

Das »Bastille«-Ereignis – Sturm auf der Sonne, im interplanetaren Raum und auf der Erde

Karin Bamert und Mirjam Y. Hofer

The »Bastille« Event –
Storm on the Sun, in the Interplanetary Space and on Earth

Abstract

The Earth is constantly bombarded by ionized energetic particles originating from solar eruptions and from the galaxy. Because ionized particles can interfere with modern technology, the solar storms directly affect human civilisation. On »Bastille Day«, July 14, 2000, one of the most intense solar eruptions, or flares, of this solar cycle was observed. The shock wave generated by the coronal mass ejection of solar material collided with the Earth's magnetosphere and triggered a severe geomagnetic storm. We analysed measurements of this phenomenon, commonly known as the »Bastille Day« event, recorded by two particle detectors on the SOHO and ULYSSES spacecrafts. The results show the large area affected by the ionized particle storm and the acceleration processes at the shock.

Keywords: coronal mass ejection, interplanetary space, ionized energetic particles, shock wave

Sonnenstürme und Weltraumwetter

Schon bald nach der Erfindung des Fernrohrs beobachteten anfangs des 17. Jahrhunderts vier unabhängige Forscher, unter ihnen Galileo Galilei¹, dunkle Flecken auf der Sonnenscheibe. Rund zweihundert Jahre später entdeckte der Amateurastronom Samuel Heinrich Schwabe, dass die Anzahl der Sonnenflecken mit einer Periode von etwa elf Jahren zu- und abnimmt. Bereits 1848 definierte Rudolf Wolf die relative Sonnenfleckenanzahl, deren Monatsmittel auch heute noch als Mass der Sonnenaktivität gebräuchlich ist.

Die Sonnenaktivität hängt mit der Umstrukturierung des im Sonneninnern erzeugten Magnetfeldes zusammen. Alle elf Jahre kehrt sich die Orientierung des solaren magnetischen Dipols um. Das Magnetfeld an der Sonnenoberfläche richtet sich um das Aktivitätsmaximum neu aus und gibt an die hochionisierte Sonnenatmosphäre Energie ab.

In dieser Phase werden in magnetisch aktiven Regionen vermehrt Blitze, so genannte Flares, beobachtet. Innerhalb weniger Minuten werden grosse Mengen Energie in Form von energiereichen Teilchen (hauptsächlich Protonen und Elektronen sowie wenige schwerere, geladene Teilchen) und als γ - und Röntgenstrahlung freigesetzt. Flares werden nach ihrer maximalen Röntgenstrahlungsintensität klassifiziert.² Ihre jeweilige Häufigkeit korreliert nahezu mit der Anzahl Sonnenflecken. Während des Maximums der Sonnenaktivität geht jedoch kurzzeitig die Zahl der intensivsten Flares (Klasse X und M) zurück^[1].

Intensive Flares sind oft, aber nicht immer, von koronalen Massenauswürfen begleitet. Dabei löst sich unter explosionsartiger Freisetzung grosser Energiemengen eine röhrenförmige magnetische Struktur von der Sonne und wird in den interplanetaren Raum geschleudert. Diese magnetische Struktur enthält Milliarden von Tonnen solaren Materials. Während des solaren Aktivitätsminimums wird im Durchschnitt ein koronaler Massenauswurf pro Woche beobachtet, um das Aktivitätsmaximum

herum zwei bis drei pro Tag.

In Sonnennähe erreichen die koronalen Massenauswürfe Geschwindigkeiten bis zu 2000 Kilometer pro Sekunde (dies entspricht etwa sieben Millionen Kilometern pro Stunde). Da sie sich wesentlich schneller ausbreiten als der Sonnenwind, der mit 400–800 Kilometer pro Sekunde kontinuierlich von der Sonne wegströmt, bilden sie eine Stosswelle, die sich im interplanetaren Raum ausbreitet. An der Stosswelle werden weitere Teilchen beschleunigt, insbesondere Teilchen aus der Sonnenatmosphäre, Sonnenwind-Teilchen, Teilchen von früheren Flares und koronalen Massenauswürfen, ionisierte interstellare Teilchen sowie solare und galaktische kosmische Strahlungsteilchen.

