

PROSPECTIVE IN2P3/IRFU 2013-2022

Institut national de physique nucléaire et de physique de particules du CNRS
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA

cnrs

www.cnrs.fr

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE
cea

Sommaire

- 4 IN2P3/Irfu, une stratégie commune
- 6 Physique des particules
- 8 Physique nucléaire
- 10 Astroparticules et cosmologie
- 12 Astrophysique : structuration de l'Univers
- 14 Accélérateurs
- 16 Instrumentation
- 18 Cryo-magnétisme et cryogénie
- 20 Nucléaire-énergie
- 22 Nucléaire-santé
- 24 IN2P3 et Irfu en bref
- 25 Sigles et acronymes

une stratégie commune

Construire un avenir pour la physique des deux infinis et affirmer le positionnement de la France dans la stratégie européenne et le contexte international.

Les journées Prospectives IN2P3-Irfu, qui se sont déroulées à Giens du 2 au 5 avril 2012, avaient pour but d'élaborer une feuille de route en physique subatomique pour la période 2013 - 2022.

Des documents d'orientation, préparés par vingt groupes de travail thématiques, ont été soumis aux commentaires de notre communauté et fait l'objet de discussions pendant ces journées.

Rassemblant plus de trois cents participants, les journées de prospectives ont été particulièrement enrichissantes et nous tenons encore à remercier l'ensemble de la communauté pour son implication et son travail : un travail approfondi, dense et complet à la suite duquel des discussions fructueuses, pas toujours consensuelles, ont pu avoir lieu, sur la science, les orientations stratégiques ou encore les projets à porter ou à défendre. Tous ces éléments, qui reflètent la vision scientifique de notre communauté, ont servi de base pour élaborer notre stratégie commune pour

les dix prochaines années afin de construire ensemble un avenir pour la physique des deux infinis et affirmer le positionnement de la France dans la stratégie européenne et le contexte international. Les conclusions des groupes de travail liés à la physique des particules ont d'ailleurs été soumises comme contributions au forum sur la stratégie européenne préparée par le Cern.

Nous avons choisi de présenter une feuille de route commune à nos deux instituts IN2P3 et Irfu en mettant en évidence les thématiques prioritaires. Lorsque, pour des raisons de périmètre différent ou de spécificités institutionnelles, notre vision était singulière mais néanmoins complémentaire, nous avons indiqué les priorités propres de chaque institut.

Sans reprendre de façon exhaustive le contenu de chacune des thématiques, les priorités majeures peuvent être présentées selon les axes suivants.

En physique des particules, l'exploitation optimale du potentiel du LHC, incluant la haute luminosité, est la priorité des deux instituts.

Pour y arriver, il est nécessaire à la fois de maintenir une forte implication dans les analyses des données des expériences Atlas, CMS et LHCb pour l'IN2P3 en garantissant les moyens de calcul adéquats, mais

également de s'impliquer largement dans l'amélioration (*upgrades*) des détecteurs. Nous soutenons aussi la participation à des expériences de basse énergie comme la mesure du moment dipolaire du neutron (nEDM pour l'IN2P3) et l'étude de la gravité sur l'antimatière (Aegis pour l'IN2P3, Gbar pour l'Irfu).

En physique nucléaire, les efforts des deux instituts se concentreront, pour ce qui concerne la structure et la dynamique nucléaires, sur la construction de Spiral2 dans sa globalité et ses équipements associés tout en maintenant l'exploitation du Ganil. Pour la physique hadronique, les deux expériences prioritaires demeurent Alice au LHC, et ses *upgrades*, et le programme de structure du nucléon au TJNAF sur Clas12. En parallèle des efforts portés sur Spiral2, il est important de continuer le programme d'étude des noyaux dans des conditions extrêmes auprès des installations existantes (Riken, Isolde, Dubna, Jyväskylä, Alto).

Dans le domaine de la recherche sur l'Univers sombre, le positionnement pour l'avenir

se traduit par un soutien de nos instituts au projet CTA et de l'IN2P3 au projet LSST, projets très structurants qui nécessitent des partenariats internationaux aux meilleurs niveaux. La détection directe de matière noire demeure aussi quant à elle un sujet très stratégique, marqué par la compétition entre différentes technologies entre lesquelles il nous faudra clairement choisir. Pour la physique des neutrinos, au-delà de la poursuite de l'expérience T2K jusqu'à l'horizon 2018, une implication dans une expérience « Long Baseline » devra être menée pour conduire à la détermination de la hiérarchie de masse puis, dans un deuxième temps, à une couverture optimale de la violation de CP dans le secteur des neutrinos. À l'IN2P3, deux autres sujets majeurs sont soutenus : l'étude de la désintégration double bêta au travers du démonstrateur de Super-Nemo et la recherche des ondes gravitationnelles au travers d'Advanced Virgo.

La théorie est vitale pour nos thématiques de physique des particules, de physique nucléaire, d'astroparticules et de cosmologie mais aussi pour la physique aux interfaces de ces disciplines. Elle ouvre de nouveaux champs, indique de nouvelles découvertes et sert d'appui à l'interprétation de nos données et de guide pour la direction de nouvelles expériences ou thématiques. Même si elle dépasse largement le cadre de nos deux seuls instituts, la théorie reste une préoccupation commune de l'IN2P3 et de l'Irfu et à ce titre est clairement soutenue.

Notre compétence unique en recherches et développements pour ce qui concerne les accélérateurs, les aimants et l'instrumentation est clairement l'une de nos forces. Dans ces trois domaines cruciaux pour l'avenir, la collaboration très étroite entre IN2P3 et Irfu est capitale pour nous permettre de garder une place de choix au niveau international sur nos projets prioritaires, mais aussi pour apporter notre savoir-faire aux autres disciplines.

Même si des différences d'approche existent entre l'IN2P3 et l'Irfu dans les domaines relatifs aux thématiques regroupées sous les vocables nucléaire-santé et

nucléaire-énergie, il est néanmoins très important de mettre ici en synergie nos compétences tout en collaborant avec nos collègues de ces autres disciplines.

L'application de nos connaissances spécifiques en physique nucléaire et de nos savoir-faire techniques permet d'apporter un éclairage académique original tant sur des questions concernant les déchets radioactifs et leur stockage, mais aussi leur transmutation (filrière ADS, projet Myrrha) que sur des filières électronucléaires nouvelles, comme celles basées sur le cycle du thorium.

De même, grâce ici aussi à ses compétences scientifiques et techniques, l'IN2P3, en collaboration avec le milieu (bio-) médical, apporte majoritairement son savoir-faire à la lutte contre le cancer, dans les domaines tant de la thérapie, via les irradiations externes ou internes (hadronthérapie, immunothérapie, production de radioéléments), que du diagnostic via des outils nouveaux d'imagerie (xénon liquide, outils per-opératoires,...) et de l'instrumentation associée.

En conclusion de ce rapide tour d'horizon de notre feuille de route, il est important de rappeler qu'aucune des actions de recherche de l'IN2P3 et de l'Irfu n'est menée de façon isolée. Toutes requièrent une forte coordination nationale au sein de larges collaborations françaises, européennes ou mondiales. De plus, notre recherche s'appuie très fortement sur de très grandes infrastructures de recherche (TGIR) essentielles au développement de nos disciplines, dont le soutien nous est indispensable. Si le dialogue entre nos deux instituts est vital, il doit nécessairement s'accompagner de discussions avec nos autres partenaires que sont les universités (en particulier pour les actions d'enseignements relatives à nos disciplines et techniques), le CEA, le Cnes, les autres instituts du CNRS et les organismes étrangers comme le Cern, l'ESO et l'ESA.

Jacques Martino, directeur de l'IN2P3
Philippe Chomaz, directeur de l'Irfu

Physique des particules

Investissement majeur des deux instituts de ces quinze dernières années en physique des particules, le LHC et ses expériences (Atlas et CMS) ont fourni un premier résultat remarquable en juillet 2012 avec la découverte d'un nouveau boson dont les propriétés s'apparentent à celles du boson de Higgs du Modèle standard. Une nouvelle physique au-delà du Modèle standard, autre objectif majeur du LHC, n'a pas encore été observée mais des contraintes indirectes fortes sur certains modèles ont été obtenues notamment avec l'observation du mode $B_s \rightarrow \mu\mu$ par CMS et LHCb. La France a joué un rôle prépondérant dans l'obtention de ces résultats.

Mesurer les propriétés de la nouvelle particule, rechercher des déviations au Modèle standard ou observer des nouvelles particules : tels sont les enjeux de la prochaine décennie.

Dans ce cadre, le LHC reste le programme prioritaire, sans négliger pour autant les opportunités offertes par les recherches auprès d'autres futurs collisionneurs et la participation à des expériences à basse énergie.

Programmes prioritaires

Le LHC et les expériences Atlas, CMS et LHCb

Après un arrêt début 2013, la prochaine prise de données aura lieu début 2015 avec une énergie dans le centre de masse de l'ordre de 13-14 TeV et une luminosité accrue.

L'exploitation optimale des données du LHC est la priorité des deux instituts

Il est nécessaire de maintenir une forte implication de nos chercheurs dans les analyses des données en favorisant si possible la présence de chercheurs basés au Cern. Des moyens de calculs adéquats tant au Centre de

calcul de l'IN2P3 (Tier1¹) que dans les centres de niveau 2 (Tier2) sont indispensables pour renforcer la visibilité acquise jusqu'à présent.

À partir de 2018, une première phase d'augmentation de la luminosité du LHC aura lieu et des modifications des détecteurs sont nécessaires. Elles concernent les détecteurs de traces (vertex) et les systèmes de déclenchement pour les expériences Atlas et CMS. Les équipes des deux instituts sont engagées dans ces développements, et un financement à hauteur de notre contribution en effectifs dans ces expériences est indispensable à travers les Très grandes infrastructures de

recherche (TGR) pour conserver notre savoir-faire et notre visibilité dans ces collaborations.

Pour l'IN2P3, la refonte de l'ensemble du système de lecture de l'expérience LHCb est nécessaire pour profiter de l'accroissement de la luminosité.

Objectifs :

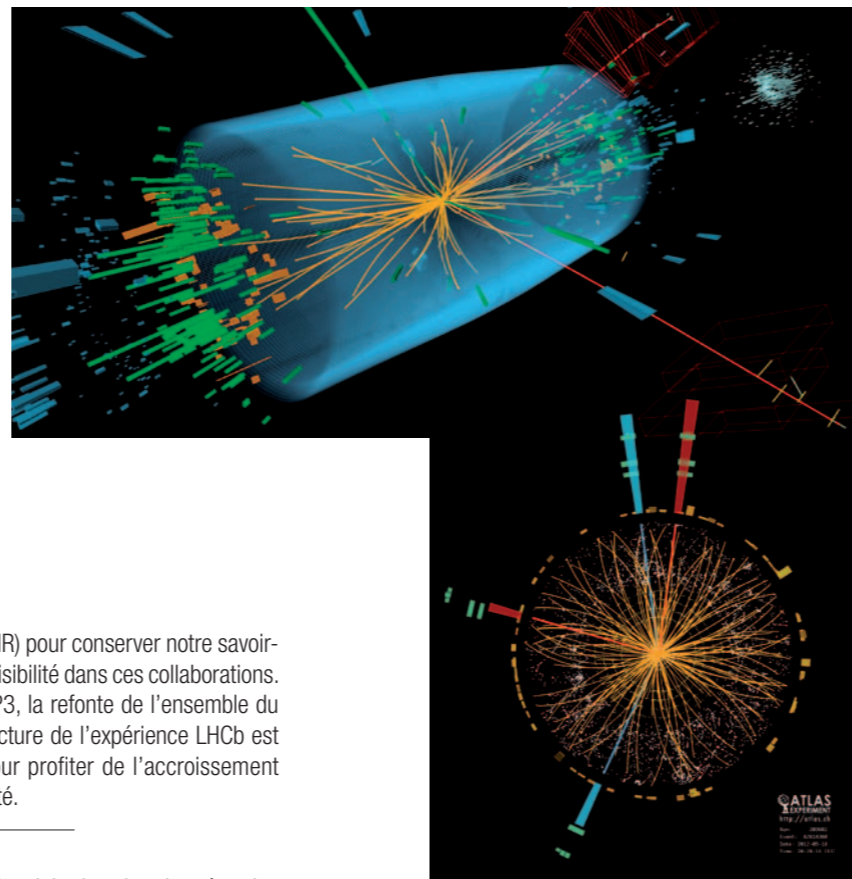
- poursuivre l'exploitation des données des expériences au LHC-Cern ;
- assurer les moyens de calcul nécessaires aux expériences ;
- participer aux *upgrades* des détecteurs Atlas et CMS ;
- pour l'IN2P3, participation significative à l'upgrade de LHCb.

Au-delà de 2023, une seconde phase d'augmentation de la luminosité est prévue impliquant des changements majeurs dans les expériences Atlas et CMS.

Les enjeux physiques de cette phase restent encore à affiner ainsi que la participation de nos instituts. Il est cependant nécessaire de conserver une activité de R&D suffisante et ciblée en vue de possibles engagements.

Objectifs :

- participer aux R&D des *upgrades* des détecteurs Atlas et CMS pour la phase 2.



▲ Salle informatique du Centre de calcul de l'IN2P3/CNRS.

Autres programmes

Nouveaux projets de collisionneur

La contribution à des développements sur l'accélérateur et les détecteurs pour un collisionneur linéaire international (ILC) est lancée depuis une dizaine d'année. La découverte du nouveau boson, puis sa caractérisation fine, peut, dans un contexte mondial, notamment avec la volonté de nos collègues Japonais, aboutir à la construction d'un tel collisionneur, opérationnel au-delà de 2025.

Les R&D doivent être menés à leur terme et les deux instituts restent vigilants sur l'opportunité d'un ILC au Japon dans la construction duquel la France pourrait envisager de s'impliquer dans le contexte d'un effort européen concerté.

◀ Collision « candidate » pour signer la présence d'un boson de Higgs dans l'expérience CMS (en haut) et dans l'expérience Atlas (en bas).

▼ ILC : vue artistique.

La communauté française doit aussi être présente dans les réflexions sur le prochain accélérateur européen après le LHC au Cern.

