ETH zürich

ETH Library

Plasma instabilities of energetic electrons in solar and stellar coronae

observations and interpretation of short non-thermal radio and hard X-ray phenomena

Doctoral Thesis

Author(s):
Güdel, Manuel

Publication date:
1991

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-000578678

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. 9374

PLASMA INSTABILITIES OF ENERGETIC ELECTRONS IN SOLAR AND STELLAR CORONAE

Observations and Interpretation of Short Non-thermal Radio and Hard X-ray Phenomena

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

Manuel Güdel
Dipl. Phys. ETH Zürich

born April 28, 1962
citizen of Ursenbach BE

accepted on the recommendation of
PD Dr. A.O. Benz, referee
Prof. Dr. J.O. Stenflo, co-referee

1991

Abstract

Many astrophysical sources exhibit signatures of *non-thermal* electrons. Accelerated electron populations act as exciters of *plasma instabilities*, which in turn lead to strong, detectable *radio emission*. Deceleration of the fast particles in high density regimes results in thick-target bremsstrahlung observable in the *X-ray* range. Both radio and hard X-ray observations are primary tools providing basic information on the solar and stellar environment, on the presence of hot confined plasmas ("coronae"), and on interactions of surface magnetic fields with coronal structures and stellar winds. At the same time, the astrophysical observations require the investigation of plasma instabilities not achievable under laboratory conditions.

In this thesis, observations, interpretation, and theory of non-thermal electron populations in solar and stellar coronae and stellar outflows are presented. Chapters 1 and 2 summarize a few aspects of non-thermal radio and hard X-ray emission from solar and stellar flares, with a view to comparing violent stellar flares with the more modest solar counterparts.

Radio detections of stellar sources of strong microwave emission are presented. *Dwarf novae* are interacting binaries consisting of a late-type star filling its Roche lobe, and a white dwarf surrounded by an accretion disk. During an optical outburst, strong and variable radio emission has been detected; it is interpreted in terms of electron cyclotron maser emission in converging magnetic fields, presumably close to the white dwarf; alternatively, yet less convincing, gyrosynchrotron radiation may be responsible (Chapter 3). - Whereas many late-type main sequence stars are well known to possess active chromospheres and coronae, early-type stars are suspected to lack significant coronal structures. However, the detection of a peculiar microwave spectrum of a pre-main sequence *Herbig Ae star* indicates that substantial magnetic fields may influence the stellar atmosphere, that is supposed to be controlled by winds in these stars (Chapter 4). - *dMe stars* constitute the class of stars that is most promising to exhibit evidence of solar-like activity at a level detectable with the current instruments. A broad-band spectrum of the dMe star UV Ceti over all VLA frequencies is interpreted as a superposition of two components; the lower frequency part is identified with gyrosynchrotron emission of a non-thermal tenuous electron component, whereas the higher frequencies are proposed to be radiated by the thermal bulk. Using X-ray data of the stellar corona, the magnetic field is estimated between 600 an 2070 Gauss in the sources of the various frequencies (Chapter 5).

Most evident signatures of non-thermal processes are narrow-band short time scale structures in the decimetric and microwave regimes. The first broad-band dynamic spectrum of a very strong *stellar flare* on AD Leo is presented; it has been recorded simultaneously with the three largest single dish telescopes. Extremely short rise and decay times ($\lesssim 0.1$ s) require a coherent mechanism for such processes. Using bandwidth information, source parameters are estimated; a source size of $\lesssim 4 \cdot 10^9$ cm is derived; this implies a brightness temperature of $\gtrsim 10^{14}$ K. Maser in a $B = 600$ G/$n = 4{\cdot}10^{10}$ cm^{-3} (or half these values) plasma is proposed (Chapter 6). - The better known *solar bursts* are the subject a morphological study, comparing high resolution digital dynamic spectra in the decimetric range. This regime is believed to offer the principal indications of the primary energy release during impulsive solar flares. The diversity of individual structures is classified in four main categories: type III-like bursts, continua,

pulsations, and spikes (Chapter 7).

