

Link

www.e12.physik.tu-muenchen.de/groups/index.html

Die Nuklidkarte, auf der alle Atomkerne als Kästchen eingetragen sind, ist hier wie eine Landschaft dargestellt. In der Mitte liegt das Tal der Stabilität mit den schwarz eingzeichneten stabilen Atomkernen, die Berge rechts und links stellen instabile Atome dar

Zinn 100

50 Protonen,
50 Neutronen
doppelt magisch
und instabil

Kalzium 40

20 Protonen,
20 Neutronen
doppelt magisch
und stabil

Hafnium Hf 168

72 Protonen und
96 Neutronen
deformierter Kern

Sauerstoff 16

8 Protonen,
8 Neutronen
doppelt magisch
und stabil

Blei 208

82 Protonen und
126 Neutronen
doppelt magisch
und stabil

Lithium 11

3 Protonen und
8 Neutronen
Halo-Kern

Nickel 78

28 Protonen,
50 Neutronen
doppelt magisch
und instabil

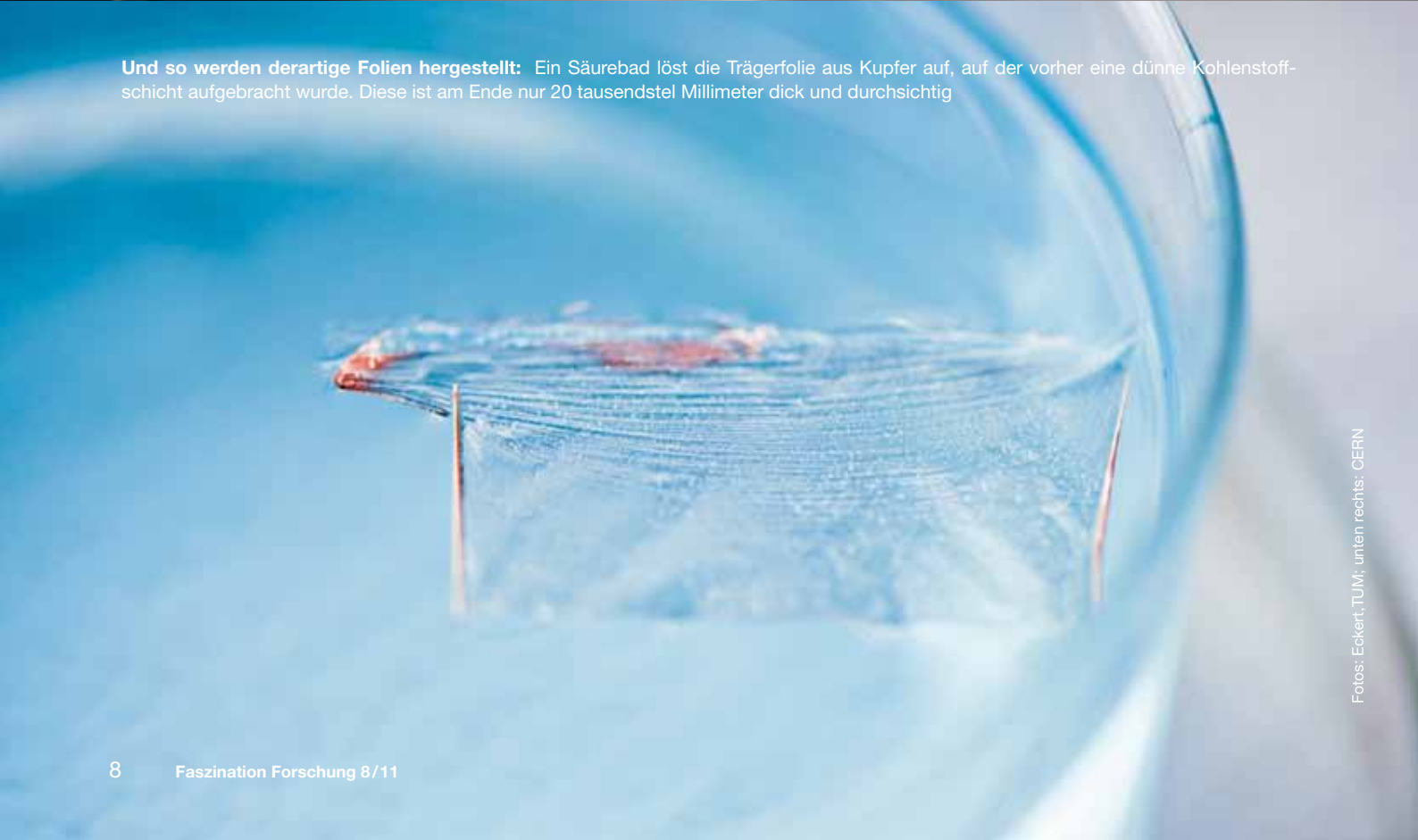
Expedition zur Insel der Inversion

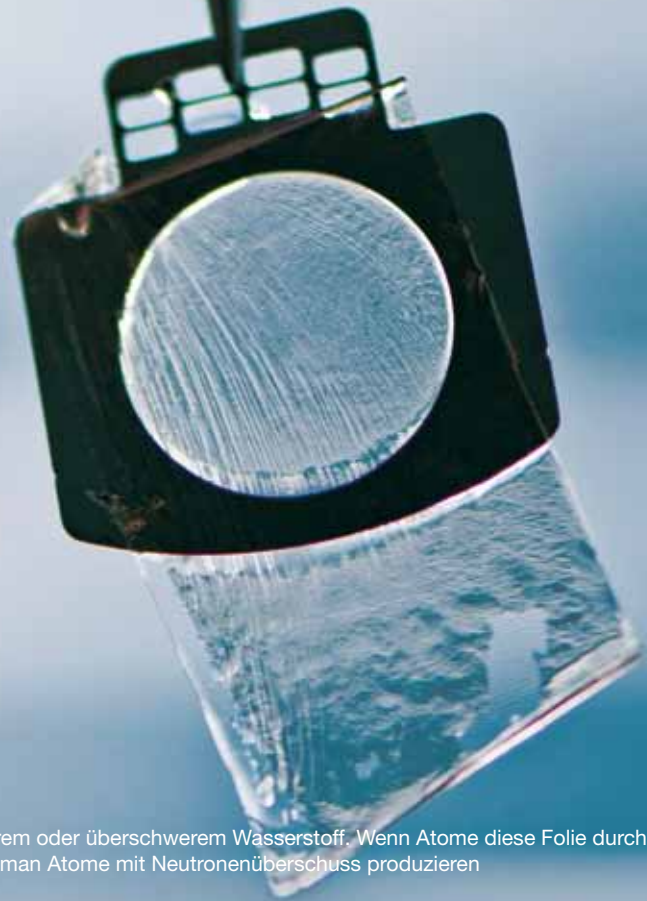
Materie weit jenseits unserer Alltagserfahrung herzustellen und zu untersuchen ist eine Kunst, die nur wenige Forscher auf der Welt beherrschen. Wissenschaftler der TUM gehören dazu. Sie gewinnen dabei Erkenntnisse über den Aufbau der Atomkerne und die Entstehung schwerer chemischer Elemente in Sternexplosionen



Dünne Folien, sogenannte Targets, spielen eine wichtige Rolle bei den Experimenten der Kernphysiker. Wenn schnelle Atomkerne auf diese Targets treffen, entstehen durch Kernreaktionen exotische Kerne, die man nachweisen und vermessen kann

Und so werden derartige Folien hergestellt: Ein Säurebad löst die Trägerfolie aus Kupfer auf, auf der vorher eine dünne Kohlenstoffschicht aufgebracht wurde. Diese ist am Ende nur 20 tausendstel Millimeter dick und durchsichtig

