



**Rapport d'activité**  
**2011-2014**

12 février 2014

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>Activités du GDR</b> .....	<b>4</b>
<b>Rapports des groupes de travail</b> .....	<b>5</b>
<b>a. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU NEUTRINO (GT1)</b> .....	<b>6</b>
i. Compréhension des oscillations neutrinos et approfondissement de la connaissance de la matrice MNSP.....	6
ii. Étude des anomalies réacteur et gallium pour la recherche de neutrinos stériles.....	7
iii. Recherche de désintégration double $\beta$ sans émission de neutrino .....	7
iv. Résumé des présentations aux réunions du GDR v concernant le GT1 .....	9
<b>b. Physique au-delà du Modèle Standard (GT2)</b> .....	<b>9</b>
i. Objectifs et rôle du groupe 2 au sein du GDR .....	9
ii. Composition du groupe 2 .....	10
iii. Thèmes de recherche .....	10
iv. Réalisation des objectifs .....	10
v. Résultats obtenus .....	12
vi. Travaux en cours et projets futurs.....	15
vii. Résumé des présentations du groupe 2 aux réunions du GDR.....	15
viii. Liste des publications des membres du Groupe 2 liées aux thèmes de recherche du GDR (pendant la période couverte par ce rapport) .....	16
<b>c. NEUTRINOS DANS L'UNIVERS (GT3)</b> .....	<b>19</b>
i. Objectifs.....	20
ii. Résumé des présentations du groupe 3 aux réunions du GDR .....	20
iii. Thèmes de recherche abordés et résultats obtenus .....	21
iv. Conclusions.....	28
<b>d. Accélérateurs, moyens de détection, R&amp;D et Valorisation (GT4)</b> .....	<b>29</b>
i. Objectifs et rôle du groupe.....	29
ii. Thématiques de recherche.....	29
iii. Conclusion et perspectives .....	34
iv. Résumé des présentations au GDR concernant le GT4 .....	35
v. Références.....	35
<b>e. Outils communs aux groupes de travail (GT5)</b> .....	<b>36</b>
i. Objectifs du et rôle du groupe.....	36
ii. Liste de exposés du GT5 .....	36
<b>Conclusions</b> .....	<b>37</b>
<b>Futur</b> .....	<b>37</b>
<b>Annexe 1 : Description de la structure du GDR Neutrino</b> .....	<b>39</b>
<b>Annexe 2 : Laboratoires et équipes participants au GDR</b> .....	<b>40</b>
<b>Annexe 3 : Feuille de route pour la physique des neutrinos</b> .....	<b>41</b>

## Introduction

Le GDR neutrino (GDR2918) a été créé en janvier 2005 pour une durée initiale de deux ans puis renouvelé pour 4 ans en 2007 puis en 2011.

### La mission du GDR Neutrino :

La mission de ce groupement de recherche s'articule autour de 4 thèmes qui sont :

- de fédérer les équipes de recherche du CEA et du CNRS travaillant autour de la physique du neutrino que ce soit au niveau expérimental ou théorique.
- de procéder à l'élaboration de la «feuille de route» scientifique de la communauté française dans le domaine du neutrino, en cohérence avec l'ensemble des partenaires internationaux.
- de consolider et accroître l'expertise de la communauté française dans la compréhension des propriétés du neutrino.
- de constituer un forum pour l'ensemble des jeunes chercheurs de la discipline, en particulier les étudiants en thèse et les jeunes postdocs.

### - Fonctionnement du Groupement

La structure de travail du GDR repose sur l'existence de 5 groupes de travail. Ceux-ci permettent de couvrir l'ensemble des sujets et activités neutrinos existantes en France. Les sujets sont d'intérêt commun à tous les groupes et sont suffisamment larges de façon à pouvoir attirer toute personne de la communauté.

Les thèmes couverts sont :

- GT1 - Détermination des paramètres du neutrino
- GT2 - Physique au-delà du modèle standard
- GT3 - Neutrinos dans l'univers
- GT4 - Accélérateurs, moyens de détection, R&D et valorisation
- GT5 - Outils communs aux groupes de travail

Des sessions plénières tenues deux fois par an, permettent de faire le point sur l'avancement des travaux de chaque groupe et de fixer de nouvelles orientations.

Les activités du GDR évoluent et peuvent être influencées par le contexte mondial et par le travail d'autres groupes dans les autres pays. Les groupes de travail sont donc amenés à collaborer avec des groupes étrangers ayant des activités similaires et ont recours occasionnellement à des experts provenant d'autres communautés.

Une attention particulière est portée aux jeunes chercheurs (thésards, post-docs). Au cours des réunions plénières le GDR favorise autant que possible des exposés effectués par les étudiants en thèse.

Les directions scientifiques principales du GDR sont revues par le Conseil de Groupement composé du Conseil scientifique et des coordinateurs des groupes de travail. La composition du conseil est donnée en Annexe 1.

Le contact avec les différents laboratoires impliqués dans les neutrinos (IN2P3 du CNRS, Irfu et IPHT du CEA) est effectué à travers un représentant qui est chargé de récupérer et diffuser les informations au niveau de son unité. Les représentants de chaque laboratoire sont aussi chargés de recenser les activités relatives au GDR et maintenir un descriptif des activités de chaque membre de l'unité.

Le budget du GDR est consacré uniquement aux frais de missions nécessaires à la participation aux réunions plénières et, dans la mesure du possible, aux réunions des groupes de travail des agents des laboratoires du CNRS. Le reste des dépenses doit être couvert par les laboratoires participants.

La communauté française des neutrinos regroupe à peu près une centaine de chercheurs théoriciens et expérimentateurs. Chaque réunion plénière voit son nombre de participants atteindre à peu près les 2/3 de la communauté ce qui offre une unique occasion de réunir toutes les expertises concernées.

A la fin 2013, 26 étudiants de thèse et 11 postdocs de moins de 3 ans étaient impliqués dans la recherche en physique des neutrinos en France.

## Activités du GDR

### Actions effectuées

Le GDR et ses groupes de travail se réunissent essentiellement deux fois par an pendant deux jours en faisant le tour des instituts participants. Une des deux journées est consacrée aux travaux des groupes de travail alors que l'autre est consacrée à des exposés et discussions sur des sujets d'actualité. Pendant cette journée, de nombreux chercheurs extérieurs sont invités à exposer leurs travaux et à participer aux discussions.

Pendant les 4 années couvertes par ce mandat, les réunions suivantes ont eu lieu:

- Réunions plénières: LAL Orsay, 16-17 juin 2014 (**à venir**)
- Réunions plénières: IPNL Lyon, 12-13 novembre 2013 ([page web](#), [transparents](#))
- Réunions plénières: LPNHE Paris, 21-22 mai 2013 ([page web](#), [transparents](#))
- Réunions plénières: LPC Caen, 30-31 octobre 2012 ([page web](#), [transparents](#))
- Réunions plénières: APC Paris, 20-21 juin 2012 ([page web](#), [transparents](#))
- Réunions plénières: LAPP, 28-29 Novembre 2011 ([page web](#), [transparents](#))
- Réunion conseil de groupement: APC, 2 Septembre 2011

Ces années ont été consacrées à la préparation et la participation aux journées de prospectives IN2P3 et Irfu, à la contribution de la communauté française des neutrinos à la réunion préparatoire de la stratégie Européenne du conseil du CERN et à la réflexion sur les contributions françaises dans les projets neutrino à court et moyen terme.

Le GDR a pu ainsi contribuer activement à la mise à jour de la "feuille de route" scientifique de la communauté française, en cohérence avec l'ensemble des partenaires internationaux. Cette synthèse couvre les thèmes de recherches principaux sur lesquels une activité des groupes français est en cours ou envisagé. Pour ce mandat l'exercice a été réalisé en 2 temps.

Tout d'abord pour la préparation des journées prospectives Irfu-IN2P3 qui ont eu lieu en avril 2012 (<http://journeesprospective-in2p3-irfu.in2p3.fr/>) un groupe de travail, dont une grande partie émanait du GDR, a été mis en place en 2011 et a permis de préparer ces journées et de fournir le rapport correspondant. Le document détaillé et le document de synthèse sont accessibles aux adresses suivantes:

[http://journeesprospective-in2p3-irfu.in2p3.fr/ressources/pdf/gt\\_4\\_Prospectives-neutrino\\_160212.pdf](http://journeesprospective-in2p3-irfu.in2p3.fr/ressources/pdf/gt_4_Prospectives-neutrino_160212.pdf)

et

[http://journeesprospective-in2p3-irfu.in2p3.fr/ressources/pdf/gt\\_4\\_Synthese\\_Prospectives-neutrino\\_160212.pdf](http://journeesprospective-in2p3-irfu.in2p3.fr/ressources/pdf/gt_4_Synthese_Prospectives-neutrino_160212.pdf)

Quatre des responsables des groupes de travail du GDR ont donné les présentations neutrinos à ces journées de prospectives (S. Lavignac, G. Mention, L. Simard, A. Tonazzo).

En juillet 2012 le document de synthèse alors produit a été mis à jour pour être soumis comme contribution française au 'CERN Council Open Symposium on European Strategy for Particle Physics' à Varsovie <https://indico.cern.ch/event/175067/contribution/31> en vue de la préparation de la stratégie européenne du conseil du CERN.

Dans un deuxième temps, le paysage pour les futurs projets ayant évolué, notamment pour les projets de faisceau longue distance, le conseil de groupement du GDR a mis à jour la feuille de route qu'il a soumise aux directions de l'IN2P3 et de l'Irfu ainsi qu'aux Conseil Scientifiques des 2 instituts en mai 2013.

Le document produit correspondant est mis en annexe 3 de ce rapport.

Les sujets principaux traités pendant les réunions générales ont permis de revoir de manière systématique toutes les recherches qui ont abouti à des résultats majeurs ces dernières années qui sont entre autre la détermination de  $\theta_{13}$ , la mise en évidence d'apparition de neutrino de saveur différentes dans un faisceau avec T2K et OPERA, l'observation de neutrinos de l'univers de très grande énergie avec Icecube.

De plus des revues théoriques relativement complètes sur les neutrinos stériles ont permis de faire le pont avec les projets expérimentaux dans lesquels les groupes français s'engagent avec des sources radioactives intenses ou des réacteurs. A cela s'ajoutent des revues expérimentales sur les recherches de désintégration double beta sans émission de neutrinos permettant d'apprécier l'articulation de cette branche avec d'autres volets de recherche et de pouvoir discuter les résultats récents des projets EXO-200, Gerda et Nemo3.

De plus, durant ces journées un certain nombre de discussion a lieu aussi pour faire le point sur les engagements dans les projets sur contrats européens et sur les futurs projets internationaux sur accélérateurs.

Le GDR, malgré les réductions importantes de budget ces dernières années, a repris le principe de financer en partie les frais pour envoyer régulièrement des étudiants de thèse ou postdoc à des écoles d'été consacrées à la physique du neutrino, à des workshops ou des conférences thématiques.

Régulièrement, lors des réunions du GDR, il est demandé à un jeune chercheur de présenter les dernières nouvelles ou de résumer les faits saillants qui ont été présentés lors des conférences principales sur la physique des neutrinos.

Parmi les opérations envisagées pour les prochaines années, nous comptons poursuivre selon les mêmes axes couverts actuellement et qui sont:

- Maintenir une veille scientifique sur les évolutions du domaine de recherche à la fois théorique et expérimentale. Débattre dans la communauté des projets actuels, des résultats scientifiques et les futures orientations.
- Contribuer activement à la mise à jour de la "feuille de route" scientifique de physique des neutrinos de la communauté française et à la prospective nationale.
- Développer les échanges entre les différentes branches de la thématique.
- Favoriser la formation des jeunes en les faisant participer à des réunions, et en apportant des aides pour participer à des ateliers et conférences pour présenter leurs travaux au niveau international.

Le bilan détaillé des activités des groupes de travail (GT) est décrit dans la prochaine section de ce document.

## Rapports des groupes de travail

Chaque groupe de travail est animé par 2 coordinateurs dont les noms suivent :

GT1-coordonateurs : Guillaume Mention et Laurent. Simard

GT2-coordonateurs : Stéphane Lavignac et Marco Cirelli (jusqu 'en 2013) Ana Teixeira (en 2014)

GT3- coordonateurs : Cristina Volpe et Antoine Kouchner

GT4- coordonateurs : Eric Baussan et Andrea Giuliani

GT5- coordonateurs : Anselmo Meregaglia et Alessandra Tonazzo

## A. DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU NEUTRINO (GT1)

Ce groupe de travail s'articule autour des diverses approches expérimentales afin de déterminer les paramètres des neutrinos. Les objectifs de ce groupe sont :

- de favoriser les échanges d'informations entre les diverses équipes françaises engagées sur des expériences sur les neutrinos au travers de brèves présentations et de sur les états d'avancement lors des rencontres ;
- d'assurer un suivi des connaissances mondiales sur les paramètres d'oscillation et faire une synthèse de cette connaissance au cours du temps.
- de fédérer et renforcer les travaux des experts français visant à contribuer à la définition, puis à la réalisation dans le cadre d'un partenariat international des étapes pour le plus long terme.

Le groupe GT1 a poursuivi ces objectifs tout au long de ces dernières années en programmant systématiquement lors des réunions du GDR neutrino des présentations ciblées et en permettant aux plus jeunes (doctorants et post-doctorants) de participer activement au travers d'exposés ou de discussions avec la communauté de physique des neutrinos en France.

Depuis septembre 2011, il y a eu 5 réunions du GdR dans lesquelles le groupe GT1 a organisé des présentations ciblées, axées sur les nombreux résultats expérimentaux concernant les paramètres du neutrino.

Le schéma de travail du groupe est identique à celui déjà appliqué dans les précédentes années d'existence du GDR. Le rapport reprend donc les grands thèmes décrits dans les rapports précédents en mettant l'accent sur les apports récents.

### I. COMPREHENSION DES OSCILLATIONS NEUTRINOS ET APPROFONDISSEMENT DE LA CONNAISSANCE DE LA MATRICE MNSP

Les activités du GT1 s'inscrivent ici dans la poursuite des mesures de la matrice PMNS avec les expériences Borexino, OPERA, T2K et Double Chooz. Ces quatre expériences, dont les trois dernières ont une forte implication des groupes français, sont en cours de prises de données et en phase d'analyse, pour trois à cinq années. Elles ont ainsi permis à de nombreux doctorants et post-doctorants de présenter leur travail et une vue d'ensemble des résultats expérimentaux de leur domaine.

Les premières apparitions de  $\nu_\tau$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$  ont été observées dans l'expérience OPERA. Les premiers résultats ont été présentés par F. Brunet (novembre 2011), ainsi qu'une analyse plus aboutie par P. Del Amo Sanchez (mai 2013), adjoint d'une recherche d'oscillation en  $\nu_e$  pour la mesure de  $\theta_{13}$  et la recherche d'oscillation en neutrino stériles que nous aborderons dans la section suivante. Les expériences T2K et Double Chooz ont fourni en 2011 les premières indications et la preuve de la grande valeur de  $\theta_{13}$  avec une mesure de  $\sin^2(2\theta_{13})$  de l'ordre de 0.10. Les états d'avancements et les successions de résultats de ces 2 expériences ont été assidûment suivis par les présentations de A. Remoto (novembre 2011), V. Durand (juin 2012), P. Novella (mai 2013) pour Double Chooz et M. Macaire (novembre 2011), E. Mazzucato (juin 2012), V. Galymov (mai 2013) et B. Quilain (novembre 2013) pour T2K. Ces mesures ont été confirmées en 2012 par l'expérience de Daya Bay. L'expérience RENO a présenté un résultat tout à fait compatible mais mal compris vis-à-vis de la soustraction des bruits de fond. La mesure de cet angle est d'une grande importance pour la définition du futur programme expérimental pour étudier la violation de CP dans la matrice PMNS et déterminer la hiérarchie de masse. Les expériences vont poursuivre leur prise de données pour fournir des mesures améliorées avec des études minutieuses des systématiques. Double Chooz se poursuit avec la construction et la mise en service du détecteur proche pour 2014. T2K a récemment mis à jour sa mesure  $\nu_\mu$  de disparition conduisant à la meilleure contrainte de l'angle de

mélange  $\theta_{23}$  et cette mesure sera continuellement améliorée avec l'accroissement de l'échantillon de données. Le programme de physique de T2K pourrait être complété par des données prises en mode anti-neutrino, suivi par une phase de mise à niveau de l'accélérateur pour augmenter l'intensité du faisceau JPARC. La combinaison d'une mesure précise de  $\theta_{13}$  par des expériences de réacteurs et la mesure d'apparition de  $\nu_e$  peut apporter des informations importantes sur la violation de CP paramétrée par la phase  $\delta$  de la matrice PMNS. Sur ce thème, une étude de concept de grand détecteur (mégatonne) Cherenkov à eau, MEMPHYS, a été présentée par M. Buizza Avanzini au cours du GdR du mois d'octobre 2012.

Il est intéressant de mentionner que la mesure d'un troisième grand angle de mélange des neutrinos a lancé de nouvelles études pour enquêter sur la complémentarité possible de la mesure de la hiérarchie de masse à l'aide de détecteurs de neutrinos atmosphériques 'deep-sea/ice' (comme ORCA ou PINGU).

## II. ÉTUDE DES ANOMALIES REACTEUR ET GALLIUM POUR LA RECHERCHE DE NEUTRINOS STERILES

Les diverses anomalies liées à l'expérience LSND, les mesures d'étalonnage de GALLEX et SAGE avec une source intense, et plus récemment à l'anomalie de flux de neutrinos mesurés auprès des expériences réacteur ne peut pas être facilement décrite dans une interprétation globale d'oscillations de neutrinos dans un modèle minimum à trois états de saveur. En fait, certaines d'entre elles pourraient indiquer l'existence de neutrinos stériles avec une masse de l'ordre de l'eV. La clarification de la source possible de ces anomalies ou l'absence de telles anomalies de physique doit être traitée par la communauté et étudiée.

Plusieurs méthodes expérimentales sont proposées à partir de sources radioactives intenses, de réacteurs nucléaires ou des expériences sur accélérateur à courte distance. Les groupes français sont principalement impliqués dans des projets basés sur des sources radioactives intenses et des réacteurs nucléaires. L'expérience Nucifer conçue à l'origine pour la non-prolifération nucléaire pourrait fournir les premières indications dans le sens de neutrinos stériles. J. Gaffiot (octobre 2012) et M. Péquignot (novembre 2013) ont présenté l'avancement et les premiers résultats de cette expérience. L'année 2014 sera importante, avec un fonctionnement nominal du réacteur Osiris à Saclay, après une longue période d'arrêt pour maintenance.

D'autres expériences sont à l'étude, en particulier avec des sources radioactives très intenses déployées dans ou à proximité des détecteurs existants (comme KamLAND ou Borexino) et avec de nouvelles mesures à proximité de cœurs de réacteurs nucléaires compacts, comme à l'ILL et le projet STEREO. Le potentiel de résultats pour la physique est importante sur du court à moyen terme. Les expériences prévues peuvent fournir des résultats de physique des neutrinos importants. Les deux types d'expériences (source et réacteurs) ont été fortement soutenus par la communauté avec l'obtention d'une ERC pour CeLAND et d'une ANR pour STEREO. Ces deux projets ont été présentés par A. Collin en octobre 2012, pour STEREO, et par J. Gaffiot en novembre 2013 pour CeLAND. Le démarrage de prise de données pour ces 2 expériences est prévu aux environs de mi 2015.

