

HELIOPHYSIK

Die Sonne als Teilchenbeschleuniger

In der Heliosphäre lassen sich Erzeugung, Beschleunigung und Ausbreitung von hochenergetischen Teilchen in situ untersuchen.

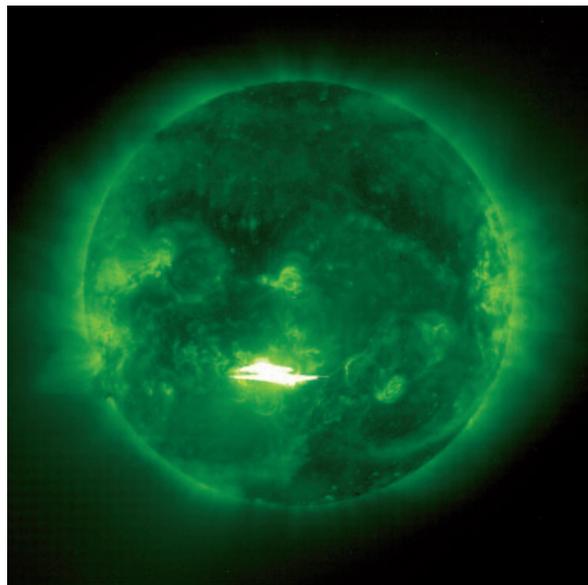
Bernd Heber, Wolfgang Dröge, Berndt Klecker und Gottfried Mann

Fast hundert Jahre nach der Entdeckung der kosmischen Höhenstrahlung sind die Mechanismen der Teilchenbeschleunigung heute im Prinzip bekannt. Zahlreiche Missionen zur Erforschung des „Plasmalabors“ der Heliosphäre haben dazu entscheidend beigetragen, aber auch neue Fragen aufgeworfen. Die Ergebnisse lassen sich nun auf andere astrophysikalische Objekte übertragen, die sich einer direkten Untersuchung entziehen.

Im Jahr 1912 unternahm Victor Hess einen Ballonflug, um das Höhenprofil in der Atmosphäre der wenige Jahre zuvor entdeckten Radioaktivität zu messen. Die Zählrate nahm zunächst wie erwartet ab, um dann jedoch unerwartet anzusteigen. Offensichtlich gab es nicht nur eine natürliche Strahlungskomponente aus dem Erdboden, sondern auch eine aus den oberen Atmosphärenschichten, die „Höhenstrahlung“ genannt wurde. Diese hatte, so erkannte man später, ihren eigentlichen Ursprung im Weltraum.

Der kosmische Strahlungsfluss, den man mit Raumsonden außerhalb der Erdatmosphäre misst, ist nicht konstant, sondern variiert auf unterschiedlichen Zeitskalen (siehe Artikel von Scherer und Fichtner in diesem Heft). Dabei zeigt sich, dass die Intensität von Teilchen geringer Energie (Protonen in Abb. 1) der Sonnenaktivität folgt. Bei energiereichen Teilchen (Elektronen und Alphateilchen in Abb. 1) sind die Verhältnisse jedoch umgekehrt: In Phasen hoher Sonnenaktivität ist ihre Intensität niedrig, bei niedriger Sonnenaktivität jedoch hoch. Diese Antikorrelation rührt daher, dass die energiereicheren Teilchen in der Galaxis außerhalb der Heliosphäre entstanden sind und diese durchqueren müssen, um zur Erde zu gelangen. In Phasen hoher Sonnenaktivität wird die Ausbreitung im interplanetaren Raum aber durch die zunehmende Turbulenz im Magnetfeld der Heliosphäre dergestalt modifiziert, dass weniger Teilchen die Erde erreichen [1]. Im Gegensatz dazu werden Protonen durch die Aktivität in der Korona auf eine Energie von einigen 10 MeV beschleunigt, sodass sich eine Korrelation zwischen deren Intensität und der Sonnenaktivität beobachten lässt.

Vergleichen wir schematisch die Werdegänge eines Teilchens aus der Galaxis bzw. der Heliosphäre von der Quelle zum Beobachter miteinander, so finden sich die folgenden Parallelen: Die Quelle energiereicher Teilchen kann unter anderem die Korona von Sternen oder



SOHO

Diese Aufnahme der SOHO-Mission vom 28. Oktober 2003 zeigt die Korona der Sonne im extrem ultravioletten Licht (19,5 nm). Aufgrund einer plötzlichen Eruption, eines sog. Flares, leuchtet das 1,5 Millionen Kelvin heiße Plasma auf.

der Sonne sein. Einige Teilchen werden beschleunigt und breiten sich im interstellaren und interplanetaren Raum aus. Enrico Fermi zeigte, dass ein an einer magnetisierten Stoßwelle gespiegeltes Teilchen – abhängig von der Relativbewegung zwischen beiden Stoßpartnern – entweder Energie gewinnen oder verlieren kann. Bei astrophysikalischen Stoßwellen wird es im Mittel Energie gewinnen. Modellrechnungen zeigen, dass die Energie der galaktischen kosmischen Strahlung eine Größe von bis zu 10^{15} eV oder mehr erreichen kann. Das resultierende Energiespektrum ist ein (gebrochenes) Potenzgesetz.

KOMPAKT

- Stoßwellen spielen eine entscheidende Rolle bei der Beschleunigung von Teilchen im Sonnensystem.
- Sie entstehen im Zusammenhang mit gewaltigen Eruptionen auf der Sonne (*Flares*) bzw. beim Abbremsen des Sonnenwinds im interplanetaren Raum.
- Neben der Beschleunigung von Ionen und Elektronen sind Flares auch für die Emission von Gamma- und Radiostrahlung verantwortlich.
- Die Teilchen breiten sich diffusiv im turbulenten interplanetaren Magnetfeld aus.

