

Les activités scientifiques du groupe de physique du GANIL se regroupent autour de 4 grands thèmes génériques : la structure du noyau atomique, les propriétés de la matière nucléaire, l'astrophysique nucléaire, et les interactions fondamentales du modèle standard. Ces quatre grands thèmes sont étroitement liés, que ce soit par l'interconnexion des différents sujets, ou par l'utilisation de techniques expérimentales communes. Ils sont également couverts par les théoriciens du groupe. L'interaction entre les théoriciens et expérimentateurs du groupe permet d'approfondir l'interprétation des données, et peut donner lieu à des propositions d'expériences nouvelles. Les collaborations entre les physiciens du groupe sont donc nombreuses. L'année 2014 a compté un temps de faisceau plus important que l'année dernière, avec deux périodes de programmation. Au cours de la première, le séparateur LISE a été particulièrement utilisé, avec une longue campagne d'expériences couplant les détecteurs MUST2, TIARA et EXOGAM, mais aussi des expériences sur la structure des noyaux lourds et les moments magnétiques nucléaires. Au cours de la deuxième, les efforts se concentrent sur la préparation de la future campagne AGATA qui débutera en 2015, avec le commissioning du détecteur et du système de détection accompagnant le spectromètre VAMOS.

Une partie des activités du groupe se consacre également aux projets SPIRAL2, S3 et NFS, et en ce qui concerne l'installation existante, à l'upgrade de SPIRAL 1. Le groupe est moteur dans différents développements de détecteurs pour SPIRAL 2, comme EXOGAM 2, PARIS, ACTAR TPC ou FAZIA.

Les ateliers FUSTIPEN, qui accueillent régulièrement des théoriciens de grand renom, sont une réelle opportunité pour le groupe physique. A la suite de présentations dans un cadre informel et d'audience limitée, ces ateliers déclenchent des collaborations très profitables aux développements scientifiques.

Enfin, les physiciens participent à également à des expériences dans d'autres laboratoires. Ces contributions sont importantes pour maintenir les collaborations et déclencher de nouveaux programmes au GANIL, ainsi que d'assurer le maintien d'un développement scientifique et technique de qualité.

1. Physique théorique

Le groupe théorie a maintenu en 2013 une activité remarquable, malgré sa taille restreinte, avec l'organisation de 5 colloques, ateliers ou séminaire FUSTIPEN, traitant de sujets d'intérêt pertinents pour le groupe de physique dans son ensemble, sur des domaines variés comme les challenges en astrophysique nucléaire, les modes d'excitation dipolaire des noyaux, la dynamique de la fission, la description microscopique des noyaux légers et ou des noyaux près de la drip-line par des modèles prenant en compte le couplage au continuum.

Le groupe théorie a maintenu en 2014 une activité remarquable, malgré sa taille restreinte, avec l'organisation de 9 colloques, ateliers ou séminaires FUSTIPEN, traitant de sujets d'intérêt pertinents pour le groupe de physique dans son ensemble, sur des domaines variés comme la description microscopique de la structure nucléaire et des réactions en incluant le continuum, la description microscopique des mécanismes de fission et de fusion, les développements récents du modèle en couches, la structure de la croûte des étoiles à neutrons, le phénomène d'appariement de proton et neutron dans le cadre du modèle en couches, la caractéristique exponentielle des désintégrations, le rôle du chaos et des symétries fondamentales dans la description du noyau atomique, le rôle des calculs de structure nucléaire dans l'étude de la désintégration double β . Ces ateliers et colloques permettent aux expérimentateurs du GANIL, entre autres, d'échanger avec de grands théoriciens dans un cadre informel, ce qui est très profitable aux développements scientifiques au GANIL.

Formes et symétries

Le noyau atomique est un système quantique complexe dont les propriétés souvent sont simples et régulières. Une façon de comprendre l'émergence de cette simplicité dans le comportement du noyau part de la notion de symétrie. Nous avons continué l'étude des symétries dynamiques généralisées (symétrie partielle et quasi symétrie) dans les systèmes quantiques avec bosons et/ou fermions. En particulier, nous avons montré [P. Van Isacker, Nuclear Physics News 24 (2014) 23] que la notion de symétrie généralisée est indispensable dans la

compréhension des régularités observées dans les noyaux. Un exemple de ce mécanisme est l'observation d'une symétrie dynamique partielle et approximée de type $SO(6)$ dans les noyaux déformés des terres rares [C. Kremer et al., Phys. Rev. C 89 (2014) 041302(R)]. Nous avons élaboré plusieurs prédictions dans le contexte d'un modèle en termes de paires de nucléons (ou, alternativement, bosons) à spin élevé [P. Van Isacker, Int. J. Mod. Phys. E 22 (2013) 1330028]. Ces prédictions concernent les moments dipolaires magnétiques et quadrupolaires électriques de certains états isomères dans les noyaux $N=Z$ comme par exemple dans le ^{94}Ag . Nos résultats obtenus au cours des dernières années à propos de la séniorité des états de particules identiques ont été résumés dans un article de revue [P. Van Isacker et S. Heinze, Ann. Phys. (NY) 349 (2014) 73]. Une étude des symétries dynamiques généralisées dans un système quantique mixte de bosons et fermions (IBFM) est en préparation. Deux nouveaux axes de recherche seront explorés : la contribution de l'appariement isoscalaire dans la décroissance double β et les corrélations à quatre corps (type alpha) dans un modèle à deux couches. En ce qui concerne nos travaux relatifs à la séniorité, notre but à long terme est de généraliser les résultats obtenus pour des particules identiques dans une seule couche au cas avec neutrons et protons dans plusieurs couches.

Collaboration : Université de Huelva, Espagne ; Racah Institute of Physics, Jérusalem, Israël ; Université de Batna, Algérie ; Lawrence Berkeley National Laboratory, Californie, Etats-Unis ; Université Technique de Darmstadt, Allemagne ; Université de Cologne, Allemagne ; Université de North Carolina, Etats-Unis ; Université de Delaware, Etats-Unis

Role du continuum dans la structure et les réactions nucléaires

Le traitement théorique de la spectroscopie et des mécanismes de réaction mettant en jeu des noyaux situés à la limite de la liaison nucléaire fait intervenir des couplages entre les états liés du noyau et les états du continuum. Plusieurs solutions ont été formulées et développées au GANIL pour inclure le continuum dans ces descriptions, par exemple les modèles : «Shell Model Embedded in the Continuum» (SMEC) ou «Gamow Shell Model» (GSM). La méthode GSM est une extension du modèle en couches multi-configurationnel dans le plan complexe de l'énergie. Une application récente de cette théorie recherche les anomalies de facteurs spectroscopiques dans les noyaux miroir, l'effet collectif (instabilité des fonctions d'onde du modèle en couches) dans des mélanges de configurations pour les états près du continuum. Ceci pour comprendre le mécanisme de clusterisation α , t , $2n$ ou $2p$ au sein du noyau, la formation de la resonance pygmée. Une autre application se trouve dans le développement de la théorie de réactions à partir du modèle GSM pour décrire les réactions de diffusion élastique et inélastique (p, p'). Récemment, il a été démontré que le couplage aux états du continuum peut engendrer une forte disparité des fonctions d'ondes des états près de la drip-line dans les noyaux miroir ^{16}N et ^{16}F . Nos études récentes portent maintenant sur :

- l'inclusion des états du continuum de cible faiblement liés dans le formalisme GSM pour décrire les réactions nucléaires.
- le développement de la théorie des réactions à partir du modèle GSM pour décrire les réactions de capture radiative (p, γ), (n, γ), et les réactions de transfert (d, p), (p, d), (α, p),...
- l'application du modèle GSM pour comprendre le mécanisme de réactions : $7\text{Be}(p, \gamma)8\text{B}$ and $17\text{F}(p, \gamma)18\text{Ne}$
- le développement de l'approche ab-initio de GSM sans cœur avec des interactions nucléon-nucléon chirales réalistes pour la description des états résonants de 4He et le couplage spin-orbite dans 5He .
- les excitations du système électron-molécule neutre dipolaire et quadripolaire dans l'approche GSM des canaux couplés pour les états résonants

Collaboration : GANIL; ORNL-Oak Ridge, USA ; Univ. of Tennessee, Knoxville, USA; Univ. of Arizona, Tucson, USA ; Michigan State University, East Lansing, USA ; Iowa State Univ., Ames, USA ; IPN- Krakow, Pologne; Chalmers Univ., Goetheburg, Suede ; Yukawa Institute, Kyoto, Japon ; Univ. of Kyoto, Japon ; Kitami Inst. Of Technology, Japan ; Hokkaido Univ., Sapporo, Japon ; INR Debrecen, Hongrie ; CSIC, Madrid, Espagne

Dynamique de la fission nucléaire

Plusieurs chercheurs du GANIL sont fortement impliqués dans des études dédiées à la fission, sur une large gamme en noyaux fissionnant, moment angulaire et température. Plusieurs expériences exploitant les atouts de la fission ont eu lieu sur le site récemment. D'un point de vue théorique, nous poursuivons depuis 2011 une étude sur les effets statiques et dynamiques pour la fission à basse et haute température, respectivement.

Dans le cadre de la fission aux énergies d'excitation élevées, notre approche repose sur une théorie de transport, basée sur la solution de l'équation du mouvement de Langevin dans un espace multi-dimensionnel (3 et 4 dimensions). Cette méthode permet de suivre l'évolution temporelle du noyau fissionnant, et de sonder l'intrication complexe de la surface d'énergie potentielle et des forces d'inertie et de friction. Nous avons démontré par nos calculs dynamiques que, pour les systèmes modérément fissiles et modérément chauds, la connaissance actuelle ne permet pas d'émettre des conclusions in-ambiguës sur la physique sous-jacente, et en particulier de questionner la validité du théorème topographique [C. Schmitt, K. Mazurek, P.N. Nadtochy, Phys. Lett. B 737 (2014) 289]. Afin d'étendre le modèle de Langevin de Omsk à plus basse énergie, nous avons récemment étudié le degré de liberté de charge ; et la comparaison préliminaire de nos résultats avec les données collectées au GANIL pour les distributions isotopiques de fragments issus de la fission à température modérée est encourageante. Aussi, nous avons débuté l'extension du code Langevin avec l'introduction de surfaces d'énergie microscopique de Livermore, USA. En 2015, nous travaillerons dans la continuation de ces deux aspects.

Dans le but d'étendre l'étude à la fission à très basse énergie, nous travaillons sur la modélisation de l'énergie potentielle dans un espace à 4 dimensions incluant les effets microscopiques. Nos prédictions, basées sur des considérations purement statiques pour le moment, offrent une description qualitative consistante des observations expérimentales relatives à l'évolution des différents modes de fission de la région des noyaux de Hg et dans la région des actinides et noyaux transuraniens. En 2015, nous allons poursuivre notre étude sur des chaînes de Polonium avec une analyse quantitative.

Les différents travaux mentionnés plus haut ont fait l'objet de publications dans des journaux et revues à comité de lecture et ont été présentés à plusieurs conférences et workshops internationaux. De plus, ils ont motivé la proposition d'une expérience au GANIL, et acceptée par le PAC en avril 2014, pour mesurer les propriétés de fission de ^{178}Hg à basse température à VAMOS++ (Porte-parole : C. Schmitt). Enfin, ils motivent une proposition d'expérience sur la fission dans la région des Hg que nous allons soumettre au PAC de IUAC, New Dehli, en décembre 2014 (Porte-parole : C. Schmitt).

Collaborations: Accords COPIN-IN2P3/CNRS (Pologne-France) n°12-145 (Maj-Schmitt) et n°08-131 (Pomorski-Bartel), Accords LEA COPIGAL (Pologne-France) (Mazurek-Schmitt).

