Kapitel 1

Einleitung

Die Entdeckung solarer Flares geht auf den 1. September 1859 zurück, als die beiden englischen Amateurastronomen R. C. Carrington und R. Hodgson unabhängig voneinander ein minutenlanges Aufleuchten in der Nähe einer Sonnenfleckengruppe beobachteten. Sie sahen einen sogenannten Weißlicht-Flare, ein sehr seltenes Ereignis mit Kontinuumsemission im Optischen. Carrington war darüber hinaus die etwa zeitgleiche Auslenkung einer Kompassnadel aufgefallen. Hätte man diese Beobachtung ernsthaft erörtert, wäre es möglich gewesen, lange vor Röntgen auf die Existenz harter Strahlung oder lange vor Heaviside auf das Vorhandensein einer Ionosphäre zu schließen. Leider wurde aber das Ereignis von Lord Kelvin als vollkommen zufällig abgetan, da die Beeinflussung einer Kompassnadel durch irgendwelche Aktivität auf der Sonne unvorstellbar schien. Da sich Carrington mit dieser einfachen Interpretation — "eine Schwalbe macht noch keinen Sommer" — zufriedengab, wurde von einer weiteren Diskussion abgesehen (Carrington, 1860; Meadows, 1970).

Besonders verwunderlich ist diese kategorische Entscheidung, wenn man bedenkt, daß schon häufiger Auswirkungen geomagnetischer Stürme beobachtet worden waren. Von Sabine (1852) war sogar bereits vermutet worden, daß die Häufigkeit von Störungen des Erdmagnetfeldes dem elfjährigen Sonnenfleckenzyklus folgt!

Dieser Auftakt zur Erforschung von Phänomenen der aktiven Sonne verdeutlicht bereits eindrucksvoll die enge Wechselwirkung von Sonnenaktivität und Erdatmosphäre. Der Stellenwert des Energieflusses der ruhigen Sonne für die Lebensbedingungen auf unserer Erde war seit jeher zumindest auf einer intuitiven Ebene[1] richtig eingeschätzt worden. Da sich Flares — mit Ausnahme eben der Weißlicht-Flares — optisch nicht unmittelbar manifestieren, ist die gleichzeitige Notwendigkeit einer zuverlässigen Abschirmung gegen die ansonsten lebensbedrohlichen Ausbrüche harter Strahlung bis vor kurzem unserer Aufmerksamkeit entgangen.

Die Beziehungen von solarem Magnetfeld und Sonnenwind mit der Magnetosphäre und Atmosphäre der Erde sind vielfältig. Bei Flare-Ereignissen können im wesentlichen drei Phänomene auftreten: (1) Geomagnetische Stürme mit einer großräumigen Beeinflussung der Magnetosphäre treten als Folge eines Massenauswurfs (*coronal mass ejection* CME) von der Sonne auf. Die ausgeschleuderte Materie besteht aus geladenen Teilchen, die sich mit hohen Geschwindigkeiten

[1]Erste Ansätze zu einer rationalen Erklärung sind von dem griechischen Naturphilosophen Anaxagoras (etwa 500 v. Chr.) bekannt. Er hielt die Sonne für eine glühende Steinkugel, die der Erde Licht und Wärme spendet. Er wurde daraufhin für seine revolutionären Ansichten aus Athen verjagt.

