

(German version see p. 6)

Hunting for the neutrino mass with "cool" detectors

An international collaboration led by a research group from GSI/FAIR in Darmstadt, Germany, has achieved the first measurement of the chemical stability of a superheavy element compound. The focus was on the hexacarbonyl complex $\text{Sg}(\text{CO})_6$ of seaborgium (Sg, element 106). The result: The bond between the seaborgium atom and a carbonyl ligand is weaker than expected based on its position in the periodic table. Relativistic effects are the cause. The results are published in the journal Nature.

Superheavy elements (SHE) with atomic numbers from 104 to 118 are artificially produced in nuclear fusion reactions at particle accelerators — at rates of at most a few atoms per day. Due to their short lifetimes, in the range of seconds at most, chemical studies are very challenging. A prime interest in their study comes from tracing the influence of relativistic effects: Because of the high nuclear charge of SHE, electrons near the atomic nucleus are accelerated to velocities approaching the speed of light. According to Einstein's famous theory of special relativity, objects moving near the limiting speed of light become heavier.

Bohr's model of the atom tells us that this leads to the electrons residing closer to the nucleus and becoming more strongly bound. More distant electrons are not subject to relativistic mass increase and are even moved farther away because the stronger bound electrons shield the positive nuclear charge better. Both effects lead to changes in the electronic structure of superheavy atoms, and, thus, in the chemical properties of their compounds, compared to their lighter homologs. Comparative studies among like complexes of homolog elements thus allow probing fundamental underpinnings of the periodic table of the elements.

“For the first time, we succeeded in measuring the strength of the chemical bond in a compound of a superheavy element, namely that between the central seaborgium atom and a carbon monoxide ligand. We have then compared it to the strength of this bond in the hexacarbonyl of the lighter homolog, tungsten,” explains Dr. Alexander Yakushev of GSI/FAIR, spokesperson of the collaboration. “From chromium over molybdenum to tungsten, the bond strength in the hexacarbonyls increases, suggesting that it should be even stronger in seaborgium. But the measurements show that the high atomic number of seaborgium alters its electronic shell structure, overturning the trend and leading to a bond weakening.” Recent quantum-chemical calculations that take the influence of relativity into full account explain this effect. Simpler calculations neglecting the effects of relativity predict a continuation of increasing bond strength.

The $\text{Sg}(\text{CO})_6$ was synthesized for the first time about ten years ago at the RIKEN Nishina Center, Japan, in an experiment led by scientists from Johannes Gutenberg University Mainz (JGU) and GSI/FAIR as the first compound of the carbonyl class for a superheavy element. Its bonding properties made it immediately attractive for attempts to measure the strength of a chemical bond between the central seaborgium atom and a carbon monoxide ligand, but first attempts remained unsuccessful.

Key to experimental success are fast chemical syntheses with high yields, combined with elaborate methods to register the quick radioactive decay as needed for the identification of the single atoms. In the experiment at GSI/FAIR, the researchers produced the isotope seaborgium-259, for which two nuclear states with different but short lifetimes below half a

second are known. For comparative purposes, the similarly short-lived tungsten isotopes 161 and 162 were produced.

After production and isolation in the experiment setup TASCA (TransActinide Separator and Chemistry Apparatus), the atoms came to rest in a gas atmosphere containing carbon-monoxide. The gas led to compound formation and flushed all atoms into a narrow detector channel with two consecutive arrays to detect each atom by registering its nuclear decay. Products of the chemical reaction of seaborgium and tungsten with carbon monoxide remain chemically reactive and deposit on the first detector array— unless they form the volatile hexacarbonyl compound, which travels past this first channel, reaching a second detector array which is cooled to temperatures low enough to adsorb these complexes.

The efficiency for transformation into the hexacarbonyl complex depends critically on the bond strength between the sixth carbon monoxide ligand and the central atom. Measuring which fraction of all seaborgium atoms formed the hexacarbonyl complex thus allows deducing the strength of this chemical bond. In total, 75 seaborgium atoms were registered, thereof three in the hexacarbonyl-detector. In contrast, 17 percent of all tungsten atoms formed the analog compound. From the much lower yield of $\text{Sg}(\text{CO})_6$ compared to $\text{W}(\text{CO})_6$, a bond strength that is lower by 4 kJ/mol in $\text{Sg}(\text{CO})_6$ was deduced. Thus, the trend of increasing stability of hexacarbonyls within the chromium group from chromium over molybdenum to tungsten is inversed in seaborgium.

Professor Christoph E. Düllmann, head of the superheavy element chemistry departments at GSI/FAIR and at Helmholtz Institute Mainz and professor at Mainz University emphasizes: “This breakthrough experiment would not have been possible without interdisciplinary and international collaboration between research institutions from around the world. It complements the international scientific programs at GSI and FAIR, where the origin of the elements in the Universe and their properties are being investigated.”

After this first successful detailed study of the chemical bonding in molecules of superheavy elements, the researchers already prepare experiments with yet heavier elements beyond seaborgium. (CP/BP)

Original Publication:

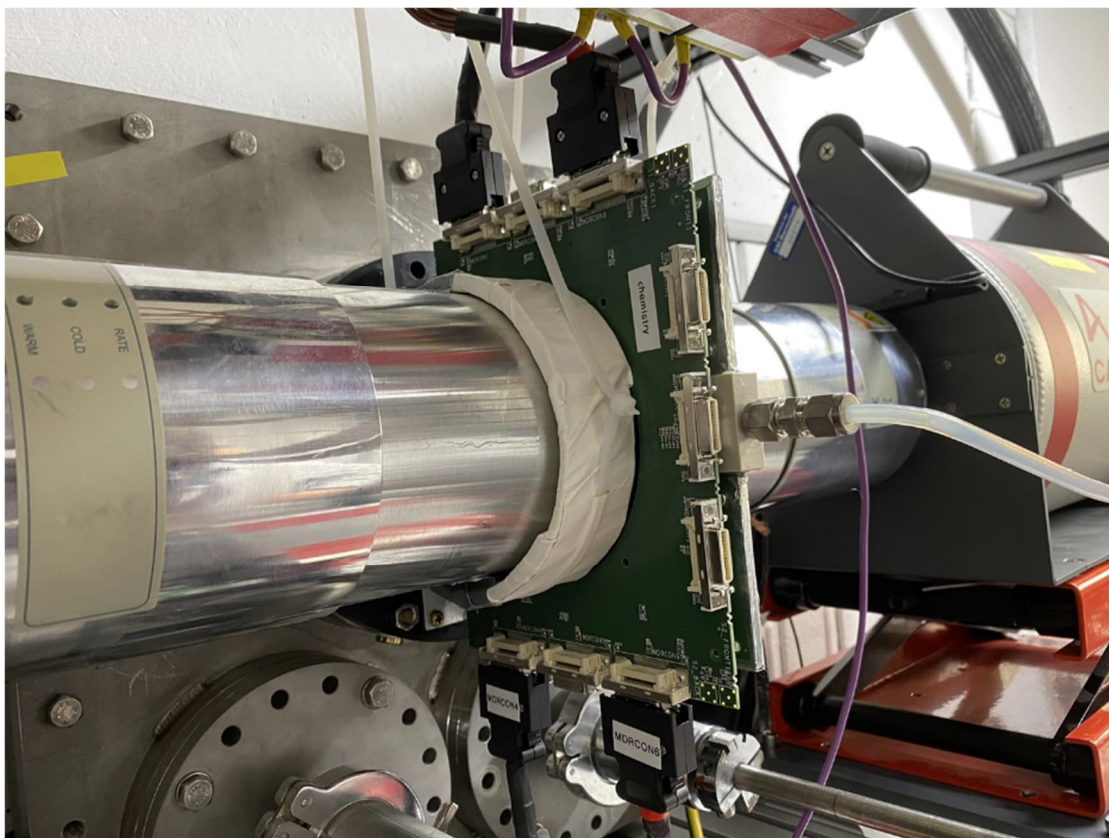
Observation of relativistic bond weakening in seaborgium hexacarbonyl

Alexander Yakushev, Jadambaa Khuyagbaatar, Christoph E. Düllmann, Valeria Pershina, Matthias Schädel, Jochen Ballof, Pavel Bartl, Michael Block, Raul-Andrei Cantemir, Dominik Dietzel, Francesca Giacoppo, Katharina Hermainski, Rolf-Dietmar Herzberg, Jan John, Jörg Krier, Nikolaus Kurz, Sven Löchner, Moumita Maiti, Pavol Mošat', Sebastian Raeder, Tetsuya K. Sato, Brigitta Schausten, Juha Uusitalo, Peter Wieczorek

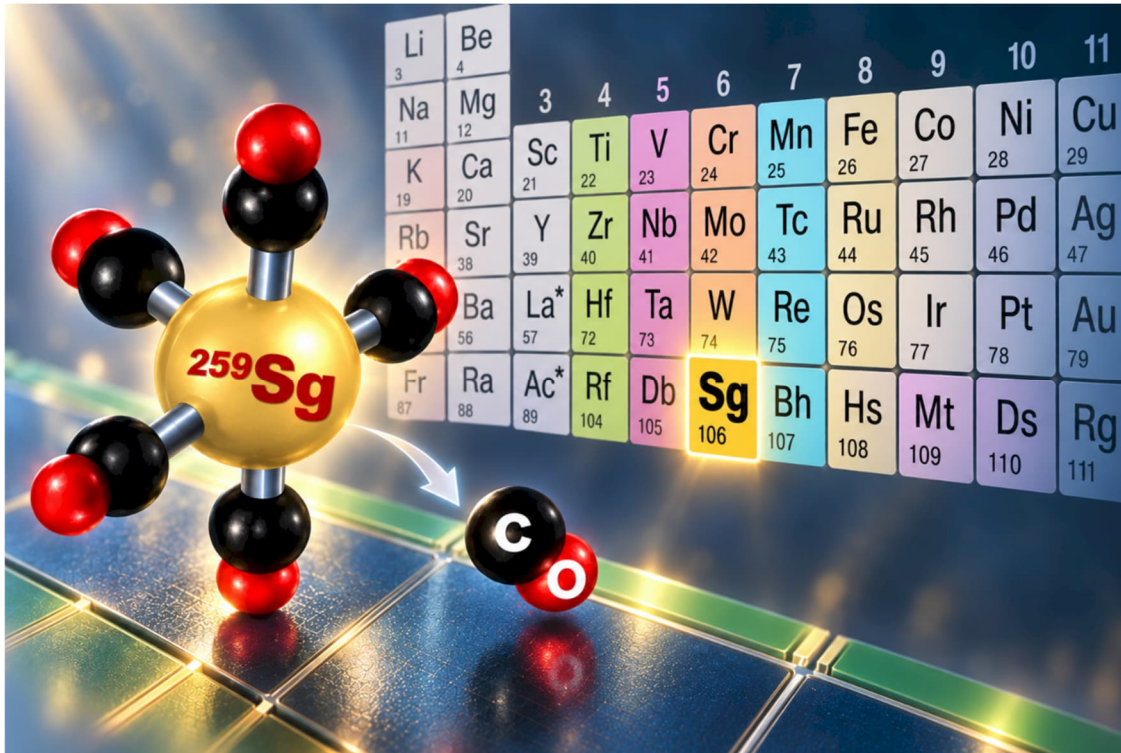
[Nature 658, 337 \(2026\)](#)

Contact:

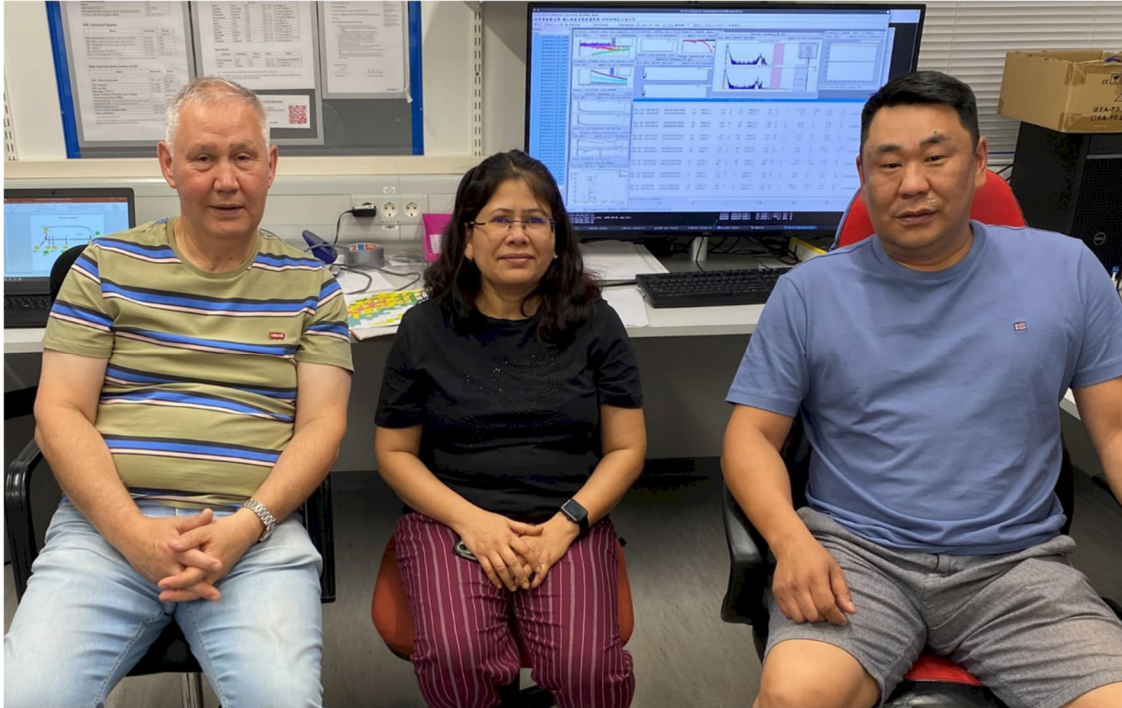
Prof. Dr. Christoph E. Düllmann
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
Helmholtz-Institut Mainz
duellmann@uni-mainz.de
Phone: +49 6131 39 25852



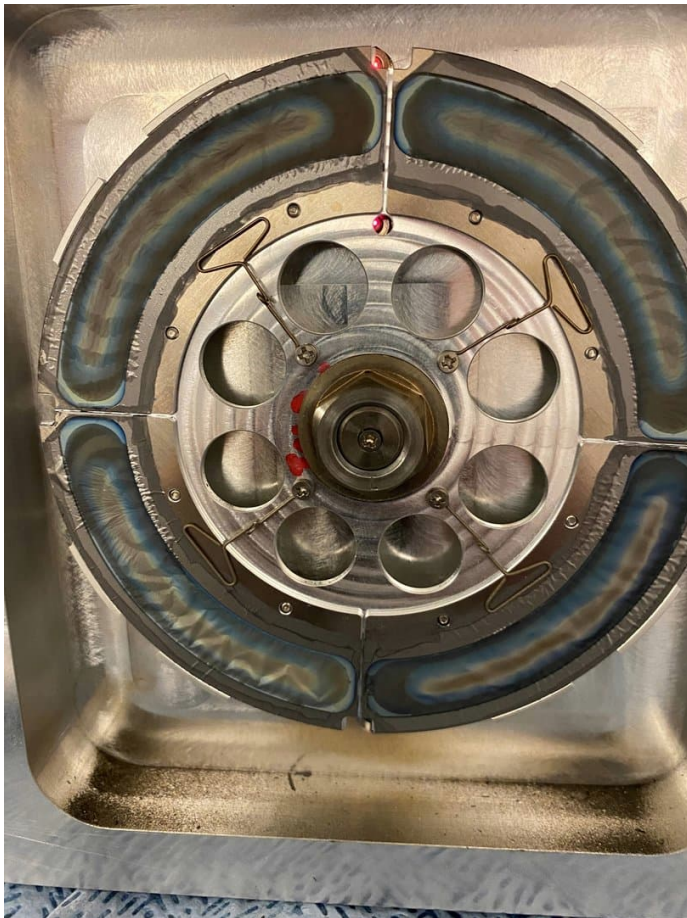
Experimental setup behind the TASCA separator: the first detector array, mounted behind the reaction chamber at TASCA, surrounded by two germanium detectors. (© A. Yakushev / GSI)