Prof. Dr. Bernd Heber, Prof. Dr. Wolfgang Dröge, Institut für Experimentelle und Angewandte Physik, Universität Kiel, Leibnizstr. 11, 24098 Kiel; Dr. Berndt Klecker, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Postfach 1312, 85741 Garching; Prof. Dr. Gottfried Mann, Astrophysikalisches Institut Potsdam, An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam

Im Unterschied zur Untersuchung der galaktischen kosmischen Strahlung in der Astroteilchenphysik können wir in der Heliosphäre einige Quellen sowie Beschleunigungs- und Ausbreitungsprozesse in-situ mit Raumfahrzeugen analysieren und somit Beiträge zu grundsätzlichen Fragen der Astroteilchen- und Plasmaphysik leisten:

- Wo und wie wird die kosmische Strahlung auf die teilweise gewaltigen Energien beschleunigt?
- Wie werden unsere Messungen nahe der Erde durch die Ausbreitung der Strahlung durch den interplanetaren und interstellaren Raum modifiziert?
- Wie beeinflusst die Plasmaturbulenz die Ausbreitung geladener Teilchen und wie können wir aus der Analyse von Teilchendaten Aussagen über die Turbulenz gewinnen?

Stoßwellen liefern die Energie

Bewegt sich ein Objekt in einem Gas schneller als die Schallgeschwindigkeit – das ist die Geschwindigkeit, mit der sich Störungen im Gas ausbreiten können –, so entsteht vor diesem Objekt eine Stoßwelle, an der sich die Dichte, die Temperatur und der Druck abrupt ändern. Bekanntestes Beispiel auf der Erde ist der „Überschall-Knall“ oder Mach-Kegel eines Flugzeugs, das mit Überschallgeschwindigkeit fliegt. Ist das Gas ionisiert, also ein Plasma, und führt ein Magnetfeld mit sich, so ist neben der Schallgeschwindigkeit die charakteristische Geschwindigkeit für die Ausbreitung magnetischer Störungen oder Wellen (Alfvén-Geschwindigkeit) wichtig. An einer Stoßwelle im Plasma ändern sich dementsprechend sprunghaft die Geschwindigkeit, Dichte und Temperatur des Plasmas sowie die Stärke des Magnetfeldes [2].

Analog zum Mach-Kegel in der Atmosphäre, den ein Flugzeug erzeugt, können Stoßwellen im Sonnenwind z. B. durch koronale Massenauswürfe (CME, coronal mass ejection) entstehen. Dabei wird von der Sonne aus eine Masse von ca. 10^{13} kg mit Geschwindig-

keiten von bis zu 2000 km/s in die Korona oder den interplanetaren Raum injiziert. Stoßwellen entstehen auch immer dann, wenn der Sonnenwind gegen ein Hindernis wie die Magnetosphäre der Erde strömt. Die aus dieser Wechselwirkung resultierende Stoßwelle heißt Bugstoßwelle der Erde (vgl. Artikel von Büchner et al. in diesem Heft).

Ionen und Elektronen bewegen sich auf helikalen Bahnen entlang des Magnetfeldes (Abb. 2). Werden sie bei ihrer Ausbreitung an Magnetfeldfluktuationen gestreut, sodass sie die Stoßwelle mehrfach durchlaufen, so nehmen sie bei jeder Durchquerung einen Impuls $\Delta p \sim \Delta U/v$ auf, wobei v die Teilchengeschwindigkeit und $\Delta U = U_1 - U_2$ der Unterschied der Sonnenwindgeschwindigkeit vor (U_2) und hinter (U_1) der Stoßwelle sind (Fermi-Prozess). Dies führt im idealisierten Fall unendlich langer Beschleunigungszeit sowie einer planaren und unendlich ausgedehnten Stoßwelle für $\Delta U \ll v$ zu einem Potenzspektrum der Verteilungsfunktion $h(p) \propto p^{-\gamma}$ für den Impuls p der beschleunigten Teilchen. Dabei hängt $\gamma = 3r/(r-1)$ nur vom Kompressionsverhältnis $r = U_1/U_2$ der Stoßwelle im lokalen Koordinatensystem, aber nicht von den Teilcheneigenschaften ab [3]. Im Falle der koronalen und interplanetaren Stoßwellen ist die Quelle der beschleunigten Teilchen das Hintergrundplasma (der Sonnenwind), von dem ein kleiner Teil in den Fermi-Prozess injiziert wird und dabei durch Wechselwirkung mit dem Magnetfeld Wellen anregt, die ihrerseits die Teilchen streuen. Die für Stoßwellenbeschleunigung typische Signatur ist damit ein Anstieg der Intensität der Teilchen über einen weiten Energiebereich, die zumindest bei niedrigen Energien durch ein Potenzgesetz in Energie oder Geschwindigkeit angenähert werden kann, sowie ein Anstieg der Wellenaktivität nahe an der Stoßwelle. Bei hohen Energien (> 10 MeV pro Nukleon) fallen die Spektren oft exponentiell ab, da die idealisierten Bedingungen in der Regel nicht erfüllt sind. In zunehmender Entfernung von der Stoßwelle überlagert sich dem Prozess der Beschleunigung die Ausbreitung der Teilchen in der Korona und im interplanetaren Raum.

1) Bei der Analyse der Teilchenausbreitung in elektromagnetischen Feldern wird statt der Energie häufig die „Steifigkeit“ $R = pc/q$ benutzt, da Teilchen gleicher Steifigkeit gleiche Larmorradien besitzen. Dabei ist p der Impuls in GeV/c und q die Ladungszahl des betrachteten Teilchens. In Abb. 1 gilt für die Elektronen bzw. Alphateilchen $R = 1,2$ GV, für die Protonen $R \sim 0,24$ GV.

