



HAL
open science

Contribution au développement de détecteurs bolométriques (1995-2010)

Pierre de Marcillac

► **To cite this version:**

Pierre de Marcillac. Contribution au développement de détecteurs bolométriques (1995-2010). Instrumentation et méthodes pour l'astrophysique [astro-ph.IM]. Université Paris Sud - Orsay, 2010. tel-01945071

HAL Id: tel-01945071

<https://hal.science/tel-01945071>

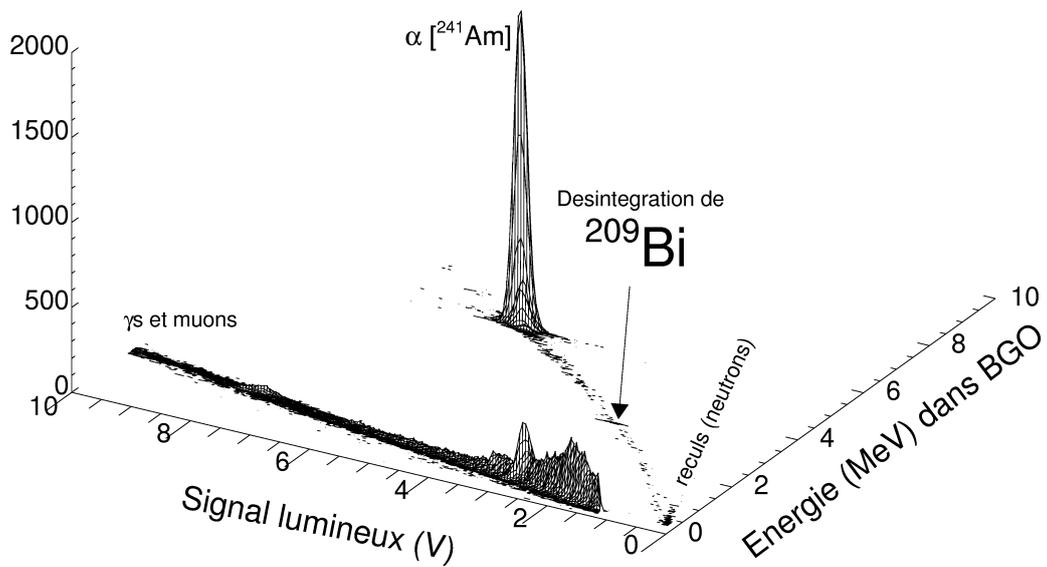
Submitted on 5 Dec 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Contribution au développement de détecteurs bolométriques (1995-2010)

Pierre de Marcillac



Habilitation à Diriger des Recherches,
spécialité « Astroparticules »,
de l'Université Paris Sud 11, Orsay.

Soutenu le 24 septembre 2010

*à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay,
devant un jury constitué de :*

- Mlle Corinne Augier rapporteur
- M. Franz von Feilitzsch rapporteur
- M. Andrea Giuliani rapporteur
- M. Gabriel Chardin examinateur
- M. Klaus Eitel examinateur
- M. Alexandre Broniatowski examinateur

Contribution au développement de détecteurs bolométriques (1995-2010)

Plan

Remerciements

1. Introduction	1
2. La matière noire en 2010 : une hypothèse renforcée, une nature qui résiste	6
3. L'approche IAS de la détection directe	15
3.1. Outils.....	15
3.1.1. Un réfrigérateur à dilution petit mais transportable (Figure 1).....	15
3.2. ROSEBUD-I (1999-2001) : sensible mais radioactive... (Figure 2 ; Tableau 1).....	16
3.3. R&D Bolomètres scintillants : invention d'une technique double bolométrique.....	19
3.3.1. Principes (Figure 3).....	19
3.3.2. Montages (Figures 4 & 5).....	21
3.3.3. Bolomètres optiques (Figures 6 & 7 ; Tableau 2).....	21
3.3.4. Avantages et inconvénients...(Figure 8 ; Tableaux 3 & 4).....	22
3.4. ROSEBUD-II (2006-2007): un fond irréductible, non radioactif.....	27
3.4.1. Configuration type, ou l'apport d'une expérience à cibles multiples complémentaires (Figures 9 & 10).....	27
3.4.2. Fond basse énergie : Saphir	28
3.4.2.1. Le signal de scintillation (Figure 11).....	28
3.4.2.2. Un matériau discriminant aux signaux anti-corrélés :	29
3.4.2.2.1. Gammas/reculs et anti-corrélation (Figure 12 & 13, Tableau 5).....	29
3.4.2.2.2. Gammas/alphas : Extinction lumineuse et thermique (Figures 14 & 15).....	30
3.4.2.3. Mise en évidence d'un léger effet de surface (Figure 16).....	31
3.4.2.4. Effet d'une forte irradiation sur saphir « Verneuil » (Figure 17).....	31
3.4.2.5. Le fond « saphir » au LSC (Figures 18 & 19).....	32
3.4.3. Fond haute énergie : BGO	32
3.4.3.1. Le signal de scintillation (Figure 20).....	32
3.4.3.2. Un matériau discriminant... et radioactif.....	33
3.4.3.2.1. Gammas/reculs (Figures 21 & 22 ; Tableau 6).....	33
3.4.3.2.2. Contamination en ²⁰⁷ Bi (Figure 23).....	34
3.4.3.2.3. La désintégration du bismuth « stable » (Figures 24 à 26).....	35
3.4.3.3. Le fond « BGO » au LSC (Figures 27 & 28).....	39
3.4.4. Fond « neutrons » : LiF	40
3.4.4.1. Un matériau discriminant.....	40
3.4.4.1.1. Gammas/reculs/alphas/neutrons dans 16g LiF (Figure 29).....	40

3.4.4.1.2.	Un révélateur de neutrons lents et rapides (Figure 30)	40
3.4.4.1.3.	Les fonds de neutrons IAS et Canfranc (Figure 31)	41
3.4.5.	Le fond final de ROSEBUD-II :	41
3.4.5.1.	Saphir et BGO : un fond final irréductible, non ionisant (Figure 32)	41
3.4.5.2.	La part des neutrons rapide dans les fond du Saphir et du BGO, estimée par le LiF : principes de la mesure et 1 ^{ère} tentative (Figure 33)	43
4.	Chemins de traverse bolométriques.....	46
4.1.	Bolométrie 4π (non illustré)	46
4.2.	De l'usage des contaminations : corrélations lumineuses dans SrF ₂ (Figures 34, 35 & 36).....	46
4.3.	Spectroscopie haute résolution alpha (Figure 37)	47
4.3.1.	La contrepartie « reculs », une source très intéressante.....	49
4.4.	Discrimination dans un petit cube de quartz (SiO ₂) (Figures 38 & 39)	50
4.5.	Spectroscopie haute résolution des neutrons rapides (Figures 40, 41 & 42)	50
4.6.	Une petite incursion du côté du $\beta\beta 0\nu$: un bolomètre discriminant en TeO ₂ (Figure 43)	51
4.7.	Bolomètres submillimétriques pour la calibration de Planck-HFI (Figures 44, 45 & 46)	52
5.	Perspectives bolométriques.....	55
5.1.	A court terme : compréhension des événements de reculs de ROSEBUD-II au LSC.....	55
5.1.1.	Mesures au LSM sur EDELWEISSII (Figures 47 & 48)	55
5.2.	R&D recherche de nouvelles cibles.....	57
5.2.1.	Spectromètre à fibre optique 1.4 K-300 K (Figures 49 & 50, Tableau 7)	57
5.2.2.	Etude de nouvelles cibles lithiées (Figure 51)	57
5.3.	Ge-NTD hyper purs ? (Figure 52)	58
5.4.	Extension aux fortes masses de la technique des bolomètres à cibles démontable (Figure 53)	59
5.4.1.	de RPSCINT à EURECA, en passant par ROSEBUD-III ?	59
5.5.	Substitutions électriques ?	60
	Conclusion.....	61

Figures & Tableaux

Publications

Annexes

Annexe I (sélection de 5 articles) :

1. Désintégration alpha de ²⁰⁹Bi : une durée de vie record $T_{1/2} \sim 1.9 \cdot 10^{19}$ ans
P. de Marcillac et al., Nature 422 (2003) 876-878 + Supplementary Information
2. Haute résolution alpha : 3.1 keV FWHM à 5.5 MeV sur source externe
E. Leblanc et al., Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 1281-1286
3. ROSEBUD-I au Canfranc
S. Cebrián et al., Astroparticle Physics 21 (2004) 23-34

Propriétés du saphir

4. Traitement de l'anti-corrélation des voies lumière et chaleur : une mesure originale du rendement lumineux
J.Amaré et al., Applied Physics Letters 87, 264102 (2005)
5. Calibration de la réponse thermique relative des reculs (^{206}Pb) /gammas
N.Coron et al., Physics Letters B659 (2008) 113-118

Annexe II : Collaborations

Annexe III : Encadrement/Formation/Animation/Prospective

Annexe IV : Responsabilités administratives

Annexe V : Partenariat et valorisation

Remerciements

Le travail présenté ici n'aurait pas pu se réaliser sans de nombreuses personnes. Au premier rang desquelles les membres de mon équipe « STAP », à présent tous retraités, Jacques Leblanc, Gérard Dambier, et le plus jeune d'entre eux, Noël Coron, qui a dirigé cette équipe, et qui, je l'espère, pourra poursuivre ses recherches en qualité de directeur de recherche émérite du CNRS. Tous les détecteurs que j'ai pu tester ont été conçus par ses soins, et montés sous binoculaire par Jacques Leblanc avec un taux de réussite exceptionnel. Gérard s'est fortement investi dans le montage de l'installation de ROSEBUD dans le tunnel du Somport, et dans toutes les interfaces cryogéniques que nous avons utilisées : un grand merci donc aux trois concepteurs des fameux cryostats 4K CDL –mis pour « Coron-Dambier-Leblanc », pour ceux que cela intriguait, et pour parler comme à l'école– pour ces années de recherche fructueuses, qui ont sans doute été la meilleure illustration de ce pouvait faire une équipe CNRS « à l'ancienne », avec des ingénieurs qui lui étaient affectés. Sans compter l'aide précieuse du service d'électronique, pour les non-moins-fameuses boîtes orange IAS (préamplis) de Georges Jegoudez et Jean-Pierre Lepeltier, toujours en activité (les boîtes !) et celle du bureau d'études (Jean-Pierre Moalic) pour les dessins. Ai-je besoin d'ajouter que tous ces contributeurs sont également retraités ? Une véritable hécatombe ! Puissions-nous avec Thierry Redon, qui nous a rejoints récemment, assimiler rapidement ces savoir-faire à deux, ce qui devrait être faisable si on repousse la retraite à 90 ans, n'est-ce pas Thierry ?

Je suis très reconnaissant à Noël d'avoir su maintenir également un laboratoire opérationnel, équipé et extrêmement bien rangé, au prix de nombreuses heures passées à rédiger des bons de commande, disposant de toutes les pièces et accessoires nécessaires pour le plus grand bénéfice de nos recherches. Et parfois de celles de nos collègues. Je suis toujours très étonné par le temps que met Noël à retrouver un document ancien, qui est généralement celui que je mets à descendre de son bureau au sous sol du labo, avant qu'il ne frappe à la porte, pour se présenter avec le document à la main.

Un grand merci également aux administratifs du laboratoire que nous avons beaucoup sollicités pour leur soutien efficace à nos recherches –cela ne m'étonnerait pas que nous détenions le record de bons de commande par chercheur du labo !– et aux directeurs successifs de l'IAS qui ont accepté que nous nous adonnions à cette Astrophysique Spéciale des souterrains : Alan Gabriel, Jean-Loup Puget, Fabienne Casoli, Alain Abergel & Yves Langevin, et à tous ceux qui nous ont régulièrement fait confiance dans les commissions de l'INSU (CSA, Programme National de Cosmologie) en recommandant de soutenir nos travaux. Au passage, je voudrais rendre hommage aux « anciens » qui ont su construire cet outil extraordinaire qu'est le CNRS, et à ceux qui se battent pour le préserver, et permettre à de jeunes chercheurs de se l'approprier.

Les travaux de certains d'entre eux, Lidia Torres, Ysraël Ortigoza pour les campagnes de ROSEBUD au Canfranc, et Johann Gironnet pour la spectroscopie des neutrons, ont souvent orienté nos recherches de ces dernières années vers de nouveaux rivages scientifiques –mais souvent bolométriques !– à mesure des questions que soulevaient leurs sujets de thèse : qu'ils en soient remerciés. Je leur souhaite de tout cœur que des opportunités se présentent devant eux pour qu'ils puissent s'engager dans la voie qu'ils désirent suivre.

Enfin, je serais bien ingrat de ne pas remercier les membres du jury de cette HDR, qui ont eu à juger ce que j'ai souvent ressenti comme un Objet Universitaire Mal Identifié (OUMI), en particulier Franz, Andrea et Klaus, pour l'effort qu'ils ont consenti à me lire en français. La réalité étant qu'il valait mieux que je leur épargne mon anglais...

*A Lidia,
pour sa patience et sa confiance,
et à nos deux petits saltimbanques,
Miguel le dragon
et Sylvain la pirouette.*

1. Introduction

22 ans de bolométrie...
dont 15ans comme Chargé de Rechercher la matière noire
pour le compte du CNRS.

La nature de la Matière Noire de l'Univers qui contribuerait pour près de 23% à son bilan masse-énergie est une des énigmes majeures de la cosmologie –depuis 1932– mais aussi de la physique des particules. Lorsque j'ai commencé ma thèse en 1988, les deux communautés concernées venaient de réaliser qu'une particule massive interagissant faiblement (WIMP) comme celles que proposent les extensions SuperSymétriques du modèle standard (neutralinos,...) était peut-être à l'œuvre.

Sa détection directe par diffusion élastique impose un cahier des charges très sévère : des faibles seuils de détection (qq. keV), un taux d'événement évanouissant (inférieur à 1 événement/jour/kg avec des sections efficaces d'interaction de l'ordre de la fraction de picobarn), une dégénérescence élevée (le signal est un spectre de noyaux de reculs, continu) et une seule signature (une modulation annuelle) pouvant indiquer l'appartenance des particules détectées à un halo galactique. De nombreuses équipes ont pourtant relevé le défi instrumental, et j'ai été associé aux tentatives de détection des équipes françaises.

En particulier, mon équipe a montré pendant la période de ma thèse que les détecteurs bolométriques massifs refroidis à très basse température (<100 mK) étaient probablement la meilleure réponse, avec un détecteur en saphir de 25 g présentant un seuil en énergie de 4 keV^[9]. De nombreuses équipes internationales sont arrivées à des résultats similaires dans les années 1990 : les bolomètres sont maintenant considérés comme la voie la plus sûre permettant d'arriver à une détection non ambiguë de la matière noire.

J'ai effectué un post-doc en 1993-1994 dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso accueilli par l'équipe du professeur Fiorini pour des recherches sur la double désintégration beta sans neutrino de ¹³⁰Te avec des bolomètres massifs en TeO₂ : ces recherches –à priori moins difficiles que les expériences de détection de la matière noire car le signal visé est une raie, à haute énergie– se poursuivent actuellement et il est probable que les techniques que nous avons développées par la suite à l'IAS puissent contribuer à les aider à se débarrasser de leur bruit de fond alpha.

En 1995 je rejoignais comme Chargé de Recherches du CNRS à l'IAS l'équipe STAP (Spectrométrie Thermique pour l'Astrophysique et la Physique) dirigée par Noël Coron, qui m'avait accueilli durant ma thèse. L'intégralité des détecteurs que j'ai pu tester a été réalisée par Jacques Leblanc, conçue dans le détail par Noël Coron, et pensée par toute l'équipe au fur et à mesure des nouveaux besoins et fonctionnalités qui se faisaient sentir. Nous n'avons pratiquement construit depuis que des prototypes, souvent de plus en plus complexes, apprenant encore de chaque détecteur. Le premier détecteur rencontré au cours de ma thèse portait le numéro B157, et l'équipe vient de caractériser récemment le B322 : je me suis frotté à la plupart d'entre eux...et c'est ainsi que j'ai acquis progressivement une assez bonne connaissance des bolomètres et de leur potentiel. Le point fort de l'équipe réside dans sa grande autonomie, qui va de pair avec une grande réactivité: nous maîtrisons à peu près tous les éléments entrant dans la construction des détecteurs –hormis le tirage des cristaux– et en particulier nous avons développé un savoir faire important dans la réalisation de thermomètres en Ge-NTD.

Une collaboration avec l'IPNL de Lyon nous permettait de tester en 1996 sur leur réfrigérateur Oxford un bolomètre de 1.1 kg en saphir, qui est longtemps resté le bolomètre le plus massif jamais testé –non sans difficultés !

La collaboration ROSEBUD se mettait en place en 1997 entre l'IAS et l'Université de Saragosse pour installer une expérience dans le tunnel de Canfranc (Pyrénées) qui démarrait dès 1999. Nous n'avions pas été capables de tester le saphir de 1.1 kg à l'IAS : la taille réduite de notre équipe nous avait amenés à faire le choix d'un réfrigérateur à dilution de taille modeste ($\Phi=40\text{mm}$), conçus par Patrick Pari au SPEC. Ce réfrigérateur transportable en voiture nous permettait d'envisager des manips en deux temps : observations en tunnel et R&D en labo à l'IAS, avec exactement le même dispositif expérimental, pour une très grande réactivité. L'installation ROSEBUD est ainsi complètement ré-activable en moins d'une semaine. Le prix à payer pour cette réactivité est double: nous avons dû construire des détecteurs massifs suffisamment rapides (typiquement $\sim 10\text{-}20\text{ms}$) pour ne pas être gêné par le rayonnement cosmique à l'IAS et nous ne pouvions pas assurer de poses suffisamment longues (en $\text{kg}\times\text{jour}$), pour être contraignantes pour les modèles de matière noire, étant données les faibles masses en jeu et les faibles ressources humaines dont nous avons disposé (l'équipe espagnole consacre la majeure partie de son temps à l'enseignement au sein de l'Université de Saragosse).

Les données de la campagne ROSEBUD de mesure 1999-2001 avec un jeu de détecteurs (saphir (Al_2O_3), Ge,...) ont permis de prendre la mesure d'un fond important de radioactivité avec lequel il allait falloir compter^{[31], [37], [39], [40]}. Un détecteur double « lumière & chaleur » à cible CaWO_4 (54g) était introduit en fin de campagne. Il montrait tout l'intérêt d'une technique mixte pour le rejet du fond gamma et bêta associé au fond radioactif.

Une période intense de R&D s'en est suivie, menée à l'IAS de 2002 à 2006, qui nous a permis de mener à maturité la technique des bolomètres massifs scintillants refroidis à très basse température, pour la détection d'événements rarissimes. C'est une technique mixte à deux bolomètres « chaleur et lumière ». Elle combine la très haute résolution énergétique permise par la voie « chaleur » avec un pouvoir d'identification élevé des particules, dont le pouvoir d'ionisation est révélé par la mesure effectuée sur la voie « lumière ». Nous avons joué et jouons toujours un rôle de pionniers de cette technique, à présent reprise par trois équipes au niveau international.

Les mesures ROSEBUD de 2001 discréditaient nos détecteurs CaWO_4 pour leur taux de contamination interne élevé dans les chaînes naturelles U et Th^[37] : nous avons alors étudié les propriétés basse température d'un autre scintillateur « classique » des physiciens nucléaires, qui l'utilisaient jusqu'alors à 300K, le germanate de bismuth (BGO, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$). Après une année de qualifications, nous sortions les premiers bolomètres performants en BGO, étudiés à l'IAS sous irradiations alphas (source ^{241}Am), puis neutrons (source ^{252}Cf , pour provoquer des noyaux de reculs). Une série de mesures haute énergie était alors programmée en mars 2002 pour vérifier que le détecteur n'avait pas été contaminé accidentellement par la source alpha : une contamination alpha à basse énergie (3137 keV) était présente dans les spectres, non tabulée. Après recherches bibliographiques, je me suis aperçu que **nous venions probablement de détecter, par hasard, la désintégration naturelle du bismuth (209-Bi)** qui était recherchée depuis 1949. Une série de mesures ont permis de confirmer cette hypothèse sans aucune ambiguïté : la durée de vie du bismuth, jusqu'alors le plus lourd des isotopes stables, est mesurée à $T_{1/2}=1.9\pm 0.2 \cdot 10^{19}$ ans. Il s'agit du record de durée de vie d'un isotope vis-à-vis de la désintégration alpha. Ces résultats, publiés dans la revue Nature en 2003^[38], ont été obtenus sans trop de peine dans un laboratoire de surface, ce qui permettait de souligner la puissance de la technique utilisée. Ils ont crédibilisé définitivement les recherches entreprises avec des bolomètres scintillants pour la recherche d'événements rarissimes.

Parallèlement à ces mesures sur BGO, nous relevions en 2003 un signal fort de lumière à 20mK dans nos détecteurs en saphir, un effet complètement inattendu ^[5]. Une anti-corrélation forte des voies lumière et chaleur nous permettait de comprendre enfin les raisons pour lesquelles les résolutions de nos bolomètres en saphir plafonnait jusqu'ici à des valeurs anormalement élevées pour ce matériau^[9].

Cette émission lumineuse du saphir nous permettait de repartir au Canfranc en 2007 pour une campagne de mesures avec des bolomètres doubles, tous scintillants, en saphir (50g), BGO (46g) et LiF (33g), et l'espoir de rejeter le fond mesuré en 1999-2001 s'il était d'origine radioactive. Malheureusement, des événements non ionisants subsistent dans la branche « des reculs » sur le saphir et le BGO, là où est attendu le signal matière noire ^{[51], [55]}.

Il pourrait s'agir de neutrons rapides –bien que le taux associé d'événements soit élevé, de l'ordre d'une dizaine d'événements par jour. Le bolomètre en LiF, grâce auquel nous nous proposons de réaliser une spectroscopie des neutrons rapides –via leur réaction de capture sur ${}^6\text{Li}$ ^{[6],[36]} – aurait pu permettre d'infirmer cette hypothèse, s'il avait été plus sensible. De fait, une bonne partie de mes activités de recherche actuelles est liée à l'étude et à la réalisation de bolomètres massifs enrichis en lithium-6 pour la spectroscopie des neutrons rapides. Ces neutrons constituent le fond ultime des expériences de détection de la matière noire, mais ils sont aussi associés au fond de bon nombre d'expériences recherchant des événements rarissimes...Des mesures sur un petit détecteur de 0.5g en ${}^6\text{LiF}$ refroidi à 300mK ont permis de valider définitivement le principe spectroscopique : l'énergie de neutrons rapides monocinétiques délivrés par l'installation AMANDE de l'IRSN à Cadarache en juillet 2009 est recouverte à mieux que 1% à 300mK dans l'intervalle 200keV-17MeV (*thèse de Johann Gironnet, en cours*).

La campagne ROSEBUD de 2007, a permis de convaincre la communauté française et européenne de l'intérêt de nos recherches sur les bolomètres scintillants : nous avons maintenant pleinement intégré le projet européen EURECA qui propose une tentative de détection de la matière noire avec une tonne de détecteurs et des bruits de fond réduits de deux ordres de grandeur par rapport aux meilleures expériences. Ce projet très ambitieux devrait inclure des bolomètres massifs scintillants –développés également par la collaboration CRESST- conformément aux recommandations de la feuille de route ApPEC pour le développement des recherches sur les astroparticules au niveau européen: il devrait également occuper une bonne partie de mes futures activités. En attendant qu'il se concrétise, mon équipe est associée aux mesures sur le banc cryogénique de la collaboration EDELWEISS-II

dans le tunnel de Modane, avec un jeu de trois bolomètres doubles IAS.

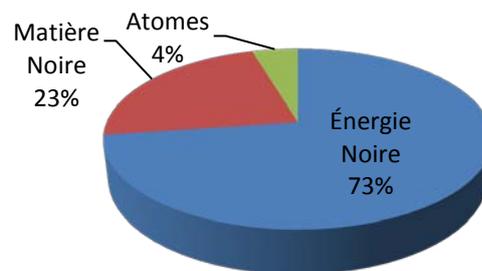
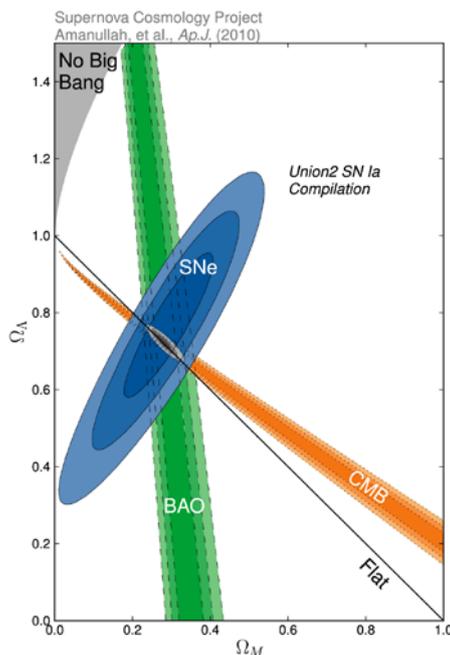
Parallèlement à une activité de R&D basse température ($\rightarrow 1.4$ K) de cristaux scintillants sous irradiation X menée à l'IAS, je participe également au sein de l'équipe STAP à une R&D purement exploratoire sur des bolomètres 20mK à cibles originales démontables (Cu, Ta, $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$,...) dans le cadre de collaborations ponctuelles pour la spectroscopie haute résolution en énergie –à mieux que 1%–sous irradiation alpha, X, neutron,...

Une bonne partie des années 2004 à 2006 a été consacrée à la réalisation et à la caractérisation de deux bolomètres submillimétriques utilisés avec succès lors de la phase de calibration de l'expérience Planck-HFI à l'IAS en 2006 ^{[57],[58]}. Ils auront été les seuls détecteurs français utilisés lors de cette expérience emblématique de la bolométrie.

Rétrospectivement j'espère avoir contribué tout au long de ces années à enrichir la palette des détecteurs bolométriques afin que nous puissions disposer d'outils performants et variés capables aussi bien de cerner un éventuel signal « matière noire » que de mesurer les fonds présents avec précision et confiance dans leur identification.

2. La matière noire en 2010 : une hypothèse renforcée, une nature qui résiste

Durant les quinze années qui ont accompagné les développements bolométriques décrits dans ce manuscrit, la cosmologie a réalisé d'immenses progrès, accédant au statut de « science de précision ». ¹ Les mesures de COBE du fond microonde cosmologique (CMB) avaient permis d'asseoir la théorie du Big-Bang en 1992 : la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers par l'analyse des courbes de lumières des chandelles standards SNIa en 1998, la mesure fine des anisotropies du CMB par WMAP en 2003, l'observation des oscillations acoustiques de baryons (BAO) dans le grand relevé SDSS en 2004, ont permis de définir par des mesures indépendantes la géométrie de l'Univers à mieux que 10%...Un modèle cosmologique dit « de concordance » en est issu, d'un univers plat de type Λ CDM (Matière Noire Froide avec une constante cosmologique Λ).



Le contenu énergétique actuel de l'Univers interprétation des données WMAP7 + BAO+ H_0 . d'après Komatsu E. et al., *Seven Year WMAP Observations : Cosmological Interpretation* soumis à *ApJ. Supp. Series*, arXiv: 1001.4538v2. Le secteur « Matière Noire » peut contenir une contribution neutrinos estimée à $\Omega_\nu < 1.3\%$ (95% CL).

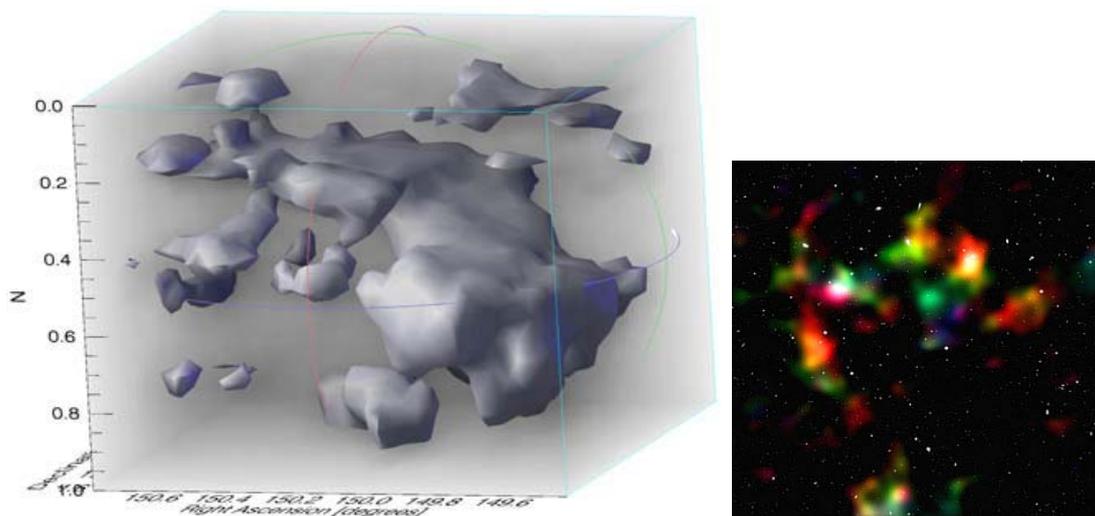
Modèle de concordance cosmologique Λ CDM
(Densité d'énergie du vide Ω_Λ en fonction de la densité de matière Ω_M ; contours à 68%, 95% et 99.7% CL)
Amanullah R. et al, *ApJ.* 716 (2010) 712

De façon remarquable, l'hypothèse d'une Matière Noire a survécu à tous ses bouleversements. Le paysage 2010 est celui d'une Matière Noire au statut renforcé par rapport à la situation de 1995, représentant près de 85% du contenu matériel de l'Univers, et contribuant à près de 23% de son contenu énergétique.

¹ Je me rappelle une conférence de Moriond dans les années 1990s à l'issue de laquelle Jim Peebles prenait les paris de la communauté pour une constante de Hubble H_0 à choisir entre 50 et 100 km/sec/Mpc. Elle est maintenant fixée à $H_0 \sim 71 \pm 4$ km/sec/Mpc, soit à mieux que 5% !

Pendant que les cosmologues moissonnaient, les physiciens des particules mettaient au point le LHC qui devrait leur permettre de reprendre le flambeau des découvertes dans les années à venir. Certains parmi eux, appartenant à la communauté des astro-particules s'enterraient définitivement dans les laboratoires souterrains...d'où ils avaient déjà précisé certaines propriétés remarquables des neutrinos.²

La technique des lentilles gravitationnelles s'est également perfectionnée durant ces années : elle constitue à présent une des sondes de choix pour les prochaines missions visant à préciser la nature de l'énergie noire. Elle nous permet déjà, grâce au télescope spatial Hubble (HST), de dresser les toutes premières cartes de la matière noire en 3D.



Première tomographie 3D de la distribution de matière noire, dans le champ « COSMOS » du HST: le profil de densité est déterminé par les déformations par effet de lentille gravitationnelle des images de près de 500 000 galaxies du champ. Les distances sont estimées par des mesures complémentaires de grands instruments sol (Massey R. et al, *Dark matter maps reveal cosmic scaffolding*, Nature 445 (2007) 286-290). Les couleurs sur la photo du champ codent pour la distance.

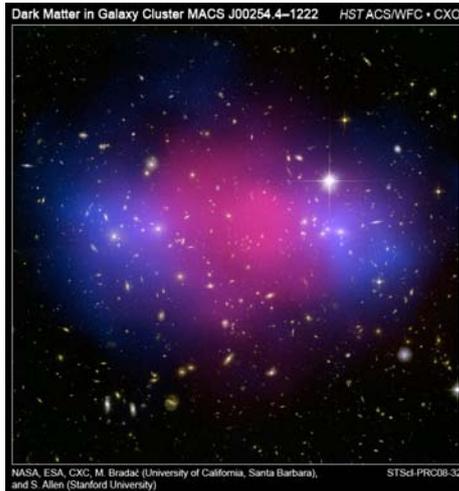
L'évolution de la distribution de matière noire de cette carte avec le temps a été trouvée compatible avec l'accélération observée de l'expansion de l'Univers. (Schrabback T. et al., *Evidence for the accelerated expansion of the Universe from weak lensing tomography with COSMOS*, A&A 516 A63 (2010))

Les observations, simulations, ... de ces dernières années pointent donc plus que jamais vers un besoin de Matière Noire à toutes les échelles, et en particulier dans notre Voie Lactée, ce qui intéresse les expérimentateurs que nous sommes au plus haut point ! Sa densité y est estimée à 0.3 GeV/cm^3 au niveau du système solaire³, une valeur qui n'a remarquablement pas changé depuis 20 ans.

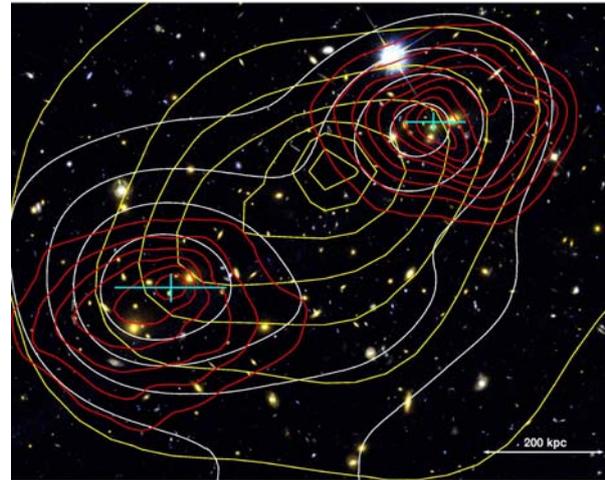
² qui vaudront le prix Nobel de Physique 2002 à Ray Davis et Masatoshi Koshiba ; voir l'article de John Bahcall « Solving the Mystery of the Missing Neutrinos », http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/bahcall/

³ Kamionkowski M. & Kinkhabwala A., *Galactic halo models and particle dark-matter detection*, Phys. Rev. D 57, 3256–3263 (1998)

A moins qu'il n'y ait que de la matière ordinaire⁴? Aux sceptiques, l'approche MOND (MODified Newtonian Dynamics), en dépit de faiblesses structurelles, propose de s'affranchir du besoin de Matière Noire par une modification des lois de la dynamique de Newton aux faibles accélérations. Elle est à présent très sérieusement mise à mal par plusieurs observations⁵ :



Vestiges de la collision des deux amas constitutifs de l'objet MACS J0025.4-1222
La distribution bimodale de matière noire (en bleu) est très nettement séparée de celle du gaz X (en rose) indiquant la nature non collisionnelle de la rencontre pour ses constituants.



Superposition des contours de densité de matière déduits : 1) de l'effet de cisaillement gravitationnel des images des galaxies d'arrière plan (en rouge) ; 2) de la luminosité optique stellaire (en blanc) ; 3) du gaz X dans l'objet MACS J0025.4-1222.

- l'observation en 2006 des vestiges de la collision entre deux amas 1E 0657-56 (Bullet Cluster) par le satellite X Chandra (révélant le gaz chaud de l'amas) et le télescope spatial Hubble a permis de déceler un décalage très significatif entre les distributions de masse des amas– restituée par effet de lentille gravitationnelle des galaxies d'arrière plan–et le gaz X des amas, resté en arrière dans la collision par effet de friction dynamique. C'est ce qu'on attend si la majeure partie de la matière est répartie dans un fluide de nature non collisionnelle comme la Matière Noire, alors que dans l'approche MOND, l'essentiel de la masse est dans le gaz X, et il ne peut y avoir de décalage.⁶

⁴ « Stuff like us ! », comme le clamait le prix Nobel W. Fowler dans les conférences des années 1990s, lui qui n'y croyait pas...

⁵ Pour une approche plus nuancée de l'approche MOND –et moins de parti pris...–, on pourra se reporter au cours de Françoise Combes donné à l'école de Gif2009, *Mond et les Galaxies*, <http://www-subatech.in2p3.fr/Gif2009/gif09-combes.pdf>, ou à la page dédiée de Stacy McGaugh, de l'Université de Maryland : <http://www.astro.umd.edu/~ssm/mond/>.

⁶ Clowe D. et al., *A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter*. ApJ 648: L109–L113 (2006)

- La même technique « multi-messagers » Chandra/HST permettra en 2008 de mettre en évidence une séparation encore plus nette entre le gaz X et la distribution de masse pour les amas entrés en collision de l'objet MACS J0025.4-1222 (photomontage et contours ci-dessus).⁷
- L'observation dans le catalogue SDSS d'une décroissance Képlérienne des vitesses de près de 3000 galaxies distantes « satellites » de galaxies massives isolées est conforme avec le déclin attendu de la densité de matière des halos de matière noire en périphérie des galaxies hôtes ($\rho_{DM} \sim r^{-3}$). Dans l'hypothèse MOND, les sondes distantes du potentiel gravitationnel orbitent à vitesse constante quelle que soit leur distance.⁸

Parallèlement, les expériences EROS, MACHO, ...visant à détecter la Matière Noire baryonique du halo galactique sous forme d'objet compact (de « MACHOs » : Naines brunes, nuages de gaz,..) par effet de microlentille gravitationnelle sur les étoiles d'arrière plan ont sérieusement limité leur contribution à moins de quelques % du halo de matière sombre galactique⁹. Ces résultats importants –probablement assez frustrants pour les équipes engagées !– sont une incitation très forte à persévérer à la recherche dans le halo sous la forme de particules non baryoniques.

Manuel Drees et Gilles Gerbier passent régulièrement en revue depuis 2003 les motivations et les efforts tendant à détecter la Matière Noire du halo galactique sous la forme non baryonique, que ce soit de façon indirecte –l'information étant portée par leurs éventuels produits d'annihilation– ou de façon directe, par une détection dans des expériences souterraines¹⁰. Un dossier « grand public » est également consacré au problème de la Matière Noire dans le dernier numéro de la Recherche¹¹.

⁷ Bradac M. et al., *Revealing the properties of Dark Matter in the Merging Cluster MACS J0025.4-1222*, ApJ 687 (2008) 959-967

⁸ Prada F. et al., *Observing the Dark Matter Density Profile of Isolated Galaxies*, ApJ 598 (2003) 260-271

⁹ Voir par exemple l'article « Un Monde moins MACHO » sur le site du CEA/IRFU

http://irfu.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=1469

«(...) Les résultats (d'Eros-2) sont sans appel : moins de 8% de la masse du halo galactique est sous forme de machos d'une demi-masse solaire. Aucun phénomène de microlentille affectant une étoile brillante n'est observé vers le Grand Nuage, et un seul vers le Petit Nuage ; ce dernier était déjà connu depuis 1997 (...). De fait, ces résultats sont compatibles avec une absence totale de machos(...)»

¹⁰ M. Drees & G. Gerbier, Chapitre 22 : « Dark Matter » in « The Review of Particle Physics K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), J. Phys. G 37, 075021 (2010) <http://www-pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-dark-matter.pdf> (revue à jour au 15 janvier 2010)

¹¹ Matière Noire : de quoi est réellement fait l'Univers ? La Recherche n°444, septembre 2010. La première partie, consacrée aux détecteurs, présente quelques erreurs...

Pour la détection indirecte, sont recherchés un continuum gamma, une raie gamma d'annihilation à haute énergie –qui serait le « fusil fumant » de ce genre de détection, un signal neutrino ou encore une anomalie dans la composition des particules d'antimatière (antiprotons, positrons) du rayonnement cosmique... La situation paraît particulièrement confuse en 2010, chaque expérience reportant un excès de signal (EGRET, PAMELA...) ayant tendance à le considérer comme un signal d'origine « matière noire » : les excès observés sont parfois contredits, incompatibles entre eux ou conduisent à des candidats Matière Noire très exotiques (par exemple des neutralinos « leptophiliques »,...) et, enfin, tous les résultats sont affectés par de très grandes incertitudes d'ordre astrophysique (densité des (sub)halos, mécanismes de propagation des rayons cosmiques, ...). Paradoxalement la détection directe paraît moins incertaine : au moins connaît-on la densité de ce que nous recherchons, même si la particule que nous recherchons est décrite par au moins 5 paramètres libres...¹².

Il y a donc de grandes chances (!) pour que la Matière Noire non baryonique du halo galactique, si elle existe, soit d'abord détectée de façon non ambiguë dans des expériences de détection directe. Les candidats ne manquent pas : reliques thermiques (WIMPs), condensats, wimpzillas, superwimps... tous motivés par des extensions du modèle standard de la physique des particules, dont la SUperSYmétrie¹³. Parmi toutes ces particules, les WIMPs ont le bon goût de conduire naturellement à des abondances reliques actuelles de l'ordre de grandeur de la densité critique Ω_c : c'est très certainement la raison pour laquelle ils ont été les plus étudiés. A côté du candidat WIMP évident que serait un neutrino lourd, –dont on n'a aucune garantie de stabilité, mais au moins sait-on que les neutrinos existent !– la plus légère des particules SUperSYmétriques (LSP), est très attractive, car protégée de toute désintégration, dans les théories SUSY avec conservation de la R-parité. Le LSP devant être neutre, il ne reste plus que deux candidats, un sneutrino, ou le plus léger des 4 neutralinos χ qui apparaissent dans la théorie. Le sneutrino étant écarté par des considérations de masse, il reste le plus léger des neutralinos¹⁴, qui est la particule que nous espérons « tous » détecter sur terre¹⁵ !

¹² Pour se rendre compte de la complexité de cette détection voir la présentation de Pierre Salati à l'IAP, le 17 Mai 2010 : « Implications of the Cosmic Ray Anomalies on Dark Matter », téléchargeable sur le site de l'IAP : <http://www-internet.iap.fr/ActivitesScientifiques/SeminairesEtColloques/SeminairesIAP/2010/salati.html> .

¹³ Quelle particule pour la matière noire ? La Recherche (2010) *Op. Cit.*

¹⁴ Qu'on appellera par la suite « le » neutralino, par souci de simplification.

¹⁵ Voir la discussion –et les références– dans la revue « Dark Matter » de M. Drees & G. Gerbier. *Op. Cit.*

Les quatre neutralinos, et donc parmi eux le LSP, sont les états propres de masse d'un mélange composé du Zino, du photino et des deux Higgsinos, partenaires supersymétriques respectifs du Z^0 , du photon et des deux bosons neutres de Higgs (h, H) qui apparaissent dans la théorie. Le neutralino est un fermion de spin $\frac{1}{2}$, particule de Majorana : identique à son antiparticule, le neutralino peut s'annihiler avec lui-même (permettant ainsi un espoir de détection indirecte via les produits de son annihilation). Le neutralino diffuse très rarement sur les noyaux des cibles terrestres avec des taux d'événements au mieux de 1 evt/kg/jour mais qui peuvent descendre en dessous de à 1 evt/kg/an, ce qui souligne l'extrême difficulté de sa détection, au regard des fonds habituels rencontrés dans des détecteurs un tant soit peu massifs (gammas, neutrons,...). Le signal à mesurer, produit de la diffusion, est donc un noyau de recul¹⁶ avec des dépôts d'énergie de quelques keV. Le profil énergétique est malheureusement un continuum dicté par les masses du neutralino, de la cible, par leur couplage respectif, et par des considérations de cinématique relatives à notre mouvement dans le halo sombre galactique.

Initialement, le neutralino est décrit par 105 paramètres libres (masses, couplages), qui ont pu être ramenés à 5 seulement dans le cadre du Modèle SuperSymétrique Minimal (MSSM). Sa composition n'est bien évidemment pas connue, et il nous faut donc rechercher une particule dans un espace à 5 paramètres libres, soulignant ainsi la difficulté de son identification !

On décompose généralement l'interaction du neutralino avec les noyaux en une partie spin-indépendante, SI, qui bénéficie d'un facteur de cohérence ($\sigma_{SI} \propto A^2$) favorisant les masses élevées¹⁷ et qui a le mérite de permettre de comparer les différentes expériences entre elles (les sections efficaces de diffusion sont ramenées au nucléon), et une partie spin-dépendante, SD, dépendant du spin nucléaire, généralement beaucoup plus faible dans l'espace des paramètres testé (mais pas toujours) : on compare alors les expériences porteuses de spin entre elles selon que le noyau testé est porteur d'un proton ou d'un neutron non apparié, en faisant l'hypothèse d'un couplage pur du neutralino avec ce nucléon non apparié.

On trouvera une description détaillée de tous les aspects de la détection directe dans les nombreuses thèses qui lui ont été consacrées ou dans les revues¹⁸.

¹⁶ Accompagné éventuellement de gammas si la diffusion est inélastique

¹⁷ Mais avec une perte de cohérence avec A de plus en plus importante aux énergies de reculs élevées

¹⁸ Par exemple Gaitskell R. J. et al., Direct Detection of Dark Matter, Annual Review of Nuclear and Particle Science 54 (2004) 315-359 Richard J. Gaitskell

Notons au passage que s'il a fallu concéder une place importante à l'énergie noire (le terme Λ de Λ CDM), la matière noire perdant près d'un facteur 5 entre 1995 et 2010, la situation des expériences de détection directe s'est plutôt améliorée : une densité relique moindre de Matière Noire à grande échelle signifie des sections efficaces d'annihilation du neutralino plus élevées et donc des sections efficaces de diffusion plus importante sur les cibles en raison des relations de « crossing » qui les relient. Une matière noire « sub-dominante » implique ainsi des taux d'événements espérés plus important de ces particules dans nos détecteurs¹⁹.

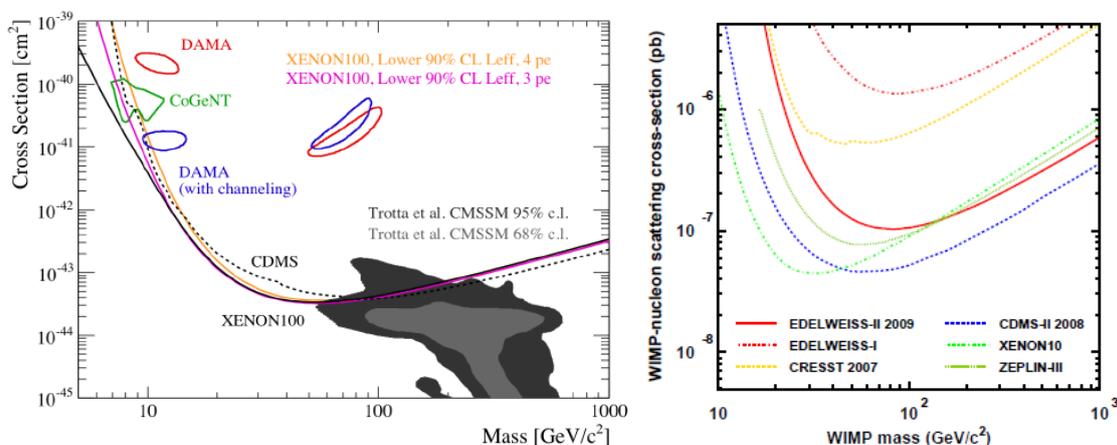
La situation de la détection directe en 2010 est la suivante :

- Une expérience énigmatique, DAMA/LIBRA, qui aborde la détection par la partie «fusil fumant » et reporte une détection positive d'un constituant d'origine galactique, « modèle indépendant », vu à travers une modulation de son fond compatible avec la cinématique du halo. Ce signal a été presque complètement exclu par d'autres expériences dans l'hypothèse d'un neutralino standard, et il ne reste plus que des fenêtres très étroites à très basse masse ou une petite fenêtre dans le cadre d'un WIMP capable de diffusion inélastique.
- Une technique « bulldozer » proposée en 1996²⁰ et arrivée rapidement à maturité: les détecteurs à gaz nobles liquéfiés, avec une capacité d'extension rapide de la masse fiducielle et une radio-pureté originelle « garantie ». L'expérience emblématique de ces techniques est actuellement XENON100 au Gran Sasso. Ces expériences peinent à convaincre de leur calibration en énergie aux basses énergies de recul...
- Des détecteurs bolométriques en pointe (Si ou Ge pour CDMS, Ge pour EDELWEISS,...) grâce aux techniques actives de discrimination et de rejection des événements de surface, et à leur excellente résolution en énergie. Mais les techniques de discrimination relèvent significativement le seuil que l'on pourrait espérer de la voie chaleur seule et manquent pour le moment les basses masses de WIMPs qui focalisent l'intérêt.
- Des expériences comme CoGent, à petit budget, et visant des niches dans l'espace des paramètres libres du neutralino, en l'occurrence les très basses masses, grâce à une configuration de leur diode Ge permettant des seuils bas de détection.

¹⁹ Voir par exemple Scopel S., *Relic Neutralinos*, Nucl.Physics B (Proc.Suppl) 110 (2002) 76-78

²⁰ par la collaboration ZEPLIN

- Une technique bolométrique multi-cible monosite qui progresse, les bolomètres massifs scintillants, défrichée et supportée principalement par l'expérience CRESST au Gran Sasso, et étudiée par notre équipe IAS dans le cadre de l'expérience ROSEBUD.
- Et une situation qui commence à devenir intéressante :
 - des premiers événements qui apparaissent, (CoGeNT : un fond basse énergie non expliqué par des simulations, interprété comme la signature d'un WIMP de faible masse, de 7 à 10 GeV/c²)²¹. Cette hypothèse est rejetée –non sans une vive controverse– par la collaboration XENON100 qui ne voit rien, en dépit des difficultés à convaincre de sa calibration à très basse énergie.



Diagrammes d'exclusion –ou d'existence– SI des neutralinos en 2010.

Les sections efficaces SI de diffusion du neutralino sur les cibles des différentes expériences ont été ramenées au nucléon pour comparaison entre elles (10^{-8} pb = 10^{-44} cm²). Le diagramme de gauche a été publié après l'annonce des premiers résultats de XENON100 et la controverse qui s'en est suivie avec CoGeNT (arXiv : 1005.2615v1 ; 14 Mai 2010). Le diagramme de droite, publié par la collaboration EDELWEISS (arXiv : 0912.0805v1 ; 4 Décembre 2009) souligne les excellents résultats de nos futurs partenaires dans EURECA, CRESST et EDELWEISS.

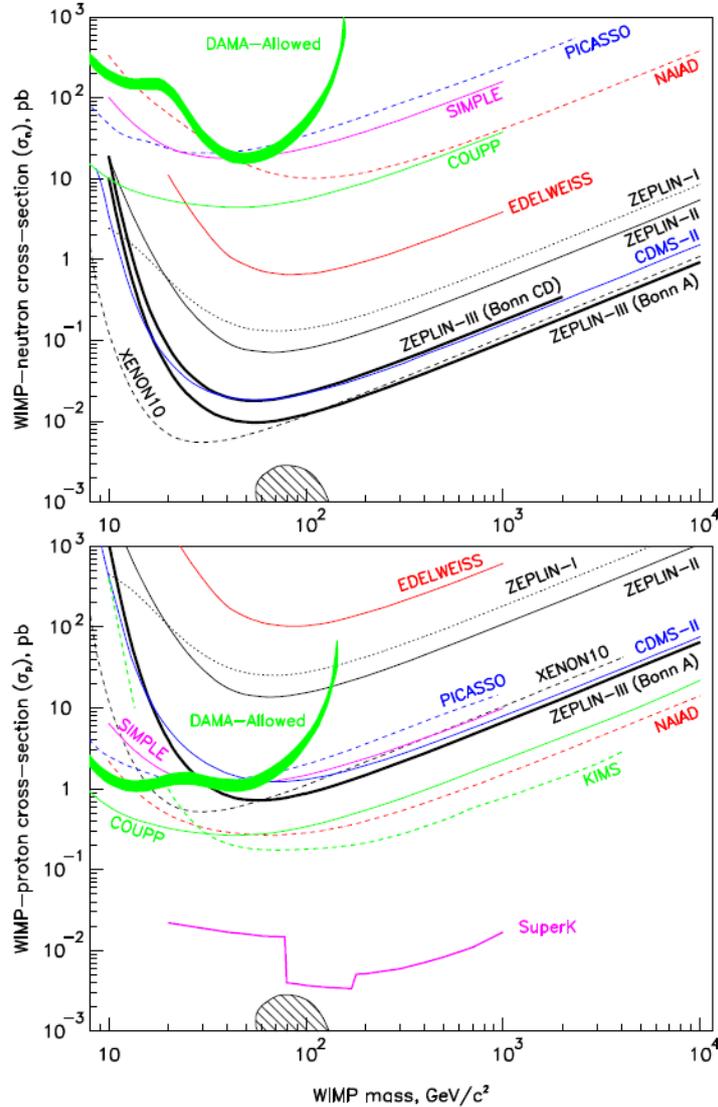
- quelques événements détectés, apparemment compatibles avec beaucoup de « buzz » du côté américain et une pincée de neutralino (CDMS²², et EDELWEISS beaucoup plus prudent)²³.
- Notons que dans tous les cas, chacun compte ses neutrons résiduels pour les comparer au taux relevé, et l'estimation correcte de ce taux sera probablement une des questions

²¹ C. E. Aalseth et al., "Results from a Search for Light-Mass Dark Matter with a P-type Point Contact Germanium Detector" (arXiv: 1002.4703v1)

²² Z. Ahmed et al., "Results from the Final Exposure of the CDMS II Experiment" (arXiv:0912.3592v1)

²³ Ces annonces font l'hypothèse que le fond sous jacent est connu : c'est à mon sens la principale difficulté et objection qu'on peut leur opposer, alors que ces mêmes expériences sont des expériences pionnières de ce même fond, où elles avancent en *terra incognita*

clefs des prochaines générations de détecteurs à la tonne... Nous espérons que des bolomètres à cible lithiée pourront participer à cette caractérisation.



