



Doctoral Thesis

## Observations and simulations of particle acceleration in solar flares

**Author(s):**

Messmer, Peter

**Publication Date:**

2001

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004225437> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 14412

# Observations and Simulations of Particle Acceleration in Solar Flares

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZÜRICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

**PETER MESSMER**  
Dipl. Phys. ETH Zürich

born January 15, 1973  
citizen of Thal SG

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Arnold O. Benz, examiner  
Dr. Kurt Appert and  
Prof. Dr. Jan O. Stenflo, co-examiners

2001

# Abstract

During a *solar flare*, an explosion like release of energy in the solar corona, large amounts of charged particles are accelerated. However, most of their energy is subsequently converted into electromagnetic radiation, rendering flares a well observable object in various wavelengths. Besides the generic interest in solar flares due to their violent nature, their partial connection to coronal ejecta are of direct importance to the terrestrial environment. Additionally, small scale solar flares, so called micro- or nano-flares, may be responsible for the overall heating of the solar corona.

Although the phenomenon of solar flares has been known for almost 150 years now and despite the large amount of observational data, it is still unclear, how more than  $10^{37}$  electrons can be accelerated on time scales of the order of 100s. Observations trace energy loss processes, but not the actual energization. Theoretical models try to explain different aspects of acceleration, but usually not a whole scenario, as non-linearity makes a rigorous treatment difficult. Progress can be made on both the observational as well as on the theoretical side: Improving the observing capabilities helps to reduce the degree of freedom left to interpretation. On the other hand improved methods to treat non-linear problems may help to identify promising acceleration models.

In this thesis, the particle acceleration problem is approached from both the observational side (Part I) and from the model side (Part II).

Ultimately, the solution to the acceleration problem has to base on observations. It is therefore necessary to collect as much observational data as possible. The improved Zurich broadband radio spectrometer *Phoenix-2* has become operational in spring 1998 and collected more than 1300 radio bursts since then. The spectrometer system is described in Chapter 2, focusing mainly on the system calibration, data archiving and automatization processes. Additionally, the problems of increasing terrestrial interference are presented.

Among the observed radio bursts, the class of so called *narrowband decimetric spikes* are of specific interest. They are the shortest and narrowest banded solar radio emission currently known. Their good correlation with hard X-ray

emission make them a potential diagnostic for the particle acceleration mechanism. In Chapter 3, the minimum bandwidth of narrowband decimetric spikes is determined to be as low as 0.17% of the center frequency. This narrow bandwidth is a constraint which has to be accounted for in any spike emission model.

A general problem in flare particle acceleration is how to distribute the energy among large volumes of particles. Many of the proposed mechanisms are only capable to accelerate the particles parallel to an ambient magnetic field. Without additional scattering mechanisms, this leads to anisotropic velocity distributions and reduces the efficiency of the accelerator. The isotropization process of a plasma with anisotropic velocity distribution is therefore a crucial part of acceleration.

The non-linear behavior of the plasma prohibits an analytical treatment. The isotropization process is therefore modeled by means of numerical simulations. The simulation has to capture both electron and proton time- and length-scales, making it computationally demanding. A parallel code to efficiently simulate large scale plasmas in a self-consistent way was therefore developed (Chapter 4). Performance results on different computing platforms are reported and results of the well known beam-plasma instabilities are presented in Appendix B.

The actual isotropization process is investigated in Chapter 5. It turns out that the Electron Firehose Instability can work as an isotropization process. Not only the electrons are isotropized by pitch-angle scattering, but some energy is also transferred to the protons. Additionally, this mechanism is a potential source of radio emission.

# Zusammenfassung

Während einem *Solaren Flare*<sup>1</sup>, einer explosionsartigen Energiefreisetzung in der Sonnen-Korona, werden grosse Mengen von Teilchen beschleunigt. Einen Grossteil ihrer Energie wird anschliessend in elektromagnetische Strahlung umgewandelt und machen Flares so zu einem gut beobachtbaren Objekt in verschiedenen Wellenlängen. Nebst dem allgemeinen Interesse in Solaren Flares aufgrund ihres gewaltigen Ausmasses ist ihr teilweiser Zusammenhang mit Koronalen Auswürfen von direktem Einfluss auf die Erdumgebung. Darüber hinaus könnten kleine Instanzen von Flares, sogenannte Mikro- oder Nano-Flares, für die Heizung der Korona verantwortlich sein.

