



ASTROPHYSIK

UND ATMOSPHERE

# Das Licht – Nachrichtendienst der Sterne

von Kathrin Göbel und René Reifarth

**Das Sternenlicht verrät viel über die Entstehung der Elemente, das Alter und die zukünftige Entwicklung des Universums. Aber Astrophysiker richten ihren Blick nicht nur in den Nachthimmel. Frankfurter Physiker simulieren Rote Riesen im Labor und stellen damit etablierte Theorien auf den Prüfstand.**

**D**ie Sonne ist unser nächster Stern und bildet das Zentrum unseres Planetensystems. Im Innern der Sonne verschmelzen jede Sekunde mehr als 500 Milliarden Kilogramm des leichtesten Elements Wasserstoff zum nächstschwereren Element Helium. Dieser Fusionsprozess setzt Energie in Form von Licht frei, das ins All abgestrahlt wird. Auf der Erde erreicht uns pro Quadratmeter eine Leistung von etwa 1,4 Kilowatt.

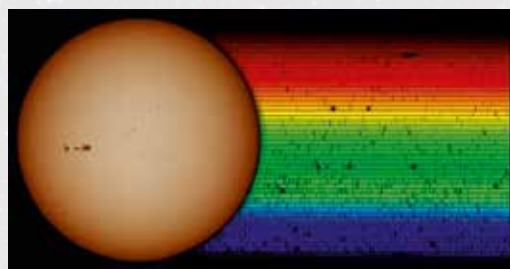
Wenn wir das Licht der Sonne zerlegen, erhalten wir einen wunderschönen Regenbogen. Bei genauer Analyse des Spektrums von Rot bis Blau zeigt sich, dass es Lücken aufweist, die sogenannten Fraunhofer-Linien (Abb. 2). Die Erklärung dafür fanden im 19. Jahrhundert der Chemiker Robert Bunsen und der Physiker Gustav Kirchhoff, als sie die Wechselwirkung von Licht und Gasen untersuchten. Dabei stellten sie fest, dass jedes Gas, beziehungsweise jedes Element, Licht charakteristischer Wellenlängen absorbiert, so dass im Spektrum Lücken entstehen. Aus den Lücken im Sonnenspektrum kann man daher im Umkehrschluss die chemische Zusammensetzung der Sonnenoberfläche bestimmen. Dies führte zur Entdeckung des bis dahin auf der Erde unbekanntes »Sonnenelements« Helium. Heute wissen wir, dass alle Sterne zu etwa 75 Prozent aus Wasserstoff und 25 Prozent aus Helium bestehen.

## Inventur im Sonnensystem

Die Elementhäufigkeiten im Sonnensystem können wir anhand von Position und Stärke der Linien (Lücken) des Sonnenspektrums bestimmen. Unverfälschte Informationen vom Beginn des Sonnensystems liefern uns außerdem Meteoriten. Die Sonne und die Planeten sind aus einer Staubwolke entstanden. Gleichzeitig formten sich auch kleinere Materiebrocken. In

ihnen ist die ursprüngliche Zusammensetzung der Elemente konserviert. Einige dieser Brocken durchdringen die Atmosphäre und erreichen den Erdboden. Dann sprechen wir von Meteoriten. Diese Gesteine können wir im Labor untersuchen und die Elementhäufigkeiten bestimmen.

Die häufigsten Elemente im Sonnensystem sind Wasserstoff und Helium. Bis zum schwersten stabilen Element Bismut fallen die Häufigkeiten um viele Größenordnungen ab. Ebenso fällt auf, dass die stark gebundenen Elemente der Eisengruppe (um die Massenzahl 56 herum) um Größenordnungen häufiger als die umliegenden Elemente sind (Abb. 3).

