

Étude des propriétés spectroscopiques du ^{19}Ne d'intérêt astrophysique via une nouvelle méthode de diffusion inélastique

F. Boulay

▶ **To cite this version:**

F. Boulay. Étude des propriétés spectroscopiques du ^{19}Ne d'intérêt astrophysique via une nouvelle méthode de diffusion inélastique. Journées de Rencontre Jeunes Chercheurs 2013, Dec 2013, Barbaste, France. pp.19-22. in2p3-01057940

HAL Id: in2p3-01057940
https://hal.in2p3.fr/in2p3-01057940

Submitted on 2 Sep 2014

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.

Etude des propriétés spectroscopiques du ^{19}Ne d'intérêt astrophysique via une nouvelle méthode de diffusion inélastique



Florent Boulay
Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL), Caen

Résumé

Dans la perspective d'étudier le phénomène stellaire explosif appelé nova, une expérience inédite de diffusion inélastique utilisant un faisceau radioactif de ^{19}Ne sur une cible de protons a été menée en novembre 2013 à GANIL auprès du spectromètre VAMOS. Elle avait pour but de mesurer les propriétés des états du ^{19}Ne situés dans la zone d'intérêt astrophysique s'étalant de 6 MeV à 7.2 MeV d'énergie d'excitation. Pour la première fois, VAMOS a été configuré en mode spectrographe pour détecter des protons de hautes énergies (jusqu'à 25 MeV).

1 Introduction et motivations

La description classique d'une nova est celle d'un système binaire d'étoiles, composé typiquement d'une naine blanche (petit objet stellaire de haute densité composé essentiellement d'oxygène, de carbone ou de néon) accrétant de la matière des couches externes d'une étoile compagnon (étoile dans sa séquence principale ou au stade de géante rouge).

D'un point de vue thermodynamique, à cause de la grande densité en surface de la naine blanche, le gaz stellaire se trouve dans un état dégénéré. La température et la pression du gaz continuent d'augmenter en même temps que la matière (H et He principalement) de l'étoile compagnon tombe sur la naine sous l'effet de sa grande gravité. Ce processus perdure jusqu'à l'enclenchement d'une explosion thermonucléaire, communément appelée nova. De la matière est expulsée dans l'espace (produits des fusions). Il se produit 10 à 20 novae par an dans notre galaxie.

Selon les simulations actuelles, lors d'une nova, de nombreux noyaux émetteurs β^+ sont produits [1], principalement du ^{13}N, ^{18}F ^{22}Na et ^{26}Al pour les novae du groupe O/Ne. Une observable possible des novae est donc le rayonnement γ émis par ces noyaux, notamment celui à 511 keV issu de l'annihilation des positrons de décroissance. La production d'émetteurs β^+ au sein des novae se fait essentiellement par captures de protons par les éléments stables à la surface de la naine blanche.

Le ^{18}F possède une durée de vie suffisamment longue (110 minutes) pour, à la fois, franchir la période d'opacité de la nova (phase où aucun rayonnement γ ne peut s'échapper de la nova) et aussi laisser un temps suffisant pour que les satellites et leurs instruments d'observations puissent être orientés vers la nova. L'étude de ces rayonnements est une des missions du satellite Européen INTEGRAL mis en orbite autour de la Terre en 2002. La connaissance de la quantité d'émetteurs β^+ présents au sein des novae permettrait ainsi de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre dans ces explosions.

Selon les calculs théoriques, l'abondance en ^{18}F est modifiée principalement par les voies de destruction de cet élément par captures de protons : ^{18}F(p, α)^{15}O plus particulièrement et ^{18}F(p, γ) ^{19}Ne. Les taux de ces réactions sont actuellement entachés de grandes barres d'erreur. Ceci est lié au fait que les sections efficaces de ces réactions ne peuvent pas être mesurées directement. En effet, l'étude directe de la réaction ^{18}F(p,α)^{15}O est compliquée, à cause du caractère radioactif du ^{18}F : D'une part, il n'est pas possible actuellement d'envoyer un faisceau de proton sur une cible de ^{18}F. D'autre part, les faibles intensités de faisceau de ^{18}F disponibles à ce jour ne permettent pas, non plus, cette étude. Par ailleurs, la solution alternative consistant à étudier la réaction conjuguée ^{15}O(α,p)^{18}F est, elle aussi, compliquée puisqu'elle implique l'utilisation d'un faisceau de ^{15}O radioactif également faiblement produit.

