



Physique des noyaux très exotiques

Very exotic nuclei physics

R. BÉRAUD, R. BOUVIER^(α), G. CANCEL, E. CHABANAT, L. DUCROUX, A. EMSALLEM, N. REDON et collaborateurs.

Service IPN-Lyon: ^(α) soutien aux expériences

Section 1 et 2, Collaboration: IPN-Lyon, Acc. Lab. Univ. Jyväskylä

Section 3, Collaboration: IPN-Lyon, IFD Varsovie, GANIL Caën, IAP Bucarest, GSI Darmstadt, IPN Orsay, CEN Bruyères-le-Châtel, Univ. Göttingen, IKS Louvain.

Section 4, Collaboration: IPN-Lyon, ISN-Grenoble, ILL et Univ. Batna.

Our studies have been devoted to the nuclear structure of nuclei far off the valley of β -stability. For the neutron deficient side, we have installed our ion guide on-line with the K=130 cyclotron at Jyväskylä and carried out successful experiments on light rare-earth elements. At Ganil, we have discovered a new island of " μ s isomers" around $Z=28$ and $N=40$ among the products of quasifragmentation of a 60.3 A.MeV ^{86}Kr beam by using a novel IL- γ correlation technique.

1 - Amélioration du Guide d'ions

La technique dite "IGISOL" consistant à coupler un guide d'ions avec un séparateur d'isotopes en ligne sur un accélérateur a permis des percées remarquables dans l'étude des noyaux exotiques (voir [1] pour une vue d'ensemble des développements et de l'état actuel de la technique). Depuis le début des années 90, nous avons, dans le cadre d'une collaboration IPN Lyon-ISN Grenoble-JINR Dubna, conçu et développé à SARA une chambre de recul adaptée aux réactions de fusion-évaporation induites par ions lourds (I.L.) [2].

Une série d'expériences réalisées à Grenoble en bombardant des cibles de $^{92,94}\text{Mo}$ avec des projectiles de ^{40}Ca ($\simeq 5$ MeV/u) a permis de mesurer de nouvelles périodes et d'étudier les désintégrations β des noyaux très déficitaires en neutrons de la région des terres rares légères ($^{127,129}\text{Ce}$, ^{129}Nd) [3].

Au début de l'année 96, nous avons implanté notre système au Laboratoire de l'Accélérateur de l'Université de Jyväskylä (Finlande). Une nouvelle chambre a été conçue et réalisée au service mécanique de l'IPNL pour satisfaire aux contraintes techniques de la ligne de faisceau dite "IGISOL" du cyclotron à I.L. (K=130) de Jyväskylä.

La première expérience, en Novembre 96, avait pour objectif principal l'optimisation des paramètres du système guide d'ions+séparateur avec un nouvel ensemble de pompage ($\simeq 3000$ m³/h au lieu de $\simeq 5000$ m³/h) et un aimant de 55 degré à champ uniforme (au lieu d'un aimant 120 degré à indice $n=1/2$ à SARA).

L'efficacité globale de séparation a été déterminée

en mesurant l'activité α du ^{150}Dy de période 7.2 min, produite par bombardement d'une cible de ^{116}Cd enrichie à 93.3% avec un faisceau de $^{40}\text{Ar}^{8+}$ à 190 MeV, comme cela avait été fait antérieurement à SARA [2]. Compte-tenu de l'énergie de recul élevée des produits de réaction ($E_R^{max}=47$ MeV), les premiers tests ont été focalisés sur les performances en fonction de la pression d'hélium.

L'efficacité maximale ainsi obtenue à une pression d'hélium de 500 mbar est $\simeq 0.5\%$ (c'est-à-dire 3.5 fois supérieure à celle obtenue à SARA). Dans ces conditions, le pouvoir de résolution en masse du système couplé $(M/\Delta M)_{1/2}$ était de 250 environ pour les ions $^{129}\text{Xe}^+$ accélérés à 40 keV. On constate une dépendance linéaire du rendement en fonction de l'intensité du faisceau primaire dans le domaine (0.36-3.1) 10^{11} pps et prouve ainsi que la méthode "shadow" est bien adaptée aux faisceaux intenses d'I.L.

