



ASTRONOMIE

Das neue Bild der Milchstraße

Die Gaia-Mission der Europäischen Weltraumorganisation kartiert seit 2014 unsere Galaxis.

Stefan Jordan

Die Gaia-Mission ist eine Erfolgsgeschichte und liefert einen umfangreicheren und genaueren Blick auf die Milchstraße als je zuvor. Die Beobachtungsdaten zeigen nicht nur faszinierende Einsichten in die Entwicklungsgeschichte unserer Galaxis, sondern sind für alle Bereiche der Astrophysik relevant.

Unser Sonnensystem befindet sich in der Milchstraße, einer Spiralgalaxie, die aus rund 200 Milliarden Sternen besteht. Sie hat einen Durchmesser von ungefähr 100 000 Lichtjahren, und ihr Zentrum ist etwa 26 000 Lichtjahre von uns entfernt. Weil wir uns inmitten

der Milchstraße befinden, fällt es schwer, die räumliche Struktur unserer Galaxis zu erforschen – vor allem, weil es dazu nötig ist, die Entfernung von Sternen mit extrem präzisen Messinstrumenten zu bestimmen. Ein wichtiger Fortschritt ließ sich mit dem Astrometrie-Satelliten Hipparcos erzielen, der zwischen 1989 und 1993 mehr als 100 000 Sterne der Milchstraße mit hoher Genauigkeit vermessen hat und dadurch unser Wissen über die Sterne und die Dynamik der Milchstraße erweiterte.

Nach dem großen Erfolg von Hipparcos kam die Idee auf, einen Nachfolger zu bauen, der in der Lage sein sollte, zehntausendmal mehr Sterne mit einer bis zu 50-fach hö-

◀ Gaia hat die Dichte junger Sterne vermessen: Weiß zeigt Regionen hoher, gelb und grün solche mit geringerer Sternendichte. Die Überlagerung mit der künstlerischen Darstellung der Milchstraße illustriert, dass die Spiralarme weniger stark ausgeprägt sind; das ist konsistent mit den Messungen von Gaia in der Sonnenumgebung.

heren Genauigkeit zu vermessen. Was die Zahl der Sterne angeht, hat Gaia [1] dieses Ziel mit dem neuesten und dritten Sternkatalog (Data Release 3) bereits übertroffen, der Daten für 1,8 Milliarden Sterne enthält [2, 3].

Das Gaia-Projekt sollte ursprünglich ein interferometrisches Teleskop nutzen, um mit einem vorgegebenen Durchmesser des Hauptspiegels eine größtmögliche astrometrische Positionsgenauigkeit zu erreichen. Aus diesem Grund trug das Projekt zunächst das Akronym GAIA, was für „Global Astrometric Interferometer for Astrophysics“ steht. Später folgte jedoch die Entscheidung, zwei speziell gebaute, aber letztlich konventionelle Teleskope zu verwenden. Damit gelang es, deutlich mehr und lichtschwächere Sterne zu vermessen, weil sich dadurch die große Datenmenge pro Stern für die Übertragung der Beugungsmuster einsparen ließ. Die Datenmenge, die Gaia täglich zur Erde übertragen kann, ist auf etwa 90 Gigabyte begrenzt. Auch ohne Interferometer blieb der Name erhalten – nun ohne durchgehende Großschreibung. Der Satellit trägt damit den altgriechischen Namen der Erde bzw. der antiken Erdgöttin, befindet sich allerdings rund viermal weiter entfernt von ihr als der Mond.

Nach zwei Jahrzehnten Vorbereitung startete Gaia am 19. Dezember 2013 zu ihrem Zielort in der Nähe des 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernten Lagrange-Punktes L2 im Erde-Sonne-System (Abb. 2). Den Lissajous-Orbit um L2 erreichte Gaia am 14. Januar 2014 nach einer kurzen Zündung ihrer Triebwerke. Am L2 treten praktisch keine mechanischen und thermischen Störungen des Instrumentes durch die Erde auf, die sich außerdem – anders als bei einer niedrigen Umlaufbahn um die Erde – nicht ständig vor die beobachteten Himmelsobjekte schiebt. Daher ist die Umgebung des L2 sehr geeignet für Weltraumteleskope und wird beispielsweise auch vom James-Webb-Teleskop benutzt.

