

## Synthèse de la journée de prospectives du DPhP du 16 octobre 2017

Rédigée par le conseil scientifique interne du département : G. Hamel de Monchenault (chef du DPhP), G. Vasseur (adjoint au chef du DPhP), S. Bolognesi, F. Couderc, J.F. Glicenstein, J.F. Laporte, J. Malclès, D. Yvon (président), E. Armengaud (secrétaire).

Les réflexions ont été organisées en amont par des groupes autour d'un certain nombre de thématiques, listées ci-dessous :

- Physique aux futurs collisionneurs (Philippe Schwemling)
- Physique de la saveur (Fabrice Couderc)
- Neutrinos : oscillations, violation de CP, hiérarchie des masses (Sandrine Emery)
- Neutrinos : au-delà de PMNS, recherches de stériles (Matthieu Vivier)
- Neutrinos : désintégration double-béta (Federico Ferri)
- Expériences avec l'antimatière (Pauline Comini)
- Ondes gravitationnelles, approche multi-messagers, astronomie gamma et neutrino (Fabian Schussler, Emmanuel Moulin)
- Recherche directe de matière noire, axions (Pierre Brun)
- Cosmologie (Jean-Baptiste Melin)
- Energie, santé, applications sociétales (Slava Sharyy)
- Autres sujets (Sotiris Loucatos, Marc Besançon)

Les résultats des réflexions de chaque groupe ont été portés par écrit dans de courts documents, et présentés au cours de la journée du 16 octobre. Le présent document constitue une synthèse de ces réflexions et des discussions qui ont eu lieu.

### **Physique aux collisionneurs et saveurs lourdes**

Le modèle standard de la physique des particules est maintenant une théorie bien établie, après la découverte du boson de Higgs au LHC en 2012. Les expériences sur collisionneurs ont désormais deux objectifs principaux.

- Afin de tester la cohérence du modèle standard (MS) dans le secteur de la brisure électrofaible, il faut étudier au mieux les propriétés du boson de Higgs, en mesurant avec précision ses couplages, et étudier les caractéristiques de la diffusion des bosons vecteurs.

- De nombreux questionnements subsistent autour du modèle standard : structure de jauge, naturalité du boson de Higgs, secteur de Yukawa, violation de CP et de la saveur, grand nombre de paramètres libres... D'autres questions sont soulevées par les observations cosmologiques (e.g. matière noire, baryogénèse, inflation). Cela motive la recherche d'une nouvelle physique. Celle-ci pourra être explorée d'une part par une montée en énergie des collisionneurs  $e^+e^-$  ou hadroniques (ppbar/pp) et d'autre part par des mesures de précision des différents paramètres du MS.

Pour parvenir à ces objectifs, les principaux programmes suivants ont été évoqués :

- Le LHC puis HL-LHC (LHC haute luminosité) est le programme majeur dans lequel est engagé le département, jusqu'au-delà de 2030. Il permettra en particulier d'étudier les couplages du boson de Higgs avec une précision allant de quelques à une dizaine de pourcents.
- Pour explorer des échelles d'énergie jusqu'à de l'ordre de 100 TeV, le CERN pilote le projet FCC-hh, un collisionneur circulaire de 97 km de circonférence, avec des aimants dipolaires de 16 T. Si un CDR ("conceptual design report") est attendu pour 2018, aucune décision sur la construction ne sera prise avant 2025.
- Le projet HE-LHC (LHC haute énergie), un collisionneur pp dans le tunnel du LEP/LHC, atteindrait 27 TeV en augmentant la puissance des aimants du LHC de 8 à 16 T. Ce projet pourrait être considéré si la réalisation et le coût de production d'aimants à 16 T sont maîtrisés à court terme. Ce programme, d'un coût bien inférieur au FCC-hh, pourrait se faire plus rapidement. Il permettrait certaines mesures difficiles au HL-LHC, comme l'auto-couplage du boson de Higgs, et doublerait l'espace de phase explorable.
- Le projet de collisionneur  $e^+e^-$  ILC permettrait d'étudier le boson de Higgs avec précision dans un environnement plus propre que celui des collisionneurs hadroniques. Pour lancer le projet une première phase à 250 GeV est proposée, le potentiel de physique total n'étant accessible qu'avec le programme complet (comportant au moins une phase à 350 GeV puis potentiellement à 500 GeV). Cette infrastructure serait hébergée au Japon, et sa mise en service pourrait avoir lieu vers 2030 si le financement est décidé.
- Dans le cadre du FCC-hh, une première phase, nommée FCC-ee où le tunnel du FCC hébergerait un collisionneur leptonique, pourrait développer un programme de physique similaire à l'ILC dès 2035, avec plus de luminosité mais une énergie maximale plus basse (limitée à 350 GeV).

