



Le 3 juin 2015, applaudissements dans la salle de contrôle d'ATLAS pour saluer les premières collisions de protons à une énergie inédite de 13 TeV. (CERN-PHOTO-201506-128-7)

# Physique et expériences

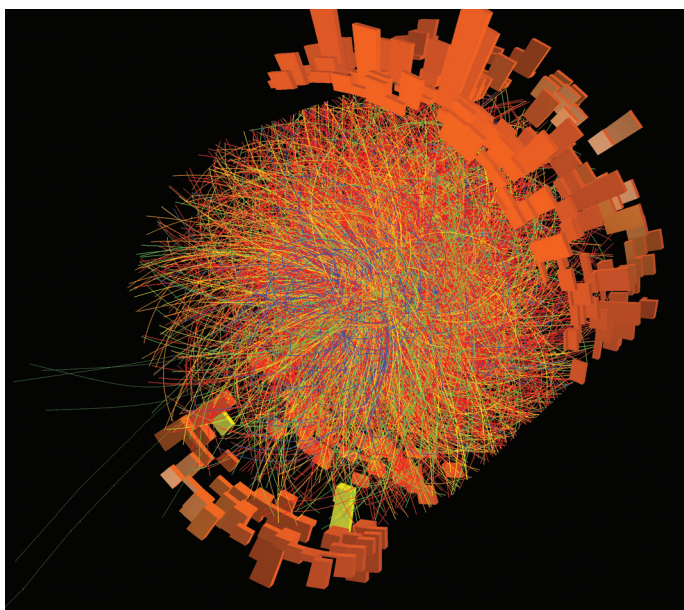
Après deux ans de travaux de maintenance et de consolidation et des mois de préparation, le LHC a repris du service en 2015. Le 3 juin, il a commencé à produire des données pour la physique à 13 TeV, soit près du double de l'énergie de collision de la première période d'exploitation. La saison 2 du LHC pouvait commencer.

## ALICE rajeunie

C'est avec une expérience ALICE rajeunie que le LHC a repris du service. Pendant le premier long arrêt, ALICE a fait peau neuve afin d'améliorer sa performance globale. De nouveaux modules sont venus compléter le détecteur à rayonnement de transition, offrant une couverture azimutale totale. L'étendue du spectromètre à photons a été élargie grâce à un quatrième module. Un nouveau calorimètre électromagnétique a été positionné dos à dos avec le calorimètre existant et un détecteur a été ajouté au système de déclenchement. En prévision d'un flux de particules plus important, le mélange de gaz dans la chambre à projection

temporelle a été modifié, de même que l'électronique de lecture de plusieurs systèmes de détection. ALICE a ainsi pu collecter une vaste quantité de données avec les collisions proton-proton à 13 TeV et à 5,02 TeV, et les collisions plomb-plomb à 5,02 TeV. Le volume de données collectées représente 7 pétaoctets, l'équivalent du volume recueilli pendant toute la première période d'exploitation. Ce chiffre traduit la spectaculaire performance du LHC, car, la luminosité nominale initiale, en mode « ions », a été largement dépassée, augurant d'un programme scientifique prometteur.

En parallèle, l'analyse des données de la première période d'exploitation avance à grands pas. Sur la base d'analyses complètes et détaillées, un modèle standard des collisions d'ions lourds prend forme. Les mesures prises révèlent que la matière nucléaire portée aux températures atteintes lors des collisions plomb-plomb au LHC possède toutes les caractéristiques dynamiques et thermodynamiques du liquide le plus parfait,



Une des premières collisions de faisceaux stables d'ions lourds enregistrées par ALICE le 25 novembre 2015. (OPEN-PHO-EXP-2015-013-2)

et nous donnent un aperçu du potentiel de la poursuite de ces mesures sur un échantillon plus volumineux pour préciser les propriétés fondamentales du plasma quark-gluon.

Par ailleurs, il a été observé que de nombreuses signatures attribuées à la dynamique collective d'un milieu dans les collisions plomb-plomb étaient aussi présentes dans des systèmes plus légers, comme dans des collisions proton-plomb ou proton-proton. Suite à cette observation, les recherches ont été réorientées vers la compréhension globale des collisions hadroniques dans les petits et grands systèmes. Bien que l'atténuation des jets de particules par le milieu chaud et dense, une des caractéristiques des collisions plomb-plomb, ne semble pas se produire dans les collisions proton-plomb, on peut se demander si le mécanisme fondamental qui donne lieu à la dynamique collective dans les collisions plomb-plomb est présent dans les collisions de hadrons plus légers, ou si des gouttelettes de plasma quark-gluon se forment lors de ces collisions. Pendant la deuxième période d'exploitation du LHC, ALICE collectera et analysera des données pour répondre à ces questions et comprendre le mécanisme fondamental.

ALICE a prouvé sa polyvalence par des mesures qui ont conduit à de nouveaux résultats inédits. Par exemple, une mesure de haute précision a été réalisée sur la différence de masse entre matière et antimatière pour le deuton et le  $^3\text{He}$ , améliorant la précédente mesure de plus d'un ordre de grandeur. Elle a permis de tester l'une des symétries les plus fondamentales de la nature. Autre exemple : une analyse détaillée du spectre des particules  $J/\Psi$  offre de nouvelles perspectives pour l'étude du plasma quark-gluon.

En 2015, la phase de R&D pour le programme d'amélioration d'ALICE, qui doit être mis en place à la fin de la deuxième période d'exploitation, touchait à sa fin. La création des prototypes a démarré et la production en série devrait débuter en 2016.

## ATLAS – cinq axes de travail

Le programme d'ATLAS pour 2015 s'articulait autour de cinq axes : remettre en marche le détecteur et mettre en service le

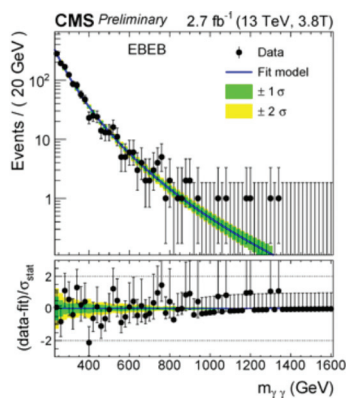
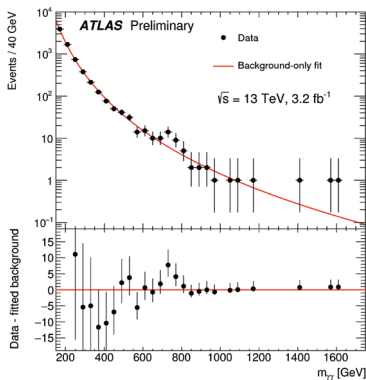
logiciel et le modèle d'analyse développés pendant la période d'arrêt ; accumuler des données de bonne qualité à une énergie de collision proton-proton (pp) de 13 TeV ; analyser les nouvelles données pour les mesures du Modèle standard et la recherche d'une nouvelle physique ; poursuivre l'analyse des données de la première période d'exploitation, et préparer le document de cadrage pour la phase 2 du programme d'amélioration du détecteur. Ce document a été accueilli favorablement par le Comité d'examen des ressources du LHC, qui a validé la première étape du processus d'approbation de la phase 2 du programme d'amélioration, permettant le passage à la phase des rapports techniques de conception.

