

ASTRONOMIE

# Die Milchstraße als Labor

Das Radial Velocity Experiment (RAVE) wird bis Ende 2012 einige hunderttausend Sterne spektroskopisch analysieren.

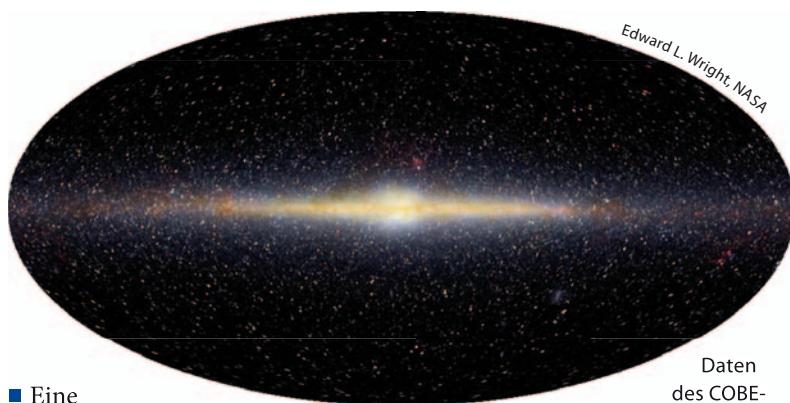
Matthias Steinmetz

Die Milchstraße dient als Prototyp für einen fundamentalen Baustein unseres Kosmos, die Spiralgalaxien. In unserer Heimatgalaxie können wir von einzelnen Sternen Abstände und Eigenbewegungen messen und ihr Spektrum aufnehmen. Da Sterne wie Fossilien die chemische Zusammensetzung zum Zeitpunkt ihres Entstehens „konservieren“, eignet sich die Milchstraße als Labor für die Galaxienentstehung und Kosmologie.

Schon Demokrit vermutete im 5. Jahrhundert v. Chr., dass die Milchstraße, deren verschwommenes Band den Nachthimmel durchzieht, in Wirklichkeit aus unzähligen Sternen besteht. Galileo Galilei konnte dies Anfang des 17. Jahrhunderts mit dem Fernrohr bestätigen. Ende des 18. Jahrhunderts führte Herschel die erste systematische Himmelsdurchmusterung durch und erkannte die scheibenartige Gestalt unserer Milchstraße. Er positionierte die Sonne in die Nähe des galaktischen Zentrums, eine Täuschung aufgrund der vernachlässigten interstellaren Extinktion. Erst in den 1920er-Jahren erkannte Shapley durch die Vermessung weit entfernter Kugelsternhaufen ober- und unterhalb der galaktischen Scheibe, dass die Sonne eher in den Außenbereichen der Scheibe liegt.

Unsere Milchstraße besitzt eine Sonderrolle: Nur die Galaxien der näheren kosmischen Nachbarschaft (bis zu Abständen von etwa 30 Millionen Lichtjahren) können wir in Einzelsterne auflösen, nur in Galaxien unserer lokalen Gruppe – also das Ensemble von Milchstraße, Andromedagalaxie M31, Galaxie M33 sowie deren Satellitengalaxien – können wir einzelne Sterne spektroskopieren, und nur in (Teilen) unserer Milchstraße können wir Abstände und tangentielle Eigenbewegungen direkt messen. Die Milchstraße lässt sich strukturell, chemisch und kinematisch in ihre Bestandteile zerlegen. Das Radial Velocity Experiment (RAVE, [1]) generiert seit fast zehn Jahren einen systematischen Datensatz von hunderttausenden Sternen. Fast jede Nacht werden Beobachtungen durchgeführt, die ein internationales Team von Wissenschaftlern aus zehn Ländern auswertet.

Seit den späten 1920er-Jahren haben wir ein grundlegendes Bild vom Aufbau unserer Milchstraße erarbeitet, das die folgenden wesentlichen Komponenten umfasst (Abb. 1):



Daten des COBE-Satelliten ermöglichen diesen seitlichen Anblick der Milchstraße.

- Eine dünne Scheibe, deren Dichte sowohl in radialer als auch in vertikaler Richtung exponentiell abfällt mit einer Skalenlänge von  $3,5 \text{ kpc}^1$  bzw.  $0,25 \text{ kpc}$ . Sie besteht aus Staub, Molekülwolken und interstellarem Gas sowie aus Sternen jeden Alters, von gerade geborenen hoher Masse bis hin zu solchen, die zehn Milliarden Jahre alt sind. In den Sternen ähnelt die Häufigkeit und die Verteilung der chemischen Elemente derjenigen unserer Sonne. Die Sterne umlaufen das galaktische Zentrum nahezu auf Kreisbahnen mit einer mittleren Geschwindigkeit von  $220 \text{ km/s}$ . Da diese Geschwindigkeit praktisch nicht vom Abstand zum galaktischen Zentrum abhängt, nimmt die gesamte innerhalb eines Radius  $R$  eingeschlossene Masse linear mit  $R$  zu. Neben der systematischen Rotation bewegen sich die Sterne der dünnen Scheibe nur sehr langsam mit rund  $20 \text{ km/s}$ . Die dünne Scheibe dominiert mit ihren 200 Milliarden Sternen das Leuchten der Milchstraße.

- Eine dicke Scheibe mit einer ähnlichen Struktur wie die dünne, jedoch nur etwa 10 % ihrer Masse. Ihre Sterne haben geringere Häufigkeiten der chemischen

<sup>1)</sup> 1 Kiloparsec (kpc) sind 3262 Lichtjahre.

## KOMPAKT

- Die Milchstraße besteht im Wesentlichen aus einer dünnen und einer dicken Scheibe, aus einem zentralen Bulge und einem stellaren Halo, der die Galaxie umgibt.
- Die Analyse der chemischen und kinematischen Eigenschaften von Sternpopulationen erlaubt Rückschlüsse auf die Epochen im Leben unserer Galaxie und ihre Entstehungsgeschichte.
- Bisherige Daten des Radial Velocity Experiments (RAVE) erlauben u. a. Aussagen über die Gesamtmasse der Milchstraße, die Entstehung der dicken Scheibe bzw. über galaktische Überreste.

