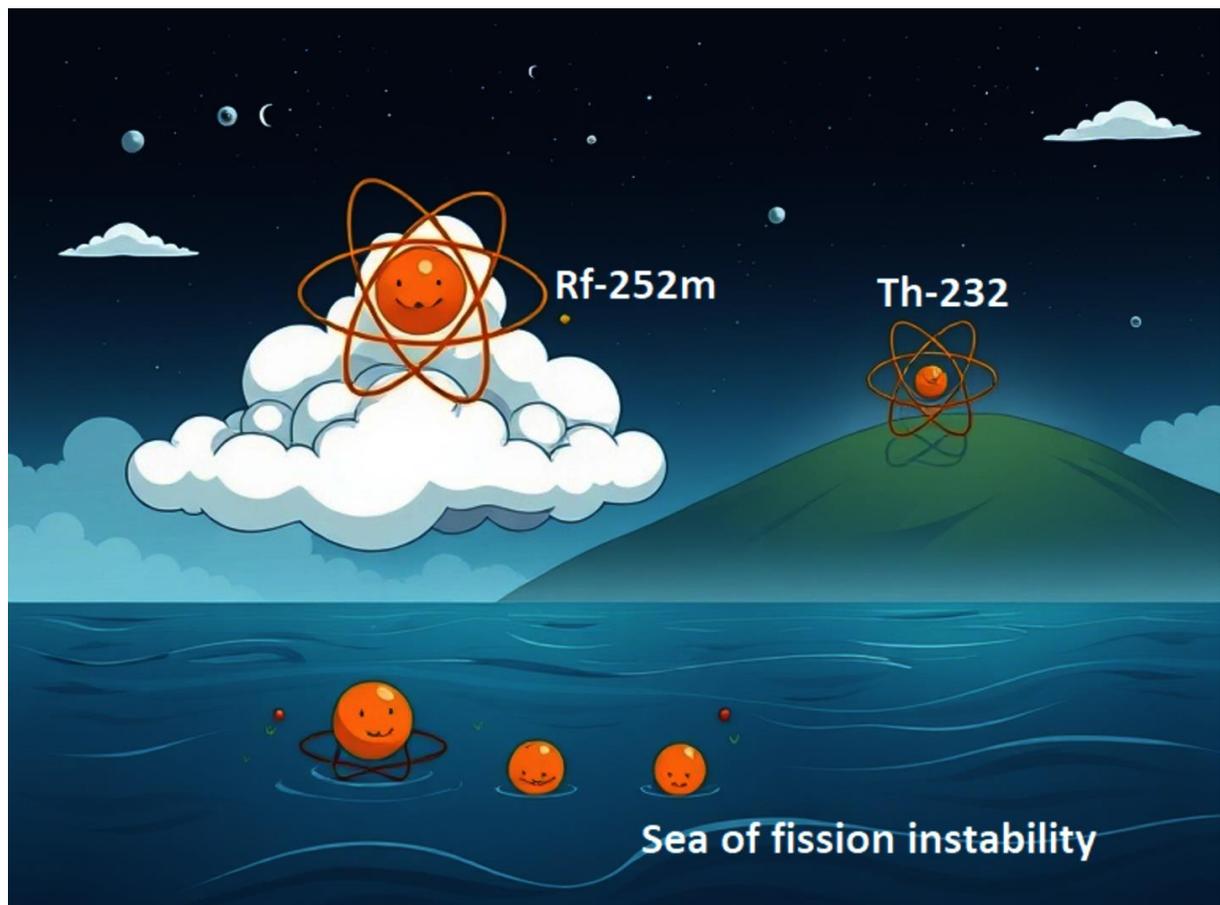


(German version see below)

## Land ahoy! — Experiments at GSI/FAIR reveal the shoreline of the island of stability of superheavy elements

A team of researchers from GSI/FAIR, Johannes Gutenberg University Mainz and the Helmholtz Institute Mainz has succeeded in exploring the limits of the so-called island of stability within the superheavy nuclides more precisely by measuring the superheavy rutherfordium-252 nucleus, which is now the shortest-lived known superheavy nucleus. The results were published in the journal “Physical Review Letters” and highlighted as an “Editor's suggestion”.



