

## Neuer Schock der Erkenntnis

Nach 30 Jahren Flugzeit gelangt die Voyager 2-Sonde in die Grenzregion des Sonnensystems zum interstellaren Medium und liefert spektakuläre Einblicke, die Voyager 1 versagt blieben.

Kein von Menschenhand gemachtes Objekt ist tiefer in den Weltraum gelangt als die beiden 1977 gestarteten Voyager-Sonden der NASA. Ursprünglich sollten diese die Gasplaneten Jupiter und Saturn zusammen mit deren Monden erkunden. Doch die beiden Sonden funktionieren weiterhin. Nachdem sie die Bahn des Pluto längst hinter sich gelassen haben, erforschen sie nun die Grenzregionen unseres Sonnensystems.

Unter der Heliosphäre versteht man die Plasmablase, welche unser Sonnensystem umhüllt, während es sich durch das interstellare Medium der Milchstraße bewegt (Abb. 1).<sup>1)</sup> Die Heliosphäre wird durch den 400 bis 800 km/s schnellen Sonnenwind gebildet, der hauptsächlich aus Protonen und Elektronen besteht. Vom Ruhesystem der Sonne aus gesehen, umströmt das lokale interstellare Medium (LISM) mit einer Geschwindigkeit von 25 km/s den Sonnenwind. Während der neutrale Anteil des LISM fast ungehindert bis tief in die Heliosphäre eindringt, umströmt die Plasmakomponente die Heliopause wie ein Fluid. In den miteinander wechselwirkenden Überschallplasmaströmungen – dem Sonnenwind und dem interstellaren Wind – bilden sich Stoßwellen aus, der Terminations- und der Bugschock. Die energiereichen Teilchen der kosmischen Strahlung dringen aus allen Richtungen durch die Heliopause, die interstellares und solares Plasma trennt, in die Heliosphäre ein, wo ihre Intensität durch den Sonnenwind verringert (moduliert) wird.

Im Unterschied zur inneren Heliosphäre, die zumindest teilweise direkten Messungen zugänglich ist, ließ sich ihre Randregion bisher lediglich durch Modellrechnungen erfassen. Daraus ergeben sich alternative Modelle, die beschreiben, wie sich die Sonnenwindströmung den interstellaren Bedingungen anpasst. Dies geschieht in der „inneren Helioschicht“, d. h. zwischen

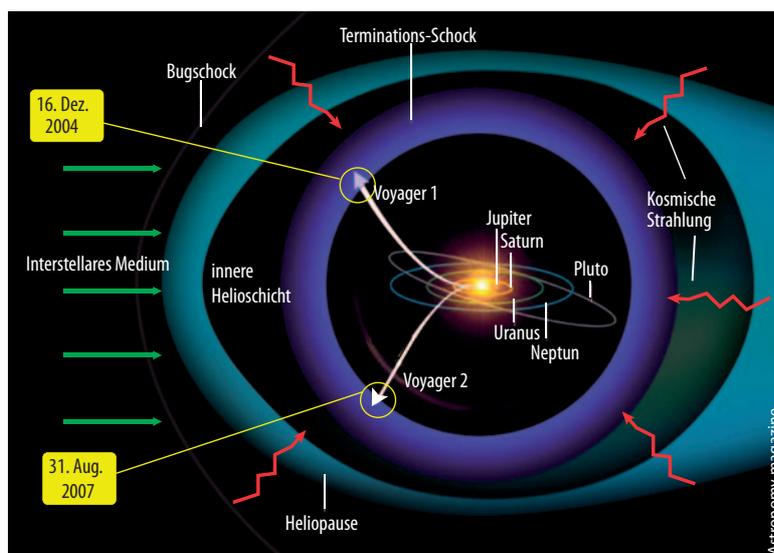


Abb. 1 Die Raumsonden Voyager 1 und 2 haben mittlerweile den Terminations-Schock der Heliosphäre durchflogen und

befinden sich seitdem in der inneren Helioschicht und damit in unmittelbarer Nähe zum interstellaren Medium.

Terminations-Schock und Heliopause: Das Sonnenwindplasma reagiert auf Druck und Dynamik des umgebenden LISM, nachdem es am Schock komprimiert, aufgeheizt und aus seiner radialen Expansion in den heliosphärischen Schweif umgelenkt wird.

Im Dezember 2004 durchflog die Sonde Voyager 1 in einer Entfernung von 94 Astronomischen Einheiten (AE) den Terminations-Schock. Dies hatte sich zwei Jahre zuvor bereits durch plötzliche schockreflektierte Ionen mit Energien bis zu einigen MeV angedeutet. Da die Plasmadetektoren der Sonde bei ihrem Saturnvorbeiflug 1980 beschädigt worden waren, ließ sich das Sonnenwindplasma selbst nicht beobachten. Der Schock ließ sich nur indirekt über die Messung der Magnetfeldkompression sowie über Daten zu energiereichen Teilchen identifizieren.

