

# Prospective IN2P3-Irfu

Giens 2-5 Avril 2012

## Rapports de Synthèse des Groupes de Travail

- GT01: Modèle Standard p. 3
- GT02: Au delà du Modèle Standard p. 5
- GT03: Violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes p. 7
- GT04: Neutrino: masses, oscillations. Désintégration du proton p. 9
- GT05: Univers à haute énergie, ondes gravitationnelles, multi-messagers p. 11
- GT06: Matière noire, énergie noire, cosmologie p. 13
- GT07: Plasma de quarks et gluons p. 15
- GT08: Structure du nucléon et QCD à haute énergie p. 17
- GT09: Structure et dynamique nucléaire p. 19
- GT10: Astrophysique nucléaire p. 21
- GT11: Physique et chimie pour l'énergie nucléaire p. 23
- GT12: Interface avec les sciences du vivant p. 25
- GT13: Accélérateurs p. 27
- GT14: Instrumentation & Détection p. 29
- GT15: Relations Recherche-Enseignement p. 32
- GT16: Calcul p. 33
- GT17: Interface avec les sciences de la terre et l'environnement p. 35
- GT19: Théorie p. 37
- GT20: Organisation et financement de la recherche p. 40



# Groupe de Travail No 1

## Modèle Standard, mesures de précision, brisure électrofaible

Le groupe de travail 1 dresse l'état des lieux et les perspectives des recherches sur le modèle standard (MS) de la physique des particules, en particulier sur le mécanisme de brisure de symétrie électrofaible.

Le MS décrit les fermions (rangés en 3 familles d'un lepton chargé, un neutrino, 2 quarks et les antiparticules associées) et leurs interactions via 12 bosons vecteurs (8 gluons, le photon, les bosons Z et W) résultant de l'invariance de la physique sous le groupe de jauge  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ . La symétrie de couleur (groupe  $SU(3)_C$ ) est exacte, la symétrie électrofaible est brisée (laissant exacte  $U(1)_{EM}$  comme symétrie résiduelle). Le MS contient des paramètres libres (les masses des fermions et des bosons, les constantes de couplage, les angles de mélanges et la phase du secteur des quarks) auxquels l'expérience donne accès via des observables en plus grand nombre (les masses et les largeurs des bosons de jauge, des quarks lourds, les sections efficaces totales et différentielles du boson Z, les couplages). Le système est donc surcontraint.

Malgré ses succès, le MS présente des limites. D'une part, il n'incorpore pas des faits expérimentaux indéniables comme l'existence de la matière noire et l'asymétrie baryonique dans l'univers. Au niveau conceptuel, de nombreuses questions restent ouvertes : pourquoi trois familles de quarks et de leptons? Pourquoi tant de paramètres libres et présentant une telle variété ? Pourquoi la symétrie électrofaible est-elle brisée ? Pourquoi la gravité n'est-elle pas incluse ? Certaines de ces questions pourraient trouver une explication ou une origine dynamique dans une théorie plus fondamentale. Les faiblesses du MS incitent les physiciens d'une part, à tester ce modèle de façon intensive et à mettre en évidence expérimentalement des incohérences, et d'autre part à développer des modèles résolvant ces problèmes. Les mesures de précision permettent de prédire les paramètres encore inconnus du modèle ainsi que de tester sa cohérence, les observables expérimentales permettant de remonter à ces paramètres de manière redondante. Elles permettent de sonder la physique à des échelles d'énergie bien plus grandes que les énergies en jeu dans les expériences, à travers les processus faisant intervenir des particules virtuelles dans des corrections radiatives (excitations quantiques).

Des mesures de précision de ces observables permettent différentes approches :

- tester la cohérence interne du modèle via un ajustement global, cohérence vérifiée à ce jour à deux écarts standard.
- confronter les calculs et les mesures, des écarts signaleraient la présence de nouvelle physique.
- via des mesures de précision, contraindre indirectement les briques manquantes (masse du boson de Higgs MH, paramètre non prédit par le modèle, et nature de la brisure de symétrie).

Ce à quoi s'ajoute évidemment la recherche directe du boson de Higgs standard.

Les analyses de physique sont menées auprès des collisionneurs.

### **Etat des lieux et perspectives en fonction des moyens expérimentaux**

- Auprès du LEP, collisionneur  $e^+e^-$  (1989-2000), ont été faites des mesures du secteur électrofaible à des précisions qui vont être difficiles à dépasser, des paramètres du Z en particulier. Une limite inférieure de 114.4 GeV sur la masse du boson de Higgs a été posée.
- Tevatron, collisions  $p\bar{p}$  (1992-2010), avec  $\sqrt{s}$  jusqu'à 2 TeV. Des mesures extensives dans tous les domaines concernant le MS ont été faites, notamment des mesures de précisions dans le secteur du W, la découverte du quark top avec une mesure de sa masse au GeV près et une exclusion de certains domaines de masses possibles du Higgs du MS (et une possible confirmation d'un signal à 125 GeV suggérée par le LHC).
- LHC. Prise de données en cours et en deux phases. La première phase, entre 2010 et fin 2012, est à  $\sqrt{s} = 7$  TeV (8 TeV en 2012) 5 fb<sup>-1</sup> par expérience (entre 20 et 25 fb<sup>-1</sup> prévus par expérience d'ici fin 2012). Le domaine autorisé pour un boson de Higgs léger est réduit à l'intervalle 115-127 GeV (et un possible signal à 125 GeV)

Avec la statistique qui sera accumulée pendant la prise de donnée 2012, les collaborations ATLAS et CMS pourront découvrir ou exclure totalement un boson de Higgs standard de masse inférieure à 600 GeV, et en cas de découverte commencer les mesures des rapports de branchement des différents canaux.

En ce qui concerne le MS et la brisure de symétrie, les orientations futures dépendent cruciallement des résultats des analyses LHC 2012.

- LHC. La deuxième phase, nominale, 2014 -2018, sera à  $\sqrt{s} = 13$  TeV et  $L = 300 \text{ fb}^{-1}$ . Dans le secteur du top, la masse sera mesurée à mieux que le GeV, les sections efficaces de production à quelques % (idem pour le top célibataire). Les sections efficaces différentielles du quark top et des bosons de jauge permettront de poser des contraintes sur les modèles théoriques sous-jacents (pQCD, PDF, PS). La masse du boson W devrait être mesurée à quelques MeV près. Les mesures des couplages multiples des bosons de jauge qui nécessitent à la fois beaucoup de luminosité et de très hautes énergies gagneront en sensibilité mais nécessiteront des outils futurs.

En cas de découverte d'un boson de Higgs léger, sa masse pourra être déterminée avec une précision de l'ordre de 0.1% et ses autres propriétés (largeur, nombres quantiques, rapports de branchement) pourront être estimées. En cas de non découverte, il faudra quand même mener les analyses de recherche dans chaque canal de désintégration possible afin de savoir si un boson de Higgs léger n'existe pas avec des propriétés non standard. Dans le cas d'une absence de découverte, il sera extrêmement important de comprendre quel est le mécanisme de brisure de symétrie et concentrer le travail d'analyse sur les couplages multiples de bosons de jauge.

- HL-LHC. La version haute luminosité du LHC pourrait démarrer après 2020, avec une luminosité attendue de  $300 \text{ fb}^{-1}$  par an. Cette option permet l'étude de processus rares, donc des couplages trilineaires et quadrilineaires des bosons, dont l'étude est cruciale en l'absence de découverte du boson de Higgs standard dans la mesure où elle donne des informations sur le mécanisme de brisure de symétrie et le comportement du MS au-delà du TeV. Il faut néanmoins souligner que certains de ces couplages (impliquant plusieurs bosons Z dans l'état final par exemple) nécessitent une énergie dans le centre de masse au niveau du processus dur de l'ordre du TeV et que le HL-LHC ne sera pas suffisant.

- ILC. Le futur collisionneur linéaire électron-positron pourrait voir le jour dans les années post 2020. Plusieurs modes de fonctionnement sont envisagés avec différentes énergies dans le centre de masse et possibilité d'utiliser des faisceaux polarisés : en mode GigaZ i.e. à  $\sqrt{s} = M_Z$ , au seuil de la production de paires de W ou de paires de quarks top pour les mesures de précisions du MS, en particulier le mode GigaZ polarisé est le seul qui permette une mesure plus précise que la mesure actuelle de l'angle de mélange faible ; en cas de découverte du boson de Higgs standard  $\sqrt{s} = M_H + 100$  GeV est l'énergie dans le centre de masse la plus favorable à la détermination précise de tous les paramètres du boson de Higgs ;  $\sqrt{s} = 350, 500$  et  $800$  GeV sont des modes couramment envisagés pour mesurer respectivement  $M_H$ , les couplages du boson de Higgs (y compris à lui-même sauf au quark top) et le couplage du boson de Higgs au quark top. L'ILC est donc une option à favoriser dans le cas de la découverte du boson de Higgs standard. Enfin, il faut noter d'une part que certaines mesures nécessitent des collisions à basse énergie comme l'augmentation de la précision sur  $\Delta\alpha_{had}$  et  $g_2$  ; d'autre part qu'il existe d'ores et déjà des études sur des projets à plus long terme comme un collisionneur à muons, à photons ou un LHC à très haute énergie qui permettrait des recherches de résonances à très hautes masses et des mesures de certains couplages quadrilineaires de bosons de jauge.

### **Moyens mis et à mettre en oeuvre**

Il est visible que les orientations futures tant en terme de moyens humains que matériels dépendent des résultats du LHC, et ce dès la fin de l'année 2012. Il est clair aussi que la distinction entre les groupe de travail GT1 et GT2 perd ici de sa pertinence et qu'il faut considérer les possibles résultats en terme de nouvelle physique dans son ensemble i.e. en intégrant et le boson de Higgs standard et la nouvelle physique. Toute découverte entrainera la nécessité d'un instrument dédié aux mesures associées et un glissement des personnels vers ces nouvelles mesures. A contrario, en l'absence de découverte, il faudrait s'orienter vers une machine de recherche plus que de mesure.

## Groupe de Travail No 2 Au delà du Modèle Standard

Au cours des quatre dernières décennies le modèle standard de la physique des particules a confirmé sa pertinence dans la description des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions. Dans le cadre du modèle standard minimal, la brisure de la symétrie électrofaible est réalisée grâce au mécanisme de Higgs qui prévoit en particulier l'existence d'une particule scalaire massive neutre, le boson de Higgs. L'existence d'un boson de Higgs permet entre autre de résoudre le problème de l'unitarité du modèle standard. Cependant l'existence du boson de Higgs introduit à son tour le problème de hiérarchie de jauge. Le modèle standard de la physique des particules apparaîtrait finalement comme une théorie effective issue d'une théorie sous jacente plus fondamentale. Les expériences auprès du LHC ont fourni leurs premiers résultats basés sur un lot d'événements correspondant à une luminosité intégrée dépassant  $4\text{fb}^{-1}$  à une énergie de 7 TeV dans le centre de masse. Le Tevatron a fourni ses dernières collisions en 2011. Les expériences CDF et D0 ont terminé leur prise de données et s'appêtent à publier leurs résultats finals avec la statistique complète correspondant à une luminosité intégrée de l'ordre de  $10\text{fb}^{-1}$  par expérience. Cet ensemble de mesure vient compléter les mesures effectuées auprès des collisionneurs  $e^+e^-$  LEP et SLC, qui ont accumulé  $\sim 2.5\text{fb}^{-1}$  autour, puis au delà ( $\sim 900\text{pb}^{-1}$ ) de la resonance du boson Z.

Au cours de l'année 2011 les expériences ATLAS et CMS ont considérablement étendu le domaine de masse du boson de Higgs exclu par rapport au domaine auparavant déjà exclu par les expériences du Tevatron lors de la décennie précédente et les expériences du LEP. Cependant les deux collaborations ont trouvé des indices prometteurs dans la gamme de masses 124-126 GeV. Ceux-ci ne sont pas encore assez solides pour qu'il soit possible de parler de découverte ; les résultats récents des expériences CDF et D0 semblent également pointer sur des indices dans une gamme de masse 115-135 GeV.

L'existence d'une nouvelle physique (NP), se manifestant par l'apparition de nouveaux phénomènes (nouvelle particule, résonance, section efficace modifiée, asymétries, couplages anormaux ...) n'a pas été pour le moment mise en évidence.

Ces premiers résultats conduisent à des contraintes fortes sur les paramètres de nombreux modèles proposés pour décrire une éventuelle NP. Par exemple les extensions supersymétriques les plus simples se trouvent déjà fortement contraintes ainsi que les modèles de dimensions supplémentaires les plus simples.

A l'heure actuelle, la première recommandation consiste donc à encourager la poursuite des investigations avec la seule machine disponible à savoir le LHC et de s'assurer du support des expériences pour une collecte de données suffisante ( $100\text{fb}^{-1}$ ) dans la phase LHC 13-14 TeV. Pour aller au delà, en l'absence d'indication expérimentale directe pour NP, on peut faire quatre hypothèses s'articulant autour de la découverte ou non d'un boson de Higgs au LHC en 2012, accompagnée ou non de NP.

### **Découverte d'un boson de Higgs et rien d'autre.**

Après la découverte d'un boson de Higgs au LHC, il faudra étudier ses propriétés : masse, spin, section efficace de production, rapport d'embranchement, couplage aux fermions, auto-couplage pour déterminer s'il est bien le boson de Higgs du modèle standard ou un boson de Higgs plus exotique, et s'il est bien celui qui résulte de la brisure de la symétrie électrofaible. S'il est découvert sans être accompagné par la découverte de NP, la question de la stabilité de la masse de ce boson restera posée. Dans ce scénario, le LHC 13-14 TeV peut fournir les premières mesures, mais la mesure complète de toutes les propriétés nécessitera d'une part un collisionneur  $e^+e^-$  de type ILC (i.e. avec une énergie dans le centre de masse inférieure au TeV) pour la mesure de l'auto-couplage, et d'autre part un LHC à très haute énergie (HE-LHC, 33 TeV) pour résoudre la question de la stabilité de la masse du boson de Higgs. Dans ce scénario, la question d'un candidat à la matière noire (DM) provenant de la physique des particules resterait posée.

## Découverte d'un boson de Higgs et de NP.

Les mesures consécutives à la découverte d'un boson de Higgs accompagné de la découverte de NP devront permettre de déterminer plus précisément soit la pertinence des approches déjà envisagées (extensions supersymétriques à l'échelle électrofaible, dimensions supplémentaires, modèles composites) soit la nécessité d'un cadre nouveau. Dans ce scénario les recommandations concernant le boson de Higgs sont similaires à celle du scénario précédent. Pour la partie NP, il faudra maximiser les possibilités du LHC grâce à une phase soit haute luminosité (HL-LHC) soit haute énergie (HE-LHC) selon la nature de NP découverte. Puis il s'agira de s'engager dans un programme  $e^+e^-$  permettant d'explorer une large plage de masse allant au moins jusqu'à 1 TeV afin d'effectuer des mesures plus précises sur la NP découverte. Finalement la question du candidat à la DM devrait être explorée selon le type de NP identifiée.

### Aucun boson de Higgs n'est découvert mais NP est découvert.

Dans cette hypothèse, il faudra éclaircir la question de la brisure de symétrie électrofaible et de son éventuelle relation avec la NP. Il s'agira également d'éclaircir la question d'un Higgs "invisible", i.e. décroissant en une paire de particules invisibles. Cette particule invisible ferait un bon candidat à la matière noire. Dans ce scénario les recommandations sont similaires à celles concernant la NP du scénario précédent auxquelles il faut éventuellement ajouter un collisionneur  $e^+e^-$  de type ILC pour la détection d'un Higgs "invisible" dans le cas où la NP ne suffit pas à expliquer l'absence d'un Higgs.

### Ni boson de Higgs ni NP ne sont découverts.

Dans ce scénario, toutes les questions restent ouvertes, y compris celles de la matière noire. La problématique d'un Higgs invisible sera posée, et au delà celle de la brisure de la symétrie électrofaible et de l'unitarité du modèle standard. Un collisionneur  $e^+e^-$  de type ILC et/ou une phase HL-LHC et HE-LHC seront alors nécessaires.

## Moyens

La recherche directe de physique au delà du modèle standard se concentre pour une grande part sur la recherche auprès des collisionneurs et leurs expériences attenantes dont beaucoup sont suffisamment généralistes pour englober de nombreux domaines de la physique des particules et donc dépasser le simple cadre de la physique au delà du modèle standard. Ainsi les questions de financement seront proches voire communes à d'autres groupes de travail en particulier le groupe 1 sur la physique du modèle standard. Les collisionneurs du futur ont été décrits dans le cadre de chacune des quatre hypothèses concernant le résultat du LHC après analyse des données 2012. Le panorama actuel de l'implication des expérimentateurs pourrait fortement varier en fonction de ce résultat. Concernant la NP, de nombreux liens existent déjà entre la communauté des expérimentateurs du LHC et d'autres communautés (théoriciens, physiciens travaillant à la détection de la matière noire), grâce notamment aux GDR ou encore grâce aux projets de type "théorie LHC France" ou aux ateliers des Houches, et doivent être amplifiés voire étendus vers d'autres communautés (neutrinos, cosmologie). Plusieurs projets communs entre expérimentateurs et théoriciens ont également déjà été construits autour de sujets spécifiques sur la recherche de NP auprès du LHC. Ce type de projets devrait également être encouragé. Une découverte de NP provoquerait dans la communauté une mobilisation des forces sans précédent, et l'un des enjeux résiderait dans sa réactivité et les capacités d'adaptation. Ces dernières seront grandement améliorées si nous pouvons embaucher des permanents, et proposer et financer thèses et post-docs dans des délais brefs par rapport à ceux de la plupart des guichets de financement actuels.

