

Diss ETH No. 16199

Reconstruction of Solar Irradiance Variations in Cycles 21–23 based on Surface Magnetic Fields

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doktor der Naturwissenschaften

Presented by

Thomas Wenzler

Dipl. Phys. ETH
born August 30, 1965
from Medeglia, TI

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.O. Stenflo, examiner
Prof. Dr. S.K. Solanki and
Prof. Dr. W. Schmutz, co-examiners

Zurich, 2005

Abstract

The main aim of this thesis is to reconstruct solar irradiance variations over the current and the previous two solar activity cycles. The model is based on the assumption that all irradiance changes on time scales from days to the 11-year solar cycle scale are entirely caused by the evolving distribution of the magnetic field on the solar surface.

The most successful recent reconstructions are based on the observations (magnetograms and continuum intensity images) performed by the Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Interferometer (SOI/MDI) onboard the ESA/NASA satellite Solar and Heliospheric Observatory (SoHO) which are available from 1996 until now. However, it is important to extend the reconstruction over a longer time period (i.e. for the pre-SoHO period). This is possible with ground based observations of the National Solar Observatory/Kitt Peak Vacuum Telescope (NSO/KPVT), which date back to the year 1974. Two data sets are available. One of these is the set of the older magnetograph (NSO-512) before 1992. The other, newer data set is the record of the spectromagnetograph (NSO-SPM) from 1992 to 2003.

In a first step we compare and intercalibrate the magnetograms as well as continuum images recorded by the NSO-SPM at Kitt Peak and the MDI on board SoHO in order to test how well the ground-based NSO-SPM data can be used to reconstruct total solar irradiance (TSI) variations. We demonstrate that NSO-SPM data can be employed to reconstruct TSI variations with almost the same accuracy as earlier shown for MDI data.

In a second step we calculate the reconstructions of TSI also based on the NSO-SPM data, but for the whole time period of these data, i.e. from 1992 to 2003 (covering parts of cycles 22 and 23). The comparison with observational data gives a good correspondence for the whole period, with no bias between the two solar activity cycles on time scales longer than

the solar rotation period, and suggests that the source of the irradiance variations is the same for cycles 22 and 23, namely the evolution of the magnetic flux at the solar surface.

Next we include the older NSO-512 data set, which overlaps with the NSO-SPM data for a few months, back to the year 1974, i.e. from the minimum of cycle 21 to the declining phase of cycle 23. The reconstructed irradiance is compared with three composites of total solar irradiance measurements. A good correspondence is found with the total solar irradiance composite from PMOD/WRC, with no bias between the three cycles on time scales longer than the solar rotation period. This suggests that the same driver of the irradiance variations, namely the evolution of the magnetic flux at the solar surface, is acting in cycles 21, 22 and 23. The agreement with the other composites (ACRIM and IRMB) is less marked. In particular, a secular increase in the irradiance exhibited by these composites is not present in the reconstructions. This result implies that either no secular trend in the irradiance is present over cycles 21–23 or that any such trend is unrelated to surface magnetism. It weakens the claims in the literature for the presence of such a trend and has some implications for the influence of solar irradiance variations on climate in recent decades.

Furthermore, based on a statistical analysis of the reconstructed total solar irradiance in cycles 21–23, we identify the contributions of different magnetic features on the solar surface to the variations of the total solar irradiance and evaluate the ratio of umbral to sunspot area.

Finally, we study the latitude distribution of solar activity as presented by sunspot positions and areas using the five lowest statistical moments of the latitudinal distribution of all complete sunspot cycles since 1874 and compare these moments with each other. Remarkable correlations are found between some of the moments. The same analysis when applied to different dynamo models reveals significant differences between the models and demonstrates that such moments are a powerful diagnostic to distinguish between rival dynamo models. Such an analysis also provides the possibility for improved estimates of the butterfly diagram for earlier times when only sunspot numbers were available and hence to improve irradiance reconstructions for the period since the Maunder minimum.

Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Dissertation ist die Rekonstruktion der solaren Helligkeitsvariationen während des aktuellen und den beiden vorherigen solaren Aktivitätszyklen. Das Modell basiert auf der Annahme, dass die Helligkeitsschwankungen über Zeiträume von Tagen bis zum 11-jährigen Sonnenzyklus primär durch das sich verändernde Magnetfeld auf der Oberfläche der Sonne verursacht werden.

