



UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11

irfu
cea
saclay

CEA SACLAY DSM/IRFU/SPhN
Université Paris-Sud 11

Habilitation à Diriger des Recherches

présentée le 2 décembre 2009
par

THEISEN Christophe

Spectroscopie du noyau : déformations et masses extrêmes

Jury :

| | |
|--------------------|------------|
| M. F. Azaiez | Rapporteur |
| M. B. Blank | Rapporteur |
| M. P. Désesquelles | Président |
| M. P.-H. Heenen | |
| M. W. Kortén | |
| M. P. Van Duppen | Rapporteur |

Table des matières

| | |
|--|------------|
| Préface | 5 |
| 1 Contexte : déformations et masses extrêmes | 7 |
| 1.1 Du macroscopique au microscopique | 8 |
| 1.2 Déformations et rotation | 10 |
| 1.3 Noyaux de masse extrême | 16 |
| 1.4 Méthodologie : outils et observables | 17 |
| 1.5 Repères chronologiques | 18 |
| 2 Instrumentation et techniques d'analyse | 23 |
| 2.1 Spectroscopie gamma : de EUROGAM à AGATA | 24 |
| 2.2 La fission et les cellules solaires : SAPHIR | 43 |
| 2.3 Spectromètres et détection plan focal : BEST et MUSETT | 48 |
| 2.4 Techniques d'analyse | 56 |
| 3 Thèmes et expériences | 59 |
| 3.1 Le noyau superdéformé | 59 |
| 3.2 Fission et spectroscopie des fragments de fission | 72 |
| 3.3 Les éléments lourds et super-lourds | 78 |
| 4 Perspectives | 95 |
| 4.1 Contexte et état des lieux | 95 |
| 4.2 Objectifs | 99 |
| 4.3 Méthodologie | 104 |
| 4.4 Développements instrumentaux | 110 |
| 4.5 Thématiques annexes | 119 |
| Récapitulatif et conclusions | 121 |
| Bibliographie | 123 |
| Annexes | 141 |

| | | |
|----------|---|------------|
| A | Curriculum vitae | 141 |
| A.1 | Enseignement | 141 |
| A.2 | Encadrement | 141 |
| A.3 | Participation à des comités, organisation de colloques, séminaires, | 142 |
| A.4 | Programmes d'échanges, collaborations, réseaux internationaux, projets nationaux et Européens | 142 |
| A.5 | Actions de valorisation | 143 |
| A.6 | Administration liée à la recherche (coordinateur de projet, chef d'équipe/labo, etc.) | 144 |
| A.7 | Porte parole d'expériences | 144 |
| B | Liste des publications | 145 |
| B.1 | Articles de périodiques | 145 |
| B.2 | Comptes rendus de conférences | 158 |

Préface

Ce mémoire est présenté pour obtenir le diplôme d'HDR. Il présente la synthèse de travaux réalisés depuis ma thèse de doctorat à Strasbourg, puis depuis 1995 au service de physique nucléaire du CEA Saclay. Ce mémoire a été conçu non seulement dans l'optique du diplôme d'HDR, mais également comme document didactique avec le souhait qu'il puisse être agréable et utile au lecteur.

Les travaux de physique nucléaire expérimentale présentés ici se rapportent principalement à l'étude de deux états extrêmes du noyau : déformation d'une part, noyaux lourds et très lourds d'autre part. L'étude de ces états extrêmes ou contraints vise à une compréhension globale et profonde des états du noyau dans toute leur diversité afin de converger vers une modélisation la plus fidèle et prédictive possible. L'outil employé est la spectroscopie qui nécessite l'utilisation et donc la conception d'outils de détection performants (détection gamma, particules chargées, électronique et acquisition associées, techniques d'analyse) afin d'extraire fidèlement et avec le meilleur rendement les informations souvent rares délivrées par le noyau.

Ce mémoire s'articule en quatre chapitres qui peuvent être lus indépendamment les uns des autres. Je rappellerai dans un premier temps le contexte des études en mettant l'accent sur la déformation, la rotation et les noyaux les plus lourds. Je ferai ensuite un tour d'horizon des développements instrumentaux : spectromètres gamma, détection de fragments de fission, détection au plan focal de spectromètres ou séparateurs, sans oublier les techniques d'analyse. Le troisième chapitre sera consacré à l'exposé des thèmes, expériences et principaux résultats obtenus :

- états superdéformés à haut moment angulaire,
- spectroscopie de noyaux riches en neutrons issus de la fission,
- noyaux très lourds proches des frontières de la carte des noyaux.

Je tenterai de donner une synthèse non seulement des études réalisées, mais plus généralement de ces trois thématiques.

Je terminerai en présentant les perspectives à court et moyen terme dans le domaine des noyaux les plus lourds.

On pourra trouver en annexes un curriculum vitæ ainsi que la liste des publications.

Chapitre 1

Contexte : déformations et masses extrêmes

Comprendre et prédire la structure du noyau est une tâche difficile puisque l'interaction nucléaire dans le milieu n'est connue que dans ses grandes lignes. L'interaction nucléon-nucléon résulte elle-même de l'interaction forte qui lie les quarks. Ce sont les propriétés particulières de l'interaction forte qui définissent celles de l'interaction nucléon-nucléon : répulsive à courte portée ~ 0.4 fm, attractive au-delà de ~ 1 fm et n'est pas centrale. A ceci s'ajoute l'interaction coulombienne répulsive qui fragilise les noyaux les plus lourds ou riches en protons.

Le caractère prédictif des modèles est ainsi limité du fait que l'interaction nucléaire ne peut être utilisée comme ingrédient de base, contrairement à la physique atomique où l'interaction électromagnétique entre électrons est parfaitement connue.

La complexité de l'interaction est également source de nombreux phénomènes à travers la carte des noyaux. Nous pouvons citer par exemple les diverses formes du noyau (oblate, prolata, octupolaire...), la coexistence de forme, les effets de couches subtils responsables de la cohésion des noyaux les plus lourds, les effets d'appariement entre nucléons.

Notre connaissance partielle de l'interaction nucléaire se manifeste particulièrement pour les noyaux "exotiques" possédant une forte asymétrie entre le nombre de protons et de neutrons. Quelles sont dans ces conditions l'évolution de la force spin-orbite, l'évolution des corrélations d'appariement, les corrélations proton-neutron dans la région $N=Z$, quelle peut être la contribution d'une force à trois corps ?

Cette diversité et richesse de phénomènes proscrit une focalisation sur un noyau. Il serait vain de mettre en avant un noyau clef puisque les propriétés peuvent évoluer dramatiquement entre un noyau et ses voisins. La carte des noyaux est une mosaïque dont chaque noyau est un élément. Visualiser et décrypter cette mosaïque nécessite une vision globale, démarche interdisant une focalisation sur un noyau particulier. Des études systématiques sont par conséquent incontournables, par exemple sur des chaînes isotopiques ou isotoniques, comparaison de noyaux miroirs, etc.

Afin d'étudier les effets les plus subtils, l'expérimentateur analyse généralement la réponse du noyau à une contrainte extérieure. Il est en effet plus instructif d'étudier un objet contraint qu'un objet inerte, d'autant plus que les observables révélées par un noyau

inerte sont peu nombreuses. Il s'agit ici de contraindre le noyau avec délicatesse pour qu'il nous dévoile ses secrets. Pour fixer un ordre de grandeur, les énergies de liaison sont de quelques dizaines MeV pour des objets de plusieurs dizaines de GeV. Exciter le noyau au-delà de quelques MeV nuit dans la plupart des cas à sa cohésion. La gamme d'énergie d'excitation (ou plus précisément la température) à laquelle nous nous intéressons est de quelques MeV.

Outre les contraintes extérieures comme la rotation ou la superdéformation, les états extrêmes peuvent correspondre à une caractéristique intrinsèque du noyau : déformation de l'état fondamental, masse extrême, isospin, ... Dans ce mémoire, je m'intéresserai particulièrement à deux de ces états : la déformation et la masse.

Dans ce chapitre, mon intention n'est pas de faire une revue exhaustive de la physique des noyaux déformés et très lourds. Il existe de nombreux ouvrages généraux auxquels on pourra se rapporter [sea68a, boh69a, boh75a, rin80a, voi83a, szy83a, arm85a, gar86a, sea87a, mun88a, arm90a, sea90a, nil95a, mot98a, hof98a, hof00b, fra01a, war01a, hof02a, arm03a, her04a, lei04a, oga07a, sob07a, her08a]. L'objectif de ce chapitre est d'exposer les éléments de base permettant d'asseoir le contexte et d'exposer les enjeux. On trouvera également au paragraphe 1.5 des repères chronologiques liés à mes travaux.

1.1 Du macroscopique au microscopique

Deux aspects en apparence antagonistes gouvernent les propriétés des noyaux : propriétés macroscopiques décrites par le modèle de la goutte liquide et propriétés microscopiques liées aux effets de couche. On peut ajouter à cette dualité les comportements chaotiques pour accroître la complexité.

Ces aspects résultent en fait, à des échelles différentes, des propriétés de l'interaction entre nucléons.

Les propriétés macroscopiques décrites par le modèle de la goutte liquide sont généralement motivées par le caractère fermionique des constituants. Une approche alternative et à mon avis élégante a été proposée par B.R. Mottelson en termes de paramètre de "quantalité" [mot99a, mot98a]. Ce paramètre est fonction de la portée de l'interaction et de son énergie potentielle. Dans le cas du noyau, il résulte de cette analyse un caractère liquide : les nucléons sont délocalisés et ont un libre parcours moyen infini. L'approximation de la goutte liquide résulte également du fait que les excitations du noyau ont une énergie faible par rapport à sa masse.

Le modèle de la goutte liquide permet de prédire avec une précision étonnante, compte tenu de sa simplicité, la masse des noyaux. Il permet aussi une description de la réponse du noyau vis-à-vis de la rotation et de déduire le moment angulaire maximum qu'un noyau puisse supporter. Conséquence importante, la forme d'équilibre d'une goutte liquide est sphérique.

Si le modèle de la goutte liquide ne permet pas de rendre compte d'effets microscopiques, il permet cependant d'introduire le concept de particules indépendantes et donc de champ moyen. Comme nous venons de le voir, le caractère liquide implique un libre

parcours moyen élevé des nucléons dans le noyau, confirmé par ailleurs par des expériences de diffusion de neutrons. Ce libre parcours moyen n'est en réalité pas infini, mais de quelques dizaines de fm. Il serait tentant de voir ici une incohérence entre la faible portée de l'interaction nucléaire (environ 1 fm) et ce libre parcours moyen élevé. La justification du caractère liquide exposé précédemment résout cette contradiction.

Les nucléons sont donc dilués dans un système soumis à un champ moyen. Cette vision permet de simplifier grandement les calculs en physique nucléaire. En effet, le nombre ni faible, ni élevé de constituants ne permet ni de résoudre le problème à N corps (à supposer que l'interaction nucléaire soit parfaitement connue), ni d'appliquer les lois de la physique statistique : il s'agit d'un système mésoscopique.

L'approximation du champ moyen permet naturellement d'expliquer les effets de couches, également observés dans les atomes, les systèmes moléculaires, les agrégats métalliques. Les nucléons peuvent être considérés comme soumis à un potentiel commun. En ajoutant le caractère fermionique des particules, on arrive naturellement à une description en termes de modèle en couches. Ce modèle introduit fin des années 40 a permis de décrire avec succès les nombres magiques sphériques [may49a, may50a, hax49a]. Les descriptions plus récentes à l'aide de champ moyen auto-consistant ou non (voir par exemple [nil95a, ben03a]) résultent des mêmes arguments. A première vue, les idées de champ moyen et d'orbitales, de mouvement périodique semblent être peu évidentes pour un liquide. Une fois de plus, ces deux aspects sont liés, comme je viens de l'expliquer, aux propriétés de la force nucléaire et ne sont nullement incompatibles.

La présence de couches fermées, de nombres magiques, résulte du champ moyen et d'orbitales périodiques. Il a été démontré que la présence de couches fermées ou plus précisément d'intervalles en énergie ("gaps") dans la structure en couches individuelle est une propriété générique de systèmes à orbitales périodiques. La théorie classique des orbites périodiques permet en effet de décrire les propriétés globales du noyau, y compris les déformations. Les fondements de ce formalisme ont été exposés dans un contexte général par M.C. Gutzwiller [gut71a] d'une part et par R. Balian et C. Bloch d'autre part [bal72a] et appliqués au noyau par A. Bohr et B.R. Mottelson [boh75a], V.M. Strutinsky [str77a], I. Ragnarsson [rag78a]. On pourra également trouver une application récente de cette théorie aux noyaux en rotation dans la référence [del04a]. Il est possible, à l'aide de cette théorie, d'estimer l'espacement caractéristique entre couches, proportionnel à $A^{-1/3}$. On peut comprendre ceci en considérant un oscillateur de volume A et donc de rayon $A^{1/3}$. Par conséquent, l'espacement caractéristique entre niveaux diminue lorsque la masse augmente. Autre conséquence: l'énergie due aux effets de couche ($A^{-1/3}$) est faible comparée aux effets de volume (A) ou de surface ($A^{2/3}$). On peut donc en première approximation découpler les effets collectifs des effets de particules individuelles : il s'agit de l'hypothèse adiabatique.

Le mouvement de particules indépendantes n'est cependant qu'une approximation. On doit en effet prendre en compte les corrélations d'appariement, interaction résiduelle, afin d'aboutir à une description satisfaisante. Les corrélations d'appariement sont communément considérées comme effectives en surface du noyau, et sont du même ordre de grandeur que les effets de couche ; elles favorisent le couplage de nucléons ayant leur

moment angulaire j antiparallèle, et dans une moindre mesure parallèle. Le traitement des corrélations pour N nucléons est un problème complexe qui nécessite l'usage d'approximations. Nous verrons par la suite l'impact des corrélations d'appariement sur les noyaux en rotation.

1.2 Déformations et rotation

L'existence de noyaux déformés a été soupçonnée dès les années 30 par des mesures de moments magnétiques puis électriques, bien avant l'apparition du modèle en couche sphérique. L'abondance de noyaux déformés rend leur étude incontournable et constitue le point central de ce document. La déformation peut être soit associée à l'état fondamental pour les noyaux situés entre les nombres magiques sphériques, soit apparaître pour des états excités et/ou à haut moment angulaire.

1.2.1 Déformations nucléaires

La présence de déformations nucléaires est intimement liée au champ moyen. Les nucléons, comme les électrons, ont un moment angulaire j dont la projection sur l'axe de quantification vaut m . Pour une projection m élevée, la distribution est centrée dans le plan équatorial et donc "aplatie". À l'inverse, la distribution est centrée dans le plan perpendiculaire et donc "allongée" pour m faible. La présence de ces orbitales à distribution anisotrope, encore appelées orbitales polarisantes, tend à déformer l'ensemble des nucléons, et donc le champ moyen. L'introduction d'un champ moyen déformé, tel que suggéré par S.G. Nilsson s'impose donc [nil55a, nil95a].

Notons qu'il y a ici une différence fondamentale avec la physique atomique : les orbitales électroniques sont également anisotropes, mais l'atome reste globalement sphérique puisque les électrons sont soumis à un potentiel central attractif créé par le noyau. Les électrons ne créent pas eux-mêmes le champ auquel ils sont soumis.

La déformation du champ moyen nucléaire la plus élémentaire est l'élongation, ingrédient du modèle de Nilsson. Sans rentrer dans la théorie des symétries et des groupes, la brisure de la symétrie sphérique nécessite l'introduction d'un nouveau nombre quantique. Les orbitales sont étiquetées par $[N, n_z, \Lambda] \Omega$. N et n_z sont associés à l'oscillateur harmonique. Λ et Ω sont respectivement les projections sur l'axe de symétrie du moment angulaire orbital et total. Les orbitales de faible Ω , les premières remplies dans une couche majeure tendent à allonger le noyau alors que celles de haut Ω tendent à l'aplatir (il y a ici analogie parfaite avec les densités de particules de nombres quantique l et m).

La présence de ces orbitales dont l'énergie évolue avec la déformation génère de nouveaux intervalles en énergie. La forme adoptée est celle pour laquelle la dégénérescence de niveaux est la plus élevée ou en d'autres termes densité de niveau la plus faible : l'énergie totale du noyau est minimisée grâce aux effets de couches.

En utilisant une vision simpliste, le remplissage successif d'orbitales de bas Ω hors des couches fermées augmente l'élongation jusqu'au remplissage d'orbitales de haut Ω qui favorisent les formes aplaties ; la déformation étant maximale à mi-couche. Les nucléons

présents dans les couches fermées favorisent la forme sphérique alors que ceux hors des couches fermées favorisent la déformation. L'équilibre est régi par ces deux classes de nucléons qui conduit à une déformation dépendant globalement de $A^{-1/3}$. Cette valeur n'est en réalité atteinte qu'en milieu de couche. On peut également expliquer cette tendance à l'aide d'arguments macroscopiques par une compétition entre les effets de volume (A) et les effets de surface proportionnels à $A^{2/3}$ [boh75a]. L'argumentation de V.M. Strutinsky basée sur la théorie des orbites périodiques [str77a] conduit au même résultat.

On serait tenté de conclure, en considérant un remplissage successif des orbites, à des formes allongées dès le début de couche et à des formes aplaties en fin de couche. C'est effectivement vrai mais la réalité est plus complexe puisque le noyau ne se résume pas à un empilement de couches ; un réarrangement important des nucléons (ou de configurations particule-trou) a lieu si on considère une transition d'une configuration sphérique à une configuration déformée. Ce ne sont pas uniquement les orbites polarisantes qui deviennent actives lorsque l'on ajoute des particules à un cœur sphérique : le champ moyen dans son ensemble est réarrangé. La présence d'intervalles qui apparaissent aussi bien pour des formes allongées qu'aplaties importe donc pour déterminer la forme d'équilibre du noyau.

Ces arguments ne rendent cependant pas compte d'une préférence de la nature pour les formes allongées. Au niveau macroscopique, le modèle de la goutte liquide préfère la forme sphérique. Pour des numéros atomiques élevés, l'interaction coulombienne tend à allonger le noyau jusqu'à sa rupture, sa fission. Mais dans tous les cas, la seule forme d'équilibre macroscopique est sphérique. La goutte liquide n'explique en aucun cas pourquoi la nature tend à favoriser les formes allongées ; le déficit de formes aplaties restant dans une large mesure énigmatique. Une explication qualitative de cette asymétrie a été avancée par H. Frisk [fri90a] à l'aide de la théorie classique des orbites périodiques : alors que les énergies de corrections de couches sont équivalentes pour les déformations oblates ou prolates, la densité de niveaux est favorable pour les formes prolates. Dans un article récent [ham09a], I. Hamamoto et B.R. Mottelson notent que l'interaction entre couches de même parité modifie notablement le comportement des orbites de moment angulaire l élevé du côté oblate, avec pour conséquence une densité de niveau plus élevée et donc des formes défavorisées. La surface caractéristique du potentiel nucléaire est à l'origine de ce comportement particulier. Toujours selon ces mêmes auteurs, le rôle du potentiel spin orbite, des corrélations d'appariement et de l'isospin restent à préciser.

La description en termes des nombres quantiques $[N, n_z, \Lambda] \Omega$ a une conséquence importante sur les transitions nucléaires : les transitions entre états pour lesquels K (projection du moment angulaire sur l'axe de symétrie) diffère sont en principe interdites : il s'agit de l'isomérisme K . Le temps de vie de l'isomère est d'autant plus grand que ΔK est grand (de façon empirique, le temps de vie évolue selon une puissance de ΔK : voir par exemple [lob68a]).

L'élongation n'est pas la seule déformation nucléaire possible. Tous les degrés de liberté sont permis à condition de favoriser une dégénérescence de niveaux élevée. Un cas particulier est celui des déformations octupolaires privilégiées par la proximité d'orbitales ayant $\Delta l = \Delta j = 3$; les nombres magiques correspondant étant 34, 56, 88, 134. Voir les

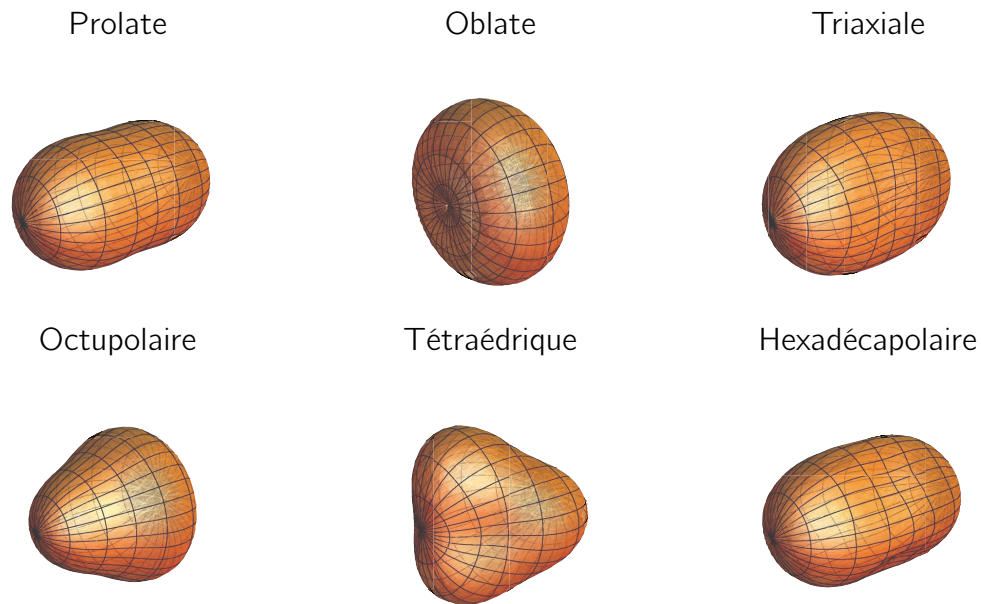


Fig. 1.1 – *Formes caractéristiques de noyaux.* Prolate $\beta = 0.6$; Oblate $\beta = -0.6$; Triaxiale $\beta = -0.6$, $\gamma = 30^\circ$; Octupolaire $\alpha_{30} = 0.3$; Tétrahédrique $\alpha_{32} = 0.3$; Hexadécapolaire $\beta = 0.6$, $\alpha_{44} = 0.1$.

articles de revue de Ahmad et Bulter [ahm93a], Butler et Nazarewicz [but96a] pour de plus amples détails.

De façon générale, une symétrie est signée par une séquence d'états caractéristique : spin, parité, énergie, rapport d'intensité entre rayonnements $E2$ et $M1$ (voir [fra01a]). C'est le cas des symétries de type C_4 (moment hexadécapolaire) sur lesquelles je reviendrai au chapitre 3.1, des symétries chirales, des formes tétraédriques (cas particulier de forme octupolaire) récemment prédites [dud02a]. Egalement, rien n'interdit au noyau d'être triaxial. Quelques formes caractéristiques de noyaux sont représentées figure 1.1.

La forme d'équilibre d'un noyau dépend de sa configuration et peut évoluer avec son énergie d'excitation. Par exemple, un noyau peut être sphérique dans son état fondamental alors que l'excitation de particules peut conduire à une forme allongée ou aplatie. Lorsque ces différents états sont à des énergies proches, les fonctions d'onde peuvent se mélanger. Ce phénomène est appelé coexistence de forme [woo92a]. Si l'on reprend l'exemple de configurations allongée et aplatie qui interagissent, la fonction d'onde résultante ne sera ni allongée ni aplatie, mais "un peu des deux". Une transposition de ce phénomène à l'échelle macroscopique serait hasardeuse.

Il existe donc de multiples déformations, toutes favorisées par des hybridations d'orbitales particulières, et dont le comportement sous l'effet de la rotation sera présenté au paragraphe suivant.

1.2.2 Rotation

Au cours d'une réaction nucléaire, le noyau peut acquérir du moment angulaire. C'est le cas pour les réactions de fusion-évaporation que j'ai principalement utilisées lors de mes travaux, mais aussi dans une moindre mesure pour l'excitation coulombienne, du transfert, de la fission ou de la fragmentation. Le noyau peut donc entrer en rotation, à condition que des symétries soient brisées. Par contre, un noyau sphérique de spin et parité 0^+ ne peut tourner car toutes les orientations sont indiscernables. Un cas particulier est celui des rotations magnétiques pour lesquelles l'anisotropie est due aux moments magnétiques protons et neutrons orthogonaux (voir l'article de revue de Clark et Machiavelli [cla00a]).

D'un point de vue purement macroscopique, la rotation favorise les noyaux allongés : pour une même amplitude de déformation, le moment d'inertie d'un noyau aplati est plus faible que celui d'un noyau allongé.

Les séquences observées avec la rotation sont régies par des principes de symétrie. Un noyau de projection $K = 0$ en rotation possède des niveaux d'énergie $E = \frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}I(I + 1)$ connectés par des transitions quadripolaires électriques $E2$, \mathcal{J} étant le moment d'inertie qui évolue globalement selon $A^{5/3}$. Pour $K \neq 0$, c'est-à-dire dans le cas d'une ou plusieurs particules couplées à un cœur, deux bandes de même parité sont connectées par des transitions dipolaires électriques $M1$, l'intensité relative des transitions $E2$ et $M1$ étant fonction des moments dipolaires magnétiques et quadripolaires électriques. Les énergies des états valent dans ce cas $E = \frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}\{I(I + 1) - K^2\}$. Notons que dans ce cas appelé "déformation alignement", K reste un bon nombre quantique. Ce n'est pas toujours le cas : le moment angulaire de la ou des particules couplées au cœur peut s'aligner le long de l'axe de rotation. Il s'agit du mode de couplage "rotation alignement" favorisé pour les orbitales de faible projection Ω . Ces formulations découlent du principe de découplage des modes collectifs et individuels, appelé encore hypothèse adiabatique, le mouvement des particules étant plus rapide que celui du cœur en rotation.

Dans le cas particulier $K = 1/2$, les états partenaires par renversement du temps interagissent, ce qui entraîne un décalage des deux bandes partenaires.

Dans le cas de déformation octupolaire, le noyau n'est pas invariant par symétrie de réflexion ; les deux bandes de parités alternées sont connectées par des transitions dipolaires électriques $E1$.

La signature de la rotation est un spectre dont les pics sont régulièrement espacés, ce qui en facilite grandement la lecture : toute irrégularité dans le spectre sera signe "d'anomalie", par exemple d'interaction entre mode collectifs et de particules indépendantes. Bien que les temps caractéristiques du mouvement collectif et du mouvement de particules soient différents, ils sont suffisamment proches pour que les deux modes interagissent. Ainsi, la rotation, la vibration et le mouvement de particules entrent en compétition pour distordre les spectres. L'étude de ces interactions est riche en enseignements sur la structure du noyau.

Un mode purement collectif du noyau serait associé à un moment d'inertie identique à celui d'un fluide en rotation. Or, il est observé que le moment d'inertie est plus faible

de moitié à un tiers. Ceci est généralement attribué aux corrélations d'appariement qui introduisent un degré de superfluidité qui n'est cependant pas complet puisque le système comporte un nombre fini de particules. Les corrélations d'appariement ont une préférence pour les formes sphériques ; elles subsistent avec la déformation, mais sont progressivement détruites sous l'effet de la rotation ou plus précisément de la force de Coriolis. La conséquence est une brisure des paires qui s'alignent sur l'axe de rotation. Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation du moment d'inertie. Dans le cas d'un alignement total, on a affaire à un rebroussement ("backbending"). Un autre type de perturbation est associé à la coexistence de formes. Les états rotationnels, comme leur tête de bande, peuvent interagir. Les déviations par rapport au rotor parfait permettent de déduire le mélange de fonctions d'onde. Citons aussi l'effet de symétrie C_4 qui, toujours selon des principes de symétrie, induit des perturbations de période $\Delta I = 4$.

Pour de plus amples informations sur les brisures de symétries dans les noyaux en rotation, on pourra consulter [fra01a]. L'étude des noyaux en rotation est un sujet riche. Pour de plus amples détails, on pourra se référer aux revues ou ouvrages de de Voigt *et al.* [voi83a], Szymanski [szy83a], Garrett *et al.* [gar86a], Frauendorf [fra01a] Newton [new89a], Nilsson et Ragnarsson [nil95a], Ward et Fallon [war01a].

1.2.3 Superdéformation

En abordant les déformations nucléaires au paragraphe 1.2.1, j'ai justifié leur existence par des effets de couches énergétiquement favorables. Pour un champ moyen de rapport d'axes 2:1, ces effets de couches sont amplifiés. Plus généralement, un rapport entier d'oscillations entre les axes induit une dégénérescence de niveaux élevée et une faible densité de niveaux, soit un intervalle en énergie (qui reste cependant plus faible que pour les formes sphériques). La théorie des orbites périodiques mentionnée plus haut permet également de justifier la superdéformation (SD) par des orbites particulières [ari98a].

De tels états superdéformés ont été observés pour la première fois sous forme d'isomère de fission dans ^{242}Am [pol62a, per62a]. Les états hyperdéformés (rapport 3:1) ont quant à eux été mis en évidence dans la région des actinides par des expériences de capture de neutron ou de transfert : voir par exemple [blo89a]. Le fait que ces états aient été vus pour la première fois dans la région des actinides est lié aux propriétés macroscopiques de la goutte liquide. Afin que les formes très allongées soient stabilisées, un puits de potentiel dû aux corrections de couches doit se développer sur la barrière de fission. Cette barrière de fission est d'autant plus faible que le numéro atomique est élevé. Les corrections de couches favorables à la superdéformation se développant sur cette bosse, l'énergie d'excitation d'états superdéformés sera d'autant plus faible que le numéro atomique sera élevé, ce qui facilitera par conséquent leur observation. C'est aussi pour cette raison que les états superdéformés sont parfois appelés isomères de fission dans la région des actinides : la tête de bande est confinée dans un minimum avant de décroître majoritairement par fission. Les états SD ont par la suite été observés par spectroscopie γ dans des noyaux plus légers (donc pour une tête de bande d'énergie d'excitation plus élevée) peuplés par réactions de fusion-évaporation. Dans ces noyaux, les états SD de bas moment angulaire ne sont pas

Yrast. Il faut peupler le noyau à moment angulaire suffisamment élevé (quelques dizaines de \hbar) pour que le moment d'inertie compense l'énergie d'excitation élevée de la tête de bande. L'intensité résultante est au mieux de quelques % par rapport à la population totale. D'autre part, l'apparition du second minimum est favorisée par la rotation puisque la barrière de fission diminue lorsque le moment angulaire augmente.

Les états SD ont donné lieu à de nombreuses études, essentiellement dans les régions de masse 150 et 190. L'intérêt de telles bandes est multiple et je cite quelques thèmes d'étude à titre d'exemple :

- les bandes SD permettent d'étudier la réponse du noyau à très haut moment angulaire,
- les orbitales stabilisantes sont issues de couches majeures d'énergies plus élevées, encore appelées orbitales intruses, qui sont également actives dans des noyaux sphériques plus lourds,
- la grande régularité et longueur des séquences permet de mettre en évidence la moindre irrégularité,
- il est possible d'étudier les manifestations des corrélations d'appariement (en l'occurrence leur disparition) à très haut moment angulaire,
- la découverte des bandes jumelles est une curiosité remarquable : il s'agit d'une bande SD d'un noyau possédant à quelques keV près les mêmes énergies qu'une bande SD d'un noyau voisin. Un tel phénomène ne peut être expliqué que par un alignement demi-entier du moment angulaire sur l'axe de rotation ; axe pour lequel on n'a pas de bons nombres quantiques. Bien que ce phénomène soit bien reproduit par les calculs de champ moyen, son origine reste mal comprise et, à mon avis, énigmatique,
- la découverte d'oscillations $\Delta I = 4$ du moment d'inertie a donné lieu à de nombreuses spéculations, dont la présence de symétrie C_4 .

Un des défis de l'étude des états SD a été de déterminer leurs énergies d'excitation, donnée importante pour permettre une comparaison avec les modèles. Or, la désexcitation des états SD s'accompagne d'un réarrangement conséquent des nucléons. De plus, les états SD de bas moment angulaire ne sont pas Yrast et la densité élevée d'états de faible déformation favorise leur décroissance statistique avant que la tête de bande ne soit atteinte. Ainsi, la décroissance des bandes SD est très fragmentée et n'a pu être mise en évidence que dans un nombre restreint de cas, et grâce à des dispositifs très performants.

Malgré de nombreuses tentatives, les états hyperdéformés n'ont pu être mis en évidence à haut moment angulaire et leur observation reste un défi pour les années à venir.

De même, aucune bande SD aplatie (oblate) n'a encore été observée bien que des effets de couche puissent les stabiliser. Le moment d'inertie plus faible des déformations aplaties par rapport à celles allongées ne peut cependant rendre ces états Yrast qu'à très haut moment angulaire.

Le chapitre 3.1 sera dédié à la superdéformation.

1.2.4 La fission

Bien que la fission ne fasse pas l'objet de mes études, certains aspects apparaîtront souvent dans les expériences que nous avons faites et il convient de rappeler ici quelques points.

Sous l'effet de la rotation, le noyau est soumis à la force centrifuge et tend à s'allonger. Lorsqu'un moment angulaire critique est atteint, les termes de surface et de volume ne sont plus suffisants pour assurer la cohésion du noyau. Ce moment angulaire critique dépend principalement de la masse du noyau. Il atteint un maximum d'environ $90\hbar$ pour les noyaux de masse 150 et diminue rapidement avec la masse pour s'annuler vers $A \sim 320$. Plus précisément, le moment angulaire critique est fonction du paramètre de fissilité Z^2/A . Contrairement à l'idée largement répandue, le moment angulaire critique reste élevé, de l'ordre de $60\hbar$ pour les noyaux de masse ~ 250 autour de ^{254}No .

Pour les systèmes lourds, la fusion-fission entre en compétition avec les réactions de fusion-évaporation. Rappelons que lors de collisions entre ions lourds, le noyau composé est créé avec quelques dizaines de MeV d'énergie d'excitation et peut décroître soit par fission, soit par évaporation de particules légères. Ces facteurs contraignent les conditions dans lesquelles le noyau résiduel est créé, et prennent toute leur importance avec l'étude des noyaux super-lourds et superdéformés. Bien que les noyaux super-lourds puissent résister à plusieurs dizaines de \hbar , quelques MeV d'énergie d'excitation suffisent pour que la fission soit le canal dominant. Ainsi, les sections efficaces de production de noyaux super-lourds sont très faibles, de quelques μb dans le meilleur des cas comparé à quelques centaines de mb pour la fission.

Si la fission est un phénomène souvent limitant et indésirable, ce peut aussi être un moyen de production de noyaux exotiques. En effet, la fission produit des noyaux riches en neutrons qui peuvent ensuite être étudiés par spectroscopie. Le détecteur de fragments de fission SAPHIR dédié à ces études sera présenté au paragraphe 2.2. La spectroscopie de fragments de fission sera quant à elle détaillée au paragraphe 3.2. J'évoquerai au paragraphe 2.2 les études de fission induites par neutrons, également menées à l'aide du détecteur SAPHIR.

1.3 Noyaux de masse extrême

J'ai déjà largement décrit la physique des noyaux super-lourds lors d'un cours donné en 2002 à l'école Joliot-Curie de physique nucléaire [the03b]. Je me contenterai donc de résumer ici brièvement les aspects les plus typiques de cette région de masse.

L'existence des noyaux les plus lourds est due entièrement à des effets de couche. En effet, la répulsion coulombienne est telle que pour $Z \gtrsim 104$, la barrière macroscopique a disparu.

Les modèles théoriques prédisent tous l'existence d'un îlot de stabilité au-delà des actinides, c'est-à-dire l'existence de nombres magiques sphériques. Les modèles s'accordent aussi sur la relative mollesse de cet îlot : il ne faut pas s'attendre à un noyau doublement magique très stable avec un premier état excité vibrationnel 3^- comme pour ^{208}Pb , mais

plutôt à une région à stabilité renforcée. Cependant, les modèles divergent sur les nombres magiques qui pourraient valoir 114, 120 ou 126 pour les protons, et 172 ou 184 pour les neutrons. Une complexité dans la structure de ces noyaux vient du fait que la densité de niveaux augmente avec la masse. Ainsi, la stabilité des noyaux super-lourds est due uniquement à de délicats effets de couche qui sont encore peu explorés, les sections efficaces de production de ces noyaux étant très faibles. L'étude des noyaux super-lourds nécessite des outils très performants afin d'identifier sans ambiguïté un atome produit parmi plusieurs millions de réactions parasites. Bien entendu, l'utilisation de faisceaux intenses, lorsque les dispositifs expérimentaux le permettent, est un avantage considérable.

J'ai souligné au paragraphe 1.2.1 la stabilité accrue que peuvent acquérir les noyaux déformés grâce à des effets de couche. La région des noyaux super-lourds ne fait pas exception à cette règle. Ainsi, il est bien établi depuis quelques années que les noyaux de la région autour de ${}_{100}^{252}\text{Fm}$ sont déformés. Certaines orbitales stabilisant ces noyaux déformés sont issues de couche supérieures. Il est alors possible de sonder des orbitales également actives dans des noyaux sphériques de masse plus élevée. Il est également prédit une stabilisation renforcée autour du noyau déformé ${}_{108}^{270}\text{Hs}$, région encore très peu explorée.

La spectroscopie des noyaux super-lourds peut être menée dans deux directions : d'une part l'étude des états de particules individuelles et d'autre part l'étude de noyaux déformés en rotation. Ces deux thèmes peuvent être menés de front comme illustré au paragraphe 3.3 avec les noyaux ${}_{103}^{255}\text{Lr}$, ${}_{101}^{251}\text{Md}$ et ${}_{99}^{247}\text{Es}$. J'illustrerai également les développements instrumentaux réalisés pour l'étude des noyaux super-lourds au paragraphe 2.3.

1.4 Méthodologie : outils et observables

Dans les paragraphes précédents, j'ai survolé les principaux thèmes objets de ce mémoire : noyaux déformés et/ou de masse extrême. Expérimentalement, le noyau délivre des signaux que nous devons interpréter afin d'en déduire des informations sur leur structure. L'objectif n'est pas ici de passer en revue les dispositifs ou techniques expérimentaux (ce sera l'objet du chapitre 2), mais de décrire brièvement les mesures dictées par la physique.

L'outil principal utilisé est la spectroscopie. Le noyau nous délivre en quelque sorte un message codé que nous devons déchiffrer.

La méthode privilégiée en spectroscopie consiste à déterminer les schémas de niveaux. La spectroscopie gamma est très abondamment employée puisque la désexcitation du noyau est dominée par les rayonnements électromagnétiques. Les corrélations angulaires permettent de déduire la multipolarité et donc le spin et la parité des états. La spectroscopie d'électrons est incontournable lorsque les transitions sont très converties, particulièrement dans les noyaux lourds, mais aussi pour les transitions $E0$ non radiatives. De plus, la mesure des électrons permet de déduire la multipolarité des transitions grâce au coefficient de conversion. Mesurer l'intensité des transitions facilite également la construction des schémas de niveaux. Enfin, la mesure des temps de vie renseigne sur la collectivité et l'isomérisme.

La spectroscopie alpha permet également de bâtir des schémas de niveaux. Les transitions alpha peuplent préférentiellement des états de fonction d'onde similaire et leur intensité dépend fortement des états finaux disponibles. Le facteur d'empêchement ("Hindrance Factor") déduit à partir de temps de vie, de l'énergie et de l'intensité de la transition permet une contrainte forte du spin et de la parité.

Outre les schémas de niveaux, la mesure des rayonnements permet de déduire des quantités comme la déformation. Le moment quadripolaire électrique peut être déduit de la probabilité de transition $B(E2)$, fonction de l'énergie de la transition et de son temps de vie partiel. La mesure de temps de vie est un vaste sujet que je ne détaillerai pas ici.

Des informations sur la collectivité peuvent être déduites grâce au moment d'inertie. Les propriétés des orbitales sur lesquelles sont bâties les bandes de rotation peuvent être déduites du rapport $B(M1)/B(E2)$ entre transition inter- et intra-bande.

La mesure peut également être un piège. Il faut interpréter celle-ci en prenant en compte le filtre dû au mode de détection. A partir de la mesure, on déduit ce qui a réellement été émis par le noyau ; enfin seulement on peut remonter à la physique. Un exemple de biais expérimental est l'effet de sommation de particules alpha et de transitions émises en coïncidence. Une interprétation correcte des mesures nécessite dans ce cas la prise en compte d'effets atomiques : électrons de conversion, rayons X, cascade Auger.

Je me suis focalisé dans ce paragraphe sur la spectroscopie du noyau. D'autres mesures sont nécessaires pour identifier le noyau ou permettre d'étudier le mécanisme de réaction : particules chargées, ions lourds, multiplicité et énergie somme de cascades... Ces aspects sont annexes à la spectroscopie des noyaux qui reste le but principal de mes études. Cependant, la détection d'ions lourds est incontournable pour l'étude des fragments de fission ou l'étude des noyaux très lourds. Les techniques expérimentales associées seront discutées au chapitre suivant.

1.5 Repères chronologiques

| | |
|------|--|
| 1860 | Introduction du tableau périodique des éléments par Dimitri Mendeleïev. |
| 1899 | Décroissance alpha identifiée pour la première fois par Ernest Rutherford. |
| 1921 | Découverte de l'isomérisme par Otto Hahn (^{234}Pa). |
| 1929 | Construction du premier cyclotron par Ernest Orlando Lawrence à Berkeley. |
| 1935 | Modèle de la goutte liquide par Carl Friedrich von Weizsäcke (également développé en parallèle par George Gamow et Hans Albrecht Bethe). |
| 1938 | Découverte de la fission par Otto Hahn et Friedrich Straßmann ; phénomène expliqué par Lise Meitner et Otto Robert Frisch. |

-
- 1940 Découverte de la fission spontanée par Georgi Nikolaevich Flerov et Konstantin Antonovitsch Petrzhak [fle40a].
- 1950 Modèle en couches par Maria Göppert-Mayer, Otto Haxel, Johannes Hans Daniel Jensen, Hans Eduard Suess [may49a, may50a, hax49a].
- 1952 Découverte de l'einsteinium $Z=99$ et du fermium $Z=100$ par Albert Ghiorso et collaborateurs dans les débris de l'explosion thermonucléaire "Mike" [ghi55a].
- 1954 Modèle de "cranking" introduit par Davis Rittenhouse Inglis [ing54a, ing54b].
- 1955 Découverte du mendélévium $Z=101$ par A. Ghiorso et collaborateurs. Il s'agit du dernier élément identifié uniquement par méthode chimique et premier élément identifié atome par atome [ghi55b].
- 1955 Modèle de l'oscillateur harmonique déformé par Sven Gösta Nilsson [nil55a].
- 1956 Force effective dérivée de champ de mésons, plus tard utilisée par les calculs de type RMF (Relativistic Mean Field) [due56a].
- 1958 Découverte du nobélium $Z=102$ [don65a, zag66a].
- 1959 Interaction effective de Skyrme [sky59a].
- 1961 Découverte du lawrencium $Z=103$ [ghi61a, don65a].
- 1962 Découverte d'un isomère de fission dans ^{242}Am par Sergei Mikhailovich Polikanov [pol62a, per62a].
- 1962 Développement des détecteurs germanium Ge(Li) [tav63a].
- 1964 Découverte du rutherfordium ($Z=104$) par Georgy Nikolayevich Flerov, confirmée en 1969 par A. Ghiorso [fle64a, ghi69a].
- 1967 Méthode mise au point par Vilen Mitrofanovich Strutinski pour calculer la stabilité des éléments super-lourds, et qui aura en général d'importantes applications pour la structure des noyaux déformés [str67a, str68a].
- 1970 Découverte du dubnium ($Z = 105$). Les premières indications de G.N. Flerov en 1968 sont confirmées par A. Ghiorso en 1970 [fle68a, ghi70a].
- 1970 Premiers calculs auto-consistants avec une force de Skyrme [vau70a, vau70b].
- 1972 Mise en évidence d'isomères dans ^{250}Fm et ^{254}No par A. Ghiorso [ghi73a].
- 1973 Utilisation de réactions de fusion froide pour la synthèse des éléments super-lourds par Yuri Tsolakovich Oganessian et collaborateurs [oga75a].
- 1976 Introduction du terme "routhien" par K. Neergård [nee76a].
- 1976 Découverte du seaborgium ($Z=106$) conjointement à Berkeley et Dubna [oga74a].
- 1976 Le séparateur SHIP conçu par Heinz Ewald et collaborateurs est mis en service à GSI. Il permettra la découverte des éléments $Z=107$ à 112.
-

-
- 1980 Interaction effective à portée finie de Gogny [dec80a].
- 1980 Installation de Tessa 1 à Risø (Danemark) constitué de 4 détecteurs Ge. Cet ensemble sera transféré à Daresbury (UK) en 1982.
- 1981 Découverte du bohrium à GSI (Z=107) par Gottfried Münzenberg et collaborateurs [mun81a], première d'une longue série avec le meitnérium (Z=109) en 1982 [mun82a], le hassium (Z=108) en 1984 [mun84a], le darmstadtium (Z=110) en 1994 [hof95a], le roentgenium (Z=111) en 1994 [hof95b, hof02b] et Z=112 en 1995 [hof96a].
- 1983 Multidétecteur Tessa 2 (Daresbury) constitué d'un château de BGO et de 6 détecteurs germanium.
- 1983 Premiers faisceaux délivrés par le GANIL. Pour être précis, la première expérience a été réalisée le 18 janvier 1983 alors que le premier faisceau a été accéléré le 19 novembre 1982.
- 1985 Installation à Berkeley du multidétecteur HERA constitué de 21 détecteurs Ge et de leur enceinte anti-compton.
- 1986 Installation Tessa 3 à Daresbury constitué 16 détecteurs Ge; a permis la découverte de la superdéformation dans ^{152}Dy par Peter Twin et collaborateurs [twi86a].
- 1987 Multidétecteur gamma 8π à Chalk River [and84a].
- 1987 Bande superdéformée de ^{149}Gd [haa88a].
- 1989 Découverte par Thadée Byrski et collaborateurs des bandes superdéformées jumelles $^{151}\text{Tb}^*$ - ^{152}Dy [byr90a].
- 1991 1992 Rotations magnétiques ou "shears bands" découvertes à peu près simultanément par plusieurs équipes: ^{194}Pb [fan91a], ^{198}Pb [cla92a], $^{199,200}\text{Pb}$ [bal92a], ^{197}Pb [kuh92a].
- 1992 1993 EUROGAM I à Daresbury (45 détecteur Ge coaxiaux).
- 1993 Dernier faisceau délivré par l'accélérateur tandem de Daresbury (22 mars) [req93a].
- 1993 Le VIVITRON délivre son premier faisceau le 6 août.
- 1994 1996 EUROGAM II à Strasbourg auprès du VIVITRON (30 détecteur Ge coaxiaux et 24 "clovers").
- 1994 Mise en service du séparateur RITU à l'université de Jyväskylä [lei95a].
- 1997 1998 GAREL+ à Strasbourg auprès du VIVITRON: détecteurs Ge coaxiaux, détecteur d'électrons Betatronc et filtre de reculs RFD.
- 1997 1998 EUROBALL III à Legnaro (Italie): 15 détecteur Ge coaxiaux, 26 "clovers" et 15 "clusters".
- 1998 Mise en service du séparateur BGS (Berkeley Gas-filled Separator) à Berkeley.
-

-
- 1998 Spectroscopie gamma prompte de ^{254}No à Argonne et Jyväskylä [rei99a, lei99a].
- 1998 Indications sur la synthèse de $Z=114$ à Dubna avec DGFS (Dubna Gas Filled Separator) suivi en 1999 d'autres indications avec VASSILISSA et DGFS de nouveau. Il s'agit du premier élément identifié à Dubna depuis que ce laboratoire adopte de nouveau la stratégie de la fusion chaude [oga99a].
- 1999 Première expérience test avec EXOGAM à GANIL.
- 1999 2003 EUROBALL IV à Strasbourg auprès du VIVITRON : il s'agit de EUROBALL III auquel a été ajouté une boule interne.
- 2000 2005 Projet européen EXOTAG (Studies of exotic nuclei using tagging spectrometers).
- 2000 Indications sur la synthèse de $Z=116$ à Dubna [oga00a].
- 2001 Premier faisceau délivré par Spiral1 au GANIL (23 septembre).
- 2002 Spectroscopie électron prompte de ^{254}No à Jyväskylä par Peter Butler et collaborateurs [but02a].
- 2003 Première expérience avec VAMOS au GANIL.
- 2003 2008 Installation de JUROGAM I (43 détecteurs coaxiaux) à Jyväskylä.
- 2003 Spectroscopie après décroissance de ^{255}Lr à Jyväskylä (février) et GANIL (décembre).
- 2003 Spectroscopie gamma prompte de ^{251}Md à Jyväskylä.
- 2003 Dernier faisceau délivré par le VIVITRON (8 décembre).
- 2003 2008 Installation de CLARA (25 "clovers") à Legnaro.
- 2003 Indications sur la synthèse de $Z=115$ et $Z=113$ à Dubna [oga04a].
- 2004 Indications sur la synthèse de $Z=113$ obtenues par Kosuke Morita et collaborateurs à Riken par réaction de fusion froide. Deux chaînes de décroissance ont été observées pour un total de 241 jours de faisceau, ce qui correspond à une section efficace d'environ 30 fb [mor04b, mor07a].
- 2004 Test des modes "Recoil Tagging" et "Recoil Decay Tagging" avec VAMOS et EXOGAM.
- 2005 Indications sur la synthèse de $Z=118$ à Dubna [oga06a].
- 2005 2008 Spectroscopie gamma prompte de ^{255}Lr à Jyväskylä [ket09a].
- 2005 2008 Projet européen INTAG (Instrumentation for TAGging).
- 2008 Le DAPNIA (Département d'Astrophysique, de Physique des Particules, de Physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée) devient l'IRFU (Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers).
-

| | |
|------|--|
| 2008 | Mesure de la masse de $^{252,253,254}\text{No}$ avec SHIPTRAP. |
| 2008 | Installation de JUROGAM II à Jyväskylä (24 “clovers” et 15 coaxiaux). |
| 2009 | Test de VAMOS en mode “gas filled” par Christelle Schmitt et collaborateurs (Mars). |
| 2009 | Premier test à Legnaro d’un cluster triple AGATA avec sa chaîne d’électronique et acquisition complète (mars). |

Chapitre 2

Instrumentation et techniques d'analyse

La conception et la construction de dispositifs de détection est un impératif pour le physicien expérimentateur. Ce travail souvent peu valorisable car peu rentable en terme de facteur d'impact prend une part conséquente dans mes travaux.

Les objectifs de physique imposent de sonder des effets rares nécessitant des dispositifs *ad hoc* souvent complexes et coûteux. Ainsi, de larges collaborations se sont formées pour construire les ensembles de détection gamma les plus performants comme nous le verrons au paragraphe 2.1. Après avoir été utilisateur de EUROGAM et EUROBALL dédiés aux hautes multiplicités, j'ai participé à la conception de EXOGAM optimisé pour les événements rares produits grâce aux faisceaux radioactifs de SPIRAL. D'importants efforts sont consacrés à la construction du multidétecteur gamma de nouvelle génération AGATA.

Des dispositifs plus modestes et dédiés doivent être mis en œuvre afin de compléter les grands instruments. J'ai ainsi été impliqué dans la conception, la construction et l'exploitation d'un ensemble de cellules solaires pour la détection des fragments de fission. Cet ensemble appelé SAPHIR sera décrit au paragraphe 2.2.

Les ensembles de détection installés au plan focal de spectromètres sont également de taille modeste. Ces dispositifs sont peu versatiles car conçus en fonction de l'optique du spectromètre ou conçus pour des objectifs très précis: BEST pour LISE et MUsETT pour VAMOS à GANIL. Bien entendu, de nouveaux spectromètres, tel S^3 doivent être conçus afin d'atteindre les noyaux les plus exotiques. Les spectromètres et systèmes de détection associés seront exposés au paragraphe 2.3.

Enfin, le dernier maillon de la chaîne expérimentale concerne l'analyse de données. Afin de tirer le meilleur parti des dispositifs, des techniques adéquates et parfois complexes doivent être développées. Je résumerai ma contribution au paragraphe 2.4.

2.1 Spectroscopie gamma : de EUROGAM à AGATA

Développés depuis une cinquantaine d'années, les spectromètres gamma de haute résolution construits à partir de cristaux de germanium jouent un rôle moteur en spectroscopie nucléaire (pour un historique, voir les revues de J. Eberth et J. Simpson [ebe08a], I.Y. Lee, M.A. Deleplanque et K.Vetter [lee03a]). La spectroscopie gamma est le dénominateur commun de mes travaux et a donc pris une part importante depuis l'utilisation d'EUROGAM jusqu'à la conception d'AGATA.

2.1.1 EUROGAM, EUROBALL et sa filiation

Bien que n'ayant pas participé à la conception et construction de ces ensembles de détection (voir figure 2.1), je les ai continûment utilisés lors de mes travaux et ai partiellement contribué à leur exploitation lors de leur installation à Strasbourg. Etant de plus impliqué dans la conception de leurs successeurs, il m'a semblé utile de rappeler ici leurs principes et caractéristiques. Je décris également brièvement les détecteurs additionnels conçus ou utilisés avec EUROGAM et EUROBALL. Enfin, les ensembles issus du démantèlement d'EUROBALL seront mentionnés.

L'essor de la spectroscopie des noyaux en rotation dans les années 80, avec la découverte de la bande superdéformée de ^{152}Dy [twi86a], a motivé la construction d'EUROGAM I dans le cadre d'une collaboration Franco-Britannique. L'étude de noyaux en rotation à haut moment angulaire en a guidé la conception. Compte tenu du coût des détecteurs Ge, le choix de la géométrie était relativement restreint : 45 cristaux pour une efficacité photopique totale de 4 % à 1.3 MeV. A cette période charnière pour l'électronique, le standard VXI a été adopté pour une meilleure intégration, mais aussi pour un diagnostic facilité grâce aux lignes d'inspection. EUROGAM I a été en service auprès du tandem de Daresbury de 1992 à 1993. J'y ai réalisé de nombreuses expériences, objet entre autres de travaux de thèse sur ^{149}Gd [fli93a, fli93b, the95a, fli95a].

La contrainte due à l'utilisation d'enceintes anti-compton et de détecteurs coaxiaux ne permettait pas d'augmenter significativement l'angle solide et donc l'efficacité. Un gain a pu être obtenu avec EUROGAM II, toujours collaboration Franco-Britannique, grâce à l'utilisation de détecteurs composites trèfle ("clover"). Il s'agit de quatre cristaux assemblés dans un capot unique. EUROGAM II installé à Strasbourg auprès du Vivitron de 1994 à 1996 était constitué de 30 détecteurs coaxiaux et de 24 détecteurs trèfle pour une efficacité de 8 %. J'ai utilisé EUROGAM II pour l'étude de ^{147}Gd [the96a], combiné à un ensemble de télescopes Si (SaSi) pour la recherche d'états super-déformés peuplés par réaction de transfert, et combiné avec SAPHIR (cf paragraphe 2.2) pour la spectroscopie de fragments de fission issus d'une source de ^{252}Cf [gau97a, gau97b, gau98a] ou issus de la réaction de fission induite $p + ^{232}\text{Th}$. Suite à cette expérience, la dernière réalisée avec EUROGAM II, le journal local "Les dernières nouvelles d'Alsace" a publié un reportage reproduit figure 2.2.

Dans la continuité d'EUROGAM II, un accroissement d'efficacité imposait de poursuivre dans la voie des détecteurs composites. EUROBALL III est constitué de 15 détecteurs coaxiaux, 26 trèfles et 15 "cluster" (ensembles de sept cristaux hexagonaux) pour une efficacité photopique de 10 %. La collaboration s'est élargie aux partenaires italiens,

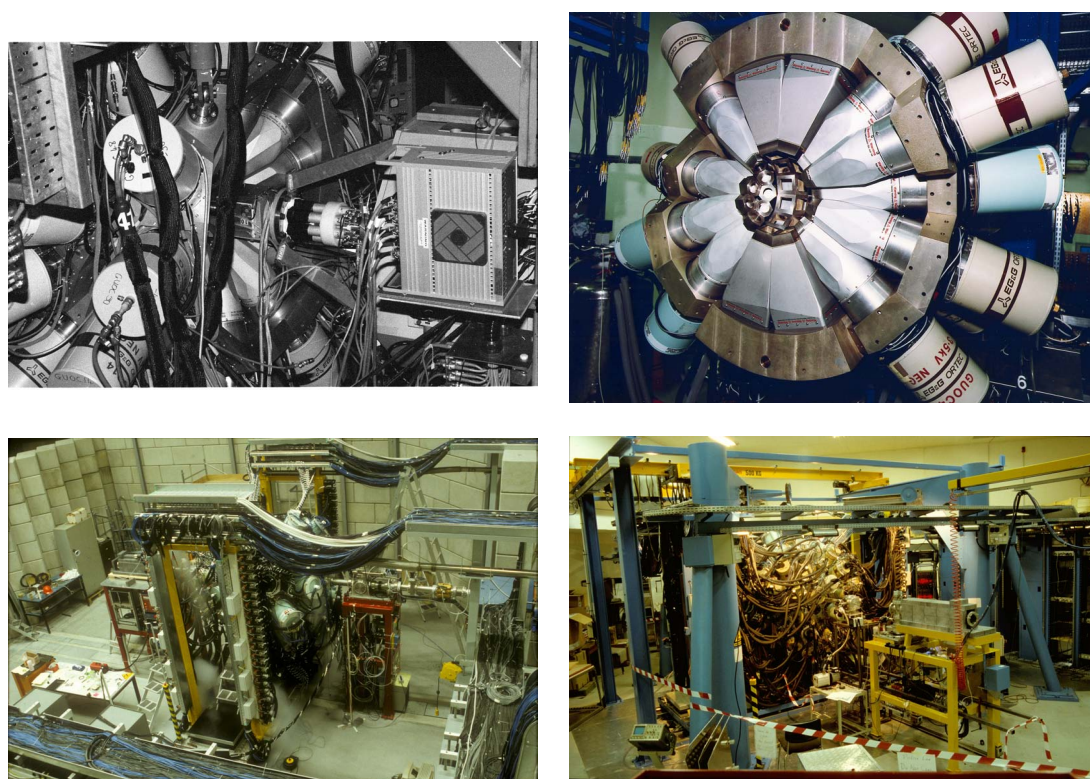


Fig. 2.1 – De gauche à droite puis de haut en bas : i) EUROGAM I installé à Daresbury couplé à un détecteur PPAC pour les fragments de fission et à des scintillateurs BGO pour la détection des isomères. Lors de cette expérience [bel91a], une des tout dernière réalisée avec EUROGAM I, le noyau ^{147}Gd a été étudié. ii) EUROGAM II installé à Strasbourg. iii) EUROBALL III installé à Legnaro. iv) EUROBALL IV installé à Strasbourg.

allemands, suédois et danois. EUROBALL III a été en service à Legnaro de 1997 à 1998. Je l'ai utilisé couplé à SAPHIR pour la spectroscopie de fragments de fission produits par la réaction $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ [hou00a, hou98a, hou99a, luc02a, por05a, ven05a, ven06a, ven07a].

La phase IV en service à Strasbourg a consisté à adjoindre une boule interne constituée de cristaux de BGO. EUROBALL IV a été en service jusqu'à son démantèlement en 2003 auprès du VIVITRON. J'ai participé essentiellement à des mesures de temps de vie dans les fragments de fission grâce à un "plunger" actif basé sur SAPHIR [smi02a, bis05a, the98a].

2.1.1.1 Les détecteurs additionnels

Une évolution des thèmes de physique a accompagné les différentes phases de EUROGAM I à EUROBALL IV. La physique des hauts spins a été progressivement substituée par d'autres thèmes nécessitant la sélection des voies de réaction ou la mesure d'autres rayonnements ou particules. Cette pratique, marginale avec EUROGAM I est devenue dominante avec EUROBALL IV. Dans ce cadre, j'ai participé au groupe de travail "EUROBALL ancillary detectors".

De part la spécificité de l'électronique VXI dédiée, le système n'était pas explicitement

RECHERCHE

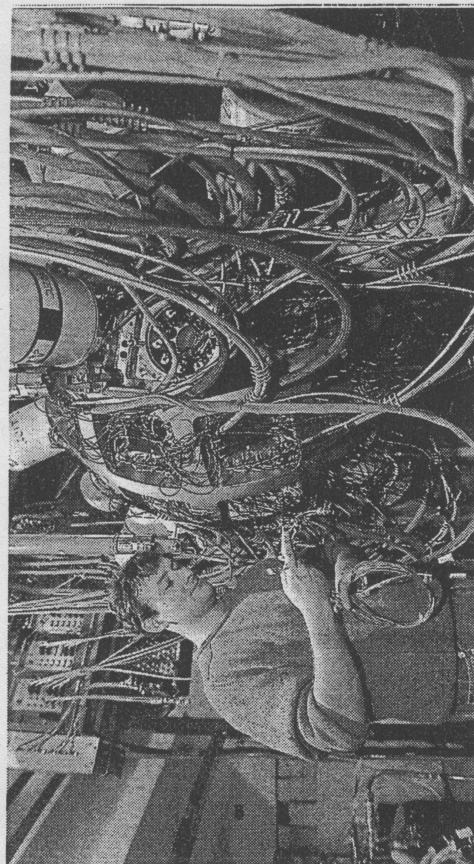
La physique des noyaux déformés

●●● EUROGAM, le multi-détecteur de rayons gamma, a fait sa dernière expérience hier matin, au Centre de recherches nucléaires de Cronenbourg. Son démontage a aussitôt débuté avant une nouvelle vie à Padoue.

Ce détecteur avait fonctionné de 1992 à 1993 en Grande-Bretagne. Puis la fermeture des accélérateurs de particules d'outre-Manche avait entraîné le transfert d'EUROGAM à Strasbourg. Presque un retour aux sources, puisque la plupart des détecteurs individuels avaient été fabriqués par Eurysis, à Lingolsheim.

A présent la machine (qui travaillait à Strasbourg sur des faisceaux d'électrons produits par l'accélérateur VIVITRON) est désossée pour être remontée à Padoue, en Italie. Ce n'est d'ailleurs qu'un au-revoir pour le multi-détecteur, qui reviendra à Strasbourg en 1998. Il en va donc des instruments comme des chercheurs: la mobilité est pres-que la règle.

En attendant, les scientifiques strasbourgeois ne se morfondront pas à côté de l'accélérateur VIVITRON. Car trois autres détecteurs permettent d'utiliser ses faisceaux d'électrons pour réaliser des expériences de



Le multi-détecteur de rayons gamma en cours de démontage. (Photo DNA)

physique nucléaire. Le multi-détecteur DEMON permet d'étudier les neutrons, ICARE concerne les protons alpha et les particules à charges légères, tandis que CHARISSA détecte les fragments légers de particules, issus de noyaux cassés.

2 800 heures d'électrons à 18 millions de volts

Hier matin, lors de l'ultime expérience strasbourgeoise d'EUROGAM, MM. B. Haas, N. Rowley et J.P. Vivien pouvaient dresser un bilan positif de son séjour au Centre de recherches nucléaires (CRN). En effet, les

physiciens ont pu vérifier l'hypothèse des noyaux super-déformés.

Ces découvertes strasbourgeoises ont été faites dans l'environnement de l'accélérateur VIVITRON, énorme machine conçue et réalisée au CRN. La «bête» a délivré des faisceaux de 20 millions de volts l'an dernier, mais 23 expériences ont été conduites à 18 Mvolts, 28 000 heures de faisceaux sur cibles ont permis à 430 chercheurs étrangers et français (en plus des Strasbourgeois) de faire de la physique nucléaire.

Désormais crédible sur le plan international, l'accélérateur électrostatique VIVI-

TRON est à fiabiliser à la tension de 20 millions de volts. Après seulement, sa tension sera portée à 25 Mvolts, qui suffit à la demande des physiciens.

Vers la mixité avec l'université

Hier, l'arrêt du multi-détecteur EUROGAM est intervenu après un fonctionnement ininterrompu depuis juillet. Chercheurs, ingénieurs et techniciens n'ont donc pas pris de vacances estivales. Ils ont travaillé au sein d'un laboratoire d'aileurs voué à la restructuration. En effet, cette unité propre du CNRS va se transformer en unité mixte CNRS-Université, sans doute le 1er janvier 1997.

Cette réadaptation interviendra dans un contexte de départ à la retraite d'une cinquantaine d'ITA en quatre ans sur quelque 200 actuellement. Une échéance décalée de cinq ans pour les chercheurs. Le directeur Bernard Haas espère le remplacement d'un ITA pour 3 retraités et la nomination d'un chercheur par an. Cette refonte du Centre de recherches nucléaires est l'un des aspects du remodelage du campus de Cronenbourg, où l'Université Louis Pasteur et le CNRS vont devoir cohabiter harmonieusement.

Michel Gissy
ITA: ingénieurs, techniciens et administratifs

Fig. 2.2 – Article paru dans les "Dernières nouvelles d'Alsace" du 9 octobre 1996.

conçu comme ouvert à d'autres détecteurs. Avec EUROGAM II, nous avons utilisé SaSi (voir figure 2.3): un ensemble de 6 télescopes Si conçu à Saclay pour la spectroscopie de ^{194}Hg par réactions de transfert. Le choix de l'électronique s'est porté sur les cartes VXI des détecteurs coaxiaux. Ce principe a été repris pour les premières expériences réalisées avec SAPHIR et EUROGAM II, puis avec EUROBALL IV et le détecteur d'électrons de conversion ICEMOS, collaboration entre Bonn et Saclay (voir figure 2.3). Cette solution adaptée à un faible nombre de voies devenait inadaptée à des configurations de SAPHIR à plusieurs dizaines de voies. Ainsi, nous avons développé pour SAPHIR des cartes VXI dédiées. J'y reviendrai au paragraphe 2.2.

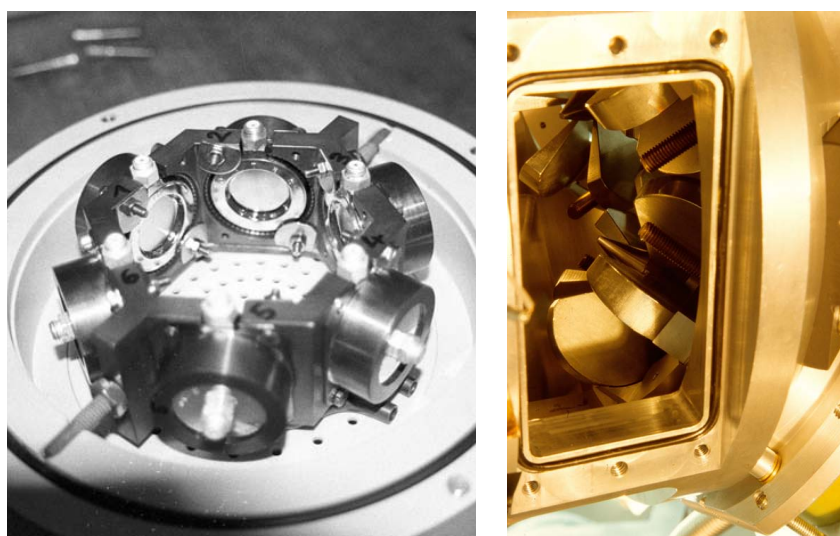


Fig. 2.3 – Les détecteurs additionnels SaSi (gauche) et ICEMOS (droite)

2.1.1.2 La filiation

Avec l'évolution de EUROGAM II à EUROBALL III, 15 détecteurs coaxiaux et leur électronique n'étaient plus utilisés. La collaboration Garel+ a saisi cette opportunité pour installer à Strasbourg de 1997 à 1998 un ensemble combinant la détection gamma, le Betatronc pour les électrons de conversion et le "Recoil Filter Detector" pour les résidus de fusion-évaporation. Nous avons réalisé grâce à cet instrument la spectroscopie de ^{74}Kr [bec99a, bec00a] et ^{196}Po [the98c].

Face à une évolution des thèmes de physique, des intérêts divergents des partenaires et dans une moindre mesure la fermeture annoncée du VIVITRON, la collaboration EUROBALL se dissout en 2003. Les détecteurs et leur électronique sont gérés par un consortium chargé d'allouer le patrimoine pour des campagnes. Les détecteurs "cluster" sont transférés à GSI auprès du FRS (RISING), les "clovers" sont installés à Legnaro auprès de PRISMA (CLARA) jusqu'en 2008. Enfin, les détecteurs coaxiaux sont installés à Jyväskylä (JUROGAM) auprès de RITU dans une configuration très proche de EUROGAM I. L'ajout des détecteurs trèfle en 2008 (JUROGAM II) permet d'améliorer l'efficacité du

dispositif. J'utiliserai JUROGAM à de nombreuses occasions pour la spectroscopie des éléments super-lourds : voir paragraphe 3.3.

Bien que l'on puisse regretter le démantèlement d'un des détecteur gamma les plus performant au monde pour la spectroscopie des hauts spins, laissant GAMMASPHERE comme seule alternative aux États-Unis, on doit admettre que les trois ensembles résultants ont permis de donner un nouveau souffle à d'autres thèmes de physique et d'obtenir de nombreux résultats.

