



# target

## Krebstherapie

Noch ist es ein Blick in die Zukunft: Die Kombination von Kohlenstoffionen- und Immuntherapie könnte zu einem effektiven Instrument im Kampf gegen Krebs werden (Seite 26).



## Schwarzes Loch

Computersimulationen liefern neue Informationen über Neutronensternverschmelzungen (Seite 49).

## Elementeforschung

Spektroskopie von superschweren Elementen verbindet physikalische und chemische Methoden (Seite 36).

## ALICE-Experiment

Neue Erkenntnisse über Hadronen und ihre Wechselwirkung bei Proton-Proton-Kollisionen am LHC (Seite 44).





## WUNDERBARE WISSENSCHAFT

### BLICK INS INNERE DES SUPER-FRS-MULTIPLETTS

Der Super-FRS des künftigen Beschleunigerzentrums FAIR ist ein wichtiger Baustein der Gesamtanlage mit großem Entdeckungspotenzial für die Wissenschaft: In diesem Teil des Beschleunigerkomplexes geht es um Experimente mit extrem seltenen exotischen Kernen im Rahmen von FAIRs Experimentssäule NUSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions). Dafür werden insgesamt 32 Multiplett-Magneteinheiten, produziert von der Firma ASG Superconductors in Italien, benötigt. In ein langes

Multiplett, wie hier auf dem Foto zu sehen, sind insgesamt neun supraleitende Einzelmagnete integriert und es ist ein echtes Schwerkzeug: Es ist sieben Meter lang, hat einen Durchmesser von 2,5 Metern und wiegt über 60 Tonnen. Die Multipletts dienen später im Super-FRS der Lenkung und Formung des Strahls, um einen hochpräzisen Teilchenstrahl zu erreichen. Aktuell werden sie am Forschungszentrum CERN getestet.

Lesen Sie mehr auf Seite 19.





## Liebe Leser\*innen,

fast ein Jahr ist seit meinem Amtsantritt als Administrativer Geschäftsführer bei GSI und FAIR vergangen. Es war ein sehr ungewöhnliches Jahr, das insbesondere durch die zahlreichen Herausforderungen der Corona-Pandemie geprägt war, denen wir alle uns stellen mussten.

In dieser Zeit war wichtig, unsere Arbeit am Campus und die Errichtung von FAIR bestmöglich weiterzuführen – selbstverständlich unter Einhaltung aller nötigen Sicherheitsmaßnahmen. Dabei ist es uns gelungen, viele Tätigkeiten und Abläufe zu digitalisieren und hierfür verlässliche und leistungsfähige Strukturen aufzubauen. Das Homeoffice ist zu einem festen Bestandteil unseres Arbeitsalltags geworden. Auf diese Weise konnten nicht nur die Wissenschaft fortgesetzt und FAIR weitergebaut werden, wie sich an zahlreichen Beispielen für fertiggestellte Komponenten und publizierte Forschungsergebnisse hier im Magazin ablesen lässt. Auch die Infrastrukturabteilungen konnten weiterhin verlässlich ihre Aufgaben für den Campus erfüllen. Diese guten Ergebnisse wollen wir selbstverständlich auch in diesem Jahr wieder erreichen.

An FAIR arbeiten 3000 Forschende aus aller Welt und schon lange ist GSI ein internationales Zentrum. Diversität und Inklusion sind dabei selbstverständliche Ziele. In diesem Rahmen haben wir uns entschieden, dies nun sprachlich im Arbeitsalltag und auch im Magazin durch die Nutzung des Gendersterns abzubilden.

Viel Spaß beim Lesen wünscht

Dr. Ulrich Breuer  
Administrativer Geschäftsführer von FAIR und GSI  
im Namen der Geschäftsführung





[www.blauer-engel.de/uz161](http://www.blauer-engel.de/uz161)

# Blauer Engel

Höchstleistungsrechenzentrum Gr





Blick ins Innere des mit Rechnerschränken gefüllten Green IT Cubes.

een IT Cube erhält Umweltzeichen



Das Höchstleistungsrechenzentrum von GSI und FAIR, der Green IT Cube, darf den Blauen Engel als Kennzeichnung für besondere Umweltfreundlichkeit führen. Er ist damit aktuell

der für das Rechnen aufgewendeten elektrischen Leistung, anstatt 30 bis zu 100 Prozent, wie es in herkömmlichen Rechenzentren mit Luftkühlung der Fall ist.“

mit dem Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS). Das leistungsstarke Konzept konnte schon mehrfach Preise für Innovation und Umweltfreundlichkeit gewinnen.

## Gleichzeitige Energie- und Platzersparnis

eins von drei Rechenzentren, die sich mit dem Umweltzeichen der Bundesregierung schmücken können. Dank eines speziellen Kühlsystems ist er besonders energieeffizient und ressourcenschonend. Der Green IT Cube ist eines der leistungsfähigsten wissenschaftlichen Rechenzentren der Welt. Er wird enorme Rechenkapazitäten für Experimente an den Beschleunigeranlagen von GSI und zukünftig von FAIR bereitstellen.

Der Green IT Cube wurde bei GSI in Darmstadt errichtet und aus Mitteln des Bundes und des Landes Hessen über Helmholtz-Ausbauinvestitionen finanziert. Das Konzept ermöglicht die Realisierung und den besonders effizienten Betrieb von Rechenzentren für Großforschungseinrichtungen, wie die bei GSI entstehende internationale Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research).

„Der Green IT Cube ist ein besonders energieeffizientes Rechenzentrum, weil der Energieaufwand für die Kühlung der Computer im Vergleich zu herkömmlichen Rechenzentren sehr gering ist“, erläuterte Dr. Helmut Kreiser, Leiter der Rechenzentren auf dem GSI/FAIR-Campus. „Der Green IT Cube kühlt seine Rechner mit einem innovativen Luft-Wasser-Verfahren. Dadurch entspricht der Energieaufwand für die Kühlung weniger als sieben Prozent

Das effektive Kühlverfahren ermöglicht es, die Rechner im Green IT Cube platzsparend unterzubringen. In einem 27 x 30 x 22 Kubikmeter großen würfelförmigen Gebäude können insgesamt 768 Rechnerschränke in sechs Stockwerken dicht an dicht angeordnet werden. Zurzeit sind zwei von sechs Stockwerken mit einer maximalen Kühlleistung von vier Megawatt ausgebaut. Im Endausbau wird der Green IT Cube eine Kühlleistung von zwölf Megawatt erreichen können. Durch die gleichzeitige Energie- und Platzersparnis ist er sehr kosteneffizient. Mit der Server-Abwärme des Green IT Cubes wird darüber hinaus auf dem GSI-Campus bereits heute ein modernes Büro- und Kantinengebäude beheizt.

„Wir sind sehr froh und natürlich stolz, eine so bekannte und renommierte Auszeichnung wie den Blauen Engel für unser Rechenzentrum zu erhalten“, sagte Professor Paolo Giubellino, der Wissenschaftliche Geschäftsführer von FAIR und GSI. „Die Technologie für die Kühlung ist nicht nur ein Beispiel für die Kompetenz und den Erfindungsgeist unserer Wissenschaftler\*innen, sondern auch für das Potenzial eines Forschungszentrums wie dem unseren, zur Verbesserung auch bereits etablierter Technik im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Effizienz beizutragen. Dieses Potenzial zu verfolgen und auszubauen, ist uns bei unserer Forschung an GSI und FAIR ein großes Anliegen.“

Forschende nutzen den Green IT Cube, um Simulationen durchzuführen und Detektoren für FAIR zu entwickeln. Außerdem werten sie Messdaten von Experimenten an den Beschleunigeranlagen von GSI und in Zukunft von FAIR aus, mit denen sie grundlegende Erkenntnisse über den Aufbau der Ma-

## Beispiel für Kompetenz und Erfindungsgeist

Entwickelt wurde die Kühltechnik von Volker Lindenstruth, Professor der Goethe-Universität Frankfurt und zum damaligen Zeitpunkt Leiter der GSI-IT, sowie Horst Stöcker, ebenfalls Professor in Frankfurt und zum damaligen Zeitpunkt Wissenschaftlicher Geschäftsführer von GSI, in Zusammenarbeit

ter und die Entwicklung des Universums gewinnen. Dafür wird der Green IT Cube langfristig bedarfsgerecht mit Rechnersystemen bestückt werden, die den Anforderungen der Wissenschaft bezüglich Rechenleistung, Speicherkapazität und Zugriffsgeschwindigkeit gerecht werden.





Außenansicht des Green IT Cubes auf dem GSI/FAIR-Campus.

Der Blaue Engel ist seit über 40 Jahren das Umweltzeichen der Bundesregierung und die Orientierung beim nachhaltigen Einkauf. Unabhängig und glaubwürdig setzt er anspruchsvolle Maßstäbe für umweltfreundliche Produkte und Dienstleistungen. Der Blaue Engel garantiert, dass mit ihm ausgezeichnete Produkte und Dienstleis-

tungen hohe Ansprüche an Umwelt-, Gesundheits- und Gebrauchseigenschaften erfüllen. Dabei ist bei der Beurteilung stets der gesamte Lebensweg zu betrachten. Für jede Produktgruppe werden Kriterien erarbeitet, die mit dem Blauen Engel gekennzeichnete Produkte und Dienstleistungen erfüllen müssen. Um dabei die technische Ent-

wicklung widerzuspiegeln, überprüft das Umweltbundesamt alle drei bis vier Jahre die Kriterien. Auf diese Weise werden Unternehmen gefordert, ihre Produkte immer umweltfreundlicher zu gestalten. Der Green IT Cube war das erste Rechenzentrum, das sich auf Basis der 2019 geänderten Kriterien mit dem Umweltzeichen schmücken konnte. ■





Helmholtz-Zentren wollen gemeinsames Verständnis von Diversität, Inklusion und einer diversitätssensiblen Organisationskultur entwickeln.

# Diversität und Inklusion

**Die Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft haben sich darauf geeinigt, ein gemeinsames Verständnis von Diversität, Inklusion und einer diversitätssensiblen Organisationskultur zu entwickeln und zu leben.**

Alle 19 Mitglieder der Helmholtz-Gemeinschaft, darunter GSI, haben dazu in ihrer Mitgliederversammlung eine entsprechende Leitlinie offiziell verabschiedet.

In großen Forschungsinfrastrukturen wie GSI, das bereits seit der Gründung starke internationale Kooperationen pflegt, oder auch dem von mehreren Ländern getragenen FAIR-Projekt, ist Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Menschen und Kulturen schon lange gelebte Vielfalt. So kann Wissen und Knowhow aus der gesamten Welt für Forschung und Hightech-Entwicklungen zusammengebracht werden, um beste Resultate zu erzielen. Die Basis dazu wird nun in der Helmholtz-Leitlinie verschriftlicht, um Rahmenbe-

dingungen dafür zu schaffen, Vielfalt und Inklusion auch in den Prozessen, Strukturen und Gegebenheiten des Zentrums abzubilden.

Ausgangspunkt ist eine einfache Erkenntnis: Menschen sind vielfältig. Die derzeit 40 000 Mitarbeitenden der Helmholtz-Gemeinschaft und natürlich auch die rund 1500 Mitarbeitenden von GSI und FAIR unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht voneinander: in ihrem persönlichen Lebensentwurf bzw. ihrer persönlichen Lebenssituation, ihrem Geschlecht, ihrer Weltanschauung, ihrer Biografie und Herkunft, ihren Fähigkeiten und Neigungen, ihrem äußeren Erscheinungsbild und vielen anderen Aspekten. Diese Summe der menschlichen Unterschiede, die wahl-

weise als „Diversität“ oder „Vielfalt“ bezeichnet wird, erkennen die Helmholtz-Mitglieder als unumstößliche Tatsache an.

Unter Inklusion wird die aktive Gestaltung der Organisationskultur verstanden, um alle Personen zu berücksichtigen und ihnen gleichermaßen Chancen auf Einflussnahme, Mitwirkung und individuelle Weiterentwicklung zu ermöglichen. Erfolgreiche Inklusion zeigt sich darin, dass die Menschen, die in und mit den Zentren arbeiten, eine Atmosphäre von Respekt und Fairness, Wertschätzung und Zugehörigkeit, Sicherheit und Offenheit erleben und überzeugt davon sind, hier ihre Talente voll entwickeln und persönlich wachsen zu können. ■





Von links: Dr. Stefan Kaufmann, Mitglied des Deutschen Bundestags, Professor Grigory Trubnikov, Erster stellvertretender Minister des Ministeriums für Wissenschaft und Bildung der Russischen Föderation, Professor Otmar Wiestler, Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Professor Vladimir Kekelidze, Vize-Direktor des JINR für das Wissenschaftsprojekt NICA, Professor Paolo Giubellino, Wissenschaftlicher Geschäftsführer von GSI und FAIR, Professor Wolf-Dieter Lukas, Staatssekretär des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, und Professor Andrey Fursenko, Berater des Präsidenten der Russischen Föderation.

# Millionenabkommen

Die Forschungszusammenarbeit vertiefen, Spitzenforschung und Nachwuchsförderung stärken – das sind einige der wesentlichen Intentionen der „Deutsch-Russischen Roadmap für die Zusammenarbeit in Bildung, Wissenschaft, Forschung und Innovation“, die Deutschland und Russland im Dezember 2018 vereinbart haben. Ein wichtiger Schritt in diesem Rahmen war die Unterzeichnung eines Abkommens zwischen GSI und dem Joint Institute for Nuclear Research (JINR).

Zu den Zielen der deutsch-russischen Roadmap gehört die Ausweitung der Zusammenarbeit an großen Forschungsinfrastrukturen in Russland. Eines der dafür identifizierten Projekte ist die Instrumentierung und wissenschaftliche Nutzung der zukünftigen Beschleunigeranlage NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), die derzeit in Dubna beim JINR entsteht. Die deutschen Beiträge zu dieser Kooperation werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziert und durch GSI

ausgestaltet. Dazu wurde ein Kooperationsabkommen zwischen JINR und GSI ausgearbeitet, das einen Gesamtumfang von rund 20 Millionen Euro hat. Es wurde Anfang Februar in Moskau während der „Helmholtz-Wintergespräche 2020“, einer traditionellen Veranstaltung für den Meinungsaustausch zwischen Entscheidungsträgern aus Politik, Wissenschaft und Gesellschaft in Russland und Deutschland, unterzeichnet.

Das Abkommen über die technische Kooperation zwischen GSI und JINR besteht aus mehreren Teilprojekten: Koordination und technischer Follow-up, stochastische Kühlung für den NICA-Collider, Silizium-Tracking-System für das NICA-Experiment BM@N sowie Ausleseelektronik und Datenerfassung für dieses Experiment, Forschung und Entwicklung für den supraleitenden Hochintensitäts-Ioneninjektor Linacs@JINR und schließlich noch Strahldiagnose und LLRF-Elektronik für Linearbeschleuniger. Als nächster Schritt werden derzeit die Details dieser sechs Unterprojekte ausgearbeitet.

Professor Paolo Giubellino, der das Abkommen gemeinsam mit Professor Vladimir Kekelidze, Vize-Direktor des JINR für das Wissenschaftsprojekt NICA, unterzeichnet hat, sagte: „Ich bin sehr erfreut über die neue Kooperation, die auf einer bereits bestehenden, sehr guten Basis zwischen beiden Instituten aufbauen kann.“ Die Zusammenarbeit zwischen GSI und JINR blickt auf eine lange Tradition zurück und umfasst sowohl die Forschung an den existierenden Beschleuniger- und Experimentieranlagen beider Partner als auch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für künftige Forschungsinfrastrukturen wie die beiden Beschleunigerzentren FAIR und NICA, die derzeit in Darmstadt bei GSI und in Dubna am JINR entstehen. „Die Vereinbarung bietet hervorragende Möglichkeiten, unsere Zusammenarbeit in Zukunft noch weiter zu stärken und vielversprechende neue Perspektiven in den Bereichen Forschung und technologische Innovationen zu eröffnen.“ ■



# FAIR-Ringbeschleuniger: Von der Produktion zur Installation

**Die nächsten entscheidenden Weichen für den großen FAIR-Ringbeschleuniger SIS100 werden gestellt.**

Während die Rohbauarbeiten auf dem Baufeld voranschreiten und parallel auch die Entwicklung und Fertigung der Hightech-Komponenten für das künftige Beschleunigerzentrum FAIR läuft, rückt nun ein weiterer maßgeblicher Aspekt immer mehr in den Fokus: die Montage der Beschleunigermaschine in den neu errichteten Gebäuden.

Wenn auch die gegenwärtigen Schwerpunkte noch auf der Beschaffung der Beschleunigerkomponenten liegen, werden derzeit erste, wichtige Schritte in Richtung Maschinenmontage unternommen. Die Projektgruppe SIS100/SIS18, bestehend aus den Arbeitspaketleiter\*innen, Vertreter\*innen internationaler Provider und der Subprojektleitung hatte ihre dreitägige Klausurtagung unter das Motto „Von der Produktion zur Installation“ gestellt. Dabei waren auch Vertreter des neuen Subprojektes „Site Management (SMG)“ mit dem Ziel beteiligt, die nächste Phase in der Projektrealisierung gemeinsam vorzubereiten.

In welchen Sequenzen soll die Installation der Maschine ablaufen? Welche Reihenfolge beim Aufbau der Beschleunigerkomponenten ist die beste? Wie werden die schweren Teile an ihre richtige Position in den Neubauten platziert? Das sind nur einige Fragen, die

mit hoher Präzision beantwortet werden müssen. Derzeitige Schwerpunkte sind die Herstellung installationsbereiter Baugruppen, der Aufbau und Test einer kompletten SIS100-Einheitszelle, bestehend aus zwei Dipol-, zwei Quadrupol- und mehreren Korrekturmagneten, die Entwicklung von Transport- und Hebehilfsmitteln und die Berücksichtigung technikspezifischer Randbedingungen bei der Festlegung von Installationssequenzen. Außerdem müssen weitere wichtige Meilensteine wie der Montage-Abschluss der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA), die Fertigstellung zentraler Einrichtungen, die Liefertermine und die Installationsbereitschaft aller Beschleunigerkomponenten in die Planung aufgenommen werden.

Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auf die Kryotechnik gelegt. Der Ringbeschleuniger SIS100 benötigt supraleitende Magnete, um die extrem schnellen Teilchen zu lenken. Supraleitung ist nur mithilfe von ausgefeilter Kryotechnik zu erreichen: Sie muss eine Tiefsttemperatur von minus 268,6 °C im gesamten Ringsystem des SIS100 aufrechterhalten, die zum Betrieb benötigt wird.

Für die Installation solcher kryogenen Systeme, der kryomagnetischen Module und der lokalen Kryogenik sind besondere, qualitätssichernde Maßnahmen

nötig. Dabei müssen auch europäische Richtlinien eingehalten werden, beispielsweise die Druckgeräte-Richtlinie, die bei zahlreichen Arbeitsschritten zur Anwendung kommt. Deshalb wurden bei dem Treffen der Projektgruppe und des neuen Subprojekts auch Möglichkeiten für eine effiziente Ausnutzung der verlängerten Installationsphase der kryogenen Systeme durch einen parallelen Start der Hardwareinbetriebnahme warmer Systeme erörtert. Eine effiziente Planung für die Installation und Inbetriebnahme der technischen Einzelsysteme ist eine Voraussetzung für eine zeitnahe Kaltinbetriebnahme, sowie für die Inbetriebnahme der Hauptstromversorgung in Verbindung mit der dann supraleitenden Magnetkette. Insgesamt steht hinter all diesen komplexen Planungen ein entscheidendes Ziel: die Herstellung eines ersten Pilotstrahls durch das SIS100, das Herzstück des künftigen Beschleunigerzentrums FAIR. ■

## DRONELAPSE

Drei Jahre Bau  
im Zeitraffer:  
[youtu.be/uRIQL\\_9JPYs](https://youtu.be/uRIQL_9JPYs)  
(QR-Code scannen)







Die Rohbauarbeiten auf dem Baufeld schreiten voran, auch die Montage der Beschleunigermaschine rückt immer mehr in den Fokus.



# Abnahmetest: Detektorteil für CBM erfolgreich übergeben

Ein wichtiger Baustein für das künftige CBM-Experiment, eine der vier zentralen Säulen des FAIR-Forschungsprogramms, hat erfolgreich den Abnahmetest vor Ort auf dem GSI- und FAIR-Campus (SAT, Site Acceptance Test) durchlaufen. Im Namen eines Teams des Kernphysikalischen Instituts (NPI) der Tschechischen Akademie der Wissenschaften (CAS) und der Technischen Universität in Prag (CTU) hatte Dr. Petr Chudoba vom NPI den Manipulator für den PSD-Detektor übergeben, ein tschechischer Sachbeitrag für FAIR. Es ist zugleich der erste nach Deutschland gelieferte In-kind-Beitrag eines ausländischen Partners für das CBM-Experiment.

Die Tschechische Republik ist als Partnerstaat direkt mit dem FAIR-Projekt verbunden und war im Frühjahr 2019 als „Aspirant Partner“ beigetreten. Die Partnerschaft konnte damals bereits auf eine langjährig bestehende, sehr gute

Zusammenarbeit von tschechischen Forschungseinrichtungen und GSI/FAIR aufbauen. Tschechische Forschende sind beispielsweise beim Großdetektor HADES beteiligt sowie in der nuklearen Astrophysik und sind in allen vier Forschungssäulen aktiv, so auch bei CBM. Hier leisten sie einen bedeutenden Beitrag zur Forschung, Entwicklung und Konstruktion des PSD-Detektors (Projectile Spectator Detector), der Teil des CBM-Experimentaufbaus ist.

Der PSD dient beim CBM-Experiment zur Messung der Geometrie von Schwerionenkollisionen. Die nun gelieferte Komponente, der Manipulator, ist der bewegliche Teil dieses Detektors. Der Detektor wird Teilchen aus der Wechselwirkung von relativistischen schweren Ionen mit einem Target aufspüren können. Dafür wird er in einem Abstand von etwa acht bis zwölf Metern vom Interaktionspunkt aus um das Strahlrohr

herum angeordnet. Da das Strahlrohr beweglich ist, muss auch der Detektor in mehreren Richtungen beweglich sein und sich im Bereich von mehreren Grad drehen können. Das Gewicht des PSD beträgt etwa 25 Tonnen, daher war es eine besondere Herausforderung, einen entsprechenden Stützrahmen, den PSD-Manipulator, zu konstruieren und zu bauen.

Das tschechische Team hat diese komplexe Anforderung erfolgreich erfüllt. Der Manipulator ermöglicht nun eine horizontale und vertikale Bewegung mit einer Präzision im Millimeterbereich sowie die Rotation des gesamten PSD-Detektors. Nach seiner Installation wird der Manipulator rund 25 Tonnen an Kalorimeter-Messmodulen unterstützen können. Nach dem nun erfolgten erfolgreichen Tests wird das Detektorteil bis zur Installation im CBM-Cave bei GSI/FAIR gelagert. ■



Manipulator für den PSD-Detektor des CBM-Experiments an FAIR.





Das Bad im Kupferelektrolyten sorgt für Glanz.

# Großverkupferung

## GSI-Galvanik erreicht wichtigen Meilenstein für FAIR.

In der Galvanik-Abteilung von GSI ist ein wichtiger Erfolg erzielt worden: Die Verkupferung einer zwei Meter durchmessenden Kavität wurde erfolgreich umgesetzt. Dies ist zugleich von großer Bedeutung für das künftige Beschleunigerzentrum FAIR. Um die FAIR-Parameter zu erreichen, muss der bestehende Linearbeschleuniger UNILAC, der künftig als Vorbeschleuniger dienen wird, teilweise mit neuen Kavitäten aufgerüstet werden.

Kavitäten oder auch Hohlraumresonatoren sind zentrale Elemente von Beschleunigern. Darin schwingen starke elektromagnetische Felder, die ihre Energie auf die entlang der Röhrenachse fliegende Teilchen übertragen. Um die elektrische Leitfähigkeit zu verbessern, werden die Oberflächen verkupfert. Bei GSI und FAIR ist die Galvanik-Abteilung dafür zu-

ständig, Tanks und Bauteile der Teilchenbeschleuniger von innen mit einer Schicht aus hochglänzendem Kupfer zu überziehen. Die Aufgabe der Galvanisierung ist anspruchsvoll, die Anforderungen an die Oberflächenqualität sind hoch

Aktuell muss die Alvarez-Beschleunigungsstruktur, ein Abschnitt des GSI-UNILAC, für zukünftige Höchstleistungen ersetzt werden, damit FAIR die geplante hohe Strahlqualität liefern kann. Einer der kritischen Punkte bei diesem Upgrade ist das Verkupfern besonders großer Kavitäten-Sektionen. Eine Herausforderung, die bei GSI letztmalig vor über 20 Jahren anstand. Dennoch ist es der GSI-Galvanik nun gelungen, bereits beim ersten Versuch ihre Fähigkeit zu demonstrieren und eine Kavität dieser Größe zu verkupfern. Somit ist ein sehr entscheidender Aspekt

des Alvarez-Ersatzes adressiert und positiv gelöst worden.

Die Galvanik-Anlage, die im Laufe der Forschungsjahre und des Beschleunigerbaus auf dem GSI- und FAIR-Campus entstanden ist, ist einmalig. Sie erlaubt Hochglanz-Verkupferungen von Metalloberflächen wie Stahl und Edelstahl bis zu 200 Mikrometer Dicke. Vor allem die Größe der Elemente, die verkupfert werden können, macht die Anlage außergewöhnlich. Sogar ein Kran kommt beim Manövrieren zum Einsatz, um die teils tonnenschweren Bauteile zwischen den verschiedenen Reinigungs- und Beschichtungsbädern hin und her zu bewegen. Ausführbar sind Verkupferungen von Elementen bis zur maximalen Länge von 2,5 Metern sowie einem Durchmesser von bis zu 2,5 Metern. ■





Blick in den FAIR-Speicherring CRYRING.

