

SYMÉTRIES DANS LE MONDE SUBATOMIQUE

Les symétries jouent un rôle fondamental en physique des particules élémentaires. Le Modèle Standard qui décrit les interactions électromagnétique, faible et forte est basé sur une symétrie de jauge qui lui confère toute sa cohérence mathématique. La brisure spontanée de la symétrie électrofaible est un pilier central du modèle, générant les masses des bosons de jauge et des fermions et donnant naissance au boson de Higgs dont la recherche est le but majeur du collisionneur LHC au CERN.

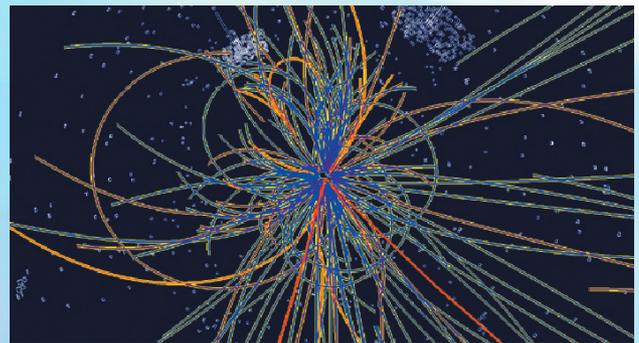
Depuis le démarrage du LHC, les progrès faits sur la recherche du boson de Higgs sont considérables, et une réponse définitive à la question de l'existence du boson de Higgs tel que prédit par le Modèle Standard est attendue avec les données prises au LHC en 2012. Ce résultat sera d'une importance cruciale et déterminera les futurs projets, comme la construction d'un accélérateur linéaire électron-positron, ou les différentes possibilités d'exploitation du LHC. En dehors de la recherche du boson de Higgs, des mesures de précision sur les paramètres relatifs aux interactions électrofaibles ou encore à la chromodynamique quantique permettent des tests décisifs du Modèle Standard et une meilleure compréhension des constituants élémentaires de la matière. Munie de ces connaissances, la recherche de nouveaux phénomènes prédits par des théories au delà du Modèle Standard, telles que la supersymétrie avec son cortège de nouvelles particules ou les modèles de dimensions supplémentaires d'espace-temps, deviennent possibles.

La différence entre la matière et l'antimatière, dont la manifestation la plus évidente est la prédominance de la matière dans notre Univers, est une des grandes questions fondamentales de la physique actuelle. Elle se pose au niveau élémentaire notamment en termes de violation de symétrie dans le domaine des quarks, ou encore dans le domaine des neutrinos. Enfin, l'étude de l'atome d'antihydrogène est une autre voie pour étudier la différence entre la matière et l'antimatière.

La mesure précise des effets de violation de symétrie sur les quarks du type beau est au cœur du programme d'une des expériences du LHC, LHCb. Afin de poursuivre cette voie, certains physiciens s'intéressent également à un nouveau projet, une « super » usine de quarks beaux, récemment approuvée en Italie.

La mesure des paramètres d'oscillation de neutrinos, qui a été mise en évidence à la fin des années 90, ne laisse plus qu'un paramètre libre, l'angle θ_{13} . Les premières indications des expériences T2K et Double Chooz pointent vers une valeur assez grande de cet angle, qui rendrait possible l'observation d'une violation de symétrie dans le secteur des neutrinos.

Par ailleurs, des activités de recherche et développement ont pour objet d'étudier d'autres propriétés de cette particule : la mesure de sa masse par la désintégration double bêta sans neutrinos ou par des contraintes cosmologiques, sa nature Dirac ou Majorana, la hiérarchie de masse entre les trois familles des neutrinos ou encore la recherche de neutrinos stériles.

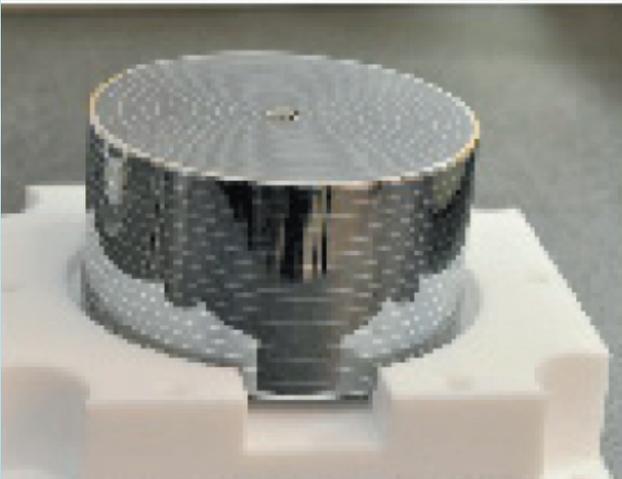


Ces activités expérimentales sont accompagnées par des travaux théoriques, tant pour l'interprétation des résultats, que par l'élaboration de nouveaux modèles ou encore par la mise à disposition de nouveaux outils, qui n'est possible que par des échanges continus entre les communautés de théoriciens et d'expérimentateurs.

