

INTERPLANETARE BESCHLEUNIGUNG AM BEISPIEL
KOROTIERENDER EREIGNISSE
ANALYSE DER MESSUNGEN AUF HELIOS 1 UND 2
IN DEN JAHREN 1975 UND 1976

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
des Fachbereichs Mathematik-Naturwissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von
FRITHJOF ZÖLLICH

Kiel, 1981

Referent:

Korreferent:

Tag der mündlichen Prüfung:

Zum Druck genehmigt: Kiel, den

.
Dekan

Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1.	Einleitung	1
2.	Modelle der Beschleunigung kosmischer Strahlung	4
2.1.	Beschleunigung galaktischer kosmischer Strahlung	4
2.2.	Shockbeschleunigung und statistische Beschleunigung	5
2.3.	Energieverluste	6
2.4.	Modelle der Shockbeschleunigung	7
2.5.	Beschleunigungsmodell von Fisk und Lee (1980) für CIRs	12
3.	Großräumige Strukturen im äußeren Sonnensystem und Einflüsse auf Ausbreitungsvorgänge	14
3.1.	Entstehung von CIRs	14
3.2.	Struktur des interplanetaren Raums im äußeren Sonnensystem	15
3.3.	Einfluß der CIRs auf die Ausbreitung energetischer Teilchen	15
4.	Messungen korotierender Ereignisse zu Beginn des Jahres 1976	21
4.1.	Unterschied solarer und korotierender Ereignisse	21
4.2.	Entstehung des Intensitätsprofils korotierender Ereignisse bei radialen Entfernungen kleiner 1 AU	36
4.3.	Messungen der winkelabhängigen Intensität	42
4.3.1.	Bisherige Untersuchungen der Winkelverteilungen nicht flareerzeugter Ereignisse	42
4.3.2.	Einfluß verschiedener Ausbreitungsmodelle auf die Interpretation gemessener Winkelverteilungen der Intensität	43
4.3.3.	Anisotropie korotierender Ereignisse zu Beginn des Jahres 1976	46
4.3.3.1.	Berechnung der Anisotropie aus den Sektormessungen der Intensität	47
4.3.3.2.	Untersuchungen der Anisotropie korotierender Ereignisse	51
5.	Korotierende Ereignisse in den Jahren 1975 und 1976 - Messungen auf Helios 1 und 2	58
5.1.	Untersuchungen der schnellen Sonnenwindströme	58
5.2.	Korotierende schnelle Sonnenwindströme und korotierende Ereignisse	63

6.	Einfluß solarer Flares auf die Beschleunigung von CIRs	68
6.1.	Störungen innerhalb eines Zyklus korotierender Ereignisse	68
6.2.	Solare Aktivitäten im März und Auswirkungen auf die Beschleunigung von CIRs	72
6.3.	Einfluß von solaren Störungen auf die radialen Gradienten der Intensität korotierender Ereignisse	86
7.	Zusammenfassung	88
	Literatur	93
	Danksagung	
	Lebenslauf	

1. Einleitung

Schon frühzeitig zeigten Messungen auf Raumfahrzeugen eine Sorte von Intensitätsanstiegen, die sich durch wesentliche Merkmale von prompten Flareereignissen unterschieden. Sie erhielten den Namen korotierende Ereignisse, da sie nach jeweils 27 Tagen - dieser Zeitraum entspricht einer Sonnenrotation in der Nähe des Äquators - erneut beobachtet werden konnten (Bryant et al., 1965; Fan et al., 1966). Weder konnten diese Ereignisse auf größere Flares zurückgeführt werden, noch beobachtete man verstärkt auftretende Radiostrahlung. Der für prompte Flareereignisse typische steile Anstieg und langsamere Abfall im Intensitätsprofil wurde nicht gemessen. Die korotierenden Ereignisse zeigen ein symmetrisches Profil und dauern in Erdnähe typisch zwischen acht und zwölf Tagen. Verschiedene Phasen der Ereignisse sind bei Teilchen unterschiedlicher Energie zur selben Zeit zu beobachten, d. h. es gibt keine Geschwindigkeitsdispersion. Oberhalb von ca. 20 MeV/N können die korotierenden Ereignisse nicht beobachtet werden (McDonald et al., 1976).

Viele Autoren beschäftigen sich mit der Frage, ob diese Teilchen bei der Sonne oder im interplanetaren Raum beschleunigt worden sind (Lin und Anderson, 1967; Fan et al., 1968; Anderson, 1969; McCracken und Rao, 1970; McDonald und Desai, 1971; Krimigis et al., 1971; Roelof und Krimigis, 1973). Erste Modelle versuchten, die Beobachtungen durch kontinuierliche Beschleunigung der Teilchen bei der Sonne zu erklären. Die Teilchen sollten in einer sich vergrößernden Magnetfeldblase gefangen gehalten werden, die mit der Sonne korotiert (McDonald und Desai, 1971). Dieses Modell setzt voraus, daß die Magnetfeldkonfiguration sich über mehrere Monate aufrechterhält. Noch wichtiger ist die Konsequenz dieses Modells, daß die Intensität mit wachsendem radialen Abstand von der Sonne abnehmen muß.

Während des Fluges zum Jupiter stellte man mit den Raumsonden Pioneer 10 und 11 fest, daß die Intensität der korotierenden Ereignisse deutlich zunahm (McDonald et al., 1976). Ein positiver Gradient der Intensität von ca. 300 % / AU ist zwischen 0.3 und 4 AU gemessen worden (Kunow et al., 1977; Van Hollebeke et al., 1978). Korotierende Ereignisse höchster Intensität werden bei einer radialen Entfernung von 4 - 5 AU von der Sonne registriert. Bei größeren Entfernungen nimmt die maximale Intensität dann wieder ab (Van Hollebeke et al., 1978).

Barnes und Simpson (1976) konnten den Nachweis erbringen, daß diese Ereignisse durch interplanetare Beschleunigung an einem Vorwärts- und Rückwärtsschlag von "Corotating Interaction Regions", im folgenden mit CIR abgekürzt, entstehen. Bei einer radialen Entfernung von etwa 2 AU bilden sich diese Regionen aus, wenn korotierende schnelle Sonnenwindströme auf das langsamere Plasma stoßen. Theoretisch werden die dabei auftretenden Vorgänge in Arbeiten von Hundhausen (1973a, 1973b) abgehandelt. Einen Vergleich der theoretischen Modelle mit Messungen von Pioneer 10 und 11 zeigen die Arbeiten von Smith und Wolfe (1976) sowie Hundhausen und Gosling (1976).

Die korotierenden schnellen Sonnenwindströme entstehen oberhalb koronaler Löcher auf der Sonne. Diese Löcher werden bevorzugt während des solaren Minimums in Äquatornähe auf der Sonne beobachtet (Hundhausen, 1977). Aus diesem Grund häufen sich um das solare Minimum die Beobachtungen korotierender Ereignisse. Dies zeigen auch Messungen von Helios 1 und 2 zu Beginn des Jahres 1976.

Die Experimente auf Helios 1 und 2 messen korotierende Ereignisse relativ weit entfernt vom Entstehungsort. Feinheiten des Beschleunigungsprozesses können deshalb in dieser Arbeit nicht untersucht werden. Eine ausführliche Beschreibung des Experiments und seiner Eigenschaften findet man bei Kunow et al. (1975). Anhand der Messungen der Jahre 1975 und 1976 wird analysiert, wann korotierende Ereignisse beobachtet wurden, wann sich ein Zyklus von Ereignissen ausbildet und wann er endet. Weiterhin werden die Fragen untersucht, ob es einen zeitlichen Aufbau innerhalb eines Zyklus gibt, zu welchem Zeitpunkt die Ereignisse höchste Teilchenintensität aufweisen und durch welche Umstände bei 1 AU zeitweilig innerhalb eines Zyklus keine Ereignisse beobachtet werden können. Mehrere Gründe kommen für die beobachteten Schwankungen in Frage.

- Der Beschleunigungsprozess variiert mit der Zeit.
- Die Quelle der nichtbeschleunigten Teilchen ändert sich mit der Zeit.
- Die Ausbreitung zwischen Beschleunigung und Beobachter ist gestört.

Um diese Fragen untersuchen zu können, ist es wichtig, genauere Kenntnisse über Beschleunigungsvorgänge an Shocks zu besitzen. Diese werden im Kapitel 2 knapp dargestellt und Anwendungen für die Shockbeschleunigung der CIRs sowie Ergebnisse vorgestellt.

Kapitel 3 behandelt die Entstehung der CIRs und ihre Eigenschaften. Die Struktur des interplanetaren Mediums wird entschieden durch die CIRs bestimmt. Damit verknüpft sind Auswirkungen auf die Ausbreitung von Jupiterelektronen, sowie der solaren und galaktischen kosmischen Strahlung.

Das Teilchenexperiment der Universität Kiel auf dem Raumfahrzeug Helios 1 registrierte zu Beginn des Jahres 1976 die am besten ausgebildeten korotierenden Ereignisse der Jahre 1975 und 1976. Die Messungen von Helios 1 und 2 - Helios 2 wurde im Januar 1976 gestartet - werden im Kapitel 4 vorgestellt. Mit Hilfe eines einfachen Modells der Struktur des interplanetaren Raumes von Morfill et al. (1980) wird erklärt, wo die von Helios gemessenen Teilchen beschleunigt worden sind. Für jedes Ereignis wird eine Analyse der Winkelverteilungen der Intensität durchgeführt. Ziel ist es, herauszufinden, ob die Strömungen der Teilchen sich in verschiedenen Phasen des Ereignisses ändern.

Da korotierende schnelle Sonnenwindströme eine notwendige Voraussetzung für die Existenz von CIRs sind, werden die gemessenen Sonnenwinddaten von Helios 1 der Jahre 1975 und 1976 analysiert. Die mit den korotierenden schnellen Sonnenwindströmen verbundenen Intensitätsanstiege der Protonen im Energiebereich 4 - 13 MeV werden untersucht. Weiterhin interessiert, ob alle oder welche schnellen Sonnenwindströme mit Intensitätsanstiegen verbunden sind. Diese Fragen werden in Kapitel 5 behandelt.

Während eines Zyklus gut ausgebildeter korotierender Ereignisse gibt es gestörte Perioden. Dann sind entweder keine Ereignisse zu sehen oder die Intensität ist stark reduziert. Ob Vorgänge auf der Sonne eine Rolle spielen und wie die Vorgänge Einfluß haben auf die Beschleunigung oder Ausbreitung wird in Kapitel 6 untersucht.

2. Modelle der Beschleunigung kosmischer Strahlung

Durch zahlreiche Satelliten, die zeitlich hochauflösende Experimente zur Messung des Magnetfeldes, des Plasmas sowie der Teilchenintensität an Bord haben, ist es möglich, die Beschleunigung direkt am Ort des Geschehens zu untersuchen. Auffällig sind die in der Nähe der Shocks gemessenen Intensitätsanstiege. Zwei Sorten von interplanetaren Shocks werden beobachtet. Die eine Sorte wird etwa 2 Tage nach größeren Flares auf der Sonne bei der Erde gemessen. Die großräumige Form dieser flare-erzeugten Shocks ist durch statistische Messungen untersucht worden (Chao und Lepping, 1974). Wie die Form dieser "Zunge" aussieht und durch welche zusätzlichen Merkmale sie sich auszeichnet, wird von Hundhausen (1972) beschrieben. Die andere Sorte, sie trägt den Namen korotierende Shocks, wird durch die Wechselwirkung eines langlebigen schnellen Sonnenwindstroms mit langsamem Plasma erzeugt. Diese Shocks treten normalerweise paarweise auf und begrenzen die CIR. Die Beschleunigung korotierender Shocks wird in dieser Arbeit näher untersucht.

Den Beschleunigungsprozessen an interplanetaren Shocks wird großes Interesse entgegengebracht, da interstellare Shocks die Teilchen auf dieselbe Weise beschleunigen wie interplanetare Shocks. Die im interplanetaren Raum gewonnenen Erkenntnisse über die Vorgänge bei der Beschleunigung an Shocks ermöglichen fundierte Aussagen über die Beschleunigung der kosmischen Strahlung. Da neben der Shockbeschleunigung noch andere Arten bekannt sind, ist es wichtig darzustellen, welcher Stellenwert der Shockbeschleunigung zugemessen wird. Auch sollen im folgenden die anderen bekannten Beschleunigungsmechanismen vorgestellt werden.

2.1. Beschleunigung der galaktischen kosmischen Strahlung

Schon frühzeitig wurde theoretisch der Einfluß magnetohydrodynamischer Shocks auf eine gegebene Teilchenpopulation untersucht (Dorman und Freidmann, 1959; Shabansky, 1961). Die Frage nach Beschleunigungsort und -art der kosmischen Strahlung - also nach dem Ursprung - war Anlaß für Theoretiker, Modelle zu ersinnen. Lingenfelter (1979) beschreibt den Weg, der in dieser Frage bis heute beschritten worden ist.

Lange Zeit lagen zwei Modelle miteinander in Konkurrenz, die verschiedene Entstehungsorte für die kosmische Strahlung besaßen. Bei dem einen Modell wird die kosmische Strahlung in diskreten Quellen, z. B. Supernovae, erzeugt. Bei Supernovae-Explosionen sollen Shocks mit hohen Geschwindigkeiten entstehen und ihre Strömungsenergie auf die Teilchen übertragen (Baade und Zwicky, 1934; Colgate und Johns, 1960). Dieser Supernovae Mechanismus galt lange Zeit als wahrscheinlichstes Modell für die Entstehung kosmischer Strahlung.

Ganz anderer Natur war das Beschleunigungsmodell von Fermi (1949). Durch Wechselwirkung von Wellen mit Teilchen im interstellaren Raum sollen die Teilchen Nettoenergie gewinnen. Hier liegt eine diffuse Quelle als Entstehungsort für die kosmische Strahlung vor. Heute glaubt man, daß der Hauptanteil der Beschleunigung galaktischer kosmischer Strahlung von relativ häufig vorkommenden interstellaren Shocks geleistet wird (Axford, 1980).

2.2. Shockbeschleunigung und statistische Beschleunigung

Die interstellaren und interplanetaren Shocks werden durch großräumige Materiebewegungen erzeugt, so z. B. durch Supernovae, expandierende H II - Regionen, stellare Winde und Flares. Materiebewegungen auf kleiner Skala führen zu verschiedenen Typen von Wellen. Sowohl Shocks als auch die verschiedenen Wellen können Teilchen beschleunigen. Die Teilchen werden bei der Reflexion und auch bei der Transmission eines Shocks durch ein elektrisches Feld beschleunigt, welches auftritt, solange nicht Shocknormale und Magnetfeldrichtung identisch sind. Von einer statistischen Beschleunigung wird gesprochen, wenn die Teilchen durch Stöße mit Streuzentren, die statistisch im Raum verteilt sind, Nettoenergie gewinnen. Im Sonnenwind dienen hauptsächlich Alfvénwellen und magnetoakustische Wellen als Streuzentrum. Genauere Beschreibungen findet man bei Fermi (1949, 1954), Hasselmann und Wibberenz (1968), Thompson (1955) und bei Fisk (1976).

Die statistische Beschleunigung spielt gegenüber der Shockbeschleunigung eine untergeordnete Rolle, ist aber nicht zu vernachlässigen. Sie ist in der Lage, aus dem Plasma heraus Teilchen zu beschleunigen. Dies ist bei der Shockbeschleunigung nicht möglich und somit wäre eine zweistufige Beschleunigung - erst statistisch und dann Shockbeschleunigung -

denkbar und wahrscheinlich. Bei diesem gekoppelten Prozess würde keine, z. B. durch Flares, vorbeschleunigte Population von Teilchen nötig sein, um eine Shockbeschleunigung zu ermöglichen. Dieser Gedanke wird bei der Erklärung korotierender Ereignisse, die sich an den korotierenden Shocks ausbilden, wichtig.

Bisher wurde bei der Shockbeschleunigung immer nur von dem Einfluß eines einzelnen Shocks gesprochen. Toptyghin (1980) beschreibt ein Modell mit einem Ensemble von Shocks, deren Fronten statistisch im Raum verteilt sind. Zwischen den Shocks werden verschiedene starke Turbulenzen des Magnetfeldes angenommen. Dadurch entstehen Zellen mit jeweils unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen. Die Teilchenausbreitung und die Beschleunigung muß durch eine Vielzahl von Transportgleichungen in geeigneter Form beschrieben werden. Auf diesem Gebiet liegen erste Ergebnisse vor, die in einem Übersichtsartikel zu Beschleunigungsvorgängen von Toptyghin (1980) dargestellt werden.

2.3. Energieverluste

Neben den Mechanismen, die die Teilchen beschleunigen, werden auch Vorgänge beschrieben, die den Teilchen Energie entziehen. Die Wirksamkeit der Beschleunigung kann durch verschiedene Faktoren reduziert werden (Völk et al., 1979; Bulanov und Dogiel, 1979; Krimsky et al., 1979):

- Die Shockfronten besitzen nur eine endliche Lebensdauer.
- Die Magnetfeldturbulenzen, die für eine mehrfache Wechselwirkung Teilchen - Shock sorgen, müssen vom Shock aufgebaut werden.
- Die Magnetfeldturbulenzen werden auch gleichzeitig durch verschiedene Effekte gedämpft.
- Es treten Energieverluste durch Ionisation, Coulomb Kernstöße, adiabatische Abkühlung, Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung und inversen Comptoneffekt auf.

Shocks sind oft mit "Verlustregionen" gekoppelt (SNR, H II Regionen stellare Winde).

Trotz aller Verluste scheint die Shockbeschleunigung in einem turbulenten Medium der beste theoretische Ansatz zur Erklärung der hochenergetischen galaktischen kosmischen Strahlung zu sein.

2.4. Modelle der Shockbeschleunigung

Im folgenden werden verschiedene Konzepte für die Wechselwirkung zwischen Teilchen und Shock beschrieben. Theoretische Vorhersagen werden verglichen mit Beobachtungen, die durch Meßsonden im interplanetaren Raum gewonnen wurden. Die folgenden Konzepte werden kurz vorgestellt:

- Einmalige Wechselwirkung Teilchen - Shock
- Mehrfache Wechselwirkung Teilchen - Shock durch streuendes Medium in der Nähe des Shocks.

Die einmalige Wechselwirkung zwischen Teilchen und Shock ist sicherlich ein Beschleunigungsprozess, der auf einer kürzeren Zeitskala erfolgt als die mehrfache Wechselwirkung. Auch kann man sich vorstellen, daß der Energiezuwachs nicht so hoch sein kann. Am einfachsten kann der Prozess der einmaligen Wechselwirkung bei einem senkrechten Shock erläutert werden. Die Shockfront und das Magnetfeld auf der Vorderseite des Shocks sind in diesem Fall parallel. Abbildung 1 zeigt die Situation in einem Koordinatensystem, in dem der Shock ruht. Das Plasma strömt auf der Vorderseite des Shocks mit einer Geschwindigkeit U_1 in Richtung des Shocks. Durch die Bewegung des Plasmas wird ein elektrisches Feld E erzeugt, welches senkrecht auf der Plasmageschwindigkeit U_1 und dem Magnetfeld B_1 steht. Dieses elektrische Feld erzwingt eine $E \times B$ -Drift der Teilchen in Richtung der Shockfront. Sobald der Gyrationradius die Shockfront erreicht hat, registriert das Teilchen eine größere Magnetfeldstärke auf der Rückseite des Shocks. Das Teilchen vollführt eine Gradient B - Drift in Richtung des elektrischen Feldes. In dieser Phase findet die Beschleunigung der Teilchen statt. Der Weg eines Teilchens durch einen senkrechten Shock ist in Abbildung 2 gezeigt. Der Energiegewinn beträgt im Mittel $E_1/E_2 = B_1/B_2$ (Parker, 1958; Hudson, 1965; Chen und Armstrong, 1972;

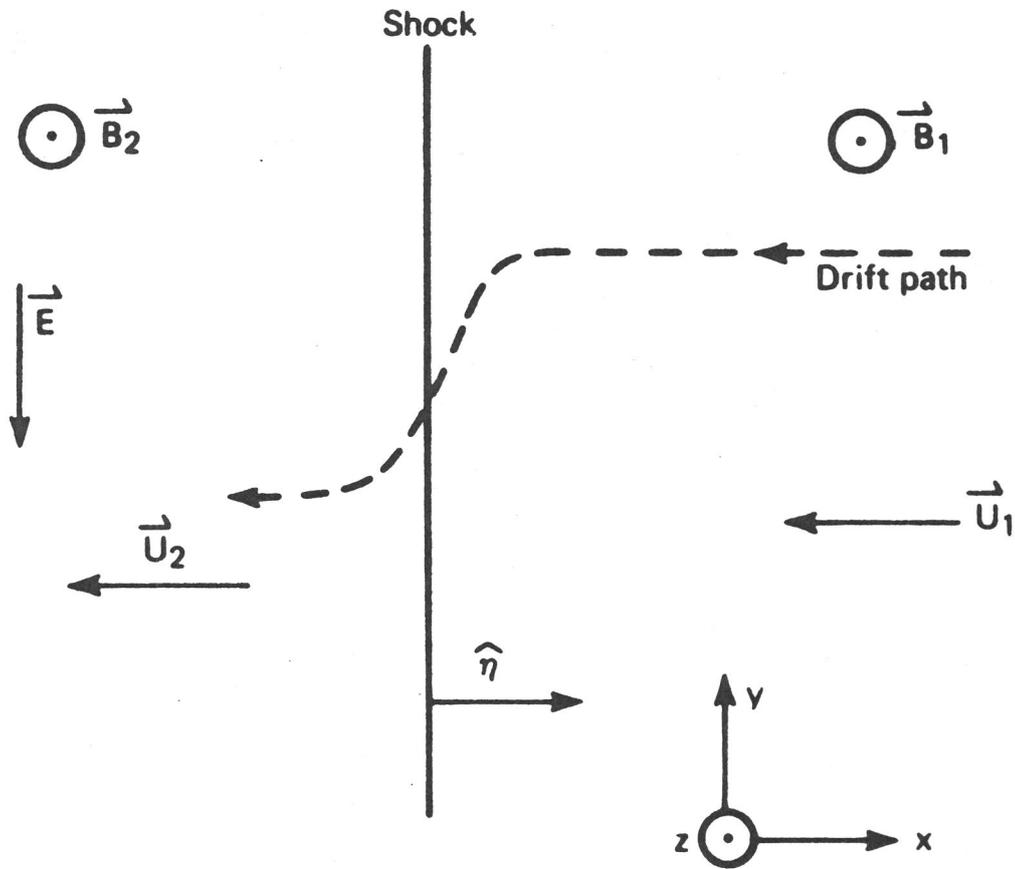


Abb. 1: Geometrie des senkrechten Shocks (Armstrong et al., 1977)

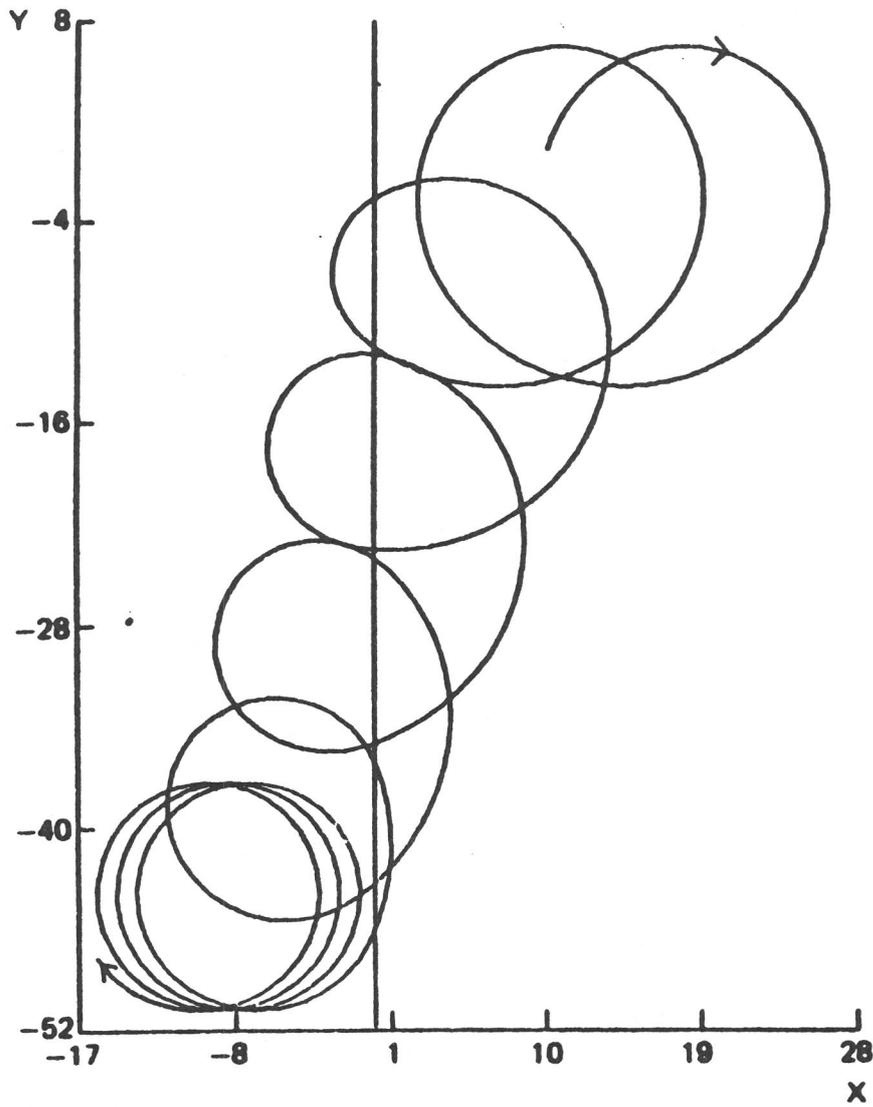


Abb. 2: Transmission eines geladenen Teilchens durch einen senkrechten Shock (Armstrong et al., 1977)

Sarris und Van Allen, 1974; Topyghin, 1980). Der Beschleunigung an einem senkrechten Shock werden folgende Eigenschaften von der Theorie her vorhergesagt (Armstrong et al., 1977):

- Alle Teilchen durchdringen den Shock. Die beschleunigten Teilchen müßten auf der Rückseite des Shocks beobachtet werden.
- Die Winkelverteilungen der Intensität zeigen auf der rückwärtigen Seite des Shocks Maxima senkrecht zum Magnetfeld.

So einfach dieser Fall auch ist, in der Natur wird sich ein senkrechter Shock wegen der Schwankungen der Magnetfeldrichtung nicht lange aufrecht erhalten können. Auch zeigen Beobachtungen, daß häufig beschleunigte Teilchen vor dem Shock gemessen werden.

Interessant ist deshalb, wie sich die Aussagen ändern, wenn kleine Winkel bis etwa 10^0 zwischen Magnetfeld und Shockfront zugelassen werden. Dieser Shock heißt im Englischen "small angle oblique shock". Der Hauptunterschied zum senkrechten Shock besteht darin, daß jetzt Teilchen reflektiert werden und sich im Raum vor dem Shock aufhalten können. Folgende Vorhersagen über die Beschleunigung an solch einem Shock existieren (Armstrong et al., 1977):

- Die reflektierenden Teilchen gewinnen mehr Energie als die Teilchen, die den Shock durchdringen.
- Die Winkelverteilungen der Intensität zeigen starke Anisotropie entlang des Magnetfeldes vor dem Shock und Maxima senkrecht zum Magnetfeld auf der Rückseite des Shocks.

Mit diesem Beschleunigungsmodell ist es nicht möglich, Teilchen aus dem Sonnenwind heraus zu beschleunigen. Die Teilchen müssen also bereits vorbeschleunigt sein und Energien besitzen, die deutlich oberhalb der Energien liegen, die im Sonnenwind vorkommen (Gosling et al., 1980).

Intensitätsmessungen von Protonen und Alphapartikeln in der Nähe von Shocks zeigen zwei Sorten von Anstiegen. Der langsame Anstieg, der bereits 10 Stunden oder länger vor Eintreffen des Shocks beobachtet wird,

wird ESP-Ereignis genannt. ESP ist die Abkürzung für "Energetic Storm Particle". Meist ist diesem langsamen Anstieg in direkter Nähe des Shocks ein rapider Anstieg überlagert. Dieser Anstieg heißt Shockspike und dauert nur wenige Minuten. Von Shockspikes existieren zahlreiche Beobachtungen (Van Allen und Ness, 1967; Armstrong et al., 1970; Ogilvie und Arens, 1971; Palmeira et al., 1971; Sarris und Van Allen, 1974; Armstrong et al., 1976; Armstrong et al., (1977)). Die bisher beschriebenen Modelle der einmaligen Wechselwirkung beschreiben in recht guter Weise die Beobachtungen im Zusammenhang mit Shockspikes. Hervorzuheben ist, daß die vorhergesagten Winkelverteilungen der Intensität mit hohen Anisotropien vor dem Shock und Intensitätsmaxima senkrecht zum Magnetfeld auf der Rückseite des Shocks beobachtet werden (Zölllich, 1977). Die Shockspikes werden nur bis zu Energien von maximal 25 MeV/N registriert, im Gegensatz zu den ESP-Ereignissen. Hier beobachtet man Teilchen wesentlich höherer Energie mit einer Anisotropie, die geringer ist als bei Shockspikes und die jeweils vom Shock weggerichtet ist. Die ESP-Ereignisse haben eine Dauer von 10 Stunden und länger.

Bei diesen Beobachtungen erscheint ein Modell sinnvoll, bei dem Teilchen durch ein turbulentes Medium zu häufiger Wechselwirkung mit der Stoßwelle veranlaßt werden. Im interplanetaren Raum sind solche Fluktuationen des Magnet- und des elektrischen Feldes in der Nähe von Shockfronten beobachtet worden. Die Teilchen werden durch diese Fluktuationen gestoßen. Durch die dabei auftretende Richtungsänderung der Ausbreitung queren sie mehrfach die Shockfront und gewinnen dabei Energie. Damit ließen sich die beobachteten höheren Energien der Teilchen bei ESP-Ereignissen einfach erklären.

Eine Beschleunigung von Teilchen findet auch dann statt, wenn durch die Plasmabewegung kein elektrisches Feld in der Shockfront erzeugt wird. Dies kommt vor, wenn die Plasmaströmung und das Magnetfeld parallel oder antiparallel gerichtet sind. In diesem Fall liegt eine Diffusion der Teilchen vor, die an Magnetfeldinhomogenitäten gestreut werden und die verschiedene Geschwindigkeit vor und hinter dem Shock haben.

An solch einem Shock gewinnen die Teilchen Energie durch die Fermi-beschleunigung erster Art. Folgende Beobachtungen können mit diesem Modell erklärt werden:

- Vor dem Shock gibt es einen exponentiellen Anstieg der Intensität.
- Das Energiespektrum kann durch ein Potenzgesetz dargestellt werden.

Weiterhin ist wichtig, nach welcher Zeit sich ein Gleichgewicht einstellt, so daß zeitunabhängige Energiespektren und radiale Gradienten der Intensität beobachtet werden können. Bis sich dieses Gleichgewicht einstellt, vergeht folgende Zeit (Forman und Morfill, 1979):

$$\tau_{\text{acc}} = k \ln (E/E_0)/V^2$$

(Zeichenerklärung siehe Seite 87)

Diese für die Beschleunigung charakteristische Zeit wird eine wichtige Rolle spielen bei Untersuchungen möglicher Störungen.

Dieses Modell ist auf verschiedene räumliche Konfigurationen und Teilchensorten angewandt worden. Im Zusammenhang mit einem radial sich ausbreitendem Shock hat Fisk (1969) das Problem der solaren Modulation und des Forbushanstiegs und Abfalls berechnet. Fisk und Lee (1980) berechnen die Beschleunigungsvorgänge an den begrenzenden Shocks von CIRs mit Hilfe dieses Modells. Im folgenden Abschnitt wird diese Arbeit vorgestellt.