Am L2 begann dann eine Testphase von sechs Monaten, um den Satelliten und die Instrumente zu überprüfen, zu justieren und zu kalibrieren. Während der gesamten Mission und insbesondere während dieser Anfangsphase spielt die „First-Look“-Qualitätskontrolle eine wichtige Rolle, welche die Gaia-Gruppe am Astronomischen Rechen-Institut (ARI) des Zentrums für Astronomie in Heidelberg (ZAH) leitet und dafür Software erstellt, die dann bei der ESA in der Nähe von Madrid ausgeführt wird [4].

An Bord von Gaia befinden sich zwei gleichartige Spiegelteleskope mit rechteckigen Hauptspiegeln, die zwei 106,5 Grad am Himmel voneinander entfernte Gesichtsfelder anvisieren (Abb. 1). Im Laufe der Zeit tastet Gaia mit ihren beiden Teleskopen den gesamten Himmel mehrmals und aus verschiedenen Richtungen ab. Gaias 106 lichtempfindliche CCD-Detektoren registrieren die Bilder der

Sterne. Insgesamt kommt die Gaia-Kamera auf fast ein Gigapixel; davon werden aber aufgrund der begrenzten Datenübertragungsrate (8 Megabit pro Sekunde) zu den Deep-Space-Antennen der ESA nur die Daten aus den Himmelsbereichen mit punktförmigen Objekten, die heller als die 21. Größenklasse sind, übertragen. Das entspricht in etwa der Helligkeit einer Kerze in etwa 30 000 Kilometer Entfernung.

Mit jedem der beiden Gesichtsfelder beobachtet Gaia im Durchschnitt mehr als hundert Sterne pro Sekunde. Tritt ein Stern in eines der beiden Felder ein, nimmt der Satellit vollautomatisch neun astrometrische Bilder und zwei Spektren mit niedriger spektraler Auflösung zwischen $R \approx 30$ und 100 auf. Die hellsten etwa 100 Millionen Sterne werden zusätzlich im nahen Infraroten (846 – 870 Nanometer) mit höherer Auflösung ($R \approx 11500$) mit dem Radialgeschwindigkeits-Spektrografen (Radial Velocity Spectrograph) aufgenommen – vor allem, um mithilfe des Doppler-Effekts die Bewegung der Himmelskörper auf uns zu oder von uns weg zu messen, aber auch, um die chemische Zusammensetzung an der Sternoberfläche zu bestimmen.

Das Besondere an Gaia ist die extrem hohe Präzision der astrometrischen Positionsmessungen: Ziel ist es, die Positionen und deren jährliche Änderungen bei ausreichend hellen Sternen mit einer Genauigkeit von 20 Mikrobogen Sekunden zu messen. Dies entspricht von der Erde aus gesehen der Bewegung einer Lichtquelle in der Entfernung des Mondes um nur vier Zentimeter. Um diese fast unglaubliche Aufgabe zu erfüllen, muss einerseits die Ausrichtung der Teleskope in jedem Augenblick der Mission mit derselben Genauigkeit bekannt sein. Andererseits gilt es, die Geometrie des Teleskops und der Kamera auf etwa

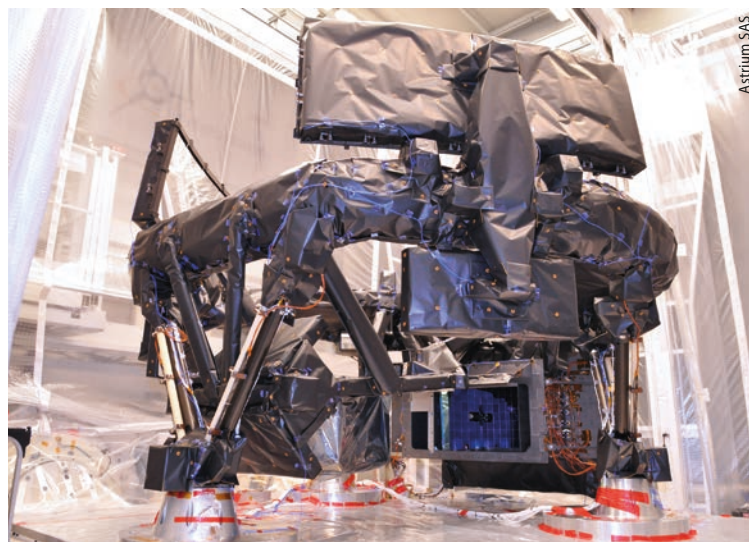


Abb. 1 Gaia verwendet zwei identische Teleskope, die auf einer torusförmigen Montierung befestigt sind. Das Licht tritt durch zwei Öffnungen in der Satellithülle ein und trifft auf die beiden rechteckigen Primärspiegel, die sich gegenüber den Öffnungen befinden und hier links und rechts zu erkennen sind. Die Hauptspiegel haben eine Größe von 145×50 Zentimetern und 35 Meter Brennweite. Wie alle zehn Spiegel sind auch die Primärspiegel rechteckig und aus gesintertem Siliziumkarbid gefertigt – dem gleichen Material, das auch für die Montierung Verwendung findet und wegen seiner günstigen thermischen Eigenschaften ausgewählt wurde. Weitere Spiegel falten den Strahlengang, um das Licht beider Teleskope auf eine gemeinsame Fokalebene mit 106 CCD-Detektoren zu projizieren.