## Groupe de Travail No 3

# Violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes

Au cours de la décennie passée, les expériences BABAR et Belle, installées auprès des usines à mésons B, ont fourni une quantité impressionnante d'informations sur la physique des saveurs dans le domaine des quarks. Dans la limite des incertitudes théoriques et expérimentales, cet ensemble de mesures dessine une image remarquablement cohérente de la violation de la symétrie CP, en accord avec les mesures effectuées dans les secteurs des quarks légers, notamment le quark étrange. Le mécanisme de Kobayashi-Maskawa incorporé dans le Modèle Standard a ainsi été validé avec une grande précision. La physique des saveurs connaît actuellement un changement de paradigme. Si elle a longtemps été perçue comme un outil de précision pour valider le Modèle Standard, elle est de plus en plus comprise comme un ensemble de contraintes extrêmement fortes sur ses extensions potentielles. En effet, les processus qui changent la saveur sont sensibles à des contributions de haute énergie par l'intermédiaire de diagrammes mettant en jeu des particules virtuelles. Leurs mesures permettent d'accéder à l'échelle de masse des nouvelles particules et à leurs couplages. Dans le passé, les mesures de précision, en particulier dans le domaine des saveurs, ont permis d'estimer les masses des quarks charmé, beauté et top avant leur découverte directe. Aujourd'hui, les contraintes émanant des transitions  $K^0 - \bar{K}^0$  ou des transitions radiatives  $b \rightarrow s\gamma$  sont si fortes qu'elles impliquent que les nouvelles particules sont soit très massives (deux à trois ordres de grandeur au dessus du TeV) soit qu'elles se couplent très faiblement aux particules du Modèle Standard. Un moyen de bâtir des modèles satisfaisant automatiquement ces contraintes consiste à accepter le principe de violation minimale de la saveur, à savoir que la seule brisure de la symétrie des saveurs est entièrement contenue dans les couplages de Yukawa du Modèle Standard. Mais ce principe minimal, ne découlant pas d'une dynamique spécifique, n'a pas actuellement de justification théorique profonde. S'il devait être observé, il serait donc essentiel de découvrir l'origine de son existence. Les études de la violation de la symétrie CP et des désintégrations rares dans le secteur de la beauté et du charme sont donc des outils privilégiés pour mettre en évidence des phénomènes au-delà du Modèle Standard et du principe de violation minimale de la saveur. La recherche indirecte de la nouvelle physique en utilisant des transitions entre saveurs est organisée autour de quelques projets au niveau mondial. On citera notamment KOTO et NA62 pour la mesure du rapport de branchement  $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  et  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ , LHCb et son upgrade pour l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans le système des mésons beaux mais aussi des baryons beaux et des hadrons charmés, les projets Belle-2 et SuperB pour l'étude de la violation de CP et des désintégrations rares dans les systèmes des mésons B et charmés. Par ailleurs des expériences dédiées sont en préparation pour mesurer plus précisément le moment dipolaire électrique du neutron, étudier l'atome d'antihydrogène, pour déterminer la constante de gravitation des antiparticules ou bien encore pour étudier la violation de la saveur dans les transitions leptoniques comme l'expérience MEG le fait actuellement, ou comme la prochaine génération d'expériences en préparation comme Mu2E. Sur le plan expérimental, le panorama des expériences a évolué ces dernières années, ce qui a entraîné des modifications dans la répartition de la communauté française. L'expérience NA48 s'est achevée, et avec elle une étude expérimentale approfondie de la violation de CP et de certaines désintégrations très rares dans le secteur des kaons. La fin de la prise des données auprès de BABAR a aussi occasionné des changements dans les thématiques de recherche. Une partie des physiciens de BABAR poursuit les mêmes thématiques scientifiques via l'expérience LHCb ou le projet SuperB, une autre partie s'est tournée vers d'autres expériences auprès du LHC, des expériences de physique du neutrino ou de cosmologie. En France, l'avenir de la thématique violation de CP, matière-antimatière, saveurs lourdes s'organise autour de cinq projets : l'upgrade de LHCb, SuperB, nEDM, GBAR et AEGIS. Les deux premiers sont des projets de grande taille qui couvrent un large domaine scientifique allant de la violation de CP dans les mésons beaux et charmés à la recherche de particules exotiques et de violation du nombre leptonique. Les trois derniers sont des expériences dédiées, de petite taille, pour la mesure du moment dipolaire électrique du neutron et de la constante de gravitation des antiparticules. Ces cinq projets sont très ambitieux. Ils montrent la vitalité de cette communauté et l'importance de cette thématique pour mettre en évidence et comprendre la physique au-delà du Modèle Standard en parfaite complémentarité avec les expériences de recherche directe.

- Nous recommandons de soutenir l'upgrade de LHCb pour son potentiel unique notamment à travers la très grande statistique de mésons Bs et l'accès à des désintégrations exclusives extrêmement rares, son enracinement dans la communauté et la très grande visibilité des équipes françaises ;
- Suite à l'approbation récente par le gouvernement italien du projet SuperB, nous recommandons d'approuver la participation d'équipes françaises dans ce programme, au vu de la capacité du laboratoire Nicola Cabibbo de le conduire dans le calendrier prévu et de la capacité des groupes français à agréger de nouveaux collaborateurs autour du noyau qui y participe depuis l'origine. Nous soulignons la complémentarité du potentiel de physique des super usines à B avec celui des expériences sur machine hadronique et leur potentiel unique pour les états finaux contenant des particules neutres.
- Nous recommandons de soutenir l'expérience nEDM dans sa phase III pour atteindre une sensibilité de  $10^{28} e.cm$ , et de s'engager dans le projet GBAR et/ou AEGIS pour la mesure de la constante gravitationnelle de l'antimatière. Nous notons également le caractère pluridisciplinaire de ces projets.

## Groupe de Travail No 4

# Neutrino: masses, oscillations. Désintégration du proton

La physique des neutrinos a connu deux décennies riches en découvertes majeures, notamment celle des oscillations des neutrinos. Un ensemble cohérent de résultats expérimentaux a permis de résoudre l'énigme des neutrinos solaires et le déficit, connu depuis longue date, des neutrinos atmosphériques. Cela a démontré que les neutrinos oscillent et donc qu'ils ont une masse. C'est un premier élément très important qui montre que le modèle standard minimal est incomplet. Néanmoins, des nombreuses questions fondamentales restent ouvertes dans ce domaine, notamment en ce qui concerne le dernier angle de rotation de la matrice PMNS,  $\theta_{13}$ , l'existence ou pas de phénomènes de violation de CP liés à cette matrice, le type de hiérarchie de masse, et last but not least la nature même du neutrino, Dirac ou Majorana.

Tout au long de ce travail nous avons montré comment la prochaine décennie verra les efforts se tourner vers quatre axes prioritaires d'investigation pour lesquels la communauté française de physique des neutrinos propose de s'investir et ainsi poursuivre son implication majeure dans cette thématique. Ces quatre axes proposés sont :

**La poursuite de l'exploration de la matrice de mélange PMNS avec les expériences en cours, Borexino, OPERA, T2K et Double Chooz.**

Ces quatre expériences, avec pour trois d'entre elles (OPERA, T2K et Double Chooz) une forte implication des groupes français, sont actuellement en prise de données et cela pour les prochains trois à cinq ans. Borexino sonde les flux de neutrinos solaires pour la détermination des paramètres d'oscillation  $\Delta m_{12}$  et  $\theta_{12}$ , et apporte des informations notables sur les mécanismes nucléaires à l'oeuvre au coeur du Soleil. OPERA étudie les oscillations  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  et devrait pouvoir conclure sa prise de données en mettant en évidence l'apparition de  $\nu_\tau$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$ , ce qui pour l'instant reste une hypothèse. T2K et Double Chooz ont déjà montré des premières indications d'un angle  $\theta_{13}$  grand, proche de la limite supérieure. Il s'agit pour ces expériences de poursuivre la prise de données, pour Double Chooz avec la construction du laboratoire proche et la mise en service de son détecteur, et d'apporter une confirmation de ces indications, avec des mesures de plus grande précision. Signalons que la mesure de cet angle est d'une grande importance pour le programme futur d'expériences visant à étudier la violation de CP dans la matrice PMNS. Ce programme est particulièrement intéressant du fait que T2K et Double Chooz apportent un éclairage complémentaire sur  $\theta_{13}$ , grâce à des techniques orthogonales et à la mesure de phénomènes différents (apparition-disparition). Le programme de physique de T2K pourrait être poursuivi par une prise de données en mode anti-neutrino, ensuite par une phase d'upgrade et une montée en puissance de JPARC.

### **L'étude des anomalies**

Une série d'anomalies a été mise en évidence dans les études expérimentales des neutrinos. Les plus connues sont liées à l'expérience LSND, aux mesures de calibration de GALLEX et SAGE avec une source intense, et plus récemment à l'anomalie des mesures de flux de neutrinos avec des réacteurs. L'ensemble de ces anomalies ne se prête pas facilement à une interprétation globale. Néanmoins, certaines d'entre elles pourraient indiquer l'existence de neutrinos stériles avec une masse de l'ordre de l'eV. L'expérience NUCIFER initialement prévue pour la non-prolifération nucléaire pourrait donner des premières indications dans ce sens. D'autres expériences sont à l'étude, notamment avec des sources radioactives très intenses déployées dans des détecteurs existants (comme Borexino ou KamLAND) et avec des nouvelles mesures auprès de réacteurs, notamment à l'ILL. Il faut aussi évoquer l'anomalie de la vitesse supra-luminique des neutrinos observés par OPERA. Si cela est confirmé par d'autres expériences (MINOS, T2K), et si aucune explication en terme d'erreur systématique expérimentale n'est trouvée, elle pourrait indiquer une violation de la relativité qui demanderait à être étudiée de façon plus approfondie.

## **Les expériences accélérateur à longue ligne de base couplées à des détecteurs de type Mégatonne**

Si les premières indications d'un angle  $\theta_{13}$  grand se confirment, on peut envisager une nouvelle étape dans l'exploration de la matrice PMNS avec comme axes la détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos et l'étude de la phase de violation de CP. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un super-faisceau avec une puissance du MW et d'un détecteur lointain d'une masse de l'ordre de la Mégatonne. Sur ce programme pourraient se déployer des efforts considérables au niveau mondial, avec des projets aux USA (LBNE) et au Japon (Hyper-Kamiokande, avec un upgrade JPARC). Dans ces études, l'Europe possède des atouts considérables, en particulier avec la possibilité d'une ligne de base courte, CERN à Fréjus de 130 km, et celle d'une ligne de base très longue, CERN à Pyhäsalmi de 2500 km, proche de la distance magique . C'est sur ces deux options que travaille LAGUNA-LBNO, étude européenne qui rassemble la communauté intéressée par ces études. Celle-ci s'accorde pour souligner le rôle primordial du CERN dans ces projets et a privilégié une approche incrémentale, dans laquelle la masse des détecteurs augmente par paliers successifs, en permettant de moduler l'effort de construction. A chaque étape correspondent des objectifs de physique très clairs dans l'étude de la matrice PMNS. Au programme avec un faisceau se couplent des études des neutrinos astrophysiques et la recherche de désintégration du proton. Une Lettre d'Intention devrait être soumise au CERN au cours de l'année 2012. Cet effort, qui voit une bonne participation de la communauté française, doit être suivi et soutenu, vu l'importance fondamentale de cet axe de recherche. Au niveau français, il conviendrait de soutenir aussi l'effort de R&D pour des détecteurs Mégatonne.

### **La recherche de désintégrations double beta sans neutrino**

La recherche de désintégrations double beta sans neutrino est la seule à pouvoir nous renseigner sur la nature du neutrino : Dirac ou Majorana. En outre, elle peut établir le type de hiérarchie de masse en parallèle avec l'information que les mesures d'oscillations peuvent donner sur ce sujet crucial. Deux approches de détection ont été retenues par les laboratoires français. D'une part l'approche de tracement et calorimétrie, en continuant une longue tradition qui a vu et voit la France à l'avant-garde dans la recherche de cette décroissance rare. Cette technologie est la seule qui permet d'accéder à tous les paramètres de l'état final à deux électrons. Après Nemo-3, le projet SuperNEMO se propose d'atteindre une sensibilité sur le neutrino de Majorana de l'ordre de 0,05 eV en 2016-2018 avec un scénario de mise en route séquentielle des modules de SuperNEMO. D'autre part, un développement extrêmement prometteur, basé sur la technique des bolomètres scintillants, a débuté très récemment, en partie en lien avec le projet LUCIFER et en partie en suivant une démarche originale qui utiliserait des cristaux de ZnMoO4 pour des recherches avec l'isotope prometteur 100Mo. Comme pour la technique à tracement et calorimétrie, plusieurs isotopes pourraient en principe être investigués, en donnant une redondance indispensable pour la découverte de la décroissance double beta.

## Groupe de Travail No 5

# Univers à haute énergie, ondes gravitationnelles, multi-messagers

Il y a cinquante ans la naissance de l'astronomie X puis de l'astronomie gamma a permis de révéler tout une catégorie d'astres animés de phénomènes extrêmement violents. Ces observations ont conduit à s'interroger sur leur dynamique, les mécanismes d'accélération des électrons et des noyaux, leur efficacité relative, et la propagation de ces particules dans la Galaxie et l'Univers en général.

En astrophysique, la vérification expérimentale des modèles et théories est remplacée par des études statistiques de population. L'expérience ne pouvant être répétée en laboratoire, c'est la Nature qui répète les phénomènes pour nous avec la difficulté supplémentaire d'une mauvaise connaissance ou d'une méconnaissance des conditions initiales. Ces conditions initiales sont généralement démasquées par les informations apportées par d'autres longueurs d'ondes ou d'autres messagers. La Science des phénomènes à haute énergie ne peut donc se construire qu'au travers d'une liste de projets complémentaires, a priori tous nécessaires, ce qui rend difficile un établissement de priorités. Cependant, certaines techniques ou certains domaines scientifiques ont atteint une maturité telle qu'ils permettent, ou qu'ils sont sur le point de permettre d'accumuler des informations cruciales pour nous éclairer sur la stratégie à adopter à plus long terme.

Le **télescope Fermi** a ainsi permis de construire un catalogue de plus d'un millier de sources entre 20 MeV et 300 GeV. Son fonctionnement est aujourd'hui garanti jusque mi-2013. Une prolongation est plausible au-delà. La France y joue un rôle majeur. Notons qu'il n'y a pas d'instrument équivalent en préparation pour lui succéder.

Entre 50 GeV et 300 TeV, fort des succès rencontrés par les générations actuelles de détecteurs au sol, le **projet CTA** devrait obtenir un catalogue d'un millier de sources avant la fin de la décennie. Les données aux énergies les plus basses recouvriront celles de Fermi, et pourraient contribuer à différencier scénarios hadroniques et électromagnétiques en particulier dans les restes de supernovae. L'importance du retour scientifique escompté justifie l'engouement de la communauté scientifique pour ce projet (800 collaborateurs, 150 instituts), et en particulier la très forte adhésion de la communauté des astrophysiciens. La mise en place d'une organisation cohérente du projet reste un défi majeur à relever dans les quelques années qui viennent.

Ni Fermi, ni CTA ne peuvent remplacer un télescope grand champ dédié à la détection des sursauts gamma. Aujourd'hui c'est le satellite Swift qui joue ce rôle, lancé en 2004 initialement pour 5 ans. Le satellite **SVOM** devait être lancé en 2017 pour observer des sursauts gamma à grand décalage spectral, avec un taux comparable à Swift. La poursuite de ce projet franco-chinois paraît aujourd'hui très incertaine. Il est crucial que la communauté étudie une solution alternative afin de s'assurer qu'un télescope GRB soit en prise de données à la fin de cette décennie.

Le retour scientifique ne pourra être complet que si le domaine des rayons X ( $E < 10 \text{ keV}$ ) est couvert. Or les satellites XMM-Newton et Chandra ont dépassé leur durée de vie initiale. INTEGRAL lancé en 2002 pourrait voir sa mission étendue jusqu'en 2014. La communauté compte donc beaucoup sur le satellite LOFT prévu pour 2020 (compétition M3 en 2013), mais surtout le successeur des satellites généralistes actuels, ATHENA/IXO en compétition L1 à l'ESA (décision en 2015, en même temps que LISA/NGO).

La fertilité du domaine des rayons X et gamma est le fruit d'une longue maturation technologique et scientifique. Les autres messagers n'en sont qu'à leurs balbutiements. Les étapes franchies ces dix dernières années laissent espérer des progrès substantiels en rayons cosmiques chargés de haute énergie, et les premières détections de neutrinos cosmiques et d'ondes gravitationnelles.

Dans le domaine des rayons cosmiques, la référence reste l'**Observatoire Pierre Auger**. La corrélation de 69 événements de plus de  $5 \cdot 10^{19}$  eV avec la distribution de matière à 100 Mpc pourra être confirmée par l'accumulation de données. Mais pour aller plus loin il sera nécessaire de gagner un ordre de grandeur sur le taux d'événement. La communauté se tourne vers un projet incluant la détection radio des gerbes. En parallèle, des efforts sont consentis pour augmenter les capacités d'Auger à plus basse énergie, dans la

zone de la cheville . Les programmes R&D engagés dans Auger doivent être soutenus afin d’augmenter le retour scientifique du détecteur existant et de permettre de proposer dans les 5 ans une nouvelle génération de détecteur pour la décennie suivante.

