

La physique (expérimentale) du halo

A. C. Mueller

▶ **To cite this version:**

A. C. Mueller. La physique (expérimentale) du halo. École thématique. Ecole Joliot Curie "Les noyaux en 1993 : une nouvelle façon d'exister", Maubuisson, (France), du 13-18 septembre 1993 : 12ème session, 1993. cel-00648741

HAL Id: cel-00648741
https://cel.hal.science/cel-00648741

Submitted on 6 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.

La physique (expérimentale) du halo

(Notes de cours)

Alex C. MUELLER

CNRS-IN2P3
Institut de Physique Nucléaire
91406 ORSAY cedex

I. INTRODUCTION

Ce n'est qu'après des hésitations et quelque peu réticent que je soumets ces notes de cours aux organisateurs de l'école "Joliot-Curie" de 1993: Étant donné la grande mouvance de ce récent champ de recherche (plus de cent publications dans les derniers 5 ans!) il m'est impossible, à l'heure actuelle, de rédiger un ouvrage didactique et "complet" qui mériterait le terme *cours*, au sens générique du terme. En effet, il faut également garder à l'esprit que de nouvelles informations expérimentales sortent tous les jours, en particulier en provenance du MSU-NSCL (USA) et du RIKEN (Japon), qui consacrent à ce domaine des faisceaux exotiques un nombre d'heures très important de faisceau d'accélérateur. Les mêmes observations peuvent être faites en ce qui concerne le phénomène du halo d'un point de vue théorique. Je crains donc, que ces notes, dans un laps de temps court, ne présentent pas le même intérêt qu'habituellement les cours de l'école Joliot-Curie. Les résultats les plus récents (expérimentaux et théoriques) seront publiés dans les comptes-rendus de la récente et très instructive "3rd International Conference on Radioactive Nuclear Beams" [1]. Une revue générale des noyaux situés aux bords de la stabilité, relativement facile à lire, est également sous presse [2].

Par ailleurs, un excellent article, assez court, que l'on peut consulter afin de comprendre "la physique du halo", a été rédigé par P.G. Hansen [3]. Le même auteur a aussi récemment publié une discussion "vulgarisée" du phénomène du halo dans la revue "New Scientist", s'adressant à un public plus large que des physiciens [4].

Avec toutes ces remarques faites, l'ambition de ces notes de cours est la suivante: Je présenterais, en reprenant les mêmes têtes de chapitre choisies pour la présentation orale, une sélection des faits expérimentaux caractéristiques. Par ailleurs, je suis conscient que mes critères de sélection ont privilégié les travaux effectués en France.

II. CHAPITRES DU COURS

II.1. Carte des noyaux exotiques et bords de la stabilité nucléaire pour la région des noyaux les plus légers.

La figure 1 montre la carte des nuclides pour les noyaux les plus légers jusqu'à l'élément néon. Le "pattern" caractéristique d'absence et de présence d'isotopes (prédit par les formules de masse courantes) a été vérifié expérimentalement, en particulier grâce aux expériences réalisées au GANIL avec le spectromètre LISE (voir aussi le chapitre II.3). Ce pattern souligne le rôle essentiel que l'appariement joue à la drip-line en neutrons: pour tous les éléments, l'isotope le plus lourd a un nombre pair de neutrons (=2n). A l'exception des isotopes de l'hydrogène et de l'azote, tous les cas avec 2n-1 ne sont pas liés, et, pour l'hélium et le bore, les isotopes avec 2n-3 sont toujours non-liés. Un cas intéressant est celui de l'oxygène: ^{26}O est lié prévu par la plupart des prédictions théoriques, mais comme nous le discuterons dans le chapitre II.3, l'expérience n'a permis que la synthèse du ^{24}O.

Ce sont ces noyaux légers au bord de la stabilité, très faiblement liés, qui vont donner naissance au phénomène du halo de neutrons.

II.2. Mesures directes de masse de noyaux légers situés à la "drip-line" en neutrons: situation actuelle et perspectives de futurs instruments. Le cas particulier du ^{11}Li.

Afin d'aller au-delà des observations qualitatives comme celles faites dans le contexte de la description de la figure 1, il faut faire des expériences de mesure de masse. Compte tenu des taux de production faibles des noyaux situés au bord de la stabilité, ces expériences sont très difficiles. Cependant, des progrès ont été faits ces dernières années (pour toutes les références, voir § 5.2 dans [2]) en particulier, grâce à des expériences de mesure *directe* de masse à Los Alamos et au GANIL, où la combinaison des spectromètres ALPHA et SPEG s'est révélée très puissante [5]).

Pour le ^{11}Li, le premier noyau faiblement lié pour lequel les phénomènes de halo ont été mis en évidence, la bonne connaissance de l'énergie de liaison est importante car sa valeur entre de façon critique dans toutes les descriptions théoriques du halo. Jusqu'à très récemment, cette valeur était quelque peu incertaine, mais il semble, qu'une expérience récente, à MSU, a permis de "lever le doute" : S_{2n} = 318 keV (B.M. Young et al. Phys.Rev.Lett. sous presse). L'expérience à MSU se basait sur une réaction de transfert avec un faisceau stable, ^{14}C(^{11}B,^{11}Li)^{14}O. Cette technique, (aussi beaucoup utilisée avec l'accélérateur VICKSI à Berlin, voir les références dans le §5.2 de [2]) ne peut cependant cibler que les noyaux les plus légers sur la drip-line en neutrons à cause de la courbure de la vallée des noyaux stables. Si on veut aller au-delà du ^{11}Li, il faut disposer de faisceaux radioactifs (riches en neutrons) afin de pouvoir poursuivre cette technique puissante. C'est en effet une des raisons avancées pour de la construction des futurs post-accélérateurs à faisceaux "exotiques".

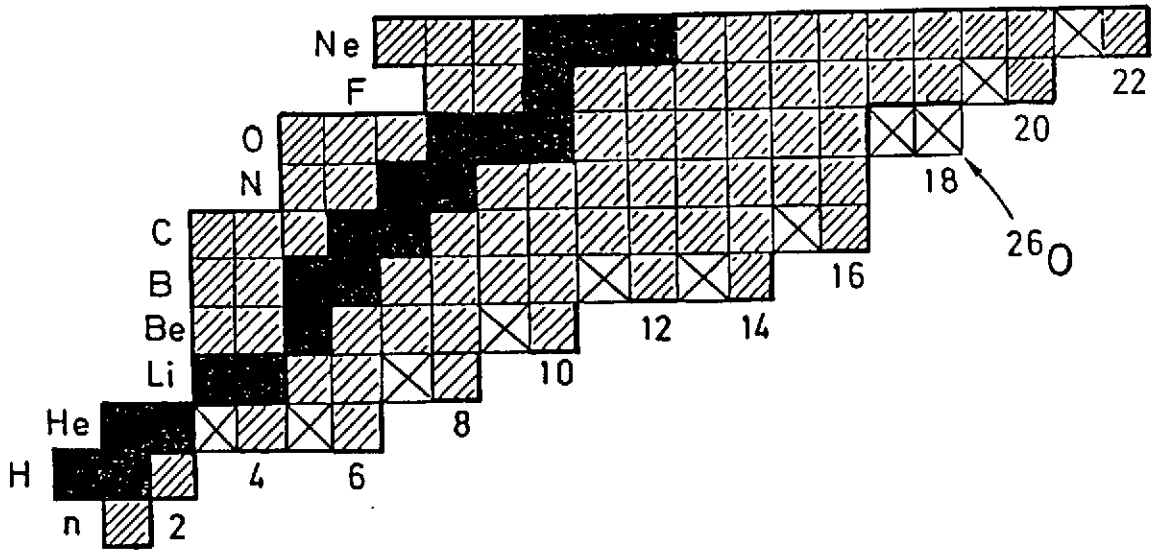


Figure 1: Carte des nuclides pour les noyaux les plus légers jusqu'à l'élément néon.

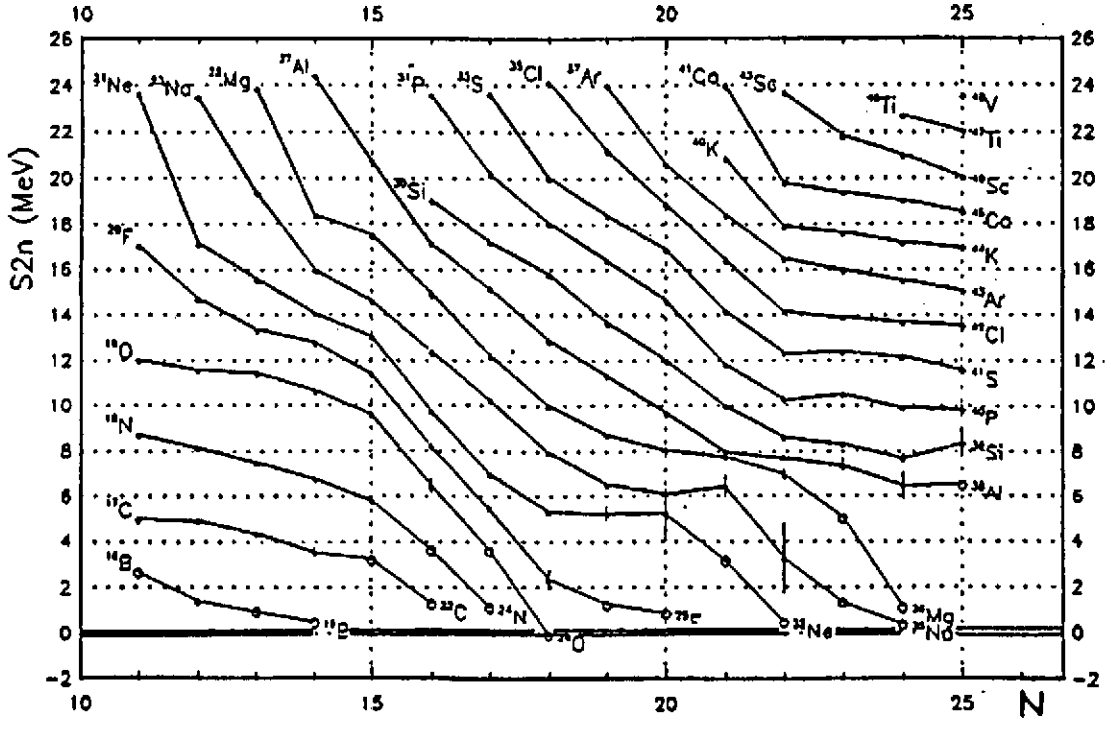


Figure 2: Énergie de liaison des deux derniers neutrons pour les éléments légers (voir texte du chapitre II.2).