L'année a commencé par la mise en service du système de déclenchement et du détecteur à l'aide de rayons cosmiques et de données de collisions pp. Les premières données obtenues avec un faisceau stable ont été enregistrées le 3 juin. Les données de plus de 200 millions de collisions pp avec des faisceaux de faible intensité ont été collectées à des fins d'alignement et d'études sur les trajectographes, notamment sur le nouveau sous-détecteur à pixels d'ATLAS : la couche b insérable (IBL). Ces données ont été utilisées pour une nouvelle observation par ATLAS de l'effet de crête (« *ridge effect* ») à 13 TeV, une configuration particulière de corrélations à grande portée entre particules qu'ATLAS a pu attribuer à des modulations d'impulsions de particules isolées, similaires à celles déjà observées dans des collisions proton-plomb.

Pendant l'été, ATLAS a présenté ses premières mesures à 13 TeV de processus mous de QCD et de production de particules W et Z et de quarks top. La recherche de nouveaux phénomènes de masse élevée soumis à l'interaction forte parmi les premiers  $100 \text{ pb}^{-1}$  de données n'a pas permis d'observer de signal. ATLAS a aussi préparé un large éventail de résultats de performance du détecteur montrant une bonne compréhension des premières données.

Lors de son séminaire de fin d'année et des conférences qui ont suivi, la collaboration a présenté un grand nombre d'analyses sur la base d'un échantillon de  $3,6 \text{ fb}^{-1}$  de données de collisions pp

## La chasse aux bosses



En physique des particules, une découverte peut parfois prendre la forme d'une « bosse » sur une courbe représentant une distribution de phénomènes connus. Par exemple, la physique connue peut expliquer une distribution d'événements à deux photons dont la courbe s'abaisse régulièrement en fonction d'une grandeur que les physiciens appellent la masse invariante et qui est reliée à l'énergie et l'impulsion totales de la particule initiale. Si une nouvelle particule est produite à une certaine masse, et qu'elle produit aussi des photons, cette nouvelle source de paires de photons formera une bosse dans la distribution : un excédent de paires de photons par rapport aux modèles de physique connue. C'est un signal comme celui-là qui a contribué à la découverte du boson de Higgs en 2012.

Fin 2015, une petite bosse observée aux alentours de 750 GeV par ATLAS et CMS a donné lieu à de nombreuses spéculations. Il pourrait s'agir simplement d'une fluctuation statistique, mais tous les yeux seront rivés sur les deux expériences lorsque la deuxième période d'exploitation reprendra en 2016.

Graphiques produits par ATLAS et CMS montrant une petite bosse dans les données à environ 750 GeV.

à 13 TeV. Ces analyses comprenaient notamment les premières mesures de toutes les productions du boson de Higgs se désintégrant en paires de photons et de bosons Z, d'autres mesures de production du quark top, incluant aussi des processus plus rares comme le top seul (processus électrofaible) et la paire top-antitop associée à un boson W ou Z.

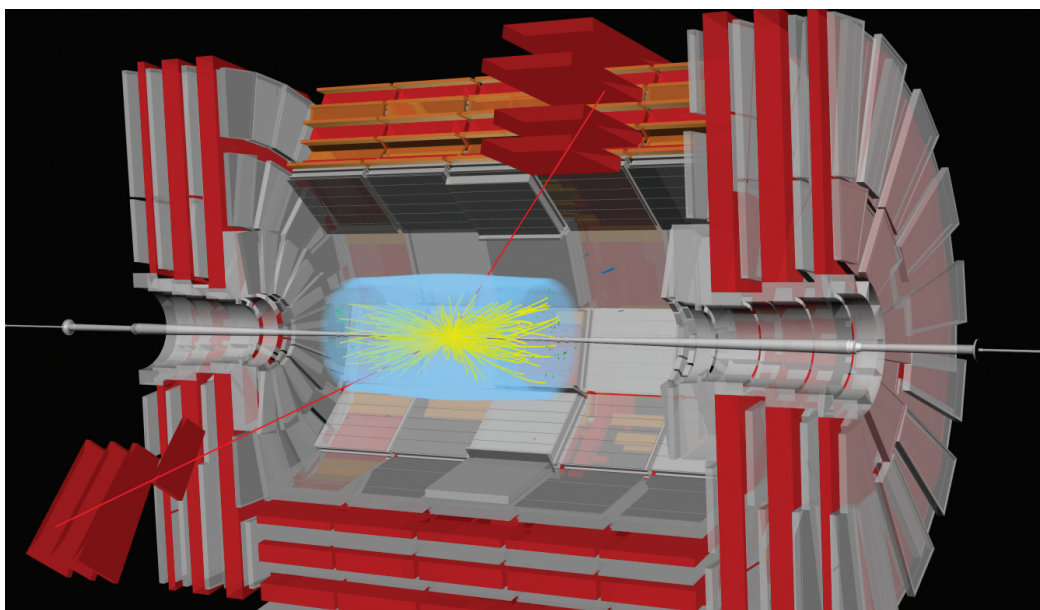
L'accent a été mis sur la recherche de nouveaux phénomènes comprenant des événements avec des jets de haute énergie, des leptons, des photons, des bosons W, Z ou de Higgs, des impulsions transversales manquantes et des combinaisons de ces différents éléments. La majorité des recherches n'ont pas montré d'écart par rapport au Modèle standard. La seule exception notable a été la « bosse » observée à environ 750 GeV dans le spectre de masse des paires de photons. La probabilité qu'un tel effet se produise en l'absence de signal est équivalente à environ deux écarts-type, et un signal potentiel n'est pas totalement exclu par les résultats de la première période d'exploitation. Aucun signal résonnant n'a par ailleurs été observé par ATLAS dans le spectre de masse photon+Z dans les données obtenues à 13 TeV. Le redémarrage du LHC devrait permettre de clarifier l'interprétation de ces faits.

ATLAS a continué de publier des analyses fondées sur les données de la première période d'exploitation ; en avril 2016, la collaboration aura publié 525 articles au total, dont 122 en 2015. Les sujets traités comprennent la violation de CP et les désintégrations rares du méson B. Des articles publiés par ATLAS traitent de la production de paires de bosons W et Z et de mesures

de la production et des propriétés de désintégration du quark top. ATLAS a publié la totalité des mesures pertinentes de la masse, de la production et des propriétés de désintégration du Higgs effectuées pendant la première période d'exploitation. ATLAS et CMS ont uni leurs forces en combinant leurs mesures de la masse et du couplage du boson de Higgs, établissant l'observation de sa désintégration en une paire de leptons tau. Le programme de recherche de la première période d'exploitation s'est achevé en 2015, avec notamment la publication de synthèses détaillées. Le programme de collisions d'ions lourds a été marqué par une nouvelle analyse des asymétries di-jets dans les collisions plomb-plomb, proton-plomb et proton-proton, révélant des propriétés similaires dans les collisions périphériques plomb-plomb et proton-proton, mais d'importantes modifications dans les collisions centrales plomb-plomb.

