

Fingerabdrücke im Regenbogen:
Im Jahr 1814 entdeckte Joseph von Fraunhofer im Sonnenspektrum dunkle Linien. Später stellte sich heraus, dass diese von allen möglichen chemischen Elementen stammen. Heute ist die Spektralanalyse ein mächtiges Werkzeug der Astrophysik.

FOTO: N.A.SHARP, NOAO/NSO/KITP PEAK PEAK FT/ST/AURA/NSF

KOSMISCHE DETEKTIVARBEIT

TEXT: THOMAS BÜHRKE

Die Chemie eines Sterns enthält wertvolle Informationen, etwa über seine Geschichte oder die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Sternenfamilie. Um aus einem spektralen Fingerabdruck die Häufigkeiten der Elemente exakt zu ermitteln, bedarf es allerdings ausgeklügelter Methoden. Maria Bergemann vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg hat hier neue Standards gesetzt.

Die Natur ist eine elegante Baumeisterin. Aus nicht einmal hundert Elementen hat sie ein Universum mit einer enormen Vielfalt geschaffen, von diffusen Gaswolken über Sterne und Planeten bis hin zu intelligentem Leben. Der Trick: Atome üben elektrische Kräfte aus, verbinden sich zu einer Fülle von Molekülen und können Energie aufnehmen und abgeben.

Die chemische Zusammensetzung eines Körpers ist entscheidend für seine Eigenschaften. Unsere Erde etwa besteht überwiegend aus schweren Elementen wie Eisen, Sauerstoff, Silicium und Magnesium. Die weitaus häufigsten Elemente im All sind hin-

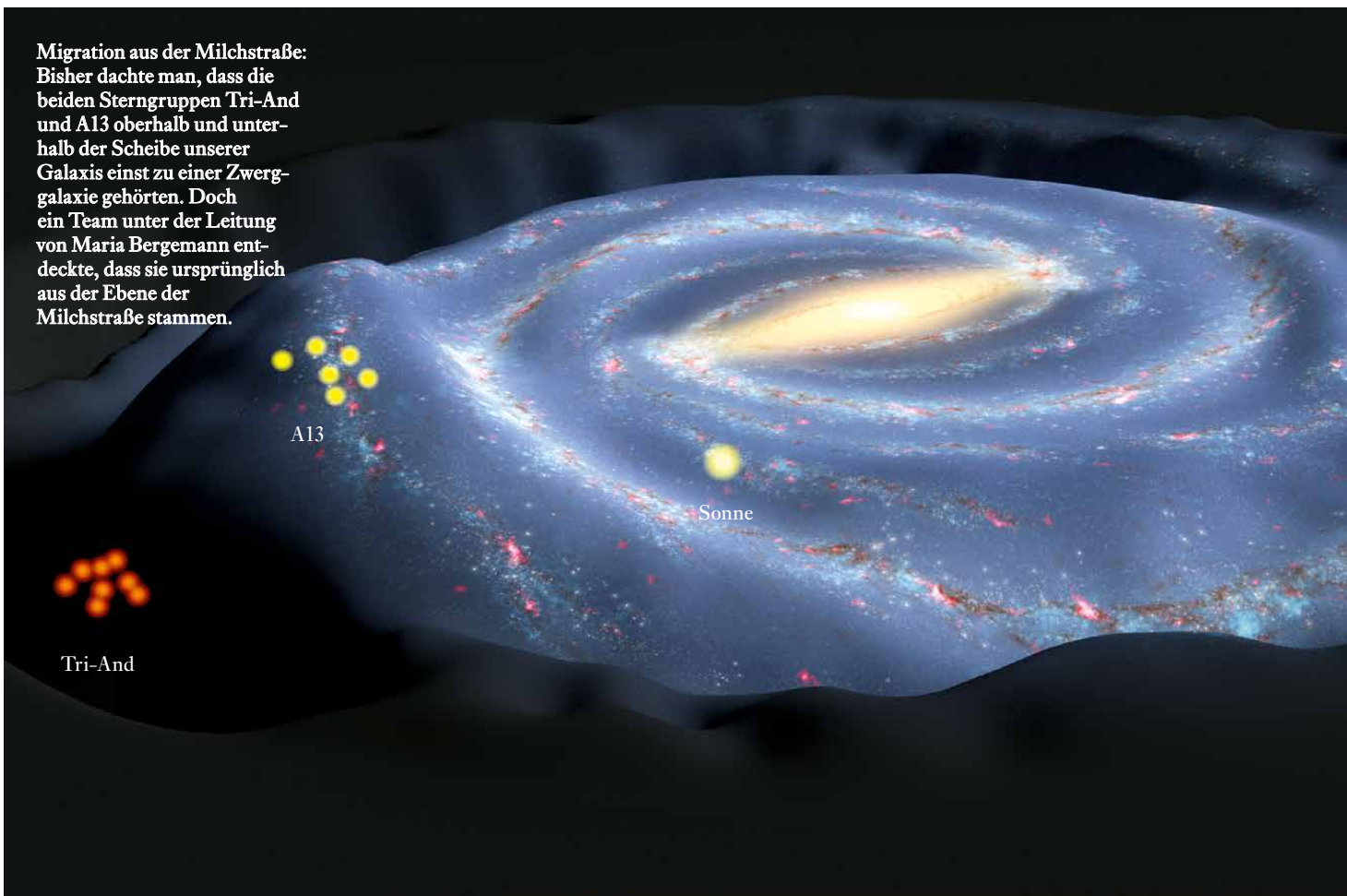
gegen die leichtesten Stoffe: Wasserstoff und Helium. Wegen ihrer Flüchtigkeit sind sie auf der Erde selten.