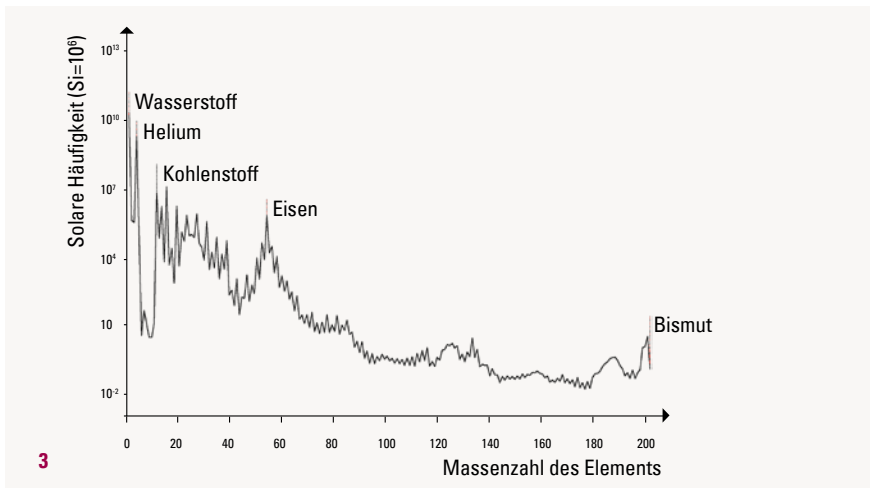


## Die Sterne am Nachthimmel

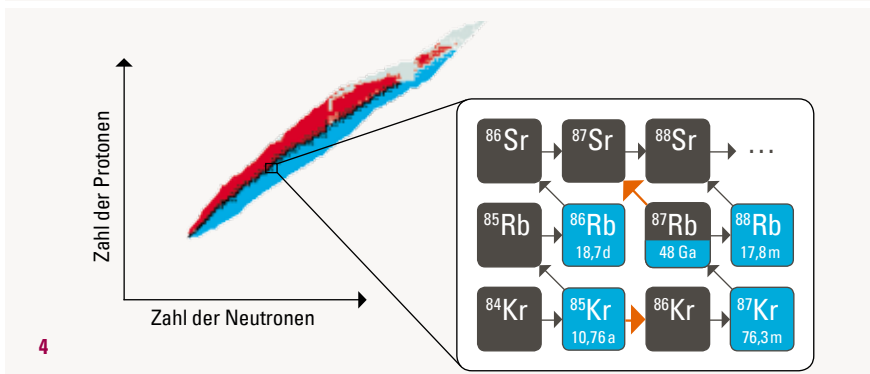
Ein genauer Blick an den Nachthimmel offenbart, dass die Sterne nicht alle gleich sind. Mit bloßem Auge können wir Sterne unterschiedlicher Farben erkennen: von Rot bis Gelb, über Weiß bis hin zu Blau (Abb. 1). Die Farbe verrät uns eine Eigenschaft des Sterns, die Oberflächentemperatur. Ein kühler Stern sendet vorwiegend rotes Licht aus, ein sehr heißer Stern hingegen eher blaues Licht. Informationen über die Größe eines Sterns erhalten wir aus der Temperatur und der Leuchtkraft (abgestrahlte Energie pro Zeit): Ein blauer (heißer) Stern mit kleiner Leuchtkraft muss sehr klein sein, ein roter (kühler) Stern mit großer Leuchtkraft sehr groß.

**1** Beeindruckende Sternentstehungsregionen aus Rot leuchtendem Wasserstoffgas im Sternbild Fuhrmann am Nordhimmel. Unter den Sternen unterschiedlicher Farbe sind auch einige Rote Riesen.

**2** Unsere Augen nehmen das Licht wahr, das von der Sonnenoberfläche (Photosphäre) ausgesendet wird. Eine detaillierte Analyse des Lichts zeigt ein Frequenzspektrum von Rot bis Blau. Elemente in der Sternatmosphäre absorbieren Licht bestimmter Frequenzen, so dass Lücken in Form schwarzer Linien im Spektrum entstehen. Die Linien erlauben es, die Elemente in der Photosphäre eindeutig zu identifizieren.



3



4

**3** Die solare Häufigkeit der Elemente. Wasserstoff und Helium sind die häufigsten Elemente im Sonnensystem. Bis zum schwersten stabilen Element Bismut fallen die Häufigkeiten um etwa zehn Größenordnungen ab. Auf ein Bismutatome kommen etwa zehn Milliarden Wasserstoffatome. Die stark gebundenen Elemente der Eisengruppe sind um Größenordnungen häufiger als die umliegenden Elemente.

