

Représentation d'un événement du détecteur ALICE, doté de nouveaux éléments durant le LS1, montrant une gerbe de particules produites par un muon cosmique de haute énergie. (Collaboration ALICE)

Physique et expériences

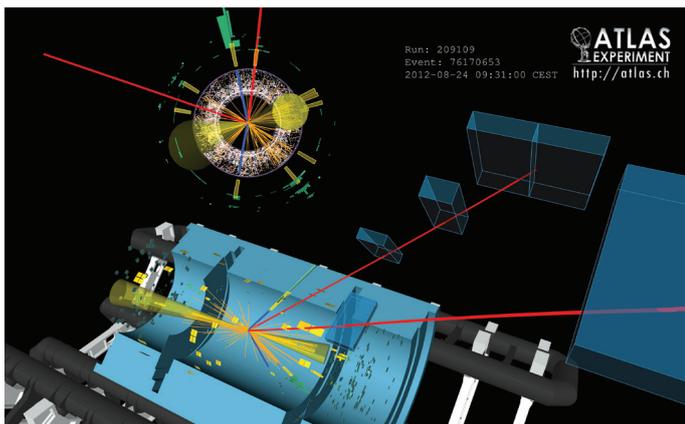
Pour la plupart des expériences, 2014 a été marquée par les dernières étapes du long arrêt technique et la préparation, à l'automne, du redémarrage progressif du complexe d'accélérateurs, avec le retour des faisceaux partout sauf dans le LHC. Certaines équipes ont mené des travaux intensifs de rénovation et d'amélioration et d'autres ont continué à analyser les données collectées auparavant. Les collaborations LHC avaient encore beaucoup de données à analyser et ont pu présenter de nombreux résultats finaux à partir des données de la première période d'exploitation.

ALICE : la matière la plus chaude

La collaboration ALICE étudie, par des mesures de précision, comment l'organisation des quarks dans la matière influe sur le comportement de celle-ci dans les conditions extrêmes de température qui prévalaient dans l'Univers primordial. ALICE avait déjà établi que la matière créée dans les collisions d'ions lourds au LHC présentait les caractéristiques d'un liquide

« parfait », résultat consolidé par les analyses effectuées en 2014 sur la totalité des données issues de la première exploitation. Le passage d'une phase où les constituants fondamentaux (les « partons ») se déplacent librement à l'état ordinaire de la matière, constituée de hadrons, est décrit de façon satisfaisante par les équations de l'hydrodynamique. L'état hadronique final mesuré concorde avec un modèle statistique dans lequel les hadrons émergent d'un « bain » chaud à 155 MeV, bien que certains éléments restent inexpliqués.

Mais comment décrire cette phase partonique, aussi appelée plasma quark-gluon ? Pour étudier l'hypothèse de hadrons produits par la coalescence de quarks dans le plasma, ALICE a comparé les spectres des protons (constitués de trois quarks) et des mésons phi (de même masse, mais constitués d'une paire quark-antiquark). Le modèle de coalescence ne prédit pas les résultats observés et ne résout pas le problème de la composition du plasma quark-gluon. Toutefois, le fait que le J/psi (état lié d'un quark c et d'un antiquark c) peut être régénéré



Représentation d'un événement candidat à la désintégration d'un boson de Higgs en deux électrons et deux muons, accompagné de deux jets de particules à petits angles. (Collaboration ATLAS)

dans le plasma quark-gluon semble indiquer la présence de quarks c non confinés. Pour explorer cette voie, ALICE étudie la production de jets de particules, qui permettent de sonder le plasma avec une meilleure résolution. D'après l'analyse des données acquises lors de la première exploitation, on peut attendre des mesures de précision futures qu'elles nous éclairent sur la nature du plasma.

L'analyse des données en 2014 était principalement axée sur la question de savoir si une gouttelette de plasma quark-gluon peut être produite dans de petits systèmes. La question est venue de l'observation inattendue d'une production de nombreuses particules dans les collisions proton-plomb. En effet, on retrouve dans ces collisions à haute multiplicité la plupart des caractéristiques de la dynamique collective du plasma quark-gluon. De même, une « structure en crête », considérée dans les collisions Pb-Pb comme une signature d'un comportement collectif, a été observée dans des collisions proton-proton à haute multiplicité, fait qui pourrait avoir plusieurs interprétations. ALICE a mesuré un ensemble d'observables qui, dans les collisions proton-plomb centrales, peuvent être décrits de façon satisfaisante par la dynamique collective d'un système en équilibre. En particulier, la composition de l'état hadronique final (étant donné le taux de production des différents hadrons) correspond aux prédictions du modèle statistique. Les valeurs mesurées du flux radial et elliptique des hadrons à faible impulsion transversale, ainsi que la dimension du système hadronique au stade où les hadrons cessent d'interagir, correspondent à un système en expansion collective. D'autres mesures ont montré que les indices d'un comportement collectif observés dans les collisions p-p et p-Pb augmentent avec la multiplicité, s'approchant des valeurs mesurées dans les collisions Pb-Pb. Toutes ces observations ont été possibles grâce au développement par ALICE d'une nouvelle méthode permettant de déterminer la centralité dans les collisions proton-noyau.

Une question demeure, toutefois : pourquoi le phénomène

d'atténuation des jets, universellement observé dans les collisions d'ions lourds, semble-t-il absent des collisions centrales proton-plomb ?

L'expérience ALICE a fait l'objet pendant le LS1 d'un programme intensif visant à améliorer les systèmes et à préparer l'accroissement de luminosité prévu lors de la deuxième exploitation.

Les cinq super-modules du détecteur à rayonnement de transition encore manquants ont été installés. Un nouveau calorimètre di-jet a été installé, dos à dos avec le calorimètre électromagnétique existant, pour accroître la zone de couverture du détecteur, et un module supplémentaire a été ajouté au spectromètre à photons. Un nouvel élément, le détecteur à diffraction d'ALICE, a également été installé. Celui-ci consiste en deux doubles couches de compteurs de gerbes placés à distance de la région d'interaction, dans la caverne d'ALICE, à 16 m du point de collision, et dans le tunnel du LHC, à 19 m dans la direction opposée. Le mélange de gaz (90 % néon – 10 % CO_2) dans la chambre à projection temporelle d'ALICE a été remplacé par un mélange argon- CO_2 dans les mêmes proportions, afin d'avoir une réponse plus stable dans des flux de particules élevés sans dégradation significative de la résolution de la mesure de l'impulsion pour des impulsions transversales faibles. L'électronique de lecture de tous les systèmes du détecteur a été adaptée pour fonctionner à une vitesse accrue. Cette amélioration, s'ajoutant à une rénovation complète des systèmes informatiques pour l'acquisition de données et le déclenchement de haut niveau, permettra à ALICE d'exploiter pleinement les collisions Pb-Pb à pas moins de 10 kHz lors de l'exploitation 2 du LHC.