### iii. RECHERCHE DE DESINTEGRATION DOUBLE $\beta$ SANS EMISSION DE NEUTRINO

De nombreuses extensions du modèle standard fournissent un cadre naturel pour la masse des neutrinos et la violation du nombre leptonique. En particulier, le mécanisme de seesaw, qui exige l'existence d'un neutrino de Majorana, explique la faible masse des neutrinos. L'existence des neutrinos de Majorana fournirait également un cadre naturel pour le processus de leptogenèse ce qui pourrait expliquer l'asymétrie baryon-antibaryon observée dans l'univers. L'observation de la double

désintégration bêta sans émission de neutrinos ( $0\nu\beta\beta$ ) prouverait que les neutrinos sont des particules de Majorana et que le nombre leptonique n'est pas conservé. Plusieurs mécanismes peuvent générer cette désintégration : échange d'un neutrino de Majorana léger, courants droits, supersymétrie...

Les isotopes pour lesquels la désintégration  $\beta$  simple est interdite pour des raisons énergétiques ou fortement supprimée sont les plus appropriés pour la recherche de cette désintégration radioactive rare. La signature expérimentale est l'émission de deux électrons d'énergie totale égale à l'énergie libérée lors de la désintégration. Plusieurs techniques expérimentales permettent la recherche de la  $0\nu\beta\beta$  et certaines ont donné des résultats très compétitifs :

- EXO-200 est une TPC contenant 200 kg de Xénon liquide enrichi à 80% en  $^{136}\text{Xe}$ . La mesure à la fois de la scintillation et de l'ionisation permet d'améliorer la résolution en énergie. EXO-200 a présenté la première mesure de la double désintégration bêta avec émission de neutrinos ( $2\nu\beta\beta$ ) du  $^{136}\text{Xe}$ , ainsi qu'une limite à 90% de niveau de confiance de  $1,6 \times 10^{25}$  ans sur la demi-vie du processus  $0\nu\beta\beta$ , soit une limite sur la masse effective du neutrino de Majorana de 0.14-0.38 eV. Les résultats de cette expérience ont été présentés par Mike MARINO en mai 2013.
- GERDA recherche la double désintégration bêta du  $^{76}\text{Ge}$ . Des détecteurs Germanium de haute pureté enrichis à 86% en  $^{76}\text{Ge}$  sont immergés dans un cryostat rempli d'argon liquide. L'argon sert également de blindage contre les bruits de fond externes. Stefan SCHOENERT a présenté en octobre 2012 les performances de GERDA, ainsi que le niveau de bruit de fond obtenu. Depuis, l'expérience GERDA a publié ses résultats sur la double désintégration bêta  $0\nu\beta\beta$  ; à 90% de niveau de confiance, une limite de  $2,1 \times 10^{25}$  ans a été obtenue sur la demi-vie  $0\nu\beta\beta$ , soit une limite de 0,2-0,4 eV sur la masse effective du neutrino de Majorana.
- NEMO-3 est une expérience de type tracko-calorimétrique. Les trajectoires des électrons sont reconstruites dans un détecteur de traces et leur énergie est mesurée par un calorimètre. Le détecteur est entouré d'un blindage en fer contre les gammas externes et en eau borée et bois contre les neutrons. L'identification des particules permet une forte réjection des bruits de fond. Pour le  $^{100}\text{Mo}$ , isotope le plus présent dans NEMO-3, la limite sur la demi-vie  $0\nu\beta\beta$  est  $10^{24}$  ans, soit une limite de 0.3-0.8 eV sur la masse effective du neutrino de Majorana. NEMO-3 a été présentée par Sophie BLONDEL en novembre 2011. La prise de données de NEMO-3 est terminée depuis janvier 2011. La collaboration NEMO a conçu un futur projet, SuperNEMO dans le but de gagner 2 ordres de grandeur sur la sensibilité sur la demi-vie  $0\nu\beta\beta$ , avec un détecteur contenant 100 kg de sources ( $^{82}\text{Se}$ , voire  $^{150}\text{Nd}$  ou  $^{48}\text{Ca}$  si l'enrichissement est possible). La sensibilité correspondante sur la masse effective du neutrino de Majorana est de 0.04-0.1 eV. A l'issue d'une phase de R&D, les spécifications (résolution en énergie du calorimètre, construction du détecteur BiPo pour mesurer les feuilles sources avec la sensibilité requise) ont été atteintes. Le premier module de SuperNEMO, appelé démonstrateur, est en construction. Il contiendra 7 kg de  $^{82}\text{Se}$  et sera installé au Laboratoire Souterrain de Modane actuel. Il doit permettre de montrer la capacité de SuperNEMO à atteindre ses spécifications en termes de bruit de fond et d'avoir une sensibilité sur la demi-vie  $0\nu\beta\beta$  de  $6,5 \times 10^{24}$  ans après 3 ans de prise de données. La prise de données doit débuter en 2015. Le projet SUPERNEMO a également été présenté par Sophie BLONDEL en novembre 2011.
- Les bolomètres scintillants combinent l'excellente résolution en énergie des bolomètres et la réjection des bruits de fond provenant des alphas surfaciques, que permet la mesure supplémentaire de la scintillation. Ainsi un niveau de bruit de fond extrêmement faible, de l'ordre de 1 coup/(keV.tonne.an) doit pouvoir être atteint. L'activité en France se focalise sur des cristaux de  $\text{ZnMoO}_4$ . Les premiers tests sont prometteurs, avec des cristaux non enrichis en  $^{100}\text{Mo}$  de masse de quelques dizaines à quelques centaines de grammes. Pour 40 cristaux enrichis de 400g, la sensibilité sur la demi-vie  $0\nu\beta\beta$  de  $4,9 \times 10^{25}$  ans, soit 0.03-0.09 eV pour la masse effective. Margherita TENCONI a présenté ce projet en juin 2012.



#### IV. RESUME DES PRESENTATIONS AUX REUNIONS DU GDR v CONCERNANT LE GT1

##### A) Oscillations de neutrinos

Double Chooz : Alberto Remoto à Annecy, 28/29 novembre 2011  
Vincent Durand à l'APC, 20/21 juin 2012  
Pau Novella au LPNHE, 22/23 mai 2013)

T2K : Michael Macaire à Annecy, 28/29 novembre 2011  
Edoardo Mazzucato à l'APC, 20/21 juin 2012  
Vyacheslav Galymov au LPNHE, 22/23 mai 2013)  
Benjamin Quilain, à l'IPN de Lyon, 12/13 novembre 2013

OPERA: Florian Brunet à Annecy, 28/29 novembre 2011  
Pablo del Almo Sanchez au LPNHE, 22/23 mai 2013)

Violation de CP : Potential studies for the delta\_CP discovery with the MEMPHYS  
Margherita BUIZZA AVANZINI à Caen, 30/31 octobre 2012

##### B) Anomalies

CELAND : Michel Cribier à l'APC, 20/21 juin 2012  
Jonathan Gaffiot, à l'IPN de Lyon, 12/13 novembre 2013  
NUCIFER : Jonathan Gaffiot à Caen, 30/31 octobre 2012  
Maxime Péquignot, à l'IPN de Lyon, 12/13 novembre 2013  
STEREO : Antoine Collin à Caen, 30/31 octobre 2012

##### C) Double $\beta$

NEMO-3 : Sophie Blondel à Annecy, 28/29 novembre 2011  
SuperNEMO : Sophie Blondel à Annecy, 28/29 novembre 2011)  
Bolomètres scintillants : Margherita Tenconi à l'APC, 20/21 juin 2012  
GERDA : Stefan Schoenert à Caen, 30/31 octobre 2012  
EXO : Mike Marino au LPNHE, 22/23 mai 2013

## B. PHYSIQUE AU-DELA DU MODELE STANDARD (GT2)

### I. OBJECTIFS ET ROLE DU GROUPE 2 AU SEIN DU GDR

L'objectif de ce Groupe de Travail, actif depuis le début du GDR, est double. D'une part il vise à rassembler les théoriciens français travaillant dans le domaine de la physique au-delà du Modèle Standard et de la physique des neutrinos. D'autre part, il se propose de favoriser les échanges entre ces théoriciens et les expérimentateurs impliqués dans les expériences sur les neutrinos. Les réunions du GDR sont le lieu privilégié pour de tels échanges, soit sous la forme d'exposés pédagogiques sur des problématiques intéressant à la fois expérimentateurs et théoriciens, soit lors de séances de travail ou de séminaires informels sur un thème particulier. Par exemple, une partie de la réunion des 28 et 29 novembre 2011 a été consacrée à la discussion des implications théoriques des résultats publiés peu avant par l'expérience OPERA au laboratoire du Gran Sasso, portant sur la mesure d'une vitesse des neutrinos supérieure à celle de la lumière. Un résumé des conclusions de cette séance de travail est donné dans ce rapport.

Parallèlement à ces activités communes, les membres du Groupe 2 poursuivent, en petits groupes, des travaux théoriques sur différents aspects de la physique des neutrinos. Quelques-uns des résultats obtenus et des travaux en cours sont présentés dans ce rapport.

## II. COMPOSITION DU GROUPE 2

Le Groupe 2 du GDR Neutrino a été coordonné par Marco Cirelli et Stéphane Lavignac. À partir de novembre 2013, Ana Teixeira prend la place de M.Cirelli. Il se compose des chercheurs et chercheuses permanents suivants:

- Asmaa Abada (LPT Orsay)
- Marco Cirelli (IPhT Saclay)
- Sacha Davidson (IPN Lyon)
- Aldo Deandrea (IPN Lyon)
- Michele Frigerio (LCC Montpellier)
- Stéphane Lavignac (IPhT Saclay)
- Gregory Moreau (LPT Orsay)
- Jean Orloff (LPC Clermont-Ferrand)
- Ana Teixeira (LPC Clermont-Ferrand)

A cette liste, il faut ajouter les noms de postdocs et doctorants ayant participé aux activités du GT2 pendant une période limitée:

- Enrico Bertuzzo (postdoc à l'IPhT Saclay)
- Martin Elmer (doctorant à l'IPN Lyon)
- Pedro Machado (doctorant à l'IPhT Saclay)
- Benoit Schmauch (doctorant à l'IPhT Saclay)

## III. THEMES DE RECHERCHE

L'origine des masses des neutrinos et les conséquences phénoménologiques de la présence de neutrinos massifs dans les extensions du Modèle Standard restent le centre d'intérêt commun aux membres du groupe. En particulier, plusieurs d'entre eux s'intéressent au mécanisme de seesaw, dans lequel les neutrinos gauches du Modèle Standard sont couplés à des neutrinos droits super-lourds. Ces neutrinos droits peuvent être à l'origine de l'asymétrie baryonique de l'Univers via le mécanisme de la leptogenèse; dans les extensions supersymétriques du Modèle Standard, ils peuvent aussi induire des violations de saveur et de la symétrie CP dans le secteur des leptons chargés. Les neutrinos stériles font également l'objet d'un intérêt suivi de la part des membres du GT2, notamment en ce qui concerne leurs conséquences en astrophysique et en cosmologie (en liaison avec le groupe 3).

On peut donc classer schématiquement les activités du GT2 dans les thèmes suivants:

- mécanismes de génération des masses des neutrinos, symétries de la matrice de masse ;
- propriétés des neutrinos en cosmologie et en astrophysique (en liaison avec le GT3) ;
- leptogenèse ;
- violation de la saveur et de la symétrie CP dans le secteur leptonique.

## IV. REALISATION DES OBJECTIFS

L'un des buts du GT2 est de réunir des théoriciens dispersés dans des laboratoires différents, mais ayant des intérêts scientifiques communs. Les doctorants et les postdocs bénéficient également de cette possibilité de discuter avec d'autres chercheurs permanents, postdocs ou doctorants. Des collaborations internes au groupe se sont développées et ont conduit à plusieurs publications communes (voir la liste de publications à la fin de ce rapport), notamment sur la leptogenèse. Les échanges au sein du GDR ont également stimulé de nombreuses publications ne rentrant pas forcément dans la catégorie des publications communes. Il est à noter qu'en dépit du nombre relativement faible de théoriciens travaillant sur la physique des neutrinos en France, le nombre de publications et leur impact au niveau international témoignent d'une activité soutenue, avec des points forts dans les

thèmes de la leptogenèse et de la violation de la saveur leptonique. La physique des oscillations de neutrinos proprement dite est en revanche nettement moins représentée. Les résultats obtenus sont décrits plus loin.

Un autre rôle important du Groupe 2 est d'animer des discussions sur des problématiques proches des expériences représentées au sein du GDR. Dans ce but, le GT2 a programmé de nombreux exposés pédagogiques sur des sujets d'intérêt général, comme l'impact des neutrinos stériles dans les expériences d'oscillation, en astrophysique et en cosmologie ; les neutrinos de l'annihilation de la Matière Noire au centre du Soleil ; le nuMSM (un modèle avec des neutrinos stériles de masses comprises entre le keV et le GeV introduit par M. Shaposhnikov de l'EPFL Lausanne). Ces exposés ont été donnés soit par des membres du GT2, soit par des intervenants extérieurs.

Des exposés plus proches des travaux de recherche des membres du GT2 ont également été programmés, si possible en lien avec l'actualité expérimentale.

### **Conclusions de la réunion de travail sur les résultats de l'expérience OPERA (nov. 2011)**

Une session spécifique du GT2 (28 novembre 2011) a été consacrée à la présentation et l'interprétation théorique des résultats publiés quelques semaines plus tôt par la collaboration OPERA concernant la mesure de la vitesse des neutrinos.

Un exposé par un membre de la collaboration expérimentale (Giulia Brunetti) a d'abord permis de rappeler les résultats fondamentaux: l'expérience OPERA avait mesuré, pendant la période 2009 à 2011, la vitesse des neutrinos envoyés par le faisceau du CERN vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso, en Italie, et avait trouvé une vitesse supérieure à celle de la lumière. Les neutrinos auraient précédé la lumière d'environ 60 ns sur un parcours d'environ 730 km. La significativité statistique de la mesure était de 6.2 sigma. La mesure, très complexe, mettait en jeu différents aspects allant de la physique des particules à la métrologie et jusqu'à la géologie. La mesure, répétée plusieurs fois, ne montrait pas de variation par rapport à la période de l'année (sur 2 ans) ni à l'énergie de départ des neutrinos.

Ensuite, un exposé par Luca Maccione a abordé la discussion des implications théorique et phénoménologique d'un tel résultat. D'abord une revue panoramique sur la violation de l'invariance de Lorentz (qui serait directement impliquée par une vitesse supérieure à celle de la lumière) a été présentée. Les contraintes imposées par les mesures des neutrinos provenant de la supernova SN1987a, par les mesures d'oscillation et par les mesures de (non-)désintégration des neutrinos rendent cette hypothèse très difficile, voire impossible, à réconcilier avec les résultats connus.

Ainsi, différentes hypothèses théoriques alternatives ont été abordées: effet d'un champ (de spin 2, masse élevée et couplage non standard) affectant la propagation des neutrinos dans le milieu dense de la Terre, effets de la théorie de la 'relativité restreinte déformée' (Deformed Special Relativity) ou bien des effets de théorie des cordes.

Cette réunion de travail a permis de conclure qu'aucune explication théorique ne permettait d'expliquer de façon auto-consistante les résultats d'OPERA et les autres mesures de physique des neutrinos (en physique des particules et astroparticules).

La suite est bien connue: quelque mois plus tard l'expérience OPERA a communiqué la découverte d'au moins deux importantes erreurs systématiques dans la synchronisation des systèmes de mesure. La mesure a par conséquent été rétractée. Néanmoins, le très grand et vif débat scientifique développé autour d'elle, au sein du GDR mais aussi dans la communauté plus en générale, a été très positif et il a permis de gagner une vision nouvelle sur certains des principes fondamentaux de la recherche scientifique.

## V. RESULTATS OBTENUS

*Les chiffres entre crochets font référence aux publications des membres du Groupe 2 dont la liste est donnée plus loin.*

### **(1) Mécanismes de génération des masses des neutrinos / symétries de la matrice de masse des neutrinos**

L'origine des masses des neutrinos reste à ce jour inconnue, et les expériences d'oscillations ne nous fournissent pas d'indication à ce sujet. Une grande variété de scénarios de génération des masses des neutrinos existe, et leur étude est nécessaire pour identifier des observables discriminantes. Une partie significative de l'activité du Groupe 2 a porté sur ces scénarios, sur leurs caractéristiques et leurs prédictions [4,5,15,19,24,31,38]. Les symétries susceptibles d'expliquer la structure observée de la matrice de masse des neutrinos ont également été étudiées [27,30].

Dans la référence [5], la possibilité de reconstruire les paramètres du mécanisme de seesaw supersymétrique de type I (dans lequel les masses des neutrinos du Modèle Standard sont engendrées par l'échange de neutrinos de Majorana lourds) à l'aide de mesures précises de processus violant la saveur leptonique a été étudiée. Les réalisations minimales du mécanisme de seesaw inverse, qui fait intervenir des neutrinos singlets supplémentaires, ont fait l'objet de la publication [38] ; il a été montré que ces scénarios conduisaient à des prédictions pour la hiérarchie de masse ainsi que pour la masse effective mesurée dans la double désintégration bêta sans émission de neutrino. Dans un autre article [15], il a été montré que les modèles supersymétriques dans lesquels le nombre leptonique est identifié à une R-symétrie continue peuvent reproduire les paramètres d'oscillation mesurés des neutrinos. Enfin, la publication [4] a établi un lien entre le mécanisme de seesaw à l'origine des masses des neutrinos et les propriétés de la matière noire, dans l'hypothèse où cette dernière est un pseudo-boson de Goldstone associé à une symétrie approximative du secteur de seesaw.

Les références [19,24,31] se sont intéressées aux masses et angles de mélanges des neutrinos dans le cadre des modèles avec dimensions supplémentaires d'espace. La dépendance en énergie (renormalisation) des masses et angles de mélange de neutrinos de Majorana a été étudiée d'une part dans un modèle supersymétrique à 5 dimensions [19], d'autre part dans le scénario de dimension supplémentaire universelle (UED) avec une [24] ou deux [31] dimensions supplémentaires dans lesquelles se propagent tous les champs du Modèle Standard.

Une étude statistique de la matrice de masse des neutrinos et des corrélations entre ses coefficients, utilisant les données expérimentales les plus récentes, a été menée dans la référence [27] dans le but d'identifier une éventuelle structure ou des symétries sous-jacentes. La publication [30] a montré qu'une valeur non maximale de l'angle de mélange  $\theta_{23}$ , en lien avec la valeur observée de  $\theta_{13}$ , est une propriété de certaines symétries de saveur discrètes.

### **(2) Neutrinos non-standard en physique des particules et en cosmologie**

Les neutrinos jouent un rôle particulier en cosmologie, de par leur grand nombre dans l'Univers et leur masse petite mais non nulle. Les observations cosmologiques (nucléosynthèse, anisotropies du rayonnement cosmique de fond, distribution des galaxies...) imposent donc des contraintes significatives sur les propriétés des neutrinos, notamment sur leur masse et sur le nombre de neutrinos (actifs et stériles). Ces dernières ont été renforcées par la publication des premiers résultats du satellite Planck en 2013. Par ailleurs, un certain nombre d'anomalies expérimentales (déficit de  $\bar{\nu}_e$  à courte distance, dit « anomalie des réacteurs », déficit de  $\nu_e$  observé lors de la calibration des expériences Ga-Ge, expériences LSND et MiniBooNE) ne peuvent s'expliquer dans le cadre des oscillations des trois neutrinos du Modèle Standard, et pourraient être dues à l'existence de neutrinos stériles.