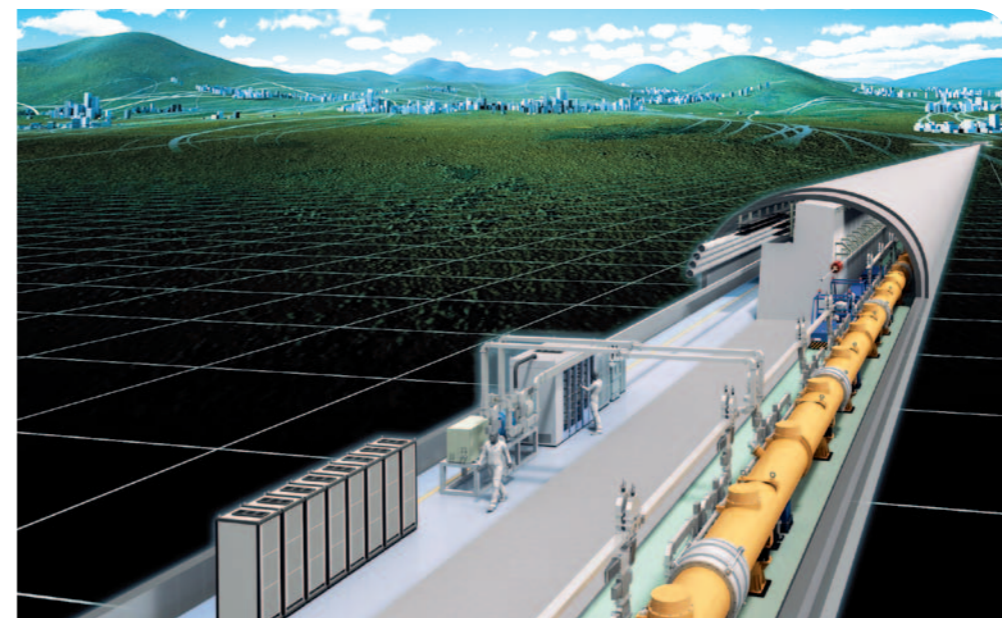
Objectifs :

- mener à leur terme les R&D accélérateur et détecteur pour ILC ;
- participer aux réflexions sur le prochain accélérateur européen après le LHC au Cern.

Expériences basse énergie

Si les expériences à la frontière des hautes énergies, avec leurs grandes collaborations, restent privilégiées dans les instituts, il convient de rester ouvert à d'autres approches originales permettant d'accéder à une physique au-delà du Modèle standard. En outre, de tels projets peuvent aussi permettre à certains de nos chercheurs d'acquérir un spectre complet d'activité, difficilement envisageable dans de très grandes collaborations.

Dans ce contexte, la mesure du moment dipolaire du neutron (nEDM à PSI pour l'IN2P3) et l'étude de la gravité sur l'antimatière (Aegis pour l'IN2P3, GBAR pour l'Irfu) sont des axes prioritaires.



¹ La grille de calcul utilisée pour le LHC s'appuie sur la collaboration internationale W-LCG (Worldwide LHC Computing Grid) qui fédère 140 centres de calcul dans 35 pays. Ces centres sont répartis en 4 catégories. Le niveau 0 (ou « Tier 0 ») est le centre de calcul du Cern qui recueille et traite les données en sortie des détecteurs. Ces dernières sont ensuite dupliquées dans 11 centres de calcul nationaux dits de « niveau 1 » ou « Tier 1 » qui ont un contact privilégié avec certains centres de niveau 2 et 3.

Physique nucléaire

La physique nucléaire, c'est à dire la physique du noyau atomique et de ses constituants, est une physique complexe et extrêmement variée, depuis la formation d'une matière déconfinée à très hautes température et densité d'énergie dans les premières microsecondes d'existence de l'Univers après le Big Bang, jusqu'à celle de noyaux atomiques stables et exotiques en passant par la structure des nucléons en termes de quarks et de gluons. Il n'existe pas à l'heure actuelle de « Modèle standard pour la physique nucléaire », c'est-à-dire de cadre théorique qui permette de décrire à partir des premiers principes l'ensemble des phénomènes hadroniques et nucléaires. Nous sommes ainsi confrontés à plusieurs questions fondamentales :

- comment se comportent les systèmes très chauds et très denses de quarks et gluons ?
- comment s'opère le confinement des quarks dans les nucléons ?
- comment se comportent les noyaux dans des conditions extrêmes de déformation, d'isospin, de spin ... ?

L'IN2P3 et l'Irfu apportent un soutien important et continu aux études visant à approfondir la connaissance de ces différents systèmes – plasma, nucléon, noyau.

Programmes prioritaires

Concernant l'étude du plasma de quarks et gluons, la priorité est mise sur Alice, une expérience du LHC dédiée aux collisions d'ions lourds et financée au travers d'un TGIR. Entre 2014 et 2017, de nouvelles prises de données permettront de gagner un ordre de grandeur sur la luminosité intégrée, d'améliorer ainsi la précision des mesures et d'étudier en détail les mécanismes de production des différentes sondes utilisées en multipliant les systèmes. La communauté est actuellement très impliquée dans trois projets d'amélioration des détecteurs d'Alice pour le LHC à haute luminosité après 2018 ; l'upgrade du spectromètre à muons pour les hautes luminosités, l'ITS, un nouveau système de trajectographie interne, et le MFT, un nouveau tracker de muon vers l'avant (TGIR upgrade LHC).

Concernant l'étude de la structure des noyaux, la priorité est donnée à l'étude des noyaux dans des configurations extrêmes. Ces études seront concentrées à Ganil à partir de 2015 avec la mise en service de Spiral2 et de ses salles expérimentales. La réalisation de Spiral2 (projet retenu au niveau européen liste Esfri et financé au travers d'un TGIR) et la préparation de son programme scientifique sont la priorité de ces prochaines années. La construction des instruments S3 et Desir (tous deux financés au travers d'un Equipex), NFS

Objectifs :

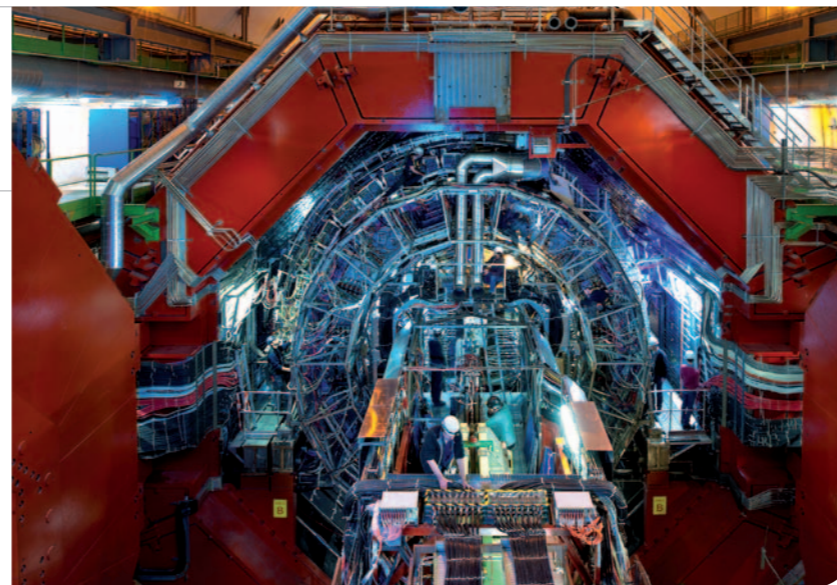
- poursuivre l'expérience Alice au Cern ;
- profiter au mieux de l'augmentation de la luminosité ;
- participer aux upgrades d'Alice.

En matière de physique hadronique, l'IN2P3 et l'Irfu soutiennent des programmes expérimentaux, dont le but est d'étudier la structure interne des nucléons et la dynamique du confinement des quarks. L'IN2P3 et l'Irfu sont associés dans le cadre d'un important programme expérimental, mené depuis de nombreuses années à JLab-6 GeV et qui se poursuivra auprès de JLab-12 GeV (faisceau prévu en 2014), et qui consiste à mesurer les distributions de partons généralisées (GPD) caractérisant les corrélations position-vitesse des quarks à l'intérieur du nucléon. Ces études expérimentales s'accompagnent de la mise en œuvre d'une plateforme d'analyse et de phénoménologie des GPD¹, et de calculs QCD² sur réseaux.

Objectifs :

- participer à l'upgrade de JLab-12 GeV et réaliser un programme d'étude des GPD ;
- développer une plateforme d'analyse des GPD ;
- réaliser des calculs QCD sur réseaux sur la structure du nucléon.

Concernant l'étude de la structure des noyaux, la priorité est donnée à l'étude des noyaux dans des configurations extrêmes. Ces études seront concentrées à Ganil à partir de 2015 avec la mise en service de Spiral2 et de ses salles expérimentales. La réalisation de Spiral2 (projet retenu au niveau européen liste Esfri et financé au travers d'un TGIR) et la préparation de son programme scientifique sont la priorité de ces prochaines années. La construction des instruments S3 et Desir (tous deux financés au travers d'un Equipex), NFS

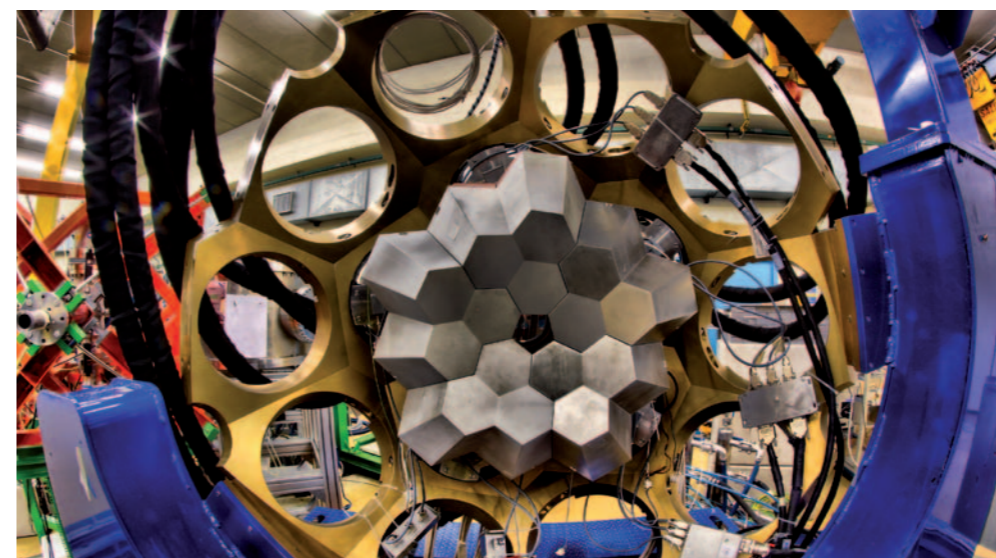


▲ Le détecteur Alice.

et Agata et des détecteurs associés sont en cours et cristallisent l'ensemble des efforts des physiciens de l'IN2P3 et de l'Irfu. En parallèle de ces études expérimentales, des études théoriques sont menées pour comprendre l'origine de la cohésion des noyaux et prédire leurs propriétés de structure ; les développements portent notamment sur la prise en compte du « couplage au continuum » pour l'étude des noyaux exotiques, et la mise en œuvre d'approches *ab-initio* pour décrire la structure et les réactions nucléaires.

Objectifs :

- démarrage de Spiral2 Phase1 ;
- mise en œuvre de Spiral2 Phase2 ;
- développement d'approches *ab-initio* pour la structure et les réactions nucléaires.



▲ Le détecteur Agata.

Autres programmes

L'Irfu est actuellement engagé dans le programme Compass2 au Cern, pour étudier, grâce à un faisceau de muons, les corrélations entre position et vitesse à l'intérieur du nucléon afin de cartographier la distribution de quarks et de gluons dans le nucléon et d'estimer la contribution de leurs moments orbitaux au spin du nucléon. Grâce à l'énergie élevée des faisceaux de muons au Cern, Compass a un rôle unique à jouer, complémentaire à celui des expériences de JLab utilisant des électrons à 6 puis 12 GeV.

Pour l'IN2P3, il est à noter que les projets d'analyse sur les jets, photons, quarkonia et saveurs lourdes ouvertes pour tous ces systèmes sont également une priorité de la communauté CMS Ions Lourds pour les prochaines années.

À l'horizon 2018, le projet Panda, installé à Fair, pourrait mobiliser une partie importante de la communauté scientifique européenne en physique hadronique. Les physiciens de l'IN2P3 sont leaders en termes d'étude de la structure électromagnétique du proton et de processus exclusifs durs pour accéder avec une grande précision à des domaines cinématiques peu ou totalement inexplorés en parfaite complémentarité avec les programmes de JLab et Compass.

En parallèle des efforts portés sur Spiral2, la communauté des physiciens nucléaires travaillant sur des expériences à basse énergie porte un programme expérimental d'étude des noyaux dans des conditions extrêmes (noyaux exotiques, noyaux déformés, noyaux super-lourds) auprès des installations existantes : notamment Ganil-Spiral1, Alto, ILL, Isolde, Riken avec en particulier la mise en œuvre du dispositif Minos pour la spectroscopie des noyaux

riches en neutrons, Dubna avec la nouvelle installation Gabriela pour l'étude des noyaux très lourds et Jyväskylä. Les mécanismes de réaction sont aussi à l'étude avec les recherches sur la fission, sur la capture, notamment auprès de NTOF au Cern, et sur le processus de spallation.

À plus long terme

Concernant la structure du noyau atomique, pour atteindre des régions encore plus éloignées de la vallée de stabilité des noyaux, le projet européen Eurisol de nouvelle génération d'ions radioactifs produits par la méthode Isol est à l'étude.

Concernant le plasma de quarks et gluons, de nouvelles idées ont émergé récemment avec les projets Chic et After (cibles fixes au LHC) qui devraient permettre de mettre en évidence la séquence de déconfinement.

Concernant la structure du nucléon, un projet de collisionneur électron-ion (EIC) à hautes énergie et luminosité pourrait être envisagé pour des études ultra précises dans une région cinématique où la mer de quarks et gluons domine et où les phénomènes de saturation des distributions de gluons sont importants.



▲ L'injecteur d'ions légers Spiral2 dans sa casemate à l'Irfu avant d'être livré au Ganil fin 2012.

1. Les distributions généralisées de partons (ou GPD, de l'anglais Generalized Parton Distribution) décrivent la structure du nucléon en termes de corrélations de partons (quarks et gluons) d'impulsions différentes

2. La chromodynamique quantique (ou QCD, de l'anglais Quantum Chromodynamics), est une théorie physique qui décrit l'interaction forte, l'une des forces fondamentales qui maintient ensemble les quarks au sein des nucléons et est donc responsable de la cohésion des noyaux atomiques.

Astroparticules et cosmologie

Dans le domaine des astroparticules, les programmes de l'IN2P3 et de l'Irfu sont relativement proches. Néanmoins, ils présentent des différences de stratégie significatives selon les thématiques.

Programmes prioritaires

Dans le domaine de l'astronomie gamma, le remarquable succès de Fermi et de Hess, prolongé par la mise en œuvre récente du télescope de 28 mètres de Hess-II, a permis la détection d'environ 60 pourcent de l'ensemble des sources gamma de très haute énergie. Ce succès conduit la communauté française (INSU, IN2P3 et Irfu) à soutenir fortement le projet mondial CTA (Cherenkov Telescope Array), dont le lancement pourrait avoir lieu à partir de 2015.

La cosmologie connaît par ailleurs actuellement un véritable âge d'or, avec une excellente visibilité des groupes français dans des

projets comme SNLS/SNF, Boss ou encore Planck. Après le succès du programme SNLS, la participation au programme LSST, programme majeur d'observation au sol à l'horizon 2020, s'avère être une forte priorité pour l'IN2P3, avec des contributions importantes à l'électronique et à la caméra. Dans l'attente de l'exploitation de LSST, une participation à DES (Dark Energy Survey) pourrait être envisagée.