La figure 2, extraite d'un rapport de G. Audi [6], montre une description globale des mesures de masse: C'est l'énergie de séparation des *deux* derniers neutrons, S_{2n}, qui est portée en fonction de la masse A pour les éléments légers. On note une tendance curieuse lors ce qu'on approche la "drip-line". Les courbes ne semblent pas couper l'axe $S_{2n}=0$ de façon franche, ou transiter du régime lié (vis-à-vis de l'interaction forte) au régime non-lié. La tendance est plutôt celle d'une approche tangentielle, indiquant peut-être, qu'il ne faut que de très peu pour lier des systèmes avec de grands "clusters" de neutrons [7].

II.3 Comment accéder aux noyaux situés à la neutron drip-line: production de faisceaux exotiques par fragmentation du projectile. Méthodes de séparation et de purification.

A la fin des années 1970 Symons, Westfall et leurs collaborateurs [8,9] ont découvert, à Berkeley, qu'il était possible de produire des faisceaux secondaires très riches en neutrons par fragmentation de projectile d'ions lourds. La persistance des caractéristiques de la fragmentation à haute énergie dans le domaine des énergies de Fermi [10] a permis, dès 1984, le développement d'un large programme expérimental à GANIL auprès du spectromètre LISE [11]. L'utilisation de la fragmentation du faisceau primaire du GANIL pour produire des faisceaux secondaires a nécessité la conception d'un spectromètre avec les propriétés suivantes:

- une détection autour de 0° avec une ouverture angulaire importante et à très bas bruit de fond (en particulier l'élimination complète du faisceau primaire) afin d'être sensible à des événements de faible section efficace
- une bonne identification de particules afin de pouvoir séparer les nombreux produits de la réaction sans ambiguïté
- une optique d'ions souple afin de produire des faisceaux secondaires d'une qualité optique raisonnable.

La solution suivante a été retenue pour LISE: un spectromètre magnétique constitué de deux dipôles identiques (D1 et D2) dans une configuration achromatique (Fig.3). La longueur de la trajectoire dans la ligne est au premier ordre (mieux que 10^{-4}) indépendante de l'angle d'entrée dans le spectromètre. Ceci facilite la mesure du temps de vol des particules dans l'instrument. Une sélection supplémentaire en Z peut être faite en introduisant au plan focal intermédiaire de LISE une feuille de matière. L'achromatisme de la ligne est conservé pour l'isotope que l'on veut transmettre en ajustant la rigidité magnétique du second aimant à la perte d'énergie du fragment voulu dans la feuille. Le spectromètre LISE dans sa première version se terminait à ce premier point focal achromatique, une description détaillée est présentée en référence [11]. Un filtre de WIEN a été ajouté depuis, donnant une sélection supplémentaire en vitesse [12].

L'identification des produits de fragmentation est faite dans un télescope de détecteurs semi-conducteurs installé au premier point focal achromatique. La mesure, événement par événement, de la perte d'énergie ΔE, de l'énergie totale E et du temps de vol (TOF) dans le

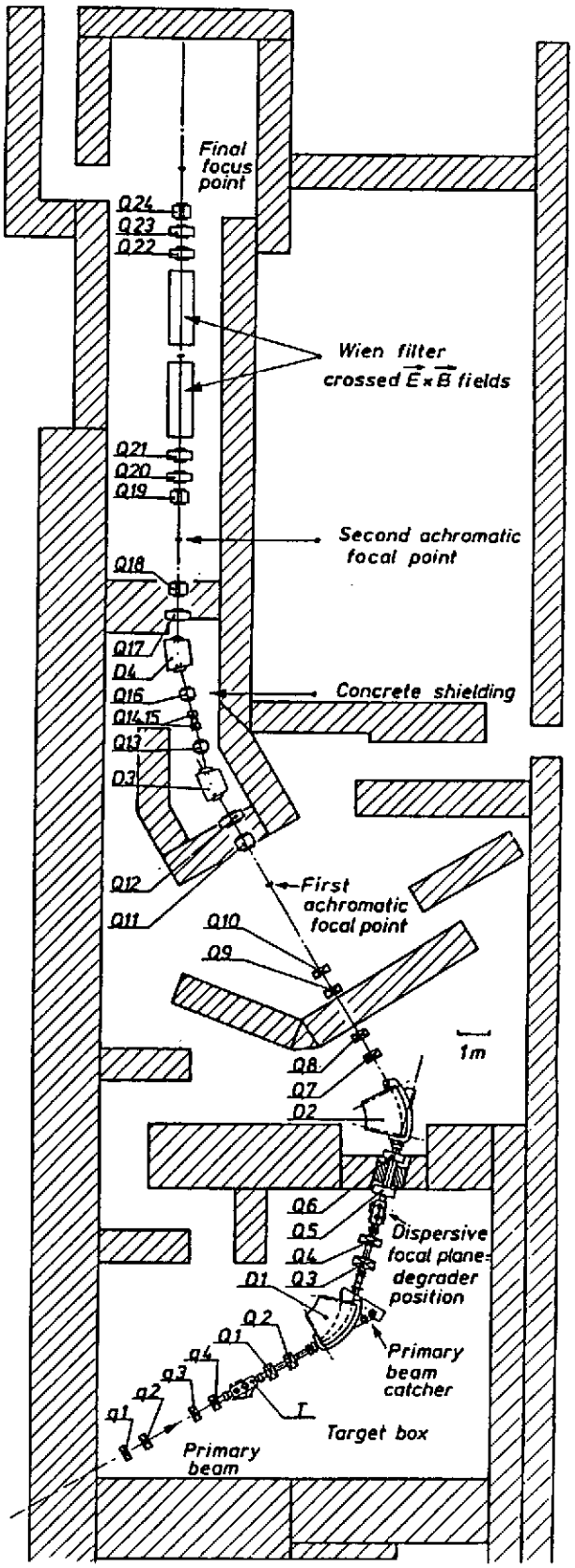


Figure 3: Le spectromètre LISE du GANIL. L'extension au-delà du premier point focal achromatique ("LISE") a été construite en 1992. $q_{1\text{-}4}$ et $Q_{1\text{-}24}$ sont des quadrupoles de focalisation en amont et en aval de la cible, respectivement. D_1 et D_2 d'une part et D_3 et D_4 d'autre part, sont des dipoles magnétiques qui assurent le double achromatisme de l'ensemble de LISE3.

spectromètre permet une détermination de la masse et du numéro atomique des fragments. La figure 4 représente une matrice d'identification (ΔE-TOF) obtenue dans la réaction d'un faisceau de ^{48}Ca à 44MeV/A sur une cible de Ta de 173mg/cm^2.

On remarque la parfaite réjection du dispositif pour le faisceau primaire. Les noyaux les plus riches en neutrons observés ^{11}Li, ^{14}Be, ^{22}C, ^{23}N et ^{29}F correspondent aux derniers noyaux prédits liés [13]. En effet, les expériences auprès de LISE ont permis la synthèse de ^{22}C, ^{23}N et ^{29}F ainsi que de ^{32}Ne pour la première fois. On peut également noter que les noyaux de ^{13}Be, $^{16,18}B$, ^{21}C, ^{25}O, ^{28}F et ^{31}Ne prédits non liés ne sont pas observés ce qui souligne l'excellent pouvoir séparateur de LISE. Il est cependant étonnant de ne pas observer dans cette expérience le noyau semi-magique ^{26}O prédit lié par la plupart des formules de masse alors qu'en utilisant la systématique des taux de production on prévoyait environ 30 coups. Ceci peut signifier que pour les isotopes d'oxygène (pourtant semi-magique en protons) on assiste à un effet brutal de diminution de liaison. Une explication alternative avancée par P. G. Hansen (communication privée) est que ce noyau, faiblement lié, subit dans la cible de production une importante dissociation coulombienne (voir aussi II.7)

Grâce à la technique de fragmentation du projectile, avec des faisceaux de $^{36,40}Ar$, $^{40,48}Ca$, ^{58}Ni, ^{86}Kr, de très nombreux isotopes aussi bien très excédentaires que déficients en neutrons ont pu être fabriqués pour la première fois et de nombreuses études spectroscopiques ont été menées (voir [2] et références incluses]. Un exemple récent est la découverte de la nouvelle radioactivité β-3protons dans la décroissance du noyau ^{31}Ar [14, 15]. Les études de décroissance par neutrons retardés de noyaux exotiques de S et Cl, produits à LISE par fragmentation de ^{48}Ca apportent de précieuses informations dans un domaine autre que nucléaire: l'astrophysique. En effet il est possible d'interpréter les abondances isotopiques observées dans la météorite Allende en incluant des effets de structure nucléaire [16].

