

EXPLORER LA NATURE DE L'UNIVERS

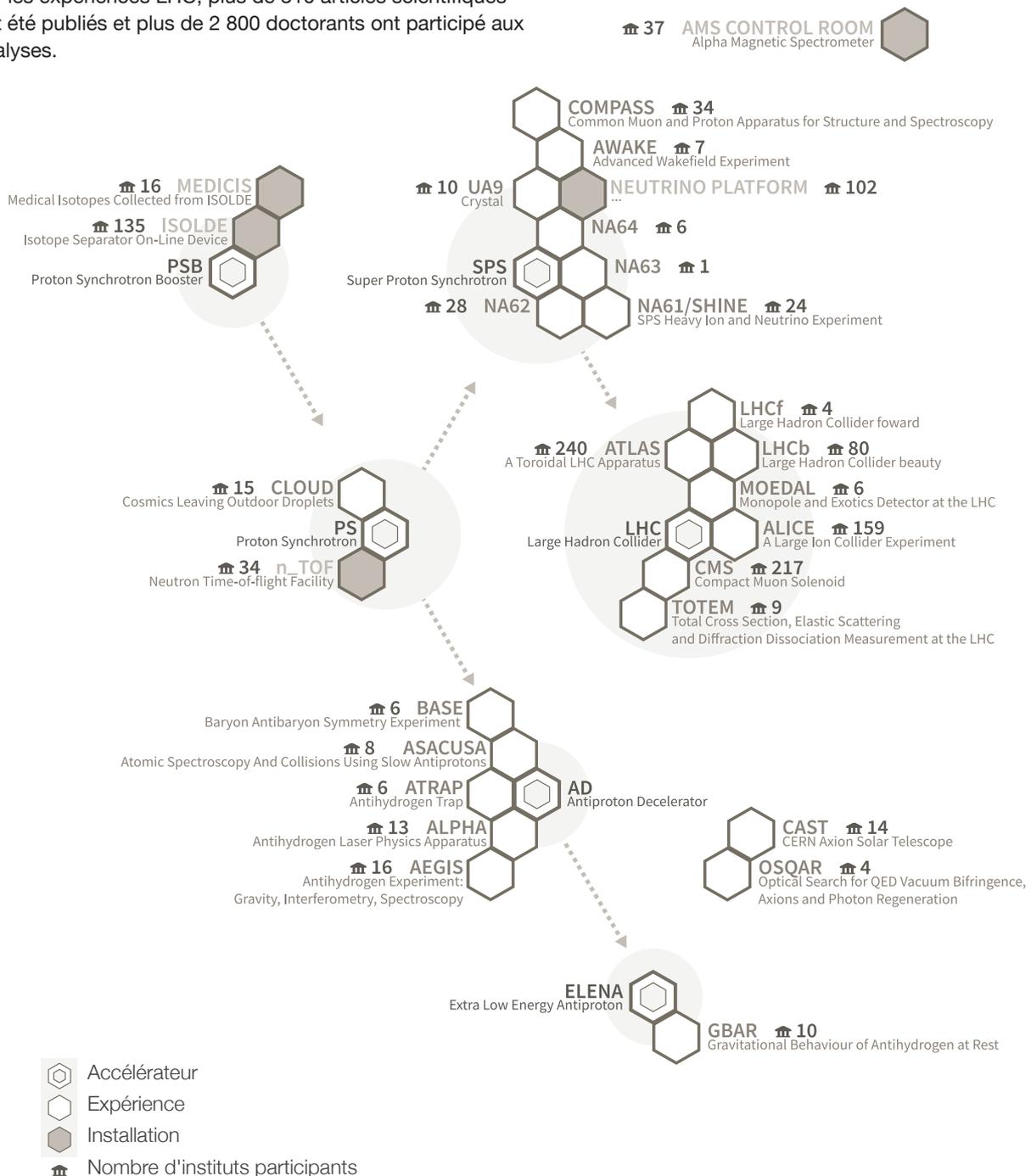
Pour explorer la structure fondamentale de l'Univers, le CERN utilise un complexe d'accélérateurs exceptionnel, dans lequel des faisceaux de particules entrent en collision ou percutent des cibles fixes. Les résultats sont enregistrés par des détecteurs et analysés par des milliers de physiciens, au CERN ou ailleurs.