Projet SARFEN (Structure And Reactions For Exotic Nuclei)-Réseau NupNet

L'objectif du projet est (i) de développer la théorie des réactions et ses méthodes pour la description des propriétés spectroscopiques des isotopes rares, (ii) de fournir un support microscopique issu des modèles les plus avancés de structure nucléaire pour perfectionner la description des réactions de transfert, et (iii) l'étude des corrélations nucléon-nucléon dans les systèmes nucléaires exotiques, dont les propriétés sont déterminées par des combinaisons de corrélation à plusieurs corps et des couplages au continuum. L'élaboration d'outils pratiques, adaptés aux études spectroscopiques des isotopes rares, sera décisive pour le succès des programmes expérimentaux dans les installations de faisceaux radioactifs, existantes et futures. Le projet SARFEN créera un grand effort cohérent de la part de théoriciens européens, pour faire progresser le traitement de ce problème difficile. De nouveaux outils théoriques pour la structure nucléaire et les réactions nucléaires, en synergie avec les études actuelles et futures des noyaux exotiques en Europe seront développés.

Participants: Le GANIL, Bruyères-le-Châtel, IPHC-Strasbourg, BAS-Sofia, Uni. de Jyväskylä, Univ. de Varsovie, l'INP-Cracovie, Varsovie Institute of Technology, IFIN-HH Bucarest, Univ. Autonoma de Madrid, Univ. de Surrey, l'INFN-Padoue ; IPN Orsay

Projet TALENT (Training in Advanced Low Energy Nuclear Theory)

L'initiative récente TALENT est une formation aux techniques avancées en physique nucléaire théorique (voir <http://www.nucleartalent.org>) au travers d'un réseau multinational de plusieurs institutions européennes et nord-américaines. Cette initiative vise à développer un vaste programme qui servira de plate-forme pour la théorie d'avant-garde sur les noyaux d'atomes et leurs réactions.

Dans ce cadre, l'École TALENT sur la « Théorie pour explorer les expériences de structure nucléaires » a eu lieu au GANIL, Caen, France, du 11 Aout au 29 Aout 2014. Le cours a été donné par les enseignants de Yale Univ., USA ; Univ. de Notre Dame, USA ; Lawrence Berkeley National Laboratory, USA ; Univ. de Cologne, Allemagne ; Technische Univ. de Darmstadt, Allemagne ; GANIL.

L'objectif de cette école TALENT était de permettre aux jeunes chercheurs d'acquérir les connaissances de base nécessaires pour une étude plus avancée, par l'exposition à la fois des méthodes formelles et l'expérience pratique de l'utilisation des méthodes de théorie de structure nucléaire - y compris l'utilisation de certains codes associés. Les objectifs étaient de développer à la fois (i) les connaissances de base et (ii) la confiance dans les choix des méthodes et des sélections de paramètres physiques pour résoudre (approximativement) les problèmes à plusieurs corps de structure nucléaire en utilisant des outils théoriques disponibles. En 2014 60 candidats se sont présentés pour participer aux trois semaines de l'école, seulement 30 ont été sélectionnés.

2. Structure nucléaire

L'ensemble des activités sur l'étude de la structure du noyau s'étend sur une large gamme de phénomènes et de techniques expérimentales. Les différentes composantes de l'interaction nucléaire et leur évolution avec l'isospin des noyaux, l'influence du continuum sur la structure en couches à l'approche des noyaux faiblement liés ou encore l'apparition de phénomènes collectifs (clusterisation, déformation et coexistence de forme) sont explorées. En 2014, cet axe de recherches a été marqué par un programme très intense sur la ligne LISE. Une longue campagne d'expérience a été réalisée, utilisant le couplage entre les détecteurs MUST2, TIARA et EXOGAM, et des réactions de transfert induites par des faisceaux secondaires sélectionnés par LISE afin de peupler et d'étudier les propriétés d'états spécifiques de noyaux exotiques. Une première approche a démontré la faisabilité de la spectroscopie d'éléments très lourds. Certains phénomènes, comme l'appariement proton-neutron sont étudiés à l'aide de différentes techniques expérimentales, comme le multi-détecteur NEDA en G21 ou les réactions de transfert à LISE. Les études menées à VAMOS permettent d'étudier l'évolution de la structure en couche sur de longues chaînes isotopiques. En particulier, le multidétecteur couplé au spectromètre permet d'étudier l'évolution des phénomènes de déformation dans la région proche de la sous-couche N=60 de noyaux riches en neutrons produits dans des réactions profondément inélastiques, et l'évolution de la structure en couche proche de l' ^{132}Sn l'est dans la spectroscopie en ligne des fragments de fission.

Expériences réalisées ou planifiées en 2014 au GANIL

Réactions de transfert sur LISE : campagne MUST2+TIARA+EXOGAM

Dans cette campagne de trois expériences la combinaison de détecteurs CATS+TIARA_MUST2+EXOGAM a été utilisée pour détecter la trajectoire des ions incidents, les énergies et angles des particules légères émises lors des réactions avec des cibles de CD₂, ainsi que les photons émis en coïncidence. Le détecteur Charissa placé à zéro degré en aval permettait par ailleurs une identification des noyaux exotiques produits lors de la réaction. L'intensité, la pureté et la capacité de ralentissements des faisceaux secondaires ont été des gages essentiels du succès de ce type d'expériences.

E628 – B. Fernandez-Dominguez et al. – LISE D6

Les réactions de $^{16}\text{C}(d,p)^{17}\text{C}$ et $^{16}\text{C}(d,t)^{15}\text{C}$ ont été réalisées dans le but de déterminer les énergies et occupations des orbitales normalement occupées et de valence dans le ^{16}C , de confirmer l'effondrement du gap N=20 ainsi que le renforcement de N=16 loin de la vallée de stabilité. Le faisceau de ^{16}C , obtenu par fragmentation, a été ralenti à une énergie de 18 MeV/A. Une analyse préliminaire permet de séparer les états à basse énergie connus du ^{17}C et de voir un état non lié à très haute énergie d'excitation qui signerait la présence du gap N=16. La voie $(d, ^4\text{He})$ menant au noyau de ^{14}B est un sous produit intéressant de cette expérience.

E644 – M. Assié et al. – LISE D6

Le but de cette expérience était de prouver l'existence d'un nouveau mode d'appariement nucléaire ($T=0, S=1$) recherché depuis longtemps, dans lequel un proton et un neutron sont appariés avec spin alignés, comme dans le noyau de deutérium. Pour ce faire, la réaction de transfert de deuteron ($p, {}^3\text{He}$) a été utilisée dans les noyaux $N=Z$ de ${}^{56}\text{Ni}$ et de ${}^{52}\text{Fe}$ afin de voir si des signatures correspondant à ce type de transfert sont vues dans les noyaux de ${}^{54}\text{Co}$ et ${}^{51}\text{Mn}$ et si leur probabilité de peuplement est favorisée dans le cas de ${}^{52}\text{Fe}$, comme attendu si ce mode d'appariement est collectif. Les états correspondants à $T=0$ ont été vus dans une analyse en ligne dans les deux cas, la recherche de leur aspect collectif est en cours d'analyse. Dans cette expérience également d'autres voies de réaction intéressantes sont peuplées simultanément.

Collaboration : IPNO, Irfu, GANIL, Univ of Surrey, Univ St Jacques de Compostelle, LPC Caen

E657 – A. Corsi et al. – LISE D6

La réaction de transfert ${}^{72}\text{Se}(p,t){}^{70}\text{Se}$ devait être utilisée pour tenter de peupler l'état excité 0_2^+ de basse énergie prédit dans le ${}^{70}\text{Se}$, de caractériser une possible coexistence de formes dans ce noyau et d'étudier l'évolution de la forme des noyaux dans cette région de masse. Afin d'identifier cet état, hypothétiquement isomère, une mesure dédiée a été effectuée avec un faisceau de ${}^{70}\text{Se}$ produit directement par fragmentation, et implanté au centre d'une chambre dédiée à la recherche d'isomères. Cet isomère n'a pas été vu, il est donc probablement inexistant ou de durée de vie trop courte pour survivre au vol entre la cible de production et le dispositif de détection. La réaction de transfert ${}^{72}\text{Se}$ n'a malheureusement pu être effectuée en raison du trop grand nombre de noyaux contaminants qui ne pouvaient être identifiés un à un et qui ont contraint à réduire le taux de comptage du noyau d'intérêt pour ne pas saturer les détecteurs. Ce taux s'est avéré insuffisant pour identifier l'état isomérique recherché.

Collaboration : Irfu, IPNO, GANIL, Univ of Surrey, Univ St Jacques de Compostelle, LPC Caen

Mesure de moments nucléaires*E633 – G. Neyens et al. – LISE D6*

L'étude visait à déterminer les facteurs g et les moments quadripolaires électriques des isotopes riches en neutrons de ${}^{64,65}\text{Co}$ afin d'étudier l'émergence d'une région de déformation à $N=40$ loin de la vallée de stabilité. La technique utilisée, dite β -NMR, consiste à produire des faisceaux polarisés en spin des isotopes radioactifs d'intérêt en sélectionnant les fragments émis à plus de 2° par rapport à la direction d'incidence du faisceau sur la cible, puis de les implanter dans un cristal placé dans un champ magnétique puissant, et d'observer une asymétrie dans leur décroissance β . L'expérience n'a permis d'observer aucune résonance dans ces noyaux: soit elles se trouvent dans une région totalement inattendue, soit la polarisation induite par le mécanisme de production et de sélection des fragments est détruite sitôt l'implantation dans le cristal.

Une autre expérience de ce type a été acceptée au PAC GANIL en 2012. Elle a pour but de déterminer le moment quadripolaire des états fondamental et isomère du ${}^{34}\text{Al}$. Ce type de mesure a déjà été effectué sur LISE pour des isotopes d'Al au voisinage de $N=20$, de sorte que l'expérience devrait être plus simple que pour les Co.

Collaboration : K.U.Leuven ; GANIL ; CEA-DAM/DIF Bruyères-Le-Châtel ; CSNSM ; Univ. of Athens ; Univ. of Ghent ; Univ. of Madrid ; Academy of Sciences Sofia.

Spectroscopie des noyaux très lourds*E656 (suite) – J. Piot et al. – ${}^{257}\text{Db}$ – LISE D6*

L'expérience E656 avait pour but d'étudier en détail la spectroscopie du ${}^{257}\text{Db}$ ($Z=105$) via ses voies de décroissances alpha pour comprendre la structure nucléaire des noyaux super-lourds autour du gap déformé $N=152$. De nombreux problèmes ont été rencontrés dans cette expérience très ambitieuse, d'abord dans la synthèse de l'isotope par fusion évaporation, dans l'identification et la réjection des événements contaminants

dans le détecteur d'implantation, et ensuite dans le fonctionnement du détecteur lui-même. Du fait de ces problèmes, seulement 30% de la statistique totale a pu être accumulée, mais cela a été suffisant pour **conclure** que l'expérience est faisable si toutes les conditions optimales sont réunies (intensité faisceau primaire maximale, réduction de l'épaisseur de fenêtre des galottes servant à la réjection d'événements non souhaités, fonctionnement de tous les détecteurs, tenue de la cible rotative à l'irradiation). Un test sera effectué fin 2014 avec la réaction plus efficace $^{40}\text{Ar} + ^{174}\text{Yb} \rightarrow ^{210-211}\text{Ra}$ afin de valider à les conditions de réalisation de l'étude finale du ^{257}Db .

Collaboration : GANIL ; Univ. Jyväskylä ; CEA Saclay ; GSI ; JINR Dubna ; CSNSM Orsay ; IPHC Strasbourg ; LPC Caen, Univ. Liverpool ; Dept Nuclear Physics Bratislava.

Etude de la dépendance d'asymétrie des corrélations des nucléons de valences

E655s – A. Gillibert et al - VAMOS

L'expérience e655s avait pour objectif d'étudier l'asymétrie de la dépendance des corrélations parmi les nucléons de valence à l'aide de réactions de transfert. Un faisceau Spiral de ^{18}Ne et le couplage des détecteurs MUST2 et du spectromètre VAMOS ont été utilisés pour mesurer les distributions angulaires lors réactions de transfert $^{18}\text{Ne}(d,^3\text{He})^{17}\text{Ne}$ et $^{18}\text{Ne}(d,t)^{19}\text{Ne}$ à 18MeV/u afin d'extraire les facteurs spectroscopiques et de les confronter à la dépendance asymétrique observée lors des mesures par réactions de knock-out.