# FAIR-Speicherring CRYRING einsatzbereit

Der erste FAIR-Speicherring, der sogenannte CRYRING, ist bereit, Experimente der wissenschaftlichen Forschungscommunity durchzuführen. CRYRING ist ein äußerst erfolgreicher Ionenspeicherring, der viele Jahre in Stockholm zentrale Forschungsbeiträge in der Atom- und Molekularphysik ermöglicht hat. Er wurde als schwedischer Sachbeitrag (sogenanntes In-Kind) zu GSI und FAIR nach Darmstadt gebracht. Hier wurde er modernisiert, an FAIR-Standards angepasst und unter dem Projektnamen "CRYRING@ESR" an den bestehenden Experimentierspeicherring ESR auf dem GSI-Gelände angeschlossen. Zusammen mit der bereits bestehenden Ionenfalle

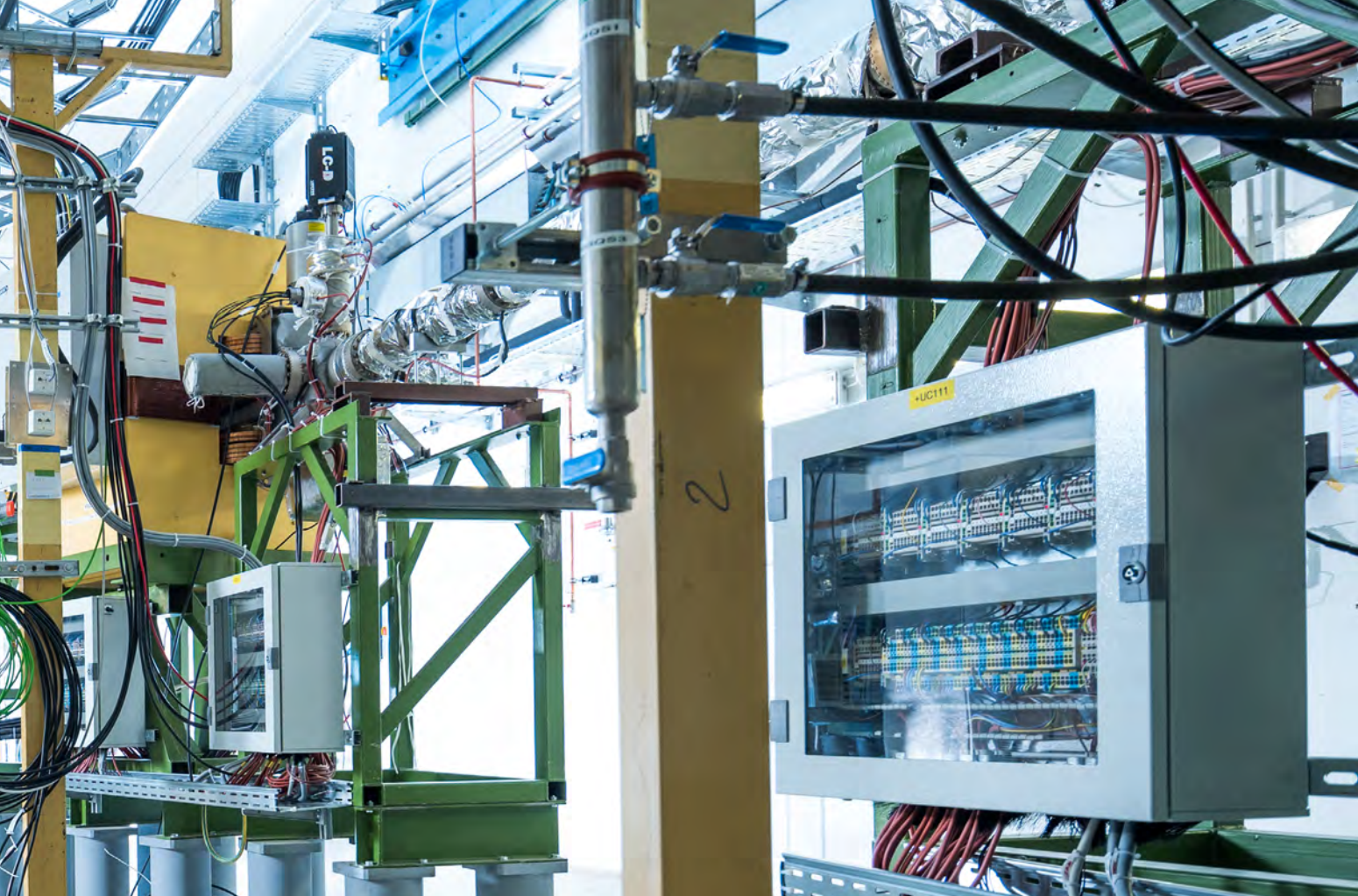
HITRAP, dem ESR und dem zukünftigen Hochenergiespeicherring HESR wird CRYRING Teil des einzigartigen Portfolios von Fallen- und Speichieranlagen für schwere Ionen von FAIR sein.

CRYRING ist eine Anlage zum Speichern von hochgeladenen, schweren Ionen bei niedriger Strahlenergie. Mit seinem hohen Vakuum eignet sich der Speicherring besonders gut, die Ionen bei kleinen Energien zu speichern und zu kühlen. Mit niedrigerenergetischen Ionen sind Experimente von höchster Präzision, aber auch in einem zuvor unerreichten Regime langsamer, adiabatischer Stöße möglich, welche uns einen neuen Ein-

blick in atom-, astro- und kernphysikalische Prozesse erlauben.

Der Wiederaufbau des CRYRING wurde 2015 begonnen. Im Jahr 2017 konnte erstmals gespeicherter Strahl erzeugt werden, zunächst noch aus einer lokalen Quelle. In den vergangenen Jahren wurde an der Optimierung des Ringbetriebs, der Strahlkühlung und -diagnose, am neuen FAIR-Kontrollsystem und an der experimentellen Infrastruktur gearbeitet. Die Inbetriebnahme ist nun kurz vor dem Abschluss und so weit fortgeschritten, dass die Anlage bereit für die Aufnahme wissenschaftlicher Experimente ist.





Für dieses Frühjahr waren am CRYRING bereits diverse Experimente der wissenschaftlichen Nutzerinnen und Nutzer unter internationaler Beteiligung geplant. Aufgrund der Corona-Pandemie mussten sie jedoch vorläufig abgesagt und in kommende Betriebszeiten verschoben werden. Es wurde dennoch weiter an der vollständigen Inbetriebnahme der Anlage gearbeitet. Hierbei wurden hochgeladene, schwere Blei-Ionen (Beryllium-artiges  $\text{Pb}^{78+}$  und später auch  $\text{Pb}^{82+}$  mit vollständig entfernter Elektronenhülle) aus dem GSI-Linearbeschleuniger UNILAC via den Ringbeschleuniger SIS-18 und den Experimentierspeicherring ESR nicht nur zu CRYRING transportiert, sondern auch gespeichert, gekühlt und für Tests der experimentellen Infrastruktur genutzt. Die Lebensdauern und die Elektronenkühlung der gespeicherten Strahlen stimmten mit vorherigen Abschätzungen überein.

In den ersten Tests registrierten Röntgendetektoren am sogenannten Elek-

tronenkühler das charakteristische Röntgenspektrum der hochgeladenen schweren Ionen, welches für das fundamentale Verständnis der elektromagnetischen Wechselwirkung in extrem starken Feldern (Quantenelektrodynamik) von besonderem Interesse ist. Im CRYRING gespeicherte Ionen durchfliegen bei jedem Umlauf auf einer kurzen Strecke im Elektronenkühler eine mit gleicher Geschwindigkeit mitfliegende kalte, dichte Elektronenwolke, welche primär der Strahlkühlung dient. Ein sekundärer Nebeneffekt ist, dass auch ein kleiner Teil der Ionen ein Elektron aus der Wolke einfängt und die hierbei freiwerdende Energie als Röntgenstrahlung freisetzt. Diese Strahlung können sich die Forschenden für die Untersuchung der Quantenelektrodynamik zunutze machen.

Aufgrund der zwölfseitigen Geometrie des CRYRINGS lassen sich die Röntgenzähler in eine ideale Stellung exakt

auf Achse vor und hinter den Ionenstrahl und dennoch recht nahe an den Wechselwirkungsbereich mit den Kühlelektronen bringen. Hierdurch werden Unsicherheiten im Beobachtungswinkel weitgehend eliminiert, die durch die Dopplerverschiebung hervorgerufen werden. Die niedrige Strahlenergie der gespeicherten Ionen trägt ihrerseits dazu bei, diese Verschiebung an sich zu reduzieren, so dass sich Röntgenspektren mit einer unerreichten Präzision und Reinheit erfassen lassen.

Für die Zukunft ist geplant, die aktuell aufgrund von COVID-19 nicht durchführbaren Experimente bald möglich nachzuholen. Des Weiteren soll die Inbetriebnahme vollständig abgeschlossen werden. Dazu wird noch die Extraktion ergänzt werden, um die abgebremsten, gekühlten Ionen aus dem Ring auszuleiten und material- und biophysikalische Experimente mit festen Targets zu ermöglichen. ■



# Volles Tempo

## Serienproduktion der SIS100-Beschleunigungskavitäten, Leistungsverstärker und Versorgungseinheiten abgeschlossen. Alle Komponenten geliefert.

Der Schwerionenbeschleuniger SIS100 mit 1,1 Kilometern Umfang ist das Herzstück der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), die gerade bei GSI entsteht. Er wird in Zukunft schwerste Ionen innerhalb einer halben Sekunde auf Endgeschwindigkeit beschleunigen. Alle dazu notwendigen Kavitäten, Leistungsverstärker und Versorgungs-

einheiten wurden nun an GSI/FAIR geliefert. Damit ist die Serienproduktion der Hauptkomponenten des SIS100-Beschleunigungssystems abgeschlossen.

Die kurze Beschleunigungszeit des SIS100 ist ein wesentlicher Unterschied zu anderen supraleitenden Synchrotrons, insbesondere den großen Collider-Synchrotrons, deren Beschleuni-

gungsrampe typischerweise mehrere Minuten dauert. Um dies zu ermöglichen, ist das SIS100 mit einer großen Anzahl von Hochfrequenzbeschleunigungseinrichtungen ausgestattet. Für die Erstausrüstung wurden 14 Kavitäten für die Beschleunigung der schweren Ionen vorgesehen und bestellt, im Endausbau werden dazu 20 Kavitäten benötigt. Neben den Hochfrequenz-



Von RI Research Instruments realisierte Kavität inkl. der hauptsächlich von der GSI-Abteilung „Ring RF“ entwickelten Elektronik im Hintergrund.





Vertreter\*innen des GSI/FAIR-Teams im SIS100-Beschleunigungsprojekt im Lager in Weiterstadt vor einigen der SIS100-Beschleunigungskavitäten (von links nach rechts: Dr. Niels Pyka, Elena Reitz, Dr. Peter Spiller, Dr. Janet Schmidt, Robert Balß, Dr. Dieter Lens, Dr. Hans Günter König).

anlagen für die Strahlbeschleunigung verfügt das SIS100 über weitere neun Kavitäten zur Kompression der beschleunigten Ionenpulse und vier weitere spezielle Systeme. Letztere dienen zum einen zur Stabilisierung des Strahls bei hohen Intensitäten, zum anderen auch zur Erzeugung von Hochfrequenzbarrieren, die einen rechteckigen Strahlpuls vor der Extraktion umschließen. Mit dieser Ausstattung von Hochfrequenzanlagen ähneln die Geraden des SIS100 eher einem Linearbeschleuniger als einem Synchrotron.

Die Entwicklung und der Bau der Beschleunigungskavitäten wurde an die Firma RI Research Instruments GmbH vergeben. Nach einer Designphase, in der RI eng mit den Fachkräften der Ring-HF-Abteilung von GSI zusammenarbeitete, folgte die Fertigung und

Abnahme des First-of-Series-Systems. Basierend auf den Ergebnissen dieser Aktivitäten startete im Herbst letzten Jahres die Produktion der 13 Seriengeräte, bestehend aus Kavitäten und Leistungsverstärkern. Gleichzeitig wurden die dazu gehörigen Versorgungseinheiten in der Schweiz von RIs Kooperationspartner, der Firma Ampegon Power Electronics AG, heute Teil der Aretè & Cocchi Technology Group, produziert.

Anfang Dezember wurden die letzten Komponenten für das SIS100-Beschleunigungssystem durch RI geliefert. Damit sind nun alle Komponenten der Beschaffung – jeweils 14 Kavitäten und Leistungsverstärker von RI sowie 14 Versorgungseinheiten von Ampegon – bei GSI/FAIR eingetroffen. Zusammen mit der „low level RF“, dem Elektroniksystem zur Steuerung und Synchro-

nisierung, bilden sie das Beschleunigungssystem des SIS100-Synchrotrons, mit dem ein Spitzenwert der Beschleunigungsspannung von insgesamt 280 000 Volt auf den keramischen Gaps der Kavitäten erzeugt werden kann.

Die Produktion und die Abnahmetests wurden Anfang 2020 durch die Coronapandemie vor unerwartete Herausforderungen gestellt, doch dank Schichtarbeit, flexibler Anpassung an die jeweiligen Vorgaben und vor allem enger Kooperation der Teams bei GSI/FAIR, RI und Ampegon konnten die Aktivitäten trotz erschwelter Umstände erfolgreich durchgeführt werden. Neben dem Abschluss der Serienproduktion der supraleitenden Dipolmodule ist damit ein weiterer wichtiger Meilenstein für die Errichtung des SIS100-Synchrotrons erreicht. ■





Der HADES-Detektor gehörte zu den Stationen beim Rundgang mit Staatssekretär Lukas. Im Foto von links: Der Wissenschaftliche Geschäftsführer von GSI und FAIR, Professor Paolo Giubellino, Staatssekretär Professor Wolf-Dieter Lukas und die Wissenschaftlerinnen Professorin Hannah Elfner und Professorin Tetyana Galatyuk.

## Erfolge und Perspektiven: Forschungsstaatssekretär Lukas besucht GSI und FAIR

Die Forschung an FAIR und die aktuellen Forschungsaktivitäten auf dem Weg dorthin standen im Mittelpunkt eines Besuchs von Professor Wolf-Dieter Lukas, Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Gemeinsam mit weiteren Führungskräften aus dem BMBF informierte er sich auf dem FAIR- und GSI-Campus über die Perspektiven für die nächsten Jahre. Professor Paolo Giubellino, Wissenschaftlicher Geschäftsführer von GSI und FAIR, Dr. Ulrich Breuer, Administrativer Geschäftsführer, und Jörg Blaurock, Technischer Geschäftsführer, empfingen die Gäste

Mit Präsentationen und bei einer Führung erhielten die Gäste einen umfassenden Einblick in die aktuelle und die an den FAIR-Anlagen geplante Forschung. Staatssekretär Lukas zeigte sich beeindruckt sowohl von den Erfolgen von GSI als auch von den herausragenden Aktivitäten im Rahmen des laufenden FAIR-Phase-0-Programms und von den vielversprechenden wissenschaftli-

chen Perspektiven, die sich mit der Inbetriebnahme von FAIR ergeben werden: „Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung ist ein entscheidendes Fundament für Entwicklung und Fortschritt in einer Gesellschaft. Ihre Förderung ist deshalb ein zentrales Anliegen des Bundesforschungsministeriums. Ich konnte mich heute von der ausgezeichneten Spitzenforschung bei der GSI und den wissenschaftlich faszinierenden Möglichkeiten der künftigen FAIR-Anlagen überzeugen.“

Die einzigartigen Möglichkeiten von FAIR und die zukünftigen Herausforderungen standen auch bei einem Rundgang durch die bestehende Beschleunigeranlage im Fokus. Zu den Stationen, an denen junge Forschende ebenso wie verantwortliche Wissenschaftler\*innen den Gästen Einblicke in ihre Arbeit gaben, gehörten der Experimentierspeicherring ESR, der Medizinbestrahlungsplatz der Biophysik, die Großexperimente R3B und HADES so-

wie das Höchstleistungsrechenzentrum von GSI und FAIR, der Green IT Cube. Zusammenfassend zu seinem Besuch betonte Staatssekretär Lukas: „Ich bin besonders beeindruckt von der hohen Kompetenz und der Begeisterung der jungen Forschenden für ihre Arbeit an der GSI, die ich während des Besuchs getroffen habe.“

Mit dem bei GSI entstehenden internationalen Beschleunigerzentrum FAIR sollen extreme Zustände von Materie im Labor erzeugt und erforscht werden, wie sie sonst nur in Neutronensternen, Supernovae, Sternen oder großen Gasplaneten vorkommen. FAIR erforscht damit „das Universum im Labor“. Die künftigen Forschungsarbeiten von FAIR bauen auf der erfolgreichen Forschung an der GSI auf. Wissenschaftler\*innen aus aller Welt werden die verschiedenen Bereiche von GSI und FAIR nutzen, um in einzigartigen Experimenten neue Erkenntnisse über den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums zu gewinnen. ■



# Langes Multiplett für Super-Fragmentseparator im Teststand

Das erste sogenannte lange Multiplett für den supraleitenden Fragmentseparator (Super-FRS) der neuen Beschleunigeranlage FAIR wurde am Teststand des europäischen Forschungszentrums CERN in der Schweiz angeliefert. Hergestellt wurde es von der Firma ASG Superconductors in Italien. Zwischen GSI/FAIR und CERN besteht eine Kooperationsvereinbarung zur Prüfung von Beschleunigermagneten, in deren Rahmen auch das Multiplett vor der Lieferung nach Darmstadt eine Reihe von detaillierten Qualitätstests durchlaufen wird.

In das Multiplett sind insgesamt neun supraleitende Einzelmagnete integriert und es ist ein echtes Schwergewicht: Es ist sieben Meter lang, hat einen Durchmesser von 2,5 Metern und wiegt über 60 Tonnen. Dementsprechend erfolgte die Anlieferung zum CERN mittels eines Schwerlasttransports auf einem Tieflader. Nach der Montage im Teststand wird das Multiplett abgekühlt und umfangreichen Prüfungen von Betriebsparametern und Magnetfeldqualitäten unterzogen, die voraussichtlich etwa sechs bis neun Monate dauern werden. Nach erfolgreichem Abschluss der Abnahmetests soll das Multiplett zu GSI transportiert und im Rahmen einer Vormontage auf die spätere Tunnelinstallation vorbereitet werden. Bis zum endgültigen Einbau werden das Multiplett und auch seine Nachfolger danach zwischengelagert.

Die Multipletts dienen später im Super-FRS der Lenkung und Formung des Strahls, um einen hochpräzisen Teilchenstrahl zu erreichen. Der Super-FRS des künftigen Beschleunigerzentrums FAIR ist ein wichtiger Baustein der Gesamtanlage mit großem Entdeckungspotenzial für die Wissenschaft: In diesem Teil des Beschleu-

nigerkomplexes geht es um Experimente mit extrem seltenen exotischen Kernen im Rahmen von FAIR's Experimentsäule NUSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions). Dafür werden Ionen der schwersten Elemente zunächst auf eine Materialprobe (Target) geschossen und durch den Aufprall zertrümmert. Unter den so entstandenen Fragmenten sind auch exotische Kerne, die am Super-FRS aussortiert und für weitere Experimente zur Verfügung gestellt werden. Dabei können mit dem neuen Separator Kerne bis hin zu Uran bei relativistischen Energien produziert, isotonenrein separiert und untersucht werden. Da dieser gesamte Vorgang nur wenige Hundert Nanosekunden dauert, ermöglicht der Super-FRS den Zugang zu sehr kurzlebigen Kernen.

Die Multipletts, die im italienischen La Spezia hergestellt werden, sind ebenso wie das anschließende Testverfahren ein wichtiger Sachbeitrag (In-kind) von GSI

zum FAIR-Projekt. GSI ist der deutsche Hauptgesellschafter in der internationalen FAIR GmbH. Alle supraleitenden Magnete, die für den Super-FRS benötigt werden, sollen in wechselnder Abfolge in der neuen Testanlage am CERN geprüft werden. Dies beinhaltet sowohl die insgesamt 32 Multiplett-Einheiten, als auch 24 supraleitende Dipolmagnete, die für die Umlenkung des Teilchenstrahls benötigt werden. Bereits im Jahr 2019 war ein erstes kurzes Multiplett an das CERN geliefert worden, mit dem der erste von insgesamt drei Testständen in Betrieb genommen wurde. Der Abnahmetest des kurzen Multipletts wurde in der Zwischenzeit trotz erschwelter Corona-Bedingungen am CERN erfolgreich abgeschlossen. Zurzeit wird mit dem Multiplett der zweite Teststand in Betrieb genommen, um so die Tests der Serien-Multipletts vorzubereiten. Ab Frühjahr dieses Jahres ist im etwa monatlichen Rhythmus je eine weitere Multiplett-Anlieferung geplant. ■

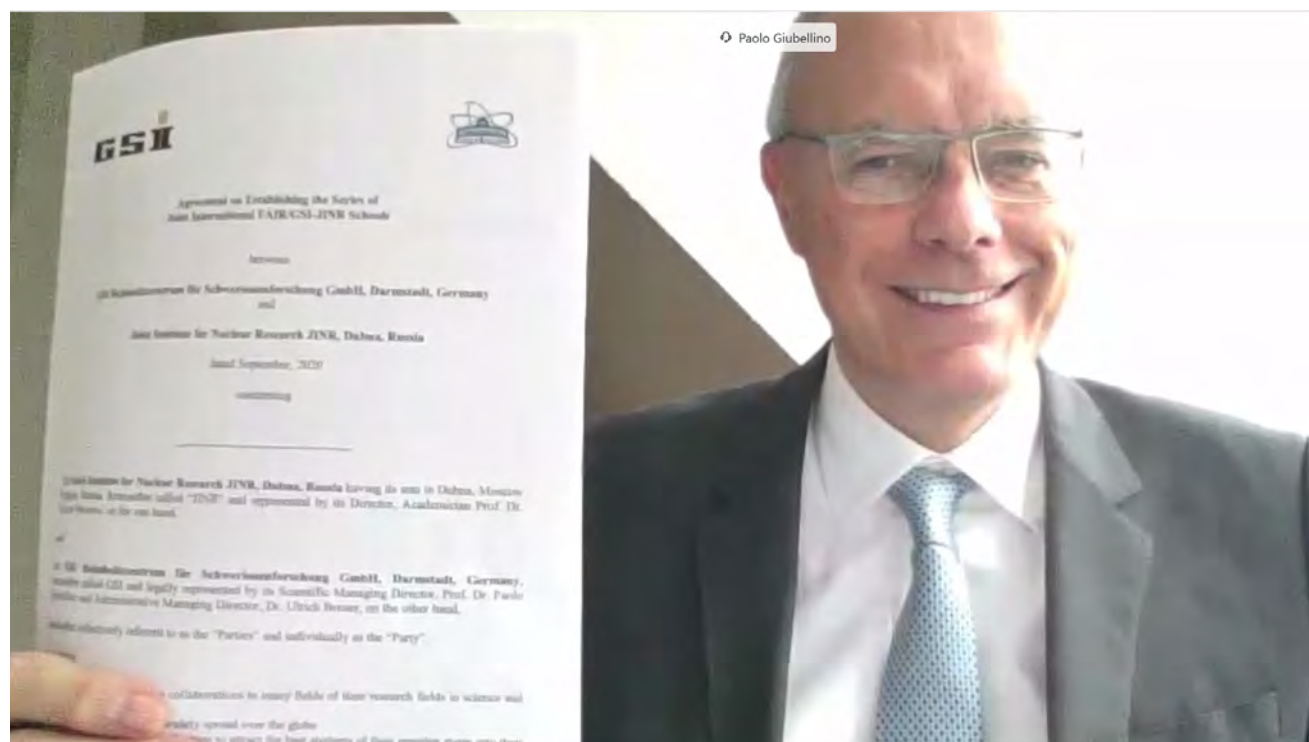


Anlieferung des langen Super-FRS-Multipletts am CERN-Teststand.



# Wissenschaftliche Nachwuchsförderung: GSI/FAIR und JINR etablieren gemeinsame internationale Schule

Es ist ein starkes Zeichen für die Zukunft: GSI/FAIR und das Joint Institute for Nuclear Research (JINR) wollen in internationaler Zusammenarbeit junge Talente fördern und gründen dafür gemeinsam die „International Joint FAIR/GSI-JINR School“. Ein entsprechendes Abkommen wurde nun von Vertreter\*innen beider Einrichtungen geschlossen.



Screenshot aus der Videokonferenz: Professor Paolo Giubellino präsentiert den Vertrag zwischen GSI/FAIR und JINR.



Die gute Zusammenarbeit zwischen GSI und JINR blickt auf eine lange Tradition zurück und umfasst sowohl Bereiche aus Wissenschaft und Technologie an den existierenden Beschleuniger- und Experimentieranlagen beider Partner als auch Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für die Beschleunigerzentren FAIR und NICA, die derzeit in Darmstadt bei GSI und in Dubna am JINR entstehen. Die neue Schule soll inhaltlich die aktuellen und zukünftigen wissenschaftlichen Programme

on und unterstrich die Wichtigkeit der wissenschaftlichen Ausbildung: „Die Schule wird hervorragende Möglichkeiten bieten und vielversprechende neue Perspektiven eröffnen. Das ist essentiell. Denn die Studierenden von heute sind die FAIR-Forschenden von morgen. Mit unserem neuen Angebot gewinnen wir die Wissenschaftler\*innen der Zukunft. Zudem wird damit die enge und sehr gute Zusammenarbeit zwischen den beiden Instituten in Darmstadt und Dubna noch weiter verstärkt.“

in Anwesenheit der Betreuenden Probleme lösen und Projekte in Angriff nehmen. Die Studierenden werden auf der Grundlage individueller Bewerbungen und Empfehlungsschreiben ihrer jeweiligen Betreuungspersonen ausgewählt. Dabei wird auch auf einen guten Nationalitätenmix geachtet, um die internationale Zusammenarbeit konsequent zu fördern. Geplant ist ein Angebot für Promovierende, die in kleinen Gruppen mit direktem Feedback durch die Betreuungspersonen konzentriert Erfahrungen sammeln können und einen Überblick weit über ihren eigenen Forschungsbereich hinaus erhalten.

## Wissenschaftliche Bandbreite für junge Forschende

abdecken und wendet sich mit ihrem hochkarätigen Angebot an junge Teilnehmende aus allen Mitgliedsstaaten von GSI/FAIR und JINR/NICA.

Die Schule wird abwechselnd einmal im Jahr für einen Zeitraum von zehn bis 14 Tagen in Deutschland oder Russland beziehungsweise einem der FAIR- oder JINR-Mitgliedstaaten organisiert. Sie bietet 40 bis 50 Promovierenden die einmalige Chance, in die Forschungsgebiete und Technologie-Entwicklungen an FAIR/GSI und JINR einzutauchen, insbesondere in die Themen Hadronen- und Kernphysik, Atomphysik, Plasmaphysik, Materialforschung, Biophysik und Strahlenmedizin, Beschleunigerphysik, Detektor-Forschung und -Entwicklung, Mikro-/Nanoelektronik, Informationstechnologie und Hochleistungsrechnen. Auf diese Weise lernen die jungen Forschenden die ganze wissenschaftliche und technologische Bandbreite der an FAIR/GSI und JINR verfolgten Forschung kennen.

Professor Paolo Giubellino zeigte sich begeistert von der neuen Kooperati-

on und unterstrich die Wichtigkeit der wissenschaftlichen Ausbildung: „Die Schule wird hervorragende Möglichkeiten bieten und vielversprechende neue Perspektiven eröffnen. Das ist essentiell. Denn die Studierenden von heute sind die FAIR-Forschenden von morgen. Mit unserem neuen Angebot gewinnen wir die Wissenschaftler\*innen der Zukunft. Zudem wird damit die enge und sehr gute Zusammenarbeit zwischen den beiden Instituten in Darmstadt und Dubna noch weiter verstärkt.“

Professor Giubellino betonte: „Dies, zusammen mit der sehr offenen Diskussionskultur der Veranstaltung, führt zu einem regen Austausch über die Grenzen von Forschungsgruppen, Disziplinen und Ländern hinweg. Wir fördern gemeinsam neue Talente, bringen junge Menschen aus der ganzen Welt zusammen und gehen auch in COVID-Zeiten gezielt voran, um die Zukunft zu gestalten.“

In ihrer Vereinbarung unterstrichen die beiden Partnerinstitutionen: „Gerade im heutigen Umfeld einer immer globaler werdenden Welt wird die Kompetenz zur Diskussion, Zusammenarbeit und Kooperation in internationalen Teams immer wichtiger. Die Gemeinschaft der Forschenden stand schon immer

## „Wir fördern gemeinsam neue Talente.“

Die internationale FAIR/GSI-JINR-Schule kombiniert dabei exzellente pädagogische Vorträge von internationalen GSI-, FAIR- und JINR-Expert\*innen mit Workshops, in denen die Studierenden

an vorderster Front der globalen Partnerschaft und wird dies auch weiterhin tun.“ Dazu wird die „International Joint FAIR/GSI-JINR School“ einen wichtigen Beitrag leisten. ■



# KURZgefasst

## VOM BEGINN DES LEBENS ZUM URSPRUNG DES WELTALLS

Gibt es Leben nur auf der Erde? Wie ist das Universum, in dem wir leben, entstanden? Und was hält die Materie im Innersten zusammen? Diesen Fragestellungen gehen Forschende der Bergischen Universität Wuppertal anhand verschiedener Großexperimente auf den Grund.