Le (HL-)LHC est l'unique collisionneur à la "frontière en énergie" dont le développement soit garanti, et le seul en exploitation à court et moyen terme. Il est donc essentiel de rester visible en particulier dans les améliorations des détecteurs actuellement envisagées. L'impact scientifique anticipé du HL-LHC n'est néanmoins pas du même poids que celui du LHC initial.

Au-delà du LHC, il faut voir quels projets vont émerger et se tenir prêt, en particulier en contribuant à la stratégie européenne. Il existe au sein du département des groupes de physiciens actifs et intéressés sur les projets mentionnés.

Mentionnons aussi, dans le cadre thématique de l'interaction forte, le projet de collisionneur électron-ions EIC aux Etats-Unis dans lequel le DPhN est déjà engagé.

Enfin, la physique des saveurs et la violation de CP dans le secteur hadronique permettent également de sonder les hautes échelles en énergie, à travers l'étude de désintégrations rares des kaons et des hadrons beaux et charmés.

Dans le secteur des K, afin d'élucider le désaccord entre la mesure et la prédiction du rapport  $\epsilon'/\epsilon$ , une nouvelle stratégie est déployée. Il s'agit d'étudier les désintégrations  $K \rightarrow \pi \nu \nu$ , dont les prédictions des rapports de branchement sont robustes et peu entachées par les incertitudes QCD. Elles constituent le but principal d'un certain nombre d'expériences en cours ou projetées. L'expérience NA62, en cours au CERN, vise à court terme à mesurer  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  avec 10% de précision. L'expérience KOTO à J-PARC vise, elle, une première mesure de  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  vers 2021, une deuxième phase plus lointaine devant permettre d'atteindre une précision de l'ordre de 10% dans ce canal. Le projet KLEVER, qui pourrait être conduit au SPS du CERN durant le Run 4 (2026-2029), vise le même but de physique.

L'étude des hadrons b est actuellement dominée par LHCb, qui a livré de nombreux résultats comme la mesure des désintégrations  $B_{s/d} \rightarrow \mu \mu$ , compatible avec le MS, et l'observation d'un certain nombre d'anomalies, par exemple dans les modes de désintégration  $b \rightarrow s ll$ . L'expérience Belle-II auprès du nouveau collisionneur SuperKEKB, qui a vu ses premiers faisceaux en 2016, devrait collecter 50/ab d'ici 2025. Elle sera complémentaire de LHCb, avec un environnement plus "propre" et une luminosité 40 fois plus importante que celle de Belle. Enfin, l'exploitation du FCC-ee au pôle du Z ( $\rightarrow b\bar{b}$ ), avec sa très haute luminosité, permettrait aussi d'étudier cette physique.

La physique des saveurs dans le secteur des hadrons n'est plus couverte au sein du DPhP depuis plusieurs années. Le projet KLEVER sera présenté au SPSC en 2018 et constitue une opportunité possible pour le DPhP. Surtout, une participation à l'expérience Belle-II pourrait être envisagée dans un contexte où des groupes de l'IN2P3 ont rejoint ce projet.

