

# Scintillation2

N° 93 - FÉVRIER 2016

Dans notre institut de *Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers*, nous menons l'exploration des lois via les expériences et l'interprétation des phénomènes observés. Chaque article de notre revue propose de découvrir l'un des angles d'attaque adoptés par nos labos pour étudier et comprendre les lois : conception d'instruments, projets, expériences et analyses. L'Irfu est impliqué aussi dans des missions de formation, désormais dans la nouvelle matrice, l'*Université Paris-Saclay*, et en contribuant à l'élaboration des outils éducatifs numériques, les MOOCs (p. 11). En 2015, la physique des **neutrinos** a été mise à l'honneur, avec le prix Nobel décerné aux collaborations qui apportèrent les preuves de la métamorphose des neutrinos. Ces études sur les neutrinos, et en général les questions sur leur rôle dans l'asymétrie matière-antimatière, font partie des thématiques de l'Irfu. Nous verrons (p. 2) comment sont réalisées les mesures sur leurs **oscillations** dans les expériences **T2K** et **Double Chooz**.

Pour exprimer les différentes « saveurs » de physique de l'Irfu, les oscillations concernent aussi le comité de Scintillations, la rédaction en chef évoluera régulièrement : fin 2015, Nathalie Besson a passé le relais après avoir dirigé avec dynamisme et enthousiasme trois numéros de la revue. Elle reste dans le navire, apportant son expertise de la physique des 2 infinis, et en particulier de la physique des particules auprès du **LHC**, dont les premiers résultats (phase 2 à 13 TeV, p. 10) permettent de scruter l'horizon au-delà du modèle standard. Quand il s'agit d'interpréter les observations du cosmos, des logiciels de visualisation sont nécessaires : ainsi, informaticiens et astrophysiciens nous fournissent une carte dynamique pour révéler les structures de l'« *horizon céleste immense* » (**Laniakea**) de notre galaxie.

Pour explorer les lois de la physique, les équipes de l'Irfu conçoivent des techniques innovantes. Les compétences développées sont également mobilisées pour proposer des solutions à des questions d'instrumentation, comme dans le cas de **SR2S**, un **bouclier magnétique** pour les missions vers Mars, et du détecteur **CaLIPSO**, pour l'**imagerie** du cerveau.

\* Voir l'atelier du Larsim, pour l'Espace de Structure et de réactions Nucléaires Théorique : <http://esnt.cea.fr/index.php?id=66&ref=1>.

\*\* « Comment écrire la Science ? » : atelier ESNT-Larsim de 2016. À suivre... au n° 94.

## Les lois de l'UNIVERS : de l'exploration au nouvel horizon

- ♦ **Oscillations de neutrinos**, T2K, Double Chooz (p. 2)
- ♦ **Laniakea**, L'art de voir l'Univers en mouvement (p. 4)
- ♦ **SR2S**, Un aimant pour aller sur Mars (p. 6)
- ♦ **CaLIPSO**, L'imagerie par Tomographie par Émission de Positons (p. 8)
- ♦ Le Redémarrage du **LHC** (p. 10)
- ♦ L'Irfu au cœur de l'**Université Paris Saclay** (p. 11)
- ♦ **L'Irfu à l'affiche!** « Va-et-Vient » des équipements (p. 12)

Après les mesures et les interprétations, vient la phase d'examen des frontières, limites et incertitudes des modèles\* ; ce questionnement, au cœur de la démarche scientifique, sous-tend toutes nos activités et l'écriture de la science. Ce numéro présente quelques-unes des facettes de la science qui s'écrit\*\* à l'Irfu. Le prochain sera consacré aux interactions physique-philosophie portées par une nouvelle saveur de l'institut : le Larsim, qui nous proposera de réexaminer notre vision des lois de la physique.

Tout le comité vous adresse ses meilleurs vœux de bonne lecture en 2016... et d'écriture ; à vos plumes pour proposer, vous aussi, un récit d'exploration des lois de l'Univers !

Valérie Lapoux



Francesco GIZZARELLI

# Le point sur les oscillations de neutrinos

Dans le bestiaire de la physique des particules, les neutrinos recèlent encore bien des secrets. Dénués de charge électrique, interagissant très peu avec la matière, les neutrinos existent sous trois saveurs : électronique, muonique et tauique. Ils ont de plus la propriété de se transformer d'une saveur en une autre. Il s'agit du phénomène d'oscillations des neutrinos découvert par les expériences Super-Kamiokande (1998) et Sudbury Neutrino Observatory (2000), et couronné par le prix Nobel de physique de 2015. Les expériences Double Chooz et T2K dans lesquelles l'Irfu est impliqué sont aujourd'hui à la pointe de ce champ de recherche. Deux doctorants, Valérian Sibille, en dernière année de thèse au SPhN, et Francesco Gizzarelli, en deuxième année de thèse au SPP, nous en parlent dans cet article.

## T2K sur la piste de l'asymétrie matière-antimatière

L'interprétation des oscillations repose sur l'hypothèse selon laquelle les trois saveurs de neutrinos sont en fait des « mélanges » (superpositions quantiques) de trois états de masse,  $\nu_i, i=1,2,3$ , chacun évoluant différemment dans le temps. Prenons l'exemple d'un neutrino produit avec une saveur muonique. En chemin vers un détecteur, il oscillera vers les autres saveurs (électronique ou tauique) en fonction de la distance parcourue depuis son lieu de production. La probabilité que ce neutrino soit toujours détecté comme muonique, après un parcours de quelques centaines de mètres ou de kilomètres, dépendra de l'amplitude et de la fréquence de ces oscillations.

Dans ce scénario, les oscillations sont décrites à l'aide de sept paramètres : les différences en masse entre chaque paire d'états ( $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2$  et  $\Delta m_{13}^2$ ), trois angles caractérisant leur mélange ( $\theta_{12}, \theta_{23}$  et  $\theta_{13}$ ) et une phase dite de violation des propriétés de conservation de charge et de parité<sup>1</sup> (CP),  $\delta_{CP}$ . Cette phase est importante, car une valeur non nulle de  $\delta_{CP}$  impliquerait des sources de violation de CP au-delà de celles détectées dans le secteur des quarks. Rappelons que de tels effets s'ils existaient à la fois pour les neutrinos et les quarks pourraient expliquer l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'Univers.

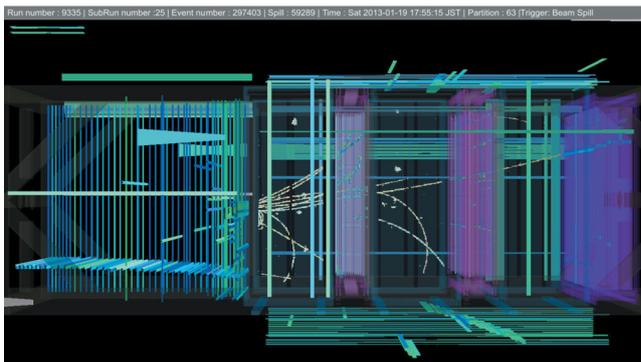


Figure 1: Reconstruction graphique de l'interaction d'un neutrino muonique dans le détecteur proche.

La collaboration Tokai-to-Kamioka (T2K) a conçu une expérience pour observer les oscillations du neutrino muonique afin d'étudier les mélanges des paires 23 et 13. Les neutrinos sont produits au J-PARC et après avoir voyagé 295 km sous terre sont détectés par Super-Kamiokande, un gigantesque détecteur Tcherenkov<sup>2</sup> à eau de 50 000 tonnes. Un autre détecteur, situé à 280 m du point de production des neutrinos, procure des informations sur les neutrinos avant

oscillation (Fig. 1). C'est en mesurant le taux de neutrinos dans ce détecteur proche et dans le détecteur lointain qu'on étudie leurs oscillations.

L'Irfu a joué un rôle de premier plan dans la conception et la construction du détecteur proche. Aujourd'hui, le SPP prend part à l'étude des interactions des neutrinos sur différents noyaux, le  $^{12}\text{C}$  et l' $^{16}\text{O}$ , constitutifs des détecteurs proche et lointain, ce qui permettra de mieux comprendre les taux de neutrinos mesurés dans ces deux détecteurs, augmentant par là la sensibilité de l'analyse des oscillations.

