

Durchbruch auf ganzer Linie

Wenn sich Magnetfeldlinien in Plasmen reorganisieren, wird magnetische Energie in Teilchenenergie überführt. Beobachtungen des Sonnenwinds haben nun ergeben, dass sich dieses Phänomen sehr viel weiter ausdehnen kann als bisher vermutet.

Die Rekonnexion magnetischer Felder ist ein faszinierendes und rätselhaftes Phänomen, das in ionisierten Gasen (Plasmen) auftritt. Sie transformiert Magnetfeldkonfigurationen und konvertiert die gespeicherte Feldenergie in kinetische Energie der geladenen Teilchen des Plasmas. Direkte und indirekte Beweise für die Existenz dieses Prozesses kommen aus unterschiedlichsten Gebieten, von den explosiven Ausbrüchen in der Sonnenatmosphäre und deren Auswirkungen auf den Sonnenwind über die Plasma-Jets der Erdmagnetosphäre bis zu den katastrophalen Zusammenbrüchen in Plasmafusionsmaschinen. Der Sonnenwind ist die ständig von der Sonne mit hoher Geschwindigkeit (ca. 400 km s^{-1}), aber geringer Dichte (ca. 5 cm^{-3}) ausgesandte Plasmaströmung, die das gesamte Sonnensystem erfüllt und zur Ausbildung der Magnetosphären vieler Planeten führt. Kürzlich präsentierte ein internationales Wissenschaftlerteam Beobachtungen, die dazu beitragen, die räumlichen und zeitlichen Skalen der Rekonnexion im Sonnenwind zu klären [1].

Plasmen, die im Weltraum im Wesentlichen aus Protonen und Elektronen bestehen, sind gewöhn-

lich von Magnetfeldern durchdrungen. Dabei verhält sich das Magnetfeld in der Regel so, als sei es in das Plasma „eingefroren“: Die Teilchen des Plasmas verleihen den Magnetfeldlinien eine physikalische Identität, indem sie um die Feldlinien gyrieren. Das bedeutet, dass eine Feldlinie – wie Spaghetti beim Umrühren im Topf – immer dieselben Teilchen miteinander verbindet, auch wenn sie ständig ihre Form und Position verändert (Abb. a).

Was aber passiert, wenn aufgrund der Bewegungen im Plasma zwei Magnetfeldlinien zusammenstoßen, die in entgegengesetzte Richtung zeigen? Im Bild des Eingefrorenenseins würden alle Teilchen auf ihren jeweiligen Feldlinien bleiben, unabhängig davon, wie stark man diese zusammendrückt. Dies ist aber nur eine Näherung, und unter – im Moment noch wenig verstandenen – Umständen kann es zu einem „Schlupf“ zwischen Feldlinien und Plasma kommen. Die Feldlinien können dann durchbrechen und sich an einem „X-Punkt“ über Kreuz neu verbinden (Abb. b). Magnetfelder verhalten sich in gewissem Sinn wie Gummibänder. Die nach der Verbindung stark gekrümmten Feldlinien möchten sich entspannen und agieren deshalb wie eine Steinschleuder: Sie übertragen so ihre gespeicherte Energie auf die Teilchen des Plasmas, das dann mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen wird. Dies ist die Quintessenz der magnetischen Rekonnexion [2].

Wenn Feldlinien, die in benachbarten Schichten liegen, rekonnexionieren, wird aus dem einzelnen X-

