

DAS UNSICHTBARE UNIVERSUM

PAOLO GRIGIS UND ARNOLD O. BENZ

Röntgenwellen unterscheiden sich von sichtbarem Licht durch ihre tausendfach höhere Frequenz und Energie pro Photo; Radiowellen weisen hingegen eine tausendfach kleinere Frequenz und Energie auf. Viele Himmelskörper strahlen in allen Wellenlängenbereichen vom Röntgen- bis zum Radiobereich. Sind Röntgen- und Radiostrahlung besonders intensiv, ist dies immer ein Indiz für hochenergetische Vorgänge.

Farbkodierte Röntgenaufnahme des Zentrums der Milchstrasse, gewonnen mit dem Satelliten CHANDRA. Der Ausschnitt umfasst $2 \times 0,8$ Grad, entsprechend 900×360 Lj. Bild: NASA

Röntgen- und Radiowellen beinhalten komplementäre Informationen und werden oft zur Fernerkundung von Teilchen mit hoher Energie gemeinsam beobachtet. Die hochenergetischen Vorgänge im Universum sind allgemein von Interesse, da sie mit ihren unvorstellbaren Energien seine Entwicklung mitprägen. Hochenergetische Teilchen durchdringen zum Beispiel selbst Dunkelwolken, in denen Sterne entstehen, und ionisieren sowohl Moleküle als auch Atome. Dies hat entscheidende Auswirkungen auf die Sternentstehung im Allgemeinen sowie auf die

chemische Entwicklung. Hochenergieprozesse sind die Ursache für die heissen Hüllen von Sternen, und in der Folge für Schockwellen und Sternwinde. Einzelne kosmische Hochenergeteilchen erreichen Energien von 10^{20} eV und übertreffen damit die Produkte von irdischen Teilchenbeschleunigern um viele Zehnerpotenzen. Für die kosmischen Beschleunigungsprozesse scheint zu gelten, dass sie umso weniger verstanden werden, je näher sie bei der Erde stattfinden. In Sonneneruptionen werden in wenigen Sekunden grosse Mengen von Elektro-

nen und Protonen beschleunigt, deren totale Energie das Millionenfache des jährlichen Schweizer Stromverbrauchs beträgt. Die Ausgangsenergie liegt im Magnetfeld und in elektrischen Strömen. Sie wird vermutlich zunächst in turbulente Wellen umgewandelt, die ihre Energie den Teilchen der Sonnenkorona weitergeben. Andere Vorgänge wie Schockwellen und elektrische Felder spielen energetisch eine untergeordnete Rolle.

