

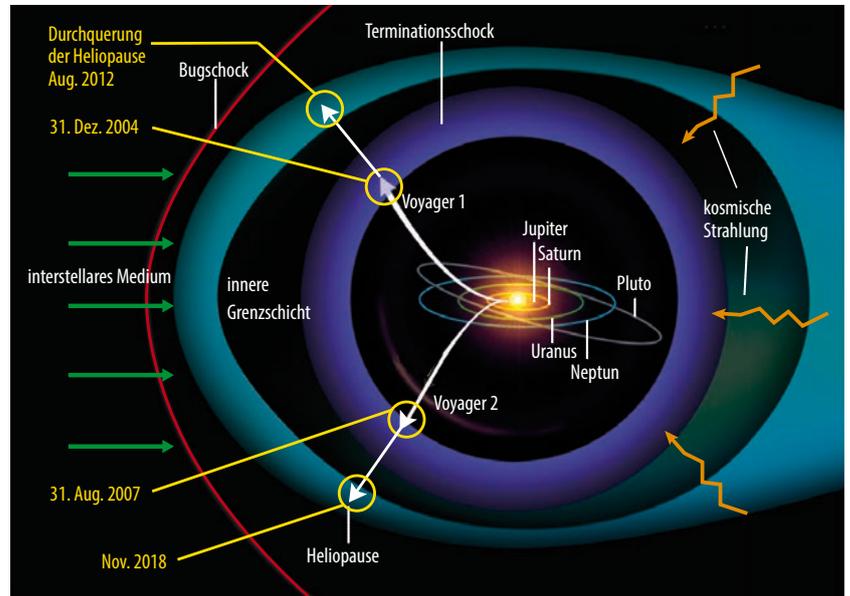
# Flug ins Ungewisse

Inzwischen haben beide Voyager-Sonden die Heliopause durchquert und wichtige Daten geliefert.

Horst Fichtner und Klaus Scherer

Im September 1977 starteten die beiden Raumsonden Voyager 1 und 2 mit dem Ziel, das äußere Planetensystem und den interstellaren Raum zu erforschen. Noch heute senden beide Sonden Daten zur Erde. Am 5. November 2018 erreichte Voyager 2 sechs Jahre nach ihrer Zwillingssonde eine bisher mit direkten Messungen unerforschte Region in unserer kosmischen Nachbarschaft: Sie durchquerte die Heliopause, welche das solare vom interstellaren Plasma trennt (**Abb. 1**). Die Heliopause begrenzt damit die Region, die der Sonnenwind einnehmen kann. Diese kontinuierliche, zunächst radiale und überschallschnelle Protonen-Elektronen-Plasmaströmung besitzt am Erdborbit (bei einer Astronomischen Einheit, AE) eine Geschwindigkeit von 400 bis 800 km/s, eine Dichte von 5 bis 10 Teilchen pro  $\text{cm}^3$  und eine Temperatur von 50 000 bis 100 000 K. In einer Region, die sich aus einer inneren und äußeren Helioschicht zusammensetzt, die durch die Heliopause getrennt sind, erfolgt die Anpassung dieser Sonnenwindströmung an die Bedingungen des interstellaren Mediums: eine Relativgeschwindigkeit von ca. 26 km/s zur Sonne, eine Temperatur von etwa 6000 K und eine Dichte von 0,1 Teilchen pro  $\text{cm}^3$ . In Richtung Sonne ist die innere Helioschicht vom Terminationsschock berandet, den die Sonden 2004 bzw. 2007 durchflogen haben [1]. Der Bugschock bildet die interstellare Grenze der äußeren Helioschicht [2].