II.4. Le nouvel outil: réactions induites par des faisceaux exotiques. Mesures de sections efficaces totales et premiers signes de présence du "halo". Moment magnétique et moment quadripolaire électrique du ^{11}Li par spectroscopie laser.

C'est au milieu des années 90 que Tanihata et ses collaborateurs ont eu l'idée de profiter de *l'énergie* des faisceaux exotiques, préparés par fragmentation du projectile. Leur expérience était la plus simple que l'on puisse imaginer: une mesure de la section efficace totale d'interaction σ_I par la méthode de transmission: On regarde le nombre de particules que l'on envoie sur une cible et on analyse combien de noyaux ont interagi après la cible en comptant ceux qui ont changé leur numéro atomique ou leur nombre de masse. De ces σ_I il est alors possible (par un calcul de type Glauber) de déduire des rayons de matière nucléaire [17]. La figure 5 montre des rayons ainsi obtenus, en envoyant des faisceaux légers dans la gamme de 400-800 MeV/u sur une cible d'interaction. De façon surprenante, on observe une forte déviation pour les noyaux situés sur la drip-line par rapport au comportement "normal",

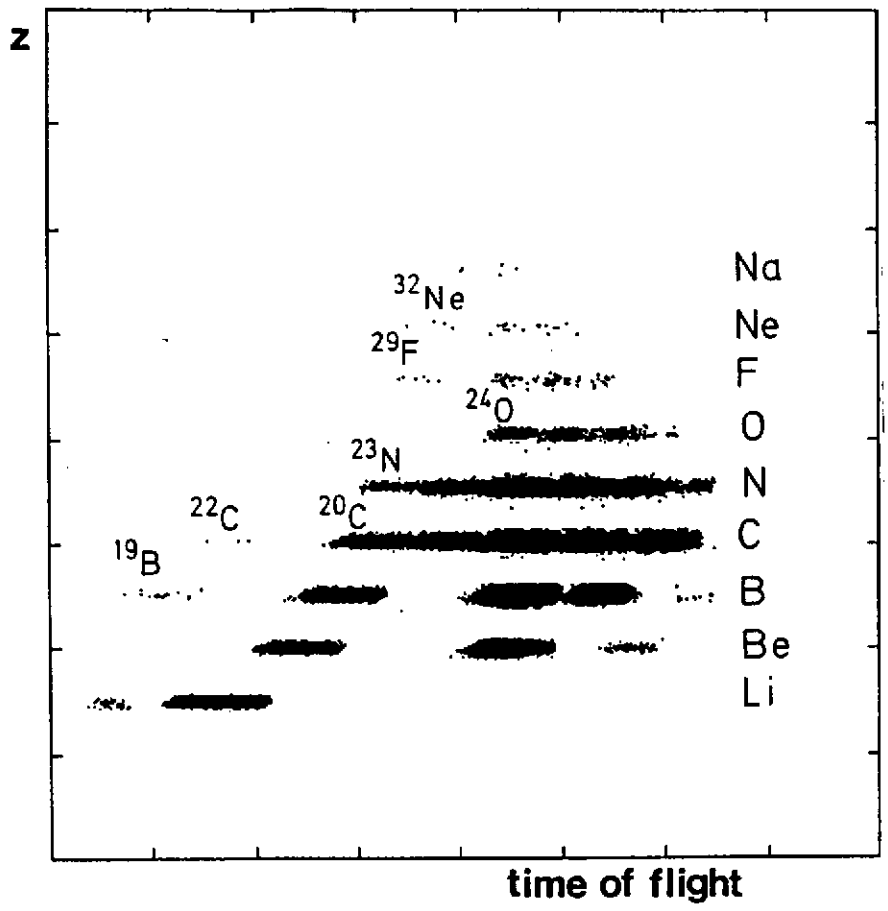


Figure 4: Noyaux très riches en neutrons jusqu'à la limite de stabilité identifiés dans la fragmentation d'un faisceau de ^{48}Ca à 44MeV/A sur une cible de Ta.

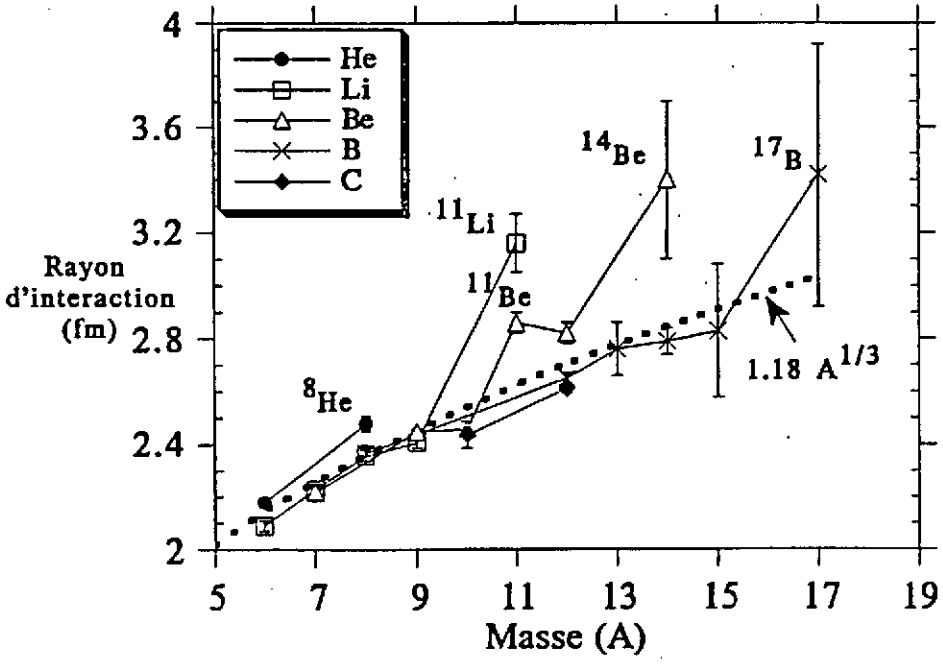


Figure 5: Rayons d'interaction des isotopes légers. La figure a été prise de la référence [17].

conforme à la gouttelette liquide, de tous les autres noyaux. Cet effet a été rapidement interprété par Hansen et Jonson comme étant dû à une large extension spatiale de la fonction d'onde des derniers neutrons [18]. Ils ont montré que ce phénomène d'un ***halo de neutron(s)*** résultait de la faible énergie de liaison de ce(s) dernier(s). Ils prédisaient également qu'on allait observer des sections efficaces d'excitation E1 très élevées ("polarisation" halo-coeur) pouvant donner lieu à un break-up Coulombien des neutrons du halo.

Des indications confirmant l'hypothèse de Hansen et Jonson ont été obtenues par la suite: Une expérience à SATURNE à 80 MeV/u, par exemple, a également utilisé la méthode de transmission pour l'étude des isotopes ^{8,9,11}Li. La détection, à l'aide de scintillateurs plastiques a permis de déterminer non seulement les σ_I mais aussi plus spécifiquement les sections efficaces de changement de charge atomique $\sigma_{\Delta Z}$. La figure 6 [19] justement montre que $\sigma_{\Delta Z}$ est constant et pour le ^{11}Li ne représente que 40% de la section efficace totale alors que ce rapport est de 70% pour le ^{8}Li et atteint 90% dans la vallée de stabilité. Cette observation est en accord avec un rayon de charge constant pour les isotopes du lithium et signifie, par conséquent, que le grand rayon du ^{11}Li concerne uniquement les neutrons. Des expériences de spectroscopie laser, faits auprès du séparateur en ligne ISOLDE au CERN [20, 21] ont permis de mesurer le moment magnétique et le moment quadripolaire électrique du ^{11}Li. En effet, la valeur du moment magnétique est proche de la valeur "Schmidt" d'un seul proton de valence et celle du moment quadripolaire est quasiment égale à celle du ^{9}Li. Il y a donc pas de signe que le rayon du ^{11}Li est modifié par une déformation (de charge) du noyau.

II.5. Diffusion élastique de faisceaux à "halo": Premières études au GANIL. Expériences plus précises à MSU et à RIKEN. Perspectives avec "SISSI".