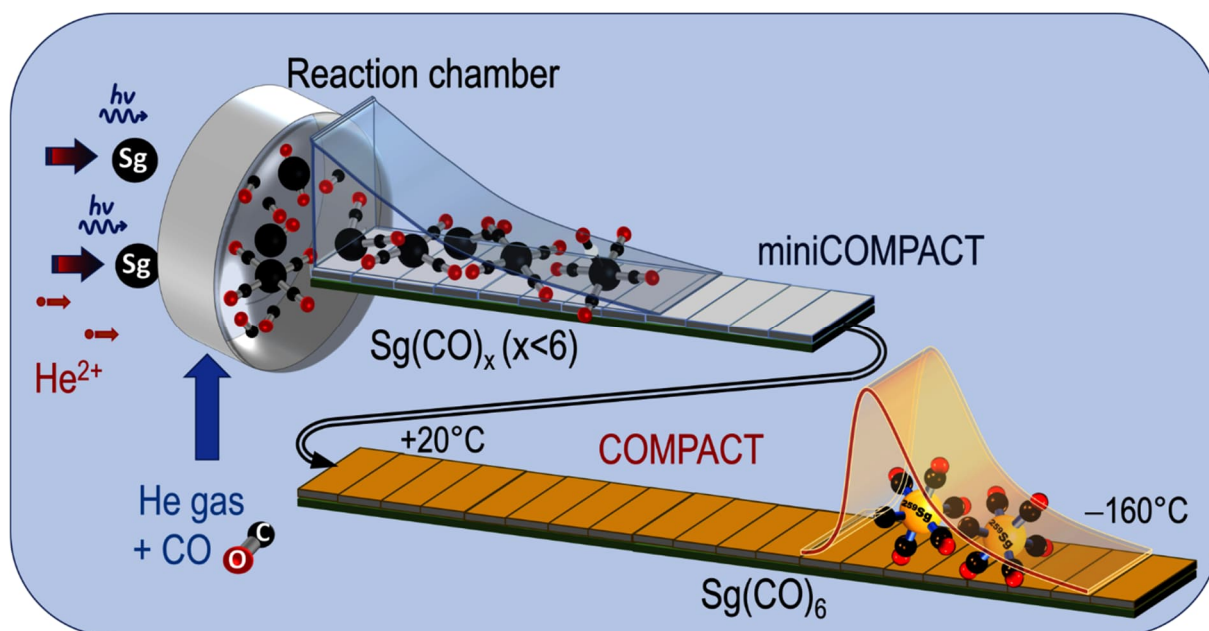
The decomposition of $\text{Sg}(\text{CO})_6$. (© A. Yakushev / GSI and K. Hermainski; AI assisted)



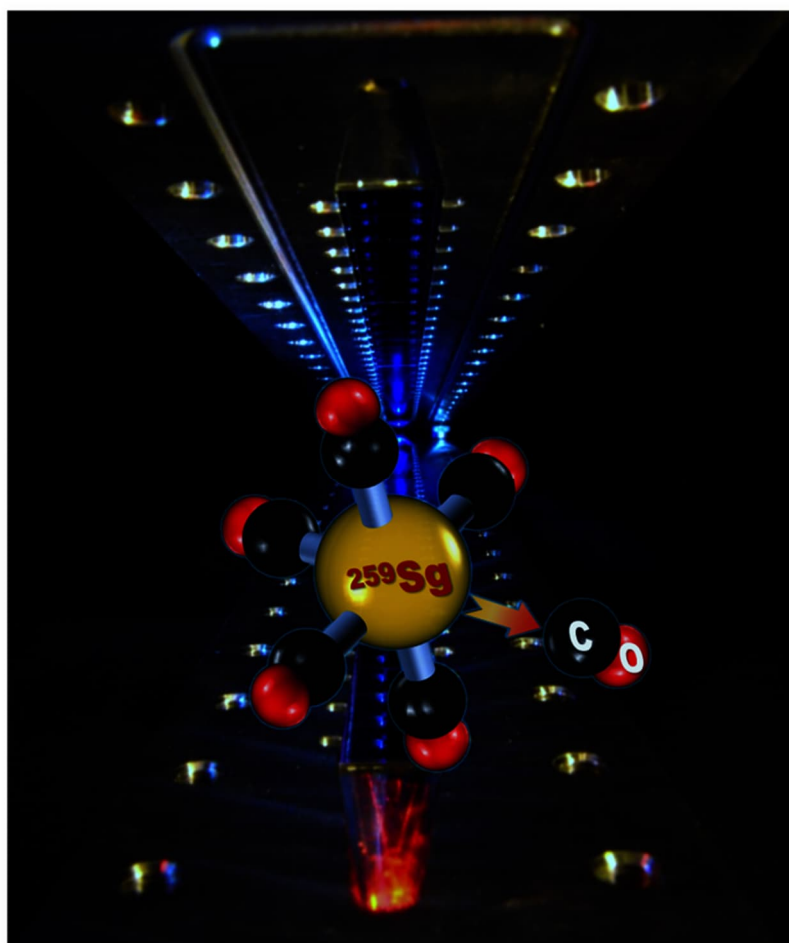
Three participants of the experiment in the TASCA control room (from left to right): Dr. Alexander Yakushev from GSI Darmstadt, the spokesperson of the experiment; Dr. Moumita Maiti from IIT Roorkee (India), and Dr. Jadambaa Khuyagbaatar from GSI. (© A. Yakushev / GSI)



The 10 cm diameter TASCA target wheel with the four target segments containing lead-208 deposited on 500 nm-thick carbon foils. The intense chromium-52 beam led to morphological changes in the irradiated areas, which are visible by their coloration. (© A. Yakushev / GSI)



The experimental setup used in the study of $\text{Sg}(\text{CO})_6$, mounted behind the TASCA separator at GSI/FAIR.
(© A. Yakushev / GSI)



The decomposition of $\text{Sg}(\text{CO})_6$ inside a COMPACT detector. (© A. Yakushev / GSI)

Chemische Bindung mit superschwerem Element bei GSI/FAIR untersucht

Eine internationale Kollaboration unter Leitung eines Forschungsteams von GSI/FAIR in Darmstadt hat erstmalig die chemische Stabilität eines Moleküls eines superschweren Elements untersucht. Im Fokus stand dabei der Hexacarbonyl-Komplex $\text{Sg}(\text{CO})_6$ des superschweren Elements Seaborgium (Sg, Element 106). Das Ergebnis: Die Bindung zwischen dem Seaborgium-Atom und einem Carbonyl-Liganden ist schwächer als aufgrund der Position im Periodensystem erwartet. Verantwortlich dafür sind relativistische Effekte. Die Ergebnisse sind im Fachjournal Nature veröffentlicht.

Superschwere Elemente (SHE) mit Ordnungszahlen zwischen 104 und 118 werden künstlich in Kernfusionsreaktionen an Teilchenbeschleunigern hergestellt – mit Produktionsraten von wenigen Atomen pro Tag. Aufgrund der kurzen Lebensdauern, maximal im Sekundenbereich, sind chemische Untersuchungen eine Herausforderung. Ein Hauptinteresse besteht darin, den Einfluss relativistischer Effekte nachzuvollziehen: Durch die hohe Kernladung der SHE werden Elektronen in der Nähe des Atomkerns auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Nach Einsteins berühmter spezieller Relativitätstheorie werden Objekte, die sich nahe der limitierenden Lichtgeschwindigkeit bewegen, schwerer.