Sterne wie die Sonne sind heiße Gasbälle, die an ihrer Oberfläche noch heute die Zusammensetzung widerspiegeln, mit der sie geboren wurden. „Wenn wir jeden individuellen Stern in der Milchstraße einer bestimmten Familie zuordnen können, in der er geboren wurde, können wir deren Entwicklung rekonstruieren“, sagt Maria Bergemann, Lise-Meitner-Gruppenleiterin am Max-Planck-Institut für Astronomie. Das Problem ist nur: Es ist unmöglich, zur Sonne oder zu einem anderen Stern zu fliegen und eine Gasprobe zu entnehmen. Forschende benötigen eine andere Methode, um die Zusammensetzung zu ermitteln: die Sternspektroskopie. Im Grunde sind diese Überlegungen nicht neu, aber ihre Realisierung erfordert modernste Möglichkeiten der Teleskoptechnik und der Analyse von Sternspektren. Für Letzteres wandelt Maria Bergemann auf den Spuren von Joseph von Fraunhofer, Robert

Bunsen und Gustav Kirchhoff. Fraunhofer hatte 1814 mit einem Glasprisma Sonnenlicht in seine Regenbogenfarben aufgespalten. Der dabei erzeugte Farbfächer enthielt zu Fraunhofers Verwunderung an die sechshundert dunkle Linien. Von dieser Entdeckung angespornt, fand er auch in Spektren sehr heller Sterne dunkle Linien – teilweise an denselben Positionen, doch mit anderen Breiten und Stärken als bei der Sonne. Und genau diese Unterschiede geben Aufschluss über Zusammensetzung und Natur jedes Sterns.

Die entscheidende Deutung der sogenannten Fraunhoferlinien gelang Bunsen und Kirchhoff im Jahr 1860 in Heidelberg, wo auch Maria Bergemann forscht. Bei Spektralexperimenten mit Gasbrennern fiel den Wissenschaftlern auf, dass chemische Elemente im Spektrum bei ganz bestimmten Wellenlängen eine Linie erzeugen. Auf diese Weise konnten sie als Erstes Natrium in Fraunhofers Sonnenspektrum identifizieren. Heute ist die Spektralanalyse in vielen Be-

Migration aus der Milchstraße: Bisher dachte man, dass die beiden Sterngruppen Tri-And und A13 oberhalb und unterhalb der Scheibe unserer Galaxis einst zu einer Zwerggalaxie gehörten. Doch ein Team unter der Leitung von Maria Bergemann entdeckte, dass sie ursprünglich aus der Ebene der Milchstraße stammen.