2.5. Beschleunigungsmodell von Fisk und Lee (1980) für CIRs

In einem Koordinatensystem, welches mit der Sonne fest verbunden ist und rotiert, zeigt die Plasmageschwindigkeit in Richtung des Magnetfeldes (Hundhausen, 1972). In diesem Fall wird durch die Plasmaströ-

mung kein elektrisches Feld erzeugt. Deshalb erfahren die Teilchen eine Fermibeschleunigung erster Art durch Kompression zwischen Magnetfeldirregularitäten, die sich vor und nach dem Shock mit verschiedener Geschwindigkeit bewegen. Das Neue an diesem Modell war, daß in der Transportgleichung für die Teilchen neben Diffusion und Konvektion die adiabatische Abkühlung berücksichtigt wurde. Dieses Modell ist in der Lage, folgende Beobachtungen zu erklären:

- exponentielle Spektren bei der Erde
- Änderung der Spektren mit radialem Abstand von der Sonne
- radiale Gradienten der Intensität
- verschiedene Intensitäten und Spektren am Vorwärts- und Rückwärtsschok der CIRs.

3. Großräumige Strukturen im äußeren Sonnensystem und Einflüsse auf Ausbreitungsvorgänge

In diesem Kapitel werden die großräumigen Strukturen innerhalb und außerhalb der Erdbahn beschrieben. Besonderen Wert wird auf die Struktur im äußeren Sonnensystem gelegt. Hier dominiert der Einfluß von CIRs, der sich auf die Ausbreitung galaktischer und solarer kosmischer Strahlung und auf die Jupiterelektronen entscheidend auswirkt. Messungen von Pioneer 10 und 11 zeigen die Eigenschaften der CIRs, speziell die Beschleunigung an den begrenzenden Shocks.

3.1. Entstehung von CIRs

In Erdnähe zeigen sich deutlich schnelle und langsame Sonnenwindströme als Hauptmerkmal der Plasmamessungen. Diese strukturieren das interplanetare Medium bis etwa 2 AU, wie Messungen von Pioneer 10 und 11 gezeigt haben. In der Anstiegsphase des schnellen Sonnenwindstroms kommt es zu einer Wechselwirkungsregion zwischen dem schnellen und dem davorliegenden langsameren Plasma. Hier entsteht ein Kompressionsgebiet. Die Untersuchungen der Effekte in dieser Region bei größeren radialen Entfernungen waren ein Hauptziel der Sonnenwindmessungen von Pioneer 10 und 11.

Die Existenz korotierender Shocks im Zusammenhang mit schnellen Sonnenwindströmen wurde bereits von Parker (1963) vorhergesagt. In Erdnähe konnten diese Shocks aber nur selten beobachtet werden. Hundhausen (1973b) präsentierte ein Modell, welches erklären konnte, warum die Shocks innerhalb 1 AU selten zu sehen waren. Dieses Modell sagte voraus, daß korotierende Shocks sich erst bei radialen Entfernungen größer 1 AU von der Sonne ausbilden.

Messungen von Pioneer 10 und 11 zeigten, daß bei Entfernungen größer als etwa 2 AU Shocks sich ausbilden, die ein Gebiet erhöhter Turbulenzen begrenzen. Das Magnetfeld und das Plasma sind in diesen Regionen

stark komprimiert. Diese Gebiete heißen CIRs. Ein neueres Modell von Dryer (1978) kann relativ genaue Vorhersagen über den zeitlichen Verlauf der Plasmageschwindigkeit, der Dichte und Temperatur sowie über die Magnetfeldstärke bei größeren radialen Entfernungen machen. Die entsprechenden Größen bei 1 AU dienen als Eingangsparameter. Dieses Modell beschreibt also die Entwicklung der CIRs aus den schnellen Sonnenwindströmen.

3.2. Struktur des interplanetaren Raums im äußeren Sonnensystem

Die CIRs wachsen mit zunehmender radialer Entfernung in ihrer Breite an (Smith und Wolfe, 1977). Derselben Arbeit ist Abbildung 3 entnommen, welche die Struktur im äußeren Sonnensystem wiedergibt. Gebiete mit hohen Turbulenzen wechseln sich ab mit ruhigen Gebieten. Wegen der zunehmenden Breite der CIRs wird es bei größeren radialen Entfernungen passieren, daß der Vorwärtsschock auf den Rückwärtsschock einer vorausgegangenen CIR trifft. Bei zwei schnellen Sonnenwindströmen, die CIRs ausbilden, ergibt sich eine großräumige Struktur wie in Abbildung 4 dargestellt (Gold und Roelof, 1978). In diesem Fall mit zwei CIRs treffen diese sich bei einer radialen Entfernung von etwa 10 AU. Die ruhigen Gebiete sind abgeschlossen und haben eine radiale Ausdehnung zwischen etwa 10 und 20 AU, je nachdem ob zwei oder eine CIR existieren. Diese reichen nicht an die Grenze der Heliosphäre.

3.3. Einfluß der CIRs auf die Ausbreitung energetischer Teilchen

Die Struktur des äußeren Sonnensystems hat großen Einfluß auf Ausbreitungsvorgänge galaktischer und solarer kosmischer Strahlung sowie auf Elektronen, die vom Jupiter stammen. Mit Pioneer 11 wurden starke Variationen der Elektronen vom Jupiter registriert, die in Zeitabständen einer Sonnenrotation auftraten. Conlon und Simpson (1977) haben für diese Beobachtungen ein Modell gefunden. Dieses Modell nimmt gleichmäßige Abstrahlung von beschleunigten Jupiter-elektronen an und eine Ausbreitung entlang und quer zum Magnetfeld. Hauptaussage ist, daß Jupiter-elektronen nur dann tief ins Sonnen-

COROTATING INTERPLANETARY REGIONS

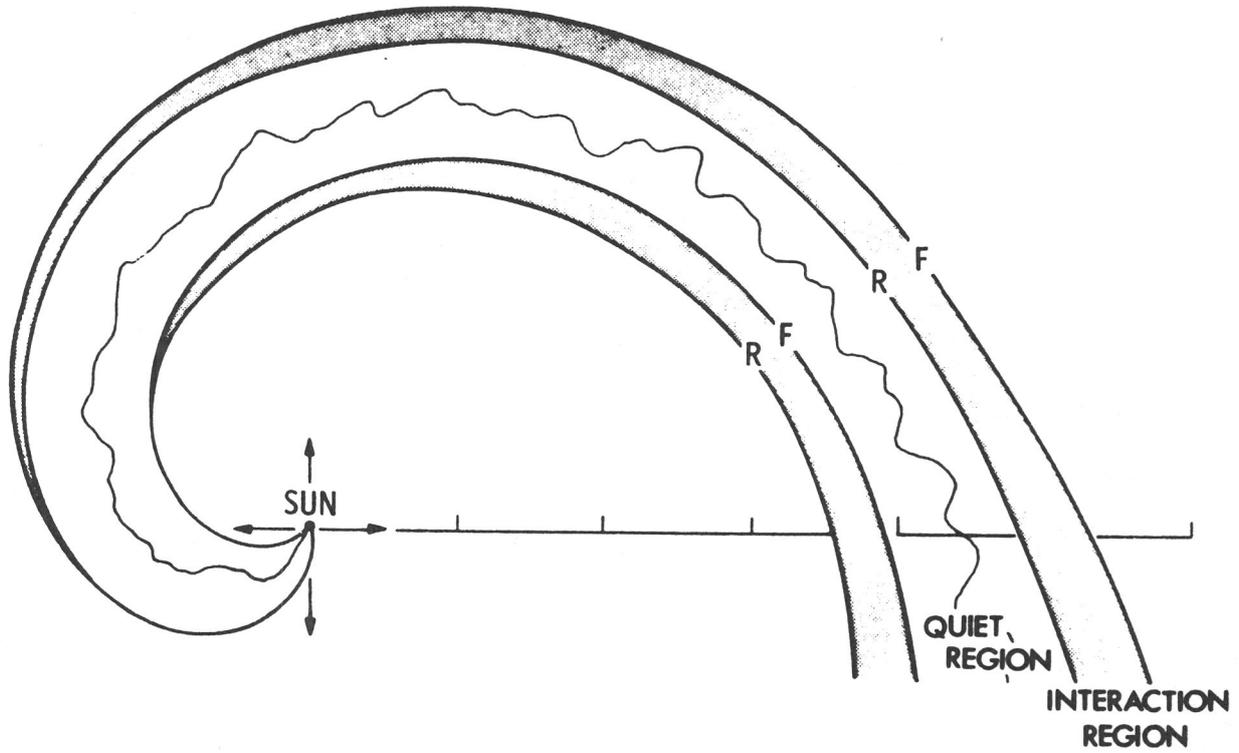


Abb. 3: Struktur des interplanetaren Raumes bis 5 AU
(Smith und Wolfe, 1977).

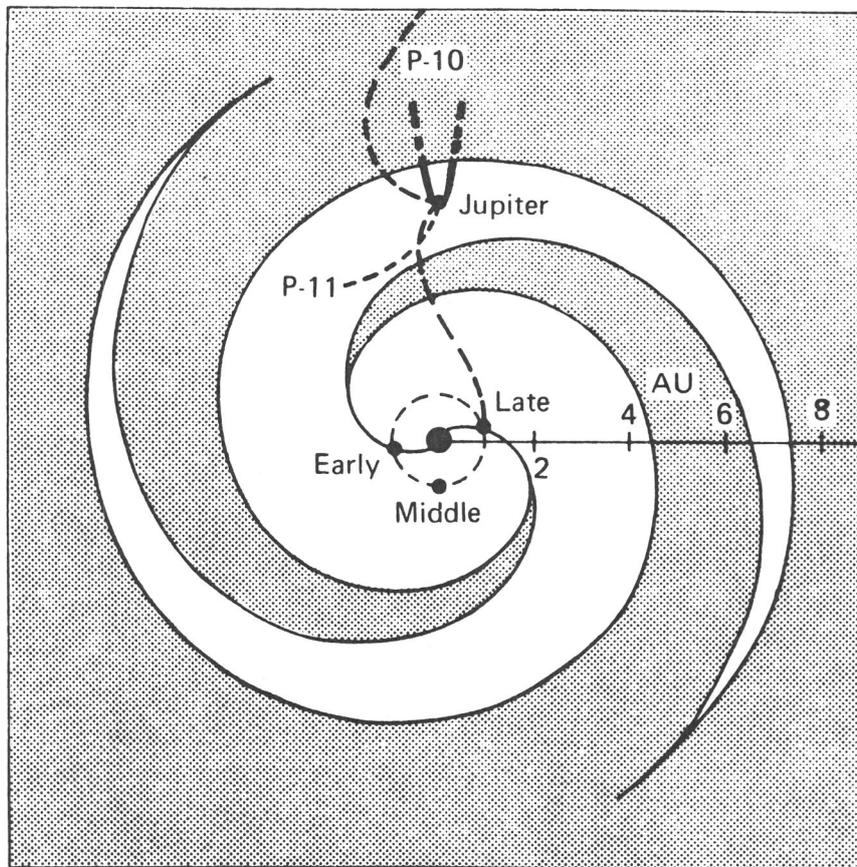


Abb. 4: Struktur der Heliosphäre, wenn zwei korotierende schnelle Sonnenwindströme existieren (Gold und Roelof, 1978)

system eindringen können, wenn sich sowohl der Beobachter in Erdnähe als auch Jupiter in einer ruhigen Region zwischen zwei CIRs befinden. Bei solch einer Konstellation können Jupiterelektronen innerhalb 1 AU Entfernung von der Sonne nachgewiesen werden (Chenette et al., 1977). Die CIRs stören die Ausbreitung der Elektronen in Richtung Sonne, sobald Beobachter und der Jupiter in verschiedenen Regionen liegen. Dann wirken die CIRs wie Barrieren für die Elektronen.

Ähnliche Beobachtungen erhält man bei solaren Flareereignissen. Smith und Wolfe (1977) zeigen anhand der von Pioneer 10 gemessenen Protonenintensität eines der größten Flareereignisse vom August 1972, daß nach jedem Vorwärts- und Rückwärtsschock einer CIR die Intensität sich stark reduziert. Auch bei solaren Flareereignissen spielt es eine Rolle, ob der Beobachter und der Flare gemeinsam in einem ruhigen Gebiet zwischen den CIRs liegen, oder ob eine andere Konstellation vorliegt.

Bereits erwähnt wurde die Reduktion der galaktischen kosmischen Strahlung, die im Zusammenhang mit korotierenden schnellen Sonnenwindströmen beobachtet wurde (Barouch und Burlaga, 1975). Diese Reduktion wird Forbushabfall genannt. Morfill et al. (1979) erklären diese Beobachtungen mit einem Modell, welches erlaubt, den Diffusionskoeffizienten als Funktion der Phase im Sonnenwind aufgrund von Messungen des Plasmas und Magnetfeldes zu berechnen. Einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Forbushabfällen bei der Erde und von Pioneer 11 gemessenen CIRs konnte festgestellt werden, nachdem die Korotationszeit zwischen Pioneer und der Erde berücksichtigt worden war (Smith und Wolfe, 1977). Die CIRs beeinflussen also in entscheidender Weise die Ausbreitung der solaren und galaktischen kosmischen Strahlung.

Eine weitere Eigenschaft der CIRs ist ihr Vermögen, Teilchen zu beschleunigen. Korreliert mit den begrenzenden Shocks werden Intensitätsanstiege der Protonen und Alphateilchen registriert (Barnes und Simpson, 1976; Pesses et al., 1978). Solare Beschleunigung konnte für diese korotierenden Ereignisse ausgeschlossen werden, da ein positiver Gradient des Intensitätsmaximums zwischen 0.3 und 5 AU

beobachtet wurde (McDonald et al., 1976; Van Hollebeke et al., 1978). Barnes und Simpson (1976) konnten eindeutig interplanetare Beschleunigung am Vorwärts- und Rückwärtsshock nachweisen. Dieser Arbeit ist Abbildung 5 entnommen. Sie zeigt typisch die Änderungen der Intensität-, Plasma- und Magnetfeldmessungen, die von Pioneer während der Passage einer CIR gemessen wurden.

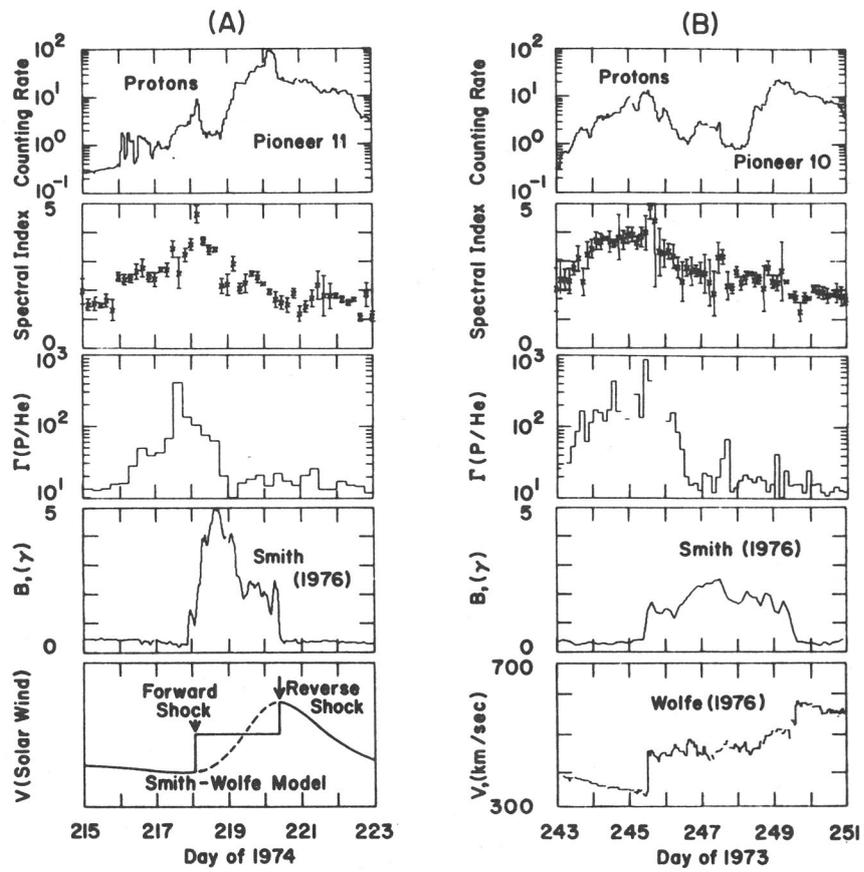


Abb. 5: Charakteristische Messungen der Intensität, des Plasmas und des Magnetfeldes in der Nähe von CIRs (Barnes und Simpson, 1976)

4. Messungen korotierender Ereignisse zu Beginn des Jahres 1976

Während des solaren Minimums zu Beginn des Jahres 1976 haben Helios 1 und 2 ausgeprägte korotierende Ereignisse gemessen. Anhand der Intensitäts-, Plasma- und Magnetfeldmessungen sollen die Unterschiede zu solaren Ereignissen noch einmal deutlich werden. Weiterhin wird untersucht, welche Eigenschaften Magnetfeld- und Plasmamessungen in verschiedenen Phasen der korotierenden Ereignisse aufweisen.

4.1. Unterschied solarer und korotierender Ereignisse

Die auf Helios 1 und 2 gemessenen Stundenmittel der Intensitäten von Protonen, Alphateilchen und Elektronen in verschiedenen Energiekanälen sind in den Abbildungen 6 und 7 für den Zeitraum Januar bis April 1976 dargestellt. Ein Ereignis ist in allen Teilchen- und Energiekanälen gemessen worden. Die Teilchen dieses Ereignisses sind durch einen Flare auf der Sonne beschleunigt worden. Genauere Untersuchungen dieses Ereignisses findet man bei Bieber et al. (1980). Die anderen vier Ereignisse, die bei den Protonen mit Energien zwischen 4 und 13 MeV gemessen wurden, zeigen folgende Beobachtungen, die erlauben, sie zu den korotierenden Ereignissen zu zählen:

- Die Zeitspanne zwischen den Ereignissen beträgt etwa 27 Tage; dies entspricht etwa einer Sonnenrotation.
- Die Elektronen zeigen keinen Intensitätsanstieg.
- Die korotierenden Ereignisse sind bei Teilchen mit Energien bis zu etwa 15 MeV/N zu beobachten.

Bei Flareereignissen werden die Teilchen also wirkungsvoller beschleunigt als bei korotierenden Ereignissen. Die Tatsache, daß keine Elektronen gemessen werden, weist ebenso wie die relativ niedrige Grenzenergie auf Shockbeschleunigung hin.

In der folgenden Abbildung 8 sind nur die Protonen mit Energien zwischen 4 und 13 MeV, die auf Helios 1 und 2 gemessen wurden, dargestellt.

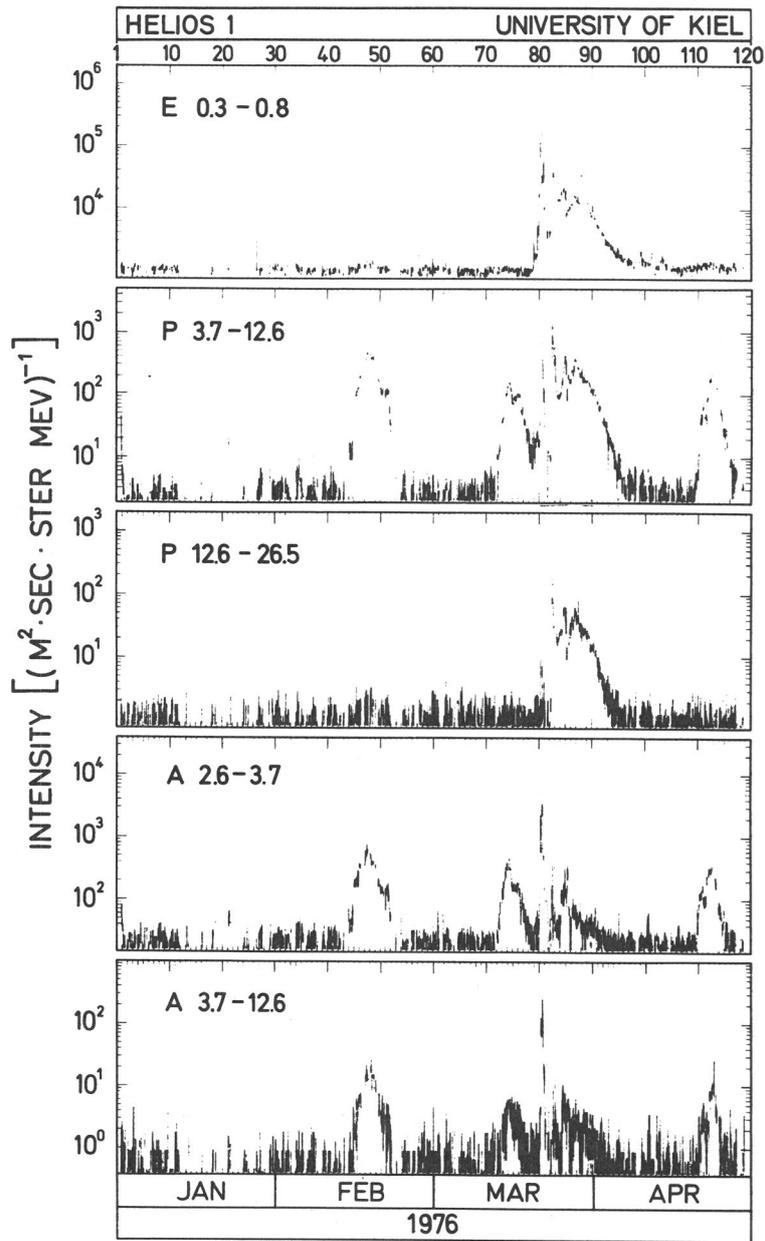


Abb. 6: Intensitätsmessungen auf Helios 1 von Januar bis April 1976

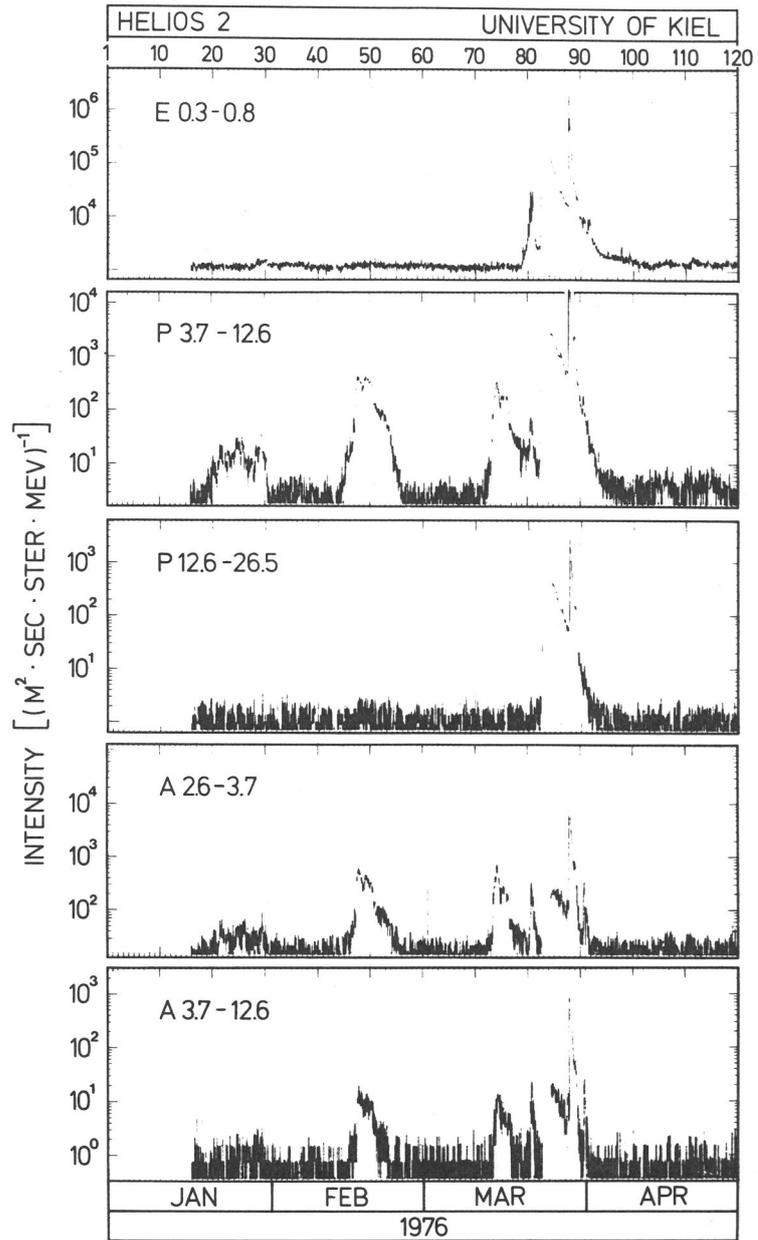


Abb. 7: Intensitätsmessungen auf Helios 2 von Januar bis April 1976

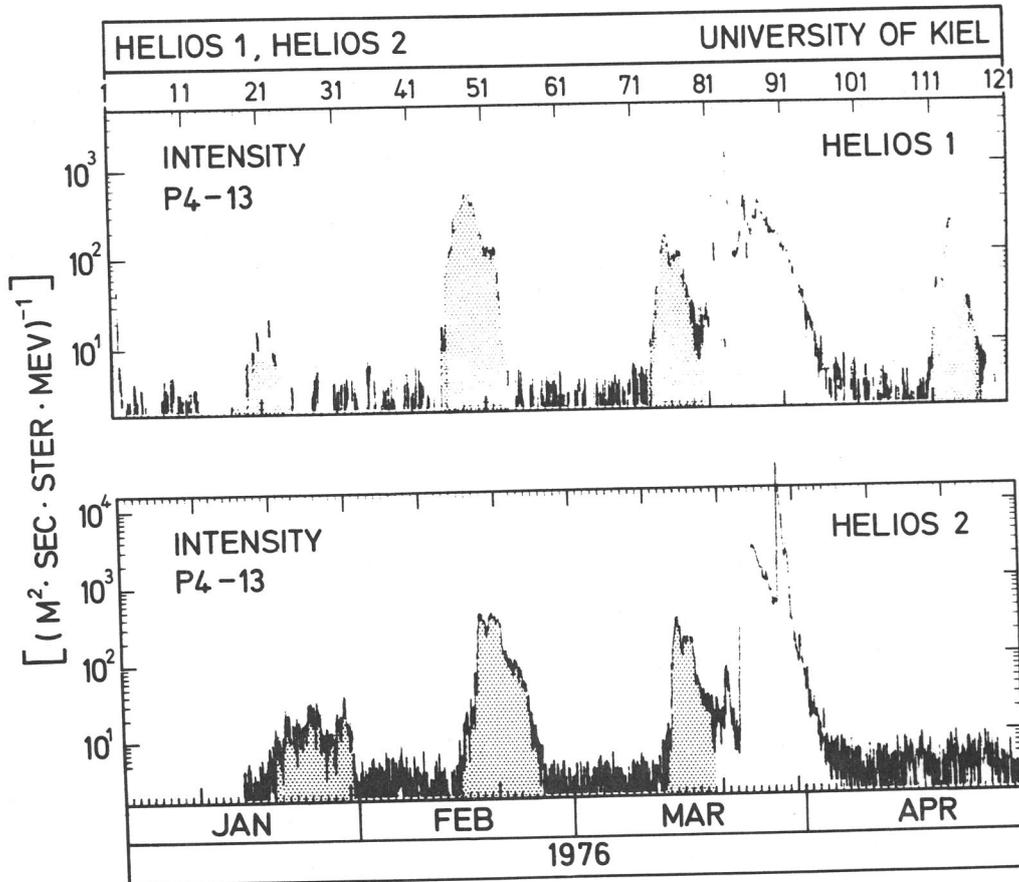


Abb. 8: Vergleich der Protonenintensitäten (4 - 13 MeV) auf Helios 1 und 2 für den Zeitraum Januar bis April 1976

Innerhalb dieses Zyklus korotierender Ereignisse zeigen nicht alle gleiche Intensitätsmaxima. Wegen des gemessenen positiven Gradienten der Teilchenintensität bis zu einer radialen Entfernung von 4 AU (Van Hollebeke et al., 1978) wäre bei wachsendem Abstand ein höheres Intensitätsmaximum zu erwarten. Die Unterschiede in der Intensität des korotierenden Ereignisses im April 1976 können allerdings nicht durch Gradienten erklärt werden. Hier ergäbe sich ein Gradient der Intensität von etwa 1500 % / AU im deutlichen Gegensatz zu dem Gradienten des korotierenden Ereignisses im März 1976, der bei 300 % / AU lag. Auch die im Januar 1976 gemessenen Intensitäten deuten auf eine Störung hin. Welcher Natur diese Störungen sind, wird im Kapitel 6 diskutiert.

Abbildungen 6 und 9 - für Helios 2 sind es 7 und 10 - zusammen erlauben, aus der Vielzahl von Ereignissen die korotierenden herauszufiltern. Hierfür wurden die Sonnenwindgeschwindigkeit sowie die Richtung des Magnetfeldes und das Proton/Alpha-Verhältnis aufgetragen. Der Azimutwinkel des Magnetfeldes ist der Winkel zwischen der Linie Raumfahrzeug, Sonne und der Projektion des Magnetfelvektors in die Ebene der Ekliptik. Die Orientierung des Winkels ist in Abbildung 11 zu sehen. Zeigt der Vektor radial von der Sonne weg, entspricht dies einem Azimutwert von 180° . Die chemische Zusammensetzung dieser Ereignisse wird durch das Verhältnis von Proton zu Alphateilchen charakterisiert. Diese Größe eignet sich gut zur Unterscheidung, da im Gegensatz zu solaren Ereignissen dieses Verhältnis bei korotierenden Ereignissen nahezu konstant ist (McGuire et al., 1978; Scholer et al., 1979; Witte, 1979). Nimmt man noch andere chemische Verhältnisse für korotierende Ereignisse hinzu, so stellt man fest, daß diese den Elementhäufigkeiten im Sonnenwind sehr nahe kommen (Gloeckler, 1979). Es erscheint also wahrscheinlich, daß die korotierenden Ereignisse aus dem Sonnenwind heraus beschleunigt wurden.

Die in Abbildungen 9 und 10 aufgetragenen Größen sollen also eine Unterscheidung korotierender Ereignisse von solaren ermöglichen. Folgende Beobachtungen fallen auf:

- Die korotierenden Teilchenströme werden gleichzeitig mit schnellen Sonnenwindströmen gemessen, die ca. nach 27 Tagen erneut zu beobachten sind.

