Kapitel 7

Diskussion der Ergebnisse

Langzeit-Emission von γ–Strahlung in solaren Flares

Die Beobachtung von Langzeit-Emission bei γ–Energien ist das wichtigste Ergebnis der Untersuchung der Flares im Juni 1991. Es beeinflußt die Vorstellungen von Beschleunigungs- und Speicherszenarien der hochenergetischen Teilchen in Flares.

Vor diesen Messungen ist γ–Emission von Flares nur maximal etwa 40 min beobachtet worden. Die Modellvorstellungen beruhen dabei auf einem kurzzeitigen Beschleunigungsmechanismus, der während der impulsiven Phase hochenergetische Teilchen zur Verfügung stellt. Jede darüber hinausreichende Emission konnte durch den magnetischen Einschluß dieser Teilchen in den Flare-Bögen erklärt werden. Während also die impulsive Phase durch die Beschleunigung der Teilchen charakterisiert ist, tritt in den späteren Phasen die Speicherung der Teilchen in den Vordergrund.

Eine andere Vorstellung geht davon aus, daß auch in den Spätphasen des Flares Teilchen beschleunigt werden. Es werden entweder die Teilchen in den Flarebögen weiterbeschleunigt oder es wird eine neu beschleunigte Population in die Bögen injiziert. Das bedeutet, daß auch die langzeitige Emission die Beschleunigungsprozesse widerspiegelt und möglicherweise auch dann noch Rekonnektion auf kleinen Skalen in den Magnetfeldbögen auftritt. Eine großräumige Rekonnektion würde hingegen die magetischen Bogenstrukturen aufbrechen.

Das Modell von Ramaty & Mandzhavidze (1994a), das aufgrund der Ergebnisse von EGRET für den 11. Juni-Flare gerechnet wurde, basiert auf dem langzeitigen Einschluß von Teilchen. Wie in Kapitel 2, Abschnitt 2.5 gezeigt wurde, treten verschiedene Verlustprozesse auf, die einen Langzeiteinschluß erschweren. Da Teilchendrift in diesem Zeitbereich bereits eine wichtige Rolle spielt, ist die Annahme von verdrillten Magnetfeldschläuchen unerlässlich (Lau *et al.*, 1993). Größere Schwierigkeiten bereitet die Entleerung der Speicherregion durch PAS. Ramaty & Mandzhavidze finden, daß die von EGRET beobachtete Abklingzeit der Flusses $> 50\,MeV$ extreme Bedingungen erfordert: Ein hohes Spiegelverhältnis von $B_{max}/B_{min} = 50$, um gute Einschlußbedingungen zu gewährleisten, muß mit einer sehr geringen Anregung von Plasmawellen $W_A < 2 \cdot 10^{-8}\,erg\,cm^{-3}$ einhergehen. Daneben ist eine geringe Magentfeldstärke von $B_c = 10\,G$ im koronalen Teil des Bogens notwendig, um zu hohe Synchrotronverluste der Elektronen zu vermeiden, sowie eine koronale Materiedichte unter $5 \cdot 10^{10}\,cm^{-3}$, um die Coulombwechselwirkung gering zu halten.

Die Prozesse während der impulsiven Phase laufen in relativ kompakten Regionen ab. Zur

Beschleunigung der Teilchen wird dabei ein relativ hohes Niveau an Plasmaturbulenz (z.B. $W_A \approx 6\, erg\, cm^{-3}$ für einen Bogen mit Radius $R = 10^9\, cm$ bei stochastischer Beschleunigung) benötigt. Die Hauptschwierigkeit auf theoretischer Ebene besteht nun unter anderem darin, zu erklären, wie die Teilchen aus der Beschleunigungsregion in den Speicherbogen injiziert werden können, ohne daß dabei erneut Plasmawellen angeregt werden.

Eine wichtige Konsequenz dieses Speichermodells ist die Aussage, daß aufgrund der unterschiedlichen Energieverluste Protonen $> 400\, MeV$ eine etwa 30-mal langsamere Abklingzeit besitzen als Protonen von etwa $10\, MeV$. Das bedeutet, daß der Fluß der nuklearen Linien im Vergleich zum pionischen Fluß entsprechend schneller abfallen sollte. Entsprechendes gilt für das Zeitverhalten der Neutroneneinfanglinie, die von etwa $100\, MeV$-Protonen stammt.