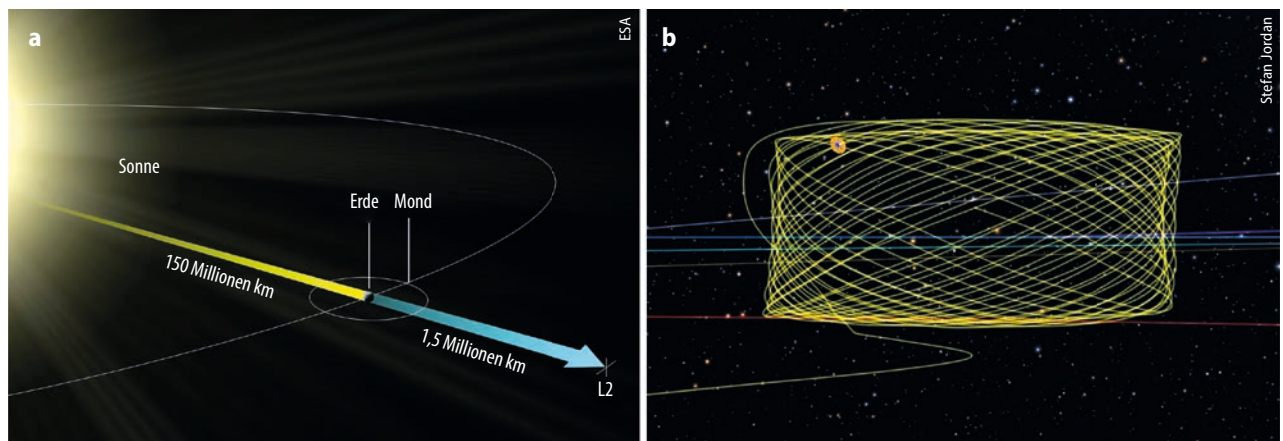


Abb. 2 Gaia ist seit Januar 2014 in der Nähe des rund 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernten Lagrange-Punkts L2 des Erde-Sonne-Systems stationiert (a). Am L2 heben sich im mitrotierenden Bezugssystem von Sonne und Erde die Gravitations- und Fliehkräfte gegenseitig auf. Gaia vollführt eine Schleifenbahn (Lissajous-Orbit) um den L2 (b). Die Bahn ist in der Ebene senkrecht zur Blickrichtung eines Beobachters auf der Erde dargestellt, der stets zum L2 schaut, sich also in einem Jahr langsam um 360 Grad dreht. Die Ebene der Erdbahn verläuft dabei horizontal durch die Bildmitte.

0,3 Nanometer genau zu kennen. Dieser Wert ergibt sich aus der Multiplikation des Abstands der beiden Hauptspiegel von drei Metern mit 10^{-10} , was 20 Mikrobogensekunden im Bogenmaß entspricht. Selbst wenn die Geometrie der Instrumente im Labor so genau vermessbar wäre, würden die enormen Beschleunigungen und Vibrationen während des Raketenstarts zu einem völlig anderen Ergebnis führen.

Von der Datenflut zum Sternkatalog

Es gibt nur eine Methode, um das Ziel einer Kalibration mit einigen Mikrobogensekunden Genauigkeit zu erreichen: die Billionen astrometrischer Einzelmessungen von Gaia zu verwenden, um nicht nur die Richtung zu den Sternen zu bestimmen, sondern auch Gaias Instrumente und deren Ausrichtung präzise zu messen. Als Basis dient ein kompliziertes mathematisches Verfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate, das voraussetzt, dass das Instrument im Laufe von Tagen keinen schnellen Schwankungen unterworfen ist. Dies zu gewährleisten stellte eine enorme Herausforderung an die Konstruktion des Satelliten dar.

