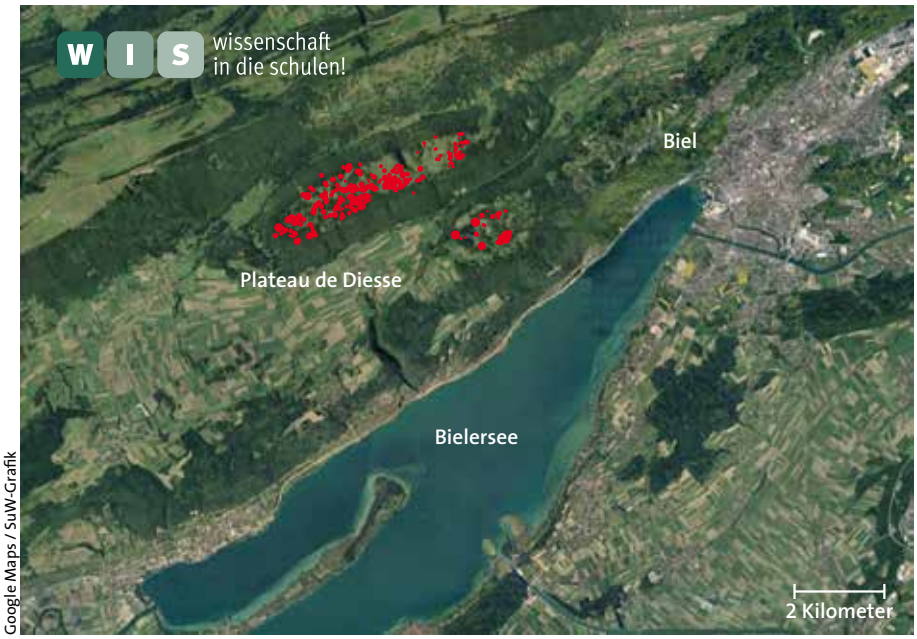


Google Maps / SuW-Grafik

Unweit der Schweizer Stadt Biel am Bielersee, rund 30 Kilometer nordwestlich von Bern, liegt das Streufeld des Twannberg-Falls. Es erstreckt sich über ein Areal von rund 3×5 Kilometern Größe. Die Fundorte der einzelnen Fragmente sind rot markiert.

Der erste Fund war der Twannberg-Meteorit aus dem Jahr 1984. Die maximal 18 Zentimeter breite Schnittfläche lässt einen Einkristall von Eisen erkennen, was sich an den durchlaufenden Spaltflächen ablesen lässt. Darin eingeschlossen ist das für einen Eisenmeteoriten vom Typ IIG charakteristische Mineral Schreibersit (Fe_3P). Es bildet Kristalle, die einige Zentimeter Größe erreichen.

Twannberg – ein Meteoritenstreufeld im Schweizer Jura

Im Schweizer Jura liegen Bruchstücke eines der größten Eisenmeteoritenfälle Europas. Der mehrere Meter große Asteroid mit sehr ungewöhnlicher Zusammensetzung zerbrach beim Fall in der Erdatmosphäre vor mehr als 100 000 Jahren in Tausende Fragmente.

Meteoritenfälle sind seltene Ereignisse. Weltweit werden jährlich nur einige wenige frisch gefallene Meteoriten gefunden und dokumentiert. Dass sich in der Datenbank der Meteoritical Society dennoch fast 55 000 Einträge verschiedener Meteoriten finden, ist vorwiegend auf den Zeitfaktor zurückzuführen: In geeigneten Gebieten heißer Wüsten und der Antarktis konnten sich Meteoriten über lange Zeiträume hinweg ansammeln und konzentrieren (siehe SuW 1/1987, S. 18). In so gebildeten »Akkumulationen« sind Funde wahrscheinlicher.

Die Häufigkeit von Meteoritenfällen nimmt zum Glück mit zunehmender Größe stark ab. Beobachtete Großereignisse sind die Fälle von Tunguska im Jahr 1908, Sikhote Alin (1947) und Tscheljabinsk (2013), alle in Russland. Bei diesen drei Ereignissen handelt es sich um Fälle von Himmelskörpern von einigen Metern bis rund 30 Meter Durchmesser, die in der Erdatmosphäre fragmentierten oder vollständig explodierten. Im Vergleich zu kraterbildenden Meteoritenfällen, im Extremfall zurückzuführen auf die Einschläge von Asteroiden mit bis zu zehn Kilometer Durchmesser, sind dies kleine Ereignisse. Auf Grund ihrer wesentlich größeren Wahrscheinlichkeit und dem Potenzial, Asteroiden auf Kollisionskurs in Zukunft vor dem Fall erkennen zu können, sind die kleinen Körper aber von besonderem Interesse.

Krater und Streufelder

Überreste von solchen kosmischen Kleinkatastrophen finden sich auf der Erde als kleine Krater, Streufelder oder als Kombination von Kratern mit Streufeldern. In Europa sind Morasko, Polen (Streufeld und sieben Krater bis 90 Meter Durchmesser), sowie Muonionalusta (großes Streufeld in Nordschweden) bekannt.

Das Auffinden eines neuen großen Streufelds in Mitteleuropa ist überraschend: Erst während der letzten Jahre ist klar geworden, dass die im Jahr 1984 bei Biel in der Schweiz gefundene, 15,915 Kilogramm schwere Masse des Twannberg-Meteoriten nur eines einer Vielzahl von Fragmenten eines großen Meteoritenschauers ist (siehe Bild S. 19 oben).

Nachdem im Jahr 2000 ein zweites Fragment des Twannberg-Meteoriten auf dem Dachboden eines alten Hauses im Dorf Twann am Bieler See gefunden wurde, kamen bis 2007 insgesamt sechs Meteoriten zusammen. Einer stammte aus einer alten Museumssammlung, drei weitere wurden von Goldwäschern in einem Bach gefunden. Ab dem Jahr 2009 begannen dann Sammler systematisch nach Fragmenten dieses Eisenmeteoritenschauers zu suchen. Zuerst fanden sie 75 offenbar transportierte kleinere Fragmente im Twannbach. Dies war der endgültige Beweis, dass hier wirklich ein größeres Streufeld mit vielen Fragmenten vorhanden sein muss.

Ab Herbst 2013 gelangen dann mehrere Neufunde in der Umgebung der Fundstelle der ersten Masse von 1984. Seit dem Frühling 2014 erfolgten mehrere gemeinsame Suchaktionen von Sammlern und Wissenschaftlern. Bei der nicht einfachen Suche nach einer Systematik in der Verteilung der Funde gelang schließlich im Jahr

Naturhistorisches Museum Bern

2015 der Durchbruch: Die Entdeckung des eigentlichen Streufelds, oder wenigstens eines Teils davon, auf dem nahegelegenen Mont Sujet. Hier kamen innerhalb eines guten Jahres rund 500 Fragmente des Twannberg-Meteoriten ans Tageslicht. Die Gesamtzahl der Funde liegt mittlerweile bereits bei mehr als 600 und die Gesamtmasse bei rund 80 Kilogramm. Die Erforschung des Twannberg-Streufelds ist ein Beispiel einer gut funktionierenden Zusammenarbeit zwischen Sammlern, die als »Citizen Scientists« einen unschätzbaren Arbeitsaufwand leisten, und wissenschaftlichen Institutionen. Dem durch gesetzliche Bestimmungen festgelegten Rahmen wird dabei Rechnung getragen.

