

Sonder les noyaux en les épluchant

Marlène Assié⁽¹⁾, Denis Lacroix⁽²⁾ et Jean-Antoine Scarpaci⁽¹⁾ (scarpaci@ipno.in2p3.fr)

(1) Institut de Physique Nucléaire, UMR 8608, 15, rue Georges Clemenceau, 91406 Orsay Cedex

(2) Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL), BP 55027, 14076 Caen Cedex

Le noyau atomique est un archétype de système quantique à peu de constituants.

Lors d'une collision nucléaire périphérique, si les deux noyaux s'effleurent à peine, un ou plusieurs nucléons peuvent être arrachés à l'un d'entre eux. La détection des particules émises permet de remonter aux caractéristiques du noyau émetteur, comme ses propriétés quantiques ou sa forme, ainsi qu'aux corrélations initiales dans le noyau.

Le phénomène que discute ce papier, l'épluchage des noyaux, aussi appelé *towing mode*, est un nouveau mécanisme de réaction qui a été récemment découvert par une équipe française. Il est particulièrement intéressant, car il permet de remonter à de nombreuses propriétés des nucléons dans le noyau.

Découverte d'un phénomène : le *towing mode*

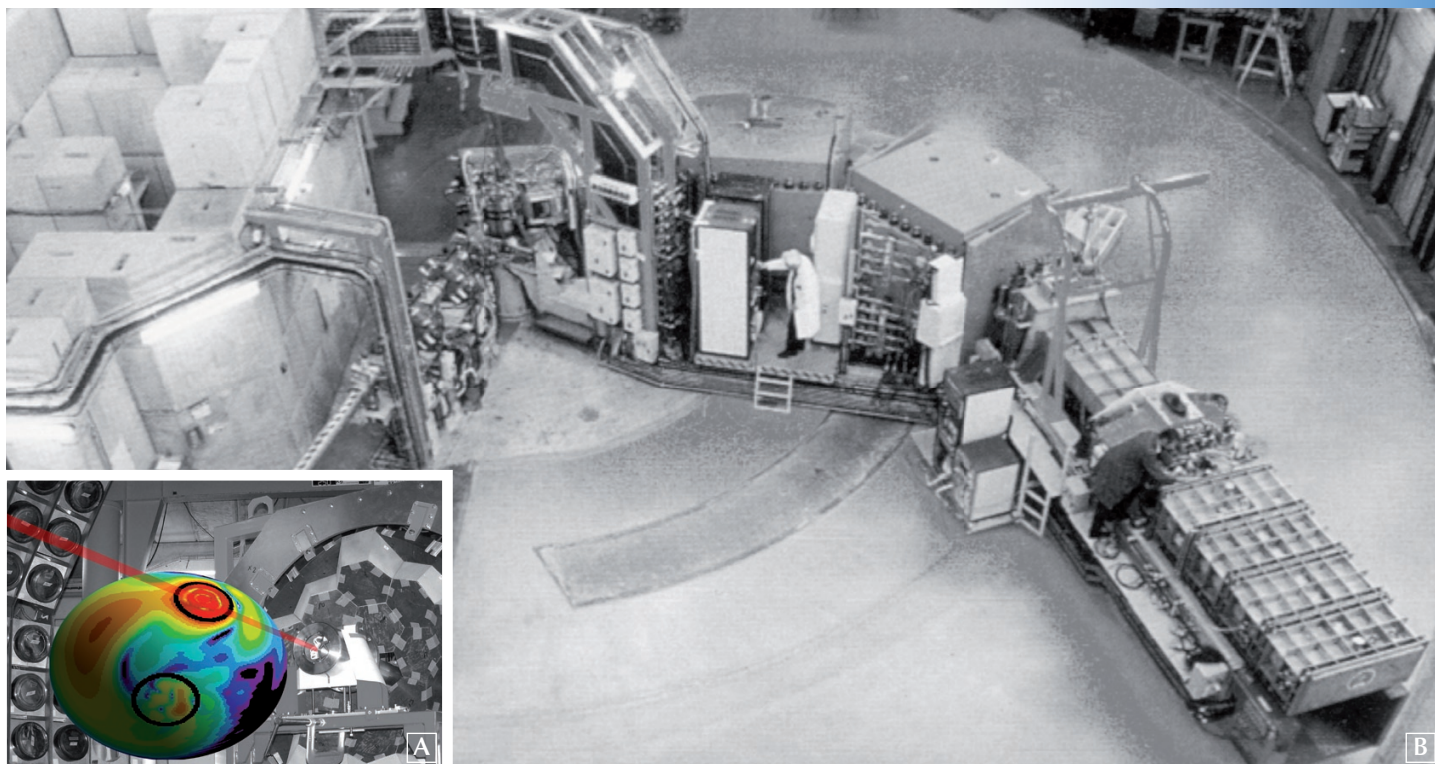
De nombreuses expériences en physique nucléaire consistent à provoquer la collision entre deux noyaux, l'un étant la cible et l'autre le projectile. Si cette collision n'est pas trop violente, elle conduit à l'émission de quelques neutrons et protons. La mesure précise des propriétés de ces particules peut permettre de remonter à leur état dans le noyau d'origine et donc à l'état fondamental de ce noyau. C'est lors d'expériences réalisées au GANIL, le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds qui est situé à Caen, en Basse-Normandie, que, dans les années 90, il a été observé que certains des nucléons émis par la cible avaient des propriétés très particulières :