Im Durchschnitt erfolgen in jeder Sekunde etwa 20 000 astrometrische Messungen an rund 2000 Sternen. Dabei misst eine Atomuhr, wann ein Stern die einzelnen CCD-Detektoren in der Fokalebene passiert. Falls genau feststeht, welcher Richtung zum Himmel diese Positionen in der Gaia-Kamera entsprechen, lassen sich diese einfach auf die Himmelskugel projizieren – und sofort liegen die Koordinaten dieser Sterne zum Zeitpunkt der Messung fest. Aber leider ist die Ausrichtung der beiden Gaia-Teleskope nicht genau genug bekannt. Kennt man aber von vielen der Sterne wenigstens die ungefähren Koordinaten am Himmel, dann lässt sich aus der Lage ihrer Bilder in der Fokalebene berechnen, wohin das Teleskop zu jedem Zeitpunkt ungefähr blickt. Diese Ausrichtung („attitude“) kann wiederum dazu dienen, um daraus die Positionen der gemessenen Sterne am Himmel neu zu berechnen. Sie sind im Allgemeinen ein wenig besser als die Positionen vom Anfang. Mit den neuen Sternpositionen lässt sich die „attitude“ der Tele-

skope erneut berechnen, was wiederum hilft, die Sternpositionen zu jedem Messzeitpunkt mit der Methode der kleinsten Quadrate besser zu bestimmen. Dieser interaktive Prozess, der mathematisch ein blockiteratives Verfahren für ein Gleichungssystem mit vielen Millionen Unbekannten darstellt, wird so lange wiederholt, bis mathematische Konvergenz vorliegt. Diese Lösung enthält gleichzeitig die Positionen der Sterne sowie die Ausrichtungen der Teleskope zu den entsprechenden Zeiten.

In Wirklichkeit läuft alles deutlich komplizierter ab, denn es gilt zu berücksichtigen, dass auch die Geometrie des Messinstrumentes und deren langsame Veränderungen die Lage der Bilder der Sterne beeinflusst. Ein weiterer iterativer Prozess verbessert daher auch die Kenntnis der Geometrie der Gaia-Instrumente so lange, bis das Verfahren konvergiert und sich aus Billionen von Einzelmessungen während der langen Messzeit von Gaia präzise astrometrische Daten und eine sehr genaue Kenntnis des Messinstrumentes ergeben. Da sich die Sterne aufgrund ihrer Bewegung durch den Raum und durch den Parallaxeneffekt (**Abb. 3**) verschieben, enthält die Lösung nicht nur die Sternpositionen zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern auch deren Bewegungen und Parallaxen.

Erhellende Präzision

Der wichtigste Grund für die enormen Genauigkeitsanforderungen besteht darin, dass Gaia die Entfernungen der Sterne bestimmen soll. Ohne deren Kenntnis lässt sich zwar von der Erde aus die scheinbare Helligkeit messen, d. h. wie viel Strahlung der Sterne bei uns ankommt, nicht aber, wie viel ein Stern in den Weltraum abstrahlt. Diese absolute Helligkeit bzw. Leuchtkraft der Sterne hängt von ihrer Masse und ihrer Entwicklungsphase ab; sie ist zusammen mit der Farbe und dem Spektrum ein wichtiger Indikator für das Alter des Sterns.

Nur mit der Parallaxenmethode lassen sich die Entfernungen der Sterne unabhängig von deren Eigenschaften bestimmen. Sie nutzt die scheinbare Verschiebung der

Richtung zu den Sternen aufgrund der Bewegung eines Beobachters um die Sonne aus. Weil diese Verschiebung auch bei nahegelegenen Sternen sehr klein ist, gelang es erst 1838, eine signifikante Parallaxe für einen Stern zu messen: Der Astronom Friedrich Wilhelm Bessel bestimmte die Parallaxe des Sterns 61 Cygni zu $(0,3136 \pm 0,0202)$ Bogensekunden und berechnete eine Entfernung von etwa 10,4 Lichtjahren. Der Wert von Gaia im dritten Sternkatalog beträgt $(0,2859949 \pm 0,0000599)$ Bogensekunden, was 11,4 Lichtjahren und einem 340-mal kleineren Messfehler als zu Bessels Zeiten entspricht.

Die dreidimensionale Position von Sternen im Weltraum mit solch hoher Genauigkeit zu bestimmen, gelingt nur, wenn sich die Messapparaturen wie bei Hipparcos und Gaia im Weltraum befinden. Mit dem Präzisionsziel von 20 Mikrobogensekunden für ausreichend helle Sterne lässt sich die Entfernung eines Sternes in 1600 Lichtjahren Entfernung auf etwa ein Prozent genau bestimmen.