Les taux de production obtenus pour des noyaux très déficitaires en neutrons de masse $A=120-126$ en utilisant les réactions $^{92,94}\text{Mo} + ^{36}\text{Ar}$ à 175 et 190 MeV sont rapportés dans la référence [4]. Ils sont de l'ordre de 1 à 100 at/s, ce qui est suffisant pour entreprendre l'étude approfondie des noyaux de cette région. Par ailleurs, une expérience exploratoire (en collaboration avec NPI S^t Petersburg et Univ. Varsovie) a montré que notre technique peut être appliquée à l'étude des noyaux d'éléments très réfractaires (e.g. Zr, Nb, Mo) autour de $A=80$. L'investigation des propriétés spécifiques de ces noyaux, situés le long de la ligne $N=Z$, est soutenue par quelques problèmes fondamentaux des

plus actuels, tels que l'appariement p-n par exemple.

2 - Nouvel isomère de 400 ms dans la chaîne A=125

Les noyaux de cette région dite de transition présentent une déformation triaxiale et deviennent de plus en plus déformés à l'approche de la ligne d'émission spontanée de protons ($B_p=0$). Dans les noyaux à Z impair, la présence de l'orbitale $\pi(h_{11/2})$ donne naissance à des bandes collectives, construites sur un état isomérique $11/2^-$, bien étudiées par spectroscopie "in beam". En revanche, les bas de schémas sont généralement mal connus au point que l'énergie d'excitation des bandes est très souvent indéterminée. L'étude par désintégration β^+/EC permet souvent de combler ces lacunes en identifiant des transitions connectant le niveau fondamental avec le(s) niveau(x) isomérique(s) et d'autres niveaux de parité positive ou négative.

Avec le système décrit précédemment, nous avons produit par réaction $^{94}\text{Mo} + ^{36}\text{Ar}$ (175 MeV, $6 \cdot 10^{11}$ pps) des isotopes de Pr, Ce et La très déficients en neutrons. L'activité séparée en masse ($A=125$) a été implantée à 40 keV dans une bande de transport dont le mouvement était synchronisé avec la pulsation du séparateur ($T_{ON} = T_{OFF} = 10$ s). Les détecteurs ont été placés à la station d'implantation pour mesurer la croissance et la décroissance de l'activité. Deux détecteurs Ge-HP, un coaxial de 37.5% et un planaire ($1000 \text{ mm}^2 \times 10 \text{ mm}$) ont été utilisés en géométrie compacte pour mesurer les coïncidences $\gamma - \gamma-t$, $\gamma-X-t$, et les spectres directs $\gamma-T$ et $X-T$ codés grâce au système d'acquisition VENLA [5]. La figure 1 montre nettement une composante rapide dans la courbe croissance-décroissance de la raie K_α -La. La composante longue donne une période (10.5 ± 0.5) s en bon accord avec les résultats antérieurs concernant la désintégration $^{125}\text{Ce} \rightarrow ^{125}\text{La}$. Il est alors possible d'extraire une période $T_{1/2} = (0.4 \pm 0.2)$ s pour le niveau isomérique vraisemblablement situé dans ^{125}La [6]. Ce résultat montre l'aptitude de notre système à réaliser une séparation isotopique rapide (quelques ms) de noyaux radioactifs d'éléments très réfractaires réputés difficiles à obtenir voire inaccessibles avec les sources d'ions classiques.

La raie γ de 107 keV qui n'apparaît pas dans le spectre de coïncidence X- γ est un candidat possible pour une transition E3 désexcitant ce niveau ($T_{1/2}^W = 0.37$ s). Des mesures complémentaires d'électrons de conversion interne et de coïncidences $e^- - \gamma-t$ en particulier ont été réalisées fin 97; elles sont en cours de dépouillement et devraient permettre de clarifier entre autres, le schéma de niveau de ^{125}La dans une large fenêtre en énergie ($Q_{EC} \simeq 7.3$ MeV).