Collaboration : Irfu/IKS Leuven/ GANIL

Analyse d'expériences réalisées avant 2014

Symétrie d'isospin, appariement nucléaire

Il s'agit d'étudier l'appariement dans le canal T=0 ainsi que la recherche d'un nouveau type de couplage entre nucléons de valence dans les noyaux $N \sim Z$ et. Nous avons décrit dans une étude publiée en 2010, que le noyau ^{92}Pd présente un appariement isoscalaire qui influence profondément le schéma de niveaux. Un article a été publié dans la revue Nature (B.Cederwall et. al. Nature 469, 68-71 (2010)). De la même expérience, un deuxième article portant sur l'étude de l'évolution de la séniorité dans un noyau voisin (^{91}Ru) ainsi que sur les performances d'EXOGAM utilisé comme polarimètre a été publié en (Y. Zheng et al, Phys. Rev. C 87, 044328 (2013)). Deux autres articles portant sur l'étude des isotopes de ^{95}Rh et de ^{94}Ru ont été publiés en 2014 (F. Ghazi Moradi et al Phys. Rev. C 89, 014301 (2014) et F. Ghazi Moradi et al Phys. Rev. C 89, 044310 (2014)). Cette thématique se poursuit en 2014 avec une expérience visant à synthétiser et étudier le noyau de ^{96}Cd , correspondant à un trou alpha par rapport au cœur de ^{100}Sn .

Collaboration : GANIL, Univ. of York UK, Univ. of Uppsala Suède, Univ. of Warsaw Pologne, INFN Padova Italie, LNL Legnaro Italie, Royal Institute of Technology Stockholm Suède, ATOMKI Debrecen Roumanie, INFN Napoli Italie, Univ. of Ankara Turquie, IFIC Valencia Espagne

Etude de la collectivité dans les noyaux de $^{69,70,71,72}\text{Zn}$ par la technique du plunger

Les résultats de l'expérience E588, réalisée en septembre 2010, sont la mesure des probabilités de transition entre états excités dans les isotopes radioactifs de Zn proches du ^{68}Ni . La mesure est extraite à partir du temps de vie des états nucléaires. La technique dite du plunger a été utilisée sur le spectromètre VAMOS en coïncidence avec le spectromètre gamma EXOGAM. L'analyse des données montre une évolution régulière de la collectivité avec le nombre de neutrons pour les isotopes pair-pair de Zn. La mesure des rapports $B(E2:4+\rightarrow 2+)/B(E2:2+\rightarrow 0+)$ indique que la séniorité est un bon nombre quantique dans ces isotopes. La spectroscopie des noyaux impairs situés à une particule/trou de $N=40$ révèle la coexistence d'états de type collectifs et particule indépendante analysée dans le cadre théorique du modèle en couches. Cette analyse fait partie de la thèse de I. Celikovic (VINCA-GANIL), soutenue en décembre 2013 au GANIL. Un papier résumant ce travail a été écrit et sera soumis fin 2014 pour publication.

Collaboration GANIL, IRFU, Univ. of Koln, INFN LNL Italy, Univ of Padova Italy, Univ. of Warsaw, Univ. of Oslo, VINCA Serbie

Spectroscopie en vol des fragments de fission

Notre étude sur l'évolution de la structure nucléaire à haut moment angulaire et grand isospin a été approfondie, par la mesure de la spectroscopie gamma prompt de fragments de fission identifiés isotopiquement. Ces mesures ont été collectées en utilisant la combinaison du spectromètre d'ions lourds VAMOS++ et du spectromètre gamma EXOGAM. Les méthodes d'analyses ont été perfectionnées, améliorant la résolution de l'identification isotopique ainsi que la qualité des spectres gamma en coïncidence ; la quantité de données exploitables en a pu être augmentée. Cette approche a été publiée dans le volume 2014 de l'encyclopédie «Encyclopaedia of Science and technology », et une étude spécifiquement dédiée à la chaîne isotopique des Zr a été communiquée dans la revue Phys. Lett. B. Cette technique permet l'étude simultanée et systématique de longues chaînes isotopiques. Nous avons pu aborder la structure des noyaux riches en neutrons autour de l'étain afin d'approfondir la compréhension actuelle autour de la couche N=82 dans des noyaux loin de la stabilité, de même que l'évolution des propriétés rotationnelles d'isotopes de terre-rares riches en neutrons. Enfin, la spectroscopie de certains isotopes exotiques des fragments de fission dits « légers » autour du Zr ont été étudiés en détails. Les calculs théoriques associés ont été menés, ou sont en cours, et des ébauches de publications sont en préparation.

Deux propositions d'expériences rédigées par notre groupe, utilisant AGATA@VAMOS++, ont été acceptées par le PAC du GANIL en avril 2014. Elles sont programmées courant 2015. Les études que nous mènerons avec AGATA@VAMOS++ s'attachent, pour l'une, à la structure nucléaire dans la région emblématique au-delà du ^{48}Ca , et, pour l'autre, à l'évolution de la structure nucléaire loin de la stabilité, dans les noyaux extrêmement riches en neutrons à moment angulaire élevé. Alors que la production des noyaux d'intérêt repose sur les mécanismes profondément inélastiques (largement exploités à VAMOS) pour la première expérience, elle est basée sur la fusion-fission pour la deuxième, en continuation directe de l'étude pionnière mentionnée plus haut. La production riche qu'offre la fission, la sélectivité de VAMOS++ et les performances du « tracking » dans AGATA permettront d'atteindre une sensibilité exceptionnelle.

Collaboration : GANIL ; TIFR, India ; VECC, India

Expériences réalisées dans d'autres laboratoires

Symétrie d'isospin, mélange d'isospin

Dans cette même thématique, nous avons également développé un programme visant à mesurer directement le mélange d'isospin dans le multiplet A=38 Ca-K-Ar en procédant par excitation Coulombienne d'un faisceau isomérique. Une proposition d'expérience a été soumise dans ce sens au PAC de TRIUMF, proposition qui a été acceptée. De façon complémentaire, nous devons aussi mesurer une probabilité de transition réduite dans le noyau de ^{38}Ca . Ceci a aussi été proposé et accepté au laboratoire de Varsovie. Ces deux expériences sont toujours en attente de programmation. Les difficultés de TRIUMF à fournir un faisceau suffisamment pur et post accéléré de $^{38\text{m}}\text{K}$ nous font envisager une expérience auprès de SPIRAL1 lorsque l'upgrade sera réalisé (2016).

Collaboration: GANIL, INFN Padova, LNL, Legnaro, IFIC Valencia, SLCJ Warsaw, Soltan Institute Warsaw, Univ. Of Notre Dame, Univ. Of York, TRIUMF, Univ. Of Guelph, CENBG Bordeaux

Coexistence de formes dans les isotopes lourds de Sr

Alors que le noyau de ^{96}Sr a un comportement quasi parfait de vibreur quantique, le noyau de ^{98}Sr ayant 2 neutrons de plus est prédit comme un rotor quantique quasi parfait de grande déformation. L'étude des noyaux de ^{98}Sr et ^{96}Sr par excitation Coulombienne de faisceau radioactif a été réalisée en 2011 et 2007 respectivement à ISOLDE. De nombreux B(E2) ainsi que plusieurs moments quadripolaire ont été obtenus dans le ^{98}Sr supportant le scénario d'inversion de formes entre le ^{96}Sr et ^{98}Sr . Une collaboration avec les théoriciens du CEA-DAM a permis une comparaison théorie-expérience pour ces deux noyaux. Une publication sera soumise fin 2014.

Collaboration: GANIL, CERN, CEA-Saclay, CEA-DAM, Oslo university, IKS-Leuven, IKP Cologne, CSNSM, HIL-Warsaw

Campagne EXOGAM à l'ILL (EXILL)

Durant l'arrêt d'hiver 2012-2013, le détecteur EXOGAM a été installé auprès de la ligne PF1B du réacteur de l'ILL à Grenoble. Ce programme expérimental appelé EXILL, a eu lieu au cours de 2 cycles de réacteur, durant lesquels deux dispositifs ont été mis en œuvre : le premier comportant 8 détecteurs EXOGAM, 6 de GASP et 2 de Lohengrin pour produire des événements de coïncidences élevées ($\text{fold} > 2$), le deuxième comportant les 8 détecteurs EXOGAM auxquels ont été adjoints des scintillateurs de LaBr₃ qui appartiennent à la collaboration FATIMA pour des mesures de temps de vie courts. Nous avons réalisé plusieurs campagnes sur la spectroscopie des fragments de fission de ²³⁵U et de ²⁴¹Pu (premier dispositif) et sur les mesures de temps de vie de ces mêmes fragments. En plus, des réactions de capture radiative ont été effectuées.

La collaboration regroupe plus de 100 physiciens venus d'une vingtaine de laboratoires. L'ensemble de ces expériences s'est bien déroulé et les analyses sont en cours. Des workshops d'analyse ont lieu régulièrement pour suivre l'évolution de travail des différentes collaborations. Le groupe du GANIL est positionné sur deux thématiques : 1) nous cherchons à identifier les états au-delà du premier 2⁺ dans le ^{94,96}Kr et mesurer le temps de vie des premiers états appartenant aux trois structures coexistant à basse énergie dans les noyaux de ¹⁰¹Zr, ¹⁰²Nb et ¹⁰³Mo à N=60. Ces propositions d'expériences se placent dans la continuité des expériences réalisées au CERN. 2) nous réalisons la spectroscopie ainsi que la mesure de temps de vie des noyaux les plus légers produits dans la fission de ²³⁵U proches du ⁷⁸Ni dans les chaînes isotopiques de Ge, Cu, Zn et Se. L'utilisation de cibles différentes permet d'accéder à des noyaux plus légers moins peuplés dans la fission des ²³⁸U et ²⁵²Cf. Au GANIL, C. Michelagnoli, post-doc IN2P3 au GANIL depuis Octobre 2013, est en charge de cette analyse de données qui est toujours en cours.

Collaboration : GANIL, ILL and the EXILL Collaboration

Structure de ¹⁰⁰Sn (RIKEN)

Nous avons réalisé à RIKEN une expérience visant à étudier la structure de ¹⁰⁰Sn ainsi que la décroissance des noyaux situés dans son voisinage. Le succès de cette expérience repose sur la production suffisamment abondante des noyaux d'intérêt et aussi sur une séparation et une identification performante. Dans le cadre de la collaboration bâtie pour cette expérience, nous avons optimisé le réglage du séparateur avec le code LISE++. Un test de production a eu lieu à RIKEN fin 2011 et nous avons testé les différentes options possibles. La meilleure option fait l'objet d'une publication dans le rapport annuel de RIKEN. L'expérience a été réalisée en juin 2013. L'analyse de la production de nouveaux isotopes observés : ⁹⁴Cd, ⁹²Ag, ⁹⁰Pd fait partie du travail de thèse d'I Celikovic soutenue en décembre 2013. Une publication est en cours d'écriture.

Collaboration : GANIL, RIKEN, NSCL, TU München

3. Astrophysique nucléaire

De nombreux sujets d'intérêt pour l'astrophysique sont développés au sein du GANIL, portant en particulier sur la détermination de sections efficaces de réactions intervenant au cours des différentes étapes de la vie d'une étoile.

Supernovae

E563 : L'expérience a été réalisée en 2009. Elle visait à mesurer la section efficace à basse énergie de la réaction ⁷⁸Kr(α, γ)⁸²Sr. Cette réaction est importante pour comprendre l'origine des éléments de type «p», concernant une vingtaine de noyaux stables déficitaires en neutron. La nucléosynthèse de ces éléments ayant probablement lieu dans les supernovae. Le filtre de Wien du spectromètre LISE a été utilisé pour sélectionner le noyau composé et rejeter l'intense faisceau incident. L'excellente réjection du filtre de Wien, meilleure que 1 sur 1010 n'a pourtant pas permis de s'affranchir d'une importante pollution dont l'origine pourrait être due à des inhomogénéités de la cible d'hélium solide. Un test utilisant une cible gazeuse sans fenêtre a été réalisé en mars 2012. Il a permis de vérifier que l'utilisation d'une telle cible est compatible avec le niveau de vide très

élevé requis par l'utilisation du filtre de vitesse. Cependant, des problèmes d'alignement mécanique et de réglage optique du faisceau n'ont pas permis de vérifier que le problème de pollution dû à la cible solide est résolu. En 2014, des tests réalisés sans faisceau ont montré que l'épaisseur effective de la cible gazeuse n'est pas suffisante. Une nouvelle cible gazeuse sera étudiée en début 2015. Des simulations du faisceau ont montré que le réglage de l'expérience est plus difficile que prévu. Nous devons maintenant étudier des solutions pour simplifier la mesure (utilisation de collimateurs). Une expérience est en attente de programmation depuis 2013, nous espérons que cela sera possible en 2015.