Immerhin bestätigten sich z. B. die erwarteten Werte für die Entfernung des Terminations-Schocks und für den Plasmakompressionsfaktor von 2,5, der das Verhältnis der Dichten auf der stromabwärtigen zur stromaufwärtigen Schockseite beschreibt. Und es ergaben sich erste Überraschungen: So

zeigten die Daten eindeutig, dass der Terminations-Schock – zumindest am Ort von Voyager 1 – entgegen allen Modellvorstellungen nicht die alleinige Quellenregion der energiereichen „anomalen“ kosmischen Teilchenstrahlung<sup>2)</sup> sein kann, sondern eher die einer nicht erwarteten Population nur schwach beschleunigter Ionen. Außerdem ließ sich aus den Magnetfeldmessungen indirekt auf eine unerwartet niedrige Plasmageschwindigkeit jenseits des Schocks schließen.

### Ein zweiter Anlauf

Durch die technischen Probleme bei Voyager 1 blieb die Schockdiagnose unvollständig, verschärft durch eine gestörte Telemetrie am Tag des Durchflugs. Der Erfolg, den seit Jahren vorhergesagten Schock endlich detektiert zu haben, war also getrübt. Viele Fragen blieben unbeantwortet: Wie ist die genaue Struktur des Schocks? Wie erfolgt die Teilchenbeschleunigung im Detail? Wie ist der Plasmazustand in der inneren Helioschicht?

Die mit Voyager 1 gewonnenen Erkenntnisse reichten jedoch aus, um den Zeitpunkt des mit Span-

1) vgl. Schwerpunkt Heliophysik, Physik Journal, März 2007, ab S. 31

2) Die „anomale“ kosmische Strahlung besteht aus einfach geladenen energiereichen Teilchen, die im Spektrum der gesamten (galaktischen, vollständig ionisierten) kosmischen Strahlung zu einem zusätzlichen (seinerzeit unerwarteten, daher „anomalen“) Peak bei Energien um 10 bis 100 MeV führen.

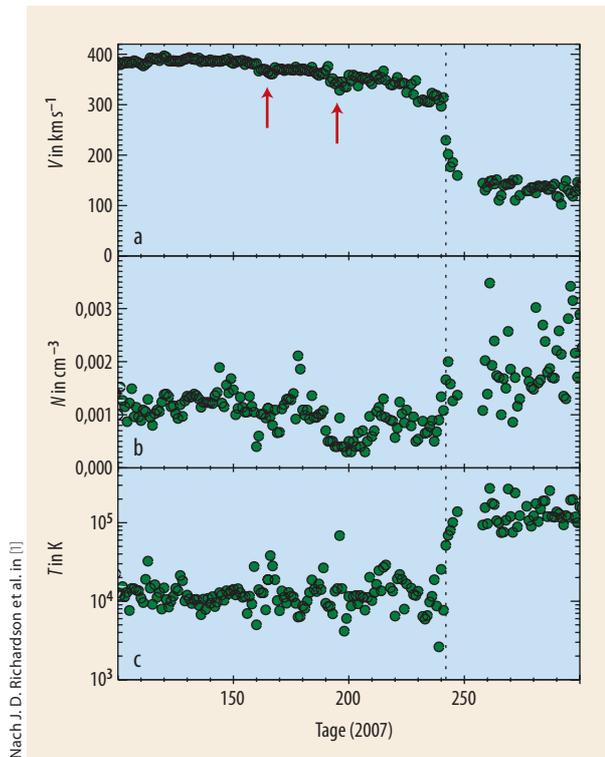


Abb. 2 Die tagesgemittelten Plasmadaten von Voyager 2 zeigen, wie das Sonnenwindplasma beginnend am Tag 150/2007 leicht stufenweise abgebremst wird (rote Pfeile, a). Am Tag 242/2007 (gestrichelte Linie), beim Flug durch den Terminations-Schock, vermindert sich die Geschwindigkeit sprunghaft, was mit einer Verdichtung (b) und Aufheizung (c) einhergeht.

nung erwarteten Durchflugs der zweiten Voyager-Sonde besser vorhersagen zu können. Voyager 2 erreichte am 31. August 2007 den Terminations-Schock und lieferte grundlegend neue Erkenntnisse [1]. Daneben bestätigte sie die früheren Messungen. So ist die Schock-Region auch am Ort von Voyager 2 nicht der Ursprung anomaler kosmischer Strahlung. Somit bleibt die Frage, ob diese Ionen in anderen Regionen der Schockfläche oder etwa weiter außen in der inneren Helioschicht entstehen.