**Antares** a atteint sa phase de production scientifique avec les données prises depuis 2007. En 2006, la communauté s’est rassemblée dans le consortium **KM3NeT**, en passe de signer un MoU afin de déployer un télescope à neutrinos de plusieurs km<sup>3</sup> sur les trois sites méditerranéens français, italien et grec. Une phase d’ingénierie démarre qui devrait permettre de déployer les détecteurs entre 2015 et 2019, avec un premier retour scientifique pour la fin de la décennie. Le télescope KM3NeT est optimisé pour détecter les neutrinos cosmiques des sources galactiques observées par HESS, et a une couverture complémentaire à Icecube, en prise de donnée depuis 2008. Le domaine d’énergie couvert est celui de CTA.

Les détecteurs Virgo et Ligo ont tracé la route pour **Advanced Virgo** et Advanced Ligo qui devraient fonctionner à partir de 2014 avec une sensibilité accrue d’un facteur 10, et obtenir les premières données exploitables à partir de 2016. La détection de ne serait-ce que d’un seul signal serait un événement scientifique majeur qui ouvrirait la voie vers l’interféromètre souterrain **Einstein Telescope**. L’interférométrie spatiale permettrait d’augmenter encore les performances et sera mise à l’épreuve en 2015 lors de la mission **LISA Pathfinder**, qui conduira peut-être à ce que le projet **eLISA/NGO** soit sélectionné par l’ESA en 2015 comme mission L, pour un lancement à la fin de cette période de prospective. Le futur des ondes gravitationnelles en France est assujéti à la poursuite de l’effort engagé dans un contexte de compétition internationale. Il est aussi fortement relié à la détection d’un signal au milieu de cette décennie.

Dans un domaine aussi évolutif, il est important de ne pas négliger le potentiel de découverte des expériences dans des domaines encore mal exploités, et de continuer à consacrer une partie des ressources à des R&D novatrices. Pour ce qui concerne les rayons cosmiques, citons le domaine des énergies en dessous du genou, cible des détecteurs embarqués sur **CREAM** ou du réseau au sol **LHAASO**, et pour les énergies au-delà de la coupure GZK, le projet **JEM-EUSO**. En gamma, le domaine entre 100 keV et 100 MeV est mal exploré et difficile d’accès expérimentalement mais les efforts doivent être poursuivis (détecteur Compton, mesures de polarisation). Aux très hautes énergies une participation à **LHAASO** permet d’avoir une vue complémentaire de celle de CTA.

Compte tenu des temps de développement des détecteurs et de leur durée de vie, il est essentiel de veiller à ce qu’il y ait une continuité dans l’acquisition et le transfert des compétences, et qu’aucun des domaines ne deviennent sous-critique, malgré la nécessité inéluctable de devoir regrouper de plus en plus de ressources sur un nombre de plus en plus restreint de projets. C’est à ce prix que l’Univers à haute énergie pourra continuer à se dévoiler en utilisant tous les messagers disponibles, pendant la période couverte par cet exercice de prospective et au-delà.

## Groupe de Travail No 6

# Matière noire, énergie noire, cosmologie

La cosmologie est l'étude des propriétés globales de l'Univers. Elle inclut essentiellement les champs de recherche suivants:

- La mesure des propriétés moyennées de l'Univers observable: taux d'expansion ( $H_0$ ) et densités moyennes de ses principaux composants (matière noire, énergie noire, baryons, photons et neutrinos).
- L'étude des inhomogénéités à grande échelle et des objets gravitationnellement liés (galaxies et amas de galaxies).
- La détection de la matière noire.
- L'étude des modèles théoriques d'Univers primordial qui peuvent expliquer la composition et la structure de l'Univers observable.
- L'étude de la formation et des caractéristiques des tout premiers objets compacts (étoiles et quasars).

Les deux premiers sont intimement liés puisque la formation gravitationnelle des structures dépend fortement des densités relatives des composantes sombres et baryoniques. Ils sont souvent combinés sous le nom de "paramètres cosmologiques" ou "cosmologie observationnelle". La détection de la matière noire (froide) est largement indépendante de la cosmologie observationnelle, formant une communauté scientifique séparée. L'étude de l'Univers primordial vise à unifier la cosmologie théorique avec la physique des particules théorique, à l'aide de modèles d'inflation et de baryogénèse. Enfin, l'étude des "premières lumières" de l'Univers provenant d'étoiles et de quasars est quasiment absente de l'IN2P3 et présente à l'IRFU uniquement au sein du SAP. Nous dirons donc peu sur cet important sujet.

Les résultats de la cosmologie observationnelle sont en général bien décrits par le modèle  $\Lambda$ CDM, maintenant standard, dans lequel la densité moyenne correspond à 1% près à la densité critique,  $3H_0^2/8\pi G$ , et avec des abondances relatives d'énergie noire, matière noire et baryons à redshift nul valant  $(\Omega_\Lambda, \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_b) = (0.726 \pm 0.015, 0.228 \pm 0.013, 0.0456 \pm 0.0015)$  (WMAP 2009). L'énergie noire est compatible avec une énergie du vide indépendante du temps, ou de manière équivalente avec une constante cosmologique, et est responsable de l'accélération actuelle de l'expansion de l'Univers. La matière noire froide domine les objets gravitationnellement liés que sont les galaxies et amas de galaxies. Ces conclusions sont basées sur l'interprétation de données provenant:

- des anisotropies du fond diffus micro-onde cosmique (CMB)
- des distances de luminosité des supernovae de type Ia (SNIa)
- du spectre de puissance des inhomogénéités de densité (grandes structures - LSS) et en particulier de l'empreinte sur celui-ci des oscillations acoustiques baryoniques (BAO)
- des déformations des images de galaxies lointaines par effet de lentille gravitationnelle
- du nombre et de la composition des amas de galaxies

Alors que les paramètres de  $\Lambda$ CDM sont maintenant connus avec une précision correcte, leurs valeurs n'ont aucune justification théorique bien établie.

Les chercheurs français sont impliqués dans tous les domaines de la cosmologie qui ont mené à la construction de  $\Lambda$ CDM. En cosmologie observationnelle, l'IN2P3 et l'IRFU sont en particulier impliqués dans PLANCK (anisotropies du CMB), SNLS (SuperNova Legacy Survey) et BOSS (Baryon acoustic Oscillation Spectroscopic Survey). Pour la recherche de matière noire froide non baryonique, mentionnons l'expérience

XENON, ainsi que le rôle majeur dans l'expérience de recherche de WIMPs par détection directe EDELWEISS. Des recherches intenses de photons et neutrinos provenant de l'annihilation de WIMPs ont été menées par HESS et ANTARES. La communauté des cosmologues de l'IN2P3/IRFU/IPhT regroupe environ 200 membre (voir table de la section 1).

Les dix dernières années ont vu l'émergence du modèle  $\Lambda$ CDM et la mesure de ses paramètres avec une précision meilleure que 10%. Le but des dix prochaines années sera d'améliorer la précision sur ces paramètres et, plus important, de rechercher des désaccords avec  $\Lambda$ CDM indiquant une nouvelle physique. Un but important dans ce contexte est d'améliorer les limites sur la variation temporelle de la densité d'énergie noire (paramètres cosmologiques  $w$  et  $w_a$ ). Il est aussi fondamental de placer des contraintes sur des déviations de la théorie gravitationnelle standard (la relativité générale) à grande échelle en mesurant proprement l'histoire de l'expansion de l'Univers et la formation simultanée des grandes structures. Ce sont les objectifs principaux du Large Synoptic Survey Telescope (LSST) et de la mission spatiale Euclid, qui doivent commencer à produire des données vers la fin de la décennie. LSST est un grand relevé photométrique du ciel conçu avant tout pour des mesures de cisaillement gravitationnel faible mais qui va aussi étudier le BAO et les SNIa. Euclid est conçu avant tout pour le cisaillement gravitationnel et le BAO mais pourrait aussi étudier les SNIa. Des résultats intermédiaires sur le BAO devraient être produits par eBOSS, une extension de BOSS.

Avec la mesure finale des anisotropies de température du CMB par Planck, les études sont maintenant centrées sur sa polarisation. La recherche des "modes B" est particulièrement importante car elle fournirait une indication directe en faveur de l'inflation. C'est le but de QUBIC, un observatoire interférométrique du CMB mené par la France qui doit être construit en Antarctique.

La détection directe ou indirecte de matière noire sous forme de WIMPs est une piste expérimentale cruciale pour tenter de comprendre la physique qui se cache derrière la paramétrisation  $\Lambda$ CDM. Des expériences de détection directe à l'échelle de la tonne deviennent réalisables, comme EURECA, la suite prévue d'EDELWEISS, et les suites de XENON. Pour la détection indirecte via l'observation de produits d'annihilation des WIMPs, CTA devrait améliorer les résultats déjà obtenus par HESS.

Il est clairement très difficile d'extrapoler au-delà de 10 ans. Le rapport de prospective écrit il y a sept ans seulement ne mentionnait ni le BAO (découvert en 2006), ni les crises financières de 2007-2011, qui ont toutes deux un impact important sur la pratique de la cosmologie de 2011. Nous pouvons néanmoins mentionner deux projets qui n'ont pas (encore) bénéficié de la participation IN2P3/IRFU. Le premier est le Square Kilometer Array (SKA), un radiotélescope conçu en partie pour fournir un relevé quasiment plein-ciel jusqu'à des redshifts  $z \sim 2$ . En second, un effort est en cours pour construire des télescopes optiques de 30 mètres de diamètre. De tels instruments pourraient permettre la mesure directe de la dépendance en temps du taux d'expansion via la dépendance en temps des positions des raies spectrales.

## Groupe de Travail No 7

# Plasma de quarks et gluons

La Chromodynamique Quantique (QCD), théorie fondamentale des interactions fortes, prédit dans ses calculs sur réseau l'existence d'un état déconfiné de la matière nucléaire, appelé *plasma de quarks et de gluons* (QGP), à très haute température et densité d'énergie. Selon le modèle cosmologique standard, l'Univers serait passé par cet état dans ses premières microsecondes d'existence après le Big Bang. Les conditions nécessaires à la production du QGP peuvent être atteintes en laboratoire avec des collisions d'ions lourds à très haute énergie. Depuis plus de 25 ans, un important programme expérimental dédié à l'étude des collisions d'ions lourds aux énergies ultra-relativistes a été mis en place. Les premières indications du déconfinement ont été observées sur l'accélérateur SPS au CERN avec la mesure de la suppression des charmonia dans les collisions Pb-Pb les plus centrales. Depuis l'an 2000, le RHIC au BNL (USA) a obtenu d'importants résultats qui ont donné lieu à l'annonce officielle de la découverte d'un nouvel état de la matière se comportant comme un fluide idéal, à une température initiale de l'ordre de 300 MeV et une haute densité de couleur. Parmi les observables pertinentes, les sondes dures, à travers le phénomène de jet quenching, ont été déterminantes au RHIC motivant leur étude auprès du LHC où l'énergie disponible dans le centre de masse est (sera) quatorze (vingt-sept) fois supérieure.

Deux campagnes de mesures en Pb-Pb ont eu lieu en 2010 et 2011 et une prise de données en p-Pb est prévue pour fin 2012. Ce programme se poursuivra jusqu'en 2017 et au-delà, avec une augmentation de la luminosité et avec des systèmes plus légers. Elle va permettre de caractériser en détail les différentes propriétés du QGP. En particulier, l'étude des propriétés d'hadronisation et de thermalisation du QGP pourra être étendue du secteur de l'étrangeté vers le charme. La perte d'énergie des partons de haute énergie dans le QGP pourra être étudiée plus en détail à l'aide des processus photon-jet ou Z-jet, mais également dans le secteur des quarks charmés et beaux. De plus, la physique de formation des quarkonia, basée sur les propriétés de déconfinement et de recombinaison, pourra être étudiée en détail dans les secteurs du charme et de la beauté. Finalement, de nouvelles surprises nous attendront probablement dans la *terra incognita* explorée par le LHC.

Depuis les années 80, les groupes français ont participé aux différents programmes d'ions lourds, qui se sont déroulés auprès du SPS et de RHIC. Ils ont ainsi pu développer une grande expérience dans ce domaine de recherche et acquérir une reconnaissance internationale. En particulier, un investissement humain et financier important a été fourni pour la construction du spectromètre à muons, du détecteur de vertex au silicium à micropistes et du détecteur d'interaction V0 d'ALICE. Depuis 2006, ils se sont également impliqués dans la construction du calorimètre électromagnétique d'ALICE. Depuis 2008, un groupe a rejoint la collaboration CMS pour contribuer au programme des ions lourds.

Les collaborations ALICE et CMS, ont déjà fourni des résultats surprenants, notamment pour des analyses où les groupes français ont été leaders, portant sur les données Pb-Pb de 2010 et 2011. Les premiers résultats d'ALICE ont porté sur les mesures de multiplicité et d'écoulement elliptique des hadrons, pour lesquels le détecteur V0 a joué un rôle clef. L'expérience CMS a observé une asymétrie en énergie dans les événements di-jets de très grande impulsion transverse pour les collisions Pb-Pb les plus centrales. Cette étude apporte des premières informations sur la perte d'énergie des partons dans le milieu et sur la façon dont l'énergie est dissipée dans le QGP. De façon complémentaire, ALICE a mené à bien les premières études détaillées des fluctuations du bruit de fond pour la reconstruction des jets. Les premiers résultats sur les quarkonia ont été obtenus à l'aide du bras di-muons d'ALICE et CMS, qui ont mesuré le facteur de modification nucléaire du  $J/\psi$  à petites et grandes impulsions transverses, respectivement. Ces premiers résultats suggèrent que les processus de recombinaison de quarks charmés après une phase de déconfinement pourraient fortement contribuer à la production de  $J/\psi$  à faible impulsion transverse. La collaboration CMS a fourni des résultats dans le secteur des bottomonia, avec une suppression des états excités (2S et 3S) par rapport à l'état fondamental (1S). Il faut également noter que les premières mesures de production des particules multi-étrange dans ALICE sont en bon accord avec les modèles statistiques et que CMS a mesuré pour la première fois en ions lourds des bosons Z et W.

À ce jour les résultats obtenus ne représentent qu'une faible fraction des résultats scientifiques attendus avec le programme d'ions lourds au LHC. Les données Pb-Pb de 2011, avec une statistique 20 fois supérieure à celle de 2010, sont actuellement en cours d'analyse. Par ailleurs, la prise de données p-Pb prévue en 2012 permettra la première étude des effets nucléaires froids au LHC, et en particulier l'étude des fonction de distributions partoniques à très petits  $x$ . Entre 2014 et 2017, les nouvelles prises de données Pb-Pb permettront de gagner un ordre de grandeur sur la luminosité intégrée, et une nouvelle prise de données p-Pb à haute luminosité et vraisemblablement une prise de données avec des ions légers seront réalisées. Elles permettront d'obtenir un ensemble consistant de mesures, portant sur différents systèmes, pour une première caractérisation du QGP formé au LHC. De ce point de vue, les projets d'analyse sur les jets, photons, quarkonia et saveurs lourdes ouvertes sera une priorité de notre communauté pour les six prochaines années, et au delà.

La communauté est actuellement très impliquée dans les projets d'amélioration de l'expérience ALICE pour le LHC à haute luminosité, après 2018. Un premier objectif déjà approuvé par la collaboration ALICE, sera l'amélioration du dispositif expérimental existant pour profiter de l'augmentation d'un ordre de grandeur de la luminosité en collisions Pb-Pb. Munie d'un nouveau système de trajectographie interne (ITS) aux performances largement supérieures à celles d'aujourd'hui, l'expérience aura également accès à l'étude de la production des baryons charmés et mésons beaux. Au delà des améliorations nécessaires du spectromètre à muons pour les hautes luminosités, la communauté française est fortement impliquée dans le projet MFT qui consiste en un trajectographe composé de plusieurs plans de pixels assemblés devant l'absorbeur du spectromètre à muons. Associé au spectromètre à muons, il serait le seul capable de mesurer les mésons vecteurs et les charmonia  $J/\psi$  et  $\psi'$  en Pb-Pb au LHC jusqu'à des faibles impulsions transverses, où le phénomène de régénération devrait jouer un rôle. Le programme de R&D a d'ores et déjà démarré. Les groupes engagés actuellement dans la construction du calorimètre EMCal d'ALICE, poursuivent leur réflexion sur une implication possible auprès de plusieurs projets d'amélioration. Deux d'entre eux proposent une extension du calorimètre avec un couplage possible avec un détecteur Cerenkov pour identifier les particules au sein des jets, tandis qu'un autre projet propose d'étendre la mesure des corrélations dans le domaine des petits  $x$ . Ces projets sont actuellement en cours d'évaluation par la collaboration ALICE. L'expérience CMS ne nécessite pas de développement spécifique pour fonctionner après 2018 en ions lourds.

De nouvelles idées ont émergé récemment avec les projets CHIC et AFTER. Le projet CHIC se propose de mesurer la production du charmonium  $\chi_c$  dans les collisions Pb-Pb aux énergies du SPS, mesure indispensable pour mettre en évidence la séquence de déconfinement des quarkonia. À plus long terme, le projet AFTER a l'ambition de construire un programme scientifique autour d'une expérience sur cible fixe au LHC, qui permettrait d'étudier un grand nombre de systèmes et pourrait s'appuyer sur les choix technologiques de l'expérience CHIC. Ces projets auront besoin de mobiliser une masse critique minimale de chercheurs en France et à l'étranger.

Finalement, l'expérience CBM à FAIR se focalisera sur l'étude de la transition de phase près du point critique. Aujourd'hui, notre communauté exprime une faible motivation pour s'impliquer dans ce programme, bien qu'une activité R&D pour un détecteur de vertex à pixels est en cours.