Un ajustement global de toutes les données d'oscillations de neutrinos (neutrinos d'accélérateurs et de réacteurs à courte et longue distance, neutrinos de sources radioactives, neutrinos solaires et atmosphériques) a été effectué dans la publication [29], dans le cadre de scénarios avec 1 ou 2 neutrinos stériles. La qualité de l'ajustement est faible en raison de la tension entre les expériences d'apparition (LSND et MiniBooNE) et de disparition (anomalies « Gallium » et des réacteurs). Le spectre 1+3+1 est favorisé par rapport aux cas 3+1 et 3+2. Les références [3,9] ont étudié la possibilité d'expliquer les anomalies observées dans le cadre de modèles où les neutrinos du Modèle Standard sont confinés à une brane à 4 dimensions, elle-même plongée dans un espace-temps plat à 5 dimensions dans lequel les neutrinos droits se propagent. Les excitations de Kaluza-Klein des neutrinos droits jouent le rôle de neutrinos stériles et permettent d'expliquer l'anomalie des réacteurs et le déficit de  $\nu_e$  observé lors de la calibration des expériences Ga-Ge. Enfin, un membre du Groupe 2 du GDR Neutrino a participé à la rédaction d'un « white paper » sur les neutrinos stériles [16].

La publication [8] a étudié la possibilité de tester de manière précise l'invariance de Lorentz dans le secteur des neutrinos avec les expériences d'oscillations à longue distance et les neutrinos provenant de sources astrophysiques. La tension entre les contraintes dues aux événements observés de la Supernova 1987a et la mesure d'une vitesse supérieure à celle de la lumière par l'expérience OPERA (qui a été démentie par la suite) a été mise en évidence.

D'autres propriétés non standard des neutrinos, comme d'éventuelles interactions changeant la saveur (NSIs), pourraient modifier la propagation des neutrinos dans la matière ainsi que leur production et leur détection et affecter l'interprétation des expériences d'oscillation. Des limites expérimentales sur de telles interactions ont été déduites des données de LEP2 dans la référence [7], dans laquelle les limites attendues du LHC14 ont également été discutées. Les contraintes dues aux données du Tevatron et du LHC7 sur un leptoquark se désintégrant en un quark top et un lepton chargé ont été étudiées dans la référence [1].

La publication [6] a étudié la possibilité de tester différents effets susceptibles d'affecter les oscillations des neutrinos (présences de neutrinos stériles, masses des neutrinos dépendant de l'environnement [MaVaNs] ...) dans une expérience de type Mössbauer, dans laquelle des antineutrinos électroniques sont émis puis absorbés de manière résonnante. La référence [14] a montré que les expériences de détection directe de matière noire pourraient être utilisées pour détecter des interactions non standard des neutrinos, dues par exemple à un moment magnétique très supérieur à sa valeur standard ou à une nouvelle force.

Dans le mécanisme de seesaw, les neutrinos de Majorana lourds responsables des masses des neutrinos peuvent également engendrer l'asymétrie baryonique de l'Univers à travers leurs désintégrations. Ce processus, connu sous le nom de leptogenèse, a été étudié dans le cadre du mécanisme de seesaw inverse, qui fait intervenir des neutrinos singlets supplémentaires pouvant être légers [23]. La leptogenèse a lieu à la transition électrofaible et, sous certaines conditions, l'asymétrie baryonique peut être reliée à la densité de matière noire.

Enfin, les neutrinos issus de l'annihilation de matière noire au centre du soleil pourraient aider à identifier celle-ci. Tous les outils nécessaires pour le calcul du spectre d'énergie des neutrinos au niveau de la terre sont fournis dans la publication [37], dont les résultats sont également disponibles sous forme numérique.

### **(3) Effets des masses des neutrinos dans les extensions du Modèle Standard : violation de la saveur dans le secteur des leptons chargés**

Si les neutrinos sont des fermions de Majorana, l'origine de leur masse fait appel à une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard. Cette nouvelle physique introduit généralement de nouvelles sources de violation de la saveur et de la symétrie CP dans le secteur des leptons, en plus de celles déjà contenues dans la matrice PMNS. Une partie des travaux du groupe 2 a consisté à étudier, dans le

cadre de divers mécanismes de génération des masses des neutrinos, les processus impliquant des leptons chargés et violant la saveur [2,12,13,20] ou l'universalité leptonique [17,26,35], ainsi que les événements violant la saveur leptonique aux collisionneurs [2,18,21,25,28,33], et la complémentarité entre ces différentes observables.

La violation de la saveur dans le secteur des leptons chargés (CLFV) a fait l'objet de deux revues [10,34] présentant les différentes observables accessibles aux expériences opérant à basse énergie (désintégrations rares des leptons chargés telles que  $\mu \rightarrow e \gamma$ ,  $\tau \rightarrow l \gamma$ ,  $\mu \rightarrow 3e$ , conversion  $\mu \rightarrow e$  dans les noyaux) et à haute énergie (états finaux de type  $e \mu$  + énergie manquante au LHC ou à un futur collisionneur linéaire), la complémentarité entre ces deux types d'observables et les prédictions génériques des grandes classes de modèle, la plus étudiée étant le modèle de seesaw (de type I) supersymétrique avec termes de brisure douce universels à haute énergie. Le modèle de seesaw supersymétrique de type III (dans lequel les états lourds responsables des masses des neutrinos sont des triplets électrofaibles fermioniques) a été étudié dans la référence [2]. Dans le modèle de seesaw inverse supersymétrique, la contribution des diagrammes « Higgs pingouins » aux processus tels que  $\tau \rightarrow 3\mu$  [12] et celles des diagrammes « Z pingouins » à  $\mu \rightarrow 3e$  et à la conversion  $\mu \rightarrow e$  dans les noyaux [20] peuvent être dominantes et conduire à des taux d'embranchement nettement supérieurs à ceux prédits par les modèles de seesaw supersymétriques usuels (sans remettre en cause, toutefois, la propriété de découplage de la contribution des sneutrinos droits lorsque leurs masses deviennent très grandes [36]). Sans référence à un modèle particulier, la publication [13] a exploré les conséquences de l'observation de la désintégration rare  $\tau \rightarrow e \gamma$  ou  $\tau \rightarrow \mu \gamma$  pour la structure de saveur (leptonique) des couplages de la nouvelle physique sous-jacente.

Le potentiel d'un futur collisionneur linéaire pour la découverte d'une nouvelle physique violant la saveur leptonique a été étudié, dans le cadre du seesaw supersymétrique de type I, par les références [18,28]. Par ailleurs, la publication [33] a montré que les modèles de seesaw supersymétriques les plus généraux n'excluent pas la possibilité d'observer à la fois la désintégration  $\mu \rightarrow e \gamma$  et la violation de la saveur leptonique au LHC, contrairement aux modèles avec termes de brisure douce universels à haute énergie. Enfin, les limites sur les rapports d'embranchement de  $Z \rightarrow \mu e$ ,  $\tau \mu$  et de  $H \rightarrow \tau \mu$  accessibles au LHC8 avec  $20 \text{ fb}^{-1}$  ont été obtenues dans les publications [21] et [25].

En dehors des observables violant la saveur leptonique, la recherche de déviation à l'universalité leptonique dans diverses désintégrations constitue un test de certains modèles de neutrinos massifs. En particulier, l'effet de la présence de neutrinos stériles sur les rapports  $R_K = \Gamma(K \rightarrow e \nu) / \Gamma(K \rightarrow \mu \nu)$  et  $R_{\pi} = \Gamma(\pi \rightarrow e \nu) / \Gamma(\pi \rightarrow \mu \nu)$  [26] et sur un grand nombre de désintégrations leptoniques et semi-leptoniques [35] a été étudié. Par ailleurs, la référence [17] a montré que les contributions supersymétriques à  $R_K$  étaient toujours petites, même avec les termes de brisure douce les plus généraux compatibles avec les données expérimentales, compte tenu de la contrainte due à la désintégration  $B_u^+ \rightarrow \tau^+ \nu$ .

#### (4) Phénoménologie des oscillations de neutrinos

Une petite partie des activités du Groupe 2 a été consacrée à des travaux plus phénoménologiques relatifs à la détermination des paramètres des neutrinos dans les expériences en cours ou futures. Dans la référence [11], la première analyse combinée des expériences T2K, MINOS, Double Chooz, Daya Bay et RENO a été effectuée pour obtenir une détermination précise de l'angle de mélange  $\theta_{13}$ . Dans la publication [22], le potentiel de physique d'un détecteur à scintillateur liquide de 3kt placé dans un laboratoire souterrain sous la cordillère des Andes a été étudié, notamment en ce qui concerne les géoneutrinos et les neutrinos de supernovae.

## VI. TRAVAUX EN COURS ET PROJETS FUTURS

Les projets futurs du Groupe 2 se situent dans la continuité de ce qui a été fait au cours des 4 années passées. D'une part, il continuera à faciliter les échanges au sein du GDR entre théoriciens et expérimentateurs, et à organiser des exposés et des séances de discussion sur des thèmes d'intérêts communs, ou sur des sujets théoriques ou phénoménologiques intéressant plus particulièrement les expérimentateurs. Parmi les thèmes à aborder lors des prochaines réunions du GDR figurent l'interprétation des nouveaux résultats de MINOS dans le canal antineutrino (les valeurs de  $\Delta m^2$  et  $\sin^2 2\theta$  préférées par les données diffèrent légèrement par rapport à celles du canal neutrino), les éventuels effets de l'intrication quantique sur les oscillations de neutrinos, la possibilité (ou non) de tester l'origine des masses des neutrinos au LHC (pour certains mécanismes particuliers)...

D'autre part, les membres du Groupe 2 poursuivront leurs travaux sur la physique des neutrinos et ses liens avec les extensions du Modèle Standard. L'origine des masses des neutrinos reste un mystère et la recherche d'effets observables permettant d'identifier le mécanisme de génération sous-jacent (dans les oscillations de neutrinos ou dans d'autres expériences), un vrai défi. Un aspect qui n'a pas été abordé jusqu'ici au sein du Groupe 2 et mériterait de l'être est celui des signatures éventuelles au LHC de ce mécanisme. Bien que seuls des scénarios particuliers (supersymétrie avec brisure de la R-parité, seesaw supersymétrique, certains mécanismes de seesaw à l'échelle du TeV...) induisent des effets observables aux collisionneurs, le fait qu'il soit possible de les tester dans les années qui viennent justifie de s'y intéresser. Un collisionneur linéaire offrirait un environnement très adapté aux études du secteur leptonique des extensions du Modèle Standard. Comme au LHC, on s'intéresse aux signatures qui peuvent être associées à certaines propriétés des neutrinos (par exemple la violation du nombre leptonique) en profitant des études avec des faisceaux polarisés.

Un autre sujet d'intérêt du Groupe 2 concerne les conséquences phénoménologiques indirectes de la physique à l'origine de la masse des neutrinos. Parmi celles-ci, la leptogenèse continuera à susciter des travaux de membres du GT2, qu'il s'agisse d'inclure de nouveaux effets pour affiner le calcul de l'asymétrie baryonique engendrée ou d'étudier de nouveaux scénarios. De même, les manifestations indirectes des masses des neutrinos dans la physique des saveurs continuent de susciter l'intérêt en raison des perspectives expérimentales (MEG, Mu2e, PRIME...). En outre, dans certains modèles, la violation de la saveur leptonique peut également être testée au LHC (ainsi qu'après d'un collisionneur linéaire), et l'étude des différentes signatures utilisée pour tester différents modèles de nouvelle physique.

Thème plus directement lié au programme expérimental de physique des neutrinos, la phénoménologie des oscillations est actuellement peu représentée au sein du groupe 2 ; la possibilité d'inviter régulièrement des experts étrangers est à l'étude. Enfin, la cosmologie et l'astrophysique des neutrinos (en lien avec le Groupe 3) est également un sujet d'intérêt compte tenu des perspectives expérimentales des prochaines années (satellite Planck, rayons cosmiques de haute énergie, observation éventuelle de neutrinos de supernovae, observation possible dans les télescopes à neutrinos (ICECUBE, Antares) de neutrinos provenant de l'annihilation de particules de Matière Noire au centre de la Galaxie ou au centre du Soleil...). Certains modèles de neutrinos massifs font aussi intervenir des états pouvant jouer le rôle de matière noire, et leur espace de paramètres peut donc être contraint par les données cosmologiques.

## VII. RESUME DES PRESENTATIONS DU GROUPE 2 AUX REUNIONS DU GDR

**G** = présentation générale

**GT2** = présentation dans le cadre de l'activité du groupe 2

### RÉUNION PLÉNIÈRE GDR 11-12/10/2010 A L'IPNO (ORSAY)

- Reconciling leptogenesis with observable mu to e gamma (François-Xavier Josse-Michaux)

**GT**

**REUNION PLENIERE GDR 28-29/11/2011 AU LAPP (ANNECY)**

- Violations of Lorentz invariance and OPERA (Luca Maccione) **G**
- Interactions non-standard des neutrinos (Sacha Davidson) **GT**

**REUNION PLENIERE GDR 20-21/06/2012 A L'APC (PARIS)**

- Sterile neutrinos : the common origin of dark and ordinary matter. Current status and future prospects (Oleg Ruchayskiy) **G**
- Modeles theoriques en vue d'un grand  $\theta_{13}$  (Enrico Bertuzzo) **GT**
- Modele de seesaw au TeV (Martin Elmer) **GT**

**REUNION PLENIERE GDR 30-31/10/2012 AU LPC (CAEN)**

- On the strategies for the Search of CP Violation with T2K (Renata Zukanovich-Funchal) **G**
- Neutrino mass origin and the LHC (Miha Nemevsek) **GT**
- A minimal model of Neutrino Flavor (Akin Wingerter) **GT**

**REUNION PLENIERE GDR 21-22/05/2013 AU LPNHE (PARIS)**

- Light dark matter properties with neutrinos from the Sun (Mattias Blennow) **G**
- Planck results and neutrinos (Julien Lesgourgues) **G**

**RÉUNION PLÉNIÈRE GDR 12-13/11/2013 A L'IPNL (LYON)**

- Sterile Neutrino Oscillations: The Global Picture (Pedro Machado) **GT**
- Leptogenesis (Benoit Schmauch) **GT**

**VIII. LISTE DES PUBLICATIONS DES MEMBRES DU GROUPE 2 LIEES AUX THEMES DE RECHERCHE DU GDR (PENDANT LA PERIODE COUVERTE PAR CE RAPPORT)**

[1] *Leptoquarks decaying to a top quark and a charged lepton at hadron colliders*

Sacha Davidson, Patrice Verdier. Feb 2011. 13 pp.

Published in Phys.Rev. D83 (2011) 115016

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.115016 ; e-Print: arXiv:1102.4562 [hep-ph]

[2] *Probing the supersymmetric type III seesaw: LFV at low-energies and at the LHC*

A. Abada, A.J.R. Figueiredo, J.C. Romao, A.M. Teixeira. Apr 2011. 20 pp.

Published in JHEP 1108 (2011) 099

LPT-ORSAY-11-19, CFTP-11-008, PCCF-RI-1102 ; e-Print: arXiv:1104.3962 [hep-ph]

[3] *Bulk Neutrinos as an Alternative Cause of the Gallium and Reactor Anti-neutrino Anomalies*

P.A.N. Machado, H. Nunokawa, F.A.Pereira dos Santos, R.Zukanovich Funchal. Jul 2011. 6 pp.

Published in Phys.Rev. D85 (2012) 073012

DOI: 10.1103/PhysRevD.85.073012 ; e-Print: arXiv:1107.2400 [hep-ph]

[4] *Sub-GeV dark matter as pseudo-Goldstone from the seesaw scale*

Michele Frigerio, Thomas Hambye, Eduard Masso. Jul 2011. 29 pp.

Published in Phys.Rev. X1 (2011) 021026

ULB-TH-11-17 ; DOI: 10.1103/PhysRevX.1.021026 ; e-Print: arXiv:1107.4564 [hep-ph]

[5] *Reconstructing Seesaws*

Sacha Davidson, Martin Elmer. Aug 2011. 14 pp.

Published in Eur.Phys.J. C71 (2011) 1804

DOI: 10.1140/epjc/s10052-011-1804-1 ; e-Print: arXiv:1108.0548 [hep-ph]

[6] *Testing Nonstandard Neutrino Properties with a Mossbauer Oscillation Experiment*

P.A.N. Machado, H. Nunokawa, F.A. Pereira dos Santos, R. Zukanovich Funchal. Aug 2011. 13 pp.

Published in JHEP 1111 (2011) 136

DOI: 10.1007/JHEP11(2011)136 ; e-Print: arXiv:1108.3339 [hep-ph]



[7] *Non-Standard Neutrino Interactions at Colliders*

Sacha Davidson, Veronica Sanz. Aug 2011.

Published in Phys.Rev. D84 (2011) 113011

DOI: 10.1103/PhysRevD.84.113011 ; e-Print: arXiv:1108.5320 [hep-ph]

[8] *Superluminal neutrinos in long baseline experiments and SN1987a*

Giacomo Cacciapaglia, Aldo Deandrea, Luca Panizzi. Sep 2011. 22 pp.

Published in JHEP 1111 (2011) 137

LYCEN-2011-05, KCL-PH-TH-2011-16

DOI: 10.1007/JHEP11(2011)137 ; e-Print: arXiv:1109.4980 [hep-ph]

[9] *Large Extra Dimensions and Neutrino Oscillations*

P.A.N. Machado, H. Nunokawa, F.A.Pereira dos Santos, R.Zukanovich Funchal. Oct 2011. 4 pp.

Contributed to Conference: C11-08-01.6 Proceedings ; e-Print: arXiv:1110.1465 [hep-ph]

[10] *Flavour Violation in charged leptons: Present and Future*

A. Abada. Oct 2011. 8 pp.

Published in Comptes Rendus Physique 13 (2012) 180-185

LPT-ORSAY-11-80 ; e-Print: arXiv:1110.6507 [hep-ph]

[11] *Combining Accelerator and Reactor Measurements of  $\theta_{13}$ : The First Result*

P.A.N. Machado, H. Minakata, H. Nunokawa, R. Zukanovich Funchal. Nov 2011. 5 pp.

Published in JHEP 1205 (2012) 023

DOI: 10.1007/JHEP05(2012)023 ; e-Print: arXiv:1111.3330 [hep-ph]

[12] *Enhanced Higgs Mediated Lepton Flavour Violating Processes in the SuSy Inverse Seesaw Model*

Asmaa Abada, Debottam Das, Cedric Weiland. Nov 2011. 16 pp.

Published in JHEP 1203 (2012) 100

LPT-ORSAY-11-60 ; e-Print: arXiv:1111.5836 [hep-ph]

[13] *Learning about flavour structure from tau to ell gamma and mu to e gamma?*

Sacha Davidson. Dec 2011. 19 pp.

Published in Eur.Phys.J. C72 (2012) 1897

DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1897-1 ; e-Print: arXiv:1112.2956 [hep-ph]

[14] *Exploring nu Signals in Dark Matter Detectors*

Roni Harnik, Joachim Kopp, Pedro A.N. Machado. Feb 2012. 37 pp.

Published in JCAP 1207 (2012) 026

FERMILAB-PUB-12-048-T

DOI: 10.1088/1475-7516/2012/07/026 ; e-Print: arXiv:1202.6073 [hep-ph]

[15] *Fitting Neutrino Physics with a  $U(1)_R$  Lepton Number*

Enrico Bertuzzo, Claudia Frugiuele. Mar 2012. 20 pp.

Published in JHEP 1205 (2012) 100

DOI: 10.1007/JHEP05(2012)100 ; e-Print: arXiv:1203.5340 [hep-ph]

[16] *Light Sterile Neutrinos: A White Paper*

K.N. Abazajian, M.A. Acero, S.K. Agarwalla, A.A. Aguilar-Arevalo, C.H. Albright, S. Antusch, C.A. Argüelles,

A.B. Balantekin, G. Barenboim, V. Barger *et al.*. Apr 2012. 281 pp.