Obwohl das Phänomen Solare Flares schon beinahe 150 Jahre bekannt ist, und trotz der grossen Menge an Beobachtungsdaten ist es immer noch unklar, wie mehr als  $10^{37}$  Elektronen auf Zeitskalen von der Grössenordnung 100s beschleunigt werden können. Beobachtungen weisen Energieverluste nach, aber nicht die eigentliche Energiezunahme. Theoretische Modelle versuchen, verschiedene Aspekte der Beschleunigung zu erklären, normalerweise jedoch nicht den gesamten Ablauf, da Nicht-Linearität eine strenge Behandlung erschwert. Fortschritte können sowohl auf der Beobachtungs- als auch auf der theoretischen Seite erzielt werden: Eine Verbesserung der Beobachtungsmittel hilft, die Freiheitsgrade in der Interpretation zu reduzieren. Auf der anderen Seite können verbesserte Methoden zur Handhabung von nicht-linearen Problemen dazu beitragen, erfolgversprechende Beschleunigungs-Modelle zu identifizieren.

In dieser Abhandlung wird die Teilchenbeschleunigung sowohl von der Beobachtungs-Seite (Teil I) wie auch von der Modell-Seite (Teil II) angegangen.

Letztendlich muss die Lösung des Teilchenbeschleunigungs-Problems durch Beobachtungen gestützt werden. Es ist deswegen notwendig, so viele Beobachtungsdaten wie möglich zu sammeln. Das verbesserte Zürcher Breitband Radio-Spektrometer *Phoenix-2* wurde im Frühling 1998 in Betrieb genommen und hat

---

<sup>1</sup>Viele der Termini werden in ihrer englischen Form auch in Deutsch verwendet. Die Übertragungen werden deswegen nicht im Text angegeben.  
Solar Flare  $\approx$  Strahlungsausbruch

seither mehr als 1300 Radio-Bursts<sup>2</sup> gesammelt. Das Spektrometer-System ist in Kapitel 2 beschrieben, wobei vorwiegend auf die System-Kalibration, die Daten-Archivierung und die Automatisierung Gewicht gelegt wird. Zudem wird das Problem der zunehmenden terrestrischen Störungen dargelegt.

Unter den beobachteten Bursts ist die Klasse der *schmalbandigen dezimetrischen Spikes*<sup>3</sup> von besonderem Interesse. Sie sind die kürzesten und schmalbandigsten heute bekannten Radio-Emissionen der Sonne. Ihre gute Korrelation mit harter Röntgen-Strahlung macht sie zu einer möglichen Diagnose für Teilchenbeschleunigungs-Mechanismen. In Kapitel 3 wird die minimale Bandbreite von schmalbandigen dezimetrischen Spikes auf unter 0.17% der Zentralfrequenz bestimmt. Diese Schmalbandigkeit muss von einem vorgeschlagenen Spike-Emissions-Modell erklärt werden können.

Ein generelles Problem in der Teilchenbeschleunigung in Flares stellt die Frage dar, wie man die Energie auf ein grosses Volumen von Teilchen verteilen kann. Viele der vorgeschlagenen Mechanismen sind nur fähig, Teilchen parallel zu einem Umgebungsmagnetfeld zu beschleunigen. Ohne zusätzlichen Streumechanismus führt dies zu einer anisotropen Geschwindigkeitsverteilung und reduziert die Effizienz des Beschleunigers. Die Isotropisierung eines Plasmas mit anisotroper Geschwindigkeitsverteilung ist deswegen ein entscheidender Teil im Beschleunigungsvorgang.

Das nicht-lineare Verhalten des Plasmas verhindert eine analytische Behandlung. Deswegen ist der Isotropisierungs-Vorgang mittels numerischer Simulationen modelliert worden. Die Simulation muss sowohl Elektronen- wie auch Protonen-Zeit- und Längenskalen auflösen, was sie ziemlich rechenintensiv macht. Deswegen wurde ein paralleler Code zur effizienten selbst-konzistenten grossräumigen Plasmasimulation entwickelt (Kapitel 4). Geschwindigkeits-Messungen auf verschiedenen Rechenanlagen werden präsentiert und Resultate der bekannten Beam<sup>4</sup>-Plasma Instabilität werden im Anhang B vorgestellt.

Der eigentliche Isotropisierungs-Vorgang wird in Kapitel 5 untersucht. Es stellt sich heraus, dass die Electron-Firehose-Instabilität<sup>5</sup> als Isotropisierungs-Vorgang ablaufen kann. Es werden nicht nur die Elektronen durch Pitch-angle<sup>6</sup>-Streuung isotropisiert, sondern auch ein Teil der Energie von den Elektronen auf die Protonen übertragen. Darüber hinaus ist dieser Vorgang eine mögliche Quelle von Radio-Emissionen.

---

<sup>2</sup>Burst  $\approx$  Ausbruch

<sup>3</sup>Spike  $\approx$  Spitze

<sup>4</sup>Beam  $\approx$  Strahl

<sup>5</sup>Electron Firehose Instability  $\approx$  Elektronen Gartenschlauch Instabilität

<sup>6</sup>Pitch-angle  $\approx$  Anstellwinkel