De son côté, l'Irfu étudie des contributions aux projets eBoss et BigBoss permettant de préparer et de compléter le programme de physique de Euclid aussi bien concernant le signal BAO¹ que sur le cisaillement gravitationnel.



▲ L'observatoire international Hess 2, en Namibie.

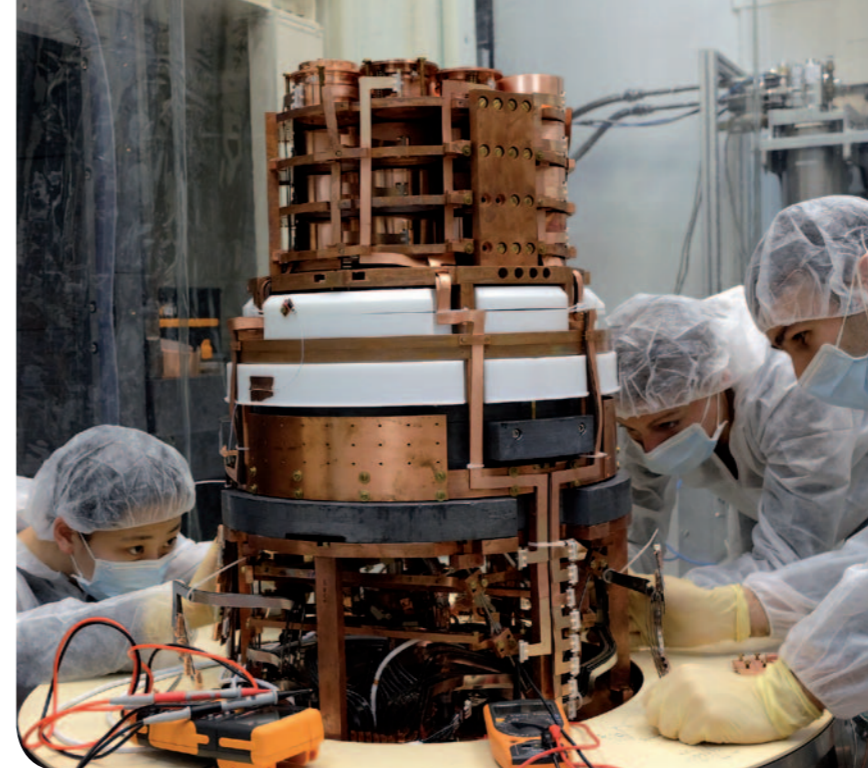
L'Irfu, l'IN2P3 (et l'INSU) s'engagent dans le projet spatial Euclid, avec des responsabilités importantes sur les détecteurs infrarouges et le segment sol.

Grâce à sa contribution majoritaire, aux côtés de l'INP et de l'INSU, l'IN2P3 confirme par ailleurs son fort soutien au projet Advanced Virgo, qui doit mener à la découverte des ondes gravitationnelles aux alentours de 2016, avec de fortes contributions instrumentales côté IN2P3.

La communauté neutrino française est impliquée dans un ensemble de projets et expériences au meilleur niveau international. Au-delà de la poursuite jusqu'à l'horizon 2018 de l'expérience T2K, une convergence des acteurs français dans une expérience « long baseline », devant conduire à la détermination de la hiérarchie des masses puis à une couverture optimale de la violation de CP dans le secteur des neutrinos, est actuellement à l'étude. Les deux instituts confirment leur soutien à une telle participation, en cohérence avec la stratégie dans ce domaine.

Concernant les recherches sur la désintégration double bêta, dans lesquelles ne sont actuellement impliquées que des équipes de l'IN2P3, la ligne majeure reste le projet Super-Nemo, dans sa phase de démonstration, avec une phase d'exploration de la technique des bolomètres scintillants en collaboration avec l'Irfu qui pourrait déboucher sur une collaboration franco-italienne.

Dans le domaine de la recherche directe de matière noire, les deux instituts ont jusqu'à présent focalisé leurs recherches sur l'optimisation des détecteurs cryogéniques et l'expérience Edelweiss. Au-delà de l'exploitation optimale de la phase Edelweiss-III, la stratégie française dans ce domaine reste à définir mais il sera nécessaire de tenir compte des compétences acquises dans le domaine des détecteurs cryogéniques pour l'étude du CMB²-polarisation. La possibilité d'accroître l'investissement dans le projet Xenon-1ton sera étudiée.



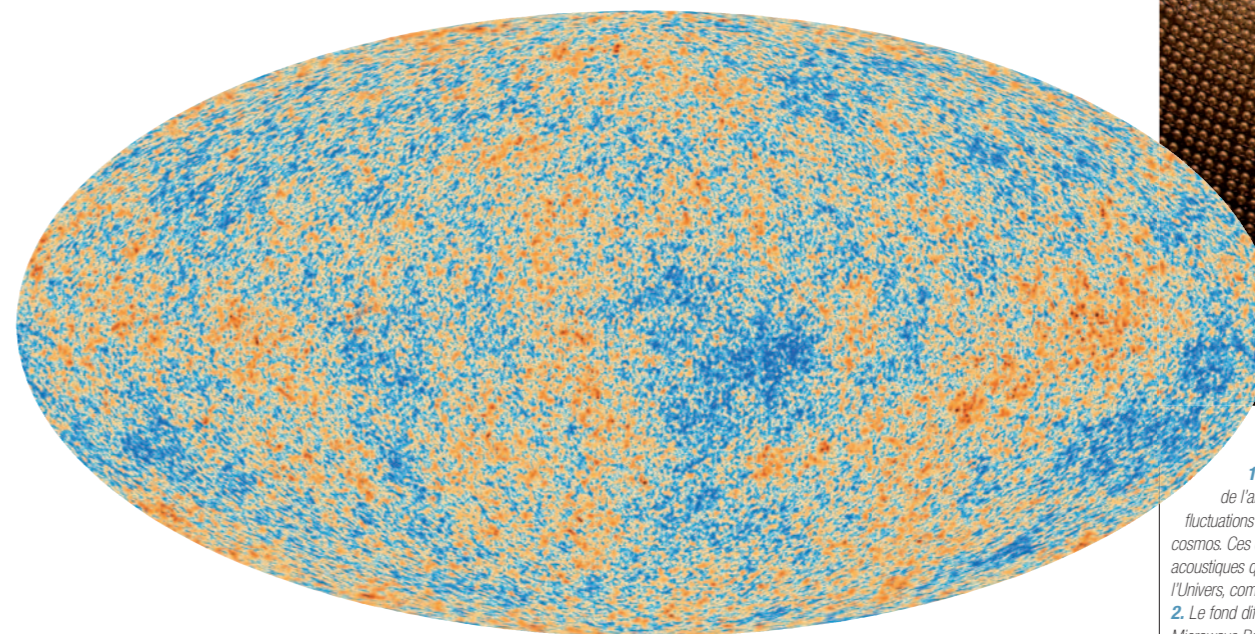
▲ Finalisation du montage des 36 détecteurs de l'expérience Edelweiss 3 avant refroidissement à 15mK et mise en mesure pour plusieurs mois.

▼ Détecteur géant Super-Kamiokande utilisé dans l'expérience T2K au Japon. En bas de l'image, une équipe inspecte le détecteur pendant qu'il est encore vide.

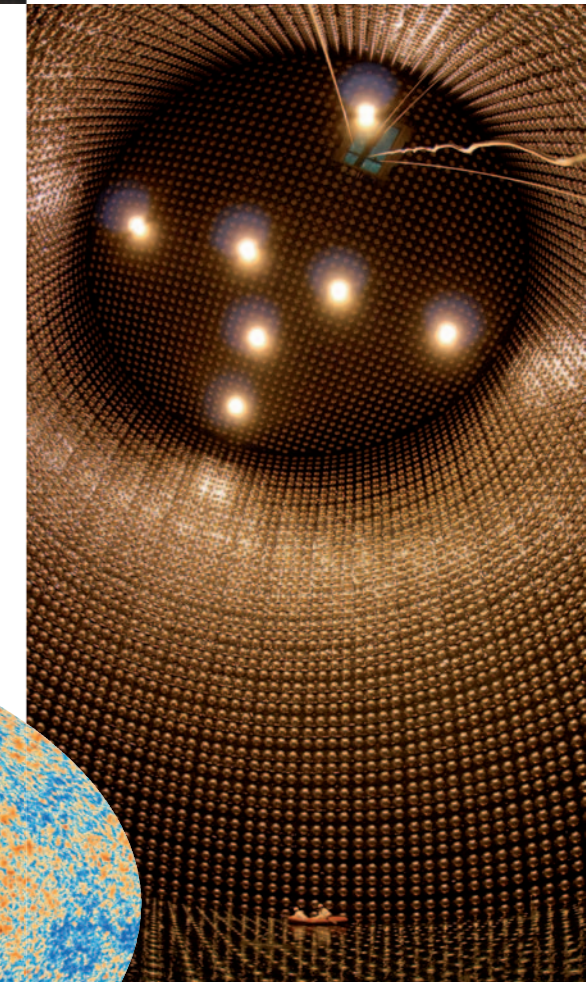
Autres programmes

La communauté étudiant le rayonnement cosmique aux énergies extrêmes (10^{18} - 10^{20} eV) est actuellement impliquée principalement dans le projet Auger, dont la collaboration doit définir prochainement la stratégie d'upgrade expérimental à l'horizon 2015. Ces développements expérimentaux pourraient mener à une extension du site de détection à l'horizon 2018-2020. La voie spatiale est également explorée, avec dans un premier temps le test Euso-Ballon soutenu par le Cnes.

Dans le domaine de l'astronomie neutrino, la contribution des équipes de l'Irfu et de l'IN2P3 a été essentielle pour le succès du projet Antares. Néanmoins, la collaboration KM3 a tardé à démontrer une stratégie optimale et commune au niveau européen. La détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos à travers les projets Orca ou une expérience « very long baseline » (USA ou Russie) est un axe actuellement à l'étude qui pourrait constituer une réorientation et une convergence renforcée du projet.



▲ Carte de la température du rayonnement fossile issue des observations réalisées par le satellite Planck.



1. Les oscillations acoustiques de baryons (ou BAO, de l'anglais Baryon acoustic oscillations) sont de subtiles fluctuations périodiques de la densité des galaxies dans le cosmos. Ces oscillations sont les empreintes d'ondes acoustiques qui étaient présentes dans le plasma primordial de l'Univers, composé alors d'électrons, protons et photons.
2. Le fond diffus cosmologique (ou CMB, de l'anglais Cosmic Microwave Background) est le rayonnement le plus ancien qui ait été émis dans l'Univers. Son observation permet de reconstituer avec précision le contenu ainsi qu'une grande partie de l'histoire de l'Univers.

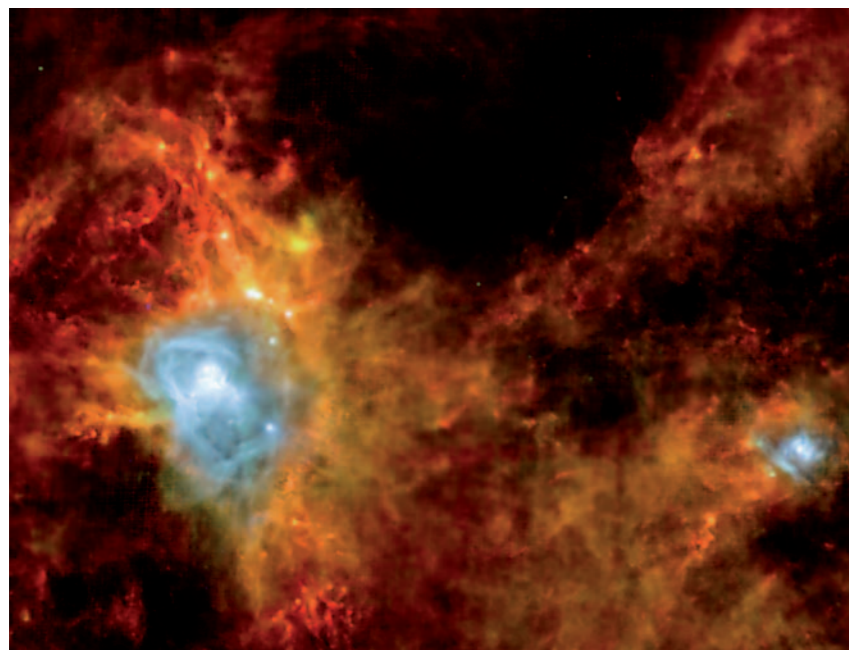
Astrophysique

structuration de l'Univers

À l'Irfu, les recherches en astrophysique consistent à étudier la formation et l'évolution des galaxies, des amas de galaxies, des étoiles et des planètes. Les infimes inhomogénéités observées dans le fond diffus cosmologique par les satellites WMAP et plus récemment Planck constituent les conditions initiales pour la structuration de l'Univers. Le modèle cosmologique dit de « concordance », avec ses deux composantes, matière noire et énergie noire, constitue le cadre théorique de la structuration de l'Univers. Observer la structuration de l'Univers est un moyen de tester le modèle cosmologique. Structuration de l'Univers et cosmologie observationnelle sont donc intimement liées.

Grâce à une combinaison d'observations multi-longueurs d'onde de grandes portions du ciel et de simulations numériques multi-échelles sur des calculateurs massivement parallèles, la compréhension de la structuration de l'Univers a progressé rapidement ces dernières années.

▼ La région Cygnus observée par le satellite Herschel.



Ainsi, des simulations numériques de la structure de l'Univers à grande échelle, effectuées avec le code Ramses, ont montré que la croissance en masse des galaxies était alimentée à partir de filaments de gaz froid extragalactique. Des lois d'échelles reliant différents paramètres observationnels pour les galaxies et les amas de galaxies, ont été établies grâce à la constitution de catalogues d'objets obtenus à partir de grandes cartographies du ciel (Herschel, XMM, Planck, Fermi...). Contrairement aux attentes, il a été montré que les collisions de galaxies ne jouaient qu'un rôle mineur dans l'histoire de la formation des étoiles, un désaccord entre la fonction de masse des amas de galaxies déduite des observations et celle prédite par la modélisation ayant été mis en évidence. Un pas important dans la compréhension de la formation des étoiles a en outre été franchi en observant que celles-ci se formaient dans des filaments à l'intérieur des galaxies. Une nouvelle composante du milieu interstellaire (gaz sombre) a notamment été découverte avec les satellites Fermi et Planck. L'intérieur des étoiles a quant à lui été révélé grâce à l'astérosismologie (Corot, Kepler); une modélisation plus poussée des étoiles, prenant en compte des effets dynamiques (rotation, le champ magnétique...), est à présent nécessaire. Un nouveau modèle pour la formation des satellites des planètes du système solaire (satellites formés à partir des anneaux de poussières) a par ailleurs été établi (Cassini).

Les nouveaux questionnements suscités par les découvertes récentes feront l'objet des recherches dans le cadre de la prochaine génération d'observatoires.

