

(German version see below)

The heaviest element ever chemically studied – Experiments at GSI/FAIR succeed in determining properties of moscovium and nihonium

An international team led by scientists of GSI/FAIR in Darmstadt, Johannes Gutenberg University Mainz and the Helmholtz Institute Mainz, succeeded in determining the chemical properties of the artificially produced superheavy elements moscovium and nihonium (elements 115 and 113). Moscovium thus becomes the heaviest element ever chemically studied. Both of the newly characterized elements are more chemically reactive than flerovium (element 114), which was previously studied at GSI/FAIR. The results are published in the journal *Frontiers in Chemistry*.

With this result, experiments at GSI/FAIR now provide data on the three superheavy elements 113, 114 and 115, allowing for a reliable classification of their properties and an assessment of the structure of the periodic table in this extreme region. As elements become heavier, their many protons in the nucleus accelerate the electrons spinning around the core to ever higher velocities – so high that effects explicable only with Einstein's famous relativity theory kick in. The sheer speed renders electrons heavier.

In lead (element 82), for example, the effects of such processes are already at work and contribute to the chemical processes in lead batteries. The neighbors left and right – thallium and bismuth – behave differently. The effect, albeit small, is localized at lead. Could a superheavy element be a lead alternative? How about the heavier neighbor down the group of the periodic table, flerovium, element 114, discovered and chemically studied only in the last 20 years? It was found to be quite unlike lead, transforms into a gas easily and is less chemically reactive.

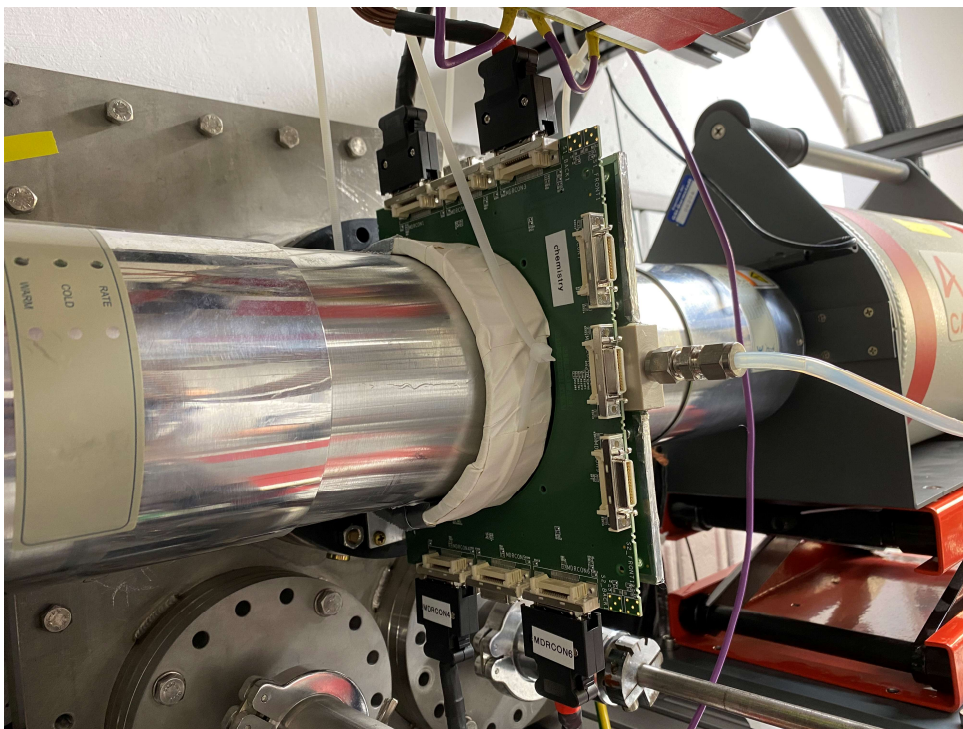
To find answers, the two neighbors, elements 113, nihonium, and 115, moscovium, needed to be tested as well. While first hints at the chemistry of nihonium were reported, nobody had so far achieved a study of the chemistry of moscovium – where the best-suited isotope exists for only about 20 hundredths of a second.

