

Schlussbericht

Vorhaben: Untersuchung von Teilchenbeschleunigungsmechanismen an Stoßwellen mittels der Daten des EPAC-Instruments an Bord des ULYSSES-Satelliten

Förderkennzeichen: 50 ON 9601 0

In der Astrophysik spielt das Problem der Erzeugung hochenergetischer Teilchen eine große Rolle. Solche Teilchen können z. B. durch Stoßwellen in kosmischen Plasmen erzeugt werden. Die Weltraumsonde ULYSSES bot die Möglichkeit, Stoßwellen in der Heliosphäre durch in-situ Messungen zu untersuchen. Deshalb war das Ziel dieses Forschungsvorhabens, Teilchenbeschleunigungsmechanismen an Stoßwellen mittels des EPAC-Instruments an Bord der Raumsonde ULYSSES zu untersuchen. Das EPAC-Instrument erlaubt, die Flüsse von hochenergetischen Teilchen (Elektronen, Protonen und schwere Ionen) zu messen. Durch die Wechselwirkung des schnellen Sonnenwindes mit dem langsamen ergeben sich sogenannte korotierende Wechselwirkungsregionen (Corotating Interaction Regions (CIR)). Dabei strömt der schnelle Sonnenwind in den langsamen, wodurch er abgebremst wird. Es entsteht ein Paar von Stoßwellen, an denen Teilchen beschleunigt werden. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden in international anerkannten, referierten Zeitschriften publiziert. Darüberhinaus erhielt Herr Dr. Mann von Prof. Geiss (Direktor des International Space Science Institute in Bern) die Einladung, an dem CIR-Workshop vom 6. - 13. Juni 1998 in Bern teilzunehmen und dort zusammen mit Herrn Prof. Scholer (Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik Garching) die Arbeitsgruppe 7 (Origin Injection, and Acceleration of CIR Particles) zu leiten. Die Ergebnisse dieses Workshops wurden in einer Monographie *Corotating Interaction Regions* (eds. by A. Balogh, J. T. Gosling, J. R. Jokipii, R. Kallenbach and H. Kunow, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL) veröffentlicht. Gerade darin ist die internationale Resonanz der in diesem Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse zu erkennen. Weiterhin sei hervorgehoben, dass Dr. Mann und Dr. Claßen an zwei internationalen CIR-Workshops auf Schloss Elmau teilnahmen, wo die Ergebnisse dieser Forschungen präsentiert wurden. Auch die Arbeitsaufenthalte am Max-Planck-Institut für Aeronomie in Lindau und am Imperial College London von beiden Herren trugen zur Festigung der nationalen und internationalen Beziehungen der Arbeitsgruppe *Solare Radioastronomie* des Astrophysikalischen Instituts Potsdam bei.

Während der Phase, in der die Raumsonde ULYSSES sich von Jupiter aus der Ekliptik heraus in Richtung höherer heliosphärischer Breiten bewegte, durchflog ULYSSES mehrmals sogenannte "Corotating Interaction Regions". Wie bereits schon erwähnt, sind diese Strukturen mit einem Paar von Stoßwellen verbunden. Es handelt sich dabei um den sogenannten "Forward-Shock", der in den langsamen Sonnenwind in Richtung Ekliptik hineinläuft, wohingegen sich der "Reverse-Shock" in den schnellen Sonnenwind zu höheren heliosphärischen Breiten bewegt. Aus den ULYSSES-Daten wurden 32 Stoßwellen untersucht. Als erstes wurden die Shockparameter wie Magnetfeld-, Dichte- und Temperatursprung, die Alfvén-Mach-Zahl M_{A1} und der Winkel θ_{Bn} zwischen dem Magnetfeld und der Stoßwellennormale für alle 32 Stoßwellen abgeleitet. Dies wurde während mehrerer Arbeitsaufenthalte von Dr. Claßen am Max-Planck-Institut für Aeronomie in Lindau getan. Weiterhin wurden die Elektronen- und Protonenflüsse beim