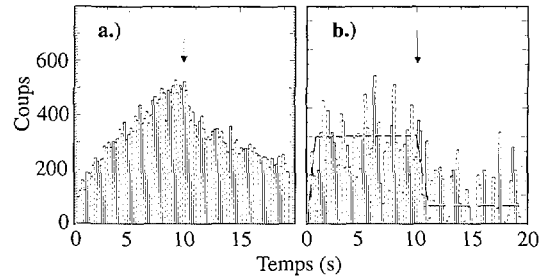


Figure 1: Courbes activation-décroissance mesurées avec pulsation ($T_{ON}=T_{OFF}=10$ s) du faisceau séparé en masse ($A=125$): K_α -La (a) et γ -107 keV (b).

3 - Nouvel îlot d'isomères autour de Z=28, N=40

La fragmentation des projectiles (I.L.) aux énergies intermédiaires et les techniques de séparation cinématique associées ont permis de faire des avancées remarquables dans le domaine des noyaux exotiques. Au GANIL, par fragmentation d'un faisceau de ^{86}Kr d'énergie 60.3 A.MeV sur une cible de Ni naturel d'épaisseur 100 μm , nous avons produit des noyaux riches en neutrons près des couches fermées Z=28 et N=40. Grâce à la technique de corrélation fragment- γ décrite dans [7], il a été possible de mettre en évidence un nouvel îlot d'isomérisme dans cette région de la carte (N,Z) [8].

La sélection des noyaux désirés est d'abord obtenue grâce à une analyse magnétique effectuée par le spectromètre LISE 3 [9]. L'introduction d'un dégradeur entre les deux dipôles permet de réduire les noyaux contaminants par la sélection supplémentaire en perte d'énergie (en A^3/Z^2). Les noyaux ainsi triés sont implantés au point focal final dans un télescope composé de 4 détecteurs Si (300, 500, 500 et 500 μm) entouré par un ensemble de 5 détecteurs Ge (HPGe) dont l'efficacité absolue γ globale est d'environ 5% à 1 MeV.

Le temps de vol (TOF) par rapport à la HF du cyclotron était mesuré entre la cible et le premier détecteur du télescope. Ainsi, la base de vol étant de 118m, elle correspondait à des valeurs de TOF typiquement autour de 1.2 μs . Avec des modules convertisseur temps-amplitude réglés sur une gamme de 100 μs pour chaque détecteur γ , il a été possible de mesurer le retard entre l'implantation de l'ion lourd radioactif et l'émission du(des) γ isomérique(s). L'identification en masse (A), numéro atomique (Z) et état de charge (q) de chaque I.L. a été réalisée par la technique standard TOF- $\Delta E-E$ [10] et permet de constituer une matrice d'identification. La méthode de R. Grywacz et al. [7] permet alors grâce à une représentation bidimensionnelle $\gamma-A/Z$ de révéler immédiatement la présence d'isomères μs . Au

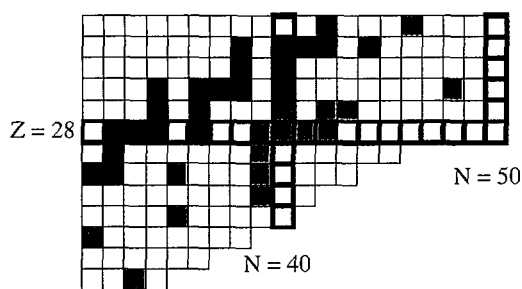


Figure 2: Région de la carte des noyaux avec les isomères observés (en vert) et les noyaux stables (en noir).

cours de cette expérience, 16 nouveaux états isomériques de périodes allant de 200 ns à 100 μ s ont été identifiés (figure 2) autour de $Z=28$, $N=40$. Pour chacun d'entre eux, un schéma de décroissance comportant l'énergie d'excitation, la période avec attribution de spin, parité et multipolarité pour la transition isomérique ont été proposés [7].

