

(German version see below)

Fermium studied at GSI/FAIR

Researchers investigate nuclear properties of element 100 with laser light

Where does the periodic table of chemical elements end and which processes lead to the existence of heavy elements? An international research team reports on experiments performed at the GSI/FAIR accelerator facility and at Johannes Gutenberg University Mainz to come closer to an answer. They gained insight into the structure of atomic nuclei of fermium (element 100) with different numbers of neutrons. Using forefront laser spectroscopy techniques, they traced the evolution of the nuclear charge radius and found a steady increase as neutrons were added to the nuclei. This indicates that localized nuclear shell effects have a reduced influence on the nuclear charge radius in these heavy nuclei. The results were published in the scientific journal Nature.

Elements beyond uranium (element 92), like for example Fermium (element 100), do not occur naturally in the Earth's crust. To be studied, they thus have to be produced artificially. They bridge from the heaviest naturally occurring elements to the so-called superheavy elements, which start at element 104. Superheavy elements owe their existence to stabilizing quantum mechanical shell effects, which add about two thousandths of the total nuclear binding energy. Albeit a small contribution, it is decisive in counteracting the repelling forces between the many positively charged protons.

Quantum mechanical effects induced by the building blocks of atomic nuclei, the protons and neutrons, which together make up the nucleus, are explained by the nuclear shell model. Similar to atoms, where filled electron shells lead to chemical stability and inertness, nuclei with filled nuclear shells (containing so-called “magic” numbers of protons/neutrons) exhibit an increased stability. Consequently, their nuclear binding energies and their lifetimes increase. In lighter nuclei, filled nuclear shells are known to also influence trends in the nuclear charge radii.

Using laser spectroscopy methods, subtle changes in the atomic structure can be analyzed, which in turn provide information about nuclear properties such as the nuclear charge radius, i.e. the distribution of protons in the atomic nucleus. Studies of several atomic nuclei of the same element, but with different neutron numbers, have revealed a steady increase in this radius, unless a magic number is crossed. Then, a kink is observed, as the slope of the radial increase changes at the shell closure. This effect was found for lighter, spherical atomic nuclei up to lead.

New insight into the nuclear structure of heavy nuclei

“Using a laser-based method, we investigated fermium atomic nuclei, which possess 100 protons, and between 145 and 157 neutrons. Specifically, we studied the influence of quantum mechanical shell effects on the size of the atomic nuclei. This allowed shedding light on the structure of these nuclei in the range around the known shell effect at neutron number 152 from a new perspective,” explains Dr. Sebastian Raeder, the spokesperson of the experiment at GSI/FAIR. “At this neutron number, the signature of a neutron shell closure was previously observed in trends of the nuclear binding energy. The strength of the shell effect was measured by high-precision mass measurements at GSI/FAIR in 2012. As mass is equivalent to energy according to Einstein, these mass measurements gave hints about the extra binding energy the shell effect provides. Atomic nuclei around neutron number 152 are an ideal testbench for deeper studies, as they happen to be shaped more like a rugby-ball, rather than spherical. This deformation allows the many protons in their nuclei to be further apart than in a spherical nucleus.”

For the current measurements, an international collaboration of 27 institutes from seven countries examined fermium isotopes with lifetimes ranging from a few seconds to a hundred days, using different methods for producing the fermium isotopes and by methodological developments in the applied laser spectroscopy techniques. The short-lived isotopes were produced at the GSI/FAIR accelerator facility, with only a few atoms per minute being available for the experiments in some cases. To probe them, a tailored laser spectroscopy method was used that researchers had developed a few years ago for measurements on nobelium isotopes. The produced nuclei were stopped in argon gas and picked up electrons to form neutral atoms, which were then probed by laser light.

The neutron-rich, long-lived fermium isotopes (fermium-255, fermium-257) were produced in picogram amounts at Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, USA, and at Institut Laue-Langevinat Grenoble, France. A radiochemical preparation of the samples was performed at Johannes Gutenberg University Mainz (JGU). Using a different method, they were subsequently evaporated in a reservoir and examined in vacuum with laser light.

Laser light of a suitable wavelength lifts an electron in the fermium atom to a higher-lying orbital, and then removes it from the atom altogether, forming a fermium ion, which can be detected efficiently. The exact energy required for this stepwise ion-formation process varies with neutron number. This small change in excitation energy was measured to obtain information about the change in size of the atomic nuclei.

