

Rätselhaftes Band am Himmel

Mit einem erdgebundenen Satelliten ließ sich erstmals der Grenzbereich der Heliosphäre vermessen.

Zahlreiche Raumsonden haben seit über fünfzig Jahren zur Erkundung unseres Sonnensystems beigetragen. Neben den Planeten gilt ein besonderes Interesse der Heliosphäre, d. h. der Region, in der sich der von der Sonne ausgehende Plasmastrom, der Sonnenwind, ausbreitet (Abb. 1). Die kürzlich beendete Ulysses-Mission konnte diese großräumige Plasmastruktur zum ersten Mal dreidimensional erforschen. Die beiden Raumsonden Voyager 1 und 2 drangen sogar bis an den Rand der Heliosphäre und somit des Sonnensystems vor. Nach diesen beiden Punktmessungen gelang es mithilfe der IBEX-Mission nun erstmals, die innere Grenzschicht zwischen Terminationsschock und Heliopause vollständig zu vermessen – mit überraschenden Ergebnissen!

Die Heliosphäre umhüllt unser Sonnensystem, während es sich durch das interstellare Medium der Milchstraße bewegt. Da sich sowohl der Sonnenwind als auch das relativ dazu strömende interstellare Medium mit Überschallgeschwindigkeit (supersonisch) ausbreiten, bilden sich zwei Stoßwellen aus: der Terminationsschock, an dem der supersonische Sonnenwind in eine

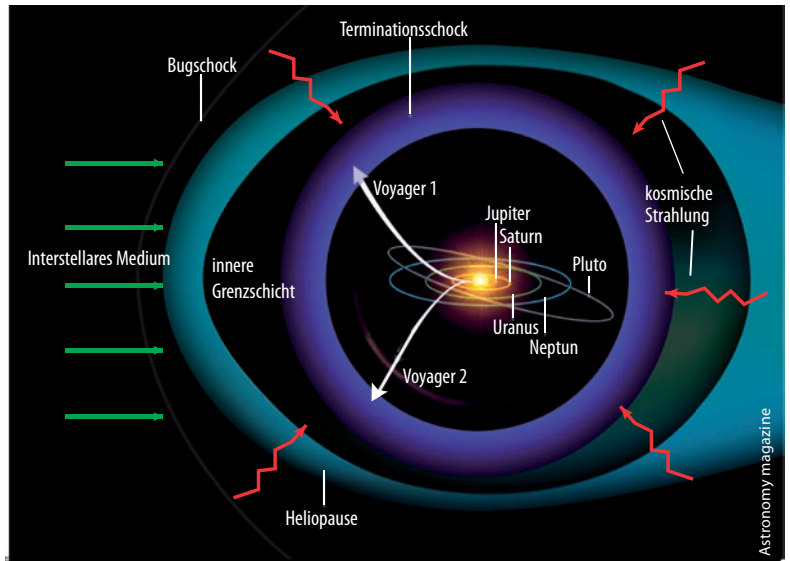


Abb. 1 Jenseits der äußeren Planeten befinden sich Terminationsschock, Heliopause und Bugsschock, die die Heliosphäre von innen nach außen begrenzen.

subsonische Strömung übergeht, sowie der Bugsschock, an dem das interstellare Medium subsonisch wird. Dazwischen bildet sich eine Druckgleichgewichtsfläche aus, die Heliopause, an der beide Strömungen entlang fließen, ohne sich zu durchdringen (Abb. 1).

Die Sonden Voyager 1 und 2 durchflogen 2004 bzw. 2007 den Terminationsschock bei einem Abstand von 94 bzw. 84 Astrono-

zen. Die beiden Voyager-Sonden sind 2004 bzw. 2007 durch den Terminationschock geflogen.

mischen Einheiten [1].^{+) All}erdings ist unklar, inwieweit diese lokalen Messungen auf räumliche und / oder zeitliche Variationen zurückzuführen sind. Die globale Struktur der inneren heliosphärischen Grenzschicht lässt sich jedoch auch mithilfe eines erdgebundenen Satelliten vermessen, da interstellare Neutralatome, vor allem atomarer Wasserstoff sowie in geringeren Anteilen auch Helium und Sauerstoff, die heliosphärischen Schocks nahezu ungehindert durchdringen können. Sie werden im supersonischen Sonnenwind durch Ladungsaustausch-Prozesse ionisiert und bilden die Population der „Pickup-Ionen“. Der Ladungsaustausch erfolgt auch in der inneren heliosphärischen Grenzschicht zwischen den Pickup-Ionen, Sonnenwindprotonen und interstellaren neutralen Atomen, die den Terminationschock durchdrungen haben. Hierdurch entsteht z. B. aus einem schnellen Proton ein schnelles neutrales Wasserstoffatom, das aufgrund der breiten thermischen Verteilung der Protonen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in Richtung Erde fliegt und sich dort messen lässt. In der äußeren heliosphärischen

+) vgl. Physik Journal, August/September 2008, S. 22. Eine Astronomische Einheit entspricht der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne (149 Millionen km).