En attendant des faisceaux radioactifs plus intenses en ^{18}F et en ^{15}O une meilleure estimation de ces taux de réaction via le noyau de ^{19}Ne est toutefois possible. Comme le montre l'étude réalisée par S. Utku et collaborateurs [2], une bonne connaissance des propriétés intrinsèques du ^{19}Ne telles que le spin, la parité et les largeurs partielles des états dans la zone de Gamow [1] permet de contraindre les incertitudes sur les valeurs actuelles du taux des réactions ^{18}F(p, α)^{15}O et ^{18}F(p, γ)^{19}Ne.

Cependant des incertitudes pèsent aussi sur les propriétés spectroscopiques du ^{19}Ne. Le spin des états est, notamment, souvent déduit à partir du noyau miroir de ^{19}F [3]. On peut illustrer l'importance d'une attribution correcte des propriétés structurelles du noyau grâce à la figure 1. On y observe l'évolution du taux de réaction de l'état résonant à 8 keV (soit 6.419 MeV d'énergie d'excitation) pour la voie ^{18}F(p,α)^{15}O en fonction de la température pour différentes valeurs de moment angulaire. Ce taux de réaction représente la vitesse de destruction par capture proton du ^{18}F par mole et par unité de volume en fonction de la température du milieu. C'est une grandeur importante pour les calculs

[1] La gamme en énergie où les réactions nucléaires induites par les particules chargées ont lieu est la zone dite de Gamow. Elle se situe au dessus du seuil d'émission proton (S_p) et s'étend jusqu'à environ 7 MeV d'énergie d'excitation dans le cas d'une nova, pour le ^{19}Ne.

astrophysiques.

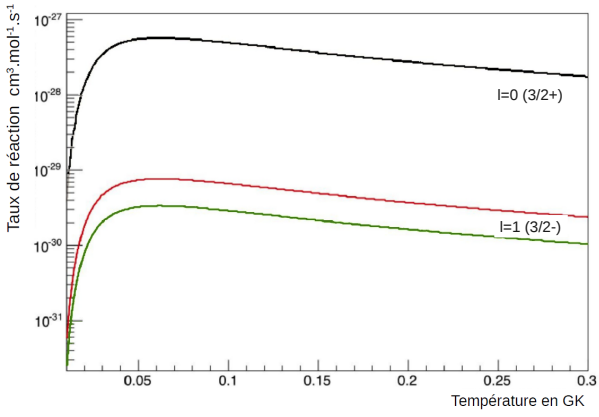


FIG. 1: Evolution du taux de réaction pour l'état résonant à 8 keV et la réaction ^{18}F(p, α)^{15}O en fonction de la température, pour différentes valeurs de moment angulaire (spin parité).

L'état à 8 keV a été choisi car une controverse existe sur son moment angulaire orbital. A. S. Adekola *et al.* [4] ont mesuré un moment angulaire l=1 [2] or cet état avait jusqu'alors été considéré comme ayant un moment l=0. On constate sur la figure qu'un mauvais assignement du moment de l'état entraîne une variation importante du taux de réaction associé. On note ainsi l'importance d'une attribution non ambiguë des propriétés intrinsèques des états pour le calcul du taux de réaction. C'est une des motivations de l'expérience.

2 Mesure des propriétés spectroscopiques du ^{19}Ne à l'aide du spectromètre VAMOS à GANIL

2.1 Nouvelle méthode de diffusion inélastique

Le mécanisme de réaction choisie pour peupler les états d'intérêt du ^{19}Ne est la diffusion inélastique d'un faisceau de ^{19}Ne à 10 MeV/u sur une cible de protons (polyéthylène C_2H_4 de 1μm d'épaisseur). Schématiquement, le ^{19}Ne est excité par diffusion inélastique et un proton p' est émis :

$$^{19}\mathrm{Ne} + \mathrm{p} \rightarrow \left(^{19}\mathrm{Ne}\right)^{*} + \mathrm{p}' \qquad (1)$$

Une fois le ^{19}Ne produit dans un état excité, il va décroître suivant plusieurs voies :

$$\left(^{19}\mathrm{Ne}\right)^{*} \rightarrow {}^{18}\mathrm{F} + \mathrm{p}'' \qquad (2)$$

[2] Une incertitude existe quant à la correspondance de l'état à 8 keV avec l'état dans le noyau miroir du ^{19}F (deux candidats potentiels existent, d'où les deux courbes).

$$\textit{ou} \qquad \left(^{19}\mathrm{Ne}\right)^{*} \rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \alpha \qquad (3)$$

$$\textit{ou} \qquad \left(^{19}\mathrm{Ne}\right)^{*} \rightarrow {}^{19}\mathrm{Ne} + \gamma \qquad (4)$$

En pratique, on mesure l'énergie des protons p' pour obtenir le spectre en énergie des états excités du ^{19}Ne. Le choix d'un système de détection ayant la meilleure résolution en énergie possible est crucial pour être capable de distinguer les états proches.