Collaboration : Demokritos Athen ; GANIL ; Bochum ; LLN ; Edinburgh ; Univ.of Notre Dame ; Weissmann Institute ; Saraf ; JYFL

Novae

E641S : Ultime étude du ^{19}Ne pour l'astrophysique ? Cette proposition d'expérience a été soumise au PAC du GANIL en septembre 2011. Il s'agit de mesurer les propriétés encore inconnues de certains états excités du ^{19}Ne , ou de confirmer celles qui existent déjà. Ce sujet est la suite de l'étude E561S (publiée en 2012), et de la thèse de J.C. Dalouzy (2008). Une thèse est en cours sur ce sujet (F. Boulay, sept 2012-août 2015). Un test a été réalisé en octobre 2012 à Rez en république Tchèque, afin de comprendre le fonctionnement d'un détecteur gazeux (MAYAITO) couplées à un multiplexeur pour mesurer des protons de 25 MeV. Une expérience test a été réalisée sur VAMOS en octobre 2013 avec le montage final de l'expérience, à savoir un ensemble de détection de particules chargées (CD-PAD) couplé au spectromètre VAMOS. Ce test a permis de valider le principe de l'expérience (détection de protons avec VAMOS), et de détecter quelques problèmes inattendus (en particulier de pollution de particules légères), qui ont été résolus après coup. L'expérience a finalement été programmée en novembre 2013 et s'est très bien déroulée. L'analyse des données est en cours. Les premiers résultats les plus importants sont prévus pour la fin de l'année 2014. On prévoit de présenter les résultats finaux dans une conférence internationale (NPA) en mai 2015.

Collaboration Univ of Edinburgh, GANIL, IPN-Orsay, Université d'York, Serbia, Rez Czech Republic, HH Romania, Huelva Spain, CSNSM, LPC Caen, Bruyère CEA, Sao Paulo Brasil.

La combustion hydrostatique

E658S : Il s'agit d'une expérience proposée à la suite de l'étude E578S (publiée en 2013 dans PRL et la thèse de P. Ujic soutenue en 2011). L'objectif de l'expérience est de mesurer l'effet d'écrantage des électrons dans différents matériaux. L'effet d'écrantage électronique est important en astrophysique dans les sites où la température est relativement faible, habituellement lors des combustions hydrostatiques. En effet les sections efficaces de réactions mesurées en laboratoire à basse énergie diffèrent de celles des réactions ayant lieu dans le plasma stellaire du fait de la présence des électrons qui ont un effet d'écran sur le potentiel de répulsion Coulombienne. L'effet d'écran peut également changer la durée de vie des noyaux radioactifs, c'est ce que nous avons choisi d'étudier avec des noyaux de ^{19}Ne implantés dans deux matériaux (métallique et isolant). L'expérience a été réalisée en novembre 2013 et s'est bien déroulée. L'analyse est en cours dans 4 labos différents (LPC, Serbie, Roumanie et GANIL). Les résultats intermédiaires montrent qu'il y a des problèmes non prévus et mal compris qu'il faut résoudre. Une première réunion de confrontation des résultats des analyses des trois labos est prévue en début 2015.

(Collaboration : GANIL, Institute of Nuclear Physics Science Vinca, Belgrade, IPNO, CSNSM, LPC Caen, IFIN-HH, Bucharest, ASCR-Rez Czech Republic).

Sursauts X

E560S : L'expérience a eu lieu en juin 2011. Elle avait pour objectif l'étude de la réaction $^{14}\text{O}(\alpha,p)^{17}\text{F}$ d'intérêt astrophysique pour les sursauts X. L'intensité de cette réaction va contrôler l'intensité de l'explosion. Cette mesure a été permise grâce à de nombreuses études de développement de faisceaux purifiés à basse énergie. Des difficultés sont apparues pendant l'expérience. Nous avons constaté une forte pollution en particules légères produites par des réactions avec la cible, et une forte dégradation en énergie du faisceau après ralentissement dans un dégradeur. Cette expérience est toujours en cours d'analyse mais ne permettra pas

d'obtenir des résultats de physique. Nous espérons proposer une nouvelle proposition d'expérience avec de meilleures conditions expérimentales, en particulier avec la cible active ACTAR.

E442S : Les résultats ont été publiés en 2014 dans la revue Phys. Rev. C 90. Ils montrent comment, dans le cas particulier du ^{16}F , on peut prédire les propriétés des états d'un noyau lorsque l'on connaît les propriétés du noyau miroir.

(Collaboration : University of Edinburgh, LPC Caen, GANIL)

Collaborations associées : République Tchèque : LEA NuAG (Nuclear Astrophysics and Grid) ; Roumanie : Collaboration IN2P3-INFIN/HH ; Russie : Collaboration IN2P3 – JINR Dubna

Astrochimie

P986 – E. Dartois et al. – LISE D4

L'objectif de cette expérience était d'étudier la transformation de la glace interstellaire (selon son niveau de porosité et son type de phase amorphe ou cristalline) du fait de l'irradiation par des ions lourds aux énergies rencontrées dans le fond diffus cosmique. Une analyse par spectroscopie laser de la glace a permis d'en caractériser le changement d'état. L'expérience, d'une durée de 4 UT, a donné de très bons résultats, et une publication est en cours de soumission.

Collaboration : IAS Orsay ; CIMAP-CIRIL ; Physics Dep Rio de Janeiro ; IPN Orsay ; NASA ; Institut des Sciences moléculaires Orsay ; GANIL.

4. Matière nucléaire et mécanismes de réaction

L'étude de la matière nucléaire permet d'établir comment émergent, à partir des propriétés individuelles des nucléons, des caractéristiques collectives complexes. Les réactions nucléaires sont un outil pour provoquer des excitations qui mettent en jeu les propriétés collectives et de transport de la matière : par exemple et par ordre d'énergie croissante, les résonances géantes, la fission, et finalement la multifragmentation et la vaporisation. Les propriétés dynamiques des réactions nucléaires permettent de révéler des caractéristiques fondamentales du noyau atomique et de comprendre la synthèse de noyaux super-lourds ou très exotiques.

Equation d'état de la matière nucléaire et multifragmentation

Nous avons publié un article [E. Bonnet et al, Phys. Rev. C 89 (2014)] comparant des calculs de champ moyen stochastique aux données INDRA pour le système Xe+Sn entre 25 et 50 MeV/nucléon. C'est dans ce domaine en énergie qu'on observe, dans les collisions centrales, la disparition de la fusion-évaporation/fission au profit de la multifragmentation. Les fragments produits dans ces réactions sont animés d'une vitesse radiale, en plus du mouvement thermique, qui est interprétée comme une mémoire du mouvement d'expansion du système dans lequel les fragments se sont formés. Les calculs de champ moyen stochastique suivent l'évolution des collisions, de l'instant de contact entre projectile et cible jusqu'à la formation des fragments, dans un temps $\sim 300\text{fm}/c$ (10^{-21} sec.). Dans ces calculs, la multifragmentation trouve son origine dans l'amplification exponentielle des fluctuations de densité dans de la matière nucléaire diluée: l'expansion du système initial l'amène à des densités faibles où il est instable par rapport à la formation de fragments. Si l'accord entre calculs et expérience est assez satisfaisant pour les énergies supérieures à 32 MeV/nucléon, il y a néanmoins un désaccord en ce qui concerne l'énergie du début de la multifragmentation, observé vers 25 MeV/nucléon dans les données. L'analyse détaillée des résultats du calcul montre que ce désaccord provient de la vitesse d'expansion insuffisante des systèmes formés en-dessous de 39 MeV/nucléon: des fragments commencent à se former, mais n'ont pas le temps de se séparer et s'effondrent pour donner un résidu de fusion. Nous espérons par la suite obtenir de meilleurs résultats avec des calculs de champ moyen stochastiques améliorés qui ont été développés récemment [P. Napolitani & M. Colonna]. D'autres calculs avec le même modèle sont en cours pour les collisions Ta+Zn que nous avons mesurées lors de l'expérience E613 réalisée en 2011. Le but de l'expérience a été d'étudier la multifragmentation de systèmes de même taille (masse, charge) et de même énergie d'excitation que ceux produits dans les collisions Xe+Sn, mais avec moins d'énergie d'expansion radiale dû à la plus faible compression initiale du système asymétrique (Ta+Zn). Les premiers résultats de cette

expérience ont été présentés cette année dans une conférence internationale. Cette analyse préliminaire semble confirmer les prédictions tirées de publications précédentes : à E^* , Z , et A constante, la quantité d'expansion radiale déterminerait le nombre et la taille des fragments produits, au contraire des modèles statistiques dans lesquels ce flot collectif est supposé découplé des poids statistiques des partitions. Ce résultat démontre encore une fois la nature dynamique du processus de multifragmentation. Cette analyse a été le sujet de la thèse de doctorat de Diego Gruyer, soutenue en septembre 2014 au GANIL.

Les premiers résultats de l'expérience E503, couplant le spectromètre VAMOS au détecteur 4p INDRA, font partie de la thèse de Mark Boisjoli soutenue fin 2013. Un long papier reportant ces résultats est en cours de rédaction. Et un autre papier est en discussion au sein de la collaboration INDRA. Un nouvel étudiant a commencé sa thèse pour poursuivre, en partie, l'analyse et l'interprétation des résultats de l'expérience E503. Des résultats préliminaires ont été présentés à i) ARIS2014, à Tokyo et seront publiés aux proceedings de la conférence (soumis) ; ii) à IWM-EC2014 à Catane et seront publiés aux proceedings de la conférence ; iii) au workshop ECT*, Trento Italie.

Pour explorer l'énergie de symétrie avec la densité il est nécessaire de varier, sur une grande gamme, l'énergie de bombardement. Cela a impliqué la réalisation d'expériences non seulement à GANIL mais aussi une participation à des expériences dans d'autres laboratoires où l'énergie peut aller au delà des 100 MeV/A, comme à GSI et RIKEN. L'expérience E503 effectuée au GANIL permet de sonder la dépendance de l'énergie de symétrie aux basses densités, tandis que les expériences à GSI et à RIKEN explorent la dépendance aux hautes densités. Ce travail se fait dans un cadre de collaboration internationale.

Collaboration : GANIL, LPC, Caen, IPN-Orsay, Dapnia-CEA, IPN-Lyon, France; Université Laval, Quebec, Canada; GSI, Allemagne; INFN : Naples, Bologne, Florence, Legnaro et LNS Catane, Italie; VECC, Kolkata, Inde, Daresbury Laboratory, UK

Une lettre d'intention a été présentée au PAC du GANIL sur le couplage de FAZIA et INDRA au GANIL en 2016/7. L'ajout de l'identification en charge (Z) et en masse (A) des fragments jusqu'au titane ou chrome ($Z \sim 22-24$) aux angles avant en remplaçant les premières couronnes d'INDRA par le démonstrateur FAZIA permettra d'entamer un nouveau programme scientifique ambitieux sur les propriétés de la matière nucléaire asymétrique ($N \neq Z$, $\rho_n \neq \rho_p$) chaude et diluée. Avec des mesures exclusives aussi complètes nous pourrions contraindre et améliorer les modèles de transport et d'équilibre statistique dont les ingrédients proviennent d'approches microscopiques des interactions effectives neutron-proton dans le milieu nucléaire. Les prédictions des différentes approches divergent dès qu'on s'éloigne des conditions d'équilibre de la matière symétrique ($\rho_n = \rho_p$, $T=0$, $\rho = \rho_n + \rho_p = \rho_0$).