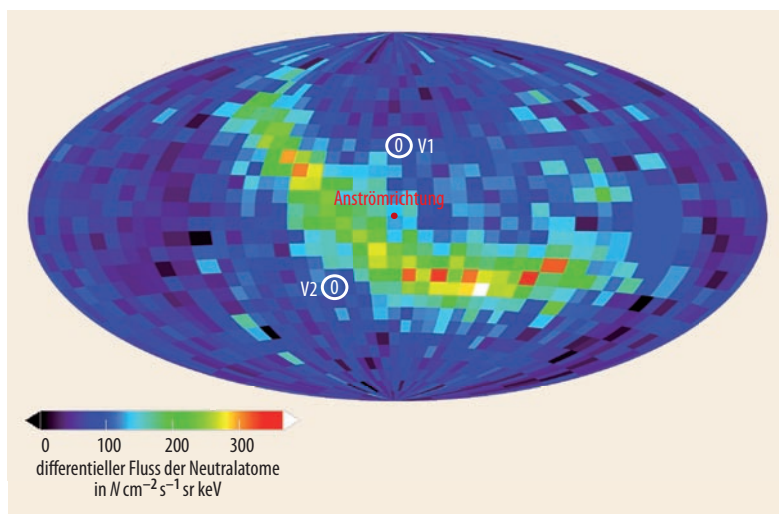


Abb. 2 Die Ergebnisse der IBEX-Mission zeigen deutlich ein Band von energiereichen Neutralatomen (ENA, hier bei 1,1 keV), das sich vom Nordpol über den Äquator windet und zum Nordpol zurückkehrt [3]. Der Fluss ist hier in einer

Mollweide-Projektion in ekliptischen Koordinaten gezeigt. „V1“ und „V2“ bezeichnen die Durchgänge der beiden Voyager-Sonden durch den Terminationschock.

Dr. Klaus Scherer, Institut für Theoretische Physik, Ruhr-Universität-Bochum, 44780 Bochum; Dr. Andreas Kopp, Dipl.-Phys. Oliver Sternal, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Leibnizstraße 11, 24118 Kiel

Grenzschicht zwischen Heliopause und Bugschock ist es dagegen zu kalt, um genügend neutrale Atome zu produzieren, und in der inneren Heliosphäre, innerhalb des Terminationsschocks, ist der Wirkungsquerschnitt des Ladungsaustausches wegen der supersonischen Geschwindigkeiten zu klein.

Die Produktionsrate der neu entstandenen schnellen Neutralatome (Energetic Neutral Atoms: ENAs) hängt wesentlich von den Plasmametern in der inneren heliosphärischen Grenzschicht ab, sodass ihre spektrale Winkelverteilung Rückschlüsse auf die Struktur und Beschaffenheit der äußeren Heliosphäre erlaubt [2]. Verkürzt gesagt: Ein starker Schock bedeutet eine „heiße“ Protonenverteilung und viele ENAs aus der Anströmrichtung, ein schwacher Schock eine „kalte“ Protonenverteilung und viele ENAs aus der Abströmrichtung.

Der im Oktober 2008 gestartete NASA-Satellit IBEX (Interstellar Boundary EXplorer), an dem auch deutsche Wissenschaftler beteiligt sind, hat nun erstmals die ENAs global vermessen. IBEX umkreist die Erde auf einer hochexzentrischen Bahn zwischen 15 000 und

300 000 km und dreht sich dabei um eine stets zur Sonne gerichtete Achse. Senkrecht dazu detektieren zwei entgegengesetzt zueinander angeordnete Instrumente energiereiche und neutrale Wasserstoff-, Helium- und Sauerstoffatome. Die Instrumente decken im Laufe eines halben Jahres den kompletten Himmel ab, abgesehen von kleinen Lücken, die infolge der Abschattung durch die Erdmagnetosphäre entstehen. Kürzlich wurden die ersten, überraschenden Ergebnisse in einer Reihe von Arbeiten veröffentlicht.