Die wichtigsten Resultate, die sich aus den Beobachtungen ergeben, lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Langzeit-Emission von γ–Strahlung $> 50\, MeV$ wurde von EGRET beim 11. Juni-Flare für mehr als 10 Stunden beobachtet (Kanbach *et al.*, 1993).
- Langzeit-Emission von γ–Strahlung in der $2.2\, MeV$-Linie wurde von COMPTEL beim 11. Juni-Flare für etwa 4 Stunden beobachtet (Ryan *et al.*, 1993a; Rank *et al.*, 1993)
- Die Zeitprofile sowohl des Flusses $> 50\, MeV$ als auch der $2.2\, MeV$-Linie können durch einen exponentiellen Abfall mit zwei Abklingkonstanten beschrieben werden. Innerhalb der statistischen Fehler ergeben sich für beide Energiebereiche dieselben Abklingkonstanten.
- Langzeit-Emission in der $2.2\, MeV$-Linie wird von COMPTEL ebenso für den Flare am 15. Juni beobachtet. Das Verhalten ist dem 11. Juni-Flare sehr ähnlich und die Anpassung eines exponentiellen Abfalls ergibt vergleichbare Abklingkonstanten.
- Die Messungen von GAMMA-1 (Akimov *et al.*, 1991a) lassen beim 15.Juni-Flare eine Langzeit-Emission im Energiebereich $> 100\, MeV$ erkennen.

Der Vergleich der Messungen von EGRET und COMPTEL beim 11. Juni-Flare zeigt deutlich, daß die Langzeit-Emission nicht durch Teilcheneinschluß in Magnetfeldbögen mit geringer Plasmaturbulenz erklärt werden kann. Die übereinstimmenden Zeitverläufe in unterschiedlichen Energiebereichen erfordern, daß die Energieänderungen im Protonenspektrum von der Energie der Protonen unabhängig sind. Dies steht im Widerspruch zu den Voraussagen des Einschlußmodells. Für Zeiten bis etwa 3:00 UT, also immerhin eine Stunde nach Beginn des Flares, kann mit den Zeitverläufen der promten Linien und der Emission oberhalb $8\, MeV$, die von COMPTEL gemessen werden, mit dem gleichen Argument eine Langzeitspeicherung ausgeschlossen werden. Die langen Abklingkonstanten erfordern außerdem Bedingungen, die konträr zu der nach einem Flare erwarteten Situation sind.
In der ursprünglichen Veröffentlichung der EGRET-Messungen (Kanbach *et al.*, 1993) werden Zeitkonstanten für einen exponentiellen Abfall von $25\, min$ und $255\, min$ angegeben. Diese Ergebnisse basieren auf einer Auswertung der Funkenkammerdaten und sind durch Totzeitprobleme auf den Bereich nach etwa 4:00 UT beschränkt. Die Bestimmung der kurzen Zeitkonstanten ist daher sehr unsicher. Durch die Hinzunahme der Messungen des Energiekalorimeters TASC (Schneid *et al.*, 1994) kann dieser Wert auf etwa $12\, min$ festgelegt werden.

Die schneller abklingende Komponente wird in Kanbach *et al.* mit der Bremsstrahlungsemission primärer Elektronen in Verbindung gebracht. Die Abklingzeit stimmt jedoch gut mit dem von COMPTEL gemessenen $2.2\,MeV$-Verlauf überein. Da die Untersuchung der COMPTEL-Daten ein hartes Spektrum für die Langzeit-Phase ergibt, ist anzunehmen, daß auch Pionen mit demselben Zeitverlauf produziert werden. Die Signatur der sekundären Elektronen ist in den COMPTEL-Spektren nachweisbar und ihr Abklingverhalten, soweit es verfolgt werden kann (siehe Abbildung 5.3d auf Seite 62) weicht vom Verlauf des $2.2\,MeV$-Flusses nicht wesentlich ab. Es ist daher wahrscheinlich, daß das schnell abklingende EGRET Signal in Bereich $> 50\,MeV$ ebenfalls durch den Zerfall von Pionen und nicht durch primäre Elektronen bestimmt wird.