## Physique des neutrinos

La connaissance des propriétés des neutrinos a connu de grands progrès depuis la découverte de leurs oscillations il y a une vingtaine d'années. Dans le cadre du modèle standard à trois neutrinos, les mesures des paramètres de la matrice PMNS et des différences de masses au carré des neutrinos progressent rapidement, en particulier grâce à la valeur relativement élevée de l'angle de mélange  $\sin^2(\theta_{13}) = (2.10 \pm 0.11) \times 10^{-2}$  (PDG 2017). Les paramètres qui restent peu contraints sont la phase violant CP ( $\delta_{CP}$ , non-nulle à 2 sigma d'après les derniers résultats de T2K), l'ordre des masses (plusieurs indications faibles en faveur d'une hiérarchie "normale"), l'octant de l'angle  $\theta_{23}$ , et l'échelle absolue de masse. Est aussi inconnue la nature, de Dirac ou de Majorana, des termes de masse des neutrinos.

Les expériences d'oscillations de neutrinos à venir visent à mesurer les paramètres liés au mélange, et ainsi à surcontraindre dans le secteur des leptons l'équivalent du triangle d'unitarité des quarks. En particulier, une mesure significative d'une phase  $\delta_{CP}$  non nulle serait une découverte majeure indiquant, pour la première fois, une violation de CP dans le secteur leptonique.

- Deux projets sont en cours pour la mesure des oscillations des neutrinos : T2K et NOVA. T2K a été renouvelé pour une deuxième phase (T2K-2) de 2021 à 2026 avec à la clé un programme d'amélioration du faisceau et du détecteur proche qui rendront possible la mesure de violation de CP à 3 sigma, en cas de violation maximale.
- Plusieurs projets, dont le démarrage est prévu autour de 2020, visent particulièrement à mesurer l'ordre des masses : JUNO auprès de réacteurs, et ORCA et Pingu en utilisant les neutrinos atmosphériques.
- A l'horizon 2026, deux expériences de mesure de précision des oscillations de neutrinos produits par des accélérateurs devraient voir le jour, mettant l'accent sur la découverte de violation de CP à 5 sigma: les projets DUNE (Etats-Unis) et HyperKamiokande (Japon). Le groupe "neutrinos d'accélérateurs" du DPhP participe aux expériences T2K (en cours d'exploitation), T2K-2 (refonte du détecteur proche), ainsi qu'au prototype WA105 de TPC diphasique à argon liquide pour DUNE. Il est donc actuellement bien placé pour contribuer à l'un de ces deux projets, un choix devant être fait vers 2018-2019.

On peut tester la nature de Dirac ou Majorana des neutrinos, en recherchant le processus rare de désintégration double-bêta sans neutrino de certains noyaux, dont l'existence prouverait que le neutrino serait sa propre anti-particule, i.e. un fermion de Majorana. En particulier les expériences de prochaine génération auront la sensibilité nécessaire pour trancher entre les deux hypothèses dans l'hypothèse d'une hiérarchie de masse inverse. Un certain nombre de

combinaisons technologie-isotope sont développées et pourraient être compétitives, dans la perspective d'une expérience à grande échelle dans la décennie 2020. Dans ce cadre, le DPhP est bien placé en contribuant au développement et à l'exploitation de bolomètres scintillants au sein du programme CUPID qui permettra d'atteindre une sensibilité meilleure que l'expérience CUORE en cours d'exploitation. L'IRFU est aussi impliqué dans d'autres projets de R&D utilisant d'autres technologies (TPC sphérique et projet PANDA-X).

Les développements de détecteurs à très bas seuils en énergie et bas bruits de fonds permettent d'envisager des perspectives intéressantes pour la détection de neutrinos de "basse" énergie - avec plusieurs buts de physique reliés. La diffusion cohérente des neutrinos sur noyau, récemment observée par l'expérience COHERENT, permettra de nouveaux tests des propriétés des neutrinos et de l'interaction faible à très bas transfert d'impulsion (moment magnétique du neutrino, angle de Weinberg, ...). Pour pouvoir établir l'échelle de masse absolue des neutrinos, des mesures à basse énergie de spectres bêta ou de capture électronique (HOLMES, ECHO, MARE) pourraient atteindre des sensibilités meilleures que celle de l'expérience KATRIN actuellement en préparation. Enfin, de manière plus spéculative encore, la détection du fond diffus cosmologique de neutrinos est envisagée via capture sur le tritium (démonstrateur PTOLEMY). Dans ce contexte les activités de R&D menées au DPhP sur détecteurs cryogéniques pourront mener à participer à cette thématique. Des opportunités existent en particulier à court terme pour la diffusion cohérente de neutrinos auprès de réacteurs.