2.1.2 EXOGAM

Les campagnes EUROGAM et EUROBALL exploitaient essentiellement les réactions induites par faisceaux stables autour de la barrière coulombienne. Parallèlement, le besoin de réaliser la spectroscopie γ à GANIL avec des faisceaux radioactifs ou pour des énergies intermédiaires s'intensifiait. En 1997, une collaboration entre le Danemark, la Finlande, l'Allemagne, la Hongrie, la Pologne, la Suède, l'Espagne le Royaume Uni et la France a proposé la construction d'EXOGAM.

J'ai participé à la conception et à la construction d'EXOGAM depuis le début du projet. Ma contribution a porté sur le test et la caractérisation des détecteurs germanium, l'électronique et l'acquisition, l'installation de la phase préliminaire et de la phase finale ainsi qu'à l'exploitation. Dans ce cadre, j'ai participé à deux groupes de travail : électronique et acquisition de données d'un part, et détecteurs additionnels d'autre part.

2.1.2.1 L'ensemble EXOGAM

Afin d'exploiter au mieux les spécificités des faisceaux radioactifs de Spiral, le choix s'est porté sur un multidétecteur de haute efficacité adapté aux basses multiplicités.

De nouveaux détecteurs trèfle ("clover") directement inspirés d'EUROGAM II ont été conçus : de même taille, chaque cristal étant segmenté en quatre afin de réduire l'angle solide : voir figure 2.5. Les détecteurs d'EXOGAM sont basés sur le même principe et tirent les enseignements des tests et expériences réalisés avec les "clovers" segmentés de type EUROGAM.

La géométrie d'EXOGAM présentée figure 2.4 est constituée de 16 "clovers". Pour être précis, il s'agit d'un petit rhombicuboctaèdre, solide d'Archimède. Les détecteurs peuvent être placés à deux distances de la cible selon que l'on privilégie l'efficacité ou la résolution angulaire. En configuration rapprochée, l'efficacité photopic de chaque "clover" est d'environ 1 %, soit une efficacité remarquable d'environ 16 % pour l'ensemble (on note ici que le fait de ne pas privilégier les hautes multiplicités permet d'obtenir une efficacité supérieure à celle d'EUROBALL). L'électronique et l'acquisition s'inscrivent dans la continuité d'EUROGAM et EUROBALL puisqu'il s'agit d'électronique VXI.

EXOGAM est dédié aux salles G1 (VAMOS) et G2 du GANIL. Afin de faciliter le mouvement entre ces deux salles, les détecteurs, l'électronique et l'infrastructure sont installés sur une plate-forme.

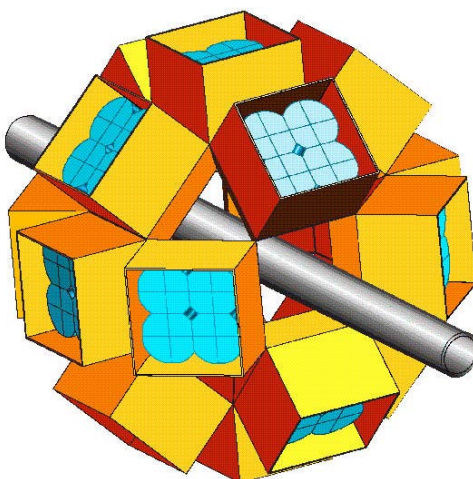


Fig. 2.4 – Géométrie d'EXOGAM.

2.1.2.2 Test et caractérisation de détecteurs

De nombreux tests ont été nécessaires afin d'arrêter le choix des détecteurs Ge. Dans un premier temps, un "clover" segmenté de taille EUROGAM, acheté en 1997 par le CEA Saclay, a été caractérisé à Saclay : voir figure 2.5. Un banc de tests a été mis en place afin de caractériser les détecteurs [the98b] pour ensuite optimiser l'électronique dédiée et contraindre la conception d'un détecteur prototype EXOGAM.

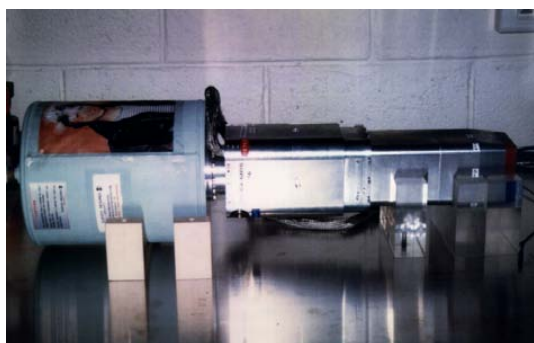


Fig. 2.5 – Détecteurs "clover" en test à Saclay. Gauche : détecteur de taille EUROGAM. Droite : détecteur prototype EXOGAM.

Les tests de ce prototype EXOGAM acheté par le CEA Saclay (délivré en juillet 1999) ont été réalisés sur le même banc [the00a] : voir figure 2.5. Enfin, un des détecteur série acheté par le CEA Saclay a été caractérisé en 2002. Ce travail a été réalisé avec Audrey Chatillon lors de son stage de DEA [cha02].

2.1.2.3 Implémentation et exploitation

Outre les tests en source présentés au paragraphe précédent, la collaboration EXOGAM a effectué des tests et expériences sous faisceau dès qu'un minimum de détecteurs, électronique et infrastructure étaient disponibles. La première phase a débuté en 1999 avec des "clovers" segmentés de taille EUROGAM et les premières enceintes anti-Compton disponibles. Les cartes d'instrumentation VXI dédiées à EXOGAM n'étant pas disponibles, les expériences ont été réalisées à l'aide des cartes VXI SAPHIR (voir paragraphe 2.2) et ADC GANIL. Etant responsable de l'électronique de la phase préliminaire, j'ai fortement contribué aux premières expériences. En particulier, il a fallu collecter l'électronique et avoir de nombreux contacts avec les ingénieurs de la collaboration afin d'assurer le meilleur fonctionnement de l'électronique et de l'acquisition. Les résultats de la première expérience de mise en service ("commissioning") sont reportés dans [the99a].

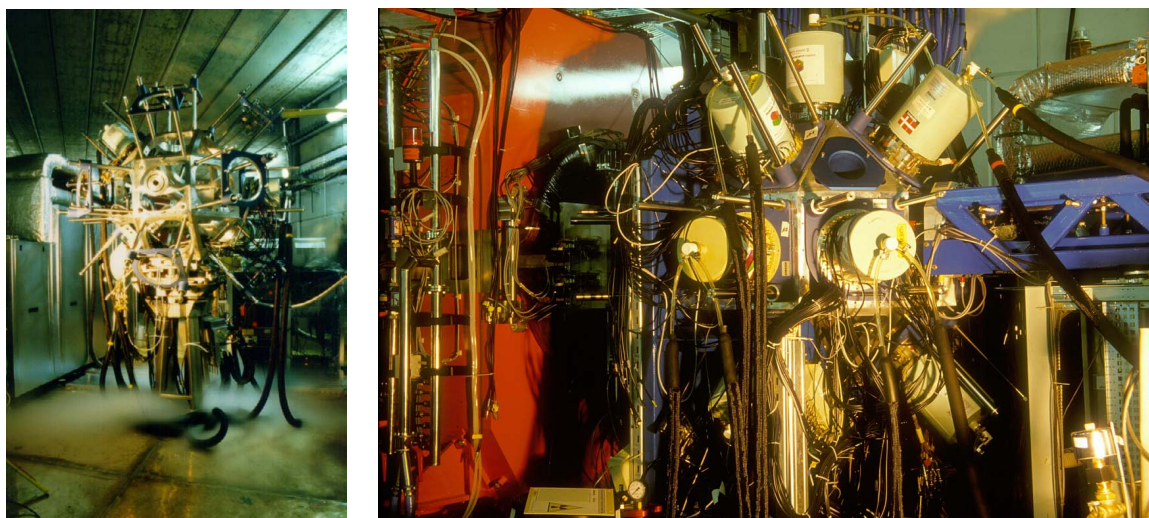


Fig. 2.6 – Gauche: vue d'EXOGAM en phase préliminaire, salle G2 (1999). Droite: EXOGAM couplé à VAMOS (2003).

Le système a ensuite graduellement évolué avec la livraison des détecteurs EXOGAM, de la mécanique, des châssis et armoires électronique et des cartes d'instrumentation VXI (voir des photographies d'EXOGAM figure 2.6 à différents stades). J'ai régulièrement contribué à l'installation et à la fiabilisation d'EXOGAM lors d'expériences. Une contribution substantielle a été apportée lors d'un séjour sabbatique à GANIL en 2003. Depuis la phase opérationnelle d'EXOGAM, j'ai pu contribuer à de nombreuses expériences [bou03a, kor04a, red04a, gor05a, gor05b, gor07a, cle05a, kor05a, obe06a, cat05a, lab05a, lab05b, lem06a, fer06a, obe06b, gil07a, cle07a, rej07a, obe06c, gil07b, bha08a, gel08, zie08a, bha09a, muc09a, zie09a].

2.1.2.4 Les détecteurs additionnels

Nous avons principalement utilisé deux détecteurs “additionnels” avec EXOGAM : détecteur silicium pour l’excitation coulombienne ainsi que le spectromètre VAMOS.

Lors de l’étude de noyaux radioactifs par excitation coulombienne, il est indispensable de détecter le noyau incident et/ou le noyau cible diffusé pour deux raisons : i) la détection de l’ion signe la réaction et est indispensable pour s’affranchir du bruit de fond issu de l’implantation du faisceau radioactif ii) il est nécessaire de mesurer la section efficace différentielle afin de déterminer le signe de la déformation. Ainsi, nous avons utilisé un détecteur silicium annulaire segmenté pour la mesure par excitation coulombienne de $^{74,76}\text{Kr}$ et ^{44}Ar : voir figure 2.7. Le codage des 32 voies était assuré par les cartes VXI SAPHIR.

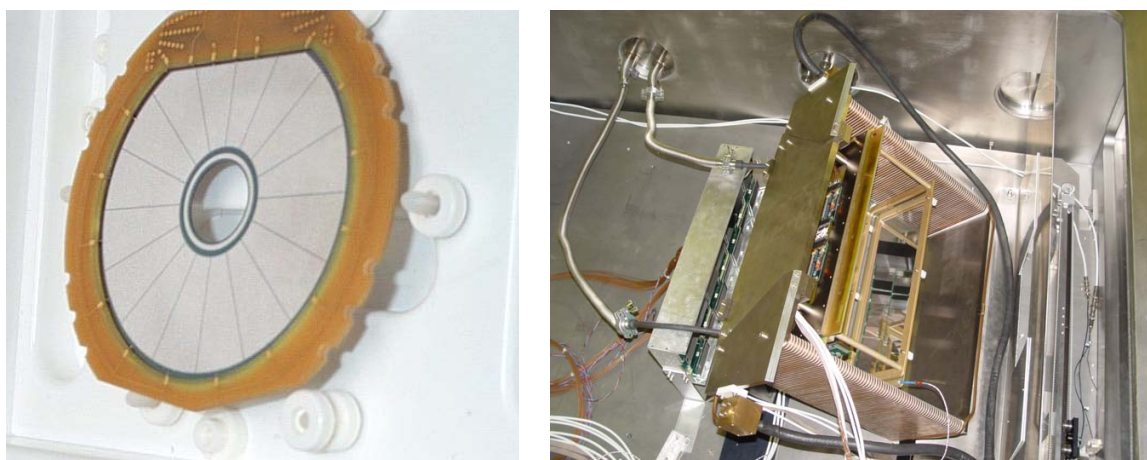


Fig. 2.7 – Gauche : détecteur Si annulaire. Droite : détecteur SeD et mur HARPEE au plan focal de VAMOS.

Depuis 1993, nous avons entrepris l’étude de noyaux très lourds à l’aide de VAMOS et EXOGAM. De telles expériences nécessitent d’identifier les résidus de fusion-évaporation noyés dans un bruit de fond dominant. Grâce à son filtre de Wien et son ouverture angulaire élevée, VAMOS ouvre d’importantes perspectives dans ce domaine. Nous avons jusqu’à présent réalisé deux tests visant à prouver la faisabilité de telles expériences. Lors du premier, effectuée en novembre 2004, la détection au plan focal de VAMOS consistait en un détecteur à électrons secondaires SeD et un mur de Si emprunté à la collaboration HARPEE (voir figure 2.7). Lors de la seconde expérience réalisée en juillet 2007 [sul08a], nous avons utilisé une seconde version du mur HARPEE. Afin de mener à bien ce programme de recherche, nous avons initié la construction du mur de silicium segmenté MUsETT destiné au plan focal de VAMOS. Ce détecteur sera détaillé au paragraphe 2.3.2.

2.1.2.5 Utilisation des “clovers” segmentés dans multiples contextes

Alors qu’EXOGAM n’était pas encore opérationnel, les “clover” segmentés de taille EUROGAM étaient disponibles. Diverses collaborations ont saisi cette opportunité pour

bénéficier de leurs performances. Trois détecteurs ont été installés lors de la campagne SARI (Segmented Array at RITU) à l'université de Jyväskylä en 1998 (voir figure 2.8-1). C'est avec ce dispositif que la spectroscopie prompt de ^{254}No a pu être réalisée [lei99a]. Les détecteurs ont également été utilisés en 1999 à GSI pour l'étude d'isomères auprès du FRS. GANIL a bien entendu bénéficié de ces détecteurs : la première expérience réunissant les 4 "clover" segmentés de taille EUROGAM a permis en 1998 d'étudier l'excitation coulombienne de ^{68}Ni auprès du spectromètre LISE (voir figure 2.8-2).

Cette pratique s'est ensuite généralisée à GANIL avec l'utilisation de "clover" segmentés de taille EUROGAM et EXOGAM auprès des spectromètres LISE ou SPEG : voir figure 2.8. Nous pouvons citer par exemple l'étude d'états isomériques produits après fragmentation, l'excitation coulombienne, la spectroscopie après fragmentation ou les expériences de décroissance. En particulier, nous avons conçu et utilisé le dispositif BEST afin d'étudier la structure de ^{255}Lr et de ses descendants auprès de LISE. Quatre détecteurs EXOGAM conférant un efficacité maximum de 22 % étaient utilisés. Nous reviendrons sur BEST au paragraphe 2.3 et sur les résultats de cette expérience au paragraphe 3.3.

Le succès des détecteurs trèfle peut être attesté par le nombre d'expériences les requérant soit avec EXOGAM, soit en nombre limité dans diverses salles expérimentales du GANIL. On peut estimer que 40 % des expériences réalisées au GANIL utilisent ces détecteurs.

Les résultats d'expériences utilisant des "clovers" segmentés auxquelles j'ai participé peuvent être trouvés dans les références [lei99a, kan99a, lec99a, lec99b] (Université de Jyväskylä), [podo00, pfu02a, caa05a] (GSI), [soh00, aza02a, soh02a, dom03a, sor04a, bur09a] (SPEG) [sor02a, bou03b, saw03a, saw04a, cha05a, cha05b, per06a, cha06a, dau06a, bur06a, sto07a, the07a, the08a] (LISE).

2.1.2.6 EXOGAM2

L'électronique d'EXOGAM conçue il y a une dizaine d'années est basée sur des principes établis il y a près de vingt ans. Afin d'accroître la fiabilité, les performances, et de faire face aux enjeux de Spiral2, EXOGAM2 est envisagé.

Le projet EXOGAM2 se propose d'équiper toutes les voies d'électronique digitale. Depuis quelques années, le traitement numérique des signaux succède au traitement analogique pour de meilleures performances en termes de taux de comptage et de flexibilité. Bien qu'elles soient relativement récentes, la maintenance des cartes VXI est déjà problématique dû à l'obsolescence de certains composants. La fiabilité est parfois aléatoire, fait inacceptable dans la perspective de Spiral2 : tout accès aux aires expérimentales pourra être impossible pendant plusieurs jours, voir plusieurs semaines.

L'électronique digitale permet un gain substantiel en termes de taux de comptage : 50 kHz, voir 100 kHz ou plus en utilisant les techniques sophistiquées d'ADONIS [bar06a] peuvent être envisagés. De plus, une limitation de l'électronique VXI vient de son mode de lecture et du déclenchement en temps mort commun.

L'argumentation physique pour EXOGAM2 couvre divers domaines. L'intérêt est évident dans le cadre de l'étude de noyaux très lourds. Augmenter le taux de comptage permet d'accroître l'intensité de faisceau, donc la statistique ou d'atteindre des sections

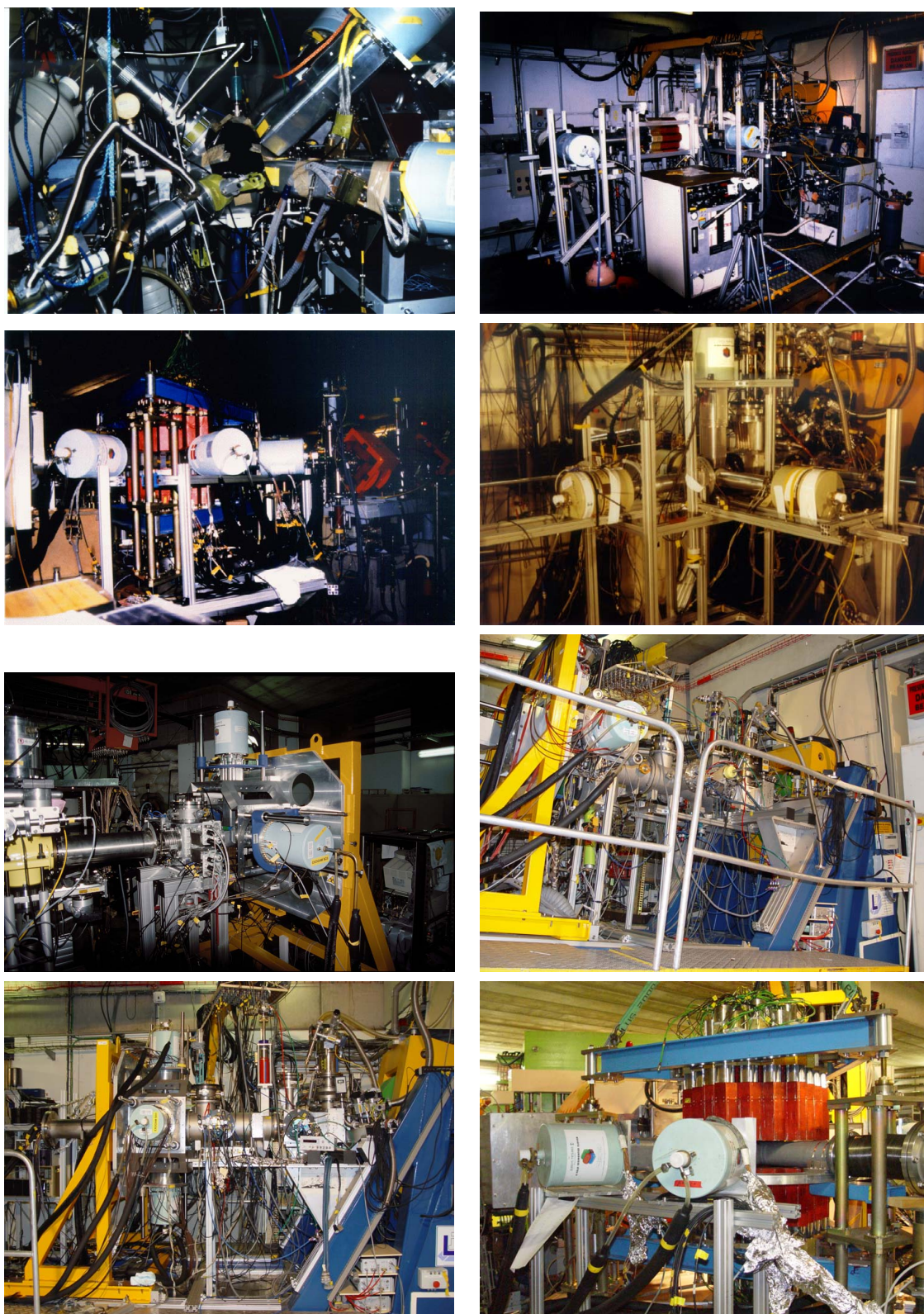


Fig. 2.8 – De gauche à droite puis de haut en bas. 1) SARI couplé au détecteur d'électrons de conversion ICEMOS à Jyväskylä (août 1998). 2) Dispositif pour l'étude d'excitation coulombienne à LISE (1998). 3) Clovers à SPEG (mai 1999). 4) Etude d'états isomériques de $^{72,74}\text{Kr}$ à LISE (juillet 2000). 5) LISE 2000 (décembre 2001). 6) Dispositif BEST à LISE (décembre 2003). 7) Excitation coulombienne à LISE (juillet 2004). 8) Détecteurs trèfle à SPEG avec le château de cristal (mars 2005).

efficaces plus faibles. L'étiquetage en temps permettra plus de souplesse lors du couplage avec VAMOS. Une argumentation plus exhaustive sera trouvée dans des lettres d'intention Spiral2 auxquelles j'ai contribué [spi06a, spi06b].

2.1.3 AGATA

2.1.3.1 Introduction

Les multidétecteurs gamma les plus performants tels que EUROBALL ou EXOGAM sont tous basés sur le même principe : les détecteurs Ge de bonne résolution sont cernés d'enceintes anti-compton afin de garantir un bon rapport pic/total. Afin d'éviter les empilements de rayonnements, le nombre de détecteurs doit être élevé. EUROBALL et GAMMASPHERE culminent, pour environ 200 cristaux, avec une efficacité d'environ 10 %. EXOGAM a quant à lui une efficacité d'environ 15 % pour 64 cristaux grâce à l'utilisation systématique de détecteurs composites proches de la cible.

Afin de succéder à EUROBALL et de dépasser les limites actuelles, la solution adoptée par la collaboration AGATA en Europe et GRETA aux États-Unis est basée sur le pistage ("tracking") des rayons gamma. Afin d'obtenir une bonne efficacité, il est nécessaire d'avoir un angle solide couvert par les détecteurs Ge maximum. Afin de limiter le coût et l'encombrement, le nombre de détecteurs doit être restreint, typiquement de l'ordre de la centaine. Afin de s'affranchir des problèmes d'empilement, l'idée est de reconstruire la trajectoire de chaque rayonnement gamma dans le volume de Ge grâce à des algorithmes de "tracking". Afin d'être efficaces, ces algorithmes ont besoin de connaître chaque interaction avec une bonne résolution en position, typiquement quelques mm. Segmenter les détecteurs est nécessaire mais ne suffit pas : il faut en plus déterminer les points d'interactions grâce à l'analyse de forme des signaux. Par conséquent, l'électronique doit être digitale.

Ces impératifs ont contraint la géométrie d'AGATA : 180 cristaux segmentés chacun en 36 segments, correspondant ainsi à 6660 voies électroniques.

Construire un tel détecteur est un challenge technologique et un projet coûteux que seule une large collaboration peut entreprendre. Ainsi, 12 pays européens ont joint leurs efforts humains et financiers : Allemagne, Bulgarie, Danemark, Finlande, France, Hongrie, Italie, Pologne, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Turquie.

Je participe à ce projet depuis son commencement en contribuant aux détecteurs additionnels, à l'acquisition de données, à l'analyse de données et à la conduite de projet.

2.1.3.2 Généralités

AGATA sera constitué de 180 cristaux hexagonaux encapsulés et divisés en 36 segments (voir figure 2.9). Les cristaux seront assemblés en "triple cluster".

L'architecture globale du système est présentée figure 2.10. Tous les signaux sont numérisés à une cadence de 100 MHz par des "digitizer". Les traces sont ensuite envoyées dans des cartes de pré-traitement au format ATCA (Advanced Telecommunication Computing Architecture). C'est à ce niveau qu'un filtrage peut être effectué grâce au GTS "Global Trigger System".

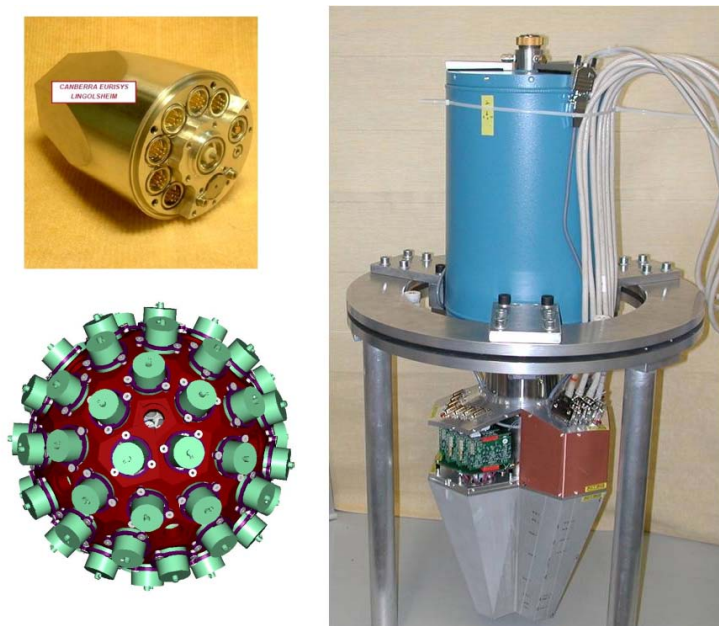


Fig. 2.9 – Haut gauche : Capsule AGATA. Bas gauche : configuration 4π à 180 cristaux. Droite : cluster triple.

Après le pré-traitement, les traces sont envoyées à des processeurs afin de réaliser l'étalonnage et l'analyse de forme des signaux : calcul de la position de chaque interaction.

Les n interactions des différents détecteurs sont regroupées en événements ("Event Builder") puis les données des détecteurs additionnels sont ajoutées et corrélées ("Merge").

L'algorithme de pistage "tracking" est ensuite appliqué au n interactions pour reconstruire les m rayonnements gamma. Enfin, les données sont écrites sur disque et l'analyse sur site peut être réalisée.

L'acquisition de données (DAQ) sera détaillée au paragraphe 2.1.3.4. Pour être bref, il s'agit du transport des données, du "Run Control" qui centralise les actions et messages de la DAQ, du "Slow Control" pour le contrôle du matériel et de l'interface graphique associée à ces éléments.

Le DSS "Detector Support System" assure quant à lui le contrôle des détecteurs : alimentations, circuit de refroidissement.

Les performances d'AGATA en phase finale 4π seront très supérieures à celles des détecteurs existants avec une efficacité photopique de l'ordre de 50 % et une résolution angulaire d'environ 1° . Un gain considérable d'environ deux ordres de grandeur en sensibilité sera obtenu.

Les thèmes de physique abordés seront très vastes et ont été présentés dans plusieurs documents, par exemple des lettres d'intention Spiral2 [spi06a, spi06b] ou le "physics case AGATA" [aga08b]. En ce qui me concerne, AGATA permettra des avancées considérables pour la spectroscopie des éléments super-lourds. Je reviendrai sur ce point au chapitre 4.

Face au coût élevé d'AGATA et aux challenges à surmonter, il a été décidé de réaliser la construction en plusieurs phases. La première phase appelée démonstrateur sera constituée

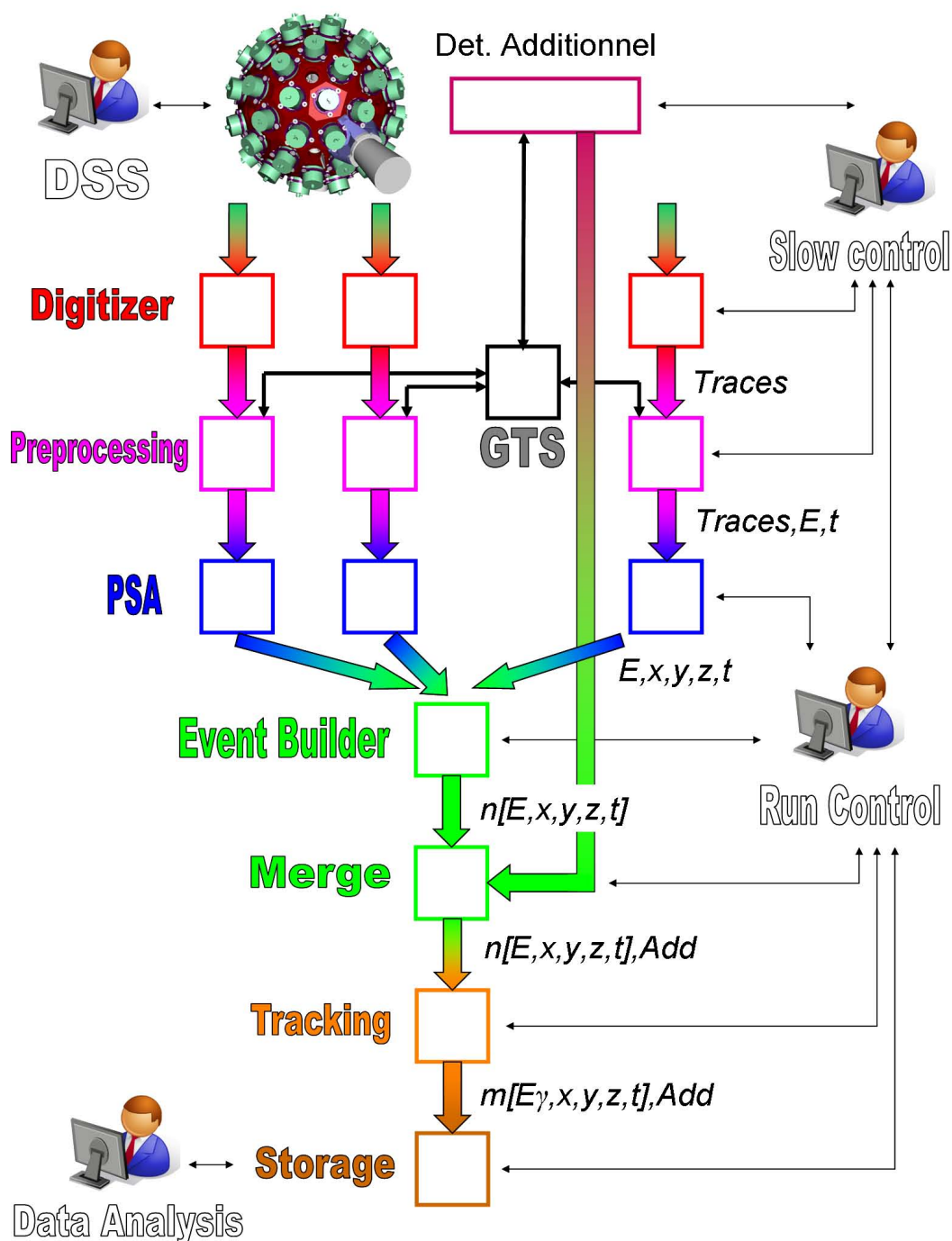


Fig. 2.10 – Architecture d'AGATA.

de 15 cristaux c'est-à-dire 5 "triple cluster". L'ensemble de la DAQ et l'infrastructure sont similaires à ce qui est envisagé pour les phases ultérieures. L'objectif du démonstrateur est de valider le concept et la faisabilité du "tracking" avant la construction de l'ensemble complet. Cette étape constitue un jalon d'importance capitale pour la collaboration. L'état des lieux à cette étape du projet est résumé dans le "Technical Design Report" [aga08c]. Le

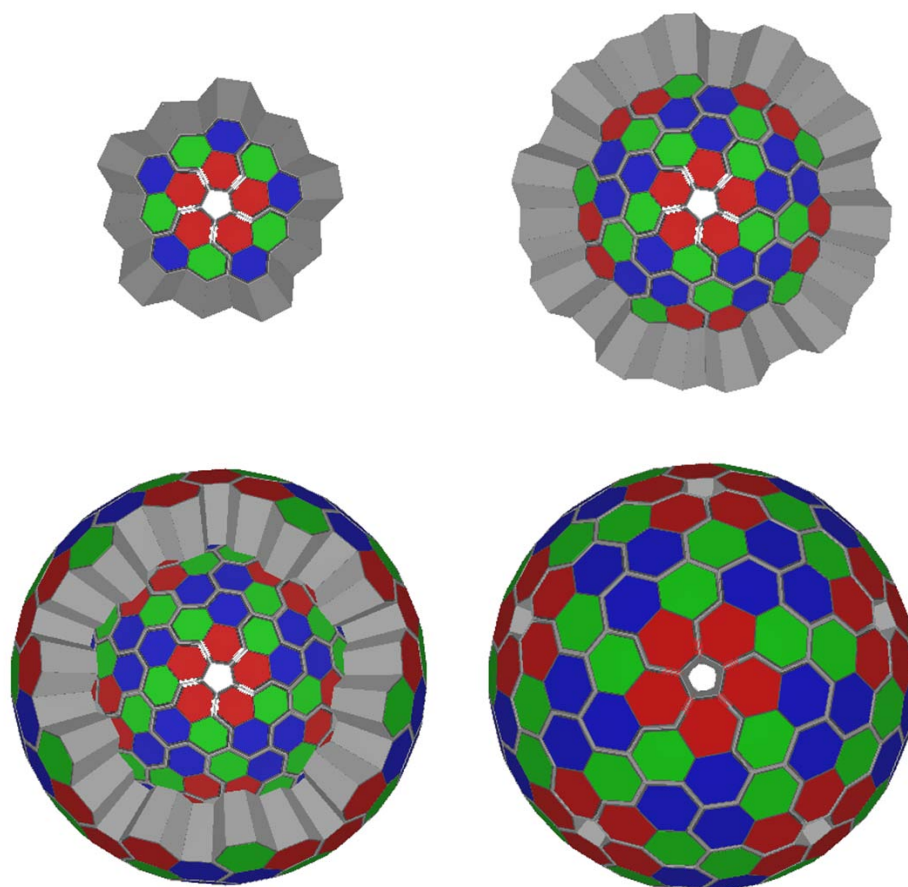


Fig. 2.11 – Géométries d'AGATA pour 5 "triple cluster", 1π , 3π et 4π .

démonstrateur est implanté à Legnaro depuis 2009. Le nombre de détecteurs augmentera ensuite progressivement avec les phases démonstrateur à GSI puis à GANIL [aga05c]. Enfin, l'ensemble évoluera progressivement vers la phase 4π . Des vues des différentes phases sont présentées figure 2.11.

2.1.3.3 Electronique et acquisition des détecteurs additionnels

AGATA est un détecteur nomade destiné à être couplé avec divers détecteurs additionnels dans divers laboratoires.

L'électronique et l'acquisition d'AGATA sont conçus pour offrir les meilleures performances et font appel à des technologies très spécifiques. L'électronique et acquisition des détecteurs additionnels étant également spécifiques et hétérogènes, le couplage de sous-systèmes est, comme pour EUROBALL ou EXOGAM, un problème complexe nécessitant d'interagir avec de nombreux éléments de l'ensemble. La collaboration a inclus ces contraintes et souhaité un couplage des détecteurs additionnels le plus aisé possible. Deux

points essentiels sont à intégrer :

- les événements des détecteurs additionnels doivent être corrélés avec ceux d'AGATA,
- les flots de données des détecteurs additionnels doivent être fusionnés avec celui d'AGATA.

Le groupe "electronics and data acquisition integration" que j'ai dirigé de 2003 à 2007 avant de laisser la place à Piotr Bednarczyk est chargé de ces tâches.

La principale tâche du groupe consiste à fournir les interfaces entre AGATA et les détecteurs additionnels. L'architecture mise en place est schématisée figure 2.12.

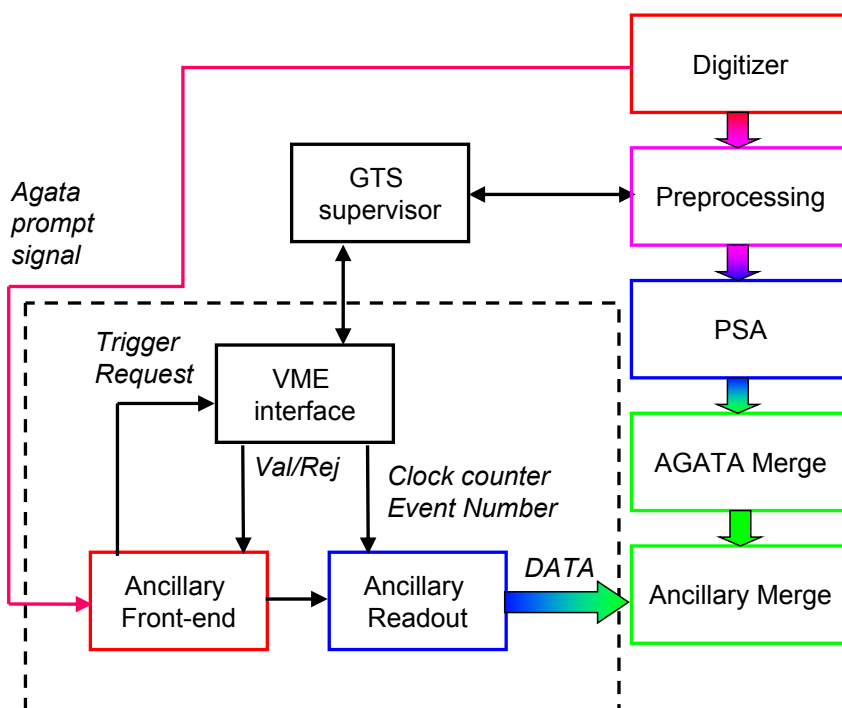


Fig. 2.12 – Couplage des détecteurs additionnels avec AGATA.

La première fonction à mettre en œuvre consiste à corrélés les événements des sous-systèmes au niveau du GTS d'AGATA [bel07a, bel05a]. Il s'agit d'adapter le mécanisme du GTS aux détecteurs additionnels, et ceci de façon la plus versatile possible. Etant donné que la plupart des détecteurs fonctionnent avec des modules VME ou VXI, au moins à un maillon de leur chaîne, le standard VME a été choisi, sachant que de telles cartes peuvent être insérées dans des châssis VXI. L'interface VME nommée AGAVA [aga05a] pour AGATA Ancillary Vme Adapter a été conçue par une collaboration entre Cracovie, GANIL et Padoue.

Une fois les événements corrélés, ceux-ci doivent être insérés dans un flot de données commun : voir [aga05b]. Le transport des données est assuré par le logiciel NARVAL développé à Orsay. Je reviendrai sur la DAQ plus généralement au paragraphe 2.1.3.4.

Les spécifications concernant le couplage des détecteurs additionnels avec la DAQ ont été définies en collaboration avec IPNO, CSNSM, Daresbury et GANIL [aga05b].

Travailler sur les détecteurs additionnels est avant tout un travail nécessitant de fédérer différentes équipes. En tant que “team leader” je me suis toujours efforcé d’impliquer les concepteurs et utilisateurs de détecteurs additionnels et d’être à leur écoute. Ce travail a également nécessité d’être en contact et de travailler avec diverses équipes de la collaboration AGATA : numérisation, pre-processing, global clock and trigger, data acquisition, run control and GUI, gamma-ray tracking et data analysis. Les aspects présentés ci-dessus ont été soit initiés, soit mis en place lors de ma direction du groupe de travail.

2.1.3.4 Acquisition

La DAQ AGATA regroupe l’essentiel de l’informatique du détecteur : transport des données, contrôle de l’électronique, intégration des algorithmes, interface graphique, contrôle de l’expérience, stockage des données, unités de traitement. La DAQ d’AGATA fait appel à de nouveaux concepts par rapport à ses prédécesseurs : le traitement est entièrement numérique et doit être réalisé en temps réel afin de fournir en fin de chaîne l’énergie et l’angle des rayonnements émis par le noyau. Le niveau de complexité et nombre de canaux à gérer est également très supérieur comparé à la génération précédente.

Au démarrage du projet, la DAQ était gérée conjointement avec l’électronique frontale et l’analyse de forme des signaux. Face à la complexité de l’électronique, le projet a été réorganisé début 2007 pour que la DAQ constitue, sous ma responsabilité, un groupe à part entière.

Je présente ici les éléments de la DAQ, les contraintes, performances, l’implémentation ainsi que ma contribution à la tête du groupe de travail.

Le transport de données constitue une tâche essentielle de la DAQ. Il s’agit, comme indiqué figure 2.12, de transporter les données depuis l’électronique frontale jusqu’au système de stockage en passant par les unités de traitement : PSA, event-builder, merge et tracking. Le transport est basé sur un concept original : NARVAL (Nouvelle Acquisition temps Réel Version x.y Avec Linux) [gra05a] développée sous ADA par Xavier Grave (IPNO) et ses collaborateurs. La conception en ADA procure la robustesse nécessaire à la fiabilité et au volume élevé de données à transporter.

A chaque étape du traitement, NARVAL doit intégrer les algorithmes écrits indifféremment en C, C++ ou ADA [cre06a]. Les données sont transportées selon le format de données AGATA ADF (Agata Data Format) [leg07a, ste09a]. Afin de rendre la manipulation des données transparente, une librairie interface pour encoder et décoder les données a été développée [ste07a, ste09a]. A différentes étapes du flot de données, il est possible d’espionner les données pour le diagnostic ou l’analyse en ligne.

Notons que lors de la mise en service (“commissioning”) du démonstrateur, toutes les traces sont écrites sur disque afin de vérifier l’intégrité des algorithmes de PSA, ce qui

représente un volume considérable de quelques TB par jour¹.

Outre le transport des données et l'intégration des algorithmes, il est indispensable de centraliser les informations de l'expérience : accéder au système d'acquisition ; configurer la DAQ ; synchroniser avec d'autres systèmes comme les détecteurs additionnels, l'électronique frontale ; centraliser les actions et l'état du système ; surveiller le système ; centraliser les erreurs et agir en conséquence ; fournir et recueillir les informations des interfaces graphiques ; fournir les outils de coopération lors de l'expérience. Ces fonctions seront assurées par le Run Control, outil basé sur le projet européen GRIDCC (Grid Enabled Remote Instrumentation with Distributed Control and Computation) [gri07a].

Le contrôle de l'expérience inclut également l'électronique : numériseur et électronique de pré-traitement ACTA (y compris le GTS). Le Slow Control de chaque sous-système est développé par ou en lien étroit avec les concepteurs du matériel. Un "Global Slow Control" gère l'ensemble des sous-systèmes : topologie de l'expérience, gestion des configurations, des interdépendances, liaison avec le Run Control.

Les algorithmes de traitement ou l'électronique peuvent produire des spectres pour le diagnostique ou le contrôle de l'expérience. Un serveur des spectres développé à partir de ROOT par le GANIL est utilisé [gru] : voir figure 2.13.

Une interface graphique est indispensable à la DAQ. Idéalement, une unique interface serait à mettre à disposition des utilisateurs pour l'ensemble de l'expérience. Cependant, développer une telle interface pose un problème de main d'œuvre. D'autre part, les besoins sont différents selon le type d'utilisateur : information synthétique pour le physicien ; contrôle détaillé du matériel et logiciel pour l'ingénieur. Une approche universelle n'est donc pas nécessairement souhaitable. L'interface graphique mise à disposition du physicien regroupe les actions et états indispensables au déroulement de l'expérience. La DAQ est synthétisée sous forme de diagramme représentant la topologie du système fournie par NARVAL : voir figure 2.13. Des interfaces graphiques spécifiques à l'électronique sont fournies. Un "logbook" électronique est également mis à la disposition des utilisateurs (peut être alimenté automatiquement par le Slow Control).

La DAQ est déployée sur des serveurs tiroir "Pizza Box". Le traitement du PSA requiert la part la plus importante de la puissance de calcul. Les serveurs double quadri-cœur permettent d'atteindre des taux d'environ 3 kHz par cristal. Le Run Control, event-builder, merge et tracking utilisent chacun un serveur. Le stockage des données est assuré par un système RAID de 64 TB (128 TB escomptés) : voir figure 2.14.

A l'instar des aspects techniques développés ci-dessus, l'organisation du groupe de travail DAQ revêt une importance capitale. Le groupe est divisé en deux équipes. L'équipe "Data Flow" s'attache à développer NARVAL, à intégrer les algorithmes et déployer le système tant du point de vue matériel que logiciel. Cette équipe est dirigée par Xavier Grave

1. Lors du premier test sous faisceau réalisé en 2009 avec un cluster triple, 14 TB de données ont été produites.

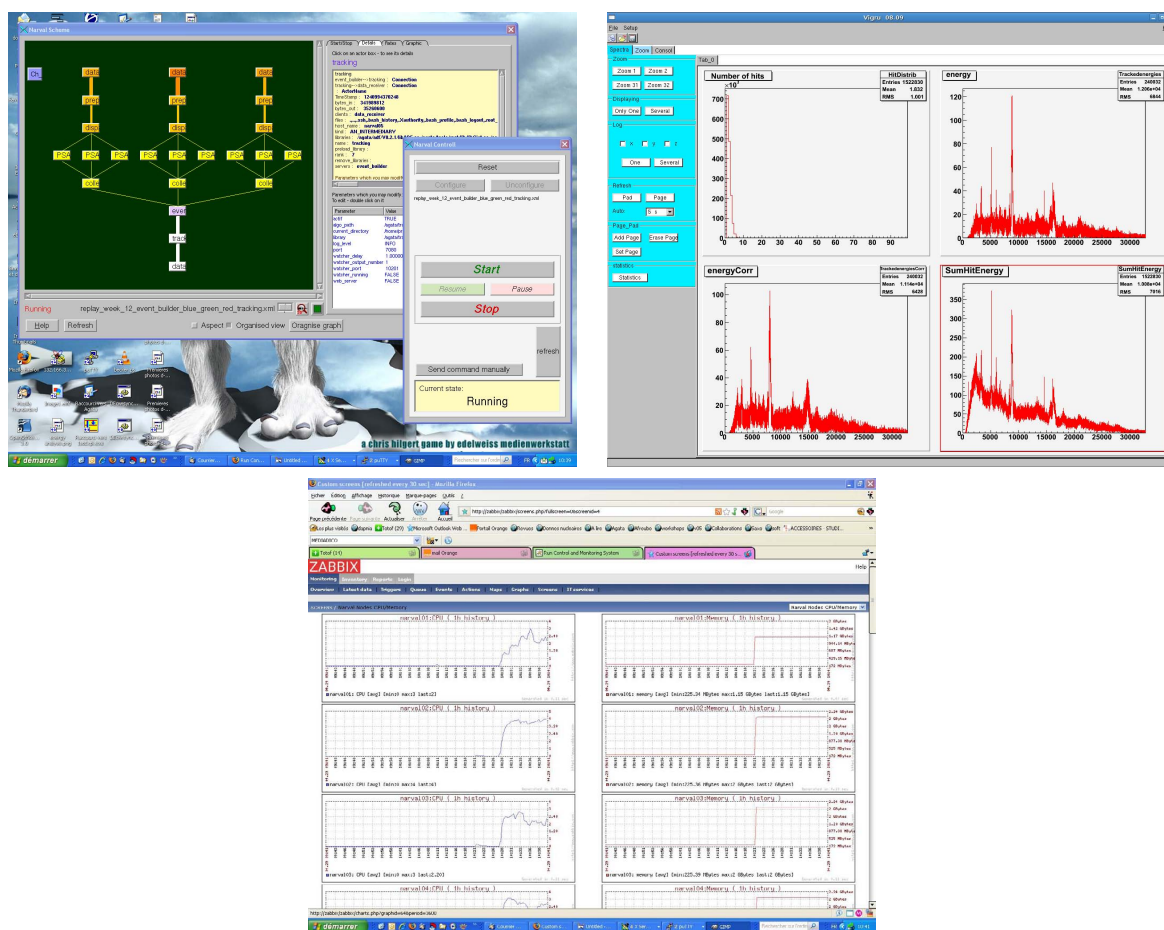


Fig. 2.13 – Gauche : logiciel de contrôle “cracow”. Droite Spectres “ViGRU”. Bas : logiciel de surveillance “zabbix”.

de l'IPNO et regroupe des personnels du CSNSM Orsay et de GANIL. La seconde équipe “Run Control and Graphical User Interface” développe l'aspect contrôle de l'expérience et regroupe du personnel de Legnaro et Cracovie sous la direction de Gaetano Maron. Le groupe a également en charge toute l'infrastructure associée : réseau, gestion des utilisateurs, sécurité, maintenance matérielle et logicielle, ainsi que le “Global Slow Control” du matériel.

Dans l'optique de l'exploitation, les opérations de déploiement, de maintenance, gestion des utilisateurs, règles d'utilisation ... ont dû être définies rigoureusement [aga08a], planifiées et documentées.

Un site web a été mis en place [agawd] avec un serveur wiki regroupant des documentations destinées aux utilisateurs. Des réunions fréquentes par visio-conférence ont été instaurées dès mon arrivée à la tête du groupe de travail. Fédérer les équipes a été une priorité.

La gestion du groupe implique de nombreux contacts avec la quasi totalité des groupes ou équipes de la collaboration : digitisation, pre-processing, global clock and trigger, PSA, infrastructure, electronics and DAQ integration of ancillaries, gamma-ray tracking, detector



Fig. 2.14 – Gauche : serveurs “pizza boxes”. Droite : serveur de disques.

database, data analysis. Egalement, des contacts avec d'autres collaborations telles EXOGAM ou FAIR/NUSTAR sont nécessaires afin d'assurer le couplage ou d'envisager des collaborations techniques.

La gestion financière, les relations avec l'Europe et la préparation des phases ultérieures (technique, financière, organisationnelle) m'incombent également.

Depuis mon implication dans le groupe de travail début 2007, peu de temps était disponible pour fournir la DAQ à la collaboration. Fédérer les équipes et les organiser a été ma priorité, laissant les aspects techniques sous la responsabilité des équipes. Après un peu moins de deux ans de travail acharné de la part de tous, la DAQ a été déployée avec succès à Legnaro, et est depuis en constante évolution.

2.1.3.5 L'analyse de données

De part mon travail sur la DAQ, j'ai eu de nombreux contacts avec le groupe de travail analyse de données et me suis efforcé d'y contribuer.

Les données produites par AGATA sont stockées sur disque local. J'ai plaidé en faveur du stockage sur grille de calcul et le transfert vers le “Tier 1” de Bologne a été mis en place.

Dimensionner le système de stockage a été nécessaire. J'ai contribué aux estimations : apport d'informations sur le format de données, contribution de certains détecteurs additionnels [nyb07a].

Dans un souci de centraliser les informations sur le matériel AGATA, une base de données unique basée sur Oracle et implémentée au centre de calcul de l'IN2P3 de Lyon est développée. J'ai contribué à la définition des éléments devant être stockés et à l'organisation de la base de données.

En marge du travail lié à la DAQ, j'ai contribué au package d'analyse “gammaware” développé par la collaboration [agaa]. Ce travail a été réalisé en collaboration avec Olivier

Stézowski, team leader de l'équipe "Data Analysis".

Je reviendrai sur l'analyse de données au paragraphe 2.4, où je présenterai les outils développées pour exploiter les données recueillies lors d'expériences.

2.1.3.6 AGATA Management Board

L'AMB est l'instance technique d'AGATA à laquelle participent tous les responsables de groupe de travail. J'y participe donc depuis début 2007. Sous la direction du "project manager" (John Simpson, Daresbury), l'AMB discute les choix techniques, rend compte des avancées des groupes de travail et équipes, planifie les actions, prépare le budget et organise les semaines AGATA qui ont lieu une ou deux fois par an. L'AMB se doit également de préparer les phases futures du projet. L'AMB assiste l'ASC (Agata Steering Commite) dans les choix et rend compte tant du point de vue technique que financier. Il s'agit d'un travail considérable de part la charge et les responsabilités inhérentes.

2.1.3.7 Epilogue provisoire

Mon implication s'est progressivement accrue depuis le lancement du projet. Au départ observateur attentif ou contributeur aux idées de physique, j'ai participé à différents groupes de travail, dirigé l'équipe électronique et acquisition des détecteurs additionnels, dirigé le groupe de travail DAQ et été membre de l'AMB. Une chaîne complète constituée d'un cluster triple a été testée avec succès en Mars 2009. Il s'agit maintenant de faire évoluer le système vers le démonstrateur complet, et au-delà et vers un système stable et convivial. Le chapitre AGATA n'est donc pas clos.

2.2 La fission et les cellules solaires : SAPHIR

La collaboration SAPHIR (Saclay Aquitaine Photovoltaic cells for Isomer Research) rassemble le CENBG Bordeaux et le CEA Saclay avec pour objectif la détection des fragments de fission à l'aide de cellules solaires.

L'idée d'utiliser de tels détecteurs pour les fragments de fission a émergé au début des années 90. Contrairement aux détecteurs Si habituels, les cellules solaires présentent une forte résistance aux radiations et sont d'une utilisation aisée. Il n'est pas nécessaire de les polariser ni de les refroidir, il est possible de les découper et la mécanique associée peut être sommaire. Les cellules solaires présentent un rapport qualité prix déconcertant de quelques euros par cm^2 . Les performances sont suffisantes pour les applications envisagées : résolution en énergie de $\sim 2\%$ et résolution en temps de moins de 10 ns. Une photographie de cellules solaires est présentée figure 2.15. Pour plus de détails, on pourra consulter [gau98a, hou00a, pet02a, the98a].

Après quelques expériences réalisées auprès du tandem de Saclay, la collaboration élargie au CEA DAM/SPN [sap96a] s'est dans un premier temps focalisée sur la spectroscopie des fragments de fission en coïncidence avec les multidétecteurs gamma EUROGAM puis

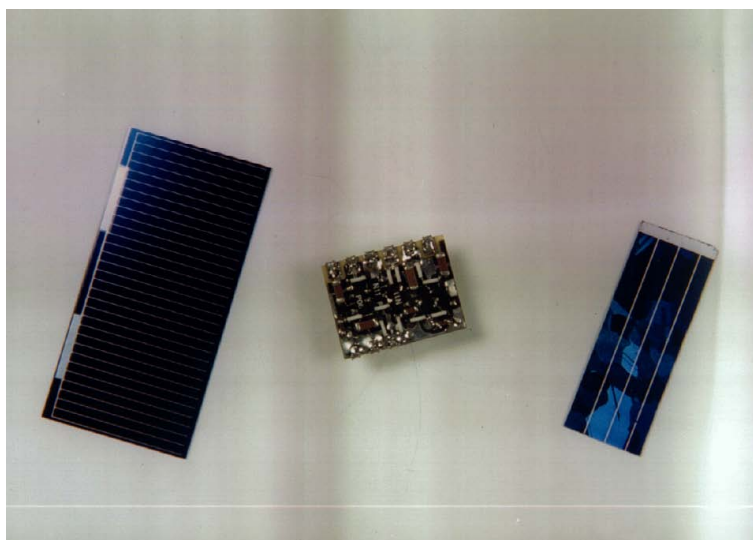


Fig. 2.15 – De gauche à droite : cellule solaire monocristalline ($40 \times 20 \text{ mm}^2$), préamplificateur SAPHIR ; cellule polycristalline ($25 \times 12 \text{ mm}^2$).

EUROBALL. Par la suite, les cellules solaires ont été utilisées pour mesurer des sections efficaces de fission d'actinides : études dans le cadre de l'aval du cycle.

Les développements techniques auxquels j'ai contribué sont décrits dans ce paragraphe : dispositifs expérimentaux, électronique et acquisition. Quelques résultats obtenus lors des expériences seront présentés au paragraphe 3.2.

2.2.1 Configurations de SAPHIR

La première expérience à laquelle j'ai participé a été réalisée en novembre 1995 à Strasbourg. Il s'agissait d'étudier les isomères de fragments de fission produits par une source de ^{252}Cf . Le dispositif très simple constitué de deux cellules de part et d'autre de la source (voir figure 2.16-1) permettait de signer la fission spontanée, de donner une référence en temps et d'estimer la masse des fragments. Les rayonnements retardés émis par les fragments implantés dans les cellules étaient détectés à l'aide d'EUROGAM II. Ce type d'expérience a l'avantage considérable d'être effectué sans faisceau et donc de pouvoir bénéficier d'une longue période de prise de données. Cette expérience a permis d'étudier les états isomériques de 59 noyaux, dont 12 pour lesquels l'observation était faite pour la première fois [gau98a, gau97a, gau97b].

Afin d'atteindre des isotopes complémentaires, nous avons poursuivi ces études en octobre 1996, toujours avec EUROGAM II, à l'aide de la réaction de fission induite $p + ^{232}\text{Th}$. Le dispositif était cette fois-ci constitué de 10 cellules solaires : voir figure 2.16-2. La granularité d'un des plans de détection devait permettre de réaliser la correction Doppler pour les rayonnements gamma émis en vol par un des deux fragments.

Le même principe a été repris en octobre 1997 avec un ensemble de 48 cellules agencées en 4 anneaux : voir figure 2.16-3. La réaction de fusion-fission $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ était utilisée et les

rayonnements gamma détectés à l'aide de EUROBALL III installé à Legnaro. Le dispositif SAPHIR avait été préalablement testé au tandem d'Orsay en Juillet 1997. Nous avons pu identifier plus de 10 nouveaux états isomériques [hou00a, hou99a, hou98a, luc02a, por05a, ven05a, ven06a, ven07a].

En décembre 1998, nous avons réalisé au tandem d'Orsay une expérience pour étudier la fission de ^{182}Pt par deux réactions : $^{48}\text{Ti} + ^{134}\text{Ba}$ et $^{32}\text{Si} + ^{150}\text{Sm}$. Le dispositif était constitué de 2 plans de 8 cellules chacun et un détecteur Ge étaient utilisés : voir figure 2.16-4. Cette expérience était initiée par M.-G. Porquet (CSNSM Orsay).

Gavin Smith (Manchester) a sollicité la collaboration SAPHIR pour construire un "plunger" actif permettant de mesurer les temps de vie de fragments de fission produits par une source de ^{252}Cf . Le principe [the98a, smi02a] reprend celui du "plunger" conventionnel : les fragments de fission traversent un dégradeur avant d'être détectés dans un mur de 48 cellules : voir figure 2.16-5. Les rayonnements gamma étaient mesurés grâce à EUROBALL IV installé à Strasbourg. Les mesures étant faites hors faisceau, nous avons pu réaliser 4 expériences en août 1999, avril et décembre 2000 et 2002 [smi02a, bis05a].

La collaboration est revenue à un de ses objectifs initiaux en réalisant au tandem d'Orsay en avril 2001 une expérience visant à observer un isomère de fission dans ^{236}U par fusion incomplète $^{232}\text{Th}(^7\text{Li}, p2n)^{236}\text{U}$. Les fragments de fission étaient détectés grâce à un mur de cellules placé après la cible (voir figure 2.16-6). Les protons étaient détectés grâce à un hémisphère composé de Csl DIAMANT [sch97a]. Deux détecteurs Ge complétaient le dispositif.

Je termine ce panorama par des expériences réalisées dans le cadre de l'aval du cycle consistant à déterminer les sections efficaces de fission et de capture radiative d'actinides induites par neutrons. Les cibles étant rarement disponibles pour de telles études, une parade consiste à utiliser des réactions de transfert pour se substituer à la réaction induite par neutrons. A l'initiative du CENBG Bordeaux, nous avons étudié la réaction $^{232}\text{Th}(^3\text{He}, pf)^{234}\text{Pa}$ simulant $^{233}\text{Pa}(n, f)$ [pet01a, pet02a, pet04a, aic06a]. Le dispositif utilisé au tandem d'Orsay en mai et novembre 2000 était constitué de 2 télescopes Si et 15 cellules solaires : voir figure 2.16-7. La même réaction a été utilisée en janvier et avril 2003 pour simuler la réaction de capture radiative $^{233}\text{Pa}(n, \gamma)$ [boy04a, jur05a, boy06a, aic06a]. Enfin, la même technique a été utilisée en juin 2004 avec une cible de ^{243}Am pour étudier les réactions $^{242}\text{Cm}(n, f)$, $^{243}\text{Cm}(n, f)$ et $^{241}\text{Am}(n, f)$ substituées par les réactions $^{243}\text{Am}(^3\text{He}, df)^{242}\text{Cm}$, $^{243}\text{Am}(^3\text{He}, tf)^{243}\text{Cm}$ et $^{243}\text{Am}(^3\text{He}, \alpha f)^{242}\text{Am}$ [jur05a, aic06a, jur07a, jur07c, jur08a].

2.2.2 Electronique et acquisition

Un des objectifs de la collaboration était de coupler quelques dizaines de cellules solaires aux multidétecteurs EUROGAM puis EUROBALL [the97b, the03a]. Il a donc fallu construire l'électronique frontale correspondante (préamplificateurs) et doter SAPHIR d'électronique et acquisition compatibles avec ces multidétecteurs gamma. Dans le souci de faciliter le couplage avec EUROGAM ou EUROBALL, notre choix s'est porté sur le

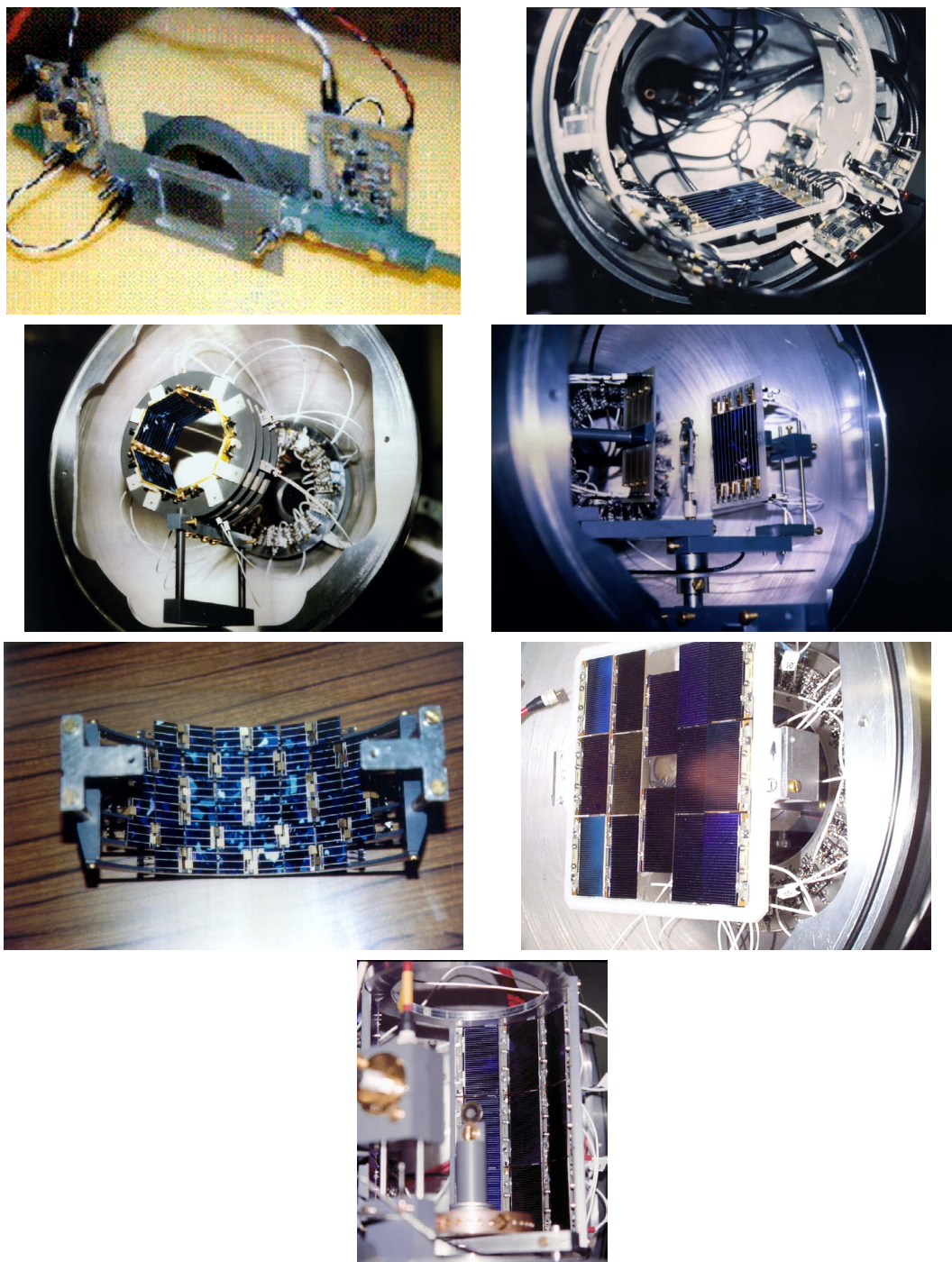


Fig. 2.16 – Configurations de SAPHIR. De gauche à droite puis de haut en bas : 1) deux cellules solaires couplées à EUROGAM II - fission spontanée de ^{252}Cf (novembre 1995). 2) Dix cellules solaires couplées à EUROGAM II - fission induite $p + ^{232}\text{Th}$ (octobre 1996). 3) 48 cellules solaires couplées à EUROBALL III - fusion-fission $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ (octobre 1997). 4) 16 cellules solaires - fission de ^{182}Pt (décembre 1998). 5) 48 cellules utilisées pour le "plunger" actif EUROBALL IV (avril 2000). 6) 14 cellules solaires - isomère de fission ^{236}U (avril 2001). 7) 15 cellules solaires et 2 télescopes - fission de ^{234}Pa (novembre 2000).

standard VXI : voir figure 2.17. Ce choix ayant des conséquences lourdes en termes de coût et de main d'œuvre, nous avons voulu que ces cartes ne soient pas uniquement dédiées à SAPHIR, mais les plus versatiles possibles pour traiter les signaux d'autres détecteurs : Ge, Si, ... [the97a].

Deux environnements d'acquisition ont été développés. Le premier est destiné aux tests en laboratoire, essentiellement pour les ingénieurs développant l'électronique. Une interface graphique spécifique a été développée, permettant entre autres de réaliser des tests fonctionnels, de linéarité, de niveau de bruit ... Le second environnement est destiné aux expériences et est entièrement compatible avec le mode de lecture EUROGAM - EUROBALL : interface et "slow control" basés sur MIDAS [mid], logiciel d'acquisition inspiré de celui développé pour la collaboration Icare. Nous avons développé un logiciel d'analyse en ligne basé sur Euroxx.y (voir paragraphe 2.4). L'ensemble constitue un système d'acquisition autonome (voir figure 2.17) qui a été utilisé depuis 1998 à de nombreuses reprises au tandem d'Orsay, y compris avec les cartes VXI de Diamant [gal04a]. Les cartes VXI SAPHIR ont été utilisées à plusieurs reprises avec EUROBALL IV, avec EXOGAM lors de la phase préliminaire (signaux Ge) et pour traiter un détecteur Si annulaire.

L'électronique et acquisition SAPHIR sont toujours opérationnelles et sont actuellement basées au CENBG Bordeaux.

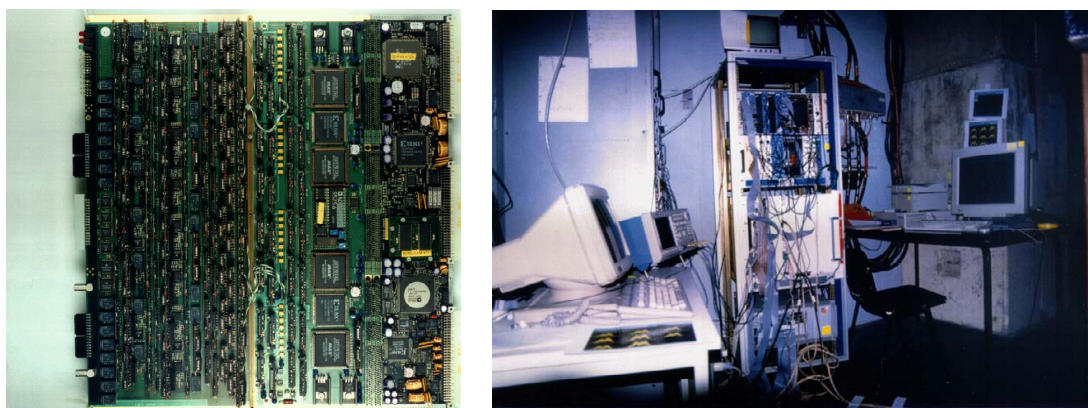


Fig. 2.17 – *Electronique et acquisition SAPHIR. Gauche : carte VXI. Droite : électronique et acquisition SAPHIR installées au tandem d'Orsay.*

2.2.3 Essaimage

Nous avons précédemment mentionné l'usage de cellules solaires par la collaboration SAPHIR dans divers contextes et avec de nombreux collaborateurs. Le laboratoire DAM/SPN a poursuivi ses études à Los Alamos avec le dispositif GEANIE pour des études auprès de faisceaux de neutrons. L'attrait des cellules solaires a nourri de nombreuses sollicitations pour mettre en œuvre des détecteurs. Le laboratoire de Cap Town en Afrique du Sud (iThemba Labs) s'est doté de préamplificateurs SAPHIR pour construire un ensemble de 32 cellules solaires utilisé avec le spectromètre gamma AFRODITE. Nous

avons eu des contacts avec le laboratoire TUM de Munich pour l'utilisation de cellules solaires. Avec notre aide, l'université de Bonn a utilisé des cellules solaires.

