

Diss. ETH No. 16374

Modeling Variations of the Solar UV Spectrum with COSI

A dissertation submitted to the

**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH**

for the degree of

Doctor of Natural Science

presented by

Margit Haberreiter

Physicist University of Tübingen
born May 29, 1968
from Günzburg, Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J.O. Stenflo, examiner
Prof. Dr. W. Schmutz and
Prof. Dr. S. Solanki, co-examiners

2006

Gesehen und akzeptiert!
20.3.06
J. O. Stenflo

Abstract

The aim of the present thesis is the reconstruction of the solar UV variability on the basis of solar spectrum synthesis, carried out with the radiative transfer code COSI (COde for Solar Irradiance) and an available analysis of magnetograms of the solar disk going back to 1974, describing the time-dependent contributions of the active regions - sunspot umbra, penumbra and faculae on the solar disk.

COSI is a spherical radiative transfer code that simultaneously solves the radiative transport equation and the equations for statistical equilibrium. This is essential for the spectrum synthesis of the ultra-violet (UV), as it is partly formed in the chromosphere, where the assumption of local thermodynamic equilibrium (LTE) does not hold. In its present form COSI is for the first time applied for solar studies. Thus a number of modifications, essential for the calculation of solar spectra, have been carried out within the scope of this thesis.

First there is the implementation of solar atmosphere structures to account for the temperature and density stratification for different active regions, in particular for the rising temperature profile of the chromosphere. Then the implantation of atomic levels and the corresponding photoionization cross sections was required to calculate the ionization, recombination and the line transitions of a number of lines in non-LTE. Furthermore, the radiative and collisional processes of negative hydrogen - being the dominant opacity source in the visible and IR wavelength range - are fully accounted for. In particular we implemented the collisional cross sections of the negative hydrogen with electrons and protons.

Most important is the inclusion of the opacity of all spectral lines in the solution of the non-LTE radiative transport. We employ the new concept of iterated opacity distribution functions (ODFs) - *non-LTE ODFs* - being ODFs that are iterated until the population numbers converge. We show that only with the inclusion of the line opacities can we reproduce observations.

The implementations are validated against other synthetic spectra, observations and a reference spectrum. To investigate the uncertainties of the observations we first compared the time series of the UV measurements of two instruments. This is essential, as these measurements are used to validate our reconstructions. We find that the observations reveal absolute (up to a factor of 2) and also different relative (up to a factor of 10) uncertainties. The comparisons of the synthetic spectra with reveal that from 1300 to 1700 Å and in the IR the COSI calculations reproduce the observations very well. However, at other wavelengths the calculations generally overestimate the observed flux.

Representing the basis for the reconstructions, we calculate solar intensity spectra for the quiet Sun, sunspots and plage for different positions on the solar disk. They are then weighted according to their time-dependent fractional area on the solar disk, derived from an available analysis of space-based and ground-based magnetograms - the Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Interferometer (SOI/MDI) onboard the ESA/NASA satellite Solar and Heliospheric Observatory (SoHO), and the National Solar Observatory/Kitt Peak

Vacuum Telescope (NSO/KPVT). This leads to a time series of the specific irradiance.

A sensitivity study reveals that a reconstruction employing the umbra atmosphere structure (Model S) for calculating the penumbra intensities leads to a lower correlation with the observations than using Model C.

The reconstructions are compared with the Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor (SUSIM) and Solar/Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE) observations. We find that the solar surface magnetic field is a suitable proxy for UV reconstructions. In particular, we find that between 1300 to 1700 Å the observed variability is well reproduced. However, at other wavelength ranges the reconstructions underestimate the observed variability substantially.

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die zeitliche Rekonstruktion der Variabilität der solaren ultravioletten (UV) Strahlung. Dies wird mittels synthetischer Sonnenspektren, berechnet mit dem Strahlungstransportmodell COSI (COde for Solar Irradiance) und einer vorhandenen Analyse von Messungen des Oberflächenmagnetfeldes der Sonne, welche bis zum Jahre 1974 zurückreichen, durchgeführt.

COSI ist ein Strahlungstransportmodell in sphärischer Symmetrie, welches die Gleichungen für den Strahlungstransport und des statistischen Gleichgewichts gleichzeitig löst. Dies ist insbesondere für das UV wichtig, da dieses teilweise in der Chromosphäre - jene Region in der Sonnenatmosphäre, welche ein ansteigendes Temperaturprofil zeigt - formiert wird, in welcher die Annahme für lokales thermodynamisches Gleichgewicht (LTE) nicht gilt. In seiner jetzigen Form wird COSI erstmals für solare Studien angewendet. Dazu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit einige Modifikationen durchgeführt, welche essentiell für eine realistische Berechnung von Sonnenspektren sind.