Pour les espèces stables, une façon classique d'explorer les distributions de densité des protons et des neutrons est l'étude des distributions angulaires de noyaux diffusés élastiquement. Ce fut le but d'une première expérience au GANIL d'étudier de façon non destructive le ^{11}Li et d'apprécier la faisabilité de diffusion élastique de faisceaux secondaires de faible intensité. Des faisceaux de ^{7}Li à 25.4 MeV/u (1000 pps) et de ^{11}Li à 29MeV/u (150 pps) ont été produits avec une pureté mieux que 98% par fragmentation d'un projectile ^{18}O à 76MeV/u sur une cible composite de Be+C de 3.2 g/cm^2. Cette cible permettait à la fois la production et le ralentissement des fragments à l'énergie voulue. La trajectoire des particules secondaires a été reconstruite événement par événement à l'aide de deux détecteurs Si à localisation x-y placés à la sortie de LISE3. Le second détecteur servait de cible "active" (104 mg/cm^2). Les angles et les énergies des particules diffusées étaient mesurés à l'aide de deux détecteurs circulaires à pistes placés en aval. Une matrice de 7 cristaux BGO a été utilisée pour déterminer l'énergie résiduelle de chaque particule. La figure 7 montre la distribution angulaire de la diffusion élastique du ^{7}Li et du ^{11}Li obtenue de cette manière. Il est clair que l'épaisseur de la cible, la résolution angulaire modeste (1.5°) et la contribution de

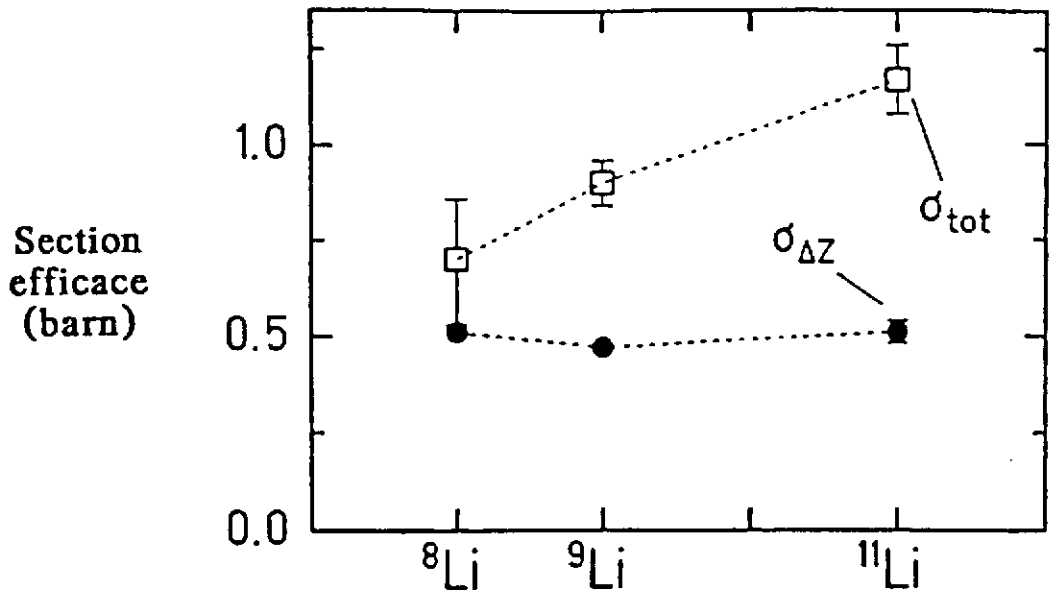


Figure 6: Sections efficaces de changement de charge ($\sigma_{\Delta Z}$) et totale (σ_{tot}) pour les isotopes du lithium. La figure a été prise de la référence [19].

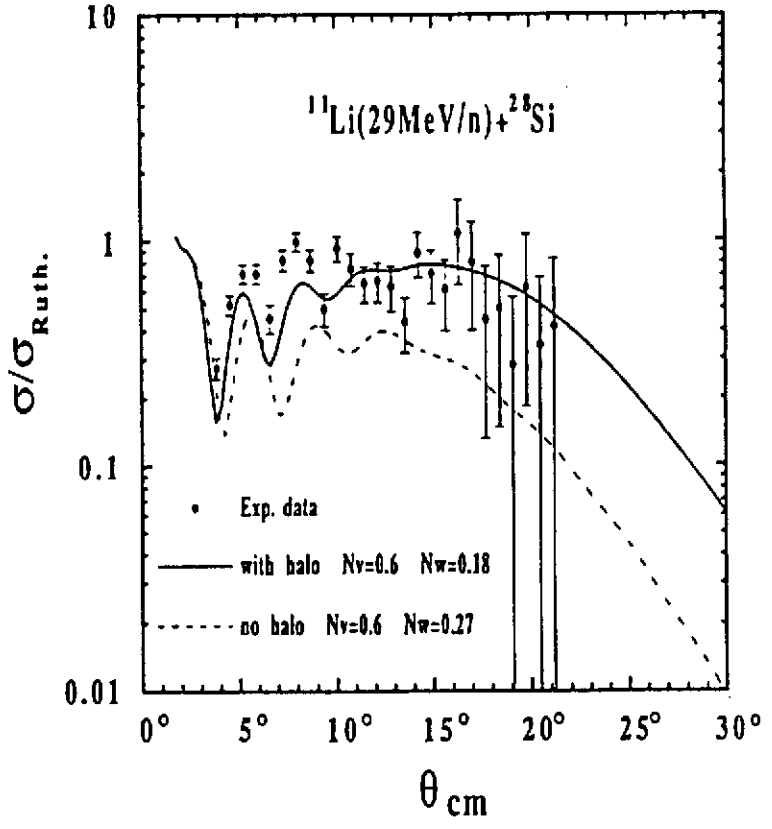


Figure 7: Distribution angulaire de diffusion élastique pour le noyau ^{11}Li. Les traits correspondent à des fits effectués dans le cadre du modèle optique; sans et avec "halo".

la diffusion inélastique atténuent quelque peu l'allure diffractionelle de cette distribution. Néanmoins, la distribution obtenue pour le ^{7}Li est en accord avec une analyse effectuée en canaux couplés avec des paramètres extraits d'une expérience de diffusion de ^{6}Li sur la même cible. Bien que la statistique soit faible, les valeurs σ/σ_R du ^{11}Li restent très élevées sur une grande plage angulaire et décroissent beaucoup plus lentement que celles du ^{7}Li. Une description détaillée de cette expérience et son interprétation dans le cadre du modèle optique est publiée [22].

Une expérience de meilleure efficacité a été menée à RIKEN à 60MeV/u [23]. Cette fois le ^{9,11}Li étaient diffusés en cinématique inverse sur les protons d'une cible de polyéthylène. Les trajectoires des faisceaux exotiques avant et après la cible étaient déterminées par des chambres à fils en coïncidence avec les protons de recul. A MSU, Kolata et al. ont étudié le système symétrique ^{11}Li+ ^{12}C à 60MeV/u [24]. Cette expérience a été analysée en terme du modèle optique par C. Mermaz [25], qui trouve une longue traîne dans le potentiel réel. La partie imaginaire exhibe une certaine transparence de surface donnant lieu à des effets réfractifs importants. Une discussion générale critique d'analyse des diffusions élastiques par le modèle optique a été effectuée par R. Da Silveira [26]. D'un point de vue expérimentale, la mise en service du dispositif SISSI au GANIL qui permet d'envoyer des faisceaux issus de fragmentation du projectile dans toutes les salles d'expériences peut ouvrir de nouvelles perspectives: en effet on peut analyser les diffusions avec le spectromètre de très haute résolution SPEG.

II.6. Excitation Coulombienne de systèmes faiblement liés, le développement de la technique expérimentale: grands compteurs germanium associés au spectromètre LISE3. Perspectives.

Une question intéressante est de savoir si les noyaux à halo peuvent avoir des niveaux excités *liés* que la fenêtre ouverte en énergie de liaison soit très restreinte. La méthode expérimentale a récemment été développée au GANIL, pour des faisceaux radioactifs en provenance du spectromètre LISE3. Comme le montre la figure 8, des compteurs au Germanium hyperpur de très grand volume, de type "EUROGAM", ont été placés autour d'une cible avec un numéro atomique élevé, afin de provoquer une excitation Coulombienne des projectiles sortant du spectromètre (profitant des fortes probabilités de transition E1, voir le chapitre II.4). La méthode en soi est, bien sûr, un des grands outils classiques de la physique nucléaire à basse énergie, mais elle n'avait jamais été appliquée à un faisceau radioactif issu de la fragmentation du projectile. En effet ces derniers ont des intensités inférieures de plusieurs ordres de grandeur à celles des faisceaux stables et des qualités optiques médiocres.

La figure 9 montre les signaux obtenus dans les trois compteurs gamma pour un faisceau secondaire de ^{11}Be d'une énergie de 45 MeV/u [27] choisi comme test de la méthode car cet isotope à halo est le seul connu possédant un niveau excité, à 320 keV, pour une énergie de liaison de 504 keV. Les photons de désexcitation sont clairement visibles mais on peut

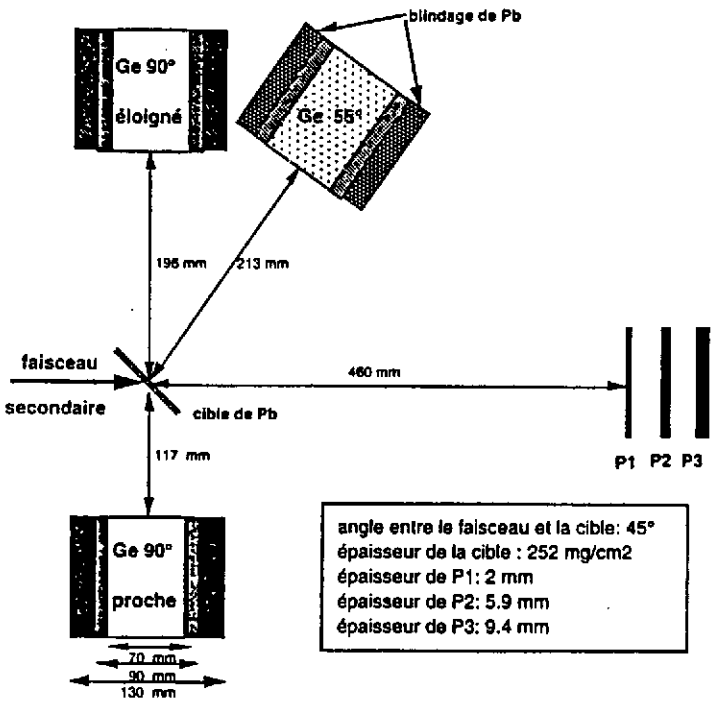


Figure 8: Dispositif expérimental d'excitation coulombienne installé à la sortie de LISE3 (voir II.6)

