

^{10}Be in polar ice cores and ^{14}C in tree rings: Separation of production and system effects, comparison with past climate changes and implications for solar physics

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
Abreu Castiñeira José Ángel
Licenciado en Ciencias Físicas, University of Vigo
born in March 24, 1976
citizen of Galiza, Spain

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Jürg Beer, examiner
Prof. Dr. Antonio Ferriz Mas, co-examiner
Prof. Dr. Stefan Brönnimann, co-examiner
Prof. Dr. Werner Schmutz, co-examiner

2009

Abstract

Understanding the Sun's magnetic activity is important because of its impact on the Earth's environment. The sunspot record since 1610 shows irregular 11-year cycles of activity; they are modulated on longer timescales and were interrupted by the Maunder minimum in the 17th century. Recent activity has been abnormally high for at least 8 cycles: is this grand maximum likely to terminate soon or even to be followed by another (Maunder-like) grand minimum? Cosmogenic radionuclides stored in natural archives such as ^{10}Be in ice cores and ^{14}C in tree rings have proven to be very useful in reconstructing past solar activity, and changes in the geomagnetic field intensity over many millennia. At present, this is the only method to extend the records of solar activity proxies beyond the instrumental period. To answer the previous questions we use, as a measure of the Sun's open magnetic field, a composite record of the solar modulation potential ϕ , reconstructed principally from the record of cosmogenic ^{10}Be abundances in the GRIP ice core from Greenland. However, the cosmogenic radionuclide signal contains also a climate component introduced by the transport of the radionuclides from the atmosphere to the archive where they are stored. In order to employ cosmogenic radionuclides in astrophysical or climate studies, first these two components must be separated. Fortunately, theory shows that the response of ^{10}Be and ^{14}C systems to climate variations is very different. Thus comparing both radionuclides makes it possible to distinguish between climate induced variations and solar/geomagnetic ones. In this work, we apply PCA (Principal Component Analysis) to ^{10}Be from ice cores as well as to ^{14}C from tree rings in order to isolate and remove the climate effects in the records. In this way ^{10}Be and ^{14}C become much better tools for climate as well as for astrophysical applications, for instance in form of solar modulation potential ϕ . The ϕ composite used in this work extends back for almost 10,000 years, showing many grand maxima and grand minima. We carry out a statistical analysis of this record and calculate the life expectancy of the current grand maximum. We find that it is only expected to last for a further 15–36 years¹, and we therefore predict a decline in solar activity within the next two or three cycles. In addition, we also estimate the probability that the current grand maximum will be followed by a (Maunder-like) grand minimum. The spectral analysis of the solar modulation potential ϕ reveals strong modulation at well defined periods, namely ~ 2200 , 980 and 200. Comparison of the afore mentioned open-flux proxies with sunspots, points to the existence of a magnetic threshold below which, the sunspots do not reach the solar surface. We suggest two separate full dynamos operating in two separate layers. The possible decoupling between both dynamos could be the explanation for activity minima such as the Maunder minimum.

¹Starting in 2004, hence, 2019-2040 A.D.

Zusammenfassung

Die Sonnenaktivität zu verstehen ist wichtig, da sie ein wichtiger Antreiber für das Klima der Erde ist. Die gemessene Anzahl der Sonnenflecken seit 1610 weist einen unregelmässigen 11-Jahreszyklus auf. Dieser Zyklus variiert auch auf längeren Zeitskalen und war sogar im 17. Jahrhundert während des Maunder-Minimums unterbrochen. Hingegen war die Sonnenaktivität während der letzten acht 11-Jahreszyklen aussergewöhnlich hoch. Es stellen sich also die Fragen: Wann wird die momentane Phase hoher Aktivität zu Ende gehen? Was passiert danach? Kommt im Anschluss ein Maunder Minimum?

Kosmogene Radionuklide, gespeichert in natürlichen Archiven wie, z.B., ^{10}Be in Eisbohrkernen und ^{14}C in Baumringen, können verwendet werden, um einerseits die Vergangenheit der letzten Jahrtausende der Sonnenaktivität und andererseits der Erdmagnetfeldstärke zu rekonstruieren. Zur Zeit ist das die einzige verfügbare Methode, um direkte Proxydaten (wie Sonnenflecken) der Sonnenaktivität vor der Beobachtungsperiode zu erweitern. Um die obigen Fragen zu beantworten, wird in dieser Arbeit als Proxy für das offene solare Magnetfeld ein Datensatz des solaren Modulationspotentials verwendet. Dieser Datensatz wurde aus ^{10}Be Konzentrationen gemessen im GRIP Eisbohrkern ermittelt. Das im Eisbohrkern enthaltene Signal besteht jedoch nicht nur aus einer solarer Komponente, sondern auch aus einer klimatischen Komponente. Diese klimatische Komponente wird aufgrund des Transports der Radionuklide von der Atmosphäre zum Archiv (z.B. Eisbohrkerne oder Baumringe) verursacht. Um kosmogene Radionuklide in Astrophysik so wie in Klimauntersuchungen anwenden zu können, müssen folglich zuerst diese zwei Komponenten voneinander getrennt werden. Die Theorie zeigt, dass die durch Sonnenvariabilität verursachten Produktionsänderungen sich auf ^{10}Be und ^{14}C gleich auswirken. Klimaänderungen (Systemeffekte) dagegen drücken sich in den ^{10}Be und ^{14}C Daten verschieden aus. Der Vergleich beider Nuklide erlaubt es, das Produktionssignal von den Systemeffekten zu trennen; diese Trennung erfolgt mit Hilfe der "Hauptkomponentenanalyse". Das abgetrennte Klimasignal ermöglicht, die systematische Identifizierung der Klimaänderungen im Holozän. Ein detaillierter Vergleich des solaren Signals wie auch des klimatischen Signals mit verfügbaren Klimadaten sollte es ermöglichen, Rückschlüsse auf den Einfluss der Sonnenaktivität auf das Klima zu ziehen. Durch die Eliminierung der klimatischen Komponente, wird eine realistischere Rekonstruktion des solaren Modulationspotentials ermöglicht, wobei ein wertvoller Proxy für die Sonnenaktivität zur Verfügung steht. Der in dieser Arbeit verwendete Datensatz des solaren Modulationspotentials geht mehrere Jahrtausende zurück. Deutlich zu sehen sind das Auftreten grosser solarer Minima (wie das Maunder Minimum) und grosser solarer Maxima (wie die jetzige Zeit). In dieser Arbeit wurde eine statistische Auswertung der Zeitreihe durchgeführt. Damit konnte die Lebenserwartung des momentan grossen solaren Maximum abgeschätzt werden. Es wird erwartet, dass es innerhalb von 15-36 Jahren zu Ende geht. Daraus wird gefolgert, dass Sonnenaktivität innerhalb der nächsten zwei Zyklen abnehmen wird. Eine weitere Auswertung erlaubt eine Voraussage über das Auftreten des nächsten Maunder Minimum.

Hier wird erwartet, dass rund um das Jahr 2100 ein grosses solares Minimum auftreten wird. Der Vergleich von Daten von kosmogene Radionukliden und Sonnenflecken deutet auf zwei unterschiedliche Dynamos in der Sonne hin. Wir stellen die Hypothese auf, dass es die Auskopplung zwischen diese zwei Dynamos, die Ursache für Grosse Minima ist.