**4** Schematische Darstellung einer Nuklidkarte. Alle existierenden Kerne sind nach ihrer Protonen- und Neutronenzahl aufgetragen. Stabile Kerne sind in schwarz dargestellt, instabile Kerne in Rot, Blau und Grau. Rechts: Ausschnitt aus der Nuklidkarte rund um Krypton (Kr), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr). Der Kern  $^{84}\text{Kr}$  (Krypton-84) kann ein Neutron einfangen. Dabei entsteht der instabile Kern  $^{85}\text{Kr}$ , der anschließend entweder ein Neutron einfängt oder zu  $^{85}\text{Rb}$  zerfällt. Der Reaktionspfad verzweigt sich hier (Verzweigungspunkt). Abhängig von der Wahrscheinlichkeit, dass  $^{85}\text{Kr}$  ein Neutron einfängt, werden verschiedene Reaktionspfade beschritten. In der Folge wird entweder  $^{87}\text{Rb}$  oder  $^{87}\text{Sr}$  häufiger erzeugt.

**Wir Kinder des Kosmos**

Die Elemente leichter als Kohlenstoff (Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium und Bor) wurden schon unmittelbar nach dem Urknall vor etwa 13,8 Milliarden Jahren gebildet. Die Elemente von Kohlenstoff bis Eisen werden im zunehmend heißer werdenden Innern von Sternen durch die Verschmelzung von leichteren Elementen erzeugt. Diese Fusionsprozesse bilden die fundamentale Energiequelle der Sterne und bestimmen ihre Entwicklung. Dabei werden mehrere aufeinanderfolgende Brennphasen durchlaufen: Im Wasserstoffbrennen wird Helium erzeugt, das in der nächsten Phase, dem Heliumbrennen, zu Kohlenstoff fusioniert. Leichte Sterne wie die Sonne können keine weitere Brennphase zünden. Dass in unserem Sonnensystem trotzdem schwerere Elemente vorhanden sind, liegt daran, dass diese schon in der Staubwolke waren, aus der es vor etwa 4,5 Milliarden Jahren entstanden ist.

Elemente, die schwerer sind als Kohlenstoff, entstehen in Sternen, die mehr als achtmal schwerer sind als die Sonne. Auf das Neonbrennen folgt das Sauerstoffbrennen und schließlich das Siliziumbrennen. Dabei entsteht das am stärksten gebundene Element Eisen.

Um die schweren Elemente bis hin zu Bismut zu erzeugen, muss Energie aufgewendet werden. Das Licht der Sterne zeigt uns, in welcher Sternentwicklungsphase schwere Elemente

erzeugt werden. Nehmen wir zum Beispiel das Element Technetium. Es zerfällt nach einigen Millionen Jahren. Im Sonnensystem, und damit auch auf der Erde, kommt Technetium nicht vor, weil das bei der Entstehung der Erde vorhandene Material in den vergangenen vier Milliarden Jahren seit der Entstehung unseres Planeten zerfallen ist. Mitte des 20. Jahrhunderts aber entdeckte der Physiker Paul Willard Merrill den Fingerabdruck von Technetium in den Spektren von Roten Riesen. Da Rote Riesen schon einige Milliarden Jahre alte Sterne sind, müssen sie das Element Technetium also frisch erzeugen.

Etwa die Hälfte der Elemente, die schwerer als Eisen sind, wird im sogenannten s-Prozess erzeugt. Dieser Prozess startet bei Eisen und produziert sukzessive die schwereren Kerne. Um den Ablauf des Prozesses zu verstehen, muss man sich die Elemente genau anschauen: Eisen beispielsweise besteht aus 26 Protonen. Hinzu kommen unterschiedliche Anzahlen von Neutronen. Diese verschiedenen Varianten eines Kerns nennt man Isotope. Das häufigste Eisenisotop Eisen-56 besitzt 30 Neutronen. Aber auch Eisenkerne mit 28, 31 und 32 Neutronen sind stabil. Alle anderen Kombinationen von 26 Protonen und X Neutronen sind nicht stabil, was bedeutet, dass diese Kerne nach einer bestimmten Zeit zerfallen. Genauso verhält es sich auch für die anderen Elemente. Die meisten Elemente haben mehr als eine stabile Zusammensetzung im Kern.

In einem Roten Riesen sind freie Neutronen vorhanden. Diese können zum Beispiel auf einen Kryptonkern treffen und eingefangen werden (Abb. 4). So entsteht der nächstschwere Kryptonkern. Jeder Kern fängt etwa einmal alle zehn Jahre ein Neutron ein. Nach einem oder mehreren Neutroneneinfängen wird schließlich ein instabiler Kern erzeugt, der zum nächstschweren Element, in diesem Fall Rubidium, zerfällt. Der Rubidiumkern kann wiederum Neutronen einfangen. Auf diese Weise werden sukzessive schwerere Elemente bis hin zu Bismut erzeugt.