Bohrs Atommodell besagt, dass die Elektronen somit näher an den Kern rücken und stärker gebunden sind. Entferntere Elektronen unterliegen der relativistischen Massenzunahme nicht und sind sogar noch weiter entfernt, weil die stärker gebundenen Elektronen die positive Kernladung besser abschirmen. Beides führt zu Veränderungen in der Elektronenstruktur superschwerer Atome und damit auch in den chemischen Eigenschaften ihrer Verbindungen im Vergleich zu ihren leichteren Homologen. Vergleichende Untersuchungen solcher identischer Molekülsorten homologer Elemente ermöglichen es somit, grundlegende Zusammenhänge des Periodensystems der Elemente zu ergründen.

„Wir konnten erstmalig die Stärke der chemischen Bindung einer Verbindung mit einem superschweren Element messen, nämlich zwischen dem zentralen Seaborgium-Atom und einem Kohlenmonoxid-Liganden. Dies haben wir dann mit der Stärke der gleichen Bindung im Hexacarbonyl des leichteren Homologen Wolfram verglichen“, erläutert Dr. Alexander Yakushev von GSI/FAIR, Sprecher der Kollaboration. „Von Chrom über Molybdän zu Wolfram steigt die Bindungsstärke an, sollte also eigentlich in Seaborgium am stärksten sein. Die Messung zeigt jedoch, dass die hohe Kernladungszahl des Seaborgiums seine Elektronenstruktur verändert, was den Trend umkehrt und zu einer schwächeren Bindung führt.“ Kürzliche quantenchemische Berechnungen, die den Einfluss der Relativität vollständig miteinbeziehen, erklären die Beobachtung. Einfachere Modelle, welche die Relativität vernachlässigen, sagen eine weiter ansteigende Bindungsstärke voraus.

Mit $\text{Sg}(\text{CO})_6$ wurde vor etwa zehn Jahren am RIKEN Nishina Center in Japan im Rahmen eines Experiments unter der Leitung von Wissenschaftler*innen der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (JGU) und von GSI/FAIR erstmals eine Hexacarbonyl-Verbindung mit einem SHE synthetisiert. Sie erwies sich aufgrund ihrer Bindungseigenschaften sofort als geeignet, die Stärke einer chemischen Bindung zwischen dem zentralen Seaborgium-Atom und einem Kohlenmonoxid-Liganden zu messen. Erste Versuche blieben jedoch erfolglos.

Ein Schlüssel zum experimentellen Erfolg sind schnelle chemische Synthesen mit hohen Ausbeuten, kombiniert mit ausgeklügelten Methoden zur Messung des radioaktiven Zerfalls für die Identifikation der Einzelatome. Im Experiment bei GSI/FAIR stellten die Forschenden das Isotop Seaborgium-259 her, für das zwei Kernzustände mit unterschiedlichen, kurzen

Lebensdauern unter einer halben Sekunde bekannt sind. Zum Vergleich wurden die ebenfalls kurzlebigen Wolfram-Isotope 161 und 162 hergestellt.

Nach Produktion und Isolation im Experimentaufbau TASCA (TransActiniden Separator und Chemie Apparatur) stoppten die Atome in einer Gasatmosphäre, die Kohlenstoffmonoxid enthielt, was zur Bildung der Komplexe führte. Das Gas spülte alle Atome in einen schmalen Kanal mit zwei Detektoren, um jedes Atom durch den Nachweis seines radioaktiven Zerfalls zu registrieren. Produkte der Reaktion von Seaborgium und Wolfram mit Kohlenstoffmonoxid bleiben chemisch reaktiv und adsorbieren im ersten Detektor – es sei denn, sie bilden das unreaktive und flüchtige Hexacarbonyl, das den ersten Kanal überfliegt und den zweiten Detektor erreicht. Dieser ist auf tiefe Temperaturen abgekühlt, die niedrig genug sind, um diese Verbindungen zu adsorbieren.

Die Effizienz, mit der ein Hexacarbonyl-Komplex gebildet wird, hängt entscheidend von der Stärke der Bindung beim Andocken des sechsten Kohlenstoffmonoxid-Liganden und des zentralen Atoms ab. Eine Bestimmung des Anteils aller Atome, die als Hexacarbonyl-Komplex vorliegen, erlaubt demnach einen Rückschluss auf die Stärke der chemischen Bindung. Insgesamt wurden 75 Seaborgium-Atome registriert, drei davon im Hexacarbonyl-Detektor. Beim Wolfram bildeten aber 17 Prozent aller Atome die analoge Verbindung. Aus der deutlich geringeren Ausbeute von $\text{Sg}(\text{CO})_6$ folgte, dass dessen Bindungsstärke um 4 kJ/mol geringer ist als bei $\text{W}(\text{CO})_6$. Der Trend der ansteigenden Stabilität des Hexacarbonyls in der Chromgruppe von Chrom über Molybdän zu Wolfram dreht sich somit zum Seaborgium hin.