Trifft die Stosswelle und der nachfolgende Massenauswurf auf die Erdmagnetosphäre, also auf den Raum, in dem das Erdmagnetfeld dominiert, wird der subsolare Punkt – Gleichgewicht zwischen dem Sonnenwind und der Erdmagnetosphäre, das normalerweise in einer Distanz von zehn Erdradien liegt – zur Erde hin verschoben. Die Magnetosphäre kann dadurch auf der Sonnenseite der Erde bis etwa 30 Prozent zusammengedrückt werden.

Oft werden als Folge eines solchen Magnetfeldsturms wunderschöne Polarlichter (Aurorae) beobachtet. In der nordischen Sagenwelt, den Mythen der nordamerikanischen Indianer und Inuit, der im Norden Skandinaviens heimischen Samen sowie sibirischer Völker spielt das Polarlicht eine grosse Rolle. Oft wurde es als Tanz der Jungfrauen, der Walküren oder als Kampf der Götter und Geister gedeutet. Tatsächlich entsteht ein Polarlicht durch Stossanregung von neutralen Atomen, meist Teilen von Molekülen (zum Beispiel Sauerstoff, Stickstoff), durch energiereiche Elektronen und Protonen. Die angeregten Atome senden beim Übergang der eigenen Elektronen in den Grundzustand je nach Atom elektromagnetische Strahlung verschiedener Wellenlänge aus.

Während die Einflüsse dieser magnetischen Sturmphänomene auf die Natur, Tiere und Menschen nur begrenzt bekannt sind, stellen die energiereichen Teilchen ein ernstes Risiko für technische Einrichtungen dar, da sie zum Beispiel Elektronikbauteile von Satelliten und Raumsonden zerstören können.

Durch den massiven Teilchensturm am 24. März 1991 (Flare X9.4 am 22. März 1991) wurden Sonnensegel und Elektronik von mehreren Satelliten massiv beschädigt, und ein Satellit, *Marecs-A*, fiel

¹Galileo Galilei, Johann Goldsmith (latinisiert Fabricius), Thomas Harriot und Christoph Scheiner stritten um das Primat dieser Entdeckung. Aus heutiger Sicht ist Fabricius als Entdecker der Sonnenflecken anzusehen, denn er publizierte seine Entdeckung als erster.

²Intensitätsklassen von Röntgen-Flares: Klasse X: Intensität $\geq 10^{-4}$ W/m² (Watt pro Quadratmeter); Klasse M: $10^{-5} < \text{Intensität} < 10^{-4}$ W/m²; Klasse C: $10^{-6} < \text{Intensität} < 10^{-5}$ W/m². Die Flares X9.4 und X5 haben maximale Intensitäten von $9.4 \cdot 10^{-4}$ W/m² und $5.0 \cdot 10^{-4}$ W/m².

total aus^[2]. Anfang März 1989 zerstörten induzierte Ströme einen Transformator in einem Kernkraftwerk in New Jersey, USA. Derselbe Sturm hatte zur Folge, dass in der kanadischen Provinz Quebec Millionen von Menschen für Stunden ohne Strom waren. Oft sind auch Computersysteme an Bord von Flugzeugen, Eisenbahnsignalanlagen, Telekommunikationsverbindungen und Erdölpipelines betroffen.

Vor einigen Jahren wurde für diese Phänomene eine neue Bezeichnung geschaffen: Der Begriff „Weltraumwetter“³ beschreibt Zustände und Vorgänge auf der Sonne und im Sonnenwind, im interplanetaren Raum, in der Magnetosphäre, Ionosphäre und Thermosphäre, welche die Technologie im Raum und auf der Erde beeinflussen und das Leben und die menschliche Gesundheit gefährden können.³ Bereits am 1. September 1859 beobachte-

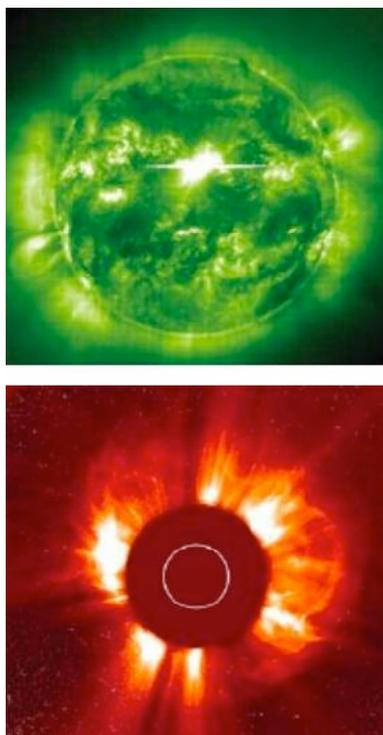


Abbildung 1: Die solare Eruption – das Flare – (oben) und der koronale Massenauswurf (unten) während des »Bastille«-Ereignisses am 14. Juli 2000, beobachtet von der Raumsonde *SOHO* (ESA- und NASA-Mission).