2.2.4 Bilan

Depuis sa constitution, la collaboration SAPHIR a effectué de nombreuses expériences soit avec les cellules solaires, soit avec son électronique. J'ai recensé une trentaine de publications liées à des expériences utilisant les détecteurs SAPHIR ou son électronique [gau97a, gau98a, hou98a, the98a, hou99a, hou00a, luc02a, smi02a, pet02a, bou03a, kor04a, pet04a, por05a, ven05a, gor05a, gor05b, cle05a, kor05a, bis05a, jur05a, ven06a, aic06a, boy06a, ven07a, jur07a, jur07c, cle07a, gor07a, jur08a] et 6 thèses directement liées à SAPHIR [gau97b, roa99a, hou00a, wal01a, pet01a, boy04a]. Après la spectroscopie des fragments de fission, les études se sont tournées vers la mesure de sections efficaces de fission. Cette valorisation intéressante et originale de SAPHIR s'éloigne cependant de mes thèmes de recherche et n'est plus une priorité. Le CENBG étant devenu l'utilisateur exclusif de SAPHIR et de son électronique, j'ai transféré à mes collaborateurs Bordelais l'électronique, l'acquisition est les compétences nécessaires à son fonctionnement.

2.3 Spectromètres et détection plan focal: BEST et MUSETT

Les développements instrumentaux réalisés auprès de spectromètres sont résumés dans ce paragraphe: dispositifs plan focal BEST installé auprès de LISE et MUSETT destiné à équiper VAMOS.

2.3.1 BEST, spectroscopie retardée avec LISE

Alors qu'un programme expérimental sur la synthèse d'éléments super-lourds était initié à GANIL auprès du spectromètre LISE [sto07a], nous avons proposé la spectroscopie après décroissance du noyau très lourd ^{255}Lr . Le dispositif développé par la collaboration FULIS (FUSion at LISe) n'étant pas optimisé pour les études spectroscopiques, nous avons développé BEST (Box for Electron Spectroscopy after Tagging). L'objectif était de combiner la détection des ions lourds, des particules alpha, des électrons et des rayonnements gamma au plan focal de LISE. Cette combinaison de détecteurs est maintenant très largement répandue mais était, lors de la conception de BEST en 2003, encore peu courante.

J'ai conçu BEST avec le personnel technique du GANIL lors d'un séjour sabbatique. La plupart des tests en laboratoire, l'installation du dispositif à LISE et l'exploitation des données ont été faits avec Audrey Chatillon dans le cadre de ses travaux de thèse [cha05a].

On trouvera une description de BEST dans [cha05a, cha05b, cha06a, the08a]. Je me contente ici de résumer ses principales caractéristiques.

- Les ions lourds implantés et les particules alpha sont détectés par un Si segmenté

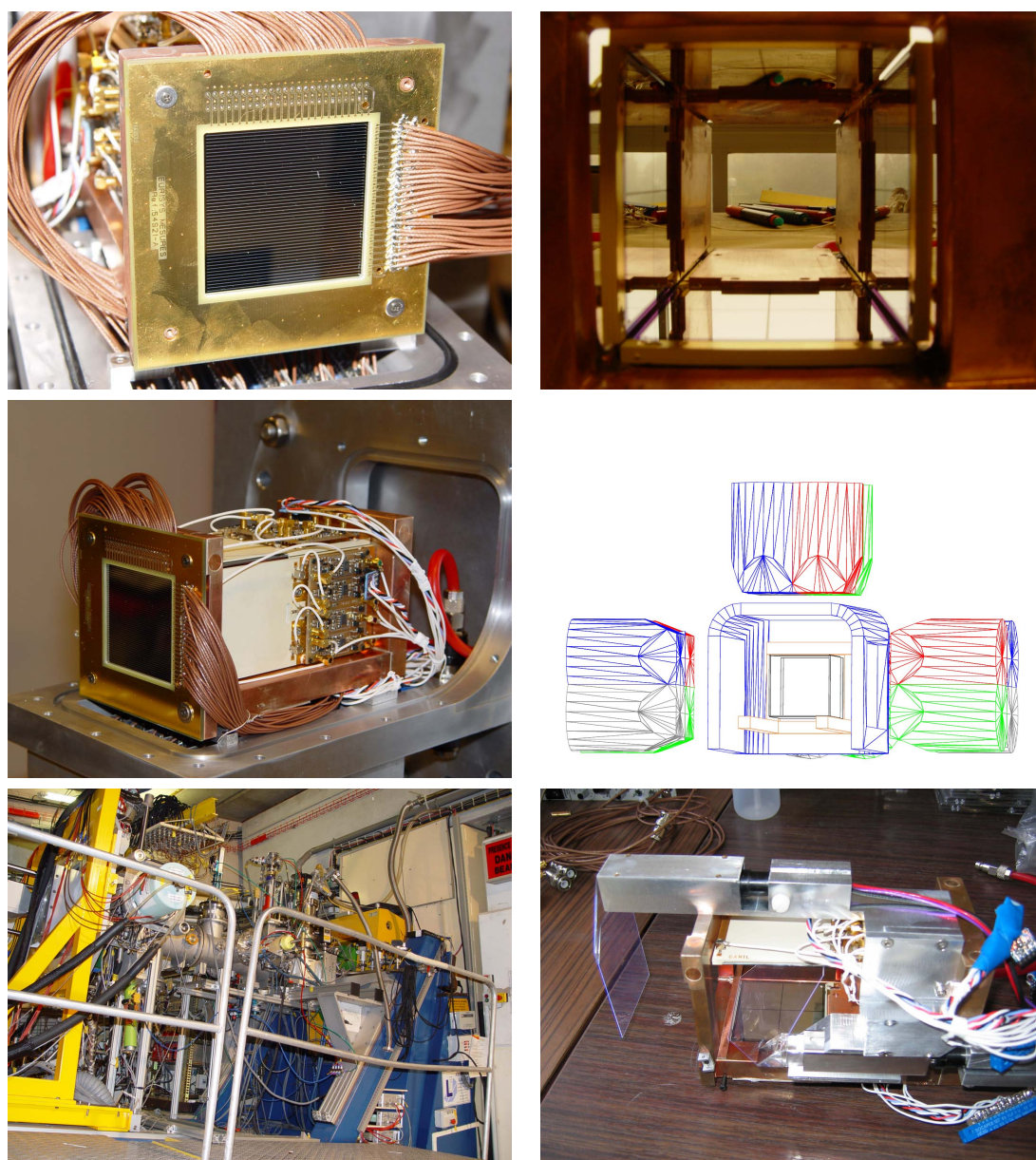


Fig. 2.18 – Vues de BEST. De gauche à droite puis de haut en bas : 1) Détecteur d'implantation. 2) Tunnel. 3) Ensemble de détecteurs Si. 4) Géométrie modélisée grâce à Geant4 ; certaines parties sont cachées pour une meilleure visibilité. 5) Ensemble installé sur la ligne LISE. 6) Tunnel combiné à des scintillateurs plastiques.

sur les deux faces (48+48 pistes) de $5 \times 5 \text{ cm}^2$: voir figure 2.18-1.

- Un tunnel placé en amont permet de détecter les électrons et les particules alpha s'échappant du Si d'implantation. Le tunnel est constitué de 4 détecteurs Si de 1 mm d'épaisseur et de taille $5 \times 5 \text{ cm}^2$: voir figure 2.18-2. Les détecteurs sont montés sur supports céramique sur lesquels sont installés 4 préamplificateurs.
- Les détecteurs Si sont montés sur un support en cuivre à l'intérieur duquel circule un

liquide à -15°C : voir figure 2.18-3. La chambre accueillant BEST a été spécialement étudiée pour minimiser l'encombrement et minimiser l'absorption des rayonnements gamma.

- Afin de réaliser des calibrations périodiques pendant l'expérience, un mécanisme basé sur un zoom d'appareil photo permet d'insérer une source alpha et électron à l'entrée du tunnel.

La résolution du détecteur d'implantation est d'environ 40 keV pour les particules alpha. La résolution du tunnel est d'environ 8 keV pour les électrons K365 d'une source de ^{133}Ba et inférieure à 20keV pour les particules alpha. En condition expérimentale, l'efficacité du tunnel dépend de la profondeur d'implantation, de l'énergie des électrons et dans une moindre mesure de la distribution des noyaux émetteurs à la surface du Si d'implantation. L'efficacité de détection simulée à l'aide du logiciel Geant4 [ago03a] (voir figure 2.18-4) est d'environ 8% pour des électrons de 50 à 500 keV [the08a].

Après les tests en laboratoire, nous avons installé BEST sur la ligne LISE : voir figure 2.18-5. Quatre détecteurs Ge d'EXOGRAM ont été adjoints. L'efficacité simulée avec Geant4 présente un maximum de 23 % à 80 keV et décroît progressivement à 10 % pour des rayonnements de 500 keV [the08a]. Les détecteurs Si sont précédés de deux "galottes" (feuille émissive et galette à micro-canaux) afin de mesurer le temps de vol. De plus amples détails pourront être trouvés dans [cha05a]. Notons également que l'optique du spectromètre LISE a été simulée et optimisée à l'aide des codes zgoubi [meo93a, zgo] et COSY Infinity [mak99a].

Les performances de BEST lors de l'expérience ont été conformes aux spécifications et l'expérience a donné les résultats escomptés [cha05a, cha05b, cha06a, the07a, the08a]. Le détecteur BEST a été de nouveau utilisé en Novembre 2008 lors d'une expérience sur la synthèse de ^{260}Rf par réaction symétrique $^{136}\text{Xe} + ^{124}\text{Sn}$ [dro, ave09a].

Une partie du dispositif BEST a également été réutilisée lors d'une expérience sur l'excitation coulombienne de ^{68}Se . Les ions étaient implantés dans un scintillateur plastique d'où étaient émis les électrons de conversion détectés par deux Si du tunnel BEST : voir figure 2.18-6. Plus de détails sur cette technique originale sont données dans [cle08a].

Notons que le dispositif BEST a partiellement inspiré la construction de GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the ELeCtromagnetic Analyser VASSI-LISSA) [hau06a] installé à Dubna (Russie). En particulier, les préamplificateurs du tunnel de BEST ont été utilisés.

Pour un coût relativement faible, BEST a permis de réaliser avec succès la spectroscopie après décroissance de ^{255}Lr . Ce dispositif peut être utilisé pour d'autres expériences de décroissance et une configuration allégée a été utilisée pour étudier la décroissance isomérique de faisceaux radioactifs. Outre les bonnes performances et résultats obtenus, la construction de BEST nous a permis d'acquérir les compétences sur les dispositifs de détection au plan focal de spectromètres. Dans la continuité de BEST, nous avons conçu et construit MUSETT décrit au paragraphe suivant.

2.3.2 MUSETT et la spectroscopie des éléments très lourds avec VAMOS

2.3.2.1 Spectroscopie des éléments très lourds avec VAMOS et genèse de MUSETT

De part les performances d'EXOGAM et de VAMOS, le GANIL dispose de deux outils potentiellement uniques pour réaliser la spectroscopie des éléments très lourds et super-lourds. EXOGAM a en effet une très grande efficacité pour les basses multiplicités ; la grande ouverture angulaire de VAMOS lui confère une grande transmission et son filtre de Wien peut être utilisé pour s'affranchir du faisceau. Les performances sont uniques pour l'étude de réactions très asymétriques. Ces opportunités ont été discutées pour la première fois en 2003 dans le cadre du projet européen EXOTAG (Studies of exotic nuclei using tagging spectrometers).

Le premier test réalisé avec la réaction $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O},4n)^{222}\text{Th}$ a été réalisé en novembre 2004. L'expérience a permis d'isoler la réaction de fusion-évaporation et de mesurer les particules alpha de décroissance. Les rayonnements gamma de ^{222}Th ont pu être mesurés avec EXOGAM et ont été correctement extraits de l'important bruit de fond induit par les réactions parasites. Bien que la transmission n'ait pas pu être mesurée précisément, qu'une modeste réjection de faisceau ($\sim 10^7$) ait été obtenue, et surtout que le dispositif de détection au plan focal de VAMOS n'était pas optimal, des résultats très prometteurs ont été obtenus : voir par exemple figure 2.19. Ces résultats nous ont conduit à proposer une expérience sur la spectroscopie prompt de ^{255}No [the05a] et ont motivés la construction du dispositif plan focal MUSETT.

Nous avons ensuite réalisé un second test avec des conditions expérimentales plus contraignantes : réactions avec un faisceau de ^{22}Ne et des cibles de ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{238}U . Suivant une suggestion de Maurycy Rejmund, nous avons également testé un mode du filtre de Wien original. Habituellement, un tel filtre est réglé pour transmettre les résidus à 0° et pour dévier le faisceau. Ici, nous avons réglé le filtre de Wien pour transmettre le faisceau à 0° et pour dévier les résidus. Ce mode permet un contrôle du faisceau, avantage considérable dans la perspective d'expériences avec des faisceaux radioactifs. Des simulations optiques réalisées avec le code Zgoubi [meo93a, zgo] permettent de prédire une transmission de l'ordre de 50 %, identique pour les deux différents réglages du filtre. Ce second test réalisé en juillet 2007 [sul08a] a souffert de nombreux problèmes techniques que je ne détaillerai pas ici. Nous avons cependant pu mesurer une transmission de 40 %, ce qui est considérable comparé à d'autres spectromètres couplés à un multidétecteur gamma.

Parallèlement, la spectroscopie des éléments super-lourds a été détaillée dans une lettre d'intention Spiral2 [spi06a]. Entre autres développements, la collaboration a proposé d'étudier VAMOS en mode "gas-filled". Christelle Schmitt (IPN Lyon) supervise ces développements [sch08a].

De part ses performances, VAMOS offre un potentiel important pour la spectroscopie des éléments très lourds. Des études préliminaires très prometteuses ont confirmé les simu-

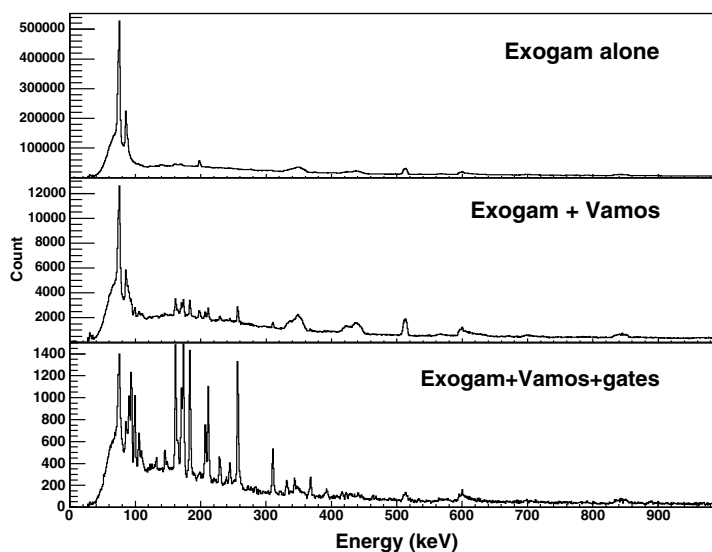


Fig. 2.19 – Spectres gamma obtenus avec EXOGAM et la réaction $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O},4n)^{222}\text{Th}$. De haut en bas : i) EXOGAM sans conditions externes ii) EXOGAM déclenché par VAMOS iii) EXOGAM déclenché par VAMOS et avec des conditions logicielles. Seules les transitions de ^{222}Th subsistent.

lations. Maillon important d'un dispositif expérimental, un système de détection performant doit être développé. C'est l'objectif de MUSETT que nous décrivons maintenant.

2.3.2.2 MUSETT : motivations et spécifications

Suite au test très prometteur effectué en 2004 avec VAMOS et EXOGAM, la construction d'un dispositif performant et dédié s'est imposée. Le nom MUSETT fait référence à l'objectif principal : MUR de Silicium pour l'Etude des Transfermiens par Tagging. Bien que la spectroscopie d'éléments très lourds par la technique d'étiquetage du recul par sa décroissance soit notre objectif phare, nous avons pensé MUSETT dans un cadre plus large : par exemple la spectroscopie dans la région des noyaux de Pb très déficients en neutrons, la spectroscopie d'actinides, ... [mus07b].

La figure 2.20 schématise la détection de MUSETT. En réaction très asymétrique, les produits de fusion-évaporation ont une énergie très faible, inférieure à 10 MeV et il est indispensable d'utiliser un détecteur Si sans fenêtre. Le détecteur Si est segmenté afin de corrélérer en position l'implantation du recul à sa décroissance alpha. Lorsque l'énergie des ions incidents le permet, on peut adjoindre une chambre d'ionisation pour une mesure $\Delta E - E$. On peut de plus mesurer la trajectoire des ions grâce à une chambre à dérive. Le seuil de ce détecteur pouvant être très bas, la détection d'une partie de la radioactivité s'échappant du Si permettra d'améliorer la qualité des spectres.

Dans un souci de cohérence avec la détection VAMOS existante, le mur de Si et le détecteur gazeux adoptent le standard mécanique en tiroirs d'HARPEE (détecteur à HAute Résolution pour la Perte d'Énergie et l'Énergie). Outre les modules HARPEE existants

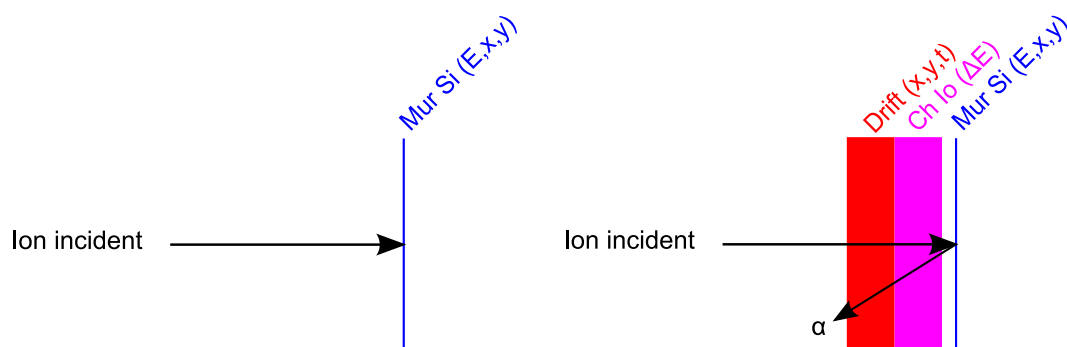


Fig. 2.20 – Configurations de MUSETT. Gauche: Mur de Si seul pour la détection d'ions lourds et lents. Droite: Mur de Si et détecteur hybride chambre à dérive - chambre d'ionisation pour la mesure de perte d'énergie, de trajectoires et de radioactivité s'échappant.

(mur de Si classique et chambre d'ionisation), on pourra disposer des modules MUSETT qui pourront être couplés selon les besoins de l'expérience en constituant un ensemble versatile.

Les ingrédients de MUSETT ne présentent pas d'originalité particulière : détecteurs Si sans fenêtre ou segmentés, chambre à dérive ou chambre d'ionisation existent. C'est par contre la combinaison de tous ces ingrédients, à laquelle on doit ajouter l'électronique et l'acquisition, qui est originale et constitue un challenge technologique. En particulier, la triple coexistence de chambre à dérive, chambre d'ionisation et détecteur Si est nouvelle et demande une étude et une attention particulière. Le nombre élevé de voies électroniques et également une contrainte forte.

Comme je viens de le préciser, des ingrédients de MUSETT existent. Nous nous sommes ainsi inspirés de détecteurs existants et travaillé en synergie avec d'autres collaborations et bénéficié de leurs innovations : MUST II pour les détecteurs Si, HARPEE pour le couplage de détecteur Si et gazeux et pour l'expertise en détection auprès de VAMOS.

2.3.2.3 Organisation du projet

Le projet MUSETT, collaboration entre le CEA Saclay DSM/IRFU et le GANIL, bénéficie d'un financement de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ce mode de financement n'est pas sans conséquences sur l'organisation et la gestion du projet : dossier conséquent, gestion financière propre, rapports semestriels, nécessité de signer un accord de consortium [mus07a], ..., auxquels s'ajoutent la procédure de conduite de projet et d'évaluation propre à l'IRFU.

J'assume la coordination du projet au niveau de l'ANR et en ai la responsabilité scientifique au niveau de l'IRFU. Le responsable scientifique forme au niveau de l'IRFU un tandem avec le chef de projet : Fabien Jeanneau (SEDI). Barbara Sulignano, post-doctorante recrutée grâce au financement de l'ANR (avant d'obtenir un poste permanent dans l'équipe) assure une part notable des développements et tests. Maurycy Rejmund est

correspondant (au sens de l'ANR) pour le GANIL et l'interlocuteur privilégié. MUSETT s'inscrit pleinement dans le cadre du JRA INTAG (FP6) [int08a].

2.3.2.4 Description technique

Afin de couvrir le plan focal de VAMOS, le mur est constitué de 4 détecteurs de 10×10 cm² segmentés chacun en 128 pistes sur chaque face. Afin de permettre la détection d'ions lourds et lents, seule l'épaisseur d'implantation de bore ($0.25 \mu\text{m}$) constitue la fenêtre d'entrée côté jonction (ce type de détecteur est généralement couvert par une fenêtre d'aluminium). Hormis cette caractéristique, ces détecteurs sont identiques à ceux de MUST II et proviennent du même fournisseur : voir figure 2.21-1.

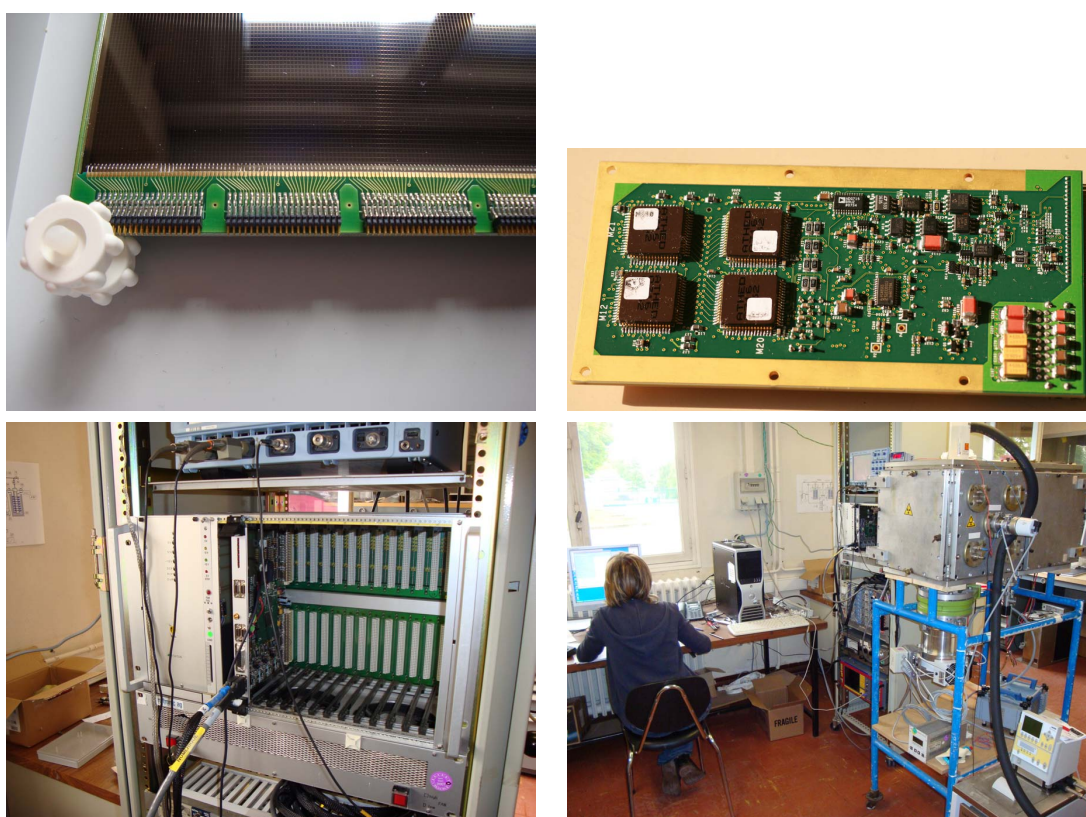


Fig. 2.21 – Vues de MUSETT. De gauche à droite puis de haut en bas : 1) Détecteur Si ; 2) carte COFEE ; 3) carte VME CVM ; 4) vue du banc de test ;

Etant donné la forte similitude avec les détecteurs MUST II, une électronique similaire est utilisée. Pour un tel nombre de voies (1024), l'utilisation d'électronique frontale ASIC s'impose. Nous utilisons les ASIC 16 voies ATHED [bar05a] conçus par IRFU/SEDI et qui sont une version légèrement modifiée des ASIC MATE3 [bar04a]. Les ASICs sont installés sur des cartes filles COFEE (figure 2.21-2) développées par IPN Orsay et qui reprennent l'essentiel des fonctionnalités des cartes MUFEE [let04a].

L'électronique frontale peut être lue par les cartes VXI MUVI [muv03a] développées par le GANIL. Afin d'alléger le système, le SEDI a conçu de nouvelles cartes VME, appelées

CVM [dru06a] (figure 2.21-3), destinées aux tests.

Les alimentations hautes et basses tension sont délivrées par un châssis CAEN pilotable à distance. Le système de refroidissement pour les détecteurs Si et les cartes frontales est également pilotable à distance.

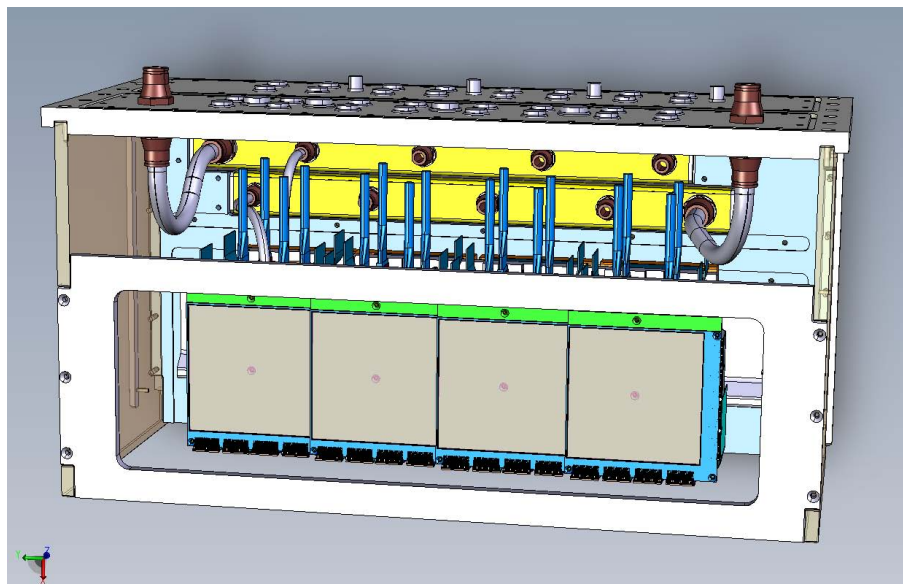


Fig. 2.22 – Mur de Si MUSETT.

Des outils d'analyse sont développés sous ROOT [bru07a, roo] afin de calibrer et traiter les données issues du mur.

Les caractéristiques du détecteur gazeux ont été déterminées grâce à des simulations Geant4 [ago03a] réalisées par Cédric Dossat, alors post-doctorant dans le groupe : détermination de la taille de la chambre à dérive et d'ionisation, pression de gaz, dynamique des chambres. Coupler les trois détecteurs chambre à dérive, chambre d'ionisation et Si implique la proximité de champs électriques qui ne doivent pas influencer et perturber la mesure. Des simulations électrostatiques ont été réalisées et nous avons bénéficié du retour d'expérience acquis par la collaboration HARPEE.

La compatibilité avec HARPEE a contraint la mécanique de MUSETT. L'intégration des détecteurs Si et de leur électronique est délicate vu le faible espace disponible, le nombre relativement élevé de câbles et la volonté d'avoir une surface de Si couvrant le plan focal maximale : voir figure 2.22.

L'ensemble MUSETT est entièrement testé et caractérisé au SEDI (figure 2.21-4) avant la mise en œuvre au GANIL.

2.3.2.5 Etat des lieux et continuation

A l'heure où je termine ce paragraphe (août 2009), le projet MUSETT est en cours d'achèvement : restent le délicat câblage de l'ensemble et l'intégration à GANIL. Nous avons déjà demandé et obtenu 4 jours de faisceau à GANIL afin de tester MUSETT en conditions réelles [sul08b]. Afin d'optimiser et rationaliser le temps de faisceau, nous

souhaitons coupler ce premier test MUsETT avec la première partie de l'expérience E519 sur la spectroscopie gamma prompte de ^{255}No .

A moyen terme, il semble pertinent de considérer le détecteur MUsETT comme une base pour la détection du futur séparateur spectromètre S3 dédié aux faisceaux stables hyper-intenses de Spiral2. Bien qu'aucun engagement n'ait été pris en ce sens, cette option est déjà considérée par la collaboration.

2.4 Techniques d'analyse

Dernier maillon de la chaîne expérimentale, les outils et techniques d'analyse revêtent une importance capitale afin d'exploiter au mieux les données en un minimum de temps. Depuis la thèse, mes travaux m'ont conduit à développer des logiciels ou à contribuer à d'autres. L'analyse peut être également le premier maillon de la chaîne expérimentale lorsqu'il s'agit de simulations de détecteurs.

Lors de l'exploitation des données EUROGAM, dès 1992, il a paru souhaitable de développer un logiciel d'analyse modulaire : Euroxx.y (xx.y étant le numéro de version). L'idée de ce logiciel était de séparer les tâches de lecture, pré-traitement, filtrage et gestion des histogrammes. Euroxx.y est conçu sous forme de modules (concrètement, ce sont des bibliothèques) s'échangeant des données, et utilisables dans divers contextes. Euroxx.y a continuellement évolué selon les besoins des utilisateurs. Plus de 30 formats de données brutes ont été implémentés, une interface avec root [bru07a, roo] a été développée (histogrammes et arbres), l'analyse en ligne des données de l'acquisition SAPHIR a été développée, le logiciel a été porté sur différentes plateformes, traite les formats "little" ou "big endian"... Plusieurs travaux de thèse ont été effectués avec Euroxx.y (parmi lesquels [the95a, gau97b, kad97a, kin00a, hou00a, hur02a, bou03c, cha05a, cle06a]).²

Concept probablement innovant lors de sa conception, Euroxx.y a été largement utilisé pendant plus d'une décennie mais est maintenant délaissé depuis la généralisation de root dans la communauté de physique nucléaire.

Le traitement séquentiel (tel que réalisé avec Euroxx.y) n'est pas optimum avec les données de multiplicité élevées issues de multidétecteurs gamma. Stocker un histogramme de dimension $M > 2$ n'est pas toujours réalisable; effectuer un traitement séquentiel de ces données est pénalisant en temps et ne permet pas d'ajustements rapides. Un logiciel de stockage et de filtrage appelé "database" a été développé dès le début des années 1990 à Strasbourg [fli92a]. J'ai contribué à ce logiciel, repris et enrichi par la suite par O. Stézowski [ste99a].

Analyser des données de haute multiplicité est un problème complexe qui, s'il n'est pas traité correctement, peut conduire à des artefacts, des distorsions ou pertes de statistique. J'ai contribué au développement d'une technique permettant de traiter correctement les événements de multiplicité élevée [bea95a]. La soustraction de fond

2. Je n'ai pas recensé le nombre de publications liées à Euroxx.y.

d'événements de multiplicité élevée est également un problème complexe qui, s'il n'est pas traité correctement, peut laisser subsister des pics factices. J'ai développé un traitement exact de ce problème [the95a]. Enfin, nous avons amélioré la technique de traitement d'événements de haute multiplicité en utilisant des fenêtres de coïncidence sphériques ou asymétriques [the99a].

Le traitement de détecteurs composites tels les "cluster" d'EUROBALL ou les détecteurs trèfle d'EXOGAM passe par la sommation des énergies de cristaux. Une étude de l'efficacité de la sommation en fonction de l'énergie des rayonnements, de la distribution spatiale des agrégats et du temps a été réalisée avec M. Houry dans le cadre de sa thèse [hou00a].

Au cours des analyses, j'ai été confronté à une diversité et évolution des formats d'histogrammes. Afin de faciliter la lecture ou écriture (par exemple dans Euroxx.y), j'ai été amené à développer une librairie interface et des programmes de conversion. Une partie de ces fonctionnalités a été implémentée dans le logiciel d'analyse d'AGATA "gammaware" [agaa] développé essentiellement par O. Stézowski, responsable de l'équipe "data analysis".

La conception de détecteurs, la modélisation de leur réponse ou la confrontation des données expérimentales à des prédictions nécessite d'effectuer des simulations. J'ai ainsi utilisé Geant3 [gea] puis Geant4 [ago03a]. Une étude importante a été réalisée pour simuler et comprendre la contribution d'effets atomiques dans les expériences de décroissance [cha05a, cha06a, the07a, the08a] : voir paragraphe 3.3.

Chapitre 3

Thèmes et expériences

3.1 Le noyau superdéformé

L'étude du noyau superdéformé par spectroscopie γ a connu une effervescence et son heure de gloire dans les années 90. Ce sujet a été moteur dans le développement de détecteurs, dans les développements théoriques et a généré une littérature très abondante. Je n'ai pas la prétention de faire ici une revue du sujet ni d'apporter un éclairage nouveau mais de résumer, à travers ma contribution (étude de ^{147}Gd [the96a], ^{149}Gd [fli93a, fli95a]) les points clefs de ces études. Le lecteur pourra consulter pour de plus amples détails les articles consacrés aux isomères de fission ou à la superdéformation : [bjo80a, thi02a, abe90a, nol88a, jan91a, naz89a, war01a, afa96a, mey92a, bak95b].

3.1.1 Abondance des noyaux superdéformés

Le premier noyau superdéformé a été observé en 1962 par le biais de fission isomérique dans ^{242}Am [pol62a, per62a]; la première identification formelle ayant été apportée par H.J. Specht en 1972 dans ^{240}Pu [spe72a]. Ce sujet florissant dans les années 70 avec les actinides, où ces états sont encore appelés isomères de fission (voir les revues de S. Bjørnholm et J.E. Lynn [bjo80a], P. Thierolf et D. Habs [thi02a]) a connu un nouvel essor en 1986 avec la découverte par P.J. Twin et collaborateurs d'une bande superdéformée discrète à haut moment angulaire dans ^{152}Dy [twi86a].

Une avalanche de résultats suivit cette découverte : première bande SD dans le noyau impair ^{149}Gd par B. Haas [haa88a], découverte dans la région de masse 190 par E.F. Moore (^{191}Hg [moo89a]), dans la région de masse 130 (^{132}Ce [nol85a, kir87a]), région de masse 80 (^{83}Sr [bak95a, laf95a]), région de masse 60 (^{62}Zn [sve97a]) ainsi que quelques cas isolés comme ^{36}Ar [sve00a] ou ^{40}Ca [ide01a].

A ce jour, près de 400 bandes superdéformées ou isomères de fission ont été découverts dans environ 150 noyaux : voir la figure 3.1. Parmi celles-ci, j'ai contribué à l'étude de 6 bandes SD de ^{149}Gd [fli95a] (nombre porté à 13 par O. Stézowski [ste97a, byr98a]) et des 6 bandes SD de ^{147}Gd [the96a].

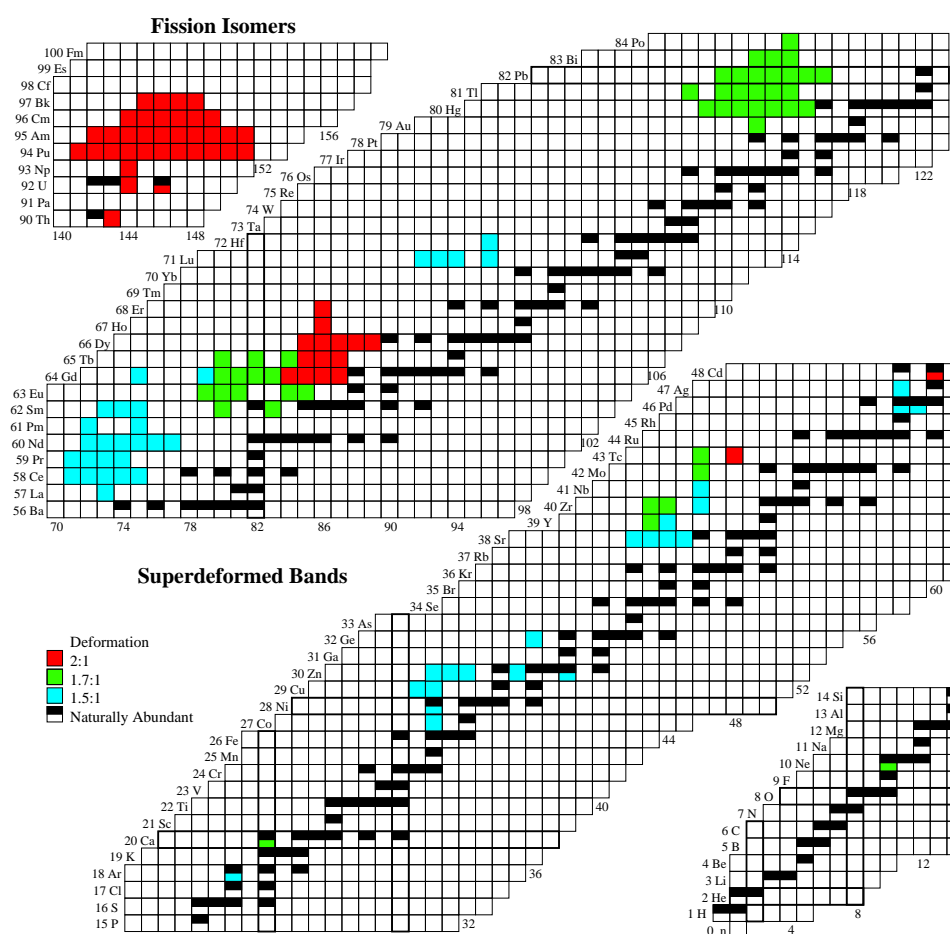


Fig. 3.1 – Carte des noyaux superdéformés et isomères de fission (tiré de [sin02a]).

3.1.2 Superdéformation et orbites super-intruses

La présence de noyaux superdéformés résulte d'une stabilité accrue pour de grandes élongations. Avec le modèle de l'oscillateur harmonique (voir figure 3.2), des dégénérescences élevées et des intervalles en énergie importants apparaissent pour un rapport d'axes, ou de fréquences d'oscillations $\omega_{\perp} : \omega_z$, valant exactement 2:1 (cette dégénérescence apparaît de façon générale pour des rapports entiers de fréquences d'oscillations selon les 3 axes principaux $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3$ [boh75a, str77a, rag78a]). Les orbites issues de couches principales élevées, dont l'énergie diminue avec la déformation, contribuent à cette dégénérescence. Si N est la couche sphérique active, les orbitales super-intruses de la couche $N + 2$ ont une pente élevée en fonction de la déformation, sont très fortement polarisantes et contribuent fortement au moment quadripolaire.

L'introduction du terme spin-orbite dans tout calcul de champ moyen modifie sensiblement le schéma de l'oscillateur harmonique : les intervalles apparaissent en réalité pour des rapports d'axes inférieurs à 2:1. Dès les années 70, des calculs de corrections de couches tournants ont permis de prédire la région de masse 150 comme étant propice aux

formes SD à haut moment angulaire [ben75a, nee75a, nee76a, and76a], le noyau ^{152}Dy étant un cas très favorable [rag80a]. Rappelons que du point de vue macroscopique, il s'agit de la région pour laquelle les noyaux supportent les moments angulaires les plus élevés. D'autre part, la rotation diminue la barrière de fission et facilite la stabilisation par des effets de couche.

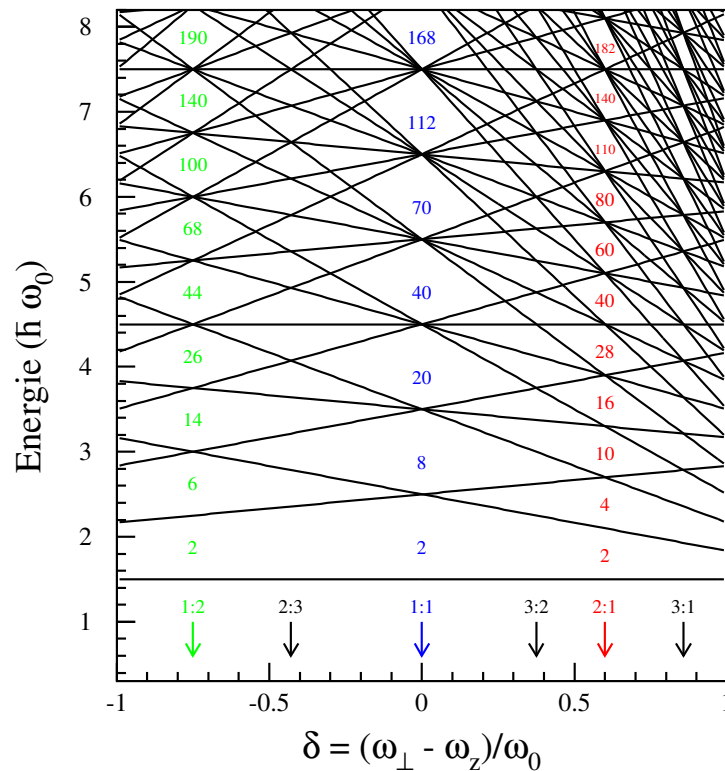


Fig. 3.2 – Spectre de particules individuelles calculé à l'aide du potentiel de l'oscillateur harmonique déformé.

Hormis une déformation d'environ 2:1, la présence simultanée d'orbitales super-intruses proton et neutron est le caractère définissant les noyaux superdéformés. De la même manière, il est admis que la présence simultanée d'orbitales hyper-intruses (couche majeure $N + 3$) est nécessaire pour générer des formes hyper-déformées (voir par exemple la discussion dans [dud04a]). La seule présence d'orbitale hyper-intruse neutron ou proton comme dans ^{152}Dy [dag94a] ou ^{108}Cd [cla01a, gor02a, gor03a] contribue à une forte élongation mais ne suffit pas à conférer une forme hyper-déformée.

Les orbitales intruses sont caractérisées par un moment angulaire j élevé et par une projection K faible. Elles sont ainsi fortement affectées par la force de Coriolis, découplées, et s'alignent très rapidement sous l'effet de la rotation. Elles pénètrent alors une région d'orbitales ayant une parité opposée, interagissent peu avec celles-ci et sont donc relativement pures. Ce comportement contraste avec les autres orbitales qui subissent peu l'effet de la rotation et suivent le mouvement du cœur de façon adiabatique : il s'agit de la limite de couplage fort d'autant plus valide que j est faible et la déformation élevée. De part leur comportement particulier, les orbites super-intruses gouvernent les propriétés

globales des noyaux SD : moment d'inertie mais aussi décroissance.

La position des orbitales intruses évolue fortement avec la déformation. Pour de fortes élongations, il y a possibilité de sonder des orbitales actives dans des noyaux beaucoup plus lourds ou à plusieurs MeV d'excitation pour de faibles élongations. De la même manière, la spectroscopie de noyaux très lourds déformés $Z \sim 102$ permet de sonder des orbitales actives pour les noyaux sphériques super-lourds : voir paragraphe 3.3.

3.1.3 Spécificités et propriétés globales des noyaux superdéformés

De part la présence de forts intervalles en énergie, le noyau SD est très stable et exhibe des effets de couches très marqués. Avec leur grande régularité, les bandes SD sont les meilleurs rotors quantiques connus dans la nature. Un signal expérimental fort et riche est délivré sur une large gamme de fréquence de rotation, ne laissant que peu d'ambiguïtés. On dispose donc d'un bon outil pour étudier le comportement des orbitales, ce qui n'est pas forcément le cas quand différents effets entrent en compétition et brouillent le signal expérimental.

Les noyaux SD peuplés par réactions de fusion-évaporation sont soumis à des vitesses de rotation extrêmes : environ 10^{20} Hz pour $I \sim 60\hbar$. On dispose ici d'un laboratoire idéal pour étudier l'effet de cette contrainte extrême sur la structure du noyau : comportement des corrélations d'appariement en fonction de la rotation, évolution de la forme du noyau avec la rotation.

La régularité et rigidité des bandes SD a en outre permis de mettre en exergue deux phénomènes fascinants et inattendus : les bandes jumelles et les oscillations $\Delta I = 4$. Je reviendrai sur ces deux phénomènes aux paragraphes 3.1.5 et 3.1.6.

Outre la régularité des bandes SD, c'est aussi l'avalanche de résultats qui a conduit à ces observations inattendues. Sans une cartographie systématique des îlots de stabilité SD, ces découvertes n'auraient sans doute pas été possibles.

Le comportement des bandes SD varie sensiblement d'une région de masse à une autre, mais reste globalement stable dans une région de masse donnée. Les propriétés globales peuvent être expliquées à l'aide d'arguments simples donnés ici en comparant les régions des masses 150 et 190.

L'aspect macroscopique de la goutte liquide permet de rendre compte assez simplement de la plage en fréquence des bandes SD. Le moment angulaire maximum de la goutte liquide en rotation est plus élevé pour la masse 150 que 190. Ainsi, les bandes SD de masse 150 s'étendent jusqu'à des spins d'environ $65 \hbar$, comparé à environ $50 \hbar$ pour la masse 190. Au-delà, la forme prolata n'est plus stable et devrait subir, du point de vue macroscopique, une transition de forme Jacobi (voir par exemple [war02a]). Quelle que soit le moment angulaire, la forme SD doit être stabilisée par des effets de couche se développant sur la barrière de fission, la hauteur de celle-ci diminuant avec la masse. Les têtes de bandes SD de masse 190 sont donc à plus faible énergie d'excitation que dans la masse 150 et sont donc Yrast jusqu'à de plus basses fréquences de rotation.

Sous l'effet de la rotation (force de Coriolis) les paires de nucléons tendent à se briser. Cette brisure s'accompagne d'une augmentation du moment d'inertie, qui dans le cas le plus brutal se manifeste par un rebroussement en fonction de la fréquence de rotation ("backbending"). Cette augmentation est observée dans la région de masse 190 mais est absente dans la masse 150 : la brisure de paires se produit dans une gamme qui n'est pas accessible expérimentalement puisque la bande a déjà décliné vers le puits d'états normalement déformés.

A contrario, le comportement du moment d'inertie dans la masse 150 est dominé par la contribution des orbitales intruses : la singularité de ces orbitales confère un comportement caractéristique du moment d'inertie en fonction du remplissage intrus [ben88a, shi90a].

Les noyaux SD fournissent une opportunité unique pour étudier les corrélations d'appariement à haute fréquence de rotation. Sous l'effet de la rotation, les paires s'alignent progressivement, ce qui conduit à une diminution, voir disparition des corrélations (effet Mottelson-Valatin [mot60a]), les fortes déformations jouant en sens inverse ("frequency-deformation scaling" [naz87a, sat90a]). Ainsi, les questions du lien entre rotation, déformation, force de Coriolis, du traitement correct de la disparition des corrélations et de la conservation du nombre de particules n'avaient pu être abordées avant l'étude des bandes SD. En particulier, les corrélations d'appariement ont été ajustées dans le cadre de la méthode HFB afin de reproduire au mieux le moment d'inertie dans la masse 150 [rig99a].

Les noyaux SD étant très rigides, les excitations dans le puits SD sont dominées par les excitations de particules. Quelques cas de corrélations octupolaires ont cependant été mentionnés dans les régions de masse 150 dans ^{148}Gd [dea96a], ^{152}Dy [lau02a], masse 190 dans ^{190}Hg [cro94a, cro95a, kor01a], ^{193}Hg [cul90a], ^{194}Hg [fal97a], ^{196}Pb [bou97a, ros01a, ros02a] et dans l'isomère de fission ^{240}Pu [pan00a, gas01a].

Je termine cette vue d'ensemble des propriétés globales de bandes SD en mentionnant leur décroissance. A basse fréquence de rotation, les bandes SD ne sont plus Yrast ; la densité est dominée par les états de déformation normale. La décroissance est par conséquent dominée par des processus statistiques et donc très fragmentée. La recherche des connections entre les puits SD et ND est cependant vitale puisqu'elles apportent une mesure formelle du spin, de la parité et de l'énergie d'excitation des états SD. Quelques cas ont été rapportés dans la région de masse 190 : ^{191}Hg [sie04a], ^{194}Hg [kho96a, hac97a], ^{192}Pb [mcn97a, wil03a], ^{194}Pb [lop96a, hau97a]. Dans la région de masse 150, la décroissance se produit à haut moment angulaire : environ $30 \hbar$. L'énergie d'excitation est donc particulièrement difficile à établir. Le seul cas où les transitions de lien ont été observées reste ^{152}Dy [lau02b] (le cas de ^{149}Gd [fin99a] reste controversé).

Je n'aborde pas ici la question de la population des bandes SD et les études du continuum et suggère au lecteur de consulter l'article de revue [dos96a].

3.1.4 Méthodologie

Plusieurs approches complémentaires peuvent être adoptées afin d'interpréter les bandes SD. Généralement, la méthodologie consiste à assigner les configurations des bandes et à comparer les observables soit d'une bande à l'autre, soit avec la théorie. Confrontation des observables et assignement des configurations sont souvent intimement liés puisque généralement réalisés conjointement.

En l'absence de mesures formelles de spin, parité et énergie d'excitation des bandes SD, les comparaisons sont essentiellement faites à l'aide du moment d'inertie dynamique ou de l'alignement. La mesure de moment quadripolaire électrique offre un élément de comparaison supplémentaire (voir par exemple [sve97a, and00a] pour la masse 60, [ler03a] pour la masse 80, [cla96a, hac98a] pour la masse 130, [sav96a, nis97a, bea98a] pour la masse 150 et [hug94a, moo97a, bus98a] pour la masse 190).

Dans certaines régions de masse, le spin des états SD peut être déterminé grâce à la méthode de Harris [bec90a, dra90a, sha06a]. Bien qu'il n'y ait à notre avis aucune justification formelle de cette méthode pour les noyaux impairs puisque le terme brisant la symétrie par renversement du temps est omis, la technique donne de bons résultats dans les régions de masse 190, 60 et 80. Dans la région de masse 150, l'alignement à bas spin n'étant pas observé, le développement de Harris ne peut et ne doit pas être extrapolé. Pour des raisons similaires, il aurait été trop hasardeux d'extraire des "routhiens" expérimentaux dans la région de masse 150.

Le moment d'inertie dynamique est couramment utilisé mais donne une information somme toute limitée : les bandes de même configuration intruse ont un moment d'inertie très similaire et la précision limitée des modèles ne permet pas une confrontation directe. Dans quelques cas typiques, le moment d'inertie fournit cependant une information caractéristique univoque de la configuration. Il s'agit par exemple de la bosse dans le moment d'inertie de $^{145}\text{Gd}(2)$ [rza95a], $^{146}\text{Gd}(1)$ [sch95a], $^{147}\text{Gd}(1,5)$ [the96a], $^{148}\text{Gd}(2,7,8)$ [the96a, ste97a, byr98a], $^{149}\text{Gd}(12)$ [ste97a, byr98a] attribuée au croisement d'orbitales. Outre l'assignement des orbites, la position de la bosse renseigne sur les différences de déformation entre les bandes : voir la discussion dans [the96a]. Des croisements de même nature ont également été observés dans $^{192}\text{Hg}(2)$ [fal95a] et $^{193}\text{Hg}(1,4)$ [cul90a]. D'autres cas de comportements particuliers de moment d'inertie sont dus par exemple à l'alignement de particules à bas spin ($^{150}\text{Gd}(1)$ [fal89a], $^{149}\text{Gd}(b)$ [fli93b]) ou à une interaction entre niveaux ($^{150}\text{Gd}(2,4)$ [bea93a], $^{149}\text{Gd}(9,10)$ [ste97a, byr98a]).

De manière générale, j'ai utilisé la méthodologie proposée par I. Ragnarsson, consistant à utiliser l'alignement effectif : différence de spin total en deux bandes pour une même fréquence de rotation [rag93a]¹. Cette méthodologie est fondée sur les propriétés d'additivité des orbitales : les contributions des orbitales peuvent être séparées et superposées à un cœur afin de bâtir des bandes. Cette hypothèse est bien justifiée par les faibles corrélations d'appariement et par le fort couplage de particules au cœur. Un accord remarquable a été obtenu lors de nos études de $^{147,149}\text{Gd}$ [fli95a, the96a]. Outre l'assignement des configurations grâce à leur comportement caractéristique, la méthode permet d'assigner

1. A noter que dans cette référence, certaines configurations proposées se sont avérées erronées.

le spin d'une bande relativement à une autre et, de proche en proche, à toutes les bandes d'une région.

3.1.5 Les bandes identiques

Découvertes fortuitement en 1989 par Th. Byrski et collaborateurs [byr90a] dans la région de masse 150, le phénomène de bandes jumelles (ou identiques ou isospectrales) s'est étendu à la région de masse 190 [ste90a, ste90b] et est apparu comme abondant et emblématique de la superdéformation. Pour mémoire, les bandes identiques sont deux bandes de noyaux voisins ayant des énergies similaires à environ 2 keV près ou, plus surprenant encore, décalées de 1/4, 1/2 ou 3/4 l'une par rapport à l'autre; similarité totalement incompatible avec un moment d'inertie macroscopique fonction de $A^{5/3}$. Défiant les attentes de la mécanique quantique, ce phénomène qui n'avait pas été prédit a fasciné, généré une très abondante littérature et suscité de nombreuses hypothèses, y compris les plus exotiques quant à son interprétation.

Les noyaux ^{147}Gd et ^{149}Gd présentent, comme la plupart des noyaux de masse 150 une abondance étonnante de bandes jumelles. Hormis les bandes à comportement particulier du moment d'inertie dynamique, c'est-à-dire bosse ou alignement, toutes les bandes présentent un caractère gémellaire [fli93a, fli95a, the96a, ste97a, byr98a].

L'abondance de bandes jumelles dans différentes régions de masse semble indiquer un caractère universel et donc une propriété générique du noyau. La présence de bandes identiques n'est pas l'apanage de la superdéformation puisqu'elles ont également été observées à déformation normale: voir par exemple [ahm91a, cas92a, bak92a, lag04a, ven03a, zha92a]. Récemment, nous avons pu mettre en évidence une grande similarité entre les bandes de ^{251}Md et ^{255}Lr : voir paragraphe 3.3.3. L'analyse en terme de "fractional change" [def96a] montre l'universalité du phénomène quelle que soit la déformation et la région de masse, la plus faible abondance pour les noyaux ND étant attribuée aux corrélations d'appariement suffisamment intenses pour mélanger les configurations, et à l'effet du "blocking" (le moment d'inertie de noyaux impairs est généralement supérieur de 10 à 15 % de celui de noyaux pair-pairs).

Les relations arithmétiques entre bandes identiques sont généralement traduites en termes d'alignement, qu'il soit effectif ou incrémental. J'ai, comme évoqué au paragraphe précédent, utilisé l'alignement effectif et comparé les données aux calculs de I. Ragnarsson. Le bon accord entre les données expérimentales et ces calculs illustre la validité du concept d'additivité des orbitales.

Une revue de différentes interprétations est donnée dans [bak95b]. Je cite ici les plus intéressantes ou riches en enseignements sur le phénomène, en tentant de dégager quelques lignes directrices et de noter les consensus.

En règle générale, il est étonnant de constater un bon accord entre les modèles et l'expérience, le phénomène pouvant être reproduit sans contraintes ni ajustements particuliers. Cependant, la précision des calculs n'est pas suffisante pour reproduire les données expérimentales en absolu avec une précision de l'ordre du keV. Les comparaisons

sont donc souvent faites en relatif - à l'aide par exemple d'alignement - ce qui permet par ailleurs d'ignorer ou de soustraire des contributions mal connues comme les corrélations d'appariement. L'accord étant globalement satisfaisant, les modèles peuvent donc s'attacher à traquer le phénomène et à trouver son origine.

Les modèles s'accordent généralement sur un mécanisme de compensation entre la masse, la déformation et la rotation. Il ne s'agit donc pas simplement d'une orbitale spectatrice et neutre sans effet sur le cœur.

Bien qu'incomplets, les modèles les plus simples comme celui de l'oscillateur harmonique permettent une étude analytique et une séparation des différentes contributions. Les approches similaires de Z. Szymanski [szy90a, szy95a, szy93a] d'une part et I. Ragnarsson [rag90a, rag91a, rag93a] d'autre part mettent en avant les orbitales à forte densité dans le plan équatorial, c'est-à-dire n_z faible et tendant à une déformation oblate. Naïvement, on peut comprendre que ces orbitales ont un faible recouvrement avec les orbitales à distribution prolata (en particulier les orbitales intruses), interagissent peu et ont donc un comportement très stable quelle que soit la fréquence de rotation.

D'après I. Ragnarsson, les valeurs demi-entières de l'alignement effectif ne sont pas simplement dues à une liberté du spin par rapport au moment angulaire (comme c'est le cas avec l'approche pseudo-spin [naz90a, dud90a, szy98a]), mais résulte d'effets de compensation. J'ai déjà mentionné les propriétés additives de l'alignement effectif qui confère la simplicité au modèle. D'après W. Satula [sat96a], cette fois-ci à l'aide de modèle auto-consistant HFB, l'additivité s'applique également au moment quadripolaire électrique, en excellent accord avec les mesures [sav96a, hac98a, bea98a].

Les modèles de champ moyen auto-consistant HFB, RMF ou IBM reproduisent eux aussi les données, mais ont l'inconvénient de fournir un résultat global duquel il est difficile de séparer les contributions [che92a, kon93a, sun87a, paa92a, chi94a]. Le rôle des termes de la force brisant la symétrie par renversement du temps a été soulevé [dob95a, muk92a] sans qu'il soit possible de conclure.

De façon générale, les modèles ont permis de dégager de tendances mais aucune conclusion n'a été tirée quant à l'origine du phénomène.

Après une période florissante et foisonnante en résultats expérimentaux et interprétations, les bandes identiques ont progressivement quitté le devant de la scène en laissant les scénarios au rang d'hypothèses.

Bien que les modèles de champ moyen reproduisent de façon satisfaisante la gémellité, les raisons profondes du phénomène restent, à mon avis profondément obscures. Nous disposons d'un faisceau de présomptions, toutes vérifiées et cohérentes, mais n'étant pas étayées par de solides fondements. De nombreux modèles ont été utilisés. A ceux cités précédemment, ajoutons le modèle de "cluster" [buc03a] ou le modèle en couches tournant [he05a]. Certains ont été tentés d'y voir le rôle de symétries [gui93a, iac91a] comme la symétrie de pseudo-spin [naz90a, dud90a, szy98a, tro94a], de supersymétries [gel90a, ama91a], de nouvelle symétrie encore cachée ou d'une énigmatique nouvelle physique.

Je suis intimement convaincu que le phénomène de bandes jumelles n'a rien d'ésotérique mais résulte de propriétés basiques de l'interaction nucléaire. Il est difficile d'imaginer que

seuls les noyaux SD réunissent les critères nécessaires à l'occurrence de bandes jumelles. Il peut certes y avoir un terrain favorable, mais il semble incontestable que la grande pureté des orbitales (donc les faibles corrélations) et la rigidité des noyaux permet de révéler l'effet. Le phénomène reste cependant mystérieux car un doute subsiste quant à son caractère accidentel ou générique. Nous pouvons regretter qu'aucune confrontation n'ait été menée sur différentes régions de masse, les modèles se contentant souvent des comparaisons avec quelques cas précis. Sans incriminer le caractère prédictif des modèles vis-à-vis des bandes jumelles, on peut regretter un manque de vision globale du phénomène. Si beaucoup de questions ont été posées, peu de réponses ont été données alors que le sujet est riche.

Pour conclure, avançons quelques hypothèses : l'alignement effectif demi-entier semble traduire une liberté du spin pour des orbitales localisées dans le plan équatorial. N'y a-t-il pas ici une propriété fondamentale de l'interaction spin-orbite ? Est-il bien nécessaire d'invoquer la mécanique quantique pour générer un nombre qui n'est que très approximativement demi-entier ? N'y a-t-il pas une piste intéressante pour raffiner l'interaction nucléaire effective ?

3.1.6 Oscillations $\Delta I = 4$, une symétrie C_4 ?

Identifiées pour la première fois dans ^{149}Gd , les oscillations $\Delta I = 4$ sont emblématiques de ce noyau. Bien que ma contribution à ce sujet ait été modeste, il était difficile de dresser un tableau de la superdéformation sans évoquer ce phénomène. Compte tenu des études réalisées entre temps, je m'efforce, avec quelques années de recul, de donner mon point de vue sur la question.

3.1.6.1 Historique

La spectroscopie de la bande Yrast de ^{149}Gd à l'aide du spectromètre 8π permettait de soupçonner des irrégularités du moment d'inertie dynamique pour les plus hauts spins [haa88a, haa90a], confirmées plus tard par une expérience effectuée avec EURO-GAM I [fli93b]. Il s'agit de déviations extrêmement faibles de ~ 60 eV par rapport à un rotor régulier, soit une perturbation de l'ordre de 10^{-4} de l'énergie des transitions, ou de l'ordre de 10^{-6} de l'énergie d'excitation des états SD. Plus que des déviations, il s'agit d'oscillations du moment d'inertie sur une large plage de moment angulaire. Expérimentalement, l'amplitude des oscillations peut être extraite par diverses techniques de lissage ou de soustraction de référence [fli93b, ced94a, mag97a, the95a]. Toutes ces méthodes concordent et permettent d'affirmer qu'il ne s'agit pas de fluctuations accidentelles ni du fruit de biais expérimentaux.

Ce phénomène inattendu a rapidement suscité un grand intérêt de la part de théoriciens. Les oscillations de période $\Delta I = 4$ ont suggéré une symétrie de type C_4 , invariance par rotation de $\pi/2$ autour d'un axe. Un principe générique en physique est la correspondance entre symétries et observables. A chaque symétrie correspond une séquence particulière de transitions entre états I^π : voir par exemple [fra01a, boh75a, dob00a, dob00b]. De même

qu'à une invariance par rotation de π (symétrie C_2) correspondent des transitions $E2$, une invariance par rotation de $\pi/2$ (symétrie C_4) doit être caractérisée par un motif $\Delta I = 4$.

L'amplitude des oscillations étant très faible, la symétrie n'est pas vérifiée exactement, mais constitue une perturbation du rotor prolata. De telles déviations sont instructives car elles peuvent nous renseigner sur la structure interne de l'objet.

Les jalons théoriques ont été posés en termes de symétrie d'ordre 4 par I.M. Pavlichenkov d'une part, I. Hamamoto et B. Mottelson d'autre part; la plupart de la littérature publiée par la suite découlant de ces deux propositions. Une explication alternative et originale a été également proposée par I.N. Michailov et Ph. Quentin en termes de vorticité (tourbillons).

En parallèle, de nombreuses expériences se sont attachées à exhiber (ou pas) des oscillations au-delà du cas historique de $^{149}\text{Gd}(1)$. Comme pour les bandes jumelles, de nombreuses équipes ont cherché des oscillations ... et en ont trouvé, parfois à tort.

Dans un ordre chronologique de publication, il s'agit des noyaux ^{194}Hg [ced94a] (cas infirmé par la suite [kru96a]), $^{153}\text{Dy}(1)$ [ced95a], $^{131,132,133}\text{Ce}$ [sem96a], $^{192}\text{Tl}(2)$ [fis96a] (cas non confirmé à notre connaissance), $^{148}\text{Eu}(1)$ et $^{148}\text{Gd}(6)$ [has97a], $^{150}\text{Tb}(1)$ et $^{149}\text{Gd}(7)$ [kin00a].

Ces études montrent clairement que le phénomène existe dans certains noyaux, pour certaines bandes, et disparaît brutalement dans les voisins. De telles observations n'auraient pu être faites sans les dispositifs les plus performants et constituent un cas typique, comme pour les bandes jumelles, où les études systématiques sont à l'évidence utiles et révélatrices.

3.1.6.2 Interprétations

Historiquement, la première interprétation a été avancée par I.M. Pavlichenkov en termes de théorie des bifurcations de systèmes quantiques en rotation [pav93a, pav06a] : la force centrifuge ou de Coriolis fait apparaître des déviations par rapport au rotor parfait (plus généralement, ces déviations apparaissent lorsqu'il y a interaction entre différents degrés de liberté). Dans le cas d'oscillations du moment d'inertie dynamique, I.M. Pavlichenkov propose avec S. Flibotte un Hamiltonien possédant une perturbation de symétrie $C_{4\nu}$ (invariance par rotation de $\pi/2$ et selon 4 plans; il s'agit d'un groupe de symétrie ponctuelle, c'est-à-dire laissant inchangé au moins un point commun), l'axe de symétrie étant confondu avec l'axe de rotation [pav95a]. Précisons qu'il s'agit d'une approche phénoménologique qui n'a pas nécessairement la prétention de révéler l'origine microscopique de la perturbation.

L'expérimentateur peut être tenté de visualiser la symétrie C_4 et de la transposer à un noyau de forme hexadécapolaire, ce qui a pu être source de confusion. Une symétrie n'est en effet pas nécessairement liée à une forme. Par exemple, une symétrie C_2 (invariance par rotation de π) n'est pas nécessairement associée à une forme prolata; les rotations magnétiques en sont le parfait exemple. I.M. Pavlichenkov suggère en effet une origine dynamique des perturbations C_4 telle le couplage entre rotation et vibration hexadécapolaire. Pour cette raison, je ne présenterai ici aucun noyau de forme

hexadécapolaire².

Au-delà d'une approche purement phénoménologique, I.M. Pavlichenkov montre que le moment hexadécapolaire Q_{44} , y compris son signe, est clairement lié au nombre de nucléons dans une couche donnée [pav96a, pav97a], ce qui pourrait expliquer le lien entre la présence des oscillations et le contenu intrus dans la région de masse 150.

Parallèlement à l'analyse de I.M. Pavlichenkov, I. Hamamoto et B. Mottelson proposent une interprétation également phénoménologique elle aussi basée sur un Hamiltonien intégrant une symétrie $C_{4\nu}$ [ham94a], mais dont l'axe de symétrie est confondu avec l'axe de symétrie du noyau. Dans des cas particuliers, les oscillations s'expriment selon $\cos(\frac{\pi}{2}(I - I_0))$ et sont alors périodiques.

I. Hamamoto et B. Mottelson évaluent le moment hexadécapolaire Y_{44} d'orbitales de haut j , trouvé "appréciable" et évoluant en valeur et signe dans une couche donnée [ham95a]. Une différence majeure avec l'interprétation de I.M. Pavlichenkov réside dans l'origine géométrique de la symétrie $C_{4\nu}$ puisqu'une déformation Y_{44} est suggérée. Cependant, tous les calculs microscopiques effectués dans le cadre du modèle tournant incliné TAC ("Tilted Axis Cranking") [don96a], du modèle Woods-Saxon [luo95a] ou Hartree-Fock [dud95a, mag95a] s'accordent sur l'absence de déformation Y_{44} substantielle. Il est donc probable que la symétrie $C_{4\nu}$ ne soit pas associée à une déformation statique mais ait une origine dynamique (l'autre hypothèse serait de dire que tous les modèles souffrent de l'absence d'un ingrédient générateur de déformation Y_{44}).

Les deux approches précédentes abordent les oscillations sous l'angle des symétries. I.N. Mikhailov et P. Quentin l'abordent sous l'angle de la mécanique des fluides avec la vorticité intrinsèque [mik95a, mik96a]. Par analogie avec la mécanique classique, des courants ou tourbillons se forment dans un noyau en rotation. Ces mouvements tourbillonnaires sont associés à un courant J quantifié. Le couplage de la rotation I avec la vorticité engendre des oscillations. D. Samsen, P. Quentin et I.N. Mikhailov appliquent ce formalisme aux noyaux SD de masse 150 en utilisant des calculs tournants Hartree-Fock [sam99a].

Citons pour être exhaustif les travaux de A.O. Macchiavelli et collaborateurs [mac95a] (principes de symétrie), K. Burzyński, P. Magierski et collaborateurs [bur95a, mag95b, bur95b, mag97a] (nucléons d'une couche j soumis à une interaction hexad capole-hexad capole), S.S. Malik et collaborateurs [mal00a] (modèle particule plus rotor), et enfin les approches de type IBM [kot96a, tok97a, liu97a, wu97a].

L'amplitude des oscillations a été remarquablement analysée par D.S. Haslip et collaborateurs [has98a] en intégrant les données alors disponibles de $^{149}\text{Gd}(1)$, $^{148}\text{Eu}(1)$ et $^{148}\text{Gd}(6)$, analyse étendue par N. Kintz [kin00a] en intégrant $^{150}\text{Tb}(1)$ (voir aussi [rob03a]). La dépendance remarquable des oscillations en fonction de $\cos(\frac{\pi}{2}(I - I_0))$ pour ces noyaux abonde dans le sens de I. Hamamoto et B. Mottelson. Le fait remarquable que les bandes $^{149}\text{Gd}(1)$, $^{148}\text{Eu}(1)$ et $^{148}\text{Gd}(6)$ soient jumelles indique un effet évident de structure, au-delà du simple contenu intrus.

2. Le lecteur friand de formes hexad capolaires pourra consulter [roh97a].

Outre les articles cités précédemment, on pourra s'étonner d'une littérature d'un intérêt douteux (pour rester poli), parfois dans des revues prestigieuses, n'apportant absolument rien au débat ou se contentant de décliner des évidences (j'ai choisi de ne pas citer ces articles). Peut-être s'agit-il d'une incidence de sujets en vogue, où certains profitent du foisonnement de résultats et d'idées pour faire entendre une voix à laquelle personne n'aurait prêté attention en temps normal.

