

Forschung mit Neutronen in Chemie und Physik am TRIGA Mainz

Von Klaus Blaum, Klaus Eberhardt, Gabriele Hampel, Werner Heil, Jens Volker Kratz und Wilfried Nörtershäuser

Aus welchen Elementen besteht das Universum? Kann man die Materie – Antimaterie-Asymmetrie im Universum erklären? Unter anderem solch fundamentale Fragen an der Schnittstelle zwischen Kern- und Astrophysik versuchen die Wissenschaftler am Mainzer Forschungsreaktor zu klären.

Unsere materielle Welt und der Mensch selbst bestehen zu mehr als 50 Prozent aus Neutronen. Gebunden im Atomkern wirken sie über die starke Kernwechselwirkung, die die Kernbausteine – Protonen und Neutronen – zusammenhält. Das freie Neutron ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 900 Sekunden in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Infolge ihrer elektrischen Neutralität ionisieren Neutronen nicht und können auch das elektrostatische Abstoßungspotential der Kernladungen überwinden. Damit können freie Neutronen mühelos starke Materialschichten durchdringen und als Sonden verwendet werden, wenn beispielsweise die Struktur und Anregungszustände von kondensierter Materie untersucht werden sollen. Durch Neutronenbestrahlung kann Materie aber auch verändert werden, indem die Neutronen im Kern absorbiert werden und verschiedene Kernreaktionen auslösen. Von Natur aus sind freie Neutronen selten. Sie können jedoch in kommerziellen Kernreaktoren und auch in Forschungsreaktoren hergestellt werden. Von letzteren gibt es genau zwei an deutschen Universitäten: Die Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) an der Technischen Universität München und den TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomic) an der Universität Mainz. Beide dienen in erster Linie zur Erzeugung von hohen Neutronendichten für Forschungszwecke, für Materialprüfungen und -analysen sowie zur Herstellung von Radionukliden.

Forschungsreaktor TRIGA Mainz

Der TRIGA Mainz (Abb. 1) wurde auf Initiative von Fritz Straßmann, dem damaligen Direktor des Instituts für Anorganische Chemie und Kernchemie der Universität Mainz, ab 1960 gebaut. Am 3. August 1965 konnte mit dem Einsetzen des 57. Brennelementes in den Kern erstmals eine sich selbst aufrechterhaltende Kettenreaktion initiiert werden. Im April 1967 erfolgte die offizielle Inbetriebnahme des Reaktors, wobei Otto Hahn den ersten Reaktor puls auslöste. Seitdem sind mehr als 16.000 Pulse durchgeführt worden. Der TRIGA Mainz kann im Dauerbetrieb mit einer maximalen Leistung von 100 Kilowatt

gefahren werden. Darüber hinaus erlaubt eine Pulseinrichtung das Einbringen einer Überschussreaktivität in einem kurzen Zeitintervall, wodurch für 0,03 Sekunden eine Spitzenleistung von bis zu 250 Megawatt und eine Energiefreisetzung von 12 Megajoule erreicht werden kann.

Am TRIGA-Reaktor werden Neutronen aus der Kernspaltung des Isotops Uran-235 freigesetzt. Dieses ist in den TRIGA-Brennelementen in Form einer Uran-Zirkonium-Hydrid-Legierung mit einer Anreicherung von maximal 20 Prozent enthalten. Pro Spaltung eines Uran-235-Kerns entstehen 2 bis 3 schnelle Neutronen mit einer mittleren Energie von etwa 1 Megaelektronenvolt (MeV). Durch Wechselwirkung mit den Wasserstoffkernen der Zirkonium-Hydrid-Brennstoffmatrix wird diese Energie auf ein thermisches Maß von etwa 0,025 eV abgesenkt bzw. moderiert. Erst dann kann wieder eine Kernspaltung des Urans-235 erfolgen. Eine Erhöhung der Brennelementtemperatur bewirkt eine schlechtere Moderation der Neutronen und damit eine Abnahme der Spaltprozesse. Beim Pulsbetrieb, bei dem die Brennelementtemperatur auf bis zu 300 °C ansteigen kann, verringert sich deshalb die Zahl der thermischen Neutronen sehr stark und der Reaktor schaltet sich selbständig ab. Auf Grund dieses *prompten negativen Temperaturkoeffizienten* sind TRIGA-Reaktoren inhärent sicherere Forschungsreaktoren, das heißt eine nicht kontrollierbare Kettenreaktion kann unter keinen Umständen auftreten.