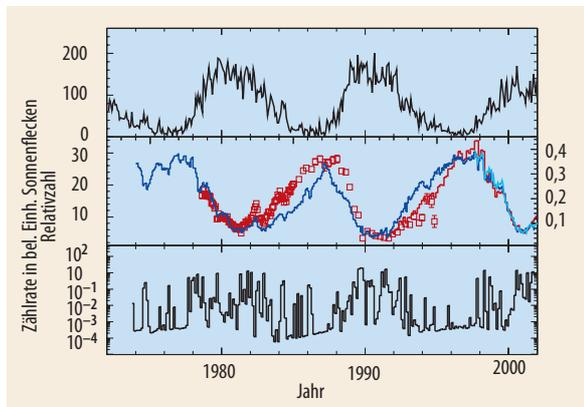


Abb. 1 Die Monatsmittelwerte der Sonnenfleckenzahl (oben) sind antikorreliert mit der Zählrate von hochenergetischen Elektronen (Mitte, rot) und Alphateilchen (blau) und korreliert mit der Zählrate niederenergetischer Protonen (unten).¹⁾ Die verschiedenen Symbole bzw. Farben entsprechen verschiedenen Instrumenten.

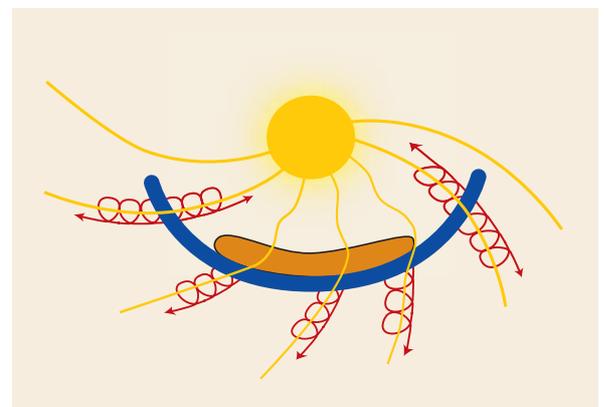


Abb. 2 Ein koronaler Massenauswurf (CME, orange) breitet sich im interplanetaren Raum aus und treibt eine Stoßwelle an (blau). Durchlaufen Ionen und Elektronen auf ihrer helikalen Bahn längs der Magnetfeldlinien (gelb) die Stoßwelle, so werden sie dabei beschleunigt.

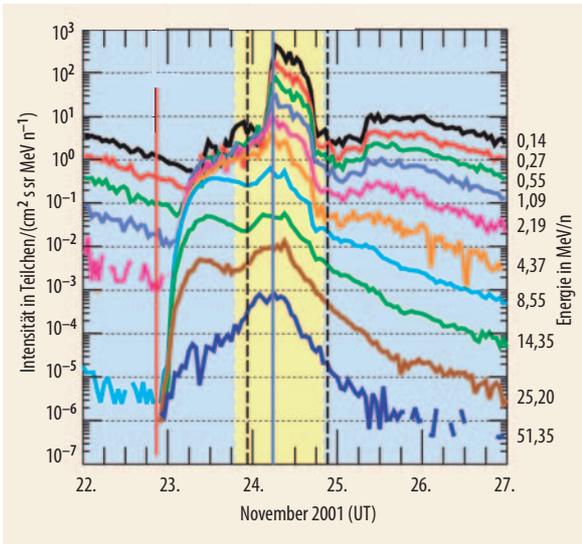


Abb. 3 Am 22. November 2001 (rote Linie) wurde auf der Sonnenscheibe bei 15° S und 34° W ein Flare beobachtet. Die erzeugte Stoßwelle (blaue Linie) überquerte den Satelliten ACE wenige Tage später und führte zu einem steilen Intensitätsanstieg der hier beispielhaft betrachteten Sauerstoffionen über einen weiten Energiebereich [4] (vgl. Text).

Mithilfe des Satelliten Advanced Composition Explorer (ACE) ist es z. B. im November 2001 gelungen, die typische Signatur für die Beschleunigung von Ionen an einer Stoßwelle zu detektieren (Abb. 3). Die Stoßwelle wurde dabei durch einen CME angetrieben, dessen Ursache wiederum ein sog. Flare-Ereignis am 22. November 2001 war. Diese plötzlichen Eruptionen dauern nur wenige Minuten bis Stunden und setzen eine gewaltige Energie frei.

Nach einem Flare-Ereignis an der Sonne (senkrechte rote Linie) steigen die Intensitäten zunächst stark an und erreichen nach ca. 12 bis 24 Stunden, je nach Energie, ein erstes Maximum. Dieser Anstieg wird durch die koronale Stoßwelle hervorgerufen, da die an der Stoßwelle beschleunigten Teilchen den Satelliten infolge ihrer höheren Geschwindigkeit wesentlich früher erreichen als die Stoßwelle selbst. Korreliert mit dem Eintreffen der interplanetaren Stoßwelle am Satelliten (blaue Linie) steigen die Teilchenintensitäten infolge von lokaler Beschleunigung im interplanetaren Raum noch einmal stark an. Das differentielle Energiespektrum der lokal beschleunigten Sauerstoffionen (gelb unterlegter Zeitraum) lässt sich in diesem Ereignis z. B. durch $J(E) \propto E^{-1.1} \exp(-E/3,5)$ annähern, wobei E die Energie in Einheiten von MeV/Nukleon ist [4]. Somit erlaubt das Plasmalabor Heliosphäre mit solchen in-situ Beobachtungen einen direkten Rückschluss auf fundamentale Plasmaprozesse.