En outre, aux faibles densités ($\rho < \rho_0$) la matière nucléaire ne reste pas homogène, puisque la formation de clusters est énergiquement favorisée. La description théorique de ce phénomène, impliquant des effets au-delà du champ moyen (corrélations à N-corps, fluctuations), et donc de son effet sur la dynamique des réactions ainsi que sur l'équation d'état, n'est pas à ce jour bien maîtrisée. Le programme FAZIA@INDRA apportera beaucoup de nouvelles données pour l'amélioration de sa compréhension. Cet aspect est une des clés pour la prédiction du spectre des neutrinos émis lors de l'effondrement du cœur des supernovæ et des conditions de la nucléosynthèse qui y a lieu. La "neutrinosphère", la partie de la supernova où les neutrinos subissent les dernières interactions avec la matière avant de s'échapper librement, est constituée de matière nucléaire riche en neutrons à basse densité et autour de $T=5$ MeV de température. Un atelier organisé cette année à Trento, auquel certains d'entre nous ont participé, a eu pour but de lancer un effort mondial pour améliorer notre connaissance de la composition et l'équation d'état de cette matière, en rapprochant la physique des collisions d'ions lourds (expérimentale et théorique), l'astrophysique et la physique des neutrinos.

Temps de fission d'éléments super-lourds mesurés par fluorescence X

L'expérience E581 a confirmé l'existence d'atomes de $Z=120$ grâce à la détection de leur fluorescence X. Cette expérience a donné lieu, entre autres, à la soutenance d'une thèse de Doctorat ainsi qu'à la publication en 2012 d'une lettre dans Physical Review Letters. Dans le prolongement de ces résultats, l'expérience E651 a été

réalisée en mars 2014 avec un dispositif expérimental sensiblement amélioré. Le but de cette expérience était de former et d'étudier le temps de fission de deux isotopes différents de $Z = 124$ afin de mettre en évidence le rôle du nombre de neutrons sur la stabilité de cet élément. Cette expérience est en cours d'analyse et les premiers résultats sont attendus en 2015.

Parallèlement, une expérience a été préparée auprès de l'accélérateur de l'Australian National University (ANU), expérience que nous allons réaliser en 2015 en collaboration avec un groupe australien. Cette expérience permettra d'obtenir une vue cohérente et unifiée des mécanismes de réaction conduisant à la formation par fusion d'éléments super-lourds, le dispositif expérimental australien (CUBE) permettant de sonder les temps de fission courts, celui de Ganil (FLUOX) permettant de sonder les temps de fission longs. Grâce à la complémentarité des dispositifs expérimentaux, les sections efficaces de fusion seront déterminées pour la première fois de façon purement expérimentale.

Collaboration : GANIL, IPNO, ANU

E653 : Moment angulaire induit dans les réactions de transfert avec MAYA

Cette expérience a pour but de valider la méthode de reconstruction de la section efficace de fission induite par neutron à partir de réactions de transfert. Cette méthode, dite de substitution, est utilisée pour améliorer et élargir des nouvelles générations de bases de données nucléaires évaluées. Les considérations théoriques sur lesquelles la méthode repose sont toutefois controversées, et il est nécessaire d'apporter des informations expérimentales sur les conditions de population du système fissionnant produit par les réactions de transfert. Si l'énergie d'excitation est en général bien déterminée, le moment angulaire l'est très peu, et son influence sur les probabilités de fission reste donc mal connue.

La mesure des distributions angulaires des fragments de fission en coïncidence avec le partenaire de la réaction de transfert permettra de remonter au moment angulaire induit dans ces réactions. Pour cela, la cible active MAYA est utilisée, car elle permet une efficacité de détection et une couverture angulaire optimales. Pour garantir le succès de l'expérience, il a fallu modifier la cible active de façon à ce qu'elle puisse résister à la forte ionisation produite par le faisceau d'uranium dans le gaz de la cible. Cette modification consiste en un masque électrostatique autour de la trajectoire du faisceau. Il a été testé avec succès en juillet 2013 et fait l'objet d'une publication dans NIM A. L'expérience se déroulera à la fin de l'année 2014.

Collaboration : GANIL (Responsable); Univ. de Santiago de Compostela (Espagne) ; IPN Orsay.

Rendements isotopiques de fission induite par réaction de transfert.

Ce programme expérimental développé au GANIL a pour objectif de mesurer les distributions isotopiques des fragments de fission d'actinides compris entre l' ^{238}U et le ^{250}Cf , pour des énergies d'excitation de l'ordre de quelques MeV au dessus de la barrière de fission, c'est à dire très similaires aux énergies induites par des neutrons rapides dans les réacteurs. A ces énergies, la distribution des fragments est fortement influencée par les effets de structure en couches sur l'énergie macroscopique du noyau fissionnant, ce qui donne l'occasion d'étudier la structure nucléaire à des déformations inaccessibles par tout autre mécanisme. La technique utilisée est celle de la cinématique inverse, ce qui permet d'avoir une bonne résolution en charge, couplée au spectromètre VAMOS, qui assure la résolution en masse. Ainsi, l'ensemble des fragments produits est identifié avec une excellente résolution (celle-ci étant limitée aux fragments légers en cinématique directe). Ce thème a fait l'objet de deux thèses au GANIL, soutenues en 2010 et 2012. Des programmes européens dédiés à la recherche sur les problématiques de l'énergie nucléaires ont financé 3 ans de contrats post-doctoraux. Les rendements isotopiques résultats de la fission du ^{240}Pu sont aujourd'hui inclus dans la base de données EXFOR de l'Agence pour l'Energie Nucléaire. Cette technique particulière permet en plus d'avoir un ensemble de données avec plusieurs variables corrélées, comme l'énergie cinétique des fragments, ce qui permet de reconstruire la distribution isotopique des fragments au point de scission. Ceci permet d'aborder le thème du partage de l'énergie d'excitation et les configurations de déformation choisies par le noyau fissionnant. Une thèse est en cours à l'Université de Santiago de Compostela, Espagne.

Collaboration : GANIL, Univ. Santiago de Compostela, Espagne, GSI, Allemagne ; IPNO, Univ. Göteborg, Suède

5. Interactions fondamentales

Les mesures de précision de la corrélation angulaire β - ν , du temps de vie et de rapport d'embranchement dans la désintégration β permettent de tester différentes hypothèses du Modèle Standard, concernant les symétries de l'interaction faible ou l'unitarité de la matrice CKM par la détermination de l'élément de matrice de mélange des quarks V_{ud} . Dans ces domaines, elles sont complémentaires à la physique des hautes énergies. Au GANIL, la plupart de ces mesures de précision sont réalisées sur SPIRAL. L'installation SPIRAL étant temporairement indisponible jusqu'en 2016 pour son upgrade (voir section suivante), le travail en 2014 a principalement consisté en l'analyse de données d'expériences réalisées les années précédentes. Parallèlement à ces mesures, la collaboration thématique avec l'Université de Guelph (Canada) et le CENBG s'est renforcée en 2013 et en 2014 avec la participation du GANIL à des mesures précises à TRIUMF de la durée de vie de noyaux émetteurs beta $0^+ \rightarrow 0^+$: ^{10}C , ^{14}O et ^{18}Ne . L'association de la station IBE à l'équipement LPCTrap, conjuguée à la disponibilité à l'horizon 2017 de nouveaux faisceaux d'ions radioactifs fait ainsi de la partie basse énergie de SPIRAL un lieu privilégié pour l'étude des transitions β miroirs ainsi que des transitions β super-permises de type $0^+ \rightarrow 0^+$ en attendant la mise en opération de DESIR.

Mesures de corrélations angulaires β - ν

E646S - E. Liénard et al - LIRAT

Cette expérience réalisée en 2013 à l'aide de l'équipement LPCTrap installé auprès de la ligne basse énergie LIRAT de l'installation SPIRAL a permis d'observer la distribution en temps de vol des ions $^{19}\text{F}^{9+}$ émis dans la désintégration β miroir d'ions $^{19}\text{Ne}^{1+}$, en coïncidence avec la détection des particules β émises. Elle permettra de tester la modélisation du phénomène de shake-off dans la désintégration β et en particulier d'étudier l'importance de l'effet Auger. La détermination du paramètre de corrélation angulaire β - ν dans la désintégration de ce noyau permettra en outre d'extraire le rapport de mélange Fermi/Gamow-Teller dans la désintégration β miroir de ce noyau, en vue d'améliorer la précision du test de l'unitarité de la matrice de mélange des quarks.

Parallèlement, un important travail de simulation est effectué de manière à caractériser l'incertitude systématique associée aux mesures de corrélation effectuées par le passé avec LPCTrap dans la décroissance de ^6He , ^{35}Ar et ^{19}Ne .

Collaboration : LPC Caen, GANIL, CIMAP, IKS Leuven, MSU, Granada University

Mesures de temps de vie et de rapports d'embranchement

E622S - G. Grinyer, J. C. Thomas et al - IBE

Cette expérience de mesure très précise du rapport d'embranchement de la décroissance super-permise $0^+ \rightarrow 0^+$ de ^{18}Ne a été effectuée en 2012 auprès de la station d'identification IBE de SPIRAL. Son analyse fait l'objet d'une thèse qui s'achèvera début 2015 et qui a déjà fait l'objet d'un article publié dans NIM A. Des problèmes techniques liés à l'acquisition des données et au contrôle du phénomène d'empilement des rayonnements gamma détectés ne permettront pas d'obtenir la précision escomptée de l'ordre de 0.2 %. En revanche, les résultats obtenus permettent de se convaincre que les modifications techniques opérées sur la station d'identification de même que le protocole de mesure mis en place permettront à l'avenir d'atteindre cet objectif.

Collaboration : GANIL, CENBG, TRIUMF, Université de Guelph

Mesures de temps de vie pendant le test FEBIAD - P. Delahaye et al - IBE

Etude des désintégrations β miroir : les développements techniques opérés sur la station d'identification de SPIRAL ont permis lors du test d'une nouvelle source d'ions de type FEBIAD réalisé en décembre 2013 (voir

section 6 ci-dessous) de mesurer avec une très bonne précision la durée de vie de trois noyaux émetteurs β miroir : ^{17}F et ^{21}Na d'une part (précision de 0.05 %) et ^{33}Cl d'autre part (précision de 0.1 %). Dans les deux premiers cas, la précision atteinte est 5 fois meilleure que celle de mesures antérieures et elle est 2 fois meilleure dans le dernier cas. Du fait de la précision des résultats obtenus, l'incertitude sur les valeurs de Ft associées est aujourd'hui dominée par celle des autres observables expérimentales entrant dans leur calcul, soit la masse des noyaux, le rapport d'embranchement et le paramètre de mélange Fermi/Gamow-Teller caractérisant ces transitions β miroirs.

Collaboration : GANIL, CERN ISOLDE

6. Etude des méthodes de production de faisceaux radioactifs et radio-isotopes

Ces dernières années, les activités du groupe de physique ont montré une nouvelle impulsion sur le développement de faisceaux radioactifs et radio-isotopes. Ces activités concernent les tests de production de nouveaux faisceaux pour l'upgrade de SPIRAL1, différentes mesures visant à valider les simulations des rendements de fission pour SPIRAL2 phase 2, et comme thème émergent le développement de méthodes de production de radio-isotopes à des fins médicales.

Production de faisceaux ISOL

Upgrade de SPIRAL

L'upgrade de SPIRAL permettra de fournir de nouveaux faisceaux radioactifs d'éléments métalliques aux énergies de CIME dès fin 2016. La nouvelle installation SPIRAL devrait offrir de nombreuses opportunités pour la communauté de physique, dont certaines ont déjà été évaluées lors de différentes revues : au PAC d'avril 2010, lors de la semaine AGATA en 2013 ou encore lors de l'atelier DESIR/S3 LEB début 2014. Au total plus de 20 Lols ont été présentées.