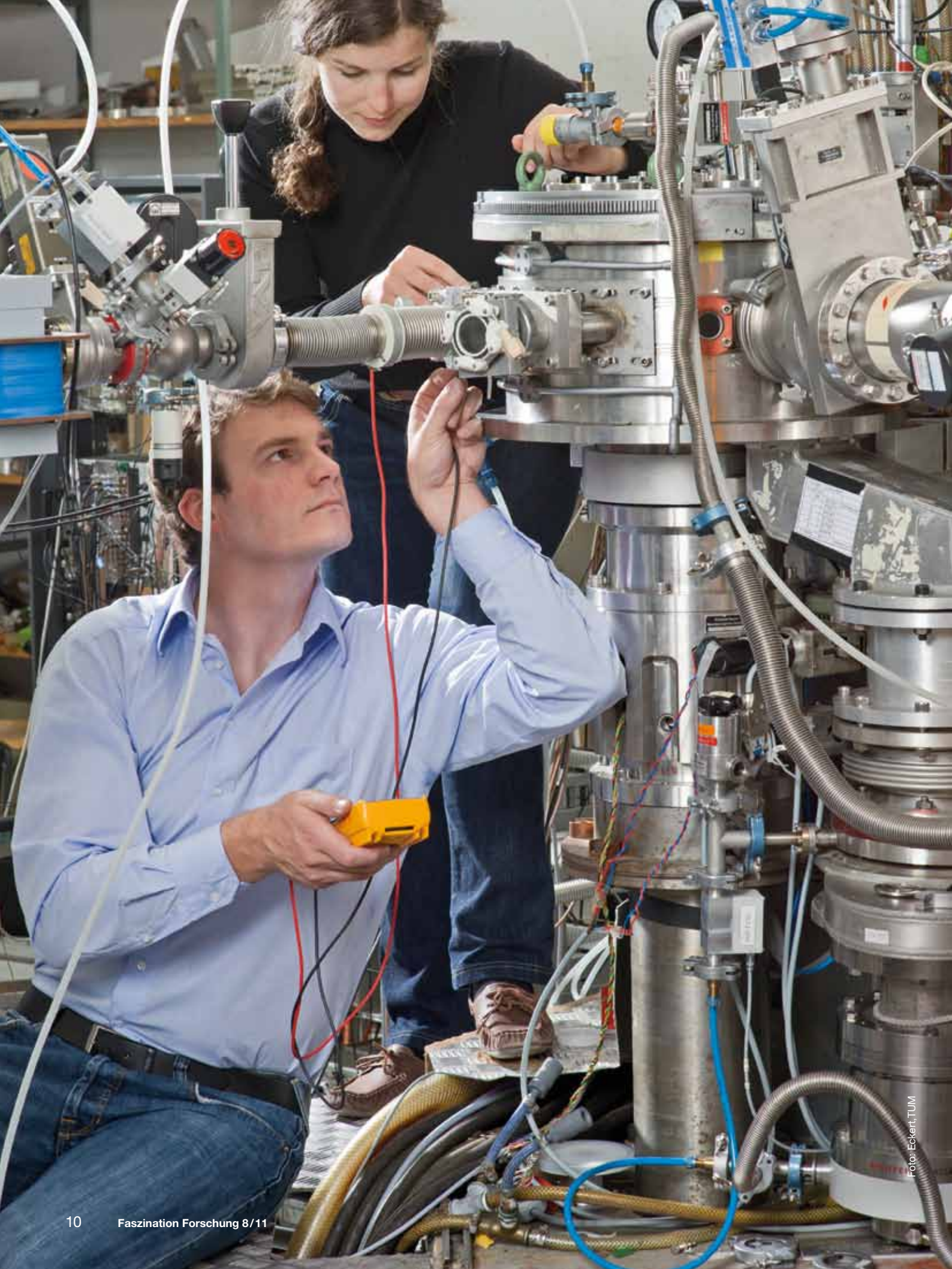




Eine andere Art von Folien besteht aus Polyethylen mit schwerem oder überschwerem Wasserstoff. Wenn Atome diese Folie durchdringen, entreißen sie oft dem Wasserstoff seine Neutronen. So kann man Atome mit Neutronenüberschuss produzieren

Am Miniball-Detektor des Experiments REX-ISOLDE im Kernforschungszentrum CERN machten die TUM Forscher ihre Messungen an deformierten Magnesiumkernen. Sie sind instabil und senden bei ihrem Zerfall Gammastrahlen aus, die hier nachgewiesen werden

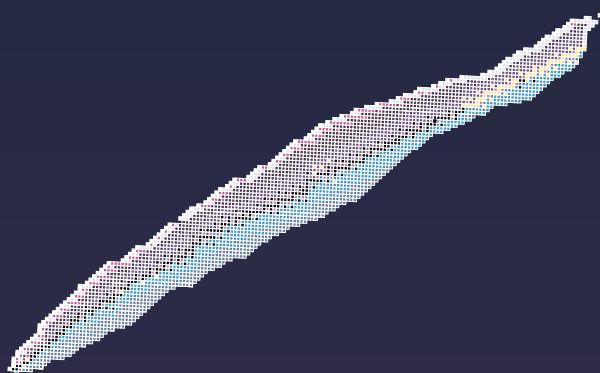




Dennis Mücher und Katharina Nowak bei Vorbereitungsarbeiten an der Targetkammer des Q3D-Magnetspektrographen am Maier-Leibnitz-Beschleunigerlabor der TUM. Auch dort kann man Grundlagenforschung mit Atomkernen machen, ähnlich wie am Experiment REX-ISOLDE im CERN

Die Nuklidkarte

Auf ihr sind alle bekannten, knapp 2500 Atomkerne nach der Zahl ihrer Protonen, die gleichzeitig die Ordnungszahl ist, und der Zahl ihrer Neutronen geordnet. Nur die schwarz markierten Kerne, die das „Tal der Stabilität“ bilden, sind in der Natur stabil vorhanden. Alle anderen werden durch Kernreaktionen erzeugt und zerfallen durch Beta- oder Alpha-Zerfall oder durch Spaltung. Die äußeren Linien markieren die Grenzen der Stabilität nach den heute gängigen Theorien, wobei die Atomkerne ganz kurz nach ihrer Bildung wieder ein Proton oder ein Neutron verlieren. Manche Forscher erwarten jenseits dieser Karte rechts oben noch eine „Insel der Stabilität“. Derartig schwere Atomkerne konnten aber bisher auf der Erde nicht erzeugt werden. Ob diese Elemente, deren Z bzw. N magische Zahlen betragen, existieren und stabil sind, weiß man heute noch nicht.



Das Leben der Kerne war nach einer Drittel Sekunde schon wieder vorbei, aber in dieser kurzen Zeitspanne gaben sie den Forschern große Rätsel auf. Die Rede ist von exotischen Magnesium-Atomkernen, die TUM Physiker am Genfer Forschungszentrum CERN erzeugt und vermessen haben. Das Besondere an ihnen war, dass sie nicht die übliche kugelige, sondern längliche Gestalt hatten. Erst wenn man sie energetisch anregte, bekamen sie Kugelform. Das hatte man nach der Theorie so nicht erwartet. „Diese Erkenntnisse stellen uns vor neue Herausforderungen. Wir müssen den Mechanismus genauer verstehen, der die veränderte Struktur herbeiführt“, sagt Prof. Reiner Krücken, der bis vor Kurzem am Physik-Department der TUM den Lehrstuhl für Physik der Hadronen und Kerne leitete und Anfang März für drei Jahre als wissenschaftlicher Leiter des kanadischen Forschungszentrums Triumf nach Vancouver wechselte. Kernphysiker finden immer wieder seltsame

Phänomene, wenn sie neue, extreme Arten von Materie herstellen: Manchmal haben die Kerne Kugelform, manchmal sehen sie länglich aus wie eine Zigarre, manchmal flach wie ein Diskus. Und mitunter blähen sie sich gewaltig auf, etwa das Lithium-11, bei dem der Kern mit seinen nur elf Protonen und Neutronen so groß ist wie ein Bleikern mit 208 Protonen und Neutronen. Die Forscher suchen dann nach Theorien, die all diese Besonderheiten erklären können.