- leur vitesse ne correspondait ni à celle du projectile ni à celle de la cible, contrairement aux expériences usuelles pour lesquelles cette vitesse permet d'identifier l'origine du nucléon observé (ceux ayant une vitesse proche de celle du projectile provenant du projectile, et ceux ayant une vitesse très faible provenant de la cible). Or, dans certains cas, il a été observé que les nucléons avaient une vitesse intermédiaire entre ces deux limites ;
- la mesure précise du bilan énergétique a montré que ces nucléons étaient les moins liés et les plus périphériques du noyau ;
- la trajectoire de ces nucléons avait la caractéristique de se trouver dans le plan de la réaction défini par le projectile diffusé.

Au sein de notre équipe expérimentale, nous avons très rapidement émis l'hypothèse que le processus physique sous-jacent devait être assez simple. Tout se passait en effet comme si le nucléon, issu de la cible, était

attiré par le noyau projectile sans jamais être complètement transféré. On savait déjà que lorsqu'un projectile passe à proximité d'un noyau cible dans une collision de basse énergie, les nucléons de la cible ressentent l'attraction du potentiel nucléaire du projectile, et peuvent être transférés de l'un à l'autre : c'est un processus appelé le « transfert ». Si le projectile passe au contraire trop vite, les nucléons n'ont pas le temps d'être transférés, mais une partie de l'énergie du projectile leur est cependant transmise. Ils sortent alors du noyau dans lequel ils étaient liés, sans pour autant être capturés par l'autre noyau. Ce mécanisme, qui peut être vu comme un remorquage, a été nommé *towing mode* (littéralement « mode de remorquage ») (fig. 1) et conduit à des propriétés cinématiques des nucléons émis qui lui sont caractéristiques. De façon symétrique, ce processus peut aussi extraire du projectile un nucléon, qui sera alors ralenti par la cible, comme nous le verrons lors de l'étude des noyaux exotiques.