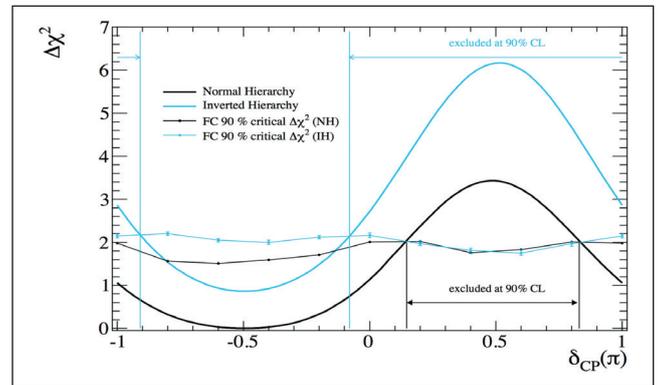


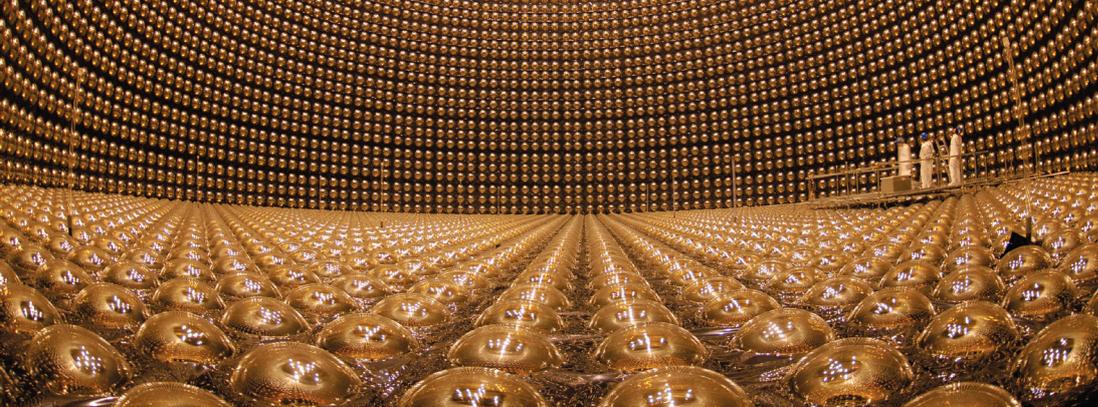
Figure 2: Résultat du test de compatibilité entre données (apparition de neutrinos électroniques dans T2K et mesure de  $\theta_{13}$  auprès des réacteurs) et valeur de  $\delta_{CP}$  en fonction de cette dernière. Les valeurs de  $\delta_{CP}$  proches de  $-\pi/2$  conduisent à un très bon accord avec les données, les autres valeurs sont exclues avec une probabilité de 90 %. Deux courbes sont données, pour deux hypothèses sur les hiérarchies entre états de masse, normale (l'état 1 étant le moins massif) ou inversée (l'état 3 étant le moins massif).

Après l'analyse de 15 % seulement du total des données attendues à terme, T2K a fourni les valeurs les plus précises des paramètres  $\Delta m_{23}^2$  et  $\theta_{23}$  en mesurant la disparition des neutrinos muoniques. Mieux encore, T2K a mis en évidence l'apparition de neutrinos électroniques dans un faisceau initial de neutrinos muoniques, ce qui constitue une première mondiale ! Enfin, en utilisant la valeur de  $\theta_{13}$  issue des expériences auprès des réacteurs, T2K en a déduit une mesure indirecte de  $\delta_{CP}$  dont la valeur a été trouvée proche de  $-\pi/2$  (Fig. 2).

En mai 2014, T2K a commencé à collecter des données avec un faisceau d'antineutrinos. Si la valeur de  $\delta_{CP}$  est bien de  $-\pi/2$ , le taux d'apparition d'antineutrinos électroniques sera plus faible que dans le cas des faisceaux de neutrinos. De nouveaux résultats sont attendus tout prochainement. Affaire à suivre...

<sup>1</sup>Voir ScintillationS 85, 2011, article « L'asymétrie matière-antimatière » par Georges Vasseur, <http://irfu.cea.fr/ScintillationS/index.php?annee=2011>.

<sup>2</sup>Détecteur utilisant la lumière émise par une particule chargée lors de la traversée d'un milieu diélectrique à une vitesse dans le milieu supérieure à la vitesse de la lumière (effet Tcherenkov).



Valérian SIBILLE

## Double Chooz redouble d'attention

L'expérience Double Chooz a pour objectif de donner une valeur précise à l'un des paramètres qui régissent l'amplitude des oscillations des neutrinos, l'angle de mélange  $\theta_{13}$ . Elle met à profit deux réacteurs nucléaires d'EDF situés dans les Ardennes françaises, qui servent de sources pures et intenses d'antineutrinos électroniques. Deux détecteurs identiques, remplis chacun de 8 tonnes de liquide scintillant et situés respectivement à 400 m et à 1000 m des réacteurs, permettent d'évaluer la distorsion du spectre des antineutrinos électroniques, due à l'oscillation de ces derniers dans un autre état de saveur (Fig. 3).

Si les deux réacteurs produisent environ  $10^{21}$  antineutrinos électroniques par seconde, le détecteur le plus éloigné, en marche depuis quatre ans, n'en voit qu'une quarantaine par jour. En outre, l'oscillation, à cette distance, n'entraîne la disparition que de 5 % d'entre eux. On comprend, dès lors, l'intérêt de quantifier le bruit de fond, majoritairement cosmogénique. Malgré l'enfouissement des détecteurs sous une large couche de roche (de 100 m pour le détecteur lointain et de 40 m pour le détecteur proche), chaque jour, une poignée d'événements induits par les muons cosmiques vient polluer le spectre neutrino. Ces événements, que je me suis attelé à simuler pour le détecteur lointain, en incluant un traitement d'erreur complet, correspondent aux désintégrations des noyaux exotiques de  $^9\text{Li}$  et  $\text{d}^8\text{He}$ , dont les spectres en énergie sont complexes et recouvrent celui des neutrinos. Les spectres simulés ont pu être comparés aux données, validant la procédure d'identification du bruit de fond cosmogénique parmi les candidats neutrinos, et ont permis d'extraire, par ajustement, une première estimation de l'abondance relative des isotopes de  $^9\text{Li}$  et  $\text{d}^8\text{He}$  (Fig. 4). L'épaisseur de roche qui sert de blindage aux détecteurs n'étant pas la même, j'ai maintenant pour tâche de traiter avec le même soin le bruit de fond cosmogénique du détecteur proche.

En 2012, Double Chooz était la première expérience auprès de réacteurs à montrer à 90 % de confiance que la valeur de  $\theta_{13}$  était non nulle. Le détecteur proche de Double Chooz est maintenant en fonctionnement depuis moins d'un an. Grâce à ce dernier, nous pourrions caractériser précisément le spectre neutrino, avant que l'oscillation ne se soit développée, et fournir un point d'ancrage solide pour la mesure de  $\theta_{13}$  au niveau du détecteur lointain. L'ensemble des données obtenues par les deux détecteurs permettra, d'ici trois ans, de réduire d'au moins un facteur 3 les incertitudes systématiques sur la détermination de  $\theta_{13}$ .

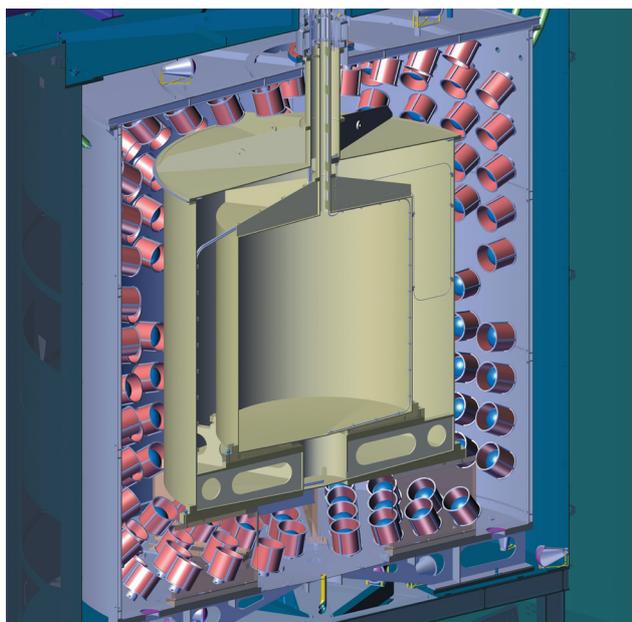


Figure 3 : Schéma d'un détecteur de Double Chooz. Le volume central est rempli de liquide scintillant dans lequel ont lieu les interactions des neutrinos. Autour, 390 détecteurs de lumière permettent de signaler chaque interaction dans la cible.