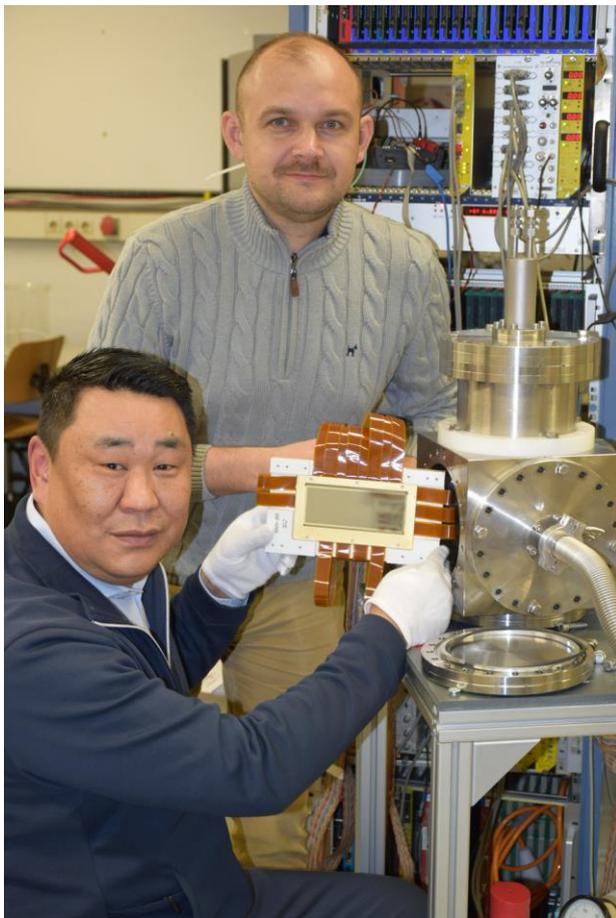
*Sea of instability - In the sea of instability, where fission occurs on a time scale of less than  $10^{-14}$  seconds, no atom and thus no element can exist. The extremely short-lived Rf-252 with a half-life of 60 nanoseconds was produced and guided to the detection system thanks to an isomeric state — hovering in the “cloud of stability” — with a half-life of 13 microseconds, more than 200 times longer than the ground state. On top of a mountain, the primordial Th-232, which is the heavy nucleus that is most stable against fission (on the scale of  $10^{21}$  seconds) is shown.*

*Picture: AI-generated image; Pavol Mosat and Jadambaa Khuyagbaatar*

The strong force ensures cohesion in atomic nuclei consisting of protons and neutrons. However, as the positively charged protons repel each other, nuclei with too many protons are at risk of splitting — a challenge in the production of new, superheavy elements. Certain combinations of protons and neutrons, the so-called “magic numbers”, give nuclei additional stability. When taking these magic combinations into account, theoretical works dating back

to the 1960s predict an island of stability in the sea of unstable superheavy nuclei, where very long lifetimes could be achieved, even approaching the age of the Earth.

The concept of this island has since been confirmed, with the observation of increasing half-lives in the heaviest currently known nuclei as the predicted next magic number of 184 neutrons is approached. However, the location of the peak of this island, its height (reflecting the maximum expected half-life), and also the island's extension are still unknown. Researchers at GSI/FAIR in Darmstadt, the Johannes Gutenberg University Mainz (JGU) and the Helmholtz Institute Mainz (HIM) have now come a step closer to mapping this island, by discovering the shortest-lived superheavy nucleus known thus far, which marks the position of the island's shoreline in nuclei of rutherfordium (Rf, element 104).

