

Auf der Spur des Sternenstaubs –

wie schwere Elemente im Kosmos entstehen

Wir sind aus Sternenstaub. Das lernt man bei Klaus Blaum, Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Er erforscht, wie schwere Elemente in Sternen entstehen. Wissenschaftlich heißt das „Nukleosynthese“. Darin steckt das lateinische Wort *nucleus* für „Kern“, also Atomkern, und das griechische Wort *synthesis* für „Aufbau“. Als unser Planet vor 4,6 Milliarden Jahren entstand, kamen tatsächlich viele Elemente als Sternenstaub auf die Erde.

Wenn wir die **chemischen Elemente**, aus denen unser Körper besteht, getrennt wiegen könnten, würden wir Folgendes feststellen: Umgerechnet auf unser Gewicht bestehen wir aus rund 56 Prozent Sauerstoff, 28 Prozent Kohlenstoff, neun Prozent Wasserstoff, zwei Prozent Stickstoff und 1,5 Prozent Calcium, dazu kommen noch Spurenelemente.* Alle diese Elemente stammen aus Sternen, nur der Wasserstoff hat eine andere Vergangenheit. Das leichteste chemische Element entstand kurz nach dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren. Wenn uns also jemand nach unserem Alter fragt, können wir zu Recht antworten, dass wir zu neun Prozent fast so alt sind wie das Universum. Die restlichen 91 Prozent sind jünger – aber immer noch Milliarden von Jahren alt.

Der Urknall erzeugte auch einen Teil des Heliums und Lithiums im Weltall, die Elemente Nummer Zwei und Drei im Perioden-

system. Alle schwereren Elemente entstehen ausschließlich in Sternen, einige sogar erst in deren Todeskampf. Dabei blähen sich Sterne von der Größe unserer Sonne zu einem roten Riesen auf. Am Ende stoßen sie ihre äußere Hülle ab, und ihr Inneres fällt zu einem Weißen Zwerg zusammen. Noch dramatischer enden größere Sterne, die mindestens acht Sonnenmassen besitzen. Sie explodieren in einer Supernova, deren extreme Hitze schwere Elemente erbrütet. Diese Elemente schleudern sie unter anderem als Sternenstaub ins Weltall. Übrig bleibt ein sehr kleiner Neutronenstern, in dem Materie extrem zusammengepresst ist (**Titelbild**).

DAS STERBEN VON STERNEN

Sterne verbrauchen während des größten Teils ihrer Existenz ihren riesigen Wasserstoffvorrat. Im Kern der Sonne zum Beispiel herrscht eine Temperatur von rund 15 Millionen Grad. In der enormen Hitze verlieren Atome alle Elektronen, und vom leichten Wasserstoff sind nur noch einzelne Protonen als nackte Atomkerne übrig. Diese Protonen quetscht ein gigantischer Druck von 200 Milliarden Erdatmosphären so dicht zusammen, dass sie permanent aufeinander einprasseln. Dabei verschmelzen regelmäßig vier Protonen zu einem Heliumkern (**siehe Techmax 9**). Helium ist also teilweise Sternenjasche, ein anderer Teil kommt wie Wasserstoff aus dem Urknall.

Pro Sekunde fusioniert die Sonne rund 564 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 560 Millionen Tonnen Helium. Sie verliert also in jeder Sekunde vier Millionen Tonnen an Masse, was ungefähr dem Mount Everest entspricht.** Was dabei geschieht, beschreibt Albert Einsteins berühmtes $E = mc^2$. Diese Formel besagt, dass Masse und Energie zwei Seiten derselben Medaille sind. Masse kann in Energie umgewandelt werden und umgekehrt. Ersteres passiert in Sternen und heizt sie auf. Der Gegendruck des heißen Gases verhindert, dass der Stern unter seiner eigenen gewaltigen Schwerkraft (Gravitation) einstürzt.