Prof. Dr. Matthias Steinmetz, Leibniz-Institut für Astrophysik (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam

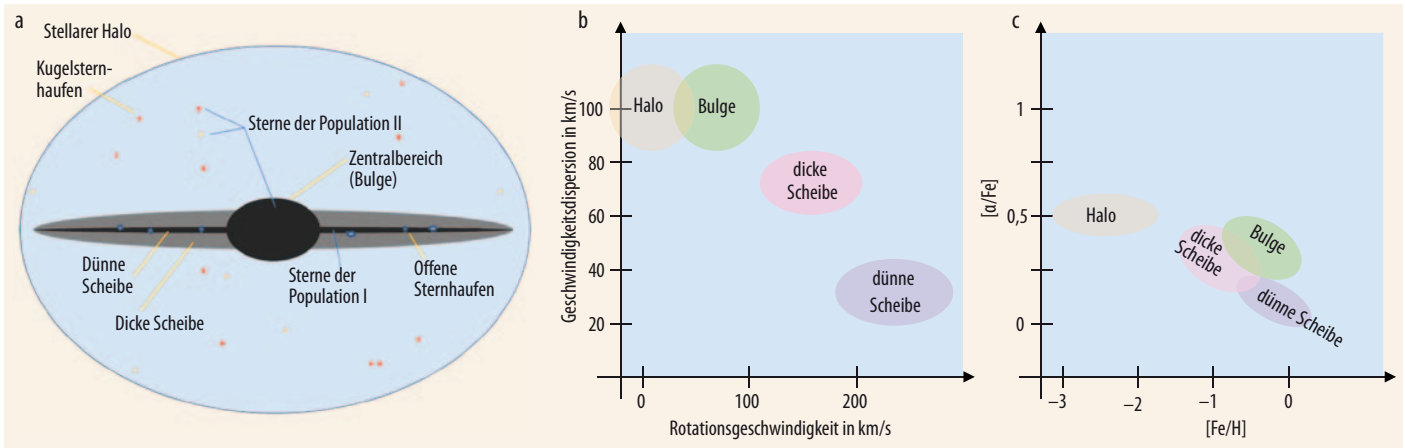


Abb. 1 Die Milchstraße besteht aus einer dünnen und einer dicken Scheibe. Im Zentrum befindet sich ein sog. Bulge. Ein stellarer Halo

umgibt die Milchstraße (a). Jede Komponente zeichnet sich durch eine charakteristische Kinematik aus (b) sowie eine spezifische

chemische Zusammensetzung (c).  $[X/Y]$  ist die Häufigkeit eines Elements X relativ zum Element Y.<sup>2)</sup>

Elemente und sind im Mittel älter; junge Sterne fehlen. Die individuellen Orbits der Sterne weisen höhere Exzentrizität auf, folglich ist die mittlere Rotationsgeschwindigkeit geringer (etwa 170 km/s), die Eigenbewegung entsprechend größer.

■ Der stellare Halo, also eine sphäroidale Verteilung von Sternen, umgibt mit einer Ausdehnung von etwa 50 kpc die galaktische Scheibe. Die Sterne des Halos sind alt, metallarm und besitzen mehr  $\alpha$ -Elemente<sup>3)</sup> wie O, Mg oder Si als die Sonne – man sagt, die  $\alpha$ -Elemente sind überhäufig. Kinematisch ist der stellare Halo durch dynamischen Druck gestützt, die Geschwindigkeitsdispersion beträgt etwa 100 km/s, die mittlere Rotation ist fast Null.

■ Eine „Ausbeulung“ (engl. „bulge“) dominiert das galaktische Zentrum. Dieses sphäroidale, druckgestützte System besteht aus alten Sternen mit überhäufigen  $\alpha$ -Elementen. Im Zentrum des Bulges sitzt ein supermassives Schwarzes Loch mit einer Gesamtmasse von 2,6 Millionen Sonnenmassen.

■ Um die flache Rotationskurve der Scheibenkomponenten zu erklären, ist ein sphäroidaler Halo aus Dunkler Materie notwendig, dessen Eigenschaften gut mit den Vorhersagen der kosmologischen Strukturbildung übereinstimmen.

Viele der genannten Zahlenwerte sind nur recht ungenau bekannt, oft sehr viel ungenauer als bei benachbarten Galaxien. Dies liegt daran, dass wir die Milchstraße von innen heraus betrachten. Ein Großteil bleibt uns aufgrund der Extinktion durch interstellares Gas und Staub zudem verborgen.

Nach dem eben gezeichneten Bild sind die einzelnen Komponenten – mit Ausnahme der Spiralarme in der dünnen Scheibe – glatt und strukturlos, ohne größere Zeichen von Wechselwirkung z. B. durch den Zusammenstoß mit anderen Galaxien. In der Tat sind selbstgravitierende Scheiben relativ fragile Systeme, deren Strukturlosigkeit eine wichtige Randbedingung an die Akkretionsrate der Galaxie stellt. Oder haben wir die Unterstrukturen in der Milchstraße nur noch nicht gesehen? Gemäß der kosmologischen Perspektive, nach der Galaxien durch systematisches Verschmelzen

von kleinen zu größeren Strukturen wachsen, sollten solche Unterstrukturen zahlreich vorhanden sein [2].

### Galaktische Archäologie

In der Tat wurden in den beiden letzten Jahrzehnten zahlreiche Indizien für eine deutlich inhomogenere Struktur unserer Milchstraße gefunden. Dies begann mit der Entdeckung der Sagittarius-Zwerggalaxie, die rund 20 kpc entfernt liegt und derzeit vom Gezeitenfeld unserer Galaxis zerrissen wird. Ihre Überreste erstrecken sich entlang von Großkreisen über den galaktischen Himmel (Infokasten). Abbildende Durchmusterungen, insbesondere der Sloan Digital Sky Survey (SDSS), haben zahlreiche weitere solcher Strukturen im Halo entdeckt. Auch die in den 70er-Jahren identifizierten „moving groups“ stoßen in Anbetracht dieser Entwicklungen auf neues Interesse. Diese Sterne der galaktischen Scheibe sind in räumlichen Koordinaten nicht mehr als zusammengehörig zu erkennen, bilden im Geschwindigkeitsraum aber noch eine Gruppe. Zumindest bei einigen Gruppen könnte es sich um Gezeitenüberreste zerrissener Zwerggalaxien handeln. Auch in anderen Galaxien unserer lokalen Umgebung treten Gezeitenströme auf. Jedoch bleibt unklar, ob ihre Zahl und Ausprägung im Einklang mit den Vorhersagen des kosmologischen Standardmodells [3] sind oder ob es in der Milchstraße auffällig ruhig zugeht.