Professor Christoph E. Düllmann, Leiter der Abteilungen für die Chemie superschwerer Elemente bei GSI/FAIR und am Helmholtz-Institut Mainz sowie Professor an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, betont: „Dieses bahnbrechende Experiment wäre ohne interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen rund um die Welt nicht möglich gewesen. Es ergänzt die internationalen Wissenschaftsprogramme bei GSI und FAIR, in denen der Ursprung der Elemente in unserem Universum und ihre Eigenschaften untersucht werden.“

Nach dieser ersten erfolgreichen Detailuntersuchung der Bindung in Molekülen mit superschweren Elementen bereiten die Forschenden bereits Experimente mit noch schwereren Elementen als Seaborgium vor. (CP/BP)

Original Publikation:

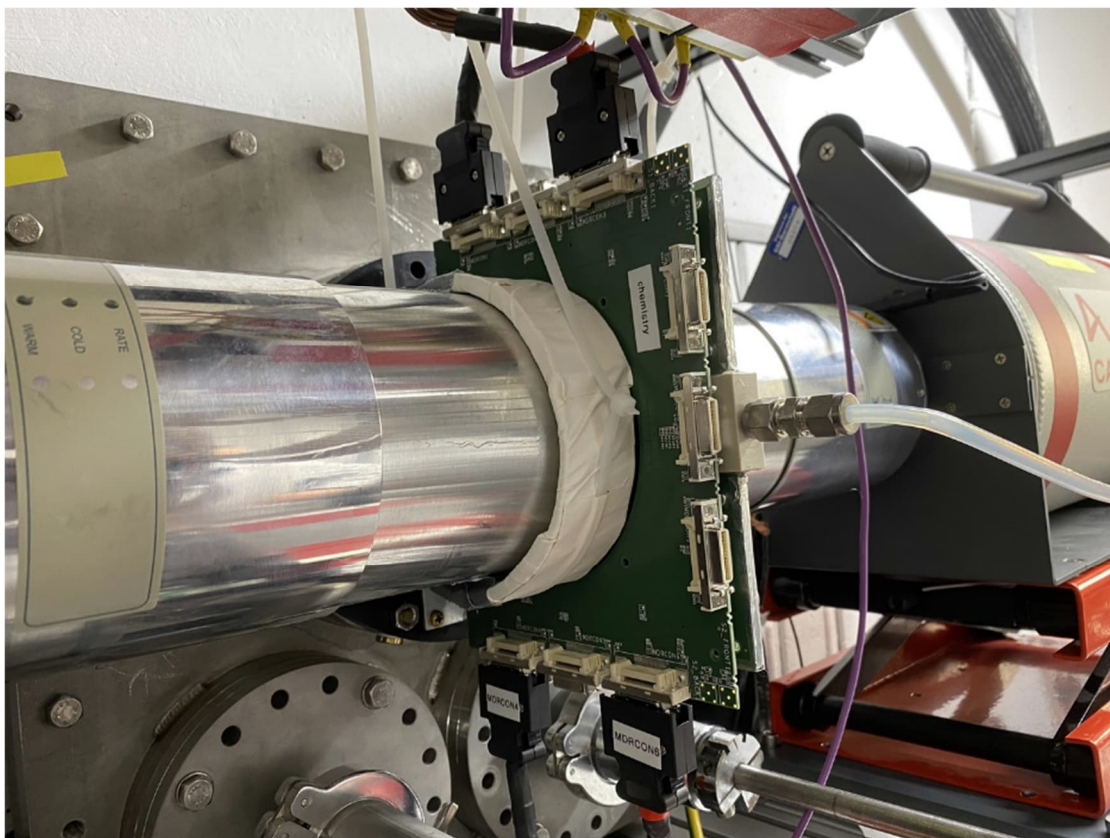
Observation of relativistic bond weakening in seaborgium hexacarbonyl

Alexander Yakushev, Jadambaa Khuyagbaatar, Christoph E. Düllmann, Valeria Pershina, Matthias Schädel, Jochen Ballof, Pavel Bartl, Michael Block, Raul-Andrei Cantemir, Dominik Dietzel, Francesca Giacoppo, Katharina Hermainski, Rolf-Dietmar Herzberg, Jan John, Jörg Krier, Nikolaus Kurz, Sven Löchner, Moumita Maiti, Pavol Mošat', Sebastian Raeder, Tetsuya K. Sato, Brigitta Schausten, Juha Uusitalo, Peter Wieczorek

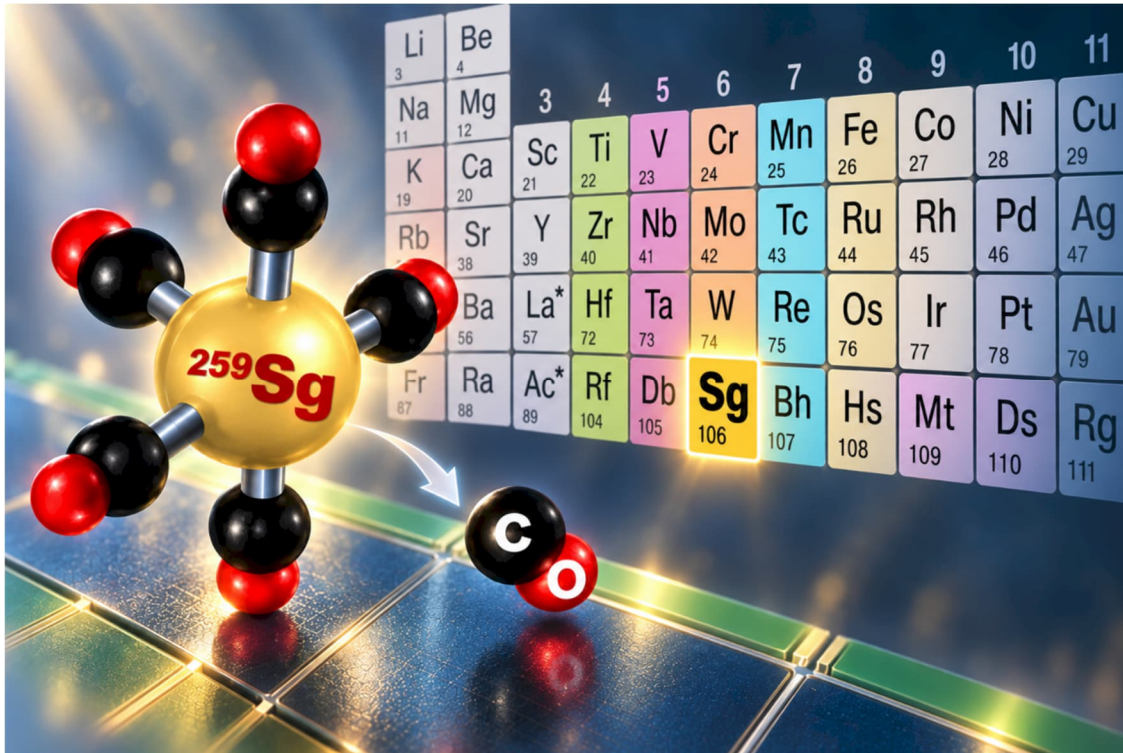
[Nature 658, 337 \(2026\)](#)