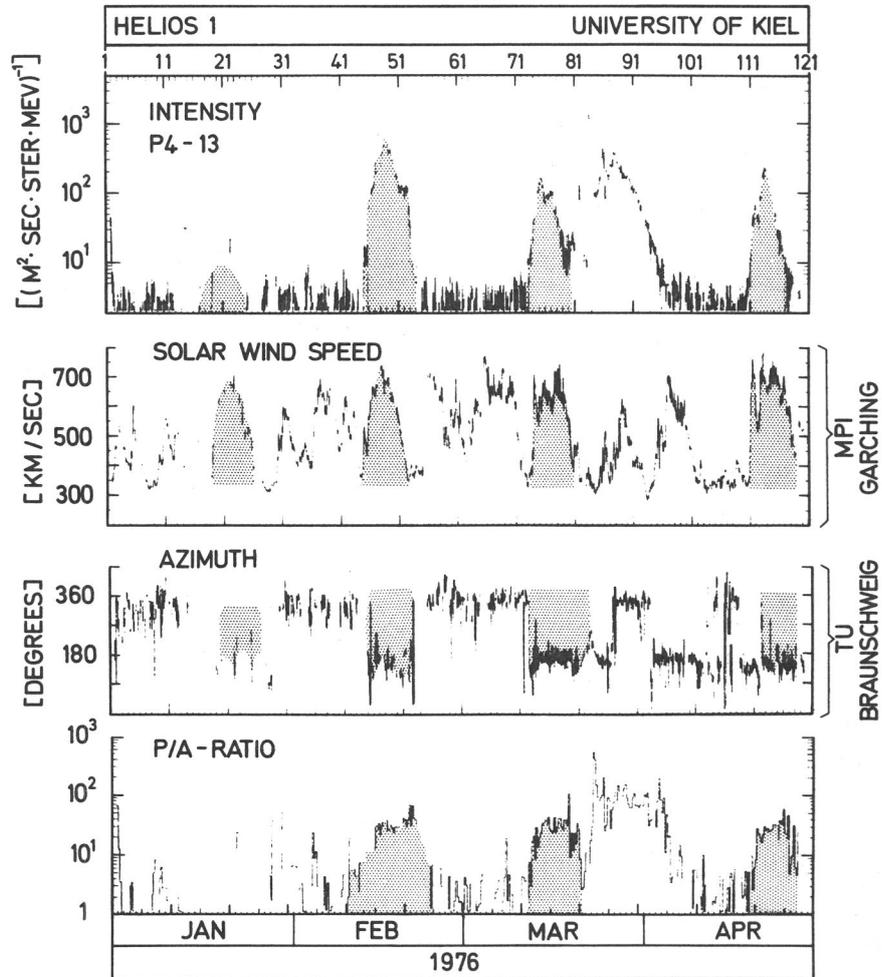


Abb. 9: Intensitäts-, Plasma- und Magnetfeldmessungen zur Erkennung korotierender Ereignisse - Messungen auf Helios 1

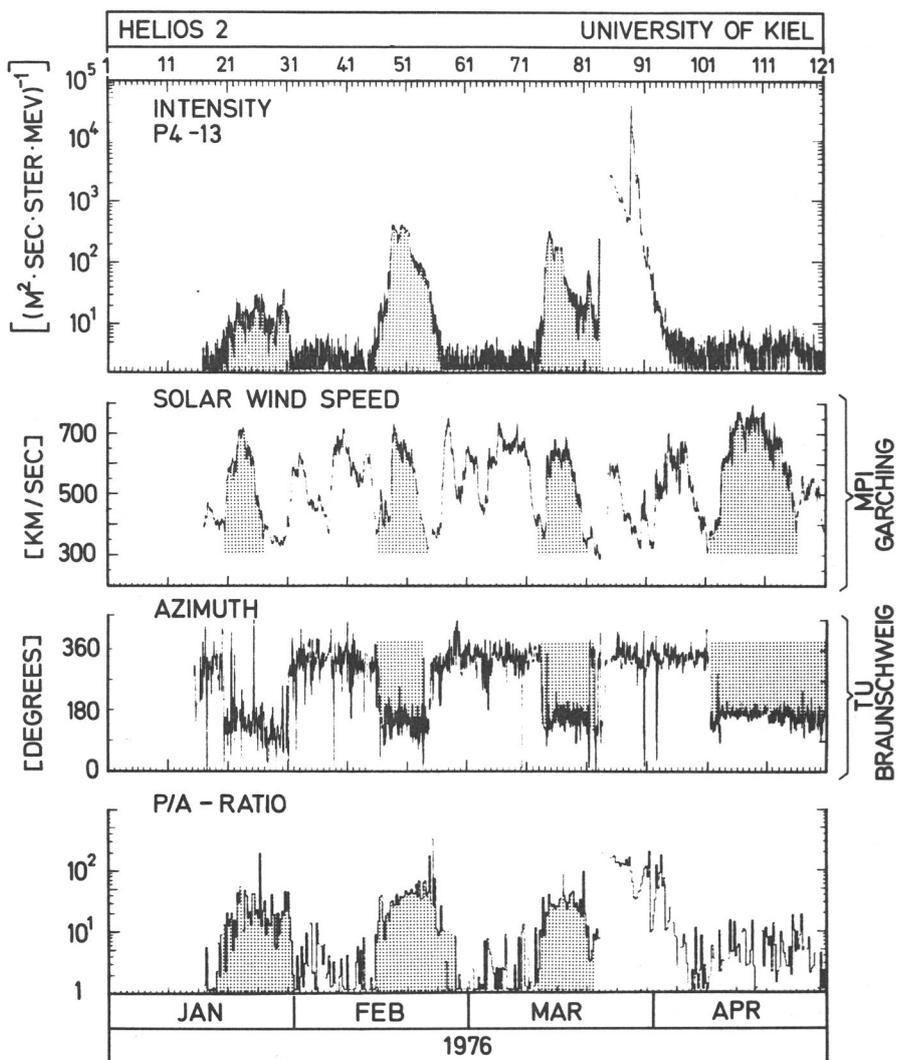


Abb. 10: Intensitäts-, Plasma- und Magnetfeldmessungen auf Helios 2

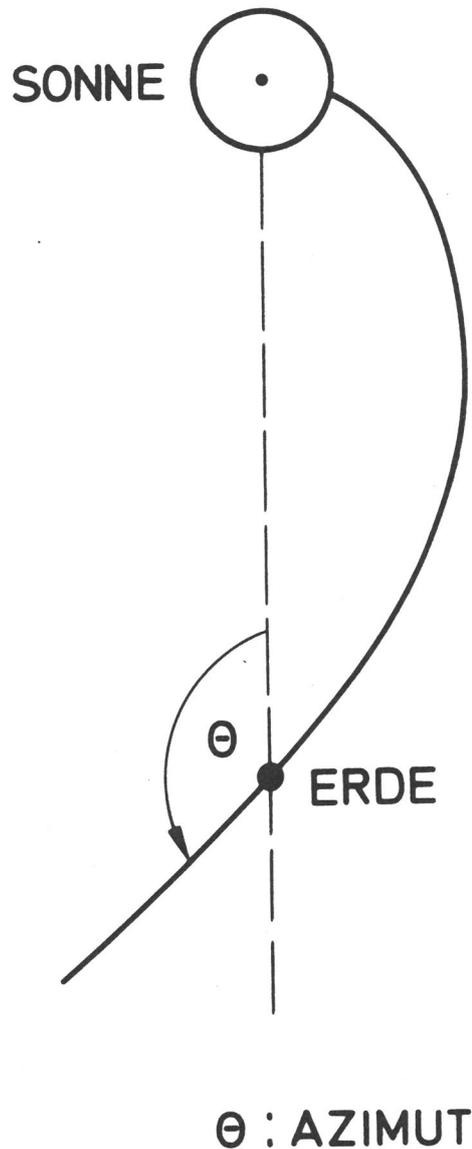


Abb. 11: Das Azimut - Winkel zwischen Projektion des Magnetfeldvektors in die Ebene der Ekliptik und der Richtung zur Sonne

- Bei diesen schnellen Sonnenwindströmen ist das Magnetfeld während dieses speziellen Zyklus von korotierenden Ereignissen zu Beginn des Jahres 1976 auswärtsgerichtet.
- Das Verhältnis von Protonen zu Alphateilchen muß eine gute Konstanz aufweisen.

Zusammen mit den Beobachtungen, daß keine Elektronenereignisse vorliegen und die Ereignisse nur bis zu einer Grenzenergie von etwa 15 MeV/N zu beobachten sind, ist es möglich, die Ereignisse relativ sicher als korotierende Ereignisse einzustufen. Hinzu kommt noch, daß korotierende Ereignisse sich durch eine kleine Anisotropie auszeichnen, die im Laborsystem fast den Wert 0 hat. Ausführliche Untersuchungen folgen im Kapitel 4.3..

Um Einzelheiten genauer analysieren zu können, sind die korotierenden Ereignisse vom Februar und März (Helios 1 und 2) sowie im April (Helios 1) in den Abbildungen 12 bis 16 vergrößert dargestellt.

Die enge Korrelation zwischen dem Anstieg in der Plasmageschwindigkeit und der Intensität der Protonen ist durch eine gestrichelte Linie in den Bildern hervorgehoben. Allerdings ist bei Helios 1 und 2 im März und besonders deutlich bei Helios 2 im Februar 1976 ein langsamer Anstieg der Intensität über den Untergrundwert bis zum Einsetzen des schnellen Sonnenwindstromes zu sehen. Weiterhin ändert das Magnetfeld seine Polarität ebenso wie das Proton/Alpha-Verhältnis seinen Wert bereits vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindes ändert bei allen korotierenden Ereignissen, wie Abbildung 17 vor der gestrichelten senkrechten Linie zeigt. Diese Periode vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindes spielt also eine Sonderrolle. Zusätzlich haben Untersuchungen des radialen Gradienten gezeigt, daß in dieser Periode im Gegensatz zu dem restlichen korotieren Ereignis ein negativer Gradient der Intensität gemessen wurde (Kunow et al., 1977). Somit wird die Untersuchung der Strömung der Teilchen in der Anfangsphase der Ereignisse interessant. Die Frage, ob die Teilchen in dieser Periode einen anderen Ursprung haben als die Teilchen der Hauptphase, wird in Kapitel 4.3.3.2. durch die Analyse der Winkelverteilungen der Protonenintensität untersucht.

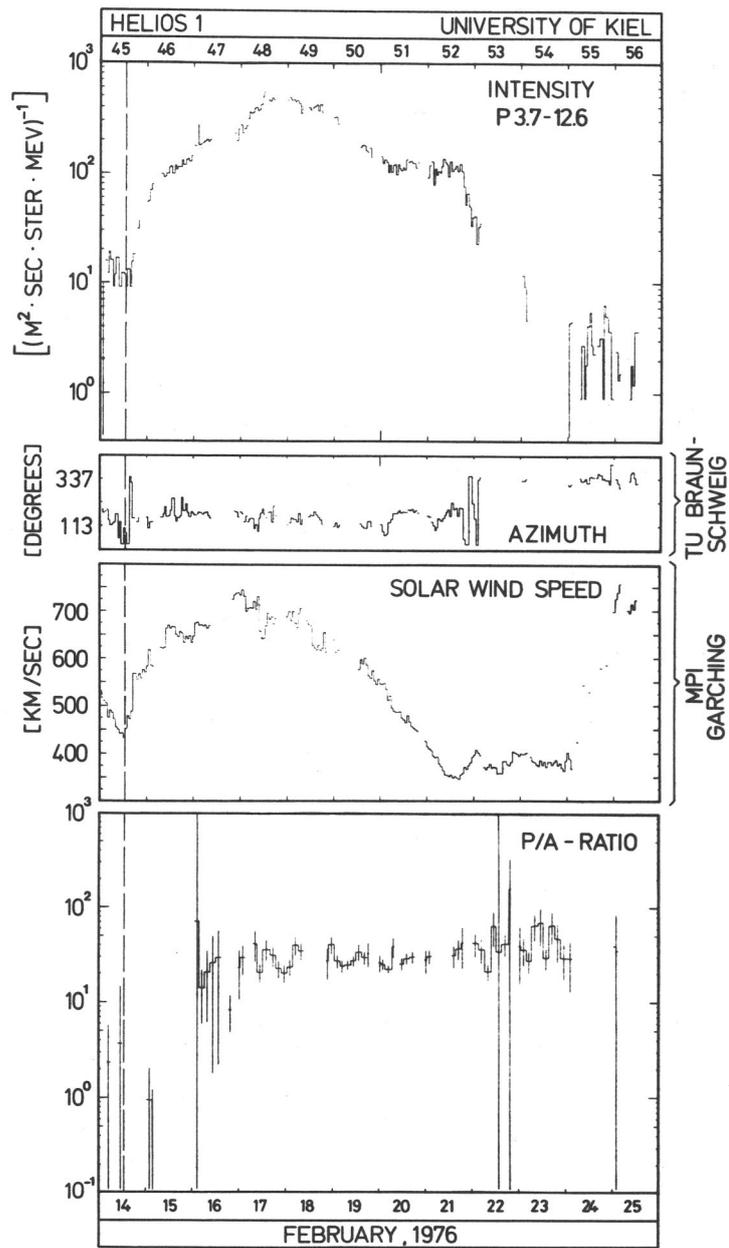


Abb. 12: Korotierendes Ereignis vom Februar 1976 -
Messungen auf Helios 1

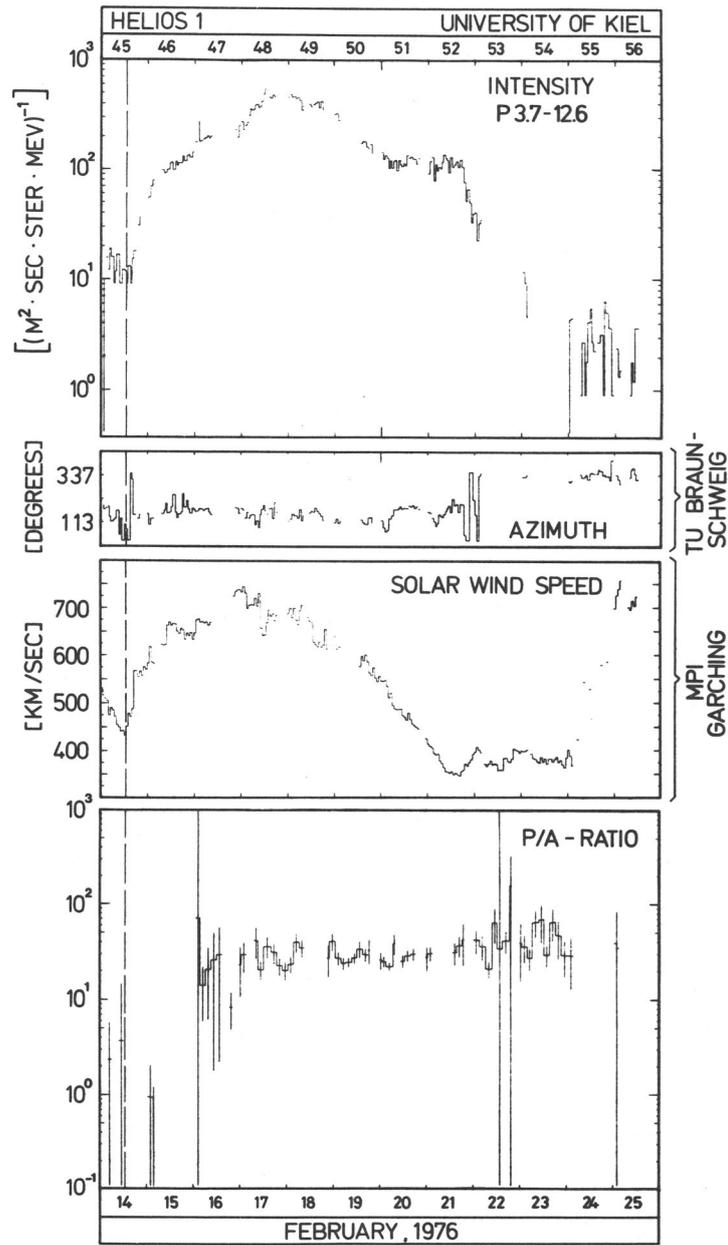


Abb. 12: Korotierendes Ereignis vom Februar 1976 -
Messungen auf Helios 1

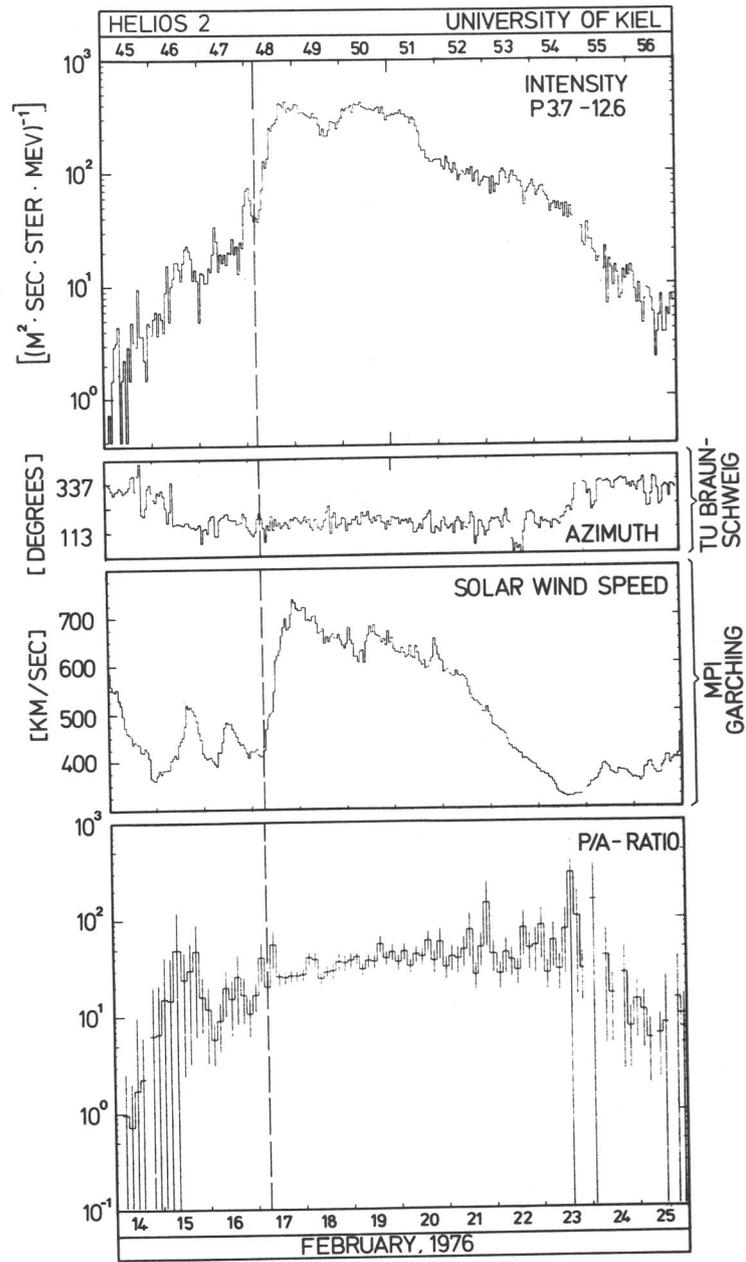


Abb. 13: Korotierendes Ereignis vom Februar 1976 -
Messungen auf Helios 2

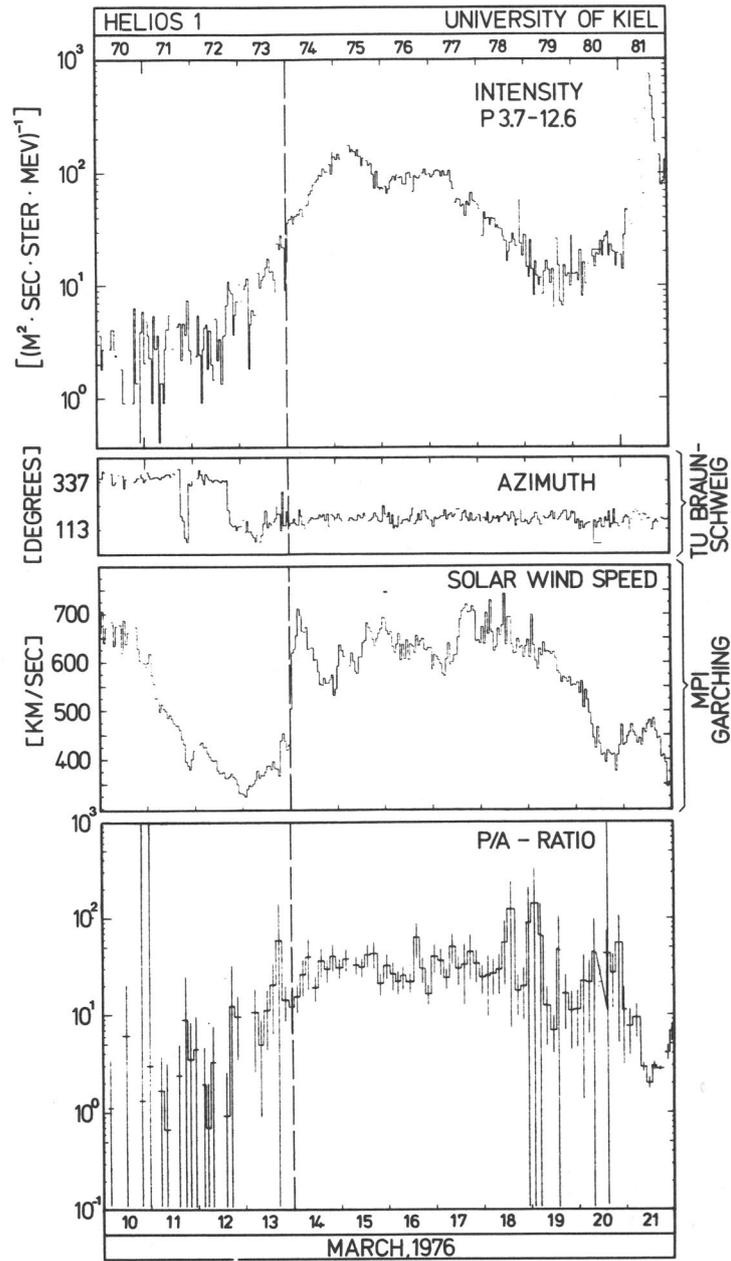


Abb. 14: Korotierendes Ereignis vom März 1976 -
Messungen auf Helios 1

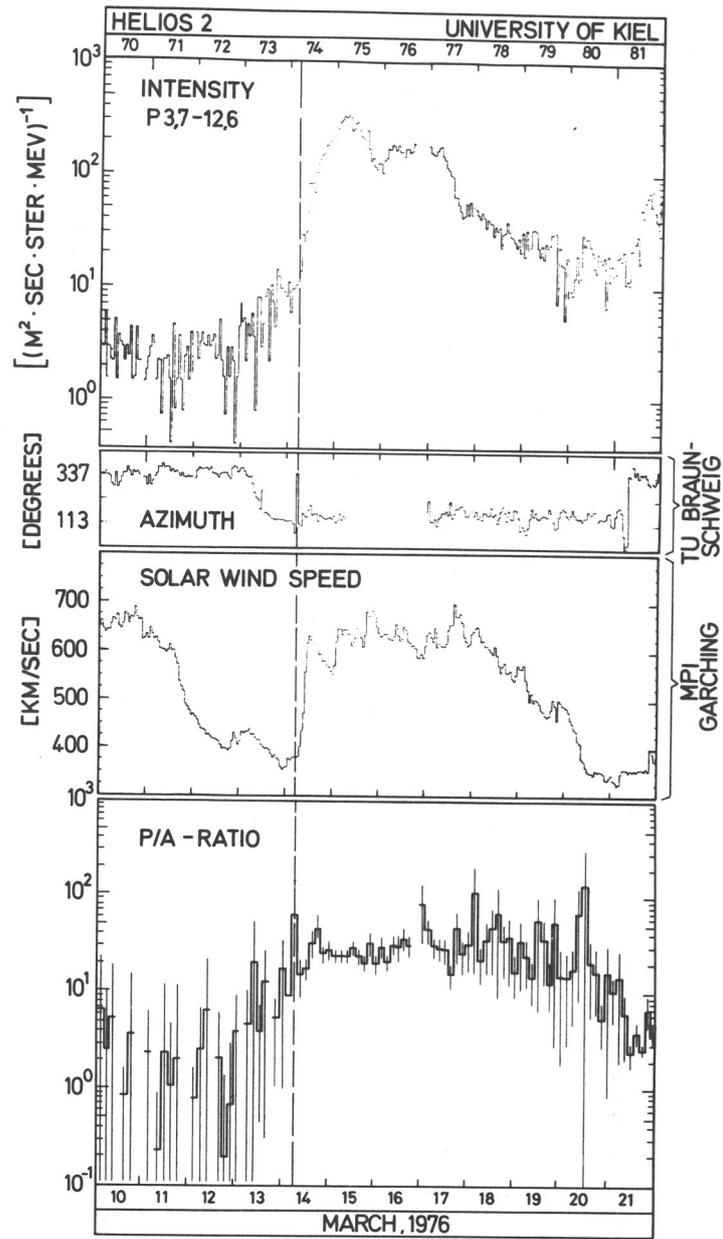


Abb. 15: Korotierendes Ereignis vom März 1976 -
Messungen auf Helios 2

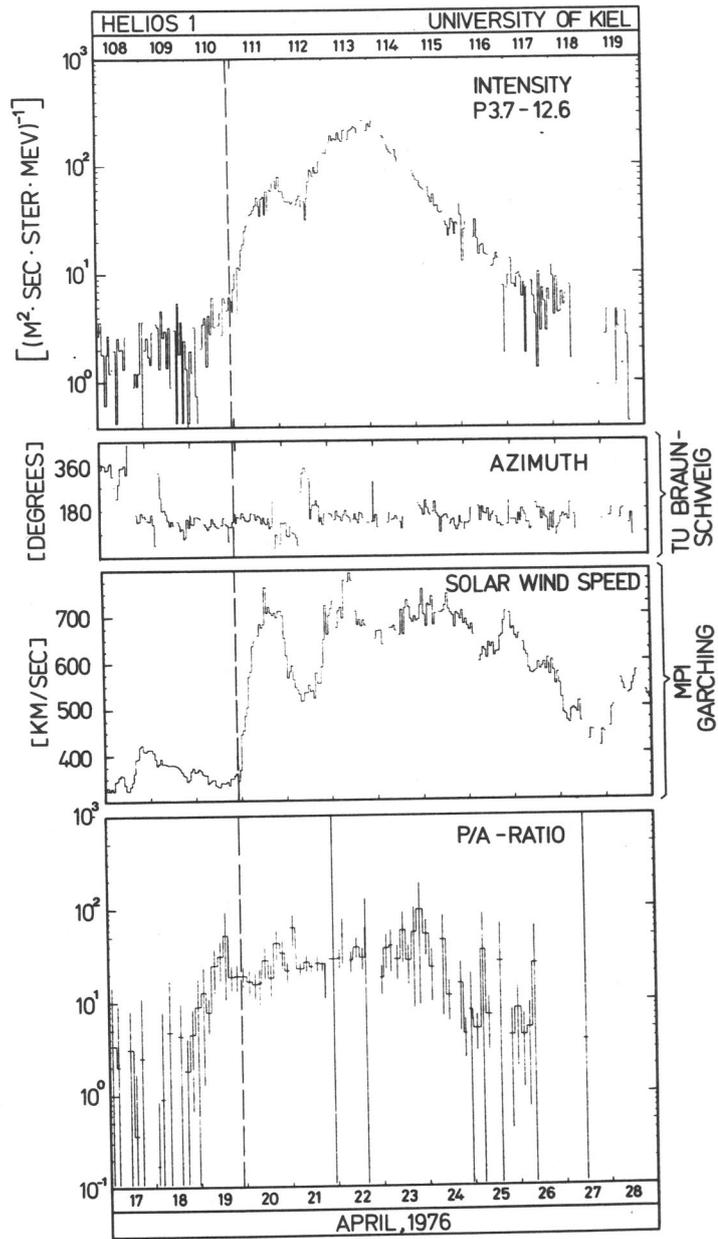


Abb. 16: Korotierendes Ereignis vom April 1976 -
Messungen auf Helios 1

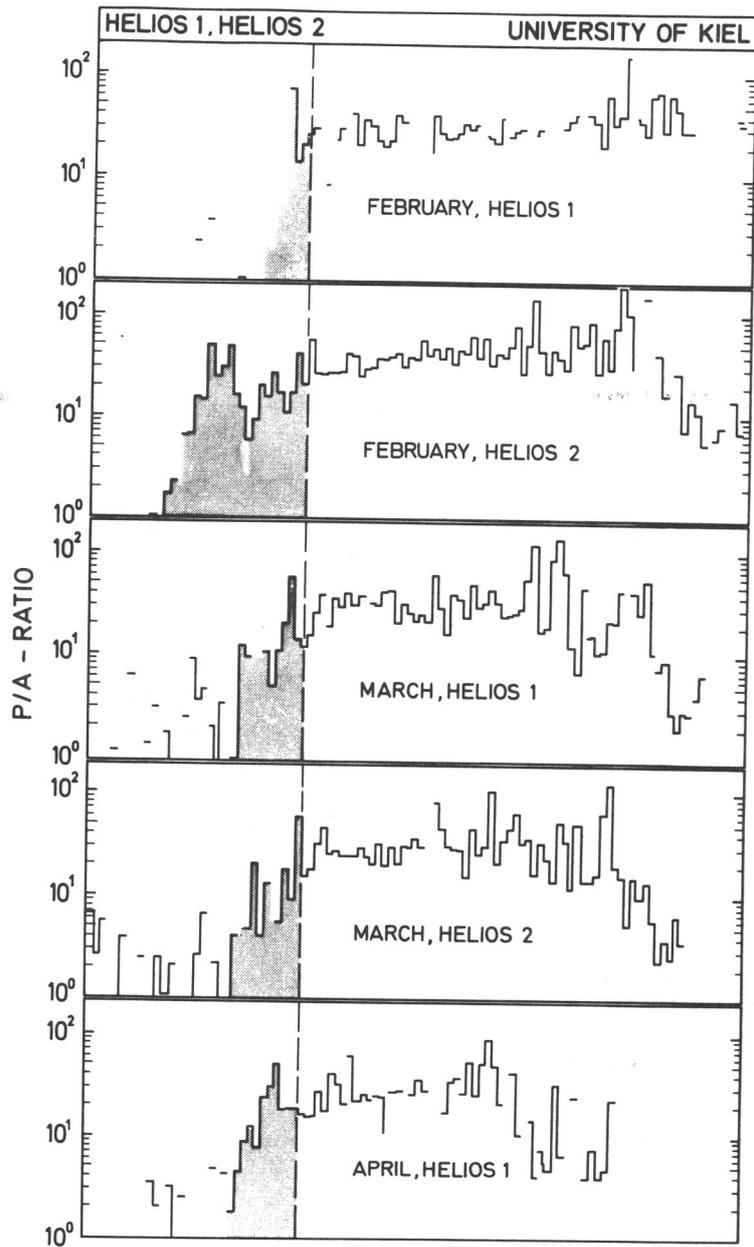


Abb. 17: Das Proton/Alphaverhältnis als Funktion der Phase im Sonnenwind - gestrichelte senkrechte Linie entspricht Beginn des schnellen korotierenden Sonnenwindstroms

Mit einer Ausnahme zeigen alle korotierenden Ereignisse während der Maximumsphase einen Doppelpeak. Diese Beobachtung ist ungewöhnlich, da Messungen bei niedrigeren Energien innerhalb 1 AU Entfernung von der Sonne dies nicht zeigen (Van Hollebeke, 1978; Scholer et al., 1979). Diese Peaks liegen zeitlich zwei Tage auseinander.

Bei größeren radialen Entfernungen von der Sonne sind zwei deutlich getrennte Intensitätsanstiege im Zusammenhang mit den Shocks, die die CIRs begrenzen, gemessen worden (Barnes und Simpson, 1976). Ob ein Zusammenhang zwischen den beiden Beobachtungen besteht, soll untersucht werden. Im nächsten Kapitel wird besprochen, wo die Teilchen beschleunigt worden sind, die wir innerhalb 1 AU mit Helios 1 und 2 messen, und ob es eine Erklärung für den beobachteten Doppelpeak gibt.

4.2. Entstehung des Intensitätsprofils korotierender Ereignisse bei radialen Entfernungen kleiner 1 AU

Im Januar 1977 wurde eine voll ausgebildete CIR innerhalb 1 AU von Helios 2 gemessen (Richter et al., 1980). Somit wäre es denkbar, daß auch in Erdnähe bei den Protonenintensitäten ein Doppelpeak beobachtet wird, wie sonst bei größeren radialen Entfernungen von der Sonne. Die mit Helios gemessenen Protonen wären in diesem Fall in der Nähe des Meßorts beschleunigt worden. Die Untersuchungen von Phasen- und Magnetfelddaten zeigen aber erst im Jahr 1977 zum ersten Mal eine ausgebildete CIR innerhalb 1 AU (Richter et al., 1980). Aus diesem Grund fällt die Möglichkeit als Erklärung für den gemessenen Doppelpeak der korotierenden Ereignisse zu Beginn des Jahres 1976 weg. Trotz allem wäre eine Untersuchung der schnellen Sonnenwindströme interessant. Möglicherweise gibt es bei der Wechselwirkung zwischen schnellem und langsamem Sonnenwind eine Vorstufe zur CIR, die bereits in der Lage ist, Teilchen zu beschleunigen.