Als Erstes sei die Implementierung von solaren Atmosphärenstrukturen erwähnt, welche das Temperaturprofil der ruhigen Sonne und jenes von aktiven Gebieten - wie Sonnenflecken und Plage - beschreiben. Für die Berechnung des UV ist insbesondere das steigende Temperaturprofil der Chromosphäre zu berücksichtigen. Desweiteren ist die Implementierung atomarer Niveaus von Elementen, welche im UV ionisieren, zusammen mit deren Strahlungsionsationsquerschnitten wichtig, um die Ionisation, Rekombination und eine gewisse Anzahl an Linienübergängen in non-LTE berechnen zu können. Zudem wurden die Strahlungs- und Stossübergänge des negativen Wasserstoffions, welches die dominierende Opazität im visuellen und infraroten (IR) liefert, berücksichtigt. Insbesondere wurden die Wirkungsquerschnitte des negativen Wasserstoffions für Kollisionen mit Elektronen und Protonen implementiert.

Äusserst wichtig für eine korrekte Berechnung der UV Spektren ist die Berücksichtigung aller Linienopazitäten im non-LTE Strahlungstransport. Um dies zu erreichen führen wir das neue Konzept von iterierten Opazitätsverteilungsfunktionen - *non-LTE ODFs* - ein. Neu gegenüber den schon bekannten ODFs ist, dass hier die ODFs iteriert werden, bis die Besetzungszahlen der atomaren Niveaus konvergieren. Wir zeigen, dass die Beobachtung nur unter Berücksichtigung aller Linienopazitäten reproduziert werden kann.

Die o.g. Modifikationen werden gegenüber anderen synthetischen Spektren, Beobachtungen und einem Referenzspektrum verglichen. Dazu führten wir zuerst einen Vergleich der beobachteten Spektren, sowie der Referenzspektren durch. Dies ist insbesondere wichtig, da die Beobachtung für die Validierung der Rekonstruktion herangezogen wird. Wir stellen fest, dass die Messungen sowohl absolute (bis zu einem Faktor 2) wie auch unterschiedliche relative Unsicherheiten (bis zu einem Faktor 10) aufweisen. Beim Vergleich der synthetischen Spektren mit den Beobachtungen bzw. Referenzspektrum finden wir eine sehr gute Übereinstimmung im Wellenlängenbereich von 1300 bis 1700 Å und im IR. Bei anderen Wellenlängen-

bereichen liegen die COSI Spektren jedoch deutlich über den beobachteten Spektren.

Die Basis für die Rekonstruktionen sind Intensitätsspektren, welche für die ruhige Sonne, Sonnenflecken und Plage für verschiedenen Positionen auf der Sonnenscheibe berechnet werden. Diese werden anhand ihres zeitabhängigen Anteils, welchen sie auf der Sonnenscheibe einnehmen, gewichtet was zu einer Zeitreihe der spezifischen Irradianz führt. Die Gewichtungsfaktoren gehen auf die vorhandene Analyse von Magnetogrammen, aufgenommen mit dem Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Interferometer (SOI/MDI) an Bord des Solar and Heliospheric Observatory (SoHO), und des National Solar Observatory/Kitt Peak Vacuum Telescope (NSO/KPVT) zurück.

Desweiteren führen wir eine Empfindlichkeitsstudie durch, welche zeigt, dass die Umbra-Atmosphärenstruktur, angewandt auf die Penumbra zu einer schlechteren Korrelation führt, als die Atmosphärenstruktur der ruhigen Sonne. Die erstellten Rekonstruktionen wurden mit Beobachtungen des Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor (SUSIM) und Solar/Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE) Instruments verglichen. Dabei zeigt sich, dass das Oberflächenmagnetfeld der Sonne grundsätzlich ein geeigneter Index zur Beschreibung der Variabilität der solar UV Strahlung darstellt. Insbesondere finden wir zwischen 1300 bis 1700 Å eine zufriedenstellende Reproduktion der Variabilität. Jedoch liegt bei anderen Wellenlängen die Variabilität der rekonstruierten Irradianz deutlich unter jener der Beobachtung.