Auf dem Mont Sujet lässt sich anhand der von Nordost nach Südwest über rund 4,5 Kilometer systematisch zunehmenden Größe der Fundstücke eine generelle Fallrichtung von Nordost nach Südwest ableiten. Der hier erhaltene Teil des Streufelds ist wahrscheinlich nur ein Überrest. Anhand von Edelgasanalysen, die am Physikalischen Institut der Universität Bern durchgeführt wurden, lässt sich folgern, dass der Ursprungskörper, auch Meteoroid genannt, vor seinem Eintritt in die Erdatmosphäre einen Durchmesser von einigen Metern hatte, entsprechend einer Masse von einigen hundert bis einigen tausend Tonnen. Die bisher gefundenen rund 80 Kilogramm entsprechen einem Würfel mit einer Kantenlänge von lediglich 22 Zentimetern. Wo ist die restliche Masse geblieben?

Abbremsung in der Atmosphäre

Der Eintritt eines Meteoroiden in die Erdatmosphäre erfolgt mit einer Geschwindigkeit von typischerweise 11 bis 30 Kilometern pro Sekunde. Er hat somit eine beträchtliche kinetische Energie, die sich in so genannte TNT-Äquivalente umrechnen lässt. Dabei entspricht die Explosionsenergie einer Tonne TNT $4{,}184 \cdot 10^{12}$ Joule. Beim Eintritt eines Objekts von einer Tonne wird je nach Geschwindigkeit die Explosionsenergie von 15 bis 100 Tonnen TNT freigesetzt. Bei kleineren Objekten wird diese Energie in der Erdatmosphäre durch Fragmentierung und Abschmelzen abgegeben. Ein Teil des Meteoroiden zersprüht dabei zu feinen Schmelztröpfchen. Der Rest, oft nur ein Bruchteil der Gesamtmasse, fällt als Meteoriten auf die Erde. Das Fallgebiet dieser Bruchstücke wird Streufeld genannt. Innerhalb eines Streufelds zeigt sich oft eine ausgeprägte Massensortierung: Die größeren Stücke werden weniger schnell abgebremst und fliegen am weitesten, während sehr kleine Stücke vom Ort der Fragmentierung, die oft in Höhen von 10 bis 30 Kilometern stattfindet, praktisch senkrecht nach unten fallen. Streufelder können eine Länge von 50 Kilometer und mehr erreichen, bei einer Breite von einigen Kilometern.

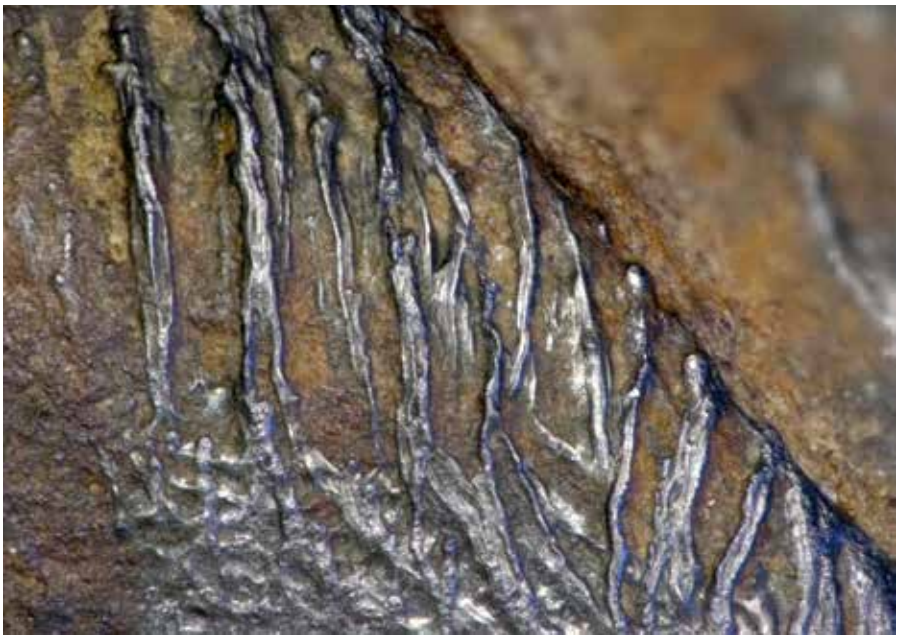
Erreichen Meteoriten den Boden mit einem noch hohen Anteil der ursprünglichen Geschwindigkeit vor Eintritt in die Erdatmosphäre, so erfolgt die Energieabgabe explosionsartig und es entstehen Krater. Das Twannberg-Ereignis liegt größenmäßig in dem Bereich, bei dem ein Teil des Körpers den Boden mit für eine Kraterbildung hinreichend hoher Geschwindigkeit erreichen kann. Es ist also nicht auszuschließen, dass einer oder mehrere kleine Krater gebildet wurden. Diese dürften aber der Erosion durch das Eis der Kaltzeiten zum Opfer gefallen sein. Für das Verhalten beim Fall spielt die Festigkeit eine große Rolle. Da Eisenmeteoriten wesentlich weniger leicht zerbrechen als Steinmeteoriten, ist die Fragmentierung bei Eisenmeteoriten weniger ausgeprägt. So sind auch die größten Meteoriten ausnahmslos solche aus Eisen.

Der Twannberg-Meteorit ist nicht nur als Fall-Ereignis interessant. Unter den rund 1000 weltweit bekannten Eisenmeteoriten gibt es nur fünf andere, welche dem gleichen seltenen Typ IIG entsprechen, zwei davon gehören höchstwahrscheinlich zum gleichen Fallereignis. Damit enthält die Gruppe IIG inklusive Twannberg nur ein halbes Prozent aller bekannten Eisenmeteoriten, wovon jeder einzelne ja schon eine Rarität ist. Die Gruppe IIG zeichnet sich durch einen für Eisenmeteoriten sehr niedrigen Nickelgehalt von rund fünf Prozent sowie einen hohen Phosphorgehalt von einem Prozent aus. Phosphor tritt in Form mehrerer Zentimeter großer Kristalle des Eisenphosphids Schreibersit (Fe_3P) auf. Sie sind in nickelarmem Eisen eingeschlossen, das in Form von Einkristallen mit mindestens Meteoritengröße vorliegt. Daher besteht auch das größte Fragment des Twannberg-Meteoriten aus einem einzelnen Eisenkristall.