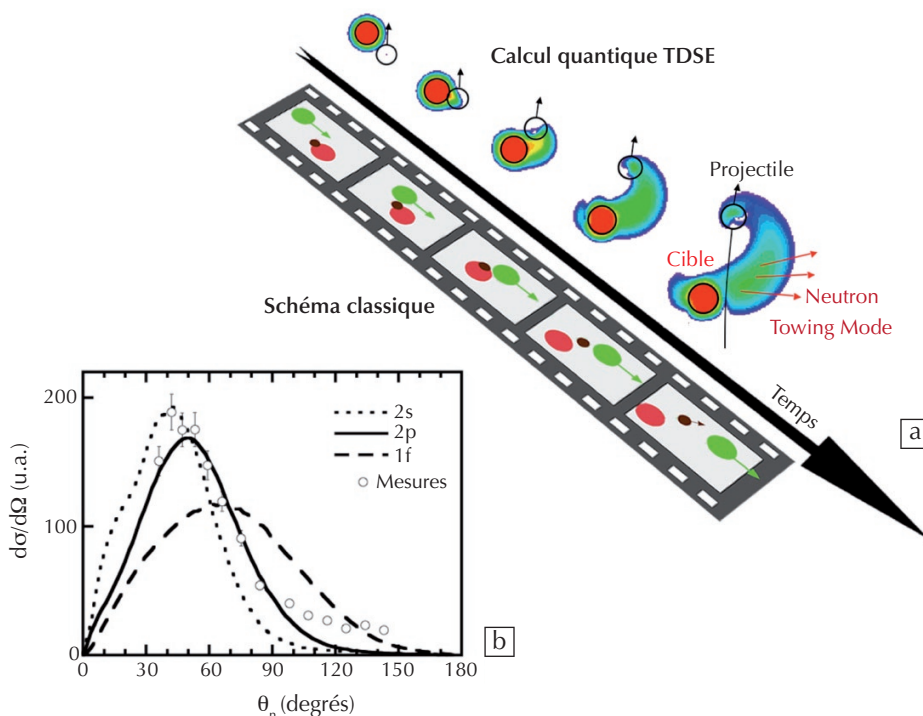
Dans la mesure où les noyaux ne font que s'effleurer, ces collisions sont dites « très périphériques » et les mécanismes en jeu sont le reflet de ces collisions peu violentes. Le noyau émetteur reste alors dans son état fondamental, ou dans un état excité très proche de l'état fondamental [1]. Ces hypothèses sur le mécanisme microscopique responsable des émissions observées ont été très rapidement validées grâce à un calcul quantique [2]. Nous avons en effet développé un modèle spécifique pour ce phénomène, et résolu l'équation de Schrödinger dépendante du temps (TDSE pour Time Dependent Schrödinger Equation) décrivant la fonction d'onde du nucléon émis.



A. Vue artistique de l'épluchage des noyaux d'hélium 6 (dont la trajectoire est indiquée par la ligne rouge) **par une cible de noyaux de plomb.** Le calcul dynamique de la densité de probabilité du neutron émis lors de l'épluchage est présenté en couleurs. En fond, on voit les détecteurs de neutrons. On remarquera qu'ici, contrairement à la figure 1a, c'est le projectile qui est épluché.
B. Le spectromètre SPEG du GANIL, où ont été réalisées les expériences de cassure du béryllium 11 ainsi que les premières expériences où le *towing mode* a été identifié, avec la cible de nickel 58.

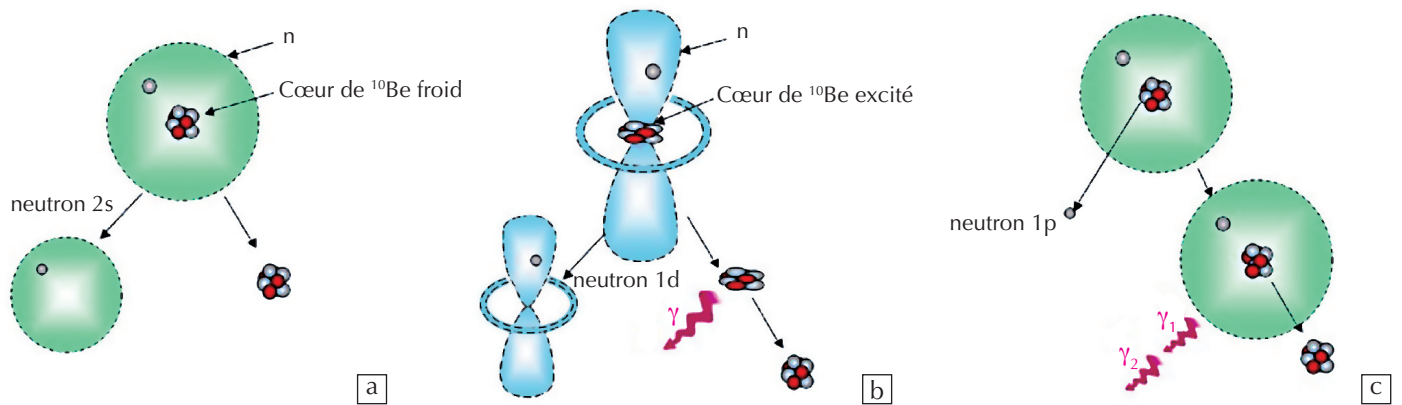
Un exemple d'évolution de cette fonction d'onde est donné sur la figure 1a pour divers temps. Au temps initial (en haut de la figure), la collision n'a pas encore eu lieu et la fonction d'onde est centrée autour de la cible. Au temps final, le projectile est passé près de la cible ; on voit qu'une partie de la fonction d'onde, initialement dans la cible, est transférée au projectile, tandis que l'autre partie représente une particule (neutron) qui peut être détectée. Cette émission d'une particule correspond au phénomène de *towing mode* observé expérimentalement. Notre calcul a également montré que les caractéristiques énergétiques et angulaires de la particule émise, dépendent de son état quantique initial, avant que le mécanisme d'émission ait lieu (fig. 1b). D'où l'idée d'utiliser ce phénomène pour extraire des informations sur le noyau.

