



HAL
open science

Les noyaux exotiques

J.-P. Dufour

► **To cite this version:**

J.-P. Dufour. Les noyaux exotiques. École thématique. Ecole Joliot Curie "La physique nucléaire du laboratoire aux étoiles", Maubuisson, (France), du 10-15 septembre 1990: 9ème session, 1990. cel-00647512

HAL Id: cel-00647512

<https://cel.hal.science/cel-00647512>

Submitted on 2 Dec 2011

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

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

LES NOYAUX EXOTIQUES

J.P. DUFOUR

CENBG - Le Haut-Vigneau, 33175 Gradignan cedex

Résumé

Les noyaux loin de la stabilité, avec des nombres de neutrons et protons très différents de ceux des noyaux stables, révèlent une très grande diversité d'organisations nucléaires. La découverte continuelle de nouveaux noyaux ou de nouvelles propriétés permet de tester le caractère prédictif des modèles qui ont montré des qualités descriptives. Les propriétés mesurées expérimentalement vont de la simple existence à des spectroscopies fines. Une grande variété de mécanismes de réactions nucléaires et de techniques expérimentales sont utilisées pour atteindre pour chaque type de mesure les meilleures performances. Les développements récents portent sur la séparation des fragments de projectiles, les mesures de masse, la mise en évidence de nouvelles radioactivités et l'étude par leurs réactions nucléaires secondaires de noyaux aux limites de liaison.

Abstract

Nuclei far from stability, having neutron and proton numbers very different from that of stable nuclei, display a large variety of nuclear structure. The continuous discovery of new nuclei or new properties allows to test the predictive power of models selected on descriptive performance. The experimental properties of interest for such comparisons range from bare isotope existence to fine detailed spectroscopy. Many different associations of reaction mechanism and experimental techniques have been used to bring each type of measurement to its best performances. Recent results bear on projectile fragments isotopic separation, mass measurements, new radioactive decay modes and study through their secondary nuclear reactions of nuclei at the limit of binding.

Introduction

La radioactivité d'abord découverte dans la nature (1895) puis créée artificiellement (1934), a été le premier phénomène permettant de mettre au jour les propriétés du noyau atomique. La nature complexe des différentes formes de radioactivité ne fut appréhendée que progressivement en impliquant des bouleversements importants dans notre perception des interactions fondamentales comme par exemple : le caractère aléatoire de la radioactivité qui orienta fortement l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique, l'émission d'un électron ou d'un positron par un noyau qui n'en contient pas ainsi que la nécessaire existence du neutrino accompagnant cette émission pour préserver la conservation de l'énergie, le rôle ambigu joué par les sous-structures, comme la particule alpha, qui peut être éjectée du noyau, et qui pourtant ne jouent pas de rôle explicite dans les modèles classiques (goutte liquide, modèle en couches) mais marquent de leur présence non seulement la radioactivité mais aussi les collisions nucléaires et la désexcitation des noyaux chauds. La dernière page de la démarche analytique, celle qui veut d'abord dégager les constituants, a certainement été tournée avec la découverte en 1984 des bosons intermédiaires W^\pm et Z_0 , dont la masse avait d'ailleurs été estimée expérimentalement [1] à partir des données de radioactivité dès les années 70.

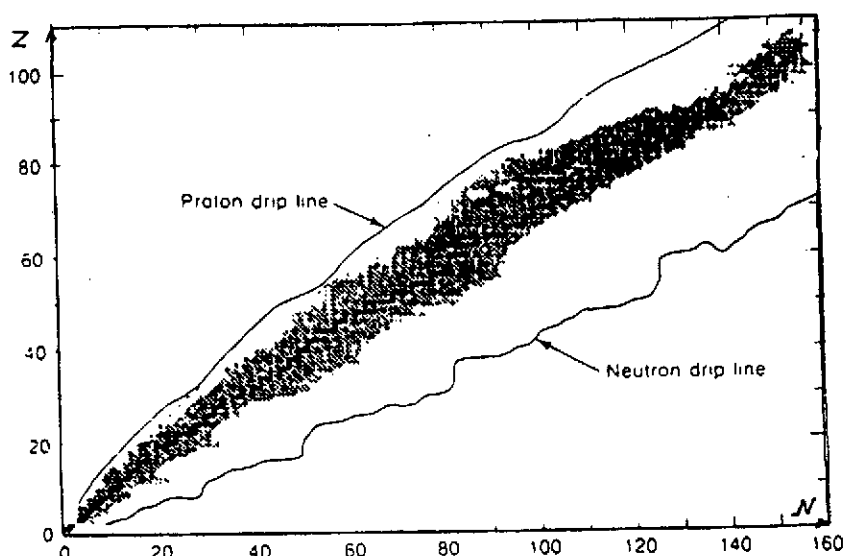


Figure 1: Carte des isotopes dans le plan (N, Z).

La tendance actuelle des recherches est donc indirectement moins tournée vers le "découpage" en constituants et davantage vers la compréhension de "l'auto-organisation" du noyau. Au contraire de la structure atomique définie par le potentiel central à symétrie sphérique (aux corrections fines près liées à la dimension du noyau) la structure nucléaire "auto-définit" le puits de potentiel et les fonctions d'ondes individuelles en dépendance mutuelle (sujet du cours de P. Quentin de cette école). Le problème posé n'a pas de solution formelle complète à l'heure actuelle et la qualité des modèles théoriques et des approximations qui les sous-tendent, ne peut être estimée que par comparaison avec les possibilités observées expérimentalement sur l'ensemble des noyaux connus. Les 2500 noyaux connus (fig. 1) en 1990 constituent une base de comparaison déjà importante et on peut se demander ce qu'apporterait d'en connaître mille ou deux mille de plus. La justification d'une recherche de nouveaux isotopes, dits "exotiques" car ayant des proportions de neutrons et de protons très différentes de celles des noyaux stables, comporte essentiellement deux volets : d'une part sur un plan systématique les modèles théoriques s'ajustent à posteriori aux données connues et ne révèlent souvent leurs faiblesses que par leurs prédictions contrôlées plus tard par l'observation, d'autre part certaines régions de N et Z présentent des propriétés élémentaires spécifiques, par exemple des noyaux doublement magiques comme ^{100}Sn et ^{78}Ni (encore non observés) ou émetteurs de protons (^{113}Cs , ^{151}Lu etc...) ou très déformés ($N \approx Z \approx 40$) ou "mous" (terres rares déficitaires en neutrons)...., qui n'existent qu'en nombre très limité (cinq noyaux doublement magiques connus au dessus de ^{16}O) voire à l'état d'exemplaire unique (transition de forme sur une couche magique : $N=20$, $Z \approx 10-11-12$). Ces régions ponctuelles qui servent de test révélateur amplificateur à des aspects différents des modèles nucléaires sont très importantes : chaque nouveau "défi" ainsi découvert débouche sur un regain d'activité pour améliorer les modèles qualitativement proches mais quantitativement faibles, et pour éliminer les autres. Ainsi en a-t-il été après la coexistence de forme vue dans les isotopes de mercure déficitaires en neutron, après la percée dans les sodium et plus récemment avec l'observation de halos de neutrons pour les noyaux légers très riches en neutrons.