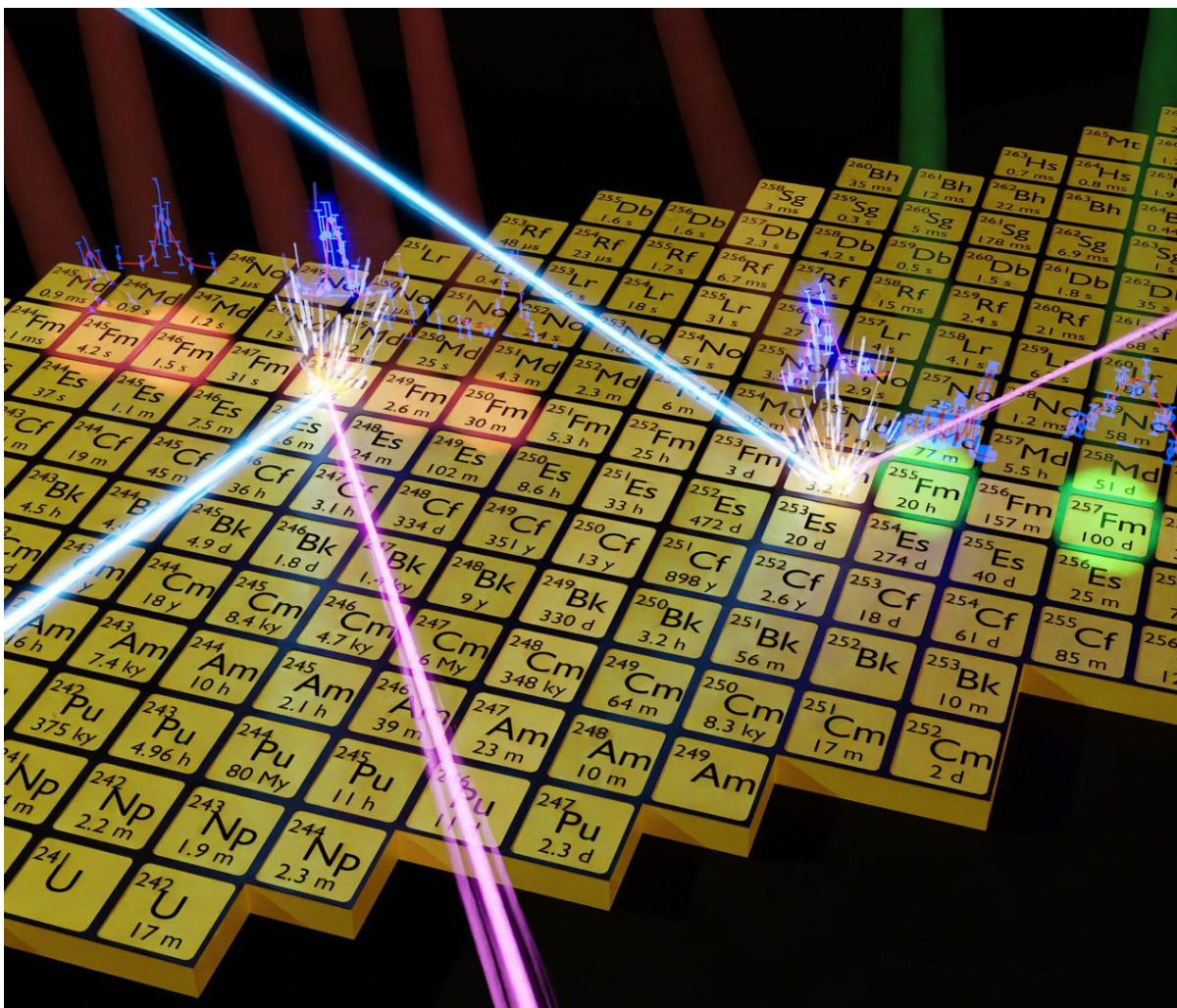
Macroscopic properties dominate

The investigations provided insight into the changes of the nuclear charge radius in fermium isotopes across the neutron number 152 and showed a steady, uniform increase. The comparison of the experimental data with various calculations performed by international collaboration partners using modern theoretical nuclear physics models allows an interpretation of the underlying physical effects. Despite different calculation methods, all

models were found to be in good agreement with each other as well as with the experimental data.