Au-delà du paradigme à trois neutrinos, la recherche de neutrinos stériles fait l'objet de plusieurs axes d'étude.

- L'anomalie des antineutrinos de réacteurs a motivé la recherche de stériles à l'eV. Plusieurs expériences dédiées sont en phase d'exploitation ou de construction, dont STEREO et CeSOX auxquelles contribue l'IRFU.
- Des neutrinos stériles au keV sont des candidats intéressants pour la matière noire tiède, et apparaissent dans des extensions du modèle standard telles que le  $\nu$ MSM. Leur recherche a été proposée au DPhP : projets DyNO et surtout TRISTAN qui constituerait une seconde phase de l'expérience KATRIN.
- Enfin, dans le cadre de ce même modèle  $\nu$ MSM, l'existence d'un neutrino stérile au GeV a été proposée, et son mélange avec les saveurs actives peut être exploré par plusieurs approches. C'est ainsi l'un des principaux buts scientifiques du projet SHiP au CERN.

## **Antimatière à basse énergie**

Au cours des 15 dernières années, l'étude des propriétés de l'antimatière a beaucoup avancé grâce aux progrès sur la décélération et le piégeage des antiprotons et de l'antihydrogène. En matière d'infrastructures, le décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN sera prochainement complété par ELENA qui fournira quelques  $10^7$  antiprotons de 100 keV toutes les 110 s. A long terme, il existe aussi la possibilité d'une ligne d'antiprotons à basse énergie au sein du complexe FAIR de Darmstadt. Il existe un petit nombre d'expériences installées auprès de l'AD/ELENA, dédiées à différentes mesures. Le DPhP se concentre sur le projet GBAR, visant avant tout à déterminer l'accélération de la pesanteur terrestre pour l'antimatière.

GBAR vise à une première détermination du signe de  $\bar{g}$  en 2021 puis une mesure au pourcent près avec quelques mois de prise de données. La précision ultime pourrait être autour de 100 ppm. Au moins pour la détermination du signe et la mesure au pourcent, le principal concurrent sera probablement ALPHA. A plus long terme, un upgrade de GBAR vise à faire "rebondir" les atomes d'antihydrogène sur une surface, permettant de faire la spectroscopie de leurs états quantiques dans le champ gravitationnel de manière similaire à ce qui a été fait pour des neutrons ultra froids. Enfin, l'expérience acquise par GBAR sur le positronium permet d'imaginer une participation à des expériences de gravitation avec du positronium et du muonium.

## **Astroparticules et matière noire**

Au cours des dernières années, les progrès des observatoires gamma, la détection d'un fond diffus de neutrinos par Ice Cube ainsi que les premières détections d'ondes gravitationnelles ont fait de l'astronomie multi-messagers une réalité. Celle-ci permet d'explorer les phénomènes de haute énergie dans l'univers, de comprendre l'origine du rayonnement cosmique, la physique des trous noirs, et mener des recherches de nouvelle physique comme la matière noire, les axions ou encore de tester l'invariance de Lorentz à très haute énergie.

L'astronomie gamma au TeV est maintenant une discipline mûre, dans laquelle le DPhP est engagé depuis 2004 via sa participation à HESS (phase 1, puis phase 2). L'engagement majeur à moyen et long terme du département est dans l'observatoire CTA qui permettra un saut scientifique quantitatif. Le maintien à moyen terme dans HESS tant que le site sud de CTA n'est

pas construit sera aussi pertinent. Enfin, une implication pourrait être envisagée dans l'observatoire HAWC-Sud qui permettra une cartographie au TeV de l'ensemble du ciel sud, de manière complémentaire à CTA.

La détection récente des ondes gravitationnelles permet déjà d'explorer la physique des trous noirs et de mener de nouveaux tests de la gravitation. Le département pourrait s'engager dans cette thématique scientifique, par exemple par l'intermédiaire de la contribution prévue de l'IRFU au projet LISA.

