

La physique des particules auprès des accélérateurs est caractérisée par un mode de fonctionnement reposant sur des collaborations internationales, et des programmes scientifiques fondés sur des questionnements évoluant sur un temps long, typiquement de l'ordre de la dizaine d'années. De ce fait, les prospectives pour le DPhP s'inscrivent nécessairement dans les orientations définies au niveau international, orientations à la définition desquelles les physiciens du département participent d'ailleurs.

Au cours des quelques années qui viennent, la machine d'où viendront l'essentiel des résultats devrait être le LHC. Rappelons que la luminosité instantanée maximale actuelle de ce collisionneur proton-proton est de l'ordre de $2.10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Les expériences accumulent actuellement de l'ordre de 40 à 50 fb^{-1} par an. Il est prévu, après un arrêt de deux ans à partir de fin 2018, d'accroître la luminosité d'un facteur deux à trois et d'accumuler 150 fb^{-1} pour chaque année de prise de données entre 2021 et 2023. Ensuite, après un nouvel arrêt qui s'accompagnera d'améliorations et de modifications majeures sur les détecteurs, la luminosité intégrée annuelle atteindra environ 300 fb^{-1} .

Après la découverte d'un type de boson de Higgs en 2012, il s'agit avant tout d'étudier ses propriétés du mieux possible, ce qui ne pourra être fait qu'au LHC dans le futur proche. S'il n'est pas apparu pour le moment de déviation par rapport aux propriétés attendues d'un boson de Higgs du Modèle Standard, il faut dans la mesure du possible aller vers des mesures de précision des couplages du boson de Higgs aux autres particules, et étudier le plus précisément possible la dépendance de ces couplages avec la masse de ces particules. La machine qui sera en position le plus rapidement d'apporter des informations sur ce point crucial de la théorie est le LHC. La précision accessible au LHC sera toutefois limitée à quelques pour-cents, voire une dizaine de pour-cents pour les couplages les plus difficiles à mesurer.

Le boson de Higgs a par ailleurs pour rôle de régulariser la diffusion WW. Il faudra s'assurer de ce rôle par la mesure précise des caractéristiques de la diffusion de bosons vecteurs. Etant donné la faiblesse des sections efficaces en jeu, cela ne pourra être fait avec la précision requise qu'avec les luminosités intégrées de plusieurs centaines de fb^{-1} qui ne seront atteintes au LHC qu'en 2025 et au-delà.

Par ailleurs, le Modèle Standard n'est pas une théorie sans zones d'ombre. Bien des propriétés des interactions et particules connues ne trouvent pas d'explication naturelle dans le cadre du Modèle Standard. Ainsi, il n'y a aucune explication à l'existence de trois familles de particules, aux importantes différences d'échelle entre les masses des particules (moins d'un eV pour les neutrinos jusqu'à 173 GeV pour le quark top). Le Modèle Standard possède nombre de paramètres libres qui ne peuvent être fixés que par l'expérience (17), ce qui donne à penser qu'il ne s'agit que d'une théorie effective de basse énergie, découlant d'une théorie plus fondamentale restant encore à mettre en évidence. Enfin, si l'existence de la matière noire et de l'énergie noire semble difficilement contestable au vu des mesures astrophysiques et cosmologiques, il n'y a à l'heure actuelle dans le Modèle Standard aucune particule susceptible de constituer la matière noire. Des extensions du Modèle Standard au sein desquelles apparaissent des particules candidates existent, mais doivent être testées expérimentalement.

Si l'on a de bonnes raisons de penser, au vu des résultats actuels du LHC, qu'il n'y a pas de nouvelle physique accessible directement à l'échelle du TeV, les questions ouvertes mentionnées ici ne peuvent être attaquées que par une nouvelle montée en énergie, ou par des mesures de précision.