Diagrammes d'exclusion –ou d'existence– Spin Dépendants des neutralinos en 2010.

Les sections efficaces SD de diffusion du neutralino sur les cibles à Spin des différentes expériences sont ramenées au nucléon non apparié dans l'hypothèse d'un couplage pur du neutralino au nucléon non apparié (**neutron** pour noyaux à N impair, **proton** pour noyaux à Z impair). Figure extraite de la référence ZEPLIN-III (arXiv : 0901.4348v1 du 27 janvier 2009). Les expériences COUPP et KIMS excluent l'interprétation du signal de DAMA comme provenant d'un neutralino à couplage Spin Dépendant.

Nature des cibles portant le spin et localisation :

- ✓ COUPP [$C^{19}F_3^{127}I$; chambre à bulle, FermiLab, (US)]
- ✓ SIMPLE [$C_2^{35}Cl_5$ & $C_2^{37}Cl_5$, détecteur en surchauffe, LSBB, (Fr)]
- ✓ PICASSO [$C_4^{19}F_{10}$, détecteur en surchauffe, SNO, (Ca)]
- ✓ NaIAD & DAMA [$^{23}Na^{127}I(TI)$, scintillateur, resp. Boulby (UK) et LNGS (It)]
- ✓ KIMS [$^{133}Cs^{127}I(TI)$, scintillateur, Yangyang Lab, (Corée du Sud)]
- ✓ EDELWEISS & CDMS [^{73}Ge , bolomètres, resp. LSM (Fr) et mine Soudan (US)]
- ✓ XENON10 & ZEPLIN [^{129}Xe & ^{131}Xe , gaz nobles liquéfiés, resp. LNGS (It) & Boulby (UK)]

- Pour ce qui concerne les bolomètres massifs scintillants, on notera avec intérêt que CRESST est actuellement l'expérience la plus contraignante pour des WIMPs ayant un état excité $\sim 100\text{keV}$ au dessus du fondamental, et interagissant de façon inélastique avec les cibles (catégorie de WIMPs ayant été proposés pour réconcilier le résultat positif de DAMA/LIBRA et ceux négatifs des autres expériences).

Les figures SI & SD des diagrammes d'exclusion rassemblées ici (multi-sites, mono-cible et multi-techniques) soulignent l'intérêt qu'il y aurait à disposer d'une unique technique mono-site et multi-cibles : les bolomètres massifs scintillants, qui sont le choix de CRESST, de ROSEBUD –sans prétendre conduire au Canfranc une expérience matière noire en vraie grandeur- et une des options retenues pour EURECA.

3. L'approche IAS de la détection directe

3.1. Outils

3.1.1. Un réfrigérateur à dilution petit mais transportable (Figure 1)

Notre équipe STAP (Spectrométrie Thermique pour l'Astrophysique et la Physique) dispose à l'IAS d'un équipement complet pour la mesure et la construction de détecteurs bolométriques. Le principal équipement est une canne à dilution 20mK (puissance de réfrigération $30\mu\text{W}$ à 100mK) conçue par Patrick Pari du CEA/SPEC, et commercialisée par la société TBT. Cette canne fonctionne sans pot 1K, remplacé par deux détentes Joule Thomson à des endroits appropriés du circuit du mélange. Avec un diamètre extérieur $\Phi=60\text{mm}$ elle permet d'intégrer et de tester 6 détecteurs –avec le câblage actuel– pour des masses de cible typiques comprises entre 50g et 200g (Figure 1). Elle peut être équipée d'écrans bas bruit en cuivre, plomb ou inox. Le fait qu'elle soit transportable dans un véhicule a conféré à ROSEBUD une très grande réactivité : dans le meilleur des cas, il ne s'est pas passé deux semaines entre une descente en froid des mêmes détecteurs à l'IAS et au Canfranc. L'installation de ROSEBUD au Canfranc duplique l'environnement nécessaire au fonctionnement de la canne et des détecteurs (banc de pompage, acquisition) : en phase de R&D, la canne retourne seule à l'IAS. Les cryostats extérieurs diffèrent cependant : nous disposons au Canfranc d'un cryostat inox à garde d'azote au Canfranc (type « Testard », modifié ; autonomie ~ 2 jours ; Figure 9) et à l'IAS d'un cryostat hélium de 35 litres malheureusement radioactif (la jupe en époxy du col est responsable de cette radioactivité) car il a une autonomie de 6 jours. Les bains cryogéniques (hélium et azote) sont pompés pendant les runs pour réduire la microphonie d'ébullition (azote) et descendre en froid (hélium). Une

conséquence très importante de la configuration adoptée –l'utilisation du même réfrigérateur pour les mesures en souterrain et les tests en surface– est que tous les détecteurs que nous avons dû construire sont **des détecteurs rapides**, avec des constantes de temps thermiques <20ms dans tous les cas, pour nous affranchir des perturbations des rayons cosmiques. Cette caractéristique unique de nos détecteurs complique la construction, car il faut s'assurer que la température s'homogénéise dans le détecteur avant de s'échapper : nous avons ainsi privilégié des senseurs Ge-NTD de grande surface, avec, par exemple, des cales de thermalisations incorporées dans le montage pour les refroidir sur plusieurs faces, ou des feuilles d'or entre la cible et le senseur assurant une fonction de shunt pour la thermalisation... Les contraintes thermiques étant plus importants en raison des surfaces de collage importantes, les senseurs sont également collés sur des pièces en Germanium pur, qui encaissent les dilatations différentielles, avec pour résultat des senseurs non contraints. On notera au passage que la rapidité des détecteurs n'est pas la situation idéale pour la résolution, lorsqu'il existe dans le détecteur des mécanismes de relâchement lent de l'énergie... La bande passante adoptée en phase de manip est typiquement 10Hz-300Hz (nos préamplificateurs « maison » ne passant pas le continu), avec une acquisition basée sur des cartes 1MHz, 12bit (modèles DAS50 & DAS58 de Metrabyte) fonctionnant dans un environnement MSDOS...

Il faut également citer comme autre équipement important des cages de Faraday à l'IAS et au Canfranc recouvertes de revêtement anéchoïque, et des bancs de plomb (épaisseur 20 cm ; h=120 cm, à l'IAS) et de polyéthylène (au Canfranc, blindage partiel) autour du réfrigérateur.

3.2. ROSEBUD-I (1999-2001) : sensible mais radioactive (Figure 2, Tableau 1)

Le réfrigérateur à dilution de l'IAS est installé dans le tunnel du Canfranc fin mars 1999. De nombreux tests de radioactivité ont été entrepris sur les matériaux les plus proches des détecteurs envisagés, ce qui a permis de définir assez précisément les contours de l'expérience^{[23],[24]} en 1998.

Le réfrigérateur pouvait à présent fonctionner sans problème pendant deux semaines à sa température de base (20mK), au lieu de quelques heures auparavant suite à la résolution de problèmes cryogéniques. Je me suis particulièrement occupé des interfaces de contrôle de tous les paramètres pertinents du système (enregistrement, contrôle à distance et alarmes via un téléphone portable), et de toute la partie acquisition.

1999 :

Nous avons effectué régulièrement des runs de 10-15 jours par mission, au moyen de trois bolomètres (Bol #200 : 25g saphir+2g 6LiF ; Bol #213 : 50g saphir & Bol #175 :25g

saphir). Le bolomètre mixte Bol#200 visait à démontrer la faisabilité d'une mesure du faible flux de neutrons attendu au Canfranc, via la réaction $6\text{Li}+n \rightarrow \alpha+3\text{H}$. En réalité nos efforts ont surtout porté sur les deux autres bolomètres qui ont montré tous les deux un seuil meilleur que 1.5keV suffisant pour la détection des Wimps.

Nous avons, par des améliorations progressives du blindage, réduit régulièrement le fond ambiant de radioactivité, qui est passé de 4000 U (1 U=1 coup/kev/kg/jour) en mars 1999 à 100 U en juin 1999 (mesures à 100 keV). Le fond résiduel était encore trop important de deux ordres de grandeur pour nous lancer dans des runs de longue durée, mais nous pensions avoir identifié la source de ce fond. Il s'agissait d'une source interne aux blindages d'après les différents tests conduits, attribuée à la superisolation du cryostat 4K. Ce cryostat a été ouvert, et ses différents composants (superisolation, charbon actif) mesurés, et remplacés par des équivalents non radioactifs.

En juillet, nous sommes retournés avec un cryostat 4K/77K « nettoyé » : le fond est descendu à 30U. Les résultats obtenus ont été présentés en août à LTD8 (8th meeting on Low Temperature Detectors) à Dalfsen (Pays-Bas)^[26] et en septembre à TAUP99 (Theoretical Aspects of Underground Physics) à Paris^[29].

En octobre, la structure du cryostat de garde 4K/77K a été modifiée pour la première fois, et le cryostat entièrement décapé. Du plomb romain (à contamination nulle en ^{210}Pb ; $t_{1/2}=22$ ans) a été rajouté entre les écrans 77K et 4K, et le fond inox avec sa soupape radioactive changé pour du cuivre de très haute pureté.

Les mesures en novembre 1999 ont révélé une amélioration du fond qui est tombé à 12-15 U.

En décembre, nouvelle série de mesures au Canfranc, avec le maximum de précautions possibles : plus de plomb pour écranter le meilleur bolomètre en saphir, mais pas d'amélioration observée du fond. Des mesures du Radon ambiant montrent que la ventilation du laboratoire souterrain est défailante. Nous démontrons la faisabilité d'un contrôle permanent de la réponse des détecteurs (et donc du seuil) au moyen de fibres optiques.

2000 :

Une bonne partie de l'année est consacrée à la R&D BOLERO et à l'achèvement d'un contrat CEA sur les bolomètres X. En novembre, nous partons au Canfranc avec un lot de 3 bolomètres prototypes nouveau [CaWO₄ (54g) ; bolomètre optique en Ge de 25mm de diamètre ; bolomètre de 67g en Ge] et un bolomètre saphir de 50g déjà mesuré, pour référence. Les dernières fuites vers l'air de l'installation cryogénique, sources éventuelles de contamination, ont été localisées et réduites, et le Radon est à présent sous contrôle. Le fond

ne bouge toujours pas, même s'il est un peu meilleur sur le bolomètre Ge de 67g (autour de 5U à 25-100 keV). Nous démontrons cependant les capacités exceptionnelles de détection du bolomètre Ge, qui présente un seuil de 420 eV (à l'époque sans équivalent dans le monde !).

2001 :

Mission de 15 jours au Canfranc en février. Problème électrique (fil coupé) sur le bolomètre Ge ce qui nous interdit de l'étudier plus avant ; le couple de bolomètre CaWO_4/Ge optique est par contre opérationnel : la statistique accumulée permet de révéler et d'identifier une contamination interne assez importante en ^{238}U et ses descendants (de l'ordre de 1Bq/kg), qui n'avait pas été vue sur les bancs de mesure gammas (diodes Ge) car il s'agit essentiellement de bêtas et d'alphas, contenus dans la cible. Cette contamination n'est, à notre niveau de bruit de fond, pas gênante pour les expériences de détection de la matière noire, car ce couple possède un excellent pouvoir de discrimination gammas/ noyaux de recul. Le fond du bolomètre saphir ne bouge toujours pas (autour de 12-15 U).

Nous découvrons par hasard une nouvelle source possible de contamination : il s'agit d'une tresse de cuivre soudée Sn/Pb dans le bain N_2 , servant de shunt thermique entre le col et le fond du cryostat 77K (à 5cm des bolomètres !). Cette pièce ne figurait sur aucun plan, et n'était pas visible. Le cryostat est ouvert, la tresse et sa soudure envoyées pour mesures: il y avait effectivement une contamination importante en ^{210}Pb et ^{210}Bi . Cette dernière contamination devait induire par bremsstrahlung un continuum dans les spectres que nous avons relevés. L'analyse quantitative de cette contribution resterait encore à faire, mais nous avons bon espoir d'avoir identifié là la source principale du fond résiduel de 2001. La partie basse du cryostat 77K, où venait se loger cette tresse, est à présent coupée (Figure 9).

2001–2006 :

Il s'est ensuivi une période longue de R&D (5 ans !) avant de retourner au Canfranc pendant laquelle, conscient des limitations apportées par le niveau de bruit de fond relevé en 2001 en 2006, nous nous sommes consacrés à améliorer la technique des bolomètres doubles scintillants que nous avons proposée en 1995, pour la thèse de Christophe Bobin, sur le réfrigérateur Oxford Instrument de l'IPN de Lyon^[21]. Cette période correspond également à une période de vaches noires et maigres, en raison d'un défaut de financement de ROSEBUD par l'INSU : les cosmologistes qui font à présent leurs délices du (bruit de) fond micro-onde découvert par Penzias et Wilson en 1964 nous faisaient payer bien cher « notre » bruit de fond « matière noire » de 1999 !

Les résultats de ROSEBUD-I ont tous été publiés entre-temps, grâce en particulier aux efforts de nos partenaires espagnols de Saragosse^{[23], [24], [26], [29-31], [33], [34], [37], [39], [40]} ! La publication Pub#3^[40], annexée à ce manuscrit, résume les résultats de ROSEBUD-I.

3.3.R&D Bolomètres scintillants : invention d'une technique double bolométrique

3.3.1. Principes (Figure 3)

La première proposition d'une mesure simultanée de la lumière et de la chaleur pour s'affranchir des bruits de fond radioactifs dans des cibles scintillantes a été faite par Luis Gonzales-Mestres et Denis Perret-Gallix, du LAPP en 1988²⁴. La première réalisation bolométrique est l'oeuvre de l'équipe de Milan dirigée par Ettore Fiorini en 1992, avec une photodiode en silicium refroidie comme détecteur optique²⁵. Mais c'est en 1994 que notre équipe IAS réalisait avec le concours de l'IPNL (thèse de Christophe Bobin) la première mesure simultanée au moyen d'un jeu de deux bolomètres, le bolomètre scintillant et son bolomètre optique associé, qui le regarde dans une cavité réfléchissante^[21]. C'est sans aucun doute la très grande familiarité de Noël Coron avec les bolomètres sub-mm qui l'a conduit à imaginer ce montage, qui est à présent le schéma retenu par toutes les équipes qui travaillent avec des bolomètres scintillants (ROSEBUD, CRESST, CUORICINO).

Dans le montage IAS standard (Figure 3) deux détecteurs bolométriques à lecture GeNTD –le bolomètre scintillant proprement dit et le bolomètre optique, dont la cible est constituée par un disque de Germanium– se regardent face à face dans une cavité réfléchissante cylindrique. Un film mince réfléchissant en Argent a été déposé au préalable à l'IAS par électrolyse au tampon sur la monture en cuivre (Cu/Ag). La thermométrie étant identique, les circuits de lecture sont les mêmes pour les deux voies, ce qui facilite grandement l'intégration dans le cryostat ; les constantes de temps des signaux étant en outre « assez » comparables (quelques ms), toutes les voies sont interchangeables. Le montage n'est pas étanche et les deux détecteurs partagent le même vide (IVC) que le réfrigérateur à dilution.

Une fibre optique de 250µm en polymère pmma (polyméthacrylate de méthyl) débouche dans la cavité, ce qui permet d'injecter un signal reproductible avec un fort niveau de signal à bruit en toutes circonstances, et sans aucune perturbation sur les voies de lecture électriques. La fibre remonte de 20mK jusqu'à l'extérieur par un connecteur étanche à embout

²⁴ L. Gonzalez-Mestres et D. Perret-Gallix (août 1988), *Detection of low-energy solar neutrinos and galactic dark matter with crystal scintillators*, Nucl. Instrum. Meth. A279, 382-387, 1989

²⁵ A. Alessandrello et al., *Development of a thermal scintillating detector for double beta decay of 48Ca*, Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, Volume 28, Issue 1, July 1992, Pages 233-235

« SMA », jusqu'à une LED commerciale de communication (type HFBR de Agilent, avec une photo diode en AlAsGa émettant dans le proche IR à $\lambda \sim 820$ nm) qui peut être placée à plusieurs dizaines de mètres en dehors de la cage de Faraday ; la LED est excitée par un générateur d'impulsions de précision (Agilent, 33210A 10MHz). Le signal délivré via cette fibre optique est absorbé à près de 100% par le bolomètre optique et remplit plusieurs fonctions essentielles envers ce détecteur :

- correction des dérives de température
- détermination de la fonction de réponse du détecteur –le créneau d'attaque optique, qui peut faire moins de 1 μ s de large, est vu comme une impulsion de Dirac.
- détermination de la linéarité (la LED est excitée à tension constante par des créneaux de largeur variable Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$... << temps de montée du détecteur optique)
- estimation du temps mort des expériences : on compte le nombre de signaux « LEDs » ayant passé le module OR des triggers par rapport au nombre d'impulsions délivrées par le générateur pendant la durée de la mesure.

Les fibres extérieures, sensibles au froid, sont démontées à chaque transfert de ^4He et l'ensemble de la chaîne optique est différent d'une intégration à l'autre : il n'est pour l'instant pas possible d'utiliser ces signaux pour une calibration absolue (on pourrait envisager de le faire indirectement par une mesure du bruit de photons associé au signal de la LED...).

Des sources radioactives internes de calibration complètent ce dispositif :

- une source X de ^{55}Fe de faible activité (quelques Bq) éclaire le détecteur optique par derrière : elle permet d'estimer le rendement de collecte optique par comparaison avec la réponse du détecteur sur les raies K_α et K_β de la source ($E \sim 6\text{keV}$)²⁶.
- un trou latéral dans la cavité permet de placer des sources alphas –lesquelles sont également des sources d'ions lourds de recul, des sources gammas,...– en regard du bolomètre scintillant pour le calibrer (^{241}Am le plus souvent, mais aussi ^{210}Po , ...). Des sources bêtas ont été également utilisées comme ^{109}Cd (pour les raies des électrons de conversion)

²⁶ A noter qu'une conversion thermique à 100% des Xs de ^{55}Fe dans le disque optique en Germanium est supposée implicitement dans les rendements lumineux de collecte publiés, ce qui ne reflète probablement pas la réalité (les paires électron-trous créées se recombinent elles ?)...mais ce problème de conversion affecte sans doute également de la même façon les photons collectés, qu'ils proviennent de la scintillation (UV, visible...) ou du signal de la LED ($h\nu \sim 1.51\text{eV}$ pour des photons de $\lambda = 820$ nm tandis que $E_{\text{gap}}(\text{Ge}) \sim 0.73$ eV à 20 mK).

3.3.2. Montages (Figures 4 & 5)

Trois montages différents ont été utilisés pour étudier les propriétés de scintillation d'une nouvelle cible à très basse température (Figure 4).

Le **montage standard** qui vient d'être décrit est coûteux : il nécessite de construire un bolomètre à partir de chaque cible, ce qui pouvait prendre plusieurs mois en l'état actuel des forces de l'équipe STAP.

Par conséquent, des solutions plus simples et plus rapides ont été recherchées : dans un premier temps nous avons envisagé un **montage en « pré-bolomètre »** (partie optionnelle de la Figure 3 et photos de la Figure 5) la cible est seulement thermalisée dans la cavité et on n'enregistre que le signal optique. Les différents rendements lumineux sous irradiation et les rapports d'extinction (« quenchings ») sont alors estimés à partir de la distribution du temps de montée –toujours la plus discriminante, cf. les Figures 11 et 20– et de mesures avec et sans source. On ne sait cependant rien dans ce montage du comportement bolométrique de la cible (chaleur spécifique, conduction thermique,...).

Nous avons donc imaginé plus récemment un troisième **montage, « à cible démontable »**, qui permet d'analyser simultanément les deux voies « chaleur » et « lumière », sur un petit échantillon de cible à 20 mK : la cible est reportée via une interface mécanique démontable (un film de cire à basse température de fusion) sur un bolomètre déjà constitué, à structure particulièrement rigide pour pouvoir permettre la manipulation : le tout est inclus dans un montage optique, comme précédemment, avec un bolomètre optique en regard. Une collerette réfléchissante montée autour de l'échantillon renvoie la lumière vers le détecteur optique. Voir l'étude de la scintillation à 20mK du quartz (SiO_2) que nous avons réalisée ainsi (Figures 38 & 39), ou celle du $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$ (Figure 51). Un intérêt de ce montage modulaire est également de permettre de pratiquer une calorimétrie différentielle (ou comparative, au choix) : les VIs du détecteurs ne changent pas car le senseur Ge-NTD, la conductance thermique G sont identiques. Le bolomètre retrouve facilement un point de polarisation précédent (I-V-T) : une mesure de la constante de temps donne un accès direct à la chaleur spécifique de la cible, qui peut aussi être comparée à une cible de référence (une pastille de Cu par exemple).

3.3.3. Bolomètres optiques (Figures 6 & 7 ; Tableau 2)

Les premiers exemplaires de bolomètres optiques construits par notre équipe (en Si, puis en Ge) étaient très mauvais au début : mal calculés, ils représentaient beaucoup trop de chaleur spécifique, et la scintillation issue du CaWO_4 et du BGO nous a échappé dans un premier temps! L'équipe allemande de CRESST ayant produit des premiers résultats avec ces

mêmes cibles, nous avons persévéré pour réussir finalement à voir la lumière issue du CaWO_4 en novembre 2000²⁷. La cible des bolomètres optiques que nous construisons ($\Phi=25\text{mm}$ ou $\Phi=40\text{mm}$) est constituée d'un disque mince en Germanium, obtenu par abrasion d'un wafer commercial, pour des épaisseurs finales variant entre $20\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$ (Tableau 2). Un poli chimique est pratiqué en fin, sans aucune « texturisation » de la surface (la réflectivité de surface n'est probablement pas optimale). La suspension, complexe, est réalisée au moyen de fils de NbTi collés et tendus de part et d'autre du disque, ou plus récemment par des coins en polypropylène. Ces détecteurs sont extrêmement sensibles, aux photons, par construction, avec des seuils de détection à 5σ de la ligne de base compris entre 60 eV et 100 eV, mais aussi aux vibrations, aux fluctuations de vide.... La cible du bolomètre optique B309 par exemple ne pèse que 50mg, pour une surface de 5cm^2 :c'est un vrai microphone qui ne demanderait qu'à vibrer, s'il n'était pas correctement suspendu. Avec un gap $\sim 0.73\text{eV}$, ces détecteurs absorbent tout rayonnement de l'UV à l'Infrarouge proche ($\lambda < 1.7\mu\text{m}$, contre $\lambda < 1.1\mu\text{m}$ pour un détecteur en Silicium), avec une réponse spectrale plate, et un signal directement proportionnel à l'énergie contenue dans le signal de scintillation. Ces deux dernières caractéristiques distinguent les bolomètres de tous les autres détecteurs optiques. On peut espérer un gain important en sensibilité en faisant travailler des détecteurs optiques optimisés à 10 mK plutôt qu'à 20 mK (Figure 7)^[42].

3.3.4. Avantages et inconvénients...(Figure 8 ; Tableaux 3 & 4)

Les bolomètres massifs scintillants présentent comme toute technique des points forts qui motiveront les uns et des points faibles qui feront reculer les autres...

– Avantages :

○ une très large palette de cibles potentielles

On trouvera dans le Tableau 3 les éléments entrant dans la composition de scintillateurs solides avérés sous la forme de poudres ou de cristaux massifs –commercialisés ou non– d'après des tests effectués au Lawrence Berkeley Laboratory sous irradiation X par l'équipe de Stephen Derenzo, très active dans la recherche de nouveaux scintillateurs inorganiques. C'est une liste bien sûre non exhaustive –on peut imaginer que cette liste s'étende à terme à tous les éléments sauf les gaz rares–, mais on est frappé par le pavage déjà

²⁷ Un couple de bolomètres 54g CaWO_4/Ge optique ayant de bonnes performances de seuil (respectivement 40 keV et 120 keV sur les voies chaleur et optique) et de discrimination a été testé directement au Canfranc en novembre 2000 et février 2001 (voir § ROSEBUD-I & Pub#3)^[40]. En dépit d'une contamination importante relevée du CaWO_4 , nous avons pu isoler seulement 4 événements dans la zone des reculs au terme de 24.2h de mesure effective. Ces événements étaient bien détachés d'une zone bêta/gamma fortement peuplée par les désintégrations de ^{210}Pb internes au cristal, nous encourageant ainsi à poursuivre la R&D bolomètres scintillants...

réalisé de la table de Mendeleïev, lorsqu'on le compare à celui des cristaux massifs semi-conducteurs disponibles commercialement, qui se limitent au Germanium et au Silicium. C'est l'argument décisif en faveur du développement de bolomètres massifs scintillants pour la recherche d'événements rares : pour ce qui concerne les expériences de détection directe de la matière noire, les incertitudes dans la description du neutralino χ sont telles qu'il faudra, une fois détecté, décliner le plus grand nombre de cibles possible (selon A ou le spin nucléaire, qu'il soit porté par un neutron ou un proton,...) pour en cerner les propriétés d'interaction, et vérifier que le signal est bien modulé par ces différents paramètres conformément à la théorie. Pour les expériences de recherche de la double désintégration bêta sans neutrino, c'est également une porte ouverte vers des détecteurs incorporant l'isotope à étudier, avec une garantie de rejection du bruit de fond alpha, tout en bénéficiant de l'excellente résolution en énergie permise par la technique bolométrique sur la voie chaleur. Encore fallait-il vérifier que tous ces cristaux, testés à 300K, scintillent à froid !

C'est sans doute l'enseignement principal de la R&D que nous avons menée en 2001-2002 à l'IAS : tous les cristaux transparents scintillent à froid, « plus ou moins »^[36], et la tendance générale est une augmentation de la scintillation à froid par rapport à la température ambiante. On peut comprendre cette tendance en considérant que les voies de désexcitation non radiatives—qui empruntent des phonons—sont inhibées à base température —précisément en raison du manque de phonons—au profit des voies radiatives, pour les états excités auxquels accèdent les atomes des cristaux sous irradiation.

Le **Tableau 4** résume les différentes mesures effectuées à l'IAS et présentées à LTD10 en 2003 : un signal de scintillation a été détecté à froid sur toutes les cibles testées $\text{CaF}_2(\text{Eu})$, YAP (YAlO_3), GSO (Gd_2SiO_3), saphir (Al_2O_3), CaWO_4 , BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), LiF, TeO_2 montées soit en pré-bolomètre, soit en bolomètre. Il conviendrait de rajouter à cette liste les cristaux testés à l'IAS depuis : SrF_2 , le quartz SiO_2 , les borates $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$ & $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$, CaF_2 pur...plus les cristaux testés au LNGS par Stefano Pirro et al. (voir le § « chemin de traverse » sur la double désintégration bêta), ou ceux testés par la collaboration CRESST²⁸

Une discrimination alphas/gammas/reculs est mise en évidence dans tous les cas, lorsque la mesure a pu être effectuée : c'est l'autre enseignement principal de ces mesures. Les particules sont discriminées par leur pouvoir ionisant dans la matrice cristalline, et, sans

²⁸ P. Meunier et al., *Discrimination between nuclear recoils and electron recoils by simultaneous detection of phonons and scintillation light*, Appl. Phys. Lett. 75, 1335-1338 (1999)

préjuger du mécanisme provoquant la scintillation, il est possible de faire une description « semi-empirique » reliant le signal de scintillation attendu au pouvoir d'arrêt²⁹.

- **Une réduction des effets systématiques...**

...des expériences à taux de comptage évanouissant. Les limites actuelles dans les diagrammes section efficace/ $M\chi$ comparent des expériences différentes, réalisées dans des sites souterrains distants, empruntant des technologies différentes, menées par des équipes différentes... Si une telle diversité est souhaitable afin de vérifier la redondance d'un signal positif détecté, on peut aussi noter qu'une « tension » de plus en plus vive se manifeste entre elles à mesure que les bruits de fond diminuent. Le recours aux simulations se généralise pour quantifier les différentes contributions au fond mesuré (neutrons, ...) et il faut croire sur parole les différents auteurs lorsqu'ils annoncent maîtriser complètement les effets systématiques de leur expérience... Une expérience à base de bolomètres massifs scintillants –à tout hasard EURECA, si ce projet voit le jour– permettrait d'aborder le problème des effets systématiques aux faibles taux de comptage avec beaucoup plus de sérénité. On remplace une configuration mono-cible multi-sites par une configuration multi-cible mono-site. Dans cette dernière configuration, une approche différentielle des fonds mesurés peut-être exploitée : tous les détecteurs voient les mêmes fonds externes (neutrons, gammas, ...), les mêmes vibrations, les mêmes bruits, et éventuellement le même signal modulé par la composition élémentaire de la cible, les différents oxydes devraient voir le même signal de recul sur les noyaux d'oxygène, etc... Une plateforme commune et une approche modulaire sont une garantie précieuse de pouvoir réduire et comprendre les effets systématiques (cette approche est aussi celle de l'expérience NEMO 3 au LSM).

Au vu de ces avantages indéniables, la poursuite des efforts tendant à la détection directe par bolomètres massifs scintillants a été recommandée en 2007 par l'ApPEC (Astroparticle Physics European Coordination), qui conseille les différentes agences nationales européennes chargées de la recherche sur les astroparticules³⁰.

- **Inconvénients :**

- **Un signal faible à la limite du bruit**

Les rendements lumineux de collecte sont de l'ordre de 1% pour les gammas, mais de quelques millièmes pour les reculs : pour des signaux de 10keV, on attend donc un signal de scintillation sous recul de quelques 10 eV (soit une poignée de photons). C'est à la limite du

²⁹ V.I. Tretyak, *Semi-empirical calculation of quenching factors for ions in scintillators*, Astroparticle Physics 33, Issue 1, February 2010, Pages 40-53

³⁰ ApPEC Roadmap 2007 (*Status and Perspectives of Astroparticle Physics in Europe*) page 37. On peut télécharger ce document ici: <http://www.aspera-eu.org/images/stories/files/Roadmap.pdf>

bruit des meilleurs de nos détecteurs optiques actuels (**Tableau 2**) ! La plupart du temps, il faut s'attendre à basse énergie –là où le signal est le plus intéressant– à un signal de recul détecté sur la voie chaleur mais masqué dans le bruit sur la voie lumière. C'est une situation très inconfortable car l'expérience devient alors vulnérable aux événements parasites thermiques ne produisant pas de lumière, comme la relaxation d'une contrainte dans la cible scintillante ou un événement Ge-NTD trop faible en énergie pour pouvoir être rejeté par sa constante de temps,...

Une solution pour sortir du bruit consisterait bien à descendre plus bas en température pour gagner en sensibilité (Figure 7), ou à chercher des solutions amplificatrices comme CRESST, via l'effet Luke-Neganov³¹.

- **Une multiplicité des reculs (dégénérescence du spectre à basse énergie)**

Les cibles scintillantes sont poly-atomiques, avec deux atomes au minimum (oxydes, fluorures,...), à la différence des bolomètres en Germanium ou en Silicium mesurant « charge et chaleur » : en raison de la faiblesse du signal lumineux, la branche des reculs des différents atomes constitutifs de la maille cristalline est facilement dégénérée, et l'identification de l'atome ayant reculé dans le cas d'une détection d'événement dans la zone des reculs est quasiment impossible à basse énergie (typiquement quelques 100keV)–sauf statistiquement– surtout si l'on dispose de bolomètres optiques de sensibilité moyenne. Les contraintes expérimentales sont alors malheureusement à rechercher à haute énergie, où l'on attend le moins de signal « matière noire ». Des calibrations dédiées–à chaque élément de la maille cristalline– doivent également être réalisées suivant un protocole expérimental qui se voudrait complet, sur source d'ions, source de neutrons, faisceau de neutrons pulsé couplé à un mur d'hodoscoptes et à une mesure de temps de vol, reculs de source alpha... comme CRESST a su remarquablement s'en donner les moyens pour qualifier les reculs de W, Ca et O dans CaWO_4 ³².

- **une radioactivité non contrôlée**

Les cristaux massifs scintillants ne bénéficient pas des années de développement industriel qui ont accompagné les semiconducteurs vers les résistivités élevées rendues nécessaires par la miniaturisation des composants électroniques : les matériaux résultants, de très haute pureté (HPGe,...), sont également intrinsèquement « radiopurs »... Rien de tout cela

³¹ C. Isail et al., *Scintillation light detectors with Neganov-Luke amplification*, NIMA, 2006, vol. 559, no2, pp. 399-401

³² W. Westphal et al., *Detector calibration measurements in CRESST*, NIMA 559, Issue 2, 15 April 2006, Pages 372-374, Proceedings of the 11th International Workshop on Low Temperature Detectors - LTD-11

n'existe pour les bolomètres scintillants, pour lesquels il n'existe pas de marché en dehors d'applications en physique fondamentale, et c'est un frein majeur à leur développement par de petites équipes. Par exemple, nous avons relevé une radioactivité élevée en ^{207}Bi de l'ordre de 3Bq/Kg dans une qualité de BGO vendu par la Sté Crismatec (Saint-Gobain) : nous avons en vain essayé de les convaincre de s'engager dans une thèse BDI cofinancée CNRS/Saint-Gobain, pour résoudre cette difficulté...³³. Cependant, certains cristaux scintillants pourraient présenter naturellement une immunité aux radioéléments : nos saphirs ne montrent pas de contamination en U ou Th, ce qui est probablement la conséquence d'une ségrégation forte des impuretés durant la cristallisation, induite par la température de fusion très élevée du saphir, 2030°C .

o **une technologie fragile...**

Les bolomètres optiques extrêmement sensibles sont aussi extrêmement fragiles (comme peut l'être un disque monocristallin de plusieurs centimètres de diamètre (Φ) quelque dizaines de microns d'épaisseur (e), avec des finesses géométriques Φ/e pouvant atteindre 1000 pour les détecteurs construits à l'IAS (Tableau 2).

Par ailleurs le bolomètre scintillant lui-même, à lecture Ge-NTD pour les détecteurs IAS, incorpore nécessairement différents matériaux dans sa construction (à la différence d'un bolomètre Ge à lecture Ge-NTD). Il faut donc prévoir par construction des pièces intermédiaires, de section réduite, capables d'encaisser les contraintes de dilation très importantes qu'il y aurait par exemple entre le germanium d'un thermomètre Ge-NTD et une cible en fluorure de lithium –un très mauvais conducteur thermique !– s'ils étaient collés directement. On réalise ainsi, pour éviter la casse, une chaîne de matériaux assez semblable dans son principe aux chaînes de verres réalisées lorsqu'on veut assembler un tube de quartz à un embout inox. On retrouve ainsi dans nos constructions IAS pas mal de collages, avec un chemin assez complexe pour évacuer la chaleur entre cible et réfrigérateur. Les phases de refroidissements ou de réchauffage sont des phases critiques, avec des effets d'« entonnoirs thermiques » conduisant à des contraintes menant à la rupture si la pente de refroidissement / ou de réchauffement est très supérieure à quelques $^\circ\text{K/mn}$ (estimation de Noël Coron). Les bolomètres scintillants sont donc particulièrement sensibles aux chocs thermiques.

³³ Le bismuth commercial est généralement un sous produit de la raffinerie du plomb : le bismuth-207 ($T_{1/2}\sim 33$ ans) trouvé en abondance dans le germanate de bismuth est très certainement issu de la cosmogenèse sur les isotopes stables du plomb. Il « suffirait » peut-être d'extraire le bismuth à l'état natif de mines de bismuth pour réaliser du BGO radiopur...

3.4. ROSEBUD-II (2006-2007): un fond irréductible, non radioactif

3.4.1. Configuration type, ou l'apport d'une expérience à cibles multiples complémentaires (Figures 9 & 10)

Les précédents détecteurs de ROSEBUD-I au Canfranc en saphir, Germanium, CaWO_4 avaient relevé de 1999 à 2001 des fonds importants à basse énergie (radioactivité, contamination interne,...). La phase intense de R&D qui suivit de 2002 à 2006 a permis de mettre au point les premiers bolomètres massifs scintillants à fort pouvoir de discrimination de l'équipe et les premiers bolomètres optiques performants : plutôt que de détailler cette phase, avec ses nombreux essais et erreurs, j'ai pensé qu'il serait plus judicieux d'aborder cette technique dans le cadre des mesures souterraines qui ont suivi, lors de la phase ROSEBUD-II.

Après la R&D encourageante de 2006, il restait encore à vérifier l'absence d'événements «constructeur» dans la zone non ionisante des reculs... Dans un laboratoire de surface comme l'IAS, et en l'absence de dispositifs spécifiques (vétos muons, blindages hydrogénés), ces événements sont noyés dans le fond des reculs nucléaires induit par les neutrons rapides ambiants (cf. Figure 12). Plutôt que d'investir dans un équipement lourd faisant appel à des techniques que nous ne maîtrisons pas pour réduire tant bien que mal ce fond à l'IAS, l'installation ROSEBUD, protégée par la roche, s'est révélée la solution la plus économique permettant de qualifier –ou d'invalider- la technologie IAS pour la détection de la matière noire.

Le cryostat inox ^4He à garde d'azote utilisé en 2001³⁴ a été ouvert pour agrandir le volume d'hélium liquide, au détriment de celui de la garde d'azote, portant l'autonomie entre transferts à près de 48h : nettoyé et débarrassé d'une source potentielle de radioactivité (une tresse de thermalisation en cuivre avec ses soudures), il a été muni d'écrans bas bruit de fond en cuivre et en plomb archéologique (Figure 9).

Un jeu de trois bolomètres massifs scintillants avec respectivement de bas en haut saphir (50g ; B274), LiF (33g ; B303) et BGO (46g ; B225) muni chacun de son détecteur optique –soit six détecteurs, qui se partageront à tour de rôle les 4 voies de mesure équipées au Canfranc– a été intégré sur la canne 20mK (Figure 10). Avec l'ordre choisi, le BGO –en position haute–est censé écranter le saphir–en position basse– d'une partie de la radioactivité résiduelle de la canne 20 mK, commerciale.

³⁴ commercialisé par la Sté CTL, et conçu par Olivier Testard du CEA

Le montage final a été testé fin décembre 2006 à l'IAS pour des premières mesures en janvier 2007 au Canfranc, après avoir transporté le réfrigérateur dans le véhicule de service de l'IAS : nous faisons ainsi la démonstration qu'il était possible de réactiver complètement ROSEBUD en un mois, après 6 ans d'absence...

3.4.2. Fond basse énergie : Saphir

3.4.2.1. Le signal de scintillation (Figure 11)

Nous avons reporté en 2002^[36] un fort signal de luminescence à 20mK, totalement inédit, sur un détecteur en saphir de 50g d'origine Russe, tiré selon la méthode Kyropoulos : dans cette technique de croissance cristalline, le cristal repose sur le bain fondu dans un creuset et croît par réduction de la puissance appliquée. C'est donc une technique « à creuset », contrairement à la technique traditionnelle de croissance selon le procédé à la flamme Verneuil : ce procédé, « sans creuset », est plus économique, mais produit des cristaux de moins bonne qualité structurale.

La source du signal de scintillation observée à froid a été en partie élucidée : dans un premier temps j'avais naïvement attribué cette scintillation à Cr^{3+} sous forme de trace, après avoir trouvé une référence traitant de l'observation de la ionoluminescence du saphir sous irradiation de protons, où elle était attribuée au doublet du rubis R1 (694.3 nm) and R2 (692.9 nm)³⁵. Le fait que ces deux transitions sont des raies *zérophonon* (i.e. non assistées par des phonons) indiquait qu'elles ne devaient pas être affectées par les très basses températures... L'étude de cette émission forte du saphir jusqu'à 30K a fait l'objet d'une thèse à l'IPNL : Melisa Luca a pu montrer en 2007³⁶ que la majeure partie de l'émission des cristaux IAS était probablement associée à la présence de traces de Ti^{3+} dans le cristal, dont la bande d'émission large dans le rouge (600nm–900nm) domine largement la transition fine de Cr^{3+} . Une concentration en Titane sous forme de traces de quelques dizaines de ppm suffit : il est probable que cette impureté diffuse du creuset vers le cristal lors du tirage Kyropoulos, dès lors que le creuset aura été utilisé pour tirer des cristaux de saphir-titane ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$) qui est un matériau laser très demandé. *A contrario*, les saphirs fabriqués selon le procédé Verneuil, sans creuset doivent être plus purs : c'est probablement la raison pour laquelle leur émission est moins prononcée (cf. Figure 17). Des cristaux de saphir intentionnellement dopés en Titane sont donc une alternative de choix pour les expériences de détection de la matière noire, tant

³⁵ IL investigations of sapphire (Al_2O_3):

[http://www.uni-](http://www.uni-leipzig.de/~nfp/Research/Methods/Ion_Beam_Analysis/IL/IL_investigation_of_sapphire/body_il_investigation_of_sapphire.html)

[leipzig.de/~nfp/Research/Methods/Ion_Beam_Analysis/IL/IL_investigation_of_sapphire/body_il_investigation_of_sapphire.html](http://www.uni-leipzig.de/~nfp/Research/Methods/Ion_Beam_Analysis/IL/IL_investigation_of_sapphire/body_il_investigation_of_sapphire.html)

et thèse de Daniel Spemann (1998) :

http://www.uni-leipzig.de/~nfp/Publications/1998/Diplomarbeit_Daniel_Spemann/body_diplomarbeit_daniel_spemann.html

³⁶ *Sapphire Scintillation Tests for Cryogenic Detectors in the Edelweiss Dark Matter Search*; thèse de Melisa Luca, soutenue le 20 juillet 2007, Université Claude Bernard-Lyon 1.

en raison de leurs excellentes propriétés thermiques (induisant des seuils bas de détection et donc l'accès à des WIMPs de faible masse) que de leur capacité de discrimination, et je dois dire que je ne comprends pas toujours pas pourquoi CRESST, qui a su construire des détecteurs en saphir performants, n'a pas saisi cette opportunité.

Le signal de scintillation du saphir à 20mK est un signal « prompt », avec une durée de vie de la scintillation inférieure à 20 μ s (**Figure 11**).

3.4.2.2. Un matériau discriminant aux signaux anti-corrélés :

3.4.2.2.1. Gammas/reculs et anti-corrélation (**Figure 12 & 13, Tableau 5**)

La discrimination reculs/gammas du saphir est excellente. Les deux populations sont bien mieux séparées que dans un détecteur en Germanium, avec un facteur d'extinction reculs/gammas $Q_{\gamma/\text{reculs}} \sim 17.5 \pm 0.5$ à 122 keV dans le saphir d'origine russe. On distingue ainsi nettement les reculs induits par les neutrons rapides ambiants, des gammas d'une source de ^{57}Co (**Figure 12**, pour une nuit de mesure à l'IAS). La contrepartie évidente de ce haut pouvoir de discrimination est qu'il faut maîtriser toutes les sources d'événements non lumineux, car à basse énergie, le signal à rechercher sera vite noyé dans le bruit du détecteur optique... Des calibrations dédiées à l'IAS sous irradiation ^{57}Co et ^{252}Cf ont permis d'estimer les domaines d'appartenance reculs/gammas dans nos détecteurs de 50g en saphir d'origine russe (**Figure 13**), et de quantifier les seuils de rejection : des seuils de réjection inférieurs à 10 keV sont possibles dans ces détecteurs avec un niveau de confiance meilleur que 95% (**Tableau 5**). Les seuils de détection à 5σ des voies chaleurs et lumière étant respectivement de 910 eV et 7.3 keV_{équivalent électron} sur notre meilleur détecteur (B213).

La caractéristique la plus remarquable des figures de discrimination gammas est sans doute l'anti-corrélation prononcée relevée entre les voies chaleur et lumière, observée dans tous nos détecteurs en saphir sur les raies gammas (**Figure 12 & Figure 14, haut**). Cette observation m'a permis, dix ans plus tard, de résoudre une énigme soulevée dans ma thèse : pour quelle raison nos détecteurs saphir butaient sur une résolution plancher de $\Delta E_{\text{FWHM}} \approx 3.6$ keV à 60 keV, bien supérieure à la contribution ligne de base (< 1 keV) ? Une telle résolution impliquait un nombre de Fano F bien trop élevé pour le saphir ($F \sim 10.8$, alors qu'on attend $F < 1$)³⁷. Pour mémoire, le nombre de Fano, empirique, intervient comme terme

³⁷ Cf. le Tableau 3.4 de la référence [9] (ma thèse) et la discussion qui suivait : à la même époque, on pouvait inférer un facteur de Fano ≤ 0.17 pour le saphir à partir de mesures présentées par le groupe de Munich, qui reportait $\Delta E_{\text{FWHM}} \approx 220$ eV à 5.9 keV dans 31g de saphir à 45mK (M. Frank et al. ; *Physics and performance of calorimetric particle detectors with dielectric absorbers and superconducting phase transition thermometers*, Journal of Low Temperature Physics 93, Nos. 3/4 (1993) 213-218)

correctif dans la résolution limite des semi-conducteurs, que l'on trouve meilleure que celle déduite des pures fluctuations statistiques: si nous observions une résolution aussi « mauvaise », c'est sans doute parce que des photons s'échappaient de nos détecteurs !

En projetant la figure parallèlement à la direction de l'anti-corrélation, on améliore sensiblement la résolution sur les raies. L'angle de l'anti-corrélation tourne cependant légèrement avec l'énergie—il se redresse à basse énergie—et une telle opération de projection n'est pas légitime sur tout le spectre : elle conduirait à une dégénérescence des relations amplitudes-énergies pour les événements relevés.

Nous avons pu tirer de l'observation de cette anti-corrélation une mesure inédite du fractionnement de l'énergie dans le saphir (Pub#4 ^[44], et thèse de Lidia Torres Ferrández ³⁸) : dans l'hypothèse où l'énergie n'est fractionnée qu'en lumière et chaleur un rendement exceptionnel de 12.7% sur gamma de 122 keV peut être déduit, associé à une efficacité de collection de ~10% seulement des photons, car le rendement de collecte est de 1.4% sur les gammas, d'après la calibration ⁵⁵Fe. Cette valeur élevée est plus vraisemblablement la manifestation qu'une troisième voie est associée à la partition de l'énergie, sous formes de pièges : cette fraction, non restituée en chaleur, est alors incluse dans les 12.7%. Cette interprétation est renforcée par l'observation d'une série de pics de thermoluminescence entre 50K et 250K, reporté dans le saphir dopé titane ([Ti]=50ppm) après irradiation sous X à 30 K ³⁹.

3.4.2.2.2. Gammas/alphas : Extinction lumineuse et thermique (Figures 14 & 15)

La discrimination gamma/alpha du saphir est également excellente. Le facteur d'extinction gamma/alpha est estimé à $Q_{\gamma/\alpha} \sim 10.3 \pm 1$ dans le saphir Russe (Figure 14 bas & Figure 15) mais $Q_{\gamma/\alpha} \sim 2.2 \pm 0.2$ seulement dans nos saphirs d'origine Verneuil ⁴⁰ (Figure 17 ; voir discussion ci-dessous pour une amélioration de ce facteur). Des mesures des extinctions « thermiques » gamma/alpha et gamma/recul ont également été effectuées sur les saphirs d'origine Russe : en polarisant fortement le détecteur pour garantir sa linéarité, et en baissant les gains pour récupérer de la dynamique, nous avons relevé un déficit $\approx -7\%$ sur la réponse des gammas par rapport aux alphas (Figure 15) ⁴¹.

³⁸ *Bolómetros centelleadores para búsqueda de materia oscura*, thèse de Lidia Torres, soutenue le 11 juillet 2008, Université de Saragosse

³⁹ Thèse Melisa Luca. *Op. cit.*

⁴⁰ Thèse Lidia Torres, *Op. cit.*

⁴¹ On retrouve curieusement le même déficit (-7%) pour CaWO₄ et BGO...ce qui semble suggérer un même mécanisme de différenciation alpha/gamma dans la conversion thermique de l'énergie.

La mesure du facteur d'extinction thermique gamma/recul dans le saphir Kyropoulos a par ailleurs fait l'objet d'une publication dédiée (Pub#5) en mesurant les reculs ^{206}Pb d'une source de ^{210}Po : on trouve aux incertitudes systématiques près un facteur d'extinction thermique $\text{REF}=1.044\pm 0.008_{\text{stat}}^{42}$, légèrement supérieur à 1, ce qui est attendu étant donné la conservation de l'énergie et le rendement élevé associé aux gammas vers les voies autres que la voie chaleur...^[52].

3.4.2.3. Mise en évidence d'un léger effet de surface (Figure 16)

Une fraction énergétique stockée en surface de saphir d'origine Russe et représentant $\approx 4\%$ de l'énergie initiale a également pu être mise en évidence lors d'une expérience de calibration avec une source interne de ^{109}Cd (émettant entre autres des électrons de conversion EC à 62.5keV et 84keV, et des Xs à 22keV) et une source externe de ^{57}Co , les gammas de 122keV associés étant absorbés dans tout le volume du saphir. L'hypothèse d'une dégradation de l'énergie dans la source elle-même a pu être rejetée par une contre-expérience originale : la même source de ^{109}Cd , présentée devant un bolomètre à cible démontable en Cuivre (cf. le montage de la Figure 4), révèle tous les pics EC à leur position attendue. Nous mettons ainsi en évidence pour la première fois la possibilité de piéger de l'énergie dans les défauts de surface du saphir.

3.4.2.4. Effet d'une forte irradiation sur saphir « Verneuil » (Figure 17)

Les saphirs d'origine Verneuil révélaient un déficit de lumière par rapport aux saphirs « Kyropoulos » : nous avons eu l'idée d'irradier un bolomètre de l'ancienne génération (à cible saphir « Verneuil ») dans une installation industrielle de radiographie gamma (source ^{60}Co de 20Ci placée à 25cm du bolomètre pendant 3 jours, pour une dose reçue estimée à 30000rads). Les centres colorés créés par l'irradiation ont modifié le pouvoir de discrimination gamma/alpha de ce détecteur, qui est passé de façon remarquable de $Q_{\gamma/\alpha}\sim 2.4$ à $Q_{\gamma/\alpha}\sim 7.1$, ce qui le rapproche des performances des saphirs « Kyropoulos » (Figure 17). La scintillation mise en évidence est stable avec le temps. On note une augmentation de l'émission sous gammas mais une diminution de l'émission sous alphas. Une irradiation supplémentaire avec une dose 10× plus élevée n'améliore plus la discrimination : le cristal est devenu jaune, et l'ensemble de ses propriétés thermiques se dégrade.

Cette expérience montre cependant qu'il peut être possible d'augmenter sensiblement l'émission lumineuse de détecteurs peu scintillants, en les irradiant une fois construits, *i.e.* sans les démonter, ce qui est un atout considérable. Un blanchiment optique contrôle et

⁴² REF=Relative Efficiency Factor

appliqué *a posteriori* (par exposition du cristal à une source UV) venant corriger l'excès d'irradiation...L'ensemble irradiation/blanchiment pourrait-il permettre ainsi une sorte de syntonisation (« tuning ») de l'émission ?