Die Astroteilchenphysiker\*innen erhalten für ihre Forschung eine Förderung durch das Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, vertreten durch die Projektträger DLR und PT-DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), und durch GSI. Für ihre Vorhaben bekommen die Wuppertaler Forschenden



Professor Karl-Heinz Kampert (l.) und Professor Klaus Helbing (3.v.r.) gemeinsam mit den Teilprojektleiter\*innen.

den unter Leitung der Astroteilchenphysiker Professor Karl-Heinz Kampert und Professor Klaus Helbing eine För-

derung von insgesamt rund zwei Millionen Euro. Mehrere Großprojekte sind damit verbunden. ■

## GSi UND FAIR UNTERSTÜTZEN „DEINE GESCHICHTE ZÄHLT“

Auf dem GSI/FAIR-Campus stand einer der symbolischen Schreibtische der Aktion „Deine Geschichte zählt“, die im Landkreis Darmstadt-Dieburg auf das Thema Gewalt an Frauen aufmerksam machen möchte. Die Aktion, die



Der symbolische Schreibtisch zu „Deine Geschichte zählt“.

zum Frauentag 2020 initiiert wurde, wird von Frauen helfen Frauen e.V., dem Frauenwohnheim Notwaende und „Mäander – individuelle Jugendhilfe“ getragen.

Im Rahmen der Aktion „Deine Geschichte zählt – Briefe gegen Gewalt an Frauen“ sind an verschiedenen Orten im Landkreis Darmstadt-Dieburg symbolische Schreibtische zu sehen. Sie ermuntern alle Menschen, die Erfahrungen mit Gewalt an Frauen und Mädchen gemacht haben, ihre Geschichte aufzuschreiben. Auch auf dem Campus von GSI und FAIR steht ein Schreibtisch mit Briefkasten. „Wir wollen das Bewusstsein schaffen, dass Gewalt gegen Frauen überall und zu jeder Zeit passiert und dass hinter jedem Gewalterlebnis eine Geschichte und damit auch ein Schicksal steht. Der Schreibtisch soll Aufmerksamkeit erregen und den Blick auch für all-

tägliche Aggression und Gewalt schärfen,“ so das Gleichstellungsgremium von GSI und FAIR.

Inspiziert wurde das Projekt durch die Aktion „Cartas de Mujeres“ aus Quito in Ecuador, bei der sich viele tausend Frauen mit Briefen und Nachrichten an die Politik wandten. Die Briefe, die an den Schreibtischen in Darmstadt-Dieburg eingehen, werden streng vertraulich behandelt und nur von Mitarbeiterinnen der Projektkooperation gelesen und ausgewertet. Zum Frauentag 2021 sollen die Ergebnisse mit Kunstaktionen in den öffentlichen Raum gebracht werden. Ideen und Forderungen an die Politik sollen an die politischen Gremien vor Ort übergeben werden. Ziel ist es, mit der Kampagne „Deine Geschichte zählt“ möglichst viele Menschen zu erreichen und Veränderungen anzustoßen. ■



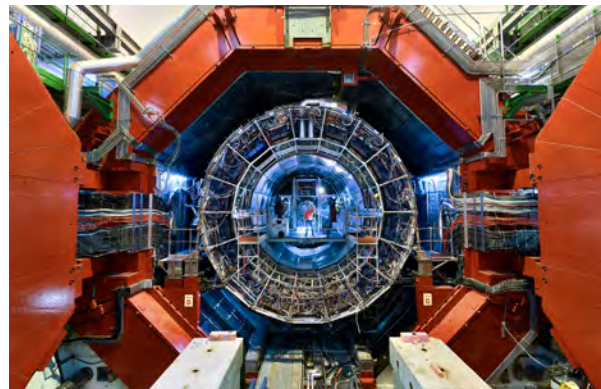
## SATURDAY MORNING PHYSICS – VIRTUELLE GSI/FAIR-VERANSTALTUNG



Screenshot aus der Videotour – Linearbeschleuniger UNILAC

Auch im Jahr 2020 fand die beliebte Veranstaltungsreihe „Saturday Morning Physics“ statt, aufgrund der Corona-Pandemie allerdings als rein virtuelles Format. Rund 200 Oberstufenschüler\*innen aus ganz Hessen nutzten die Gelegenheit zur Teilnahme, um spannende Einblicke in die aktuelle physikalische Forschung zu gewinnen. Zu der langjährigen von der Technischen Universität Darmstadt organisierten Reihe gehörte auch die traditionelle Besichtigung von GSI und FAIR, dieses Mal allerdings über eine geführte Videotour in den Linearbeschleuniger UNILAC, den Hauptkontrollraum, das Schwerionensynchrotron SIS18, den Speicherring ESR, die Tumorthherapie sowie das Großexperiment HADES. Ebenfalls stand ein virtueller Besuch in der Testanlage für supraleitende FAIR-Magnete sowie auf der Aussichtsplattform auf die FAIR-Baustelle an. ■

## VIRTUELLE ALICE-MASTERCLASS AM SCHULDORF BERGSTRASSE



Blick in den ALICE-Detektor am Forschungszentrum CERN.

Wie entstand das Universum? Woraus bestehen wir? Was untersucht die „Weltmaschine“ am CERN? Solchen Fragen konnten Wissenschaftsinteressierte in der Woche der Teilchenwelt im November 2020 nachgehen. In ganz Deutschland luden die Standorte von Netzwerk Teilchenwelt zum Streifzug durch die Forschung auf dem Gebiet der Teilchen- und Astroteilchenphysik ein. Auch GSI und FAIR beteiligten sich an einer Online-Masterclass zur Auswertung von Messdaten des CERN-Experiments ALICE, die gemeinsam mit der AG MINT-Zentrum am Schuldorf Bergstraße durchgeführt wurde. Neben der Datenauswertung gehörten auch ein Austausch mit anderen Masterclass-Gruppen per Videokonferenz sowie eine virtuelle Führung durch den ALICE-Aufbau zum Programm. ■

## VORTAGSREIHE „WISSENSCHAFT FÜR ALLE“ VON GSI UND FAIR – VIRTUELL



Vorträge im ersten Halbjahr 2021 haben das Weltall zum Schwerpunkt, im Bild der Supernova-Überrest Cassiopeia A.

Als Teil der Corona-Prävention hatten GSI und FAIR entschieden, die Präsenzvorträge der Reihe „Wissenschaft für Alle“ bis auf Weiteres auszusetzen. Da die Vortragsveranstaltungen auf dem Campus auch weiterhin nicht durchgeführt werden können, tritt nun ein digitales Angebot an ihre Stelle. Die Referent\*innen werden ihre Vorträge als Videokonferenzen anbieten. Interessierte können sich mit einem internetfähigen Gerät wie beispielsweise einem Laptop, Mobiltelefon oder Tablet über einen Einwahllink zuschalten. ■

Weitere Informationen unter :  
[www.gsi.de/wfa](http://www.gsi.de/wfa)  
(QR-Code scannen)





## Professor Friedrich-Karl Thielemann

erhielt für seine Forschungen an der Schnittstelle zwischen Kernphysik und Astronomie die Karl-Schwarzschild-Medaille, den renommiertesten Preis in Deutschland auf dem Gebiet der Astronomie und Astrophysik. Seit 2018 ist Thielemann nach seiner Emeritierung Gastwissenschaftler bei GSI und setzt seine preisgekrönte Forschung zum Ursprung der Elemente im Universum in Zusammenarbeit mit

Sie haben die Karl-Schwarzschild-Medaille 2020 verliehen bekommen. Was bedeutet das für Sie?

Die Auszeichnung ist natürlich eine große Ehre für mich! Auf der Liste der vorherigen Preisträger stehen neun Nobelpreisträger. Ich komme ursprünglich aus der Kernphysik und habe an der TU Darmstadt promoviert. Im Laufe meiner Karriere habe ich mich zunehmend mit Astrophysik beschäftigt. Deshalb ist die Karl-Schwarzschild-Medaille der Astronomischen Gesellschaft jetzt eine besondere Freude.

Welche Entdeckung würden Sie als persönliches Highlight Ihrer Karriere bezeichnen?

Im Prinzip bin ich auf alle Erkenntnisse und Arbeiten stolz, aber gemessen an der Zitierhäufigkeit meiner Veröffentlichungen könnte man die Ergebnisse rund um die Erforschung der Typ-Ia-Supernovae herausgreifen. Gemeinsam mit japanischen Kollegen haben wir die Elemententstehung in diesen Supernovae vorausgesagt. Neben der Erkenntnis, dass in diesem Prozess zwei Drittel des Eisens entsteht, das heute in unserem Sonnensystem (und unserer Galaxie) zu finden ist, spielt dieser Typ von Supernovae auch eine

wichtige Rolle für die Hubble-Konstante und damit die Expansion des Universums. Das ist möglich, da die Leuchtkraft dieser Supernovae als allgemeingültiges Maß zur Entfernungsbestimmung in der Kosmologie benutzt werden kann.

Persönlich stolz bin ich außerdem darauf, dass mein Team und ich 1999 als Erste Vorhersagen über die Entstehung von schweren Elementen bei der Verschmelzung von Neutronensternen gemacht haben und wir zuletzt der Antwort näher gekommen sind, wann massereiche Sterne als Kernkollaps-Supernovae oder als schwarzes Loch enden. Grundsätzlich freue ich mich, dass wir allgemein den Kreis vom kernphysikalischen Input und dessen Einsatz in astrophysikalischen Simulationen bis hin zum Vergleich mit astronomischen Beobachtungen schließen konnten.

Sie haben gerade zusammen mit internationalen Kolleg\*innen einen Übersichtsartikel in *Reviews of Modern Physics* über den r-Prozess veröffentlicht, der eine entscheidende Rolle bei der Synthese der schwersten Elemente im Universum spielt. Was sehen Sie, wenn Sie in einer klaren Sommernacht den Sternenhimmel anschauen?

Tatsächlich wohne ich an einem Ort mit geringer Lichtverschmutzung, da freue ich mich, wenn ich den Streifen der Milchstraße an klaren Tagen sehen kann. Meine Frau, die regelmäßig Informationen zum Sternhimmel liest, sagt mir auch, welche Planeten gerade wo zu erkennen sind. Aber eigentlich bin ich keiner von denen, die sich schon als Kind für Sterne begeisterten. Ich bin im Ruhrgebiet aufgewachsen und man konnte oft nicht erkennen, ob der Himmel im Westen wegen des Sonnenuntergangs oder wegen eines Abstichs der Stahlindustrie rot war. Ich bin aus anderen Gründen zur Astrophysik gekommen. An der TU Darmstadt war in der theoretischen Kernphysik die Gruppe um E. Hilf und W. Hillebrandt besonders aktiv, hatte viele internationale Besucher und war geprägt durch ein ausgezeichnetes Gruppenklima. Das überzeugte mich und deshalb promovierte ich in dieser Gruppe. Mein astrophysikalisches Wissen habe ich mir dann kontinuierlich angeeignet, speziell als ich auch an der Harvard University Astrophysikvorlesungen gehalten habe. Somit frage ich mich heute hauptsächlich, wie, wo und wann die chemischen Elemente im Universum, in unserer Galaxie bzw. in Sternen und Sternexplosionen entstanden sind. Die letzte umfassende Untersuchung für



den Theoriekolleg\*innen fort. Diese Arbeiten sind von großer Bedeutung für das zukünftige Experimentierprogramm an FAIR und auch schon für das laufende FAIR-Phase-0-Programm.



die schweren Elemente ist der von Ihnen angesprochene Übersichtsartikel in Reviews of Modern Physics. Dabei sind übrigens neben mir noch zwei weitere GSI-Kollegen unter den acht Autorinnen und Autoren. Auch die beiden experimentellen Mitautoren haben enge Beziehungen zu GSI.

#### Welche Möglichkeiten bietet Ihnen GSI als Gastwissenschaftler?

Mit GSI bin ich schon sehr lang eng verbunden. Schon während meines Studiums habe ich Zeit auf dem Campus verbracht und für meine Diplomarbeit und die Anfänge der Doktorarbeit die GSI-Rechner benutzt. 2009 kam ich dann als Humboldt-Preisträger wieder für längere Zeit zurück nach Darmstadt und verbringe seither regelmäßig Zeit in meiner alten Studienstadt. GSI bietet mir vor allem ein sehr bereicherndes Umfeld. Meine Kolleginnen und Kollegen in der dortigen Theorieabteilung kenne ich gut und wir arbeiten eng zusammen. Karlheinz Langanke kenne ich schon aus meiner Studienzeit, als er noch in Münster war, und wir haben danach oft zusammengearbeitet. Ein besonderes Anliegen war uns dabei auch die Förderung von hochtalentierten jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Gabriel

Martinez-Pinedo und Almudena Arcones waren beide zuerst im Team von Karlheinz und dann in meiner Basler Arbeitsgruppe, bevor sie ihre Stellen an der GSI und an der TU Darmstadt erhielten. Andreas Bauswein und Stephan Typel decken für mich wichtige Arbeitsgebiete wie Neutronensternverschmelzungen und die Zustandsgleichung von Materie bei höchsten Dichten ab. Mit den experimentellen Kollegen gibt es ebenfalls regen Austausch. Auch wenn das aufgrund von Corona zurzeit eingeschränkt ist, bietet GSI die Möglichkeit eines engen und direkten Wissensaustauschs mit Kolleginnen und Kollegen, die auf den gleichen und verwandten Gebieten arbeiten. Das motiviert uns alle! Und natürlich sind auch die Experimente, die bei GSI, zum Beispiel an den Speicherringen, durchgeführt werden, wesentlich für meine Arbeit.

#### Welche Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die zukünftige Anlage FAIR für Sie?

Mit FAIR werden exotische Kerne erzeugt werden, die noch viel weiter von der Stabilität entfernt sind als bisher erreichbar. Und mit dem CBM-Experiment (Compressed Baryonic Matter) kann die Zustandsgleichung bei extrem hohen Dichten getestet werden. Das

bedeutet, sobald FAIR läuft, gibt es für uns außerordentlich viel neuen spannenden Input, der sicherlich zu einem tieferen Verständnis des Universums und der darin ablaufenden Prozesse führen wird.

#### Wie sehen Ihre Zukunftspläne aus?

Ich habe noch viele offene Forschungsfragen, zum Beispiel zu Kernkollaps-Supernovae. Akut drängt mich aber vor allem die Frage nach dem Entstehungsort der schwersten Elemente. Lange dachte man, dass sie vor allem in Supernovae entstünden. Jetzt wissen wir, dass die Verschmelzung von Neutronensternen eine große Rolle spielt. Aber auch damit lassen sich die Häufigkeitsverteilungen von Elementen im Universum nicht voll erklären. Da fehlt noch etwas, eine andere Quelle. Sehr alte Sterne mit einem noch geringen Anteil von Eisen und anderen schweren Elementen sind da besonders interessant. Sie stammen aus den frühesten Phasen der Galaxienentwicklung und sind wahrscheinlich nur durch einen einzigen „Elementproduktions-Event“ beeinflusst. Ihr „Pattern“, also ihre Häufigkeitsverteilung von Elementen, könnte uns daher einen Hinweis auf diese Quelle geben. Auch hier erwarte ich von FAIR entscheidende kernphysikalische Beiträge. ■

# Tumorbehandlung:

## Kombination von Kohlenstoffionen- und Immuntherapie

**Noch ist es ein Blick in die Zukunft: Die Kombination von Kohlenstoffionen- und Immuntherapie könnte zu einem effektiven Instrument im Kampf gegen Krebs werden.**

Vielversprechende Ergebnisse für den möglichen Nutzen dieser Behandlungskombination hat ein internationales Forschungsteam unter der Leitung der GSI-Abteilung Biophysik und unter Einbeziehung der Universität Parthenope in Neapel und des japanischen nationalen Instituts für Radiologische Wissenschaften NIRS-QST in Chiba in der renommierten Strahlentherapie-Zeitschrift *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* der American Society for Therapeutic Radiation Oncology (ASTRO) veröffentlicht.

Auch wenn es sich erst um präklinische Ergebnisse handelt und der Weg zur klinischen Anwendung noch weit ist, weisen die aktuellen Befunde in eine aussichtsreiche Richtung: Dabei konnte gezeigt werden, dass Kohlenstoffionen, wie sie in der bei GSI entwickelten Krebstherapie zum Einsatz kommen, sehr effektiv sein können, wenn sie in Kombination mit spezifischen Molekülen, sogenann-

ten Checkpoint-Blockern, eingesetzt werden, die das Immunsystem gegen die Tumormetastasen stimulieren.

Ziel der veröffentlichten Forschungsarbeit war es, die Wirksamkeit von konventioneller Strahlentherapie (hochenergetische Röntgenstrahlung) und Kohlenstoffionentherapie in Kombination mit einer Immuntherapie zu vergleichen. Das Immunsystem spielt eine wichtige Rolle bei der Vermeidung von Krebs. Im Normalfall erkennt es entartete Zellen und kann diese „aussortieren“. Doch zugleich besitzt es hochkomplexe Kontrollmechanismen, um Überreaktionen zu vermeiden. Gerade dies können Krebszellen manchmal für sich nutzen und die Immunüberwachung herunterregulieren. Sie verschwinden damit gleichsam vom Radar. Eine Immuntherapie kann das Immunsystem im Kampf gegen den Krebs wieder aktivieren. Sie wird inzwischen häufig bei fortgeschrittenen Malignomen und

metastasierenden Patient\*innen eingesetzt, ist aber leider nur bei einigen Tumorarten wirksam.

In den anderen Fällen kommt die konventionelle Strahlentherapie als zweite Komponente hinzu, die unter bestimmten Bedingungen solche Bremsen des Immunsystems wieder lösen kann. Die strahleninduzierte Auslösung einer Immunantwort und deren Verstärkung durch eine Immuntherapie kann vor allem bei der Kontrolle von Metastasen zu guten Ergebnissen – etwa zu einer Verlangsamung des Wachstums – führen. Aber nur ein Teil der Patient\*innen spricht auf diese Therapiekombination an.

Kann die Strahlentherapie mit Kohlenstoffionen, die bei GSI sehr erfolgreich entwickelt wurde und mittlerweile in Heidelberg und Marburg sowie in neun weiteren Zentren weltweit für bestimmte Tumorformen in der klinischen Anwendung ist, hier neue Perspektiven





Die Arbeit mit Zellkulturen ist ein wichtiger Bestandteil der Tumorforschung auf dem GSI/FAIR-Campus, im Foto Dr. Alexander Helm aus der Abteilung Biophysik.

eröffnen und dabei helfen, die Metastasierung besser zu kontrollieren? Möglicherweise ist diese Therapieform immunogener, könnte also eine noch stärkere Immunantwort auslösen als eine konventionelle Strahlentherapie und gemeinsam mit einer Immuntherapie dazu führen, dass mehr Patient\*innen auf diese Therapiekombination ansprechen. Aufgrund solcher Überlegungen hat das Team mit Hauptautor Dr. Alexander Helm (GSI) in dem aktuellen Experiment, das am Beschleuniger in Chiba, Japan, durchgeführt wurde, erstmals direkt Kohlenstoffionen mit konventioneller Röntgenstrahlung in einem Mausmodell verglichen.

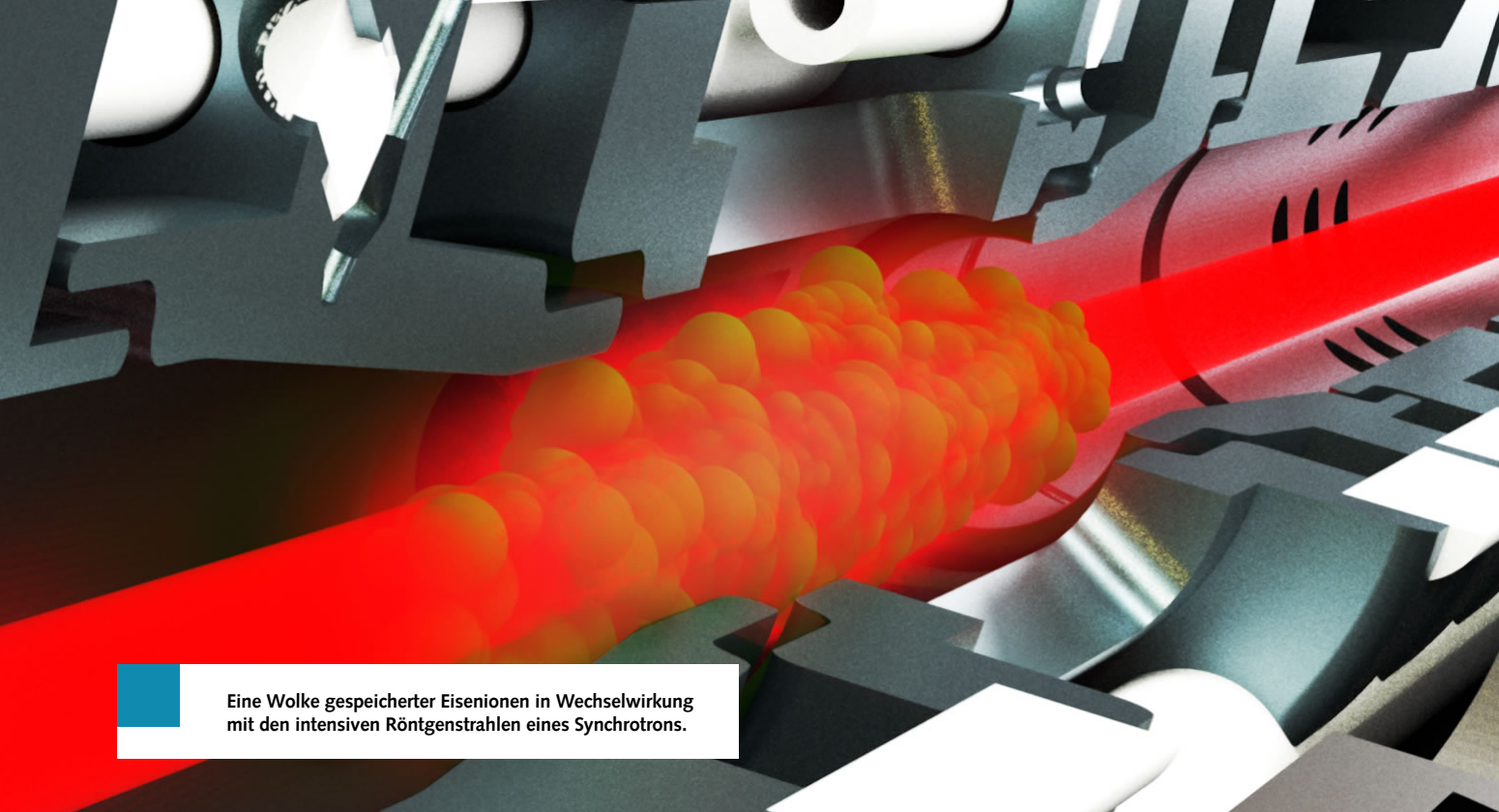
Bei der Kontrolle des Primärtumors (hier ein Osteosarkom, ein Knochentumor) lieferten Kohlenstoffionen und Röntgenstrahlen, jeweils mit einer Immuntherapie kombiniert, zunächst ähnliche Resultate. Betrachtet man jedoch das Wachstum der Metastasen, zeigte sich,

dass die Metastasierung deutlich reduziert wird, wenn der Primärtumor mit Kohlenstoffionen bestrahlt wird und dann eine Immuntherapie folgt. Die Forschenden konnten demonstrieren, dass Kohlenstoffionen plus Immuntherapie bei der Kontrolle von Lungenmetastasen wirksamer sind als beide Therapien für sich allein genommen und auch wirksamer als Röntgenstrahlen plus Immuntherapie.

Um dieses Potenzial besser ermessen zu können, muss noch viel weitere Forschung erfolgen und gemeinsam mit internationalen Partnern schließlich auch der Einsatz in klinischen Studien getestet werden. Der Leiter der GSI-Forschungsabteilung Biophysik, Professor Marco Durante, erläuterte die zukünftige Forschung: „Bei GSI/FAIR liegt der Fokus unserer Forschung darauf, die zellulären und molekularen Mechanismen, die eine starke Immunantwort auslösen, zu verstehen. Ziel ist es, die zentrale Fra-

ge zu beantworten: Wie soll bestrahlt werden, um die effizienteste, die beste Immunantwort zu bekommen im Kampf gegen den Krebs?“

Die Möglichkeiten, auf dem GSI/FAIR-Campus und am künftigen Beschleunigerzentrum FAIR modernste Molekularbiologie und hochenergetische Schwerionenphysik zu kombinieren, versprechen einzigartigen Erkenntnisgewinn. Der Wissenschaftliche Geschäftsführer von GSI und FAIR, Professor Paolo Giubellino betonte: „Die vorliegenden Ergebnisse zeigen das große Potenzial der Kohlenstoffionentherapie, das noch längst nicht ausgeschöpft ist. Gemeinsam mit unseren nationalen und internationalen Partnern wird auch in den nächsten Jahren an diesem hoch relevanten Thema weiter geforscht. Bereits die erste Stufe des FAIR-Experimentierprogramms, die FAIR-Phase 0, bietet dafür herausragende Möglichkeiten.“ ■



Eine Wolke gespeicherter Eisenionen in Wechselwirkung mit den intensiven Röntgenstrahlen eines Synchrotrons.

# Neue Messung verschärft altes Problem

**Seit Jahrzehnten rätseln Astrophysiker\*innen über zwei markante Röntgen-Emissionslinien von hochgeladenem Eisen: Ihr gemessenes Helligkeitsverhältnis stimmt nicht mit dem berechneten überein. Das beeinträchtigt die Bestimmung der Temperatur und Dichte von Plasmen.**

Neue sorgfältige, hochpräzise Messungen und Berechnungen mit modernsten Methoden schließen nun alle bisher vorgeschlagenen Erklärungen für diese Diskrepanz aus und verschärfen damit das Problem. Auch Forschende des GSI und des Helmholtz-Instituts Jena (HIJ), einer GSI-Außenstelle, sind an den Untersuchungen beteiligt. Die Ergebnisse wurden im Fachmagazin *Physical Review Letters* veröffentlicht.

