Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 28 »Klimawandel im 20. und 21. Jahrhundert«, S. 111-121.
© 2005 by Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München – ISSN 0938-5851 – ISBN 3-89937-051-1

Wie stark beeinflusst die Sonne das Klima und den derzeitigen Klimawandel?

Sami K. Solanki*

Zusammenfassung

Die Strahlung der Sonne macht aus der Erde einen bewohnbaren Planeten. Fluktuationen bei der Sonnenhelligkeit beeinflussen deshalb wahrscheinlich das Klima auf der Erde, wobei es sich als schwierig erwiesen hat genau zu bestimmen, wie die Sonnenstrahlung schwankt und wie stark solche Schwankungen das Klima auf der Erde beeinflussen. Neue Daten und neue Analysemethoden haben über die vergangenen Jahre zu einem signifikanten Fortschritt geführt, wobei noch einiges offen ist und es weiterer Forschung bedarf. Der Artikel gibt einen Überblick der aktuellen Diskussion über den Einfluss der Sonne auf das Erdklima aus der Perspektive eines Sonnenphysikers und fasst den Stand der Erkenntnisse auf den relevanten Gebieten der Sonnenphysik zusammen.

Summary

How strongly are climate and the present climatic change influenced by the sun? Solar radiation turns the Earth into a habitable planet. Fluctuations in solar brightness therefore probably have an influence on the climate on Earth, although it proved to be difficult to determine how exactly solar radiation varies and how strongly these variations influence the climate. New data and methods of analysis have led to significant progress during the past years, although some questions are left open and need further research. The article gives a survey of the current discussion about the solar influence on Earth's climate from a solar physicist's point of view, and it summarizes the present level of knowledge about relevant topics in solar physics.

Einführung

Die Erde ist eine warme und gemütliche Wiege, die im kalten und größtenteils leeren Raum schwebt, der durch hochenergetische Teilchen und kurwellige Strahlung noch lebensfeindlicher wird. Zwei für das Überleben kritische Faktoren sind der Schutz durch die Erdatmosphäre und die Wärme, die von der Sonnenstrahlung herrührt. Da die Sonne der bei weitem größte Energielieferant zur Erdoberfläche ist, beeinflusst jede Schwankung ihres Strahlungsflusses die Energiebilanz der Erdoberfläche und der Atmosphäre. Änderungen im solaren Spektrum, insbesondere der UV-Strahlung, können diesen Einfluss durch ihre Auswirkung auf die Chemie der Stratosphäre erhöhen (oder dämpfen): am wichtigsten ist dabei die Balance zwischen Ozonbildung und -zerstörung (durch Strahlung jeweils verschiedener Wellenlängen verursacht). Schließlich kann

* Solanki, Sami K., Prof. Dr., Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Max-Planck-Straße 2, D-37191 Katlenburg-Lindau. E-Mail: solanki-office@linmi.mpg.de

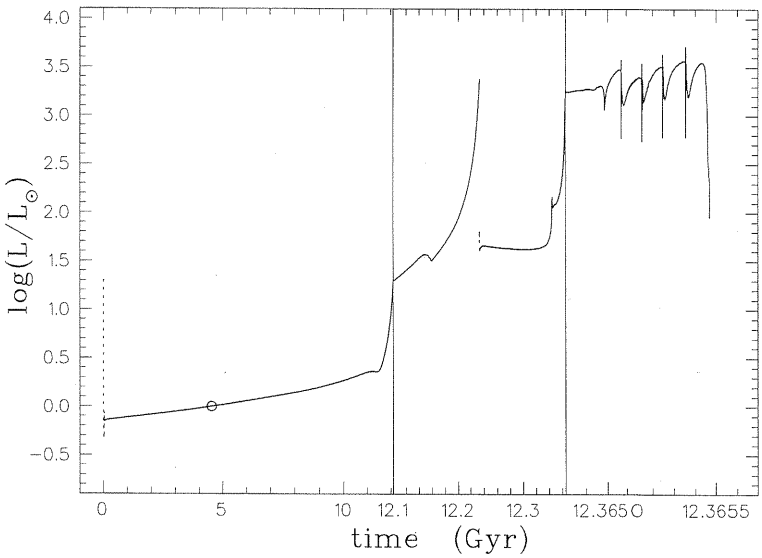

Abb. 1. Berechnete Luminosität der Sonne, auf den heutigen Wert normiert, als Funktion der Zeit dargestellt. Der gezeichnete Verlauf beginnt mit der Kontraktion der Sonne bis zur Hauptreihe (gepunktete Linie im mittleren Abschnitt) und endet mit der endgültigen Kontraktion in Richtung weißer Zwerg. Die drei verschiedenen Zeitskalen tragen der verschieden schnellen Evolution Rechnung (nach Sackmann et al. 1993).

die Sonne das Erdklima in anderer, komplexerer Art beeinflussen, z.B. durch Modulation des Flusses der kosmischen Strahlung, die, gemäß einem Vorschlag dänischer Kollegen, die Bildung von (vor allem tief liegenden) Wolken beeinflusst.

Aber wie stark variiert die Sonne und in welchem Umfang hat dies Auswirkungen auf das Erdklima? Es ist wichtig, eine klare Antwort auf diese Fragen zu finden, um den solaren Beitrag in die richtige Perspektive innerhalb der Debatte um die globale Klimaerwärmung zu setzen und insbesondere die Gewichtung in Relation zu dem vom Menschen verursachten Treibhauseffekt zu bestimmen. Zurzeit kann die Frage des Beitrags der Sonne zur globalen Erwärmung nur teilweise beantwortet werden, aber in den letzten Jahren wurden große Fortschritte erzielt. Ich möchte im Folgenden versuchen, einen kurzen Exkurs über den aktuellen Status aus Sicht eines Sonnenphysikers zu geben. Lassen Sie mich mit der Beschreibung der relevanten Eigenschaften der Sonne beginnen.

Solare Schwankungen

Es gibt zwei hauptsächliche Gründe für die Schwankungen der solaren Helligkeit: Einer ist die Evolution der Sonne, die durch Prozesse im Sonnenkern getrieben wird, der andere ist das Magnetfeld der Sonne oder besser, das Feld, das in der solaren Konvektionszone (d.h. im äußeren Teil des Sonneninneren) und in der Sonnenatmosphäre lokalisiert ist.

Die Sonne ist typisch für Sterne mit vergleichbarer Masse, Zusammensetzung und Alter. Sie liegt gegenwärtig ungefähr in der Mitte ihres 10 Milliarden Jahre dauernden Aufenthaltes auf der so genannten Hauptreihe, wo sie, ihrer Masse entsprechend, bei der Spektralklasse G2 liegt. Während dieser Zeit gewinnt die Sonne Energie durch die Fusion von Wasserstoffkernen in Heliumkerne. Es wird angenommen, dass die Sonne während dieser Zeit ihre Helligkeit annähernd verdoppelt und ihren Radius ebenfalls erheblich vergrößert. Die Evolution der Leuchtkraft der Sonne ist in Abbildung 1 dargestellt. Beim Verlassen der Hauptreihe beschleunigt sich die Evolution der Sonne, was zu einem schnellen Ansteigen und zu schnellen Fluktuationen ihrer Helligkeit und ihres Radius führt. Offensichtlich wird die Sonne schließlich die Fähigkeit der Erde

zerstören, Leben, so wie wir es kennen, zu beherbergen. Das liegt jedoch in weiter Ferne und muss uns heute noch keine Sorgen bereiten.