3.4.2.5. Le fond « saphir » au LSC (Figures 18 & 19)

Le cristal de saphir de 50g Russe intégré sur la canne 20mK et monté dans le bolomètre B274 lors des campagnes de ROSEBUD-II est du même lot que celui du bolomètre saphir de la campagne ROSEBUD-I de 1999-2001 (B213), dont les résultats ont déjà été décrits^{[40], Pub#3}. Nous n'avions fait qu'ajouter la voie lumière après la découverte de la scintillation à froid du saphir...Nous placions pour cette raison beaucoup d'espoir dans les nouvelles mesures au Canfranc. Le seuil de réjection effectif gammas/reculs à 99% CL a été relevé de 13keV à 25keV en raison des moindres performances du bolomètre optique, B287 : son disque en Germanium ayant été cassé en deux puis réparé, on voit une partie de la chaleur spécifique de la colle ajoutée dans celle du détecteur complet. Le fond relevé, –après la soustraction habituelle des événements Ge-NTD par une coupure sur la constante de temps de montée– va malheureusement rapidement révéler un taux important d'événements dans la branche des reculs (Figure 18), soit ~11 coups/keV/kg/jour dans l'intervalle $25\text{keV} \leq E < 50\text{keV}$, pour les données de février 2007, tout à fait comparable au taux relevé en 2001 dans le premier bolomètre en saphir (Figure 2 de ce manuscrit et Figure 11 de la publication Pub#3) ! Ce fond s'étend bien au-delà de 100keV, ce qui exclut que nous ayons mesuré la contrepartie recul de désintégrations alphas. Des améliorations successives du blindage extérieur en plomb et l'ajout d'un dispositif anti-radon ^{222}Rn entre les mois de février et mai 2007 ont bien permis de réduire le fond gamma relevé par le détecteur (Figure 19 pour le saphir & Figure 27 pour le BGO), mais le taux d'événements dans la branche des reculs est resté malheureusement pratiquement constant (Figure 32), pointant vers une origine interne à ce fond. On se reportera à la discussion sur l'origine de ce fond dans le chapitre concernant les résultats du 33g LiF, en novembre 2007 qui semblent exclure une origine « neutrons ». On trouvera une analyse approfondie des données du détecteur de 50g en saphir dans la thèse de Lidia Torres⁴³.

3.4.3. Fond haute énergie : BGO

3.4.3.1. Le signal de scintillation (Figures 20 & 50)

Le germanate de bismuth ($\text{BGO}=\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) est un scintillateur bien connu des physiciens nucléaires, avec un rendement lumineux moyen à 300K, de l'ordre de

⁴³ Lidia Torres, *Op. Cit.*

6900 ± 140 photons/MeV⁴⁴, soit 20% de celui de NaI(Tl) pour une longueur d'onde moyenne d'émission dans le bleu, $\lambda \sim 500$ nm (Figure 50). La scintillation est intrinsèque, portée par l'ion Bi³⁺ dans la maille cristalline. Nous avons pu étudier l'augmentation de réponse et l'évolution de la constante de temps de scintillation du BGO avec la température sur l'installation du groupe d'Oxford, en bénéficiant de la technique MPC (multi-photon counting) développée par Oxford pour les scintillateurs « lents »^[53]. Une augmentation d'un facteur ~ 3.4 du rendement lumineux est observé entre 300K et 100K sous irradiation alpha (le signal est stable en dessous), compatible avec celle que nous avons établie à l'IAS sur notre banc à fibre optique (Figure 50). La structure temporelle de la scintillation a été étudiée par le groupe d'Oxford qui a relevé au mois deux constantes de temps, avec une constante de temps longue dominante à très basse température de $\tau \sim 138 \mu\text{s}$, qui ne semble plus évoluer en dessous de 10K (entre 6K et 10K, plus précisément). Les données relevées à l'IAS dans un bolomètre de 46g (B225) refroidi à 20mK confirment cette tendance : le BGO, contrairement au saphir, est un scintillateur « retardé » à très basse température. Les signaux gammas et alphas sont enregistrés avec un retard $\tau \sim 100 \mu\text{s}$ par le bolomètre optique en Germanium, et il est même possible de séparer gammas et alphas à haute énergie par une simple mesure de la constante de temps du signal optique (Figure 20).

Dans l'espoir de prolonger de 6K à 20mK les données d'Oxford du BGO sous irradiation alpha, nous avons essayé de séparer, mais sans succès, par FFT ou par convolution temporelle, le signal de scintillation gamma de la fonction de réponse du détecteur, que les impulsions LEDs ou Xs de la Figure 20 permettent d'établir. Mon intuition est que le signal de scintillation bolométrique n'est pas purement exponentiel, avec probablement une « entête » diffusive, le temps que les paires électrons-trous créées diffusent dans le cristal.

3.4.3.2. Un matériau discriminant... et radioactif

3.4.3.2.1. Gammas/reculs (Figures 21 & 22 ; Tableau 6)

Le BGO est un excellent matériau discriminant, et un bon matériau pour la bolométrie. Gammas et reculs de noyaux—d'Oxygène principalement— sont parfaitement séparés comme le montrent les résultats de calibration de notre détecteur de 46g en BGO (B225) sous irradiations ⁶⁰Co et ²⁵²Cf (Figure 21), à l'IAS. Les neutrons rapides du fond ambiant de l'IAS sont également facilement détectés via les reculs qu'ils induisent, en venant bien sûr masquer un éventuel signal matière noire...

Ce détecteur de 46g en BGO présente un seuil à 5σ de 6 keV sur la voie chaleur.

⁴⁴ M. Moszynski et al., Intrinsic energy resolution and light yield nonproportionality of BGO, IEEE Trans. Nucl. Sci. 51, 3 (2004) 1074-1079

A partir des expériences ci-dessus, on peut donner les seuils de réjection du couple de détecteurs B225 (\equiv 46g BGO) & B276 (le détecteur optique en regard ; se reporter au [Tableau 2](#) pour ses caractéristiques). Une séparation reculs nucléaires/gammas est assurée à $E > 23$ keV avec un niveau de confiance de 90%, des performances assez comparables aux bolomètres plus massifs d'Edelweiss (320g ; Germanium), dans leur configuration 2001 ([Tableau 6](#)).

3.4.3.2.2. Contamination en ^{207}Bi ([Figure 23](#))

Le 46g a révélé très rapidement une contamination importante en ^{207}Bi , visible sur la [Figure 21](#), que nous avons pu estimer à ~ 3 Bq/kg BGO. Cette contamination est à priori gênante pour une expérience de détection de la matière noire car des gammas d'énergie supérieure à 1 MeV sont produits ([Pub#1](#), [Figure 2](#)) : d'un commun accord avec l'équipe de Saragosse nous avons néanmoins décidé de programmer ce détecteur pour ROSEBUD-II, dans l'espoir de réaliser une mesure nucléaire inédite du rapport $EC_K/EC_{L, M, \dots}$ ([Figure 23](#), et sa légende). Les données concernant ce rapport, prises en 2007 lors de la campagne ROSEBUD-II devraient être publiées en 2011. La présence en forte concentration de ^{207}Bi est probablement associée à sa cosmogénèse sur des isotopes stables du plomb : le bismuth naturel (^{209}Bi) est normalement extrait comme un sous produit de la raffinerie du plomb. La compagnie Saint-Gobain/Crismatec commercialise également une qualité radiopure –dont nous ignorons tout (par exemple si ce bismuth est extrait de mines de bismuth natif ?) mais que nous nous sommes procurée pour construire nos détecteurs suivants de 90g en BGO...Le même échantillon de BGO radiopur a pu être testée « en aveugle » successivement sur les bancs HP-Ge du LSM (Modane) et du LSC (Canfranc).

J'ai compilé lors du premier atelier RPSCINT'2008 à Kiev les concentrations en ^{207}Bi dans les différents alliages et composés du bismuth, mesurées et/ou publiées⁴⁵ ([Tableau 7](#)) : la qualité de BGO radio-pur développée par Crismatec est de loin la meilleure, avec respectivement 7 ± 2 mBq/kg Bi et 9 ± 3 mBq/kg Bi mesuré au LSC et au LSM, en très bon accord. On est encore loin des quelques 10 $\mu\text{Bq/kg}$ demandés par Fedor Danevich pour les scintillateurs d'EURECA...mais on s'en approche !

⁴⁵ N. Coron et al., *Our short experience at IAS and within ROSEBUD with radioactive contaminations in scintillating bolometers: uses and needs*. Compte-rendu de l'atelier RPSCINT'2008, Radio Pure Scintillators for EURECA, Kiev, 9-10 septembre 2008, disponible en ligne seulement : arXiv:0903.1539v2 [nucl-ex].

3.4.3.2.3. La désintégration du bismuth « stable » (Figures 24 à 26)

Il s'agit de la découverte emblématique de notre équipe sur la période considérée. C'est une découverte « pur jus » IAS : tous les auteurs de la publication à Nature (Pub#1) appartiennent au laboratoire, conformément à mon souhait initial. Il s'agissait dans l'ordre des priorités, d'une part de donner une visibilité maximale à la technique des bolomètres scintillants, et d'autre part de revendiquer l'apport de notre équipe à la problématique « détection directe d'événements rares ».

La découverte de l'instabilité du bismuth a été saluée, dès sa parution dans Nature et le communiqué de presse associé du CNRS, par la presse nationale quotidienne (articles dans Le Monde, Libération, Le Figaro, La Croix,...), la presse régionale (Le Marseillais,...), l'ensemble de la presse scientifique de vulgarisation (Ciel et Espace, Science et Vie, Science et Avenir, La Recherche), les sites d'annonces scientifiques en ligne (Science,...), tandis que des articles de fond reprenant la détection ont paru dans les revues des sociétés savantes de physique allemandes et danoises. J'ai assuré pour une bonne partie la publicité de ces résultats, et l'interaction avec les journalistes fut une expérience très instructive ! Alors que cette découverte intéresse au premier chef la physique nucléaire, l'ensemble de la presse a tenu à souligner qu'elle sortait du champ de compétence traditionnel (astrophysique) de notre laboratoire, une « pierre jetée dans le jardin de ceux qui rêvent de programmer la recherche », selon les propres termes de l'article paru dans Ciel et Espace.

Les expériences de juillet 2001 sur un bolomètre de 46g en BGO comportaient une source alpha de ^{241}Am . Lors des nouveaux tests avec ce détecteur en mars 2002, nous avons voulu nous assurer que nous n'avions pas contaminé le détecteur en surface par la source alpha, et, pour ce faire, nous l'avons polarisé suffisamment pour observer le fond haute énergie en configuration « discrimination » (les voies lumière et chaleur sont enregistrées simultanément). Nous avons observé une raie alpha sortir en une nuit (7 événements d'un coup ; vers $E=3150$ keV). Après recherche bibliographique pour identifier l'origine de cette raie, jamais observée et donc non tabulée, nous nous sommes rendu compte qu'il s'agissait probablement de la désintégration alpha de ^{209}Bi , l'isotope réputé « stable » du bismuth. Cette désintégration est rendue possible par l'excès de masse de ^{209}Bi vis à vis de sa désintégration en ^{205}Tl , avec la valeur attendue $Q_\alpha=3137 \pm 0.9$ keV. La durée de vie déduite du taux d'événement observés était compatible avec la durée de vie de ^{209}Bi prédite par les théoriciens à $\tau_{1/2}\approx 10^{19}$ - 10^{20} ans...

Nous avons aussitôt entrepris une série de mesures de confirmation, qui ont toutes validées notre hypothèse initiale :

- statistique ↑ : par des poses plus longues
- indépendance / cible initiale : un deuxième bolomètre de 92g en BGO (insert de la [Figure 24](#)) montre également la même raie alpha, avec une cadence double ([Figures 25 & 26](#)).
- calibration soignée : l'énergie de la raie a pu être déduite :

- pour le bolomètre de 46g BGO :

$$E=3130.4 \text{ keV} \pm 16.5 \text{ keV} (1 \sigma)$$

grâce à une identification du fond de radioactivité de ce détecteur

- pour le bolomètre de 92g BGO :

$$E=3137.3 \text{ keV} \pm 2.0 \text{ keV} (1 \sigma)$$

grâce à une calibration dédiée alpha (avec ^{241}Am ; [Figure 25](#))

Ces deux valeurs encadrent remarquablement l'énergie attendue de la désintégration...

- calcul actualisé de la durée de vie :

la durée de vie de ^{209}Bi déduite des mesures

$$\tau_{1/2} \approx 1.9 \pm 0.2 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

est proche de la durée de vie suspectée en 1972 par *de Carvalho et al.*, calculée par un biais utilisant la durée de vie de ^{210}Po (138 jours !), dont la structure nucléaire est proche de ^{209}Bi . Une mise à jour de ces calculs incorporant les mesures les plus récentes d'énergie et de masses atomiques m'a conduit à réviser cette valeur à

$$\tau_{1/2}(\text{théorique}) \approx 4 \cdot 10^{19} \text{ ans}$$

qui est encore plus proche de la durée de vie mesurée, et probablement compatible avec les incertitudes des modèles nucléaires utilisés...

- absence de contaminants potentiels :

La précision sur la valeur de l'énergie de désintégration est telle que les impuretés alphas proches sont exclues avec un niveau de confiance extrêmement élevé ([Figure 26](#)). Néanmoins, nous avons entrepris une analyse quantitative de la plus proche et la plus gênante d'entre elles (^{190}Pt) dans nos échantillons. Après implantation de BGO en Pt au CSNSM-Orsay et mesure sur la sonde SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) du Laboratoire de Physique des Solides et de Cristallogénèse de Meudon Bellevue (LPSC), nous pouvons définitivement exclure

^{190}Pt comme origine de la raie observée. La contamination gênante était de l'ordre de 300 ppm atomes Pt/Bi, et nous avons relevé une limite Pt/Bi < 1 ppm...

Nous avons donné dans la Lettre à Nature, une revue historique des différentes tentatives de détection de la désintégration de ^{209}Bi , depuis la première expérience reportée qui remonte à 1949. La durée de vie de ^{209}Bi étant maintenant connue, il est immédiat –et très instructif!–de comparer *a posteriori* les résultats des différentes tentatives aux taux d'événements réels attendus durant le temps de pose de ces expériences. On relève ainsi deux annonces de détection grossièrement abusives en 1957 et 1958 (faux positifs) et une expérience marginalement passée à côté de la détection en 1972 (faux négatif) pour des tests à base d'émulsions nucléaires. C'est une leçon que je ne suis pas prêt d'oublier en tant qu'expérimentateur : la détection de la matière noire est peut-être pleine en puissance de telles chausse-trappes !

La durée de vie « Hyper Cosmologique » relevée, en une seule nuit, a le mérite de souligner la puissance exceptionnelle de la technique développée, qui combine identification des particules et haute résolution.

En faisant la bibliographie du BGO, nous nous sommes aperçus que l'équipe de CUORE avait inscrit la recherche de la désintégration dans une proposition interne INFN en 2001 : il n'a pas été possible de citer cette proposition dans Nature, mais on notera au passage qu'il n'avait été envisagé de le faire alors que par la voie chaleur seulement, et en souterrain...Après notre publication, la proposition CUORE de 2003 proposait de bien « mieux » mesurer la durée de vie de ^{209}Bi ...

En vertu de l'exceptionnelle longévité reportée, un test de la validité de la loi de décroissance exponentielle aux temps courts à base de bismuth avait été proposé : il s'agissait de fabriquer du bismuth « frais » (par irradiation de neutrons sur Pb-208) et de confronter la durée de vie mesurée de ce bismuth « frais » à celle du bismuth ordinaire, « primordial » et vieux de plusieurs milliards d'années. Une telle déviation de la loi de décroissance exponentielle est en effet attendue « aux temps courts » selon des arguments fondamentaux de la physique quantique qui conduisent au fameux « paradoxe de Zénon quantique »: si on regarde constamment un système excité (par exemple un noyau radioactif), on l'empêche de se désintégrer ! J'ai fini par comprendre que ce test était en fait la motivation principale des deux équipes américaines qui recherchaient actuellement -et sans succès-la désintégration du bismuth. L'idée implicite qui sous-tend les propositions américaines est que la durée de vie de l'état est le temps caractéristique référant de la désintégration. La perspective de contribuer à

un test de physique fondamentale étant bien entendu assez excitante, j'ai essayé d'en savoir un peu plus (et fait part du début de mes investigations lors d'un séminaire donné au DAPNIA/SPP en novembre 2003). Si la réalisation pratique du test semble difficile – sans être infaisable- j'ai été dissuadé de dépenser du temps et de l'énergie à cette recherche, pour deux raisons : d'une part le temps caractéristique de l'établissement de la loi de décroissance exponentielle n'est pas calé sur le temps de vie (bref échange avec Luciano Maiani, ex-directeur du CERN, qui a écrit un article sur le sujet⁴⁶), et d'autre part la définition du temps $t=0$ pour le noyau n'échappe pas aux fondamentaux de la physique quantique. En vertu de ces fondamentaux, l'horloge des noyaux est remise à zéro à chaque individualisation (par passage dans la fente d'un spectromètre, lors de la dernière séparation chimique,...) et l'existence de noyaux vieux, primordiaux, est une vision naïve, qui n'a pas de « sens » (conversation avec Renaud Parentini, professeur de physique théorique au LPTHE). J'ai donc renoncé momentanément à la quête de bismuth frais...

La raie de désintégration alpha du bismuth-209 détient le record de durée de vie alpha : c'est également par la même occasion **un objet physique singulier** : elle est intrinsèquement la plus fine des raies principales de toute la physique en vertu du principe d'incertitude d'Heisenberg ($\Delta E \times \Delta T \geq \hbar \rightarrow \Delta E_{\text{limite}} \approx 10^{-42} \text{ eV} \dots$)⁴⁷.

Une conséquence pratique immédiate de notre détection est la révision de toutes les cartes de radio-nucléides (**Figure 24**), car ²⁰⁹Bi était jusqu'ici le plus lourd des isotopes stables. Le record revient à présent au noyau doublement magique ²⁰⁸Pb, qui n'est pas prêt de se désintégrer, lui... Pour ce dernier noyau, l'énergie disponible Q_α est très faible (519 keV), ce qui lui confère une durée de vie extrêmement longue (supérieure à 10^{100} ans...): le franchissement par la particule alpha de la barrière nucléaire Coulombienne par effet tunnel se traduit par des durées de vie variant exponentiellement avec Q_α ...

Une équipe de physiciens nucléaires chinois a réagi rapidement en 2003 à la publication de la durée de vie du bismuth-209, et a pu proposer un modèle nucléaire reproduisant les nouvelles données⁴⁸. J'ignore quelle sera la portée de ce modèle.

Une équipe brésilienne a également proposé en 2005 une révision des durées de vie alpha des isotopes du bismuth avec une durée de vie de ²⁰⁹Bi estimée à $(1.0 \pm 0.3) 10^{19}$ ans⁴⁹.

⁴⁶ Unstable systems in relativistic quantum field theory ; L. Maiani & M. Testa, -M.; Annals-of-Physics 263(2): (1998) 353-67.

⁴⁷ Du moins tant que la raie d'une désintégration $\beta\beta 0\nu$ plus rare n'aura pas été reportée sans ambiguïté...

⁴⁸ Alpha decay of odd-A nuclei with an extra nucleon outside a closed shell
[Xu, Chang; Ren, Zhongzhou](#), Physical Review C, vol. 68, Issue 3, id. 034319

Je me suis impliqué fortement dans les mesures de confirmation de cette découverte, puis ai pris en charge la publication de ces résultats dans Nature. La détection faite à l'IAS a été jugée « en béton » pour traduire du mieux possible les termes mêmes d'un rapporteur –a « tough experiment »–et c'est le point dont je suis le plus satisfait. Cette observation souligne de façon exemplaire les deux qualités essentielles qu'il importe de préserver dans la recherche publique, à mon sens : une recherche peu programmée (avec une part de risque consentie), et décloisonnée... Cette même technique a abouti sur la première observation de la désintégration de l'isotope ^{180}W par l'équipe CRESST, avec une durée de vie de $1.8 \cdot 10^{18}$ ans⁵⁰ : cette détection était prévisible^[37]. Une confrontation de nos données respectives sur cibles CaWO_4 en 2003 avec Franz Probst a probablement aidé à l'identification de l'impureté notable de ces cristaux, ^{147}Sm , et par suite, à une calibration correcte de l'énergie de la désintégration observée.

3.4.3.3. Le fond « BGO » au LSC (Figures 27 & 28)

La campagne de mesure ROSEBUD-II du fond du LSC par le détecteur de 46g en BGO (B225), a révélé des limitations semblables à celles du bolomètre en saphir : un fond d'événements dans la zone des reculs. Il a servi de moniteur pour l'observation du fond gamma, facilement identifiable dans la cible BGO, en raison du Z très élevé du bismuth (67% en masse du BGO ; Z=83). La réduction du fond gamma par amélioration des blindages et la mise en place d'une ventilation anti-radon entre février et mai 2007 sont directement repérables dans les spectres, tandis que les raies de ^{207}Bi , internes, demeurent inchangées (Figure 27).

Le détecteur a plutôt mieux marché que lors des calibrations à l'IAS : un seuil de détection de 2.9 keV à 5σ (contre 6 keV à l'IAS) a même été possible en février 2007, dans une période où le réfrigérateur l'IAS a atteint sa plus basse température, 18.5mK. Nous avons alors pu observer, détaché du fond gamma, le massif 2.5keV→3.8keV associé aux cascades provoquées par les captures d'électrons des couches M de Pb dans la désintégration de ^{207}Bi (EC_M)⁵¹. Malheureusement, tout comme le bolomètre de 50g en saphir, le détecteur BGO a enregistré un fond d'événements non ionisants, dans la zone des reculs (Figure 28). Le taux relevé, entre 1 & 2 évts/heure à $E>20\text{keV}$ est évidemment rédhibitoire pour prétendre engager ce détecteur dans une expérience longue durée « Matière Noire », même avec la qualité radio-

⁴⁹ Alpha decay half-life of bismuth isotopes

Tavares O.A.P., Medeiros E.L. & Terranova M.L., Journal of Physics G 31,n°2 (2005) 129-139

⁵⁰ C. Cozzini et al., Detection of the Natural Alpha Decay of Tungsten, Physical Review C 70, 064606 (2004)

⁵¹ Caracterización de un bolómetro centelleador de BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) para su aplicación en la búsqueda directa de Materia Oscura, Ysrael Ortigoza, thèse de l'Université de Saragosse, soutenue le 12 mars 2010.

pure de BGO ! Le lecteur intéressé trouvera tout de même une exploitation de ce résultat en terme de courbes d'exclusion $\sigma/M\chi$ dans la thèse d'Ysrael Ortigoza⁵², mais comme on l'imagine, ces limites ne sont absolument pas contraignantes...

Le taux relevé dans la branche des reculs n'est pas diminué par l'amélioration du blindage et la suppression du radon réalisées dans ROSEBUD entre février et mai 2007, ce qui suggère, là encore, une origine interne au détecteur pour ce fond (Figure 32).

3.4.4. Fond « neutrons » : LiF

La campagne ROSEBUD-II s'est déroulée en 4 missions de deux semaines chacune en janvier, février, mai et novembre 2007. Le bolomètre de 33g en LiF a souvent été laissé de côté, car nous ne disposions que de 4 voies de mesure, et sa calibration était problématique en l'absence de source de neutrons. Le bolomètre LiF reprenait du service en novembre 2007, avec la mise à notre disposition d'une source ²⁵²Cf au Canfranc, qui permettait de le calibrer, de ré-étalonner in situ les pouvoirs de discrimination gammas/reculs des bolomètres BGO et saphir, et, *last but not least*, de tenter de lever l'hypothèse sur une origine neutrons aux fonds non ionisants relevés sur saphir et BGO les mois précédents par une manip croisée LiF/saphir qui sera détaillée un peu plus loin...

3.4.4.1. Un matériau discriminant

3.4.4.1.1. Gammas/reculs/alphas/neutrons dans 16g LiF (Figure 29)

Il s'agit d'exploiter la réaction de capture des neutrons par le lithium-6 ($n+{}^6\text{Li}\rightarrow t+\alpha$) par la méthode bolométrique, selon une idée que j'ai proposée en 1993^{[6],[9]}. L'énergie libérée par la réaction ($Q=4.78$ MeV) se situe dans une zone énergétique où le bruit de fond alpha domine. Notre R&D sur LiF (Figure 29) a montré qu'une mesure de la lumière permettrait probablement de se débarrasser de ce fond et d'accéder à des mesures de fond de neutrons rarissimes. L'idée sous-jacente est également de réaliser la spectroscopie du fond de neutrons rapides (disons : $E_n\approx 20$ keV \rightarrow 20 MeV) via cette réaction, par observation du déplacement de la raie à 4.78 MeV + E_n . Les neutrons rapides sont le fond ultime des expériences de détection de la matière noire, et je suis persuadé qu'il faudra certes diminuer ce fond, mais aussi le mesurer ou le contraindre. Des bolomètres en LiF seront alors probablement aux premières loges ...

3.4.4.1.2. Un révélateur de neutrons lents et rapides (Figure 30)

Les mesures réalisées à l'IAS en 2006 avec une source ²⁵²Cf plus ou moins bien thermalisée par de la paraffine sur le bolomètre de 33g en LiF naturel (B303) ont permis de

⁵² *Ibid.*

montrer le parti potentiel qu'on peut tirer de la réaction de capture avec un bolomètre scintillant : mesurer les neutrons rapides là où il n'y a (presque) plus de confusion possible, et en donner idéalement le spectre... (Figure 30 ; cf. en particulier la corrélation flagrante entre diffusions élastiques et captures).

3.4.4.1.3. Les fonds de neutrons IAS et Canfranc (Figure 31)

Les fonds naturels des neutrons à l'IAS et au Canfranc –du moins la composante des neutrons thermiques absorbés avec 100% d'efficacité– ont été relevés par le bolomètre B303, et la première mesure directe de neutrons réalisée au Canfranc en janvier 2007 avec une mesure $\Phi_{\text{nth}} \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$, compatible avec les fluences reportées dans les autres laboratoires souterrains (Figure 31). On comptait en 2007 typiquement 2 à 3 neutrons thermiques par nuit dans ce détecteur au Canfranc.

3.4.5. Le fond final de ROSEBUD-II :

3.4.5.1. Saphir et BGO : un fond final irréductible, non ionisant (Figure 32)

La figure 32 résume à elle seule la mauvaise surprise de la campagne ROSEBUD-II : un fond final irréductible non ionisant, résistant aux améliorations du fond gamma. Comprendre l'origine de ce fond est capital pour la suite de ROSEBUD, et pourrait conduire à une révision de nos montages pour les bolomètres scintillants.

Plusieurs hypothèses concernant cette origine peuvent être discutées :

1. *Gammas interagissant dans des zones mortes (non scintillantes) du détecteur ?*

Les zones mortes du détecteur connectées thermiquement –c'est-à-dire celles qu'il est impossible de distinguer par leur constante de temps– sont réduites au minimum : il s'agit principalement des « yoyos » utilisés pour la suspension, ou bien des cales de thermalisation du senseur. Elles représentent environ $\sim 10^{-4}$ du volume des cibles. Le taux d'événements associé devrait varier avec le fond gamma, ce qui n'est pas observé. Cette hypothèse est donc exclue.

2. *Relâchement de contraintes (cracks) ?*

Les impulsions relevées ne se distinguent en rien des « bonnes impulsions » et survivent à toutes les coupures. Elles sont régulièrement réparties dans le temps, ce qui semble exclure que nous ayons observés des relâchements de contraintes, lesquels ont été observés arrivant plutôt groupés, à la manière des événements sismiques.⁵³

3. *Parasites électriques ?*

⁵³ J. Astrom et al., *Fracture Processes Observed with A Cryogenic Detector*, Physics Letters A356 (2006) 262-266

Dans la première phase de ROSEBUD-II, –en janvier 2007– nous avons observé une population d'événements chaleur sans contrepartie optique dans le saphir, avec un très fort taux de comptage ($\gg 1\text{evt/h}$!), mais légèrement plus lents en moyenne que des impulsions normales, sans qu'il soit possible de les séparer par une mesure de constante de temps. Ces événements ont heureusement complètement disparu au cours des missions suivantes, et, faute de mieux, nous les avons associés à des parasites électriques : de tels événements se produisent régulièrement à l'IAS en présence d'humidité dans les connecteurs, et déclenchent de mini-décharges dans le circuit de polarisation. Etions-nous en train de voir la queue de distribution statistique de tels événements, dans le saphir et le BGO ? Le fait qu'un signal de lumière non ambigu soit détecté pour les événements de reculs suffisamment énergétiques dans le BGO ($E > 150\text{ keV}$) permet d'exclure cette hypothèse.

4. *Des bulles de gaz ?*

Les bolomètres optiques, plus sensibles à priori à des variations de pression interne du vide calorimètre que les bolomètres massifs, devraient montrer également un signal fort, non observé.

5. *Des reculs contreparties d'émissions alphas ?*

Les événements relevés vont bien au delà de 100 keV (cf. [Figure 18](#)), qui est l'énergie maximale typique associée à des reculs émis en contrepartie d'émissions alphas des chaînes naturelles. Cette hypothèse est donc exclue.

6. *Des alphas dégradés en surface ?*

Nous n'avons pas relevé de raie alpha flagrante dans les spectres haute énergie du BGO et du saphir au LSC, à part les « contaminations » connues, déjà relevées à l'IAS. Mais cette partie des spectres n'a pas été suffisamment échantillonnée lors des mesures ROSEBUD-II, focalisées sur les basses énergies, pour pouvoir rejeter cette hypothèse. On ne voit pas non plus pourquoi nous échapperions à la source principale de fond de CUORE ou de CRESST, alors que nous n'avons pas pris toutes les précautions qu'ils prennent : nous ne disposons pas de salle blanche ni à l'IAS ni au LSC pour intégrer les détecteurs.

On notera la solution très élégante mise au point par l'équipe de CRESST pour s'affranchir de ces événements : une feuille en film polymérique réflecteur entourant les détecteurs, au lieu de notre revêtement Cu-Ag. La feuille est elle-même scintillante sous irradiation alpha : dans un sens –à basse énergie– les reculs détectés dans la cible sont

repérés par le signal alpha dans le film, tandis que dans l'autre –sur toute la gamme énergétique– les alphas dégradés arrivant sur la cible auront auparavant donné un signal dans la feuille.⁵⁴

Une contamination *volumique* du Cuivre dans les chaînes naturelle semble exclue comme origine de ce fond : nous avons mesuré en 1997 au LSC des limites de contamination $^{238}\text{U} < 1.5 \text{ mBq/kg}$ et $^{232}\text{Th} < 0.46 \text{ mBq/kg}$ dans le cuivre utilisé⁵⁵ (OFHC, qualité métallurgique Cuc2). En considérant une couche de surface de Cuivre épaisse de $20 \mu\text{m}$ (~parcours des alphas), contaminée avec ces limites et regardant les détecteurs, la contribution associée au taux d'événement est $< 0.01 \text{ coup/heure}$.

7. Des neutrons rapides ?

Cette hypothèse aurait pu être exclue par la simple comparaison des taux d'événements dans le BGO et le saphir, qui sont tous les deux des oxydes (on compte $3.3 \times$ plus de noyaux O dans 50g de saphir que dans 46g de BGO). Les reculs à haute énergie seront associés préférentiellement aux diffusions élastiques des neutrons rapides sur l'oxygène, pour des raisons de cinématique simples (adaptation des masses) et on devrait compter ≈ 3.3 plus de reculs dans les données Al_2O_3 que dans les données $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$. C'est ce qui est vérifié sous irradiation ^{252}Cf , et à peu près ce qui est trouvé dans le fond (aux incertitudes statistiques près, qui sont grandes !): le test ne permet pas de rejeter cette hypothèse. Il illustre cependant tout l'intérêt que l'on peut tirer d'une expérience combinant des cibles différentes, comme le permettent seuls les bolomètres scintillants ! Le fait que le détecteur de 33g LiF détecte un fond « normal » de neutrons thermiques $\Phi_{\text{nth}} \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ semble exclure l'hypothèse d'une composante « anormale » de neutrons rapides, que nous aurions vu et que les autres expériences ne verraient pas, alors que nous mesurons la même composante thermique ! L'expérience qui suit aurait presque permis de rejeter définitivement cette hypothèse.

3.4.5.2. La part des neutrons rapides dans les fonds du Saphir et du BGO, estimée par le LiF : principes de la mesure et 1^{ère} tentative (Figure 33)

Le détecteur LiF est en principe capable de mesurer le spectre des neutrons rapides par leur capture sur ^6Li . L'expérience que décrit la Figure 33 est une mesure croisée LiF/Saphir des neutrons rapides, effectuée au Canfranc en novembre 2007 au moyen d'une source ^{252}Cf : les neutrons rapides sont détectés aussi bien sur l'aile énergétique de

⁵⁴ Lang R. F. et al., *Discrimination of recoil backgrounds in scintillating calorimeters*, *Astroparticle Physics* **33**, 1 (2010) 60-64

⁵⁵ Cf. la base de données: "Ilias database on radiopurity of materials" : <http://radiopurity.in2p3.fr/>

la réaction de capture (39 évts) que dans la branche des reculs du saphir suite à leur diffusion élastique (2057 évts) pour les fenêtres en énergie indiquées sur la figure par des ellipses. En faisant l'hypothèse d'un fond de neutrons ayant la même distribution spectrale que celle de la source de ^{252}Cf (spectre de fission), une règle de trois simple montre qu'on attendait 0.27 évt. sur le LiF pour expliquer les 14 évts. relevés dans le saphir. Le bolomètre en LiF n'a reporté aucun événement, et le test est donc encore compatible avec l'hypothèse « neutrons ». Si cette mesure souligne une insuffisance de statistique pour conclure on peut cependant remarquer qu'un LiF enrichi à 95% en ^6Li –soit un gain immédiat en efficacité de détection d'un facteur 12– aurait permis de conclure, et d'infirmer définitivement cette hypothèse. C'est la raison pour laquelle, en collaboration avec une équipe de l'ICMCB nous sommes en train de construire un tel détecteur (Figure 42).

Pour conclure sur le fond ROSEBUD-II...

Suite à la discussion précédente, mon sentiment est que nous avons mis en évidence une contamination alpha de surface, et qu'il ne s'agit absolument pas de reculs : il est très troublant que les deux bolomètres de 50g en saphir et 46g en BGO, deux matériaux complètement différents, reportent tous les deux des taux de comptage comparables, de l'ordre de 1 à 2 coups/heure dans la zone des reculs (Figure 32). Etant donnée la géométrie proche de ces deux détecteurs (Φ =hauteur=2cm pour le BGO et Φ =hauteur=2.5cm pour le saphir, soit une surface exposée au cuivre $S \sim 15\text{--}25\text{cm}^2$) on peut déduire l'ordre de grandeur de la contamination associée en surface du Cuivre, $A \sim 10\text{--}40 \mu\text{Bq/cm}^2$ ⁵⁶, que l'on peut comparer à ce qui a déjà été publié. Le cylindre et les capots de cuivre utilisés pour le support des bolomètres, de type OFHC « Cu-C2 », ont été repris au carborundum, SiC, puis polis à l'alumine après leur livraison. Les dépôts électrolytiques d'argent et les sous couches d'or de quelques milliers d'Angströms ont été ensuite réalisés à l'IAS : de tels dépôts bloquent les reculs émergents mais laissent passer les éventuels alphas implantés par les descendants du radon ($^{210}\text{Po}, \dots$), ce qui ressemble assez aux données (absence de concentration vers 100keV).

EDELWEISS-II reporte un taux de comptage alpha $A \sim 4.7 \pm 0.2 \mu\text{Bq/cm}^2$ sur un cuivre livré seulement « nettoyé » par l'industriel, tandis que ce taux tombe à

⁵⁶ Cette valeur calculée ici « à la louche » est certainement affectée d'une très grande erreur statistique vu le faible nombre d'événements reportés.

$A \sim 0.1 \pm 0.02 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$ pour un cuivre fraîchement décapé à l'acide⁵⁷. On retrouve un taux que l'on peut déduire d'une publication de CRESST avant application de la feuille de polymère scintillante: le couple de détecteurs Daisy/BE13 (avec réflecteur Cu/Ag) relevait au terme de 12.3 kg.jours (run « 27 ») une contamination surfacique du cuivre en ^{210}Po , que j'ai estimée à $A \sim 0.2 - 0.5 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$ en comptant les événements reportés⁵⁸. Ces taux sont enfin à comparer à ceux, deux à trois fois meilleurs, reportés par CUORICINO, après des années d'études de traitement visant à réduire la contamination de surface alpha de leur cuivre, qui est la principale responsable de leur bruit de fond, $A \sim 0.049 \pm 0.019 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$ (U238) et $A \sim 0.034 \pm 0.013 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$ (Th232)⁵⁹. Si mon interprétation est la bonne pour le fond de ROSEBUD-II –des alphas dégradés de surface– nous n'en sommes qu'à un facteur 400...

On peut citer un autre argument en faveur de cette interprétation : Claudine Goldbach et Gérard Nollez ont mesuré en 2005, sur le banc HPGe Gentiane de la collaboration EDELWEISS au LSM, le kit constitué du bolomètre de 50g en saphir B213 –celui de ROSEBUD-I– et de son bolomètre optique (B285)⁶⁰ : l'ensemble a été jugé suffisamment peu radioactif pour être monté sur EDELWEISS-I, et ne pas perturber les bolomètres Germanium de la collaboration. L'équipe de l'IAP a détecté la présence de ^{210}Pb via sa raie γ à 46.5keV : interprétée en activité de surface des détecteurs, cette contamination du cuivre s'élève à $45 \pm 30 \mu\text{Bq}/\text{cm}^2$, un chiffre en très bon accord avec l'estimation précédente. Rappelons que ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22$ ans), descendant du radon, ^{222}Rn est le « grand père » de ^{210}Po , émetteur alpha à 5304 keV, qu'on devrait voir se désintégrer avec la même activité de surface. Nous sommes peut être, comme bien d'autres avant nous, en train de voir ^{210}Po implanté...

⁵⁷ X.F.Navick for the EDELWEISS Collaboration, *Surface Contamination by Radon Daughters Measured by Ionization-Heat NTD Germanium Detectors*, J. Low Temp Phys (2008) 151:891-895

⁵⁸ G.Angloher et al., *Limits on WIMP dark matter using scintillating CaWO_4 cryogenic detectors with active background suppression*, Astroparticle Physics 23 (2005) 325. Se reporter à la figure 8 de cet article. Voir également la figure 3 de Lang R.F. et al. (2010), *Op. Cit.*

⁵⁹ Silvia Capelli, *Background analysis of the experiments MiDBD, CUORICINO and CUORE*, Thèse de l'Université de Milan, 2005

⁶⁰ C. Goldbach & G. Nollez, *Communication personnelle, 1^{er} décembre 2005*

4. Chemins de traverse bolométriques...

4.1. Bolométrie 4π

Une collaboration scientifique s'est mise en place en 2000 entre notre équipe et l'équipe de Philippe Cassette et Elvire Leblanc du LNHB, avec qui nous partageons notre savoir faire cryogénique, tandis qu'ils nous faisaient profiter de leur maîtrise dans la fabrication des sources. Un des objectifs de cette collaboration était l'étude de la faisabilité de bolomètres « 4π » stéradians, destinés aux mesures d'activité de solutions radioactives. De telles mesures sont parmi les missions principales du LNHB, en tant que Laboratoire Primaire des Rayonnements Ionisants. La source à étudier a été évaporée dans un **micro-bolomètre ($m \approx 100\text{mg}$) creux en Ge**, qui a été ensuite **scellé**. Cette encapsulation devait permettre de ne rater aucun des produits de la désintégration étudiée, quelque soit sa nature. En effet, une capture électronique comme celle de ^{55}Fe produit soit des électrons (80%), soit des X (20%). Les bolomètres sont les seuls détecteurs capables de réaliser la spectroscopie de ces deux types d'émission dans le même temps. Nous avons démontré les extraordinaires potentialités de cette technique au cours d'une série très originale d'expériences après réalisation de 4 détecteurs : nous avons mis en évidence des phénomènes de mauvaise thermalisation des électrons dans certains dépôts, avec un allongement consécutif des constantes de temps. Nous avons surtout pu retrouver l'activité de la source déposée (3.99 ± 0.09 Bq mesuré contre 4.07 ± 0.02 Bq attendu !).

Ces résultats ont été présentés dans une conférence de métrologie des radionucléides en 2001 ^[32] : ils pourraient ouvrir la voie aux bolomètres dans les laboratoires de métrologie, qui ne disposaient pas de nouvelle méthode de calibration des solutions depuis plus de 20 ans. Ils pourraient également déboucher à terme vers des mesures de constantes physiques fondamentales des noyaux radioactifs (probabilité de créations de lacunes K, L, M ; rendements Auger...).

4.2. De l'usage des contaminations : corrélations lumineuses dans SrF_2 (Figures 34, 35 & 36)

Le fluorure de strontium pur SrF_2 est un scintillateur 300K bien connu, particulièrement intéressant à cause de son contenu en ^{19}F : le fluor-19 présente la plus forte section efficace spin-dépendante attendue sur les neutralinos. Le premier prototype testé à 20mK a révélé une très bonne séparation gamma/alpha ($Q_{\gamma/\alpha} \sim 4.7$) et un rendement lumineux moyen : le rendement de collecte sur la branche des électrons de reculs est estimé à 0.3% (Figure 34). Nous avons malheureusement relevé dans ce bolomètre de 54g en SrF_2 un niveau

élevé de contamination attribuées aux descendants à l'équilibre du radium— ^{226}Ra (580mBq/kg) et ^{224}Ra (26mBq/kg)— grâce à la présence d'une source externe de calibration en ^{241}Am . Les raies alphas observées sont liées à la contamination interne en Radium, tandis que la structure oblique à haute énergie de la Figure 34, est liée à l'enregistrement en coïncidence par le détecteur de la cascade « BiPo » $\beta+\alpha$ ($^{214}\text{Bi}\rightarrow^{214}\text{Po}\rightarrow^{210}\text{Pb}$). Le niveau élevé de contamination exclut bien entendu ce détecteur pour toute expérience « Matière Noire », mais nous a permis de faire une observation originale et pleine d'enseignements : l'analyse de la dispersion de lumière des signaux optiques révèle visiblement une dispersion moindre pour la source interne ^{241}Am , dont les alphas sont absorbés localement en surface, que pour les contaminants internes, dispersés de façon homogène dans le volume du détecteur (Figure 35). C'est le premier signe d'une contribution géométrique, locale, à la dispersion du signal optique dans nos détecteurs. Le repérage sans ambiguïté des paires de la cascade $^{224}\text{Ra}\rightarrow^{220}\text{Rn}(56\text{s})\rightarrow^{216}\text{Po}$ dans les données (Figure 36) nous permet de tester cette hypothèse : lors des désintégrations, les noyaux fils s'implantent à quelques 100Å du noyau père et les signaux lumineux associés aux désintégrations du père et du fils sont donc issus pratiquement du même point dans le cristal. Le rapport des intensités lumineuses père/fils des paires identifiées est représenté sur la figure discutée, et la distribution des rapports est relativement fine. Lorsque les paires sont prises au hasard dans les distributions « père » et « fils », ce qui se fait par exemple par un « renversement du temps » en sélectionnant les désintégrations ^{220}Rn suivies de ^{224}Ra , paires qui n'ont alors aucune réalité physique, la distribution du rapport des intensités est notablement élargie.

Ce test simple, inédit à notre connaissance, permet de certifier qu'une part de « localisation » entre dans la largeur des distributions des signaux optiques, liée, soit à des effets purement géométriques (dans le cas, par exemple, où les photons émis sont fortement réabsorbés par le cristal lui-même), soit à des effets physiques (dans le cas d'inhomogénéité d'impuretés potentielles jouant le rôle de centres lumineux).⁶¹

4.3.Spectroscopie haute résolution alpha (Figure 37)

La spectroscopie alpha à haute résolution semble bien loin des préoccupations des chasseurs de matière noire : c'est pourtant par ce biais que la bolométrie sur particules est entrée dans l'équipe de l'IAS avec une résolution spectaculaire pour l'époque de 36 keV FWHM à 5-6 MeV sur un bolomètre à cible diamant, fonctionnant à 1.3 K⁶². (^4He pompé). Nous avons entrepris d'améliorer cette résolution en descendant à beaucoup plus

⁶¹ Présenté à RPSCINT'08, à Kiev, en septembre 2008 (N. Coron et al., *Op. Cit.*)

⁶² N. Coron et al., *A composite bolometer as a charged-particle spectrometer*, Nature 314 (1985) 75 - 76

basse température dans le cadre d'un partenariat poursuivi pendant des années tant dans le domaine de la résolution en X que dans celui de la résolution alpha avec le Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB), ex LMRI, de Saclay. Le LNHB est le laboratoire national de métrologie dans le domaine des rayonnements ionisants : il est chargé de la réalisation des références dans le domaine des rayonnements ionisants. C'est à ce titre qu'il s'est intéressé aux bolomètres comme technique potentielle à haute résolution alpha, dans l'espoir de démêler plus facilement et plus rapidement les spectres complexes des isotopes de l'Uranium, du Plutonium,...^[56]. Rappelons que les meilleurs détecteurs conventionnels au Silicium ont une résolution plancher ≈ 9 keV FWHM sur des alphas de 5 MeV, tandis que les mêmes détecteurs commerciaux affichent plutôt couramment 20 keV : cette résolution limite est liée principalement au straggling dans l'électrode de la diode Si qui fait face à la source.

Les bolomètres n'ont pas ces problèmes de perte d'énergie en surface : c'est ce que nous avons montré au terme d'une étude menée avec le LNHB, avec un bolomètre à cible Cuivre (référence IAS : B306) capable d'une résolution de 3.1 ± 0.3 keV à 5.5 MeV, estimée d'après le flanc haute énergie des raies d'une source électrodéposée de ^{238}Pu , externe^[45] (Pub#2 et [Figure 37](#)). Les bolomètres accédaient ainsi à la spectroscopie alpha à « mieux que le 1% » tout comme ils l'ont fait en spectroscopie X, gamma, ... Le choix de la nature de la cible a été primordial, puisqu'on attend très peu de stockage d'énergie dans le cuivre : ce que nous avons payé en chaleur spécifique nous a aidé à tirer la résolution au maximum. On notera que les résolutions « ligne de base » de ce détecteur sont très encourageantes (600eV FWHM) de sorte qu'une source alpha interne –en sandwich dans deux feuilles de cuivre laminées ?– nous permettrait peut-être de passer sous la barre de 1 keV FWHM sur les raies... De fait, une résolution exceptionnelle de 1.06 keV FWHM estimée d'après le flanc haute énergie du spectre d'une source de ^{210}Po a été reporté récemment par une équipe du NIST (microcalorimètre à absorbeur Sn supra et à lecture TES à 85mK)⁶³.

Notons enfin, que développer une expertise haute résolution alpha est également intéressant pour la spectroscopie que nous proposons des neutrons rapides via leur

⁶³ Horansky et al., *Superconducting calorimetric alpha particle sensors for nuclear nonproliferation applications*, Applied Physics Letters 93, 12 (2008) 123504 - 123504-3. Faisant le bilan des différentes contributions connues à la résolution, l'équipe du NIST pense avoir rencontré pour la première fois la limite ultime de résolution alpha dans les solides, liée aux fluctuations statistiques du nombre de paires de Frenkel créées (\equiv une lacune et un atome en site interstitiel, suite au déplacement des atomes de la maille cristalline par l'alpha en fin de parcours)

réaction de capture sur ${}^6\text{Li}$ à 4.78 MeV, car les domaines d'énergie sont les mêmes (4.5MeV-10MeV) et les chaînes et techniques d'acquisition transposables.

4.3.1. La contrepartie « reculs », une source très intéressante, encore ignorée...

Les sources alphas sont également des sources de recul : c'est une évidence qui est réapparue avec les bolomètres, capables de mesurer des particules très peu ionisantes, comme des ions lourds de quelques keV. Ces reculs peuvent d'une certaine manière simuler à faible coût les reculs de noyaux suite à la diffusion élastique de neutrons ou de Wimps. Par exemple, un recul de 103 keV d'un noyau de ${}^{206}\text{Pb}$ (suite à la désintégration alpha de ${}^{210}\text{Po}$) engendrera une cascade de collisions et d'ionisations très proche de ce que provoque un recul de 103keV de ${}^{209}\text{Bi}$ dans le BGO (cf. la thèse d'Ysraël Ortigoza pour une application avec ${}^{241}\text{Am}$ et les reculs de ${}^{237}\text{Np}$ ⁶⁴). La seule différence étant dans la localisation en surface des événements collectés – 100Å à 200Å selon l'énergie et le cristal irradié– qui ne permet pas de tester le cristal en volume. Cette particularité des reculs d'émetteurs alphas n'est jusqu'à présent pas du tout exploitée (faute de détecteurs appropriés), mais je crois qu'elle a un bel avenir dans deux domaines :

- a) *en métrologie de précision*, dans la fabrication de sources alphas ultra-fines. Le spectre des reculs est beaucoup plus sensible que le spectre alpha à l'épaisseur de la source. Un catalogue croisé des spectres reculs/alphas –encore à construire !– permettrait de qualifier une source haute résolution alpha par une mesure du spectre des reculs seul, et de garantir la source α pour meilleure que tant de ‰, sans avoir à la mesurer sur une chaîne alpha du « dernier cri ».
- b) *pour la caractérisation de matrices de bolomètres*. Les reculs de 100keV, comme ${}^{206}\text{Pb}$ issu de ${}^{210}\text{Po}$, sont la seule excitation capable de délivrer un signal mono-énergétique élevé, et de s'implanter dans de très fines épaisseurs. Une source étendue de ${}^{210}\text{Po}$ permettrait de tester très simplement l'homogénéité de la réponse d'un détecteur sub-mm ou matriciel qui utiliserait un support membranaire pour l'isolation thermique et la sensibilité : dans la course vers des $\text{NEP} < 10^{-18} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$, ou vers des résolutions X de quelques eV, on cherche des détecteurs les mieux découplés possible, et le recours aux structures (sub-)microniques devient courant. Les détecteurs de Planck-HFI, par exemple, utilise une structure toile d'araignée en nitrure de Silicium (Si_3N_4) de

⁶⁴ Ysraël Ortigoza, thèse (*Op. Cit.*)

1 μ m d'épaisseur⁶⁵, qui n'a pas été testée bras par bras, faute d'excitation disponible.

Nos bolomètres en saphir scintillants sont parfaitement capables de révéler les spectres de reculs, sans bruit de fond gamma/électrons associé en raison de leur pouvoir discriminant et pourraient servir à qualifier une telle source de ²¹⁰Po étendue (Pub#5)^[52].

4.4. Discrimination dans un petit cube de quartz (SiO₂) (Figures 38 & 39)

Grâce à la configuration de bolomètre modulaire (cf. Figure 4) nous avons pu tester avec succès la fluorescence du quartz SiO₂, qui, de moins de 10⁻⁵ à 300K atteint 2% à 20mK sur gammas (Figures 38 & 39). Ces figures illustrent l'usage très général qui peut être fait de ce montage : les événements dans la cible sont plus lents car ils doivent franchir plusieurs interfaces (dans le cas présent, 2 collages époxy et un assemblage à la cire, qui représentent chacun une résistance thermique supplémentaire « de Kapitza ») avant de réchauffer le senseur : ils sont sélectionnés par leur constante de temps lors des irradiations internes alpha (²⁴¹Am), et externes (⁶⁰Co). Le facteur de discrimination de la fluorescence (•/•) du quartz est de 1.7 à comparer avec un facteur de 2.4 à 10 dans les différents types de saphir, Kyropoulos ou Verneuil. Le quartz est un matériau très intéressant, pour les mêmes raisons que le Germanium : des qualités de quartz de très haute radio-pureté existent probablement, favorisées par l'extrême degré de pureté atteint par la filière silicium.

4.5. Spectroscopie haute résolution des neutrons rapides (Figures 40, 41 & 42)

Nous avons repris récemment, à la faveur de ROSEBUD-II et d'une bourse de thèse BDI CNRS accordée à Johann Gironnet, l'idée d'une spectroscopie des neutrons rapides par bolomètre à cible lithiée, que j'avais proposée en 1993 lors de ma propre thèse^{[6],[9]}. Rappelons que ces neutrons (énergies typiques de 10keV-20MeV) constitueront probablement le fond ultime des expériences de détection de la matière noire, en donnant un signal de recul identique en tout point à celui attendu. Ces neutrons donnent déjà du fil à retordre aux simulateurs des fonds relevés en souterrain, et je pense personnellement qu'on ne pourra pas indéfiniment simuler ces fonds sans n'avoir jamais mesuré de neutron rapide....