Heiße astrophysikalische Plasmen erfüllen den intergalaktischen Raum und leuchten hell in Sternatmosphären, aktiven Galaxienkernen und Superno-

va-Überresten. Sie enthalten geladene Atome (Ionen), die Röntgenstrahlung emittieren; diese ist mit Satelliteninstrumenten beobachtbar. Astrophysiker\*innen verwenden ihre Spektrallinien, um daraus beispielsweise Plasmatemperaturen oder Elementhäufigkeiten abzuleiten. Zwei der hellsten Röntgenlinien stammen von Eisenatomen, die 16 ihrer 26 Elektronen verloren haben,  $\text{Fe}^{16+}$ -Ionen – in der Astrophysik auch als Fe XVII bezeichnet. Eisen ist im Universum recht häufig; es sorgt dafür, dass Sterne wie unsere Sonne ihren Wasserstoffvorrat nur langsam, in Milliarden von Jahren, verbrennen, indem es den Strahlungs-

transport von Energie aus dem glühenden Fusionskern zu der vergleichsweise nur mäßig heißen Sternoberfläche weitgehend unterdrückt.

Seit mehr als vierzig Jahren schlagen sich Röntgenastronom\*innen mit einem ernsthaften Problem bei den beiden wichtigen  $\text{Fe}^{16+}$ -Linien herum: Das gemessene Verhältnis ihrer Intensitäten weicht deutlich von theoretischen Vorhersagen ab. Das gilt auch für Labormessungen, aber bisher waren die experimentellen und theoretischen Unsicherheiten zu groß, um die Angelegenheit zu klären.



Ein internationales Team aus 32 Wissenschaftler\*innen unter Führung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik (MPIK) und des NASA Goddard Space Flight Center hat jetzt die Ergebnisse seiner erneuten massiven Anstrengungen diese Diskrepanz zu beseitigen veröffentlicht. Dazu haben die Forschenden sowohl die bisher höchst aufgelösten Messungen als auch mehrere quantentheoretische Rechnungen mit neuester Methodik durchgeführt.

Steffen Kühn, Doktorand am MPIK und verantwortlich für die Apparatur, beschreibt den Aufwand: „Um hochgeladene Eisenionen resonant anzuregen, stellen wir sie kontinuierlich in unserer kompakten mobilen Elektronenstrahl-Ionenfalle (EBIT) her und bestrahlen sie mit Röntgenlicht des Synchrotrons PETRA III am DESY. Die Resonanz mit den Linien finden wir, indem wir die Energie des Synchrotrons über den Bereich durchstimmen, in dem sie erscheinen sollten, und die Helligkeit des Fluoreszenzlichts messen. Am DESY arbeitende Kolleg\*innen von 19 Institutionen haben über ein Jahr lang geholfen, die enorme Datenmenge zu bewältigen, akribisch auszuwerten und die Ergebnisse zu überprüfen.“

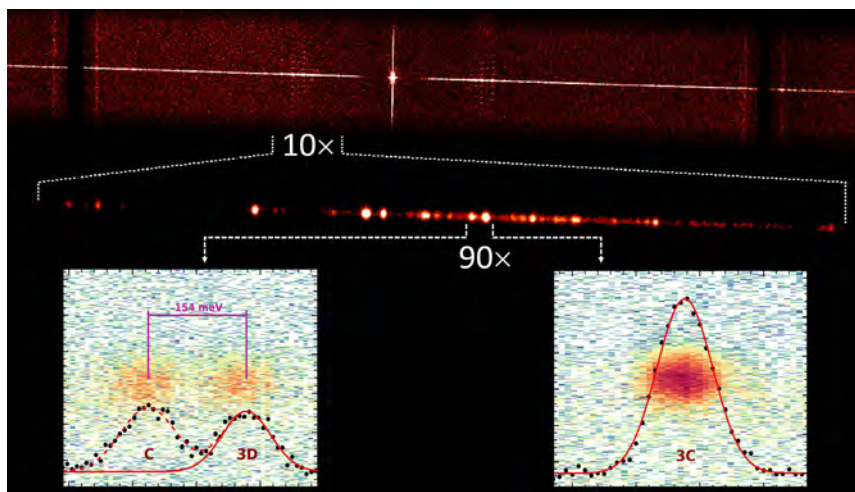
Damit alles widerspruchsfrei ist, haben die Forschenden drei verschiedene Messmethoden angewandt, um das Intensitätsverhältnis der beiden  $\text{Fe}^{16+}$ -Linien, genannt 3C und 3D, zu bestimmen. Zuerst ergaben Scans über den gesamten Bereich Linienpositionen, -breiten und -intensitäten. Zweitens haben die Experimentatoren die Energie der Röntgenphotonen auf maximale Helligkeit des Fluoreszenzlichts eingestellt und dabei den Röntgenstrahl zyklisch ab- und wieder angeschaltet, um den starken Untergrund loszuwerden. Drittens haben sie die Linien erneut gescannt, dabei aber gleichzeitig den An-Aus-Trick angewandt, um instrumentelle Effekte zu unterdrücken. „Auf diese Weise

gelang es uns, den derzeit genauesten Wert des Helligkeitsverhältnisses zu bestimmen, und zwar bei einer zehnmal so hohen spektralen Auflösung wie in früheren Arbeiten“, konstatiert Chintan Shah, Postdoc-Stipendiat bei der NASA. „Und die Eigenschaften des Strahls von PETRA III haben mögliche nichtlineare, vom Fluss der Synchrotronstrahlung abhängige Effekte vermieden, die frühere Messungen gestört haben könnten“, ergänzt Sven Bernitt, Forscher am Helmholtz-Institut Jena und einer der Projektleiter, der in der Gruppe des HIJ-Direktors und stellvertretenden Forschungsdirektors von GSI und FAIR, Thomas Stöhlker, arbeitet. Bemerkenswerterweise bestätigt das erhaltene Intensitätsverhältnis frühere astrophysikalische und Labormessungen bei deutlich verringerter Unsicherheit.

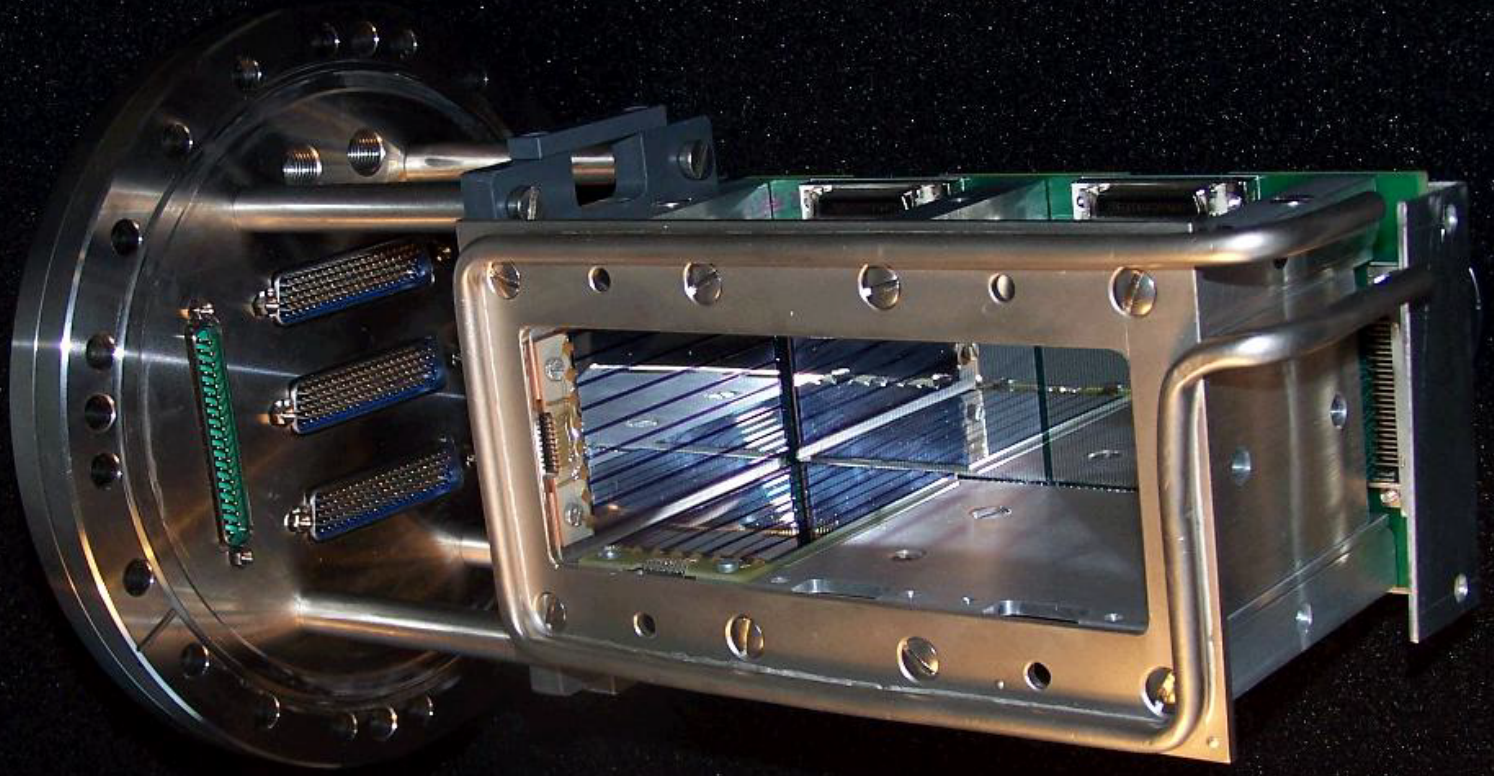
Theorieteams um Natalia Oreshkina am MPIK, aus Australien, den USA und Russland haben drei unabhängige, sehr umfangreiche, relativistische quantentheoretische Methoden eingesetzt und damit Cluster aus Hunderten von Prozessoren wochenlang heiß laufen lassen. Dieser Computer-Marathon ergab übereinstimmende Ergebnisse mit hoher numerischer Präzision. Während allerdings

die berechnete Energiedifferenz zwischen den Linien mit dem gemessenen Wert übereinstimmt, weicht das Intensitätsverhältnis klar vom experimentellen Ergebnis ab.

Die Ursache der Diskrepanz zwischen den experimentellen und theoretischen Intensitätsverhältnissen der 3C- und 3D-Linien von  $\text{Fe}^{16+}$  bleibt also weiterhin rätselhaft, da auch alle möglicherweise die Messungen störenden Effekte weitestgehend unterdrückt und die restlichen Unsicherheiten verstanden sind. Folglich sind aus Intensitäten von Röntgenlinien abgeleitete astrophysikalische Parameter zu einem gewissen Grad unsicher. Auch wenn es unbefriedigend ist, „kann man das neue, genaue Messresultat unmittelbar zur Korrektur astrophysikalischer Modelle verwenden“, empfiehlt Maurice Leutenegger, ebenfalls NASA-Forscher. „Kommende Weltraummissionen, beispielsweise das Athena-Röntgenteleskop der ESA, mit verbesserter Röntgeninstrumentierung werden bald einen unglaublichen Strom hochaufgelöster Daten zur Erde senden, und wir müssen uns darauf vorbereiten ihn zu verstehen, um aus diesen Milliarden-Dollar-Investitionen den größtmöglichen Ertrag zu ziehen.“ ■



Röntgenspektrum von Capella, aufgenommen mit dem LETG-Instrument (Low Energy Transmission Gratings) des Röntgensatelliten Chandra, und das jetzt mit der PolarX-EBIT im Labor gemessene hochaufgelöste Spektrum der Fe XVII Röntgenlinien zusammen mit Linie C von Fe XVI.



Fokalebenen-Detektor des TASCA-Separators, in den das Mendelevium-244 implantiert und in dem sein Zerfall registriert wurde.

# MENDELEVIVM-244 UND EINE RÄTSEL- HAFTE KURZLEBIGE SPALTAKTIVITÄT

**Die limitierenden Faktoren für die Existenz stabiler, superschwerer Elemente immer besser zu verstehen, ist seit Jahrzehnten ein Anliegen der Chemie und der Physik.**

Superschwere Elemente, wie die chemischen Elemente mit Ordnungszahlen größer als 103 genannt werden, kommen in der Natur nicht vor und werden künstlich mithilfe von Teilchenbeschleunigern hergestellt.

Innerhalb von Sekunden zerfallen sie. Neue Erkenntnisse zu den Spaltprozessen in solchen exotischen Kernen hat ein Team von Wissenschaftler\*innen des GSI, der Johannes

Gutenberg-Universität Mainz (JGU), des Helmholtz-Instituts Mainz (HIM) und der Universität Jyväskylä, Finnland, unter der Leitung von Dr. Jadamba Khuyagbaatar von GSI und HIM geliefert,



und dazu den bisher unbekannten Kern Mendelevium-244 hergestellt. Die Untersuchungen waren Teil der FAIR-Phase 0, der ersten Stufe des FAIR-Experimentierprogramms. Die Resultate sind in der Fachzeitschrift *Physical Review Letters* veröffentlicht worden.

rade Anzahl von Neutronen enthalten. Die verfügbaren experimentellen Daten deuten darauf hin, dass der Spontanspaltprozess in solchen Kernen stark behindert wird, noch mehr als in Kernen mit einer ungeraden Anzahl von nur einer Sorte von Bestandteilen.

vorausgesagt, dass dieser beta-verzögerte Spaltprozess für die schwersten Kerne sehr relevant und in der Tat eine der wichtigsten Zerfallsarten von beta-zerfallenden superschweren Kernen sein könnte.

## BETA-VERZÖGERTER SPALTPROZESS IST RELEVANTE ZERFALLSART

Schwere und superschwere Kerne sind zunehmend instabil gegenüber der Kernspaltung, bei der sich der Kern in zwei leichtere Fragmente spaltet. Dies liegt an der immer stärkeren Coulomb-Abstoßung zwischen der großen Anzahl positiv geladener Protonen in solchen Kernen und ist eine der Haupteinschränkungen für die Existenz stabiler superschwerer Kerne.

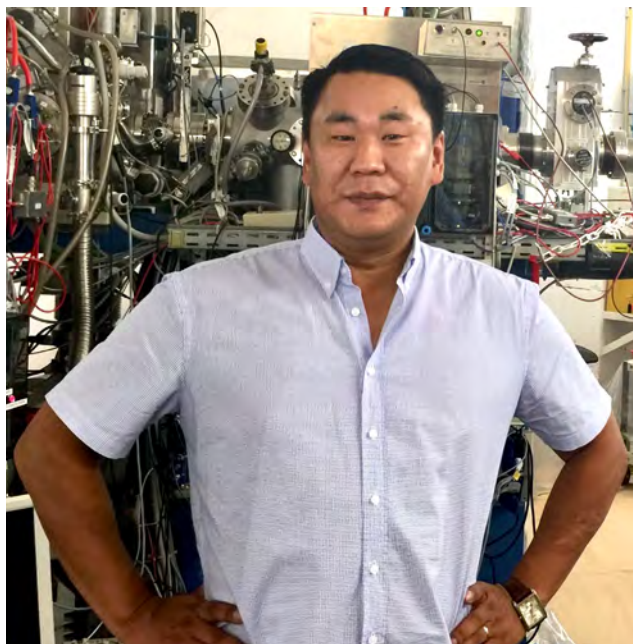
Die Kernspaltung wurde vor mehr als 80 Jahren entdeckt und wird bis heute intensiv erforscht. Die meisten experimentellen Daten über die Spontanspaltung gibt es für Kerne mit gerader Anzahl von Protonen und Neutronen – sogenannte „gerade-gerade Kerne“. Gerade-gerade Kerne bestehen ausschließlich aus Protonen- und Neutronenpaaren, und ihre Spalteigenschaften sind durch theoretische Modelle recht gut beschreibbar. Bei Kernen mit einer ungeraden Anzahl von entweder Neutronen oder Protonen wurde eine Behinderung des Spaltprozesses im Vergleich zu den Eigenschaften geradzahligter Kerne beobachtet und auf den Einfluss eines solchen einzelnen, ungepaarten Bestandteils im Kern zurückgeführt.

Weniger bekannt ist jedoch die Spaltbehinderung in „ungerade-ungeraden Kernen“, die sowohl eine ungerade Anzahl von Protonen als auch eine unge-

Wenn die Spaltwahrscheinlichkeit sehr stark reduziert ist, werden andere radioaktive Zerfallsarten wie Alpha- oder Betazerfall wahrscheinlich. Beim Betazerfall verwandelt sich ein Proton in ein Neutron oder umgekehrt, und folglich verwandeln sich ungerade-ungerade Kerne in gerade-gerade Kerne, die typischerweise eine hohe Spaltwahrscheinlichkeit haben. Dementsprechend ist im Fall, dass während der Produktion eines

ungerade-ungeraden Kerns eine Spaltaktivität beobachtet wird, oft schwierig zu erkennen, ob die Spaltung in dem ungerade-ungeraden Kern stattfand oder eher vom im Betazerfall bevölkerten gerade-geraden Tochterkern ausging, der dann eine beta-verzögerte Spaltung durchlaufen kann. Kürzlich hat Dr. Jadambaa Khuyagbaatar, Wissenschaftler in der SHE-Chemie-Gruppe am HIM und bei GSI,

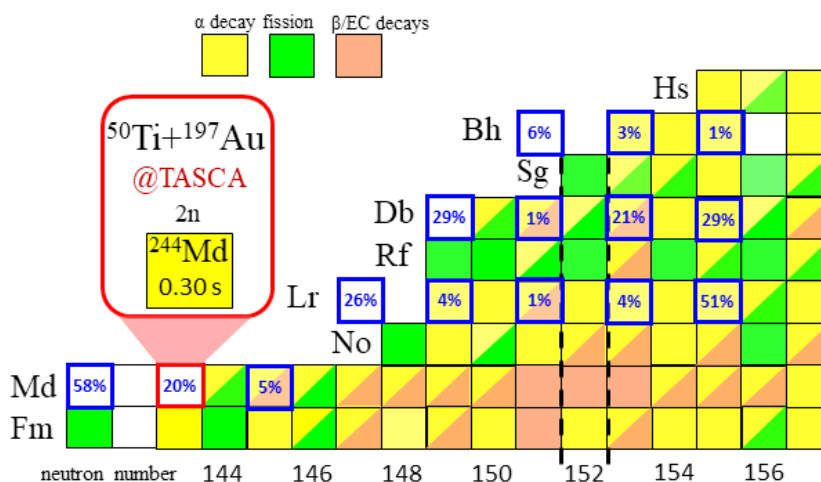
In superschweren Kernen, die experimentell äußerst schwierig herzustellen sind, ist der Betazerfall noch nicht schlüssig beobachtet worden. So wurden zum Beispiel im Falle des schwersten bei GSI in Darmstadt produzierten Elements Tenness (Element 117) in einem etwa einen Monat dauernden Experiment nur zwei Atome des ungeraden Kerns Tenness-294 beobachtet. Diese geringen Produktionsraten schränken den Nachweis und die detaillierte Untersuchung des verzögerten Spaltprozesses durch Betazerfall ein. Dennoch lassen sich neue experimentelle Daten, die Aufschluss über diesen Prozess geben, am besten in exotischen Kernen gewinnen, beispielsweise in solchen, die ein extrem unausgewogenes Verhältnis von Protonen zu Neutronen



Der Leiter des Experiments, Dr. Jadambaa Khuyagbaatar, in der Experimentierhalle X8 vor dem TASCA-Separator, der für das Mendelevium-244-Experiment verwendet wurde.

aufweisen. Dazu hat das Team von GSI, JGU, HIM und Universität Jyväskylä den bisher unbekannten Kern Mendelevium-244, einen ungerade-ungeraden Kern aus 101 Protonen und 143 Neutronen, hergestellt.

Die theoretische Schätzung geht davon aus, dass auf den Betazerfall dieses Kerns in etwa einem von fünf Fällen eine Kernspaltung folgen wird. Aufgrund der großen Energiefreisetzung des Spaltprozesses kann dieser mit hoher Empfindlichkeit nachgewiesen werden, während Betazerfälle schwieriger zu messen sind. Die Forschenden verwendeten einen intensiven Ionenstrahl aus Titan-50, der am UNILAC-Beschleuniger bei GSI zur Verfügung steht, und bestrahlten damit ein Goldtarget. Die Reaktionsprodukte von Titan- und Goldkernen wurden im „TransActinide Separator and Chemistry Apparatus“ TASCA getrennt, der Mendeleviumkerne in einen Siliziumdetektor leitete, der geeignet war, die Implantation der Kerne sowie ihren anschließenden Zerfall zu registrieren.



Ausschnitt aus der Nuklidkarte im Bereich der Mendelevium-Kerne. Jedes Kästchen stellt einen Atomkern dar, wobei die Anzahl der Protonen in vertikaler Richtung und die Anzahl der Neutronen in horizontaler Richtung zunimmt. Bekannte Kerne sind durch farbige Kästchen dargestellt, wobei die Farbe die Zerfallsart anzeigt: Alphazerfall (gelb), Betazerfall (rosa), Spontanspaltung (grün). Dick umrahmte Kästchen zeigen ungerade-ungerade Kerne an, bei denen in mindestens ein Prozent aller Betazerfälle das Auftreten der beta-verzögerten Spaltung vorhergesagt wurde

Alle sieben registrierten Atomkerne durchliefen einen Alphazerfall, das heißt,

2,8 Prozent, und ihre Beobachtung würde die Produktion von wesentlich mehr Mendelevium-244-Atomen als in diesem Entdeckungsexperiment erfordern.

## UNERWARTETE MERKMALE MOTIVIEREN ZU FOLGESTUDIEN

Ein erster Teil der Studien, der 2018 umgesetzt wurde, führte zur Beobachtung von sieben Atomen von Mendelevium-244. Im Jahr 2020 verwendeten die Forschenden eine niedrigere Titan-50-Strahlenergie, die nicht ausreichte, um Mendelevium-244 herzustellen. Tatsächlich fehlten in diesem Teil des Datensatzes Signale, wie sie Mendelevium-244 in der Studie von 2018 zugeordnet wurden, was die korrekte Zuordnung der Daten von 2018 und damit die Entdeckung des neuen Isotops bestätigte.

die Emission eines Helium-4-Kerns, der zu dem Tochterisotop Einsteinium-240 führte, das vor vier Jahren durch ein vorangegangenes Experiment an der Universität Jyväskylä entdeckt wurde. Der Betazerfall wurde nicht beobachtet, was die Festlegung einer Obergrenze für diesen Zerfallsmodus von 14 Prozent erlaubt. Wenn die zwanzigprozentige Spaltwahrscheinlichkeit aller Beta-Zerfallstöchter korrekt wäre, läge die Gesamtwahrscheinlichkeit für eine beta-verzögerte Spaltung bei höchstens

Zusätzlich zu dem alpha-zerfallenden Mendelevium-244 fanden die Forschenden Signale von kurzlebigen Spaltereignissen mit unerwarteten Merkmalen hinsichtlich ihrer Anzahl, Produktionswahrscheinlichkeit und Halbwertszeit. Ihr Ursprung kann derzeit nicht genau bestimmt werden und ist mit dem derzeitigen Wissen über die Produktion und den Zerfall von Isotopen in der Region von Mendelevium-244 auch nicht ohne Weiteres erklärbar. Dies motiviert zu Folgestudien, um detailliertere Daten zu erhalten, die dazu beitragen werden, den Spaltprozess in ungeraden Kernen weiter zu beleuchten. ■





Die Autor\*innen der Veröffentlichung über die neue Technik zur Verifizierung von Behandlungsplänen. – von links: Gianmarco Camazzola (GET\_INInvolved-Teilnehmer und ehemaliger Sommerstudent), Dr. Martina Fuss (Betreuerin aus der GSI-Biophysik), Dea Aulia Kartini (GET\_INInvolved-Teilnehmerin).

# Überprüfung von Behandlungsplänen in der Tumorthherapie

## GET\_INInvolved-Studentin und Sommerstudent beteiligt an Veröffentlichung

Bei der von GSI entwickelten Tumorthherapie mit Ionenstrahlen wie auch bei anderen Strahlentherapien werden vor der Behandlung von Personen sogenannte Behandlungspläne erstellt. Ihre Richtigkeit wird an Modellen überprüft, um einen korrekten und sicheren Ablauf zu garantieren. Die Untersuchung einer neuen Testmöglichkeit ist im wissenschaftlichen Fachjournal *Physics in Medicine and Biology* publiziert worden. Das Besondere: Dea Aulia Kartini und Gianmarco Camazzola, GET\_INInvolved-Teilnehmerin und Sommerstudent bei GSI und FAIR, stehen auf der Veröffentlichung.

Behandlungspläne für die Strahlentherapie werden mit spezieller Software berechnet. Zur Verifikation der Pläne nutzt man sogenannte Phantome. Diese können einfach aus Wasser bestehen oder sind präparierte Zellkulturen, die unter den gleichen Bedingungen bestrahlt werden, unter denen auch die Therapie am Menschen ablaufen soll. Im Anschluss überprüft man, wie viele der Zellen in den Kulturen an welchen Stellen überlebt haben. Daran lässt sich ablesen, ob der Behandlungsplan bestmöglich optimiert ist. In der Forschung sind sie insbesondere relevant, um neue Strategien oder Optimierungen für die

Bestrahlungsplanung zu testen, bevor sie in der klinischen Umgebung angewendet werden. Bisher waren dabei Phantome aus einlagigen Zellkulturen (Monolayer) im Einsatz. Die neue Technik ermöglicht es, dreidimensionale Zellvolumina zu bestrahlen.

„Anstatt die Zellen flächig wachsen zu lassen, bauen wir sie in dreidimensionale Behälter ein. Dazu nutzen wir Mikrotiterplatten, ein Standardzubehör aus dem Laborbedarf, mit 96 Wells – das sind die kleinen Vertiefungen, die auf den Platten sind“, erklärt Dea Aulia Kartini, die das Experiment leitet. „Sie werden erst mit einer Schicht aus einer Substanz namens Matrigel, dann mit einer Mischung aus Zellkultur und Matrigel, und dann wieder mit einer weiteren Schicht Matrigel gefüllt und verschlossen. So stellen wir sicher, dass sich im Inneren wirklich ein Volumen aus Zellen befindet.“ Kartini, die ursprünglich aus Indonesien stammt und in Thailand studiert, schreibt gerade an ihrer Doktorarbeit und ist bereits zum dritten Mal im Rahmen des GET\_INInvolved-Programms bei GSI und FAIR. Das Programm fördert den internationalen Austausch für Studierende und Forschende und unterstützt ihre Ausbildung und Karriere. „Unsere Untersuchungen zeigen, dass

die neuen Phantome einwandfrei funktionieren und in Zukunft die Verifikation der Behandlungspläne verbessern könnten“, so Kartini. Weitere Experimente mit 3D-Phantomen sind in naher Zukunft sowohl bei GSI als auch in Kooperation mit dem Marburger Ionenstrahl-Therapiezentrum MIT geplant.

Auf der Veröffentlichung steht auch der Name von Gianmarco Camazzola, der im Jahr 2019 im Rahmen des Summer Student Programs zu GSI und FAIR kam und hier acht Wochen lang einen Einblick in die Forschung der Abteilung Biophysik bekam. Das Summer Student Program richtet sich an internationale Studierende vor dem Abschluss und erlaubt ihnen, unabhängig von den Hochschulen Forschungsluft bei GSI und FAIR zu schnuppern. Er hat sich während seines Aufenthalts hauptsächlich mit der Software-Modellierung für die Experimente an den 3D-Phantomen beschäftigt. Aktuell ist auch er im Rahmen des GET\_INInvolved-Programms auf den GSI/FAIR-Campus zurückgekehrt. Die Veröffentlichung zeigt anschaulich den Erfolg und die Wichtigkeit der studentischen und wissenschaftlichen Austauschprogramme, die den Teilnehmenden früh einen Einblick und Einstieg in den Forschungsbetrieb ermöglichen. ■



## Dea Aulia Kartini

kommt ursprünglich aus Indonesien, studiert Physik in Thailand und arbeitet an ihrer Doktorarbeit. Im Rahmen des GET\_INVolved-Programms von FAIR und GSI ist sie bereits zum dritten Mal in Deutschland und forscht in der GSI-Abteilung Biophysik an der radiobiologischen Verifikation von Bestrahlungsplänen.