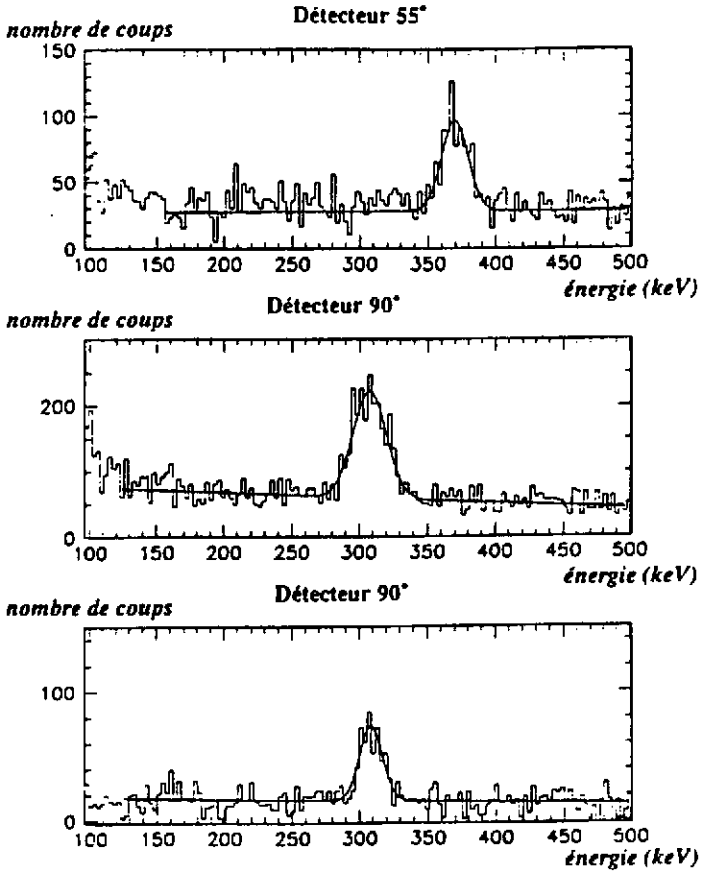


Figure 9: Spectres γ observés dans les détecteurs installés à 55° et à 90°, respectivement dans une configuration proche et éloignée de la cible (voir aussi Figure 8 et chapitre II.6).

remarquer l'important déplacement Doppler en fonction de l'angle, résultant de la haute énergie du projectile, et de façon similaire l'important élargissement Doppler. Ce dernier est aussi présent pour les détecteurs dont l'axe est à 90° par rapport à l'axe du faisceau, car ceux-ci, compte tenu de leur grande dimension, "voient" une large plage angulaire. Une façon de diminuer cet élargissement est d'éloigner les détecteurs de la cible comme on le montre la différence entre le détecteur "proche" et "éloigné". Dans une telle hypothèse, il faudrait cependant grandement augmenter le nombre des détecteurs pour maintenir une efficacité correcte, c'est-à-dire penser, en d'autres termes, à l'utilisation d'une boule gamma complète. Le rapport signal/bruit se verra alors sensiblement amélioré, limité toutefois par des élargissements Doppler dus à la mauvaise qualité optique intrinsèque du faisceau secondaire. Finalement, il faut aussi tenir compte de l'épaisseur de la cible induisant un ralentissement différentiel (nous pouvions la choisir assez grande, à cause de la somme de toutes les autres sources d'élargissement dans la configuration ci-dessus pour optimiser le signal). L'analyse encore préliminaire de cette expérience permet déjà de dire que pour les noyaux légers à halos ^{8}He,^{11}Li,^{12,14}Be il n'existe pas d'états excités liés.

De façon plus prospective, on peut dire que la technique mise en oeuvre ouvre une nouvelle voie à l'étude de la structure nucléaire de noyaux instables. En effet, l'association de boule γ de haute résolution avec les faisceaux délivrés par un *post-accélérateur* de bonnes qualités optiques et d'énergie mieux adaptée sera un outil important de spectroscopie de noyaux exotiques.

II.7. Réactions de break-up d'un noyau à halo: comment séparer les effets de la structure nucléaire et le mécanisme de réaction pour le halo à un neutron: le cas du ^{11}Be. Utilisation de cibles de numéro atomique Z différent: Break-up Coulombien, nucléaire et leur "interférence".

Comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent, les noyaux à halo ont le plus souvent un seul état lié, le fondamental. Ils posent donc un problème expérimental particulier car on ne peut pas les étudier par des méthodes spectroscopiques habituelles de structure nucléaire. (Cependant des signes indirects de la manifestation du halo peuvent être observés dans la désintégration β [28]. A la place, il est vite apparu qu'une étude plus fine de leurs réactions pouvait livrer des renseignements intéressants. Il s'agissait donc de pousser les expériences avec les faisceaux exotiques au-delà des "simples" mesures de sections efficaces *intégrales* (cf. chapitre II.4.). En particulier, des expériences ont visé des mesures de distributions en moment des fragments issus des réactions de break-up des noyaux à halo. Bien que les premières expériences aient d'abord ciblé le ^{11}Li [29,30], nous allons discuter ici en premier le cas du ^{11}Be, plus simple car constitué d'un halo avec *un seul neutron*. On n'a donc pas à se préoccuper des corrélations neutron-neutron et on peut séparer le rôle joué par la structure du noyau de celui du mécanisme de réaction. Tel était le but d'une expérience réalisée avec LISE3 qui fournissait un faisceau pur de ^{11}Be de 41 MeV/u.

Le dispositif expérimental est montré dans la figure 10. Après avoir interagi avec les cibles de réaction (béryllium, titane et or), les fragments chargés étaient détectés par un télescope à semi-conducteur et les neutrons dans un hodoscope constitué de scintillateurs liquides. L'hodoscope couvrant une large plage angulaire il a été possible de mesurer des sections efficaces différentielles. La figure 11 montre, par exemple la distribution angulaire des neutrons *en coincidence avec un fragment de* ^{10}Be pour la cible d'or. Le choix de la coincidence garantissait le caractère périphérique de la réaction et le Z élevé de la cible la prédominance d'une dissociation Coulombienne. En effet, les neutrons sont fortement piqués vers l'avant, leur distribution en moment donc très étroite ce qui, via le principe d'Heisenberg, correspond à une extension spatiale importante, signature claire de leur provenance du halo. Il faut également noter les fortes valeurs absolues des sections efficaces (quelques barn pour la section efficace intégrée!) en accord avec les prédictions de Hansen et Jonson (voir aussi II.4.). Le trait plein dans la figure correspond à un calcul perturbatif d'excitation coulombienne qui prend comme fonction d'onde du halo une fonction de type Yukawa [31]. L'accord avec la courbe expérimentale est remarquable sachant qu'aucun paramètre n'est ajusté. La grande sensibilité à la faible énergie de liaison est clairement visible sur les courbes en pointillés correspondant au même calcul avec des énergies de liaison plus faible (S_n=250 keV) et plus forte (S_n=1 MeV) que la valeur expérimentalement connue de 504 keV.

Nous avons donc vu que pour une cible de Z élevé la contribution coulombienne décrivait quasi quantitativement les sections efficaces. Afin de comprendre les contributions nucléaires, un deuxième calcul basé sur l'approximation soudaine a été effectué. Il tient compte de l'effet combiné de dissociation nucléaire et coulombienne. Là aussi il a été possible d'obtenir des expressions analytiques [32]. La figure 12 représente les sections efficaces expérimentales de dissociation pour la réaction $^{11}Be \rightarrow ^{10}Be$ pour trois différentes cibles Be, Ti, Au. Les courbes en traits pleins correspondent aux contributions calculées pour l'absorption et pour la voie inélastique c'est à dire l'état final consistant en ^{10}Be et un neutron libre; la courbe supérieure résulte des deux contributions précédentes. La courbe en traits pointillées représente un calcul sans contribution nucléaire. Cela montre ce que donnerait une dissociation purement coulombienne avec le même calcul. La contribution inélastique obtenue en annulant le terme coulombien ne peut être distinguée de l'absorption et n'est donc pas montrée. De cette figure on peut voir que les calculs sans paramètre libre reproduisent tout à fait les sections efficaces intégrales de dissociation. Les distributions en moment, comme c'était déjà le cas pour le calcul d'excitation coulombienne en perturbation pour la cible d'or (voir figure 11), sont bien reproduites également en valeur absolue pour les cibles légères. L'ensemble des résultats expérimentaux et des calculs peuvent être trouvés dans la référence [32]