L'exploration des échelles d'énergie les plus élevées peut en effet se mener de deux manières :

-La manière la plus directe est de construire un nouvel accélérateur disposant de l'énergie dans le centre de masse la plus élevée possible. C'est la voie poursuivie par le projet FCC-hh. Il s'agit d'un projet piloté par le CERN, consistant en un collisionneur proton-proton de 97 km de circonférence, devant fonctionner à une énergie de l'ordre de 100 TeV dans le centre de masse, avec des aimants dipolaires de 16T. Les premières prises de données de cette machine pourraient avoir lieu vers 2040-2045 (si la construction débutait vers 2025). Un Conceptual Design Report est en cours de préparation, et devrait être finalisé fin 2018, pour être pris en compte lors de la mise à jour de la stratégie européenne en physique des particules, pilotée par le CERN. La conception des détecteurs s'appuiera largement sur l'expérience

acquise avec les détecteurs LHC, dans la mesure où l'environnement expérimental présentera les mêmes difficultés : fort taux d'empilement des collisions (jusqu'à 1000 interactions par croisement), et fort taux d'irradiation. Le coût estimé pour le tunnel est de 5 milliards de \$. Les estimations ont été menées par des cabinets de conseil habitués à gérer ce genre de projet, et sont a priori fiables. Le coût total d'une telle machine proton-proton serait de 15 à 20 milliards de \$. La difficulté principale est la maîtrise de la technologie des aimants Nb₃Sn. Il n'y aura pas de décision sur la construction avant 2025.

Dans le cas où le coût de production des aimants à 16T est maîtrisé dans les années à venir, il est aussi possible que le projet d'un « HE-LHC » à 27 TeV soit reconsidéré pour une mise en œuvre qui n'attendrait pas la fin des runs HL-LHC prévue pour 2035-2037. On pourrait alors imaginer un arrêt prématuré du HL-LHC vers 2030, une phase de d'installation des nouveaux aimants dipolaires pendant les 5 années suivantes et le démarrage de la prise de donnée à haute énergie vers 2036. Le coût de l'opération, qui dépend essentiellement du coût des aimants Nb₃Sn, mais qui devrait avoisiner les 3 G€, resterait largement en dessous de celui du FCC-hh et pourrait même se faire à budget CERN constant. La motivation de physique pourrait venir de certaines mesures marginalement accessibles au HL-LHC (comme par exemple le self-couplage du Higgs) et qui pourraient devenir possibles en doublant l'énergie dans le centre de masse.

-Une manière plus indirecte d'explorer les échelles d'énergie les plus élevées est d'observer l'effet d'une nouvelle physique éventuelle par des déviations dans les mesures d'observables calculables avec précision dans le cadre du Modèle Standard. Quand bien même ce type de mesure sera effectué tout d'abord en collisions proton-proton au LHC, cette stratégie est tout particulièrement réalisable avec des collisions e⁺e⁻, dont l'état initial bien connu permet, contrairement aux collisions hadron-hadron, des mesures de haute précision.

Le projet ILC réunit de longue date une collaboration internationale autour de cette approche et autour d'un collisionneur linéaire e⁺/e⁻, qui serait basé au Japon près de Morioka. Il est prévu à l'heure actuelle une construction par étapes, ce qui peut permettre de lancer rapidement la construction. Dans l'optique d'une exécution rapide du projet ILC, la communauté japonaise a lancé un plan d'action KEK-ILC, et l'Europe, par la collaboration de R&D accélérateur E-JADE, a répondu par la mise sur pied d'un plan d'action européen, organisé par le CERN. Celui-ci capitalise sur la base du laser à électrons libres X-FEL récemment démarré à Hambourg.

D'ici la fin de l'année 2017, le gouvernement japonais devrait avoir en main tous les éléments pour prendre sa décision, qui n'interviendra pas avant la fin 2018, juste avant la phase 1 des upgrades du LHC. A partir du moment où la décision de construction aura été prise, commencera une phase de préparation (~2019-2022) pour le partage des responsabilités et du financement entre régions et instituts. La construction d'une machine à 250 GeV pourrait commencer vers 2023 et durer au moins 6 ans. L'existence d'un recouvrement entre les périodes de fonctionnement du HL-LHC et de l'ILC est possible et extrêmement souhaitable. Le coût d'une telle machine est estimé autour de 5 G€.

Si le Japon décide la construction de cette machine, il faudra se poser la question d'y participer, dans la mesure où il y a au sein du DPhP une communauté intéressée par ce type de physique. L'Irfu est déjà bien positionné dans le projet et dans le détecteur ILD, par ses R&D (TPC, MAPs) et par ses contributions à l'étude du potentiel de physique (dimensions supplémentaires, autocouplage du Higgs, matière noire).