Afin de reconstruire la fonction de corrélation angulaire et ainsi déterminer le spin des états résonants peuplés, les protons p' seront détectés en coïncidence avec les α ou les protons p" émis, par un détecteur annulaire segmenté à pistes qui se situera à proximité de la cible. La diffusion inélastique a l'avantage de peupler les états excités de manière non sélective (d'où le choix d'un tel mécanisme de réaction).

L'expérience se déroule en cinématique inverse (le noyau lourd est envoyé sur une cible légère). La meilleure résolution en énergie pour les protons p' est obtenue en les détectant à 0°. Cependant à cet angle, le faisceau primaire qui n'a pas réagi est aussi présent. Le challenge consiste donc à mesurer l'énergie des protons p' avec la meilleure résolution possible tout en rejetant le faisceau de ^{19}Ne de haute intensité.

Le choix d'une énergie de faisceau incident de 10 MeV/u a été fait en vérifiant qu'aucune autre réaction ne puisse polluer la zone d'intérêt dans le spectre en énergie d'excitation. Le code de calcul de section efficace Talys [5] fait apparaître qu'une chaîne de décroissance peut exister en parallèle aux réactions décrites ci-dessus. Cette chaîne est la suivante :

$$^{19}\mathrm{Ne} + \mathrm{p} \rightarrow \left(^{20}\mathrm{Na}\right)^{*} \rightarrow \left(^{16}\mathrm{F}\right)^{*} + \alpha \qquad (5)$$

$$\textit{puis} \qquad \left(^{16}\mathrm{F}\right)^{*} \rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \mathrm{p} \qquad (6)$$

Elle se traduit donc par l'émission successive d'une particule α puis d'un proton. Or, la réaction de diffusion inélastique d'intérêt induit aussi l'émission d'un proton p' et d'une particule α. Il faut vérifier que ces deux processus puissent être dissociables notamment d'un point de vue cinématique.

La figure 2 synthétise les résultats issus de la simulation. Elle représente l'énergie des particules α détectées dans le détecteur annulaire (situé près de la cible de réaction) en fonction de l'énergie des protons détectés à 0° pour les deux processus en question. Le rectangle rouge en traits continus représente la zone d'intérêt astrophysique (fenêtre de Gamow). Le parallélogramme bleu en traits pointillés représente la contribution des réactions dites parasites associées au ^{16}F. On constate que pour une énergie de 10 MeV/u la présence de ces réactions parasites ne compromet pas la mesure des propriétés du ^{19}Ne dans la zone d'intérêt astrophysique.

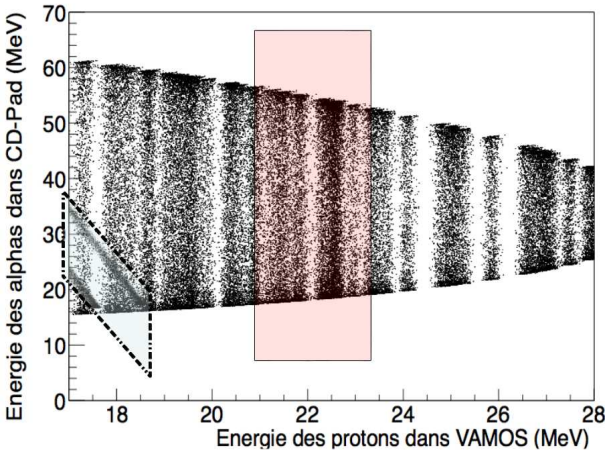


FIG. 2: Synthèse des résultats issus de la simulation des processus de diffusion inélastique du ^{19}Ne et de la chaine de décroissance parasite associée au ^{16}F : énergie des alphas détectés dans le détecteur annulaire en fonction de l'énergie des protons détectés à 0°. La zone d'intérêt astrophysique est représentée en traits pleins. La zone en traits pointillés représente les particules venant de la réaction parasite.

2.2 Le dispositif expérimental

Au regard des contraintes exposées dans le paragraphe précédent, le dispositif expérimental final qui a été adopté est représenté sur la figure 3.

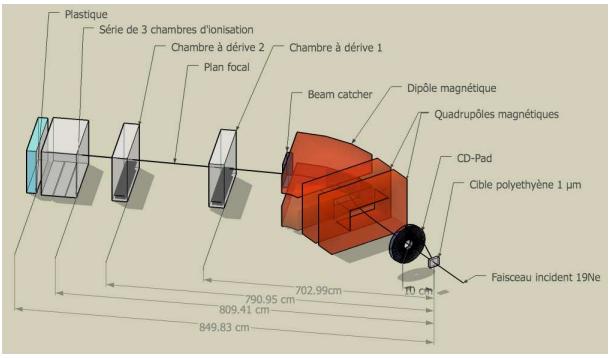


FIG. 3: Schéma du dispositif expérimental utilisé lors de l'expérience.

Il est composé :

a) d'un détecteur silicium annulaire segmenté à pistes appelé CD-PAD de diamètre externe 82 mm et possèdant une ouverture centrale de 15 mm. Positionné à une distance de 10 cm de la cible il permet la mesure de la perte d'énergie et l'énergie résiduelle des protons p" et des particules α. Il donne aussi accès à l'angle d'émission de ces particules, indispensable pour construire la fonction de corrélation angulaire.

b) du spectromètre VAMOS [6][7]. Celui-ci est utilisé d'une part pour effectuer la séparation du faisceau d'ions lourds et des protons diffusés p' via un beam-catcher (plaque épaisse de plomb). D'autre part, il permet la reconstruction de la trajectoire des protons p' et donc l'extraction de la fonction d'excitation du ^{19}Ne via un système de détection qui se compose successivement :

- de deux chambres à dérive permettant notamment une reconstruction fine de la position et des angles des particules qui les traversent,
- d'une chambre d'ionisation donnant une perte d'énergie ΔE (proportionnelle à la charge Z),
- d'un détecteur plastique épais qui arrête les particules. Il fournit l'information sur leur énergie résiduelle ainsi qu'un signal temps. Ce dernier constitue le trigger de l'acquisition des données.

Le spectromètre VAMOS permet une caractérisation et une identification non ambiguë des particules qui le traversent. Les algorithmes de reconstruction permettent de déterminer très précisément leur masse, leur charge et leur énergie. A noter qu'à l'origine le spectromètre VAMOS a été conçu et optimisé pour détecter et identifier des ions lourds. Son utilisation pour la détection et la mesure précise des énergies de protons est inédite. Tout un travail de reconfiguration et d'adaptation des chambres à dérive a été nécessaire au préalable : espacement des détecteurs, définition de la pression et des tensions nominales de fonctionnement, modification des épaisseurs des fenêtres d'entrée-sortie...

3 Premiers Résultats

L'expérience a été réalisée fin novembre 2013 à GANIL. Dans cette section, les résultats préliminaires issus de l'analyse des données sont présentés et confrontés aux résultats présents dans la littérature ou prédits dans les simulations.

Sur la figure préliminaire 4, on peut voir l'énergie des particules α mesurée dans le CD-PAD en fonction de l'énergie des protons détectés dans VAMOS. On constate un très bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par la simulation (fig 2). Aucune réaction supplémentaire non prévue n'a été observée au cours de l'expérience. Cette information est importante pour l'analyse. La simulation considère une probabilité de population identique comme hypothèse de départ. Comme attendu, on constate aussi sur la figure 4 que les états (lignes verticales) ne sont pas peuplés de manières équiprobables.

Il est possible de valider la méthode expérimentale employée en comparant les résultats obtenus dans la zone en énergie d'excitation située entre 5.6 MeV et 6.6 MeV avec ceux disponibles dans la littérature [8]. Le spectre obtenu par l'analyse en ligne des données (Fig 5) possède la même structure que celui extrait de l'expérience de diffusion inélastique menée à Louvain-la-Neuve en 2006 (nombre de pics, amplitude et position relative).

