Mitteilungsblätter der
Astronomischen Arbeitsgruppe Laufen e.V.

Ausgabe 7 — Juli 1993

Editorial ... oder ... eine kleine Revolution

Man hält es nicht für möglich. Nein, ehrlich, wir waren echt perplex. Wir haben nicht nur den langersehnten *ersten* Leserbrief bekommen, wir haben auch eine ganze Reihe „Neuautoren“, die so neu freilich nicht sind. Eigentlich haben fast alle schon in einer unserer früheren Ausgaben „publiziert“.

Auch in dieser Ausgabe haben wir versucht, einige der Anregungen, die uns vor allem mündlich zugetragen wurden, umzusetzen. Nach wie vor ein Problem haben wir mit dem Niveau der theoretischen Beiträge. Jedem können wir es leider nicht recht machen. Trotzdem wollen wir versuchen, eine möglichst große Bandbreite anzubieten. Es wird vermutlich des öfteren vorkommen, daß nicht jeder alles versteht. Wir bemühen uns jedoch, die Artikel so zu verfassen, daß man auch dann eine Vorstellung vom Inhalt bekommen kann, wenn man nicht alle Details versteht. Will jemand mehr zu einem bestimmten Thema erfahren, so möchten wir hiermit auffordern, mit den Autoren direkt in Kontakt zu treten. Anfragen können aber auch als Leserbrief eingereicht werden (Wir freuen uns wirklich über alle Post). Wir haben allen größeren Artikeln eine Zusammenfassung vorangestellt. In dieser kurzen Inhaltsangabe wird zum Teil wild mit Fachausdrücken um sich geworfen. Das soll bitte niemanden von der Lektüre dieser Artikel abhalten. Die meisten Ausdrücke werden im Text (hoffentlich ausreichend) erläutert.

In dieser Ausgabe gibt es auch wieder einmal Vereinsinterna zu lesen. Gerade das halten wir für sehr wichtig, denn schließlich wollen wir ja ein Forum für alle Belange des Vereins sein. Auch sehr gefreut haben wir uns über die Beobachtungshinweise und -projekte.

Immer noch. Immer noch feilen wir an unserem Layout. Wir heißt in diesem Fall vor allem Andi Härpfer, der sich langsam zum Layout-Profi entwickelt.

Immer noch. Immer noch haben wir Finanzierungsprobleme. Mit ständig zunehmendem Umfang steigen auch die Kopierkosten. Zudem wollen immer mehr Leute ein Exemplar dieses wunderschönen Magazins. Und mehr Seiten multipliziert mit einer höheren Auflage ist gleich immer teuerer. Im Moment ist noch keine Lösung dieses Problems in Sicht, aber auf der nächsten Mitgliederversammlung wird uns bestimmt etwas dazu einfallen.

Immer noch. Immer noch habe ich einen Schluß gefunden, so auch hier. *Schluß.*

Euer Andi Kronawitter

Interna

In eigener Sache

Ursprünglich waren für diese Ausgabe der Mitteilungsblätter ein Artikel zur Sternspektroskopie, sowie eine ausführliche Abhandlung der Supernova 1993j in NGC3031 geplant. Aufgrund zeitlicher Engpässe des Autors konnte jedoch der Beitrag zur Spektroskopie nicht rechtzeitig fertiggestellt werden. Die Helligkeitsdaten der Supernova sind noch nicht vollständig ausgewertet, außerdem liegen noch keine Spektren zu den einzelnen Entwicklungsstadien vor. Mit dem Artikel zur SN 1993j darf jedoch in der nächsten Ausgabe der Mitteilungsblätter gerechnet werden; der Artikel über Grundlagen der Sternspektroskopie wird aufgrund der geltenden Längenbeschränkung (siehe dazu auch unten) an dieser Stelle überhaupt nicht erscheinen.

Als kleine Entschädigung gibt's dafür in den Kurzmitteilungen eine Zusammenfassung der wichtigsten Meldungen bzgl. SN 1993j, und hier eine provisorische Lichtkurve um das Maximum und ein Photo der Supernova.

A. Härpfer

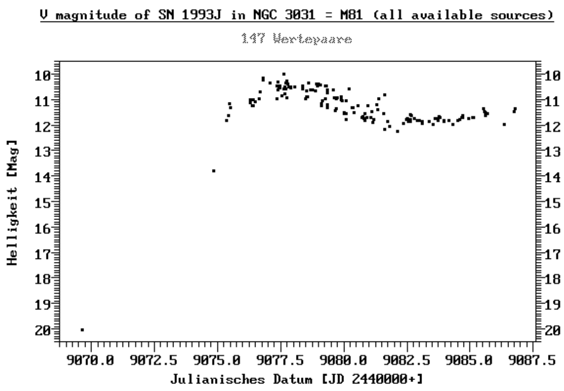

Abb. 1: Eine vorläufige Lichtkurve der Supernova 1993j. Die Werte in der Lichtkurve sind allerdings mit Vorsicht zu genießen; eine endgültige Auswertung steht noch aus.

Protokoll der ordendlichen Mitgliederversammlung am 10. Juli 1993

Anwesend:

Tassilo Bohm, Klaus Eder, Andreas Härpfer, Johann Kehl, Otto Pilzer, Michael Sturm (4 Vorstands- und 2 aktive Mitglieder)

Tagesordnung:

1. Vereinsaktionen
   - Anschaffung von Kartenmaterial
   - Finanzierung der Mitteilungsblätter
   - Workshop IWAA'94
   - SMV Tag des Gymnasium Laufen
   - Photographische Ergebnisse

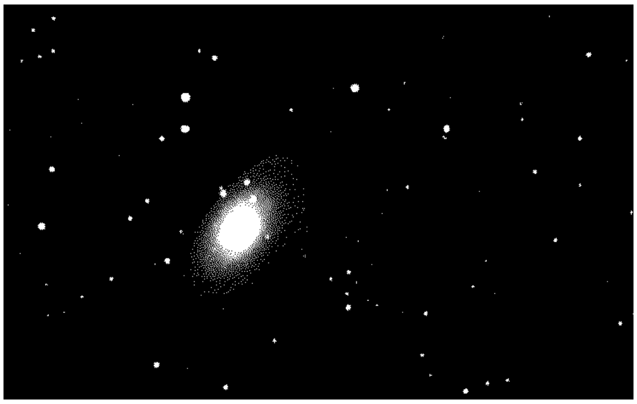

Abb. 2: Ein Bild der Spiralgalaxie NGC 3031 mit SN 1993j. Die Supernova ist der linke Stern des Sterndreiecks direkt über dem Kern der Galaxie. Norden ist unten, Osten rechts.

   - Schaukästen
2. Verkauf der Kuppel
3. Planung für den Tag der offenen Tür
4. Sonstiges: Termine

Versammlungsverlauf:

Beginn der Versammlung am 10. Juli 1993 in der Sternwarte des Gymnasium Laufen um 19.20 Uhr. Ablauf entsprechend der Tagesordnung, Andreas Härpfer verläßt die Versammlung vorzeitig um 21.10 Uhr.

1. Vereinsaktionen
   - Anschaffung von Kartenmaterial: Tassilo Bohm schlägt vor, eine Spezialkarte für Beobachtungen unter freiem Himmel zu kaufen. Diese Karte ist in Folie eingeschweißt, und gegen Tau und Regen unempfindlich. Der Kauf der Karte für DM 250,- wird einstimmig angenommen.
   - Finanzierung der Mitteilungsblätter: Andreas Härpfer beziffert die momentanen Kosten für die Mitteilungsblätter der Astronomischen Arbeitsgruppe Laufen auf etwa DM 150,- und beantragt auch für die nähere Zukunft eine Deckung der Kosten durch die Vereinskasse. Im Laufe der Diskussion stellen sich zusätzlich zur Finanzierungsnoch die Verteilungs- und Stückzahlfrage. Es wird einstimmig beschlossen die nächste Ausgabe an alle aktiven und auch fördernden Mitglieder auf Kosten der Vereinskasse zu verteilen. Es soll ein Zusatzschreiben beiliegen, in dem allen fördernden Mitgliedern ein kostenpflichtiges Abonnement der Mitteilungsblätter angeboten wird. Aktive Mitglieder erhalten die Mitteilungsblätter weiterhin kostenfrei. Zur Klärung der genauen Abonnementregelung wird der Punkt in die Tagesordnung der nächsten Mitgliederversammlung aufgenommen.

Im Zuge der Diskussion wird einstimmig beschlossen in Zukunft das Protokoll der Mitgliederversammlung in den Mitteilungsblättern zu veröffentlichen, und das Seitenlimit von 20 Seiten pro Ausgabe beizubehalten.

- Workshop IWAA'94: Die Astronomische Arbeitsgruppe Laufen lehnt eine Beteilingung an dem im März 1994 in Laufen geplanten interdisziplinären Workshop Astronomie und Astrophysik als Haupt oder Nebenorganisator aus rechtlichen Gründen mehrheitlich ab. Es wird jedoch die Unterstützung der Veranstaltung durch den Verein mit Material und Arbeitskraft zugesagt.
- SMV Tag des Gymnasium Laufen: Aus terminlichen Gründen wird eine Teilnahme der Astronomischen Arbeitsgruppe Laufen am SMV-Tag des Gymnasiums Laufen einstimmig abgelehnt.
- Fotographische Ergebnisse: Tassilo Bohm stellt erste fotographische Aufnahmen mit Hilfe des kürzlich erworbenen Off Axis Guiders vor. Die erste Aufnahme zeigt die Objekte M65, M66 und NGC 3628. Die zweite Aufnahme das Objekt M101. Die erzielten Resultate sind sehr gut, und rechtfertigen den Kauf des Off Axis Guiders in jeder Hinsicht.
- Schaukästen: Tassilo Bohm wird die Koordination von Material und Arbeitskräften zum Aufbau der von der Volksternwarte München gespendeten drei Schaukästen im Gymnasium Laufen übernehmen. Seine Schätzung des Arbeitsaufwandes bewegt sich in der Größenordnung von 5 Stunden pro Schaukasten.

2. Verkauf der Kuppel: Der geplante Verkauf der Kuppel an die Volksternwarte München findet nicht statt, da diese kein Interesse mehr an einer Übernahme hat. Tassilo Bohm wird im August/September die Restauration der Kuppel organisieren. Die Instandsetzung wird etwa drei Wochenenden mit mindestens drei Personen erfordern.
3. Planung für den Tag der offenen Tür am 9. Oktober 1993:
   - Otto Pilzer und Rudolf Reiser planen den Bau eines Miniplanetariums. Eine Abschätzung des zu erwartenden Aufwands an Geld und Zeit wird an Klaus Eder geschickt.
   - Tassilo Bohm erneuert die Gewichte der Sonnensystem-Gravitationsbox.
   - Andreas Härpfer erstellt eine Broschüre mit verschiedenen Artikeln über astronomische Themen und Höhepunkten aus den bisherigen Mitteilungsblättern. Die Vorfinanzierung erfolgt laut einstimmigem Beschluß über die Vereinskasse.
   - Tassilo Bohm besorgt, bzw. produziert Fotomaterial zur Präsentation am Tag der offenen Tür. Die Farbabzüge werden nach Preisabsprache mit Klaus Eder aus der Vereinskasse finanziert. Die Fotos werden auch zum Verkauf angeboten. (Bestellung)
   - Wie in den Jahren zuvor werden Vorträge zu verschiedenen Themen angeboten.
   - Entwürfe für Plakate, Einladungen, usw. werden von Michael Sturm erstellt. Für die Drucklegung ist Klaus Eder zuständig. Werbungen werden von Otto Pilzer organisiert.
4. Sonstiges (Termine): 28. August 1993 Mitgliederversammlung, Vorbesprechung zum Tag der offenen Tür. 9. Oktober 1993 Tag der offenen Tür. 11. Dezember 1993, 14.00 Uhr Jahreshauptversammlung; anschließend Weihnachtsfeier. Ab 1994 werden Mitgliederversammlungen jeweils alle 3 Monate am 1. Samstag im März, Juni, September und Dezember um 14.00 Uhr abgehalten. Ab sofort werden Mitgliedertage, als zwangloses Treffen monatlich jeweils am 1. Samstag, von Otto Pilzer organisiert. Es erfolgt eine gesonderte Einladung. Eine kurze Anmeldung ist erforderlich.

M. Sturm

Kommentar:

Aufgrund der Einschränkung der Seitenzahl auf 20 pro Ausgabe der Mitteilungsblätter wird es künftig nicht mehr möglich sein, größere Übersichtsartikel wie z.B. die geplanten Folgen von J. Draegers „Grundlagen der modernen Kosmologie" in diesen unterzubringen. Statt dessen sind diese Beiträge als eigenständige Papers erhältlich, die als Ergänzung zu den Mitteilungsblättern zu verstehen sind. Sie werden nach Erscheinen in gedruckter Form zum Selbstkostenpreis (= Kopierkosten) von A. Härpfer weitergegeben.

Interessenten sollen sich bitte frühzeitig *melden, um die benötigten Auflagen festlegen zu können. Das gilt natürlich auch für Interessenten aus den Reihen der fördernden Mitglieder, sowie für Nicht-Vereinsmitglieder.*

Autoren, die selbst einen längeren Artikel verfaßt haben und über diesen Verteiler „unters Volk" bringen möchten, melden sich möglichst ebenfalls direkt bei mir. Zusätzlich werden die beiträge bei Zustimmung des Autors über den e-Mail Reflektor AstroFlex verteilt. (zu AstroFlex siehe Meldung unten)

A. Härpfer

Rubriken in den Mitteilungsblättern

Da wir (die Redaktion) vor kurzem von einigen Mitgliedern darauf angesprochen wurden, in welcher Form Beiträge für unsere Mitteilungsblätter möglich sind, hier eine kurze Aufstellung, welche Rubriken wir uns in etwa vorstellen. Die Liste soll allerdings nur der Orientierung dienen und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; kein

Grund also einen Beitrag nur deshalb nicht zu schreiben, weil er nicht ins Schema paßt.

Aktuelles: Astronomische und technische Ereignisse, wie z.B. Finsternisse, Kometen, Sondenflüge

Internes: Vereinsinterne Projekte, Mitteilungen und Probleme

Grundlagen und Artikel: Beiträge zur Erläuterung und Darstellung astronomischer Sachverhalte im weitesten Sinne, d.h. inklusive mathematischer, (astro) physikalischer und technischer Belange. Die Grundlagen sollten dabei elementare Themen behandeln, Artikel dürfen mehr ins Detail gehen. Berichte über eigene Beobachtungen und Arbeitsergebnisse sind hier hochwillkommen.

Berichte: Unter diese Rubrik fallen Protokolle von Versammlungen, Veranstaltungen und diverser praktischer Tätigkeiten, die sich nicht direkt auf die Beobachtungspraxis beziehen.

Kurzmitteilungen: Unter dieser Rubrik finden kurze Nachrichten aus Zeitungen, Zeitschriften, Internet-News und anderen Quellen ihren Platz. Wer hierfür etwas Interessantes findet, sollte sich melden.

Literatur: Hinweise auf interessante Artikel anderer Zeitschriften, lesenswerte Bücher u.a. mit kurzer Inhaltsangabe.

Leserbriefe: Reaktionen der Lesergemeinde der Mitteilungsblätter in Form von Anregungen, Kritik und Diskussionen.

Zudem wurden wir angeregt, mal zwischendurch eine Statistik aufzustellen. Nachstehend also der Zwischenstand nach sechs Ausgaben Mitteilungsblättern:

- Aktuelles: Bisher eine entsprechende Mitteilung von A. Härpfer über die Nova Cygni 1992
- Internes: Ein Beitrag seitens der Redaktion
- Grundlagen und Artikel: Bisher 7 Beiträge, davon je einer von J. Draeger und K. Eder, 2 von A. Härpfer und 3 von A. Kronawitter.
- Arbeitsberichte: 3 von O. Pilzer, 2 von T. Bohm, summa summarum also 5
- Kurzmitteilungen: zahlreiche kurze Nachrichten
- Literatur: Noch nichts. (Nicht verwunderlich, da die Literaturecke erst seit der letzten Redaktionssitzung in Erwägung gezogen wurde.)
- Leserbriefe: Noch nichts. (*Sehr* verwunderlich; gibt es nichts zu den Mitteilungsblättern zu sagen?)

A. Härpfer, J. Draeger

AstroFlex
Artikel aus Amateurveröffentlichungen

Berichte und Arbeitsergebnisse von Amateurastronomen finden nur eine sehr geringe Verbreitung. Die wenigsten Beiträge lassen sich in einem Fachblatt wie *Sterne und Weltraum* unterbringen, und bei der Veröffentlichung in eigenen Mitteilungsblättern oder Vereinsnachrichten erreicht ein Titel günstigstenfalls ein paar Dutzend bis hundert Leser.

Um diesem Mißstand zu begegnen hat eine Gruppe an der TU Chemnitz einen e-Mail Reflektor[1] zur Verteilung von Beiträgen aus deutschen, österreichischen und schweizer Amateurzeitschriften eingerichtet. Die Entscheidung fiel gegenüber einer Internet-Newsgruppe und einem ftp-Zugang zugunsten einer e-Mail Verteilung aus, um auch Interessenten, die zwar über e-Mail, aber *keinen* Internet Zugang verfügen, den Bezug der Beiträge zu ermöglichen. Auf die Abonnentenliste kann man sich mittels einer Nachricht an

`astroflex-request@tu-chemnitz.de`

setzen lassen. *A. Härpfer*

Neues aus der Technik-Ecke

Die technische Ausstattung der AAL hat sich in letzter Zeit weiter verbessert. Der 76/1300 mm Refraktor wurde komplett überholt, die Montierung stark verbessert, mit Hilfe von Klaus Eder ein neues stabiles Dreibein gefertigt und ein Adapter für die Verwendung von 1.25 Zoll Okularen gedreht. Bei anschließenden Beobachtungen von Jupiter und Saturn konnte der kleine Refraktor seinen großen Bruder in der Kuppel klar auf Platz zwei verweisen.

Das C8 wurde mit einem neuen, lichtstarken Sucherfernrohr versehen, das im Gegensatz zum Vorgänger nicht nur zum Suchen, sondern auch zum Auffinden von Objekten geeignet ist. Bei anschließenden Tests konnte M101 sofort gefunden werden, ein Objekt, dessen Einstellung im großen Refraktor trotz intensiver Bemühungen nicht ohne weiteres gelang. Erste Tests des neuen Off-Axis-Nachführsystems sind zufriedenstellend verlaufen. Die Bedienung ist nicht einfach und die Stabilität nicht das Gelbe vom Ei, aber immerhin war es dem Autor möglich, eine Aufnahme von M101 15 Minuten trotz denkbar schlechter Bedingungen so genau nachzuführen, daß man sieht, was gemeint ist. Wer mit dem System fotografieren möchte, kann sich viel Ärger sparen, wenn er sich an mich wendet.

Scharfstellprobleme werden mit Hilfe einer speziellen mechanischen Krücke umgangen, dem sogenannten

[1] Ein e-Mail Reflektor verschickt an ihn gerichtete elektronische Post automatisch an eine ganze Liste von weiteren Mailadressen. Zu jedem Reflektor existiert normalerweise eine weitere e-Mail Adresse, die es ermöglicht, sich selbst in der Abonnentenliste des Reflektors ein- oder auszutragen. Wie dies im einzelnen geschieht ist jedoch von Liste zu Liste unterschiedlich.

ShureSharp. Wer, so wie der Autor, mit einem starken Knick in der Optik gesegnet ist, kann auf diese Weise trotzdem scharfe Bilder schießen. Testfotos haben außerdem ergeben, daß bei Kodak Ektar 1000 eine halbe Stunde Belichtungszeit ausreicht, um alle nennenswerten Objekte auf Film zu bannen. Eine Liste dieser Objekte (alle Galaxien und Nebel mit mehr als 10 Bogenminuten Durchmesser) ist vom Schreiber dieser Zeilen erhältlich. Wenn der Verein mit einem eigenen Sternatlas ausgestattet wäre (Wink mit dem Zaunpfahl!), könnte man all die schönen Sachen auch finden. Bleibt zu hoffen, daß die neue Ausrüstung auch benutzt wird.

T. Bohm (Technischer Leiter)

Perseidenstrom 1993 ein Knaller?

Die Aussichten, daß der ohnehin prächtigste Sternschnuppenstrom gerade dieses Jahr für ein wahrlich himmlisches Feuerwerk sorgen könnte, stehen sehr gut. Bekanntlich gehen die Perseiden auf den Kometen Swift-Tuttle aus dem Jahr 1862 zurück und bescheren seither alljährlich im August (vor allem um den 12. d.M.) stündlich 60–120 Sternschnuppen und so manche helle Feuerkugel. Im Dezember 1992 war er wieder da, der Komet, und bereits im August vorigen Jahres, also noch vor seiner Wiederentdeckung, konnte eine verstärkte Perseidenaktivität festgestellt werden.

Eben für dieses Jahr, genauer für die Nacht vom Mittwoch, den 11. August, auf Donnerstag, den 12., sagen die Meteorbeobachter ein berauschendes Himmelsschauspiel voraus. Die Nacht beginnt am 11.08. um ca. 22.15 MESZ. Der Mond geht zusammen mit dem Siebengestirn etwa 15 Minuten nach Mitternacht auf. Er befindet sich im letzten Viertel und sollte somit helligkeitsmäßig nicht sonderlich stören.

Es wäre schön, wenn sich ein Häuflein Interessierter finden würde, die diese Nacht gemeinsam auf freiem Feld mit Schlafsack und Liege verbringen wollen, z.B. zum Fotografieren, zum Beobachten und Aufzeichnen, oder (Idealfall) einfach nur zum Schauen. Im Vordergrund steht das Gemeinschaftserlebnis einer romantischen Sternschnuppennacht, die möglicherweise nicht in jedem Jahr so zu sehen sein wird.

Großer Koordinator: 08682/1765 (Rudi) oder jede andere Vereinsdienststelle.

Warum heißt dieser Sternschnuppenstrom „Perseiden“? Der Ursprungskomet hat auf seiner Reise um die Sonne einiges an Material (Staub, Gestein) verloren. Die Erde kreuzt diesen Staubgürtel jährlich im August. Ihre Lufthülle stößt genau da an diesen Gürtel, wo im weit entfernten Sternenhintergrund der Erdling das Sternzeichen *Perseus* erblickt. Die Sternschnuppen scheinen aus diesem Sternzeichen in alle Richtungen herauszufallen. Jedes Jahr treten etliche regelmäßige Sternschnuppenströme auf, z.B. die Lyriden, Cygniden, Leoniden, etc. … Die *Perseiden* bescheren jedoch seit Jahrzehnten die meisten und hellsten Sternschnuppen. *R. Reiser*

Sternschnuppenfotografie

Um Sternschnuppen fotografieren zu können, ist weder eine umfangreiche Fotoausrüstung, noch ein Teleskop mit Nachführung erforderlich. Man benötigt:

- einen Fotoapparat mit *B*- oder *T*-Einstellmöglichkeit
- einen Drahtauslöser
- einen mittelempfindlichen Film (100–200 ASA)

Der mit Film beschickte Fotoapparat wird auf einem Stativ befestigt oder einfach auf den Boden gelegt und auf ein beliebiges Feld am Himmel ausgerichtet. Die Entfernung ist auf ∞ zu stellen, die Verschlußzeit auf B oder T; die Blende sollte um einen Wert geschlossen werden (z.B. Blende 4). Mit dem Drahtauslöser wird der Verschluß nun für wenigstens 15 Minuten geöffnet. Man wähle möglichst ein Modell, das sich feststellen läßt, um bleibende Fingerdeformationen zu vermeiden. Nach oben wird der möglichen Verschlußzeit nur durch die Himmelshelligkeit bzw. die Morgendämmerung eine Grenze gesetzt. Auf den Aufnahmen sieht man die Sterne nicht mehr als Punkte, sondern als konzentrische Kreise um den Himmelspol. Sternschnuppen, die das Bildfeld gekreuzt haben, erscheinen als Geraden. Besonders reizvolle Aufnahmen erhält man, wenn man den Himmelspol mit in die Aufnahme einbezieht.

Lohnende Aufnahmen verspricht das diesjährige Perseidenmaximum (siehe Beitrag „Perseidenstrom 1993 …“ Gelungene Aufnahmen sollten nicht in der Schuhschachtel aufbewahrt, sondern im Oktober am Tag der offenen Tür ausgestellt werden. *R. Reiser*

Kontoführungsgebühren

Leider muß unser Verein seit Jahresanfang Kontoführungsgebühren für das Vereinsgirokonto bezahlen. An festen Kosten treten dadurch DM 3 monatlich sowie DM 0.45 je Buchungsposten auf, es sind also jährlich ungefähr DM 50 an Unkosten zu erwarten. Die Raiffeisenbank ist nämlich dazu übergegangen, von *allen* Vereinen Gebühren zu verlangen, die sie jedoch nur bei *gemeinnützigen* Vereinen am Jahresende als Spende zurücküberweist. Andererseits ist es schlecht möglich, auf das Konto zu verzichten, da u.a. einige Mitglieder ihren Vereinsbeitrag selbst überweisen und natürlich auch einige Überweisungen zur Begleichung diverser Rechnungen anfallen. *O. Pilzer (Kassenwart)* *Neben diversen anderen*

Vorteilen wäre dies vielleicht ein Grund, nochmals über eine Gemeinnützigkeit des Vereins nachzudenken! *A. Härpfer*

Endstadien von Sternen

Joachim Draeger

Der Artikel gibt einen kurzen Abriß der Physik von Weißen Zwergen und Neutronensternen. Der gegenwärtige Stand der Forschung hinsichtlich des Quarksternmodells wird besprochen. Auf baryonische Sterne wird nur am Rande eingegangen.

1 Einleitung

In [4] gab uns A. Kronawitter einen anschaulichen Bericht über die Sternentwicklung. Weil dabei nur kurz auf mögliche Endstadien eingegangen wurde und gerade hier durch die enormen Fortschritte der Teilchenphysik neue Gebiete erschlossen worden sind, kann ich mich nicht enthalten, einige ergänzende Zeilen zu schreiben. Wir besprechen die Modelle in der Reihenfolge steigender Massendichte.

2 Weiße Zwerge

Nur bei der Verschmelzung von Kernen mit einer Nukleonenzahl kleiner oder gleich 56 wird Energie frei. Daher befinden sich Sterne mit einem Kern bestehend aus Elementen der Eisengruppe am Ende ihrer thermonuklearen Entwicklung. Durch zunehmende Reduzierung der thermischen Energie infolge Strahlungskühlung – hauptsächlich Neutrinoemission – gewinnt allmählich die Gravitationsenergie die Oberhand: Der Stern beginnt zu kontrahieren. Dieser Kontraktionsprozeß endet erst, wenn das stellare Elektronengas vollständig entartet ist. Einen derartigen Materiezustand erreicht man bei einer Dichte von ca. $10^7\,\mathrm{g/cm^3}$. Das Verhältnis Sternmasse/Sternradius gehorcht dann der Beziehung $R \propto M^{-1/3}$.

Die Entartung eines Gases wird durch das Pauli-Prinzip verursacht: Der quantentheoretische Phasenraum (x, y, z, p_x, p_y, p_z), bestehend aus Orts- und Impulskoordinaten, ist in Elementarzellen des Volumens $\hbar^3$ aufgeteilt. Da jede Elementarzelle gemäß dem Pauli-Prinzip nur von zwei Elektronen mit gegensätzlich orientiertem Spin besetzt werden kann, ist die maximale Teilchendichte durch den Wert $2/\hbar^3$ nach oben begrenzt. Den bei Erreichen dieses Grenzwertes vorliegenden Zustand bezeichnet man als vollständig entartetes Gas.

3 Neutronensterne

Nicht alle Sterne stabilisieren im gewöhnlichen Zwergstadium. Solche mit einer Masse von mehr als 1.4 Sonnenmassen erfahren durch die Gravitationsenergie eine weitere Entartung.

Normalerweise zerfallen freie Neutronen in Protonen und Elektronen. Das bedeutet, daß die Bildung von Elektronen und Protonen aus Neutronen energetisch begünstigt ist. Bei $M > 1.4 M_\odot$ wird die Gravitationsenergie so groß, daß sie die Bindung von Elektronen an Protonen unterstützt, also quasi den betrachteten Prozeß umkehrt. Ab $10^9\,\mathrm{g/cm^3}$ beginnen die Elektronen immer häufiger in die Atomkerne einzudringen und sich mit den dort vorhandenen Protonen zu Neutronen zu vereinigen (inverser Beta-Zerfall). Dadurch entstehen Kerne mit hohem Neutronenüberschuß. Deren Instabilität führt zum Erreichen des sogenannten Neutronentropfpunktes: Kerne beginnen unter Freisetzung von Neutronen zu zerfallen. Die zunehmende Reduzierung der Elektronenzahl und weitere Abkühlung des Sternkörpers durch Neutrinostrahlung senken den Druck und beschleunigen den Kollaps. Für Dichten oberhalb $10^{11}\,\mathrm{g/cm^3}$ überwiegen Neutronen. Schließlich sind die meisten Kerne zu einem Neutronengas zerfallen, das vollständig entartet ist. (Auch Neutronen haben einen Spin; zur Erläuterung des Begrifs „Entartung“ siehe oben) Kalkulationen ergeben auch hier ein Verhältnis von Sternmasse/Sternradius zu $R \propto M^{-1/3}$. Der Proportionalitätsfaktor ist aber im Verhältnis der Massen von Elektronen und Neutronen (also etwa 0.0005) kleiner als bei einem weißen Zwerg. Damit ergeben sich für Neutronensterne Dichten zwischen $10^{14}\,\mathrm{g/cm^3}$ und $10^{15}\,\mathrm{g/cm^3}$. Überdichte Konfigurationen besitzen statt einem Neutronengas flüssige oder feste Neutronenphasen. Freie Protonen in äußeren Schichten kristallisieren und bilden eine feste Kruste, über der eine plasmatische, wenige Zentimeter dicke Atmosphärenhülle liegt. Nur Sterne mit weniger als drei Sonnenmassen können stabil als Neutronenstern existieren. Die Existenz von Pulsaren beweist die Existenz von Neutronensternen.

4 Neutronensterne mit baryonischem Kern

Bei schweren Neutronensternen kommt es im Kernbereich zu Teilchenreaktionen. Diese werden durch die

Energie des starken Gravitationsfeldes begünstigt, weshalb nun auch unter normalen Umständen ziemlich unwahrscheinliche Umwandlungen stattfinden. Dazu gehört insbesondere die Bildung schwerer Hadronen mit mehr als drei Quarks. Die entstehenden Kondensationsprodukte sind um so schwerer, je massiver der Stern ist. Das Endstadium derartiger Prozesse stellen die Quarksterne dar. Im Gegensatz zu diesen läßt sich aber die Möglichkeit der Entstehung von Neutronensternen mit baryonischem Kern mit großer Sicherheit vorhersagen.

5 Quarksterne

Die in letzter Zeit erfolgten Entwicklungen auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik haben auch die Astrophysik nicht unbeeinflußt gelassen. Hinsichtlich der Endstadien von Sternen ist dabei insbesondere die Kenntnis von dem Aufbau der Materie von Bedeutung. Hadronen und damit auch Nukleonen wie Protonen und Neutronen sind nicht, wie früher vermutet, elementar, sondern setzen sich aus sogenannten Quarks zusammen. Damit erhebt sich natürlich die Frage, ob entsprechend zu entarteten Elektronen- und Neutronengasen (Weiße Zwerge und Neutronensterne) auch entartete Quarkgase existieren können, die imstande sind, entgegen einer starken Gravitationskraft einen zusammenbrechenden massiven Körper jenseits des Stadiums eines Neutronensterns nochmals zu stabilisieren.

Eine endgültige Klärung dieses Problems steht zwar noch aus, doch ist aus heutiger Sicht eine bejahende Antwort wahrscheinlich. Die besondere Schwierigkeit der Situation besteht in der enormen Kritizität der Wahl der chromodynamischen Zustandsgleichung, welche die Quarkmaterie beschreibt; zudem erschweren die asymptotische Freiheit der Quarks und die Wechselwirkung der Gluonen untereinander Analysen von Vielteilchensystemen außerordentlich. Eine direkte Ableitung quantitativer Ergebnisse aus der QCD ist damit nur im Prinzip möglich; typischerweise auftretende Konvergenzschwierigkeiten verhindern in der Regel eine analytische Lösbarkeit. Einzig gangbarer Ausweg sind derzeit wohl Kalkulationen über Gittereichtheorien mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen. Anhand des so abgeleiteten mathematisch-physikalischen Modells gilt es nun zu entscheiden, ob bei hohen Energien ein Deconfinement[1] der Quarks vorkommt; denn erst ein Deconfinement ermöglicht überhaupt die Bildung eines Quarksterns. Eine Klärung dieses Problems durch Beschleunigerexperimente ultrarelativistischer schwerer Kerne scheint machbar zu sein.

Als nächstes sind Gedanken über die Stabilität von Quarksternen erforderlich. Fragen in dieser Hinsicht sind ausgesprochen nichttrivial. Beispielsweise gibt es begründete Vermutungen, daß „normale“ Materie bei Kontakt mit einem Quarkgas sich sofort ebenfalls in ein Quark-Gluonplasma umwandelt. In einem solchen Fall frißt sich sozusagen der quarkonische Materiezustand vom Kern eines Sterns bis zu dessen Randbezirken durch und erhöht dabei dessen Dichte kontinuierlich; sehr bald würde dadurch ein Übergang zu einem schwarzen Loch stattfinden.

Genauere Überlegungen zeigen aber einen Mechanismus auf, um die Transformation des Materiezustands zu stoppen. Die Induktion starker elektrischer Felder in den Sternmantel aus Normalmaterie, der einen Kern aus Quarkmaterie umgibt, könnte nämlich beide Materiezustände durch die Ausbildung einer dünnen Vakuumregion, verursacht durch elektromagnetische Abstoßungseffekte, voneinander trennen. Modellrechnungen zeigen die Erreichbarkeit von Feldstärken der Größenordnung $5 \cdot 10^{17}\,\mathrm{V/cm}$ und mehr. Der mögliche Maximalwert der Feldstärke ergibt sich aus der Begrenzung der Krustendicke durch die in ihr stattfindenden Umwandlungen von Protonen in Neutronen und deren Abtropfen in den Kern und aus der daraus resultierenden Begrenzung der Stromstärke.

Die vorangegangenen Überlegungen machen deutlich, welche tiefgehenden Probleme man bei der Frage nach der Existenz von Quarksternen zu klären hat. Die Astrophysik eröffnet aber auch Verfahren, solche Fragen rein beobachtungstechnisch zu entscheiden: Findet man sehr schnell rotierende Neutronensterne, die rechnerisch eigentlich durch die auftretenden Zentrifugalkräfte zerrissen werden müßten, müssen diese einen Quarkkern beinhalten.

6 Schwarze Löcher

Ab einer gewissen Grenzmasse, die bei etwas über drei Sonnenmassen liegen dürfte, ist keine Sternkonfiguration mehr stabil. Weil die Gravitationsenergie größenordnungsmäßig die Massenenergie erreicht, tritt eine erhebliche Raumkrümmung auf, die sich schließlich tropfenartig abschnürt. Mehr soll hier zu schwarzen Löchern nicht gesagt werden.

Literatur

[1] ApJ **310** 261

[1] Man beachte, daß unter den hier geschilderten Umständen das Deconfinement lediglich zu quasifreien Teilchen führt. Anschaulich betrachtet werden in den postulierten Quarksternen durch den in ihnen herrschenden Druck die Hadronen so stark aneinandergepreßt, daß sich die Quarkbags zu überlappen beginnen; diese Bedingungen gestatten es den einzelnen Quarks nicht mehr, den Bag zu identifizieren, zu dem sie eigentlich gehören. Daher ist eine quasifreie Wanderung möglich. Dies läßt sich in etwa mit der Situation der Elektronen in einem Metall vergleichen. Das „heiße“ Deconfinement, das beispielsweise kurz nach dem Urknall aufgetreten sein muß, entsteht dagegen durch ein regelrechtes Wegschmelzen des QCD-Vakuums. Es können dann überhaupt keine Bags mehr existieren; die Quarks bewegen sich echt frei.

[2] ApJ **362** 251

[3] Phys. Rev. Lett. **58** 2152

[4] A. Kronawitter: Entwicklung der Sterne, Mitteilungsblätter der Astronomischen Arbeitsgruppe Laufen e.V. Vol.5(1993), 2-7

[5] J. A. deFreitas Pacheco et al.: *The effects of QCD parameters on the quark core dimensions in compact stars*, Preprint

[6] H. Scheffler, H. Elsässer: Physik der Sterne und der Sonne, BI 1974

[7] W. Strohmeier: *Veränderliche Sterne*, Treugesell-Verlag 1974

Errata und ähnliches

Erratum in Kosmologie I

In den Mitteilungsblättern **6** S. 10 Fußnote Nummer 19 muß es statt: „Da in einem nichtstatischen Universum aber offensichtlich ...“ richtig heißen: „Da in einem *geschlossenen* Universum aber offensichtlich ...“.

Ergänzung zu Kosmologie I

Seite 4, linke Spalte, letzter Absatz: Ergänzend zu den in Teil 1 gemachten Ausführungen ist anzumerken, daß nicht nur jedes eventuell existierende statische unendliche Universum in der Newtonschen Kosmologie instabil ist, sondern ein solches sogar prinzipiell nicht existieren kann. Rechnungen von Seeliger und Neumann zeigten, daß in derartigen Situationen das Gravitationspotential nicht verschwindet; es wirkt also stets eine Gravitationskraft im Widerspruch zur angenommenen Unveränderlichkeit des Kosmos. Nachzulesen sind diese Ergebnisse etwa in [LEX] oder in O. Heckmann: *Theorie der Kosmologie*, Springer 1968.

J. Draeger

Beobachtungen eines Außenstehenden

(ein Leserbrief)

Bei dem kleinen Treffen im Halifax vor einigen Wochen, zu dem auch ich eingeladen war, hatte ich das Vergnügen, einige Mitglieder der AAG Laufen e.V. (nebst einem weiteren Gast namens Joe) in voller Aktion zu erleben. Die Gesprächsthemen wanderten von Physik über Studienbedingungen und etwas Chemie schließlich zur Astronomie in ihrer ganzen Mannigfaltigkeit. Mitteilungsblätter, Vorträge, (fast) keine echten astronomischen Beobachtungen und viele viele (z.T.) nichtssagende Worte ließen die Zeit schnell vergehen – wenn ich auch nicht allzuviel direkten Bezug zur Vereinsarbeit habe. Zumindest vor vielen Jahren wäre es mir etwas bekannter vorgekommen, da ich damals in Sachen Astronomie auch noch aktiver gewesen bin ...

In Bezug auf den in der letzten Ausgabe erschienenen Artikel zum Thema Sonne-Jupiter als Doppelsternsystem hätte ich einen Vorschlag zur gegenwärtigen terrestrischen Energiekrise zu machen. Um die Effektivität möglicher Solaranlagen zu steigern, könnte man versuchen, die Zündung Jupiters durch Erhöhung der Masse (z.B. mittels Voyager 1 und 2) baldmöglichst zu initiieren.

An dieser Stelle also die erste Resonanz auf einen hier erschienenen Artikel - gleich in Form eines Leserbriefes mit konstruktiven Vorschlägen bezüglich globaler Energieprobleme aus der Sicht eines unbefangenen Außenstehenden.

R. Gratias

Variationen der Sonnenfleckenzahl und ihr Einfluß auf die Gesamtabstrahlung der Sonne

Andi Kronawitter

In der jüngeren Vergangenheit ist eine teils sehr emotional geführte Diskussion über Klimaveränderungen in Gang gekommen. Es erweist sich allerdings bislang noch immer als schwierig, Ursachen und Auswirkungen menschlicher und natürlicher Veränderungen in diesem komplexen System zu trennen und zu analysieren. In diesem Artikel sollen natürliche Veränderungen der Abstrahlung der Sonne untersucht werden. Dabei können wir uns leider nicht auf neueste Arbeiten stützen. Dieses Manko wird aber wahrscheinlich in einer der folgenden Ausgaben behoben. Aufgrund der dünnen Datendecke sind die Ergebnisse entsprechend vage. Es gibt in diesem Forschungsbereich noch keine abgeschlossenen und schlüssigen Theorien.

Die Arbeit entstand im Sommer 1992 als Ersatz für das astrophysikalische Praktikum an der Universität München zusammen mit Herrn Josef Gieger, der aufgrund seiner Behinderung nicht am Praktikum teilnehmen konnte. Dies ist eine stark gekürzte und in einigen Punkten aktualisierte Fassung, zusammengestellt im Juni 1993.

1 Einführung

Die Sonne ist ein gewöhnlicher Stern vom Spektraltyp G2 und der Leuchtkraftklasse V, also ein Hauptreihenstern im HRD (Hertzsprung-Russell-Diagramm), der sich in Aufbau und Strahlung offenbar durch nichts von anderen Sternen dieses Typs unterscheidet. Scheinbar leuchtet die Sonne immer gleichmäßig. Sie wird nicht heller oder größer, wenn man von den Einflüssen der Erdatmosphäre absieht. Trotzdem gibt es schon seit etwa dreihundert Jahren Bestrebungen, eine Veränderlichkeit der Sonne nachzuweisen. Erst in den letzten dreißig Jahren allerdings waren diese Versuche erfolgreich. Die Krux solcher Messungen ist nämlich, daß die Helligkeitsveränderungen der Sonne nur Amplituden von 0.1–0.2% ausmachen, die Erdatmosphäre unsere Meßgenauigkeit aber auf 1% bis 2% einschränkt. Deshalb mußte man für solche Messungen auf das Zeitalter der Raumsonden warten. Mittlerweile liegen nun schon für ein Zeitintervall von knapp 20 Jahren einigermaßen homogene Meßreihen vor. Das entspricht immerhin fast der Dauer eines Sonnenzyklus.

Vergleicht man jedoch diese Zeitspanne mit den Entwicklungszeiten der Sonne (einige Milliarden, also 10^9 Jahren) oder auch nur mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Störungen in einzelnen Schichten der Sonne (immer noch mehrere Jahre), so wird die Notwendigkeit für eine andere Datenquelle als die direkte Messung offensichtlich. Schließlich werden die wenigsten Menschen einige tausend oder mehr Jahre alt. Und Forscher schon gleich gar nicht. Aus diesem Grund hat man viele verschiedene Möglichkeiten getestet, um die langfristige Veränderung der Sonnenstrahlung zu bestimmen. Die meisten beruhen auf Untersuchungen von Vorgängen auf der Erde, von denen man hofft, daß sie auf Veränderungen der Sonneneinstrahlung mehr oder weniger direkt reagieren. Genau da liegt auch der Schwachpunkt dieser Methoden: In den allermeisten Fällen kennt man die Koppelung Einstrahlung-Reaktion leider nicht sehr gut. Und wie das in der Physik so ist, können kleine Fehler bei den Eingabedaten große Fehler in den Ergebnissen nach sich ziehen.

Die Diskussion dieser Frage, wie Variationen der Sonne Einfluß auf die Erde haben und wie diese Mechanismen aussehen, ist gerade in der heutigen Zeit von großem Interesse: Die große Diskussion bezüglich der Auswirkungen des menschlichen Tuns kann nicht beurteilt werden, wenn man die natürlichen Einflüsse nicht abschätzen kann. Denn es ist durchaus vorstellbar, daß beispielsweise die Erwärmung der Erdatmosphäre in den letzten 150 Jahren hauptsächlich durch eine verstärkte Einstrahlung verursacht wurde. Allerdings gibt es dafür im Moment keinen hieb- und stichfesten Beweis. Schließlich darf man nicht außer Acht lassen, daß die Natur die hausgemachten Veränderungen auch verstärken kann. Auf jeden Fall wird die Untersuchung dieser Frage unser Verständnis über die Abläufe auf der Erde und in der Atmosphäre fördern.

Eine langfristige zeitliche Änderung der Gesamtabstrahlung der Sonne ist bislang nicht eindeutig nachweisbar. Dagegen gibt es viele relativ schnell variierende Details, betreffend z.B. die Granulation oder die Chromosphärenstruktur, über die wir noch berichten werden. Die meisten solcher variablen Phänomene gehören zum Bereich der Sonnenaktivität.

2 Aufbau der Sonnenatmosphäre

Wir beginnen unsere Reise durch die verschiedenen Schichten der Sonnenatmosphäre bei der äußersten Schicht, genauso wie eine „Sonnensonde" den Ablauf der einzelnen Schichten aufzeichnen würde.

2.1 Die Korona

Die Korona ist die äußerste Schicht der Sonne. Sie ist bis zu mehreren Sonnenradien ausgedehnt und bereits extrem verdünnt (etwa 10^{-18}g/cm^3). Ihre Strahlungsintensität ist nur etwa ein Millionstel der Intensität in der Scheibenmitte, so daß sie nur bei Sonnenfinsternissen sichtbar wird. Die Form der Korona ist stark variabel. Sie hängt vor allem davon ab, ob die Sonne im Maximum oder im Minimum der Fleckentätigkeit ist.

2.2 Die Chromosphäre

Die Chromosphäre beginnt am inneren Rand der Korona und schließt nach außen hin an die Photosphäre an. Sie erstreckt sich bis zu einer Höhe von 10^4 km über der Photosphäre. Während die Dichte nach außen hin sehr rasch kleiner wird, bis herunter auf 10–11g/cm^3, steigt die Temperatur nach Erreichen eines Minimums innerhalb der Chromosphäre wieder an, und zwar auf ca. 100 000 K (= Kelvin; 0 K entspricht $-273°$C). Wegen der geringen Dichte beträgt die Abstrahlung der Chromosphäre nur einen kleinen Bruchteil der Photosphärenstrahlung. Demnach sinkt die Intensität der Chromosphäre auf ein tausendstel und weniger des Wertes in der Scheibenmitte. So geringe Strahlungsintensitäten werden jedoch leicht von dem in der Erdatmosphäre gestreuten Photosphärenlicht überdeckt. Vom Erdboden aus wird die Chromosphäre daher nur sichtbar, wenn bei einer Sonnenfinsternis die Mondscheibe die Photosphäre abdeckt und damit das störende Streulicht in der Erdatmosphäre verschwindet. Dann zeigt sich, daß die Chromosphäre eine Art „borstige" Struktur hat, deren helle Elemente Spiculae genannt werden. Sie sind zeitlich und räumlich variabel.

2.3 Die Photosphäre

Die Photosphäre ist insofern die wichtigste Schicht der Sonnenatmosphäre, als sie diejenige Schicht ist, aus der praktisch die gesamte Lichtmenge im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung stammt, die wir auf der Erde von der Sonne empfangen können. Da diese Schicht nur sehr dünn, nämlich etwa 300 km, im Vergleich zum Durchmesser der Sonne mit 1.4 Millionen Kilometer ist, erscheint die Sonne als überall gleich helle Scheibe. Ausgedrückt im Winkelmaß nimmt die Photosphäre von der Erde aus betrachtet einen Winkel von nur $0.5''$ (im Vergleich zum Radius der Sonne von $15'59''\!.63$). Die Photosphäre strahlt eine Leistung (= Leuchtkraft) von $3.85 \cdot 10^{26}$J/sec ab. Ein wesentlicher Aspekt bezüglich der Abstrahlung ist ferner die Intensitätsverteilung, deren Maximum entsprechend der Effektivtemperatur (= 5780 K) bei ca. 500 nm liegt. Das Sonnenspektrum wird neben der Temperatur auch noch bestimmt von der chemischen Zusammensetzung und vom Druckverlauf in der Photosphäre. Treten lokale (in selteneren Fällen auch globale) Störungen in der Photosphäre auf, dann verändert sich die Abstrahlung bzw. Intensität sowie das Spektrum der Photosphäre in der betreffenden Region. Eine eingehendere Betrachtungsweise von auftretenden Störungen folgt unten.

Die Photosphäre der Sonne besitzt eine körnige Feinstruktur, die als Granulation bezeichnet wird. Photographische Aufnahmen im weißen Licht mit hinreichender Auflösung zeigen eine dichte Besetzung durch kleine helle Granula: mehr oder minder unregelmäßige, meist polygonale Zellen, die durch relativ schmale dunklere Kanäle voneinander getrennt sind. Die Beobachtung der Granulation mit erdgebundenen Teleskopen wird sehr erschwert durch die von kleinräumigen Brechungsindexfluktuationen in der Troposphäre erzeugte Verschlechterung der Bildqualität („Luftunruhe, Seeing"). Großräumige horizontale Bewegungen sind nur außerhalb der Scheibenmitte erfaßbar. Sie bestehen aus Zellen von etwa 30 000 km Durchmesser, wobei die Materie jeweils vom Zellenzentrum zum Zellenrand strömt, mit Geschwindigkeiten von etwa 0.4km/s: die Zellen sind heller (Bewegung auf den Beobachter zu) an der Seite, die der Scheibenmitte zugewandt ist, und dunkler (Bewegung vom Beobachter weg) an der sonnenrandnäheren Seite. In jeder Zelle steigt also Materie im Zentrum auf und sinkt am Rand wieder ab. Diese großen Bewegungszellen bilden das Phänomen der sogenannten Supergranulation.

Bei genauerer Betrachtung, das heißt bei einer Intensitätsmessung der Sonnenhalbkugel im Sichtbaren mit hoher Winkelauflösung, sieht man eine Abnahme der Helligkeit von der Mitte der Sonne zum Rand hin. Dieses Phänomen wird als Mitte-Rand-Verdunkelung bezeichnet. Die Ursache dafür liegt im negativen Temperaturgradienten der Photosphäre. Sehen wir an den Rand der Sonne, können wir nur in eine geringere Tiefe bzw. kühlere Schicht der Photosphäre hineinblicken und sehen somit eine Verdunkelung, weil die Intensität der Strahlung kühler Stoffe kleiner ist als die heißer Materialien (heiße Ofenplatten leuchten heller als kalte). Die Mitte-Rand-Verdunkelung dient uns als Meßmöglichkeit zur Analyse der Temperaturschichtung in der Photosphäre. Durch sie verschiebt sich das Intensitätsmaximum (nach dem „Wien'schen Verschiebungsgesetz": $\lambda_{\max} \cdot T = 2.90 \cdot 10^{-3}$ mK für $T = 4500$ K) am Rand der Photosphäre vom Grünen (um 500 nm) hin zum längerwelligen roten Licht (um 640 nm).

2.4 Die Konvektionszone

Die Wasserstoffkonvektionszone der Sonne liefert keinen Strahlungsbeitrag, da diese Zone unterhalb der Photosphäre liegt. Trotzdem hat sie wesentlichen Einfluß auf die Abstrahlung der Sonne, weil Turbulenzen des Fluidums Störungen in der Photosphäre verursachen. Das wollen wir im Folgenden eingehender erläutern.