Die beobachteten Intensitätsprofile der korotierenden Ereignisse bei radialen Entfernungen kleiner als 1 AU lassen sich, ohne Ausnahmefälle

zu bemühen, auch anders erklären. Die Teilchen sind in diesem Fall am Vorwärts- und Rückwärtsshock bei radialen Entfernungen größer als 2 AU beschleunigt worden und breiten sich entlang des Magnetfeldes in Richtung Sonne aus. Mit Hilfe eines einfachen geometrischen Modells für die interplanetare Struktur von Morfill et al. (1980) ist es möglich zu beurteilen, wo die gemessenen Teilchen beschleunigt worden sind. Dieses Modell geht von zwei Annahmen aus. Die Änderung der Breite der CIR mit wachsendem radialem Abstand wird so angenommen, daß sich die Shocks zweier verschiedener CIRs bei 10 AU Entfernung von der Sonne treffen. Im Falle einer CIR soll dies bei einem Abstand $r = 20$ AU auftreten. Weiterhin besitzt der schnelle Sonnenwindstrom in diesem Modell die Form eines "Sägezahns". Die dann entstehende Struktur des interplanetaren Raums ist in Abbildung 18 gezeigt. Dieses Modell ermöglicht die Berechnung einer Zeitspanne, die nach Durchgang der "Interaction surface" vergehen muß, um mit einem Punkt des Rückwärtsshocks bei beliebigem radialem Abstand verbunden zu sein. Dasselbe gilt für den Vorwärtsshock und die Zeitspanne vor Durchgang der "Interaction surface".

Eine theoretische Arbeit von Hundhausen und Burlaga (1975) zeigt, wo bei 1 AU Abstand von der Sonne diese "Interaction surface" sich ausbildet. Zu diesem Zeitpunkt überschreitet die Dichte des Plasmas ein Maximum und fällt deutlich ab. Zusätzlich steigt die Sonnenwindgeschwindigkeit stark an. Die "Interaction surface" stellt eine Grenze zwischen schnellem Sonnenwindplasma und vorausgegangenem langsamerem Sonnenwind dar.

Mit Helios 1 und 2 messen wir korotierende Ereignisse nur gleichzeitig mit schnellen Sonnenwindströmen. Mit Hilfe des beschriebenen Modells folgt, daß in der Nähe der Erde nur am Rückwärtsshock beschleunigte Teilchen gemessen werden. Auch das Proton/Alpha-Verhältnis korotierender Ereignisse besitzt auf Helios 1 und 2 einen Mittelwert $P/A \approx 30$ (Abb.: 17), der gut mit den von Pioneer 10 und 11 am Rückwärtsshock gemessenen Werten übereinstimmt. Das Proton/Alpha-Verhältnis am Vorwärtsshock zeigt in Abbildung 5 einen wesentlich höheren Wert von $P/A \approx 100$ (Barnes und Simpson, 1976).

Obwohl ein Modell existiert, welches die geringere Beschleunigung am Vorwärtsshock durch eine geringere Quellstärke der zu beschleunigenden Teilchen auf Grund niedrigerer Plasmatemperatur erklären kann (Scholer et al., 1980), bleibt trotzdem die Frage ungeklärt, warum die am Vorwärtsshock be-

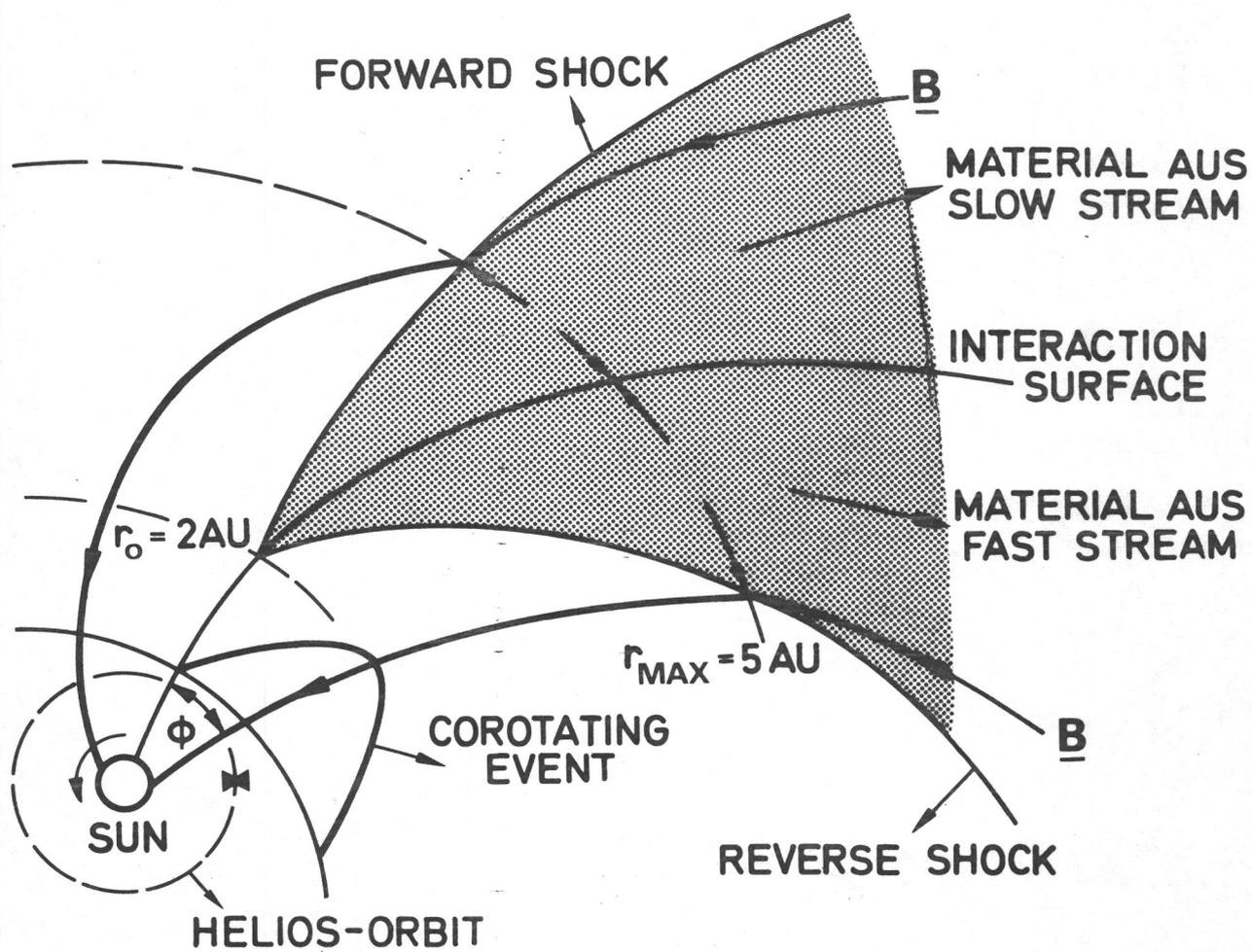


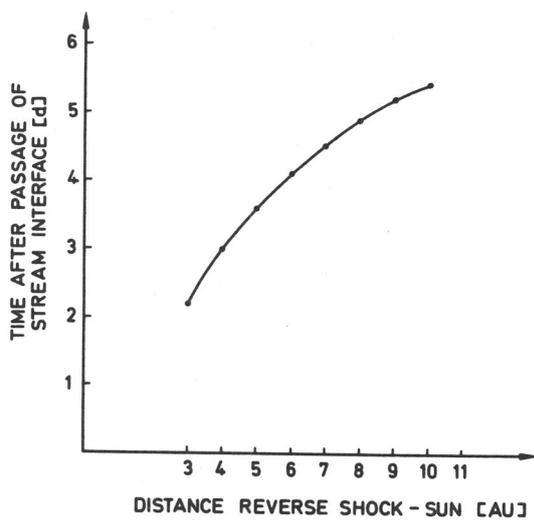
Abb. 18: Schematische Darstellung einer CIR nach Morfill et al. (1980)

schleunigten Teilchen nicht vor dem Eintreffen des schnellen Sonnenwindstroms beobachtet werden.

Im Jahre 1976 existierte, wie Untersuchungen der Plasmageschwindigkeit im Kapitel 5 zeigen werden, nur ein korotierender Sonnenwindstrom. Somit muß die Entfernung, bis Vorwärts- und Rückwärtsshock einer CIR sich treffen, mit einem Abstand $r = 20$ AU angenommen werden. Der schnelle Sonnenwindstrom soll eine Maximalgeschwindigkeit von 700 km/s und eine Minimalgeschwindigkeit von 300 km/s besitzen. Mit diesen realistischen Annahmen für die Situation zu Beginn des Jahres 1976 ergibt sich der in Abbildung 19 aufgeführte Zusammenhang zwischen Zeitdauer nach Durchgang der "Interaction surface" und der radialen Entfernung zum Rückwärtsshock.

Pioneer 10 und 11 messen die Beschleunigung am Rückwärtsshock bei verschiedenen radialen Abständen durch Messung mehrerer korotierender Ereignisse. Bei Helios 1 und 2 messen wir durch ein korotierendes Ereignis die Beschleunigung an Punkten des Rückwärtsshocks, die verschiedene radiale Entfernungen besitzen. In diesem Fall liegt also eine Überlagerung einer Quelle beschleunigter Teilchen, deren Stärke vom Abstand von der Sonne abhängt, und eines Ausbreitungsprozesses zwischen Quelle und Beobachter innerhalb 1 AU vor.

Bei einem schnellen Sonnenwindstrom, der eine stetig abnehmende Plasmageschwindigkeit aufweist, würden wir mit Punkten des Rückwärtsshocks verbunden sein, deren radiale Entfernung stetig zunimmt. Das Maximum korotierender Ereignisse wäre erreicht, wenn die Zunahme der Quellstärke bei größerer radialer Entfernung die Abnahme durch den Ausbreitungsprozess gerade noch kompensieren kann. Das wird wahrscheinlich der Fall sein, wenn das Raumfahrzeug bei etwa 1 AU mit einem Punkt des Shocks verbunden ist, der eine Entfernung von der Sonne aufweist, die kleiner als 5 AU ist. Bis zu diesem Zeitpunkt müßte eine Antikorrelation zwischen Plasmageschwindigkeit und Intensität des korotierenden Ereignisses zu beobachten sein, zu einer späteren Zeit wäre mit einer Korrelation zu rechnen. Dies gilt nur, wenn ein positiver Gradient der Intensität korotierender Ereignisse am Rückwärtsshock vorliegt, sonst kehren sich die Verhältnisse genau um. Auch die Beschleunigung am Rückwärtsshock muß zeitlich relativ konstant sein. Unter diesen Voraussetzungen müßte sich bei glattem Verlauf der Sonnenwindgeschwindigkeit auch ein glatter Intensitätsverlauf ergeben.



Feste Parameter:

Entfernungen:
 Sonne - Beginn der CIR: 2 AU
 Sonne - Raumfahrzeug: 0.5 AU
 Begegnung des Vorwärt-
 und Rückwärtsschocks
 einer CIR : 20 AU

Geschwindigkeiten
 des korotierenden
 Sonnenwindstroms:
 Maximal : 700 km/s
 Minimal : 300 km/s

Tabelle:

r [AU]	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ	29.5	39.6	47.8	54.6	60.2	64.9	68.8	72.2
t [d]	2.2	3.0	3.6	4.1	4.5	4.9	5.2	5.4

Abb. 19: Zeitdauer nach Durchgang der "Interaction surface" einer CIR als Funktion des radialen Abstandes eines Punktes des Rückwärtsschocks der CIR -
 Es existiert nur ein schneller korotierender Sonnenwindstrom und Messungen erfolgen bei einem Abstand von 0.5 AU von der Sonne.

Abbildungen 12 bis 16 zeigen, daß nur im März 1976 eine Antikorrelation zwischen Sonnenwindgeschwindigkeit und Intensität beobachtet wird. Im Februar und April 1976 wird eine Korrelation gemessen, die auf einen negativen Gradienten korotierender Ereignisse am Rückwärtsshock hinweist. Die Störungen, die speziell dazu führen, daß im April auf einigen Raumfahrzeugen keine korotierenden Ereignisse beobachtet werden können, werden in Kapitel 6 untersucht.

Nur im März lagen also ungestörte Verhältnisse vor. Da die Antikorrelation auf Helios 1 und 2 im März 1976 fast während des gesamten Ereignisses beobachtet wird - die späte Phase entspricht einer Verbindung mit einem Punkt des Rückwärtsshocks, der einen radialen Abstand von 5 AU besitzt - muß die Zunahme der Quellstärke am Rückwärtsshock die Abnahme durch die Ausbreitung bei größeren radialen Abständen deutlich übertreffen.

Unabhängig davon, ob eine Korrelation oder Antikorrelation zwischen Sonnenwindgeschwindigkeit und Intensität vorliegt, können die beobachteten Doppelpeaks durch die Schwankungen der Plasmageschwindigkeit erklärt werden. Bei einer Geschwindigkeitszunahme "rutscht" der Verbindungspunkt auf dem Rückwärtsshock zu kleineren radialen Abständen. Diese Situation tritt im März 1976 genau zwischen den Doppelpeaks auf und führt zu der beobachteten Reduktion der Intensität.

4.3. Messungen der winkelabhängigen Intensität

4.3.1. Bisherige Untersuchungen der Winkelverteilungen nicht flareerzeugter Ereignisse

Sowohl Marshall und Stone (1977, 1978) als auch Zwickl und Roelof (1979) untersuchen nicht die Winkelverteilungen speziell von korotierenden Ereignissen, sondern Perioden, in denen Intensitätsanstiege bei Protonen und Alphateilchen im Energiebereich von 0.3 bis 2.4 MeV/N beobachtet wurden, die mit keinem Flare in Zusammenhang gebracht werden konnten. Die Messungen stammen von den Raumsonden IMP 7 und 8 in der Nähe der Erde. Trotzdem werden die gefundenen Ergebnisse als repräsentativ für korotierende Ereignisse gewertet (Marshall und Stone, 1978). Die Interpretation wird von Zwickl und Roelof (1979) zu Recht kritisiert. Trotz dieser Unklarheit, ob die Ergebnisse die Eigenschaften von korotierenden Ereignissen richtig wiedergeben, sollen die wesentlichen Punkte aufgeführt werden. Marshall und Stone (1978) untersuchen Protonen und Alphateilchen mit Energien etwa zwischen 1.3 und 2.4 MeV/N im Zeitraum Oktober 1972 bis Januar 1974.

- Die diffusive Strömung der Teilchen ist zur Sonne gerichtet. Dies gilt für verschiedene Intensitäten und Sonnenwindgeschwindigkeiten.
- Die mittlere radiale diffusive Anisotropie für Protonen und Alphateilchen liegt bei 14 %.
- Die Richtung der diffusiven Komponente der Anisotropie hängt stark von der Magnetfeldrichtung ab, obwohl die Richtungen nicht immer identisch sind.

Trotz nahezu identischer Untersuchungsperiode mit Messungen von denselben Raumfahrzeugen - nur die Teilchenenergien liegen niedriger (0.3 bis 0.5 MeV) - kommen Zwickl und Roelof (1979) zu entscheidend anderen Aussagen.

- Die im Laborsystem gemessene Anisotropie senkrecht zum Magnetfeld kann vollständig durch die $E \times B$ - Drift der Teilchen in

diesem System erklärt werden. Verantwortlich dafür ist die Komponente der Sonnenwindgeschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld. Eine Ausbreitung senkrecht zum Magnetfeld findet also nicht statt.

- Die im Laborsystem gemessene Anisotropiekomponente parallel zum Magnetfeld besitzt den Wert 0. Im Laborsystem gibt es keine Strömung entlang des Magnetfeldes.

Die Teilchenpopulation insgesamt wird aber durch die $E \times B$ - Drift radial nach außen transportiert. Bei dieser Interpretation der Messungen könnte die Quelle der beschleunigten Teilchen bei der Sonne liegen im Gegensatz zu den Deutungen von Marshall und Stone.

Wie kann es zu so unterschiedlichen Aussagen bezüglich der Quelle für die Teilchen, also dem Beschleunigungsgebiet, kommen? Anisotropiemessungen sollen eine Bestimmung der Strömung in Richtung und Stärke ermöglichen. Außerdem lassen sie eine Aussage über die Lage der Quelle zu, sobald man Voraussetzungen über die Ausbreitung der Teilchen macht. Genau hierüber existieren aber unterschiedliche Ansichten, so daß es trotz gleicher Messungen der Anisotropie möglich ist, verschiedene Schlüsse auf die Lage der Quelle zu ziehen.

4.3.2. Einfluß verschiedener Ausbreitungsmodelle auf die Interpretation gemessener Winkelverteilungen der Intensität

Bevor eine Aussage über die Lage der Quelle gemacht werden kann, muß die Ausbreitung der Teilchen in einem Koordinatensystem beschrieben werden, welches keine für die Ausbreitung entscheidenden elektrischen Felder mehr enthält. Die Compton-Getting-Korrektur in ein geeignetes Koordinatensystem dient also dazu, die konvektiven elektrischen Felder, die zu einer Drift der Teilchen führen zu unterbinden. Das Problem, ob die gesamte Sonnenwindgeschwindigkeit oder nur die Komponente senkrecht zum mittleren Magnetfeld bei der Compton-Getting-Korrektur berücksichtigt werden muß, ist bereits recht alt. Dies zeigt die Arbeit von Forman (1970).

Marshall und Stone (1978) verwenden ein Ausbreitungsmodell, bei dem die Teilchen durch Magnetfeldfluktuationen, die einem mittleren Feld überlagert sind, häufig gestreut werden. In einem Koordinatensystem, welches sich mit dem Sonnenwind mitbewegt, gibt es keine konvektiven elektrischen Felder, die für eine $E \times B$ - Drift der Teilchen sorgen könnten. Die Ausbreitung ist in diesem Koordinatensystem rein diffusiv und damit mathematisch relativ einfach zu beschreiben.

Anders sieht es aus, wenn die Magnetfeldfluktuationen bei der Ausbreitung der Teilchen keine Rolle spielen. In diesem Fall wird das elektrische Feld nur durch die Geschwindigkeitskomponente des Plasmas senkrecht zum Magnetfeld bestimmt. Um wiederum die Ausbreitung der Teilchen in einem Koordinatensystem zu beschreiben, welches keine elektrischen Felder enthält, die zu einer $E \times B$ - Drift der Teilchen führen, müßte eine Compton-Getting-Korrektur in ein Koordinatensystem ausgeführt werden, welches sich mit der Sonnenwindgeschwindigkeitskomponente senkrecht zum Magnetfeld bewegt.

Bei Marshall und Stone (1978) wird die Compton-Getting-Korrektur in ein Koordinatensystem vorgenommen, in dem das Plasma ruht. Zwickl und Roelof (1979) analysieren die Messungen in einem Koordinatensystem, welches sich mit der Komponente der Sonnenwindgeschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld bewegt. In diesem System besitzt das Plasma noch eine Geschwindigkeit parallel zum Magnetfeld. Abbildung 20 veranschaulicht, warum so verschiedene Ergebnisse herauskommen.

Forman (1970) zeigt, daß für kleine Anisotropien die beobachtete Anisotropie sich als Summe der konvektiven Anisotropie und der diffusiven ergibt. Es gilt:

$$\tilde{A}_{0Bs} = \tilde{A}_C + \tilde{A}_D$$

Da die gemessenen Anisotropien Werte besitzen, die bei einigen Prozent liegen, gilt diese Vektoraddition besonders gut bei den korrolierenden Ereignissen. Die Größen mit Sternchen in Abbildung 20 er-

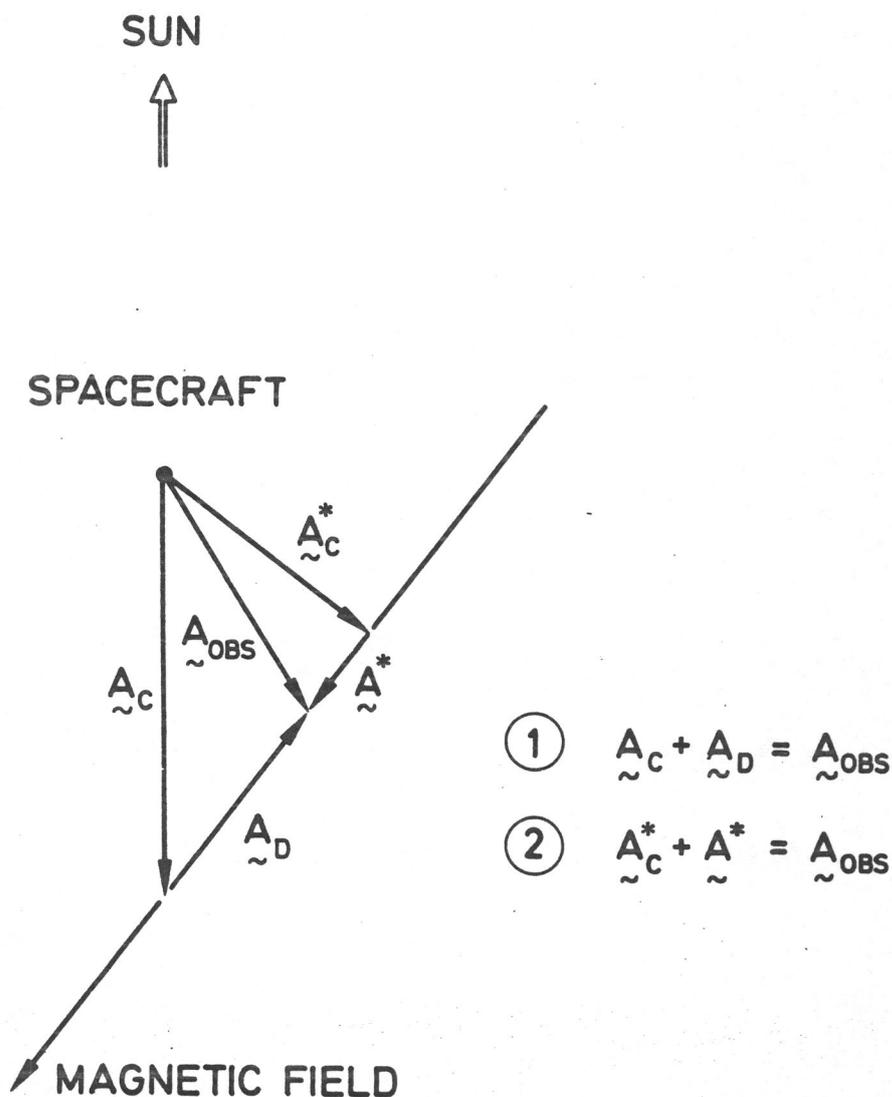


Abb. 20: Zwei verschiedene Compton-Getting-Korrekturen, die bei gleicher Messung der winkelabhängigen Intensitäten unterschiedliche Aussagen über die Lage der Quelle zulassen
 Transformation ins Koordinatensystem, welches sich
 a) mit dem Sonnenwind mitbewegt,
 b) mit der Sonnenwindgeschwindigkeitskomponente senkrecht zum Magnetfeld bewegt

hält man bei einer Transformation der gemessenen winkelabhängigen Intensität in ein Koordinatensystem, welches sich mit der Geschwindigkeitskomponente des Plasmas senkrecht zum Magnetfeld bewegt. Die anderen Größen gelten für das Koordinatensystem, in dem die Sonnenwindgeschwindigkeit den Wert 0 hat. Aus der Richtung der Komponenten der Anisotropie entlang des Magnetfeldes schließt man auf die Quelle der Teilchen. Da die Komponenten der Anisotropie, $A_{\perp D}$ und A_{\perp}^* , entgegengesetzte Richtung aufweisen, muß auch eine entgegengesetzte Lage für die Quelle der Teilchen angenommen werden.

Um klare Aussagen über die Anisotropie speziell korotierender Ereignisse zu erlangen, müssen diese vorher bei größeren radialen Abständen im Zusammenhang mit CIRs identifiziert worden sein. Dies wurde zu Beginn des Jahres 1976 durch die Messungen von Pioneer 11 (Van Hollebeke et al., 1978) erfüllt. Zu diesem Zeitpunkt messen wir auf Helios 1 und 2 korotierende Ereignisse hoher Intensität und somit auch ausreichender Statistik für die Untersuchung von Winkelverteilungen. Ziele dieser Untersuchung sollen folgende Fragen sein:

- Zeigen spezielle korotierende Ereignisse ähnliche Eigenschaften wie die von Marshall und Stone (1978) und Zwickl und Roelof (1979) untersuchten Perioden?
- Gibt es Merkmale der Anisotropie, die von der Phase im Ereignis oder im Sonnenwind abhängen?
- Ist vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms eine Teilchenpopulation zu beobachten, die radial nach außen strömt? Ein negativer Gradient für diesen Bereich wurde von Kunow et al. (1977) registriert und könnte zu solch einer Strömung der Teilchen führen.

4.3.3. Anisotropie korotierender Ereignisse zu Beginn des Jahres 1976

Die Kieler Teilchenexperimente an Bord von Helios 1 und 2 können sowohl bei Protonen wie auch bei Alphateilchen die winkelabhängige Intensität des hochenergetischen Bereichs korotierender Ereignisse messen. Bei

Energien oberhalb von 15 MeV/N werden diese Ereignisse nicht mehr registriert. Für die Untersuchungen am besten geeignet sind die Protonen im Energiebereich 4 bis 13 MeV und die Alphateilchen von 2 bis 4 MeV/N. Die bisher veröffentlichten Untersuchungen beschäftigen sich mit Protonen deutlich niedrigerer Energie. Im folgenden Kapitel wird kurz der Weg von den gemessenen acht Sektorwerten für die Intensität zu den korrigierten diffusiven Anisotropiekomponenten skizziert. An diesen sollen dann die Ergebnisse gewonnen werden.

4.3.3.1. Berechnung der Anisotropie aus den Sektormesswerten der Intensität

Die acht Sektormesswerte der Intensität werden durch eine glatte Winkelverteilung angepaßt, die folgende Form besitzt:

$$I(E, \theta) = a_0 + \sum_{n=1}^4 [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)] \quad (1)$$

Die Anpassung bei acht Sektormesswerten gelingt ohne zusätzliche Annahme nur bis zur 3. Harmonischen (Zwickl und Webber, 1976). Unter der Annahme, daß die Compton-Getting korrigierten Winkelverteilungen im Koordinatensystem, welches sich mit dem Sonnenwind mitbewegt, symmetrisch bezüglich der Magnetfeldrichtung sind, ist es möglich, die Winkelverteilung bis zur 4. Harmonischen zu berechnen (Zölllich, 1977).

Aus der angepaßten Winkelverteilung kann die Intensität in den acht Sektoren einfach berechnet werden. Es gilt:

$$R_j = \frac{1}{\pi/4} \int_{(j-1)\pi/4}^{j\pi/4} I(E, \theta) d\theta \quad (j = 1, \dots, 8) \quad (2)$$

Folgende lineare Beziehung ergibt sich, wenn Gleichung (1) eingesetzt wird:

$$R = M \cdot \alpha \quad (3)$$

M = quadratische Matrix

$$\alpha = (a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4)$$

Um die bis zur 4. Harmonischen angepaßte Verteilung zu erhalten, mußte Gleichung (3) invertiert werden. Es gilt dann:

$$\alpha = M^{-1} \cdot R \quad (4)$$

Zölllich (1977) beschreibt eine lineare Compton-Getting-Korrektur, die es ermöglicht, aus den gemessenen Sektorintensitäten durch eine einzige Matrixmultiplikation die korrigierten Sektorintensitäten für ein Koordinatensystem zu gewinnen, welches sich mit einer beliebigen Geschwindigkeit relativ zum Laborsystem der Sonde bewegt. Dieses Verfahren kann angewandt werden, wenn die beobachteten Anisotropien klein sind und die Winkelverteilungen keine starke Änderung innerhalb eines kleinen Winkelbereichs aufweisen.

Da bei vielen korotierenden Ereignissen ein positiver Gradient der Intensität gemessen wurde (Van Hollebeke et al., 1978), ist die Annahme verständlich, daß die Quelle außerhalb 1 AU ist. Das Maximum der beobachteten Intensitäten liegt etwa bei 4 - 5 AU. Folglich muß erwartet werden, daß die Teilchen entlang des Magnetfeldes in Richtung Sonne strömen. Nur eine Transformation in das Sonnenwindkoordinatensystem, in dem das Plasma ruht, liefert die gewünschte Strömung zur Sonne. Aus diesem Grund wurde die Compton-Getting-Korrektur in das Sonnenwindkoordinatensystem durchgeführt.

Um die Winkelverteilungen der Intensität im Sonnenwindsystem berechnen zu können, werden die Intensitäten der Teilchen bei verschiedenen Energien je nach Winkel zwischen Bewegungsrichtung des Plasmas und Einfallrichtung des Teilchens benötigt. Da im Laborsystem die Winkelverteilungen nur für eine feste Energie vorliegen, muß das Energiespektrum bekannt sein. Der spektrale Index spielt also eine wichtige Rolle bei der Compton-Getting-Korrektur. In dieser Arbeit wird der spektrale Index des Spektrums $I(T) \sim T^{-\gamma}$ als zeitlich konstant während des korotierenden Ereignisses angenommen. Der Wert $\gamma = 3$ wurde der Literatur entnommen (Marshall und Stone, 1978).

Wir

verwenden folgenden Ausdruck für die Anisotropie (Gleeson und Axford, 1967, 1968):

$$A = \frac{3 \cdot S}{v \cdot U} \quad (5)$$

S: gerichtete Teilchenstromdichte

v: Teilchengeschwindigkeit

U: differentielle Teilchendichte

Genau dieser Zusammenhang wurde für die Berechnung der Anisotropie höher angepaßter Winkelverteilungen der Intensität verwendet. Für axisymmetrische Winkelverteilungen berechnet sich die Anisotropie, wie Zölllich (1977) zeigt zu

$$A = \frac{a_1 - 3/5 a_3}{a_0 - 1/3 a_2 - 1/15 a_4} \quad (6)$$

In dieser Arbeit werden die Anisotropien in Richtung des Magnetfeldes ($A_{\parallel B}$), senkrecht zum Magnetfeld ($A_{\perp B}$) und in radialer Richtung A_r berechnet. Abbildung 21 veranschaulicht, welche Komponenten der Anisotropie analysiert werden.