Nach einer Arbeit von John T. Wasson und Won-Hie Choe vom Institute of Geophysics and Planetary Physics der University of California in Los Angeles, Kalifornien

Mehr zum Twannberg-Meteoriten

Die Ausstellung »Twannberg-Meteorit – Jäger des verlorenen Schatzes« ist seit dem 19. August 2016 im Naturhistorischen Museum der Burgergemeinde Bern in der Schweiz zu sehen und noch bis zum 20. August 2017 geöffnet. Die Ausstellung zeigt einen großen Teil der Funde und ist auch eine Hommage an jene Personen, welche die Meteoriten gefunden haben. Siehe: www.twannbergmeteorit.ch



Naturhistorisches Museum Bern

Die Oberfläche eines Fragments des Twannberg-Meteoriten von 279 Gramm weist deutlich erkennbare Fließlinien von Eisen auf. Sie zeugen vom Fall durch die Erdatmosphäre, wobei die Meteoritenoberfläche durch die Reibungswärme geschmolzen und durch die Luftströmung wegbewegt wurde.

en, stellt die Gruppe IIG der Eisenmeteorite den zuletzt erstarrten Teil eines Asteroidenkerns dar. Die Meteoriten der benachbarten chemischen Gruppe IIAB mit insgesamt bekannten 126 Meteoriten würden demnach aus demselben Kern stammen, wären aber früher erstarrt. Diese Ansicht ist jedoch nicht eindeutig bewiesen. Jedenfalls repräsentiert die Gruppe IIG mit Twannberg eine spät erstarrte Schmelze im Kern eines Asteroiden. Es handelt sich dabei um Prozesse, die ganz früh während der ersten Millionen Jahre nach der Entstehung unseres Sonnensystems vor 4567 Millionen Jahren stattfanden. Planetesimale, die Konstituenten der späteren Planeten, bildeten sich sehr schnell innerhalb rund einer Million Jahre nach Entstehung des Sonnensystems. Auf Grund der relativ hohen Aktivitäten kurzlebiger Radioisotope wie Aluminium-26 erwärmten sie die frisch gebildeten Körper bis zur Schmelztemperatur von Eisen und Silikatmaterial. Dadurch konnte sich die primär gemischte durchschnittliche Festsubstanz des Sonnensystems in eine schwere Metallphase, die den Kern bildete, und einen leichten Silikatmantel auftrennen.

Wann war der Twannberg-Fall?

Bei einem Meteoritenfall wie Twannberg stellt sich natürlich unmittelbar die Frage, wann sich dieses Fallereignis abgespielt hat. Eine Abschätzung, wie lange ein Eisenmeteorit auf der Erde liegt, ist anhand des Verwitterungsgrads außerordentlich schwierig. Einige Fragmente von Twannberg weisen bis zentimeterdicke Oxidationskrusten auf, während andere nur eine ganz dünne Korrosionsschicht zeigen. Durch das Bombardement von Meteoroiden im All durch Teilchen der galaktischen kosmischen Strahlung entstehen radioaktive Isotope in winziger Konzentration – auch ein frisch gefallener Meteorit ist wesentlich weniger radioaktiv als ein typisches irdisches Gestein. Auf der Erde zerfallen diese Isotope, und weil uns die Atmosphäre vor der kosmischen Strahlung weitgehend schützt, werden sie nicht nachproduziert. Aus dem Grad des Zerfalls kann somit das Fallalter berechnet werden. Derartige Untersuchungen wurden von Thomas Smith vom Physikalischen Institut der Universität Bern in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf und Kollegen durchgeführt. Das aus den Konzentrationen verschiedener kosmogener (also durch kosmische Strahlung entstandener) Radioisotope berechnete Alter liegt im Bereich von 165 000 Jahren mit einer Unsicherheit von 58 000 Jahren (35 Prozent).

Während der Kaltzeiten bildete das Juragebirge ein Hindernis für die sich von den Alpen her nach Norden ausbreitenden Gletscher. Das Twannberg-Fundgebiet am Südrand des Schweizer Juras lag ziemlich genau am Rand der Gletscherausbreitung. So liegt die vor rund 24 000 Jahren entstandene, gut ausgebildete Endmoräne des Maximalstands der jüngsten Vergletscherung aus der Würmeiszeit nur gerade 200 Meter südlich des Fundorts der ersten Twannberg-Masse von 1984 auf rund 960 Meter Höhe. Mit Ausnahme der transportierten Fragmente aus dem Twannbach wurde kein einziger Fund im Gebiet gemacht, der während der Würmeiszeit vom Eis bedeckt war. Der Fall muss daher vorher erfolgt sein.

Während der vorletzten Kaltzeit hatte das Eis eine wesentlich größere Ausdehnung und erreichte im Gebiet des Twannberg-Falls eine Höhe von rund 1200 Metern. Einige Funde wurden in Moränenablagerungen dieser vorletzten Kaltzeit gemacht, und der ungestörte Teil des Streufelds ist nur auf dem hochgelegenen Mont Sujet (1200 – 1382 Meter) erhalten. Dies deutet darauf hin, dass das Streufeld vom Eis der vorletzten Kaltzeit vor rund 185 000 bis 130 000 Jahren gestört wurde. Die geologischen Evidenzen passen daher mit der Altersbestimmung anhand der kosmogenen Isotope gut zusammen.

Die Erforschung des Streufelds ist noch im Gang. Dabei wird die Klärung und Verfeinerung der absoluten Größe, der Fallrichtung, des Zusammenhangs mit Ablagerungen der Eiszeiten sowie eine Kontrolle des Fallalters sowie eine physikalische Modellierung des Ereignisses angestrebt.

BEDA A. HOFMANN ist Leiter der Erdwissenschaftlichen Abteilung am Naturhistorischen Museum der Burgergemeinde Bern und koordiniert die Erforschung des Twannberg-Meteoritenstreufelds.

Literaturhinweise

Englert, P.: Meteorite aus der Antarktis. In: Sterne und Weltraum 1/1987, S. 18 – 23

Smith, T. et al.: Preatmospheric Size and Terrestrial Age of the Twannberg Meteorite. In: 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society, Berlin. Abstact Nr. 6187, 2016

Wasson, J. T., Choe, W.-H.: The IIG iron Meteorites: Probable Formation in the IIAB Core. In: Geochimica et Cosmochimica Acta 73, S. 4879 – 4890, 2009

WIS Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051360

duz
DEUTSCHE UNIVERSITÄTS ZEITUNG

HINTERGRUNDINFOS
zu Trends und Entwicklungen aus Forschung, Lehre und Wissenschaftsmanagement

NACHRICHTEN
aus dem nationalen und internationalen Hochschul- und Wissenschaftsgeschehen