This very feat has now been achieved by the international collaboration at GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt, Germany. The team reported that both neighbors, nihonium as well as moscovium, show a higher chemical reactivity than the intermediate flerovium. The local effect seen in lead is thus also seen in flerovium, however, much more strongly, which comes as no surprise given the much higher nuclear charge.

The observation of a mere handful of atoms was sufficient for obtaining this result. Still, it took two months of continuous around the clock work at the GSI/FAIR's heavy ion accelerator facility to achieve this. To produce the superheavy elements, the team irradiated thin foils containing americium-243 (element 95), itself an artificial element, with intense ion

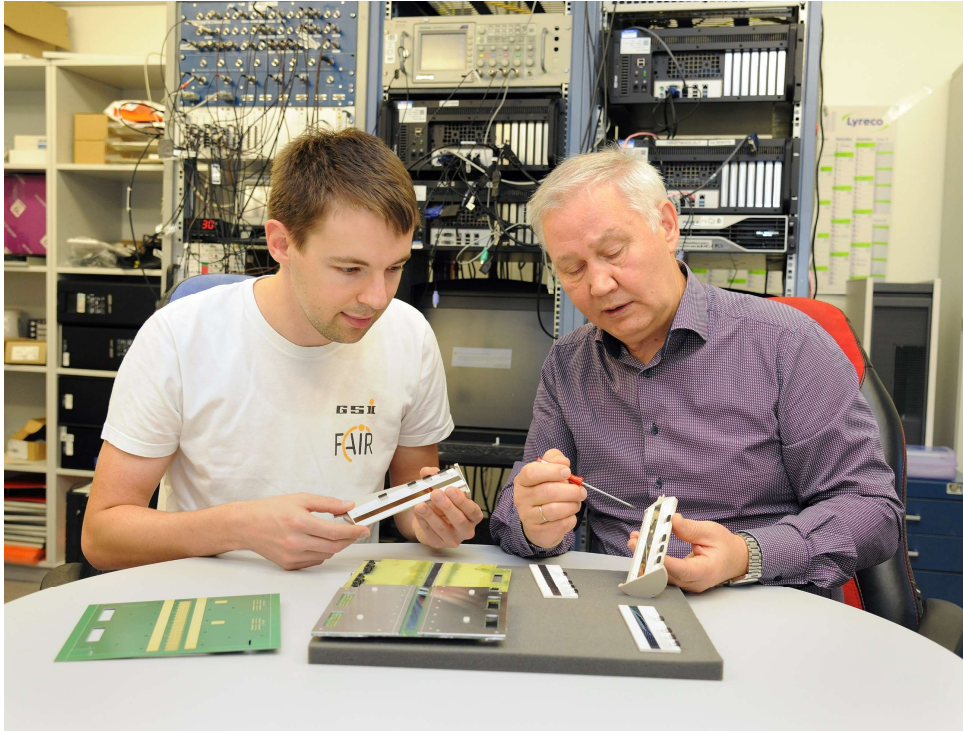
beams of calcium-48 (element 20). Their fusion led to nuclei of moscovium-288 (element 115), which transformed within a fraction of a second to nihonium-284 (element 113).

Inert gas flushed both elements through a detector array covered with a thin quartz layer. The detectors register the decay of the individual superheavy atoms and determine if the atoms form a chemical bond with quartz strong enough to hold them where they first encounter the surface. Weaker binding leads to further transport by the gas. In this way, the pattern registered in the detector array provides information on the strength of the chemical bonds – hence the chemical reactivity of the elements. Elements of low reactivity could even exit the array, but only to encounter gold-covered detectors. Bonds with gold are generally stronger than with quartz, thus ensuring that each studied atom is indeed retained and registered .