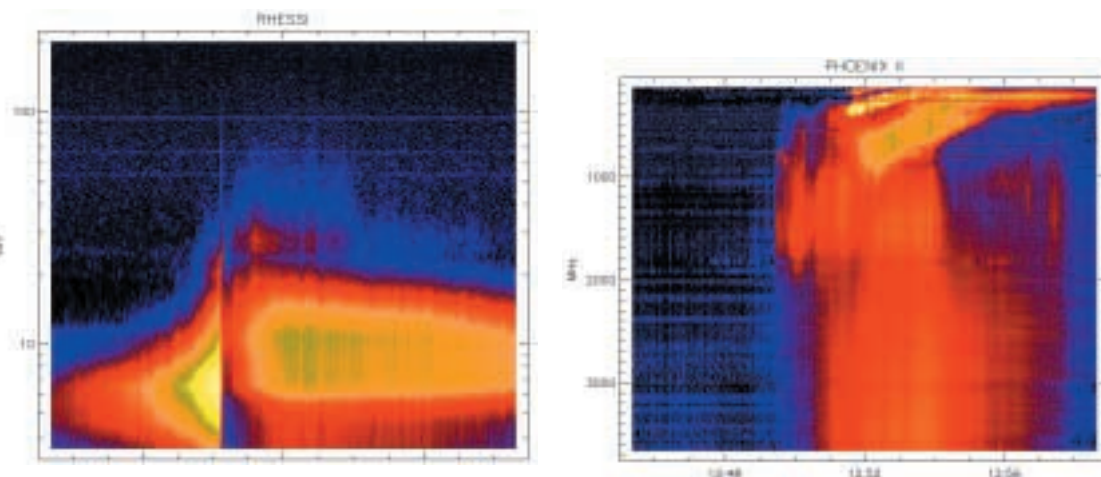


Abb. 1: Das Spektrogramm von Röntgen- und Radiowellen der Sonneneruption vom 24. April 2003, beobachtet mit RHESSI und dem Spektrometer Phoenix-2 der ETH. Die Intensität der beiden Wellen wird für jedes Energie- bzw. Frequenzintervall (vertikale Achse) und jedes Zeitintervall (horizontale Achse) in Bildform aufgetragen. Die Darstellung erlaubt einen Überblick über die verschiedenen Emissionsprozesse hochenergetischer Elektronen.

Entwicklung der Radio- und Röntgenbeobachtungen

Röntgenstrahlen erreichen die Erdoberfläche nicht und müssen im Weltraum beobachtet werden. Das macht Röntgenteleskope teuer und limitiert ihre Grösse. In den 1960er-Jahren wurden von Raketen aus kosmische Röntgenstrahlen entdeckt. Seither haben die Beobachtungsmöglichkeiten beachtlich zugenommen, doch sind sie immer noch durch den kleinen Fluss der beobachteten kosmischen Röntgenphotonen begrenzt. Radiowellen hingegen können auf der Erdoberfläche seit gut 50 Jahren mit viel grösseren Teleskopen gemessen werden. Sie haben ebenfalls von der technischen Entwicklung profitiert. Es gibt heute Interferometer mit zusammengesetzten Teleskopen über ganze Kontinente, welche selbst von relativ kleinen kosmischen Quellen scharfe Bilder machen können.

Sonnenbeobachtungen mit RHESSI

Die Teilchenbeschleunigung in der Sonnenkorona hinterlässt Spuren in Röntgen- und Radiowellen. Abb. 1 zeigt das Spektrum einer Sonneneruption in beiden Bereichen. Verschiedene Energien und Frequenzen sind vertikal gegen den zeitlichen Verlauf (horizontal) aufgetragen. Je intensiver eine Emission, desto heller wird sie als Bildpunkt im so genannten Spektrogramm eingetragen. Die Röntgenbeobachtungen stammen vom NASA-Satelliten RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), der mit Detektoren aus Germanium ausgerüstet ist und die Energie jedes einfallenden Röntgenquants genau messen kann. Die ETH war an der Software-Entwicklung für den Satelliten beteiligt und besitzt ein Datenzentrum, in dem alle Messungen vorverarbeitet und gespeichert werden. Die Radiowellen in Abb. 1 hat das ETH-Spektrometer Phoenix-2 in Bleien bei Gränichen (AG) empfangen. Es ist das breitbandigste Radioteleskop der Erde und speziell für spektrale Übersichtsmessungen geeignet. Die Röntgenphotonen unter 20 keV in Abb. 1 stammen vor allem aus dem über 20 Millionen Grad heissen Plasma der Eruption. Photonen mit höherer Energie wurden durch Hochenergie-Elektronen verursacht. Um 12.50 Uhr am 24. April 2003 bewegte RHESSI eine Absorberplatte vor die Detektoren, um sie vor Sättigung zu schützen. Die Radiostrahlungen beginnen um 12.48 Uhr bei 800 MHz (etwas unterhalb der Frequenz von Mobiltelefonen). Sie werden von Elektronenstrahlen in der Sonnenkorona verursacht. Etwas

später wird von 2000 MHz bis 4000 MHz die intensive Synchrotronstrahlung energiereicher Elektronen sichtbar (rot). Zwischen 1000 und 2000 MHz wurden Pulsationen (rot) registriert, die direkt dem Beschleunigungsprozess zugeschrieben werden. Eine Schockwelle macht sich als driftende Struktur von 600 bis 100 MHz bemerkbar (gelb). Bei etwas höheren Frequenzen zeigt sich vermutlich eine sekundäre Beschleunigungsregion, die sich in der Korona nach aussen bewegt (gelb-grün).