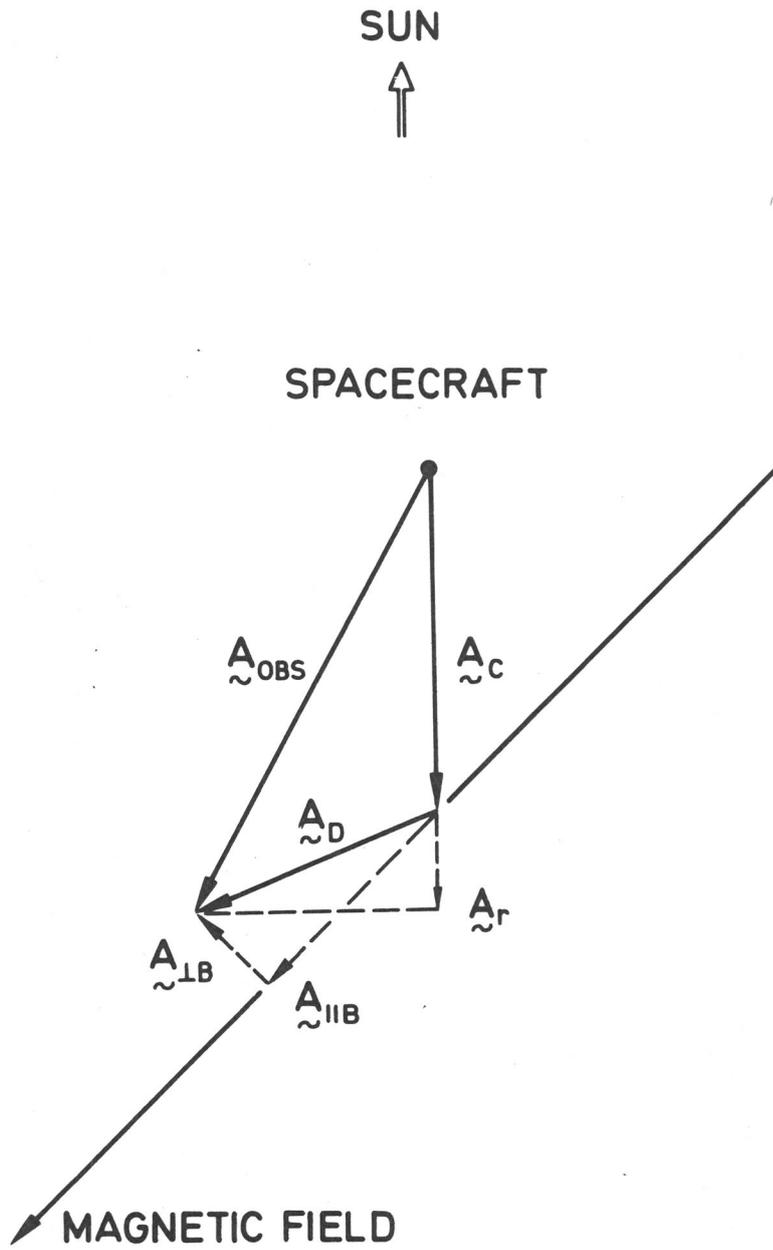


Abb. 21: Komponenten der diffusiven Anisotropie parallel und senkrecht zum Magnetfeld sowie in radialer Richtung

4.3.3.2. Untersuchungen der Anisotropie korotierender Ereignisse

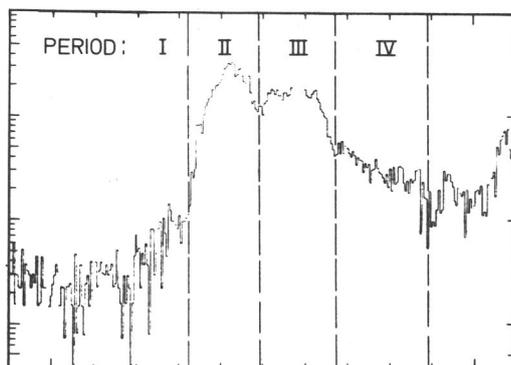
Um einen Eindruck zu erhalten, wie die unkorrigierten Winkelverteilungen der Intensität im Laborsystem der Sonde aussehen, wurde das korotierende Ereignis im März 1976 in vier charakteristische Intervalle unterteilt. Abbildung 22 zeigt diese Intervalle und die zugehörigen gemessenen Winkelverteilungen der Protonen mit Energien zwischen 4 und 13 MeV. Die Winkelverteilungen weisen bis auf die Anfangsphase (Periode 1) des Ereignisses eine kleine Anisotropie von etwa 5 % auf. Die Strömung ist von der Sonne weggerichtet.

Im folgenden werden die Anisotropiekomponenten für Winkelverteilungen der Intensität von Protonen mit Energien zwischen 4 und 13 MeV im Sonnenwindkoordinatensystem betrachtet und analysiert. Die Mittlungszeit für die Winkelverteilungen beträgt sechs Stunden.

Die diffusive Anisotropie parallel zum Magnetfeld für die korotierenden Ereignisse im Februar und März für Helios 1 und 2 sowie für Helios 1 im April sind in der Abbildung 23 dargestellt. Folgende Beobachtungen fallen auf:

- Die mittlere Anisotropie für die zum Magnetfeld parallele Komponente der Anisotropie liegt bei etwa 10 %.
- Die Strömung ist, von wenigen Ausnahmen abgesehen, die meiste Zeit sonnenwärts gerichtet. Diese Richtung wird durch positive Anisotropien wiedergegeben.
- Vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms, dies entspricht etwa Periode 1 in Abbildung 22, wird bei 3 von 5 Ereignissen eine Strömung von der Sonne weg registriert.
- Zwischen den zwei Intensitätsmaxima gibt es eine Phase, in der die Anisotropie stark abnimmt oder die Strömungsrichtung sich sogar umkehrt.

Zwei Perioden zeichnen sich also durch Abweichungen von den üblichen Anisotropiewerten der korotierenden Ereignisse ab: die Periode vor



		PROTONS P4-13 MEV				1976, DOY 72-80				UNIVERSITY OF KIEL							
		I		II		III		IV		I		II		III		IV	
PERIOD	HELIOS 1									A = 11% NP = 246		A = 3% NP = 3215		A = 6% NP = 7759		A = 7% NP = 1718	
										A = 28% NP = 167		A = 5% NP = 9799		A = 5% NP = 6383		A = 6% NP = 2072	
	HELIOS 2									A = 28% NP = 167		A = 5% NP = 9799		A = 5% NP = 6383		A = 6% NP = 2072	

Abb. 22: Gemessene Winkelverteilungen der Intensität für verschiedene Perioden des korotierenden Ereignisses

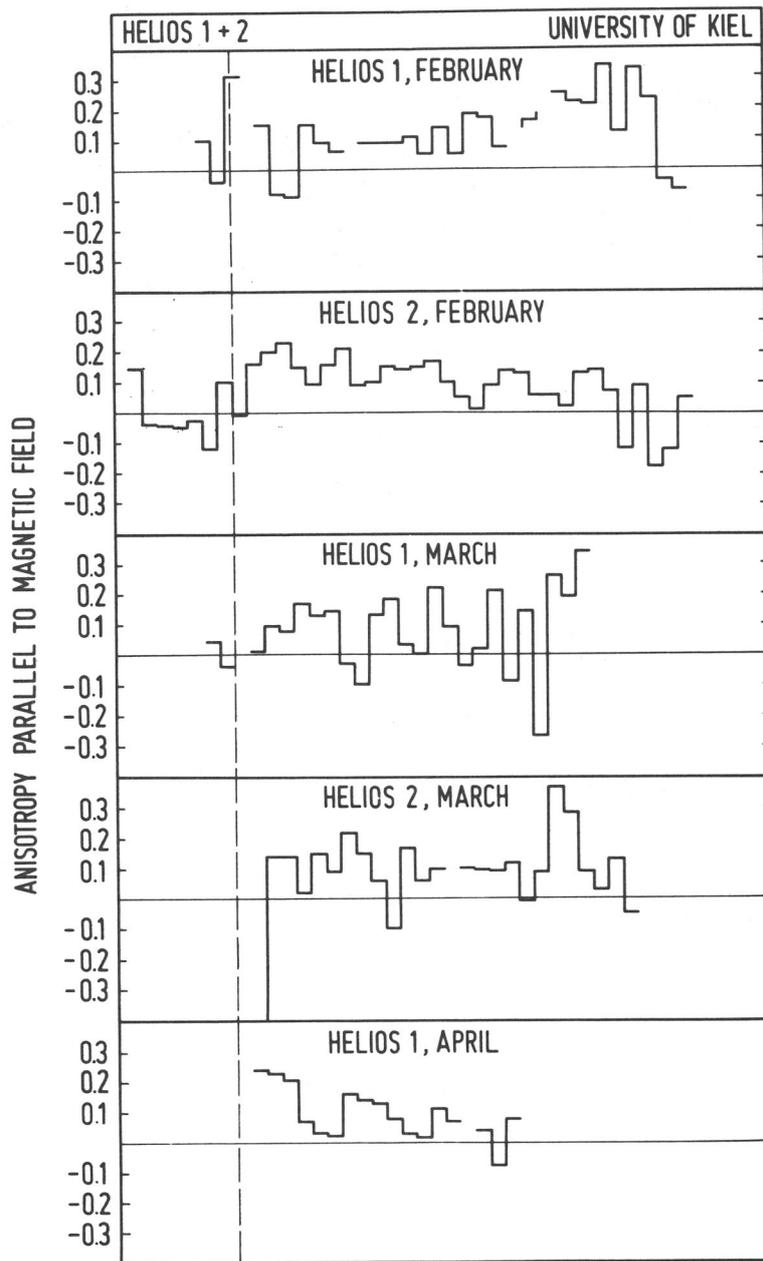


Abb. 23: Diffusive Anisotropie parallel zum Magnetfeld für verschiedene korotierende Ereignisse als Funktion der Anstiegsphase im schnellen Sonnenwindstrom (gestrichelte senkrechte Linie)

Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms und die Periode zwischen den Intensitätspeaks während der Maximumphase.

Betrachten wir als nächstes die Anisotropie senkrecht zum Magnetfeld. Für die Ereignisse im Februar und März, gemessen auf Helios 2, sind alle Anisotropiekomponenten zusammen mit dem Intensitätsprofil in den Abbildungen 24 und 25 zu sehen. Wenn keine Magnetfeldgradienten oder Teilchendichtegradienten senkrecht zur mittleren Magnetfeldrichtung vorhanden sind, ist eine symmetrische Verteilung bezüglich des Magnetfeldes zu erwarten. Das bedeutet, daß die Anisotropie senkrecht zum Magnetfeld den Wert 0 besitzt. Dies ist während der Hauptphase der korotierenden Ereignisse, wie Abbildung 24 und 25 zeigen, gut erfüllt. Änderungen des spektralen Index, der für die Berechnung der konvektiven Komponente der Anisotropie benötigt wird, haben direkten Einfluß auf diese senkrechte Komponente. Somit bedeutet diese Beobachtung, daß der Wert des spektralen Index, der aus der Literatur zu $\gamma = 3$ angenommen wurde, die Wirklichkeit gut wieder spiegelt. Auch hier zeigt sich wieder die Sonderstellung der Periode vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms und während der Maximumphase. Zu diesen Perioden werden Winkelverteilungen gemessen, die eine Strömung senkrecht zum Magnetfeld aufweisen. Die Möglichkeit, daß der spektrale Index während dieser Perioden sich von dem Wert $\gamma = 3$ unterscheidet, entfällt, da erst ein unrealistisch hoher Wert von $\gamma \geq 10$ diese Winkelverteilungen bezüglich der Magnetfeldrichtung symmetrisch machen könnte. Somit existiert tatsächlich eine Strömung senkrecht zum Magnetfeld, die von der Phase im korotierenden Ereignis abhängt.

Es wäre denkbar, daß die Teilchen, die vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms gemessen werden, am Vorwärtsshock oder in Sonnennähe beschleunigt wurden. Negative Gradienten in dieser Phase (Kunow et al., 1977) und eine auswärtsgerichtete Strömung sprechen gegen einen Ursprung der Teilchen am Vorwärtsshock der CIR. Der Wert des Proton/Alpha-Verhältnisses, der in dieser Phase bereits auf den endgültigen Wert ansteigt (Abb. 17), und die Strömung senkrecht zum Magnetfeld sprechen dafür, daß die Teilchen aus dem schnellen Sonnenwindstrom durch Querdiffusion entwichen sind und nun andere Ausbreitungsbedingungen antreffen.

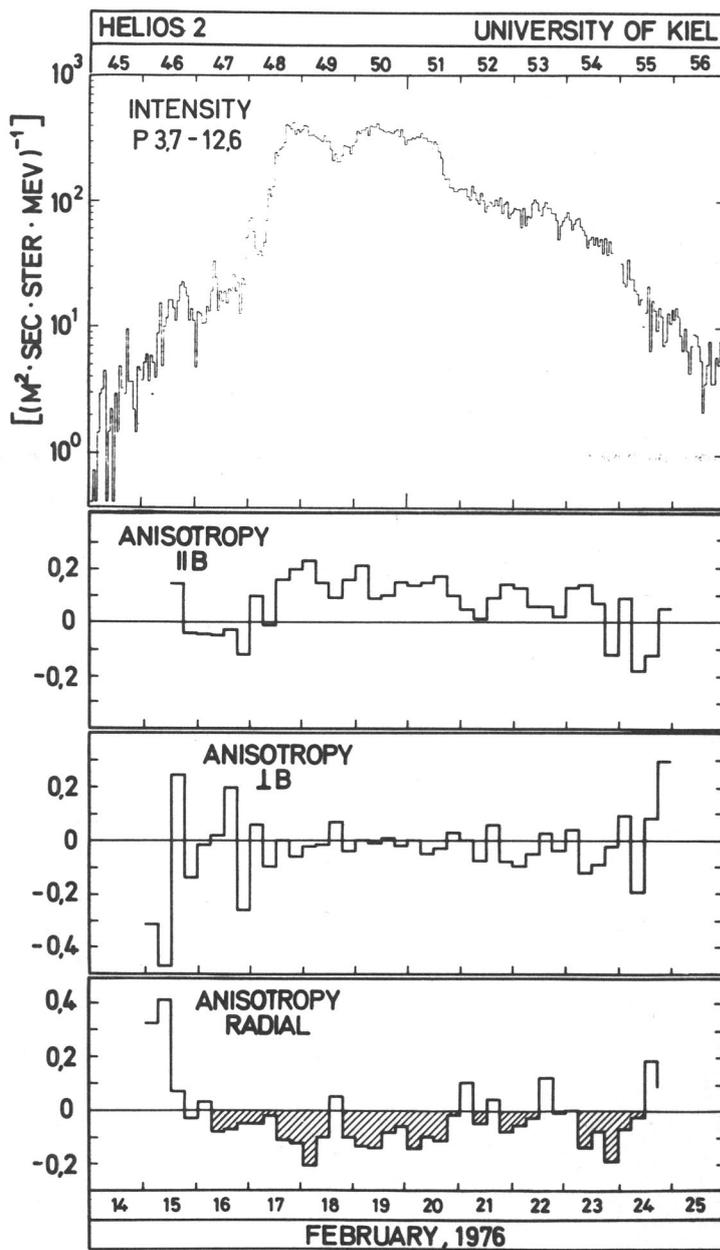


Abb. 24: Anisotropiekomponenten des korotierenden Ereignisses im Februar - Messungen auf Helios 2

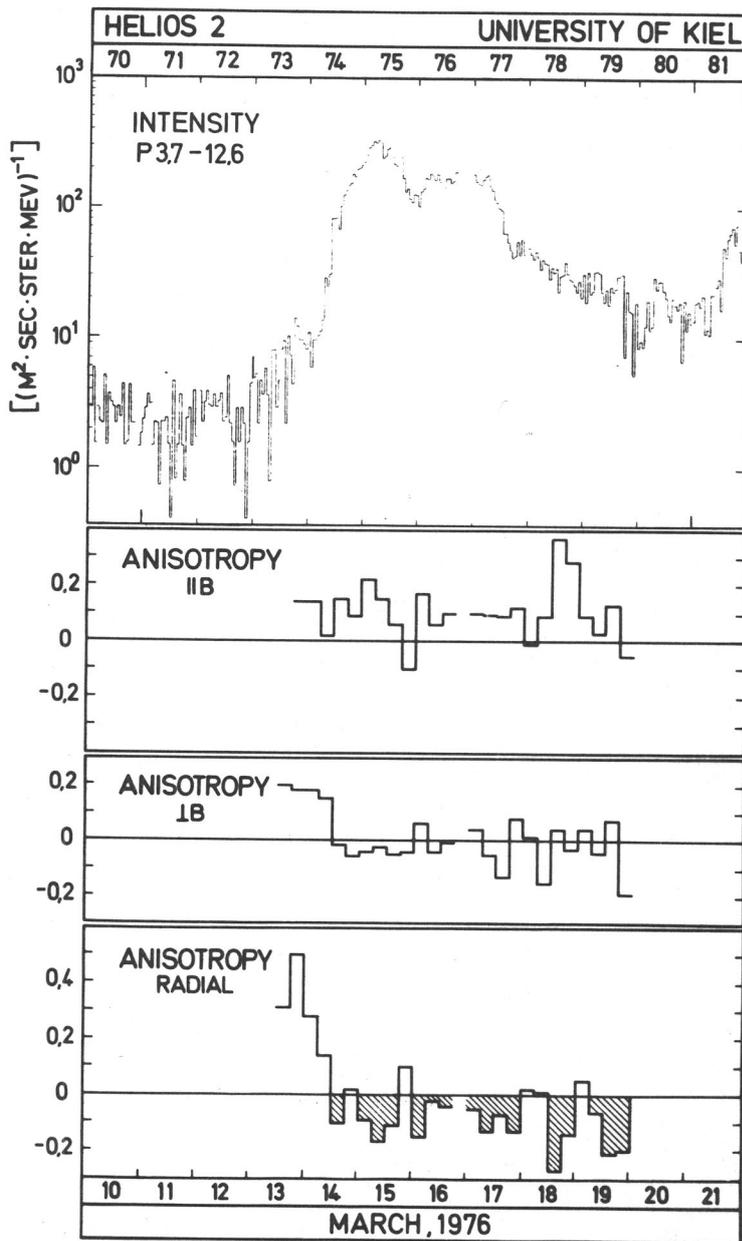


Abb. 25: Anisotropiekomponenten des korotierenden Ereignisses im März - Messungen auf Helios 2

Zum Schluß folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchungen von Winkelverteilungen der Protonenintensität im Energiebereich 4 bis 13 MeV. Durch Messungen von Pioneer 11 sind die Intensitätsanstiege, die zu Beginn des Jahres 1976 untersucht wurden, eindeutig als korotierende Ereignisse einzustufen.

- Die gemessenen Winkelverteilungen im Laborsystem der Raumsonde sind fast während des gesamten Ereignisses isotrop. Eine kleine Strömung, die von der Sonne weggerichtet ist, wird gemessen.
- In einem Koordinatensystem, welches sich mit dem Sonnenwind mitbewegt, besitzt die Anisotropie im Mittel einen Wert von $A \sim 10\% - 15\%$ in Übereinstimmung mit Messungen von Marshall und Stone (1978) bei niedrigeren Protonenenergien.
- Zwei Perioden, die von der Phase im Sonnenwind abhängen, zeigen ein deutlich unterschiedliches Verhalten der Anisotropie: es sind die Perioden vor Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms und zwischen den Intensitätsmaxima. Im ersten Fall messen wir meist auswärtsgerichtete Strömung, im zweiten entweder Isotropie oder auch eine Umkehr der Strömungsrichtung.
- Die genannten zwei Perioden zeigen im Gegensatz zum Hauptereignis eine Strömung senkrecht zum Magnetfeld.
- Da zusätzlich gemessen wird, daß das Proton/Alpha-Verhältnis schon vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms auf den Wert des Hauptereignisses anwächst, müßten die Teilchen im Sonnenwindstrom und vor dem Sonnenwindstrom gleichen Ursprung haben. Dies interpretieren wir so, daß die Teilchen durch Querdiffusion aus dem schnellen Sonnenwindstrom austreten, treffen auf andere Ausbreitungsbedingungen und strömen von der Sonne weg.

5. Korotierende Ereignisse in den Jahren 1975 und 1976
- Messungen auf Helios 1 und 2

5.1. Untersuchungen der schnellen Sonnenwindströme

Die Entscheidung, ob ein korotierendes Ereignis vorliegt oder nicht, ist natürlich nur zuverlässig zu treffen, wenn Meßergebnisse von Pioneer 11 vorliegen. Die Messungen zeigen deutlich, daß CIRs mit gut ausgebildeten Shocks und beschleunigten Teilchen bei 4 bis 5 AU existieren. Für zwei Zeiträume, vom Januar bis April 1975 und vom Dezember bis April 1975/76, liegen Messungen von Pioneer 11 vor, die deutlich mehrere korotierende Ereignisse aufweisen (Van Hollebeke, 1978).

Folgende Frage stellt sich sofort:

- Zeigen die Plasmamessungen auf Helios 1 und 2 nur in den genannten Perioden schnelle Sonnenwindströme, die in der Lage sind, CIRs und Shocks auszubilden?

Es soll untersucht werden, ob nicht auch zu anderen Zeitpunkten schnelle Sonnenwindströme gemessen werden. Sollten solche Ströme existieren, interessiert die Frage, ob zum gleichen Zeitpunkt Intensitätsanstiege der Protonen registriert wurden und warum diese kleinere Intensitäten aufweisen als zu Beginn des Jahres 1976.

Auf den Raumsonden Helios 1 und 2 werden durch ein Experiment des Max-Planck-Instituts Garching Plasmagrößen gemessen. Diese Daten liegen als Stundenmittel für die Auswertung vor. Messungen der Sonnenwindgeschwindigkeit von Helios 1 sind in Abbildung 26 für die Jahre 1975 und 1976 zu sehen. Viele schnelle Sonnenwindströme sind registriert worden, aber nicht alle können eine CIR ausbilden. Aufschluß, von welcher Stelle auf der Sonne die schnellen Sonnenwindströme stammen, kann man erlangen, wenn spezielle Annahmen über die Ausbreitung des Plasmas zwischen Sonne und Beobachter gemacht werden. Die einfachste Annahme ist eine konstante Geschwindigkeit

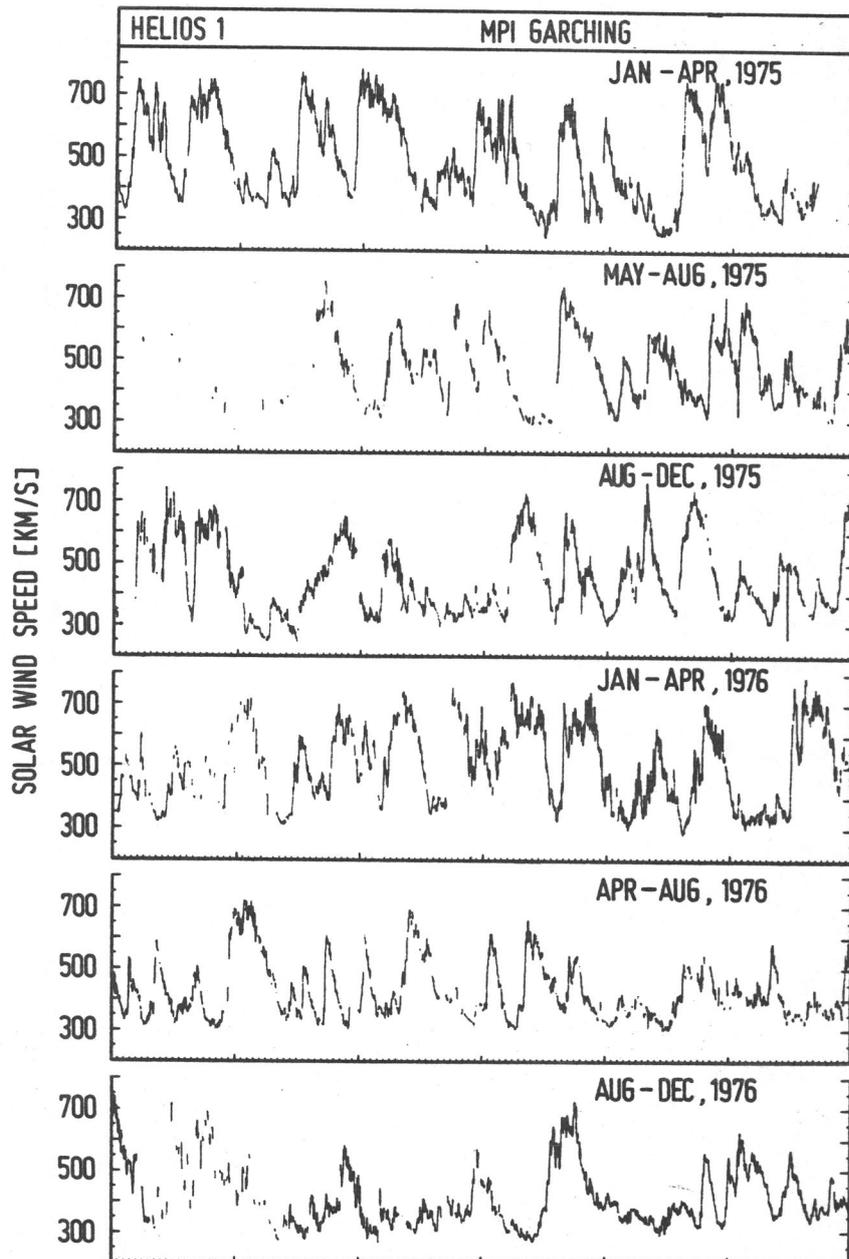


Abb. 26: Von Helios 1 gemessene Plasmageschwindigkeit für 1975 und 1976

des Plasmas zwischen Beobachter und der Sonnenoberfläche. Da wir diese Geschwindigkeit messen und die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne bekannt ist, kann der Punkt auf der Sonnenoberfläche ermittelt werden, von dem das Plasmapakett gestartet ist. Dieses Verfahren wird "Backmapping" genannt. Genauer ist diese Methode bei Nolte und Roelof (1973) beschrieben.

Die Abbildungen 27 und 28 zeigen die auf die Sonnenoberfläche projizierte Plasmageschwindigkeit für verschiedene solare Rotationen im Jahr 1975 und 1976. Für jeweils 27 Tage sind die Plasmageschwindigkeiten über der solaren Länge aufgetragen. Die Zeitspanne für die jeweilige solare Rotation ist auf der rechten Seite notiert. Die Zeit nimmt von der rechten Seite zur linken zu.

- Es gibt verschiedene Formen bei schnellen Sonnenwindströmen. Einige sind während einer Zeitspanne von 10 bis 12 Tagen gemessen worden und besitzen Spitzengeschwindigkeiten von etwa 800 km/s.
- Die korotierenden Sonnenwindströme ändern ihre Position, von der sie auf der Sonne starten, nur unwesentlich.
- Von Oktober 1975 bis Juni 1976 wird ein korotierender Sonnenwindstrom während 10 solarer Rotationen registriert, der auch mit den korotierenden Ereignissen von Januar bis April 1976 korreliert ist. Dieser Strom ist bei der Carrington Länge 270° zu sehen.
- Zu Beginn des Jahres 1975 werden für zwei solare Rotationen drei korotierende schnelle Sonnenwindströme beobachtet, die zu einer anderen Struktur des interplanetaren Raumes führen müssen als zu Beginn des Jahres 1976. Von April bis Oktober 1975 ändert sich die großräumige Struktur.
- Im Juni 1976 strömt das Plasma mit gleicher Geschwindigkeit von jedem Punkt der Sonne ab. Danach gibt es zunächst keine korotierenden schnellen Sonnenwindströme während der nächsten sechs solaren Rotationen bis zum Ende des Jahres 1976.

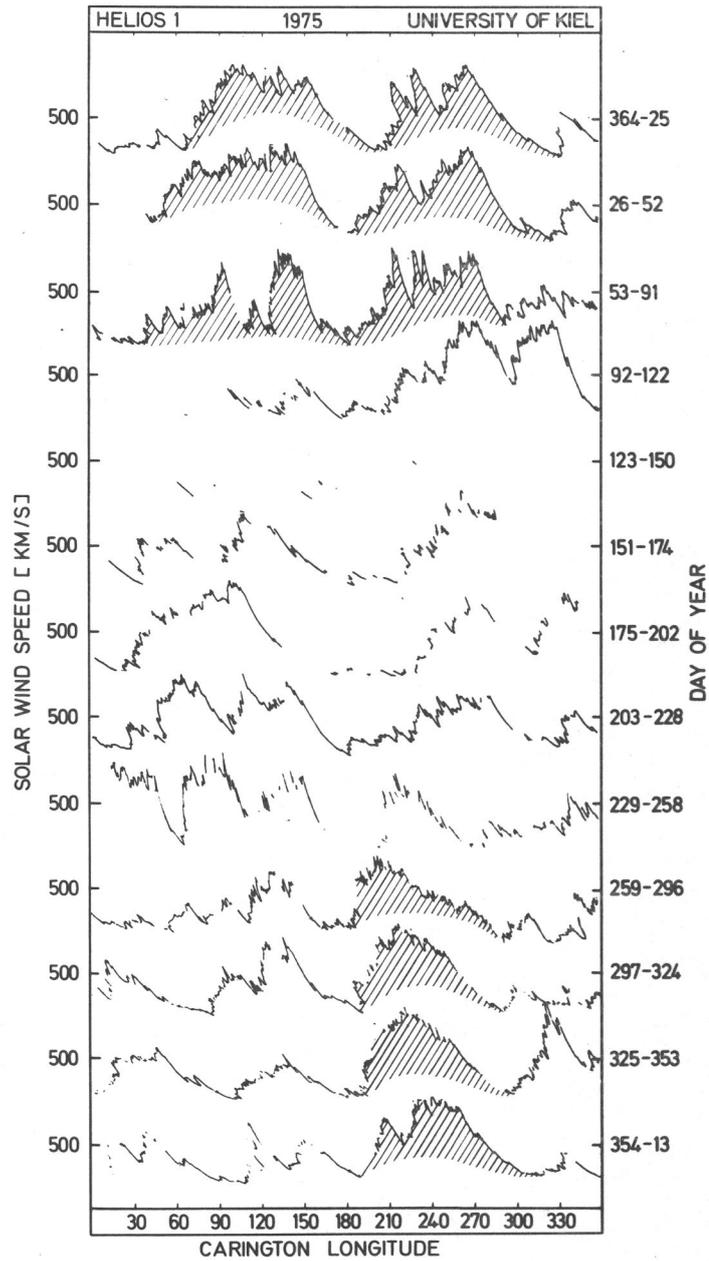


Abb. 27: Plasmageschwindigkeit als Funktion der Carrington Länge für solare Rotationen des Jahres 1975 - Messungen auf Helios 1
Eindeutig korotierende Ströme sind schraffiert.
(Plasmadaten stammen vom MPI Garching.)

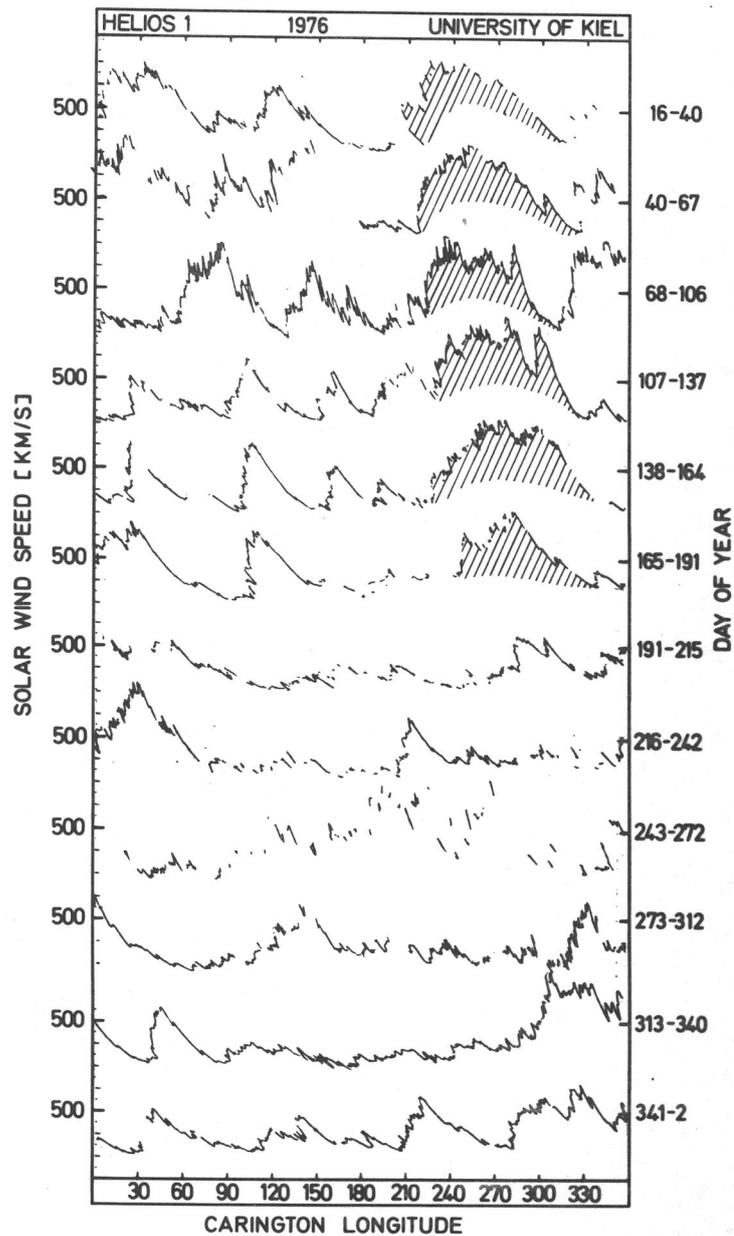


Abb. 28: Plasmageschwindigkeit als Funktion der Carrington Länge für solare Rotationen des Jahres 1976 - Messungen auf Helios 1. Eindeutig korotierende Ströme sind schraffiert. (Plasmadaten stammen vom MPI Garching.)