### CMS – redémarrage en fanfare

La collaboration CMS a été bien occupée en 2015. Au premier trimestre, les travaux à réaliser pendant le LS1 ont été achevés, et la deuxième période d'exploitation a été activement préparée. Les analyses des données de la première période d'exploitation ont été finalisées et publiées, les premières améliorations de la phase I ont été effectuées et celles de la phase II ont fait l'objet d'une proposition technique. Le document de cadrage contenant des études détaillées des améliorations proposées, assorti d'une analyse coût-avantage, a été accueilli favorablement par les comités d'examen, ouvrant la voie aux étapes suivantes.



Un événement produisant deux muons observé par CMS lors de l'exploitation proton-proton du LHC en 2015. La masse du système de deux muons atteint 2,4 TeV, c'est la plus importante jamais mesurée par le détecteur CMS pour un système muon-muon.  
(CMS-PHO-EVENTS-2015-005-5)

Avec le retour des faisceaux au LHC, CMS a pu attaquer la collecte de données à 13 TeV. Les premiers résultats et une première publication ont été présentés lors de plusieurs conférences en juillet. La publication portait sur la quantité de hadrons chargés produits dans des collisions de protons en fonction de l'énergie. Il s'agit de l'une des premières mesures réalisées au début de l'exploration d'un nouveau régime d'énergie car elle permet aux chercheurs de vérifier que les modèles théoriques utilisés pour les simulations sont corrects ; ces modèles ont ainsi pu être confirmés.

Une autre mesure importante lors de l'exploration d'un nouveau régime d'énergie est celle des particules connues. CMS a mesuré des paires de muons issues des collisions ; le spectre de masse montre clairement des pics correspondant à diverses particules allant du méson oméga au boson Z. Ces particules ont été initialement découvertes sur plusieurs décennies, mais il n'a fallu à CMS que quelques semaines pour toutes les observer à 13 TeV, ce qui prouve que l'expérience est fin prête pour découvrir de la nouvelle physique à cette énergie.

Au fil des mois, CMS a poursuivi les analyses des données collectées à 13 TeV, pour présenter en décembre plusieurs résultats de recherche d'une nouvelle physique, notamment un léger excédent, à proximité d'une masse de 750 GeV, dans le mode de désintégration en deux photons. Cet effet a également été observé par ATLAS. Dans les deux cas, la signification statistique était faible, mais le fait que les deux expériences aient remarqué le même phénomène pose question. Il faudra plus de données pour déterminer s'il s'agit d'une fluctuation statistique ou d'un indice révélateur d'une nouvelle physique.

Par ailleurs, la recherche relative à la matière noire s'est poursuivie, avec de nouvelles limites à la production directe de particules supersymétriques. Des recherches ont été menées pour trouver des événements contenant des quarks b qui signaleraient de la matière noire produite en association avec des paires de quarks t ou b, ou encore des bosons de Higgs exotiques et des désintégrations non standard de bosons de Higgs. Jusqu'à présent, ces recherches n'ont pas abouti à un résultat positif, même si les limites de la supersymétrie ont été améliorées.

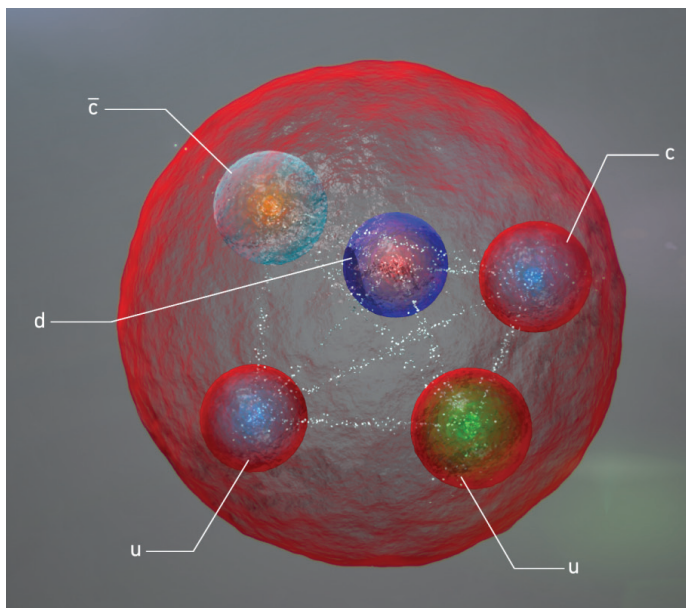
Alors que la deuxième période d'exploitation focalisait l'attention en 2015, CMS a également terminé les analyses des données de la première période, avec plus de 120 nouveaux résultats publiés et présentés lors de conférences. Bon nombre d'entre eux portaient sur les propriétés du boson de Higgs. D'autres concernaient des mesures de haute précision visant à tester le Modèle standard. Elles portaient notamment sur la production de paires de bosons W dans des interactions photon-photon, les taux de production de jets de particules à 2,76 TeV comparés aux taux observés à 8 TeV, la production de paires de photons associées à des jets et la production électrofaible d'un boson W associé à deux jets. Découvert il y a plus de vingt ans, le quark top continue de jouer un rôle essentiel dans les analyses de physique. Les nouveaux résultats de CMS comprenaient des mesures de taux de production top-antitop dans les canaux « tout hadronique » et une mesure du processus top-antitop+bottom-antibottom dans le canal lepton+jets. La recherche de signes d'une nouvelle physique se poursuit aussi, notamment dans le processus  $t \rightarrow cH$ , où le boson de Higgs se transforme en deux photons.

Pour ce qui est des ions lourds, les résultats de la première période d'exploitation portent sur la polarisation de l'upsilon en fonction de la multiplicité chargée dans les collisions proton-proton, sur la production de bosons Z, sur les fonctions de fragmentation des jets dans les collisions proton-plomb et sur la modification nucléaire des états de l'upsilon dans les collisions plomb-plomb.

## LHCb – le club des cinq

L'événement le plus marquant de l'activité de LHCb en 2015 a été la découverte des pentaquarks, particules composées de quarks assemblés selon une configuration qui n'avait encore jamais été observée. Étudier leurs propriétés pourrait permettre de mieux comprendre la composition de la matière ordinaire, c'est-à-dire les protons et les neutrons dont nous sommes faits.