Wie kam es, dass Sie beide zu GSI und FAIR gekommen sind?

Dea Aulia Kartini: Nach ihrem Besuch bei GSI und FAIR in 2017 hat Ihre Königliche Hoheit Prinzessin Maha Chakri Sirindhorn von Thailand in Bangkok den Aufbau einer Anlage für Protonentherapie initiiert. In diesem Zusammenhang hat mein jetziger Professor nach einer Studentin gesucht und mir dann auch einen Aufenthalt hier in Deutschland vorgeschlagen. Ich kannte GSI vorher nicht, aber nun bin ich schon zum dritten Mal hier.

Gianmarco Camazzola: Während meines Bachelor-Studiums an der Universität Trient, als ich ein paar Veröffentlichungen las, ist mir die Vorreiterrolle von GSI in der Medizinphysik aufgefallen. Später, als ich für meinen Master an der Universität Heidelberg war, hat mir ein früherer Sommerstudent vom Summer Student Program bei GSI und FAIR erzählt. Daraufhin habe ich mich beworben und konnte in 2019 teilnehmen. Das war eine wirklich tolle Erfahrung. Deshalb habe ich mich nun für GET\_INVolved und auch für eine Promotionsstelle hier beworben und hoffe, wenn alles klappt, nächstes Jahr beginnen zu können.

An was forschen Sie genau?

DAK: Ich versuche, die Verifikation von Bestrahlungsplänen für die Tumorthherapie zu verbessern. Um einen Bestrahlungsplan biologisch zu prüfen, nutzt man sogenannte Phantome. Das sind Zellkulturen, die in gleicher Weise „behandelt“, also bestrahlt werden, wie man es auch bei der Person machen würde. Anschließend schaut man sich das Zellüberleben an, um die Richtigkeit der Planung zu beurteilen. Für Forschungsanwendungen, beispielsweise für die Weiterentwicklung von Software für die Behandlungsplanung, ist das natürlich ebenso relevant. Die bisherigen Phantome nutzen einzelne Zelllagen dafür, die nennt man auch Monolayer. Ich erforsche eine Methode mit dreidimensionalen Phantomen. Das könnte die Genauigkeit verbessern und eine Beurteilung des Zellüberlebens in der Tiefe und in der lateralen Verteilung erlauben. Die entsprechenden Experimente habe ich vorbereitet und mithilfe des Forschungsteams auch durchgeführt. Im Anschluss haben wir eine Veröffentlichung dazu verfasst, auf der auch Gianmarco als Mitautor steht.

GC: Einige meiner Aufgaben haben sich mit Deas Forschung überlappt,

aber ich habe mehr auf der Software-Seite gearbeitet: Berechnungen und der Datenanalyse. Die Teilchensorte und -energie, der Sauerstoffsensibilisierungsfaktor oder die relative biologische Wirksamkeit – all das muss im Bestrahlungsplanungssystem TRiP98, das hier verwendet wird, eingebaut sein. Und nach dem Experiment muss man schauen, ob die gewonnenen Daten mit der Vorhersage übereinstimmen. Ich habe Deas Dosimetrie-Ergebnisse mit den Daten der TRiP98-Berechnung verglichen. Das war zum Teil meine Aufgabe als Sommerstudent, aber glücklicherweise durfte ich damals auch ein wenig in die Laborarbeit hineinschnuppern und Dea über die Schulter schauen.

Ist es das erste Mal, dass eine GET\_INVolved-Studentin bzw. ein Sommerstudent auf einer wissenschaftlichen Publikation stehen?

DAK: Meines Wissens ist es bezüglich GET\_INVolved das erste Mal.

GC: Beim Summer Student Program kann ich es nicht mit Sicherheit sagen. Ich glaube aber, dass es zumindest noch nicht sehr oft vorgekommen ist.



## Gianmarco Camazzola

hat sein Heimatland Italien verlassen, um in Heidelberg seinen Master-Abschluss in Physik zu machen. Während des Summer Student Programs 2019 war er acht Wochen lang bei GSI und FAIR zu Gast. Über GET\_INvolved kehrte er nun zurück und plant, auch seine Promotionsarbeit hier durchzuführen.



**Inwiefern war und ist die Corona-Pandemie ein Problem für Ihre Arbeit?**

DAK: Für mich war es ein sehr großes Problem. Ich wollte schon im März kommen, hatte ein Visum beantragt, aber dann wurden wegen Corona alle Grenzen geschlossen. Dann wartete ich auf einen Anruf aus der Botschaft. Im Juli hieß es dann, dass ich kommen kann. Da habe ich innerhalb einer Woche alles zusammengepackt und war dann ganz schnell in Deutschland. Hier waren alle ganz überrascht, dass ich in so kurzer Zeit kommen konnte. Und jetzt ist es kompliziert für mich als indonesische Ausländerin, zurück nach Thailand zu gehen, obwohl ich ja eigentlich dort wohne. Sie haben sehr strenge Regeln für den Einlass, die nicht einfach zu erfüllen sind. Das ist alles gerade ziemlich schwierig.

GC: Bei mir war es nicht ganz so schwierig, da ich ja ohnehin schon in Heidelberg war. Allerdings musste ich von März bis August nach Italien zurück. Daher konnte ich nicht im Labor arbeiten, sondern nur von Zuhause am Computer. Das ging aber ganz gut.

**Wie gefällt es Ihnen denn eigentlich in Deutschland?**

DAK: Für mich ist es wie ein drittes Zuhause, nach Indonesien und Thailand. Ich bin sehr gerne hier. Die Arbeit und das Team hier sind toll, das Leben ist gut und ich treffe gerne neue Menschen. Einzig die Bürokratie ist ein bisschen anstrengend, es gibt so viele Regeln und Gesetze in der EU. Bei uns sind auch die Geschäfte eigentlich immer offen, auch an Sonn- und Feiertagen – im Gegensatz zu Deutschland, wo es feste Öffnungszeiten gibt und an manchen Tagen gar nichts geöffnet hat.

GC: Ich bin ja nun schon das dritte Jahr hier und das wirklich gerne. An das Essen musste ich mich ein bisschen anpassen. Man muss immer dazu sagen, wenn man keine Soße will! An die Bürokratie bin ich zum Glück schon gewöhnt, das ist in Italien nicht anders.

**Was machen Sie in Ihrer Freizeit?**

DAK: Ich koche und backe sehr gerne, höre Musik oder sehe mir koreanische Serien an.

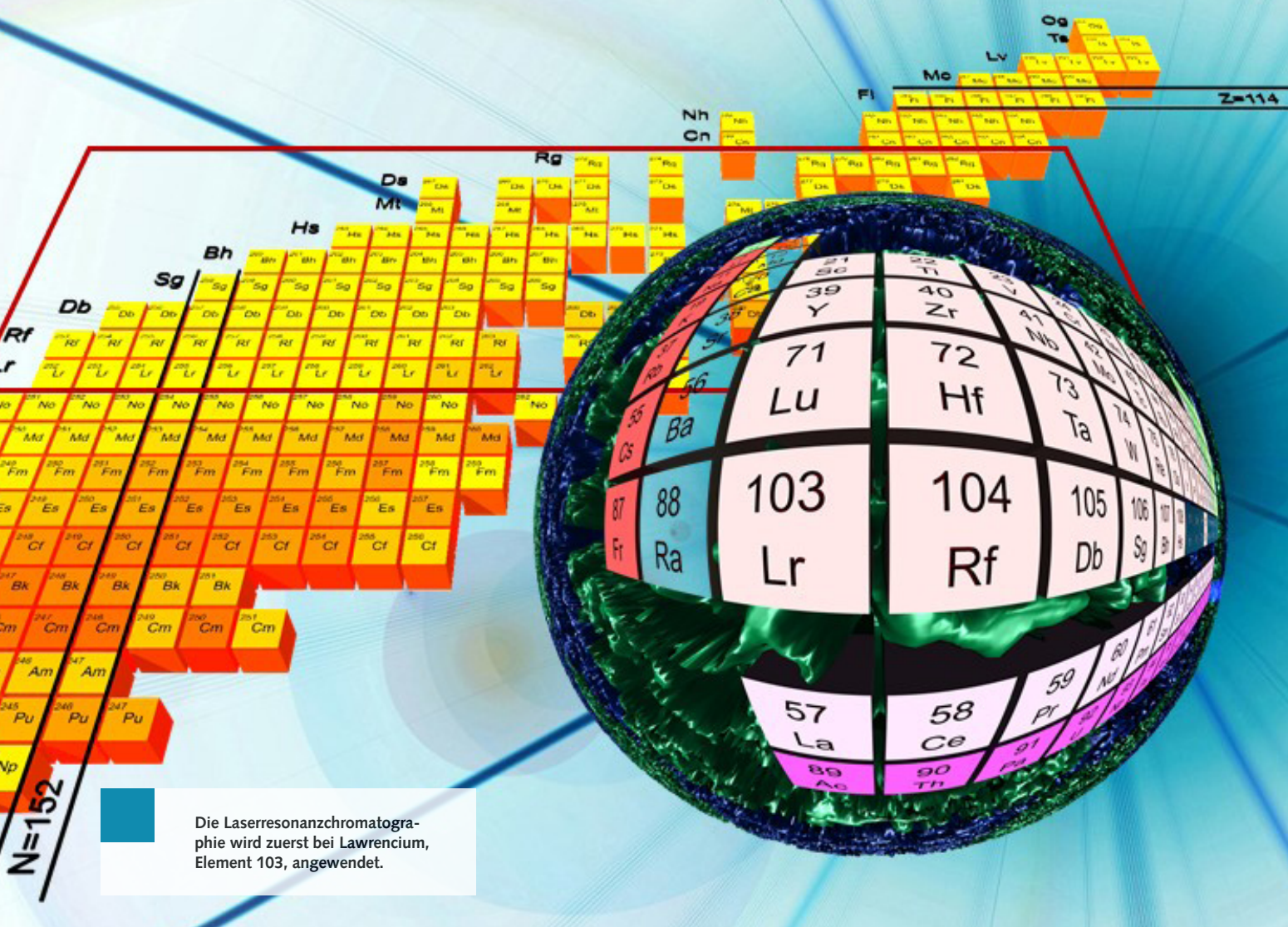
GC: In meiner Freizeit will ich möglichst keinen Stress haben. Da entspanne ich mich, lese oder schaue Videos an. Und mit meinen WG-Mitbewohnern etwas

zu Essen zuzubereiten, macht auch großen Spaß.

**Und was steht bei Ihrer Arbeit in der nächsten Zukunft an?**

DAK: Ich muss nun meine Promotionsarbeit schreiben. Und eine zweite Veröffentlichung ist auch geplant, die brauche ich für mein Stipendium. Ich bin ungefähr zu Hälfte fertig, der Rest wird jetzt gemacht. Dazu gehen auch die Experimente weiter, in Kürze sind wieder Zellbestrahlungen geplant. Wir werden noch andere Zelltypen benutzen, die empfindlicher gegenüber der Strahlung sind.

GC: Ich mache bald mit einer anderen Thematik weiter. Das Ziel ist nun, das Programm TRAX-CHEM, das von GSI zur Simulation der physikalischen und chemischen Phase von Strahlenwechselwirkungen entwickelt wurde, zu erweitern. Die geplante Erweiterung soll die Wechselwirkung der entstandenen Radikale in der biologischen Umgebung, zum Beispiel mit Proteinen, Lipiden, Enzymen usw. untersuchen. Momentan lese ich dazu erst einmal sehr viel. Ich hoffe, das dann in meiner Promotionsarbeit umzusetzen. ■



# Neue Technik zur Untersuchung superschwerer Elemente

## Verschmelzung physikalischer und chemischer Methoden für die optische Spektroskopie superschwerer Elemente

Superschwere Elemente sind faszinierende nukleare und atomare Quantensysteme, die die experimentelle Erprobung herausfordern, da sie in der Natur nicht vorkommen und, wenn sie künstlich hergestellt werden, innerhalb von Sekunden zerfallen. Um die Spitzenforschung in der Atomphysik auf diese Elemente auszuweiten, sind bahnbrechende Entwicklungen hin zu

schnellen Atomspektroskopietechniken mit extremer Empfindlichkeit erforderlich. Eine gemeinsame Anstrengung im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizont 2020 der Europäischen Union (EU) unter der Leitung von Dr. Mustapha Laatiaoui, Wissenschaftler an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) und am Helmholtz-Institut Mainz (HIM),

einer GSI-Außenstelle, mündete in die Entwicklung einer neuen Methode der optischen Spektroskopie: Die als Laserresonanzchromatographie (LRC) bezeichnete Technik soll solche Untersuchungen auch bei kleinsten Produktionsmengen ermöglichen. Der Vorschlag wurde in den Fachzeitschriften Physical Review Letters und Physical Review A veröffentlicht.



Superschwere Elemente – abgekürzt SHE für Superheavy Elements – sind ganz unten im Periodensystem der Elemente aufzufinden. Sie stellen einen fruchtbaren Boden dar, um ein Verständnis dafür zu entwickeln, wie solche exotischen Atome existieren und funktionieren können, wenn eine überwältigende Anzahl von Elektronen in den Atomhüllen und Protonen und Neutronen im Kern zusammenkommen. Einblicke in ihre elektronische Struktur können durch optische Spektroskopie-Experimente gewonnen werden, die elementspezifische Emissionsspektren enthüllen. Diese Spektren liefern wertvolle Informationen für moderne Atommodell-Berechnungen und wären etwa auch nützlich bei der Suche nach Spuren noch schwererer Elemente, die beispielsweise bei Neutronensternverschmelzungen entstehen können.

Obwohl SHEs schon vor Jahrzehnten entdeckt wurden, hinkt ihre Untersuchung mit optischer Spektroskopie der Synthese dieser Elemente weit hinterher. Der Grund ist, dass sie nur in kleinsten Mengen hergestellt werden und daher nicht mit traditionellen Methoden zu erforschen sind. Bislang endet die optische Spektroskopie bei Nobelium, Element 102 im Periodensystem. „Die derzeitigen Techniken sind an der Grenze des Mach-

baren angelangt“, erklärt Laatiaoui. „Ab dem nächst schwereren Element ändern sich die physikalisch-chemischen Eigenschaften schlagartig und erschweren die Bereitstellung von Proben in geeigneten atomaren Zuständen.“

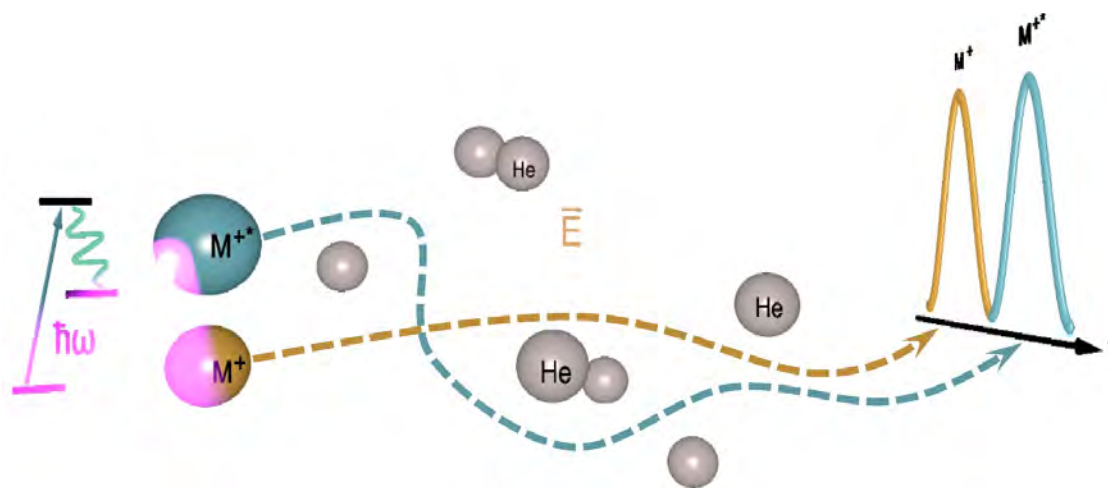
Der Physiker hat zusammen mit einem Forschungsteam daher den neuartigen Ansatz der LRC-Technik entwickelt. Sie kombiniert die Elementselektivität und spektrale Präzision der Laserspektroskopie mit der Ionenmobilitätsmassenspektrometrie und vereint die Vorteile einer hohen Empfindlichkeit mit der „Einfachheit“ der laserinduzierten Fluoreszenzspektroskopie. Die Kernidee besteht darin, die Produkte resonanter optischer Anregungen nicht anhand von Fluoreszenzlicht wie üblich, sondern anhand ihrer charakteristischen Driftzeit zu einem Teilchendetektor zu detektieren.

In ihrer theoretischen Arbeit konzentrierten sich die Autor\*innen auf einfach geladenes Lawrencium, Element 103, und auf sein leichteres chemisches Homolog. Aber das Konzept bietet einen beispiellosen Zugang zur Laserspektroskopie vieler anderer monoatomarer Ionen des Periodensystems, insbesondere der Übergangsmetalle einschließlich der hochtemperaturbeständigen Refraktär-

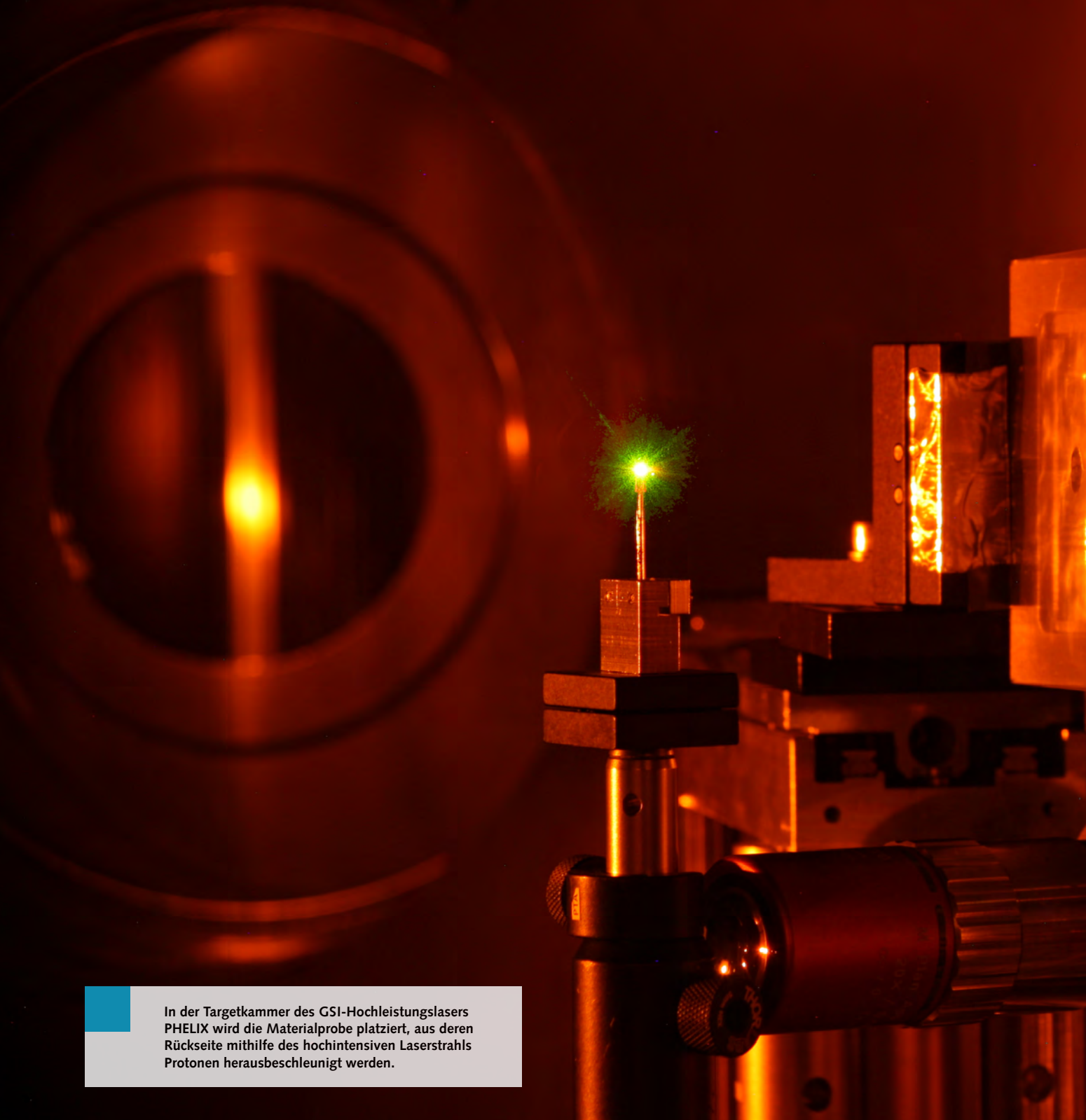
metalle und der Elemente jenseits des Lawrenciums. Andere Ionenspezies wie das dreifach geladene Thorium sollen ebenfalls in Reichweite der LRC-Methode liegen. Darüber hinaus ermöglicht die Methode die Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnisses und erleichtert damit die Ionenmobilitätsspektrometrie, die zustandsselektive Ionenchemie und andere Anwendungen.

Dr. Mustapha Laatiaoui kam im Februar 2018 an die JGU und das Helmholtz-Institut Mainz und erhielt für seine Forschungen zur Untersuchung der schwersten Elemente mittels Laserspektroskopie und Ionenmobilitätsspektrometrie Ende 2018 eine der höchstdotierten Fördermaßnahmen der EU, den ERC Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrats. In die aktuellen Veröffentlichungen gingen auch Arbeiten ein, die der Physiker bei vorherigen Tätigkeiten bei GSI in Darmstadt und an der Katholischen Universität Löwen in Belgien durchgeführt hatte.

Die Arbeit erfolgte in Kooperation mit Alexei A. Buchachenko vom Skolkovo Institute of Science and Technology und Institute of Problems of Chemical Physics, beide in Moskau, Russland, und Larry A. Viehland von der Chatham University, Pittsburgh, USA. ■



Laserresonanzchromatographie basiert auf optischer Anregung von Ionen und anschließender Detektion ihrer Ankunftszeit am Detektor.



In der Targetkammer des GSI-Hochleistungslasers PHELIX wird die Materialprobe platziert, aus deren Rückseite mithilfe des hochintensiven Laserstrahls Protonen herausbeschleunigt werden.

# Astrophysik verstehen – Mit laserbeschleunigten Protonen



## Riesige Mengen von Protonen auf kürzester Strecke und in Sekundenbruchteilen auf Geschwindigkeit bringen – das funktioniert mit der in den letzten Jahren stark weiterentwickelten Technik der Laserbeschleunigung.

Einem Forschungsteam von GSI und dem Helmholtz-Institut Jena, einer Außenstelle von GSI, ist es in Zusammenarbeit mit dem Lawrence Livermore National Laboratory, USA, gelungen, mit dem GSI-Hochleistungslaser PHELIX beschleunigte Protonen zur Spaltung anderer Kerne einzusetzen und diese zu analysieren. Die Ergebnisse wurden im Fachmagazin Scientific Reports von Nature Research veröffentlicht und könnten unter anderem neue Einblicke in astrophysikalische Prozesse ermöglichen.

Weniger als eine Picosekunde (eine Billionstel Sekunde) lang beleuchtet der PHELIX-Laser mit seinem hochintensiven Lichtpuls eine hauchdünne Goldfolie. Das reicht, um rund eine Billion nur leicht an das Gold gebundene Wasserstoffkerne (Protonen) von der Oberfläche der Rückseite der Folie hinauszuschleudern und sie auf hohe Energien zu beschleunigen. „So viele Protonen in einer so kurzen Zeitspanne lassen sich mit herkömmlichen Beschleunigungstechniken nicht erreichen“, erklärt Pascal Boller, der in der GSI-Forschungsabteilung Plasmaphysik/PHELIX im Rahmen seiner Abschlussarbeit an der Laserbeschleunigung forscht. „Mit dieser Technik lassen sich daher völlig neue Forschungsgebiete erschließen, auf die wir vorher keinen Zugriff hatten.“

### Räumliche Trennung von Erzeugung und Messung

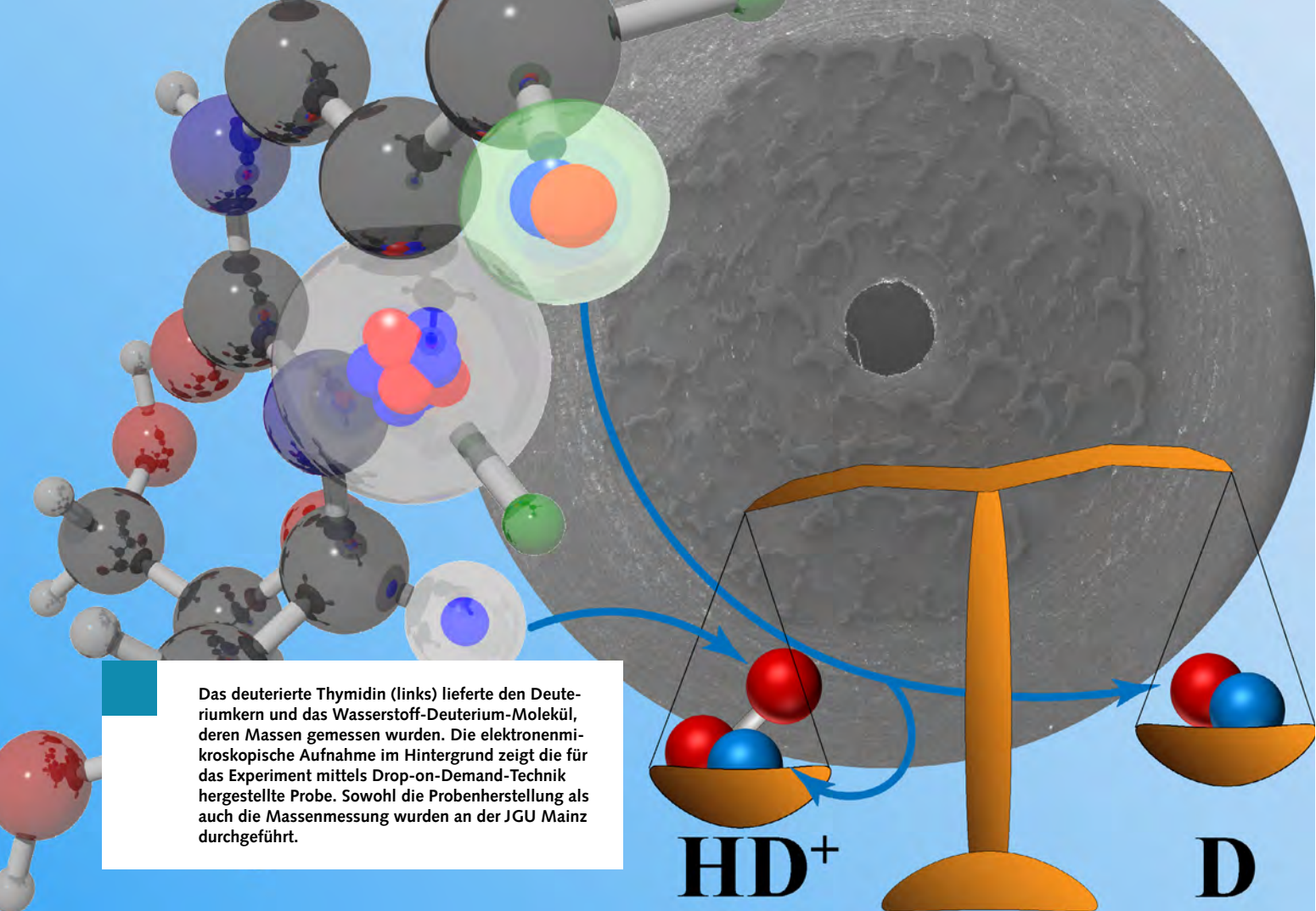
Dazu gehört unter anderem die Erzeugung von Spaltungsreaktionen, auch Fission genannt. Zu diesem Zweck lassen die Forschenden die frisch erzeugten schnellen Protonen auf Uran-Materialproben prasseln. Uran wurde aufgrund seines großen Reaktionsquerschnitts und der Verfügbarkeit von veröffentlichten Daten für Benchmarking-Zwecke als Fallstudienmaterial ausgewählt. Die Proben müssen dicht an der Protonenerzeugung stehen, um eine maximale Ausbeute an Reaktionen zu garantieren. Die durch den PHELIX-Laser erzeugten Protonen sind schnell genug um die Fission der Urankerne in kleinere Spaltprodukte herbeizuführen, die im Anschluss identifiziert und vermessen werden sollen. Allerdings hat der Laseraufprall unerwünschte Nebenwirkungen: Er erzeugt einen starken elektromagnetischen Puls und einen

Blitz aus Gammastrahlen, der die empfindlichen Messinstrumente für die Detektion stört.