Programmes prioritaires

LES OBJECTIFS POUR LES PROCHAINES ANNÉES SONT :

1 | Poursuivre l'exploitation scientifique :

- des résultats obtenus avec les observatoires en opération, notamment dans le domaine submillimétrique (Alma, Apex/Artémis, Iram-Noema) pour répondre aux questions posées par les découvertes faites avec Herschel dans le domaine de l'évolution des galaxies et de la formation des étoiles;
- des grandes bases de données fournies par Herschel, Planck, par exemple pour la détermination plus précise de la fonction de masse des amas de galaxies, Kepler pour les études d'astéro-sismologie d'ensemble, Fermi pour établir de nouveaux catalogues de sources...;
- avec les calculateurs massivement parallèles, régulièrement mis à niveau dans le cadre de Genci au niveau français et de Prace au niveau européen.

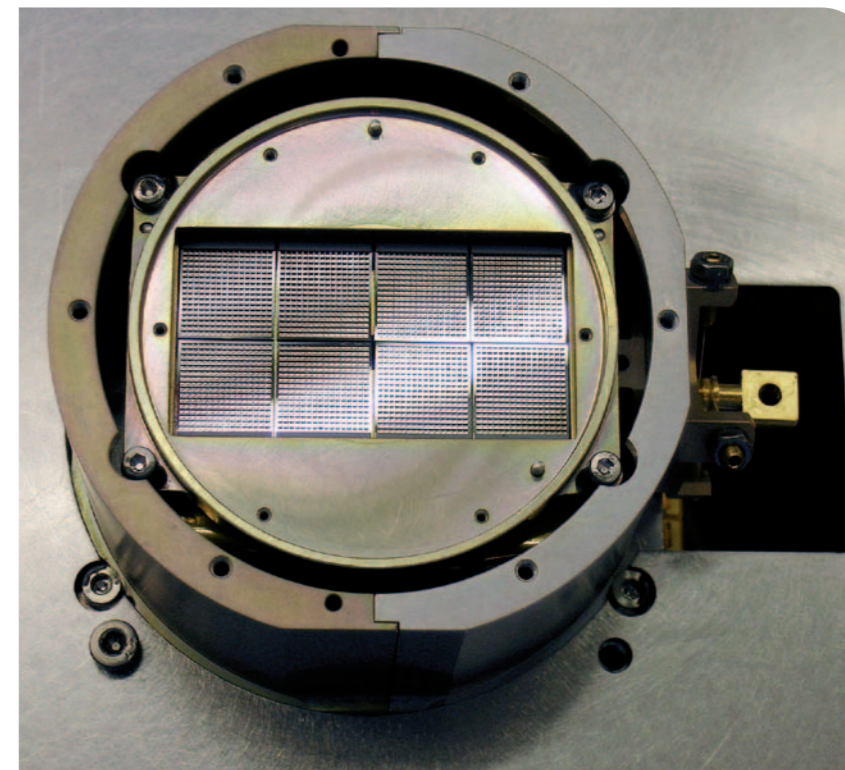
2 | Veiller à la bonne réalisation de l'instrumentation, du segment sol et de la préparation de l'exploitation scientifique pour les programmes suivants :

dans l'Espace :

- le JWST (évolution des galaxies, formation des étoiles, caractérisation des exoplanètes; participation à l'instrument Miri; lancement en 2018);
- Euclid (évolution des galaxies; participation au management, aux instruments VIS et Nisp, au segment sol; lancement en 2020);
- Svom (étude des sursauts gamma; participation aux instruments Eclairs et MXT et au segment sol; lancement vers 2020).

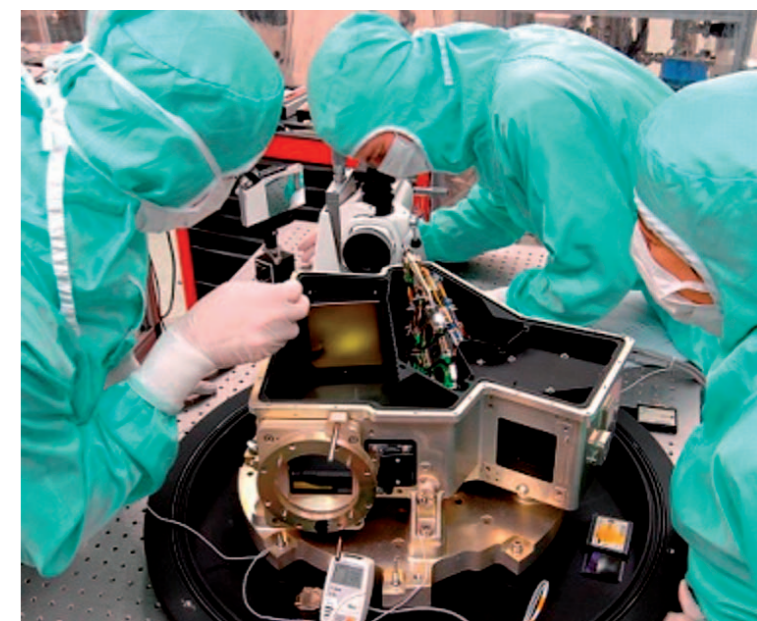
au sol :

- l'E-ELT (évolution des galaxies, formation des planètes...; participation à l'instrument Metis; en opération vers 2024);
- CTA (rayonnement cosmique; participation au segment sol; en opération vers 2018).



▲ Camera Pacs d'Herschel constituée de 8 matrices de bolomètres réalisées au CEA. Chaque matrice contient 256 pixels soit au total 2000 pixels pour une voie de l'imageur Pacs.

▶ Modèle de vol de l'imageur Mirim en cours de test au service d'astrophysique de l'Irfu.



Dans un avenir plus lointain

Nous soutenons une mission spatiale d'étude des exoplanètes (mission Echo ou Plato dans le cadre de la mission M3 du programme Cosmic-Vision de l'ESA; lancement en 2024) et un observatoire dans le domaine

du rayonnement X (mission Athena+ dans le cadre de la mission L2 du programme Cosmic-Vision de l'ESA; lancement en 2028) qui permettra notamment de poursuivre les observations multi-longueurs de l'Univers.

Pour préparer l'avenir à long terme, il est nécessaire de soutenir une R&D très active dans le domaine de l'instrumentation et en particulier des capteurs innovants pour l'astrophysique.

Accélérateurs

La physique et la technologie des accélérateurs constituent une discipline scientifique qui est au service des sciences de la matière, des sciences et technologies de l'énergie et des sciences du vivant, et qui a conduit à de nombreuses applications spécifiques dans les domaines de la santé et de l'industrie.



▲ Coupleurs de puissance permettant d'atteindre de hautes fréquences dans les cavités accélératrices de XFEL. Ceux de l'ILC seront basés sur la même technologie. Salle blanche du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) à Orsay.

construction de Soleil, et le début de la construction de Spiral2, elle a été très riche à la fois en projets et en programmes de R&D, qui ont été en grande partie définis par la préparation des projets accélérateurs inclus dans la liste Esfri² tels que Fair, XFEL, ESS, HL-LHC et ILC-Clic.

Programmes prioritaires

La décennie 2009-2018 est, quant à elle, très riche en termes de projets de construction d'accélérateurs tels que Spiral2, Linac4, XFEL, Fair, IFMIF-Eveda, ThomX, suivis par HL-LHC, ESS et Myrrha. La concrétisation de la construction de ces nombreux accélérateurs est une véritable consécration du travail de R&D effectué dans la période précédente et

s'appuie très largement sur des contributions 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 faisceaux d'ions de haute intensité, les canons à électrons et les sources de positrons innovantes.

Actuellement, ces projets mobilisent la plus grande partie des personnels scientifiques et techniques des laboratoires français impliqués.

À la lumière de la découverte du boson de Higgs, la physique des particules a établi sa stratégie.

Le volet recherche et développement s'articule aussi bien autour d'une démarche de recherche scientifique fondamentale visant à étudier et développer des méthodes novatrices voire révolutionnaires (RFQ¹, stockage d'antiparticules, laser à électrons libres, accélération « laser-plasma »), que d'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, photo injecteurs radiofréquence (RF), schémas de collision « en crabe », etc.).

Les phases de construction et d'opérations relatives au fonctionnement des accélérateurs, qui nécessitent des démarches de conduite de projet, consistent en la fabrication de systèmes accélérateurs majoritairement dans l'industrie mais également en laboratoire, et le pilotage des accélérateurs qui sont en exploitation. Ces aspects sont maîtrisés à un excellent niveau par les laboratoires français.

Si la décennie 1999-2008 a été dominée par la fin de la construction du LHC, la

Programmes prioritaires

Dans ce cadre, les activités dans le domaine des accélérateurs se focaliseront sur les objectifs suivants :

- développement de cavités accélératrices à haut gradient, de préférence suivant la technologie supraconductrice en niobium (Nb) massif et en dépôt de couches supraconductrices (R&D) ;

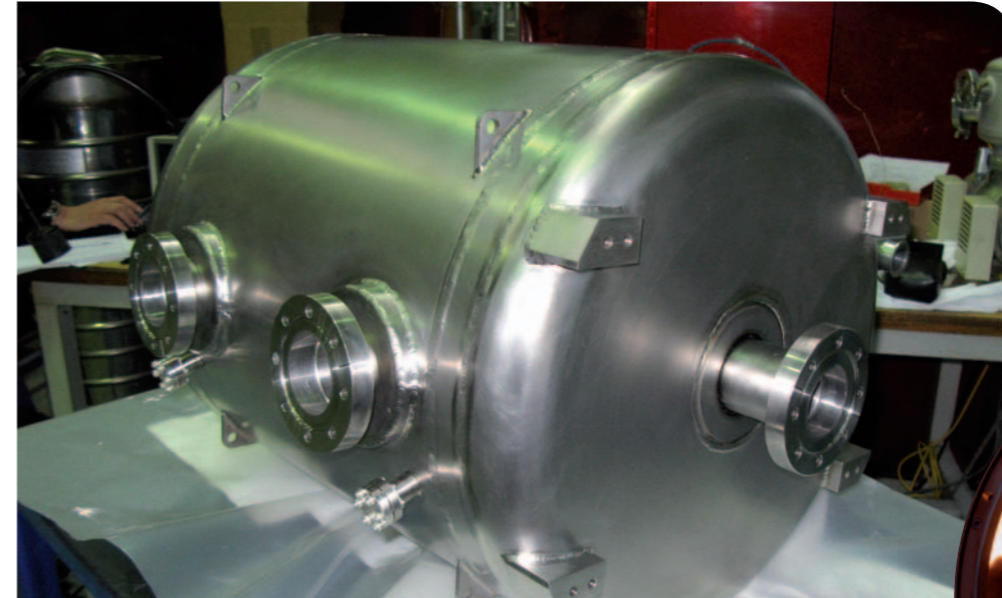
- développement de cryomodules accélérateurs à faibles pertes cryogéniques et puissance moyenne RF élevée pour le fonctionnement en CW (mode continu) sur un anneau ;
- développement d'aimants à haut champ basés sur les supraconducteurs à haute température critique, incluant aussi une importante activité sur le niobium étain (Nb3Sn) ;

Les applications des accélérateurs nécessitent des développements dans plusieurs domaines :

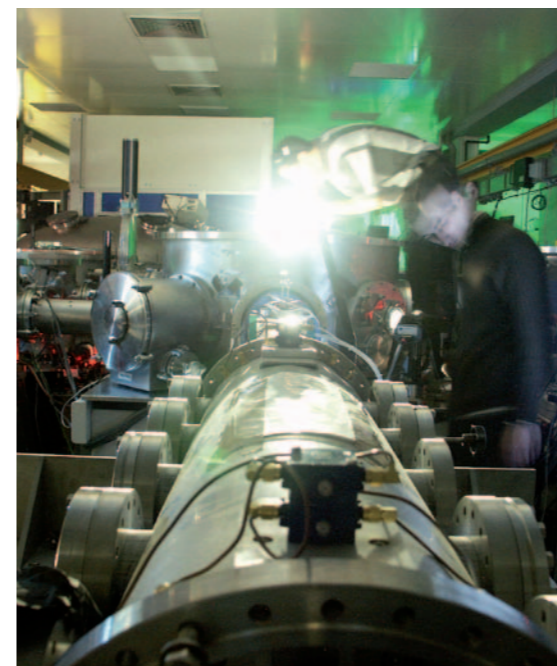
- cryomodules accélérateurs à faibles pertes cryogéniques et puissance moyenne RF élevée pour le fonctionnement en CW pour les sources de lumière de 4^e génération ;
- fiabilité extrême nécessaire aux accélérateurs ADS ;
- interaction faisceau/laser pour les sources Compton compactes et les sources de lumières en mode Sase³.

Les projets innovants (ELI-NP, Cilex) se développent de la façon suivante :

- accélération laser-plasma d'électrons multi-étage ;
- source de protons basée sur l'irradiation d'une cible hydrogène par un laser de puissance (e.g. Ican).



▲ Cavité Triple-Spoke pour le projet Eurisol.



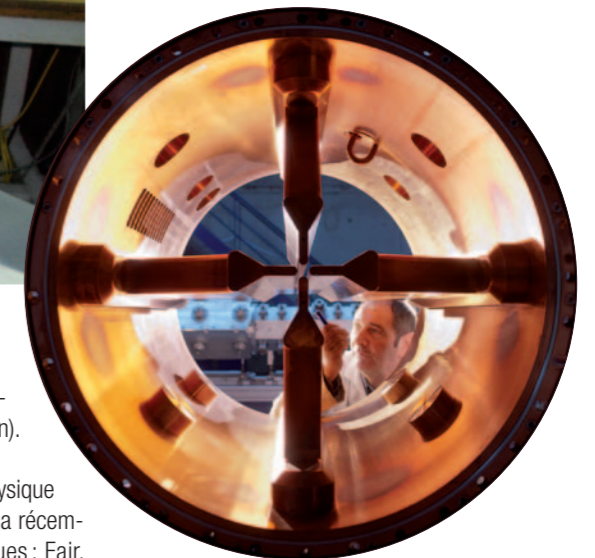
▲ Étude d'interactions par ondes laser-plasma (équipe Galop du Laboratoire Leprince-Ringuet - LLR) : vue d'ensemble de la ligne de focalisation.

- développement de sources d'électrons et de positons (polarisés ou non).

De même, la communauté en physique nucléaire, coordonnée par Nupecc, a récemment confirmé ses axes stratégiques : Fair, Spiral2 (phase 2 en particulier), et Eurisol.

Pour ce faire, les activités « accélérateurs » doivent répondre aux objectifs suivants :

- développement de cryomodules accélérateurs à haut champ pour les particules non-relativistes, à puissance RF élevée et à faibles pertes cryogéniques ;
- développement de sources d'ions hydrogène de haute intensité et de leurs injecteurs à base de cavité RFQ ;
- développement de sources d'ions lourds de haute intensité ;
- développement de cibles résistant à de forts courants et avec une grande capacité de relâchement pour la production de faisceaux radioactifs ;
- maîtrise des faisceaux multi-mégawatts.