Notre compréhension de la structure de la matière a été bouleversée en 1964, lorsque le physicien des États-unis Murray Gell-Mann a proposé une distinction entre deux catégories de particules : d'une part, les baryons, comme les protons et



LHCb a annoncé la découverte de pentaquarks en 2015. Cette représentation montre une configuration possible des quarks dans un pentaquark, dans laquelle les cinq quarks sont étroitement liés. Ils peuvent aussi être assemblés en un méson (un quark et un antiquark) et un baryon (trois quarks). (OPEN-PHO-EXP-2015-009-3)

les neutrons, qui sont composés de trois objets possédant des charges fractionnaires appelés quarks et, d'autre part, les mésons, qui sont composés de paires quark-antiquark. Gell-Mann a reçu en 1969 le prix Nobel de physique pour ces travaux. Cette théorie prévoit aussi l'existence d'autres états composites de quarks, notamment des pentaquarks, composés de quatre quarks et d'un antiquark.

Les précédentes expériences qui cherchaient des pentaquarks n'avaient pas obtenu de résultats probants. S'il en va autrement pour LHCb, c'est parce qu'elle a été en mesure de chercher des pentaquarks à partir de nombreux angles différents, et que toutes les observations ont mené à la même conclusion. C'est un peu comme si les études précédentes avaient cherché des silhouettes dans l'obscurité, tandis que LHCb menait ses recherches avec de la lumière, et sous tous les angles.

Les données de la première période d'exploitation ont aussi permis de mesurer l'un des paramètres essentiels pour décrire la différence entre matière et antimatière. Ces paramètres sont contenus dans ce qu'on appelle le « triangle d'unitarité », caractérisé par les angles alpha, bêta et gamma. LHCb a réalisé la meilleure mesure de l'angle le moins connu, gamma, permettant de faire progresser la compréhension de l'asymétrie matière-antimatière. L'expérience a également publié une analyse conjointe avec CMS d'un processus extrêmement rare, la désintégration de la particule  $B^0_s$  en deux muons. D'après le Modèle standard, ce phénomène devrait se produire environ quatre fois sur un milliard de désintégrations, mais il n'avait jamais été observé auparavant. Étudier ces désintégrations pourrait permettre de tester des théories au-delà du Modèle standard, comme la supersymétrie.

La deuxième période d'exploitation commence très bien pour LHCb, qui a collecté des données avec une grande efficacité. Une approche révolutionnaire en matière d'acquisition de données a permis de produire très rapidement de premiers résultats. Les résultats de physique connue, notamment sur les particules  $J/\psi$ , sont essentiels pour débiter une exploitation à une nouvelle énergie. Ils ont été présentés lors d'une conférence quelques semaines après le début de la prise de données. LHCb

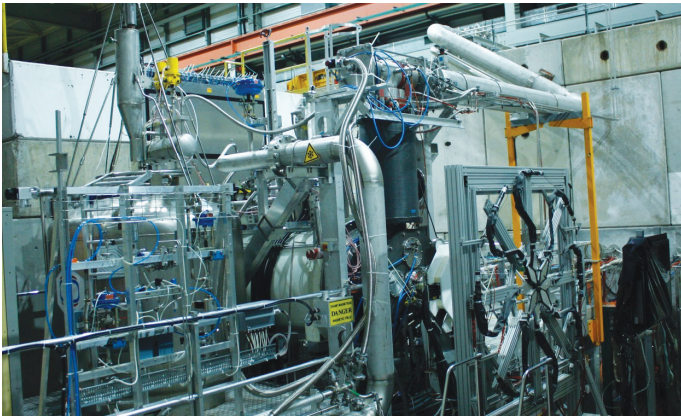
a également collecté pour la première fois des données sur des collisions d'ions plomb.

Les équipes de LHCb préparent aussi l'amélioration de l'expérience qui aura lieu pendant le deuxième long arrêt à partir de 2019. Il s'agit d'un ambitieux projet consistant à retirer entièrement le système de déclenchement matériel et de faire prendre toutes les décisions de déclenchement par des logiciels situés dans une ferme de processeurs. L'objectif est de lire les données du détecteur à la fréquence de croisement des paquets dans le LHC. Toute l'électronique de lecture sera renouvelée, ainsi qu'un grand nombre de systèmes de sous-détecteurs.

La collaboration LHCb a célébré ses 20 ans en 2015. Pour l'occasion, elle a organisé une fête et une rétrospective des étapes marquantes de son histoire. LHCb a officiellement vu le jour en août 1995, lorsqu'une lettre d'intention a été présentée pour la mise en place de la toute première expérience consacrée à la physique des b sur un collisionneur de hadrons.

## LHCf – zoom sur les petits angles

L'année 2015 a été particulièrement chargée pour l'expérience LHCf, qui étudie les particules neutres émises à très petits angles dans les collisions du LHC. Ces recherches aident les scientifiques à comprendre ce qui se passe lorsque des rayons cosmiques de haute énergie entrent en collision avec l'atmosphère. En 2015, LHCf a collecté ses premières données à 13 TeV, enregistrant quelque 40 millions d'événements en 30 heures de prise de données. Pendant que ces données étaient en cours d'analyse, LHCf a publié des articles sur les données obtenues à 7 TeV. Les résultats ont révélé des écarts par rapport aux modèles utilisés pour interpréter les données sur les rayons cosmiques, qui ont pu ainsi être améliorés. Par ailleurs, LHCf a entamé avec ATLAS une analyse conjointe des données issues de collisions proton-plomb : une démarche très prometteuse.



L'expérience COMPASS dans sa configuration de 2015. (OPEN-PHO-EXP-2016-005-1)



Dans la salle de contrôle de NA62, pendant la mise en service de l'expérience. (OPEN-PHO-EXP-2016-004-1)

## MoEDAL – à la frontière de la découverte

L'expérience MoEDAL est conçue pour la recherche de particules hautement ionisantes révélatrices d'une nouvelle physique. Son détecteur innovant, déployé près de LHCb, est doublement apte à la recherche d'une nouvelle physique ; d'une part, il agit comme un appareil photo géant, composé de détecteurs de traces nucléaires, qui ne serait sensible qu'à la nouvelle physique ; d'autre part, il est capable de piéger des particules hautement ionisantes (par exemple, le monopôle magnétique). L'installation du détecteur complet s'est achevée début 2015, et les premières données ont été collectées au printemps. Le premier article de physique de MoEDAL sera publié au printemps 2016.

## TOTEM – au plus près du faisceau

Pendant le long arrêt technique, la collaboration TOTEM a apporté à ses équipements d'importantes améliorations, parmi lesquelles l'ajout de détecteurs dits « pots romains » effectuant des mesures très près du faisceau. TOTEM, qui mesure la section efficace totale des collisions pp avec une précision inégalée, est un outil exceptionnel d'exploration de la structure du proton. En 2015, l'expérience a publié des résultats montrant comment la section efficace des collisions pp varie en fonction de l'énergie, et présentant des éléments inédits. Ces mesures constituent des points de référence essentiels pour les grandes expériences LHC et serviront à interpréter les gerbes de rayons cosmiques. Pendant la deuxième période d'exploitation, TOTEM traquera les particules exotiques telles que les « boules de glu », ces particules hypothétiques formées de gluons. Grâce à un accord conclu avec CMS, qui lui permet de combiner ses données avec celles de sa grande voisine, TOTEM aborde la deuxième période d'exploitation avec une meilleure sensibilité à la nouvelle physique.

