

Diss. ETH No. 16887

Observations and Models of the Dynamical Evolution of Solar Flares

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

PAOLO C. GRIGIS
Dipl. Phys. ETH

born September 24, 1977
citizen of Onsernone TI

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Arnold O. Benz, examiner
PD Dr. Manuel Güdel, co-examiner
Prof. Dr. Jan O. Stenflo, co-examiner

2006

Abstract

Solar flares and associated Coronal Mass Ejections (CMEs) are the biggest explosions in the solar system, converting huge amounts of magnetic energy into kinetic energy of accelerated particles and heat. The key questions at the core of flare physics research are: how is the energy stored in the solar corona before the flare? What triggers the sudden release of that energy? How are the particles accelerated and heated during the flare? Notwithstanding the strong theoretical and observational progress of the last few decades, these questions still remain open.

Hard X-ray observations of the Sun, such as provided by the Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI), are the best tools to probe the population of flare-accelerated particles, because X-rays are the direct signature of energetic electrons. In this thesis, novel RHESSI hard X-ray observations of solar flares are compared with quantitative predictions from modern theoretical models of stochastic acceleration of electrons. The focus lies on the spectral evolution, which has been discovered in the early days of hard X-ray observations, but, with a few exceptions, neglected by theorists.

The work presented here starts with RHESSI observations of the spectral evolution of the non-thermal component in the hard X-ray spectrum of solar flares. A representative sample of 24 M class impulsive flares is analyzed. They show rapid changes in the spectral hardness during distinct emission spikes. The maximum hardness is reached at peak time, thus the spectral behavior can be classified as soft-hard-soft. A quantitative relation between the normalization of the power-law component and its spectral index is found, holding for single emission spikes, as well as for the whole dataset comprising all events.

The analysis is then expanded, transforming the data from photon space to electron space and comparing the results with predictions from simple available electron acceleration models featuring soft-hard-soft behavior. This simple approach yields plausible best-fit model parameters for about 77% of the 141 events consisting of rise and decay phases of individual hard X-ray spikes. This success suggests that stochastic acceleration is a viable mechanism to explain the observed spectral evolution.

Therefore, a recent stochastic acceleration model, the transit-time damping acceleration scenario, was chosen for further investigation. A mechanism

that accounts for particle trapping in the accelerator was added in order to account for changes in the spectral hardness. The model predictions for the spectral evolution were compared with spectral observations of *looptop* hard X-ray sources, delivering a snapshot of the particles still residing in the accelerator. A novel parameter was used for the comparison, the *pivot point* (that is, a common crossing point of the accelerated particle spectra at different times). The model computations show the presence of a pivot point at an energy of 10 keV. This value can be brought in agreement with the observed value of 20 keV by enhanced trapping through an electric potential.

Lastly, some puzzling observations of the motion of hard X-ray sources during an impulsive M class flare are reported. The double sources, interpreted as footpoints of magnetic loops, show continuous motion along an arcade of magnetic loops, contradicting the predictions of the translation invariant 2.5D reconnection models, where motion perpendicular to the arcade is expected. Therefore, the development of more realistic 3D models is needed to account for such behavior.

Riassunto : osservazioni e modelli dell'evoluzione dinamica nei brillamenti solari

Le esplosioni più potenti del sistema solare sono i brillamenti solari e le espulsioni di massa coronale. Essi trasformano enormi quantità di energia magnetica in calore ed accelerano particelle fino a velocità relativistiche. La fisica dei brillamenti solari cerca di rispondere alle seguenti domande fondamentali: come viene immagazzinata l'energia nella corona prima di un brillamento? Qual è il meccanismo che innesca l'improvviso sprigionamento di tale energia? Come avviene l'accelerazione delle particelle e la liberazione del calore durante il brillamento? Nonostante i grandi progressi compiuti durante gli ultimi decenni nel campo della teoria e delle osservazioni, questi problemi rimangono tuttora irrisolti.

Il satellite RHESSI (Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager) osserva i raggi X provenienti dal sole e permette di studiare la popolazione di particelle accelerate dai brillamenti, visto che l'emissione nei raggi X può essere direttamente ricondotta agli elettroni energetici. In questa tesi, le nuove osservazioni di RHESSI sono comparate alle predizioni quantitative di moderni modelli teorici sull'accelerazione stocastica degli elettroni. Il paragone viene effettuato concentrandosi sull'evoluzione spettrale, un tema conosciuto fin dal principio delle osservazioni nei raggi X, ma, con poche eccezioni, trascurato dai teorici.

Si parte da osservazioni compiute da RHESSI sull'evoluzione spettrale della componente non termica nei brillamenti solari. L'analisi dei dati mostra rapidi cambiamenti della durezza spettrale durante i distinti picchi dell'emissione di 24 brillamenti di classe M. La massima durezza spettrale è raggiunta contemporaneamente al massimo del flusso, e quindi il comportamento spettrale comporta un andamento in cui lo spettro è dapprima soffice, poi duro e poi soffice ancora. Si osserva una relazione quantitativa tra l'indice spettrale e la normalizzazione della componente non termica. Questa legge è valida non solo per i singoli picchi di emissione, ma anche per l'insieme dei dati di tutti gli eventi.

L'analisi viene poi estesa ricostruendo la distribuzione degli elettroni ac-

celerati a partire dagli spettri osservati nei raggi X, e confrontando i risultati con le predizioni di semplici modelli sull'accelerazione degli elettroni, i cui parametri fisici possono essere stimati dai vincoli osservazionali. Nonostante i modelli considerati siano molto semplici, questo approccio produce risultati ragionevoli per i parametri fisici dei modelli in circa il 77% dei 141 eventi studiati (corrispondenti ognuno ad una fase di crescita o declino di un picco dell'emissione nei raggi X). Questi risultati suggeriscono che l'accelerazione stocastica possa essere un meccanismo atto a spiegare l'evoluzione spettrale osservata.

Quindi un modello più moderno di accelerazione stocastica, lo scenario del *transit-time damping*¹, è stato scelto per ulteriori investigazioni. Tramite l'aggiunta di un termine che descrive il meccanismo di fuga delle particelle dalla zona in cui avviene l'accelerazione, è possibile rendere conto dei cambiamenti osservati nello spettro. Le predizioni di questo modello sull'evoluzione spettrale sono state comparate con le osservazioni degli spettri di sorgenti di raggi X situate in cima agli archi del campo magnetico, dove avviene l'accelerazione. Per il confronto si utilizza un parametro detto *punto pivotale*, ovvero un punto di intersezione comune agli spettri osservati in tempi diversi. Il modello prevede la presenza di un punto pivotale ad energie intorno ai 10 keV. Modificando il modello riducendo il tasso di fuga delle particelle a basse energie, questo valore raggiunge il livello osservato di 20 keV.

Infine sono riportate alcune osservazioni sul moto delle sorgenti di raggi X durante un brillamento impulsivo di classe M. Le sorgenti doppie, osservate alla base degli archi magnetici, mostrano un movimento continuo lungo un sistema di archi coronali. Questo contraddice i modelli di riconnessione 2.5 dimensionali (invarianti rispetto alla traslazione nella terza dimensione), che prevedono moti perpendicolari al sistema di archi magnetici coronali.

¹letteralmente: “ammortizzazione nel tempo di transito”, un concetto di fisica del plasma che descrive un meccanismo per il trasferimento di energia da onde a particelle.