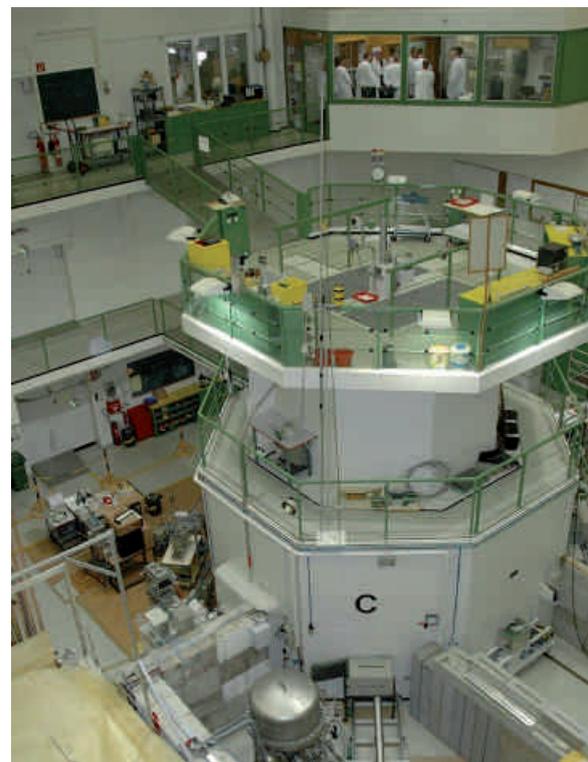


Abb. 1: Der Forschungsreaktor TRIGA Mainz mit verschiedenen Experimenten.

Der Forschungsreaktor TRIGA Mainz wird als starke Neutronenquelle für chemische und physikalische Grundlagenexperimente, für angewandte Forschungen auf den verschiedensten Gebieten sowie für Ausbildungszwecke und zum Kompetenzerhalt genutzt. Der Reaktor besitzt vier Strahlrohre (A bis D), eine thermische Säule für spezielle Experimente, sowie drei Rohrpostanlagen, ein Bestrahlungskarussell für die gleichzeitige Bestrahlung von maximal 80 Proben und ein zentrales Bestrahlungsrohr, in dem der höchste Neutronenfluss auftritt (4×10^{12} Neutronen pro Quadratzentimeter und Sekunde bei einer Leistung von 100 Kilowatt). Das Strahlrohr A wird für

die Entwicklung schneller chemischer Trennverfahren zur Untersuchung der chemischen Eigenschaften der schwersten Elemente eingesetzt. Am Strahlrohr B wird derzeit ein Experiment für Hochpräzisionsmessungen an Spaltprodukten aufgebaut und am Strahlrohr C ist eine Quelle für ultrakalte Neutronen (ultra cold neutrons = UCN) installiert. Eine weitere Apparatur zur Erzeugung noch höherer UCN-Dichten befindet sich zurzeit am Strahlrohr D im Aufbau.

Im Folgenden wird die Nutzung des TRIGA Mainz für die Grundlagenforschung beschrieben. Darüber hinaus wird der Reaktor in der angewandten Forschung für die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) zur Bestimmung von Spurenelementen, zum Beispiel in Umweltproben, Gläsern und archäologischen Proben, sowie für die Produktion einer Vielzahl von radioaktiven Isotopen genutzt. Eine weitere wichtige Aufgabe des TRIGA Mainz ist der Kompetenzerhalt und die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in den Bereichen Kern- und Radiochemie, Reaktorphysik und Strahlenschutz. Der Reaktor ist im Rahmen der Lehrveranstaltungen am Institut für Kernchemie in die Ausbildung von Studenten und Wissenschaftlern intensiv eingebunden.