Les différents aspects de l'étude des noyaux loin de la stabilité sont regroupés dans ce cours de la manière suivante :

1. La frontière de l'existence :
 - a) Le cas des éléments lourds et la prédiction des superlourds.
 - b) Les noyaux légers.L'histoire de cette recherche illustre très bien le processus itératif entre les prédictions par les modèles et les données expérimentales.
2. Les méthodes de production et séparation.
La découverte d'un nouvel isotope est nécessairement basée sur une amélioration de la production et/ou de la séparation, lesquelles reposent sur l'association : accélérateur-mécanisme de réaction nucléaire-séparateur.
3. Les propriétés de l'état fondamental : masses-rayons-formes.
Les résultats les plus récents seront mentionnés
4. Les propriétés de radioactivité.
De nouveaux modes de radioactivité ont été récemment découverts. D'autres sont actuellement recherchés.
5. Les études avec des faisceaux secondaires.
La possibilité d'utiliser des faisceaux d'isotopes loin de la stabilité ouvre de nouvelles possibilités pour étudier la structure de ces noyaux.

1 - La frontière de l'existence

a) Le cas des éléments lourds et superlourds

A la fin des années 60 une approche semi-empirique, dite de "Strutinsky", combinant le modèle de la goutte liquide (pour donner des valeurs de masses moyennes) et les calculs microscopiques de modèle en couches (pour établir des corrections quantiques) permit de prédire l'existence d'une nouvelle région de stabilité relative près de $Z=112$, $N=184$. Ces noyaux séparés de la région des transuraniens par une zone d'instabilité (durées de vies inférieures à $\approx 10^{-9}$ s) furent appelés superlourds (fig. 2). Une intense activité expérimentale suivit cette prédiction. Les essais de fusion nucléaire entre ions lourds (par ex : ${}^{86}_{36}\text{Kr} + {}^{187}_{79}\text{Au}$) ne permirent pas l'observation des superlourds mais conduisirent à la découverte d'un phénomène non observé jusque là : les collisions très inélastiques ("deep inelastic") lors desquelles les noyaux refusent de fusionner mais échangent des quantités importantes de nucléons et d'énergie. L'échec d'observation des superlourds, maintenant bien établi (fig. 3), (malgré de nombreuses publications positives infirmées ou non confirmées par la suite!) conduisit à un nouvel effort d'études théoriques sur le processus de fusion et sur les effets de couche prenant en compte la déformation des noyaux. Des expériences [2] permettant à Darmstadt la synthèse des éléments 107-108-109 démontrèrent que la voie d'une "fusion froide", c'est-à-dire formant le noyau composé avec peu d'énergie d'excitation (ne pas confondre avec la fausse "fusion froide" des chimistes), permettait la synthèse de noyaux à courte durée de vie, déficients en neutrons, des éléments lourds. La synthèse de noyaux plus proches de la ligne de stabilité apparaît ainsi clairement plus difficile car étant mieux liés les Q de réaction de fusion sont plus élevés et les noyaux formés plus chauds fissionnent plus facilement dans la désexcitation. De même la disparition du phénomène de fusion a été étudiée en détail : pour un Z final donné les systèmes d'entrée symétriques ($Z_1 \approx Z_2 \approx Z/2$) fusionnent moins bien. Mais ils conduisent aussi à des énergies d'excitation plus basses, d'où un compromis délicat dans la combinaison cible-projectile choisie pour la synthèse des éléments les plus lourds. La recherche de l'élément 110 est actuellement en cours à LBL (Berkeley) - GSI (Darmstadt) et Dubna.

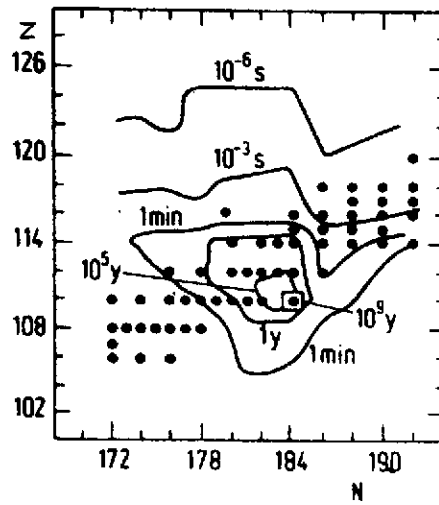


Figure 2: Durées de vies prédites dans la région N=184, Z=112

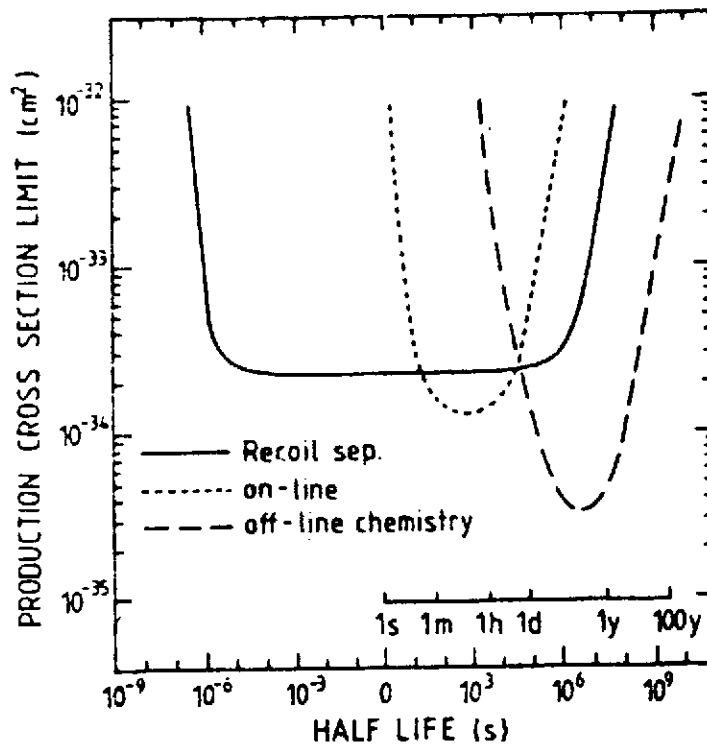


Figure 3: Sections efficaces limites de formation des superlourds obtenues avec différentes techniques