Am Rand der Heliosphäre

Im Unterschied zu den propagierenden interplanetaren Stoßwellen ist der Terminationsschock eine quasi-stationäre Stoßwelle. Gemäß der derzeit favorisierten Modellvorstellung werden daran einfach geladene vorbeschleunigte Ionen durch die Fermi-Beschleunigung

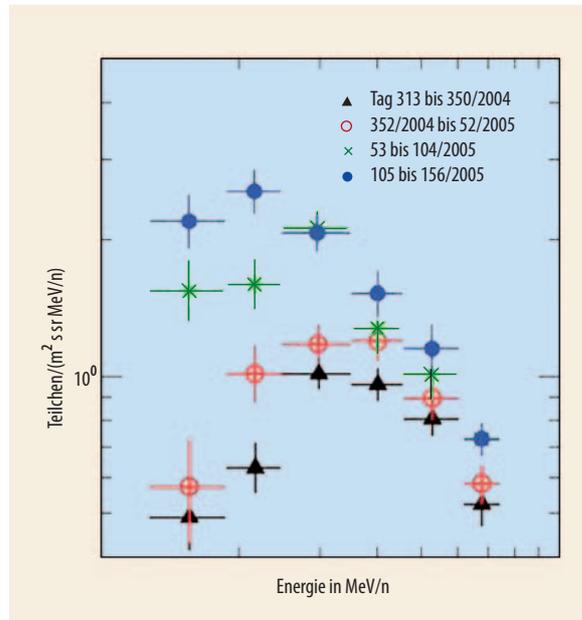


Abb. 4 Der von Voyager 1 gemessene Teilchenfluss an Heliumionen ist auch nach dem Durchfliegen des Terminationsschocks am 16. Dezember 2004 (Tag 351) weiter angestiegen.

auf Energien bis zu mehreren 100 MeV beschleunigt. Auch hier ergibt sich beim resultierenden Energiespektrum typischerweise ein Potenzgesetz, dessen Verlauf wesentlich durch das Kompressionsverhältnis des Terminationsschocks bestimmt ist. Infolge dieser zusätzlichen, lokalen Komponente zeigen verschiedene Elemente der kosmischen Strahlung, z. B. Wasserstoff, Helium oder Sauerstoff, ein zusätzliches Maximum im Energiespektrum unterhalb von ca. 100 MeV. Da diese Maxima zunächst nicht erwartet waren, wurde die Bezeichnung anomale (Komponente der) kosmische(n) Strahlung gewählt. Ihre Modellierung erlaubt es, viel über die Heliosphäre, die Turbulenz und den Transport energiereicher, geladener Teilchen zu lernen.

Am 16. Dezember 2004 hat die Raumsonde Voyager 1 den Terminationsschock durchflogen. Selbst für eine Dicke dieses Bereichs von mehreren 10^5 km dauert die Durchquerung bei Voyagers derzeitiger Geschwindigkeit von ca. 17 km/s nur einige Stunden. Der Zeitpunkt lässt sich genau bestimmen, obwohl das Instrument zur Messung der Plasmaparameter nicht mehr funktioniert. Da beim Schock jedoch das Gas komprimiert wird, steigt auch das im Plasma „eingefrorene“ Magnetfeld sprunghaft an – und dieser Anstieg wurde gemessen.

Vor dem Durchflug waren alle Messungen mit der oben skizzierten Modellvorstellung verträglich, und aufgrund des Zusammenhangs der anomalen kosmischen Strahlung mit der Plasmaturbulenz und den Schock-eigenschaften gelang es, letztere bereits sehr viel früher indirekt abzuschätzen.

Nach dem Durchflug sind aber Zweifel an einem zu einfachen Szenario angebracht: Zwar wurde mit Hilfe des einzigen noch intakten Instrumentes, welches direkt Auskunft über das Plasma gibt, nämlich dem Magnetometer, das Kompressionsverhältnis am Schock zu etwa $r=3$ bestätigt. In der Durchflugsregion wurden jedoch keine Hinweise auf eine Teilchenbeschleunigung

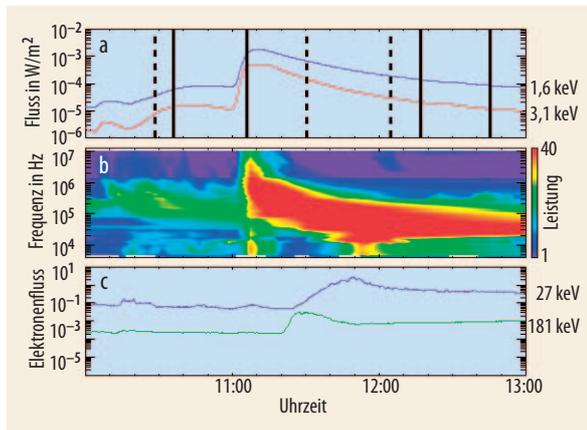


Abb. 5 a) Während des Flares am 28. Oktober 2003 stieg der vom Satelliten GOES gemessene integrale Röntgenfluss der Sonne bei 1,6 keV und 3,1 keV stark an. b) Radiospektrum des Instruments WAVES auf dem Raumfahrzeug WIND im kHz- und MHz-Bereich. Die Intensität ist farbkodiert. c) Zeitlicher Verlauf der Elektronenflüsse im Bereich von 27 keV (violett) und 181 keV (grün), wie sie vom 3D-Plasmainstrument auf WIND gemessen wurden.

nigung gefunden: Wenn man sich vorstellt, dass die Stoßwelle in **Abb. 3** stationär ist und von einer Raumsonde durchquert wird, dann müsste der Teilchenfluss nach der Durchquerung abfallen. Stattdessen steigt der Teilchenfluss unerwartet weiter an (**Abb. 4**).