Complexe d'accélérateurs du CERN, avec les expériences qu'il alimente

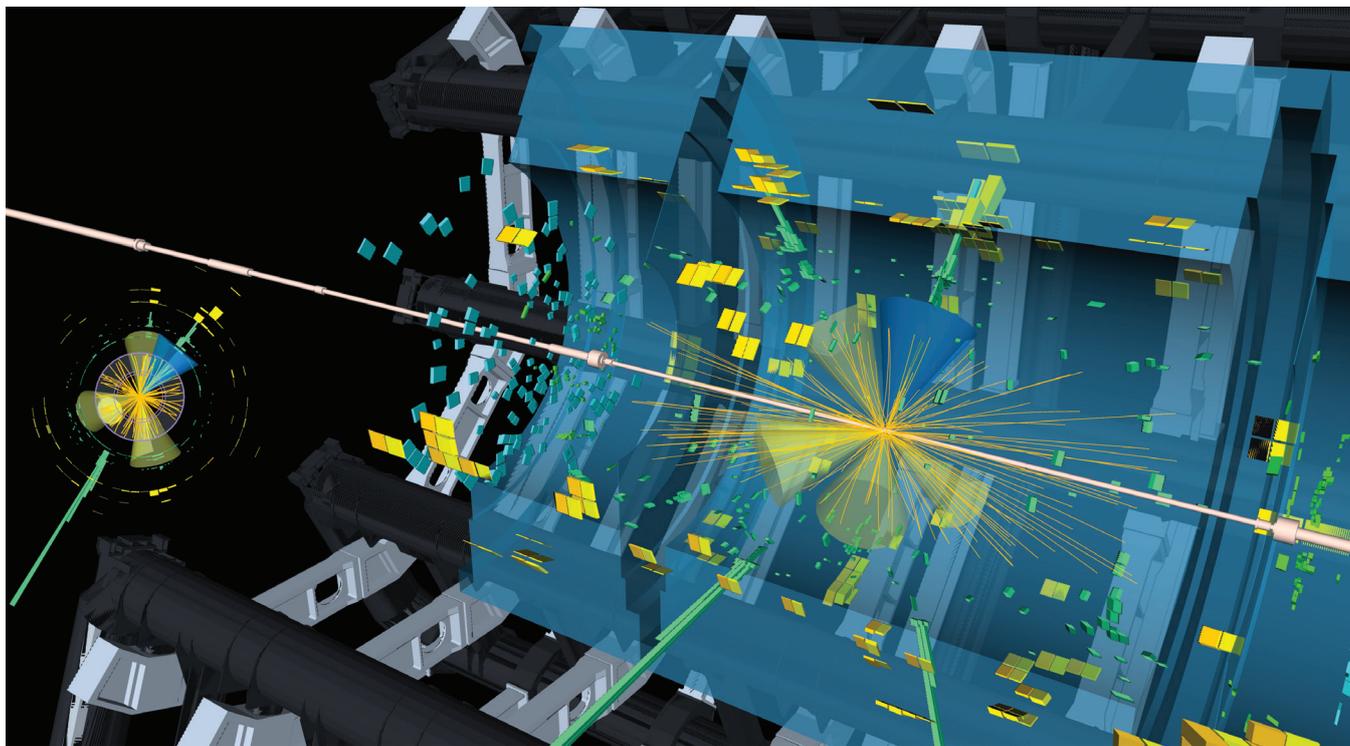


Le Grand collisionneur de hadrons (LHC) est l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant du monde. Il produit des collisions de faisceaux de protons au sein de quatre grandes expériences : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb. L'année 2018 a vu s'achever la très fructueuse deuxième exploitation du LHC (2015-2018). La machine a dépassé les attentes pour cette période en produisant environ 16 millions de milliards de collisions proton-proton à une énergie de 13 TeV (pour chacune des expériences ATLAS et CMS), ainsi qu'un immense volume de données pour les collisions plomb-plomb à une énergie de 5,02 TeV par paire de nucléons. Au total, 80 Po de données ont été enregistrées par les expériences LHC, plus de 310 articles scientifiques ont été publiés et plus de 2 800 doctorants ont participé aux analyses.

L'analyse des données du LHC, ainsi que de données d'expériences hors LHC, a déjà produit d'excellents résultats de physique, qui ont permis d'approfondir la connaissance de la matière aux échelles les plus petites et de parfaire les arguments scientifiques en vue de la prochaine mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules. Parmi les avancées se trouvent des mesures précises de l'interaction du boson de Higgs avec les fermions de troisième génération, des tests rigoureux du Modèle standard et des études de plus en plus sensibles pour la recherche d'une nouvelle physique.



Les accélérateurs du CERN alimentent de nombreuses expériences et installations utilisées par des scientifiques du monde entier.