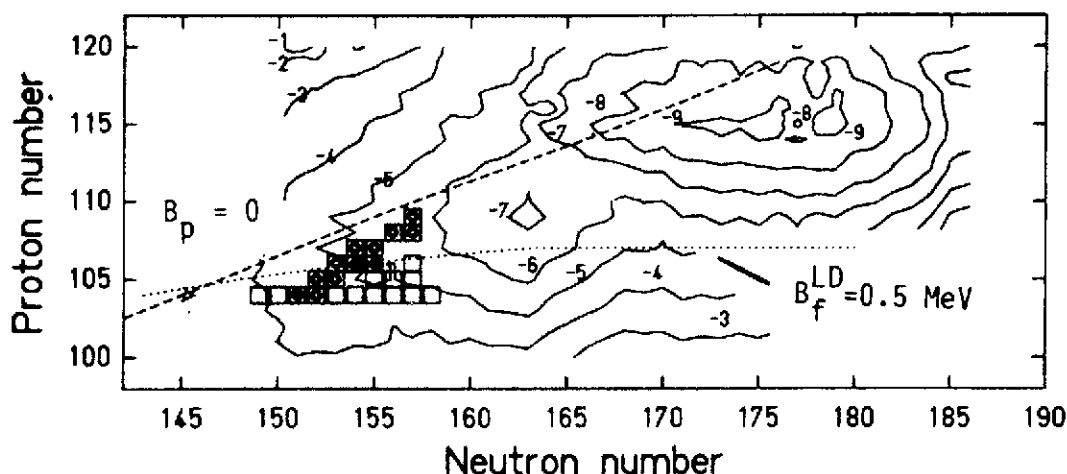


Figure 4: Courbes d'iso-effet de couche" dans le plan N-Z. Les carrés représentent les isotopes des éléments les plus lourds découverts jusqu'ici.

Les calculs les plus récents des corrections de couche dans la région des éléments lourds font ressortir une région vers $Z=110$ qui serait un "épaulement" de stabilité touchant la région des superlourds (fig. 4). Le chemin vers les superlourds, s'ils sont jamais trouvés, passe donc par une progression continue à partir des éléments connus qui permet de déceler les facteurs nouveaux qui ont mis en échec les tentatives pour aller directement en une étape de $Z=104$ à $Z=112-114$.

b) A la limite de l'existence

Dans les noyaux légers les techniques récentes, développées particulièrement à GANIL, ont permis d'atteindre les limites d'existence (en anglais les "drip lines") jusqu'à $Z=22$ pour les noyaux riches en protons et jusqu'à $Z=8$ pour les noyaux riches en neutrons [3]. Comment définit-on la non-existence? La réponse est en grande partie conventionnelle, on dit qu'existent d'une part les noyaux dans lesquels aucun "cluster" (sous-ensemble de nucléons) n'est non lié et d'autre part ceux pour lesquels des clusters sont non liés mais sans que cette valeur excède la barrière de potentiel coulombienne et/ou centrifuge que ces clusters doivent traverser pour pouvoir s'échapper du noyau. Comme cette barrière de potentiel n'est pas directement mesurée la définition d'existence repose en pratique sur celle de la durée de vie qui peut varier de dix ordres de grandeur pour quelques centaines de keV de variation d'énergie de liaison. En dessous de $T_{1/2}=10^{-18}$ s on dit que le noyau AZ n'existe pas même s'il est possible dans les réactions nucléaires d'étudier des résonances basées sur l'assemblage nucléaire transitoire AZ .

En pratique il est difficile de prouver une non-existence. Il est couramment admis que pour un mécanisme de réaction bien compris la systématique des sections efficaces est suffisamment solide pour qu'une non-observation implique la non-existence. Pour les fragments de projectile par exemple, on mesure une décroissance moyenne de section efficace d'un facteur 10 par neutron en plus (du côté riche en neutrons); ceci sert ainsi de base pour estimer que l'absence d'évènement observé avec une dynamique de 100 ou 1000 par rapport au noyau voisin est suffisante pour établir la non-existence. L'existence d'un noyau représente un test sévère pour les prédictions

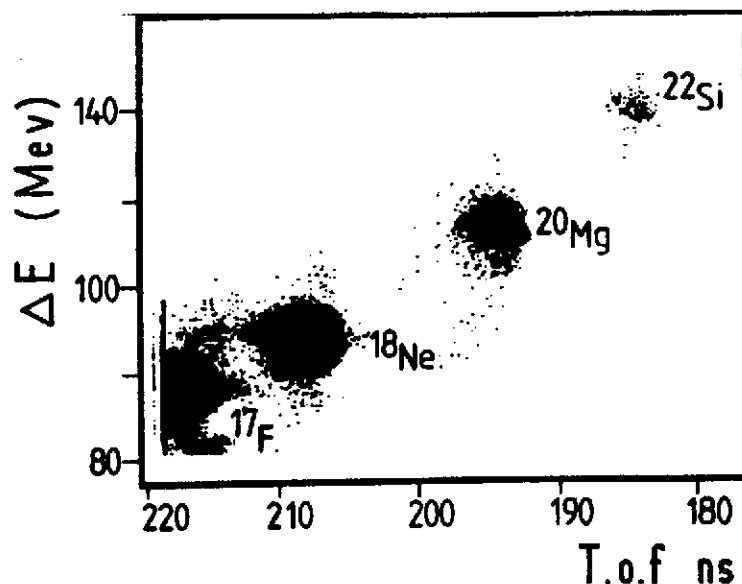


Figure 5: Identification du noyau ^{22}Si (le plus grand excès de proton connu) par perte d'énergie ΔE , sensible à Z^2 , et temps de vol (à $B\rho$ donné : sensibilité en A/Z).

de masses nucléaires. Le noyau ^{22}Si (fig. 5) par exemple a été découvert [4] à GANIL alors que les prédictions théoriques étaient partagées sur son existence. Il est intéressant de savoir qu'on connaît probablement maintenant tous les isotopes radioactifs d'éléments aussi connus que le carbone ou l'oxygène. La "neutron drip line" restera cependant encore longtemps hors d'atteinte pour les éléments plus lourds que le calcium. L "exotisme", au sens de "ce qui est vu pour la première fois", est encore loin de disparaître.

