

Vorbereitung eines Experimentes zur Laserspektroskopie an Fermium

H. Backe¹, A. Dretzke¹, G. Gwinner², G. Kube¹, W. Lauth¹, W. Ludolphs¹, R. Repnow², M. Sewtz¹,
P. Thörle³, N. Trautmann³

¹Institut für Kernphysik, Universität Mainz; ²Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg; ³Institut für Kernchemie, Universität Mainz

Mit der Laserspektroskopie können über die Messung von Hyperfeinkonstanten und Isotopieverschiebungen langer Isotopenketten detaillierte Informationen über den Atomkern gewonnen werden [1]. Das Gebiet der Transurannuklide ist für die Kernstrukturphysik, die Atomphysik aber auch für die Chemie gleichermaßen von Interesse. Die Kernstruktur kann mit Hilfe laserspektroskopischer Methoden über die Hyperfeinstrukturaufspaltung untersucht werden. Dabei können Informationen über die Kernspins, die Kernmomente und die Isotopieverschiebung gewonnen werden. Die schweren Actinidenelemente können allerdings nur mit sehr kleinen Wirkungsquerschnitten im Bereich von nb bis günstigenfalls einigen mb über Fusionsreaktionen erzeugt werden. Die Methoden müssen deshalb so empfindlich sein, daß Experimente auch dann noch möglich sind, wenn die Produktionsraten gering, die Lebensdauern kurz, und keinerlei Kenntnisse über die atomaren Anregungsschemata vorliegen.

Eine entsprechende Methode, die auf der Resonanz IonisationsSpektroskopie (RIS) in einer Puffergaszelle basiert, ist am Institut für Kernphysik entwickelt und am MP-Tandembeschleuniger in Heidelberg aufgebaut worden. Das Prinzip soll anhand von Abbildung 1 erläutert werden. Die nach einer Kernreaktion erzeugten Rückstoßkerne werden in Argon als Puffergas abgestoppt und der neutrale Anteil wird mit Laserlicht resonant ionisiert. Im Vergleich zu herkömmlichen IGISOL-Apparaturen, bei denen der Transport der Ionen aus der Zelle ausschließlich durch den Gasstrom bewirkt wird, driften die Ionen in dieser Zelle in elektrischen Feldern, die durch geeignete Elektrodensysteme erzeugt werden. Erst kurz vor der Austrittsdüse werden die Ionen vom Gasstrom erfaßt und ausgespült. Die Optimierung der Zellengeometrie und des Elektrodensystems auf hohe Effizienz und kurze Transportzeit war Gegenstand der Diplomarbeit von Th. Schütze [2]. Mit Hilfe einer segmentierten Quadrupol-Ion-Guide Struktur [3] und Skimmern werden die Ionen vom Puffergas getrennt, in einem Quadrupol Massenspektrometer (Balzers QMG 311) massenselektiert und dann direkt mit einem Channeltron-Detektor nachgewiesen. Bei einem Düsendurchmesser von 1 mm und Argon als Puffergas können Pumpen mit relativ geringem Saugvermögen verwendet werden. Die Apparatur zeichnet sich somit durch ihre kompakte Bauweise aus.

Mit Hilfe dieses IGQMS (Ion Guide Quadrupole Mass Spectrometer) [4] soll zunächst die Ionisationsenergie von Fermium ($Z=100$) bestimmt werden.