Ähnliche Untersuchungen der Plasmadaten, die auf den Raumfahrzeugen IMP 7 und 8 gemessen wurden, liegen vor (Feldmann et al., 1979). Auf einem sehr anschaulichen Farbbild sind eine Vielzahl von Daten, nicht nur Plasmadaten, für den Zeitraum 1971 bis 1978 jeweils für aufeinanderfolgende solare Rotationen dargestellt. Auch die Messungen von IMP 7 und 8 in Erdnähe zeigen von Oktober 1975 bis Juni 1976 nur einen korotierenden schnellen Sonnenwindstrom. Zuvor gab es über den langen Zeitraum von etwa 2 Jahren zwei schnelle korotierende Ströme je solare Rotation (vergl. Abb. 27).

5.2. Korotierende schnelle Sonnenwindströme und korrelierte Ereignisse

Nachdem die Sonnenwindströme erkannt sind, die bevorzugt CIRs ausbilden können, ist es möglich, die Teilchendaten zu untersuchen. Da die korotierenden Ereignisse gleichzeitig mit korotierenden schnellen Sonnenwindströmen beobachtet werden, untersuchen wir die Intensitätsmessungen der Protonen im Energiebereich 4 bis 13 MeV, die gleichzeitig mit korotierenden Sonnenwindströmen gemessen wurden.

Die Intensitätsmaxima der Protonen im Energiebereich 4 bis 13 MeV, die mit den korotierenden Hochgeschwindigkeitsströmen korreliert registriert wurden, sind für die Jahre 1975 und 1976 in Abbildung 29 dargestellt. Die Messungen stammen von Helios 1. Von Januar bis April 1975 werden kleine Intensitätsanstiege beobachtet, während von Juni bis Oktober kein Anstieg der Intensität gemessen wurde. In dem ersten Zeitraum existierten zwei korotierende schnelle Sonnenwindströme pro solare Rotation. Dann folgt eine Übergangsphase mit vereinzelt gut ausgebildeten korotierenden Sonnenwindströmen. Von Oktober 1975 bis Juni 1976 gab es nur einen korotierenden schnellen Sonnenwindstrom. In diesem Zeitraum wurden korotierende Ereignisse gemessen, die etwa um eine Größenordnung höhere Intensitätsmaxima aufwiesen. Vom Juli 1976 bis zum Ende des Jahres werden weder korotierende Sonnenwindströme noch Ereignisse beobachtet. Erste Untersuchungen der Plasmadichte, Temperatur und Geschwindigkeit zeigen keine Unterschiede zwischen den korotierenden schnellen Sonnenwindströmen zu Beginn des Jahres 1975 und 1976, die die unterschiedlichen Intensitätsmaxima erklären könnten. Auch die unterschiedliche solare Breite, mit der die Raumfahrzeuge verbunden sind, spielt keine Rolle.

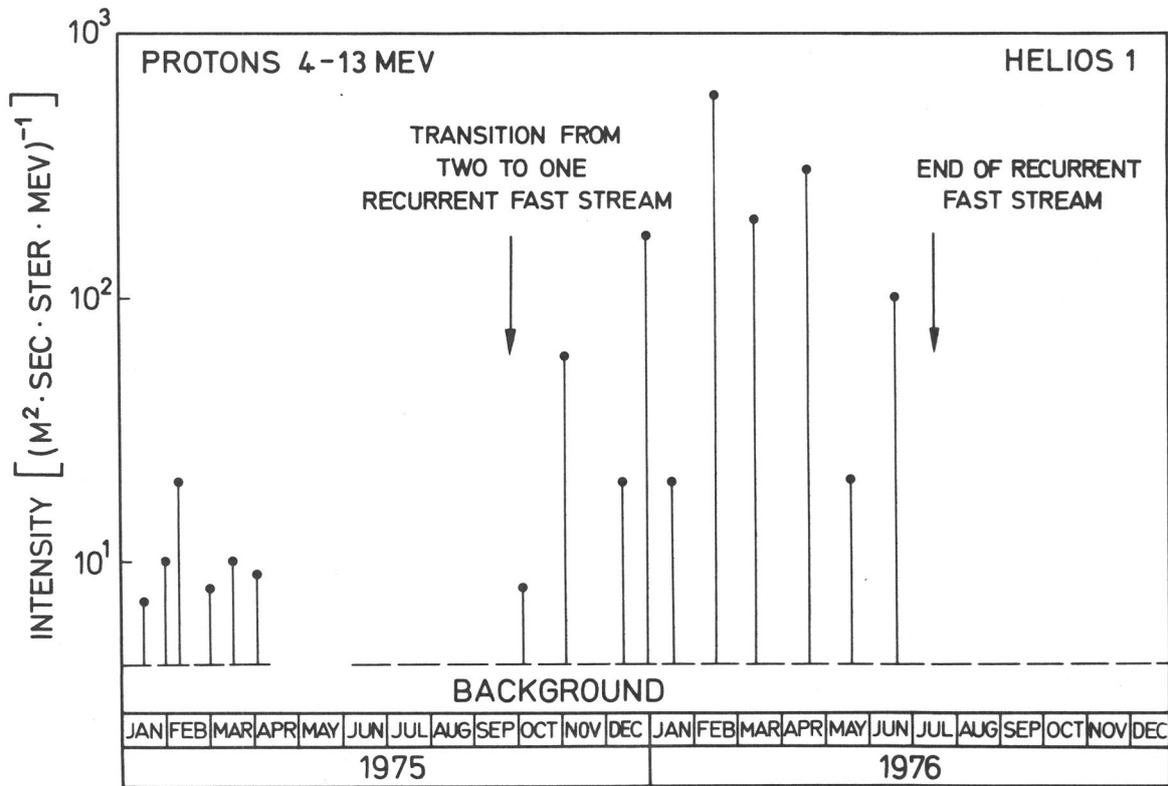


Abb. 29: Intensitätsmaxima korreliert mit korotierenden schnellen Sonnenwindströmen - Messungen auf Helios 1 in den Jahren 1975 und 1976

Alle Intensitätsmaxima der Protonen, die von Helios 1 und 2 korreliert mit korotierenden Sonnenwindströmen gemessen wurden, sind in Abbildung 30 als Funktion des radialen Abstandes dargestellt. Es fällt auf, daß mehr kleine Intensitätsanstiege registriert wurden als große, die bisher alleinig als korotierende Ereignisse untersucht wurden. Bisher ist unklar, ob für die kleinen Ereignisse derselbe Beschleunigungsmechanismus wirksam ist wie für die großen Ereignisse. Die Ereignisse weisen keinen einheitlichen positiven Gradienten auf, im Gegensatz zu Van Höllebeke et al. (1978). Die kleinen Ereignisse zeigen wenig Variation der Intensität bei unterschiedlichen radialen Entfernungen.

Für die korotierenden Ereignisse von Februar bis April 1976 wird das Verhalten der Gradienten untersucht. Diese Ereignisse waren Teil eines Zyklus, der mindestens über acht solare Rotationen beobachtet wurde. Die Intensitätsmaxima für drei aufeinanderfolgende korotierende Ereignisse als Funktion des Abstandes von der Sonne sind in Abbildung 31 zu sehen. Auch die großen korotierenden Ereignisse besitzen keinen einheitlichen Gradienten. Innerhalb 1 AU wurde ein zeitabhängiger Gradient gemessen, der sogar von einer solaren Rotation zur nächsten das Vorzeichen wechselt. Negative Gradienten zeigten sich im Februar und April 1976 zwischen 0.7 und 1.0 AU Abstand von der Sonne (Zölllich et al., 1980).

Im März wurden mehrere Flares auf der Sonne beobachtet. Der Einfluß dieser Aktivität auf die Messungen, die in diesem Kapitel besprochen wurden, wird im folgenden untersucht.

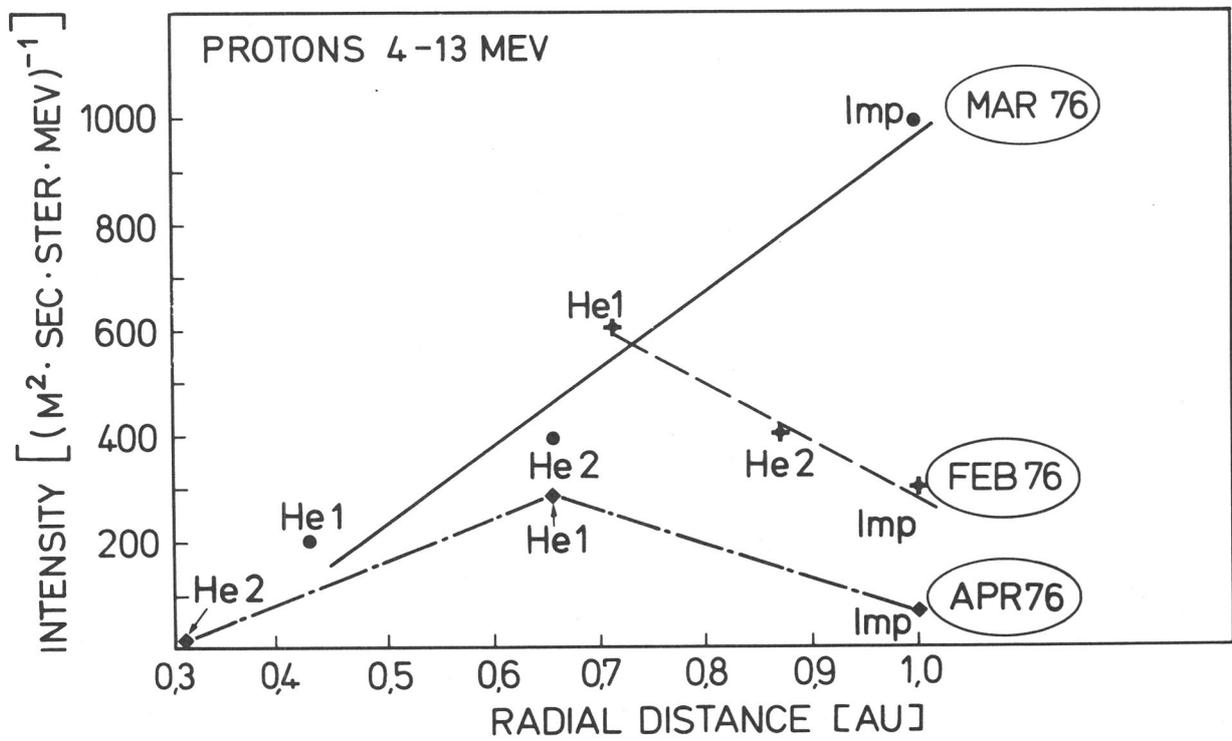


Abb. 31: Intensitätsmaxima für drei korotierende Ereignisse von Februar bis April 1976 als Funktion des Abstandes zur Sonne

6. Einflüsse solarer Flares auf die Beschleunigung von CIRs

6.1. Störungen innerhalb eines Zyklus korotierender Ereignisse

Zu Beginn des Jahres 1976 wurden korotierende Ereignisse mit den höchsten Intensitäten während der zwei Jahre 1975 und 1976 gemessen, wie Abbildung 29 deutlich zeigt. Für diesen Zeitraum sind die auf Helios 1 und 2 gemessenen Protonenintensitäten in Abbildung 8 dargestellt. Selbst in der Phase des Zyklus, in der die korotierenden Ereignisse deutlich ausgebildet sind, treten Unregelmäßigkeiten auf. Im Januar ist das Intensitätsmaximum auf Helios 1 und 2 deutlich reduziert. Komplizierter erscheint die Situation im April. Helios 1 mißt 11 Tage, nachdem bei Helios 2 nur ein äußerst geringer Anstieg registriert wurde, ein voll ausgebildetes korotierendes Ereignis. Im folgenden sollen diese Unregelmäßigkeiten genauer untersucht werden. Dazu werden Vergleiche mit Messungen anderer Raumfahrzeuge durchgeführt.

Prinzipiell sind mehrere Möglichkeiten denkbar, die zu den beobachteten Intensitätsschwankungen der Maxima korotierender Ereignisse führen:

1. Der Beschleunigungsprozess ist zeitlich veränderlich. Dies wäre denkbar, wenn z. B. ein Beschleunigungsmechanismus wirkt, bei dem es auf den Winkel des Magnetfeldes mit der Shockfront ankommt und dieser zeitlich schwankt. Weiterhin wäre es möglich, daß die Shocks nicht immer ausgebildet sind, oder verschiedene Stärke besitzen.
2. Die Quelle der Teilchen, die in den CIRs beschleunigt werden, ändert sich mit der Zeit. Dieser Prozess käme infrage, wenn hochenergetische Teilchen aus dem Plasma beschleunigt würden (Scholer et al., 1980) und die mittlere Plasmatemperatur sich zeitlich ändert.
3. Eine Störung, z. B. solare Shocks, hindern die beschleunigten Teilchen bei der Ausbreitung vom Beschleunigungsort in Richtung Sonne.

Mit Hilfe zusätzlicher Daten soll jetzt versucht werden, den Kreis dieser Möglichkeiten einzuengen. Abbildung 32 zeigt für den Zeitraum von Januar bis Juni 1976 sowohl Protonenintensitäten von Pioneer 11 bei einer radialen Entfernung von ~ 4 AU als auch Protonenintensitätsmessungen von IMP, Helios 1 und Helios 2 in Erdnähe bei 1 AU. Obwohl die Energie der gemessenen Protonen auf Pioneer 11 niedriger liegt, zeigt sich im Januar eine Reduktion des Intensitätsmaximums des korotierenden Ereignisses in völliger Übereinstimmung mit den Beobachtungen bei 1 AU. Die Anzahl der beschleunigten Teilchen war also bereits im Beschleunigungsgebiet reduziert. In diesem Fall liegt also keine Störung der Ausbreitung beschleunigter Teilchen in Richtung Sonne vor. Im Januar 1976 ist ein direkter Vergleich gut möglich, da die Raumfahrzeuge Helios 1 und 2, IMP und Pioneer beinahe auf einer Magnetfeldlinie lagen. Zeitliche Änderungen im Beschleunigungsgebiet spielen hier wegen der geringen Korotationszeit des schnellen Sonnenwindstroms keine Rolle.

Im April sieht die räumliche Konfiguration anders aus. Die räumliche Lage der verschiedenen Raumfahrzeuge ist in Abbildung 33 dargestellt. Eine angenommene Plasmageschwindigkeit von $V_{sw} = 500$ km/s liefert die Schar von eingezeichneten Magnetfeldlinien. Die Hauptbeschleunigungsregion bei einem radialen Abstand von etwa 5 AU ist etwa durch die Jupiterbahn gegeben. Die Korotationszeit des schnellen Sonnenwindstroms zwischen Helios 2, IMP und Pioneer 11 ist klein. Zwischen Helios 2 und 1 hingegen beträgt sie 10 Tage. Wegen der unterschiedlichen räumlichen Lage von Helios 1 und 2 erhalten wir Aussagen über Quelle, Beschleunigungsprozess und interplanetares Medium für unterschiedliche Zeitpunkte im Gegensatz zum Januar.

Da Pioneer 11 im April 1976 im Hauptbeschleunigungsgebiet kein korotierendes Ereignis mißt (Van Hollebeke et al., 1978), muß angenommen werden, daß in einem bestimmten Raumbereich der Beschleunigungsprozess gestört war. Wegen der geringen Korotationszeit ist es verständlich, daß sowohl bei IMP als auch bei Helios 2 sehr geringe Intensitätsanstiege registriert wurden. Auf Helios 2 hebt sich das Ereignis kaum vom Untergrund ab. Interessant ist,

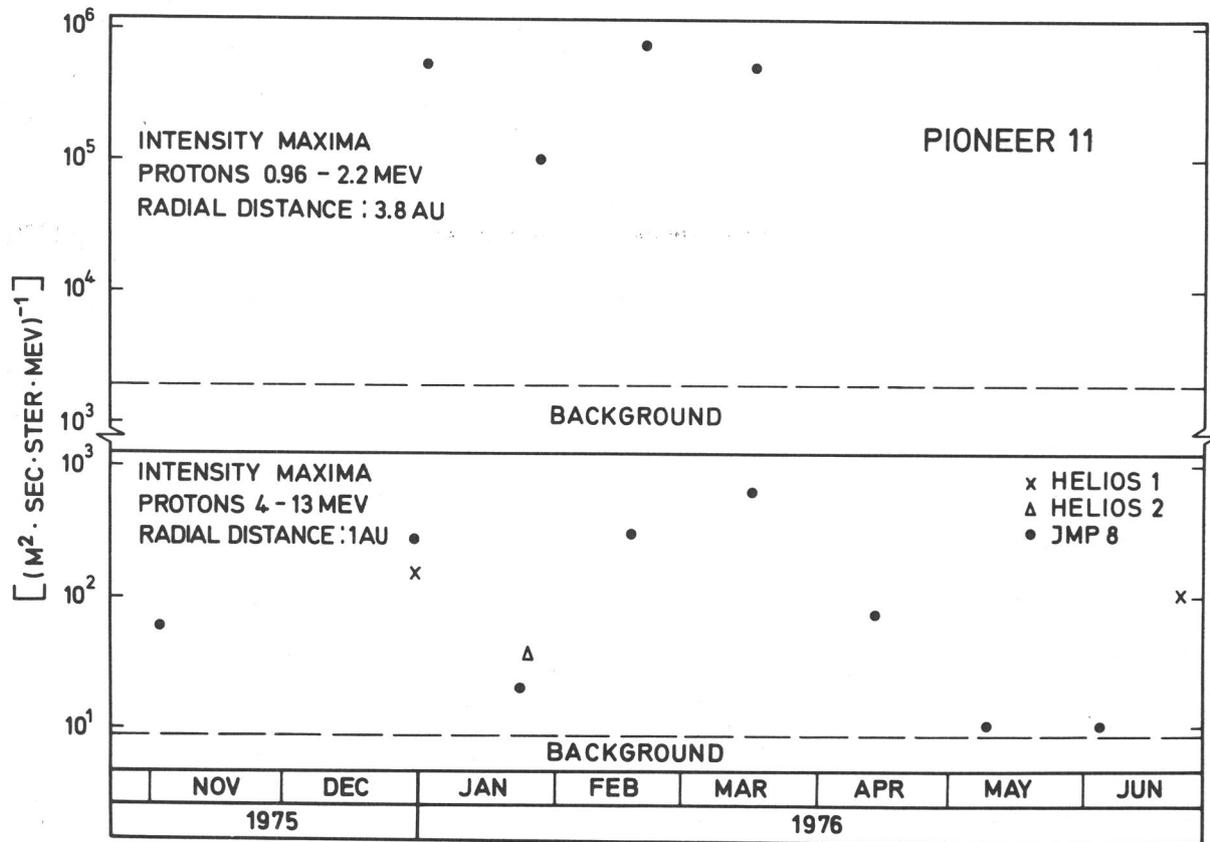


Abb. 32: Intensitätsmaxima korotierender Ereignisse
 - Messungen am Rückwärtsschock von Pioneer 11 bei 4 AU im
 Vergleich mit den entsprechenden korotierenden Ereignissen
 gemessen bei etwa 1 AU

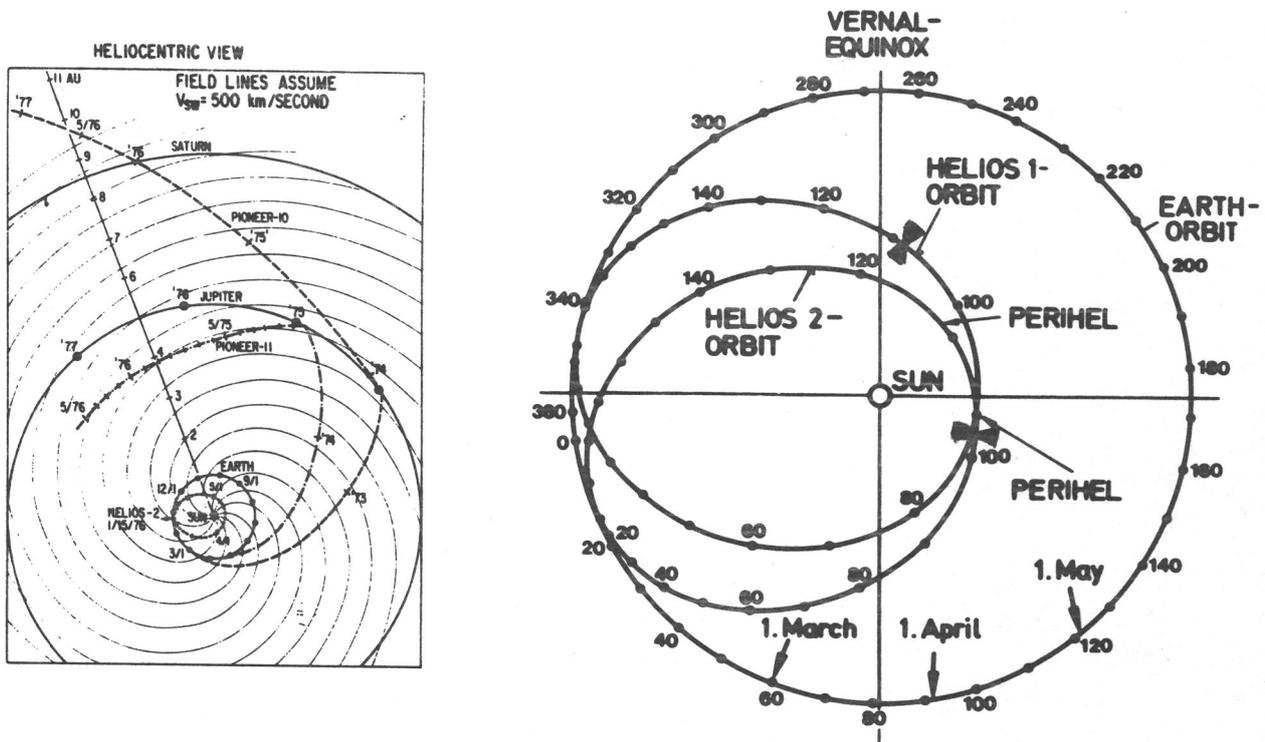


Abb. 33: Räumliche Lage der Raumfahrzeuge zum Zeitpunkt der Messung des korotierenden Ereignisses im April 1976

daß Helios 1 sich elf Tage später in einem Gebiet aufhält, in dem offenbar erneut ungestörte Verhältnisse vorliegen. Hier zeigen Messungen ein voll ausgebildetes korotierendes Ereignis.

Das folgende Kapitel soll klären, warum im April die Ausbildung korotierender Ereignisse gestört war. Dazu wird die Sonnenaktivität im März sowie deren Einfluß auf die CIRs und den Beschleunigungsprozess untersucht.

6.2. Solare Aktivitäten im März und Auswirkungen auf die Beschleunigung von CIRs

Die solaren Aktivitäten im März 1976 und ihr Einfluß auf die korotierenden Ereignisse sollen genauer untersucht werden. 1976 war das Jahr minimaler Sonnenaktivität zwischen dem 20. und 21. Zyklus. Trotz des Minimums war die höchste Restaktivität seit dem Jahr 1955 beobachtet worden (Hedeman und Dodson, 1980).

Die uns interessierende Periode März/April 1976 fällt mit dem STIP II Intervall (Study of Travelling Interplanetary Phenomena) zusammen. In dem Zeitabschnitt vom 20. März bis 5. Mai sollten Vorgänge auf der Sonne, im interplanetaren Raum sowie Auswirkungen auf die Erde von möglichst vielen Punkten auf der Erde und im interplanetaren Raum untersucht werden. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen über diese Periode findet man im UAG Report 61, 1977. Die für die Untersuchung der Störungen korotierender Ereignisse wichtigen Messungen sollen im folgenden dargestellt und diskutiert werden.

Die meisten geophysikalischen Störungen hängen mit einem aktiven Gebiet auf der Sonne zusammen, welches von Anfang März bis Ende Juni existierte und während dieser Zeit zwölf Flares erzeugte, die als "major flares" klassifiziert wurden (Hedeman und Dodson, 1980). "Major flares" zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus (Dodson und Hedeman, 1971; 1975):

- Sudden Ionospheric Disturbance ≥ 2
- H_{α} importance ≥ 1
- 10 cm flux $\geq 500 \cdot 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$
- Typ II radio burst
- Typ IV radio emission, duration $>10 \text{ min}$

Die Analyse der geomagnetischen Stürme ergibt, daß die Mehrzahl nicht mit den aufgezählten Flares korreliert. Von insgesamt 34 Stürmen des Jahres 1976 sind mit Sicherheit nur 2 durch Flares hervorgerufen worden, hingegen kehren 21 in einem 27-tägigen Rhythmus wieder (Hedeman und Dodson, 1980). Dies entspricht der Korotationsdauer eines schnellen Sonnenwindstroms für eine solare Umdrehung.

Die beiden großen Flares vom 28. März und 30. April 1976 führen zu einer geomagnetischen Störung. Abbildung 34 zeigt solch ein flare-gestörtes Gebiet, welches wie eine "Zunge" aussieht. Meistens wird solch ein Gebiet an der Frontseite durch einen Shock begrenzt. Auf Helios 2 konnte solch ein Shock, der vom Flare am 30. April stammte, gemessen werden (Gurnett et al., 1979). Diesem folgt ein Kompressionsgebiet, welches durch sich radial ausbreitendes Flarematerial erzeugt wird. Die Übergangsregion weist einen hohen Alphateilchengehalt auf (Hirshberg et al., 1970).

Die Flares, die solch ein gestörtes Gebiet hervorrufen, zeichnen sich durch Radioausbrüche vom Typ II und IV aus. Ein Typ II Ausbruch soll durch eine Shockwelle beim Ausbruch des Flares erzeugt werden. Eine sich bewegende Plasmawolke, wie das "Flare ejecta" in der Abbildung 34 ist in der Nähe der Sonne in der Lage, einen Typ IV Radioausbruch zu erzeugen. Genaue Ausführungen zu Eigenschaften und zur Entstehung der verschiedenen Radioausbrüche findet man bei Wild und Smerd (1972).

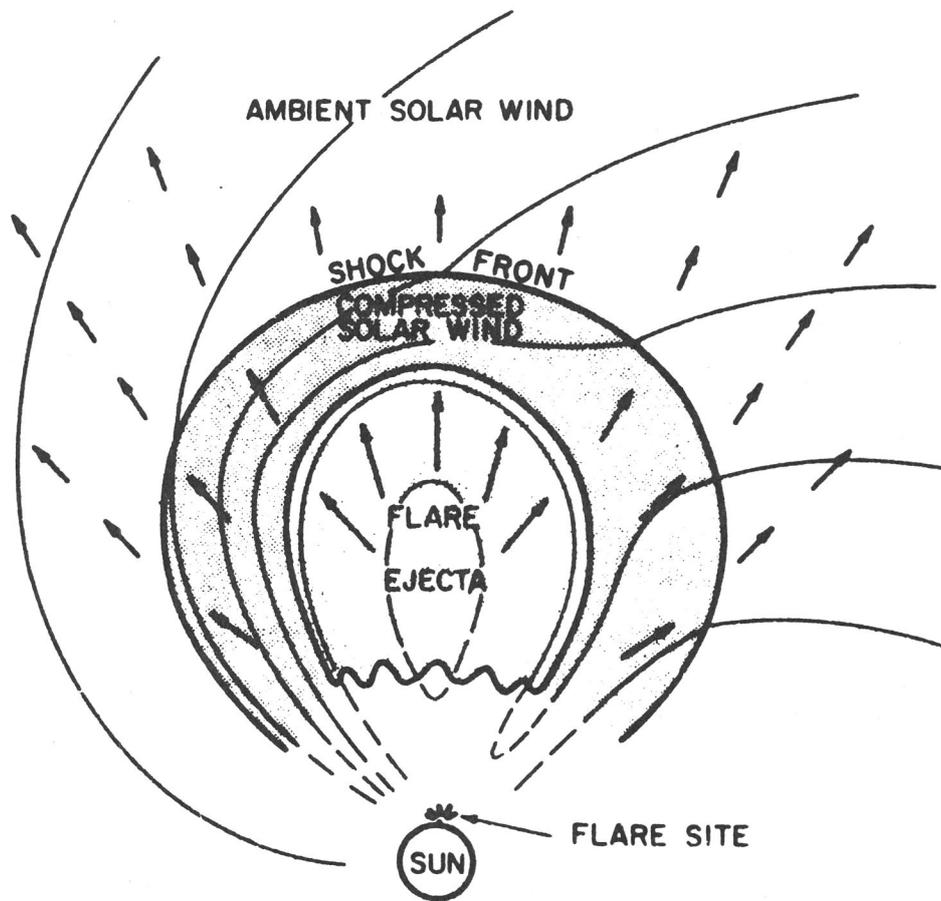


Abb. 34: Flareerzeugter Shock und beeinflusstes Gebiet
(Hundhausen, 1972)

Untersuchungen von Iucci et al. (1979) zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen Flares mit einem Typ IV Radioausbruch, der sich vom mikrometrischen bis zum metrischen Wellenlängenbereich entwickelt hat, und Forbushabfällen der Intensität galaktischer kosmischer Strahlung. Das Gebiet, welches sich durch einen Forbushabfall auszeichnet, besitzt eine Ausdehnung von 100° bis 200° in Länge und Breite. Ein Hauptgebiet der Störung liegt im westlichen Bereich. Die gesamte gestörte Region korotiert um die Sonne, während sie sich entlang des Magnetfeldes ausdehnt. Innerhalb des gestörten Gebietes erholt sich die Intensität galaktischer kosmischer Strahlung nach dem ursprünglichen Abfall wieder und steigt exponentiell zum Ausgangswert mit einer Zeitkonstanten von etwa 11 Tagen.

Für den interessierenden Zeitraum vom 20. März bis 5. Mai 1976 liegt eine Analyse der beobachteten Forbusheffekte und der zugehörigen Flares mit Radioausbrüchen vom Typ IV vor. Während dreier solarer Rotationen ist ein korotierender Forbushabfall der Intensität, welcher ausschließlich von einem aktiven Gebiet stammt, zu beobachten (Iucci et al., 1977). Dieses Gebiet heißt während der solaren Rotation 1639 McMath Plage 14 143 und ist von der Erde aus vom 23. März bis zum 6. April auf der Sonne zu beobachten. Eine Rotation später wird dasselbe aktive Gebiet McMath Plage 14 179 genannt. Die solare Aktivität dieses Gebietes kann aus Abbildung 35 entnommen werden. In dem Zeitraum vom 23. bis zum 31. März werden mehrere Typ IV Radioausbrüche gemessen, die dafür sorgen, daß mehrere gestörte Gebiete sich ineinanderschieben und sich zu einem großen vereinen.