Den Sternen unserer Milchstraße kommt eine besondere Bedeutung zu: Sie dominieren (nach der Dunklen Materie) nicht nur die Gesamtmasse der Galaxis und sind aufgrund ihrer eigenen Leuchtkraft besonders gut zu beobachten, sie fungieren auch als kosmische Fossilien – sie „konservieren“ die Häufigkeiten der chemischen Elemente aus der Gaswolke, aus der sie entstanden sind. Weitere Einsichten liefert die Analyse der relativen Elementverhältnisse. Die chemischen Elemente werden in Sternen verschiedener Masse gebildet und über unterschiedliche Mechanismen wieder an das interstellare Medium abgegeben. Die Analyse einer Sternpopulation erlaubt somit unmittelbar Rückschlüs-

2) Diese ist definiert als das logarithmische Verhältnis der Anzahl der Atome, bezogen auf das in der Sonne ( $\odot$ ):  $[X/Y] = \log(N_X/N_Y) - \log(N_X/N_Y)_\odot$ .

3) Alpha-Elemente sind dadurch charakterisiert, dass ihre häufigsten Isotope Vielfache der Masse eines Heliumkerns sind.



se auf die Bedingungen zum Zeitpunkt ihrer Entstehung und die Zeitskalen, auf denen sich Gas in Sterne verwandelt hat. Im Idealfall ist es möglich, einzelne Sternentstehungsregionen in der Frühzeit unserer Galaxis chemisch zu markieren [4, 5].

Eine besondere Rolle bei der Elemententstehung spielen Supernovae, denn ihre Explosionen sind die dominanten Brutöfen für chemische Elemente im Kosmos. Für die galaktische Archäologie ist von besonderem Interesse, dass Supernovae vom Typ Ia bzw. II verschiedene chemische Elemente auf unterschiedlichen Zeitskalen erzeugen. So entstehen in Typ-Ia-Supernovae auf Zeitskalen von etwa einer Milliarde Jahren mehr Elemente der Eisengruppe, während Supernovae vom Typ II das interstellare Medium auf einer Zeitskala von wenigen Millionen Jahren eher mit  $\alpha$ -Elementen anreichern. Wird in einer frühen Galaxie Gas innerhalb einiger zehn Millionen Jahre in Sterne umgewandelt, kann daher die resultierende Sternpopulation vergleichsweise wenig Eisengruppenelemente enthalten, weist aber gegenüber der Sonne eine Überhäufigkeit an  $\alpha$ -Elementen auf. Da die Sterne unseres Halos deutlich überhäufig  $\alpha$ -Elemente besitzen, die Sterne der lokalen Zwerggalaxien aber Eisengruppenelemente, können die Zwerggalaxien also nicht die „Bausteine“ sein, aus denen sich der stellare Halo gebildet hat.

Auch die Kinematik und Dynamik der Sterne erlauben es uns, die Entstehungsgeschichte unserer Milchstraße zu untersuchen. Da Sterne sehr viel kleiner sind als ihr typischer Abstand (für die Sonnenumgebung ist dieses Verhältnis etwa  $10^{-8}$ ), sind Stöße zwischen ihnen sehr unwahrscheinlich. Selbst in den sehr viel dichteren Gebieten in Kugelsternhaufen oder im galaktischen Zentrum beträgt das Verhältnis nur einige  $10^{-5}$ . Die Verteilungsfunktion der Sterne im Phasenraum  $f(x, v, t)$ , also die Zahl der Sterne mit Geschwindigkeit  $v$  am Ort  $x$ , wird somit in guter Näherung durch die stoßfreie Boltzmann-Gleichung (Vlasov-Gleichung) beschrieben, und die Phasenraumdichte der Sterne ist in guter Näherung eine Erhaltungsgröße (Infokasten). Zumindest in den äußeren Bereichen der Galaxie ist die dynamische Zeitskala nur etwa eine Größenordnung kleiner als das Alter des Universums.

Wie in der Archäologie kann der Astronom aus der systematischen Analyse der chemischen und/oder kinematischen Eigenschaften von Sternpopulationen auf die verschiedenen Epochen im Leben unserer Galaxie und ihre Entstehungsgeschichte schließen. Deshalb hat sich für dieses recht junge Arbeitsgebiet der Begriff Galaktische Archäologie eingebürgert.<sup>4)</sup>

### Die Vermessung der Milchstraße

Um die Entwicklungsgeschichte der Milchstraße zu enthüllen, müssen wir für möglichst viele Sterne die Elementhäufigkeiten kennen sowie die Phasenraumkoordinaten, die sich in solche entlang dem Firmament (Winkelkoordinaten, Eigenbewegungen) und solche entlang der Sichtlinie (Abstand, Radialgeschwindigkeit)