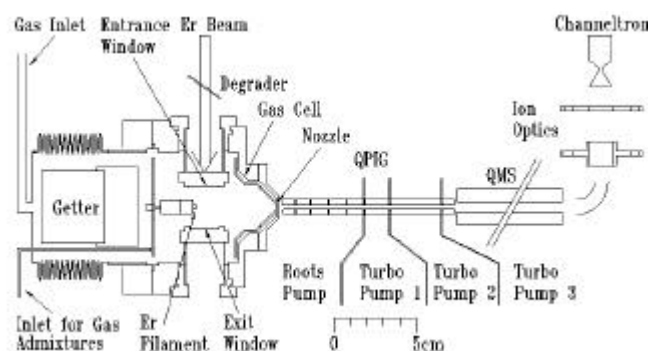


Abb. 1: Aufbau des laserspektroskopischen Experimentes am Emperor Tandem Beschleuniger des MPI für Kernphysik in Heidelberg. Um die Gasverunreinigungen möglichst klein zu halten, ist die optische Zelle in UHV Technik aufgebaut. Das Ar-Gas der Reinheit 6.0 wird durch einen Getter zusätzlich gereinigt. Mit Hilfe eines ^{nat}Er-Filamentes kann die Apparatur ohne Strahl getestet und eine Massen- und Wellenlängeneichung durchgeführt werden. Beide Laserstrahlen zur Resonanzionisation wurden über eine einzige Glasfaser zur optischen Zelle transportiert. Der Strahlfleck wurde auf einen Durchmesser von 1,5 cm aufgeweitet und senkrecht zum Er-Strahl eingestrahlt. Der HF-QuadruPol Ion Guide (QPIG) mit einem Innendurchmesser von 3 mm und einem Stabdurchmesser von 3 mm ist in 6 Segmente unterteilt.

Fermium ist das erste der schweren Actinidenelemente, für das keinerlei Kenntnisse über die atomaren Anregungsschemata vorliegen. Als Anregungsschema wird ein Zweistufenprozeß gewählt, wobei der erste Anregungsschritt in einen Bereich hoher Niveaudichte führen soll. Dazu wurde im Rahmen der Diplomarbeit von T. Kolb [5] eine Frequenzverdopplungseinheit für einen Farbstofflaser gebaut, mit der es möglich ist, Wellenlängen im Bereich von 290 nm zu erzeugen.

Nachdem die gesamte Apparatur mit Hilfe einer ²²³Ra Quelle optimiert wurde, konnte in einem ersten online Experiment das Verfahren an dem chemischen Homologen Erbium getestet werden. Dazu wurde ein gepulster 50 MeV Er⁷⁺ Strahl (100ms an/ 100ms aus) mit einem mittleren Strahlstrom von $\bar{I} = 0.6$ pA in die mit 50 mbar Ar gefüllte Puffergaszelle eingeschossen, siehe Abb.1. Die Energie der Er-Ionen wurde mit einem drehbaren Abschwächer ($C, 400 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) so angepaßt, daß ein möglichst großer Anteil in der Zelle stoppte. Die geladenen Teilchen wurden mit Hilfe elektrischer Felder während der „Clean Up“ Periode entfernt, siehe Abb. 2 (a), so daß nur neutrale Er-Atome im Gas gespeichert blieben. Mit einem gepulsten Farbstofflaser der Wellenlänge 472 nm

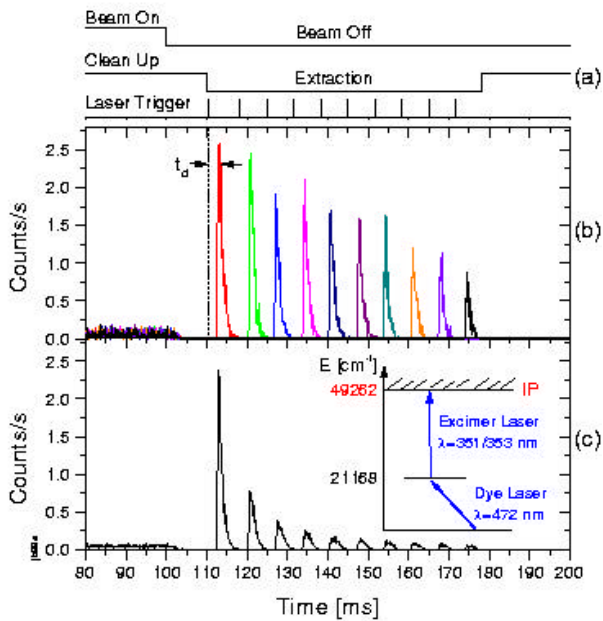


Abb. 2: Zeitlicher Ablauf bei der RIS. Pulsung des Primärstrahls (100 ms an / 100 ms aus), der elektrischen Felder und des Lasers (a). Zeit aufgelöstes Ionensignal ($m=170$ u) von 10 einzelnen Laserpulsen (b) und das entsprechende Signal für eine Sequenz von 10 Pulsen (c).