▲ Tronçon de 1 m du quadripôle à radiofréquence (RFQ) de Spiral2, qui en comprendra 5.

Outre les actions par domaine, des actions transverses doivent être favorisées :

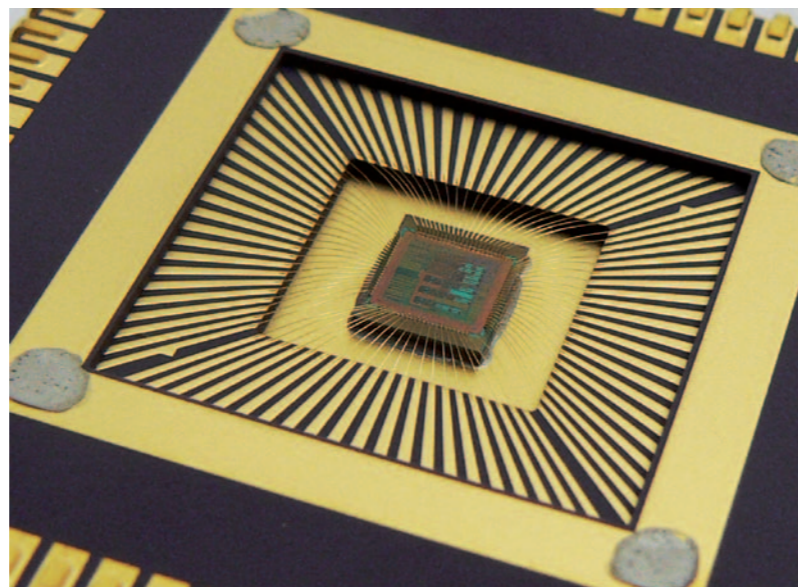
- investissement dans les plateformes technologiques au sein des laboratoires en privilégiant la complémentarité entre organismes tutelles ;
- soutien prépondérant aux projets ou programmes de recherche accélérateurs « amont », seule façon d'en assurer la nécessaire continuité sur plusieurs années.

1. RFQ (Radiofrequency Quadrupole) : cavité radiofréquence qui combine les fonctions d'accélération et de focalisation.
2. European Strategy Forum on Research Infrastructures.
3. Self-Amplified Spontaneous Emission.

Instrumentation

Les enjeux et évolutions liés à l'instrumentation à l'IN2P3 et l'Irfu présentent des spécificités identifiées de longue date, 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.

L'instrumentation 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 entraînent, inéluctablement, un fossé grandissant entre chercheurs spécialisés en analyse des mesures et acteurs du développement instrumental.



▲ « Caloric » : circuit intégré traitant les signaux des cellules du calorimètre électromagnétique devant équiper le futur collisionneur linéaire ILC.

Programmes prioritaires

Les performances des 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 (Micromegas).

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, de préserver des équipes compétentes de taille suffisante et de mettre en œuvre des outils collaboratifs.

Enfin, on note l'acquisition de compétences nouvelles concernant la réalisation d'instruments pour les expériences en orbite (AMS, Fermi, Herschel, JWST, Euclid, ...). Les contraintes spatiales (sur les matériaux utilisés, le comportement thermique, la consommation, le poids, la résistance aux vibrations et aux radiations, l'électronique, la redondance des systèmes...) doivent être intégrées dès la

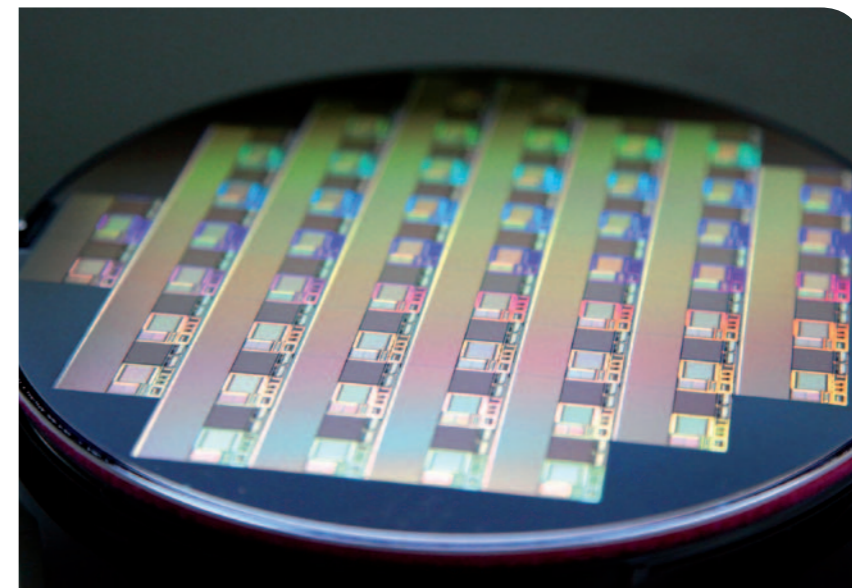
Programmes prioritaires

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. L'ampleur des développements considérés pour les futurs grands instruments (télescopes CTA, nouveaux détecteurs pour les upgrades LHC...) va certainement faire évoluer les méthodes utilisées pour la production et la caractérisation des ensembles de détection.

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. En effet, dans un contexte de ressources en diminution et de complexité technique croissante, il est important et nécessaire de développer les réseaux d'experts afin de partager au mieux les savoir-faire acquis entre projets et entre laboratoires.

Il est important aussi de maintenir et entretenir les outils communs (IAO/CAO, gestion électronique de documents - GED, projet) ainsi que leur gestion centralisée pour faciliter les communications entre laboratoires et entre projets. Ils sont un facteur important de cohésion et d'efficacité de même que les formations spécifiques.

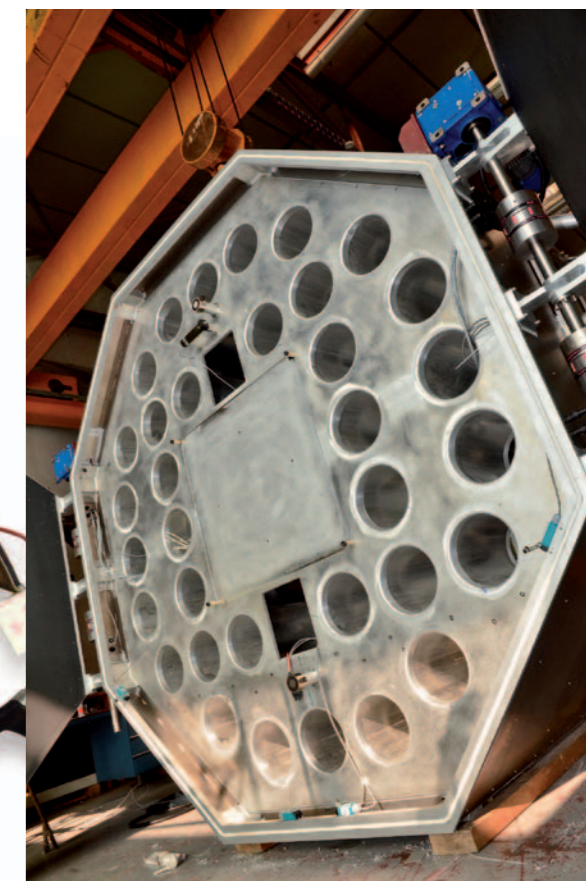
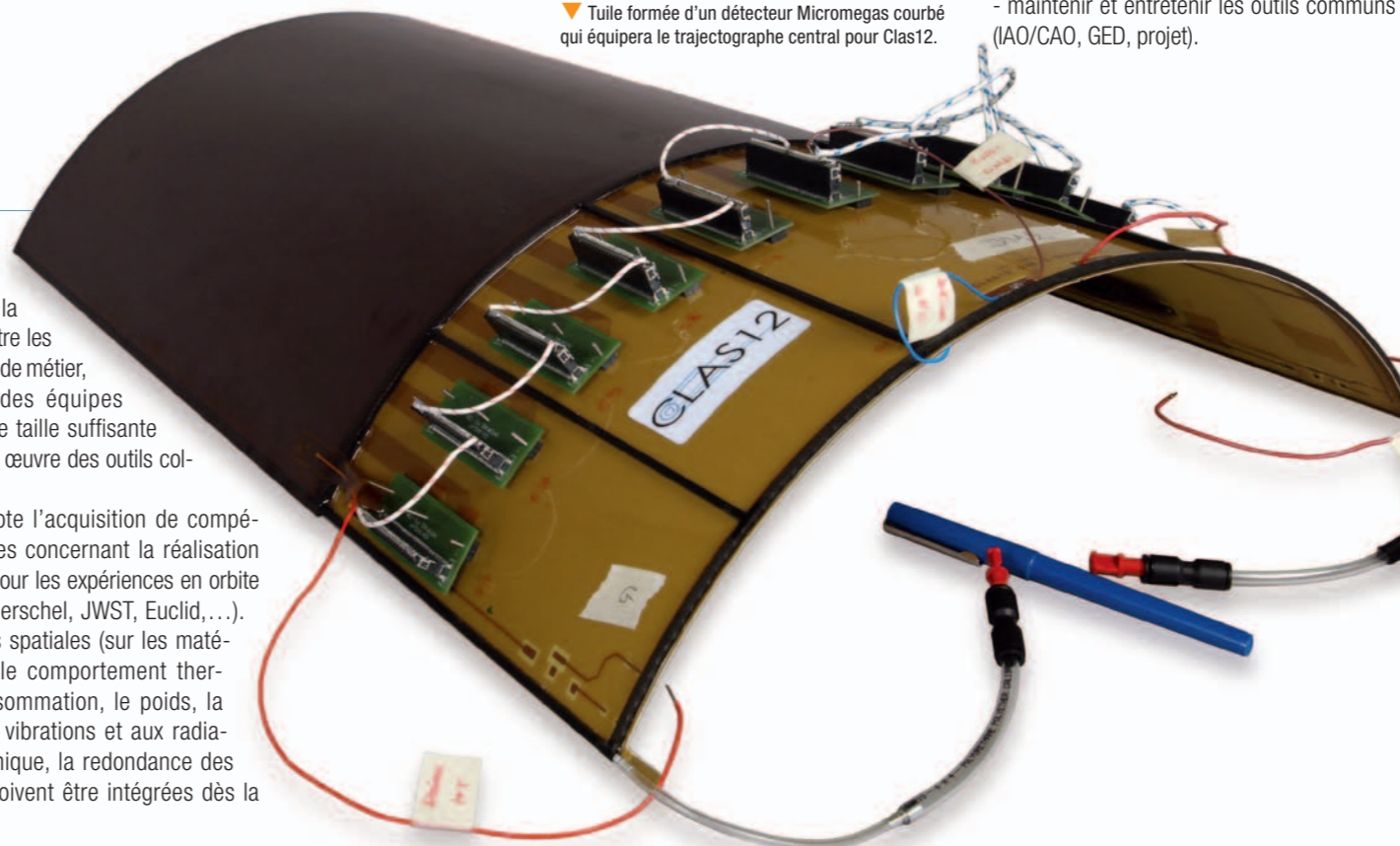
▼ Tuile formée d'un détecteur Micromegas courbé qui équipera le trajectographe central pour Clas12.



▲ Wafer de capteurs CMOS «Mimosa» conçus à l'Institut pluridisciplinaire Hubert-Curie (IPHC) à Strasbourg.

Objectifs :

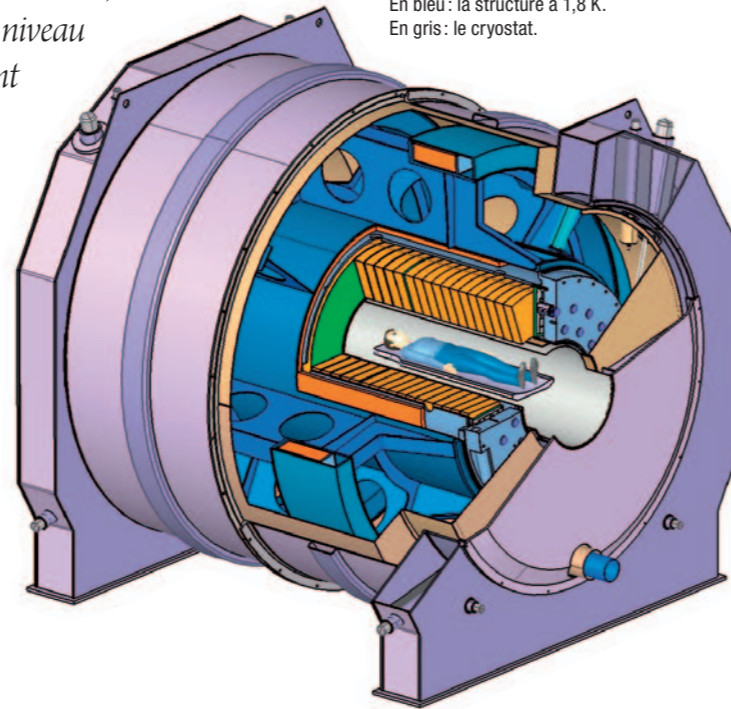
- maintenir une activité soutenue de R&D en instrumentation ;
- maintenir les outils de simulation de type multi-physique et développer les simulations en parallèle ;
- renforcer les compétences nécessaires à la réalisation d'instruments pour les expériences en orbite ;
- développer les réseaux d'experts ;
- maintenir et entretenir les outils communs (IAO/CAO, GED, projet).



▲ Prototype de mécanique de caméra (projet Gate) pour le réseau de télescopes CTA.

Cryo-magnétisme et cryogénie

L'Irfu a contribué à la construction des très grands aimants des détecteurs Atlas et CMS du Cern. Aujourd'hui, l'Institut se positionne comme un acteur majeur, au niveau international, dans la conception et le développement des grands aimants supraconducteurs, instruments qui jouent un rôle central en physique de l'infiniment petit. Le positionnement de l'Institut dans ce domaine est complété par une stratégie de coopération active avec d'autres grands laboratoires européens, en particulier le Cern, et par une forte contribution aux programmes cadres de l'Union européenne ainsi que par des programmes de R&D spécifiques sur l'utilisation des supraconducteurs à haute température critique.



▼ Coupe de l'aimant Iseult de 11,7 T.
En orange : les bobinages supraconducteurs.
En bleu : la structure à 1,8 K.
En gris : le cryostat.

Programmes prioritaires

PROGRAMMES EN COURS :

- la construction et la mise en service de l'aimant Iseult qui devrait être testé en 2014 et deviendra alors l'aimant d'IRM le plus puissant au monde ;
- les tests à froid de l'aimant Glad du spectromètre R3B, qui devraient s'achever en 2013 et qui conditionnent la livraison et la mise en service de cet aimant à GSI¹ en 2014 ;
- les discussions avec le GSI, le BMBF² et la collaboration Fair quant au travail d'ingénierie à fournir sur les 24 dipôles supraconducteurs du spectromètre SuperFRS.

