

30. Juni 1994

Diss. ETH No. 10 495

Dynamical Properties of Bursts and Flares:

An Inquiry on Deterministic Chaos in the Solar and Stellar Coronae

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

Doctor of Natural sciences

presented by

Heinz Isliker

dipl. phys. ETH Zürich

born August 25, 1962

citizen of Kleinandelfingen, ZH

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A.O. Benz, examiner

Prof. Dr. H.R. Künsch, co-examiner

Prof. Dr. J.O. Stenflo, co-examiner



24. 6. 1994

Abstract

The aim of the present inquiry is to reveal dynamical properties of coronal bursts and flares, addressing particularly the question of possible deterministic chaos, but also the questions of stationarity, periodicity, and intermittency.

The general astronomical problem this inquiry addresses is to understand the nature of the structuring in coronal processes, whose origin is still not clear: Solar and stellar flares are highly structured in space and in time (fragmented), as is indicated for example by their radio signatures: the narrowband spikes, type III, type II and IV, and pulsation events. Structured in time are also the non flare related type I events (noise storms). We show examples of respective radio spectrograms in the 0.1–1 GHz range. The analysis of the corresponding time series is accompanied by various problems which arise from the facts that the applied methods are mostly new, and the time series are short and unique: In order to achieve reliability of the results, a large part of the presented work consists in discussing and testing methods, and in developing new tools, among which an extended dimension-estimate algorithm.

To introduce the data, we present a systematic catalogue of solar flare radio-emissions in the 1–3 GHz range, based on spectrograms measured for the first time with high spectral resolution. The emissions are classified into five major groups according to morphological criteria.

The data analysis consists in the following tools: We propose a *stationarity test*: Many concepts have stationarity as a prerequisite. The test is a statistical one and is able to find stationary sections of a time series, which can undergo further analysis. *Self-affinity* is a particular form of non-stationarity. We discuss the possibility to detect it. Methods to identify *intermittency* in time series are proposed and discussed. *Power-spectra* and *correlation dimensions* are estimated in order to inquire whether the processes underlying the coronal time series are stochastic, deterministic-chaotic, or regularly deterministic. The shortness and uniqueness of coronal time series give rise to numerous possibilities for deceptive results (spuriously finite dimensions). We have developed an *extended dimension estimate algorithm*, consisting of several elements:

On one hand, we take measures to increase the numerical and statistical reliability of the results: (1) We use two different algorithms to estimate correlation dimensions, the Grassberger-Procaccia algorithm and a maximum likelihood estimate, supplemented with an intrinsic error formula. (2) We have developed a scaling and convergence test for dimension estimates. (3) We have performed numerical experiments with known chaotic systems to clarify the influence the length of a time series and its noise-level have on dimension estimates, supplemented with a theoretical discussion of some popular formulae for the minimum number of data points.

On the other hand, several properties of time series can yield finite dimensions, irrespective of whether the underlying process is deterministic or not: (1) Non-stationarity (e.g. self-affinity) — only data which have passed the mentioned stationarity test are analyzed. (2) Intermittency — we have developed a consistency test to identify the pertinent finite dimensions. (3) Temporal correlations — they are discarded in the applied algorithms. (4) Non-white power-spectra, in

combination with shortness of the corresponding time series — we use a surrogate data test to identify this effect.

Besides this, we have developed a test to check whether a too long section of a time series has been analyzed. It has to be applied in case finite dimensions have been detected, where it tests whether the beginning or the end of the analyzed section does not lie on the asserted attractor.

Furthermore, the influence some standard data-modification procedures have on dimension estimate is inquired theoretically and numerically. It turns out for instance that the subtraction of an envelope from a time series has no serious effects.

Finally, alternatives to some of the used tools are discussed: (1) another way to detect the misleading influence intermittency has on dimension estimate (via generalized dimensions); (2) mutual information to find temporal correlations; and (3) Kolmogorov-entropy, estimated with the correlation integral method, to ascertain deterministic chaos. All three tools turn out not to be suited for the analysis of coronal data.

We investigate 3 events of narrowband spikes, 13 type III groups, 10 type I storms, 3 type II bursts and 1 type IV event (all of solar origin, measured in the range 0.1-1 GHz), and 3 pulsation-like events of stellar origin (from the nearby dMe-star AD Leo) — of course, subsections of the respective time series are analyzed, too. All the events have in common that they have stationary phases, periodicities are rather seldom, and intermittency is quite abundant (within these common properties the single burst types turn out to be characteristicly different, however). None of the investigated time series reveals a low-dimensional behaviour. This implies that they originate from complex processes having dimensions (degrees of freedom) larger than about 4 to 6, which includes infinity, i.e. stochasticity. The lower limit of the degrees of freedom is inferred from numerical experiments with known chaotic systems, using time series of similar lengths, and it depends slightly on the burst types.