## Expériences au SPS

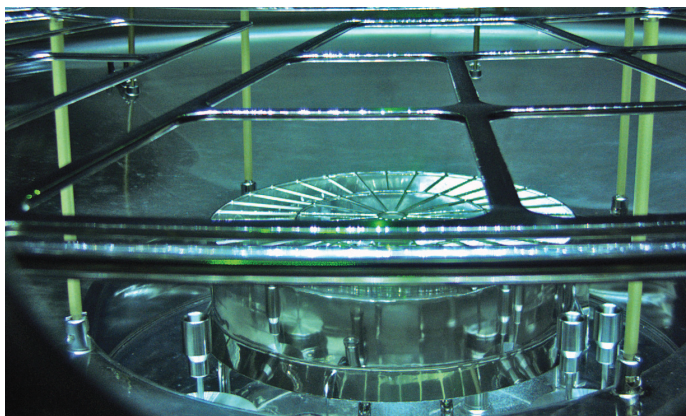
En amont du LHC se trouve le Supersynchrotron à protons (SPS) qui, en plus de fournir des faisceaux au LHC, accueille quatre

expériences actives : NA58, NA61, NA62 et NA63. NA signifie « North Area » (zone Nord), et le numéro indique simplement leur rang dans la série d'expériences menées dans cette zone depuis la première, NA1, dans les années 1970.

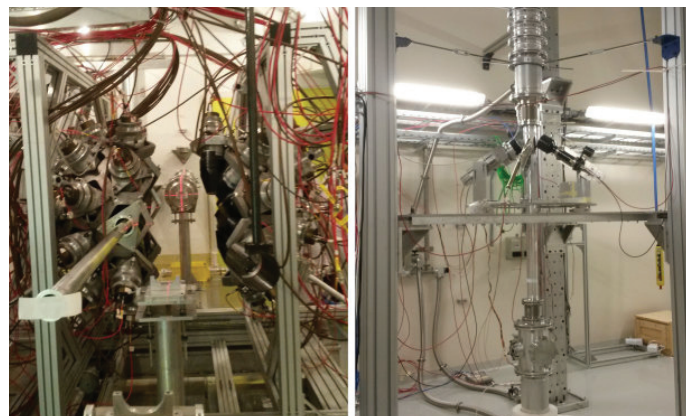
Après une exploitation pilote réussie en 2014, l'expérience COMPASS (NA58) s'est lancée en 2015 dans l'étude des interactions entre un faisceau de pions de 190 GeV et une cible d'ammoniac polarisée transversalement. En examinant comment la polarisation des protons dans la cible influe sur la production de paires de muons, les chercheurs de COMPASS disposent d'un moyen complémentaire de comprendre la structure du proton. Ils pourront notamment mesurer le moment cinétique orbital du proton, un résultat attendu avec impatience. Plusieurs éléments du spectromètre de COMPASS ont été améliorés en vue de cette mesure : l'aimant supraconducteur de la cible polarisée a été entièrement reconstruit, le trajectographe a été consolidé et un nouveau système d'acquisition de données a été mis en place.

L'expérience NA61/SHINE étudie la production de hadrons, des particules régies par l'interaction forte, la force qui empêche les noyaux atomiques de se défaire. L'un des objectifs de cette expérience est de trouver le point critique où la matière ordinaire se transforme en plasma quark-gluon, l'état de la matière juste après la naissance de l'Univers. La technique utilisée consiste à faire varier les particules du faisceau pour étudier les collisions avec des températures et des densités différentes, ces paramètres étant essentiels pour la recherche du point critique. Des progrès ont été accomplis en 2015, avec des faisceaux d'argon fournis pour la première fois par le SPS en février, puis avec des ions plomb en novembre.

La mise en service de l'expérience NA62, qui étudie les désintégrations rares du kaon, a démarré pour de bon en 2015. Si la prédiction du Modèle standard est correcte, NA62 devrait détecter 40 candidats à la désintégration par an. Les scientifiques pourront ainsi étudier la probabilité que les quarks top se désintègrent en quarks down. Comprendre les relations entre les quarks est un moyen efficace de vérifier la cohérence du Modèle standard. En 2015, des données de qualité ont été collectées



Vue interne de la partie inférieure de la chambre à brouillard de CLOUD éclairée par lumière UV lors d'une période d'expérimentation au PS. (OPEN-PHO-EXP-2016-003-1)



La ligne de faisceau horizontale dans EAR1 (à gauche) et la ligne de faisceau verticale dans la nouvelle zone d'expérimentation EAR2. (OPEN-PHO-EXP-2016-006-3)

par tous les sous-systèmes de NA62. Le détecteur a enregistré environ 20 milliards d'événements, démontrant sa performance à haute intensité. Un important sous-système, le Gigatracker, a aussi fait ses preuves, et le système de déclenchement, qui détermine les collisions à enregistrer ou à ignorer, a été mis en service.

NA63 dirige des faisceaux d'électrons et de positons sur des cristaux-cibles pour étudier des processus engendrés dans des champs électromagnétiques très intenses. Ces champs peuvent entraîner la création de nouvelles particules à partir du vide, selon des processus comparables à ceux existant au sein des étoiles à neutrons ou des trous noirs ; leur étude pourrait aider à comprendre les mécanismes de formation des rayons cosmiques de très haute énergie. En 2015, NA63 a également étudié l'émission de photons par les électrons et les positons traversant des champs élevés. Ces travaux pourraient avoir des implications pour de nouvelles techniques pour les lasers et la compréhension du rayonnement de Hawking des trous noirs, qui n'a toujours pas été observé.

## Expériences au PS

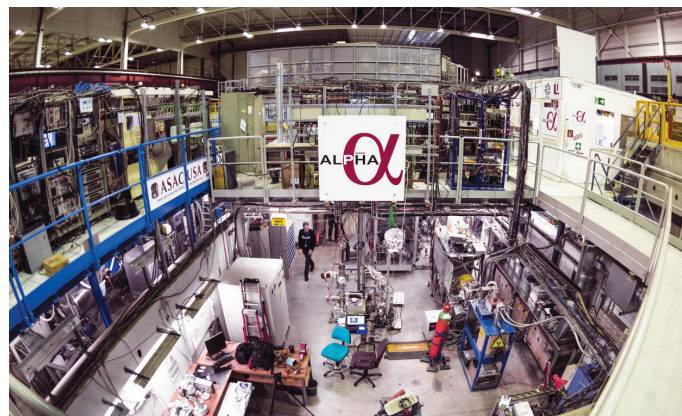
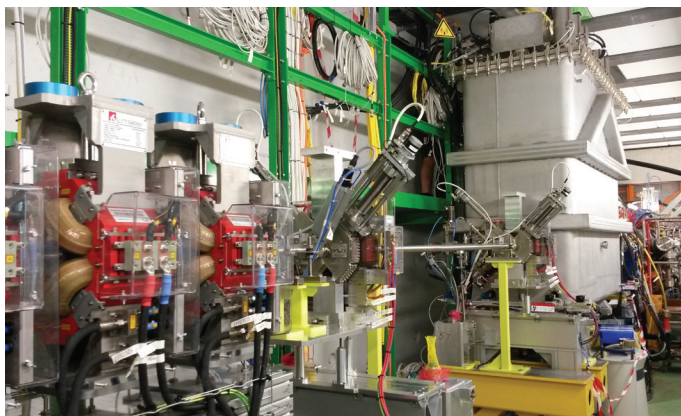
Encore en amont se trouve le PS, un accélérateur en fonctionnement depuis 1959, qui reste la clé de voûte de la chaîne des accélérateurs du CERN. En 2015, le PS a fourni des faisceaux à trois expériences et installations.