PRAXISBERICHTE
von Expertinnen und Experten zum Forschen, Lehren und Leiten

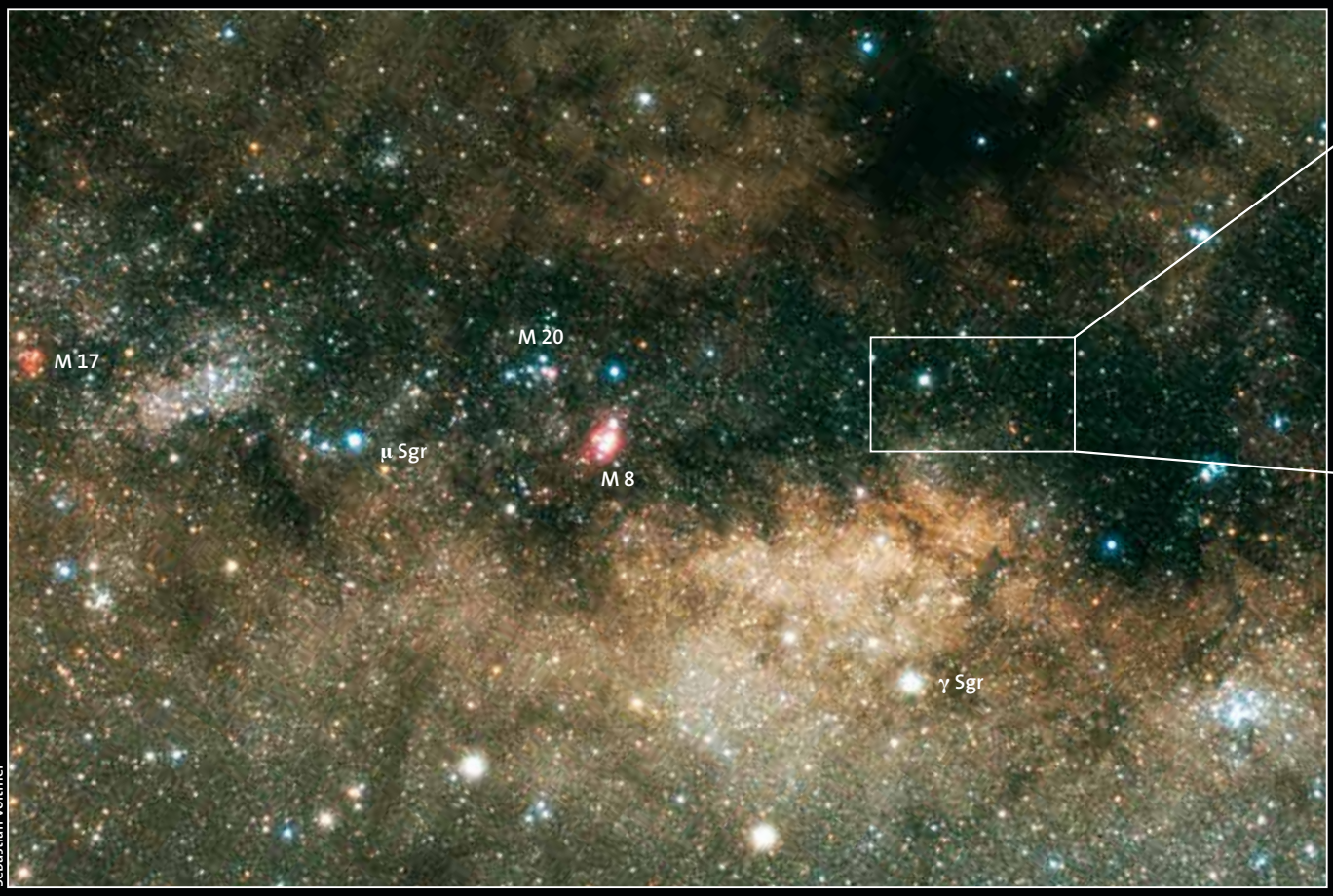
... UND DIE BESTEN JOBS
für Nachwuchswissenschaftler, Fach- und Führungskräfte im großen akademischen Stellenmarkt

2 AUSGABEN GRATIS TESTEN!

PROBEABO ZUM KENNENLERNEN

Online: www.duz.de/abo
E-Mail: kundenservice@duz-medienhaus.de
Telefon: 030 21 29 87 - 0

Für Hochschulen und sonstige größere Einrichtungen ist eine Campus-Lizenz verfügbar.



Sebastian Voltmer

Das PeVatron im Zentrum der Milchstraße

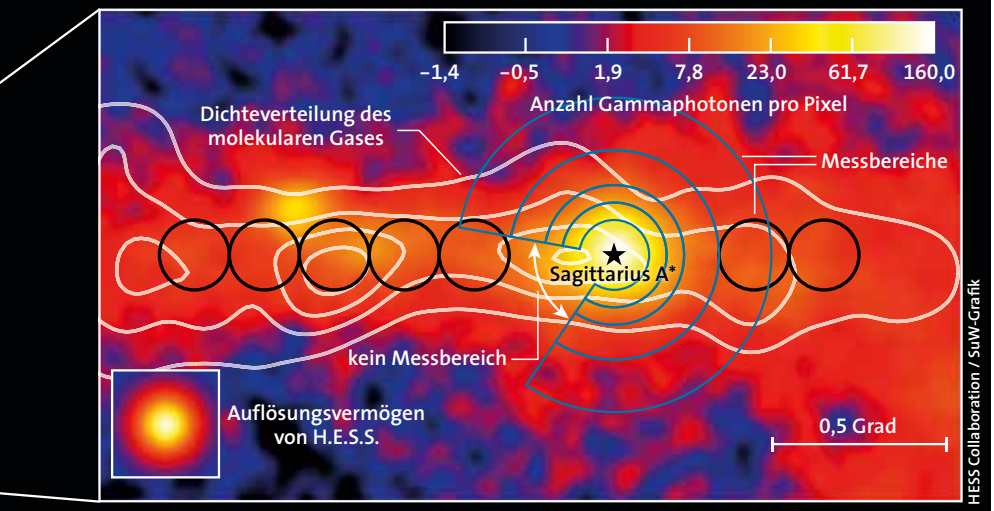
Ein Beschleuniger galaktischer kosmischer Strahlung mit beispielloser Energie

Das Schwarze Loch im Zentrum unseres Milchstraßensystems könnte die Quelle der diffusen hochenergetischen Gammastrahlung sein, die dort und in der Umgebung beobachtet wird. Außerdem liegt der Verdacht nahe, dass es für die Produktion der kosmischen Strahlung bis zu einer bestimmten Energie in Gänze verantwortlich sein könnte.

Im Jahr 1911 bestieg der österreichische Physiker Victor Hess zum ersten Mal einen Heißluftballon, um das Rätsel der durchdringenden Strahlung, welche die Ionisation der Luft verursacht, zu studieren (siehe auch SuW 11/2016, S. 28). Er entdeckte, dass die Ionisation mit steigender Höhe zunimmt und die Strahlung daher also nicht von der Erde, sondern aus dem All stammt. Dies war die Geburtsstunde eines völlig neuen Wissenschaftsfelds – der Astroteilchenphysik.

Nach mehr als 100 Jahren reger Forschungstätigkeit wissen wir heute, dass diese kosmische Strahlung aus Atomkernen besteht, die zum Teil extrem hohe Energien haben können. Diese Energien übersteigen den Bereich des Möglichen der von Menschen gebauten Beschleuniger, wie zum Beispiel dem Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf, um Faktoren von bis zu zehn Millionen. Der Ursprung dieser hochenergetischen Teilchen gibt uns allerdings bis heute Rätsel auf.

Betrachtet man das Spektrum der kosmischen Strahlung, also die Anzahl der Teilchen pro Energie, Fläche und Zeiteinheit, so ist ein charakteristischer Knick, das so genannte Knie des Spektrums, bei etwa einem Petaelektronvolt (1 PeV = 10^{15} Elektronvolt – mehr als das Hundertfache der Energien des LHC) zu erkennen (siehe SuW 9/2016, S. 16). Auf Grund theoretischer Überlegungen gehen die Astronomen davon aus, dass die kosmische Strahlung mit Energien unterhalb des Knies aus unserem Milchstraßensystem stammt, bei höheren Energien jedoch extragalaktischen Ursprungs ist. Um aber die astrophysikalischen Objekte zu lokalisieren, welche die Teilchen der kosmischen Strahlung auf ihre hohen Energien beschleunigen, lässt sich nur auf indirektem Weg vorgehen: Da die Teilchen elektrisch geladen sind, werden sie in interstellaren Magnetfeldern abgelenkt und erreichen die Erde weitestgehend isotrop, scheinen also aus allen Richtungen gleichförmig zu kommen. Tritt die kosmische Strahlung



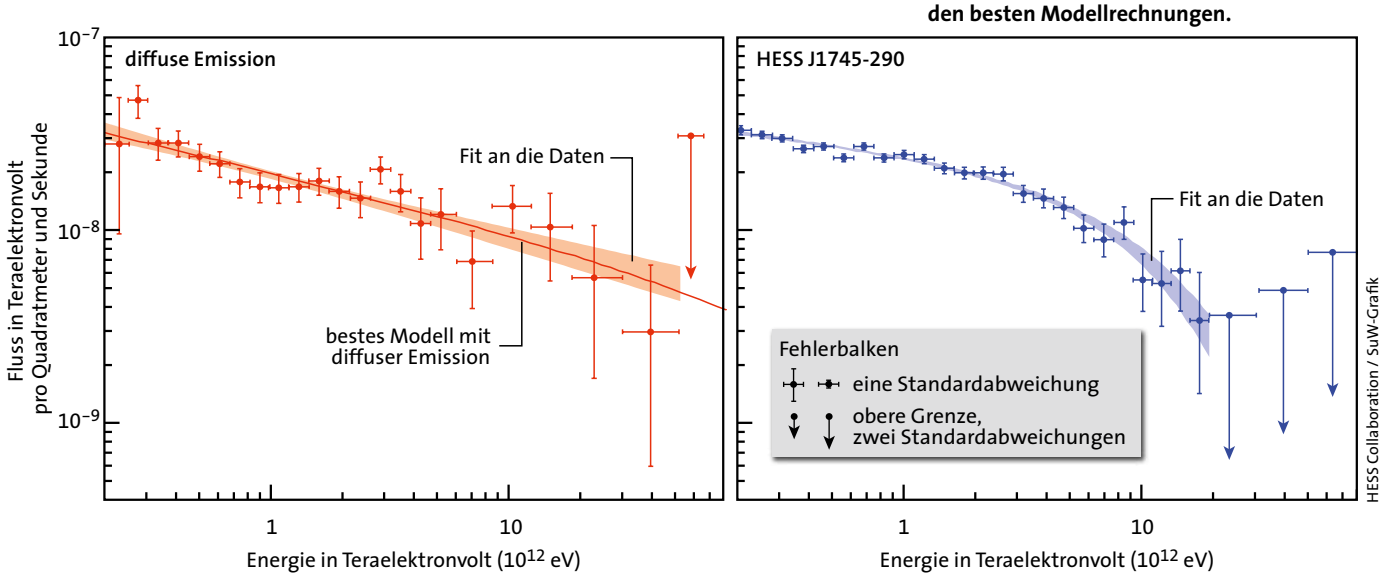
Das Zentrum unserer Galaxis liegt im weiß umrandeten Gebiet auf der Aufnahme von Sebastian Voltmer (links). Es ist durch den vorgelagerten Staub im sichtbaren Licht komplett unzugänglich. Allerdings lassen sich hochenergetische Gammaphotonen von dort mit Hilfe des High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) nachweisen. Oben: Die mit H.E.S.S. gemessene Karte der hochenergetischen Gammastrahlung in der Region des galaktischen Zentrums hat ihr Intensitätsmaximum genau dort, wo Sagittarius A* sitzt, das zentrale extrem massereiche Schwarze Loch. Der Verdacht liegt daher nahe, dass es als Quelle der Strahlung in Frage kommt. Die Farbskala zeigt die Anzahl an Gammaphotonen pro Pixel (0,02 Grad × 0,02 Grad). Die schwarz und blau umrandeten Bereiche wurde zur Datenanalyse herangezogen.

Neueste, von der H.E.S.S.-Kollaboration im Fachjournal »Nature« veröffentlichte Analysen beweisen jetzt erstmals, dass zumindest ein Objekt in der Milchstraße kosmische Strahlung bis zum Knie bei rund einem Petaelektronvolt beschleunigt. Hierzu hat H.E.S.S. in den Jahren 2004 bis 2013 das Zentrum des Milchstraßensystems mehr als 200 Stunden lang beobachtet. Neben einer sehr hellen punktförmigen Quelle mit der Bezeichnung HESS J1745–290 direkt im galaktischen Zentrum, zeigen die Daten eine ausgedehnte diffuse Emission, die gut mit den dichten Molekülwolken in dieser Region übereinstimmt (siehe Bild links und SuW 6/2008, S. 22).

Diese Korrelation deutet auf die Produktion der Gammastrahlung in Wechselwirkung von kosmischer Strahlung mit ebendieser Materie. Die Größe dieser Region liegt bei rund 500 Lichtjahren. Während das Spektrum von HESS J1745-290 ebenso wie die bisherigen entdeckten Quellen bei einer bestimmten Energie abbricht, beschreibt das Spektrum der diffusen Strahlung um diese Quelle herum ein sich fortsetzendes Potenzgesetz ohjedoch mit interstellarem Gas in Wechselwirkung, so emittiert sie Gammastrahlung, welche die Erde auf direktem Weg erreicht. Die Energie der Gammastrahlung ist dabei um etwa einen Faktor zehn niedriger als die Energie des die Strahlung erzeugenden Teilchens der kosmischen Strahlung.

Das momentan empfindlichste Instrument für den Nachweis von sehr hochenergetischer Gammastrahlung ist das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) in Namibia (siehe SuW 10/2012, S. 46). Es ist ein System von Tscherenkow-Teleskopen, das in den letzten 14 Jahren eine Vielzahl von Gammastrahlenquellen, insbesondere in unserem Milchstraßensystem, entdeckt hat. So unterschiedlich diese Quellen auch sind, sie alle haben gemein, dass ihre Spektren bereits bei einigen Teraelektronvolt (1 TeV = 10^{12} Elektronvolt) abbrechen – das Knie in der kosmischen Strahlung also nicht erreicht wird.

Die Spektren der diffusen Gammaquelle (links) und von HESS J1745-290 (rechts) weisen eine vergleichbare Abnahme mit zunehmender Energie auf. Bei rund 10 Teraelektronvolt ($10 \cdot 10^{12}$ eV) bricht das Spektrum von HESS J1745-290 allerdings ab. Als Quelle höchstenergetischer kosmischer Teilchen mit Energien von Petaelektronvolt (10^{15} eV) kommt daher nur der »Motor« der diffusen Gammaquelle in Frage – vermutlich das extrem massereiche zentrale Schwarze Loch. Die schattierten Bereiche entsprechen den besten Modellrechnungen.



ne Anzeichen eines Abbruchs bei hohen Energien (siehe Grafik S. 23 unten).

Aus der Kombination von Gammaemission und Dichte der Molekülwolken lässt sich die Intensität der kosmischen Strahlung und ihr Spektrum bestimmen. Die radiale Verteilung der diffusen Emission zeigt zudem, dass die kosmische Strahlung über Zeitskalen von mehr als 1000 Jahren hinweg in einer Quelle im Zentrum der Milchstraße (in einem Bereich von etwa 30 Lichtjahren) kontinuierlich produziert wurde und sich dann diffusiv ausgebreitet hat.

Um die maximale Energie dieser Quelle zu bestimmen, wurden die Gammadaten mit Modellrechnungen verglichen. Eine einzelne Modellierung bestimmt für mögliche Spektren kosmischer Strahlung deren Gammaemission. Der Vergleich zwischen gemessenen Daten und Modellierung ergibt eine maximale Energie von 2,9 Petaelektronvolt ($2{,}9 \cdot 10^{15}$ eV). Damit sehen wir auf diesem sehr indirekten Weg der Beobachtung zum ersten Mal überhaupt einen Teilchenbeschleuniger für Petaelektronvolt-Energien, ein so genanntes PeVatron.

Sehr wahrscheinlich handelt es sich dabei um Sagittarius A* (gesprochen: A Stern), das mit rund 4,3 Millionen Sonnenmassen extrem massereiche Schwarze Loch im Zentrum unseres Milchstraßensystems. Zwar gibt es gerade in dieser Region eine Vielzahl von Objekten, die das Potenzial hätten, kosmische Strahlung zu produzieren, beispielsweise Supernova-Überreste oder Sternhaufen, doch die langen Zeitskalen und hohen Energien lassen sich mit solchen Objekten nur schwer erklären. Ob es sich bei der Quelle HESS J1745-290 im galaktischen Zentrum tatsächlich um Sagittarius A* handelt und ob dies der Ursprung der kosmischen Strahlung ist, welche die diffuse Gammaemission produziert, lässt sich bislang nur vermuten. Eine Verbindung zwischen HESS J1745-290 und der diffusen Emission lässt sich allerdings herstellen: Das Abbrechen des Spektrums von HESS J1745-290 muss nicht notwendigerweise eine dem Spektrum innewohnende Eigenschaft sein, sondern lässt sich auch durch eine Absorption der höherenergetischen Gammastrahlung in den intensiven Infrarotstrahlungsfeldern im galaktischen Zentrum erklären.

Das Schwarze Loch Sagittarius A* befindet sich seit geraumer Zeit in einer ruhigen Phase, allerdings wird spekuliert, dass es in der Vergangenheit aktiver war. Unter den Annahmen, dass zum einen ein fester Bruchteil der von Sagittarius A* ausgestoßenen Energie in die kosmische Strahlung gegangen ist und zum anderen in der Vergangenheit größere Aktivität bestand, könnte Sagittarius A* sogar die Gesamtheit der kosmischen Strahlung bis zum Knie produziert haben. Das würde erklären, warum sich bisher keine anderen Objekte mit solchen Energien in der Milchstraße finden ließen. Mit unseren Messungen sind wir der Lösung des mittlerweile jahrhundertalten Rätsels der kosmischen Strahlung ein weiteres Mal einen Schritt näher gekommen.

KATHRIN EGBERTS promovierte am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und arbeitete danach als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Innsbruck. Jetzt leitet sie die H.E.S.S.-Arbeitsgruppe der Universität Potsdam.

ZUM NACHDENKEN

Diffuse Gammastrahlung aus dem galaktischen Zentrum

Offenbar gibt es am Ort des extrem massereichen Schwarzen Lochs im Zentrum unseres Milchstraßensystems eine Quelle höchstenergetischer Protonen. Sie treten mit dem dort vorhandenen interstellaren Gas in Wechselwirkung und produzieren dabei höchstenergetische Gammaphotonen. Sie werden im Gegensatz zu den Protonen von galaktischen Magnetfeldern nicht abgelenkt und erreichen uns unbeeinflusst von dort. Sie lassen sich mit dem High Energy Stereoscopic System H.E.S.S. in Namibia nachweisen.

Aufgabe 1: Die in der H.E.S.S.-Kollaboration zusammenarbeitenden Forscher vermaßen den inneren Bereich um Sagittarius A* über zehn Jahre hinweg. Dazu verwendeten sie auch die mit einer 66° großen Aussparung versehene Kreisfläche (siehe Grafik S. 23 oben, blau). Sie wird von zwei Ringbögen mit den Radien 0,1° und $\varrho_a = 0{,}45°$ begrenzt. Dazwischen liegen solche mit $\varrho_i = 0{,}15°$, 0,2° und 0,3°. Die Eigenschaften der diffusen Quelle wurden aus den zwischen ϱ_i und ϱ_a gemessenen Gammaphotonen ermittelt. **a)** Welche linearen Radien r_i und r_a entsprechen ϱ_i und ϱ_a, wenn das galaktische Zentrum $d_{GC} = 8{,}5$ kpc entfernt ist? **b)** Wievielen Quadratgrad (□°) und welchem Teil des gesamten Himmels entspricht dies? Hinweis: Der Himmel hat einen Raumwinkel von $4\,\pi \triangleq 4\,\pi \cdot (180°/\pi)^2$.

Aufgabe 2: Die Messungen belegen, dass die Quelle quasi kontinuierlich Protonen in die zentrale Gasregion injiziert und die Ausbreitung diffus erfolgt. Die charakteristische Größe der Diffusionsregion lässt sich dann ermitteln mit der Gleichung: $r_{Diff} = (4\,D_E\,t)^{1/2}$. Wie groß ist r_{Diff} (anzugeben in pc) mit dem hier für 10 TeV angegebenen Diffusionskoeffizienten $D_E = 6 \cdot 10^{25}$ m²/s und der Zeit $t = 6000$ a? 1 pc = $3{,}086 \cdot 10^{16}$ m.

Aufgabe 3: Die Gammastrahlenleuchtkraft der zentralen Quelle um Sagittarius A* wurde zu $L_\gamma = 5{,}69 \cdot 10^{27}$ W gemessen. Man vergleiche mit der Leuchtkraft der Sonne von $L_\odot = 3{,}846 \cdot 10^{26}$ W.

AXEL M. QUETZ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **10. Februar 2017** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. PDF: zum-nachdenken@sterne-und-weltraum.de. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 101

Literaturhinweis

HESS Collaboration: Acceleration of Petaelectronvolt Protons in the Galactic Centre. In: Nature 531, S. 476–479, 2016

WIS Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1051414 und artikel/1051517

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DIE WOCHE

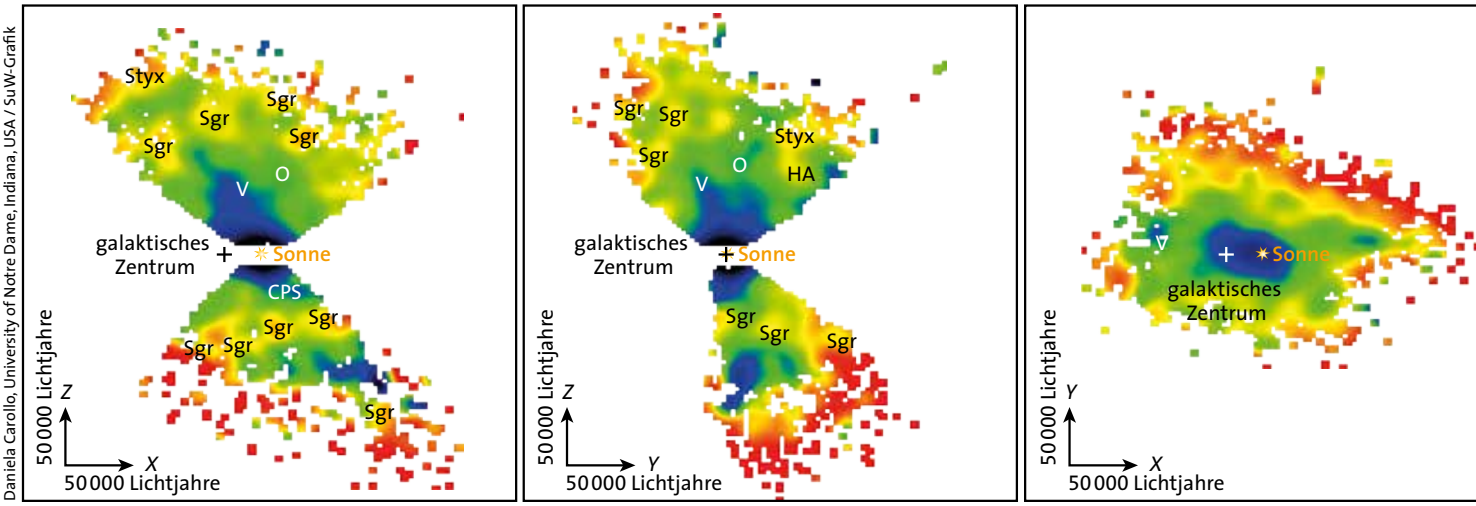
DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.

www.spektrum.de/abonnieren

ISTOCK / PETROVICH9



Daniela Carollo, University of Notre Dame, Indiana, USA / SuW-Grafik

Galaktische Jahresringe

Die bislang umfangreichste Alterskarte des galaktischen Halos zeigt, wie unser Milchstraßensystem von innen nach außen gewachsen ist.

Die galaktische Scheibe mit ihren Sternen und Gaswolken stellt nach ihrem Volumen nur einen kleinen, den innersten Teil, unseres Milchstraßensystems dar. Weit größer ist der umgebende, sphärische Halo. Auch hier gibt es Sterne, mit weit geringerer Anzahldichte zwar, aber angeordnet in einem komplexen System aus mindestens zwei diffusen Komponenten. Sie haben unterschiedliche räumliche Verteilungen, chemische Zusammensetzungen und Bewegungen. Die beiden Komponenten sind der innere und der äußere stellare Halo. Innerhalb dieser Strukturen finden sich zahlreiche Gebiete höherer Sterndichte. Langgestreckte Sternströme sind Überbleibsel von Zwerggalaxien, welche sich die Milchstraße einverleibt hat: Unsere Heimatgalaxie hat einen Wachstumsprozess durchgemacht, der längst noch nicht abgeschlossen ist.

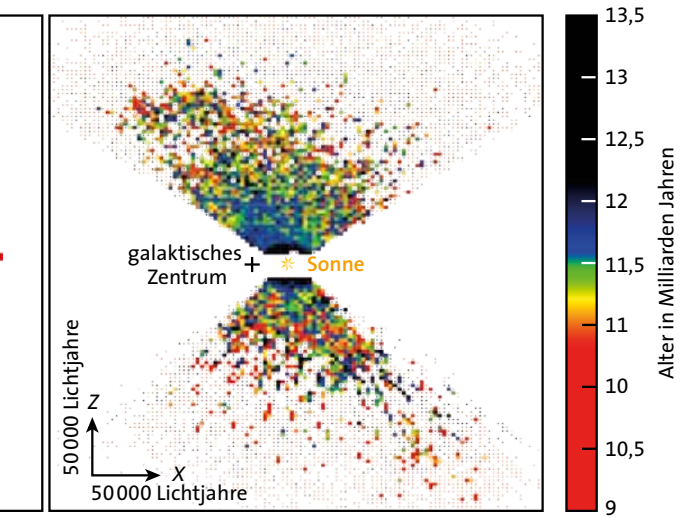
Auf dem Standardmodell der Kosmologie beruhende Modelle der Galaxienentwicklung gehen davon aus, dass sich das Milchstraßensystem sukzessive von innen nach außen erweitert hat. Einen Beleg dafür hat nun eine Forschergruppe um Daniela Carollo von der University of Notre Dame im US-Bundesstaat Indiana gefunden und in der Fachzeitschrift »Nature Physics« veröffentlicht. Die Forscher untersuchten das Alter von Halosternen und fanden heraus, dass sich die ältesten Sterne im inneren Bereich des Halos befinden, die jüngeren weiter außen. Sie bestätigten damit frühere Untersuchungen, die zu ähnlichen Ergebnissen gekommen waren (siehe SuW 5/2016, S. 28). Allerdings konnten Carollo und ihr Team das Alter von weit mehr Sternen bestimmen als ihre Vorgänger – rund 130 000. Die Sterndaten stammen aus den Archivdaten des Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Seit dem Jahr 2000 führt das SDSS systematische Beobachtungen mit einem eigenen 2,5-Meter-Teleskop am Apache Point Observatory im US-Bundesstaat New Mexico durch und durchmustert dabei den gesamten von dort aus zugänglichen Himmel. Mit dieser hohen Zahl konnten Carollo und ihr Team eine umfangreiche Karte der Altersverteilung der stellaren Halokomponente erstellen. Sie erlaubt den bislang detailliertesten Einblick in die 13,5 Milliarden Jahre lange Entstehungsgeschichte unseres Milchstraßensystems.

Blaue Horizontalaststerne als Altersindikator

Für ihre Untersuchung wählten die Astronomen einen besonderen Sterntyp, die so genannten blauen Horizontalaststerne (englisch: blue horizontal branch, BHB). Dabei handelt es sich um Sterne der Population II mit Massen zwischen einer halben und der doppelten Sonnenmasse, die sowohl ihr Leben auf der so genannten Hauptreihe im Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) als auch ihre anschließende Riesenphase auf dem Horizontalast bereits hinter sich gebracht haben (siehe Kasten S. 27). Zur vom deutschen Astronomen Walter Baade (1893–1960) getroffenen Klassifikation der Population II gehören Sterne mit einem geringen Anteil schwerer Elemente (von Astronomen Metallizität genannt), die im Allgemeinen älter als sechs Milliarden Jahre und in Kugelsternhaufen und eben im galaktischen Halo anzutreffen sind.

Statt Wasserstoff verbrennt in den Kernen der BHB-Sterne Helium, sie sind damit besonders heiß und leuchten im blauen Spektralbereich. Ihre große Leuchtkraft macht sie zu idealen Markern bei der Untersuchung des galaktischen Halos, denn sie sind auch aus großen Distanzen zu erkennen. Außerdem handelt es sich bei fast allen Halosternen der Spektraltypen B3 bis A0 um blaue Horizontalaststerne, eine Beimengung der untersuchten Probe durch Sterne anderer Art ist daher von Vornherein sehr klein (siehe Kasten S. 27). Für ihre Untersuchung verwendeten die Forscher um Carollo allerdings nur BHB-Sterne im Bereich von 0,6 bis 0,7 Sonnenmassen.

Die Forscher nutzen eine einfache Beziehung zwischen der Farbe der BHB-Sterne und ihrem Alter: Bei gleicher Metallizität hängt die Farbe der Sterne (und damit ihre Position auf dem Horizontalast) nur von ihrer Masse ab. Die Masse wiederum ist ein direkter Indikator für das Alter der Sterne: Massearme Sterne verbringen deutlich mehr Zeit auf der Hauptreihe des



Die Struktur der Altersverteilung gleicht galaktischen Jahresringen: Die ältesten Sterne (blau und schwarz) liegen innen, und je weiter man nach außen geht, desto jünger werden die Sterne (gelb und rot). Die dreidimensionale Alterskarte unseres Milchstraßensystems ist hier in drei Schnitten gezeigt: zwei Schnitte senkrecht zur galaktischen Ebene (X-Z und Y-Z) und einer in der galaktischen Ebene (X-Y). Die unmittelbare Umgebung des galaktischen Zentrums war für Messungen unzugänglich. Die rechte Grafik zeigt den gleichen Schnitt wie die ganz links, jedoch ist hier die Anzahl der Sterne pro Rasterelement durch die Punktgröße dargestellt.

3-D-Animation der Altersstruktur unserer Galaxis: goo.gl/y5DesA

FHD als massereiche Sterne. Somit entstehen in massearmen Sternen während des Wasserstoffbrennens auf der Hauptreihe größere Kerne aus Helium, oder anders ausgedrückt: Die den Heliumkern umgebende Wasserstoffhülle ist dünner bei älteren (masseärmeren) als bei jüngeren (massereicheren) Sternen. Eine dünnere Wasserstoffhülle lässt den Stern heißer und damit blauer erscheinen; Sterne mit einer dickeren Hülle erscheinen dagegen röter. Aus der relativ einfachen Beobachtung ihrer Farbe lässt sich somit auf das Alter der Sterne schließen – wenn man außerdem davon ausgeht, dass der zusätzliche Massenverlust während der vorangegangenen Riesenphase für alle BHB-Sterne gleich ist. Die Beziehung zwischen dem Alter und der Farbe der BHB-Sterne wurde bereits vor einem Vierteljahrhundert erkannt, unter anderem von Timothy Beers von der University of Notre Dame, einem Mitautor der Studie.

Die dreidimensionale Verteilung der auf diese Weise ermittelten Sternalter der BHB-Sterne zeigt ein komplexes Muster: Die innersten 50 000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum, also der Bereich bis etwa zur Sonnenbahn, werden von den ältesten Sternen bevölkert – die meisten Sterne unseres Milchstraßensystems, deren Alter mehr als zwölf Milliarden Jahre beträgt, sind hier zu finden. Weiter außen bis hin zu Abständen von 165 000 Lichtjahren zum galaktischen Zentrum werden die Sterne immer jünger, und auch die Streuung der Sternalter steigt an. Darüber hinaus lassen sich zahlreiche Regionen mit höherer Sterndichte sowie etliche Sternströme erkennen – einige davon waren bislang unbekannt.

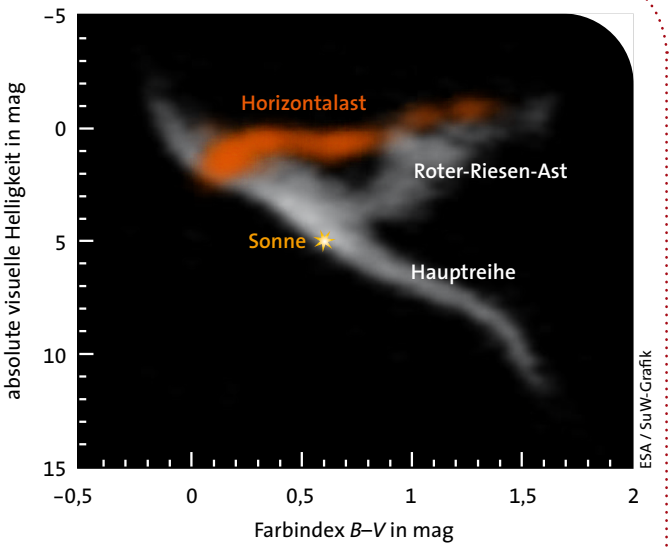
Wie galaktische Jahresringe markieren die Sternalter also die zeitliche Entwicklung unseres Milchstraßensystems. Die Altersverteilung entspricht dem, was Astronomen aus Simulationsrechnungen theoretisch hergeleitet haben, die auf den grundlegenden kosmologischen Modellen eines von Dunkler Energie und Materie dominierten Universums beruhen. Die Forscher um Carollo gehen davon aus, dass ihre Technik der Altersbestimmung von BHB-Halosternen in Zukunft auch auf neue Durchmusterungen sowohl der Milchstraße als auch anderer Galaxien in der lokalen Gruppe angewendet werden wird.

JAN HATTENBACH ist Physiker und Amateurastronom. In seinem Blog »Himmelslichter«, zu finden unter www.himmelslichter.net, schreibt er über alles, was am Himmel passiert.

Literaturhinweis

Carollo, D. et al.: The Age Structure of the Milky Way's Halo. In: Nature Physics 12, S. 1170–1176, 2016

Der Horizontalast im FHD

Im Farben-Helligkeits-Diagramm (FHD) sortieren sich die Sterne in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften in verschiedene Bereiche. Normale Sterne wie unsere Sonne liegen auf der so genannten Hauptreihe. Auf ihr verbringen die Sterne die meiste Zeit ihrer Existenz. Die Roten Riesen liegen wegen ihrer Farbe rechts und wegen ihrer hohen Leuchtkraft weit oben im Diagramm – ihre absolute Helligkeit ist hoch.

Der Horizontalast (orange markiert) enthält Sterne ungefähr gleicher Leuchtkraft, aber unterschiedlicher Farbe. Die Farbe ist hier durch die Differenz der Helligkeit in den beiden Bereichen Blau und Visuell ($B - V$) dargestellt. Die grau gefärbten Bereiche zeigen reale Daten des Satelliten Hipparcos von rund 20 000 Sternen. In dem zu Grunde liegenden Hipparcos-Datensatz sind keine Weißen Zwerge enthalten. Sie wären links unten aufgetaucht.