“Our experimental results and their interpretation with modern theoretical methods show that in the fermium nuclei, nuclear shell effects have a reduced influence on the nuclear charge radii, in contrast to the strong influence on the binding energies of these nuclei,” says Dr. Jessica Warbinek, doctoral student at GSI/FAIR and JGU at the time of the experiments and first author of the publication. “The results confirm theoretical predictions that local shell effects, which are due to few individual neutrons and protons, lose influence when the nuclear mass increases. Instead, effects dominate that are to be attributed to the full ensemble of all nucleons, with the nuclei rather seen as a charged liquid drop.”

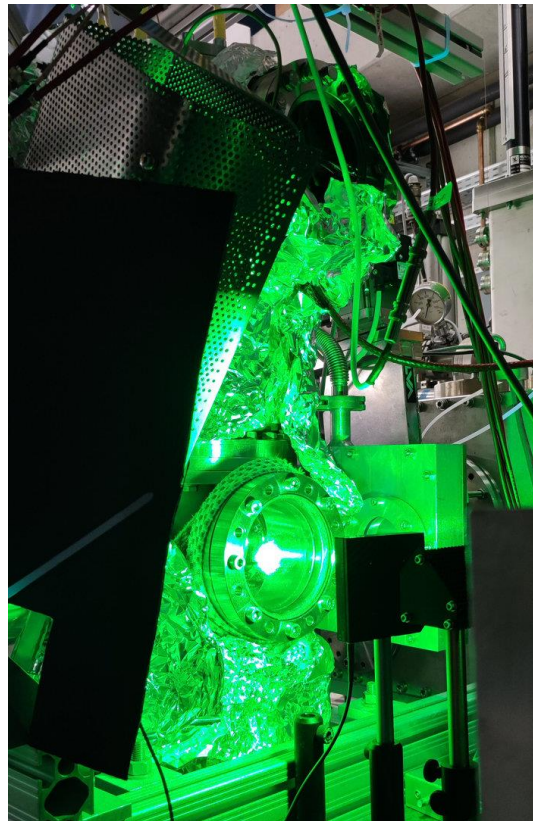
The experimental improvements of the method pave the way to further laser spectroscopic studies of heavy elements in the region around and beyond neutron number 152 and represent a step towards a better understanding of stabilization processes in heavy and superheavy elements. Ongoing developments hold the promise that future studies will be able to also reveal weak effects of nuclear shell structure, which, though, are at the heart of the existence of the heaviest known elements.



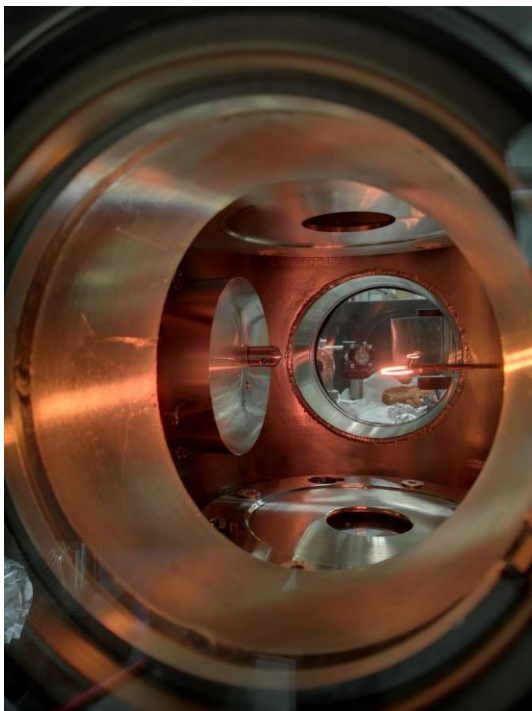
Picture 1: Artwork of the nuclear chart.
The fermium isotopes studied by laser spectroscopy are highlighted.