70

reichen der Naturwissenschaften das mächtigste Werkzeug. Das gilt insbesondere für die Astrophysik, deren Beobachtungsgegenstände in unerreichbarer Ferne liegen. Die dunklen Linien im Sonnen- oder in einem Sternspektrum entstehen, wenn Licht aus dem heißen Innern durch die kühlere äußere Atmosphäre scheint. Atome und einfache Moleküle verschlucken dabei Licht bei den für sie charakteristischen Wellenlängen. Ein Spektrum ist wie ein Fingerabdruck. Bei der Sonne sind mehrere Hunderttausend Absorptionslinien im Spektrum sichtbar. Nun lautet die entscheidende Frage: Wie kann man aus der Tiefe und Breite der Linien die Elementhäufigkeiten bestimmen?

Hierfür benötigt man atom- und molekülphysikalische Größen, die im Labor gemessen werden. Aktuelle Listen zur Modellierung und Interpreta-

tion von Sonnenspektren basieren auf insgesamt mehr als hundert Millionen atomaren und molekularen Linien. Viele von ihnen überlagern einander und lassen sich gar nicht identifizieren. Man ahnt die Komplexität der Spektralanalyse.

In den vergangenen hundert Jahren haben Astrophysiker Theorien und Modelle entwickelt, um aus Spektrallinien physikalische Größen von Sternen zu berechnen. Dazu gehören Temperatur, Druck und Schwerebeschleunigung an der Oberfläche sowie die chemische Zusammensetzung. Solche Modelle mussten notgedrungen die Realität vereinfachen. So nahm man ursprünglich an, dass im Stern bestimmte Gleichgewichte herrschen: Druck und Gravitationskraft sorgen für ein hydrostatisches, Gas und Strahlung bilden ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht.

„Jahrzehntelang wurden mit solchen stark vereinfachten Modellen aus Spektren die Häufigkeiten von Elementen bestimmt, aber die Ergebnisse sind teils um den Faktor fünf oder mehr falsch“, sagt Maria Bergemann. Ein Stern ist selbstverständlich keine vollkommen homogene Kugel, in der an jeder Stelle dieselben Verhältnisse herrschen.

Der überwiegende Teil der Sterne ist etwa so schwer wie die Sonne und leichter. All diese Sterntypen haben denselben prinzipiellen Aufbau: Im äußeren schalenförmigen Bereich, der bei der Sonne bis in eine Tiefe von etwa 500 000 Kilometern reicht, ist das Gas konvektiv, das heißt: Unablässig steigen heiße Gasmassen zur Oberfläche auf, kühlen durch Strahlung ab und sinken wieder ins Innere zurück. Dieses Auf und Ab der Materie lässt sich in ähnlicher Weise bei

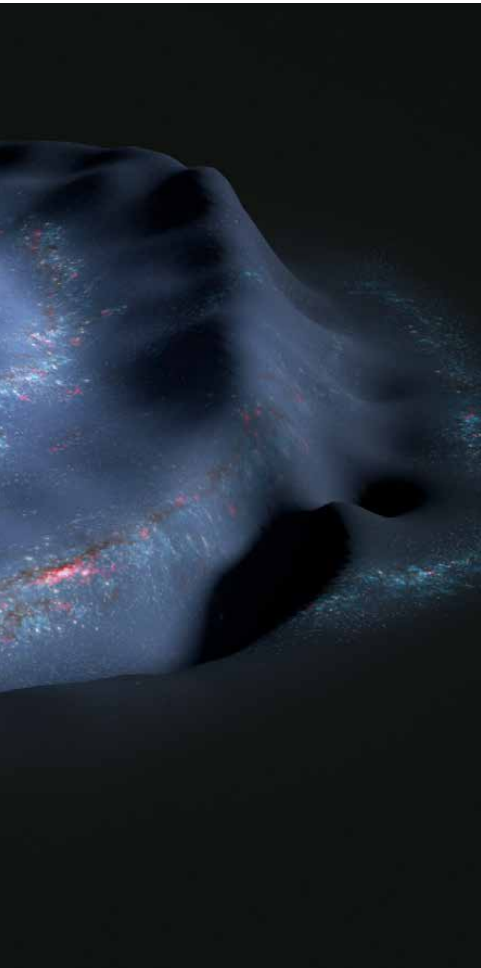


BILD: T. MUELLER/NASA/JPL-CALTECH

siedendem Wasser in einem Kochtopf beobachten. Darin entsteht ein Muster aus deutlich abgegrenzten Zellen, die man auf der Sonnenoberfläche als Granulen beobachtet.