PROGRAMMES ET R&D EN PERSPECTIVE

L'Institut contribue aux recherches et développements sur les aimants de focalisation et sur

les aimants à fort champ pour les projets de montée en luminosité et en énergie HL-LHC et HE-LHC. C'est un axe fort pour la suite de l'activité « aimants ». Ces travaux ont été identifiés comme critiques dans le cadre de la stratégie européenne en physique des particules.

Cette collaboration, dont l'accord devrait être signé fin 2013, devrait compléter l'activité de l'Irfu sur la R&D consacrée aux nouveaux supraconducteurs à haut champ ou à haute température critique.

L'Irfu poursuit cette R&D dans différents cadres :

- le projet Smes de stockage d'énergie, un partenariat avec la DRT³/CEA ;
- le projet européen SR2S de toroïde géant à considérer dans le cadre d'un voyage vers mars ;

- R&D, en collaboration avec le LNCMI⁴, pour la construction de l'aimant hybride à très fort champ ;

- les tests prévus de 2014 à 2016 des 18 bobines du Tokamak JT60-SA.

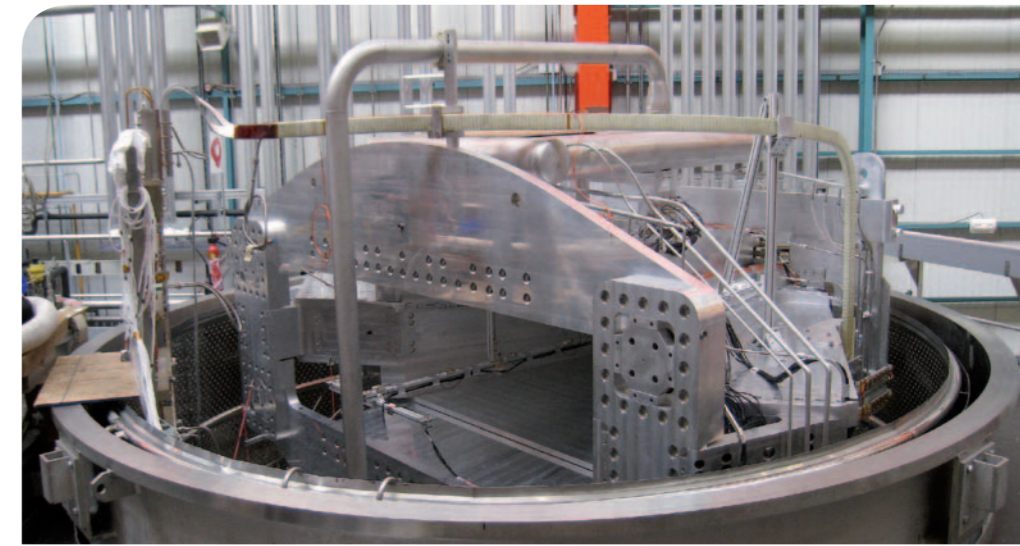
Les aimants dans le domaine de la physique subatomique se caractérisent par leur taille importante, leur grande complexité, leur performances aux limites de la technologie, leur exigence de fiabilité et de sûreté. Ainsi, il est essentiel de se doter de moyens d'intégration et d'essais de haut niveau permettant une R&D de premier rang international pour leur mise en œuvre opérationnelle. Au cours des ans, profitant à la fois des projets de construction et des programmes internationaux de R&D, l'Institut a réussi à construire un ensemble de stations d'essais important, cohérent et performant.

Programmes prioritaires

La cryogénie

Dans ce contexte, la « cryogénie » constitue un outil indispensable à la réalisation et à l'exploitation de nombreux instruments de physique. Il s'agit en particulier des accélérateurs de particules avec les aimants supraconducteurs et les cavités supraconductrices ainsi que, dans le domaine des expériences en physique des particules et en physique nucléaire, des grands aimants supraconducteurs, des cibles cryogéniques et de l'utilisation de détecteurs fonctionnant à basse température. La réalisation de tous ces équipements et instruments nécessite une maîtrise technique approfondie de la conception mécanique des cryostats et du refroidissement de leurs différents éléments constitutifs. Cette maîtrise s'appuie sur la mécanique des fluides à très basse température, et sur un corpus de connaissances technologiques fondées d'une part sur l'expérience acquise avec les fluides couramment utilisés (azote, hydrogène et hélium) et d'autre part sur la réalisation pratique des cryostats. Les applications cryogéniques exigent également la mise en œuvre de deux techniques complémentaires :

- la production et la distribution de liquides cryogéniques ;



▲ Test de la masse froide du spectromètre supraconducteur de grande acceptation Glad de l'ensemble de détection R3B (reactions with relativistic radioactive beams of exotic nuclei) dans un des cryostats de la station d'essai W7-X de l'Irfu.

- l'instrumentation spécifique et le pilotage (automatisation et sécurité) que nécessitent les dispositifs très sophistiqués associés à l'utilisation des dits liquides cryogéniques.

Les récentes évolutions de la cryogénie se traduisent non seulement par l'apparition de systèmes de plus en plus puissants pour les grands projets internationaux (Cern-LHC, LHC, ESS) mais aussi par la généralisation des cryogénérateurs qui permettent de refroidir les équipements de tailles petite et moyenne, d'une façon simple et autonome.

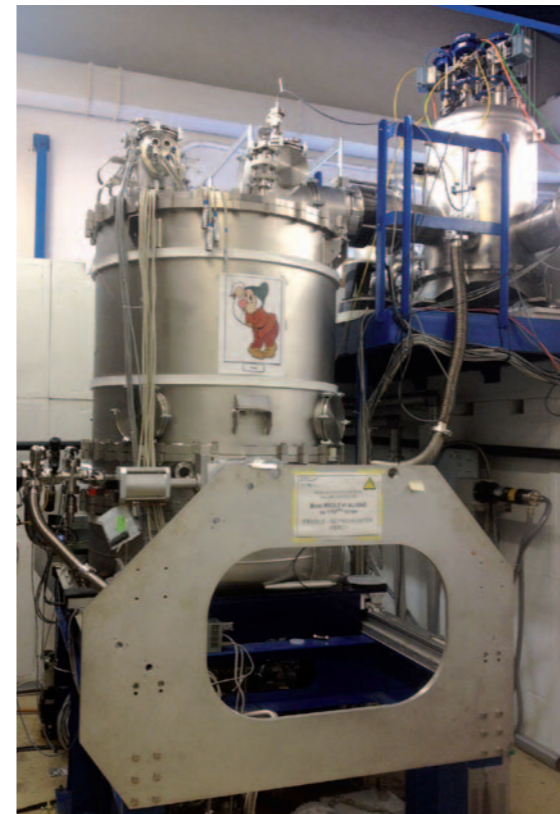
Comme discipline scientifique autonome, la cryogénie réalise également des progrès remarquables dans le domaine des simulations numériques sur les échanges thermiques finaux et les scénarios de défaut, et dans le domaine expérimental avec la mesure de plus en plus précise des caractéristiques des matériaux.

Les enjeux stratégiques pour les laboratoires IN2P3 et Irfu sont le renouvellement des installations cryogéniques existantes qui sont souvent vieillissantes et fortes consommatrices d'énergie, et la relève des spécialistes, en tenant compte du très long temps nécessaire pour acquérir les compétences

requises. Les laboratoires collaborent déjà sur les grands projets et la R&D. Ces synergies existantes ont naturellement vocation à être enrichies.

Objectifs :

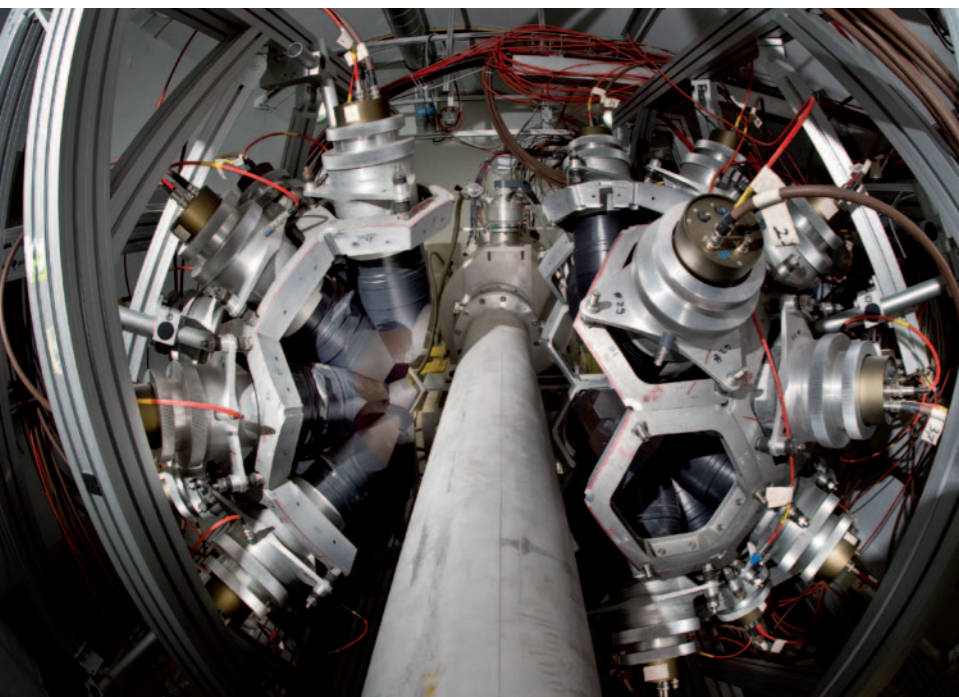
- renouveler et faire évoluer les installations cryogéniques ;
- maintenir les compétences très pointues ;
- renforcer les synergies et complémentarités entre laboratoires.



◀ Cryomodule B pour le projet Spiral2 en test à l'Institut de physique nucléaire (IPN) d'Orsay.

1. Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, centre allemand de recherche sur les ions lourds.
2. Bundesministerium für Bildung und Forschung, ministère fédéral allemand de l'enseignement et de la recherche.
3. Direction de la recherche technologique.
4. Laboratoire national des champs magnétiques intenses (CNRS/Insa Toulouse/Université Toulouse 3/Université Joseph-Fourier).

Depuis 1991, la communauté des physiciens nucléaires de l'IN2P3 et de l'Irfu s'est organisée autour de la thématique de l'énergie nucléaire de fission. Grâce à son savoir-faire et à ses compétences, elle est reconnue comme un acteur à part entière dans ce domaine. Les recherches, souvent à caractère interdisciplinaire, sont menées en collaboration étroite avec les autres acteurs du domaine au niveau français (CNRS, CEA/DEN¹, EDF, Areva...), européen (projets PCRD) et mondial (AIEA, Forum Génération IV).



▲ Le détecteur n-tof.

Ces partenariats attestent par ailleurs du besoin des industriels et des acteurs historiques du nucléaire en une R&D non directement technologique, c'est-à-dire académique et exploratoire, et ainsi d'assurer un lien fort entre les approches « universitaires » et « industrielles ».

Capitaliser nos savoir-faire, conserver et développer notre expertise sont les principaux enjeux des années à venir qui permettront en particulier de contribuer aux développements de solutions pertinentes aux problèmes de l'énergie nucléaire, de garder toute notre place dans les débats de société autour de l'énergie mais aussi d'utiliser le caractère pluridisciplinaire des recherches menées pour le mettre à profit dans d'autres domaines de physique et/ou chimie « hors énergie » (surveillance de la non-prolifération, démantèlement d'installations, sûreté et radioprotection) et aussi plus fondamentaux (structure nucléaire, physique des accélérateurs, chimie des radionucléides...).

Les recherches déclinées ci-dessous en trois grands axes ne peuvent être menées qu'avec des installations utiles à beaucoup d'autres domaines de physique et de chimie, et autour desquelles une R&D de haut niveau est aussi indispensable : les accélérateurs, les laboratoires « chauds », des moyens de calculs importants.

Chacun des axes de recherche impliquent de mener de front une recherche fondamentale, indispensable à une avancée

générale des connaissances, une R&D générique, seul gage d'innovation potentielle et de maintien d'une expertise de haut niveau, et des études plus spécifiques sur des systèmes ou des grandeurs particulières.

Programmes prioritaires

NEUTRONIQUE - DONNÉES NUCLÉAIRES

Les progrès dans le domaine des codes de calculs neutroniques font que la précision des simulations est maintenant conditionnée par la précision des données nucléaires utilisées. Des mesures plus précises sont donc nécessaires ainsi que des modèles de réactions nucléaires. Le travail d'évaluation de ces données est indispensable pour déterminer de manière cohérente les paramètres des modèles qui per-



▲ Mesure de la radioactivité lors de la réception d'un échantillon au Laboratoire de physique subatomique et des technologies associées (Subatech) à Nantes.

mettent de constituer des bibliothèques (à leur tour à valider par des mesures intégrales). Ceci met en évidence les allers et retours entre besoins en modélisation et en mesures : alimenter les modèles physiques, mais aussi réduire les incertitudes ou compléter un jeu de données.

Le choix des mesures à effectuer doit résulter d'un compromis entre les besoins pour la compréhension des mécanismes élémentaires de réaction, les demandes spécifiques pour l'étude et la conception de réacteurs et la faisabilité des expériences. Pour mener à bien ce travail, il est essentiel de renforcer les collaborations entre expérimentateurs, théoriciens, physiciens des réacteurs et évaluateurs déjà initiées dans le cadre des projets européens Andes et Chanda. Seule une vision globale et partagée ainsi construite permettra de minimiser le temps nécessaire entre la mesure et sa prise en compte dans la bibliothèque de données évaluées.

Les questions majeures à approfondir concernent la nature et la quantité d'actinides produits dans le cycle, la production de poisons neutroniques et les propriétés de décroissance des noyaux qui jouent un rôle fondamental dans le dimensionnement et le pilotage des

installations. Pour cela, il faudra disposer des installations nécessaires à de telles mesures, accélérateurs (n-tof au Cern, Gelina à Geel (Belgique), NFS à Ganil, Fair) et réacteurs (ILL) ainsi que les équipements associés, détecteurs, cibles minces et moyens de caractérisation. Concernant les mesures intégrales ou semi-intégrales, il conviendra de développer des collaborations spécifiques avec d'autres organismes (CEA/DEN, SCK/CEN, JRC) pour un accès aux installations et dispositifs de mesures (réacteurs maquette et réacteurs de recherche). Les compétences développées d'une part autour de l'ILL et d'autre part autour des expériences Muse et Guinevere sont à renforcer ainsi que des collaborations fortes entre expérimentateurs et évaluateurs.

POUR L'IN2P3, D'AUTRES THÉMATIQUES PRÉSENTÉES CI-DESSOUS SONT ÉGALEMENT PRIORITAIRES :

- études de systèmes et de scénarios

Au cœur des recherches sur l'énergie nucléaire, cette thématique situe le cadre général des sujets abordés : déploiement de réacteurs innovants, exploration de nouvelles stratégies comme l'utilisation du cycle thorium, transmutation des actinides mineurs en systèmes critiques et sous-critiques.