Voyager 1 hat als erste Sonde überhaupt am 25. August 2012 die Heliopause durchquert und das interstellare Medium erreicht. Seitdem misst sie dort die Intensität der kosmischen Strahlung und des Magnetfelds sowie indirekt und punktuell die Teilchenzahldichte des Plasmas.<sup>1)</sup> Daher waren die Erwartungen an den Heliopausendurchflug von Voyager 2 hoch: Würde die Sonde eines der aktuellen Modelle der Heliosphäre bestätigen? Und ähnliche Intensitäten von helio-



**Abb. 1** In den Jahren 2004 bzw. 2007 durchquerten die Voyager-Sonden die Terminations-Schockfläche. 2012 durchflog Voyager 1 die Heliopause, im November 2018 auch die Sonde Voyager 2 – in beiden Fällen bei einer heliozentrischen Distanz von etwa 120 AE.

sphärischen und galaktischen kosmischen Strahlungsteilchen messen wie Voyager 1? Würde der Übergang des heliosphärischen zum interstellaren Magnetfeld in gleicher Weise erfolgen? Wie wäre das interstellare Plasma beschaffen? Die Antwort auf die letzte Frage kann nur Voyager 2 geben, da ihre Faraday-Cup-Detektoren noch funktionieren und es erlauben, das interstellare Plasma direkt zu analysieren.

Grundsätzlich ähneln sich die Daten des Heliopausendurchflugs der Voyager-Sonden (**Abb. 2**): Während die Intensität der energiereichen heliosphärischen Teilchen an der Heliopause abzunehmen beginnt, steigt die der galaktischen kosmischen Strahlung dort an [3]. Die Stärke des Magnetfelds [4] und die Plasmadichte [5] nehmen zu, die Plasmageschwindigkeit dagegen ab [6].

1) Die Plasmainstrumente von Voyager 1 wurden beim Vorbeiflug an Jupiter beschädigt. Dichtewerte lassen sich aber bei der Detektion von Plasmaoszillationen indirekt über die Messung der Plasmafrequenz mit dem Plasmawellendetektor bestimmen.

Aber es gab auch Überraschungen: Voyager 1 befindet sich etwa  $35^\circ$  über der Ebene des solaren Äquators, Voyager 2 rund  $32^\circ$  darunter. Obwohl die Heliopausendurchflüge zu verschiedenen Phasen des solaren Aktivitätszyklus erfolgten, haben beide Sonden eine ähnliche heliozentrische Entfernung der Heliopause gemessen, nämlich 121,6 AE (Voyager 1) bzw. 119,0 AE (Voyager 2). Der geringe Unterschied von etwa zwei Prozent deutet darauf hin, dass die Heliopause eine bemerkenswert symmetrische globale Geometrie haben sollte – obwohl die Richtung des interstellaren Magnetfelds und des Geschwindigkeitsvektors der Sonne relativ zum lokalen interstellaren Medium asymmetrisch orientiert sind.

Eine solche symmetrische Geometrie liegt allerdings lokal nicht vor: Voyager 2 hat eine stabile und mit 700 000 km vergleichsweise dünne Heliopause registriert. Voyager 1 dagegen detektierte sie als instabil und fand daher lediglich einen breiteren Übergangsbereich zum interstellaren

Medium mit einer mehr als 200-mal größeren Dicke (ca. 1 AE). Auch das von Voyager 2 direkt jenseits der Heliopause gemessene interstellare Magnetfeld war mit  $(0,68 \pm 0,03)$  nT deutlich stärker als das zuvor von Voyager 1 beobachtete mit  $(0,49 \pm 0,05)$  nT. Die Instabilität der Heliopause, wie sie Voyager 1 registriert hat, passt zu der Vorstellung, dass sich diese Grenzfläche infolge von Rayleigh-Taylor-artigen Instabilitäten deformieren lassen. Diese treten beim Kontakt zweier Flüssigkeiten verschiedener Dichte auf, hier das dichtere interstellare Medium. Darüber hinaus spielen Kelvin-Helmholtz-artige Instabilitäten eine Rolle, die durch die verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Heliopause (Scherströmung) entstehen.

Eine zeitlich und räumlich lokalisierte Störung der Heliopause hilft, die Unterschiede in den beobachteten Intensitäten energiereicher Teilchen zu verstehen: Durch eine Verwirbelung der Heliopause infolge der Instabilitäten sind zwei magnetische Flussröhren des interstellaren Mediums in die innere Helioschicht eingedrungen. Dies erklärt die zwei lokalen Maxima