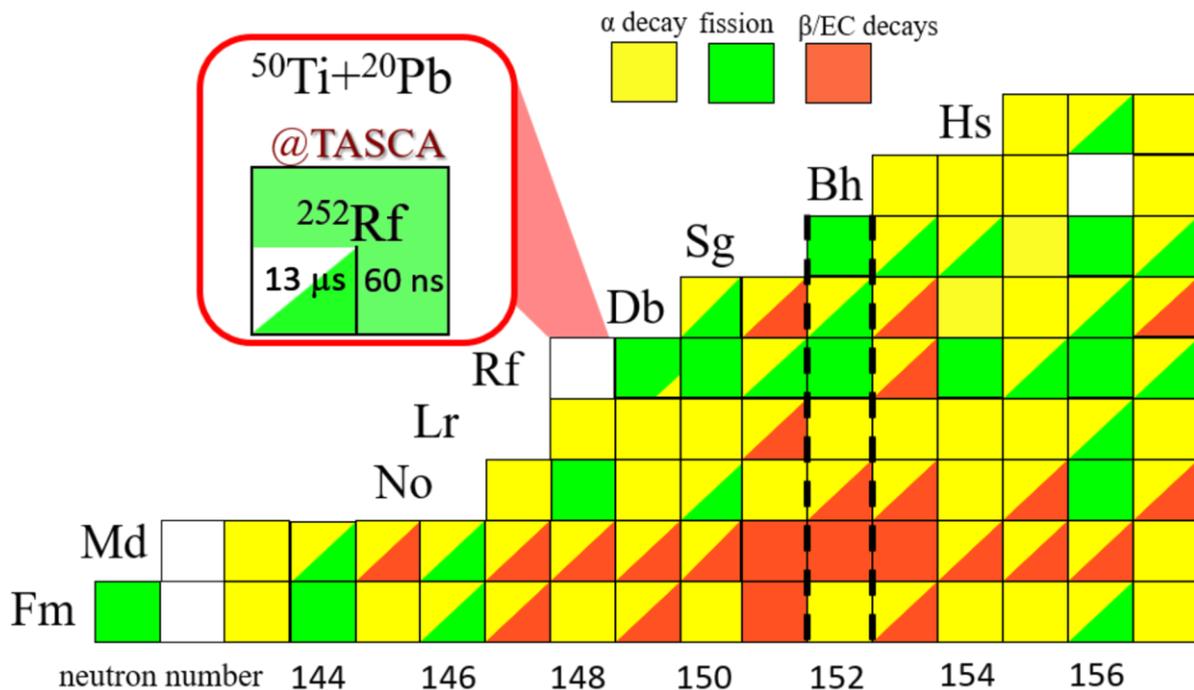


*Dr. Jadambaa Khuyagbaatar (left) and Dr. Pavol Mosat are preparing an experiment. shown. Photo: J. Krier / GSI*

To allow experimental detection, the minimum lifetime of superheavy nuclei is on the order of a millionth of a second, which renders extremely short-lived superheavy nuclei in the vicinity of sea of instability inaccessible. But there is a trick: Sometimes, excited states, stabilized by quantum effects, show longer lifetimes and open a doorway to the short-lived nuclei. "Such long-lived excited states, so-called isomers, are widespread in superheavy nuclei of deformed shape according to my calculations," says Dr. Khuyagbaatar Jadambaa, first author of the publication from GSI/FAIR's research department for superheavy element chemistry. "Thus, they enrich the picture of the island of stability with 'clouds of stability' hovering over the sea of instability."

The research team from Darmstadt and Mainz succeeded in examining these predictions by searching for the hitherto unknown nucleus Rf-252. The researchers used an intense beam of titanium-50 available at the GSI/FAIR's UNILAC accelerator to fuse titanium nuclei with lead nuclei supplied on a target foil. The fusion products were separated in the TransActinide Separator and Chemistry Apparatus TASCA. They implanted into a silicon detector after a flight-time of about 0.6 microseconds. This detector registered their implantation as well as their subsequent decay.

In total, 27 atoms of Rf-252 decaying by fission with a half-life of 13 microseconds were detected. Thanks to the fast digital data acquisition system developed by GSI/FAIR's Experiment Electronics department, electrons emitted after the implantation of the isomer Rf-252m and released in its decay to the ground state, were detected. Three such cases were registered. In all cases, a subsequent fission followed within 250 nanoseconds. From these data, a half-life of 60 ns was deduced for the ground-state of Rf-252, which is now the shortest-lived superheavy nucleus currently known.