Cette première étape dans l'élaboration d'un nouveau mécanisme a permis de valider notre intuition initiale et a placé les premières pierres d'un nouveau protocole expérimental.



1. (a) Séquences montrant l'évolution du phénomène de *towing mode*. Au-dessus de la flèche : calcul quantique TDSE de l'évolution de la fonction d'onde du dernier nucléon lié dans le noyau cible, lorsqu'un projectile passe à sa périphérie. La densité de probabilité est représentée par un code de couleur (rouge pour les grandes densités, vert pour les densités intermédiaires et bleu pour les plus faibles). En dessous de la flèche, vue cinématographique classique du phénomène.

(b) Distribution angulaire des neutrons arrachés à un noyau de ^{58}Ni , obtenue lors d'une des premières expériences où le *towing mode* a été identifié. Les courbes représentent les résultats des calculs dynamiques, supposant que le nucléon occupe initialement des couches avec des nombres quantiques différents (2s, 2p, 1f). Seul un nucléon initialement dans une couche 2p permet de rendre compte des mesures. Cette figure illustre la dépendance du mécanisme de *towing mode* par rapport aux propriétés quantiques du nucléon émis.



2. Images des configurations constituant l'état fondamental du ^{11}Be , et de leur cassure par l'émission d'un neutron. (a) Dans le cas sphérique, le neutron émis est initialement dans un état 2s. (b) Dans le cas déformé, c'est un neutron du halo dans un état initial 1d qui est arraché au noyau ^{11}Be ; un photon gamma est émis pour retourner à l'état fondamental du ^{10}Be . (c) Cas où le neutron arraché provient du cœur : ici, deux photons gammas sont émis en cascade.

>>>

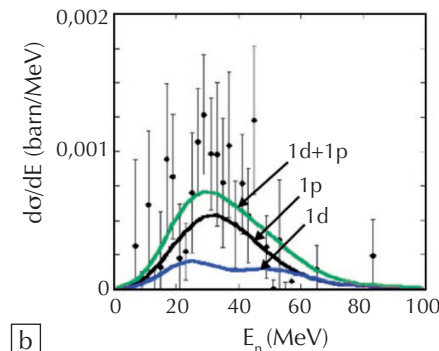
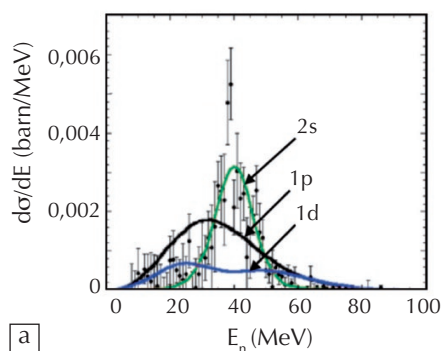
Le *towing mode*, un outil pour l'étude des noyaux

Le *towing mode* est donc un phénomène simple, et pourtant source de nombreuses informations sur les états quantiques dans les noyaux. En outre, du fait de sa forte section efficace, comparable à celle d'un mécanisme très courant et déjà mentionné (le transfert de nucléon), il se révèle être un outil de choix pour sonder les propriétés des noyaux stables, et même des noyaux exotiques qui sont produits en très faible quantité en laboratoire. Nous avons donc cherché à appliquer ce nouveau mécanisme à l'étude de certains de ces noyaux exotiques, appelés les « noyaux à halo » [3]. Ces derniers ont la particularité d'avoir un ou deux neutrons très peu liés, et dont la fonction d'onde s'étend très loin en périphérie du noyau. Un halo est donc présent autour de ces noyaux, ce qui leur donne une taille apparente beaucoup plus grande que leurs voisins.

Le premier noyau que nous avons étudié avec le *towing mode* fut le ^{11}Be , qui est l'archétype du noyau à halo. Il est composé de quatre protons et de sept neutrons et, au niveau microscopique, peut être décrit, dans son état fondamental et comme le permettent les lois de la mécanique quantique, par un mélange de deux configurations : l'une constituée d'un neutron dans un état 2s, « gravitant » autour et formant à lui seul le halo, lié à un cœur de ^{10}Be sphérique (fig. 2 a), et l'autre d'un neutron dans un état 1d lié à un cœur déformé et excité (fig. 2 b). Lors d'une réaction, c'est l'une ou l'autre de ces configurations qui est choisie. Dans la première, c'est le niveau fondamental du ^{10}Be qui est alimenté une fois le neutron arraché : aucun gamma n'est alors émis. Dans la deuxième configuration, une fois le neutron arraché au ^{11}Be , le ^{10}Be résiduel excité émet un photon gamma pour retourner à son état fondamental. La détection de ce photon permet donc de

savoir laquelle des deux configurations a été choisie pour chaque collision. Le cas présenté dans la figure 2c correspond à un neutron arraché au cœur du ^{10}Be .

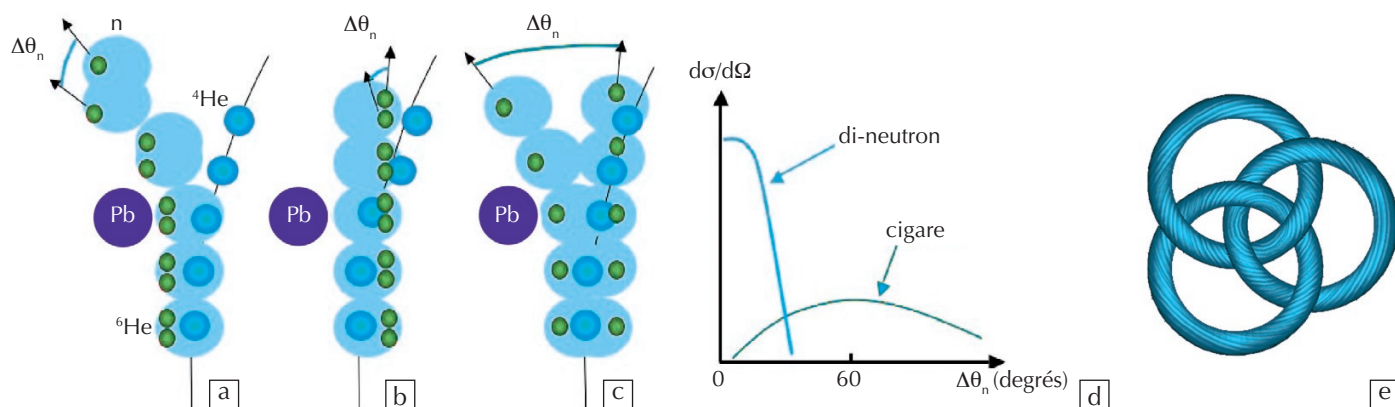
Nous avons effectué une expérience de cassure du ^{11}Be au GANIL en 2001, où avaient été mis en place des détecteurs pour identifier le noyau résiduel de ^{10}Be , les neutrons arrachés, et les rayons gamma. Cette fois-ci, le noyau de ^{11}Be qui va être épluché joue le rôle du projectile, car il s'agit d'un noyau radioactif qui ne peut pas être utilisé comme cible. Contrairement au cas de la figure 1a, le neutron détecté provient du projectile. Nous avons comparé les mesures expérimentales de l'énergie des neutrons aux résultats de nos simulations effectuées pour chacune des deux configurations (en négligeant les très faibles interférences entre elles) (fig. 3). Lorsque le neutron est émis seul (sans rayonnement gamma), il provient initialement d'une onde 2s (fig. 3a). En revanche, lorsqu'un photon gamma est détecté en coïncidence



3. Distribution en énergie des neutrons émis autour d'un angle de 40 degrés au cours de la réaction $^{11}\text{Be}+^{48}\text{Ti}$. L'échelle verticale est proportionnelle au nombre d'événements mesurés. Les courbes sont les résultats des calculs TDSE, réalisés en supposant que la fonction d'onde initiale du neutron est dans un état 2s, 1p ou 1d. (a) Spectre correspondant à des événements où aucun photon gamma n'est émis (fig. 2a).