An dieser Stelle kommt den Forschenden die Expertise einer anderen GSI-Forschungsgruppe zu Hilfe. Zur chemischen Untersuchung von superschweren Elementen ist schon länger ein Transportsystem im Einsatz, das die gewünschten Teilchen über längere Strecken vom Reaktionsort zum Detektor bringen kann. Die Reaktionskammer wird von einem Gas durchflossen, das – im Fall der Fissions-Experimente – die Spaltprodukte mitnimmt und in nur wenigen Sekunden über kleine Plastikröhrchen zu den nun mehrere Meter entfernten Messapparaturen transportiert. So kann Erzeugung und Messung räumlich getrennt und die Störung verhindert werden.

Erstmals gelang es in den Experimenten, die beiden Techniken zu verbinden und dabei verschiedene Caesium-, Xenon- und Iod-Isotope durch die Uran-Fission zu erzeugen, zuverlässig über die Aussendung von Gammastrahlung zu identifizieren und ihre kurzen Lebensdauern zu beobachten. Damit steht nun eine Methodik zur Verfügung, um Spaltungsreaktionen in hochdichter Materie im Plasmazustand zu untersuchen. Vergleichbare Gegebenheiten finden sich beispielsweise im Weltall im Inneren von Sternen, Sternexplosionen oder Neutronensternverschmelzungen. „Die Reaktionsvorgänge von Kernen zu verstehen, die im Plasma miteinander interagieren, kann uns Einblicke in die Entstehung von Atomkernen, die sogenannte Nukleosynthese, in unserem Universum ermöglichen. Nukleosynthese-Vorgänge wie s-Prozess oder r-Prozess spielen sich in genau solchen Medien ab“, erläutert Boller. „Welche Rolle Fissionsreaktionen in diesen Prozessen spielen, ist noch nicht im Detail erforscht. Hier können die laserbeschleunigten Protonen neue Informationen liefern.“

Weitere Messungen mit der Methodik sind sowohl für zukünftige Experimentierzeiten des PHELIX-Lasers bei GSI als auch an anderen Forschungszentren der Welt geplant. Die Untersuchung hoch verdichteter Materie mit Ionen- und Laserstrahlen wird auch eines der Themen sein, die an der zukünftigen Forschungsanlage FAIR weiterverfolgt werden. FAIR wird momentan in internationaler Kooperation bei GSI errichtet. Unter dem Motto „Das Universum im Labor“ sollen auch dort Zustände, wie sie in astrophysikalischen Umgebungen auftreten, auf der Erde nachvollzogen und so das Wissen über unseren Kosmos erweitert werden. ■



# Masse des Deuterons korrigiert

**Hochpräzise Messungen der Masse des Deuterons, des Kerns von schwerem Wasserstoff, bringen neue Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit fundamentaler Größen der Atom- und Kernphysik.**

Das berichtet eine Kollaboration unter der Leitung des MPI für Kernphysik zusammen mit der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, dem GSI sowie dem Helmholtz-Instituts Mainz in der Fachzeitschrift Nature. Damit stehen nun direkt auf den atomaren Massenstandard bezogene Daten für Wasserstoff H, Deuterium D und das Molekül HD, das die Forschenden ebenfalls neu gewogen haben, zur Verfügung.

Die Massen der Atomkerne wie auch die des Elektrons beeinflussen zahl-

reiche Eigenschaften von Atomen und Molekülen, beispielsweise ihre Spektren – also welche Lichtfarben sie absorbieren oder emittieren. Physiker\*innen wünschen sich möglichst genaue Werte dieser Massen, denn nur mit deren Kenntnis ist es möglich, die Spektren mit Hilfe der Atomphysik präzise zu berechnen – um sie dann mit direkten Messungen zu vergleichen und so beispielsweise Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der grundlegenden physikalischen Theorien zu ermöglichen.

Von besonderem Interesse sind in diesem Kontext Wasserstoff und seine Isotope, denn deren einfache Elektronenhülle mit nur einem einzigen Elektron lässt extrem präzise Berechnungen und damit sehr sensitive Tests grundlegender physikalischer Theorien zu. Darüber hinaus lässt sich aus der Masse des Deuterons auch die Masse des Neutrons – des zweiten Bestandteils der Atomkerne neben dem Proton – ableiten. Nachdem sie in den letzten Jahren schon das Elektron und das Proton, den Kern des gewöhnlichen Wasserstoffatoms, präzise



gewogen hatten, haben Forschende um Klaus Blaum und Sven Sturm vom MPI für Kernphysik jetzt auch das Deuteron, den Kern von schwerem Wasserstoff, bestehend aus einem Proton und einem Neutron, sowie das  $\text{HD}^+$ -Molekülion auf die „Präzisionswaage“ gelegt. Da Deuterium selten ist und normalerweise leicht durch den viel häufigeren normalen Wasserstoff ersetzt wird, hat die Arbeitsgruppe von Christoph Düllmann in Mainz eine spezielle Deuterium-Probe passgenau für die verwendete Apparatur hergestellt.

Grad über dem absoluten Nullpunkt (minus 269 °C) in einem supraleitenden Magneten. Darin haben wir je ein Deuteron ( $\text{D}^+$ ) und ein Kohlenstoffion ( $^{12}\text{C}^{6+}$ ) präpariert, abwechselnd eines davon aus seiner Speicherfalle in die dazwischen eingebaute Präzisionsfalle transferiert und seine Bewegung genauestens vermessen“, erklärt Sascha Rau, der die Messungen im Rahmen seiner Dissertation durchgeführt hat, das Messprinzip. „Aus dem so erhaltenen Verhältnis der Frequenzen beider Ionen ergibt sich direkt die Masse des

Das Resultat stimmt hervorragend mit unserem direkt gemessenen Wert überein. Außerdem passt das aus unseren Daten abgeleitete Massenverhältnis von Deuteron zu Proton sehr gut zu dem von einer anderen Gruppe direkt gemessenen Wert“, freut sich Sven Sturm. Diese Konsistenz der Daten untermauert die verwendete Messmethodik und legt es nahe, dass die Referenzwerte korrigiert werden sollten. Außerdem verringern die neuen Daten die bisher bei den Massen leichter Kerne bestehenden Diskrepanzen erheblich. Um diese jedoch vollständig aufzuklären, sind weitere hochpräzise Massenmessungen – direkt in atomaren Einheiten – an überschwerem Wasserstoff (Tritium) und leichtem Helium erforderlich. ■

## Mit ausgefeilter Messtechnik zu höchster Präzision

Als Präzisionswaagen für Ionen haben sich Penningfallen bewährt. In solch einer Falle kann man einzelne geladene Teilchen mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern für lange Zeit einsperren. Das gefangene Teilchen führt in der Falle eine charakteristische Bewegung aus, die durch eine Frequenz beschrieben wird. Diese Frequenz hängt von der Masse des gefangenen Teilchens ab – schwerere Teilchen schwingen langsamer als leichtere. Wenn man nun zwei unterschiedliche, einzelne Ionen nacheinander in der gleichen Falle vermisst, kann man so das Verhältnis der Massen exakt ermitteln – ähnlich wie auf einer klassischen mechanischen Balkenwaage.

Der Massenstandard für Atome ist das Kohlenstoffisotop  $^{12}\text{C}$ , das per Definition zwölf atomare Masseneinheiten schwer ist. „Unsere LIONTRAP genannte Penningfallen-Apparatur befindet sich in nahezu perfektem Vakuum bei einer Temperatur von etwa vier

Deuterons in atomaren Einheiten.“ Das Kohlenstoffion agiert also als Referenzgewicht auf der „Balkenwaage“.

Bei der Auswertung der Messdaten mussten die Forschenden eine Vielzahl an unvermeidlichen systematischen Effekten sehr sorgfältig berücksichtigen. Als Ergebnis erhielten sie die Masse des Deuterons zu  $2,013553212535(17)$  atomaren Einheiten, wobei die Zahl in Klammern die Unsicherheit der letzten Stellen angibt. Die mit derselben Methode bestimmte Masse des Wasserstoff-Molekülions  $\text{HD}^+$  beträgt  $3,021378241561(61)$  atomare Einheiten.

Der neue Wert für die Masse des Deuterons ist der genaueste jemals gemessene, ist aber signifikant kleiner als der tabellierte Referenzwert. „Um unser Ergebnis zu validieren, haben wir damit und mit den früher von uns gemessenen Massen des Protons und des Elektrons sowie der bekannten Bindungsenergie die Masse von  $\text{HD}^+$  berechnet.



LIONTRAP-Penningfallensystem

# Angeregter Kernzustand

## Messungen in Thorium-229 sind ein Schritt hin zur direkten Laseranregung eines Atomkerns.

Auf dem Atomkern basierende Uhren könnten unsere Zeitmessung noch genauer machen als heutige Atomuhren. Der Schlüssel dazu liegt in Thorium-229, einem Atomkern, dessen niedrigster angeregter Zustand eine sehr geringe Energie aufweist. Einem Forschungsteam aus dem Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg, der

im neuen „Tochterkern“ normalerweise intern gespeicherte Energie, die in Form von Gammastrahlen freigesetzt wird. Die Energien dieser Strahlen sind – wie Fingerabdrücke – für jeden Kerntyp charakteristisch. Durch die Charakterisierung dieser Gammastrahlen-Fingerabdrücke lernen die Forschenden viel über Atomkerne.

von den Detektoren beobachtet werden konnte. In den folgenden Jahrzehnten wurden viele Versuche unternommen, diese niederenergetische Gammastrahlung zu beobachten, allerdings ohne Erfolg, wodurch sie auf immer niedrigere Energien beschränkt wurde.

Heute wissen wir, dass der niedrigste angeregte Energiezustand des Thorium-229-Kerns, ein sogenannter Isomerenzustand, bei der niedrigsten bekannten Energie aller Atomkerne überhaupt liegt, bei einer Energie, die um Größenordnungen niedriger ist als übliche Anregungsenergien. Folglich ist die Energie der zugehörigen Gammastrahlung so niedrig, dass sie im ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums und nicht im typischen Gammastrahlungsbereich liegt. Dies führt zu der einzigartigen Situation, dass der umgekehrte Prozess der Abregung durch die Emission dieser „ultravioletten Gammastrahlung“, nämlich die Anregung des unteren Zustands durch Einstrahlen von ultraviolettem Licht auf den Kern möglich ist. Es ist das einzige Kernsystem, das mit „Table-Top“-Laserlicht angeregt werden kann. Damit eröffnen sich spannende Perspektiven, unter anderem die Konstruktion einer „nuklearen“ Uhr, bei der die Zeit durch Schwingungen des Kerns zwischen diesen beiden Zustän-

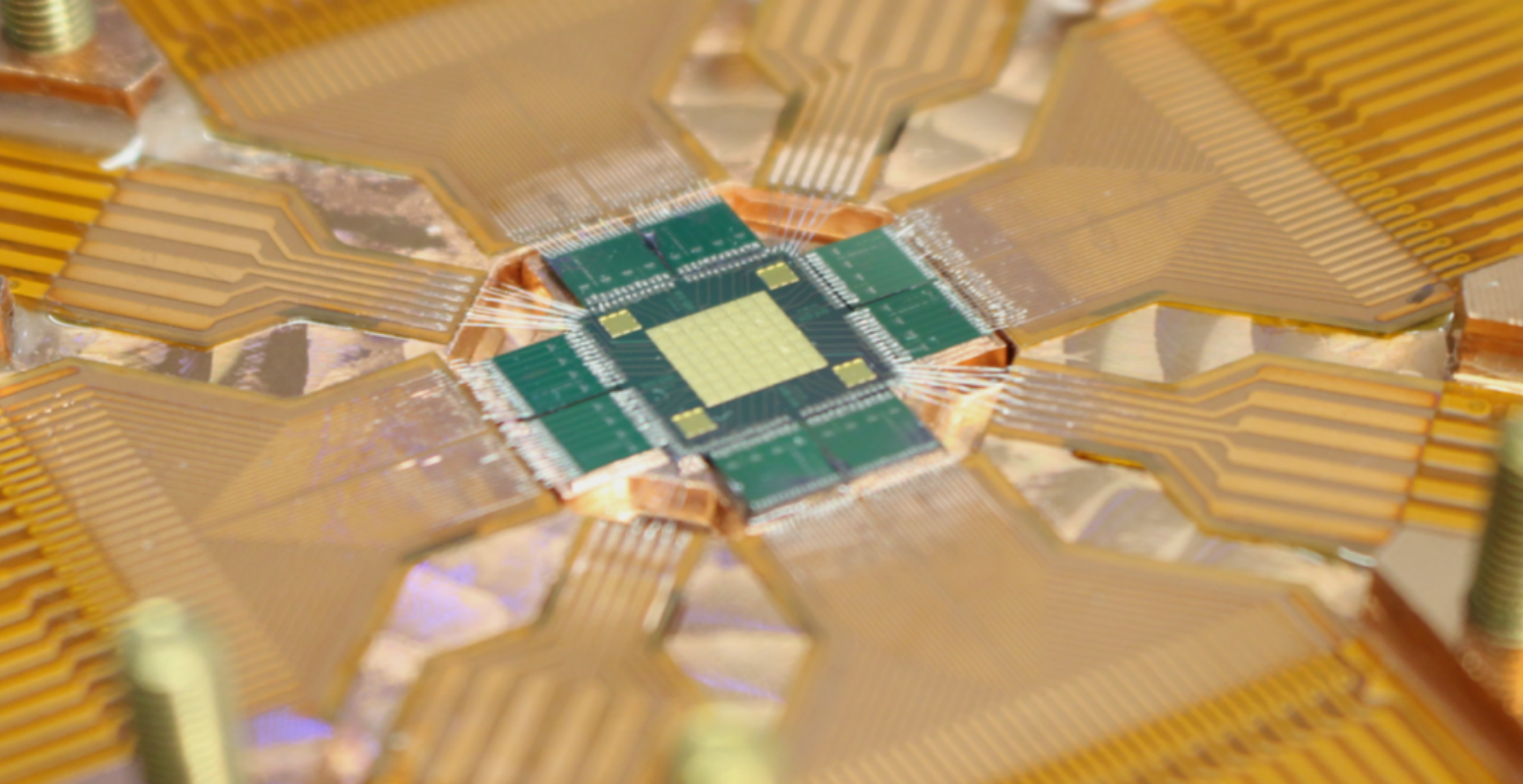
## Perspektiven für die Konstruktion einer Kernuhr verbessert

Technischen Universität Wien, der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU), dem Helmholtz-Institut Mainz (HIM) und von GSI ist es nun gelungen, diese niedrige Energie zu messen. Mit einem extrem genauen Detektor konnte der winzige Temperaturanstieg nachgewiesen werden, der durch die bei der Abregung des Atomkerns freigesetzte Energie entsteht. Damit kommt man der Realisierung einer Kernuhr einen großen Schritt näher.

Beim radioaktiven Zerfall ordnen sich Atomkerne spontan neu an, emittieren einen Teil ihrer Bestandteile und verwandeln sich in einen Kern eines anderen Atoms. Bei diesem Prozess verbleibt

Bereits 1976 untersuchten L. A. Kroger und C. W. Reich den Zerfall von Uran-233, einem künstlichen Urankern, der unter Aussendung eines Alphateilchens zu Thorium-229 zerfällt; unmittelbar darauf folgt die Emission charakteristischer Gammastrahlen, die in unterschiedlichen und im Allgemeinen gut verstandenen Mustern auftreten. Kroger und Reich registrierten jedoch eine Anomalie: Eine Energie im Spektrum der Gammastrahlung, die von allen Nuklearteorien vorhergesagt wurde, fehlte in den gemessenen Signalen. Die beste Erklärung war, dass die im niedrigsten angeregten Zustand von Thorium-229 gespeicherte innere Energie zu gering war, als dass die entsprechende Strahlung





Mikrokalorimeter-Chip vergleichbar zum im Experiment verwendeten. Jedes einzelne Mikrokalorimeter (mitte) ist 0,5 x 0,5 Quadratmillimeter gross.

den gemessen wird. Die Präzision einer solchen Uhr wird voraussichtlich besser sein als die der derzeit besten Atomuhren, die auf Schwingungen zwischen Zuständen in der Elektronenhülle beruhen, die anfälliger für externe Störungen ist als der 10 000-mal kleinere Kern.

Das Hauptproblem besteht jedoch darin, dass die Energie des isomeren Zustands noch nicht genau genug bekannt ist, um zu wissen, welches ultraviolette Licht benötigt wird, um die Schwingung zu stimulieren. Das Konsortium von Forschenden aus Heidelberg, Wien, Mainz und Darmstadt hat nun die Gamma-spektroskopie-Messung von Kroger und Reich wiederholt, allerdings unter Verwendung eines hochmodernen Gamma-spektrometers, das explizit für die Registrierung von Strahlen solch niedriger Energie ausgelegt ist.

magnetisches Mikrokalorimeter, genannt „maXs30“. Dieser auf minus 273 °C gekühlte Detektor misst den winzigen Temperaturanstieg, der bei der Absorption einer niederenergetischen Gammastrahlung auftritt. Der Temperaturanstieg führt zu einer Änderung der magnetischen Eigenschaften des Detektors, die dann mithilfe von SQUID-Magnetometern, ähnlich denen, die üblicherweise in der Magnetresonanztomographie verwendet werden, in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Der maXs30-Detektor hat eine bisher unerreichte Energieauflösung und Verstärkungslinearität; dennoch brauchte es etwa zwölf Wochen kontinuierlicher Messungen, um das Gammastrahlenspektrum mit ausreichender Genauigkeit zu erhalten.

Um diese anspruchsvolle Messung zu ermöglichen, stellte das Team von Pro-

die im Laufe der Zeit vor der Verwendung der Probe entstanden waren. Außerdem entfernten sie unerwünschte Radioisotope, deren Zerfall zu einem unerwünschten Untergrund in den Messdaten führt. Dann entwarfen sie eine Quellengeometrie und einen Probenbehälter, die zu minimalen Störungen der schwachen Signale auf dem Weg von der Probe zu den maXs30-Kalorimetern führten. Diese Schritte waren für den Erfolg der Messung erforderlich, da nur einer von 10 000 Abregungsvorgängen ein Signal erzeugt, das für die Bestimmung der Isomerenenergie nutzbar ist. Die Messung ergab das bisher präziseste Gammastrahlenspektrum des Zerfalls von Uran-233 zu Thorium-229. Das Team von Professor Thorsten Schumm an der Technischen Universität Wien hat zusammen mit dem Heidelberger Team vier verschiedene Schemata angewandt, um aus diesen Daten die Energie des Isomerenzustands abzuleiten. Das präziseste ergab einen Wert von 8,10(17) Elektronenvolt, was Licht einer Wellenlänge von 153,1(32) Nanometern entspricht, wobei die Zahl in Klammern die Unsicherheit der letzten Ziffern angibt. Diese Messung ebnet den Weg für eine direkte Laseranregung des Thorium-229-Isomers. ■

## Kühle Studien ergeben höchste Präzision

Dazu entwickelte das Forschungsteam um Professor Christian Enss und Dr. Andreas Fleischmann am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg ein

fessor Christoph Düllmann in Mainz und Darmstadt eine spezielle Probe von Uran-233 her. Zunächst entfernten sie chemisch alle Zerfalls-Tochterprodukte,

# CERN-Experiment ALICE –

## Hochpräzise Studien der starken Wechselwirkung

Es ist der Beginn eines neuen Kapitels der Hadronenphysik: In einem in der Fachzeitschrift *Nature* veröffentlichten Paper beschreibt die ALICE-Kollaboration am Europäischen Kernforschungszentrum CERN eine Technik, die eine Tür zu vielen neuen, hochpräzisen Studien am Large Hadron Collider (LHC) über die Dynamik der starken Kraft zwischen Hadronen öffnet. Von Anfang an hat auch GSI eine führende Rolle bei Bau und wissenschaftlichem Programm von ALICE, einem der vier Großexperimente am CERN, gespielt.

Mit der Veröffentlichung „Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC“ legt die ALICE Kollaboration interessante neue Erkenntnisse rund um das Thema ‚Hadronen und ihre Wechselwirkungen‘ vor. Hadronen sind aus zwei oder drei Quarks zusammengesetzte Teilchen, die durch die starke Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen gebunden werden. Diese Wechselwirkung besteht auch zwischen Hadronen und bindet Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Inneren von Atomkernen aneinander. Eine der größten Herausforderungen in der heutigen Kernphysik ist das Verständnis der starken Wechselwirkung zwischen Hadronen mit unterschiedlichem Quarkgehalt, ausgehend von der starken Wechselwirkung zwischen den Hadronen-Konstituenten Quarks und Gluonen.

### Neues Kapitel in der Hadronenphysik

Lattice-QCD(Quantenchromodynamik)-Berechnungen können verwendet werden, um die Wechselwirkung direkt aus den grundlegenden physikalischen Gesetzen heraus zu bestimmen. Jedoch liefern diese Berechnungen zuverlässige Vorhersagen nur für Hadronen, die schwere Quarks enthalten, wie beispielsweise Hyperonen, die ein oder mehrere Strange-Quarks besitzen. In der Vergangenheit wurden diese Wechselwirkungen durch Kollisionen von Hadronen in Streuexperimenten untersucht, aber diese Experimente sind schwierig mit instabilen, also schnell zerfallenden Hadronen wie Hyperonen durchzuführen. Genau diese Problematik hat bisher einen aussagekräftigen Vergleich zwischen Messun-

gen und Theorie für Hadron-Hadron-Wechselwirkungen mit Hyperonen verhindert.

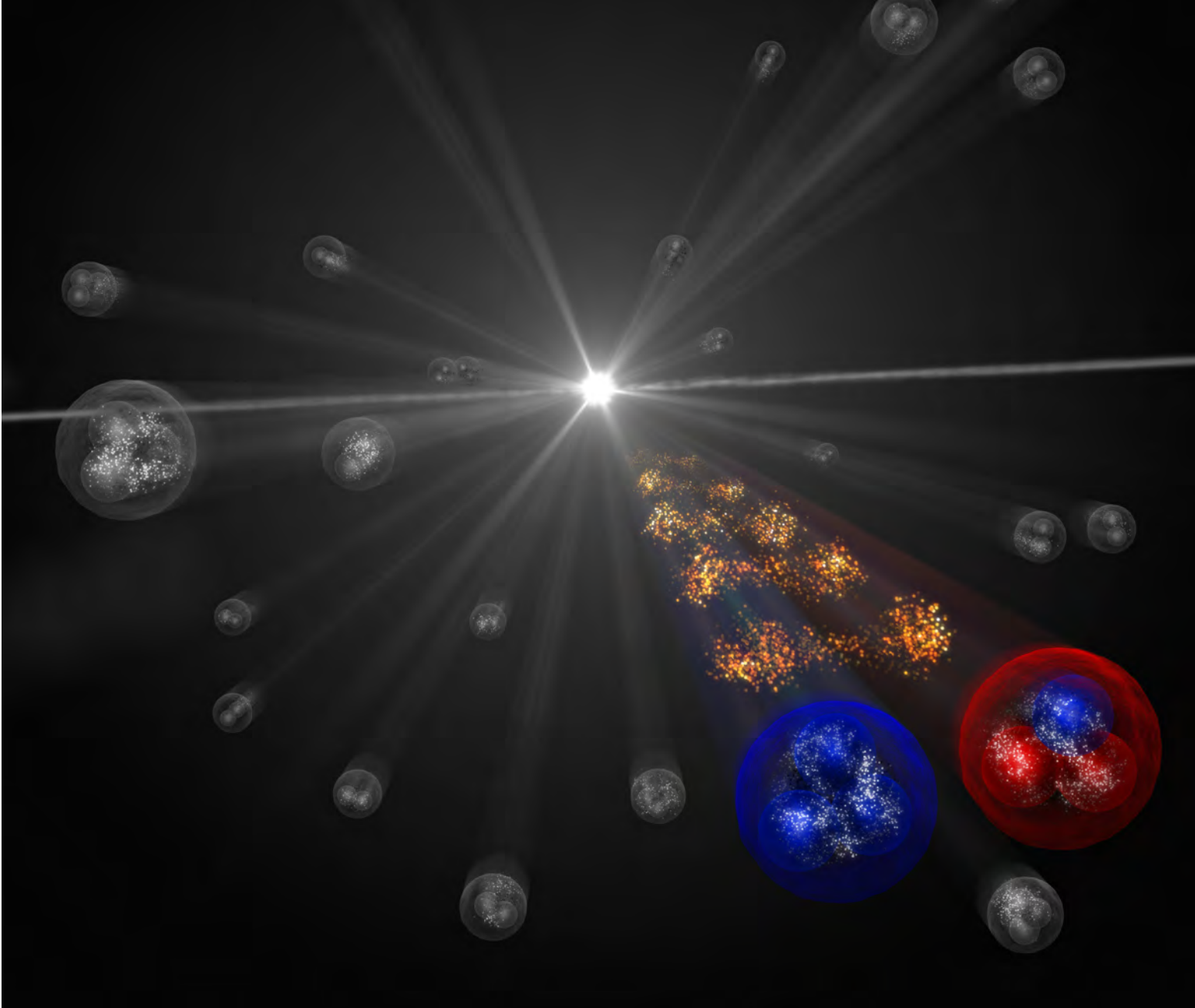
Die neue Studie der ALICE-Kollaboration rückt die Messung der Impuls-Korrelationen zwischen Hadronen, die bei Proton-Proton-Kollisionen am LHC erzeugt werden, in den Fokus. Sie zeigt, dass die darauf basierende Technik die Dynamik der starken Wechselwirkung zwischen Hyperonen und Nukleonen ans Licht bringen kann, und zwar potenziell für jedes beliebige Hadronenpaar. Die Technik wird Femtoskopie genannt, weil sie die Untersuchung von räumlichen Skalen nahe ein Femtometer ( $10^{-15}$  Meter) erlaubt – was etwa der Größe eines Hadrons entspricht und auch der Reichweite der starken Kraft.