Denn während mit milliardenteuren Beschleunigern Forscher nach den winzigsten Bestandteilen der Elementarteilchen suchen, ist man noch nicht einmal sicher, nach welchen Gesetzmäßigkeiten die viel größeren Atomkerne aufgebaut sind, aus denen unsere Welt besteht. Zwar weiß man heute, dass sie aus einem Gewusel von positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen – die gemeinsam Nukleonen heißen – bestehen, und in den 1930er-Jahren haben Physiker Theorien über die sogenannte Kernkraft entwickelt ▶

Ein kleiner Ausflug in die Geschichte

Anfang der 1930er-Jahre waren Protonen und Neutronen als Bestandteile der Atomkerne bekannt, und man konnte sich darüber Gedanken machen, was diese Gebilde eigentlich zusammenhält. Betrachtet man die Gesetze der Physik, ist es keineswegs ohne Weiteres einsehbar, warum eine Zusammenballung aus Protonen und Neutronen stabil sein soll. Immerhin tragen die Protonen eine positive Ladung, und gleichnamige elektrische Ladungen stoßen sich bekanntlich ab. Daran ändern auch die dazwischengeschobenen Neutronen nichts. Trotzdem lehrt die Erfahrung, dass Atomkerne im Allgemeinen sehr stabile Gebilde sind – unsere ganze Welt besteht daraus.

Im Jahr 1935 versuchte der Japaner Hideki Yukawa den Zusammenhalt der Nukleonen im Kern durch die Existenz besonderer Kernkräfte zu erklären, die nur auf den winzigen Entfernungen wirksam sein sollten, die den Abmessungen des Kerns entsprachen. Es gibt noch ein weiteres Beispiel in der Natur, bei dem starke Kräfte nur auf sehr kurze Distanzen wirksam sind: die Anziehungskräfte zwischen den Atomen oder Molekülen, die letztlich dafür sorgen, dass feste Körper zusammenhalten. Sie entstehen dadurch, dass die Atome sozusagen ihre äußeren Elektronen „miteinander teilen“ oder „gemeinsam benutzen“.

Diese Elektronen schwirren also ununterbrochen zwischen den Atomen hin und her und stellen so den Zusammenhalt her.

Diese Modellvorstellung übertrug Yukawa auf die Atomkerne. Warum, so fragte er, sollten nicht auch die Kernkräfte durch Teilchen erzeugt werden, die zwischen den Protonen und Neutronen des Kerns hin- und herschwirren? Er nannte diese Teilchen „Austauschteilchen“ und berechnete ihre Masse als etwa 300 Mal so schwer wie die des Elektrons. Als Bezeichnung für diese Bindepartikel bürgerte sich der Name „Pionen“ oder „Pi(π)-Mesonen“ ein. In der Tat wurde dieses Teilchen später auch wirklich entdeckt. Bis es jedoch so weit war, vergingen noch zwölf Jahre. Physiker fanden es schließlich in der kosmischen Höhenstrahlung. Die von Yukawa postulierte und später experimentell nachgewiesene Kernkraft“ bis zum Ende tauschen gegen:

Die von Yukawa postulierte und später experimentell nachgewiesene Kernkraft wurde zunächst als dritte fundamentale Kraft neben die elektromagnetische Wechselwirkung und die Gravitation gestellt. Heute weiß man, dass die fundamentale starke Kraft zwischen den Quarks im Inneren der Protonen und Neutronen wirkt und die Kernkraft eine ausserhalb der Nukleonen spürbare Restkraft ist.

(siehe Kasten oben), die die Teilchen zusammenhält, aber die Modelle sind noch relativ grob. Besonders erfolgreich war bisher das sogenannte Schalenmodell. Man stellt sich dabei vor, dass sowohl Protonen als auch Neutronen im Kern in Schalen angeordnet sind. Analog zum Bohr'schen Atommodell, bei dem die Elektronen in der Atomhülle ähnlichen Bedingungen genügen, passt in jede Schale nur eine bestimmte Anzahl von Teilchen, die durch quantenmechanische Gesetze vorgeschrieben ist. Wenn eine Schale voll ist, bedeutet das in der Regel, dass ein Atomkern mit dieser Protonen- oder Neutronenzahl besonders stabil ist. Man spricht dann von „magischen Zahlen“.

Die Anzahl der Protonen im Kern, die sogenannte Ordnungszahl Z , bestimmt, um welches Element es sich handelt, und die Anzahl der Neutronen N entscheidet darüber, ob das Atom stabil ist oder bald wieder zerfällt, also radioaktiv ist. Während die meisten dieser Atomkerne auf der Erde gar nicht natürlich existieren,

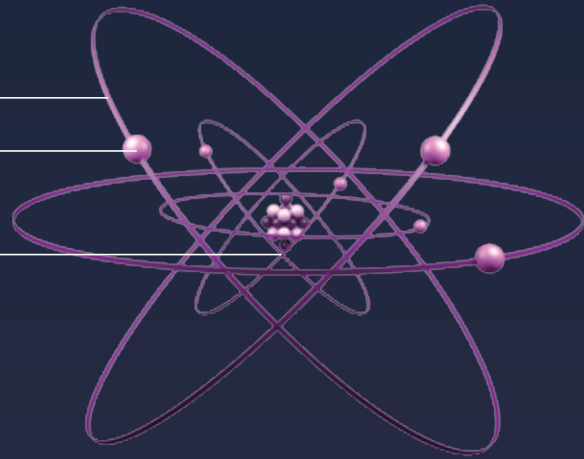
spielen sie eine große Rolle im Leben und Tod von Sternen. „Die Materie, wie wir sie kennen, ist nicht typisch für das, was sich im Inneren vieler Sterne befindet“, sagt TUM Kernphysiker Dr. Dennis Mücher. „Unter den dort herrschenden extremen Bedingungen gibt es vielleicht Atomkerne, die wir noch gar nicht kennen.“ Mit modernsten experimentellen Methoden wurde es aber in den letzten Jahren möglich, im Labor solch exotische Materie herzustellen und sie schnell genug zu untersuchen, bevor sie wieder zerfällt. Damit setzte eine Renaissance der Kernphysik ein.