Auch gibt es indirekte Anzeichen, dass die Sonnenwindgeschwindigkeit jenseits des Schocks mit weniger als 50 km/s um etwa die Hälfte niedriger als erwartet ist. Es ist derzeit zu früh, endgültige Schlüsse zu ziehen oder gar das vorherrschende Paradigma der Erzeugung der anomalen kosmischen Strahlung zu verwerfen. Es scheint lediglich klarer zu werden, dass der Terminationsschock nicht in Ruhe ist, sondern um eine Gleichgewichtslage oszilliert, und dass die Plasmabedingungen nicht überall an der Schockfläche eine effiziente Teilchenbeschleunigung erlauben. Während Voyager 1 tiefer in den Randbereich der Heliosphäre vordringen und schließlich auch Voyager 2 mit intakten Plasma-

instrumenten den Schock durchfliegen wird, stehen uns also spannende Jahre bevor. Mit den zukünftigen Messungen werden wir unser Verständnis der Randbereiche unseres Sonnensystems wesentlich vertiefen.

Explosive Ereignisse

Die Aktivität der Sonne macht sich nicht nur durch ihre 11- und 22-Jahres-Zyklen bemerkbar, sondern auch durch die bereits erwähnten Flares. Bei diesen explosiven Ereignissen wird eine große Leistung (typisch 10^{22} W) über wenige Minuten bis Stunden freigesetzt. Dies manifestiert sich in einer stark erhöhten Emission von elektromagnetischer Strahlung (vom Radio über den sichtbaren bis hin zum γ -Bereich) und energiereichen Teilchen (wie Elektronen, Protonen, schweren Ionen und Neutronen) sowie der Heizung des Plasmas der Korona bis zu $40 \cdot 10^6$ K (entsprechend einer thermischen Energie von 0,9 keV) und Massenbewegungen in der Korona wie z. B. koronalen Massenauswürfen (**Abb. 2**). Da sich ähnliche Prozesse in anderen Sternatmosphären oder in aktiven galaktischen Kernen abspielen, sind sie von generellem Interesse für die Astrophysik. Sie lassen sich aber nur auf unserer Sonne detailliert untersuchen.

Als Beispiel sei nun der Flare vom 28. Oktober 2003 betrachtet, einer der stärksten jemals beobachteten (**Abb. auf S. 43**). Der gemessene Fluss der Röntgenstrahlung stieg gegen 11:00 Uhr UT stark an und schwächte sich erst nach Stunden wieder ab (**Abb. 5a**). Allgemein wird angenommen, dass die Röntgenstrahlung als Bremsstrahlung von energiereichen Elektronen entsteht, wenn diese in der Sonnenatmosphäre Coulomb-Stöße mit Elektronen und Protonen ausführen [5]. Bemerkenswert an diesem Flare war, dass der Satellit INTEGRAL in der ersten Minute einen stark erhöhten Fluss von γ -Strahlung bis zu Energien von 10 MeV detektiert hat (**Abb. 6**). Demnach wurden beim Flare Elektronen mit Energien bis zu mindestens 10 MeV, d. h. deutlich über der thermischen Energie von etwa 1 keV, erzeugt. Diese Elektronen sind nicht nur für die Röntgen- und γ -Emission verantwortlich, sondern auch für die Radiostrahlung (**Abb. 5b** und **6**), da sie das Plasma der Sonnenkorona zum Schwingen anregen. Dadurch entstehen Langmuir-Wellen, hochfrequente elektrostatische Plasmawellen (vgl. Infokasten dazu im Artikel von Büchner in diesem Heft), deren Frequenz ν der Elektronenplasmafrequenz $\nu_{pe} = (e^2 N_e / \epsilon_0 m_e)^{1/2} / 2\pi$ entspricht. Hierin sind e die Elementarladung, N_e die Elektronenzahldichte, ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante und m_e die Elektronenmasse. Bei typischen Elektronenzahldichten von $10^{14} - 10^{16} \text{ m}^{-3}$ in der Korona liegen diese Frequenzen im MHz-Bereich [6] (**Abb. 5b**). Da die Frequenz der emittierten Radiowellen von der Elektronendichte abhängt, werden in einer gravitativ geschichteten Sonnenatmosphäre die hohen Frequenzen in der unteren und die niedrigen Frequenzen in der höheren Korona emittiert. Demnach zeigt das dynamische Radiospektrum in **Abb. 6**, dass von einer stationären Quelle

MISSIONEN

- Die europäische-amerikanische Mission **Ulysses** untersucht seit 1990 insbesondere das Magnetfeld und die Plasmaeigenschaften in den Polarregionen der Sonne. <http://helio.estec.esa.nl/ulysses>
- Die Mission **Wind** dient seit 1994 der Untersuchung der Eigenschaften von Plasma, energiereichen Teilchen und Magnetfeld. www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/wind
- **Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)**: vgl. Artikel von Peter et al. in diesem Heft.
- Der 1997 gestartete **Advanced Composition Explorer (ACE)** befindet sich am Lagrange-Punkt L1 zwischen Erde und Sonne und dient der Detektion von niederenergetischen Teilchen aus dem Sonnensystem und hochenergetischen aus der Milchstraße. www.srl.caltech.edu/ACE
- Der 2002 gestartete **Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)** soll helfen, die Physik der Teilchenbeschleunigung in Flares aufzuklären. <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/>

bei etwa 300 MHz energiereiche Elektronen erzeugt werden und sich sowohl nach unten (d. h. Drift zu hohen Frequenzen) als auch nach oben (d. h. Drift zu niedrigeren Frequenzen) in der Korona ausbreiten.

Ein Teil der vom Flare erzeugten Elektronen kann auch die Korona verlassen und bewegt sich entlang des interplanetaren Magnetfeldes in die Heliosphäre. Ist ein Satellit mit einer solchen Magnetfeldlinie verbunden, lassen sich diese Elektronen direkt beobachten. Am 28. Oktober 2003 hat die Raumsonde WIND nahe der Erde einen Anstieg der Elektronenintensität beobachtet (Abb. 5c). Da sich die Elektronen entlang der interplanetaren Magnetfeldlinie bewegen, erreichen Elektronen mit einer Energie von 181 bzw. 27 keV etwa 10 bzw. 30 Minuten nach dem Flarebeginn den erd-nahen Satelliten. Diese Geschwindigkeitsdispersion ist ein Indiz dafür, dass sich die Teilchenquelle in einer Entfernung von einer astronomischen Einheit, also in der Sonnenkorona, befindet.