(b) Spectre en coïncidence avec un photon gamma (figs. 2b et 2c).

On voit que l'émission sans gamma est compatible avec l'émission d'un neutron initialement dans une onde 2s, tandis que seule la somme des contributions des émissions par une onde 1p et 1d permet de reproduire le second cas.



4. Collisions entre un noyau d'hélium 6 et un noyau de plomb pour différentes configurations du halo : di-neutron (a et b) et cigare (c), conduisant respectivement à l'émission de deux neutrons à petits et grands angles relatifs. (d) Distribution en angle relatif $\Delta\theta_n$ entre les deux neutrons émis pour ces deux configurations. (e) Anneaux borroméens.

avec le neutron, le spectre des neutrons est plus bas en énergie et n'est plus reproduit par le calcul pour une onde 2s (fig. 3b). Une analyse précise montre l'existence de plusieurs origines de l'émission de rayon gamma. Soit il y a émission lors de l'arrachage de la configuration 1d (fig. 2b), soit un gamma peut également être émis lorsqu'un nucléon est arraché depuis l'état 1p (fig. 2c). Ce dernier cas correspond à l'émission d'un neutron du cœur de ^{10}Be , dont quatre neutrons sur les six sont dans l'état 1p. La désexcitation de cette configuration du ^{10}Be donne aussi lieu à l'émission de rayons gamma à l'énergie considérée. La détection d'un photon gamma signifie donc que l'on a détecté le neutron du halo qui était dans un état 1d, ou un neutron du cœur dans un état 1p. Nous avons ainsi confirmé non seulement que le neutron périphérique était bien soit dans un état 2s, soit dans un état 1d, mais nous avons aussi pu extraire la proportion respective de ces deux configurations dans l'état fondamental du ^{11}Be [4].

Sonder les corrélations à deux corps

Expérimentalement, on a observé que les noyaux présentant un nombre pair de neutrons et/ou de protons sont plus liés que les autres. Cet effet signe un phénomène bien connu en physique : l'appariement de paires de Cooper de fermions. Ainsi, lorsque deux nucléons sont appariés, l'arrachage de l'un d'eux affecte l'autre nucléon de la paire de Cooper de manière significative. Si les deux nucléons sont spatialement proches

l'un de l'autre (petite paire de Cooper, qui pourrait plutôt s'apparenter à un condensat de Bose-Einstein), leur probabilité d'être tous les deux arrachés par le mécanisme de *towing mode* est beaucoup plus grande que lorsqu'ils sont éloignés (paires de Cooper faiblement liées, comme dans BCS).