Die Ausdehnung des gestörten Gebietes soll aus den beobachteten Forbushabfällen bei der Erde, auf Helios 1 und 2 sowie auf Pioneer 10 und 11 ermittelt werden. Die Forbushabfälle auf Pioneer 10 und 11 konnten aus Messungen der Protonen mit Energien oberhalb 80 MeV abgelesen werden. Die Messungen in Abbildung 36 entstammen einer Arbeit von Van Allen (1980), der die Intensität galaktischer kosmischer Strahlung bis zu einer radialen Entfernung von 18 AU von der Sonne untersucht. Auf Helios 1 und 2 werden die integralen Zählraten aller Teilchen mit Energien oberhalb 50 MeV untersucht und so Forbushabfälle registriert.

List of Significant Solar-Terrestrial Phenomena (20 March - 2 May 1976)

Date 1976	Time (UT)	Event
March 20	0203 2257	Type II radio burst at the east limb (Culgoora) Type II radio burst at the east limb (Culgoora)
		Note: Solar wind velocity enhancement on 9 April observed by Pioneer 10 (9.7 AU, 147° east of the Sun-Earth line).
23	0450 0837-0841 0840-1900 0841 0842 0907-0945 1100	X-ray enhancement, east limb (OSO-8) Solar flare (S05, E90; McMath Plage 14143; SB) X-ray enhancement (GOES-1) Type II and Type IV radio bursts (IZMIRAN, Moscow) Type IV radio burst (Dürnten) Solar flare (S07, E90; McMath Plage 14143; SN) Many loops observed in H-alpha, SE limb (Ramey)
26	0233	Sudden commencement geomagnetic storm (Ap=138)
28	1840 1905-2021 1915 1921-1950 1925-1939 1931-2400	Onset of X-ray enhancement, 1-8Å (GOES-1) Solar flare (S07, E28; McMath Plage 14143; 1B) Onset of 8800 MHz solar noise burst. Maximum at 1934 UT with flux density of 3719 flux units (Sagamore Hill) Type II radio burst (Harvard) Type IV radio burst (Sagamore Hill) Type IV radio burst (Boulder)
31	1108 1138-1350 1153-1512 1356-1407 1437-1442 1445-1508	Onset of X-ray enhancement, 1-8Å (SMA/GOES) Solar flare (S07, W09; McMath Plage 14143; 1N) Type IV radio burst (Dürnten) Solar flare (S08, W09; McMath Plage 14143; SF) Solar flare (S10, W03; McMath Plage 14143; SN) Solar flare (S11, W08; McMath Plage 14143; SF)
April 1	0255	Sudden commencement geomagnetic storm (Ap=107)

April 30	2043 2047-2218 2047 2103-2130 2107-2129 2120-2125 2125-2130 2130	Onset of X-ray enhancement, 1-8Å (GOES-1) Solar flare (S08, W46; McMath Plage 14179; 1B) Onset of 2800 MHz solar noise burst at Ottawa. Maximum at 2109 UT with flux density of 1670 flux units. Type IV radio burst (Sagamore Hill) Type II radio burst (Harvard) Onset of GLE (Inuvik, Canada, neutron monitor) Onset of PCA (Thule, Greenland; Cape Zhelaniya and Dixon Island, USSR) Onset of 6-10 MeV protons observed on SMS/GOES
May 1	0130	Maximum PCA at Thule, Greenland (2.7 dB)
2	1829	Sudden commencement geomagnetic storm (Ap=58 on 2 May; Ap=94 on 3 May)

Abb. 35: Solare Aktivitäten von März bis Mai 1976

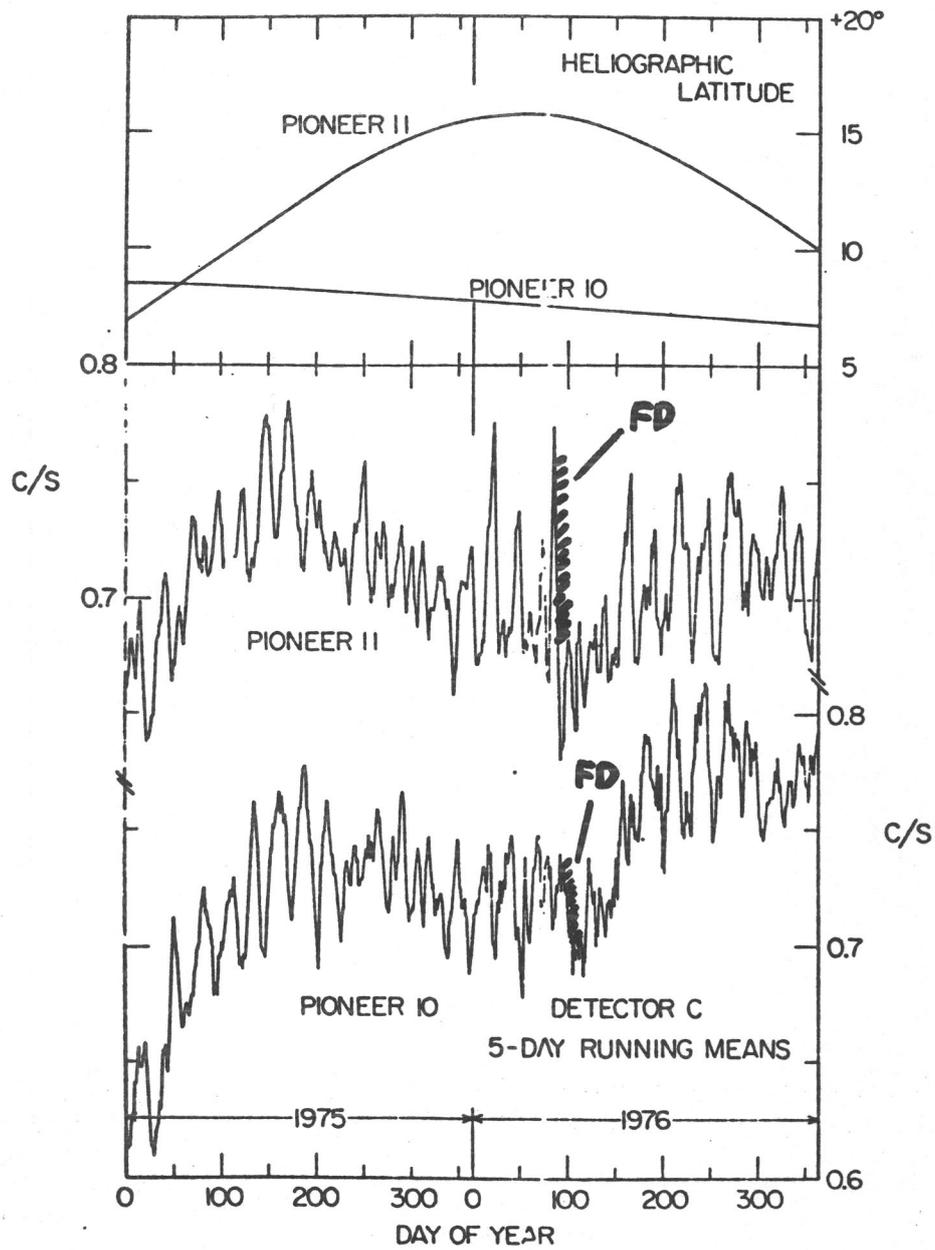


Abb. 36: Zählrate für Protonen mit Energien oberhalb 80 MeV gemessen von Pioneer 10 und 11 in den Jahren 1975 und 1976 (Van Allen, 1980)

Die zeitliche Abfolge und Entwicklung des gestörten Gebiets im Zeitraum 20. März bis 20. April soll durch eine Folge von Abbildungen veranschaulicht werden.

Abbildung 37 zeigt die räumliche Lage der Raumfahrzeuge und des aktiven Gebiets am 20. März 1976 in einem stationären Koordinatensystem. Zu diesem Zeitpunkt, als das aktive Gebiet (Mc Math Plage 14 143) etwa 40° hinter dem Ostrand der Sonne war, wurde ein intensiver Radioausbruch vom Typ II gemessen, der von diesem aktiven Gebiet stammen muß (Nelson und McLean, 1977). Durch Raumfahrzeuge direkt konnte die Stoßwelle nicht nachgewiesen werden, aber aus Szintillationsmessungen hat man eine Shockgeschwindigkeit von $V_s = 1260$ km/s ermittelt (Pinter, 1977). Pioneer 10 liegt in radialer Richtung zum Flare am 20. März bei etwa 10 AU Entfernung. Sowohl ein schneller Sonnenwindstrom, der vom aktiven Gebiet am 20. März ausgeht, als auch ein Forbushabfall der Protonintensität wurden um den 9. April beobachtet (Abbildungen 35 und 36). Nach 20 Tagen hat das solargestörte Gebiet Pioneer 10 erreicht.

Am 29. März erreicht die Störung die Erde und fast gleichzeitig Pioneer 11, wie Abbildung 38 zeigt. Durch mehrere aufeinanderfolgende Typ IV Radioausbrüche bis zum 31. März erhält das gestörte Gebiet die Form eines "Halbmondes". Bisher liegen die CIR und das durch solare Flares gestörte Gebiet etwa 180 Grad auseinander. Da die CIR korotiert, wird es zu einem späteren Zeitpunkt zu einer Wechselwirkung mit der solaren Störung kommen.

Etwa zwischen dem 9. und 14. April müßten auf Pioneer 11, IMP und auf Helios 2 die korotierenden Ereignisse zu messen sein. Auf Helios 2 ist deutlich der korotierende schnelle Sonnenwindstrom gemessen worden. Daß innerhalb dieses Zeitraums auch auf IMP und Pioneer 11 korotierende Ereignisse zu erwarten sind, ist bei Van Hollebeke et al. (1978) nachzulesen. Auf IMP standen Plasma und Magnetfeldmessungen, auf Pioneer 11 nur Magnetfeldmessungen zur Verfügung. Die Magnetfelddaten auf Pioneer 11 müssen zu diesem Zeitpunkt eine CIR aufgewiesen haben. Im vorangegangenen Kapitel sind die Messungen zu diesem

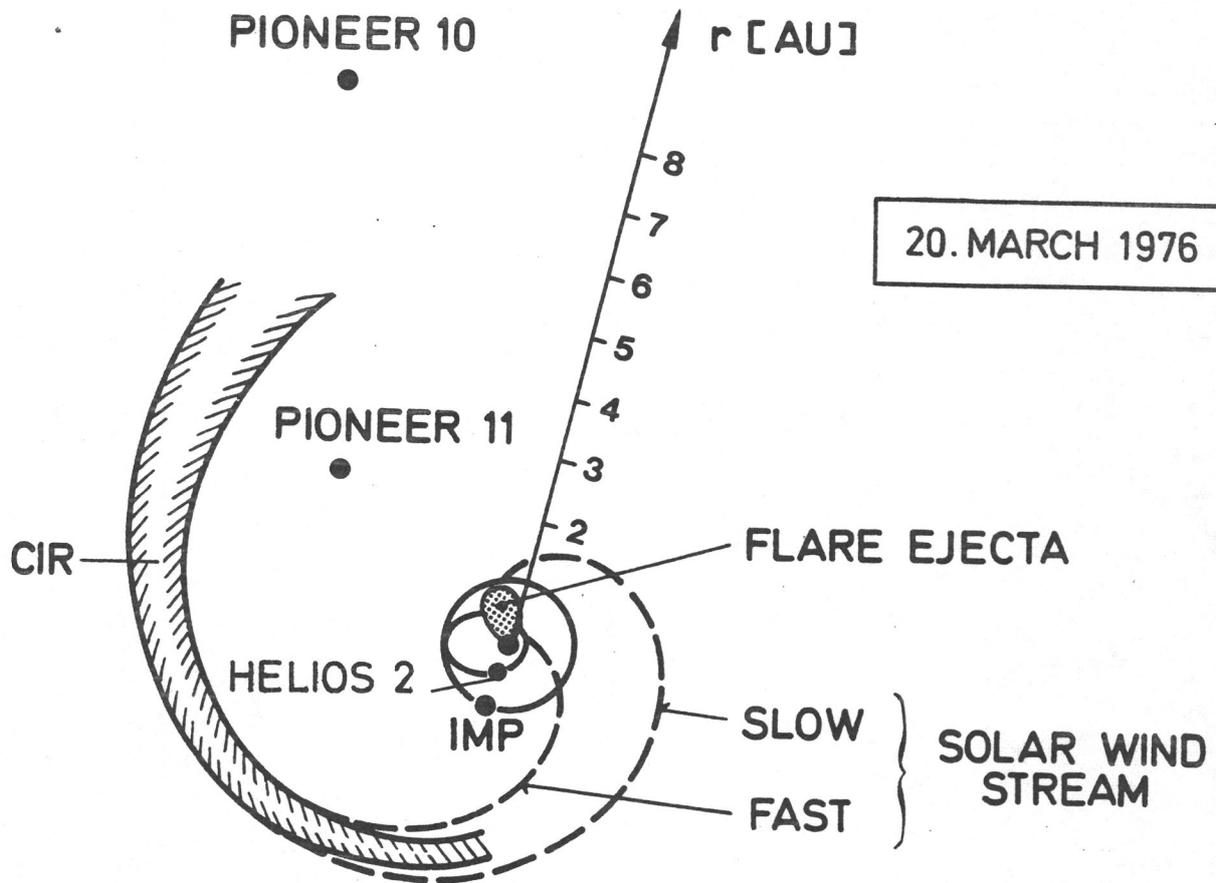


Abb. 37: Räumliche Lage der Raumfahrzeuge und des aktiven Gebiets am 20. März 1976 - Entstehung der solaren Störung

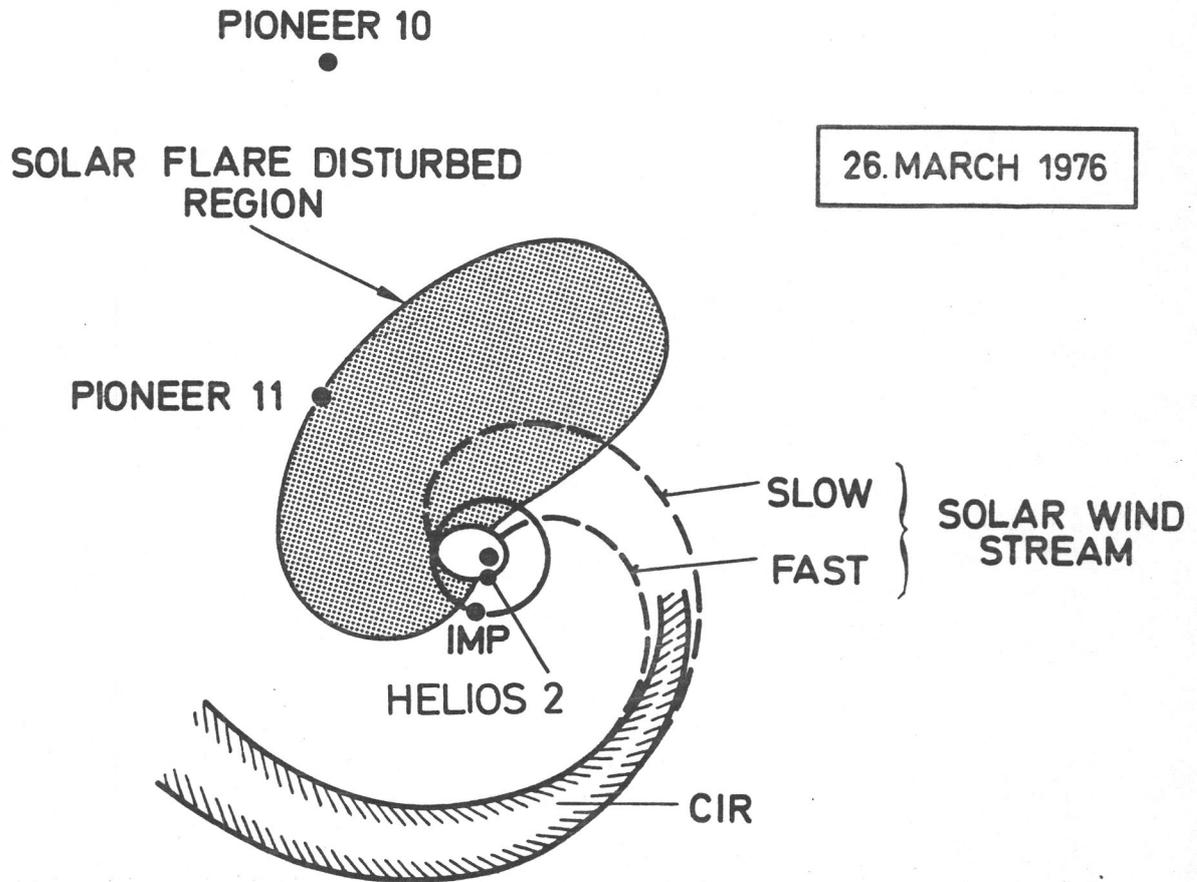


Abb. 38: Räumliche Situation am 26. März 1976

Zeitpunkt bereits beschrieben worden. IMP mißt einen kleinen Intensitätsanstieg, Pioneer 11 und Helios 2 nahezu keinen.

Bevor die Wechselwirkung zwischen CIR und korotierendem Sonnenwindstrom noch genauer analysiert wird, soll erklärt werden, warum auf Helios 1 am 20. April ein ungestörtes voll ausgebildetes Ereignis gemessen werden konnte. Da ab 31. März kein Flare mit einem Radioausbruch des Typs IV aus diesem aktiven Gebiet registriert wurde, entsteht keine neue solare Störung von diesem Zeitpunkt an. Die alte Störung entfernt sich mit konstanter Geschwindigkeit (Smith und Wolfe, 1977) von der Sonne. Bei einer angenommenen mittleren Geschwindigkeit von 600 km/s hat die gesamte Störung nach etwa 15 Tagen einen Abstand von 5 AU zur Sonne. Da spätestens dann das Hauptbeschleunigungsgebiet bei 4 AU Entfernung nicht mehr von solaren Shocks beeinflusst wird, müßten erneut korotierende Ereignisse zu beobachten sein. Am 22. April, also nach 22 Tagen, wurde auf Helios 1 ein gut ausgebildetes korotierendes Ereignis gemessen. Die Situation zu diesem Zeitpunkt veranschaulicht Abbildung 39.

Bisher wurde aus den Beobachtungen geschlossen, daß das Ausbleiben der korotierenden Ereignisse auf Pioneer 11, IMP und Helios 2 auf die Wechselwirkung zwischen CIR und der solaren Störungen zurückzuführen sind. Welche Wechselwirkung stattfindet und warum korotierende Ereignisse sich nicht ausbilden, ist damit noch nicht erklärt.

Es existieren verschiedene theoretische Modelle, die die Bewegung eines Shocks, der vor einer solaren Störung beobachtet werden kann (Abbildung 34), durch einen schnellen Sonnenwindstrom beschreiben (Heineman und Siscoe; 1974, Hirshberg et al., 1974; Burlaga und Scudder, 1975). Der Einfluß auf die Stärke und den Verlauf des Shocks der solaren Störung wird berechnet. Abbildung 40 zeigt anschaulich den Einfluß auf den Verlauf der Shockfront. Allerdings wird hier nur die Situation bei einer Entfernung von etwa 1 AU zur Sonne erörtert. Bei größeren radialen Entfernungen trifft der korotierende Shock auf der Vorderseite der CIR auf den solaren Shock. Theoretische Berechnungen ergeben, daß beide sich vereinigen sollen (Burlaga et al., 1975). Es ist nicht bekannt, welche Vorhersagen die Modelle bezüglich

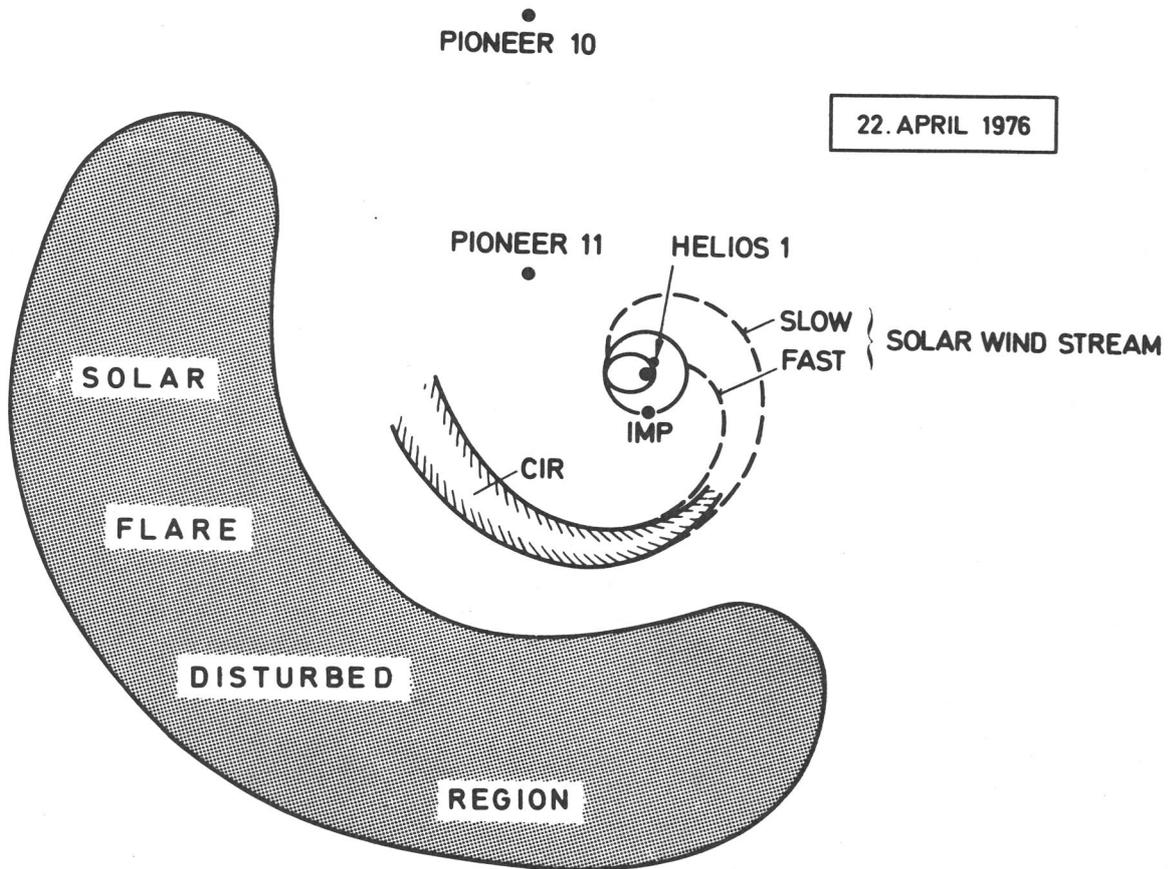


Abb. 39: Situation am 22. April 1976 -
Helios 1 mißt erneut korotierendes Ereignis

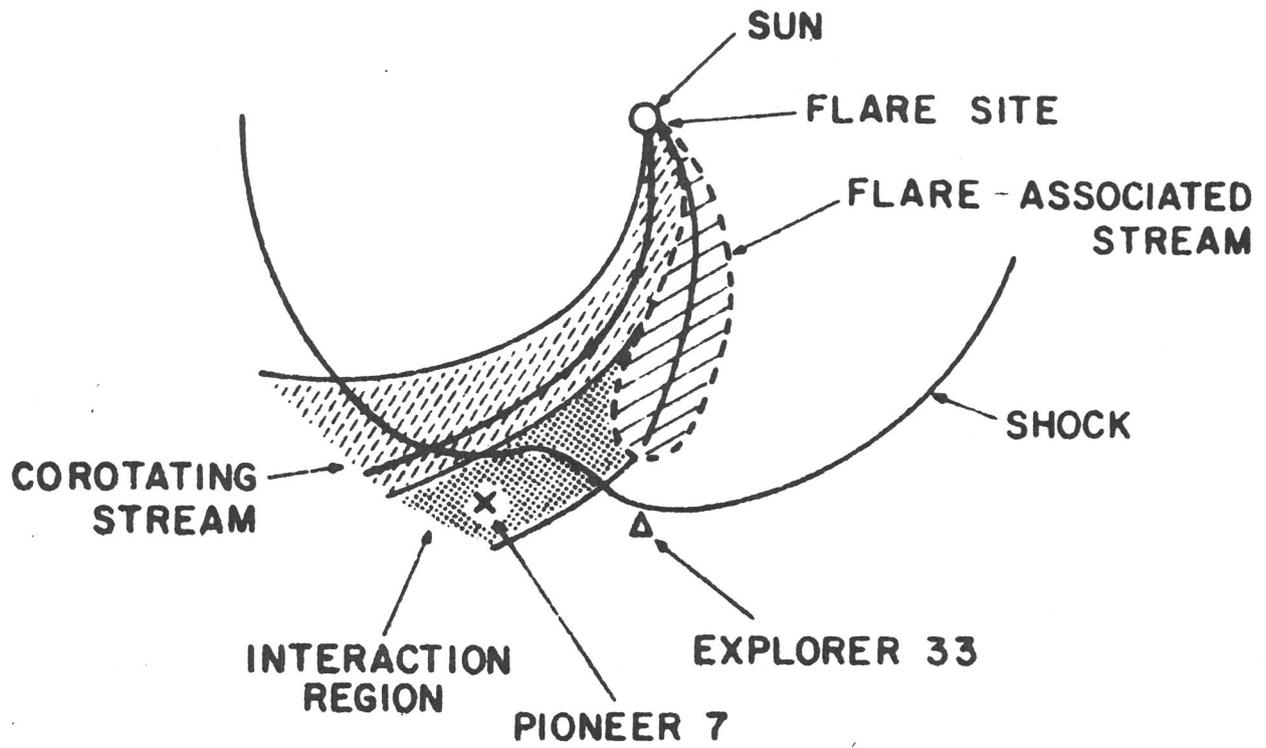


Abb. 40: Wechselwirkung eines korotierenden mit einem
Flareshock (Burlaga et al., 1975)

des Einflusses auf den Rückwärtsshock machen, während der schnelle Sonnenwindstrom durch eine solare Störung korotiert.

Zwei Gründe wären denkbar, die zu den Beobachtungen im April führen.

- Der Rückwärtsshock kann, während er durch die solare Störung korotiert, keine korotierenden Ereignisse ausbilden, da er stark durch die Wechselwirkungen beeinflusst wird. In diesem Fall wäre eine Änderung des Beschleunigungsprozesses der Grund, warum Pioneer 11, IMP und Helios 2 keine Ereignisse gemessen haben.

- Der Rückwärtsshock bleibt durch die Wechselwirkung weitgehendst unbeeinflusst. Da das Plasma der solaren Störung eine geringere Temperatur besitzt (Montgomery et al., 1974), und der Rückwärtsshock nur die höchst-energetischen Plasmateilchen beschleunigen kann, können sich keine korotierenden Ereignisse mehr ausbilden. Die Ursache der Störungen im April wäre somit eine reduzierte Quellstärke der zu beschleunigenden Teilchen.

Van Hollebeke et al., (1978) haben die Magnetfelddaten von Pioneer 11 analysiert und festgestellt, wann eine CIR und wann korrelierte Intensitätsanstiege gemessen worden sind. Die Angaben von Van Hollebeke et al. (1978) interpretieren wir so, daß eine CIR gemessen worden ist.

Damit scheidet der erste Grund aus. Die solare Störung bewirkt also, daß die Quellstärke der zu beschleunigenden Teilchen so lange reduziert ist, bis die CIR diese verläßt. Somit ist auch geklärt, warum nach größeren solaren Flares oft keine korotierenden Ereignisse gemessen werden können (Van Hollebeke et al., 1978). Diese Erklärung ist neben den chemischen Elementhäufigkeiten, z. B. die Konstanz des Proton/Alpha-Verhältnisses, ein weiterer Hinweis, daß die korotierenden Ereignisse aus dem Sonnewind beschleunigt worden sind. Unterschiedliche Plasmatemperaturen am Vorwärts- und Rückwärtsshock sollten auch erklären können, warum am Rückwärtsshock ein höheres Intensitätsmaximum gemessen wird (Scholer et al., 1980). In diesem Fall

spielt eine räumlich unterschiedliche Plasmatemperatur eine Rolle. Für die Störungen des Zyklus korotierender Ereignisse ist eine zeitlich veränderliche Plasmatemperatur verantwortlich, wie sie bereits nach Shocks sowohl bei Protonen als auch bei Elektronen gemessen wurde (Gosling et al., 1973; Montgomery et al., 1974).

6.3. Einfluß von solaren Störungen auf die radialen Gradienten der Intensität korotierender Ereignisse

Die von Van Hollebeke et al. (1978) gefundenen positiven Gradienten der Intensität korotierender Ereignisse lassen sich durch das Beschleunigungsmodell von Fisk und Lee (1980) erklären. Grundlage ist eine zeitunabhängige Ausbreitungsgleichung für die Teilchen, die Diffusion, Konvektion und adiabatische Abkühlung einschließt.

Dieses Modell kann sicher nicht angewendet werden, wenn zeitabhängige solare Störungen die Quellstärke der unbeschleunigten Teilchen beeinflussen. Zukünftige theoretische Rechnungen müssen Aussagen liefern über das zeitliche Verhalten der Gradienten der Intensität korotierender Ereignisse, wenn die Quelle der beschleunigten Teilchen am Rückwärtsschok während einer solaren Störung abgeschaltet wird.

Im gestörten Fall müssen die radialen Gradienten zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmt werden. Die Korotationszeit zwischen Raumfahrzeugen bei verschiedenen radialen Abständen muß gering sein. Dies ist nur im Februar in etwa erfüllt. Hier zeigen Messungen innerhalb 1 AU einen negativen Gradienten. In diesem Fall wurde die Störung, die in den Intensitätsmessungen bereits im Januar zu beobachten war, nicht näher beschrieben.

Im April wäre eine Bestimmung des radialen Gradienten aus den Messungen von Helios 2, IMP und Pioneer 11 denkbar. Allerdings werden wegen einer solaren Störung eines aktiven Gebiets auf der Sonne keine oder nahezu keine korotierenden Ereignisse gemessen. Wegen der Korotationszeit des schnellen Sonnenwindstroms von Pioneer 11 zu Helios 1 können die Intensitätsmessungen in Abbildung 31 nicht als ein negativer Gradient gedeutet werden.

Forman und Morfill (1979) können die Zeit nach Durchgang einer Störung bis zu einem erneuten Gleichgewicht, welches durch zeitunabhängige Energiespektren und radiale Gradienten charakterisiert ist, abschätzen zu

$$\tau_{\text{acc}} = K \cdot \ln(E/E_0)/V^2.$$

- K: Diffusionskoeffizient
- E: Energie der beschleunigten Teilchen
- E_0 : Energie der unbeschleunigten Teilchen
- V: Sprung der Plasmageschwindigkeit am Shock

Diese Zeit ist stark abhängig vom Diffusionskoeffizienten. Das zeigen die folgenden Beispiele mit typischen Werten:

Beispiel 1:

$$\begin{aligned} K &= 10^{20} \text{cm}^2/\text{s} \\ E &= 5 \text{ MeV} \\ E_0 &= 0.1 \text{ MeV} \\ V &= 200 \text{ km/s} \end{aligned} \Rightarrow \tau_{\text{acc}} = 11 \frac{1}{3} \text{ Tage}$$

Beispiel 2:

$$\begin{aligned} K &= 10^{21} \text{cm}^2/\text{s} \\ E &= 5 \text{ MeV} \\ E_0 &= 0.1 \text{ MeV} \\ V &= 200 \text{ km/s} \end{aligned} \Rightarrow \tau_{\text{acc}} = 113 \text{ Tage}$$

Untersuchungen der Anisotropie und radialen Gradienten liefern Diffusionskoeffizienten, die bei $5 \cdot 10^{20} \text{cm}^2/\text{s}$ liegen (Mewaldt et al., 1978). Diese Werte stimmen etwa mit den Werten für die Diffusionskoeffizienten bei solaren Teilchenereignissen. Eine Übersicht für diese Werte findet man bei Wibberenz (1979).