Stoßwellenübergang aus den EPAC-Daten ermittelt. Hierbei ergab sich ein sehr wichtiges Ergebnis, welches auch international Beachtung fand, wie auf dem schon erwähnten ISSI-Workshop zu erkennen war. Durch die Datenanalyse konnte gezeigt werden, dass diejenigen Stoßwellen Elektronen (mit einer Energie von 300 keV) und Protonen (mit einer Energie von 1 MeV) besonders effizient beschleunigen, wenn sie die Bedingungen $M_{A1} > 2.5$ und $50^\circ \leq \theta_{Bn} \leq 75^\circ$ simultan erfüllen. Das heißt letztendlich, dass sogenannte superkritische, quasi-senkrechte Stoßwellen sehr effiziente Teilchenbeschleuniger sind. Anschließend ging man der Frage nach, in welchem Gebiet der Stoßwelle die Teilchenbeschleunigung stattfindet. Dazu reisten Dr. Mann und Dr. Claßen zum Imperial College London. Dort verfügt die Gruppe um Dr. Balogh über die zeitlich hochaufgelösten Magnetfelddaten von ULYSSES. Diese Daten wurden benutzt, um den Grad der Turbulenz des Magnetfeldes in drei verschiedenen Gebieten der Stoßwelle zu bestimmen. Es handelt sich dabei um das Anströmgebiet (das ist das Gebiet vor der Stoßwelle), dem Gebiet unmittelbar nach dem Stoßwellenübergang und dem Abströmgebiet (das ist das Gebiet nach dem Stoßwellenübergang). Der so ermittelte Grad der Magnetfeldturbulenz wurde mit den von EPAC gemessenen Flüssen hochenergetischer Protonen verglichen. Dabei zeigte sich, dass im Gebiet unmittelbar nach dem Stoßwellenübergang eine sehr große Korrelation zwischen dem Grad der Magnetfeldturbulenz und den Flüssen der hochenergetischen Ionen besteht. Daraus folgt, dass die Teilchenbeschleunigung unmittelbar nach dem Stoßwellenübergang erfolgt. Es muss sich also um einen lokalen Prozess der Welle-Teilchen-Wechselwirkung handeln.

Parallel dazu wurde ein Teilchenbeschleunigungsmodell für Elektronen entwickelt. Es basiert auf der Wechselwirkung von Elektronen mit großamplitudigen Magnetfeldfluktuationen. Bekanntlich stellen Magnetfeldfluktuationen magnetische Spiegel dar, an denen geladene Teilchen reflektiert und beschleunigt werden können. Im Rahmen des erarbeiteten Modells werden die Elektronen durch Mehrfachstreuung an solchen großamplitudigen Magnetfeldfluktuationen bis zu sehr hohen Energie beschleunigt. Die Rechnungen wurden voll relativistisch ausgeführt, um auch so die Teilchenflüsse von 0,4 MeV Elektronen durch das EPAC-Instrument theoretisch zu erklären. Um die Elektronenspektren ermitteln zu können, wurden neben den Daten des EPAC-Instruments auch noch die Daten des HISCALE-Instruments verwendet. Das HISCALE-Instrument befindet sich ebenfalls auf der Raumsonde ULYSSES und misst die Elektronenflüsse im niederenergetischen Bereich von 30 - 300 keV. Die Daten wurden uns durch Herrn Dr. Roelof (John Hopkins University, Laurel, USA) zur Verfügung gestellt. Bei der Datenauswertung wurden die Elektronenflüsse im Energiebereich 30 - 50 keV beim Stoßwellenübergang mit denen während ruhiger Sonnenwindperioden verglichen. Als Ergebnis zeigte sich eine Korrelation zwischen der Anhebung der Elektronenflüsse in diesem Energiekanal durch die Stoßwelle mit der Magnetfeldkompression und der Alfvénmachzahl der betreffenden Stoßwelle. Diese Korrelation konnte durch das von uns entwickelte Modell der Elektronenbeschleunigung theoretisch erklärt werden. Die Anhebung der Elektronenflüsse wird durch zwei Prozesse hervorgerufen. Als erstes wird das Plasma und mithin auch die Elektronen durch die Stoßwelle geheizt, und anschließend werden sie dann durch die Magnetfeldturbulenz beschleunigt. Gerade beide Prozesse können nur unmittelbar nach dem Stoßwellenübergang stattfinden, wodurch sich der Kreis zu den bereits genannten Beobachtungsbefunden schließt.