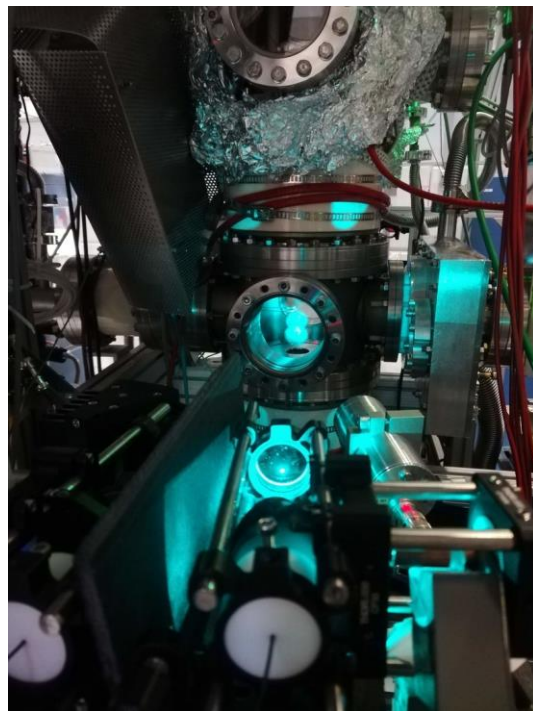
Picture 2: Exterior view of the experimental setup. Gas-cell setup used at GSI/FAIR for the investigation of the short-lived fermium isotopes with the glowing desorption filament.



Picture 3: Experimental setup. Gas-cell setup used at GSI/FAIR for the investigation of the short-lived fermium isotopes.



Picture 4: Inside the experimental setup. Stopping volume in the gas-cell setup with a glowing desorption filament.



Picture 5: Experimental setup. Gas-cell setup used at GSI/FAIR for the investigation of the short-lived fermium isotopes.

More Info:

- [Press release](#) at the *Johannes Gutenberg University Mainz* (JGU) (german/english)
- **Publication** in *Nature*:
Warbinek, J., Rickert, E., Raeder, S., Albrecht-Schönzart, T., Andelic, B., Auler, J., Bally, B., Bender, M., Berndt, S., Block, M., Brizard, A., Chauveau, P., Cheal, B., Chhetri, P., Claessens, A., de Roubin, A., Devlin, C., Dorrer, H., Düllmann, C.E., Ezold, J., Ferrer, R., Gadelshin, V., Gaiser, A., Giacoppo, F., Goriely, S., Gutiérrez, M.J., Harvey, A., Hasse, R., Heinke, R., Heßberger, F.-P., Hilaire, S., Kaja, M., Kaleja, O., Kieck, T., Kim, E., Kneip, N., Köster, U., Kraemer, S., Laatiaoui, M., Lantis, J., Lecesne, N., Loria Basto, A.T., Mistry, A.K., Mokry, C., Moore, I., Murböck, T., Münzberg, D., Nazarewicz, W., Niemeyer, T., Nothhelfer, S., Péru, S., Raggio, A., Reinhard, P.-G., Renisch, D., Rey-Herme, E., Romans, J., Romero Romero, E., Runke, J., Ryssens, W., Savajols, H., Schneider, F., Sperling, J., Stemmler, M., Studer, D., Thörle-Pospiech, P., Trautmann, N., Urquiza-González, M., van Beek, K., Van Cleve, S., Van Duppen, P., Vandebrouck, M., Verstraelen, E., Walther, T., Weber, F., Wendt, K.

Smooth trends in fermium charge radii and the impact of shell effects

[Nature 634, 1075–1079 \(2024\)](#)

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08062-z>

Fermium bei GSI/FAIR untersucht – Forschende messen Kerneigenschaften von Element 100 mit Laserlicht

Wo endet das Periodensystem der chemischen Elemente und welche Prozesse erlauben die Existenz der schwersten Elemente? Einem internationalen Forschungsteam ist es gelungen, einer Beantwortung näher zu kommen und mit Messungen an der GSI/FAIR-Beschleunigeranlage und in Laboren der Johannes Gutenberg-Universität Mainz einen Einblick in die Struktur von Fermium-Atomkernen (Element 100) mit unterschiedlichen Anzahlen an Neutronen zu gewinnen. Mit modernen Laserspektroskopietechniken bestimmten sie die Ausdehnung des Kernladungsradius und ermittelten, dass dieser mit zunehmender Neutronenzahl gleichmäßig ansteigt. Dies weist darauf hin, dass Kernschaleneffekte bei diesen schweren Kernen nur einen geringen Einfluss auf die Kernladungsradien haben. Die Resultate wurden in der Fachzeitschrift Nature veröffentlicht.