Strukturen in der Sonnenkorona

Der RHESSI-Satellit kann erstmals die energiereiche Röntgenstrahlung abbilden mittels eines neuen bildgebenden Verfahrens. Zum ersten Mal können Astrophysiker die Sonnenkorona gleichzeitig in den wichtigsten Wellenlängen studieren. In Abb. 2 ist die Quelle der Röntgenstrahlung auf einem Bild des TRACE-Satelliten (Transition Region And Coronal Explorer) eingezeichnet, der die ruhige Korona in einer Spektrallinie des achtfach ionisierten Eisens beobachtet (Temperatur etwa 1,5 Millionen K). Die Radiostrahlung wurde mit dem ETH-Spektrometer identifiziert und auf der Frequenz von 327 MHz mit dem Very Large Array in New Mexico (USA) lokalisiert. Die roten Kreise zeigen ihre Position und Stärke. Im räumlichen Vergleich von Röntgen- und Radiowellen (Abb. 2) zeigen sich überraschende Unterschiede. Während die Röntgenstrahlung aus dem oberen Teil eines Magnetbogens stammt, sind die Radioquellen entlang einer höher liegenden Struktur angeordnet, welche im TRACE-Bild dunkel

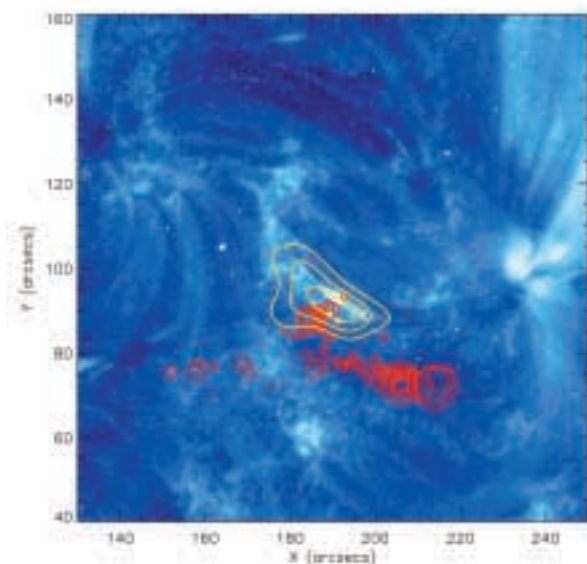


Abb. 2: Die aktive Sonnenkorona in den Wellenlängen des extremen Ultraviolets (blau), Röntgenstrahlen (gelb) und Radiowellen (rot). Der Bildausschnitt zeigt einen Zehntel des Sonnenradius nahe der Mitte der Sonnenscheibe am 1. Oktober 2002.

erscheint. Diese Struktur scheint der Ort zu sein, wo die Koronaaktivität Energie freisetzt. Die mehrere hunderttausend Kilometer lange Struktur ist wahrscheinlich zu heiss für TRACE. Die beschleunigten Elektronen gelangen zum Bogen, wo sie ihre Energie durch Stösse unter Abstrahlung von Röntgenwellen verlieren.

Die Entdeckung von Aktivitätszonen ist nur möglich, indem Röntgen- und Radiowellen kombiniert werden. Noch ist dies nur in speziellen Fällen möglich, wenn verschiedene Instrumente gleichzeitig beobachten. An Abb. 2 waren vier Teleskope beteiligt. Ihre Kombination ist wie ein Puzzle, das erst dann einen Sinn gibt, wenn genügend Elemente zusammengefügt sind.

Forschungsinformationen

Paolo Grigis gehört zur Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Benz. Der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeitsgruppe ist die Plasmaphysik. P. Grigis arbeitet im Rahmen seiner Doktorarbeit auf dem Gebiet der koronalen Heizungsvorgänge, Mikroflares sowie Beschleunigungsprozesse in Sonneneruptionen.

<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/>,
<http://www.hessi.ethz.ch/pop/>

Paolo Grigis

Doktorand am Institut für Astronomie der ETH Zürich

Arnold Benz

Professor am Institut für Astronomie der ETH Zürich