MATIERE ET ENERGIE SOMBRES

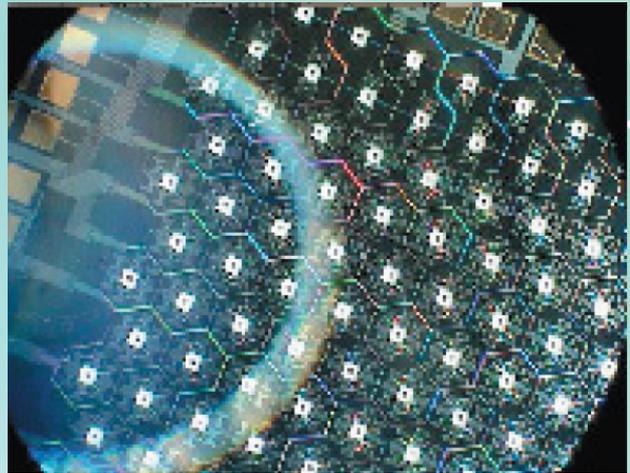
L'histoire de l'évolution de l'Univers et de ses grandes structures est un thème de recherche en pleine effervescence au niveau international, et en particulier dans les laboratoires de P2IO.

Les observations cosmologiques montrent en effet une composition remarquable du contenu énergétique de notre univers : la matière que nous connaissons n'y représente en effet que 4 % du total, alors que les 96 % restants sont attribués pour 22 % à la matière noire, et pour les 74 % restants à une mystérieuse énergie noire associée à une accélération de l'expansion de l'Univers, découverte qui a donné lieu au prix Nobel 2011 de Physique.



L'identification de ces énigmatiques composantes sombres de l'Univers représente l'un des enjeux majeurs de la physique contemporaine, à la frontière de la cosmologie, de l'astrophysique et de la physique des astroparticules. Elle nécessite de nombreux programmes d'observation, de simulation et d'analyse phénoménologique. Il s'agit notamment de la détection directe de la matière noire sous forme de WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), de sa recherche sous forme de particules supersymétriques au LHC.

L'observation du rayonnement cosmologique et de la distribution des galaxies et des amas a pour but de mesurer l'influence de l'énergie noire sur les paramètres cosmologiques.

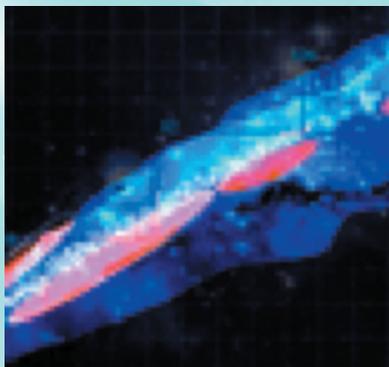


Les contributions des équipes de P2IO à la résolution de cette énigme scientifique sont multiples et concernent notamment :

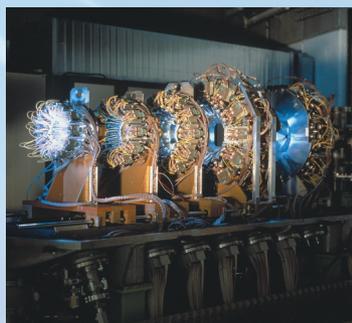
- une implication très forte dans le programme LHC, à la fois dans les expériences ATLAS et CMS, ainsi que dans les analyses de données ;
- la détection directe de matière noire, où trois laboratoires de P2IO participent à l'expérience EDELWEISS. Ces laboratoires assurent également la coordination du projet européen EURECA dont l'objectif est d'obtenir une tonne de détecteurs cryogéniques ;
- la mesure des paramètres cosmologiques et la caractérisation de l'énergie noire et de la distribution de matière noire via une implication forte dans les missions spatiales importantes de l'Agence Spatiale Européenne, comme Planck et Euclid. Les grands relevés au sol, comme SNLS, BOSS ou LSST seront également des outils très précieux ;
- les simulations sur ordinateur de l'évolution de l'Univers, de ses grandes structures jusqu'aux galaxies.
- la détection indirecte de matière noire, avec d'importantes participations à l'expérience H E S S - 2 d'astronomie gamma, et à son successeur CTA (Cerenkov Telescope Array), et à l'expérience spatiale FERMI.