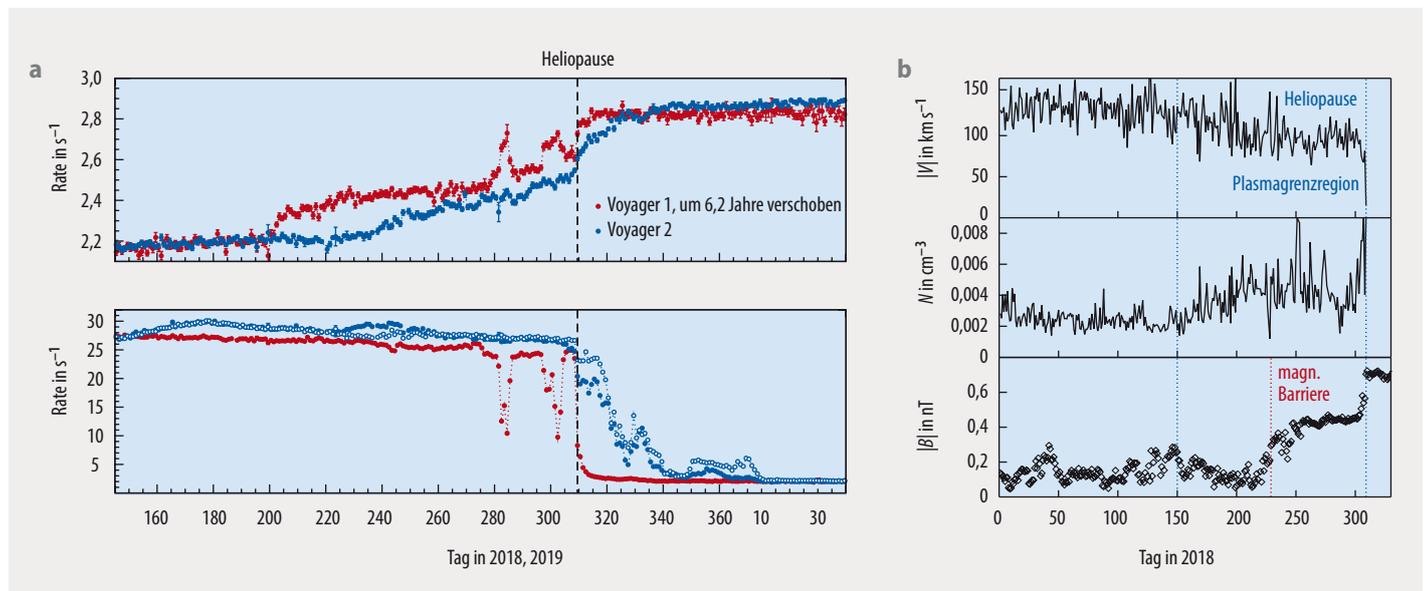
bzw. Minima in den Intensitäten der galaktischen kosmischen Strahlung bzw. der energiereichen heliosphärischen Teilchen (rot, **Abb. 2a**), die Voyager 1 aufzeichnete. Derartige „Vorboten“ der Heliopause hat Voyager 2 nicht gesehen (blau, **Abb. 2a**), was auf eine dort und zu diesem Zeitpunkt ungestörte Heliopause hindeutet. Schließlich detektierte Voyager 2 auf der interstellaren Seite der Heliopause im Vergleich zu Voyager 1 eine doppelt so dicke Übergangsschicht in der kosmischen Strahlungsintensität. Dort sinkt die Intensität der aus der Heliosphäre diffundierenden energiereichen Teilchen auf Null und diejenige der galaktischen kosmischen Strahlung steigt auf den konstanten interstellaren Wert. Dieses Verhalten kann daraus resultieren, dass sich die Feldlinien des interstellaren Magnetfelds an eine ungestörte, (quasi-)stabile Heliopause anschmiegen. Ähnlich ist dies bei planetaren Bugschocks beobachtet worden.

### Konkurrierende Modelle

Die Voyager-Sonden haben für einen gegebenen Zeitpunkt lediglich

an zwei Punkten Messwerte geliefert, die nur entlang zweier eindimensionaler Trajektorien vorliegen. Damit sind Rückschlüsse auf eine großräumige, dreidimensionale Struktur, die zeitlich variabel ist, nur eingeschränkt möglich. Zudem war die Bedeutung einiger subtiler, aber wesentlicher physikalischer Zusammenhänge beim Start der beiden Sonden nicht bekannt. Ein Beispiel sind Ladungsaustauschprozesse mit Neutralatomen aus dem interstellaren Medium [2]. Daher fehlen an Bord Instrumente für deren Untersuchung.