Modellrechnungen hatten ein Maximum der Intensität des spektralen ENA-Flusses in Anströmrichtung (Abb. 2) und entsprechend ein Minimum in der stromabwärtigen Richtung (rechtes und linkes Ende der Äquatorlinie) vorhergesagt [4]. Die IBEX-Daten zeigen stattdessen ein Band hoher Intensität, das asymmetrisch um die Anströmrichtung herum verteilt und darüber hinaus zum (ekliptischen) Nordpol hin verschoben ist, in höheren Breiten jedoch allmählich verschwindet (Abb. 2). Dieses Band ist in fast allen Energiebereichen von wenigen keV bis hinunter zu einigen hundert eV zu sehen. Erst bei noch kleineren Energien unter-

KURZGEFASST

■ Erkennungsdienst für Exoplaneten

Astronomen aus Deutschland und Kanada haben erstmals das Spektrum, also den „chemischen Fingerabdruck“, eines Exoplaneten direkt gemessen. Der Planet umkreist den 130 Lichtjahre entfernten Stern HR8799 und hat die zehnfache Jupitermasse. Bei der Messung am Very Large Telescope der ESO in Chile galt es, das Spektrum aus dem mehrere tausend Mal intensiveren Sternenlicht durch eine lange Belichtungszeit „herauszukitzeln“.

M. Janson et al., *The Astrophys. J. Lett.* **709**, erscheint am 1. 2. 2010

■ Dualität mit Neutronen

Wenn Licht an einer Glas-Vakuum-Grenze total reflektiert wird, erfährt der reflektierte Strahl eine winzige laterale Verschiebung. Ursache dieses Effekts, mit dem sich bereits Newton beschäftigt hat, ist das exponentiell gedämpfte Eindringen des Lichts in das Vakuum. Erst 1947 gelang es Fritz Goos und Hilda Hänchen in Hamburg, diesen später

nach ihnen benannten Effekt nachzuweisen. Gibt es einen analogen Effekt bei Materiewellen? Ja, lautet nun die Antwort von niederländischen und britischen Physikern, die an der Neutronenquelle ISIS die Reflexion von spinpolarisierten Neutronen an einer magnetisierten Oberfläche untersucht haben. Damit ist zugleich ein weiteres Beispiel für die Teilchen-Welle-Dualität der Quantenmechanik gefunden. V.-O. de Haan et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 010401 (2010)

■ Transistor aus einem Molekül

Ein einzelnes Molekül, mit Nanodrähten aus Gold kontaktiert, eignet sich als Transistor. Amerikanische und koreanische Wissenschaftler haben dies an Dithiol-Molekülen gezeigt. Ein elektrisches Feld, das an einem Gate anliegt, verschiebt die Energie der Molekülorbitale relativ zur Fermi-Energie von Gold und kann damit den Strom durch die organischen Moleküle steuern. H. Song et al., *Nature* **462**, 1039 (2009)

halb von 100 eV taucht das erwartete Verhalten auf [5].

Eine Erklärung für dieses unerwartete Ergebnis steht zurzeit noch aus, in ersten Überlegungen spielen die Magnetfelder im lokalen interstellaren Medium eine Rolle. Magnetfelder mit für Laborverhältnisse verschwindend geringen Feldstärken von wenigen Nano-Tesla könnten für eine Asymmetrie der Heliosphäre sorgen, da sie Bug-schock und Heliopause „verbiegen“. Allerdings bleibt noch unklar, wie das Band entsteht, das sich offenbar

dort befindet, wo das Magnetfeld senkrecht zur radialen Richtung steht [6]. Als eine Möglichkeit werden ENAs diskutiert, die in der äußeren Grenzschicht entstehen [7].

Bislang konnte kein Modell die IBEX-Beobachtungen zufriedenstellend erklären. Zudem deuten neuere Messungen eine mögliche zeitliche Variation des Bandes an. Diese Beobachtungsergebnisse fordern Theorie und Modellierung heraus. Daher bleibt zu hoffen, dass IBEX noch einige Jahre Himmelskarten aufnehmen und damit auch

zeitliche Variationen sichtbar machen kann.

Klaus Scherer, Andreas Kopp
und Oliver Sternal

- [1] E. C. Stone et al., *Nature* **454**, 71 (2008)
- [2] H.-J. Fahr, H. Fichtner und K. Scherer, *Reviews of Geophysics* **45**, 4003 (2007)
- [3] D. J. McComas et al. *Science* **326**, 959 (2009)
- [4] O. Sternal, H. Fichtner und K. Scherer, *Astron. Astroph.* **477**, 365 (2008)
- [5] E. Möbius et al., *Science* **326**, 969 (2009)
- [6] N. A. Schwadron et al. *Science* **326**, 966 (2009)
- [7] J. Heerikhuisen et al., *Astroph. J. Lett.* **708**, L126 (2010)

■ Ein Förderband für kalte Atome

Ein Bose-Einstein-Kondensat von Rubidium-Atomen lässt sich vollkommen kohärent in einem Ratschenpotential gerichtet bewegen.