FERMILAB-PUB-12-881-PPD ; e-Print: arXiv:1204.5379 [hep-ph]

[17] *Revisiting the  $\Gamma(K \rightarrow e\nu)/\Gamma(K \rightarrow \mu\nu)$  Ratio in Supersymmetric Unified Models*

R.M. Fonseca, J.C. Romao, A.M. Teixeira. May 2012. 20 pp.

Published in Eur.Phys.J. C72 (2012) 2228

CFTP-12-004, PCCF-RI-12-03

DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-2228-2 ; e-Print: arXiv:1205.1411 [hep-ph]

[18] *Lepton flavour violation: physics potential of a Linear Collider*

A. Abada, A.J.R. Figueiredo, J.C. Romao, A.M. Teixeira. Jun 2012. 30 pp.

Published in JHEP 1208 (2012) 138  
LPT-ORSAY-12-17, CFTP-12-006, PCCF-RI-12-04 ; e-Print: arXiv:1206.2306 [hep-ph]

[19] *The Evolution of Neutrino Masses and Mixings in the 5D MSSM*  
A.S. Cornell, Aldo Deandrea, Lu-Xin Liu, Ahmad Tarhini. Jun 2012. 14 pp.  
Published in Eur.Phys.J.Plus 128 (2013) 6  
LYCEN-2012-01, WITS-CTP-100  
DOI: 10.1140/epjp/i2013-13006-4 ; e-Print: arXiv:1206.5988 [hep-ph]

[20] *Enhancing lepton flavour violation in the SuSy inverse seesaw beyond the dipole contribution*  
Asmaa Abada, Debottam Das, Avelino Vicente, Cedric Weiland. Jun 2012. 29 pp.  
Published in JHEP 1209 (2012) 015  
LPT-ORSAY-12-36, LPT-12-36 ; e-Print: arXiv:1206.6497 [hep-ph]

[21] *LHC sensitivity to lepton flavour violating Z boson decays*  
Sacha Davidson, Sylvain Lacroix, Patrice Verdier. Jul 2012. 11 pp.  
Published in JHEP 1209 (2012) 092  
DOI: 10.1007/JHEP09(2012)092 ; e-Print: arXiv:1207.4894 [hep-ph]

[22] *Potential of a Neutrino Detector in the ANDES Underground Laboratory for Geophysics and Astrophysics of Neutrinos*  
P.A.N. Machado, T. Muhlbeier, H. Nunokawa, R. Zukanovich Funchal. Jul 2012. 20 pp.  
Published in Phys.Rev. D86 (2012) 125001  
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.125001 ; e-Print: arXiv:1207.5454 [hep-ph]

[23] *Similar Dark Matter and Baryon abundances with TeV-scale Leptogenesis*  
Sacha Davidson, Martin Elmer (Lyon, IPN). Aug 2012. 13 pp.  
Published in JHEP 1210 (2012) 148  
DOI: 10.1007/JHEP10(2012)148 ; e-Print: arXiv:1208.0551 [hep-ph]

[24] *Renormalisation running of masses and mixings in UED models*  
A.S. Cornell, Aldo Deandrea, Lu-Xin Liu, Ahmad Tarhini. Sep 2012. 41 pp.  
Published in Mod.Phys.Lett. A28 (2013) 11, 1330007  
LYCEN-2012-05, WITS-CTP-105  
DOI: 10.1142/S0217732313300073 ; e-Print: arXiv:1209.6239 [hep-ph]

[25] *LHC sensitivity to the decay  $h \rightarrow \tau^+ \mu^-$*   
Sacha Davidson, Patrice Verdier (Lyon, IPN). Nov 2012. 6 pp.  
Published in Phys.Rev. D86 (2012) 111701  
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.111701 ; e-Print: arXiv:1211.1248 [hep-ph]

[26] *Tree-level lepton universality violation in the presence of sterile neutrinos: impact for  $R_K$  and  $R_{\pi}$*   
A. Abada, D. Das, A.M. Teixeira, A. Vicente, C. Weiland. Nov 2012. 10 pp.  
Published in JHEP 1302 (2013) 048 ; e-Print: arXiv:1211.3052 [hep-ph]

[27] *Neutrino Mass Matrix Textures: A Data-driven Approach*  
E. Bertuzzo, P.A.N. Machado, R.Zukanovich Funchal. Feb 2013. 25 pp.  
Published in JHEP 1306 (2013) 097  
DOI: 10.1007/JHEP06(2013)097 ; e-Print: arXiv:1302.0653 [hep-ph]

[28] *Potential of a Linear Collider for Lepton Flavour Violation studies in the SUSY seesaw*  
A. Abada, J.C. Romão, A.M. Teixeira. Mar 11, 2013. 8 pp.  
Published in J.Phys.Conf.Ser. 447 (2013) 012035  
LPT-ORSAY-13-21, CFTP-13-005, PCCF-RI-13-03 ; e-Print: arXiv:1303.2625 [hep-ph]

[29] *Sterile Neutrino Oscillations: The Global Picture*  
Joachim Kopp, Pedro A. N. Machado, Michele Maltoni, Thomas Schwetz. Mar 12, 2013. 51 pp.  
Published in JHEP 1305 (2013) 050  
IFT-UAM-CSIC-13-026  
DOI: 10.1007/JHEP05(2013)050 ; e-Print: arXiv:1303.3011 [hep-ph]

- [30] *Minimal lepton flavour structures lead to non-maximal 2-3 mixing*  
Michele Frigerio, Albert Villanova del Moral. Mar 21, 2013. 24 pp.  
Published in JHEP 1307 (2013) 146  
L2C:13-045, LUPM:13-004  
DOI: 10.1007/JHEP07(2013)146 ; e-Print: arXiv:1303.5284 [hep-ph]
- [31] *Higgs quartic coupling and neutrino sector evolution in 2UED models*  
Ammar Abdalgabar, Alan S. Cornell, Aldo Deandrea, Ahmad Tarhini. Jul 24, 2013. 7 pp.  
LYCEN-2013-07, WITS-CTP-118 ; e-Print: arXiv:1307.6401 [hep-ph]
- [32] *The Physics of Neutrinos*  
Renata Zukanovich Funchal, Benoît Schmauch, Gaëlle Giesen. Aug 5, 2013. ;e-Print: arXiv:1308.1029 [hep-ph]
- [33] *Slepton mass splittings and cLFV in the SUSY seesaw in the light of recent experimental results*  
A.J.R. Figueiredo, A.M. Teixeira. Sep 30, 2013. 19 pp.  
CFTP-13-022, PCCF-RI-13-06 ; e-Print: arXiv:1309.7951 [hep-ph]
- [34] *Neutrino Physics, Lepton Flavour Violation and the LHC*  
Asmaa Abada. Oct 14, 2013. 10 pp.  
LPT-ORSAY-13-76  
Conference: C13-05-26 ; e-Print: arXiv:1310.3800 [hep-ph]
- [35] *Sterile neutrinos in leptonic and semileptonic decays*  
A. Abada, A.M. Teixeira, A. Vicente, C. Weiland. Nov 12, 2013. 30 pp.  
LPT-ORSAY-13-54, PCCF-RI-13-05, IFT-UAM-CSIC-13-118, FTUAM-13-31;e-Print: arXiv:1311.2830[hep-ph]
- [36] *On the decoupling of heavy sneutrinos in low-scale seesaw models*  
Manuel E. Krauss, Werner Porod, Florian Staub, Asmaa Abada, Avelino Vicente, Cédric Weiland.  
Dec 18, 2013. 6 pp.  
BONN-TH-2013-09, LPT-ORSAY-13-140 ; e-Print: arXiv:1312.5318 [hep-ph]
- [37] *PPPC 4 DMnu: A Poor Particle Physicist Cookbook for Neutrinos from DM annihilations in the Sun*  
Pietro Baratella, Marco Cirelli, Andi Hektor, Joosep Pata, Morten Piibeleht, Alessandro Strumia. Dec 22, 2013.  
27 pp.  
SACLAY-T13-040 ; e-Print: arXiv:1312.6408 [hep-ph]
- [38] *Looking for the minimal realisation of the inverse seesaw*  
Asmaa Abada, Michele Lucente. Jan 7, 2014. 27 pp.  
LPT-ORSAY-13-39, SISSA-59-2013-FISI ; e-Print: arXiv:1401.1507 [hep-ph].

### C. NEUTRINOS DANS L'UNIVERS (GT3)

L'étude des neutrinos de l'univers est un domaine très actif, capable d'apporter des découvertes majeures. C'est en effet grâce à l'observation des neutrinos solaires réalisée par R. Davis que le phénomène d'oscillation a été mis en évidence, avec un impact dans plusieurs domaines de la physique, de la physique de hautes énergies à l'astrophysique et la cosmologie. En particulier, c'est la première forte indication expérimentale d'une physique au-delà du Modèle Standard des particules. R. Davis, pour son expérience pionnière sur les neutrinos solaires, ainsi que M. Koshiba, pour la première observation des neutrinos provenant d'une supernova à effondrement gravitationnel (la SN1987A) ont obtenu le prix Nobel de physique en 2002, avec R. Giacconi.

L'activité du groupe de travail « Neutrinos de l'Univers » porte sur cinq thématiques : les neutrinos solaires, les neutrinos des supernovae, les géo-neutrinos, les neutrinos de haute énergie (atmosphériques et astrophysiques) et les neutrinos cosmologiques (de l'Univers primordiale). Ces thématiques constituent les sous-domaines dans lesquels les expérimentateurs et les théoriciens français sont fortement impliqués. L'étude de ces neutrinos nous apporte des informations

fondamentales quant à leurs sources ainsi que sur les propriétés encore méconnues des neutrinos. L'ordre des états propres de masse, la violation de CP leptonique, l'hypothèse de l'existence des neutrinos stériles représentent des questions de tout premier plan.

## I. OBJECTIFS

Dans la période 2011-2014 des résultats importants ont été obtenus du côté expérimental ainsi que théorique dans les sous-domaines mentionnés. En particulier, une observation attendue depuis longtemps a vu le jour : la découverte des neutrinos de haute énergie d'origine astrophysique par l'expérience IceCube. Ceci ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

Les objectifs du groupe 3 sont essentiellement

- 1- proposer des exposés sur les résultats expérimentaux et les progrès théoriques récents, dans les cinq thématiques sous-mentionnées,
- 2- animer des discussions et participer à la rédaction de documents sur les potentialités de physique des projets en cours ou en phase d'étude,
- 3- donner aux jeunes doctorants ou post-doctorants la possibilité de présenter leurs travaux à la communauté française.

## II. RESUME DES PRESENTATIONS DU GROUPE 3 AUX REUNIONS DU GDR

Suivant ces objectifs, voici la liste des exposés organisés lors des réunions:

### Réunion du 28-29/11/2011

- “Fishing cosmological neutrinos”, Carlos Pena Garay (Valencia U. and IFIC) (avec le GT2)
- “Astronomie neutrino de haute énergie”, Juergen Brunner (CPPM)
- “LAGUNA LBNO”, André Rubbia (ETH Zurich) (avec GT1)
- “The neutrino signal at HALO : learning about the primary fluxes and neutrino properties”, Daavid Väänänen (IPN Orsay)

### Réunion du 20-21/06/2012

- “A First Search for coincident Gravitational Waves and High Energy Neutrinos using LIGO, Virgo and ANTARES data from 2007”, V. Van Elewyck (APC)
- “Recent results from IceCube”, Mathieu Labare (U. Bruxelles)

### Réunion du 30-31/10/2012

- “Mass hierarchy determination using atmospheric neutrinos : projects and prospects ”, Paschal Coyle (CPPM)
- “MeV sterile neutrinos and Warm Dark Matter ”, Francois Vannucci (Université Paris 7)
- “Search fo high energy neutrinos from Fermi bubbles”, Vladimir Kulikoskiy (APC/ Gênes)
- “Recent results from Borexino”, Davide Franco (APC)

### Réunion du 21-22/05/2013

- “Planck Results and neutrino”, Julien Lesgourgues (EPFL) (avec e GT2)
- “New geo neutrino results from Borexino and Kamland”, Yury Suvorov (LNGS)
- “Asymmetric core collapse supernovae induced by hydrodynamic instabilities ”, Thierry Foglizzo (AIM, CEA-Saclay)
- “Search for high energy neutrinos from microquasars with ANTARES”, Salvatore Galata (CPPM)

### Réunion du 12-13/11/2013

- “IceCube results and interpretation”, Markus Ackermann (Desy)
- “A novel perspective on neutrino flavor conversion in supernovae”, Cristina Volpe (APC)
- “DarkSide”, Stefano Perasso (APC)
- “ORCA”, Véronique Van Elewyck (APC)

Il est à noter que plusieurs workshops ont été organisés par les coordinateurs du GT3 :

- « Frontiers in Neutrino Physics », mars 2011, APC Paris
- « Neutrinos at the forefront of elementary particle physics and astrophysics » octobre 2012, IPN Lyon
- « Orca meeting », 17-18 avril 2013, APC Paris

### III. THEMES DE RECHERCHE ABORDES ET RESULTATS OBTENUS

Dans le texte qui suit nous faisons le point sur les thématiques abordés, leur intérêt, les progrès significatifs réalisés dans les quatre dernières années et les perspectives pour l'avenir proche. L'implication française dans les projets est soulignée.

#### *1. Les neutrinos solaires*

Depuis la fin des années 60, les expériences pionnières (chlore, GALLEX/GNO, SAGE, SuperKamiokande) observaient un flux de neutrinos solaires ( $\nu_e$ ) inférieur au flux prédit par les modèles solaires. En 2001, l'expérience SNO, sensible à toutes les saveurs de neutrinos, a mis en évidence a) que les  $\nu_e$  disparus s'étaient transformés en  $\nu_\mu$  ou  $\nu_\tau$  via le mécanisme d'oscillation; b) que le flux total de neutrinos mesuré était en accord avec les modèles. Mais ces expériences ne fournissaient que des informations partielles sur le spectre en énergie des neutrinos, ne mesurant que les neutrinos du  $^8\text{B}$  (0,01% du flux total). La question de la spectroscopie complète des neutrinos solaires restait ouverte pour affiner notre compréhension du fonctionnement du Soleil.

A partir de 2002-2003 et l'arrêt des R&D HELLAZ, SuperMUNU et LENS, l'investissement français dans le domaine des neutrinos solaires s'est limité à la participation d'une équipe de l'APC (IN2P3-Université Paris Diderot) à l'expérience Borexino dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso. Le but principal de Borexino était la mesure de la raie du  $^7\text{Be}$ , mais l'excellent fonctionnement du détecteur depuis le printemps 2007 a permis d'aller bien au-delà: outre la mesure des neutrinos du  $^7\text{Be}$  avec une précision de 5% [1] et une mesure du rapport jour-nuit compatible avec l'absence d'asymétrie [2], Borexino a mesuré pour la première fois les neutrinos pep (issus d'une réaction sœur de la réaction de fusion primordiale pp) et mis une limite sur les neutrinos CNO [3], limite très proche des prédictions des modèles solaires. Borexino a également mesuré les neutrinos du  $^8\text{B}$  avec un seuil de 3 MeV [4]. Cet ensemble de mesures a permis de conforter la solution MSW-LMA [3], en particulier dans la région de transition entre l'oscillation dans le vide et la solution MSW adiabatique. Enfin, en 2010, Borexino a observé pour la première fois les géoneutrinos [5], mesure complétée en 2013 [6] (voir section suivante). Last, but not least, après l'annonce d'OPERA, Borexino a contribué à montrer que les neutrinos n'allaient pas plus vite que la lumière entre le CERN et le Gran Sasso [7].

La contribution de l'équipe APC a été essentiellement centrée sur l'acquisition électronique complémentaire à celle existante mais dans le but de tracer les neutrinos de plus haute énergie en particulier ceux qui viendraient de l'explosion d'une supernova galactique. Cette contribution, après un modeste financement ponctuel de l'IN2P3 en 2000 pour l'achat de flash-ADC (150 k€), s'est

limitée jusqu'en 2012 à un financement du laboratoire APC correspondant aux missions pour les shifts et les réunions de collaboration. De multiples demandes de reconnaissance officielle ont été faites auprès de la direction de l'IN2P3, en particulier depuis le démarrage de l'expérience en 2007, sans succès. Il est à noter que l'université Paris-Diderot a financé fin 2011 une année de post-doc pour la mesure de la vitesse des neutrinos.

Dans le futur (2014-2017), les objectifs scientifiques « neutrinos solaires » de Borexino sont : a) une première observation des neutrinos primordiaux pp ; b) une première observation des neutrinos CNO. Ces objectifs de premier plan peuvent être atteints, mais rien n'est garanti car, malgré plusieurs cycles de purification du scintillateur, il reste à bien comprendre les bruits de fond résiduels.

Les physiciens de l'APC participent ponctuellement aux analyses de physique, en particulier celles liées aux événements à haute énergie mesurés de manière complémentaire avec les flash-ADC, celles liées au bruit de fond induit par les muons cosmiques et, plus récemment, celles liées aux neutrinos pp.

Borexino envisage également de faire une recherche de neutrinos stériles [8] avec une source de chrome et/ou de cérium.

## 2. Les neutrinos de la Terre ou géo-neutrinos

La mesure de la chaleur qu'émet en propre la Terre se situe entre 30 et 40 TW, soit l'équivalent de 10 000 centrales nucléaires. Cette chaleur, due pour tout ou partie à la chaleur émise par les désintégrations  $\beta$  des éléments radioactifs à vie longue présents dans la Terre,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , s'accompagne d'antineutrinos, les *géoneutrinos*. Les énergies maximales des antineutrinos émis par  $^{238}\text{U}$  (3,27 MeV) et par le  $^{232}\text{Th}$  (2,25 MeV) sont au-dessus du seuil des réactions  $\beta$ -inverses sur les protons libres (1,8 MeV). Les géoneutrinos peuvent ainsi être détectés comme le sont les antineutrinos des réacteurs. Les deux composantes peuvent être évaluées séparément par les énergies maximales différentes puisque les formes de ces spectres de désintégrations sont parfaitement connues. Ceci offre un moyen nouveau pour déterminer la contribution radiogénique à la chaleur de la Terre et permettre de trancher entre différents modèles géochimiques de composition de la Terre. On s'attend à un flux moyen d'environ  $2 \times 10^6 \bar{\nu}_e / \text{cm}^2 \text{s}$  en tenant compte d'une suppression de 0,6 due aux oscillations, flux environ 30 000 fois plus faible que celui des neutrinos solaires sur Terre, mais heureusement pour leur détection, composé d'antineutrinos.

En 2005, l'expérience KamLAND a publié des premiers résultats concernant les géoneutrinos [8]. Cette première indication, importante, n'était pas encore statistiquement significative. Malgré une masse de cible importante, KamLAND souffre principalement d'un bruit de fond très important des antineutrinos des centrales nucléaires dont le spectre en énergie s'étend jusqu'à 8 MeV environ (distance moyenne 200 km). Début 2010, l'expérience Borexino, bénéficiant d'un bruit de fond lié aux réacteurs nucléaires très inférieur à celui de KamLAND (distance moyenne d'environ 1000 km), a montré pour la première fois un signal à plus de  $4\sigma$  [5].

Depuis, de nouveaux résultats ont été présentés par les deux collaborations. Avec 1353 jours d'observation, Borexino a observé  $14.3 \pm 4.4$  événements [6]. KamLAND, de son côté, observe  $116^{+28}_{-27}$  événements [9], confirmant que les géoneutrinos sont maintenant une réalité. Des analyses combinées préliminaires de Borexino et KamLAND permettent de donner une indication sur la composition de la croûte et du manteau.