2 - La production et la séparation des noyaux exotiques

Le premier maillon de la chaîne de production est constitué essentiellement par les accélérateurs. Très brièvement on retiendra que l'intensité fournie joue un rôle prépondérant, mais pas unique. Ainsi les machines à proton délivrant des intensités allant jusqu'à 1mA permettent des taux de réactions nucléaires élevés. En comparaison les machines à ions lourds comme GANIL (Caen), SATURNE (Saclay) et GSI (Darmstadt) ont des intensités plus faibles mais permettent en utilisant la cinématique de production des techniques de sélection très performantes. Ceci revient à dire que les comparaisons entre les différents moyens d'étudier des noyaux exotiques doivent se faire en prenant l'ensemble accélérateur-mécanisme de réaction-séparateur, et l'expérience montre qu'il existe de nombreuses combinaisons performantes. Ce cours détaillera essentiellement trois méthodes qui ont permis des percées importantes dans des régions différentes de la carte des isotopes.

a) Les séparateurs de type "ISOL" :

Le terme "ISOL" veut dire "Isotopic Separation On-Line" et est couramment utilisé pour des séparateurs qui associent une source d'ions, une accélération électrostatique (quelques dizaines de kV) et une analyse magnétique. En Europe l'exemple type d'une réalisation de ce genre est ISOLDE implanté au CERN auprès du synchrocyclotron qui délivre des protons de 600 MeV. La partie la plus délicate d'un séparateur ISOL est la source d'ions. En effet, les réactions

nucléaires induites par les protons produisent des milliers d'isotopes ayant toutes les masses possibles jusqu'à la masse de la cible, il convient donc que l'ionisation opérée par la source d'ion soit sélective d'une espèce chimique et si possible d'une seule. La production d'alcalins est ainsi un cas particulièrement favorable d'élément sélectivement ionisable [3].

Les performances globales de ces séparateurs sont donc très variables selon les éléments : les temps de transports peuvent varier de quelques millisecondes à plusieurs minutes et les efficacités d'extraction de quelques dizaines de pourcent à 10^{-4} ou 10^{-5} . Le développement de nouvelles sources d'ions plus universelles utilisant par exemple des lasers travaillant par ionisation résonante, et donc sélective, permettront peut-être de généraliser cette technique à tous les éléments. La performance de ces séparateurs la plus remarquable est le très fort taux de comptage obtenu pour des noyaux moyennement éloignés de la stabilité. Cette caractéristique permet la réalisation d'expériences sophistiquées notamment en mesures de structure hyperfine.

b) Les spectromètres de recul :

On appelle ainsi des systèmes utilisant la cinématique d'une réaction nucléaire qui communique une énergie de recul importante au noyau d'intérêt. La séparation des différents noyaux produits est faite à l'aide de champs électriques et magnétiques[6], voire à l'aide de ralentisseurs gazeux[7]. Les deux mécanismes de réaction qui sont à la base de la plupart des spectromètres de recul sont la fusion ($E_{\text{recul}} \approx 0.1 \text{ MeV}$ à 3 MeV/n) et la fission ($\approx 1 \text{ MeV/n}$). A ces énergies, des tensions électrostatiques de quelques centaines de kilovolts permettent des déflexions suffisamment importantes pour permettre des séparations de bonne qualité. Le schéma du spectromètre SHIP utilisé à GSI (Darmstadt) pour séparer les éléments lourds est montré sur la figure 6. Il s'agit d'un filtre de vitesse (équilibre entre $q\vec{v} \cdot \vec{B}$ et $q\vec{E}$) dont la caractéristique est d'avoir deux étages pour une réjection complète du faisceau, y compris ses possibles diffusions sur les collimateurs. L'efficacité d'un tel ensemble peut atteindre 100% dans le cas d'une fusion complète très froide et décroît pour des fusions donnant lieu à des évaporations de particules qui changent la vitesse du noyau composé. Le temps de transport très court ($\approx 1\mu\text{s}$) est très adapté pour les noyaux très lourds émetteurs alpha ou fission spontanée dont la durée de vie peut varier de dix ordres de grandeur avec quelques nucléons de plus ou moins.

c) Les séparateurs isotopiques de fragments du projectile : la méthode PFIS

Le terme "PFIS" signifie "Projectile Fragments Isotopic Separation"[9]. Dans ce type de spectromètre la cinématique de réaction est inversée par rapport au cas précédent : au lieu de regarder un "quasi-cible" on s'intéresse à un "quasi-projectile" focalisé vers l'avant grâce à l'impulsion initiale, beaucoup plus grande que les variations d'impulsion liées à la réaction nucléaire. L'avantage de cette focalisation est double : i) les fragments de projectiles (F.P.) étant pour l'essentiel contenus dans un cône dont l'axe est à 0° et d'ouverture inférieure à deux ou trois degrés, l'efficacité du système est grande, ii) la vitesse des F.P. est assez bien définie pour permettre à un simple tri magnétique d'opérer une sélection en A/Z qui élimine très facilement le faisceau et la plupart des noyaux stables sans intérêt[8]. Ces deux propriétés permirent les premières études de noyaux exotiques formés par fragmentation du projectile.

Pour obtenir une séparation en A et Z , et non simplement A/Z , il s'est avéré très efficace de sélectionner les noyaux par leur perte d'énergie dans un solide[9]. Combinée avec une deuxième analyse magnétique, qui mesure en fait la perte de moment, on peut ainsi obtenir une sélection en A^{2-5}/Z^{1-5} (fig. 7). Le premier spectromètre utilisant les deux séparations de la méthode PFIS, et sur lequel elle a été mise au point, est le spectromètre LISE à GANIL (fig. 8). Depuis quelques années des spectromètres utilisant le même principe ont été réalisés à GSI (RFA),

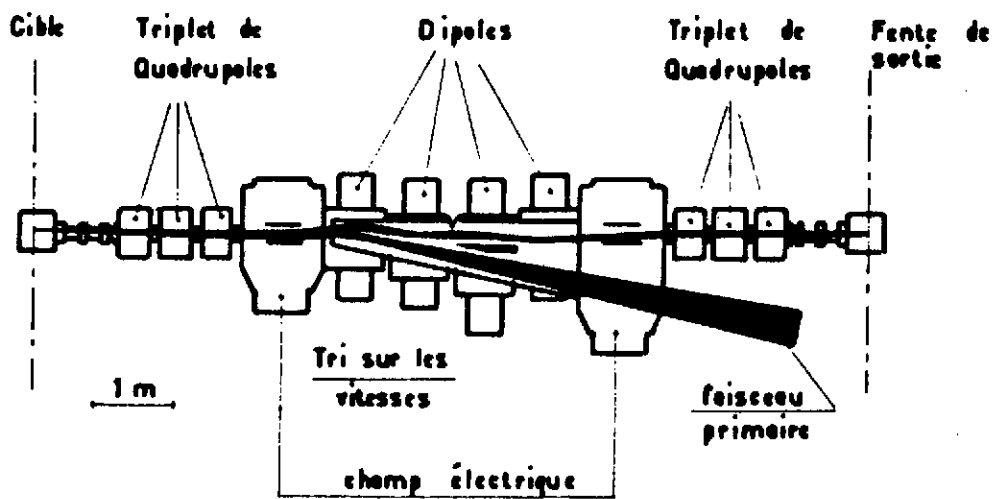


Figure 6: Spectromètre SHIP à GSI (Darmstadt). Les champs \vec{E} et \vec{B} du filtre de vitesse sont utilisés en alternance et non simultanément en un même point