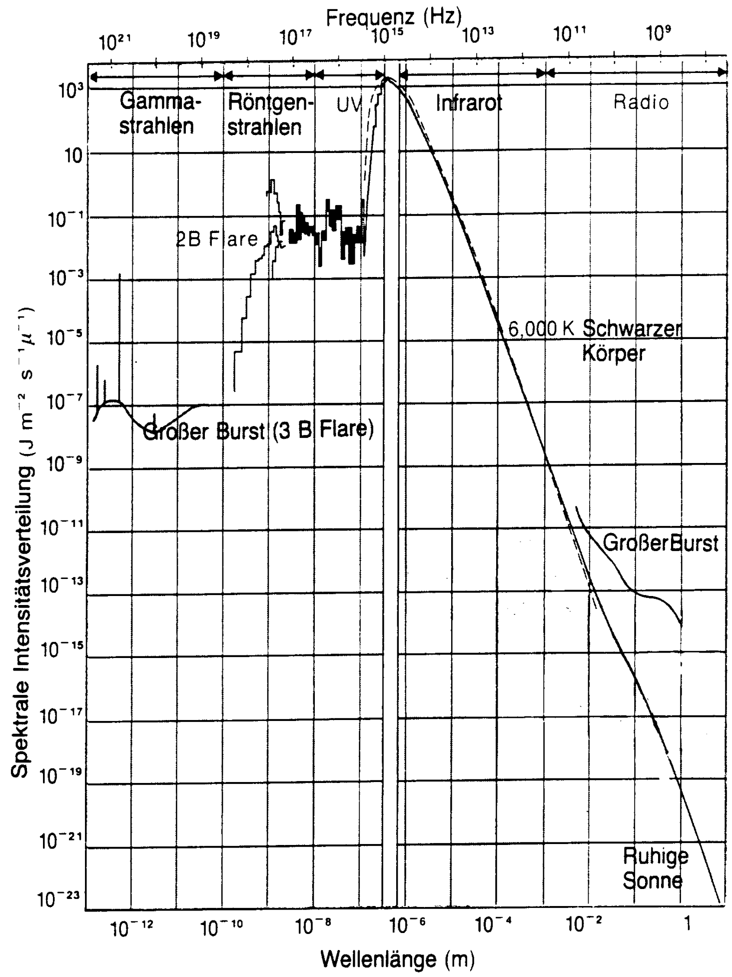

Abbildung 1.1: *Der Energieausstoß der Sonne vom Radiobereich bis zu γ–Energien (aus Moore et al., 1982). Der thermische Fluß der ruhigen Sonne (glatte durchgezogene Kurve) kann gut durch einen schwarzen Körper mit einer Temperatur von etwa 6000K angenähert werden (gestrichelte Kurve). Bei Flare-Ausbrüchen erhöht sich der Fluß im Radiobereich und vor allem im UV-, Röntgen- und γ–Bereich drastisch (als Beispiele sind Messungen an verschiedenen Flares mit dargestellt). Neben thermischer Emission treten nun vor allem nichtthermische Prozesse in den Vordergrund. Der optische Bereich verändert sich dabei kaum.*

von bis zu $> 1000\,km\,s^{-1}$ bewegen. Diese Teilchen können beispielsweise über die Induktion elektrischer Felder zur Beschleunigung von Elektronen in der Erdmagnetosphäre führen und dadurch Aurora-Erscheinungen auslösen. Obwohl CMEs lange als Folgeerscheinung von Flares gehalten wurden, deutet inzwischen vieles darauf hin, daß es eine gemeinsame Ursache für Flares und CMEs gibt (siehe Kahler, 1992). (2) Der hohe Fluß an UV- und weicher Röntgenstrahlung bewirkt eine zusätzliche Ionisierung in hohen Schichten der Erdatmosphäre[2]. Dadurch wird auch eine Störung des Erdmagnetfeldes ausgelöst (Dellinger, 1936). (3) Zusätzlich zur langsamen Komponente des Sonnenwinds tritt bei Flares eine Population schneller Teilchen auf. Sie verhindern ein Eindringen der kosmischen Strahlung ins innere Sonnensystem und führen so zu einem Rückgang der Intensität der kosmischen Strahlung (Forbush, 1946). Treffen solche Ionen mit Energien $> 1\,GeV$ auf die Erdatmosphäre auf, produzieren sie einen Schauer von Sekundärteilchen, die von Teilchendetektoren am Erdboden nachgewiesen werden können. Diese Ereignisse sind deshalb auch unter der Bezeichnung *ground-level enhancement* (GLE) bekannt.