À plus long terme, et en particulier pour le programme HL-LHC (voir p. 19), un ambitieux programme d'amélioration a été lancé. Il s'agit de renforcer substantiellement la performance des systèmes du détecteur pour les secteurs charme et beauté, et de préparer les luminosités élevées à venir, qui nécessiteront des vitesses de lecture allant jusqu'à 50 kHz pour les collisions

Travailler ensemble

En 2014, les expériences LHC ont travaillé ensemble étroitement dans des domaines essentiels de la physique, afin de combiner leurs analyses et d'améliorer ainsi la précision de leurs mesures. En particulier, les équipes d'ATLAS et de CMS ont pu calculer la masse du boson de Higgs avec une précision inégalée.

Autre fait marquant : la combinaison des mesures faites par CMS et LHCb des désintégrations en muons de deux mésons B neutres, $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ et $B^0 \rightarrow \mu\mu$. Ces particules apparentées sont constituées d'un quark b lié à un quark s, dans B_s^0 , ou à un quark d, dans B^0 . Il s'agit d'une piste formidable dans la recherche d'une nouvelle physique, car ces deux désintégrations subissent une importante réduction dans le Modèle standard. La chasse aux légers écarts par rapport aux prédictions continue.

Les collaborations CMS et TOTEM ont effectué ensemble l'analyse de particules chargées produites lors de collisions p-p, ouvrant ainsi la voie à de futures mesures conjointes.

Pb-Pb. En 2014, le Comité des expériences LHC a approuvé deux rapports de conception technique, l'un pour un nouveau trajectographe interne et l'autre pour une nouvelle électronique. D'autres études, relatives à un nouveau trajectographe aux petits angles pour les muons, à l'amélioration de la chambre à projection temporelle et à un nouveau système informatique en direct et en différé seront soumises pour approbation en 2015.

ATLAS : nombreux résultats

Le principal objectif d'ATLAS était d'extraire le maximum d'informations possible des données collectées lors de l'exploitation 1 du LHC, avant le lancement de l'exploitation 2 en 2015. Après avoir établi les principales propriétés du boson de Higgs et observé ses couplages bosoniques et fermioniques en 2013, l'expérience a pu obtenir de nouvelles mesures des deux voies de désintégration en deux photons et quatre leptons chargés (voir figure p. 22). Ces mesures ont permis de préciser la masse du boson de Higgs et ses couplages, et de mieux comprendre les divers mécanismes de production du boson dans les collisions p-p. ATLAS a également établi l'existence de la désintégration du boson de Higgs en deux bosons W et mesuré l'intensité du signal correspondant avec une précision d'environ 20 % – avancée importante dans la connaissance des propriétés de la particule. Ces travaux n'ont pour l'instant montré aucun écart par rapport aux prédictions du Modèle standard.

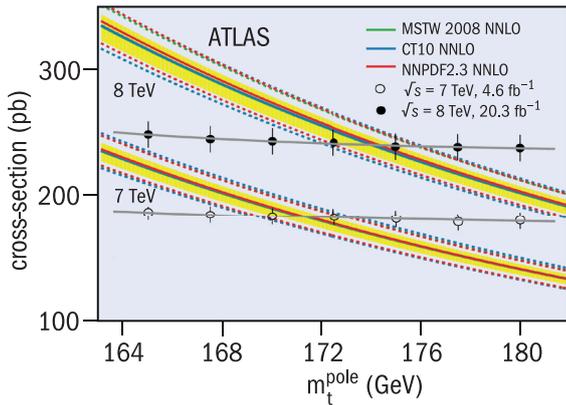
Des études approfondies du Modèle standard se sont poursuivies en 2014, avec de nombreux résultats, notamment les mesures les plus précises à ce jour du taux de production de quarks top, avec une incertitude d'environ 4 % seulement. Ces résultats, qui concordent bien avec les prédictions théoriques, peuvent être utilisés pour établir avec une grande précision la masse du quark top (voir figure p. 24) et pour fixer des limites à la production supplémentaire de quarks top par des processus liés à la physique hors Modèle standard, tels que la supersymétrie.

Mesurer les couplages des bosons W et Z entre eux permet de mettre à l'épreuve le modèle électrofaible sous-jacent, qui peut révéler des couplages anormaux et ainsi indiquer une nouvelle physique. Les processus correspondants sont toutefois extrêmement rares et leur observation n'a pu être possible que récemment, grâce à l'énergie dans le centre de masse et la luminosité élevées offertes par le LHC. ATLAS a mis en évidence la contribution purement électrofaible à la production d'un boson Z et de deux jets de particules, incluant le processus de fusion de bosons faibles, $WW \rightarrow Z$. Ces résultats concordent bien avec le Modèle standard.

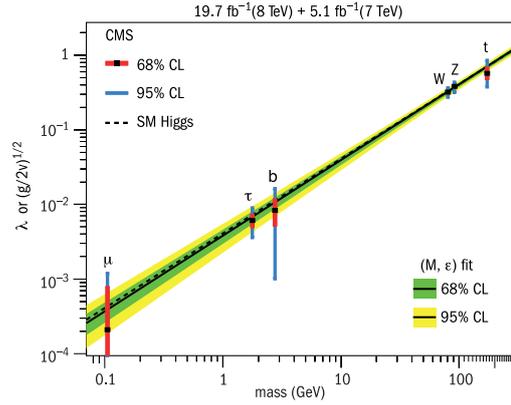
Parmi les nombreux autres résultats obtenus par ATLAS en 2014, on citera le taux de production de bosons W en combinaison avec des jets et une détermination plus précise de la probabilité totale des interactions p-p à l'énergie de l'exploitation 1 du LHC, au moyen des détecteurs ALFA dans ATLAS. À noter également de nouveaux résultats sur les collisions protons-ions, où l'étude de la production de jets permet de mieux comprendre la géométrie de ce type de collisions.

La recherche de nouvelles particules ou de nouveaux phénomènes s'est poursuivie sans relâche. ATLAS a approfondi son étude de la supersymétrie en recherchant des événements comptant deux ou trois leptons, associés à une énergie manquante, susceptibles d'indiquer une particule supersymétrique non détectée. Dans les deux cas, aucun écart notable par rapport au Modèle standard n'a été constaté. Ce résultat peut être utilisé pour fixer de nouvelles limites concernant la supersymétrie. De nombreuses autres études ont recherché de nouvelles particules dans divers scénarios, mais aucun indice de nouvelle physique n'a été détecté, ce qui limite fortement les modèles prédisant des particules ou phénomènes exotiques.

L'année a aussi été marquée par l'achèvement du programme intensif de maintenance, de consolidation et d'amélioration du détecteur entrepris pendant le LS1, avec en fin d'année une mise en service complète de tous les éléments en vue



Mesures réalisées par ATLAS de la probabilité de la production de paires de tops (section efficace) pour des énergies dans le centre de masse de 7 et 8 TeV, par rapport aux prédictions théoriques de la chromodynamique quantique en fonction de la masse du quark top.