Abb. 2: Chemische Trennapparatur (ARCA = Automated Rapid Chemistry Apparatus), mit der die Eigenschaften der Elemente 104, 105 und 106 in wässriger Lösung erforscht wurden.

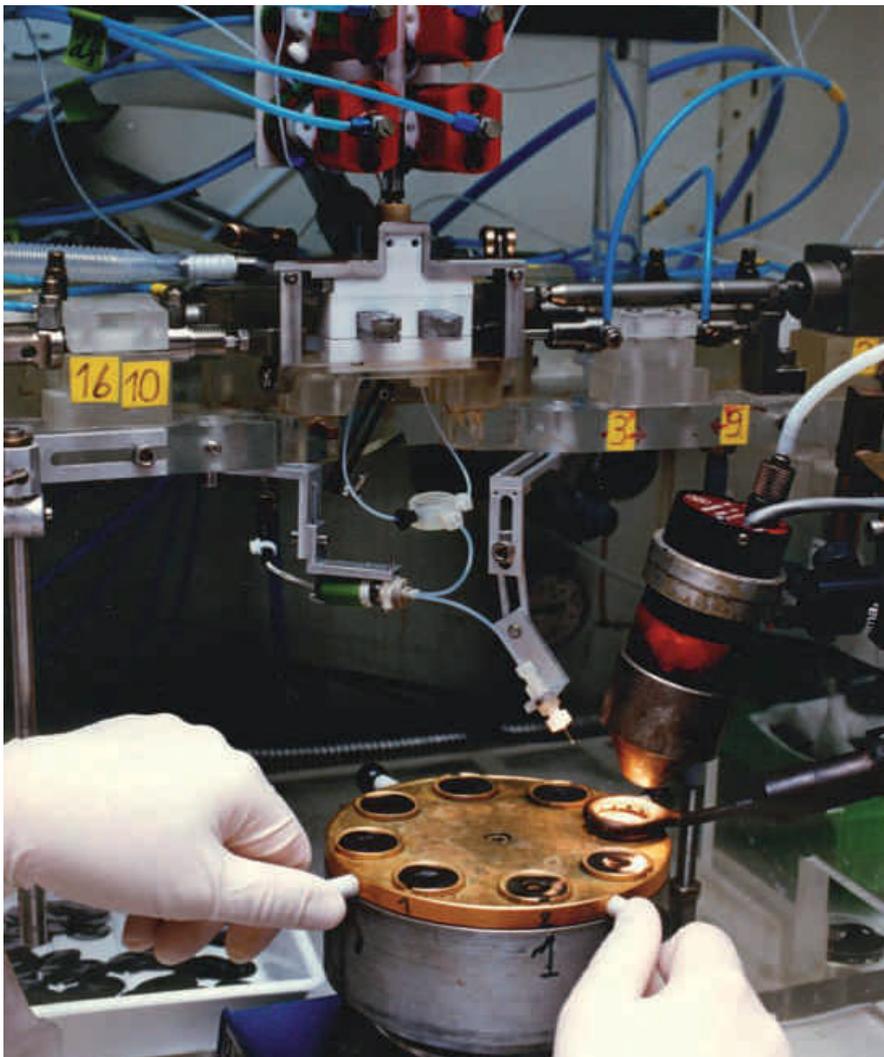


Foto: W. Brüche (GSI)

Chemie und Physik der superschweren Elemente

Bei den durch Kern-Kern-Fusion herstellbaren schwersten Elementen werden die radialsymmetrischen Elektronenorbitale durch relativistische Effekte kontrahiert und energetisch stabilisiert, wodurch die Kernladung stärker abgeschirmt wird. Dadurch können die chemischen Eigenschaften der schwersten Elemente von denen ihrer leichteren Homologen erheblich abweichen, und es ist eines der spannendsten Kapitel der modernen Kernchemie, diese Abweichungen zu bestimmen und mit den Vorhersagen relativistischer quantenchemischer Rechnungen zu vergleichen.