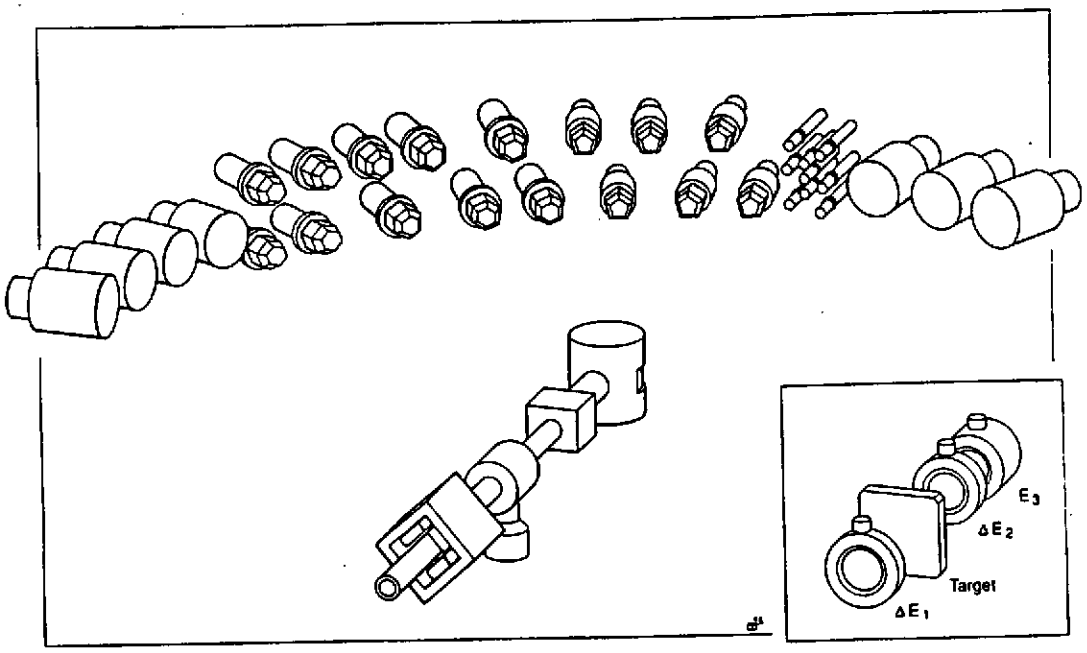


Figure 10: Dispositif expérimental pour l'étude du break-up de noyaux à halo utilisé auprès de LISE3 (voir texte du chapitre II.7).

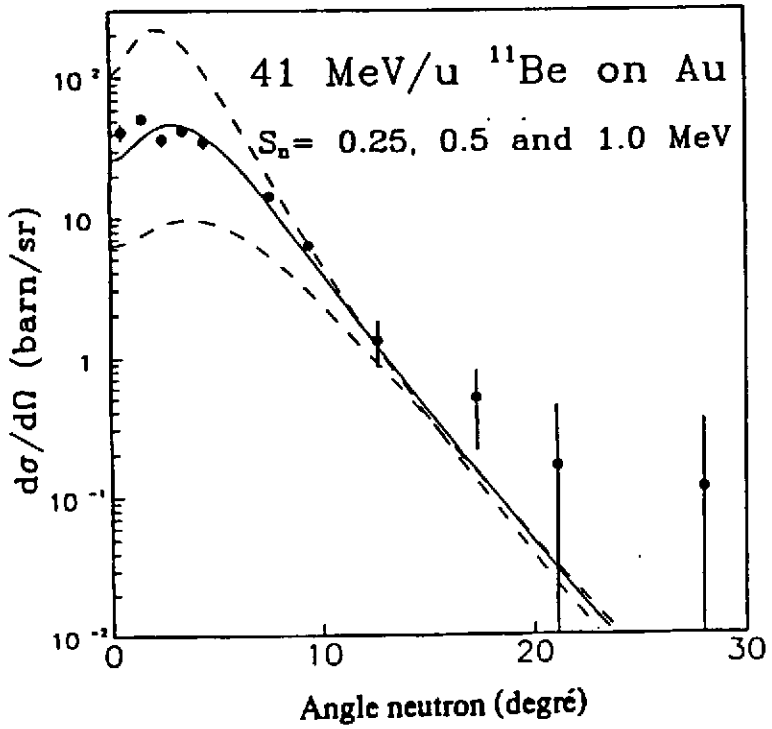


Figure 11: Distributions angulaires des neutrons observés dans le break-up du ^{11}Be à 41MeV/u (voir texte du chapitre II.7)

II.8 Perfectionnement des dispositifs expérimentaux pour l'étude du break-up: Mesures de distribution en moment parallèle (MSU, GSI) et cinématique complète (RIKEN, MSU, GSI). Le halo à deux neutrons (surtout ^{11}Li): Discussion (d'exemples) d'expériences du type break-up à différentes énergies. Distributions angulaires de neutrons et distributions en moment des fragments chargés à différentes énergies. Corrélations neutron-neutron.

Au paragraphe précédent nous avons discuté une expérience mesurant les distributions en moment des neutrons issus du break-up d'un noyau à halo. Bien sûr, on peut aussi mesurer ces distributions pour les particules chargées de recul et "l'idéal" seraient des expériences de cinématique complète. Une revue des différents résultats expérimentaux est présentée dans les paragraphes 5.6 et 5.7 de la référence [2]. Historiquement, ce fut d'abord les moments transverses par rapport à la direction du faisceau qui furent étudiés (voir par exemple [33]). Depuis, il a été montré [34] que les moments transverses pour les ions lourds étaient affectés par la déflexion coulombienne ainsi que par la diffusion multiple (les cibles utilisées dans les expériences de break-up sont souvent assez épaisses). Par contre, les distributions en moment parallèle, elles, ne sont pas sensibles à ces effets et reflètent mieux (la transformée de Fourier de) la fonction d'onde du halo [35]. N.A. Orr et al. ont développé une méthode élégante de mesure des distributions en moment parallèle des ^{9}Li issus du break-up du ^{11}Li à 66MeV/u sur différentes cibles. Cette expérience a été réalisée à MSU [34] avec le spectromètre A1200 de configuration similaire à LISE. L'astuce consistait à placer la cible de réaction au plan focal intermédiaire et d'analyser les produits chargés de réaction dans la seconde partie du spectromètre. Le spectromètre travaillant en mode "dispersion matching", l'énergie différente des ^{11}Li incidents était ainsi automatiquement prise en compte et le problème de la grande dispersion en moment d'un faisceau secondaire produit par fragmentation de cette manière contourné. La méthode est en principe adaptable à tous les spectromètres achromatiques et est utilisée maintenant également avec le FRS de GSI aux énergies relativistes(voir H. Geissel dans [1]).

Des expériences visant une cinématique complète sont maintenant montées à RIKEN, MSU, GSI, un des buts étant d'étudier des corrélations neutron-neutron dans les systèmes à halo di-neutronique. K. Riisager a attiré l'attention des expérimentateurs sur la façon souvent différente d'extraire de leurs données les largeurs des distributions en moment. Il a notamment entrepris une analyse comparative de ces distributions obtenues dans toutes les expériences sur le ^{11}Li (voir K. Riisager dans [1]). La figure 13 montre les résultats obtenus. On voit tout d'abord que les largeurs sont très faibles et dépendent très peu de l'énergie. Ainsi le fait que les distributions angulaires des neutrons soient très piquées vers l'avant, mises en évidence d'abord sur LISE (3° "d'ouverture" pour le ^{11}Li [29]), persiste à des énergies plus élevées.

La figure montre aussi qu'il existe un rapport $\sqrt{2}$ entre la largeur des distributions en moment des fragments chargés et celles déduites des distributions angulaires des neutrons (mesurées en "simple"). En vertu de la conservation de l'impulsion, la largeur en moments

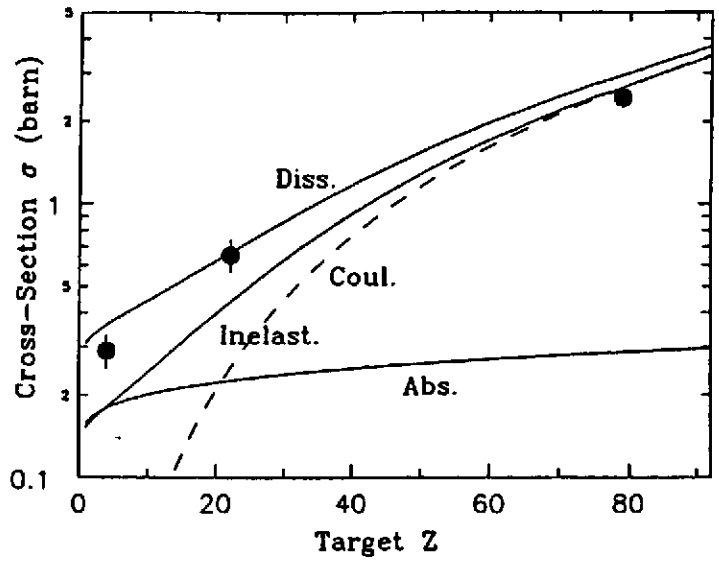
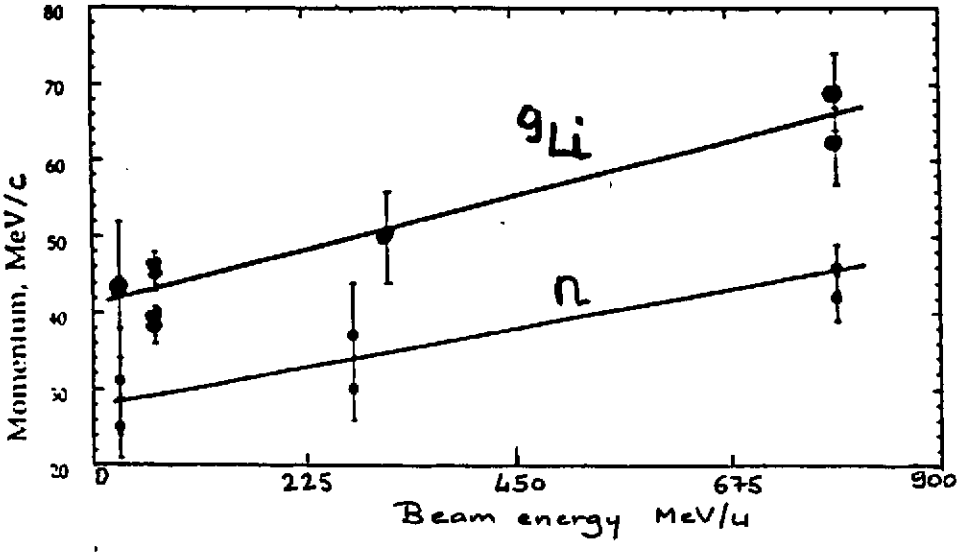