Die erfolgreichsten, neuesten Rekonstruktionen basieren auf Beobachtungen (Magnetogramme und Kontinuumsintensitätsbilder), die durch das Solar Oscillations Investigation/Michelson Doppler Interferometer (SOI/MDI) des ESA/NASA Satelliten Solar and Heliospheric Observatory (SoHO) durchgeführt werden. Diese Beobachtungsdaten sind jedoch nur für den Zeitraum zwischen 1996 und heute erhältlich. Es ist jedoch wichtig, die Rekonstruktionen für eine Zeit vor dem Start des SoHO Satelliten zu erstellen. Dies ist bis zurück ins Jahr 1974 mit den Beobachtungen vom National Solar Observatory/Kitt Peak Vakuum Telescope (NSO/KPVT) möglich. Dabei sind folgende zwei Datensätze erhältlich. Der erste Datensatz wurde mit dem älteren Magnetographen (NSO-512) für die Zeitperiode von 1974 bis 1992 aufgenommen, der zweite mit dem Spektromagnetographen (NSO-SPM) für den Zeitraum von 1992 bis 2003.

Als Erstes vergleichen und kalibrieren wir die NSO-SPM und MDI/SoHO Magnetogramme sowie die Kontinuumsbilder miteinander. Dies gibt uns die Möglichkeit zu testen, inwieweit die erdgebundenen NSO-SPM Daten für die Rekonstruktion der totalen Helligkeitsschwankungen verwendet werden können. Wir zeigen, dass diese Rekonstruktionen praktisch die gleiche Genauigkeit erreichen wie diejenigen, die mit den MDI Daten erstellt wurden.

Als Zweites erweitern wir die NSO-SPM Rekonstruktionen der totalen solaren Helligkeit für die gesamte Beobachtungsperiode der NSO-

SPM Daten, d.h. von 1992 bis 2003 (während den Zyklen 22 und 23). Der Vergleich mit Beobachtungsdaten ergibt für den gesamten Zeitabschnitt eine gute Übereinstimmung. Betrachten wir Zeitskalen, die grösser sind als die solare Rotationsperiode, finden wir kein unterschiedliches Verhalten der beiden Aktivitätszyklen 22 und 23. Dies impliziert, dass in beiden Zyklen die Evolution des magnetischen Flusses der Sonnenoberfläche die massgebende Quelle der Helligkeitsschwankungen ist.

Im nächsten Schritt erweitern wir die Rekonstruktionen mit Hilfe des älteren NSO-512 Datensatzes, der mit den NSO-SPM Daten für einige Monate überlappt, bis zurück zum Jahr 1974, d.h. vom Minimum des Zyklus 21 bis zur abfallenden Phase des Zyklus 23. Die Resultate werden mit drei verschiedenen zusammengesetzten Messreihen der totalen solaren Helligkeit verglichen. Wir finden eine sehr gute Übereinstimmung mit der PMOD/WRC Messreihe. Auch stellen wir für Zeitskalen grösser als die solare Rotationsperiode kein unterschiedliches Verhalten zwischen den drei Zyklen fest. Dies impliziert, dass die gleiche Quelle der Helligkeitsveränderungen, d.h. die Evolution des magnetischen Flusses der Sonnenoberfläche, in allen drei Zyklen 21, 22 und 23 massgebend ist. Die Übereinstimmung mit den anderen beiden Zeitreihen (ACRIM und IRMB) ist weniger ausgeprägt. Insbesondere weisen die beiden Zeitreihen im Gegensatz zu den Rekonstruktionen eine langfristige Zunahme der Helligkeit auf. Dieses Resultat deutet an, dass entweder kein langfristiger Trend in der Helligkeit während den Zyklen 21 bis 23 existiert, oder dass ein solcher Trend ohne Beziehung zum Oberflächenmagnetismus steht. Dies schwächt die Ansprüche in der Literatur für das Vorhandensein eines solchen Trends und ist relevant für die Diskussion des Einflusses der solaren Helligkeitsschwankungen auf das Klima in den letzten Jahrzehnten.

Basierend auf einer statistischen Analyse der rekonstruierten totalen Sonnenhelligkeit während den Zyklen 21 bis 23, identifizieren wir den jeweiligen Beitrag der verschiedenen magnetischen Gebiete auf der Sonnenoberfläche zur Änderung der totalen Sonnenhelligkeit. Zusätzlich bestimmen wir das Verhältnis von Umbra zur Sonnenfleckfläche.

Abschliessend studieren wir anhand der Position und Fläche von Sonnenflecken die Breite-Verteilung der Sonnenaktivität, indem wir die fünf niedrigsten statistischen Momente der latitudinalen Verteilung aller kompletten Sonnenfleckenzyklen seit 1874 miteinander vergleichen. Die glei-

che Analyse angewandt auf unterschiedliche Dynamomodelle deckt bedeutende Unterschiede zwischen den Modellen auf. Es zeigt sich, dass diese Momentanalyse ein leistungsfähiges Werkzeug darstellt, das zwischen sich rivalisierenden Dynamomodellen zu unterscheiden vermag. Im Weiteren hat man mit dieser Analyse die Möglichkeit, für frühere Zeitabschnitte, in denen nur Sonnenfleckenzahlen existieren, das Schmetterlingsdiagramm genauer zu erstellen. Folglich können die Rekonstruktionen der solaren Helligkeit für den Zeitraum bis zurück zum Maunder Minimum verbessert werden.