Aber was ist mit der Vergangenheit? Gemäß den meisten Evolutionsrechnungen war die Leuchtkraft der Sonne zu Beginn ihres Aufenthalts auf der Hauptreihe ungefähr 30 % niedriger als der aktuelle Wert. Das würde bedeuten, wenn es sonst keine Änderungen gegeben hätte, dass die Sonne damals nicht ausreichend Energie geliefert hätte, um die Erdoberfläche davor zu bewahren, größtenteils mit Eis überzogen zu sein. Da Eis fast die gesamte einfallende Strahlung reflektiert, würde diese vergrößerte Albedo es selbst der derzeitigen, hellen Sonne unmöglich machen, diesen Eispanzer abzuschmelzen. Die Tatsache, dass die Erde nicht mit Eis überzogen ist, legt nahe, dass sich irgendetwas anderes im Verlauf der Erdgeschichte geändert hat, oder dass die Evolutionsrechnungen revidiert werden müssen. Carl Sagan war unter den Ersten, die vorgeschlagen haben, dass die vermutliche Evolution der Zusammensetzung der Erdatmosphäre die Evolution der Sonnenleuchtkraft recht genau kompensiert hat. Die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre war bei der jungen Erde sehr viel größer, so dass die solaren Schwankungen und Änderungen der Treibhausgaskonzentration über Milliarden von Jahren das Erdklima in gleichen Maßen bestimmt haben.

Die andere hauptsächliche Größe, die zu Schwankungen der Helligkeit der Sonne führt, ist das Magnetfeld der Sonne. Es wird durch einen Dynamo erzeugt, der am unteren Rand der Konvektionszone beheimatet ist, also ungefähr bei 30 % der Distanz zwischen der Sonnenoberfläche und dem Sonnenkern. Die hauptsächlichen Faktoren, welche die Stärke und die Struktur des resultierenden Magnetfeldes bestimmen, sind die (differentielle) Rotation der Sonne und die (turbulente) Konvektion auf und unter der Sonnenoberfläche. Die differentiale Rotation erzeugt vorwiegend ein toroidales Feld nahe der unteren Grenze der Konvektionszone. Mit der Zeit wird dieses Feld durch die Scherströmung, welche mit der differentiellen Rotation einhergeht, verstärkt. Oberhalb einer bestimmten kritischen Stärke wird das Feld instabil und einzelne Schleifen beginnen, in Richtung der Sonnenoberfläche aufzusteigen. Sie treten schließlich durch die Oberfläche hindurch und bilden Bögen in der Sonnenatmosphäre. Zu diesem Zeitpunkt wird das Magnetfeld für Beobachtungen zugänglich. Die Wechselwir-

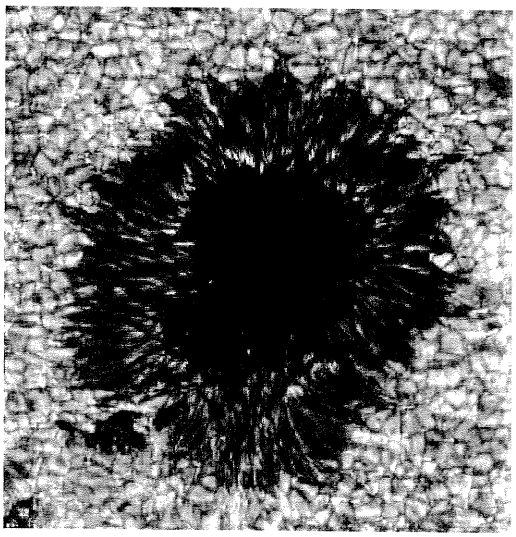

Abb. 2. Sonnenfleck und umgebende Photosphäre. Der innere, dunkle Teil wird Umbra genannt, der äußere gestreifte Teil ist die Penumbra. Die Erde hätte bequem im Fleck Platz. Der Sonnenfleck ist umgeben von Granulen, d.h. Konvektionszellen mit einem hellen Kern, in dem heißes Gas nach oben fließt, und dunklen Rändern, die aus kühlem, abströmendem Gas bestehen (Abb. freundlicherweise von T. Berger, Lockheed-Martin Solar and Astrophysics Lab. zur Verfügung gestellt).

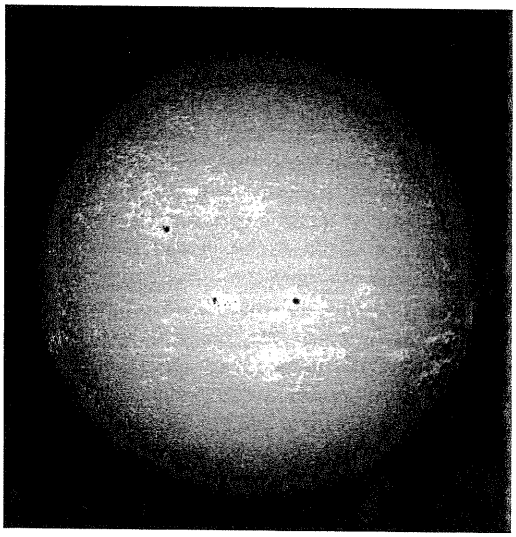

Abb. 3. Volle Sonnenscheibe, aufgenommen im Licht von einfach ionisiertem Kalzium. Die dunklen Stellen sind Sonnenflecken, die größeren hellen Flächen sind Sonnenfackeln und die kleinen hellen Stellen, die auf der gesamten Sonnenscheibe vorhanden sind, sind Netzwerkelemente.

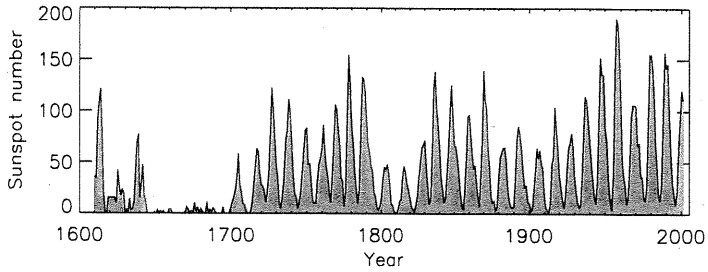

Abb. 4. Anzahl der Sonnenflecken im Jahresmittel, die seit der Erfindung des Teleskops aufgezeichnet wurden. Der Sonnenfleckenzyklus ist deutlich zu sehen. Der Zeitraum in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts, als die Sonne praktisch frei von Sonnenflecken war, wird als Maunder-Minimum bezeichnet.

kung mit der Konvektion führt zur Konzentration oder Bündelung des Feldes in so genannte Flussröhren. Die größten davon, die Sonnenflecken, haben Durchmesser, die dem Erddurchmesser entsprechen und als dunkle Stellen auf der Sonnenoberfläche sichtbar sind. Ein relativ symmetrischer Sonnenfleck wird in Abbildung 2 dargestellt. Die viel häufigeren kleineren Flussröhren, die als helle Punkte erscheinen, weisen Durchmesser von unter 300 km auf und werden als Magnetelemente bezeichnet. Konzentrationen in größerer Anzahl davon sind als helle Fackeln in den aktiven Gebieten sichtbar (wo ebenfalls die Sonnenflecken zu finden sind) und als ein Netzwerk, das sich über die gesamte Sonnenoberfläche erstreckt (Abb. 3).