Kontakt:

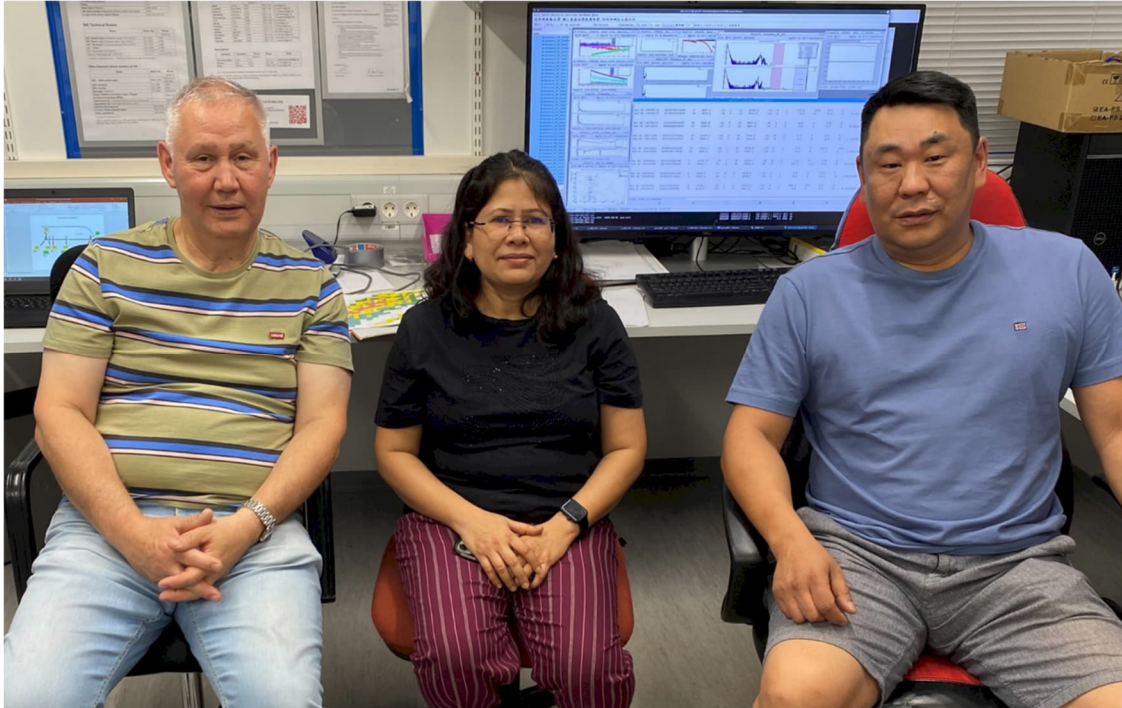
Prof. Dr. Christoph E. Düllmann
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH
Helmholtz-Institut Mainz
duellmann@uni-mainz.de
Phone: +49 6131 39 25852



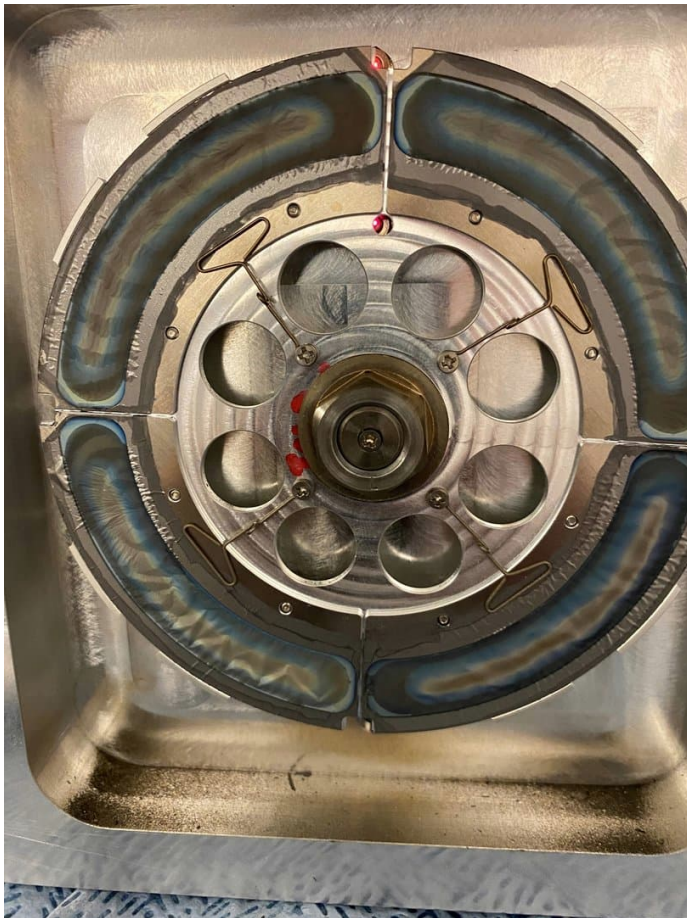
Experimentaufbau hinter dem TASCA-Separator: der erste Detektor hinter der Reaktionskammer, umgeben von zwei Germaniumdetektoren. (© A. Yakushev / GSI)