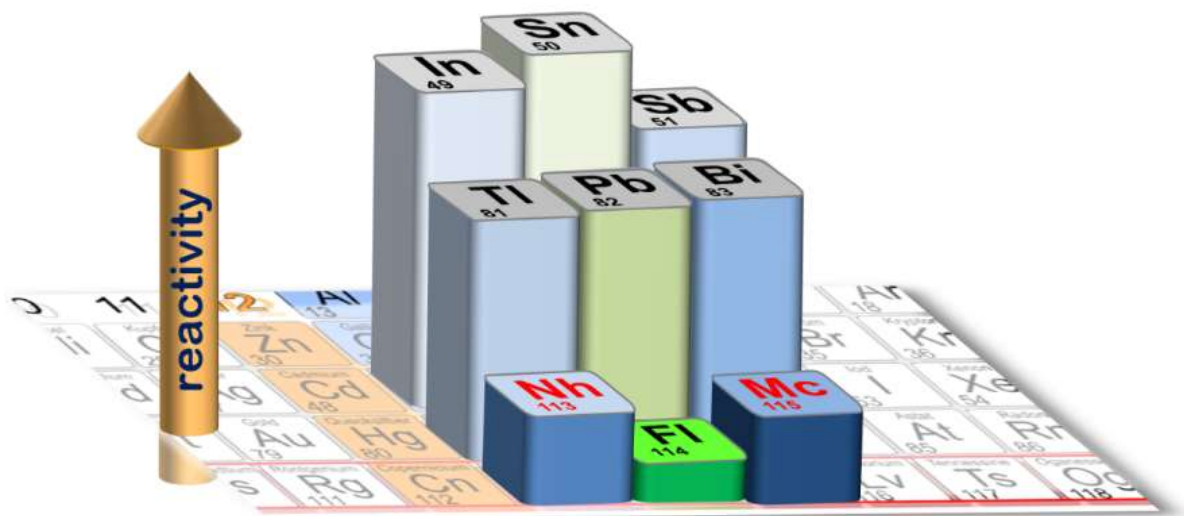
Picture 1: Experimental setup behind the TASCA separator – The detector array with the quartz-coated detectors is located between the two visible circuit boards. Additional detectors surround the channel. (© Photo: A. Yakushev / GSI)

“Thanks to a newly developed setup for chemical separation and detection in combination with the electromagnetic separator TASCA, our gas chromatography studies could be extended to more reactive chemical elements like nihonium and moscovium,” explains Dr. Alexander Yakushev of GSI/FAIR, the spokesperson of the international collaboration. “We have succeeded in increasing the efficiency and reducing the time required for the chemical separation to such an extent that we were able to observe the very short-lived moscovium-288, and at an even larger rate of about two detected atoms every week its daughter nihonium-284.”



Picture 2: Dr. Alexander Yakushev, spokesperson of the experiment (right) and Dominik Dietzel, PhD student from Johannes Gutenberg University Mainz (left) work on the detector channel used to register the short-lived nihonium and moscovium atoms. (© Photo: G. Otto / GSI)

In total, four moscovium atoms were registered, all in the quartz-covered array. Among the 14 detected nihonium atoms, deposition mostly on quartz was observed, pointing to the formation of a chemical bond. One atom reached the gold-covered array, indicating that the quartz bond is not very strong. This is in contrast to the behavior of the lighter homologs thallium (for nihonium) and bismuth (for moscovium), which are both known to form strong bonds with quartz. Similarly, lead, the homolog of flerovium, forms strong bonds with quartz, whereas flerovium does not.



Picture 3: Cutout of the periodic table – The height of the bars of the highlighted elements represents the strength of the bonding on a quartz surface. (© Graphic: A. Yakushev / Ch.E. Düllmann / GSI)

The complete data set on these elements shows that the superheavy elements are much less reactive than their lighter homologs, ascribed to inertness associated with the occurrence of relativistic effects. The most pronounced effect is seen locally at flerovium, which is still a metal, but a very weakly reacting one – a behavior that indicates the presence of closed electron (sub)shells, almost as in the non-reactive noble gases. The results demonstrate the influence of Einstein's relativity theory in the periodic table and at the same time set a new record for the heaviest element ever chemically studied.