Les physiciens de l'APC ont contribué à l'analyse des géoneutrinos, en particulier à la mesure du bruit de fond induit par les réacteurs nucléaires français : il a été possible, grâce à EDF, d'obtenir des informations très précises sur les paramètres de fonctionnement de ces centrales (moyenne de la puissance thermique quotidienne et composition du combustible des cœurs), lesquels permettent de

calculer avec précision le flux attendu d'anti-neutrinos de réacteurs dans le détecteur. Les informations sur les autres centrales nucléaires européennes ont été fournies par l'AIEA.

Pour le futur proche, Borexino continue de prendre des données, mais la masse de la cible reste modeste. Concernant KamLAND, l'expérience va bénéficier de l'arrêt des réacteurs nucléaires japonais, suite à la catastrophe de Fukushima. Ceci devrait permettre un excellent rapport signal/bruit (résultats préliminaires dans [9]). A plus lointaine échéance, il faudra a) augmenter significativement la statistique ; b) placer des détecteurs à plusieurs endroits de la Terre, pour évaluer plus finement les composantes venant de la croûte ou du manteau.

Il a été proposé qu'un réacteur naturel à fission nucléaire d'une puissance de 3 à 10 TW soit (ou ait été) en opération dans le noyau de la Terre. Entre autres cela aiderait à comprendre la source d'énergie du champ magnétique terrestre [10]. L'hypothèse a été testée par Borexino qui l'infirme fortement.

Les géo-neutrinos témoignent de l'origine radioactive d'une grande partie de la chaleur de la Terre et pourraient à terme donner de précieux indices sur la structure des couches géologiques formant notre planète. On voit donc l'intérêt que représente la mesure de cette nouvelle source d'antineutrinos pour une autre communauté scientifique. Un tel programme trouve naturellement sa place dans un détecteur sensible aux neutrinos de basses énergies comme ceux à base de liquide scintillant à la LENA ou JUNO, il devient impossible si l'on utilise d'autres techniques.

Côté européen, la prise des données de l'expérience Borexino va se poursuivre dans les années à venir. Il faut noter également que des études sont en cours sur la possibilité de mesurer la direction des antineutrinos, en synergie avec Double Chooz (à la suite d'études faites pour l'expérience CHOOZ).

### **Références**

- [1] G. Bellini et al., Precision Measurement of the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Interaction Rate in Borexino, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 141302.
- [2] G. Bellini et al., Absence of a Day-Night Asymmetry in the  $^7\text{Be}$  Solar Neutrino Rate in Borexino, Phys. Lett. B707 (2012) 22.
- [3] G. Bellini et al., First Evidence of pep solar neutrinos by direct detection in Borexino, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 051302.
- [4] G. Bellini et al., Measurement of the solar  $^8\text{B}$  neutrino rate with a liquid scintillator target and 3 MeV energy threshold in the Borexino detector, Phys. Rev. D82 (2010) 033006.
- [5] G. Bellini et al., Observation of Geoneutrinos, Phys. Lett. B687 (2010) 299.
- [6] G. Bellini et al., Measurement of Geoneutrinos from 1353 days of Borexino, Phys. Lett. B722 (2013) 295.
- [7] G. Bellini et al., Measurement of CNGS muon neutrino speed with Borexino, Phys. Lett. B716 (2012) 401.
- [8] T. Araki et al., Experimental investigation of geologically produced antineutrinos in KamLAND, Nature 436 (2005) 499.
- [9] A. Gando et al., Reactor On-Off Antineutrino Measurement with KamLAND, arXiv:1303.4667;
- [10] J.M. Herndon, Proc. Nat. Acad. Sci. USA 93 (2) (1996) 646 ; J.M. Herndon, Proc. Nat. Acad. Sci. USA 100 (6) (2003) 3047.

### *3. Les neutrinos des supernovae*

Les supernovae à effondrement gravitationnel sont des sources très intéressantes de neutrinos. Lors de la mort de l'étoile, 99 % de l'énergie gravitationnelle est emportée par des neutrinos de toutes les saveurs, dans un laps de temps d'environ 10 secondes. Cette durée correspond à l'explosion puis au

refroidissement de l'étoile à neutrons. La détection d'une vingtaine d'événements associés à la supernova 1987A dans le grand nuage de Magellan a apporté une première confirmation des prédictions des modèles d'explosions ainsi que des informations cruciales concernant les propriétés encore méconnues des neutrinos telles que son moment magnétique. Les neutrinos des supernovae joueraient un rôle clé quant à deux questions ouvertes fondamentales en astrophysique, i.e. celles du mécanisme d'explosion des étoiles massives et du site où les éléments lourds ( $A > 56$ ) se formeraient. L'étude de ces neutrinos est importante : i) pour les observations futures d'explosions (extra)galactiques ; ii) pour la découverte du fond diffus des neutrinos de supernovae intégré sur des distances cosmologiques ; iii) pour la compréhension des conditions et du (ou des) site(s) stellaire(s) de certains processus de nucléosynthèse (processus r, vp et "neutrino nucleosynthesis") [FI, Vol1].

Des progrès théoriques importants ont été réalisés dans les dernières années. Tout d'abord les simulations des supernovae ont atteint une grande complexité de nos jours et sont réalisées depuis peu à 2D voir 3D. Elles incluent une description réaliste du transport des neutrinos dans l'étoile, des réactions nucléaires, de la convection et des instabilités hydrodynamiques. Les simulations à la frontière de ces recherches montrent plusieurs indications d'une explosion réussie pour divers progéniteurs. Toutefois les simulations à 3D n'apportent pas d'indications plus probantes que celles à 2D. De plus, plusieurs aspects (neutrinos, convection, instabilités) contribuent à l'explosion mais il n'y a pas à l'heure actuelle un consensus sur le mécanisme sous-jacent. Des progrès importants sont donc à atteindre dans le futur proche.

En parallèle avec ces progrès, des avancées importantes ont été réalisées dans la compréhension des phénomènes de conversion de saveur dans les supernovae. En plus de l'effet de conversion résonnante de Mikheev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) bien établi, des phénomènes collectifs de conversion de saveur, phénomènes engendrés par l'interaction des neutrinos avec eux-mêmes, ont été mis en lumière récemment. Leur description et leur compréhension ont nécessité de concepts et des approches interdisciplinaires comme celles utilisés pour les systèmes de spin soumis à des champs magnétiques [Vol2] où les méthodes utilisées pour les systèmes à N-corps tels que les noyaux atomiques ou en matière condensés [Vol3]. Bien que de nombreux aspects des phénomènes de conversion de saveur des neutrinos dans les supernovae aient été identifiés, des questions importantes requièrent des simulations encore plus poussées et une compréhension plus profonde des mécanismes en jeu [Vol1].

Des prédictions précises des flux des neutrinos des supernovae provenant d'une nouvelle explosion ou associé au fond diffus sont essentielles pour les observations futures. Au-delà des renseignements importants qu'elles apporteraient sur l'explosion elles pourraient nous donner des informations cruciales sur les neutrinos comme par exemple sur la hiérarchie de masse [Vol3].

Du point de vue expérimental, un réseau de détecteurs dans le monde peut détecter une nouvelle explosion (extra)galactique (SN Early Warning System). La technologie Cherenkov à eau et à scintillation a bien démontré ses capacités de détection des neutrinos des supernovae. Au Japon le détecteur Hyper-K 23 fois plus grand que Super-K est très activement étudié [HK]. Des études de faisabilité sont menées pour d'autres détecteurs de grande envergure. Entre 2011 et 2014 l'étude de faisabilité LAGUNA-LBNO (suite de LAGUNA), financée par la communauté européenne, a poussé les études des détecteurs de grande taille fondées sur la technologie de l'argon liquide (GLACIER) et les détecteurs à scintillation (LENA ou JUNO) [L], ainsi que les laboratoires souterrains qui pourraient les accueillir. Selon les prédictions actuelles, les observatoires de grande taille auraient la potentialité de découvrir le fond diffus des neutrinos de supernovae. Les expérimentateurs français ont pris une part très active à cette étude de faisabilité. Les théoriciens français travaillant à ces problématiques apportent des contributions originales à la frontière de ces recherches.

## Références

[FI] Focus Issue on « Neutrinos and nucleosynthesis : state of the art and open issues », à paraître dans Journal of Physics G.

[Vol1] C. Volpe, Ann.Phys.(Berlin) 525 (2013) 8-9, 588.



- [Rev] Duan, Fuller and Qian, *Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.* 60 (2010).  
 Duan and Kneller, *J.Phys.* G36 (2009) 113201.
- [Vol2] C. Volpe, D. Väänänen, C. Espinoza, *Phys.Rev.* D87 (2013) 113010.  
 D. Väänänen, C. Volpe, *Phys.Rev.* D88 (2013) 065003.
- [Vol3] S. Galais et C. Volpe, *Phys.Rev.* D84 (2011) 085005.
- [HM] D. Väänänen, C. Volpe, *JCAP* 1110 (2011) 019.  
 P. D. Serpico et al *Phys.Rev.* D85 (2012) 085031.
- [HK] K. Abe et al, arXiv : 1109.3262.
- [L] Lena collaboration, *Astropart.Phys.* 35 (2012) 685.

#### 4. *Les neutrinos cosmologiques*

Pour les neutrinos cosmologiques, nous n'avons pour l'instant que des informations indirectes provenant de la nucléosynthèse primordiale et de la formation des grandes structures. Ces neutrinos constituent un fond très froid, ayant une température d'environ 2K. Ils sont donc extrêmement difficiles à détecter par les méthodes traditionnelles et nécessitent d'approches originales. L'année 2013 a délivré les résultats très attendus de l'expérience PLANCK incluant une mesure précise du nombre effectif des neutrinos  $N_{\text{eff}} = 3.36 \pm 0.66$  (95% C.L.) ainsi qu'une limite supérieure sur la somme des masses des neutrinos [Planck1]. Ces mesures apportent des informations clés sur les questions cruciales de l'existence des neutrinos stériles et sur la masse des neutrinos.

[Planck1] P. A. R. Ade et al. , arXiv:1303.5062.

#### 5. *Les télescopes à neutrinos*

La détection des rayons cosmiques au début du 20<sup>ème</sup> siècle a démontré l'existence d'accélérateurs cosmiques permettant de porter des particules chargées à des énergies extrêmes pouvant atteindre  $10^{21}$  eV. L'identification des sources de rayons cosmiques de haute énergie reste cependant ambiguë, malgré les progrès obtenus ces dernières années notamment par les instruments Auger, HESS et Fermi. Si les restes de supernovae semblent être à l'origine des rayons cosmiques Galactiques [Hes, Fer], les noyaux actifs de galaxies sont souvent évoqués comme sources potentielles extragalactiques [Aug, Jet]. Dans ce contexte, l'observation des neutrinos de haute énergie, produits principalement dans des processus hadroniques d'interaction entre des particules chargées et la matière ou le rayonnement ambiant, pourrait apporter des renseignements cruciaux. Par ailleurs la très faible section efficace d'interaction des neutrinos et leur innocuité vis-à-vis des champs magnétiques, offre à cette particule la possibilité d'explorer les régions les plus intimes d'objets cosmiques très distants. Cet avantage pour explorer des régions généralement inaccessibles devient un handicap lorsqu'il s'agit de les mettre en évidence, nécessitant ainsi l'utilisation de détecteurs de très grandes dimensions. Les neutrinos de très haute énergie et les techniques de détection qui sont employées ouvrent d'autres champs de recherche touchant aussi bien aux propriétés physiques du neutrino lui-même (projets ORCA et PINGU, voir § « Etudes des neutrinos atmosphériques »), à l'étude indirecte de la matière noire non baryonique [Ant\_dm], ou à la présence d'objets plus exotiques encore, comme les monopoles magnétiques [Ant\_mp] ou les nucléarites.

Les difficultés techniques associées à la méthode de détection constituent plusieurs défis à relever. La détection des neutrinos est indirecte. Le détecteur est une matrice tridimensionnelle de photomultiplicateurs qui, plongés dans un milieu transparent, captent la lumière Tcherenkov émise par les particules chargées issues de l'interaction profondément inélastique des neutrinos avec les noyaux environnants. Pour diminuer l'influence du bruit de fond que constituent les muons atmosphériques (descendants) les détecteurs doivent être placés sous un épais bouclier. Compte tenu de leurs dimensions ( $0(\text{km}^3)$ ), imposée par la faiblesse des flux de neutrinos cosmiques et celle de leur section efficace, la seule possibilité est l'enfouissement profond dans la glace (IceCube au pôle Sud [IC]), dans un lac (Baikal [Bai]) ou dans la mer (ANTARES [ANT\_DET] et son successeur KM3NeT [KM3] en Méditerranée).

## 6. Recherche de neutrinos cosmiques

Ces réalisations instrumentales ont permis des avancées très significatives dans le domaine. La plus spectaculaire étant l'observation par IceCube d'un excès significatif d'événements, compatible avec l'observation d'un flux diffus de neutrinos d'origine extraterrestre. Cette observation s'est faite en 2 étapes. Une première analyse [IC\_PeV], exploitant les données recueillies entre mai 2010 et mai 2012, optimisée pour la recherche de neutrinos de ultra haute énergie (neutrinos *cosmogéniques* produits par l'interaction des rayons cosmiques de ultra haute énergie avec les fonds diffus de photons) a révélé la présence de 2 événements de type « cascade »<sup>1</sup> dans le volume instrumenté. Ces 2 événements, nommés Ernie et Bert sont une énergie de l'ordre du PeV, soit à la sont représentés figure 1. Le bruit de fond attendu était estimé à  $\sim 0.01$  événements, ce qui représente un excès équivalent à  $2.8\sigma$ . Ernie et Bert sont les deux neutrinos les plus énergétiques jamais observés ( $E \sim \text{PeV}$ ), mais leur énergie est néanmoins inférieure à celle attendue pour les neutrinos cosmogéniques. A ce niveau d'énergie, les neutrinos ont peu de chance de traverser la Terre : Ernie et Bert sont probablement des événements descendants (donc venant de l'hémisphère sud), bien que la résolution angulaire d'IceCube pour ce type de cascades soit limitée à une quinzaine de degrés. Après ce résultat, la collaboration IceCube a rapidement décidé d'entreprendre une analyse de suivi permettant d'abaisser le seuil en énergie de la recherche ( $\sim 30$  TeV) et d'augmenter l'acceptance pour des événements de types cascades ( $\sim 80\%$  des événements attendus pour un flux de neutrinos cosmiques  $dN/dE \propto E^{-2}$  en équipartition de saveur). Les résultats de cette étude ont été publiés récemment dans la revue *Science* [IC\_Hese]. L'analyse se concentre sur la recherche d'interactions se produisant dans le détecteur et donnant lieu soit à une cascade, soit à une cascade associée à la trace d'un muon. Cette dernière topologie offrant une bien meilleure résolution angulaire. Les données exploitées couvrent encore la période de mai 2010 à mai 2012. Un total de 28 événements (incluant Ernie et Bert) a été observé pour un bruit de fond atmosphérique de  $\sim 10.6$  événements, ce qui porte la significativité de l'excès à  $4.1\sigma$ . Ces résultats apportent ainsi la première indication directe de l'existence de neutrinos cosmiques de haute énergie et viennent récompenser des dizaines d'années d'efforts instrumentaux. Ils ouvrent enfin la voie vers une possible astronomie des neutrinos à haute énergie...Mais d'autres étapes doivent être franchies. En effet, la répartition des événements, représentée figure 2, est compatible avec un flux diffus isotrope, même si certaines accumulations, notamment aux alentours du Centre Galactique sont présentes. L'identification des sources exige une très bonne résolution angulaire et passe sans doute par l'observation de neutrinos muoniques. A ce titre, si les données accumulées par ANTARES permettent d'exclure que l'accumulation observée près du centre Galactique soit produite par une seule source (même relativement étendue), la taille modeste du détecteur ne permettra sans doute pas une confirmation indépendante du résultat d'IceCube. Ceci sera le premier objectif du successeur d'ANTARES, nommé KM3NeT, dont la construction a d'ores et déjà commencé qui devrait atteindre plusieurs  $\text{km}^3$ .

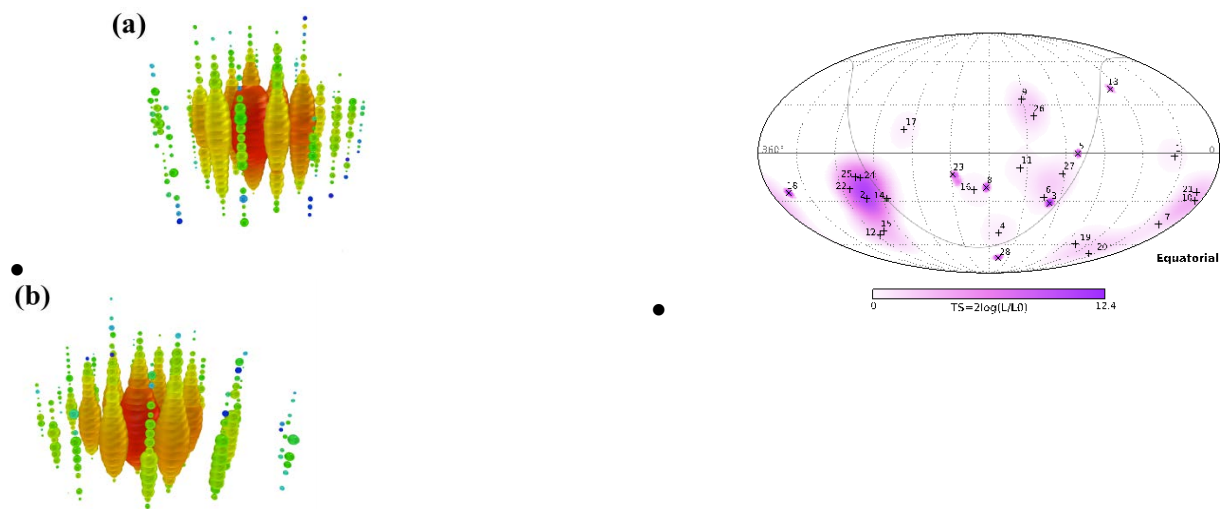
En France, les activités principales se concentrent donc sur l'exploitation des données d'ANTARES et la construction de KM3NeT. Les derniers résultats d'ANTARES sont présentés en détails dans [Ant\_ICRC13]. Ils incluent les meilleures limites mondiales pour la recherche de sources ponctuelles de neutrinos du TeV dans le ciel de l'hémisphère Sud<sup>2</sup>. Un large programme de recherche *multi-messagers* est également mené, notamment pour la détection de sources transitoires (e.g GRB). L'idée étant d'observer une coïncidence directionnelle et temporelle entre un neutrino et un autre signal, gamma, X, ou optique. Ainsi ANTARES reçoit les alertes GCN et émet ses propres alertes [ANT\_alerts] en cas d'événement rare comme la détection d'un doublet de neutrinos dans une fenêtre de 900 s et dans un champ de vue de  $3^\circ \times 3^\circ$ . Ces alertes sont suivies depuis 2009 par les télescopes optiques robotiques TAROT, ROTSE, et ZADKO, et plus récemment par l'instrument SWIFT/XRT. Un projet similaire est à l'étude avec la collaboration HESS. Des concomitances sont également

---

<sup>1</sup> Une gerbe électromagnétique produite par l'interaction un neutrino électronique ou une gerbe hadronique engendrée par d'interaction d'un neutrino de saveur quelconque.