Die superschweren Elemente sind auch aus kernphysikalischer Sicht interessante Studienobjekte: Nach dem Flüssigkeitstropfen-Modell sollte das Periodensystem der Elemente etwa bei Element 104 enden. Die gegenüber dem Flüssigkeitstropfen-Modell um 15 Größenordnungen längere Lebensdauer dieser Elemente und die Existenz zahlreicher noch schwererer Elemente ist auf abgeschlossene Nukleonenschalen zurückzuführen, deren Lokalisierung und Stärke durch das Studium der nuklearen Eigenschaften der superschweren Elemente aufgeklärt werden können. Um die chemischen Eigenschaften dieser schwersten Elemente zu untersuchen, werden am TRIGA Mainz rechnergesteuerte, schnelle chemische Trennverfahren entwickelt und automatisiert. Essentiell ist hier die Erzeugung kurzlebiger Spaltprodukte, die den schwersten Elementen chemisch homolog sind. Mit diesen Homologen können chemische Trennapparaturen (Abb. 2) getestet und optimiert werden, die dann zum Beispiel am Schwerionenbeschleuniger der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt zum Studium der chemischen Eigenschaften der superschweren Elemente eingesetzt werden. So sind hochempfindliche, schnelle chemische Verfahren für die Elemente der Gruppen 4, 5, 6, 8 und 11 bis 16 ausgearbeitet worden. Die Arbeiten über die Chemie der schwersten Elemente werden mit zahlreichen internationalen Kooperationspartnern durchgeführt. Eine gemeinsame Berufung der Universität Mainz und der GSI Darmstadt auf dem Gebiet der schwersten Elemente verstärkt diese Forschungsrichtung.

Hochpräzisionsmessungen an neutronenreichen Radionukliden

Zurzeit wird am Strahlrohr B des TRIGA Mainz eine weltweit einzigartige Anlage aufgebaut, bei der mittels Massenspektrometrie und Laserspektroskopie die Eigenschaften (zum Beispiel Masse und Kernladungsradius) von neutronenreichen Radionukliden mit höchster Präzision ermittelt werden sollen. Diese Eigenschaften von Atomkernen spielen eine wichtige Rolle bei der Suche nach Antworten auf die noch

ungeklärten fundamentalen Fragen an der Schnittstelle zwischen Kern- und Astrophysik: Wie entstehen beispielsweise chemische Elemente im Inneren der Sterne? Aus welchen Elementen ist das Universum zusammengesetzt? Dazu werden über die Spaltung von Uran-235, Plutonium-239 oder Californium-249 am Reaktor sehr kurzlebige, neutronenreiche Nuklide erzeugt, wie sie auch in Sternexplosionen entstehen. Anschließend werden an diesen Nukliden Massen- bzw. Laserspektroskopiemessungen durchgeführt. Zur Produktion der Spaltprodukte wird ein Präparat aus dem zu spaltenden Material in einer speziellen Kammer in der Nähe des Reaktorkerns platziert und mit Neutronen bestrahlt. Die dabei entstehenden Spaltprodukte werden mit einem Gasjet kontinuierlich zu einer Ionenquelle transportiert und dann als geladene Teilchen in die entsprechende Messapparatur eingebracht. Je neutronenreicher und damit interessanter für die Astrophysik das zu untersuchende Nuklid ist, desto geringer ist in der Regel die Produktionsrate bei der Kernspaltung.