Die Konvektionszone der Sonne beginnt bei einer Tiefe von ca. 500 km mit einer Temperatur von $T = 7000\,\mathrm{K}$ und reicht bis etwa 150 000 km Tiefe und einer Temperatur von $T = 10^6\,\mathrm{K}$. Das entspricht $0.2\,R_\odot$. $R_\odot$ bezeichnet „Sonnenradien". Oberhalb der Konvektionszone liegt der Wasserstoff in neutraler Form, unterhalb in vollständig ionisierter Form vor. In der Konvektionszone selbst ist der Wasserstoff teilweise ionisiert. Der „Motor" der Konvektion ist der unterschiedliche Ionisationszustand des Wasserstoffes in den einzelnen Schichten. Konvektionszellen entstehen durch lokale Temperaturinhomogenitäten in den tiefen Schichten der Konvektionszone; Zellen mit höherer Temperatur und entsprechend kleinerem spezifischem Gewicht steigen wie Wasserdampfblasen in einem Topf mit kochendem Wasser auf. Beim Aufstieg verrichtet die Konvektionszelle Arbeit gegen das Schwerefeld der Sonne, kühlt dabei ab und erhöht die Wahrscheinlichkeit für die Rekombination des Wasserstoffes. Bei jedem Rekombinationsprozeß werden der Zelle 13.6 eV thermische Energie zugeführt. Diese Energiequelle funktioniert solange, bis der ursprünglich ionisierte Wasserstoff vollständig neutralisiert ist. Nach vollständiger Umsetzung der thermischen Energie in Auftriebsarbeit kommt die Konvektionszelle zum Stillstand und löst sich auf. Analog dazu sinken kühlere Volumenelemente vom oberen Rand der Konvektionszone ab, wobei sie in heißere Regionen der Konvektionszone gelangen und dabei ionisiert werden, also die 13.6 eV Ionisationsenergie pro Atom abgeben. Das bedeutet nichts anderes als eine Abkühlung des Volumenelementes. Weil es damit kühler als das umgebende Material wird, sinkt es weiter ab, bis es vollständig ionsiert wieder am unteren Rand der Konvektionszone ankommt. Der Kreislauf kann von neuem beginnen. (Vergleiche Beschreibung des Pulsationsmechanismus der RR-Lyr, Ausgabe 5 der Mitteilungsblätter.)

Der Energietransport in der Konvektionszone erfolgt nahezu vollständig durch Konvektion (= turbulente Durchmischung von aufsteigenden und absinkenden Massenelementen). Strahlungstransport spielt hier keine Rolle, nur Teilchenstöße können noch einen merklichen Energiebetrag transportieren.

In einem einfachen Modell kann man den Energietransport durch Konvektion mit der Mischungswegtheorie beschreiben. Die Mischungswegtheorie beschreibt die langsame Diffusion der Energie aus dem Sonneninneren durch die Konvektionszone. Dabei geht man von einer Konvektionszelle mit der Kantenlänge l aus, die eine Art freie Weglänge der gleichen Dimension l zurücklegt und dann ihren Temperaturüberschuß, ihren Impuls und ihre Energie durch Vermischung mit der Umgebung plötzlich abgibt.

Zur Verfeinerung dieser Theorie kann man die Randbedingungen für den konvektiven Fluß von der Schichttiefe abhängig machen. Zufriedenstellende Theorien über den Energietransport in der Konvektionszone gibt es derzeit noch nicht.

3 Energietransport in der Sonnenatmosphäre

Die im Kernbereich der Sonne erzeugte Energie versucht zu entfliehen oder anders ausgedrückt, sie wird von der Quelle nach außen wegtransportiert. In den inneren Schichten, die uns aber bei unserer Fragestellung nicht interessieren, geschieht dies vor allem durch Strahlung. In der Konvektionszone dagegen spielt der Strahlungstransport kaum eine Rolle. Hier wird die Energie in „Klumpen" weitertransportiert. Diese Schicht ist für uns bereits von Bedeutung, da Störungen in der Konvektionszone sich auf die äußeren Lagen auswirken. In der Photosphäre wird der Energietransport wieder von der Strahlung übernommen. Die Photosphäre gibt den größten Teil der Energie im Bereich des sichtbaren Lichtes bei etwa 500 nm ab. Dieser Wellenlänge entspricht der grüne Spektralbereich.

Betrachten wir diese Abstrahlung einmal genauer: Die Photosphäre besteht aus einer ganzen Reihe verschiedener Gase. Die Atome, aus denen sich diese Gase zusammensetzen, sind in der Lage, Lichtquanten (Photonen genannt) aufzunehmen (zu absorbieren), und nach einer gewissen Zeit wieder abzugeben (zu re-emittieren). Hätte die ganze Photosphäre überall die gleiche Temperatur, so würden im zeitlichen Mittel alle Atome gleich viele Photonen absorbieren und reemittieren und wir würden die Sonne (fast) nicht sehen, weil nur sehr wenige Photonen von den äußersten Schichten ins Weltall entfliehen könnten. Wie wir aber bereits oben erwähnt haben, ist die Photosphäre am inneren Rand heißer als an der äußeren Begrenzung. Man spricht hier von einem negtiven Temperaturgradienten. Ein Gradient ist etwas, das eine Steigung angibt. Negativ heißt er, weil die Temperatur von Innen nach Außen abnimmt. Stellen wir uns die Photosphäre nun einmal in Schichten aufgeteilt vor (wie Zwiebelschalen). Die innenliegenden Schalen sind heiß, die außenliegenden kälter. Heißeres Material strahlt stärker als kühleres, man erinnere sich an die heiße Ofenplatte. Ein angeregtes Atom, also ein Atom, das ein Photon aufgenommen hat, kann die mit dem Photon aufgenommene Energie in eine beliebige Richtung wieder abstrahlen. Also nach innen genauso wie nach außen. Da aber die äußeren Schichten kühler sind und deshalb weniger abstrahlen, gelangt ein gewisser Überschuß der Strahlung der inneren Lagen nach außen und verschwindet auf nimmer Wiedersehen im All.

Anders ausgedrückt: Die inneren heißen Schichten strahlen den höheren, kühleren Schichten mehr Energie zu als umgekehrt, so daß ein Nettofluß der Energie von innen nach außen resultiert.

4 Störungen im Energietransport

Wir unterteilen diesen Abschnitt in zwei Teile. Im ersten behandeln wir die Phänomene der aktiven Sonne, im zweiten die Ansätze für eine theoretische Behandlung des gestörten Energieflußes.

4.1 Phänomene der aktiven Sonne

Unter dem Begriff Sonnenaktivität wird die ganze Vielzahl kurzlebiger Erscheinungen zusammengefaßt, die dem mittleren Normalzustand der Sonne zeitweilig als lokale Störung überlagert sind. Gemeinsame Grundursachen lassen sich für viele von ihnen schon deswegen vermuten, weil ihre Häufigkeiten mehr oder minder eng korreliert sind und in einem gemeinsamen Aktivitätszyklus schwanken.

4.1.1 Sonnenflecken

Die Sonnenflecken sind wohl die prominentesten Vertreter aus der Gruppe der Phänomene der aktiven Sonne. Auf der Sonnenscheibe findet man immer wieder sporadisch auftretende dunkle Flecken unterschiedlicher Größe und Lebensdauer; diese Sonnenflecken sind bereits sehr lange bekannt und ihre Häufigkeitsstatistik ist entsprechend wohl belegt. Die kleinsten noch sichtbaren Flecken mit Durchmessern von ca. 1000 km heißen Poren. Einige von ihnen entwickeln sich im Laufe von Tagen zu großen Flecken. Untersuchungen über deren magnetische Eigenschaften haben ergeben, daß zumeist zwei solcher Flecken eng zusammen bleiben sowie verschiedene magnetische Polarität besitzen, d.h. eine bipolare Gruppe bilden. Flecken typischer Größe haben einen dunklen Kern (die Umbra, bis 50 000 km Durchmesser) umgeben von einem etwas weniger dunklen Gebiet (der Penumbra, die in sich eine grob radial verlaufende Hell-Dunkel-Struktur aufweist). Die größten Sonnenflecken erreichen Durchmesser von einigen 100 000 km. Die Tiefenausdehnung der Sonnenflecken liegt etwa in einem Bereich von 1000 km. Genaue Aussagen über die Tiefe sind ziemlich schwierig, da es hier um Schichten der Sonne geht, die man nicht direkt einsehen kann. Große Sonnenflecken treten häufig in Gruppen auf, die so groß werden können, daß sie mit „bloßem Auge“ sichtbar sind. Kleine Flecken existieren nur wenige Tage, große Flecken jedoch auch über mehrere Monate hinweg. Die relative Dunkelheit der Sonnenflecken beruht auf einer Temperaturerniedrigung um bis zu etwa 2000 K gegenüber der ungestörten Photosphäre (etwa 5800 K).

Im Bereich der Sonnenflecken mißt man (mit dem Zeeman-Effekt) starke Magnetfelder, die in der Größenordnung von 100 Gauß bis etwa 4500 Gauß liegen. Das ist um Größenordnungen höher als das Mittel der Sonne (ca. 10 Gauß).

Die geometrische Ausdehnung und die Häufigkeit von Sonnenflecken unterliegen sehr starken Schwankungen. Über längere Zeiten gemittelt ergibt sich jedoch ein peridisches Erscheinungsbild: der Sonnenfleckenzyklus. Dieser Sonnenfleckenzyklus kann bis zum Beginn der teleskopischen Beobachtung am Anfang des 17. Jahrhunderts (Galilei) zurückverfolgt werden. Aufeinanderfolgenden Maxima variieren dabei in Zeitabständen zwischen 7 und 17 Jahren. Die mittlere Periode des Sonnenfleckenzyklus beträgt etwa 11 Jahre. Im jeweils darauffolgenden Fleckenzyklus polt sich dann die magnetische Polarität der Sonnenflecken um, weshalb man gewöhnlich zwei aufeinanderfolgende Sonnenfleckenzyklen zu einem magnetischen oder Aktivitätszyklus mit einer Gesamtperiode von etwa 22 Jahren zusammenfaßt. Im gleichen Rhythmus polt sich offenbar auch das schwache allgemeine Magnetfeld der Sonne um.

Für die Sonnenfleckenzyklen ist eine Durchlaufzählung in Gebrauch, die 1760 beginnt und nach welcher 1965 der 20. Zyklus einsetzte (Beginn des Anstieges). Ein Fleckenzyklus beginnt mit dem ersten Auftreten eines Flecken auf einer heliographischen Breite von $\pm 35°$. Die Entstehungsorte der Flecken bzw. Fleckengruppen wandern während eines Zyklus von dieser Breite in Richtung des Äquators bis zu der Breite von $\pm 5°$. Man bezeichnet diesen Bereich allgemein als Fleckenzone. Außerhalb der Fleckenzone werden fast keine Flecken beobachtet.

Zur Einteilung der Fleckengruppen einigte man sich auf das Schema der „Züricher Klassifikation“, die in neun Klassen (von A bis I) unterteilt ist. In dieser Klassifikation beginnt die Entwicklung der Fleckengruppen stets bei A, verläuft dann, je nach Ausprägung, hin zu späteren Klassen, bis sie sich wieder rückbilden, um schließlich in der Klasse A wieder unterzutauchen. Bei kleineren Gruppen verläuft der Entwicklungweg meist nur bis C oder D und dann zurück zu A.

Die Lebensdauer der Sonnenflecken liegt zwischen wenigen Tage für sehr kleine porenartige Flecken, die sich nicht weiterentwickeln, und etwa 100 Tagen, (= rund vier Sonnenrotationen) für extrem große Flecken bzw. Fleckengruppen. 95% aller Sonnenflecken haben eine Lebensdauer von weniger als 11 Tage.

4.1.2 Korrelierte Phänomene der Sonnenflecken

Nachdem wir im vorigen Abschnitt die auffälligste Erscheinung der Sonnenaktivität, die Sonnenflecken, beschrieben haben, wollen wir uns noch den anderen Erscheinungen zuwenden, die mit dem Auftreten aktiver

Regionen in Verbindung stehen. Dazu gehören die solaren Magnetfelder, die Fackeln oder Faculae, die Flares, die Protuberanzen und die Störungen der Radiostrahlung.

Magnetfelder Die zu den Flecken gehörenden Felder sollen hier nicht noch einmal beschrieben werden. Die Sonne verfügt auch über andere Magnetfelder: das Polfeld, die bipolaren magnetischen Regionen (BMR) und die unipolaren magnetischen Regionen.

In hohen heliographischen Breiten beobachtet man polare Felder einheitlicher (nördlicher bzw. südlicher) Polarität mit einer Feldstärke von etwa 1 Gauß, was gut mit den sichtbaren Polarstrahlen der Korona während des Fleckenminimums übereinstimmt. Zwischen 1920 und 1960 polten sich diese Polfelder zu den Zeiten der Fleckenmaxima um. Danach maß man nur sehr geringe Beträge und beim Fleckenmaximum 1968 fand keine Umpolung statt. Erst 1973 wechselte die Polarität wieder. (Die Quelle hierzu ist [5], 1. Auflage, 1974; aus diesem Grund können wir den weiteren Verlauf nicht nachvollziehen.)

