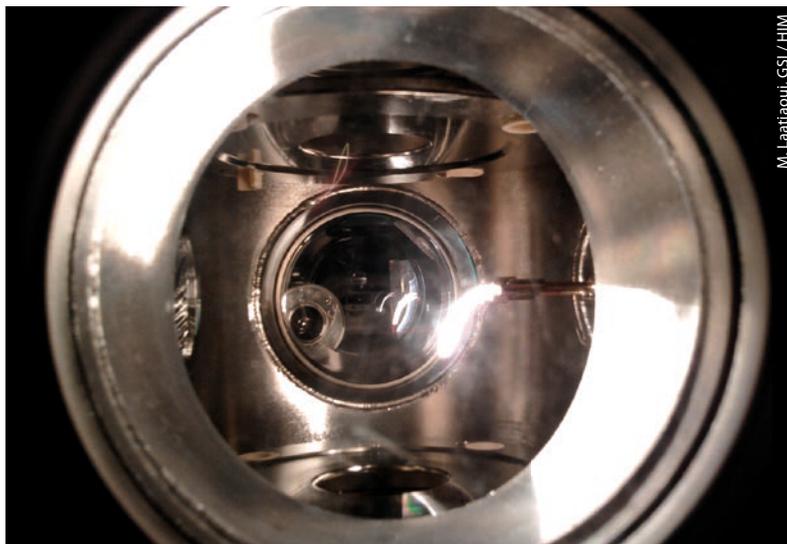


■ Selten schwerer Nachweis

Resonante Laserspektroskopie ermöglichte es, erstmals einen atomaren Übergang im superschweren Element Nobelium zu messen.

Zum Periodensystem der Elemente sind in den vergangenen Jahrzehnten immer neue Elemente hinzugekommen, die in der Natur nicht vorkommen, weil sie kein stabiles Isotop besitzen. Die Elemente bis Fermium mit der Kernladungszahl $Z = 100$ lassen sich durch Neutroneneinfangreaktionen in Kernreaktoren erbrüten. Bei den Transfermium-Elementen mit $Z > 100$ sind die Zerfallszeiten so kurz, dass es nur gezielte Kernstöße in Beschleunigeranlagen ermöglichen, die radioaktiven Isotope zu erzeugen. Verschmilzt dabei ein Calcium-Projektil mit einem Blei-Targetkern, entsteht das Element Nobelium ($Z = 102$). Seine atomaren Eigenschaften waren im Gegensatz zu verschiedenen Kerneigenschaften nahezu unerforscht. Kürzlich gelang es einer internationalen Kollaboration mittels resonanter Laserspektroskopie, als erste Eigenschaften von Nobelium eine Resonanz und das Ionisationspotential zu bestimmen [1].

Um schwere und superschwere (Transfermium-)Elemente zu produzieren, kommt prinzipiell immer noch die gleiche Technik wie in



M. Laatiaoui, GSI/HIM

Nobelium-Isotope gelangen von links in die Argon-Gaszelle. Nach dem Stoppen

sammeln sie sich am heißen Filamentdraht (r.) für die Laserspektroskopie.

den 1980er-Jahren zum Einsatz. Damit gelang es am GSI Helmholtzzentrum in Darmstadt, die Elemente von Bohrium ($Z = 107$) bis Copernicium ($Z = 112$) zu erzeugen und nachzuweisen [2]. Dabei verschmelzen in Fusionsreaktionen mittelschwere Projektile mit schweren Targetkernen. Mittlerweile kennt man durch Experimente, die u. a. am Vereinigten Institut für Kernforschung (Dubna, Russland)

stattfanden, die Elemente bis zum Oganesson ($Z = 118$) [3, 4]. Die Erzeugungsraten betragen oft nur wenige Kerne pro Stunde und sinken mit wachsender Ladungszahl.

Zwar lassen sich Transfermium-Elemente erzeugen – über ihre Elektronen- und Valenzschalenstruktur ist bislang aber fast nichts bekannt. Aufgrund der relativistischen Elektronenbewegung kann man diese Eigenschaften oft nur vage aus dem Verhalten der leichteren Homologen extrapolieren. Obwohl der Einfluss relativistischer Effekte schon lange bekannt ist, stellen konsistent relativistische Berechnungen atomarer Spektren bis heute eine Herausforderung für die Theorie dar. Insbesondere wenn es gilt, auch Korrelationen und quantenelektrodynamische Korrekturen auf Grundlage des Dirac-Coulomb-Breit-Hamilton-Operators zu berücksichtigen [5].

Auf experimenteller Seite charakterisierten Kernchemiker die chemischen Eigenschaften einiger (super-)schwerer Elemente bis Copernicium ($Z = 112$) mit Proben, die sehr wenige Atome umfassten. So gelang es kürzlich, das Ionisationspotential von Lawrencium ($Z = 103$) mittels eines Oberflächenverfahrens zu bestimmen [6].