Deshalb wird ein Stern instabil, sobald sein Wasserstoffvorrat aufgebraucht ist. In der Gravitationspresse wird sein innerer Kern immer heißer und dichter. Bei etwa 100 Millionen Grad zündet das „Heliumbrennen“: Es stabilisiert den aufgeblähten Stern nochmals für einige Millionen Jahre. „Dabei verschmelzen jeweils zwei Heliumkerne zu einem Berylliumkern“, erklärt Klaus Blaum, „und dieser mit einem dritten Heliumkern zu einem Kohlenstoffkern.“ Je weiter das Sterben von Sternen fortschreitet, desto schwerer sind die Atomkerne, die entstehen. „Das geht bis zum Eisen“, erklärt der Kernphysiker, „dort ist Schluss.“



In einem Kern ringen zwei Superhelden gegeneinander (li.): Die Starke Kraft sorgt dafür dass sich die Kernteilchen (Nukleonen) gegenseitig anziehen. Die Coloumb-Kraft bzw. elektromagnetische Wechselwirkung hingegen treibt sie auseinander, weil die elektrisch gleich geladenen Protonen sich gegenseitig abstoßen. Wird der Kern groß, dann kann sich die schwächere Coulomb-Kraft dank ihrer unendlichen Reichweite durchsetzen.

Eisenkerne sind besonders stabil und markieren eine Wende. Wenn noch schwerere Elemente durch Fusion entstehen sollen, muss viel Energie zugeführt werden. Denn die Fusion verbraucht oberhalb von Eisen Energie statt sie freizusetzen. Deshalb geht die Natur andere Wege bei schwereren Elementen, und das sind viele. Schließlich ist Eisen erst das 26. von über 90 natürlich vorkommenden Elementen im **Periodensystem**. Wie aber entstehen alle schwereren Elemente? Zum Beispiel Gold? Auf der Suche nach Antworten arbeiten die Heidelberger mit Astrophysikern zusammen. Diese richten ihre Teleskope auf

die Sterne und haben so das Große im Blick. Ins Kleinste, in die Atomkerne, „schauen“ dagegen die Kernphysiker – diese aufwändigen Experimente sind eine Art Supermikroskop und finden an großen Teilchenbeschleunigern statt.

Um die **Nukleosynthese** zu verstehen, muss man in die Physik von Atomkernen eintauchen. Das Wissen über den genauen inneren Aufbau von Atomkernen hat noch erstaunlich viele Lücken. Der Grund: Je größer Atomkerne sind, desto komplexere „Vierteilchensysteme“ aus vielen Protonen und Neutronen bilden sie.

DAS WECHSELSPIEL DER KRÄFTE

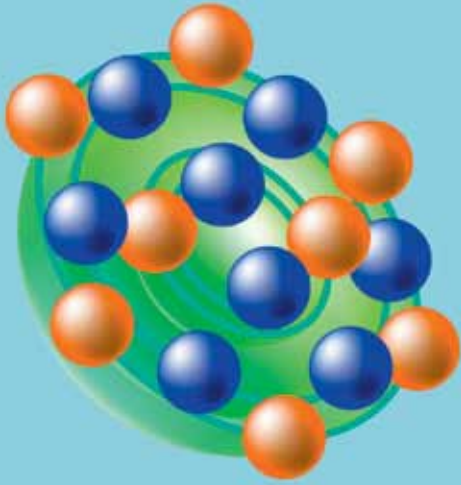
Atomkerne werden vor allem von den zwei stärksten der vier heute bekannten physikalischen Kräfte beherrscht: Die „**Starke Kraft**“ vereint dabei die meisten Stärkepunkte auf sich. Sie wirkt auf beide Sorten Kernteilchen (Nukleonen), Protonen und Neutronen, anziehend. Über diese gegenseitige Anziehung hält sie die Kerne zusammen. Ihr Gegenspieler ist die elektromagnetische Wechselwirkung, die zweitstärkste Kraft. Sie ist nach dem französischen Physiker Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) benannt. Die **Coulomb-Kraft** sorgt dafür, dass die elektrisch gleich geladenen Protonen sich heftig voneinander abstoßen. In der Kampfarena des Periodensystems siegt meist die Starke Kraft über die Coulomb-Kraft. Doch wie alle Superhelden hat auch sie eine Schwäche: ihre kurze Reichweite. Ihr Klammergriff ist zwar stark, aber kurzarmig. Dagegen reicht die Coulomb-Kraft unendlich weit (Abb. A). Deshalb wachsen ihre Siegchancen mit der Größe eines Kerns. Siegt sie, dann zerplatzt er in einer spontanen Kernspaltung.