Die Forscher können heute das Verhältnis von Protonen zu Neutronen in Atomkernen in weiten Grenzen künstlich ändern. Dafür ist allerdings ein gigantischer experimenteller Aufwand nötig. Die neuen Kerne produziert man beispielsweise aus anderen, stabilen Kernen, die man zerschmettert. Das geschieht, indem man die Ausgangskerne in einem großen Beschleuniger auf fast Lichtgeschwindigkeit bringt und sie dann auf eine Folie

Äußere Elektronenschale _____

Elektron _____

Innere Elektronenschale _____



Atome bestehen aus einem Kern, der von Elektronen umkreist wird. Diese bewegen sich auf bestimmten Schalen. Analog stellt man sich den Aufbau des Atomkerns vor

oder ein Materialstück, das sogenannte Target, schießt. Dort entstehen durch Kernreaktionen exotische Kerne, welche sich mit geeigneten Geräten nach Kernladung und Masse trennen, anschließend abbremsen, bündeln und erneut beschleunigen lassen und die dann sortenrein für die physikalischen Untersuchungen zur Verfügung stehen. Anlagen, wo all dies möglich ist, gibt es nur einige auf der Welt, etwa im GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt, am CERN in Genf, am RIKEN in Tokio sowie an einigen weiteren Zentren in Europa. Gerade werden auch in den USA und Kanada neue Anlagen gebaut, die bessere Experimentiermöglichkeiten bieten sollen.

Urankerne zertrümmert

Die Messungen, die zu den mysteriösen Magnesiumkernen am CERN führten, fanden an der Anlage REX-ISOLDE statt. Ein internationales Forscherteam unter der Führung von Physikern des Exzellenzclusters Uni-

verse an der TU München hat sich dort Kerne in einem Bereich mit der magischen Neutronenzahl 20, der „Insel der Inversion“ genannt wird, genauer angesehen. Die Forscher ließen einen Strahl aus hochbeschleunigten Protonen auf Platten aus Urancarbid treffen. Die winzigen Geschosse zertrümmerten viele Urankerne, und es entstand eine Unzahl verschiedener Fragmente, darunter auch Magnesiumkerne mit 18 Neutronen und einem Atomgewicht von 30. „Normale“ Magnesiumkerne, wie sie auf der Erde häufig vorkommen, besitzen nur zwölf Neutronen. Wegen der großen Überzahl der Neutronen wird der Magnesium-30-Kern instabil, er ist radioaktiv und durchschnittlich nach gut einer dritten Sekunde schon wieder zerfallen.

Die Kunst der Experimentatoren bestand nun darin, innerhalb dieser kurzen Zeit die neu entstandenen Magnesiumkerne aus allen anderen Elementen herauszufiltern, zu präparieren und auf eine Titanfolie, die mit Tritium, schwerem Wasserstoff, beladen war, zu ▶