Ganz so weit ist Gaia noch nicht. Im aktuellen dritten Sternkatalog „Gaia Data Release 3“ (Gaia DR3), der am 13. Juni 2022 veröffentlicht wurde und dessen Daten auf einem Zeitraum von 34 Monaten beruhen, liegen die zufälligen Messfehler der qualitativ besten Sternpositionen im Bereich von etwa 30 Mikrobogensekunden. Allerdings kommen noch systematische Fehler von ähnlicher Größenordnung hinzu. Wenn Gaias Messungen Anfang 2025 enden, liegen Daten über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren vor. Daraus ergibt sich ein noch besseres Verständnis des Messprozesses und des Messinstruments, was die komplizierte Kalibration und damit auch den systematischen Fehler noch weiter verbessert.

Der Gaia DR3 enthält Positionsbestimmungen und Helligkeitswerte für 1,8 Milliarden Sterne; für knapp 1,5 Milliarden Sterne liegen auch Werte für die Sternparallaxen und Eigenbewegungen, also die fortschreitende Veränderung der Richtung zum Stern pro Jahr, vor. Für 33 Millionen Sterne liefert Gaia DR3 darüber hinaus Radialgeschwindigkeiten, sodass sich sogar die dreidimensionale Bewe-

gung der Sterne im Raum berechnen lässt. Ergänzend gibt es Farbmessungen für 1,5 Milliarden Sterne, 220 Millionen niedrig aufgelöste Sternspektren und knapp eine Million höher aufgelöste Radialgeschwindigkeits-Spektren (**Abb. 3**): insgesamt ein wahrer Datenschatz für die Astronomie. Vor allem wenn man bedenkt, dass schon auf die Veröffentlichung des Gaia Data Release 2 (Gaia DR2) am 25. April 2018 im Durchschnitt jeden Tag fünf wissenschaftliche Arbeiten folgten, welche die Ergebnisse der Gaia-Mission benutzten. In einem Tweet vom 12. Juni 2022 hat der Wissenschaftsdirektor der NASA Thomas Zurbuchen der ESA dazu gratuliert, dass Gaia bereits Mitte 2021 das Hubble-Weltraumteleskop bei der Zahl der auf den Projekten basierenden Veröffentlichungen pro Jahr überholt hat.

Galaktische Kollisionen ...

Eine der Hauptaufgaben von Gaia besteht darin, die Struktur und Entwicklung der Milchstraße besser zu verstehen. Die meisten ihrer Sterne ordnen sich in einer flachen rotierenden Scheibe von grob 100 000 Lichtjahren Durchmesser an. Auf eine Darstellung der Milchstraßenscheibe von oben lassen sich die von Gaia gemessenen dreidimensionalen Positionen von jungen Sternen in der Sonnenumgebung projizieren (**Abb.** auf S. 24). Diese konzentrieren sich in der Nähe der Spiralarme, welche die Geburtsstätten von Sternen sind. Gaia kann die jungen Sterne anhand ihrer Farbe und Leuchtkraft identifizieren.

Für die Frage, wie sich die Milchstraße im Laufe der Zeit entwickelt hat, spielt die hochgenaue Messung der Bewegungen der Sterne eine wesentliche Rolle. Schon vor Gaia lagen Hinweise vor, dass unsere Milchstraße sich im Laufe der Jahrtausende immer wieder kleinere Galaxien einverleibt hat. Bei der Annäherung von Zwerggalaxien an die massereiche Milchstraße treten Gezeitenkräfte auf, die diese Sternsysteme zerreißen. Vor und hinter einer Zwerggalaxie bilden sich dünne schlauchförmige Regionen, entlang derer sich die eingefangenen Sterne bewegen. Mit Gaia gelang es,