Sehr schwere Elemente am Ende des Periodensystems werden deshalb instabil. Doch auch mittelschwere Elemente können zerfallen. Als grobe Regel für Stabilität gilt: Bei leichten Elementen müssen Protonen- und Neutronenzahl etwa gleich sein, zu schwereren Elementen hin braucht es einen wachsenden Überschuss an Neutronen. Letzteres kann man sich gut anhand des Ringkampfes vorstellen: Jedes Neutron kämpft treu auf der Seite der Starken Kraft, Protonen mischen dagegen auf beiden Seiten mit. Folglich hilft ein Neutronenüberschuss in der Mannschaft der Starken Kraft, einen größeren Kern zusammen zu zwingen.

Und wie sieht nun ein Atomkern aus? 1935 dachte der deutsche Physiker Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) an einen schwebenden Wassertropfen. Die Oberflächenspannung des Tropfens hält die Wassermoleküle in einer Kugelform, weil dies Energie spart. Gleiches müsste auch für Atomkerne gelten, nahm von Weizsäcker richtig an. „Sein **Tröpfchenmodell** zählt modernisiert auch heute noch zu den besten Kernmodellen“, bestätigt Blaum. Ein gutes Modell muss aber noch einen strengen Schiedsrichter berücksichtigen: die Quantenmechanik. Mit nur grob zehn Femtometern (Millionstel eines Milliardstel Meters) Durchmesser sind Atomkerne unfassbar winzig. Und gehören somit zur Quantenwelt. Und diese kennt verschiedene Sorten von Quantenteilchen.

Protonen, Neutronen und Elektronen gehören dabei zu den sogenannten Fermionen und diese sind ein bisschen unsozial: Keines will seinen Quantenzustand mit einem anderen Fermion teilen. In Atomkernen sind diese Quantenzustände vereinfacht gesprochen wie Zwiebelschalen angeordnet. Dieses **Schalen-**

Abb. B



Grafik © R. Wengenmayr

Im Schalenmodell (hier am Beispiel von Sauerstoff) sitzen beide Nukleonensorten (Protonen – rot, Neutronen – blau) auf getrennten Schalen. Weil sich die Protonen gegenseitig elektrisch abstoßen, reduziert das ihre Bindungsenergie und macht ihre Schalen leicht größer als bei den Neutronen. Ein Sauerstoff-Kern mit acht Protonen und acht Neutronen hat vollständig gefüllte Schalen. Er ist „doppelt magisch“ und besonders stabil.

modell (Abb. B) entwickelten die deutsche Physikerin Maria Goeppert-Mayer (1906-1972) und ihr Kollege Hans Jensen (1907-1973), wofür sie 1963 den Physik-Nobelpreis bekamen. „Jede Schale kann man sich als Sitzreihe in einem Theater vorstellen“, erklärt Blaum: „Der Platzanwieser füllt Reihe um Reihe mit Besuchern, also Protonen und Neutronen.“ Sobald eine Sitzreihe bzw. Schale voll ist, ist sie besonders stabil. Diese Quantenregel gilt übrigens genauso für die Elektronenschalen der Atomhülle: Vollständig gefüllt machen sie das Atom zum Edelgas. Das Atom spart dadurch viel Energie und ist chemisch extrem stabil.

