

(German version see page 7 onwards)

Greetings from the island of enhanced stability: The quest for the limit of the periodic table

Review in Nature Reviews Physics discusses major challenges in the field of superheavy elements and their nuclei and provides an outlook on future developments

Since the turn of the century, six new chemical elements have been discovered and subsequently added to the periodic table of elements, the very icon of chemistry. These new elements have high atomic numbers up to 118 and are significantly heavier than uranium, the element with the highest atomic number (92) found in larger quantities on Earth. This raises questions such as how many more of these superheavy species are waiting to be discovered, where – if at all – is a fundamental limit in the creation of these elements, and what are the characteristics of the so-called island of enhanced stability. In a recent review, experts in theoretical and experimental chemistry and physics of the heaviest elements and their nuclei summarize the major challenges and offer a fresh view on new superheavy elements and the limit of the periodic table. One of them is Professor Christoph Düllmann from the GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt, Johannes Gutenberg University Mainz, and the Helmholtz Institute Mainz (HIM). In its February issue, the world's leading high-impact journal Nature Reviews Physics presents the topic as its cover story.

Visualizing an island of stability of superheavy nuclei

Already in the first half of the last century, researchers realized that the mass of atomic nuclei is smaller than the total mass of their proton and neutron constituents. This difference in mass is responsible for the binding energy of the nuclei. Certain numbers of neutrons and protons lead to stronger binding and are referred to as “magic”. In fact, scientists observed early on that protons and neutrons move in individual shells that are similar to electronic shells, with nuclei of the metal lead being the heaviest with completely filled shells containing 82 protons and 126 neutrons – a doubly-magic nucleus. Early theoretical predictions suggested that the extra stability from the next “magic” numbers, far from nuclei known at that time, might lead to lifetimes comparable to the age of the Earth. This led to the notion of a so-called island of stability of superheavy nuclei separated from uranium and its neighbors by a sea of instability.

There are numerous graphical representations of the island of stability, depicting it as a distant island. Many decades have passed since this image emerged, so it is time to take a fresh look at the stability of superheavy nuclei and see where the journey to the limits of mass and charge might lead us. In their recent paper titled "The quest for superheavy elements and the limit of the periodic table", the authors describe the current state of knowledge and the most important challenges in the field of these superheavies. They also present key considerations for future development.