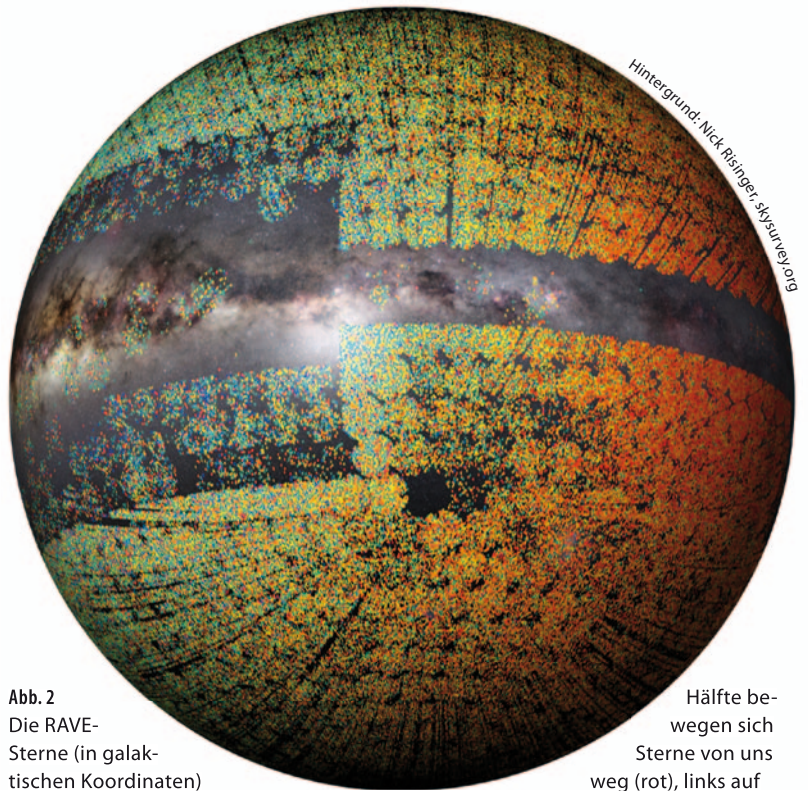


Abb. 2 Die RAVE-Sterne (in galaktischen Koordinaten) verteilen sich über die ganze Hemisphäre. Im Hintergrund ist eine optische Aufnahme der Milchstraße zu sehen. Farblich kodiert ist die Radialgeschwindigkeit der Sterne: In der rechten

Hälfte bewegen sich Sterne von uns weg (rot), links auf uns zu (blau). Die Sonne hat bezogen auf die lokale Kreisgeschwindigkeit um das galaktische Zentrum (etwa 220 km/s) eine Eigenbewegung von etwa 20 km/s.

keit) aufteilen. Die Winkelkoordinaten sind dank photometrischer Durchmusterungen für viele Millionen Sterne unserer Milchstraße bekannt. Abstände präzise zu bestimmen, ist eine der größten Herausforderungen in der Astrometrie. Für etwa 100 000 Sterne gelang dies der ESA-Mission Hipparcos über Parallaxenmessung mit einer Messgenauigkeit von  $10^{-3}$  Bogensekunden – für die Hälfte der Sterne lag der Fehler bei unter 20 %. Für alle anderen Sterne sind wir auf sehr viel ungenauere sekundäre Messungen angewiesen. Auch Eigenbewegungen ließen sich in der Vergangenheit nur mit Weltraummissionen wie Hipparcos bestimmen. Dank moderner CCD-Surveys oder digitaler Prozessierung von Photoplaten ist es aber mittlerweile möglich, über eine Zeit von mindestens zehn Jahren recht verlässlich

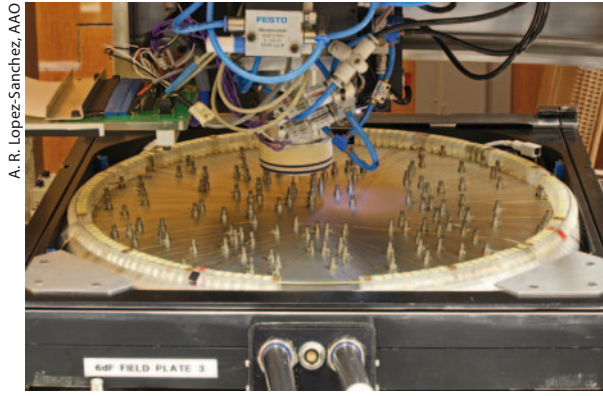
4) Eine alternative Bezeichnung ist „near-field cosmology“: Diese analysiert die Entwicklung unserer Milchstraße anhand von Sternpopulationen verschiedener kosmischer Epochen, während die (far-field) Kosmologie Populationen von Galaxien zu unterschiedlichen Epochen statistisch untersucht.

### GEZEITENSTRÖME

Wenn eine Satellitengalaxie in ihrem Orbit um die Muttergalaxie den sog. Roche-Radius durchquert, zerreißt sie aufgrund von Gezeitenkräften. Genau wie es auf der Erde einen Flutberg sowohl auf der dem Mond zugewandten als auch auf der abgewandten Seite gibt, bildet auch die einfallende Satellitengalaxie zwei Gezeitschweife: Einer gewinnt gegenüber dem Einfallorbit Drehimpuls, einer verliert Drehimpuls. Die Gezeitschweife orientieren sich entlang des einfallenden Orbits, werden aber durch nichtradi-

ale Kräfte (z. B. Abweichungen von der Kugelsymmetrie in der Muttergalaxie) und Streuung an Substrukturen sukzessive ausgewaschen. Dabei verringert sich die räumliche Dichte der Gezeitenreste. Da dieses stoßfreie System das Liouville-Theorem befolgt, resultiert aus der geringeren Dichte eine Kompression in der Geschwindigkeit. Solche Strukturen sind im Geschwindigkeitsraum über viele Umlaufzeitskalen nachweisbar, selbst wenn sie in räumlichen Koordinaten schnell ausgewaschen werden.

Abb. 3 Seit 2003 wurden im Rahmen der RAVE-Kampagne in rund 1800 Messnächten über 4500 Felder erfasst. Für jedes Feld positioniert der Roboter die Fasern des Spektrographen neu.



Eigenbewegungen zu bestimmen. Eine Eigenbewegung von einer Millibogensekunde pro Jahr entspricht in einem Abstand von 1 kpc einer Geschwindigkeit von 4,76 km/s, dies ist zu vergleichen mit der Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße (220 km/s), der Geschwindigkeitsdispersion der jungen dünnen Scheibe (10 – 20 km/s) oder der des stellaren Halos (100 km/s). Zumindest in der weiteren Sonnenumgebung (wenige kpc) lassen sich bei dieser Genauigkeit kinematisch interessante Randbedingungen ableiten.

Sehr viel uneinheitlicher war zu Beginn des letzten Jahrzehnts die Situation bei der spektroskopischen Messung der Häufigkeit und Radialgeschwindigkeit von Sternen. Zwar fanden sich in den Archiven der Astronomen etwa 40 000 solcher Messungen, die Daten waren jedoch sehr inhomogen bezüglich des Spektralbereichs, der Auflösung, des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses und der Auswahlfunktion. Für detaillierte galaktische Strukturanalysen sind diese Daten nur bedingt zu gebrauchen. In der Tat gab es für die Andromeda-Galaxie homogenere Daten als für unsere Galaxie – weil wir mitten in der Milchstraße sitzen und die Sterndichte am Firmament sehr gering ist.