L'expérience CLOUD s'intéresse à une question essentielle : la formation des aérosols dans l'atmosphère et son impact sur les nuages et le climat. Grâce à un faisceau du PS, CLOUD étudie l'influence des rayons cosmiques sur la formation des aérosols. En 2015, CLOUD a élargi son champ de recherche sur la nucléation et la croissance des particules d'aérosol pour y inclure deux des vapeurs biogènes les plus abondantes dans l'atmosphère : l'alpha-pinène et le delta-3-carène. De l'acide sulfurique, de l'ammoniac et des oxydes d'azote ont été ajoutés pour recréer les conditions complexes observées au poste de Hyytiälä (Finlande), en forêt, afin de comprendre quelles vapeurs agissent sur la

nucléation et la croissance des particules d'aérosol et comment ces processus sont influencés par la radioactivité naturelle et les rayons cosmiques. Les analyses sont en cours et les premières publications sont attendues en 2016.

L'expérience DIRAC permet aux physiciens de mieux comprendre la force forte en mesurant la durée de vie d'atomes exotiques à vie brève constitués de paires de particules de la famille des mésons. En 2015, DIRAC a observé pour la première fois des atomes  $\pi^+K^-$  et  $\pi^-K^+$ , constitués de pions et de kaons. Ces atomes sont issus de l'interaction de protons du PS avec des cibles en nickel et en platine. Dans la cible, certains de ces atomes se dissocient rapidement, et le pion et le kaon poursuivent seuls leur trajectoire. Les mesures de la durée de vie et d'autres propriétés de ces atomes peuvent ensuite être comparées très précisément aux prédictions théoriques, dans le but de mieux comprendre l'interaction forte.

L'installation de mesure du temps de vol des neutrons (n\_TOF) fournit des faisceaux pulsés de neutrons issus de l'interaction de protons du PS avec une cible en plomb. Les neutrons sont collimatés et guidés vers deux zones d'expérimentation qui fonctionnent simultanément : EAR1, placée à 185 m de la cible, horizontalement, qui collecte des données depuis 2001, et EAR2, située à environ 20 m, verticalement, qui a reçu son premier faisceau en 2014. La mesure du temps de vol permet d'étudier les réactions provoquées par les neutrons en fonction de leur énergie, ce qui a des retombées sur l'étude de la nucléosynthèse stellaire et sur la technologie nucléaire, notamment pour l'élimination des déchets nucléaires. En 2015, le programme de physique d'EAR1 incluait la mesure des rayons gamma émis lors d'une capture neutronique par certains noyaux. Une fission induite par des neutrons a en outre été mesurée sur un noyau de neptunium 237. À EAR2, la mise en service de la ligne de faisceau a été achevée. Des mesures de capture neutronique ont été réalisées sur les isotopes radioactifs thulium 171 et prométhium 147. Les sections efficaces d'émissions de rayons alpha induites par des neutrons ont été mesurées sur du soufre 33



La ligne de faisceau d'ISOLDE qui alimente le dispositif Miniball. On distingue au second plan le premier cryomodule d'HIE-ISOLDE dans son cryostat gris clair. (OPEN-PHO-ACCEL-2016-007-1)

Vue du hall d'expérimentation du Décélérateur d'antiprotons. (CERN-PHOTO-201601-005-11)

et du béryllium 7. Ces dernières données pourraient aider à comprendre pourquoi les mesures de l'abondance de lithium contredisent les prédictions des modèles du Big Bang. Enfin, un nouveau spectromètre à fragments de fissions exotiques, STEFF, a été installé et a collecté ses premières données ; les deux zones d'expérimentation de n\_TOF sont donc pleinement opérationnelles.

## Les faisceaux exotiques d'ISOLDE

L'installation de production de faisceaux exotiques ISOLDE a mené 35 expériences en 2015. L'une d'elles consistait notamment à extraire des faisceaux particulièrement résistants et réfractaires d'ions bore en utilisant la molécule ionisée  $\text{BF}_2^+$ . Un matériau comme le bore est dit réfractaire parce qu'il résiste à des conditions extrêmes et est donc difficile à ioniser. L'extraction permettra l'étude du noyau à halo  $^8\text{B}$ . Les noyaux à halo possèdent un cœur compact de protons et de neutrons, entouré d'un halo épars composé d'autres nucléons. Des systèmes faiblement liés comme ceux-ci permettent d'étudier les limites entre systèmes liés et non-liés.

Cinq expériences concluantes ont été menées à la station de désintégration IDS. Elles portaient sur des éléments allant du  $^{20}\text{Mg}$ , à la limite inférieure de stabilité sous laquelle les noyaux doivent perdre des protons, jusqu'au  $^{132}\text{Sn}$ , doublement magique et très riche en neutrons. Dans les modèles nucléaires, les protons et les neutrons sont répartis en couches et, lorsqu'un noyau contient un certain nombre de protons et de neutrons, ses couches sont pleines : on dit qu'elles sont complètes. Un noyau avec une couche complète est magique. Si les couches de protons et de neutrons sont toutes les deux complètes, il est doublement magique. Les noyaux doublement magiques ont des propriétés spécifiques facilement identifiables : ils sont sphériques et difficiles à exciter. Une question importante de la physique nucléaire porte sur la validité pour les noyaux instables des nombres magiques déterminés pour les noyaux stables. Ce résultat d'ISOLDE aide à répondre à cette question, qui représente un défi pour la théorie.