Elemente jenseits von Uran (92 Protonen) – wie beispielsweise Fermium (Element 100) – kommen nicht natürlich in der Erdkruste vor und müssen daher für Experimente künstlich erzeugt werden. Sie bilden die Brücke zwischen den natürlich vorkommenden und den sogenannten superschweren Elementen, die bei 104 Protonen beginnen.

Quantenmechanische Schaleneffekte ermöglichen die Existenz der superschweren Elemente, obwohl sie nur etwa zwei Tausendstel der Kernbindungsenergie ausmachen, weil sie zu einer zusätzlichen Stabilisierung des Atomkerns führen. Der kleine Beitrag ist entscheidend, um den abstoßenden Kräften zwischen den vielen positiv geladenen Protonen entgegen zu wirken.

Das Schalenmodell erklärt quantenmechanische Effekte, deren Stärke von der Anzahl der Bausteine der Atomkerne, den Protonen und Neutronen, abhängt und zu einer Schalenstruktur im Atomkern führt. Ähnlich wie bei den Atomen, wo vollständig gefüllte Elektronenschalen zu chemischer Stabilität und Reaktionsträgheit führen, zeigen auch gefüllte Kernschalen (bei sogenannten „magischen“ Protonen-/Neutronenzahlen) eine erhöhte Stabilität. Infolgedessen steigen ihre Kernbindungsenergien und die Lebensdauern. In leichteren Kernen ist bekannt, dass gefüllte Kernschalen auch die Kernradien beeinflussen.

Mit der Laserspektroskopie können kleinste Änderungen in der Atomstruktur analysiert und daraus Rückschlüsse auf Kerneigenschaften wie den Ladungsradius, also die Verteilung der Protonen im Atomkern, gezogen werden. Untersuchungen mehrerer Nuklide des gleichen Elements mit unterschiedlicher Neutronenzahl zeigen einen stetigen Anstieg dieses Radius, es sei denn, eine magische Zahl wird überschritten. Dann wird ein Knick beobachtet, da sich die Steigung des radialen Anstiegs beim Schalenschluss ändert. Dieser Effekt wurde für leichtere, kugelförmige Atomkerne bis hin zu Blei festgestellt.

Neuer Einblick in die Kernstruktur schwerer Kerne

„Mithilfe der Laserspektroskopie haben wir Fermium-Atomkerne mit 100 Protonen, aber mit verschiedenen Neutronenzahl im Bereich von 145 und 157 untersucht. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Einfluss quantenmechanischer Schaleneffekte auf die Größe

der Atomkerne. So gelang es uns, die Struktur dieser Kerne rund um den bekannten Schaleneffekt bei einer Neutronenzahl von 152 aus einer neuen Perspektive zu betrachten“, erläutert Dr. Sebastian Raeder, der Leiter des Experiments bei GSI/FAIR. „Bei dieser Neutronenanzahl wurde zuvor die Signatur eines Neutronenschalenabschlusses in der Bindungsenergie beobachtet. Dessen Stärke wurde durch Hochpräzisionsmassenmessungen bei GSI/FAIR im Jahr 2012 vermessen. Da nach Einstein Masse äquivalent zu Energie ist, geben diese Messungen Hinweise über die zusätzliche Bindungsenergie, die der Schaleneffekt liefert. Die Atomkerne um die Neutronenzahl 152 sind ideale Testkandidaten für tieferegehende Studien, da sie nicht kugelförmig, sondern eher wie ein Rugby-Ball geformt sind. Diese Deformation erlaubt den vielen Protonen des Kerns, etwas weiter voneinander entfernt zu sein als in einer Kugel.“

Dank des Einsatzes unterschiedlicher Verfahren für die Produktion sowie methodischer Weiterentwicklungen der Laserspektroskopie untersuchte die internationale Kollaboration von 27 Partnerinstituten aus sieben Ländern in den aktuellen Messungen Fermium-Isotope mit Lebensdauern von wenigen Sekunden bis zu hundert Tagen. Die kurzlebigen Isotope wurden an der Beschleunigeranlage von GSI/FAIR hergestellt, wobei teilweise nur ein Atom pro Minute für die Experimente zur Verfügung stand. Zur Messung wurde ein Laserspektroskopie-Verfahren genutzt, das Forschende vor einigen Jahren für Messungen an Nobelium-Isotopen entwickelt hatten. Die produzierten Kerne wurden in Argongas abgestoppt und nahmen dort Elektronen auf, um zu neutralen Atomen zu werden, welche dann mithilfe von Lasern untersucht wurden.