In den beiden Helmholtz-Nachwuchsgruppen von K. Blaum (Institut für Physik) und W. Nörtershäuser (Institut für Kernchemie) wurden in letzter Zeit spezielle Nachweismethoden entwickelt und am TRIGA Mainz erprobt. Damit ist es möglich, die Experimente sogar an einzelnen Ionen durchzuführen. Im Falle der Massenspektrometrie wird dazu eine so genannte Penning-Falle eingesetzt (Abb. 3a,c). Bei diesem Versuchsaufbau können geladene Teilchen in einer Überlagerung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes über einen Zeitraum von mehreren Sekunden hinweg gespeichert werden. Aus der dabei ausgeführten charakteristischen Bewegung (Abb. 3b) kann dann bei bekannter Ladung des Ions seine Masse bestimmt werden, auch wenn die exotischen Teilchen nur wenige Millisekunden leben. Bei den bisherigen Penningfallenexperimenten bleiben die Ionen, deren Masse bestimmt werden soll, nur für Bruchteile einer Sekunde in der Falle gespeichert. Danach müssen sie für den Nachweis aus der Falle ausgeschossen werden und stehen nicht mehr für weitere Messungen zur Verfügung. Für den nächsten Messpunkt muss wieder ein neues Ion in die Falle geladen werden. Deshalb nennt man diese Methode destruktiv und sie ist für die Messung von Teilchen, die nur geringste Produktionsraten besitzen, nicht optimal. Die Penningfalle am TRIGA Mainz ist mit einer weitaus leistungsfähigeren, aber auch komplizierteren Nachweisteknik ausgestattet. Das in der Falle oszillierende Teilchen induziert einen so genannten Spiegelstrom in den Elektroden der Falle, das heißt die Elektronen im Elektrodenmaterial werden bei Annäherung des positiven Ions an die Elektrode angezogen und kehren wieder an ihren Ausgangsort zurück, wenn sich das Ion wieder entfernt. Dadurch entsteht in der Elektrode ein extrem geringer Wechselstrom in der Größenordnung von wenigen Femtoampere (10^{-15} A), den man nur bei Tempe-

raturen nahe dem absoluten Nullpunkt nachweisen kann, weil er sonst vom thermischen Rauschen der Elektronen überdeckt wird. Der Nachweis mit dieser Methode erlaubt es, das gespeicherte Ion nachzuweisen, ohne es aus der Falle zu entfernen (nicht destruktiv) und viele Messpunkte mit einem einzelnen gespeicherten Ion aufzunehmen, bis es radioaktiv zerfällt.

Die Laserspektroskopie nutzt die extreme Empfindlichkeit, die man mit dem Nachweis des an einzelnen Atomen gestreuten Lichtes erreichen kann. In besonders günstigen Fällen kann man an gespeicherten Ionen soviel Licht streuen, dass ein einzelnes Atom für das menschliche Auge sichtbar wird. Mit der Laserspektroskopie ist auch die effiziente und

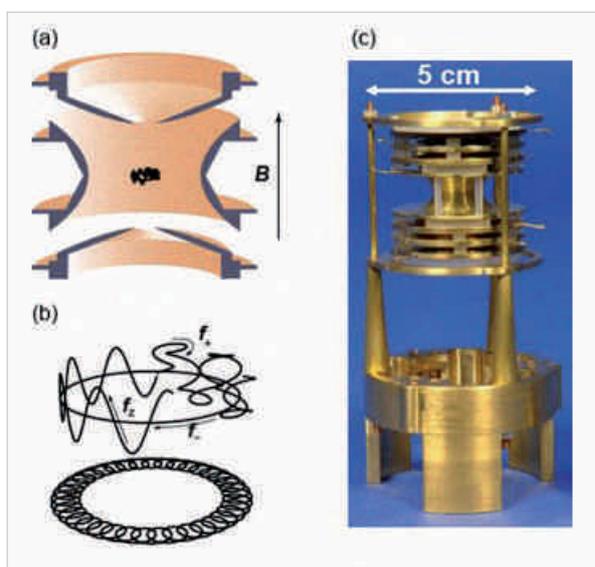


Abb. 3: (a) Schnitt durch eine Penning-Falle mit (b) resultierender Ionenbewegung. (c) Photo der eingesetzten Penning-Falle.