With technological advances, new requirements for materials emerge. Could new elements contribute? Like cars transform from fossil to electricity-driven, also other items of our daily life phase out, being replaced by technology based on novel materials. The first flerovium-based device is not around the corner yet. Only single atoms per week – which last for less than a second – can currently be produced. As technology advances, this may change, eventually making larger amounts available. Whether they might serve in future batteries, as medical agents, or enrich our lives in ways inconceivable today, we do not know. But thanks to the groundbreaking experiments at Darmstadt, future researchers will have a head-start and already know the chemical character of these new materials. The result also opens new perspectives for the international facility FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*), which is currently under construction in Darmstadt.

(German version see below)

Das schwerste bisher chemisch untersuchte Element – In Experimenten bei GSI/FAIR gelingt Bestimmung der Eigenschaften von Moscovium und Nihonium

Einem internationalen Team unter der Leitung von Wissenschaftler*innen von GSI/FAIR in Darmstadt, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und dem Helmholtz-Institut Mainz, ist es gelungen, die chemischen Eigenschaften der künstlich hergestellten superschweren Elemente Moscovium und Nihonium (Elemente 115 und 113) zu bestimmen. Moscovium ist damit das schwerste jemals chemisch untersuchte Element. Beide neu charakterisierten Elemente sind chemisch reaktiver als das bereits in der Vergangenheit bei GSI/FAIR untersuchte Flerovium (Element 114). Die Ergebnisse sind im Fachjournal *Frontiers in Chemistry* veröffentlicht.

Dank dieser aktuellen Resultate liefern Experimente an GSI/FAIR nun Daten zu den drei superschweren Elementen 113, 114 und 115, was eine zuverlässige Klassifizierung ihrer Eigenschaften und der Struktur des Periodensystems in dieser extremen Gegend ermöglicht. Wenn Elemente schwerer werden, beschleunigen die vielen Protonen im Kern die um sie kreisenden Elektronen auf immer höhere Geschwindigkeiten – so hoch, dass Effekte auftreten, die nur mithilfe von Einsteins berühmter Relativitätstheorie zu erklären sind. Die reine Geschwindigkeit macht die Elektronen schwerer.

In Blei (Element 82) beispielsweise treten solche Effekte bereits zu Tage und tragen zu den chemischen Prozessen in Bleiakkumulatoren bei. Die linken und rechten Nachbarn – Thallium und Bismut – zeigen dieses Verhalten jedoch nicht. Der Effekt, wenngleich klein, ist bei Blei lokalisiert. Könnte ein superschweres Element eine Bleialternative sein? Wie wäre es mit dem schwereren Nachbarn unterhalb im Periodensystem, Flerovium, Element 114, das erst in den vergangenen 20 Jahren gefunden und chemisch untersucht wurde? Es verhält sich recht anders als Blei, geht schnell in den gasförmigen Zustand über und ist chemisch weniger reaktiv.

Um Antworten zu finden, mussten auch die beiden benachbarten Elemente 113 und 115 (Nihonium und Moscovium) untersucht werden. Während bereits über erste Hinweise auf die Chemie des Nihoniums berichtet wurde, war es bisher niemandem gelungen, die Chemie des Moscoviums zu untersuchen, bei dem das geeignetste Isotop nur etwa 20 Hundertstelsekunden existiert.

Dies ist der internationalen Kollaboration am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt (Deutschland) nun geglückt. Das Team konnte zeigen, dass die beiden Nachbarn Nihonium und Moscovium chemisch reaktiver sind als das dazwischenliegende Flerovium. Der in Blei beobachtete lokale Effekt tritt also auch in Flerovium auf, allerdings viel stärker, was angesichts der höheren Kernladung nicht verwundert. Um dies zu zeigen, benötigten die Forschenden nur eine Handvoll Atome, aber zwei Monate kontinuierlicher Arbeit rund um die Uhr an der Schwerionenbeschleunigeranlage von GSI/FAIR. Um die superschweren Elemente

herzustellen, bestrahlte das Team dünne Folien mit Americium-243 (Element 95), selbst ein künstliches Element, mit intensiven Ionenstrahlen aus Calcium-48 (Element 20). Ihre Fusion führte zu den Moscovium-288-Kernen (Element 115), welche innerhalb von Sekundenbruchteilen zu Nihonium-284 (Element 113) zerfielen.