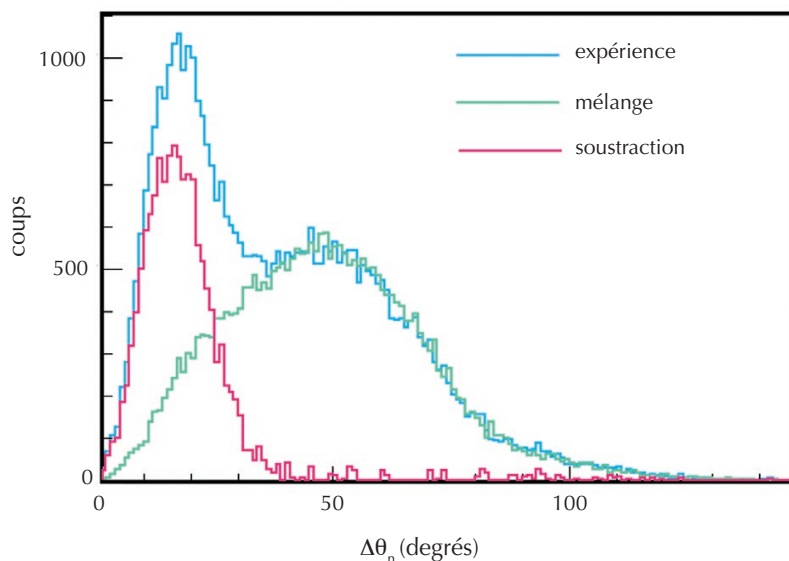
Les outils théoriques développés jusqu'à présent ont négligé ces corrélations d'appariement. Néanmoins, des améliorations ont été développées afin de les prendre en compte [5]. Il existe des noyaux parfaitement adaptés pour ce type d'étude expérimentale et pour lesquels la corrélation entre deux neutrons est très importante : ce sont les noyaux « borroméens », c'est-à-dire des systèmes à trois composantes dont aucune des sous-structures binaires n'est liée, alors que la structure ternaire l'est. Leur nom provient des anneaux de l'emblème de la famille italienne Borromée, qui représente trois anneaux enlacés de telle sorte que si l'un des anneaux est coupé, l'ensemble se disloque (fig. 4e). L'hélium 6 fait partie de ces noyaux : il est formé d'un cœur d'hélium 4 (auss appelé particule alpha, le plus abondant des isotopes d'hélium dans la nature) et de deux neutrons corrélés, gravitant à sa périphérie. Aucun des sous-systèmes $^4\text{He} + \text{neutron}$ ou $\text{neutron} + \text{neutron}$ n'est lié. C'est aussi un noyau à halo, dont le halo est composé de deux neutrons.

D'un point de vue théorique, la coexistence de deux configurations dominantes a été prédite pour ce noyau : une configuration dite « di-neutron », où les deux neutrons sont très proches l'un de l'autre dans le halo, et une configuration dite « cigare », où les deux neutrons sont éloignés et situés de part et d'autre du cœur alpha.

Le mécanisme du *towing mode* a permis de distinguer ces deux configurations. En effet, dans la configuration « di-neutron », si les deux neutrons sont du côté de la cible pendant la collision, lorsque l'un des nucléons va ressentir le potentiel nucléaire à courte portée de la cible, l'autre le ressentira pareillement ; ils seront donc émis tous les deux par le mécanisme de *towing mode*, avec des propriétés cinématiques similaires, à grand angle par rapport au faisceau incident et à petit angle relatif $\Delta\theta_n$ (fig. 4a). Si par contre, le « di-neutron » se trouve du côté opposé à la cible pendant la collision, les neutrons seront tous deux émis vers l'avant (fig. 4b). Dans les deux cas, l'angle relatif entre les neutrons émis sera petit. En revanche, pour la configuration « cigare », seul l'un des deux neutrons peut ressentir le potentiel de la cible et être émis à grand angle (fig. 4c). Le second neutron est tout de même émis car, rappelons-le, aucun des sous-systèmes binaires n'est lié, mais il est émis dans la direction du faisceau. Au final, c'est la distribution en angle relatif $\Delta\theta_n$ entre les deux neutrons qui caractérisera les deux configurations extrêmes, « di-neutron » et « cigare » (fig. 4d).

Nous avons ainsi réalisé une expérience au GANIL durant l'année 2006 [6], dans laquelle les projectiles du faisceau d'hélium 6 étaient épluchés par des atomes cibles de plomb. En mesurant les deux neutrons en coïncidence avec la particule d'hélium 4, il a été possible d'extraire l'angle relatif auquel ont été émis les neutrons (courbe bleue de la figure 5). Cette distribution en angle relatif est le reflet, non seulement des corrélations initiales





5. Distribution des neutrons en coïncidence avec les noyaux d'hélium 4 émis au cours de la réaction ${}^6\text{He}+\text{Pb}$, en fonction de leur angle relatif $\Delta\theta_n$. La distribution expérimentale est présentée en bleu. Le spectre en vert représente la distribution attendue dans le cas où aucune corrélation entre les neutrons ne serait présente, et a été obtenue par mélange des événements. Le spectre rouge est la soustraction des deux spectres précédents.

>>>

des deux neutrons au sein de l'hélium 6, mais aussi de la couverture angulaire du dispositif expérimental qui peut altérer la forme de la distribution.