Die bipolaren magnetischen Regionen sind Gebiete mit Magnetfeldern der Größenordnung 10 Gauß, die sich aus zwei Teilgebieten entgegengesetzter Polarität zusammensetzen, wobei die Feldlinien aus dem einen Gebiet herauskommen und im anderen wieder verschwinden. Der positive und negative magnetische Fluß ist in etwa gleich groß. Diese BMR sind die langlebigsten Erscheinungen der solaren Aktivität. Sie kommen schon vor den Fleckengruppen und verschwinden erst nach ihnen. Manchmal bilden sich aber auch keine Flecken aus. Zudem kann die Struktur dieser Regionen sehr komplex sein, so daß man auch den Begriff multipolare magnetische Regionen verwendet.

Die unipolaren magnetischen Regionen sind sehr seltene Erscheinungen mit einer Feldstärke von ≤ 3 Gauß. Sie sind vermutlich Überreste alter BMR.

Magnetographen mit einer Winkelauflösung von $\simeq 1''$ zeigen außerhalb der Sonnenflecken scharf begrenzte radiale Feldlinienbündel mit Feldstärken von einigen 100 Gauß.

Faculae und Plages Man unterscheidet die photosphärischen Fackeln, die wir als Faculae bezeichnen, und die chromosphärischen, die wir Plages nennen. Die Fackeln sind ausgedehnte Gebiete etwas überhöhter Helligkeit ($\simeq$ 10%), die meistens in der Umgebung von Sonnenflecken, aber auch isoliert auftreten können. So treten isolierte Fackeln in den Polregionen auf und in BMR mit einer Feldstärke von mehr als 2 Gauß. Die höhere Temperatur der Fackeln erklärt man sich, da die Fackeln hauptsächlich über Gebieten mit radialen Flußröhren hoher Feldstärke anzutreffen sind, zumeist durch magnetische Aufheizung, das heißt, es könnte sich dabei um den inversen (bzw. kompensierenden) Effekt zur Abkühlung in den Sonnenflecken handeln. Allerdings sind nicht alle Autoren dieser Meinung. Die photosphärischen Faculae kann man im weißen Licht am Sonnenrand beobachten, wo das Licht aus den höhergelegenen und damit kühleren Schichten der Photosphäre stammt (Mitte-Rand-Verdunklung). Zur Scheibenmitte hin wird der Kontrast zu der hier aus den heißeren tiefen Schichten stammenden Strahlung zu klein für direkte Beobachtung. Die chromosphärischen Plages findet man am besten durch Aufnahmen der Sonne im Licht starker Fraunhoferlinien, so zum Beispiel der CaII-Linien, oder im extremen UV. Dabei zeigt sich, daß die Plages die Fortsetzungen der Faculae in der Chromosphäre sind. Die statistische Gesetzmäßigkeit der Fackeln ähnelt der der Flecken, allerdings ist die Lebensdauer der Fackeln um etwa den Faktor drei größer als die der zugehörige Flecken. Die polaren Fackeln treten vor und während des Minimums der Sonnenaktivität auf, und zwar an Gebieten der polaren Felder. Ein Problem sollte noch kurz erwähnt werden: Die Bestimmung der Flächen der Fackeln ist aufgrund des geringen Kontrastes und der unregelmäßigen Umrisse der Fackelgebiete nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund ergeben sich bei der Bewertung der Bedeutung der Fackeln bei Variationen der Sonne nicht zu vernachlässigende Probleme.

Flares Die Flares werden zuweilen auch Eruptionen genannt. Diesen Namen erhielten sie aufgrund ihres Erscheinungsbildes: Zwischen oder in der Umgebung von Flecken leuchtet plötzlich ein eng begrenztes Gebiet im Licht der H_α-Linie auf. Schwächer ist dieses Phänomen auch in anderen Chromosphärenlinien zu beobachten. Bei sehr großen Erscheinungen kommt es eventuell sogar zu einem Materialausstoß. Diese kann man bisweilen sogar im weißen Licht sehen. Nach dem steilen Anstieg fällt die Lichtkurve des Flares langsam wieder ab. Die Flares werden nach Größe und Intensität (von H_α) in sogenannte Importanzklassen eingeteilt, die mit 1−, 1, 2, 3, 3+ bezeichnet werden. Die Häufigkeit der Flares hängt vor allem von der Größe der Fleckengruppe ab. Zudem zeigen Gruppen mit komplexer magnetischer Struktur mehr Flares. Große Fleckengruppen haben pro Tag meist einen großen Flare und 10 bis 100 mittlere und kleine Flares. Bei einem solchen Ausbruch wird praktisch im gesamten elektromagnetischen Spektrum Energie emittiert, meist als Verstärkung der Emission der aktiven Region. Im Optischen dominieren die Emissionslinien von CaII, die H- und K-Linien. Interessanter aber sind die Emissionen im UV und im EUV (extremen UV), darunter die HeII Linie bei 30.4 nm (Ly_α-Linie des HeII Spektrums) und anderer Linien von hoch ionisierten Metallen. Zudem ist eine Verstärkung der weichen Röntgenstrahlung in Gegenwart von Flares zu verzeichnen. Und sogar harte Röntgenstrahlung, die aus Kernprozessen stammt (Paarvernichtung von Elektronen und Positronen, Stöße von Protonen und Neutronen, ...), wird beobachtet und kann zu Störungen in der Ionosphäre der Erde und in der Folge zu Unterbrechungen im Funkverkehr führen. Zu guter

Letzt erwähnen wir auch noch die Zunahme der kosmischen Strahlung. Die eben erwähnten Emissionen können auf der Erde verschiedene Prozesse verursachen, wie zum Beispiel ein Anwachsen der Atmosphäre (beeinflußt Satelliten auf niedrigen Umlaufbahnen) und die Erzeugung von Isotopen wie ^{14}C, was die Hoffnung aufkeimen ließ, daß man von Messungen des ^{14}C Gehalts zum Beispiel in Holz bekannten Alters auf die Aktivität der Sonne zur Zeit des Wachstums zurückschließen könne. Allerdings spielen hier noch eine ganze Reihe anderer Größen wie verschiedene Wachstumsparameter usw. mit hinein.

Protuberanzen Protuberanzen sind fein strukturierte Materiekondensationen in der inneren Korona, die in Höhen bis zu mehreren 100 000 km aufsteigen können. Es gibt zwei Ausführungen davon: aktive und ruhende Protuberanzen. Erstere enthalten wiederum zwei Typen, nämlich die „aktivierten", die sich aus den ruhenden entwickeln, und die „Fleckenprotuberanzen", die in den frühen Stadien einer aktiven Region häufig sehr zahlreich in der Umgebung von Fleckengruppen entstehen. Letztere bilden oft Bögen oder knotenförmige Kondensationen. In der Regel verändern sie ihre Struktur sehr schnell und verschwinden nach einigen Tagen wieder. Die ruhenden Protuberanzen entstehen erst in der späten Entwicklung einer aktiven Region. Sie wachsen zu den Polen hin und haben Lebensdauern bis zu mehreren Sonnenrotationen.

Radiostörungen Die letzte Art von Aktivität der Sonne sind die Störungen der Radiostrahlung. Die Störungen sind Überlagerungen auf die Radioemission der ruhigen Sonne. Man unterscheidet drei Arten:

1. Die langsam variable oder „Fleckenkomponente" im Wellenlängenbereich von 1.5 cm bis 1 m mit einem Maximum bei 15 cm ist stark an die Sonnenfleckenzahl gekoppelt. Allerdings dauert die Fleckenkomponente länger an als die zugehörige Gruppe. Die Amplitude gestörter zu ungestörter Strahlung beträgt $\simeq 5$.
2. Die Rauschstürme treten bei Wellenlängen > 1 m in engen Frequenzbändern auf. Sie setzen sich aus vielen einzelnen Strahlungsstößen in dichter Folge über Stunden bis zu mehreren Tagen hin zusammen, wobei ein einzelner Strahlungsstoß zwischen 0.1 und 10 Sekunden andauert und bis zum hundertfachen der gewöhnlichen Strahlung betragen kann. Zu den Sonnenfleckenzahlen besteht nur eine lose Korrelation. Rauschstürme sind die häufigste Komponente der gestörten Radioemission der Sonne.
3. Die Strahlungsausbrüche dagegen sind das stärkste Phänomen der gestörten solaren Radiostrahlung. Sie kommen im gesamten Radiofenster vor, allerdings mit verschiedener Amplitude: im cm Bereich beträgt sie das 10- bis 40-fache, im Meterbereich kann sie bis zum zehntausendfachen des ungestörten Wertes annehmen. Teilweise kommt es beim Anstieg, der üblicherweise 0.1 s bis zu einigen Minuten dauern kann, zu Verzögerungen zwischen verschiedenen Bandbereichen. Alle größeren Strahlungsausbrüche treten nur beim Erscheinen von Flares auf und bei den kleineren geht man davon aus, daß sie mit schwachen Flares korreliert sind, die schwer zu beobachten sind.

4.2 Theoretische Ansätze

Wie bereits im Abschnitt über die Konvektionszone erwähnt, werden in dieser Schicht große Mengen ionisierter Materie bewegt. Bewegte Ladungen stellen aber einen elektrischen Strom dar. Damit können wir schon auf die Natur der Störungen des Energieflusses in dieser Schicht schließen, wenn wir wissen, daß in der Konvektionszone magnetische Felder in teilweise ungewohnten Formen auftreten können. Diese magnetischen Felder beeinflussen zum einen die konvektive Bewegung des Plasmas, zum Beispiel in der Form, daß sie die Aufwärtsbewegung behindern und damit die nach außen transportierte Energiemenge reduzieren, zum anderen werden die Magnetfelder selbst natürlich durch die Plasmabewegung beeinflußt. So werden sie nach außen transportiert und können in die Photosphäre und in die darüberliegenden Atmosphärenschichten der Sonne gelangen. Die Sonne hat dann zwei Möglichkeiten, auf diesen modifizierten Fluß zu reagieren: Entweder sie verändert ihre Abstrahlung oder ihren Radius. Welche Reaktionsart dabei dominiert, hängt im Wesentlichen von der Zeitskala der Störung ab. Die Extreme beschreiben Änderungen in Zeitskalen von $\simeq 10^5 - 10^7$ Jahren, wobei sich die Konvektionszone immer im thermischen Gleichgewicht befindet und Modifikationen des Energieflusses nur Änderungen des Radius, nicht aber der Leuchtkraft verursachen, und kurzzeitige Variationen mit charakteristischen Zeitskalen von weniger als einem Jahr, wobei sich aufgrund der thermischen Trägheit der Konvektionszone und der geringen Ausdehnung der darüberliegenden Photosphäre praktisch keine Radiusänderungen, sondern nur Variationen in der Abstrahlung ergeben.

Für die meisten Modelle von Störungen in der Konvektionszone verwendet man die Mischungswegtheorie als Basis zur Beschreibung des Energietransportes. Das hat den Vorteil, daß man die Effizienz des konvektiven Energietransportes mit nur einem Parameter α, der Skalenhöhe, beschreiben kann. Diese Skalenhöhe steht über

$$\alpha = \frac{l}{H}$$

in Beziehung zur Mischungsweglänge l, der charakteristischen „freien Weglänge" eines Konvektionselementes. H bedeutet hier die Druckskalentiefe bei einer gegebenen Tiefe. Natürlich ist das eine starke Vereinfachung der wahren Begebenheiten, denn tatsächlich müßte man zur

Beschreibung der turbulenten Wirbel in der Konvektionszone eine ganze Serie von Größen angeben. Allerdings ist dabei nur die Rolle der größeren Wirbel zufriedenstellend mit der Theorie des konvektiven solaren Dynamo erklärt, während die Einwirkung der magnetischen Felder auf die Fluidbewegung und den Wärmetransport bisher noch kaum verstanden ist. Einzig Berechnungen auf sehr eingeschränkter Grundlage weisen darauf hin, daß das Auftreten vieler kleiner magnetischer Flußröhren die Effizienz der Konvektion hinsichtlich des Energietransportes verringern kann.

Aufgrund des Fehlens gesicherter Erkenntnisse über die Vorgänge in der Konvektionszone und aufgrund der Einfachheit verwendet man eben die Skalenhöhe α als Parameter zur Beschreibung der Effizienz des Energietransportes in der Konvektionszone. Somit muß man die Veränderungen der beobachtbaren Größen wie den Radius und die Leuchtkraft der Sonne nur in Relation zur Skalenhöhe angeben. Dazu gibt man in der Regel die relativen Amplituden

$$\frac{\delta \ln L}{\delta \ln \alpha} \quad \text{und} \quad \frac{\delta \ln R}{\delta \ln \alpha}$$

und das Verhältnis

$$W = \frac{\delta \ln R}{\delta \ln L}$$

an[1]. Dabei ergibt sich für einen konvektiven Stern wie die Sonne

$$\delta \ln L = C_1 \frac{\delta \alpha}{\delta t}.$$

Für die Konstante C_1 gibt es in den Veröffentlichungen einen breiten Bereich an Werten, allerdings hat man sich auf einen wahrscheinlichen Wert von

$$C_1 \simeq 3 \cdot 10^4 \quad \text{für} \quad 1.0 < \alpha < 2.3$$

verständigt. Aus der Größe dieses Wertes kann man leicht ersehen, daß selbst kleine Änderungen von α große Auswirkungen auf die Leuchtkraft haben.