⁶⁵ Bock J.J. et al., *Infrared Bolometers with Silicon Nitride Micromesh Absorbers*, Submillimetre and Far-Infrared Space Instrumentation, Proceedings of the 30th ESLAB Symposium held in Noordwijk, 24-26 September 1996. Edited by E.J. Rolfe and G. Pilbratt. ESA SP-388. Paris: European Space Agency, 1996., p.119

Le principe simplissime de la spectroscopie :

$$E_{\text{bolo}} = 4.784 \text{ MeV} + E_n$$

a été validé en juillet 2009 sur l'installation AMANDE de l'IRSN à Cadarache (**Figure 40**) au moyen d'un bolomètre de 0.53g en ${}^6\text{LiF}$ (enrichissement 95% en ${}^6\text{Li}$) refroidi à 400 mK⁶⁶. Nous recouvrons l'énergie de neutrons incidents délivrés par AMANDE avec une précision meilleure que 2% sur la gamme 50keV→17MeV –le traitement du point $E_n=1200\text{keV}$ est détaillé en **Figure 41**– et une résolution de 40 keV à 200 keV FWHM sur toute la gamme d'énergie explorée (*thèse de Johann Gironnet, en cours*).

Le principe spectroscopique une fois validé à 400 mK est extrapolable à 20mK⁶⁷ : Etant plus froid, on peut alors disposer de cibles beaucoup plus massives, pour des performances spectroscopiques identiques, *a priori*. Dans cet esprit, nous avons entrepris une collaboration avec l'ICMCB de Bordeaux (équipe de Matias Vélazquez) qui a su tirer en 2009 un cristal de 33g en ${}^6\text{LiF}$, apparemment sans défaut, qui est en cours de montage bolométrique à l'IAS (Cf. photo de la **Figure 42**). Un tel cristal nous permettra d'augmenter l'efficacité de détection des neutrons par un facteur 12 (**Figure 42**) C'est l'ordre de grandeur qui nous manquait pour nous permettre de conclure sur une origine neutrons au fond relevé par ROSEBUD-II en 2006-2007 dans nos bolomètres en saphir et en BGO (cf. **Figure 33**).

4.6. Une petite incursion du côté du $\beta\beta 0\nu$: un bolomètre discriminant en TeO_2

(**Figure 43**)

Une discrimination « Lumière/Chaleur » a été relevée lors d'une mesure réalisée à l'IAS sur un bolomètre de 25g en **oxyde de tellure (TeO_2)**, sous irradiation ${}^{252}\text{Cf}$ (**Figure 43**) à 20mK : moyennant un détecteur optique extrêmement sensible, il paraît possible de séparer alphas et gammas au niveau de la raie de désintégration de ${}^{130}\text{Te}$.

Le niveau de fond relevé par la collaboration CUORICINO au niveau de la raie $0\nu\beta\beta$ de ${}^{130}\text{Te}$ est de 0.18 ± 0.02 c/keV/kg/an, avec une contribution dominante d'alphas de surface dégradés en énergie de 0.11 c/keV/kg/an (soit ~60% du fond) estimée par extrapolation de la

⁶⁶ Le principe a également été validé par une équipe américaine du LLNL, qui a d'ailleurs déposé un brevet en nov. 2008 et construit un spectromètre commercial à base de bolomètre 100mK en ${}^6\text{LiF}$ baptisé UltraSpec (Niedermayr T. et al., *Unfolding of cryogenic neutron spectra*, NIMA 579(2007) 165-168 & US Patent 7446314 : Superconducting gamma and fast neutron spectrometers with high energy resolution)

⁶⁷ on ne voit pas ce qui pourrait changer quoique ce soit de radical dans les interactions des produits de la réaction, alpha et tritium, entre ces deux températures...D'ailleurs, notre bolomètre de 33g en LiF naturel, exposé au Canfranc à une source ${}^{252}\text{Cf}$, lors de la campagne ROSEBUD-II retrouvait la résonance de la réaction de capture $n+{}^6\text{Li}$ à l'énergie attendue, 240keV.

mesure du fond alpha à plus haute énergie⁶⁸ : notre observation prend alors tout son intérêt, en permettant à CUORICINO de se débarrasser d'une bonne partie de son fond. Le signal est très faible –avec dans notre cas un rendement de collecte sur gammas $\sim 4 \cdot 10^{-5}$: c'est sans doute la raison pour laquelle la collaboration CUORICINO a essayé de doper le TeO_2 avec Nb et Mn, mais sans succès. Une approche autrement prometteuse est celle qui consisterait à changer de cible double bêta : c'est l'approche suivie par Stefano Pirro au LNGS, qui a identifié en 2010 comme cibles potentielles PbMoO_4 , ZnSe , CdMoO_4 , SrMoO_4 , CdWO_4 , CaF_2 , CaMoO_4 , & ZnMoO_4 (R&D INFN BoLux et projet Européen Lucifer) : tous ces cristaux scintillants font preuve d'une excellente discrimination à froid et permettraient des mesures $0\nu\beta\beta$ sans fond alpha.

Il a été récemment avancé que le signal relevé dans ce détecteur pourrait être dû au rayonnement Cerenkov⁶⁹, qui, rappelons-le, ne se manifeste que lorsque la particule considérée se déplace plus vite que la lumière dans le cristal. Ce mécanisme est potentiellement extrêmement intéressant pour les scintillateurs double beta. Ainsi, le seuil d'émission Cerenkov dans le TeO_2 ($n=2.4$) est $\sim M/10$, soit 50 keV pour des électrons et 400 MeV pour des alphas. Le signal sur les électrons semble compatible avec l'émission Cerenkov faite par l'auteur, mais nous avons reporté un signal faiblissime mais non nul sur les alphas de 5.5MeV : il est donc possible qu'il s'agisse bien de scintillation. Le signal de lumière alpha aurait pu être capté par diaphonie, bien que des mesures dédiées (inversion d'une polarisation) aient semblé l'exclure. Malheureusement, ce détecteur a été retrouvé cassé en fin de run, et a dû être démonté pour récupérer le senseur. C'est une manip à refaire...

4.7. Bolomètres submillimétriques pour la calibration de Planck-HFI (Figures 44, 45 & 46)

Nous avons construit, testé et caractérisé complètement à 300 mK deux bolomètres originaux baptisés Bolomètre de Référence (Bol#292) et Bolomètre Etalon (Bol#294), destinés à l'étalonnage dans la cuve Saturne de l'IAS des sources de calibration des prototypes de qualification et de vol de Planck-HFI (Figure 44).

Ces prototypes de bolomètre submm, comportent comme nouveauté une résistance de chauffage de $20\text{k}\Omega$ collée sur le bouclier. L'idée originale de ce montage est de pouvoir remonter très simplement à la puissance absolue optique absorbée par le détecteur, en

⁶⁸ C. Brofferio et al., *CUORICINO status and CUORE prospects*, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 145 (2005) 268-271

⁶⁹ T. Tabarelli de Fatis, *Cerenkov emission as a positive tag of double beta decays in bolometric experiments*, Eur. Phys. J. C (2010) 65: 359–361

injectant une puissance Joule reproduisant le point de fonctionnement du bolomètre. La chaleur spécifique de la résistance (un chip commercial monté sur Silicium) a été réduite au minimum de ce que la technologie IAS permet. La perte de sensibilité correspondant à cette chaleur spécifique additive est à mettre en balance avec l'intérêt d'un tel montage pour une détermination absolue de la réponse du détecteur. Les tests de calibration dynamique ont montré qu'on retrouvait avec une précision meilleure que 1% l'énergie dissipée consécutive à la thermalisation de particules alphas (source ^{241}Am ; réponse DC déduite $S_0 \approx 7.23 \cdot 10^7 \text{ V/W}$) en injectant une puissance Joule dans la résistance (réponse DC déduite $S_0 \approx 7.19 \cdot 10^7 \text{ V/W}$), ce qui validait la méthode « Joule » (Figure 46). Par ailleurs des tests optiques, avec une source constituée d'un corps noir et une géométrie bien définie, ont montré qu'on retrouvait bien par la résistance chauffante la puissance absorbée avec une indétermination inférieure à 10%. Notons enfin comme autre originalité la présence d'une fibre optique dans la sphère d'intégration du bolomètre : les signaux issus de LED et transportés par la fibre sont une source facile d'excitation des détecteurs, non diaphonique et ne présentant aucun risque de faire fondre le détecteur, à la différence des signaux injectés sur la résistance chauffante !

Les analyses détaillées de ces détecteurs ont été faites dans un premier temps avec notre électronique standard (polarisation continue ; électronique IAS 3Hz-100kHz). Les deux détecteurs ne présentent aucune anomalie de modélisation. Néanmoins, les constantes de temps effectives relevées, trop importantes au départ, ont été « accélérées » pour se rapprocher des fréquences de modulation envisagées (10 Hz), et les bolomètres retouchés en conséquence. Le bolomètre le plus rapide (Bol#294) a finalement une fréquence de coupure haute voisine de 3Hz.

Dans un deuxième temps il m'était demandé de faire fonctionner ces détecteurs avec un module électronique développé par le CESR (polarisation alternative en créneaux et triangles, également adoptée à présent par EDELWEISS) et le soft accompagnant (EGSE), deux éléments prévus lors des manip d'étalonnage de Planck. Les composants du boîtier des JFETS refroidis ont été adaptés pour la température de fonctionnement des bolomètres (300mK) et les courants de polarisation correspondants. J'ai passé pas mal de temps (plusieurs semaines...) à essayer de déboguer un montage électronique défectueux avant de comprendre que les pistes internes du circuit, sous traitées, se court-circuitaient en de nombreux points lors des soudures des composants. Après reconstitution de ces pistes en surface, le montage s'est mis à marcher : il a été validé (VIs identiques dans les deux méthodes), puis livré tel quel avec les deux bolomètres Référence et Etalon à l'équipe de calibration de Planck HFI en mai 2004.

J'ai calculé et fait réaliser par IR-Lab deux cornets concentrateurs, de type paraboliques-cônes, montés actuellement sur ces deux détecteurs, et répondant aux exigences de calibration (étendue de faisceau 9mm^2 , angle d'acceptance 15°) des détecteurs de Planck HFI.

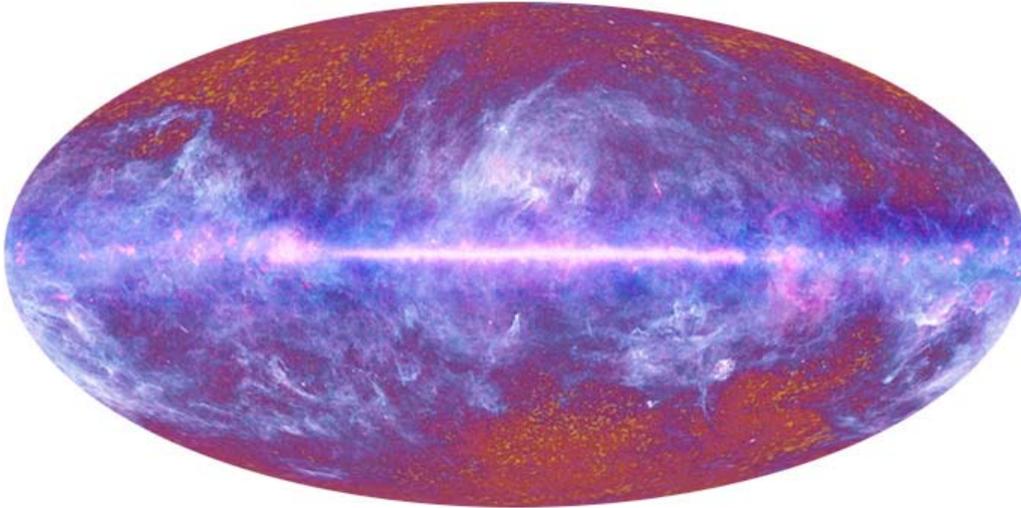
Le bolomètre « Etalon », devait mesurer la puissance reçue au plan focal de Planck- à la position de pixels caractéristiques de Planck HFI. Il n'a pu finalement être utilisé : il supposait une descente en froid dédiée, que les différentes péripéties de la calibration (fuite, retard, calendrier tendu) ont rendu impossibles. Par contre le bolomètre « de Référence », installé dans la cavité intégratrice du cryostat Saturne de l'IAS, a joué pleinement son rôle : il a permis d'estimer les facteurs de transmission spectrale des pixels de Planck-HFI^{[57],[58]} (Figure 45). C'est une donnée essentielle pour une soustraction correcte des avant-plans du CMB, qui est la difficulté majeure de cette expérience.

Planck-HFI a été tiré avec succès par l'ESA le 14 mai 2009 de Kourou. Le consortium vient de fournir son premier relevé complet du ciel dans les longueurs d'onde submm : c'est une image spectaculaire du ciel à laquelle les modestes bolomètres de notre équipe auront contribué...

En dehors de ces mesures, j'ai rédigé en 1995 un rapport interne IAS sur l'adéquation des bolomètres submm construits dans l'équipe aux contraintes du projet Planck, qui s'appelaient alors Cobra/Samba⁷⁰. La conclusion était que 300 mK était une température insuffisante, et qu'il aurait fallu absolument refroidir ces détecteurs à 100 mK s'ils avaient été retenus. Le choix d'une technologie de détecteurs a été fait peu après (avec le choix judicieux des « bolomètres araignées » de Caltech : leur faible coefficient de remplissage géométrique leur permettra en 2009 d'être relativement insensibles aux rayons cosmiques, qu'ils ont rencontrés en abondance une fois en orbite au point de Lagrange L2). J'ai ensuite rédigé une lettre⁷¹ adressée à l'équipe américaine pour les alerter d'une valeur trop optimiste de la chaleur spécifique du Ge-NTD, avec les éléments bibliographiques et les mesures internes à l'équipe dont je disposais : la sensibilité prévue des détecteurs de Planck-HFI a dû en être corrigée, avec des conséquences importantes sur le dimensionnement de l'expérience (moins de sensibilité signifie plus de temps de pose pour le même objectif visé en $\Delta T/T$).

⁷⁰ P.de Marcillac, « NEP intrinsèques des bolomètres IAS selon la technologie au point en 1995 », Rapport interne IAS, mars 1995. Disponible sur demande.

⁷¹ Lettre à A.E.Lange (UC Berkeley) du 18 février 1995 : l'équipe américaine indiquait une valeur ~ 1000 fois trop faible pour la chaleur spécifique du Ge-NTD ($C_{\text{el}}=2.0 \cdot 10^{-9} \text{ T en } \text{J.K}^{-1}.\text{cm}^{-3}$). L'erreur, commise dans la référence D.C.Alsop et al., « Design and construction of high sensitivity infrared bolometers for operations at 300mK », Applied Optics 31, 1 (1992) 6610 s'est propagée dans J.J. Bock et al., « A novel bolometer for infrared and millimeter-wave astrophysics », Space Science Reviews, Volume 74, Numbers 1-2, (1995) 229-235. Bien que l'équipe américaine ait reconnu son erreur, elle n'a pas demandé la publication d'un correctif...



Premier relevé du ciel par Planck HFI (5 juillet 2010)

Le signal du CMB se détache aux hautes latitudes galactiques. On peut apprécier sur cette carte l'importance d'une séparation correcte des différentes composantes spectrales pour en déduire le fond microonde sous-jacent, lequel recèle toute l'information cosmologique (© ESA, LFI & HFI Consortia)

5. Perspectives bolométriques

5.1.A court terme : compréhension des événements « de reculs » de ROSEBUD-II au LSC

5.1.1. Mesures au LSM sur EDELWEISSII (Figures 47 & 48)

Notre priorité « matière noire » est la compréhension des événements détectés dans la zone des reculs de ROSEBUD-II pour le saphir et le BGO en 2007.

En association avec l'équipe EDELWEISS nous avons testé en 2006 un bolomètre scintillant en saphir (B213) du même lot que celui du Canfranc (B274), monté sur la platine supérieure du banc EDELWEISS (Figure 47): la discrimination lumière/chaleur a été effectivement reportée au LSM, et les caractéristiques des bolomètres IAS retrouvés au LSM. Le bolomètre chaleur en saphir souffrait cependant d'une oscillation à 111 Hz, et le bolomètre optique, très microphonique a empêché toute mesure pertinente « matière noire » à bas seuil (le meilleur seuil relevé au LSM étant $\sim 100 \text{ keV}_{\text{équivalent électron}}$ sur cette voie). Les meilleures performances ont été obtenues lorsque les *pulse tubes* du réfrigérateur étaient OFF, une configuration qui n'est pas envisageable très longtemps !⁷²

Des améliorations visant l'amélioration du découplage mécanique des *pulse tubes* ont été réalisées depuis dans le cadre de la mise à jour EDELWEISS-II, et, suite aux mesures ROSEBUD-II de 2007, nous avons proposé à la collaboration un jeu de 3 bolomètres doubles incluant 2 des bolomètres testés au Canfranc : 50g saphir (B274), 33g LiF (B303) et un

⁷² Voir la thèse de Melisa Luca (*Op. Cit.*) pour un compte rendu détaillé de cette expérience.

nouveau détecteur de 91g en BGO de qualité radio-pur, jamais testé en souterrain. L'objectif de ce nouveau run était triple, nos détecteurs bénéficiant des temps de pose exceptionnels permis par l'installation du LSM (un réfrigérateur actif pendant des mois !), avec les problèmes suivants à résoudre, classés par ordre de priorité :

1. *Comprendre les événements de reculs de la campagne ROSEBUD-II*, en les confirmant, puis en identifiant d'éventuelles raies alphas associées.
2. *Contribuer à une meilleure connaissance du fond de neutrons rapides in situ* grâce au bolomètre de 33g en LiF (mesures de fond ou de calibrations par la source Am-Be du LSM)
3. *Améliorer la mesure de la durée de vie de ^{209}Bi* , qui avait été établie après une dizaine de jours d'intégration seulement à l'IAS, et éventuellement sortir la raie alpha de la désintégration vers le excité à 204keV de ^{205}Tl , beaucoup plus rare.

Le jeu de bolomètres IAS a été démonté en mai 2010 pour faire la place à la nouvelle génération de bolomètres Germanium FID (Full InterDigit), et les deux premiers objectifs ne seront probablement pas atteints. Bien que les réponses—en nV/keV—au LSM soient compatibles avec celles de l'IAS ou du Canfranc— à températures et points de polarisation équivalents— le niveau de bruit était moins bon. En raison d'une source de microphonie non identifiée, les bolomètres chaleurs en saphir et BGO accusaient une perte de Signal sur Bruit d'un facteur 10, et les bolomètres optiques une perte d'un facteur 5 (Figure 48). Ces performances qui rendent illusoire toute exploitation « Matière Noire » du temps de pose au LSM, ne permettent pas d'avancer dans la compréhension du fond du détecteur B274 (50g saphir), étant donné, par exemple, l'impossibilité de séparer les branches alphas et la branche des reculs. Le bolomètre 33g LiF pour sa part a été retrouvé endommagé, avec un capteur décollé, à son retour à l'IAS⁷³: le décollage s'est probablement produit en début de run, pour une raison que nous ignorons (choc mécanique pendant les voyages Canfranc→IAS→LSM→IAS, choc thermique,... ?) : ce détecteur n'a pas vu un seul neutron, et en particulier, il s'est montré complètement insensible pendant les runs de calibration Am-Be !

Le bilan de ce run reste cependant à établir (un rapport est en cours du côté IAS) et peut-être pourra-t-on finalement dire quelque chose de plus concernant la désintégration de ^{209}Bi , après filtrages numériques appropriés ? Le run a permis de mettre en évidence les

⁷³ En principe, une mesure fine de la constante de temps devrait permettre de dater le décollage (les VIs pour leur part sont inchangés)

sérieux problèmes d'adaptation de nos détecteurs –rapides par construction– à une polarisation triangle et carré (alternative et synchrone) opérant à 1kHz : en raison de cette mésadaptation, beaucoup d'information est perdue sur la nature des événements enregistrés. Ce test devrait alimenter la réflexion sur la lecture des futurs détecteurs d'EURECA.

5.2. R&D recherche de nouvelles cibles

5.2.1. Spectromètre à fibre optique 1.4 K-300 K (Figures 49 & 50, Tableau 7)

Dans le but d'étudier et de sélectionner les matériaux scintillants par leurs propriétés à 4K plutôt qu'à 20mK, nous avons réalisé en 2007 un spectromètre à fibre optique, utilisant un des cryostats hélium CDL4 (CDL= « Coron–Dambier–Leblanc ») conçus par l'équipe « CDL » de l'IAS dans les années 1980s (Figure 49). Les échantillons sont thermalisés dans des cavités à revêtement réflecteur Cu/Ag et regardent le mini faisceau issu d'un micro tube X (type Moxtek, 40kV, 100µA) à travers une feuille d'aluminium de 13µm –qui ferme la cavité– et la fenêtre d'entrée du cryostat, en Beryllium mince. Le spectre d'émission est transmis via une fibre optique à l'extérieur du cryostat, et analysé par un spectromètre à fibre commercial 200nm-1100nm de la marque AVANTES (Figure 50), ou mesuré par une photo diode silicium, pour les études de variations de rendement avec la température. Cette méthode rapide nous a permis de dégrossir les propriétés de matériaux comme le LiF pur, irradié ou non, CaF₂, le borates de lithium et d'euporium (Tableau 8) ou plus récemment le borate de lithium et de gadolinium, le gypse CaSO₄(2H₂O),... et devrait être appliquée systématiquement au saphir pour prendre la suite des mesures de l'IPNL⁷⁴. La difficulté dans le cas d'émission faible aux températures considérées est dans le couplage optique de la fibre dans la cavité, qui demande des propriétés exceptionnelles de réflectivité étant donné la surface de collection de la fibre (~mm²) par rapport à la surface de la cavité (~quelques cm²). J'espère également avoir l'occasion d'intégrer dans un tel montage une excitation alpha –mais il faudra une source de très forte activité !– pour pouvoir enfin comparer les spectres d'émission alpha et gamma à froid, qu'aucune équipe n'a sorti jusqu'à présent.

5.2.2. Etude de nouvelles cibles lithiées (Figure 51)

Un des problèmes du LiF pour la spectroscopie de neutrons rapides « sans bruit de fond » est la faiblesse de l'émission lumineuse (le rendement de collecte sur gammas est ~0.4%, et ~10⁻⁴ seulement sur les produits de la capture ou les alphas ; cf. Figure 29), alors que la plupart des cristaux scintillants à froid ont montré un rendement de collecte proche de 10⁻³ sur les alphas. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés au borate de

⁷⁴ thèse de Melisa Luca, *Op. Cit.*

lithium et d'euporium, $\text{Li}_6\text{Eu}(\text{BO}_3)_3$ après avoir été contactés par Fedor Danevich (INR Kiev) sur l'intérêt de ce cristal, pour confirmer par la voie bolométrique la mesure de la demi-vie de ^{151}Eu ⁷⁵. Disposant à un échantillon de 2g donné par Kiev, nous avons mené une étude en 2009 sur la spectroscopie d'émission à froid sous irradiation X grâce au montage décrit précédemment : cette étude a montré une émission de lumière importante sous X, augmentant à froid. Nous avons alors découpé un petit cube de 3mm de côté dans cet échantillon, et l'avons étudié à 20mK, sous l'irradiation ^{252}Cf d'une source externe, intégré sur un bolomètre à cible démontable, comme nous l'avons fait pour le quartz. Les résultats obtenus sont extrêmement encourageants : le cristal montre un pouvoir de discrimination élevé et les produits des captures des neutrons sur le Bore-10 (à 2.31MeV et 2.79MeV) et le Lithium-6 (à 4.78MeV) sont détectés sans aucune difficulté, avec un rendement lumineux supérieur à celui du LiF, de l'ordre de $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ sur alphas (Figure 51). Nous devrions tester bientôt dans le même montage 20mK un échantillon de borate de lithium et de gadolinium, $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$, cristal qui combine trois des cibles traditionnelles des neutrons : ^{10}B , ^6Li et ^{157}Gd !⁷⁶. Ce sera une excellente occasion d'étudier l'effet de poison du gadolinium vis-à-vis des neutrons thermiques : l'ajout de ^{157}Gd permet-il d'augmenter le contraste neutrons rapides/neutrons thermiques sur la raie de capture de ^6Li ?

5.3. Ge-NTD hyper purs ? (Figure 52)

Les Ge-NTDs de l'équipe, « made in IAS », sont encore radioactifs des années après leur irradiation. L'application de coupures sur la constante de temps a été nécessaire pour soustraire leur contribution dans les données de ROSEBUD (Figure 52 et Pub#3^[40]). De façon générale, s'agissant d'événements sans contrepartie optique, les événements associés peuvent se confondre avec des reculs dont le signal serait noyé dans le bruit, dans le cas de bolomètres faiblement scintillants, tandis qu'à basse énergie, quelque soit la cible, les formes des impulsions seront confuses et il ne sera de toute façon plus possible de les soustraire⁷⁷. Par ailleurs, la fréquence d'échantillonnage relativement lente utilisée pour la lecture des Ge-NTD dans une polarisation triangle et carrée « à la EDELWEISS/PLANCK-HFI » interdit de reconnaître ces événements d'après la constante de temps de montée : la séparation est typiquement $\sim 100\mu\text{s}$ avec des événements se produisant dans les cibles saphirs de nos bolomètres. Une solution serait sans doute de ralentir nos détecteurs en découplant mieux la

⁷⁵ P. Belli et al., *Search for α decay of natural Europium*, Nuclear Physics A 789,1-4 (2007) 15-29

⁷⁶ Pour rappel, la section efficace de capture des neutrons thermiques de ^{157}Gd est extraordinaire : ~ 250000 barns (contre 960 barns pour ^6Li et 3800 barns pour ^{10}B) !. Nous devrions l'observer via les cascades électroniques de 80keV qui l'accompagnent.

⁷⁷ une fois réglé bien sûr le problème des événements dans la zone des reculs de ROSEBUD-II !

cible du thermomètre, mais le risque est de ne plus pouvoir les tester à l'IAS en raison des rayons cosmiques et des empilements induits. Une meilleure solution est sans doute de concevoir une nouvelle génération de Ge-NTD non radioactifs : je suis persuadé que la raison de la radioactivité résiduelle de nos senseurs est dans la qualité moyenne du germanium (qualité « optique ») utilisé à la base : cette radioactivité a été contrôlée sur les bancs PACO du LSC ou sur ceux du LSM, dès que nous pouvions récupérer le Germanium irradié. Nos Germanium NTDs sont d'origines hétérogènes et semblent plus radioactifs que ceux proposés jusqu'en 2006 par les « fournisseurs mondiaux » de Ge-NTD, Haller et Beeman, mesurée par le groupe de Milan⁷⁸ (on peut citer en particulier la présence de ^{60}Co dans un lingot à ~ 27 Bq/kg, tandis que les activités en $^{68}\text{Ge} \sim 80$ Bq/kg et $^{65}\text{Zn} \sim 6$ Bq/kg sont plutôt comparables à celles des NTDs américains : ces dernières activités testent plutôt la composante de neutrons rapides du réacteur). Nous devrions irradier prochainement 120g de germanium hyperpur –qualité HPGe des bancs bas bruit gamma– ce Germanium est certes beaucoup plus cher à l'achat, mais il devrait nous permettre de limiter au maximum l'activation d'impuretés, et sans doute de sauver des expériences beaucoup plus coûteuses que la matière brute !

5.4. Extension aux fortes masses de la technique des bolomètres à cibles démontable

(Figure 53)

5.4.1. de RPSCINT à EURECA, en passant par ROSEBUD-III ?

ROSEBUD-II a permis de montrer les limites de notre collaboration dans sa forme passée : on ne peut contribuer de façon satisfaisante au mouvement général visant à détecter la matière noire avec des missions aussi rares...faute de moyens, faute d'équipement significatif et faute de personnels disponibles –la partie espagnole est prise à 90.9% dans des activités d'enseignements (libre un mois sur onze). Ces conditions aux limites difficiles sont la raison principale pour laquelle nous ne figurons dans aucune courbe d'exclusion depuis des années : nos prétentions initiales ont dû être ramenées à la réalité, et nous ne pouvons décentement présenter ROSEBUD que comme un banc bolométrique capable de tester des prototypes, sans prétention aucune de l'engager dans une expérience de détection accumulant les kg.jours. L'équipe espagnole, dont le siège est à Saragosse, est par contre rodée aux mesures longue durée de radioactivité sur ses bancs HPGe, avec des déplacements hebdomadaires au Canfranc (à 2h de voiture et 160kms de Saragosse) pour assurer les transferts d'azote et/ou le changement d'échantillon à tester. J'ai pensé que l'extension aux fortes masses du montage

⁷⁸Alessandrello A. et al., *Measurements of residual radioactivity in neutron transmutation doped thermistors*, NIM B 93, 3 (1994) 322-325

modulaire à cible démontable (Figure 3) pourrait être une des façons la plus judicieuse pour les deux parties de poursuivre la collaboration ROSEBUD, étant donné la façon dont nous avons travaillé ensemble jusqu'à présent, en la reconvertissant en un banc de mesures bolométriques des très faibles radioactivités. Pour remplir les objectifs d'EURECA il faut viser des radioactivités de l'ordre de $10 \mu\text{Bq/kg}$, soit deux ordres de grandeurs de mieux que la radioactivité du scintillateur le plus « radiopur » (ZnWO_4)⁷⁹. La R&D associée demandera un aller et retour constant entre les procédés de tirage et les mesures de radioactivité en retour, et seul un montage cible=détecteur est envisageable pour la mesure de traces de radioactivité. Monter le cristal en bolomètre massif scintillant serait la façon la plus sûre et la plus rapide d'assurer ce retour, grâce au pouvoir de discrimination de la technique et à la très haute résolution de la voie chaleur. Dans l'extension proposée, comme dans nos mini-détecteurs, la cible est permutable et il n'y a pas lieu de reconstruire de bolomètre : il faudrait « juste » définir le montage le plus judicieux (celui de la Figure 53 ?), « trouver » un réfrigérateur ROSEBUD-III sans fluide cryogénique (pulse tube+dilution ou ADR) pour éviter les transferts récurrents et résoudre le problème des vibrations au niveau du détecteur...sans doute quelques années d'études en perspectives et quelques personnes à convaincre...

5.5. Substitutions électriques ?

Je souhaite étudier pour l'avenir des montages bolométriques à substitution électrique dans lesquels un créneau Joule est envoyé sur un chip résistif collé sur les cibles massives : de tels montages servent surtout actuellement à corriger des dérives des réfrigérateurs (comme dans les expériences CUORICINO ou CRESST) mais la possibilité de les utiliser en calorimétrie absolue n'est pas envisagée ou mentionnée. On pourrait pourtant grâce à de telles résistances s'affranchir définitivement du besoin de calibrations récurrentes par des sources radioactives dans les expériences à long temps de pose, alors que ces calibrations vont devenir de plus en plus acrobatiques pour des raisons d'encombrements. Pour donner un exemple, un créneau de tension $\Delta V=0.1\text{V}$, de durée $\Delta t=1.6\mu\text{s}$ délivre une énergie de 5 MeV dans une résistance de $20\text{k}\Omega$: les générateurs d'impulsions actuels peuvent garantir cette valeur avec une excellente précision. L'estimation de l'énergie réelle déposée dans le détecteur, qui est une des grandes inconnues des détecteurs bolométriques de particules deviendrait alors possible : remonter à la partition correcte de l'énergie aux très basses températures permettrait de cerner les facteurs intrinsèques à la cible venant limiter la résolution des expériences de recherche d'événements rares.

⁷⁹ D'après les minutes de RPSCINT'09 transmises par Fedor Danevich: les présentations de 2009 sont téléchargeables sur le site de l'INR de Kiev <http://lpd.kinr.kiev.ua/rps09/>

Conclusion

Au cours de ces quinze années écoulées, résumées dans ce manuscrit, j'espère avoir contribué à installer durablement les détecteurs bolométriques refroidis dans le peloton de tête des détecteurs, en révélant quelques unes de leurs performances, et en apportant quelques idées pour les exploiter au mieux.

Ces détecteurs sont un domaine où des communautés importantes se côtoient, sans vraiment se mélanger, alors qu'elles travaillent fondamentalement avec les mêmes outils. Des passerelles existent pourtant, par exemple via les procédures de calibration, mais elles sont très peu empruntées : en tant qu'instrumentaliste des souterrains hébergé dans un laboratoire d'astrophysique spatial, j'espère avoir l'occasion de voir la communauté « submillimétrique » et la communauté « matière noire » travailler ensemble, par exemple sur l'électronique de lecture, les calibrations absolues, la photométrie 20mK, la cryogénie... Il est déjà exceptionnel qu'une même technologie contribue à répondre à deux interrogations fondamentales de la cosmologie observationnelle : la carte précise des fluctuations de température du fond cosmologique, et la nature de la matière noire. J'ai eu rétrospectivement beaucoup de chance d'avoir pu contribuer un tout petit peu à celle ci, et beaucoup plus à l'autre.

Les bolomètres massifs scintillants qui me paraissent –très subjectivement !– une des technologies les plus prometteuses, devraient être le motif naturel de regroupement des communautés « matière noire » et « double beta », qui ont également tant à échanger. J'espère être un des acteurs de ces regroupements dans le futur : à quand un réfrigérateur commun, si possible européen ? Quelles logiques ont fait que nous développons des systèmes semblables en divers endroits ?

La familiarité acquise grâce aux nombreux détecteurs construits dans mon équipe IAS me rend plutôt confiant pour la suite des événements : ces détecteurs tiennent leurs promesses. Les bolomètres massifs scintillants n'en sont probablement qu'à leur tout début, même s'ils sont arrivés à un degré certain de maturité en quelques années, et, pour leur part, les neutrons rapides n'ont qu'à bien se tenir !

Les difficultés rencontrées au terme de la campagne ROSEBUD-II sont probablement des difficultés déjà rencontrées et partiellement résolues par les autres équipes : finalement, nous en sommes probablement arrivés au point d'avoir nous aussi des problèmes

d'événements de surface ! Ces difficultés n'ont peut-être rien d'éliminatoire pour la technologie mise en œuvre à l'IAS. Une des questions qui va se poser à court terme –outre le devenir de mon équipe réduite en 2010 dans sa composante permanente à sa plus simple expression– est la forme de notre contribution au futur projet EURECA : l'accès à un laboratoire souterrain est une nécessité en raison des nombreux neutrons ambiants et le nouveau laboratoire de Canfranc est sans doute une opportunité à saisir pour une collaboration franco-hispanique déjà constituée. Je propose ici de reconvertir ROSEBUD en un banc de mesures bolométriques des très faibles radioactivités, afin de pouvoir alimenter la R&D sur les bolomètres scintillants radio-purs, ce qui demandera pas mal d'expertises de part et d'autres des Pyrénées...

Figures & Tableaux

Tirés à part pour la version papier...

Publications

de la plus récente à la plus ancienne...

(les articles joints au manuscrit sont encadrés en gris)

58. Planck pre-launch status: HFI ground calibration

F. Pajot, P.A.R. Ade, J.-L. Beney, E. Bréelle, D. Broszkiewicz, P. Camus, C. Carabétian, A. Catalano, A. Chardin, M. Charra, J. Charra, R. Cizeron, F. Couchot, A. Coulais, B.P. Crill., K. Dassas, J. Daubin, P. de Bernardis, P. de Marcillac, J.-M. Delouis, F.-X. Désert, P. Duret, P. Eng, C. Evesque, J.-J. Fourmond, S. Francois, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, L. Guglielmi, G. Guyot, J. Haissinski, S. Henrot-Versillé, V. Hervier, W. Holmes, W.C. Jones., J.-M. Lamarre, P. Lami, A.E. Lange, M. Lefebvre, B. Leriche, C. Leroy, J. Macias-Perez, T. Maciaszek, B. Maffei, A. Mahendran, B. Mansoux, S. Masi, C. Mercier, M.-A. Miville-Deschenes, L. Montier, C. Nicolas, F. Noviello, O. Perdereau, F. Piacentini, M. Piat, S. Plaszczynski, E. Pointecouteau, R. Pons, N. Ponthieu, J.-L. Puget, D. Rambaud, C. Renault, J.-C. Renault, C. Rioux, I. Ristorcelli, C. Rosset, G. Savini, R. Sudiwala, J.-P. Torre, M. Tristram, D. Vallée, M. Veneziani and D. Yvon

Astronomy & Astrophysics, Vol. 520 (Septembre-Octobre 2010) Pre-launch status of the Planck mission, A10

57. Planck pre-launch status: High Frequency Instrument polarization calibration

C. Rosset, M. Tristram, N. Ponthieu, P. Ade, A. Catalano, L. Conversi, F. Couchot, B. P. Crill, F.-X. Désert, K. Ganga, M. Giard, Y. Giraud-Héraud, J. Haissinski, S. Henrot-Versillé, W. Holmes, W. C. Jones, J.-M. Lamarre, A. Lange, C. Leroy, J. Macías-Pérez, B. Maffei, P. de Marcillac, M.-A. Miville-Deschènes, L. Montier, F. Noviello, F. Pajot, O. Perdereau, F. Piacentini, M. Piat, S. Plaszczynski, E. Pointecouteau, J.-L. Puget, I. Ristorcelli, G. Savini, R. Sudiwala, M. Veneziani and D. Yvon

Astronomy & Astrophysics, Vol. 520 (Septembre-Octobre 2010) Pre-launch status of the Planck mission, A13

56. Alpha-particle emission probabilities in the decay of ^{240}Pu

Sibbens G, Pommé S, Altitzoglou T, García-Toraño E, Janssen H, Dersch R, Ott O, Sánchez AM, Montero MP, Loidl M, Coron N, de Marcillac P, Semkow TM.

Applied Radiation and Isotopes 68 (2010) 1459-66

55. Sapphire, BGO and LiF scintillating bolometers developed for dark matter experiments

N. Coron, J. Gironnet, J. Leblanc, P. de Marcillac, T. Redon, E. García, M. Martínez, R.Y. Ortigoza Paredes, A. Ortiz de Solórzano, C. Pobes, J. Puimedón, M.L. Sarsa, L. Torres and J. Villar

Proceedings of Science, The Identification of Dark Matter, IDM 2008, Stockholm, Sweden, 18-22 Août 2008, PoS (idm2008) 007.

<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=64>

54. A BGO scintillating bolometer as dark matter detector prototype

Coron N., Garcia E., Gironnet J., Leblanc J., de Marcillac P. Martinez M., Ortigoza Y., Ortiz de Solorzano A., Pobes C., Puimedon J., Redon T. Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.

Optical Materials 31, 10 (2009) 1393-1397

53. Scintillation studies of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) down to a temperature of 6K

Gironnet J., Mikhailik V.B., Kraus H., de Marcillac P., Coron, N.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 594, 358-361, (2008).

52. Thermal relative efficiency factor for recoiling ^{206}Pb nuclei in a sapphire bolometer

Coron N., Garcia E., Gironnet J., Leblanc J., de Marcillac P. Martinez M., Ortigoza Y., Pobes C., Puimedon J., Redon T. Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.

Physics Letters B, vol 659, issue 1-2, 113-118, (2008).

51. Recent performance of scintillating bolometers developed for dark matter searches Calleja A.,

Coron N., Garcia E., Gironnet J., Leblanc J., de Marcillac P. Martinez M., Ortiz de Solorzano A., Pobes C., Puimedon J., Redon T. Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.

« *Proceedings of Low Temperature Detectors Conf. LTD12* », *J. Low Temp. Phys.*, 151, 848-853, (2008).

50. Measurement of the nuclear recoil thermal relative efficiency factor with an undoped sapphire scintillating bolometer

Coron N., Garcia E., Gironnet J., Leblanc J., de Marcillac P., Martinez M., Ortigoza Y., Pobes C., Puimedon J., Redon T., Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.

« *Proceedings of Low Temperature Detectors Conf. LTD12* », *J. Low Temp. Phys.*, 151, 865-870, (2008).

49. The SciCryo project and cryogenic scintillation of Al_2O_3 for dark matter

Di Stefano P.C.F., Coron N., de Marcillac P., Dujardin C., Luca M., Petricca F., Proebst F., Vanzetto S., Verdier M.-A., and the EDELWEISS collaboration,

« *Proceedings of Low Temperature Detectors Conf. LTD12* », *J. Low Temp. Phys.*, 151, 902-907, (2008).

48. High performance scintillating bolometers in the search for wimps: ROSEBUD experiment
García E., Puimedon J., Sarsa M.L., Torres L., Coron N., de Marcillac P., Gironnet J., Leblanc J., Redon T.
« *The Identification of Dark Matter proceedings, 6th International Workshop, IDM 2006* », Rhodes, Greece, 11-16 sept. 2006, World Scientific ed., 302-307.

47. Bolometric WIMP search at Canfranc with different absorbers

Cebrián S., Coron, Dambier G, García E., Irastorza I.G., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A., Morales J., Ortiz de Solórzano A., Puimedón J., Sarsa M.L., Villar J.A
Astroparticle Physics, 21, 23-34, (2004).

46. Recent developments on scintillating bolometers for WIMP searches : ROSEBUD status,

Amaré J., Beltran B., Cebrian S., Garcia E., Irastorza I.G., Gomez H., G. Luzon, Martinez M., Morales J., Ortiz de Solorzano A., Pobes C., Puimedon J., Rodriguez A., Ruz J., Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A., Coron N., Dambier G., Leblanc J., de Marcillac P., Redon T.
Proceedings of TAUP2005; IX Int. Conf. On Topics in Astroparticle and Underground Physics, J. Phys.: Conf. Ser. 39,133-135,(2006).

45. High energy resolution alpha spectrometry using cryogenic detectors,

Leblanc E., Coron N., Leblanc J., de Marcillac P., Bouchard J., Plagnard J.,
Proceedings of ICRM 2005 (15th Intern. Conf. on Radionuclide Metrology and its applications), Applied Radiation and Isotopes, 64 (2006) 1281–1286.

44. Light yield of undoped sapphire at low temperature under particle excitation,

Amaré J., Beltran B., Carmona J.M., Cebrian S., Coron N., Dambier G., Garcia E., Gomez H., Irastorza I.G., Leblanc J., Luzon G., de Marcillac P., Martinez M., Morales J., Ortiz de Solorzano A., Pobes C., Puimedon J., Redon T., Rodriguez A., Ruz J., Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.,
Applied Physics Letters, 87, 264102,1-3, (2005).

43. Performances of a scintillating sapphire bolometer for the Rosebud experiment,

Amaré J., Beltran B., Carmona J.M., Cebrian S., Garcia E., Irastorza I.G., Gomez H., G. Luzon, Martinez M., Morales J., Ortiz de Solorzano A., Pobes C., Puimedon J., Rodriguez A., Ruz J., Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A., Coron N., Dambier G., Leblanc J., de Marcillac P.,
«*The Identification of Dark Matter.Proceedings, 5th Intern. Workshop, IDM 2004*», N.J.C. Spooner et V. Kudryavtsev, ed., World Scientific, 384-389, (2005).

42. Highly sensitive large-area bolometers for scintillating studies below 100mK

Coron N., de Marcillac P., Leblanc J., Dambier G., Moalic J.P.
Optical Engineering 43, 7 (2004) 1568-76.

41. Highly sensitive large area bolometers for scintillating studies below 100mK (from near IR to soft X-rays)

Coron N., de Marcillac P., Leblanc J., Dambier G., Moalic J.P.
Proceedings of SPIE Vol. 5251 (2004)73-84, Detectors and Associated Signal Processing; Jean-Pierre Chatard, Peter N. Dennis; Eds.

40. Bolometric WIMP search at Canfranc with different absorbers

Cebrián S., Coron N., Dambier G, García E., Irastorza I., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A., Morales J., Ortiz de Solórzano A., Puimedón J., Sarsa M., Villar J.
Astroparticle Physics 21 (2004) 23-34.

39. First underground light versus heat discrimination for dark matter search

Cebrián S., García E., Irastorza I.G., Leblanc J., Morales A., Morales J., Ortiz de Solórzano A., Puimedón J., Sarsa M.L., Villar J.A., Coron N., Dambier G., Leblanc J., de Marcillac P.
Physics Letters B,563, 48-52,(2003).

38. Experimental detection of α -particles from the radioactive decay of natural bismuth

de Marcillac P., Coron N., Dambier G., Leblanc J., Moalic J.P.
Nature, 422, 876-978, (2003).

37. Improved limits for natural α radioactivity of tungsten with a CaWO_4 scintillating bolometer,

Cebrián S., Coron N., Dambier G., de Marcillac P., García E., Irastorza I.G., Leblanc J., Morales A., Morales J., Ortiz de Solórzano A., Puimedón J., Sarsa M.L., Villar J.A.,
Physics Letters B,556, 14-20 (2003).

36. Scintillating and particle discrimination properties of selected crystals for low temperature bolometers: from LiF to BGO

Coron N., Dambier G., Leblanc E., Leblanc J., de Marcillac P., Moalic J.P.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 520 (2004) 159-162.

35. High energy resolution X-ray, gamma and electron spectroscopy with cryogenic detectors

Loidl M., Leblanc E., Branger T., Coron N., Leblanc J., de Marcillac P.

Applied Radiation And Isotopes 60 (2004) 363-368.

34. Cryogenic detection techniques at the Canfranc Underground laboratory: the ROSEBUD experiment

Nuclear Physics B, Proc. Suppl. 118 (2003); 523.

33. The Rosebud experiment at Canfranc : 2001 report,

Cebrián S., Coron N., Dambier G., García E., Irastorza I.G., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A., Morales J., Ortiz de Solórzano J., Puimedón J., Sarsa N.L., Villar J.A.

Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 110(2002) 97-99

32. A new absolute measurement method for low energy emitting radionuclides standardization

E. Leblanc, P. de Marcillac, N. Coron, J. Leblanc, M. Loidl, J.F. Metge, J. Bouchard

Applied Radiations and Isotopes, 56, 1-2 (2002) 245-51

31. First Results of the Rosebud Dark Matter Experiment

S. Cebrián, N. Coron, G. Dambier, E. García, D. González, I.G. Irastorza, J. Leblanc, P. de Marcillac, A. Morales, J. Morales, A. Ortiz de Solórzano, A. Peruzzi, J. Puimedón, M.L. Sarsa, S. Scopel, J.A. Villar

Astroparticle Physics 15, 1 (2001) 79-85.

30. Status report on the ROSEBUD dark matter experiment

S. Cebrián, N. Coron, G. Dambier, E. García, D. González, I.G. Irastorza, J. Leblanc, P. de Marcillac, A. Morales, J. Morales, A. Ortiz de Solórzano, A. Peruzzi, J. Puimedón, M.L. Sarsa, S. Scopel, J.A. Villar

Proceedings of the 3rd International Workshop on *The Identification of Dark Matter*; Eds. N. J. C. Spooner & V. Kudryavtsev; World Scientific (2000) 361-366

29. Status of the ROSEBUD dark matter experiment in 1999

Cebrian S, Coron N, Dambier G, de Marcillac P, Garcia E, Gonzalez D, Irastorza IG, Leblanc J, Morales A, Morales J, Ortiz de Solorzano A, Peruzzi A, Puimedon J, Sarsa ML, Scopel S, Villar JA

Nuclear Physics B, Proceedings Supplements. 87 (2000) 500-1.

28. Calibration and first light of the Diabolo photometer at the Millimetre and Infrared Testa Grigia Observatory,

A. Benoit, F. Zagury, N. Coron, M. De petris, F.X. Desert, M. Giard, J.P. Bernard, J.P. Crussaire, G. Dambier, P. De bernardis, J. Delabrouille, A. De luca, P. de Marcillac, G. Jegoudez, J.M. Lamarre, J. Leblanc, J.P. Lepeltier, B. Leriche, G. Mainella, J. Narbonne, F. Pajot, R. Pons, J.L. Puget, S. Pujol, G. Recouvreur, G. Serra, V. Soglasnova, J.P. Torre, B. Vozzi : 2000,

Astronomy and Astrophysics Supplement Series 141,3 (2000) 523-32.

27. Cryogenic detectors below 100 mK for X-ray measurements in metrology

Bobin C., Leblanc E., Bouchard J., Coron N., Cassette P., Leblanc J., de Marcillac P., Plagnard J.

présenté à ICRM 99, juin 1999, Prague, *Journal of Applied Radiations and Isotopes* 52, 3 (2000) 403-6.

26. Status of the ROSEBUD dark matter search experiment

Cebrian S., Coron N., Dambier G., Garcia E., Gonzalez D., Irastorza I.G., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A., Morales J., Ortiz de Solorzano A., Peruzzi A., Puimedon J., Sarsa M.L., Scopel S., Villar J.A.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 444, 1-2 (2000) 315-8.

25. Sea level characterization of a 1100 g sapphire bolometer,

S. Pecourt, I. Berkes, C. Bobin, N. Coron, M. De Jesus, J.P. Hadjout, J. Leblanc, P. de Marcillac,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 438,2-3(1999) 333-9.

24. Performances and Prospects of the “Rosebud” Dark Matter Search Experiment

Cebrián S., Coron N., Dambier G., García E., González D., Irastorza I.G., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A., Morales J., Ortiz de Solórzano A., Puimedón J., Salinas A., Sarsa M.L., Scopel S., Villar J.A.

Astroparticle Physics 10, 4 (1999) 361-8.

23. Towards measurements of recoils below 4 KeV with the “ROSEBUD” experiment

Bobin C., Coron N., Dambier G., Garcia E., Goldbach C., Gonzales D., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A., Morales J., Nollez G., Ortez de Solorzano A., Puimedon J., Salinas A., Sarsa M.L., Scopel S., Villar J.A.,

Nuclear Physics B, Proceedings Supplement 70 (1999) 90-5.

22. Observations of the Sunyaev-Zel'dovitch effect at high angular resolution towards the galaxy cluster A665, A2163 and CL0016+16,

Desert F-X., Benoit A., Gaertner S., Bernard J-P., Coron N., Delabrouille J., de Marcillac P., Giard M., Lamarre J-M., Lefloch B., Puget J-L., Sirbi A.,
New Astronomy vol 3, 8 (1998) 655-69.

21. Alpha/Gamma discrimination with a CaF₂(Eu) target bolometer optically coupled to a composite infrared bolometer,

Bobin C., Berkes I., Coron N., Hadjout J.P., Leblanc J. & de Marcillac P.,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 386, 2-3 (1997) 453-7.

20. Bolometer characterisation with a specially developed cryogenic source having more than five peaks in the 1-6 keV range

Leblanc E., Coron N., Leblanc J., de Sanoit J., Nollez G., Plagnard J., Bouchard J., de Marcillac P.
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 370, 1 (1996) 208-10.

19. Evidence for signal enhancement due to ballistic phonon conversion in NbSi thin films bolometers

Yvon D, Berge L, Dumoulin L, de Marcillac P, Marnieros S, Pari P, Chardin G
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 370, 1 (1996) 200-2.

18. Underground low temperature calorimeters to search for rare events

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi O, Fiorini E, Garcia E, Giuliani A, de Marcillac P, Nucciotti A, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Zanotti L
Nuclear Physics B, Proceedings Supplements 44 (1995) 181-5.

17. First tests on a large mass, low temperature array detector

Alessandrello A, Brofferio C, Cremonesi O, Garcia E, Giuliani A, Nucciotti A, Parmeggiano S, Pavan M, Pessina G, Previtali E, de Marcillac P
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 360, no.1-2 (1995) 363-6.

16. The Milano-Gran Sasso experiment on double beta decay using thermal detector array

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi O, Fiorini E, Garcia E, Giuliani A, de Marcillac P, Nucciotti A, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Zanotti L
Proceedings of the 27th International Conference on High Energy Physics. IOP Publishing, Bristol, UK, 2 (1995) 943-4.

15. A new search for neutrinoless beta beta decay with a thermal detector

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi O, Fiorini E, Garcia E, Giuliani A, de Marcillac P, Nucciotti A, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Zanotti L
Physics Letters B. 335, 3-4 (1994) 519-25.

14. Bolometric measurement of the beta spectrum of ¹¹³Cd

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi O, Danevich FA, de Marcillac P, Fiorini E, Giuliani A, Kouts VN, Nikolayko AS, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Vignoli C, Zanotti L, Zdesenko YuG
Nuclear Physics B, Proceedings Supplements 35 (1994) 394-6.