Excerpt of the nuclear chart showing the measured decay properties of Rf-252

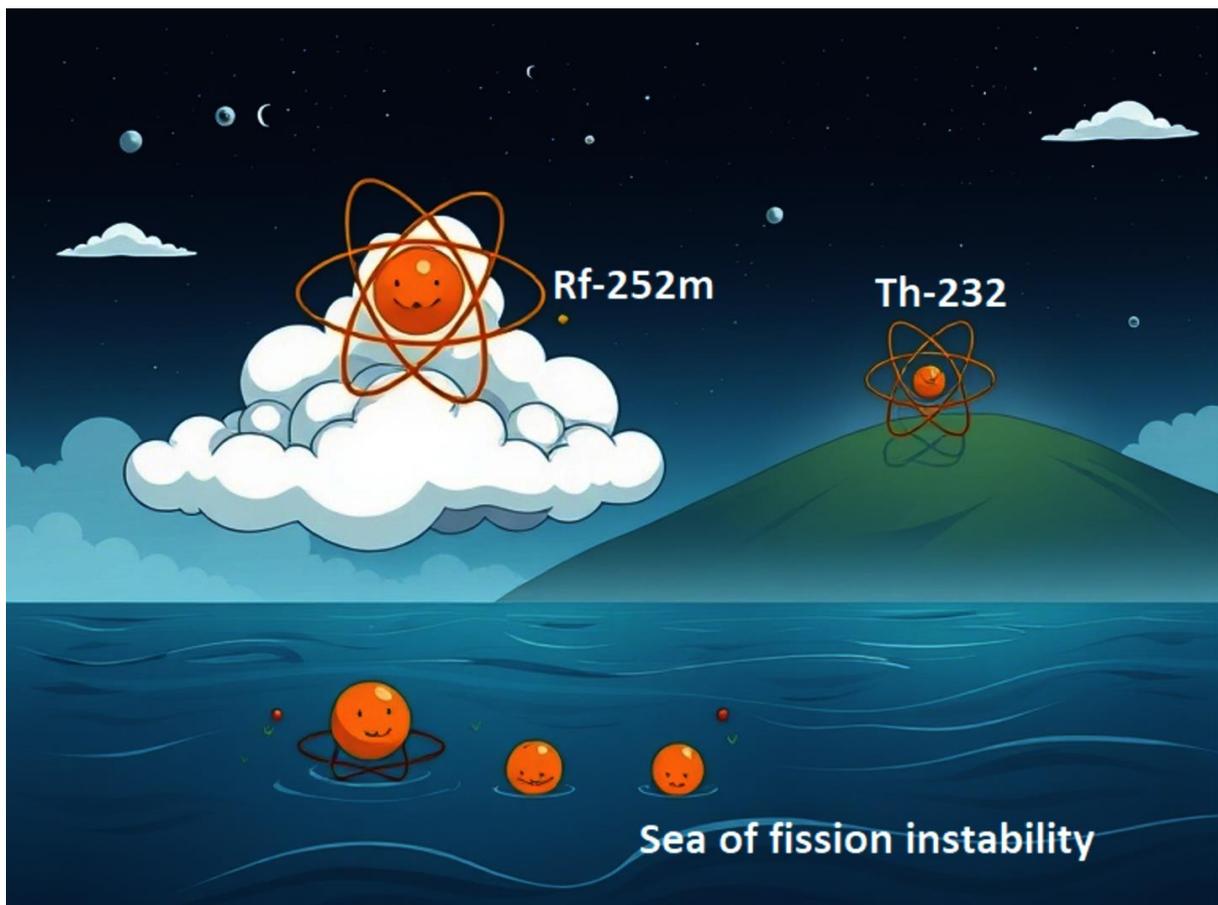
Picture: Jadamba Khuyagbaatar / GSI

“The result decreases the lower limit of the known lifetimes of the heaviest nuclei by almost two orders of magnitude, to times that are too short for direct measurement in the absence of suitable isomer states. The present findings set a new benchmark for further exploration of phenomena associated with such isomer states, inverted fission-stability where excited states are more stable than the ground state, and the isotopic border in the heaviest nuclei.” says Professor Christoph E. Düllmann, head of the research department for superheavy element chemistry at GSI/FAIR.