## Groupe de Travail No 8

# Structure du nucléon et QCD à haute énergie

La sonde électromagnétique constitue l'une des meilleures façons d'accéder à la structure en quarks et gluons du nucléon et des noyaux. Les facteurs de forme et les fonctions de structure de la diffusion inélastique profonde ont révélé la taille et la structure longitudinale de ces hadrons. La dernière décennie a été l'occasion d'avancées spectaculaires qui ouvrent la voie à une exploration tridimensionnelle de cette structure à l'aide de processus exclusifs ou semi-inclusifs. Par ailleurs, l'étude de phénomènes de saturation des distributions de gluons à très haute énergie ouvre une fenêtre vers les phénomènes non-linéaires de la QCD.

Le concept de distributions de partons généralisées (GPD) est sans doute l'élément le plus emblématique de la nouvelle physique hadronique. Ces GPDs permettent d'associer à chaque parton portant une fraction de l'impulsion longitudinale du nucléon, une position dans le plan transverse à l'axe de la collision, ce qui conduit à une tomographie (ou femto-photographie) du nucléon. Les GPDs sont accessibles par l'étude des réactions exclusives dures, comme la leptoproduction exclusive de photons (DVCS) ou de mésons (DVMP), dans une cinématique vers l'avant. L'autre variable essentielle des GPDs est la skewness qui mesure la non-diagonalité des éléments de matrice hadroniques et qui est l'équivalent de la variable de Bjorken dans la diffusion inélastique inclusive. Les GPDs permettent en outre d'avoir accès au moment angulaire orbital des quarks et gluons. Les amplitudes de distribution de transition (TDAs) complètent l'arsenal des fonctions hadroniques définies dans le cadre de la factorisation colinéaire de la QCD. Elles sont accessibles d'une part en leptoproduction, mais dans une cinématique vers l'arrière, comme les GPDs mais aussi dans les réactions d'annihilation d'un antiproton sur un nucléon (à FAIR-PANDA) avec une sonde électromagnétique de genre temps. Dans un cadre théorique un peu différent, les 8 distributions de partons dépendant de leur moment transverse (TMD), accessibles dans les processus semi-inclusifs, donnent accès à des effets (Collins, Sivers, Boer-Mulders) très caractéristiques de la structure en spin des nucléons.

La communauté hadronique française, bien que de taille réduite par rapport aux autres pays d'Europe comme l'Allemagne ou l'Italie, a été et reste au premier plan parmi les acteurs de cette nouvelle physique hadronique.

- Son engagement et ses succès à JLab et à COMPASS, dans les dix dernières années sont internationalement reconnus. Mais il faut souligner que si JLab à 6 GeV, HERA et COMPASS-I ont tracé la voie expérimentale à suivre pour l'étude exhaustive des GPDs et des TMDs, celle-ci ne sera menée à bien qu'à JLab 12 GeV et COMPASS-II, dont l'exploitation commencera vers 2014 et durera environ 10 ans. Il est donc logique et cohérent de renforcer le potentiel des équipes françaises engagées dans ces deux expériences dont les complémentarités (leptons initiaux, cinématiques, détecteurs) sont indispensables et exemplaires. Les physiciens de l'IN2P3 et de l'Irfu travaillant sur les programmes expérimentaux à JLab et COMPASS représentent environ 2/3 de la communauté française.
- A l'horizon 2018, le projet PANDA, installé à FAIR, devrait focaliser une partie importante de la communauté européenne de physique hadronique. Les physiciens de l'IN2P3 impliqués sur ce projet, ont pris le leadership dans l'étude de la structure électromagnétique du proton et sur l'étude de processus exclusifs durs. Les études de faisabilité montrent qu'on pourra accéder avec grande précision à des domaines cinématiques peu ou totalement inexplorés. L'extraction des facteurs de forme électromagnétique et des TDAs dans la région temps est exemplaire de la complémentarité avec les programmes de JLab et COMPASS. Le programme expérimental autour du projet PANDA mobilise environ 1/4 de la communauté française.
- Mentionnons qu'un nouveau domaine cinématique de la QCD est accessible au LHC : la physique diffractive en p-p ou A-A où les hadrons restent intacts après une interaction dure. La construction de détecteurs pour mesurer les protons très peu déviés par rapport à l'axe des faisceaux est indispensable pour cette physique. Le projet AFP (ATLAS Forward Physics), porté par quelques physiciens français, vise à bénéficier de la haute luminosité délivrée au LHC.

- A plus long terme, un projet de collisionneur électrons-ions à haute énergie et haute luminosité commence à être sérieusement étudié par de nombreux groupes de physiciens expérimentateurs et théoriciens. Sa construction se ferait à horizon 2025 soit sur le site de BNL ou celui de Jefferson Lab, mais une version à plus basse énergie est aussi envisagée en Allemagne. Une telle machine permettrait des études ultra-précises de la structure du nucléon et des noyaux dans une région cinématique où la mer de quarks et de gluons domine et où les phénomènes de saturation des distributions de gluons sont importants. Des études préliminaires de mesures de GPD, ainsi qu'une participation importante à l'élaboration du Science Case ont permis aux physiciens français d'avoir un impact significatif lors des discussions sur la réalisation d'un tel collisionneur.
- Un autre projet à horizon 2025, utilisant les faisceaux du LHC sur une cible fixe, est aussi à l'étude par quelques physiciens de l'IN2P3. Celui-ci vient en complément de la physique étudiée par les collisionneurs électrons-ions avec des mesures précises de processus hadroniques durs de la QCD. Ainsi, des études innovantes de configurations rares où les gluons et les quarks lourds portent une grande fraction de l'impulsion du nucléon seraient possibles. Enfin, l'utilisation de cibles polarisées permettraient l'étude des corrélations entre le spin du proton et le moment angulaire du gluon au travers de l'effet Sivers.

Depuis 2007, la communauté de physique hadronique française à la fois théorique et expérimentale s'est regroupée dans le Groupement de Recherche Nucléon (jusqu'en 2011) élargi aujourd'hui au PH-QCD. Ce GDR a permis de consolider les collaborations déjà en place et est devenu le cadre naturel pour l'organisation des workshops et des écoles dans nos disciplines. En outre, les perspectives à long terme (EIC, AFTER) sont d'ors et déjà discutées au sein du GDR et permettent ainsi de faire merger des idées de physique nouvelles.

Pour assurer la présence et le rôle moteur des groupes français dans ce domaine de physique en pleine expansion, une politique d'embauche énergique doit être menée en France. Malgré leur dynamisme et leur visibilité, les groupes français sont fragiles, parfois à la limite de la sous-criticité, et doivent se surpasser pour assurer leurs responsabilités et engagements présents et futurs. A l'IN2P3, La priorité devrait porter sur les activités expérimentales auprès du JLab et de PANDA. A l'Irfu, un renforcement des équipes JLab et COMPASS à l'aube de leur redémarrage en 2014 est nécessaire. Enfin, le soutien des théoriciens de notre communauté, y compris en dehors du périmètre IN2P3-Irfu, est primordial pour le développement de nos programmes de physique. Il est donc crucial de maintenir ce niveau de soutien théorique et si possible le renforcer.

## Groupe de Travail No 9

# Structure et dynamique nucléaire

De nombreux domaines progressent dans leur compréhension des lois fondamentales de la nature par l'exploration des extrêmes de la discipline : le système est placé et étudié dans des conditions extrêmes. En physique nucléaire, ce principe heuristique est appliqué en créant en laboratoire et en sondant, sous conditions contrôlées, des noyaux atomiques qui n'existent à l'état naturel que dans les systèmes de l'infiniment grand ( $10^{25}$  m) comme les étoiles et les galaxies, établissant par là même leur connexion avec la réalité sous-jacente de l'infiniment petit ( $10^{-15}$  m). Cette démarche nécessite d'étudier le comportement d'une vaste gamme de noyaux, de même qu'en biologie, pour comprendre un système complet et son évolution, il est nécessaire d'effectuer un séquençage ADN complet l'étude d'une seule séquence ne suffit pas.

Structure et dynamique nucléaires sont les disciplines ayant pour objectif la compréhension de l'origine, de l'évolution et de la structure du noyau atomique, système fortement corrélé à l'échelle femtométrique. Trois niveaux d'approches, intimement liés, sont nécessaires: i) la recherche des limites de l'existence des noyaux aux confins de leur composition relative en protons et neutrons (ou isospin) et de leur nombre total de nucléons (ou masse), afin de répondre à la question de la nature de l'interaction qui lie les noyaux stables présents sur terre ou des noyaux rares présents dans le cosmos ; c'est en s'éloignant de la stabilité que de nouvelles structures sont observées et/ou prédites ; la matière nucléaire très asymétrique, comme celle révélée aux limites de la liaison nucléaire met en lumière l'influence des termes les moins bien connus de l'interaction nucléaire ; ii) la détermination des états internes de ces noyaux afin de comprendre l'équilibre subtil entre les mouvements individuels des protons et des neutrons et leurs comportements collectifs, de mettre ainsi en évidence les régularités dans ces systèmes complexes ; iii) l'interprétation des phénomènes de collision et d'effet tunnel pour identifier les paramètres clefs qui gouvernent la dynamique entre des systèmes nucléaires composites en interaction. De plus, des mesures très précises des décroissances radioactives permettent de déterminer certaines déviations par rapport au Modèle Standard, de manière indépendante et avec une très grande sensibilité.

Sur le plan théorique, le lien entre l'interaction forte et l'interaction nucléaire est désormais établi. Néanmoins les formes ainsi obtenues pour l'interaction nucléaire ne permettent pas de traiter le problème à N-corps quel que soit le nombre de nucléons. Les théoriciens développent donc d'autres concepts et formes d'interaction pour accéder à une description microscopique globale de la carte des noyaux. De grands progrès ont été accomplis ; pour les années à venir la nouvelle frontière apparaît au niveau de la prise en compte explicite du terme à trois corps de l'interaction nucléaire.

L'investissement de la communauté française dans ses infrastructures scientifiques, installations à faisceaux radioactifs de première génération et à faisceaux stables, ont permis de découvrir et de comprendre de nouvelles facettes des systèmes nucléaires, allant des nouvelles formes de radioactivités aux propriétés et comportements exotiques de la matière à l'échelle du femtomètre, telles que les transitions de phases, effets de couches, les déformations extrêmes, la fusion sous-coulombienne etc. Ces progrès nécessitent non seulement la capacité de produire et préparer ces états nucléaires rares ou extrêmes mais également d'atteindre les observables d'intérêt en ayant recours aux développements les plus poussés des systèmes de détection. La communauté a choisi la technique ISOL, qui permet de produire et d'accélérer des faisceaux de noyaux de courte durée de vie, n'existant pas sur terre, avec les meilleures qualités optiques et de résolution en énergie. Le projet SPIRAL2, basé sur la technique ISOL doit aboutir (auprès du GANIL) à une installation unique au monde, fournissant les faisceaux radioactifs (principalement de fragments de fission) les plus intenses en Europe. Cette installation, grâce à son injecteur, le LINAG, permettra également de disposer de faisceaux stables ultra-intenses. Pour mener à bien le programme expérimental ouvert par cette opportunité unique, notre communauté s'est engagée, au cours de la décennie écoulée, dans la construction des détecteurs de particules (et spectromètres) et de rayonnement gamma de prochaine génération, dans le cadre de vastes collaborations internationales. Ces instruments entrent progressivement en fonctionnement (certains sous forme de démonstrateurs) et certains d'entre eux verront leur achèvement dans la décennie à venir. Ils offriront une sélectivité de plusieurs ordres de grandeur supérieure à ceux de la génération actuelle permettant d'étendre les recherches de signatures d'événements extrêmes ou rares, soit dans les collisions sur cible

des faisceaux stables ultra-intenses, soit dans celles des faisceaux radioactifs. Les données alors recueillies seront essentielles pour les développements théoriques visant à une description microscopique globale des phénomènes nucléaires. Elles pourront également être importantes comme données de base pour les modèles de nucléosynthèse stellaire, pour les études de réacteurs de nouvelle génération ou encore pour la synthèse de nouveaux isotopes employés par la médecine nucléaire. De plus, la source de neutrons rapides de très grande intensité, conçue dans le cadre de SPIRAL2, ouvrira de nouveaux domaines de recherche en science des matériaux. Enfin, grâce au dynamisme impulsé par SPIRAL2, de nombreux étudiants pourront être attirés et formés à la recherche et aux techniques de la physique nucléaire et de ses applications, renforçant ainsi la synergie entre les Universités et les Instituts. Tous ces développements nécessiteront un effort constant et soutenu d'augmentation des ressources humaines dans la discipline. L'importance de SPIRAL2 a été reconnue par le jury international de sélection de la prochaine génération d'Equipements d'Excellence, toutes disciplines confondues. Deux des plus importants équipements du futur SPIRAL2 : S3 et DESIR, ont ainsi été retenus et financés.

A l'heure actuelle, la communauté française de la structure et dynamique nucléaires est à la croisée des chemins, devant faire face simultanément à l'exploitation des installations existantes en France (et des installations complémentaires à l'international) et à la construction d'une ambitieuse installation de prochaine génération. Le risque potentiel serait de ne pas disposer des ressources suffisantes pour à la fois achever la construction en cours de SPIRAL2 et de ses équipements associés, exploiter l'installation GANIL existante et la coupler à SPIRAL2 ; exploiter l'installation Tandem/ALTO (Tandem et ISOL-photofission) et l'amener à son plein potentiel scientifique. Les conséquences seraient la diminution de la compétitivité et de l'impact de notre communauté dans ses domaines d'excellence, et la perte des investissements et efforts accomplis jusqu'à ce jour. Notre groupe de travail, après consultation globale de la communauté, recommande avec la plus haute priorité, l'achèvement complet et dans les délais impartis de SPIRAL2 et de son instrumentation.

**Cette recommandation est en accord avec le plan à long terme pour l'Europe de NUPECC, plaçant en première priorité l'achèvement de la construction de SPIRAL2, de ses infrastructures et instruments associés, et de l'installation complémentaire FAIR. En période intermédiaire, l'exploitation des nouveaux faisceaux radioactifs disponibles à GANIL (SPIRAL1) et à ALTO aura le double avantage de produire des résultats scientifiques majeurs tout en permettant de résoudre les problèmes technologiques et instrumentaux et ainsi garantir une exploitation optimale de l'installation SPIRAL2 dès sa mise en opération.**

L'utilisation d'installations internationales complémentaires (RIKEN-RIBF à présent, FAIR/FRIB à la fin de cette décennie) augmentera les opportunités scientifiques, permettant de réaliser les objectifs décrits dans ce rapport.

Les installations actuelles utilisant la fragmentation du projectile telles que RIKEN, MSU et GSI permettent d'atteindre des régions de la carte des noyaux à la fois riches et déficientes en neutrons. Pour atteindre les régions les plus éloignées de la stabilité, il faudra fragmenter les faisceaux radioactifs les plus intenses produits par SPIRAL2 à des énergies de l'ordre de 150 MeV/nucléon. Une étude de faisabilité détaillée sur cette post-accélération doit être menée à l'issue de la construction de SPIRAL2. Cette augmentation en énergie de SPIRAL2 peut être considérée comme une solution pour la construction d'EURISOL, le projet d'installation européenne de nouvelle génération pour la physique nucléaire, recommandé pour la liste ES-FRI par NUPECC. L'expertise acquise au cours de la conception et de la construction de SPIRAL2 ainsi que le potentiel technique bien établi de la communauté française dans ce domaine, pourraient lui offrir une position privilégiée pour relever les défis scientifiques et technologiques de cette nouvelle entreprise, dont l'impact exceptionnel nous garantirait un rôle moteur incontestable.

# Groupe de Travail No 10

## Astrophysique nucléaire

Les astrophysiciens nucléaires traitent de questions se situant à la frontière entre différents champs disciplinaires : physique stellaire, physique nucléaire, physique des neutrinos, astroparticules, cosmologie, planétologie. Les travaux effectués à l'IN2P3 et à l'Irfu apportent des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Comment sont synthétisés les éléments chimiques dans l'Univers ?
- Quels processus expliquent les profils des courbes de lumière des sursauts X ?
- Quels sont les différents mécanismes d'explosion des étoiles en supernovae ?
- Comment se forment les étoiles à neutrons et quelle est leur structure interne ?
- Où sont produits les rayons cosmiques dans la Voie lactée et quel rôle jouent-ils dans l'écosystème galactique ?
- Les constantes de couplage des interactions fondamentales ont-elles varié avec le temps depuis le Big-Bang ?
- Dans quel contexte astrophysique le système solaire s'est-il formé ?

Pour traiter ces questions, les équipes d'astrophysique nucléaire de nos deux instituts développent des modélisations numériques de plus en plus sophistiquées et utilisent une grande variété d'outils instrumentaux : télescopes spatiaux pour l'astérosismologie et les astronomies X et gamma, accélérateurs de faisceaux stables, accélérateurs de faisceaux radioactifs, faisceaux de neutrons, microsondes ioniques, lasers de puissance ... Divers développements expérimentaux autour de telles installations devraient contribuer au maintien de la bonne visibilité de la communauté française au cours de la prochaine décennie.

La nucléosynthèse primordiale explique très bien les abondances primordiales mesurées de plusieurs éléments légers. Ce très bon accord nous permet aujourd'hui de contraindre les éventuelles variations des constantes fondamentales, et de tester des modèles de gravitation alternatifs. Aujourd'hui, seule l'abondance primordiale du  ${}^7\text{Li}$  reste mal expliquée : on constate un désaccord d'un facteur 4 entre l'abondance mesurée dans de vieilles étoiles du halo de notre galaxie et l'abondance prédite. Pour tenter de résoudre cette énigme, l'étude approfondie de quelques réactions nucléaires sera entreprise dans la prochaine décennie et le rôle de la turbulence stellaire dans la déplétion du  ${}^7\text{Li}$  mieux maîtrisé.