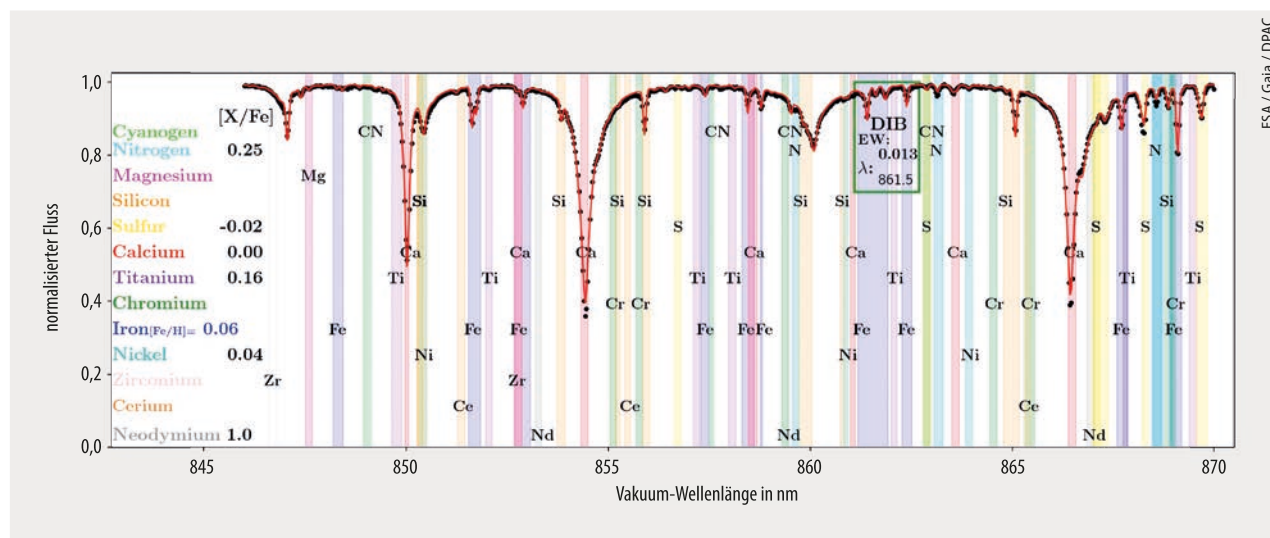


Abb. 3 Dieses Radialgeschwindigkeits-Spektrum zeigt den von Gaia registrierten Energiefluss (schwarze Punkte) für Wellenlängen von 846 bis 870 nm. Die farbigen Streifen geben die Atome und Moleküle in der Sternoberfläche an, die zu den jeweiligen Absorptionslinien gehören. Aus solchen Spektren ergab sich die chemische Zusammensetzung von 2,5 Millionen Sternoberflächen im Gaia-DR3-Katalog.

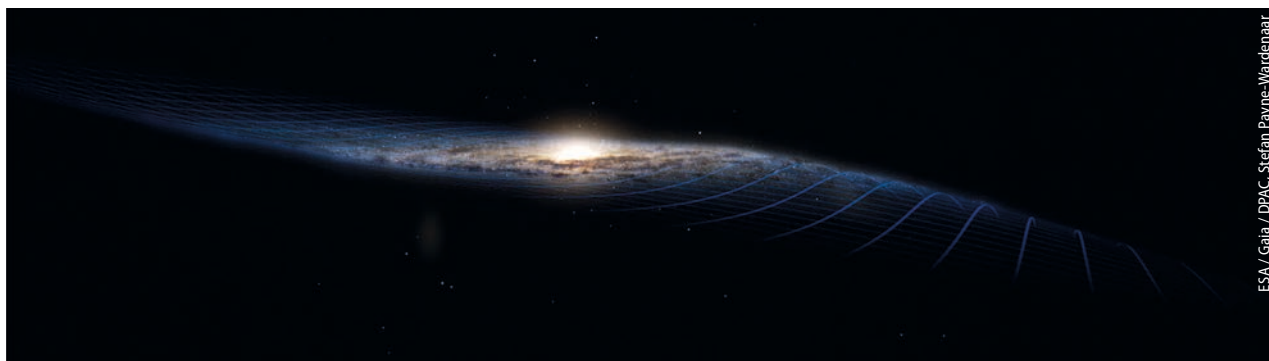


Abb. 4 Diese künstlerische Darstellung zeigt die von Gaia gemessene Verbiegung der Scheibe der Milchstraße, die sich in rund 600 Millionen Jahren um das galaktische Zentrum bewegt. Die Verbiegung entstand sehr wahrscheinlich bei einer sehr nahen Begegnung mit der Sagittarius-Zwerggalaxie.

die dreidimensionale Struktur und Bewegung dieser Sternströme viel genauer als bisher zu bestimmen und viele neue Strömungsmuster zu entdecken. Diese Muster im Orts- und Geschwindigkeitsraum (Phasenraum) lassen sich mit Computersimulationen vergleichen, um daraus Anhaltspunkte über die Größe der Zwerggalaxien und den Zeitpunkt ihrer nahen Begegnung mit der Milchstraße zu erhalten.