Die neutronenreichen, langlebigen Fermiumisotope (Fermium-255, Fermium-257) wurden in Pikogramm-Mengen am Oak Ridge National Laboratory in Oak Ridge, USA, und dem Institut Laue-Langevin in Grenoble, Frankreich, hergestellt. Eine radiochemische Präparation der Proben wurde an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) durchgeführt. Im Anschluss wurde dort eine Methode verwendet, bei der die Probe in einem Reservoir verdampft und im Vakuum mit Laserlicht untersucht wurde.

Laserlicht passender Wellenlänge bringt ein Elektron in Fermium-Atomen von einem Orbital auf ein weiter außen liegendes Orbital, und entfernt es schließlich ganz vom Atom, was effizient nachgewiesen werden kann. Die nötige Energie für diesen schrittweisen Ionenbildungsprozess ändert sich mit der Neutronenzahl. Diese kleine Änderung der Anregungsenergie wurde gemessen, um Informationen über die Größenänderungen der Atomkerne zu bekommen.

Makroskopische Eigenschaften dominieren

Die Untersuchungen erlaubten einen Einblick in die Änderungen des mittleren Kernladungsradius in Fermium-Isotopen über die Neutronenzahl 152 hinweg. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kernladungsradien gleichmäßig ansteigen. Der Vergleich dieser experimentellen Daten mit verschiedenen theoretischen Berechnungen, die von internationalen Kollaborationspartnern mit modernen theoretischen Kernmodellen

durchgeführt wurden, ermöglicht eine Interpretation der zugrunde liegenden physikalischen Effekte. Dabei wurde eine große Übereinstimmung aller Modelle, trotz unterschiedlicher Berechnungsmethoden, miteinander und auch mit den experimentellen Daten gefunden.

„Unsere experimentellen Ergebnisse und deren Interpretation mit Hilfe modernster theoretischer Verfahren weisen darauf hin, dass bei den Fermium-Atomkernen die Kernschaleneffekte keinen messbaren Einfluss auf die Kernladungsradien haben, im Gegensatz zum starken Einfluss, den sie auf die Bindungsenergien dieser Kerne haben“, sagt Jessica Warbinek, zum Zeitpunkt der Messung Doktorandin bei GSI/FAIR und JGU und Erstautorin der Publikation. „Die Ergebnisse bestätigen theoretische Vorhersagen, dass mit steigender Kernmasse nicht mehr Schaleneffekte dominieren, die nur von wenigen, einzelnen Kernbausteinen bestimmt werden, sondern Effekte, die auf die Gesamtheit aller Neutronen und Protonen zurückzuführen sind und Atomkerne eher als geladene Tröpfchen betrachten.“

Die experimentellen Verbesserungen eröffnen den Weg zu weiteren laserspektroskopischen Studien von schweren Elementen in der Region rund um die Neutronenzahl 152 und in noch schwereren Elementen, die bisher für solche Messungen unzugänglich sind. Dies stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zum besseren Verständnis von Stabilisationsprozessen in schweren und superschweren Elementen mit neuartigen Methoden dar. Weitere Entwicklungen werden es in Zukunft erlauben, selbst geringfügige Effekte der Schalenstruktur aufzuspüren, die der Grund für die Existenz der schwersten bekannten Elemente sind.