Mesures effectuées par CMS montrant la manière dont le couplage du boson de Higgs avec d'autres particules augmente en fonction de la masse de celles-ci.

de l'exploitation 2 du LHC. La couche b insérable (IBL) a été installée à l'intérieur du détecteur à pixels, renforçant la capacité d'identifier et d'« étiqueter » les quarks lourds dans les jets denses de particules. Plusieurs séquences de mise en service au fil de l'année ont permis de réintégrer tous les éléments d'ATLAS et de commencer à s'entraîner à la prise de données à 100 kHz au niveau du premier déclenchement, contre 75 kHz pendant l'exploitation 1. De nouvelles fonctions ont été ajoutées à ce niveau, notamment la possibilité de sélectionner des événements dès ce stade selon leur topologie. Des améliorations majeures ont été apportées aux logiciels en différé ; la vitesse de reconstitution des événements a ainsi été accrue d'un facteur trois, ce qui permettra de profiter pleinement de la performance accrue du LHC après le LS1.

CMS : haute précision

L'une des principales priorités du programme de physique est l'étude détaillée du boson de Higgs, qui a beaucoup progressé en 2014, avec l'achèvement de l'analyse des données de la première exploitation et des analyses combinées visant à atteindre une plus grande précision. Après la publication de résultats sur les principaux canaux de désintégration du Higgs, une étape majeure a été franchie avec la mise en évidence de désintégrations en leptons tau et en quarks b, indice fort de l'existence de désintégrations fermioniques. À signaler également le calcul d'une nouvelle limite pour la largeur du Higgs, améliorée de plus de deux ordres de grandeur par rapport à la valeur précédente. D'autres études ont confirmé les prédictions du Modèle standard sur l'augmentation d'intensité du couplage du boson de Higgs avec d'autres particules en fonction de leur masse (voir figure en haut à droite).

Les premiers résultats combinés sur le Higgs présentés par CMS intégraient les données des principaux canaux analysés avec la totalité des données de la première période d'exploitation. La recherche de bosons de Higgs produits en association avec des quarks top, combinée à d'autres analyses, a révélé un écart

intéressant d'environ 2σ par rapport aux prédictions du Modèle standard, ce qui ouvre des perspectives de gains de sensibilité ultérieurement. CMS a également poussé sa recherche de bosons de Higgs jusqu'à l'échelle du téraélectronvolt. En combinant toutes les études menées, CMS interprète les données pour ces masses élevées dans le contexte de modèles intégrant la nouvelle physique et définit des limites pour les découvertes potentielles.

La recherche « classique » de particules supersymétriques et de matière noire se poursuit, mais CMS utilise aussi le boson de Higgs comme « éclairer » pour explorer une nouvelle physique. On a pu ainsi définir plusieurs limites d'exclusion, sans trouver d'indices de l'existence de la matière noire ou d'autres particules nouvelles. Plusieurs nouvelles analyses sont en cours pour étudier les points inexplorés.

Les mesures de haute précision de la physique du Modèle standard ont débouché sur des résultats exceptionnels, notamment sur le quark top, la plus lourde des particules élémentaires. La combinaison des résultats obtenus par le LHC et par le Tevatron (Fermilab) avait permis de fixer une moyenne internationale pour la masse du top, rapidement détrônée par une nouvelle mesure de CMS, encore plus précise.

De nombreux résultats de physique des ions lourds ont été annoncés par la collaboration CMS, qui en a rendu compte lors de la conférence *Quark Matter 2014*.

Deux vastes opérations ont été menées par la collaboration CMS afin de se préparer au flux de données de la deuxième période d'exploitation. CSA14 (*Computing, Software and Analysis exercise*) a fourni aux équipes chargées du calcul, de l'informatique, de la validation et des analyses de physique de précieuses informations. PHYS14 a permis de prouver que les analyses de haute priorité étaient fin prêtes pour le premier fb^{-1} de données à venir.

Enfin, le travail de préparation d'une proposition technique pour le projet d'amélioration de CMS a bien avancé. On a ainsi démontré la nécessité de réaliser l'amélioration pour la phase 2,



CMS juste avant la fermeture de la structure. On peut voir le tube de faisceau et le nouveau système d'étanchéité environnementale. (CMS Collaboration)

en achevant les simulations du détecteur pour la phase 1 (compte tenu des hypothèses sur le vieillissement du détecteur), en évaluant les performances attendues du détecteur dans la phase 2, et en élargissant les objectifs de physique de manière à exploiter pleinement le potentiel du projet LHC haute luminosité (voir p. 19).

Les principaux objectifs du LS1 ont été atteints en 2014, certains avec de l'avance, ce qui a permis de résoudre des problèmes apparus pendant le long arrêt technique : le détecteur à pixels et le détecteur de pied de gerbe du calorimètre électromagnétique ont eu des défaillances imprévues qu'il a fallu corriger. Les principaux objectifs étaient d'installer un nouveau système d'étanchéité environnementale afin de faire fonctionner le trajectographe à une température beaucoup plus basse que lors de la première période d'exploitation (et ainsi prolonger sa durée de vie à des intensités de faisceau plus élevées), d'installer le tube de faisceau pour la phase 1 d'amélioration, et d'installer puis de mettre en service les chambres à muons afin de réaliser le projet initial. Le remplacement des photo-détecteurs dans la couche externe du calorimètre hadronique, a été réalisé en même temps que des améliorations majeures des infrastructures communes. Les systèmes de déclenchement et d'acquisition des données ont aussi été grandement améliorés pour tirer parti au mieux de l'énergie et de l'intensité élevées de la deuxième exploitation. D'autres opérations ont été menées, notamment des tests avec des rayons cosmiques.

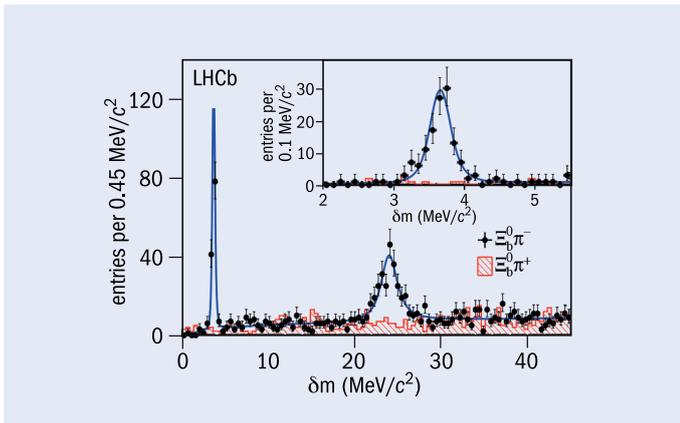
LHCb : beauté rare

L'expérience LHCb réalise des mesures précises de particules contenant des quarks beauté (b) ou charmés (c). Elle se concentre sur les désintégrations rares et sur la violation de CP (différence de comportement entre une particule et son antiparticule), phénomènes qui pourraient ouvrir la voie à une nouvelle physique via des effets quantiques. En 2014, la poursuite de l'analyse des données collectées pendant la première période d'exploitation a permis de bien avancer dans les mesures de référence.