Die in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse haben einen beachtlichen Fortschritt im Verständnis der Erzeugung von energetischen Elektronen durch Stoßwellen in kosmischen Plasmen gebracht. Solche Stoßwellen findet man auch an Supernova-Überresten. Zukünftig beabsichtigen wir, das von uns entwickelte Elektronenbeschleunigungsmodell auf solche Supernova-Überreste zu übertragen, um die radioastronomisch gemessenen Elektronenspektren an den mit den Supernova-Überresten verbundenen Stoßwellen zu übertragen. Dazu wurde bereits Kontakt zu den Herren Prof. Fürst und Dr. Reich am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn aufgenommen.

Die gesamten im Rahmen dieses Forschungsvorhabens veröffentlichten Publikationen sind im Anhang zusammengestellt.

Der Finanzierungsplan wurde vollständig eingehalten. Der Zeitplan wurde im wesentlichen ebenfalls eingehalten. Infolge eines Arbeitsunfalls war Herr Dr. Mann vom 9.12.1998 bis 7. Juni 1999 krank, weshalb das DLR dankenswerter Weise auch eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.1999 gewährte. Dadurch konnten die Arbeiten zu diesem Forschungsvorhaben erfolgreich abgeschlossen werden.

Potsdam, den 12.04.2000

Dr. G. Mann

Erschienene Publikationen

Claßen, H.-T., Mann, G.:

Electron acceleration and type II radio emission at quasi-parallel shock waves, *Izv. vyssh. uch. zav.-Radiofizika XLI N1*, 84, (1998).

Claßen H.-T., Mann G:

Electron acceleration at steepened magnetic field structures in the vicinity of quasi-parallel shock waves, *Astron. & Astrophys.* 322 , 696-703, (1997).

Claßen, H.-T., Mann, G.:

Motion of ions reflected off quasi-parallel shock waves in the presence of large-amplitude magnetic field fluctuations. *Astron. & Astrophys.* 330 , 381-388, (1998).

Claßen H.-T., Mann G., Forsyth R.J., Keppler E.:

Low frequency plasma turbulence and high energy particles at CIR-related shock waves, *Astron. & Astrophys.*, 347, 313-328, (1999).

Claßen H.-T., Mann G., Forsyth R.J., Keppler E.:
Particle acceleration at corotating interaction regions, Solar Wind Nine, AIP CP 471, 625-628, Woodbury, New York, (1999).

Claßen, H.-T., Mann, G., Keppler, E.:
Particle acceleration efficiency and MHD characteristics of CIR-related shocks. Astron. & Astrophys. 335 , 1101-1110, (1998).

Mann, G.:
Electron acceleration at coronal and interplanetary shock waves, Proc. Workshop "Planetary Radio Emission", (1996).

Mann, G., Audaß, H., Claßen, H.-T., Klassen, A., Dröge, W., Kunow, H.:
Shock accelerated electrons in the corona, ESA-SP 404 , 543-547, (1997).

Mann, G. and Claßen, H.-T.:
Electron acceleration at coronal and interplanetary shock waves, Proc. of the 8th International Solar Wind Conference, Dana Point, California, AIP Conference Proceedings 382 , 24-27, (1996).

Mann, G., Claßen, H.-T., Motschmann, U., Kunow, H., Dröge, W.:
High energetic electrons accelerated by a coronal shock wave, Astrophys. Space Sciences 264, 1, (1999).

Mason, G.M., von Steiger, R. (Co-Chairs), ..., Mann, G., et al.:
Origin, injection, and acceleration of CIR particles: Observations (Report of Working Group 6), Space Science Reviews 89, 327-367, Kluwer Academic Publishers, (1999).

Scholer, M., Mann, G. (Co-Chairs) et al.:
Origin, injection, and acceleration of CIR particles: Theory (Report of Working Group 7), Space Science Reviews 89, 369-399, Kluwer Academic Publishers, (1999).