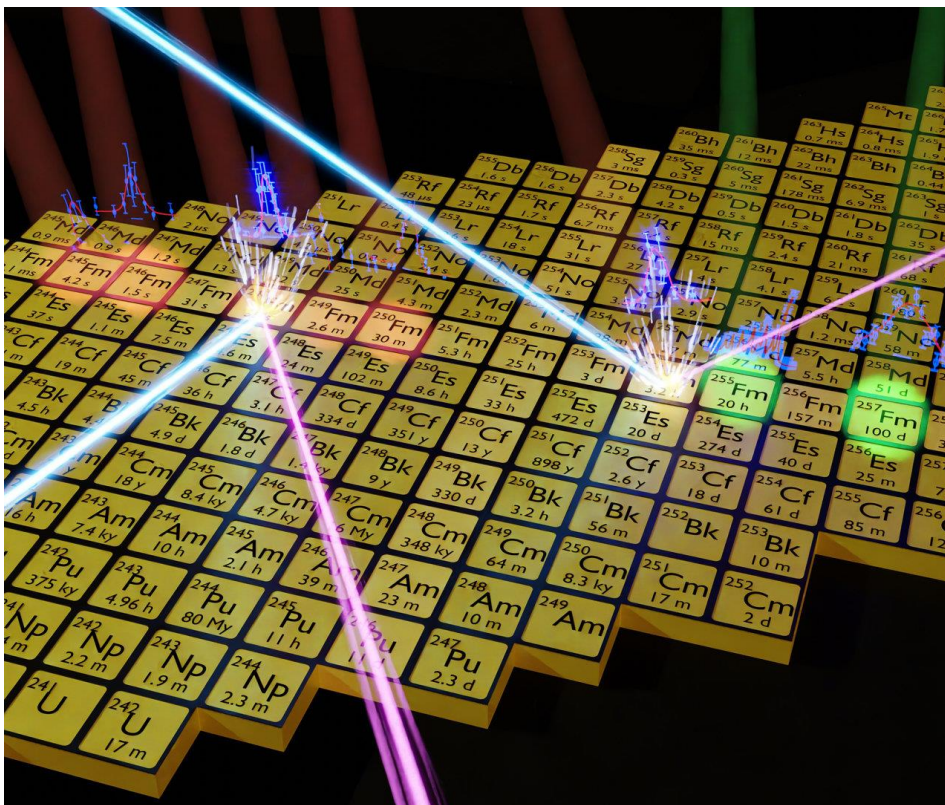


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung der Nuklidkarte.
Die untersuchten Fermium-Isotope sind hervorgehoben.



Abbildung 2: Außenansicht des Messaufbaus.
Gaszellenaufbau, der bei GSI/FAIR für die Untersuchung der kurzlebigen Fermium-Isotope genutzt wurde, mit leuchtendem Desorptionsfilament.

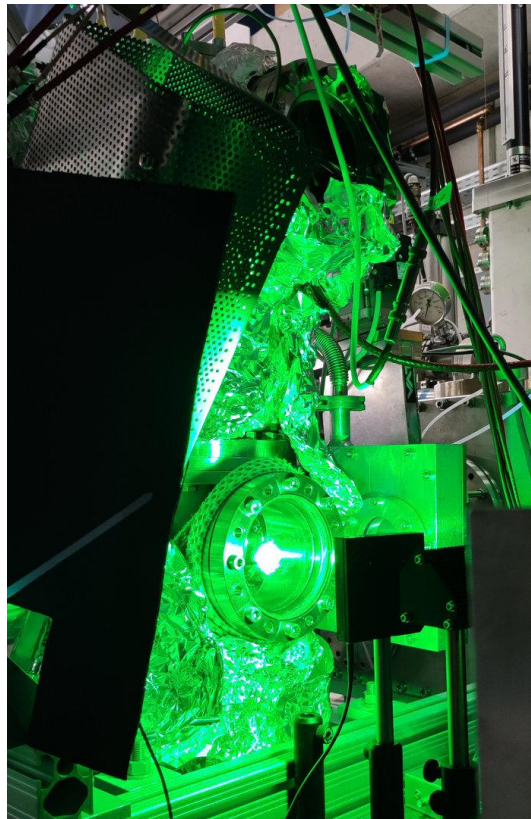


Abbildung 3: Messaufbau.
Gaszellenaufbau, der bei GSI/FAIR für die Untersuchung der kurzlebigen Fermium-Isotope genutzt wurde.