On observe toutefois une nette amélioration de la résolution en énergie sur les états du ^{19}Ne avec le nouveau dispositif expérimental. Selon l'analyse préliminaire la

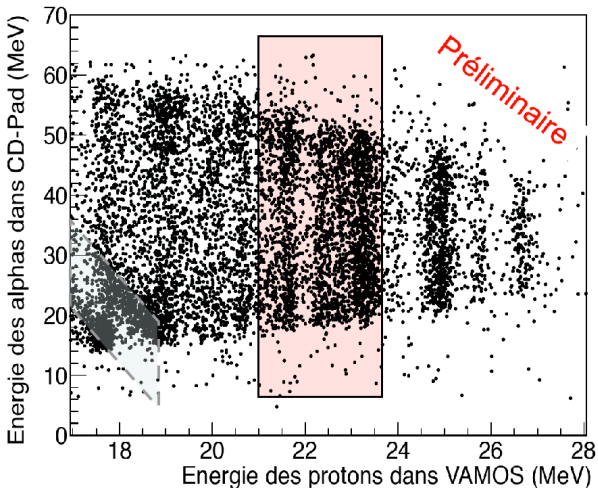


FIG. 4: Energie des particules α détectées dans le CD-PAD en fonction de l'énergie des protons détectés dans VAMOS. Le rectangle en traits pleins représente la zone d'intérêt astrophysique, le parallélogramme en traits pointillés représente la zone où les réactions parasites associées au ^{16}F sont présentes.

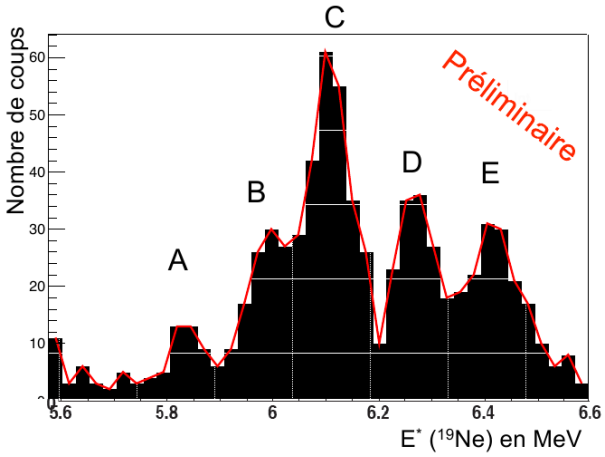


FIG. 5: Spectre en énergie d'excitation du ^{19}Ne issu de l'analyse en ligne des données (la nomenclature des pics est identique à celle employée par [8]).

résolution en Bρ obtenue avec VAMOS avoisine $\frac{2}{1000}$ (une analyse plus précise est nécessaire pour confirmer cette valeur et une marge d'amélioration existe), correspondant à environ 34(17) keV dans le centre de masse. On discerne beaucoup mieux les pics. C'est un élément indispensable pour l'étape suivante qui consistera à construire la fonction de corrélation entre ces protons p' et les particules détectées dans le CD-PAD (α et p"), et qui permettra donc de déterminer le spin des états.

4 Bilans et perspectives

L'expérience de diffusion inélastique qui s'est déroulée à GANIL avec le spectromètre VAMOS est un franc succès. On a pu mettre en évidence que la nouvelle méthode expérimentale, qui propose d'associer le spectromètre VAMOS à un détecteur de particules légères, permet la reconstruction de la fonction d'excitation des protons p' de hautes énergies avec une résolution en énergie jamais égalée pour ce type d'expériences. Elle conduira ainsi à une détermination univoque des propriétés spectroscopiques du ^{19}Ne. L'analyse fine des données est en cours. Cette nouvelle technique pourra être réutilisée dans l'avenir avec les nouveaux faisceaux radioactifs que délivreront les installations SPIRAL I et SPIRAL II.

5 Remerciements

Merci aux organisateurs et coordinateurs de sessions pour ces JRJC très enrichissantes et un grand merci à tous ceux qui m'ont permis d'obtenir ces données.

Références

[1] J. José and M. Hernanz, J. Phys. G. 34 (2007) R431.

[2] S. Utku et al Phys. Rev. C 57, 1998.

[3] C. D. Nesaraja, N. Shu *et al.*, Phys. Rev. C 75 (2007) "Nuclear structure properties of astrophysical importance for ^{19}Ne above the proton threshold energy"

[4] A. S. Adekola, Ph.D ; thesis, Ohio University, 2009.

[5] `http://www.talys.eu`

[6] M. Rejmund *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 646 (2001) 184

[7] H. Savajols *et al.*, Nuclear Physics A 654 (1999)1027c

[8] J. C. Dalouzy, PhD thesis (2009) Université de Caen/Basse-Normandie "Spectroscopy of neon nineteen by inelastic scattering. Astrophysical applications."