The morphological class of *solar millisecond radio spikes* is conspicuous by several temporal, spectral, and energetic characteristics. It is believed to represent the radio indication of the primary particle acceleration during flares. This is supported by a close association with impulsive hard X-ray events. - *Spectral* studies indicate a close relation to type III bursts, originating from fast particle streams (Chapter 8). - The interpretation in terms of moving particles is followed in a study of extremely high resolution radio observations, that clearly resolve the individual emission elements. The decay rate is found to be constant at constant frequency, and follows an approximately inverse frequency dependence. Using plasma temperatures between 2.1 and 4.1 $\cdot 10^6$ K, the *profiles* are compatible with collisional damping processes (Chapter 9). - Information on the *polarization* and *directivity* properties of the spike radiation is crucial for a closer insight into the radiation mechanism. The polarization follows a significant center-to-limb variation, with the strongest polarization (up to 100%) coming from the center of the solar disc. Depolarization becomes significant beyond about 40° angular central distance, where spike events also become underabundant. This is interpreted in terms of propagation effects, absorption, and reflection (Chapter 10). - The discovery of *higher harmonics* of radio spikes questions the favored interpretation by cyclotron maser emission. Synchrotron maser is proposed, offering indications of relativistic particles in the solar corona (Chapter 11). - The link to the energetics of spike radiation is provided through a detailed analysis of a large set of spike events and simultaneous *hard X-rays.* Radio signals are delayed against X-rays up to several seconds, but nevertheless reveal a close correlation with the X-ray profile. With this, spikes are identified as signatures of the fragmentation of the accelerator into $10 - 10^4$ *elementary* energy releases (Chapter 12).

Instabilities of particles accelerated in strong electric fields are investigated in a numerical particle simulation approach. If beams are injected into electric fields, *runaway* electron populations are created, developing a variety of plasma instabilities. These lead to narrow-band intense propagating electromagnetic emission; the dependence on the ambient magnetic field and on other parameters is discussed, and application to solar spike bursts suggested (Chapter 13).

Instabilities can be controlled by modulations of the ambient plasma. Extremely long living solitary structures in a magnetized plasma are theoretically investigated. *Solitons* are found at speeds comparable with the Alfvén speed. Applying the theory to a two electron component plasma, a new kind of soliton is found, containing a sheet of trapped hot or non-thermal electrons. These may radiate and give the interpretation for intermediately drifting solar bursts (IMDs) during type IV events (Chapter 14).

Zusammenfassung

Zahlreiche astrophysikalische Quellen geben Hinweise auf *nicht-thermische* Elektronen. Populationen von beschleunigten Elektronen regen *Plasma-Instabilitäten* an, welche ihrerseits starke, detektierbare *Radioemission* aussenden. Werden schnelle Teilchen in Bereichen hoher Dichte abgebremst, entsteht *Bremsstrahlung*, die im Gebiet der *harten Röntgen-Strahlen* beobachtbar wird. Radio- und Röntgen-Beobachtungen sind wichtige Hilfsmittel, um grundlegende Informationen zu gewinnen über die Bedingungen in der Umgebung der Sonne und der Sterne, über die Anwesenheit eingeschlossener heisser Plasmen ("Koronae") und über Wechselwirkungen der Oberflächen-Magnetfelder mit koronalen Strukturen oder stellaren Winden. Gleichzeitig erfordern die astrophysikalischen Beobachtungen Untersuchungen über Plasma-Instabilitäten unter Verhältnissen, die im Laboratorium nicht herstellbar sind.

In dieser Dissertation werden Beobachtungen, ihre Interpretation und Theorie von nicht-thermischen Elektronen in solaren und stellaren Koronae und stellaren Winden vorgestellt. Kapitel 1 und 2 fassen einige Gesichtspunkte nicht-thermischer Radio- und Röntgen-Emission von solaren und stellaren *flares* zusammen, mit der Absicht, die sehr heftigen stellaren Ausbrüche mit den bescheideneren solaren zu vergleichen.