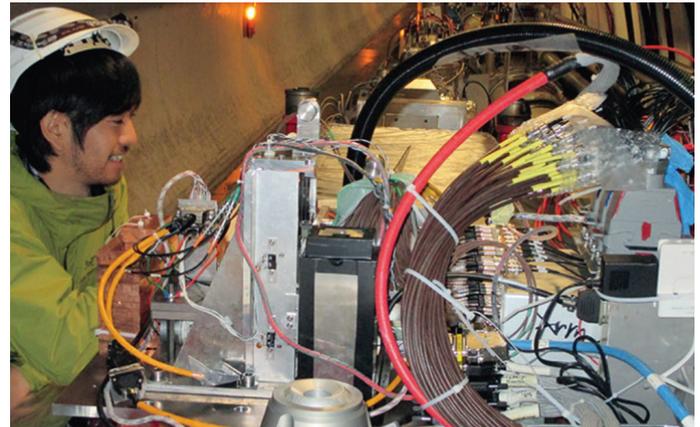
L'une des mesures les plus attendues concernaient l'analyse complète de φ_s , l'angle de violation de CP lié à l'interférence entre désintégration et mélange du méson B_s^0 avec son antiparticule. Ce résultat est très intéressant pour la recherche d'une nouvelle physique, la prédiction du Modèle standard pour φ_s étant très précise avec une valeur très faible, qui pourrait être augmentée par la nouvelle physique. La valeur $-0,010 \pm 0,039$ radians obtenue pour φ_s est la plus précise à ce jour et concorde bien avec le Modèle standard. Autre résultat marquant, la mesure précise de la phase γ , l'un des angles de la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, qui définit les interactions entre les six quarks du Modèle standard. C'est la première fois qu'une seule expérience obtient une précision inférieure à 10° .

La collaboration est aussi parvenue à mesurer R_K , le rapport de probabilité de désintégration d'un méson B^+ en $K^+\mu^+\mu^-$ ou en $K^+e^+e^-$. Ces désintégrations très rares se produisent deux fois sur 10 millions de collisions (2×10^{-7}), lorsqu'un quark b se transforme en quark s ($b \rightarrow s$), processus extrêmement sensible aux effets des particules existant uniquement au-delà du Modèle standard. D'après le Modèle standard, ce rapport devrait être très proche de 1 en raison du principe d'universalité leptonique, qui veut que les électrons (e) et les muons (μ) se comportent de façon identique. Les mesures de LHCb montrent que R_K est différent de 1 avec un niveau de signification de $2,6 \sigma$. Ce résultat, s'il est confirmé, pourrait être l'indice d'interactions leptoniques non universelles. La désintégration $B \rightarrow K^0 \mu^+ \mu^-$, autre processus $b \rightarrow s$, montre elle aussi un écart marqué entre les mesures de la variable angulaire P_5' et les prédictions du Modèle standard, ce qui donne lieu à d'intenses débats au sein de la communauté de la physique des particules.

Le grand nombre d'échantillons de désintégrations collecté a permis d'étudier de manière approfondie les particules produites par différents canaux de désintégration. Par exemple, la collaboration LHCb a publié des résultats démontrant sans ambiguïté, pour la première fois, que certains hadrons, dans ce cas le Z(4430), ont une nature exotique qui ne s'intègre pas dans la version la plus simple du modèle des quarks.



Mise en évidence par LHCb de deux nouvelles particules, Ξ_b^- (premier pic) et Ξ_b^{*-} (deuxième pic), observées par leur désintégration en $\Xi_b^0 \pi^+$. δm est la différence entre la masse de la paire $\Xi_b^0 \pi^+$ et la somme des masses individuelles de Ξ_b^0 et de π^- .



Le détecteur Arm1 de LHCf. (T. Sako)

Elle a également montré qu'une structure $\bar{D}^0 K^-$ avec une masse de 2 860 MeV est composée de deux résonances, l'une avec un spin 1 et l'autre avec un spin 3. Cette observation d'une particule de spin 3 contenant des quarks lourds est inédite et devrait apporter d'autres enseignements dans le domaine de la spectroscopie des hadrons.

Autre résultat intéressant, la découverte de deux nouvelles particules, Ξ_b^- et Ξ_b^{*-} . Prédites par le modèle des quarks, ce sont des baryons contenant trois quarks (b, s et d). Leur observation et la mesure extrêmement précise de leurs propriétés permettent à LHCb de tester de manière rigoureuse des modèles de chromodynamique quantique à basse énergie.

Le programme visant à mesurer les sections efficaces est facilité par le remarquable étalonnage de la luminosité effectué par l'expérience. La luminosité a été mesurée avec une précision relative de 1,12 %, soit la meilleure jamais obtenue au LHC et dans un collisionneur de hadrons utilisant des faisceaux à paquets. Début 2013, LHCb a collecté des données lors d'une exploitation avec des ions plomb, et observé pour la première fois la production de bosons Z dans des collisions proton-plomb, pour une énergie dans le centre de masse de 5 TeV par paire de proton-nucléon.

L'amélioration de LHCb a été approuvée et sera réalisée au cours du deuxième long arrêt du LHC. Elle permettra d'augmenter d'un ordre de grandeur la capacité d'acquisition de données de l'expérience. En 2014, LHCb a choisi la technologie destinée aux trois unités de trajectographie situées derrière l'aimant, ouvrant ainsi la voie à la construction d'un trajectographe à fibres complet.

LHCf

L'expérience LHCf (*Large Hadron Collider forward*) étudie les particules neutres émises au point de collision à un angle presque nul par rapport à la ligne des faisceaux. Ces interactions « à petits angles » sont importantes pour comprendre ce qui arrive lorsque des rayons cosmiques de haute énergie entrent en collision avec

l'atmosphère. La collaboration a publié des résultats sur les pions neutres, obtenus lors de l'exploitation proton-plomb en 2014. Elle a également achevé l'amélioration des détecteurs du point de vue de la résistance aux rayonnements. Ces nouveaux détecteurs ont été testés au SPS en octobre, avant d'être installés à 140 m de part et d'autre du point de collision d'ATLAS. LHCf et ATLAS ont commencé à réfléchir à une mise en commun de la collecte et de l'analyse de données pour l'étude de la production de particules à petits angles.