Eine zweite Art der Beeinflußung der Konvektionszone ist der sogenannte magnetische Auftrieb (*magnetic buoyancy*). Hier bewirkt eine Änderung der Zustandsgleichung um den Betrag

$$p_m = \frac{B^2}{8\pi}$$

eine Modifikation des Radius und der Leuchtkraft der Sonne. Diese Störung hat den Effekt, daß (lokal) das Volumen pro Einheitsmasse anschwillt, woraus sich ein Anwachsen des solaren Radius ergibt. Wie dieser Effekt im einzelnen vor sich geht, ist noch nicht sehr genau bekannt (wenn er überhaupt in dieser Art eine Rolle spielt). Das Aufblähen ist in diesem Modell abhängig von der Konzentration magnetischer Felder in Flußröhren mit großer Feldstärke und von der Tiefe der Störung. Weil diese Größen weitgehend unbekannt sind, kann man auch nur grobe Abschätzungen der Größenordnung dieses Effektes machen. So schwanken die Angaben von

$$\delta \ln R \simeq 10^{-4}$$

bei Thomas bis zu

$$\delta \ln R \simeq \delta \ln L \simeq 10^{-7}.$$

Ein Modell von Spiegel und Weiss kommt auf

$$\delta \ln L \simeq 10^{-3},$$

jedoch wird dieses Modell heftig umstritten, da es sich nicht wie die anderen auf die Mischungswegtheorie stützt.

Wie groß der Beitrag der einzelnen Effekte letztlich ist, kann erst entschieden werden, wenn es eine vollständige Theorie der Vorgänge in der Konvektionszone gibt. Dann kann man auch von der groben Beschreibung Abschied nehmen und zum Beispiel lokale Störungen im Modell untersuchen. Ein weiterer Schwachpunkt der bisherigen Modelle ist, daß sie immer noch von sphärischer Symmetrie der Störungen ausgehen.

In der über der Konvektionszone liegenden Schichte, der Photosphäre, rücken lokale Störungen wie aktive Regionen und speziell Sonnenflecken in den Mittelpunkt des Interesses.

Untersucht man einen Sonnenflecken, so stellt man fest, daß die Temperatur im Kernbereich um etwa 2000 K erniedrigt ist und das Spektrum im Kernbereich dem Spekrum eines kühlen Sternes wie z.B. einem K-Stern entspricht. Offensichtlich gibt es also in einer tieferen Schicht unter dem Fleck ein Hemmnis für den Energietransport. Die ersten Überlegungen dazu gingen davon aus, daß der durch dieses Hindernis blockierte Fluß in der unmittelbaren Umgebung des Flecks in Form eines hellen Rings austreten sollte. Diese hellen Ringe konnten aber nicht beobachtet werden. Parker stellte danach die These auf, daß der „vermißte“ Fluß in Form von Alven-Wellen entweder nach außen oder zurück ins Sonneninnere abgestrahlt wird. Messungen des koronalen Alven-Flusses ergaben jedoch für die Kühlung des darunter liegenden Flecks zu geringe Werte und für die einwärts gerichtete Strahlung konnten keine quantitativen Belege gefunden werden. Zudem wurde bei diesem Modell angenommen, daß die Hemmung der Konvektion auf eine dünne Schicht beschränkt ist, was sich aber als falsch herausstellte. Damit bleiben noch die Mechanismen der unmittelbaren Reemission und der Speicherung des blockierten Flusses in der Konvektionszone. Während in dem Artikel von G. Newkirk [4] die Speicherung favorisiert wird, gehen andere wie etwa P. Foukal davon aus, daß der mit Faculae bedeckte Flächenanteil der Photosphäre den der

[1] Da es sich um kleine Änderungen handelt, wurde bewußt die Bezeichnung δ anstelle von Δ verwendet

Sonnenflecken bei zunehmender Aktivität übertrifft und die Helligkeitszunahme der aktiven Sonne durch das Auftreten der Faculae zu erklären ist. Foukal stützt sich auf die Satellitenmessungen von ACRIM und Nimbus 7, die vom Fleckenmaximum 1980 bis zum Zykluswechsel 1986 eine Abnahme der Helligkeit um 0.02% pro Jahr und anschließend ab 1987 einen Anstieg derselben messen konnten. Wir sind allerdings weder in der Lage aufgrund von Modellrechnungen oder aufgrund unseres Wissens über die Richtigkeit der einen oder anderen These zu befinden. Deshalb skizzieren wir nur kurz die Grundzüge des Modelles für die Blockade und Speicherung des Flusses.

Es wird bei den meisten Modellen angenommen, daß der Sonnenfleck bis in eine begrenzte Tiefe unter die Photosphäre vordringt, daß die Mischungswegtheorie gilt und daß die Gegenwart des Sonnenfleckes den Energieeingang an der Basis der Photosphäre nicht beeinflußt. Des weiteren wird ein Sonnenfleck idealisert als zylindersymmetrisch angenommen. Weiter benötigt man zur Beschreibung des modifizierten Energieflusses verschiedene Zeitskalen:

$$t_s = \text{einige Tage}:$$

Auftreten und Verschwinden von Sonnenflecken,

$$t_D = \frac{D^2}{k} \quad \text{mit } k = \frac{l \cdot v}{3},$$

(v = Geschw. der mittleren Konvektionsbew.) die Zeit, die eine Temperaturstörung braucht, um die Strecke D zurückzulegen und t_{KH} die Relaxationszeit der Konvektionszone. Dabei zeigt sich, daß der austretende Fluß unmittelbar nach dem Einsetzen des Flecks gerade um die Menge fällt, die durch die abgedunkelte Oberfläche blockiert wird, und daß der Fluß in dem nicht verdunkelten Gebiet über t_{KH} ansteigt, bis die Gesamthelligkeit ihren ungestörten Wert wieder erreicht hat. Nach einer Zeit $t(d)$, wobei d die Tiefe des Sonnenfleckes ist, erreicht die Störung die Oberfläche. Also kurz: Der Fleck tritt auf, worauf die Helligkeit abnimmt; die von ihm erzeugte Störung des superadiabatischen Temperaturgradienten erreicht nach einer charakteristischen Zeit $t(d)$ die Oberfläche, von wann ab die Helligkeit dann mit t_{KH} wieder zunimmt. Analog läuft das Abklingen des Sonnenflecks nach den selben Zeitskalen. Für den Auftriebseffekt in der superadiabatischen Schicht findet Gilliland den Wert

$$\delta \ln R \simeq 5 \cdot 10^{-5}$$

und ein Verhältnis von

$$-8 \cdot 10^{-2} < W < 3 \cdot 10^{-3}.$$

Bevor wir die empirischen Daten aufführen, möchten wir noch anmerken, daß die Messungen der Variationen erst mit weltraumgestützten Meßeinrichtungen mit ausreichender Genauigkeit gewonnen werden konnten. Die Amplituden der Schwankungen liegen nämlich etwa bei 0.1–0.2%, während die Genauigkeit bodengestützter Instrumente aufgrund der Luftunruhe nur 1% erreichen kann. Daraus folgt sofort, daß die verfügbaren Daten erst einige Dekaden (im besten Fall) abdecken. Aus diesem Grund sind erst die kurzzeitigen Variationen einigermaßen gut untersucht, aber schon bei den Sonnenzykluszeiten, erst recht aber bei langfristigen oder säkularen Veränderungen kann man aufgrund der bisher viel zu kurzen Meßzeiten kaum signifikante Trends herauslesen.

Damit haben wir schon die vier Zeitskalen vorgestellt, nach welchen die Messungen eingeteilt werden. Kurzzeitige Variationen umspannen den Zeitraum von Tagen bis zu einem Jahr, sonnenzyklische den Bereich $1\,\mathrm{a} < t < 11\,\mathrm{a}$, langfristige $11\,\mathrm{a} < t < 500\,\mathrm{a}$ und säkulare schließlich umfassen das Intervall von $500\,\mathrm{a} < t < 100\,000\,\mathrm{a}$ (a = Jahre). Eine weitere Differenz zur theoretischen Betrachtungsweise ist, daß man bei den Beobachtungen von Leuchtkraft- oder Radiusänderungen nicht direkt auf die Ursache der Veränderungen schließen kann.

4.2.1 Kurzzeitige Variationen

Für diesen Zeitbereich sind derzeit keine ausreichend genauen Daten über Radiusänderungen verfügbar. Die ersten Weltraumobservationen von Mariner 6 und 7 ließen keinen Zusammenhang zwischen Helligkeitsänderungen und dem Auftreten aktiver Zonen erkennen. Erst durch die genaueren Meßvorrichtungen von Nimbus 6 und 7 und von ACRIM (von der Solar Maximum Mission) mit einer Genauigkeit für Helligkeitsmessungen von

$$\delta \ln S \simeq 3 \cdot 10^{-5}$$

konnten die erwünschten Daten gewonnen werden. Damit konnte die Helligkeitsänderung für den Durchgang großer Fleckengruppen über die Scheibe in Zeitskalen von 5 bis 8 Tagen zu

$$\delta \ln S \simeq -2 \cdot 10^{-3}$$

gemessen werden. Bei der Interpretation dieser Daten geht man in der Regel nach folgendem Schema vor:

1. Konstruktion eines Strahlungsmodells einer typischen aktiven Region einschließlich des Flußdefizites bzw. -exzesses durch Sonnenflecken und Faculae;
2. Erweiterung des Modells, um die Effekte der Randverdunklung einzubinden;
3. Berechnung einer synthetischen Zeitreihe der Abstrahlungscharakteristik des Modells;
4. Vergleich der synthetischen Zeitreihen mit den Daten der Sonden.

Meistens verwendet man zur Modellbildung einen „Standardsonnenfleck“, für den die Kontraste und Randverdunklung von Umbra und Penumbra sowie der ungestörten Photosphäre fest sind, ebenso wie das Verhältnis der Flächen von Umbra und Penumbra. In Wirklichkeit verändern sich jedoch die Kontraste und auch die

Flächenverhältnisse können sehr verschiedene Werte annehmen.

Das Durchrechnen des oben vorgestellten Modells ergibt einen um etwa 30–40% zu geringen Fluß. Ein anders aufgebautes Modell von Foukal kann diese Differenz mit dem Beitrag der Faculae zur Abstrahlung erklären. Die Vertreter des ersteren Modells führen dagegen an, daß bei diesen Berechnungen zu große Flächen eingesetzt wurden und daß das von aktiven Zonen unabhängige Auftreten von Faculae auf keine nahe „Verwandschaft" von Faculae und Flecken schließen lasse und die Faculae daher nicht die Flußdifferenz aufnehmen könnten.

Weitere Erkenntnisse erhofft man sich von der Untersuchung sonnenähnlicher Sterne und Veränderlicher, deren Variabilität offenbar von Flecken ähnlich denen der Sonne, aber viel stärkerer Ausprägung, herrührt. Bei der ersten Gruppe hatte man bislang noch keinen Erfolg, die betrachteten Sterne der Typen dF bis dG zeigten keine Variabilität größer als $0\overset{m}{.}004$. Bei jungen Sterne in den Plejaden und den Hyaden konnte man, als Test für die Nachweisgrenze, Variationen im Bereich von

$$\delta \ln S \simeq 0\overset{m}{.}01$$

nachweisen. Bleibt die Beobachtung von Veränderlichen der Klassen BY Draconis und RS Canis Venaticorum. Bei diesen Sternen sind bis zu 30% der Sternoberfläche mit Flecken bedeckt im Vergleich zu 0.1–0.2% bei der Sonne. Allerdings sind diese Sterne ganz anders aufgebaut – sie verfügen über sehr ausgedehnte Konvektionszonen und rotieren sehr schnell, was auf eine starke magnetische Aktivität getrieben durch turbulente Dynamos schließen läßt – und außerdem kann man die Fleckenzonen nicht vermessen und von den anderen Merkmalen aktiver Zonen separieren. Damit ist ihr Wert als Vergleichsquelle für Vorgänge auf der Sonne sehr eingeschränkt.