selektive Ionisation einzelner Atome möglich: Durch eine mehrstufige Anregung eines oder mehrerer Elektronen wird schließlich so viel Energie in dem Atom akkumuliert, dass ein Elektron das Atom verlassen kann. Diese Methode der laserresonanten Ionisations-Massenspektrometrie wird im Institut für Kernchemie seit vielen Jahren zum empfindlichen Nachweis beispielsweise von Plutonium eingesetzt, wobei hier noch eine Million Atome Plutonium nachweisbar sind; diese Menge entspricht einem Gewicht von 0,4 Femtogramm bzw. 0,0000000004 Mikrogramm. Am TRIGA Mainz sollen diese laserspektroskopischen Methoden zur Untersuchung neutronenreicher Spaltprodukte eingesetzt werden. Mit Hilfe der hochauflösenden Laserspektroskopie erhält man Aufschluss über die geometrische Form dieser Kerne, ihre Radien sowie über eventuell vorhandene Deformationen. Viele Atomkerne besitzen nämlich keine kugelförmige Gestalt, sie können vielmehr auch „platt gedrückt“ sein wie eine Linse oder mehr an einen Rugby-Ball erinnern. Diese Formen werden durch kollektive Effekte der Nukleonen hervorgerufen und sind von großem wissenschaftlichem Interesse.

Ultrakalte Neutronen am TRIGA Mainz

Starke Neutronenquellen, wie zum Beispiel Forschungsreaktoren, liefern überwiegend thermische Neutronen, die eine Geschwindigkeit von 2.200 Metern pro Sekunde besitzen. Diese Neutronen lassen sich als freie Neutronen in Strahlexperimenten beobachten. Aus der hohen Geschwindigkeit resultiert eine kurze Verweilzeit in der Messapparatur und damit eine geringe Empfindlichkeit. Ende der vierziger Jahre des letzten Jahrhunderts postulierte Enrico Fermi, dass sehr langsame Neutronen mit Geschwindigkeiten von nur wenigen Metern pro Sekunde von Festkörperoberflächen vollständig reflektiert werden. Diese Eigenschaft erlaubt es, extrem niederenergetische Neutronen in geeigneten Behältern für einige Minuten zu speichern und damit die Empfindlichkeit von Messungen fundamentaler neutronenphysikalischer Eigenschaften des Neutrons um viele Größenordnungen zu erhöhen. Besonders gut geeignete Materialien zur Reflektion von Neutronen sind Nickel, Beryllium oder Berylliumoxid. Neutronen mit Geschwindigkeiten von etwa fünf Metern pro Sekunde werden von diesen Materialien total reflektiert. Diese Geschwindigkeit entspricht der thermischen Bewegung im Bereich wenigen Milli-Kelvin, also fast am

absoluten Temperatur-Nullpunkt von $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deshalb bezeichnet man diese Neutronen als ultrakalt (ultra cold neutrons = UCN).

Die Messgenauigkeit der Experimente mit ultrakalten Neutronen ist bis heute allerdings durch die relativ niedrigen Neutronendichten der vorhandenen Quellen limitiert. Die bisher weltweit intensivste UCN-Quelle befindet sich am Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich.

Am TRIGA Mainz wurde in Kooperation mit dem Institut für Physik der Universität Mainz (W. Heil) und der TU München (S. Paul) ein neues Konzept zur Produktion von UCN entwickelt. Die im gepulsten Betrieb des TRIGA Mainz entstehenden thermischen Neutronen ($\sim 10^{14}$ Neutronen pro cm^2 und Puls) wechselwirken nahe am Reaktorkern mit gefrorenem Deuterium, welches auf einer Temperatur von $-265\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten wird, und erreichen dabei eine Geschwindigkeit von fünf Metern pro Sekunde. Am Strahlrohr C lassen sich derzeit etwa 200.000 UCN pro Puls erzeugen, die über einen Neutronenleiter aus poliertem Edelstahl zum Experiment bzw. direkt zum Neutronendetektor geführt werden (Abb. 4). Damit steht am TRIGA Mainz schon jetzt eine einzigartige Quelle für Experimente mit ultrakalten Neutronen zur