DIE MAGIE DER VOLLEN SCHALEN

In Atomkernen ist das ähnlich. Voll gefüllte Schalen heißen dort „magisch“. **Magische Kerne** sind wie Edelgase stabiler als vergleichbare Kerne mit ungefüllten Schalen. Allerdings haben Blaum und seine Kollegen inzwischen magische Kerne entdeckt, die das Schalenmodell nicht erklären kann. Solche Kerne besitzen zum Beispiel einen extremen Überschuss an Neutronen. Das perfekte Modell für Atomkerne fehlt also noch. Welche Schalen magisch sind, ist gerade bei ganz schweren Kernen noch unbekannt. Oder um im Bild des Theaters zu bleiben: die Gesamtzahl der Plätze in den hinteren Sitzreihen ist ungewiss. Genau das möchte Blaums Team für wissenschaftlich besonders interessante Atomkerne herausbekommen – um die Modelle von Atomkernen zu verbessern. Damit lässt sich die Nukleosynthese der schweren Elemente in Sternen genauer enträtseln.

Die Bindungsenergie ist also der Sesam-Öffne-Dich zum inneren Aufbau von Atomkernen. Wie aber misst man sie? Hier kommt wieder die berühmte Formel $E = mc^2$ ins Spiel. Danach lässt sich die im Kern gespeicherte Energie über seine Masse herausfinden. Also müssen die Kerne auf eine Waage. Ein Goldkern zum Beispiel wiegt rund $3,3 \text{ bis } 10^{-22}$ Gramm. Ein Goldatom im Fell eines kleinen Wildkaninchens würde dieses im gleichen

Verhältnis schwerer machen wie ein zusätzliches Kaninchen die gesamte Erde. „Etwa ein Prozent dieser bereits winzigen Kernmasse steckt in der Bindungsenergie“, sagt Blaum. Ein locker gebundener Kern ist somit minimal schwerer als ein stabilerer magischer Kern mit gleicher Nukleonenzahl: Die stärkere Bindung zwischen Protonen und Neutronen spart mehr Energie und damit Masse ein.

Um diese unfassbar kleine Massenänderung zu erfassen, mussten die Heidelberger die empfindlichsten Waagen der Welt bauen. Eine davon steht am Institut für Kernchemie in Mainz. Sofort fällt im Gewirr von Rohren und Kabeln eine große Metalltrommel auf. In ihr befindet sich ein starker supraleitender Magnet, den flüssiges Helium auf rund vier Kelvin, also auf minus 269 Grad Celsius kühlt. „In diesem Magnet steckt die eigentliche Waage“, erklärt Blaum, „eine sogenannte Penning-Falle.“ Das ist eine kleine Röhre, die nur wenige Zentimeter lang ist und einige Millimeter Durchmesser hat. In ihr herrscht ein nahezu perfektes Vakuum, damit keine umherflitzenden Gasmoleküle den zu wiegenden Atomkern aus der Falle kicken.