te Richard Carrington mit seinem Sonnenteleskop eine gewaltige Explosion auf der Sonne. Dies war eines der intensivsten Flares überhaupt. Als knapp 20

Stunden darauf die Kompassnadeln „verrückt spielten“, vermutete er einen Zusammenhang. Die Ursache der geomagnetischen Stürme, die koronalen Massenauswürfe, wurde aber erst 1971 mit Koronographen auf der Raumsonde *OSO 7* (*7th Orbiting Solar Observatory*) entdeckt. Koronale Massenauswürfe sind im ultravioletten (UV-) Licht sichtbar und wegen der Absorption der UV- und Röntgenstrahlung durch die Erdatmosphäre von der Erde aus nicht beobachtbar. Mit Hilfe von Instrumenten auf der Raumsonde *SOHO* (*Solar and Heliospheric Observatory*)^[3] können Flares und koronale Massenauswürfe seit 1996 rund um die Uhr direkt beobachtet werden. Aus den Messdaten kann abgeschätzt werden, ob ein Massenauswurf auf die Erde gerichtet ist. Auch die ungefähre Ankunftszeit der Stosswelle lässt sich berechnen. Durch solche Beobachtungen entstehen verschiedene Weltraumwetterberichte, zum Beispiel derjenige des NASA-Weltraumwetterdienstes⁴.

Eine weitere Methode für eine Frühwarnung kommt aus dem Gebiet der hochenergetischen kosmischen Teilchenstrahlung, die durch magnetische Strukturen im interplanetaren Raum moduliert wird. Die kosmische Strahlung wird seit 1956 mit einem weltweiten Netz von Neutronenmonitoren kontinuierlich registriert. Die galaktische kosmische Strahlung fällt isotrop, also von allen Seiten gleich, in das Sonnensystem ein. Eine räumlich ungleich verteilte Intensität wenige Stunden vor dem Auftreffen der kosmischen Strahlung kann bei starken Ereignissen auf die Ankunft einer magnetischen Störung im Raum aufmerksam machen^[4]. Am 24. März 1991 registrierten 31 Neutronenmonitore vor Ankunft der Stosswelle einen Anstieg der kosmischen Strahlungsintensität. Bei 15 europäischen und osteuropäischen Stationen wurde hingegen kein Anstieg verzeichnet. Die Analyse des Anstieges identifizierte einen hochenergetischen, anisotropen Teilchenfluss, welcher von der der Sonne abgewandten Seite der Erde kam^[5].

Eine weitere Methode für eine Frühwarnung kommt aus dem Gebiet der hochenergetischen kosmischen Teilchenstrahlung, die durch magnetische Strukturen im interplanetaren Raum moduliert wird. Die kosmische Strahlung wird seit 1956 mit einem weltweiten Netz von Neutronenmonitoren kontinuierlich registriert. Die galaktische kosmische Strahlung fällt isotrop, also von allen Seiten gleich,

³Frei übersetztes Zitat von J. Freeman, 1995

⁴National Aeronautics and Space Administration, USA; www.spaceweather.com

in das Sonnensystem ein. Eine räumlich ungleich verteilte Intensität wenige Stunden vor dem Auftreffen der kosmischen Strahlung kann bei starken Ereignissen auf die Ankunft einer magnetischen Störung im Raum aufmerksam machen. Am 24. März 1991 registrierten 31 Neutronenmonitore vor Ankunft der Stosswelle einen Anstieg der kosmischen Strahlungsintensität. Bei 15 europäischen und osteuropäischen Stationen wurde hingegen kein Anstieg verzeichnet. Die Analyse des Anstieges identifizierte einen hochenergetischen, anisotropen Teilchenfluss, welcher von der der Sonne abgewandten Seite der Erde kam.