La nature de la matière noire reste une question ouverte majeure en physique fondamentale. Le DPhP a une implication importante dans les recherches indirectes de WIMP à l'aide de télescopes Cherenkov, dans le cadre de HESS et CTA. La recherche directe de WIMP avec l'expérience EDELWEISS s'est concentrée ces dernières années vers les basses masses (autour du GeV), en raison des résultats négatifs de la recherche de supersymétrie au LHC, et des progrès des détecteurs au Xénon. Les développements de R&D en détecteurs bolométriques dans le cadre d'EDELWEISS se font de manière complémentaire avec la recherche en double bêta. Notons enfin que la TPC sphérique développée à l'IRFU est aussi exploitée pour la recherche de WIMP de basses masses.

Les axions, particules hypothétiques pouvant expliquer l'absence de violation de CP dans l'interaction forte, font l'objet de recherches plus actives qu'auparavant. L'IRFU, impliqué dans le détecteur CAST d'axions solaires, pourrait participer à son successeur IAXO. Il y a aussi un intérêt scientifique particulièrement grand pour la recherche d'axions légers (meV -  $\mu$ eV) constituant la matière noire. Leur détection se ferait via la recherche de signal radio en présence de champ magnétique, et le DPhP, déjà engagé dans des études préliminaires sur une expérience de démonstration, pourrait rejoindre ces recherches par exemple dans le cadre de la collaboration MADMAX.

De manière générale, la recherche de matière noire s'est récemment étendue à un espace de modèles beaucoup plus grand que les WIMP supersymétriques, et dans ce contexte il y a consensus sur l'intérêt de développer l'activité et de participer à une variété de montages différents dans le cadre d'expériences de taille modeste.

## **Cosmologie observationnelle**

Le modèle de concordance de la cosmologie est maintenant quantitativement établi grâce entre autres aux mesures du CMB, aux mesures cosmographiques (SN1a, BAO), et à l'étude des

grandes structures (clustering des galaxies, amas, effets de lentilles, forêt Lyman-alpha, ...). Les objectifs scientifiques des grands projets à venir sont maintenant, de manière schématique :

- Consolider ce modèle en le surcontraignant, et en particulier résoudre certaines tensions dans les observations actuelles (par exemple sur  $H_0$  ou l'amplitude des fluctuations). En particulier, on devrait obtenir une mesure de la somme des masses des neutrinos (ce qui permettra de compléter les paramètres du modèle standard à trois neutrinos, avec les expériences d'oscillations).
- Tester avec la plus grande précision possible les propriétés de l'énergie noire (mesures de l'équation d'état " $w$ " et variantes), ainsi que la validité des lois de la gravitation à grande échelle (taux de croissance des structures avec le RSD = Redshift Space Distortion; "glissement gravitationnel" avec le weak lensing).
- Etudier l'inflation : recherche des modes B dans les anisotropies primaires du CMB (paramètre  $r$ ), recherche de non-gaussianités primordiales ( $f_{NL}$ ), mesure du spectre de puissance primordial (paramètre  $n_s$  et ses variations).

Le DPhP est historiquement impliqué dans le CMB, les SN1a et la radiodétection de l'émission à 21 cm; son implication majeure actuelle et à court terme est dans la lignée des relevés spectroscopiques optiques grand champ BOSS/eBOSS/DESI. A l'horizon 2025, au-delà de la phase de DESI en cours de préparation, l'implication dans les grands relevés pourra se poursuivre avec par exemple une seconde phase de DESI focalisée sur les plus grands redshifts, ou bien le projet MSE sur le CFHT. Au-delà de 2030 un survey spectroscopique "à un milliard d'objets", comme le projet BOA, est envisagé, visant en particulier une mesure de  $f_{NL}$ .

A moyen terme, il est aussi envisagé que le DPhP se positionne de manière plus importante sur l'une des deux thématiques suivantes.