Un autre projet, circulaire celui-là, est l'étape e⁺/e⁻ du projet FCC-hh. Cette étape FCC-ee, qui pose moins de problèmes techniques que la phase pp, pourrait intervenir vers 2035. Pour un coût du même ordre de grandeur que celui de l'ILC (mais avec plus d'inconnues vu le moindre niveau de détails du design study), il serait possible de faire la même physique mais avec plus de luminosité (facteur ~×10 à 250 GeV et ~×2 à 350 GeV) et avec plus d'un détecteur. En revanche, il ne serait pas possible de monter l'énergie au-delà de 350 GeV.

La Chine étudie le même type de projet. Un tunnel en Chine est pour le moment potentiellement moins cher à construire que l'équivalent en Europe et technologiquement sans problème, une machine e^+/e^- similaire à FCC-ee (et à terme à FCC-hh) en Chine est donc aussi envisageable. Cette machine pourrait prendre des données aux alentours de 2030.

Que ce soit pour ILC ou FCC-ee, si les techniques de détection sont connues (détecteurs gazeux et silicium), la réalisation pratique sera délicate, étant donné la haute granularité nécessaire, ainsi que la stabilité en temps demandée aux détecteurs pour assurer des mesures de précision sur un échantillon à la statistique inégale.

En parallèle de ces projets relevant strictement des thématiques du DPhP, il peut exister au sein d'autres départements des projets susceptibles d'attirer des physiciens du département. C'est le cas par exemple du projet EIC (Electron-Ion Collider), dont les thématiques relèvent plutôt du DPhN, mais qui peut effectuer des mesures importantes sur la structure du proton, et utiles à la compréhension de l'interaction forte aux énergies ultimes.

L'EIC a pour ambition de réaliser des collisions entre un faisceau d'électrons d'impulsion de 20 à 30 GeV/c contre un faisceau d'ions de 100 à 150 GeV/c par nucléon. Le faisceau d'ions peut faire intervenir des ions légers comme le Deutérium aux plus lourds comme le plomb. Le faisceau peut aussi être simplement un faisceau de protons. De plus, et c'est une condition très importante de l'EIC, tant le faisceau d'électrons que d'ions peuvent être polarisés à 70 % avec une luminosité instantanée environ 1000 fois celle du collisionneur HERA, soit $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Le domaine cinématique que recouvre un tel collisionneur est proche de celui de HERA mais avec l'avantage que les faisceaux étant polarisés, il est possible d'étudier le contenu en spin (et moments orbitaux) des noyaux et nucléons, qui sont mal connus dans ce domaine cinématique. D'autre part, l'étude des effets nucléaires qui modifient les densités partoniques est également un sujet ouvert accessible à l'EIC. Il y a deux options : (1) construire un faisceau d'ions au Jefferson Lab ou (2) construire un faisceau d'électrons au RHIC. La décision doit être prise prochainement (avant 2020) pour une construction entre 2022 et 2025. La communauté autour de l'EIC compte 650 personnes, pour 142 instituts dans 27 pays.

Pour les dix prochaines années, le LHC, progressivement amélioré sera la machine dont sortiront a priori le plus de résultats et d'avancées nouvelles. De ce point de vue, il est essentiel pour l'Irfu de se positionner de manière visible avant tout dans les améliorations des détecteurs actuellement envisagés. Il est clair par ailleurs que les perspectives du DPhP s'inscrivent dans les stratégies définies au niveau européen et mondial sur la physique des particules. A plus long terme, au-delà du LHC il faudra donc voir quel(s) projet(s) va/vont émerger et se tenir prêt, car il existe au sein de l'Irfu des groupes de physiciens actifs et intéressés sur tous les projets mentionnés.

A très long terme, au-delà des projets concrets en cours d'étude à l'heure actuelle, se pose aussi la question de l'émergence d'idées et de technologies nouvelles dans notre domaine, en particulier en termes de techniques d'accélération, qui représentent un thème de recherche en soi, dans lequel il peut y avoir un intérêt pour les physiciens du DPhP à s'impliquer.