In future experimental campaigns, the measurement of isomeric states with inverted fission stability in the next heavier element seaborgium (Sg, element 106) is envisioned and to be used for the synthesis of Sg isotopes with lifetimes below a microseconds in order to further map the isotopic border. The result also opens new perspectives for the international facility FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), which is currently under construction in Darmstadt. (CP)

## Land in Sicht! – Küstenlinie der Insel der Stabilität der superschweren Elemente durch Experimente bei GSI/FAIR enthüllt

Einem Team von Forschenden von GSI/FAIR, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und des Helmholtz-Instituts Mainz ist es gelungen, die Grenzen der sogenannten Insel der Stabilität innerhalb der superschweren Nuklide durch die Messung des superschweren Rutherfordium-252-Kerns genauer auszuloten, welcher dadurch als kurzlebigster bekannter superschwerer Kern bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse wurden in im Fachjournal „Physical Review Letters“ veröffentlicht und als „Editor's suggestion“ hervorgehoben.



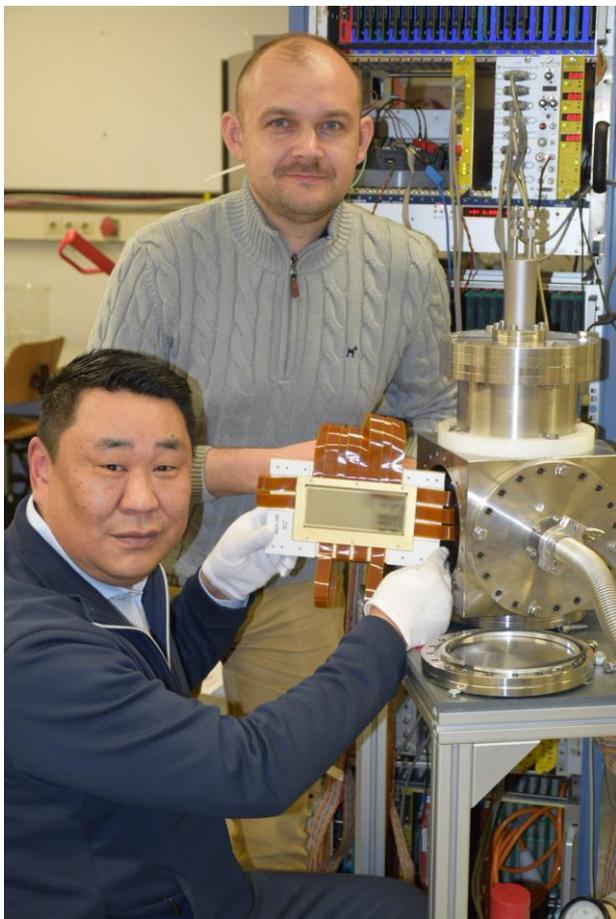
Meer der Instabilität - Im Meer der Instabilität findet die Spaltung auf einer Zeitskala von weniger als 10-14 Sekunden statt und kein Atom und somit kein Element kann existieren. Das extrem kurzlebige Rf-252 mit einer Halbwertszeit von 60 Nanosekunden wurde dank eines isomeren Zustands – schwebend in der „Stabilitätswolke“ – mit einer Halbwertszeit von 13 Mikrosekunden, also mehr als 200-mal länger als der Grundzustand, erzeugt und zum Detektionssystem geleitet. Auf der Spitze eines Berges ist das primordiale Th-232 zu sehen, der schwere Kern, der am stabilsten gegen Spaltung ist (auf der Skala von 1021 Sekunden).

Abbildung: KI-generiertes Bild, Pavol Mosat und Jadamba Khuyagbaatar

Die starke Kraft sorgt in den aus Protonen und Neutronen bestehenden Atomkernen für Zusammenhalt. Da die positiv geladenen Protonen sich gegenseitig abstoßen, drohen Kerne mit zu vielen Protonen jedoch zu spalten – eine Herausforderung bei der Herstellung von neuen, superschweren Elementen. Bestimmte Kombinationen aus Protonen und Neutronen, die sogenannten „magischen Zahlen“, verleihen Kernen zusätzliche Stabilität. Theoretische

Arbeiten unter Berücksichtigung dieser magischen Kombinationen sagten bereits in den 1960er Jahren eine Insel der Stabilität im Meer der instabilen superschweren Kerne theoretisch voraus, auf der sehr lange Lebensdauern erreicht werden könnten, die sich sogar dem Alter der Erde annähern.