Das »Bastille«-Ereignis

Am 14. Juli 2000, am Jahrestag des Sturms auf die Bastille, um 10:24 Universalzeit, wurde eines der intensivsten Flares (X5) dieses Sonnenaktivitätszyklus beobachtet. Das Flare fand nahe am Zentrum der Sonnenscheibe (22 Grad Nord, 70 Grad West) statt, wie in Abbildung 1 (oben) sichtbar ist. Eine halbe Stunde später begann sich ein gewaltiger koronaler Massenauswurf mit einer Geschwindigkeit von rund 1775 Kilometern pro Sekunde (etwa 6 Millionen Kilometern pro Stunde) Richtung Erde auszubreiten. Der damit verbundene Teilchensturm war einer der stärksten seit Oktober 1989.

Die hochenergetische kosmische Teilchenstrahlung zeigte am 14. Juli 2000 einen starken anisotropen Anstieg. Der Teilchenfluss kam wie schon am 24. März 1991 ebenfalls von der sonnenabgewandten Richtung auf die Erde zu. Diese hochenergetischen Teilchen wurden als ursprünglich von der Sonne kommende Teilchen identifiziert, die im Abstand von 0.3 AE⁵ hinter der Erde an einer magnetischen Störung reflektiert wurden, die die Erde bereits passiert hatte [6]. Mit dem Passieren der Stosswelle am 15. Juli 2000 wurde ein starker Abfall der galaktischen kosmischen Strahlung gemessen.

Die energiereichen solaren Teilchen werden auch mit optischen und UV-Detektoren registriert. Zahlreiche Teilchendetektoren auf Raumsonden, unter anderem *SOHO*, *ACE* (*Advanced Composition Explorer*) und *WIND*, waren am 14. Juli in kürzester Zeit gesättigt und somit zwischenzeitlich ausser Betrieb. Die Solarsegel von *SOHO* büssten einige Prozent ihrer Leistung ein, erholten sich später aber wieder. Die totale Funktionsdauer der Solarzellen wird durch solche Teilchenstürme jedoch wesentlich

reduziert.

In der Nacht vom 15. auf den 16. Juli konnten Polarlichter – sonst nur in den Polarregionen zu sehen – bis in mittlere geographische Breiten beobachtet werden. Dies war eine Folge der durch den Aufprall verformten Erdmagnetosphäre und des dadurch stark erweiterten Polarovals, in dem die Polarlichter meistens auftreten.

Die magnetischen Störungen des Bastille-Ereignisses wanderten weiter im interplanetaren Raum und bewirkten nach etwa 180 Tagen auf der Raumsonde *Voyager 2* bei 63 AE einen Abfall der kosmischen Strahlung um etwa 13 Prozent und nach 245 Tagen auf *Voyager 1* bei 80 AE eine Reduktion um etwa neun Prozent^[7].

Auswirkungen des »Bastille«-Ereignisses

Im Juli 2000 beobachteten zahlreiche im Welt- raum und auf der Erde positionierte Messinstrumente die Sonne und den interplanetaren Raum. Wir konzentrieren uns hier auf die Messungen der Teilcheninstrumente *COSPIN/LET* auf der Raumsonde *ULYSSES* und *CELIAS/HSTOF* auf der Raumsonde *SOHO*.

Die Raumsonde *ULYSSES* wurde 1990 gestartet. Seit 1992 umkreist sie die Sonne auf einer elliptischen Umlaufbahn beinahe senkrecht zur Ekliptik (Erdbahnebene) mit Abständen zur Sonne von etwa 1.3 bis 5.4 AE (etwa 200 bis 800 Millionen Kilometern). *ULYSSES* ist die erste und bis jetzt einzige Sonde, die sich auf ihrem Umlauf von der Ekliptik bis zu hohen solaren Breiten von etwa 80 Grad bewegt. Während des »Bastille«-Ereignisses befand sich die Sonde auf einer südlichen Breite von 62 Grad in einem Abstand von etwa 3.1 AE.

