et de l'interprétation théorique, sera crucial pour libérer le plein potentiel de ces initiatives. Les laboratoires européens sont à la pointe de la recherche dans ces domaines. L'Europe devrait continuer d'apporter un vigoureux soutien à ces activités, le CERN jouant un rôle central.

Le CERN mène un passionnant programme de recherche expérimentale en physique nucléaire. Les données découlant de ses expériences jouent un rôle essentiel dans l'interprétation des observations cosmiques. Le Laboratoire fournit également un appui aux initiatives d'astrophysique des particules à travers son programme d'expériences reconnues, ainsi que par l'intermédiaire de l'initiative EuCAPT pour la théorie.

- A. La communauté européenne de la physique des particules, en coordination avec l'APPEC et le NuPECC, devrait maintenir sa diversité scientifique à travers une collaboration étroite avec des laboratoires et infrastructures de recherche dans les domaines de la physique nucléaire et de l'astrophysique des particules en Europe et ailleurs, notamment avec le télescope Einstein en Europe et le collisionneur électron-ion aux États-Unis.
- B. Le CERN devrait maintenir son niveau actuel de participation aux expériences de physique nucléaire et d'astrophysique des particules. Des activités d'expérimentation supplémentaires au-delà des programmes de physique des particules avec accélérateur du CERN ne devraient être envisagées que si des ressources suffisantes permettent de couvrir la mission première du Laboratoire.

9



Durabilité et impact environnemental

Les préoccupations environnementales, en particulier celles liées au changement climatique, orientent les efforts de la communauté pour réduire l'impact environnemental de la recherche en physique des particules et mettre au point des solutions durables, susceptibles de profiter aussi à la société. L'évaluation et l'atténuation de l'impact environnemental sont importantes, que ce soit au niveau institutionnel, au niveau du projet ou au niveau individuel.

La consommation d'énergie et les émissions doivent être réduites le plus possible lors de la création et de l'exploitation des installations et des projets. Une telle démarche nécessite de mettre en œuvre des stratégies de durabilité, dont bon nombre peuvent être coordonnées entre les laboratoires de physique des particules, de protéger l'environnement, de préserver la biodiversité locale, de réutiliser l'énergie et de faire preuve de résilience face au changement climatique.

- A. Pour les nouveaux projets proposés, une évaluation détaillée du cycle de vie devrait être réalisée à chaque étape, de l'idée première à la conception et à la mise en œuvre, afin de quantifier et de limiter le plus possible l'impact environnemental.
 - B. La communauté de la physique des particules devrait poursuivre et intensifier ses efforts pour mettre au point et adopter des solutions durables.
- La communication et la collaboration sont au cœur de la vie scientifique et de la productivité de la communauté de la physique des particules, mais elles doivent être mises en balance avec les conséquences environnementales.
- C. Un équilibre réel entre les réunions en présentiel et en distanciel devrait être envisagé afin d'atténuer l'impact environnemental des déplacements fortement émetteurs de carbone.



Dialogue avec le public, éducation, communication et aspects socioprofessionnels

L'éducation inclusive, la communication et le dialogue sont essentiels pour renforcer la confiance du public envers la science et ses méthodes, favoriser la pensée critique et lutter contre la désinformation. Ces activités sont également cruciales pour inciter les futures générations à faire carrière dans la physique des particules et renforcer l'intérêt du public. Le Réseau de communication de la physique des particules en Europe (EPPCN), le Groupe international de communication grand public sur la physique des particules (IPPOG) et le Forum sur les programmes destinés aux enseignants et aux étudiants ont joué un rôle très important à cet égard.

- A. L'éducation, la communication et le dialogue dans le domaine de la physique des particules devraient cibler un vaste éventail de parties prenantes, et des efforts spécifiques devraient être déployés pour toucher des publics divers et sous-représentés.

Ces activités devraient mettre en lumière les avantages sociétaux et économiques des futurs collisionneurs et des innovations technologiques mises au point pour les rendre plus durables, ainsi que l'importance d'une collaboration internationale inclusive.

- B. Les institutions européennes et le CERN devraient encourager, intégrer et soutenir davantage les nombreuses initiatives en matière d'éducation, de sensibilisation et de communication grand public menées au sein des différentes communautés nationales d'Europe, de l'EPPCN, de l'IPPOG et du Forum sur les programmes destinés aux enseignants et aux étudiants.

Pour assurer l'avenir de la discipline, il est nécessaire de former la future génération de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens qui travailleront sur les accélérateurs, les systèmes de calcul et l'instrumentation pour détecteurs. Il est également important de veiller à ce que les spécialistes de ces domaines restent en place pendant toute la durée des projets de physique des particules.

- C. Les programmes européens de formation spécialisée dans les domaines de la science des accélérateurs, des systèmes de calcul et de l'instrumentation pour détecteurs devraient être développés davantage, notamment en ce qui concerne la durabilité et l'exposition directe aux nouvelles technologies, pour les niveaux master et doctorat. Les écoles internationales existantes dans ces domaines devraient bénéficier d'un appui afin de proposer un programme de formation élargi et cohérent.
- D. La communauté devrait promouvoir activement la création de postes à long terme pour des ingénieurs et des techniciens, ainsi que pour des physiciens ayant des compétences technologiques dans les domaines des accélérateurs, des détecteurs et des systèmes de calcul. Les transferts de connaissances bidirectionnels devraient également être encouragés à travers la mobilité entre l'industrie et l'université.

Pour aborder les questions fondamentales de la physique des particules et, en particulier, accomplir le travail qui rendra possibles le prochain projet de collisionneur phare du CERN et ses expériences, il est

nécessaire de recruter et de fidéliser les jeunes talents les plus brillants. Cela suppose d'instaurer un environnement de travail favorable, respectueux et motivant pour les jeunes chercheurs.

- E. La communauté de la physique des particules devrait continuer indéfectiblement à mettre les principes d'égalité, de diversité et d'inclusion au cœur de toutes ses activités.

Pour cela, les institutions doivent apporter un appui constant aux programmes d'égalité, de diversité et d'inclusion et aux bureaux chargés de ces programmes, et accueillir des membres de la communauté ayant des compétences diverses.

- F. Les actuels efforts de mentorat, de facilitation de la mobilité entre institutions et de promotion du bien-être des chercheurs en début de carrière devraient être renforcés. Outre les accomplissements scientifiques, l'évaluation professionnelle devrait également tenir compte des activités menées dans les domaines de la technologie, de la communication grand public et du transfert de connaissances.



<https://europeanstrategy.cern>

Réalisation éditoriale et graphique :
Groupe Éducation, communication et activités grand public du CERN

CERN-ESU-2025-002

ISBN:978-92-9083-726-8 (version papier)

978-92-9083-727-5 (version électronique)

DOI: <http://dx.doi.org/10.17181/CERN.423R.S20Z>

Copyright © CERN 2026

CC-BY-4.0