<sup>2</sup> Dans une partie du ciel de l'hémisphère Sud, les limites d'IceCube surpassent celles d'ANTARES, mais dans une gamme d'énergie plus haute ( $\sim \text{PeV}$ ) où les sources Galactiques sont peu enclines à émettre.

recherchées sur des périodes plus longues correspondant par exemple à des phases d'activité intense de sources connues [ANT\_flares]. Dans la même veine, un programme de travail a été établi avec les collaborations VIRGO-LIGO pour la recherche conjointe de neutrinos de haute énergie et d'ondes gravitationnelles. Les résultats d'une première étude commune ont été récemment publiés [ANT\_OG]. En ce qui concerne KM3NeT, outre l'impulsion que donnent au projet les résultats d'IceCube, le fait le plus marquant est le choix de design et de la technologie commune du futur détecteur qui sera implanté sur plusieurs sites, dont le site ANTARES. Il s'agit finalement de lignes souples qui seront équipées à chaque étage d'un seul module optique d'un type nouveau qui contiendra 31 photomultiplicateurs de 3 pouces au lieu d'un seul photomultiplicateur de 10 pouces. Ce nouveau dispositif offre plusieurs avantages : un gain d'un facteur 3 en termes de surface de collection, un meilleur comptage du nombre de photons incidents, une meilleure détermination de la direction d'arrivée de ces photons et la possibilité d'utiliser des coïncidences entre photomultiplicateurs pour s'affranchir du bruit de fond optique ambiant. Depuis avril 2013, un prototype est en opération sur le site ANTARES. Son bon fonctionnement ouvre la voie vers le déploiement de la première ligne du détecteur d'ici la fin de l'année 2014.



• **Figure 1 :** Représentation graphique des deux événements observés par IceCube en Août 2011 (a-Ernie) et janvier 2012 (b-Bert). Le code de couleur symbolise les temps d'arrivée relatifs des photons détectés (rouge : premiers – bleu : derniers). Tiré de [IC-PeV].

• **Figure 2 :** carte du ciel (en coordonnées équatoriales) des 28 événements détectés par IceCube lors de l'analyse de suivi faisant suite à l'observation des 2 événements de la figure 1. Le code de couleur indique la valeur du test statistique. Les croix (x) symbolisent des muons, tandis que le symbole (+) indique des gerbes. Extrait de [IC-Hese].

## 7. *Etudes des neutrinos atmosphériques.*

Si l'objectif premier des télescopes à neutrinos est de développer l'astronomie neutrino dans le domaine d'énergie du TeV au PeV, le même principe de détection peut être utilisé pour étudier les propriétés fondamentales des neutrinos en exploitant l'abondant flux de neutrinos produits par interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère (neutrinos atmosphériques). Des premières études ont été menées dans ce sens par ANTARES [Ant\_osc] et IceCube [IC\_osc]. Les résultats publiés prouvent la validité du concept mais ne sont pas compétitifs avec autres mesures mondiales. Pour cela, un réseau de PMTs plus dense encore que celui d'ANTARES est nécessaire de manière à abaisser le seuil de détection à des énergies de l'ordre du GeV, là où les mécanismes d'oscillation

entre neutrinos de différentes saveurs, et en particulier les effets matière, peuvent être observés. Ceci pourrait permettre, outre des mesures plus précises de certains paramètres de la matrice de mélange, d'établir la hiérarchie des états propres de masse des neutrinos (normale ou inversée) en quelques années [Akh13]. La hiérarchie de masse serait révélée en étudiant l'influence des effets de matière sur la distribution d'énergie des neutrinos atmosphériques en fonction de l'angle zénithal d'incidence. Des études de faisabilité, baptisées PINGU [PIN] et ORCA [ORC] ont été débutées par les collaborations IceCube et KM3NeT respectivement. Ces études bénéficient du soutien d'ASPERA [ASP] en Europe, grâce à un appel d'offre lancé à l'été 2012. Les travaux déjà accomplis incluent plusieurs études sur l'influence des systématiques liées à la mesure (incertitudes sur les paramètres de mélange, sur le flux atmosphérique, le profil de densité terrestre, ou encore les résolutions instrumentales) ainsi que des méthodes statistiques pour quantifier le pouvoir de discrimination des détecteurs (voir par exemple [Fra12]). Les études les plus récentes semblent indiquer que la hiérarchie de masse pourrait être déterminée avec un niveau de confiance de 3 (5) sigma en 3 (10) ans. Ces résultats, encourageants, doivent être consolidés dans les mois qui viennent. L'évolution de ces projets a fait et fera l'objet de présentation au GDR. Concernant la hiérarchie de masse, le potentiel de découverte d'un détecteur comme ORCA avec un faisceau de neutrino issus de Protvino (Russie), par le biais de l'apparition de neutrinos électroniques, a également été étudié et présenté au GDR [ORCB].

## Références

- [Aug] The Auger collaboration, *Science* 318 (5852), 938  
 The Auger collaboration, *Astroparticle Physics* **34** (2010) 314  
 [Hes] Nukri Komin for the H.E.S.S. collaboration, arXiv:1201.0641  
 [Fer] M Ackermann et al. 2013 *Science* 339 807.  
 [jet] M.D Trigo et al, *Nature* 504, 260–262 (12 December 2013)  
 [Ant\_dm] S. Adrian-Martinez et al., *JCAP11* (2013) 032  
 [Ant\_mp] S. Adrian-Martinez et al., *Astropart. Phys.* 35 (2012) 634640  
 [IC] R. Abbasi et al., *Astropart.Phys.* 35, 615 (2012)  
 [Bai] Zh.-A. Dzhilkibaev, arXiv:0909.5562  
 [ANT\_DET] J.A. Aguilar et al, *NIM A* 656 (2011) pp. 11-38  
 [KM3] The KM3NeT consortium, <http://www.km3net.org/TDR/TDR-KM3NeT.pdf>, ISBN 978-90-6488-033-9  
 [IC-PeV] M. G. Aartsen et al., *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 021103  
 [IC\_Hese] M. G. Aartsen et al., *Science* 342 (2013) 6161  
 [Ant\_ICRC13] The Antares collaboration, proceedings of the 33rd ICRC, arXiv:1312.4308  
 [ANT\_alert] M. Ageron et al., *Astropart. Phys.* 35 (2012) 530536  
 [ANT\_flares] S. Adrian-Martinez et al., *Astropart. Phys.* 36 (2012) 204210  
 [ANT\_OG] The antares, VIRGO & LSC collaborations, *JCAP06(2013)008*  
 [Ant\_osc] S.Adrian-Martinez et al. , *Phys. Lett. B* 714 (2012) 224  
 [IC\_osc] M. G.Aartsen et al., *Phys. Rev. Lett* 111 (2013) 081801  
 [Akh13] E. K. Akhmedov, S. Razzaque and A. Y. Smirnov, *JHEP* 1302 (2013).  
 [PIN] M. G.Aartsen et al., arXiv:1401.2046 [physics.ins-det]  
 [ORC] P. Kooijman for KM3NeT, 33rd ICRC, id 164  
 [ASP] <http://www.aspera-eu.org/>  
 [Fra12] D. Franco et al., *JHEP* 04 (2013) 008.  
 [ORCB] J. Brunner, arXiv:1304.6230.

## IV. CONCLUSIONS

Les réunions du GDR « Neutrino » ont été extrêmement utiles pour la communauté française dans une période riche de progrès majeurs. Elles ont permis: - des échanges étroits entre les théoriciens et les expérimentateurs; - de discuter les nombreux résultats et des progrès réalisés dans le domaine; - d'inviter des chercheurs de renommée internationale. Le renouvellement du GDR pour les prochains quatre ans est absolument nécessaire en vue des avancées théoriques en cours ainsi que des résultats expérimentaux importants attendus dans l'avenir proche, et de leurs implications dans divers domaines de la physique.

## D. ACCELERATEURS, MOYENS DE DETECTION, R&D ET VALORISATION (GT4)

### I. OBJECTIFS ET ROLE DU GROUPE

Les récentes mesures des paramètres d'oscillation du neutrino ouvrent de nouvelles perspectives en matière de recherches fondamentales et requièrent des infrastructures et des détecteurs de plus en plus élaborés. Ce groupe de travail (GT4) permet de faire le point sur les techniques de détection actuelles et aborde l'état de la recherche en matière d'innovations technologiques pour l'étude des propriétés du neutrino. Il contribue également à l'élaboration de la feuille de route scientifique de la communauté française en relation avec l'ensemble des partenaires internationaux de la communauté du neutrino. Enfin, le GT4 participe à la valorisation des développements techniques issus des travaux autour de la physique du neutrino. Le groupe est ouvert à des physiciens des particules, des physiciens nucléaires, des astrophysiciens ainsi qu'à des experts travaillant en R&D sur les sources et les détecteurs de neutrinos.

### II. THEMATIQUES DE RECHERCHE

La physique du neutrino est un domaine de recherches fondamentales de premier plan dans le paysage de la physique des particules. Les prochaines mesures requièrent un niveau de précision qui nécessite le développement de nouvelles infrastructures de plus en plus sophistiquées et le développement de nouvelles techniques de détection qui peuvent être utilisées conjointement avec les techniques conventionnelles. Ces développements effectués dans le cadre de la recherche fondamentale peuvent également donner lieu à des développements dans d'autres domaines notamment les applications médicales ou dans celui de la non-prolifération. Les thématiques du groupe de travail s'articulent donc autour de deux champs de recherche fondamentale et d'un champ transverse :

- Les accélérateurs de neutrinos et leurs détecteurs
- Les expériences bas bruit de fond (Double désintégration bêta  $\beta\beta 0\nu$ , spectromètre bêta,...)
- Interdisciplinarité

Les aspects valorisation sont abordés dans la partie interdisciplinaire qui illustre le transfert technologique de la recherche fondamentale vers des domaines appliqués et qui peuvent donner lieu à un transfert vers l'industrie.

#### *1. Les accélérateurs de neutrinos et leurs détecteurs*

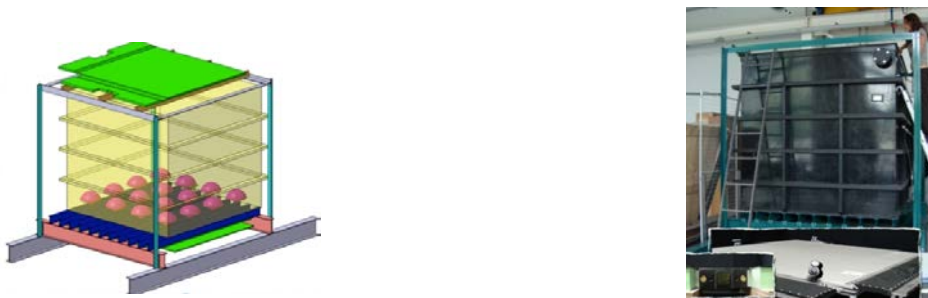
La mesure du dernier paramètre de la matrice de mélange PMNS ( $\theta_{13}$ ) notamment par les expériences auprès des réacteurs ouvrent la voie à la mesure de la violation CP et de la hiérarchie de masse dans le secteur des neutrinos. La stratégie européenne réaffirme sa volonté de soutenir un programme accélérateur pour l'étude des propriétés du neutrino qui s'inscrit dans une vision à long terme [1]. Au niveau européen des programmes de recherches ont mené des études sur les différentes infrastructures possibles (sources et détecteurs) permettant d'atteindre ces objectifs de précisions, notamment LAGUNA, LAGUNA-LBNO et EUROnu et ont donné des indications sur les orientations futures à suivre.

Dans ce contexte, les différentes thématiques liées au développement de ces nouvelles sources de neutrinos ont été discutées en faisant un état des lieux sur les super faisceaux de neutrinos, les faisceaux radioactifs (Bêta-Beams) ainsi que les usines de neutrinos (Neutrino Factory). Il se dégage ainsi la nécessité de poursuivre l'effort de recherche et de développement sur les sources de haute intensité à partir d'un faisceau de protons de plusieurs Méga Watts. Au niveau européen différents scénarios sont envisagés à partir de complexes accélérateurs déjà existants au RAL et au CERN. Une nouvelle option est également envisageable et consiste à utiliser la ligne de faisceau de la source européenne de spallation neutron ESS (European Spallation Source) pour produire un faisceau de neutrinos d'une puissance de 5MW.



L'étude concernant l'optimisation des détecteurs à l'échelle du MegaTonne a été conduite au sein de collaborations internationales notamment LBNE et LAGUNA-LBNO. L'ensemble des programmes de recherches s'articule principalement autour des technologies suivantes : water Cerenkov, scintillateur liquide et argon liquide.

**Water Cerenkov.** Cette technique de détection est éprouvée depuis SK puis par T2K et ne présente pas de verrous technologiques particuliers. Trois détecteurs à l'échelle du Mégatonnes ont été proposés HyperK[2] au Japon, WCD aux États Unis par la collaboration LBNE[3] et dans le cadre européen MEMPHYS (MEGaton Mass PHYSics[4]). Ce dernier a été initialement développé pour la ligne de faisceau du CERN au Laboratoire Souterrain de Modane (4800 m.w.e) dans une configuration à courte longueur de faisceau (130km) ou à très longue distance du CERN vers la mine de Pyhäsalmi (2400 km) située en Finlande. Cependant, MEMPHYS peut être également utilisé à une échelle intermédiaire (500-600 km) en se plaçant au second maximum d'oscillation  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  et en utilisant un faisceau de neutrinos produit par la source de spallation neutrons ESS (European Spallation Source [5]). La configuration envisagée comporte deux cylindres d'une hauteur (65mx100m) avec une masse fiducielle de 540kt. Des études techniques sur l'extension du Laboratoire Souterrain de Modane ont également été menées pour démontrer la faisabilité du projet. Un prototype à échelle réduite MEMPHYNO (Fig.1) a été élaboré afin d'optimiser la collection de lumière, les photodétecteurs ainsi que l'électronique d'acquisition.



**Fig. 1 MEMPHYNO (2mx2mx2m)**

De nombreux progrès ont été réalisés sur le plan technique, avec une couverture optique de 30%. L'utilisation de concentrateur optique au niveau des photomultiplicateurs permet d'augmenter l'efficacité de collection de lumière au niveau de la photocathode de rapport 1.5 ainsi que la résolution en énergie. La perte de couverture optique due à la réduction de 50% du nombre de photomultiplicateur est compensée par le concentrateur optique et par des photocathodes de haute efficacité quantique. Les études mènent à la conclusion que le détecteur possèdera une couverture de géométrique de 20% avec des photomultiplicateurs R11780 d'Hamamatsu de 12'' de diamètre.

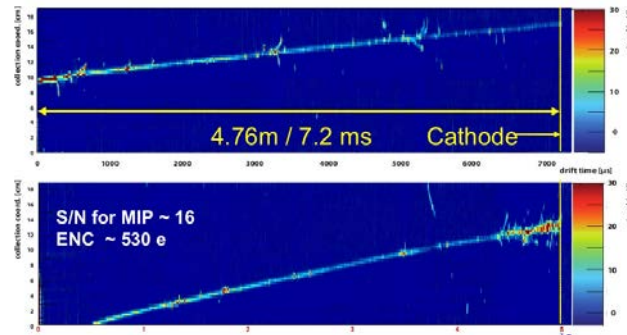
Le prototype a également permis de mettre la configuration d'un élément structurel de base du détecteur d'un point de vue géométrique (4x4 photomultiplicateurs + 1 photomultiplicateur dédié au veto) au sein de la collaboration PMm2.

**Scintillateur Liquide.** Principalement utilisé pour expérience auprès des réacteurs comme Reno, Daya Bay et Double Chooz, ou pour l'étude des neutrinos du soleil avec Borexino, cette technique de détection présente l'avantage d'avoir le plus bas seuil de détection un rendement lumineux supérieur par rapport à l'eau. Dans le futur, deux détecteurs sont proposés à l'échelle de plusieurs dizaines de ktons : JUNO et LENA.

**Argon Liquide.** Le détecteur consiste en une chambre à projection temporelle dont la cible est constituée d'argon liquide. Cette technique a déjà été utilisée avec succès par le détecteur ICARUS-

CNGS2. La prochaine génération à l'échelle de 50 à 100 ktons (GLACIER [6]) constitue un challenge technologique et nécessite un programme de R&D. La première étape consiste à réaliser un prototype à échelle réduite afin de valider le concept et notamment de mettre en œuvre un circuit de purification de l'argon liquide et la réalisation de plan de lecture de grandes dimensions avec son électronique de lecture bas bruits fonctionnant à des températures cryogéniques.

De nombreux progrès ont été réalisés sur les techniques cryogéniques et ont été exposées aux cours de réunions successives, notamment par l'exposé des premiers résultats concernant l'expérience ARGONTUBE[7] démontrant la possibilité d'avoir un signal sur une distance de dérive de l'ordre 5m dans l'argon liquide.



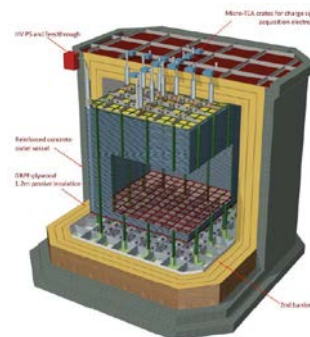
**Fig. 2 - ARGONTUBE - Traces de particules**

En complément de la mesure calorimétrique, l'addition d'un champ magnétique permettrait de contribuer au processus d'identification des traces et améliorera la mesure de l'énergie impulsion des particules secondaires.

Au niveau européen l'effort de recherche pour un détecteur à l'échelle de plusieurs dizaines de ktons se poursuivra par la réalisation d'un démonstrateur (LBNO-Proto/WA105) dans le cadre de la plateforme neutrino du CERN.

Le volume actif de ce détecteur sera de 6mx6mx6m rempli d'argon liquide et possèdera également une phase gazeuse permettant l'amplification par des LEM ou micromegas. Le challenge technique réside principalement dans les champs d'investigation suivants :

- Etude structurelle du prototype
- Système de purification
- Haute tension 300-600 kV
- Plans larges de lecture à base de LEM muni de son électronique



**Fig. 3 – Prototype WA105**

Le plan de lecture représente 1/20 de l'aire de GLACIER (version 20kt).

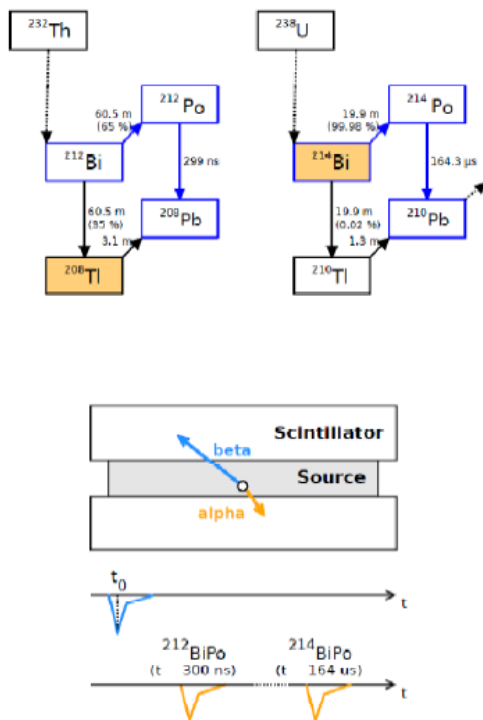
## *2. Les expériences bas bruit de fond*

Sur le plan des expériences bas bruit de fonds, il existe de nombreuses expériences au niveau international dédiées à la recherche de la double désintégration bêta. La plupart d'entre elles, dont SuperNEMO, une expérience très prometteuse avec une importante participation française, utilise des techniques classiques de détection de particules (détecteurs à scintillation et détecteurs à gaz). En plus de cette technologie plus traditionnelle, ce groupe de travail consacre une activité importante à de nouvelles technologies innovantes pour l'étude des processus rares. C'est le cas d'une nouvelle technique basée sur l'approche calorimétrique (source et détecteur coïncidents) permettant d'étudier la

double désintégration bêta de nombreux isotopes prometteurs avec une haute résolution énergétique. Elle se base sur l'utilisation de détecteurs sophistiqués fonctionnant à basse température, nommés bolomètres.