- Après Planck, les observations en cours et futures du CMB vont permettre encore d'impacter fortement plusieurs aspects de la cosmologie, des amas de galaxies à l'inflation. Deux types de projets existent pour la décennie 2020 et au-delà. D'une part des observatoires au sol (projets essentiellement américains du "CMB-S4"), d'autre part, des satellites comme CORE ou LiteBIRD. Les opportunités et buts scientifiques de ces deux approches sont différents, si bien qu'un choix entre les deux devra être bien pesé. Une thématique scientifique naturelle, à l'interface avec les activités dans DESI, serait le lensing du CMB.
- Une autre option éventuelle serait l'exploitation de grands relevés dans les longueurs d'onde radio. Si les projets dits "d'intensity mapping" sur lesquels le DPhP s'est initialement positionné pour l'étude du BAO semblent moins prometteurs aujourd'hui, l'observatoire SKA permettra lui d'obtenir un ensemble riche de nouvelles mesures cosmologiques, surtout dans sa phase 2 prévue à l'horizon 2030.



## Sociétal et autres

Le DPHP est impliqué dans le développement de détecteurs pour l'imagerie médicale nucléaire. La motivation du groupe est de prototyper une rupture technologique, de grand potentiel pour améliorer les performances des imageurs Tomographes par Emission de Positron (TEP). Les détecteurs de rayonnement gamma mis en œuvre sont susceptibles d'être exploités dans beaucoup d'autres mesures et usages.

Les développements autour du projet d'imageur TEP temps de vol et de très haute résolution spatiale à base de  $\text{Bi}(\text{CH}_3)_3$  liquide (projet CaLIPSO) vont se poursuivre, avec pour but d'être exploités dans un cadre de recherche (imagerie du petit animal et imagerie neurologique).

Le projet plus récent ClearMind, lui, exploite une rupture sur le couplage optique cristal scintillant/photo-détecteur. Ce détecteur a le potentiel d'approcher la frontière des 10 ps sur la mesure des temps de vol de photons de 511 keV. Son potentiel en matière de résolution spatiale (aujourd'hui évalué à  $4\text{mm}^3$ ) doit être approfondi. Une valorisation industrielle d'une telle technologie semble plus aisée que pour le projet CaLIPSO.

Un projet innovant de fibre optique dite à retournement de photons est aussi développé au DPHP.

Enfin, d'autres projets d'expériences, hors des thématiques précédentes, ont été évoqués comme pistes possibles. En particulier, une expérience est envisagée sur l'infrastructure Apollon (laser 10 PW) du CILEX afin d'étudier le paradoxe de perte d'information des trous noirs, en mesurant le rayonnement de Hawking émis par un miroir plasma relativiste accéléré. Ce rayonnement est le même que celui émis par les trous noirs (principe d'équivalence).

## Conclusions

Une grande partie des activités du DPHP dans les cinq prochaines années (2018-2022) est planifiée dans le cadre de projets en cours, qui eux-mêmes s'inscrivent dans la continuité des grandes thématiques du département. Ce sont notamment, en étroite collaboration avec les équipes du DEDIP et du DIS, les refontes des détecteurs ATLAS et CMS pour la phase haute-luminosité du LHC, l'amélioration du détecteur proche ND280 de T2K – étape possible vers le projet T2HK –, la production de caméras Nectarcam et de miroirs pour équiper les télescopes de taille moyenne de CTA et la production de cryostats pour les spectrographes de DESI.

L'expérience GBAR est en cours de mise en route au CERN, tandis que d'autres projets font l'objet d'une intense activité de recherche et développement, comme par exemple l'optimisation du plan de lecture d'une TPC pour un détecteur à l'ILC ou au FCC-ee, la

participation au programme WA105 (ProtoDune-DP) en vue d'une éventuelle participation à la fabrication d'un module de 10 kt à argon liquide diphasique pour Dune ou la mise au point de détecteurs tridimensionnels ultrarapides pour la tomographie par émission de positons.

L'objet de ces prospectives était aussi de poser dès aujourd'hui les jalons d'une physique toujours plus passionnante dans les décennies à venir.

En physique auprès des grands collisionneurs hadroniques, la question qui se pose est celle de l'après HL-LHC. Les avis divergent sur la justification de physique d'une machine à 100 TeV (FCC-hh) par rapport à celle d'une machine à 27 TeV (HE-LHC), notamment si aucune nouvelle physique n'est observée à 14 TeV. En revanche, si la nouvelle physique est observée au HL-LHC, un programme ambitieux à l'énergie la plus élevée possible comme le FCC-hh serait souhaitable et pleinement justifié.