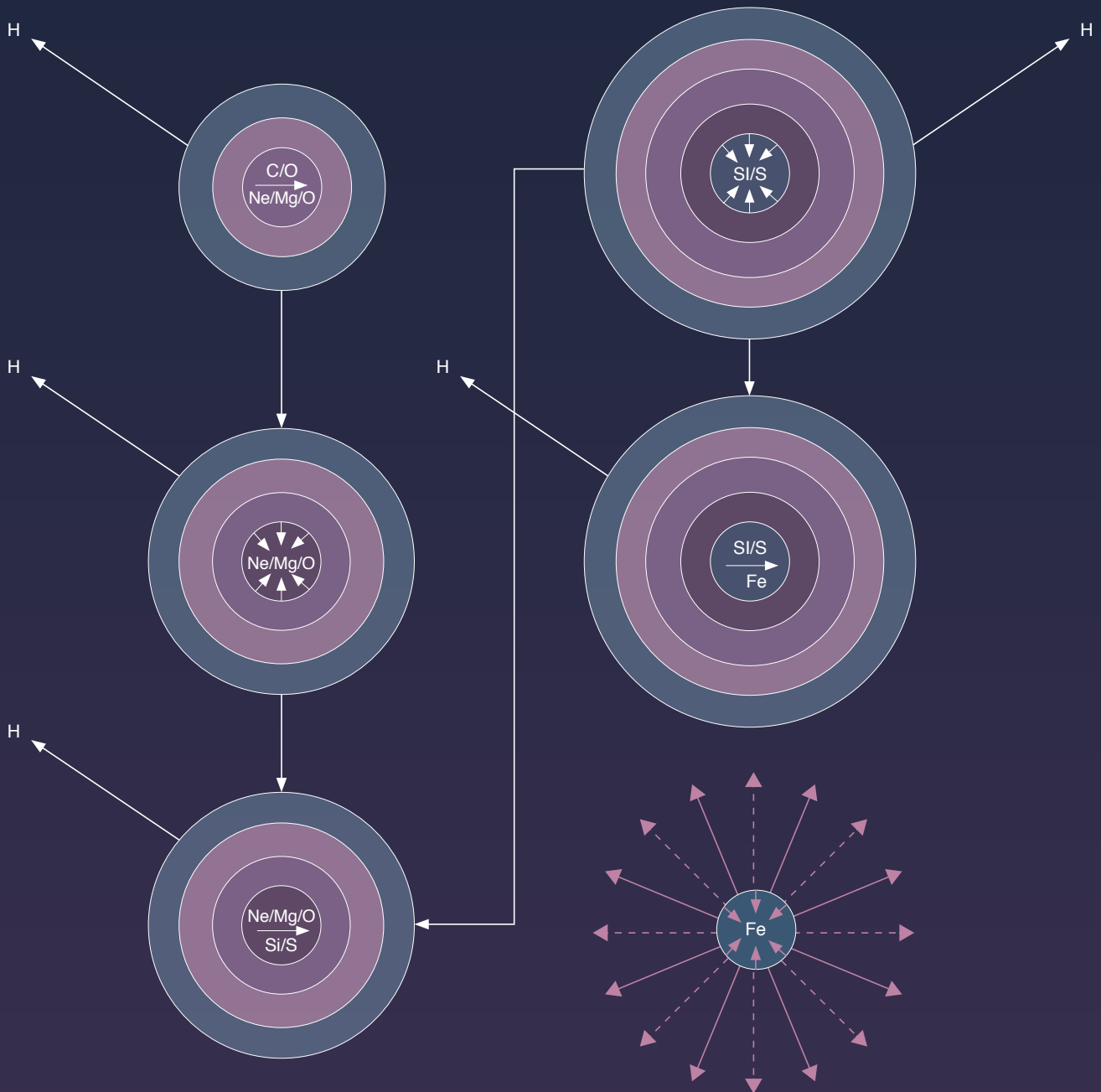


Der Krebsnebel ist der heute noch sichtbare Überrest einer Supernova. In derartigen Sternen entstehen unter extremem Druck und bei hohen Temperaturen Atomkerne, die auch schwerer sind als Eisen. Sie werden dann bei der Explosion ins Weltall hinausgeschleudert

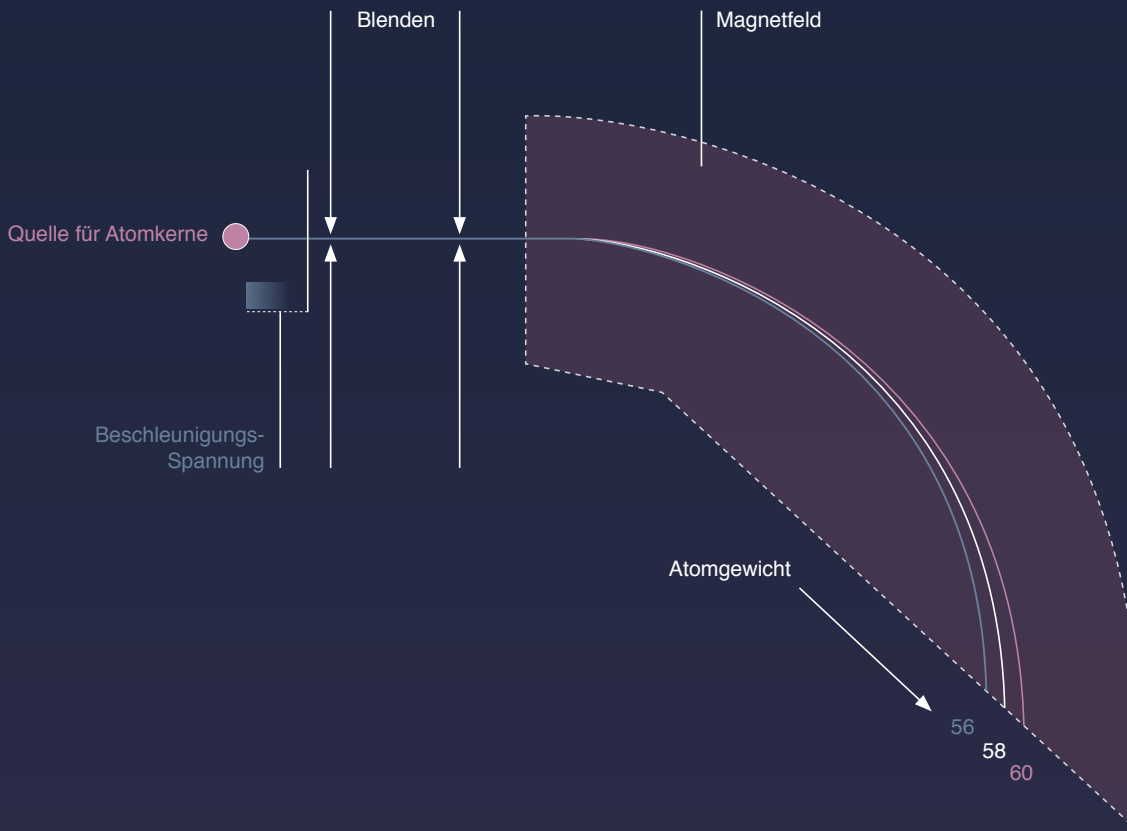
leiten. Dort streiften die Kerne bei Zusammenstößen je zwei Neutronen vom Tritium ab und nahmen sie auf – so entstanden Magnesium-32-Kerne. Und diese unterzogen die Forscher nun genauesten Messungen. Dabei stellten sie fest, dass es ovale und kugelförmige Exemplare gab. Doch deren Produktion gelang schon bei viel niedrigerer Energie, als theoretisch vorhergesagt. „Dieses Ergebnis stellt eine Herausforderung dar für die theoretische Beschreibung des Übergangs von einer Form in die andere“, resümiert Dr. Kathrin Wimmer in ihrer Veröffentlichung in den *Physical Review Letters*. Und ihr Doktorvater Reiner Krücken unterstreicht die Bedeutung dieser Entdeckung: „Die Freude war groß, dass es uns endlich gelungen ist, auch die sphärische Form dieses Magnesiumkerns nachweisen zu können.“ Man wird den neuen Kern und seine Eigenschaften nun auch in die Nuklidkarten eintragen. So heißen die farbigen Tableaus, die in vielen Physiklabors an der Wand hängen. Sie stellen eine Art Landkarte dar, denn sie zei-