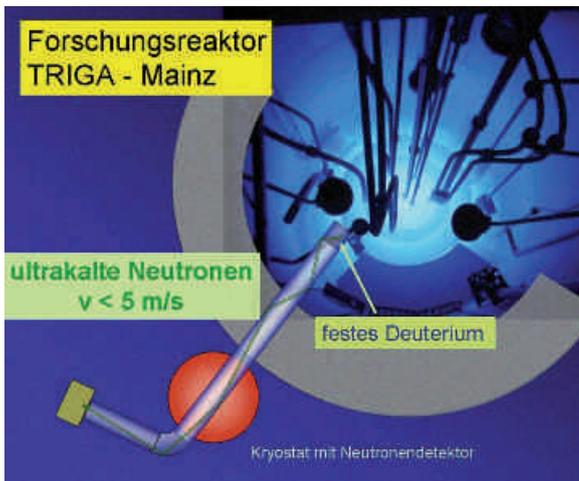


Abb. 4: Schematischer Aufbau der UCN-Quelle am TRIGA Mainz.

Verfügung. Technische Verbesserungen der UCN-Quelle und der gerade durchgeführte Wechsel vom tangentialen Strahlrohr C zum zentralen Strahlrohr D werden die UCN-Ausbeute um mindestens eine Größenordnung erhöhen. Die präzise Bestimmung fundamentaler Eigenschaften des Neutrons, wie beispielsweise seiner Lebensdauer, ist von großer Bedeutung in der Physik. In Kooperation mit dem Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen (Schweiz) werden zurzeit Experimente zur Bestimmung des elektrischen Dipolmoments des Neutrons vorbereitet. Sollte das Neutron ein elektrisches Dipolmoment besitzen, so hätte dies kosmologische Bedeutung. Seine Entdeckung würde helfen, das Phänomen der Materie – Antimaterie-Asymmetrie in unserem Universum zu erklären. Solche Experimente verlangen eine so hohe Präzision und Empfindlichkeit, dass sie nur mit ultrakalten Neutronen durchgeführt werden können. ■

■ Summary

The reactor TRIGA Mainz at the Institut für Kernchemie is one of two research reactors operated by a university in Germany and the only one that can be operated in the steady-state mode with up to 100 kilowatts power as well as in a pulsed mode with a maximum peak power up to 250 megawatts. Here, we present a survey of the main scientific investigations currently performed at the TRIGA Mainz, ranging from basic research in nuclear chemistry, fundamental atomic and nuclear physics to applied science for research and industry. This includes – among others – chemical and physical studies of the heaviest elements in the periodic table, high precision mass and laserspectroscopic measurements on neutron-rich radioisotopes and the production and investigation of ultra cold neutrons. The reactor is also intensively used for education and training.



Dr. habil. Klaus Blaum

Klaus Blaum promovierte 2000 in Physik an der Universität Mainz, ehe er vier Jahre als PostDoc zur GSI nach Darmstadt und als CERN-Fellow zu ISOLTRAP nach Genf ging. Seit 2004 leitet er die Helmholtz-

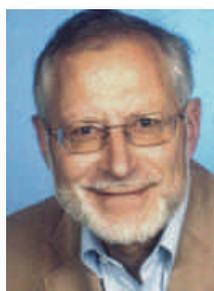
Nachwuchsgruppe „Experimente mit gespeicherten und gekühlten Ionen“ am Institut für Physik in Mainz. Für seine Arbeiten hat er eine Reihe von Auszeichnungen erhalten, so zum Beispiel den Gustav-Hertz-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2004, den Mattauch-Herzog-Preis 2005 der Deutschen Gesellschaft für Massenspektrometrie und den Lehrpreis 2006 des Landes Rheinland-Pfalz.