MSU (USA) et RIKEN (Japon). Aux énergies disponibles à GANIL ($E/A \approx 60-100$ MeV/n) la conservation de vitesse dans la réaction nucléaire n'est réalisée qu'en première approximation et certains noyaux proches de la stabilité très fortement produits au niveau de la cible contaminent le noyau d'intérêt à la sortie, même en étant rejetés à 99%. Pour renforcer ce facteur de réjection un filtre de vitesse a été récemment rajouté à LISE, les premiers test sur faisceau ayant lieu au moment de cette conférence .

L'adaptation de la méthode PFIS aux énergies relativistes est particulièrement prometteuse[10] car tous les facteurs physiques essentiels évoluent positivement : épaisseurs de cible, focalisation géométrique à 0° dans l'acceptance du spectromètre, noyaux lourds complètement épluchés de leurs électrons. Seule l'intensité assez faible de ces faisceaux risque d'en diminuer l'intérêt.

3 - Propriétés de l'état fondamental

La première des propriétés de l'état fondamental est sa masse (référencée à celle de ^{12}C). La masse d'un noyau est déterminée par de multiples effets et la reproduction des valeurs observées par des calculs théoriques est d'une manière générale étagée entre deux extrêmes : entièrement phénoménologique avec beaucoup de paramètres ajustables (goutte liquide "corrigée") ou entièrement microscopique (seuls ingrédients de départ l'interaction effective nucléon-nucléon, cf cours de P. Quentin). Le degré de précision de différentes formules de masse est porté dans la table 1. La difficulté de décrire simultanément toutes les masses connues est illustrée dans la fig.9. Il apparait que les écarts résiduels entre valeurs théoriques et expérimentales laissent subsister une certaine dépendance par rapport aux excès ou défauts de neutrons, montrant ainsi une insuffisante compréhension de la structure des noyaux loin de la stabilité.

Une mesure systématique de masses dans une certaine région fait apparaître une superposition d "accidents" locaux sur une évolution générale régulière. Les écarts à la régularité ont toujours une origine quantique mais selon deux cas différents de structure : i) pour une forme

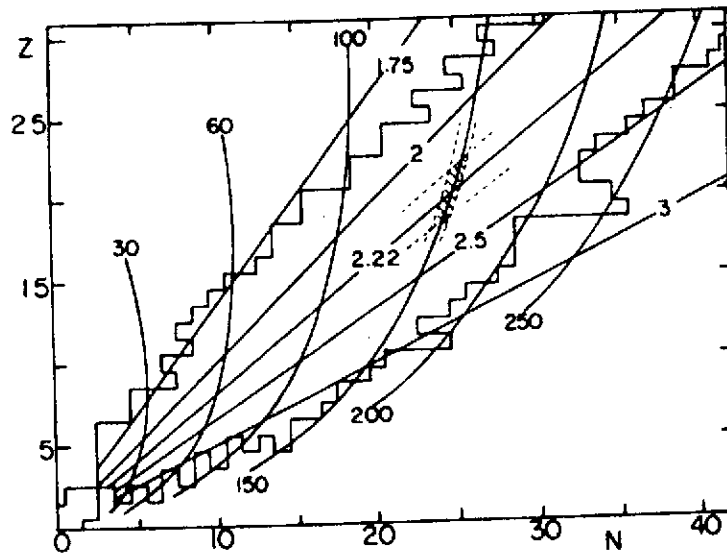


Figure 7: Zones du plan N, Z sélectionnées par la méthode PFIS utilisant un dégradeur en énergie pour trier les fragments de projectile.

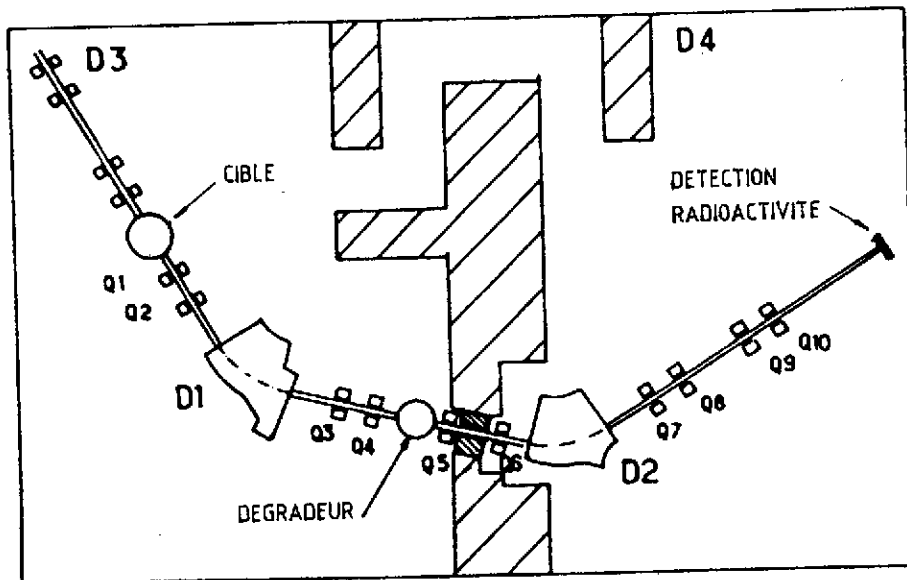


Figure 8: Schéma du spectromètre LISE à GANIL. Un filtre de vitesse ajouté récemment (LISE 3) complète maintenant l'exemple représenté.