Cette technologie possède un fort potentiel pour couvrir la région concernant la hiérarchie inverse des masses des neutrinos. D'excellentes expériences calorimétriques peuvent être réalisées aussi par une technologie plus classique, comme celle des TPC au xénon en phase gazeuse sous haute pression ou en phase liquide, comme prévu respectivement dans les expériences NEXT et EXO-200. Cette approche a été examinée respectivement dans les présentations d'Igor LIUBARSKY en Novembre 2013 et de Razvan GORNEA en Novembre 2011. Une position particulière est occupée par les

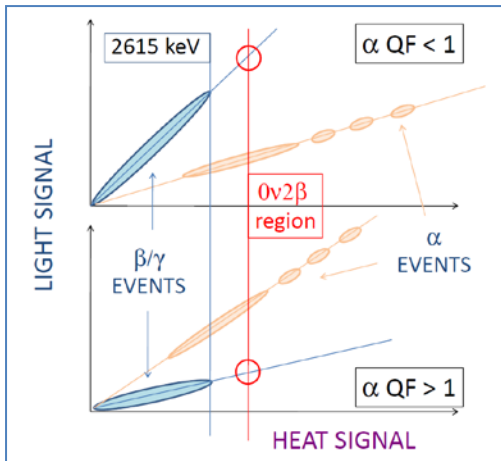
expériences qui visent à la mesure directe de la masse du neutrino en étudiant la forme du spectre bêta en proximité de l'énergie de transition. On s'est occupé plus marginalement de ce sujet-là, avec un approfondissement de l'état de l'expérience KATRIN (qui prévoit l'analyse du spectre bêta du tritium avec un spectromètre électrostatique à collimation magnétique) avec le rapport de Susanne MERTENS en Juin 2012 et une revue des possibilités offertes par la technique bolométrique présentée par Sergio DI DOMIZIO en Novembre 2011. Les deux technologies pour la double désintégration bêta poursuivie en France seront discutées plus en détail dans la suite.



**Fig. 4 – Le principe de détection de faibles radioactivités à la base de BiPo**

extrêmement faible par rapport à d'autres techniques. Du fait de la résolution en énergie limitée (typiquement l'émission de deux neutrinos constitue une source de bruit de fond pour celui sans neutrinos dans l'état final). Les sources doivent être minces pour réduire l'auto-absorption. Contrairement aux expériences calorimétriques, la mesure de toutes les informations cinématiques (distribution angulaire, énergie individuelle de l'électron) peut permettre la compréhension du mécanisme à l'origine de la double désintégration bêta. Du point de vue technologique, et sujet d'étude dans le présent groupe de travail, il faut signaler la construction d'un détecteur BiPo sensible à des contaminations de quelques  $\mu\text{Bq/kg}$  dans les sources minces double bêta et mis en œuvre dans la Laboratoire Souterrain de Canfranc en Espagne [8], et présenté dans notre groupe de travail par Hector GOMEZ MALUENDA en Octobre 2012. Le concept du détecteur repose sur la détection de coïncidences retardées alpha-bêta pour l'identification des chaînes Bismuth-Polonium de la radioactivité naturelle (Fig. 4). Le détecteur BiPo est dispositif instrumental indispensable pour une correcte sélection des matériaux utilisés pour construire les sources minces.

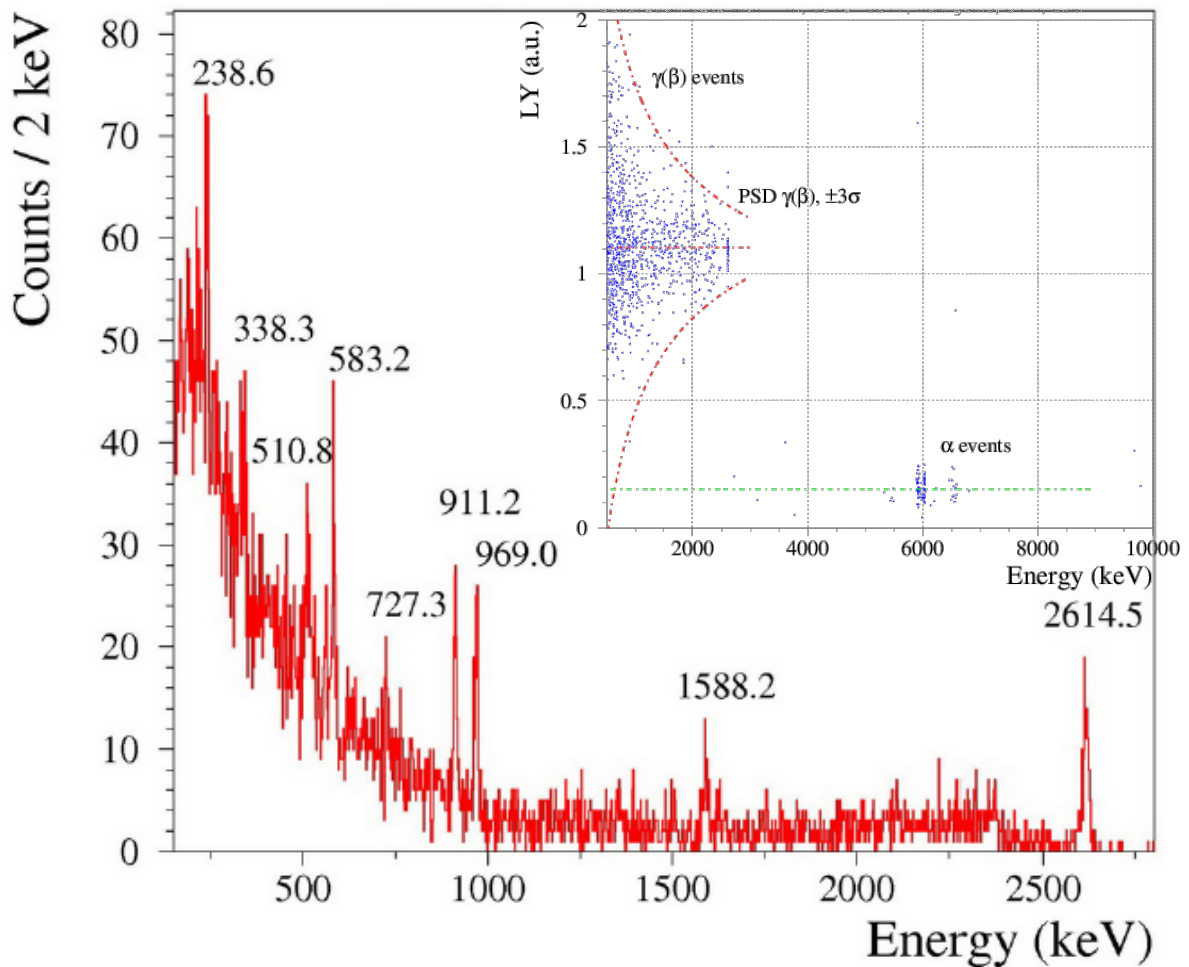




**Fig. 5 – Discrimination  $\alpha/\beta$  avec des bolomètres scintillants**

Les bolomètres scintillants (LUCIFER et LUMINEU) : Un des arguments centraux dans GT4 sont les bolomètres scintillants, des détecteurs de particules opérant à basse température capables de détecter simultanément la lumière de scintillation et la chaleur développée par un événement nucléaire (voir encore le rapport de Sergio DI DOMIZIO en Novembre 2011). Cette double approche permet le rejet des interactions dues à des particules alpha avec une efficacité proche de l'unité (Fig, 5). Le rendement lumineux des alphas est généralement très différent de celui des particules bêta. Si les bolomètres scintillants contiennent un candidat à la double désintégration bêta caractérisé par une énergie de transition plus élevée que la dernière ligne de la radioactivité gamma naturelle (2,6 MeV), le rejet de particules alpha permet une expérience avec un bruit de fond quasi nulle pour les expositions nécessaires pour couvrir la région de la hiérarchie inverse.

Un axe spécifique de recherche porte sur les détecteurs de lumière à basse température, qui sont à leur fois des bolomètres composés par des absorbeurs minces de germanium et des capteurs de température. Si le seuil des détecteurs de lumière est suffisamment faible pour détecter la lumière Cerenkov, la technique peut être étendue à des bolomètres non scintillants, tels que ceux à base de



**Fig. 6 – Résultats obtenus à Modane avec un bolomètre de  $\text{ZnMoO}_4$  de 313 g : calibration avec une source de  $^{232}\text{Th}$  (voie chaleur) ; dans l'insert, rejet des événements alphas dans la même calibration par leur faible rendement lumineux (LY) par rapport aux betas et gammas.**

cristaux de  $\text{TeO}_2$  actuellement utilisés dans l'expérience CUORE (Matteo BIASSONI a présenté l'expérience CUORE-0 - étape préliminaire avant la réalisation de CUORE - en Mai 2013, tandis que l'approche Cerenkov à CUORE a été discutée par Marco VIGNATI en Juin 2012). Les isotopes les plus intéressants, tous avec des énergies de transition au-dessus de 2,6 MeV, sont le  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{100}\text{Mo}$  et  $^{116}\text{Cd}$ , qui peuvent être étudiés dans le contexte de cristaux scintillants de  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnMoO}_4$  et  $\text{CdWO}_4$  respectivement. Le  $^{82}\text{Se}$  est le sujet de l'expérience LUCIFER, qui se déroule principalement en Italie au Laboratoire Souterrain du Gran Sasso, mais qui voit aussi une participation française pour le développement des détecteurs de lumière et l'étude des senseurs de température. En France, il y a une ligne active de recherche sur le  $^{100}\text{Mo}$  [9], qui se caractérise par une valeur de réaction Q d'environ 3 MeV, dans le cadre du projet ANR LUMINEU. Ce projet vise à l'exploitation de cristaux scintillants de  $\text{ZnMoO}_4$ , comme discuté dans la présentation de Dmitry CHERNYAK en Mai 2013, et, dans le cadre de GT1, par Margherita TENCONI en Juin 2012. Le composé choisi a montré un excellent comportement thermique (résolutions énergétiques de l'ordre de 0,3 % et un facteur de rejet alpha très élevé, largement supérieur à 99.9% - voir Fig. 6). La synthèse des cristaux de  $\text{ZnMoO}_4$  est obtenue par une technique de pointe, la méthode Czochralski à faible gradient thermique, qui garantit une excellente qualité du cristal et une pureté extrême, et limite les pertes de la matière première qui peuvent être gardées au-dessous de quelques pourcents. Une approche progressive, fondée sur la réalisation de bolomètres scintillants de masse croissante, a abouti à la réalisation d'un détecteur de 300 g, entièrement caractérisé en surface et au Laboratoire Souterrain de Modane dans le cryostat de l'expérience EDELWEISS pour la recherche de la matière noire. Les résultats achevés confirment la faisabilité d'une expérience de grande taille en terme de résolution énergétique, rejet du fond alpha et pureté intrinsèque des cristaux. La prochaine étape, déjà programmée et en cours d'exécution, prévoit la mise en œuvre comme détecteurs de cristaux naturels et enrichis. Ces dispositifs constitueront les éléments de base pour une future grande matrice qui pourrait être installée dans un environnement souterrain, soit en France en exploitant les infrastructures d'EDELWEISS après l'exploitation de cette expérience, soit en Italie dans les cryostats installés au Gran Sasso. Cette technique a la possibilité d'utiliser des quantités considérables de molybdène enrichi (plusieurs kg) grâce à une collaboration avec l'Institut de Recherche Nucléaire de Kiev (Ukraine) et l'ITEP de Moscou (Russie).

### *3. Interdisciplinarité*

Le dernier champ d'études consiste à mettre en avant les possibilités interdisciplinaires que présentent les aspects fondamentaux de la R&D faite sur les grands instruments. Les présentations ont montré que les développements et les techniques de détection à base de scintillateur liquide et de xénon liquide peuvent également être employés dans un cadre interdisciplinaire. Les techniques utilisées auprès des détecteurs étudiant les antineutrinos provenant des réacteurs nucléaires sont employés dans le projet NUCIFER dédié à la non-prolifération. Afin de répondre à la demande de l'IAEA, un détecteur de taille réduite est en cours d'élaboration et doit atteindre 50% d'efficacité de détection. Le détecteur est actuellement en phase de test auprès du réacteur OSIRIS à Saclay. Ce prototype rentre dans le cadre des études de non-prolifération et doit donner lieu à un développement à l'échelle industrielle. Le détecteur sera localisé à la surface et sera exposé à de nombreuses sources de bruit de fond et nécessitera un veto ainsi que des blindages.

La deuxième catégorie de développements concerne l'utilisation des techniques cryogéniques notamment à base de liquides nobles initialement développées pour les expériences bas bruit de fond et utilisées pour les applications médicales. L'utilisation des propriétés du xénon dans une TPC à xénon liquide et l'ionisation couplée avec la scintillation permet une reconstruction en trois dimensions du point d'interaction. Cela a été mis à profit pour la création d'un télescope à compton. Le projet XEMIS (XENon Medical Imaging System) utilisant un télescope compton dans la cible est du xénon liquide

## III. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le domaine du neutrino est actuellement en plein essor et prometteuse de découvertes. La mise en œuvre des technologies du futur passe par la réalisation de prototypes de plus en plus sophistiqué et dont la technologie est aussi profitable à des domaines connexes. LE CERN participera aux

développements technologiques en mettant en place une plateforme dédiée à la R&D en physique du neutrino. Ce dynamisme de la communauté internationale se reflète au niveau national par l'implication des différents groupes des laboratoires de l'IN2P3 dans l'étude et la réalisation de prototype au sein de collaborations internationales.

#### IV. RESUME DES PRESENTATIONS AU GDR CONCERNANT LE GT4

IPNL Lyon 12-13 Novembre 2013

- MEMPHYS status, M. Buizza Avanzini (APC, CNRS)
- MicroBoone, I. Kreslo (Bern)
- NEXT TPC, I. Liubarsky, (IFIC Paterna)

LPNHE Paris 21-22 Mai 2013

- ESS project, Dr. Nikolaos Vassilopoulos (IPHC, CNRS)
- Scintillating Bolometers - Rejection of background due to standard two-neutrino
- double beta decay, Dmitry Chernyak (CSNSM)
- CUORE-0, Dr. Matteo Biassoni (INFN Milano Bicocca)

LPC Caen 30-31 octobre 2012

- MARS detector technology and the SOLiD neutrino oscillation experiment, Dr. Alfons Weber (STFC/RAL)
- BiPo status, Hector Gomez Maluenda (LAL)
- The LPCTrap experiment, Dominique Durand (LPC Caen)

APC Paris 20-21 juin 2012

- E<sub>ect</sub> Cerenkov dans le Te02, M. Vignati
- Beta Beam, E. Wildner
- Probing the absolute neutrino mass scale with the KATRIN experiment, S. Mertens

28-29 novembre 2011, LAPP, Annecy-le-Vieux

- R&D in the framework of the Nucifer experiment, Frédéric Yermia
- Bolometric detectors in neutrino physics, Sergio Di Domizio
- Particle detection with liquid xenon technologies, Tugdual Oger
- Search for neutrino-less double beta decay with EXO-200, Razvan Gornea

#### V. REFERENCES

- [1] Sergio Bertolucci, Alain Blondel, Anselmo Cervera, Andrea Donini, Marcos Dracos, et al. European Strategy for Accelerator-Based Neutrino Physics. 2012.
- [2] K. Abe, T. Abe, H. Aihara, Y. Fukuda, Y. Hayato, et al. Letter of Intent : The Hyper-Kamiokande Experiment \_ Detector Design and Physics Potential \_. 2011.
- [3] J. Goon and I. Stancu. The Long Baseline Neutrino Experiment (LBNE) Water Cherenkov Detector (WCD) Conceptual Design Report (CDR). 2012.
- [4] L. Agostino, M. Buizza-Avanzini, M. Mara<sub>ni</sub>, T. Patzak, A. Tonazzo, et al. Future large-scale water-Cherenkov detector. Phys.Rev.ST Accel.Beams, 16 :061001, 2013.
- [5] E. Baussan et al. A Very Intense Neutrino Super Beam Experiment for Leptonic CP Violation Discovery based on the European Spallation Source Linac : A Snowmass 2013 White Paper. 2013.
- [6] A. Rubbia. Experiments for CP violation : A Giant liquid argon scintillation, Cerenkov and charge imaging experiment ? pages 321\_350, 2004.
- [7] A. Ereditato, C.C. Hsu, S. Janos, I. Kreslo, M. Messina, et al. Design and operation of ARGONTUBE : a 5 m long drift liquid argon TPC. JINST, 8 :P07002, 2013
- [8] H. Gómez et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 718 (2013) 52–55
- [9] J. W. Beeman et al., Phys. Lett. B 710 (2012) 318–323

## E. OUTILS COMMUNS AUX GROUPES DE TRAVAIL (GT5)

### I. OBJECTIFS DU ET ROLE DU GROUPE

Ce groupe de travail est un groupe transversal qui s'occupe des outils communs aux autres groupes. Les arguments principaux que l'on a identifiés sont notamment : software, statistique, techniques expérimentales, et mesures sur la section efficace des neutrinos.

Ce sont en fait les arguments traités dans les exposés effectués lors des réunions GDR comme on peut le voir dans la liste ci-dessous.

Un groupe dédié nommé "gdrnu" a été créé au centre de calcul de Lyon avec le but de fournir un accès facile à plusieurs logiciels utilisés par la communauté neutrino.

Par exemple, on a installé GLOBES (logiciel pour simuler les expériences de "long baseline") et GENIE (générateur d'interaction des neutrinos), qui sont disponibles immédiatement après le log-in exactement comme avec ROOT.

Vingt personnes font déjà parti du groupe et elles ont donné des retours positifs sur la facilité d'utilisation des logiciels disponibles et ceci sans devoir s'occuper de l'installation, opération parfois compliquée.

Une page spécifique sur les activités du GT5 a été créée ([http://gdrneutrino-wg5.in2p3.fr/GDRWG5/WG5\\_Home.html](http://gdrneutrino-wg5.in2p3.fr/GDRWG5/WG5_Home.html)) contenant aussi les informations relatives aux logiciels déployés.

### II. LISTE DE EXPOSES DU GT5

LAPP Annecy-le-Vieux, 28-29 Novembre 2011

- Software organisation with the CC - A.Meregaglia
- Neutrino SuperBeam and Memphys simulation - N.Vassilopoulos
- Calibration au photo électron des PM de Double Chooz - L.Kalousis
- Reactor simulations for the Double Chooz experiment - A.Onillon

APC Paris, 20-21 June 2012

- The Double Chooz final fit - G.Mention
- Probabilistic inference in physics - G.D'Agostini

LPC Caen, 30-31 Octobre 2012

- Simulation and reconstruction tools of ANTARES linked to ORCA/PINGU - J.Brunner

LPNHE Paris, 21-22 Mai 2013

- Pulse shape discrimination as a tool for neutrino detectors - A.Minotti
- NA61 results for T2K - L.Zambelli

IPNL Lyon, 12-13 Novembre 2013

- Nuclear effects in neutrino interactions - M.Martini
- Neutrino-nucleus interaction and cross section measurements - M.Wascko

## Conclusions

Le GDR neutrino (unité de recherche CNRS GDR2918) aura effectué pendant les 4 dernières années près de 6 sessions plénières.