Il conviendra de perfectionner les nouvelles méthodes de simulation adaptées à tout type de réacteurs mises au point précédemment afin notamment d'y inclure des aspects relatifs à la sûreté. En particulier, la faisabilité des systèmes innovants ne pourra être garantie que par des prédictions fiables du comportement global des réacteurs lors de transitoires. À cet égard, il sera important de renforcer et même développer nos compétences en matière de sûreté, de cinétique des réacteurs et de thermo-hydraulique. Les outils d'analyse de sensibilité et d'incertitude sont indispensables pour mieux appréhender les marges de sûreté nécessaires et les besoins d'amélioration des données nucléaires. Enfin, il faudra envisager des études de scénarios de déploiement en y incluant notamment des aspects technico-économiques.

Dans ce cadre, les principaux systèmes innovants alternatifs à étudier sont les réacteurs à sels fondus (Molten Salt Fast Reactor), les systèmes sous-critiques (ADS - Accelerator Driven System) et les réacteurs innovants à eau (incluant le cycle du thorium).

- physico-chimie pour le nucléaire et radiochimie

La physico-chimie pour le nucléaire et la ra-

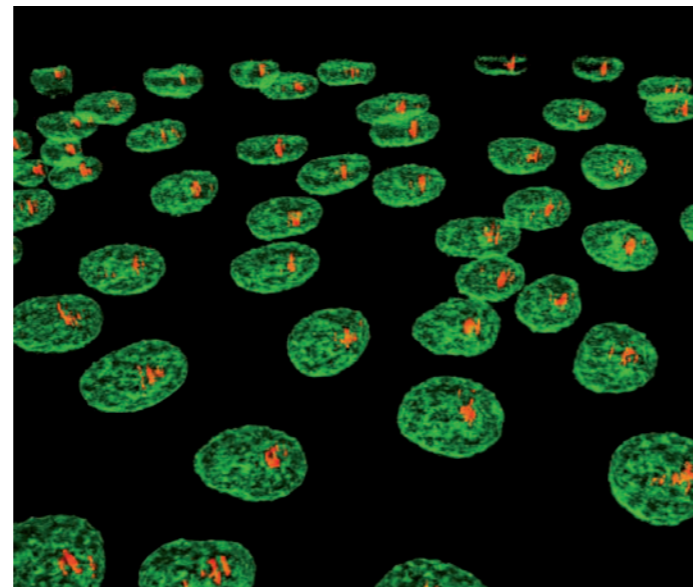
diochimie tiennent une place particulière en raison de leur omniprésence dans les processus mis en jeu dans le cycle électronucléaire. La compréhension des phénomènes mis en jeu nécessite une description quantitative fiable à toutes les échelles et seules modélisation et expérience permettent de valider les concepts et les procédés. Les principales questions ouvertes concernent la compréhension des propriétés spécifiques des actinides (éléments 5f), la radiolyse, la séparation des effets spécifiques provenant des contributions chimiques et physiques, le développement de méthodes analytiques dans le domaine des ultra-traces et la pyrochimie, tant comme base de développement pour les réacteurs à sels fondus, que comme alternative aux méthodes séparatives aux solvants organiques.

La lourdeur des équipements nécessaires à de telles études et les contraintes de sûreté conduisent la plupart des équipes de l'IN2P3 à travailler sur des radionucléides peu radioactifs, ou bien, pour les études de matériaux, à étudier les dommages des faisceaux d'ions sur des matrices stables comme équivalents à ceux provoqués par la radioactivité. Une petite partie de la communauté continue cependant à travailler en milieu chaud, notamment sur les sels fondus, les liquides ioniques et sur l'électrochimie des actinides. Afin de pouvoir pérenniser ces activités, il paraît indispensable non seulement d'inciter les différentes équipes à poursuivre les études en cours, mais aussi de développer nos compétences en ce qui concerne la radioprotection, la gestion des risques, la gestion des radio-isotopes et l'évacuation des déchets radioactifs.

▼ Insertion de la ligne verticale de l'accélérateur Genepi-3C dans le cœur du réacteur de Guinevere.



Ces activités, fédérées et animés par le Groupement de recherche (GDR) « Modélisation en instrumentation pour l'imagerie biomédicale » (MI2B), concernent le développement de nouvelles approches méthodologiques et instrumentales pour des applications à l'interface de la physique et des sciences de la vie, utilisant des techniques et méthodes nucléaires. Si l'axe principal du GDR MI2B concerne « les outils et méthodes nucléaires pour la lutte contre le cancer », son domaine d'application dépasse le seul traitement du cancer et reste ouvert à toute activité impliquant des techniques et des méthodes relevant de la physique nucléaire et de la physique expérimentale des hautes énergies. Pour l'IN2P3, cette thématique prioritaire se décline en quatre pôles dont les spécificités sont données ci-dessous, structurés chacun en domaines définissant des activités scientifiques fédératives.



▲ Simulation d'irradiations de cellules de peau humaine avec l'outil de simulation « Monte Carlo Geant4 ». En vert : le noyau cellulaire contenant l'ADN; en rouge : les radiations.

Programmes prioritaires

LE PÔLE « IMAGERIE » développera prioritairement de nouvelles méthodes dans les domaines suivants :

- l'imagerie moléculaire préclinique, qui devra répondre à la diversité des besoins sur les différents modèles animaux en proposant des solutions d'imagerie dédiées et complémentaires (plateforme d'imagerie *in vivo* multimodale) mais également en développant des systèmes haute performance permettant d'aller jusqu'à l'imagerie du petit animal éveillé et libre de ses mouvements (imagerie X par comptage de photons ou imagerie du rayonnement Cerenkov);
- l'imagerie clinique portable se concentrera sur le développement de détecteurs performants et miniaturisés (imagerie peropératoire nucléaire et optique) pour assister l'exérèse

des tissus cancéreux et aussi sur un système ambulatoire TEP/TDM¹ pour le suivi thérapeutique. Une R&D amont qualifiera des modules de détection innovants basés sur des ruptures technologiques;

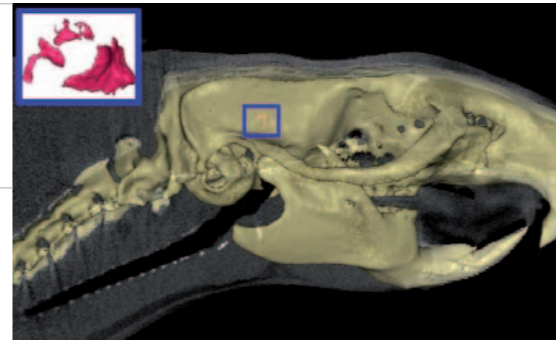
- la quantification en médecine nucléaire nécessitera de nouvelles approches de reconstruction d'images et de correction pour accéder à des informations plus poussées notamment dans le cadre du suivi thérapeutique;
- l'imagerie « chimique » visera le développement de méthodes d'analyse par faisceau d'ions pour visualiser les éléments chimiques de la cellule unique à l'organisme. L'utilisation de protons pour accéder à la composition chimique des tissus constituera, quant à elle, une nouvelle approche développée au sein du pôle imagerie.

LE PÔLE « RADIOBIOLOGIE » a pour objectif principal de développer des outils, méthodes, modèles et simulations pour aider les biologistes dans leur quête de la compréhension des effets induits par les rayonnements ionisants sur la matière vivante. Les modalités d'action reposent sur deux points :

- acquérir en masse des données physiques, chimiques et biologiques, avec des protocoles communs mais dans des conditions multiples (irradiation, environnement, lignées cellulaires);
- développer des modèles biophysiques permettant de synthétiser, comprendre et prédire les effets en fonction des irradiations (dose, particule, énergie, débit de dose), des individus ou des lignées cellulaires.

Pour remplir ces objectifs, l'IN2P3 s'appuie sur les domaines suivants :

- mesures expérimentales des effets biologiques grâce à des plateformes d'accélérateurs de l'IN2P3;



▲ Mise en évidence de micro dépôts de calcaire anormaux (en rose) au niveau du cerveau d'un rat (plateforme Amissa). L'image fonctionnelle du cerveau est superposée à l'image anatomique du crâne du rat.

- optimisation de plateformes d'irradiation au travers de leur mise en réseau grâce à leurs performances complémentaires et originales (micro/nano faisceaux);
- optimisation de l'acquisition de données radiobiologiques de plus en plus sophistiquées (comme la vidéo-microscopie en temps réel ou le stockage et le traitement d'imagerie microscopique pour l'analyse des foci);
- simulation et modélisation, aussi bien pour les effets physico-chimiques précoces que pour la modélisation de la dose biologique et du comportement tumoral par l'amélioration de la description des processus physico-chimiques fondamentaux.

LE PÔLE « THÉRAPIE » a pour objectif principal d'améliorer l'efficacité thérapeutique de la radiothérapie. La stratégie est de concentrer au mieux la dose dans les tumeurs, tout en épargnant au mieux les tissus sains environnants. Les faisceaux de protons ou carbone

permettent une grande précision balistique et en outre, pour le carbone, une grande efficacité biologique.

Pour remplir ces objectifs, les modalités d'action du pôle « thérapie » reposent sur deux points :

- obtenir un contrôle des paramètres des faisceaux incidents, qu'il s'agisse de radiothérapie classique ou conformationnelle avec modulation d'intensité ou en hadronthérapie
- mesurer les données physiques pour valider les modèles physiques utilisés pour les plans de traitement en hadronthérapie

Les quatre sous-thématiques associées regroupent différents développements instrumentaux :

- contrôle de faisceau en hadronthérapie et radiothérapie (développement du moniteur de faisceau Dosion et de fibres scintillantes lues par CCD², nouvelles sources de rayonnements X et gamma);
- données et modèles physiques pour les TPS³ en hadronthérapie : mesure de l'ensemble des sections efficaces nucléaires;
- contrôle de dose : les développements porteront sur le contrôle en ligne et en temps réel du parcours des ions par les rayonnements secondaires issus de la fragmentation nucléaire, par exemple les émetteurs β+, les protons et les gammas prompts, et des simulations Monte Carlo dans le but de comparer les performances de différentes architectures TEP utilisées pour la détection.

LE PÔLE « RADIONUCLÉIDE » constitue un thème émergent dont les objectifs sont de faciliter les échanges entre chercheurs, de mettre en commun les moyens, de faire émer-

ger des projets collaboratifs, d'organiser la formation autour de cette thématique et de diffuser une information de qualité auprès des milieux scientifiques et du public.

Ces recherches s'appuient sur les plateformes d'accélérateurs comme le cyclotron Arronax (Nantes), le cyclotron Cyrécé (Strasbourg) et le Tandem (Orsay) associées à des matériels spécifiques (enceintes blindées et automates de synthèse) et couvrent quatre domaines de recherche fondamentale et appliquée :

- recherche prospective de radiomarqueurs avec mesure de leur section efficace de production et de leurs caractéristiques nucléaires;
- optimisation de la technique de production;
- étude des radionucléides pour l'imagerie phénotypique, de l'hypoxie, cardiaque TEP ainsi que des aspects théranostiques;
- étude des radionucléides pour la thérapie notamment la curiethérapie à l'aide de nanoparticules activées et la thérapie ciblée avec des émetteurs alpha et bêta.



▲ Évaluation clinique de la mini caméra « Poci » pour guider l'ablation des cancers du sein (hôpital Tenon).

◀ Cyclotron C70 dans sa casemate au GIP Arronax.



1. Tomographie par émission de positons/ tomodensitométrie.
2. Charge-Coupled Device, ou en français « dispositif à transfert de charge » (DTC).
3. Systèmes informatiques de planification de traitement.

L'IN2P3 et l'Irfu en bref

► **L'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS** a pour mission de promouvoir et fédérer les activités de recherche en physique subatomique. Il coordonne les programmes dans ce domaine pour le compte du CNRS et des universités, en partenariat avec le CEA. Ces recherches visent à explorer la physique des particules et des noyaux atomiques, les interactions fondamentales et les connexions entre l'infiniment petit et l'infiniment grand.

Si ces grands thèmes représentent le cœur de la discipline, l'IN2P3 a aussi vocation à apporter ses compétences à d'autres domaines scientifiques, ainsi qu'à la résolution de certains problèmes posés par la société, et à participer à la formation des jeunes aux côtés de l'Université. Il a enfin pour devoir de faire bénéficier le monde de l'entreprise de son expertise en diffusant vers l'industrie les ressources technologiques qu'il a su développer dans le cadre de ses activités de recherche.

Chiffres clés :

2 450 personnes permanentes (chercheurs, ingénieurs et techniciens, enseignants-chercheurs) ;
470 doctorants et post-doctorants ;
25 laboratoires et plateformes ;
40 grands projets à caractère international ;
4 groupements de recherche ;
13 laboratoires internationaux associés ;
2 groupements de recherche internationaux ;
2 groupements d'intérêt public de R&D.

► **L'Irfu, Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers de la direction des sciences de la matière (DSM) du CEA**, a une double vocation, scientifique et technologique. Il regroupe trois disciplines scientifiques, l'astrophysique, la physique nucléaire et la physique des particules, ainsi que l'ensemble des services techniques associés. Ces trois disciplines partagent de nombreuses méthodes expérimentales puisque l'exploration de l'Univers à petite ou à grande échelle repose sur la détection des rayonnements. L'Institut se positionne en maître d'œuvre des instruments de recherche : charges utiles des satellites, accélérateurs, aimants supraconducteurs, systèmes de détection...

L'Irfu développe un programme de recherche et développement, l'accès à de hautes technologies et d'importants moyens d'essais.

Chiffres clés :

610 personnes permanentes ;
200 doctorants et post-doctorants ;
6 laboratoires ;
70 projets en phase de conception, de construction ou d'exploitation ;
19 laboratoires internationaux associés ;
2 groupements d'intérêt scientifique avec le CNRS ;
4 laboratoires communs avec le CNRS et les universités.

Sigles et acronymes

ADS - Accelerator Driven System : système piloté par un accélérateur de particules, dédié à l'incinération des déchets nucléaires.

Advanced Virgo - Interféromètre de 2^e génération pour la détection au sol des ondes gravitationnelles, qui sera installé à Cascina en Italie.

Aegis - Antihydrogen Experiment : Gravity, Interferometry, Spectroscopy : expérience au Cern ayant pour but de mesurer l'effet de la gravitation terrestre sur l'antimatière en utilisant un faisceau d'antihydrogène.

After - projet d'expérience sur cible fixe au LHC afin d'étudier avec une grande précision la matière nucléaire froide et la physique du plasma de quarks et de gluons.

Agata - Advance gamma-ray tracking array : projet international de développement d'un spectromètre gamma.

AIEA - Agence internationale de l'énergie atomique.

Alice - A large ion collider experiment : expérience dédiée à l'exploration des propriétés du plasma de quarks et de gluons au LHC.

Alma - Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array : expérience dédiée à l'étude du rayonnement provenant des objets les plus froids de l'Univers.

Alto - Accélérateur linéaire auprès du Tandem d'Orsay : projet d'installation d'un accélérateur d'électrons (10-50 MeV, 10 μ A) auprès du Tandem d'Orsay.

AMS - Anti-matter in space : expérience de recherche d'antimatière dans l'espace.