Événement candidat, enregistré par ATLAS, pour la production d'un boson de Higgs en association avec une paire top anti-top. L'événement contient deux photons et six jets de particules. (ATLAS-PHOTO-2019-016-3)

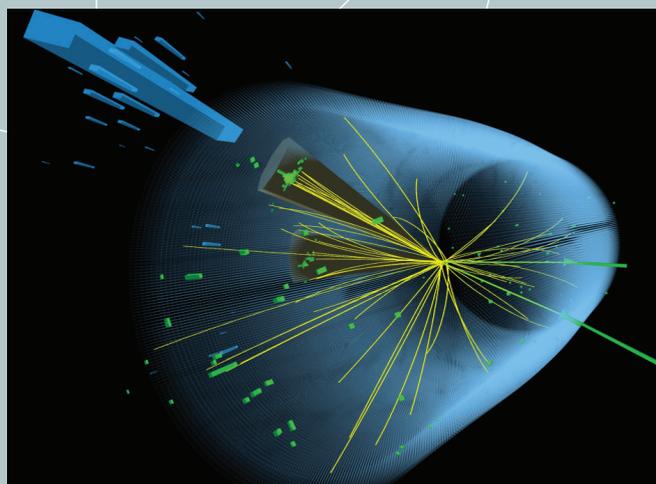
LE BOSON DE HIGGS AU MICROSCOPE

Le Modèle standard inclut des prédictions précises sur les interactions du boson de Higgs avec d'autres particules. La vérification de ces prédictions occupe une grande place dans les programmes de recherche auprès du LHC et des futurs collisionneurs proposés, car tout écart pourrait ouvrir la voie à une nouvelle physique. Pour cela, on étudie les désintégrations du boson de Higgs en particules plus légères, qui surviennent presque immédiatement après sa production. Cette année, ATLAS et CMS ont observé pour la première fois la désintégration du boson de Higgs en paires de quarks bottom-antibottom. Le Modèle standard prédit que ce mode de désintégration est le plus abondant ; cependant, ces paires pouvant être produites dans le LHC par divers processus, il est difficile d'isoler celles qui sont issues du Higgs.

Comme le quark top est plus massif que le boson de Higgs, la désintégration du Higgs en une paire top-antitop n'est pas possible. Toutefois, les scientifiques peuvent étudier les interactions Higgs-top en recherchant des exemples de production d'un Higgs en association avec une paire top-antitop ; en 2018, ATLAS et CMS ont mis en évidence cette « production associée » dans les données enregistrées les années précédentes. Le taux de production de ce processus, tout comme celui de la désintégration du Higgs en paires de quarks bottom-antibottom, correspond aux prédictions du Modèle standard, au niveau actuel de précision statistique.

LE LHC TESTE LES PRÉDICTIONS DU MODÈLE STANDARD SUR LES INTERACTIONS DU BOSON DE HIGGS AVEC D'AUTRES PARTICULES. TOUT ÉCART POURRAIT OUVRIR LA VOIE À UNE NOUVELLE PHYSIQUE.

Événement candidat, enregistré par CMS, pour une désintégration du boson de Higgs en une paire de quarks bottom-antibottom, associée à une désintégration d'un boson Z en un électron et un positon. (CMS-PHO-EVENTS-2018-008-1)



METTRE À L'ÉPREUVE LE MODÈLE STANDARD

En 2018, les expériences LHC ont testé le Modèle standard avec un niveau de précision inédit. Le quark top reste une source de mesures et d'observations intéressantes, qui, associées à la mesure de la masse du boson de Higgs, s'avèrent essentielles pour réduire les incertitudes dans les prédictions du Modèle standard. ATLAS a mesuré la masse du quark top avec une précision de 0,3 % en combinant des données résultant de différents canaux de désintégration. CMS a exploré des modes de production rares du quark top sensibles aux indices de physique au-delà du Modèle standard. La collaboration a observé la production d'un quark top associé à un boson Z et un deuxième quark, et a mis en évidence la production d'un quark top associé à un photon et un autre quark. À noter à CMS également, des mesures de processus connus du Modèle standard avec une précision améliorée, ainsi que de nouvelles études de la physique des mésons B.

Le boson de Higgs a une incidence sur la probabilité de diffusion entre bosons W et Z. En 2018, ATLAS a observé des diffusions de paires de bosons W ainsi que des diffusions d'un W et d'un Z. De futures données permettront de mesurer cette diffusion avec une plus grande précision, en recherchant les écarts par rapport aux valeurs prédites. ATLAS a également mesuré l'angle de mélange électrofaible, paramètre essentiel pour comprendre l'unification de la force électromagnétique et de la force faible dans le Modèle standard, avec une précision inédite au LHC, comparable aux résultats les plus précis (sur la base d'une seule expérience) obtenus au LEP et au Tevatron.