Überhaupt zeigen die Gaia-Daten klar, dass sich unsere Milchstraße nicht in einem Gleichgewichtszustand befindet, sondern immer wieder durch die nahe Begegnung mit kleineren Sternsystemen durchgeschüttelt wurde. Ein mit Gaia DR2 entdecktes Bewegungsmuster [5] zeigt, dass die Scheibe unserer Milchstraße vor 300 bis 900 Millionen Jahren zu Schwingungen angeregt worden sein muss, vermutlich durch eine dichte Annäherung der Sagittarius-Zwerggalaxie. Nur die hohe Genauigkeit, mit der Gaia die Bewegung der Sterne messen kann, ermöglicht es, solche Schwingungsmuster im Phasenraum zu entdecken und mit Computersimulationen zu interpretieren. Die Sagittarius-

Galaxie könnte auch eine Verbiegung der Milchstraßen-Scheibe verursacht haben, die sich aus den Gaia-Daten ableiten ließ (**Abb. 4**) [6].

Die wahrscheinlich dramatischste Wirkung hatte aber ein Ereignis vor etwa zehn Milliarden Jahren, als eine „Gaia Enceladus“ genannte Galaxie mit unserem Sternsystem verschmolzen ist, die ein Viertel der damaligen Masse der Milchstraße besaß [7]. Die Überreste davon, die sich von uns aus gesehen über den gesamten Himmel verteilen, identifizierte Gaia anhand der deutlich unterschiedlichen Umlaufbahnen der Sterne (**Abb. 5**). Die Kollision machte auch die davor noch recht dünne galaktische Scheibe deutlich dicker.

... und spektrale Spurensuche

Nicht nur die Astrometrie hilft dabei, die Struktur und Vergangenheit unserer Milchstraße besser zu verstehen, sondern auch die Messung der chemischen Zusammen-



Abb. 5 Vor etwa zehn Milliarden Jahren ist die Gaia-Enceladus-Galaxie mit unserer Milchstraße kollidiert. Mithilfe der Gaia-Daten gelang es, die Überreste dieses Ereignisses (blau) von anderen Sternen zu unterscheiden: Sie bewegen sich auf langgestreckten Bahnen in die entgegengesetzte Richtung im Vergleich zu den meisten anderen hundert Milliarden Sternen der Galaxis, einschließlich unserer Sonne.

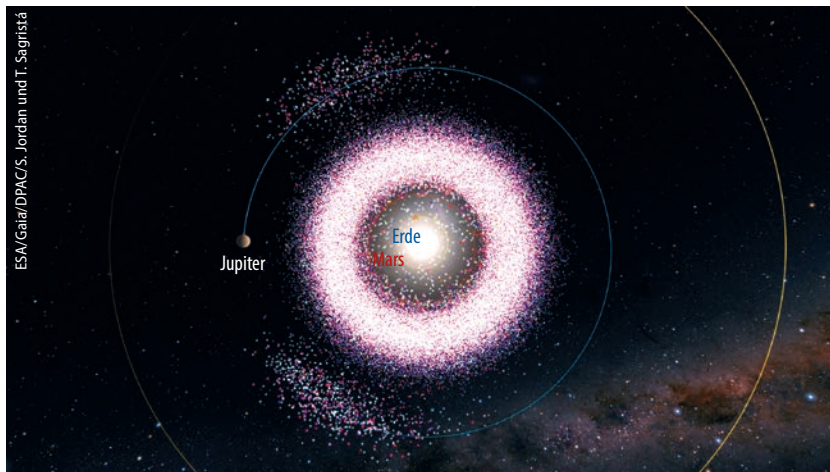


Abb. 6 Gaia hat die Positionen und Umlaufbahnen von über 158 000 Asteroiden hochgenau gemessen, die meisten davon im Haupt-Asteroidengürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Darüber hinaus sind 400 Asteroiden zu erkennen, die der Erde nahe kommen können. Weiter außen befinden sich zwei große Gruppen von „Trojanern“, welche die Sonne auf fast der gleichen Bahn wie Jupiter umkreisen. Für fast 60 000 Asteroiden konnte Gaia auch Reflexionsspektren messen, die eine Bestimmung der Oberflächenzusammensetzung erlauben. Darauf beruht die unterschiedliche Einfärbung der Kleinplaneten.