13. Search for the neutrinoless double beta decay of ¹³⁰Te with a bolometric detector

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi N, Fiorini E, Garcia E, Giuliani A, de Marcillac P, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Zanotti L
Nuclear Physics B, Proceedings Supplements 35 (1994) 366-8.

12. Further investigations of thermal cryogenic detectors in the field of ionizing radiation metrology

Masse, D., Bouchard, J., Picolo, J. L., Coursol, N., Torre, J.P., Zhou, J. W., Coron, N., de Marcillac, P., Leblanc, J., Stroke, H.H.,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 339, 1-2 (1994), 131-6.

11. Bolometric detection of the recoil spectrum in the alpha decay of ²¹⁰Po

Zhou, J. W., de Marcillac, P., Artzner, G., Coron, N., Goldbach, Cl., Leblanc, J., Nollez, G., Stroke, H.H.,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 349, 1 (1994), 225-30.

10. Underground measurements at the Frejus tunnel in the 3keV-5MeV energy range with a massive bolometer

Coron, N., Zhou, J. W., de Bellefon, A., Dambier, G., Giraud-Heraud Y., Goldbach, Cl., Gonzalez-Mestres, L., Goret, P., Leblanc, J., de Marcillac, P., Nollez, G.,
Nuclear Physics B, Proceedings Supplements 35, (1994) 169-71.

9. Bolomètres massifs refoidis à très basse température pour la détection de la matière noire non baryonique : faisabilité et premières mesures souterraines au tunnel du Fréjus

Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université PARIS VII, Spécialité : Astrophysique et Techniques Spatiales, soutenue le 21 décembre 1993.

8. TeO₂ bolometers to search for double beta decay of ¹³⁰Te: status of art

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi O, Fiorini E, Garcia E, Giuliani A, de Marcillac P, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Zanotti L

Journal of Low Temperature Physics 93, 3-4 (1993) 201-6.

7. High Z bolometers for analysis of internal beta and alpha activities

Alessandrello A, Brofferio C, Camin DV, Cremonesi O, Fiorini E, Giuliani A, de Marcillac P, Pavan M, Pessina G, Previtali E, Zanotti L, Kouts VN, Zdezenko YuG

Journal of Low Temperature Physics 93, 3-4 (1993) 815-20.

6. Characterisation of a 2g LiF bolometer

de Marcillac P., Coron N., Leblanc J., Bobin C., Berkes I., de Jesus M., Hadjout J-P, Gonzalez-Mestres L., Zhou J.W.,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 337, 1 (1993) 95-100.

5. Towards a bolometric dark matter detection experiment: underground radioactive background measurements in the 3 keV - 5 MeV energy range with a massive bolometer at 55 mK,

Coron, N., Zhou, J. W., De Bellefon, A., Dambier, G., Giraud-Heraud Y., Goldbach, Cl., Gonzalez-Mestres, L., Goret, P., Leblanc, J., de Marcillac, P., Nollez, G.,

Astronomy & Astrophysics 278, 2 (1993) L31-L34.

4. Enhanced performance of a bolometric detector at mK temperatures in high magnetic fields

de Moor, P., Wouters, J., Van Overmeire, F., Coron, N., Camps, J., de Marcillac, P., Jegoudez, G., Leblanc, J Schuurmans, P., Severijns, N., Vanderpoorten, W., Vanneste, L.,

Journal of Low Temperature Physics 93, 3-4 (1993) 295-300.

3. Advances towards fast thermal detectors of intermediate mass with high resolution and large dynamic range

Zhou, J. W., de Marcillac, P., Coron, N., Wang, S., Stroke, H.H., Redi, O., Leblanc, J., Dambier, G., Barthelemy, M., Torre, J.P., Testard, O., Beyer, G., Ravn, H.L., Mangin, J.,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 335, 3 (1993) 443-452.

2. Performances and applications of cooled composite bolometers in the field of ionizing radiation metrology

Coursol, N., Coron, N., Masse, D., Stroke, H.H., Zhou, J. W., de Marcillac, P., Leblanc, J., Artzner, G., Dambier, G., Bouchard, J., Jegoudez, G., Lepeltier, J.P., Nollez, G., Goldbach, Cl., Picolo, J. L.,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 312, 1-2 (1992) 24-33.

1. Thermal spectrometry of particles and gamma -rays with cooled composite bolometers of mass up to 25 grams

Coron N, Artzner G, de Marcillac P, Stroke H, Benoit A, Amoudry F, Ravn H, Ionson B, Torre JP, Testard O, Dambier G, Leblanc J, Jegoudez G, Lepeltier JP

Superconducting and Low Temperature Particle Detectors, Proceedings of Symposium C of the 1988 E-MRS Fall Conference. (1989) 115-26.

Annexes

Annexe I (sélection de 5 articles) :

1. Désintégration alpha de ^{209}Bi : une durée de vie record $T_{1/2} \sim 1.9 \cdot 10^{19}$ ans
P. de Marcillac et al., Nature 422 (2003) 876-878 + Supplementary Information
 2. Haute résolution alpha : 3.1 keV FWHM à 5.5 MeV sur source externe
E. Leblanc et al., Applied Radiation and Isotopes 64 (2006) 1281-1286
 3. ROSEBUD-I au Canfranc
S. Cebrián et al., Astroparticle Physics 21 (2004) 23-34
- Propriétés du saphir
4. Traitement de l'anti-corrélation des voies lumière et chaleur : une mesure originale du rendement lumineux
J. Amaré et al., Applied Physics Letters 87, 264102 (2005)
 5. Calibration de la réponse thermique relative des reculs (^{206}Pb) /gammas
N. Coron et al., Physics Letters B659 (2008) 113-118

Annexe II : Collaborations

Collaborations en cours ou passées, par ordre d'importance en 2010

- ✓ **projet Européen EURECA** (European Underground Rare Event Calorimeter Array)
page d'accueil : <http://www.eureca.ox.ac.uk/>
- ✓ **Université de Saragosse** (Espagne ; Département de Physique des Hautes Energies et des Astro-particules) : expérience ROSEBUD (détection directe de la matière noire dans le Laboratoire Souterrain de Canfranc).
- ✓ **Equipe EDELWEISS** (France, CEA & IN2P3) : détection directe de la matière noire dans le Laboratoire Souterrain de Modane avec bolomètres scintillants
- ✓ **ICMCB** (Institut de Chimie de la Matière condensée, Bordeaux) : tirage de cristaux
- ✓ **IRSN/LMDN** (Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons, Cadarache)
Accord de recherche CNRS/IRSN (en cours) pour le développement de spectromètre bolométrique de neutrons
- ✓ **PSI** (Institut Paul Scherrer ; Suisse ; Laboratoire Développements et Méthodes) : spectrométrie des neutrons rapides (pour la durée de la thèse de Johann Gironnet)
- ✓ **INR Kiev** (Institut pour la Recherche Nucléaire) : R&D sur scintillateurs radio-purs
- ✓ **Oxford** (Département de Physique) : R&D basse température sur scintillateurs
- ✓ **IPN Lyon** : R&D basse température sur scintillateurs
- ✓ **LNHB** : (Laboratoire National Henri Becquerel ; Saclay) : spectrométrie alpha, X
- ✓ **Planck-HFI** : réalisation et qualification de détecteurs étalons pour la calibration (2004-2006)

Annexe III : Encadrement/Formation/...

Encadrement des thèses de

- Sophie Pécourt (~30%)
Matière noire non-baryonique : détecteurs à scintillation et bolomètres pour la recherche de WIMPs
 Thèse défendue le 15 mai 1998, Université Claude Bernard Lyon-1
 Publication associée : Référence 25
- Lidia Torres (~50%)
Bolómetros centelleadores para búsqueda de materia oscura
 Thèse défendue le 11 juillet 2008, Université de Saragosse (Espagne)
 Publications associées : Références 55, 54, 52–50, 48, 46, 44 & 43
- Ysrael Ortigoza (~30%)
Caracterización de un bolómetro centelleador de BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) para su aplicación en la búsqueda directa de Materia Oscura
 Thèse défendue le 12 mars 2010, Université de Saragosse (Espagne)
 Publications associées : Références 55, 54, 52 & 50

Direction de la thèse de

- Johann Gironnet (100%)
Spectroscopie de neutrons rapides par bolomètres à cible lithiée pour la réduction des fonds des expériences de détection de la matière noire
 Thèse de l'Université Paris-Sud, en cours
 Publications associées : Références 55–50 & 48

Formation :

Depuis 2005, tous les deux ans, je donne un cours de formation permanente (~4 h) destiné aux Ingénieurs IN2P3 : Cycle Instrumentation « Du détecteur à la mesure », qu'on peut trouver sur le site formation de l'IN2P3. Le but est de diffuser vers la communauté nucléaire des informations sur une technique performante qu'ils connaissent très mal⁸⁰, pour partie en raison des difficultés d'ordre cryogénique, mais aussi en raison des constantes de temps des détecteurs bolométriques qui les cantonnent à des applications hors-accélérateurs. C'est probablement par le mode « intégrateur » sur faisceau X –ou sur faisceaux de neutrons–

⁸⁰ en dehors de participations aux projets comme Planck-HFI, EDELWEISS, ...

que les bolomètres se feront connaître de cette communauté (Noël Coron a proposé une application en photométrie avec le projet IAS/CEA de photomètre X « BOLUX » à 1.2K, utilisable sur le synchrotron SOLEIL). L'espoir est aussi de développer à terme des collaborations IAS-IN2P3 avec des équipes bénéficiant d'un environnement technique suffisant pour qu'elles soient capables de construire elles-mêmes des détecteurs.

Détecteurs bolométriques refroidis : 1. Principes

<http://www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-07/P.De.Marcillac-1.pdf>

Détecteurs bolométriques refroidis : 2. Applications

<http://www.in2p3.fr/actions/formation/DetAMesure-07/P.De.Marcillac-2.pdf>

Annexe III (suite) :.../Animation/Prospective

Animation Scientifique :

Membre du comité local d'organisation de la conférence internationale LTD12 (Low Temperature Detectors ; Paris CNAM, juillet 2007 ; ~300 participants)

Co-organisation en 2004 des deux premières journées « Astroparticules et Cosmologie » d'Orsay (CAPPS). La première journée a été consacrée à la Physique, et la deuxième à l'instrumentation et la R&D (site <http://capps.web.lal.in2p3.fr>).

J'ai écrit un article de vulgarisation dans la revue PleinSud Spécial Recherche 2004 sur les bolomètres : « Un détecteur universel, un détective hors pair » (5 pages). Cette revue, paraissant tous les deux ans, est destinée à la communication externe de l'Université Paris Sud.

Enfin, je suis expert désigné sur la question bolomètres pour la toute récente BNSE (banque numérique des savoirs de l'Essonne ; site <http://www.savoirs.essonne.fr>)

Prospective :

J'ai été désigné correspondant en 2004 pour l'IAS des Etats Généraux de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur ; membre du comité de site d'Orsay (sous-groupe « Recherche et Société ») et, avec quelques uns, nous avons animé les débats au sein du laboratoire.

Annexe IV : Responsabilités administratives

Rapport d'expertise (juillet 2001) :

Rapport sur la demande de Plan-Pluri-Formations 2001-2003 de l'Université d'Avignon - Pays de Vaucluse (UAPV), concernant le Laboratoire Souterrain Bas Bruit (LSBB) de Rustrel. Ce rapport m'a été demandé par le Département Physique et Sciences pour l'Ingénieur (DS2), Mission Scientifique Universitaire, Direction de la Recherche au Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche. Ce Plan Pluri Formation a été accepté.

Conseils Scientifiques :

- Membre du CS du LSBB (Laboratoire Souterrain à Bas Bruit de Rustrel-pays d'Apt ; Université de Nice Sophia Antipolis, CNRS & Observatoire de la Côte d'Azur) en 2005.

J'ai participé à la demande de la direction du LSBB au premier Conseil Scientifique « informel » de ce laboratoire nouvellement créé, après la reconversion civile des installations de tir du plateau d'Albion (ce CS s'est tenu fin septembre 2005). Le CS informel, constitué par la direction du LSB, était restreint à trois intervenants externes : un physicien des solides sismologue, un hydrogéologue et un astrophysicien. Il faisait suite aux journées de présentation des activités de ce laboratoire souterrain multidisciplinaire, et de ses caractéristiques bas-bruit uniques. Le LSBB est officiellement géré par l'Université de Nice depuis 2005. Un rapport a été rédigé à son intention : j'étais responsable de la partie du rapport relative aux activités en astroparticules du LSBB.

- Membre du CS du PNC (Programme National de Cosmologie) de 2006 à 2007.
- Membre du CS du PNCG (Programme National de Cosmologie et des Galaxies) depuis 2008.
- Membre du SAC (Scientific Advisory Committee) du LSBB depuis juin 2010

Participation aux jurys de thèse de :

- Sophie Pécourt (1998) : Matière noire non baryonique : détecteurs à scintillation et bolomètres pour la recherche de WIMPs.

- Tomoko Morlat (2004) : Amélioration de la durée de vie des détecteurs de gouttelettes de fréon en surchauffe en vue de la détection de matière cachée
- Véronique Sanglard (2005) : Recherche de la matière noire non-baryonique à l'aide de détecteurs cryogéniques à double composante ionisation et chaleur: analyse et interprétation des données de l'expérience EDELWEISS-I
- Matias Rodrigues (2007) : Développement d'un bolomètre magnétique haute résolution en énergie pour la spectroscopie gamma appliquée à la détermination des intensités d'émission photoniques

Annexe V : Partenariat et valorisation

Participation aux contrats d'achat de recherche amont CEA / CNRS, intitulés :

- « Développement de bolomètres optimisés pour la métrologie des rayonnements ionisants »

participation aux mesures, interprétation, traitement des données (20 bolomètres ont été nécessaires pour la réalisation de ce contrat !).

Références : contrat CEA-041089800 & CNRS-545016

rapport final IAS n° RS-99-02 (20 avril 1999)

- Etude et Développement de détecteurs bolométriques pour la spectroscopie alpha haute résolution ;

N. Coron, P. de Marcillac, G. Dambier, J. Leblanc, J.P.Moalic

Contrat BNM (Bureau National de Métrologie) #01 3 003 ; UPS (Université Paris-Sud) #N 6036 0 ; CNRS #041.1917.00. Rapport IAS #RS 04-01 du 11 février 2004

Contribution au développement de détecteurs bolométriques (1995-2010)

Pierre de Marcillac

Figures & Tableaux



Bolomètre IAS de 91g en BGO avec son détecteur optique



Figure 1

Réfrigérateur 20 mK installé dans la cabine acoustique blindée de l'IAS. Il est descendu avec le cryostat He-4 dans un banc de plomb de 20 cm d'épaisseur qui est situé sous le sol et il repose sur des plots anti-vibrations. L'électronique est sur batterie et les signaux sont transmis à l'extérieur par des amplificateurs à sortie par fibres optiques.

Partie basse de la canne 20 mK avant fermeture du capot calorimètre ; sur cette intégration, on a installé six bolomètres (2 doubles chaleur-lumière, 1 chaleur, et 1 optique sur un cristal monté en « pré-bolomètre »).

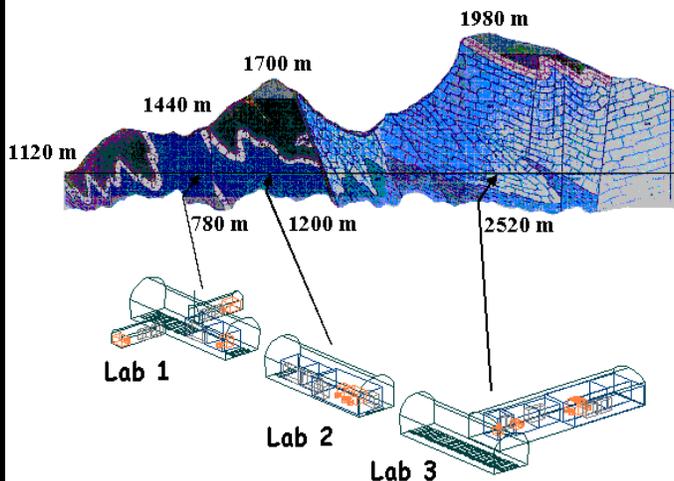
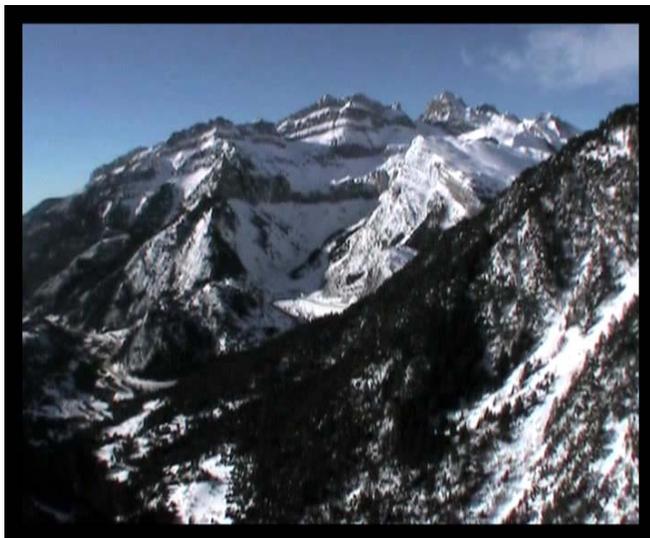


Figure 2

Le pic Tobazo qui abrite le Laboratoire Souterrain du Canfranc dans les Pyrénées espagnoles.

L'expérience ROSEBUD est installée à l'entrée du laboratoire #3, qui débouche sur l'ancien tunnel ferroviaire, sous 2500 m d'équivalent eau.

Réduction attendue en 2006 du bruit de fond de ROSEBUD enregistré en 2001 dans nos bolomètres en saphir—dans l'hypothèse où le fond n'aurait pas changé—grâce à la discrimination « lumière »/ « chaleur ». On attendait une réjection efficace à 100% du fond bêta/gamma à $E > 24$ keV, et un niveau de fond inférieur à 1 coup / keV / kg / jour à $E > 12$ keV.

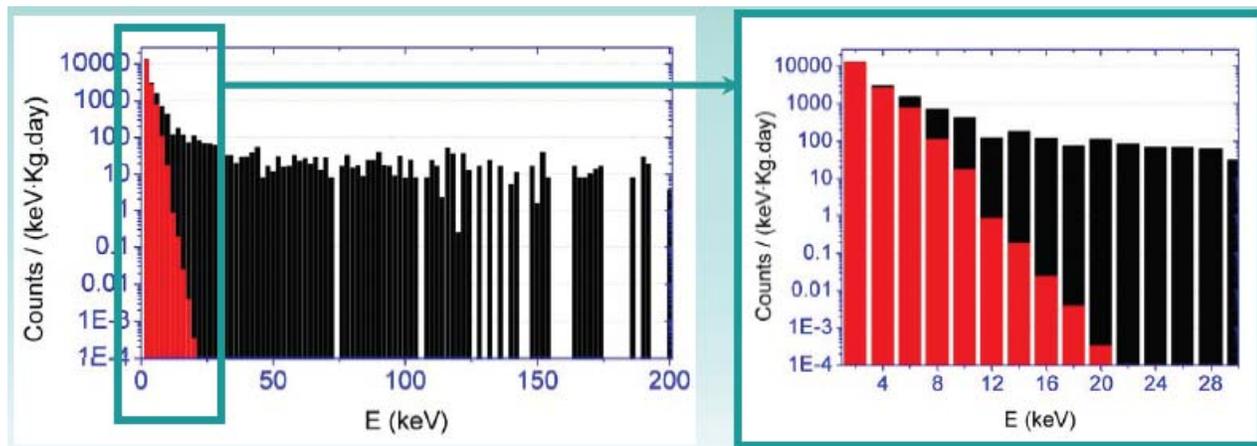


Table 1
Main features of the different bolometers used in the experiment

Name	Absorber	Mass (g)	Rise time (μs)			FWHM resolution (keV)	Sensitivity ($\mu\text{V}/\text{keV}$)	FWHM baseline resol (keV)
			Absorber interact.	NTD interact.	IR pulses			
B213	Al_2O_3	50	~ 1200	~ 900	~ 1000	3.2 (at 122)	0.5–1.0	0.2
B265	Ge	67	~ 1000	~ 650	~ 1000	1.0 (at 10.4) 3.0 (at 122)	0.3–0.6	0.14
B278	CaWO_4	54	~ 5000	~ 1500	~ 1800	38 (at 51) 39 (at 692) 61 (at 5410)	0.02–0.03	10–20
B276	Ge	0.26	~ 850	~ 850	~ 850	1.0 (at 5.9) 14 (at 51)* 81 (at 692)*	7.0–13.0	0.06

Note that rise times depend on the bolometer polarization conditions and so, only typical values are given. The same argument stands for sensitivities, which vary with polarization and working temperature conditions. FWHM energy resolutions marked with an asterisk are those of the bolometer B276 used as a detector of the B278 light.

Tableau 1

Principales caractéristiques des détecteurs testés au LSC en 1999-2001. On notera en particulier la différence des constantes de temps de montée des événements survenant dans les Ge-NTD et dans les absorbeurs, de près de $300 \mu\text{s}$ seulement dans le bolomètre en saphir B213. Le détecteur B276 est un bolomètre optique en Ge de 25 mm de diamètre. Tableau extrait de la Réf. 40 (Pub#2).

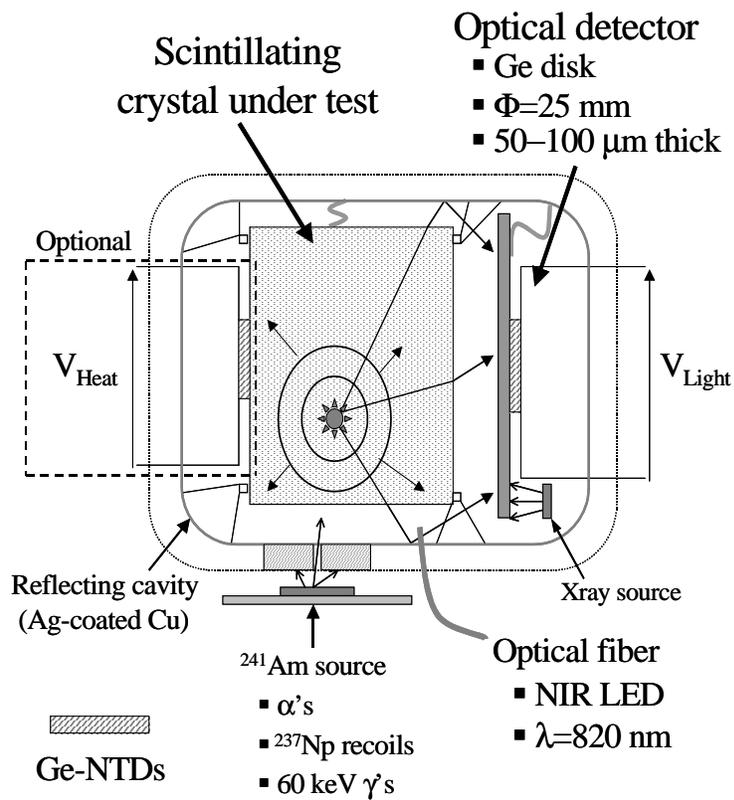


Figure 3

Principe de la mesure double lumière/chaaleur (bolomètres scintillant et optique).

Les fuites thermiques qui relient les détecteurs au réfrigérateur 20 mk sont représentées schématiquement par un symbole hélicoïdal (-). Dans les montages en « pré-bolomètre », optionnels, la cible scintillante n'est pas équipée de senseur Ge-NTD et l'identification du lieu de l'interaction est réalisée par l'étude des distribution des constantes de temps du signal optique

Trois montages pour l'étude de la scintillation de [cristal] à basse T

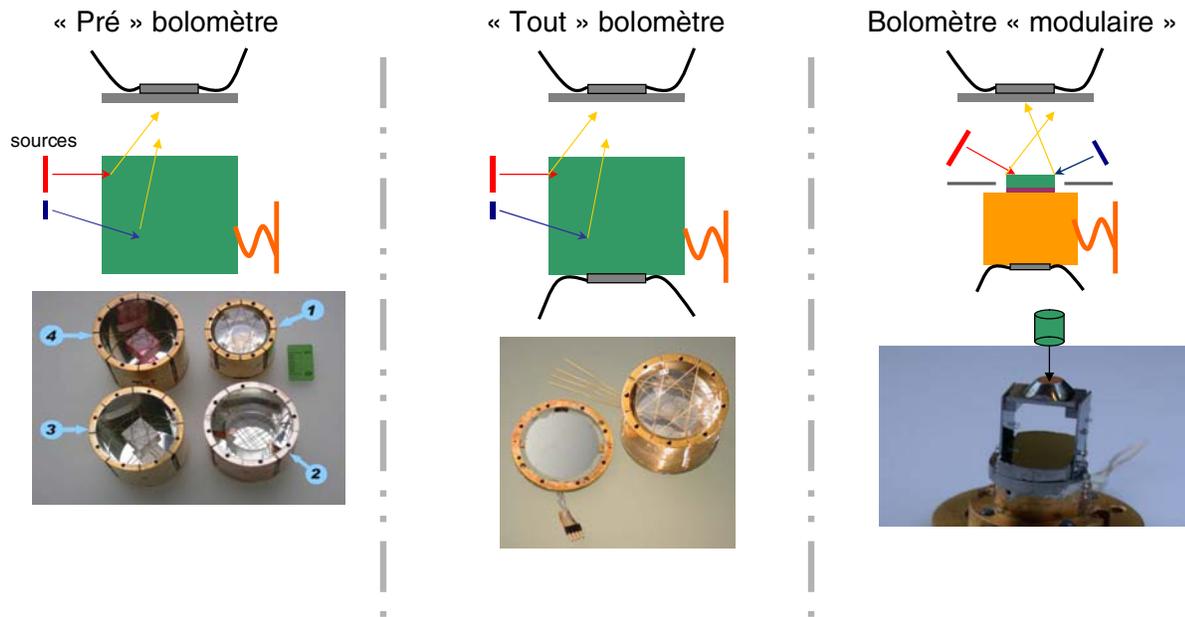


Figure 4

Schéma et photos des trois configurations utilisées pour tester la scintillation de nouveaux cristaux et leur taux de discrimination (gamma/alpha, gamma/reculs,...). Les tailles possibles de cibles varient de quelques millimètres cubes à 12 centimètres cubes.

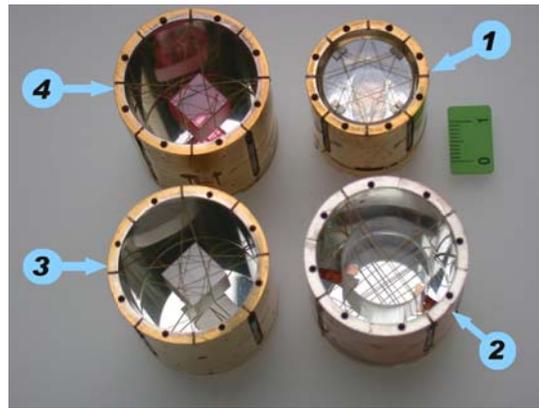


Figure 5

Photo 1 : Cavités argentées avec cristaux scintillants montés en pré-bolomètres pour mesure du taux de fluorescence à 20 mK (les bolomètres optiques Ø 25 mm que nous avons développés sont ensuite plaqués sur l'ouverture pour la mesure). ① cristal de BGO ; ② cristal de $\text{CaF}_2(\text{Eu})$; ③ cristal de YAP (Ce) ; ④ cristal de rubis en $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Ti})$.

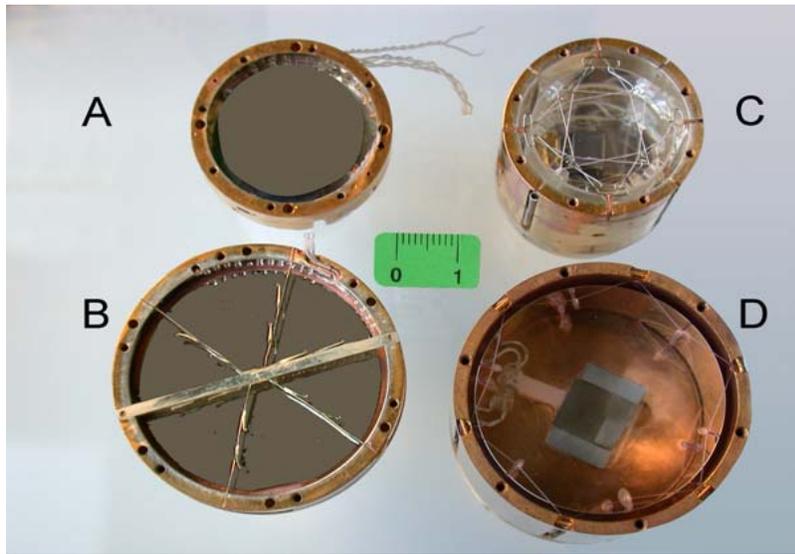


Figure 6

Bolomètres scintillants et optiques conçus pour la détection en souterrain de la matière noire avec soustraction du bruit de fond radioactif. A: bolomètre optique de $\varnothing=25$ mm en germanium. B: bolomètre optique de $\varnothing=40$ mm en germanium (montré ici en construction). C: bolomètre scintillant à cible de 91 g en BGO D: bolomètre à cible de 200 g en saphir.

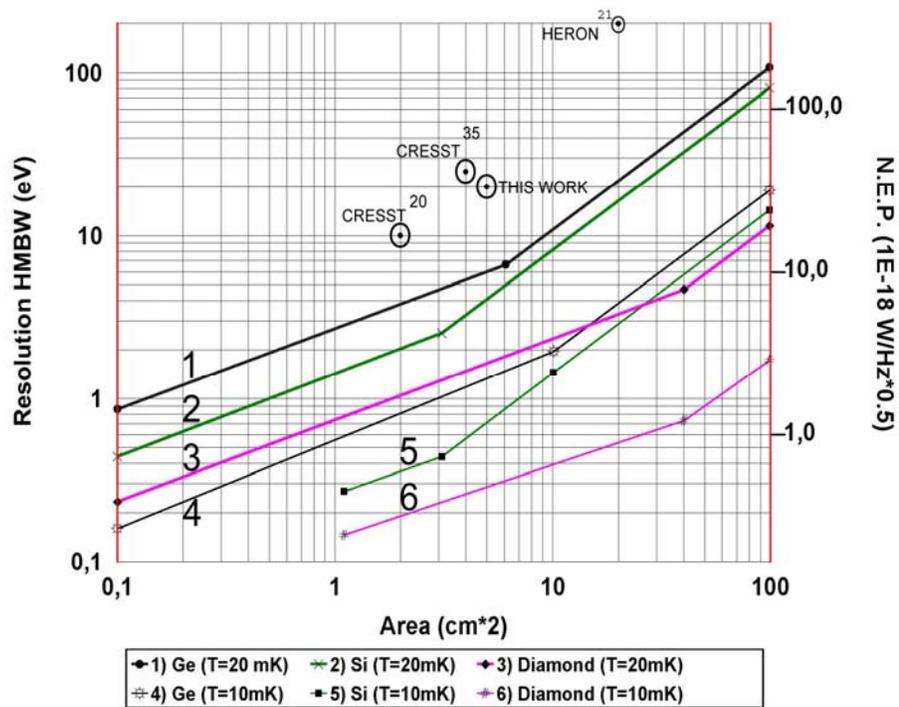


Figure 7

Modélisation de la résolution ultime des bolomètres optiques en fonction de leur surface S pour trois types de substrats différents à $T=20$ mK et $T=10$ mK; le NEP équivalent pour une constante de temps de 10 ms est reporté sur l'axe de droite. ① & ④ substrat Ge pur et poli (épaisseur ≈ 50 μm jusqu'à $S=6$ cm^2 , croissant linéairement avec S au dessus) ② & ⑤ substrat Si (épaisseur ≈ 50 μm jusqu'à 3 cm^2 , et même commentaire) recouvert de 2 μm de Ge pour l'absorption visible; ③ & ⑥ substrat diamant IIA (épaisseur ≈ 100 μm jusqu'à 40 cm^2) recouvert également de 2 μm de Ge. Une efficacité optique $\eta=50\%$ est assumée dans tous les cas (figure extraite de la Réf. 42). Les points correspondants aux données IAS et à des expériences en cours en 2004 (CRESST, HERON) sont reportés.

Référence IAS du bolomètre	Epaisseur du disque en Germanium pur	Diamètre optique de l'absorbeur	Résolution ligne de base FWHM
B276	90 μm	25 mm	54 eV
B285	90 μm	25 mm	40 eV
B287	90 μm	25 mm	30 eV
B287 réparé	90 μm	25 mm	60 eV
B297	45 μm	40 mm	45 eV
B304	45 μm	25 mm	30 eV
B308	30 μm	25 mm	50 eV
B309	20 μm	25 mm	50 eV

Tableau 2

Bolomètres optiques de grands diamètres IAS utilisés pour mesurer la fluorescence des bolomètres massifs (conçus pour T :15 mK→25 mK) ; les constantes de temps sont inférieures à 5 ms. Le bolomètre B287, un des plus performants, a dû être réparé (disque cassé).

SEMI-CONDUCTEURS [DISCRIMINATION « CHARGE / CHALEUR »]

d'après Knoll G., *Radiation Detection and measurement*

H																		He
Li	Be																	
Na	Mg																	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

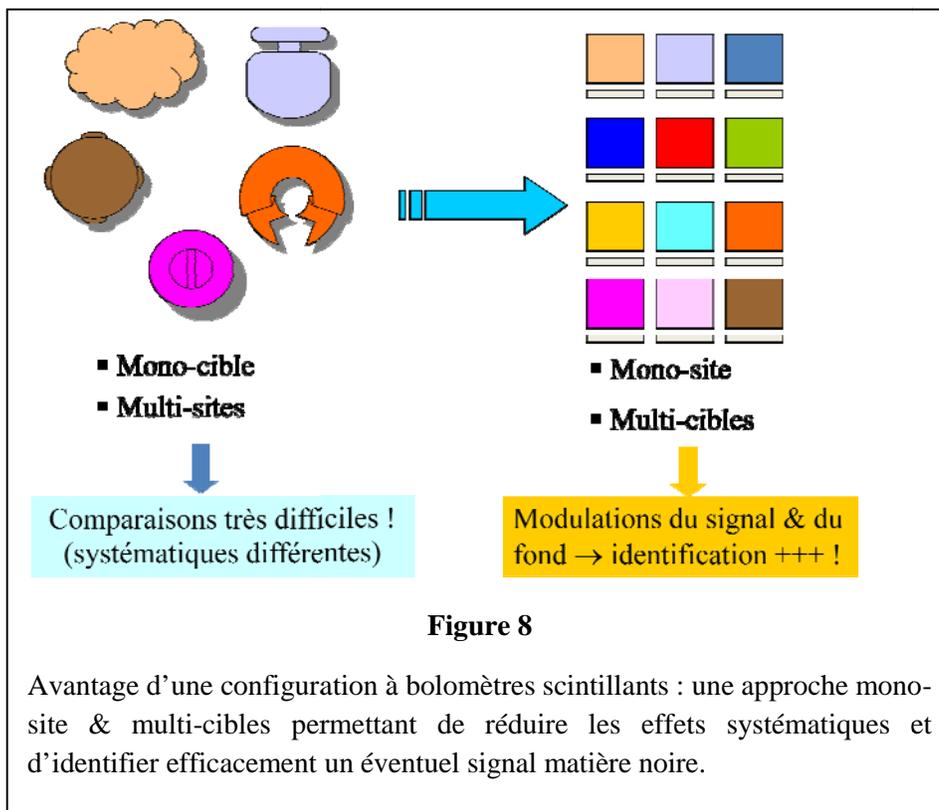
SCINTILLATEURS [DISCRIMINATION « LUMIERE / CHALEUR »]

d'après: *Derenzo S. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-37 (1990) 203-208; Derenzo S. & Moses W., proceedings of CRYSTAL 2000, sept. 1992,...*

H																		He
Li	Be																	
Na	Mg																	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

Tableau 3

Tables périodiques des éléments. Les éléments inclus dans des cristaux disponibles commercialement pour réaliser des bolomètres à discrimination « charge/chaueur » (Haut : semi-conducteurs) ou « lumière/chaueur » (Bas : scintillateurs) sont repérés par les couleurs vives. Le choix des cibles est nettement en faveur des cibles scintillantes, lesquelles, en contrepartie, ne bénéficient pas encore du degré de pureté des semi-conducteurs.



	Cristaux				Bolomètres				
	CaF ₂	YAP YAlO ₃	GSO Gd ₂ SiO ₅	Al ₂ O ₃	CaWO ₄	BGO Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	LiF	TeO ₂	Al ₂ O ₃
Agent dopant	Eu	Ce	Ce	Ti					
Masse	20g	6g	7g	4g	54g	46g	16g	25g	50g
Lumière collectée keV/MeV γ	~14		3	13	6	7.5	0.38	0.05	12.7
Lumière collectée keV/MeV α	2.6	1.3	0.43	1.7	1.5	1.3	0.11	0.002	1.13
Qf γ/α	~5.4		7	7.6	4	5.8	3.5	25	11.2
Qf γ/recoil					10	12-15	6.5		21.5

Origine	Aries	SGCD	Hitachi	Rubicon	Pi-Kem	SGCD	Aries	Crystal Technology	Sorem
Année d'achat	1993	2000	2002	2001	2000	1997		1989	1995
Coût k€/kg	8.5	33	40	56	33	2		10	2.5
Désintégration α			¹⁵² Gd 0.2%		¹⁸⁰ W 0.1%	²⁰⁹ Bi			
Désintégration $\beta\beta$	⁴⁸ Ca 0.2%		¹⁶⁰ Gd 22%		⁴⁸ Ca 0.2%	⁷⁶ Ge 7%		¹³⁰ Te 34%	
Neutrons			¹⁵⁵ Gd ¹⁵⁷ Gd				⁶ Li		
Radioactivité					U, Th	²⁰⁷ Bi, U, Th		Voir l'exp. Cuore	
Spin et intérêt matière noire	¹⁹ F 1/2 + fort taux	⁸⁹ Y 1/2	¹⁵⁵ Gd 15% ¹⁵⁷ Gd 16% 3/2	²⁷ Al 5/2 bas seuil	¹⁸³ W 14% 1/2	²⁰⁹ Bi 9/2 + fort A		¹²⁵ Te 7% 1/2	²⁷ Al; 5/2 bas seuil
Commentaires		run court !				Une qualité à faible [²⁰⁷ Bi] existe !		Cristal fendu en fin !	Tirage Kyropoulos

Tableau 4 Résultats des tests IAS sur cristaux, montés seuls ou en bolomètres (cf. Figure 4). Les facteurs d'extinction relevés sont notés Q_f (« Quenching factors »). Les rendements ont été mesurés grâce à la source X en ⁵⁵Fe qui irradie l'arrière du bolomètre optique en Ge ; il n'est pas tenu compte des pertes par réflexion, auto-absorption, ... qui ne sont pas connues. Des applications possibles de ces mesures en fonction de la nature des cibles sont indiquées (présentation LTD10 & Réf. 36).

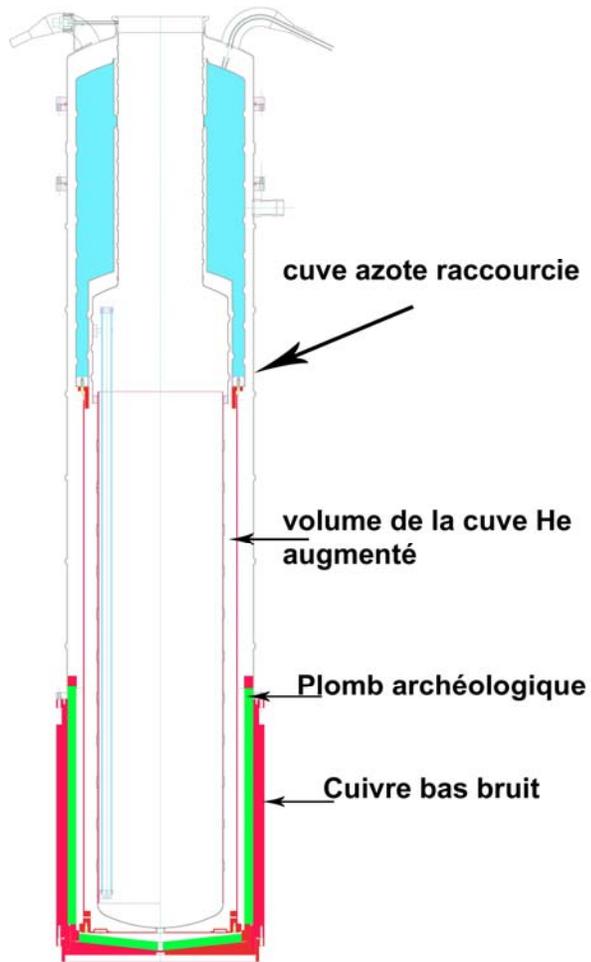


Figure 9

Dernière version du cryostat bas bruit 4 K à garde d'azote de ROSEBUD (cryostat CEA « Testard ») : afin d'harmoniser les périodes de transferts N_2 et 4He , la garde d'azote a été diminuée au profit d'un agrandissement du volume 4He . L'autonomie de l'expérience entre deux transferts a été ainsi portée à deux jours.

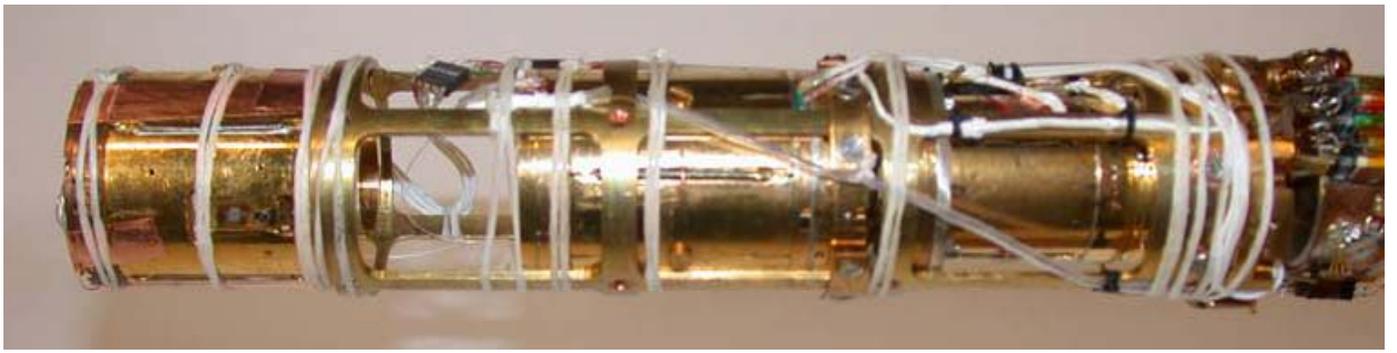


Figure 10

Photo de la partie inférieure (refroidie à 20 mK) de la canne à dilution IAS avec 3 bolomètres scintillants doubles en saphir, LiF et BGO –de gauche à droite–montés fin 2006 et étudiés au Canfranc sur l’installation de ROSEBUD. On notera le soin particulier mis pour réduire au maximum la microphonie des câbles (fils de frettage). Intégration de Noël Coron.

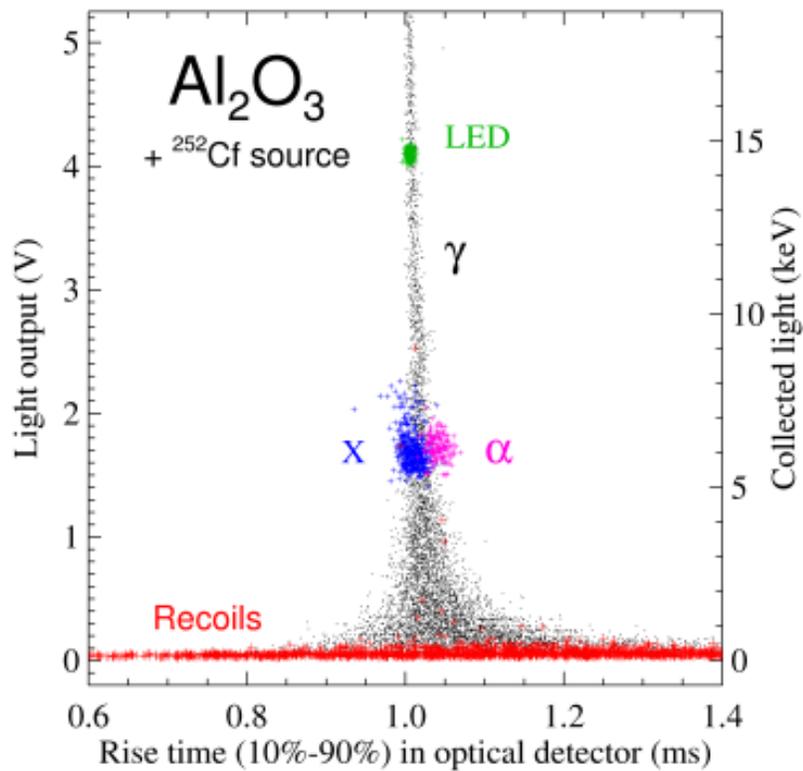


Figure 11

Distribution des constantes de temps de montée des signaux optiques associés au saphir, caractéristique d'un scintillateur de type « rapide ». Voir la Figure 20 pour un scintillateur de type « retardé », en BGO. Ces observations devraient donner des clefs pour comprendre les mécanismes de l'émission. Les populations respectives sont sélectionnées au moyen des diagrammes de discrimination lumière/chaleur. Lorsque la voie chaleur n'est pas montée sur le cristal étudié, et le signal optique est seul mesuré, ces distributions permettent d'identifier avec confiance la nature des événements survenant (Présentation LTD10 & Réf. 36).

Bol#213 (Al2O3) & Bol#287 (Ge_opt) @ IAS [asc0_1.124 ; avril 2004]

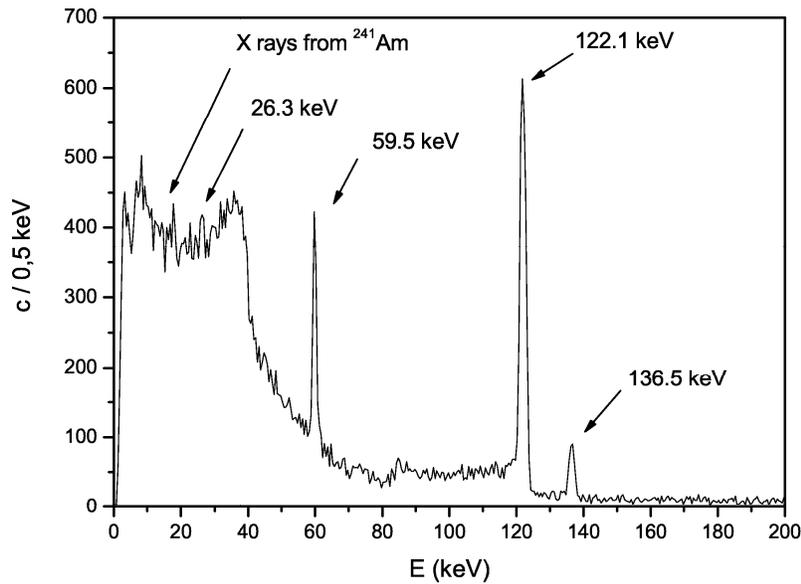
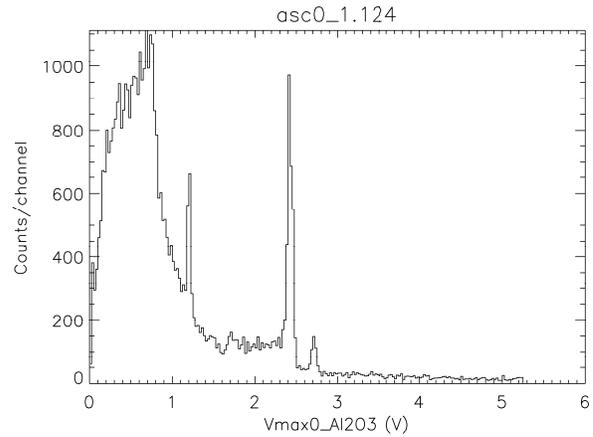
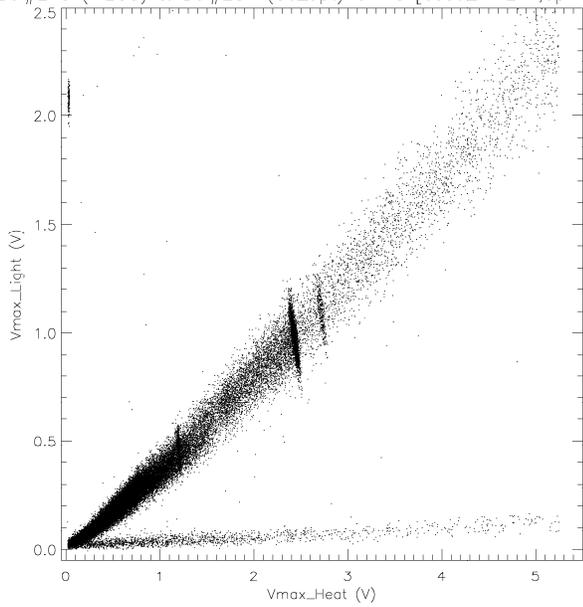


Figure 12

Discrimination électrons de recul/ atomes de recul du fond de neutrons dans un bolomètre de 50 g en saphir (Irradiation sous ^{57}Co). Une corrélation des signaux de lumière (en y) et de chaleur (en x) est observée. Prise en compte, elle permet de diviser la résolution de ce détecteur par un facteur ≈ 2.3 à 122 keV. A noter : l'angle de l'anti-corrélation relevée « tourne » en fait avec l'énergie et se redresse vers la verticale –absence de corrélation apparente– à basse énergie:

- **En haut, à droite :** Spectre de la voie chaleur, sans correction. Résolution brute ~ 4.5 keV FWHM.
- **En bas :** Spectre gamma dans le bolomètre de 50g de saphir après correction de l'anti-corrélation lumière/chaleur relevée sur ce détecteur. Après cette opération, la résolution sur la raie 122 keV post filtrage optimal est passée de 3.7 keV à 1.6 keV (thèse Lidia Torres).