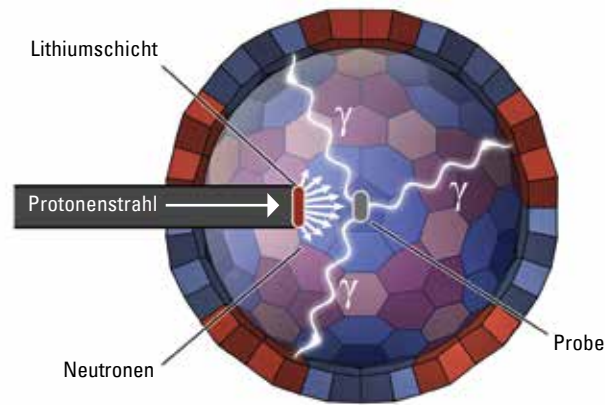
**Sterne im Labor**

Im Innern von Sternen herrschen unvorstellbar hohe Temperaturen von bis zu einigen Milliarden Grad Celsius. Die freien Neutronen haben bei diesen Temperaturen eine große Geschwindigkeit. Trotzdem ist es leicht, diese schnellen Neutronen in Teilchenbeschleunigern zu erzeugen und in irdischen Laboren zu untersuchen. Erst die genaue Kenntnis der Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit einer Reaktion als Funktion der Temperatur und der Dichte im Stern erlaubt quantitative Rück-

schlüsse auf die Vorgänge im Inneren der Sterne.

Ein Forschungsschwerpunkt unserer Arbeitsgruppe für Experimentelle Astrophysik ist die Untersuchung von Neutroneneinfangreaktionen im s-Prozess. Instabile (radioaktive) Isotope sind dabei von besonderem Interesse. Wenn sie im Stern durch Neutroneneinfang produziert werden, können sie anschließend entweder erneut ein Neutron einfangen oder zerfallen. Der Reaktionspfad verzweigt sich an dieser Stelle (Verzweigungspunkt). Abhängig vom Reaktionspfad werden bestimmte Kerne mehr oder weniger häufig produziert: Eine größere Zahl an freien Neutronen führt zum Beispiel zu einer vermehrten Produktion der Neutroneneinfangsprodukte.

Untersuchungen an radioaktiven Kernen erfordern jedoch viel größere experimentelle Anstrengungen als Experimente mit stabilen Kernen. Zum einen sind die Erzeugung des Probenmaterials und der Umgang damit wesentlich schwieriger. Zum anderen stört die von den radioaktiven Kernen ausgesandte Strahlung die Messung, weil sie die Signale der Reaktionsprodukte im Detektor überlagert. Deshalb kann nur eine geringe Menge an Probenmaterial ver-



**5** Schematischer Aufbau zur Messung von Neutroneneinfangreaktionen im Projekt NAUTILUS: Mithilfe eines Beschleunigers werden Protonen beschleunigt. Sie durchqueren eine Lithiumschicht, wobei Neutronen entstehen. Die Kerne in der Probe, die Neutronen einfangen, gehen in einen angeregten Zustand über. Sie geben die Energie anschließend durch Aussendung von Licht ( $\gamma$ ) wieder ab. Dieses Licht wird mit dem Detektor gemessen. Das erlaubt Rückschlüsse auf die erzeugten Kerne und die Anzahl der Reaktionen.

wendet werden. Im Experiment kann dies nur durch entsprechend höhere Neutronenflüsse ausgeglichen werden. An der im Bau befindlichen Frankfurter Neutronenquelle FRANZ entstehen derzeit weltweit einmalige Experimentiermöglichkeiten. Dies betrifft insbesondere die Anzahl der verfügbaren Neutronen mit astrophysikalisch relevanten Energien.