Les groupes de travail ont pleinement joué leur rôle d'animateurs d'activités autour de leurs sujets alloués. Le GDR a alimenté des discussions et réflexions essentielles en invitant à ses réunions des membres extérieurs experts à des sujets spécifiques. Il a aussi essayé de donner à ses membres une vue globale de la physique du neutrino en organisant des débats où des physiciens internationalement connus étaient invités ou en faisant participer certains de ses membres à des conférences internationales.

Une partie du budget dévoué aux réunions des groupes de travail est désormais consacré à une contribution financière pour la participation de 2 à 3 étudiants ou jeunes chercheurs à des écoles d'été, des workshops ou conférences pour leur permettre de présenter leurs travaux.

Finalement, nous confirmons la bonne vitalité de ce GDR et son utilité au sein de la communauté ne fait pas de doute, la force étant une structure permettant d'apporter une certaine cohésion scientifique à la communauté neutrino. Nous espérons vivement la reconduction du GDR neutrino pour quatre années de plus.

## Futur

Le GDR permet à tous les chercheurs travaillant dans le domaine du neutrino de suivre la plupart des projets dans cette thématique. Il donne aussi l'occasion aux jeunes chercheurs et doctorants d'exposer leurs travaux librement. Il doit continuer à constituer un forum de discussion entre chercheurs français et un lien avec la communauté neutrino internationale.

Les prochaines quatre années seront cruciales, non seulement concernant la physique du neutrino mais aussi la physique des particules dans son ensemble. Tout porte à croire que des décisions importantes seront prises concernant les futures faisceaux de neutrinos, les programmes de R&D détecteurs pour ceux-ci et l'articulation mondiale de ces projets.

L'avenir des prochaines grandes installations commencera à être défini dans cette période. La feuille de route définie dans ce document sera fortement influencée par ces décisions et aura besoin d'actualisation et de soutien. Dans ce contexte, le GDR demande son renouvellement pour quatre ans.

Pendant cette période, de nouveaux résultats concernant les premiers indices éventuels sur le domaine à explorer pour la phase CP, la précision accrue de  $\theta_{13}$  avec les réacteurs et la cohérence avec les mesures de T2K vont arriver. L'élaboration de programmes expérimentaux pour déterminer la hiérarchie de masse avec les atmosphériques et les réacteurs à longue distance va avoir certainement lieu. La réalisation des démonstrateurs ou des détecteurs nouvelle génération pour la recherche du processus de double beta sans émission de neutrino va apporter dans les 4 prochaines années des données essentielles pour définir la meilleure stratégie et technologie pour aborder la question de la nature du neutrino. Les projets sur réacteur et avec source radioactive intense devraient nous permettre de comprendre ce qui se cache derrière les anomalies réacteurs et Gallium, et si des neutrinos stériles en sont à l'origine.

Toutes ces avancées permettront de mieux définir les prochains projets et notre participation à ces projets.

Les actions bien coordonnées du GDR permettront aussi à la communauté française de peser davantage dans la balance des décisions au niveau international.

Une durée de quatre ans et une augmentation de son budget permettraient au GDR neutrino de mieux organiser des études spécifiques menées dans son sein et initiées par le GDR lui-même.

Ce dernier point pourrait aider aussi les groupes de travail à fonctionner de façon plus autonome, à initier au sein du GDR davantage d'études et à produire encore plus de documents scientifiques. Une augmentation du budget permettrait aussi une meilleure représentativité du GDR aux conférences et workshops internationaux.

Comme par le passé, le GDR recommande fortement l'établissement d'une stratégie de recrutement concernant la thématique neutrino. La taille de la communauté neutrino française est relativement faible par rapport aux tâches qui nous attendent. Elle est faible aussi par rapport aux autres thématiques de l'IN2P3/CEA. Pendant les prochaines années et pour palier au problème de vieillissement de la communauté neutrino, il est important de recruter au moins un jeune chercheur par an sur des postes fléchés.

## Annexe 1 : Description de la structure du GDR Neutrino

Le GDR neutrino (2918) est une entité CNRS créée en 2005 et renouvelée pour 4 ans à partir d'octobre 2011.

La direction précédente était effectuée par M. Dracos et M. Zito.

Le fonctionnement du GDR depuis sa création a montré que la structure initiale était adaptée et s'avère efficace pour remplir sa mission. De ce fait il a été décidé pour le nouveau mandat de reprendre la même structure organisationnelle en incluant les 5 groupes de travail et en conservant les thèmes associés.

La structure du fonctionnement est la suivante :

- directeurs: D. Duchesneau (IN2P3/CNRS) et M. Zito (IRFU/CEA)
- 1 conseil scientifique
- 5 groupes de travail

### Composition du conseil scientifique de 2011 à 2014:

Dario Autiero (président)	dario.autiero@ipnl.in2p3.fr
Marcos Dracos	marcos.dracos@IREs.in2p3.fr
Francois Mauger	mauger@lpccaen.in2p3.fr
Edoardo Mazzucato	edoardo.mazzucato@cea.fr
Mauro Mezzetto	mauro.mezzetto@pd.infn.it
Christos Touramanis	C.Touramanis@liverpool.ac.uk
Thomas Schwetz	schwetz@mpi-hd.mpg.de
Francesco Vissani	vissani@lngs.infn.it
+ 2 directeurs	

### Les groupes de travail et leurs coordinatrices/coordonateurs:

- GT1-Détermination des paramètres du neutrino  
Guillaume Mention et Laurent. Simard
- GT2-Physique au-delà du modèle standard  
Stéphane Lavignac et Marco Cirelli (jusqu'en 2013) Ana Teixeira (en 2014)
- GT3-Neutrinos dans l'univers  
Cristina Volpe et Antoine Kouchner
- GT4-Accélérateurs, moyens de détection, R&D et valorisation  
Eric Baussan et Andrea Giuliani
- GT5-Outils communs aux groupes de travail  
Anselmo Mereaglia et Alessandra Tonazzo

Site WEB: <http://gdrneutrino.in2p3.fr/>

Liste email: [GDRNU-L@IN2P3.FR](mailto:GDRNU-L@IN2P3.FR)



## Annexe 2 : Laboratoires et équipes participants au GDR

CNRS

Noms des responsables	Intitulé des équipes	Laboratoire
DUCHESNEAU Dominique	groupe Neutrino	LAPP - UMR 5814
MARQUET Christine	NEMO	CENBG - UMR 5797
MAUGER François	Interactions Fondamentales et Nature du Neutrino	LPC Caen - UMR 6534
TEIXEIRA Ana	Pôle théorie	LPC Clermont - UMR 6533
MONTANET François	Stereo	LPSC – UMR 5821
SCHIENBEIN Ingo	Physique Théorique	LPSC– UMR 5821
AUTIERO Dario	groupe Neutrino	IPNL - UMR 5822
BUSTO José	SuperNEMO	CPPM - UMR 7346
BERTIN Vincent	Antares	CPPM - UMR 7346
FALLOT Muriel	Erdre / Physique du neutrino	Subatech – UMR 6457
GIULIANI Andrea	Détecteurs Cryogéniques	CSNSM - UMR 8609
SIMARD Laurent	NEMO	LAL - UMR 8607
PATZAK Thomas	LBNO	APC – UMR 7164
KOUCHNER Antoine	Antares-KM3NeT-ORCA	APC – UMR 7164
DE KERRET Hervé	Double Chooz	APC – UMR 7164
FRANCO Davide	DarkSide	APC – UMR 7164
LASSERRE Thierry	Neutrinos Stériles	APC – UMR 7164
VOLPE Cristina	Théorie	APC – UMR 7164
GONIN Michel	T2K	LLR - UMR 7638
DUMARCHEZ Jacques	T2K	LPNHE - UMR 7585
ABADA Asmaa	Théorie neutrino	LPT Orsay - UMR 8627
DRACOS Marcos	OPERA / Double Chooz	IPHC - UMR 7178

CEA :

LAVIGNAC Stéphane	Théorie neutrino	IPhT CEA & URA 2306 CNRS
ZITO Marco	Neutrinos accélérateurs	Irfu Saclay
LASSERRE Thierry	Double Chooz/Nucifer	Irfu Saclay



## Annexe 3 : Feuille de route pour la physique des neutrinos

### Update of proposed French roadmap for Neutrino Physics

Date: May 26<sup>th</sup> 2013

#### Forewords:

Following the IN2P3-IRFU prospective days in April 2012, where a clear view on the possible research program from the French neutrino community was presented, the Scientific Council of the GDR2819 (neutrino) has prepared this short letter to recall and update the roadmap.

This roadmap was also submitted as an input to the European Strategy Preparatory Group for the symposium held in Krakow on September 2012. The document is available at:

<https://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=31&confId=175067>

#### Introduction:

For the last two decades, neutrino physics has been producing major discoveries including neutrino oscillations. These results gave clear confirmation that active neutrinos oscillate and therefore have mass with three different mass states. This is a very important result showing that the Minimal Standard Model is incomplete and requires an extension which is not yet known. The neutrino research field is very broad and active, at the frontier of today's particle physics. Several experiments have recently brought us another important step forward in our understanding of the flavour oscillation mechanism by measuring the third mixing angle of the PMNS matrix. Nevertheless, despite these great advances, many fundamental questions remain open in this area, which will require pursuing and developing a challenging experimental program. Among those important questions we find:

- What is the absolute scale of neutrino mass?
- What is the mass hierarchy?
- Are neutrinos their own antiparticles?
- Are there "sterile" neutrinos?
- Is there CP violation phenomena associated with the lepton mixing matrix?

These probable future discoveries will have important consequences for our understanding of matter and of the Universe, such as baryon asymmetry in the Universe, the nature of particle masses and questions of flavours. They may open a window on the physics beyond the Standard Model and on Grand Unification that is otherwise unattainable by searches at the high energy frontier. They would have an important impact in astrophysics, e.g. on core-collapse supernova physics and might be relevant as well in the context of the search for high energy neutrinos in the Universe. Throughout the recent prospective work on physics in France we showed how the next decade will see the efforts of the French community in neutrino physics concentrated on four priority areas of investigation.

#### **1. Pursue the PMNS mixing matrix investigation with the Borexino, OPERA, T2K and Double Chooz experiments.**

These four experiments, among which three of them (OPERA, T2K and Double Chooz) have a strong involvement of French groups, are currently taking data or completing data analysis and that for the

next three to five years. OPERA is expected to conclude its analysis by providing a clear proof of the  $\nu_\tau$  appearance in the CNGS  $\nu_\mu$  beam in less than 2 years. The T2K and Double Chooz experiments have provided in 2011 early indications and evidence of the large value of  $\theta_{13}$ . These indications and observations have been confirmed in 2012 by the Daya Bay and RENO reactor experiments which have made measurements of this third mixing angle with unprecedented precision. The measurement of this angle is of great importance for the definition of the future experimental program to study CP violation in the PMNS matrix and determine the mass hierarchy.

The experiments will continue their data taking in order to provide improved measurements with careful systematics studies. Double Chooz is continuing with the construction and commissioning of the near detector for 2013. T2K has recently updated its  $\nu_\mu$  disappearance measurement leading to the best constraint of the  $\theta_{23}$  mixing angle and this measurement will be continuously improved with the increased data sample. The physics program of T2K could be complemented by data taken in anti-neutrino mode, followed by an upgrade phase of the accelerator complex to increase the JPARC beam intensity. The combination of a precise measurement of  $\theta_{13}$  by reactor experiments and the measurement of  $\nu_e$  appearance may bring important information on the CP violation phase delta of the PMNS matrix.

It is interesting to mention that the measurement of a third large neutrino mixing angle has initiated new studies to investigate the possible complementarity of the mass hierarchy measurement using deep-sea/ice atmospheric neutrino detectors (like ORCA or PINGU).

## **2. Prepare future long baseline neutrino oscillation experiments and the quest for leptonic CP violation and mass hierarchy.**

The recent measurements of large  $\theta_{13}$  angle clarify the possible next steps in the exploration of the PMNS matrix. A large  $\theta_{13}$  should allow a clear determination of the neutrino mass hierarchy and open the exciting possibility to measure the CP violation phase. These studies will require accelerator-based intense neutrino beams. Several approaches with various beam and detector technologies are considered in the world.

Considerable efforts are deployed on this program worldwide, with proposals in the USA (LBNE) and Japan (Hyper-Kamiokande, with a JPARC upgrade). In these studies Europe has considerable assets, especially with the possibility of a short baseline, CERN to Frejus 130 km, and that of a very long baseline, CERN to Pyhäsalmi of 2300 km. It is on these two options that LAGUNA-LBNO (European project that brings together the community interested in these studies) is working until 2014. The work relies on the significant role of CERN in these projects and is primarily focused on the option with a Liquid argon detector in Finland with an incremental approach, in which the mass of the detectors increases in successive stages, by modulating the construction effort. For each stage the physics goals are well defined for the neutrino PMNS matrix study. In addition to neutrino beam programs, major subjects such as astrophysical studies and the search for proton decay are covered by this experimental program. After a preliminary phase of studies (LAGUNA, EURONu, LAGUNA-LBNO) and a comparison of the various options the French community is in the position to make more explicit recommendations.

Those recommendations include also outputs from the European Strategy Group which states *the strong scientific case for a long-baseline neutrino programme exploring CP violation and the mass hierarchy in the neutrino sector* and that *CERN should develop a neutrino*

*programme to pave the way for a substantial European role in future long-baseline experiments.*

Having in mind these recent ESG recommendations, the CERN priorities and ongoing discussions on the Finnish position we also recognize the validity of the CERN to Pyhäsalmi option, outcome from the LAGUNA-LBNO studies. We are as well considering alternative options for beam and detector sites but keeping similar detector technologies and baselines as the ones foreseen in the context of the CERN to Pyhäsalmi program. In this situation:

- We strongly support such option for the first phase of the exploration of the Matter Hierarchy and CP phase with a powerful beam and a 20 to 100 kton Liquid Argon TPC plus a magnetised iron scintillator calorimeter.
- We stress the high potential of this underground observatory for a range of astrophysical measurements, including atmospheric, solar and SN neutrinos, and for GUT-related studies of nucleon decay.
- We recognize that this challenging program over more than a decade needs a matching program of R&D, both in the areas of high power proton accelerators and neutrinos beams and for the ambitious large mass neutrino detectors of the new generation.
- The French community has developed a coherent participation to the necessary detector R&D at CERN and proposes to contribute to the construction, operation and data analysis of a LBNO LAr prototype (6x6x6 m<sup>3</sup> -300 tons) proposed to the SPSC (June 2013).

A second phase in a long term strategy should be based on a better defined neutrino beam with well controlled flux intensity and flavours aiming at studying precisely the CP violation phase and performing a full investigation of the neutrino properties with a full coverage of all neutrino transitions. In this respect, the Neutrino Factory seems to be the optimal solution for an ultimate neutrino beam.

A recent proposal of long baseline project based on the European Spallation Source (ESS) under construction at Lund emerged. ESS should have by 2023 the most powerful (5 MW, 2.5 GeV) proton driver in the world for neutron applications also providing an opportunity to produce in Europe a very intense, low energy neutrino beam. This machine, when coupled to the performance of a 500 kton Water Cerenkov detector, like MEMPHYS studied in the context of Laguna and Euronu projects, can perform CP violation search over a large fraction of the CP phase range, and mass hierarchy determination. We recognize that the investigation of using ESS proton driver to produce a very intense neutrino beam and work on the project design study is interesting and should be pursued. Thanks to MEMPHYS, this project can also address with very good performances a large range of astrophysical measurements, including atmospheric, solar and super novae neutrinos, and nucleon decay studies.

At the French level, R&D effort for Megaton class detectors should be supported.

### **3. Study the reactor and Gallium anomalies search for sterile neutrinos**

The various anomalies related to the LSND experiment, to the calibration measurements of GALLEX and SAGE with an intense source, and more recently to the anomaly with neutrino flux reactor measurements cannot be easily described within a global interpretation with neutrino flavour oscillations in a minimal three-state model. Actually, some of them could

indicate the existence of sterile neutrinos with mass of the order of eV. The clarification of the possible source of these anomalies or the absence of such physics anomalies should be addressed by the community and studied. Several experimental methods are proposed based on nuclear sources, reactors or short baseline accelerator experiments. The French groups are mainly involved in projects based on nuclear sources and reactors. The Nucifer experiment originally designed for nuclear non-proliferation could provide early indications in the direction of sterile neutrinos. Other experiments are under study, especially with very intense radioactive sources deployed in existing detectors (like KamLAND or Borexino) and with new measurements close to compact nuclear reactor cores, like at ILL and the STEREO project. The physics case and the short to medium term experiments foreseen may provide important neutrino physics results which are worth to get. The 2 types of experiments (source and reactor) should be strongly supported.

#### **4. Neutrinoless Double beta decay search**

The search for neutrinoless double beta decay is the only experiment which can tell us about the nature of the neutrino: Dirac or Majorana fermion. In addition, while difficult, it could probe the type of mass hierarchy independently from the oscillation experiments. From a more general point of view, the observation of this rare process would imply total lepton number violation.

Given the fundamental and unique contribution that the search for a neutrinoless double beta decay can bring to neutrino physics and in general to physics beyond the Standard Model, a very rich experimental program is in progress worldwide on this subject, with several projects able in principle to approach the exploration of the inverted hierarchy region of the neutrino mass pattern. Two very promising detection approaches have been adopted by French laboratories.

- The approach of tracking and calorimetry, continues a long tradition that has seen France at the forefront of the search for this rare decay in the last years. These are the only technologies that provide access to all parameters of the two-electron final state. After Nemo-3, the SuperNEMO project aims to achieve sensitivity on the Majorana neutrino of about 0.05 eV with a scenario based on a sequential SuperNEMO module construction and commissioning after 2016. The construction of a demonstrator module of SuperNEMO has been accepted. It will host 7 kg of Selenium-82 and from the beginning of 2015 demonstrate the ability to reach the SuperNEMO background specifications, as well as have the sensitivity to the controversial signal observed by part of the Heidelberg-Moscow collaboration.
- An extremely promising development, based on the technique of scintillating bolometers, began recently. In this context, a pilot experiment (project LUMINEU) is now funded and will be performed within 2015. This search will be based on ZnMoO<sub>4</sub> crystals enriched in <sup>100</sup>Mo, a favourable double beta decay isotope. Further developments foresee the use of 10 kg of enriched material. Recently, the underground operation of large mass crystals of ZnMoO<sub>4</sub> (about 300 g) showed that their internal contamination is compatible with the demanded background level of the final experiment.

## **Recommendations**

The research program in neutrino physics proposed by the French community for the next ten years concerns:

- Oscillation studies and PMNS precision measurements.
- Anomaly investigation and search for sterile neutrinos.
- Future long baseline neutrino experiment for mass hierarchy determination and search for CP violation in the leptonic sector, proton decay.
- Study of the nature of the neutrino with the search for neutrinoless double beta decay process.

These research projects cover most of the fundamental questions of the field and short, medium and long term plans. The French neutrino community, both experimentalists and theorists, amounts to about 80-100 people. Their expertise is recognised internationally in various domains. It is important that the effort is maintained to keep the competence and the expertise in France. It is essential to guarantee a constant rate of new fresh positions along the time and the proper financing.

This research program requires developing several R&D for detectors and accelerators in the coming years. We also consider that it is essential for the next decades to have new world-class neutrino projects **in Europe** as complementary frontier research to the one performed at LHC.

GDR Neutrino  
Scientific Council