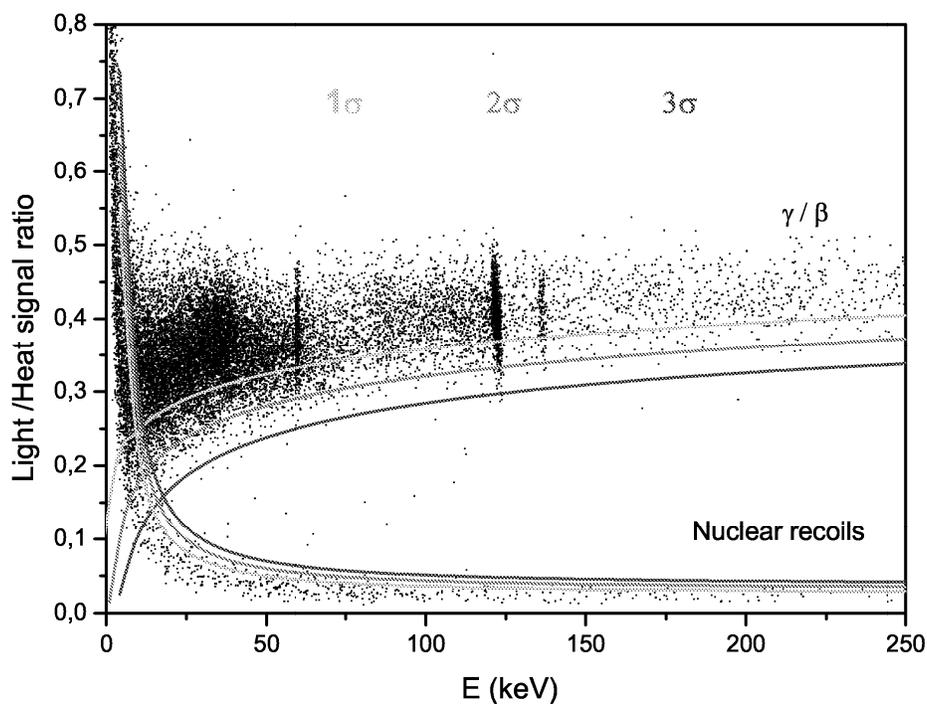
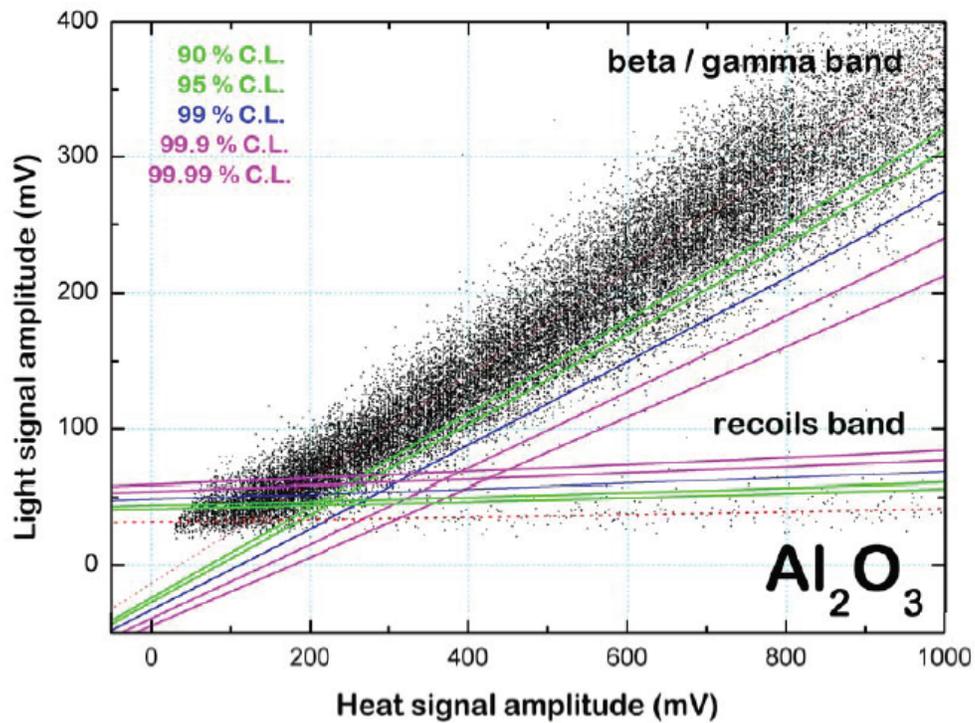


Figure 13

Discrimination gamma/recoil dans un bolomètre IAS de 50g en saphir. Haut : Les zones d'appartenance ont été établies après calibrations dédiées gammas (source ^{57}Co ; ces diagrammes) et neutrons (source ^{252}Cf). Bas : Zones d'existence à 1σ (CL 68%), 2σ (CL 95.5%) et 3σ (CL 99.7%) des électrons de recul (gammas/bétas) et des atomes de recul dans le bolomètre de 50g en saphir. On représente en X le signal de chaleur dans la cible en saphir, et en Y le rapport des deux signaux.

Seuil de réjection (keV)	Niveau de confiance
8.7	90%
10.0	95%
13.0	99%
17.1	99.9%
21.3	99.99%

Tableau 5

Seuils et niveaux de confiance correspondants à l'acceptation de reculs nucléaires et à la réjection d'événements β/γ dans un bolomètre de 50g en saphir (B213), d'origine russe (tirage Kyropoulos) d'après les mesures effectuées à l'IAS (voir Figure 12). *Thèse de Lidia Torres, 2008.*

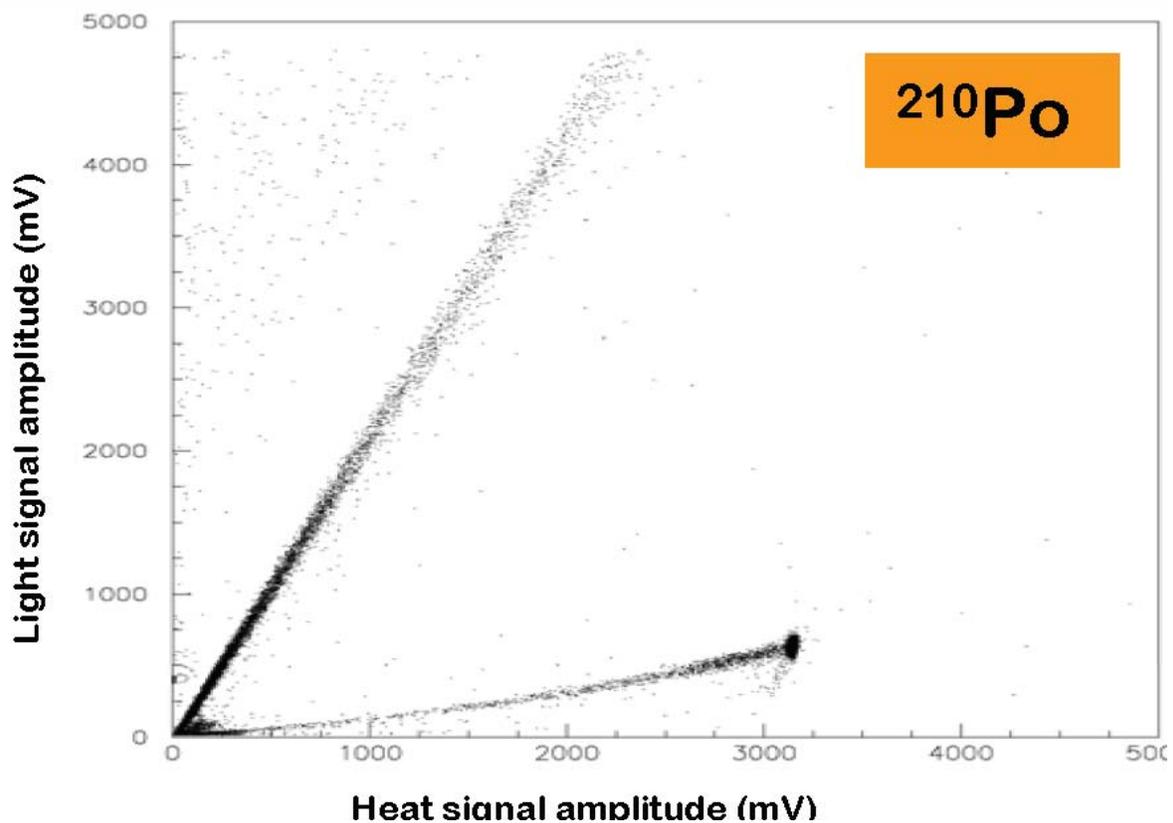
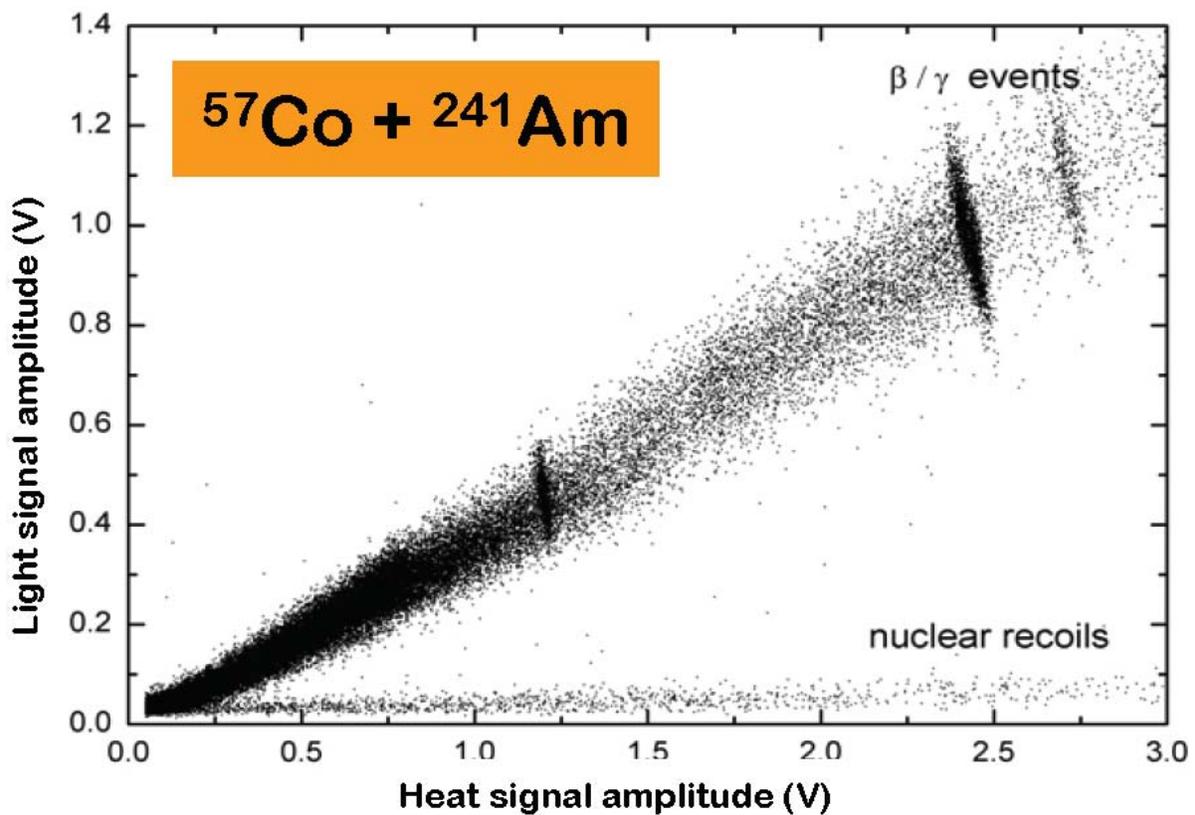
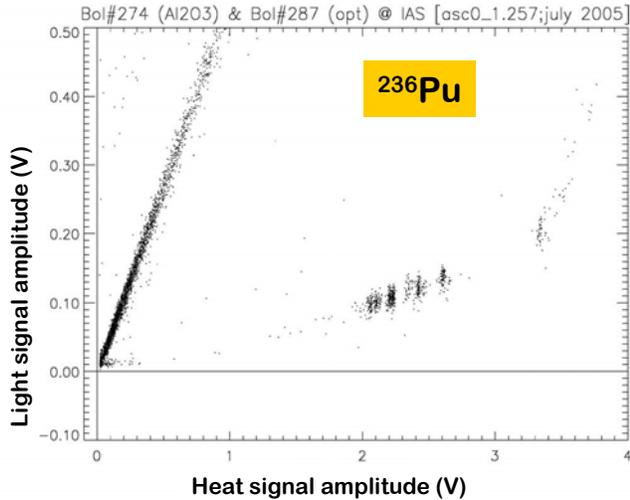


Figure 14

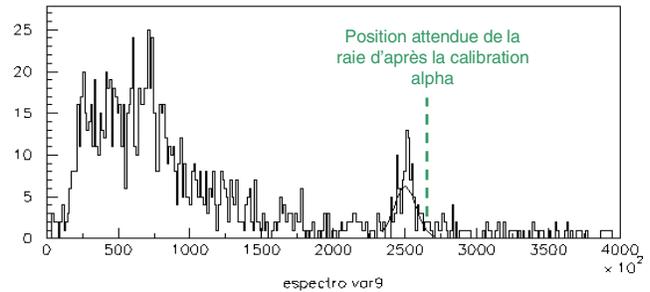
Haut : Mise en évidence de l'anti-corrélation lumière-chaleur dans un nouveau bolomètre saphir de 50 g, à tirage Kyropoulos (origine pays de l'est ; Bol#274) ; sur sources internes avec raies gamma à 60, 122 et 136 keV. Une source externe de neutrons (^{252}Cf) a permis de mesurer le rapport des émissions lumière gamma/ lumière recul, avec une valeur élevée ~ 17.5 .

Bas : Etude de la non-linéarité (dans le même bolomètre), à forte énergie, de la branche alpha avec une source ^{210}Po interne. Mesure du rapport des émissions lumière gamma/lumière alpha à ~ 10.3 .

**Estimation des facteurs d'extinction γ/α
dans un saphir d'origine russe (tirage Kyropoulos)**



Heat signal amplitude (V)
Diagramme de discrimination et calibration
haute énergie
(^{236}Pu et descendants)
forte polarisation; gain faible

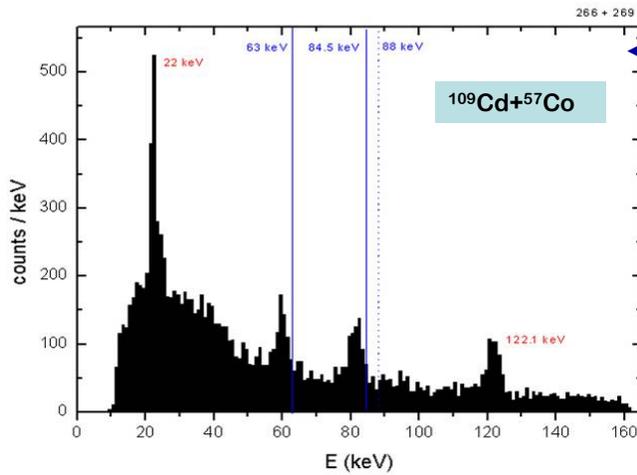


Calibration basse énergie sur source ^{57}Co
(122keV; 136keV)
forte polarisation; gain élevé

Figure 15

Etude de la linéarité et de la réponse de 10 KeV (X et gammas) à 5 MeV (alphas) d'un bolomètre saphir de 50g à haut rendement lumineux (Bol#274 ; saphir russe Kyropoulos) couplé à un bolomètre optique. Mesure à polarisation élevée, dans un bolomètre « chaud ». Les gammas donnent 10.3 fois plus de lumière que les alphas. La réponse en chaleur sur les alphas est par contre 1.07 fois celle sur les gammas (extinction « thermique »).

Effets de surface dans le saphir



L'hypothèse d'une dégradation de l'énergie dans la source elle-même est rejetée par une calibration sur un bolomètre à cible Cu

Les électrons d'une source ^{109}Cd sont détectés avec une perte d'énergie / calibration X

$$\begin{array}{l} E_e = 62.5 \text{ keV} \quad \rightarrow \quad 60 \text{ keV} \\ E_e = 84 \text{ keV} \quad \quad \quad \rightarrow \quad 81.7 \text{ keV} \\ E_e = 87 \text{ keV} \end{array}$$

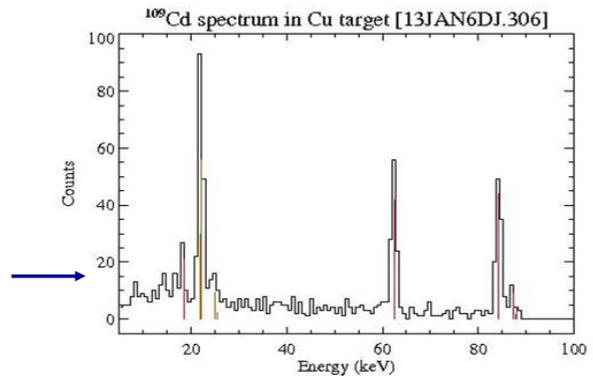


Figure 16

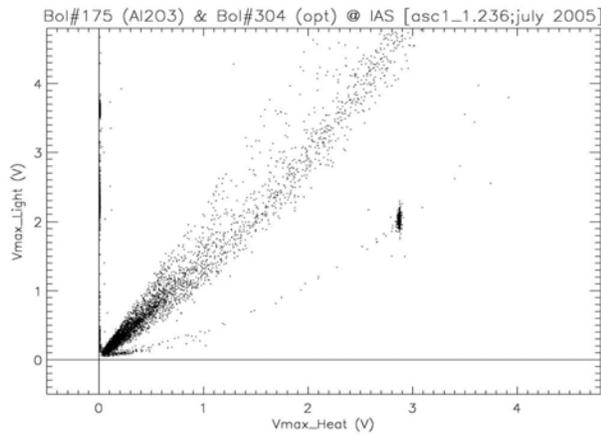
Etude comparée des spectres d'une source ultra-mince de référence de ^{109}Cd réalisés sur un bolomètre saphir, puis sur un bolomètre à cible cuivre. En surface le saphir transforme l'énergie des électrons en chaleur avec un rendement de 0.96 par rapport aux gammas pénétrants de 122 keV ce qui décale les raies e^- de conversion de près de -2 keV. Dans le bolomètre en cuivre, toutes les raies sont à leur place.

R&D sur saphir
Renforcement de la scintillation / du pouvoir de discrimination...

- 25g Al₂O₃ (tirage Verneuil) & bolomètre optique en Germanium

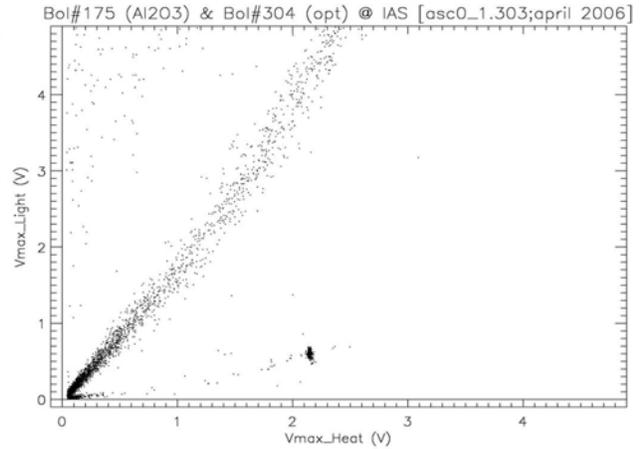
Source ⁶⁰Co; 20Ci@25cm; 3 jours

Avant irradiation: $\gamma/\alpha \sim 2.4$



A

Après irradiation: $\gamma/\alpha \sim 7.1$



B

Figure 17

Réponse lumière-chaueur d'un bolomètre saphir peu fluorescent de 25g (Bol#175 ; saphir Verneuil ; origine Grenoble-RSA). A) avant irradiation ; B) après irradiation à 30000 rads. Le pouvoir de discrimination alpha/gamma a été multiplié par 3.

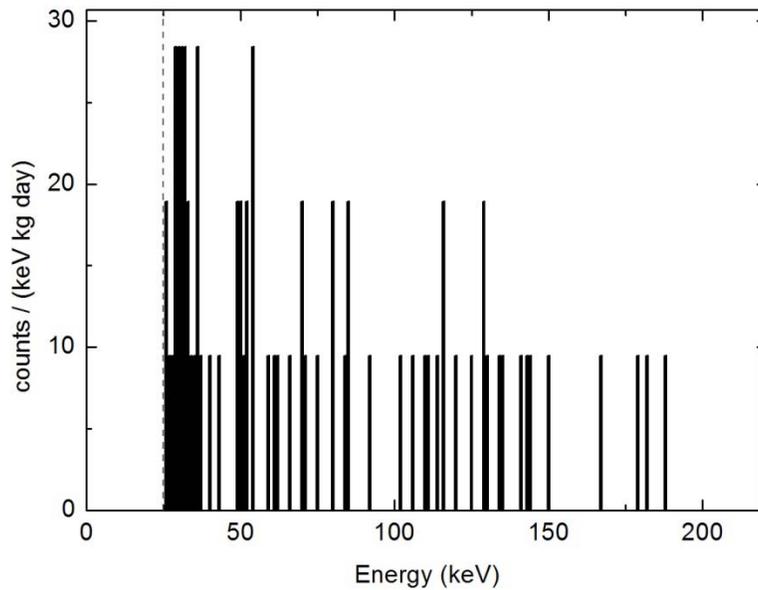
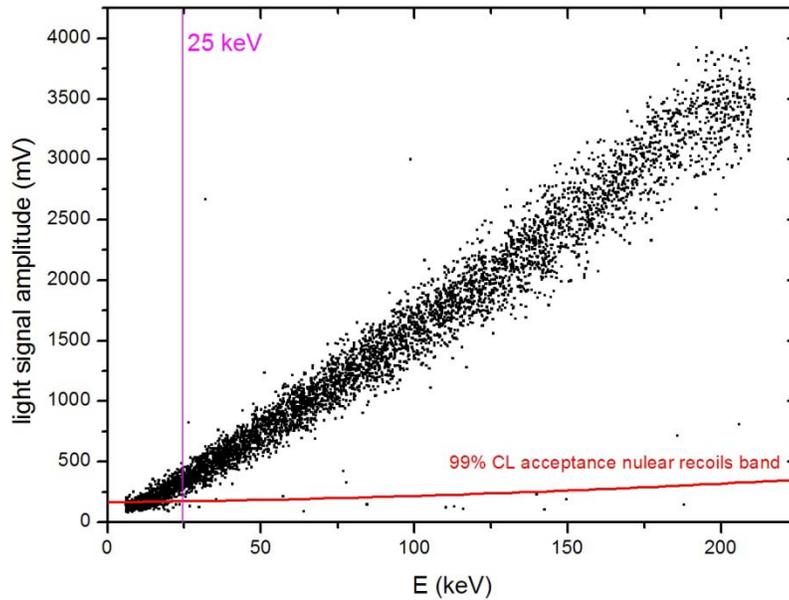


Figure 18

Haut : Fond (10.9h) observé au Canfranc dans le bolomètre de 50g en saphir en 2007. En l'absence d'une calibration neutron dédiée, la zone d'identification des reculs est déterminée ici par le niveau du bruit sur la voie optique et le rapport des rendements optiques observés à l'IAS durant les séances de calibration (rapport \approx 17.5). On relève sur cette figure 11 événements « reculs » entre 25 et 200 keV.

Bas : Spectre des événements sans contrepartie optique relevé dans le bolomètre de 50g en saphir et pouvant être interprétés comme des reculs. Temps effectif 52h (80% des données de février 2007). Taux relevés en coups/keV/kg/jour : $25\text{keV} \leq E \leq 50\text{keV}$ (11 évts) ; $50\text{keV} \leq E \leq 100\text{keV}$ (4 évts) ; $100\text{keV} \leq E \leq 200\text{keV}$ (2 évts)

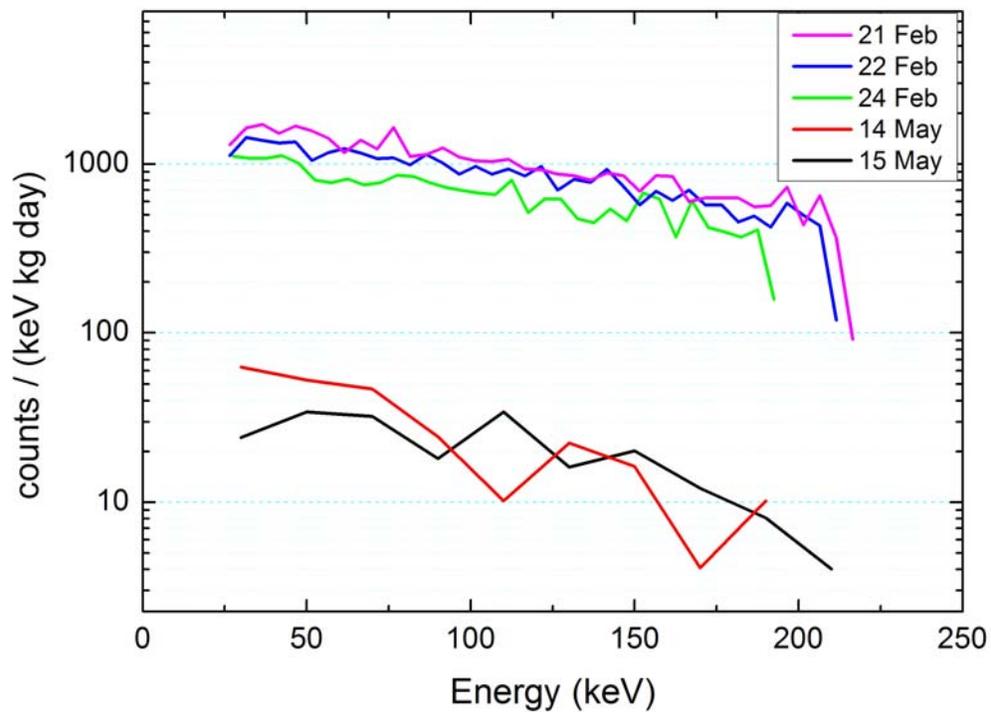


Figure 19

Réduction du fond gamma relevé par le bolomètre de 50g en saphir B274 entre février et mai 2007 au Canfranc. On observe une réduction d'un facteur 30 environ. Les événements « reculs » affichent pour leur part un taux pratiquement constant entre les deux périodes : il ne s'agit donc pas de gammas du fond interagissant dans des zones mortes du détecteur. C'est un des principaux enseignements de ces mesures sur saphir et une information importante pour les mesures et constructions ultérieures. Extrait de la thèse de Lidia Torres.

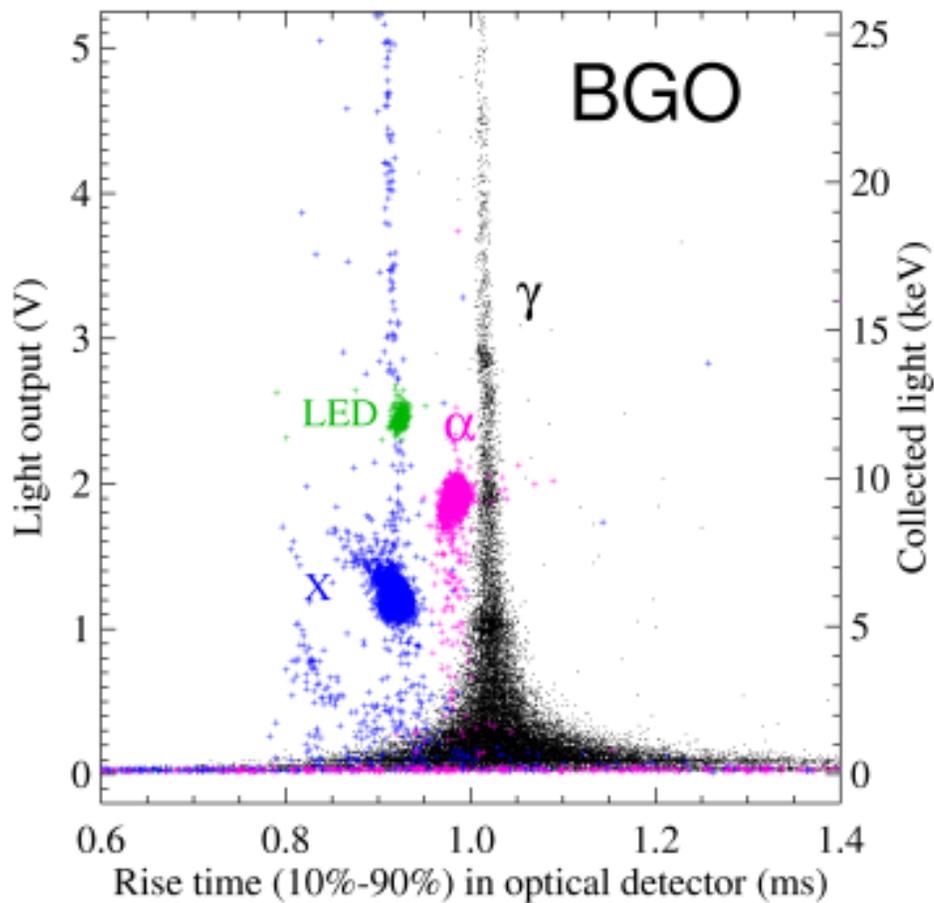


Figure 20

Distribution des constantes de temps de montée des signaux optiques associés au BGO, caractéristique d'un scintillateur de type « retardé ». Voir la Figure 13 pour un scintillateur de type « rapide », en Al_2O_3 . Ces observations devraient donner des clefs pour comprendre les mécanismes de l'émission. Les populations respectives sont sélectionnées au moyen des diagrammes de discrimination lumière/chaleur. Lorsque la voie chaleur n'est pas montée sur le cristal étudié, et le signal optique est seul mesuré, ces distributions permettent d'identifier avec confiance la nature des événements survenant (Présentation LTD10 & Réf. 36).

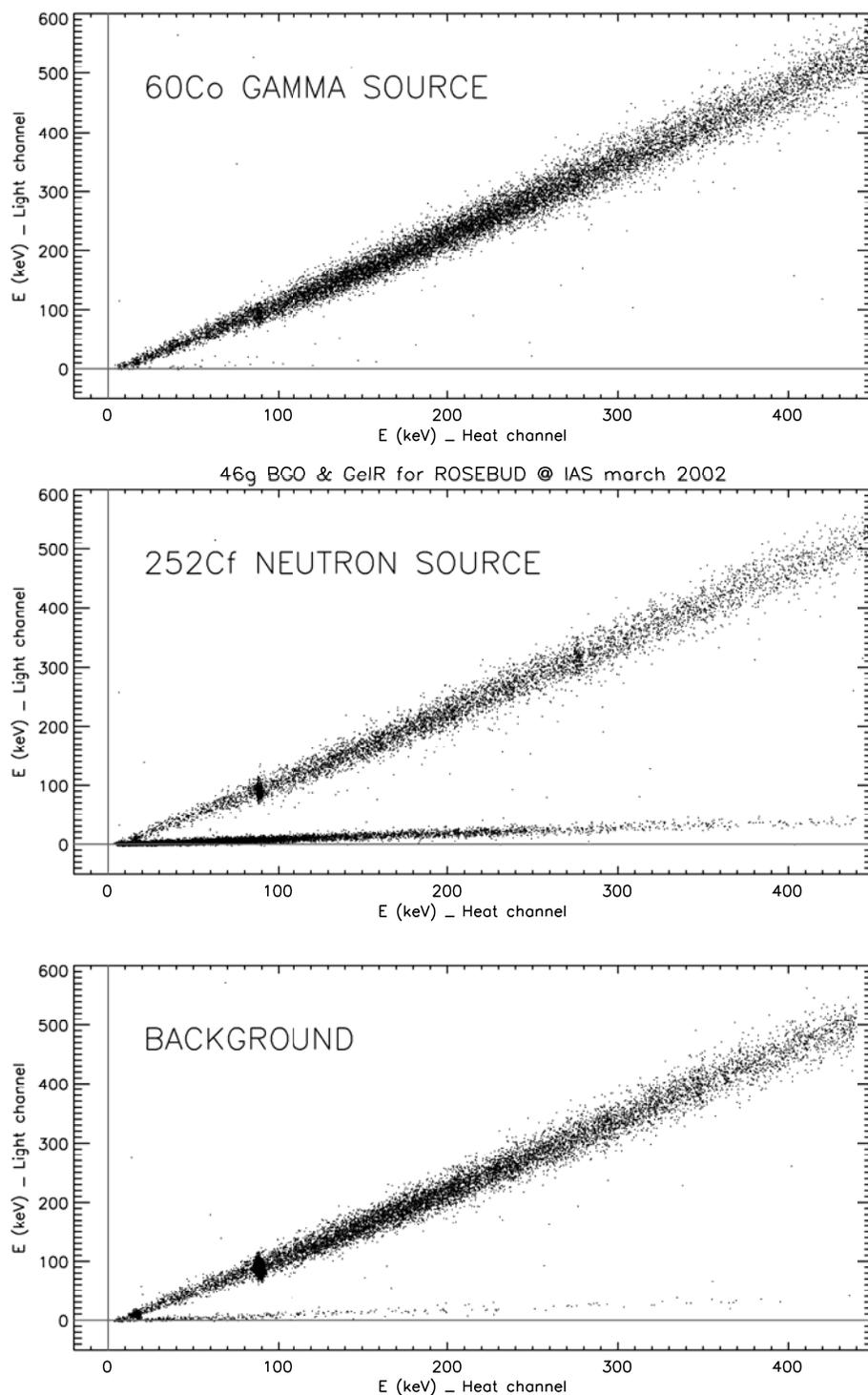


Figure 21

Haut : Diagramme de discrimination « Lumière/Chaleur » relevé lors d'une **calibration gamma** à l'IAS des bolomètres Bol#225 (BGO 46g) et Bol#276 (Ge optique). Source ^{60}Co .

Milieu : Diagramme de discrimination « Lumière/Chaleur » relevé lors d'une **calibration neutron** à l'IAS des bolomètres Bol#225 (BGO 46g) et Bol#276 (Ge optique). Source ^{252}Cf . On distingue très nettement les différentes courbes identifiant la zone des gammas, et des reculs de noyaux. Les raies détectées proviennent de la source de calibration (60 keV) et de la contamination interne en ^{207}Bi (88 keV). A noter le très bon seuil de ce détecteur [6 keV à 5σ]

Bas: Diagramme de discrimination « Lumière/Chaleur » relevé lors d'une mesure de **fond** réalisée à l'IAS dans la foulée de la précédente figure. A noter la composante de reculs induite par le fond ambiant de neutrons.

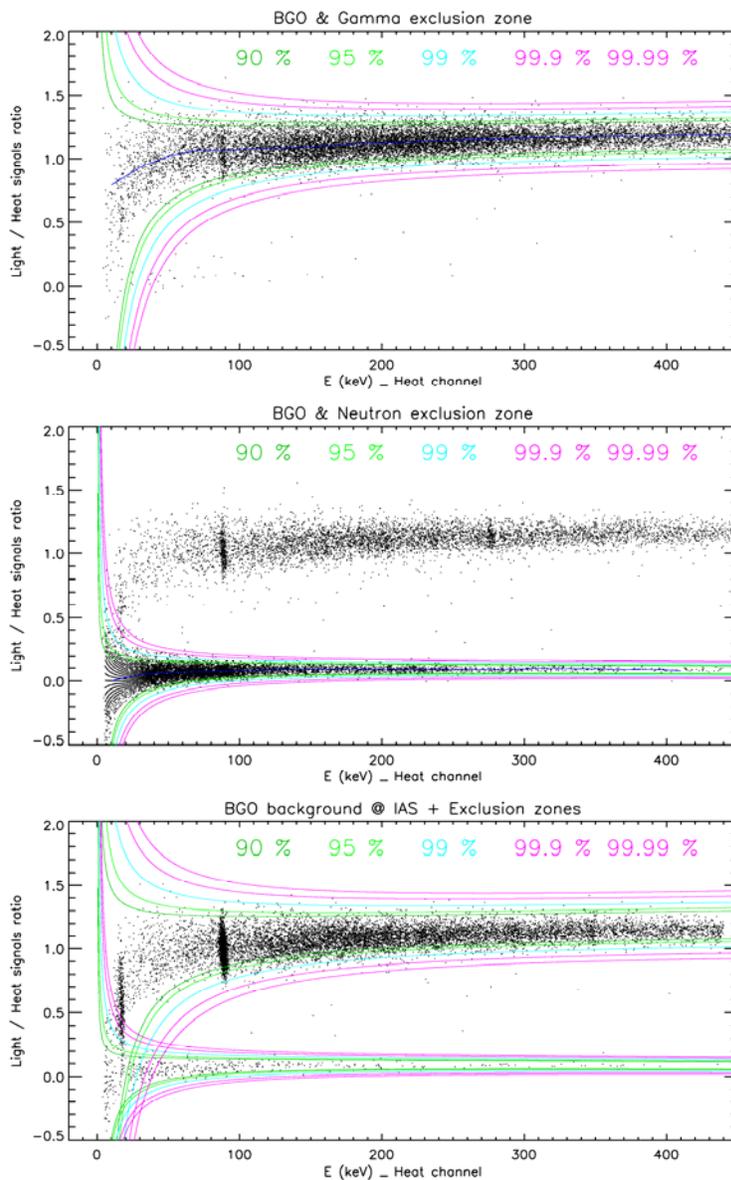


Figure 22

Zones d'identification gammas / reculs tirées des expériences précédentes et de la mesure du rapport des signaux « lumière » / « chaleur ». Les limites d'appartenance comprenant 90% à 99.99% des populations respectives sont représentées.

Pouvoir de discrimination du bolomètre 46g BGO		
Séparation des distributions gammas / reculs	Seuil d'énergie considéré	
	BGO 46g	Ge 320g [Edelweiss] Astro-ph/0106094
> 90%	E > 23 keV	E > 15 keV
> 95%	E > 27 keV	E > 19 keV
> 99%	E > 34 keV	E > 28 keV
> 99.9%	E > 43 keV	E > 36 keV
> 99.99%	E > 51 keV	E > 45 keV

Tableau 6

Zones d'exclusions comparées des bolomètres 46g BGO et 320g Ge d'Edelweiss

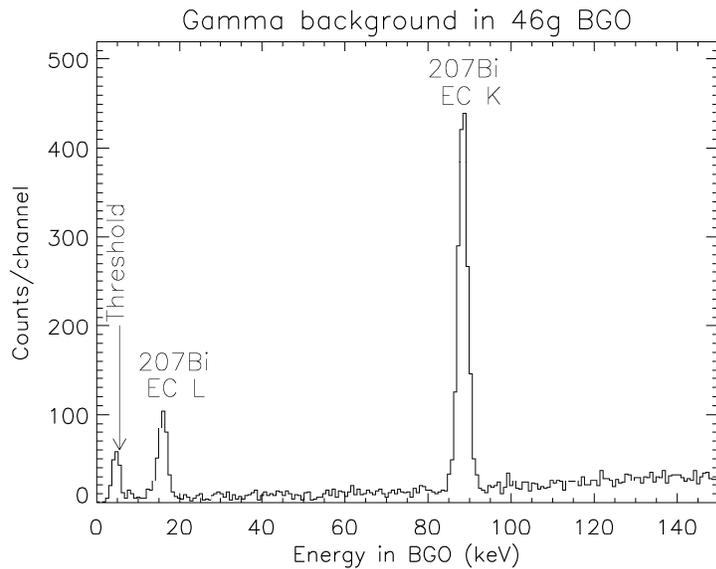


Figure 23

Spectre à basse énergie dans le premier prototype de 46g en BGO.

La contamination en ^{207}Bi domine nettement ce spectre, mais nous en attendons également une retombée nucléaire : quelques jours d'intégration au Canfranc suffiraient à donner à la valeur du rapport de branchement de capture électronique vers les niveaux K et L de ^{207}Pb , $\text{EC}_K / \text{EC}_L$, une précision inégalée [cf. A.M. Mandal & A.P. Prato, *J.Phys.G ; Nuclear Physics 11 (1985) 1025-1033* pour se convaincre de l'intérêt théorique d'une telle mesure]. Nous bénéficions en effet d'une configuration exceptionnelle :

- l'émetteur ^{207}Bi est noyé dans la masse du cristal-détecteur et les raies EC_K et EC_L réabsorbées à 100% devraient se séparer complètement dans un environnement bas-bruit
- ces raies sont observées car le noyau fils ^{207}Pb possède un niveau excité mésomère de durée de vie suffisante ($\tau_{1/2} \approx 0.8$ sec) pour permettre au réarrangement des couches électroniques qui suit la capture d'être enregistré séparément des gammas et/ou électrons qui accompagnent ensuite le retour au niveau fondamental.

Source	Activité mBq/kg Bi	Références & commentaires
BGO Crismatec (qualité radio-pure)	7 ± 2	LSC (1999); J. Puimedón, <i>communication privée</i>
	9 ± 3	LSM (1999); C. Goldbach (également, en mBq/kg BGO: $^{40}\text{K} < 7$; $^{212}\text{Pb} = 6 \pm 4$; $^{208}\text{Tl} = 3 \pm 2$), <i>communication privée</i>
BGO Harshaw	175	LSM (<1996?); P. Hubert, <i>communication privée</i>
BGO Crismatec	750	
PbS, concentré	2000	K. Fukuda et al. (1995)
BGO Crismatec	4400	Y. Satoh et al. (1993)
Bi, lingot (1992)	10000	
Bi, lingot (1992)	2900	
Bi, lingot (1992)	2000	
Bi, lingot (1967)	<200	

Tableau 7 : contamination en ^{207}Bi dans les composés à base de bismuth

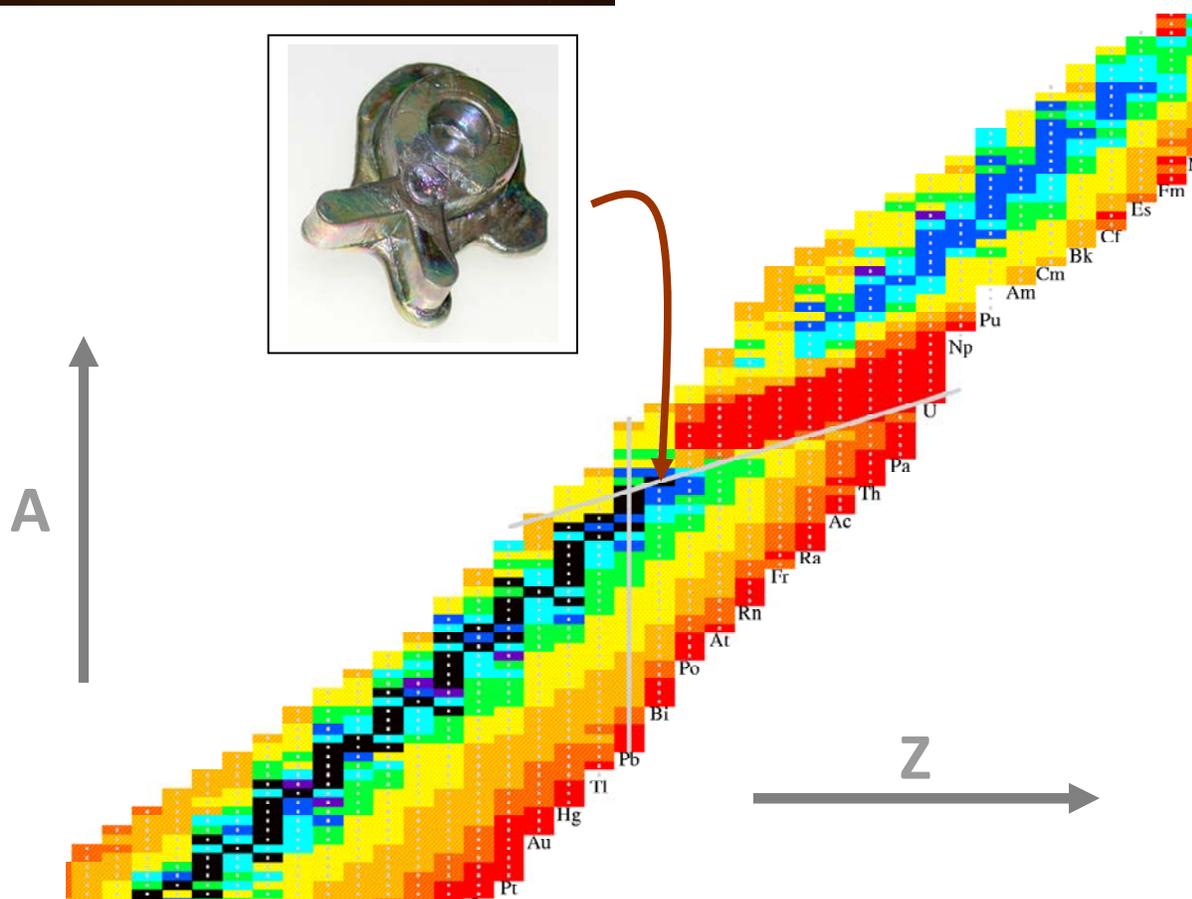


Figure 24

Instabilité du bismuth : Table des isotopes connus dans le diagramme A (nombre de masse)–Z (numéro atomique). Le code de couleur renseigne sur la durée de vie de l'isotope considéré : de rouge ($T_{1/2} < 0.1s$) à noir (stable). Les mesures de notre équipe ont montré en 2003 que, au sommet de la vallée de stabilité, l'isotope ^{209}Bi était en réalité « instable », et se désintérait avec la durée de vie de $2 \cdot 10^{19}$ ans... Pour l'anecdote, la « fève radioactive » qui pointe vers ^{209}Bi , coulée à partir de 10g de bismuth pur à l'occasion du tirage de la galette des rois 2004 de l'IAS, n'émet « que » 3 alphas par jour....

Photo (insert) : les tombeurs du bismuth...

Bolomètres de 46g et 91g en BGO ayant détecté la désintégration de Bi-209 ; Ces deux détecteurs figurent avec un bolomètre optique de 25mm de diamètre en germanium.

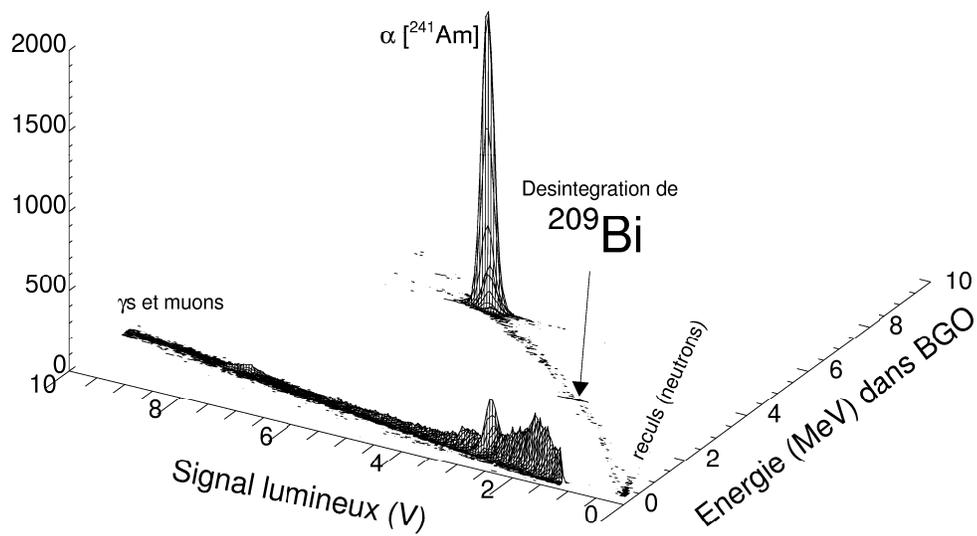
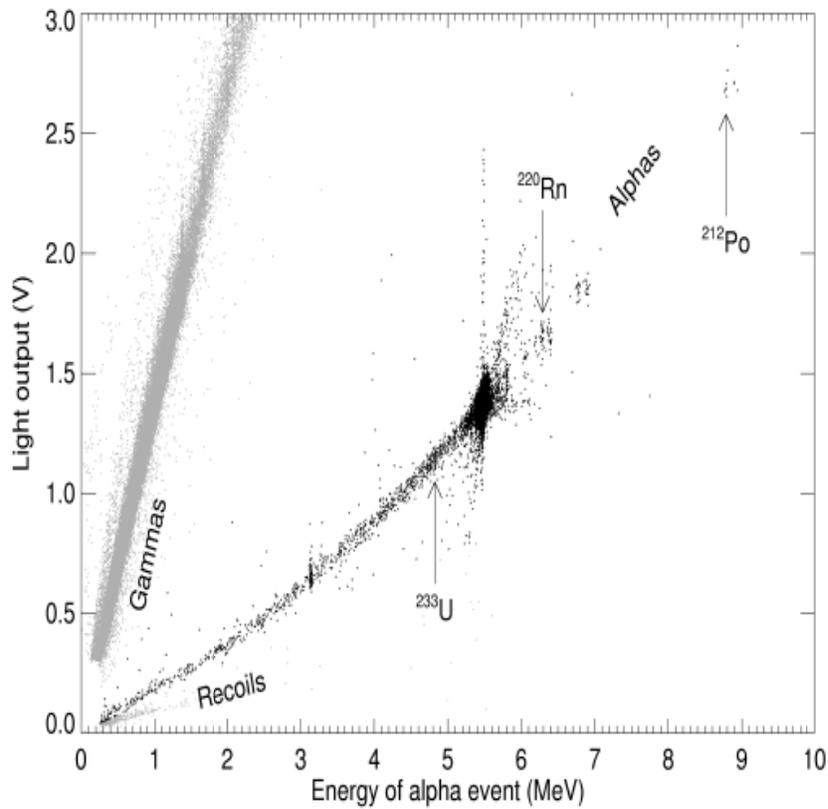


Figure 25

Diagramme de discrimination gammas/alphas/recoils dans le bolomètre de 91g en **BGO**, lors d'une calibration alpha avec ^{241}Am ($E_{\alpha}=5.5$ MeV) en 2D (haut) puis 3D (bas). Résultat de 5 jours d'intégration du fond : la raie qu'on devine vers 3.14 MeV est la désintégration naturelle du bismuth (^{209}Bi).

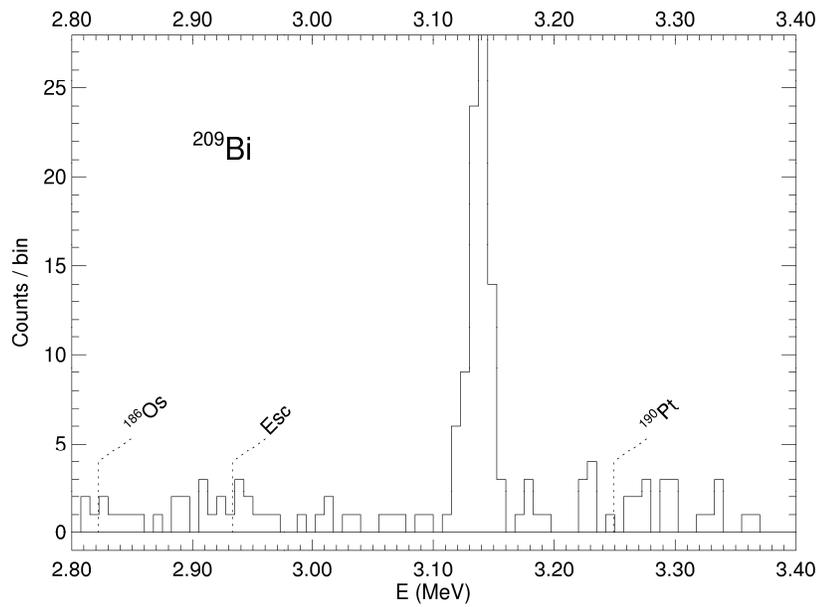


Figure 26

Spectre relevé de la raie alpha de ^{209}Bi , détectée à 3137 keV, qui est précisément l'énergie attendue de la désintégration. La position de raies déjà détectées dans le passé et/ou susceptibles d'être présentes dans l'intervalle 2.8 MeV-3.4 MeV a été reportée sur les spectres (^{186}Os ; ^{190}Pt et raie d'échappement de la désintégration vers le niveau à 204 keV de ^{205}Tl) : aucune de ces raies n'est en fait visible, conformément à l'analyse (l'article publié dans Nature donne une description exhaustive de cette expérience ; Réf. 38 et Pub#1).

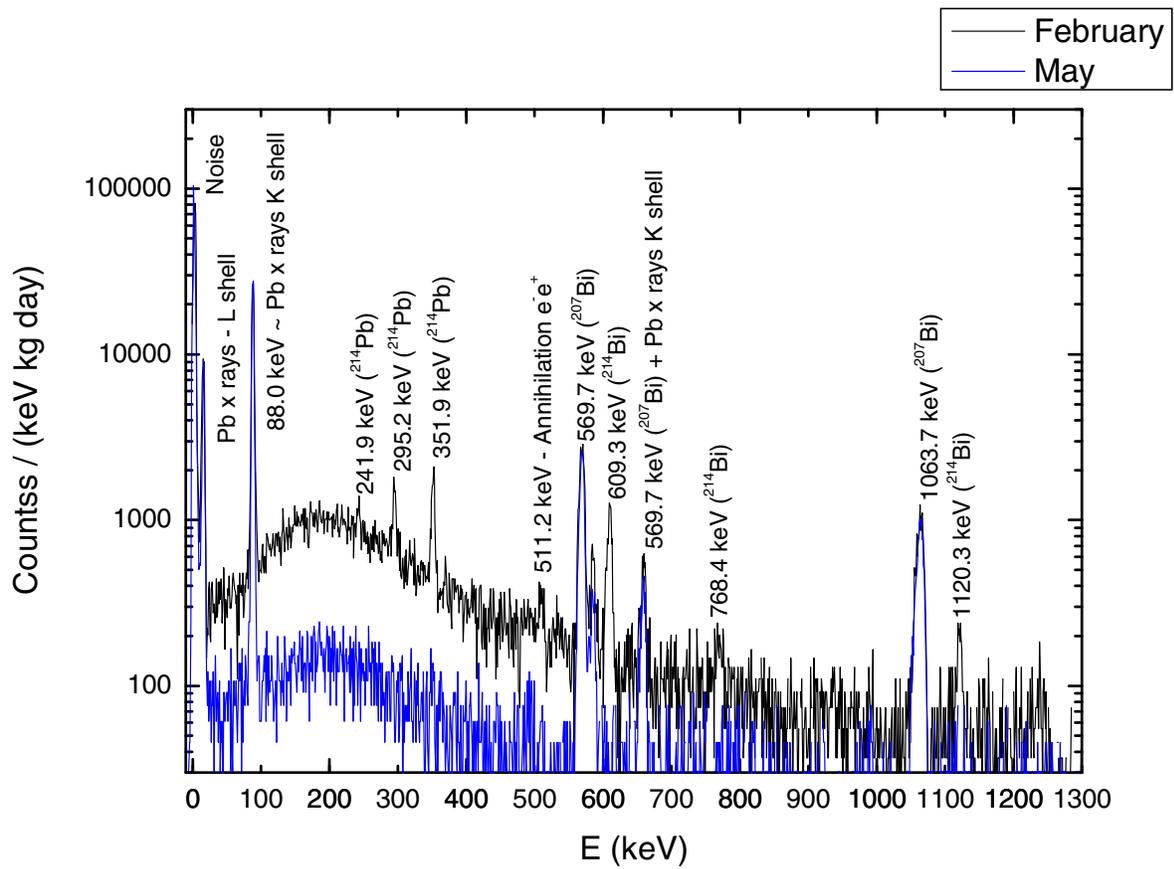


Figure 27

Evolution du fond gamma dans le bolomètre de 46g en BGO B225 entre février 2007 et mai 2007. Les blindages et la protection contre le radon ont été renforcés entre ces deux dates. Les raies de ^{214}Pb associées au radon à 242, 295 & 352 keV ont disparu dans le spectre du mois de mai. Extrait de la thèse d'Ysraël Ortigoza (2010).

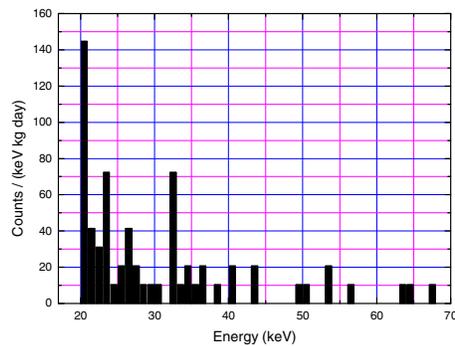
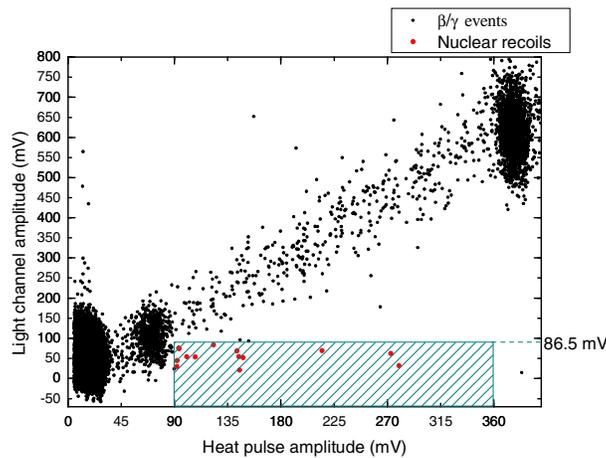
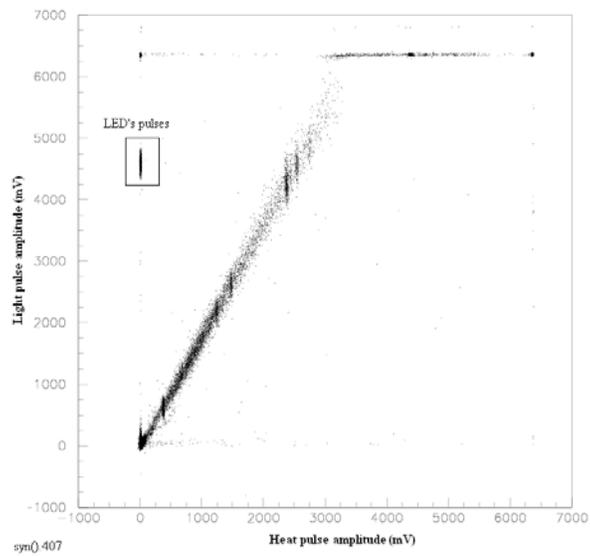


Figure 28

Haut :Plot de discrimination chaleur/lumière obtenu au Canfranc dans le bolomètre de 46g en BGO. Temps effectif 9h15. Calibration en énergie de la voie chaleur : on distingue à $V_{max} \approx 4.5V$ la raie à 1063 keV de ^{207}Bi , qui saturate la voie optique.

Milieu :Zoom à basse énergie de la figure précédente. Le cadre isole des événements susceptibles d'être des atomes de reculs candidats dans le BGO de 46g, après application de coupures sur les constantes de temps –ce qui permet de rejeter les désintégrations se produisant dans le senseur Ge-NTD.

Bas :Spectre cumulé des 76 événements « de recul » relevés dans le bolomètre de 46g en BGO en février et mai 2007. Durée effective : 56 h. Taux relevés en coups/keV/kg/jour : $20keV \leq E \leq 40keV$ (28) ; $40keV \leq E \leq 80keV$ (3). Thèse d'Ysraël Ortigoza; Université de Saragosse ; 2010).

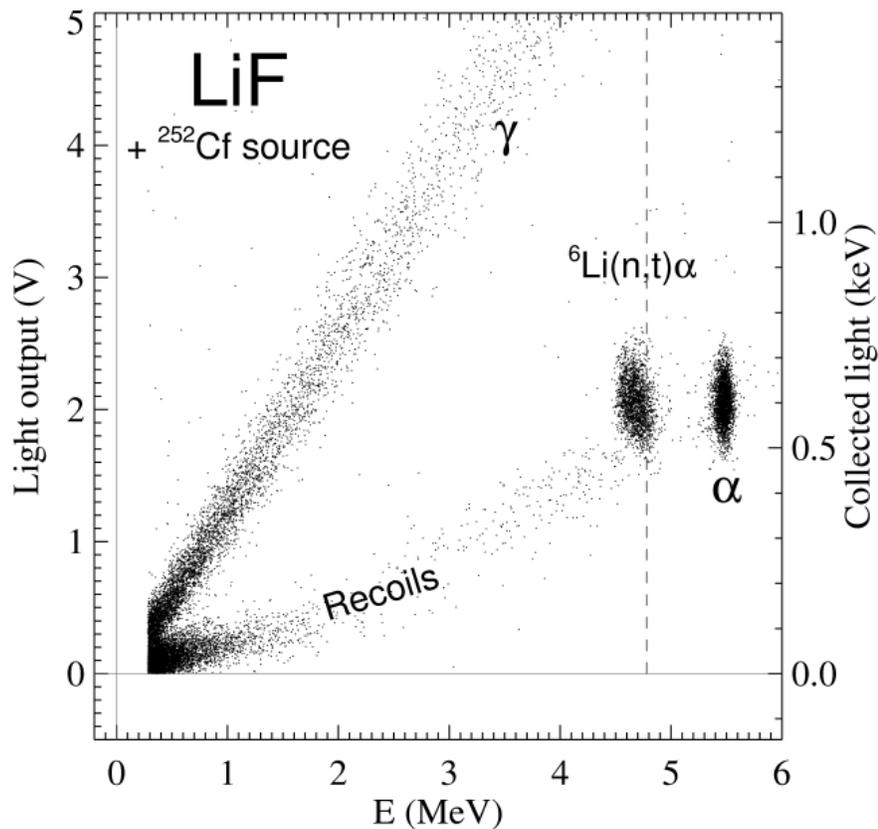


Figure 29

Diagramme de discrimination « Lumière/Chaleur » relevé lors d'une mesure réalisée à l'IAS sur un bolomètre prototype de 16g en LiF naturel, sous irradiation de neutrons par ^{252}Cf . La réaction ${}^6\text{Li}(n,\alpha)t$ à $Q=4.78$ MeV est nettement détectée, sur une branche qui paraît séparée des branches alpha et gammas en raison du plus fort pouvoir d'ionisation du tritium/alpha. On observe une anti-corrélation sur la raie de capture, mais pas sur la raie alpha d'une source interne de ${}^{241}\text{Am}$ (effet géométrique ?). Cette figure ouvre la voie à une mesure in situ, sans fond parasite, des très faibles flux de neutrons. Les taux d'événements associés sont l'un des paramètres le moins bien maîtrisé dans toutes les recherches d'événements rares (présentation LTD10 & Réf. 36).

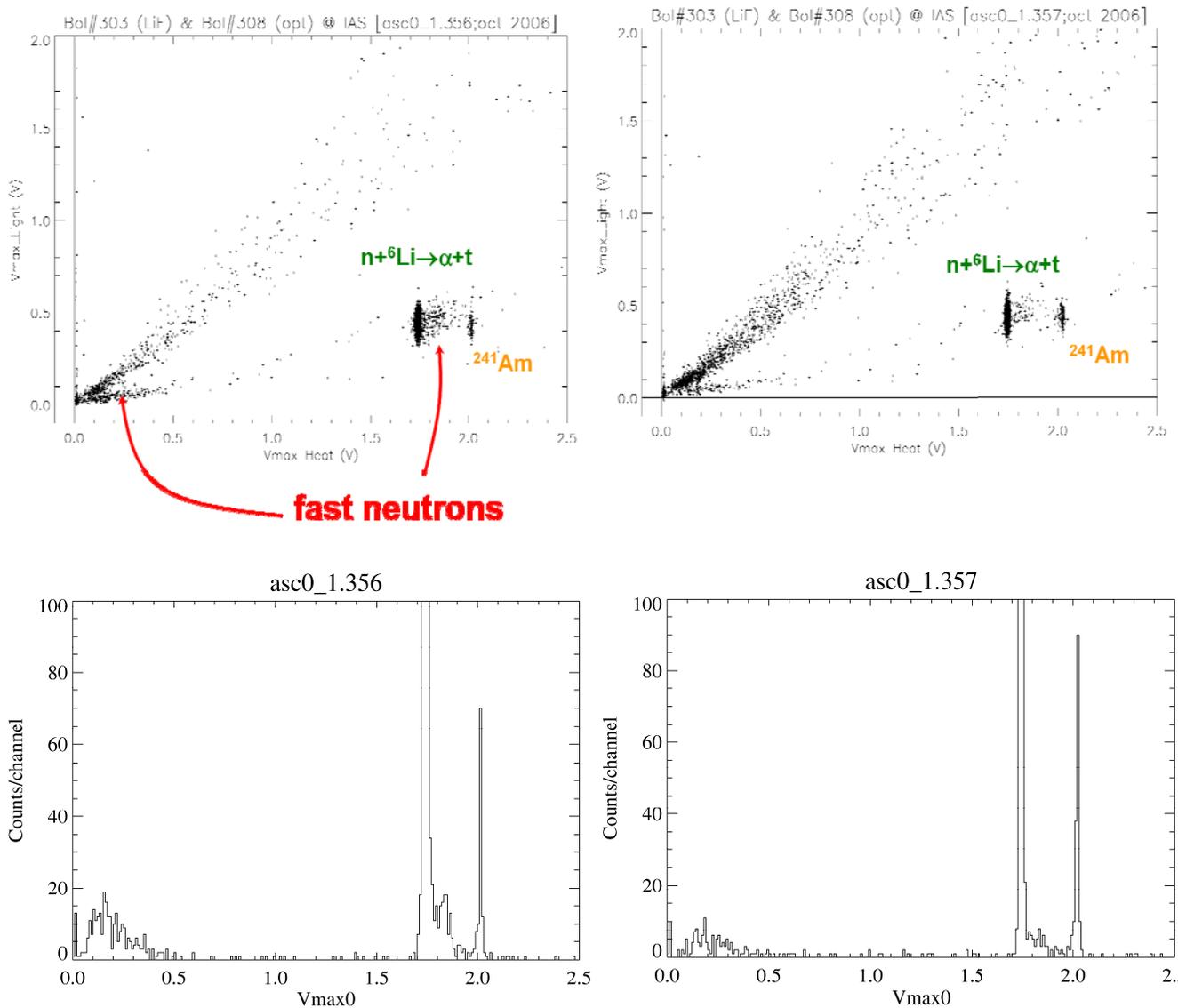


Figure 30

Haut : Calibration à l'IAS du bolomètre 33g LiF B303 en octobre 2006 avec une source de neutrons en ^{252}Cf . Les deux diagrammes soulignent l'effet d'une thermalisation partielle (à droite) de la source dans un bidon de paraffine : la partie haute énergie du pic de la réaction de capture sur ^6Li diminue visiblement, ainsi que la contribution des reculs produits par la diffusion élastique des neutrons sur la cible (branche des événements à basse énergie et faible taux de lumière). C'est l'idée même que nous souhaitons approfondir : peut-on déduire du profil des événements de capture le spectre des neutrons rapides pour pouvoir soustraire sa contribution aux événements de reculs ? Il semblerait que cela soit possible avec ces mesures...

Bas : Spectres associés dans le 33g LiF des deux expériences. Les coups dans la raie alpha –une source alpha interne– servent d'horloge de comptage pour comparaison.

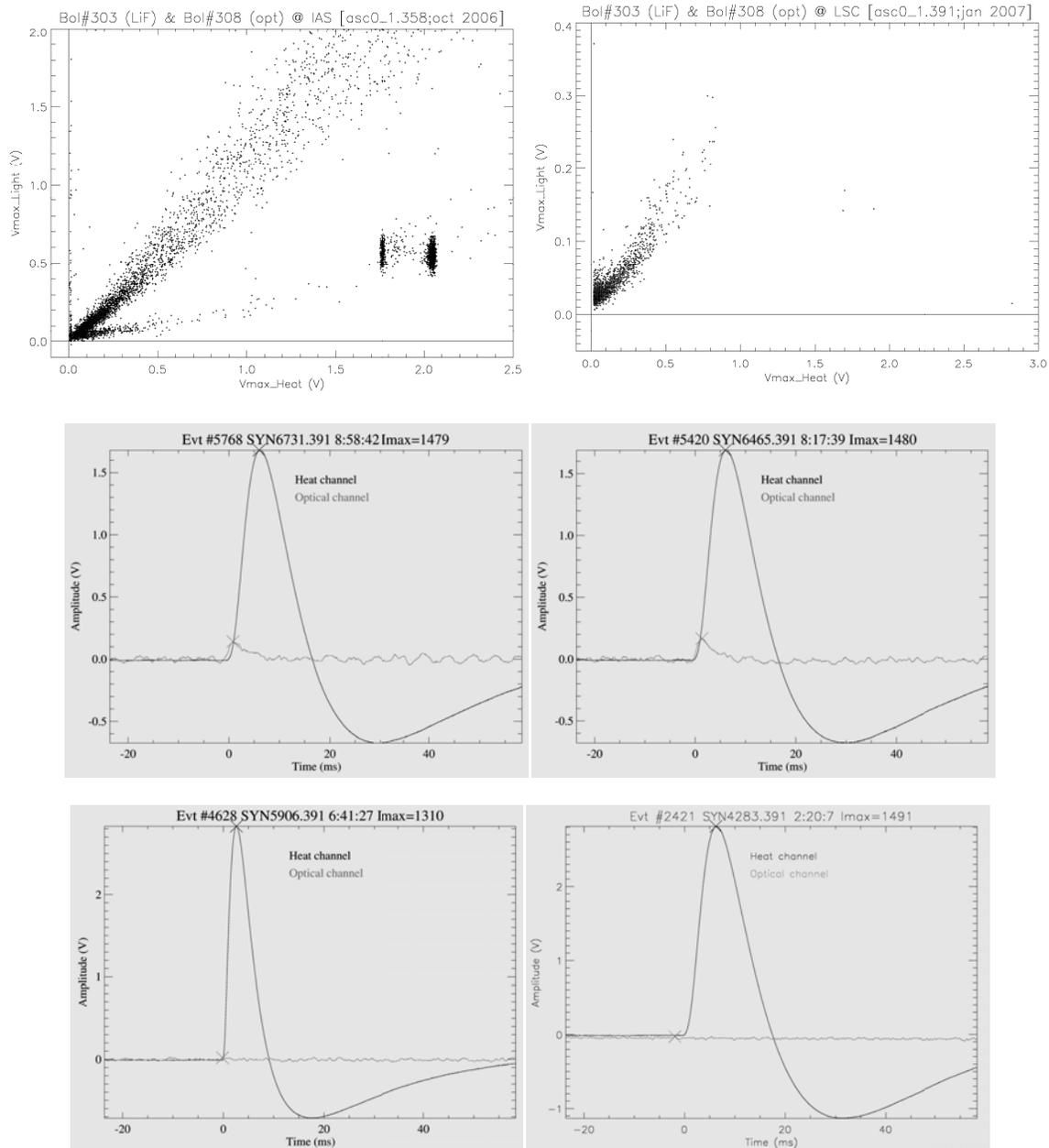


Figure 31

Haut : Spectres comparés des fonds IAS (oct 2006 ; avec calibration alpha) et Canfranc (LSC, janv 2007 ; sans calibration alpha) dans les mêmes conditions de température et polarisation des bolomètres LiF et optique. Durée de la mesure ≈ 15 h (une nuit). On remarquera l'absence de rayons cosmiques sur la branche gamma au Canfranc, et les deux événements qui sont apparus dans la nuit à la position des neutrons. On note également un événement alpha (^{210}Po ?) dans le LiF et le spectre du Canfranc et un événement alpha sans contrepartie optique dans le même spectre (désintégration dans la colle ?). Ces événements sont représentés sur les figures suivantes. On a pu déduire de ces mesures, par une mesure directe la première fois au Canfranc, une limite du flux de neutrons thermiques $\Phi_{\text{nth}} \leq 2 \cdot 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$. Ce flux est 150 fois plus élevé au niveau de la mer $\Phi_{\text{nth}} \leq 300 \cdot 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ à l'IAS, pour la nuit de mesure considérée.

Bas : Événements atypiques (i.e hors fond gammas) relevés dans le bolomètre de 33g en LiF au Canfranc. En haut : les 2 neutrons relevés qui sont curieusement arrivés à quelques minutes d'intervalle ! En bas à gauche : un événement « senseur » dans le Ge-NTD (car plus rapide et sans lumière). En bas à droite : probablement un alpha dans un collage (car sans contrepartie optique).

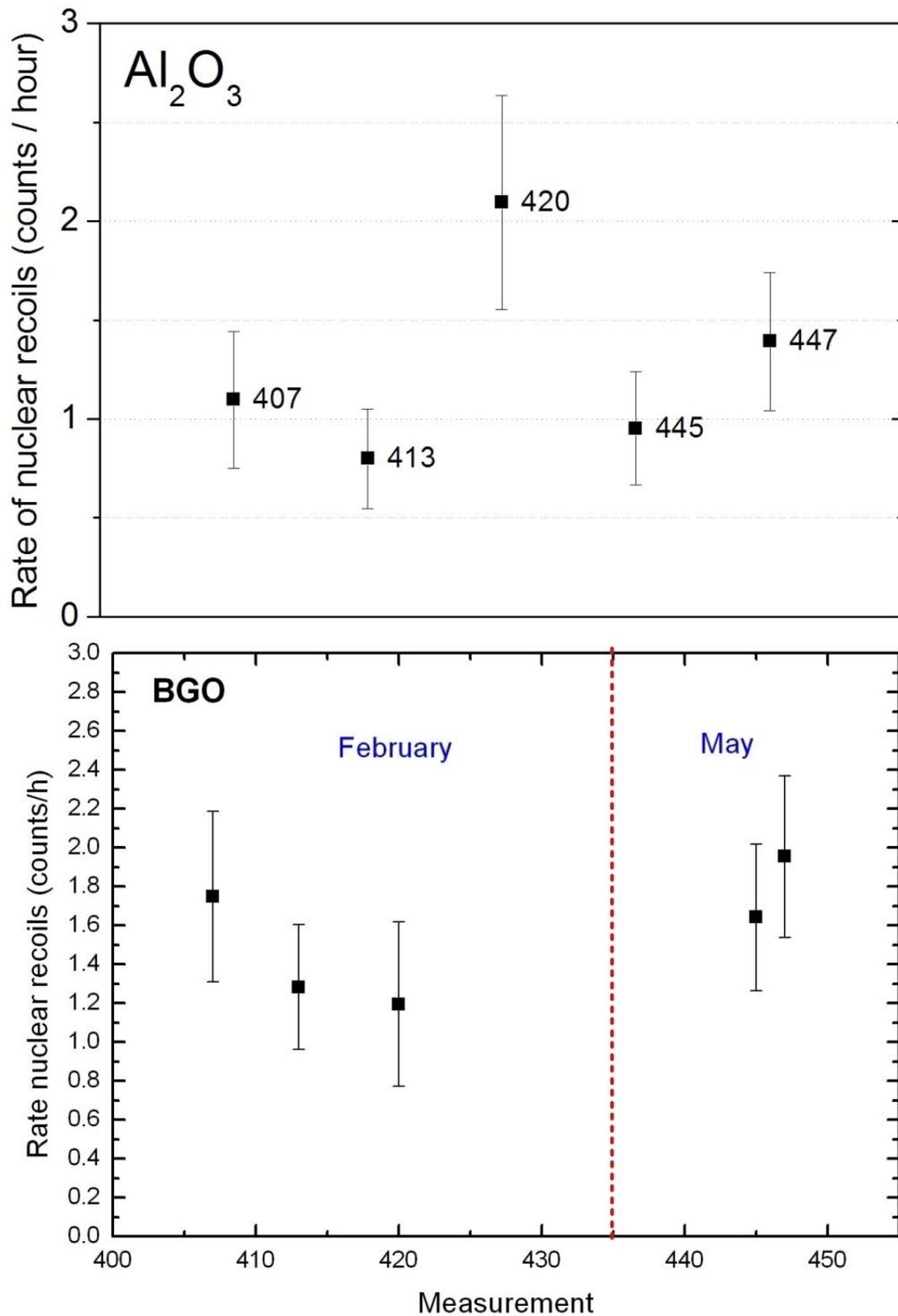


Figure 32

Fond des événements non ionisant –i.e sans lumière– dans le saphir puis dans le BGO de février à mai 2007 au Canfranc: les fonds relevés sont trouvés relativement constants ($25\text{keV} < E < 200\text{keV}$). Ces événements ont pu être cernés précisément dans les données grâce à la calibration neutrons ^{252}Cf réalisée en novembre 2007 au Canfranc.

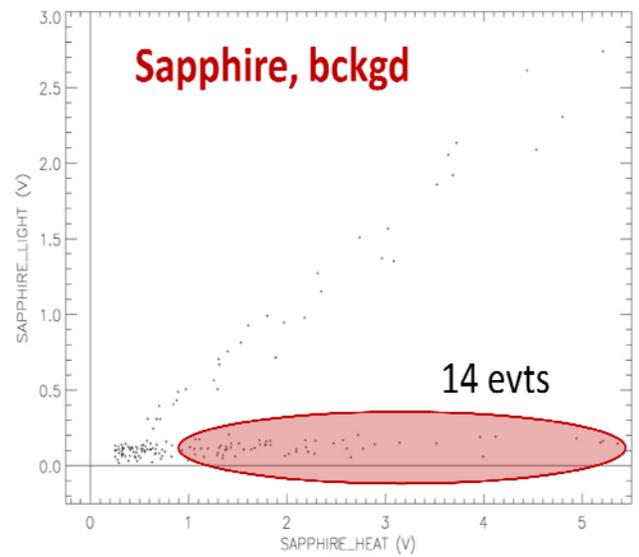
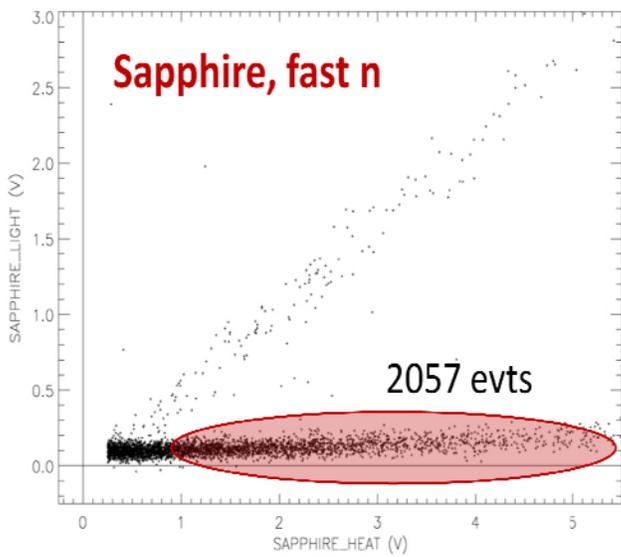
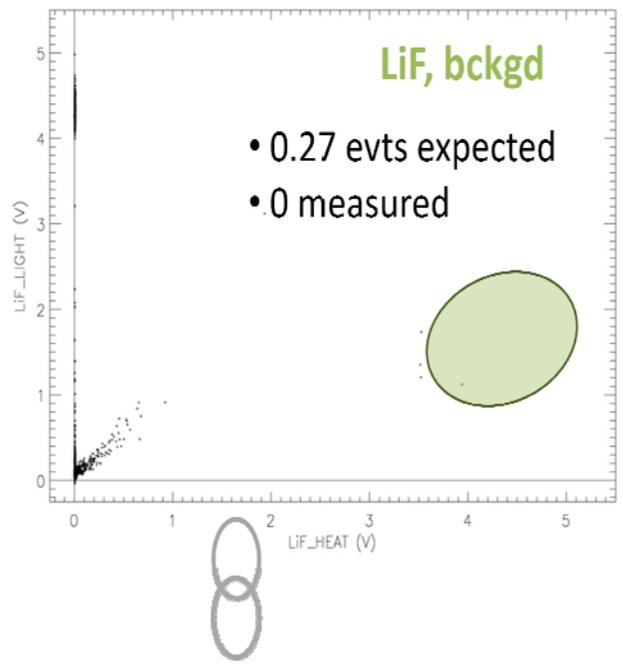
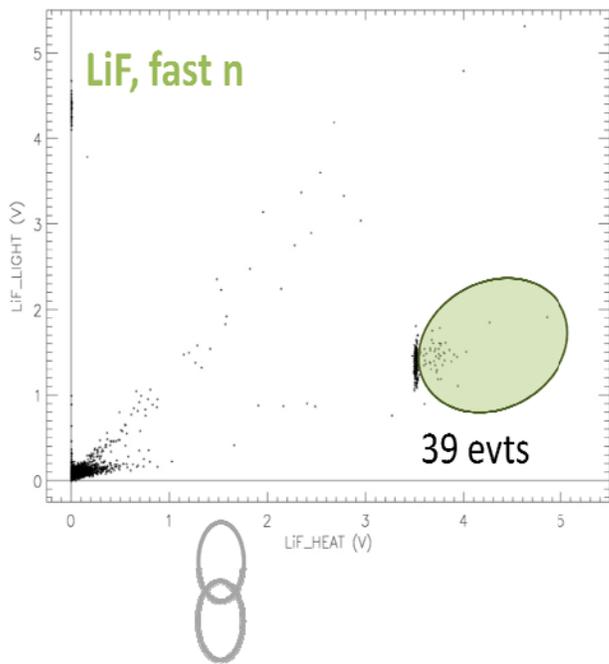


Figure 33

Tentative d'utilisation croisée des données des bolomètres de 33g en LiF et saphir pour estimer la composante « neutron » sur le bolomètre saphir : l'irradiation par une source ^{252}Cf non thermalisée provoque des reculs dans les deux détecteurs et des captures dans le LiF sous l'action des neutrons rapides (diagrammes de gauche). En supposant que le fond de neutrons ambiants du Canfranc possède le même spectre que la source (neutrons de fissions) on en déduit par une simple règle de trois le taux d'événements de capture 0.27 neutronique que devrait mesurer le bolomètre LiF si les 14 événements non ionisants dans le fond saphir ($\sim 15\text{h}$) étaient tous des reculs. L'efficacité de détection du LiF est insuffisante pour permettre de confirmer ou de rejeter cette hypothèse : on attend moins d'un événement dans le même temps (0 évt. relevé ; 0.27 évt. attendu). L'événement relevé dans le fond du LiF vers [3.9V, 1.15V] à faible taux de lumière et vu également dans d'autres données est probablement un alpha de ^{210}Po d'après son énergie ($\sim 5.4\text{ MeV}$). Les 3 événements relevés dans le fond du LiF sont à la position de la capture des neutrons thermiques : de tels événements ont permis de mesurer pour la première fois le flux correspondant au Canfranc.

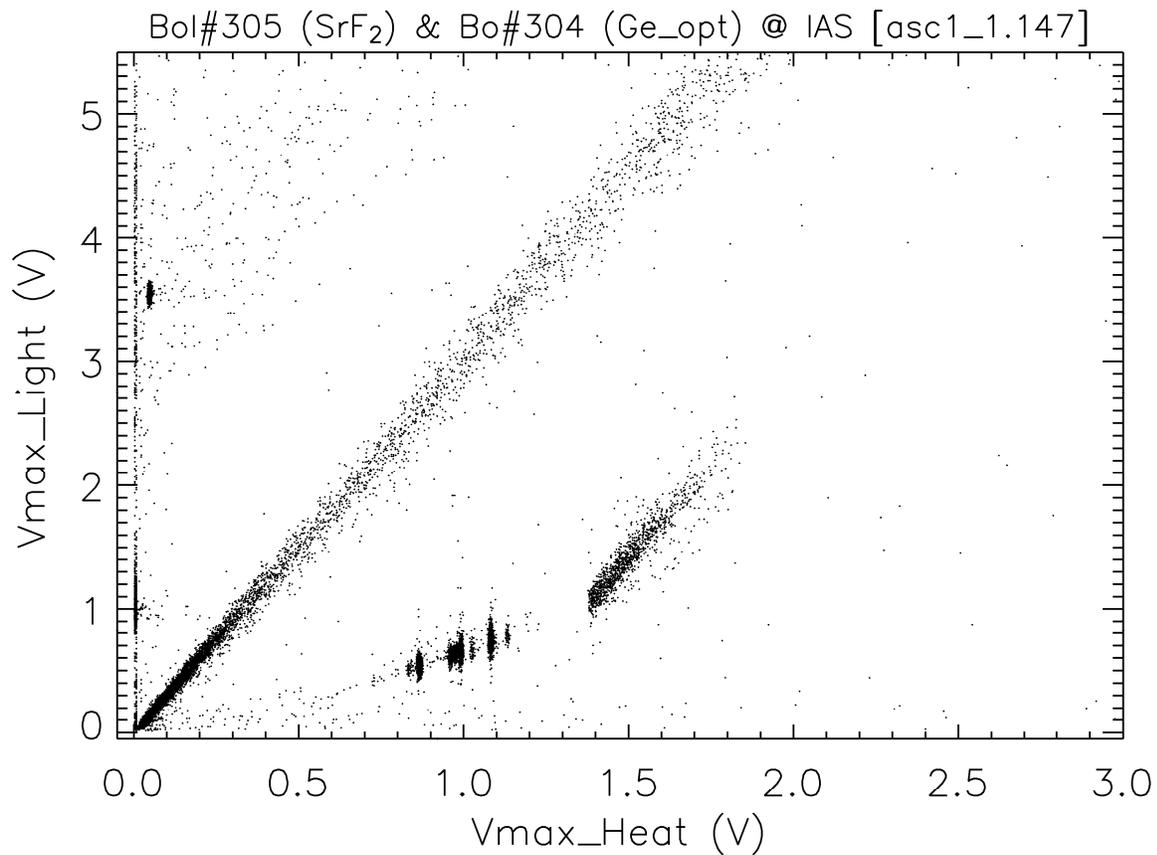
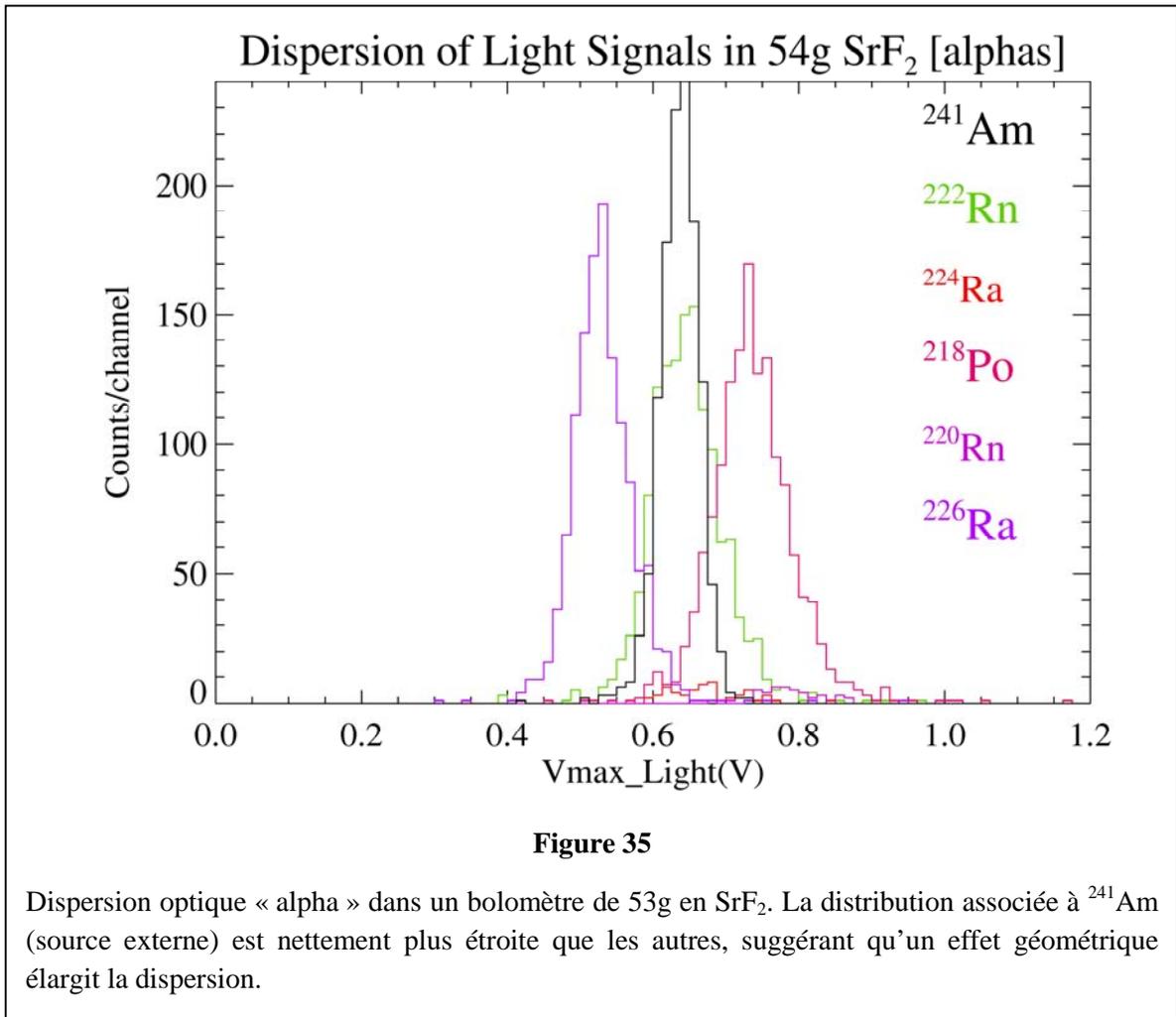


Figure 34

Diagramme de discrimination « lumière et chaleur » dans un bolomètre de 53g en SrF₂ (partie haute énergie ; 15h de pose à l'IAS). On observe principalement la branche diagonale gammas/bêta/rayons cosmiques, et une population à plus faible rendement lumineux associée aux alphas. Les populations associées à une source X (⁵⁵Fe) de calibration du bolomètre optique (vers 1V), ainsi qu'au signal d'excitation optique par une LED IR (vers 3.5V) sont également visibles aux faibles signaux de chaleur dans le SrF₂. Une série de raies alphas est visible, attribuées aux chaînes de décroissance de ²²⁶Ra et ²³²Th. On observe la présence remarquable d'une population attribuée à la coïncidence β+α de la cascade BiPo, ²¹⁴Bi→²¹⁴Po(164μs)→²¹⁰Pb. Le bolomètre, trop lent, somme naturellement ces deux désintégrations.



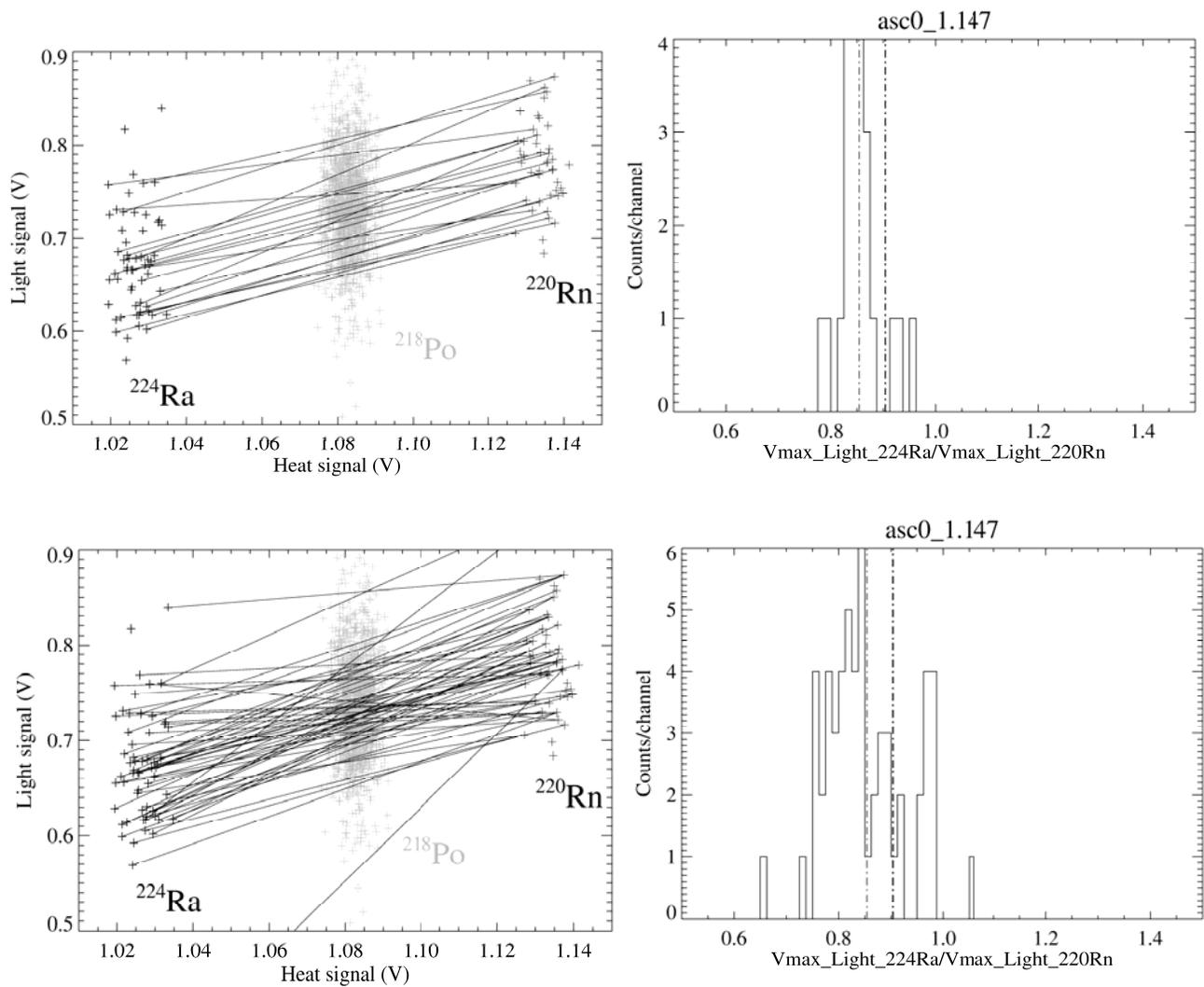


Figure 36

Mise en évidence d'un effet de localisation dans la scintillation d'un cristal de SrF_2

En haut : paires réelles $^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$ dans un bolomètre de 53 g en SrF_2 et rapport de leurs signaux optiques. La distribution des rapports est centrée sur le rapport des moyennes des signaux des deux distributions (en gris), non loin du rapport attendu des énergies (en noir) : ce décalage s'explique par une faible non linéarité du signal de scintillation alpha.

En bas : Paires arbitraires $^{216}\text{Po} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$ dans ce même bolomètre obtenues par « renversement du temps » et rapport de leurs signaux optiques. La distribution du rapport des intensités est nettement élargie : ce test simple – inédit à notre connaissance – permet de certifier qu'une part de « localisation » entre dans la largeur des distributions des signaux optiques.

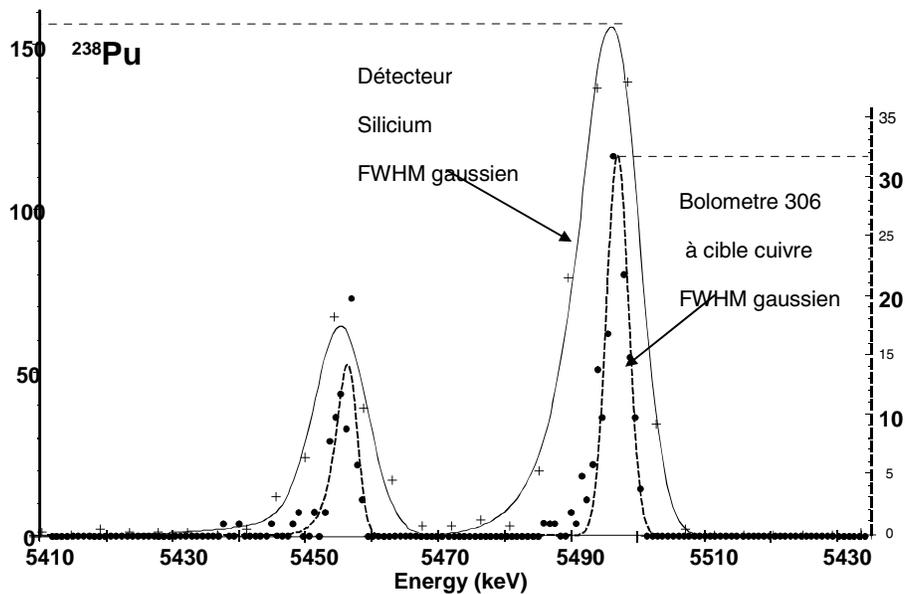
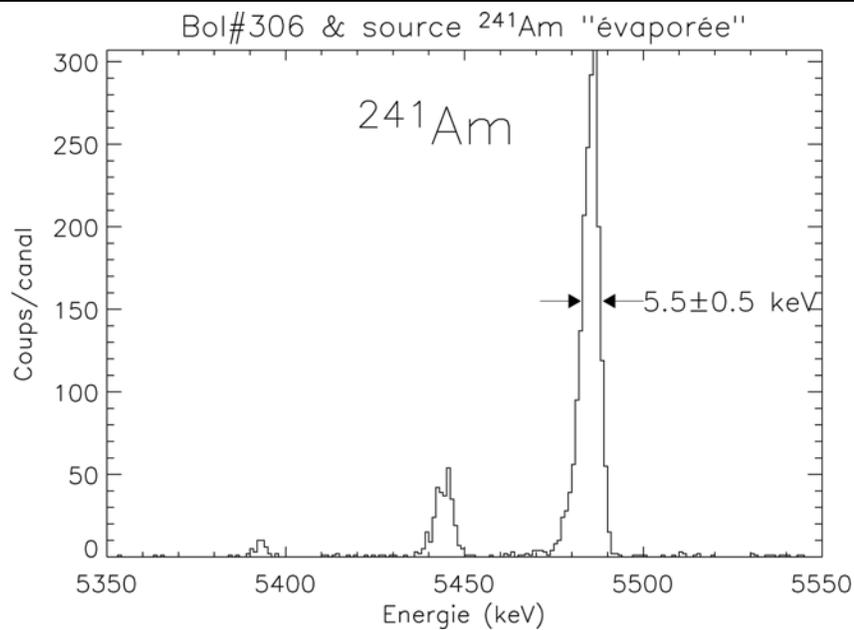
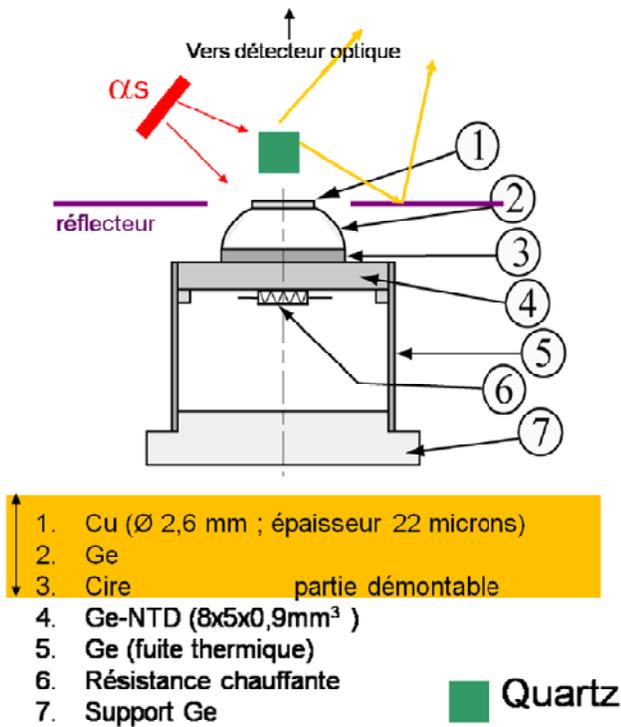


Figure 37

Haut : Spectre d'une source alpha externe haute qualité avec le bolomètre B306 (configuration : cible démontable en **cuivre ultra pur** de diamètre 1.5mm & « yoyo » en Ge pur). La résolution est meilleure que 6 KeV à mi hauteur sur une source externe. Par ailleurs ce détecteur de 4 ms de constante de temps a un bruit propre de 600 eV seulement permettait d'espérer une résolution encore meilleure avec une source sélectionnée et avec une chaîne d'acquisition de plus grande dynamique (cf ci-dessous)

Bas : Spectres d'une source alpha ^{238}Pu électro-déposée et donc ultra mince réalisés soit avec un détecteur classique silicium à barrière de surface soit avec notre bolomètre à cible démontable le plus performant (B306). Dans ce cas l'absorbeur est en cuivre ultra-pur et sa capacité calorifique à 20 mK est égale à celle d'un cristal en saphir de 240 grammes ! La résolution de 3.1 keV obtenue à mi-hauteur avec un fit gaussien est exceptionnelle en spectrométrie alpha (Ref. 45 et Pub#2).

Etude du Quartz (SiO_2) à basse T avec un bolomètre « modulaire »



Les « bons » événements (dans le quartz) sont sélectionnés par leur constante de temps sur la voie chaleur

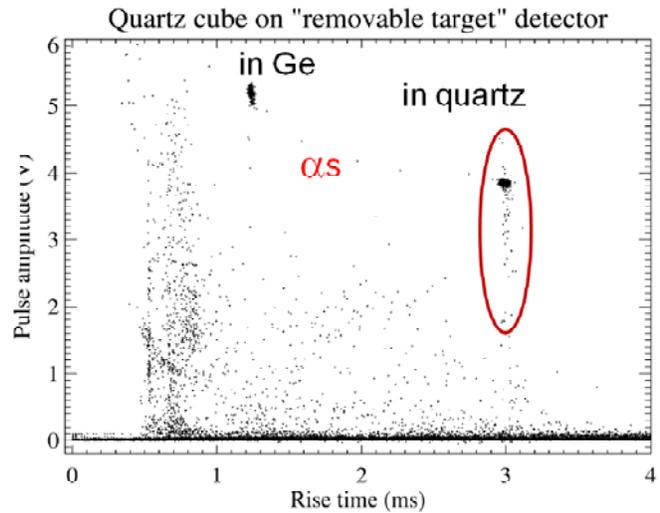


Figure 38

Schéma du bolomètre à cible interchangeable B300 monté avec un cube de quartz, face à un bolomètre optique (étude de la fluorescence à 20 mK et du rapport chaleur/lumière sur alphas et gammas). Les événements dans la cible quartz collée sont sélectionnés et reconnus grâce à la constante de temps de montée de l'impulsion thermique.

Discrimination dans SiO₂ (quartz) à basse T...

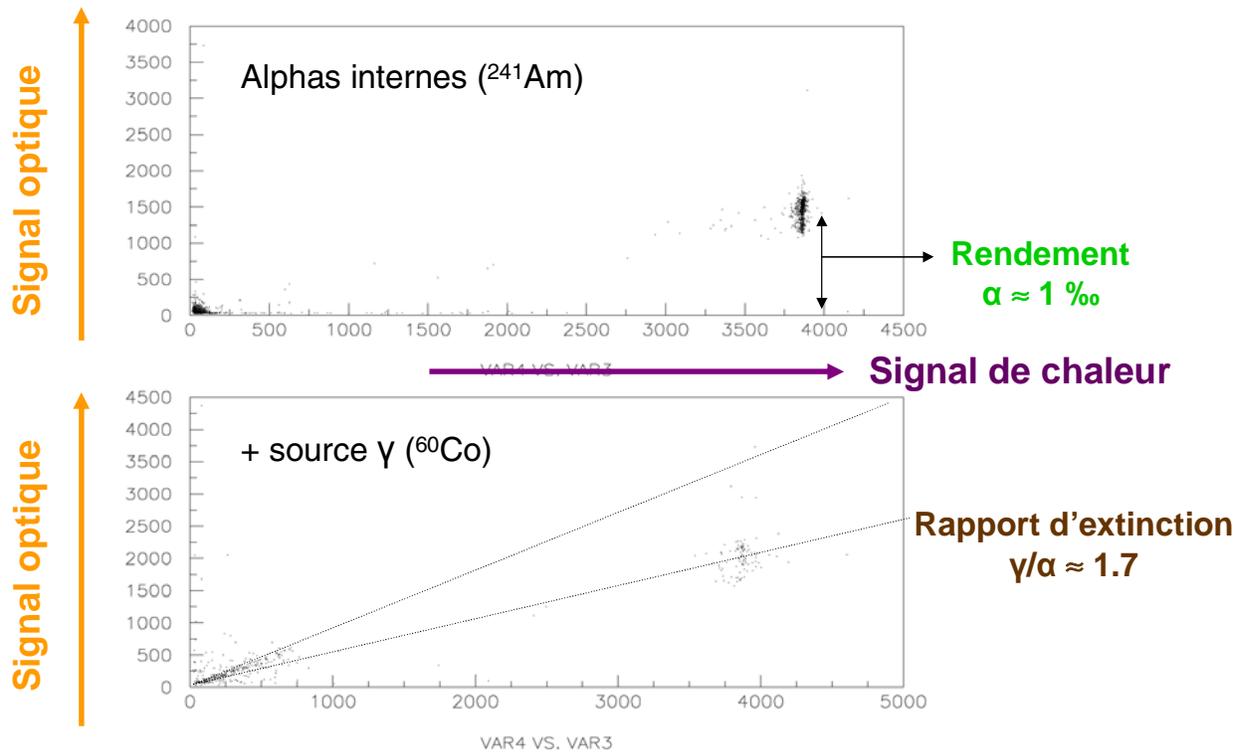


Figure 39

Signal de fluorescence en fonction du signal chaleur pour le bolomètre à cible en quartz avec la source alpha interne fixe et une source gamma externe amovible. Les événements ont été sélectionnés au préalable par leurs constantes de temps (cf. Figure précédente).