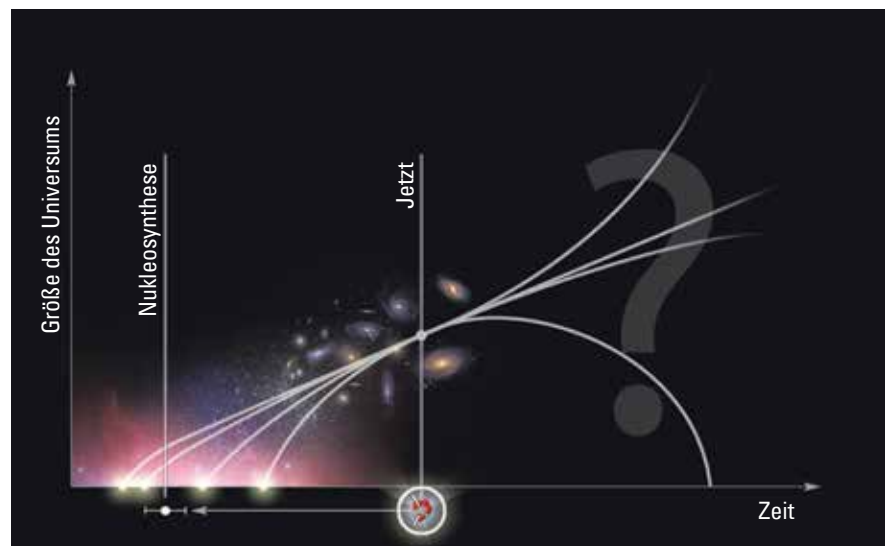
Im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrat geförderten Projekts NAUTILUS (Nuclear Astrophysics Constraining Stellar Nucleosynthesis) wird die Probe deutlich näher an der Neutronenquelle platziert als üblich. Bei kürzerem Abstand erreichen wesentlich mehr der in alle Raumrichtungen fliegenden Neutronen die Probe. Somit kann bei gleicher Neutronenquellstärke mit noch kleineren Probenmengen experimentiert werden.

Das neue Verfahren soll am Beispiel des radioaktiven Krypton-85 demonstriert werden. Der Kern Krypton-85 ist ein Verzweigungspunkt im s-Prozess (Abb. 4) und von höchstem astrophysikalischem Interesse. Da das Edelgas Krypton praktisch nur als Gas in Experimenten eingesetzt werden kann, ist die Herstellung

**6** Seit dem Urknall dehnt sich das Universum aus. Die theoretischen Modelle der Kosmologie sagen verschiedene Szenarien für die Entwicklung des Universums voraus: Wird es unter der Kraftwirkung der Massen wieder zusammenfallen? Dehnt es sich mit konstanter Geschwindigkeit immer weiter aus? Oder dehnt es sich gar mit immer größerer Geschwindigkeit aus? Die Mitglieder der Arbeitsgruppe Experimentelle Astrophysik sind auf der Suche nach der Antwort: Mit kosmologischen »Uhren« bestimmen sie, wann die ersten schweren Elemente in Sternen erzeugt wurden (Nukleosynthese). Daraus bestimmen sie das Alter des Universums und damit dessen Vergangenheit und Zukunft.