Ein vielversprechendes und von vielen Beobachtungen gestütztes Szenario lässt sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 6): Wenn eine Protuberanz infolge von Plasmaströmungen in der Photosphäre destabilisiert wird und nach oben aufsteigt, dehnen sich die unter ihm liegenden Magnetfeldlinien. Dadurch treten benachbarte Magnetfeldlinien mit unterschiedlicher Richtung auf, was schließlich aufgrund des Ampèreschen Gesetzes zur Ausbildung einer Stromschicht führt. Übersteigt die mit dem Strom verbundene Driftgeschwindigkeit der Elektronen einen kritischen Wert, kommt es zu einer Instabilität, wodurch Plasmapwellen angeregt werden. Diese Wellen wirken dem Strom entgegen und stellen mithin einen anomalen Widerstand dar [7] (vgl. den Artikel von Büchner et al. in diesem Heft). Das Gebiet des erhöhten anomalen Widerstandes nennt man Diffusionsgebiet. Dort kommt es zur magnetischen Rekonnexion. Infolge der starken Krümmung der frisch rekonnectierten Magnetfeldlinien in der Nähe des Diffusionsgebietes wird

das dort langsam einströmende Plasma mit einer sehr hohen Geschwindigkeit hinausgepresst, sodass ein heißer Plasma-Jet entsteht, der von langsamen, magnetoakustischen Stoßwellen (SMSS, slow magnetosonic shocks) seitlich begrenzt wird. Wird dieser Jet durch seine Wechselwirkung mit dem umgebenden Plasma, z. B. in Form eines so genannten Post-Flare-Loops (PFL)¹⁾ abgebremst, bildet sich eine stehende Stoßwelle (FMSS) aus, deren Signaturen im dynamischen Radiospektrum bei ca. 300 MHz (s. roter Pfeil in Abb. 6) und gleichzeitig in der Intensität des Röntgen- und γ -Fluss zu sehen sind (Abb. 6). Wie oben erläutert, können Stoßwellen in kosmischen Plasmen Teilchen beschleunigen. Rechnungen zeigen, dass gerade die sich in der Nähe des magnetischen Rekonnexionsgebietes ausbildende Stoßwelle in der Lage ist, relativistische Elektronen bis zu 10 MeV zu erzeugen, wie es auch während des Flares vom 28. Oktober 2003 zu beobachten war [8].

1) Loops sind Magnetfeldbögen, die in der Photosphäre verankert sind und bis in die Korona reichen.

Teilchenausbreitung im Magnetfeld

Nachdem wir in den vorhergehenden Absätzen gezeigt haben, dass im Zusammenhang mit solaren Ereignissen geladene Teilchen bis zu Energien oberhalb einiger 100 MeV beschleunigt und im interplanetaren Raum gemessen werden, diskutieren wir in diesem Abschnitt die Ausbreitung dieser Teilchen im interplanetaren Magnetfeld. Nahe der Sonne beobachten wir Plasma, das in Filamenten eingeschlossen ist. Dort überwiegt der magnetische Druck den Gasdruck, sodass das Plasma im Magnetfeld gefangen ist. Im interplanetaren Raum dagegen ist das Sonnenmagnetfeld in den von der Sonne radial nach außen strömenden Sonnenwind eingefroren. Da die Sonne rotiert und die Fußpunkte der magnetischen Feldlinien mitführt, ergeben sich für die Magnetfeldlinien ähnlich zu einem Rasensprenger archimedische Spiralen (Abb. 7a). Am Beispiel eines Anfang März 1979 stattgefundenen Flares im extrem ultra-