MoEDAL

L'expérience MoEDAL (*Monopole and Exotics Detector At the LHC*) est conçue pour la recherche de particules hautement ionisantes révélatrices d'une nouvelle physique, comme des monopôles magnétiques ou des particules chargées massives à longue durée de vie. L'année 2014 a été fructueuse pour la collaboration avec notamment la publication d'un programme de physique décrivant plus de 30 scénarios de découvertes possibles. Le détecteur innovant de MoEDAL a été installé durant l'hiver 2014 pour une prise de données en 2015. Constitué majoritairement de dispositifs passifs, MoEDAL regroupe sur 100 m² des détecteurs de traces nucléaires en plastique agissant comme une pellicule photo sensible à la nouvelle physique. En outre, le dispositif de piégeage de 1 tonne pourra capturer les particules fortement ionisantes révélatrices d'une physique au-delà du Modèle standard. Le niveau de rayonnement est surveillé par un système de détecteurs à pixels TimePix en temps réel, à la pointe de la technologie.

TOTEM

Située comme CMS au point 5 du LHC, l'expérience TOTEM a pour mission de réaliser, au plus près des faisceaux du LHC, des mesures précises de particules produites à très petits angles lors des collisions. En 2014, l'analyse des données collectées pendant des cycles d'exploitation spéciaux en 2012 a mis en évidence pour la première fois un comportement non exponentiel



Au point 8, Becky Parker (au centre), enseignante, aux côtés de deux anciens élèves de la *Simon Langton Grammar School for Boys*, qui ont rejoint la collaboration MoEDAL en 2014. (CERN-GE-1311279 – 11)



Installation du dernier module du trajectographe à pailles, pesant près de 5 tonnes, dans NA62. (CERN-PHOTO-201409-176 – 4)

dans la diffusion élastique proton-proton pour une énergie dans le centre de masse de 8 TeV.

En vue de la deuxième période d'exploitation, des travaux de consolidation et d'amélioration ont été menés sur les pots romains, dispositifs cylindriques permettant de disposer les détecteurs au plus près du faisceau. De nouveaux pots destinés à recevoir des détecteurs de temps de vol de haute précision pour une exploitation à haute luminosité ont été ajoutés. La collaboration a élaboré une proposition d'amélioration et un rapport technique de conception concernant les mesures du temps de vol. Elle a également présenté un rapport technique de conception conjoint avec CMS. Ces documents, avalisés par le Comité LHC, décrivent les travaux de consolidation et d'amélioration devant être menés pour répondre aux objectifs de physique de la deuxième période d'exploitation.

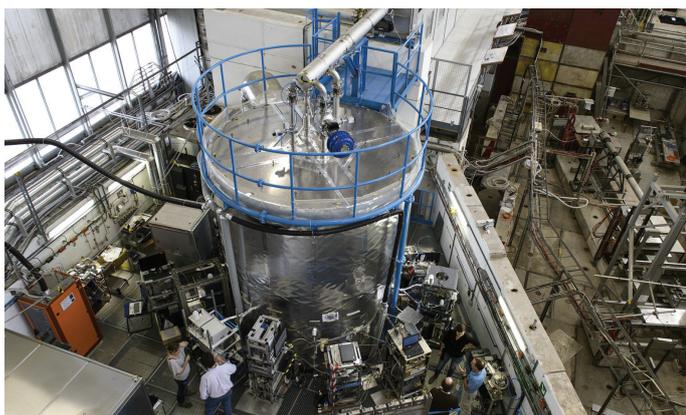
Faisceaux du SPS

En octobre, après le LS1, le SPS a recommencé à fournir des protons aux expériences de la zone Nord, sur le site de Préveessin. L'expérience COMPASS (NA58) a achevé ses préparatifs pour sa collecte de données en 2015. Elle étudiera l'impact d'un faisceau de pions de 190 GeV sur une cible d'ammoniac polarisée transversalement. L'objectif est de mesurer pour la première fois les effets de la polarisation des protons de la cible sur la production de paires de muons dans la réaction $\pi^+p \rightarrow \mu^+\mu^-X$. La ligne de faisceau a subi des modifications complexes, notamment le déplacement de deux mètres de la plus grande cible de protons polarisés du monde et de ses aimants supraconducteurs afin d'installer l'absorbeur, composé de tungstène, d'oxyde d'aluminium et de béton. Cette cible ne laisse passer que les muons (et les neutrinos), mais génère aussi de nombreuses particules de basse énergie, ce qui complique la reconstitution des événements. En 2014, la nouvelle configuration a pu être mise en service lors de l'exploitation pilote de deux mois, sans que la cible ne soit toutefois encore polarisée.

L'expérience NA61/SHINE utilise le faisceau du SPS pour comprendre dans quelles conditions et comment les quarks et les gluons, habituellement confinés dans les hadrons, peuvent se déplacer librement sous la forme d'un plasma quark-gluon. En 2014, la collaboration a publié les premiers résultats de ses études sur les collisions proton-proton et béryllium-béryllium aux énergies du SPS. Étonnamment, les collisions p-p montrent des variations en fonction de l'énergie semblables à celles liées à l'apparition du déconfinement dans les collisions Pb-Pb à NA49, une expérience précédente auprès du SPS. D'autre part, les résultats des collisions p-p et Be-Be n'ont montré aucune trace d'un hypothétique point critique au-delà duquel il y aurait une transition en douceur entre les phases de confinement et de déconfinement de la matière.

Avec le retour du faisceau dans le SPS, NA61/SHINE a pu tester plusieurs améliorations apportées pendant le LS1 à la ligne de faisceau, aux détecteurs et aux logiciels d'analyse. En outre, le Comité de la recherche du CERN a approuvé l'élargissement du programme de physique de NA61/SHINE pour inclure les mesures de la production de hadrons utiles à la modélisation des faisceaux de neutrinos pour les expériences en cours ou futures à Fermilab.

Le nouveau détecteur NA62 a reçu son premier faisceau du SPS en octobre. Début septembre, la dernière des quatre chambres de trajectographie du détecteur à pailles a été descendue à son emplacement dans l'expérience. Chaque chambre est constituée de 16 couches de pailles remplies de gaz, d'une grande fragilité, détectant les particules chargées qui les traversent. C'est la première fois qu'un dispositif de cette taille est placé directement dans l'enceinte à vide d'une expérience, ce qui va permettre de mesurer la trajectoire et l'impulsion des particules chargées avec une grande précision. Le principal objectif de l'expérience est d'explorer une échelle infinitésimale (10^{-21} mètre), en étudiant des désintégrations très rares du kaon. L'expérience NA63 étudie les effets quantiques des interactions se produisant dans un champ magnétique élevé lorsque des particules de haute énergie traversent de fines cibles amorphes



L'expérience CLOUD. (CERN-EX-1310264-02)



Le nouveau bâtiment EAR2 pour la source de neutrons n_TOF. (OPEN-PHO-CIVIL-2015-002 – 1)

et cristallines. En 2014, la collaboration a publié, avec les physiciens de l'étude CLIC (voir p. 20), des calculs sur le phénomène du *beamstrahlung*, à partir de comparaisons avec les données de NA63. Le *beamstrahlung* est un facteur limitatif des études sur les collisionneurs électron-positon de nouvelle génération tels que le CLIC. Il apparaît lorsque les particules d'un paquet de haute énergie « perçoivent » un champ électrique fort dû au paquet arrivant en sens opposé, entraînant l'émission d'un rayonnement intense. La force de ces champs peut avoir des effets indésirables tels que la perte de polarisation du faisceau ou des faisceaux plus diffus. Inversement, comme l'ont montré d'autres membres de la collaboration NA63, les effets de la polarisation des champs extrêmement forts peuvent permettre de tester le phénomène appelé biréfringence du vide.