Radiobeobachtungen von stellaren Quellen starker Mikrowellen-Emission werden vorgestellt. *Zwergnovae* sind Doppelsterne mit Masse-Austausch; sie bestehen aus einem Stern späten Spektraltyps, der seine kritische Roche-Grenze ausfüllt, und einem weissen Zwerg, der von einer Akkretionsscheibe umgeben ist. Während eines optischen Strahlungs-Ausbruchs wurde starke und zeitlich veränderliche Radiostrahlung detektiert; sie wird mit dem Modell des Elektron-Zyklotron-Masers interpretiert, der in Gebieten konvergierender Magnetfelder wirksam wird, wahrscheinlich in der Nähe des weissen Zwergs; als weniger wahrscheinliche Alternative bietet sich Gyrosynchrotron-Emission an (Kapitel 3). - Während man auf vielen Hauptreihen-Sternen späten Spektraltyps aktive Chromosphären und Koronae nachgewiesen hat, wird allgemein vermutet, dass Sterne frühen Spektraltyps keine nennenswerten koronalen Strukturen besitzen. Aus der Mikrowellen-Beobachtung eines (Vor-Haupttreihen-) *Herbig-Ae-Sterns* wurde jedoch ein völlig unerwartetes Spektrum rekonstruiert, das darauf hinweist, dass beträchtliche Magnetfelder die stellare Atmosphäre beeinflussen könnten; von dieser nimmt man an, dass sie hauptsächlich durch Winde kontrolliert wird (Kapitel 4). - *dMe-Sterne* sind für die heutigen Instrumente am vielversprechendsten für die Suche nach Anzeichen sonnen-ähnlicher Aktivität. Ein breitbandiges Spektrum des Flare-Sterns UV Ceti über alle VLA-Frequenzen wird als Überlagerung zweier Komponenten gedeutet; der tieferfrequente Teil wird mit Gyrosynchrotron-Emission einer nicht-thermischen dünnen Elektron-Komponente identifiziert; dagegen wird vorgeschlagen, dass die höheren Frequenzen vom thermischen Hintergrund emittiert werden. Unter Verwendung von Röntgen-Daten wird das Magnetfeld in den Quellen der verschiedenen Frequenzen zu 600 bis 2070 Gauss abgeschätzt.

Die offensichtlichsten Anzeichen nicht-thermischer Prozesse sind schmalbandige kurzzeitige Strukturen im Dezimeter- und Mikrowellen-Bereich. Das erste breitbandige dynamische Spektrum eines sehr starken *stellaren Ausbruchs* auf AD Leo wird diskutiert; es wurde mit den drei grössten Einzelteleskopen gleichzeitig aufgenommen. Die extrem kurzen Anstiegs- und Zerfallszeiten (≤ 0.1 s) bedingen einen kohärenten Mechanismus. Mit Hilfe der Bandbreiten werden Quellen-Parameter abgeschätzt; die Grösse

der Quellen ergibt sich zu $\lesssim 4 \cdot 10^9$ cm; das führt zu Helligkeitstemperaturen $\gtrsim 10^{14}$ K. Maser-Emission in einen Plasma mit $B = 600$ G und $n = 4 \cdot 10^{10}$ cm^{-3} (oder den doppelten Werten) wird vorgeschlagen (Kapitel 6). - Die besser bekannten *solaren Ausbrüche* sind Gegenstand einer morphologischen Untersuchung; hochaufgelöste, digitale dynamische Spektren im Dezimeter-Gebiet werden verglichen. Dieser Frequenzbereich enthält wahrscheinlich die wesentlichen Anzeichen der primären Energiefreisetzung während impulsiver flares. Die Vielfalt einzelner Strukturen wird in vier Klassen eingeteilt: Typ III-artige Ausbrüche, Kontinua, Pulsationen und Spikes (Kapitel 7).