Le projet d'upgrade de SPIRAL repose notamment sur le développement d'un ensemble cible-source FEBIAD qui a été testé en ligne et à puissance nominale sur SPIRAL en Décembre 2013. De nombreux faisceaux ont été produits lors de ce test en utilisant un faisceau de ^{36}Ar , avec des intensités compatibles avec les intensités généralement requises par diverses expériences de physique (10^4 - 10^8 pps). Entre particulier, les 6 nouveaux éléments suivants ont pu être produits : Na, Al, Mg, P, Cl et K. Ils s'ajouteront au 7 qui ont été délivrés jusqu'à maintenant par l'installation SPIRAL à partir de fin 2016. De nombreux autres sont a priori possibles avec d'autres faisceaux incidents. L'analyse des résultats de l'expérience de fin 2013 est terminée et un article est en cours de rédaction (soumission Décembre 2014). Une fiabilisation de l'ECS FEBIAD sera réalisée en fin 2014 – début 2015 sur le banc de test des ECS. La post-accélération des faisceaux mono-chargés produits par la source d'ions FEBIAD requiert l'utilisation d'un booster de charge de type ECR qui a été assemblé cette année. Des tests du booster de charge de type Phoenix au LPSC sont prévus en 2015 dans le cadre du projet EMILIE (voir ci-dessous) avant son installation sur SPIRAL pour des tests en 2016.

Collaboration : GANIL, LPC Caen, CERN ISOLDE, LPSC, ANL

Projet EMILIE

GANIL coordonne le projet européen EMILIE, dont le but est l'optimisation des méthodes d'élévation de charge dans les booster de charge de type ECR et EBIS pour les installations ISOL actuelles et futures, dont SPIRAL 1& 2, SPES, ISOLDE et EURISOL. Cette année de nouveaux tests de performances de booster de charge ECR ont été réalisés au LPSC. Un vide amélioré et un champ magnétique optimisé ont permis d'obtenir de meilleures efficacités de capture. Les résultats de ces tests ont été présentés à ECRIS 2014. En 2015 le booster de charge de l'installation SPIRAL sera testé hors ligne au LPSC. Les tests du prototype de debuncher EBIS, construit par le LPC Caen et conçu pour rendre continu le faisceau naturellement pulsé des EBIS, seront réalisés entre fin 2014 et début 2015.

Collaboration : GANIL, LPSC, LPC Caen, INFN Legnaro, INFN LNS, JYFL, HIL

Ionisation Laser (suite du projet GISELE)

La source d'ions laser ainsi que les équipements dédiés à l'ionisation par résonance laser sont continuellement améliorés dans la perspective d'une installation prochaine sur S3 LEB (2016). Des expériences de spectroscopie laser ont eu lieu en collaboration avec le groupe LARISSA de Johannes Gutenberg-Universität. L'installation de caméras permettant de voir à distance les faisceaux UV et Infrarouge dans la ligne de transport des faisceaux ainsi que l'installation d'un télescope visualisant la source d'ions ont permis de faciliter l'alignement des faisceaux laser et de surveiller leurs positions durant les expériences. Différents schémas d'ionisation ont été testés pour la production de faisceaux d'étain et une mesure d'efficacité d'ionisation a pu être effectuée avec le schéma le plus efficace. En parallèle, des mesures du profil du faisceau d'ions ont été enregistrées grâce aux nouveaux profileurs développés au GANIL. La réponse en temps de la source d'ions a aussi pu être mesurée grâce à ce diagnostic. Ces travaux ont donné lieu à une publication dans RSI : J.L. Henares et al, RSI 85, 02B914 (2014). En 2015, l'objectif sera d'améliorer le système laser afin d'automatiser et de permettre des expériences plus fines de spectroscopie laser. Ceci sera fait par la motorisation de certains équipements des cavités laser et le développement des programmes d'acquisition associés. En parallèle, les tests de 4 géométries différentes du corps de source d'ions permettront d'évaluer l'impact du changement de géométrie sur la production et la pureté de faisceaux d'ions radioactifs. Les schémas d'ionisation de l'argent et du zirconium seront étudiés.

Collaboration : GANIL, TRIUMF, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, CERN ISOLDE

Mesures pour SPIRAL 2 phase 2

Des mesures de section efficaces $U(n, fZA)$ à JYFL par spectroscopie gamma en coïncidence (G. Lhersonneau et al, NIM A, 2013) ont été motivées par le fait que la simulation d'une expérience à IGISOL prédit des taux 2 à 3 fois supérieurs aux observations expérimentales. La partie de l'analyse dont le GANIL est en charge est quasiment finie avec l'analyse d'une trentaine de masses, une dernière révision devra valider les masses à adopter définitivement comme étant fiables. La méthode de coïncidence γ - γ appliquée à cette étude est prouvée être suffisamment sélective et pourrait avoir des applications en spectroscopie, potentiellement pour tous les produits de fission de période supérieure à 1 seconde.

Collaboration : GANIL, Jyväskylä, LPSC, Rez, Bucarest

Une mesure de taux de production et de répartition spatiale des neutrons produits dans une cible en ^{13}C irradiée par des deutons de moyennes énergies ($E_{\text{max}} = 65 \text{ MeV}$) a été réalisée à JYFL, faisant suite aux mesures avec des cibles de ^{12}C et eau lourde. L'analyse des mesures est en cours. Ces résultats présenteront un intérêt évident pour les nouvelles installations nucléaires à cause du manque dans les données nucléaires relatives à la production de neutrons énergétiques (~ 14 à 60 MeV) notamment par réaction de stripping.

Collaboration : GANIL, Jyväskylä (2012-2014)

R&D Production de radio-isotopes pour applications médicales au GANIL

Une nouvelle activité de R&D pour la production de radio-isotopes pour les applications médicales a vu le jour en 2014. Nous avons évalué les possibles implications du GANIL notamment dans la perspectives des futurs faisceaux qui seront délivrés par le LINAC de SPIRAL2 à partir de 2016. Cette activité s'appuie notamment sur la mise en place d'une collaboration avec ARRONAX pour l'étude de la production d'un radioélément innovant l'astate 211 dont le développement en est au stade préclinique à Nantes. L'apport du GANIL dans ce domaine serait la qualité des faisceaux (énergie ajustable, ions disponibles et intensité) ainsi que le développement d'une cible de bismuth liquide qui pourrait se faire dans le cadre d'une collaboration avec le CERN. D'autres radioéléments d'intérêts ont été identifiés comme le ^{68}Ga , pour lequel une collaboration étroite avec CYCERON est en discussion, ou le ^{64}Cu qui pourrait être synthétisé via différentes voie de réaction dont les sections efficaces et les contaminants doivent être mesurés. Cette activité de R&D doit s'appuyer à terme sur un financement sur projets. Pour cela un certain nombre d'initiatives ont été engagées notamment une demande de financement dans le cadre du PSPC porté par un consortium privé-public dont le GANIL est partenaire.

Collaboration: GANIL, ARRONAX, CYCERON

Faisceaux stables/ faisceaux primaires

Le GANIL, en étroite collaboration avec les laboratoires impliqués dans ECOS de NuPEcc, a mis en place une carte de noyaux appelée ECOS. Cette carte présente les données relatives aux faisceaux d'ions stables produits dans les installations européennes. Il s'agit de centraliser des données de faisceaux stables permettant à la communauté des physiciens expérimentateurs d'avoir facilement accès aux différentes données au niveau européen. La Carte est consultable sur le lien : <http://u.ganil-spiral2.eu/chart-ecos/>.

Collaboration : GANIL, IPN (Orsay), GSI, IFJ (Cracovie), JYFL (Jyväskylä), LNL (Legnaro), LNS (Catane), SLCJ (Varsovie)

7. Développements techniques spécifiques

Afin d'assurer le niveau des expériences du GANIL à un niveau de compétition international, des développements permanents sont poursuivis. La construction de nouveaux détecteurs, le développement d'infrastructure spécifique pour l'accueil de gros instruments ou l'amélioration des équipements en sont des exemples spécifiques.

En parallèle, un investissement important est dédié au développement de nouvelles techniques de détection comme FAZIA, EXOGAM2, ACTAR ou PARIS et/ou d'installations futures auprès de SPIRAL2, comme NFS, ou S3 et DESIR qui ont toutes deux été sélectionnées dans le cadre du programme EQUIPEX.

Projet AGATA@GANIL

A partir de 2014 et jusqu'à la fin de 2016, le GANIL va accueillir le spectromètre européen AGATA. Ce détecteur germanium est le premier exemplaire d'une nouvelle génération de spectromètre gamma pour la spectroscopie nucléaire. Après une phase réussie de démonstration au LNL-Legnaro en Italie, la collaboration exploite depuis Janvier 2012 AGATA au GSI dans la salle S4 au plan focal du FRS. Le GANIL se prépare depuis Février 2012 à l'accueil du détecteur dans la salle G1. Il s'agit d'un effort important pour les services technique et de physique du GANIL. Après deux années et demie de préparation au GANIL, le détecteur AGATA a été déménagé du GSI en Juin 2014 et son installation au GANIL s'est déroulée durant l'été 2014. Les infrastructures, l'électronique et le système d'acquisition sont installés depuis fin aout 2014. Les quatre premiers modules de détection sont arrivés à l'automne 2014. Une série de tests sous faisceau est planifiée entre novembre et décembre 2014. Le groupe du GANIL est bien évidemment totalement impliqué dans l'installation, la mise en fonctionnement et l'exploitation du détecteur pendant les runs de commissioning.

Un appel à lettres d'intentions a été lancé en Octobre 2012. Au mois de Février 2013 s'est tenu un premier workshop de physique dédié à la campagne AGATA au GANIL. Un peu plus de 45 lettres d'intentions y ont été discutées afin de présenter un programme scientifique de haut niveau. La forte réponse de la communauté montre l'enthousiasme pour cette campagne au GANIL. En février 2014, le GANIL a organisé un workshop préparatoire à la réunion du PAC d'avril 2014. 25 propositions d'expérience pour l'équivalent de 700 UT de faisceau ont été présentées par une large collaboration. 10 expériences ont été acceptées par le comité avec 325 UT de faisceau à planifier entre 2015 et 2016. Le début de la campagne de physique est fixé au mois de mars 2015.

Collaboration : GANIL, AGATA collaboration

Projet VAMOS++

Plusieurs développements du spectromètre VAMOS++ ont été menés avec succès, ou sont en train de l'être, afin d'améliorer ses capacités en terme de résolution et de taux de comptage. Ceci sera primordial pour son couplage à AGATA, afin d'atteindre la sensibilité maximale possible avec ce couplage. Ces développements consistent à l'installation imminente d'un nouveau détecteur de position et de temps à l'entrée de VAMOS++, le remplacement prévu du mur de Silicium par une chambre à ionisation au plan focal, ainsi que la construction d'un nouveau système de détection de l'autre côté de VAMOS++ (par rapport à la direction du faisceau

incident). Ce dernier permettra, dans le cas de réactions binaires d'intercepter et identifier les deux produits de réaction en coïncidence (notamment, les deux fragments pour une réaction de fission).

Le projet visant à adjoindre à VAMOS++ une opération en mode gazeux est en cours. Ce développement permettra d'élargir la palette de physique de VAMOS++, et en premier lieu lors de la seconde phase de la campagne AGATA@GANIL. Le financement du projet est en cours de discussion avec les instances dirigeantes du laboratoire et de l'IrFU Saclay.

Expériences sur LISE en 2015

L'activité sur LISE sera très fortement réduite en 2015 du fait du fonctionnement du GANIL avec seulement un cyclotron (qui ne permettra donc pas de produire des faisceaux par fragmentation du projectile) et du déroulement de la campagne AGATA sur la ligne VAMOS pendant plusieurs mois. Nous souhaitons mettre à profit ce temps d'arrêt forcé pour améliorer les performances du spectromètre en vue de gagner en intensité et en gamme d'énergie de faisceaux primaires en vue d'expériences futures déjà acceptées (4 en attente de programmation) ou qui vont être proposées aux prochains comités d'expériences :

- Lors de la plupart des réglages effectués sur la ligne LISE, nous sommes contraints de diminuer l'intensité du faisceau primaire pour éviter que des états de charge du faisceau n'endommagent la ligne, mettant en péril les expériences. Nous avons démontré que pour la production de faisceau de ^{56}Ni en particulier, la mise en place d'un chemisage refroidit sur une partie de la ligne nous ferait gagner un facteur 8 sur sa production par fragmentation.