Eine Voraussage erfüllte sich aufs Schönste: Nachdem 2005 in den Voyager 2-Daten Vorboten des Schocks auftauchten, verließ die Sonde den ungestörten überschallschnellen Sonnenwind bereits bei 83,7 AE (Abb. 2), also bei einer geringeren heliozentrischen Entfernung als Voyager 1. Dies ist eine Folge eines asymmetrischen interstellaren Magnetfelddruckes, der eine Asymmetrie des Terminations-Schocks verursacht. Mithilfe magneto-hydrodynamischer Rechnungen lässt sich ausschließen, dass der Schock sich zwischen Dezember 2004 und August 2007 um mehr als drei AE in Richtung Sonne bewegt hat. Damit bestätigt sich unmittelbar eine Asymmetrie

der Heliosphäre, die sich ausnutzen lässt, um Stärke und Orientierung des interstellaren Magnetfeldes zu bestimmen.

Vor allem konnte Voyager 2 endlich das Sonnenwindplasma in der Schockregion direkt beobachten. Doch die Sonde detektierte statt einer gleich fünf Schock-Durchquerungen innerhalb von rund 48 Stunden. Diese Mehrfachdurchquerungen lassen sich auf Oszillationen des Schocks als Folge von Staudruckschwankungen im Sonnenwindplasma zurückführen, waren jedoch in dieser Frequenz und Amplitude nicht vorhergesagt worden.

In der inneren Helioschicht war aufgrund der Plasmakompression von 2,5 eine Temperatur von ca.  $10^6$  K zu erwarten gewesen. Die neuen Messungen zeigen jedoch überraschend, dass die Temperatur in der inneren Helioschicht um eine Größenordnung niedriger liegt. Offenbar wandelt sich die kinetische Energie des Sonnenwindes nicht ausschließlich in thermische Energie um. Dies lässt nach anderen Energieabsorbieren fragen. Tatsächlich entsteht erst mit der Berücksichtigung suprathemischer Ionen ein konsistentes Bild: Am Schock werden bis zu 80 Prozent der Energie des ankommenden Sonnenwindflusses auf „Pick-Up Ionen“ der inneren Helioschicht übertragen. Das führt offenbar dazu, dass die Energiedichte der Ionen höher ist als die des Magnetfeldes.

Im Gesamtbild stellt es sich also so dar, dass der eigentliche Sonnenwind entgegen den Erwartungen nach dem Schockdurchgang weiterhin supersonisch ist. Der Schock dürfte sich nur dann physikalisch verstehen lassen, wenn man ihn als gekoppeltes System von separaten Fluiden beschreibt.

Nach den Prognosen dürften die beiden Voyager-Sonden übrigens noch bis 2020 in Betrieb bleiben und Daten liefern – ein weiteres Jahrzehnt, um die Grenzen der Heliosphäre direkt zu erforschen!

Horst Fichtner und Hans-Jörg Fahr

[1] Nature 454, 63–83 (2008)

## KURZGEFASST

### ■ Elektronenbahnen im Atom

Physikern aus den USA und Österreich ist es gelungen, in Kaliumatomen quantenmechanische Wellenpakete zu erzeugen, die sich wie die Elektronen im Bohrschen Atommodell auf diskreten Bahnen bewegen. Die Wellenpakete bestehen aus äußerst schwach gebundenen Zuständen (Energien kleiner meV) mit sehr hoher Hauptquantenzahl  $n \sim 300$ , sog. Rydberg-Zuständen. Die Pakete bewegten sich auf fast kreisförmigen Bahnen mehrmals um den Kern, bevor sie auseinanderliefen.

J. J. Mestayer et al., Phys. Rev. Lett. 100, 243004 (2008)

### ■ Eine Pumpe für den Atomlaser

Ein Atomlaser ist im Prinzip ein Bose-Einstein-Kondensat (BEK), aus dem sich ein kohärenter Atomstrahl auskoppeln lässt. Da das BEK zu Beginn eine feste Atomzahl enthält, versiegte der Strahl bisher allerdings schnell. Wie australische Physiker gezeigt haben, lassen sich Atome aus einem zweiten, wenige Mikrometer entfernten BEK in das erste Kondensat pumpen, während dieses Atome emittiert. Ein zusätzliches „Förderband“, das stetig kalte Atome zuführt, sollte daher künftig einen kontinuierlichen Atomlaser ermöglichen. N. P. Robins et al., nature physics, doi:10.1038/nphys1027

Priv. Doz. Dr. Horst Fichtner, Institut für Theoretische Physik, Lehrstuhl IV: Welt-raum- und Astrophysik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum; Prof. Hans-Jörg Fahr, Argelander-Institut für Astronomie, Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Auf dem Hülgel 71, 53121 Bonn