Das Modell von Ryan & Lee (1991) beruht auf kontinuierlicher Beschleunigung während der Spätphasen des Flares. Dieses Modell geht von einer sehr hohen Plasmaturbulenz in der Speicherregion aus. Sowohl stochastische als auch Schock-Beschleunigung können in einer solchen Umgebung sehr effizient funktionieren, da ausreichend viele Streuzentren zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.3). Um eine effiziente Beschleunigung zu ermöglichen, müssen die Teilchen außerdem für eine genügend lange Zeit in der Beschleunigungsregion verweilen. Aufgrund der hohen Plasmawellendichte erleiden die Teilchen jedoch bereits so viele Streuungen, daß sie nur diffusiv entweichen können. Im Gegensatz zum magnetischen Einschluß in einem nicht-turbulenten Bogen findet hier also ein stoßbedingter Einschluß (*"collision trapping"*) statt.

Aus den Beobachtungen ist nicht zu entscheiden, welcher Mechanismus für diese ausgedehnte Beschleunigungsperiode verantwortlich ist. Die Beobachtung eines Typ II Radio-Bursts beim 15. Juni und die Messung von GLEs (*ground level enhancement*) sprechen eher für eine Schockfront. Allerdings wird keine außergewöhnliche Mikrowellenaktivität beobachtet. Weiterhin ist aufgrund der ungenügenden Zeitauflösung der Messungen nicht zu unterscheiden, ob der Prozess wirklich kontinuierlich aufrechterhalten bleibt, oder ob sich Perioden mit verstärkter Teilchenbeschleunigung mit reinen Speicherzeiten abwechseln ("Episoden-Beschleunigung") und daher nur im groben Zeitmittel das beobachtete glatte Abklingen entsteht.

Die Messungen die für den Flare am 15. Juni vorliegen, weisen ein weniger vollständiges Bild auf, jedoch läßt sich die gleiche Argumentation auch für dieses Ereignis aufrechterhalten. Der zweifache exponentielle Abfall, der von COMPTEL gemessen wird, erstreckt sich über Stunden. Dies erfordert ebenfalls extreme Bedingungen für einen magnetischen Langzeit-Einschluß. Die Messungen von GAMMA-1 zeigen, allerdings für einen etwas früheren Zeitraum, ein ähnliches Abklingverhalten des $> 50\,MeV$-Flusses. Im folgenden Beobachtungsfenster ergibt sich für GAMMA-1 ebenfalls eine signifikante Messung, woraus sich eine Abklingzeit von etwa $100\,min$ ableiten läßt. Darüber hinaus scheint ebenso der Mikrowellenverlauf zu späten Zeiten des Flares mit der nuklearen und pionischen γ–Emission zu korrelieren. All diese gleichartig verlaufenden Zeitprofile erlauben es, eine langzeitige Speicherung von Teilchen als Erklärung dieses Flares ebenso auszuschließen.

In der Folge des Flares am 15. Juni wird ein GLE-Ereignis gemessen. Nach Kocharov L. *et al.* (1994) deuten die Messungen darauf hin, daß die ersten nicht-relativistischen Protonen erst nach der impulsiven Phase ins interplanetare Medium eingebracht worden sind. Zur gleichen Zeit wurde auch ein Typ II Radio-Burst im Meterwellenbereich gemessen (Russische Referenz *Solnechney Dannye* in Kocharov L. *et al.*). Dieser Burst-Typ wird gewöhnlich mit einer koronalen Schockwelle in Zusammenhang gebracht. Diese Schockfront kommt daher als mögliche Ursache für eine fortgesetzte Beschleunigung in Frage.