L'existence d'états isomériques au voisinage des couches fermées a renforcé la validité du modèle en couches et tout particulièrement l'existence du terme de couplage spin-orbite. Pour les noyaux $N=39$, $Z=28, 27, 26$ et 25, l'origine de l'isomérisme peut être reliée à l'excitation du neutron célibataire de l'orbitale $p_{1/2}$ vers l'orbitale $g_{9/2}$ donnant ainsi lieu à une grande différence de spin, on peut parler ici "d'isomères de particule unique".

L'identification du ^{70m}Ni , de période $T_{1/2} = (210 \pm 50)$ ns, est un résultat essentiel pour la compréhension de la structure des "isomères de séniorité" 8^+ , formés par le couplage de deux particules identiques $(g_{9/2})^2$ et se désexcitant par quatre transitions E2 connectant les états 8^+ , 6^+ , 4^+ , 2^+ et 0^+ . L'observation du ^{70m}Ni donne non seulement la position du niveau 2^+ (1259 keV) mais devrait permettre aussi de tester l'interaction effective $\nu g_{9/2} - \nu g_{9/2}$. L'abaissement de ce niveau 2^+ du $^{70}\text{Ni}_{42}$ par rapport à celui du $^{68}\text{Ni}_{40}$ (2033 keV) signe la fermeture de la sous-couche $N=40$ prédite par divers modèles [11].

Ces résultats sur les noyaux riches en neutrons $Z \simeq 28$, $40 < N < 50$ ont permis de montrer la validité du concept "valence mirror" puisque l'échange des neutrons par les protons donne aussi lieu à un îlot d'isomérisme dans le cas des noyaux autour de $N = 50$, $40 \leq Z < 50$.

4 - Mesure d'électrons de conversion sur Lohengrin, ILL

Les informations sur les états excités des noyaux riches en neutrons présentent actuellement un intérêt scientifique considérable: fermeture de couches, persistance des propriétés de magicité loin de la vallée de stabilité, implications astrophysiques. Ces noyaux restent difficiles à atteindre, mais une dizaine d'entre eux ont été identifiés ces derniers mois par nos collaborateurs (ISN-ILL). L'obtention d'une AP (en 1997) va nous permettre d'équiper la station de comptage d'un détecteur d'électrons Si(Li) de grande surface. Enfin ce projet a permis à une jeune équipe de chercheurs algériens de se structurer en vue de participer aux expériences prochaines grâce à un accord de collaboration franco-algérien CNRS/DRS.

Remerciements: les travaux de recherche correspondants aux paragraphes 1 et 2 ont été réalisés grâce au soutien de "Access to Large Scale Facility program under the Training and Mobility of Reserachers program of the European Union".

Bibliographie

- [1] P. Dendooven et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.*, B126 (1997) 182.
- [2] R. Béraud et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.*, A346 (1994) 196.
- [3] A. Gizon et al., *Z. Phys.*, A358 (1997) 369 et *Z. Phys.*, A359 (1997) 11.
- [4] P. Dendooven et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.* à venir.
- [5] K.T. Loberg et al., *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 42 (1995) 17.
- [6] R. Béraud et al., *Int. Symp. on Exotic Nuclear Shapes*, Debrecen (Hongrie), 12-17 Mai 1997; à paraître dans *Heavy Ion Physics*.
- [7] R. Grzywacz et al., *Phys. Lett.*, B355 (1995) 439 et *Phys. Rev.*, C55 (1997) 1126.
- [8] R. Grzywacz et al., soumis à *Phys. Rev. Lett.*
- [9] R. Anne et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.*, B70 (1992) 276.
- [10] D. Bazin et al., *Nucl. Phys.*, A515 (1990) 349.
- [11] E. Chabanat et al., *Nucl. Phys.*, A627 (1997) 710 et à paraître dans *Nucl. Phys. A*.