- Certaines des expériences de réaction de transfert nécessitent un ralentissement des faisceaux secondaires produits à ~ 40 MeV/A jusqu'à 10 ou 15 MeV/A. Cependant un tel ralentissement s'accompagne d'une perte de transmission qui peut atteindre un facteur 10. Nous cherchons donc la possibilité de ralentir les faisceaux produits par fragmentation de la manière la moins pénalisante possible. Une piste est l'utilisation de la cible active ACTAR-TPC qui pourrait servir simultanément de ralentisseur, de moyen de déterminer les pertes d'énergies des noyaux un à un, de déterminer leur trajectoire en vue d'une expérience située en aval avec par exemple le système traditionnel de détection pour les réactions de transfert. Le détecteur ACTAR-TPC pourrait également être utilisé comme cible de réaction, ce qui permettrait de réaliser simultanément deux expériences à des énergies différentes en combinant une cible active et une cible solide traditionnelle.

-Le détecteur CAVIAR, localisé en D3, n'est pour le moment pas utilisé car les taux de comptage sont beaucoup trop élevés dans la majorité des réglages effectués ces dernières années. La possibilité mécanique de l'installer au deuxième plan focal de LISE étant démontrée, nous allons étudier l'intérêt scientifique de ce changement dans des cas concrets d'expériences.

Un atelier sera organisé début 2015 pour discuter ces points ainsi que la réalisation de programmes scientifiques sur LISE dans les prochaines années sous forme de campagnes d'expériences.

Projet EXOGAM2

EXOGAM2 est un projet qui a pour objectif de remplacer l'électronique VXI actuelle par une électronique numérique. Cette évolution est dictée par le programme scientifique associé à EXOGAM et permettra à terme d'atteindre des taux de comptage très élevés et de mieux localiser l'interaction des rayonnements gamma dans le détecteur. Durant l'année 2014, les aspects techniques associés aux différents systèmes EXOGAM2 ont été terminés et mis au niveau du cahier des charges, excepté ce qui concerne la partie relative à l'implémentation du filtre de Kalman qui sera finalisée en 2015. L'ensemble des appels d'offres (numériseurs, carte FADC et boîte d'interconnexion) a été lancé et les contrats signés. Une chaîne complète de numérisation a été installée sur 2 cristaux d'un clover pendant l'expérience E623 et a démontré que l'ensemble est extrêmement stable et sur une longue période. En 2015, le projet EXOGAM2 complet sera installé, testé et clôturé. Les collaborations NEDA et DIAMANT ont adopté la même solution technique et les discussions sont en cours avec PARIS et S3.

Collaboration: GANIL, KTH Stockholm, Lund Univ., Uppsala Univ., CSNSM Orsay, IPN Orsay, IUAC New Delhi, TIFR Mumbai, IFJ PAN Krakow, ATOMKI Debrecen, Nigde Univ.

Projet ERC : Active Target and Time Projection Chamber (ACTAR TPC)

Le détecteur ACTAR TPC utilisera un système de détection à base de « micro-pattern gas detectors » (MPGDs). Ces détecteurs offrent un choix attrayant pour les applications de physique nucléaire en raison de leur bonne réponse en temps (rapide et précise), d'une excellente résolution spatiale et de leur capacité à fonctionner de manière optimale même à de fort taux de comptage. Ils sont aussi plus robustes que les chambres à fils (comme utilisé aujourd'hui dans MAYA et VAMOS, par exemple), et peuvent être produits dans une variété de formes et de tailles, allant de quelques millimètres pour les détecteurs de petite dimension jusqu'à 1 mètre pour les grands systèmes.

Micromegas a été choisi pour équiper un « démonstrateur » d'ACTAR TPC qui est composé d'un plan de pistes de 2048 pads de 2x2 mm². Le détecteur a été conçu par l'IPN d'Orsay et le GANIL. La conception de ce démonstrateur permet l'étude de différents aspects, comme l'intégration d'une connectique à forte densité, le couplage du détecteur avec la mécanique, ou encore l'électrostatique de la cage de champ. De plus, il permettra de tester la nouvelle électronique GET en conditions réelles et de motiver la conception du système d'acquisition lié à cette électronique au sein du GANIL. Le détecteur et sa nouvelle électronique GET a été utilisé pour la première fois sous faisceau (12C @ 6.6 MeV/u dans G3) en Juin 2014.

Un financement de 1.29M€ sur 5 ans a été accordé par l'ERC (European Research Council) pour la fabrication du détecteur final ACTAR TPC. Le projet a commencé en février 2014. Les premières expériences sont prévues fin 2016.

Collaboration : GANIL (Responsable); CEA/Irfu Saclay; CENBG Bordeaux; IKS Leuven (Belgique); IPN Orsay; Universidade de Santiago de Compostela (Espagne)

Projet ANR : General Electronics for TPCs (GET)

L'électronique développée dans le cadre de l'ANR "GET" (2009-2014) jouera un rôle essentiel dans le système d'acquisition final du détecteur ACTAR TPC. Comme le projet GET touche à sa fin (octobre 2014), les nouveaux modules sont en passe d'être terminés et disponibles, facilitant ainsi la mise en œuvre de plus grands systèmes avec beaucoup plus de canaux. Pour certaines cartes la production de masse a déjà commencé et pour d'autres elle va commencer avant la fin de cette année. En juin 2014 nous avons réalisé un système d'acquisition avec 8 cartes AsAd (ASIC support & ADC), 2 cartes CoBo (concentration des données), et 1 carte MUTANTA (horloge) pour un total de 2048 voies. Pour la première fois, nous avons utilisé avec succès un détecteur gazeux équipé avec le système GET pour enregistrer et analyser les trajectoires d'un faisceau ¹²C et ses réactions dans le détecteur. Au sein du projet GET, GANIL est plus particulièrement chargé de la conception du module MUTANT (Multiplicity, Trigger and Time) et de l'ensemble de l'acquisition de données du système construit autour du nouveau standard de communication μ TCA. Ce dispositif devra gérer environ 16000 voies d'électronique et sera indispensable dans le futur pour ACTAR TPC et d'autres détecteurs du GANIL.

Collaboration : CEA/Irfu Saclay (Responsable); CENBG Bordeaux; GANIL; MSU (États Unis)

Calorimètre gamma de nouvelle génération PARIS

Le détecteur PARIS est le projet d'un calorimètre gamma de nouvelle génération utilisant un assemblage innovant de scintillateurs LaBr₃ et NaI, destiné à donner accès aux énergies et à la multiplicité des photons émis lors d'une réaction sur une large gamme en énergie photon (~100keV à 40MeV). Ces informations permettront d'étudier un large spectre de physique, allant des résonances géantes, aux transitions de forme, des aspects de structure nucléaire fine et de la dynamique nucléaire. Les réactions envisagées dans le cadre de PARIS sont majoritairement la fusion-évaporation et fusion-fission, et plus particulièrement avec les faisceaux de SPIRAL2. Un chercheur du GANIL a dirigé le groupe de travail « Theory and Physics cases » jusque mi-2012, groupe qui a fortement contribué à la définition des expériences phares du futur détecteur. Le GANIL a maintenant la responsabilité de porte-parole de la campagne PARIS au laboratoire.

Le détecteur PARIS est maintenant en phase de construction ; plus de 30 cellules LaBr₃/NaI individuelles auront été délivrées par Saint Gobain d'ici fin 2014. En 2012-2014 l'implication des chercheurs GANIL dans PARIS a suivi plusieurs axes. Tout d'abord nous avons contribué à l'élaboration d'une stratégie pour le programme de "commissioning" de PARIS. Ensuite nous avons participé à l'analyse de simulations GEANT4 de réactions de fusion-évaporation/fission pour PARIS couplé à différents détecteurs auxiliaires. Ce travail s'est enrichi en 2013 par la contribution à l'interprétation de données d'une expérience réalisée à LNL, Italie, qui permet d'améliorer les ingrédients de la simulation. Ces résultats ont entraîné les chercheurs du laboratoire à proposer une campagne d'expériences avec PARIS à l'IPNO, en attendant sa venue au GANIL. Depuis mai 2014, un chercheur en post-doctorat a été affecté au GANIL dans le cadre du projet européen CRISP. En collaboration avec les chercheurs du laboratoire, il a réalisé les tests et calibrations du détecteur LaBr₃/NaI PARIS délivré au GANIL en juin 2014 (un second devrait suivre en décembre), ainsi que les études sur l'utilisation des détecteurs PARIS à proximité des champs magnétiques de VAMOS++. En parallèle, le post-doctorant développe un outil de simulations généraliste, incluant des générateurs d'évènements de diverses réactions (élastiques, profondément inélastiques, fusion-évaporation, fission) et leur mise en œuvre dans des expériences au GANIL, incluant les détecteurs VAMOS++, PARIS et AGATA. Ces simulations seront utiles pour la campagne AGATA@GANIL. Les premières comparaisons réalisées avec des données de fission collectées à VAMOS++ sont encourageantes et laissent envisager la disponibilité du code de simulations à la communauté dans un avenir proche.

Collaborations: Accords COPIN-IN2P3/CNRS n°12-145 (Maj-Schmitt), Accords LEA COPIGAL « PARIS » (Maj-Schmitt).

FAZIA

Le projet FAZIA a été lancé en vue de construire un nouveau multi-détecteur 4π de particules chargées, adapté à l'étude des noyaux chauds dans des conditions extrêmes de forme, d'énergie d'excitation, de spin et d'asymétrie N/Z. Ces noyaux chauds seront formés grâce aux nouvelles installations de faisceaux exotiques (SPIRAL2, EURISOL). Ce détecteur apportera des améliorations de détection et d'identification de la charge et aussi de la masse des particules chargées ayant des énergies cinétiques entre quelques MeV et 10 GeV.

Le projet FAZIA rentre dans sa phase de démonstrateur (2011-2015):

Cette étape est consacrée à construire et tester un prototype composé de 200 cellules disposées dans une géométrie spécifique qui répond aux besoins techniques en termes de granularité et de résolution angulaire. Des tests sont prévus pour permettre de rechercher d'éventuels problèmes mécaniques, électroniques, de diaphonie, de flux de données, système de refroidissement, etc ... Dans le cadre de SPIRAL2PP, un MOU entre la France, l'Italie, la Roumanie et la Pologne a été signé. Le démonstrateur couplé à des multi-détecteurs existants sera également utilisé durant cette période. Un test d'intégration électronique et mécanique d'un bloc de FAZIA (16 télescopes) au LNS de Catane a été retardé à cause de problèmes de non fonctionnement de la machine du LNS, le test est programmé en décembre 2014. La construction des autres blocks devrait se poursuivre.

Une demande d'expérience au LNS de Catane a été acceptée où 4 blocks FAZIA (72 modules) seront testés. Cette expérience utilisera le même système $40,48\text{Ca}+40,48\text{Ca}$ à $E/A= 35$ MeV mesuré à GANIL en couplant INDRA à VAMOS. Cette mesure permettra la détermination de la section efficace des isotopes produits dans cette réaction et complétera la mesure effectuée à GANIL. Cette expérience devrait se faire au courant 2015.

Collaboration : IN2P3/CNRS, GANIL-SPIRAL2 (Caen), INFN Italy, COPIN, POLAND, IFIN-HH (Bucharest) ROMANIA

NFS

Les bâtiments NFS, salle du convertisseur et salle de temps de vol, sont terminés. La ventilation nucléaire, les portes lourdes et l'ascenseur sont installés. Les servitudes, fluide, câblage, lignes de gaz et d'azote seront installées dans les prochains mois.

Les éléments de la ligne de faisceau sont soit en construction, soit déjà livrés. La carte de champ magnétique de l'aimant a été mesurée. Les plans de l'arrêt faisceau de neutrons sont terminés, la consultation pour sa construction va être lancée sous peu. Le second collimateur, indispensable pour certaines expériences dans la salle de temps de vol, est étudié et sera conçu par les physiciens et ingénieurs de l'IPHC de Strasbourg.