Zusätzlich zur Konvektion kommt es in Sternatmosphären zu einer Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen den Atomen untereinander und mit der Strahlung. Deswegen sind detaillierte Modelle nötig, um aus den gemessenen Spektrallinien die chemischen Häufigkeiten zu berechnen. Hierfür muss man das Paradigma des Gleichgewichts aufgeben.

Modelle, die auf ein lokales thermodynamisches Gleichgewicht verzichten (Non-LTE-Modelle), wurden zwar bereits in den 1970er-Jahren entwickelt, die praktische Anwendung auf die Analyse von Sternspektren ist jedoch erst vor etwa zwanzig Jahren mit dem Einsatz leistungsstarker Supercomputer möglich geworden. Dies hat vor allem mit den unzähligen Anregungsniveaus der Atome und Moleküle zu tun. Allein für neutrales Eisen müssen die Forschenden mehr als 600 Niveaus, fast 8000 Niveaübergänge durch Strahlung und 39 000 durch Zusammenstöße mit anderen Atomen berücksichtigen. Anfangs waren die Modelle

noch eindimensional, dann folgte eine Steigerung zu zweidimensionalen Rechnungen, bis kürzlich die Königsklasse der vollen dreidimensionalen Modelle möglich wurde. Nur mit klugen und effizienten Algorithmen kann ein Computer in vertretbarer Zeit solche Modelle rechnen. Maria Bergemann gilt in diesem Metier als Pionierin.

Doch wie findet man überhaupt heraus, welche Rechnung das richtige Ergebnis liefert? Hier fungiert die Sonne als Prüfstein. Jede Granule auf ihrer Oberfläche bildet eine Konvektionszelle, in deren Zentrum heißes Gas aufsteigt, während in den dunkleren Rändern kühleres Gas absinkt. Die chemische Zusammensetzung ändert sich jedoch nicht. Wenn man also ein Spektrum aus dem Zentralbereich und eines vom Rand nimmt, muss die Analyse dieselben Elementhäufigkeiten liefern.

Eine solche Analyse gelingt nur mit den neuen, dreidimensionalen Non-LTE-Modellen. Sie geben die unterschiedlichen Formen der Spektrallinien aus den heißen und kühleren Bereichen richtig wieder. Alle Berechnungen verschiedener Bereiche der Sonne und unterschiedlicher Niveaübergänge müssen einen selbstkonsistenten

71



Prüfstein Sonne: Auf der Oberfläche unseres Sterns zeigen sich jede Menge Granulen. Anhand dieser Konvektionszellen, in denen Gas ständig in Bewegung ist, lassen sich Modelle für die Spektralanalyse von Sternen testen.