Afin de dégager la contribution des corrélations initiales des deux neutrons qui nous intéressent, on a besoin de connaître l'allure de la distribution que l'on aurait obtenue dans les mêmes conditions expérimentales, s'il n'y avait pas de corrélations. Nous avons extrait cette distribution des données expérimentales en faisant un mélange des événements, c'est-à-dire en prenant un neutron dans un événement et le second neutron dans un autre événement mesuré à un temps différent. La courbe de mélange ainsi obtenue (courbe verte de la figure 5) permet une comparaison directe avec les données expérimentales (courbe bleue). Dans le cas où l'on suppose qu'il existe une contribution d'événements pour lesquels les deux neutrons ne sont pas corrélés, il faudrait donc soustraire du spectre expérimental une fraction de ce spectre de mélange. Lorsque l'on maximise cette contribution de façon à ne pas dépasser les données originales, il faut leur soustraire le spectre vert tel que présenté dans la figure 5. Le résultat obtenu (courbe rouge) montre une forte contribution de neutrons aux petits angles relatifs, signant ainsi la configuration « di-neutron », et pas ou peu de contribution à grand angle relatif. Dans le cas opposé, où l'on suppose que 100 % des événements mesurés sont des paires de neutrons initialement corrélés, il ne faut rien soustraire et l'on observe alors deux composantes, l'une où est attendue la contribution du « di-neutron » et l'autre

celle du « cigare ». Reste maintenant à comparer ces données avec les prédictions de calculs dynamiques, comme le TDDM décrit dans la réf. [5], pour extraire la proportion de ces deux composantes.

L'avenir du towing mode

Dans cet article, nous avons montré que l'épluchage d'un ou plusieurs nucléons, le towing mode, est un outil nouveau et riche de développement pour la physique nucléaire. Il permet en effet de signer les états quantiques dans les noyaux et d'accéder à leurs corrélations. À l'avenir, les nouveaux noyaux produits par la prochaine génération d'accélérateurs de noyaux exotiques, tels que SPIRAL-2 au GANIL, FAIR au GSI (Allemagne) ou encore à RIKEN (Japon), pourront aussi être étudiés grâce à ce mécanisme. Ceci permettra de mieux cerner les propriétés des nucléons dans le milieu nucléaire.

Une autre application de ce mécanisme concerne l'étude des états moléculaires dans les noyaux. L'idée, encore une fois

toute simple, est que si ces derniers sont composés de sous-ensembles, eux-mêmes composés de neutrons et de protons, il y a toutes les chances de pouvoir arracher ces sous-ensembles grâce au towing mode. Lors de l'étude de la réaction ${}^{40}\text{Ca} + {}^{40}\text{Ca}$ réalisée au GANIL, il a déjà été observé l'émission de particules alpha laissant penser à l'existence d'agrégats de particules alpha dans le noyau de calcium. Une expérience va être réalisée au cours de l'année 2011, dans laquelle nous allons étudier ces agrégats d'alpha dans le calcium 40 et comparer les résultats à ceux d'un noyau voisin, tel que l'argon 40, pour lequel il n'est pas attendu d'état moléculaire.

En conclusion, nous pensons que le towing mode est un outil complémentaire à ceux déjà existants, et qu'en plus, il devrait aussi permettre d'explorer les propriétés des noyaux dans les configurations moléculaires les plus extrêmes. Les possibilités d'étude grâce à ce mécanisme sont donc très variées, et nous n'avons pas encore fini d'en découvrir l'étendue. ■

Références

- 1 • J.A. Scarpati *et al.*, "A new phenomenon in heavy ion inelastic scattering: the towing mode", *Phys. Lett.* **B 428** (1998) 241.
- 2 • D. Lacroix *et al.*, "Theoretical description of the towing mode through a time-dependent quantum calculation", *Nucl. Phys.* **A 658** (1999) 273.
- 3 • J.L. Sida, « L'insoutenable légèreté du halo », *Reflets de la physique* n°8 (2008) 17 (téléchargeable sur www.refletsdelaphysique.fr).
- 4 • V. Lima *et al.*, "Nuclear Break-up of ${}^{11}\text{Be}$ ", *Nucl. Phys.* **A 795** (2007) 1.
- 5 • M. Assié et D. Lacroix, "Probing Neutron Correlations through Nuclear Breakup", *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 202501.
- 6 • M. Assié *et al.*, "Neutron correlations in ${}^6\text{He}$ viewed through nuclear break-up", *EPJA* **42** (2009) 441.