3.1.6.3 Synthèse

Les oscillations $\Delta I = 4$ observées pour l'essentiel dans des noyaux de masse 150 restent en grande partie sans explications. Plusieurs approches telles celles de I.M. Pavlichenkov, I. Hamamoto et B. Mottelson, I.N Michailov et Ph. Quentin apportent leur pièce à l'édifice et permettent de reproduire les oscillations, même si certains ingrédients peuvent être antagonistes. L'ajustement remarquable des données expérimentales grâce au formalisme de B. Mottelson et I. Hamamoto plaide en faveur de cette interprétation. Cependant, la correspondance entre symétrie d'ordre 4 et déformation hexadécapolaire suggérée par ces auteurs, recherchée en vain, a été à notre avis source de confusion³.

Comme pour les bandes jumelles, il est clair que l'extrême régularité des bandes rotationnelles superdéformées a permis de mettre en lumière le phénomène. Il est clair également que les études systématiques à l'aide des appareils les plus performants ont été décisives dans la découverte puis recherche d'oscillations. Rappelons cependant que les oscillations $\Delta I = 4$ ont pour la première fois été signalées dans des terres rares et actinides par Peker *et al.* [pek83a], une ré-analyse à posteriori permettant de les déceler dans d'autres noyaux de déformation normale [wu97a].

Au-delà de la physique nucléaire, des bifurcations $\Delta I = 4$ ont été observées pour des molécules diatomiques comme YD, CrH, CrD, Cu² [bon96a] ou AgH [ray97a] avec une amplitude relative du même ordre que pour les noyaux. Le même type d'oscillations est donc observé dans des systèmes variés et à des échelles énergétiques très différentes. De là à attribuer les mêmes causes aux mêmes effets, il y a un pas que nous ne franchirons pas. Une approche élargie aux contextes moléculaires et nucléaires serait probablement riche en enseignements.

Si la plupart des modèles prévoient des conditions critiques à l'enclenchement des oscillations, aucun ne pointe les conditions strictes confinant son observation à certains noyaux, pour certaines configurations. La plupart des interprétations citées sont phénoménologiques et n'ont pas eu pour prétention d'avancer des effets de structure microscopiques. Par conséquent aucun des modèles n'a un caractère prédictif, ce qui ne saurait être scientifiquement satisfaisant. Pourtant, le cas des bandes jumelles ¹⁴⁹Gd(1), ¹⁴⁸Gd(6) et ¹⁴⁸Eu(1) est suffisamment troublant pour susciter des éclaircissements. Les effets microscopiques associés aux symétries C_4 , une cause possible des oscillations, ont été recherchés sans qu'il soit possible de conclure. Peut-être y a-t-il une voie à poursuivre :

3. Etant donné la renommée des auteurs, la communauté était inévitablement très attentive à cette suggestion.

les oscillations nous révèlent un aspect (inattendu) de la structure interne du noyau. Peut-être est-ce révélateur d'un ingrédient des modèles, voir même d'un aspect (inattendu) de l'interaction effective?

3.1.7 Bilan

Grâce à une meilleure connaissance des noyaux $^{147,149}\text{Gd}$, j'ai apporté ma pierre à l'édifice superdéformé. Mes travaux ont contribué à une meilleure connaissance des états de particules individuelles, des bandes jumelles et des oscillations $\Delta I = 4$. En marge de l'étude de la superdéformation dans la masse 150, j'ai également contribué à une tentative visant à peupler des états SD par réactions de transfert.

Ces contributions s'inscrivent dans une période faste pour la superdéformation où expériences, résultats, interprétations foisonnaient.

De part la multitude et variété des résultats, il a été et il reste difficile d'avoir une vision globale de la SD. Pourtant décisives dans la découverte des bandes jumelles ou d'oscillations $\Delta I = 4$, les études systématiques ont pu paraître rébarbatives, voir abusives. Difficile donc de ne pas être noyé dans les détails (le sujet est riche) et d'en extraire les informations pertinentes (le sujet est complexe).

Le sujet est en effet simple sous un premier angle mais révélateur d'une grande complexité: compétition entre modes collectifs et individuels, influence et nature des corrélations d'appariement, comportent des particules individuelles (bandes jumelles), collectivité (symétries, vibration), complexité de la décroissance (modes chaotiques), ... Les apports de la SD sont effectivement nombreux et très significatifs. Cette richesse est en grande partie conséquence de la lisibilité des spectres: bandes rotationnelles d'une grande régularité et d'un décryptage aisé. Physique par conséquent lisible et support de communication simple et aisé.

Des phénomènes, des plus inattendus et des plus excitants restent cependant sans réponses convaincantes: bandes jumelles, oscillations $\Delta I = 4$. Malgré les progrès spectaculaires des modèles, ceux-ci n'ont peut-être pas un niveau de détail suffisant pour décrire toutes les subtilités de cette contrainte extrême du noyau?

Un manque de réponses a très certainement contribué au désintérêt puis déclin du sujet. Les problématiques des bandes jumelles et oscillations $\Delta I = 4$ le montrent: des questions restent en suspens. Peut-être les progrès en physique théorique faits depuis seraient-ils en mesure d'apporter des réponses à ces questions? Le sujet n'est malheureusement plus stimulant et fédérateur des expérimentateurs et théoriciens: en l'absence d'expériences, les questions ne sont plus débattues et restent en suspens.

Malgré quelques tentatives, la recherche d'états hyper-déformés à haut moment angulaire s'est révélée infructueuse. Il faudra certainement attendre la mise en service de grands instruments tels AGATA et/ou les faisceaux radioactifs de haute intensité de Spiral2 pour redynamiser le domaine derrière un sujet phare comme la HD.

L'étude des noyaux en rotation a toujours été moteur de l'instrumentation. Nul doute que le futur perpétue cette tradition, d'autant plus que les acteurs d'AGATA sont en grande partie issus de cette communauté.

3.2 Fission et spectroscopie des fragments de fission

En explorant la carte des noyaux de part et d'autre de la vallée de stabilité bêta, le physicien sonde le degré d'isospin. La spectroscopie des fragments de fission riches en neutrons, à l'aide du détecteur SAPHIR (voir paragraphe 2.2), a été un de mes thèmes de recherche pendant quelques années. Ayant été porte parole d'expériences fécondes en termes de publications, et ayant très largement contribué au développement du détecteur de fragments de fission SAPHIR, il me semble utile de passer brièvement en revue l'intérêt de telles études et de récapituler les principaux résultats obtenus.

3.2.1 Fragments de fission et noyaux riches en neutrons

A une exception près (^3He), tous les noyaux stables ont un nombre de neutrons supérieur ou égal au nombre de protons. L'excès de neutrons apporte la cohésion permettant de compenser la répulsion coulombienne, conférant ainsi un caractère asymétrique à la carte des noyaux. Un modèle aussi simple que celui de la goutte liquide permet de dessiner les contours de la carte des noyaux s'étendant très largement du côté riche en neutrons alors que la "drip-line" proton est plus rapidement atteinte⁴.

La région des noyaux riches en neutrons est encore mal connue: une vaste terra incognita reste à explorer avant d'en atteindre la frontière. Ce déficit, asymétrie dans la connaissance, s'explique simplement si l'on considère les différentes réactions nucléaires disponibles. La fusion de deux noyaux stables peuple inévitablement des noyaux déficients en neutrons. Les réactions de fragmentation ou profondément inélastiques permettent d'explorer une région s'étendant autour de la cible ou du projectile. Très largement exploitées à GANIL-LISE ou à GSI-FRS, ces réactions ont permis la découverte de très nombreux noyaux. C'est historiquement la fission, de part sa simplicité de mise en œuvre, qui a permis de nombreuses études de noyaux riches en neutrons. Qu'il s'agisse de fission spontanée d'actinides ou de fission induite, ces réactions produisent un très grand nombre de fragments sur des séries d'environ 10 isotopes pour plus de 30 charges. Ce mode de production attrayant n'est rien d'autre que la technique de base de nombreux dispositifs existants ou en projet de part le monde: spectromètre Lohengrin à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble, dispositif MAFF (Munich Accélérateur for Fission Fragments) [hab03a], ALTO (Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay) [ibr07a], HRIBF (Holifield Radioactive ion Beam Facility) à Oak Ridge [alt98a], ISOLDE au CERN [wisol] (exploite également la spallation), EURISOL [eur03a] ou bien entendu le futur dispositif SPIRAL2 (voir par exemple [lew08a]).

4. Jusqu'à $Z=83$ pour les Z impairs, et $Z=30$ pour les pairs.

3.2.2 Spectroscopie de noyaux riches en neutron

3.2.2.1 Diversité

Etudier les noyaux riches en neutrons revient à explorer une vaste région de la carte des noyaux. Passer en revue la multitude de thèmes potentiels reviendrait à faire la liste des spécificités du noyau atomique : caractère magique, déformation, rotation, vibration, états à une particule, formes octupolaires, coexistence de forme, transition de forme, isomérisme, ... Bien malin qui pourrait prétendre avoir identifié le noyau intéressant ou qui pourrait mettre en avant une thématique plus noble qu'une autre. L'étude de tous les noyaux est instructive et contribue à une vision globale de la physique nucléaire.

Plusieurs équipes ont étudié les fragments de fission avec EUROGRAM, EUROBALL, GAMMASPHERE et en ont tiré une impressionnante littérature : voir par exemple [ahm95a, ham95b, smi03a]. La construction de dispositifs additionnels a de plus permis la mesure de facteurs gyromagnétiques (voir par exemple [smi99a]) ou temps de vie par la méthode du "plunger" (voir par exemple [smi02a]).

Dans un souci de ne pas imposer au lecteur un catalogue rébarbatif, je ne détaillerai aucune des études réalisées mais invite le lecteur à consulter les publications issues des expériences réalisées [gau98a, hou99a, luc02a, por05a, ven05a, ven06a, ven07a]. Précisons cependant que le domaine d'investigation des fragments lié au processus de fission se limite aux états Yrast ou proches, de quelques MeV d'énergie d'excitation et de 4 à 10 \hbar de moment angulaire.

3.2.2.2 Isomérisme de fragments de fission

L'isomérisme n'est pas une spécificité des fragments de fission mais permet une première approche aisée de la spectroscopie d'isotopes rares. L'isomérisme est en effet une signature expérimentale forte qui permet d'extraire relativement facilement des schémas de niveaux parmi la multitude de rayonnements émis. Cette première approche peut être une base pour compléter les schémas par des rayonnements prompts.

Une telle démarche est communément adoptée dans des régions où peu est encore connu : voir par exemple les travaux de J.M. Daugas avec LISE [dau99a] ou de M. Caamaño et collaborateurs auprès du FRS [caa05a].

Les isomères sont cependant plus qu'une curiosité expérimentale⁵. D'un point de vue fondamental, ces états nous renseignent sur la structure du noyau. On distingue généralement trois types d'isomères. Les premiers appelés isomères de spin doivent leur temps de vie à la faible probabilité de transition entre états de spin différent, conformément aux estimations de V.F. Weisskopf [wei51a]. Les seconds appelés isomères de forme doivent leur temps de vie à la barrière qu'il faut franchir pour passer d'une forme très allongée aux états de déformation normale. Le troisième type n'est rencontré que dans les noyaux déformés lorsque K est un bon nombre quantique. Ici, le temps de vie de l'isomère K est

5. Précisons que certaines études initiées à Saclay ont été en partie motivées par la recherche d'isomères à long temps de vie dans la perspective du stockage d'énergie.

lié au très faible recouvrement entre états initial et final. Si λ est la multipolarité de la transition, le temps de vie augmente avec le degré d'interdiction $\nu = |K_i - K_f| - \lambda$. De façon empirique, on peut trouver des règles entre le facteur de ralentissement F_W et le degré d'interdiction, F_W étant le rapport entre le temps de vie expérimental et l'estimation Weisskopf: voir par exemple [lob68a, wal90a].

Dans les noyaux impairs, les isomères apparaissent naturellement par la proximité d'états de projection K différents. Dans les noyaux pair-pairs, l'isomérisme K est lié à la présence d'états à deux quasi-particules (2qp). L'énergie d'excitation de tels états ainsi que le temps de vie constituent de fortes contraintes vis-à-vis des modèles (il est généralement peu aisé de calculer un temps de vie ou un taux de transition entre états de particules individuelles). Entre autres, nous avons étudié les isomères K dans les noyaux riches en neutrons $^{152,154,156}\text{Nd}$ [gau98a] (fission spontanée de ^{252}Cf). L'isomérisme K est présent tout au long de la carte des noyaux. Quelques cas seront mentionnés au chapitre 3.3 dans les noyaux très lourds.

3.2.3 Méthodologie

Du choix de la réaction va dépendre la distribution (N, Z) de fragments de fission. Celle-ci dépend à la fois du noyau fissionnant et de son énergie d'excitation. La distribution de fragments de fission se développe autour d'une ligne d'équilibre N/Z constant donné par le noyau fissionnant. Avec un rapport N/Z élevé, la fission de ^{252}Cf donne accès à des fragments relativement riches en neutrons. La fission spontanée a l'immense avantage de s'affranchir des accélérateurs et permet donc de réaliser des expériences quasi sans limitation de temps. Cependant, la fission de ^{252}Cf est asymétrique et présente un fort déficit de fragments autour de la masse 125 et pour les noyaux de $_{49}\text{In}$. Afin de combler cette région, on pourra faire appel à la fission induite comme $p + ^{232}\text{Th}$ ou $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ (voir figure 3.3) donnant cependant des fragments moins riches en neutrons que pour la fission spontanée de ^{252}Cf .

Lors de l'élaboration des schémas de niveaux, un fragment apparaît en coïncidence avec plusieurs partenaires (appelés aussi compagnons). Lorsqu'un noyau très riche en neutrons est mal ou pas connu, son partenaire moins riche en neutrons l'est généralement mieux. On peut exploiter cette complémentarité afin d'élaborer des schémas de niveaux pour des noyaux ou rien n'était connu jusqu'alors. Une analyse simultanée de plusieurs systèmes peut de plus permettre de lever des ambiguïtés. Par exemple, on peut exploiter le fait que ^{127}Sb a pour partenaire principal ^{94}Y dans la réaction $^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ et ^{113}Ag dans la réaction $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ [por05a].

Lors des expériences que nous avons réalisées, nous avons exploité la complémentarité entre cibles ou sources minces ou épaisses. Avec une cible ou source mince, les rayonnements retardés sont émis depuis le détecteur SAPHIR qui signe la fission et donne une référence en temps pour le spectromètre gamma. Lorsque les deux fragments sont détectés en coïncidence, il est possible d'estimer leur masse à quelques unités près ainsi que l'énergie d'excitation du système fissionnant: voir par exemple la thèse de M. Houry [hou00a]. Sauf dans le cas du "plonger", la granularité de SAPHIR ne permet pas de

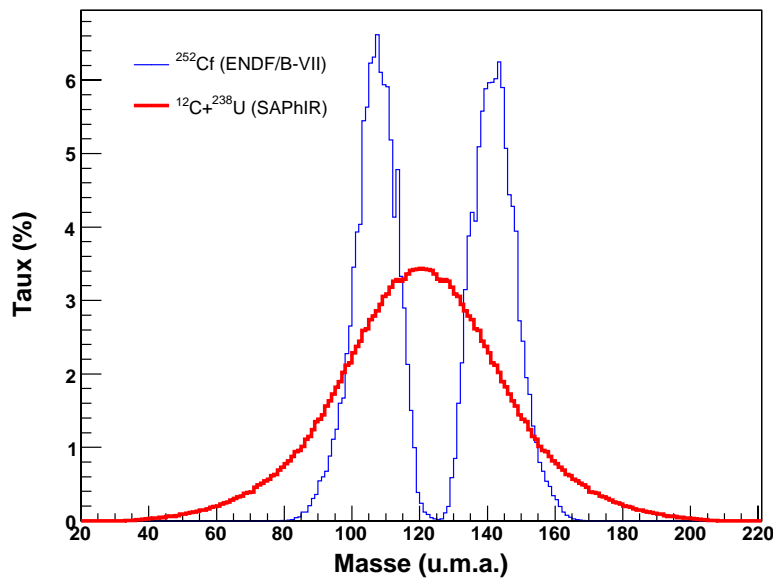


Fig. 3.3 – Production de fragments de fission en fonction de la masse pour la fission spontanée de ^{252}Cf (courbe bleue, données tirées de ENDF/B-VII [cha06b]) et fission induite $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ (courbe rouge, données expérimentales obtenues avec SAPHIR [hou00a]).

réaliser la correction Doppler des rayonnements émis en vol avec une précision suffisante. Les cibles ou sources minces privilégient donc l'étude des rayonnements retardés. Les rayonnements prompts sont à l'inverse préférentiellement étudiés en cible ou source épaisse, au détriment de la sélectivité et d'une référence temporelle puisque SAPHIR ne peut être utilisé. Ces deux types d'expériences sont donc complémentaires. Ainsi nous avons utilisé la réaction $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ à la fois en cible épaisse (47 mg/cm^2) et cible mince ($140 \mu\text{g/cm}^2$).

3.2.4 Bilan

La première expérience utilisant SAPHIR et un multidétecteur gamma de grande efficacité a été réalisée en novembre 1995 à Strasbourg avec EUROGAM II : voir paragraphe 2.2.1 et figure 2.16-1. Il s'agissait d'étudier l'isomérisme des fragments de fission produits par une source de ^{252}Cf . Cette première expérience réalisée essentiellement au sein de la collaboration SAPHIR a été en grande partie motivée par les déboires du VIVITRON et la disponibilité d'EUROGAM II. D'ambition modeste, cette expérience analysée par Claire Gautherin dans le cadre de sa thèse [gau97b] a cependant permis d'observer des états isomériques dans 59 noyaux, 12 schémas de niveaux étant observés pour la première fois : voir figure 3.4. L'accent a été mis sur l'étude d'isomères K dans les isotopes de $^{152,154,156}\text{Nd}$ [gau98a].

Confortés par ce succès, nous avons proposé en 1996 de poursuivre l'étude d'isomères produits par fission induite de ^{232}Th par protons, toujours avec EUROGAM II et toujours au sein de la collaboration SAPHIR. L'idée était de compléter la fission spontanée asymétrique

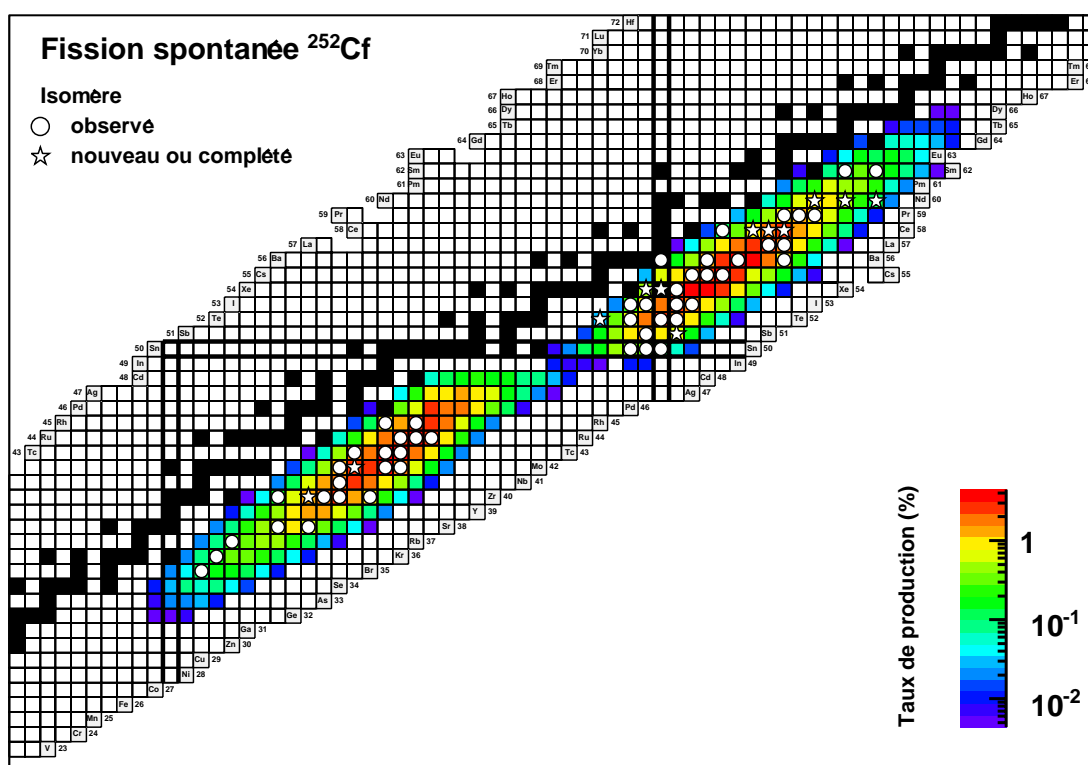


Fig. 3.4 – Isomères observés après fission spontanée de ^{252}Cf . Les observations sont superposées aux taux de production des fragments de fission tirés de la base de données ENDF/B-VII.

de ^{252}Cf par la fission induite symétrique et de réaliser une correction Doppler des rayonnements émis en vol grâce à la granularité de SAPHIR (voir paragraphe 2.2.1 et figure 2.16-2). L'expérience réalisée en octobre 1996 n'a pas pu fournir de résultats convaincants dû essentiellement aux instabilités du faisceau induisant un trop fort bruit de fond.

Fin 1996, nous avons proposé une expérience similaire avec EUROBALL III, alors installé à Legnaro. Nous avons alors choisi d'exploiter la fission induite $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$. L'équipe SAPHIR s'est alors ouverte à d'autres collaborateurs séduits par notre dispositif et par les résultats obtenus avec la source de ^{252}Cf (porte parole avec John Durell, Université de Manchester). Le dispositif SAPHIR était alors constitué de 32 cellules (voir paragraphe 2.2.1 et figure 2.16-3) pour une efficacité d'environ 50 %. Dans un souci de complémentarité entre rayonnements retardés et prompts, l'expérience a été réalisée d'une part en cible mince avec SAPHIR (octobre 1997) et d'autre part en cible épaisse (juillet 1998). L'expérience a été analysée par Michael Houry et Adrian Roach (Université de Manchester) dans le cadre de leur thèse [hou00a, roa99a]. M.-G. Porquet et ses collaborateurs ont également exploité les données afin de compléter des données de fission obtenues avec les réactions $^{18}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ et $^{31}\text{P} + ^{176}\text{Yb}$.

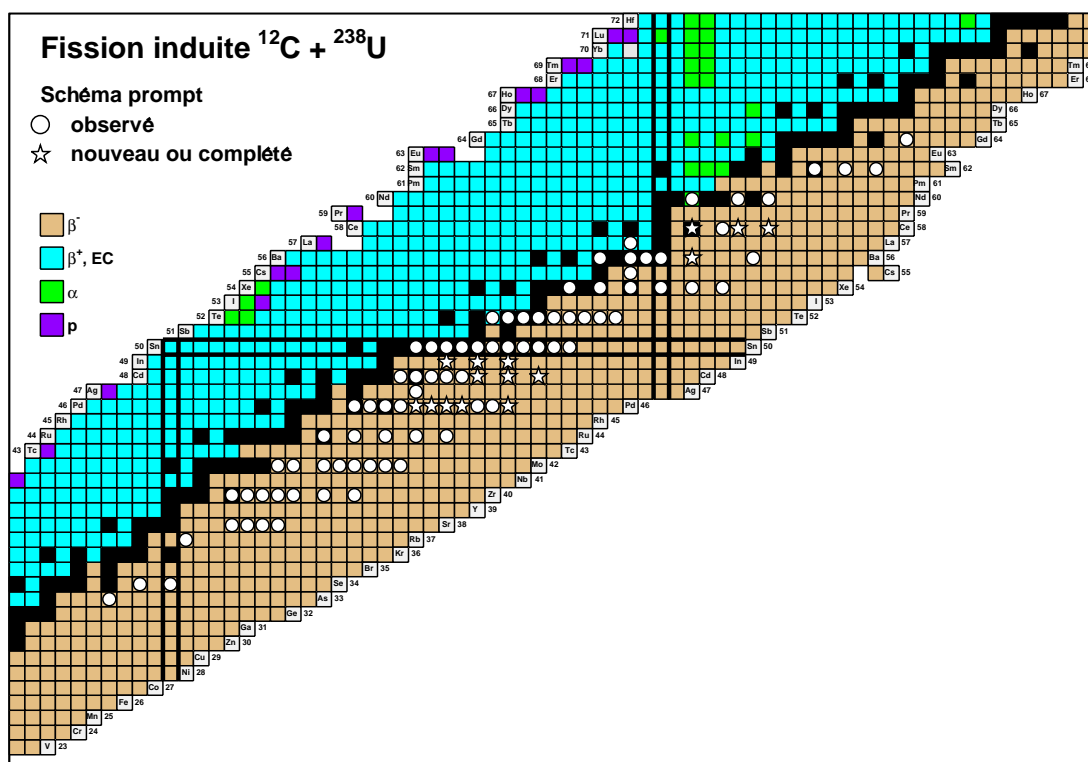
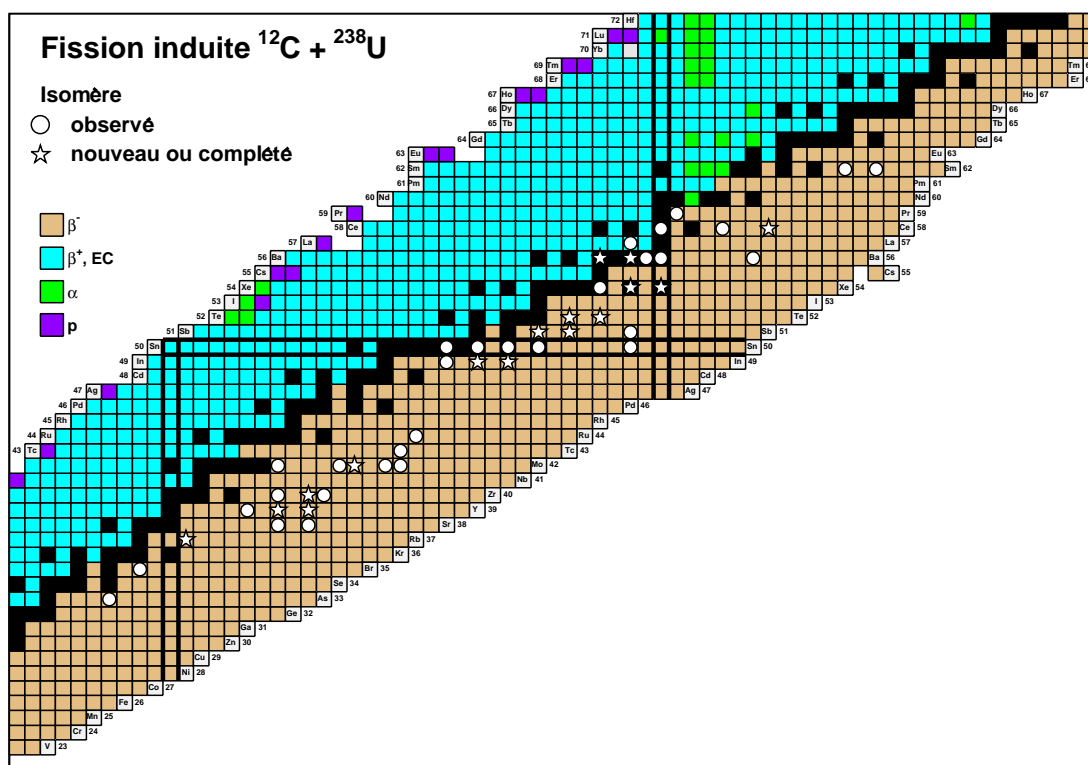


Fig. 3.5 – Isomères (haut) et schémas prompts (bas) observés après fission induite $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$. A noter que la liste de schémas prompts n'est pas limitative.

Si toutes les données issues de cette expérience étaient exploitées, plus de 200 noyaux pourraient être étudiés. M. Houry dans ses travaux de thèse s'est "contenté" de dresser un peu plus de 100 schémas de niveaux. Notons qu'un grand nombre de schémas déduits restent hypothétiques ou n'ont pu être formellement assignés. Parmi les données, la décroissance de 16 isomères a été observée soit pour la première fois, soit complétée : voir partie haute de la figure 3.5. En ce qui concerne la décroissance prompte, il s'agit de 17 schémas nouveaux ou complétés : voir partie basse de la figure 3.5.

Il va de soi, pour les raisons déjà évoquées au paragraphe 3.2.2.1, que les thèmes de physique abordés sont variés. Pour plus de détails, je suggère la lecture des 8 publications issues des expériences réalisées à Strasbourg, Legnaro ou Orsay [gau98a, hou99a, luc02a, por05a, ven07a, ven05a, ven06a, gau98a]. Pour l'ensemble des expériences, des schémas de niveaux ont été établis dans plus de 150 noyaux, incluant plus de 80 schémas de niveaux retardés.

Plus de dix ans après leur réalisation, les expériences de fission induite effectuées avec EUROBALL III continuent d'être exploitées. Ceci prouve leur richesse et la somme de connaissances qui s'offre aux physiciens du côté riche en neutrons de la carte des noyaux. Les faisceaux exotiques de SPIRAL2 permettront de prolonger l'exploration de cette terra incognita.

3.3 Les éléments lourds et super-lourds

La spectroscopie des éléments les plus lourds constitue mon thème de recherche principal depuis 1998, année marquée par l'observation de la bande rotationnelle fondamentale de ^{254}No à Jyväskylä [lei99a] et à Argonne [rei99a]. Ces deux expériences établissent en quelque sorte un renouveau et tournant dans la spectroscopie des éléments les plus lourds. J'étudierai par la suite de façon la plus exhaustive possible les noyaux impairs en proton $^{255}_{103}\text{Lr}$ et $^{251}_{101}\text{Md}$ à GANIL et à l'université de Jyväskylä [cha06a, cha07a, the08a]. L'étude de ces deux noyaux, réalisée avec Audrey Chatillon dans le cadre de sa thèse [cha05a], constitue le fil rouge de ce chapitre.

J'ai déjà très largement présenté la physique des éléments les plus lourds dans un cours donné en 2002 à l'école Joliot-Curie de physique nucléaire [the03b]. On pourra aussi consulter le support de cours donné lors de Euroschool 2008 [the08b] ou dans les articles de revues ou ouvrages consacrés à ces éléments [arm85a, arm90a, arm03a, her04a, her08a, hof98a, hof02a, hof00b, lei04a, mun88a, oga07a, sea68a, sea87a, sea90a, sob07a].

Après avoir brièvement rappelé le contexte, je passerai en revue les expériences réalisées sur ^{255}Lr et ^{251}Md exploitant les techniques complémentaires de spectroscopie prompte d'une part et spectroscopie retardée d'autre part. Je résumerai ensuite les études menées afin d'intégrer les effets atomiques dans l'interprétation des spectres.

3.3.1 Contexte

L'étude des noyaux les plus lourds est un riche et vaste sujet. Dans ce paragraphe, je passerai en revue les diverses questions liées aux éléments super-lourds en mettant en lumière les récents progrès ou évolutions de la discipline.

- L'étude des noyaux les plus lourds est en premier lieu l'étude d'un état extrême du noyau : nous nous intéressons ici aux contraintes de masse et charge. Quelles sont les limites de la carte des noyaux ? Quelles sont les limites de stabilité de la matière nucléaire ? Du point de vue macroscopique, le modèle de la goutte liquide permet de décrire assez simplement les contours de stabilité aussi bien pour la carte des noyaux (N, Z) qu'en fonction du moment angulaire (voir paragraphes 1.1 et 3.2.1). Pour un nombre de protons élevé, l'interaction nucléaire ne suffit plus à compenser la répulsion coulombienne tendant à la fission.

Les effets de couche parviennent à repousser notablement ces limites macroscopiques. Dans ces conditions extrêmes où la stabilité du noyau n'est due qu'à des effets de couches, la structure du noyau joue un rôle primordial. Difficile dans ce contexte de donner une définition des éléments super-lourds, lourds ou encore très lourds. Des noms arbitraires comme transuraniens ou transfermiens sont utilisés mais correspondent plus à des barrières arbitraires que physiques. Les chimistes ont des définitions plus formelles comme actinides, transactinides ou super-actinides correspondant à des couches fermées électroniques. Selon A. Bohr, les éléments super-lourds sont ceux dont la stabilité est essentiellement déterminée par les effets de couche [boh74a]. Pour G. T. Seaborg, il s'agit d'éléments dont le temps de vie est remarquablement plus long que ses voisins de la carte des noyaux [sea90a]. S. Hofmann préfère réserver le nom super-lourd aux noyaux de couche fermée sphérique [hof02a]. Lors de Euroschool 2008, M. Pfützner a suggéré avec humour d'appeler super-lourd tout élément n'ayant pas encore de nom. Définition glissante donc qui a d'ailleurs évolué récemment puisque les éléments 110 et 111 ont été nommés respectivement darmstadtium [cor03a] et roentgenium [cor04a] ; le processus pour baptiser l'élément 112 (copernicium Cp est proposé) étant en cours [iup09a]. Au-delà de la boutade, la suggestion de M. Pfützner illustre la notion d'inconnu, de quête que suscitent les éléments les plus lourds.

- On constate en parcourant la carte des noyaux à partir de ^{208}Pb , élément stable le plus lourd, une alternance entre régions de stabilité et de fragilité. Au-delà de ^{208}Pb , il faut atteindre la région des actinides pour que les isotopes aient un long ou très long de temps de vie, parfois comparable à celui de la terre. Au-delà de cette région, la stabilité diminue de nouveau sans qu'il ait été possible jusqu'à présent d'atteindre un hypothétique îlot de stabilité. Cette alternance dans la carte des noyaux est le parfait reflet de la structure en couche des nucléons où régions de densité accrue alternent avec régions de stabilité accrue, le tout étant modulé par des effets de déformation.

La question des prochains nombres magiques et d'un prochain îlot de stabilité se pose donc avec pour corollaire expérimental la quête de ce Graal.

Quelle est dans ce contexte la validité et le pouvoir de prédiction des modèles ? La densité de niveaux augmentant avec le nombre de nucléons, les intervalles sont par conséquent de moins en moins marqués jusqu'à reposer sur des effets les plus fins de modèles. Par exemple, déplacer quelques états de quelques centaines de keV privilégiera $Z=114$, 120 ou 126 : voir par exemple [cwi96a, rut97a, ben99a, kru00a, ben01a, ben03a, afa05a]. Pour cette raison, le caractère magique des super-lourds n'est pas prédit aussi marqué et localisé que pour ^{48}Ca ou ^{208}Pb . Il faut plutôt s'attendre à une région de stabilité accrue autour de nombres magiques. Du point de vue théorique, les modèles (ou plus précisément l'interaction effective) sont essentiellement ajustés sur les propriétés de noyaux doublement magiques. Au-delà de ^{208}Pb , tous les calculs reposent sur des extrapolations dont l'expérimentateur tente de vérifier (ou infirmer) la validité. Deux voies peuvent être suivies : soit synthétiser les éléments les plus lourds pour atteindre directement un îlot super-lourd, soit réaliser la spectroscopie des éléments les plus lourds afin de comparer modèles et expériences. Historiquement, étudier la structure des éléments les plus lourds n'a pas été la préoccupation principale des "découvreurs". Une quête de l'élément le plus lourd semble avoir guidé des recherches, et on peut être surpris que les effets de couches soient pas ou peu mentionnés par certaines figures de la recherche des super-lourds comme A. Ghiorso, G.N. Flerov ou même encore Yu.Ts. Oganessian de nos jours. Du point de vue théorique, on s'est longtemps focalisé sur un îlot super-lourd correspondant à des nombres magiques sphériques. Jusque dans les années 70, on n'évoquait pas la possibilité d'avoir des éléments super-lourds déformés. D'après les calculs sphériques, on passait donc directement des actinides (déformés par ailleurs) à un îlot de stabilité $Z=114$. Il faudra attendre un article important de S. Cwiok en 1983 [cwi83a] pour avoir des prédictions de sous-couche magique déformée avec $^{270}_{108}\text{Hs}$.

La spectroscopie autour de la sous-couche magique déformée $^{252}_{100}\text{Fm}$ est actuellement un sujet dynamique et prospère qui a connu de profondes évolutions ces dernières années.

Après s'être attachées à l'étude des propriétés collectives de noyaux pair-pairs, les expériences sont désormais plus axées sur les noyaux impairs ou états de quasi-particules. La spectroscopie de ^{253}No a été raffinée [her02a, rei05a, eec06a, her09a] et nous avons mené une étude exhaustive de ^{251}Md par spectroscopie prompt électronique et gamma et après décroissance alpha de ^{255}Lr [cha06a, cha07a, the08a]. Récemment, la spectroscopie prompt de ^{255}Lr a pu être réalisée [ket09a].

Un des résultats les plus marquants des dernières années concerne l'étude d'isomères K dans le noyau pair-pair ^{254}No [her06a, tan06a]. Etude suivie par celles de ^{250}Fm [gre08a] et $^{250,252}\text{No}$ [pet06a, rob08a, sul07a]. Ces études permettent, comme dans les noyaux impairs, l'étude de configurations de particules individuelles. L'accord très approximatif entre les données expérimentales et les calculs théoriques est surprenant et doit être tiré au clair. Les expériences sont pour la communauté l'occasion d'un retour vers les travaux de A. Ghiorso qui avaient permis de découvrir dans les années 70 ces isomères K dans ^{250}Fm et ^{254}No [ghi73a]. Rétrospectivement,

la précision de ces études datant de près de 40 ans reste étonnante.

Les seuls états excités connus dans les noyaux $Z > 104$ sont tous des isomères, probablement K . La présence de tels états pourrait renforcer la stabilité de ces noyaux [xu04aa]. Un cas emblématique est celui de ^{270}Ds [hof01a] pour lequel la section efficace de réaction $^{207}\text{Pb}(^{64}\text{Ni},3n)^{270}\text{Ds}$ est exceptionnellement élevée.

- Synthétiser les noyaux les plus lourds impose d'étudier le mécanisme de réaction. Si ces études ne constituent pas notre objectif principal, elles restent absolument indispensables : comprendre comment former au mieux les éléments super-lourds, produire de nouveaux isotopes proches de la vallée de stabilité bêta grâce à de nouvelles réactions ou avec des faisceaux radioactifs. Il s'agit non seulement de prédire les sections efficaces, mais aussi d'optimiser les énergies de bombardement puisque les fonctions d'excitation sont très étroites. A l'inverse, la structure du noyau (caractère magique, densité de niveau, forme) intervient dans le mécanisme. Structure et mécanisme sont donc intimement liés. Je tiens ici à souligner l'importance de telles études dans la perspective des faisceaux de Spiral2 : la possibilité d'utiliser des faisceaux radioactifs afin de synthétiser des isotopes lourds riches en neutrons est primordiale. Ce sujet est en partie développé dans une des lettres d'intention Spiral2 [spi06a].
- De nombreux travaux ont visé à chercher des éléments super-lourds dans la nature. Des traces ont été cherchées dans différentes sources terrestres, dans les météorites, sur la lune, dans des poussières cosmiques... Une question intéressante est celle de la possible synthèse d'éléments super-lourds dans la nature ; l'explosion de supernovæ de type II (processus r de nucléosynthèse) étant une source probable [mel74a, mat76a, kra93a, rau94a, pfe01a, cam03a]. La découverte de Es et Fm dans les débris de l'explosion de la bombe thermonucléaire "Mike" [ghi55a] indique que ces éléments ont dû être synthétisés dans la nature, et pointe la similitude entre explosion thermonucléaire et processus r . Après "Mike", d'importants travaux longtemps restés secrets tant aux Etats-Unis qu'en Union Soviétique ont eu pour objectifs l'étude de flux de neutron et la production d'isotopes par capture neutronique à l'aide d'explosions thermonucléaires.

Ces expériences étaient intégrées dans des programmes d'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques. Les objectifs et l'ampleur de tels programmes ont de quoi surprendre. Il s'agit aux Etats-Unis du programme "Plowshare" [plo97a] de 1957 à 1973 avec 27 tirs dont au moins 8 dédiés aux éléments lourds ("Heavy Elements Program") et à la neutronique. En Union Soviétique, le programme "Peacefull Nuclear Explosions" [nor98a] de 1965 à 1988 a consisté en 122 explosions avec entre autres 14 tirs "Halite" dédiés à la production de transplutoniens.

Malgré les moyens spectaculaires déployés, le bilan scientifique apparaît maigre tant du point de vue de la synthèse (l'élément le plus lourd observé est ^{257}Fm) que de la simulation du processus r : voir entre autres [hof64a, bel65a, dor65a, los65a, bel67a, bel67b, ing69a, ebe72a, ada96a, bec04a].

- Les propriétés atomiques des éléments les plus lourds restent, comme leurs propriétés nucléaires, mal connues. Les énergies de liaison des électrons ainsi que les taux de

transitions (fluorescence, Auger, Coster-Kronig) reposent sur des modèles ou des évaluations.

La connaissance de ces processus a un intérêt évident pour la physique atomique, mais peut également avoir des conséquences sur la physique nucléaire :

- la relaxation de l'atome après émission d'électrons de conversion s'accompagne de rayonnements qui, étant détectés, ne peuvent être ignorés,
- la spectroscopie optique (LASER) permet de mesurer avec une précision remarquable les propriétés d'états fondamentaux ou d'isomères : spin, moment quadripolaire électrique, moment magnétique. Les éléments les plus lourds étudiés par cette technique sont ^{253}Es [wor68a, wor70a] et ^{255}Fm [sew03a, bac05a]. De telles mesures devraient être possibles à moyen terme grâce aux faisceaux hyper-intenses et LINAG, au séparateur spectromètre S3 et au dispositif DESIR,
- la mesure de rayons X peut, grâce à la technique de l'horloge atomique, permettre de déduire des temps de vie de l'ordre de 10^{-18} s (voir par exemple [wil04a]). Une expérience exploitant cette technique doit être réalisée à GANIL auprès de VAMOS fin 2009 [jac08a].

Notons pour l'anecdote un autre effet qui contribue à l'instabilité des atomes super-lourds : les atomes de numéro atomique supérieur à environ 172 doivent être instables vis-à-vis de l'émission de positron. La couche atomique la plus liée $1s_{1/2}$ doit en effet atteindre une énergie de -511 keV (voir par exemple [pie68a, rei81a]).

- La chimie des éléments super-lourds peut être d'un grand intérêt pour la physique nucléaire. Les propriétés chimiques d'un élément étant établies d'une part, elles peuvent être exploitées d'autre part pour assigner le numéro atomique de noyaux issus d'une chaîne de décroissance, et par conséquent confirmer le numéro atomique de nouveaux éléments. L'étude des propriétés chimiques d'éléments les plus lourds pose d'autre part la question de la validité du tableau de Mendeleïev pour les numéros atomiques les plus élevés. La mise en service récente du spectromètre TASCÀ à GSI, en grande partie dédié à la chimie des éléments super-lourds, permet d'attendre de nombreux résultats dans ce domaine.
- La masse est une des quantités les plus fondamentales du noyau et des plus contraignantes vis-à-vis de la théorie. Dans la plupart des cas, la masse est déduite, de proche en proche, des énergies de décroissance alpha. La précision des masses est donc assujettie à la précision des mesures et aux biais éventuels de la décroissance alpha : (i) la transition la plus intense n'est généralement pas celle entre états fondamentaux de noyaux impairs (ii) la décroissance alpha peut être minoritaire par rapport aux autres modes. La mesure directe de $^{252,253,254}\text{No}$ [blo] avec le piège de Penning SHIPTRAP est dans ce domaine un des résultats les plus marquants des dernières années.
- L'étude de la fission des éléments super-lourds constitue une sonde indirecte de la structure : par exemple mesure de distribution des fragments de fission, multiplicité et énergie de neutrons, énergie cinétique relaxée, ... Je ne développerai ici aucune de ces études mais tiens cependant à mentionner la technique originale du "blocking"

qui a récemment permis de mesurer des temps de vie de fission pour les isotopes de $Z = 114, 120$ et 124 [mor08a].

Ce rapide tour d'horizon permet de percevoir la richesse et diversité de la physique autour des éléments les plus lourds. Dans les paragraphes qui suivent, je me focaliserai sur la spectroscopie des noyaux autour des couches semi-magiques déformées $Z = 100$ et $N = 152$.

3.3.2 Chronologie et méthodologie

Je présente brièvement dans ce paragraphe les expériences les plus marquantes que nous avons réalisées. Cette chronologie est l'occasion de présenter les techniques expérimentales et les objectifs qu'elles permettent de cibler.

Comme évoqué plusieurs fois dans ce mémoire, l'observation en 1998 de bande rotationnelle par spectroscopie gamma prompte de ^{254}No , quasi simultanément à Argonne [rei99a] et Jyväskylä [lei99a], est un fait marquant en structure nucléaire. A Jyväskylä, c'est l'installation d'un ensemble de Ge conséquent auprès du séparateur RITU qui a permis cette expérience. Le caractère quadruplement magique de la réaction $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ conférant une section efficace exceptionnellement élevée d'environ $2 \mu\text{b}$ a également motivé cette étude.

Une fructueuse collaboration s'est alors établie afin d'explorer les isotopes autour de ^{254}No . Après ^{252}No , j'ai contribué en tant que co porte-parole à la spectroscopie prompte de ^{250}Fm . Cette expérience réalisée en septembre 2001 a été analysée avec Audrey Chatillon dans le cadre de son stage de DEA [cha02]. Il s'agissait essentiellement de "se faire la main" sur des données dans l'optique de futures propositions.

Etant donné la forte conversion de transitions $E2$ à basse énergie, correspondant donc aux transitions à bas moment angulaire, la spectroscopie d'électrons s'impose. La spectroscopie de ^{254}No avec SACRED [but96b] (Silicon Array for ConveRSION Electron Detection) en 2002 [but02a, hum04a] constitue un tour de force. La spectroscopie électron de ^{253}No [her02a] et ^{250}Fm [bas06a] sera ensuite réalisée.

Nous avons ensuite entrepris une étude complète de ^{251}Md et ^{255}Lr aussi bien par spectroscopie prompte que retardée et réalisé une série de 6 expériences ; Audrey Chatillon ou moi-même étant porte parole ou co porte-parole.

Dans un premier temps, nous avons tenté en novembre 2002 la spectroscopie prompte de ^{251}Md avec SACRED. L'électronique TDR [laz01a], alors en phase de mise en service, n'a pas permis d'exploiter les données de SACRED. Nous avons cependant mesuré la fonction d'excitation de la réaction $^{205}\text{Tl}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{251}\text{Md}$. Nous réaliserons avec succès la spectroscopie gamma prompte de ^{251}Md en juin 2003.

En parallèle, nous avons étudié la filiation ^{255}Lr , ^{251}Md , ^{247}Es par spectroscopie retardée à Jyväskylä (février 2002) et GANIL (décembre 2003). Une des motivations de l'expérience à GANIL était de bénéficier du dispositif et de la campagne FULIS [gre02a], essentiellement dédiée à la synthèse des éléments super-lourds. Nous avons pour cela

développé, principalement lors d'un séjour sabbatique au GANIL, le dispositif BEST dédié au plan focal de LISE (voir également le paragraphe 2.3.1). Cette expérience a prouvé que LISE-FULIS est un dispositif compétitif pour la spectroscopie des transférmiens.

Les 4 expériences dédiées à l'étude de ^{251}Md ont toutes été analysées avec Audrey Chatillon dans le cadre de sa thèse. Les résultats ont été modélisés en étroite collaboration avec Michael Bender, Paul Bonche et Paul-Henri Heenen. L'essentiel des calculs Hartree-Fock-Bogoliubov [ben03b, bon05a] a été réalisé par Audrey Chatillon ou par moi-même.

Les expériences de décroissance nous ont conduits à mener une étude détaillée des processus atomiques associés aux électrons de conversion. Dès 2006, cette étude est réalisée avec Araceli Lopez-Martens (CSNSM Orsay) et Pr. Christiane Bonnelle (Laboratoire de Chimie Physique - Matière et Rayonnement, Université Pierre et Marie Curie 6).

En complément de la spectroscopie après décroissance, j'ai également participé à l'étude de ^{255}Lr par spectroscopie gamma prompt. Deux expériences ont été réalisées en février 2005 et avril 2008 [ket09a].

Comme évoqué au paragraphe 2.3.2.1, nous avons proposé dès 2004 de réaliser la spectroscopie prompt de ^{255}No à GANIL avec EXOGAM et VAMOS. Après deux tests réalisés en novembre 2004 et juillet 2007, nous devons réaliser le premier test sous faisceau de MUSETT début 2010 pour une possible prise de données fin 2010.

Les expériences énumérées précédemment concernent noyaux pairs et impairs, expériences de spectroscopie prompt ou retardée. Les spécificités de ces deux techniques ont déjà été largement développées dans le cours donné à l'école Joliot-Curie [the03b] : les expériences de spectroscopie prompt, électron et gamma, permettent d'étudier essentiellement les propriétés collectives du noyau alors que la spectroscopie retardée est plus indiquée pour les études d'états de particules individuelles. Insistons sur le fait qu'il s'agit d'une tendance et non d'une généralité. La combinaison des deux est idéale et permet, par exemple, l'étude d'états collectifs basés sur des états spécifiques : par exemple bande rotationnelle bâtie sur des états isomère K comme dans ^{250}Fm [gre08a] ou bande rotationnelle étiquetée soit par la décroissance isomère, soit par la décroissance de l'état fondamental de ^{255}Lr [ket09a].

Si la spectroscopie au plan focal permet d'utiliser des faisceaux plus intenses que pour la spectroscopie prompt, cet avantage est partiellement contrebalancé par la statistique minimale requise afin d'exploiter le spectre, et par la nécessité de peupler le noyau père. Dans le cas de la spectroscopie prompt, il s'agit de quelques centaines d'événements alors qu'au moins mille sont souhaitables pour établir des schémas par décroissance. Lorsque l'on établit une bande rotationnelle par spectroscopie prompt, les coups sont presque équitablement répartis sur l'ensemble des transitions. En spectroscopie retardée, seuls quelques canaux de désexcitation concentrent l'essentiel de la statistique puisque la décroissance alpha est très sélective. Hormis les voies triviales entre fonctions d'onde similaires, l'intensité chute rapidement d'au moins un ordre de grandeur. Une statistique confortable est également souhaitable pour observer des coïncidences alpha-gamma ou alpha-électron. Le rapport d'embranchement alpha peut être également faible avec une

contribution majoritaire de la fission ou de la capture électronique.

Si la spectroscopie simultanée prompte et retardée reste idéale en ce qui concerne les objectifs, cette combinaison n'est techniquement pas optimale puisque les intensités de faisceaux exploitables diffèrent d'au moins un ordre de grandeur : de quelques pA pour la spectroscopie prompte jusqu'à plusieurs μA pour la spectroscopie retardée. C'est pour cette raison que notre stratégie pour l'étude de ^{251}Md a consisté à effectuer séparément spectroscopie prompte et retardée. Ces études sont passées en revue dans les paragraphes qui suivent.

3.3.3 Spectroscopie prompte : modes collectifs

L'étude de ^{251}Md par spectroscopie électron et gamma prompte s'inscrit dans un programme de recherche mené à l'université de Jyväskylä, tant sur les noyaux pairs que impairs.

Plusieurs options sont généralement offertes afin d'assigner les configurations et interpréter le comportement des bandes rotationnelles.

- Exploitation du moment d'inertie : cette information est souvent peu instructive pour les noyaux impairs puisque différant très peu d'une configuration à l'autre ; les calculs théoriques n'atteignant pas une précision suffisante pour discriminer.
- Avec quelques hypothèses et en prenant toutes les précautions liées à l'empirisme de la technique, l'extrapolation de Harris et la systématique de Grodzin permettent de déduire le moment quadripolaire électrique (ou paramètre de déformation) : voir par exemple [her02b]. L'accord avec les calculs de type HFB est remarquable (voir [cha02]). Je suis cependant sceptique quant à la validité de cette technique pour les noyaux impairs normalement déformés (ND). Il n'y a en effet aucune justification du développement du moment angulaire I en puissances paires de la fréquence de rotation. Une grande régularité du moment d'inertie est nécessaire pour que l'ajustement soit significatif, ce qui n'est à mon avis pas le cas pour les séquences ND à basse fréquence. J'ai testé cette technique avec les bandes rotationnelles d'actinides avec des résultats peu convaincants. J'obtiens de plus pour ^{253}No des résultats très dépendant des transitions considérées et mettant en doute l'interprétation de [rei05a].
- Les noyaux $K \neq 0$ tels que ^{251}Md se distinguent par une brisure de symétrie par renversement du temps et par un schéma de décroissance caractéristique : deux séquences de transitions $E2$ connectées par des transitions $M1$ généralement converties, le rapport d'intensité donnant accès au moment magnétique de la tête de bande. L'intérêt de réaliser à la fois la spectroscopie gamma et électron est ici évident. Notre étude de ^{251}Md par spectroscopie électron n'a malheureusement pas été concluante pour des raisons techniques. Pour l'interprétation, nous avons comparé les empreintes de spectres gamma modélisées à l'empreinte expérimentale. Une démarche similaire a permis d'interpréter la bande rotationnelle de ^{253}No , telle que mesurée à Jyväskylä [eec06a, her09a]. Les moments magnétiques et énergies de transitions ont été calculés grâce au modèle HFB pour chacune des configurations les

plus probables. Ceci nous a permis de prédire les rapports d'intensité $T(M1)/T(E2)$ et de les confronter à l'expérience : voir [cha05a, cha07a] et figure 3.6.

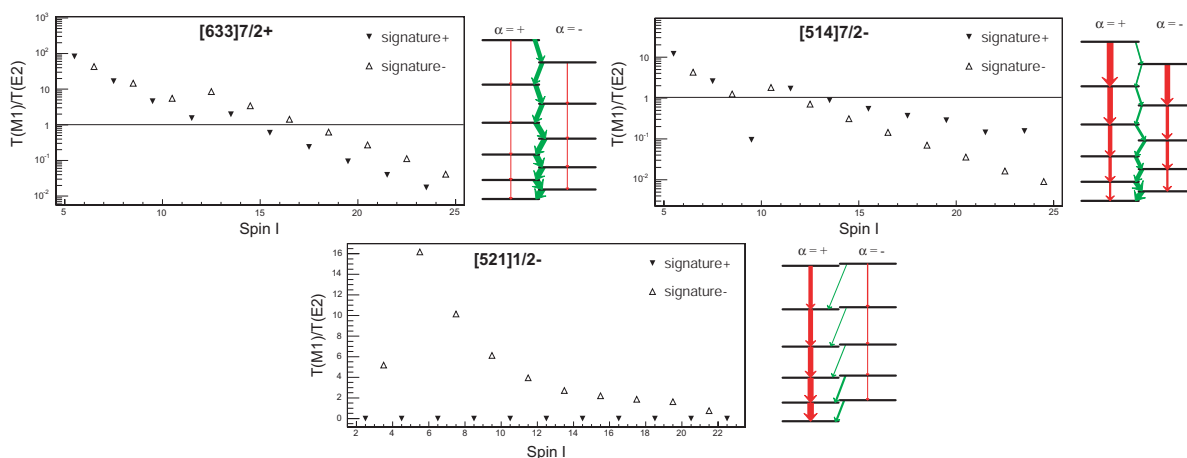


Fig. 3.6 – Rapport de taux de transition $T(M1)/T(E2)$ pour différentes configuration de ^{251}Md . Les figures sont tirées de [cha05a].

La séquence de transitions $E2$ observée dans ^{251}Md a été assignée à la tête de bande $1/2^-$ étiquetée par le label de Nilsson $[521]1/2^-$. D'après l'étude de spectroscopie retardée (voir paragraphe suivant 3.3.4), il s'agit d'un état excité à 55 keV, en accord avec nos calculs HFB.

L'état $[521]1/2^-$ est issu de la couche sphérique $2f_{5/2}$ située au dessus de $Z = 114$ et dont l'énergie diminue fortement avec la déformation. En sondant cette orbite dans un noyau déformé, on a donc une vue partielle de noyaux sphériques plus lourds, en l'occurrence $Z = 114$.

La démarche adoptée peut être vue comme une étape visant à explorer les orbitales impliquées dans la structure des noyaux les plus lourds. Lors de cette étude, nous n'avons pu mettre en évidence la séquence bâtie sur l'état fondamental $7/2^-$ ni sur l'état excité $7/2^+$ qui n'est d'ailleurs pas encore observé⁶. La détection simultanée de rayonnements gamma et électron avec SAGE devrait être très précieuse et puissante pour éclaircir ces points.

3.3.4 Spectroscopie retardée : excitation de particules

Les études après décroissance alpha au plan focal de spectromètres complètent les expériences de spectroscopie prompte en mettant l'accent sur l'étude des états de particules individuelles. Cette particularité est intimement liée aux propriétés de la décroissance alpha qui privilégie la population d'états de basse énergie, avec peu de transfert de moment angulaire, et pour des fonctions d'ondes père et fils similaires. Du

6. Notons que nous avons des indications quant à une deuxième séquence rotationnelle; la faible statistique ne permettant pas de conclure.

point de vue expérimental, la spectroscopie au plan focal du spectromètre (i) implique un très bas bruit de fond permettant l'étude de canaux à très faible statistique (ii) permet l'étude d'états isomériques (iii) n'impose quasiment pas de limites quant à l'intensité de faisceau utilisable (iv) permet, de part la filiation, l'étude simultanée de plusieurs noyaux. L'étude de ^{251}Md après décroissance alpha de ^{255}Lr est donc le complément idéal de la spectroscopie prompt pour étudier les états de particules individuelles proton.

Nous avons réalisé deux expériences similaires à l'université de Jyväskylä et au GANIL ; expériences complémentaires en terme de détection plan focal et donc d'information obtenue.

L'utilisation d'outils de détection performants permet d'observer la structure fine alpha et l'éventuelle présence en coïncidence de transitions gamma ou électron qui permettent d'ébaucher des schémas de niveau. L'assignement du spin et de la parité des états est grandement facilité par l'analyse en terme de facteur d'empêchement (ou "Hindrance Factor" HF), quantité qui peut être comparée à $\log ft$ utilisé en décroissance bêta ou au facteur spectroscopique. Si les règles de sélection de la décroissance alpha sont peu contraignantes, l'intensité des transitions évolue fortement selon les états impliqués. La probabilité de décroissance alpha résulte de la combinaison de trois effets : énergie de transition, charge et recouvrement des fonctions d'onde. Une analyse de type HF consiste à éliminer la partie "triviale" macroscopique due à l'énergie et à la charge et à ne conserver que la partie liée à la structure.

Le HF est simplement le rapport entre le temps de vie partiel expérimental et le temps de vie calculé pour la même énergie grâce au formalisme de pénétration de barrière et sans aucun ingrédient microscopique. Des règles empiriques permettent de lier HF aux changements de spin, parité et projection de spin Σ entre états initial et final : voir par exemple [sea90a].

L'analyse en terme de facteur d'empêchement combinée à la détection électron et gamma, et contraint par le nombre limité d'états prédits par la théorie à proximité du niveau de Fermi a permis d'obtenir le schéma de niveaux présenté figure 13 de la référence [cha06a]. Nous passons ici sur les détails les plus subtils de l'analyse qui sont détaillés dans les articles [cha06a, the08a] ainsi que dans la thèse [cha05a].

Malgré sa puissance, la technique de décroissance alpha présente quelques biais expérimentaux et inconvénients :

- La conversion de transitions en coïncidence avec la décroissance alpha peut distordre les spectres et fausser les énergies de transitions alpha. Afin d'interpréter au mieux les données expérimentales, nous avons mené une étude détaillée des transitions atomiques liées à la conversion. J'y reviendrai au paragraphe 3.3.5.
- La forte sélectivité de la décroissance alpha peut proscrire l'observation d'états peuplés uniquement par transitions alpha fortement empêchées et donc de très faible intensité. L'état $[633]7/2^+$ de ^{251}Md prédit à basse énergie par tous les modèles a pu ainsi échapper à notre détection. De la même manière, l'alimentation de l'état $3/2^-$ de ^{247}Es n'est pas favorisée ; il n'est cependant pas exclu qu'il s'agisse de l'état fondamental.

Nos résultats expérimentaux ont été confrontés à des calculs théoriques. Comme pour les résultats obtenus par spectroscopie prompte, nous avons réalisé des calculs HFB avec force de Skyrme Sly4. La précision des modèles n'étant pas meilleure que 200 keV, il est inutile de comparer l'énergie absolue d'états à l'intérieur de cette fourchette. Par exemple, nos expériences concluent à des états $1/2^-$ et $7/2^-$ très proches en énergie. Le fait que la théorie prévoit une inversion dans l'ordre de ces états, mais toujours séparés d'environ 200 keV, ne permet pas de conclure. De même, les légères différences entre modèles HFB avec interaction de Skyrme (nos travaux) et HFB avec interaction de Gogny [gou] ou Woods-Saxon [cwi94a, par04a] en ce qui concerne la position respective des états $1/2^-$ et $7/2^-$ ne permettent pas, seules, de tirer des conclusions quant à leurs mérites respectifs. Par contre, l'écart relatif entre ces états $1/2^-$ et $7/2^-$ le long d'une chaîne isotopique ou plus généralement entre états de particules individuelles donné est instructif : une vue d'ensemble permet de dégager des tendances, par exemple position relative d'états de particules, évolution et effet de la déformation, etc. Au-delà de la simple comparaison des schémas de niveau de ^{255}Lr , ^{251}Md et ^{247}Es , nous donc avons mené une étude globale des noyaux impairs en protons autour de $Z = 101$.

Les résultats sont résumés figures 14, 15, 16 et 17 de la référence [cha06a]. Je résume ici les grandes lignes de la discussion.

Dans les isotopes de Es, la position relative entre l'orbite favorisant la déformation $7/2^+$ ($1i_{13/2}^+$) et $7/2^-$ ($1h_{9/2}^-$) la défavorisant présente un maximum pour $N = 152$, nombre semi-magique déformé. Nos calculs favorisent plutôt $N = 150$, ce qui est lié à un défaut de la force de Skyrme Sly4. L'écart relatif entre ces deux orbites est par contre du bon ordre de grandeur ce qui suggère que la couche sphérique $1i_{13/2}^+$ soit correctement placée.

Expérimentalement, les états $7/2^-$ et $1/2^-$ sont proches en énergie pour les isotopes d'einsteinium ainsi que dans les deux seuls cas connus ayant plus de protons (^{251}Md et ^{255}Lr). Ceci suggère que l'orbite $1/2^-$ issue de la couche sphérique $2f_{5/2}$ doit être légèrement poussée vers le haut. Similairement, la position de l'orbite $3/2^-$ montre que la couche sphérique correspondante $2f_{7/2}^-$ devrait également être poussée vers le haut.

En tenant compte des écarts relatifs, il apparaît que l'écart entre les deux partenaires spin-orbite $2f_{5/2}$ et $2f_{7/2}$ est surestimé d'environ 500 keV. Cette tendance est un défaut général du modèle HFB qui souffre d'un "splitting" spin-orbite surestimé dans les noyaux lourds (voir par exemple [ben99a, ben03b]) alors que les théories de champ moyen relativiste RMF tendent à mieux reproduire cet écart. Les sources et conséquences de cette interaction spin-orbite sont suffisamment importantes pour que l'on s'attarde quelques instants sur ce problème. Le potentiel spin-orbite s'exprime en fonction du potentiel par $V_s = -\frac{1}{r} \frac{\partial V(r)}{\partial r}$. Selon cette relation, l'interaction affecte principalement les orbites au centre du noyau. Si une déplétion apparaît au centre du noyau, cela peut affecter l'intensité et le signe de l'interaction dans cette région. Etant donné le numéro atomique élevé des noyaux considérés ici, la forte répulsion coulombienne facilite une telle déplétion [ben01a, ben99a], voir même tend à créer des noyaux bulles [die97a, dec99a]. Cette effet est accentué par la polarisation d'orbitales de haut j [afa05a].

La densité au centre du noyau affecte la position des partenaires $\pi 3p_{1/2-3/2}$, $\pi 2f_{5/2-7/2}$, $\nu 3d_{3/2-5/2}$ impliqués dans la structure des éléments super-lourds (voir les figures 4.3

et 4.4). Dans le cas de modèles de champ moyen relativiste RMF, l'écart résultant entre les orbites $3p_{3/2}$ et $2f_{5/2}$ aura tendance à ouvrir l'intervalle $Z = 120$. A l'inverse, les forces de Skyrme avec leur potentiel spin-orbite plus élevé tendent à privilégier $Z = 126$. De même, les modèles de type Woods-Saxon ou Nilsson surestimant la séparation des orbitales proton $\pi 2f_{5/2-7/2}$ privilégient $Z = 114$. Voir pour plus de détails [ben99a, ben01a, afa05a].

La spectroscopie d'isotopes de Es, corroborée pour la première fois pour des numéros atomiques plus élevés avec ^{251}Md et ^{255}Lr infléchissent très légèrement les prédictions HFB puisque nous suggérons d'augmenter l'intervalle $Z = 114$ d'environ 200 keV entre les orbites $1i_{13/2}$ et $2f_{5/2}$, $Z = 126$ restant cependant privilégié.

D'après notre étude, le modèle HFB montre sa force et révèle quelques faiblesses. Les données spectroscopiques obtenues sur les noyaux les plus lourds montrent un accord remarquable : dans tous les cas l'accord est meilleur que 500 keV. Le pouvoir de prédiction de HFB est donc étonnement bon compte tenu du fait qu'on est ici à près de 50 unités de masse du dernier noyau stable ^{208}Pb .

3.3.5 Effets atomiques

3.3.5.1 Préambule

Lors de l'interprétation des expériences sur la décroissance de ^{255}Lr , nous avons dû prendre en compte les processus atomiques liés à la conversion de transitions nucléaires. De fil en aiguille, nous avons réalisé une étude approfondie des transitions atomiques, Auger et Coster-Kronig de l'atome d'einsteinium. L'objectif de cette étude était double :

- interpréter au mieux les données expérimentales, confirmer la présence de transitions qui échappent à la détection directe.
- La spectroscopie nucléaire peut-elle contribuer à une meilleure connaissance de l'atome : peut-on mesurer ou déduire des taux de transition ou énergies de transitions atomiques à partir d'expériences de décroissance ?

L'ensemble de cette étude associant physique nucléaire et physique atomique a fait l'objet d'une publication [the08a]. Je ne répéterai donc pas ici les résultats de cette étude mais décris l'origine et itinéraire de ces travaux et reviens sur les principales conclusions et perspectives.

3.3.5.2 Motivations et méthodologie

Avec l'augmentation du numéro atomique et de la masse du noyau, la conversion électronique est un processus de plus en plus probable. Cette occurrence est due à la fois à l'augmentation de la densité électronique et aux énergies de transitions nucléaires de plus en plus faibles dû à la compression des spectres, ou en d'autres termes à la densité nucléaire et complexité spectrale croissante.

Mesurer la conversion est un outil puissant pour déterminer la multipolarité des transitions, mais introduit un biais expérimental qu'il faut déceler, comprendre et si possible

exploiter. Ce biais est communément appelé sommation des électrons, bien connu et pris en compte depuis longtemps lors de l'interprétation d'expériences de décroissance. Lorsque la décroissance alpha du noyau père peuple un état excité du noyau fils, les processus atomiques liés à la désexcitation de ce dernier peuvent être absorbés dans le détecteur d'implantation, et donc se sommer avec la transition alpha.

La relaxation atomique comblant la lacune créée par la conversion consiste soit en la fluorescence X, soit en l'émission d'électrons Auger ou Coster-Kronig. Après émission d'une de ces transitions, l'atome réside avec une (X) ou deux (électron) vacances qui seront à leur tour comblées par d'autres transitions atomiques. Cette cascade s'achève lorsqu'il n'y a plus d'énergie disponible : voir la figure 1 de la référence [the08a]. La sommation de chacune de ces transitions atomiques totalement ou partiellement absorbées dans le détecteur d'implantation conduit à la distorsion du spectre alpha et à la présence de pics satellites (voir la figure 2 de la référence [the08a]). Ces pics doivent être interprétés correctement afin de ne pas conclure à des états nucléaires inexistantes. Comme indiqué au début de ce paragraphe, nous avons fait face à une telle situation lors de l'étude de la filiation de ^{255}Lr : transition $M1$ de 50 keV dans ^{247}Es en coïncidence avec la décroissance alpha de ^{251}Md (voir le schéma de décroissance [cha06a], figure 13). Avant d'aboutir à cette conclusion, nous avons réalisé une simulation de cette cascade afin de vérifier la concordance entre les hypothèses et les spectres mesurés. Une première approche simplifiée du problème a été menée avec Audrey Chatillon [cha06a]. Le dispositif expérimental BEST a été introduit dans le code de simulation GEANT4 [ago03a] : détecteurs Si, clover EXOGAM et mécanique susceptible d'absorber ou diffuser les rayonnements. En ce qui concerne EXOGAM, nous avons largement bénéficié de développements faits par Marc Labiche pour la collaboration TIARA [lab09a]. La nécessité de maîtriser et connaître parfaitement le dispositif expérimental apparaît crucial pour de telles études.

Nous avons ensuite trouvé un intérêt commun avec Araceli Lopez-Martens faisant face à une problématique similaire pour l'interprétation de données collectées à Dubna [lop06a]. Afin de simuler les cascades atomiques le plus fidèlement possible, nous nous sommes heurtés à deux problèmes principaux :

- il n'existe pas de tables, évaluations ou calculs, des transitions Auger ou Coster-Kronig au-delà de $Z = 100$. Une simulation complète doit en effet inclure toutes les transitions radiatives et non radiatives : taux de radiation et énergies. En se limitant aux vacances initiales L , il s'agit d'un peu moins de cent transitions possibles.
- les évaluations de la table des isotopes [fir96a] ou de Krause [kra79a] sont entachées de grandes incertitudes, jusqu'à 50 % pour certaines transitions, ce qui ne saurait être satisfaisant pour réaliser des simulations fidèles.

Quelques recherches bibliographiques nous ont conduits vers Marie-Martine Bé du laboratoire National Henri Becquerel (Saclay) qui a confirmé le manque de données ou évaluations pour les éléments les plus lourds. Marie-Martine Bé nous a cependant guidés vers Pr. Christiane Bonnelle du laboratoire Chimie Physique - Matière et Rayonnement de l'université Pierre et Marie Curie. Ch. Bonnelle, spécialiste des processus atomiques dans les noyaux lourds a bien voulu réaliser de nouveaux calculs de l'atome d'einsteinium. L'état de l'art des calculs atomiques a été mis en œuvre pour modéliser les phénomènes

de relaxation après vacance initiale $L1$, $L2$ ou $L3$.

3.3.5.3 Récapitulatif des résultats et conclusions

Les nouveaux calculs de l'atome d'einsteinium révèlent des écarts spectaculaires par rapport aux évaluations précédentes : jusqu'à 20 % pour les taux de transitions. Ces écarts peuvent cependant être compensés par le jeu de cascades de transitions. La quantité significative est en effet le taux de transition effectif qui résulte du comblement successif de lacunes. Nous avons également noté le rôle primordial de transitions de basse énergie comme $L1 - L3X$ (f_{13}) ou $L2 - L3X$ (f_{23}). Ces transitions contribuent peu à l'énergie sommée mais leur taux très élevé leur confère un rôle clef dans la modélisation des cascades. Globalement nous concluons pour nos conditions expérimentales à une influence, faible mais non négligeable, des taux de transition atomiques sur les spectres finaux qui convoluent de nombreux processus et effets. Parmi ces effets, nous avons étudié l'influence de la profondeur d'implantation et de la résolution du détecteur : quels critères ou conditions expérimentales doivent être remplis afin d'être discriminant ? Une bonne résolution d'environ 15 keV, techniquement réalisable, et/ou une profondeur d'implantation la plus élevée possible pour minimiser la probabilité d'échappement sont des critères positifs.

Discriminer entre différents scénarii grâce aux spectres alpha semble cependant une tâche délicate. Les indicateurs expérimentaux sont en effet très largement lissés par l'utilisation des détecteurs d'implantation qui somment différentes contributions. Pour surmonter cette difficulté, nous proposons la mesure directe de rayons X grâce à un détecteur de photons de basse énergie. L'utilisation de système de transport par jet de gaz serait une alternative mais le prix à payer est la perte d'information sur la filiation des noyaux.

Si la mesure de taux atomiques est une tâche ardue qui mériterait de consacrer, à long terme, d'importants efforts, leur prise en compte reste absolument indispensable pour interpréter au mieux les spectres de désexcitation nucléaire. On ne peut ignorer la physique atomique puisque les processus de relaxation génèrent une structure fine dans les spectres de désexcitation alpha. Il est important de noter le caractère universel des pics satellites et traînes dans la décroissance de noyaux déformés. Pour un noyau pair-pair, l'alimentation de l'état 2^+ à environ 50 keV d'énergie d'excitation génère une traîne à gauche de la transition la plus intense $0^+ \rightarrow 0^+$.

L'interprétation de spectres alpha requiert donc la prise en compte complète de processus atomiques et nucléaires. L'étude que nous avons menée constitue à cet égard un exemple fructueux de collaboration interdisciplinaire.

3.3.6 Bilan

La spectroscopie prompt de ^{254}No effectuée en 1998 parallèlement à Jyväskylä en Finlande et Argonne aux Etats-Unis a marqué un tournant dans l'étude de noyaux super-lourds. Ces expériences pionnières suivies par celles d'autres isotopes pair-pairs de la région ont permis d'établir des jalons et repères. L'amélioration et évolution des techniques

expérimentales permet depuis quelques années l'étude de noyaux impairs ou d'isomères K , et donc de se concentrer sur l'étude des états de particules individuelles.

L'étude exhaustive du noyau impair en protons ${}_{101}^{251}\text{Md}$ a constitué le fil rouge de mes travaux pendant plusieurs années. Ces travaux ont consisté en l'étude des états de particules individuelles, des états collectifs et en la modélisation par des calculs de champ moyen HFB. De nouvelles informations ont également été obtenues dans les noyaux de ${}_{103}^{255}\text{Lr}$ et ${}_{99}^{247}\text{Es}$ et nous avons élargi la modélisation à tous les isotopes impairs en proton de cette région.

Nous avons réalisé 4 expériences afin d'étudier ${}^{251}\text{Md}$ de la façon la plus complète possible. La démarche consistant à étudier un noyau sous plusieurs angles me semble appropriée. Les règles de sélection, facteur d'empêchement, conversion électronique ou autres limitations techniques font qu'on ne peut extraire toutes les observables d'une seule et unique expérience. Spectroscopie gamma ou électron prompt d'une part, et spectroscopie retardée d'autre part ont avantages et inconvénients mais la complémentarité des deux techniques permet une étude exhaustive et solide.

La spectroscopie gamma prompt réalisée à l'université de Jyväskylä en exploitant la technique RDT a permis d'établir une bande rotationnelle construite sur un état excité. La spectroscopie retardée consistant à étudier la décroissance (α) et la désexcitation (γ , électron) de ${}^{255}\text{Lr}$ et de sa filiation au plan focal d'un spectromètre a été réalisée à Jyväskylä et au GANIL. Des schémas de niveaux et configurations de particules individuelles ont pu être établis pour la première fois dans ${}^{255}\text{Lr}$, ${}^{251}\text{Md}$ et ${}^{247}\text{Es}$.

L'étude des noyaux déformés autour de nombres semi-magiques ($Z = 100$, $N = 152$ en l'occurrence) permet de sonder des orbitales issues de couches sphériques dont l'énergie diminue avec la déformation "down-sloping orbitals". On peut avoir ainsi une image partielle de noyaux plus lourds qui seraient beaucoup plus difficiles à produire (en pratique impossible en l'état actuel). Notre étude de ${}^{251}\text{Md}$ a ainsi permis d'étudier l'orbitale proton issue de la couche sphérique $2f_{5/2}$ correspondant à $Z=114$, et donc de sonder partiellement cet élément. Cette approche est assurément à poursuivre.

L'interprétation de résultats expérimentaux n'aurait pu être faite sans modélisation. Tisser des liens étroits avec la théorie me semble judicieux. Au-delà des noyaux de ${}^{255}\text{Lr}$, ${}^{251}\text{Md}$ et ${}^{247}\text{Es}$, la comparaison des données expérimentales avec les calculs pour de larges chaînes isotopique ou isotoniques me semble adéquate afin d'avoir une vision globale permettant de tirer des enseignements. Réaliser une partie des calculs HFB a certainement contribué à une interprétation pertinente. C'est ainsi que nous avons pu déduire force et faiblesse du modèle et pu mettre en doute l'existence de l'intervalle sphérique $Z = 114$.

Outre l'aspect scientifique consistant à étudier des noyaux depuis l'expérience jusqu'à la modélisation, mes travaux comportent un volet instrumental important développé au chapitre 2 : détection, électronique, acquisition, techniques d'analyse. Afin d'interpréter au mieux les données expérimentales, nous avons du prendre en compte les processus de relaxation atomique liés à la conversion : fluorescence et cascade Auger. Nous avons ainsi développé des outils de simulation permettant d'interpréter au mieux les spectres. Nous avons également tenté de discriminer entre différentes modélisations de l'atome grâce aux

données de désexcitation nucléaire. La maîtrise absolue du dispositif expérimental est ici indispensable : nécessité d'avoir des preuves solides pour les événements rares, et simulation du dispositif expérimental pour l'interprétation des effets de relaxation atomique.

Le laboratoire de Jyväskylä présente d'évidents atouts pour l'étude des transférmiens : performances, stabilité, fiabilité. L'expérience réalisée auprès de LISE avec le dispositif BEST a permis d'obtenir des résultats très compétitifs. Mettre en œuvre cette expérience a très largement bénéficié d'une campagne d'expériences dite "FULIS" qui a requis des moyens humains considérables. L'adéquation entre les efforts fournis, la rentabilité du dispositif, de l'accélérateur et le bilan scientifique mérite réflexion.

Les nouveaux résultats obtenus pour ^{255}Lr , ^{251}Md et ^{247}Es ont tous été confirmés par de récentes expériences réalisées à Dubna [hau08a], GSI [ant08a] ou Jyväskylä [ket09a]. Un nouvel isomère a été suggéré dans ^{255}Lr [hau08a] puis confirmé [ant08a, ket09a]. Malgré tous nos efforts, quelques zones d'ombre subsistent dans les 3 isotopes. Pour des raisons inhérentes au système de détection et aux règles de sélection, facteur d'empêchement, temps de vie, ..., l'état $7/2^+$ prédit à basse énergie par tous les modèles n'a pu être observé ; même remarque pour l'état $3/2^-$ qui pourrait être l'état fondamental de ^{247}Es . Dans ^{251}Md , seule la bande de rotation bâtie sur l'état excité $1/2^-$ a été observée. Qu'en est-il de l'état fondamental $7/2^-$ et du probable état excité $7/2^+$?

Pour des raisons aussi bien théoriques qu'expérimentales, nous nous sommes restreints à comparer l'énergie d'excitation, le spin et la parité d'états. Expérimentalement, la mesure de la déformation serait précieuse ; les mesures par spectroscopie optique seraient remarquables. Du point de vue théorique, le calcul de temps de vie et taux de transition (α) donnerait des points de comparaison supplémentaires.

Comme nous l'avons vu précédemment, les modèles HFB et RMF diffèrent par leur prédiction du prochain nombre magique $Z = 120$ ou $Z = 126$. Notre étude tend à exclure $Z = 114$ mais ne permet pas de sonder les orbitales $3p_{3/2}$, $3p_{1/2}$ ou $1i_{11/2}$ permettant de trancher en faveur de l'une ou l'autre hypothèse. Etablir les propriétés de ces orbitales est un objectif à atteindre.

Des futures expériences mettant en œuvre de nouvelles techniques ou dispositifs expérimentaux devront répondre à ces questions. Hormis compléter la spectroscopie de ^{255}Lr et de sa filiation, il me semble indispensable à l'avenir d'obtenir des données concluantes pour d'autres isotopes de Md, Lr afin d'étayer et de raffiner les résultats déjà obtenus. Plus généralement, la spectroscopie n'est établie de façon exhaustive que dans peu de cas. Certains cas ambigus (et notre étude a prouvé que le cas de ^{251}Md l'était) mériteraient à l'évidence d'être revisités.

La spectroscopie gamma de ^{255}Lr réalisée en 2005 et 2008 à Jyväskylä complète et étaye nos résultats obtenus sur ^{251}Md . Cette étude a permis d'exploiter au mieux la puissance de la technique RDT : voir figure 3.7. ^{255}Lr possède en effet un isomère $7/2^-$ à 37 keV décroissant par une transition alpha caractéristique vers l'état fondamental $7/2^-$ de ^{251}Md . Il est dans ce cas possible d'étiqueter les transitions gamma promptes bâties aussi bien sur l'état excité $7/2^-$ que sur l'état fondamental $1/2^-$. Bien que la statistique soit faible, l'étiquetage de l'isomère $7/2^-$ donne de fortes présomptions quant à la présence

de deux séquences $E2$ couplées, en parfait accord avec nos calculs HFB. L'étiquetage par l'état fondamental $1/2^-$ révèle quant à lui une seule séquence $E2$ caractéristique d'un état $K = 1/2$, également en parfait accord avec nos résultats sur ^{251}Md .

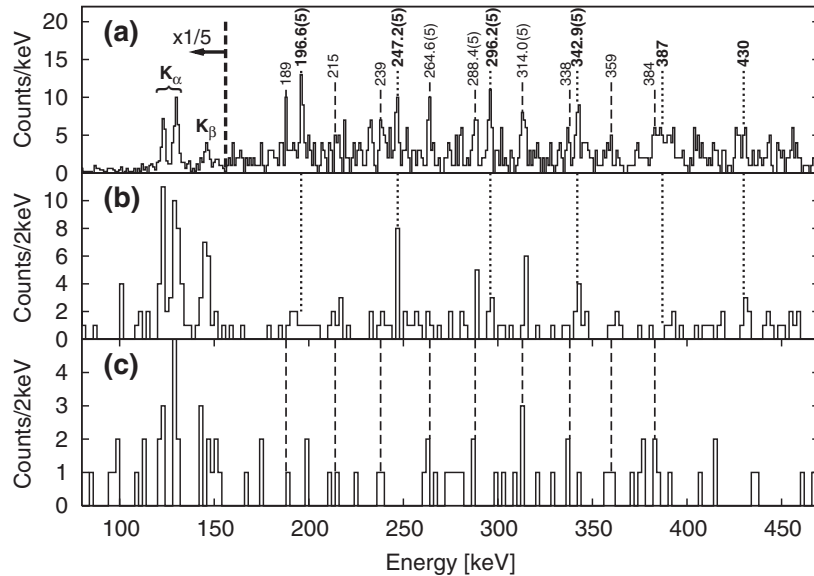


Fig. 3.7 – Spectres gamma prompts de ^{255}Lr (figure tirée de [ket09a]). Spectre obtenu par étiquetage du recul (a), étiquetage par la décroissance de l'état $1/2^-$ (b) et $7/2^-$ (c).

Le spectre de ^{255}Lr bâti sur l'état $1/2^-$ nous fournit une énigme : les énergies des transitions sont en effet similaires à 3 keV près à celles de ^{251}Md . Cette similarité rappelle fortement le phénomène de bandes jumelles décrit au paragraphe 3.1.5, et inspire donc une analyse similaire. La similitude est-elle accidentelle ou résulte-t-elle d'effets de compensation comme pour les bandes SD ? En l'absence d'interprétation, cette particularité pourrait ébranler nos certitudes.

L'étude de ^{247}Es , ^{251}Md , ^{255}Lr laisse apparaître des zones d'ombre et ouvre des perspectives sur lesquelles je reviendrai au chapitre suivant. Un rapide tour d'horizon de la région des transférmiens permet de constater d'importantes lacunes : spin et parité de l'état fondamental incertain ou inconnu ; très peu d'états excités connus ; vaste friche à explorer en direction de la vallée de stabilité β ... La spectroscopie prompt de ^{255}Lr réalisée avec RITU et JUROGAM permet d'atteindre les limites actuelles de cette technique. Les limitations de la spectroscopie après décroissance sont également entrevues. Des progrès sont attendus dans les prochaines années avec les nouveaux faisceaux et instruments.

Chapitre 4

Perspectives

Dans les chapitres 2 et 3 précédents, j'ai résumé mes travaux consacrés aux développements instrumentaux et thèmes de physique. Une grande partie de ces travaux est dédiée aux noyaux lourds et super-lourds. Cette thématique est en pleine évolution puisque de très larges et ambitieuses perspectives sont en cours de discussion, en particulier autour des faisceaux de très haute intensité de LINAG, des faisceaux radioactifs de Spiral2 et du séparateur - spectromètre S3. Mes perspectives à court et à long terme s'inscrivent dans ce cadre et donc dans la continuité de travaux réalisés depuis environ dix ans (voir le paragraphe 3.3). Bien que ces éléments suscitent de nombreuses études, je me restreins dans ce mémoire à des objectifs ciblés, à savoir la spectroscopie des actinides et transactinides.

Ce chapitre est articulé de la façon suivante: le contexte scientifique sera rappelé au paragraphe qui suit. Je décrirai ensuite les objectifs scientifiques. La méthodologie sera exposée au paragraphe 4.3: observables, techniques expérimentales, modélisation. Les nouveaux instruments et installations, leurs performances et les collaborations seront ensuite présentés. J'évoquerai au paragraphe 4.5 les perspectives ouvertes par ces nouveaux développements dans un contexte élargi.

4.1 Contexte et état des lieux: les noyaux lourds et super-lourds

J'ai déjà très largement développé l'étude des noyaux lourds et super-lourds au chapitre 3.3 ainsi que dans le cours [the03b]. Je rappellerai donc ici brièvement le contexte et l'état des lieux et suggère au lecteur de consulter ce chapitre et cours pour plus de détails.

4.1.1 Contexte

L'étude des noyaux lourds et super-lourds s'inscrit dans le large contexte des études de physique nucléaire visant à une connaissance la plus complète possible de l'ensemble

des noyaux, à une compréhension la plus profonde des différents phénomènes observés et à une modélisation la plus fidèle et prédictive possible.

L'étude des noyaux les plus lourds permet d'adresser plus spécifiquement les questions suivantes :

- Que sont les noyaux super-lourds et pourquoi existent-ils ?
- Quelles sont les limites de stabilité de la matière nucléaire en fonction du nombre de neutrons, protons et du moment angulaire ?
- Comment modéliser les noyaux super-lourds ?
- Comment les synthétiser ? Les noyaux super-lourds ont-ils été créés dans la nature ? Par nucléosynthèse ?
- Quelles sont leur propriétés atomiques et chimiques, jusqu'où le tableau de Mendeleïev est-il valide ?

Deux approches peuvent être suivies afin d'améliorer notre compréhension des noyaux de charge et masse extrêmes.

La première consiste à repousser les limites en synthétisant les noyaux les plus lourds. Les sections efficaces de production diminuant dramatiquement avec la charge, peu d'informations peuvent être tirées des rares isotopes produits.

La seconde approche consiste à étudier de façon la plus complète possible des noyaux plus légers mais cependant très lourds qui peuvent être produits en quantité substantielle. Les études sont singulièrement compliquées par les difficultés expérimentales et par la finesse des effets. La densité de niveaux augmentant avec le nombre de nucléons, la complexité des spectres et la structure va également en s'accroissant. Mes recherches sont orientées dans cette direction : spectroscopie des noyaux très lourds et super-lourds.

4.1.2 Etat des lieux

L'état des lieux présenté dans ce paragraphe concerne la spectroscopie de noyaux lourds et super-lourds. D'autres aspects comme le mécanisme de réaction, la synthèse ou la chimie ne sont pas traités ici.

La spectroscopie détaillée des transférmiens connaît un essor important depuis une dizaine d'année. La spectroscopie prompte de ^{254}No effectuée en 1998 parallèlement à l'université de Jyväskylä et Argonne a marqué un tournant dans la discipline et a été suivi d'études d'isotopes voisins tant pair-pairs que impairs. La spectroscopie après décroissance a très fortement évolué avec les dispositifs plan focal alliant détection de particules alpha, de rayonnements gamma et d'électron. Les laboratoires de Jyväskylä, Dubna ([lop06a, lop07a, hau08a, hau08b]) et GSI sont les plus actifs dans ce domaine. Malgré d'importants efforts et progrès spectaculaires dans divers laboratoires, les noyaux de transférmiens restent très mal connus. Les données se résument essentiellement aux énergies d'états, spin et parité dans quelques cas, temps de vie d'isomères. Aucune information détaillée sur des états excités (hormis les isomères) telle que temps de vie, moment quadripolaire ou magnétique n'est disponible. L'état des lieux devient dramatique

pour les transactinides : spin et parité de l'état fondamental incertain, très peu d'états excités connus. Les figures 4.1 et 4.2 résument cet état des lieux.

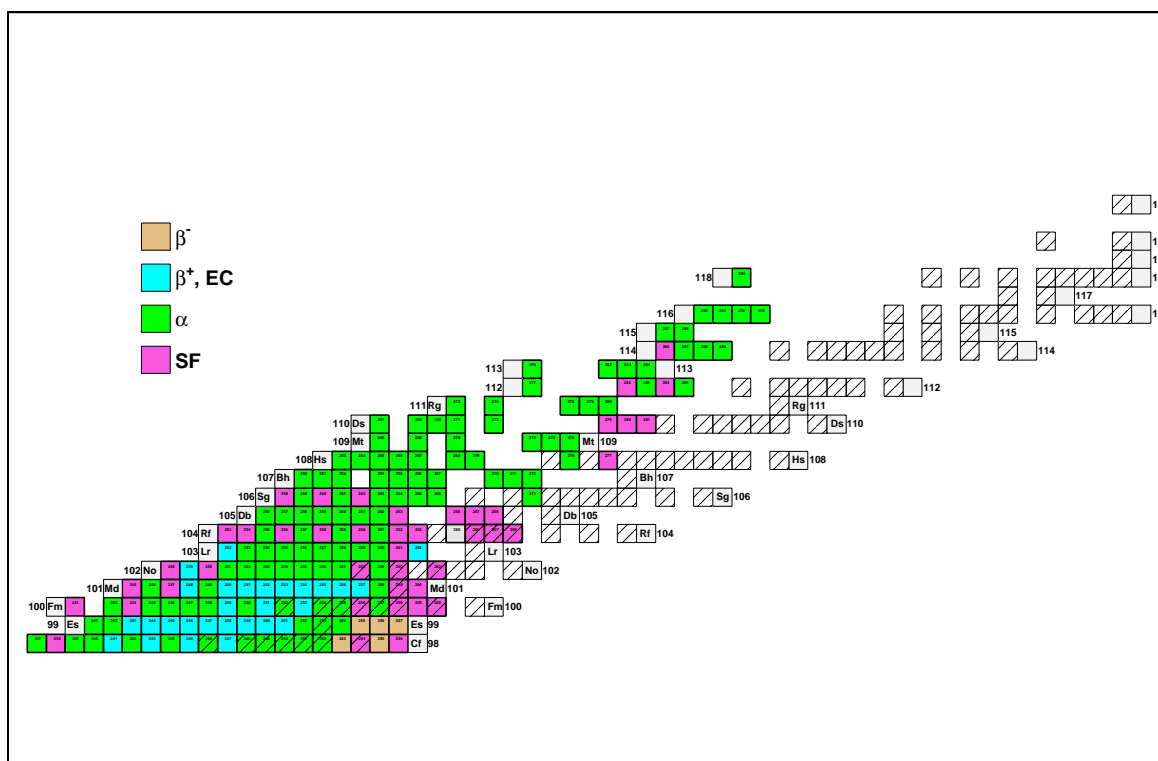


Fig. 4.1 – Carte des noyaux pour les éléments les plus lourds connus. Les noyaux stables vis-à-vis de la désintégration bêta, tels que prévus dans la référence [mol97a], sont hachurés.

Pour résumer, très peu de données spectroscopiques sont connues au-delà de $Z = 103$ aussi bien par spectroscopie prompt que retardée. Curieusement, les noyaux impairs légers de Bk et Es restent assez mal connus et mériteraient, à notre avis, de nouvelles investigations.

Très peu de données sont disponibles, mais aussi très peu d'isotopes sont connus. Les réactions de fusion froide ou chaude ainsi que les sections efficaces correspondantes restreignent fortement les isotopes accessibles pour lesquels la spectroscopie détaillée est possible. Les noyaux sont ainsi situés essentiellement du côté déficient en neutrons (la position de la stabilité bêta restant par ailleurs incertaine pour les transactinides).

L'état des lieux est encore plus rapide à dresser en ce qui concerne les propriétés de l'état fondamental. La spectroscopie optique se résume à ^{253}Es [wor68a, wor70a] et ^{255}Fm [sew03a, bac05a] dans une moindre mesure. La masse n'a pu être mesurée directement que dans $^{252,253,254}\text{No}$ [blo].

Comme mentionné au chapitre 3.3.5, des données atomiques sont inexistantes dans les transfermiens, ce qui mériterait des expériences dédiées.

Etant donné le nombre très restreint de données expérimentales, les comparaisons avec

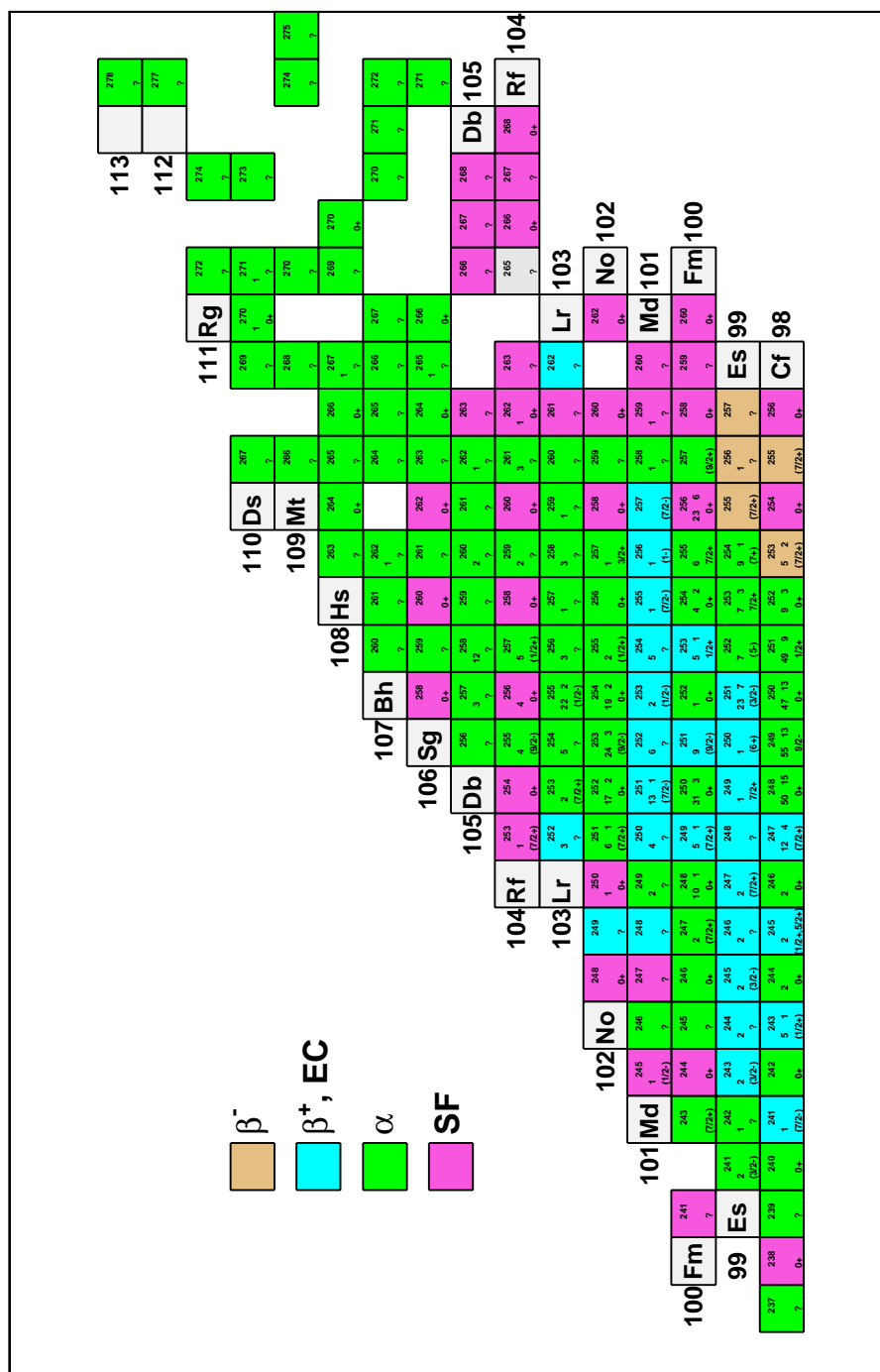


Fig. 4.2 – Carte des noyaux pour les éléments les plus lourds. Sont indiqués pour chaque noyau sous le nombre de nucléons : nombre éventuel d'états excités et bandes rotationnelles connus. Le spin et la parité sont indiqués sur la dernière ligne. Cet état des lieux est pour l'essentiel tiré de la référence [her08a], étendu et mis à jour (au 1er juillet 2009) à l'aide des références [mun89a, hof01a, hes04a, mor04a, asa05a, hes05a, bas06a, her06a, hes06a, cha06a, lop06a, lop07a, cha07a, sul07a, dul08a, gre08a, hau08a, kat08a, ant08a, jep09a, ket09a].

les modèles théoriques ne peuvent être que très locales et pour des observables spécifiques. L'accord entre données expérimentales et modèles est globalement satisfaisant. Le moment d'inertie est fidèle à $\sim 10\hbar^2 / \text{MeV}^{-1}$. Les schémas de niveaux sont reproduits avec une précision d'environ 200 keV, malgré un désaccord pour les isomères K récemment mesurés dans $^{250,252,254}\text{No}$ [pet06a, rob08a, sul07a, her06a, tan06a], ^{250}Fm [gre08a]. Un consensus s'établit autour de la semi-magicité du noyau déformé ^{270}Hs . Les prédictions divergent au-delà de cette région quant à la position d'un îlot de magicité sphérique, les différences étant attribués essentiellement à la paramétrisation de l'interaction spin-orbite.

4.2 Objectifs

Comme indiqué plus haut, l'objectif de la physique nucléaire, et de la spectroscopie des noyaux lourds et super-lourds en particulier, est d'aboutir à une large connaissance, à une compréhension globale des phénomènes et à une modélisation fidèle et prédictive.

Les objectifs scientifiques seront présentés au paragraphe 4.2.1. Contribuer aux développements d'instruments et installation est une nécessité développée au paragraphe 4.2.2. Je tenterai d'aborder les aspects liés à la société au paragraphe 4.2.3.

4.2.1 Objectifs scientifiques

Les études que nous proposons de poursuivre doivent permettre d'établir les propriétés de base des noyaux lourds et super-lourds, de réaliser la spectroscopie et de comparer les données expérimentales aux prédictions théoriques. Les propriétés de base du noyau sont la masse, le spin, la parité, la déformation (moment quadripolaire) et le moment magnétique de l'état fondamental. Les données spectroscopiques renseignent sur la collectivité (rotation) et sur les états de particules individuelles proches du niveau de Fermi.

Les comparaisons entre données expérimentales et modèles permettent de déterminer les forces et faiblesses des modèles afin de les raffiner, d'améliorer l'ingrédient de base qu'est la force effective et par conséquent d'améliorer le pouvoir prédictif. Un enjeu important concerne l'interaction spin-orbite puisque son amplitude a de fortes conséquences sur la position des nombres magiques. Une déplétion au centre des noyaux induite par la forte répulsion coulombienne pourrait s'accompagner de variations de l'interaction spin-orbite (voir paragraphe 3.3.4 et références [ben99a, ben01a, afa05a]).

Les données sur les noyaux au-delà de $Z=100$ sont parcellaires et rares au-delà de $Z=102$. La limite actuelle en spectroscopie prompte est donnée par ^{255}Lr ; ^{256}Rf étant probablement réalisable à court terme [gre08a]¹. La limite en spectroscopie retardée se situe également dans cette région. L'objectif est d'obtenir des données le plus loin possible en direction de l'îlot de stabilité super-lourd sphérique ($Z=120$, 126 ou $N=172$, 184 selon les modèles) en passant par l'îlot de noyaux déformés autour de ^{270}Hs . Il s'agit non seulement d'aller vers des isotopes de numéro atomique élevé, mais aussi vers la vallée

1. Planifié à l'université de Jyväskylä fin 2009.

de stabilité bêta. Bien que les noyaux les plus stables ne le soient pas nécessairement vis-à-vis de la désintégration bêta, explorer le degré d'isospin permet d'apporter des contraintes, d'alimenter comparaisons avec les modèles.

La carte des noyaux étant une vaste mosaïque, les études ne peuvent se résumer à la quête du Graal, c'est-à-dire à un hypothétique noyau doublement magique sphérique. Seules des études sur de larges séries isotopiques ou isotoniques permettent de dégager des tendances et d'obtenir des données concluantes. Comparer un seul noyau avec un modèle ne permet généralement pas de conclure et encore moins d'avoir une vision globale. Il est cependant important d'obtenir des données solides pour des isotopes, comme nous l'avons fait avec le noyau impair en proton ^{251}Md . Des études récentes avec les appareils les plus performants montrent que les évaluations ou données expérimentales anciennes sont surprenantes ou sans fondements. Beaucoup de noyaux seraient donc à revisiter.

La déformation est une propriété récurrente de la carte des noyaux, la sphéricité étant plutôt une exception. L'étude des noyaux déformés autour de nombres semi-magiques nous donne l'opportunité de sonder les orbitales dites "down-sloping", c'est-à-dire dont l'énergie diminue avec la déformation. On peut ainsi avoir une vision des états sphériques impliquant un nombre de protons plus élevé. Toutes les précautions nécessaires doivent bien entendu être prises afin de ne pas tirer de conclusions hâtives, sachant que le mélange de configurations module la pureté des orbitales. Notre étude de ^{251}Md a par exemple permis de sonder l'orbitale proton $[521]1/2^-$ issue de la couche sphérique $2f_{5/2}$, active pour $Z = 114$. Une telle approche a souvent été avancée pour appuyer les études de noyaux superdéformés. Par exemple, les orbitales proton $[530]1/2^-$ ($2f_{7/2}$), neutron $[761]3/2^-$ ($1j_{15/2}$) ou $[640]1/2^+$ ($1i_{11/2}$) sont à la fois actives pour les noyaux superdéformés de masse 190 et pour les noyaux super-lourds sphériques. Pour les noyaux SD, l'interprétation est cependant singulièrement compliquée par la très forte dépendance de ces orbitales en fonction de la déformation et surtout par le fait que les énergies de tête de bande soient pas ou très mal connues dans la plupart des cas.

Atteindre le noyau doublement magique ^{270}Hs est un objectif phare. Les modèles s'accordent pour que les effets de couche soient particulièrement marqués dans cette région. Etablir les propriétés de ^{270}Hs est donc un test et repère important pour les modèles. Le schéma de Nilsson figure 4.3 permet de visualiser les orbitales actives autour de ^{270}Hs .

Observer les excitations proton permettrait de sonder la couche sphérique $3p_{3/2-}$ via l'orbitale déformée $[510]1/2^-$. A plus haute énergie d'excitation ou pour un nombre élevé de protons, on aurait accès aux couches sphériques (non représentées sur la figure 4.3) $1j_{15/2}$ ($[770]1/2^-$) ou $2g_{9/2}$ ($[651]1/2^+$). En ce qui concerne les neutrons, l'étude d'états excités ou d'isotopes moins déficients en neutrons permettrait de sonder les couches sphériques $3d_{3/2}^+$ ($[600]1/2^+$) ou $2h_{11/2-}$ ($[761]1/2^-$). La position de toutes ces orbitales apporterait des informations en faveur de $Z = 120$ ou 126 , $N = 172$ ou 184 comme illustré sur le schéma de particules individuelles figure 4.4.

La présence d'isomères K est une des conséquences de la déformation. Etudier ces états s'inscrit dans les études spectroscopiques et apporte de fortes contraintes : les isomères récemment observés dans ^{250}Fm , $^{252,254}\text{No}$ sont encore très mal reproduits par les modèles. L'étude de noyaux déformés est associée à leur rotation : il s'agit d'étudier la réponse du

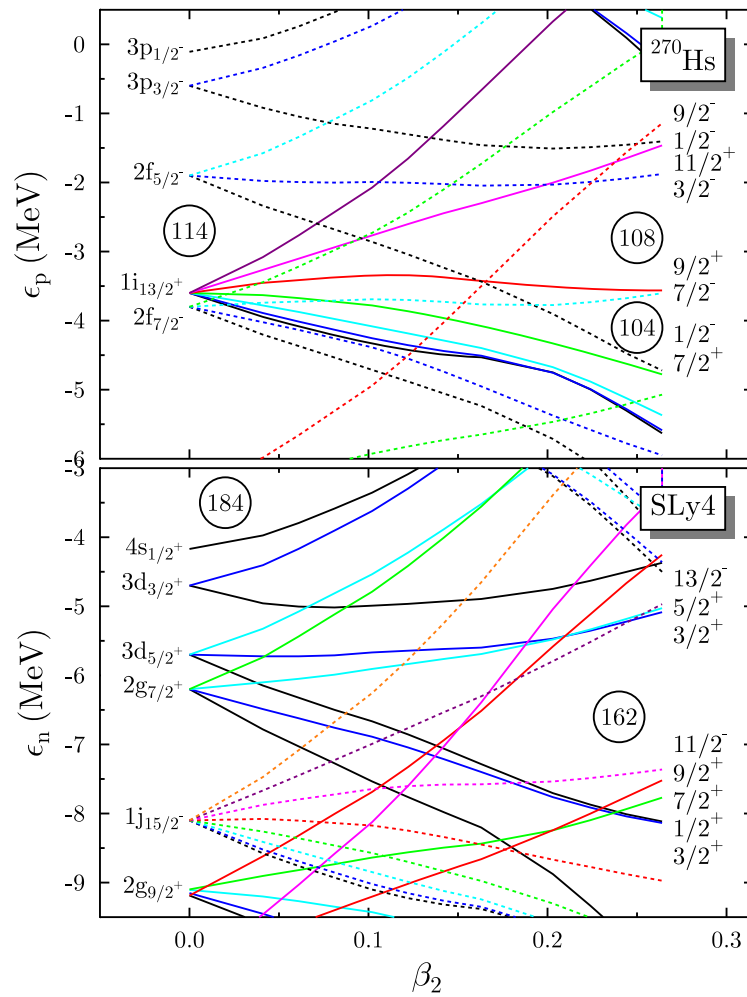


Fig. 4.3 – Schéma de Nilsson pour ^{270}Hs [benp]. Les énergies d'orbitales sont tracées jusqu'à la déformation prédite pour ^{270}Hs . Les différentes couleurs correspondent aux valeurs j_z des orbites.

noyau vis-à-vis de cette contrainte.

Observer des états est une chose. Mesurer leurs propriétés en est une autre. Il est ainsi indispensable de déduire au moins leur spin et parité, et si possible le moment quadripolaire électrique, dipolaire magnétique, le temps de vie. La spectroscopie d'états Yrast de noyaux pair-pairs n'est peut-être pas des plus riche et spectaculaire, mais permet d'établir des repères indispensables sans lesquels l'interprétation des noyaux impairs serait singulièrement compliquée, voir même n'aurait aucun sens.

Déterminer les propriétés de l'état fondamental est essentiel. Confronter le spin et la parité de l'état fondamental aux modèles n'est peut-être pas des plus pertinent compte tenu de possibles inversions et de la proximité de nombreux états, mais il est frustrant de constater que cette propriété basique n'est pas connue ou incertaine dans la plupart des noyaux impairs. Les caractéristiques de l'état fondamental ont des conséquences directes sur les modes de décroissance et états fils peuplés par radioactivité. Déterminer les modes

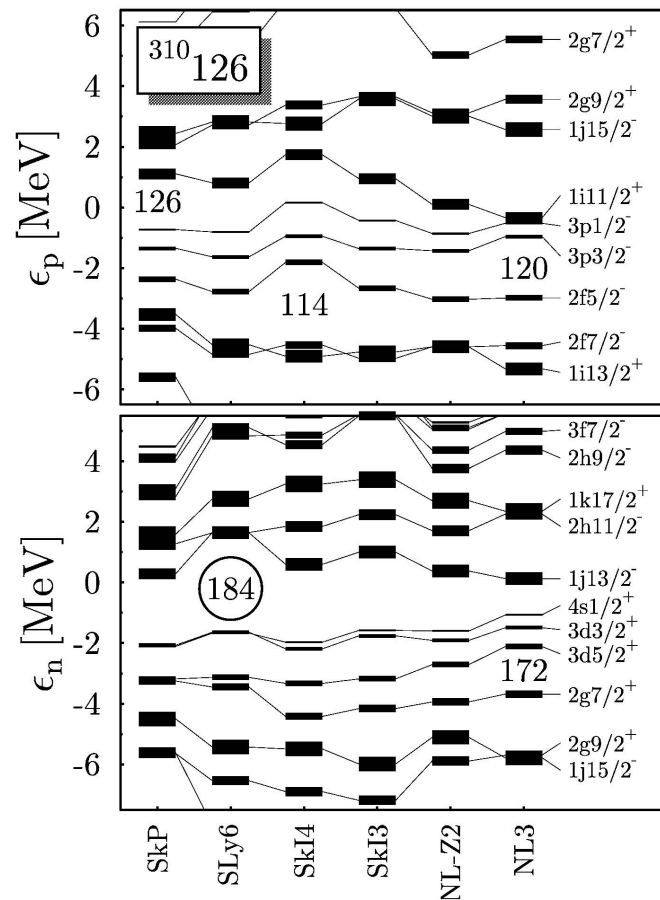


Fig. 4.4 – Schémas de particules individuelles calculés à partir de plusieurs interactions. Figure tirée de [ben01a].

de décroissance est par ailleurs une donnée de base qui donne accès aux énergies de séparation ou renseigne sur la barrière de fission.

La masse est également une des données les plus basiques de la physique nucléaire qui fournit un des tests les plus sévères pour les modèles et qui pourrait fortement contraindre la paramétrisation des corrélations d'appariement (voir par exemple [dug01a]).

La spectroscopie nucléaire n'est pas le seul domaine qui reste à défricher pour les éléments les plus lourds. Déterminer les propriétés atomiques est un objectif important : comment se comporte le noyau atomique pour un champ coulombien élevé ? Comme exposé au paragraphe 3.3.5, de telles études ont des conséquences directes sur l'interprétation des spectres : rayons X, électrons Auger ou Coster-Kronig sont en effet émis après conversion électronique. Peu de données sont disponibles au-delà de Cf ($Z=98$). Effectuer la spectroscopie optique des noyaux, comme je l'envisage, nécessite également une bonne connaissance de la structure atomique.

Si les études de mécanisme de réaction ne sont pas mon objectif principal, elles restent absolument indispensables : comprendre comment former au mieux les éléments super-

lourds, produire de nouveaux isotopes proches de la vallée de stabilité par de nouvelles réactions, avec des faisceaux radioactifs. Il s'agit non seulement de prédire les sections efficaces, mais aussi d'optimiser les énergies de bombardement puisque les fonctions d'excitation sont très étroites. A l'inverse, la structure du noyau (caractère magique, densité de niveau, forme) intervient dans le mécanisme de réaction. Structure et mécanisme sont donc intimement liés.

La plupart des objectifs présentés ici s'inscrivent dans une démarche à moyen ou long terme compte tenu des importants moyens expérimentaux à mettre en œuvre. Mes projets à court terme s'inscrivent dans la continuité de travaux sur ^{251}Md (voir le paragraphe 3.3). Je compte par exemple clarifier la structure de ^{251}Md . Un important chantier entrepris depuis quelques années vise à étudier la structure de ^{255}No .

Mon objectif est ensuite de poursuivre en direction de ^{270}Hs . Je reviendrai sur les noyaux accessibles et sur la statistique escomptée au paragraphe 4.4. Mesure de masse et spectroscopie optique auprès des faisceaux hyper-intenses de Spiral2 sont envisagées à plus long terme.

4.2.2 Objectifs techniques : installations et dispositifs

Réaliser les objectifs scientifiques présentés au paragraphe précédent nécessite des instruments et installations performants. Contribuer à ces développements a toujours été et continuera à être un objectif majeur. Les développements en cours de détecteurs ont été très largement présentés dans ce mémoire. MUSETT devrait être achevé prochainement (cf paragraphe 2.3) et je compte m'investir dans la détection de S3 dès 2010. Le démonstrateur d'AGATA est en cours d'installation et va évoluer progressivement vers sa phase 4π (cf 2.1.3). D'autres chantiers sont en cours ou envisagés, essentiellement dans le cadre de Spiral2. J'y reviendrai au paragraphe 4.4.

4.2.3 Applications dans la société ?

L'étude des noyaux super-lourds est avant tout un travail de recherche fondamentale. Comme tout travail de recherche, ces travaux doivent avoir un intérêt et doivent être justifiés, ne serait-ce que vis-à-vis des tutelles. Les applications des actinides dans la société sont bien connues et établies depuis environ un demi-siècle : énergie, défense ou plus rarement industrielles (mesure d'épaisseur ou détecteurs de fumée grâce à la radioactivité alpha). Il n'y a probablement aucune application directe à espérer de l'étude des transférmiens et ces noyaux n'ont probablement jamais été créés dans la nature. Il s'agit avant tout d'un travail exploratoire de recherche fondamentale qui vise à améliorer et contraindre les modèles, repousser les limites de la connaissance en synthétisant les éléments les plus lourds, comprendre la structure de noyaux, dessiner les contours de la table des noyaux... Objectifs certes peu "vendables" auprès de la société car difficiles à vulgariser (le noyau est complexe ; peu d'images spectaculaires ; pas d'applications) mais méritant, à mon avis, de la considération et de l'intérêt. Des efforts seraient certainement à faire afin d'améliorer l'image de la physique nucléaire dans la société ; une difficulté

majeure consistant à surmonter l'image et les amalgames résultants d'accidents nucléaires ou d'applications à la défense.

Deux excès opposés doivent être, à mon avis, évités : faire preuve d'hypocrisie comme dans les années soixante où l'on parlait d'applications pacifiques des explosions nucléaires², et considérer les tutelles comme de simples mécènes à qui on ne doit pas rendre de compte.

Hormis les applications des études scientifiques, je tiens à mentionner les applications technologiques. Les instruments développés mettent en œuvre des technologies pointues qui peuvent, à court ou moyen terme, trouver des applications industrielles. Je pense ici spécifiquement à la détection de rayonnements gamma. Les nouvelles technologies de détecteurs germanium hautement segmentés et de pistage des photons permettent de réaliser l'imagerie gamma de haute résolution. Il y a ici de potentielles applications pour la sécurité (imagerie de colis) et la médecine.

4.3 Méthodologie

Les techniques expérimentales utilisées pour l'étude des noyaux lourds et super-lourds sont passées en revue dans ce paragraphe : mesures et observables. Je commente ensuite les méthodes possibles ou envisagées afin de produire les isotopes d'intérêt avant de terminer par quelques remarques sur la modélisation.

4.3.1 Mesures et observables

Différentes observables ne peuvent généralement être extraites que grâce à différentes techniques expérimentales et donc différentes expériences.

Un grand nombre d'études contemporaines s'attachent à réaliser la spectroscopie des noyaux, c'est-à-dire décrypter les rares données expérimentales : observer les états nucléaires et déduire leurs propriétés. Deux techniques complémentaires sont généralement employées : spectroscopie prompte et retardée. Ayant déjà très largement décrit ces techniques et leurs mérites respectifs au paragraphe 3.3 et dans le cours [the03b], je tenterai d'être bref et de mettre l'accent sur les mesures innovantes. Les mesures des propriétés de l'état fondamental puis de propriétés atomiques seront ensuite évoquées.

4.3.1.1 Spectroscopie prompte

Ces études consistent à réaliser la spectroscopie gamma et/ou électron prompte. Cette technique privilégie l'étude des états collectifs, en l'occurrence la rotation. L'observation de cascades de transitions permet d'extraire le moment d'inertie du noyau. La détection d'électrons s'impose puisque la conversion domine aux basses énergies. Pour les noyaux impairs ou plus généralement de projection K non nulle, les bandes de rotation des deux partenaires composées de transitions quadripolaires électriques $E2$ sont connectées par des transitions dipolaires magnétiques $M1$. La mesure du rapport $B(M1)/B(E2)$ permet de

2. Ou même prétendre que l'élément 115 est un combustible des OVNIS...

déduire le moment magnétique de la tête de bande. Il s'agit d'une signature quasi-unique permettant d'assigner spin et parité.

Afin de gagner en sensibilité, il est essentiel d'améliorer l'efficacité et de permettre l'utilisation de faisceaux intenses. On pourra ainsi atteindre des noyaux plus lourds, plus faiblement peuplés ou des voies de désexcitation plus rares.

Afin de construire des schémas de niveau et de résoudre les ambiguïtés, il est essentiel de réaliser des mesures en coïncidence γ^n et idéalement γ^n - e^- . Pour reprendre l'exemple de ^{251}Md , c'est uniquement grâce à de telles mesures que l'on pourra mesurer les bandes basées sur les états $7/2^+$ et $7/2^-$, assigner sans ambiguïté le spin et la parité grâce au moment magnétique. L'intérêt de mesurer les transitions converties est également incontestable pour les études de bandes rotationnelles bâties sur des isomères K dans les noyaux pair-pairs.

La déformation ou le moment quadripolaire sont à présent déduits du spectre rotationnel : interpolation de Harris et systématique de type "Grodzin". Bien que ce procédé donne, pour les noyaux pair-pairs, des résultats en excellent accord avec les modèles, il ne s'agit pas d'une mesure. De plus, la présence d'autres degrés de liberté telle la vibration ou la triaxialité fausseraient ce raisonnement. Des mesures de temps de vie par la technique du "plunger" et/ou par excitation coulombienne permettraient de déduire la déformation sans biais et avec une meilleure précision. Je reviendrai sur la faisabilité de telles expériences au paragraphe 4.4.

Les expériences de spectroscopie prompte sont réalisées auprès de séparateurs ou spectromètres afin d'isoler les noyaux d'intérêt de l'important bruit issu de réactions parasites. Les techniques d'étiquetage du recul ("Recoil Tagging"), d'étiquetage du recul par sa décroissance ("Recoil Decay Tagging") ou même d'étiquetage par la fission sont exploitées.

4.3.1.2 Spectroscopie après décroissance

Cette technique, très largement décrite au paragraphe 3.3.4, consiste à étudier la décroissance de noyaux, généralement émetteurs alpha. Décroissance bêta ou capture électronique sont également possibles mais plus délicates car moins sensibles. Lors de ces expériences, il est de fait nécessaire de peupler le noyau père. Comparé à la spectroscopie prompte, la section efficace du noyau initial est (faux exception) plus faible, ce qui est en grande partie compensé par les plus grandes intensités de faisceaux utiles.

Le dispositif plan focal doit combiner la détection du recul, de particules alpha, électrons, rayonnements gamma, particules bêta avec la meilleure efficacité possible afin de déduire schéma de niveaux, intensité des rayonnements, temps de vie. La détection simultanée d'électrons et de rayonnements gamma permet de déduire le facteur de conversion et donc la multipolarité des transitions. Les transitions alpha sont analysées en terme de facteur d'empêchement, ce qui renseigne sur le recouvrement de fonctions d'ondes et contraint fortement spin et parité.

La technique de décroissance est plutôt adaptée à l'étude des noyaux impairs; la décroissance alpha de noyaux pair-pairs étant dans la plupart des cas triviale. Observer l'état 2^+ de noyaux pair-pairs est certes instructif (voir par exemple [sob07a]) mais pas

nécessairement aisé compte tenu des effets de sommation. Je fais ici référence au biais expérimental déjà très largement évoqué au paragraphe 3.3.4 et qui nécessite la prise en compte des processus de relaxation atomique.

4.3.1.3 Propriétés de l'état fondamental

Outre les données spectroscopiques mentionnées précédemment, la mesure de masse permettrait de combler une lacune importante dans la région des noyaux très lourds et super-lourds. La masse, quantité très contraignante pour les modèles, est actuellement déduite d'énergies de décroissance alpha et est entachée de grandes incertitudes. De plus, la présence d'isomères ou de transitions fortement empêchées peut fausser les valeurs Q_α . La mesure récente de la masse de $^{252,253,254}\text{No}$ à GSI avec un piège à ions ouvre la voie vers de nouvelles études [blo].

La spectroscopie optique (LASER) d'atomes permet de déduire le spin et les moments électromagnétiques d'états fondamentaux ou d'isomères. Aucun atome n'a pu encore être étudié au-delà de $Z=100$. Développer cette technique pour les noyaux transférmiens est essentiel.

4.3.1.4 Spectroscopie atomique

J'ai à plusieurs reprises souligné des lacunes dans les données atomiques pour les transférmiens. Si les énergies de transitions atomiques semblent bien maîtrisées, nous avons constaté d'importants désaccords concernant les taux de transitions. Réaliser de telles mesures sort assurément du cadre de la physique nucléaire et nécessite de mettre en œuvre des techniques spécifiques: spectroscopie à très basse énergie X et électron, sachant que les techniques d'implantation ne paraissent pas optimales.

Etant donné l'ampleur de ce chantier, la spectroscopie atomique n'est pas pour moi une priorité mais une éventualité, par exemple auprès de l'installation DESIR [spi06c]. Je ne détaillerai pas plus de potentiels travaux dans la suite de ce mémoire.

4.3.2 Production d'isotopes, mécanisme de réaction

Comme évoqué précédemment, faisceaux et cibles stables conduisent à la formation d'isotopes déficients en neutrons. Peu d'alternatives sont offertes afin de se diriger vers la vallée de stabilité bêta. L'utilisation de cibles radioactives, actinides en l'occurrence, va dans ce sens mais il faut souligner les difficultés de mise en œuvre liées à leur radioactivité, radio-toxicité et coût. Une collaboration franco-russe exploite ces réactions à Dubna auprès du séparateur Vassilissa. Je développe pour ma part un programme expérimental auprès des spectromètres VAMOS et EXOGAM, en exploitant les réactions très asymétriques avec cible de ^{238}U .

Peupler de manière optimale les noyaux et/ou produire de nouveaux isotopes doit bénéficier aux études spectroscopiques. La figure 4.5 résume une compilation des sections efficaces de production que j'ai réalisée. Lorsque différentes réactions sont disponibles, j'ai

retenu celle ayant la section efficace la plus élevée et conservé d'une part les réactions de fusion froide et fusion chaude d'autre part. J'ai exclu les cibles exotiques telles que Es pourtant intéressantes en termes de section efficace (voir par exemple [hof71a]).

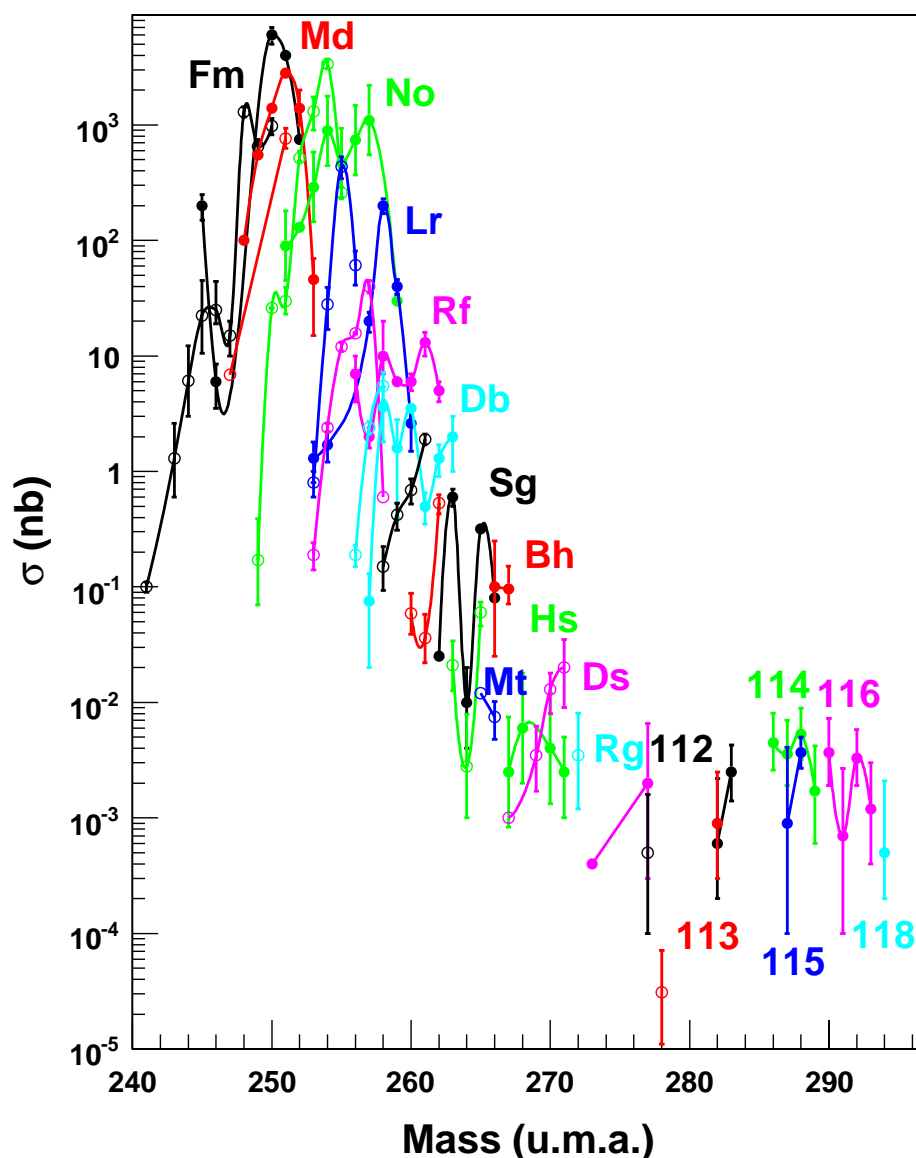


Fig. 4.5 – Sections efficaces expérimentales de production pour $Z \geq 100$ (état des lieux au 1er juillet 2009). Les symboles plein (creux) correspondent aux réactions de fusion chaude (froide).

Plusieurs options peuvent être envisagées afin d'aller au-delà des moyens de production et sections efficaces tel que résumé figure 4.5 :

- **Faisceaux radioactifs**

L'utilisation de faisceaux radioactifs riches en neutrons permet potentiellement la

synthèse de nouveaux isotopes. Certains auteurs prédisent une augmentation de la section efficace avec ces faisceaux : diminution de la barrière de fusion avec le couplage au mode dipolaire collectif mou [hus91a, hus91b, tak91a, agu92a, das92a], couplage avec les réactions de transfert [sig97a, wat01a]. Si ces prédictions sont corroborées par quelques expériences [zyr97a, lov97a], d'autres calculs basés notamment sur le concept de système di-nucléaire (DNS) incitent à plus de prudence [ada00a, ada04a, ada04b, ada04c, liu07a, ari07a, fen07a]. De ces prédictions, on doit dresser un tableau contrasté : l'intérêt de faisceaux radioactifs quant aux sections efficaces est spéculatif et à prendre avec précautions.

Quand bien même les sections efficaces seraient similaires ou du même ordre de grandeur par rapport aux faisceaux stables, le tableau s'assombrit lorsque l'on prend en compte les intensités des faisceaux radioactifs escomptés dans un avenir proche avec Spiral2 ou dans un avenir plus lointain avec par exemple Eurisol : voir par exemple [hof01b] ou la synthèse très complète donnée par W. Loveland [lov07a].

Aux réactions de fusion froide avec cibles de Pb ou éléments proches devraient correspondre des sections efficaces attrayantes. Mais compte tenu des intensités prévues, ces réactions ne seraient pas compétitives avec la fusion chaude (cibles d'actinides).

Les réactions avec faisceaux légers riches en neutrons (O, Ne, ...) sur cibles d'actinides doivent permettre la synthèse de nouveaux isotopes, mais ces faisceaux ne sont pas à espérer pour un avenir proche, et ne seront en tout cas pas produits par Spiral2.

Les perspectives ne sont guère plus encourageantes quant aux faisceaux riches en neutrons issus de la fission (Spiral2). Considérons par exemple des faisceaux parmi les plus intenses escomptés comme ^{92}Kr ou ^{96}Rb : 10^9 pps [lew09a]. L'utilisation de cibles de terres rares permet d'envisager par exemple les réactions : $^{158}\text{Gd} + ^{92}\text{Kr} \rightarrow ^{250}\text{Fm}^*$ ou $^{158}\text{Gd} + ^{96}\text{Rb} \rightarrow ^{254}\text{Md}^*$. Même si les sections efficaces étaient élevées (disons $1 \mu\text{b}$ pour être optimiste), ces réactions ne seraient par compétitives car i) ne produisant pas de nouveaux isotopes ii) ne conduisant pas à une production substantielle pour réaliser des études spectroscopiques.

- **Réactions symétriques**

L'utilisation de réactions symétriques avec faisceaux de Xe ou Sn riches en neutrons est attractive pour produire de nouveaux isotopes. Si certaines prédictions ont suscité beaucoup d'espoirs, il convient d'être prudent face aux sections efficaces différant de plusieurs ordres de grandeur [ari97a, ari99a, vel01a, den04a, swi05a, siw07a, zag07a, zag08a]. Ces réactions n'ont jusqu'à présent pas permis de synthétiser des isotopes. Une limite de 4 pb a récemment été donnée pour la réaction $^{136}\text{Xe} + ^{136}\text{Xe}$ [oga09a]. Une récente expérience réalisée au GANIL visant à mesurer la section efficace de $^{136}\text{Xe} + ^{124}\text{Sn}$ [dro, ave09a] n'a pas permis de conclure, si ce n'est la difficulté de séparer faisceaux et résidus en réaction symétrique.

- **Transfert multinucléon**

Ces réactions entre noyaux massifs permettent de peupler avec des sections efficaces substantielles (jusqu'à plusieurs mb) les actinides les plus lourds sur de larges

séries isotopiques [sch78a, sch82a, lee82a, lee83a, moo86a, moo93a]. Ces réactions permettent d'atteindre les noyaux de Fm et Md les plus riches en neutrons connus. Si les sections efficaces de productions sont relativement bien reproduites par les modèles [zag06a, zag07a, zag08a], de grandes inconnues subsistent en ce qui concerne la transmission du spectromètre (distribution angulaire des produits de réaction) et l'utilisation de cibles d'actinides exotiques, voir très exotiques comme ^{254}Es . Il serait cependant judicieux d'envisager avec S3 l'utilisation de telles réactions potentiellement très intéressantes pour la spectroscopie.

- **Exploitation et optimisation de réactions de fusion froide et chaude avec faisceaux stables**

Les modèles les plus récents permettent de reproduire avec une assez bonne précision (au pire un ordre de grandeur) les sections expérimentales de fusion froide (jusqu'à $Z = 113$) et de fusion chaude (jusqu'à $Z = 118$). On peut avoir une relative confiance en les prédictions pour des combinaisons cibles/faisceau ne s'éloignant pas trop de celles mesurées alors que l'on constate d'importants désaccords, jusqu'à 4 ordres de grandeur, pour des réactions inconnues telles que $^{208}\text{Pb}(^{86}\text{Kr},1n)^{293}118$.

J'ai tenté une compilation de diverses prédictions [ili82a, che99a, smo99a, smo99b, den00a, smo01a, zag01a, ada04a, ada04b, ada04c, bou04a, swi04a, wan04a, swi05a, zag06a, fen07a, liu07a, lov07a, siw07a, zag07a, zag08a, fen09a] en tentant d'écarter les résultats semblant fantaisistes ou infirmées par des mesures ultérieures. Lorsque aucun calcul ou prédiction n'est disponible, j'ai extrapolé les mesures ou prédictions. A noter que les récents calculs sont plutôt orientés vers la synthèse des éléments les plus lourds alors que peu de calculs sont disponibles pour les actinides lourds. Cette compilation et estimation sera utilisée au paragraphe 4.4.2 lorsque je discuterai de possibles expériences de spectroscopie.

Parmi les réactions potentiellement intéressantes, je pense aux réactions avec faisceaux de ^{40}Ca permettant de peupler des isotopes de No et Lr très déficients en neutrons ; les réactions avec cibles de $^{203,205}\text{Tl}$ peu explorées mais intéressantes pour la synthèse de Md ; les réactions sur cibles de ^{238}U avec divers faisceaux de Si, S ou Ar ($Z = 106, 108$ et 110), ...

Arrêtons nous quelques instants sur la quête du Graal en tenant d'imaginer des réactions avec cibles de ^{208}Pb , ^{238}U ou ^{249}Cf permettant d'atteindre les noyaux doublement magiques potentiels $^{298}114_{184}$, $^{292}120_{172}$ et $^{310}126_{184}$. Pour $^{298}114_{184}$, toutes les réactions potentielles $^{208}\text{Pb}(^{91}\text{Ge},1n)$, $^{238}\text{U}(^{64}\text{Ti},4n)$ et $^{249}\text{Cf}(^{53}\text{S},4n)$ nécessiteraient un faisceau radioactif. $^{292}120_{172}$ et $^{310}126_{184}$ pourraient tous deux être peuplés avec des faisceaux stables : $^{208}\text{Pb}(^{86}\text{Sr},2n)$, $^{249}\text{Cf}(^{48}\text{Ti},5n)$, $^{238}\text{U}(^{76}\text{Se},4n)$ ou $^{249}\text{Cf}(^{64}\text{Ni},3n)$. On pourrait donc, uniquement du point de vue des combinaisons cibles/faisceaux atteindre les noyaux doublement magiques prédits par les modèles de type RMF ou HFB.

Sans considérer des noyaux aussi lourds pour lesquels les sections efficaces de production sont probablement très faibles, les études de synthèse et de mécanisme de réaction avec faisceaux stables restent à défricher pour les actinides lourds et transactinides.

4.3.3 Modélisation

Confronter les données expérimentales aux calculs théoriques est indispensable. Comme évoqué précédemment, confronter le schéma de niveaux d'un seul isotope aux calculs a peu de sens compte tenu de la précision des modèles. La densité d'états étant relativement élevée pour les noyaux transférmiens, une inversion de niveaux n'est pas nécessairement significative. La comparaison d'observables le long d'une chaîne isotopique ou isotonique est en revanche instructive. Ce constat plaide assurément en faveur de mesures systématiques. Ce type de mesure n'est pas forcément populaire, mais est logique compte tenu de la spécificité de la discipline. Répétons le : la carte des noyaux est une vaste mosaïque et les recherches ne consistent pas en la quête du Graal. Une petite parenthèse du côté de la superdéformation va dans le même sens : sans études systématiques aucune tentative d'explication de bandes jumelles ou oscillations $\Delta I = 4$ n'aurait été possible.

Si la théorie n'atteint pas le niveau de détail des données expérimentales (moment d'inertie à environ $10\hbar^2\text{MeV}^{-1}$, énergies de particules individuelles à environ 200 keV près), l'accord reste remarquable pour les noyaux transférmiens en ce qui concerne les schémas de niveaux. Il serait certainement instructif de mesurer des observables plus discriminantes comme temps de vie, moment quadripolaire, moment magnétique, masse. D'un autre côté certaines données comme les taux de transitions électromagnétiques ou facteur d'empêchement sont délicates à calculer. Il serait donc judicieux à l'avenir de mesurer et calculer des observables plus pertinentes pour une confrontation judicieuse.

Dans le cadre de l'étude de ^{251}Md , j'ai réalisé une partie des calculs. Je ne plaide pas ici dans le sens de calculs faits systématiquement par l'expérimentateur puisque je suis convaincu qu'expérience et théorie sont des disciplines spécifiques qu'il est délicat de concilier. Je plaide cependant en faveur d'échanges étroits avec la théorie qui seuls permettent d'interpréter avec pertinence les données expérimentales.

4.4 Développements instrumentaux, plan de développement, moyens

Je présente dans ce paragraphe les développements instrumentaux en cours ou à venir permettant de mettre en œuvre les techniques présentées au paragraphe 4.3. Avant de présenter ces instruments, les collaborations impliquées et les moyens mis en œuvre, je mets l'accent sur les spécificités des noyaux super-lourds.

4.4.1 Spécificités des noyaux super-lourds

Une des spécificités les plus marquées des expériences sur les noyaux lourds et super-lourds est la faible statistique des événements pertinents qu'il faut extraire d'un important bruit de fond. Pour les expériences de spectroscopie prompte, il s'agit dans le meilleur des cas de quelques événements par heure pour des intensités de faisceau de environ 10^{10} pps et des taux de comptage autour de la cible de quelques 10^6 événements par seconde. Pour des expériences de synthèse, il peut s'agir de quelques événements par mois, voir par an

comme dans le cas extrême de $Z=113$ [mor04b, mor07a] pour des doses de faisceau de 10^{18} particules ou plus. Réaliser de telles expériences nécessite évidemment une patience et un calme remarquable, et à mon avis beaucoup d'humilité³.

Il est aisé de comprendre que dans ces conditions, les dispositifs doivent être efficaces, sélectifs et les plus fiables possibles. Afin de travailler en tout sérénité et afin d'obtenir des résultats univoques, l'expérimentateur doit avoir, à mon avis, une totale confiance dans son dispositif et l'organisation doit faire preuve de souplesse.

Illustrons ces propos par quelques exemples abondant dans ce sens :

- L'interprétation des données de décroissance où les effets de sommation sont présents nécessite de connaître parfaitement la réponse du détecteur qui doit être entièrement simulé.
- La stabilité et fiabilité des dispositifs RITU et JUROGAM installés à l'université de Jyväskylä sont des facteurs essentiels contribuant au succès et nombreux résultats obtenus. JUROGAM n'est pas le dispositif de spectroscopie gamma le plus performant de sa catégorie mais a permis d'obtenir une somme de résultats impressionnante. Le dispositif LISE est compétitif comme le prouve nos résultats obtenus après décroissance alpha de ^{255}Lr , mais souffre d'un manque de stabilité. Chaque expérience FULIS nécessite une nouvelle installation de la cible tournante, modification du filtre de Wien, installation des détecteurs au plan focal... Opérations lourdes, potentiellement source d'erreurs, lourde en termes de main d'œuvre.
- L'organisation et la planification doit faire preuve de souplesse afin de faire face aux aléas et s'adapter à l'évolution au jour le jour du déroulement de l'expérience.
- Il est également indispensable de disposer d'un temps de faisceau test suffisant afin de mettre au point et maîtriser les dispositifs et le mécanisme de réaction en laissant de côté (temporairement du moins) la rentabilité scientifique mesurée en facteur d'impact, indice h , nombre de "PRL" ou "Nature". Rappelons ici que des années d'expériences et de tests ont précédé la spectroscopie prompte de ^{254}No à Jyväskylä. Même remarque pour GSI avant que ne soit synthétisé l'élément 107. On doit ici souligner une fois de plus l'importance des études de mécanisme de réaction indispensables compte tenu de la chute spectaculaire des sections efficaces avec le numéro atomique (environ un facteur 10 pour deux numéros atomiques) et de l'étroitesse des fonctions d'excitation (l'énergie de bombardement est un paramètre crucial pour les expériences de synthèse ou de spectroscopie). Les laboratoires phares des super-lourds que sont GSI et Dubna ont consacré et continueront très certainement à consacrer d'importants efforts à ces expériences moins spectaculaires que la synthèse ou la spectroscopie, mais déterminantes.
- De solides preuves doivent être apportées afin d'étayer la véracité d'événements rares. On ne peut que regretter l'épisode fâcheux $Z = 118$ à Berkeley et approuver la grande prudence dont font preuve Yu. Ts. Oganessian et ses collaborateurs vis-à-vis de nouveaux résultats. La maîtrise et la caractérisation du BGS (Berkeley Gas-filled Separator) auraient certainement été souhaitables avant de tenter la synthèse de

3. Et accessoirement un grain de folie.

$Z = 118$ et évité l'annonce prématurée de résultats erronés. D'une façon générale, la précipitation, la pression et le manque de maîtrise ne contribuent pas à la sérénité et au confort des utilisateurs nécessaires au bon déroulement des expériences.

Ces quelques principes et considérations devraient, selon moi, guider la construction de futurs instruments faute de quoi un dispositif prétendu le meilleur sur le papier pourrait s'avérer en pratique moins prolixe que prévu.

Je milite ainsi pour que "fiabilité" soit le mot clé de S3 afin de fournir un confort aux utilisateurs, relâcher le stress, mais également pour tenir compte des contraintes liées à la radioactivité et à l'environnement.

4.4.2 Instruments, faisceaux et performances

J'ai présenté au paragraphe précédent les techniques adéquates permettant de poursuivre le projet de recherche. De nombreux développements d'instruments ou d'accélérateurs sont en cours ou à venir et permettront de repousser les limites expérimentales actuelles : accroître la sensibilité, produire plus d'atomes, produire de nouveaux isotopes, mettre en œuvre de nouvelles techniques. La dualité produire plus - étudier mieux guide les développements actuels.

Parmi ces développements, certains sont dédiés à l'étude des noyaux lourds et super-lourd, d'autres bénéficieront très largement à ces études. Quelques tendances peuvent être dégagées des développements actuels ou prévus :

- Les performances de spectromètres gamma sont accrues grâce à l'utilisation d'électronique digitale : taux de comptage plus élevé (JUROGAM II, EXOGAM2) mais aussi l'analyse de forme des signaux pour la traque des photons (AGATA en Europe, GRETA aux Etats-Unis).
- Combinaison de détection de rayonnements gamma et d'électron avec SAGE installé auprès de RITU.
- Utilisation de faisceaux hyper-intenses : amélioration de l'UNILAC à GSI ou construction de LINAG "driver" de Spiral2.
- Exploration des potentialités offertes par l'utilisation de faisceaux radioactifs de haute intensité et/ou de cibles radioactives pour produire de nouveaux isotopes. J'ai déjà abordé cet aspect au paragraphe 4.3.2.
- Spectromètre ou séparateur de haute réjection et/ou de haute transmission, par exemple TASCA à GSI (essentiellement dédié à la chimie), MARA à Jyväskylä [sar08a] (pour les réactions symétriques), S3 auprès de LINAG ou pourquoi pas un nouveau spectromètre 0 degré pour les faisceaux radioactifs de Spiral2. Spectromètres ou séparateurs sont bien entendu associés à leur détection plan focal.
- Techniques de basse énergie : SHIPTRAP à GSI pour les mesures de masse, chimie auprès de TASCA, MASHA (Mass Analyser of SuperHeavy Atoms) à Dubna pour les mesures de masses [sem04a, oga03a], couplage de S3 avec DESIR [spi06c] pour tout un panel de mesures (spectroscopie optique, mesures de masses, ...).

Dans les paragraphes qui suivent, je détaillerai les développements instrumentaux me concernant ou bénéficiant à mes travaux ; je m'efforcerais d'estimer les limites d'observation

compte tenu des efficacités et taux de production connus ou extrapolés. J'utiliserai d'une part les sections efficaces connues telles que représentées figure 4.5 et d'autre part les prédictions ou estimations pour les réactions qui n'ont pas encore été mesurées (voir paragraphe 4.3.2).

Pour le calcul des taux de production, j'ai retenu des épaisseurs de cibles stables de $400 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, et de $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ pour les actinides (afin de limiter la dispersion angulaire). En ce qui concerne la spectroscopie prompte, je considère des intensités correspondant à la saturation des détecteurs en me basant sur les expériences autour de ^{254}No . Pour des numéros atomiques plus élevés, et en fusion froide, la section efficace totale tend à diminuer puisque les expériences sont réalisées sous la barrière. On pourrait donc, pour la fusion froide, augmenter l'intensité de faisceau sans conséquences notables sur la détection. Les chiffres donnés doivent être pris comme des estimations, et des limites inférieures quant à la statistique obtenue. En ce qui concerne les expériences de décroissance, je considère les intensités escomptées avec le driver LINAG et un RFQ $A/Q = 6$.

4.4.2.1 Spectroscopie prompte

Jusqu'en 2008, le spectromètre gamma le plus performant pour l'étude des noyaux super-sourd était incontestablement JUROGAM I. L'évolution de JUROGAM I à JUROGAM II (24 "clover" et 15 "phase I") s'accompagne d'un gain sensible en efficacité photopic en passant de $\sim 4.2\%$ à $\sim 6\%$ à 1.3 MeV.

JUROGAM II devrait permettre l'étude de ^{256}Rf (section efficace d'environ 15 nb [dra08a]) mais également la mesure de temps de vie de ^{254}No par la technique du "plunger". La faisabilité de cette dernière expérience peut être estimée à la lumière d'une récente étude de ^{194}Po [gra08a]. La section efficace de production par la réaction $^{114}\text{Cd}(^{83}\text{Kr}, 3n)^{194}\text{Po}$ est beaucoup plus élevée ici: $120 \mu\text{b}$. En se contentant de la technique "Recoil Tagging" ($\times 2$), avec l'utilisation d'électronique digitale pour un taux de comptage plus élevé ($\times 2$), une expérience deux fois plus longue, deux fois moins de distances mesurées, deux fois moins de statistique par pic, et compte tenu de l'efficacité de JUROGAM II et de l'énergie des transitions d'intérêt, une section efficace limite de $2 \mu\text{b}$ peut être estimée.

En parallèle, l'étude simultanée et en coïncidence des rayonnements gamma et des électrons prompts sera possible grâce au spectromètre SAGE. L'efficacité électrons sera d'environ 10 % à 300 keV et 5 % à 100 keV. Avec des efficacités de détection des électrons et rayonnements gamma équivalentes, on pourra collecter suffisamment de coïncidences $e^- - \gamma$ ou $\gamma - \gamma$ pour étudier les bandes fortement converties et déduire les facteurs gyromagnétiques. Il y a là un avantage considérable comparé aux mesures électrons intégrales telles que celle réalisée pour ^{253}No [her02a], la modeste résolution des spectres ne permettant pas d'extraire les énergies de transitions. Dans la continuité de nos études récentes, nous comptons compléter la spectroscopie de ^{251}Md et ^{255}Lr : clarifier les bandes excitées, mesurer des facteurs gyromagnétiques et clarifier la gémellité de ces deux noyaux.

Nous avons depuis quelques années initié un programme expérimental à GANIL auprès des spectromètres VAMOS et EXOGAM. Les avantages de ces deux instruments pour les

réactions très asymétriques a déjà été discuté au paragraphe 2.3.2.1. Les performances comparées de divers appareils montrent à l'évidence que EXOGAM est un des instruments les plus performants: voir table 4.1. Après des études de faisabilité déjà évoquées au paragraphe 2.3.2.1, j'espère pouvoir très prochainement réaliser la spectroscopie γ prompt de du noyau impair en neutrons ^{255}No .

Afin d'améliorer la détection plan focal de VAMOS, nous avons entrepris depuis fin 2005 la construction du dispositif MUsETT (MUR de Silicium pour l'Etude des Transfertiers par Tagging). Ce mur hautement segmenté financé par l'Agence National de la Recherche doit être opérationnel fin 2009 (contribution en tant que coordinateur et responsable scientifique). Diverses voies sont également étudiées afin d'améliorer les performances de VAMOS: mode séparateur à gaz ou changement du filtre de Wien. Ces améliorations sont menées à la fois pour exploiter au mieux les faisceaux existants et pour préparer les études à l'aide des faisceaux radioactifs de Spiral2 à l'horizon 2013. En ce qui concerne EXOGAM, l'évolution vers une électronique digitale devrait permettre d'ici deux à trois ans d'accroître ses performances (taux de comptage), sa fiabilité et sa souplesse (couplage avec d'autres détecteurs dont VAMOS).

Les performances de 5 dispositifs sont comparées figure 4.6 où ne sont considérées que les sections efficaces de production mesurées. Cette figure représente le nombre de cascades émises par jour et pour une intensité de faisceau de 1 pA. Pour un noyau pair-pair (impair en proton et/ou neutron), l'intensité de la cascade considérée est de 40 % (10 %). Pour les réactions de fusion chaude (cibles d'actinides), j'ai supposé une transmission du séparateur ou spectromètre trois fois plus faible que pour les réactions de fusion froide. Les cinq lignes horizontales correspondent à une limite d'observation pour une expérience de 14 jours et une intensité de faisceau de 10 pA pour JUROGAM I, JUROGAM II ou EXOGAM, et 100 pA dans les deux autres cas. Si on suppose que 100 rayonnements doivent être détectés afin d'observer une bande rotationnelle, la limite d'observation s'exprime par: $\text{Lim} = 100 \times \frac{1}{14} \times \frac{1}{I(\text{nA})} \times \frac{1}{N_\gamma} \times \frac{1}{\epsilon_r}$. La figure 4.6 donne des

| | ϵ_γ (1.3 MeV) | N_{det} | ϵ_γ (500 keV) | \overline{N}_γ | $\epsilon_{\gamma \geq 1}$ | $\epsilon_{\gamma \geq 2}$ | ϵ_r |
|--------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| Jurosphere + RITU | 1.7 % | 25 | 3.4 % | 0.20 | 18 % | 1.5 % | 30 % |
| JUROGAM I + RITU | 4.2 % | 34 | 8.4 % | 0.50 | 40 % | 8 % | 30 % |
| JUROGAM II + RITU | 6 % | 39 | 12 % | 0.70 | 53 % | 15 % | 30 % |
| GAMMASPHERE + FMA | 10 % | 100 | 20 % | 1.19 | 73 % | 34 % | 5 % |
| EXOGAM + VAMOS | 12 % | 12 | 24 % | 1.24 | 74 % | 37 % | 60 % |
| AGATA (3π) + VAMOS | 30 % | 135 | 50 % | 2.89 | 95 % | 86 % | 60 % |

Tab. 4.1 – Efficacité de divers spectromètres gamma couplés à un spectromètre ou séparateur. N_{det} est le nombre de détecteurs considérés. \overline{N}_γ est le nombre moyen de rayonnements détectés pour une cascade de 6 transitions. $\epsilon_{\gamma \geq 1}$ ($\epsilon_{\gamma \geq 2}$) est la probabilité de détecter au moins 1 (2) rayonnements. ϵ_r est la transmission du séparateur ou spectromètre pour des réactions de fusion froide.

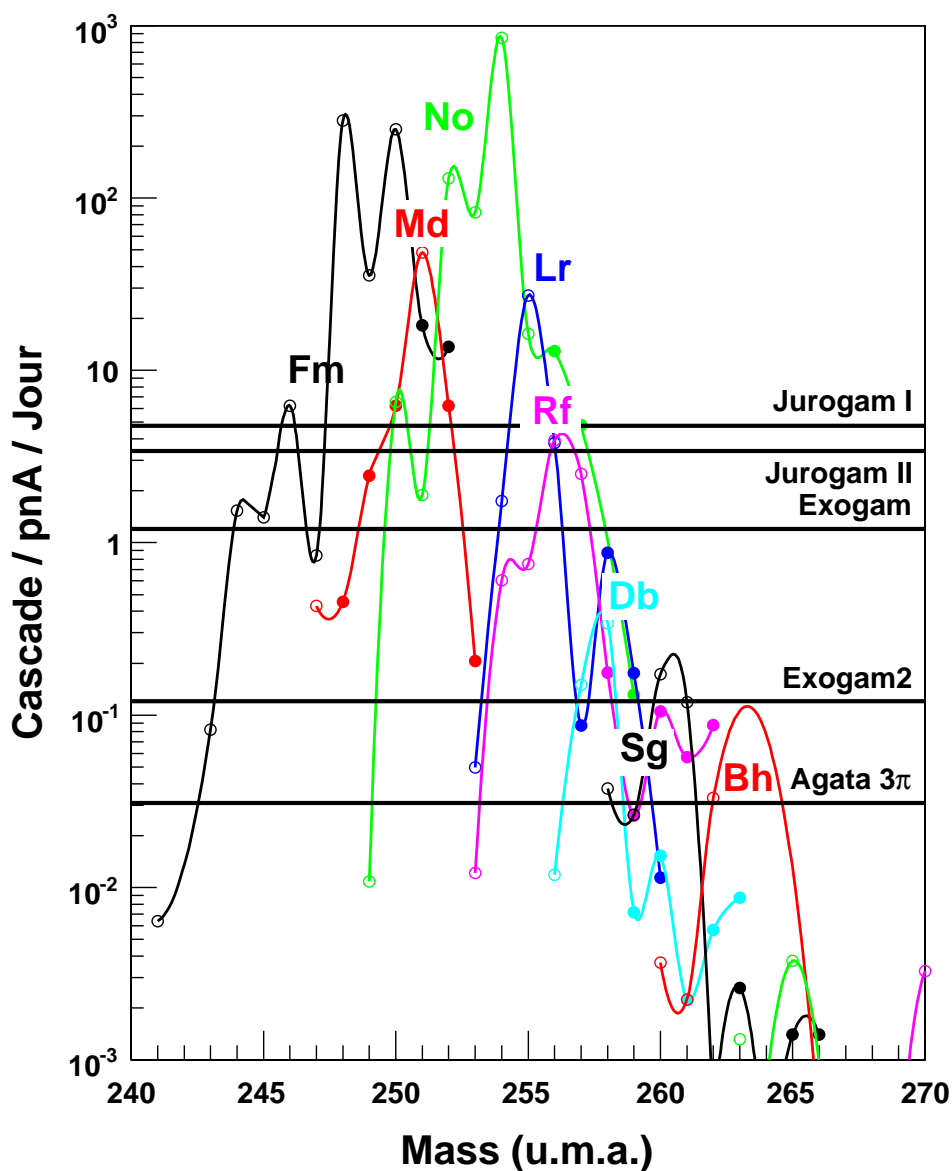


Fig. 4.6 – Limite d'observation en spectroscopie gamma prompt.

estimations et n'a donc pas la prétention de donner des indications fermes quant à la faisabilité des expériences.

D'après cette figure, il apparaît que ^{255}Lr constitue un cas limite pour JUROGAM I. JUROGAM II ayant une limite d'observation légèrement inférieure à JUROGAM I doit permettre la spectroscopie de ^{256}Rf . A plus long terme, il est possible d'envisager avec AGATA la spectroscopie de plusieurs isotopes de Db, de ^{260}Sg voir même de ^{262}Bh . Un gain spectaculaire pour les mesures en coïncidence gamma-gamma bénéficiera particulièrement à l'étude d'isotopes impairs. Bien entendu, le couplage d'EXOGRAM ou d'AGATA avec un détecteur d'électrons serait très profitable. L'installation d'un tel dispositif à GANIL a été évoquée dans la lettre d'intention Spiral2 [spi06a].

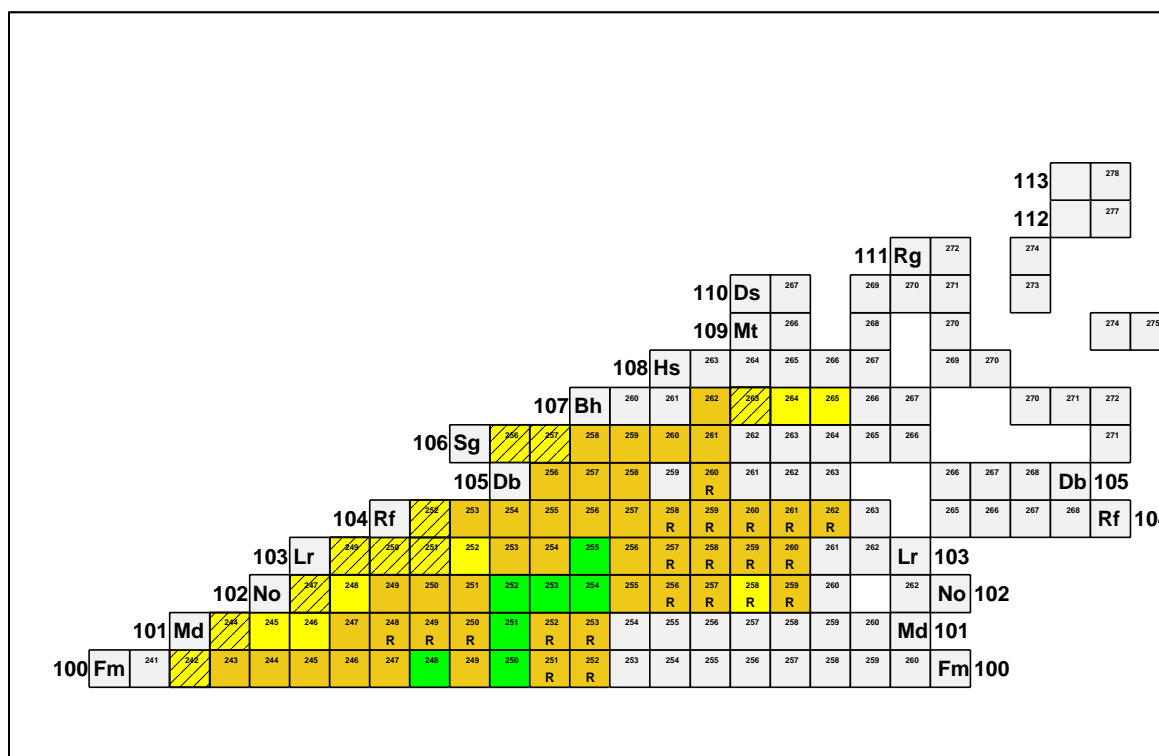


Fig. 4.7 – Spectroscopie gamma envisageable avec AGATA. Se référer au texte pour le code de couleur.

Les études envisageables avec AGATA sont résumées sur la carte des noyaux figure 4.7. En vert sont représentés les noyaux pour lesquels la spectroscopie prompte a déjà été réalisée. En orange sont représentés les noyaux accessibles compte tenu des sections efficaces connues ; en jaune compte tenu de prédictions ou d'extrapolations (voir paragraphe 4.3.2). Les noyaux hachurés ne sont pas encore connus. Le symbole "R" signifie qu'une cible d'actinide doit être utilisée. A noter que pour les isotopes de $^{248-250}\text{Md}$, l'utilisation de cibles stables doit être possible, mais conditionné par des mesures de section efficaces.

Avec les évolutions à court et moyen terme de la spectroscopie prompte, il sera possible d'élargir considérablement le champ d'investigation. Le noyau doublement magique ^{270}Hs est un jalon qui semble encore hors d'atteinte, mais dont on devrait pouvoir se rapprocher avec des isotopes de Sg, voir même de Bh.

4.4.2.2 Spectroscopie après décroissance

L'objectif phare de Spiral2 est de délivrer des faisceaux radioactifs intenses. Grâce à son driver LINAG, on disposera également de faisceaux stables hyper-intenses. Des intensités de $10 \mu\text{A}$ ou plus seront disponibles, par exemple $\sim 15 \mu\text{A}$ pour ^{40}Ca , $\sim 10 \mu\text{A}$ pour ^{58}Ni , ... Le super spectromètre séparateur S3 doit permettre d'exploiter au mieux ces

isotopiques de Hs peuplées par les réactions $^{32-36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ ou chaînes isotopiques de Sg peuplées par les réactions $^{28-30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$. A taux de production équivalent, ce qui est actuellement réalisable autour de $Z = 101$ le sera avec S3 pour $Z = 106 - 108$.

S3 devrait également permettre de réaliser des mesures d'excitation coulombienne de transferrmiens. Les noyaux produits par réaction en cinématique inverse pourraient être excités au plan focal du spectromètre. Avec une intensité de faisceau primaire ^{208}Pb de $1 \mu\text{A}$ et une cible de ^{48}Ca de $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, on produit 16 noyaux de ^{254}No /s à $3.1 \text{ MeV}/\text{A}$. En supposant un moment quadripolaire électrique de $1400 \text{ e}\cdot\text{fm}^2$, la section efficace d'excitation de l'état 4^+ (6^+) est approximativement de 15b (5b). Avec une transmission de 50% , une cible secondaire de ^{208}Pb de $10 \text{ mg}/\text{cm}^2$, ~ 300 (100) transitions $4^+ \rightarrow 2^+$ ($6^+ \rightarrow 4^+$) sont émises par jour. Il peut dans ces conditions être envisagé de mesurer les probabilités de transition $B(E2, 4^+ \rightarrow 2^+)$ et $B(E2, 6^+ \rightarrow 4^+)$.

4.4.2.3 Propriétés de l'état fondamental

Outre la spectroscopie plan focal par les techniques conventionnelles d'étiquetage ou de corrélations génétiques qui seront mises en œuvre dès la mise en service de S3, les pièges à ions offrent à plus long terme des perspectives excitantes: mesure de masse, spectroscopie optique.

Les masses de $^{252-254}\text{No}$ ont été récemment mesurées [blo] à l'aide de SHIPTRAP [dil01a, neu06a, eli07a]. ^{252}No constitue ainsi le cas le plus difficile avec ~ 0.6 ions injectés par seconde dans le piège. Une mesure de résonance cyclotron nécessite de l'ordre de 300 ions afin d'avoir une précision suffisante d'environ 20 keV . Avec une efficacité globale du piège de 0.5% , environ 60000 ions sont requis pour réaliser une mesure de masse. On pourrait ainsi mesurer des masses jusqu'à des isotopes de Sg.

J'ai précédemment évoqué les contraintes apportées par de telles mesures vis-à-vis de la théorie. Il y a également un grand intérêt à réaliser de telles expériences pour déduire l'énergie d'excitation d'isomères (par exemple les isomères K des transferrmiens) mais aussi pour mesurer la masse de noyaux dont les chaînes de décroissance ne sont pas connectées à des noyaux connus, ou plus simplement des noyaux qui ne sont pas émetteurs alpha.

La spectroscopie optique fait également appel à des techniques de piégeage: voir par exemple [klu03a, mar04a]. Comme pour les mesures de masses, des taux de production de quelques atomes par seconde suffisent pour réaliser la spectroscopie LASER. Les noyaux accessibles sont globalement les mêmes que pour les mesures de masse, allant ainsi très au-delà de ^{255}Fm , isotope le plus lourd étudié par spectroscopie optique [sew03a, bac05a] pour lequel spin, moment dipolaire magnétique et quadripolaire électrique ont pu être établis. Sans chercher à atteindre les noyaux les plus lourds, la spectroscopie optique serait très précieuse pour établir spin et moment magnétique (et par déduction la parité) de l'état fondamental de noyaux impairs. Un exemple typique consisterait à étudier les isotopes d'einsteinium pour lesquels une ambiguïté subsiste quant à l'état fondamental qui pourrait ne jamais avoir été observé (voir paragraphe 3.3.4). La spectroscopie LASER colinéaire est la mieux adaptée à de telles mesures.

Les mesures à basse énergie auprès de S3 doivent être faites en lien étroit avec la collaboration DESIR [spi06c] (Désintégration, Excitation et Stockage des Ions Radioactifs). Il s'agit entre autres de mesures de masse ou de spectroscopie LASER colinéaire avec la ligne LUMIERE (Laser Utilisation for Measurement and Ionization of Exotic Radioactive Elements). Etant donné le fort recouvrement entre les objectifs des dispositifs S3 et DESIR, les aires expérimentales ont été agencées afin de permettre d'alimenter DESIR avec les produits de réaction issus de S3.

La possibilité de ré-accélérer avec CIME les ions produits par S3 a été évoquée récemment. Il y a ici des perspectives uniques et fascinantes pour l'étude des noyaux les plus lourds, en particulier pour l'excitation coulombienne et les réactions directes.

4.4.3 Moyens, collaborations, réseaux

Etant donné la complexité et le coût élevé de nouveaux instruments comme AGATA ou S3, les développements et les expériences ne peuvent s'inscrire que dans le cadre de larges collaborations internationales : AGATA regroupe 12 pays européens ; S3 est une collaboration transatlantique. Outre le financement, les réseaux et initiatives européennes permettent d'établir des collaborations et de fédérer des équipes : citons INTAG [int08a] (INstrumentation for TAGging), SHE-network, ECOS [ecow] dans le cadre de Nupec (European Collaboration of Stable Beams), gammapool [gamw], COPIGAL (collaboration franco-polonaise)... Dans la perspective des nouveaux faisceaux de Spiral2, un grand nombre de physiciens a présenté ses objectifs dans des lettres d'intention dont trois sont directement liées aux éléments lourds et super-lourds [spi06a, spi06d, spi09a]. En parallèle, le comité GANIL 2015 [ganw] mène des réflexions quant à l'exploitation et le devenir à moyen terme des faisceaux et dispositifs existants.

Outre les collaborations citées plus haut, les travaux sont réalisés avec quelques collaborateurs avec lesquels j'ai des liens étroits : Université de Jyväskylä, Université de Liverpool, GSI, GANIL Caen, CSNSM Orsay. Sur le plan local, l'équipe de l'IRFU/SPhN focalisée sur les noyaux très lourds et super-lourds est constituée de 3 physiciens. Nous bénéficions de synergies au sein d'un groupe 12 physiciens auquel se greffent de trop rares doctorants ou post-doctorants. Les importants moyens techniques de l'IRFU permettent la construction, par exemple, de MUSETT ou S3. Les ateliers ESNT (Espace de Structure Nucléaire Théorique) organisés à Saclay permettent de plus de très fructueux échanges avec les théoriciens.

4.5 Thématiques annexes

Dans ce mémoire, les perspectives offertes par de nouveaux instruments ou faisceaux ont été essentiellement illustrées dans le contexte des noyaux lourds et super-lourds. Bien entendu, ces nouveaux dispositifs ou accélérateurs pourront bénéficier à de nombreuses thématiques comme en témoignent l'argumentaire de physique Spiral2 [sci06a], les nombreuses lettres d'intention Spiral2 ou l'argumentaire de physique d'AGATA [aga08b].

Sans vouloir dresser ici un catalogue exhaustif de toutes les opportunités offertes, je mentionne ici quelques pistes me semblant du plus grand intérêt.

- Une des avancées les plus spectaculaires attendue avec AGATA concerne les états de très haut moment angulaire : renouveau dans le domaine des états superdéformés (transitions de lien, alimentation, gémellité, oscillations du moment d'inertie) et, espérons-le, découverte d'états hyperdéformés à haut moment angulaire. Les tentatives effectuées avec EUROBALL IV ou GAMMASPHERE se sont révélées infructueuses soit par manque de sensibilité, soit du choix des noyaux tentés, soit du fait de conditions défavorables à la population de tels états (moment angulaire et énergie d'excitation pour simplifier). Les faisceaux radioactifs intenses de Spiral2 pourraient permettre de réunir les conditions propices à de telles études. La région des Cd riches en neutrons semble favorable à l'occurrence simultanée d'orbitales hyper-intruses proton et neutron. D'autre part, la barrière de fission augmentant avec le nombre de neutrons devrait favoriser la stabilité d'états de très haut moment angulaire.
- En restant dans le domaine des formes extrêmes, on peut évoquer de nouvelles études d'isomères de fission. Ces isomères restent pour la plupart à explorer : énergie d'excitation non connue, pas de spectroscopie d'états collectifs [bjo80a, thi02a]. Lorsque le temps de vie le permet, on peut envisager d'exploiter les techniques de "Recoil (Decay or Fission) Tagging" pour une spectroscopie de rayonnements gamma ou d'électron ; ou bien des études de décroissance au plan focal de spectromètre. On peut également envisager d'étendre l'îlot d'isomères de fission au-delà des noyaux de $^{242-245}\text{Bk}$ [gan73a, rep71a, wol72a, vyl72a], comme suggéré par de récents calculs HFB avec force de Gogny [del06a]. On peut penser ici à ^{244}Cf , ^{245}Es ou même ^{246}Fm .
- A plus bas moment angulaire, l'excitation coulombienne de faisceaux radioactifs de Spiral2 permettra l'étude des formes dans toute leur diversité : évolution le long de chaînes isotopiques ou isotoniques, évolution du caractère magique avec l'isospin, coexistence de forme, formes exotiques, ... Diverses combinaisons expérimentales sont envisageables : détection de rayonnements gamma avec AGATA ou EXOGAM2, ions diffusés avec un Si annulaire (rappelons ici que l'électronique MUSETT est également dédiée à ces détecteurs) ; production avec S3 et excitation sur cible secondaire, ou même ré-accelération avec le cyclotron CIME.
- En ce qui concerne les réactions de fusion-évaporation avec des faisceaux exotiques, VAMOS reste très attractif, d'autant plus que le récent test en mode gaz est très encourageant [sch08a]. Un nouveau spectromètre à zéro degré dédié aux faisceaux radioactifs intenses devrait cependant être envisagé.
- La région des plombs déficients en neutrons présente, sur le plan expérimental, de nombreux points communs avec les noyaux lourds et super-lourds. MUSETT et ses détecteurs gazeux ont été en partie conçus dans cette optique. Spectroscopie prompte avec AGATA/EXOGAM2 ou retardée avec S3 permettront un gain spectaculaire dans cette région avec l'étude de la coexistence de forme ou de la radioactivité proton.

Récapitulatif et conclusions

Ce mémoire résume des travaux réalisés depuis près de vingt ans à Strasbourg puis à Saclay. Ce document étant présenté pour obtenir le diplôme d'HDR, je n'oublie pas les étudiants de M2, doctorants et post-doctorants qui m'ont accompagné et contribué de manière souvent décisive à ces études. Après s'être intéressé aux noyaux superdéformés à haut moment angulaire puis à la spectroscopie de fragments de fission riches en neutrons, je poursuis l'étude d'états extrêmes de la matière nucléaire avec les noyaux lourds et super-lourds. Mon programme à court et moyen terme est dédié à l'étude et à la compréhension de ces noyaux très fragiles qui ne doivent leur stabilité qu'à de délicats effets de couche. L'étude de cet état de masse et charge extrême permet de sonder des détails subtils de la matière dans le but d'avoir une bonne compréhension de l'ensemble des noyaux et d'aboutir à une modélisation fidèle et prédictive. La recherche et l'étude des noyaux les plus lourds jouent un rôle moteur en physique nucléaire en contribuant à une meilleure connaissance des modes de décroissance, modélisation des effets de couches, du mécanisme de réaction...

L'étude du noyau impair en proton ^{251}Md a constitué le fil rouge de mes travaux pendant plusieurs années : étude des propriétés collectives et états de particules individuelles par spectroscopie prompt gamma et électron et après décroissance, modélisation à l'aide de calculs HFB. Réaliser des études complètes et conclusives de ce type pour des noyaux plus lourds ou plus exotiques est un de mes objectifs.

Etant donné les faibles taux de production des atomes les plus lourds, les études expérimentales mettent en œuvre des techniques sophistiquées et des instruments performants. Les expériences de spectroscopie prompt déjà réalisées dans la région proche de nobélium ($Z=102$) vont, avec la mise en service de nouveaux instruments, progressivement se raffiner et s'étendre vers le noyau semi-magique déformé $^{270}_{108}\text{Hs}$. La spectroscopie retardée, technique complémentaire, doit être réalisée dans la même région et au-delà.

En complément des techniques bien établies, il convient de développer les mesures directes de moment quadripolaire électrique (temps de vie, excitation coulombienne), la spectroscopie après réactions de transfert, les mesures de propriétés de l'état fondamental à l'aide de dispositifs basse énergie (mesure de masse, spectroscopie optique). L'étude des propriétés atomique des noyaux les plus lourds est également une voie à développer.

La mise en service de Spiral2 délivrant d'une part des faisceaux radioactifs intenses et stables hyper-intenses d'autre part permettra de produire des isotopes plus lourds, plus

exotiques ou en plus grande quantité. Les progrès spectaculaires attendus ne sauraient être faits sans d'ambitieux développements instrumentaux : amélioration de VAMOS, dispositif plan focal MUSETT, évolution vers EXOGAM2, mise en service puis montée en puissance d'AGATA, Super Spectromètre Séparateur S3 associé à sa détection plan focal et ses dispositifs basse énergie. La plupart de ces développements seront achevés à l'horizon 2013.

Après avoir contribué à la construction d'EXOGAM et SAPHIR puis développé le dispositif plan focal BEST, MUSETT et AGATA sont les deux principaux développements instrumentaux auxquels je consacre d'importants efforts. Le multidétecteur AGATA de nouvelle génération apportera un gain spectaculaire en sensibilité qui bénéficiera à une large communauté de physiciens. Le développement de spectromètres gamma a toujours été moteur en spectroscopie nucléaire et conduit à des résultats spectaculaires ou inattendus. AGATA laisse donc présager de beaux résultats et probablement d'heureuses surprises.

La construction d'outils de plus en plus puissants tel AGATA induit une complexité dont les collaborations n'ont probablement pas encore tiré pleinement les enseignements ; les coûts encore inédits pour la discipline ne sont pas nécessairement accompagnés des moyens humains et financiers permettant de faire face aux défis lancés. L'utilisation de nouveaux faisceaux radioactifs ou de très haute intensité implique de plus des règles de sûreté et de suivi de procédures de plus en plus rigoureuses et absorbantes. On constate également l'évolution récente vers un nouveau type de gouvernance de la recherche impliquant une part de plus en plus croissante (et inquiétante) de l'administration, de la conduite et gestion des projets et de la recherche de financements.

Il convient de prendre la mesure de ces changements en évoluant vers de nouvelles procédures, collaborations, méthodes de gestion afin d'exploiter au mieux les nouveaux instruments et faisceaux. La mutualisation des moyens liée à la sophistication et au coût de plus en plus élevé des instruments implique de travailler au sein de larges collaborations. En corollaire, les détecteurs sont souvent nomades, exploités auprès de divers accélérateurs et bénéficient d'une grande diversité de faisceaux. Ceci conduit aussi à un brassage des idées, à une variété et richesse des thématiques abordées.

Une des spécificités de la physique nucléaire est le grand nombre de noyaux et de phénomènes présents à travers la carte des noyaux. Il est donc essentiel d'être ouvert aux tendances et attentif aux progrès technologiques et scientifiques réalisées de toute part. La spectroscopie des noyaux super-lourds n'est qu'un exemple de la richesse de la structure nucléaire mais reste, à mon avis, un des plus intéressants et prometteurs de la discipline pour les prochaines années. Je compte donc, pour au moins une décennie, concentrer tous mes efforts dans cette direction aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan des développements instrumentaux.

Bibliographie

- [abe90a] S. Åberg, Nucl. Phys. A520 (1990) 35c.
- [ada00a] G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, Nucl. Phys. A 678 (2000) 24.
- [ada04a] G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, Phys. Rev. C 69 (2004) 011601(R).
- [ada04b] G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, Phys. Rev. C 69 (2004) 014607.
- [ada04c] G.G. Adamian, N.V. Antonenko, W. Scheid, Phys. Rev. C 69 (2004) 044601.
- [ada96a] V.B. Adamskii *et al.*, At. Energ. 81 (1996) 651.
- [afa96a] A.V. Afanasjev, J. König, P. Ring, Nucl. Phys. A 608 (1996) 107.
- [afa05a] A.V. Afanasjev, S. Frauendorf, Phys. Rev. C 71 (2005) 024308.
- [agaa] "Gammaware user's guide", AGATA Data Analysis Team.
- [agu92a] C.E. Aguiar *et al.*, Phys. Rev. C 46 (1992) R45.
- [aga05a] AGATA Ancillary Detectors and Ancillary Detector Integration Working Group, "Specifications of the AGAVA (AGata Ancillary Vme Adapter) Ancillary Detector GTS Interface", version 2.0, 2005.
- [aga05b] N. Dosme, X. Grave, E. Legay, V. Pucknell, F. Saillant, Ch. Theisen. "Merge of ancillary detectors with AGATA", version 0.3, 2005.
- [aga05c] "PROPOSAL FOR AGATA at GANIL: context and impact", rapport de collaboration, 2005.
- [aga08a] AGATA DAQ Working Group, "AGATA DAQ RULES - organization, responsibilities and policies", 2008.
- [aga08b] "Agata Physics Case", edited by D. Balabanski and D. Bucurescu, 2008.
- [aga08c] "Agata Technical Design Report", Edited by J. Simpson, J. Nyberg and W. Korten, 2008.
- [agawd] AGATA DAQ web site: <http://csngwinfo.in2p3.fr/>.
- [ago03a] S. Agostinelli *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 506 (2003) 250.
- [ahm91a] I. Amhad *et al.*, Phys. Rev. C 44 (1991) 1204.
- [ahm93a] I. Amhad and P.A. Butler, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 43 (1993) 71.
- [ahm95a] I. Ahmad and W.R. Phillips, Rep. Prog. Phys. 58 (1995) 1415.
- [aic06a] M. Aiche *et al.*, Proceedings of the international workshop on nuclear data needs for generation IV nuclear energy systems, Antwerpen, Belgium 5-7 April 2005. World scientific publishing (2006) p. 222.

- [alt98a] G.D. Alton and J.R. Beene, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 24 (1998) 1347.
- [ama91a] R.D. Amado *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 67 (1991) 2777.
- [and76a] G. Andersson *et al.*, *Nucl. Phys. A* 268 (1976) 205.
- [and84a] H.R. Andrews *et al.*, "Proposal for a National Facility: The 8PI Spectrometer", AECL Report No. 8329, 1984.
- [and00a] C. Andreoiu *et al.*, *Phys. Rev. C* 62 (2000) 051301.
- [ant08a] S. Antalic *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 38 (2008) 219.
- [ari98a] K.-I. Arita *et al.*, *Prog. Theo. Phys.* 100 (1998) 1223.
- [ari97a] Y. Aritomo *et al.*, *Phys. Rev. C* 55 (1997) R1011.
- [ari99a] Y. Aritomo *et al.*, *Phys. Rev. C* 59 (1999) 796.
- [ari07a] Y. Aritomo, *Phys. Rev. C* 75 (2007) 024602.
- [arm85a] P. Armbruster, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 35 (1985) 135.
- [arm90a] P. Armbruster, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 50 (2000) 411.
- [arm03a] P. Armbruster, *C.R. Phys.* 4 (2003) 571.
- [asa05a] M. Asai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 95 (2005) 102502.
- [ave09a] B. Avez, Thèse de doctorat, 2009.
- [aza02a] F. Azaiez *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 15 (2002) 93.
- [bac05a] H. Backe *et al.*, *Hyperfine Interact.* 162 (2005) 3.
- [bac07a] H. Backe *et al.*, *Eur. Phys. J. D* 45 (2007) 99.
- [bak92a] C. Baktash *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 69 (1992) 1500.
- [bak95a] C. Baktash *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 74 (1995) 1946.
- [bak95b] C. Baktash, B. Haas, W. Nazarewicz, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 45 (1995) 485.
- [bal72a] R. Balian and C. Bloch, *Ann. Phys.* 69 (1972) 76.
- [bal92a] G. Baldsiefen *et al.*, *Phys. Lett. B* 275 (1992) 252.
- [bar04a] P. Baron, "Documentation technique de l'asic MATE3", 2005.
- [bar05a] P. Baron, "Description des modifications et des performances de l'asic ATHED", 2005.
- [bar06a] E. Barat *et al.*, 2006 IEEE Nuclear Science Symposium, Conference Record vol. 2 (2006) 955.
- [bas06a] J.E. Bastin *et al.*, *Phys. Rev. C* 73 (2006) 024308.
- [bea93a] C.W. Beausang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 91 (1993) 1800.
- [bea95a] C.W. Beausang *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 364 (1995) 560.
- [bea98a] C.W. Beausang *et al.*, *Phys. Lett. B* 417 (1998) 13.
- [bec90a] J.A. Becker *et al.*, *Phys. Rev. C* 41 (1996) R9.
- [bec99a] F. Becker *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 4 (1999) 103.
- [bec00a] F. Becker *et al.*, *Phys. Scr. T88* (2000) 17.

- [bec04a] S.A. Becker, 2004, in *Origin and Evolution of the Elements*. Volume 4, Carnegie Observatories Astrophysics Series, ed. A. McWilliam and M. Rauch, Cambridge University Press.
- [bel91a] G. Bélier *et al.*, Rapport d'activité C.R.N. 1991-1992, 35.
- [bel65a] G.I. Bell, *Phys. Rev.* 139 (1965) B1207.
- [bel67a] G.I. Bell, *Rev. Mod. Phys.* 39 (1967) 59.
- [bel67b] G.I. Bell, *Phys. Rev.* 158 (1967) 1127.
- [bel05a] M. Bellato. "AGATA Global Trigger and Synchronization Hardware", 2005.
- [bel07a] M. Bellato *et al.*, Proceedings of Real Time Conference, 2007. 15th IEEE-NPSS.
- [ben75a] R. Bengtsson *et al.*, *Phys. Lett. B* 57 (1975) 301.
- [ben88a] T. Bengtsson, I. Ragnarsson and S. Åberg, *Phys. Lett. B* 208 (1988) 39.
- [ben99a] M. Bender *et al.*, *Phys. Rev. C* 60 (1999) 034304.
- [ben01a] M. Bender, W. Nazarewicz, P. -G. Reinhard, *Phys. Lett. B* 515 (2001) 42.
- [ben03a] M. Bender, P.-H. Heenen, P.-G. Reinhard, *Rev. Mod. Phys.* 75 (2003) 121.
- [ben03b] M. Bender, P. Bonche, T. Duguet, P. -H. Heenen, *Nucl. Phys. A* 723 (2003) 354.
- [benp] M. Bender, communication privée.
- [bha08a] S. Bhattacharyya *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 032501.
- [bha09a] S. Bhattacharyya *et al.*, *Phys. Rev. C* 79 (2009) 014313.
- [bis05a] D.C. Biswas *et al.*, *Phys. Rev. C* 71 (2005) 011301.
- [bjo80a] S. Bjørnholm and J.E. Lynn, *Rev. Mod. Phys.* 52 (1980) 725.
- [blo89a] J. Blons, *Nucl. Phys. A* 502 (1989) 121c.
- [blo] M. Block *et al.*, à paraître.
- [boh69a] A. Bohr, B.R. Mottelson. *Nuclear Structure, Volume I*, W.A Benjamin Inc, 1969.
- [boh74a] A. Bohr, *Phys. Scr.* 10A (1974) 52.
- [boh75a] A. Bohr, B.R. Mottelson. *Nuclear Structure, Volume II*, W.A Benjamin Inc, 1975.
- [bon96a] D. Bonatsos *et al.*, *Phys. Rev. A* 54 (1996) R2533.
- [bon05a] P. Bonche, H. Flocard, P.-H. Heenen, *Comput. Phys. Commun.* 171 (2005) 49.
- [bou03a] E. Bouchez *et al.*, *Acta Phys. Pol. B* 34 (2003) 2443.
- [bou03b] E. Bouchez *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 90 (2003) 082502.
- [bou03c] E. Bouchez, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2003.
- [bou04a] B. Bouriquet, Y. Abe and G. Kosenko, *Eur. Phys. J. A* 22 (2004) 9.
- [bou97a] S. Bouneau *et al.*, *Z. Phys. A: Hadrons Nucl.* 358 (1997) 179.
- [boy04a] S. Boyer, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 2004.
- [boy06a] S. Boyer *et al.*, *Nucl. Phys. A* 775 (2006) 175.

- [bru07a] R. Brun, F. Rademakers, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 389 (1997) 81.
- [buc03a] B. Buck, A.C. Merchant et S.M. Perez, Phys. Rev. C 68 (2003) 024313.
- [bur06a] A. Bürger *et al.*, AIP Conference Proceedings 831 (2006) 418.
- [bur09a] A. Bürger *et al.*, Phys. Rev. Lett, sous presse.
- [bur95a] K. Burzyński *et al.*, Phys. Scr. T56 (1995) 228.
- [bur95b] K. Burzyński *et al.*, Phys. Rev. C 51 (1995) 1825.
- [bus98a] B.C. Busse *et al.*, Phys. Rev. C 57 (1998) R1017.
- [but96a] P.A. Butler and W. Nazarewicz, Rev. Mod. Phys. 68 (1996) 349.
- [but96b] P.A. Butler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 381 (1996) 433.
- [but02a] P.A. Butler *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 202501.
- [byr90a] Th. Byrski *et al.*, Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 1650.
- [byr98a] Th. Byrski *et al.*, Phys. Rev. C 57 (1998) 1151.
- [caa05a] M. Caamaño *et al.*, Eur. Phys. J. A 23 (2005) 201.
- [cam03a] A.G.W. Cameron, Astrophys. J. 587 (2003) 327.
- [cas92a] R.F. Casten *et al.*, Phys. Rev. C 45 (1992) R1413.
- [cat05a] W.N. Catford *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31 (2005) S1655.
- [ced94a] B. Cederwall *et al.*, Phys. Rev. Lett. 72 (1994) 3150.
- [ced95a] B. Cederwall *et al.*, Phys. Lett. B 346 (1995) 244.
- [cha02] A. Chatillon, Mémoire de DEA, Université Lyon I, 2002.
- [cha05a] A. Chatillon, Thèse de Doctorat, Université Lyon I, 2005.
- [cha05b] A. Chatillon *et al.*, Proc. Intern. Symposium Exotic Nuclei, Peterhof, Russia, July 5-12, 2004, Yu.E. Penionzhkevich, E.A. Cherepanov, Eds., World Scientific, Singapore, p.198 (2005).
- [cha06a] A. Chatillon *et al.*, Eur. Phys. J. A 30 (2006) 397.
- [cha07a] A. Chatillon *et al.*, Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 132503.
- [cha06b] M.B. Chadwick *et al.*, Nucl. Data Sheets 107 (2931) 2006.
- [che92a] B.-Q. Chen *et al.*, Phys. Rev. C 46 (1992) R1582.
- [che99a] E.A. Cherepanov, Pramana J. Phys. 53 (1999) 619.
- [chi94a] H.C. Chiang, S.T. Hsieh, and H.Z. Sun, Phys. Rev. C 49 (1994) 1917.
- [cla92a] R.M. Clark *et al.*, Phys. Lett. B 275 (1992) 247.
- [cla96a] R.M. Clark *et al.*, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3510.
- [cla00a] R.M. Clark and A.O. Macchiavelli, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 50 (2000) 1.
- [cla01a] R.M. Clark *et al.*, Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 202502.
- [cle05a] E. Clément *et al.*, AIP Conference Proceedings 764 (2005) 55.
- [cle06a] E. Clément, Thèse de Doctorat, Université Paris XI - Paris Sud, 2006.
- [cle07a] E. Clément *et al.*, Phys. Rev. C 75 (2007) 054313.

- [cle08a] E. Clément *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 587 (2008) 292.
- [cor03a] J. Corish, G.M. Rosenblatt, Pure Appl. Chem. 75 (2003) 1613.
- [cor04a] J. Corish, G.M. Rosenblatt, Pure Appl. Chem. 76 (2003) 2101.
- [cro94a] B. Crowell *et al.*, Phys. Lett. B 333 (1994) 320.
- [cro95a] B. Crowell *et al.*, Phys. Rev. C 51 (1995) R1599.
- [cre06a] J. Cresswell, X. Grave, "AGATA PSA and Tracking Algorithm Integration", 2006.
- [cul90a] D.M. Cullen *et al.*, Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1547.
- [cwi83a] S. Ćwiok *et al.*, Nucl. Phys. A 410 (1983) 254.
- [cwi94a] S. Ćwiok *et al.*, Nucl. Phys. A573 (1994) 354.
- [cwi96a] S. Ćwiok *et al.*, Nucl. Phys. A611 (1996) 246. ,
- [dag94a] P.J. Dagnall *et al.*, Phys. Lett. B 335 (1994) 313.
- [das92a] C.H. Dasso and R. Donangelo, Phys. Lett. B 276 (1992) 1.
- [dau99a] J.M. Daugas, "Etude de la structure et du mécanisme de production des états isomères aux énergies intermédiaire", Thèse de doctorat, Université de Caen, 1999.
- [dau06a] J.M. Daugas *et al.*, AIP Conference Proceedings 831 (2006) 427.
- [dea96a] G. de Angelis *et al.*, Phys. Rev. C 52 (1996) 679.
- [dec80a] J. Dechargé, D. Gogny, Phys. Rev. C 21 (1980) 1568.
- [dec99a] J. Dechargé, J.-F. Berger, K. Dietrich, M.S. Weiss, Phys. Lett. B 451 (1999) 275.
- [def96a] G. de France *et al.*, Phys. Rev. C 53 (1996) R1070.
- [del04a] M.A. Deleplanque *et al.*, Phys. Rev. C 69 (2004) 044309.
- [del06a] J.-P. Delaroche *et al.*, Nucl. Phys. A 771 (2006) 103.
- [den00a] V.Yu. Denisov and S. Hofmann, Phys. Rev. C 61 (2000) 034606.
- [den04a] V.Yu. Denisov, Prog. Part. Nucl. Phys. 46 (2001) 303.
- [die97a] K. Dietrich, K. Pomorski, Nucl. Phys. A 627 (1997) 175.
- [dil01a] J. Dilling *et al.*, Hyperfine Interact. 132 (2001) 495.
- [dob95a] J. Dobaczewski and J. Dudek, Phys. Rev. C 52 (1995) 1827.
- [dob00a] J. Dobaczewski *et al.*, Phys. Rev. C 62 (2000) 041310.
- [dob00b] J. Dobaczewski *et al.*, Phys. Rev. C 62 (2000) 041311.
- [dom03a] Zs. Dombrádi *et al.*, Nucl. Phys. A 727 (2003) 195.
- [don65a] E.D. Donets *et al.*, At. Energ. USSR 19 (1965) 109; Soviet J. At. Energy 19 (1965) 95.
- [don96a] D. Döna, S. Frauendorf, J. Meng, Phys. Lett. B 387 (1995) 667.
- [dor65a] D.W. Dorn, R.W. Hoff, Phys. Rev. Lett. 14 (1965) 440.
- [dos96a] T. Døssing *et al.*, Phys. Rep. 268 (1996) 1.
- [dra08a] I. Dragojević, *et al.*, Phys. Rev. C 78 (2008) 024605.

- [dra90a] J.E. Draper *et al.*, Phys. Rev. C 42 (1990) R1791.
- [dro] A. Drouart *et al.*, GANIL proposal E533.
- [dru06a] F. Druillolle, "MUST VME Board", 2006.
- [dud90a] J. Dudek, T.R. Werner and Z. Zsymanski, Phys. Lett. B 248 (1990) 235.
- [dud95a] J. Dudek *et al.*, C.R.N. Report 95-15, 1995.
- [dud02a] J. Dudek *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 252502.
- [dud04a] J. Dudek *et al.*, Eur. Phys. J. A 20 (2004) 15.
- [due56a] H.P. Duerr, Phys. Rev. 103 (1956) 469.
- [dug01a] T. Duguet, P. Bonche, P.-H. Heenen, Nucl. Phys. A 679 (2001) 427.
- [dul08a] Ch. E. Düllmann and A. Türler, Phys. Rev. C 77 (2008) 064320.
- [ebe72a] S.H. Eberle, Kerntechnik 14 (1972) 65.
- [ebe08a] J. Eberth, J. Simpson, Prog. Part. Nucl. Phys. 60 (2008) 283.
- [ecow] ECOS web site: <http://www.nupec.org/ecos/>.
- [eec06a] S. Eeckhaudt, Thèse de Doctorat, Université de Jyväskylä, 2006.
- [eli07a] S.A. Eliseev *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 258 (2007) 479.
- [eur03a] "The EURISOL Report, A feasibility study for a european isotope-separation-on-line radioactive ion beam facility", Edited by John Cornell, 2003.
- [fal89a] P. Fallon *et al.*, Phys. Lett. B 218 (1989) 137.
- [fal95a] P. Fallon *et al.*, Phys. Rev. C 51 (1995) R1609.
- [fal97a] P. Fallon *et al.*, Phys. Rev. C 55 (1997) R999.
- [fan91a] B. Fant *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 17 (1991) 319.
- [fen07a] Z.-Q. Feng, *et al.*, Phys. Rev. C 76 (2007) 044606.
- [fen09a] Z.-Q. Feng, *et al.*, Nucl. Phys. A 816 (2009) 33.
- [fer06a] B. Fernández-Domínguez *et al.*, AIP Conference Proceedings 831 (2006) 347.
- [fin99a] C. Finck *et al.*, Phys. Lett. B 467 (1999) 15.
- [fir96a] R.B. Firestone, V.S. Shirley, *et al.*, Table of Isotopes, eighth ed., Wiley, New York, 1996.
- [fis96a] S.M. Fischer *et al.*, Phys. Rev. C 53 (1996) 2126.
- [fle40a] G.N. Flerov, K.A. Petrzhak, Phys. Rev. 58 (1940) 89.
- [fle64a] G.N. Flerov *et al.*, Phys. Lett. 13 (1964) 73.
- [fle68a] G.N. Flerov *et al.*, JINR Preprint P7-3808.
- [fli92a] S. Flibotte *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 320 (1992) 325.
- [fli93a] S. Flibotte, G. Hackman, Ch. Theisen *et al.*, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 688.
- [fli93b] S. Flibotte *et al.*, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 4299.
- [fli95a] S. Flibotte, G. Hackmann, I. Ragnarsson, Ch. Theisen *et al.*, Nucl. Phys. A584 (1995) 373.
- [fra01a] S. Frauendorf, Rev. Mod. Phys. 73 (2001) 463.
- [fri90a] H. Frisk, Nucl. Phys. A511 (1990) 309.

- [gamw] Gammapool web site : <http://gammapool.lnl.infn.it/>.
- [gan73a] Yu. P. Gangrskii *et al.*, Soviet J. At. Energy 33 (1973) 948; At. Energ. USSR 33 (1972) 829.
- [ganw] GANIL 2015 web site : <http://ganil2015.ganil.fr/>.
- [gar86a] J.D. Garrett, G. Hagemann and B. Herskind, Ann. Rev. Nucl. Sci. 36 (1986) 419.
- [gas01a] D. Gassmann *et al.*, Phys. Lett. B 497 (2001) 181.
- [gra05a] X. Grave *et al.*, Proceedings of Real Time Conference, 2005. 14th IEEE-NPSS, p119.
- [gal04a] J. Gál *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 516 (2004) 502.
- [gau97a] C. Gautherin *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. 38 (1997) 289.
- [gau97b] C. Gautherin, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 1997.
- [gau98a] C. Gautherin *et al.*, Eur. Phys. J. A 1 (1998) 391.
- [gea] "GEANT4 Detector description and simulation tool", CERN Program Library Long Write-up W5013, CERN Geneva.
- [gel90a] A. Gelberg, P. von Brentano and R.F. Casten, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 16 (1990) L143.
- [gel08] M. Gélin *et al.*, Nucl. Phys. A 805 (2008) 368.
- [ghi55a] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. 99 (1955) 1048.
- [ghi55b] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. 98 (1955) 1518.
- [ghi61a] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. Lett. 6 (1961) 473.
- [ghi69a] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. Lett. 22 (1969) 1317.
- [ghi70a] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. Lett. 26 (1970) 1498.
- [ghi73a] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. C 7 (1973) 2032.
- [ghi74a] A. Ghiorso *et al.*, Phys. Rev. Lett. 33 (1974) 1490.
- [gil07a] A. Gillibert *et al.*, Nucl. Phys. A 787 (2007) 423c.
- [gil07b] A. Gillibert *et al.*, Eur. Phys. J. Special Topics, 150 (2007) 161.
- [gor02a] A. Görgen *et al.*, Phys. Rev. C 65 (2002) 027302.
- [gor03a] A. Görgen *et al.*, AIP Conference Proceedings 656 (2003) 17.
- [gor05a] A. Görgen *et al.*, Acta Phys. Pol. B 36 (2005) 1281.
- [gor05b] A. Görgen *et al.*, AIP Conference Proceedings 802 (2005) 275.
- [gor07a] A. Görgen *et al.*, Eur. Phys. J. Special Topics, 150 (2007) 117.
- [gou] H. Goutte, Communication privée.
- [gra08a] T. Grahn *et al.*, Nucl. Phys. A 801 (2008) 83.
- [gre08a] P.T. Greenlees *et al.*, Phys. Rev. C 78 (2008) 021303.
- [gre08b] P.T. Greenlees *et al.*, "In-Beam Gamma-Ray Spectroscopy Heavy Elements : ^{256}Rf ", Jurogam II Proposal, 2008.
- [gre02a] S. Grévy *et al.*, J. Nucl. Radiochem. Sci. 3 (2002) 9.

- [gri07a] "GRIDCC Project - D8.3 Project Final Report, with gender issues report appended", 2007.
- [gru] "Gru/ViGru documentation" :
<http://wiki.ganil.fr/gap/wiki/Documentation/Software/Gru>
- [gui93a] M.W. Guidry *et al.*, Phys. Rev. C 48 (1993) 1739.
- [gut71a] M.C. Gutzwiller, J. Math. Phys. 12 (1971) 343.
- [haa88a] B. Haas *et al.*, Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 503.
- [haa90a] B. Haas *et al.*, Phys. Rev. C 42 (1990) R1817.
- [hab03a] D. Habs *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 204 (2003) 739.
- [hac97a] G. Hackman *et al.*, Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 4100.
- [hac98a] G. Hackman *et al.*, Phys. Lett. B 416 (1998) 268.
- [ham94a] I. Hamamoto, B. Mottelson, Phys. Lett. B 333 (1994) 294.
- [ham95a] I. Hamamoto, B. Mottelson, Phys. Scr. T56 (1995) 27.
- [ham09a] I. Hamamoto, B.R. Mottelson, Phys. Rev. C 79 (2009) 034317.
- [ham95b] J.H. Hamilton *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. 35 (1995) 635.
- [has97a] D.S. Haslip *et al.*, Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 3447.
- [has98a] D.S. Haslip *et al.*, Phys. Rev. C 58 (1998) R2649.
- [hau97a] K. Hauschild *et al.*, Phys. Rev. C 55 (1997) 2819.
- [hau06a] K. Hauschild *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 560 (2006) 388.
- [hau08a] K. Hauschild *et al.*, Phys. Rev. C 78 (2008) 021302.
- [hau08b] K. Hauschild *et al.*, Phys. Rev. C 77 (2008) 047305.
- [hax49a] O. Haxel *et al.*, Phys. Rev. 75 (1949) 1766.
- [he05a] X.T. He *et al.*, Eur. Phys. J. A 23 (2005) 217.
- [her02a] R.-D. Herzberg *et al.*, Eur. Phys. J. A 15 (2002) 205.
- [her02b] R.-D. Herzberg *et al.*, Phys. Rev. C 65 (2002) 014303.
- [her04a] R.-D. Herzberg, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004) R123.
- [her06a] R.-D. Herzberg *et al.*, Nature (London) 442 (2006) 896.
- [her08a] R.-D. Herzberg, P.T. Greenlees. Prog. Part. Nucl. Phys. 61 (2008) 674.
- [her09a] R.-D. Herzberg *et al.*, Eur. Phys. J. A, in press.
- [hes04a] F.P. Hessberger *et al.*, Eur. Phys. J. A 22 (2004) 417.
- [hes05a] F.P. Hessberger *et al.*, Eur. Phys. J. A 26 (2005) 233.
- [hes06a] F.P. Hessberger *et al.*, Eur. Phys. J. A 30 (2006) 561.
- [hof64a] R.W. Hoff, D.W. Dorn, Nucl. Sci. Eng. 18 (1964) 110.
- [hof71a] R.W. Hoff *et al.*, Nucl. Phys. A 169 (1971) 641.
- [hof95a] S. Hoffmann *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 350 (1995) 277.
- [hof95b] S. Hoffmann *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 350 (1995) 281.
- [hof96a] S. Hoffmann *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 354 (1996) 229.
- [hof98a] S. Hoffmann, Rep. Prog. Phys. 61 (1998) 639.

- [hof00a] S. Hoffmann, G. Münzenberg, *Rev. Mod. Phys.* 72 (2000) 733.
- [hof01a] S. Hoffmann *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 10 (2001) 5.
- [hof01b] S. Hoffmann, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 46 (2001) 293.
- [hof02a] S. Hoffmann, "On beyond Uranium, Journey to the End of the Periodic table", Taylor and Francis ed., 2002.
- [hof02b] S. Hoffmann *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 14 (2002) 147.
- [hof00b] D.C. Hofmann, A. Ghiorso, G.T. Seaborg, "The transuranium people - the inside story", Imperial College Press, 2000.
- [hou98a] M. Houry *et al.*, *AIP Conference Proceedings* 447 (1998) 220.
- [hou99a] M. Houry *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 6 (1999) 43.
- [hou00a] M. Houry, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, Orsay, 2000.
- [hug94a] J.R. Hughes *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 72 (1994) 824.
- [hum04a] R.D. Humphreys *et al.*, *Phys. Rev. C* 69 (2004) 064324.
- [hus91a] M.S. Hussein, *Phys. Rev. C* 44 (1991) 446.
- [hus91b] M.S. Hussein, *Nucl. Phys. A* 513 (1991) 192.
- [hur02a] A. Hürstel, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2002.
- [iac91a] F. Iachello, *Nucl. Phys. A* 522 (1991) 83c.
- [ibr07a] F. Ibrahim *et al.*, *Nucl. Phys. A* 787 (2007) 110.
- [ide01a] E. Ideguchi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001) 222501.
- [ili82a] A.S. Il'inov, Yu.Ts. Oganessian and E.A. Cherepanov, *Sov. J. Nucl. Phys.* 36 (1982) 69; *Yad. Fiz.* 36 (1982) 118.
- [ing69a] J.S. Ingley, *Nucl. Phys. A* 124 (1969) 130.
- [ing54a] D.R. Inglis, *Phys. Rev.* 96 (1954) 1059.
- [ing54b] D.R. Inglis, *Phys. Rev.* 97 (1954) 701.
- [int08a] INTAG collaboration, "Z and A identification for medium-mass and heavy nuclei", Final report, 2008.
- [iup09a] IUPAC Press Release, July 20th, 2009.
- [jac08a] D. Jacquet *et al.*, Proposition d'expérience Ganil E581, 2008.
- [jan91a] R.V.F. Janssens and T.L. Khoo, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 41 (1991) 321.
- [jep09a] H.B. Jeppesen *et al.*, *Phys. Rev. C* 79 (2009) 031303R.
- [jur05a] B. Jurado *et al.*, *AIP Conference Proceedings* 789 (2005) 15.
- [jur07a] B. Jurado *et al.*, Proceedings of 2007 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22-27, 2007, Nice, France, Published by EDP Science (2008), Vol 1, p331.
- [jur07c] B. Jurado *et al.*, Proceedings of the CNR* 2007 conference, *AIP Conference Proceedings* 1005 (2008) 90.
- [jur08a] B. Jurado *et al.*, Proceedings of the seminar on Fission: Corsendonk Priory, Belgium, 18-21 September 2007. World Scientific Publishing (2008), p47.
- [kad97a] N. Khadiri, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1997.

- [kan99a] H. Kankaanpää *et al.*, AIP Conference Proceedings 495 (1999) 260.
- [kat08a] K. Katori *et al.*, Phys. Rev. C 78 (2008) 014301.
- [ket09a] S. Ketelhut *et al.*, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 212501.
- [kho96a] T.L. Khoo *et al.*, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 1583.
- [kin00a] N. Kintz, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2000.
- [kir87a] A.J. Kirwan *et al.*, Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 467.
- [klu03a] H.-J. Kluge, W. Nörtershäuser, Spectrochim. Acta B 58 (2003) 1031.
- [kon93a] J. König and P. Ring, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 3079.
- [kor01a] A. Korichi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 2746.
- [kor04a] W. Korten *et al.*, Nucl. Phys. A 746 (2004) 90c.
- [kor05a] W. Korten *et al.*, Nucl. Phys. A 752 (2005) 255c.
- [kot96a] V.K.B. Kota, Phys. Rev. C 53 (1996) 2550.
- [kra93a] K.-L. Kratz *et al.*, Astrophys. J. 403 (1993) 216.
- [kra79a] M.O. Krause, J. Phys. Chem. Ref. Data 8 (1979) 307.
- [kru96a] R. Krücken *et al.*, Phys. Rev. C 54 (1996) R2109.
- [kru00a] A.T. Kruppa *et al.*, Phys. Rev. C 61 (2000) 034313.
- [kuh92a] A. Kuhnert *et al.*, Phys. Rev. C 46 (1992) 133.
- [lab05a] M. Labiche *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31 (2005) S1691.
- [lab05b] M. Labiche *et al.*, Rom. J. Phys. 50 (2005) 657.
- [lab09a] M. Labiche *et al.*, soumis à Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.
- [laf95a] D.R. LaFosse *et al.*, Phys. Lett. B 354 (1995) 34.
- [lag04a] K. Lagergren *et al.*, Eur. Phys. J. A 21 (2004) 375.
- [lau02a] T. Lauritsen *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 282501.
- [lau02b] T. Lauritsen *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 042501.
- [laz01a] I. Lazarus *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 48 (2001) 567.
- [lec99a] Y. Le Coz *et al.*, AIP Conference Proceedings 495 (1999) 253.
- [lec99b] Y. Le Coz *et al.*, Eur. Phys. J. direct A 3 (1999) 1.
- [lee82a] D. Lee *et al.*, Phys. Rev. C 25 (1982) 286.
- [lee83a] D. Lee *et al.*, Phys. Rev. C 27 (1983) 2656.
- [lee03a] I.Y. Lee, M.A. Deleplanque and K. Vetter, Rep. Prog. Phys. 66 (2003) 1095.
- [leg07a] E. Legay *et al.*, "Dataflow in the AGATA DAQ", 2007.
- [lei95a] M. Leino *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 99 (1995) 653.
- [lei99a] M. Leino *et al.*, Eur. Phys. J. A 6 (1999) 63.
- [lei04a] M. Leino, F.-P. Hessberger, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 54 (2004) 175.
- [lem06a] R.C. Lemmon *et al.*, AIP Conference Proceedings 853 (2006) 285.
- [ler03a] F. Lerma *et al.*, Phys. Rev. C 67 (2003) 044310.
- [let04a] L. Letterier, "Documentation technique sur l'électronique front-end de MUST2", Rapport de collaboration, 2004.