KURZGEFASST

■ Tiefgekühlte Ionen

Ein internationales Forscherteam konnte mit einer Quadrupol-Ionenfalle am Speicherring BESSY II erstmals zehn Millionen Ni^{2+} -Ionen einfangen und auf 7,4 K abkühlen. Bisher waren diese Temperaturen nur für etwa 1000 Ionen möglich. Das reichte nicht aus, um mit Röntgenspektroskopie das magnetische Moment der Ionen zu bestimmen. Erst mit Helium als Puffergas gelang es, die benötigte Anzahl von Ionen zu verlangsamen. *V. Zamudio-Bayer et al., J. Chem. Phys.* **145**, Ausgabe 19, 194302 (2016)

■ Konzentriertes Ammoniak

Der Ausstoß des Spurengases Ammoniak (NH_3) nahm in den letzten Jahren weltweit stark zu. Wissenschaftler des KIT wiesen NH_3 in umfangreichen Daten des Weltraumsatelliten Envisat nun in der oberen Troposphäre nach. Im

asiatischen Monsun fanden sie eine erhöhte Konzentration von 33 NH_3 -Molekülen in einer Billion Luftmoleküle. Weil aus NH_3 Kondensationskeime für die Wolkenbildung entstehen, hilft das Ergebnis, Klimamodelle zu verbessern. *M. Höpfner et al., Atmos. Chem. Phys.* **16**, 14357 (2016)

■ Hochmagnetisiertes Vakuum

Schon Werner Heisenberg und Hans Euler sagten voraus, dass hochmagnetisiertes Vakuum auf Licht wie ein Prisma wirkt. Der experimentelle Nachweis dieser Vakuumdoppelbrechung gelang nun einem europäischen Team am Very Large Telescope der ESO. Das Licht eines isolierten Neutronensterns stellte sich als so stark linear polarisiert heraus, dass nur Vakuumdoppelbrechung dafür verantwortlich sein kann. *R. P. Mignani et al., MNRAS* **465**, 492 (2016)

Spektroskopische Verfahren an superschweren Elementen erfordern aufgrund der geringen Produktionsraten und sehr kleinen Lebensdauern einen selektiven und schnellen Nachweis, um die Anregungen und Linienverschiebungen eindeutig einem Isotop zuordnen zu können. Die resonante Laserspektroskopie bietet dazu sehr gute Voraussetzungen. Diese Methode wurde zu Beginn der 1990er-Jahre am Kernphysikalischen Institut in Mainz entwickelt [7]. Dabei regt ein durchstimmbarer Laser die Atome resonant an. Ein zweiter Laser ionisiert sie danach (Abb. 1). Die Ionen sammeln sich mithilfe eines elektrostatischen Potentials an einer Elektrode. Von dort werden sie zu einem Detektor geleitet, der es erlaubt, sie anhand ihrer α -Zerfallsketten eindeutig zu identifizieren. Die Methode ist umso erfolgreicher, je exakter dank theoretischer Vorhersagen die „Startwerte“ für den Laserscan bekannt sind.

Für schwere Elemente kam diese Methode beim Isotop ^{255}Fm zum Einsatz [8]. Aufgrund der relativ langen Halbwertszeit von 20,1 Stunden gelang es am Oak Ridge National Laboratory, USA, eine makroskopische Probe aus $2,7 \cdot 10^{10}$ Isotopen – das entspricht etwa 10 Pikogramm – herzustellen. Die resonante Laserspektroskopie ermöglichte es in einem Offline-Experiment, zwei atomare Energieniveaus im nahen ultravioletten Bereich mit Wellenzahlen von etwa $25\,000\text{ cm}^{-1}$ nachzuweisen.

Um auch kurzlebige Isotope mit Laserspektroskopie zu untersuchen, ist es notwendig, die Methode für online erzeugte Proben zu optimieren. Das ist im Fall von ^{254}No einer internationalen Kollaboration gelungen, an der deutsche Gruppen aus Mainz und Darmstadt beteiligt waren [1]. Das Isotop ^{254}No hat eine Halbwertszeit von 51,2 Sekunden und wurde mit der Fusionsreaktion $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ am UNILAC-Beschleuniger des GSI Helmholtzzentrums Darmstadt erzeugt. Etwa vier Ionen pro Sekunde standen zur Verfügung, die am SHIP-Massenseparator in einer Argon-Gaszelle