Zwischen der Entstehung der letzten solaren Störung am 21. März 1976 auf der Sonne und dem gut ausgebildeten Ereignis im April auf Helios 1 liegt eine Zeitspanne von 20 Tagen. Da die solare Störung, also das Flareplasma, etwa 10 Tage braucht, um zu einer radialen Entfernung von etwa 4 AU zu gelangen und somit als Störung für die Beschleunigung von korotierenden Ereignissen unwirksam zu werden, verbleiben in diesem Fall etwa weitere 10 Tage, bis sich ein Gleichgewicht erneut einstellt. Damit deutet die Analyse der Störung im April auf einen kleineren Diffusionskoeffizienten als oben zitiert, der bei etwa $K = 10^{20} \text{cm}^2/\text{s}$ liegt.

Weitere Untersuchungen von Störungen korotierender Ereignisse wären interessant im Hinblick auf die Frage, ob ein erhöhter Diffusionskoeffizient auch für korotierende Ereignisse wie im zweiten Beispiel dazu führen könnte, daß über lange Zeiträume sich keine Zyklen gut ausgebildeter korotierender Ereignisse aufbauen können. In diesem Fall würde das Gleichgewicht sich nicht ausbilden, weil in dem langen Zeitraum erneut solare Störungen von der Sonne ausgesandt werden.

7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Teilchenbeschleunigung an quasistationären interplanetaren Stoßwellen untersucht. Messungen der Teilchenexperimente der Universität Kiel auf Helios 1 und 2 werden zu diesem Zwecke herangezogen. Hauptsächlich werden Protonen im Energiebereich 4 bis 13 MeV in den Jahren 1975 und 1976 analysiert. Der Abstand der Heliossonden bewegt sich etwa zwischen 0.3 und 1.0 AU zur Sonne.

Bei radialen Entfernungen größer 2 AU von der Sonne bilden sich quasistationäre Stoßwellen aus. Durch Wechselwirkung eines schnellen mit einem langsamen Sonnenwindstrom entsteht eine CIR (Corotating Interaction Region), die durch einen Vorwärts- und Rückwärtsschock begrenzt ist. Interplanetare Beschleunigung an diesen Shocks, die im Mittel bis zu einer radialen Entfernung von 5 AU zunimmt, ist durch Messungen korotierender Ereignisse mit Pioneer 10 und 11 nachgewiesen worden.

Die Messungen auf Helios 1 und 2 zeigen auch korotierende Ereignisse, die sich wesentlich von solaren Flareereignissen unterscheiden. Sie werden immer korreliert mit einem schnellen Sonnenwindstrom beobachtet. Nicht jeder schnelle Sonnenwindstrom kommt dafür in Frage. Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, daß folgende schnelle Sonnenwindströme mit korotierenden Ereignissen belegt sind:

- Die schnellen Sonnenwindströme müssen von einer bestimmten Stelle auf der Sonne ausgehen und über mehrere solare Rotationen zu beobachten sein.
- Es gibt zu Beginn des Jahres 1975 zwei korotierende schnelle Sonnenwindströme pro solarer Rotation im Gegensatz zum Zeitraum von Oktober 1975 bis Juni 1976, als nur einer gemessen wurde. Die korotierenden Ereignisse zeigen etwa um eine Größenordnung höhere Intensitäten in der Periode mit nur einem korotierenden Sonnenwindstrom pro Rotation.
- In der Übergangsphase von Juni bis Oktober 1975 werden noch gut ausgebildete korotierende schnelle Sonnenwindströme gemessen. Die Zweistromstruktur löst sich aber auf. In diesem Zeitraum werden keine korotierenden Ereignisse gemessen.

Dies zeigt, daß korotierende schnelle Sonnenwindströme eine zeit-unabhängige, stabile Struktur im interplanetaren Raum erzeugt haben müssen, damit Teilchen durch interplanetare Beschleunigung an den Shocks der CIRs Energie gewinnen können. Untersuchungen von Pesses et al. (1978) ergeben weiterhin, daß nicht jede CIR Shocks aufweist.

- Hört ein korotierender Sonnenwindstrom auf zu existieren, wie im Juli 1976 beobachtet wurde, so werden keine korotierenden Ereignisse mehr gemessen.

Mit Hilfe eines einfachen Modells von Morfill et al. (1980) wird untersucht, wo die auf Helios gemessenen Teilchen korotierender Ereignisse beschleunigt wurden. Helios ist während der Messung eines korotierenden Ereignisses mit Punkten des Rückwärtsshocks verbunden, die bei stetig abnehmender Plasmageschwindigkeit des korotierenden Sonnenwindstroms größere radiale Entfernung zur Sonne besitzen. Die Untersuchungen zeigen weiter, daß die Teilchen des korotierenden Ereignisses am Rückwärtsschock bei radialen Entfernungen zwischen 2 und 5 AU beschleunigt wurden. Allerdings ist völlig unklar, warum die am Vorwärtsschock der CIR beschleunigten Teilchen auf Helios 1 und 2 nicht vor dem Einsetzen des korotierenden schnellen Sonnenwindstroms gemessen werden.

Die Helios-Ergebnisse zeigen bei vielen Ereignissen einen Doppelpeak im Intensitätsprofil korotierender Ereignisse. Im März 1976 während einer ungestörten Periode sind die Reduktionen in der Intensität auf Helios 1 und 2 auf einen Anstieg in der Sonnenwindgeschwindigkeit gekoppelt.

Dies führt zu folgender Deutung:

- Helios ist mit einem Punkt des Rückwärtsshocks verbunden, der beim Anstieg der Plasmageschwindigkeit zu kleineren radialen Abständen springt. Ein während ruhiger Phasen beobachteter positiver Gradient der Intensität führt zu der beobachteten Reduktion.

(Eine andere Erklärungsmöglichkeit wäre, daß der schnelle Sonnenwindstrom sich nicht gegen das langsamere Plasma durchsetzen kann. In diesem Fall wäre Helios nicht mit dem Rückwärtsschock verbunden; die Intensitätsreduk-

tion sollte dann allerdings erheblich kräftiger ausfallen als beobachtet).

Die Analyse der Winkelverteilungen der Intensität wird für korotierende Ereignisse zu Beginn des Jahres 1976 vorgenommen. Das Verhalten der Strömung wird speziell für verschiedene Phasen des Ereignisses untersucht. Die gemessenen Winkelverteilungen zeigen über dem Hauptereignis eine geringe Störung und sind nahezu isotrop im Gegensatz zu solaren Flareereignissen. Für genauere Analysen werden die Winkelverteilungen der Intensität in ein Koordinatensystem transformiert, welches mit dem Sonnenwindplasma fest verbunden ist. In diesem System werden die Anisotropiekomponenten parallel und senkrecht zum mittleren Magnetfeld untersucht.

- In Übereinstimmung mit Untersuchungen bei Teilchen mit niedrigeren Energien messen wir bei Protonen im Energiebereich 4 bis 13 MeV eine mittlere Anisotropie von 10 %, die zur Sonne gerichtet ist.
- Davon abweichende Werte zeigen die Perioden vor dem Einsetzen des schnellen Sonnenwindstroms und zwischen den beiden Intensitätsmaxima des Hauptereignisses. Bei zwei Ereignissen ist eine Umkehr der Strömungsrichtung zu beobachten. Zusätzlich zeigen diese Perioden eine Strömung senkrecht zum Magnetfeld.

Für die Periode Januar bis April 1976 liegen für eine Untersuchung Daten von Helios 1 und 2, IMP 8 sowie Pioneer 10 und 11 vor. Während dieser Zeitspanne treten Unregelmäßigkeiten auf.

Im Januar 1976 sind die Intensitäten sowohl auf Pioneer 11 wie auch auf Helios 1 und 2 reduziert. Somit kommt eine solare Störung zwischen den Heliossonden und dem Hauptbeschleunigungsgebiet bei Pioneer 11 als Grund nicht in Frage. Zu diesem Zeitpunkt war eine CIR mit Shocks voll ausgebildet. Nach Scholer et al. (1980) ist auch nicht mit veränderlichen Beschleunigungsbedingungen zu rechnen, da sowohl die Shockstärke als auch der Winkel zwischen Shocknormalen und Magnetfeld nur geringfügig sich ändern. Somit muß angenommen werden, daß im Januar 1976 die

Quelle der Teilchen, die am Rückwärtsschock beschleunigt werden, zeitlich schwankt.

Die Untersuchungen der Intensitätsmaxima innerhalb 1 AU weisen auf starke zeitliche Änderungen hin. Während dreier solarer Rotationen von Februar bis April wechselte das Vorzeichen des Gradienten der Intensität jedesmal. Die negativen Gradienten im Februar und April sind ein deutlicher Hinweis, daß es häufig nicht richtig ist, von der Annahme stationärer Zustände bei der Quelle der zu beschleunigenden Teilchen, beim Beschleunigungsprozess und bei der Ausbreitung zwischen Beobachter und Rückwärtsschock auszugehen.

Speziell die Störung im April 1976 soll genau untersucht werden. Im April werden auf den Raumfahrzeugen Helios 2, IMP 8 und Pioneer 11 sehr geringe oder fast keine korotierenden Ereignisse gemessen. Die Korotationszeit zwischen diesen Sonden war relativ gering. Hingegen wird 20 Tage später auf Helios 1 ein voll ausgebildetes Ereignis registriert. Die für diese Beobachtung verantwortliche Störung war eindeutig solaren Ursprungs.

Ein aktives Gebiet auf der Sonne produziert mehrere Flares mit Typ II und IV Radioausbrüchen vom 20. bis 31. März. Die mit diesen solaren Störungen verbundenen Gebiete zeichnen sich durch eine Reduktion der galaktischen kosmischen Strahlung (Forbushabfall) aus. In dieses großräumig gestörte Gebiet korotiert die CIR und ist in diesem Augenblick nicht in der Lage, korotierende Ereignisse zu erzeugen, wie die Messungen im April auf Helios 2, IMP 8 und Pioneer 11 zeigen.

Theoretische Überlegungen ergeben, daß der Shock, der vor der solaren Störung "herläuft", und der Vorwärtsschock der CIR sich vereinigen (Burlaga et al., 1980). Der Rückwärtsschock und damit die CIR als Beschleunigungsgebiet für korotierende Ereignisse bleiben aber möglicherweise unbeeinflusst. Dies zeigen auch Messungen auf Pioneer 11 im April, als eine CIR gemessen wurde.

Die Störungen bei der Ausbildung korotierender Ereignisse im April müssen also durch veränderte Eigenschaften des Plasmas der solaren Störung hervorgerufen werden. Es ist bekannt, daß innerhalb einer solaren Störung sowohl die Elektronen- als auch die Protonentemperatur des Plasmas niedriger liegt (Montgomery et al., 1974). Unter der Voraussetzung, daß die korotierenden Ereignisse aus den hochenergetischen Teilchen des Sonnenwindplasmas

beschleunigt werden, kann das Ausbleiben der korotierenden Ereignisse im April durch die Änderung der Quellstärke der zu beschleunigenden Teilchen innerhalb einer solaren Störung erklärt werden.

Nachdem die CIR wieder ungestörtes Sonnenwindplasma erreicht, vergeht eine Zeit, bis sich erneut zeitunabhängige Energiespektren und radiale Gradienten ausgebildet haben. Diese Zeit wurde von Forman und Morfill (1976) theoretisch berechnet und hängt entscheidend vom Diffusionskoeffizienten ab. Im April zeigen Messungen auf Helios 1, daß dieses Gleichgewicht sich nach etwa 10 Tagen erneut eingestellt hat. Theoretisch ergibt sich diese Zeit für einen Diffusionskoeffizienten $K \approx 10^{20} \text{cm}^2/\text{s}$. Messungen der Anisotropie und der radialen Gradienten korotierender Ereignisse ergeben höhere Werte des Diffusionskoeffizienten. Bereits ein Wert von $K = 10^{21} \text{cm}^2/\text{s}$ könnte dazu führen, daß solare Störungen bedingt durch Flares einen Gleichgewichtszustand verhindern, der sich erst nach einer relativ langen Zeit ausbilden kann.

L i t e r a t u r

- Anderson, K.A., Electrons and protons in long lived streams of energetic solar particles, *Solar Phys.*, 6, 111, 1969.
- Armstrong, T., S. Krimigis, K. Behannon, Proton fluxes at 300 keV associated with propagating interplanetary shock waves, *J. Geophys. Res.*, 75, 5980, 1970.
- Armstrong, T., S. Krimigis, D. Hovestadt, B. Klecker, G. Gloeckler, Observation of temporal and spatial variations in the Fe/O charge composition of the solar particle event of 4 July, 1974, *Solar Phys.*, 49, 395, 1976.
- Armstrong, T.P., G. Chen, E.T. Sarris, S.M. Krimigis, Acceleration and modulation of electrons and ions by propagating interplanetary shocks, in: *Study of Travelling Interplanetary Phenomena* (Hrsg. M.A. Shea), 367, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1977.
- Axford, W.I., The acceleration of galactic cosmic rays, Preprint, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau, MPAE-W-100-80-12, 1980.
- Baade, W., F. Zwicky, Supernovae and cosmic rays, *Phy. Rev.*, 45, 138, 1934.
- Barnes, C.W., J.A. Simpson, Evidence for interplanetary acceleration of nucleons in corotating interaction regions, *Astrophys. J.*, 207, 977, 1976.
- Barouch, E., L.F. Burlaga, Causes of Forbush decreases and other cosmic ray variations, *J. Geophys. Res.*, 80, 449, 1975.
- Bieber, J.W., J.A. Earl, G. Green, H. Kunow, R. Müller-Mellin, G. Wibbrenz, Interplanetary pitch angle scattering and coronal transport of solar energetic particles: new information from Helios, *J. Geophys. Res.*, 85, 2313, 1980.
- Bryant, D.A., T.L. Cline, U.D. Desai, F.B. McDonald, Continual acceleration of solar protons in the MeV range, *Phys. Rev. Lett.*, 14, 481, 1965.
- Bulanov, S.V., V.A. Dogiel, The influence of the losses on an acceleration of cosmic rays in shock waves, *Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th*, 2, 70, 1979.
- Burlaga, L.F., J.D. Scudder, Motion of shocks through interplanetary streams, *J. Geophys. Res.*, 80, 4004, 1975.
- Burlaga, L., R. Lepping, R. Weber, T. Armstrong, C. Goodrich, J. Sullivan, D. Gurnett, P. Kellogg, E. Keppler, F. Mariani, F. Neubauer, H. Rosenbauer, R. Schwenn, Interplanetary particles and fields, November 22 to December 6, 1977: Helios, Voyager, and Imp observations between 0.6 and 1.6 AU, *J. Geophys. Res.*, 85, 2227, 1980.
- Chao, J.K., R.P. Lepping, A correlative study of ssc's, interplanetary shocks, and solar activity, *J. Geophys. Res.*, 79, 1799, 1974.

- Chenette, D.L., T.F. Conlon, K.R. Pyle, J.A. Simpson, Observations of Jovian electrons at 1 AU throughout the 13 month Jovian synodic year, *Astrophys. J. Lett.*, 215, L 95, 1977.
- Colgate, S.A., M.H. Johnson, Hydrodynamic origin of cosmic rays, *Phys. Rev. Lett.*, 5, 235, 1960.
- Conlon, T.F., J.A. Simpson, Modulation of Jovian electron intensity in interplanetary space by corotating interaction regions, *Astrophys. J. Lett.*, 211, L 45, 1977.
- Chen, G., T. Armstrong, Proc. of Conf. on Solar Terrestrial Relations, Calgary, 453, 1972.
- Dodson, H., E.R. Hedeman, UAG Report 14, 1971.
- Dodson, H., R.E. Hedeman, UAG Report 52, 1975.
- Dorman, L.I., G.I. Freidman, The Questions of Magnetohydrodynamics and Plasma Dynamics, Zinätne, Riga, 77, 1959.
- Dryer, M., Z.K. Smith, E.J. Smith, J.D. Mihalov, J.H. Wolfe, R.S. Steinolfson, S.T. Wu, Dynamic MHD modeling of solar wind corotating stream interaction regions observed by Pioneer 10 and 11, *J. Geophys. Res.*, 83, 4347, 1978.
- Fan, C.Y., G. Gloeckler, J.A. Simpson, Protons and helium nuclei within interplanetary magnetic regions which co-rotate with the sun, Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 9th, 1, 109, 1966.
- Fan, C.Y., M. Pick, R. Pyle, J.A. Simpson, D.R. Smith, Protons associated with centers of solar activity and their propagation in interplanetary magnetic field regions corotating with the sun, *J. Geophys. Res.*, 73, 1555, 1968.
- Feldmann, W.G., J.R. Asbridge, S.J. Bame, J.T. Gosling, Long-term solar wind electron variations between 1971 and 1978, *J. Geophys. Res.*, 84, 7371, 1979.
- Fermi, E., On the origin of the cosmic radiation, *Phys. Rev.*, 75, 1169, 1949.
- Fermi, E., Galactic magnetic fields and the origin of cosmic radiation, *Astrophys. J.*, 119, 1, 1954.
- Fisk, L.A., The behaviour of cosmic rays in the interplanetary medium, Ph. D. thesis, University of California, San Diego, 1969.
- Fisk, L.A., The acceleration of energetic particles in the interplanetary medium by transit time damping, *J. Geophys. Res.*, 81, 4633, 1976.
- Fisk, L.A., M.A. Lee, Shock acceleration of energetic particles in corotating interaction regions in the solar wind, *Astrophys. J.*, 237, 620, 1980.
- Forman, M.A., The Compton-Getting-effect for cosmic-ray particles and photons and the Lorentz-invariance of distribution functions, *Planet. Space Sci.*, 18, 25, 1970.

- Forman, M.A., The equilibrium anisotropy in the flux of 10 MeV solar flare particles and their convection in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, 75, 3147, 1970.
- Forman, M.A., G. Morfill, Time-dependent acceleration of solar wind plasma to MeV energies at corotating interplanetary shocks, *Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th*, 5, 328, 1979.
- Gleeson, L.J., W.I. Axford, Cosmic rays in the interplanetary medium, *Astrophys. J.*, 149, L 115, 1967.
- Gleeson, L.J., W.I. Axford, The Compton-Getting-effect, *Astrophys. Space Sci.*, 2, 431, 1968.
- Gloeckler, G., Observations of energetic particles in the near and far interplanetary medium, Preprint, Dep. of Physics and Astronomy University of Maryland, TR 79-081/PP 79-144, 1979.
- Gold, R.E., E.C. Roelof, Jovian electron propagation via solar wind stream interaction regions, Preprint, John Hopkins University/Applied Physics Laboratory, 78/14, 1978.
- Gosling, J.T., V. Pizzo, S.J. Bame, Anomalously low proton temperatures in the solar wind following interplanetary shock waves - evidence for magnetic bottles?, *J. Geophys. Res.*, 78, 2001, 1973.
- Gosling, J.T., J.R. Asbridge, S.J. Bame, W.C. Feldmann, G. Paschmann, N. Schopke, Solar wind ion accelerated to 40 keV by shock wave disturbance, *J. Geophys. Res.*, 85, 744, 1980.
- Gurnett, D.A., F.M. Neubauer, R. Schwenn, Plasma wave turbulence associated with an interplanetary shock, *J. Geophys. Res.*, 84, 541, 1979.
- Hasselmann, K., G. Wibberenz, Scattering of charged particles by random electromagnetic fields, *Zs. f. Geophys.*, 34, 353, 1968.
- Hedemann, E.R., H. Dodson, Study of geomagnetic storms, solar flares, and centers of activity in 1976, the year between solar activity cycles 20 and 21, Preprint, John Hopkins University, Applied Physics Laboratory, 80-11, 1980.
- Heinemann, M.A., G.L. Siscoe, Shapes of strong shock fronts in an inhomogeneous solar wind, *J. Geophys. Res.*, 79, 1349, 1974.
- Hirshberg, J., A. Alksne, D.S. Colburn, S.J. Bame, A.J. Hundhausen, Observation of solar-flare-induced interplanetary shock and helium enriched driver gas, *J. Geophys. Res.*, 75, 1, 1970.
- Hirshberg, J., K. Nakagawa, R.E. Wellck, Propagation of sudden disturbances through a nonhomogeneous solar wind, *J. Geophys. Res.*, 79, 3726, 1974.
- Hudson, P.D., *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 131, 23, 1965.
- Hundhausen, A.J., *Solar Wind and Coronal Expansion*, Springer Verlag, *Physics and Chemistry in Space*, 5, 169, 1972.

- Hundhausen, A.J., Nonlinear model of high speed solar wind streams, *J. Geophys. Res.*, 78, 1528, 1973a.
- Hundhausen, A.J., Evolution of large-scale solar wind structures beyond 1 AU, *J. Geophys. Res.*, 78, 2035, 1973b.
- Hundhausen, A.J., L.F. Burlaga, A model for the origin of solar wind stream interfaces, *J. Geophys. Res.*, 80, 1845, 1975.
- Hundhausen, A.J., J.T. Gosling, Solar wind structure at large heliocentric distances: An interpretation of Pioneer 10 observations, *J. Geophys. Res.*, 81, 1436, 1976.
- Hundhausen, A.J., An interplanetary view of coronal holes, in: *Coronal Holes and High Speed Wind Streams* (Hrsg. J.B. Zirker), 225, Colorado Associated University Press, 1977.
- Iucci, N., M. Parisi, M. Storini, G. Villoresi, N.L. Zangrilli, A. Felici, The corotative model of Forbush decreases applied to the events associated with the long-lived McMath Region 14143 from 20 March to 8 June 1976, UAG Report, 61, 224, 1977.
- Iucci, N., M. Parisi, M. Storini, G. Villoresi, Forbush decreases: Origin and development in the interplanetary space, *Il Nuovo Cimento*, 2C, 1, 1979.
- Krimigis, S.M., E.C. Roelof, T.P. Armstrong, J.A. Van Allen, Low-energy (>0.3 MeV) solar particle observations at widely separated points (>0.1 AU) during 1967, *J. Geophys. Res.*, 76, 5921, 1971.
- Krimsky, G.F., A.I. Kuzmin, S.I. Petukhov, A formation of high energy electron spectrum by a regular acceleration mechanism, *Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th*, 2, 75, 1979.
- Kunow, H., G. Wibberenz, G. Green, R. Müller-Mellin, M. Witte, H. Hempe, Das Kieler Experiment zur Messung der kosmischen Strahlung zwischen 1.0 und 0.3 EA [E6], *Raumfahrtforschung*, 5, 253, 1975.
- Kunow, H., G. Wibberenz, G. Green, R. Müller-Mellin, M. Witte, H. Hempe, R.A. Mewaldt, E.C. Stone, R.E. Vogt, Simultaneous observations of cosmic ray particles in a corotating interplanetary structure at different solar distances between 0.3 and 1 AU from Helios 1 and 2 and Imp 7 and 8, *Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 15th*, 3, 227, 1977.
- Lin, R.P., K.A. Anderson, Electrons >40 keV and protons >500 keV of solar origin, *Solar Phys.*, 1, 446, 1967.
- Lingenfelter, R.E., Cosmic ray origin and propagation, *Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th*, 14, 135, 1979.
- Marshall, F.E., E.C. Stone, Persistent sunward flow of 1.6 MeV protons at 1 AU, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 57, 1977.
- Marshall, F.E., E.C. Stone, Characteristics of sunward flowing proton and alpha particle fluxes of moderate intensity, *J. Geophys. Res.*, 83, 3289, 1978.

- McCracken, K.G., K.R. Rao, Solar cosmic ray phenomena, *Space Sci. Rev.*, 11, 155, 1970.
- McDonald, F.B., U.D. Desai, Recurrent solar cosmic ray events and solar M regions, *J. Geophys. Res.*, 76, 808, 1971.
- McDonald, F.B., B.J. Teegarden, J.H. Trainor, T.T. von Roseninge, The interplanetary acceleration of energetic nucleons, *Astrophys. J.*, 203, L 149, 1976.
- McGuire, R.E., T.T. von Roseninge, F.B. McDonald, The composition of corotating energetic particle streams, *Astrophys. J.*, 224, L 87, 1978.
- Mewaldt, R.A., E.C. Stone, R.E. Vogt, The radial diffusion coefficient of 1.3 - 2.3 MeV protons in recurrent proton streams, *Geophys. Res. Lett.*, 5, 965, 1978.
- Montgomery, M.D., J.R. Asbridge, J.R. Bame, W.C. Feldmann, Solar wind electron temperature depressions following some interplanetary shock waves: Evidence for magnetic merging?, *J. Geophys. Res.*, 79, 3103, 1974.
- Morfill, G., A.K. Richter, M. Scholer, Average properties of cosmic ray diffusion in solar wind streams, *J. Geophys. Res.*, 84, 1505, 1979.
- Morfill, G., M. Scholer, M.A.I. Van Hollebeke, The longitudinal galactic cosmic ray intensity modulation in a diffusive and a scatter-free model of the inner heliosphere, *J. Geophys. Res.*, 85, 2307, 1980.
- Nelson, G.J., D.J. McLean, Type II radio bursts of 20 March 1976 originated from well behind the solar limb, *UAG Report*, 61, 90, 1977.
- Nolte, J.T., E.C. Roelof, Large scale structure of the interplanetary medium I. High coronal source longitude of the quiet-time solar wind, *Solar Phys.*, 33, 241, 1973.
- Ogilvie, K., J. Arens, Acceleration of protons by interplanetary shocks, *J. Geophys. Res.*, 76, 13, 1971.
- Palmeira, F., F. Allum, U. Rao, Low-energy proton increases associated with interplanetary shock waves, *Solar Phys.*, 21, 204, 1971.
- Parker, E.N., Origin and dynamics of cosmic rays, *Phys. Rev.*, 109, 1328, 1958.
- Parker, E.N., *Interplanetary Dynamical Processes*, Interscience, New York, S. 92, 1963.
- Pesses, M.E., J.A. Van Allen, C.K. Goertz, Energetic protons associated with interplanetary active regions 1 - 5 AU from the sun, *J. Geophys. Res.*, 83, 553, 1978.
- Pinter, S., Velocities of propagation of March/April 1976 coronal and interplanetary shock waves, *UAG Report*, 61, 127, 1977.

- Richter, A.K., K.C. Hsieh, E. Keppler, R. Schwenn, F.M. Neubauer, Helios-2 Beobachtung einer CIR bei 0.98 AE, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Frühjahrstagung Mainz, 1002, 1980.
- Roelof, E.C., S.M. Krimigis, Analysis and synthesis of coronal and interplanetary energetic particle, plasma and magnetic field observations over three solar rotations, J. Geophys. Res., 78, 5375, 1973.
- Sarris, E., J. Van Allen, Effects of interplanetary shock waves on energetic charged particles, J. Geophys. Res., 79, 4157, 1974.
- Scholer, M., D. Hovestadt, B. Klecker, G. Gloeckler, The composition of energetic particles in corotating events, Astrophys. J., 227, 323, 1979.
- Scholer, M., G. Morfill, M.A.I. Van Hollebeke, On the origin of corotating energetic particle events, J. Geophys. Res., 85, 1743, 1980.
- Shabansky, U.P., J. Exp. Theor. Phys., 41, 1107, 1961.
- Smith, E.J., J.H. Wolfe, Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneer 10 and 11, Geophys. Res. Lett., 3, 137, 1976.
- Smith, E.J., J.H. Wolfe, Pioneer 10, 11 observations of evolving solar wind streams and shocks beyond 1 AU, in: Study of Travelling Interplanetary Phenomena (Hrsg. M.A. Shea), 227, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1977.
- Thompson, W.B., Proc. Roy. Soc. London, A 223, 402, 1955.
- Toptyghin, I.N., Acceleration of particles by shocks in a cosmic plasma, Space Sci. Rev., 26, 157, 1980.
- Van Allen, J.H., N.F. Ness, Observed particle effects of an interplanetary shock wave on July 8, 1966, J. Geophys. Res., 72, 935, 1967.
- Van Allen, J.A., Galactic cosmic-ray intensity to a heliocentric distance of 18 AU, Astrophys. J., 238, 763, 1980.
- Van Hollebeke, M.A.I., F.B. McDonald, J.H. Trainor, T.T. von Roseninge, The radial variation of corotating energetic particle streams in the inner and outer solar system, J. Geophys. Res., 83, 4723, 1978.
- Völk, H.J., G. Morfill, M.A. Forman, Shock acceleration of cosmic rays in lossy media, Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th, 2, 38, 1979.
- Wibberenz, G., Coronal and interplanetary propagation, Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th, 14, 234, 1979.
- Wild, J.P., S.F. Smerd, Radio bursts from the solar corona, Annual Rev. of Astron. and Astrophys., 10, 159, 1972.
- Witte, M., Das Verhältnis von Protonen und Alphateilchen in solaren Flareereignissen und seine Aussagen zur interplanetaren Teilchenausbreitung, Dissertation, Kiel, 1979.

- Zöllich, F., Theorie der Compton-Getting-Korrektur und ihre Anwendung auf Messungen von Winkelverteilungen der solaren kosmischen Strahlung and Bord von Helios 1, Diplomarbeit, Kiel, 1977.
- Zöllich, F., G. Wibberenz, H. Kunow, G. Green, Corotating events in the energy range 4 - 13 MeV as observed on board Helios 1 and 2 in 1975 and 1976, Adv. Space Res., 1, 89, 1981.
- Zwickl, R.D., W.R. Webber, Limitations of the cos approximation as applied to the cosmic ray anisotropy, Nuclear Instruments And Methods, 138, 191, 1976.
- Zwickl, R.D., E.C. Roelof, Interplanetary propagation of <1 MeV protons in non-impulsive energetic particle events, Proc. Int. Conf. Cosmic Rays 16th, 5, 293, 1979.

Danksagung

Diese Arbeit entstand am Institut für Reine und Angewandte Kernphysik der Christian-Albrechts-Universität Kiel.

Herrn Prof. Dr. G. Wibberenz danke ich für die Unterstützung und das Interesse am Fortgang dieser Arbeit. Ermunterungen und Kritik in zahlreichen Diskussionen haben sie entscheidend gefördert.

Ohne die ausgezeichneten Messungen der Kieler Teilchenexperimente an Bord von Helios 1 und 2 wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Allen Mitgliedern des Helios-Teams, speziell Herrn H. Kunow, Dr. G. Green und Dr. M. Witte, danke ich für die geleistete Vorarbeit.

Frau Drechsler, Frau Löwe und Frau Wriedt haben bei der Anfertigung der Abbildungen und beim Schreiben des Manuskripts durch ihre schnelle, sorgfältige und gründliche Arbeit sehr geholfen.

Herrn Dr. Rosenbauer und Herrn Dr. Neubauer danke ich, daß sie Plasma- und Magnetfeldmessungen für die Untersuchung zur Verfügung stellten.

Diese Arbeit ist unveröffentlicht bis auf Teile, die in folgender
Publikation enthalten sind

Zöllich, F., G. Wibberenz, H. Kunow, G. Green, Corotating events
in the energy range 4 - 13 MeV as observed on board
Helios 1 and 2 in 1975 and 1976, Adv. Space Res., 1, 89,
1981.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit bis auf die Anleitung durch meinen wissenschaftlichen Betreuer, Herrn Prof. Dr. G. Wibberenz, selbständig und unter ausschließlicher Benutzung der angegebenen Literatur angefertigt habe.

FRITHJOF ZÖLLICH

L e b e n s l a u f

Geburtsdatum/-ort 16. Februar 1952 / Kiel

Familienstand verheiratet seit 2. Mai 1980 mit
Sonja Zölllich, geb. Hampe

Schulbildung 1958-62 Grundschule in Kiel

1962-70 Max-Planck-Gymnasium Kiel
Abschluß: Abitur

Studium 1970-77 Physik/Mathematik-Studium an der
Christian-Albrechts-Universität

1973 Vordiplom

1977 Diplom in Physik
Thema der experimentellen Arbeit:
"Theorie der Compton-Getting-
Korrektur und ihre Anwendung
auf Messungen von Winkelverteilun-
gen der solaren kosmischen Strah-
lung an Bord von Helios 1"

Tätigkeiten seit 1978 wissenschaftlicher Angestellter,
Promotion am Institut für Reine
und Angewandte Kernphysik Kiel

Kiel, den 28. April 1981