Das *COSPIN/LET* (*Low Energy Telescope*) auf der Raumsonde *ULYSSES* misst mit Hilfe mehrerer Festkörperdetektoren die Elementhäufigkeiten der energiereichen Teilchen^[8]. Die Analyse der Elementhäufigkeiten dient der Identifikation des Beschleunigungsortes und der Beschleunigungsprozesse, die das Material selektiv mitnehmen. Diese Elementhäufigkeiten sind unterschiedlich je nach Messbereich. Abbildung 2 zeigt oben die elementaren Häufigkeiten von Helium, Kohlenstoff, Stickstoff, Neon und Eisen relativ zu Sauerstoff und unten den Protonenfluss für die Tage 190 bis 240 des Jahres 2000. Am 14. Juli 2000 (Tag 196) wurde ein starker Anstieg des Protonenflusses und das plötzliche Auftreten von energiereichen Teilchen registriert. Der Protonenfluss blieb während weiterer

⁵AE = Astronomische Einheit = mittlerer Abstand Erde-Sonne \approx 150 Millionen Kilometer.

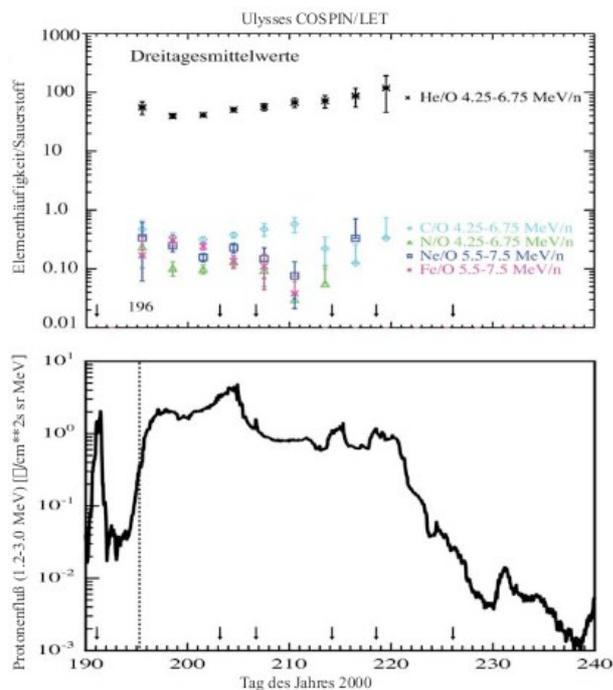


Abbildung 2: Die Elementhäufigkeiten der beim »Bastille«-Ereignis von der Sonne weggeschleuderten energiereichen Teilchen relativ zu Sauerstoff (oben) und der Protonenfluß (unten), gemessen von der Raumsonde ULYSSES mit dem Teleskop CO-SPIN/LET. Am 14. Juli 2000 (Tag 196) stieg der Protonenfluß stark an und traten plötzlich energiereiche Teilchen auf. Die Energieintervalle in Mega-elektronenvolt (MeV), worin die einzelnen Elementverhältnisse gemessen wurden, sind in der Bildlegende angegeben. Die Pfeile in der oberen Figur markieren die Ankunftszeit von Stosswellen bei ULYSSES. (Abbildung modifiziert aus [9])

25 Tage hoch, da ein Ereignis dem anderen folgte, was auch im gehäuftem Auftreten von Stosswellen (Pfeile) ersichtlich ist.

Im Juli 2000 stimmen die elementaren Häufigkeiten bei ULYSSES mit Werten von Raumsonden in der Ekliptik, zum Beispiel mit WIND, überein, was darauf schliessen lässt, dass dasselbe Ereignis beobachtet wurde. Der interplanetare Teilchensturm breitete sich auf einem riesigen Volumen von mehreren AE³ aus.

Die dazu gehörenden, auf ULYSSES gemessenen Flussprofile sind ähnlich denen, die bei 1 AE in der Ekliptik gemessen wurden. In der Phase, in der derartige Ereignisse wieder abklingen, ist das Flussmaximum gemessen auf ULYSSES bei drei AE auf 62 Grad südlicher Breite nur um zehn- bis hundert-

mal niedriger als bei 1 AE. Im Weltraum herrscht Hochvakuum, und das Nichtverschwinden der Teilchenpopulation über so grosse Distanzen ist daher höchst erstaunlich.