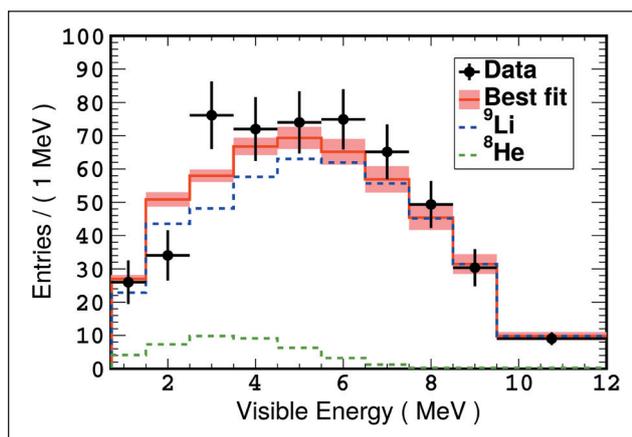


Figure 4 : Spectre du bruit de fond cosmogénique contaminant le signal neutrino. Les données (en noir) correspondent aux candidats identifiés comme événements de bruit de fond dans l'analyse. Les courbes bleue et verte représentent les spectres simulés des noyaux de  $^9\text{Li}$  et  $\text{d}^8\text{He}$ . La courbe rouge est obtenue par ajustement des spectres Monte Carlo sur les données, portant la contribution  $\text{d}^8\text{He}$  à 8 %.



# L'art de voir l'UNIVERS en mouvement

Au cœur du Cosmic Web, des chercheurs étudient les phénomènes qui régissent les superamas de galaxie.

Article co-écrit par Alice Mounissamy (Irfu, Com) et Daniel Pomarède (Irfu, Sedi).

4 N° 93 - FÉVRIER 2016

Dans le chaos apparent des centaines de milliards de galaxies qui composent le cosmos, comment comprendre ce que l'on voit ? Comment voir ce que l'on ne comprend pas encore ? Développé pour le projet COAST (Computational Astrophysics, voir le lien), le logiciel SDvision (pour Saclay Data Visualization) était destiné à l'origine à visualiser de grandes quantités de données massives issues de simulations. Aujourd'hui, il est un outil remarquable pour analyser les mouvements et la structure de notre Univers proche.

Dans l'Univers, les galaxies se concentrent en un vaste réseau cosmique en évolution : le Cosmic Web. Une toile faite de nœuds reliés par des filaments, séparant des vides. Deux phénomènes s'affrontent au sein de cette architecture : l'expansion de l'Univers, faisant s'éloigner les galaxies les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance<sup>1</sup> et la gravitation tendant à structurer la matière pour former le Cosmic Web. Chaque nœud du réseau est associé à un bassin d'attraction gravitationnelle ou zone d'influence au sein de laquelle la matière (galaxies et matière noire) converge sur un attracteur. Ce concept de bassin d'attraction a ensuite contribué à définir les superamas de galaxies, des regroupements pouvant contenir des milliers de galaxies.

L'aventure commence en 2010, quand Daniel Pomarède, ingénieur-chercheur du Laboratoire d'Ingénierie Logicielle des Applications Scientifiques (Lilas) au Sedi (Irfu), est sollicité pour le projet Cosmic Flows (voir encadré). Il doit alors, en collaboration avec 3 astrophysiciens, R. Brent Tully, H. Courtois et Y. Hoffman, réaliser une cartographie dynamique de notre Univers, étendue sur 300 millions d'années-lumière et centrée sur la Voie Lactée. Le développement de cette représentation, établie sur les données de 1800 galaxies (le catalogue Cosmicflows-1) et publiée dans *The Astronomical Journal*<sup>2</sup>, marquait une étape dans l'étude des structures extragalactiques. Il contribuait à clarifier la question du « Grand Attracteur » à l'origine de notre mouvement de

630 km/s dans l'Univers. La correspondance entre les puits de matière noire et la position des galaxies y étant clairement identifiée, elle apportait une confirmation directe du modèle standard de la cosmologie, qui régit l'évolution de l'Univers depuis le Big-bang.

Le projet Cosmic Flows exploite les mesures des vitesses particulières des galaxies<sup>3</sup>. La vitesse particulière d'une galaxie est sa déviation par rapport à sa vitesse de récession, associée à l'expansion de l'Univers. Seule la composante radiale (c'est-à-dire le long de la ligne de visée) de ces vitesses est accessible. Ces mesures sont utilisées en entrée d'un algorithme (filtre de Wiener), qui permet de reconstruire le champ de vitesse global en 3 dimensions. À partir de ce

champ de vitesse, de nombreuses informations sont alors obtenues : le champ de densité de matière (y compris de la matière noire), le champ de gravitation et les variations telles que les phénomènes de compression ou de dilatation à l'œuvre dans le champ de vitesse. C'est à ce stade que le logiciel SDvision entre en jeu. À travers sa capacité à visualiser de manière interactive et immersive ces données tridimensionnelles, il permet de les comparer à d'autres informations cosmographiques.

En 2013 commence l'étude d'un nouveau catalogue de 8000 galaxies, Cosmicflows-2. Lors de la première session de visualisation, est apparue une nouvelle structure à laquelle appartient notre galaxie. Un bassin d'attraction gravitationnelle à l'intérieur duquel les lignes de courants du champ de vitesse (vitesses des galaxies) convergent vers une destination unique, l'attracteur. L'observation de ce type de structure est alors proposée comme moyen de définir

les superamas de galaxies. Cette investigation n'a permis, pour la première fois, d'identifier les frontières de notre superamas de galaxies, désigné avec l'accord de l'Union Astronomique Internationale par le nom Hawaïen « Laniakea », signifiant « Horizon céleste immense ». Un hommage aux navigateurs polynésiens qui se guidaient par les étoiles et les courants océaniques à travers le Pacifique. Laniakea, de



Figure 1: La collaboration internationale Cosmic Flows contribue à diffuser à toute la communauté scientifique la cartographie dynamique de l'Univers proche incluant les travaux issus de Laniakea.

<sup>1</sup>Loi de Hubble.

<sup>2</sup>« Cosmography of the local Universe », H. Courtois et al., *The Astronomical Journal*, V. 146, n° 3 (2013).

<sup>3</sup>Les catalogues Cosmicflows 1 et 2 s'appuient notamment sur des données du radio télescope de Green Bank (Virginie Occidentale), du télescope de l'Université d'Hawaï à l'Observatoire du Mauna Kea, et du télescope spatial Hubble.

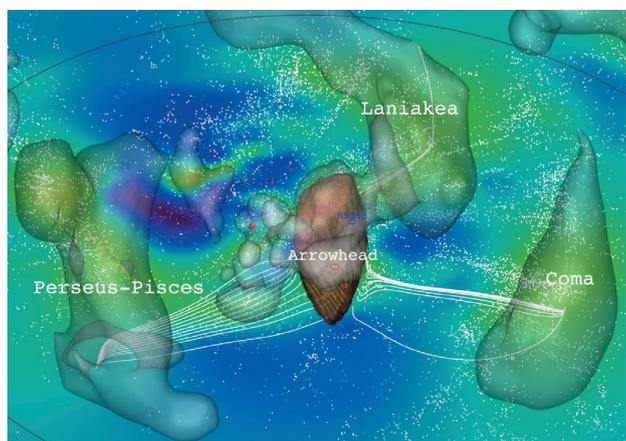


dimension caractéristique 500 millions d'années-lumière - 160 Mpc<sup>(4)</sup> - est la plus grande structure identifiée à laquelle appartient notre galaxie, la Voie Lactée. Cette découverte a été publiée dans la revue Nature<sup>4</sup> (Fig. 1).

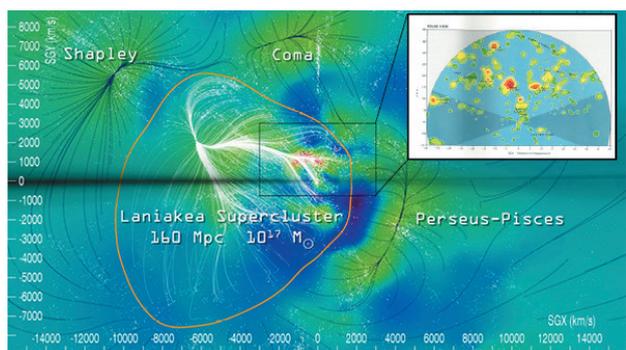
Mais comment ces superamas interagissent-ils ? En novembre 2015, l'équipe du Projet Cosmic Flows enrichissait la cartographie du cosmos d'une structure de dimension plus restreinte : Arrowhead<sup>5</sup>, un mini superamas de dimension 25 Mégaparsecs (Fig. 2). La surface reconstruite de son bassin d'attraction, en forme de « pointe de flèche » est piquée au point de contact des zones d'influence de trois géants cosmiques : les superamas Laniakea, Perseus-Pisces, et Coma. L'analyse des courants gravitationnels a permis, cette fois-ci, de délimiter le bassin d'attraction d'Arrowhead et de comprendre

l'implication des forces exercées par les trois superamas géants voisins dans le maintien de son équilibre.