Les physiciens cherchent à comprendre pourquoi l'Univers est constitué presque intégralement de matière, l'antimatière étant quasi inexistante. Cette asymétrie pourrait s'expliquer par la différence dans la manière dont matière et antimatière interagissent via la force faible. L'expérience LHCb, conçue pour étudier cette différence, appelée violation de CP

(charge-parité), a réalisé diverses mesures de précision. En 2018, plusieurs paramètres liés à la matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa), qui quantifie la violation de CP possible dans les quarks, ont ainsi été mesurés. En particulier, la collaboration a mesuré l'angle γ au moyen de différentes méthodes et obtenu une valeur moyenne de 74° , avec une incertitude d'environ 5° – la mesure la plus précise de cet angle obtenue à ce jour par une seule expérience.

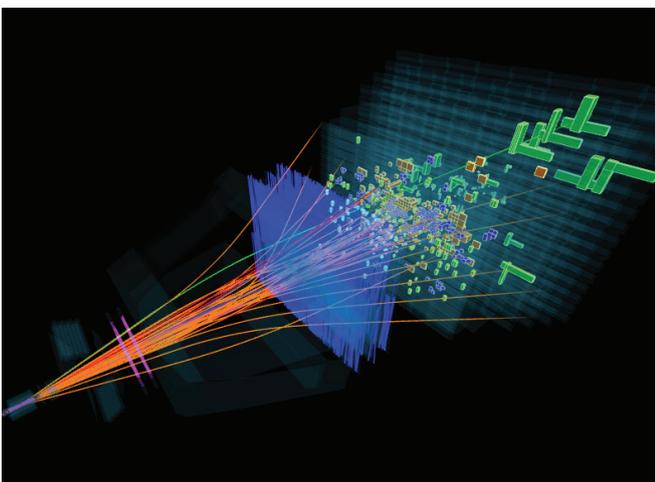
La collaboration a en outre observé le premier indice d'une transformation rare, celle du méson B_s en un kaon excité et en deux muons, et déterminé les meilleures limites concernant la transformation d'un méson B^+ en trois muons et un neutrino. LHCb a également mesuré la durée de vie du baryon doublement charmé Ξ_{cc}^{++} , observé pour la première fois par l'expérience en 2017, et celle de l'oméga charmé ($\Omega^0 c$). Cette dernière mesure, soit 268 ± 26 fs, est d'une précision inégalée, mais le chiffre est près de quatre fois supérieur aux résultats précédents et contredit des prédictions antérieures.

En plus de son mode de fonctionnement habituel, le mode « collision », LHCb a également fonctionné en mode « cible fixe », avec l'injection dans le tube de faisceau de gaz rares tels que l'hélium. Les atomes de ces gaz rares ont servi de cibles fixes pour les protons ; LHCb a pu ainsi observer dans ces collisions la production de particules J/ψ et D^0 et effectuer la première mesure de la probabilité de production d'antiprotons dans des collisions proton-hélium.