gen die Landschaft der chemischen Elemente, geordnet nach der Zusammensetzung ihrer Atomkerne. Da gibt es das „Tal der Stabilität“, „Ozeane der Instabilität“, Küstenlinien (drip lines), „Inseln der Inversion“, und ganz in der Ferne ragt die „Insel der Stabilität“ auf, von der heute noch niemand weiß, ob es sich nur um ein Phantom oder doch um Realität handelt. Forscher versuchen, die Grenzen dieser Landschaft zu überschreiten und auf unbekanntes Terrain vorzustoßen. In ihrem ganz besonderen Fokus stehen dabei die magischen Zahlen. „Forschungsergebnisse der letzten Jahre legen nahe, dass sich magische Zahlen in manchen exotischen Kernen verschieben oder dass ganz neue magische Zahlen auftauchen können“, sagt Reiner Krücken. „Das könnte neue Erklärungsmöglichkeiten bieten für die Entstehung von schweren Elementen in den Sternen.“

So wollen die Physiker mit ihren irdischen Experimenten letztlich den Prozessen auf die Spur kommen, wie ▶



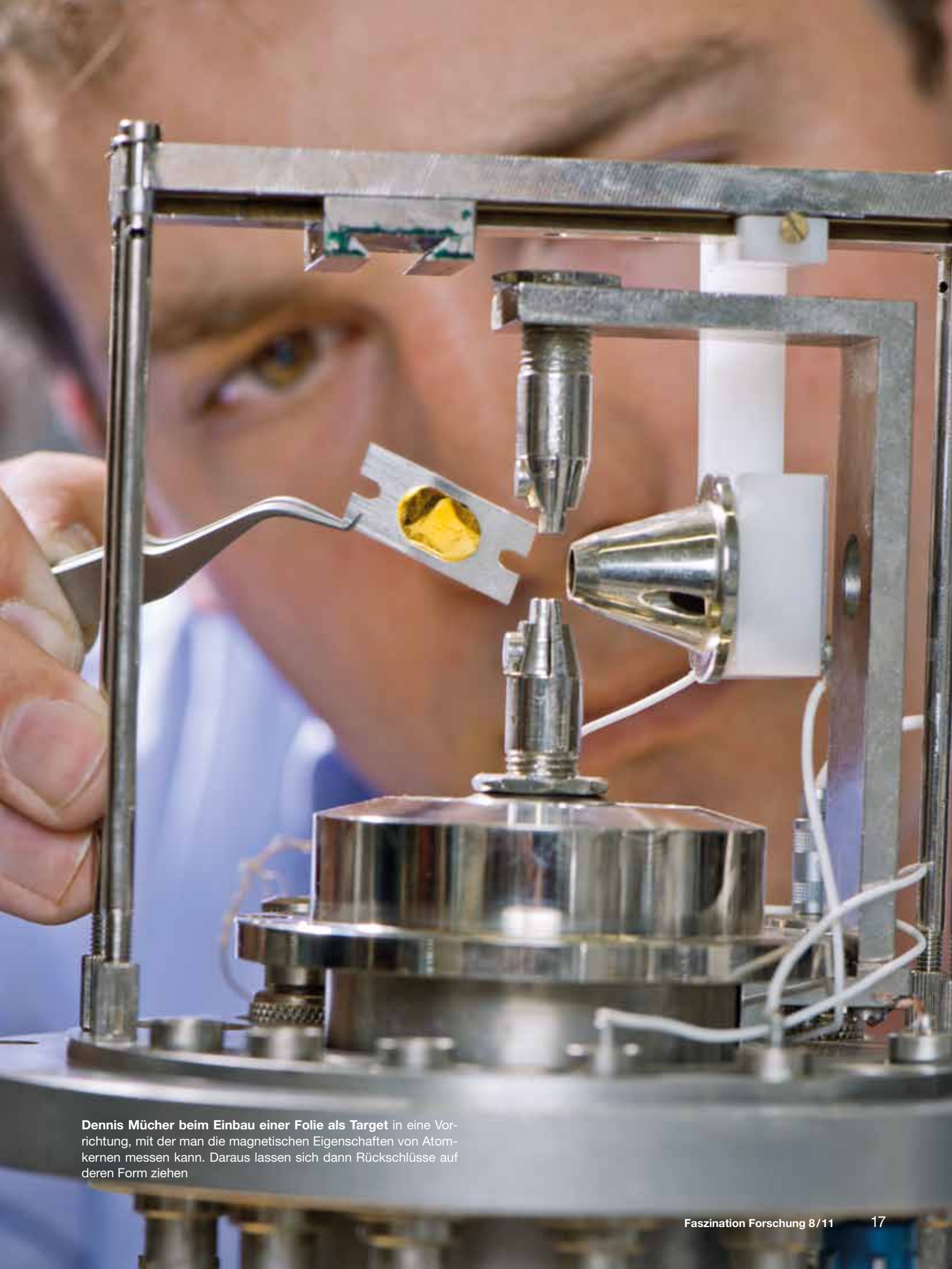
Die Entstehung schwerer Elemente nach heutigen Theorien: Schwere Sterne mit mehr als zehn Sonnenmassen brennen in Schalen weiter. Je weiter innen die Schalen liegen, desto schwerer sind die Elemente, die dort entstehen. Am Ende explodiert der innerste Kern