Wie kann aus der ungeordneten Brownschen Bewegung von mikroskopischen Objekten, z. B. Zellen, ein gerichteter Transport entstehen? Diese insbesondere für die Biologie, aber möglicherweise auch für die Technik relevante Frage beantwortet die Physik mit dem Konzept der Brownschen Motoren [1]. Demnach lässt sich die ungeordnete Bewegung in räumlich periodischen Strukturen auf verblüffende Weise gleichrichten, obwohl im Mittel keine Kräfte, Temperaturgradienten oder Konzentrationsgefälle wirken. Dies setzt allerdings voraus, dass sich die zufälligen Fluktuationen mit makroskopischen Reibungs-

kräften im dynamischen Gleichgewicht befinden. Aber lässt sich eine gerichtete Bewegung mit einer endlichen, mittleren Geschwindigkeit auch ohne Reibung erzielen, wenn sämtliche Anfangsgeschwindigkeiten im Mittel keine Vorzugsrichtung aufweisen? Kräfte führen gewöhnlich zu einer beschleunigten Bewegung, die entweder räumlich eingeschränkt ist oder unbegrenzt anwächst. So führt das Anlegen einer konstanten Kraft in einem periodischen Potential mit genügend großer Anfangsenergie zu einer unbegrenzt beschleunigten Bewegung über viele Potentialberge hinweg. An dieser Situation ändert auch die Quantenphysik überhaupt

nichts: Eine konstante Kraft führt nun zu sog. Bloch-Oszillationen oder in Gegenwart von quantenmechanischen Interband-Tunnelvorgängen wiederum zu einer unbegrenzten Beschleunigung.

Daher ist es zunächst sehr erstaunlich, dass sich auch ohne Reibung, also im Rahmen einer Hamiltonschen Dynamik, das Ziel einer mittleren gerichteten Bewegung verwirklichen lässt [2]. Man muss dabei schon auf pfiffige Ideen zurückgreifen. Wie schon bei den Brownschen Motoren bedarf es dazu der Brechung von Symmetrien, insbesondere der Zeitumkehrsymmetrie, da sich ansonsten Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen

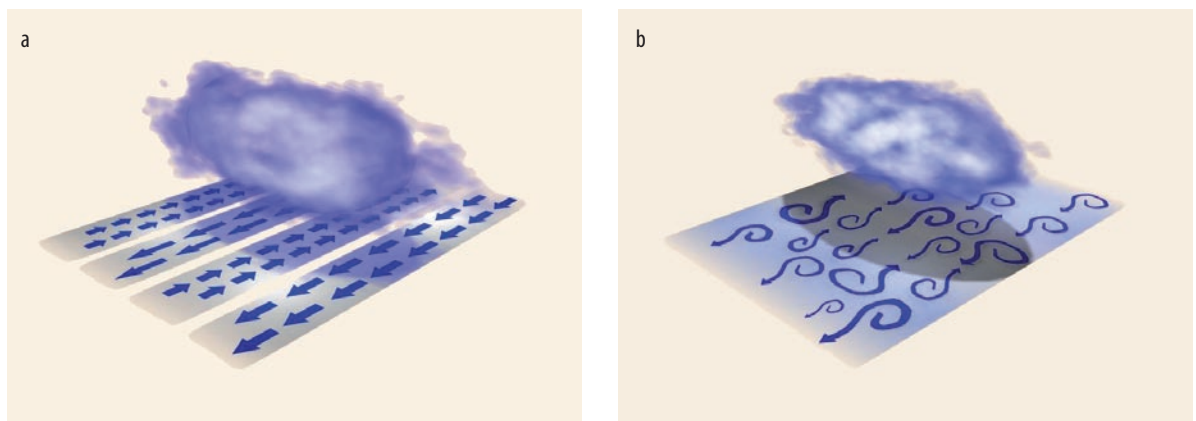


Abb. 1 a) Bei der Hamiltonschen Quantenrutsche setzt sich die gerichtete Bewegung einer Wolke aus Bose-Einstein-kondensierten Rubidium-Atomen

zusammen aus gewichteten, transportierenden Floquet-Zuständen mit jeweils unterschiedlichen mittleren Geschwindigkeiten, die damit ein Quanten-Förder-

band für kalte Atome nachahmen [3, 4]. b) Bei der klassisch chaotischen Ratsche übernimmt eine chaotische Strömung die Rolle der Floquet-Zustände [2].