

## ■ Trug- statt Bugschock?

Daten über den neutralen Anteil des lokalen interstellaren Mediums lassen die Struktur der Heliosphäre in neuem Licht erscheinen.

In den vergangenen zehn Jahren war es eine der zentralen Aufgaben der Heliophysik, die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit dem interstellaren Medium zu erforschen.<sup>1)</sup> Gegenüber früheren Jahren ist das Interesse deutlich gestiegen – eine Folge der vorliegenden und zu erwartenden Daten, welche die Natur der äußeren Heliosphäre, also der vom Sonnenwindplasma dominierten Region um die Sonne, offenbaren. Zum einen liefern die beiden Raumsonden Voyager 1 und 2 direkt vor Ort Daten über unsere unmittelbare interstellare Nachbarschaft.<sup>2)</sup> Zum anderen beobachtet der Interstellar Boundary Explorer (IBEX)<sup>3)</sup> auf seinem Erdorbit aus der Ferne, wie Atome (H, He, O, Ne) aus der Randregion der Heliosphäre und dem umgebenden interstellaren Medium in Richtung der Sonne fließen. Mehrfach musste aufgrund der neuen Messungen unsere Vorstellung über die Beschaffenheit dieser Schnittstelle zwischen Helio- und Astrophysik revidiert werden. Jüngst hat das internationale IBEX-Team für eine weitere Überraschung gesorgt: So scheint der jahrzehntelang als wahrscheinlich angenommene Bugschock im interstellaren Medium nicht zu existieren [1].

Um diesen Befund würdigen zu können, ist es notwendig, sich die Struktur der Heliosphäre zu vergegenwärtigen (Abb. 1). Diese Plasma-blase im lokalen interstellaren Medium (LISM) wird gemäß der bisherigen „klassischen“ Vorstellung durch den 400 bis 800 km/s schnellen Sonnenwind gebildet, der hauptsächlich aus Protonen und Elektronen besteht. Vom Ruhesystem der Sonne aus gesehen wechselwirkt diese Plasmaströmung mit dem 25 km/s schnellen LISM. Der neutrale Anteil des LISM dringt fast ungehindert bis tief in die Heliosphäre ein, wo ihn IBEX detektieren kann. Die mit Überschallgeschwindigkeit strö-

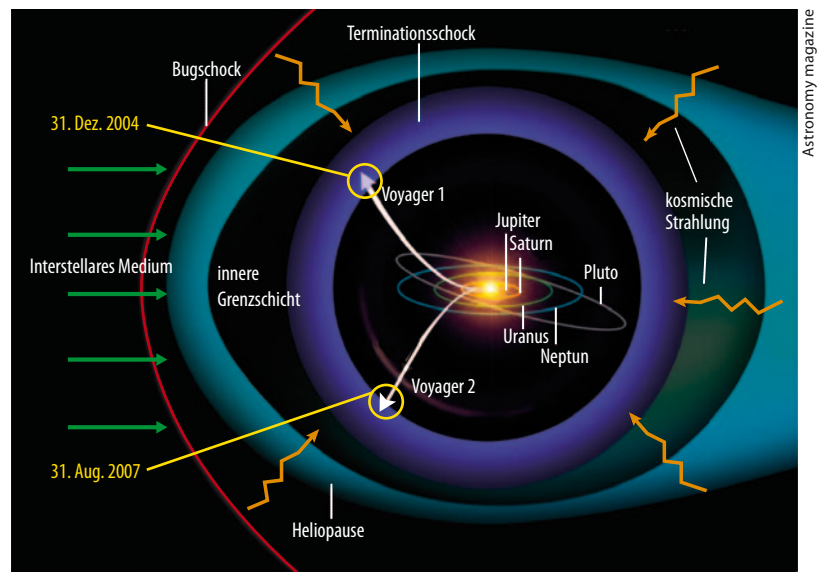
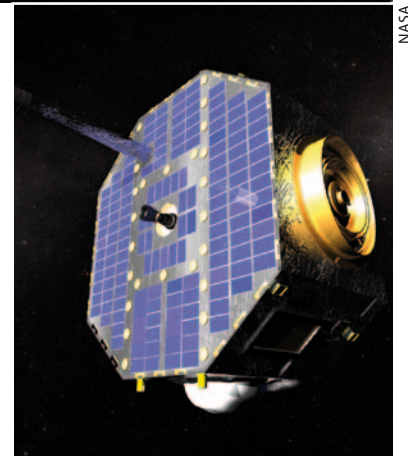


Abb. 1 Während der Terminations-Schock der Heliosphäre mittlerweile von den Raumsonden Voyager 1 und 2 in den Jahren 2004 und 2007 durchflogen wurde, ist die Existenz des Bugschocks (rote Linie) durch Neutralgasmessungen mit der Sonde IBEX im Erdorbit (rechts) zweifelhaft geworden.



mende solare und LISM-Plasma-komponente werden infolge ihrer gegenseitigen Wechselwirkung nach einem jeweiligen Stoßwellenübergang auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst und umgelenkt, da sie sich als magnetisierte Plasmaströmungen nicht durchdringen können. Die sich in dieser idealisierten Vorstellung ausbildende Trennfläche (Kontaktdiskontinuität) zwischen beiden Plasmen ist als Heliopause bekannt. Auf beiden Seiten der Heliopause befinden sich Stoßwellen. Zum einen ist dies der Terminationsschock in der Sonnenwindströmung, den die zwei Voyagersonden 2004 und 2007 tatsächlich durchflogen und somit zweifelsfrei nachgewiesen haben. Zum anderen handelt es sich um den Bugschock im LISM.