Faisceaux du PS

La collaboration CLOUD cherche à répondre à deux des questions les plus complexes de la science de l'atmosphère : comment les nouvelles particules d'aérosol sont-elles formées dans l'atmosphère ? Et quels effets ces particules ont-elles sur le climat ? CLOUD tente plus particulièrement de déterminer, à l'aide d'un faisceau du PS, si la formation de ces particules est favorisée par l'ionisation des rayons cosmiques galactiques. En mai, la collaboration a montré dans une étude expérimentale publiée dans *Science* que les vapeurs biogènes oxydées se combinent avec de l'acide sulfurique pour former de nouvelles particules, ce qui peut en grande partie expliquer la formation de particules dans la basse atmosphère. Elle a également rendu compte d'études de modélisation à l'échelle mondiale prouvant le rôle fondamental des arbres dans la formation de nouvelles particules dans l'atmosphère, que l'on perçoit sous la forme d'un halo bleu lorsqu'on regarde une montagne lointaine. L'expérience DIRAC, menée au PS entre 2007 et 2012, a mesuré la durée de vie d'« atomes » inhabituels ($\pi^+\pi^-$ et πK) afin de vérifier les prédictions à basse énergie de la chromodynamique quantique pour les quarks légers. Ces durées de vie peuvent

être exprimées comme la fonction linéaire connue de deux longueurs de diffusion, qui caractérisent l'interaction. Les études menées tout au long de 2014 ont permis à la collaboration de mesurer pour la première fois la durée de vie de l'atome πK . Des analyses plus poussées ont permis d'observer pour la première fois des atomes de pionium à vie longue, avec une signification statistique supérieure à 7σ . Ces résultats permettent d'obtenir une nouvelle combinaison linéaire des longueurs de diffusion, et ainsi de mesurer chacune d'elles.

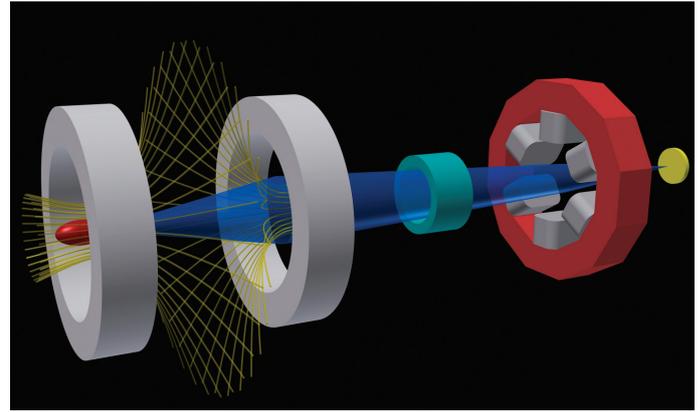
L'installation de mesure du temps de vol des neutrons, n_TOF, est une source de faisceaux pulsés de neutrons produits par l'interaction de protons du PS sur une cible en plomb. Les neutrons sont collimatés et guidés à travers des tubes de faisceau sous vide jusqu'à deux zones d'expérimentation : EAR1, placée à l'horizontale à environ 185 m de la cible, et EAR2, installée à la verticale à environ 20 m. EAR2, récemment construite, a reçu son premier faisceau de neutrons le 25 juillet. Son exploitation, parallèle à celle d'EAR1, vient compléter les recherches dans celle-ci. Le programme de physique d'EAR1 a inclus les mesures de la capture de neutrons du germanium 73 et du thulium 171, radioactif. La nouvelle ligne de faisceau a été mise en service à EAR2 et une expérience a été menée en fin d'année sur la section efficace de la fission du plutonium 240. Cette section efficace a été mesurée précédemment dans EAR1, lors d'une campagne d'expérimentation de plus de deux ans. Dans EAR2, les mesures ont pu être effectuées après six semaines, grâce à un flux de neutrons plus élevé et à un taux de neutrons bien supérieur, ce qui a permis de mesurer aussi la section efficace dans la zone située au-dessous du seuil. La faisabilité des expériences sur la fission dans EAR2 a ainsi pu être démontrée.

Le réveil d'ISOLDE

L'installation ISOLDE produit et accélère des faisceaux de noyaux radioactifs. La collaboration a tiré parti du LS1 pour améliorer le dispositif, notamment ISOLTRAP, et pour construire et mettre



La station IDS (*ISOLDE Decay Station*) est l'une des deux nouvelles stations d'expérimentation permanentes à l'installation ISOLDE. Elle permettra d'étudier la désintégration bêta et de mesurer la durée de vie d'états excités. (CERN-PHOTO-201410-212 – 5)



Le piège à rebroussement d'ASACUSA. De gauche à droite : le piège à rebroussement permettant de produire les atomes d'antihydrogène, une cavité micro-ondes (en vert) pour provoquer des transitions hyperfines, un aimant sextupôle (en rouge et gris) et un détecteur d'antihydrogène (en jaune). (Institut Stefan Meyer)

en service deux nouvelles stations permanentes, IDS (*ISOLDE Decay Station*) et VITO (*Versatile Ion-polarized Technique on-line*), qui a même recueilli des données. Des dispositifs mobiles ont été amenés par de nouveaux groupes d'ISOLDE, notamment des détecteurs de neutrons proposés par des groupes de Caen et de Madrid pour étudier la corrélation neutron-neutron dans le lithium 11, et le dispositif TATRA, du groupe de Bratislava, destiné à mesurer les désintégrations du mercure pauvre en neutrons.

Après le redémarrage du Booster du PS, qui fournit des protons à ISOLDE, 26 expériences et trois exploitations d'essai ont été menées entre fin juillet et mi-décembre. La toute première période d'expérimentation, lancée le 1^{er} août, a été accueillie dans l'effervescence. Des échantillons de lanthanides ont été collectés et envoyés à d'autres laboratoires (du terbium 149 et du terbium 155 à l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, et du néodyme 140 à l'Université technique du Danemark, à Risø). Il s'agissait de trouver des éléments chimiques contenant des isotopes utilisables dans le domaine médical.

Grâce à un ensemble de dispositifs de pointe complémentaires, on a pu déterminer les propriétés de l'état fondamental d'une longue liste d'isotopes de l'astate, l'élément chimique le plus rare sur Terre, avec des taux de production et des demi-vies qui varient de huit ordres de grandeur. Ce succès résulte de la synergie de trois équipements : les lasers de la source d'ions laser à ionisation résonnante, le dispositif à moulinet équipé de détecteurs de silicium et de germanium, et le dispositif de mesure de temps de vol multi-réflexeur d'ISOLTRAP utilisé comme spectromètre de masse.

Le projet ISOLDE à haute énergie et haute intensité (HIE-ISOLDE) a bien progressé en 2014 (voir p. 19), suscitant un intérêt croissant dans le monde, dans l'attente de son démarrage avec des faisceaux post-accélérés, prévu fin 2015.

Cette année passionnante s'est conclue avec l'édition annuelle de l'atelier ISOLDE et la réunion des utilisateurs, du 15 au 17 décembre, avec une célébration le 17 décembre du

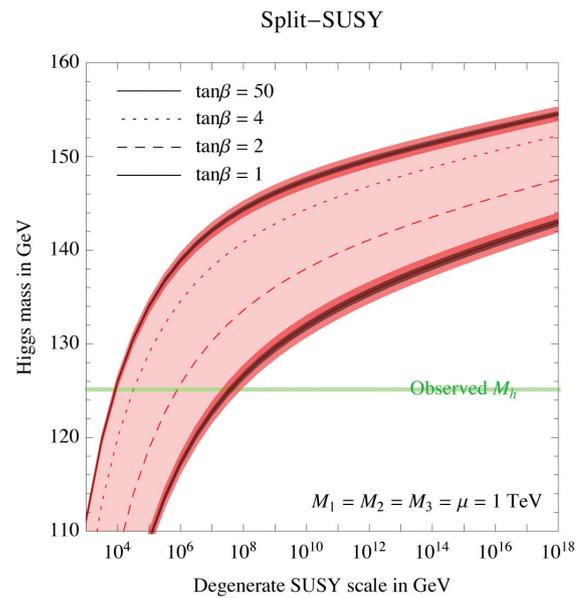
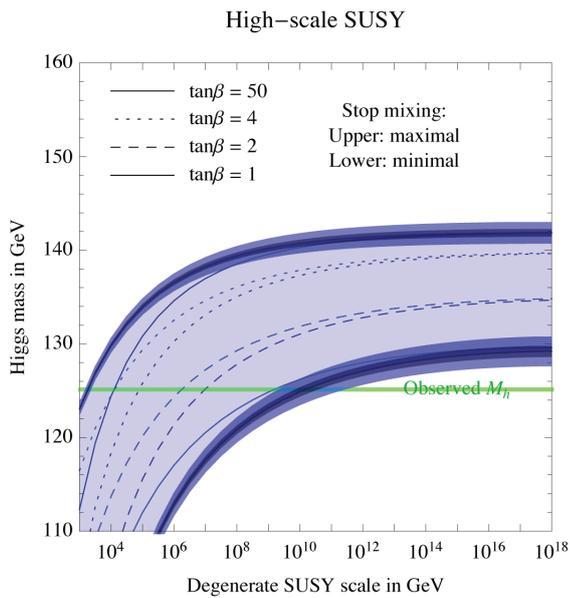
cinquantenaire de l'approbation d'ISOLDE par le Conseil, en présence de Torleif Ericson, qui était à l'époque Président du Comité des expériences de physique nucléaire. Des interventions de tous les anciens responsables du groupe ont permis de revenir sur les étapes marquantes de l'histoire de l'installation.

Zoom sur l'antimatière

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) produit des antiprotons de basse énergie destinés à de nombreuses recherches, notamment la synthèse de l'antihydrogène. Les antiprotons sont créés lorsque les protons du PS entrent en collision avec une cible. Le retour du faisceau dans les expériences de l'AD a eu lieu en octobre, après les améliorations effectuées pendant le LS1. La collaboration ALPHA a poursuivi l'analyse des données collectées avant le LS1 et a présenté une nouvelle mesure précise de la charge de l'antihydrogène, qui s'est révélée compatible avec zéro jusqu'à la huitième décimale. La collaboration ASACUSA, qui a pour objectif de réaliser une spectroscopie micro-ondes très précise de l'antihydrogène, a également publié des résultats à partir de données collectées en 2012 rendant compte de la toute première production d'un faisceau d'atomes d'antihydrogène.

À l'automne, l'arrivée des faisceaux a rendu possible la mise en service d'un nouveau dispositif amélioré, ALPHA-2, qui permet un meilleur accès des lasers pour sonder les atomes d'antihydrogène piégés. Toujours dans le hall de l'AD, la collaboration ATRAP a terminé l'installation d'un piège à antihydrogène de deuxième génération pour permettre l'utilisation de lasers. L'expérience ASACUSA a mis en service une configuration nouvelle, qui comprend un nouvel aimant supraconducteur à « double pointe », un nouveau trajectographe et un nouveau détecteur final d'antihydrogène.

Le LS1 a aussi vu l'installation d'une nouvelle ligne de faisceau pour l'expérience BASE, dont l'objectif est de réaliser des mesures de haute précision du moment magnétique de l'antiproton. La collaboration a installé et mis en service l'ensemble du dispositif,



a recueilli des données sur des antiprotons pris isolément et a actionné un piège réservoir à antiprotons.

Les expériences AEGIS et GBAR sont conçues pour mesurer l'interaction gravitationnelle de l'antimatière. La collaboration AEGIS a terminé l'installation du dispositif et sa mise en service avec des antiprotons et des positons en vue de son exploitation en 2015. Pendant ce temps, les études concernant la future expérience GBAR d'ELENA (voir p. 18), à l'AD, se sont poursuivies, avec une version de démonstration déjà bien avancée à Saclay ; la mise en œuvre technique du dispositif au CERN est prévue pour 2016.

Astroparticules

Deux expériences du CERN qui traquent les particules pouvant être à l'origine de la matière noire ont poursuivi leurs recherches pendant le LS1 en utilisant les aimants dipolaires du LHC. L'expérience CAST scrute le soleil à la recherche d'axions produits par l'astre et d'autres particules candidates à la matière noire. En 2014, après la mise en service d'un deuxième système optique à rayons X améliorant encore la détection des axions solaires, les tubes de son aimant ont continué de fonctionner sous vide. Le détecteur au silicium, qui explorait la gamme d'énergie en-deçà de 1 KeV, a été remplacé par un détecteur InGrid à pixels sur le plan focal de l'un des télescopes à rayons X. La sensibilité de CAST à l'énergie noire devrait ainsi être améliorée. OSQAR, une expérience qui cherche en quelque sorte à détecter un rayonnement de lumière à travers un mur, traque les possibles oscillations quantiques entre les photons optiques et les particules candidates à la matière noire, telles que les axions ou les particules ressemblant à l'axion (ALP), dans le champ magnétique transversal de 9 teslas produit par deux dipôles LHC de réserve. En 2014, l'expérience a fonctionné avec une sensibilité exceptionnelle, en utilisant un rayonnement laser continu de 18,5 W émettant dans le vert (532 nm), mais n'a pas détecté de photon régénéré au-delà du « mur ». Ces résultats repoussent les limites de l'existence possible des axions et

des ALP à un niveau inédit pour une telle expérience menée en laboratoire.