Diese Methode hat es dem ALICE-Team bereits früher ermöglicht, Wechselwirkungen mit Lambda( $\Lambda$ )- und Sigma( $\Sigma$ )-Hyperonen, die ein Strange-Quark plus zwei leichte Quarks enthalten, sowie mit dem Xi( $\Xi$ )-Hyperon, das aus zwei Strange-Quarks plus einem leichten Quark besteht, zu untersuchen. In der neuen Studie nutzte das Team die Technik, um mit hoher Präzision die Wechselwirkung zwischen einem Proton und dem seltensten der Hyperonen, dem Omega ( $\Omega$ )-Hyperon, das drei Strange-Quarks enthält, zu bestimmen.

„Die erhaltene Genauigkeit der Bestimmung der starken Wechselwirkung für alle Arten von Hyperonen war unerwartet“, sagt ALICE-Physikerin Laura Fabbietti, Professorin an der Technischen Universität München. „Dies lässt sich durch drei Faktoren erklären: die Tatsache, dass der LHC Hadronen mit Strange-Quarks in großen Mengen erzeugen kann, die Sensitivität der Femtoskopie-Technik auf den kurzreichweitigen Teil der starken Wechselwirkung, und schließlich die hervorragenden Messgenauigkeiten, die mit dem ALICE-Detektor bei der Teilchenidentifizierung und Impulsmessung erreicht werden.“

Kernphysiker Professor Peter Braun-Munzinger, wissenschaftlicher Direktor des ExtreMe Matter Instituts EMMI bei GSI und langjähriger Vorsitzender des Collaboration Boards von ALICE, ist in die aktuellen Untersuchungen maßgeblich involviert. Er unterstreicht ebenfalls die Bedeutung der nun veröffentlichten Forschung: „Unsere Erkenntnisse öffnen wirklich die Tür zu einem neuen Kapitel in der Hadronen-





Künstlerische Darstellung der ALICE-Studie über die Wechselwirkung zwischen dem seltensten der Hyperonen, dem Omega( $\Omega$ )-Hyperon (links), das drei Strange-Quarks enthält, und einem Proton (rechts).

physik, und mit der um den Faktor 100 erhöhten Statistik für Run3 und Run4 am LHC werden viele neue Untersuchungen möglich sein.“

Die Verbindung zwischen GSI und ALICE ist traditionell sehr eng: Die Forschungsabteilung ALICE von GSI ist mitverantwortlich für den Betrieb der zwei größten Detektorsysteme von ALICE. Die Zeitprojektionskammer (TPC) und der Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) wurden unter wesentlicher Beteiligung von GSI-Mitarbeitenden der ALICE-Abteilung und des Detektorlabors entwickelt und aufgebaut. Aktuell leistet GSI einen maßgeblichen Beitrag zum ALICE-Upgrade-Programm, insbesondere im TPC-Projekt und bei der Entwicklung des neuen Online-Offline(O2)-Software-Frameworks. Dazu arbeiten die ALICE-Abteilung, das Detektorlabor und

die IT-Abteilung eng zusammen. GSI-Wissenschaftler\*innen haben diverse führende Rollen in der Datenanalyse und im Physikprogramm von ALICE. Die GSI-Wissenschaftlerin und Professorin an der Universität Heidelberg, Silvia Masciocchi, ist derzeit Vorsitzende des ALICE Collaboration Boards.

„Unsere neue Messung ermöglicht einen Vergleich mit Vorhersagen aus Lattice-QCD-Berechnungen und bietet eine solide Basis für weitere theoretische Arbeiten“, sagt ALICE-Sprecher Dr. Luciano Musa. „Die Daten der nächsten LHC-Strahlzeiten sollten uns Zugang zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen beliebigen Hadronenpaaren ermöglichen.“ Er betont abschließend: „ALICE hat einen neuen Weg für die Hadronenphysik am LHC eröffnet – einen Weg, der alle Arten von Quarks umfasst.“ ■

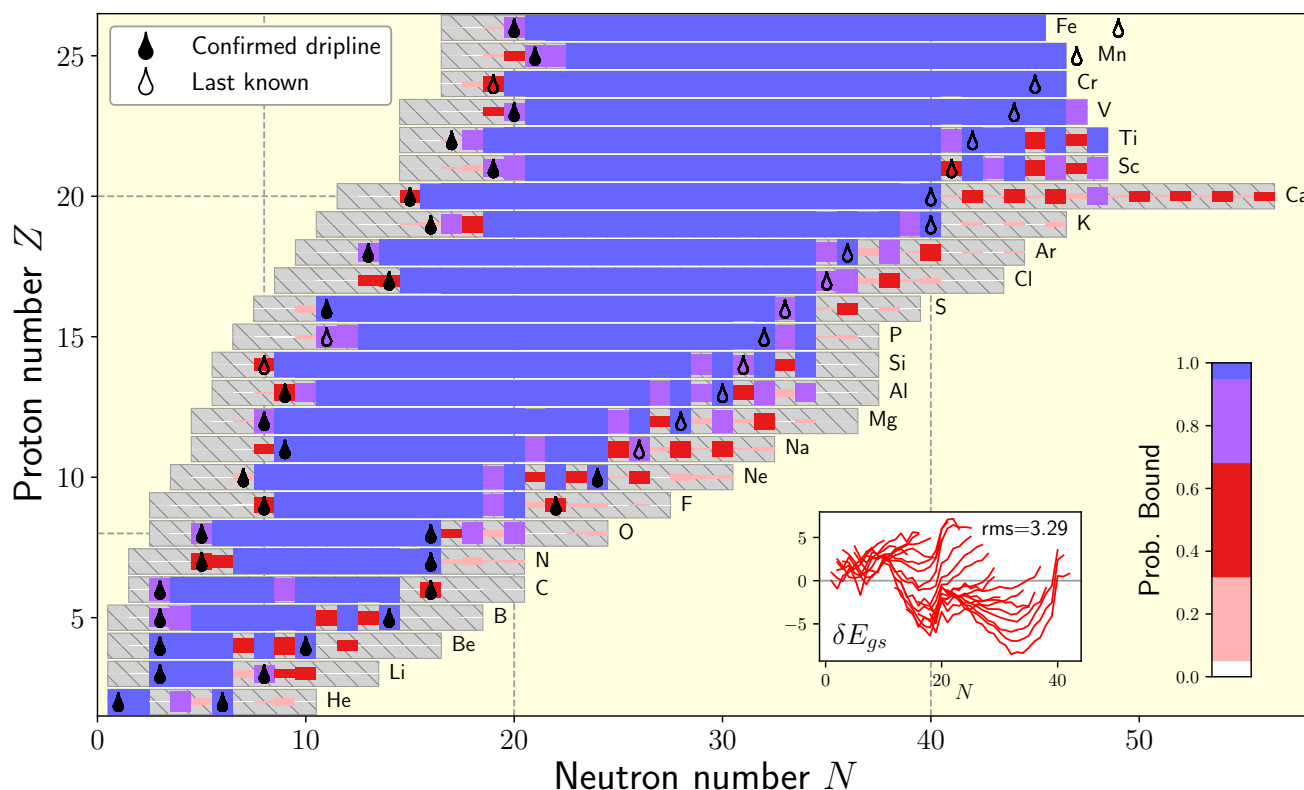
# Grenzen von Atomkernen vorhergesagt

Mithilfe neuer Berechnungen lassen sich die Eigenschaften von fast 700 Isotopen zwischen Helium und Eisen vorhersagen. Sie zeigen, welche Atomkerne existieren können und welche nicht. In einem Beitrag in *Physical Review Letters* berichten Forschende der TU Darmstadt, der University of Washington, des kanadischen Forschungszentrums TRIUMF und der Universität

Mainz, wie sie erstmals einen großen Bereich der Nuklidkarte basierend auf der starken Wechselwirkung simulierten. An der Forschung ist auch das ExtreMe Matter Institute EMMI von GSI und TU Darmstadt beteiligt.

Atomkerne werden durch die starke Wechselwirkung zwischen Neutronen und Protonen zusammengehal-

ten. Etwa zehn Prozent der bekannten Atomkerne sind stabil. Ausgehend von diesen stabilen Isotopen werden Kerne durch Hinzufügen oder Entfernen von Neutronen immer instabiler, bis Neutronen sich nicht mehr an den Kern binden können und „heraustropfen“. Diese Grenze der Existenz, die sogenannte Neutronen-„Dripline“, wurde experimentell bislang nur für leichte



Globale ab initio Berechnungen von Helium bis Eisen (Element He und Fe). Der graue Bereich zeigt alle 700 berechneten Atomkerne, während die Farbe (und Höhe) für jedes Isotop mit Neutronenzahl  $N$  und Protonenzahl  $Z$  der Wahrscheinlichkeit entspricht, dass dieses gebunden ist (probability bound). Zum Vergleich sind die experimentell bekannte Neutronen- und Protonen-Dripline bzw. das zuletzt entdeckte Isotop mit ausgefüllten bzw. leeren Tröpfchensymbolen gezeigt.



Elemente bis Neon entdeckt. Das Verständnis der Neutronen-Dripline und der Struktur neutronenreicher Kerne spielt auch eine zentrale Rolle für das Forschungsprogramm der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR bei GSI.

Helium bis Eisen zu simulieren. Dies gelang durch die Verwendung einer neuen ab initio Vielteilchen-Methode – der In-Medium Similarity Renormalization Group –, kombiniert mit einer Erweiterung, welche teilweise gefüllte Orbitale

mit experimentellen Massenmessungen und eine statistische Analyse konnten auch theoretische Unsicherheiten für die Vorhersagen bestimmt werden, etwa für die Separationsenergien der Atomkerne und so auch für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Isotop gebunden ist oder nicht existiert.

## Fundgrube an Information über mögliche neue Isotope

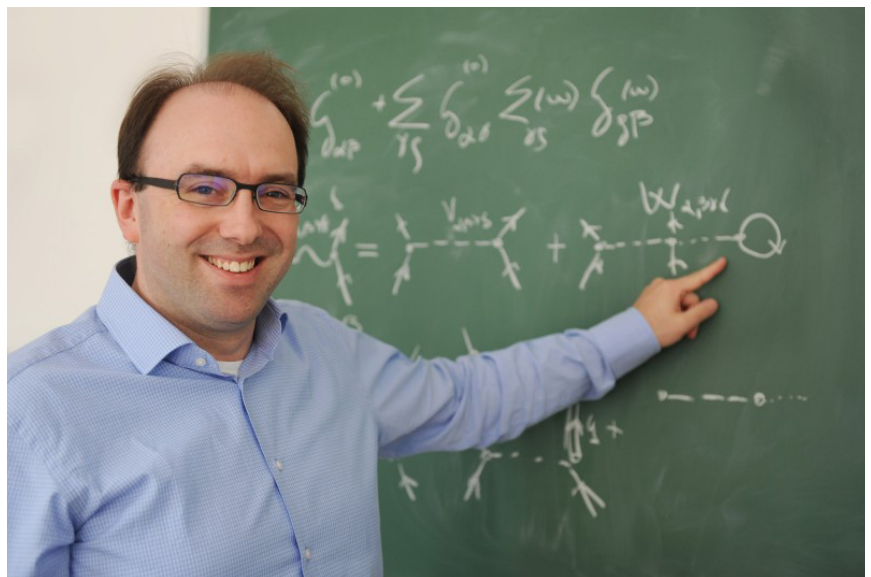
In einer neuen Studie „Ab Initio Limits of Nuclei“, die im Journal Physical Review Letters als Editors' Suggestion mit einer begleitenden Synopsis in APS Physics erschienen ist, gelang es EMMI-Professor Achim Schwenk von der TU Darmstadt, der auch Max Planck Fellow am MPI für Kernphysik in Heidelberg ist, gemeinsam mit Forschenden der University of Washington, des TRIUMF und der Universität Mainz, die Grenzen von Atomkernen mit Hilfe innovativer theoretischer Methoden bis zu mittelschweren Kernen zu berechnen. Die Ergebnisse sind eine Fundgrube an Informationen über mögliche neue Isotope und liefern einen Fahrplan für Kernphysiker\*innen, um diese zu verifizieren.

Die neue Arbeit ist nicht der erste Versuch, den extrem neutronenreichen Bereich der Kernlandschaft theoretisch zu erforschen. Frühere Untersuchungen nutzten die Dichtefunktionaltheorie, um gebundene Isotope zwischen Helium und den schweren Elementen vorherzusagen. Professor Schwenk und seine Kollegen hingegen erstellten nun erstmals die Nuklidkarte auf der Basis der ab initio Kerntheorie. Ausgehend von mikroskopischen Zwei- und Drei-Teilchen-Wechselwirkungen lösten sie die Vielteilchen-Schrödinger-Gleichung, um die Eigenschaften von Atomkernen von

behandeln kann, um alle Kerne zuverlässig zu bestimmen.

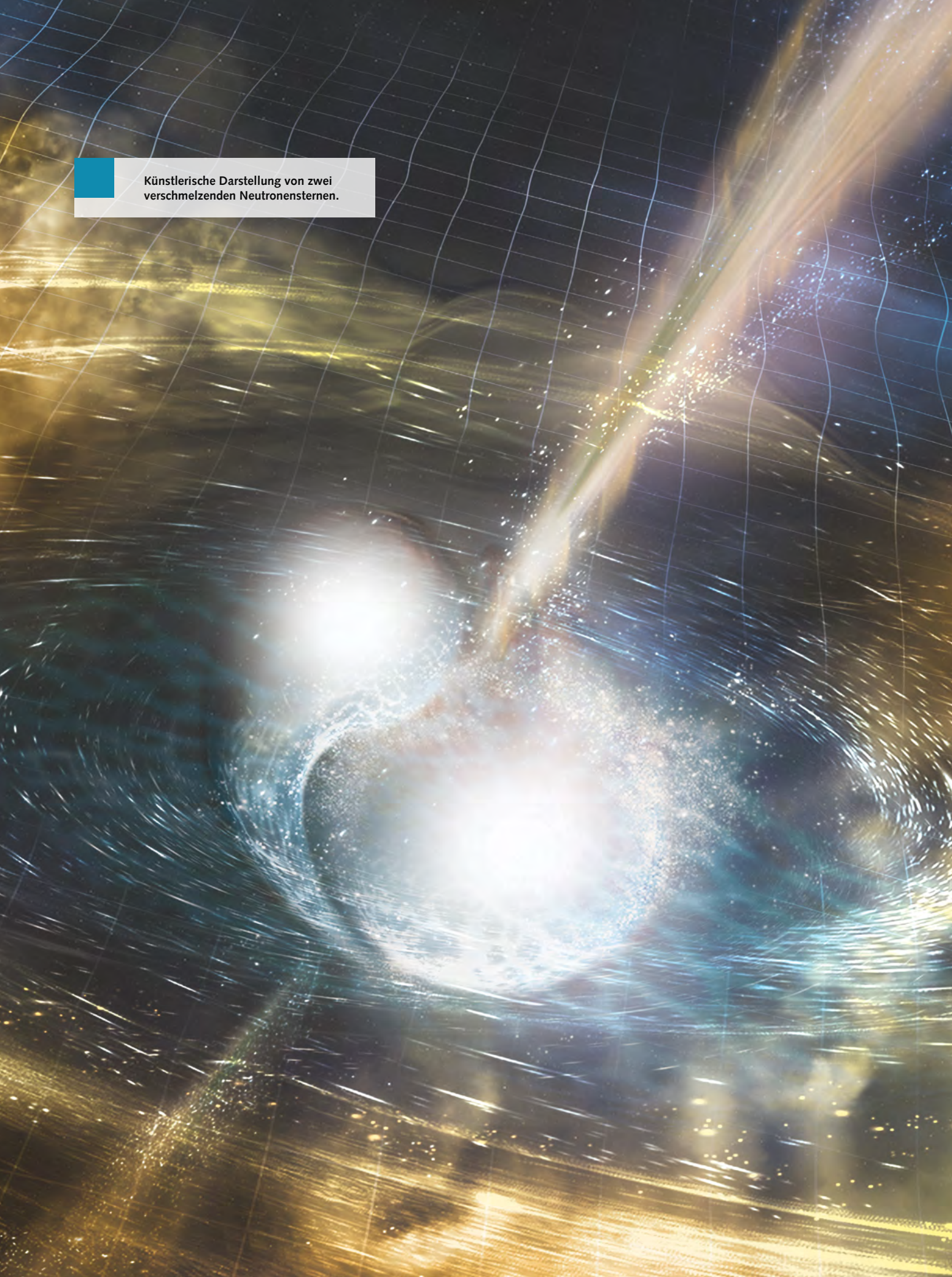
Ausgehend von Zwei- und Drei-Nukleonen-Wechselwirkungen basierend auf der starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik, berechneten die Forschenden die Grundzustandsenergien von fast 700 Isotopen. Die Ergebnisse stimmen mit früheren Messungen überein und dienen als Grundlage für die Bestimmung der Lage der Neutronen- und Protonen-Dripline. Durch Vergleiche

Die neue Studie ist ein Meilenstein im Verständnis, wie die Nuklidkarte und Kernstruktur aus der starken Wechselwirkung entstehen. Dies ist eine Schlüsselfrage des DFG-geförderten Sonderforschungsbereichs 1245 „Atomkerne: Von fundamentalen Wechselwirkungen zu Struktur und Sternen“ an der TU Darmstadt, in dessen Rahmen die Forschungsarbeit entstand. Als nächstes wollen die Forschenden ihre Berechnungen auf schwerere Elemente ausweiten, um den Input für die Simulation der Synthese schwerer Elemente voranzutreiben. Diese verläuft in neutronenreichen Umgebungen in Richtung der Neutronen-Dripline und findet in der Natur beim Verschmelzen von Neutronensternen oder in extremen Supernovae statt. ■



EMMI-Professor Achim Schwenk von der TU Darmstadt gelang es gemeinsam mit Forschenden der University of Washington, des TRIUMF und der Universität Mainz, die Grenzen von Atomkernen mit Hilfe theoretischer Methoden bis zu mittelschweren Kernen zu berechnen.



An artistic rendering of two neutron stars in the final stages of a merger. The stars are depicted as bright, glowing spheres of white and blue, surrounded by a complex, swirling structure of blue and yellow gas and dust. The background is a dark, deep blue space filled with a grid of thin, white lines that curve and warp around the central event, representing the intense gravitational field. A bright, yellowish-white light source is visible in the upper right corner, casting a strong glow across the scene. The overall composition is dynamic and dramatic, capturing the immense energy and gravity of the event.

Künstlerische Darstellung von zwei verschmelzenden Neutronensternen.



# Schwarzes Loch – ja oder nein?

## Neue Computer-Simulationen versprechen Erkenntnisse über den Ausgang von Neutronensternkollisionen.

Eine neue Studie von GSI-Forschenden und internationalen Kolleg\*innen beleuchtet die Bildung Schwarzer Löcher in Neutronensternkollisionen. Computer-Simulationen zeigen, dass die Eigenschaften hochdichter Materie, wie sie schon heute in den Labors von GSI und FAIR untersucht wird und noch präziser an der künftigen FAIR-Anlage erforscht werden wird, dabei eine entscheidende Rolle spielen. Die Ergebnisse wurden in der Fachzeitschrift *Physical Review Letters* veröffentlicht. Viel Aufmerksamkeit erfährt das Thema derzeit auch durch die Verleihung des Physik-Nobelpreises 2020 für die theoretische Beschreibung von Schwarzen Löchern und für die Entdeckung eines supermassiven Objekts im Zentrum unserer Galaxie.

Aber unter welchen Bedingungen bildet sich überhaupt ein Schwarzes Loch? Dieser Frage sind Wissenschaftler\*innen von GSI in einer internationalen Kollaboration nachgegangen. Die Forschenden

untersuchten hierbei mit Hilfe von Computer-Simulationen einen speziellen Prozess, der zur Bildung eines Schwarzen Loches führen kann: die Kollision zweier Neutronensterne.

### Entscheidend ist die Masse

Schon in Neutronensternen ist Materie extrem verdichtet. Die Masse von anderthalb Sonnen ist auf den Radius von wenigen Kilometern zusammengedrückt. Damit entstehen ähnliche beziehungsweise sogar noch höhere Dichten als im Innern von Atomkernen. Verschmelzen zwei Neutronensterne in einem Doppelsternsystem, wird die Materie in der Kollision noch zusätz-

lich verdichtet. Beste Chancen also für die Entstehung eines Schwarzen Lochs. Schwarze Löcher sind die kompaktesten Objekte im Universum, selbst Licht kann nicht mehr entweichen, weshalb sie sich nicht direkt beobachten lassen.

„Entscheidend ist die Masse der Neutronensterne“, fasst Dr. Andreas Bauswein aus der GSI-Forschungsabteilung Theorie die Studie zusammen. „Überschreitet die Gesamtmasse des Doppelsternsystems eine bestimmte Grenze, ist der Kollaps zum Schwarzen Loch unausweichlich.“ Wo genau diese Grenzmasse liegt, hängt jedoch von den Eigenschaften hochdichter Kernmaterie ab. Diese Eigenschaften sind im Detail noch nicht genau bekannt und werden zum Beispiel auch in viel kleinerem Maßstab bei Kollisionen von Atomkernen an den Beschleunigereinrichtungen bei GSI untersucht. In diesen Schwerionenstößen werden tatsächlich ähnliche Bedingungen wie bei Neutronensternverschmelzungen erzeugt. Basie-

rend auf theoretischen Überlegungen und Experimenten mit Schwerionenstößen, können bestimmte Modelle (sogenannte Zustandsgleichungen) von Neutronensternmaterie berechnet werden.

Für zahlreiche solcher Zustandsgleichungen konnte die Studie nun die Grenzmasse berechnen. Das Ergebnis: Lässt sich Neutronensternmaterie beziehungsweise Kernmaterie leicht komprimieren – ist die Materie/Zustandsgleichung also „weich“ –, führt schon die Kollision von relativ leichten Sternen zur Bildung eines Schwarzen Lochs. „Steife“, schwer komprimierbare Kernmaterie dagegen kann größere Massen gegen den sogenannten Gravitationskollaps stabilisieren, und es bildet sich nur ein sehr schwerer rotierender Neutronenstern als Überbleibsel der Kollision. Die Grenzmasse selbst gibt also Auskunft über die Eigenschaften von Kernmaterie und könnte laut der neuesten Studie sogar klären, ob sich während der Kollision die

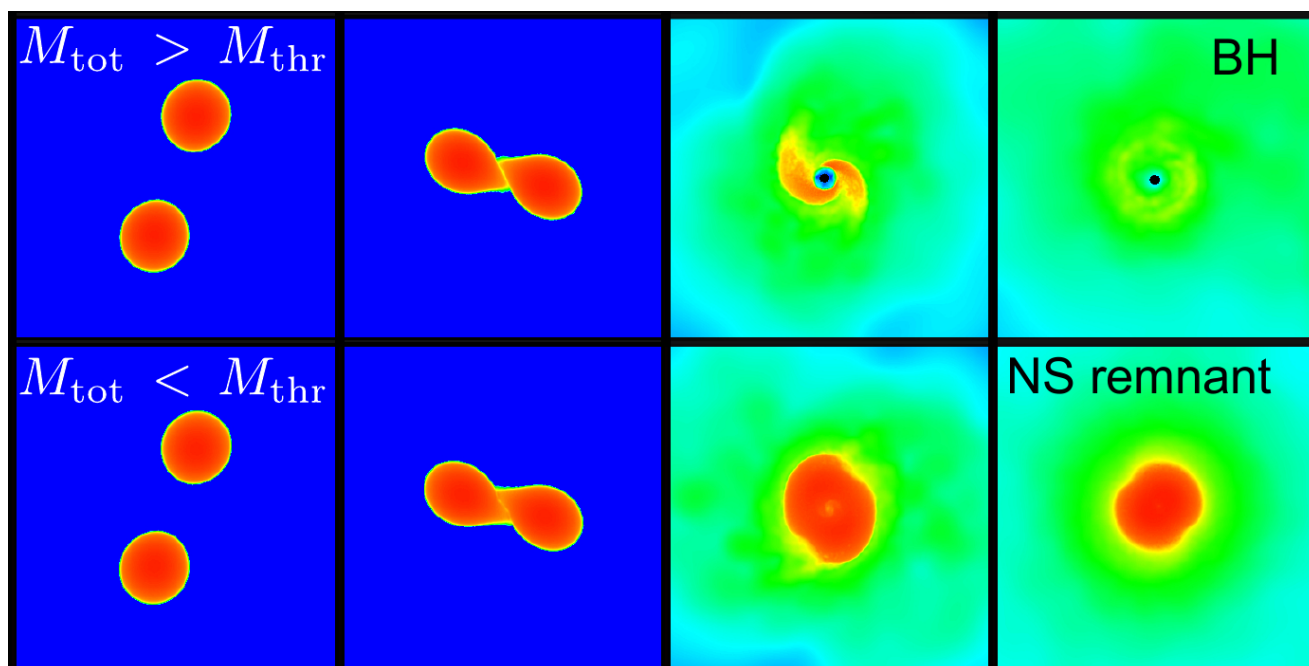
Kernbausteine in ihre Bestandteile, die Quarks, auflösen

## Weichen gestellt für die Zukunft

„Das ist deshalb spannend, weil wir die Grenzmasse in Zukunft aus Beobachtungen ableiten können“, ergänzt Professor Nikolaos Stergioulas vom Fachbereich Physik der Aristoteles-Universität Thessaloniki in Griechenland. Vor wenigen Jahren wurde zum ersten Mal eine Neutronensternverschmelzung mittels Gravitationswellen beobachtet, und einige Stunden später konnten Teleskope das optische Signal der Verschmelzung feststellen. Bildet sich ein Schwarzes Loch, ist dieses optische Signal der Kollision jedoch sehr schwach. Die Teleskopdaten

verraten demnach, ob sich ein Schwarzes Loch gebildet hat. Gleichzeitig kann aus der Form des Gravitationswellensignals die Gesamtmasse bestimmt werden: Je lauter beziehungsweise stärker das Signal ist, umso schwerer waren die Sterne.

Während Gravitationswellendetektoren und Teleskope auf die nächste Neutronensternverschmelzung warten, werden in Darmstadt die Weichen für noch detailliertere Erkenntnisse gestellt. Mit dem neuen Beschleunigerzentrum FAIR, das derzeit bei GSI entsteht, können die Bedingungen in Neutronensternverschmelzungen künftig noch realistischer nachgebildet werden. Schließlich wird nur die Kombination aus astronomischen Beobachtungen, Computer-Simulationen und Schwerionen-Experimenten die Fragen nach den fundamentalen Bausteinen der Materie und deren Eigenschaften klären können und damit auch die Frage, wann der Kollaps zum Schwarzen Loch auftritt. ■



Die obere und untere Bilderserie zeigt jeweils eine Simulation einer Neutronensternverschmelzung. In dem in den oberen Tafeln gezeigten Szenario kollabiert der Stern nach der Verschmelzung und bildet ein schwarzes Loch (BH), während das in der unteren Reihe gezeigte Szenario zu einem zumindest vorübergehend stabilen Stern führt (NS remnant).