Si les réactions nucléaires impliquées dans la combustion de l'hydrogène sont actuellement bien précisées, ce n'est déjà pas le cas de la combustion de l'hélium et encore moins des phases ultérieures. Ainsi, certaines réactions comme  ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{22}\text{Ne}(\alpha, n){}^{25}\text{Mg}$  et  ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$  feront certainement l'objet d'études dans le futur, essentiellement dans des installations nucléaires produisant des faisceaux stables (comme au Tandem d'Orsay). Certaines études nécessiteront de disposer d'un accélérateur de particules de grande intensité associé à un équipement de détection performant, ainsi que d'un laboratoire de fabrication de cibles de très haute pureté (séparateur isotopique). Par ailleurs, les lasers de puissance permettront de créer en laboratoire des interactions directement représentatives des interactions nucléaires à l'oeuvre dans les étoiles, incluant l'effet d'écrantage dans le plasma (effet pouvant être important en astrophysique, pas toujours bien estimé, qui amplifie les sections efficaces des réactions nucléaires à basse énergie). C'est actuellement un grand défi de la prochaine décennie. De premières études de la sorte devraient prochainement commencer auprès de l'installation constituée du laser pétawatt PETAL couplé au Laser MégaJoule. Certains éléments produits dans les étoiles sont radioactifs de durée de vie longue et peuvent être observés en astronomie gamma, comme le  ${}^{26}\text{Al}$  et  ${}^{60}\text{Fe}$ . Certaines réactions nucléaires permettant de former/détruire ces isotopes dans les étoiles restent à préciser pour contraindre l'interprétation des observations gamma. Il sera parfois nécessaire de produire des cibles radioactives (installation CACAO) et de mesurer les sections efficaces des réactions les plus importantes en utilisant des faisceaux de neutrons. L'analyse des données sismiques enregistrées par les satellites SoHO (1995-2015), PICARD (2010-2015), CoRoT (2008- 2013) et Kepler (2010-2015) pour des milliers d'étoiles, fournira des données complémentaires. Elle permettra dans un proche avenir, d'introduire correctement la rotation interne et la présence de champ magnétique dans les différentes phases, en particulier la phase de contraction solaire. Les effets de cette dynamique interne sur la déformation des étoiles en particulier massives seront aussi étudiés. Ces progrès sont cruciaux pour aborder les phases finales

d'évolution dans une géométrie plus réaliste où les phénomènes d'explosion sont étudiés tant pour les SN de type I que pour les SN de type II.

Les phases tardives de l'évolution des étoiles massives restent, en général, mal comprises. Les phases de nucléosynthèse dite explosive de l'évolution stellaire se caractérisent par des conditions de température et de pression extrêmes, mettant en jeu une multitude de réactions nucléaires et de processus physiques complexes. Bien qu'un effort important ait été engagé ces dernières décennies dans la modélisation multidimensionnelle de ces explosions stellaires et dans les expériences en laboratoire visant à mesurer précisément les taux des réactions nucléaires, beaucoup reste encore à faire. En particulier, l'identification du site du processus r (capture rapide de neutrons), qui est responsable de la synthèse d'environ la moitié des éléments lourds au-delà du fer, demeure toujours un objectif majeur du domaine. Dans les prochaines décennies, grâce au développement de nouveaux faisceaux SPIRAL1, et surtout à l'arrivée de faisceaux radioactifs intenses avec SPIRAL2 et ALTO, de nouvelles réactions et des propriétés intrinsèques nucléaires des noyaux radioactifs (temps de vie, masse) pourront être étudiées et permettront de contraindre davantage les scénarios astrophysiques. A plus long terme, si le projet EURISOL se développe et produit des faisceaux radioactifs ultra intenses (1010 pps), il sera possible de mesurer directement les réactions astrophysiques à basse énergie dans la fenêtre de Gamow. En plus de la nucléosynthèse explosive, c'est également le processus d'effondrement des étoiles massives et la formation des étoiles à neutrons qui, toujours fortement incompris, suscitent beaucoup d'intérêt. Des études nucléaires (en particulier sur l'appariement et l'équation d'état) permettront également de mieux comprendre la structure interne et les processus de refroidissement des étoiles à neutrons.

Un siècle tout juste après la découverte des rayons cosmiques, l'origine astrophysique de ces particules énergétiques et leurs effets sur le milieu interstellaire posent encore de nombreuses questions. Ainsi, bien que les rayons cosmiques de basse énergie ( $< 1 \text{ GeV}$  par nucléon) soient vraisemblablement responsables d'une ionisation et d'un chauffage importants des nuages moléculaires, leur flux et leur composition demeurent très mal connus. L'observation de raies gamma nucléaires produites par collision des ions du rayonnement cosmique avec le gaz ambiant constitue un objectif important pour les futurs télescopes d'astronomie gamma. Des équipes de l'IN2P3 et de l'Irfu ont engagé des projets de recherche et développement de nouveaux détecteurs gamma visant à préparer la succession du satellite INTEGRAL. L'astronomie X joue également un rôle clé pour comprendre l'accélération des rayons cosmiques, ainsi que les stades précoces (étoiles T Tauri) et ultimes (supernovae, naines blanches, étoiles à neutrons) de l'évolution stellaire.

L'analyse isotopique de matériaux extraterrestres (météorites et micrométéorites) permet d'apporter des informations capitales sur la nucléosynthèse stellaire (grains présolaires). A la frontière entre la planétologie et l'astrophysique, ce domaine de l'astrophysique nucléaire apporte également des éléments de réponses sur le contexte astrophysique de naissance de notre étoile. Depuis de nombreuses années, les chercheurs de l'IN2P3 ont développé un programme de collecte et d'analyses isotopiques de poussières interplanétaires (micrométéorites). La collection de micrométéorites CONCORDIA est unique au monde et permet d'étudier des échantillons cométaires dans un état de conservation inégalé.

La physique nucléaire théorique guide les études de physique expérimentale, en déterminant les meilleures conditions de mesure. Les modèles nucléaires permettent également de fournir des données pour les codes astrophysiques impossibles à obtenir autrement. Pour les milieux dilués, la théorie fournit par exemple des prédictions pour les masses, ou pour les sections efficaces. Dans les milieux denses, les naines blanches, les étoiles à neutrons ou bien encore les supernovae, ouvrent une fenêtre sur des états de la matière non reproductibles en laboratoire. La description de la matière dans les conditions extrêmes de densité, de température et d'asymétrie d'isospin nécessite le développement de modèles sophistiqués qui peuvent faire le lien entre, d'une part, les expériences en laboratoire et, d'autre part, les systèmes astrophysiques liés à des mesures observationnelles. La réduction de l'incertitude sur l'extrapolation des modèles nucléaires pour l'astrophysique est ici cruciale.

Dans le texte qui suit, nous avons souhaité faire un document complet décrivant les différents aspects thématiques qui intéressent les astrophysiciens nucléaires de l'Irfu et de l'IN2P3, en y précisant les résultats obtenus et les directions envisagées. Pour cela nous avons regroupé les thématiques en quatre grands volets : les grandes questions du domaine, les moyens d'observation, les mesures en laboratoire et les théories nucléaires pour l'astrophysique.

## Groupe de Travail No 11

# Physique et chimie pour l'énergie nucléaire

L'étude de nouveaux concepts de réacteurs et des différentes options pour l'amont et l'aval du cycle nécessite de disposer de données et d'outils de simulation fiables. Ceci requiert à la fois des études fondamentales sur les mécanismes de base qui régissent les réactions et des démonstrations à différentes échelles des concepts proposés afin de valider ces simulations. Les recherches en physique et chimie pour l'énergie nucléaire, menées ces dernières années par l'IN2P3 et de l'Irfu, se sont déroulées en collaboration étroite avec les autres acteurs du domaine au niveau français (CEA/DEN, EDF, Areva ...), européen (projets PCRD) et mondial (Forum Génération IV). Les développements nécessaires pour avancer des solutions pertinentes aux problèmes de l'énergie nucléaire vont se poursuivre sur la période 2012-2020. Ces développements concernent trois aspects : les études de systèmes et de scénarios, les données nucléaires et la physico-chimie.

Les **études de systèmes et de scénarios**, développés au CNRS et au CEA, sont basées sur la maîtrise de la physique des réacteurs. Elles permettent d'optimiser des cycles voire des filières, et de tester les sensibilités et les corrélations entre les différentes grandeurs physiques. Ces travaux trouvent leur prolongement dans des analyses multidisciplinaires sur les impacts économiques ou sociétaux des grands choix qui seront faits dans les années à venir. Peut-on définir des cycles efficaces de production d'énergie à la fois sûrs et produisant peu de déchets ? Comment développer des scénarios globaux et anticiper les impacts d'une stratégie énergétique ? Répondre à ces questions sera le défi des études des systèmes et scénarios dans les années à venir.

La fiabilité des outils de simulation, et donc la pertinence des études réalisées, nécessite une maîtrise accrue de **la neutronique et des données nucléaires**. C'est un enjeu majeur de ces perspectives que de réduire les incertitudes associées à certaines données. Si pour le cycle et la filière actuels les données accumulées sur les actinides majeurs sont relativement bien maîtrisées, il n'en est pas de même pour le cycle alternatif Th-U, les combustibles enrichis en actinides mineurs et la filière rapide. Pour répondre à ces besoins, deux axes ont été définis par la communauté : les mesures de sections efficaces de réaction en fonction de l'énergie du neutron incident et l'étude du processus de fission. Certaines réactions ne pouvant être atteintes directement, elles font l'objet d'études via des réactions de substitution dont il faut maîtriser l'interprétation. Enfin, pour réaliser des études poussées de sensibilité associées aux différentes filières de réacteur, il devient indispensable d'identifier les corrélations dans les données et de savoir les propager dans les simulations. Cet effort doit être complété par des mesures en "maquettes" critiques ou sous-critiques afin de valider in-situ les codes de calcul de neutronique et les concepts technologiques de certains systèmes innovants tels que les ADS. En parallèle de la filière fission, des activités se développent à l'Irfu dans le cadre de la fusion, tant inertielle que magnétique.

Un effort important doit aussi être poursuivi autour de la **physico-chimie pour le nucléaire**. Cette thématique commence à la mine, se poursuit au sein du réacteur avant une fin de cycle avec la séparation et le stockage des différents matériaux du cycle électronucléaire. A chacune de ces étapes, il faut suivre et contrôler les transferts à la géosphère et la biosphère afin de maîtriser les impacts environnementaux. Comment prédire ces transferts ? Quelles sont les propriétés de confinement des matériaux ? Comment élaborer les différents matériaux nécessaires aux réacteurs de génération IV ? Peut-on prévoir leur évolution sous rayonnement ? Plusieurs études abordant ces questions sont présentées dans ces perspectives.

L'expertise acquise dans les domaines des simulations, des modèles et des données nucléaires a conduit les physiciens à **appliquer leurs savoir-faire** à des questions de société comme les analyses de sûreté pour des installations en fonctionnement ou en construction (Spiral 2 ...) et l'organisation du démantèlement d'installations nucléaires (Saturne ...). D'autre part, l'expertise du groupe 11 sur le fonctionnement des réacteurs et sur la détection de neutrinos lui a permis de proposer à l'AIEA un moyen de contrôle des réacteurs dans le cadre du traité de non-prolifération. Enfin, les similitudes dans les procédés d'extraction chimique entre le combustible et les lanthanides pourraient conduire à un partenariat industriel pour extraire des terres rares stratégiques.

Le groupe de travail a pu dégager les **recommandations** suivantes :

- Les travaux du groupe 11 s'appuient sur l'expertise de physiciens et de chimistes qui mettent à profit leur connaissance et leur savoir-faire au service d'enjeux sociétaux majeurs. Il existe deux façons de progresser : soit par une avancée générale des connaissances qui permettra de mieux décrire un processus physique, soit par l'étude spécifique d'une grandeur nécessaire pour les simulations. Cette dualité des chercheurs du groupe 11 est une richesse qui doit être reconnue : toutes leurs études ne doivent pas être avec une visée applicative à court terme même s'ils doivent être capable de répondre à un besoin précis.
- Les choix énergétiques et politiques de la France pourraient avoir un impact sur les priorités données à nos activités. Cela a été le cas, par exemple pour la loi Birraux-Bataille, cela peut être le cas pour d'autres décisions. Il est essentiel de préserver l'expertise indépendante, scientifique et technologique, du CNRS et du CEA, afin de pérenniser sur le long terme les savoirs acquis et de pouvoir contribuer objectivement aux débats politiques.
- Compte tenu du caractère pluridisciplinaire des travaux de ce groupe, les collaborations devraient s'étendre à d'autres thématiques, en particulier pour l'étude de la physique des réacteurs (thermo-hydraulique ...). Un rapprochement des groupes de recherche de radiochimie avec les partenaires du réseau Becquerel pourrait avoir un effet synergique concernant l'étude du transfert des isotopes radioactifs dans l'environnement.
- Il apparaît indispensable pour maîtriser l'ensemble du cycle, de connaître les marges et les sensibilités, d'être capable de calculer des incertitudes et les corrélations entre les différentes grandeurs physiques. Il faut donc développer des outils pour introduire les incertitudes et les covariances dans toutes les tables de données nucléaires mais aussi pour propager ces incertitudes en les couplant aux autres processus physiques.
- Il semble nécessaire pour analyser les données nucléaires, de disposer d'un fort soutien théorique (modélisation et évaluation). De plus, pour augmenter la reconnaissance des travaux expérimentaux du groupe, le contrôle d'une chaîne complète d'évaluation serait un atout majeur pour l'inclusion des résultats de nos travaux dans les bibliothèques de référence (ENDF, Jeff ...).
- Lors des expériences, les cibles utilisées sont généralement radioactives. D'une part, il est impératif de disposer du savoir-faire et d'installations nécessaires à la fabrication de cibles spécifiques et à leur caractérisation. Le laboratoire Cacao (Chimie des actinides et cibles radioactives à Orsay), le laboratoire Pierre Süe de Saclay, la ligne Aramis du CSNSM et, à plus long terme, la construction d'un séparateur magnétique doivent être soutenus afin de répondre à cette demande. D'autre part, compte tenu de la réglementation actuelle pour la détention, la manipulation et l'évacuation des radio-isotopes, il est important de maintenir des infrastructures et des compétences nécessaires pour assurer la radioprotection, la gestion des radio-isotopes et la sûreté des expériences.
- L'accès aux sources de neutrons est critique pour un grand nombre de nos études. Nous soutenons donc les installations existantes en Europe (Gelina à Geel, n-tof au Cern, ILL) et futures (NFS à Spiral 2) ainsi que les projets futurs de faisceaux radioactifs (HIE à Isolde et Fair à GSI).
- Pour finir, il existe de nombreux interlocuteurs possibles dans le domaine de l'énergie nucléaire. Serait-il opportun de créer une cellule d'information ou d'experts susceptible d'informer sur les processus de base mis en jeu dans l'électronucléaire ? Une telle cellule d'information augmenterait l'unité, l'identité et la visibilité du groupe physique et chimie pour l'énergie nucléaire .

## Groupe de Travail No 12

# Interface avec les sciences du vivant

L'IN2P3 et l'IRFU ont tous deux les capacités pour jouer un rôle majeur à l'interface entre la Physique, la Biologie et la Médecine. Leurs atouts résident avant tout dans les compétences des laboratoires dans les domaines de la réalisation et de l'utilisation d'accélérateurs de particules, la simulation de l'interaction rayonnement-matière, l'instrumentation et l'électronique, et la force de leurs services techniques, qui sont autant d'éléments favorables au développement d'outils originaux et innovants pour les Sciences de la Vie. Les équipes de l'IN2P3 se sont structurées au niveau national afin d'améliorer la visibilité et la coordination de leurs activités. Le Groupement de Recherche "Modélisation et Instrumentation pour l'Imagerie Biomédicale" (GDR MI2B), créé initialement pour fédérer les équipes travaillant sur les techniques d'imagerie, regroupe une cinquantaine de physiciens répartis dans onze laboratoires. Ce GDR a été renouvelé fin 2011. Depuis 2010 il est dédié aux Instruments et Méthodes Nucléaires pour la lutte contre le Cancer, tout en étant ouvert à d'autres domaines des Sciences de la Vie et de la Santé. En ce qui concerne l'Irfu, l'essentiel des moyens a été consacré ces dernières années au développement des techniques d'imagerie du cerveau dans le cadre de NEUROSPIN. D'autres thèmes émergent cependant, l'instrumentation autour des imageurs TEP (CaLIPSO et ART) et la modélisation des réactions nucléaires pour l'hadronthérapie, et ont vocation à se développer à l'avenir. Les trois grands pôles principaux d'activités actuellement couverts sont:

- **les outils et méthodes nucléaires pour la radiobiologie** : ces études permettent d'estimer le risque des rayonnements ionisants pour la santé, mais aussi d'améliorer les thérapies du cancer basées sur ces rayonnements. Nos instituts y contribuent en mettant au point des plateformes d'irradiation et en contribuant à l'élaboration de modèles multi-échelles de réponses cellulaires aux rayonnements ionisants.
- **les méthodes et instruments en imagerie biomédicale** : il s'agit d'élaborer des systèmes d'imagerie dédiés et originaux et de développer de nouvelles méthodes pour le diagnostic et le suivi thérapeutique. L'activité s'étend de la R&D instrumentale amont via le développement de détecteurs innovants pour l'imagerie préclinique ou clinique à l'utilisation d'outils de reconstruction d'images ou de traitement du signal qui permettent de jeter un pont quantitatif entre l'image et les paramètres physiologiques ou métaboliques.
- **les thérapies innovantes et imagerie associée** : les physiciens contribuent au développement de l'hadronthérapie (en particulier avec des ions carbone), en développant des outils pour le plan de traitement (mesures physiques de base et simulations), le contrôle faisceau et le contrôle qualité du traitement ou l'estimation des effets secondaires à long terme. Ils participent également à l'amélioration de la radiothérapie X. Enfin, ils explorent de nouvelles voies de production de radioéléments pour l'imagerie et le traitement des tumeurs.