Beide Elemente wurden mit Inertgas durch einen Detektorkanal mit einer dünnen Quarzoberfläche gespült. Die Detektoren registrieren den Zerfall der individuellen superschweren Atome und ermitteln so, ob sie eine chemische Verbindung mit dem Quarz eingehen, die stark genug ist, um die Atome dort festzuhalten, wo sie zuerst auf die Oberfläche treffen. Schwächere Bindung führt zu einem weiteren Transport mit dem Gas. So kann das im Detektorkanal registrierte Muster Informationen über die Stärke der chemischen Bindung und infolgedessen der chemischen Reaktivität des Elements liefern. Schwach reaktive Elemente können den Kanal sogar verlassen, um dann auf goldbeschichtete Detektoren zu treffen. Bindungen mit Gold sind im Allgemeinen stärker als mit Quarz, so dass sichergestellt wird, dass jedes erzeugte Atom auch wirklich festgehalten und detektiert wird.

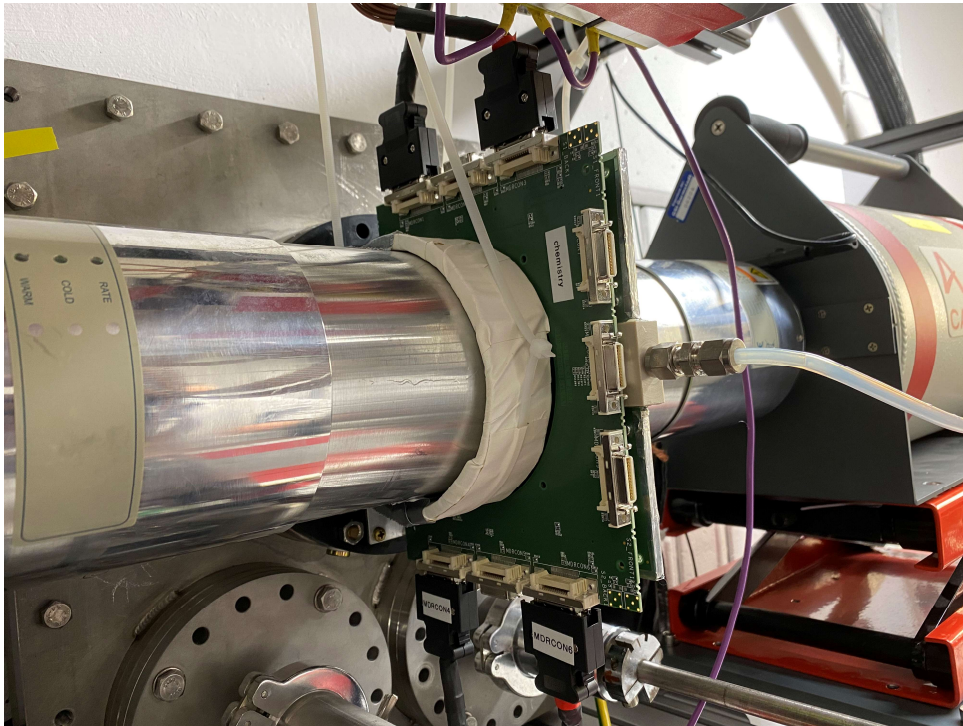


Abbildung 1: Versuchsaufbau hinter dem TASCA-Separator – Der Detektorkanal mit den quarzbeschichteten Detektoren befindet sich zwischen den beiden sichtbaren Leiterplatten. Weitere Detektoren umgeben den Kanal. (© Foto: A. Yakushev / GSI)