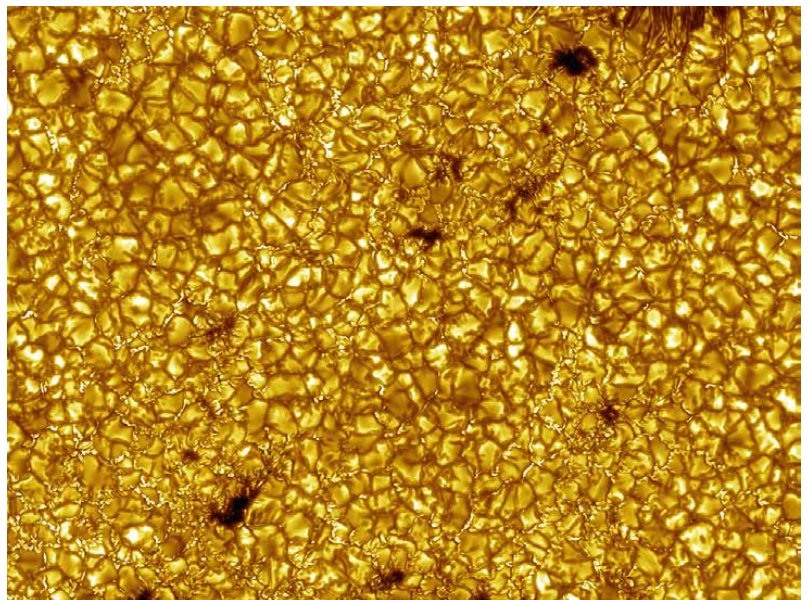


BILD: VASCO HENRIQUES

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Die Häufigkeiten chemischer Elemente in den Sternen sind wie ein Fingerabdruck. Sie verraten die Zugehörigkeit eines Sterns zu einer Gruppe.

Die chemischen Unterschiede von Sternen in der Milchstraße oder einer fernen Galaxie erzählen viel über die Entstehung und Entwicklung dieser Sternsysteme.

Die Berechnung von chemischen Häufigkeiten aus einem Spektrum erfordert hochkomplexe Modelle sowie Kenntnisse über atomare Größen und dynamische Vorgänge in den Sternen.

versität Cambridge, bevor Bergemann 2014 ans Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie kam, wo sie heute eine Lise-Meitner-Gruppe leitet.

Ihre Analysemodelle sind der Schlüssel zum Verständnis ganz unterschiedlicher astrophysikalischer Probleme. Es fällt nicht leicht, aus den vielen Ergebnissen einzelne herauszugreifen. Eines förderte jüngst ein Ereignis aus der Geschichte unserer Milchstraße zutage. Diese ist eine Spiralgalaxie, in der sich die meisten Sterne in der verhältnismäßig dünnen Scheibe bewegen. Doch auch außerhalb der Scheibe, im sogenannten Halo, finden sich Sterne. So gibt es zwei kleine Gruppen, jeweils etwa 14000 Lichtjahre ober- und unterhalb der Milchstraßenebene.

Bis vor Kurzem nahmen die meisten Fachleute an, dass diese Triangulum-Andromeda (Tri-And) und A13 genannten Gruppen ehemals zu einer Zwerggalaxie gehörten. Doch dann gewann ein internationales Team unter Bergemanns Leitung Spektren dieser Sterne. Das überraschende Ergebnis: Die Mitglieder dieser beiden Gruppen besitzen eine identische chemische Zusammensetzung – und diese entspricht jener von Sternen innerhalb der Milchstraßenebene.

Die Galaxienscheibe schwingt

„Diese Sterne sind höchstwahrscheinlich aus der Scheibe herausgewandert und nicht Überreste einer mit der Milchstraße kollidierten Zwerggalaxie“, schließt Bergemann aus dem Ergebnis, das seitdem zahlreiche andere Teams bestätigt haben. Eine solche Sternwanderung lässt sich durch eine Schwingung der Galaxienscheibe erklären, ausgelöst durch die Gezeitenwechselwirkung einer nahe vorbeigezogenen, massereichen Satellitengalaxie. Computermodelle zeigen, dass hierbei die äußere Scheibe um bis zu 30 Grad nach oben und unten schwang und Sterne wie die in Tri-

And und A13 weit über die Mittelebene hinaus in den Halo befördern konnte. Damit gelang es der Heidelberger Forscherin und ihrem Team, eine weitere Leerstelle im großen Puzzle zur Entwicklung der Milchstraße zu schließen.

Ein anderes Ergebnis führt noch weiter in die Vergangenheit zurück. Im Urknall sind fast ausschließlich die beiden leichtesten Elemente, Wasserstoff und Helium, entstanden. Die ersten Sterne verschmolzen diese Stoffe in Fusionsreaktionen zu schwereren Elementen. Über starke Teilchenwinde und bei Explosionen von massereichen Sonnen als Supernovae gelangten diese neuen Stoffe ins All, wo sie der nächsten Generation von Sternen zur Verfügung standen, die wiederum in ihrem Innern schwerere Elemente erbrüteten. Aufgrund die-