[2]Die Reflexion von Radiowellen an der Grenzschicht zwischen Ionosphäre und Mesosphäre wird beim KW-Funkverkehr ausgenutzt. Die Störung dieser Schicht durch Flares führt zum Zusammenbruch der KW-Fernverbindungen und ist als Mögel-Dellinger-Effekt bekannt.

Die Darstellung des Energieausstoßes der Sonne in Abbildung 1.1 zeigt für die ruhige Sonne in erster Näherung ein Schwarzkörperspektrum von etwa 6000 K mit dem Maximum im Optischen. Es fällt zu niederen Energien langsam, zu höheren sehr rasch ab. Danach wäre im Röntgen- und γ–Bereich normalerweise keine thermische Emission zu erwarten. Nur durch die hohen koronalen Temperaturen um 10^6 K kann eine schwache Emission bis etwa 1 keV gemessen werden. Beim Auftreten solarer Flares steigt jedoch die Hochenergiestrahlung wie auch die Radiostrahlung durch thermische und nichtthermische Prozesse enorm an. Dagegen verändert sich die Emission im optischen und infraroten Bereich kaum.

Flare-Ausbrüche gehören zu den energiereichsten Vorgängen in unserem Sonnensystem. Bei großen Ausbrüchen wird eine Energie von bis zu 10^{32} erg freigesetzt. Demgegenüber nimmt sich beispielsweise der spektakuläre "Kometensturz auf Jupiter" des Kometen *Shoemaker-Levy 9* im Juli 1994 mit geschätzten 10^{27} erg (nach Ingersoll & Kanamori, 1995) eher bescheiden aus.

Wegen der unmittelbaren Nähe der Sonne eröffnen sich gute Beobachtungsmöglichkeiten. So ist beispielsweise der gemessene Spitzenfluß des Flares vom 11. Juni 1991 bei 1 MeV etwa 1000-mal höher als der Fluß des Crab Supernova-Überrestes, der weitaus stärksten kosmischen Quelle bei dieser Energie. Eine Vielzahl von Parametern können bei Flareausbrüchen teilweise mit hoher Genauigkeit festgelegt werden und stellen hohe Anforderungen an theoretische Modellrechnungen. Flares weisen außerdem eine große Variationsbreite in ihren Eigenschaften auf. Sie sind damit hervorragende Testobjekte für Theorien über alle Arten von plasmaphysikalischen Vorgängen und Teilchenwechselwirkungen, wie beispielsweise Energiefreisetzung, Beschleunigungsvorgänge, spektrale Modifikationen durch Energiegewinn- und -verlustprozesse, Strahlungserzeugung sowie Propagation und Speicherung von Teilchen. Gerade diese Prozesse spielen bei vielen Objekten des "aktiven Universums" eine zentrale Rolle. Als Beispiele seien Akkretionsscheiben mit Magnetfeldern in Binärsystemen oder Plasmajets aus den Kernen aktiver Galaxien genannt. Außerdem sind Flares wichtige Quellen für die niederenergetische Komponente der kosmischen Strahlung. Auf die vielen Wechselwirkungen mit der Erdmagnetosphäre wurde bereits hingewiesen. Weiterhin ist die Sonne ein Beispiel für die sogenannten Flare-Sterne, die in unregelmäßigen Abständen enorme Röntgen-Ausbrüche zeigen. Somit eignen sich Flares hervorragend, um Einblick in eine Reihe grundlegender astrophysikalischer Prozesse zu erlangen.

Flare-Beobachtungen wurden lange Zeit nur optisch (vor allem im Licht der H_α-Linie und der CaII H- und K-Linien) und später auch im Radiobereich durchgeführt. Bereits früh wurde klar, daß Flares fast ausnahmslos im Zusammenhang mit aktiven Regionen der Sonne auftreten. Damit sind sie auch an den etwa elfjährigen Aktivitätszyklus der Sonne gekoppelt.

Die treibende Kraft für alle Erscheinungen der aktiven Sonne ist das solare Magnetfeld (**?**). Es wurde daher früh zur Speicherung und Bereitstellung der Flare-Energie vorgeschlagen, um die Freisetzung der enormen Energiemengen auf Sekunden-Zeitskalen zu erklären. Auffälligerweise treten Flares nicht in beliebigen Sonnenfleckengruppen auf, sondern bevorzugen deutlich sogenannte δ-Gruppen, die eine komplexe Morphologie und damit auch eine komplexe Magnetfeldstruktur aufweisen.

Die freigesetzte Energie führt zur Aufheizung des Plasmas und verursacht so thermische Emission bis in den UV- und weichen Röntgen-Bereich. Ebenso werden dabei geladene Teilchen beschleunigt, die entweder von der Sonne entweichen oder Wechselwirkungen mit Materie der Sonnenatmosphäre ausführen und auf diese Weise Sekundärteilchen und elektromagnetische Strahlung erzeugen können.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die Produktion von γ–Strahlung und Neutronen bei Flares zuerst von Biermann *et al.* (1951) und Morrison (1958) theoretisch vorgeschlagen. Spätere Modellrechnungen von Lingenfelter & Ramaty (1967) sagten Linienemission bei 0.511 MeV, 2.2 MeV, 4.4 MeV und 6.1 MeV, sowie ein breites Kontinuum um 70 MeV voraus.

Wegen der abschirmenden Wirkung der Erdatmosphäre ist diese Strahlung jedoch vom Erdboden aus nicht beobachtbar. So wurde die experimentelle Bestätigung erst im Satellitenzeitalter möglich und gelang Peterson & Winkler (1959) mit einem Raketenexperiment. Die erste Messung von Linienemission im γ–Bereich erfolgte durch Chupp *et al.* (1973) mit dem *Orbiting Solar Observatory* OSO-7 für den Flare vom 4. August 1972. Nachfolgende Projekte in den achtziger Jahren wie HEAO-1 (Hudson *et al.*, 1980), HEAO-3 (Prince *et al.*, 1982) und HINOTORI (Yoshimori *et al.*, 1983) bestätigten diese Ergebnisse und fanden eine Reihe weiterer, schwächerer Linien. Einen Meilenstein in der Erforschung solarer Flares stellt der Satellit *Solar Maximum Mission* SMM mit dem *Gamma Ray Spectrometer* GRS (Forrest *et al.*, 1980) dar, dessen Beobachtungen zwischen 1980 und 1989 eine erste statistische Basis von Flare-Messungen im γ–Bereich geschaffen haben. SMM gelang auch der erste Nachweis von Neutronen[3] beim Flare am 21. Juni 1980 (Chupp, 1984).

Zur Zeit liefern die beiden Observatorien CGRO bei γ–Energien und YOHKOH im Röntgenbereich, die im April und August 1991 gestartet wurden, eine Flut neuer Beobachtungsergebnisse. Hochenergiemessungen werden auch von den Instrumenten GAMMA-1 und PHEBUS/GRANAT, sowie erdgebundenen Teilchenmonitoren durchgeführt. Ergänzt werden die Beobachtungen durch ein Netz von Observatorien, die Aufzeichnungen im Optischen und Radiobereich durchführen, sowie Messungen mit Magnetographen.

Im Juni 1991 — gegen Ende des 22. Sonnenfleckenzyklus' — überquerte eine außergewöhnlich aktive Fleckengruppe die Sonnenscheibe. Daraufhin wurde die laufende Beobachtung von CGRO unterbrochen und der Satellit am 8. Juni außerplanmäßig auf die Sonne orientiert. Während dieser einwöchigen Observationsperiode konnten die Instrumente γ–Emission und Neutronen der großen Flares vom 9., 11. und 15. Juni 1991 registrieren.