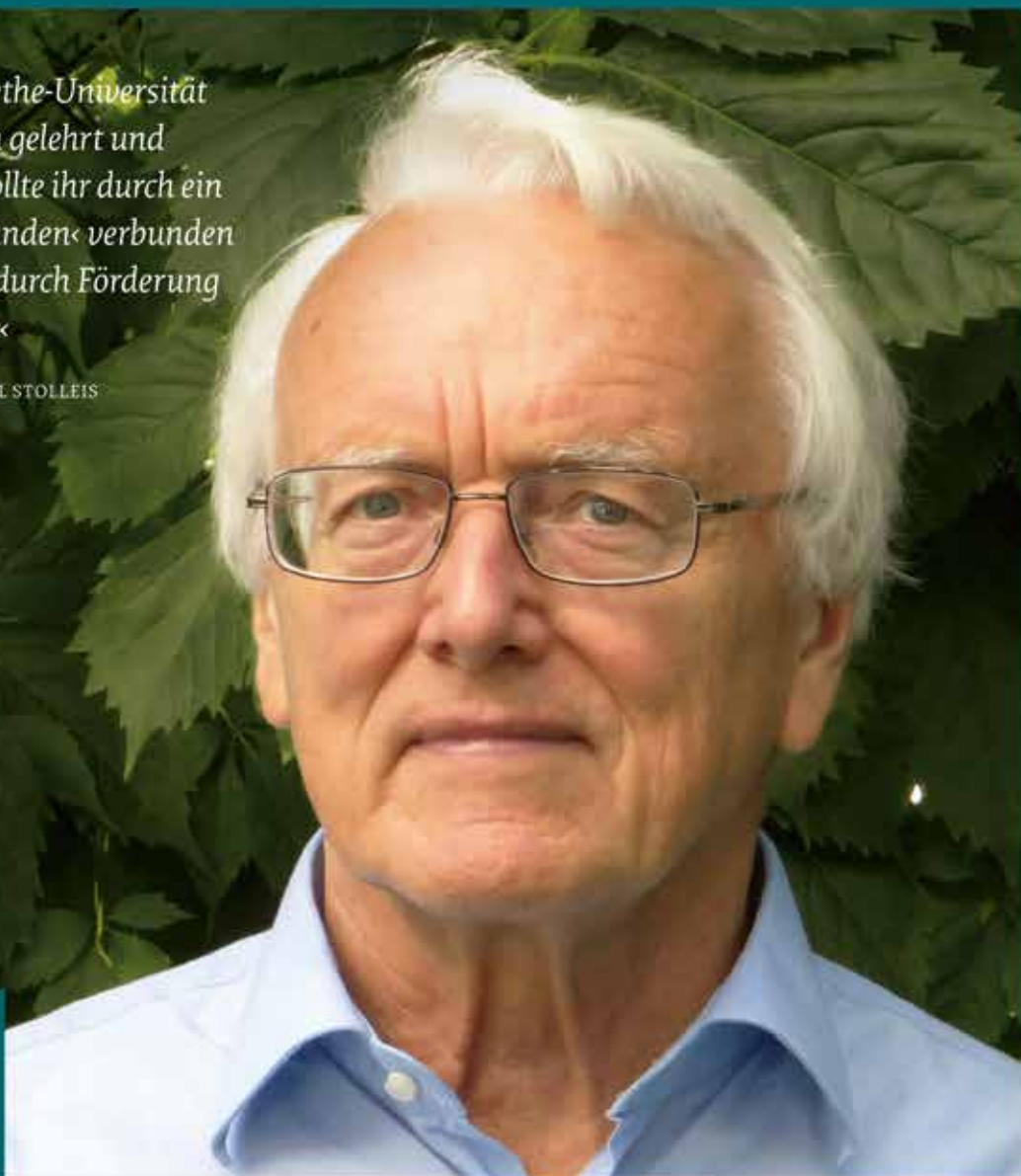
## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Aus dem Licht der Sterne können wir auf ihre Eigenschaften und Vorgänge in ihrem Innern schließen.
- Sterne verschmelzen die meiste Zeit ihres Lebens das leichteste Element Wasserstoff zum nächstschweren Element Helium. In den Spätphasen der Sternentwicklung werden Elemente schwerer als Eisen erzeugt.
- Astrophysiker simulieren die Elemententstehung in Sternen am PC. Die Ergebnisse von Labormessungen gehen in die Simulationen ein. Ziel ist es, die Häufigkeiten der Elemente im Sonnensystem zu reproduzieren.
- Kernphysikalische Messungen ermöglichen die Altersbestimmung des Universums und verraten, wie die Zukunft des Universums aussieht.



»Wer viele Jahre an der Goethe-Universität unter besten Bedingungen gelehrt und geforscht hat, kann und sollte ihr durch ein Engagement bei den »Freunden« verbunden bleiben. Es ist ein Dank – durch Förderung der nächsten Generation.«

PROF. EM. DR. DR. H.C. MULT. MICHAEL STOLLEIS  
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR  
EUROPÄISCHE RECHTSGESCHICHTE



FREUNDE  
DER UNIVERSITÄT

## Machen Sie mit. Werden Sie ein Freund!

Werden Sie Mitglied bei den Freunden und unterstützen Sie mit uns Forschung und Lehre an der Goethe-Universität.

NAME, VORNAME

STRASSE, PLZ, ORT, STAAT

### Beitrittserklärung

Ich möchte Mitglied werden und die Vereinigung von Freunden und Förderern der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main e. V. unterstützen

- als Freund: Jahresbeitrag ab 70 Euro  
 als Förderer: Jahresbeitrag ab 200 Euro  
 als Donator: Jahresbeitrag ab 500 Euro  
 als Firmenmitglied: Jahresbeitrag ab 500 Euro

### Einzugsermächtigung

Bitte buchen Sie den Jahresbeitrag von meinem Konto ab.