“Dank eines neu entwickelten Aufbaus für chemische Separation und Detektion in Kombination mit dem elektromagnetischen Separator TASCA konnten unsere gaschromatografischen Untersuchungen zu reaktiveren chemischen Elementen wie Nihonium und Moscovium ausgeweitet werden“, erläutert Dr. Alexander Yakushev von GSI/FAIR, der Sprecher der internationalen Kollaboration. „Wir haben die Effizienz erhöht und die Zeit für die chemische Separation so weit reduziert, dass wir das sehr kurzlebige Moscovium-288 nachweisen konnten, und mit einer größeren Rate von zwei gemessenen Atomen pro Woche auch dessen Tochter Nihonium-284.“

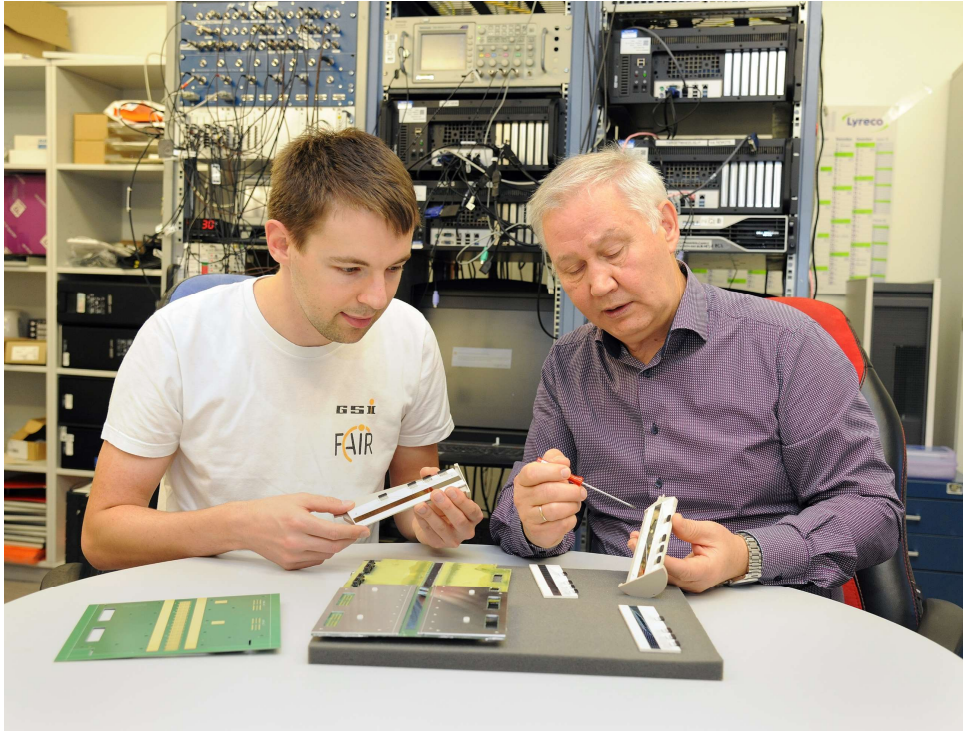


Abbildung 2: Dr. Alexander Yakushev, Sprecher des Experiments (rechts) und Dominik Dietzel, Doktorand der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (links) arbeiten am Detektorkanal, der zur Registrierung der kurzlebigen Nihonium- und Moscovium-Atome dient. (© Foto: G. Otto / GSI)

Insgesamt wurden vier Moscovium-Atome registriert, alle im quarzbedeckten Detektorbereich. Auch die 14 gemessenen Nihonium-Atome wurden hauptsächlich im quarzbedeckten Bereich nachgewiesen, was die Bildung einer chemischen Bindung nahelegt. Ein Atom jedoch erreichte den goldbeschichteten Bereich, was vermuten lässt, dass die Quarzbindung nicht sehr stark ist. Dies steht im Kontrast zum Verhalten der Homologen Thallium (für Nihonium) und Bismut (für Moscovium), die beide starke Bindungen mit Quarz eingehen. Ebenso bildet Blei, das Homolog des Fleroviums, eine starke Verbindung mit Quarz, im Gegensatz zu Flerovium, das sich nicht mit Quarz verbindet.