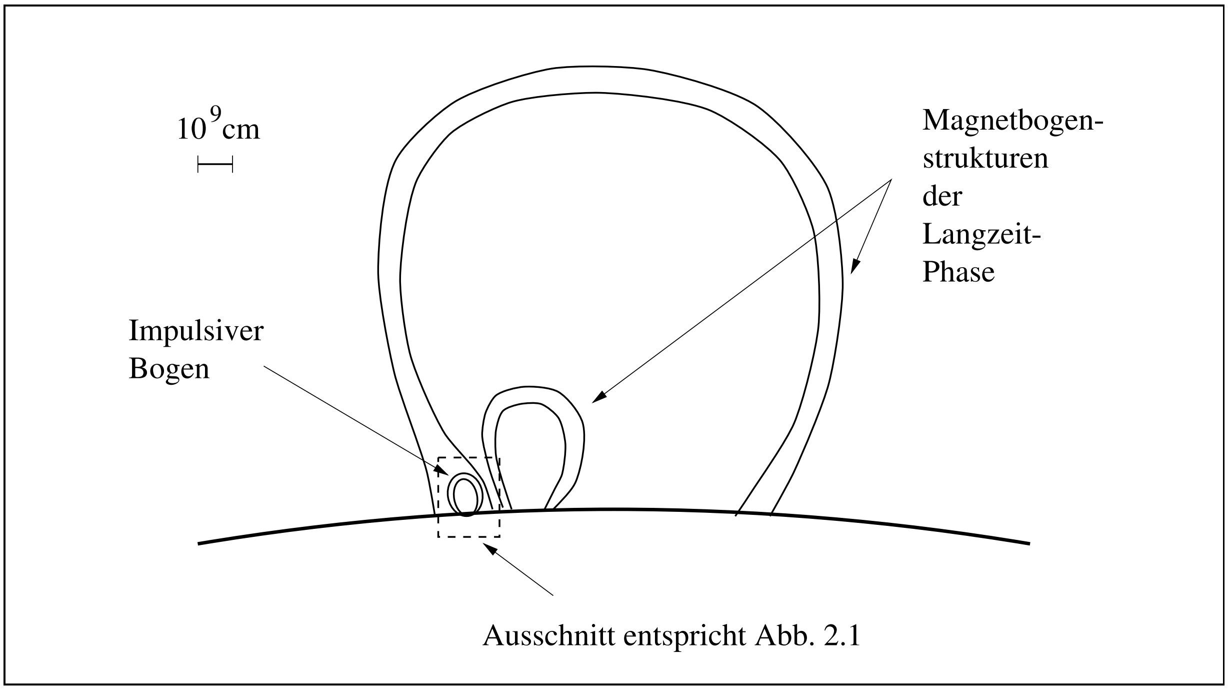

Abbildung 7.1: *Diese Skizze zeigt ein System aus Magnetfeldbögen, das das Zustandekommen der drei unterschiedlichen Zeitkonstanten beim 11. Juni-Flare veranschaulichen soll. Nach der impulsiven Phase, die in einer sehr kleinen Bogenstruktur stattfindet, bevölkern die Teilchen während der Langzeit-Phase wesentlich weiträumigere Regionen (vgl. auch Abbildung 2.1 auf Seite 7).*

In den Modellrechnungen werden üblicherweise nur einfache Magnetbögen verwendet. Aus optischen Aufnahmen ist jedoch bekannt, daß die Geometrie dieser Bogenstrukturen mitunter sehr komplex sein kann. Die Beobachtung unterschiedlicher Abklingzeiten kann in einem einfachen Ansatz durch verschiedene Bogenstrukturen unterschiedlicher Größe verstanden werden. Für einen Magnetbogen mit sehr hoher Plasmaturbulenz kann die Teilchenbewegung durch Diffusion beschrieben werden. Solange sich die Diffusionskonstante der Teilchen und die Energiedichte der Plasmawellen nicht über das System verändern, ist die Abklingzeit proportional zur Wurzel aus der Ausdehnung des Bogens.

Beim 11. Juni werden drei verschiedene Abklingzeiten beobachtet: $\tau_1 = 1.2\,min$ am Ende der impulsiven Phase, sowie $\tau_2 = 9.4\,min$ und $\tau_3 = 220\,min$ während der Langzeit-Phase. Die Radien von impulsiven Flare-Bögen liegen in der Größenordnung von $10^9\,cm$. Dies kann direkt aus SXR- und HXR-Aufnahmen von YOHKOH abgeleitet werden (z.B. Kosugi, 1994). Legt man die Ausdehnung des impulsiven Bogens mit diesem Wert fest, so erwartet man für die Bögen der langzeitigen Phase Ausdehnungen von $3 \cdot 10^9\,cm$ und $1.3 \cdot 10^{10}\,cm$. Eine Zeichnung eines solchen Systems mit den gefundenen Verhältnissen der Radien ist in Abbildung 7.1 gezeichnet. Für den 15. Juni-Flare wurden im H_α-Licht tatsächlich Bogensysteme mit einer Ausdehnung von etwa $10^{10}\,cm$ vom Astronomischen Observatorium Warschau und vom Big Bear Observatory beobachtet (vgl. Abbildung 4.4 auf Seite 54).

Die lange Abklingphase der $2.2\,MeV$ Emission ist in den beiden Flares, obwohl vier Tage zwischen ihnen liegen, erstaunlich gleich. Auch die Abklingzeiten stimmen im Rahmen der

Meßfehler überein. In dem Bild der unterschiedlich großen Flare-Bögen deutet diese Beobachtung darauf hin, daß sich die großräumige Magnetfeldgeometrie über einen Zeitraum von Tagen kaum verändert. Obwohl die impulsiven Bögen den Bewegungen der Fleckengruppe folgen und somit immer neu deformiert werden, zeichnen sich die weiträumigen Strukturen möglicherweise durch eine große Stabilität gegenüber den in ihnen ablaufenden Prozessen aus.

Das Verhalten der Flares im Juni 1991 ähnelt stark dem großen Flare am 3. Juni 1982, der von SMM beobachtet wurde (Forrest *et al.*, 1985; Chupp *et al.*, 1987). Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß die γ–Emission $> 25\,MeV$ in der Spätphase des Flares nach einer Analyse von Dunphy & Chupp (1994) ebenfalls mit einem zweifachen exponentiellen Abfall beschrieben werden kann. Die Zeitkonstanten ergeben Abklingzeiten von $(1.15 \pm 0.14)\,min$ und $(11.7 \pm 3.0)\,min$. Der Übergang erfolgt etwa $5\,min$ nach Beginn des Flares. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem Zeitverhalten des Flares am 11. Juni, so würde dies einen Wechsel von der ersten ($\tau_1 = 1.2\,min$) zur zweiten ($\tau_2 = 9.4\,min$) Zeitkonstanten, d.h. von der impulsiven zur Langzeit-Phase, entsprechen.

Spektrale Entwicklung

Bei der Untersuchung von Spektren des 11. Juni-Flares kann eine klare Trennung zwischen der impulsiven Phase und der Langzeit-Phase gefunden werden. Der Übergang läßt sich durch verschiedene Beobachtungen näher charakterisieren:

- Die prompte nukleare Emission verschwindet nach der impulsiven Phase unter die Sensitivitätsgrenze. Nach einer Lücke von etwa $5\,min$ setzt die Emission erneut ein.
- Der Vergleich von nuklearem Fluß und $2.2\,MeV$-Linienfluß zeigt, daß das Spektrum während der Langzeit-Phase deutlich härter ist als in der impulsiven Phase.
- Die Bremsstrahlung der sekundären Elektronen aus dem Zerfall geladener Pionen weist während der impulsiven Phase nur einen geringen Einfluß auf. Die Produktion geladener Pionen setzt offenbar erst mit der Langzeit-Phase ein.
- Das Verhältnis aus nuklearem Fluß und Bremsstrahlungfluß der sekundären Elektronen weist ebenfalls auf eine Härtung des Spektrums hin und steht im Einklang mit der Veränderung des Fluenz-Verhältnisses.

Aus den hier gefundenen Ergebnissen sowie den weiteren Beobachtungen anderer Instrumente ergibt sich folgendes Bild:
Der Flare beginnt mit einer impulsiven Beschleunigung von Teilchen. Diese Phase dauert etwa $10\,min$ an und ist durch eine hohe Zeitvariabilität gekennzeichnet. Die γ–Emission wird von nuklearen Komponenten dominiert, die von einem relativ weichen Protonenspektrum erzeugt werden. Pionenerzeugung spielt keine Rolle. Daneben tritt ein Bremsstrahlungskontinuum von primären Elektronen auf, die ebenso im Radio- und Mikrowellenbereich beobachtet werden können. Die Mikrowellenemission ist hochgradig zeitvariabel, was auf die Beschleunigung der Teilchen in einer relativ kompakten Region hindeutet. Im Rahmen der Meßgenauigkeit treten keine energieabhängigen Zeitverzögerungen auf, so daß man keine längerdauernden Speicherprozesse erwarten kann. Weiterhin verursacht der Flare thermische Prozesse, was zur Emission von SXR-Photonen und einem hellen Aufleuchten der aktiven Region im H_α-Licht führt. Diese

Phase zeigt nach dem letzten Maximum ein schnelles Abklingen. Das Ende dieser Phase verläuft bei HXR- und γ–Energien und ebenso im Mikrowellenbereich kontinuierlich und glatt.