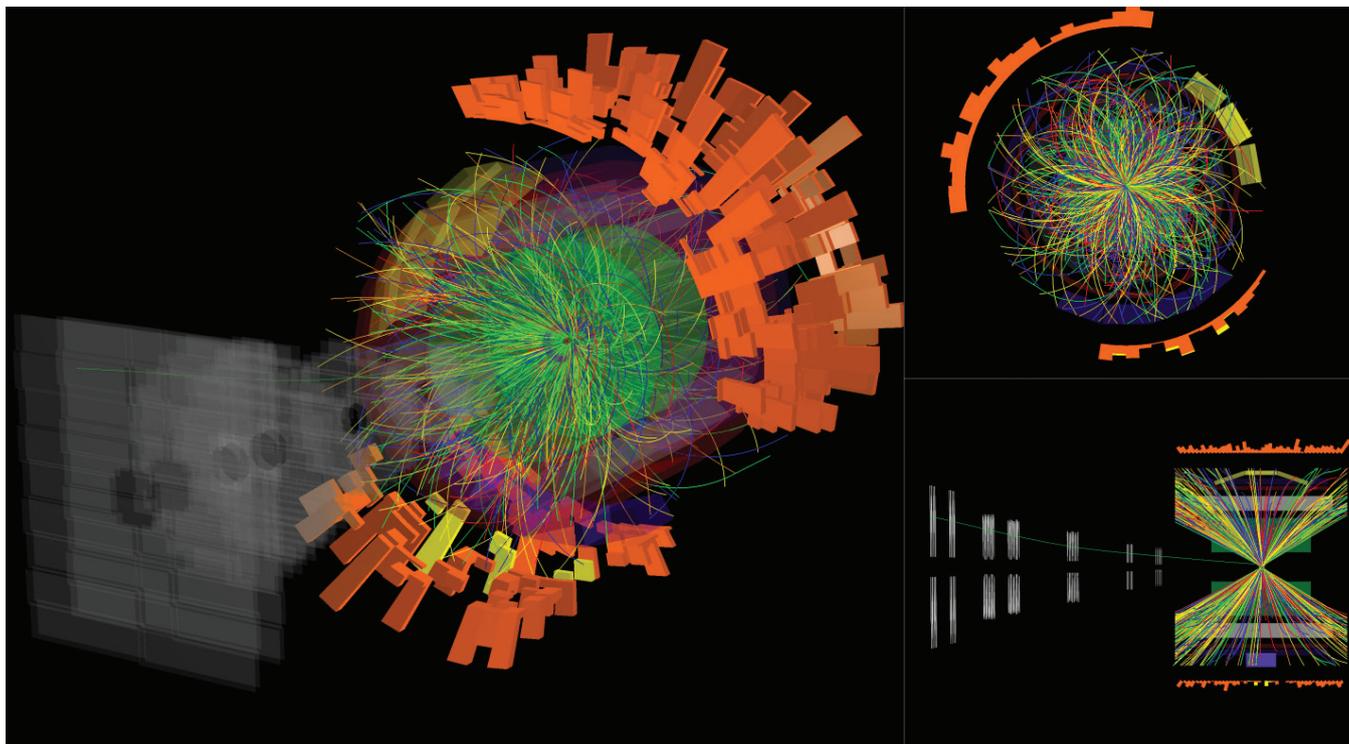
En fin d'année, l'expérience TOTEM, qui s'intéresse aux interactions à petits angles, au moyen de détecteurs situés à 220 mètres de part et d'autre de l'expérience CMS, a présenté de bons éléments à l'appui de l'existence d'un composé de trois gluons dénommé « odderon », théorisé en 1973. Ce résultat est dérivé des mesures précises de la probabilité des collisions proton-proton à de hautes énergies, et pourrait nous permettre de mieux comprendre les données produites par le LHC et les futurs collisionneurs.

Collision proton-proton enregistrée par LHCb début 2018.

(OPEN-PHO-EXP-2018-005-2)



LE MODÈLE STANDARD NE REND
PAS COMPTE DE LA MATIÈRE
NOIRE ET DE L'ÉNERGIE SOMBRE,
CE QUI SUGGÈRE L'EXISTENCE
DE PARTICULES ET DE FORCES
NOUVELLES.



Trajectoires de particules et dépôts d'énergie dans le détecteur ALICE lors des premières collisions de noyaux de plomb de 2018.
(ALICE-EVENTDISPLAY-2018-003-1)

À LA RECHERCHE DE NOUVEAUX PHÉNOMÈNES

Le Modèle standard a résisté à tous les tests auxquels l'ont soumis les expériences. Pourtant, il ne rend pas compte d'éléments essentiels tels que la matière noire et l'énergie sombre, ce qui suggère l'existence d'une nouvelle physique qui reste à découvrir.

En 2018, ATLAS et CMS ont mené de nombreuses recherches dans ce domaine. Ainsi, ATLAS a recherché des événements dans lesquels des particules extrêmement massives se transforment en paires de bosons W et Z. L'analyse des données enregistrées a permis d'exclure jusqu'à 4,15 TeV l'existence de types spécifiques de ces particules massives. CMS a traqué les particules exotiques Z' (« Z prime »), prédites par certaines extensions du Modèle standard, et des particules hypothétiques appelées « leptoquarks », censées être des hybrides de leptons et de quarks. Les collaborations ont toutes deux recherché de nombreuses signatures différentes de la matière noire et de la supersymétrie, mais n'ont trouvé aucun indice de leur existence à partir des divers paramètres étudiés.

LA CHALEUR DE L'UNIVERS PRIMORDIAL

Le LHC produit également des collisions de noyaux de plomb pour générer des systèmes plus grands et plus chauds. Ces collisions recréent le plasma quarks-gluons, état dense de quarks et de gluons en liberté qui aurait existé dans l'Univers primordial. La collaboration ALICE a

montré que les jets de particules émergeant des collisions plomb-plomb sont plus resserrés que ceux formés dans les collisions proton-proton, ce qui s'explique par les rayonnements de faible énergie à de grands angles par rapport à l'axe du jet provoqués par l'interaction des particules du jet avec le plasma quarks-gluons.

