

Diss. ETH No. 18256

RECONSTRUCTION OF SOLAR ACTIVITY DURING THE
HOLOCENE USING THE COSMOGENIC RADIONUCLIDE
BERYLLIUM-10

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
FRIEDHELM STEINHILBER
Diplom Physicist, University of Osnabrück
born March 24, 1980
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
PROF. DR. JÜRGEN BEER, examiner
PROF. DR. STEFAN BRÖNNIMANN, co-examiner
PROF. DR. BERND HEBER, co-examiner
PROF. DR. WERNER SCHMUTZ, co-examiner

2009

Abstract

Total solar irradiance has been directly and continuously measured from space since 1978. Prior to this time there is no accurate information of total solar irradiance and, therefore, must be reconstructed. This thesis addresses the problem of reconstructing the total solar irradiance for the past about 10,000 years by using data of the cosmogenic radionuclide ^{10}Be measured in polar ice cores. ^{10}Be is produced in the Earth's atmosphere by the interaction of cosmic rays with the atmospheric gases. The changing solar activity leads to a variation of cosmic rays. The cosmic rays coming from the milky way penetrate into the heliosphere where they react with the solar wind. Cosmic rays are charged particles and, therefore, get deflected by the magnetic field, which is connected with the solar wind. The solar wind is disturbed in times of high solar activity leading to a decrease in the intensity of cosmic rays, which can travel to Earth. Another influence on the cosmic rays has the geomagnetic field. Thus, the higher the solar activity or the stronger the geomagnetic field, the less cosmic rays reach the Earth's atmosphere and the less ^{10}Be is produced. After production ^{10}Be attaches to aerosols and is removed from the atmosphere to the ground. A part comes to polar regions where it gets archived in ice.

The ^{10}Be signal measured in an ice core is composed of a production and a system signal. The production is due to the cosmic rays and the system signal is due to possible climate influences on the transport from the atmosphere to the ice core. The system effects can be considerably suppressed by low-pass filtering the data. The low-pass filtered ^{10}Be signal reflects the production. Production calculations take into account changes in the geomagnetic field intensity and allow for reconstructing the history of solar magnetic activity expressed as the solar modulation potential. ^{10}Be and also the solar modulation potential are indirect proxies of solar magnetic activity and there is no direct relationship between them and total solar irradiance. However, as shown in this thesis, the solar modulation potential is indirectly related to total solar irradiance.

This thesis is divided in two parts. In the first part different records of ^{10}Be are used to build a composite of the solar modulation potential over the past 9300 years. This composite goes only until 1950. To incorporate the time from 1950 to the present, this record is extended with the solar modulation potential calculated from neutron monitor count rates. The composite shows that the solar activity is very high for the past 50 years, but not exceptionally high. This conclusion comes from the fact that 25 periods in the composite are identified in which the Sun has been in a state of similar high activity. This corresponds to about 15% of the time of the investigated 9300 years. The solar modulation potential is physically related to the strength of the open solar magnetic field, which therefore can be worked out. One main result is that the solar magnetic field was not vanished during the Maunder minimum (1645-1715). This is in contradiction to earlier sunspot-based reconstructions, but confirms findings of annual resolved ^{10}Be . This result is very substantial because it shows a varying Sun although almost

no sunspots were observed during the Maunder minimum. A second result is that grand solar minima, such as the Maunder minimum, are not regularly distributed in time, but occurred in clusters. These clusters have lengths of about 500 years and are apart from each other by about 2300 years. They coincide with the minima of the known 2300-year Hallstatt cycle. The last cluster covered the period of about 1350 to 1850 and includes the Spörer (1420 to 1550), the Maunder (1645 to 1715) and the Dalton minimum (1790 to 1830). The next Hallstatt cycle minimum including the next cluster of grand solar minima will be in about 1500 years. But this does not exclude the occurrence of a single grand solar minimum within the next 1500 years.