Ces différentes découvertes, s'appuyant sur l'outil SDvision, apportent un nouvel éclairage sur de nombreuses hypothèses de l'astrophysique. Les travaux actuels portent sur l'étude du Cosmic Web et le rôle des vides cosmiques. La collaboration prépare un nouveau catalogue Cosmicflows-3 incluant 20 000 galaxies, avec des données notamment du télescope spatial Spitzer de la NASA. Un nouveau défi au vu de la puissance de calcul nécessaire pour cartographier avec une précision accrue un domaine de dimension d'un milliard d'années-lumière, centré sur notre galaxie.



**Figure 2 :** Visualisation en trois dimensions de la structure du bassin d'attraction d'Arrowhead en équilibre entre ses trois voisins cosmiques géants Laniakea, Perseus-Pisces et Coma.



**Figure 3 :** L'univers proche de mieux en mieux cartographié : de l'Atlas des Galaxies proches de Brent Tully & Richard Fisher en 1987 (en haut à droite) aux nouvelles visualisations possibles avec SDvision.

## Daniel POMARÈDE nous explique sa rencontre avec l'astrophysique

« Ce qui m'intéresse c'est la cosmographie au sens premier du terme, c'est-à-dire la cartographie du cosmos, la visualisation de ses structures. Cet intérêt est né au travers d'une rencontre avec Marguerite Pierre, chercheuse au Service d'Astrophysique (Irfu). En 2009, elle m'a demandé d'utiliser le logiciel SDvision pour l'aider à étudier la distribution des amas de galaxies observés avec le satellite XMM-Newton. J'ai donc dû, pour la première fois, adapter ce logiciel à des données réelles. Nous avons présenté nos résultats lors d'une conférence sur l'origine des galaxies en 2010. C'est à cette occasion que j'ai rencontré Brent Tully, l'astrophysicien de l'Université d'Hawaï qui a donné son nom à la relation de Tully-Fischer (qui caractérise la relation existant entre la vitesse de rotation des étoiles autour du centre d'une galaxie spirale avec la luminosité de celle-ci). Il considérait mon logiciel de visualisation comme un outil pouvant apporter une contribution majeure pour ses propres travaux, notamment son atlas de l'Univers (Fig. 3). Nous avons donc entamé une collaboration spontanée incluant également les astrophysiciens Hélène Courtois de l'Université de Lyon/IPNL, et Yehuda Hoffman du Racah Institute of Physics de l'Université Hébraïque de Jérusalem, » explique Daniel Pomarède.

<sup>4</sup>« The Laniakea Supercluster of Galaxies », R. Brent Tully et al., *Nature*, V. 513, n° 7516 (2014).

<sup>5</sup>« The Arrowhead Mini-supercluster of Galaxies », D. Pomarède et al., *The Astrophysical Journal*, V. 812, n° 1 (2015).

<sup>(4)</sup>Mégaparsec : Le parsec est une unité de longueur utilisée en astronomie valant, par définition, exactement (648 000/π) unités astronomiques (une ua valant 149 597 870 700 m). Son nom vient de la contraction de « parallaxe-seconde ». Un mégaparsec vaut un million de parsecs.

**D**epuis le début de l'exploration spatiale humaine, les missions, au-delà des 2 km de l'orbite basse terrestre, ont toujours été limitées à de courtes durées, moins de 6 mois. Parmi les problèmes techniques à résoudre, le risque d'irradiation est la principale préoccupation pour l'avenir des longues missions habitées vers Mars ou pour une colonisation de la Lune. Les sources de doses reçues dans l'espace proviennent essentiellement des particules chargées émises par le soleil et des rayons cosmiques galactiques. Alors que des stratégies de blindage existent pour les particules solaires, concevoir un blindage efficace pour les rayons cosmiques est plus difficile.

La solution retenue pour protéger le vaisseau spatial est de dévier les trajectoires des particules chargées en produisant un champ magnétique statique par de grands aimants supraconducteurs toroïdaux. Ce système de blindage magnétique (Fig. 1) requiert des technologies critiques (poids de l'aimant, fiabilité de fonctionnement et refroidissement) qu'il s'agit de développer et de valider. Le projet européen SR2S (*Space Radiation Superconducting Shield*) a pour but

d'accroître le niveau de ces technologies. Sur trois ans, plusieurs configurations ont été étudiées dont celle d'un aimant toroidal, comme Atlas (Fig. 2). Son avantage ? Il peut produire un champ magnétique quasiment nul à l'intérieur de l'aimant, constituant l'habitable. La taille est imposante : 10 m de long et 5 m de diamètre interne ! Les principaux partenaires, (l'Institut Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Columbus et le CEA), ont étudié, développé et testé différentes technologies « clés » nécessaires à la construction d'un aimant de cette taille.

Il faut protéger... et refroidir un tel aimant. Cela a été les deux principales tâches du SACM. La protection d'un aimant consiste simplement à éviter qu'il ne s'endommage lorsqu'il subit un quench (passage de l'état supraconducteur à l'état normal). Le SACM a étudié un système innovant établi sur des « switches » supraconducteurs (interrupteurs permettant de mettre des bobines en court-circuit sur elles-mêmes) et une partition *ad-hoc* des bobinages composant l'aimant. Ainsi, lors d'un quench, l'aimant se réchauffe seulement jusqu'à 170 K sans subir de dommage. Le système de refroidissement

utilise une combinaison de technologies spatiale et cryogénique (Fig. 3). Ne recevant *in fine* qu'une dizaine de watts, l'aimant sera refroidi directement par des cryogénérateurs via des liens thermiques conductifs. Il est également nécessaire d'intercepter la chaleur rayonnée depuis l'habitable humain, à 300 K, par un écran maintenu à une température d'environ 80 K. Pour cela, nous avons opté pour des systèmes de refroidissement indépendant de la gravité afin de distribuer la puissance des cryogénérateurs sur l'ensemble de l'écran. Le système choisi est un caloduc oscillant. Il

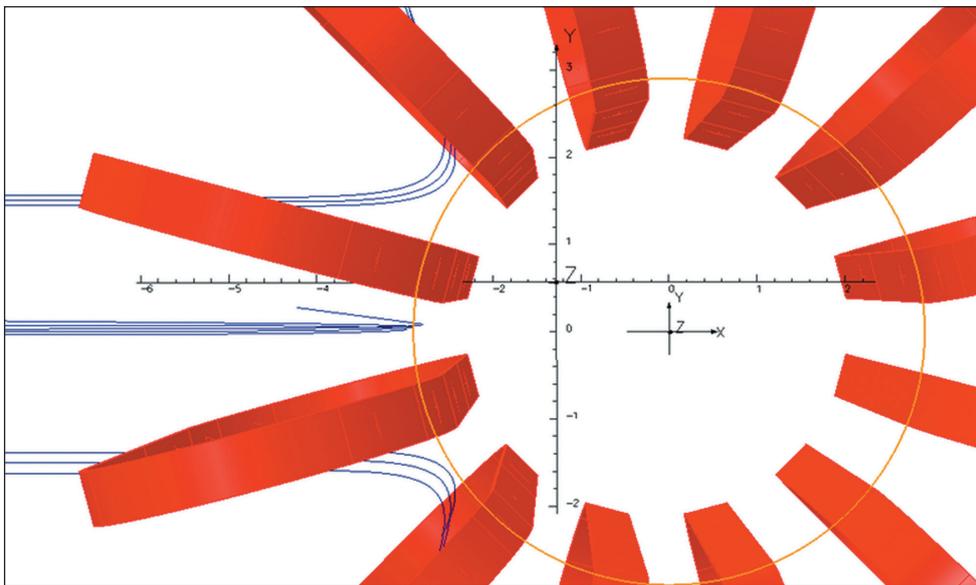
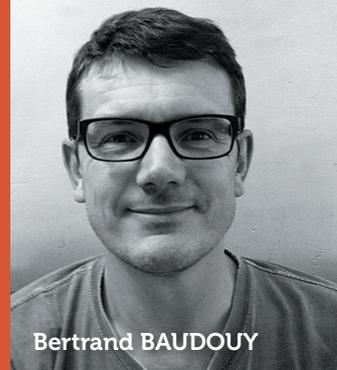


Figure 1 : Les particules chargées sont déviées (trajectoires en bleu) par le champ magnétique de l'aimant toroidal.