wurden die Er-Atome resonant angeregt und mit dem Licht eines Excimerlasers (350 nm) nichtresonant ionisiert. Zunächst wurde nur jeweils ein Laserimpuls mit einer variablen Zeitverzögerung zwischen 3 ms und 72 ms eingestrahlt, siehe Abb. 2 (b). Der Abfall der Amplitude des Ionensignals kann auf Diffusionsverluste zurückgeführt werden. Die Verzögerungszeit $t_d=2.8$ ms zwischen Laserimpuls und dem Maximum des Ionensignals entspricht der Transportzeit vom Stoppvolumen zum Detektor. Sowohl die Breite des Signals (FWHM=1.0 ms), als auch die Transportzeit, sind empfindlich vom Spannungsgefälle zwischen Düse und den ersten beiden QPIG Segmenten abhängig. Bei typischen Gradienten von 2 V zwischen zwei Segmenten bewirken bereits Änderungen in der Größenordnung von 100 mV einen Verlust der Zeitstruktur, während die Effizienz nahezu unverändert bleibt. Für diesen Fall wurden Transportzeiten von ≥ 200 ms und eine starke Produktion von Kohlenwasserstoffionen im Ion Guide System gemessen.

In einem weiteren Experiment wurde eine Sequenz von 10 Laserpulsen bei einer Repetitionsrate von 150 Hz eingestrahlt, siehe Abb. 2 (c). Nach Berücksichtigung der Diffusionsverluste, folgt die RIS-Effizienz $e_{RIS} = 50\%$ aus dem Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Ionensignale. Die Gesamteffizienz des Systems wurde aus dem Verhältnis der Zählrate des Channeltron Detektors \dot{N}_d zu dem Ionenstrom des Primärstrahls \dot{N}_p zu

$e = \dot{N}_d / \dot{N}_p = 4 \cdot 10^{-5}$ bestimmt. Zum Vergleich mit der erwarteten Effizienz wird

$$e = e_{stop} \cdot e_{neutral} \cdot e_{overlap} \cdot e_{RIS} \cdot e_{cell} \cdot e_{trans}$$

berechnet. Der Anteil der in der Zelle gestoppten Ionen wurde mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen zu $e_{stop} \approx 0.2$ bestimmt. Der Anteil der Ionen, die beim Stoppprozess neutralisieren beträgt etwa 13 % [6]. Die Tatsache, daß die Zählrate über einen Bereich von 3 ppA bis 1 pA linear ansteigt, unterstützt diese Annahme. In [7] war kein Anstieg der Neutralisation im entsprechenden Energiebereich zu erkennen. Der räumliche Überlapp des Laserstrahlflecks mit der Stoppverteilung betrug $e_{overlap} = 0.3$ und die Transporteffizienz durch den QPIG und den QMS $e_{trans} = 0.15$. Daraus muß gefolgert werden, daß die Effizienz der Extraktion der Ionen aus der Gaszelle nur $e_{cell} = 0.05$ beträgt. Dies steht im Gegensatz zu off-line Messungen (0.5) und könnte mit der räumlichen Verteilung der gestoppten Ionen erklärt werden.

Bevor mit der Spektroskopie an Fm begonnen werden kann, soll in einem weiteren Schritt Er über die Reaktion $^{161}\text{Dy}(\alpha, 2n)^{163}\text{Er}$ unter Verwendung eines auf 80% angereicherten ^{161}Dy Targets erzeugt werden, das am Institut für Kernchemie elektrochemisch hergestellt wird. Aufgrund der geringen Rückstoßenergie von 500 keV können 90% der Fusionsprodukte innerhalb einer Sphäre von 2 mm Durchmesser gestoppt werden. Falls durch die Plasmabildung des intensiven Primärstrahls eine vollständige Neutralisation erfolgen sollte, kann in diesem Fall mit einer Gesamteffizienz von 3% gerechnet werden.

- [1] E. W. Otten, Treatise on Heavy-Ion Science, Vol. 8, ed. D. A. Bromley, Plenum Publ. Corp. 1989, p. 517
- [2] Th. Schütze, Diplomarbeit, Universität Mainz (1998)
- [3] M. Sewtz, Diplomarbeit, Universität Mainz (1997)
- [4] H. Backe et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B** **126**, 406 (1997)
- [5] T. Kolb, Diplomarbeit, Universität Mainz (1998)
- [6] H. Backe et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B** **70**, 521 (1992)
- [7] K. Morita et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B** **26**, 406 (1987)