Figure 12: Sections efficaces expérimentales de dissociation pour la réaction $^{11}Be \rightarrow ^{10}Be$ pour différentes cibles comparées aux contributions calculées (voir texte du chapitre II.7)



E_{beam} (MeV/u)	Distribution	Target	FWHM(W_2) (MeV/c)
26-30	p(n)	Pb	31(7) MSU
24-34	$p_\perp$(n)	Be, Ni, Au	25(4) GANIL
280	$p_\perp$(n)	C, Pb	37(7), 30(4) GSI
790	$p_\perp$(n)	C, Pb	46(3), 42(3) Berkeley
26-30	p(^{9}Li)	Pb	43(9) MSU
60-72	$p_\parallel$(^{9}Li)	Be, Nb, Ta, U	46(2), 45(2), 39(2), 38(2) MSU
319	$p_\parallel$(^{9}Li)	Pb	50(6) GSI
790	$p_\perp$(^{9}Li)	d, C, Pb	69(5), 62(5), 170(35) Berkeley

Figure 13: Largeurs de distributions en moment pour le ^{9}Li et pour les neutrons dans le break-up du ^{11}Li en fonction de l'énergie. Le tableau résume les mesures effectuées dans les différents laboratoires (d'après K. Riisager dans [1])

des ^{9}Li, $\Gamma_{^{9}Li}$, doit être égale à celle des deux neutrons Γ_{2n}. Il y a donc un facteur $\sqrt{2}$ entre Γ_{2n} et Γ_{n} correspondant à la valeur maximale que peut prendre la largeur Γ_{2n} si les deux neutrons ne sont pas du tout corrélés lorsqu'ils se séparent du ^{9}Li. Le fait que l'on semble observer aucune corrélation n'est pas encore compris. A titre d'exemple, Bertsch et Esbensen prédisent une (anti)-corrélation [36] dans un calcul théorique. Bien sûr le ^{11}Li est un noyau plus compliqué que le ^{11}Be car c'est un système à trois corps. De plus, il faut se rappeler (voir Figure 1) que ^{10}Li est non lié et qu'il en est de même pour le di-neutron. Par conséquent ce noyau à halo di-neutronique (comme d'autres ^{14}Be, ^{17,19}B...) n'est même seulement lié que par les effets à trois corps. D'un point de vue théorique, on essaie de développer des modèles adaptés (voir I. Thompson dans [1]), d'un point de vue expérimental il faut pousser au maximum les expériences de cinématique complète qui ont démarrées à MSU [37], à RIKEN [38] et à GSI [39]. Ce type d'expériences permet d'étudier des états dans le continuum comme des résonances géantes de basse énergie. Notons que les premières observations sont plutôt conformes que les excitations du halo sont moins de nature collective que venant de la "force à une particule" responsable des fortes transitions E1.

III. En guise de conclusion.

Ce cours a montré que l'étude des réactions induites par des faisceaux exotiques a donné lieu à la découverte de nouveaux phénomènes. Ces expériences, jusqu'alors infaisables, sont devenues possibles grâce au développement de faisceaux d'ions radioactifs par fragmentation du projectile. Compte tenu de la gamme en énergie et des qualités optiques médiocres, cette méthode ne donne cependant accès qu'à un domaine limité d'expériences. La récente requête de *post-accélérateurs à ions radioactifs*, en particulier aussi en Europe [40], vise le créneau très prometteur aux alentours de la barrière Coulombienne. La qualité optique des faisceaux issus des post-accélérateurs devrait être comparable à celle des faisceaux stables d'aujourd'hui. En France, la construction de l'ensemble SPIRAL a commencé auprès du GANIL dans le cadre d'une grande collaboration entre différents laboratoires. La figure 14 montre la gamme d'énergie prévue en sortie de SPIRAL. A Grenoble, la faisabilité d'un projet utilisant les neutrons du réacteur de l'ILL pour la production des espèces radioactives et le cyclotron SARA de l'ISN pour leur post-accélération est étudié dans un programme de recherche et développement.

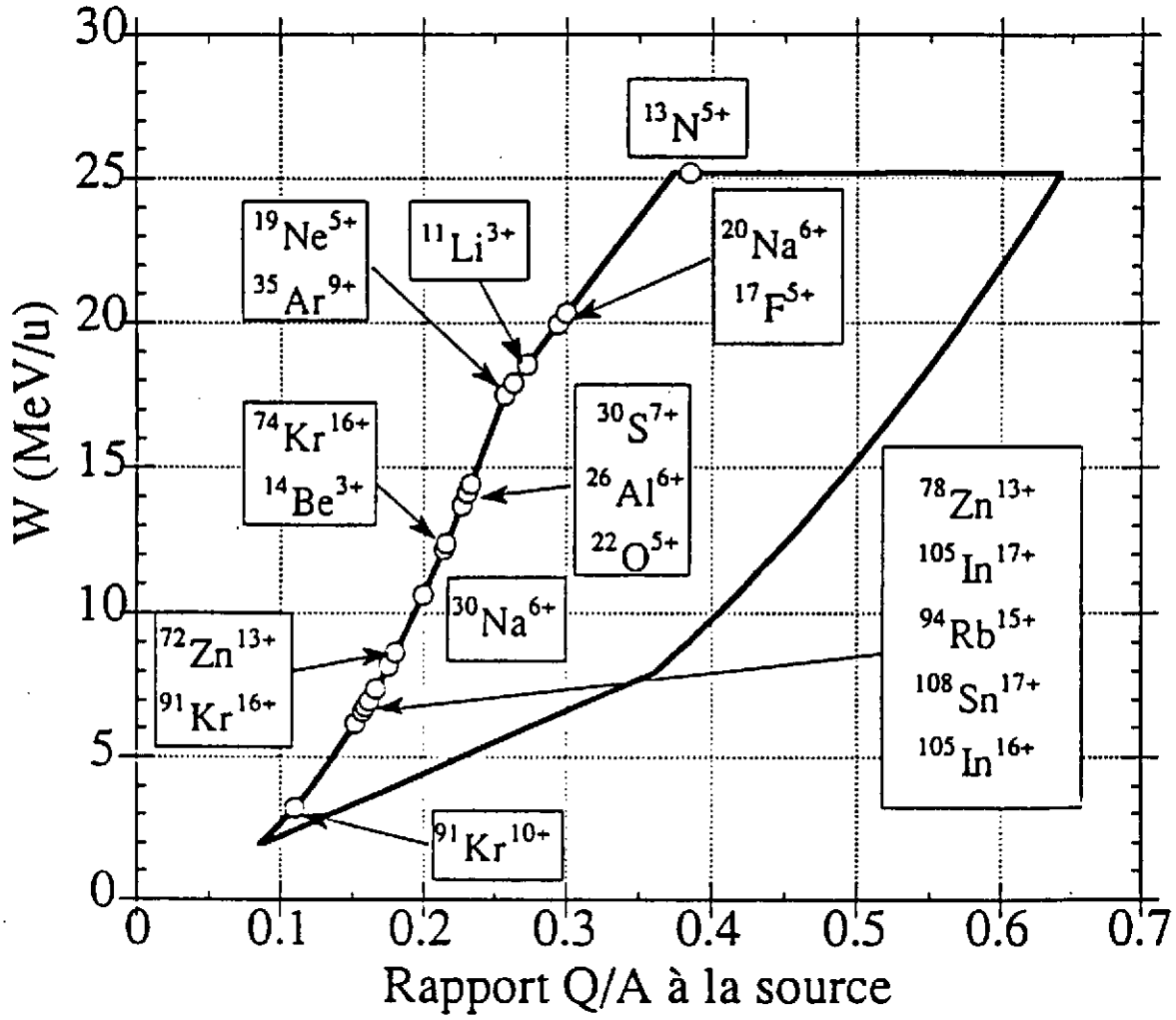


Figure 14: Domaine d'énergie du futur post-accélérateur SPIRAL au GANIL

REFERENCES

[1] Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Radioactive Nuclear Beams, East Lansing, Michigan, USA, 1993, D.J. Morrissey ed., Editions Frontières (Gif-sur-Yvette), sous presse

[2] Alex C. Mueller and Bradley M. Sherrill, "Nuclei at the limits of particle Stability", Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 43 (1993) sous presse

[3] P.G. Hansen, Nucl. Phys. A553 (1992) 89c

[4] P. G. Hansen, New Scientist, édition du 9 octobre 1993

[5] W. Mittig, 5th Int. Conf. on Nuclei far from Stability, Rosseau Lake, Ontario, Canada, Septembre 1987, AIP Conference Proceedings N°164, Ian S. Towner ed.

[6] G. Audi, Workshop on Nuclear Structure of light Nuclei far from Stability, Experiment and Theory, Obernai, France, Novembre 1989, CRN Strasbourg, G. Klotz ed.