# Comment envoyer un équipage humain sur Mars ?

Par Bertrand BAUDOUY (Irfu, SACM)

Les équipages des futures missions envisagées vers Mars seront soumis aux rayonnements spatiaux intenses, sur de longues périodes (> 6 mois). Il faut donc trouver une solution pour les protéger contre l'irradiation. Dans le cadre d'un projet européen prospectif SR2S (FP7\*), le SACM a travaillé à la conception d'un bouclier magnétique supraconducteur : un aimant toroïdal dédié au blindage radiologique actif de l'habitacle. Il a été responsable de l'étude de la protection de l'aimant et du choix de son système de refroidissement cryogénique associé, conduisant au développement de « caloducs oscillants » qui devraient assurer un mode de transfert de chaleur non gravitaire. Les tests sont en cours.



Bertrand BAUDOUY

est actuellement en test au SACM. Il est composé d'un tube capillaire qui fait plusieurs allers-retours entre un évaporateur et un condenseur avant de reboucler sur lui-même. Ce tube est partiellement rempli de liquide et dimensionné pour que le phénomène de capillarité domine et crée une alternance de poches de vapeur et de bouchons de liquide qui vont osciller et échanger la chaleur. Ces caloducs du SACM mesurent environ 3,6 m de long. S'ils s'avèrent efficaces, ils seront les plus longs en fonctionnement à température cryogénique.

Au terme du projet, à la fin de 2015, le bilan est prometteur : plusieurs solutions ont été obtenues, elles permettent de poursuivre l'étude d'aimants de protection active pour le spatial et de développer de nouvelles techniques, comme les caloducs oscillants, qui ont déjà été proposés comme systèmes cryogéniques dans deux futurs projets d'aimants au SACM.

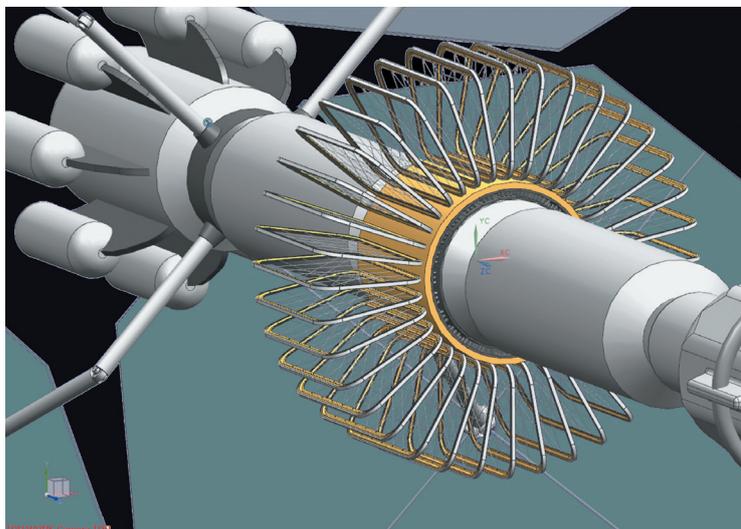


Figure 2: Vue de l'une des configurations toroïdales étudiées pour la protection radiologique active des astronautes.

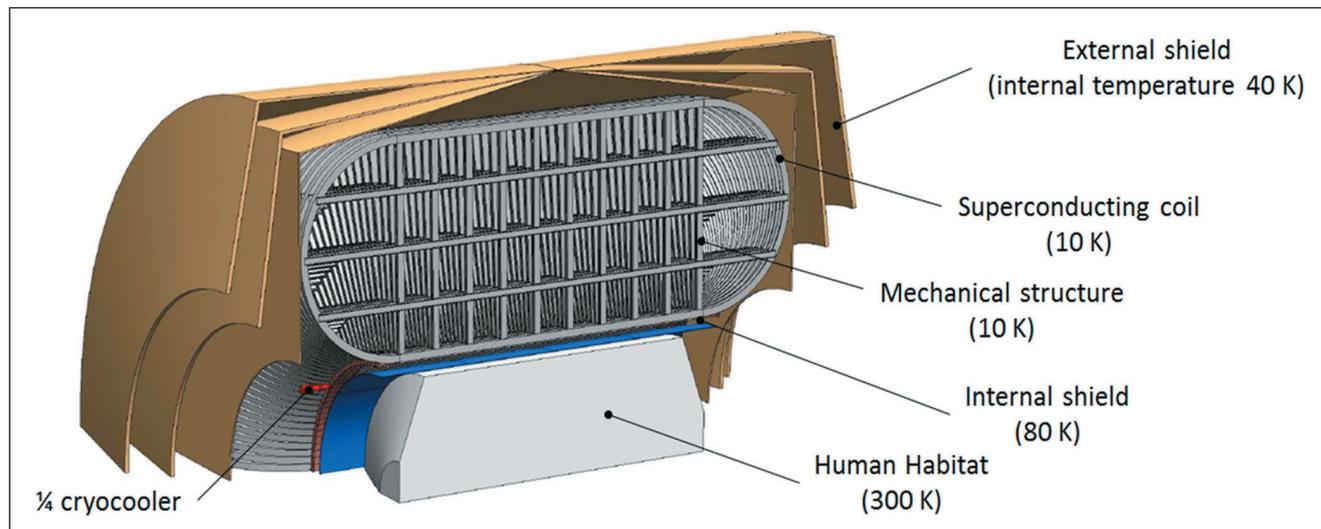


Figure 3: Pour réduire le flux solaire, la technologie d'écran « V-Groove », comme celle utilisée pour le James Webb Space Telescope, permet d'atténuer le flux incident de 200 kW à 2 W.

\*Pour plus d'informations sur le projet SR2S financé sur le plan-cadre européen « FP7 » (Funded Project 7) vous pouvez visiter le site web : [www.sr2s.eu](http://www.sr2s.eu).

# L'imagerie par Tomographie par Émission de Positons : nouveaux développements en vue avec CaLIPSO

Par Dominique YVON (Irfu, SPP)

Depuis 5 ans, des techniciens, ingénieurs et physiciens de l'Irfu s'investissent sur le projet CaLIPSO (Calorimètre Liquide Ionisation Position Scintillation). Il s'agit de réaliser l'imagerie de l'activité biochimique du cerveau avec une résolution spatiale de 1 mm<sup>3</sup>.

La technique utilisée est la Tomographie par Émission de Positons (en abrégé TEP). Elle consiste à injecter dans la circulation sanguine du patient un traceur biochimique contenant une substance radioactive, qui se fixe sur l'organe qui la consomme. L'atome radioactif du traceur, émetteur  $\beta^+$ , libère un positon (un antiélectron). Celui-ci s'annihile et produit deux photons énergétiques (tous deux de 511 keV) qui se propagent « dos à dos » le long d'une ligne passant par le point d'annihilation.

L'injection de traceur dans le corps du patient produit un grand nombre de paires de photons de 511 keV (des millions par seconde) pointant vers l'organe consommant le traceur. La détection de ces photons permet de reconstruire la carte de la concentration biochimique du traceur au sein des organes, et donc la carte de l'activité du métabolisme, pour le processus biochimique d'intérêt lors de l'examen (Fig. 1).

L'objectif du projet CaLIPSO est de développer un détecteur TEP dont les performances en termes d'efficacité et de précision permettraient de cartographier l'activité d'un cerveau humain avec une résolution similaire à celle des Imageurs par Résonance Magnétique nucléaire cliniques (en abrégé IRM). Comme l'imagerie TEP est 10<sup>8</sup> fois plus sensible que l'IRM pour mesurer les abondances des neurotransmetteurs, un imageur TEP à haute résolution serait un excellent complément des imageurs IRM pour le diagnostic et la recherche médicale. L'efficacité de détection est un point sensible car, pour une même qualité d'image, plus le détecteur est efficace, plus on peut réduire la dose de traceur injectée. La résolution du détecteur, quant à elle, conditionne directement la résolution spatiale des images finales. Et pour reconstruire avec une précision de 1 mm<sup>3</sup> la position d'annihilation des positons via le croisement des lignes de vol des photons de 511 keV, il faut que la résolution spatiale des détecteurs dans lesquels interagissent ces photons soit de précision équivalente.