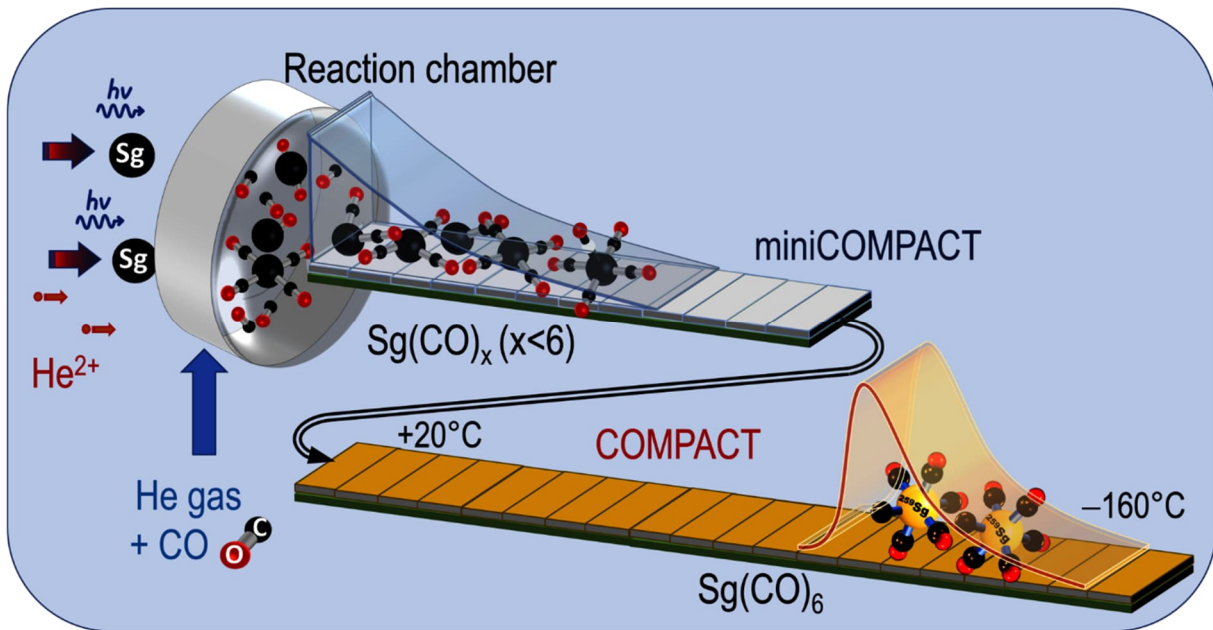
Die Zersetzung von $\text{Sg}(\text{CO})_6$. (© A. Yakushev / GSI und K. Hermainski; mit Hilfe von KI erstellt)



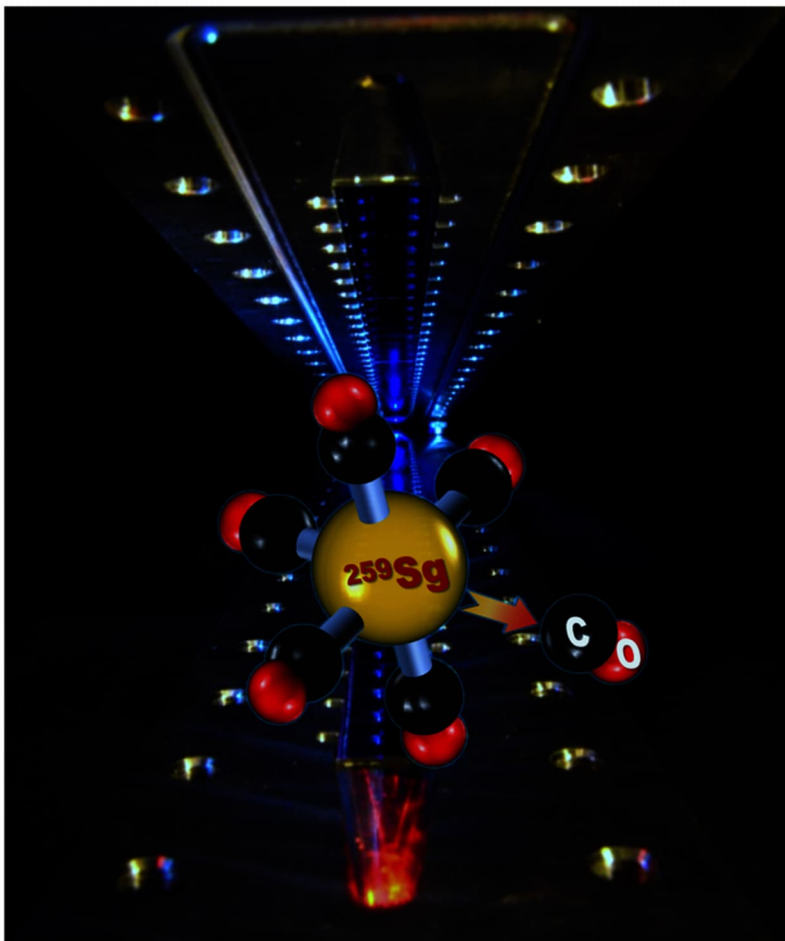
Drei Experimentbeteiligte im TASCA Kontrollraum (v.l.n.r.): Dr. Alexander Yakushev von GSI Darmstadt, Sprecher des Experiments; Dr. Moumita Maiti von IIT Roorkee (Indien) und Dr. Jadambaa Khuyagbaatar von GSI. (© A. Yakushev / GSI)



Das TASCA Targetrad mit einem Durchmesser von 10 cm und den vier Segmenten mit Blei-208 auf 500 nm dünnen Kohlenstofffolien. Der intensive Chrom-52 Strahl hat die Morphologie der bestrahlten Bereiche verändert, sichtbar an der Verfärbung. (© A. Yakushev / GSI)



In der Untersuchung von $\text{Sg}(\text{CO})_6$ genutzter Experimentaufbau hinter dem TASCA-Separator bei GSI/FAIR.
(© A. Yakushev / GSI)



Die Zersetzung von $\text{Sg}(\text{CO})_6$ in einem COMPACT-Detektor. (© A. Yakushev / GSI)