Der Bugschock ist bisher keiner direkten Messung zugänglich, so dass sich seine Existenz lediglich indirekt überprüfen lässt. Dazu ist es zunächst notwendig, die Temperatur  $T_{\text{LISM}}$  und die Geschwindigkeit  $v_{\text{LISM}}$  des LISM-Plasmas im Ruhesystem der Sonne zu bestimmen. Die bisherigen Konsenswerte [2] – aus Daten früherer Missionen wie z. B. Ulysses und unter Annahme eines thermischen Gleichgewichts zwischen Neutralgas und Plasma – betragen  $T_{\text{LISM}} = 6300 \pm 340 \text{ K}$  und  $v_{\text{LISM}} = 26,3 \pm 0,4 \text{ km/s}$ . Dies führt mit der gut begründeten Annahme einer Protonen-dominierten Ionenkomponente des LISM-Plasmas auf eine Schallgeschwindigkeit von  $(2 k_B T_{\text{LISM}}/m_p)^{1/2} = 10 \text{ km/s}$ , mit der Boltzmann-Konstanten  $k_B$  und der Protonenmasse  $m_p$ . Demnach sind

1) siehe das zugehörige Schwerpunktheft „Heliophysik“, Physik Journal, März 2007, ab S. 31

2) vgl. Physik Journal, August/September 2008, S. 22

3) vgl. Physik Journal, Februar 2010, S. 16

rein hydrodynamisch eine Überschallströmung und ein Bugstoß zu erwarten.

Die Auswertung der IBEX-Messungen liefert nun zwar die gleiche Temperatur für das LISM, aber eine um rund 3 km/s geringere Geschwindigkeit  $v_{\text{LISM}} = 23,2 \pm 0,3$  km/s, was die Schlussfolgerung scheinbar nicht ändert. Nun ist aber zu beachten, dass das LISM-Plasma von einem großräumig strukturierten Magnetfeld durchsetzt ist, sodass neben Schall- bzw. Druckwellen auch magneto-hydrodynamische Wellen Strömungen im Medium übertragen können. Die Ausbildung einer Stoßwelle erfordert also eine Strömungsgeschwindigkeit, die nicht nur die Schall-, sondern auch mindestens die Alfvén-Geschwindigkeit übertrifft:  $v_A = B/(\mu_0 \rho)^{1/2}$ , mit der Vakuumpermeabilität  $\mu_0$  und der Plasmamassendichte  $\rho$ .

Magnetfeldstärke und Plasmadichte leiten sich ebenfalls aus IBEX-Messungen in Verbindung mit numerischen Simulationen der äußeren Heliosphäre ab zu  $B_{\text{LISM}} \geq 3 \mu\text{G} = 0,3 \text{ nT}$  und  $n_{\text{LISM}} \leq 0,07 \text{ cm}^{-3}$  [3] (Abb. 2). Daraus folgt eine Alfvén-Geschwindigkeit von mindestens 24,8 km/s, sodass die Geschwindigkeit der Strömung insbesondere diejenige von schnellen magnetoakustischen Wellen unterschreitet und sich somit kein Bugstoß ausbilden kann. Damit haben die IBEX-Messungen eine Spekulation erhärtet, die schon Mitte der 80er-Jahre geäußert [4] und in den 90er-Jahren sogar quantitativ untersucht [5], aber bis jüngst für unwahrscheinlich gehalten wurde.

Wie belastbar ist dieses neue Ergebnis? Und welche Bedeutung hat es? Die Frage nach der Belastbarkeit lässt sich natürlich in die Frage nach den Ungenauigkeiten der bestimmten Plasmamaparameter übersetzen. Während Temperatur und Geschwindigkeit des LISM vergleichsweise zuverlässig aus der direkten Messung von interstellaren Heliumatomen, die fast ungehindert bis zum Erdborbit vordringen, abzuleiten sind, gilt das nicht in gleichem Maße für das Magnetfeld