- [lew08a] M. Lewitowicz, Nucl. Phys. A 805 (2008) 519c.
- [lew09a] M. Lewitowicz, "SPIRAL 2 fission fragments production yields after postacceleration", 2009.
- [liu97a] Y. Liu *et al.*, Phys. Rev. C 56 (1997) 1370.
- [lob68a] K.E.G. Löbner, Phys. Lett. B 26B (1968) 369.
- [lop96a] A. Lopez-Martens *et al.*, Phys. Lett. B 380 (1996) 18.
- [lop06a] A. Lopez-Martens *et al.*, Phys. Rev. C 74 (2006) 044303.
- [lop07a] A. Lopez-Martens *et al.*, Eur. Phys. J. A 32 (2007) 245.
- [los65a] Los Alamos Radiochemistry Group, Phys. Rev. Lett, 14 (1965) 962.
- [lov97a] W. Loveland *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 23 (1997) 1251.
- [lov07a] W. Loveland, Phys. Rev. C 76 (2007) 014612.
- [luc02a] R. Lucas *et al.*, Eur. Phys. J. A 15 (2002) 315.
- [liu07a] Z.H. Liu and Jing-Dong Bao, Phys. Rev. C 76 (2007) 034604.
- [luo95a] W.D. Luo *et al.*, Phys. Rev. C 52 (1995) 2989.
- [mac95a] A.O. Macchiavelli *et al.*, Phys. Rev. C 51 (1995) R1.
- [mag95a] P. Magierski *et al.*, Phys. Rev. C 51 (1995) R2880.
- [mag95b] P. Magierski *et al.*, Acta Phys. Pol. B 26 (1995) 291.
- [mag97a] P. Magierski *et al.*, Phys. Rev. C 55 (1997) 1236.
- [mak99a] K. Makino and M. Berz, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 427, 338 (1999).
- [mal00a] S.S. Malik *et al.*, Int. J. Mod. Phys. E 9 (2000) 487.
- [mar04a] K.P. Marinova, Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei 35 (2004) 1296.
- [mat76a] G.J. Mathews, V.E. Viola, Nature 261 (1976) 382.
- [may49a] M.G. Mayer, Phys. Rev. 75 (1949) 1969.
- [may50a] M.G. Mayer, Phys. Rev. 78 (1950) 16, 22.
- [mcn97a] D.P. McNabb *et al.*, Phys. Rev. C 56 (1997) 2474.
- [mel74a] H.W. Meldner, J. Nuckolls and L. Wood, Phys. Scr. 10A (1974) 149.
- [meo93a] F. Méot and S. Valéro, SATURNE Note LNS/GT/93-12.
- [mey92a] M. Meyer and J.P. Vivien, Ann. Phys. Fr. 17 (1992) 11.
- [mid] MIDAS Multiple Instance Data Acquisition System
<http://npg.dl.ac.uk/MIDAS/>.
- [mik95a] I.N. Mikhailov and P. Quentin, Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 3336.
- [mik96a] I.N. Mikhailov, Ch. Briançon and P. Quentin, Phys. Part. Nucl. 27 (1996) 121.
- [mol97a] P. Möller *et al.*, At. Data Nucl. Data Tables 66 (1997) 131.
- [moo86a] K.J. Moody *et al.*, Phys. Rev. C 33 (1986) 1315.
- [moo89a] E.F. Moore *et al.*, Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 360.
- [moo93a] K.J. Moody *et al.*, Nucl. Phys. A 563 (1996) 21.
- [moo97a] E.F. Moore *et al.*, Phys. Rev. C 55 (1997) R2150.

- [mor04a] K. Morita, Eur. Phys. J. A 21 (2004) 257.
- [mor04b] K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2593.
- [mor07a] K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 045001.
- [mor08a] M. Morjean *et al.*, Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 072701.
- [mot60a] B.R. Mottelson and J.G. Valatin, Phys. Rev. Lett. 5 (1960) 511.
- [mot98a] B. Mottelson, "Elementary features of nuclear structure". Les Houches Session LXVI - "Trends in nuclear physics", 100 years later. Elsevier, 1998.
- [mot99a] B.R. Mottelson, Nucl. Phys. A649 (1999) 45c.
- [muc09a] D. Mücher *et al.*, AIP Conference Proceedings 1090 (2009) 587.
- [muk92a] M. Mukerjee, Phys. Lett. B 297 (1992) 1.
- [mun81a] G. Münzenberg *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 300 (1981) 108.
- [mun82a] G. Münzenberg *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 309 (1982) 89.
- [mun84a] G. Münzenberg *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 317 (1984) 317.
- [mun88a] G. Münzenberg. Rep. Prog. Phys. 51 (1988) 57.
- [mun89a] G. Münzenberg *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 333 (1989) 163.
- [mus07a] "Accord de collaboration pour la réalisation du programme MUSETT", 2007.
- [mus07b] F. Jeanneau et Ch. Theisen, "Référentiel Projet: MUSETT et COULEX", Rapport de collaboration, 2007.
- [muv03a] GANIL/GIP, "MUVI - Cahier des charges", Rapport de collaboration, 2003.
- [naz87a] W. Nazarewicz, Z. Szymański, J. Dudek, Phys. Lett. B 196 (1987) 404.
- [naz89a] W. Nazarewicz, R. Wyss and A. Johnson, Nucl. Phys. A 503 (1989) 285.
- [naz90a] W. Nazarewicz, P. Fallon, P. Twin and J.D. Garrett, Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 1654.
- [nee75a] K. Neergård and V.V. Pashkevich, Phys. Lett. B 59 (1975) 218.
- [nee76a] K. Neergård, V.V. Pashkevich and S. Frauendorf, Nucl. Phys. A 262 (1976) 61.
- [neu06a] J.B. Neumayr *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 244 (2006) 489.
- [new89a] J.O. Newton, Contemp. Phys. 30 (1989) 277.
- [nil55a] S.G. Nilsson, Kgl. Danske Videnskab. Selskab, Mat. -fys. Medd. 29, No.16 (1955).
- [nil95a] S.G. Nilsson and I. Ragnarsson, "Shapes and shells in nuclear structure", Cambridge university press, 1995.
- [nis97a] D. Nisius *et al.*, Phys. Lett. B 416 (1997) 18.
- [nol85a] P.J. Nolan *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 11 (1985) 17.
- [nol88a] P.J. Nolan and P.J. Twin, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 38 (1988) 533.
- [nor98a] M.D. Nordyke, Science and Global Security 7 (1998) 1.
- [nyb07a] J. Nyberg, "Agata Data rates", Rapport de collaboration, 2007.
- [obe06a] A. Obertelli *et al.*, Phys. Lett. B 633 (2006) 33.

- [obe06b] A. Obertelli *et al.*, Phys. Rev. C 74 (2006) 064305.
- [obe06c] A. Obertelli *et al.*, AIP Conference Proceedings 831 (2006) 177.
- [oga74a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, JETP Lett. 20 (1974) 265.
- [oga75a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Nucl. Phys. A 239 (1975) 353.
- [oga99a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 3154.
- [oga00a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C 63 (2000) 011301 (R).
- [oga03a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 204 (2003) 606.
- [oga04a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C 69 (2004) 021601.
- [oga06a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C 74 (2006) 044602.
- [oga07a] Yu. Oganessian, Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 (2007) R165.
- [oga09a] Yu.Ts. Oganessian *et al.*, Phys. Rev. C 79 (2009) 024608.
- [paa92a] V. Paar, D.K. Sunko and D. Vretenar, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 18 (1992) L919.
- [pan00a] D. Pansegrau *et al.*, Phys. Lett. B 484 (2000) 1.
- [par04a] A. Parkhomenko, A. Sobiczewski, Acta Phys. Pol. B 35 (2004) 2447.
- [pav93a] I.M. Pavlichenkov, Phys. Rep. 226 (1993) 173.
- [pav95a] I.M. Pavlichenkov, S. Flibotte, Phys. Rev. C 51 (1995) R460.
- [pav96a] I.M. Pavlichenkov, JETP Lett. 64 (1996) 252.
- [pav97a] I.M. Pavlichenkov, Phys. Rev. C 55 (1997) 1275.
- [pav06a] I.M. Pavlichenkov, Phys. At. Nucl. 69 (2006) 1008.
- [pek83a] L.K. Peker *et al.*, Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 1749.
- [per62a] V.P. Perelygin *et al.*, Sov. Phys. JETP 15 (1962) 1022; Zhur. Eksptl. i Teoret. Fiz. 42 (1962) 1472.
- [per06a] O. Perru *et al.*, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 232501.
- [pet96a] C.M. Petrache *et al.*, Nucl. Phys. A 597 (1996) 106.
- [pet01a] M. Petit *et al.*, Proceedings of the Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation 6, Madrid, 2001.
- [pet02a] M. Petit, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 2002.
- [pet04a] M. Petit *et al.*, Nucl. Phys. A 735 (2004) 345.
- [pet06a] D. Peterson *et al.*, Phys. Rev. C 74 (2006) 014316.
- [pfe01a] B. Pfeiffer *et al.*, Nucl. Phys. A 693 (2001) 282.
- [pfu02a] M. Pfützner *et al.*, Phys. Rev. C 65 (2002) 064604.
- [pie68a] W. Pieper, W. Greiner. Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 218 (1968) 327.
- [plo97a] "Plowshare program executive summary", U.S. Department of Energy, Office of Public Affairs, Nevada operations office, Las Vegas, 1997.
- [podo00] Zs. Podolyák *et al.*, Phys. Lett. B 491 (2000) 225.
- [pol62a] S.M. Polikanov *et al.*, Sov. Phys. JETP 15 (1962) 1016; Zhur. Eksptl. i Teoret. Fiz. 42 (1962) 1464

- [por05a] M.-G. Porquet *et al.*, Eur. Phys. J. A 24 (2005) 39.
- [rag78a] I. Ragnarsson *et al.*, Phys. Rep. 45 (1978) 1.
- [rag80a] I. Ragnarsson *et al.*, Nucl. Phys. A 347 (1980) 287.
- [rag90a] I. Ragnarsson, Nucl. Phys. A 520 (1990) 67c.
- [rag91a] I. Ragnarsson, Phys. Lett. B 264 (1991) 5.
- [rag93a] I. Ragnarsson, Nucl. Phys. A 557 (1993) 167c.
- [rau94a] T. Rauscher *et al.*, Astrophys. J. 429 (1994) 499.
- [ray97a] P. Raychev *et al.*, Phys. Rev. C 56 (1997) 2759.
- [red04a] N. Redon *et al.*, AIP Conference Proceedings 701 (2004) 208.
- [rei81a] J. Reinhardt *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 303 (1981) 173.
- [rei99a] P. Reiter *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 809.
- [rei05a] P. Reiter *et al.*, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 032501.
- [rej07a] M. Rejmund *et al.*, Phys. Rev. C 76 (2006) 021304.
- [rep71a] R. Repnow, V. Metag and P. Von Brentano, Z. Phys. 243 (1971) 418.
- [req93a] Proceedings of the conference "Requiem for an accelerator, A celebration of excellence at the NFS", 13-14 March 1993.
- [rig99a] C. Rigollet *et al.*, Phys. Rev. C 59 (1999) 3120.
- [rin80a] P. Ring, P. Schuck, "The Nuclear Many-Body Problem", Springer-Verlag, 1980.
- [roa99a] A. Roach, "Gamma-ray spectroscopy of neutron-rich Cd nuclei", PhD Thesis, University of Manchester, 1999.
- [rob03a] J. Robin, "Recherche et étude de transitions de liaison entre les puits super- et normalement déformés dans le noyau ^{151}Tb .", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2003.
- [rob08a] A. P. Robinson *et al.*, Phys. Rev. C 78 (2008) 034308.
- [roh97a] S.G. Rohoziński, Phys. Rev. C 56 (1997) 165.
- [roo] ROOT, <http://root.cern.ch>.
- [ros01a] D. Roßbach *et al.*, Phys. Lett. B 513 (2001) 9.
- [ros02a] D. Roßbach *et al.*, Phys. Rev. C 66 (2002) 024316.
- [sap96a] "Collaboration DAPNIA/SPhN - CENBG - DAM/SPN pour la construction et l'utilisation de SAPHIR", 1996.
- [rut97a] K. Rutz *et al.*, Phys. Rev. C 56 (1997) 238.
- [rza95a] T. Rząca-Urban *et al.*, Phys. Lett. B 356 (1995) 456.
- [sam99a] D. Samsøen, P. Quentin and I.N. Mikhailov, Phys. Rev. C 60 (1996) 014301.
- [sar08a] J. Sarén *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 266 (2008) 4196.
- [sat90a] W. Satula, Z. Szymanski and W. Nazarewicz, Phys. Scr. 42 (1990) 515.
- [sat96a] W. Satula *et al.*, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 5182.
- [sav96a] H. Savajols *et al.*, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 4480.
- [saw03a] M. Sawicka *et al.*, Phys. Rev. C 68 (2003) 044304.
- [saw04a] M. Sawicka *et al.*, Eur. Phys. J. A 22 (2004) 455.

- [sch78a] M. Schädel *et al.*, Phys. Rev. Lett 41 (1978) 469.
- [sch82a] M. Schädel *et al.*, Phys. Rev. Lett 48 (1982) 852.
- [sch95a] C. Schumacher *et al.*, Phys. Rev. C 52 (1995) 1302.
- [sch97a] J.N. Scheurer *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 385 (1997) 501.
- [sch08a] Ch. Schmitt *et al.*, "Upgrade of VAMOS: A Gas filled mode of operation", 2008.
- [sci06a] "The scientific objectives of the Spiral2 project", Ouvrage collectif, édité par Ganil, 2006.
- [sea68a] G.T. Seaborg, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 18 (1968) 53.
- [sea87a] G.T. Seaborg, W. Loveland, Contemp. Phys. 28 (1987) 33.
- [sea90a] G.T. Seaborg, W.D. Loveland, "The elements beyond Uranium", J. Wiley and Sons, 1990.
- [sem04a] A.G. Semchenkov *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 75 (2004) 1598.
- [sem96a] A.T. Semple *et al.*, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3671.
- [sew03a] M. Sewtz *et al.*, Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 163002.
- [sha06a] A.S. Shalaby, Acta. Phys. Hung. A 25 (2006) 117.
- [shi90a] Y.R. Shimizu, E. Vigezzi, and R.A. Broglia, Nucl. Phys. A 509 (1990) 80.
- [sie04a] S. Siem *et al.*, Phys. Rev. C 70 (2004) 014303.
- [sky59a] T.H.R. Skyrme, Nucl. Phys. 9 (1959) 635.
- [sig97a] C. Signorini, Nucl. Phys. A616 (1997) 262c.
- [sin02a] B. Singh, R. Zywna and R.B. Firestone, Nucl. Data Sheets 97 (2002) 241.
- [siw07a] K. Siwek-Wilczyńska *et al.*, Int. J. Mod. Phys. E 16 (2007) 483.
- [smi99a] A.G. Smith *et al.*, Phys. Lett. B 453 (1999) 206.
- [smi02a] A.G. Smith *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 28 (2002) 2307.
- [smi03a] "Nuclei on the neutron-rich side of stability", "Achievements with the Euroball spectrometer 1997-2003", édité par W. Korten et S. Lunardi, 2003.
- [smo99a] R. Smolańczuk, Phys. Rev. C 59 (1999) 2634.
- [smo99b] R. Smolańczuk, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 4705.
- [smo01a] R. Smolańczuk, Phys. Rev. C 63 (2001) 044607.
- [sob07a] A. Sobiczewski, K. Pomorski, Prog. Part. Nucl. Sci. 58 (2007) 292.
- [soh00] D. Sohler *et al.*, Acta Phys. Hung. 12, (2000) 281.
- [soh02a] D. Sohler *et al.*, Phys. Rev. C 66 (2002) 054302.
- [sor02a] O. Sorlin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 092501.
- [sor04a] O. Sorlin *et al.*, Eur. Phys. J. A 22 (2004) 173.
- [spe72a] H.J. Specht *et al.*, Phys. Lett. B 41 (1972) 42.
- [spi06a] Spiral2 Letter of Intent "From actinides to superheavy elements with SPIRAL 2: reaction dynamics and structure", 2006.
- [spi06b] Spiral2 Letter of Intent "High-resolution Gamma-ray Spectroscopy at SPIRAL2", 2006.

- [spi06c] Spiral2 Letter of Intent "The DESIR facility (Decay, Excitation and Storage of Radioactive Ions).", 2006. Voir également <http://www.cenbg.in2p3.fr/desir>
- [spi06d] Spiral2 Letter of Intent "S3: The Super Separator Spectrometer for LINAG beams", 2006.
- [spi09a] Spiral2 Letter of Intent "Production and spectroscopy of heavy and superheavy elements using S3 and LINAG", 2009.
- [ste90a] F.S. Stephens *et al.*, Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2623.
- [ste90b] F.S. Stephens *et al.*, Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 301.
- [ste97a] O. Stézowski, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1997.
- [ste99a] O. Stézowski *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 424 (1999) 552.
- [ste07a] O. Stézowski, "A library of services to decode/encode data through the Agata Data Flow", 2007.
- [ste09a] O. Stézowski, "ADF documentation", disponible sur wiki DAQ AGATA <http://csngwinfo.in2p3.fr/mediawiki/index.php/ADF>.
- [sto07a] Ch. Stodel *et al.*, AIP Conference Proceedings 891 (2007) 55.
- [str67a] V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A 95 (1967) 420.
- [str68a] V.M. Strutinsky, Nucl. Phys. A 122 (1968) 1.
- [str77a] V.M. Strutinsky *et al.*, Z. Phys. A: Hadrons Nucl. 283 (1977) 269.
- [sul07a] B. Sulignano *et al.*, Eur. Phys. J. A 33 (2007) 327.
- [sul08a] B. Sulignano and Ch. Theisen for the E519 collaboration. "Report on the Recoil-Tagging test at VAMOS", Rapport de collaboration, 2008.
- [sul08b] B. Sulignano *et al.*, Proposition d'expérience Ganil E579.
- [sun87a] D.K. Sunko and V. Paar, Phys. Lett. 199 B (1987) 482.
- [sve97a] C. E. Svensson *et al.*, Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 1233.
- [sve00a] C. E. Svensson *et al.*, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2693.
- [swi04a] W.J. Świątecki *et al.*, Int. J. Mod. Phys. E 13 (2004) 261.
- [swi05a] W.J. Świątecki *et al.*, Phys. Rev. C 71 (2005) 014602.
- [szy83a] Z. Szymanski, "Fast Nuclear Rotation", Clarendon, Oxford, 1982.
- [szy90a] Z. Szymanski, Nucl. Phys. A 520 (1990) 1c.
- [szy93a] Z. Szymanski, Acta Phys. Pol. B 24 (1993) 23.
- [szy95a] Z. Szymanski, Phys. Rev. C 51 (1995) R1090.
- [szy98a] Z. Szymanski and W. Nazarewicz, Phys. Lett. B 433 (1998) 229.
- [tak91a] N. Takigawa and H. Sagawa, Phys. Lett. B 265 (1991) 23.
- [tan06a] S.K. Tandel *et al.*, Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 082502.
- [tav63a] A.J. Tavendale, G.T. Ewan, Nucl. Instr. Meth. 25 (1963) 185.
- [the95a] Ch. Theisen, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1995.
- [the96a] Ch. Theisen, N. Khadiri, J.P. Vivien *et al.*, Phys. Rev. C 54, 2910 (1996).

- [the97a] Ch. Theisen *et al.*, "Electronique VXI SAPHIR et détecteurs additionnels. Spécifications techniques de besoins et cahier des charges", rapport de collaboration, 1997.
- [the97b] Ch. Theisen *et al.*, "The SAPHIR detector", "Ancillary detectors and devices for Euroball", édité par H. Grave (1997), p47.
- [the98a] Ch. Theisen *et al.*, AIP Conference Proceedings 447 (1998) 143.
- [the98b] Ch. Theisen *et al.*, "Tests of the segmented clover detector "Cloclo" ", Rapport de collaboration, 1998.
- [the98c] Ch. Theisen *et al.*, "Shape coexistence in neutron-deficient ^{196}Po ", Garel+ (Vivitron) proposal, 1998.
- [the99a] Ch. Theisen *et al.*, "Exogam june 99 experiment report", Rapport de collaboration, 1999.
- [the99b] Ch. Theisen *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 432 (1999) 249.
- [the00a] Ch. Theisen *et al.*, "Tests of the Eurisyx Exogam segmented clover detector "Cloclo2" ", Rapport de collaboration, 2000.
- [the03a] "The SAPHIR detector", "Achievements with the Euroball spectrometer 1997-2003", édité par W. Korten et S. Lunardi, 2003.
- [the03b] Ch. Theisen, "Des noyaux lourds au super-lourds", Cours donné à l'école Joliot-Curie de Physique nucléaire 2002 - édité en 2003.
- [the05a] Ch. Theisen *et al.*, GANIL proposal E519.
- [the07a] Ch. Theisen, Acta Phys. Pol. B 38 (2007) 1525.
- [the08a] Ch. Theisen, A. Lopez-Martens, Ch. Bonnelle, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 589 (2008) 230.
- [the08b] Ch. Theisen, support de cours donné à 15th Euroschool on Exotic Beams, Piaski (Pologne), "Spectroscopy of very heavy elements", <http://irfu.cea.fr/Sphn/Phocea/Membres/Cours/index.php>
- [thi02a] P. Thirolf and D. Habs, Prog. Part. Nucl. Phys. 49 (2002) 325.
- [tok97a] H. Toki and L.-A. Wu, Phys. Rev. Lett. 79 (1997) 2006.
- [tro94a] D. Troltenier *et al.*, Nucl. Phys. A 567 (1994) 591.
- [twi86a] P.J. Twin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 811.
- [wan04a] K. Wang *et al.*, Chin. Phys. Lett. 21 (2004) 464.
- [vau70a] D. Vautherin, D.M. Brink, Phys. Lett. B 32 (1970) 149.
- [vau70b] D. Vautherin, M. Veneroni, D. M. Brink, Phys. Lett. B 33 (1970) 381.
- [vel01a] M. Velselsky, Texas A&M Cyclotron Institute Progress Report 2000-2001, p II-30.
- [ven03a] Ts. Venkova *et al.*, Eur. Phys. J. A 21 (2003) 1.
- [ven05a] Ts. Venkova *et al.*, Eur. Phys. J. A 26 (2005) 315.
- [ven06a] Ts. Venkova *et al.*, Eur. Phys. J. A 28 (2006) 147.
- [ven07a] Ts. Venkova *et al.*, Eur. Phys. J. A 34 (2007) 349.

- [voi83a] M.J.A. de Voigt, J. Dudek and Z. Szymanski, Rev. Mod. Phys. 55 (1983) 949.
- [vyl72a] I. Vylkov *et al.*, Sov. J. Nucl. Phys. 16 (1972) 253; Yad. Fiz. 16 (1972) 454.
- [wal90a] P.M. Walker, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 16 (1990) L233.
- [wal01a] R. Wall, "A differential doppler shift technique for the lifetime measurements of excited states in fission fragments", University of Manchester, 2001.
- [war01a] D. Ward, P. Fallon, Adv. Nucl. Phys. 26 (2001) 167.
- [war02a] D. Ward *et al.*, Phys. Rev. C 66 (2002) 024317.
- [wat01a] Y.X. Watanabe *et al.*, Eur. Phys. J. A 10 (2001) 373.
- [wei51a] V.F. Weisskopf, Phys. Rev. 83 (1951) 1073.
- [wil04a] H.W. Wilschut and V.L. Kravchuk, Nucl. Phys. A 734 (2004) 156.
- [wil03a] A.N. Wilson *et al.*, Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 142501.
- [wisol] Site web d'ISOLDE <http://isolde.web.cern.ch/ISOLDE/>
- [wol72a] K.L. Wolf and J.P. Unik, Phys. Lett. 38B (1972) 405.
- [woo92a] J.L. Wood *et al.*, Phys. Rep. 215 (1992) 101.
- [wor68a] E.S. Worden *et al.*, J. Opt. Soc. Am. 58 (1968) 998.
- [wor70a] E.S. Worden *et al.*, J. Opt. Soc. Am. 60 (1970) 1297.
- [wu97a] L.-A. Wu and H. Toki, Phys. Rev. C 56 (1997) 1821.
- [xu04aa] F.R. Xu *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82 (2004) 252501.
- [zag66a] B.A. Zager *et al.*, At. Energ. USSR 20 (1966) 230; Sov.Soviet J. At. Energy 20 (1966) 264.
- [zag01a] V.I. Zagrebaev *et al.*, Phys. Rev. C 65 (2001) 014607.
- [zag06a] V.I. Zagrebaev *et al.*, Phys. Rev. C 73 (2006) 031602(R).
- [zag07a] V. Zagrebaev and W. Greiner, Nucl. Phys. A 787 (2007) 363c.
- [zag08a] V. Zagrebaev and W. Greiner, Phys. Rev. C 78 (2008) 034610.
- [zha92a] J.Y. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 1160.
- [zie08a] M. Zielińska *et al.*, Acta Phys. Pol. B 39 (2008) 519.
- [zie09a] M. Zielińska *et al.*, Phys. Rev. C 80 (2009) 014317.
- [zgo] zgoubi <http://sourceforge.net/projects/zgoubi/>
- [zyr97a] K.E. Zyromski *et al.*, Phys. Rev. C 55 (1997) R562.

Annexe A

Curriculum vitæ

A.1 Enseignement

- 1991-1995. Monitorat à l'université Louis Pasteur (Strasbourg). Mise en place du cours d'informatique scientifique pour DESS Instrumentation et Méthodes d'Analyse Chimiques, Spectroscopiques, Electroniques et Nucléaires; Certificat d'Enseignement Spécialisé Techniques et Nucléaires et Radioprotection. Travaux pratiques de physique nucléaire CES TNR.
- 2002. Ecole Joliot-Curie de physique nucléaire. "Des noyaux lourds aux super-lourds".
- 2008. 15th Euroschool on Exotic Beams, Piaski (Pologne). "Spectroscopy of very heavy elements".

A.2 Encadrement

A.2.1 Stages

- M. Jung, première année d'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg. "Méthodes d'analyse d'événements de multiplicité élevée à grande statistique". Juin - juillet 1993.
- E. Gross, première année d'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg. "Détection et exploitation du rayonnement gamma provenant de noyaux superdéformés". Juin - juillet 1993.
- F. Wellenreiter, deuxième année d'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg. "Développement de logiciels de traitement statistique des données en C++". Juillet - août 1995.
- E. Bouchez, Université Louis Pasteur, Strasbourg Stage de DEA. Mars - juin 2000, "Spectroscopie gamma et électron de conversion du noyau superdéformé ^{136}Nd ".
- A. Chatillon. Stage de DEA. "Caractérisation d'un détecteur germanium pour EXOGAM - Spectroscopie gamma du noyau ^{250}Fm ". Février - juillet 2002.

A.2.2 Thèse

- A. Chatillon “Spectroscopie des transfermiums impairs en proton: la structure du noyau de ^{251}Md ”. Thèse soutenue le 26 octobre 2005.

A.2.3 Post-doc

- C. Dossat. Septembre 2005 - septembre 2007.
- B. Sulignano. Juillet 2008 - juillet 2008 (financement ANR).

A.3 Participation à des comités, organisation de colloques, séminaires, ...

- Organisation des séminaires du SPhN : 1997 - 1999.
- Membre du comité d'expérience IReS-Vivitron (nommé) : 2001 - 2003.
- Membre du Bureau des Utilisateurs du GANIL - BUG (élu) : 2003 - 2008.
- Organisation du symposium “Physics with AGATA” (2004).
- Organisation d'un atelier EXOTAG (2004).
- Membre du comité de pilotage INTAG “Instrumentation for Tagging” : 2005 - 2008.
- Membre du Conseil Scientifique et Technique de Service du SPhN - CSTS (élu) : 2006 - 2009.
- Organisateur d'un atelier ESNT (Espace de Structure Nucléaire Théorique) “spectroscopy of transactinides nuclei”. Janvier - février 2007.
- Membre du comité d'expériences du GANIL (nommé) : depuis 2007.
- Membre du conseil scientifique du CENBG Bordeaux (nommé) : depuis 2007.
- Expertise pour le STFC (Science and Technology Facilities Council), UK : 2009
- Expert senior CEA (nommé) : depuis 2009.

A.4 Programmes d'échanges, collaborations, réseaux internationaux, projets nationaux et Européens

- Collaboration SAPHIR (Saclay Aquitaine photovoltaic cells for isomer research) : depuis 1995.
- Collaboration EUROBALL :
 - “Ancillary detector group” : 1996 - 2002.
 - “Electronics and acquisition group” : 1996 - 2000.
 - Comité EUROBALL France : 2002.
- Collaboration EXOGAM :
 - “EXOGAM ancillary detector group” : depuis 1997.

- “EXO GAM data and acquisition” : 1997 - 2002.
- Responsable de l'électronique “EXO GAM early implementation” : 1998 à 1999.
- Projet Européen EXOTAG (FP5) “Studies of exotic nuclei using tagging spectrometers” : 2000 - 2005.
- Collaboration AGATA :
 - “Gamma tracking France” (devenu AGATA France) : depuis 2001.
 - Nombreux groupes de travail depuis 2002. Responsabilités au niveau de groupes de travail et du management (voir plus loin).
- Collaboration HENS “Heavy Elements Nuclear Structure” : 2004 - 2007.
- JRA INTAG “Instrumentation for Tagging” - projet Européen EURONS FP6 : 2005 - 2008.
- JRA AGATA - projet Européen EURONS FP6 : 2005 - 2008.
- Réseau GammaPool “Coordination of the resources for gamma-ray spectroscopy in Europe” - projet Européen EURONS FP6 : 2005 - 2008.
- Réseau SHE “Transfermium element synthesis, properties and reactions” - projet Européen EURONS FP6 : 2005 - 2008.
- Spiral2: Nombreuses contributions autour de Spiral2: “Physics case”, ateliers, groupes de travail, lettres d'intention (depuis 2006).
 - Correspondant “Spectroscopy of transactinides elements” pour la lettre d'intention “From actinides to superheavy elements with SPIRAL 2: reaction dynamics and structure” (2006).
 - Co porte-parole de la lettre d'intention “Production and spectroscopy of heavy and superheavy elements using S3 and LINAG” (2009).
- Collaboration Super Spectromètre Séparateur S3 : Participation depuis 2006. Définition du spectromètre et particulièrement de sa détection au plan focal. Coordinateur pour la spectroscopie prompt et retardée : depuis juin 2006.
- Programme d'échange avec la Pologne COPIGAL : depuis 2008.
- GANIL 2015 Vamos Cluster group : depuis 2008

A.5 Actions de valorisation, brevets, logiciels/matériels diffusés, autres réalisations...

- Webmaster SPhN : 2001 - 2008. Support technique pour la création et mise en ligne des pages internet et intranet.
- Logiciel de dépouillement Euroxx pour le traitement des données Eurogam, Euroball, Exogam, Jurogam, ... Développements débutés en 1991. Diffusion à la demande et utilisation libre.
- Librairies et programmes de manipulation de spectres. Développements débutés en 1998. Diffusion à la demande et utilisation libre.

- Contribution au logiciel d'analyse d'AGATA "gammaware". Développements débutés en 2005. Téléchargement libre depuis le site <http://agata.in2p3.fr/>.
- Initiateur (2007) et contributeur du site web de la DAQ AGATA <http://csngwinfo.in2p3.fr/>.

A.6 Administration liée à la recherche (coordinateur de projet, chef d'équipe/labo, etc.)

- Porte parole ou co porte-parole de 9 expériences à Strasbourg, Legnaro (Italie), Jyväskylä (Finlande) et GANIL : voir liste au paragraphe A.7.
- "Team leader" intégration électronique et détecteurs auxiliaires AGATA (nommé) : de 2003 à 2007.
- Coordinateur et responsable scientifique du projet MUSETT : depuis 2005.
- "Group leader" AGATA DAQ (nommé) : depuis février 2007.
- Membre de l'AMB "AGATA Management Board" (nommé) : depuis février 2007.

A.7 Porte parole d'expériences

- Y. Le Coz, Ch. Theisen *et al.*, "Study of the neutron-rich isomeric nuclei produced with proton-induced fission of ^{232}Th ". PAC Vivitron, 1996.
- J. Durell, Ch. Theisen *et al.*, "Gamma-ray studies of ^{238}U induced by ^{12}C . Spectroscopy and fission dynamics", PAC Legnaro, 1996.
- Ch. Theisen *et al.*, "Shape coexistence in neutron-deficient ^{196}Po ", PAC Vivitron, 1998.
- R.-D. Herzberg, J. Styczen, M. Leino, Ch. Theisen *et al.*, "Spectroscopy of superheavy nuclei: nuclear structure of $^{250}_{100}\text{Fm}$ ". PAC Jyväskylä, 2001.
- Ch. Theisen, J.M. Casandjian *et al.*, "Spectroscopy of transfermium nuclei". PAC Ganil, 2001.
- P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, Ch. Theisen *et al.*, "Alpha-decay spectroscopy of the transfermium nucleus ^{255}Lr ". PAC Jyväskylä, 2002.
- Ch. Theisen, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg *et al.*, "Rotational band structures in the odd-Z transfermium nucleus studied by prompt electron spectroscopy", PAC Jyväskylä, 2002.
- P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, Ch. Theisen *et al.*, "In-beam gamma-ray spectroscopy of the transfermium nucleus ^{255}Lr ". PAC Jyväskylä, 2004.
- Ch. Theisen, P.T. Greenlees, A.V. Yeremin, W. Meczynski *et al.*, "Spectroscopy of the odd transfermium ^{255}No ". PAC Ganil, 2005.

Annexe B

Liste des publications

B.1 Articles de périodiques

- S. Flibotte, U.J. Huttmeier, P. Bednarczyk, G. de France, B. Haas, P. Romain, **Ch. Theisen**, J.P. Vivien and J. Zen.
Multidimensional analysis of high resolution γ -ray data.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A320 (1992) 325.
- D. Curien, G. de France, C.W. Beausang, F.A. Beck, Th. Byrski, S. Clarke, P. Dagnall, G. Duchêne, S. Flibotte, S. Forbes, B. Haas, M.A. Joyce, B. Kharraja, B.M. Nyako, C. Schück, J. Simpson, **Ch. Theisen**, P.J. Twin, J.P. Vivien and L. Zolnai.
De-excitation from superdeformed bands in ^{151}Tb and neighbouring nuclei.
Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 2559.
- S. Flibotte, H.R. Andrews, G.C. Ball, C.W. Beausang, F.A. Beck, G. Bélier, Th. Byrski, D. Curien, P.J. Dagnall, G. de France, D. Disdier, G. Duchêne, Ch. Finck, B. Haas, G. Hackman, D.S. Haslip, V.P. Janzen, B. Kharraja, J.C. Lisle, J.C. Merdinger, S.M. Mullins, W. Nazarewicz, D.C. Radford, V. Rauch, H. Savajols, J. Styczen, **Ch. Theisen**, P.J. Twin, J.P. Vivien, J.C. Waddington, D. Ward, K. Züber and S. Åberg.
 $\Delta I = 4$ Bifurcation in a Superdeformed band : Evidence for a C_4 Symmetry.
Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 4299.
- S. Flibotte, G. Hackman, **Ch. Theisen**, H.R. Andrews, G.C. Ball, C. Beausang, F.A. Beck, G. Bélier, M.A. Bentley, Th. Byrski, D. Curien, G. de France, D. Disdier, G. Duchêne, P. Fallon, B. Haas, V.P. Janzen, P.M. Jones, B. Kharraja, J.A. Kuehner, J.C. Lisle, J.C. Merdinger, S.M. Mullins, E.S. Paul, D. Prévost, D.C. Radford, V. Rauch, J.F. Smith, S. Styczen, P.J. Twin, J.C. Waddington, D. Ward and K. Züber.
Multi-particle excitations and identical bands in the superdeformed ^{149}Gd nucleus.
Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 688.
- G. Duchêne, C.W. Beausang, F.A. Beck, Th. Byrski, D. Curien, P. Dagnall, S. Flibotte, P.D. Forsyth, G. de France, B. Haas, B. Kharraja, J.C. Merdinger, D. Prévost, C. Schück, **Ch. Theisen**, P.J. Twin and J.P. Vivien.
High Spin States in the Nucleus ^{150}Tb .

Z. Phys. A: Hadrons Nucl. A350 (1994) 39.

- C.M. Petrache, G. Duchêne, B. Kharraja, C.W. Beausang, F.A. Beck, Th. Byrski, D. Curien, P. Dagnall, S. Flibotte, P.D. Forsyth, G. de France, B. Haas, A. Kiss, J.C. Merdinger, D. Prévost, C. Schüick, **Ch. Theisen**, P.J. Twin and J.P. Vivien.
Detailed Level Scheme of ^{151}Tb and the Feeding of the Normal-deformed States by the Superdeformed Bands.
Nucl. Phys. A579 (1994) 285.
- C.W. Beausang, D. Prévost, M.A. Bergstrom, G. de France, B. Haas, J.C. Lisle, **Ch. Theisen**, J. Timar, P.J. Twin and J.N. Wilson.
Using high-fold data from the new generation of γ -ray detector arrays.
*Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*364 (1995) 560.
- S. Flibotte, G. Hackmann, I. Ragnarsson, **Ch. Theisen**, H.R. Andrews, G.C. Ball, C.W. Beausang, F.A. Beck, G. Béliet, M.A. Bentley, Th. Byrski, D. Curien, G. de France, D. Disdier, G. Duchêne, B. Haas, D.S. Haslip, V.P. Janzen, B. Kharraja, J.A. Kuehner, J.C. Lisle, J.C. Merdinger, S.M. Mullins, E. Paul, D. Prévost, D.C. Radford, V. Rauch, J.F. Smith, J. Styczen, P.J. Twin, J.P. Vivien, J.C. Waddington, D. Ward and K. Züber.
Multi-particle excitations in the superdeformed ^{149}Gd nucleus.
Nucl. Phys. A584 (1995) 373.
- B. Kharraja, Th. Byrski, F.A. Beck, C.W. Beausang, M.A. Bentley, D. Curien, P.J. Dagnall, G. Duchêne, S. Flibotte, G. de France, Zs. Fülöp, B. Haas, A.Z. Kiss, J.C. Lisle, C.M. Petrache, **Ch. Theisen**, P.J. Twin, J.P. Vivien, K. Züber.
Unfavoured signature partner superdeformed bands associated with proton excitations in ^{151}Tb .
Phys. Lett. 341B (1995) 268.
- A. Lopez-Martens, F. Hannachi, A. Korichi, C. Schuck, E. Gueorguieva, Ch. Vieu, B. Haas, R. Lucas, A. Astier, G. Baldsiefen, M. Carpenter, G. de France, R. Duffait, L. Ducroux, Y. Le Coz, Ch. Finck, A. Görgen, H. Hübel, T.L. Khoo, T. Lauritsen, M. Meyer, D. Prévost, N. Redon, C. Rigollet, H. Savajols, J.F. Sharpey-Schafer, O. Stézowski, **Ch. Theisen**, U. Van Severen, J.P. Vivien, A.N. Wilson.
Single Step Links of the Superdeformed Band in ^{194}Pb : A measure of the absolute excitation energy, spin and parity of the superdeformed states.
Phys. Lett. 380B (1996) 18.
- J.M. Nieminen, S. Flibotte, A. Galindo-Uribarri, G. Viesti, G.C. Ball, D. Bazzacco, M. Cromaz, G. de Angelis, J. DeGraaf, M. De Poli, T.E. Drake, D. Fabris, Ch. Finck, V.P. Janzen, S. Lunardi, M. Lunardon, N.H. Medina, G. Maron, C.M. Petrache, D.C. Radford, C. Rossi Alvarez, O. Stezowski, **Ch. Theisen**, J.C. Waddington, D. Ward, J.N. Wilson.
Superdeformed Band in ^{147}Tb .
Phys. Rev. C 54 (1996) 2764.
- H. Savajols, A. Korichi, D. Ward, D. Appelbe, G.C. Ball, C. Beausang, F.A. Beck, T. Byrski, D. Curien, P. Dagnall, G. de France, D. Disdier, G. Duchêne, S. Erturk, Ch. Finck, S. Flibotte,

B. Gall, A. Galindo-Uribarri, B. Haas, G. Hackman, V. Janzen, B. Kharraja, J.C. Lisle, J.C. Merdinger, S.M. Mullins, S. Pilotte, D. Prévost, D.C. Radford, V. Rauch, C. Rigollet, D. Smalley, M.B. Smith, O. Stézowski, J. Styczen, **Ch. Theisen**, P.J. Twin, J.P. Vivien, J.C. Waddington, K. Züber and I. Ragnarsson.

Lifetime measurements of superdeformed bands in $^{149-148}\text{Gd}$ and ^{152}Dy : evidence for structure-dependent elongations.

Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 4480.

- **Ch. Theisen**, N. Khadiri, J.P. Vivien, I. Ragnarsson, C.W. Beusang, F.A. Beck, G. Bélier, T. Byrski, D. Curien, G. de France, D. Disdier, G. Duchene, Ch. Finck, S. Flibotte, B. Gall, B. Haas, H. Hanine, B. Herskind, B. Kharraja, J.C. Merdinger, A. Nourreddine, B.M. Nyako, G.E. Perez, D. Prévost, O. Stézowski, V. Rauch, C. Rigollet, H. Savajols, J. Sharpey-Schafer, P.J. Twin, L. Wei, K. Züber.

Favored Neutron Excitations in Superdeformed ^{147}Gd .

Phys. Rev. C 54 (1996) 2910.

- F. Hannachi, A. Lopez-Martens, A. Korichi, C. Schuck, E. Gueorguieva, C. Vieu, B. Haas, R. Lucas, A. Astier, G. Baldsiefen, M. Carpenter, G. de France, R. Duffait, L. Ducroux, Y. Le Coz, Ch. Finck, A. Görgen, H. Hübel, T.L. Khoo, T. Lauritsen, M. Meyer, D. Prévost, N. Redon, C. Rigollet, H. Savajols, J.F. Sharpey-Schafer, O. Stézowski, **Ch. Theisen**, U. Van Severen, J.P. Vivien, A.N. Wilson.

Observation of the Single Step Links of the Yrast Superdeformed Band in ^{194}Pb .

Z. Phys. A: Hadrons Nucl. A358 (1997) 183.

- C. Gautherin, M. Houry, W. Korten, Y. Le Coz, R. Lucas, X.H. Phan, **Ch. Theisen**, Ch. Badimon, G. Barreau, T.P. Doan, G. Pedemey, G. Bélier, M. Girod, V. Méot, S. Péru, A. Astier, L. Ducroux, M. Meyer, N. Redon.

New Isomeric States in $^{152,154,156}\text{Nd}$ produced by spontaneous fission of ^{252}Cf .

Eur. Phys. J. A 1 (1998) 391.

- F. Becker, W. Korten, F. Hannachi, P. Paris, N. Buforn, C. Chandler, M. Houry, H. Hübel, J. Hansen, Y. Le Coz, C.F. Liang, A. Lopez-Martens, R. Lucas, E. Mergel, P.H. Regan, G. Schönwasser, **Ch. Theisen**.

Investigation of Oblate-Prolate Shape-Coexistence in ^{74}Kr .

Eur. Phys. J. A 4 (1999) 103.

- Ch. Finck, O. Stézowski, N. Kintz, J.P. Vivien, K. Züber, A. Nourreddine, D.E. Appelbe, C.W. Beusang, F.A. Beck, T. Byrski, S. Courtin, D. Curien, G. de France, G. Duchêne, S. Ertürk, B.J.P. Gall, B. Haas, N. Khadiri, E. Pachoud, C. Rigollet, M. Smith, **Ch. Theisen**, P. J. Twin.

First evidence for linking transitions between the superdeformed yrast band and the normal deformed states in ^{149}Gd .

Phys. Lett. 467B (1999) 15.

- M. Houry, R. Lucas, M.G. Porquet, **Ch. Theisen**, M. Girod, M. Aiche, M.M. Aleonard, A. Astier, G. Barreau, F. Becker, J.F. Chemin, I. Deloncle, T.P. Doan, J.L. Durell, K. Hauschild, W. Korten, Y. Le Coz, M.J. Leddy, S. Perries, N. Redon, A.A. Roach,

J.N. Scheurer, A.G. Smith, B.J. Varley.

Structure of neutron rich palladium isotopes produced in heavy ion induced fission.

Eur. Phys. J. A 6 (1999) 43.

- Y. Le Coz, F. Becker, H. Kankaanpää, W. Korten, E. Mergel, P.A. Butler, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, D. Hawcroft, K. Helariutta, R.D. Herzberg, M. Houry, H. Hübel, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, P. Kuusiniemi, M. Leino, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, P. Rahkila, D. Rossbach, A. Savelius, **Ch. Theisen**.

Evidence of multiple shape-coexistence in ^{188}Pb .

Eur. Phys. J. direct A 3 (1999) 1.

- M. Leino, H. Kankaanpää, R.-D. Herzberg, A.J. Chewter, F.P. Heßberger, Y. Le Coz, F. Becker, P.A. Butler, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, K. Eskola, J. Gerl, P.T. Greenlees, K. Helariutta, M. Houry, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, T.L. Khoo, A. Kleinbohl, W. Korten, P. Kuusiniemi, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, R.D. Page, P. Rahkila, P. Reiter, A. Savelius, Ch. Schlegel, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska, H.J. Wollersheim.

In-beam study of ^{254}No .

Eur. Phys. J. A 6 (1999) 63.

- **Ch. Theisen**, N. Kintz, O. Stézowski, J.P. Vivien.

Improvement of high-fold γ -ray data processing : the spherical gate method.

Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 432 (1999) 249.

- D.M. Cullen, A.T. Reed, D.E. Appelbe, A.N. Wilson, E.S. Paul, M.H. Bergström, J.F. Sharpey-Schafer, C. Baktash, I. Frosch, I.Y. Lee, A.O. Macchiavelli, R.W. MacLeod, D. Prévost, **Ch. Theisen**, D. Curien.

High-spin states and lifetime measurements in ^{171}Hf .

Nucl. Phys. A 673 (2000) 3.

- Zs. Podolyák, P.H. Regan, M. Pfützner, J. Gerl, M. Hellström, M. Caamaño, P. Mayet, Ch. Schlegel, A. Aprahamian, J. Benlliure, A.M. Bruce, P.A. Butler, D. Cortina Gil, D.M. Cullen, J. Döring, T. Enquist, F. Rejmund, C. Fox, J. Garcés Narro, H. Geissel, W. Gelletly, J. Giovinazzo, M. Górska, H. Grawe, R. Grzywacz, A. Kleinböhl, W. Korten, M. Lewitowicz, R. Lucas, H. Mach, M. Mineva, C. O'Leary, F. De Oliveira, C.J. Pearson, M. Rejmund, M. Sawicka, H. Schaffner, K. Schmidt, **Ch. Theisen**, P.M. Walker, D.D. Warner, C. Wheldon, H.J. Wollersheim, S. Wooding, F.R. Xu.

Isomer Spectroscopy of $^{190}\text{W}_{116}$.

Phys. Lett. 491B (2000) 225.

- P.A. Butler, R.D. Humphreys, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, D.G. Jenkins, G.D. Jones, H. Kankaanpää, H. Kettunen, P. Rahkila, C. Scholey, J. Uusitalo, N. Amzal, J.E. Bastin, P.M.T. Brew, K. Eskola, J. Gerl, N.J. Hammond, K. Hauschild, K. Helariutta, F.P. Heßberger, A. Hürstel, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, A. Keenan, T.-L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, S.W. Odegard, T. Page, J. Pakarinen, P. Reiter, G. Sletten, **Ch. Theisen** and H. J. Wollersheim.

Conversion electron cascades in $^{254}_{102}\text{No}$.

Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 202501.

- Th. Byrski, F.A. Beck, P. Bednarczyk, N. Kintz, K. Zuber, J.P. Vivien, S. Courtin, D. Curien, D. Duchêne, C. Finck, B. Gall, A. Nourreddine, A. Odahara, O. Stézowski and **Ch. Theisen**.
Enhanced population of superdeformation in the mass $A=150$ region.
Phys. Rev. C 65 (2002) 034324.

- R.-D. Herzberg, N. Amzal, F. Becker, P.A. Butler, A.J. Chewter, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, K. Eskola, J. Gerl, P.T. Greenlees, N. Hammond, K. Hauschild, K. Helariutta, F.P. Heßberger, M. Houry, G.D. Jones, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, C.J. Lister, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, T. Page, P. Rahkila, P. Reiter, Ch. Schlegel, C.S. Scholey, O. Stézowski, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska, J. Uusitalo and H.J. Wollersheim.
Spectroscopy of transfermium nuclei: $^{252}_{102}\text{No}$.
Phys. Rev. C 65 (2002) 014303.

- A. Hürstel, M. Rejmund, E. Bouchez, P.T. Greenlees, K. Hauschild, S. Juutinen, H. Kettunen, W. Korten, Y. Le Coz, P. Nieminen, **Ch. Theisen**, A.N. Andreyev, F. Becker, T. Enqvist, P.M. Jones, R. Julin, H. Kankaanpää, A. Keenan, P. Kuusiniemi, M. Leino, A.P. Leppänen, M. Muikku, J. Pakarinen, P. Rahkila, J. Uusitalo.
Isomeric states in proton-unbound $^{187,189}\text{Bi}$ isotopes.
Eur. Phys. J. A 15 (2002) 329.

- R. Lucas, M.-G. Porquet, Ts. Venkova, I. Deloncle, M. Houry, **Ch. Theisen**, A. Astier, A. Bauchet, S. Lalkovski, G. Barreau, N. Buforn, T.P. Doan, L. Donadille, O. Dorvaux, J. Durell, Th. Ethvignot, B.P.J. Gall, D. Grimwood, W. Korten, Y. Le Coz, M. Meyer, A. Minkova, A. Prévost, N. Redon, A. Roach, N. Schultz, O. Stézowski, A.G. Smith and B. J. Varley.
High-spin study of odd- A $_{49}\text{In}$ isotopes beyond the neutron mid-shell.
Eur. Phys. J. A 15 (2002) 315.

- E. Mergel, C.M. Petrache, G. Lo Bianco, H. Hübel, J. Domscheit, D. Roßbach, C. Schönwaßer, N. Nenoff, A. Neußer, A. Görgen, F. Becker, E. Bouchez, M. Houry, A. Hürstel, Y. Le Coz, R. Lucas, **Ch. Theisen**, W. Korten, A. Bracco, N. Blasi, F. Camera, S. Leoni, F. Hannachi, A. Lopez-Martens, M. Rejmund, D. Gassmann, P. Reiter, P.G. Thirolf, A. Astier, N. Buforn, M. Meyer, N. Redon, O. Stézowski.
Candidates for chiral doublet bands in ^{136}Nd .
Eur. Phys. J. A 15 (2002) 417.

- M. Pfützner, P.H. Regan, P.M. Walker, M. Caamaño, J. Gerl, M. Hellström, P. Mayet, K.-H. Schmidt, Zs. Podolyák, M.N. Mineva, A. Aprahamian, J. Benlliure, A.M. Bruce, P.A. Butler, D. Cortina Gil, D.M. Cullen, J. Döring, T. Enquist, C. Fox, J. Garcés Narro, H. Geissel, W. Gelletly, J. Giovannozzo, M. Górska, H. Grawe, R. Grzywacz, A. Kleinböhl, W. Korten, M. Lewitowicz, R. Lucas, H. Mach, C.D. O'Leary, F. De Oliveira, C.J. Pearson, F. Rejmund, M. Rejmund, M. Sawicka, H. Schaffner, Ch. Schlegel, K. Schmidt, **Ch. Theisen**, F. Vivès, D.D. Warner, C. Wheldon, H.J. Wollersheim, and S. Wooding.
Angular momentum population in the fragmentation of ^{208}Pb at 1 GeV/nucleon.

Phys. Rev. C 65 (2002) 064604.

- A.G. Smith, R.M. Wall, D. Patel, G.S. Simpson, D.M. Cullen, J.L. Durell, S.J. Freeman, J.C. Lisle, J.F. Smith, B.J. Varley, G. Barreau, M. Petit, **Ch. Theisen**, E. Bouchez, M. Houry, R. Lucas, B. Cahan, A. Le Coguie, B.J.P. Gall, O. Dorvaux and N. Schultz.
Lifetimes of yrast rotational states of the fission fragments ^{100}Zr and ^{104}Mo measured using a differential plunger.
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 28 (2002) 2307.
- D. Sohler, Zs. Dombrádi, J. Timár, O. Sorlin, F. Azaiez, F. Amorini, M. Belleguic, C. Donzaud, J. Duprat, D. Guillemaud-Muller, F. Ibrahim, J.A. Scarpaci, M. Stanoiu, M.J. Lopez, M.G. Saint-Laurent, F. Becker, F. Sarazin, C. Stodel, G. Voltolini, S.M. Lukyanov, V. Maslov, Yu.-E. Penionzhkevich, M. Girod, S. Péru, F. Nowacki, G. Sletten, R. Lucas, **Ch. Theisen**, D. Baiborodin, Z. Dlouhy, J. Mrazek, C. Borcea, A. Bauchet, C.J. Moore, M.J. Taylor.
Shape evolution in heavy sulfur isotopes and the erosion of the N=28 shell closure.
Phys. Rev. C 66 (2002) 054302.
- O. Sorlin, S. Leenhardt, C. Donzaud, J. Duprat, F. Azaiez, F. Nowacki, H. Grawe, Zs. Dombrádi, F. Amorini, A. Astier, D. Baiborodin, M. Belleguic, C. Borcea, C. Bourgeois, D.M. Cullen, Z. Dlouhy, E. Dragulescu, M. Górska, S. Grévy, D. Guillemaud-Mueller, G. Hagemann, B. Herskind, J. Kiener, R. Lemmon, M. Lewitowicz, S.M. Lukyanov, P. Mayet, F. de Oliveira Santos, D. Pantalica, Yu.E. Penionzhkevich, F. Pougheon, A. Poves, N. Redon, M.G. Saint-Laurent, J.A. Scarpaci, G. Sletten, M. Stanoiu, O. Tarasov, and **Ch. Theisen**.
 $^{68}_{28}\text{Ni}_{40}$: Magicity versus superfluidity.
Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 092501.
- E. Bouchez, I. Matea, W. Korten, F. Becker, B. Blank, C. Borcea, A. Buta, A. Emsallem, G. de France, J. Genevey, F. Hannachi, K. Hauschild, A. Hürstel, Y. Le Coz, M. Lewitowicz, R. Lucas, F. Negoita, F. de Oliveira Santos, D. Pantalica, J. Pinston, P. Rahkila, M. Rejmund, M. Stanoiu, and **Ch. Theisen**.
New shape isomer in the self-conjugate nucleus ^{72}Kr .
Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 082502.
- Zs. Dombradi, D. Sohler, O. Sorlin, F. Azaiez, F. Nowacki, M. Stanoiu, Yu.E. Penionzhkevich, J. Timar, F. Amorini, D. Baiborodin, A. Bauchet, F. Becker, M. Belleguic, C. Borcea, C. Bourgeois, Z. Dlouhy, C. Donzaud, J. Duprat, Z. Elekes, D. Guillemaud-Mueller, F. Ibrahim, M. Lewitowicz, M.J. Lopez, R. Lucas, S.M. Lukyanov, V. Maslov, C. Moore, J. Mrazek, M.G. Saint-Laurent, F. Sarazin, J.A. Scarpaci, G. Sletten, C. Stodel, M. Taylor, **Ch. Theisen**, G. Voltolini.
Search for particle-hole excitations across the N = 28 shell gap in $^{45,46}\text{Ar}$ nuclei.
Nucl. Phys. A 727 (2003) 195.
- M. Sawicka, R. Grzywacz, I. Matea, H. Grawe, M. Pfutzner, J.M. Daugas, M. Lewitowicz, D.L. Balabanski, F. Becker, G. Belier, C. Bingham, C. Borcea, E. Bouchez, A. Buta, M. La Commara, E. Dragulescu, G. de France, G. Georgiev, J. Giovinazzo, M. Gorska, F. Hammache, M. Hass, M. Hellstrom, F. Ibrahim, Z. Janas, H. Mach, P. Mayet, V. Meot, F. Negoita, G. Neyens, F. de Oliveira Santos, R.D. Page, O. Perru, Zs. Podolyak, O. Roig,

K.P. Rykaczewski, M.G. Saint-Laurent, J.E. Sauvestre, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, C. Stodel, **Ch. Theisen**, D. Verney, J. Zylicz.

Low energy levels in ^{72}Ni .

Phys. Rev. C 68 (2003) 044304.

- R.D. Humphreys, P.A. Butler, J.E. Bastin, P.T. Greenlees, N.J. Hammond, R.D. Herzberg, D.G. Jenkins, G.D. Jones, H. Kankaanpää, A. Keenan, H. Kettunen, T. Page, P. Rahkila, C. Scholey, J. Uusitalo, N. Amzal, P.M.T. Brew, K. Eskola, J. Gerl, K. Hauschild, K. Helariutta, F.-P. Heßberger, A. Hürstel, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, T.-L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, S.W. Ødegård, J. Pakarinen, P. Reiter, G. Sletten, **Ch. Theisen**, and H.-J. Wollersheim.

In-beam electron spectroscopy of ^{226}U and ^{254}No .

Phys. Rev. C 69 (2004) 064324.

- A. Hürstel, Y. Le Coz, E. Bouchez, A. Chatillon, A. Görgen, P.T. Greenlees, K. Hauschild, S. Juutinen, H. Kettunen, W. Korten, P. Nieminen, M. Rejmund, **Ch. Theisen**, J. Wilson, A.N. Andreyev, F. Becker, T. Enqvist, P.M. Jones, R. Julin, H. Kankaanpää, A. Keenan, P. Kuusiniemi, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, J. Pakarinen, P. Rahkila and J. Uusitalo.

Prolate deformation in the $^{187,189}\text{Bi}$ isotopes.

Eur. Phys. J. A 21 (2004) 365.

- M. Petit, M. Aiche, G. Barreau, S. Boyer, N. Carjan, S. Czajkowski, D. Dassié, C. Grosjean, A. Guiral, B. Haas, D. Karamanis, S. Misicu, C. Rizea, F. Saintamon, S. Andriamonje, E. Bouchez, F. Gunsing, A. Hürstel, Y. Lecoq, R. Lucas, **Ch. Theisen**, A. Billebaud, L. Perrot, E. Bauge.

Determination of the $^{233}\text{Pa}(n,f)$ reaction cross section from 0.5 to 10 MeV neutron energy using the transfer reaction $^{232}\text{Th}(^3\text{He},p)^{234}\text{Pa}$.

Nucl. Phys. A 735 (2004) 345.

- M. Sawicka, M. Pfützner, R. Grzywacz, J.M. Daugas, I. Matea, M. Lewitowicz, H. Grawe, F. Becker, G. Bélier, C. Bingham, R. Borcea, E. Bouchez, A. Buta, E. Dragulescu, J.E. Sauvestre, G. Georgiev, J. Giovinazzo, F. Hammache, F. Ibrahim, P. Mayet, V. Méot, F. Negoita, F. de Oliveira Santos, O. Perru, O. Roig, K.P. Rykaczewski, M.G. Saint-Laurent, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, C. Stodel, **Ch. Theisen**, D. Verney.

Evidence for an isomer in ^{76}Ni .

Eur. Phys. J. A 20 (2004) 109.

- M. Sawicka, I. Matea, H. Grawe, R. Grzywacz, M. Pfützner, M. Lewitowicz, J.M. Daugas, B.A. Brown, A. Lisetskiy, F. Becker, G. Bélier, C. Bingham, R. Borcea, E. Bouchez, A. Buta, E. Dragulescu, G. de France, G. Georgiev, J. Giovinazzo, F. Hammache, F. Ibrahim, P. Mayet, V. Méot, F. Negoita, F. de Oliveira Santos, O. Perru, O. Roig, K. Rykaczewski, M.G. Saint-Laurent, J.E. Sauvestre, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, C. Stodel, **Ch. Theisen**, D. Verney and J. Zylicz.

Beta-decay of ^{71}Co and ^{73}Co .

Eur. Phys. J. A 22 (2004) 455.

- O. Sorlin, Zs. Dombrádi, D. Sohler, F. Azaiez, J. Timár, Yu.E. Penionzhkevich, F. Amorini, D. Baiborodin, A. Bauchet, F. Becker, M. Belleguic, C. Borcea, C. Bourgeois, Z. Dlouhy, C. Donzaud, J. Duprat, L. Gaudefroy, D. Guillemaud-Mueller, F. Ibrahim, M.J. Lopez, R. Lucas, S.M. Lukyanov, V. Maslov, J. Mrazek, C. Moore, F. Nowacki, F. Pougheon, M.G. Saint-Laurent, F. Sarazin, J.A. Scarpaci, G. Sletten, M. Stanoiu, C. Stodel, M. Taylor, and **Ch. Theisen**.
Structure of the neutron-rich $^{37,39}\text{P}$ and $^{43,45}\text{Cl}$ nuclei.
Eur. Phys. J. A 22 (2004) 173.
- D.C. Biswas, A.G. Smith, R.M. Wall, D. Patel, G.S. Simpson, D.M. Cullen, J.L. Durell, S.J. Freeman, J.C. Lisle, J.F. Smith, B.J. Varley, T. Yousef, G. Barreau, M. Petit, **Ch. Theisen**, E. Bouchez, M. Houry, R. Lucas, B. Cahan, A. Le Coguie, B.J.P. Gall, O. Dorvaux, and N. Schulz.
Lifetimes of excited states in octupole-collective $^{142,144}\text{Ba}$ nuclei.
Phys. Rev. C 71 (2005) 011301.
Phys. Rev. C 71 (2005) 019901.
- M. Caamaño, P.M. Walker, P.H. Regan, M. Pfützner, Zs. Podolyák, J. Gerl, M. Hellström, P. Mayet, M.N. Mineva, A. Aprahamian, J. Benlliure, A.M. Bruce, P.A. Butler, D. Cortina Gil, D.M. Cullen, J. Döring, T. Enqvist, C. Fox, J. Garcés Narro, H. Geissel, W. Gelletly, J. Giovinazzo, M. Górska, H. Grawe, R. Grzywacz, A. Kleinböhl, W. Korten, M. Lewitowicz, R. Lucas, H. Mach, C.D. O'Leary, F. De Oliveira, C.J. Pearson, F. Rejmund, M. Rejmund, M. Sawicka, H. Schaffner, C. Schlegel, K. Schmidt, K.H. Schmidt, P.D. Stevenson, **Ch. Theisen**, F. Vivès, D.D. Warner, C. Wheldon, H.J. Wollersheim, S. Wooding, F. Xu, and O. Yordanov.
Isomers in neutron-rich $A \sim 190$ nuclides from ^{208}Pb fragmentation.
Eur. Phys. J. A 23 (2005) 201.
- S. Eeckhaudt, P.T. Greenlees, N. Amzal, J.E. Bastin, E. Bouchez, P.A. Butler, A. Chatillon, K. Eskola, J. Gerl, T. Grahn, A. Görgen, R.-D. Herzberg, F.P. Hessberger, A. Hürstel, P.J.C. Ikin, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, P. Nieminen, J. Pakarinen, J. Perkowski, A. Pritchard, P. Reiter, P. Rahkila, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, K. Van de Vel and J. Wilson.
Evidence for non-yrast states in ^{254}No .
Eur. Phys. J. A 26 (2005) 227.
- A. Görgen, E. Clément, A. Chatillon, A. Dewald, W. Korten, Y. Le Coz, N. Marginean, B. Melon, R. Menegazzo, O. Möller, **Ch. Theisen**, D. Tonev, C.A. Ur, K.O. Zell.
Lifetime measurement in ^{74}Kr and ^{76}Kr .
Eur. Phys. J. A 26 (2005) 153.
- M.-G. Porquet, Ts. Venkova, R. Lucas, A. Astier, A. Bauchet, I. Deloncle, A. Prévost, F. Azaiez, G. Barreau, A. Bogachev, N. Buforn, A. Buta, D. Curien, T.P. Doan, L. Donadille, O. Dorvaux, G. Duchêne, J. Durell, Th. Ethvignot, B.P.J. Gall, D. Grimwood, M. Houry, F. Khalfallah, W. Korten, S. Lalkovski, Y. Le Coz, M. Meyer, A. Minkova, I. Piqueras, N. Redon, A. Roach, M. Rousseau, N. Schulz, A.G. Smith, O. Stézowski, **Ch. Theisen** and

B.J. Varley.

High-spin structures of nuclei: Single proton and core-coupled states.

Eur. Phys. J. A 24 (2005) 39.

- Ts. Venkova, M.-G. Porquet, A. Astier, I. Deloncle, P. Petkov, A. Prévost, F. Azaiez, A. Bogachev, A. Buta, D. Curien, O. Dorvaux, G. Duchêne, J. Durell, B.J.P. Gall, M. Houry, F. Khalfallah, R. Lucas, M. Meyer, I. Piqueras, N. Redon, A. Roach, M. Rousseau, O. Stézowski and **Ch. Theisen**.

New high-spin states of ^{147}Nd and ^{145}Ce : Octupole correlation in the $N = 87$ isotones.

Eur. Phys. J. A 26 (2005) 315.

- J.E. Bastin, R.-D. Herzberg, P.A. Butler, G.D. Jones, R.D. Page, D.G. Jenkins, N. Amzal, P.M.T. Brew, N.J. Hammond, R.D. Humphreys, P.J.C. Ikin, T. Page, P.T. Greenlees, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, A. Keenan, H. Kettunen, P. Kuusiniemi, M. Leino, A.P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, P. Rahkila, C. Scholey, J. Uusitalo, E. Bouchez, A. Chatillon, A. Hürstel, W. Korten, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, D. Ackermann, J. Gerl, K. Helariutta, F.P. Hessberger, Ch. Schlegel, H.J. Wollersheim, M. Lach, A. Maj, W. Meczynski, J. Styczen, T.L. Khoo, C.J. Lister, A.V. Afanasjev, H.J. Maier, P. Reiter, P. Bednarczyk, K. Eskola and K. Hauschild.

In-beam gamma ray and conversion electron study of ^{250}Fm .

Phys. Rev. C 73 (2006) 024308.

- F. Becker, A. Petrovici, J. Iwanicki, N. Amzal, W. Korten, K. Hauschild, A. Hürstel, **Ch. Theisen**, P.A. Butler, R.A. Cunningham, T. Czosnyka, G. de France, J. Gerl, P. Greenlees, K. Helariutta, R.-D. Herzberg, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, M. Muikku, P. Nieminen, O. Radu, P. Rahkila and Ch. Schlegel.

Coulomb excitation of ^{78}Kr .

Nucl. Phys. A 770 (2006) 107.

- S. Boyer, D. Dassié, J.N. Wilson, M. Aïche, G. Barreau, S. Czajkowski, C. Grojean, A. Guiral, B. Haas, B. Osmanov, G. Aerts, E. Berthoumieux, F. Gunsing, **Ch. Theisen**, N. Thiollière, L. Perrot.

Determination of the $^{233}\text{Pa}(n,\gamma)$ capture cross section from 0 to 1 MeV neutron energy using the transfer reaction $^{232}\text{Th}(^3\text{He},p)^{234}\text{Pa}^*$.

Nucl. Phys. A 775 (2006) 175.

- A. Chatillon, **Ch. Theisen**, P.T. Greenlees, G. Auger, J.E. Bastin, E. Bouchez, B. Bouriquet, J.M. Casandjian, R. Cee, E. Clément, R. Dayras, G. de France, R. De Toureil, S. Eeckhaudt, A. Görgen, T. Grahn, S. Grévy, K. Hauschild, R.D. Herzberg, P.J.C. Ikin, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, A. Korichi, W. Korten, Y. Le Coz, M. Leino, A. Lopez-Martens, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, J. Perkowski, A. Pritchard, P. Rahkila, M. Rejmund, J. Saren, C. Scholey, S. Siem, M.G. Saint-Laurent, C. Simenel, Yu.G. Sobolev, Ch. Stodel, J. Uusitalo, A. Villari, M. Bender, P. Bonche, and P.-H. Heenen.

Spectroscopy and single-particle structure of the odd-Z heavy elements ^{255}Lr , ^{251}Md and ^{247}Es .

Eur. Phys. J. A 30 (2006) 397.

- R.-D. Herzberg, P.T. Greenlees, P.A. Butler, G.D. Jones, M. Venhart, I.G. Darby, S. Eeckhau dt, K. Eskola, T. Grahn, C. Gray-Jones, F.P. Hessberger, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, S. Ketelhut, W. Korten, M. Leino, A.-P. Leppänen, S. Moon, M. Nyman, R.D. Page, J. Pakarinen, A. Pritchard, P. Rahkila, J. Sareén, C. Scholey, A. Steer, Y. Sun, **Ch. Theisen** and J. Uusitalo.
Nuclear isomers in superheavy elements as stepping stones towards the island of stability.
Nature (London) 442 (2006) 896.
- A.-P. Leppänen, J. Uusitalo, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, N. Amzal, F. Becker, P.A. Butler, A.J.C. Chewter, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, S. Eeckhau dt, K. Eskola, J. Gerl, T. Grahn, N.J. Hammond, K. Hauschild, K. Helariutta, F.P. Hessberger, M. Houry, G.D. Jones, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, C.J. Lister, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, M. Nyman, R.D. Page, J. Pakarinen, P. Rahkila, P. Reiter, J. Sarén, Ch. Schlegel, C. Scholey, O. Stezowski, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska and H.J. Wollersheim.
Recoil-fission tagging of the transfermium nucleus ^{252}No .
Eur. Phys. J. A 28 (2006) 301.
- A. Lopez-Martens, K. Hauschild, A.V. Yeremin, A.V. Belozerov, Ch. Briançon, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, D. Curien, O. Dorvaux, B. Gall, V.A. Gorshkov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A.P. Kabachenko, F. Khalfallah, A. Korichi, A.C. Larsen, O.N. Malyshev, A. Minkova, Yu.Ts. Oganessian, A.G. Popeko, M. Rousseau, N. Rowley, R.N. Sagaidak, S. Sharo, A.V. Shutov, S. Siem, A.I. Svirikhin, N.U.H. Syed and **Ch. Theisen**.
Detailed spectroscopy of ^{249}Fm .
Phys. Rev. C 74 (2006) 044303.
- A. Obertelli, A. Gillibert, N. Alamanos, M. Alvarez, F. Auger, R. Dayras, A. Drouart, G. de France, B. Jurado, N. Keeley, V. Lapoux, W. Mittig, X. Mougeot, L. Nalpas, A. Pakou, N. Patronis, E.C. Pollacco, F. Rejmund, M. Rejmund, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, F. Skaza and **Ch. Theisen**.
Shell gap reduction in neutron-rich $N=17$ nuclei.
Phys. Lett. B 633 (2006) 33.
- A. Obertelli, A. Gillibert, N. Alamanos, M.A.G. Alvarez, F. Auger, R. Dayras, A. Drouart, N. Keeley, V. Lapoux, X. Mougeot, L. Nalpas, E. Pollacco, F. Skaza, **Ch. Theisen**, G. de France, B. Jurado, W. Mittig, F. Rejmund, M. Rejmund, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, A. Pakou and N. Patronis.
Gamma spectroscopy of $^{25,27}\text{Ne}$ and $^{26,27}\text{Na}$.
Phys. Rev. C 74 (2006) 064305.
- O. Perru, O. Sorlin, S. Franchoo, F. Azaiez, E. Bouchez, C. Bourgeois, A. Chatillon, J.M. Daugas, Z. Dlouhy, Zs. Dombrádi, C. Donzaud, L. Gaudefroy, H. Grawe, S. Grévy, D. Guillemaud-Mueller, F. Hammache, F. Ibrahim, Y. Le Coz, S.M. Lukyanov, I. Matea, J. Mrazek, F. Nowacki, Yu.-E. Penionzhkevich, F. de Oliveira Santos, F. Pougheon, M.G. Saint-Laurent, G. Sletten, M. Stanoiu, C. Stodel, **Ch. Theisen**, and D. Verney.
Enhanced Core Polarization in ^{70}Ni and ^{74}Zn .

Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 232501.

- Ts. Venkova, M.-G. Porquet, M. Houry, R. Lucas, **Ch. Theisen**, J. Durell and A. Roach.
A new high-spin level scheme for ^{149}Nd from fusion-fission reaction.
Eur. Phys. J. A 28 (2006) 147.

- A. Chatillon, **Ch. Theisen**, E. Bouchez, P.A. Butler, E. Clément, O. Dorvaux, S. Eeckhaudt, B.J.P. Gall, A. Görgen, T. Grahn, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, F. Hessberger, A. Hürstel, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, F. Khalfallah, W. Korten, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, P. Nieminen, J. Pakarinen, J. Perkowski, P. Rahkila, M. Rousseau, C. Scholey, J. Uusitalo, J.N. Wilson, P. Bonche, and P.-H. Heenen.
Observation of a Rotational Band in the Odd-Z Transfermium Nucleus $^{251}_{101}\text{Md}$.
Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 132503.

- E. Clément, A. Görgen, W. Korten, E. Bouchez, A. Chatillon, J.-P. Delaroche, M. Girod, H. Goutte, A. Hürstel, Y. Le Coz, A. Obertelli, S. Péru, **Ch. Theisen**, J.N. Wilson, M. Zielinska, C. Andreoiu, F. Becker, P.A. Butler, J.M. Casandjian, W.N. Catford, T. Czosnyka, G. de France, J. Gerl, R.-D. Herzberg, J. Iwanicki, D.G. Jenkins, G.D. Jones, P.J. Napiorkowski, G. Sletten, and C.N. Timis.
Shape coexistence in neutron-deficient krypton isotopes.
Phys. Rev. C 75 (2007) 054313.

- A. Lopez-Martens, K. Hauschild, A.V. Yeremin, O. Dorvaux, A.V. Belozerov, Ch. Briançon, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, D. Curien, P. Désquelles, B. Gall, V.A. Gorshkov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A.P. Kabachenko, F. Khalfallah, A. Korichi, A.C. Larsen, O.N. Malyshev, A. Minkova, Yu.Ts. Oganessian, A.G. Popeko, M. Rousseau, N. Rowley, R.N. Sagaidak, S. Sharo, A.V. Shutov, S. Siem, L. Stuttgé, A.I. Svirikhin N.U.H. Syed and **Ch. Theisen**.
Isomeric states in ^{253}No .
Eur. Phys. J. A 32 (2007) 245.

- M. Rejmund, S. Bhattacharyya, A. Navin, W. Mittig, L. Gaudefroy, M. Gelin, G. Mukherjee, F. Rejmund, P. Roussel-Chomaz, and **Ch. Theisen**.
Shell evolution and the N=34 “magic number”.
Phys. Rev. C 76 (2007) 021304(R).

- Ts. Venkova, M.-G. Porquet, I. Deloncle, P. Petkov, A. Astier, A. Prévost, F. Azaiez, A. Bogachev, A. Buta, D. Curien, O. Dorvaux, G. Duchêne, J. Durell, B.J.P. Gall, M. Houry, F. Khalfallah, R. Lucas, M. Meyer, I. Piqueras, N. Redon, A. Roach, M. Rousseau, O. Stézowski, and **Ch. Theisen**.
New high-spin states of $^{142}_{58}\text{Ce}$ and $^{140}_{56}\text{Ba}$ from fusion-fission reactions: Proton excitations in the N = 84 isotones.
Eur. Phys. J. A 34 (2007) 349.

- S. Bhattacharyya, M. Rejmund, A. Navin, E. Caurier, F. Nowacki, A. Poves, R. Chapman, D. O'Donnell, M. Gelin, A. Hodsdon, X. Liang, W. Mittig, G. Mukherjee, F. Rejmund, M. Rousseau, P. Roussel-Chomaz, K.-M. Spohr and **Ch. Theisen**.
Structure of Neutron-Rich Ar Isotopes Beyond N=28.

Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 032501.

- E. Clément, A. Görgen, W. Korten, A. Bürger, A. Chatillon, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, M. Zielińska, B. Blank, P.J. Davies, S.P. Fox, J. Gerl, G. Georgiev, S. Grévy, J. Iwanicki, D.G. Jenkins, F. Johnston-Theasby, P. Joshi, I. Matea, P.J. Napiorkowski, F. de Oliveira Santos, M.G. Pellegriti and R. Wadsworth.

A new device for combined Coulomb excitation and isomeric conversion electron spectroscopy with fast fragmentation beams.

*Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*587 (2008) 292.

- K. Hauschild, A. Lopez-Martens, A.V. Yeremin, O. Dorvaux, S. Antalic, A.V. Belozerov, Ch. Briançon, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, D. Curien, B. Gall, A. Görgen, V.A. Gorshkov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A.P. Kabachenko, F. Khalfallah, A.C. Larsen, O.N. Malyshev, A. Minkova, A.G. Popeko, M. Rousseau, N. Rowley, S. Saro, A.V. Shutov, S. Siem, L. Stuttgé, A.I. Svirikhin, N.U.H. Syed, **Ch. Theisen**, and M. Venhart.

High- K , $t_{1/2} = 1.4(1)$ ms, isomeric state in ^{255}Lr .

Phys. Rev. C 79 (2008) 021302(R).

- J. Ljungvall, A. Görgen, M. Girod, J.-P. Delaroche, A. Dewald, C. Dossat, E. Farnea, W. Korten, B. Melon, R. Menegazzo, A. Obertelli, R. Orlandi, P. Petkov, T. Pissulla, S. Siem, R.P. Singh, J. Srebrny, **Ch. Theisen**, C.A. Ur, J.J. Valiente-Dobón, K.O. Zell, and M. Zielińska.

Shape Coexistence in Light Se Isotopes: Evidence for Oblate Shapes.

Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 102502.

- **Ch. Theisen**, A. Lopez-Martens, Ch. Bonnelle.

Internal conversion and summing effects in heavy-nuclei spectroscopy.

*Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*589 (2008) 230.

- S. Bhattacharyya, M. Rejmund, A. Navin, E. Caurier, F. Nowacki, A. Poves, R. Chapman, D. O'Donnell, M. Gelin, A. Hodsdon, X. Liang, W. Mittig, G. Mukherjee, F. Rejmund, M. Rousseau, P. Roussel-Chomaz, K.-M. Spohr and **Ch. Theisen**.

Spectroscopy of $^{52,53}\text{Sc}$.

Phys. Rev. C 79 (2009) 014313.

- S. Ketelhut, P.T. Greenlees, D. Ackermann, S. Antalic, E. Clément, I.G. Darby, O. Dorvaux, A. Drouart, S. Eeckhaudt, B.J.P. Gall, A. Görgen, T. Grahn, C. Gray-Jones, K. Hauschild, R.-D. Herzberg, F. Heßberger, U. Jakobsson, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, T.-L. Khoo, W. Korten, M. Leino, A.P. Leppänen, J. Ljungvall, S. Moon, M. Nyman, A. Obertelli, J. Pakarinen, E. Parr, P. Papadakis, P. Peura, J. Piot, A. Pritchard, P. Rahkila, D. Rostron, P. Ruotsalainen, M. Sandzelius, J. Sarén, C. Scholey, J. Sorri, A. Steer, B. Sulignano, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, M. Venhart, M. Zielinska, M. Bender and P.-H. Heenen.

Gamma-Ray Spectroscopy at the Limits: First Observation of Rotational Bands in ^{255}Lr .

Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 212501.

- M. Zielińska, A. Görgen, E. Clément, J. -P. Delaroche, M. Girod, W. Korten, A. Bürger, W. Catford, C. Dossat, J. Iwanicki, J. Libert, J. Ljungvall, P. J. Napiorkowski, A. Obertelli, D. Pietak, R. Rodríguez-Guzmán, G. Sletten, J. Srebrny, **Ch. Theisen** and K. Wrzosek.
Shape of ^{44}Ar : Onset of deformation in neutron-rich nuclei near ^{48}Ca .
Phys. Rev. C 80 (2009) 014317.
- A. Bürger, F. Azaiez, A. Algora, A. Al-Khatib, B. Bastin, G. Benzoni, R. Borcea, Ch. Bourgeois, P. Bringel, E. Clément, J.-C. Dalouzy, Z. Dlouhý, Zs. Dombrádi, A. Drouart, C. Engelhardt, S. Franchoo, Zs. Fülöp, A. Görgen, S. Grévy, H. Hübel, F. Ibrahim, W. Korten, J. Mrázek, A. Navin, F. Rotaru, P. Roussel Chomaz, M.-G. Saint-Laurent, G. Sletten, D. Soehler, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, **Ch. Theisen**, C. Timis, D. Verney and S. Williams.
Occupancies of deeply bound valence neutron orbitals in ^{37}Ca .
Phys. Rev. Lett., Sous presse

B.2 Comptes rendus de conférences

- C.W. Beusang, A. Alderson, I. Ali, M.A. Bentley, P.J. Dagnall, G. de France, G. Duchêne, P. Fallon, S. Flibotte, P.D. Forsyth, B. Haas, P. Romain, G. Smith, **Ch. Theisen**, P.J. Twin and J.P. Vivien.
Entrance channel effects and the superdeformed band in ^{152}Dy .
Proceedings of the International Conference on Nuclear Structure at High Angular Momentum, Ottawa May 18-21, 1992, p54. AECL-10613.
- S. Flibotte, U.J. Huttmeier, P. Bednarczyk, G. de France, B. Haas, P. Romain, **Ch. Theisen**, J.P. Vivien and J. Zen.
Multidimensional analysis of high resolution γ -ray data.
Proceedings of Workshop on Large Gamma-Ray detector array, Chalk River Laboratories, 1992. AECL-10613.
- F.A. Beck, Th. Byrski, D. Curien, G. Duchêne, S. Flibotte, G. de France, B. Haas, B. Kharraja, J.C. Merdinger, **Ch. Theisen**, J.P. Vivien, J.C. Lisle. C.W. Beusang, P. Dagnall, P. Fallon, J. Simpson, P.J. Twin, F. Hannachi, C. Schück, Z. Fülöp, M. Josza, A. Kiss and B.M. Nyako.
The first results from EUROGAM: superdeformed structures in ^{151}Tb .
21th International Symposium On Rapidly Rotating Nuclei, Tokyo, Japan, 1992. Nucl. Phys. A557 (1993) 67c.
- J.P. Vivien, I. Ragnarsson, C.W. Beusang, F.A. Beck, G. Bélier, Th. Byrski, D. Curien, P.J. Dagnall, D. Disdier, G. Duchêne, G. de France, S. Flibotte, B. Haas, B. Herskind, N. Khadiri, B. Kharraja, S. Leoni, J.C. Merdinger, A. Nourredine, B. Nyakó, C.M. Petrache, D. Prévost, V. Rauch, H. Savajols, **Ch. Theisen**, P.J. Twin, L. Wei and K. Züber.
Neutron excitation in ^{147}Gd superdeformed nucleus.
Contrib. Conf. on Physics from Large γ -Ray Detector Arrays, Berkeley, California, Vol.1, p.15 (1994).
- C.M. Petrache, G. Duchêne, C.W. Beusang, F.A. Beck, Th. Byrski, D. Curien, P.J. Dagnall, S. Flibotte, P.D. Forsyth, G. de France, B. Haas, B. Kharraja, A. Kiss, J.C. Merdinger, D. Prévost, C. Schück, **Ch. Theisen**, P.J. Twin and J.P. Vivien.
Decay out of Superdeformed Bands in Tb Isotopes.
Proceedings of the international symposium on new nuclear structure phenomena in the vicinity of closed shells. 30 August-3 September 1994, Stockholm, Sweden. Phys. Scr. T56 (1995) 299.
- C. Gautherin, W. Korten, Y. Le Coz, R. Lucas, X.H. Phan, Th. Pussieux, **Ch. Theisen**, Ch. Badimon, G. Barreau, T.P. Doan, G. Pedemey, G. Belier, V. Méot, A. Astier, L. Ducroux, M. Meyer, N. Redon.
Study of isomeric states in neutron-rich nuclei produced by spontaneous fission of ^{252}Cf .
4 pi High Resolution Gamma Ray Spectroscopy and Nuclear Structure. Erice, 16 September - 24 September 1996. Prog. Part. Nucl. Phys. Vol 38 (1997) 289.

- M. Houry, W. Korten, Y. Le Coz, R. Lucas, **Ch. Theisen**, G. Barreau, T.P. Doan, M. Aiche, M.M. Aleonard, J.F. Chemin, J.N. Scheurer, G. Bélier, V. Méot, Th. Ethvignot, J. Durell, D. Grimwood, W.R. Philips, A. Roach, A.G. Smith, B.J. Varley, I. Deloncle, M.G. Porquet, A. Astier, S. Perries, N. Redon.
 γ -ray studies of the fission of ^{238}U induced by ^{12}C . Spectroscopy and fission dynamics.
Proc. 2nd International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy, Seyssins, France.
AIP Conference Proceedings 447 (1998) 220.
- **Ch. Theisen**, C. Gautherin, M. Houry, W. Korten, Y. Le Coz, R. Lucas, G. Barreau, T.P. Doan, G. Bélier, V. Méot, Th. Ethvignot, B. Cahan, A. Le Coguie, X. Coppolani, B. Delaitre, P. Le Boulout, Ph. Legou, O. Maillard, G. Durand, A. Bouillac, G. Carles, N. Karkour, D. Linget, I. Merlin, V.F.E. Pucknell, G. Smith.
SAPhIR: A fission fragments detector.
Proc. 2nd International Workshop on Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy, Seyssins, France.
AIP Conference Proceedings 447 (1998) 143.
- F. Becker, W. Korten, F. Hannachi, P. Paris, N. Buforn, C. Chandler, A. Jansen, M. Houry, Y. Le Coz, C.F. Liang, A. Lopez-Martens, R. Lucas, E. Mergel, G. Schönwasser, **Ch. Theisen**.
Investigation of Shape-Coexistence in ^{74}Kr , ^{74}Se .
International Summer School Structure and Stability of Nucleons and Nuclear Systems. Pre-deal, Romania, August 24 - September 5, 1998.
Rom. J. Phys. 44 (1999) 75.
- M. Houry, **Ch. Theisen**, R. Lucas, F. Becker, W. Korten, Y. Le Coz, G. Barreau, T.P. Doan, J.L. Durell, D. Grimwood, A.A. Roach, A.G. Smith, B.J. Varley, Th. Ethvignot, I. Deloncle, M.G. Porquet, A. Astier, S. Perries, N. Redon.
Gamma-ray studies of induced fission $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$.
Proc. Int. Conf. on "The Nucleus: New Physics for the New Millenium", held Jan. 18-22, 1999 at NAC, Faure, South Africa, in "The Physics for the New Millenium", ed. By F.D. Smit, R. Lindsay and S.V. Fortsch, Kluwer Academic/ Plenum Publishers (1999).
- F. Becker, N. Amzal, P. Bringel, P.A. Butler, N. Buforn, C. Chandler, R.A. Cunningham, T. Czosnyka, G. de France, J. Gerl, A. Görgen, P. Greenlees, F. Hannachi, K. Hauschild, K. Helariutta, R.-D. Herzberg, M. Houry, H. Hubel, A. Hurstel, J. Iwanicki, A. Jansen, P. Jones, R. Julin, H. Kankaanpaa, W. Korten, Y. Le Coz, C.F. Liang, A. Lopez-Martens, R. Lucas, E. Mergel, M. Muikku, P. Nieminen, P. Paris, P.H. Regan, Ch. Schlegel, G. Schonwasser, **Ch. Theisen**, H.-J. Wollersheim.
Shape Coexistence in the Kr Isotopes.
Proc. Inter. Workshop PINGST 2000, Selected Topics on N=Z Nuclei, Lund, Sweden, June 6-10, 2000, D. Rudolph, M. Hellstrom, Eds., p.82 (2000).
- F. Becker, W. Korten, P.A. Bulter, F. Hannachi, P. Paris, N. Buforn, C. Chandler, A. Jansen, M. Houry, P. Greenlees, P.M. Jones, R. Julin, H. Kankaanpää, C.F. Liang, A. Lopez-Martens,

E. Mergel, Y. Le Coz, R. Lucas, P.H. Regan, G. Schönwasser, **Ch. Theisen**.

Investigation of Oblate-Prolate Shape-Coexistence in ^{74}Kr .

International Conference on Achievements and Perspectives in Nuclear Structure, Crete (Greece) July, 11-17, 1999.

Phys. Scr. T88 (2000) 17.

- R-D. Herzberg, P.A. Butler, A.J. Chewter, G.D. Jones, R.D. Page, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, K. Helariutta, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, H. Kettunen, P. Kuusiniemi, M. Leino, M. Muikku, P. Nieminen, P. Rahlika, A. Savelius, W.H. Traska, J. Gerl, F.P. Heßberger, Ch. Schleger, H.J. Wollersheim, F. Becker, M. Houry, W. Korten, R. Lucas, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, P. Reiter, T.L. Khoo, K. Eskola.

Gamma spectroscopy of the transfermium nucleus nobelium-254.

Proceedings of the second International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, St Andrews, Scotland, June 28-July 3, 1999, J.H. Hamilton, W.R. Phillips, H.K. Carter, Eds., World Scientific, Singapore, p.196 (2000).

- H. Kankaanpää, M. Leino, R-D. Herzberg, A.J. Chewter, F.P. Heßberger, Y. Le Coz, F. Becker, P.A. Butler, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, K. Eskola, J. Gerl, P.T. Greenlees, K. Helariutta, M. Houry, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, T.L. Khoo, A. Kleinbohl, W. Korten, P. Kuusiniemi, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, R.D. Page, P. Rahkila, P. Reiter, A. Savelius, Ch. Schlegel, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska, H.J. Wollersheim.

Excited states in the heavy nuclide ^{254}No .

Experimental nuclear physics in europe: Facing the next millennium. Sevilla (Spain), 21-26 June 1999.

AIP Conference Proceedings 495 (2000) 260.

- Y. Le Coz, F. Becker, H. Kankaanpää, W. Korten, E. Mergel, P.A. Butler, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, D. Hawcroft, K. Helariutta, R.D. Herzberg, M. Houry, H. Hübel, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, P. Kuusiniemi, M. Leino, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, P. Rahkila, D. Rossbach, A. Savelius, **Ch. Theisen**.

Indication of triple-shape in ^{188}Pb .

Experimental nuclear physics in europe: Facing the next millennium. Sevilla (Spain), 21-26 June 1999.

AIP Conference Proceedings 495 (2000) 253.

- R. Lucas, M. Houry, **Ch. Theisen**, F. Becker, W. Korten, Y. Le Coz, J.L. Durell, M.J. Leddy, A.A. Roach, A.G. Smith, B.J. Varley, G. Barreau, M. Aiche, M.M. Aleonard, J.F. Chemin, T.P. Doan, J.N. Scheurer, M.G. Porquet, I. Deloncle, M. Girod, Th. Ethevignot, A. Astier, N. Redon, S. Perries.

Study of fission fragments from $^{12}\text{C} + ^{238}\text{U}$ reactions: prompt and delayed spectroscopy.

Proceedings of the second International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, St Andrews, Scotland, June 28-July 3, 1999, J.H. Hamilton, W.R. Phillips, H.K. Carter, Eds., World Scientific, Singapore, p.79 (2000).

- M. Petit, M. Aiche, S. Andriamonje, G. Barreau, S. Boyer, O. Busch, S. Czajkowski,

D. Karamanis, F. Saintamon, E. Bouchez, F. Becker, F. Gunsing, A. Hürstel, Y. Le Coz, R. Lucas, M. Rejmund, **Ch. Theisen**, A. Billebaud, L. Perrot.

Determination of the neutron fission cross-section for ^{233}Pa from 0.5 to 10 MeV using the transfer reaction $^{232}\text{Th}(^3\text{He},\text{pf})^{234}\text{Pa}$.

Proceedings of the 6th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, 11-13 December 2000, Madrid (Spain).

- C. Schlegel, P.H. Regan, M. Pfützner, J. Gerl, M. Hellström, Zs. Podolyák, M. Caanaño, P. Mayet, A. Aprahamian, J. Benlliure, A.M. Bruce, P.A. Butler, D. Cortina Gil, D.M. Cullen, J. Döring, T. Enquist, F. Farget, C. Fox, J. Garcés Narro, W. Gellely, J. Giovinazzo, M. Górská, H. Grawe, R. Grzywacz, A. Kleinböhl, W. Korten, M. Lewitowicz, R. Lucas, H. Mach, M. Mineva, C. O'Leary, F. De Oliveira, C.J. Pearson, M. Rejmund, M. Sawicka, H. Schaffner, K. Schmidt, **Ch. Theisen**, P.M. Walker, D.D. Warner, C. Wheldon, H.J. Wollersheim, S. Wooding, F. Xu.

K-Isomers in Very Neutron-Rich Nuclei around Mass 180.

International Conference on Achievements and Perspectives in Nuclear Structure, Crete (Greece) July, 11-17, 1999.

Phys. Scr. T88 (2000) 72.

- D. Sohler, J. Timár, Zs. Dombrádi, B.M. Nyakó, F. Azaiez, O. Sorlin, F. Amorini, M. Belleguic, C. Bourgeois, C. Donzaud, J. Duprat, D. Guillemaud-Mueller, F. Ibrahim, L. Petizon, J.A. Scarpaci, C. Stodel, M. Stanoiu, M.J. Lopez, F. Sarazin, M.G. Saint Laurent, G. Voltolini, D. Baiborodin, S.M. Lukyanov, V. Maslov, Yu.E. Penionzhkevich, A. Bauchet, F. Becker, **Ch. Theisen**, C. Borcea, Z. Dlouhy, J. Mrazek, R. Lucas, C. Moore, M. Taylor, G. Sletten, F. Nowacki.

Study of the Neutron-Rich Ar, Cl, S and P Nuclei Near the N = 28 Closed Shell.

International Symposium on Exotic Nuclear Structures. ENS 2000. Debrecen, Hungary, May 15-20, 2000.

Acta Phys. Hung. N. S. 12 (2000) 281.

- N. Amzal, P.A. Butler, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, R.D. Humphreys, H. Kankaanpää, J. Bastin, F. Becker, P.M. Brew, J.F.C. Cocks, R.A. Cunningham, T. Czosnyka, K. Eskola, J. Gerl, N.J. Hammond, K. Hauschild, P. Heikinen, K. Helariutta, F.-P. Heßberger, A. Hürstel, I. Iwanicki, G.D. Jones, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, A. Keenan, H. Kettunen, S. Khlebnikov, T.-L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, M. Muikku, P. Nieminen, T. Page, P. Rahkila, P. Reiter, C. S. Scholey, G. Sletten, O. Stézowski, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, H.-J. Wollersheim.

The structure of heavy octupole and superheavy quadrupole deformed nuclei.

High Spin Physics 2001 Conference, Warsaw, Poland, February 6-10, 2001.

Acta Phys. Pol. B32 (2001) 2519.

- P.A. Butler, A.J. Chewter, H. Kankaanpää, R.D. Herzberg, F. Becker, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, K. Eskola, J. Gerl, P.T. Greenlees, N. Hammond, K. Helariutta, F.P. Heßberger, M. Houry, R.D. Humphreys, A. Hürstel, G.D. Jones, R. Julin, S. Juutinen, A. Keenan, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, R. D. Page, T. Page, P. Rahkila, P. Reiter, A. Savelius, Ch. Schlegel, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska, J. Uusitalo, H.J. Wollersheim.

Towards In-Beam Spectroscopy of the Heaviest Elements.

XXXIII Zakopane School of Physics: "Trends in Nuclear Physics", Zakopane, Poland, (2000). Acta Phys. Pol. B32 (2001) 619.

- P. Nieminen, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, P.T. Greenlees, K. Helariutta, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, H. Kettunen, P. Kuusiniemi, M. Leino, M. Muikku, P. Rahkila, A. Savelius, J. Uusitalo, A.N. Andreyev, F. Becker, K. Eskola, K. Hauschild, M. Houry, M. Huyse, W. Korten, Y. Le Coz, R. Lucas, T. Lonroth, **Ch. Theisen**, K. Van de Vel, P. Van Duppen, N. Amzal, P.A. Butler, N. Hammond, C. Scholey, R. Wyss.

Gamma-Ray Spectroscopy of ^{191,193}Bi.

XXXIII Zakopane School of Physics: "Trends in Nuclear Physics", Zakopane, Poland, (2000). Acta Phys. Pol. B32 (2001) 1019.

- F. Azaiez, M. Belleguic, D. Sohler, M. Stanoiu, Zs. Dombrádi, O. Sorlin, J. Timár, F. Amorini, D. Baiborodin, A. Bauchet, F. Becker, C. Borcea, C. Bourgeois, Z. Dlouhy, C. Donzaud, J. Duprat, D. Guillemaud-Mueller, F. Ibrahim, M.J. Lopez, R. Lucas, S.M. Lukyanov, V. Maslov, J. Mrazek, C. Moore, F. Nowacki, B.M. Nyakó, Yu.E. Penionzhkevich, M.G. Saint-Laurent, F. Sarazin, J.A. Scarpaci, G. Sletten, C. Stodel, M. Taylor, **Ch. Theisen** and G. Voltolini.

Probing shell structure in neutron-rich nuclei with in-beam gamma-spectroscopy.

3rd International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses ENAM 2001. Hämeenlinna, Finland, 2-7 July 2001. Eur. Phys. J. A 15 (2002) 93.

- E. Bouchez, K. Hauschild, A. Hürstel, W. Korten, Y. Le Coz, R. Lucas, M. Rejmund, **Ch. Theisen**, F. Becker, G. de France, M. Lewitowicz, I. Matea, F. De Oliveira, M. Staniou, B. Blank, C. Borcea, A. Buta, F. Negoita, D. Pantelica, A. Emsallem, J. Genevey, J. Pinston, F. Hannachi, P. Rahkila.

A new shape isomer in the N=Z nucleus ⁷²Kr.

Proceedings of the int. conf. on nucl. phys. at the borderlines., p60. Lipari, 21-24 May 2001. World Scientific 2002.

- R.-D. Herzberg, N. Amzal, J.E. Bastin, F. Becker, P.M.T. Brew, P.A. Butler, A.J.C. Chewter, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, K. Eskola, J. Gerl, P.T. Greenlees, N.J. Hammond, K. Hauschild, K. Helariutta, F. Heßberger, M. Houry, A. Hürstel, R.D. Humphreys, G.D. Jones, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.P. Leppänen, C.J. Lister, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, R.D. Page, T. Page, P. Rahkila, P. Reiter, Ch. Schlegel, C. Scholey, G. Sletten, O. Stezowski, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska, J. Uusitalo and H.J. Wollersheim.

In-beam spectroscopy of ^{252,254}No.

3rd International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses ENAM 2001. Hämeenlinna, Finland, 2-7 July 2001. Eur. Phys. J. A 15 (2002) 205.

- E. Bouchez, A. Chatillon, A. Huerstel, W. Korten, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, J.M. Casandjian, G. de France, F. Becker, J. Gerl, T. Czosnyka, J. Iwanicki, M. Zielinska, P. Butler, R. Herzberg, D. Jenkins, G. Jones, G. Sletten, W. Catford, C. Timis.

First Radioactive Beam Coulomb Excitation Experiment on SPIRAL.

XXXVII Zakopane School of Physics "Trends in Nuclear Physics", Zakopane, Poland, September 3-10, 2002.

Acta Phys. Pol. B34 (2003) 2443.

- P.A. Butler, R.D. Humphreys, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, D.G. Jenkins, G.D. Jones, H. Kankaanpää, H. Kettunen, P. Rahkila, C. Scholey, J. Uusitalo, N. Amzal, C. Andreoiu, A. Andreyev, D. Appelbe, J.E. Bastin, P.M.T. Brew, K. Eskola, S.J. Freeman, J. Gerl, N.J. Hammond, K. Hauschild, K. Helariutta, F.-P. Hessberger, A. Hürstel, P.J.C. Ikin, P.M. Jones, D.T. Joss, R. Julin, S. Juutinen, A. Keenan, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, S.W. Odegard, R.D. Page, T. Page, J. Pakarinen, P. Reiter, J. Simpson, G. Sletten, **Ch. Theisen**, B.J. Varley, H.-J. Wollersheim.

High K Bands in Mid-Supershell Nuclei.

XXXVII Zakopane School of Physics "Trends in Nuclear Physics", Zakopane, Poland, September 3-10, 2002.

Acta Phys. Pol. B34 (2003) 2107.

- R. Grzywacz, M. Sawicka, M. Pfutzner, J.M. Daugas, J. Giovinazzo, H. Grawe, I. Matea, F. Becker, C. Bingham, R. Borcea, E. Bouchez, A. Buta, G. Belier, J.E. Sauvestre, E. Dragulescu, G. Georgiev, F. Ibrahim, F. Hammache, P. Mayet, V. Meot, M. Lewitowicz, F. de Oliveira, F. Negoita, O. Perru, K. Rykaczewski, O. Roig, O. Sorlin, I. Stefan, C. Stodel, M.G. Saint-Laurent, M. Stanoiu, **Ch. Theisen**, D. Verney.

Beta Decay of ^{72}Co And Excited Levels In ^{72}Ni .

Proc. Frontiers of Nuclear Structure, Berkeley, California, P. Fallon and R. Clark, Eds.

AIP Conference Proceedings 656 (2003) 233.

- P. Nieminen, S. Juutinen, J.F.C. Cocks, O. Dorvaux, T. Enqvist, T. Grahn, P.T. Greenlees, K. Helariutta, P.M. Jones, R. Julin, H. Kankaanpää, A. Keenan, H. Kettunen, P. Kuusiniemi, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, J. Pakarinen, P. Rahkila, A. Savelius, J. Uusitalo, E. Bouchez, A. Hürstel, K. Hauschild, W. Korten, Y. Le Coz, M. Rejmund, **Ch. Theisen**, N. Amzal, A.N. Andreyev, K. Eskola, N. Hammond, M. Huyse, T. Lonroth, C. Scholey, P. Van Duppen, R. Wyss.

Gamma-ray Spectroscopy Of Very Neutron-Deficient Bi Isotopes.

Proc. Frontiers of Nuclear Structure, Berkeley, California, P. Fallon and R. Clark, Eds.

AIP Conference Proceedings 656 (2003) 63.

- P.T. Greenlees, A.N. Andreyev, J. Bastin, F. Becker, E. Bouchez, P.A. Butler, J.F.C. Cocks, Y. Le Coz, K. Eskola, J. Gerl, K. Hauschild, K. Helariutta, R.-D. Herzberg, F.P. Heßberger, R.D. Humphreys, A. Hürstel, D.G. Jenkins, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, A. Keenan, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, R.D. Page, T. Page, J. Pakarinen, P. Rahkila, P. Reiter, Ch. Schlegel, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, K. Van de Vel, R. Wadsworth and H.-J. Wollersheim.

In-beam spectroscopy at the RITU gas-filled recoil separator.

Conference on Nuclear Structure with Large γ -arrays: Status and Perspectives. Legnaro-Padua (Italy), September 23-27, 2002.

Eur. Phys. J. A 20 (2004) 87.

- W. Korten, E. Bouchez, E. Clément, A. Chatillon, A. Görgen, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, J. Wilson, J.M. Casandjian, G. de France, G. Sletten, T. Czosnyka, J. Iwanicki, M. Zielinska, C. Andreoiu, P. Butler, R.-D. Herzberg, D. Jenkins, G. Jones, F. Becker, J. Gerl, W. Catford and C. Timis.

Shape coexistence in Krypton isotopes studied through Coulomb excitation of radioactive Krypton ion beams.

Proceedings of the Sixth International Conference on Radioactive Nuclear Beams (RNB6). Nucl. Phys. A746 (2004) 90c.

- A. Lopez-Martens, T. Døssing, T.L. Khoo, B. Herskind, T. Lauristen, M. Matsuo, K. Yoshida, A. Korichi, F. Hannachi, I. Ahmad, H. Amro, G. de Angelis, D. Bazzacco, C. Beausang, E. Bouchez, P. Bringel, I.J. Calderin, M.P. Carpenter, S.M. Fischer, G. Hackman, K. Hauschild, H. Hübel, A. Hürstel, R.V.F. Janssens, F.G. Kondev, W. Korten, T. Kröll, Y. Le Coz, N. Marginean, R. Menegazzo, E. Mergel, D. Napoli, N. Nenoff, S. Neumann, A. Neusser, D. Nisius, G. Mukherjee, M. Rejmund, D. Rossbach, C. Rossi Alvarez, C. Schück, G. Schonwasser, A.K. Singh, **Ch. Theisen**, Ch. Vieu and C. Ur.

Gamma-ray feeding and decay of superdeformed states.

Conference on Nuclear Structure with Large γ -arrays: Status and Perspectives. Legnaro-Padua (Italy), September 23-27, 2002.

Eur. Phys. J. A 20 (2004) 49.

- N. Redon, A. Prévost, D. Guinet, Ph. Laitesse, M. Meyer, B. Rossé, O. Stézowski, P.J. Nolan, C. Andreoiu, A.J. Boston, M. Descovich, A.O. Evans, S. Gros, J. Norman, R.D. Page, E.S. Paul, G. Rainovski, J. Sampson, G. de France, J.M. Casandjian, **Ch. Theisen**, J.N. Scheurer, B.M. Nyakó, J. Gál, G. Kalinka, J. Molnár, Zs. Dombrádi, J. Timár, L. Zolnai, K. Juhász, A. Astier, I. Deloncle, M.G. Porquet, R. Wadsworth, P. Raddon, Y. Lee, A. Wilkinson, P. Joshi, J. Simpson, D. Appelbe, D. Joss, R. Lemmon, J. Smith, D. Cullen, A. Brondi, G. La Rana, R. Moro, E. Vardacci and M. Girod.

Deformation of the very neutron-deficient rare-earth nuclei produced with the SPIRAL ^{76}Kr radioactive beam and studied with EXOGAM + DIAMANT.

International Conf. on The Labyrinth in Nuclear Structure, Crete, Greece, 13-19 July 2003. AIP Conference Proceedings 701 (2004) 208.

- M. Sawicka, M. Pfützner, R. Grzywacz, J.M. Daugas, I. Matea, M. Lewitowicz, H. Grawe, F. Becker, G. Bélier, C. Bingham, R. Borcea, E. Bouchez, A. Buta, E. Dragulescu, J.E. Sauvestre, G. Georgiev, J. Giovinazzo, F. Hammache, F. Ibrahim, P. Mayet, V. Méot, F. Negoita, F. de Oliveira Santos, O. Perru, O. Roig, K.P. Rykaczewski, M.G. Saint-Laurent, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, C. Stodel, **Ch. Theisen** and D. Verney.

Evidence for an isomer in ^{76}Ni .

Conference on Nuclear Structure with Large γ -arrays: Status and Perspectives. Legnaro-Padua (Italy), September 23-27, 2002.

Eur. Phys. J. A 20 (2004) 109.

- W.N. Catford, C.N. Timis, R.C. Lemmon, M. Labiche, N.A. Orr, L. Caballero, R. Chapman, M. Freer, M. Chartier, H. Savajols, M. Rejmund, N. Amzal, N.I. Ashwood, T.D. Baldwin,

M. Burns, N. Curtis, G. de France, W. Gelletly, X. Liang, S.D. Pain, V.P.E. Pucknell, B. Rubio, O. Sorlin, K. Spohr, **Ch. Theisen** and D.D. Warner.

Nucleon transfer via (d,p) using TIARA with a ^{24}Ne radioactive beam.

International Conference on the interface between NUclear STructure, Astrophysics and Reactions (University of Surrey, Guildford, UK, 5-8 January 2005).

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31 (2005) S1655.

- A. Chatillon, **Ch. Theisen**, E. Bouchez, E. Clément, R. Dayras, A. Drouart, A. Görgen, A. Hürstel, W. Korten, Y. Le Coz, C. Simenel, J. Wilson, S. Eeckhaudt, T. Grahn, P.T. Greenlees, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, M. Leino, A.-P. Leppänen, V. Maanselka, P. Nieminen, J. Pakarinen, J. Perkowski, P. Rahkila, J. Saren, C. Scholey, J. Uusitalo, K. Van De Vel, G. Auger, B. Bouriquet, J.M. Casandjian, R. Cee, G. De France, R. De Turreil, M.G. St Laurent, Ch. Stodel, A. Villari, M. Rejmund, N. Amzal, J.E. Bastin, P.A. Butler, R.-D. Herzberg, P.J.C. Ikin, G.D. Jones, A. Pritchard, S. Grévy, K. Hauschild, A. Korichi, A. Lopez-Martens, F.P. Hessberger, S.M. Lukyanov, Yu.E. Penionzhkevich, Yu.G. Sobolev, O. Dorvaux, B. Gall, F. Khalfallah, M. Rousseau.

Spectroscopy of the odd transfermium ^{251}Md and ^{255}Lr nuclei using γ , electron and α spectroscopy.

Proc. Intern. Symposium Exotic Nuclei, Peterhof, Russia, July 5-12, 2004, Yu. E. Penionzhkevich, E. A. Cherepanov, Eds., World Scientific, Singapore, p.198 (2005).

- E. Clément, A. Görgen, E. Bouchez, A. Chatillon, W. Korten, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, C. Andreoiu, F. Becker, B. Blank, C. Borcea, A. Buta, P. Butler, J.M. Casandjian, W.N. Catford, T. Czosnyka, A. Emsallem, G. de France, J. Genevey, J. Gerl, F. Hannachi, K. Hauschild, R.-D. Herzberg, A. Hürstel, J. Iwanicki, D. Jenkins, G. Jones, M. Lewitowicz, R. Lucas, I. Matea, F. Negoita, F. de Oliveira Santos, D. Pantelica, J. Pinston, P. Rahkila, M. Rejmund, G. Sletten, M. Stanoiu, C. Timis, R. Wadsworth, J.N. Wilson, M. Zielinska.

Shape Coexistence In Light Krypton Isotopes.

Proc. Nuclei at the Limits, Argonne, Illinois, D. Seweryniak and T.L. Khoo, eds.

AIP Conference Proceedings 764 (2005) 55.

- S. Eeckhaudt, N. Amzal, J.E. Bastin, E. Bouchez, P. A. Butler, A. Chatillon, K. Eskola, J. Gerl, T. Grahn, A. Görgen, P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, F.P. Hessberger, A. Hürstel, P.J.C. Ikin, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, P. Nieminen, J. Pakarinen, J. Perkowski, A. Pritchard, P. Reiter, P. Rahkila, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, K. Van de Vel, J. Wilson and H.J. Wollersheim.

In-beam gamma-ray spectroscopy of ^{254}No .

Fourth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM'04). September 12-16, 2004. Southern Pine Conference Center of Callaway Gardens in Pine Mountain, GA, USA.

Eur. Phys. J. A 25 (2005) s01-605.

- A. Görgen, E. Clément, E. Bouchez, A. Chatillon, W. Korten, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, C. Andreoiu, F. Becker, B. Blank, A. Bürger, P. Butler, J.M. Casandjian, W. Catford, T. Czosnyka, P. Davies, S.P. Fox, G. de France, G. Georgiev, J. Gerl, H. Hübel, J. Iwanicki, D.G. Jenkins, F. Johnston-Theasby, P. Joshi, I. Matea, P. Napiorkowski, F. de Oliveira

Santos, G. Sletten, C. Timis, R. Wadsworth, M. Zielinska.

Shape Coexistence in Light Krypton Isotopes.

XXXIX Zakopane School of Physics, August 31 - September 5, 2004, Zakopane, Poland.
Acta Phys. Pol. B36 (2005) 1281.

- A. Görgen, E. Clément, E. Bouchez, A. Chatillon, W. Korten, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, J.N. Wilson, C. Andreoiu, F. Becker, J.M. Casandjian, A. Dewald, G. de France, J. Gerl, J. Iwanicki, N. Marginean, B. Melon, R. Menegazzo, O. Möller, G. Sletten, C. Timis, D. Tonev, C.A. Ur, K.O. Zell, and M. Zielinska.

Shape Coexistence in Light Krypton Isotopes.

EXOTIC NUCLEAR SYSTEMS: International Symposium on Exotic Nuclear Systems ENS'05.

AIP Conference Proceedings 802 (2005) 275.

- P.T. Greenlees, N. Amzal, J.E. Bastin, E. Bouchez, P.A. Butler, A. Chatillon, O. Dorvaux, S. Eeckhaudt, K. Eskola, B. Gall, J. Gerl, T. Grahn, A. Görgen, N.J. Hammond, K. Hauschild, R.-D. Herzberg, F.-P. Heßberger, R.D. Humphreys, A. Hürstel, D.G. Jenkins, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, A. Keenan, H. Kettunen, F. Khalfallah, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, J. Pakarinen, P. Rahkila, P. Reiter, M. Rousseau, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, J. Wilson and H.-J. Wollersheim.

In-beam and decay spectroscopy of transfermium elements.

Fourth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM'04). September 12-16, 2004. Southern Pine Conference Center of Callaway Gardens in Pine Mountain, GA, USA.

Eur. Phys. J. A 25 (2005) s01-599.

- P.T. Greenlees, N. Amzal, J.E. Bastin, E. Bouchez, P.A. Butler, A. Chatillon, O. Dorvaux, S. Eeckhaudt, K. Eskola, B. Gall, J. Gerl, T. Grahn, A. Görgen, N.J. Hammond, K. Hauschild, R.-D. Herzberg, F.-P. Hessberger, R.D. Humphreys, A. Hürstel, D.G. Jenkins, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankaanpää, A. Keenan, H. Kettunen, F. Khalfallah, W. Korten, P. Kuusiniemi, M. Leino, A.P. Leppänen, M. Muikku, P. Nieminen, J. Pakarinen, P. Rahkila, P. Reiter, M. Rousseau, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, J. Wilson, H.-J. Wollersheim.

Heavy Element Spectroscopy At JYFL.

Proc. Nuclei at the Limits, Argonne, Illinois, D. Seweryniak and T.L. Khoo, eds.

AIP Conference Proceedings 764 (2005) 237.

- B. Jurado, M. Aiche, G. Barreau, S. Boyer, S. Czajkowski, D. Dassié, C. Grosjean, A. Guiral, B. Haas, B. Osmanov, M. Petit, E. Berthoumieux, F. Gunsing, L. Perrot, **Ch. Theisen**, E. Bauge, F. Michel-Sendis, A. Billebaud, J.N. Wilson, I. Ahmad, R. Janssens.

Determination of Minor Actinides Fission Cross Sections By Means of Transfer Reactions.

Proceeding of FISSION 2005, 3rd international workshop on nuclear fission and fission-products spectroscopy, Cadarache, 11-14 May 2005.

AIP Conference Proceedings 798 (2005) 19.

- W. Korten, E. Clément, E. Bouchez, A. Chatillon, A. Görgen, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, J.M. Casandjian, G. de France, G. Sletten, T. Czosnyka, J. Iwanicki, M. Zielinska, F. Becker, J. Gerl, W. Catford, C. Timis, P. Butler, C. Andreoiu.
Investigation of heavy N ~ Z nuclei using energetic radioactive ion beams.
Proceedings of the 22nd International Nuclear Physics Conference. Göteborg, Sweden. 27th June - 2nd July 2004.
Nucl. Phys. A752 (2005) 255c.
- M. Labiche, C.N. Timis, R.C. Lemmon, W.N. Catford, R. Chapman, N. Amzal, N.I. Ashwood, T.D. Baldwin, M. Burns, L. Caballero, M. Chartier, N. Curtis, G. De France, W. Gelletly, X. Liang, M. Freer, N.A. Orr, S.D. Pain, V.P.E. Pucknell, M. Rejmund, B. Rubio, H. Savajols, O. Sorlin, K. Spohr, **Ch. Theisen** and D.D. Warner.
Study of transfer reactions in inverse kinematics with the TIARA array.
International Conference on the interface between NUclear STructure, Astrophysics and Reactions (University of Surrey, Guildford, UK, 5-8 January 2005).
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 31 (2005) S169.
- M. Labiche, C.N. Timis, R.C. Lemmon, W.N. Catford, R. Chapman, B. Rubio, L. Caballero, N. Amzal, N.I. Ashwood, T.D. Baldwin, M. Burns, M. Chartier, N. Curtis, G. de France, W. Gelletly, X. Liang, M. Freer, N.A. Orr, S. Pain, V.P.E. Pucknell, M. Rejmund, H. Savajols, O. Sorlin, K. Spohr, **Ch. Theisen**, D.D. Warner.
Nucleon Transfer Reaction Studies at GANIL using Radioactive Nuclear Beams.
Proceedings of the 5th International Balkan Workshop on Applied Physics 5-7 July, 2004, Constanta, Romania.
Rom. J. Phys. 50 (2005) 657.
- Ch. Stodel, R. Anne, G. Auger, B. Bouriquet, J.M. Casandjian, R. Cee, G. De France, F. De Oliveira Santos, R. De Turreil, A. Khouaja, A. Peghaire, M.G. Saint-Laurent, A.C.C. Villari, J.P. Wieleczko, N. Amar, S. Grevy, J. Peter, R. Dayras, A. Drouart, A. Gillibert, **Ch. Theisen**, A. Chatillon, E. Clément, K. Lojek, Z. Sosin, A. Wieloch, K. Hauschild, F. Hannachi, A. Lopez-Martens, L. Stuttge, F.P. Hessberger, S. Hofmann, R. Lichtenthaler, F. Hanappe.
Search for super-heavy elements at GANIL.
Proc. Intern. Symposium Exotic Nuclei, Peterhof, Russia, July 5-12, 2004, Yu. E. Penionzhkevich, E. A. Cherepanov, Eds., World Scientific, Singapore, p.180 (2005).
- M. Aiche, G. Barreau, S. Boyer, S. Czajkowski, S. Dassié, C. Grosjean, A. Guiral, B. Haas, B. Jurado, B. Osmanov, E. Bauge, M. Petit, E. Berthoumieux, F. Gunsing, L. Perrot, **Ch. Theisen**, F. Michel-Sendis, A. Billebaud, J.N. Wilson, I. Ahmad, J.P. Greene and R.V.F. Janssens.
Determination of minor actinides fission cross sections by means of transfer reaction.
Proceedings of the international workshop on nuclear data needs for generation IV nuclear energy systems, Antwerpen, Belgium 5-7 April 2005. World scientific publishing (2006) p. 222.
- A. Bürger, M. Stanoiu, F. Azaiez, Zs. Dombrádi, A. Algora, A. Al-Khatib, B. Bastin, G. Benzoni, R. Borcea, Ch. Bourgeois, P. Bringel, E. Clément, J.-C. Dalouzy, Z. Dlouhý, A. Drouart, C. Engelhardt, S. Franchoo, Zs. Fülöp, A. Görgen, S. Grévy, H. Hübel, F. Ibrahim, W. Korten, J. Mrázek, A. Navin, C. Timis, F. Rotaru, P. Roussel-Chomaz, M.G. Saint-

Laurent, G. Sletten, D. Sohler, O. Sorlin, **Ch. Theisen**, D. Verney, and S. Williams.

Spectroscopy of neutron-deficient nuclei around ^{36}Ca .

International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions - FINUSTAR, Kos, Greece, 12-17 September 2005.

AIP Conference Proceedings 831 (2006) 418.

- J.M. Daugas, M. Sawicka, M. Pfützner, I. Matea, H. Grawe, R. Grzywacz, N.L. Achouri, J.C. Angélique, D. Baiborodin, F. Becker, G. Bélier, R. Bentida, R. Béraud, C. Bingham, C. Borcea, R. Borcea, E. Bouchez, A. Buta, W.N. Catford, E. Dragulescu, A. Emsallem, G. de France, J. Giovinazzo, M. Girod, H. Goutte, G. Gorgiev, K.L. Grzywacz-Jones, F. Hammache, F. Ibrahim, R.C. Lemmon, M. Lewitowicz, M.J. Lopez-Jimenez, P. Mayet, V. Méot, F. Negoita, F. de Oliveira-Santos, O. Perru, P.H. Regan, O. Roig, K. Rykaczewski, M.G. Saint-Laurent, J.E. Sauvestre, G. Sletten, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, C. Stodel, **Ch. Theisen**, D. Verney, and J. Zylicz.

Isomeric island in the vicinity of ^{66}Fe .

International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions - FINUSTAR, Kos, Greece, 12-17 September 2005.

AIP Conference Proceedings 831 (2006) 427.

- S. Eeckhaudt, N. Amzal, J. E. Bastin, E. Bouchez, P.A. Butler, A. Chatillon, K. Eskola, J. Gerl, T. Grahn, P.T. Greenlees, A. Görgen, R.-D. Herzberg, F.P. Hessberger, A. Hüstel, P.J.C. Ikin, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, P. Nieminen, J. Pakarinen, J. Perkowski, A. Pritchard, P. Reiter, P. Rahkila, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, K. Van de Vel, and J. Wilson.

In-beam spectroscopy of ^{254}No .

International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions - FINUSTAR, Kos, Greece, 12-17 September 2005.

AIP Conference Proceedings 831 (2006) 445.

- B. Fernández-Domínguez, R.C. Lemmon, C. Timis, M. Labiche, W.N. Catford, M. Chartier, N. Ashwood, N. Amzal, T.D. Baldwin, M. Burns, L. Caballero, R. Chapman, N. Curtis, G. de France, M. Freer, W. Gelletly, X. Liang, N.A. Orr, S.D. Pain, V.P.E. Pucknell, M. Rejmund, B. Rubio, H. Savajols, O. Sorlin, K. Spohr, **Ch. Theisen**, and D.D. Warner.

Studies of the Single Particle Structure of Exotic Nuclei using Transfer Reactions.

International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions - FINUSTAR, Kos, Greece, 12-17 September 2005.

AIP Conference Proceedings 831 (2006) 347.

- R.C. Lemmon, B. Fernandez-Dominguez, C. Timis, M. Labiche, W.N. Catford, M. Chartier, N. Ashwood, N. Amzal, T.D. Baldwin, M. Burns, L. Caballero, R. Chapman, N. Curtis, G. de France, M. Freer, W. Gelletly, X. Liang, N.A. Orr, S.D. Pain, V.P.E. Pucknell, M. Rejmund, B. Rubio, H. Savajols, O. Sorlin, K. Spohr, **Ch. Theisen**, and D.D. Warner.

Studies of Single-Particle Structure in the $N=16$ Region Using Transfer Reactions.

Proceedings of FUSION06: Reaction Mechanisms and Nuclear Structure at the Coulomb Barrier, San Servolo, Venice, Italy, 19-23 March 2006.

AIP Conference Proceedings 853 (2006) 285.

- A. Obertelli, N. Alamanos, M. Alvarez, F. Auger, R. Dayras, A. Drouart, G. De France, A. Gillibert, B. Jurado, N. Keeley, V. Lapoux, W. Mittig, X. Mougeot, L. Nalpas, A. Pakou, N. Patronis, E. Pollacco, F. Rejmund, M. Rejmund, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, F. Skaza, and **Ch. Theisen**.
Shell Gap Reduction In Exotic N = 17 Nuclei.
International Conference on Frontiers in Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions - FINUSTAR, Kos, Greece, 12-17 September 2005.
AIP Conference Proceedings 831 (2006) 177.
- A. Bürger, F. Azaiez, M. Stanoiu, Zs. Dombradi, A. Algora, A. Al-Khatib, B. Bastin, G. Benzoni, R. Borcea, Ch. Bourgeois, P. Bringel, E. Clement, J.-C. Dalouzy, Z. Dlouhy, A. Drouart, C. Engelhardt, S. Franchoo, Zs. Fueleop, A. Goergen, S. Grevy, H. Huebel, F. Ibrahim, W. Korten, J. Mrazek, A. Navin, F. Rotaru, P. Roussel-Chomaz, M.-G. Saint-Laurent, G. Sletten, D. Sohler, O. Sorlin, **Ch. Theisen**, C. Timis, D. Verney, S. Williams.
Spectroscopy around ^{36}Ca .
XXXI Zakopane conference on nuclear physics "Tends in nuclear physics". September 4-10, 2006. Zakopane (Poland).
Acta Phys. Pol. B38 (2007) 1353.
- A. Bürger, M. Stanoiu, F. Azaiez, Zs. Dombrádi, A. Algora, A. Al-Khatib, B. Bastin, G. Benzoni, R. Borcea, Ch. Bourgeois, P. Bringel, E. Clément, J.-C. Dalouzy, Z. Dlouhý, A. Drouart, C. Engelhardt, S. Franchoo, Zs. Fülöp, A. Görger, S. Grévy, H. Hübel, F. Ibrahim, W. Korten, J. Mrázek, A. Navin, F. Rotaru, P. Roussel-Chomaz, M.G. Saint Laurent, G. Sletten, D. Sohler, O. Sorlin, **Ch. Theisen**, C. Timis, D. Verney and S. Williams.
Spectroscopy of neutron-deficient nuclei around ^{36}Ca .
Proceedings of The Seventh International Conference on Radioactive Nuclear Beams (RNB7), Cortina d'Ampezzo, 2-7 July 2007.
Eur. Phys. J. Special Topics 150 (2007) 89.
- C. Dossat, **Ch. Theisen**, A. Bürger, E. Clément, A. Görger, W. Korten, S. Eeckhaudt, P. Jones, T. Grahn, P.T. Greenlees, R. Julin, S. Juutinen, M. Leino, A.-P. Leppänen, M. Nyman, J. Pakarinen, P. Rahkila, J. Sarén, C. Scholey, J. Sorri, J. Uusitalo and M. Venhart.
Spectroscopy of the very neutron-deficient ^{189}Bi .
Proceeding of the International Conference on Proton Emitting Nuclei and related topics (PROCON07), Lisbonne, 17-27 June 2007.
AIP Conference Proceedings 961 (2007) 196.
- A. Gillibert, N. Alamanos, M. Alvarez, F. Auger, D. Beaumel, E. Becheva, Y. Blumenfeld, R. Dayras, F. Delaunay, A. Drouart, G. de France, L. Giot, B. Jurado, N. Keeley, K.W. Kemper, V. Lapoux, W. Mittig, X. Mougeot, L. Nalpas, A. Obertelli, N. Patronis, A. Pakou, E.C. Pollacco, R. Raabe, P. Roussel-Chomaz, S. Stepantsov, **Ch. Theisen** and R. Wolski.
Structure of exotic nuclei from direct reactions.
Proceedings of the Ninth International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2006), Rio de Janeiro, Brazil.

Nucl. Phys. A787 (2007) 423c.

- A. Gillibert, A. Obertelli, N. Alamanos, M. Alvarez, F. Auger, R. Dayras, A. Drouart, G. de France, B. Jurado, N. Keeley, V. Lapoux, W. Mittig, X. Mougeot, L. Nalpas, A. Pakou, N. Patronis, E. Pollacco, F. Rejmund, M. Rejmund, P. Roussel-Chomaz, H. Savajols, F. Skaza and **Ch. Theisen**.
Study of N = 16 for Ne isotopes.
Proceedings of The Seventh International Conference on Radioactive Nuclear Beams (RNB7), Cortina d'Ampezzo, 2-7 July 2007.
Eur. Phys. J. Special Topics 150 (2007) 161.

- A. Gorgen, E. Clement, W. Korten, E. Bouchez, A. Chatillon, A. Hurstel, Y. Le Coz, **Ch. Theisen**, J.N. Wilson, M. Zielinska, C. Andreoiu, F. Becker, P. Butler, J.M. Casandjian, W.N. Catford, T. Czosnyka, G. de France, J. Gerl, R.-D. Herzberg, J. Iwanicki, D.G. Jenkins, G.D. Jones, P.J. Napiorkowski, G. Sletten and C. Timis.
Shape coexistence in ^{74}Kr and ^{76}Kr .
Proceedings of The Seventh International Conference on Radioactive Nuclear Beams (RNB7), Cortina d'Ampezzo, 2-7 July 2007.
Eur. Phys. J. Special Topics 150 (2007) 117.

- Ch. Stodel, N. Amar, R. Anne, G. Auger, B. Bouriquet, J.-M. Casandjian, A. Chatillon, R. Cee, E. Clement, R. Dayras, O. Dorvaux, A. Drouart, G. de France, F. De Oliveira Santos, R. de Turreil, S. Grevy, F. Hannachi, F. Hannappe, K. Hauschild, F.P. Hessberger, S. Hofmann, A. Korichi, R. Lichtenhaler, K. Lojek, A. Lopez-Martens, A. Peghaire, J. Peter, M.-G. Saint-Laurent, Z. Sosin, L. Stuttge, **Ch. Theisen**, A.C.C. Villari, J.-P. Wieleczko, and A. Wieloch.
A review on SHE research at GANIL.
Tours Symposium On Nuclear Physics VI, February 26, 2007.
AIP Conference Proceedings 891 (2007) 55.

- **Ch. Theisen** on behalf of the JUROGAM, GREAT and E375 Collaborations.
Spectroscopy of proton-odd transfermium nuclei.
XXXI Zakopane conference on nuclear physics "Tends in nuclear physics". September 4-10, 2006. Zakopane (Poland).
Acta Phys. Pol. B38 (2007) 1525.

- A.V. Yeremin, A.V. Belozerov, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, V.A. Gorshkov, A.P. Kabachenko, O.N. Malyshev, Yu.Ts. Oganessian, A.G. Popeko, A.V. Shutov, A.I. Svirikhin, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, Ch. Briancon, A. Korichi, D. Curien, O. Dorvaux, B. Gall, F. Khalfallah, M. Rousseau, N. Rowley, M. Guttormsen, S. Siem, A.C. Sunde, N. Syed, F. Hanappe, A. Minkova, S. Sharo, M. Venhart, and **Ch. Theisen**.
Gamma and electron spectroscopy of heavy nuclei at FLNR JINR.
International Symposium On Exotic Nuclei Khanty-Mansiysk, Russia, 17-22 July 2006.
AIP Conference Proceedings 912 (2007) 119.

- O. Dorvaux, A. Lopez-Martens, K. Hauschild, A.V. Yeremin, A. Khouaja, A.V. Belozerov, Ch. Brianon, M.L. Chelnokov, V.I. Chepigin, D. Curien, P. Desesquelles, B. Gall, V.A. Gorsh-

kov, M. Guttormsen, F. Hanappe, A.P. Kabachenko, F. Khalfallah, A. Korichi, A.C. Larsen, O.N. Malyshev, A. Minkova, Yu.Ts. Oganessian, A.G. Popeko, M. Rousseau, N. Rowley, R.N. Sagaidak, S. Sharo, A.V. Shutov, S. Siem, V.I.L. Stuttgé, A. I. Svirikhin, N.U.H. Syed, and **Ch. Theisen**.

Spectroscopy of heavy elements at Dubna.

Proceedings of Frontiers in nuclear structure, astrophysics, and reactions: Finustar 2, Crete (Greece), 10-14 September 2007.

AIP Conference Proceedings 1012 (2008) 64.

- M. Gélín, P. Roussel-Chomaz, W. Mittig, G. Mukherjee, H. Savajols, D. Baiborodine, S. Bhattacharya, M. Caamano, G. De France, A. Gillibert, S. Lukyanov, V. Maslov, A. Navin, A. Obertelli, Yu.E. Penionzhkevich, M. Rejmund, **Ch. Theisen**.

Revisiting the island of inversion: region ^{32}Mg and ^{34}Si .

INPC 2007 - Proceedings of the 23rd International Nuclear Physics Conference, Volume II. Nucl. Phys. A805 (2008) 368.

- P.T. Greenlees, R.-D. Herzberg, S. Ketelhut, D. Ackermann, P.A. Butler, A. Chatillon, S. Eeckhaudt, B.J.P. Gall, T. Grahn, C. Gray-Jones, A. Görgen, F.P. Hessberger, U. Jakobsson, G.D. Jones, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, T.-L. Khoo, W. Korten, M. Leino, S. Moon, M. Nyman, J. Pakarinen, P. Papadakis, P. Peura, P. Rahkila, M. Richer, D. Rostron, C. Santos, J. Sarén, C. Scholey, J. Sorri, S.K. Tandel, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, and M. Venhart.

Spectroscopy of Very Heavy Elements.

Proceedings of Frontiers in nuclear structure, astrophysics, and reactions: Finustar 2, Crete (Greece), 10-14 September 2007.

AIP Conference Proceedings 1012 (2008) 56.

- B. Jurado, G. Kessedjian, M. Aiche, G. Barreau, A. Bidaud, S. Czajkowski, D. Dassié, B. Haas, L. Mathieu, B. Osmanov, L. Audouin, N. Capellán, L. Tassan-Got, J.N. Wilson, E. Berthoumieux, F. Gunsing, **Ch. Theisen**, O. Serot, E. Bauge, I. Ahmad, J. P. Greene and R. V. F. Janssens.

Fission Cross Sections and Fission-Fragment Mass Yields via the Surrogate Reaction Method.

Proceedings of the 2007 International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics - CNR 2007.*

AIP Conference Proceedings 1005 (2008) 90.

- B. Jurado, G. Kessedjian, M. Aiche, G. Barreau, A. Bidaud, S. Czajkowski, D. Dassié, B. Haas, L. Mathieu, B. Osmanov, L. Audouin, N. Capellán, L. Tassan-Got, J.N. Wilson, E. Berthoumieux, F. Gunsing, **Ch. Theisen**, O. Serot, E. Bauge, I. Ahmad, J.P. Greene, and R.V.F. Janssens.

Determination of minor-actinides fission cross sections by means of the surrogate reaction method.

International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007, April 22-27, 2007, Nice, France, Published by EDP Science (2008), Vol 1, p331.

- B. Jurado, G. Kessedjian, M. Aiche, G. Barreau, A. Bidaud, S. Czajkowski, D. Dassié,

B. Haas, L. Mathieu, B. Osmanov, L. Audouin, N. Capellán, L. Tassan-Got, J.N. Wilson, E. Berthoumieux, F. Gunsing, **Ch. Theisen**, E. Bauge, O. Serot, I. Ahmad, J.P. Greene, and R.V.F. Janssens.

Minor-actinides fission cross-sections and fission fragment mass yields via the surrogate reaction technique.

Seminar on Fission: Corsendonk Priory, Belgium, 18-21 September 2007. World Scientific Publishing (2008), p47.

- S. Ketelhut, P.T. Greenlees, A. Chatillon, E. Bouchez, P. A. Butler, E. Clément, O. Dorvaux, S. Eeckhoudt, B.J.P. Gall, A. Görgen, T. Grahn, R.-D. Herzberg, F. Hessberger, A. Hürstel, P. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kettunen, F. Khalfallah, W. Korten, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, S. Moon, P. Nieminen, M. Nyman, J. Pakarinen, J. Perkowski, P. Rahkila, M. Rousseau, J. Sarén, C. Scholey, **Ch. Theisen**, J. Uusitalo, J.N. Wilson, P. Bonche and P.-H. Heenen.

Spectroscopy of odd-proton nuclei in the region of ^{254}No .

Proceedings of Frontiers in nuclear structure, astrophysics, and reactions: Finustar 2, Crete (Greece), 10-14 September 2007.

AIP Conference Proceedings 1012 (2008) 368.

- M. Zielińska, A. Görgen, A. Bürger, W. Catford, E. Clément, C. Dossat, J. Iwanicki, W. Korten, J. Ljungvall, P.J. Napiorkowski, D. Pietak, G. Sletten, J. Srebrny, **Ch. Theisen**, K. Wrzosek.

Coulomb excitation of neutron-rich ^{44}Ar at Spiral.

XXX Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland, September 2-9, 2007.

Acta Phys. Pol. B39 (2008) 519.

- R.-D. Herzberg, S. Moon, S. Eeckhoudt, P.T. Greenlees, P.A. Butler, T. Page, A.V. Afanasjev, N. Amzal, J.E. Bastin, F. Becker, M. Bender, B. Bruyneel, J.F.C. Cocks, I.G. Darby, O. Dorvaux, K. Eskola, J. Gerl, T. Grahn, C. Gray-Jones, N.J. Hammond, K. Hauschild, P.-H. Heenen, K. Heljarutta, A. Herzberg, F. Hessberger, M. Houry, A. Hürstel, R.D. Humphreys, G.D. Jones, P.M. Jones, R. Julin, S. Juutinen, H. Kankanpää, H. Kettunen, T.L. Khoo, W. Korten, P. Kuusiniemi, Y. Le Coz, M. Leino, A.-P. Leppänen, C.J. Lister, R. Lucas, M. Muikku, P. Nieminen, M. Nyman, R.D. Page, T. Page, J. Pakarinen, A. Pritchard, P. Rahkila, P. Reiter, M. Sandzelius, J. Saren, Ch. Schlegel, C. Scholey, **Ch. Theisen**, W.H. Trzaska, J. Uusitalo, A. Wiens, H.J. Wollersheim.

Structure of rotational bands in ^{253}No .

Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses. September 7-13, 2008, Ryn, Poland.

Eur. Phys. J. A, Sous presse.

- D. Mücher, J. Iwanicki, J. Jolie, I. Stefanescu, J. Van de Walle, F. Becker, U. Bergmann, A. Blazhev, E. Bouchez, P. Butler, J. Cederkäll, T. Czosnyka, T. Davinson, J. Eberth, T. Faestermann, S. Franchoo, C. Fransen, J. Gerl, R. Gernhäuser, D. Habs, R.-D. Herzberg, M. Huyse, D. Jenkins, G. Jones, O. Kester, W. Korten, J. Kownacki, T. Kröll, R. Krücken, Z. Liu, S. Mandal, P. Napiorkowski, T. Nilsson, N. Pietralla, G. Rainovski, H. Scheit, A. Scherillo, D. Schwalm, T. Sieber, **Ch. Theisen**, P. Van Duppen, N. Warr, D. Weisshaar, F. Wenander, B. Wolf, P. Woods and M. Zielinska.

Shell Structure and Shape Changes in Neutron Rich Krypton Isotopes.

CAPTURE GAMMA-RAY SPECTROSCOPY AND RELATED TOPICS: Proceedings of the 13th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics. Cologne (Germany), 25-29 August 2008.

AIP Conference Proceedings 1090 (2009) 587.

- S. Franchoo, N.L. Achouri, A. Algora, A. Al-Khatib, J.-C. Angélique, F. Azaiez, D. Baborodin, B. Bastin, D. Beaumel, M. Belleguic, G. Benzoni, Y. Blumenfeld, C. Borcea, R. Borcea, C. Bourgeois, P. Bringel, B.A. Brown, A. Bürger, A. Buta, R. Chapman, E. Clément, J.-C. Dalouzy, Z. Dlouhy, Z. Dombradi, A. Drouart, Z. Elekes, C. Engelhardt, S. Fortier, Z. Fülöp, L. Gaudefroy, M. Gélin, J. Gibelin, A. Görgen, S. Grévy, D. Guillemaud-Mueller, F. Hammache, H. Hübel, S. Iacob, F. Ibrahim, K. Kemper, A. Kerek, W. Korten, A. Krasznahorkay, K.-L. Kratz, B. Laurent, M. Lazar, D. Lebhertz, M. Lewitowicz, X. Liang, E. Liénard, S. Lukyanov, S. Mandal, C. Monrozeau, J. Mrazek, L. Nalpas, A. Navin, F. Negoita, F. Nowacki, N. Orr, A. Ostrowski, T. Otsuka, D. Pantelica, Y. Penionzhkevich, J. Piekarewicz, Z. Podolyak, E. Pollacco, F. Pougheon, A. Poves, F. Rotaru, P. Roussel-Chomaz, E. Rich, J.-A. Scarpaci, M.-G. Saint-Laurent, H. Savajols, G. Sletten, D. Soehler, O. Sorlin, M. Stanoiu, I. Stefan, T. Suzuki, **Ch. Theisen**, J. Timar, C. Timis, E. Tryggestad, D. Verney, S. Williams, A. Yamamoto.

Recent results from GANIL.

Zakopane Conference on Nuclear Physics, September 1-7, 2008, Zakopane, Poland.

Acta Phys. Pol. B40 (2009) 419.