The results are finally confronted with a particular stochastic flare scenario, constructed by reducing a broad class of flare models to their basic properties. The flare scenario is analyzed for the same properties as the empirical data, and it turns out that the model is largely compatible with the properties of the measured bursts.

Most important, the extended dimension-estimate method we have developed prevents from deceptive results, being aware of various possible effects, and it is ready to be applied in any field where short and unique time series are dealt with.

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist, Eigenschaften der Dynamik von koronalen Bursts und Flares (Eruptionen) zu finden. Insbesondere wird die Frage nach möglichem deterministischem Chaos untersucht, aber auch die Fragen nach Stationarität, Periodizität und Intermittenz.

Das allgemeine astronomische Problem, auf das sich diese Untersuchung bezieht, ist, das Wesen der Strukturiertheit in koronalen Prozessen zu verstehen, deren Ursprung noch nicht geklärt ist: Solare wie auch stellare Flares sind reich an zeitlichen und räumlichen Strukturen (Fragmentierung), wie zum Beispiel ihrer Radiowellensignatur entnommen werden kann: den schmalbandigen Spikes, den Typ-III-, Typ-II-, Typ-IV- und den Pulsationsereignissen. Zeitlich strukturiert sind auch die nicht mit Flares zusammenhängenden Ereignisse vom Typ I (Rauschstürme). Beispiele von Radio-Spektrogrammen im Bereich 0.1–1 GHz werden vorgeführt. Die Analyse der entsprechenden Zeitreihen bringt verschiedene Probleme zum Vorschein, da einerseits die angewendeten Methoden neu und andererseits die Zeitreihen kurz und einmalig sind. Um verlässliche Resultate zu erzielen, muss ein grosser Teil der präsentierten Arbeit in der Diskussion und im Testen von Methoden bestehen, und in der Entwicklung neuer Verfahren, was, unter anderem, zu einem erweiterten Algorithmus zur Dimensionsschätzung führt.

Zur Einführung der Daten präsentieren wir einen systematischen Katalog solarer Flare-Radioemission im Bereich 1–3 GHz, basierend auf Spektrogrammen, die zum ersten Mal mit hoher Frequenzauflösung gemessen wurden. Die Emissionen sind nach morphologischen Kriterien in 5 Gruppen klassifiziert worden.

Die Datenanalyse besteht aus den folgenden Methoden: Ein *Stationaritätstest* wird vorgeschlagen: Stationarität ist die Voraussetzung vieler Konzepte. Der Test ist statistischer Natur und fähig, stationäre Abschnitte in Zeitreihen aufzufinden, die dann weiter untersucht werden können. *Selbstaffinität* ist eine spezielle Form von Nicht-Stationarität. Wir diskutieren die Möglichkeit, sie festzustellen. Methoden, um *Intermittenz* in Zeitreihen zu identifizieren, werden vorgeschlagen und diskutiert. *Power-Spektren* und *Korrelationsdimensionen* werden geschätzt, um zwischen stochastischen, deterministisch chaotischen und regulär deterministischen Prozessen zu unterscheiden. Die Kürze und Einmaligkeit koronaler Zeitreihen gibt Anlass zu zahlreichen Möglichkeiten, täuschende Resultate zu erhalten (falscherweise endliche Dimensionen). Wir haben einen *erweiterten Algorithmus zur Dimensionsschätzung* entwickelt, der aus verschiedenen Elementen besteht:

Einerseits werden Massnahmen ergriffen, um die numerische und statistische Verlässlichkeit der Resultate zu erhöhen: (1) Wir benutzen zwei Algorithmen, um Dimensionen zu schätzen, den Grassberger-Procaccia-Algorithmus und eine Maximum-Likelihood-Schätzung, ergänzt mit einer intrinsischen Fehlerabschätzung. (2) Wir haben einen statistischen Test entwickelt, der das Skalierverhalten und die Konvergenz in Dimensionsschätzungen beurteilt. (3) Anhand numerischer Experimente mit bekannten chaotischen Systemen haben wir den Einfluss untersucht, den Datenlänge und Rauschniveau auf Dimensionsschätzungen haben. Ergänzend dazu werden zwei bekannte Formeln für die minimal nötige Datenmenge diskutiert.