So kann man Atomkerne mit unterschiedlichem Atomgewicht und gleicher Protonenzahl voneinander trennen: Die beschleunigten Atomkerne, die durch die Löcher in den Blenden fliegen, werden vom Magnetfeld unterschiedlich abgelenkt, je nach ihrem Gewicht

unsere Materie draußen im All überhaupt entstanden ist. Denn gerade über die Bildung der schwereren Elemente hat man heute nur Vermutungen, aber noch keine klaren Beweise. Die häufigsten Elemente im Universum, Wasserstoff und Helium, bildeten sich bereits kurz nach dem Urknall. Andere Elemente wie Kohlenstoff oder Sauerstoff entstanden später durch die Fusion von Atomkernen im Inneren von Sternen. Elemente, die schwerer sind als Eisen, können dort jedoch nicht mehr entstehen. Sie verdanken ihre Existenz vermutlich gigantischen Sternexplosionen, auch Supernovä genannt, in denen unter extremem Druck und bei hohen Temperaturen schwere Kerne „gebacken“ und dann ins Weltall hinausgeschleudert wurden. Dazu zählen beispielsweise die Edelmetalle Gold und Silber oder das radioaktive Uran. Bei der Klärung der offenen Fragen arbeiten Kernphysik und Astrophysik eng zusammen. Denn in der Hexenküche einer Supernova entsteht offenbar eine Vielzahl massereicher Atomkerne, die über

verschiedene kurzlebige Zwischenstadien zu stabilen Elementen zerfallen. „Dass dabei auch exotische Materie entsteht, wissen wir, denn wir fanden Überreste einer solchen Explosion in der Tiefsee, wo sie sich vor rund drei Millionen Jahren ablagerten“, sagt Reiner Krücken. Dr. Thomas Faestermann, dem mit seinem Team vor einigen Jahren diese Entdeckung glückte, erklärt die Einzelheiten: „Wenn man Überreste exotischer Kerne finden will, darf man natürlich nicht nach Atomen suchen, die es auch sonst auf der Erde gibt. Wir spezialisierten uns auf radioaktives Eisen-60. Dieses Radionuklid mit einer Halbwertszeit von 2,6 Millionen Jahren wird innerhalb unseres Sonnensystems praktisch nicht erzeugt, während in einer einzigen Supernova aber eine Menge mit der zehnfachen Erdmasse davon entstehen kann.“ Die Wucht der Explosion schleudert alle neu gebildeten Elemente hinaus ins Weltall, und so können sie auch die Erde erreichen. Faestermanns Messproben stammen aus einer sogenannten Tiefsee-Mangankruste. ▷



Dennis Muecher beim Einbau einer Folie als **Target** in eine Vorrichtung, mit der man die magnetischen Eigenschaften von Atomkernen messen kann. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf deren Form ziehen



Foto: Eckert, TUM

In solchen **Vakuumkammern** wie hier am Maier-Leibnitz-Beschleunigerlabor der TUM laufen die Experimente in der Realität ab. Die Atomkerne werden darin beschleunigt, gebündelt, auf Targets geschossen und anschließend werden ihre Eigenschaften detailliert vermessen

Sie wurden aus einer Tiefe von knapp 5000 Metern vom Grund des Pazifischen Ozeans geborgen. Dort wuchsen die Schichten über mehrere Millionen Jahre lang mit einer Geschwindigkeit von lediglich 2,5 Millimetern pro Million Jahre. Jeder Schicht kann also nach ihrer Tiefe ein Alter zugeordnet werden. In einer etwa drei Millionen Jahre alten Schicht wurde eine deutliche Eisen-60-Überhöhung gemessen, ein Wert, der genau mit dem erwarteten Eisen-60-Niederschlag durch eine Supernova in einem Abstand von 100 Lichtjahren übereinstimmt.

Medizinische Anwendungen

Um dies herauszufinden, benötigten die Forscher unvorstellbar empfindliche Geräte. Der Versuchsaufbau ähnelt dem von REX-ISOLDE: Auch hier wurden die Kerne separiert, beschleunigt, abgelenkt, auf Folien geschossen, wieder gebündelt und erneut gefiltert, bevor sie im Detektor anhand ihrer Flugzeit zweifelsfrei

nachgewiesen werden konnten. Am Ende erzielte man eine Empfindlichkeit von einem Eisen-60-Kern auf zehn Milliarden Eisen-Atome, das entspricht in etwa dem Nachweis von zwei Fingerhut voll Schnaps, gut verrührt im Bodensee.

All diese Arbeiten gehören natürlich zur reinsten Grundlagenforschung. Dennoch gibt es auch praktische Anwendungen, so Reiner Krücken: „Wir können mit unseren Anlagen neue Isotope für medizinische Anwendungen finden, etwa für das PET(Positronen-Emissions-Tomographie)-Verfahren, aber auch Alpha-Strahler für eine bessere Tumorbehandlung. Hinzu kommt, dass wir für unsere Zwecke so empfindliche Analysemethoden entwickelt haben, wie sie niemand sonst hat.“ So brächten die exotischen Atomkerne einen Gewinn für alle: den Kern- und Astrophysikern die Befriedigung ihrer Neugier und gleichzeitig der Materialforschung und Medizin einen Fortschritt bei ihren Verfahren.

Brigitte Röthlein