In the second part the solar modulation potential is calibrated with total solar irradiance. In a first calibration total solar irradiance is reconstructed back to 1933. Although only based on a mathematical statistical method this reconstruction is in good agreement with physical reconstructions based on sunspot number. To go further back in time the information of the relationship between total solar irradiance and the open solar magnetic field is used. Both records are measured since 1978 showing a similar behaviour during the 11-year solar cycle minima. The levels of the data are lower during the solar minimum of 2008 than during the two solar minima of 1986 and 1996. A detailed study shows that these two data sets linearly correlate. Other solar activity data, such as sunspots, faculae, 10.7 cm radio flux, MgII-index, CaII-hk-index, do not show such distinct decreases indicating that they do not describe the long-term behaviour of total solar irradiance. The found relationship between total solar irradiance and open solar magnetic field is used with the results from the first part of this thesis to come to the final result of this thesis: the first observationally and physics based record of total solar irradiance for the past 9300 years.

In combination with climate models the record of total solar irradiance provides the unique opportunity to quantitatively test the numerous claimed links between climate changes and varying solar activity for the past, the present and to estimate the solar influence in the future.

Zusammenfassung

Die totale solare Irradianz wird seit 1978 direkt und kontinuierlich von Satelliten gemessen. Für die Zeit davor existieren keine verlässlichen Informationen über die totale solare Irradianz, und sie kann nur durch Rekonstruktion bestimmt werden. Das Ziel dieser Dissertation ist die Rekonstruktion der totalen solaren Irradianz für die letzten etwa 10'000 Jahre unter Berücksichtigung von Daten des kosmogenen Radionuklids ^{10}Be aus polaren Eisbohrkernen. ^{10}Be wird durch Interaktion kosmischer Strahlung mit Gasen in der Erdatmosphäre produziert. Die schwankende Sonnenaktivität führt zu einer Variation der kosmischen Strahlung. Die aus der Milchstrasse kommende kosmische Strahlung dringt in das Sonnensystem ein, wo sie auf den von der Sonne wegströmenden Sonnenwind trifft. Die kosmische Strahlung besteht aus geladenen Teilchen und wird deswegen vom Magnetfeld im Sonnenwind abgelenkt. Zu Zeiten hoher Sonnenaktivität ist der Sonnenwind stark gestört, was zur Folge hat, dass weniger kosmische Strahlung bis zur Erde gelangt als bei niedriger Sonnenaktivität. Einen weiteren Einfluss auf die kosmische Strahlung hat das Erdmagnetfeld. Es gilt: je höher die Sonnenaktivität bzw. je stärker das Erdmagnetfeld, desto weniger kosmische Strahlung kann in die Erdatmosphäre eindringen wo folglich weniger ^{10}Be produziert wird. Nach der Produktion bindet sich ^{10}Be an Aerosole, mit denen es zu Boden transportiert wird. Ein Teil des ^{10}Be gelangt in polare Gebiete und wird im Eis archiviert.

Das im Eis gemessene ^{10}Be -Signal setzt sich aus einem Produktionssignal aufgrund der kosmischen Strahlung und einem Systemsignal aufgrund des Transports von der Atmosphäre ins Eis zusammen. Das Systemsignal wird durch Filterung der Daten unterdrückt. Nach der Filterung reflektiert das Signal nur noch ein Produktionssignal. Produktionsratenrechnungen für ^{10}Be berücksichtigen das Erdmagnetfeld und erlauben damit die Rekonstruktion der Sonnenaktivität dargestellt in Form des solaren Modulationspotentials. ^{10}Be und das solare Modulationspotential sind indirekte Proxies der Sonnenaktivität und es gibt keinen direkten Zusammenhang zur totalen solaren Irradianz. Jedoch kann vom solaren Modulationspotential indirekt auf die Irradianz geschlossen werden, was Thema dieser Arbeit ist.

Die vorliegende Arbeit ist in zwei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Teil werden verschiedene Datensätze des kosmogenen Radionuklids ^{10}Be benutzt, um einen zusammenhängenden Datensatz des solaren Modulationspotentials der letzten 9300 Jahre zu erstellen. Dieser Datensatz reicht aber nur bis 1950. Um die Zeit bis heute miteinzubeziehen, wird der Datensatz erweitert mit dem solaren Modulationspotential, welches aus Daten von Neutronen-Monitoren berechnet wurde. Das solare Modulationspotential der letzten 50 Jahre zeigt sehr hohe Werte. Jedoch sind diese nicht einzigartig, denn während der letzten 9300 Jahre findet man 25 weitere Perioden mit ähnlicher Aktivität wie heute, was etwa 15 % der Zeit entspricht. Das solare Modulationspotential ist mit der Stärke des offenen solaren Magnetfeldes verknüpft und erlaubt es, diese zu berechnen. Die Untersuchungen ergeben, dass das Magnetfeld während des Maunder Minimums (1645-1715) nicht verschwunden war. Dieses Resultat widerspricht