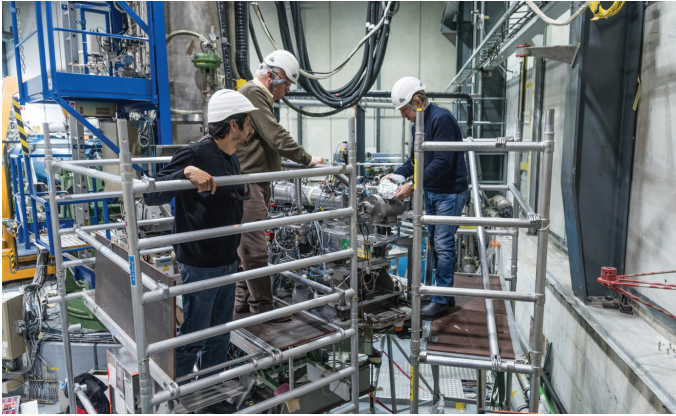
En combinant les données obtenues à la station IDS avec les mesures de masse réalisées par le détecteur ISOLTRAP, la limite supérieure en masse de l'îlot des noyaux déformés contenant environ 20 neutrons, comme  $^{34}\text{Mg}$ , sera bientôt observable. De telles mesures sont capitales pour tester les modèles nucléaires et ainsi comprendre la physique des noyaux. La détermination du rayon quadratique moyen des isotopes de mercure et d'or a également représenté une avancée importante : elle a été obtenue en repoussant les limites de la sensibilité grâce aux dernières innovations technologiques en matière de production, de séparation et de détection. Les mesures effectuées montrent des changements de déformation spectaculaires pour les isotopes contenant 104 neutrons.

En 2015, le projet HIE-ISOLDE (ISOLDE à haute intensité et haute énergie) a fourni ses premiers faisceaux (voir p. 24). Le 22 octobre, des faisceaux de zinc exotique de numéros atomiques 74 et 76 ont été accélérés jusqu'à 4 MeV par nucléon pour la première fois, marquant le début d'une nouvelle ère pour ISOLDE.

## Expériences sur l'antimatière

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN est une installation unique au monde qui fournit des faisceaux d'antiprotons de basse énergie à des expériences étudiant principalement l'antimatière. L'atome d'hydrogène faisant partie des systèmes les mieux connus en physique, l'un des objectifs du programme d'expérimentation de l'AD est de réaliser des mesures précises des atomes d'antihydrogène. L'atome d'antihydrogène est composé d'un antiproton et d'un positon (antiparticules du proton et de l'électron qui forment l'atome d'hydrogène). Mesurer les propriétés de l'antihydrogène avec la même précision que celles de l'hydrogène permettra de mieux comprendre les symétries entre la matière et l'antimatière et, peut-être, d'expliquer pourquoi nous vivons dans un Univers de matière alors que la matière et l'antimatière ont été produites en quantités égales lors du Big Bang.





Des membres de la collaboration CAST devant le nouveau détecteur KWISP de l'expérience. Installé sur l'hélioscope solaire, ce détecteur va élargir le champ de recherche de CAST pour inclure les caméléons, particules candidates pour l'énergie noire. (CERN-PHOTO-201602-049-22)

En 2015, l'expérience ASACUSA a publié les résultats d'expériences menées avec un faisceau d'hydrogène atomique qui montrent que le dispositif expérimental est capable de réaliser des mesures spectroscopiques d'atomes en vol. Il reste à présent à renouveler l'expérience avec un faisceau d'antihydrogène. De son côté, l'expérience BASE compare les particules de matière et d'antimatière avec le même objectif : déterminer les différences entre les propriétés de la matière et de l'antimatière. En 2015, BASE a comparé les rapports charge sur masse des protons et des antiprotons, et n'a relevé aucune différence au niveau du millionième de millionième.

ALPHA, ATRAP et AEGIS ont travaillé sur la suite de leur programme : l'étude de l'interaction de lasers avec des atomes d'antihydrogène piégés pour ALPHA et ATRAP ; la production pulsée d'atomes d'antihydrogène par la production pulsée et l'excitation par laser du positonium pour AEGIS. Enfin, la préparation de l'AD pour l'installation de GBAR s'est achevée, le premier équipement devant être placé début 2016.

## Physique des astroparticules

La physique des particules va bien au-delà des recherches avec des faisceaux de haute énergie. Les basses énergies peuvent aussi nous apprendre beaucoup, tout comme les particules venant de l'espace. Au CERN, deux expériences étudiant ces aspects sont en quête d'une nouvelle physique.

L'expérience OSQAR explore la frontière des basses énergies à la recherche de particules hypothétiques qui pourraient constituer les mystérieuses matière et énergie noires. Selon certaines théories, ces particules pourraient être produites à partir d'un faisceau de lumière exposé à un champ magnétique élevé ; OSQAR utilise ainsi un faisceau laser qu'elle envoie dans un dipôle du LHC. En 2015, l'expérience a élargi son champ de recherche pour y inclure les caméléons, des particules candidates pour l'énergie noire dont la masse varie en fonction de la densité de leur environnement. Si les caméléons existent, ils devraient apparaître via la conversion de photons dans un champ magnétique transverse. Aucune signature n'a encore été observée ; l'analyse en cours devrait permettre de fixer de nouvelles limites d'exclusion dans la

recherche de caméléons. L'énergie noire reste à ce jour toujours aussi insaisissable.

L'expérience CAST a passé 14 ans à observer le Soleil dans le but de détecter des axions, ces particules qui constitueraient la matière noire de l'Univers et seraient produites en abondance au centre du Soleil. Les axions solaires qui pénétreraient le détecteur de CAST seraient convertis en rayons X, facilement mesurables. Jusqu'à présent, les chercheurs de CAST n'ont pas observé ces axions solaires ; ils ont donc élargi leurs recherches pour englober les axions fossiles produits lors du Big Bang. L'expérience installe deux capteurs qui permettront au détecteur d'être plus sensible aux caméléons solaires, ces candidats pour l'énergie noire dont les mécanismes de production et de détection sont comparables à ceux des axions. L'une des techniques de détection de CAST utilise un capteur opto-mécanique ultrasensible (KWISP), inédit dans le domaine de la physique des astroparticules.

## La plateforme neutrino du CERN

Inaugurée fin 2014, la plateforme neutrino est au centre de la participation de l'Europe à la recherche mondiale sur les neutrinos. Elle comprend une installation de R&D au CERN qui permettra à la communauté des spécialistes des neutrinos de concevoir et de produire les prototypes de la prochaine génération de détecteurs de neutrinos.

Comprendre l'insaisissable neutrino est une priorité pour la physique des particules. La recherche sur les neutrinos auprès des accélérateurs de particules et les études menées en cosmologie se complètent : de futures mesures pourraient permettre d'élucider des mystères comme la nature de la matière noire et le déséquilibre entre matière et antimatière dans l'Univers. Les expériences menées permettront d'observer les neutrinos issus des supernovas.

Avec cette plateforme, le CERN donne une nouvelle direction à son programme sur les neutrinos. Dans les années 1970, des faisceaux de neutrinos produits au CERN ont permis de découvrir les courants neutres avec la chambre à bulles Gargamelle. Les derniers faisceaux de neutrinos produits au CERN ont traversé l'écorce terrestre pour rejoindre le Laboratoire national du Gran Sasso de l'INFN, en Italie, entre juillet 2006 et décembre 2012.

En décembre 2014, la plateforme neutrino a réceptionné le détecteur ICARUS, expédié du Gran Sasso, où il a servi jusqu'en 2012 à étudier le faisceau de neutrinos envoyé par le CERN. ICARUS est en cours de rénovation au CERN. En 2017, il sera acheminé au Fermilab, aux États-Unis, pour un programme de recherche consacré aux neutrinos.