### Durchmusterung mit Roboterunterstützung

RAVE sollte ursprünglich bis zu eine Million Spektren für Sterne unserer Milchstraße messen. Bei einer Belichtungszeit von einer Stunde pro Stern würde eine

solche Durchmusterung an einem dedizierten Teleskop etwa 500 Jahre benötigen. Glasfasern als Lichtleiter reduzieren diese Zahl signifikant, Multiobjektspektrographen erlauben es, simultan einige hundert (und demnächst einige tausend) Spektren aufzunehmen, was die Durchführungszeit auf einige Jahre verkürzt hat. Jedoch liegen alle Fasern in einem Feld von bestenfalls einigen Grad Durchmesser – dem Gesichtsfeld des Teleskops –, sodass vor allem in der Nähe der galaktischen Pole oft zu wenige Sterne verfügbar sind.

Für die Himmeldurchmusterung gibt es zwei Ansätze: Entweder beobachtet man stichprobenartig eine gewisse Zahl an Sichtlinien für recht lichtschwache Sterne, die über den Himmel verteilt sind – diesen Ansatz verfolgte der Sloan Digital Sky Survey [6]. Bei RAVE durchmusteren Astronomen mit einem relativ kleinen Teleskop und großem Gesichtsfeld eine ganze Hemisphäre, allerdings ausschließlich für hellere Sterne [1]. Die Kampagne nutzt das nur noch wenig nachgefragte UK-Schmidt-Teleskop (UKST) des Australian Astronomical Observatory. Dieses besitzt ein sehr großes Gesichtsfeld von etwa 40 Quadratgrad, sodass 500 Aufnahmen eine komplette Hemisphäre abdecken (Abb. 2). Das UKST besitzt mit dem 6dF-Multiobjektspektrographen bis zu 150 Fasern, die ein Roboter frei über das Gesichtsfeld positionieren kann und die eine spektrale Auflösung von  $\Delta\lambda/\lambda = 7500$  ermöglichen. Die gewählte Helligkeit von  $9 < I < 13$  gewährleistet<sup>5)</sup>, dass auch in den dünn besiedelten Gebieten um den galaktischen Pol einige hundert Sterne pro Gesichtsfeld verfügbar sind. Für das Teleskop stehen drei Faserplatten zur Verfügung, sodass ein Roboter während der Belichtung bereits die nächste Platte vorbereiten kann (Abb. 3). Die Belichtungszeit beträgt pro Feld im Mittel eine Stunde, sodass sich in einer guten Nacht bis zu sechs Platten (oder etwa 1000 Sterne) aufnehmen lassen. Aufgrund technischer und klimatischer Randbedingungen sind aber eher drei Platten realistisch.

Das spektroskopisch verfügbare Fenster von 840 bis 880 nm ist für Studien dieser Art hochinteressant, da es nur wenige Emissionslinien des Nachthimmels enthält, mit dem Ca-Triplett aber eine klare Signatur,

5) *I*: Helligkeit (in Magnituden – ein in der Astronomie übliches, logarithmisches Helligkeitsmaß) im I-Band ( $900 \pm 150$  nm). Dies entspricht Sternen, die zwischen 40 und 1600 mal lichtschwächer sind als die schwächsten mit bloßem Auge erkennbaren Sterne (5. Magnitude)

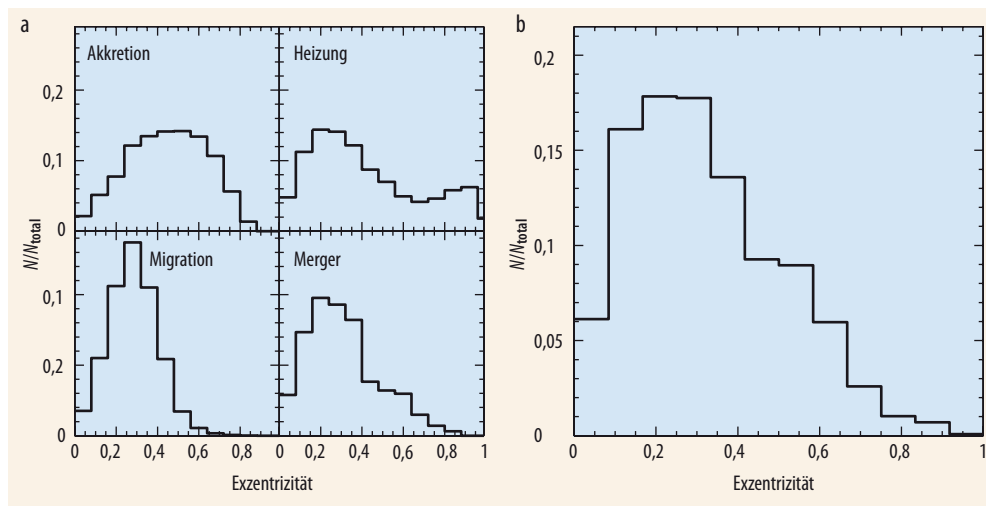


Abb. 4 Die Exzentrizitätsverteilung der Sterne der dicken Scheibe hängt vom Entstehungsszenario ab (a). Die mit RAVE bestimmte Verteilung passt zu keinem der ersten drei Modelle (b).



die es erlaubt, Radialgeschwindigkeiten von Sternen mit einer Genauigkeit von etwa 2 km/s zu messen. Zudem existieren in diesem Spektralbereich zahlreiche schwache Linien von diversen chemischen Elementen, sodass sich zudem stellare Parameter [7], sekundäre Entfernungsindikatoren sowie chemische Häufigkeiten von Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe und Ni bestimmen lassen [8]. Nicht zuletzt deshalb wird auch Gaia, die nächste Astrometriemission der ESA, diesen Spektralbereich nutzen.