En comparant ses résultats avec ceux du Collisionneur d'ions lourds relativistes RHIC, situé aux États-Unis, ALICE a observé que la production de mésons J/ψ au LHC n'était pas aussi réduite pour des impulsions transversales faibles, et a conclu que la réduction causée par le plasma quarks-gluons était contrecarrée par la recombinaison de quarks c et anti-c en mésons J/ψ. ALICE a aussi observé que la proportion de baryons Λ_c par rapport aux mésons D produits était plus élevée dans les collisions plomb-plomb que dans les collisions proton-proton et proton-plomb ; ce phénomène est attendu si les quarks c se lient à d'autres quarks du plasma quarks-gluons pour former des baryons et des mésons. La dynamique de ces processus sera étudiée avec précision à partir des données qu'ALICE recueillera au cours des prochaines exploitations du LHC. Par ailleurs, ALICE a observé que cette proportion de Λ_c par rapport aux D était plus élevée que prévu par les calculs théoriques, même dans les collisions proton-proton et proton-plomb.

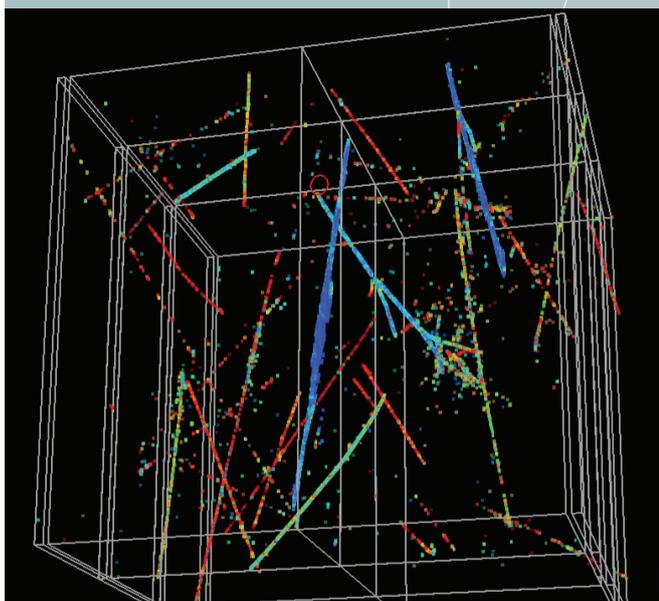
À LA POURSUITE DES NEUTRINOS

Les neutrinos, les particules massives les plus légères connues à ce jour, continuent d'occuper une grande place dans la recherche en physique des hautes énergies. Les chercheurs se demandent notamment comment ils acquièrent leur masse et s'ils violent la symétrie CP (charge-parité). L'expérience OPERA, au Laboratoire du Gran Sasso en Italie, a été conçue pour prouver, grâce à l'étude de faisceaux de neutrinos du muon envoyés depuis le CERN, à 730 km de là, que les neutrinos du muon peuvent osciller en neutrinos du tau. En 2018, la collaboration chargée de cette expérience a rapporté l'observation de dix événements candidats pour une conversion d'un neutrino du muon en neutrino du tau, et a clairement montré que les neutrinos du muon se transforment en neutrinos du tau entre le CERN et le Gran Sasso.

Pendant ce temps, les collaborations ATLAS et CMS cherchaient des neutrinos Majorana lourds, particules hypothétiques qui pourraient expliquer la très petite masse

des neutrinos au travers du « mécanisme de la bascule ». Elles n'en ont trouvé aucune trace dans les gammes de paramètres étudiées, mais cette absence de signal est cruciale car elle permet de définir des contraintes strictes pour les modèles théoriques.

La plateforme neutrino du CERN, créée pour soutenir la participation de l'Europe aux projets de recherche sur les neutrinos utilisant des accélérateurs aux États-Unis et au Japon, fournit des faisceaux chargés et un espace de test pour les grands détecteurs de neutrinos. En 2018 s'est achevée la construction de deux grands cryostat à membrane, destinés à accueillir des prototypes de $6 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$ du futur détecteur à argon liquide de DUNE auprès de l'installation neutrino longue distance aux États-Unis, qui utilise des chambres à projection temporelle à phase simple et à phase double. Le premier grand prototype ProtoDUNE à phase simple a été mis en service en 2018 et a enregistré ses premières traces de particules lors de tests au CERN, démontrant la viabilité de cette technologie à grande échelle et marquant une étape importante du projet DUNE.