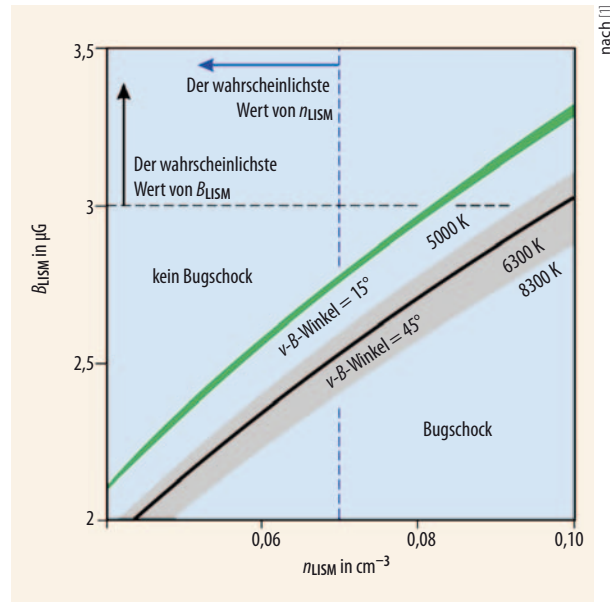


Abb. 2 Die wahrscheinlichsten Werte für die Magnetfeldstärke und die Protonendichte im lokalen interstellaren Medium fallen ins Rechteck links oben. Sie liegen deutlich oberhalb der Grenzkurven, die für die zwei Winkel  $15^\circ$  und  $45^\circ$  zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Magnetfeld den Bereich des Parameter-raums mit möglichem Bugstoß nach oben begrenzen. Der schattierte Bereich zeigt den Einfluss der Temperatur für einen Winkel von  $45^\circ$ .

und die Protonendichte im LISM. Da der Grad der gefundenen „Subalfvénizität“ nur gering ist, lässt sich ein sehr schwacher, aber dennoch existierender Bugstoß noch nicht ausschließen.

Die Frage nach der Bedeutung hingegen ist eindeutig zu beantworten, da die IBEX-Messungen sicherlich einen höchstens schwach ausgeprägten Bugstoß offenbaren. Das hat zur Konsequenz, dass die sog. Wasserstoffwand, also eine Erhöhung der Neutralgasdichte zwischen Bugstoß und Heliopause, ebenfalls geringer ausfällt als zuvor oft angenommen. Somit wird es notwendig, die interstellare Lyman- $\alpha$ -Absorption, die bisher unter Verwendung einer ausgeprägteren Wasserstoffwand konsistent zu erklären war [6], nun für die neuen LISM-Parameter zu analysieren. Solche Analysen dienen auch dazu, um Kenngrößen (z. B. die Massenverlustrate) der Lyman- $\alpha$  emittierenden sonnenähnlichen Sterne zu bestimmen.

Eine weitere Implikation besteht in der möglicherweise durch einen nicht vorhandenen oder nur sehr schwachen Schock veränderten lokalen interstellaren Turbulenz. Dies kann den Transport der galaktischen kosmischen Strahlung bereits vor Erreichen der Heliopause beeinflussen und damit ein weiteres lang etabliertes Paradigma in Frage stellen [7]. Dieses besagt, dass die kosmische Strahlung bzw. deren

Energiespektren erst innerhalb der Heliopause moduliert, d. h. durch Wechselwirkungen mit dem Sonnenwindplasma verändert werden. Ein verändertes LISM (ohne Bugstoß) könnte eine mögliche Modulationsregion jenseits der Heliopause verstärken. Schließlich könnte das neueste IBEX-Ergebnis auch auf Inhomogenitäten im LISM hinweisen, die bereits in [2] diskutiert wurden.

Letztlich ist Geduld gefragt: Erst in-situ-Messungen jenseits der Heliopause werden zweifelsfrei Aufschluss geben – und solche sind vielleicht mit den Voyager-Sonden innerhalb ihrer aktiven Zeit bis ca. 2022 noch möglich. Wir dürfen also in den nächsten Jahren mit Spannung neue Daten von der Grenze unseres Sonnensystems erwarten.

Horst Fichtner und  
Frederic Effenberger

- [1] D. J. McComas et al., *Science* **336**, 1291 (2012)
- [2] E. Möbius et al., *Astron. Astrophys.* **426**, 897 (2004)
- [3] M. Opher et al., *Science* **316**, 875 (2007); H. Washimi et al., *Astrophys. J.* **670**, L139 (2007); R. Ratkiewicz und J. Grygorczuk, *Geophys. Res. Lett.* **35**, L23105 (2008)
- [4] H. J. Fahr, *Adv. Space Res.* **6**, 13 (1986)
- [5] K. G. Gayley et al., *Astrophys. J.* **487**, 259 (1997)
- [6] B. E. Wood et al., *Astrophys. J.* **574**, 412 (2002)
- [7] K. Scherer et al., *Astrophys. J.* **735**, 128 (2011)

Priv.-Doz. Dr. Horst Fichtner und Dipl.-Phys. Frederic Effenberger, Lehrstuhl für Theoretische Physik IV: Weltraum- und Astrophysik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum