

Titre : Développements pour la spectroscopie laser des noyaux exotiques avec la Branche de Basse Energie de S^3 et le projet FRIENDS³

Mots clés : spectroscopie laser, cellule gazeuse, déplacement isotopique, structure hyperfine, propriétés nucléaires, SPIRAL2

Résumé : Cette thèse présente une série de développements visant à réaliser la spectroscopie laser à ionisation résonante sur des isotopes à vie courte produits par le Spectromètre Super Séparateur (S^3) et stoppés dans la cellule à gaz de sa branche basse énergie (S^3 -LEB). Cette recherche se concentre sur deux sujets.

Tout d'abord, des mesures de spectroscopie laser hors ligne ont été réalisées sur des isotopes stables d'erbium, l'élément de choix pour la mise en service en ligne de S^3 -LEB. Ces mesures ont été réalisées en utilisant la configuration complète de S^3 -LEB ainsi que la gamme de systèmes laser Ti:sa disponibles, représentant une validation des principes de fonctionnement de l'ensemble de l'appareillage. Pour identifier le schéma optimal pour les prochaines expériences en ligne, différentes transitions atomiques ont été étudiées par spectroscopie laser dans la cellule à gaz et dans le jet de gaz. Les déplacements isotopiques ont été déterminés pour les étapes d'excitation et d'ionisation. Les facteurs de champ F et de masse M des étapes d'excitation ont été extraits du déplacement isotopique à l'aide d'une analyse King-plot, et les incertitudes expérimentales associées aux deux facteurs ont été discutées. Des mesures de la puissance de saturation ont été effectuées et les coefficients d'élargissement et de décalage des raies dus à la pression ont été déterminés dans l'environnement de la cellule à gaz.

De plus, les coefficients hyperfins du premier état excité de la transition à 408,8 nm ont été extraits de la spectroscopie à jet gazeux à haute résolution avec une résolution spectrale d'environ 200 MHz. La transition à 408,8 nm de l'erbium est proposée comme une candidate appropriée pour les premières expériences sur S^3 .

Deuxièmement, des simulations ont été réalisées afin de développer une future génération de cellule à gaz S^3 -LEB optimisée pour l'étude des isotopes à courte durée de vie, ceux-ci présentant un temps d'extraction réduit et utilisant un mécanisme de neutralisation universel. Dans cette cellule à gaz, l'extraction rapide des ions est obtenue grâce à une combinaison du champ électrique et du flux gazeux. Des simulations ont été réalisées avec des logiciels de pointe afin de souligner l'aspect pluridisciplinaire, notamment l'écoulement du gaz, le champ électrostatique, le transport des ions sous haute pression et la dynamique des électrons générés par l'ionisation des gaz. Sur la base de ces simulations, un prototype optimisé de cellule à gaz a été conçu en prenant en compte le temps d'extraction, l'efficacité, ainsi que le temps de neutralisation.

Title : Developments for the laser spectroscopy of exotic nuclei with the S³ Low Energy Branch and the FRIENDS³ project

Keywords : laser spectroscopy, gas stopping cell, isotope shift, hyperfine structure, nuclear properties, SPIRAL2

Abstract : This thesis presents a series of developments aimed to perform resonance-ionization laser spectroscopy on short-lived isotopes produced by the Super Separator Spectrometer (S³) of SPIRAL2 at GANIL and stopped in the gas cell of its Low Energy Branch (S³-LEB). This research focuses on two topics.

Firstly, off-line laser spectroscopy measurements were performed on stable isotopes of erbium, the element of choice for the on-line commissioning of S³-LEB. These measurements were performed using the full S³-LEB setup along with the range of available Ti:sapphire laser systems, representing a proof of principle of the entire apparatus. To identify the optimal scheme for the forthcoming on-line experiments, different atomic transitions were studied by laser spectroscopy in the gas cell and in the gas jet. Isotope shifts were determined for the excitation and ionization steps. Field and mass-shift factors for the excitation steps were extracted from the isotope-shift data using King-plot analysis, and the associated experimental uncertainties in the two factors were discussed. Saturation-power measurements were carried out and the pressure broadening and shift coefficients were determined in the gas-cell environment.

Additionally, hyperfine coefficients for the first excited state of the 408.8 nm transition were extracted from the high-resolution gas-jet spectroscopy with a spectral resolution of around 200 MHz. The 408.8 nm transition of erbium is proposed as a suitable candidate for day-one experiments at S³.

Secondly, simulations were performed to develop a future generation of the S³-LEB gas cell optimized for the study of short-lived isotopes, featuring a reduced extraction time and using a universal neutralization mechanism. In this gas cell, fast ion extraction is achieved through a combination of electrical field and gas flow. Simulations were performed with state-of-the-art software for capturing the multiphysics aspect, including the gas flow, the electrostatic field, the ion transport in high pressure and the dynamics of electrons generated by the ionization of the gas. Based on these simulations, an optimized gas-cell prototype has been designed, taking into account the extraction time, the efficiency, as well as the time available for neutralization.