LA MATIÈRE NUCLÉAIRE FORTEMENT COUPLÉE



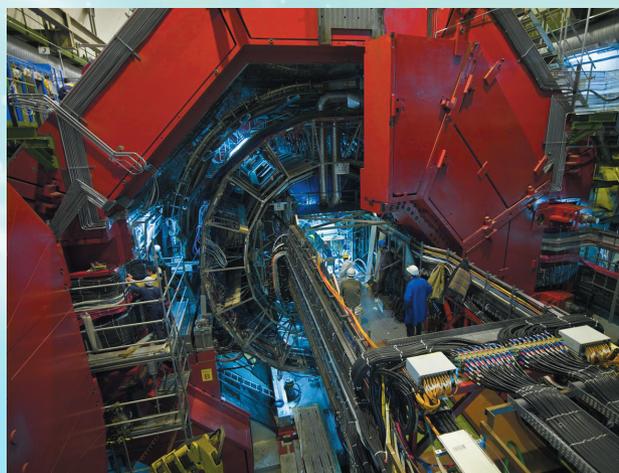
Le comportement de la matière à l'échelle du noyau atomique est un fascinant sujet d'études. Les interactions des quarks et des gluons sont à la source de leur confinement dans les hadrons, mais aussi de l'existence d'états extrêmes, tels qu'à l'intérieur des objets astrophysiques. Ces états peuvent être créés grâce à des faisceaux d'ions produits par des accélérateurs de différents types. Des collisions entre deux ions de plomb sont ainsi étudiées au LHC. Les physiciens espèrent grâce à elles atteindre en laboratoire des densités extrêmes de matière et d'énergie. On considère que ces conditions sont proches de ce qu'était l'Univers peu après son explosion primordiale. Selon la chromodynamique quantique, un plasma de quarks et de gluons dont on pourrait alors sonder les propriétés devrait être créé dans ces collisions. Dans un autre domaine d'énergie, le Thomas Jefferson Laboratory situé en Virginie (USA) utilise, pour élucider la dynamique du confinement des quarks et des gluons dans



les noyaux, des collisions entre des électrons de quelques GeV et des protons ou des noyaux. Cet accélérateur entamera en 2014 un nouveau

cycle d'expériences, dont certaines sous la responsabilité d'équipes franciliennes.

Dans le bestiaire des noyaux atomiques qui composent la matière, à côté de ceux dont l'âge avoisine celui de l'Univers lui-même, certains s'avèrent si éphémères que leur détection relève encore du défi technologique. Or ces noyaux dits exotiques exhibent souvent des propriétés différentes de celles de leurs cousins plus ordinaires. Ils jouent pour cela un rôle clé pour tester les modèles de structure nucléaire avec lesquels il est possible de mieux comprendre la formation des éléments dans l'Univers.



Pour étudier cet assemblage si simple et si compliqué à la fois, les chercheurs franciliens créent à l'aide d'accélérateurs de particules, à ALTO en Ile de France, au GANIL à Caen, ou à RIKEN au Japon, ces noyaux si rares, étudient leur décroissance, les cassent, les chauffent, tout comme cela se passe au cœur des étoiles.



Les équipes franciliennes ont un rôle majeur dans l'étude et la mise en place du grand projet européen de faisceaux exotiques SPIRAL2 à Caen, actuellement en construction.

FORMATION DES SYSTÈMES STELLAIRES ET CONDITIONS D'APPARITION DE LA VIE



Les thématiques liées à la formation des systèmes stellaires et aux conditions d'apparition de la vie sont en pleine évolution. La chaîne complexe des événements qui conduit d'un nuage moléculaire à un système stellaire avec son cortège de planètes commence à être mieux comprise avec les observations astrophysiques, en particulier celles d'Herschel (observatoire sub-mm lancé en 2009) et bientôt celles d'ALMA (interféromètre dans le domaine millimétrique). Les observations au sol (vitesses radiales) et dans l'espace (CoRoT, Kepler) enrichissent à un rythme rapide les statistiques sur les systèmes exoplanétaires, avec des objets observés de plus en plus proches de la taille de la Terre et des systèmes multiples de plus en plus complexes. La prochaine étape va être la caractérisation spectroscopique des exoplanètes avec en particulier la détection d'atmosphères éventuelles.



Les missions d'exploration du système solaire en cours ou programmées vont avoir un impact important sur ces questions. S'appuyant sur les résultats des orbiteurs Mars Express et MRO, le véhicule NASA « Curiosity » qui vient d'être lancé avec succès va explorer in-situ dès fin 2012 une région de Mars qui pourrait avoir présenté des conditions favorables à l'apparition de la vie il y a plusieurs milliards d'années, et d'autres missions sont envisagées pour 2018-2020 (ExoMars). Le rendez-vous cométaire prévu mi-2014 (Rosetta, ESA) permettra d'observer et d'analyser la surface d'un petit corps ayant survécu aux premières étapes de la formation du système solaire.



L'étude en laboratoire des météorites, des micrométéorites et des retours d'échantillons programmés à moyen terme (astéroïdes : Hayabusa 2 et Osiris-Rex) ou à plus long terme (retour d'échantillon de Mars) est tout à fait complémentaire des simulations en laboratoire des processus qui conduisent à la complexité, en particulier organique, dans les environnements astrophysiques, pouvant mener à une chimie pré-biotique à la surface des planètes de type tellurique...

La combinaison de ces trois approches (observations astrophysiques, exploration du système solaire, étude en laboratoire de la matière extraterrestre et des processus à l'œuvre dans les environnements astrophysiques) va clairement révolutionner notre compréhension des conditions d'apparition de la vie dans l'Univers au cours des dix prochaines années.