### Erste Ergebnisse

Seit der ersten Beobachtung im April 2003 hat RAVE über 520 000 Spektren für 435 000 Sterne aufgenommen (einige tausend Sterne werden mehrfach abgesehen, um Fehler zu bestimmen und Doppelsterne statistisch zu erfassen). Bis zum Projektende im Dezember 2012 soll sich die Zahl auf etwa eine halbe Million Sterne erhöhen.<sup>6)</sup> Obwohl die Datenerfassung noch im Gange ist, wurden mittlerweile zahlreiche Ergebnisse publiziert, von denen einige hier kurz herausgegriffen seien.

#### Die Gesamtmasse der Milchstraße

Sphäroidale stellare Systeme wie der stellare oder der dunkle Halo haben ähnliche Eigenschaften wie Gaskugeln. Da Stöße zwischen Sternen praktisch nicht vorkommen, ist die freie Weglänge aber sehr viel größer, einzelne Sterne wandern somit über weite Bereiche des Halos. Überschreitet die Geschwindigkeit eines Sterns die lokale Fluchtgeschwindigkeit  $v_{\text{esc}}$ , entweicht er letztendlich dem System, sodass die Verteilungsfunktion bei hohen Geschwindigkeiten kleiner wird. Somit lässt sich aus der Verteilungsfunktion für ein Sternensystem  $v_{\text{esc}}$  bestimmen: Ist  $v_{\text{esc}}$  groß, können nur wenige Sterne entweichen, ist sie klein, sind es deutlich mehr. Die Fluchtgeschwindigkeit selbst hängt wiederum von der Verteilung der Masse bei hohen Radien ab. Gäbe es außerhalb der Sonnenbahn keine weitere Masse in der Milchstraße, wäre die Fluchtgeschwindigkeit das  $\sqrt{2}$ -fache der lokalen Umlaufgeschwindigkeit der Sonne, d. h. etwa 310 km/s. Die Fluchtgeschwindigkeit erhöht sich, wenn der Stern auf seinem Weg noch das Gravitationspotential von zusätzlichen Masse überwinden muss.

Die RAVE-Daten umfassen Sterne mit einer hohen galaktozentrischen Radialgeschwindigkeit von mehr als 300 km/s. Daraus lässt sich die Fluchtgeschwindigkeit  $v_{\text{esc}}$  in der Nähe der Sonnenbahn auf 498 bis 608 km/s eingrenzen. Dieses Ergebnis deutet auf signifikante Masse außerhalb der Sonnenbahn um das galaktische Zentrum. Unter der Annahme des Dichteprofiles für die Dunkle Materie, wie es aus numerischen Simulationen bekannt ist, ergibt sich eine Gesamtmasse für die Milchstraße und ihren dunklen Halo von  $1,42^{+1,14}_{-0,54} \times 10^{12}$  Sonnenmassen [10]. Im Vergleich zu ihrer Leuchtkraft und den entsprechenden Werten von anderen Galaxien wäre der dunkle Halo der Milchstraße

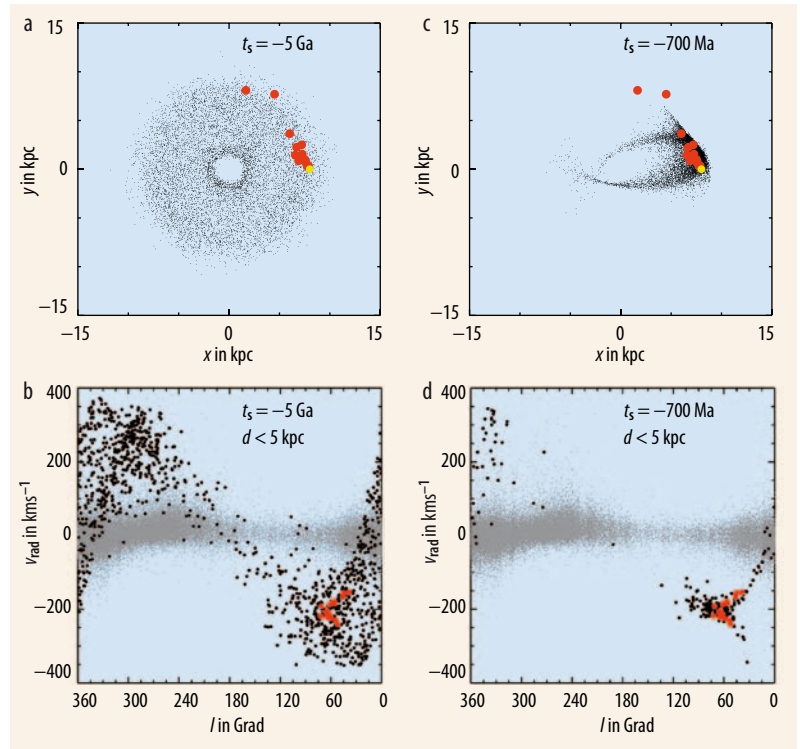


Abb. 5 Die Überreste einer Zwerggalaxie, die vor fünf Milliarden Jahren (5 Ga) zerrissen ist, verteilen sich in der Bahnebene wie ein Donut (Modellrechnung, a). Im  $l$ - $v_{\text{rad}}$ -Diagramm liegen die meisten Sterne um eine Sinuskurve (b). Das graue Band entspricht den Scheibensystemen der Milchstraße (Beobachtungs-

daten), die schwarzen Punkte sind die Überreste der zerrissenen Zwerggalaxie (Modell). Die mit RAVE identifizierten Sterne des Aquarius-Stroms (rot) legen eine erst vor 700 Ma zerrissene Galaxie nahe (c, d). Der gelbe Punkt entspricht der Position der Sonne.

vergleichsweise klein bzw. die Milchstraße effizient darin, ihr Gas in Sterne umzuwandeln. Eine unabhängige Methode und unabhängige Daten aus dem SDSS haben dieses Ergebnis bestätigt [11].