Les outils performants, tels que les plateformes de simulations comme GEANT4/GATE permettent le calcul de doses physiques et biologiques induites par les rayonnements ionisants ainsi que la modélisation des systèmes d'imagerie et l'évaluation de leurs performances. L'utilisation des grilles de calcul sont un atout dans ce domaine. Les mesures physiques de base ou l'irradiation des cellules ou des tissus vivants peuvent être réalisées auprès des plateformes d'irradiations actuelles ou en cours de développement (GANIL, AIFIRA, ARRONAX, Radiograaff, Pavirma, CYRCE) ainsi qu'auprès des centres de protonthérapie d'Orsay et de Nice. Les futurs centres ETOILE et ARCHADE devraient permettre de progresser dans les études relatives à la carbone-thérapie.

La structuration des équipes de l'IN2P3 et de l'Irfu travaillant aux interfaces avec les sciences du vivant est nécessaire afin d'optimiser l'efficacité des moyens humains et financiers. Le GDR MI2B a été récemment renouvelé et l'Irfu va y être à nouveau associé. L'ouverture à d'autres partenaires est aussi envisagée. Il faut bien évidemment tenir compte également de l'évolution du paysage et notamment des effets de structuration induits par le succès éventuel des projets Grand Emprunt qui tendrait à une structure en trois grands pôles:

- Imagerie in vivo associée à France Life Imaging
- Hadronthérapie associée à France Hadron
- Production de radiopharmaceutiques pour l'imagerie et la thérapie associée au LabEx IRON.

Il est cependant très important que les laboratoires disposent de moyens propres suffisants, seuls à même de permettre des recherches amont dans les laboratoires. Les entreprises hésitent en effet souvent à se lancer dans des développements très amont et/ou risqués, des ruptures technologiques, du fait du risque associé, des compétences nécessaires et de la durée de tels développements. Il faut cependant veiller à :

- répondre à un réel besoin de la communauté médicale par notre science et notre technologie, et non pas essayer de plaquer une technologie maîtrisée sur un vague besoin médical ;
- rechercher des ruptures technologiques à fort potentiel, spécifiques de nos compétences et peu susceptibles d'être investies par les industriels seuls.

Le GDR a montré que les projets scientifiques à l'interface de la Physique et des Sciences de la Vie prennent de plus en plus d'ampleur et nécessitent des moyens humains et financiers de plus en plus importants. Il paraît certainement nécessaire de privilégier les activités pour lesquelles les compétences spécifiques des équipes de l'IN2P3/IRFU sont clairement un atout. Par ailleurs, au vu du foisonnement actuel des projets, une évaluation interne comparative des technologies similaires afin d'identifier les plus prometteuses d'entre elles est certainement souhaitable. En ce qui concerne les moyens humains, il paraît nécessaire d'avoir :

- une dizaine de personnes supplémentaires travaillant dans la thématique Nucléaire Santé dont les deux tiers par embauche de jeunes physiciens;
- un flux de 10 doctorants par an pour l'ensemble des laboratoires, sachant qu'une part des financements de ces doctorants est hors CNRS ou Irfu (Ecoles doctorales, régions, ANR...). De plus certains travaux sont trop en amonts pour cadrer avec certains appels d'offres ;
- un effort continu au niveau de l'affectation des ingénieurs techniciens, et une cohérence des arbitrages dans les laboratoires associés au même projet.

Pour ce qui concerne les moyens financiers, ces dernières années, le budget du GDR a été constant autour de 350 k en moyenne pour des demandes en moyenne deux à trois fois plus fortes. Même si une grande partie des financements provient maintenant d'origines diverses : ANR, AAP, Europe, un passage à un budget de 1 MEuros/an au total pour l'IN2P3 et l'Irfu confondu, en prenant en compte les équipes hors GDR, serait hautement souhaitable. Par ailleurs, la plupart des projets s'inscrivant dans une programmation pluriannuelle, il est important que la politique scientifique, s'appuyant sur une évaluation scientifique rigoureuse des projets, et la gestion en moyens humains et financiers prennent en compte cet aspect.

Pour ce qui est de l'Irfu, l'association au GDR MI2B lui permettra d'utiliser au mieux et de valoriser les compétences uniques qui existent en son sein, moyennant des moyens humains et financiers propres, tout en accédant aux sources de financement externes en coordination avec l'IN2P3. Par ailleurs, l'institut devrait tirer partie de sa position au sein du CEA pour faire émerger des synergies avec la DSV et la DRT. Le thème de la santé étant central dans nos sociétés modernes, et omniprésent dans les décisions d'orientation de la recherche nationale, la visibilité de l'Irfu ne pourrait qu'en être améliorée.

## Groupe de Travail No 13 Accélérateurs

La Physique et la Technologie des accélérateurs forment une discipline scientifique qui est au service d'applications très diverses dans les domaines des sciences de la matière, des sciences et technologies de l'énergie, des sciences du vivant, et d'applications spécifiques dans les domaines de la santé et de l'industrie.

Dans son volet de Recherche et Développement, la discipline procède aussi bien par une démarche de recherche scientifique fondamentale visant à produire des percées de caractère révolutionnaire (RFQ, stockage d'antiparticules, laser à électrons libres, accélération laser et plasma), que par une démarche technologique évolutive visant à pousser les limites des performances des systèmes accélérateurs dans un cadre économique réaliste (aimants et cavités supraconductrices, onduleurs de courte longueur d'onde, photoinjecteurs RF, schémas de collision en crabe', etc).

Dans la démarche de R&D scientifique, la communauté des laboratoires français d'accélérateurs est peu représentée. Elle est au meilleur niveau mondial dans la démarche de R&D technologique.

Dans son volet de construction et d'opération d'accélérateurs, cette discipline fait appel à des démarches de conduite de projet et mène à la fabrication de systèmes accélérateurs majoritairement dans l'industrie mais également en laboratoires, et assure le pilotage d'accélérateurs. Ces aspects sont maîtrisés à un excellent niveau par les laboratoires français.

En termes de projets d'accélérateurs impliquant les laboratoires français, la décennie 1999-2008, centrée sur les précédentes Journées de Prospectives 2004, a été dominée par la fin de la construction du LHC et, mis à part SOLEIL, le début de la construction de SPIRAL2. En contrepartie, elle a été très riche en projets et programmes de R&D : les Programmes Cadres européens FP5 (Eurisol, HPNIS pour les sources H) et FP6 (CARE, Eurisol, EUROTeV, EUROFEL et EUROTRANS), dotant les laboratoires français de l'ordre de 12 MEuros de subvention de la Commission Européenne et renforçant la culture de collaboration multilaboratoires, le projet CLICCTF3 piloté par le CERN, la R&D pilotée par le GDEILC sur les accélérateurs FLASH et ATF2, et la construction de plateformes de R&D de laboratoire et autres infrastructures (SupraTech, IPHI, GUINEVERE). Ces programmes furent en grande partie définis par la préparation des projets accélérateurs inclus dans la liste ESFRI tels que FAIR, XFEL, ESS, HLLHC et ILCCLIC.

La décennie 2009-2018, centrée sur les Journées de Prospectives 2012, est au contraire très riche en construction de projets accélérateurs tels que SPIRAL2, LINAC4, XFEL, FAIR, IFMIF-EVEDA, ThomX, SuperB et plus tard HL-LHC, ESS et MYRRHA. La concrétisation de la construction de ces nombreux accélérateurs est une véritable consécration du travail de Recherches et Développements effectué dans la période précédente, et s'appuie très largement sur des contributions en nature ciblant les compétences de notre communauté dans les domaines d'excellence que constituent la Supraconductivité appliquée aux accélérateurs et aux aimants, les structures radiofréquence, les sources et injecteurs de faisceau d'ions de haute intensité, les canons à électrons et des sources de positrons innovantes.

Actuellement, ces projets mobilisent la plus grande partie des personnels scientifiques et techniques des laboratoires accélérateurs français avec pour conséquences:

- d'une part la transition abrupte en type d'activité et en mode d'organisation de ces personnels,
- d'autre part l'étiage des ressources humaines affectées à la R&D Accélérateurs tel que la poursuite même des deux principaux programmes européens du Plan Cadre FP7 (EuCARD et MAX) en devient difficile.

D'autre part, lorsque ces projets acquièrent une organisation autonome pour la phase de construction, celle-ci exerce un pouvoir d'attraction sur les collaborateurs issus des laboratoires français qui trouvent ainsi la réalisation de leur vocation. Plusieurs de nos ingénieurs sont ainsi partis vers les projets SPIRAL2, IFMIF ou ESS.

A contrario, le financement des activités de R&D est problématique. Il passe presque exclusivement par la réponse à des appels d'offres de plus en plus nombreux (FP7, ERC, Grand Emprunt, ANR, Département,

Région, etc) dont le taux de succès est globalement faible et récompense mal l'investissement de nos ingénieurs dans la constitution des dossiers.

Pour l'avenir, il est souhaitable de rééquilibrer les deux types d'activité afin que les laboratoires français développent leurs compétences et leurs moyens dans des domaines de R&D majoritairement orientés vers, ou inspirés par les besoins de la communauté des physiciens nucléaires et des physiciens des particules, tout en restant ouvert à d'autres applications par des développements connexes et de pointe. Lorsque la feuille de route des accélérateurs suscités par ces deux disciplines sera établie, le rôle et le mode d'implication des laboratoires français devra être analysé en accord avec les autres centres de recherche mondiaux, en particulier le CERN, et en fonction de l'expérience passée.

La communauté des Accélérateurs en France rassemble environ XX ingénieurs et YY techniciens. Elle est structurée sur le plan institutionnel par le Pôle Accélérateur CNRS-CEA et par la commission AccelTech du Labex P2IO, rassemblant environ 75% de l'activité. Elle est également animée par l'Interdivision Physique des Accélérateurs et Technologies Associées' de la SFP qui favorise efficacement les réseaux nationaux de collaborations.

## Groupe de Travail No 14 Instrumentation & Détection

Les enjeux et les tendances de l'instrumentation à l'IN2P3 et l'Irfu présentent des spécificités identifiées de longue date, et qui concentrent beaucoup d'efforts. Cette singularité reflète l'ambition des programmes scientifiques menés par les deux tutelles, qui nécessitent des instruments spécifiques que les équipes de recherche doivent développer par leurs propres moyens. et dont elles sont directement responsables par la suite. Les performances de ces instruments en termes de granularité, sensibilité, dynamique, résolution, vitesse, tolérance aux radiations, intégration et transparence ont progressé de plusieurs ordres de grandeur au cours des dernières années, mais les progrès technologiques récents ouvrent de nouvelles voies qu'il est indispensable d'explorer pour répondre au cahier des charges des projets scientifiques à venir. Une activité soutenue de R&D est donc indispensable pour réaliser les avancées technologiques nécessaires, que l'industrie, par vocation, n'est pas susceptible de mener à bien.

Une tendance forte se dégage dans de nombreux domaines de détection, qui vise à intégrer l'électronique frontale au sein du détecteur. Cette observation vaut tant pour les photo-détecteurs de nouvelle génération (SiPM/APD), les détecteurs de position au Silicium (capteurs CMOS), que pour les détecteurs gazeux (Micromégas).

La complexité croissante des détecteurs requiert de plus en plus fréquemment leur simulation détaillée, en faisant notamment appel aux outils de simulation de type multi-physique. Les outils logiciels correspondants doivent être acquis et maintenus. Les prochaines années verront un accroissement de la R&D sur projets et l'indissociabilité toujours plus forte des aspects détection, mécanique, électronique et informatique, avec la nécessité de simulations en parallèle. Cette évolution imposera un dialogue renforcé entre équipes de physiciens et équipes "techniques", avec les nécessités d'accroître la coordination entre les différents corps de métier et de préserver des équipes compétentes de taille suffisante.

Enfin on note l'acquisition de compétences nouvelles lors de la réalisation d'instruments pour les expériences en orbite (AMS, Fermi, ). Les contraintes spatiales (sur les matériaux utilisés, sur le comportement thermique, sur la consommation, sur le poids, sur la résistance aux vibrations et aux radiations, sur l'électronique, sur la redondance des systèmes, ) doivent être intégrés dès la conception des instruments, lors de la réalisation des modèles d'ingénierie et jusqu'à la réalisation des modèles de vol. Le respect des procédures de qualité est exigé.

### **Calorimètres, bolomètres, scintillateurs & détecteurs à effet Cherenkov.**

En calorimétrie (particules jusqu'à plusieurs GeV pour la calorimétrie classique et  $< 20 MeV$  en Physique nucléaire), on s'oriente vers des détecteurs de plus en plus segmentés (de l'ordre du  $cm^2$  pour les calorimètres classiques, quelques  $mm^2$  pour ceux à base de Germanium) et compacts avec l'utilisation d'algorithmes de suivi de particules de plus en plus complexes. Pour le LHC, l'augmentation forte de la luminosité implique de trouver des solutions pour limiter le vieillissement du matériel. Les exigences des détecteurs d'un futur collisionneur linéaire (LC) électron-positron demandent une forte augmentation du nombre de voies d'électronique. Cela entraîne une complexification notable de l'intégration.

De même qu'en calorimétrie, l'augmentation du nombre de voies des bolomètres (mesures de rayons X de 1 à 40 keV) est inéluctable (1 000 à 10 000 pixels avec une taille caractéristique du pixel de  $300\mu m$  à 3mm). Cela implique le développement d'une électronique de mesure multiplexée fonctionnant à très basse température. La tâche considérable que représentent ces développements impose de passer par des centrales de technologie accessibles aux laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu (centrale MINERVE de RENATECH, centrale PTA de MINATEC), et de mettre en place une plateforme nationale pour le développement de la calibration optique et la validation spatiale des détecteurs.

Pour les mesures d'énergie et de temps pour les énergies  $< 1 MeV$  à l'aide de scintillateurs, il faut suivre les développements de nouveaux cristaux (e.g. les cristaux de  $CeBr_3$  ou de  $SrI_2 : Eu$ ). Elles nécessitent, en particulier, une adaptation spécifique de l'électronique et de l'acquisition de données (analyse de forme de signaux pour identifier différents types de particules chargées, neutres, gammas).

Pour les détecteurs à effet Cherenkov comme pour SuperB, avec des luminosités 100 fois plus élevée que

ce qui se faisait jusqu'à présent, il faut innover. Un développement démarre au LAL d'un DIRC ("Detector of Internally Reflected Cherenkov light") de nouvelle génération pour lequel le temps de vol est un ingrédient majeur du logiciel d'assignement, utilisant les progrès en cours de l'électronique pico-seconde.

### Détecteurs gazeux

Pour les détecteurs gazeux, les détecteurs de type MPGD prennent le relai des chambres à fils. Pour les Micromégas et les GEM comme pour les RPC (Resistive Plate Chambers), la tendance forte est à l'augmentation des surfaces de détection. Pour Micromégas, l'amélioration des procédés de fabrication (bulk, microbulk, pixels) ainsi que l'intégration directe d'un ASIC dans le plan de détection ouvre de nouvelles perspectives. Tous ces développements impliquent des programmes permanents de R&D permettant de faire avancer ces technologies et l'électronique associée.

Ces technologies sont également utilisées dans les détecteurs à liquides nobles cryogéniques (Xenon/Argon liquide).

Pour la détection de neutrons, il est prévu d'utiliser les détecteurs gazeux à couches solides de conversion de neutrons. On peut citer les scintillateurs enrichi en  $^{10}B$  suivis d'un GEM, les cascades de structure Micromégas, "bulk" ou "micro-bulk", à couches de conversion en  $B_4C$  et les nouvelles chambres à projection temporelle gazeuses (TPC) à haute résolution.

### Détecteurs à semi-conducteurs

L'IN2P3 et l'Irfu sont des acteurs majeurs du développement de détecteurs semi-conducteurs au plan international. Une part importante des développements concerne les détecteurs de position pixellisés de particules chargées, qui tendent à être de plus en plus compacts, performants et radiotolérants, et dont on équipe des surfaces de plus en plus étendues. Dans la R&D pour le LHC, de nouveaux substrats de type 'p' en remplacement des types 'n' traditionnels, plus résistants aux radiations, sont développés et une réduction progressive de l'épaisseur des capteurs d'au moins  $100\mu m$  va être obtenue. Un effort important est consenti pour exploiter les technologies d'intégration verticale, qui permettent d'implanter plusieurs couches de micro-circuits dans une matrice de pixels. Par ailleurs, l'étude de matériaux de plus en plus tolérants aux rayonnements intenses (diamant) se poursuit. Quant à la détection des rayons X et des gammas, elle bénéficie de progrès importants faisant appel à des matériaux comme le CdTe.

L'emploi des détecteurs semi-conducteurs pour détecter la lumière connaît un essor considérable avec l'émergence des SiPM. Les laboratoires de l'IN2P3 et de l'Irfu s'approprient progressivement cette nouvelle technologie et tentent de réaliser des micro-circuits de conditionnement du signal intégrés dans les capteurs.

Ces activités mènent souvent à des applications dérivées intéressant d'autres domaines de recherche ou d'impact sociétal (dosimétrie, imagerie), dans lesquelles plusieurs équipes sont investies.