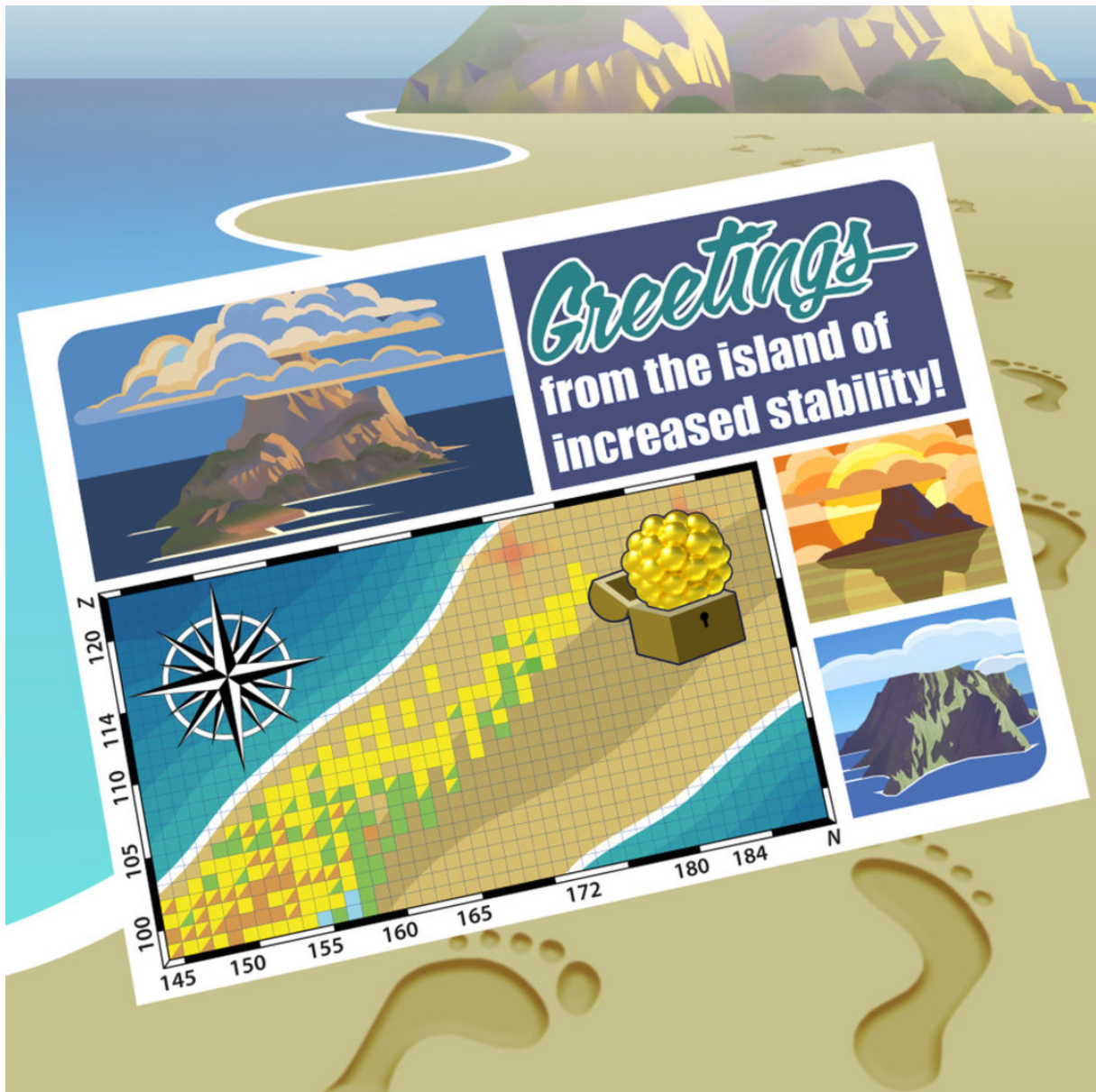
Elements up to oganesson (element 118) have been produced in experiments, named, and included in the periodic table of elements in accelerator facilities around the world, such as at GSI in Darmstadt and in future at FAIR, the international accelerator center being built at GSI. These new elements are highly unstable, with the heaviest ones disintegrating within seconds at most. A more detailed analysis reveals that their lifetimes increase towards the magic neutron number 184. In the case of copernicium (element 112), for example, which was discovered at GSI, the lifetime increases from less than a thousandth of a second to 30 seconds. However, the neutron number 184 is still a long way from being reached, so the 30 seconds are only one step on the way. Since the theoretical description is still prone to large uncertainties, there is no consensus on where the longest lifetimes will occur and how long they will be. However, there is a general agreement that truly stable superheavy nuclei are no longer to be expected.

Revising the map of superheavy elements

This leads to a revision of the superheavy landscape in two important ways. On the one hand, we have indeed arrived at the shores of the region of enhanced stability and have thus confirmed experimentally the concept of an island of enhanced stability. On the other hand, we do not yet know how large this region is – to stay with the picture. How long will the maximum lifetimes be, with the height of the mountains on the island typically representing the stability, and where will the longest lifetimes occur? The *Nature Reviews Physics* paper discusses various aspects of relevant nuclear and electronic structure theory, including the synthesis and detection of superheavy nuclei and atoms in the laboratory or in astrophysical events, their structure and stability, and the location of the current and anticipated superheavy elements in the periodic table.

The detailed investigation of the superheavy elements remains an important pillar of the research program at GSI Darmstadt, supported by infrastructure and expertise at HIM and Johannes Gutenberg University Mainz, forming a unique setting for such studies. Over the past decade, several breakthrough results were obtained, including detailed studies of their production, which led to the confirmation of element 117 and the discovery of the comparatively long-lived isotope lawrencium-266, of their nuclear structure by a variety of experimental techniques, of the structure of their atomic shells as well as their chemical properties, where flerovium (element 114) represents the heaviest element for which chemical data exist. Calculations on production in the cosmos, especially during the merging of two neutron stars, as observed experimentally for the first time in 2017, round off the research portfolio. In the future, the investigation of superheavy elements could be even more efficient thanks to the new linear accelerator HELIAC, for which the first module was recently assembled at HIM and then successfully tested in Darmstadt, so that further, even more exotic and therefore presumably longer-lived nuclei will also be experimentally achievable. An overview of the element discoveries and first chemical studies at GSI can be found in the article “Five decades of GSI superheavy element discoveries and chemical investigation,” published in May 2022. (BP/JGU)

Figure 1:



Island of enhanced stability

The island of enhanced stability of superheavy elements as seen in 2024: The coast has been reached and the experimenters have left the first footprints on the beach. Stability mountains are emerging, but it is still unclear where exactly these are to be found. Neither is it clear how long-lived the most stable atomic nuclei will be – hence, how high the mountains will be.

Picture: Simon Tschachtli / JGU & GSI Darmstadt

Figure 2:

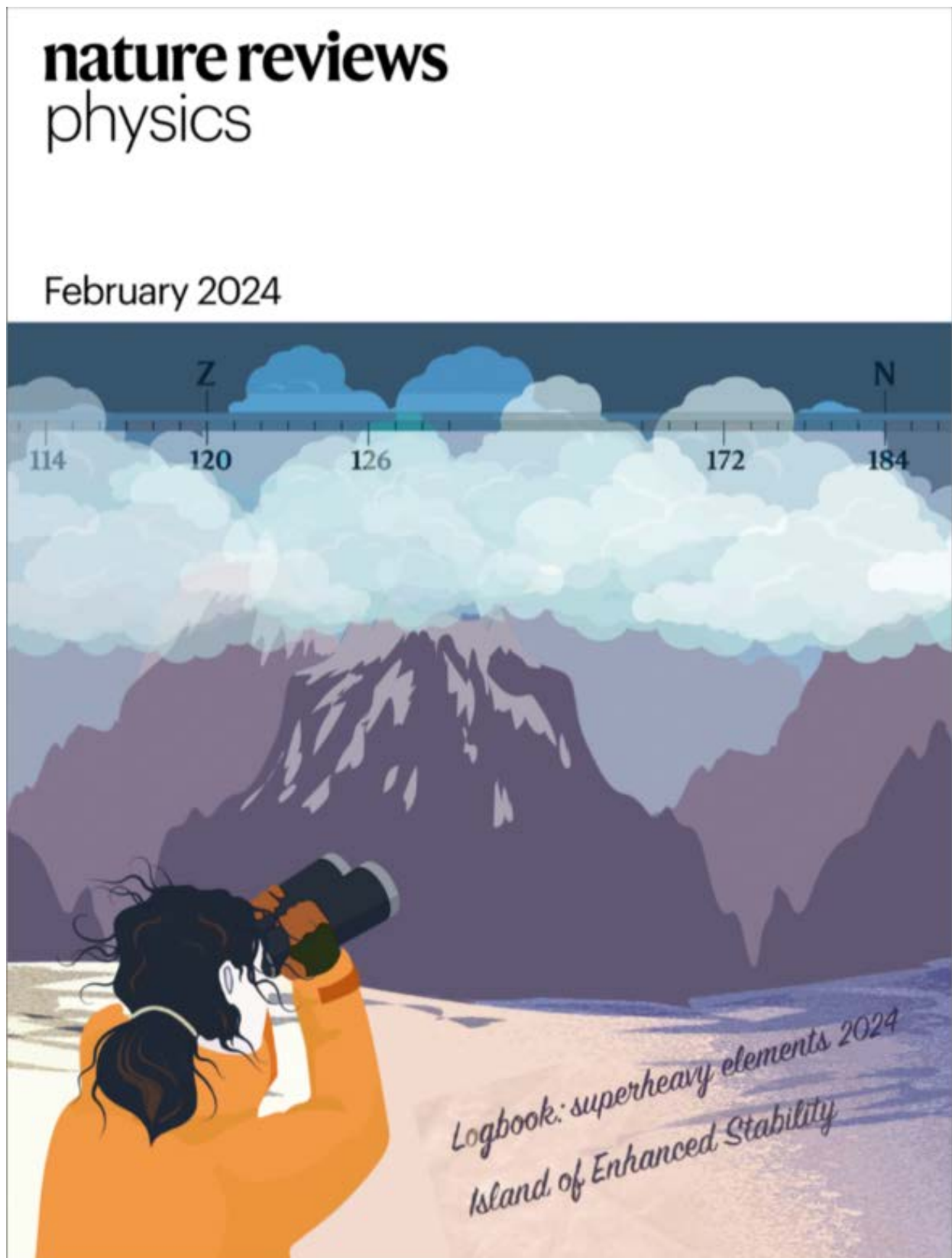


Recoil separator TASCA

The TASCA recoil separator at GSI/FAIR in Darmstadt used for the production and isolation of superheavy elements.

Photo: G. Otto, GSI/FAIR

Figure 3:



Cover

Cover of the February 2024 issue of Nature Reviews Physics

Picture: Springer Nature Ltd, cover design Susanne Harris

13.02.2024 | Joint press release of the GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, the Helmholtz Institute Mainz, and Johannes Gutenberg University Mainz

More Info:

- **Publication** in *Nature Reviews Physics*:
Odile R. Smits, Christoph E. Düllmann, Paul Indelicato, Witold Nazarewicz, Peter Schwerdtfeger
The quest for superheavy elements and the limit of the periodic table
Nature Rev. Phys. **6**, 86–98 (2024)
DOI: <https://doi.org/10.1038/s42254-023-00668-y>
- Overview of element discoveries and first chemical studies of some elements found at GSI ([Article](#) in Radiochimica Acta)
- International team of researchers observes new superheavy element 117 ([Press release of JGU](#))
- Change of course on the journey to the island of stability ([Press release of JGU](#))
- Pushing the boundaries of chemistry: Properties of heaviest element studied so far measured at GSI/FAIR ([Press release on study of chemical properties of flerovium](#))
- GSI Press release on kilonovae via [superheavies website](#)
- GSI News release regarding the planned HELIAC accelerator via [superheavies website](#)

Grüße von der Insel der erhöhten Stabilität: Die Suche nach der Grenze des Periodensystems

Übersichtsarbeit stellt wichtigste Herausforderungen auf dem Gebiet der schwersten Elemente und ihrer Kerne vor und gibt Ausblick auf künftige Entwicklungen

Seit der Jahrtausendwende wurden sechs neue chemische Elemente entdeckt und in das Periodensystem der Elemente, das Symbol der Chemie schlechthin, aufgenommen. Diese neuen Elemente haben hohe Ordnungszahlen von bis zu 118 und sind deutlich schwerer als Uran, das Element mit der höchsten Ordnungszahl (92), das in größeren Mengen auf der Erde vorkommt. Dies wirft Fragen auf, unter anderem wie viele weitere dieser superschweren Spezies noch auf ihre Entdeckung warten, wo – wenn überhaupt – eine grundsätzliche Grenze für die Existenz dieser Elemente liegt und wie die sogenannte Insel der erhöhten Stabilität aussieht. In einer kürzlich erschienenen Übersichtsarbeit fassen Expert*innen für theoretische und experimentelle Chemie und Physik der schwersten Elemente und ihrer Kerne die wichtigsten Herausforderungen zusammen und bieten einen neuen Blick auf neue superschwere Elemente und die Grenzen des Periodensystems. Zu ihnen gehört auch Prof. Dr. Christoph Düllmann vom GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) und dem Helmholtz-Institut Mainz (HIM). In seiner Februar-Ausgabe präsentiert das weltweit führende High-Impact-Journal *Nature Reviews Physics* das Thema als aktuelle Titelgeschichte.