Theoriwechsel: Entsteht eine Supernova vom Typ Ia immer durch die Explosion eines weißen Zwergs, wenn dieser von einer massereichen Muttersonne zu viel Materie aufgesaugt hat (links)? Nein, meint eine Gruppe um Maria Bergemann: Weitau häufiger verschmelzen weiße Zwerge miteinander, nachdem sie einander eine Weile umtanzt haben (rechts).



ten Wert ergeben. So lassen sich die dreidimensionalen Non-LTE-Modelle auch zuverlässig auf ferne Sterne anwenden. „Etwa 95 Prozent meiner Zeit verbringe ich mit der Arbeit an den Modellen“, sagt Bergemann. Dabei kam sie eher zufällig zur Astronomie. Geboren und aufgewachsen im russischen Kasan studierte sie zunächst Geophysik. Doch das Interesse daran wollte sich nicht so recht einstellen. „Es war mir, ehrlich gesagt, etwas langweilig“, erinnert sie sich. Dann rieten ihr die Eltern, selbst Physiker: „Wenn man etwas ganz Grundlegendes entdecken will, muss man in die Astronomie gehen.“ Ein Rat, dem sie neugierig folgte.

An der Universität Moskau befasste sie sich im Rahmen ihrer Diplomarbeit mit Sternspektren. Das anschließende Angebot auf eine Doktorandenstelle an der Cornell University lehnte sie zugunsten der Ludwig-Maximilians-Universität in München ab, wo sie 2008 promovierte. Es folgten Aufenthalte am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und an der Uni-

ses zyklischen Prozesses reicherte sich das Universum mit schweren Elementen an, die für die Entstehung von Planeten und Leben notwendig waren.

Die allererste Sternengeneration formte sich vermutlich irgendwann zwischen 100 bis 300 Millionen Jahre nach dem Urknall. Ob einige von ihnen bis heute überlebt haben, ist unklar, nachgewiesen hat man bislang noch keinen. In der Milchstraße finden sich aber einige Sterne, die so wenige schwere Elemente enthalten, dass sie aus einer der ersten Generationen stammen müssen. Maria Bergemanns Postdoktorandin Camilla Hansen hat zwei dieser Sterne ausgewählt und ihre chemischen Häufigkeiten berechnet. Ein Vergleich mit Supernova-Computermodellen belegt, dass diese beiden Sterne wohl

tatsächlich zur zweiten Generation gehören und aus Materie bestehen, die zwei Sterne mit 25 beziehungsweise 19 Sonnenmassen bei ihrer Explosion ins All abgegeben haben. Auf diese Weise kann man also etwas über die ausgestorbene erste Sternengeneration erfahren.

Im vergangenen Jahr sorgte Bergemann für einige Aufregung in der Kosmologie: Sie veröffentlichte eine Arbeit, die auf eine der Säulen dieser Wissenschaft vom Ursprung und von der Entwicklung des Weltalls zielt: dunkle Energie. Nach derzeitiger Kenntnis erfüllt diese das Universum und wirkt wie ein Überdruck in einem Dampfkessel. Sie bläht den Raum auf und lässt ihn beschleunigt expandieren. Eine spektakuläre Entdeckung, für welche die US-Forscher Saul Perlmutter, Brian Schmidt und

Adam Riess 2011 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurden.

Die Erkenntnisse der drei Wissenschaftler beruhen auf der Beobachtung eines bestimmten Typs von Supernovae, die man bis in große Entfernungen und damit bis weit in die Vergangenheit des Universums beobachten kann. Früher glaubte man, dass die meisten Supernovae – Typ Ia genannt – von einem weißen Zwergstern verursacht werden, der einen gewöhnlichen Stern umkreist. Dabei saugt er den Wasserstoff aus den äußeren Schichten des Begleiters ab und wächst dadurch. Überschreitet er eine bestimmte Masse, explodiert er. Da dies immer bei derselben Masse erfolgt, egal wie groß der weiße Zwerg anfangs war, sind alle Ia-Supernovae gleich hell und eignen sich hervorragend als Entfernungssindikatoren. So