Intérieur du détecteur ProtoDUNE à phase double, en cours de construction, qui doit commencer à fonctionner en 2019. (CERN-PHOTO-201803-085-1)

Image en 3D d'un événement enregistré par le détecteur prototype ProtoDUNE à phase simple.

LA MAGIE DES FAISCEAUX EXOTIQUES

ISOLDE, installation de recherche nucléaire du CERN existant de longue date, envoie un faisceau de protons de 1,4 GeV du Booster du PS vers un poste de cible afin de générer des faisceaux d'ions radioactifs exotiques pour, entre autres, des études sur la structure des noyaux atomiques. Ces faisceaux peuvent être réaccélérés à l'aide des accélérateurs linéaires (linacs) REX/HIE-ISOLDE. L'énergie du linac supraconducteur HIE-ISOLDE a été relevée afin d'accélérer des faisceaux jusqu'à 9,5 MeV par nucléon (voir p. 25), y compris pour des noyaux riches en neutrons. Au total, un nombre record de 51 expériences ont été menées par des utilisateurs du monde entier.



Le système de détecteurs de rayons gamma MINIBALL auprès de l'accélérateur HIE-ISOLDE. (CERN-EX-0506009-07)

Quatorze d'entre elles ont utilisé 18 faisceaux différents de l'accélérateur HIE-ISOLDE, tandis que 37 expériences de basse énergie ont utilisé plus de 80 isotopes.

Parmi les faits marquants, les collaborations MINIBALL et HIE-ISOLDE ont fourni la première preuve directe que le noyau étain 132 (^{132}Sn), considéré comme doublement magique, mérite effectivement cette qualification. De tels noyaux présentent des couches complètes de protons et de neutrons et sont exceptionnellement stables. Le résultat en question est le premier obtenu par HIE-ISOLDE et montre que cette installation est essentielle pour mieux comprendre le fonctionnement interne des noyaux atomiques. À signaler également, la révélation et l'explication de l'étendue complète de l'alternance de forme paire-impair d'isotopes exotiques de mercure, la forme de leur noyau atomique passant de celle d'un ballon de football à celle d'un ballon de rugby. Ce résultat a pu être obtenu grâce à une combinaison sans précédent d'éléments expérimentaux, tels que la source d'ions RILIS et des techniques de modélisation théoriques et informatiques.

Pour la première fois, ISOLDE a créé, grâce à RILIS, des isotopes du chrome riches en neutrons en quantité impressionnante. Ces isotopes ont été mesurés par ISOLTRAP, dispositif qui réalise des mesures de masse auprès d'ISOLDE depuis 30 ans. Les nouvelles valeurs de masse obtenues sont jusqu'à 300 fois plus précises que les précédentes, ce qui jette une lumière nouvelle sur la structure nucléaire des isotopes du chrome.

LA THÉORIE PROSPÈRE

En 2018, le département Physique théorique du CERN (TH) a produit des recherches de pointe venant appuyer les activités du Laboratoire et servir la communauté internationale de la physique théorique. Celles-ci couvrent tous les domaines pertinents pour la physique des particules et ont donné lieu, en 2018, au dépôt de 342 articles sur le serveur arXiv.

Les études mathématiques, qui ont porté entre autres sur la théorie des cordes et la théorie quantique des champs, ont révélé des liens intéressants avec des hypothèses relatives aux propriétés de la gravité dans le régime quantique. Un important travail a été consacré à tous les aspects de la physique du LHC, allant de calculs précis de processus du Modèle standard à des hypothèses créatives sur des phénomènes qui pourraient révéler des signes d'une nouvelle physique. Les études en cosmologie et en astrophysique des particules, qui font aussi partie des activités de TH, ont porté sur l'évolution de l'Univers primordial et les méthodes d'observation pour extraire des informations sur la matière noire et l'énergie sombre. Des recherches ont été faites en physique des collisions d'ions lourds, branche dynamique de la recherche théorique qui étudie les propriétés de la matière dans des conditions extrêmes, telles que celles que l'on trouve au centre des étoiles. Des travaux ont aussi été menés sur la théorie de jauge sur réseau, qui explore les propriétés complexes des interactions fortes en simulant l'espace-temps physique sur une grille.

Les théoriciens ont apporté une contribution fondamentale au LPCC (Centre de physique du LHC du CERN) et aux groupes de travail sur la physique du LHC, du CLIC et du FCC, ainsi qu'au groupe d'études sur la physique au-delà des collisionneurs (voir p. 48). Ils ont aussi largement contribué aux documents présentés pour la mise à jour de la stratégie européenne pour la physique des particules.