Détecteurs pour le collisionneur linéaire

Le projet Détecteurs pour le collisionneur linéaire (LCD), mené au CERN, englobe des recherches sur la physique et les détecteurs pour un futur collisionneur linéaire électron-positon de haute énergie réalisées en collaboration avec des groupes d'étude partout dans le monde. Le CERN accueille notamment la collaboration CLICdp (*CLIC Detector and Physics*), qui s'intéresse au potentiel de physique de l'étude CLIC (voir p. 20) et s'attache à concevoir un détecteur adapté. En 2014, sa deuxième année d'existence, CLICdp a accueilli cinq nouveaux instituts et compte désormais 25 instituts et plus de 130 participants. Les études CLIC et ILC devant relever des défis similaires, CLICdp collabore également avec les équipes travaillant sur les concepts des détecteurs ILD et SiD.

En 2014, les simulations et le travail d'ingénierie ont avant tout visé à transformer les deux modèles de conception figurant dans le rapport préliminaire de conception du CLIC en un modèle optimisé. Pour cela, il a fallu définir les paramètres de dimension et de granularité des trajectographes et des calorimètres, et choisir les technologies adaptées. Le scénario prévoyant la construction de CLIC en plusieurs phases a également été réexaminé pour mieux définir l'étape à l'énergie la plus basse. À cette énergie, on va s'intéresser à la production de Higgs uniques et de paires de quarks top, mais le potentiel de physique dans les deux cas dépend de l'énergie exacte dans le centre de masse. Une solution de compromis permettant une physique précise aussi bien du top que du Higgs est à l'étude ; le résultat sera connu en 2015. Les études de simulation de physique ont continué le référencement des performances attendues des détecteurs et des algorithmes de reconstitution, ainsi que du potentiel de mesure des propriétés du Higgs. Un rapport exhaustif sur la physique du Higgs au CLIC est en cours d'élaboration et sera publié en 2015.

En physique des particules, le problème de la hiérarchie renvoie à l'écart considérable observé entre la masse mesurée du boson de Higgs, par exemple, et les prédictions fondamentales de la théorie quantique des champs. Généralement, pour rendre compte de cet écart, on intègre la supersymétrie. La figure montre les prédictions de la masse du boson de Higgs en fonction de l'énergie à laquelle se brise la supersymétrie, avec deux scénarios possibles : une supersymétrie à une énergie élevée et une supersymétrie dédoublée. La limite supérieure pour la supersymétrie constitue un résultat intéressant. Elle montre qu'une théorie selon laquelle la supersymétrie se briserait autour de 10^{19} GeV, c'est-à-dire à l'échelle de Planck, sans aucun changement à des énergies plus basses, est incompatible avec la masse du boson de Higgs mesurée au CERN. (D'après <http://arxiv.org/abs/1407.4081>)

Le retour des faisceaux alors que le LS1 touchait à sa fin a permis de mener des essais sur des détecteurs au PS et au SPS. Les éléments du prototype de détecteur à pixels, notamment les puces TimePix3 et CLICpix couplées à des capteurs fins, ont été testés et ont donné des résultats prometteurs. CALICE, avec l'aide de la collaboration CLICdp, a testé un système calorimétrique électromagnétique-hadronique ; la collaboration FCAL a donné la première démonstration du fonctionnement multiplan du calorimètre aux petits angles, et des études d'ingénierie en laboratoire ont vérifié le système de refroidissement à l'air du détecteur à vertex au moyen d'un modèle 3D grandeur nature et de la machine à fumée du service de Secours et du Feu du CERN.

En théorie

En 2014, l'unité Théorie (PH-TH) a continué de jouer un rôle de premier plan en tant que centre de référence dans tous les domaines de la physique des particules théorique. Ses recherches ont notamment porté sur la physique du Modèle standard directement liée au LHC, les aspects formels de la théorie quantique des champs, et la théorie des cordes. D'importants efforts ont été consacrés aux conséquences de la découverte du boson de Higgs, notamment au « problème de la hiérarchie » (voir p. 30). Les recherches ont majoritairement porté sur la phénoménologie en physique des particules au-delà du Modèle standard (extensions fondées sur la supersymétrie ou sur plus de quatre dimensions), le domaine des astroparticules, la cosmologie et la physique des ions lourds, mais aussi sur la théorie des champs sur réseau et la physique mathématique. Environ la moitié des travaux ont porté sur la physique des particules du Modèle standard ou au-delà du Modèle standard. Les projets recouvraient souvent plusieurs domaines, la matière noire revêtant par exemple un intérêt pour la cosmologie comme pour la physique des collisionneurs, et la physique des trous noirs étant liée aux collisions d'ions lourds d'un point de vue holographique. En moyenne, les membres du groupe ont publié

un article par jour. Le groupe est constitué de 18 membres du personnel et peut compter plus de 35 boursiers. En outre, il accueille entre 10 et 15 attachés scientifiques payés, et, chaque année, environ 800 visiteurs à court terme, payés ou non payés. Au total, l'effectif dépasse les 120 personnes pendant les mois d'été. La rotation rapide du personnel est une conséquence du rôle de premier plan que joue le groupe au niveau mondial pour les échanges scientifiques.

Les instituts de théorie, ateliers informels pouvant durer plusieurs semaines, sont importants pour favoriser la collaboration internationale et l'échange d'idées. Le but est d'optimiser les ressources en réunissant des chercheurs invités ayant des intérêts communs et en partageant les ressources avec la communauté internationale. En 2014, quatre instituts ont eu lieu sur les thèmes « Résurgences et transséries en série dans les théories quantique, de jauge et des cordes », « Avancées conceptuelles dans le domaine de la théorie de jauge sur réseau », « Résultats des théories de jauge supersymétriques de dimensions variées » et « Holographie numérique ».

Les membres de l'unité PH-TH ont participé très activement à plusieurs conférences et ateliers internationaux. Ils ont également pris part aux travaux du *Particle Data Group* et à de nombreuses activités d'enseignement au CERN, notamment au programme de formation académique, au programme des étudiants d'été et à celui des enseignants du secondaire, ainsi qu'aux écoles européenne et latino-américaine de physique des hautes énergies. Activité particulièrement importante, le Centre de physique du LHC du CERN (LPCC) organise des ateliers et conférences et compte plusieurs groupes de travail. En novembre, l'unité PH-TH a tenu son séminaire annuel, lors duquel elle a présenté au groupe l'ensemble des activités de recherche en cours. L'objectif était de faciliter l'intégration des nouveaux membres et d'échanger des idées dans un environnement stimulant. Le programme du séminaire donne une bonne idée des travaux du groupe en 2014 (voir <https://indico.cern.ch/event/302647/other-view?view=standard>).