#### Der Ursprung der dicken Scheibe

Für die dicke Scheibe gibt es verschiedene Entstehungsszenarien, z. B. die Akkretion von Satelliten, die dynamische Aufheizung einer früheren dünnen Scheibe oder die radiale Migration von Sternen. Jedes Szenario geht mit einer anderen Exzentrizitätsverteilung in den Sternbahnen der dünnen Scheibe einher (Abb. 4). So haben die Bahnen in der geheizten dünnen Scheibe eher eine geringe Exzentrizität, während ein akkretierter, nur aus Sternen bestehender Satellit Bahnen mit hoher Exzentrizität erzeugt. Die aus den RAVE-Daten abgeleitete Exzentrizitätsverteilung ist sehr breit und besitzt bei niedrigen Werten ihr Maximum. Kein Entstehungsszenario beschreibt allein eine solche Verteilung: Beim Heizen gibt es zu viele Sterne bei hohen Bahnexzentrizitäten, bei der Akkretion zu wenige Sterne mit niedrigen Exzentrizitäten und bei der radialen Migration keine Sterne auf Bahnen mit  $\epsilon > 0,5$ . Diese Verteilung resultiert am ehesten in einem Szenario, in dem ein gasreicher Satellit akkretiert und sich nach der Einverleibung ein Teil des Gases in Sterne wandelt [12, 13], in Abb. 4 mit „Merger“ bezeichnet. In einer unabhängigen Studie kam der SDSS zeitgleich zu einer analogen Schlussfolgerung [14].

6) Die Daten der RAVE-Durchmusterung sind öffentlich verfügbar [9], [www.rave-survey.org](http://www.rave-survey.org)

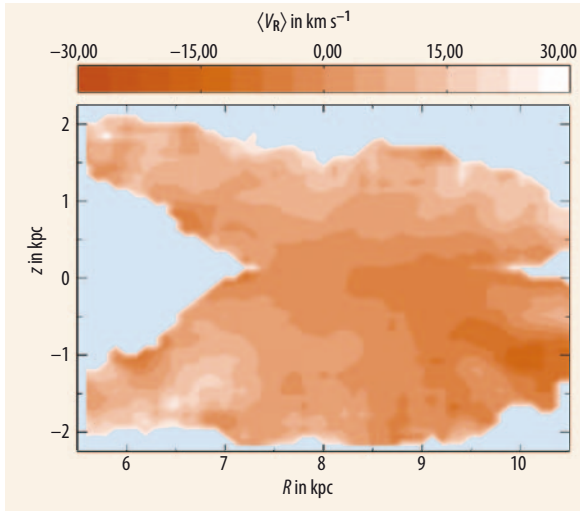


Abb. 6 Die galaktozentrische Radialgeschwindigkeit in der  $R$ - $z$ -Ebene für die Sonnenumgebung bis zu Abständen von 1,5 kpc ist deutlich geprägt von einer Nord-Süd-Asymmetrie.

### Der Sternenstrom Aquarius

Trägt man die Radialgeschwindigkeit  $v_{\text{rad}}$  der RAVE-Sterne gegen die galaktische Länge  $l$  auf, streuen die meisten Sterne aufgrund der geringen Geschwindigkeitsdispersion in der Scheibe eng um eine Sinuskurve (Abb. 5). Hohe Radialgeschwindigkeiten sind typisch für Sterne des stellaren Halos. Auffällig sind jedoch Klumpungen in gewissen Bereichen des Diagramms. Einen solchen Klumpen konnte das RAVE-Team im Sternbild Aquarius nachweisen. Eine erste Analyse zeigt, dass diese stellare Ansammlung nicht nur signifikant ist, die Sterne des Klumpens scheinen auch alle vergleichbares Alter (10 Ga) und niedrige Metallhäufigkeiten (etwa 1/10 des in der Sonne gemessenen Wertes) zu haben [15]. Die Sterne liegen zwischen 0,5 und 15 kpc von der Sonne entfernt, also näher als alle bisher entdeckten Gezeitenüberreste. Die Modellierung des Aquarius-Stroms über  $N$ -Körper-Simulation legt nahe, dass sich die  $l$ - $v_{\text{rad}}$ -Verteilung seiner Sterne am besten durch ein Szenario erklären lässt, in dem die Vorläufer in jüngerer Vergangenheit (etwa vor 700 Millionen Jahren) zerrissen wurden. Aquarius ist somit nicht nur der nächste, sondern wohl auch der jüngste Überrest in der ereignisreichen Entstehungsgeschichte unserer Milchstraße.

7) Bei dieser Häufigkeit verschwinden beim Signal-zu-Rausch-Verhältnis der RAVE-Spektren die Metalllinien im Rauschen.

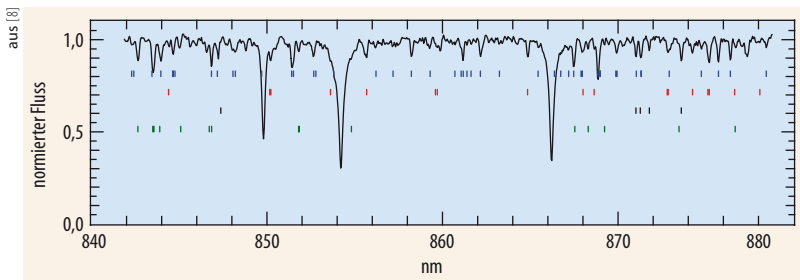


Abb. 7 Das typische Spektrum eines Sterns, wie RAVE es aufnimmt, ist dominiert von den drei Absorptionslinien des Kalzium-Tripletts. Zudem gibt es zahlreiche schwache Linien. Zum Vergleich

sind die Referenzwellenlängen für Absorptionslinien von neutralem Eisen (blau), Silizium (rot), Magnesium (schwarz) und Titan (violett) gezeigt.

### Asymmetrien in der galaktischen Scheibe

Eine Spiralgalaxie ist durch hohe Symmetrie gekennzeichnet (Abb. 1): achsensymmetrische Scheibe, kugelförmiger Bulge und Halo. In der Realität sind jedoch Bulge und Halo eher sphäroidal, wenn nicht sogar triaxial. Zudem gibt es Spiralarme, Gezeitenüberreste o. ä., sodass über die Gezeitenwechselwirkung mit den anderen galaktischen Komponenten auch die Achsensymmetrie der Scheibe gebrochen sein kann. Die Größe des RAVE-Datensatzes erlaubt es, die lokale Umgebung der Sonne detailliert zu untersuchen. Insbesondere lässt sich feststellen, ob das lokale Geschwindigkeitsfeld der Sterne konsistent mit einem achsensymmetrischen Gravitationspotential ist oder ob es Gradienten im lokalen Geschwindigkeitsfeld gibt. In der Tat konnte RAVE jüngst eine solche Asymmetrie nachweisen [16]. Eine darauf folgende Zerlegung in radialer, azimuthaler und vertikaler Richtung bringt Erstaunliches zu Tage: Sterne südlich der galaktischen Ebene erzeugen im Wesentlichen die Asymmetrie in Nord-Süd-Richtung, während die Sterne nördlich der galaktischen Ebene sehr regulär im Geschwindigkeitsraum verteilt sind (Abb. 6).