### Electronique & informatique associées aux détecteurs: électronique frontale, électronique numérique et informatique temps réel (acquisition de données)

Pour l'électronique analogique frontale cohabitent les composants discrets et les ASIC même si on constate une généralisation de ces derniers. A ce jour, la réussite de l'IN2P3 dans les ASIC est en grande partie due à l'utilisation d'une technologie unique ( $0.35\mu m$ ). Pour l'avenir, plusieurs choix se présentent à nous: les technologies  $0.13\mu m$  ou  $65nm$ , sur lesquelles le CERN mise, semblent incontournables pour les applications au LHC nécessitant un fort durcissement (trackers), celle de TOWER  $0.18\mu m$  est particulièrement attractive pour les Capteurs CMOS, et la technologie SiGe  $0.18\mu m$  semble être le successeur naturel du  $0.35\mu m$  pour les applications ayant besoin de grande dynamique (calorimètres et TPC). Les métiers liés aux ASIC sont de plus en plus complexes et spécialisés. Il ressort un besoin d'ingénieurs micro-électroniciens numériques et des concepteurs de cartes mixtes rapides et complexes. Ces métiers sont liés à l'utilisation de logiciels complexes, onéreux et en évolution permanente. Mais il faut également des ingénieurs qui soient capables de coordonner toutes ces spécialités nécessaires à l'intégration du système complet.

L'électronique frontale est liée à l'informatique en temps réel par des cartes d'électronique numérique spécifiques, dont le coeur s'appuie sur des circuits logiques programmables de type FPGA ((Field-Programmable Gate Array). Ces FPGA embarquent actuellement de plus en plus d'éléments (processeur, mémoire, liens série ultra-rapides de plusieurs gigabits par seconde) ...) et remplacent dans de nombreux cas les DSP (Digital Signal Processor). Suite à l'augmentation des vitesses de traitement, les simulations

deviennent indispensables et les moyens de mesures très onéreux. Une réflexion sur la mutualisation de ces moyens semble nécessaire. Il faut également surveiller les évolutions concernant l'intégration des processeurs dans les FPGA et on se rend compte de la nécessité de développement software collaboratif devant l'accroissement de la complexité des systèmes.

En informatique temps réel (acquisition de données), il est indispensable de mettre en place des règles de conception. Face à la complexité des développements, cela nécessite un travail collaboratif inter-laboratoire et implique des méthodes de gestion de projet et de qualité partagées. Parmi les éléments en évolution, on peut citer l'augmentation de la segmentation des détecteurs et des taux de comptage, la nécessité d'avoir un accès distant à l'électronique frontale, la résistance aux taux de radiation, l'augmentation permanente du taux de transfert de données, la nécessité de définir un format de données commun, le problème du stockage et la nécessité de compétences en traitement numérique du signal pour le traitement de l'information en provenance des détecteurs.

### **Intégration, mécanique & refroidissement**

L'évolution du domaine passe par une forte complexification, où les aspects thermomécaniques, de mécanique des fluides, thermo-hydrauliques et d'intégration des systèmes sont à traiter de plus en plus globalement pour répondre au cahier des charges d'instruments toujours plus complexes.

Pour les outils de calcul, nous évoluons maintenant vers des plateformes multi physiques et pluridisciplinaires. Les disciplines sont souvent couplées entre elles comme par exemple la thermomécanique et la mécanique des fluides, la thermo hydraulique, la radio fréquence et la thermomécanique.

Les outils de travail en CAO évoluent avec la gestion des bases de données, l'intégration complète des instruments en incorporant d'autres métiers spécifiques tels que l'instrumentation.

L'ingénierie système doit maintenant considérer toutes les phases de vie d'un système depuis sa conception jusqu'à son exploitation (voire sa maintenance), y compris les coûts, les délais, la qualité et les exigences de l'utilisateur.

bf Le métier d'instrumentaliste à l'IN2P3 & à l'Irfu

Les programmes de recherche en physique subatomique nécessitent le plus souvent des développements instrumentaux spécifiques, originaux et ambitieux, qui peuvent s'étendre sur plusieurs années et ne peuvent être sous-traités dans l'industrie. Cette activité étant essentielle au domaine de la recherche, elle concentre un effort important de la part des ingénieurs et des chercheurs. La complexité et la durée croissantes de ces activités entraîne, inéluctablement, un fossé grandissant entre chercheurs spécialisés en analyse des mesures et acteurs du développement instrumental.

Les métiers de l'instrumentation demeurent trop peu attrayants. La pénurie d'enseignements de haut niveau en "sciences de la détection" en est sans doute un facteur, auquel s'ajoute une reconnaissance mitigée dans le corps des chercheurs du CNRS. Le métier d'instrumentaliste existe cependant dans le corps des ITA, mais il devient actuellement de plus en plus difficile de recruter des ingénieurs de recherche même débutants pour l'IN2P3 dans ces disciplines vu la différence de plus en plus importante entre les salaires à l'embauche proposés par le CNRS et ceux proposés par l'industrie.

Une autre difficulté croissante concerne les développements génériques en amont, finalisés vers une problématique plutôt qu'un projet, qui sont de plus en plus difficiles à mener, notamment à cause du manque d'autonomie financière des laboratoires.

## Groupe de Travail No 15

# Relations Recherche-Enseignement

A côté de leur mission de recherche, les laboratoires de l'IN2P3 et de l'IRFU remplissent également une mission importante de formation supérieure en recevant de nombreux stagiaires et en formant des doctorants.

Le groupe Recherche et Enseignement a recensé ces activités et essayé de faire émerger les problématiques concernant l'interface entre nos laboratoires, les universités et les étudiants.

Par ailleurs, un rapport actualisé des statistiques relatives à l'enseignement dans les différents laboratoires sera présentée lors du rapport oral de ces journées de prospectives et adjoint au rapport final du groupe.

A l'occasion de ces journées, une table ronde autour des questions importantes de la formation doctorale et des débouchés pour les doctorants sortants en relation avec la politique d'emploi à venir de l'IN2P3 et du CEA sera organisée.

Les thèmes couverts par le groupe de travail ont été :

- Bilan des enseignements dispensés
- Master : flux d'étudiants, effet de la réforme LMD et internationalisation
- Financement des doctorats, Effets de la multiplicité des guichets, du fléchage de certaines bourses, offre versus demande (disparités régionales) ...
- Mobilité doctorale, notamment vers l'étranger : effet de l'ouverture des écoles doctorales aux étudiants étrangers, relations entre écoles doctorales, notamment entre écoles doctorales de site et thématiques
- Devenir des docteurs après la thèse
- Bilan de l'action dans les lycées: stages Janus, conférences NEPAL...
- Participation des doctorants à l'enseignement ( monitorat , ...)
- Actions plus grand public (fête de la science, ...)
- Réforme LMD : effets sur les stages dans les laboratoires. Contraintes posées par la gratification des stages
- Relation entre formation et recrutement : adéquation entre la politique de recrutement du CNRS et l'offre de formation (dans les deux sens)
- Organisation de la recherche (Idex / labex /equipex et impact sur nos laboratoires et nos activités)
- Relations entre chercheurs et enseignants-chercheurs

## Groupe de Travail No 16 Calcul

L'IN2P3 et l'IRFU sont à la pointe du progrès dans le traitement des très gros volumes de données depuis de nombreuses années. Poussées par les besoins de la physique des particules, elles ont mis en place les outils et acquis des ressources dont bénéficient toutes les autres disciplines scientifiques, notamment à l'IRFU et à l'IN2P3 : astroparticules, physique nucléaire et hadronique, recherches pluridisciplinaires.

Au cours des dix dernières années, la physique des particules a joué un rôle majeur dans le développement de la technologie des grilles informatiques. Le pari pris en 2001 de miser sur la grille pour l'analyse des données du LHC est une totale réussite. En 2011, cette analyse mobilise environ 250.000 processeurs dans le monde sur la LHC Computing Grid tandis que 150 PetaOctets sont nécessaires au stockage des données. L'augmentation progressive de la luminosité et l'upgrade des détecteurs va générer une croissance continue du besoin en ressources informatiques dans les 10 prochaines années. L'évolution du modèle de calcul et notamment l'accroissement des échanges de données entre Tiers 2 requièrent une amélioration des performances du réseau entre ceux-ci. La France fournit aujourd'hui 10% des ressources de la grille du LHC et l'objectif est de maintenir ce niveau de contribution mais les deux dernières années (2010, 2011) ont été particulièrement décevantes en termes de financement par le ministère de la recherche et ce niveau de participation ne pourra être maintenu à un tel niveau de financement. En plus des besoins du LHC, le démarrage de SuperB va générer des volumes de données significatifs à l'échelle de quelques PBytes par an tandis que les inconnues qui subsistent sur le calendrier de l'ILC conditionné par les résultats de physique au LHC rendent toute extrapolation impossible sur l'évolution des besoins.

Dans le même temps, la physique des astroparticules va connaître un changement d'échelle dans le volume des données à traiter sur une nouvelle génération d'instruments. Les équipes et les centres de ressources français (notamment le CC- IN2P3) sont aujourd'hui des acteurs majeurs du traitement des données de nombreuses expériences (AMS, ANTARES, Auger, Fermi, HESS, VIRGO) et se positionnent (notamment le Centre F. Arago à l'APC et le LAPP) sur les instruments de l'avenir les plus ambitieux (LISA, EUCLID, LSST, CTA, ...) .

En astrophysique, l'accès à une grande puissance de calcul permet le raffinement des modèles physiques et l'augmentation de la résolution numérique, qui est un enjeu particulièrement important pour de nombreux champs de recherche. Tout ceci a un impact immédiat sur la compréhension des phénomènes (astro)physiques. Les ressources de calcul utilisées sont à la fois les moyens de calcul intensif locaux (serveurs, grappes de serveurs), régionaux (mésocentres) et centralisés (centres nationaux et internationaux). Pour certaines thématiques, il est nécessaire de pouvoir avoir accès à un grand nombre de processeurs (plusieurs centaines à quelques milliers) sur des durées pouvant parfois atteindre la semaine voire le mois.

Dans ce contexte, les moyens en méso-équipement pour le calcul HPC (Tiers 2) doivent être maintenus et pérennisés sur le long terme à l'IRFU et à l'IN2P3 au niveau de 10% des centres nationaux (GENCI) ou 1% des centres européens (PRACE), Ces moyens de calculs Tiers 2 sont indispensables à la formation des jeunes collaborateurs, au développement et à la validation des codes de calculs parallèles HPC développés depuis plus de 10 ans et la préparation des simulations pour les centres Tiers 0 et 1. Complémentaires aux serveurs de calculs, des moyens puissants pour la visualisation des jeux de données 4-D (3 d'espace et 1 de temps) sont nécessaires pour l'analyse détaillée des simulations HPC.

La physique théorique par l'étude de QCD sur réseau est aujourd'hui un client majeur des grands supercalculateurs nationaux. La compréhension des phénomènes hadroniques pour l'étude de la violation de CP au LHC mais aussi sur les nouvelles machines SuperB et Belle II requiert des calculs toujours plus précis pour lesquels une machine pétaflopique dédiée mobilise la communauté.

A l'heure où nous écrivons ce rapport, le cloud computing apporte une révolution dans le monde du calcul intensif et du traitement de grandes masses de données. En effet, pour la première fois, les industriels ne se contentent pas de vendre des équipements pour le calcul intensif ou à haut débit mais ils développent des offres concurrentes à celles des centres de calculs académiques. Le business modèle du cloud est beaucoup plus attrayant que celui de la grille pour les industriels du secteur et la pression va augmenter considérablement

pour une externalisation des services informatiques afin d'en réduire les coûts.

Une telle externalisation ne va pas sans risques : perte de contrôle sur l'accès aux données, risques de dérapage des coûts, dépendances techniques, failles de sécurité ... Ces risques doivent être évalués et un juste compromis entre externalisation et maintien d'une expertise en interne doit être trouvé pour préserver au sein de l'IRFU et des laboratoires de l'IN2P3 un réseau d'experts pour l'administration des systèmes, le développement et le déploiement d'applications scientifiques. Les grilles ont permis de structurer et de resserrer ce réseau humain d'experts dont le CC-IN2P3 avec ses ingénieurs est le coeur technique et dont la grille du LHC est la colonne vertébrale. Le défi des prochaines années se situe à plusieurs niveaux :

- offrir aux utilisateurs des grilles de production une qualité de service stable
- développer une infrastructure de clouds académiques adossée aux clouds publics qui se substitue progressivement et de façon transparente à la grille

Le CC-IN2P3 a un rôle essentiel à jouer pour relever ce défi. Ses ingénieurs sont les leaders techniques incontestables de l'infrastructure nationale de traitement massif des données du LHC, quelle que soit la technologie sous-jacente. En complément de l'expertise technique, les nouveaux locaux inaugurés en 2011 lui permettront jusqu'en 2020 de faire face aux besoins croissants du LHC mais aussi de SuperB et des grands instruments pour l'astroparticules.

La sécurité des services informatiques demeure un souci permanent et une priorité. Par leur caractère distribué et ouvert, les grilles ont apporté de nouvelles contraintes. Il en sera de même pour le cloud computing avec notamment tous les problèmes posés par la virtualisation.

Enfin, la préservation des données et la problématique de l'accès à moyen et long terme doivent être considérées comme des nouveaux paradigmes et prises en compte de manière durable dans les programmes scientifiques.

# Groupe de Travail No 17

## Interface avec les sciences de la terre et l'environnement

### Introduction générale

Les sciences de la Terre et de l'environnement sont par essence confrontées à des défis croissants face aux questions toujours plus exigeantes et quantitatives posées par la communauté scientifique et la société en général. A titre d'exemple, la compréhension des changements climatiques, l'estimation des effets potentiellement de plus en plus dévastateurs des tremblements de terre ou des éruptions volcaniques liés au peuplement croissant des régions à risque demandent des études approfondies, inter-disciplinaires et sur des périodes de plus en plus longues. La réponse institutionnelle apportée par l'INSU à ces besoins repose sur la structuration de son programme de recherche, ainsi que des moyens disponibles, par le développement des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) pour la surveillance et la prévision, ainsi que des programmes nationaux multi-disciplinaires et multi-organismes pour une approche globale du fonctionnement et de l'évolution du système Terre dans son environnement. Parallèlement du côté IN2P3/IRFU, la maturation des techniques expérimentales et méthodologiques mises à l'épreuve avec succès pendant des longues années sur des expériences accélérateurs et hors-accélérateurs, permet d'envisager un rapprochement de nos disciplines de recherche des sciences de l'environnement. Un tel rapprochement, hautement souhaitable de point de vue de la valorisation sociétale de nos disciplines, semble à notre portée à une échéance proche autant de point de vue institutionnel grâce aux évolutions INSU, que par l'existence des collaborations actuelles viables, même si insuffisamment structurées pour l'instant. Ces collaborations actuelles IN2P3/IRFU-INSU s'inscrivent sur deux axes principaux mettant en avant les spécificités et les savoir-faire de nos disciplines: - Des transferts de technologie et de savoir-faire (instrumentation, analyse, simulation), à l'oeuvre notamment avec la planétologie, la tomographie par muons, les mesures de faible radioactivité, les projets ICOS, FOR-FIRE etc. - Une implication pérenne des observatoires astro-particules dans des mesures et des programmes interdisciplinaires avec les exemples de MEUST, Auger, Hess et naturellement des structures plus facilement identifiables comme le LSM.

### Thématiques - Moyens structurants

Une liste non exhaustive des projets engagés a été dressée à l'occasion de ces JP 2012. Ces projets couvrent les thématiques suivantes : - Géosciences et 'géo-particules': tomographie géophysique par muons et géo-neutrinos ; - Physique de l'atmosphère : AUGER, HESS & CTA - Mesures environnementales : mesures de radioactivités et influence sur les organismes vivants suivant intensité, radiochimie, flux de gaz à effet de serre, surveillance des feux de forêt - Sciences de la mer : ANTARES-MEUST - Planétologie Certains de ces projets sont adossés à de grands équipements existants ou en projet (tel qu'un détecteur Megatonne) qui sont autant d'opportunités pour structurer des collaborations pérennes entre instituts.

### Recommandations et analyse des risques

L'intérêt sociétal de la valorisation des techniques et méthodologies innovantes issues de la physique des hautes énergies et de la physique nucléaire par l'interdisciplinaire est évident autant pour nos disciplines que pour l'implantation de nos laboratoires dans le territoire. Il est opportun que les projets menés dans le cadre de l'interdisciplinarité soient reconnus comme enjeux transverses prioritaires de l'IN2P3 et de l'INSU et que leur développement soit incité. Le soutien financier de ces activités n'a pas vocation à reposer uniquement sur IN2P3/IRFU, mais il est essentiel de définir des appels d'offres ciblés et pérennes pour les amorcer et leur permettre d'arriver à une maturation suffisante pour chercher le financement nécessaire à leur mise en place auprès d'autres agences de moyens. L'IN2P3/IRFU se doivent de les accompagner en structurant les réponses aux appels d'offre des réseaux européens, en facilitant le dialogue institutionnel avec des acteurs locaux (Universités, Régions) ou scientifique avec des chercheurs extérieurs aux instituts. Une partie importante des synergies IN2P3/INSU repose sur la valorisation des transferts de technologie et de savoir-faire, tant sur la partie instrumentale que sur plan méthodologique. Dans sa grande majorité l'implication de l'IN2P3/IRFU est nécessaire autant au niveau physicien que des services techniques de manière à assurer un retour technique et scientifique de l'investissement consenti. Ceci passe par une structuration de ces activités par un pilotage technique (cellules projets) et scientifique (création de GDR inter-instituts par exemple). Dans le cas des observatoires et des grands équipements le risque est en premier

lieu lié à l'existence des projets eux-mêmes et leur pérennité, problématique où de nombreux paramètres interviennent. Dans ce cadre il est souhaitable que l'interdisciplinaire n'apparaisse pas comme un faire-valoir, un sous-produit ou une caution, mais bien comme une dimension assumée du projet. Des structures de pilotage communes avec l'INSU ne peuvent qu'être un atout dans cette mise en valeur. Elles doivent en particulier veiller à ce que l'interdisciplinaire ne soit pas une source de dispersion ni une charge de travail démesurée, à moyens constants, pour les collègues IN2P3/IRFU, mais bien une collaboration active avec d'autres instituts. La politique de recrutement joue à ce titre un rôle clé, comme pour toutes les autres thématiques. Il est donc recommandé de pouvoir identifier des post-doc, des thèses voire des postes pérennes sur ce type de thématique pour en assurer un développement correct et non pirate. Enfin un risque particulier émerge sur la dimension sociétale de certaines thématiques comme le réchauffement climatique ou les risques liés au nucléaire civil. Il est important de maîtriser les particularités de cette dimension en général absente des préoccupations IN2P3/IRFU.