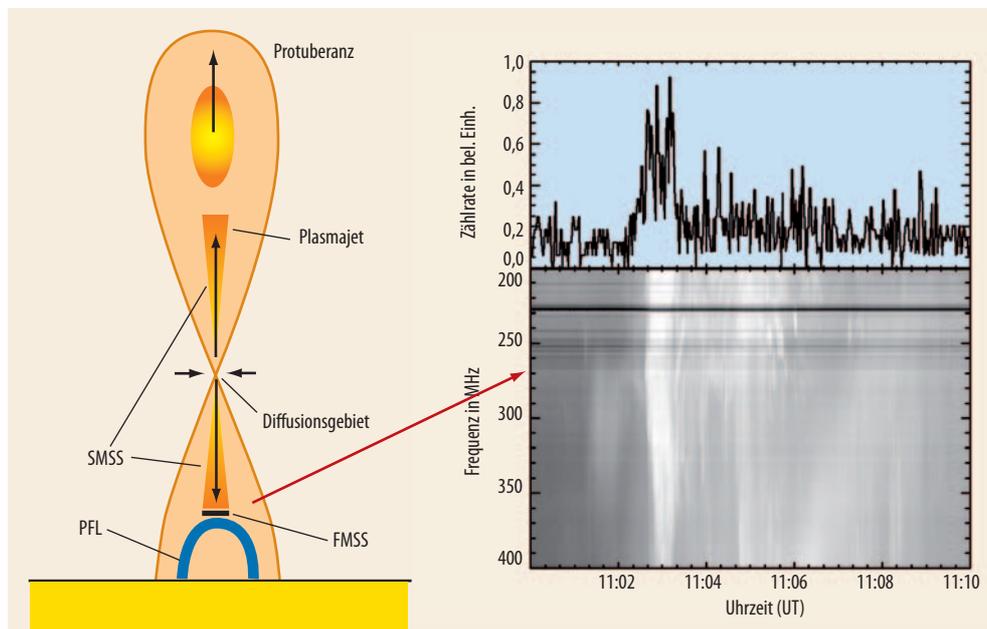


Abb. 6 Beim Flare-Szenarium (links) kommt es, ausgelöst durch eine von der Sonnenoberfläche (unten) nach oben aufsteigende eruptive Protuberanz, zur magnetischen Rekonnexion in dem Diffusionsgebiet. Der dadurch entstehende heiße Plasma-Jet wird im umgebenden Plasma abgebremst, wodurch sich wiederum eine stehende Stoßwelle (FMSS) ausbildet, deren Signaturen im dynamischen Radiospektrum zu sehen sind (rechts unten, aufgezeichnet am Astrophysikalischen Institut Potsdam). Das Diagramm rechts oben zeigt den vom Satelliten INTEGRAL gemessenen Zeitverlauf der γ -Strahlung für Energien von 7,5–10 MeV (vgl. Text).

violetten Licht wollen wir die Ausbreitung geladener Teilchen im interplanetaren Magnetfeld diskutieren. Unmittelbar nach diesem Flare haben die drei Raumsonden Helios 1, Helios 2 und IMP 8 deutliche, aber unterschiedliche Signalanstiege beim Protonenfluss detektiert (Abb. 7b). Hätten die damaligen Raumsonden optische Detektoren an Bord gehabt, so hätten alle drei Raumsonden den gleichen Intensitätsverlauf für Photonen gemessen.

Bewegt sich ein geladenes Teilchen im interplanetaren Magnetfeld, so ist seine Trajektorie durch die Lorentz-Kraft bestimmt: $d\vec{p}/dt = q\vec{v} \times \vec{B}$. Dabei sind q die Ladung, $\vec{p} = m\vec{v}$ der Impuls des Teilchens und \vec{B} das Magnetfeld. Für ein Teilchen, das sich senkrecht zu einem statischen, homogenen Magnetfeld bewegt, ergibt sich eine Kreisbahn mit Larmor-Radius r_L und Larmor-Frequenz ω . Bewegt sich das Teilchen nicht senkrecht zum Magnetfeld, so lässt sich die Ausbreitung in Komponenten senkrecht und parallel zum Magnetfeld zerlegen. In einem statischen, homogenen Magnetfeld bewegen sich die Teilchen dann entlang einer Helix. Der wesentliche Parameter, der eine solche Bahn beschreibt, ist der sog. Pitch-Winkel zwischen den Einheitsvektoren der Geschwindigkeit \vec{e}_v und der Magnetfeldrichtung \vec{e}_B : $\cos \vartheta = \vec{e}_v \cdot \vec{e}_B$. Da die Magnetfeldstärke mit dem Abstand von der Sonne abnimmt, nimmt der Pitch-Winkel eines von der Sonne kommenden Teilchens mit wachsender Entfernung ab. Man spricht hier von einer Fokussierung der Teilchen. Bedingt durch die Krümmung des interplanetaren Magnetfeldes kommt es zusätzlich zu einer Krümmungs- und Gradientendrift der Teilchen senkrecht zum Magnetfeld. Wenden wir diese Kenntnisse zur Interpretation der gemessenen Signale in Abb. 7 an, so verstehen wir, dass diese Profile nicht gleich sein können, sondern stark von den jeweiligen Positionen der Raumfahrzeuge zum Entstehungsort abhängen. Wäre die Quelle punktförmig, dann würden wir nur eine Intensitätserhöhung bei Helios 1 erwarten. Bedingt durch eine ineffiziente Diffusion senkrecht zum interplanetaren Magnetfeld

(1 % der parallelen Diffusion) und da mit diesem Ereignis ein koronaler Massenauswurf und damit eine interplanetare Stoßwelle verbunden war, breitet sich die Quelle im interplanetaren Raum aus, sodass es auch zu einem Intensitätsanstieg bei Helios 2 und IMP 8 kommt. Zusätzlich sollten alle Teilchen nur aus dem Raumwinkel stammen, der in Richtung der Teilchenquelle zeigt. Dies gilt jedoch nur für die erste Phase solcher Ereignisse. Da das interplanetare Magnetfeld eine kleinskalige Struktur aufweist und somit auf einer Reihe von Zeitskalen und Raumbereichen variiert, treten ständig unsystematische, kleinstskalige Änderungen des Pitch-Winkels ϑ auf. Daher beobachten wir in einer zweiten Phase Teilchen aus allen Raumrichtungen. Diese „Streuprozesse“ haben den Charakter eines Diffusionsprozesses und sind besonders wirksam, wenn die Teilchen in Wechselwirkung mit Strukturen treten, die in Resonanz mit ihrer durch die Gyration um das mittlere Magnetfeld gegebenen Eigenbewegung sind. Weil stochastische Prozesse bei der Teilchenausbreitung eine wesentliche Rolle spielen, ist es sinnvoll, von der Einzelteilchenbeschreibung auf eine diffusive Ensemblebeschreibung im Phasenraum überzugehen. Wie bei allen Diffusionsprozessen lässt sich die Quellenfunktion deshalb nur durch eine geeignete Beschreibung wieder aus den Messwerten gewinnen. Dabei erlauben die mathematischen Modelle auch einen Einblick in die Natur der Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit magnetischen Fluktuationen und damit in die Eigenschaften der Turbulenz im Sonnenwind [9].

Die bei der Ausbreitung solarer Teilchen gemachten Fortschritte tragen somit zu einem besseren Verständnis des Teilchentransports in astrophysikalischen Plasmen bei, wie z. B. der Ausbreitung der kosmischen Strahlung in unserer Galaxie. Darüberhinaus spielt Teilchenstreuung bei Beschleunigungsprozessen eine wesentliche Rolle, sodass auch hier nur ein wesentlich besseres Verständnis zu erwarten ist, wenn der Streuprozess und damit die Teilchenausbreitung in der Heliosphäre grundsätzlich verstanden ist.