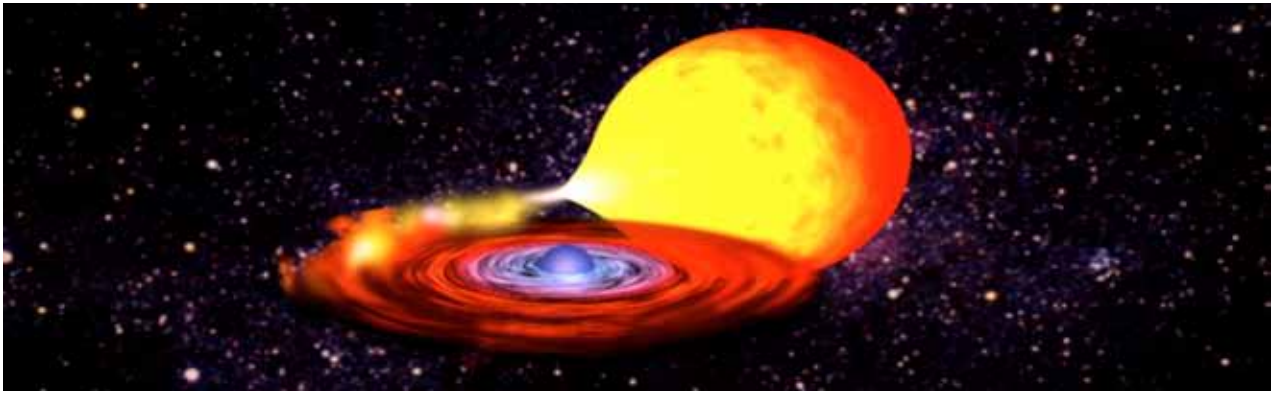
EINE WAAGE FÜR ATOMKERNE

Zuvor muss der gefangene Atomkern eine Art Hindernisrennen überstehen. Das trennt ihn wie ein Casting von anderen Kernen. Außerdem wird ihm mindestens ein Elektron entfernt, er ist also elektrisch positiv geladen. Deshalb kann die Falle ihn mit den Kräften des Magnetfelds und eines elektrischen Felds in der Schwebe halten. Der Kern rast in der Falle herum. Ihm ergeht es dabei wie jemandem auf einem Wellenflugkarussell mit Kabinen, die zusätzlich wie kleine Karussells um sich selbst rotieren. Das Ergebnis ist eine kompliziert verschraubte Bahn, trotzdem ist das Messprinzip einfach zu verstehen. „Präzisionsmessungen funktionieren am besten, wenn man etwas zählen kann“, verrät Blaum. Deshalb „zählt“ eine hochempfindliche Elektronik die Umlauffrequenzen des Kerns auf seiner Bahn mit. Im Prinzip funktioniert das wie bei einer Kugel an einer Schnur, die man im Kreis herum schleudert: Eine leichtere Kugel rotiert bei gleichem Energieaufwand schneller als eine schwerere. „Unsere empfindlichsten Waagen könnten umgerechnet auf die Masse des Airbus A-380 herausfinden, ob eine Mücke als blinder Passagier an Bord ist“, erklärt Blaum. Mit ihren Superwaagen haben die Heidelberger wichtige Antworten zur Frage beigetragen, wie Atomkerne genau aufgebaut sind.

Das führt uns wieder zur Nukleosynthese von Elementen, die schwerer als Eisen sind. In der Sterbephase sehr schwerer Sterne schwirren freie Neutronen umher, die Atomkerne einfangen können. Die Neutronen bleiben am Kern kleben wie nasse Schneeflocken an einem fliegenden Schneeball. Danach greift die dritte Kraft der Physik ein: Die „**Schwache Kraft**“ lässt so ein eingefangenes Neutron in einem „Betazerfall“ in ein Proton plus ein Elektron zerfallen. Mit dem zusätzlichen Proton rutscht der Kern nun im Periodensystem auf den nächsthöheren Platz. So erbrütet dieses Neutroneneinfangen viele Elemente jenseits von Eisen – bis ungefähr zum Blei.