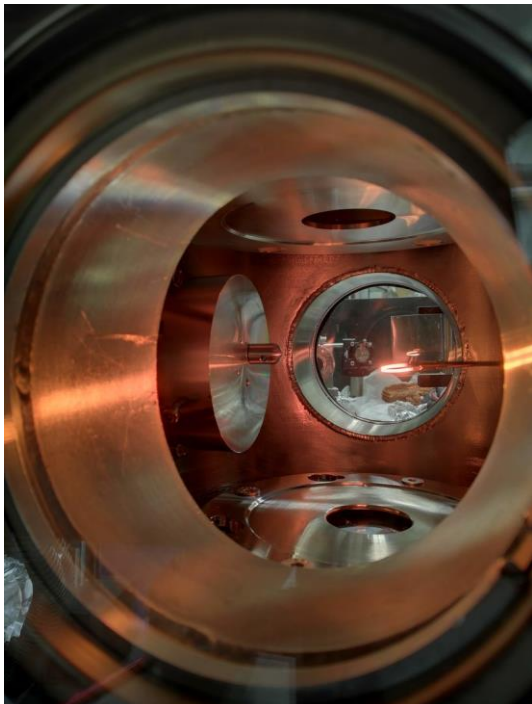


Abbildung 4: Innenansicht des Messaufbaus.
Stoppvolumen im Gaszellenaufbau mit einem glühenden Desorptionsfaden.

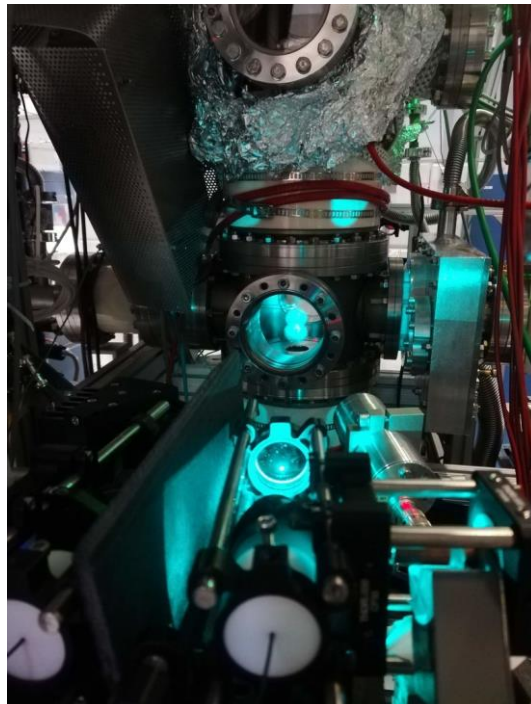


Abbildung 5: Messaufbau.
Gaszellenaufbau, der bei GSI/FAIR für die Untersuchung der kurzlebigen Fermium-Isotope genutzt wurde.

Mehr Info:

- [Pressemitteilung Johannes Gutenberg Universität Mainz \(JGU\) \(Deutsch/Englisch\)](#)
- **Publikation in *Nature*:**
Warbinek, J., Rickert, E., Raeder, S., Albrecht-Schönzart, T., Andelic, B., Auler, J., Bally, B., Bender, M., Berndt, S., Block, M., Brizard, A., Chauveau, P., Cheal, B., Chhetri, P., Claessens, A., de Roubin, A., Devlin, C., Dorrer, H., Düllmann, C.E., Ezold, J., Ferrer, R., Gadelshin, V., Gaiser, A., Giacoppo, F., Goriely, S., Gutiérrez, M.J., Harvey, A., Hasse, R., Heinke, R., Heßberger, F.-P., Hilaire, S., Kaja, M., Kaleja, O., Kieck, T., Kim, E., Kneip, N., Köster, U., Kraemer, S., Laatiaoui, M., Lantis, J., Lecesne, N., Loria Basto, A.T., Mistry, A.K., Mokry, C., Moore, I., Murböck, T., Münzberg, D., Nazarewicz, W., Niemeyer, T., Nothhelfer, S., Péru, S., Raggio, A., Reinhard, P.-G., Renisch, D., Rey-Herme, E., Romans, J., Romero Romero, E., Runke, J., Ryssens, W., Savajols, H., Schneider, F., Sperling, J., Stemmler, M., Studer, D., Thörle-Pospiech, P., Trautmann, N., Urquiza-González, M., van Beek, K., Van Cleve, S., Van Duppen, P., Vandebrouck, M., Verstraelen, E., Walther, T., Weber, F., Wendt, K.

Smooth trends in fermium charge radii and the impact of shell effects

[Nature 634, 1075–1079 \(2024\)](#)

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08062-z>