Vorstellung einer „Insel der Stabilität“ aus superschweren Kernen

Bereits in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurde erkannt, dass die Masse der Atomkerne kleiner ist als die Gesamtmasse der darin enthaltenen Protonen und Neutronen. Dieser Massenunterschied ist für die Bindungsenergie der Kerne verantwortlich. Eine bestimmte Anzahl von Neutronen und Protonen führt zu einer stärkeren Bindung und wird als „magisch“ bezeichnet. Tatsächlich wurde schon früh erkannt, dass sich Protonen und Neutronen in einzelnen Schalen bewegen, die den elektronischen Schalen ähneln, wobei die Kerne des Metalls Blei die schwersten sind mit vollständig gefüllten Schalen. Sie enthalten 82 Protonen und 126 Neutronen – ein doppelt magischer Kern. Frühe theoretische Vorhersagen legten nahe, dass die zusätzliche Stabilität der nächsten „magischen“ Zahlen, weit von den damals bekannten Kernen entfernt, zu Lebensdauern führen könnte, die mit dem Alter der Erde vergleichbar sind. Dies führte zu der Vorstellung von einer „Insel der Stabilität“ aus superschweren Kernen, die durch ein Meer der Instabilität von Uran und seinen Nachbarn getrennt ist.

Zur „Insel der Stabilität“, die als weit entfernte Insel beschrieben wird, lassen sich viele grafische Darstellungen finden. Seit der Entstehung dieses prägnanten Bildes sind inzwischen viele Jahrzehnte vergangen, sodass es an der Zeit ist, einen neuen Blick auf die Stabilität der superschweren Kerne zu werfen und zu sehen, wohin die Reise zu den Grenzen von Masse und Ladung führen könnte. In dem jetzt veröffentlichten Paper mit dem Titel „The quest for superheavy elements and the limit of the periodic table“ beschreiben die Autor*innen den

aktuellen Erkenntnisstand und die wichtigsten Herausforderungen auf dem Gebiet dieser Superheavies und stellen zentrale Überlegungen zur künftigen Entwicklung vor.

Experimentell wurden weltweit in Beschleunigeranlagen wie bei GSI in Darmstadt und künftig bei FAIR, dem dort entstehenden internationalen Beschleunigerzentrum, Elemente bis zum Oganesson (Element 118) hergestellt, benannt und in das Periodensystem der Elemente aufgenommen. Die neuen Elemente sind höchst instabil: Die schwersten bekannten zerfallen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, innerhalb von Sekundenbruchteilen. Eine genauere Analyse zeigt jedoch, dass ihre Lebensdauer in Richtung der nächsten als magisch erwarteten Neutronenzahl 184 stark ansteigt – in Copernicium (Element 112), das bei GSI entdeckt wurde, beispielsweise von weniger als einer Tausendstelsekunde auf 30 Sekunden. Dabei ist die Neutronenzahl 184 jedoch noch lange nicht erreicht worden – die 30 Sekunden sind nur ein Schritt auf dem Weg. Eine vertiefte Analyse zeigt auch, dass die theoretische Beschreibung noch unbekannter Atomkerne mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Es gibt keinen Konsens darüber, wo die längsten Lebensdauern auftreten und auch nicht darüber, wie lange sie sein werden. Alle aktuellen Berechnungen deuteten aber darauf hin, dass wirklich stabile, superschwere Kerne nicht mehr zu erwarten sind

Überarbeitung der Landkarte der superschweren Elemente

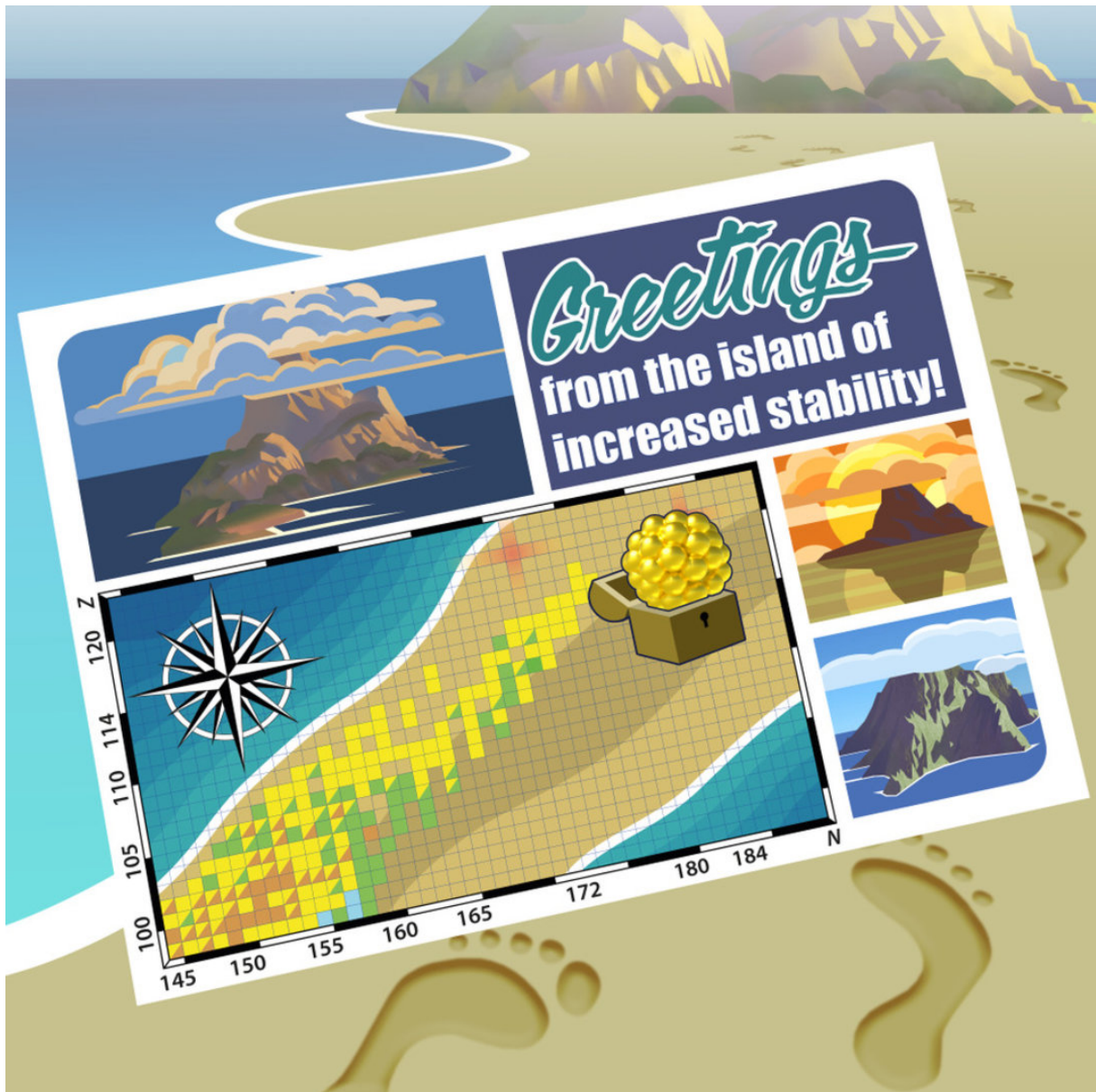
Dies führt zu einer Überarbeitung der Landkarte der superschweren Elemente in zweierlei Hinsicht: Wir sind tatsächlich an den Ufern der Region erhöhter Stabilität angekommen – das Konzept einer Insel erhöhter Stabilität ist also experimentell bestätigt. Wir wissen aber – um bei dem Bild zu bleiben – noch nicht, wie groß diese Region ist, wie lange die zu erwarteten Lebensdauern sein werden, wobei das Maß für die Stabilität oft durch die Höhe der Berge auf jener Insel dargestellt wird, und wo genau die längsten Lebensdauern auftreten. Der Artikel in Nature Reviews Physics erörtert verschiedene Aspekte der einschlägigen Kern- und Elektronenstrukturtheorie: die Synthese und den Nachweis von superschweren Kernen und Atomen im Labor oder bei astrophysikalischen Ereignissen, ihre Struktur und Stabilität sowie die Position der derzeitigen und erwarteten superschweren Elemente im Periodensystem.