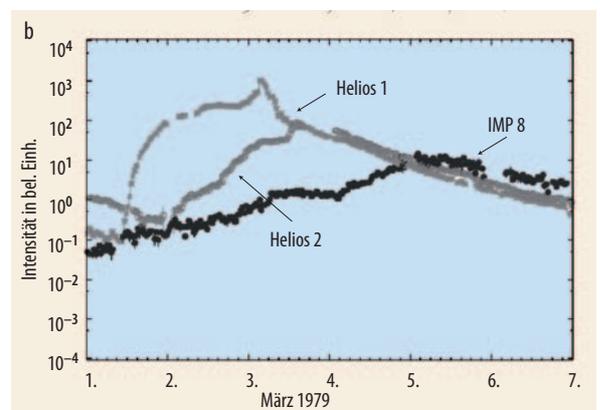
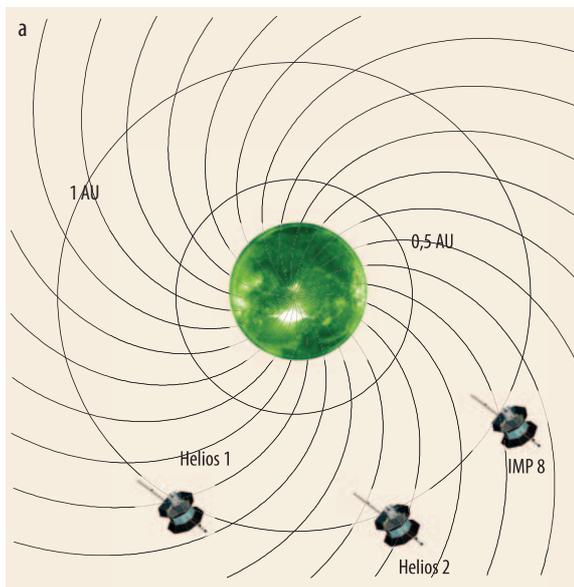


Abb. 7 a) Die Feldlinien des in der Ekliptik beobachteten interplanetaren Magnetfelds sind spiralförmig. b) Ein Anfang März 1979 im extremen ultravioletten Licht beobachteter Flare ging einher mit deutlichen, aber unterschiedlichen Signalen im Protonenfluss, der auf den drei Raumsonden IMP, Helios 1 und Helios 2 gemessen wurde.

Das Sonnensystem ... und darüber hinaus

Die Fortschritte im Verständnis der grundlegenden plasmaphysikalischen Prozesse im System Sonne-Erde lassen sich nunmehr für andere astrophysikalische Systeme anwenden, für die so detaillierte Beobachtungen nicht vorliegen. Dennoch werfen in-situ-Messungen wie z. B. die der Raumsonde Voyager am Terminationschock neue Fragen auf, die vorerst unbeantwortet bleiben müssen, da die Instrumentierung dafür nicht vorgesehen war und sich mit einer einzelnen Raumsonde räumliche und zeitliche Strukturen nicht trennen lassen. Solche Probleme lassen sich in der Zukunft nur durch ein enges Wechselspiel von Modellierung, Datenanalyse und neuen Beobachtungen mit neuartigen Raumsonden, wie z. B. der Stereo-, der Sentinels-Mission oder dem visionären Heliopause Explorer lösen [9].

Literatur

- [1] *B. Heber*, Int. J. Mod. Physics **A20**, 6621 (2005)
- [2] *W. Baumjohann* und *R. A. Treumann*, Basic Space Plasma Physics, Imperial College Press, London (1997)
- [3] *L. O. Drury*, Astrophysic and Space Science **233**, 251 (1995)
- [4] *M. I. Desai* et al., Astrophysical Journal **611**, 1156 (2004)
- [5] *J. C. Brown*, Solar Physics **25**, 158 (1972)
- [6] *D. B. Melrose*, in: Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths, S. 177 (1985)
- [7] *R. A. Treumann* und *W. Baumjohann*, Advanced Space Plasma Physics, Imperial College Press, London (1997)
- [8] *G. Mann*, *H. Aurass* und *A. Warmuth*, Astron. and Astrophys. **454**, 969 (2006)
- [9] *W. Dröge*, Advances in Space Research **35**, 532 (2005)

DIE AUTOREN

Bernd Heber hat in Kiel studiert und promoviert. Nach Post-Doc-Jahren in Saclay, Katlenburg-Lindau und Osnabrück ist er seit 2005 Professor in Kiel. Er ist Principal Investigator für die Detektoren hochenergetischer Teilchen bei den Missionen Ulysses, SOHO und Chandra.



Wolfgang Dröge ist Professor an der Universität Kiel, wo er sich mit vielfältigen Aspekten von hochenergetischen Teilchen, der Datenanalyse und der Instrumentierung beschäftigt. Er hat in Bonn Physik studiert und in Astronomie promoviert und war anschließend u. a. an den Universitäten in Chicago und Delaware.



Berndt Klecker hat an der TU München Physik studiert und im Jahr 1978 über die anomale Komponente der kosmischen Strahlung promoviert. Seit 1976 arbeitet er am MPI für extraterrestrische Physik an zahlreichen internationalen Weltraumprojekten zur Erforschung der Magnetosphäre sowie solarer und interplanetarer Teilchen.



Gottfried Mann leitet die Abteilung Sonnenphysik am Astrophysikalischen Institut Potsdam und ist seit 2003 Professor für Radioastronomie und Plasmaphysik an der Uni Potsdam. Er hat an der Humboldt-Universität Berlin studiert und promoviert.