setzung der Sternoberflächen. Diese entspricht in den meisten Fällen der Zusammensetzung der Molekülwolken, aus denen die Sterne entstanden sind. Während der ersten Minuten nach dem Urknall wurden nur Wasserstoff, Helium und eine geringe Menge Lithium gebildet. Schwere Elemente entstehen hingegen durch Kernfusion oder Neutronenabsorption im Innern von Sternen; im Laufe der Zeit transportieren Sternwinde und vor allem Supernova-Explosionen das Material in das interstellare Medium. Heute wissen wir, dass auch verschmelzende Neutronensterne erheblich zu dieser Anreicherung beitragen. Für Gaia DR3 wurden mithilfe des Spektrografen für Radialgeschwindigkeits-Spektren detaillierte Elementhäufigkeiten für die Oberflächen von rund 5,6 Millionen Sternen ermittelt. Computermodelle, welche die Gaia-Spektren der Sterne und deren gemessene Leuchtkraft nutzen, helfen, das Alter der Sterne zu bestimmen. Das zeigt, wie groß die Menge an schweren Elementen im interstellaren Medium zur Geburtszeit der Sterne in verschiedenen Regionen der Milchstraße war.

Der wachsende Datenschatz

Diese Ergebnisse zur Milchstraße sind nur ein kleiner Teil der zahlreichen Entdeckungen, welche die Gaia-Mission ermöglicht hat. Die Mission beeinflusst praktisch alle Gebiete der Astrophysik. Sie erweitert beispielsweise unser Wissen über unser Sonnensystem, indem der Gaia DR3 genaue Orbits für über 150 000 Asteroiden bereitstellt (**Abb. 6**) und für mehr als 60 000 von ihnen auch Reflexionsspektren, die Aufschlüsse über ihre chemische Zusammensetzung ermöglichen. Gaia kann auch besonders leuchtkräftige Sterne in unseren Nachbargalaxien messen und die Bewegungen dieser Galaxien relativ zur Milchstraße weitaus genauer bestimmen als zuvor. Für viele Millionen weit entfernte Galaxien und Quasare erlaubt es der Spektrograf von Gaia, ihre Rotverschiebung zu messen. Und schließlich lassen sich mit Gaia andere Methoden zur Entfernungsmessung kalibrieren, zum Beispiel die Perioden-Helligkeits-Beziehung der Cepheiden: Die Leuchtkraft dieser veränderlichen Sterne ist umso größer, je länger deren Periode des Lichtwechsels ist. Diese spielen auch eine wesentliche Rolle bei der präzi-

sen Bestimmung der Hubble-Konstanten. Diese Beispiele zeigen, wie vielfältig sich die Daten von Gaia in der Astrophysik anwenden und nutzen lassen.

Wenn alles weiterhin planmäßig verläuft, wird Gaia bis zum Frühjahr 2025 weitere hochpräzise Messungen durchführen können. Dann sind voraussichtlich die Vorräte an Stickstoffgas aufgebraucht, die für die Ausrichtung des Satelliten mithilfe von Kaltgasdüsen benötigt werden. Danach dürften noch einige Jahre vergehen, bis alle Gaia-Daten mit der bestmöglichen Kalibration des Satelliten ausgewertet wurden. Trotzdem ist Gaia bereits jetzt eines der erfolgreichsten astronomischen Messinstrumente aller Zeiten.

Literatur

- [1] Die Gaia-Webseiten der ESA (engl.) finden sich auf www.cosmos.esa.int/web/gaia und bieten umfangreiche Informationen für die Gaia-Community wie auch die interessierte Öffentlichkeit, von den Datensätzen über die wissenschaftlichen Veröffentlichungen bis hin zu allgemeinverständlichen Broschüren oder dem „Image of the Week“. Zusätzlich gibt es eine Gaia-App: bit.ly/3F8Ckno.
- [2] S. Jordan, Gaias neuer Datenschatz, *Sterne und Weltraum*, August 2022, S. 22
- [3] Einen Überblick über die wissenschaftlichen Höhepunkte aus dem Gaia DR2 bietet A. G. A. Brown, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **59**, 59 (2021); <https://arxiv.org/abs/2102.11712>
- [4] <https://gaia.ari.uni-heidelberg.de>
- [5] T. Antoja et al, *Nature* **561**, 360 (2018)
- [6] E. Poggio et al., *Nat. Astron.* **4**, 590 (2020)
- [7] A. Helmi et al., *Nature* **563**, 85 (2018)

Der Autor



Stefan Jordan arbeitet am Astronomischen Rechen-Institut des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg am Gaia-Projekt. Er betreut außerdem die Öffentlichkeitsarbeit im DFG-Sonderforschungsbereich 881 „Das Milchstraßensystem“. Zu seinen Hobbies gehören unter anderem

Paartanz und die Donald-Duck-Geschichten von Carl Barks.

Prof. Dr. Stefan Jordan, Zentrum für Astronomie, Mönchhofstraße 12 – 14, 69120 Heidelberg