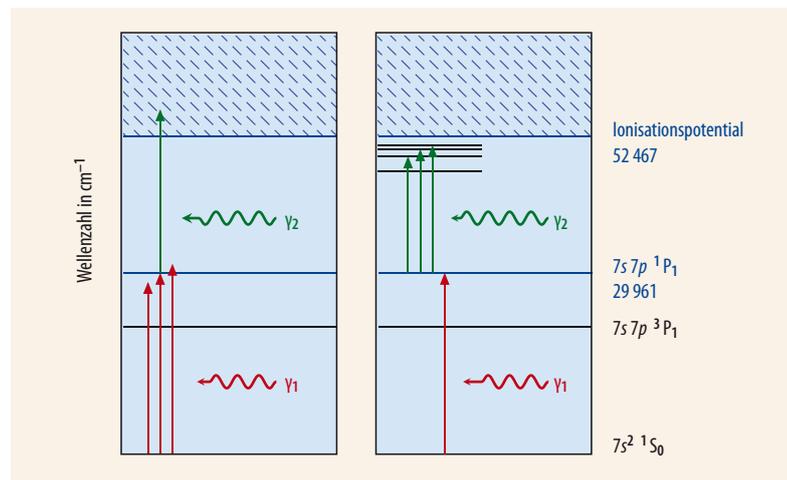


Abb. 1 Um die Wellenzahl der 1P_1 -Resonanz in ^{254}No zu bestimmen, wurde das Atom nach einer ersten Anregung (γ_1) ionisiert (γ_2 , links). Eine geringere Ener-

gie bei der zweiten Anregung erlaubte es, mehrere Rydberg-Zustände zu messen und das Ionisationspotential abzuschätzen (rechts).

gestoppt und spektroskopiert wurden. Laut theoretischen Vorhersagen sollte die $5f^{14} 7s 7p\ ^1P_1$ -Resonanz bei Wellenzahlen zwischen $29\,256$ und $31\,709\text{ cm}^{-1}$ liegen. Für einen Laserscan dieses Bereichs waren 6100 Schritte mit einem breitbandigen Laser ($0,18\text{ cm}^{-1}$) nötig, um die Resonanz in ^{254}No zu finden. Für eine genauere Vermessung der Resonanz bei $29\,961\text{ cm}^{-1}$ wurde die Bandbreite des Lasers anschließend auf $0,04\text{ cm}^{-1}$ reduziert.

Die nun bekannte 1P_1 -Resonanz in Nobelium nutzten die Forscher aus, um diese auch im benachbarten Isotop ^{252}No zu bestimmen, das in der Reaktion $^{48}\text{Ca} + ^{206}\text{Pb}$ entstand. Bei einer Halbwertszeit von nur noch 2,4 Sekunden reichte ein Ion pro Sekunde für die Spektroskopie. Die beobachtete Isotopieverschiebung der Resonanz um $0,32\text{ cm}^{-1}$ lässt sich durch die unterschiedliche Größe und Form der Isotope ^{252}No und ^{254}No erklären.

Im Isotop ^{254}No gelang es ausgehend von der 1P_1 -Resonanz außerdem, eine Serie von Rydberg-Zuständen nachzuweisen (Abb. 1). Daraus ergab sich als untere Schranke für das Ionisationspotential von Nobelium eine Wellenzahl von $52\,467\text{ cm}^{-1}$, was einer Energie von $6,505\text{ eV}$ entspricht. Diese erste Abschätzung bestätigt den Trend eines wachsenden Ionisationspotentials in den schwersten Aktiniden. Gleichzeitig ist der Wert wesentlich größer als im benach-

barten Lawrencium. In Analogie zu den Lanthaniden Ytterbium und Lutetium – den leichteren Homologen von Nobelium und Lawrencium – weist Nobelium im $5f^{14} 7s^2\ ^1S_0$ -Grundzustand einen Schalenabschluss auf.

Die Experimente mit Nobelium zeigen, wie sich trotz sehr kleiner Produktionsraten die atomaren und nuklearen Eigenschaften schwerer Elemente gezielt untersuchen lassen. Entsprechende Messungen an Lawrencium und Rutherfordium ($Z = 104$) rücken in greifbare Nähe. Sollte es die neue Technik außerdem erlauben, die Hyperfeinstruktur der Spektren zu messen, könnte man mehr über die Spins, Momente und Ladungsradien instabiler, schwerer Kerne erfahren. Damit ließe sich die Nuklidkarte bis hin zu Kernen erhöhter Stabilität vervollständigen.

Stephan Fritzsche
und Randolph Beerwerth

- [1] M. Laatiaoui, W. Lauth, H. Backe, M. Block et al. *Nature* **538**, 495 (2016)
- [2] S. Hofmann und G. Münzenberg, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 733 (2000)
- [3] Y. T. Oganessian et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 142502 (2010)
- [4] Y. T. Oganessian et al., *Phys. Rev. Lett.* **109**, 162501 (2012)
- [5] E. Eliav, S. Fritzsche und U. Kaldor, *Nucl. Phys.* **A944**, 518 (2015)
- [6] T. K. Sato et al., *Nature* **520**, 2009 (2015)
- [7] W. Lauth et al., *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1675 (1992)
- [8] M. Sewtz et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 163002 (2003)

Prof. Dr. Stephan Fritzsche und Randolph Beerwerth, M.Sc., Helmholtz-Institut Jena, Helmholtzweg 4, 07743 Jena und Theoretisch-Physikalisches Institut, Fröbelstieg 3, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 07743 Jena