Derzeit konkurrieren drei grundsätzlich verschiedene Modelle der großräumigen Struktur der Heliosphäre, die alle verträglich mit den Messungen der Voyager-Sonden sind. Das von den meisten bisher favorisierte Modell beschreibt die Heliosphäre als kometenartige Struktur mit einem ausgedehnten Schweif. Alternativ könnte die Heliosphäre infolge einer hohen interstellaren Magnetfeldstärke quasi-sphärisch bzw. blasenförmig sein. Vor einigen Jahren wurde zudem eine Form mit einem aufgespaltenen Schweif, also mit zwei „Ausfluss-Jets“ vorgeschlagen. Unter Berücksichti-



**Abb. 2** Die gemessenen Intensitätsprofile energiereicher Teilchen (a, oben) sowie des Sonnenwindplasmas (a, unten) durch Voyager 1 (rot, Daten um 6,2 Jahre verschoben) und Voyager 2 (blau) ähneln sich, zeigen aber auch markante Unterschiede: Die erste Sonde beobachtete vor Durchqueren der Heliopause „Vorboten“ einer zu dem Zeitpunkt wohl vorliegenden großräumigen Verwirbelung in Form zweier lokaler Maxima (oben) bzw. Minima (unten). Die zweite Sonde beobachtete auf der interstellaren Seite flachere Intensitätsverläufe. Erst bei signifikant größeren Distanzen zur Heliopause stellten sich die konstanten interstellaren Niveaus ein. Die Messpunkte von Voyager 2 stammen von zwei verschiedenen Messinstrumenten, angedeutet durch offene bzw. geschlossene Symbole. Die Plasma- und Magnetfeldmessungen von Voyager 2 (b) zeigen durch die abrupte Abnahme der Geschwindigkeit und Zunahme von Teilchenzahl-dichte und Magnetfeld die Heliopausedurchquerung an. Etwa 160 Tage davor veränderten sich Geschwindigkeit und Dichte schwach und graduell und deuteten so auf eine Plasmarandregion hin. Ab Tag 230 definiert ein erster fast sprunghafter Anstieg in der Magnetfeldstärke eine Region erhöhten Magnetfelds.

gung weiterer Beobachtungen wie der Lyman-alpha-Strahlung oder energiereicher Neutralatome [2] erscheint die kometenartige Heliosphäre am wahrscheinlichsten.

Die Messungen der beiden Voyager-Sonden lassen sich zwar nur eingeschränkt interpretieren. Dennoch ist der Erkenntnisgewinn, den sie erbracht haben, nicht zu überschätzen. Erstmals haben zwei Raumsonden den Bereich des von der Sonne dominierten Plasmas verlassen und sind in das interstellare Medium vorgedrungen. Damit sind sie die ersten Sonden, die außerhalb der Heliosphäre *in situ* gemessen haben.

Über das Interesse am interstellaren Medium hinaus ist bereits die Erforschung der durchflogenen Übergangsregion von solarem zu interstellarem Plasma auch für andere Bereiche von Bedeutung: Die Heliosphäre ist die am besten untersuchte Vertreterin der Klasse von Astrosphären sonnenähnlicher Sterne. Die Ergebnisse der Voyager-Mission verdeutlichen, dass die Heliosphäre – und damit auch die Astrosphären anderer Sterne – ein Schutzschild gegen kosmische Strahlung sind [7]. Diese Eigenschaft ist zum einen potenziell bedeutsam für die Entwicklung von Lebensformen

auf Planeten in diesen Astrosphären. Zum anderen beeinflusst die Intensität der kosmischen Strahlung die Nachweisbarkeit von Biosignaturen in den Atmosphären von Exoplaneten: Die kosmische Strahlung tendiert nämlich dazu, die Anzahl der lebensanzeigenden Moleküle zu verändern. So dienen beispielsweise Ozon oder Methan als Indikatoren für Leben. Doch die Höhenstrahlung kann beide Moleküle aufspalten [8]. Um also die kosmische Strahlungsumgebung von Exoplaneten zu verstehen, ist es unverzichtbar, die Struktur von Astrosphären zu kennen.