Dr. Klaus Eberhardt

Klaus Eberhardt promovierte 1992 in Kernchemie an der Universität Mainz. Seit 1993 ist er Stellvertretender Betriebsleiter des TRIGA Mainz und für die Koordination des experimentellen Programms am Reaktor verantwortlich. Seine Forschungsgebiete betreffen die Entwicklung von schnellen chemischen Trennverfahren, die Chemie der schwersten Elemente, Hochpräzisionsmessungen an Radionukliden, die Entwicklung exotischer Targets für Schwerionenreaktionen und Neutronenaktivierungsanalyse. Seit 2004 ist er im Rahmen des neuen TASCA-Projekts (TransActinide-Separator and Chemistry Apparatus) bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) Teilprojektleiter für den Bereich Targetentwicklung.

und Nutzung hyperpolarisierter Edelgase (Helium-3) in der Grundlagenforschung (Formfaktor des Neutrons) und in der angewandten Forschung (Kernspintomographie der Lunge). Die Bereitstellung und Nutzung ultrakalter Neutronen in Präzisionsexperimenten bei niedrigsten Energien ist ein weiteres Standbein seiner Forschungsaktivitäten. Für seine Arbeiten hat er eine Reihe von Auszeichnungen erhalten, so zum Beispiel den Röntgenpreis (1991), den Körberpreis (1998) und den IBA-Europhysics Preis (2005).



Prof. Dr. Jens Volker Kratz

Jens Volker Kratz promovierte 1971 in Kernchemie an der Universität Mainz. Nach einem PostDoc-Aufenthalt am Lawrence Berkeley Laboratory der University of California in Berkeley 1972 – 1974 wechselte er als Gruppenleiter der Kernchemie-Gruppe zur GSI nach Darmstadt. Seit 1982 ist er C4-Professor für Kernchemie an der Universität Mainz. Seine Forschungsgebiete betreffen die Mechanismen von Schwerionenreaktionen, die Synthese, die nuklearen und chemischen Eigenschaften der Transaktiniden, das Studium exotischer Kerne in Aufbruchreaktionen, Migration und Speziation von Aktiniden in der Umwelt, die Laser-Resonanzionisations-Massenspektrometrie und die ultrakalten Neutronen am TRIGA Mainz. Für seine Untersuchung der chemischen Eigenschaften der schwersten Elemente erhielt er 1998 den Otto-Hahn-Preis.



Dr. Wilfried Nörtershäuser

Wilfried Nörtershäuser promovierte 1999 in Physik an der Universität Mainz. Nach einem einjährigen PostDoc-Aufenthalt am Pacific Northwest National Laboratory in Richland (USA) wechselte er als PostDoc an die Universität Tübingen. Der Schwerpunkt seiner dortigen Arbeiten lag bei Experimenten mit exotischen Atomen an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt und am TRIUMF Institut in Vancouver (Kanada). Seit 2005 leitet er eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe zur „Laserspektroskopie hochgeladener Ionen und kurzlebiger exotischer Nuklide“ am Institut für Kernchemie der Universität Mainz.



Dr. Gabriele Hampel

Gabriele Hampel promovierte 1993 in Physik an der Technischen Universität Braunschweig. Von dort wechselte sie zur Medizinischen Hochschule Hannover in die Klinik für Nuklearmedizin, wo sie für die Inkorporationsmessstelle, den Strahlenschutz der Hochschule und als Betriebsleiterin für den dortigen Forschungsreaktor verantwortlich war. Seit 2004 ist sie im Institut für Kernchemie und seit 2006 als Betriebsleiterin für Betrieb und Nutzung des Forschungsreaktors TRIGA Mainz verantwortlich. Ihre Forschungsbereiche betreffen die Etablierung der Bor-Neutronen-Einfangtherapie am TRIGA Mainz, die Entwicklung einer intensiven Quelle für ultrakalten Neutronen sowie deren Anwendung und die Neutronenaktivierungsanalyse.



Prof. Dr. Werner Heil

Werner Heil promovierte 1986 in Physik an der Universität Mainz. Nach mehrjährigen Forschungsaufenthalten im europäischen Ausland (ENS-Paris, ILL-Grenoble) führte der Weg zurück an das Institut für Physik in Mainz, wo er seit 1994 eine C3-Professur inne hat. Seine Forschungsgebiete sind die Anwen-

■ Kontakt

Dr. Gabriele Hampel
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Institut für Kernchemie
Fritz-Straßmann-Weg 2
D-55128 Mainz
Tel. +49(0)6131-39 25 324
Fax +49(0)6131-39 26 047
Email: gabriele.hampel@uni-mainz.de