Die morphologische Klasse der *solaren Millisekunden-Radio-Spikes* fällt durch mehrere zeitliche, spektrale und energetische Eigenschaften auf. Spikes werden für die Anzeichen der primären Beschleunigung während flares im Radiogebiet gehalten. Das wird bestätigt durch die nahe Assoziation mit impulsiven harten Röntgen-Ausbrüchen. - Spektrale Untersuchungen deuten an, dass die Spikes eng mit den Typ III zusammenhängen und von schnellen Elektronenstrahlen erzeugt werden (Kapitel 8). - Diese Interpretation wird weiterverfolgt in einer Untersuchung von Radio-Beobachtungen mit extrem hoher Zeitauflösung; einzelne Spikes sind darin zeitlich vollständig aufgelöst. Die Zerfallsraten des Spike-Flusses sind konstant auf fester Frequenz, und verlaufen etwa umgekehrt proportional zur Frequenz. Die *Zeitprofile* sind in Übereinstimmung mit Stossdämpfungsprozessen unter Annahme von Temperaturen zwischen 2.1 und $4.1 \cdot 10^6$ K (Kapitel 9). - Kenntnisse der *Polarisation* und der *Richtungseigenschaften* der Spike-Strahlung sind wichtig für das Verständnis der Strahlunsmechanismen. Die Polarisation ist einer signifikanten Mitte-Rand-Variation unterworfen, wobei die stärkste Polarisation (bis zu 100%) vom Zentrum der Sonnenscheibe stammt. Depolarisation wird wirksam jenseits von 40° Abstand von der Scheibenmitte, und dort ist auch die Spike-Häufigkeit reduziert. Dies wird mit Propagations-Effekten, Absorption und Reflektion erklärt (Kapitel 10). - Die Entdeckung *höherer Harmonischer* von Radio-Spikes stellt die sonst bevorzugte Interpretation durch Zyklotron-Maser in Frage. Synchrotron-Maser wird vorgeschlagen; dies gibt Anzeichen für das Vorhandensein relativistischer Elektronen in der Sonnenkorona (Kapitel 11). - Die Verbindung zu den energetischen Verhältnissen in der flare-Region wird durch eine detaillierte Untersuchung möglich, in der eine grosse Anzahl von Spike-Ereignissen mit koinzidenten *Röntgen-Ausbrüchen* untersucht wird. Die Radio-Signale treten verzögert zu den Röntgen-Emissionen auf (bis zu mehreren Sekunden), zeigen aber trotzdem eine gute Korrelation mit dem Röntgen-Zeitprofil. Mit diesen Informationen werden Spikes als Anzeichen der Fragmentierung des Beschleunigers in $10 - 10^4$ elementare Energiefreisetzungen gedeutet (Kapitel 12).

Mit numerischen Teilchensimulationen werden Instabilitäten beschleunigter Elektronen in starken elektrischen Feldern untersucht. Wenn Teilchenstrahlen in elektische Felder eingeschossen werden, entstehen *runaway*-Populationen, welche ihrerseits eine Vielfalt von Plasma-Instabilitäten hervorrufen. Diese führen zu schmalbandigen, starken, propagierenden elektromagnetischen Wellen; die Abhängigkeit vom umgebenden Magnetfeld und anderen Parametern wird diskutiert, und eine Anwendung auf solare Radio-Spikes vorgeschlagen (Kapitel 13).

Instabilitäten können durch Modulationen des Plasmas kontrolliert werden. Extrem langlebige solitäre Strukturen in einem magnetisierten Plasma werden theoretisch untersucht. *Solitonen* mit Geschwindigkeiten in der Grössenordnung der Alfvén-Geschwindigkeit werden berechnet. Nach Anwendung der Theorie auf ein Zwei-Elektron-Komponenten-Plasma wird ein neuartiges Soliton gefunden, welches eine Schicht heisser, gefangener Elektronen enthält. Diese können strahlen und damit intermediär driftende Bursts (IMD) während Typ IV-Ereignissen erklären (Kapitel 14).