Die detaillierte Untersuchung der superschweren Elemente ist weiterhin eine wichtige Säule des Forschungsprogramms bei GSI/FAIR, unterstützt durch die Infrastruktur und Expertise des Helmholtz-Instituts Mainz und der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, die in einem schlagkräftigen Verbund einen einzigartigen Rahmen für solche Studien bilden. In den letzten zehn Jahren wurden mehrere bahnbrechende Ergebnisse erzielt, darunter detaillierte Untersuchungen der Produktion dieser Elemente im Labor, die zur Bestätigung des Elements 117 und zur Entdeckung des mit mehreren Stunden vergleichsweise langlebigen Isotops Lawrencium-266 führten, ihrer Kernstruktur mittels verschiedener experimenteller Techniken, der Struktur ihrer Atomhüllen sowie ihrer chemischen Eigenschaften, wobei Flerovium (Element 114) das schwerste Element darstellt, für das chemische Daten vorliegen. Berechnungen zur Produktion im Kosmos, vor allem bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne, wie sie 2017 erstmals experimentell beobachtet wurde, runden das Forschungsportfolio ab. Künftig könnte die Untersuchung der superschweren Elemente dank einem neuen in Planung befindlichen Linearbeschleuniger HELIAC, für welchen jüngst das erste Modul am HIM zusammengebaut und anschließend in Darmstadt erfolgreich getestet

13.02.2024 | Joint press release of the GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, the Helmholtz Institute Mainz, and Johannes Gutenberg University Mainz

wurde, noch effizienter erfolgen, sodass auch weitere, noch exotischere und damit vermutlich auch langlebigere Kerne experimentell erreichbar sein werden. Eine Übersicht über die Elemententdeckungen und erstmalige chemische Untersuchungen einiger Elemente, die bei GSI erfolgten, findet sich in dem Beitrag „Five decades of GSI superheavy element discoveries and chemical investigation“ vom Mai 2022. (BP/JGU)

Abbildung 1:



Insel der erhöhten Stabilität

Die Insel der erhöhten Stabilität der superschweren Elemente, wie sie 2024 gesehen wird: Die Küste ist erreicht worden und die Experimentatoren haben die ersten Fußspuren auf dem Strand hinterlassen. Stabilitätsberge zeichnen sich ab, allerdings ist noch unklar, wo genau diese zu finden sind und wie hoch und damit wie langlebig die entsprechenden stabilsten superschweren Atomkerne sind.

Bild: Simon Tschachtli / JGU & GSI Darmstadt

Abbildung 2:

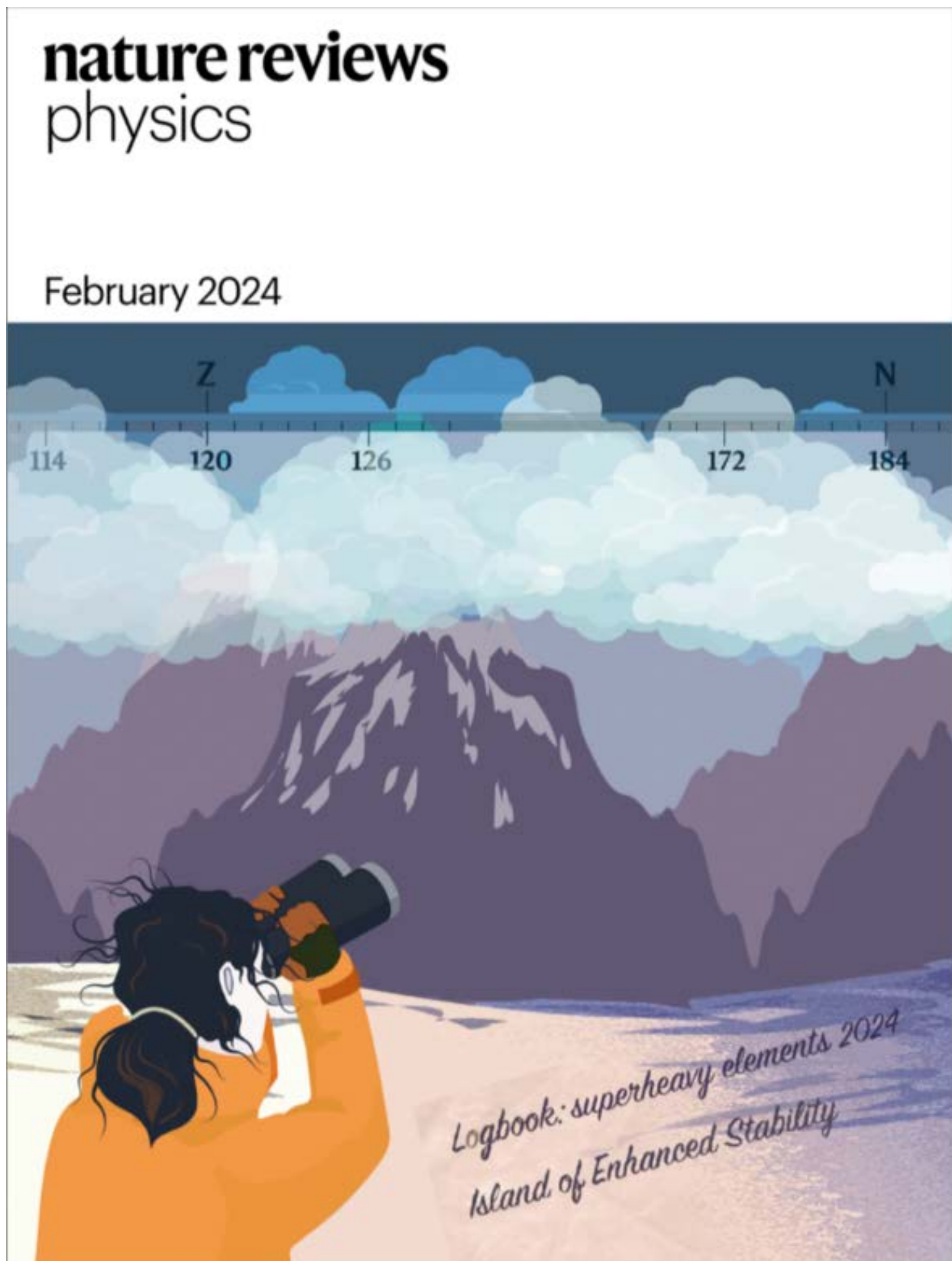


Rückstoßseparator TASCA

Der Rückstoßseparator TASCA bei GSI/FAIR in Darmstadt zur Produktion und Isolation superschwerer Elemente.

Foto: G. Otto, GSI/FAIR

Abbildung 3:



Titelblatt

Die Titelseite der Februar-Ausgabe von Nature Reviews Physics.

Bild: Springer Nature Ltd, cover design Susanne Harris

Weitere Informationen

- **Publikation** in *Nature Reviews Physics*:
Odile R. Smits, Christoph E. Düllmann, Paul Indelicato, Witold Nazarewicz, Peter Schwerdtfeger
The quest for superheavy elements and the limit of the periodic table
Nature Rev. Phys. **6**, 86–98 (2024)
DOI: <https://doi.org/10.1038/s42254-023-00668-y>
- Übersicht über die Elemententdeckungen und erstmalige chemische Untersuchungen einiger Elemente, die bei GSI erfolgten ([Artikel](#) in Radiochimica Acta)
- Internationales Forscherteam weist superschweres Element 117 nach ([Pressemitteilung JGU](#))
- Kursänderung auf der Reise zur Insel der Stabilität ([Pressemitteilung JGU](#))
- An den Grenzen der Chemie: Eigenschaften des bisher schwersten untersuchten Elements bei GSI/FAIR gemessen ([Pressemitteilung zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften von Flerovium](#) in englisch; deutsche Version siehe pdf auf der Seite)
- GSI Pressemitteilung über Kilonovae vom 20.02.2023 über die [Superheavies website](#) als pdf verfügbar
- GSI Pressemitteilung über den geplanten HELIAC Beschleuniger vom 11.10.2021 über die [Superheavies website](#) als pdf verfügbar