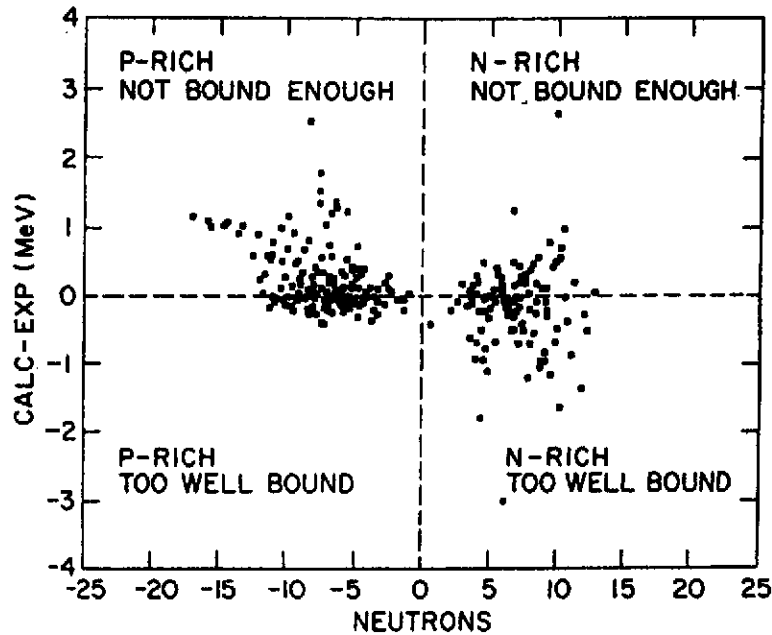


Figure 9: Ecart entre masses calculées et expérimentales portées en fonction des nombres de neutrons d'écart à la stabilité.

sphérique les nombres de nucléons proches de ceux des couches fermées montrent des variations importantes de masse ii) pour des nombres de nucléons éloignés des couches fermées les variations de forme des noyaux donnent lieu à des variations des masses nucléaires. Ces deux types de région posent aux descriptions théoriques des problèmes différents.

La mesure expérimentale des masses nucléaires a fait l'objet de nombreux développements. Parmi les innovations récentes on retiendra ici les techniques de temps de vol et celle d'excitation résonante dans une trappe Penning. La possibilité de faire parcourir une grande distance à des noyaux exotiques, guidés uniquement par des champs magnétiques qui conservent la vitesse, a été démontrée à GANIL[11]. Avec les techniques de prise de temps actuelles, galettes microcanaux et détecteurs Si, un grand temps de vol permet une précision de 10^{-4} sur la mesure de vitesse. Si la rigidité magnétique est mesurée à la même précision dans un spectromètre à haute résolution, on obtient des mesures de masses assez précises (de 100keV à 1MeV) pour des noyaux légers.

Pour des noyaux plus lourds la même précision absolue sur la masse demande une précision relative meilleure, d'autant plus que dans de nombreux cas un ou plusieurs états métastables (isomères) ayant des masses différentes du fondamental contribuent à fausser une mesure qui ne peut résoudre les mélanges de masses voisines. La technique de résonance cyclotron dans une trappe Penning a été récemment utilisée sur de nombreux isotopes du Césium, permettant l'obtention de précisions remarquables[12]; on voit notamment sur la figure 10 un signal qui permet de reconnaître la présence d'une contribution isomérique.

La bonne connaissance des masses nucléaires permet dans certaines régions d'indiquer des transitions de forme. L'énergie de liaison de deux neutrons est ainsi une bonne indication d'une telle transition dans les isotopes de sodium. La confirmation de ce changement de forme a été obtenue dans ce cas par spectroscopie laser mesurant la structure hyperfine (cf. Mécanique quantique, Cohen-Tanoundji) elle-même sensible à la fois à la masse du noyau et à son volume (rayon de charge). Les variations de rayon carré moyen, relatives à un isotope de référence stable, montrent pour les sodium un changement de structure de $N=18$ à 20 en concordance avec l'effet vu sur S_{2n} .

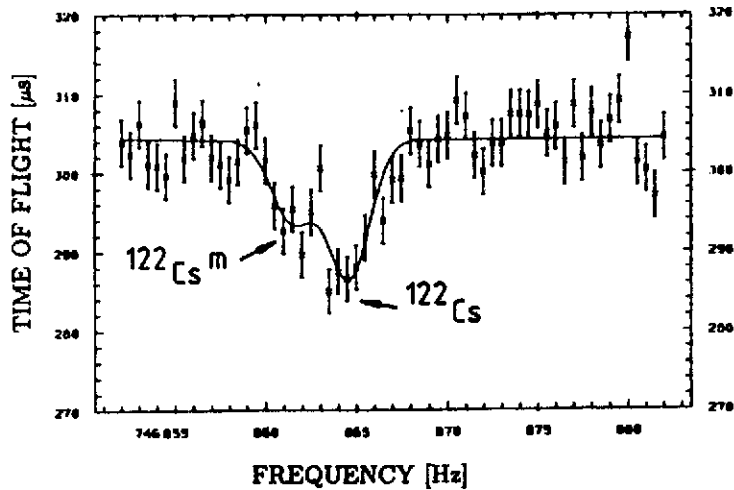


Figure 10: Signal obtenu avec un système de trappe Penning permettant de résoudre la contribution d'isomères.

Les moyens de déterminer les formes des noyaux sont assez variés. Une manière courante, mais pas nécessairement rigoureuse, consiste à considérer plusieurs états excités du noyau comme représentant une "bande de rotation". Pour les noyaux pair-pair la séquence des états $0^+ - 2^+ - 4^+ - 6^+$ etc... permet de déterminer un moment d'inertie dit de "rotor rigide". Ce sujet est donc traité ici dans le paragraphe suivant.

4 - Radioactivités et états excités du noyau

Les progrès récents de descriptions théoriques de coexistence de forme ont été appliqués aux données obtenues à partir des décroissances radioactives (β^+ et capture électronique) de noyaux de terres rares riches en protons[13]. Les décroissances des noyaux suffisamment loin de la stabilité comme $^{130-136}\text{Sn}$ permettent de peupler dans les noyaux fils un grand nombre d'états excités. Le schéma de niveau est établi à partir d'une spectroscopie gamma qui met en évidence les coïncidences (cascades $\gamma - \gamma$), les intensités relatives et éventuellement les corrélations angulaires. Les bandes de rotations mises en évidence (fig.11) permettent de montrer la coexistence de rotors à moment d'inertie très différents, ces noyaux sont dits "mous" car ils peuvent changer de forme pour une très faible différence d'énergie.

Le lien entre forme, masse et structure quantique est très bien illustré par le cas de la fission spontanée[14] des noyaux de $Z=98$ à 104. Pour des différences de quelques neutrons les paramètres caractéristiques de fission : énergies cinétiques et distributions de masse des fragments varient très fortement en montrant même des coexistences de modes (distributions dédoublées). La dynamique de la fission ainsi mise au jour peut permettre de tester les modèles de déformation sous plusieurs aspects : i) les formes explorées au cours de la fission sont très variables, ii) la fission mise en jeu reflète l'état d'ordre (superfluidité des paires de nucléons) ou de désordre (goutte liquide) du système en évolution (il est possible que lors de la scission les états d'ordre et de désordre alternent!..).