Une exigence supplémentaire est de pouvoir chronométrer avec une précision proche de 100 picosecondes les temps d'arrivée des photons dans les détecteurs. On peut alors localiser le point d'annihilation le long de la ligne de vol, ce qui améliore spectaculairement le contraste des images reconstruites. On appelle cette technique le « temps de vol ». Pour atteindre les performances voulues, le projet CaLIPSO s'appuie sur le développement d'une double détection (optique et de charge), qui offre un potentiel inégalé, et marque une rupture technologique, en ce qu'il utilise un nouveau milieu de détection, le TriMéthyl Bismuth liquide (abrégé TMBi).

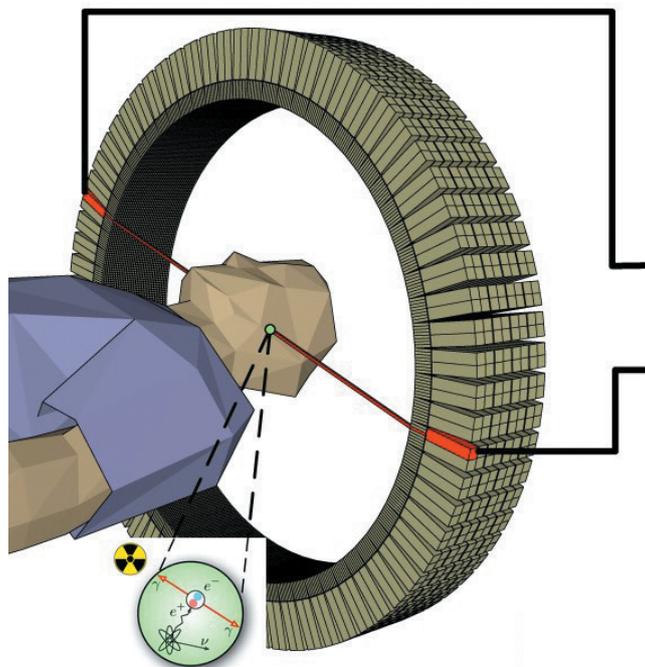


Figure1: Principe de l'imagerie TEP.

L'interaction des photons de 511 keV dans ce liquide engendre un flash quasi-instantané de quelques dizaines de photons dans le spectre visible, et libère des paires de charges. La lumière produite est détectée par un photodétecteur rapide, tandis que les charges libérées dérivent le long d'un fort champ électrique, et sont collectées par un détecteur de charge densément pixellisé (Fig. 2). La détection simultanée des signaux lumineux et des charges conduit à des performances très prometteuses. Les études permettent d'envisager un positionnement des annihilations dans un volume de 1 mm<sup>3</sup>, une résolution temporelle de 100 ps limitée par la qualité des photodétecteurs, une résolution en énergie de 10 % et une probabilité de conversion des photons en signal électrique de 47 %. Ces paramètres de détection peuvent être atteints simultanément.

Les travaux sur la détection optique sont bien avancés : le prototype optique se révèle cinq fois plus efficace que les meilleurs détecteurs qui fonctionnent suivant un principe équivalent (Fig. 3). La résolution en temps mesurée est encore modeste : 539 ps, essentiellement due aux performances intrinsèques du photomultiplicateur. Elle est déjà suffisante



pour la construction d'un imageur TEP. Une nouvelle technologie de photomultiplicateurs, dite de micro-canaux, va être utilisée afin d'obtenir des résolutions temporelles bien meilleures, et permettre d'utiliser l'information du temps de vol.

La mesure de l'ionisation nécessite d'obtenir des temps de vie des électrons libres dans le TMBi liquide supérieurs à  $10 \mu s$ , et pour cela d'extraire les contaminants électronégatifs. L'équipe CaLIPSO a réalisé l'ultra-purification d'un liquide cousin, le Tétraméthyl Silicium. Il reste à dépasser les enjeux spécifiques au TMBi et à construire et tester une chambre d'ionisation pixellisée. Pour cela, de petits prototypes ont été construits, et l'électronique de lecture à bas bruit a été validée. L'équipe travaille déjà sur les technologies nécessaires pour réaliser des détecteurs massivement multi-pixellisés.

Les travaux de développement se poursuivent. L'équipe élabore des simulations Monte-Carlo, en collaboration étroite avec le Service Hospitalier Frédéric Joliot/IMIV, pour calculer les performances d'une future machine TEP complète, fondée sur la technologie CaLIPSO. Les résultats sont conformes aux objectifs du projet et démontrent qu'une fois les technologies maîtrisées, il sera possible de réaliser un instrument d'imagerie TEP neurologique efficace et de haute résolution spatiale.

La réalisation d'un tel détecteur en rupture technologique requiert des compétences et des ressources très variées. L'équipe est reconnaissante envers les nombreux collègues hors de l'Irfu qui ont apporté leur soutien et leurs compétences, en particulier, au CEA, les groupes associés au Programme Interdisciplinaire Technologie pour la Santé, ceux de DSM/IRAMIS, de DEN/DANS et du DRT/LIST; et au-delà l'IN2P3/CSNSM et les membres de la centrale de technologie PANAMA.

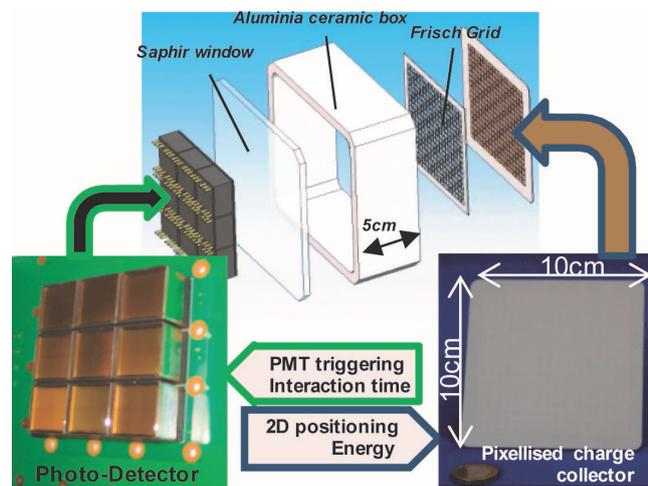


Figure 2 : Principe du détecteur CaLIPSO.

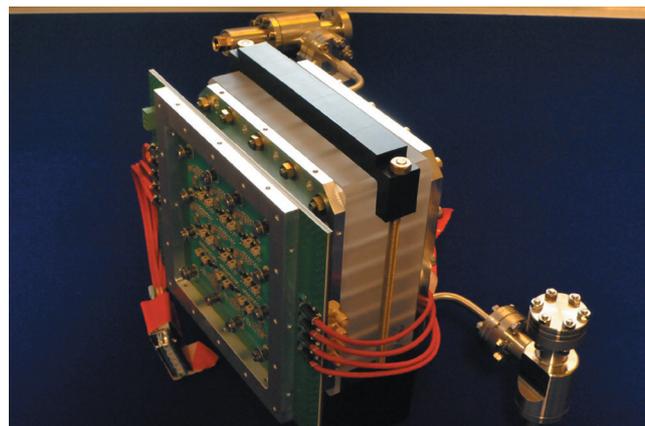


Figure 3 : Premier prototype de détecteur optique CaLIPSO.

# LHC : Trois, deux, un... redémarrez !

Le 3 juin 2015 se produisaient pour la première fois, aux quatre points de croisement des faisceaux du plus puissant accélérateur au monde, le LHC, des collisions de protons à une énergie jamais encore atteinte : 13 TeV. Pour l'expérience Atlas, c'est l'événement 25884805 de la période d'acquisition 266904 qui a marqué le coup d'envoi de la deuxième période de prise de données au LHC, appelée « run 2 » (voir l'image ci-dessous). Pour arriver à ce niveau de performance, deux ans de travaux de mise à niveau ont été nécessaires.

Article co-écrit par Alice MOUNISSAMY (Irfu, Com) et Nathalie BESSON (Irfu, SPP, Atlas)

Alice MOUNISSAMY

Nathalie BESSON

10

N° 93 - FÉVRIER 2016

Si la première période de prise de données au LHC (run 1) entre 2010 et 2012 s'est conclue par la belle découverte du boson de Higgs, l'étude de ses propriétés et la recherche de physique au-delà du modèle standard restent des champs ouverts. Avec des données plus nombreuses et à plus haute énergie, les physiciens espèrent traquer les phénomènes rares avec une plus grande précision.