### Eine Nachfolgemission

Helio- und astrophysikalische Forschung hängen stark zusammen, sodass eine Nachfolgemission logisch erscheint. Das Konzept einer solchen Interstellar-Probe wird derzeit entwickelt. Während die Voyager-Sonden primär darauf ausgelegt waren, die Planeten unseres Sonnensystems zu erkunden, soll die neue Sonde mit Instrumenten ausgerüstet sein, um speziell die heliosphärische Grenzregion und das interstellare Medium zu erforschen. Allerdings ist Geduld gefragt: Angesichts der logistischen

Herausforderungen wird eine solche Mission kaum vor Mitte dieses Jahrhunderts das interstellare Medium erreichen. Somit haben vorläufig die Voyager-Sonden das letzte Wort: Ihre Energieversorgung wird noch bis etwa 2025 ausreichen. Ihre Daten werden in den nächsten Jahren also weitere Erkenntnisse über die Physik des interstellaren Mediums ermöglichen.

- [1] H. Fichtner und H.-J. Fahr, *Physik Journal*, August/September 2008, S. 22
- [2] H. Fichtner und F. Effenberger, *Physik Journal*, Juli 2012, S. 20
- [3] S. M. Krimigis et al., *Nat. Astron.* **3**, 997 (2019) und E. C. Stone et al., *Nat. Astron.* **3**, 1013 (2019)
- [4] L. F. Burlaga et al., *Nat. Astron.* **3**, 1007 (2019)
- [5] D. A. Gurnett und W. S. Kurth, *Nat. Astron.* **3**, 1024 (2019)
- [6] J. D. Richardson et al., *Nat. Astron.* **3**, 1019 (2019)
- [7] K. Scherer und H. Fichtner, *Physik Journal*, März 2007, S. 59
- [8] M. Scheucher et al., *Astrophys. J.* **863**, 6 (2018)

## Autoren

**Priv.-Doz. Dr. Horst Fichtner** und **Dr. Klaus Scherer**, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Physik und Astronomie, 44780 Bochum

## Der Neutrinomasse direkt auf der Spur

Das KATRIN-Experiment verbesserte die Obergrenze der Neutrinomasse um einen Faktor 2.

Werner Rodejohann

**N**eutrinos besitzen eine nicht-verschwindende Ruhemasse – entgegen der Vorhersage des ansonsten so erfolgreichen Standardmodells der Elementarteilchenphysik. Die Frage, wie groß diese Masse ist, beschäftigt Teilchenphysikerinnen und -physiker schon lange, auch die KATRIN-Kollaboration, die kürzlich ihr erstes Ergebnis veröffentlicht hat [1].

Im Standardmodell kommen drei Neutrinos vor, die entsprechend ihres „Flavors“ Elektron-, Muon- und Tau-Neutrino ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$ ) heißen. Fla-

vor ist keine Erhaltungsgröße der Natur. Neutrinooszillationen, bei denen sich z. B. Elektron-Neutrinos periodisch in Muon-Neutrinos und zurück umwandeln, haben dies zweifelsfrei belegt. Dies ist Physik jenseits des Standardmodells, denn nur massive Neutrinos sind zu diesem Verwandlungstrick in der Lage [2]. In diesem Fall besitzen Flavorzustände keine wohldefinierte Masse, sondern sind Linearkombinationen von Massenzuständen  $\nu_{1,2,3}$ , welche die Masse  $m_{1,2,3}$  besitzen. So gilt etwa

$\nu_e = U_{e1}\nu_1 + U_{e2}\nu_2 + U_{e3}\nu_3$ , wobei  $U_{e1,2,3}$  die Elemente der sogenannten Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Mischungsmatrix sind. Diese lassen sich aus den beobachteten Amplituden in Oszillationsexperimenten extrahieren. Allerdings hängen Neutrinooszillationen nur von den Differenzen der quadrierten Neutrinomassen ab, nicht von den Massen selbst. Diese bleiben daher unbekannt. Aus diesem Grund sind andere Methoden erforderlich, um die Neutrinomasse zu bestimmen.