Das Konzept dieser Insel wurde inzwischen durch die Beobachtung zunehmender Halbwertszeiten in den schwersten derzeit bekannten Kernen bestätigt, wenn man sich der vorhergesagten nächsten magischen Zahl von 184 Neutronen nähert. Die Lage des Gipfels dieser Insel, ihre Höhe (die die maximal zu erwartende Halbwertszeit widerspiegelt) und auch ihre Ausdehnung sind jedoch noch unbekannt. Forschende an GSI/FAIR, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) und des Helmholtz-Instituts Mainz (HIM) sind nun der Kartierung der Insel einen Schritt näher gekommen, indem sie den kurzlebigsten bisher bekannten superschweren Kern entdeckten, der die Position der Küstenlinie der Insel in Kernen von Rutherfordium (Rf, Element 104) markiert.



*Dr. Jadambaa Khuyagbaatar (links) und Dr. Pavol Mosat bereiten ein Experiment vor.  
Foto: J. Krier / GSI*

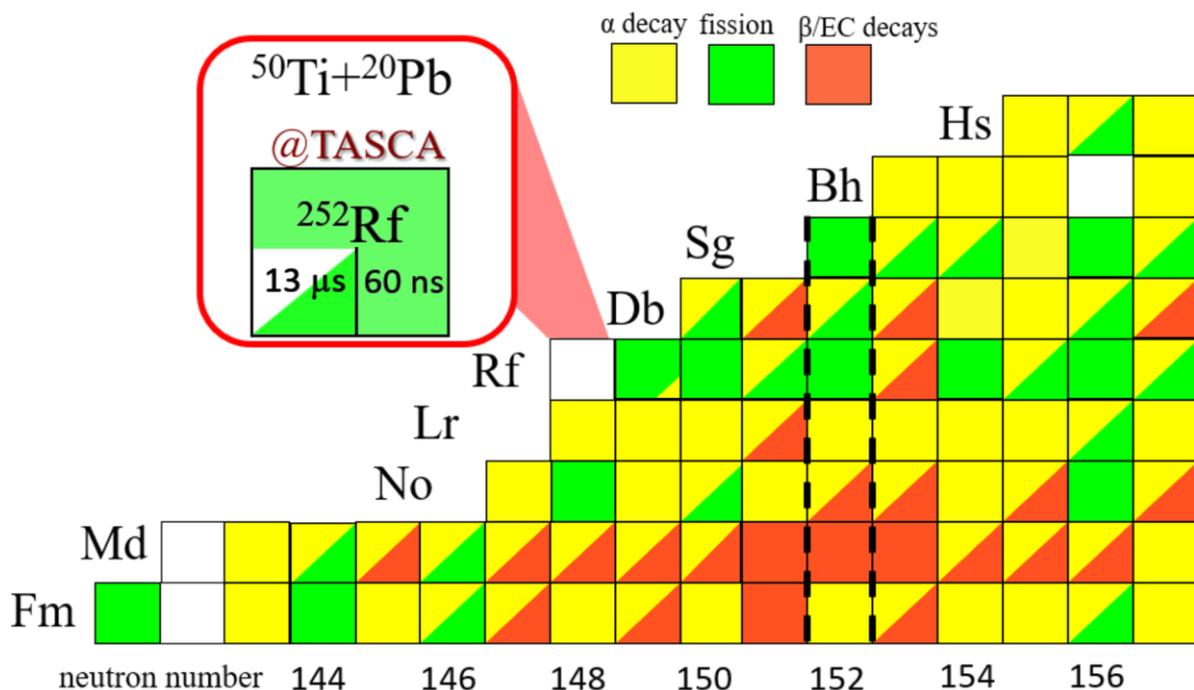
Um einen experimentellen Nachweis zu ermöglichen, muss ein superschwerer Kern eine Mindestlebensdauer in der Größenordnung von einer Millionstel Sekunde aufweisen, was extrem kurzlebige superschwere Kerne in der Nähe des Meeres der Instabilität unzugänglich macht. Aber es gibt einen Trick: Durch Quanteneffekte stabilisierte, angeregte Zustände sind manchmal langlebiger und ermöglichen so Zugang zu den kurzlebigen Kernen. „Solche langlebigen, angeregten Zustände, sogenannte Isomere, sind meinen Berechnungen zufolge in superschweren Kernen mit deformierter Form weit verbreitet“, sagt Dr. Khuyagbaatar Jadambaa, der Erstautor der Veröffentlichung aus der GSI/FAIR-Forschungsabteilung zur Untersuchung der