Etwa $5min$ später beginnt ein "neuer Flare" — die Situation hat sich verändert. Das Protonenspektrum ist härter und es entstehen vor allem Pionen. Der Beschleunigungsmechanismus ist von anderer Art als in der impulsien Phase, da die thermischen Prozesse sowie die elektronische Komponente eine weitaus geringere Rolle spielen. Es werden zwar weiterhin H_α-Aktivität der Sonnenfleckengruppe AR-6659 und vermutlich auch SXR-Fluß dieser Region gemessen, doch tritt weder ein starkes Radiosignal von Plasmawellen auf, noch bemerkenswerte H_α-Ausbrüche. Der Einfluß der Elektronen ist gering: das Bremsstrahlungskontinuum ist nicht mehr so deutlich und es wird wenig Synchrotronemission beobachtet. Der Zeitverlauf ist realtiv glatt und zeigt eine langsame exponentielle Abklingphase. Die Zeitskalen sind wesentlich länger und lassen vermuten, daß sich die Vorgänge in großen Bereichen abspielen.

Der Flare am 11. Juni zeigt in seinem Verlauf einen deutlichen Wechsel in der Natur der Emission. Er kann in dieser Hinsicht mit dem Flare vom 24. May 1990 verglichen werden (siehe Debrunner *et al.*, 1995), bei dem sich ebenfalls drei Phasen unterscheiden lassen. An eine $1.5\,min$ dauernde impulsive Beschleunigung von Teilchen, die zur Emission von γ–Linien und hochenergetischen Neutronen führt, schließt sich eine etwa $20\,min$ dauernde Emission von pioneninduzierter γ–Stahlung und hochenergetischen Neutronen an. Danach erfolgt eine Injektion von Protonen ins interplanetare Medium.

Alle diese Ereignisse, der Flare vom 15. Juni 1991 ebenso wie vom 3. Juni 1982 oder vom 24. May 1990, sind von den Wechselwirkungen der Protonen und Ionen dominiert. Sie zeigen starke Emission im pionischen Bereich. Wenn ausreichend gute Transportbedingungen der geladenen Teilchen durch das interplanetare Magnetfeld gegeben sind, sind sie mit GLEs gekoppelt, was auf offene Magnetbögen schließen laßt. In der Einteilung nach 'impulsiv' oder 'graduell' (Übersicht auf Seite 10) stehen sie weit auf der graduellen Seite. Die Beobachtung der Langzeit-Emission bei γ–Energien hat der Bezeichnung 'graduell' jedoch einen neuen Aspekt hinzugefügt.

Neutronenbeobachtungen

COMPTEL kann die Hochenergiebeobachtungen im γ–Bereich durch die Messung der solaren Neutronen ergänzen. Die Entfaltung der Daten stellt allerdings höhere Anforderungen als bei den γ–Messungen, da die Kenntnis des Zeitverlaufs der Neutronenproduktion notwendig ist. Die Analyse der Meßdaten zeigt einige Charakteristika der Neutronenproduktion, macht aber auch die Limitierung durch die Meßstatistik deutlich:

- Neutronenproduktion bei Energien von $9 - 100MeV$ tritt bei beiden Flares auf und bleibt über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten.
- Das Einsetzen der Neutronenproduktion kann beim 11. Juni-Flare ermittelt werden. Der Beginn erfolgt zeitgleich mit dem Anstieg der SXR-Zählrate des GOES-7 Satelliten.
- Die Auswertung zweier Beobachtungsperioden am 15. Juni zeigt, daß die Produktion von Neutronen über Stunden hinweg praktisch gleich beibt oder möglicherweise sogar noch ansteigt.

- Anders als die spektrale Form ist die gesamte gerichtete Emissivität offenbar relativ robust gegen das gewählte Entfaltungsmodell. Die Emissivität liegt für alle untersuchten Beobachtungsperioden etwa in der Größenordnung von $2 \cdot 10^{28}$ n sr^{-1}.
- Ein Vergleich mit der Neutroneneinfanglinie zeigt, daß man aufgrund der Linien-Fluenz eine deutlich höhere Neutronenemission erwarten würde.

Das Auftreten des 11. Juni-Flares direkt zu Beginn einer Beobachtungsperiode hat sich für die Untersuchung der γ–Strahlung als sehr vorteilhaft herausgestellt. Bei den Neutronen ist die Situation umgekehrt. Allerdings kann die Messung am 15. Juni nicht optimal ausgewertet werden, da im Rahmen der durchgeführten Messungen keine Möglichkeit besteht, das Zeitprofil der Neutronenproduktion zu ermitteln. Die Einschränkungen durch Annahmen werden vor allem bei der ersten Beobachtungsperiode des 15. Juni deutlich: Das eine Modell basiert auf der 2.2 MeV-Messung, die allerdings in einem späteren Zeitraum ermittelt wurde, das andere stützt sich auf die Mikrowellen-Messungen, deren Korrelation mit den nuklearen Reaktionen nicht unmittelbar nachgewiesen werden kann. Obwohl das Neutronensignal gut gemessen werden kann, ergeben sich aus der Entfaltung zu große Unsicherheiten, um ein Spektrum zu bestimmen.