Während die meisten Magnetfeldlinien, welche die Sonnenoberfläche durchstoßen, Bögen (loops) bilden und innerhalb einiger weniger Sonnenradien zur Sonne zurückkehren (sie bilden den so genannten geschlossenen magnetischen Fluss), wird ein kleiner Anteil durch den Sonnenwind in den interplanetaren und schließlich interstellaren Raum hinausgetragen (normalerweise offener magnetische Fluss genannt, mehr aus der eigensinnigen Warte der Sonnenphysiker, als mit der Absicht, die Maxwellschen Gesetze der Elektrodynamik in Frage zu stellen). Insbesondere erzeugen die geschlossenen Feldlinien eine große Anzahl von Phänomenen, wie z.B. Sonnenflecken, Fackeln, heiße koronale Bögen, Filamente und Protuberanzen, solare Eruptionen und die damit einhergehenden hochenergetische Strahlung und koronalen Massenauswürfe, um nur einige wenige zu nennen. Diese Phänomene werden unter dem Begriff Sonnenaktivität zusammengefasst.

Das Sonnenmagnetfeld und damit auch die dazugehörige Sonnenaktivität sind sehr stark zeitabhängig. Das am meisten hervorstechende Merkmal dieser Zeitabhängigkeit ist der solare Aktivitätszyklus mit einer ca. elfjährigen Periode. Dieser Zyklus wird durch die Anzahl der Sonnenflecken auf der Sonnenscheibe hervorragend illustriert. Diese Zahl verändert sich um das Zehnfache oder mehr zwischen Aktivitätsminimum und Maximum (Abb. 4). Gleichzeitig liefern die Sonnenflecken die längste direkte Aufzeichnung der Sonnenaktivität.

Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass einige Zyklen stärker sind als andere. Hinzu kommt, dass einige Zyklen länger sind als andere, obwohl diese Variationen nicht ausreichend groß sind, um sie aus der Abbildung deutlich erkennen zu können. In extremen Fällen werden die Zyklen so schwach, dass sie nicht mehr als solche zu erkennen sind. Dies war der Fall während des Maunder Minimums in der zweiten Hälfte des siebzehnten Jahrhunderts, als praktisch keine Sonnenflecken auf der Sonnenoberfläche auftraten. Das Maunder Minimum fiel übrigens mit der so genannten Kleinen Eiszeit in Europa zusammen, einer Zeit bitterer Kälte und großer Not, als die Themse regelmäßig gefror und die alpinen Gletscher tief in die Täler hinein wuchsen.

Die Aufzeichnung der Anzahl der Sonnenflecken und anderer, oft mehr indirekter Indikatoren des solaren Magnetismus laden zu einem Vergleich mit Klimaaufzeichnungen ein. Bei mehreren solcher Aufzeichnungen gibt es in der Tat wesentliche Zusammenhänge. Einer der auffälligsten wurde von Friis-Christensen und Lassen (1991) zwischen der Lufttemperatur über den Landmassen in der nördlichen Hemisphäre und der Länge der Sonnenfleckenzyklen gefunden (Abb. 5).

Wenn dieser Zusammenhang kein Zufallsprodukt ist, was bei Zeiträumen dieser Länge

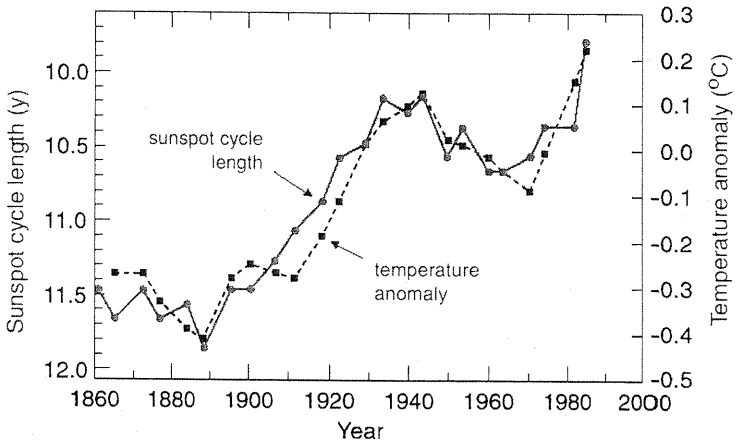

Abb. 5. Über jeweils elf Jahre gemittelte Lufttemperatur über den Landmassen auf der Nordhalbkugel, relativ zur Durchschnittstemperatur von 1951-1980 (■- - -■), und gefilterte Länge des Sonnenfleckenzyklus (●——●), aufgetragen gegen die Zeit (Friis-Christensen & Lassen 1994).

nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann, muss es einen physikalischen Zusammenhang mit einem unbekannten Mechanismus geben. Es lohnt sich, nach einem entsprechenden Mechanismus zu suchen, auch wenn spätere Arbeiten gezeigt haben, dass die tatsächliche Korrelation nicht so perfekt ist wie in Abbildung 5 dargestellt (Laut & Gundermann 2000). Die Abbildung deutet darauf hin, dass eine für das Klima relevante Form der solaren Schwankungen einen Zusammenhang mit der Länge des Sonnenzyklus haben sollte, ein Parameter, von dem früher nicht bekannt war, dass er eine bestimmende Rolle bei Schwankungen der Sonnenhelligkeit spielt. Die Formen der solaren Aktivität, die für das Klima relevant sein können, sind die Schwankungen der totalen und spektralen Irradianz (d.h. des Strahlungsflusses von oberhalb der Erdatmosphäre aus gesehen) und die Stärke des offenen Magnetfeldes der Sonne, das den Fluss der kosmischen Strahlung moduliert und damit bestimmt, wie viele dieser Teilchen die Erde erreichen.

Solare Irradianz

Wir betrachten nun eine dieser Formen der solaren Variabilität im Detail, nämlich die Fluktuationen der Helligkeit der räumlich nicht aufgelösten Sonne (der Sonne als Stern gesehen), wie sie oberhalb der Erdatmosphäre gemessen wird, die so genannte solare Irradianz.