Chemie superschwerer Elemente. „Man kann somit das Bild der Stabilitätsinsel um ‚Stabilitätswolken‘ bereichern, die über dem Meer der Instabilität schweben.“

Dem Forschungsteam aus Darmstadt und Mainz ist es geglückt, diese Vorhersagen zu überprüfen, indem sie nach dem bisher unbekanntem Kern Rf-252 suchten. Die Forschenden nutzten einen intensiven Strahl aus Titan-50, der am UNILAC-Beschleuniger von GSI/FAIR zur Verfügung steht, um Titankerne mit Bleikernen zu fusionieren, die auf einer Target-Folie

bereitgestellt wurden. Die Fusionsprodukte wurden im TransActinide Separator and Chemistry Apparatus TASCA getrennt. Nach einer Flugzeit von etwa 0,6 Mikrosekunden wurden sie in einen Siliziumdetektor implantiert. Dieser Detektor registrierte sowohl ihre Implantation als auch ihren anschließenden Zerfall.

Insgesamt wurden 27 durch Spaltung zerfallende Rf-252-Atome mit einer Halbwertszeit von 13 Mikrosekunden nachgewiesen. Dank des von der GSI/FAIR-Experimentierelektronik entwickelten schnellen digitalen Datenerfassungssystems konnten die nach der Implantation des Isomers Rf-252m emittierten und beim Zerfall in den Grundzustand freigesetzten Elektronen nachgewiesen werden. Es wurden drei solcher Fälle registriert. In allen Fällen kam es innerhalb von 250 Nanosekunden zu einer anschließenden Spaltung. Aus diesen Daten wurde eine Halbwertszeit von 60 Nanosekunden für den Grundzustand von Rf-252 abgeleitet, der somit der kurzlebige aktuell bekannte superschwere Kern ist.



Der Ausschnitt der Nuklidkarte zeigt die gemessenen Zerfallseigenschaften von Rf-252.

Abbildung: Jadambaa Khuyagbaatar / GSI

„Das Ergebnis senkt die untere Grenze der bekannten Lebensdauern der schwersten Kerne um fast zwei Größenordnungen auf Zeiten, die für eine direkte Messung in Ermangelung geeigneter isomerer Zustände zu kurz sind. Die vorliegenden Ergebnisse setzen einen neuen Maßstab für die weitere Erforschung von Phänomenen, die mit solchen isomeren Zuständen, der umgekehrten Spaltstabilität, bei der angeregte Zustände stabiler sind als der Grundzustand, und der Isotopengrenze in den schwersten Kernen verbunden sind“, erläutert Professor Christoph E. Düllmann, Leiter der Forschungsabteilung zur Untersuchung der Chemie superschwerer Elemente bei GSI/FAIR.

In zukünftigen Experimenten ist die Messung isomerer Zustände mit umgekehrter Spaltstabilität im nächst schwereren Element Seaborgium (Sg, Element 106) angedacht, die für die Synthese von Sg-Isotopen mit Lebensdauern unter einer Mikrosekunde genutzt werden sollen, um die Isotopengrenze weiter zu kartieren. Das Ergebnis eröffnet auch neue Perspektiven für die internationale Anlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), die sich derzeit in Darmstadt im Bau befindet. *(CP)*