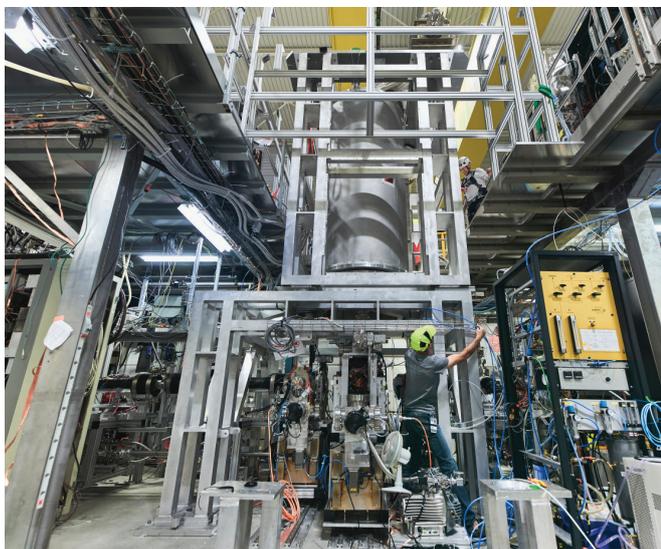
MISSION ACCOMPLIE POUR LES EXPÉRIENCES

En 2018, de grands progrès ont aussi été réalisés par les autres expériences et projets, dont beaucoup sont alimentés par des faisceaux du Booster du PS, du PS et du SPS (voir p. 25) : mesures de taux de production pertinentes pour la physique des neutrinos et étude de l'émergence du plasma quarks-gluons dans les collisions d'ions lourds avec des cibles fixes (NA61/SHINE) ; études de désintégrations rares du kaon et recherches de nouveaux leptons neutres lourds (NA62), avec la première recherche de la désintégration d'un kaon chargé positivement en un pion chargé positivement et une paire neutrino-antineutrino, basée sur des désintégrations du kaon en vol ; études des processus de rayonnement dans des champs électromagnétiques forts (NA63) ; recherches de particules du secteur sombre (NA64) ; mesures de processus induits par des neutrons pertinents pour la physique nucléaire et l'astrophysique (n_TOF) ; études de la structure des hadrons



L'expérience NA62 dans la zone Nord du CERN. (NA62-PHO-EXP-2017-001-2)

(COMPASS) ; recherches de caméléons et d'axions (CAST, OSQAR) ; études sur l'influence des rayons cosmiques sur la formation des nuages (CLOUD), paramètre important pour la modélisation des changements climatiques ; et collimation de particules au moyen de cristaux (UA9).



L'expérience ALPHA-g, ici lors de son installation dans le hall du Décélérateur d'antiprotons du CERN, a reçu son premier faisceau d'antiprotons le 30 octobre 2018. (CERN-PHOTO-201810-267-37)

EXPLORER L'ANTIMATIÈRE

Le Décélérateur d'antiprotons (AD) fournit des antiprotons de basse énergie pour, entre autres, des mesures spectroscopiques et gravitationnelles de précision, permettant de comparer plus précisément le comportement de la matière et celui de l'antimatière. L'AD accueille actuellement cinq expériences en exploitation. ALPHA, AEGIS, ASACUSA, ATRAP et BASE. Deux autres expériences, GBAR et ALPHA-g, une version verticale d'ALPHA, sont en préparation. Le nouvel anneau ELENA (voir p. 46) ralentit encore davantage les antiprotons, pour qu'ils puissent être plus facilement piégés par les expériences.

En 2018, la collaboration ALPHA a élargi ses mesures de la structure spectrale de l'antihydrogène, et réalisé les mesures directes de l'antimatière les plus précises jamais obtenues. L'équipe a déterminé la structure spectrale de la transition 1S-2S de l'antihydrogène avec une précision de l'ordre de quelques parties pour mille milliards, ouvrant la voie à une nouvelle ère d'études de haute précision des différences entre matière et antimatière et franchissant une étape importante du programme scientifique de l'AD. La collaboration a également réalisé la première mesure de la transition Lyman-alpha (ou 1S-2P), et a mesuré sa fréquence avec une précision de l'ordre de quelques parties pour cent millions. Par ailleurs, elle a réussi le tout premier refroidissement par laser de l'antihydrogène.

Les autres expériences de l'AD ont aussi connu des progrès notables : les équipements de BASE ont été ajustés pour effectuer des mesures précises des propriétés des antiprotons, et les premiers faisceaux d'antiprotons ont été fournis aux expériences GBAR et ALPHA-g, dont l'objectif est de déterminer si la gravité a le même effet sur la matière et sur l'antimatière.