Die Raumsonde SOHO wurde 1995 gestartet und befindet sich in einer Umlaufbahn um den Lagrange-Punkt L1 auf der Verbindungslinie Sonne-Erde, wo sich die verschiedenen Kräfte des Systems Sonne-Erde aufheben. Dieser Punkt ist etwa 1.5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt

Der CELIAS/HSTOF (Highly Suprathermal Time Of Flight)-Sensor [10] auf der Raumsonde SOHO ist ein Flugzeitmassenspektrometer. Mit diesem Sensor kann erstmals der Energiebereich der sogenannten suprathermalen Ionen⁶ detailliert untersucht werden. Wir analysierten die HSTOF-Daten für die Zeit der Passage der starken Stosswelle am 15. Juli. Abbildung 3 zeigt die Helium-Flussraten

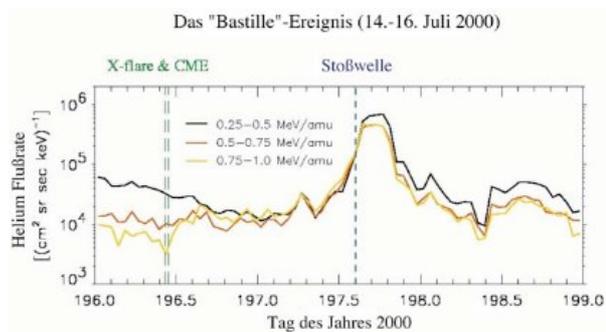


Abbildung 3: Helium-Flussraten der suprathermalen Teilchen während der Passage der Stosswelle am 15. Juli 2000, gemessen von der Raumsonde SOHO mit dem Flugzeitmassenspektrometer CELIAS/HSTOF. Die Zeit des Flare, des koronalen Massenauswurfs (CME) und der Stosswelle sind mit vertikalen Linien eingezeichnet. Die Helium-Flussrate (Heliumatome pro Fläche pro Raumwinkel pro Sekunde pro Energieintervall als Funktion der Energie pro Masse) ist für drei Energiebereiche dargestellt.. (Abbildung modifiziert aus [11])

für drei verschiedene Energiebereiche, die der Berechnung der Energiespektren und somit der Analyse des Beschleunigungsprozesses dienen. Das Intensitätsmaximum in allen drei Energiebereichen nach der Stosswelle deutet darauf hin, dass die suprathermalen Teilchen vor allem in den nach der Stosswelle auftretenden starken magnetischen Turbulenzen beschleunigt wurden.

⁶Der Energiebereich der suprathermalen Ionen liegt zwischen den typischen Sonnenwindenergien und den niedrigeren solar energetic particles.

Die Stosswelle vom 15. Juli 2000 produzierte einerseits suprathermale energiereiche Teilchen^[11~13] und modulierte andererseits die hochenergetische galaktische kosmische Strahlung. Die energiereichen Teilchen kommen somit nicht nur direkt vom Flare, sondern werden auch an den Turbulenzen der interplanetaren Stosswellen beschleunigt und verbreiten sich danach über riesige Raumbereiche. Die Mächtigkeit der Stosswelle sieht man auch daran, dass sie hochenergetische kosmische Strahlungsteilchen beeinflusste und die Erdmagnetosphäre massiv zusammendrückte.

Ausblick

Von den komplexen Prozessen, die sich in und um die Sonne abspielen, sind erst Teilbereiche verstanden. Hier wurde gezeigt, wie aus Messungen energiereicher Teilchen Kenntnisse gewonnen werden über die Ausbreitung energiereicher Teilchen sowie über ihre Beschleunigung und Umwandlung an den Stosswellen der koronalen Massenauswürfe.

Derzeit sind mehrere Missionen in Vorbereitung, die zum besseren Verständnis der Ursachen und Mechanismen von koronalen Massenauswürfen, Flares und anderen schnellen Veränderungen im Sonnensystem beitragen sollen. Zwei Projekte seien hier vorgestellt:

STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) ist eine Mission der NASA, die 2005 gestartet werden und als erste Mission einen dreidimensionalen Blick auf die Sonne und den interplanetaren Raum erlauben soll. Zwei identische Raumsonden werden mit konstantem Abstand zur Sonne von der Erde wegdriften, die eine nach Osten, die andere nach Westen. Mit Weitwinkelteleskopen werden die Sonne-Erde-Linie und koronale Massenauswürfe, die sich Richtung Erde ausbreiten, stereoskopisch festgehalten. Durch Radiotriangulation kann zudem die Position der Stosswelle kontinuierlich bestimmt werden.

Für 2012 ist der Start der *ESA-Mission SOLAR ORBITER* geplant. Diese Sonde soll die Sonnenoberfläche und -atmosphäre aus nächster Nähe sowie den interplanetaren Raum nahe der Sonne beobachten. Mit hochauflösenden Sensoren werden die aktiven Sonnenregionen, der Entstehungsort der Flares und der koronalen Massenauswürfe, untersucht.

In den letzten Jahren sind sich die Experten bewusst geworden, dass das Weltraumwetter ein hochkomplexes Naturereignis darstellt, das erst in Ansätzen erklärt werden kann. Trotz der Fortschrit-

te in den Untersuchungen sind noch viele Fragen unbeantwortet oder nicht einmal gestellt. In internationalen und multidisziplinär angelegten Projekten versucht man, mit Hilfe von immer besseren Instrumenten auf Raumsonden und auf der Erde sowie mit theoretischen Modellen das Weltraumwetter und dessen Auswirkungen besser zu verstehen; dies nicht alleine, um uns vor möglichen Gefahren schützen zu können, sondern auch, damit wir uns unserer Umgebung bewusst werden und über all die Ereignisse staunen können, die um uns und mit uns geschehen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Storini, M.Y. Hofer, „Comments on solar soft X-ray Flares“, Proc. 9th European Meeting on Solar Physics: Magnetic Fields and Solar Processes, Florence, Italy, 12–18 September, 1999, ESA SP-448 Vol. 2 (1999), p. 889–894.
- [2] D.F. Smart, M.A. Shea, E.O. Flückiger, B. Sana-huja, „Solar, interplanetary and geomagnetic phenomena in March 1991 and their association with spacecraft and terrestrial problems“, Nuclear Physics B (Proc. Supplements) 39A (1995) 26–30.
- [3] B. Fleck, V. Domingo, A.I. Poland (Ed.): „The SOHO Mission“, Kluwer, Dordrecht (1995).
- [4] K. Kudela, M. Storini, M.Y. Hofer, A. Belov, „Cosmic rays in relation to space weather“, Space Science Reviews 93/1-2 (2000) 153–174.
- [5] M.Y. Hofer, E.O. Flückiger, „Cosmic ray spectral variations and anisotropy near Earth during the March 24, 1991, Forbush decrease“, Journal of Geophysical Research 105(A10) (2000) 23085–23098.
- [6] J.W. Bieber, W. Dröge, P.A. Evenson, R. Pyle, „Energetic particle observations during the 2000 July 14 solar event“, Astrophysical Journal 567 (2002) 622–634.
- [7] W.R. Webber, F.B. McDonald, J.A. Lockwood, B. Heikkila, „The effect of the July 14, 2000 'Bastille Day' solar Flare event on >70 MeV galactic cosmic rays observed at V1 and V2 in the distant heliosphere“, Geophysical Research Letters 29/10 (2002) 15-1,
- [8] J.A. Simpson et al.: „The ULYSSES Cosmic Ray and Solar Particle Investigation“, Astronomy and Astrophysics Supplement Series 92/2 (1992) 365–399.
- [9] M.Y. Hofer, R.G. Marsden, T.R. Sanderson, C. Tranquille: „Energetic particle composition measurements at high latitudes around the solar activity maximum“, in R.F. Wimmer-Schweingruber (Ed.): Solar and Galactic Composition, SOHO/ACE Workshop, Bern, Switzerland, American Institute of Physics Conf. Proc. 598 (2001), p. 189–193.
- [10] D. Hovestadt et al., „CELIAS – Charge, Element and Isotope Analysis System for SOHO“, Solar Physics 162 (1995) 441–481.

[11] K. Bamert, R.F. Wimmer-Schweingruber, R. Kallenbach, M. Hilchenbach, B. Klecker: „Charge-to-mass fractionation during injection and acceleration of suprathermal particles associated with the Bastille Day events“, in M. Velli (Ed.): *Solar Wind Ten*, American Institute of Physics Conference Proceedings 679 (2003) 668–671.

[12] R. Kallenbach, K. Bamert, R.F. Wimmer-Schweingruber, „Charge-to-mass fractionation during acceleration and propagation of suprathermal ions near interplanetary shocks“, in M. Velli (Ed.): *Solar Wind Ten*, American Institute of Physics Conference Proceedings 679 (2003) 672–675.

[13] R. Kallenbach, K. Bamert, M. Hilchenbach, B. Klecker, „Probing diffusion parameters of suprathermal ions near heliospheric shocks“, *Advances in Space Research* (2003), in press.