Andererseits können verschiedene Eigenschaften von Zeitreihen endliche Dimensionen bewirken, unabhängig davon, ob der zugrundeliegende Prozess deter-

ministisch ist oder nicht: (1) Nicht-Stationarität (z.B. Selbstaffinität) — nur die Daten, die den erwähnten Stationaritätstest bestanden haben, werden analysiert. (2) Intermittenz — wir haben einen Konsistenz-Test entwickelt, um die einschlägigen endlichen Dimensionen zu identifizieren. (3) Zeitliche Korrelationen — die verwendeten Algorithmen sind so modifiziert, dass zeitliche Korrelationen keinen Einfluss haben können. (4) Nicht-weiße Power-Spektren, kombiniert mit Kürze der entsprechenden Zeitreihen — mit einem Surrogatsdaten-Test kann dieser Effekt identifiziert werden.

Daneben haben wir einen Test entwickelt, der abklärt, ob ein zu langer Abschnitt einer Zeitreihe analysiert wurde. Er wird angewendet in den Fällen, in denen eine endliche Dimension festgestellt wurde, wo er dann testet, ob der Anfang oder das Ende des analysierten Abschnitts möglicherweise nicht auf dem Attraktor liegt.

Des Weiteren wird der Einfluss, den einige Standardprozeduren zur Modifizierung von Daten auf Dimensionsschätzungen haben, theoretisch und numerisch untersucht. Es stellt sich heraus, dass zum Beispiel die Subtraktion einer Enveloppe keine ernsthaften Effekte zeigt.

Schlussendlich werden Alternativen zu einigen der benutzten Methoden diskutiert: (1) eine andere Art, den irreführenden Einfluss von Intermittenz auf Dimensionsschätzungen zu detektieren (mit verallgemeinerten Dimensionen); (2) Mutual-Information, um zeitliche Korrelationen aufzufinden; und (3) Kolmogorov-Entropie, mit dem Korrelationsintegral geschätzt, um deterministisches Chaos festzustellen. Es zeigt sich, dass alle drei Methoden nicht wirklich geeignet sind, um koronale Daten zu analysieren.

Wir untersuchen 3 schmalbandige Spike-Ereignisse, 13 Typ-III-Gruppen, 10 Typ-I-Stürme, 3 Typ-II-Bursts und 1 Typ-IV-Ereignis (alle solaren Ursprungs, gemessen im Bereich 0.1–1 GHz), und 3 pulsationsartige Ereignisse stellaren Ursprungs (vom nahen dMe-Stern AD Leo) — selbstverständlich sind auch Teilabschnitte der entsprechenden Zeitreihen untersucht worden. Alle Ereignisse haben gemeinsam, dass sie stationäre Phasen haben, Periodizitäten ziemlich selten sind und Intermittenz ziemlich häufig ist (innerhalb dieser gemeinsamen Eigenschaften erweisen sich die einzelnen Burst-Typen jedoch als charakteristisch verschieden). Keine der untersuchten Zeitreihen zeigt niedrig-dimensionales Verhalten. Das impliziert, dass sie von komplexen Prozessen herrühren mit Dimensionen (Freiheitsgraden) grösser als etwa 4 bis 6, was unendlich miteinschliesst, d.h. Stochastizität. Die untere Grenze für die Anzahl Freiheitsgrade ist aus numerischen Experimenten mit bekannten chaotischen Systemen hergeleitet, indem Zeitreihen von verwandter Länge analysiert worden sind. Sie hängt leicht vom Burst-Typ ab.

Die Resultate werden mit einem speziellen Flare-Szenarium konfrontiert, welches konstruiert ist als Reduktion einer breiten Klasse von Flare-Modellen auf ihre grundlegenden Eigenschaften. Das Flare-Szenarium ist auf die gleichen Eigenschaften hin untersucht worden wie die empirischen Daten, wobei sich herausstellt, dass das Modell kompatibel ist mit den Eigenschaften der gemessenen Bursts.

Der erweiterte Algorithmus zur Schätzung von Dimensionen, den wir entwickelt haben, verhindert täuschende Resultate, indem er verschiedene Effekte berücksichtigt, und er kann jederzeit in irgendeinem Gebiet angewendet werden, in dem kurze und einmalige Zeitreihen untersucht werden.