[7] A.S. Jensen and K. Riisager, Nucl. Phys. A537 (1992) 45

[8] T.J.M. Symons, Y.P. Viyogi, G.D. Westfall, P. Doll, D.E. Greiner, H. Faraggi, P.J. Lindstrom, D.K. Scott, H.J. Crawford and C. McParland, Phys. Rev. Lett. 42 (1979) 40

[9] G.D. Westfall, T.J.M. Symons, D.E. Greiner, H.H. Heckmann, P.J. Lindstrom, J. Mahoney, A.C. Shotter, D.K. Scott, H.J. Crawford, C. McParland, T.C. Awes, C.K. Gelbke and J.M. Kidd, Phys. Rev. Lett. 43 (1979) 1859

[10] V. Borrel, D. Guerreau, J. Galin, G. Gatty, D. Jacquet and X. Tarrago, Z. Phys. A314 (1983) 91

[11] R. Anne, D. Bazin, A.C. Mueller, M. Langevin, J.C. Jacmart, Nucl. Inst. Meth. A257 (1987) 215

[12] Alex C. Mueller and Rémy Anne, Nucl. Inst. Meth. B56 (1991) 559
Rémy Anne and Alex C. Mueller, Nucl. Inst. Meth. B70 (1992) 276

[13] D. Guillemaud-Mueller, J.C. Jacmart, E. Kashy, A. Latimier, A.C. Mueller, F. Pougheon, A. Richard, Yu.E. Penionzhkevich, A.G. Artukh, A.V. Belozyorov, S.M. Lukyanov, R. Anne, P. Bricault, C. Détraz, M. Lewitowicz, Y. Zhang, D. Bazin and W. D. Schmidt-Ott, Phys. Rev. C41 (1990) 937 et références incluses

[14] D. Bazin, J.P. Dufour, A. Fleury, F. Hubert, R. del Moral, M.S. Pravikoff, R. Anne, P. Bricault, C. Détraz, M. Lewitowicz, Y. Zhang, D. Guillemaud-Mueller, J.C. Jacmart, A.C. Mueller, F. Pougheon, A. Richard, Phys.Rev. C45 (1992) 69

[15] J.P. Dufour, voir cours à l'école Joliot-Curie 1993, ce volume

[16] O. Sorlin, Thèse Orsay 1991, IPNO T91.04
O. Sorlin, D. Guillemaud-Mueller, A. C. Mueller, V. Borrel, S. Dogny, F. Pougheon, K.L.Kratz, H. Gabelmann, B. Pfeiffer, A. Wöhr, W. Ziegert, Yu. E. Penionzhkevich, S. M. Lukyanov, V. S. Salamatin, R. Anne, C. Borcea, L. K. Fifield, M. Lewitowicz, M. G. Saint-Laurent, D. Bazin, C. Détraz, F. K. Thielemann, W. Hillebrandt, Phys.Rev. C47 (1993) 2941

[17] I. Tanihata, Nucl.Phys. A522 (1991) 275

[18] P.G. Hansen and B. Jonson, Europhys. Lett. 4 (1987) 409

[19] B. Blank, J.J. Gaimard, H. Geissel, K.H. Schmidt, H. Stelzer, K.Sümmerer, D. Bazin, R. Del Moral, J.P. Dufour, A. Fleury, F. Hubert, H.G. Clerc, M.Steiner, Z. Phys. A343 (1992) 375

[20] E. Arnold, J. Bonn, R. Gegenwart, W. Neu, R. Neugart, E.W. Otten, G. Ulm, K. Wendt, Phys. Lett. B197 (1987) 311

[21] E. Arnold, J. Bonn, A. Klein, R. Neugart, M. Neuroth, E.W. Otten, P. Lievens, H. Reich, W. Widdra, Phys. Lett. B281 (1992) 16

[22] M. Lewitowicz, C. Borcea, F. Carstoiu, M. G. Saint-Laurent, A. Kordyasz, R. Anne, P. Roussel-Chomaz, R. Bimbot, V. Borrel, S. Dogny, D. Guillemaud-Mueller, A. C. Mueller, F. Pougheon, F. A. Gareev, S. N. Ershov, S. M. Lukyanov, Yu. E. Penionzhkevich, N. Skobelev, S. Tretyakova, Z. Dlouhy, L. Nosek, J. Svanda, Z. Phys. A562 (1993) 301

[23] C.B. Moon, M. Fujimaki, N. Inabe, K. Katori, T. Kobayashi, H. Kumagai, T. Kubo, S. Shimoura, T. Suzuki, I. Tanihata, Proc. Int. Conf. on Nuclei far from Stability, Bernkastel-Kues, RFA, IOP Publishing (London) 1993

[24] J.J. Kolata, M.J. Zahar, R. Smith, K. Lamkin, M. Belbot, R. Tighe, B.M. Sherrill, N.A. Orr, J.S. Winfield, J.A. Winger, S.J. Yennello, G.R. Satchler, A.H. Wuosma, Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 2631

[25] M. C. Mermaz, Phys. Rev. C 47 (1993) 2213

[26] R. Da Silveira, S. Klarsfeld, A. Boukour, Ch. Leclercq-Willain, Phys. Rev. C48 (1993) 468

[27] R. Anne, D. Bazin, R. Bimbot, M. J. G. Borge, J. M. Corre, S. Dogny, D. Guillemaud-Mueller, P. G. Hansen, P. Hornshoj, P. Jensen, B. Jonson, M. Lewitowicz, A. C. Mueller, R. Neugart, T. Nilsson, G. Nyman, F. Pougheon, K. Riisager, M. G. Saint-Laurent, G. Schrieder, O. Sorlin, O. Tengblad, K. Wilhelmsen Rolander, Nouvelles de GANIL n°45, Avril 1993, M. Bex & J. Galin eds., p 7

[28] K. Riisager, M.J.G. Borge, P.G. Hansen, G. Jonson, P. Møller, T. Nilsson, G. Nyman, O. Tengblad, K. Wilhelmsen Proc. Int. Conf. on Nuclei far from Stability, Bernkastel-Kues, RFA, IOP Publishing (London) 1993

[29] R. Anne, S. E. Arnell, R. Bimbot, H. Emling, D. Guillemaud-Mueller, P. G. Hansen, L. Johannsen, B. Jonson, M. Lewitowicz, S. Mattsson, A. C. Mueller, R. Neugart, G. Nyman, F. Pougheon, A. Richter, K. Riisager, M. G. Saint-Laurent, G. Schrieder, O. Sorlin, K. Wilhelmsen
Phys. Lett. B 250 (1990) 19

[30] K. Riisager, R. Anne, S. E. Arnell, R. Bimbot, H. Emling, D. Guillemaud-Mueller, P. G. Hansen, L. Johannsen, B. Jonson, A. Latimier, M. Lewitowicz, S. Mattsson, A. C. Mueller, R. Neugart, G. Nyman, F. Pougheon, A. Richard, A. Richter, M. G. Saint-Laurent, G. Schrieder, O. Sorlin, K. Wilhelmsen
Nucl. Phys. A540 (1992) 365

[31] R. Anne, S.E. Arnell, R. Bimbot, S. Dogny, H. Emling, H. Esbensen, D. Guillemaud-Mueller, P.G. Hansen, P. Hornshøj, F. Humbert, B. Jonson, M. Keim, M. Lewitowicz, P. Møller, A.C. Mueller, R. Neugart, T. Nilsson, G. Nyman, F. Pougheon, K. Riisager, M.-G. Saint-Laurent, G. Schrieder, O.

Sorlin, O. Tengblad, K. Wilhelmsen Rolander and D. Wolski, Phys. Lett. B304 (1993) 55

[32] R. Anne, R. Bimbot, S. Dogny, H. Emling, D. Guillemaud-Mueller, P.G. Hansen, P. Hornshøj, F. Humbert, B. Jonson, M. Keim, M. Lewitowicz, P. Møller, A.C. Mueller, R. Neugart, T. Nilsson, G. Nyman, F. Pougheon, K. Riisager, M.G. Saint-Laurent, G. Schrieder, O. Sorlin, O. Tengblad and K. Wilhelmsen-Rolander, prétirage IPNO DRE 93-32 et soumis à Nuclear Physics A.

[33] T. Kobayashi, O. Yamakawa, K. Omata, K. Sugimoto, T. Shimoda, N. Takahashi, I. Tanihata, Phys. Rev. Lett. 60 (1989) 2599

[34] N.A. Orr, R. Antaramanan, Sam M. Austin, C.A. Bertulani, K. Hanold, J.H. Kelly, D.J. Morrissey, B.M. Sherrill, G.A. Souliotis, M. Thoennessen, J.S. Winfield, J.A. Winger , Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 2050

[35] C.A. Bertulani and K.W. McVoy, Phys. Rev. C46 (1992) 2638

[36] H. Esbensen, G. F.Bertsch, Nucl. Phys. A542 (1992) 310

[37] D. Sackett, K. Ieki, A. Galonsky, C.A. Bertulani, H. Esbensen, J.J. Kruse, W.G. Lynch, D.J. Morrissey, N.A. Orr, B.M. Sherill, H. Schulz, A. Sustich, J.A. Winger, F. Deak, A. Horvath, A. Kiss, Z. Seres, J.J. Kolata, R.E. Warner, D.L. Humphrey, Phys. Rev. C48 (1993) 118

[38] S. Shimoura, T. Nakamura, M. Ishihara, N. Inabe, T. Kobayashi, T. Kubo, R.H. Siemssen, I. Tanihata, Proc. Int. Conf. on Nuclei far from Stability, Bernkastel-Kues, RFA, IOP Publishing (London) 1993

[39] G. Schrieder for the Aarhus, Bochum, CERN, Cracow, Frankfurt, Gießen, Göteborg, GSI-Darmstadt, Mainz, Orsay, TH-Darmstadt Collaboration, Proc. Int. Conf. on Nuclei far from Stability, Bernkastel-Kues, RFA, IOP Publishing (London) 1993

[40] Report on the European Radioactive Beam Facilities from the NuPECC Study Group, E.G. Körner, ed., München (1993)