Die totale solare Irradianz (d.h. die Irradianz, integriert über alle Wellenlängen), die seit 1978 unter Verwendung von Radiometern an Bord von Satelliten mit ausreichender Genauigkeit gemessen wird, um wesentliche solare Schwankungen zu entdecken, ist in Abbildung 6 dargestellt. Die dort gezeichnete Kurve ist aus verschiedenen Datensätzen zusammengesetzt, weil kein Instrument die gesamte Zeitdauer überlebt hat. Zusätzlich zum elfjährigen Zyklus mit einer Amplitude von grob 0,1 % der totalen Strahlungsintensität gibt es wesentlich kürzere Fluktuationen, die in dem Diagramm den Eindruck von Rauschen erwecken. Diese Fluktuationen sind hauptsächlich solaren Ursprungs. Die Amplitude dieses »Rauschens« ändert sich in Phase mit dem Sonnenzyklus, und die Hauptexkursionen zeigen alle nach unten, was einer kurzfristigen Verdunklung entspricht. Eine solche Verdunklung ist in einem vergrößerten horizontalen Maßstab in Abbildung 7 dargestellt, zusammen mit Bildern der Sonnenscheibe an fünf Tagen. Auf diesen Bildern ist ein Paar kleiner Sonnenflecken zu sehen, welche die Sonnenscheibe überqueren und die Ursache für die Verdunklung sind. Die anderen Verdunklungen in Abbildung 6 stehen ebenfalls im Zusammenhang mit Sonnenfleckengruppen, die die Sonnenscheibe überqueren. Sonnenflecken sind dunkel, weil ihr starkes Magnetfeld die Konvektion unterdrückt, welche unterhalb der Sonnenoberfläche die vorherrschende Form des Energietransports darstellt. Der vertikale Transport durch Strahlung ist zu inef-

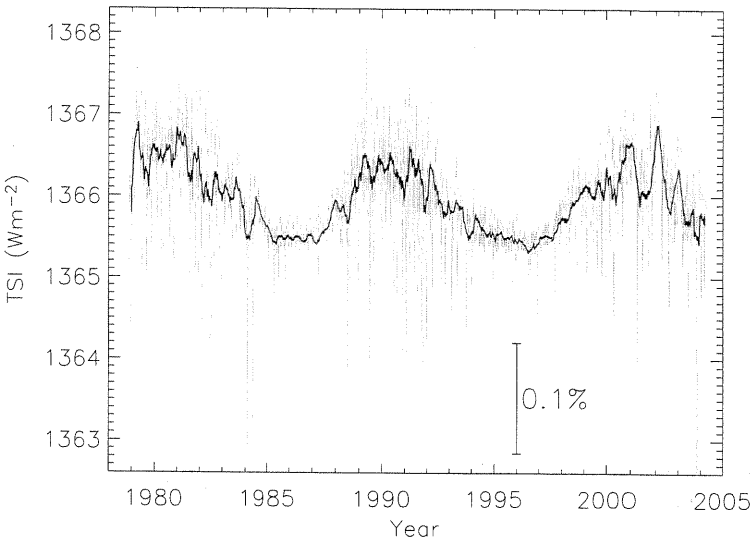

Abb. 6. Zusammengesetze Zeitreihe der totalen solaren Irradianz (Bestrahlungsstärke), die fast drei Sonnenzyklen abdeckt, gemessen mit Radiometer, die auf Raumsonden mitgeführt wurden. Daten von vier Instrumenten wurden verwendet. Details zur Zusammensetzung der verschiedenen Datensätze werden in Fröhlich (2003) angegeben.

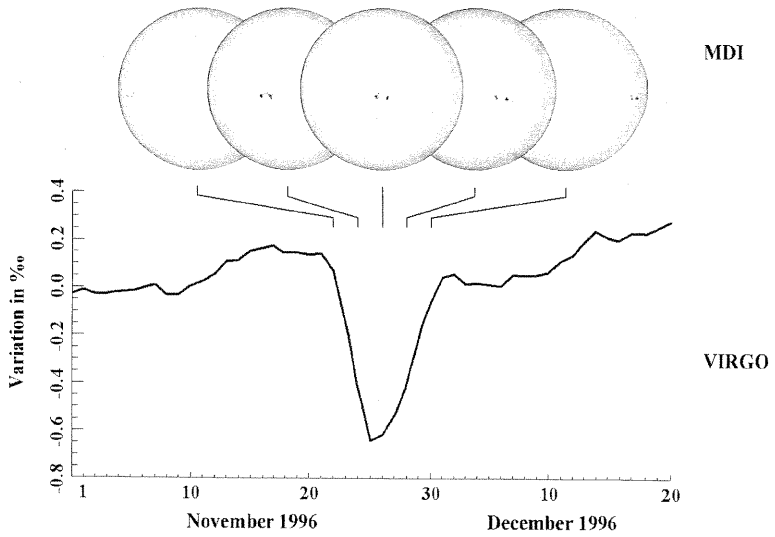

Abb. 7. Unten: Ausschnitt aus der Zeitreihe der von VIRGO auf der Raumsonde SOHO gemessenen solaren Bestrahlungsstärke. Oben: Aufnahmen der Sonne in »weißem Licht« an fünf ausgewählten Tagen. Zu beachten sind die Sonnenflecken auf der Sonnenscheibe, welche die vorübergehende Absenkung der Sonnenhelligkeit bewirken.

fizient, um den Verlust des konvektiven Transports zu kompensieren, und Sonnenflecken sind zu groß, als dass der seitlich einfließende Strahlungsstrom einen signifikanten Effekt auf ihre Helligkeit hat.

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen, dass die durch einen Sonnenfleck blockierte Energie innerhalb der Sonne gespeichert wird, um über einen viel längeren Zeitraum abgegeben zu werden als die Lebensdauer eines Flecks oder auch

die Länge des Sonnenzyklus. Eine derartige zeitweilige Speicherung von Wärme ist nur möglich, weil die Konvektionszone eine sehr hohe thermische Leitfähigkeit und Wärmekapazität besitzt, wie von Spruit (1982) gezeigt wurde. Diese Kombination bewirkt, dass Wärme, die durch einen Sonnenfleck daran gehindert wird, an die Oberfläche zu gelangen, sich schnell über die gesamte Konvektionszone verteilt (wegen der hohen thermalen Leitfähigkeit und der kurzen thermischen Zeitskala), deren Temperatur nur unwahrnehmbar ansteigt (wegen der großen Wärmekapazität), so dass alles in allem die solare Helligkeit abnimmt. Die gespeicherte Wärme wird schließlich abgestrahlt, aber nur sehr graduell über einen Zeitraum von 10^5 Jahren (entsprechend der Kelvin-Helmholtz-Relaxationszeit der Konvektionszone).

Dieser wichtige Einblick führt zur nächsten Frage: Wenn sich die Sonne bei dem Vorhandensein eines Sonnenflecks verdunkelt, warum ist sie dann im Durchschnitt heller beim Aktivitätsmaximum, d.h. wenn mehr (dunkle) Sonnenflecken auf der Sonnenscheibe auftreten, wie aus Abbildung 8 ersichtlich ist? Wissenschaftler argumentieren, dass das Magnetfeld die Konvektion und/oder andere Prozesse im Sonneninneren ausreichend beeinflusst, um den Energiefluss zu Zeiten großer solarer Aktivität zu vergrößern. Kürzlich erschienene Arbeiten unterstützen jedoch die Ansicht, dass es das Magnetfeld an der Sonnenoberfläche ist, das diese Helligkeitsänderungen hervorbringt (z.B. Krivova et al. 2003). Die Grundlage für diese Hypothese liegt in der Tatsache, dass Sonnenflecken nur die größten und bei weitem die seltensten Beispiele von magnetischen Strukturen in der solaren Photosphäre sind (sog. magnetische Flussröhren). Die kleineren Flussröhren, welche die Fackeln und das Netzwerk bilden, sind hell (siehe Abb. 3). Ähnlich wie Sonnenflecken verhindern sie die Konvektion in ihrem Inneren, aber sie sind ausreichend schmal, so dass Strahlung, die von den Seiten in die stark evakuierten Flussröhren einfließt, mehr als die Verluste ausgleicht. Die Anzahl dieser kleinen magnetischen Elemente erhöht sich parallel zur Zahl der Flecken ebenfalls vom Sonnenaktivitätsminimum zum -maximum. Die von diesen Elementen bedeckte Fläche nimmt sogar in einem bei weitem größeren Ausmaß zu als die durch Sonnenflecken bedeckte Fläche. Folglich übersteigt auf längeren Zeitskalen der durch die Fackeln verursachte Helligkeitsanstieg die Ab-

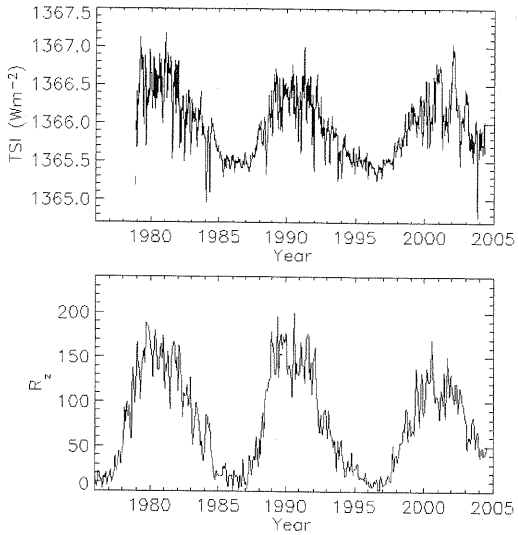

Abb. 8. Oben: Dieselbe Aufzeichnung der solaren Bestrahlungsstärke wie in Abbildung 6, aber jetzt nach Bildung eines Mittelwertes der Daten über einen Monat. Unten: Eine ähnlich geglättete Darstellung der Anzahl von Sonnenflecken (Abb. freundlicherweise von N. A. Krivova zur Verfügung gestellt).

dunklung durch die Sonnenflecken. Die zentrale Rolle des Magnetfelds bei der Erzeugung der Helligkeitsschwankungen wird dadurch erhärtet, dass die Messwerte durch ein einfaches Dreikomponentenmodell reproduziert werden können, wobei die einzelnen Komponenten die ruhige Sonne, Fackeln und Sonnenflecken repräsentieren. Abbildung 9 zeigt einen Vergleich zwischen gemessener und rekonstruierter solarer Irradianz. Die ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Modell und Daten ist beachtenswert. Dies gilt sowohl auf kurzen Zeitskalen, auf denen die Sonne rotiert und sich aktive Regionen entwickeln (Abb. 9 unten), wie auch auf dem längeren Zeitmaßstab des Sonnenzyklus (Abb. 9 oben). Das legt nahe, dass die Grundprämisse, die einem solchen Modell zu Grunde liegt, korrekt ist und dass es in der Tat die Manifestationen des Magnetfeldes auf der Sonnenoberfläche sind (d.h. Sonnenflecken und Sonnenfackeln), die für die Schwankungen der Strahlungsintensität verantwortlich sind.

Es genügt jedoch nicht, nur die Prozesse zu verstehen, die zu Schwankungen über den Sonnenzyklus führen. Zum Beispiel bewirkt eine rein periodische Schwankung der Helligkeit keine langfristige Änderung der Sonnenhelligkeit und

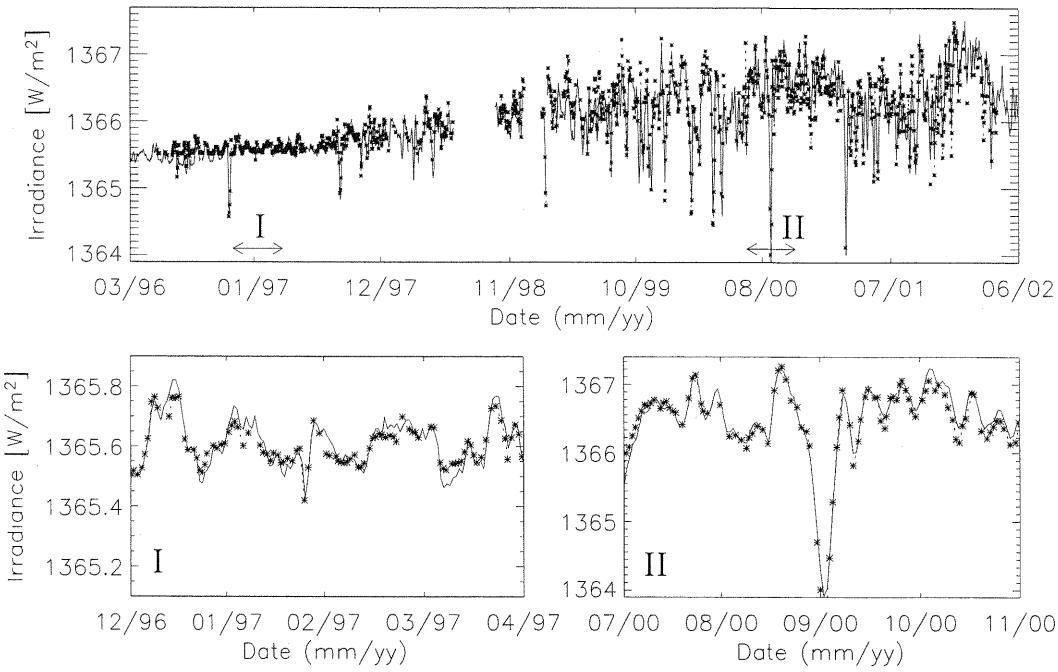

Abb. 9. Solare Irradianz, gemessen durch VIRGO (durchgezogene Kurve) und rekonstruiert anhand eines Modells, bei dem angenommen wird, dass das Magnetfeld auf der Sonnenoberfläche für die gemessenen Schwankungen verantwortlich ist. Oben: Zeitraum vom letzten Aktivitätsminimum bis zum letzten Aktivitätsmaximum. Unten: Vergrößerte Darstellungen zweier kürzerer Zeiträume, im oberen Bild durch die römischen Zahlen markiert (aus Krivova et al. 2004).

leistet somit auch keinen Beitrag zur globalen Erwärmung. Zwar ist der Sonnenzyklus nicht ganz periodisch und die Amplitude unterlag im Verlauf der letzten Jahrhunderte beträchtlichen Schwankungen, aber das alleine bringt eine Erhöhung von weniger als 0,05 % bei der solaren Irradianz über die letzten 150 Jahre hervor. Dies ist wahrscheinlich nicht ausreichend, um das Klima signifikant zu beeinflussen, obwohl Mechanismen vorstellbar sind, welche den Beitrag der Sonne so verstärken, dass auch ein solch kleiner Anstieg klimarelevant sein könnte. Diese Mechanismen sind allerdings noch nicht ausgearbeitet und somit unsicher. Gibt es also irgendeinen Grund zu glauben, dass die Sonne über die letzten paar Jahrhunderte größere Schwankungen gezeigt hat als diese? Hier ist die Situation weniger klar. Vergleiche mit anderen Sternen geben ein uneinheitliches Bild. Ältere Arbeiten gaben Hinweise darauf, dass andere Sterne, welche ähnliche Zyklen zeigen wie die Sonne, aktiver sind als Sterne, die kein zyklisches Verhalten an den Tag legen, d.h. in einem dem Maunder Minimum ähnlichen Zustand sind (Baliunas & Jastrow 1990). Eine neue Arbeit kann diesen Zusammenhang jedoch nicht bestätigen. Um ein genaues Bild zu erhalten, bedarf es weiterer Forschung (Giampapa 2003).

Immerhin eine wichtige Voraussetzung für die längerfristige Änderung der Sonnenhelligkeit wird durch die Tatsache erfüllt, dass das Magnetfeld der Sonne bei einem Aktivitätsminimum nicht verschwindet, d.h. wenn es keine Flecken auf der Sonnenoberfläche gibt. Ein Hintergrund von magnetischem Fluss, der teilweise im magnetischen Netzwerk konzentriert ist, bleibt weiterhin vorhanden. Es gibt Hinweise, dass sich dieser magnetische Hintergrund mit der Zeit ändert. Der stärkste Hinweis in dieser Richtung kommt von der Erhöhung des geomagnetischen AA-Index über die letzten 150 Jahre, der von Lockwood et al. (1999) verwandt wurde, um das interplanetare Feld, welches in engem Zusammenhang mit dem offenen magnetischen Fluss der Sonne steht, zu rekonstruieren. Ihre Rekonstruktion zeigt, dass der offene Fluss der Sonne sich

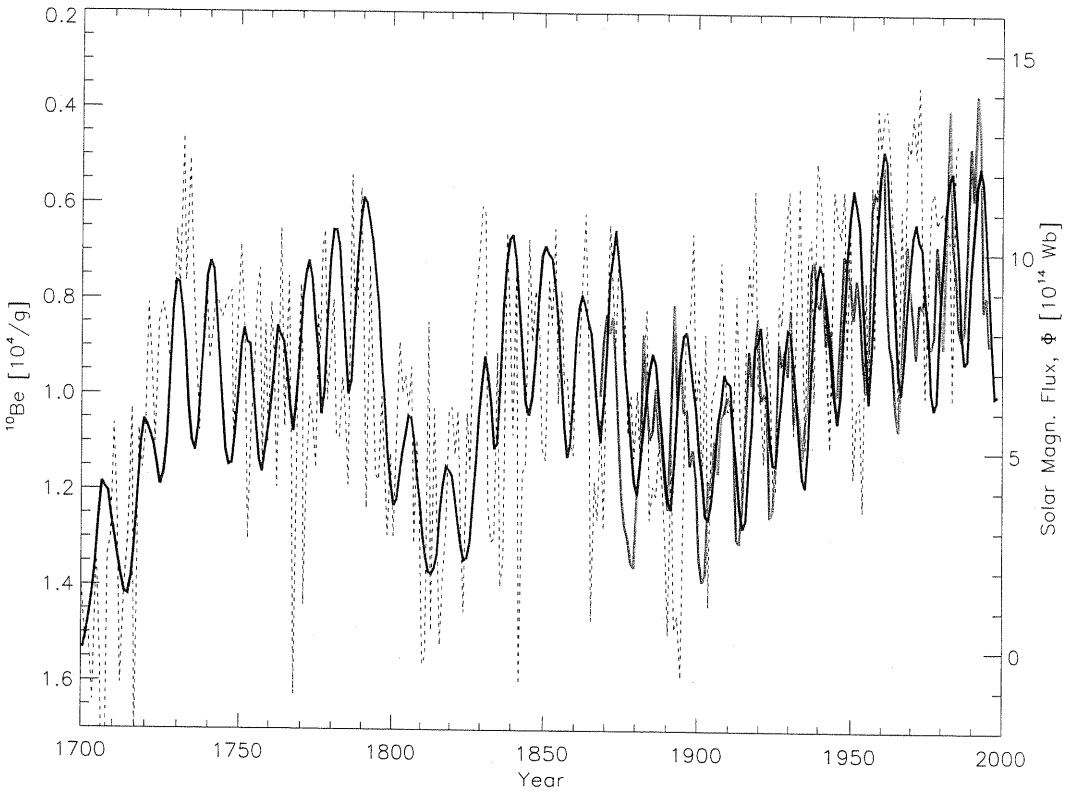

Abb. 10. Entwicklung des offenen magnetischen Flusses an der Sonnenoberfläche seit dem Ende des Maunder Minimums im Jahr 1700. —— Mit dem Modell von Solanki et al. (2000) berechnete Werte; —— Rekonstruktionen durch Lockwood et al. (1999) auf der Grundlage von geomagnetischen Indizes; ----- ^{10}Be-Konzentration in den Eiskernen (entsprechend der linken, invertierten Skala auf der Y-Achse, Beer et al. 1990).

im Verlauf des letzten Jahrhunderts verdoppelt hat.

Es ist überraschend, wie gut ein relativ einfaches Modell die Rekonstruktion von Lockwood et al. (1999) reproduziert und gleichzeitig die Evolution des totalen magnetischen Flusses der Sonne liefert (Solanki et al. 2000, 2002). Die wichtigste Eingabe in das Modell besteht darin, dass, obwohl Aktivitätszyklen, die z.B. durch Sonnenflecken beschrieben werden, sich nicht überlappen, dies beim Magnetfeld der Fall ist. In der Tat ist immer noch ein beträchtlicher Teil des magnetischen Flusses vom alten Zyklus auf der Sonnenoberfläche vorhanden, wenn der Fluss vom neuen Zyklus auszubrechen beginnt. Diese Überlappung bewirkt, dass der magnetische Fluss auf der Sonne nie komplett zerfällt, es sei denn, es gibt eine große Lücke zwischen zwei Zyklen, ähnlich dem Maunder Minimum. In Abbildung 10 werden die Voraussagen des Modells von Solanki et al. (2000) für den offenen magnetischen Fluss sowohl mit der Rekonstruktion von Lockwood et al. (1999) verglichen wie auch mit der Konzentration von ^{10}Be im Grönland-Eis. Dieses radioaktive Isotop wird durch die Wechselwirkung zwischen kosmischer Strahlung und den Luftmolekülen in der oberen Atmosphäre gebildet. Seine Produktionsrate in historischen Zeiten kann aus den Eiskernproben großer Eismassen, z.B. Grönland oder der Antarktis, entnommen werden. Da die Intensität der kosmischen Strahlung durch Prozesse moduliert wird, die mit der Stärke des offenen Sonnenmagnetfelds skalieren, wird erwartet, dass die Bildung von ^{10}Be ungefähr der Stärke des offenen Sonnenflusses folgt. Die gute Übereinstimmung zwischen den drei Kurven ist beachtenswert (im Falle des ^{10}Be ist wegen des hochfrequenten Rauschens in den Daten die Übereinstimmung auf längeren Zeitskalen besser). Ein interessanter Aspekt dieses Modells ist,

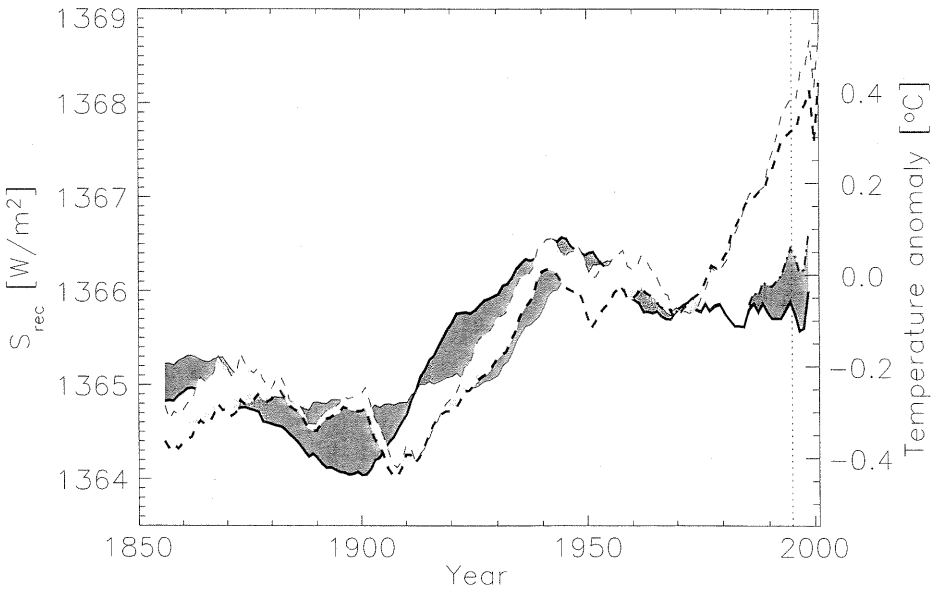

Abb. 11. Verlauf von zwei Rekonstruktionen der totalen solaren Irradianz (in W/m²), kombiniert mit Messungen (soweit verfügbar) über die letzten ca. 150 Jahre (sie umranden den dunklen Bereich), sowie von zwei Klimaaufzeichnungen (in °C; sie umranden den hellgrauen Bereich) (aus Solanki & Krivova 2003).

dass sowohl die Evolution des offenen als auch des totalen solaren magnetischen Flusses der Kombination aus Sonnenzyklus-Amplitude und -Länge folgt. Dies ist der erste physikalisch begründete Hinweis, dass die Zykluslänge, die mit Klimaindikatoren gut korreliert (siehe Abb. 5) in der Tat die Helligkeit der Sonne beeinflussen kann, ein Parameter, der einen direkten Bezug zum Klima haben könnte. Eine Unsicherheit bleibt die Größe des Helligkeitsanstiegs der Sonne in den letzten drei Jahrhunderten, seit dem Maunder-Minimum.

Änderungen des Sonnenspektrums

Mit Hilfe des totalen und offenen magnetischen Flusses und durch historische Aufzeichnungen der Anzahl von Sonnenflecken und anderer relevanter Größen ist es möglich, nicht nur die totale Irradianz der Sonne und ihre Schwankungen über die letzten paar Jahrhunderte zu rekonstruieren, sondern auch Änderungen im solaren Spektrum (insbesondere der Helligkeit der Sonne im UV) wie auch im Fluss der kosmischen Strahlung während dieser Periode. Bei allen diesen Größen, die verschiedene Pfade repräsentieren, über welche die Sonne das Klima beeinflussen könnte, hat sich gezeigt, dass sie sich in ähnlicher Weise entwickeln. Im welchem Umfang sie sich tatsächlich auf das Klima auswirken, ist immer noch Gegenstand der Diskussion, wobei ein beträchtlicher Arbeitsaufwand erforderlich sein wird, um die Beiträge der verschiedenen Mechanismen festzulegen. Als Illustration ist es informativ, solare und klimatische Zeitreihen zu vergleichen. Wenn sie ähnlich sind, beweist dies nicht, dass die Sonne Klimaänderungen verursacht, aber wenn sie wesentlich voneinander abweichen, erlaubt es, Grenzen für den Einfluss der Sonne zu setzen. In diesem Sinne wird in Abbildung 11 die totale Irradianz seit 1850 mit Klimaaufzeichnungen verglichen. Es ist zu beachten, dass die gezeichneten Kurven mit einem elf Jahre breiten Filter geglättet worden sind, um den Sonnenzyklus wegzufiltern. Die dunkelgraue Fläche zwischen den Irradianzkurven repräsentiert sehr grob die Unsicherheit bei der Rekonstruktion der Irradianz. Diese Fläche liegt zwischen zwei Rekonstruktionen, die auf unterschiedlichen Annahmen beruhen. Der hellgraue Teil markiert den Unterschied zwischen der globalen Temperatur und derjenigen der nördlichen Hemisphäre. Offensichtlich verlief in der Zeit vor etwa 1980 die solare Strahlungsintensität im Großen und Ganzen ungefähr parallel zur

Erdtemperatur und eilte ihr sogar etwas voraus.

Dies lässt einen kausalen Zusammenhang zwischen beiden Größen zu und unterstützt die Ansicht, dass die Sonne einen wichtigen, möglicherweise dominierenden Einfluss auf unser Klima in der Vergangenheit hatte. Ein Beweis dafür ist es jedoch nicht. Andere beeinflussende Faktoren zu Klimaschwankungen sind unter anderem vulkanische Aktivität und der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt. Nach 1980 jedoch zeigt die Erdtemperatur einen bemerkenswert steilen Anstieg, während sich die Helligkeit der Sonne kaum ändert (Abb. 11). Somit kann die Sonne nicht die dominante Quelle für diesen letzten Temperaturanstieg sein. Der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt ist die offensichtlichste Alternative. Die UV-Strahlungsintensität und der kosmische Strahlungsfluss verhalten sich ähnlich wie die Sonnenhelligkeit und führen zur gleichen Schlussfolgerung.

Ein weiterer Hinweis dafür, dass die Sonne für einen Teil der markanten globalen Erwärmung der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts verantwortlich war, kommt von einer Rekonstruktion der Anzahl der Sonnenflecken in den letzten 1150 Jahren (Usoskin et al. 2003). Diese basiert auf ^{10}Be-Daten und zeigt, dass die Sonne in den letzten 60 Jahren aktiver war als in den ca. 1100 Jahren zuvor. Ein Vergleich der Anzahl der Sonnenflecken mit der Erdtemperatur zeigt, dass beide Größen dieselbe Tendenz zeigen, nämlich eine langsame Abnahme über ca. 1000 Jahre, gefolgt von einem steilen Anstieg in den letzten 100-200 Jahren. Allerdings ändert dieses Resultat nichts an der Tatsacht, dass in den letzten drei Jahrzehnten die Sonne weniger als 30 % zur globalen Erwärmung beigetragen hat. Die Zeitreihe der Anzahl der Sonnenflecken ist kürzlich von Solanki et al. (2004) anhand des ^{14}C-Gehalts in Baumringen auf 11 400 Jahre ausgedehnt worden. Die erweiterte Zeitreihe zeigt, dass man über 8000 Jahre in die Vergangenheit zurückgehen muss, um eine Episode ähnlich starker Sonnenaktivität zu finden wie in den letzten 60 Jahren.

Danksagung

Für die Bereitstellung von einigen Abbildungen bin ich Natalie Krivova zum Dank verpflichtet.

Literatur

Baliunas, S. L. & R. Jastrow. 1990. Evidence for long-term brightness changes of solar-type stars. – Nature, 348: 520-523.

Beer, J., A. Blinov, G. Bonani, H. J. Hofmann & R. C. Finkel. 1990. Use of Be-10 in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. – Nature, 347: 164-166.

Friis-Christensen, E. & K. Lassen. 1994. Solar Activity and Global Temperature. – In: Pap, J. M., C. Fröhlich, H. S. Hudson & S. Solanki (eds.): Proceedings from IAU Colloquium 143: The Sun as a Variable Star: Solar and Stellar Irradiance Variations. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 339.

Fröhlich, C. 2003. Solar irradiance variations. – In: Wilson, A. (ed.): ESA SP-535: Solar Variability as an Input to the Earth's Environment. ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, pp. 183-193.

Giampapa, M. 2003. The Suns of M67. – In: Brown, A. et al. (eds.): Proceedings 12th Cool Stars Workshop: The Future of Cool Star Astrophysics. Univ. Colorado Press, pp. 91-96.

Krivova, N. A., S. K. Solanki, M. Fligge & Y. C. Unruh. 2003. Reconstruction of solar irradiance variations in cycle 23: Is solar surface magnetism the cause? – Astronomy & Astrophysics, 399: L1-L4.

Laut, P. & J. Gundermann. 2000. Solar cycle lengths and climate: A reference revisited. – J. Geophys. Res., 105: 27489-27492.

Lockwood, M., R. Stamper & M. N. Wild. 1999. A doubling of the sun's coronal magnetic field during the past 100 years. – Nature, 399: 437-439.

Sackmann, I.-J., A.I. Boothroyd & K. E. Kraemer. 1993. Our Sun. III. Present and Future. – Astrophysical Journal, 418: 457-468.

Solanki, S. K. & N. A. Krivova. 2003. Can solar variability explain global warming since 1970? – J. Geophys. Res. (Space Physics), 108: 1200 doi:10.1029/2002JA009753, 2003.

Solanki, S. K., M. Schüssler & M. Fligge. 2000. Evolution of the Sun's large-scale magnetic field since the Maunder minimum. – Nature, 408:, 445-447.

Solanki, S. K., M. Schüssler & M. Fligge. 2002. Secular variation of the Sun's magnetic flux. – Astronomy & Astrophysics, 383: 706-712.

Solanki, S. K., I. G. Usoskin, B. Kromer, M. Schüssler & J. Beer. 2004. Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11 000 years. – Nature, 431: 1084-1087.

Spruit, H. C. 1982. Effect of spots on a star's radius and luminosity. – Astronomy & Astrophysics, 108: 348-355.

Usoskin, I. G., S. K. Solanki, M. Schüssler, K. Mursula & K. Alanko. 2003. Millennium-Scale Sunspot Number Reconstruction: Evidence for an Unusually Active Sun since the 1940s. – Phys. Rev. Lett., 21: id. 211101.

Diskussion

J. Heintzenberg: Sie haben sich bewusst von allen atmosphärischen Spekulationen zurückgehalten. Ich möchte Sie trotzdem bitten, mir bei der Deutung von glaziologischen Ergebnissen zu helfen, die mir schon seit 10 Jahren im Kopf herumgehen. Die Mineralstaubdaten aus dem Grönlandeisbohrkern, die Ram et al. 1997 analysiert haben[1], zeigen 100 000 Jahre zurück einen wunderschönen elfjährigen Zyklus. Dem stehe ich als Meteorologe hilflos gegenüber.

S. Solanki: Die Daten kenne ich nicht, werde sie mir aber gerne ansehen.

D. Herm: Dass das Magnetfeld der Sonne in seinen Variationen auch Einfluss auf das Magnetfeld der Erde hat, können wir in der Erdgeschichte öfters nachweisen. Im Bereich der letzten Kaltzeiten vor 1,8 Millionen Jahren sehen wir z.B. den Olduvai-Event in der Paläomagnetik.

S. Solanki: Ein Großteil des Einflusses auf das Erdmagnetfeld kommt von den koronalen Massenauswürfen und ist im Allgemeinen sehr kurzzeitig, d.h. der Spuk ist nach kurzer Zeit vorbei. Es gibt allerdings auch die längerfristigen Änderungen des offenen magnetischen Flusses der Sonne, so wie von Lockwood et al. (1999) festgestellt[2]. Inwieweit solche Änderungen das Erdmagnetfeld langfristig beeinflussen, ist mir nicht bekannt.

H. Graßl: Sie haben ^{10}Be als einen guten Indikator gewählt. Es ist ja immer schlecht, wenn man sich nur auf einen einzigen Parameter stützt. Wenn Sie weiter zurückgehen, könnten Sie auch ^{14}C verwenden. Was könnte man daneben noch zur Stützung Ihrer Aussagen verwenden?

S. Solanki: ^{14}C ist der offensichtliche Kandidat, der von uns auch schon analysiert worden ist. Die Resultate sind fast gleich wie für ^{10}Be, aber wir können viel weiter zurückrechnen, bis zum Ende der Eiszeit. Leider ist die gegenwärtige Episode hoher Aktivität bei ^{10}Be ein einmaliger Event. Wir müssten eigentlich einen zweiten Event haben, um zu wissen, ob die Berechnungen wirklich verlässlich sind. Geht man beim ^{14}C etwa 8000-9000 Jahre zurück, so gibt es auch wieder Perioden mit ähnlicher Sonnenaktivität wie jetzt. Wir haben einige dieser Perioden festgestellt, sie dauern aber meistens nicht sehr lange[3].

F. Arnold: Wie groß sind beim Fluss der kosmischen Strahlung die prozentualen Variationen im Vergleich zum sichtbaren Licht?

S. Solanki: Bei der kosmischen Strahlung liegt die Variation im Bereich mehrerer Prozent, beim sichtbaren Licht bei 0,1 %.

D. Koelle: Haben Sie auch andere, längerfristige Zyklen der Solaraktivität festgestellt?

S. Solanki: Die »Zyklologie« ist ein beliebtes Thema. Der berühmteste Zyklus nebst dem 11-jährigen ist der 90- oder 100-jährige Gleissberg-Zyklus, aber es gibt auch einen 200-jährigen und einen 600-jährigen Zyklus. Je länger die Zyklen, umso schwieriger wird es, sie genau zu bestimmen.

1 Ram, M., M. Stolz & G. Koenig. 1997. Eleven year cycle of dust concentration variability observed in the dust profile of the GISP2 ice core from Central Greenland: Possible solar connection. – Geophys. Res. Lett., 24: 2359-2362.

2 Lockwood, M., R. Stamper & M. N. Wild. 1999. A doubling of the sun's coronal magnetic field during the past 100 years. – Nature, 399: 437-439.

3 Solanki, S. K., I. G. Usoskin, B. Kromer, M. Schüssler & J. Beer. 2004. Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11 000 years. – Nature, 431: 1084-1087.