## Groupe de Travail No 19

# Théorie

Les physiciens théoriciens impliqués dans les thématiques de physique des particules, physique nucléaire, astroparticules et cosmologie dépendent de deux tutelles : CEA et CNRS, mais sont rattachés à plusieurs instituts (CEA/IPhT, CNRS/INP ou INSU) ou directions (CEA/DAM ou DSM) qui dépassent largement les seuls instituts IRFU et IN2P3 du CEA et du CNRS.

Au delà de ces thématiques traditionnelles de l'IN2P3 et de l'IRFU, un certain nombre de théoriciens travaillent, dans les laboratoires de l'IN2P3, aux interfaces de ces disciplines, notamment dans les domaines des sciences du vivant, de la matière condensée ou de la physique mathématique. Bien évidemment, ces derniers domaines peuvent constituer le cur de l'activité des laboratoires de physique théorique de l'INP du CNRS et de l'IPhT du CEA. Afin de ne pas biaiser notre rapport sur la physique théorique dans le cadre de ces prospectives IN2P3/IRFU, nous n'avons considéré, pour les théoriciens travaillant aux interfaces, que ceux rattachés à un laboratoire de l'IN2P3, sauf indication contraire.

Dans ce cadre, la communauté de théoriciens travaillant dans ces domaines correspond à environ 215 permanents. Leur répartition par institut est indiquée sur la figure 1.

La répartition de l'ensemble des théoriciens (permanents et non-permanents) selon les grandes thématiques est indiquée sur la figure 2, pour un effectif total d'environ 390 personnes.

De nombreux physiciens théoriciens sont aussi enseignant-chercheurs à l'université. Ils jouent à ce titre un rôle essentiel dans la formation initiale des générations futures de physiciens, qu'ils soient théoriciens ou expérimentateurs. Pour nombre de physiciens expérimentateurs, ce sera d'ailleurs leur seul contact avec la physique théorique. Le rôle de formation des physiciens théoriciens en est d'autant plus important.

Les questions, et problèmes, qui peuvent se poser dans l'organisation de la communauté de physique théorique sont de nature différente selon que le laboratoire est un laboratoire de physique théorique (CEA/IPhT, CNRS/INP) ou une équipe de physique théorique dans un laboratoire expérimental (CEA/IRFU, CNRS/IN2P3 ou INSU, CEA/DAM ou DSM). Dans le cadre de ces prospectives, nous nous concentrerons pour ces recommandations sur les équipes de physique théorique dans les laboratoires de l'IN2P3 et de l'IRFU. Cela n'empêche évidemment pas certaines d'entre elles d'être pertinentes au delà de ces seules équipes.

### Fonctionnement

Le fonctionnement d'une équipe de physique théorique doit être apprécié à sa juste valeur :

- les physiciens théoriciens travaillent la plupart du temps en petites, voire très petites collaborations. Cela permet une très grande souplesse dans l'organisation du travail. Cela n'exclut cependant pas le travail en grandes collaborations, avec une organisation similaire aux collaborations expérimentales. C'est le cas notamment dans le domaine des calculs de QCD sur réseau, ou des simulations cosmologiques par exemple.
- ce travail est souvent à l'interface entre plusieurs thématiques, ou même plusieurs disciplines. Ce travail en petite collaboration ne doit pas impliquer que la taille des équipes de physique théorique au sein des laboratoires expérimentaux soit aussi très petite ! Il est essentiel, pour garder au sein de l'équipe une émulation scientifique porteuse d'idées nouvelles, et une réelle dynamique, que ces équipes aient une taille critique. Cette émulation scientifique peut se faire de deux manières différentes : en interne au sein de l'équipe, et en externe au sein de collaborations nationales ou internationales. Cela implique, en interne, une certaine cohérence dans les thématiques ou les méthodes théoriques développées au sein de chaque équipe. Cette cohérence n'implique pas, loin s'en faut, une uniformité dans les thématiques de recherche. La diversité thématique doit aussi être considérée comme source d'enrichissement scientifique.

### Financement

Plusieurs sources de financement existent pour les équipes de physique théorique : financement récurrent par les autorités de tutelle et complément éventuel sur les ressources propres du laboratoire, et financement sur projet (notamment les projets européens, LABEX et IDEX, projets ANR, projets PEPS-PTI du CNRS, et comité de financement théorie de l'IN2P3).

Ces financements ont chacun leur spécificité, et correspondent à des financements d'ampleur décroissante, avec aussi une souplesse dans le processus d'appel d'offre et d'utilisation du financement croissante. Un équilibre entre un financement récurrent et un financement sur projet doit être recherché. Compte tenu des sommes relativement modestes en jeu, cet équilibre ne devrait pas être trop difficile à trouver.

Le plan de financement des équipes de physique théorique pourrait d'ailleurs faire l'objet d'un engagement quadriennal, laboratoire par laboratoire, afin d'assurer un minimum de stabilité et permettre un investissement scientifique à moyen terme avec une visibilité forte. Le recrutement de post-doctorants devrait aussi faire l'objet d'un plan pluriannuel afin de pouvoir recruter, dans les meilleurs délais, les meilleurs candidats.

Les financements sur projet ne doivent pas se substituer au financement récurrent des équipes de physique théorique. Ce financement récurrent permet notamment de conserver toute la souplesse de fonctionnement de ces équipes, ce qui en fait leur richesse. Il doit être suffisant pour permettre une activité normale de l'équipe (missions de collaboration, participation aux workshops et conférences internationales, invitations de courte durée de collaborateurs). Le financement sur projet doit être réservé à des projets bien identifiés et évalués, d'un montant minimum par chercheur et enseignant-chercheur (de l'ordre de plusieurs milliers d'euros par exemple). Il doit pouvoir concerner les projets portés par un seul chercheur ou enseignant-chercheur.

### **Evaluation**

Le mode de fonctionnement et le financement des équipes de physique théorique doivent être au service de l'excellence scientifique. Ils doivent donc s'accompagner d'un processus d'évaluation adapté. L'évaluation par l'AERES s'est généralisée ces dernières années, et devient, de facto, le cadre général pour l'évaluation des laboratoires du CNRS et du CEA.

Son fonctionnement cependant n'est pas obligatoirement adapté aux équipes de physique théorique dans un laboratoire expérimental dans la mesure où le comité d'évaluation ne comporte souvent qu'un seul théoricien pour un comité de quatre ou cinq membres. Une évaluation avec un minimum d'objectivité, et contradictoire, n'est donc souvent pas possible.

Afin d'y remédier, l'IN2P3 et l'IRFU devraient mettre en place, au niveau national, des comités d'évaluation par grande thématique pour l'ensemble des équipes de physique théorique de leurs laboratoires. Ces comités devraient être formés en étroite collaboration avec les présidents des (nouvelles) sections 01 et 02 du comité national du CNRS et des conseils compétents de l'IRFU.

### **Relations théorie - expérience**

Les lieux de rencontre entre théoriciens et expérimentateurs sont nombreux. Au sein des laboratoires tout d'abord, les équipes de physique théorique doivent participer pleinement à l'animation scientifique au sein des laboratoires, et à toutes les réflexions de prospectives sur les projets de la discipline.

Les collaborations scientifiques avec les équipes expérimentales doivent être d'abord motivées par les intérêts et les domaines de compétence des équipes de physique théorique. Ces collaborations peuvent s'établir au sein même du laboratoire, mais aussi plus généralement au niveau national au sein de l'IN2P3 ou de l'IRFU, ou international.

Les structures du type GDR ou groupes de travail internationaux (CERN, FUSTIPEN, ) sont les lieux d'échanges naturels entre théoriciens et expérimentateurs. C'est souvent en leur sein que démarrent les nouvelles idées de collaboration.

Il ne faut cependant pas négliger les rencontres impliquant un nombre limité de théoriciens sur une thématique donnée. Ces rencontres naissent souvent à la suite de discussions informelles au sein de structures plus larges. Elles doivent pouvoir s'organiser de façon extrêmement souple. Ces rencontres ont un coût qui ne peut être pris en compte sur un projet défini souvent bien en amont. Elles doivent donc être financées au niveau du laboratoire.

## **Ressources humaines**

Une réflexion et un investissement des théoriciens à moyen et long terme sur des sujets de plus en plus complexes et souvent multidisciplinaires nécessitent une politique de recrutement cohérente et continue de physicien(ne)s sur des postes permanents. Cette politique de recrutement, large et ouverte à tous les profils, doit être reconnue aussi comme un atout majeur pour les grands programmes expérimentaux actuels et futurs de l'IN2P3 et de l'IRFU.

Cette politique de recrutement doit être obligatoirement associée à un développement de ressources humaines telles que visiteurs de longue durée, post-doctorants et doctorants. Cela est essentiel pour maintenir une dynamique scientifique forte pour ces équipes. Enfin, un flux régulier de visiteurs de courte durée (typiquement de une à plusieurs semaines) doit garantir une émulation scientifique permanente. Ce besoin est propre aux équipes de physique théorique, et son importance ne doit pas être sous-estimée. Un budget spécifique doit donc aussi être dégagé à cet effet.

# Groupe de Travail No 20

## Organisation et financement de la recherche en Physique des 2 Infinis (P2I)

### Des tendances générales

On assiste depuis plusieurs années à une réduction constante de la dotation de l'Etat à la discipline P2I (Physique des 2 Infinis), que ce soit au CNRS ou au CEA. Compte tenu de la part très importante et en progression des salaires, d'environ 2/3 dans le budget global, cette réduction se fait sentir de plus en plus durement dans la capacité de financement des programmes.

La Stratégie Nationale de la Recherche et de l'Innovation (SNRI) définit clairement une tendance à la priorisation sociétale de la recherche au niveau national (santé, énergie, environnement ...). Cela draine d'une part les budgets vers des programmes d'utilité sociale mais d'autre part efface progressivement du paysage l'identité de la recherche amont, en particulier de la P2I.

Parallèlement à cette tendance, plusieurs autres guichets de financement sont apparus progressivement depuis une dizaine d'années. Ils ont en commun la notion de projet, limité dans le temps, et fonctionnent par appels : les appels à projets ANR (blanc), les appels à projets européens (infrastructures, mobilités des chercheurs, les appels récents dits ERC du programme Ideas du Framework Programme 7) appels plutôt bottom-up, et récemment en France les appels Investissements d'avenir (Equipex, Labex, Idex, Infrastructures...) lancés par l'ANR, plus orientés top-down.

La baisse des dotations de l'Etat conduit les directions et les chercheurs à amplifier la recherche de contrats à l'extérieur, trouvant souvent leurs sources dans les priorités SNRI. A l'IRFU en particulier, cela permet, par mutualisation, le financement de projets coeur dur et/ou de personnel, en particulier technique.

Enfin, on observe la mise en place de référentiels projets et d'évaluation de la bonne utilisation des fonds publics (AERES) et la montée en puissance des Universités, qui sont des composantes incontournables du futur.

Bien que l'importance relative des contributions de ces autres guichets de financement reste aujourd'hui marginale pour la P2I (quelques pour cents du total du budget), leur impact dans notre discipline et dans la communauté devient prépondérant. Ainsi, on commence à faire face à plusieurs difficultés :

- L'identité de la discipline se perd (exemple dénomination appel blanc à l'ANR). Au delà de cette constatation, l'identité budgétaire se dilue également,
- La stratégie scientifique tend à échapper aux instituts historiques (multiplication des instances nommées d'évaluation et de décision), ce qui entraîne une dispersion et un élargissement de la gouvernance (Labex),
- La tentation est grande, pour maintenir l'activité des instituts, de s'engager dans ou d'accepter les projets répondant à la SNRI, au détriment des projets qui relèvent en premier lieu de la mission de P2I,
- La structure projet, si elle permet un gain d'efficacité dans une définition plus effective des objectifs, des moyens, des plannings et des ressources, implique un découpage et une réalisation successive de phases distinctes, qui peuvent enlever, dans certains cas, souplesse et réactivité,
- La constitution de dossiers aux contraintes différentes en fonction des guichets, la multiplication des instances d'évaluation -par les pairs- sont très chronophages.

Ces tendances sont de nature à induire des forces centrifuges et de décohésion même dans notre communauté, pourtant fortement structurée culturellement et centrée sur des projets collaboratifs.

Ces tendances existent aussi au niveau européen, et mondial. Ainsi l'Europe consacre, dans le cadre du "Framework Program 7", les programmes "Cooperation" aux priorités sociétales. Toutefois la science

amont est présente dans le programme “Ideas”, et identifiée comme une “composante clé de la richesse et du progrès social”.

### **Des propositions**

#### **Réaffirmer l’identité de notre discipline et piloter la stratégie de notre discipline**

Il est essentiel qu’à côté des thèmes privilégiés de la SNRI demeure présente et visible la recherche en amont et en particulier soit redonnées à notre discipline une identité, une visibilité, notamment :

- en proposant que soit identifié à l’ANR, à l’instar des programmes européens Ideas, un vrai programme Science-amont qui fera juste place aux thèmes de P2I,
- en obtenant de l’ANR une délégation à l’instance conjointe IN2P3-IRFU de ses compétences dans l’attribution des ressources et l’évaluation des projets de notre domaine (qui jouerait dans ce cas le rôle de guichet principal en coordonnant aussi TGIR et plateformes),

Garder la maîtrise de la stratégie et du pilotage scientifique est également nécessaire. Exemples de propositions :

- Mettre en place une instance conjointe ou coordonnée IN2P3-IRFU de définition et de pilotage de la stratégie scientifique nationale pluriannuelle à moyen terme (5 ans),
- Mettre en place une instance conjointe In2p3-Irfu de conseil et d’évaluation scientifique,
- Décliner cette stratégie dans la stratégie des laboratoires et instituts de notre communauté,
- Décliner cette stratégie dans les universités
- Décliner cette stratégie dans les Labex, et/ou établir un réseau national Labex-P2I,
- Evaluer l’opportunité de réponse aux appels à projets des équipes en fonction de cette stratégie, sans céder à l’opportunisme.

#### **Identifier, valoriser et faire connaître les apports de notre discipline**

Les ressources attribuées à une discipline scientifique, par les institutions nationales ou européennes, sont en relation étroite avec la perception qu’ont ces institutions de l’utilité sociale/culturelle (accumulation du corpus de connaissances sur notre univers) et sociétale (contribution aux priorités du moment) de la discipline.

La communication à tous les niveaux (du public au politique en passant par les media et les publics jeunes) en est une composante essentielle qui est à maintenir et développer, en accordant la juste place aux apports spécifiques sociétaux.

Pour cette composante croissante des apports sociétaux, voici quelques propositions non exhaustives :

- Croiser l’analyse des besoins des entreprises avec une analyse fonctionnelle détaillée de nos savoirs faire et compétences pour contribuer à l’émergence de transitions technologiques (transdisciplinaires). Des exemples existent en Europe (dépollution des effluents gazeux d’usine par faisceaux d’électrons, optical computing, ESA avec le transfert de technologies spatiales).
- Mutualiser, à l’échelle nationale et européenne, expertises et savoir-faire pour établir des relations industrielles de haut niveau et dans la durée. Cela passera par un établissement de cartographie de compétences, de savoir-faire et de propriété industrielle croisée entre les deux instituts, la poursuite de leur insertion dans des réseaux européens et internationaux.
- Renforcer le rapprochement avec les autres disciplines par des projets communs
- Participer aux instances décisionnaires, ministère, Europe, comités d’experts, Alliances

## **S'organiser pour optimiser et développer les ressources**

Au niveau des équipes de chercheurs, pour alléger la charge de travail représentée par la rédaction des propositions, il est utile de se rappeler que les dossiers de soumission de projets sont conçus selon des standards internationaux : organisation, besoins en ressources pluriannuels, livrables, planning, etc. Il semble indispensable que les différents acteurs s'attachent, là où ce n'est pas déjà fait, à :

- S'entraîner au montage des projets, au besoin avec l'assistance de spécialistes, pour présenter des dossiers conformes avec le maximum de chances de succès,
- Développer un système d'information performant facilitant retour d'expérience et montage des projets,
- Identifier et prendre en compte toutes les attentes des comités décisionnaires,
- Utiliser les outils et les méthodes de conduite de projets.

Au niveau des plateformes et équipements partagés :

- Mutualiser les coûts d'exploitation pour augmenter les ressources propres, en accompagnant de manière adéquate les personnels exploitant ces plateformes.

Au niveau des laboratoires, et pour mettre en uvre des propositions de la section précédente :

- Constituer une cellule conjointe de valorisation In2p3-Irfu, comprenant des représentants de la valorisation de ces deux organismes et d'experts mobilisables selon les domaines,
- Développer la qualité et l'organisation dans nos laboratoires autour de référentiels internationaux, renforcer notre organisation en mode projet, optimiser ressources humaines et financières.

Globalement, il s'agit de :

- renforcer la cohésion de la communauté autour de valeurs, de projets, de pratiques partagées. Cela soutiendra l'impact sociétal et l'image culturelle de notre discipline. Les formations communautaires, comme les écoles thématiques et les écoles scientifiques conjointes sont des outils importants de renforcement de cette cohésion. Les journées prospectives, qui proposent des orientations scientifiques consensuelles pour l'avenir en sont d'autres.