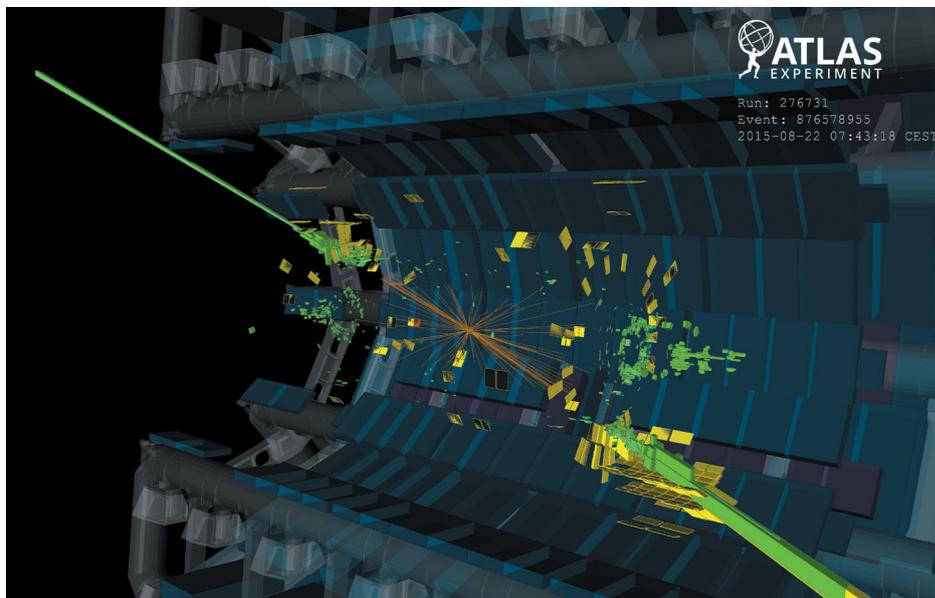
L'équipe du LHC a donc procédé à la montée en énergie, les deux faisceaux passant de 4 à 6,5 TeV chacun, mais aussi en luminosité. En d'autres termes, le nombre de paquets par faisceau a été augmenté. Conséquence : des densités de charges importantes produites par les faisceaux qu'il a fallu stabiliser. Par exemple, une opération de « scrubbing » ou grattage a eu lieu pour améliorer la qualité du vide dans les tubes où circulent les faisceaux. Ce travail minutieux a permis de diviser par 2 l'espacement entre paquets, maintenant de 25 ns et d'augmenter la charge totale par anneau, maintenant de  $26 \cdot 10^{13}$  protons, soit  $4 \cdot 10^{13}$  de plus qu'en 2012. In fine, en seulement trois mois,  $4 \text{ fb}^{-1}$  de données\* (ce qui correspond à un peu moins de ce qui a été enregistré pendant les 8 mois de prise de données en 2011) ont pu être enregistrées. Mission accomplie.

Pour s'adapter à ces nouvelles conditions de prise de données, les collaborations Atlas et CMS ont profité de l'arrêt pour mettre à niveau les détecteurs (des tubes à vide aux spectromètres à muons en passant par la calorimétrie), les logiciels d'acquisition, de déclenchement et d'analyse, ainsi que les procédures d'alignement et d'étalonnage des détecteurs. Finalement, les deux expériences ont abordé le « run 2 » avec presque 100 % de leurs 90 millions de canaux de lecture opérationnels, et les performances sont au moins analogues à celles du « run 1 ». Par

exemple, pour Atlas et sous la responsabilité des équipes de l'Irfu, la résolution en impulsion des muons a été améliorée de 25 % pour des muons de 1 TeV d'impulsion (dans la partie centrale du détecteur à muons), ce qui est d'une importance capitale pour les analyses à ces nouvelles hautes énergies.

Ce travail titanesque débouche déjà sur de nombreux résultats de physique, présentés lors de la conférence de fin d'année au CERN sur la physique au LHC à 13 TeV (liens ci-dessous). Par exemple, pour CMS et grâce aux équipes de l'Irfu, la section efficace de production à 13 TeV de bosons Z accompagnés d'un ou plusieurs jets de particules, a été précisément déterminée, en fonction du nombre de jets produits et de l'impulsion de ces jets.

En parallèle des analyses standard, de nouveaux types de signaux sont recherchés et les données recèlent peut-être des surprises : le signal d'une particule potentielle de masse environ 750 GeV et se désintégrant en deux photons, reconstruit par les deux détecteurs mais pour l'heure peu significatif, fait d'ores et déjà l'objet d'investigations plus poussées.



Reconstruction d'une des premières collisions à 13 TeV dans le détecteur Atlas. Seule une portion du détecteur est représentée.

\*En physique fondamentale, les sections efficaces sont exprimées en barn (symbole b). Cette unité est homogène à une surface :  $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ . Le fb est le symbole du femtobarn soit  $10^{-15} \text{ barn}$ . La luminosité est homogène à l'inverse d'une section efficace et s'exprime donc en  $\text{et } 1/\text{fb} = \text{fb}^{-1}$ .



Angèle SÉNÉ



## L'Irfu au cœur de Paris-Saclay

Angèle SÉNÉ (Irfu, Dir) et Frédéric DÉLIOT (Irfu, SPP; co-directeur de l'École Doctorale PHENIICS)



Frédéric DÉLIOT

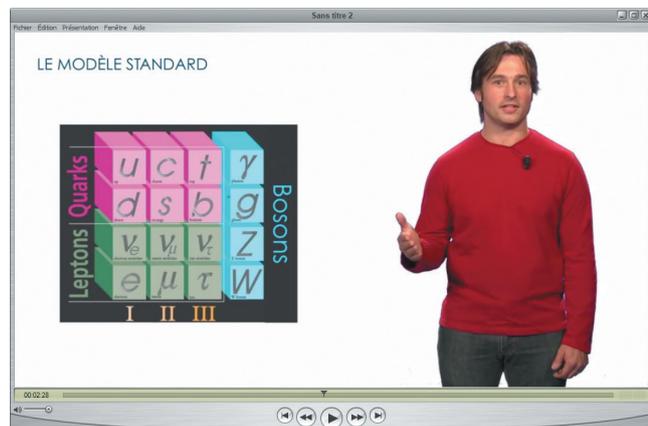
Les jalons sont d'ores et déjà posés : une carte d'étudiant officielle, la garantie d'un doctorat au label unique, la création d'un espace doctoral commun ; une politique d'admission normalisée avec des processus de sélection adaptés aux divers cursus de formation ; mais aussi la mise en place d'un cadre inédit pour les futurs élèves, comme la création d'un pôle entrepreneuriat au sein du campus. La construction de cette gigantesque université s'appuie sur le fonctionnement fédéral de ses dix-neuf partenaires. Sept organismes de recherche dont le CEA et le CNRS, rejoignent les conseils administratifs de Paris Saclay avec les Établissements d'enseignement supérieur (dix grandes écoles et deux universités) associés dans cette COMUE (COMmunauté d'Universités et d'Établissements) de référence. L'objectif de ce rapprochement est, avant tout, de créer toutes les conditions d'un foisonnement scientifique, technologique et socio-économique au sein d'une structure compétitive calquée sur les standards internationaux. Le périmètre de ce cluster doit permettre aux étudiants de bénéficier d'un environnement scientifique d'excellence et d'équipements de pointe pour se former par la recherche, l'entrepreneuriat, et l'innovation technologique, et préparer leur insertion professionnelle. Pour cela ils pourront s'appuyer sur les atouts uniques du plateau de Saclay : 15 % de la recherche française en effectif et un tissu industriel important.

L'Irfu contribue activement au démarrage de cette nouvelle université :

- ♦ au niveau de la gouvernance, avec des membres élus à la présidence du conseil académique, organe consultatif et représentatif du personnel, et dans les collèges des départements chargés de la coordination stratégique des axes de recherche ou d'innovation.
- ♦ par l'investissement croissant de son personnel dans l'enseignement et l'encadrement (de la licence au doctorat), la gestion d'écoles doctorales ou de masters, et le développement d'outils pédagogiques comme les MOOCs<sup>1</sup>. Par exemple, l'Irfu a participé, en tant que membre fondateur, à la fusion des trois Ecoles Doctorales (ED) : PNC (Physique Noyaux et Cosmos), MIPEGE (Modélisation et Instrumentation en Physique, Énergies, Géosciences et Environnement), ED de Polytechnique, pour engendrer l'école doctorale PHENIICS<sup>2</sup>. C'est maintenant la plus grande formation doctorale dévolue à la physique subatomique avec un spectre d'activités allant de la physique fondamentale à la recherche appliquée. Cette école doctorale, comme les autres écoles<sup>3</sup> associant des équipes de l'Irfu, est responsable de l'attribution de financement de thèses, de la validation des étudiants candidats à une thèse avant leur inscription mais aussi de la formation et du suivi des doctorants pendant leur contrat.



