

**Titre:** Étude du  $^{36}\text{Ca}$  : structure nucléaire et implications astrophysiques

**Mots clés:** évolution des couches, Astrophysique nucléaire, réactions directes, radioactivité 2 protons, symétrie d'isospin, X-ray burst

**Résumé:** Le noyau de  $^{36}\text{Ca}$  possède plusieurs propriétés fascinantes liées à la structure nucléaire, avec l'étude des effets de brisure de la symétrie d'isospin et de l'évolution de l'espacement des couches à la limite de non-liaison. De plus, l'énergie et la structure de ses états excités ont un intérêt astrophysique notamment pour l'étude de la réaction  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  qui est impliquée dans le processus  $rp$  se produisant dans les sursauts X.

La symétrie isospin est l'une des symétries les plus fondamentales du noyau et est liée à l'indépendance de charge de l'interaction forte. Si la symétrie d'isospin est strictement préservée, les schémas de niveaux des noyaux miroirs (avec un nombre échangé de protons et de neutrons) devraient être identiques. L'interaction coulombienne brise la symétrie d'isospin et donne lieu à un décalage de l'énergie d'excitation entre les états analogues des noyaux miroirs, appelé différence d'énergie miroir. Dans le cas de la paire miroir  $^{36}\text{Ca}$ - $^{36}\text{S}$ , l'interaction coulombienne agit comme une loupe de la structure nucléaire, dont les effets sont examinés dans ce travail.

La motivation d'astrophysique nucléaire est liée à la mesure indirecte du taux de la réaction  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  afin de mieux comprendre le profil de luminosité émis lors des sursauts X de Type Ia. En effet, cette réaction a été identifiée comme l'une des dix réactions  $(p,\gamma)$  qui pourraient avoir un impact significatif sur la forme de la courbe de lumière calculée des sursauts X. La présente expérience vise à étudier l'énergie, les valeurs de spin, les facteurs spectroscopiques protons et les largeurs des états excités d'intérêt astrophysique dans le  $^{36}\text{Ca}$ . Les informations spectroscopiques pertinentes sont

utilisées pour réexaminer le taux de la réaction  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  et ses incertitudes correspondantes et déterminer son impact sur la courbe de lumière des sursauts X.

Le  $^{36}\text{Ca}$  a été étudié au GANIL au moyen des réactions de transfert  $^{37}\text{Ca}(p,d)$  et  $^{38}\text{Ca}(p,t)$  à environ 50 MeV/nucléons. Des faisceaux radioactifs de  $^{37}\text{Ca}$  et  $^{38}\text{Ca}$ , produits avec le spectromètre LISE, ont été mesurés par deux ensembles de détecteurs sensibles à la position avant d'interagir avec une cible cryogénique d'hydrogène liquide. 6 télescopes MUST2 (cristaux de silicium DSSD et CsI) ont été utilisés pour identifier et mesurer les particules légères émises pendant la réaction de transfert. Un ensemble de trois détecteurs (chambre d'ionisation, chambre de dérive et scintillateur en plastique) ont été utilisés pour détecter l'ion lourd sortant dans le canal de sortie. La détection des éjectiles légers et lourds a permis une détermination complète de la cinématique de la réaction, une attribution du moment angulaire transféré  $L$  de tous les états produits, et une réduction significative du bruit de fond.

La spectroscopie complète du  $^{36}\text{Ca}$  a été obtenue et de nouveaux états excités ont été identifiés. De très grandes différences d'énergie miroir ont été observées dans les nouveaux états intrus du  $^{36}\text{Ca}$ . La corrélation des protons, vue à partir de la désintégration en deux protons des états hautement excités, a également été étudiée. Grâce aux résultats expérimentaux et aux calculs de modèles en couche, le taux de réaction  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  a été réévalué et fortement contraint avec une incertitude statistique pertinente. Outre le  $^{36}\text{Ca}$ , la première étude de la spectroscopie du  $^{35}\text{Ca}$  (y compris la mesure de sa masse) sera également présentée.

**Title:** Study of  $^{36}\text{Ca}$ : nuclear structure and astrophysical implications

**Keywords:** Shell evolution, Nuclear astrophysics, direct reactions, 2 proton radioactivity, Isospin symmetry, X-ray burst

**Abstract:** The  $^{36}\text{Ca}$  nucleus has several fascinating properties linked to nuclear structure, with the study of isospin symmetry breaking effects and shell gap evolution at the proton drip-line. Moreover, the energy and structure of its excited states have an astrophysical interest in particular for the study of the key reaction  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  involved in the  $rp$ -process occurring in X-ray bursts.

Isospin symmetry is one of the most fundamental symmetries in nuclei and is related to charge independence of the strong interaction. If the isospin symmetry is strictly preserved, the level schemes of mirror nuclei (with exchanged number of protons and neutrons) should be identical. The Coulomb interaction breaks the isospin symmetry and gives rise to shift in excitation energy between analogue states in mirror nuclei called Mirror Energy Differences (MED). In the case of the mirror pair  $^{36}\text{Ca}$ - $^{36}\text{S}$ , the Coulomb interaction act as a magnifying glass of the nuclear structure, which effects are scrutinized in this work.

The nuclear astrophysics motivation is linked to the indirect measurement of the  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  reaction rate to better understand the luminosity profile emitted during Type Ia X-ray burst. Indeed, this reaction has been identified as one of the ten  $(p,\gamma)$  reactions that could significantly impact the shape of the calculated X-ray burst light curve. The present experiment aims at studying the energy, spin values, proton spectroscopic factors and widths of the excited states of astrophysical interest in  $^{36}\text{Ca}$ . These relevant spectroscopic information are used to reinvestigate the  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  re-

action rate and its corresponding uncertainties and determine its impact on the X-ray burst's light curve.

$^{36}\text{Ca}$  was studied at GANIL by means of the  $^{37}\text{Ca}(p,d)$  and  $^{38}\text{Ca}(p,t)$  transfer reactions at about 50 MeV/nucleons. Radioactive beams of  $^{37}\text{Ca}$  and  $^{38}\text{Ca}$ , produced with the LISE spectrometer, were tracked by two sets of position-sensitive detectors before impinging on a liquid Hydrogen cryogenic target. 6 MUST2 telescopes (Silicon DSSD and CsI crystals) were used to identify and measure light particles emitted during the transfer reaction. An assembly of three detectors (ionization chamber, drift chamber and plastic scintillator) were used to detect the outgoing heavy ion in the exit channel. The detection of both light and heavy ejectiles ensured a complete determination of the kinematics of the reaction, an assignment of the transferred angular momentum  $L$  of all states produced, and a very reduced amount of background.

The full spectroscopy of  $^{36}\text{Ca}$  has been obtained and new excited states have been identified. Colossal MED have been observed in the newly discovered intruder states of  $^{36}\text{Ca}$ . The proton correlation, viewed from the two-proton decay of highly excited states, has been also studied. With the experimental results and the help of shell-model calculations, the  $^{35}\text{K}(p,\gamma)^{36}\text{Ca}$  reaction rate has been re-evaluated and constrained with meaningful statistical uncertainty. Besides  $^{36}\text{Ca}$ , the first study of the spectroscopy of  $^{35}\text{Ca}$  (including its mass measurement) will also be presented.