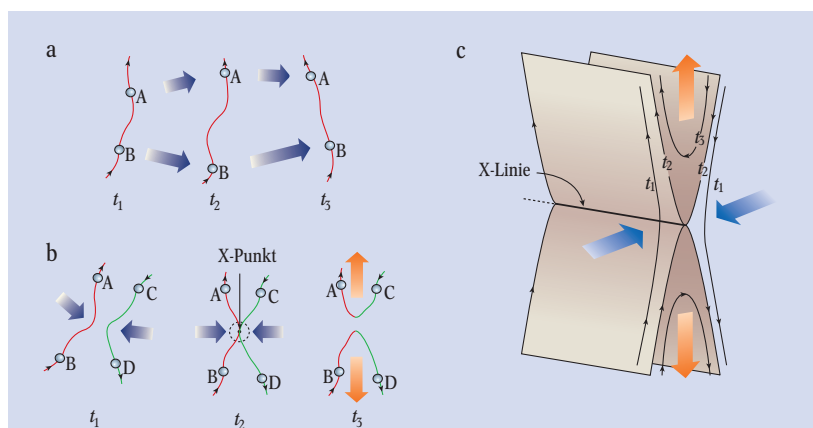
Punkt eine ganze X-Linie (Abb. c). Genau das passiert, wenn der Sonnenwind, der das Magnetfeld der Sonne in den interplanetaren Raum transportiert, auf das Erdmagnetfeld trifft. Die Bedingung des „Eingefrorenenseins“ des Magnetfelds würde dann verhindern, dass der Sonnenwind in das Erdmagnetfeld eindringen kann. Er könnte dann nur um dieses magnetische Hindernis herumströmen – wie ein Fluss um einen Brückenpfeiler, unter Hinterlassung eines Hohlraumes, der Erdmagnetosphäre. Aber direkte und indirekte Beobachtungen zeigen, dass diese Bedingung an der Magnetopause – der Oberfläche, die den Sonnenwind vom Erdmagnetfeld trennt – verletzt wird [3]. Dadurch können sich terrestrische Magnetfeldlinien direkt mit der Sonne verbinden, sodass Sonnenwindplasma entlang der Feldlinien in die Erdmagnetosphäre eindringen kann. So wird der Magnetosphäre nicht nur Masse, sondern auch Energie zugeführt. Je nach Rekonnexionsrate sind das bis zu 10 kg bzw. 800 MJ pro Sekunde, entsprechend 800 MW . Diese Energie wird zunächst gespeichert und dann in oft explosiven Ereignissen entladen, mit vielen signifikanten Konsequenzen, z. B. den spektakulären Polarlichtern in der oberen Atmosphäre, Störungen im Funkverkehr oder sogar Ungenauigkeiten in der Ortung durch GPS.

Aber kann Rekonnexion auch im Sonnenwind selbst stattfinden? Das hätte zwar keine Auswirkungen auf die Erdumgebung, könnte aber Aufschlüsse über den Prozess selbst liefern. Wie wir gesehen haben, setzt Rekonnexion benachbarte Magnetfelder mit ungefähr entgegen gesetzter Richtung voraus, wie sie im Sonnenwind auftreten können: Da sich die Bedingungen auf der Sonnenoberfläche räumlich und zeitlich ändern, variieren auch Dichte und Geschwindigkeit des Sonnenwinds oft abrupt. Damit einher gehen plötzliche Drehungen des vom Sonnenwind mitgeschleppten Magnetfeldes. Ohne Verletzung des „Eingefrorenenseins“ könnten sich die Plasmen auf den beiden Seiten eines solchen Übergangs nie miteinander vermischen. Tritt aber eine solche Verletzung auf, dann notwendigerweise auch magnetische Rekonnexion. Ein im Sonnenwind positionierter Satellit würde in diesem Fall nicht nur einfach den Übergang von einem auf den anderen Plasma- und Magnetfeldzustand

#) Mehr Informationen finden sich auf <http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/stereo/stereo.htm> bzw. <http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/mms/mms.htm>

*) Dieser Artikel ist die übersetzte und bearbeitete Fassung eines zuerst in *Nature* 439, 144 (2006) erschienenen Artikels.

Dr. Götz Paschmann,
Max-Planck-Institut
für extraterrestrische
Physik, Postfach
1312, 85741 Garching



► a) Magnetfeldlinien sind in die (durch Pfeile gekennzeichnete) Strömung des Plasmas „eingefroren“, sodass zwei geladene Teilchen, A und B, die zur Zeit t_1 auf einer Feldlinie liegen, dies auch zu allen späteren Zeiten bleiben. ► b) Wenn sich zwei entgegen gerichtete Feldlinien aufeinander zu bewegen (t_1) und sich berühren (t_2), dann brechen sie auf und verbinden sich

(„rekonnexionieren“) am X-Punkt (t_3). Die stark gekrümmten Feldlinien schleudern das Plasma mit sehr hoher Geschwindigkeit aus dem Gebiet. ► c) Perspektivische Ansicht von Magnetfeldlinien, die entlang einer X-Linie rekonnexionieren (blaue Pfeile: Zufluss, orange Pfeile: Ausfluss des Plasmas). Die Zeiten t_1 bis t_3 beziehen sich auf die gleichen Phasen wie in b.

registrieren, sondern auch das kurzzeitige Auftreten der für Rekonnexion charakteristischen schnellen Plasmaströmungen. Genau dies hat, wie kürzlich berichtet, der Advanced Composition Explorer (ACE) der NASA beobachtet [4].