Prise de vues (à gauche, l'intervenant, V. Minier, SAp) pour la réalisation des vidéos du MOOC Irfu, ExplorUnivers.



Vidéo du MOOC PHENIICS avec l'intervenant, F. Déliot.

Les ingénieurs chercheurs de l'Irfu sont aussi à l'initiative de MOOCs<sup>4</sup>, lancés respectivement en mars 2015 pour le MOOC Grand Public « ExplorUnivers » en partenariat avec l'Université de Nantes, et en novembre 2015, pour le MOOC « Des particules aux étoiles » de l'école doctorale PHENIICS. Ces outils numériques offrent des voies alternatives d'apprentissage aux étudiants, du cours d'introduction jusqu'au module intégré au cursus universitaire, et demandent un effort particulier de conception pour les rendre attractifs et didactiques.

La dynamique Paris-Saclay laisse envisager de belles perspectives. Souhaitons une longue vie à la nouvelle université !



Site de l'Université : <https://www.universite-paris-saclay.fr/fr>  
Pour transmettre une actualité scientifique, annoncer un événement sur le site : [info@universite-paris-saclay.fr](mailto:info@universite-paris-saclay.fr)

<sup>1</sup>MOOCs Massive Online Open Courses.

<sup>2</sup>École doctorale PHENIICS : Particules, Hadrons, Énergie, Noyau, Instrumentation, Imagerie, Cosmos et Simulation (ED576)

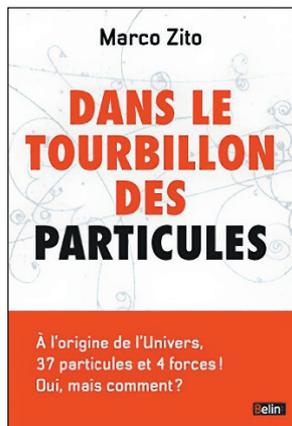
<http://www.universite-paris-saclay.fr/fr/formation/doctorat/particules-hadrons-energie-noyau-instrumentation-imagerie-cosmos-et-simulation-0>

<sup>3</sup>École doctorale Astronomie, Astrophysique d'Île-de-France (ED 127, multisite, co-accréditée par l'UPSac) ; École doctorale Electrical, Optical, Bio - physics and Engineering (ED 575 EOBÉ, accréditée par l'UPSac) ; École doctorale Sciences de la Terre (ED 560 STEP'UP, affiliée à l'Université Sorbonne Paris Cité).

<sup>4</sup>MOOC Des particules aux étoiles : <https://www.france-universite-numerique-mooc.fr/courses/ParisSaclay/71001/session01/about>

MOOC ExplorUnivers (à la découverte de l'univers) : [https://www.france-universite-numerique-mooc.fr/courses/univnantes/31003/Trimestre\\_1\\_2015/about](https://www.france-universite-numerique-mooc.fr/courses/univnantes/31003/Trimestre_1_2015/about)

## Plumes



**Marco ZITO,**  
Dans le tourbillon  
des particules,  
Éditions Belin.

L'auteur nous offre un voyage à travers le temps avec la restitution fascinante de la grande épopée de la physique des particules jusqu'à nos jours. Comment cette physique explique-t-elle la matière et l'Univers visible ? Le

tout tient à un ensemble de particules élémentaires et à quatre forces fondamentales.

Mais la quête de connaissances n'est pas terminée, la matière n'a pas dévoilé tous ses secrets. L'observation à plus grande échelle nous permet par exemple de déceler l'existence de matière « cachée », dite « matière noire », mais sa nature reste encore un mystère aux yeux des scientifiques. Des énigmes, qui constituent les défis de demain.

## Expositions, anniversaires

◆ L'Irfu a été fortement impliqué dans l'exposition organisée à la Cité des Sciences et de l'Industrie de la Villette pour célébrer les 70 ans du CEA en 2015. Consultez les dossiers de physique, les visites virtuelles et les exposés sur le site : <http://portail.cea.fr/70ans>

◆ En 2015, le SAp a également fêté 50 ans d'astrophysique : <http://irfu.cea.fr/Sap/Historique/>

## Caméras

À l'affiche des festivals de films scientifiques en 2016 : « Cornichon Supernovæ », documentaire de 52' sur le rayonnement cosmique entre Art et Science au Planétarium de Vaulx-en-Velin, avec la participation de Th. Stolarczyk (SAp). Il a été coproduit par le CEA et le Planétarium.

Au gré de leur vie dans les projets, conception, réalisation, tests, ici ou ailleurs, les équipements voyagent... Voici en 2015 quelques-uns des **Va-et-Vient** à l'Irfu

**Vient.** Le cryostat du futur tokamak **JT-60SA** a été validé avec un aimant test en novembre 2015 et les ingénieurs du projet commencent déjà à caractériser le premier aimant supraconducteur du tokamak, arrivé le 17 décembre 2015. C'est parti pour 18 bobines à tester en 2 à 3 ans sur la station de pré-assemblage conçue par l'Irfu !

**Va.** La conception de **R3B-GLAD** dipôle supraconducteur de grande acceptance de 22 tonnes a démarré en 2005. Après sa dernière étape de test dans son cryostat, en novembre 2015, l'ensemble de près de 60 tonnes est parti pour sa destination finale en Allemagne à **GSI**, où il permettra d'analyser des réactions de faisceaux d'ions lourds en 2017.



**Vont.** Douze **cryomodules** (constitués chacun d'une cavité accélératrice en matériau supraconducteur et du système de cryogénie, voir la photo) sont partis fin octobre pour leur installation sur l'accélérateur linéaire de particules **Spiral2**, au Ganil (Caen). Ils sont placés après l'injecteur et la cavité RFQ (Radio Fréquence Quadrupole). Celle-ci, développée et installée par l'Irfu, a été mise en fonctionnement avec succès, elle a accéléré le 1<sup>er</sup> faisceau Spiral2 de protons à l'énergie nominale de 0,75 MeV, le 3 décembre 2015.

**Va.** Le **spectrographe CLAS12** est arrivé à **Jefferson Lab** fin 2015. Dix jours d'installation ont suivi pour réaliser avec succès son réveil (détecteurs sous gaz et tension, en fonctionnement nominal). Ce détecteur de vertex cylindrique gazeux est un bijou technologique fabriqué à l'Irfu.

**Vient.** Pendant que les pièces du puzzle de l'aimant 11,7 T du projet **Iseult** s'assemblent à Belfort et avant son arrivée à Saclay en 2016, plusieurs éléments du satellite cryogénique commencent à être installés à Neurospin.

**À suivre dans les prochains numéros, les multiples tribulations du matériel Irfu...**

Et pour en savoir plus, consultez les pages Web des faits marquants 2015 :

[http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie\\_des\\_labos/Ast/astphp?t=actu&y=2015](http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/astphp?t=actu&y=2015)

**Directeur de la publication (Chef de l'Irfu) :** Anne-Isabelle ETIENVRE - **Direction scientifique :** Vanina RUHLMANN-KLEIDER - **Rédaction en chef :** Valérie LAPOUX.

**Design & Impression :** Idées fraîches

**Comité de rédaction du numéro 93 :** Nathalie BESSON (SPP), Philippe BRIET (SEDI, LIS), Frédéric DÉLIOT (SPP), Mylène DONNART-BARRAIL (Irfu, Dir), Andrea FERRERO (SPhN, LSN), Bertrand HERVIEU (SACM, LCSE), Fabien JEANNEAU (SEDI, DEPHY), Sophie KERHOAS-CAVATA (Irfu, Dir), Valérie LAPOUX (SPhN, LENA), Ange LOTODE (SIS, LEIGE), Pierre MANIL (SIS, LCAP), Jacques MARRONCLE (SEDI, LASD), Thomas MATERNA (SPhN, LEARN), Emmanuel MOULIN (SPP), Vanina RUHLMANN-KLEIDER (SPP), Yves SACQUIN (SPP), Angèle SÉNÉ (Irfu, Dir), Thierry STOLARCZYK (SAp), Didier VILANOVA (SPP).

**Crédit Photos :** Irfu, Kamioka Observatory (p. 2-3), D. Pomarède (p. 4-5), SR2S (p. 6-7), V. Lapoux (p. 1), ED PHENIICS (p. 11), D. Aubert, Univ. de Nantes (p. 11), Ganil-Spiral2 (p. 12).

**Dépôt légal :** Février 2016 - ISSN 1268-7855

**Numéros de Scintillations :** <http://irfu.cea.fr/ScintillationS/>