früheren Sonnenflecken basierten Magnetfeldrekonstruktionen, ist aber in Übereinstimmung mit jährlich aufgelösten Daten von ^{10}Be . Das ist ein wichtiges Ergebnis, da es eine variierende Sonnenaktivität zeigt, obwohl fast keine Sonnenflecken beobachtet wurden. Weiterhin zeigt sich, dass grosse solare Minima, wie z.B. das Maunder Minimum, nicht regelmässig über die Zeit verteilt sind, sondern in Blöcken auftreten. Diese Blöcke dauern etwa 500 Jahre und liegen etwa 2300 Jahre auseinander. Sie fallen mit den Minima des bekannten Hallstattzyklus zusammen. Der letzte solche Block dauerte von etwa 1350 bis 1850 und beinhaltet das Spörer Minimum (etwa 1420 bis 1550), das Maunder Minimum (1645 bis 1715) und das Dalton Minimum (1790 bis 1830). Der Analyse zufolge wird das nächste Hallstattzyklus-Minimum in etwa 1500 Jahren erfolgen. Daraus folgt, dass das Auftreten eines Blocks mehrerer grosser solarer Minima innerhalb der nächsten 1500 Jahre sehr unwahrscheinlich ist. Dies schliesst aber nicht das Auftreten eines einzelnen grossen solaren Minimums während dieser Zeit aus.

Im zweiten Teil wird die solare Modulationsfunktion mit der totalen solaren Irradianz kalibriert, um diese anschliessend zurück in die Vergangenheit zu rekonstruieren. Eine erste Kalibration ergibt die totale solare Irradianz zurück bis 1933. Obwohl diese Kalibration nur auf mathematisch-statistischen Methoden beruht, stimmt das Langzeitverhalten überein mit anderen physikalischen auf Sonnenflecken basierenden Rekonstruktionen. Um weiter in die Vergangenheit zurückzugehen, mache ich Gebrauch von der Information der Beziehung zwischen totaler solarer Irradianz und dem offenen solaren Magnetfeld. Beide Datensätze werden kontinuierlich und sehr genau seit 1978 gemessen. Sie zeigen beide eine sehr ähnliche Entwicklung der Werte in den Minima des 11-Jahres Sonnenzyklus'. Die Werte im solaren Minimum im Jahr 2008 sind niedriger als in den Minima in den Jahren 1986 und 1996. Eine nähere Untersuchung zeigt, dass die Minima-Werte beider Daten linear korrelieren. Andere Sonnenproxydaten, wie z.B. Sonnenflecken, Sonnenfackeln (Faculae), 10.7 cm Radiofluss, MgII-Index, CaII-hk-Index, zeigen keine bzw. nicht signifikante Abfälle in den Minima-Werten. Das deutet darauf hin, dass diese Proxydaten nicht für Rekonstruktionen des Langzeitverhaltens der totalen solaren Irradianz geeignet sind. Die gefundene Beziehung zwischen totaler solarer Irradianz und dem offenen solaren Magnetfeld wird zusammen mit den Ergebnissen aus dem ersten Abschnitt verwendet, um zum Endergebnis dieser Dissertation zu gelangen: der ersten, auf beobachtetem Langzeitverhalten, physikalisch basierten Rekonstruktion der totalen solaren Irradianz während der letzten 9300 Jahre.

In Kombination mit Klimamodellen bietet diese Rekonstruktion erstmalig die Möglichkeit, die zahlreichen qualitativ gefundenen Korrelationen zwischen Klima und variierender Sonnenaktivität quantitativ zu testen. Damit wird es möglich, den Einfluss der Sonne auf den jetzigen Klimawandel zu bestimmen und den in der Zukunft abzuschätzen.