„Als Geburtsort für ganz schwere Elemente wie Gold werden Neutronensterne vermutet“, erklärt Blaum. In einem möglichen Szenario befindet sich ein solcher Neutronenstern in einem Doppelsternsystem. Mit seiner gewaltigen Gravitation saugt

Abb. C



Künstlerische Darstellung eines Doppelsternsystems, in dem ein Neutronenstern (blau) Materie von seinem Sternpartner absaugt. Aus diesem Gas können an der Oberfläche des Neutronensterns sehr schwere Elemente entstehen. Da das Gas fast mit Lichtgeschwindigkeit auf den Neutronenstern stürzt, kommt es immer wieder zu thermonuklearen Explosionen. Diese können Materie in den Kosmos schleudern. Quelle: NASA

der Monsterzwerg Materie von seinem normalen Partnerstern ab (Abb. C). Wo diese Materie auf seine Oberfläche fällt, entstehen schwere Elemente. Neutronensterne sind die Überreste von Supernova-Explosionen. Dabei kollabiert das Innere der Sterne zu einem extrem dichten Objekt. Bis zu zwei Sonnenmassen werden von ihrer eigenen Gravitation auf eine Kugel von nur 20 bis 30 Kilometern Durchmesser zusammengepresst. Das entspricht der Ausdehnung einer mittleren Großstadt in Deutschland. Die Atome werden dabei so brutal zusammengequetscht, dass ihre Kerne aneinander stoßen. Die freigesetzten Elektronen verbinden sich im Inneren eines Neutronensterns mit Protonen zu Neutronen. Das spart in dieser extremen Umgebung Energie. „Ein Teelöffel voll Neutronensternmaterie wäre etwa so schwer wie ein massiver Eisenwürfel mit 700 Meter langen Kanten“, erklärt Blaum.

Fällt nun Gas vom Partnerstern auf den Neutronenstern, dann startet in dessen Kruste ein spezieller Brutprozess. Zu einem großen Teil besteht dieses angesaugte Gas aus Wasserstoff, dessen Kerne ihre Elektronen verlieren. Die freien Protonen werden dann von größeren Atomkernen in der Kruste eingefangen, die zu noch schwereren Elementen heranwachsen. Von den dazu ebenfalls nötigen Neutronen gibt es auf einem Neutronenstern reichlich. Dieser Wachstumsprozess gerät aber bei bestimmten Atomkernen ins Stocken. Sie heißen **Wartepunktkerne** und bestimmen zum Beispiel, wie häufig die Elemente 92 bis 98 des Periodensystems entstehen.

„Es ist sicher, dass es Wartepunktkerne gibt“, sagt Blaum, „aber wir kennen viele von ihnen noch nicht.“ Nach Kernen mit diesen Eigenschaften suchen die Heidelberger in ihren Experimenten – mit Erfolg: Blaums Team konnte in verschiedenen

internationalen Kooperationen wichtige Kandidaten für Wartepunktkerne entdecken. So lernen wir über das „Wiegen“ von Atomkernen viel über den Sternenstaub, aus dem wir selbst bestehen.

Schlagwörter

chemische Elemente, Periodensystem, Nukleosynthese, Starke Kraft, Coulomb-Kraft, Schwache Kraft, Tröpfchenmodell, Schalenmodell, Magische Kerne, Neutronenstern, Wartepunktkerne

Lese-Tipps

„Physik in der Waagschale“, MaxPlanckForschung 3/2010, www.mpg.de/782772/

„Superschwer und trotzdem stabil“, www.mpg.de/6201973/

„Kosmische Kollisionen schmieden Gold“, www.mpg.de/4413949/

Video-Tipps

Harald Lesch: Was ist ein Atomkern? auf www.youtube.com/watch?v=FFZ_sa1lma0

Harald Lesch: Atomkerne lügen nicht auf www.youtube.com/watch?v=3rIneezwei4

Publikumsvorlesung des Basler Theoretikers Friedrich Karl Thielemann auf vimeo.com/35624791

Quellen

* www.chemie.fu-berlin.de/medi/suppl/mensch.html

** <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/high-school/chemmatters/chemmatters-february-2007.pdf>

www.maxwissen.de

► der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von **BIOMAX**, **GEOMAX** und **TECHMAX**. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: **Max-Planck-Gesellschaft**, Wissenschafts- und Unternehmenskommunikation, Hofgartenstraße 8, 80539 München, e-mail: presse@gv.mpg.de