Aufgrund der hohen Sensitivität der Instrumente auf CGRO konnte beim Flare vom 11. Juni 1991 zum erstenmal von EGRET (Kanbach *et al.*, 1993) und COMPTEL (Ryan *et al.*, 1993a; Rank *et al.*, 1993) eine lang-andauernde γ–Emission über mehrere Stunden nach dem Ausbruch des Flares beobachtet werden. Dies übersteigt die längste zuvor gemessene Zeitdauer von etwa 40 min bei weitem. Ein ähnliches Verhalten konnte im Rahmen dieser Arbeit auch für den Flare am 15. Juni gezeigt werden. Dies kann mit Messungen von GAMMA-1 (Akimov *et al.*, 1991a) bei höheren Energien verglichen werden. Eine Neuanalyse des SMM-Beobachtungsmaterials des großen Flares am 3. Juni 1982 durch Dunphy & Chupp (1994) ergab nach der impulsiven Phase ebenfalls einen Zeitverlauf, der dem Zeitprofil der Juni-Flares ähnelt.

Diese Beobachtungen stellen neue Anforderungen an theoretische Modellrechnungen. In dem Modell von Ramaty & Mandzhavidze (1994a) wurde eine Speicherung der zu Beginn des Flares beschleunigten Teilchenpopulation in koronalen Magnetfeldbögen mit geringer Plasmaturbulenz angenommen. Aufgrund neuer Ergebnisse über das Abklingverhalten der Flares läßt sich dieses Modell jedoch nicht weiter aufrechterhalten. Ryan & Lee (1991) propagieren dagegen eine fort-

[3] Das Nachweisprinzip von SMM erlaubt jedoch keine direkte Trennung der Signale, die von Neutronen und γ–Strahlung $> 25\ MeV$ erzeugt werden (siehe auch Kapitel 3, Abschnitt 3.5).

laufende Beschleunigung neuer Teilchen in turbulenten Magnetfeldbögen, beziehungsweise die Injektion von Teilchen in neue Bogenstrukturen. Daneben wurde von Kocharov G. *et al.* (1994) für den Flare am 15. Juni 1991 ein zu hohen Energien härter werdendes Protonenspektrum als Erklärung vorgeschlagen. Diese Diskussion des Langzeitverhaltens ist noch nicht abgeschlossen und kann zu einem neuen Verständnis der Beschleunigungs- und Einschlußprozesse bei Flares führen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Emission von hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung und Neutronen während der solaren Flares am 11. und 15. Juni 1991. Den Untersuchungen liegen γ–Beobachtungen im MeV-Bereich sowie Neutronenmessungen des Instruments COMPTEL/CGRO zugrunde.
In Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über die derzeitigen Vorstellungen von Flare-Szenarien mit besonderem Augenmerk auf hochenergetische Prozesse in Flares gegeben. Es wird dabei auf Konzepte eingegangen, die für die Interpretation der Beobachtungsdaten von Bedeutung sind.
Eine Beschreibung des Teleskops COMPTEL mit Hinblick auf seine Nutzung als Sonnenobservatorium wird in Kapitel 3 vorgestellt. Ebenso wird die Analysemethode erklärt, um auf Besonderheiten der Datenreduktion im Fall solarer Flares hinzuweisen und die Güte der gewonnenen Ergebnisse zu zeigen.
Kapitel 4 beschreibt die Situation der aktiven Sonne im Juni 1991 und gibt einen Überblick über die vorliegenden Messungen anderer Instumente.
Kapitel 5 ist den spektralen und temporalen Aspekten der γ–Emission gewidmet. Das Hauptaugenmerk ist dabei auf die Langzeit-Emission im γ–Bereich gerichtet, die bei diesen Flares zum ersten Mal beobachtet wurde.
Kapitel 6 beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Neutronenmessungen. Es wird auch auf den Zusammenhang mit den Resultanten der Neutroneneinfanglinie eingegangen.
Die Ergebnisse der Analyse werden in Kapitel 7 diskutiert und im Zusammenhang mit anderen Messungen und theoretischen Modellrechnungen interpretiert.
Die Arbeit schließt mit einer kurzen Bewertung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere Entwicklungen in Kapitel 8.