# Clusterprojekt ELEMENTS

Mit fast 40 Millionen Euro über einen Zeitraum von vier Jahren unterstützt die Landesregierung die Spitzenforschung in Hessen in der Förderlinie „Clusterprojekte“ ab April 2021. Eines der geförderten Projekte ist ELEMENTS. Das Projekt vereint die starken Forschungskräfte mehrerer international führender Institutionen und wird bis 2025 mit 7,9 Millionen Euro gefördert. Neben der Goethe-Universität Frankfurt und der TU Darmstadt, die zu gleichen Teilen das Projekt anführen, sind auch die Universität Gießen und GSI beteiligt. Durch diesen Verbund können die Forschenden ihre herausragende Expertise in Gravitationsphysik und in der Physik von Nuklearreaktionen verknüpfen sowie die Beschleunigeranlagen in Darmstadt – die entstehende FAIR-Anlage bei GSI und den Elektronenbeschleuniger S-DALINAC der TU im Institut für Kernphysik – synergetisch nutzen.

Das Clusterprojekt ELEMENTS (Exploring the Universe from microscopic to macroscopic scales) wird Neutronensterne studieren, die gerade noch sichtbaren, kleinen Brüdern von Schwarzen Löchern. Sie entstehen nach dem Ausbrennen eines Sterns, wenn dieser nicht massereich genug war, um nach seinem Ende durch den eigenen Gravitationsdruck zu einem Schwarzen Loch zusammengepresst zu werden. Neutronensternverschmelzungen sind als extrem lichtstarke Vorgänge, Kilonovae, am Himmel sichtbar, bei denen durch Kernreaktionen unter extremen Bedingungen die schwersten chemischen Elemente erzeugt werden. ELEMENTS erforscht die Dynamik in der Verschmelzung zweier Neutronensterne und untersucht dabei auch das Gravitationsfeld, die Kernmaterie

und – Schwerpunktthema der Physiker\*innen bei GSI/FAIR und an der TU Darmstadt – die dabei entstehenden schweren chemischen Elemente.

„Ich bin erfreut über diese Entscheidung des Landes Hessen“, sagte der Wissenschaftliche Geschäftsführer von GSI und FAIR, Professor Paolo Giubellino. „Wir in Hessen verstehen es, die richtigen Menschen und die richtigen Themen zusammen zu bringen. Wir haben hier Forschungsstrukturen auf internationalem Top-Niveau. Das ermöglicht es uns, eine führende Position in den wichtigen Forschungsfeldern der Zukunft zu erreichen. Schon das aktuelle Forschungsprogramm bei GSI und FAIR bietet hervorragende Möglichkeiten, in den kommenden Jahren wird das Beschleunigerzentrum FAIR weiteres innovatives Potenzial erschließen.“ ■



Strahlführung des Elektronenbeschleunigers S-DALINAC.

## IMPRESSUM

Herausgeber und Copyright: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH | Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt

E-Mail: [target@gsi.de](mailto:target@gsi.de)

Erschienen: März 2021

Redaktion: Ingo Peter (verantwortlich), Jutta Leroudier, Berit Paflik, Carola Pomplun, Lena Weitz  
Weiterhin wirkten mit: A. Bauswein, M. Block, P. Boller, C. E. Düllmann, M. Fuss, H. Kreiser, P. Spiller, M. Winkler

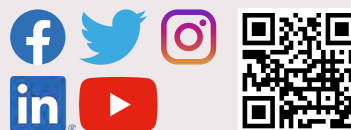
Fotos: J. Hosan - S. 1, 14, 56 r. u.; J. Ordan - S. 2, 19, 23 o. r.; G. Otto - S. 3 r., 4, 7, 56 l. o.; I. 2. v. o.; I. 2. v. u.; m. o.; r. o.; A. Socha, Pixabay - S. 8; Helmholtz - S. 9; D. Fehrenz - S. 11; GSI - S. 12, 23 o. l.; Galvanik/GSI - S. 13; A. Stuhl - S. 14; H. G. König - S. 17; C. Pomplun - S. 18; JINR - S. 20; Bergische Universität Wuppertal - S. 22 o.; D. Lang - S. 22 u.; X-ray: NASA/CXC/SAO;

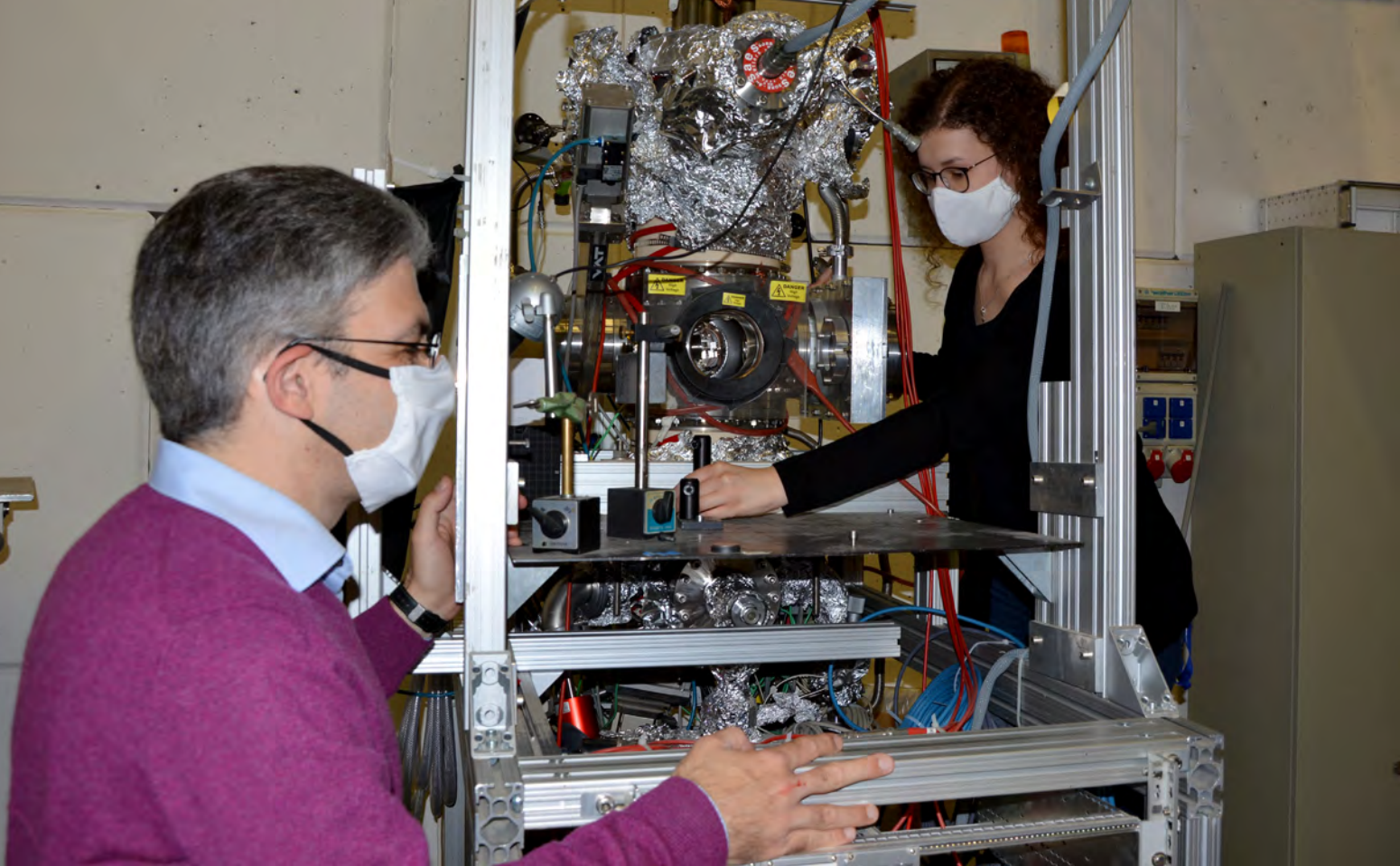
Optical: NASA/STScI; Infrared: NASA/JPL-Caltech - S. 23 u.; R. Wiedmar/SCNAT - S. 25, 56 l. 3. v. o.; A. R. Rodriguez - S. 27; S. Bernitt/HI Jena - S. 28; MPIK - S. 29, 41; A. Yakushev - S. 30; A. Di Nitto - S. 31; J. Khuyagbaatar - S. 32; J. Steitz - S. 33; M. Bernards - S. 34, Privat - S. 35, 56 l. u., m. 3. v. o., m. 3. v. u., m. 2. v. u., m. u., r. 2. v. o., r. 3. v. u.; M. Laatiaoui/HIM - S. 36, 37; V. Bagnoud/P. Boller - S. 38; R. Haas/C. E. Düllmann - S. 40; arXiv:2010.15348 - S. 43; CERN - S. 45; A. Schwenk/TUD - S. 46; C. Völker - S. 47 A. Simonnet/NSF/LIGO/Sonoma State University - S. 48; A. Bauswein - S. 50; J. Hartung/TU Darmstadt - S. 51; J. Leroudier - S. 52, 53; L. Weitz - S. 54; W. Oppel - S. 56 m. 2. v. o.; C. Hahn - S. 56 r. 3. v. o., G. Menè - S. 56 r. 2. v. u.  
Layout: Bauer und Guse GmbH, C. Pomplun  
Druck: EK Print, In den Wingerten 25, 64291 Darmstadt

Sie möchten immer die aktuelle Ausgabe von target erhalten? Zum kostenlosen Abonnement: [www.gsi.de/target](http://www.gsi.de/target)

GSI betreibt eine der weltweit führenden Beschleunigeranlagen, die Forschende aus aller Welt für Experimente über den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums nutzen. Derzeit entsteht in internationaler Zusammenarbeit die Beschleunigeranlage FAIR.

## FAIR UND GSI IN SOCIAL MEDIA





Die Doktorandin Jessica Warbinek (r.) gemeinsam mit ihrem wissenschaftlichen Betreuer Michael Block (l.) bei der Optimierung einer Vakuumkammer, die sie in der kommenden Experimentierperiode bei GSI für ihre Experimente einsetzt.

# EU-Promotionsnetzwerk zur Erforschung radioaktiver Elemente

**Starkes Engagement der Mainzer Kernchemie und Physik sowie des GSI bei dem EU-geförderten Innovative Training Network „Laser Ionization and Spectroscopy of Actinide Elements“.**

Forschende der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (JGU) und des GSI engagieren sich in der Ausbildung junger Doktorand\*innen auf dem Gebiet der Kernchemie und Kernphysik im Rahmen eines EU-geförderten internationalen Netzwerks. Dessen Ziel ist es, die Struktur der Actiniden – kurzlebige, schwere Elemente am Ende des Periodensystems – zu entschlüsseln und damit die Voraussetzung für ihre Nutzung in

der medizinischen Physik, für nukleare Anwendungen und für die Umweltüberwachung vorzubereiten. Das Konsortium besteht aus weltweit führenden Expert\*innen aus der fundamentalen Atom- und Kernphysik sowie der Kernchemie. Die EU unterstützt das Projekt „Laser Ionization and Spectroscopy of Actinide Elements“, kurz LISA, über vier Jahre mit insgesamt vier Millionen Euro.



Die Koordination von LISA hat das Forschungszentrum CERN bei Genf inne. Vonseiten der JGU sind Professor Christoph Düllmann und Professor Klaus Wendt beteiligt, sowie seitens GSI Professor Michael Block. „Von den 15 Early Stage Researchers werden voraussichtlich sechs an der Universität Mainz promovieren. Damit wird die JGU einen bedeutenden Standort innerhalb von LISA darstellen“, erwartet Klaus Wendt. „Dank der hochkonstruktiven Zusammenarbeit im Bereich der Actinidenforschung zwischen der Kernchemie, der Physik und dem HIM in Mainz erwarten wir auch entsprechende, überzeugende Resultate.“ Wendt selbst wird drei Doktorandinnen anleiten. Es ist bereits sein zweites EU-Trainingsnetzwerk, an dem er beteiligt ist.

## Internationale Beteiligung

An dem Innovativen Trainingsnetzwerk sind außer den Universitäten in Mainz, Göteborg, Hannover, Jena und Leuven in Belgien auch Großforschungseinrichtungen wie CERN, GSI, der Schwerionenbeschleuniger Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL) in Frankreich und die Beschleunigeranlage im finnischen Jyväskylä beteiligt. Dazu kommen zwei Industriepartner in Kassel und Glasgow. Zwölf weitere Partnerorganisationen von Kanada bis Japan können die Doktorand\*innen zum wissenschaftlichen Austausch besuchen.

In der Arbeitsgruppe von Christoph Düllmann im Department Chemie werden exotische Actinidenisotope, die langlebig genug und in dafür ausreichenden Mengen verfügbar sind, zunächst chemisch aufgereinigt. „Wir entwickeln Techniken, um sie dann in eine perfekte, für die vorgesehenen Experimente innerhalb des LISA-Netzwerks in Jyväskylä und an GANIL, aber auch in Mainz und am GSI optimierte Form zu bringen“, erklärt Düllmann, Leiter der Gruppe „Superschwere Elemente Chemie“ an der JGU, GSI und dem Helmholtz-Institut Mainz (HIM).

Bei GSI untersucht die Arbeitsgruppe von Michael Block mittels Laserspektroskopie die schwersten Actiniden. Diese können nur künstlich hergestellt werden und sind meist kurzlebig. Mithilfe von Lasern wird die optische Anregung von Energieniveaus in der Atomhülle detailliert vermessen, um ihre atomaren und nuklearen Eigenschaften zu bestimmen. „Das ITN bietet für die Doktoranden ein optimales

Forschungsumfeld, um die exotischen Actiniden systematisch und umfänglich zu erforschen“, sagt Michael Block, in dessen Arbeitsgruppe bei GSI im Sommer die erste Doktorandin ihre Arbeit aufgenommen hat.

Uran und Plutonium sind vermutlich die bekanntesten Actinide, aber auch Curium, Einsteinium, Fermium und Mendelevium gehören beispielsweise in diese Gruppe radioaktiver Elemente. Sie sind meistens äußerst instabil und können bislang nur synthetisch in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden. Aufgrund ihrer kurzlebigen Natur geben sie der Wissenschaft noch immer große Rätsel auf. Ihre Erforschung soll daher unser Verständnis der atomaren und nuklearen Eigenschaften verbessern. Im Rahmen von LISA ist darauf aufbauend die Entwicklung neuartiger Lasertechnologien vorgesehen, mit denen Actinide zur Entwicklung neuer Anwendungen erzeugt und untersucht werden können. Es wird erwartet, dass LISA eine kohärente und symbiotische Zusammenarbeit der Beteiligten ermöglicht und die Arbeitsbeziehungen auch noch nach Projektende fort dauern.

Zunächst hat sich allerdings der Arbeitsbeginn der ausländischen Doktorand\*innen aufgrund der Corona-Krise verzögert. Die wissenschaftlichen Betreuer rechnen damit, dass eine Doktorandin aus Polen und eine weitere Doktorandin aus Mexiko sowie Kandidatinnen aus Kanada, England und den USA, die in Mainz betreut werden, nun aber im Herbst starten können. Für alle 15 Promovierenden und weitere Gäste plant das Team zurzeit ein akademisches Training, das im Herbst 2021 in Mainz stattfinden soll. ■

| Actinoide | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Lanthan   | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | Fr | Ra | Ac | Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm  | Mn  | Mc  | Lv  | Tl  | Fl  | Ca  | Hs  | Mt  | 119 | 120 | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 |

Bei den Actiniden handelt es sich um radioaktive Metalle mit den Ordnungszahlen 89 bis 103 im Periodensystem.

# Duales Studium

**Spitzenforschung auf Weltniveau geht nur mit leistungsfähiger IT. Mit dem Green IT Cube hat GSI/FAIR deshalb eines der weltweit energieeffizientesten Höchstleistungs Rechenzentren gebaut. Um qualifizierten personellen Nachwuchs zu gewinnen und gleichzeitig die Entwicklung moderner IT voranzubringen, bietet GSI in Kooperation mit der Hochschule Darmstadt ein duales Informatikstudium an. Die 22-jährige Jannika Fücksle ist eine der Studierenden und befindet sich im fünften Semester.**



**Sie absolvieren ein duales Informatikstudium an der Hochschule Darmstadt in Kooperation mit GSI. Was steht gerade bei Ihnen an?**

Seit dem 1. Oktober 2020 absolviere ich mein sogenanntes Praxissemester bei GSI, das heißt ich bearbeite ein konkretes und spannendes IT-Projekt. Es ist insgesamt mein fünftes Semester und ich habe bereits vorher schon ein Praxissemester bei GSI verbracht. Außerdem werde ich mein letztes Semester für meine Abschlussarbeit wieder bei GSI verbringen.

**Und wenn Sie kein Praxissemester haben, was machen Sie dann? Wie müssen wir uns ein „Duales Studium“ vorstellen?**

Im Dualen Studium verbringe ich abwechselnd ein Semester entweder im

Unternehmen oder an der Hochschule. Im Unternehmen, also in meinem Fall bei GSI, mache ich dann wie gesagt konkrete praktische IT-Entwicklungsprojekte, an der Hochschule geht es dann mehr um die theoretischen Grundlagen. Das Studium dauert sieben Semester und man schließt es mit dem Bachelor ab. Anschließend gibt es auch die Möglichkeit zum Masterstudium.

**Zurzeit befinden Sie sich also im Praxissemester bei GSI und Sie haben ein konkretes praktisches Projekt vor sich bzw. schon begonnen? Was ist Ihre Aufgabe im aktuellen Praxissemester bei GSI?**

GSI ist am ALICE-Experiment am CERN in Genf wissenschaftlich und technisch stark beteiligt. Dort wird die Software JALiEn eingesetzt, mit deren Hil-

fe die weltweit verteilte ALICE-Computing-Infrastruktur betrieben wird. Durch JALiEn werden Daten transferiert und Rechenaufträge effizient auf die bereitstehenden Rechenkapazitäten im Grid verteilt, um Simulation, Rekonstruktion und Analyse der Physikdaten des ALICE-Experiments im großen Stil zu ermöglichen. Ich teste, vereinfacht gesagt, ob die ALICE-Software JALiEn auch später bei FAIR genutzt werden könnte oder ob man sie dahingehend anpassen kann.

**Wer überlegt sich denn solch ein Projekt? Gibt es jemand, der Sie bei GSI betreut?**

Ja, klar! Ich bin in der IT-Gruppe Distributed Computing und mein Betreuer ist Dr. Kilian Schwarz. Er überlegt sich im Vor-



feld geeignete Projekte, die dann von der Hochschule genehmigt werden müssen. Die Hochschule prüft vor allem, ob das Projekt fürs Studium angemessen ist.

**Jetzt haben wir etwas darüber erfahren, wie Ihr Praxissemester bei GSI aussieht. Wie läuft denn ein Semester an der Hochschule ab?**

Dort werden wie gesagt theoretische Grundlagen gelegt. Es gibt vorgegebene Module, die ich belegen muss und auch ein paar Wahlfächer. Themen sind beispielsweise „Rechnerarchitekturen“, „Programmieren, Algorithmen & Datenstrukturen“, „Software-Engineering“ oder „Entwicklung webbasierter Anwendungen“, aber auch noch viele andere mehr. Und natürlich muss ich jeweils Klausuren schreiben. Für jede bestandene Klausur erhält man Punkte, sogenannten „Credit Points“. Nur, wenn ich genug Credit Points gesammelt habe, komme ich ins nächste Semester.

**Wie ist denn der Austausch mit anderen Studierenden aus Ihrem Semester? An der Hochschule treffen Sie sich regelmäßig, aber während der Praxissemester, sind Sie da ganz „alleine“ ohne die anderen Studierenden?**

Während der Semester an der Hochschule treffen wir Studierenden uns natürlich regelmäßig in den verschiedenen Vorlesungen und Übungen. Wobei das letzte Semester wegen Corona komplett online stattfand. Aber auch in den Praxissemestern findet ein regelmäßiger Austausch statt, obwohl die Studierenden im Dualen Studium in vielen unterschiedlichen Unternehmen tätig sind.

**Und wie findet der Austausch zwischen den Studierenden während der Praxissemester statt?**

Die Praxisarbeiten werden auch von Hochschulseite aus betreut. Es gibt einen

begleitenden Professor, der mich und weitere vier Mitstudierende an anderen Unternehmen begleitet. Wir treffen uns während eines Praxissemesters in der Regel drei Mal, jeweils an einem anderen Standort. Dort tauschen wir uns über unsere Projekte aus und lernen somit auch IT-Aufgabenstellungen in anderen Unternehmen kennen. Dies ist übrigens auch für unsere Betreuer in den Unternehmen durchaus interessant, die deshalb meistens bei den Treffen mit dabei sind. Denn so entsteht auch ein Knowhow-Austausch unter den IT-Abteilungen der kooperierenden Unternehmen.

**Welchen Einfluss hat hierbei Corona auf die Praxissemester?**

Ich arbeite momentan eigentlich hauptsächlich im Homeoffice. Unter Befolgung der verbindlichen Hygienemaßnahmen könnte ich aber auch, falls nötig, zu GSI kommen.

**Wie suchen sich die Studierenden eigentlich die Unternehmen aus, an denen sie ihr Praxissemester absolvieren wollen?**

Es gibt eine lange Liste an kooperierenden Unternehmen für den Dualen Studiengang IT an der Hochschule Darmstadt. Als Interessierte muss man sich zuerst bei einem dieser Unternehmen bewerben. Und nur, wenn man vom Unternehmen eine Zusage hat und entsprechend einen gültigen Ausbildungsvertrag vorlegen kann, erst dann kann man sich an der Hochschule einschreiben.

**Das heißt, Sie haben einen Vertrag bei GSI?**

Ja, genau. Ich bin bei GSI angestellt und bekomme auch ganzjährig Gehalt, also auch während der Hochschulsemester. Das ist natürlich toll, bedeutet aber auch, dass ich keine Semesterferien habe, so wie Studierende anderer Stu-

diengänge. Ich arbeite in den Semesterferien somit „ganz normal“ bei GSI und wenn ich Urlaub machen will, muss ich, wie alle anderen Angestellten hier auch, einen Urlaubsantrag bei meinem Betreuer stellen.

**Sie sagten, es gibt eine lange Liste von Unternehmen, bei denen man ein Dualles Informatikstudium absolvieren kann. Wieso haben Sie sich ausgerechnet für GSI entschieden?**

Während meiner Schulzeit an der Heinrich-Emanuel-Merck-Schule haben wir einmal GSI im Rahmen einer Führung besucht. Danach war ich total begeistert von der Forschung bei GSI und dem Zukunftsprojekt FAIR. Wir haben dabei auch den Green IT Cube besucht und da wurde mir klar, wie wichtig eine leistungsfähige IT für die Forschung ist. Das hat mich eigentlich nie mehr losgelassen. Außerdem hatte ich als Leistungskurse die Fächer IT und Chemie. Das passt schon ziemlich gut zu GSI! So hat mich die Begeisterung bis heute nicht mehr losgelassen. Ich wollte unbedingt zu GSI und bin froh, dass es geklappt hat!

**Wir freuen uns auch, dass Sie bei uns sind und wenn junge motivierte Menschen den Weg zu uns finden. Bald ist Ihr Studium ja zu Ende. Haben Sie schon Pläne für danach?**

Mir macht die Arbeit hier riesigen Spaß. Die Aufgaben in der IT finde ich spannend und sie sind sehr vielfältig, man hat hier immer auch mit der neuesten Technik zu tun. Und dabei ein Teil zu sein von dieser einzigartigen Forschungsanlage, zu der Menschen aus aller Welt kommen, um hier zu forschen, das motiviert natürlich noch einmal zusätzlich. Ich würde also gerne noch mein Masterstudium bei GSI absolvieren und könnte mir auch sehr gut vorstellen später einmal hier dauerhaft zu arbeiten. ■



**Dr. Thomas Friedrich** aus der GSI-Forschungsabteilung Biophysik ist Preisträger des Hermann-Holthausen-Preises 2020 der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie e.V. (DEGRO).



**Professor Marco Durante**, Leiter der GSI-Forschungsabteilung Biophysik, ist von der Radiation Research Society (RRS) mit dem Failla-Preis 2020 ausgezeichnet worden.



Für seine herausragenden wissenschaftlichen Leistungen erhielt der Physiker **Professor Hans Geissel** den polnischen Alexander von Humboldt-Preis in Physik.



Für seine Forschungen an der Schnittstelle zwischen Kernphysik und Astronomie erhielt **Professor Friedrich-Karl Thielemann** die Karl-Schwarzschild-Medaille (Interview auf Seite 24).



**Dr. Uwe Niedermayer** hat den Nachwuchspreis für Beschleunigerphysik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) erhalten.



Zum „Fellow 2020“ ist **Prof. Almodena Arcones** durch die American Physical Society (APS) ernannt worden.



**Dr. Jan Rothhardt**, Laserphysiker vom Helmholtz-Institut Jena, wurde mit dem Röntgenpreis der Justus-Liebig-Universität Gießen ausgezeichnet.



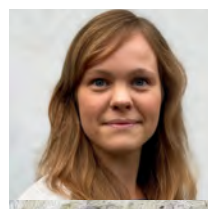
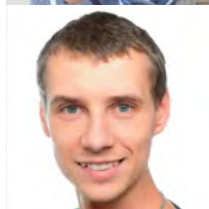
**Dr. Walter Ikegami Andersson** hat für seine Promotionsarbeit bei GSI und FAIR sowie an der Universität Uppsala den PANDA-PhD-Preis 2020 erhalten.



**Dr. Antoni Woss** ist für seine Promotionsarbeit an der University of Cambridge mit dem PANDA-Theorie-PhD-Preis 2020 ausgezeichnet worden.



Für ihre Promotionsarbeiten bei GSI und FAIR haben **Dr. Hanna Malygina** und **Dr. Ievgenii Kres** den Dissertationspreis der CBM-Kollaboration für herausragende Abschlussarbeiten in den Jahren 2018 und 2019 erhalten.



Der Christoph-Schmelzer-Preis ging an **Dr. Alina Bendinger** vom Deutschen Krebsforschungszentrum DKFZ in Heidelberg und die Ingenieurin **Dr. Giorgia Meschini** aus dem Fachgebiet Biomedizin der staatlichen Polytechnischen Universität in Mailand (Politecnico di Milano).



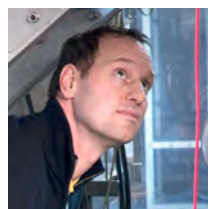
**Dr. Ivan Miskun** wurde mit dem FAIR-GSI PhD Award 2020 ausgezeichnet, der von Pfeiffer Vacuum gestiftet wird.



**Professor Omar Azzaroni** ist einer der diesjährigen Georg-Förster-Preisträger der Humboldt-Stiftung.



**Dr. Bernhard Franzke** erhielt den Horst-Klein-Preis durch den Physikalischen Verein Frankfurt, die Goethe-Universität Frankfurt und den Arbeitskreis Beschleunigerphysik (AKBP) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.



**Dr. Danyal Winters** wurde ein Fellowship der Chinesischen Akademie der Wissenschaften verliehen.