→





FOTO: THOMAS HARTMANN

74

Gegen den Mainstream: Maria Bergemann leitet eine Lise-Meitner-Gruppe am Max-Planck-Institut für Astronomie und bringt mit ihrer Forschung so manches Paradigma ins Wanken.

die Theorie. In der Realität gibt es aber wohl mindestens drei weitere Möglichkeiten, wie eine Supernova Ia entstehen kann – etwa, wenn zwei weiße Zwerge einander umkreisen, sich einander nähern und schließlich zusammenstoßen. Diese Arten sind aber unterschiedlich hell, was sich auf die Entfernungsbestimmung und die daraus ermittelte beschleunigte Expansion sowie die dunkle Energie auswirkt. Wie könnte man nun herausfinden, welcher Typ von Supernovae Ia im All dominiert?

Interessanterweise produzieren die verschiedenen Typen Elemente wie Eisen und Mangan in unterschiedlichen Häufigkeitsverhältnissen. Und damit kommt Maria Bergemann ins Spiel. Sie bestimmte zusammen mit Kolle-

gen die Häufigkeiten von Eisen und Mangan in 42 Sternen unterschiedlichen Alters. So konnte das Team die Geschichte der Manganproduktion in unserer Galaxis rekonstruieren. Mit einem erstaunlichen Ergebnis: Um das Verhältnis von Mangan und Eisen erklären zu können, müssten drei Viertel aller Supernovae Ia in der Milchstraße auf verschmelzende weiße Zwerge zurückzuführen sein. Diese Sorte ist also offenbar die Regel und nicht, wie bisher angenommen, die Ausnahme. Könnte das Konsequenzen für die Theorie der dunklen Energie haben?

„Ich habe Adam Riess einmal darauf angesprochen“, sagt Maria Bergemann. „Er war davon nicht begeistert, ist aber nicht weiter darauf eingegangen.“ Die

neuen Ergebnisse werfen nicht das Konzept der dunklen Energie als Ganzes über den Haufen. Sie zeigen aber, dass offenbar einiges im Zusammenhang mit diesem mysteriösen Akteur noch ungeklärt ist.

Maria Bergemann jedenfalls fiebert einer spannenden Zukunft entgegen. Im Jahr 2020 erhielt sie den mit nahezu 1,4 Millionen Euro dotierten ERC Starting Grant für ihr Projekt „Elements“. Damit kann sie weitere Mitarbeitende finanzieren. Diese benötigt die umtriebige Forscherin etwa auch für die Messprogramme 4Most und Weave. 4Most – eine Kampagne der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile, an der das Heidelberger Max-Planck-Institut maßgeblich beteiligt ist – wird am Südhimmel von mehr als 18 Millionen Sternen Spektren mit hoher Qualität gewinnen. Weave auf La Palma wiederum nimmt Millionen Sternspektren des Nordhimmels auf. Maria Bergemann wartet schon sehnsüchtig auf diesen Datenschatz. Doch angefangen hat alles mit einem Spektrum der Sonne vor mehr als 200 Jahren.