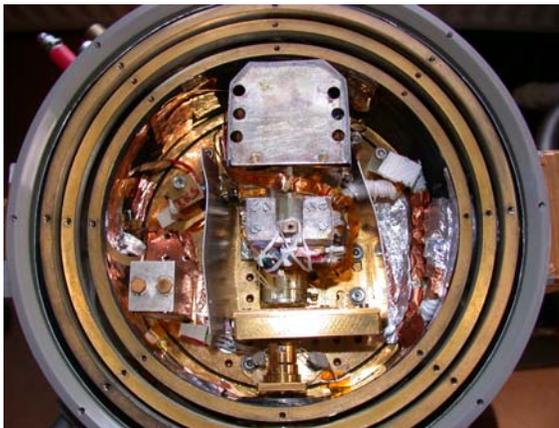
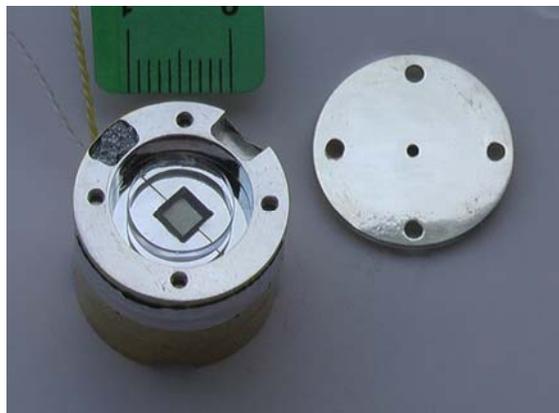


Figure 40

Haut : Bolomètre 0.53 g ^6LiF (enrichi à 95%) pour $T=300\text{ mK}$. On distingue la cible cylindrique ($\Phi=10\text{ mm}$; épaisseur=2.62 mm) ; Ce détecteur est identique au Bol#322, testé à Cadarache.

Milieu : Intégration du bolomètre Bol#322 de 0.53 g ^6LiF sur un pot 300mK. Le pot est lui-même monté sur la platine 4 K d'un cryostat hélium type « CDL4 » de l'IAS. Un dispositif porte source et un corps noir modulable –non utilisés– étaient également présents lors de la calibration sur AMANDE à l'IRSN (bas de la photo), interposés entre la fenêtre d'entrée et le détecteur. Ils ont probablement gêné la mesure (cf. Figure 41).

Bas : Configuration du banc AMANDE en juillet 2009. On distingue sur les différents bras, le faisceau issu de l'accélérateur, un bras portant le détecteur IAS – ici avec un cône d'ombre intercalé entre le détecteur et la source –, un bras portant un détecteur de référence qui vient se substituer au bolomètre, des détecteurs de champ neutronique en circonférence. Rayon du cercle=hauteur par rapport au sol=6m : on minimise ainsi l'importance le retour de neutrons diffusés vers le détecteur. *Thèse de Johann Gironnet, en cours.*

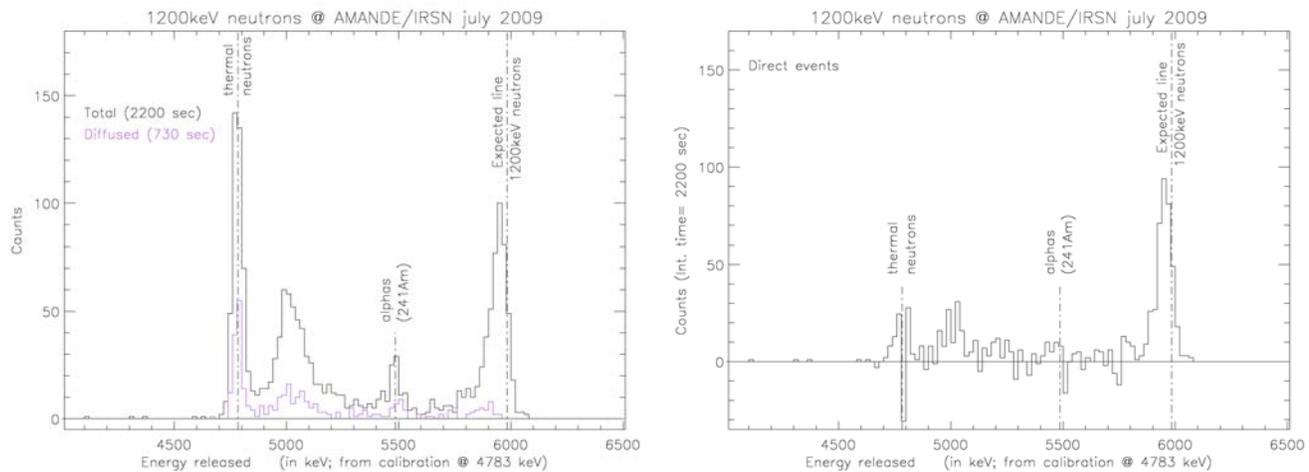


Figure 41

Réponse du détecteur 0.53 g ^6LiF au faisceau de neutrons monocinétiques de 1200 keV délivré par AMANDE

Gauche : on a superposé le spectre de la réaction de capture $n+^6\text{Li}\rightarrow\alpha+^3\text{H}$ dans les deux configurations : « sans cône d'ombre » (durée 2200s) et « avec cône d'ombre » (durée 730s). Dans cette dernière configuration, les neutrons incidents ne peuvent atteindre directement le détecteur. On identifie ainsi la partie diffusée du spectre « sans cône ». Une source ^{241}Am interne ($E=5486$ keV) permet de calibrer le détecteur en l'absence de la composante des neutrons thermiques à $Q=4783$ keV. C'est cette dernière, présente dans toutes les prises de données en raison de l'environnement proche du détecteur (beaucoup de matière diffusante !) qui est utilisée finalement pour la calibration et donc la restitution de l'énergie du neutron incident. L'efficacité de détection de ce petit bolomètre est mesurée à 0.18% en utilisant les données de calibration « primaires » du détecteur de référence de l'IRSN sur AMANDE. Elle est estimée par ailleurs à 0.34% d'après les tables de section efficace de la réaction à 1200 keV : l'accord est plutôt bon, et le facteur 2 manquant s'explique probablement par l'absorption/diffusion des neutrons dans le cône de visée par les différents matériaux du cryostat intercalés entre le détecteur et la source de neutrons (cf. Figure 40). La bosse observée à 240 keV de la raie des neutrons thermiques signe la résonance dans la réaction de capture.

Droite : Spectre final des neutrons « directs » de 1200 keV, restitué par le détecteur après normalisation et soustraction des neutrons diffusés (\equiv manip « sans cône » – manip « avec cône », à durées équivalentes de 1200 sec). On relève un écart léger ΔE du centre de la distribution par rapport à la position attendue de la raie de capture, estimé à $\Delta E\approx-30\text{keV}$ à cette énergie. L'origine de cet écart n'est pas encore connue : importance croissante du piégeage et/ou de l'émission de lumière avec l'énergie,...

Thèse de Johann Gironnet, en cours



${}^6\text{Li}(n,t)\alpha$ Neutron detection efficiencies of LiF bolometers

(cubic LiF detectors, normal n incidence; ${}^6\text{LiF}$ enriched detectors with 95% ${}^6\text{Li}$; single interaction assumed)

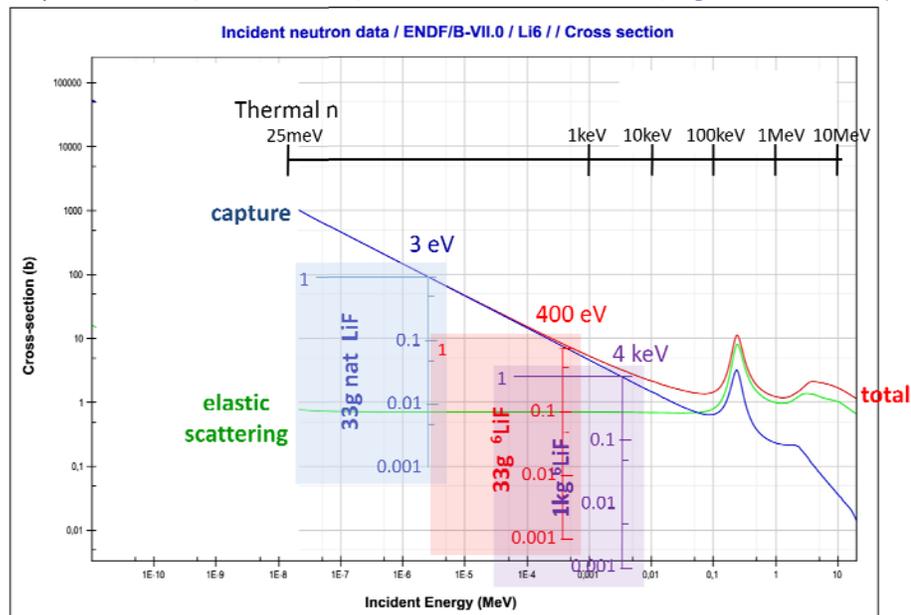


Figure 42

Haut : premier cristal massif de ${}^6\text{LiF}$ de 33g après tirage par l'ICMCB à Bordeaux selon la méthode Kyropoulos.

Bas : efficacité de détection des neutrons de bolomètres en LiF.

Les sections efficaces de diffusion élastique et de capture sont tirées des tables ENDF/B-VII.0. La figure permet d'estimer l'efficacité de détection de bolomètres en natLiF de 33g (bolomètre en LiF naturel utilisé sur ROSEBUD en 2007), ou en ${}^6\text{LiF}$ (LiF enrichi en ${}^6\text{Li}$ à 95%) de 33 g et de 1 kg. L'efficacité de détection suit la section efficace de capture (courbe bleue) pour les énergies de neutrons à partir desquelles le cristal cesse d'être opaque, c'est-à-dire respectivement à partir de 3 eV, 400 eV et 4 keV pour les cibles considérées. Ainsi, l'efficacité de détection de neutrons de 200keV–à la résonance– sur le bolo 33g natLiF est estimée à 3.3% sur 33g natLiF (échelle bleue), 46% sur 33g ${}^6\text{LiF}$ (échelle rouge) et 100% sur 1kg ${}^6\text{LiF}$ (échelle violette). Les mêmes chiffres à 1 MeV donnent respectivement 0.24% sur 33g natLiF, 3.2% sur 33g ${}^6\text{LiF}$ et 10% sur 1kg ${}^6\text{LiF}$. Le gain en efficacité de détection par neutron en incidence normale est proportionnel à l'abondance en ${}^6\text{Li}$ et à l'épaisseur de cristal traversée [\propto masse^(1/3)]. Les réactions multiples ne sont pas prises en compte dans cette estimation et les efficacités sont donc probablement légèrement sous-estimées. On a négligé également les réactions en compétition, d'où cette fois-ci, une légère surestimation probable de l'efficacité pour les cibles de fortes masses...

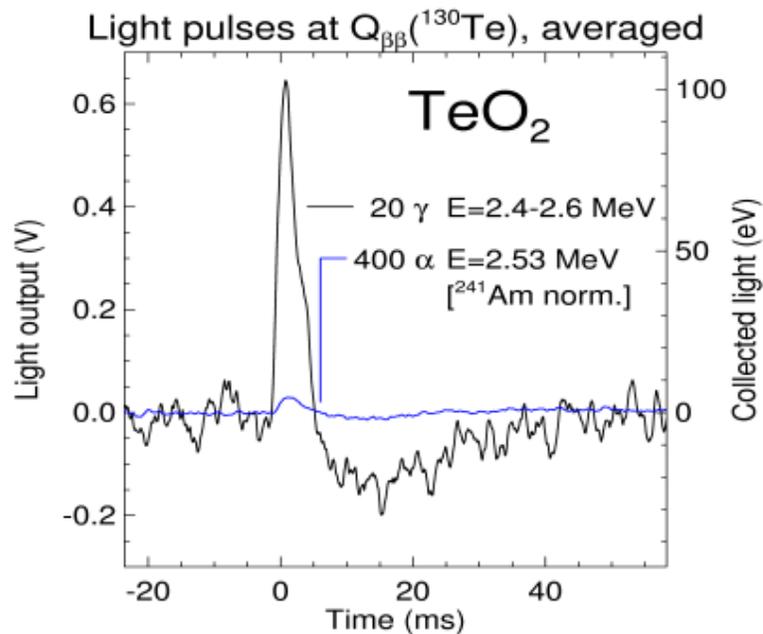
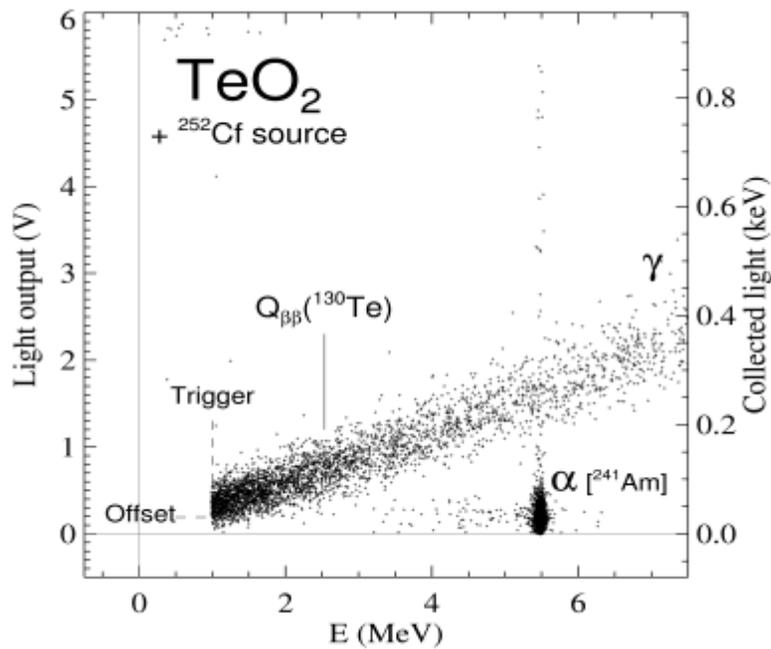
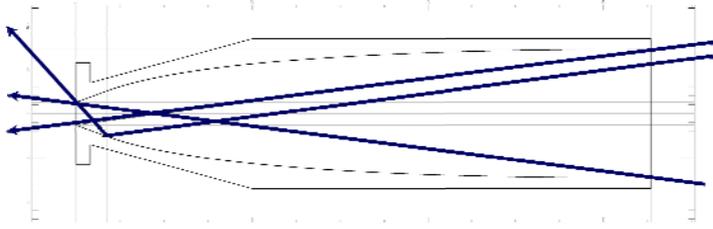


Figure 43

Haut : Diagramme de discrimination « Lumière/Chaleur » relevé lors d'une mesure réalisée à l'IAS sur un bolomètre de 25g en oxyde de tellure (TeO_2), sous irradiation ^{252}Cf . En dépit du très faible rendement lumineux, une séparation gammas/alpha s'avère possible à l'énergie de la désintégration double bêta sans neutrino de ^{130}Te ($Q_{\beta\beta}=2.53$ MeV) que recherche activement le groupe de Milan (expérience CUORE au Gran Sasso)

Bas : Impulsions optiques moyennes issues de ≈ 20 gammas et de ≈ 400 alphas (après normalisation), à l'énergie de la désintégration $\beta\beta$: la différence entre les deux signaux souligne la faisabilité d'une séparation du fond alpha qui est un des principaux facteurs limitant la sensibilité de ces expériences (présentation LTD10 & Réf. 36).

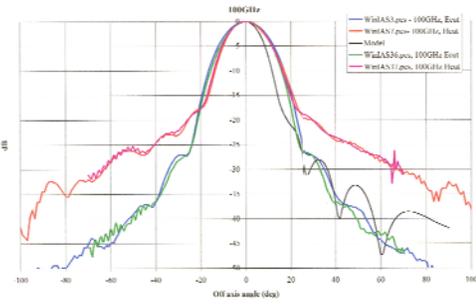
Collecteur IAS ($S\Omega=9\text{mm}^2.\text{sr}$, acceptance $\Theta=15^\circ$)



Réalisations bolomètres IAS/collecteurs IR-Lab (calibration Planck-HFI)



Mesures à Cardiff à 100GHz ($\lambda=3\text{mm}$)



Profil de deux cones IAS/IR_lab (B. Maffei)
(avec simulation)

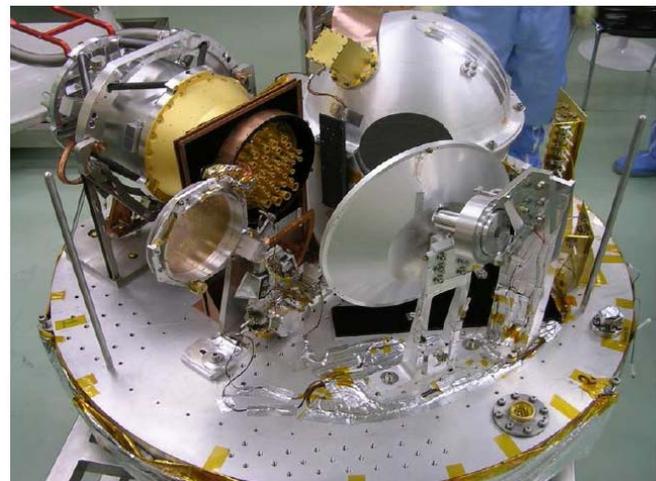
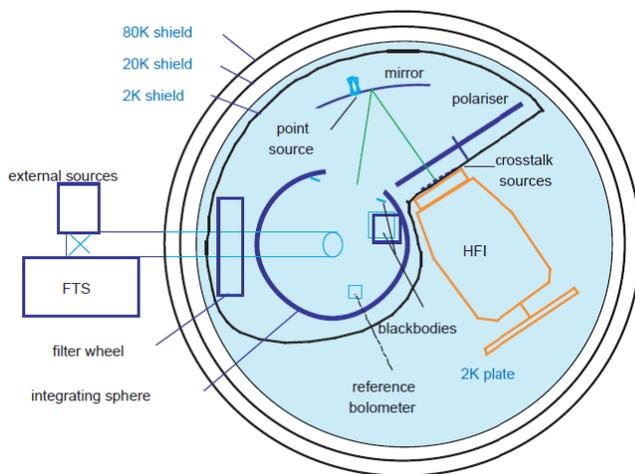


Figure 44

Bolomètres 300mK réalisés pour la calibration à l'IAS de Planck HFI (Photo des bolomètres dits « Référence » et « Etalon » avec un concentrateur libre. Un profil de concentrateurs de type cône-paraboliques a été défini pour répondre au cahier des charges imposé pour la calibration (étendue de faisceau $S\Omega$, angle d'acceptance) : réalisés par la société IRLab, leurs caractéristiques optiques ont été vérifiées à Cardiff. La réponse de ces détecteurs, dotés d'une calibration électrique, a été garantie à 10% près dans une configuration sans concentrateur après des calibrations dédiées par corps noir, source alpha et substitution électrique. Le planning serré de la calibration et des retards dus à la cryogénie n'ont pas permis d'utiliser le bolomètre étalon au plan focal de Planck HFI comme cela avait été prévu. Le bolomètre dit de Référence, placé dans la sphère intégratrice (voir schéma, Ref. 58) a par contre été utilisé tout au long de la calibration sol de Planck HFI à l'IAS (photo : modèle de vol sur la platine 2K du cryostat Saturne). Sensible dans le domaine (sub)mm, il a permis de caractériser les différentes sources et de fournir une référence stable pendant la calibration de Planck HFI.

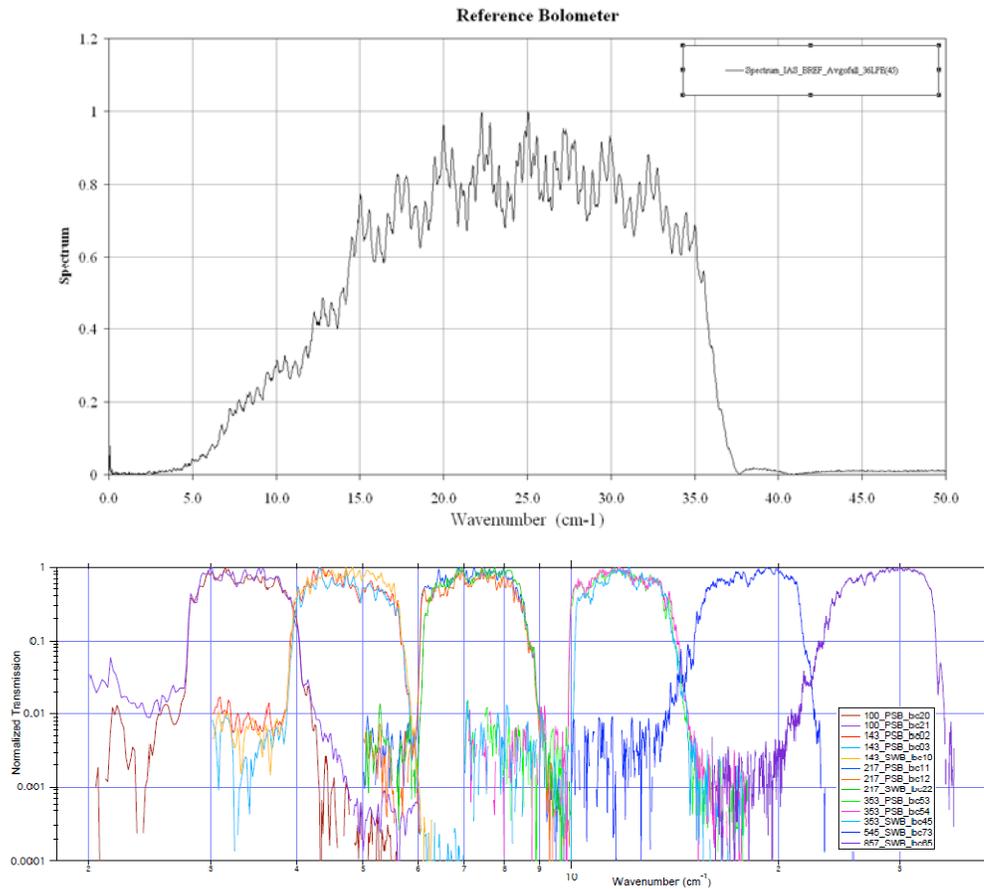
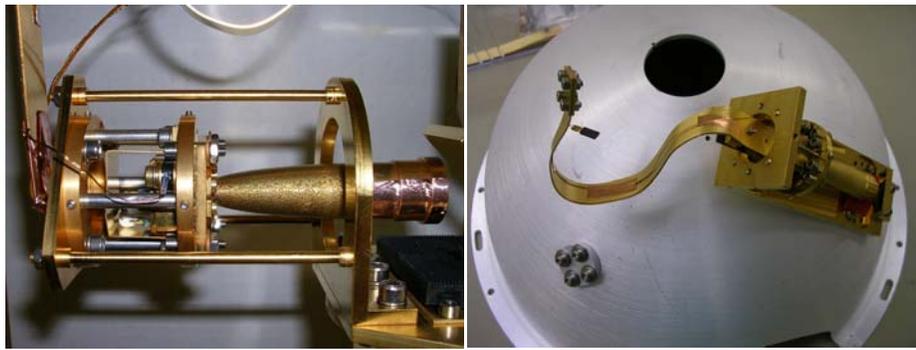


Figure 45 : Calibration de Planck HFI à l'IAS.

Haut : Photos de l'intégration du bolomètre dit « de Référence » sur son support 2K avant sa fixation à la sphère intégratrice. La languette de cuivre couple thermiquement le détecteur à un pot ^3He (300mK). Les colonnettes en inox assurent l'isolation thermique entre 300 mK et 2 K (conception mécano-thermique : Jean-Claude Renault, IAP & François Pajot, IAS)

Milieu : Spectre (sub)mm délivré par le spectromètre à transformée de Fourier (FTS), enregistré par le bolomètre « de Référence ». Ce dernier – à réponse plate- enregistre la structure fine optique de la source de calibration dans une bande passante large couvrant les six bandes de Planck HFI. (extrait de *HFI - Spectral Calibration report of the IAS measurements, Version 1.05, G. Savini, F. Pajot & P.A.R. Ade, 2006*)

Bas : La division par cette structure du spectre enregistré en parallèle par chaque pixel de Planck-HFI a permis d'en déduire leur transmission, une donnée essentielle de la calibration sol pour une soustraction correcte des différents avants plans du CMB mesurés en vol (*note : $100\text{ GHz} \approx 3.33\text{ cm}^{-1} \leftrightarrow \lambda = 3\text{ mm}$; $857\text{ GHz} \approx 28.6\text{ cm}^{-1} \leftrightarrow \lambda = 350\text{ }\mu\text{m}$*).

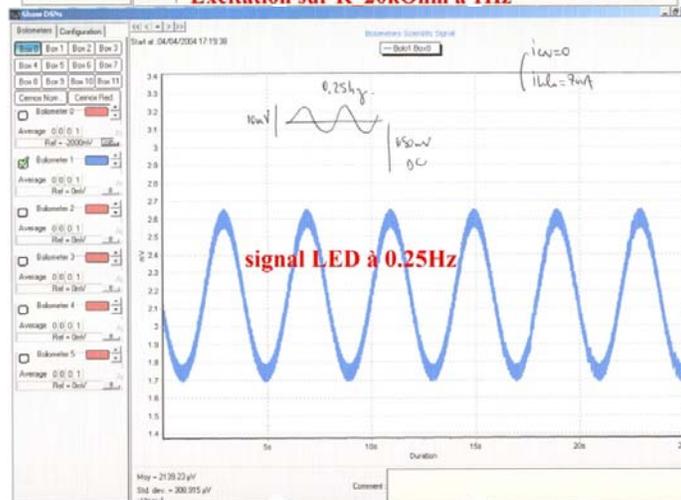
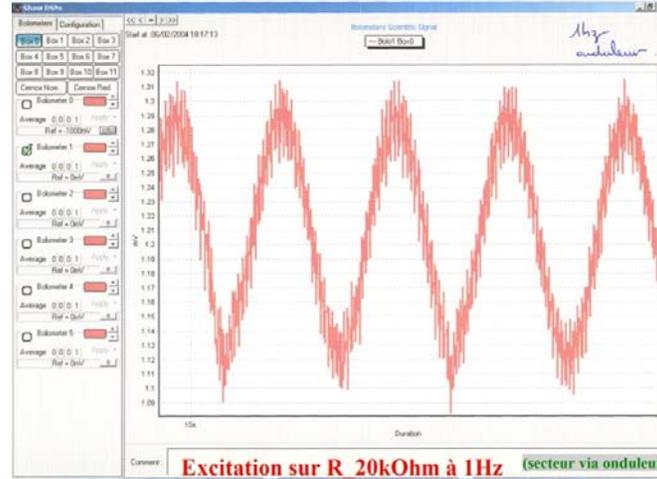
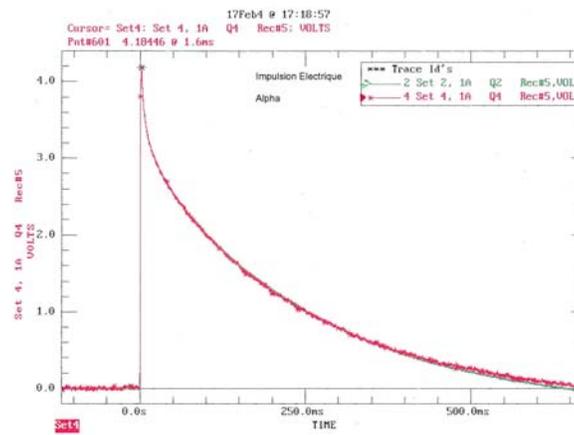


Figure 46 :

Caractérisation d'un bolomètre étalon IAS/STAP pour Planck HFI

Haut Deux impulsions superposées provenant d'un créneau « Joule », dans un chip résistif et d'une particule alpha dans un bolomètre étalon de Planck-HFI. L'accord des formes est remarquable.

Milieu : Signal Joule sur le bolomètre étalon de Planck (Bol#294)

Un signal électrique sinusoïdal de 1 Hz est envoyé à travers la résistance chauffante de 20 kOhm collée sur le détecteur refroidi à 300 mK, puis détecté par l'électronique et le soft « EGSE » du CESR.

Bas : Signal issu d'une LED sur le bolomètre étalon de Planck (Bol#294)

Un signal optique sinusoïdal de 0.25 Hz (et $\lambda=820\text{nm}$) est envoyé via une fibre optique dans la cavité réfléchissante du détecteur. On notera le bien meilleur rapport signal/bruit (absence de diaphonie) que dans la figure précédente.

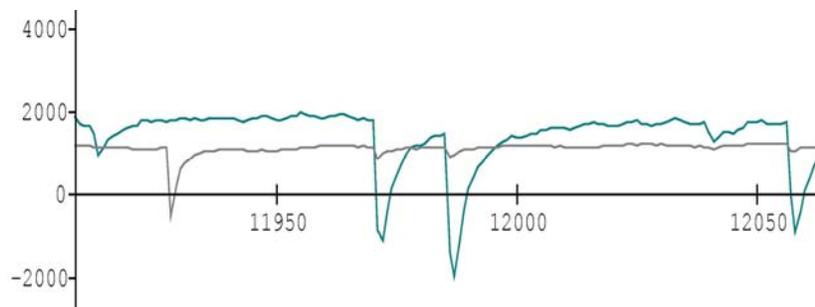


Figure 47

Haut : Bolomètres EDELWEISS en Germanium (à gauche) et IAS en saphir (à droite) en juin 2006 au LSM sur la platine supérieure du banc EDELWEISS-II. (Photo P. di Stefano / M. Luca)

Bas : Signaux simultanés de chaleur (bleu) et de lumière (gris) enregistrés dans les bolomètres IAS B213 (50g saphir) et B285 (Ge optique) lors d'une calibration ^{60}Co au LSM en juillet 2006. Durée de la trace ≈ 0.15 sec. La fréquence d'acquisition de 1 kHz est certainement insuffisante pour séparer à basse amplitude les événements « Ge-NTD » des événements « cible » par une mesure de leur temps de montée (cf. Tableau 1 pour les constantes de temps de B213, et le principe de la séparation avec la Figure 52).

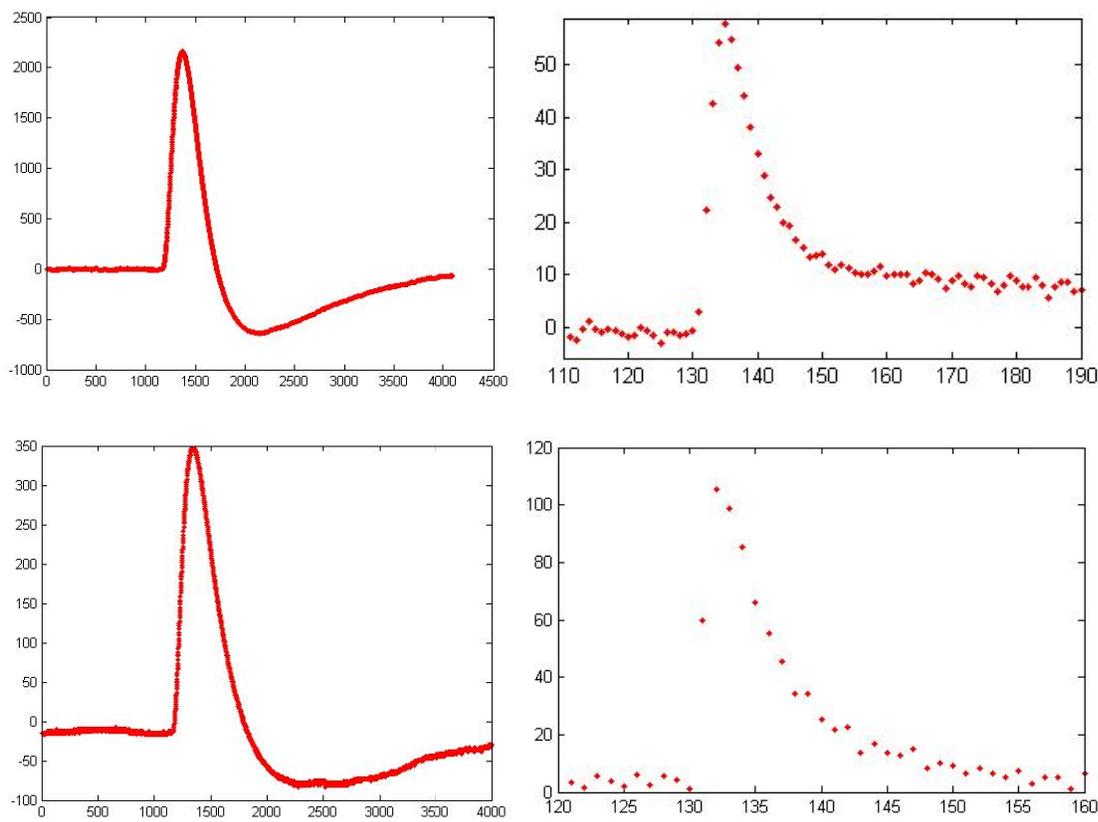
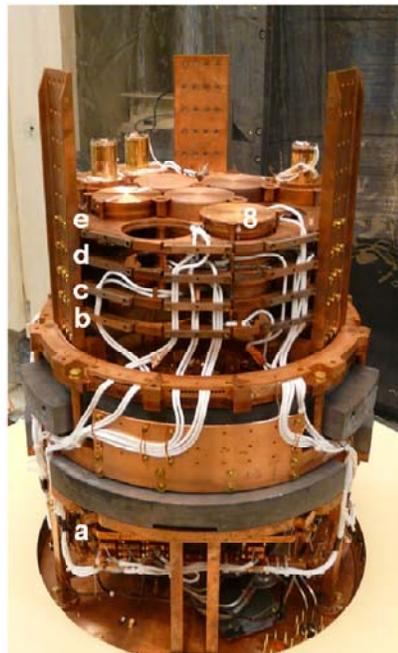


Figure 48 : Ci-dessous : Intégration de trois bolomètres doubles sur la platine haute du banc d'Edelweiss-II au LSM en 2009 : 33g LiF (B303) & 50g saphir (B274), testés au LSC en 2007 ; et 91g BGO (B281). Une source de bruit non identifiée dégrade les performances de ces détecteurs au LSM (impulsions de droite ; DC-1kHz) par rapport à l'IAS ou au Canfranc (impulsions de gauche ; 10Hz-300Hz). On a représenté en haut la désintégration de 209-Bi dans le BGO, et en bas un gamma d'environ 500keV dans le saphir. Les bolomètres optiques ont également été affectés par ce bruit, tandis que le senseur Ge-NTD du 33g LiF s'est décollé de la cible... Les seuils de discrimination dans le saphir sont > 150keV @ LSM (contre 10keV @IAS, 20keV @LSC) et > 250keV @LSM dans le BGO 91g : ils ne permettent pas d'identifier les événements vus en 2007 au LSC dans le saphir.



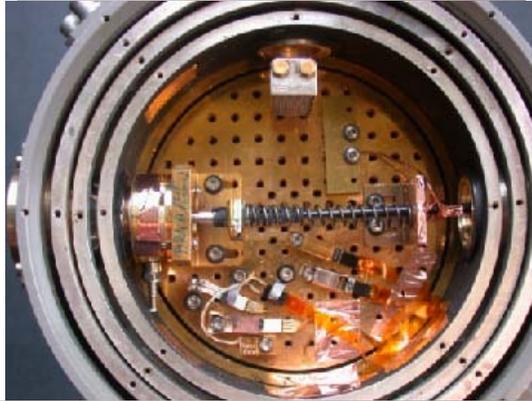


Figure 49

Haut : Cryostat hélium liquide à fenêtre d'entrée Beryllium avec une mini-source X externe (à gauche) et sortie sur fibre optique SMA vers un spectromètre.

Milieu : Fond du cryostat avec les fonds des écrans enlevés. Une cavité avec cristal scintillant est montée.

Bas : Six cavités montées avec des cristaux différents (de LiF à BGO), avec fenêtre aluminium de 13 microns pour l'irradiation X.

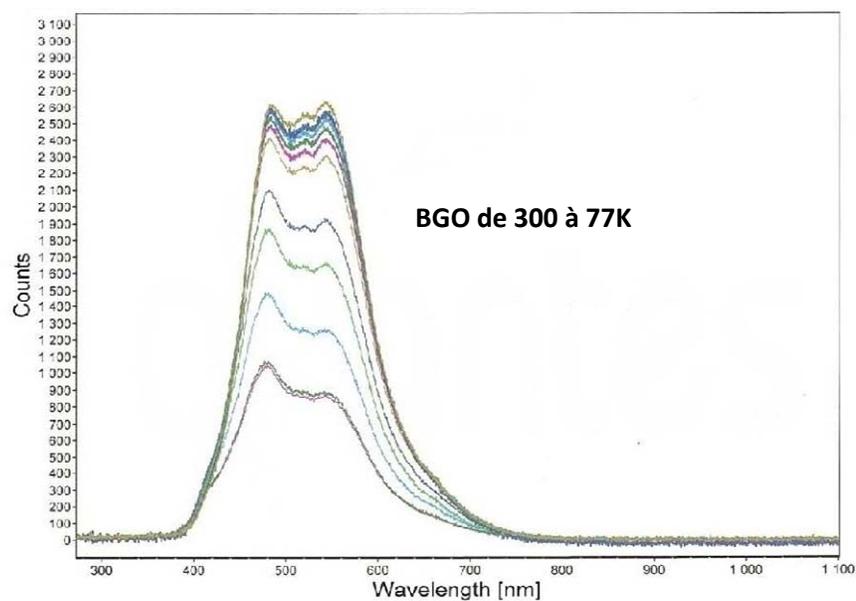
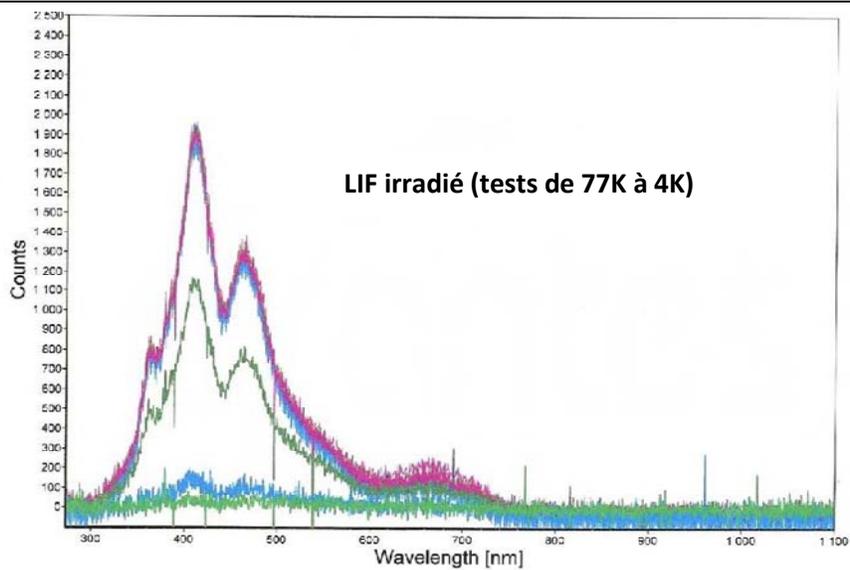


Figure 50

Spectres de fluorescence à froid (λ de 300 à 1100 nm) mesurés à différents paliers de température.

Haut : cristal de LiF irradié (^{60}Co ; 300 000 rads); la fluorescence très faible de 300K à 50K augmente beaucoup en dessous de 30K. Le LiF non irradié suit le même comportement...

Bas : cristal de BGO refroidi entre 300 K et 77 K ; la fluorescence ne change presque plus en dessous de 100 K.

	Référence IAS	Gain de fluorescence X à froid : $\eta(4K)/\eta(300K)$
LiF pur	A24-a	~14
CaF ₂ pur	Bol#314	~2
BGO	A144-5	~2.5
Li ₆ Eu(Bo ₃) ₃	A215-a	~1.8

Tableau 8

Cristaux fluorescents récemment testés dans des cavités refroidies entre 4 K et 300 K avec le cryostat à fibre de l'IAS.

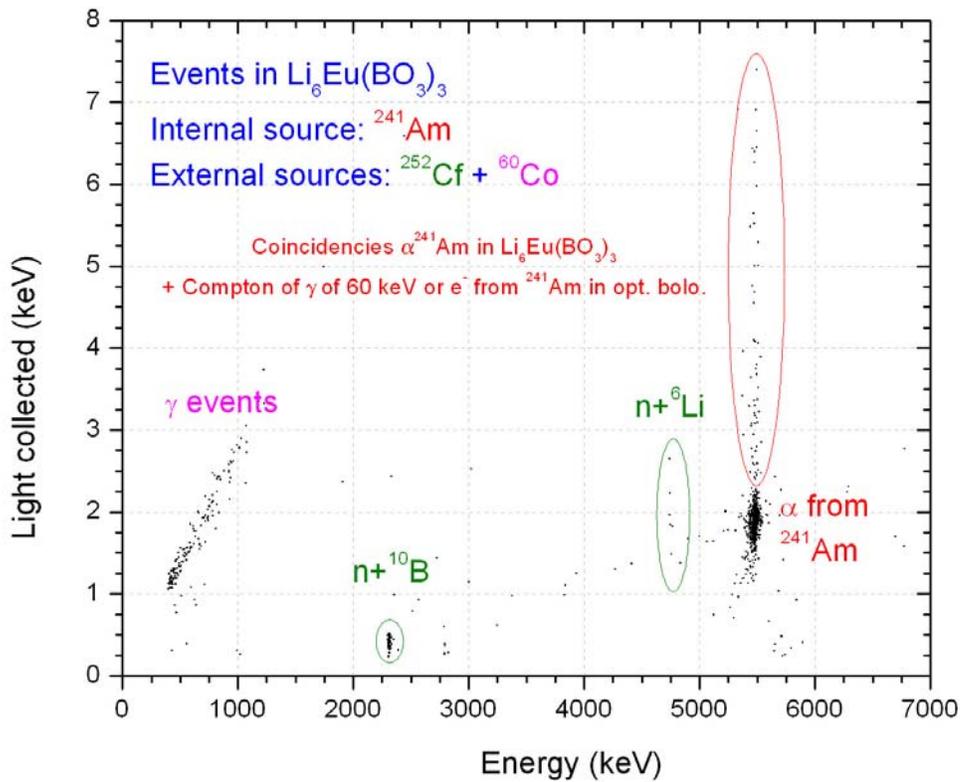
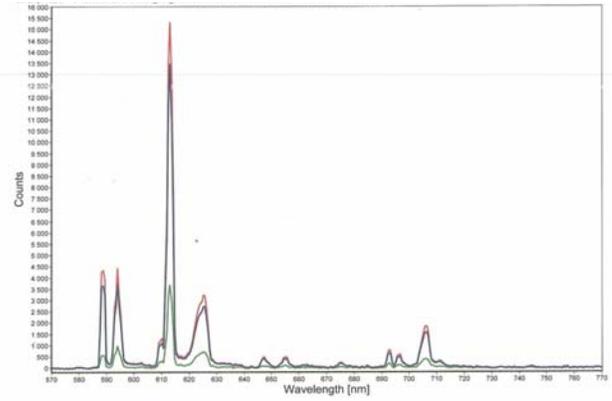
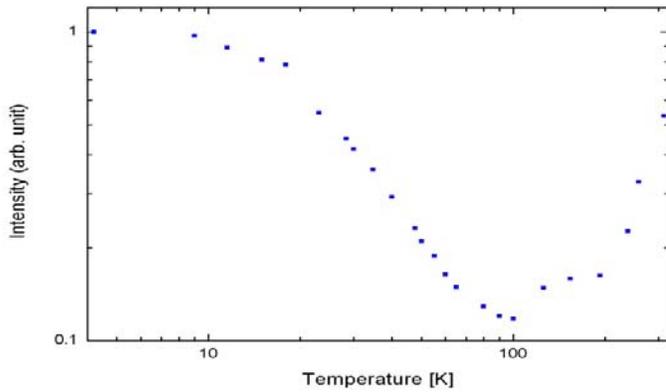


Figure 51

Etude à l'IAS du borate de lithium et d'euporium comme substitut au LiF pour la détection de neutrons

Haut : Mesures de l'intensité de fluorescence entre 4 K et 300 K d'un cristal de Li₆Eu(BO₃)₃ sur le photomètre à fibre IAS (détecteur : photodiode Si) et spectres de la fluorescence à froid du même cristal –fourni par Fedor Danevich de l'INR de Kiev– mesurés avec le photomètre à fibre et comme détecteur notre spectromètre « AVANTES »: mesures 1,4 K (bleu), 4 K(rouge) et 77 K(vert).

Bas : Etude du rapport chaleur-lumière à 20 mK dans un cristal de Li₆Eu(BO₃)₃ en fonction de la radiation (gamma, alpha, neutron). Les neutrons donnent une réaction de capture sur ⁶Li (4.8 MeV) et ¹⁰B (2.31 MeV et 2.79 MeV). L'amplitude du signal optique reflète bien le pouvoir ionisant des produits de capture (fonction décroissante de leur masse). Le cristal est monté sur le bolomètre à cible interchangeable N°300 face à un bolomètre lumière (voir le montage de la Figure 4).

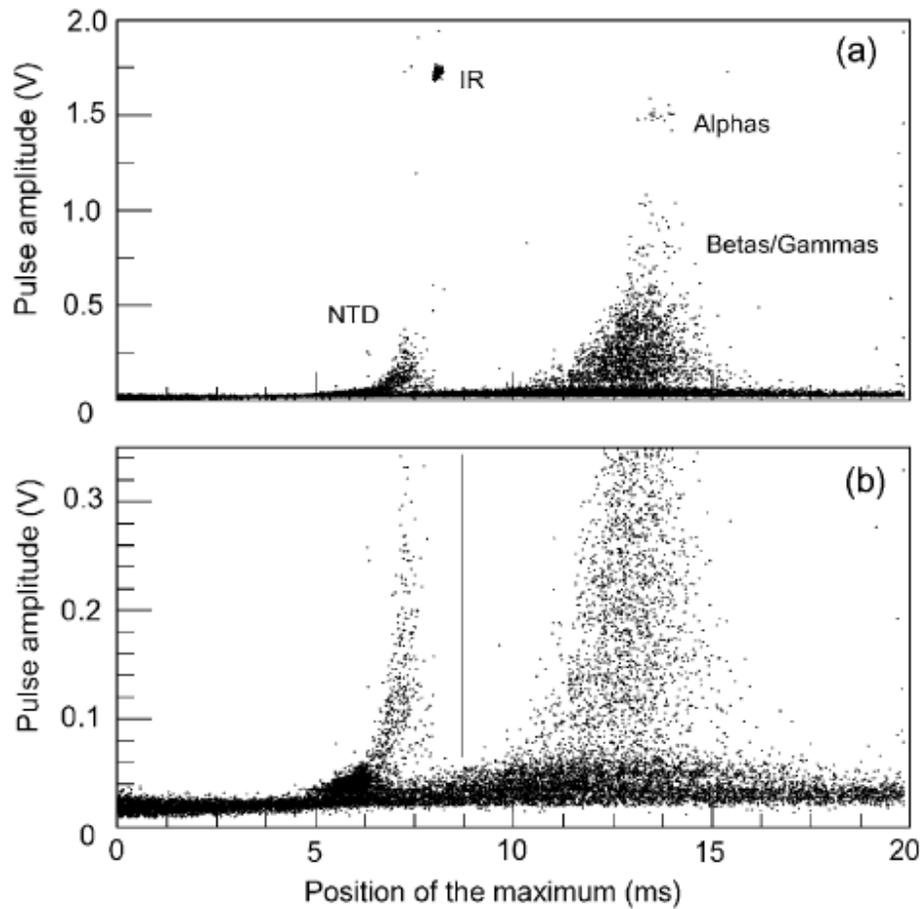


Fig. 8. (a) Pulse amplitude versus the temporal position of the maximum voltage of the pulse (with the trigger position set by software at 5.9 ms) for the case of the CaWO_4 bolometer B278. (b) Detail of the low voltage region of the same plot. A vertical line indicates the NTD discrimination criterion applied: events with its maximum amplitude before 8.75 ms (less than 2.85 ms from the trigger position) are rejected as due to NTD interactions. The discrimination efficiency is practically equal to 100% above 60 mV.

Figure 52

Distribution des temps de montée dans un bolomètre de 54g en CaWO_4 (données Canfranc). Les événements «NTD» sont systématiquement plus rapides, mais en dessous de 50 mV il est impossible de les distinguer des événements « cible ». Figure extraite de la Réf. 40.

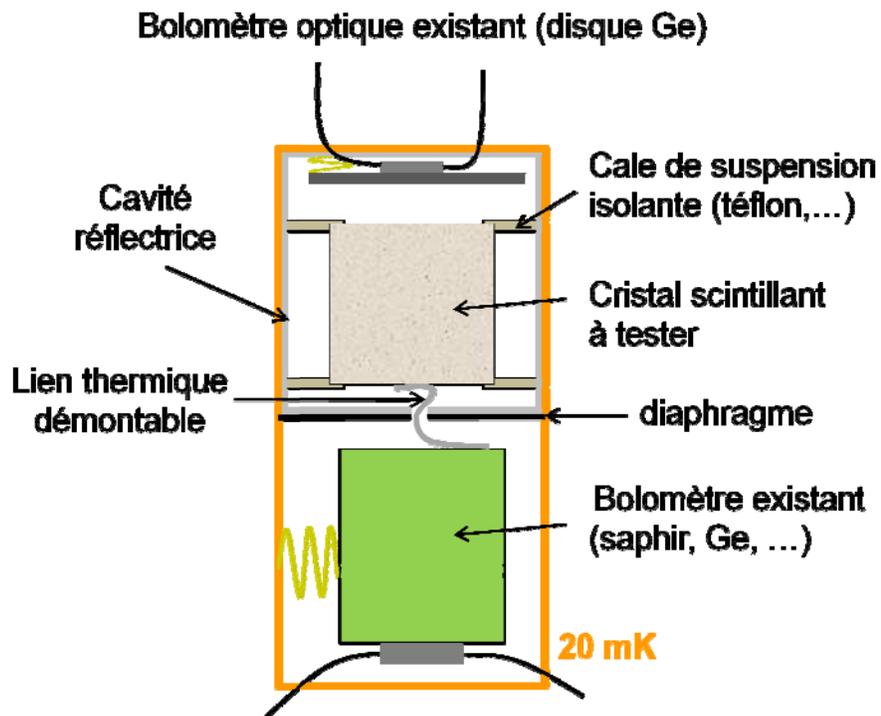


Schéma de principe d'un bolomètre à cible massive scintillante démontable. Ce montage devrait permettre de tester la radioactivité interne alpha d'échantillons massifs scintillants sans avoir à construire systématiquement un nouveau bolomètre. Une nécessité pour EURECA, et une possibilité pour ROSEBUD-III, couplé avec un banc automatique très basse température ?

Publications annexées au manuscrit HDR

- [1] **Experimental detection of α -particles from the radioactive decay of natural bismuth**
de Marcillac P., Coron N., Dambier G., Leblanc J., Moalic J.P.
[Nature, 422, 876-978, \(2003\)](#)
and [Supplementary information](#)
- [2] **High energy resolution X-ray,gamma and electron spectroscopy with cryogenic detectors**
Loidl M., Leblanc E., Branger T., Coron N., Leblanc J., de Marcillac P.
[Applied Radiation And Isotopes 60 \(2004\)363-368](#)
- [3] **Bolometric WIMP search at Canfranc with different absorbers**
Cebrián S., Coron, Dambier G, García E., Irastorza I.G., Leblanc J., de Marcillac P., Morales A.,
Morales J., Ortiz de Solórzano A., Puimedón J., Sarsa M.L.' Villar J.A
[Astroparticle Physics, 21, 23-34, \(2004\)](#)
- [4] **Light yield of undoped sapphire at low temperature under particle excitation,**
Amaré J., Beltran B., Carmona J.M., Cebrian S., Coron N., Dambier G., Garcia E., Gomez H.,
Irastorza I.G., Leblanc J., Luzon G., de Marcillac P., Martinez M., Morales J., Ortiz de Solorzano
A., Pobes C., Puimedon J., Redon T., Rodriguez A., Ruz J., Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.,
[Applied Physics Letters, 87, 264102,1-3, \(2005\)](#)
- [5] **Thermal relative efficiency factor for recoiling ^{206}Pb nuclei in a sapphire bolometer**
Coron N., Garcia E., Gironnet J., Leblanc J., de Marcillac P. Martinez M., Ortigoza Y., Pobes C.,
Puimedon J., Redon T. Sarsa M.L., Torres L., Villar J.A.
[Physics Letters B, vol 659, issue 1-2,113-118, \(2008\)](#)