Antares - Astronomy with a neutrino telescope and abyss environmental research : expérience dédiée à la détection et à l'étude des neutrinos cosmiques de haute énergie à l'aide d'un télescope sous-marin.

Apex/Artemis - Caméra Artémis (Architectures de bolomètres pour des télescopes à grand champ de vue dans le domaine sub-millimétrique au sol) installée sur le télescope Apex (Atacama Pathfinder Experiment) qui permet la cartographie de régions de formation d'étoiles et de disques proto-planétaires.

Arronax - Accélérateur pour la recherche en radiochimie et en oncologie de Nantes Atlantique : plateforme technologique pour la production de

radionucléides pour la recherche médicale et la recherche en physique/chimie nucléaire.

Athena+ - Advanced Telescope for High-energy Astrophysics : expérience dédiée à l'exploration de l'Univers chaud et énergétique.

Atlas - A toroidal LHC apparatus : expérience dédiée principalement à la recherche de nouvelle physique au LHC.

Auger (Observatoire Pierre) - Expérience de détection des rayons cosmiques d'énergie extrême (supérieure à 10^{19} eV), en Argentine.

BigBoss - Extension du projet Boss.

BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung : ministère fédéral allemand de l'enseignement et de la recherche.

Boss - Baryon oscillation spectroscopic survey - un des quatre projets du relevé SDSS-III (Sloan digital sky survey III) dédié à la recherche des oscillations de baryons, qui seraient liées à l'énergie noire et à l'évolution de l'Univers.

Cern - Organisation européenne pour la recherche nucléaire : laboratoire européen de physique des particules à Genève.

Chic - Charm In Heavy Ion Collisions : projet d'expérience sur cible fixe auprès du SPS (Super proton synchrotron) du Cern pour l'étude du plasma de quarks et gluons.

Cilex - Centre interdisciplinaire lumière extrême : projet de centre de recherche pluridisciplinaire autour du laser Appolon-10P (10 petawatt) sur le site de l'ancien accélérateur linéaire de Saclay.

Cla12 - Cebaf Large Acceptance Spectrometer : spectromètre auprès de l'accélérateur Cebaf du Jefferson Laboratory (USA) qui délivrera des faisceaux intenses d'électrons jusqu'à 12 GeV.

CMS - Compact muon solenoid : expérience dédiée principalement à la recherche de nouvelle physique au LHC.

Cnes - Centre national d'études spatiales.

CTA - Cherenkov Telescope Array : projet européen de réseau de télescopes Cherenkov de nouvelle génération en astronomie gamma des très hautes énergies.

Cyrcé - Cyclotron pour la recherche et l'enseignement : accélérateur de

particules de l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IHC) à Strasbourg permettant de produire des radio-isotopes pour le diagnostic, le suivi de médicament ou le traitement médical.

DES - Dark energy survey : programme d'observation du ciel dédié à l'étude de l'énergie noire.

Desir - Désintégration, excitation et stockage d'ions radioactifs : équipement de spectroscopie laser, qui permettra, au sein de l'infrastructure Spiral2 du Ganil, de mener des expériences à basse énergie pour la recherche en physique nucléaire.

eBoss - Extension du projet Boss du relevé SDSS-IV (Sloan digital sky survey IV).

Echo - Exoplanet Characterization Observatory : mission spatiale dédiée à la caractérisation spectrale d'exoplanètes.

Edelweiss - Expérience pour la détection des Wimps en site souterrain : expérience de recherche de matière noire à l'aide de bolomètres au Laboratoire souterrain de Modane.

E-ELT - European Extremely Large Telescope : projet de télescope terrestre de l'Observatoire européen austral.

Eli-NP - Extreme Light Infrastructure : Nuclear Physics : projet d'infrastructure de laser haute-puissance installée sur le site de l'Institut roumain de physique nucléaire (IFN-HH) à Magurele (Roumanie).

ESA - European space agency : Agence spatiale européenne.

Esfri - European Strategy Forum on Research Infrastructures : Forum européen sur les infrastructures de recherche.

ESO - European Southern Observatory : Observatoire européen austral.

ESS - European Spallation Source : installation de recherche utilisant la source de neutrons la plus puissante du monde.

Euclid - Télescope spatial de l'Agence spatiale européenne (ESA) en cours de développement, dédié à l'étude de l'énergie noire et de la matière noire.

Eurisol - European isotope separation on-line : projet de futur accélérateur européen de faisceaux radioactifs.

Euso - Extreme universe space observatory : projet d'observation des grandes gerbes cosmiques dans l'atmosphère depuis la station spatiale internationale.

Eveda - Engineering validation and engineering design activity : première phase du projet d'accélérateur Ifmif, qui permettra de valider la conception d'une telle machine.

Fair - Facility for antiproton and ion research : projet d'infrastructure qui fournira des faisceaux d'antiprotons (de 0,1 à 15 GeV) et d'ions lourds relativistes (de 1,5 à 30 GeV/nucléon) auprès du GSI (Darmstadt).

Fermi - Fermi Gamma-Ray Space Telescope : satellite d'observation de l'Univers en rayons gamma.

Gabriela - Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the Electromagnetic Analyser Vassilissa : installation dédiée à l'étude des noyaux très lourds, située à Dubna (Russie).

Ganil - Grand accélérateur national d'ions lourds (CNRS/CEA) à Caen.

Gbar - Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest : expérience utilisant les faisceaux du Décélérateur d'antiprotons (AD) du Cern et visant à déterminer de quelle manière l'antimatière réagit à la gravité.

Gelina - Accélérateur linéaire à électrons de l'Institut des matériaux et mesures de référence (IRMM, Institute for Reference Materials and Measurements) à Geel (Belgique).

Genci - Grand équipement national de calcul intensif : société chargée de la politique nationale pour le calcul intensif et la simulation numérique, membre de Prace.

Glad - GSI Large Acceptance Dipole : spectromètre supraconducteur pour l'expérience R3B.

GSI - Gesellschaft für Schwerionenforschung : laboratoire allemand de physique nucléaire, à Darmstadt.

Guinevere - Generator of uninterrupted intense neutrons at the lead Venus reactor : maquette de Myrrha, premier démonstrateur mondial d'ADS, dédié à l'incinération des déchets nucléaires, installé à Mol en Belgique.

Herschel - Télescope spatial dédié à l'observation du rayonnement infrarouge et submillimétrique.

HE-LHC - High Energy LHC : projet sur l'évolution du LHC permettant d'atteindre des énergies de collisions de 26 à 33 TeV.

...

Hess - High energy stereoscopic system : expérience de détection au sol des rayons gamma de très haute énergie (au-delà de 100 GeV).

HL-LHC - High Luminosity LHC : projet sur l'évolution du LHC visant une augmentation significative de sa luminosité.

Ifmif - International fusion material irradiation facility : projet d'accélérateur de particules dont le but est de tester les matériaux développés pour les futures installations de fusion nucléaire.

ILC - International linear collider : futur collisionneur linéaire électron-positon (énergie entre 90 GeV et 1 TeV dans le centre de masse).

ILL - Institut Laue-Langevin (Grenoble).

INP - Institut de physique du CNRS.

INSU - Institut national des sciences de l'Univers du CNRS.

Iram - Institut de radioastronomie millimétrique de Grenoble.

Iseult - Aimant de 11,75 T qui sera installé à Neurospin et sera la pièce maîtresse d'un système d'imagerie par résonance magnétique (IRM) dédié à l'imagerie cérébrale.

Isol - Isotopic separation on-line : méthode de séparation d'ions exotiques.

Isolde - Installation de production d'ions radioactifs par séparation isotopique en ligne au Cern.

Iter - International Thermonuclear Experimental Reactor : projet visant à démontrer la faisabilité d'un réacteur nucléaire utilisant le principe de la fusion.

JLab/TJNAF - Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Lab) : laboratoire américain de physique hadronique à Newport News (Virginie).

JWST - James Webb Space Telescope : télescope devant succéder au télescope spatial Hubble pour l'observation dans l'infrarouge.

LHC - Large hadron collider : collisionneur proton-proton du Cern.

LHCb - Expérience dédiée à l'étude de la violation de CP dans le système des mésons beaux au LHC.

Linac4 - Accélérateur linéaire 4, conçu pour porter des ions d'hydrogène négatifs à des énergies élevées et qui constituera la source de faisceaux de protons

du LHC après l'arrêt prévu en 2017-2018.

LNCMI - Laboratoire national des champs magnétiques intenses (Toulouse et Grenoble)

LSST - Large Synoptic Survey telescope : projet de télescope très grand champ situé au Chili, dédié à l'étude de la matière noire, de l'énergie noire, du système solaire, et de la structure de la Voie Lactée.

Minos - Magic Numbers Off Stability : projet de détecteur auprès de l'accélérateur de Riken (Institut de recherche scientifique) au Japon afin d'étudier les propriétés des noyaux très exotiques.

Miri - Mid-Infrared Instrument : caméra infrarouge à bord du JWST.

Muse - Multiplication d'une source externe auprès du réacteur Masurca (CEA, Cadarache) : expérience de caractérisation des propriétés neutroniques d'un réacteur sous-critique.

Myrrha - Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications : premier démonstrateur mondial d'ADS, dédié à l'incinération des déchets nucléaires, qui sera construit à Mol en Belgique.

nEDM - Expérience de recherche de nouvelles sources de violation de symétrie CP par la mesure du moment dipolaire électrique (EDM) du neutron, auprès de l'accélérateur de protons du PSI (Paul Scherrer Institut) en Suisse.

Nisp - Near IR Spectrometer Photometer : spectromètre de la mission Euclid qui a pour rôle la mesure des redshifts (décalage vers le rouge) des galaxies.

Noema - Nouveau télescope pour explorer l'Univers invisible.

NTOF - Neutron time of flight : installation de mesure du temps de vol des neutrons au Cern, dédiée à l'étude des interactions noyau : neutron.

Nupec - Nuclear physics European collaboration committee : comité européen pour la physique nucléaire.

Orca - Oscillation Research with Cosmics in the Abyss : projet de détecteur Cherenkov sous-marin dédié à l'étude des neutrinos de basse énergie (< 100 GeV) dans le but de déterminer la hiérarchie de masse des neutrinos.

Panda - Antiprotons Annihilation at Darmstadt : projet de détecteur auprès de l'installation Fair à GSI (Darmstadt,

Allemagne), dédié à la recherche en physique hadronique

Planck - Satellite de l'ESA pour la mesure du rayonnement de fond cosmologique.

Plato - Planetary Transits and Oscillations of stars : nouveau télescope spatial pour la recherche des systèmes planétaires.

Prace - Partnership for Advanced Computing in Europe : infrastructure chargée de la politique européenne pour le calcul intensif et la simulation numérique.

R3B - Reaction studies with Relativistic Radioactive Beams : collaboration qui met en place un programme consacré à la physique des ions radioactifs avec des faisceaux dont l'énergie sera comprise entre 150 MeV par nucléon et 1,5 GeV par nucléon.

S3 - Super séparateur spectromètre : projet de spectromètre auprès de l'accélérateur Spiral2 au Ganil pour l'étude des noyaux superlourds et exotiques ainsi que des mécanismes de réactions.

SNF - Supernova factory : expérience de mesures spectrophotométriques de supernovæ la dans le but de caractériser l'énergie noire.

SNLS - Supernova legacy survey : programme de recherche et de mesure de supernovæ la dans le but de caractériser l'énergie noire.

Smes - Superconducting Magnetic Energy Storage : projet de stockage de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant continu dans un anneau supraconducteur refroidi sous sa « température critique ».

Soleil - Source optimisée de lumière d'énergie intermédiaire du Lure : centre de rayonnement synchrotron pour l'exploration de la structure de la matière et l'étude de ses propriétés.

Spiral2 - Système de production d'ions radioactifs accélérés en ligne de 2^e génération : accélérateur de particules linéaire au Ganil (Caen) qui produira des noyaux exotiques légers et lourds à des intensités très élevées.

SR2S - Space Radiation Superconductive Shield : torroïde géant pour le voyage vers Mars.

SuperFRS - Super Fragment Separator : projet sur la production et l'étude de la structure nucléaire des noyaux exotiques.

SuperNemo - Projet de détecteur de double désintégration bêta dédié à l'étude du neutrino, 100 fois plus sensible que le détecteur Nemo (Neutrino Ettore Majorana Observatory) situé au Laboratoire souterrain de Modane.

Svom - Space Variable Objects Monitor : mission d'astronomie X et gamma dont le principal objectif est l'observation et la caractérisation des sursauts gamma dans l'Univers.

T2K - Tokai to Kamioka : expérience d'oscillation de neutrinos au Japon.

Tandem - Accélérateur Van de Graaf électrostatique d'ions situé à Orsay.

TGIR - Très grande infrastructure de recherche

ThomX - Projet de source de rayons X compacte de 45 keV pour des applications médicales et des analyses de matériaux ou d'œuvres d'art.

VIS - Imageur grand champ du satellite Euclid pour les longueurs d'onde dans le visible.

WMAP - Wilkinson microwave anisotropy probe : satellite américain d'observation du fond diffus cosmologique, prédécesseur de Planck.

XFEL - Projet européen de laser à électrons libres fonctionnant dans la gamme des rayons X, à Desy (Deutsches elektron synchrotron, laboratoire allemand de physique des particules à Hambourg).

Couverture illustration Bruno Roulet
Page 6-7 © CC-IN2P3/CNRS - © 2012 Cern - © Rey.Hori/KEK/Cern
Page 8-9 © 2012 Cern - © D.Ceccato@LNL - © CEA-Ph Stroppa
Page 10-11 © Clementina Medina / CEA-Irfu - © LSM/Edelweiss - © ESA - Collaboration Planck - © Kamioka Observatory, ICRR, Université de Tokyo
Page 12-13 © ESA - © Irfu/CEA - © Irfu/CEA
Page 14-15 © DESY/ILC, Heiner Müller-Elsne - © SDMS - © LLR - © CEA-Ph Stroppa
Page 16-17 © B. Ronfet - © Irfu/CEA - © Nicolas Busser, CNRS, IPHC - © École Polytechnique, P. Lavalie
Page 18-19 © Irfu/CEA - © Guillaume Olyry, IPNO - © Irfu/CEA
Page 20-21 © Cern - © Subatech-EMN - © CNRS
Page 22-23 © CENBG - © Équipe ImaBio, IPHC - © CNRS Photothèque / Raguet Hubert / IMNC - © GIP Arronax

Direction de la publication : Jacques Martino, Philippe Chomaz

Coordination éditoriale : Christina Cantrel

Coordination scientifique : Dominique Guillemaud-Mueller, Nicolas Alamanos

Conception graphique et réalisation : Bruno Roulet, secteur de l'imprimé de Paris Michel-Ange

Ont collaboré : Sophie Cavata, Valérie Frois, Perrine Royole-Degieux, Bernard Kubica, Ferid Haddad, Marie-Alix Duval

PROSPECTIVE

IN2P3/IRFU

2013-2022

www.in2p3.fr
irfu.cea.fr