←

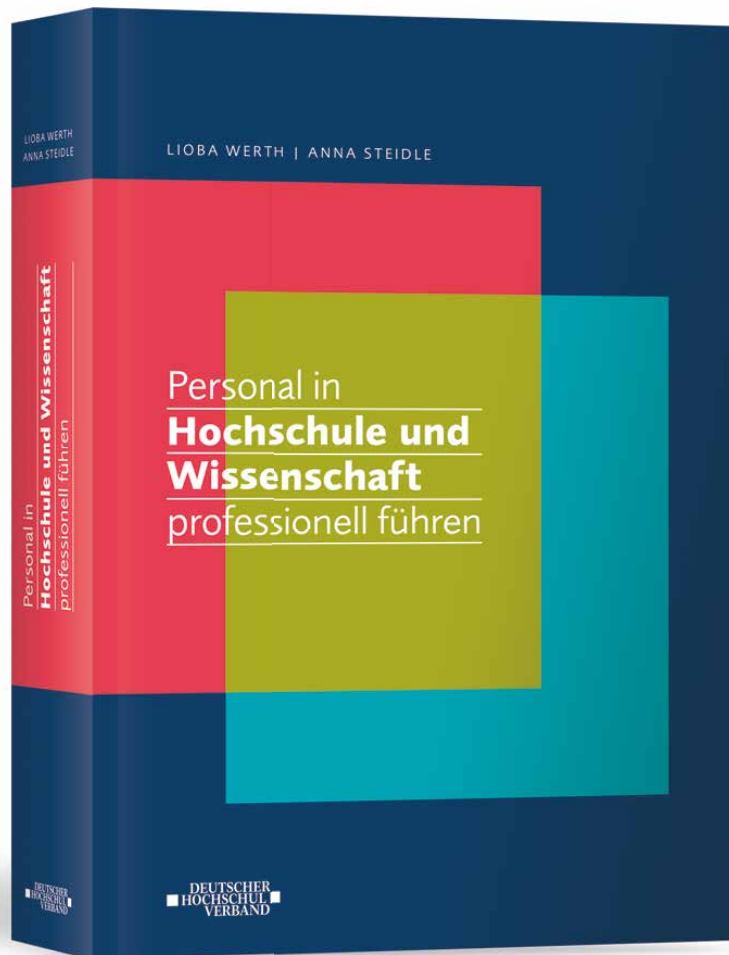
GLOSSAR

DIE MILCHSTRASSE
ist eine Spiralgalaxie mit schätzungsweise 200 bis 300 Milliarden Sternen. Einer davon ist unsere Sonne. Die Galaxis besitzt die Form eines Frisbees, dessen Rand ein wenig gewölbt ist. Sie misst etwa 100 000 Lichtjahre im Durchmesser und ist in einen kugelförmigen Halo eingehüllt – eine Art Atmosphäre, die rund 150 Kugelsternhaufen sowie Gas von geringer Dichte enthält.

DIE SPEKTRALANALYSE
ist eine Methode, bei der Licht durch optische Instrumente in einen „Regenbogen“ zerlegt wird. Bei der Sonne und anderen Sternen zeigen sich in einem solchen Spektrum charakteristische Linien, die auf bestimmte Elemente schließen lassen. Dadurch lässt sich die chemische Zusammensetzung dieser fernen Himmelsobjekte untersuchen.

Personalführung in der Wissenschaft

Wissenschaftlich fundiert und gleichzeitig praxisnah beschreiben Lioba Werth und Anna Steidle die Grundlagen, die wichtigsten Instrumente und die besonderen Herausforderungen für Führungskräfte in Hochschule und Wissenschaft.



”

Das Werk hat das Potenzial, das Standardwerk zum Thema Führung im Kontext von Wissenschaft und Hochschule zu werden.“

Professorin Isabell M. Welpe,
Inhaberin des Lehrstuhls für Strategie und Organisation an der TU München und wissenschaftliche Leiterin des Bayerischen Staatsinstituts für Hochschulforschung und Hochschulplanung

Dr. rer. nat. habil. Lioba Werth verfügt über jahrelange Lehr- und Forschungserfahrung als Professorin für Wirtschafts-, Organisations- und Sozialpsychologie. Neben ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit hat sie mehrere Lehr- und Sachbücher geschrieben – unter anderem das auch vom Deutschen Hochschulverband herausgegebene Werk „In Forschung und Lehre professionell agieren“. Darüber hinaus leitet sie seit 20 Jahren ein Unternehmen für Beratung, Coaching und Training.

Dr. rer. nat. habil. Anna Steidle ist Professorin für Personalmanagement und Führung sowie Prorektorin für Forschung und Internationales an der Hochschule Ludwigsburg. Ihr Fokus in Forschung und Anwendung liegt auf einer leistungsförderlichen Gestaltung von Arbeit. Darüber hinaus ist sie als Trainerin und Organisationsentwicklerin tätig.

Gebundene Ausgabe, 640 Seiten, 59 Euro (D) inkl. Porto, für DHV-Mitglieder zum Sonderpreis von 49 Euro inkl. Porto.

Zu bestellen über:

Deutscher Hochschulverband, Rheinallee 18–20,
53173 Bonn, Tel. 0228 9026666,
Fax 0228 9026680 oder per Mail:
dhv@hochschulverband.de