KONTOINHABER

IBAN

BANKINSTITUT

DATUM, UNTERSCHRIFT

Die Vereinigung von Freunden und Förderern der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main e. V. ist als gemeinnütziger Verein anerkannt. Spenden und Mitgliedsbeiträge sind steuerlich in vollem Umfang absetzbar. Mit meiner Unterschrift stimme ich der Speicherung meiner Angaben in einer nur zu Vereinszwecken geführten computergestützten Datei zu.

großer Proben eine technologische Herausforderung.

### Woher und wohin?

Wie alt ist unser Universum und wie entwickelt es sich? Unser heutiges Verständnis beruht auf astronomischen Beobachtungen von Sternexplosionen eines bestimmten Typs, Supernovae vom Typ Ia. Diese Explosionen scheinen alle nach dem gleichen Mechanismus abzulaufen, denn das dabei ausgesendete Licht ist identisch. Deshalb bezeichnen wir sie als Standardkerzen. Analysieren wir das Licht und bestimmen die Entfernung dieser Sterne, können wir auf den Zeitpunkt der Explosion zurückschließen und auch auf die Größe des Universums zu diesem Zeitpunkt. Die Physiker Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess analysierten viele dieser Standardkerzen und kamen zu dem Schluss, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt. Dafür erhielten sie 2011 den Physik-Nobelpreis.

Aber können wir uns wirklich auf diese Standardkerzen verlassen? Das Projekt NAUTILUS wird dies überprüfen, indem es das Alter des Universums unabhängig von Standardkerzen bestimmt. Es verwendet dazu radioaktive

Kerne mit einer Halbwertszeit, die in etwa dem Alter des Universums entspricht, als eine Art Uhr. Wenn solche Kerne im frühen Universum in einem Stern erzeugt worden sind, können wir einen Teil dieser Kerne heute noch messen und zurückrechnen, wie viel Zeit seit dem Beginn der Nukleosynthese vergangen ist. Wir wissen, dass die Nukleosynthese 500 Millionen Jahre nach dem Urknall begann, als die ersten Sterne entstanden. Bestimmt man also den Beginn der Nukleosynthese, kann man daraus auf das Alter des Universums schließen.

Mit seiner Halbwertszeit von 48 Milliarden Jahren ist der Kern Rubidium-87 ein vielversprechender Kandidat für eine solche kosmische Uhr. Der von uns untersuchte Kern Krypton-85 liegt unmittelbar auf dem Reaktionspfad zu Rubidium-87 und bestimmt dessen Häufigkeit. Ist die Rate von Neutroneneinfängen an Krypton-85 sehr hoch, wird viel Rubidium-87 produziert. Ist die Rate hingegen klein, wird wenig Rubidium-87 produziert (Abb. 4). Das Projekt NAUTILUS wird diese Rate und damit das Alter des Universums bestimmen. Werden wir die Ergebnisse der Standardkerzen bestätigen oder erwartet uns eine Überraschung? ●



### Die Autoren

**Dr. Kathrin Göbel**, Jahrgang 1985, hat ihr Bachelor- und Masterstudium in Physik an der Goethe-Universität absolviert. Dabei hat sie sich auf die Themen Kernphysik und Astrophysik spezialisiert, die während der Promotion in der Experimentellen Astrophysik verschmolzen. Seit Mai 2015 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe und Scientific Coordinator bei HIC for FAIR. Seit 2009 engagiert sich Kathrin Göbel im Physikalischen Verein. Sie organisiert die beliebten »frankfurter science slams«.

[goebel@physik.uni-frankfurt.de](mailto:goebel@physik.uni-frankfurt.de)

**Prof. Dr. René Reifarth**, Jahrgang 1973, verbrachte nach seiner Promotion an der Eberhard Karls Universität Tübingen zunächst fünf Jahre am Los Alamos National Laboratory in den USA. Als Leiter einer Helmholtz-Nachwuchsgruppe kehrte er 2007 nach Deutschland zurück und forschte an der Goethe-Universität sowie an der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt. Seit 2010 ist er Professor am Institut für Angewandte Physik und derzeit Dekan des Fachbereichs Physik sowie Wissenschaftlicher Direktor von HIC for FAIR. 2014 erhielt er für das Projekt NAUTILUS den mit zwei Millionen Euro dotierten »Consolidator Grant« des Europäischen Forschungsrates.

[reifarth@physik.uni-frankfurt.de](mailto:reifarth@physik.uni-frankfurt.de)