L'histoire de la radioactivité par ^{14}C , une sorte d'émission intermédiaire entre celle d'un alpha et la fission spontanée, montre que l'"exotisme" est parfois très près et insoupçonné puisque ce mode de décroissance a été découvert[15] récemment (1983) sur des sources radioactives classiques connues depuis le début du siècle. L'effet de couche très fort présent pour le noyau doublement magique ^{208}Pb rend très facile l'émission alpha dans les noyaux $N > 126$, $Z > 82$. Il rend également possible l'émission d'autres noyaux mais toujours en compétition avec l'émission

β -delayed neutrons from ^{17}B

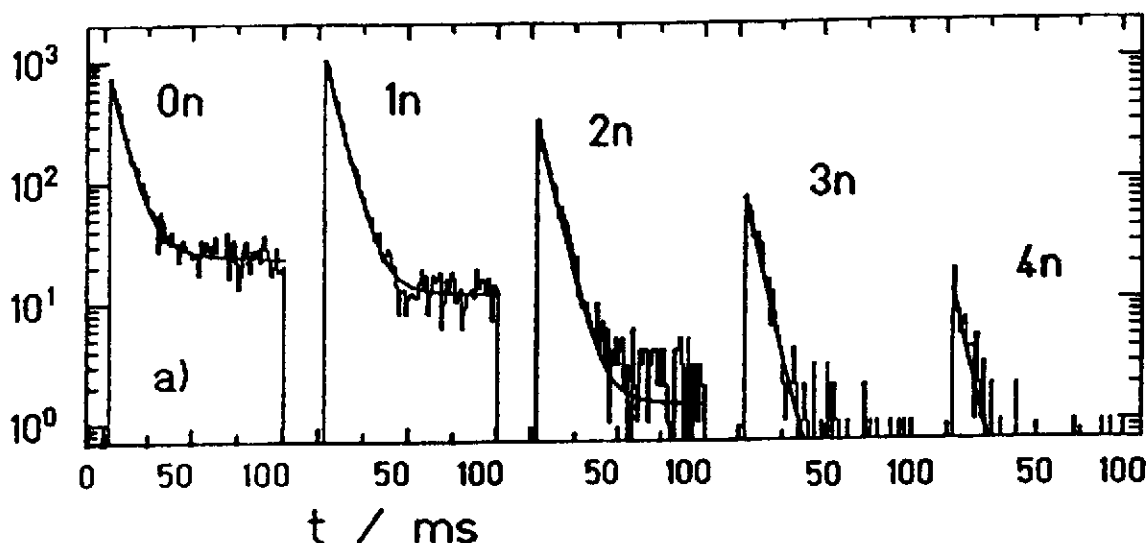


Figure 11: Décroissances en temps mesurées pour les différentes multiplicités neutron de ^{17}B . Le mode bêta-4n est observé pour la première fois.

alpha. Dans le cas de ^{222}Ra , l'émission de ^{14}C conduit à ^{208}Pb alors que celle de trois alpha conduit à ^{210}Pb et libère moins d'énergie; l'embranchement d'émission de ^{14}C n'est pourtant que de 10^{-8} . L'émission de ^{12}C est beaucoup moins probable car toujours en compétition défavorable avec l'émission de trois alphas (même noyau final). L'émission d'autres noyaux légers comme ^{22}Ne , ^{25}Mg etc... a également été observée. Les probabilités d'émission ne sont pas gouvernées complètement par les possibilités énergétiques : les noyaux ayant une forme octupolaire (forme "poire") semblent de bons émetteurs de noyaux légers, à tel point que cette radioactivité exotique pourrait être une des manifestations les plus visibles de la forme octupolaire, difficile autrement à caractériser.

Les émissions de particules (neutrons, protons ou alpha) accompagnant la désintégration bêta reflètent l'exotocité des noyaux étudiés à deux titres : d'une part les Q_β (différence de masse entre les noyaux AZ et $^AZ\pm 1$) étant grands, des niveaux à grande énergie d'excitation, dans le continuum, sont peuplés après émission bêta, d'autre part le noyau fils, lui-même assez exotique, présente des seuils d'émission de particules particulièrement bas. Les expériences réalisées à GANIL ont montré qu'aux limites de stabilité les noyaux pouvaient émettre jusqu'à quatre neutrons[16], cas du ^{17}B ($T_{1/2}=5\text{ms}$), ou jusqu'à trois protons[17], cas de ^{31}Ar ($T_{1/2}=15\text{ms}$), fig.12 et fig.13. De telles émissions de particules n'avaient jusque là été observées que dans des noyaux beaucoup plus chauds formés par fusion. Les corrélations en angle et énergie de ces particules devraient permettre d'obtenir des informations dans une gamme d'énergie d'excitation intermédiaire où le noyau transite entre ordre ($T=0$) et chaos ($T=\infty$).

Le nombre de modes radioactifs n'est pas illimité et l'on est maintenant assez proche des limites de possibilité. Il reste pourtant une radioactivité importante à découvrir : l'émission de deux protons. Les radioactivités par proton et di-proton sont probablement des phénomènes apparaissant systématiquement aux limites de stabilité, l'une pour les Z impairs (1p) et l'autre pour les Z pairs (2p). La limite de stabilité étant moins éloignée pour les Z impairs on connaît déjà six cas de radioactivité proton pour aucun de di-proton. Dans les noyaux légers accessibles à GANIL on arrive à atteindre la zone des candidats à l'émission 2p mais les faibles barrières

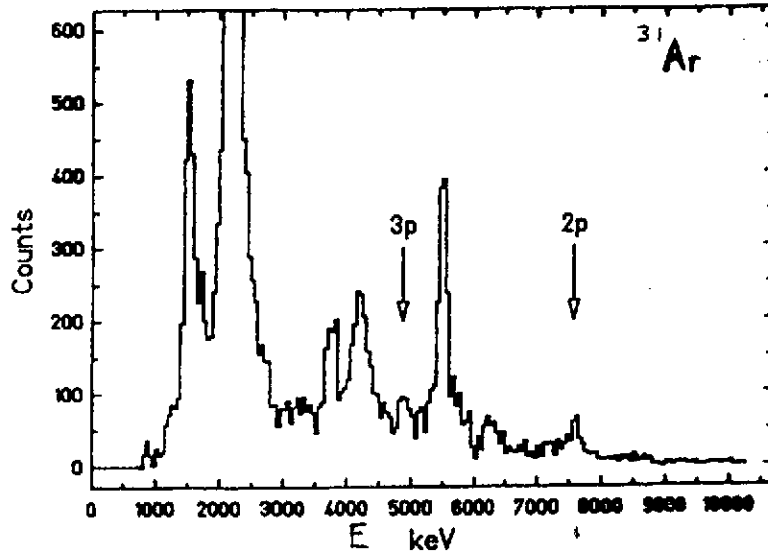


Figure 12: Spectre d'émission de particules retardées mesuré pour ^{31}Ar . Un pic est observé à l'énergie correspondant à l'émission de trois protons depuis l'état analogue $T_z=-5/2$ de ^{31}Cl .