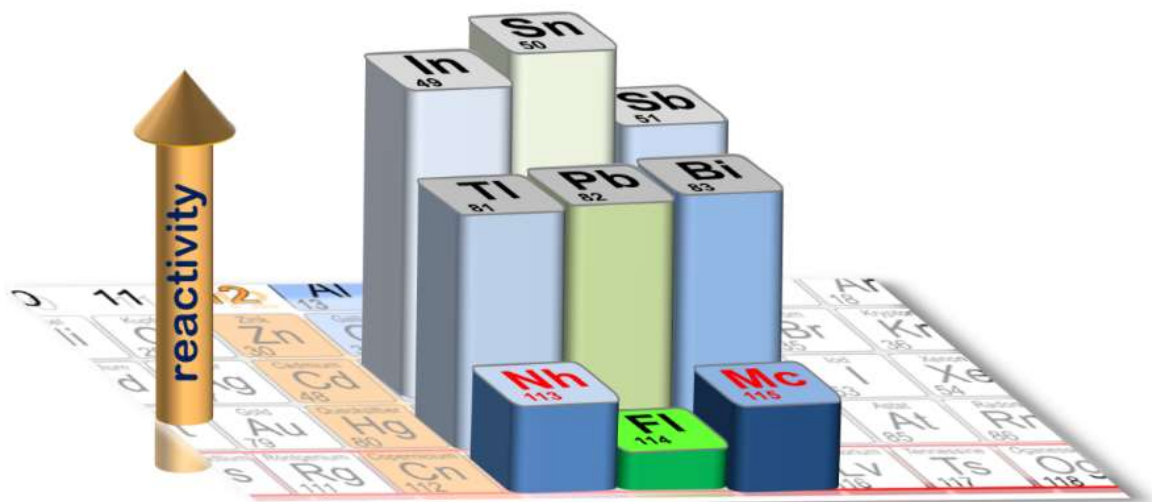


Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Periodensystem: Die Höhe der Balken der hervorgehobenen Elemente stellt die Stärke der Bindung mit einer Quarzoberfläche dar. (© Grafik: A. Yakushev / Ch.E. Düllmann / GSI)

Der vollständige Datensatz zeigt, dass die superschweren Elemente viel weniger reaktiv sind als ihre leichteren Homologe, was auf die Reaktionsträgheit im Zusammenhang mit dem Auftreten relativistischer Effekte zurückzuführen ist. Der ausgeprägteste Effekt ist lokal bei Flerovium zu beobachten, das zwar immer noch ein Metall ist, aber ein sehr schwach reagierendes – ein Verhalten, das auf das Vorhandensein geschlossener Elektronen(unter)schalen hinweist, fast wie bei den nicht reaktiven Edelgasen. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss der Einstein'schen Relativitätstheorie auf das Periodensystem und stellen gleichzeitig einen neuen Rekord für das schwerste jemals chemisch untersuchte Element auf.

Der technologische Fortschritt führt zu neuen Anforderungen an Werkstoffe. Könnten die neuen Elemente einen Beitrag leisten? Ähnlich der Transformation von Autoantrieben von fossil auf elektrisch werden weitere Gegenstände des täglichen Lebens durch neue Technologien ersetzt, die auf neuartigen Materialien basieren. Das erste Flerovium-basierte Gerät ist jedoch noch nicht in Sicht. Aktuell können einzelne Atome pro Woche, die für weniger als eine Sekunde existieren, hergestellt werden. Dies mag sich mit technologischem Fortschritt ändern; größere Mengen neuer Elemente könnten verfügbar werden. Ob sie in zukünftigen Batterien, als medizinische Wirkstoffe oder auf anderen, noch unvorstellbaren Wegen unser Leben bereichern können, wissen wir noch nicht. Aber dank der bahnbrechenden Experimente in Darmstadt haben zukünftige Forschende eine gute Ausgangslage und wissen bereits, welchen chemischen Charakter die neuen Materialien aufweisen. Das Ergebnis eröffnet auch neue Perspektiven für die internationale Anlage **FAIR** (*Facility for Antiproton and Ion Research*), die derzeit in Darmstadt gebaut wird.