Die Messung der Neutronen am 11. und 15. Juni kann mit dem großen Neutronenereignis des Flares am 3. Juni 1982 verglichen werden. Das von Chupp *et al.* (1987) ermittelte Spektrum kann im Energiebereich $100\,MeV < E_n < 2\,GeV$ gut durch ein Potenzspektrum der Form $7.4 \cdot 10^{31}\, E_n^{-2.4}$ beschrieben werden. Dieser Verlauf passt auch gut zu den Messungen von Protonen im interplanataren Medium mit ISEE-3 (Evenson *et al.*, 1983; 1985). Wenn dieses Spektrum zu niederen Energien extrapoliert und über den Bereich von COMPTEL integriert wird, so ergibt sich eine gesamte gerichtete Emissivität von $N_n = 5 \cdot 10^{30}$ n sr^{-1} für $9 - 100 MeV$. Dieser Wert liegt mehr als 2 Größenordnungen über dem für die Juni-Flares gemessenen Wert, obwohl der 3. Juni 1982 praktisch die gleiche 2.2 MeV-Fluenz wie der Flare am 11. Juni aufweist. Damit ist auch verständlich, warum kein Neutronensignal von den NM-Stationen aufgefangen werden konnte.

Das Neutronensignal am 11. Juni bleibt weit unter dem aus der 2.2 MeV-Fluenz erwarteten Wert. Eine mögliche Erklärung könnte sein, daß die meisten Neutronen erst nach der impulsiven Phase erzeugt werden und damit während der Nacht den Satelliten erreichen. Allerdings wären dann im folgenden Beobachtungsintervall verstärkt Neutronen zu erwarten. Auch bleibt unklar, warum im zweiten Intervall des 11. Juni-Flares kein starkes Neutronensignal mehr zu sehen ist, wie man es beim 15. Juni beobachtet. Die vergleichbaren 2.2 MeV-Verläufe würden eine solche Beobachtung nahelegen.

Eine plausiblere Erklärung ist in einem weichen Protonenspektrum zu suchen, wie es zu Beginn der impulsiven Phase auch beobachtet wird. Dadurch würden viele Neutronen unterhalb der Energieschwelle für COMPTEL erzeugt und nicht gemessen werden. Sie können jedoch in die Photosphäre eindringen und Linienemission erzeugen.

Einen interessanten Aspekt stellen Neutronen dar, die mit sehr niederen Energien erzeugt werden. Wenn die kinetische Energie unter $2\,keV$ bleibt, sind die Neutronen an das Gravitationsfeld der Sonne gebunden. Sie können ungehindert durch das Magnetfeld relativ lange in der Korona verbleiben, bis sie entweder zerfallen oder in die Photosphäre zurückfallen. Von Hua & Lingenfelter (1987b) wurde abgeschätzt, daß diese Neutronen etwa 20% der 2.2 MeV-

Linienemission ausmachen können. Bei einem sehr weichen Spektrum würden diese Neutronen die Linienfluenz deutlich beeinflussen. Es wird noch angemerkt, daß diese Neutronen auch erlauben würden, noch lange nach der impulsiven Phase, wenn die nuklearen Linien bereits verschwunden sind, noch 2.2 MeV-Fluß zu erzeugen. Damit würde sich eine Möglichkeit ergeben, die Diskrepanz zwischen 2.2 MeV- und $4-7$ MeV-Fluß an Ende der impulsiven Phase des 11. Juni-Flares zu erklären.

Insgesamt erlauben die Messungen eine detailliertere Untersuchung der Diskussion der Beschleunigungs- und Transportprozesse in Flares. Es ist bei diesen beiden Flares zum ersten Mal möglich, zwischen kontinuierlicher Beschleunigung und Teilcheneinschluß zu unterscheiden — in diesem Fall zugunsten des ersten Prozesses. Das exotische Verhalten der 2.2 MeV-Emission nach der impulsiven Phase sowie die Einbindung der Neutronenproduktion in ein konsistentes Bild werfen jedoch Probleme auf, deren Diskussion über die vorliegenden Messungen hinausgeht.