## Détecteurs pour un collisionneur linéaire

Le projet Détecteurs pour un collisionneur linéaire (LCD) réunit des instituts du monde entier pour étudier des questions liées à la physique et aux détecteurs en vue d'un potentiel collisionneur linéaire électron-positon comme le CLIC (voir p. 27). Il compte trois collaborations : CLICdp (détecteurs et physique), CALICE (calorimètres) et FCAL (détecteurs placés dans la partie avant, près du faisceau).

En 2015, les recherches ont porté sur la physique du Higgs et du quark top, ainsi que sur des simulations de physique au-delà du Modèle standard aux énergies du CLIC. Des recherches sur

L'optimisation des détecteurs ont permis de créer un modèle de détecteur pour le CLIC assurant une meilleure couverture des données de physique dans les bouchons. Les outils logiciels pour la simulation et la reconstruction des événements ont été améliorés, intégrant désormais une description ajustable du détecteur et un logiciel de reconstruction des traces avec un trajectographe au silicium complet. Des tests avec faisceaux concluants ont été menés avec différentes configurations de détecteurs de vertex pour le CLIC, ainsi qu'avec les détecteurs de CALICE et de FCAL. En parallèle, la collaboration CALICE a mené des essais en laboratoire avec un système de photomultiplicateurs au silicium, et publié les résultats d'une campagne de tests avec faisceaux menée avec un prototype de calorimètre tungstène-scintillateur. Bien qu'axés sur un potentiel détecteur pour le CLIC, ces travaux présentent d'importantes synergies avec d'autres projets, tels que le Collisionneur linéaire international et l'étude FCC sur un Futur collisionneur circulaire (voir p. 28).

## R&D : un futur prometteur

Les accélérateurs du CERN accueillent plusieurs projets de R&D visant à préparer les technologies de détection de particules de demain. Le projet RD18, de la collaboration Crystal Clear, mène depuis 1991 des recherches sur des détecteurs à cristaux innovants utilisés en calorimétrie électromagnétique pour la physique des particules et pour des applications médicales et industrielles. RD39 et RD50 mettent au point des trajectographes au silicium capables de supporter les conditions extrêmes d'un collisionneur de hadrons. RD42 étudie des détecteurs industriels en diamant pour des applications similaires. RD53 développe de l'électronique de lecture pour ces détecteurs. RD51 repousse les limites des détecteurs à gaz. RD52 travaille sur la calorimétrie pour des mesures d'énergie de haute qualité. Ensemble, ces collaborations couvrent les aspects des futurs détecteurs de collisionneur.

Deux autres programmes, véritables expériences, sont dans une phase de R&D. UA9 étudie la manière dont des cristaux courbés pourraient être utilisés dans les futurs collisionneurs pour éloigner des équipements sensibles le halo diffus de particules entourant les faisceaux, afin que ces derniers soient bien resserrés aux points de collision. Au LHC, ce procédé de collimation est réalisé au moyen de mâchoires en tungstène absorbant le halo. L'expérience SHiP est un projet de cible fixe au SPS visant à rechercher des particules dont l'existence a été prédite par des modèles de physique au-delà du Modèle standard. SHiP a été invitée à réaliser pendant les trois prochaines années une étude de conception approfondie démontrant la faisabilité de l'expérience.

## En théorie

En 2015, la moitié des travaux de recherche du groupe Théorie du CERN ont été consacrés au Modèle standard ou à la physique au-delà du Modèle standard. La physique du Modèle standard englobe les recherches directement liées au LHC, en particulier la chromodynamique quantique et la physique du Higgs. La physique au-delà du Modèle standard s'intéresse notamment aux extensions du Modèle standard, à la matière noire et à de possibles signatures d'une nouvelle physique au LHC.

L'annonce, le 15 décembre, de la possible observation d'une

« bosse » dans la distribution des paires de photons dans les données du LHC à 13 TeV a semé l'émoi chez les théoriciens. Le groupe Théorie du CERN a activement participé aux discussions et aux études sur l'interprétation de ces données (voir p. 14).

En dehors de la phénoménologie, d'importants travaux de recherche ont également été réalisés en astrophysique des particules et en cosmologie, mais aussi en physique des ions lourds, ainsi que sur les théories des champs sur réseau, de la gravitation et des cordes et sur la théorie formelle des champs. Les projets recouvraient souvent plusieurs domaines, la matière noire entrant dans le champ de la cosmologie et de la physique des collisionneurs, et la physique des trous noirs étant liée de façon holographique aux collisions d'ions lourds.

La théorie des champs conformes, qui relie la physique des particules, les trous noirs et la physique de la matière condensée, constitue un autre exemple. Par ailleurs, des techniques innovantes de calcul des amplitudes de diffusion, dérivées de concepts de physique mathématique, ont été employées pour effectuer des calculs complexes, utiles pour la physique des collisionneurs. Au final, les membres du groupe ont publié un article par jour en moyenne.

Le groupe Théorie du CERN compte 18 titulaires et 40 boursiers. Il gère aussi un vaste programme de visiteurs, avec une douzaine d'attachés scientifiques et environ 800 visiteurs de courte durée. Cet important flux de visiteurs témoigne de l'importance de ce groupe en tant que centre de premier plan pour les échanges scientifiques.

Les instituts de théorie, des ateliers informels durant jusqu'à quelques semaines, représentent une part importante du programme des visiteurs. Ils permettent de réunir des scientifiques visiteurs ayant des intérêts communs pour optimiser les ressources au bénéfice de la communauté internationale. En 2015, trois instituts ont été organisés : « Comprendre l'Univers primordial », « La naturalité neutre » et « Les symétries de dualité dans la théorie des cordes et la théorie M ».

Des membres du groupe Théorie ont assisté à beaucoup de conférences et d'ateliers dans le monde. Ils ont également participé aux travaux du groupe Données (*Data Particle Group*) et à des activités d'enseignement menées au CERN : formation académique, programmes des étudiants d'été et des enseignants du secondaire, ainsi qu'écoles européenne et latino-américaine de physique des hautes énergies. Comme chaque année, le groupe a accueilli l'École d'hiver sur la supergravité, les cordes et la théorie de jauge, ainsi qu'une école doctorale sur la théorie des cordes. 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, le groupe a tenu son séminaire annuel, permettant à ses membres d'avoir un aperçu exhaustif des recherches en cours. L'objectif était de faciliter l'intégration des nouveaux arrivants et d'échanger des idées dans un environnement stimulant. Le programme du séminaire donne une vue d'ensemble des travaux du groupe en 2015. (Voir <https://indico.cern.ch/event/433779/other-view?view=standard>)

En 2016, un important changement attend le groupe puisqu'il regagnera son statut de département, en reconnaissance de son rôle essentiel comme centre de référence pour la physique des particules théorique.