Idéalement, le HL-LHC fonctionnera en parallèle avec un collisionneur électron-positon capable d'atteindre une énergie supérieure au seuil de production HZ. Dans le cas d'un engagement fort du gouvernement japonais en 2018, cette machine sera l'ILC. L'alternative est une machine circulaire dans un tunnel de 100 km de circonférence avec pour vocation d'abriter par la suite un collisionneur de protons de 100 TeV. Au CERN, c'est le projet FCC-ee, dans le tunnel du FCC-hh ; en Chine, c'est le projet CEPC. Une telle machine aurait l'avantage de fonctionner à ultra-haute luminosité dans une gamme d'énergie inaccessible à l'ILC qui couvre le pôle du Z (91 GeV) et le seuil de production WW (160 GeV), tout en assurant une luminosité 5 à 10 fois supérieure à celle de l'ILC au maximum de la production HZ (250 GeV).

Si les études prospectives qui font l'objet de ce rapport n'ont pas mis en évidence la nécessité de rupture scientifique, de nouvelles pistes possibles de recherche au DPhP ont néanmoins été abordées.

Parmi elles, l'idée de s'investir de nouveau dans la physique de la saveur a été évoquée, soit en rejoignant l'expérience BELLE-II à SuperKEKB, soit par une participation au projet KLEVER au CERN dans la lignée de NA62. Dans les deux cas, l'expertise des physiciens du DPhP est grande, et les enjeux de physique sont prometteurs.

Une autre piste est celle de la physique des neutrinos à très basse énergie, qui peut profiter des développements récents sur la détection cryogénique bas bruit de fond pour baisser considérablement les seuils de détection en énergie. Cela ouvre la perspective d'étude de la diffusion cohérente neutrino sur noyau et de tests inédits de la théorie électrofaible à basse énergie. Des idées conceptuelles pour la détection de neutrinos du fond diffus cosmologique –

un objectif scientifique majeur – commencent à être évoquées. Toujours en capitalisant sur l'expertise acquise à l'Irfu dans les techniques bolométriques, le DPhP vise à maximiser son impact dans la recherche de la désintégration  $2\beta 0\nu$  en produisant un démonstrateur ambitieux pour la future expérience de nouvelle génération CUPID.

Une équipe du DPhP envisage de s'engager dans la recherche d'axions légers pouvant constituer la matière noire du halo galactique. Cela pourrait se concrétiser soit par une participation à l'expérience internationale MADMAX, soit par une expérience originale de taille intermédiaire à Saclay.

Au sein du groupe cosmologie, on réfléchit déjà aux projets de grands relevés cosmologiques post-DESI et post-Euclid, au-delà de 2025, notamment le projet BOA à un « milliard d'objets ». Les questions de la masse des neutrinos, de leur rôle dans l'évolution cosmique, de la validité de la relativité générale aux grandes échelle et de la pertinence des modèles de gravité modifiée, occupent une part croissante des activités du groupe. La participation à un futur projet CMB au sol ou dans l'espace est en cours de réflexion. D'autre part, le groupe exprime un fort intérêt pour une implication dans SKA pour des mesures cosmologiques dès la phase 1.

Les premières détections d'ondes gravitationnelles par LIGO/Virgo ont suscité un vif intérêt au DPhP, principalement dans le contexte de la recherche de contreparties gamma et neutrino de haute énergie. La future mission LISA offre des opportunités d'étude de physique fondamentale, notamment des tests de modèles de transition électrofaible dans l'univers primordial par l'analyse du fond stochastique d'ondes gravitationnelles.

Les nouvelles idées fascinantes qui ont émergé de ces perspectives témoignent d'une saine animation scientifique au sein du département. Certains projets, déjà dans une phase de conception avancée, pourraient fournir rapidement des résultats passionnants. D'autres, plus exploratoires, pourraient déboucher sur les grandes expériences de demain. C'est pourquoi il faut encourager les physiciens du DPhP à entretenir leur curiosité scientifique et à s'investir encore davantage dans des programmes de recherche et développement.