Les principales tâches des prochains mois concernent le montage du process de NFS, ligne de faisceau, aimant, collimateur, arrêt faisceau de neutrons. Un important travail est réalisé afin de planifier les actions à mettre en œuvre, identifier les ressources nécessaires et définir le planning inhérent. La séquence de montage sera dans l'ordre le collimateur, l'aimant puis la ligne de faisceau. Ce montage devrait débuter en février 2015 après que les géomètres auront réalisé le maillage de l'installation.

L'étude du convertisseur comprenant la cible rotative, le système d'extraction et le container de stockage et de manipulation est terminée. Les réponses à l'appel d'offre global représentant des coûts supérieurs au budget prévu, il a été décidé de changer de stratégie et de séparer la construction en plusieurs lots. Le développement des automatismes a commencé en 2013 au CEA/Saclay, de nombreux échanges avec le STP du GANIL ont lieu pour l'intégration des sécurités de cet ensemble dans le Système de Protection Machine. Le montage de l'ensemble et les tests d'automatismes seront réalisés par l'IRFU au centre CEA de Saclay avant d'être installé à NFS.

Un convertisseur mince en lithium ou en béryllium est nécessaire pour produire des neutrons avec un spectre quasi-monoénergétique. Le choix d'un système fixe a été fait, l'étude est terminée et sa livraison est prévue pour avril 2015.

Le premier faisceau délivré par le LINAG de SPIRAL-2 est programmé en septembre 2015. Nous envisageons de commencer les essais avec NFS dès ce premier faisceau disponible. Une série de tests de fonctionnement des différents éléments et des organes de sécurité sera programmée fin 2015. Les performances de l'installation, flux, spectres bruit de fond ambiant, seront ensuite mesurées.

Aires Expérimentales Linac (AEL)

La réception de l'infrastructure des aires expérimentales a commencé en octobre 2014 avec la partie génie civil, climatisation, ventilation et chauffage. Les autres lots seront réceptionnés prochainement avec un changement de statut de SPIRAL2 dans les prochaines semaines.

L'extension du périmètre de SPIRAL2 phase 1, décidée au COPIL de SIPRAL2 en 2013 pour la prise en charge et le financement des installations et équipements entre gros œuvre (« clos et couvert ») et l'instrumentation des AEL est effective. Cependant, des difficultés financières pour finaliser la phase 1 engendrent plusieurs retards dans le lancement des appels d'offres pour les AEL. Si cette situation perdure en 2015, des retards significatifs dans la mise en service de NFS et S³ sont à prévoir.

Afin de palier le problème de ressources, identifié en 2013, pour la réalisation de certains lots orphelins pour la réalisation de S³ et NFS, la direction du GANIL a lancé en 2014 le recrutement de CDD spécifiques pour les parties automatisme, contrôle commande et instrumentation.

L'installation des équipements scientifiques dans les salles S3 et NFS va commencer fin 2014 et va se poursuivre en 2015 avec pour objectif la mise en service de NFS fin 2015.

Super Séparateur Spectromètre (S3)

Le projet est dans sa phase de construction avec l'installation des premiers éléments sur le site du GANIL prévue en novembre 2014. Plusieurs contrats ont été lancés en 2014, avec notamment la boîte froide cryogénique et le triplet de multipole ouvert.

Le planning réactualisé de l'ensemble de la première phase du projet S³ conduit à la mise en service de l'installation au deuxième semestre 2016. Afin de préparer le programme scientifique et les premières expériences, une réunion de collaboration a été organisée en mars 2014. Cet événement a réuni plus de 115 participants provenant de 16 pays. Une feuille de route réaliste et ambitieuse pour les premières campagnes d'expériences a été élaborée et présentée récemment au conseil scientifique du GANIL lors de la GANIL/SPIRAL2 week (Octobre 2014).

Ce programme nécessite la disponibilité :

- d'une part d'un détecteur au plan focal pour les études de spectroscopie par décroissance. Ce détecteur, SIRIUS, permettra la mesure de nouveaux éléments en des temps raisonnables, l'étude de noyaux à la « drip line » proton (¹⁰⁰Sn) et ouvrira aussi des perspectives comme l'étude des mécanismes de réaction ou la spectroscopie. Ce projet non financé dans l'EQUIPEX a fait l'objet d'une demande de financement par l'ANR en 2014, qui a été rejetée. Des schémas alternatifs de financement sont à l'étude pour cet instrument indispensable pour les premières expériences. Cela constitue une priorité pour 2015.
- D'autre part d'un dispositif de basse énergie basé sur une cellule gazeuse couplé à une source d'ions laser gazeuse pour la spectroscopie de faisceaux radioactifs de très faible intensité et la production de faisceaux pour DESIR. La première phase de ce dispositif, REGLIS³, a été financé par l'ANR à hauteur de 740 k€. La réunion de lancement a eu lieu en octobre 2014. Par ailleurs un MoU est en préparation avec différents partenaires pour la consolidation et la finalisation de cette installation basse énergie auprès de S³. Ce MoU devrait être signé au premier semestre 2015.
- Enfin, la réunion de lancement de l'ANR internationale FITFISIC de collisions ions rapides-ions lents au niveau du point achromatique du spectromètre S³ s'est déroulée en Mars 2014. La réalisation d'un tel dispositif, qui sera unique au monde, repose sur la mise en commun des expertises complémentaires des chercheurs du CIMAP, du GANIL, de l'INSP, de l'Irfu mais aussi de GSI, et des Universités de Jena et de Kiel et en collaboration étroite avec la société Pantechnik, basée en Basse Normandie.

DESIR

L'inscription du projet DESIR dans le périmètre de SPIRAL2 Phase 1+ s'est traduite par une reprise de la collaboration avec le maître d'œuvre de l'extension de la Phase 1 : une nouvelle esquisse des bâtiments comprenant des canaux de transport faisceaux depuis les parties basse énergie de S3 et SPIRAL ainsi qu'un grand hall d'expérience de près de 1500 m² a été proposée. Dans cette nouvelle esquisse, l'ensemble de purification et de préparation des faisceaux d'ions constitué d'un Séparateur de Haute Résolution (HRS, développé au CENBG) et d'un quadropole radiofréquence (SHIRaC, développé au LPC Caen) initialement prévu dans le bâtiment de production de la Phase 2 du projet est intégré dans les canaux de transport faisceaux alimentant la salle DESIR et permettra d'exploiter les faisceaux issus de S3 et de spiral1 dans de meilleures conditions. Cette esquisse servira de base à l'entame d'un nouvel Avant Projet Sommaire fin 2014, suivi d'un Avant Projet Détaillé au premier semestre 2015. L'objectif est d'entamer la construction des bâtiments mi-2016 et le commissioning des lignes de faisceaux et des premiers équipements expérimentaux fin 2018.

En 2015, des composants types des lignes de transport faisceaux seront testés au CEN Bordeaux-Gradignan, en même temps que le dispositif de préparation des faisceaux d'ions délivrés aux expérimentateurs. Cet équipement constitué d'un quadropôle radiofréquence à gaz tampon (GPIB) associé à un double piège de Penning (PIPERADE) est développé par le CENBG en collaboration avec le GANIL, le LPC Caen, le CSNSM et MKPI à Heidelberg.

Sur le plan scientifique, un workshop a été organisé au printemps 2014 pour mettre à jour le programme de recherche de la collaboration en tenant compte des premiers faisceaux disponibles. En particulier, des synergies entre les installations DESIR et S3-Basse énergie ont été identifiées sur les plans techniques et scientifiques.

Laboratoires partenaires : GANIL ; CENBG ; CIMAP ; IPN Orsay ; IPHC et LPC Caen.

France Hadron

Une première campagne de mesures a été réalisée à la fin de l'année 2013. Il s'agissait de mesurer certaines sections efficaces de réaction pour des applications médicales d'hadron thérapie. Du point de vue technique, cette campagne a permis de montrer les spécificités de ce type de mesure et les contraintes associées (accès en salle, contrôle de faisceau). Un bilan très positif a été émis par les utilisateurs et une nouvelle campagne de mesure a été réalisée en Mai 2014.

8. Collaborations internationales

L'ensemble des activités du groupe de physique s'appuie sur des collaborations européennes et/ou internationales impliquant plusieurs partenaires français. Le GANIL est partenaire de trois LIA du CNRS avec l'Inde, le Japon et la Pologne (COPIGAL), d'un LEA avec la République Tchèque (NuAG) et d'un PICS avec le Canada (PRISM). La liste des collaborations IN2P3-Organisme étranger est donnée en fin de document. Enfin, le groupe de physique du GANIL est acteur de trois projets (GANAS, SARFEN et EMILIE) soutenus par le réseau NUPNET.

Egalement, un accord CNRS est géré par les membres du GANIL : CNRS / DPGRF (avec l'Algérie) Resp. P. Van Isacker.

Enfin, les physiciens du GANIL sont porteurs de plusieurs collaborations IN2P3/Organisme étranger listés ci-dessous.

IN2P3/CEA/GSI 03-45	Isospin effects in multifragmentation	A. Chbihi	W. Trautmann
IN2P3/CEA/GSI 10-64	GISELE (GANIL Ion Source using Electron Laser Excitation)	N.Lecesne	K. Wendt
IN2P3/CEA/GSI 11-66	Preparation to the AGATA campaign	E.Clement	J. Gerl
IN2P3/ Varsovie 06-121	Studies of electromagnetic structure of exotic nuclei with GANIL facilities	E. Clement	P. Napiorkowski
IN2P3/Varsovie 06-122	Spectroscopy gamma de noyaux N-Z avec EXOGAM	G. de France	M. Palacz
IN2P3/ Cracovie 08-128	New GANIL detection setup for SHE identification	C. Stodel	M.Wieloch
IN2P3/ Cracovie 09-136	Influence of the neutron excess on binary decays from compound nuclei	E. Bonnet	K. Mazurek
IN2P3/ Cracovie 10-137	Isospin symmetry breaking, exceptional points and effective symmetries from a perspective of the shell model embedded in the continuum	M. Ploszajczak	J. Okolowicz
IN2P3/ Cracovie 12-145	Advanced Monte-Carlo and GEANT 4 simulations for optimizing future experiments dedicated to nuclear dynamics at GANIL, SPIRAL1 and SPIRAL2	C. Schmitt	M. Maj
IN2P3/Varsovie 06-122	Radioactive Nuclei for medical applications	G. de France	J. Jastrzebski/Choinski
IN2P3/Roumanie - 03-33	Nuclear structure at border lines between stable and unstable nuclei	F. de Oliveira	C. Borcea
IN2P3/Roumanie - 13-57	SPIRAL2 Beam Loss Monitor construction and exploitation	P. Bertrand	F. Negoita
IN2P3/JINR 01-52	Synthesis of new elements	C. Stodel	A. Yeremin
IN2P3/JINR 05-69	Neutron Drip Line Exotica in the Region of Shells N=20, 28, 40 and 50	M. Lewitowicz	Iu. Penionzhkevich
IN2P3/JINR 09-83	Nuclei at the drip-lines, 2 proton decay and astrophysics	F. de Oliveira	R.Wolski
IN2P3/JINR 09-84	Secondary Beam Profiler for the SPIRAL2	JL. Vignet/ J. Pancin	S.Lukyanov
IN2P3/JINR 13-89	Production of new neutron-rich heavy nuclei with neutron number 126 and investigation on their properties	J. Piot	E.Kozulin

Projets ANR

<http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/partners/anr-projects>

REGLIS3	Rare Elements in-Gas Laser Ion Source and Spectroscopy at S3	2013-2017
PIPERADE	Penning Trap for Radioactive Ions at DESIR	2012-2016
GET	General Electronics for TPC	2009-2014
GISELE	GANIL Ion Source using Electron Laser Excitation	2009-2013
PROVA	PROtotype for a Versatile gamma-Array	2009-2013

Projets Européens

<http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/inter-act/european-projects/european-projects-at-ganil>

Dans le 7^{ème} Programme Cadre de la Communauté Européenne, le GANIL coordonne le projet ENSAR, et participe aux projets CRISP et LA3-NET. Enfin, dans le cadre de collaborations internationales, le GANIL est partenaire des projets nationaux BRIX et NAVI.