Aus den Messungen mit einem einzelnen Satelliten wie ACE lassen sich jedoch keine Schlüsse über die Länge der X-Linie ziehen, entlang welcher Rekonnexion stattgefunden haben müsste. Ebenso wenig war klar, ob Rekonnexion länger aktiv war als die wenigen Minuten, die es dauerte, bis die Rekonnexionschicht mit der Geschwindigkeit des Sonnenwindes über den Satelliten hinweggefegt war. Phan et al. sind nun genau diesen Fragen nachgegangen, indem sie eine günstige Konstellation von drei weit voneinander entfernten Satelliten ausnutzten – die NASA-Satelliten ACE und Wind sowie einen der vier Cluster-Satelliten der ESA –, die den Forschern eine große Basislinie für ihre Messungen gab [1]. Am 2. Februar 2002 registrierten die drei Satelliten den Durchgang einer Rekonnexionschicht mit im Wesentlichen gleichen Eigenschaften, insbesondere gleichen Plasma- und Magnetfeldänderungen und Plasmaströmungen.

Die beobachteten Plasma-geschwindigkeiten stimmten quantitativ mit den theoretischen Vorhersagen überein, die sich aus den gemessenen Magnetfeldern und Plasmadichten ergeben. Mittels einer einfachen geometrischen Betrachtung bestimmten die Autoren zunächst die Orientierung der

X-Linie. Aus den Positionen der Satelliten konnten sie dann direkt ablesen, dass die Länge der X-Linie mindestens 2,5 Millionen Kilometer, oder etwa 390-mal den Erdradius, betragen haben musste. Aus dem zeitlichen Abstand der Durchgänge bei den Satelliten ergab sich auch sofort, dass Rekonnexion nicht explosiv ablief, sondern konstant während mindestens 2,5 Stunden.

Diese Beobachtungen werden die heftige Debatte über die Frage, was Rekonnexion eigentlich bedeutet bzw. bewirken kann, neu anfachen. Mit den geplanten NASA-Missionen^{*)} STEREO (Start 2006) und MMS (2013) wird sich die Rekonnexion einerseits auf viel größeren Distanzen, andererseits ganz nahe an der X-Linie studieren lassen. Die Aussichten, endlich die Natur magnetischer Rekonnexion, die damit einhergehende Kopplung kleinräumiger mit großräumigen Phänomenen und ihre Rolle in verschiedenen kosmischen Situationen zu verstehen, sind somit gut.^{*)}

GÖTZ PASCHMANN

- [1] T. D. Phan et al., *Nature* **439**, 175 (2006)
- [2] J. W. Dungey, *Phys. Rev. Lett.* **6**, 47 (1961); H. E. Petschek, *The Physics of Solar Flares*, NASA SP-50, 425 (1964); B. U. Ö. Sonnerup, *J. Plasma Phys.* **4**, 161 (1970)
- [3] G. Paschmann et al., *Nature* **282**, 243 (1979); D. G. Sibeck et al., *Space Sci. Rev.* **88**, 207 (1999); T. D. Phan et al. *Space Sci. Rev.* **118**, 367 (2005)
- [4] J. T. Gosling et al., *J. Geophys. Res.* **110**, A01107 (2005); *Geophys. Res. Lett.* **32**, L05105 (2005)

■ Frischer Wind für die Dünenforschung

Neue Experimente in der Wüste und im Windkanal werfen etablierte Theorien über den Haufen.

Wer sich auf Expedition durch eine der Wüsten dieser Erde begibt, wird fasziniert sein von den elegant geschwungenen Formen der allgegenwärtigen Sanddünen [1]. Weitere markante Strukturen – auf viel kleinerer Längenskala – sind die überall zu findenden Rippeln,



die durch die ständig über die Sandoberfläche wehenden Winde entstehen (Abb. 1). Damit verwandt sind die Rippeln im Sand einer Brandungswelle. Bis heute ist nicht im Detail verstanden, wie sich die Sandmassen unter dem Einfluss von Wind- oder Wasserströmungen verformen und bewegen, eine wichtige Frage sowohl für die Wüstenländer als auch für die küstennahe Schifffahrt. Nun hat sich eine französische Forschergruppe der bisher

Abb. 1: Mit Rippeln verzierte Sanddüne im Great Sand Dunes National Monument, Colorado, USA (Foto: C. Krülle)