### Die Jagd nach der ersten Sternengeneration

Von besonderem Interesse für die galaktische Archäologie sind Sterne sehr niedriger Metallhäufigkeit, da in ihnen die Bedingungen zu den frühesten Zeiten im Kosmos eingefroren sind. Diese alten Sterne können, um das entsprechende Alter zu erreichen, nur geringe Masse haben und sind folglich recht leuchtschwach. Zudem sind diese Sterne selten, und ihr Nachweis verlangt hochaufgelöste Spektroskopie an den größten Teleskopen. Für eine systematische Suche ist somit eine sehr gute Vorauswahl unerlässlich. Hier kann RAVE helfen. In der Tat zeigte sich, dass 95 % der Sterne, die RAVE als Sterne mit Metallhäufigkeiten unterhalb 1/100 dem Wert der Sonne<sup>7)</sup> klassifiziert und Folgebeobachtungen unterzogen hat, tatsächlich solche geringe Häufigkeit haben, manche sogar bis hinunter zu 1/10 000 der Sonnenhäufigkeit, inklusive einer möglichen Neuentdeckung [17]. RAVE liefert somit einen hervorragenden Datensatz für Folgestudien dieser Art.

### Künftige Missionen

RAVE wird voraussichtlich im Winter 2012/2013 die aktive Datenaufnahme abschließen. Schon heute bietet RAVE die umfangreichste Datenbank mit stellaren Häufigkeiten und kinematischen Daten. Nächster großer Schritt wird der für Spätsommer 2013 angesetzte Start von Gaia sein. Diese „corner stone“-Mission der ESA hat das Ziel, bis zu einer Milliarde Sterne astrometrisch (mit einer Genauigkeit von bis zu 25 Mikrobogensekunden) und 100 Millionen Sterne spektroskopisch mit einer Auflösung und einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu untersuchen, die vergleichbar sind mit RAVE. Um jedoch spektroskopische Analysen mit deutlich höheren Auflösungen und von deutlich

schwächeren Objekten zu machen, reicht Gaia nicht aus. Dafür müssen Großteleskope am Boden zum Einsatz kommen. In einem ersten Schritt wird HERMES, ein Großprojekt von australischen Wissenschaftlern, ab 2014 bis zu eine Million Sterne mit hoher Auflösung ( $R = 28\,000$ ) in vier ausgewählten Wellenlängenbereichen spektroskopieren [18]. Mit dem GAIA-ESO-Survey werden in über 300 Nächten, verteilt über die nächsten fünf Jahre, am VLT der ESO ausgewählte 100 000 schwache Sterne analysiert. Um jedoch der Datenmenge von Gaia gerecht zu werden, bedarf es eines neuen, dedizierten Teleskops mit einem vier bis acht Meter großen Spiegel und mit einem hocheffizienten, parallelen Multiobjektspektrographen. 4MOST (4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope) ist eine Designstudie im Auftrag der ESO, die ebendies zur Aufgabe hat [19]. Mit dem Lichtsammelvermögen eines vier Meter großen Spiegels, einem großen Gesichtsfeld, einem Fasersystem mit mehr als 3000 Fasern und einem Spektrographen, der den vollen Wellenlängenbereich abdeckt, soll 4MOST ab 2018 mit der Datenakquise von bis zu 20 Millionen Sternen beginnen.

**Literatur**

[1] M. Steinmetz et al., AJ **132**, 1645 (2006)  
 [2] V. Springel, Physik Journal, Juni 2003, S. 31  
 [3] G. Börner, Physik Journal, Februar 2005, S. 21  
 [4] K. C. Freeman und J. Bland-Hawthorn, ARA&A **40**, 487 (2002)  
 [5] A. Koch, 2011, Physik Journal, Februar 2011, S. 31  
 [6] B. Yanny et al., AJ **137**, 4377 (2009)

[7] Zwitter et al., AJ, **136**, 421 (2008)  
 [8] C. Boeche et al., AJ **142**, 193 (2011)  
 [9] A. Siebert et al., AJ **141**, 187 (2011)  
 [10] Smith et al., MNRAS, **379**, 755 (2007)  
 [11] X.-X. Xue et al., ApJ, **684**, 1143 (2008)  
 [12] L. V. Sales et al. MNRAS **400**, L61 (2009)  
 [13] M. L. Wilson, et al. MNRAS **413**, 2235 (2011)  
 [14] M. Dierickx et al. ApJ **725**, 186 (2010)  
 [15] M. Williams et al. ApJ **728**, 102 (2011)  
 [16] A. Siebert et al., MNRAS, **412**, 2026 (2011)  
 [17] J. P. Fulbright et al., ApJ **724**, 104 (2010)  
 [18] K. C. Freeman in: Proc. „Galaxies and their Masks“, D. L. Block, K. C. Freeman und I. Puerari (Hrsg.), Springer, New York (2010), S. 319  
 [19] R. de Jong et al., ESO Messenger 9/2011, 14 (2011)

**DER AUTOR**

**Matthias Steinmetz** (FV Extraterrestrische Physik) hat sich in seiner Doktorarbeit mit der Entstehung von Galaxien beschäftigt. Nach Postdoc-Aufenthalten in Garching und Berkeley wurde er 1996 an das Steward Observatory der University of Arizona in Tucson berufen. Mit seinem Wechsel an das Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) 2002 als Direktor des Forschungsbereichs „Extragalaktische Astrophysik und Kosmologie“ brachte er sich zunehmend in große Himmelsdurchmusterungen ein und initiierte das RAVE-Projekt. Seit 2004 ist er Wissenschaftlicher Vorstand des AIP. Matthias Steinmetz ist derzeit Vorsitzender des Rats deutscher Sternwarten und Vize-Präsident der Astronomischen Gesellschaft.