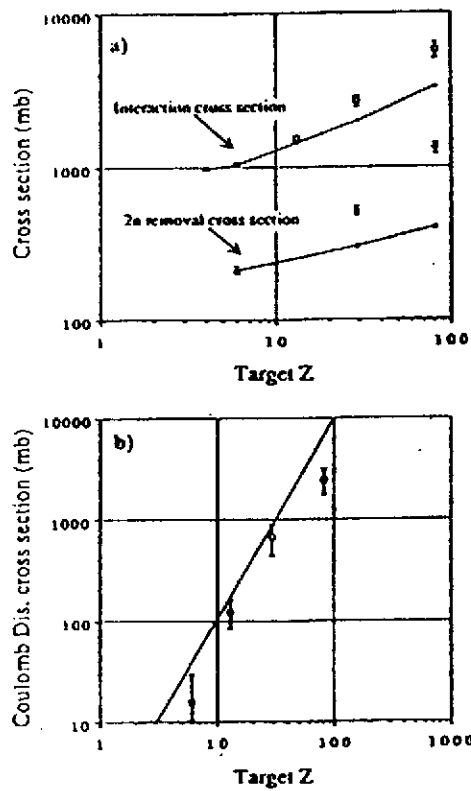


Figure 13: Sections efficaces de réaction du noyau exotique ^{11}Li à 790 MeV. L'existence d'un halo de neutrons serait à l'origine des grandes valeurs observées sur les cibles lourdes et légères.

coulombiennes de ces noyaux rendent probables les périodes inférieures à 10^{-7} s inaccessibles avec les techniques de séparation connues. Le noyau ^{39}Ti a été observé pour la première fois[18] à GANIL, il a $Q_{2p} \approx 660\text{keV}$ mais semble émettre majoritairement selon le mode β , la recherche des 2p continue!...

5 - Les études avec des faisceaux secondaires

Jusqu'au début des années 1980 toutes les réactions nucléaires étudiées ont mis en jeu des noyaux stables ou "quasi-stables", c'est à dire radioactifs avec des durées de vie très longues comme ^3H , ^{14}C (faisceaux) ou ^{248}Cm et même ^{255}Es (cibles). La production de faisceaux secondaires exotiques par fragmentation du projectile est très efficace car le temps écoulé entre la formation du faisceau et son utilisation peut être inférieur à quelques microsecondes. Les premiers résultats obtenus à Berkeley avec des faisceaux de Lithium 8-9 et 11 font apparaître des comportements très spécifiques des noyaux les plus loin de la stabilité dans les collisions nucléaires. La section efficace de réaction de ^{11}Li sur des noyaux légers dépasse de 60% la valeur attendue (fig.13). Sur des noyaux lourds la section efficace de réaction, l'écart est encore plus grand. Les auteurs[19] interprètent ces écarts par l'existence d'un "halo de neutrons" dans le noyau "Li" qui serait ainsi constitué d'un "coeur" de ^9Li et d'un nuage formé par deux neutrons très peu liés ($S_{2n} \approx 200\text{keV}$). Si l'existence d'un tel halo était confirmée ce serait un cas exceptionnel de matière nucléaire peu dense, à la limite entre le cas des nucléons libres et celui des nucléons des noyaux stables. On peut penser ainsi tester aussi bien l'équation d'état nucléaire que les corrélations entre nucléons quasi-libres. Des expériences à Saturne (Saclay) et GANIL (Caen) ont été récemment réalisées pour établir les évolutions des sections efficaces avec l'énergie incidente et mesurer les émissions de neutrons provenant du "halo".

L'intérêt des faisceaux secondaires est également très grand pour obtenir des sections efficaces de réactions nucléaires clés intervenant dans des processus de nucléosynthèse stellaire. Ces études sont cependant très difficiles car les intensités des faisceaux secondaires dépassent difficilement 10^8 particules par seconde[20] alors que les réactions de basse énergie à étudier ne permettent d'utiliser que des cibles très minces ($< 1\text{mg/cm}^2$). Une voie indirecte reposant sur l'étude de réactions inverses, par photodissociation coulombienne (photons virtuels), est actuellement recherchée à GANIL.

L'obtention de faisceaux secondaires ayant des qualités d'émittance (énergie, position, angle) identiques à celles des faisceaux primaires sera pour la première fois obtenue prochainement à GSI avec l'anneau de stockage ESR. Des phénomènes nouveaux comme la modification des propriétés de radioactivité d'un noyau par son état d'épluchage électronique pourront ainsi être observés.

Références

- [1] J.C. Hardy, I.S. Towner, *Nucl. Phys. A254*, 221 (1975)
- [2] G. Münzenberg, *Rep. on Progress in Phys.* 51, 57 (1988)
- [3] C. Detraz, D.J. Vieira, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 39, 407 (1989)
- [4] M.G. Saint-Laurent et al., *Phys. Rev. Lett.* 59, 33 (1987)
- [5] H.L. Ravn, *Phys. Rep.* 54, 201 (1979)
- [6] G. Münzenberg et al., *Nucl. Inst. Meth.* 161, 65 (1979)

- [7] A. Ghiorso et al., *Nucl. Inst. Meth.* A269, 192 (1988)
- [8] T.J.M. Symons et al., *Phys. Rev. Lett.* 42, 40 (1979)
- [9] J.P. Dufour et al., *Nucl. Inst. Meth.* A248, 267 (1986)
- [10] K.-H. Schmidt et al., *Nucl. Inst. Meth.* A260, 287 (1987)
- [11] A. Gillibert et al., *Phys. Lett.* 192, 39 (1987)
- [12] F. Kern et al., *5th Int. Conf. Nucl. Rosseau Lake 22* (1987)
- [13] N. Redon et al., *Z. Phys.* A325, 127 (1986)
- [14] E.K. Hulet et al., *Phys. Rev.* C34, 1394 (1986)
- [15] H.J. Rose, G.A. Jones, *Nature* 307, 245 (1984)
- [16] J.P. Dufour et al., *Phys. Lett.* B206, 195 (1988)
- [17] D. Bazin et al., *Nucl. Struct. Workshop Obernai (France) 1989*
- [18] C. Detraz et al., *Rapport GANIL* (1990)
- [19] I. Tanihata et al., *Phys. Rev. Lett.* 55, 2676 (1985)
- [20] D. Darquennes et al., *Radiative Nucl. Beams Conf. Berkeley (USA) 1990*