4.2.2 Sonnenzyklische Zeitskalen

Bisher konnten die Beobachtungen noch keinen Beweis dafür erbringen, daß es Modulationen der Abstrahlung in diesen Zeitskalen gibt. Die bodengebunden gewonnenen Meßdaten konnten trotz einer theoretischen Grenze von

$$\delta \ln S \simeq 10^{-3}$$

aufgrund von Fehlern keinen Beweis für eine Relation zwischen S und der Aktivität der Sonne erbringen. Messungen mit Flugzeugen und Ballonen liegen zeitlich weit verstreut und erfordern zudem unsichere und komplizierte Kalibrierungen. Und exakte Satellitenbeobachtungen überdeckten (zum Zeitpunkt des Erscheinens der Quelle 1985–87) noch nicht einen ganzen Sonnenzyklus. Zudem bestand bis vor kurzem die Befürchtung, daß die Radiometer der Raumfahrzeuge eine Drift ihrer Meßeigenschaften erleiden würden. Eine Möglichkeit anderer Art wäre, die mit den Veränderungen in diesen Zeitskalen eng korrelierte Temperatur der Photosphäre mittels der Änderung der Äquivalentbreiten temperatursensitiver Linien zu vermessen. Allerdings läuft derzeit noch kein derartiges Programm.

Bleibt zu erwähnen, daß sehr viele Versuche unternommen wurden, die Veränderungen der solaren Abstrahlung über andere indirekte Indikatoren zu untersuchen. Allerdings scheiterten bislang alle Versuche, meteorologische Parameter wie mittlere Oberflächentemperatur oder mittleren Druck oder den Wasserstand von Seen oder, wie William Herschel, den Getreidepreis als indirekte Meßgrößen einzusetzen, was vor allem daran liegt, daß es kein ausreichend exaktes Modell der Erdatmosphäre gibt, mit dem man externe Einflüsse separieren könnte. Einige der erfolgversprechendsten Ansätze werden im zweiten Teil dieser Arbeit beschrieben. Lohnend ist dieser Ansatz besonders deshalb, weil man mit den neuen Meßdaten eine Eichung der „Stellvertretergröße" vornehmen und damit Rückschlüsse auf die durch die Stellvertretergröße dokumentierte Zeit machen könnte. Vergleicht man diese Zeitspannen von einigen tausend Jahren für die Dendrochronologie (Baumringzählungen) oder gar hunderttausenden bis mehrere hundert Millionen Jahre für Sedimente aus Seen mit den 300 Jahren Beobachtungszeit von Sonnenflecken oder mit 25 Jahren Satellitenobservationen, kann man die in diesen Ansatz gesteckten Anstrengungen wohl verstehen.

Zur Radiusänderung gibt es nur das Resultat von Gilliland:

$$\delta \ln R \simeq 10^{-4},$$

und zwar antikorreliert zur magnetischen Aktivität.

4.2.3 Langfristige Variationen

Das Hauptproblem bei den direkten Messungen liegt hier darin, daß ein bereits 1923 von Abott begonnenes Programm aufgrund gelegentlicher Veränderungen des Instrumentariums keine homogenen Datenreihen ergab. Auch nach einer gründlichen Reanalyse konnte kein Trend in diesen Daten im Intervall von 1923–1954 festgestellt werden. Leider erwies es sich als nicht möglich, diese Daten mit modernen Datenserien zu „koppeln". Deshalb versucht man hier mit sehr unterschiedlichem Erfolg indirekte Parameter einzubeziehen (siehe Teil 2). Bei den Radiusmessungen scheint sich eine leichte Kontraktion der Sonne von etwa

$$\frac{d}{dt} \ln R \simeq 10^{-4}$$

pro Jahrhundert zu ergeben. Hier kann man auf ältere Messungen des Meridiandurchganges der Sonne, Merkurdurchgänge und Messungen des Sonnenbildes bei einer festen Konfiguration zurückgreifen.

Es gibt weiterhin Hinweise auf eine periodische Variation mit einer Amplitude von

$$\delta R \simeq (0.244 \pm 0.08)''$$

innerhalb von 80 Jahren und auf eine kleinere Störung mit einer Periode von ungefähr 22 Jahren. Bezüglich der vermeintlichen (monotonen) Kontraktion ist noch hinzuzufügen, daß es mehrere Gegenanzeichen zu diesem Trend gibt, die etwa aus meteorologischen Überlegungen resultieren.

4.2.4 Säkulare Veränderungen

Natürlich gibt es für solche Zeitskalen keine direkten Beobachtungen der solaren Helligkeit und so versucht man sich mit stellarer Photometrie zu behelfen. Dazu untersucht man (späte) Hauptreihensterne wohlbekannter Haufen wie Praesaepe. So erhält man als obere Grenze der Abschätzung

$$\delta \ln L < 5 \cdot 10^{-2}.$$

Ein ähnliches Resultat ergibt sich auch aus Überlegungen zum terrestrischen Klima. Allerdings muß man dabei die großen Unsicherheiten bezüglich des Klimamodells im Auge behalten. Für den Radius gibt es nur die grobe Abschätzung ausgehend von der Leuchtkraftvariation und der Annahme, daß

$$W \simeq 6 \cdot 10^{-3}$$

auf Zeitskalen von ca. 8000 Jahren gilt. Daraus bekommt man eine obere Schranke für die Radiusänderung von

$$\delta \ln R < \pm 9 \cdot 10^{-5}.$$

5 Terrestrische Untersuchungen

Wie wir in den vorangegangenen Abschnitten gesehen haben, beeinflußt die modifizierte Abstrahlung der Sonne die Erde auf verschiedene Arten. Wie ebenfalls bereits deutlich wurde, kann man die Variationen der Sonne erst seit kurzer Zeit mit ausreichender Genauigkeit mit Hilfe von Satelliten messen. Von daher ist der Wunsch natürlich verständlich, anhand der „abgespeicherten“ Modifikationen auf oder in der Erde Rückschlüsse auf die Veränderungen der Sonne in der Vergangenheit zu ziehen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die meisten Umsetzungsprozesse der solaren Strahlung auf der Erde einer ganzen Reihe von Einflüssen unterliegen, so daß es schwierig ist, die „Nettostrahlungseinflüsse“ von den anderen zu extrahieren. Die erfolgversprechensten Methoden scheinen die Dendrochronologie, also die Untersuchung der Jahresringe von Bäumen, und die Untersuchungen an geologischen Ablagerungen zu sein.

5.1 Dendrochronologie

Obgleich bereits Leonardo da Vinci bei seinen Naturbeobachtungen einen Zusammenhang zwischen der Witterung eines Jahres und der Breite der Jahresringe von Bäumen erkannt hatte, ist die Dendrochronologie eine noch sehr junge Wissenschaft. Begründet wurde sie von dem Astronomen Andrew Elliot Douglas, der damit zu Beginn dieses Jahrhunderts eine Verbindung zwischen dem elfjährigen Sonnenzyklus und der unterschiedlichen Breite der Jahresringe nachweisen wollte.

Die Jahresringe entstehen in einem unter der Rinde gelegenen Teil des Baumes, dem Kambium, welches teilungsfähig ist. Dabei entstehen je nach Wachstumsperiode verschiedene Zellen (natürlich unterscheiden sich auch die verschiedenen Baumarten voneinander). So bilden sich zum Beispiel bei der Eiche im Frühjahr großporige, im Spätsommer und im Herbst dagegen kleinporige Zellen, die etwas unterschiedliche Farben aufweisen. Baumarten wie die Eiche sind für derartige Zwecke besser als beispielsweise Nadelhölzer geeignet, da in die großporigen Zellen mit der Zeit Luft eindringt und die Eiche so gezwungen ist, zu Beginn jeder Wachstumsperiode eine neue Schicht aufzubauen, um die höhergelegenen Baumteile zu versorgen.

Nadelbäume und einige andere Arten haben dieses Manko nicht, da sie keine großporigen Zellen bilden. So sind sie nicht gezwungen, in Jahren mit ungünstigen Umgebungsbedingungen eine neue Schicht aufzubauen; sie können „Ruhejahre“ einlegen. Allerdings schränkt das ihren Wert für unsere Untersuchungen ein. Ebenso von geringem Wert sind Holzgewächse, die in Zonen ohne jahreszeitlichen Wechsel wachsen. Zwar bilden auch diese Hölzer Ringe, jedoch sind diese in der Regel nicht mit dem Jahresablauf korreliert. Am besten verwendet man also Holz aus Gegenden mit ausgeprägtem jahreszeitlichen Wechsel, wie etwa aus dem Hochgebirge oder aus nördlichen Gebieten.

Ein anderes Problem ist, daß heute noch stehende beziehungsweise frisch gefällte Bäume nur ein bestenfalls einige hundert Jahre umfassendes Intervall überdecken. Für weiter zurückliegende Zeiten muß man auf verbautes Holz zurückgreifen, das man mit Hilfe der ^{14}C-Methode oder mittels des dendrochronologischen Kalenders einordnet. Man sucht nun in dem vorliegenden Material nach Schwankungen, die mit Erscheinungen der Sonnenaktivität in Verbindung stehen könnten. Davon muß man im folgenden andere Störeinflüsse abziehen. Dies ist gegenwärtig allerdings noch nicht möglich, da man für längere Zeiträume noch nicht über ausreichende „Eichdaten“ wie Wetteraufzeichnungen und dergleichen mehr verfügt und zudem noch nicht in der Lage ist, die Einwirkungen der Helligkeitsvariationen der Sonne auf das irdische Klima (und weiter speziell auf die lokalen Verhältnisse des Standortes) mit ausreichender Genauigkeit abzuschätzen. Daneben muß noch berücksichtigt werden, daß andere Wachstumsparameter wie zum Beispiel die Menge des verfügbaren Grundwassers speziell in Gebirgsregionen Veränderungen unterliegen, die – zumindest nicht unmittelbar – mit Modulationen des Strahlungsoutputs der Sonne in Verbindung stehen (man denke etwa an Muren, Lawinen, Flußlaufveränderungen etc.).

5.2 Untersuchung von Sedimenten präkambrischer Gletscherseen

Im ersten Augenblick erscheint es überraschend, daß gerade Sedimente von Gletscherseen aus einer Zeit von vor etwa 700 Millionen Jahren Aufschluß über den solaren Aktivitätszyklus geben sollte. Aber dennoch hat man aus dieser Zeit, dem Präkambrium, Ablagerungen gefunden, die offenbar nicht durch normale Prozesse an der Erdoberfläche zu erklären sind. Diese Ablagerungen wurden in Südaustralien am Pichi-Richi-Paß in der Flinderskette gefunden. Die gesamte Schichtdicke der Ablagerungen aus dieser Zeit beträgt 60 m, allerdings zeigen nur etwa 10 m die interessierende Schichtung. Um diese Schichtung im Detail untersuchen zu können, hat man 1982 drei Bohrkerne entnommen und kartiert. Durch Vergleiche der einzelnen Stücke konnte man Fehlstellen, die an Bruchstellen aufgetreten waren, ausgleichen, so daß man letztlich eine 9.39 m lange kontinuierliche stratigraphische Bohrkernaufnahme, ein sogenanntes Log erhielt. Dieses Log enthielt 1580 Schichtzyklen.

Bevor wir uns aber um die Vermessung und Auswertung des Materials kümmern, sollten wir uns überlegen, wie es überhaupt zu einer derartigen Ablagerung kommen kann. Dazu muß man versuchen, die klimatischen Gegebenheiten zur Zeit der Entstehung dieser Ablagerungen so gut als möglich zu rekonstruieren. Das Klima am Ende des Präkambriums war gekennzeichnet von einer ausgeprägten Eiszeit, bei der die Grenze des Permafrostbodens selbst am Äquator fast auf Meereshöhe lag. In dem ariden, kalten und stark von den Jahreszeiten beherrschten Klima lief in der kurzen Sommerperiode, wenn die mittleren Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt lagen, mit allerlei feinem Material beladenes Schmelzwasser in den See, wo es wegen seiner geringeren Temperatur im Vergleich zum Seewasser absank. Dabei lagerten sich die schwereren Bestandteile am Boden ab. Die leichteren, tonigen Anteile wurden von der Wellenbewegung in der Schwebe gehalten. Erst wenn die Temperaturen im Winter wieder absanken und die Oberfläche gefror (oder aufgrund einer Temperaturinversion des Seewassers), sank dieses Material zu Boden und lagerte sich auf den gröberen Schichten ab. Mit zunehmender Erwärmung, vor allem im darauffolgenden Kambrium, wurde dieser Mechanismus eingestellt und die Ablagerungen wurden mit anderen Schichten überdeckt und versteinert. Durch geologische Umformungen wurden sie wieder freigelegt.

Kurz und gut: die (vermutlich) jährlichen Ablagerungen, Warven genannt, haben einen sogenannten gradierten Aufbau, das heißt, sie bestehen aus Schichten mit einer Dicke von 0.2 mm bis 3 mm, die „unten“ mit gröberer Körnung beginnen und „oben“ von einer Schicht feinen, tonigen Materials abgeschlossen werden. Das Gestein wird Schluffstein genannt. Die Besonderheit dieses Schichtgesteins ist, daß die Schichten periodische Anordnung aufweisen. Die Periode schwankt zwischen 9 und 14 Jahren. Die Schichtdicke nimmt dabei bis fast zur Mitte einer solchen Einheit zu, um dann wieder abzunehmen und schließlich von einer markanten dunklen Schicht aus feinem Material abgeschlossen zu werden.

Zur Auswertung verwendete man neben dem knapp 10 m langen Stück mit 1580 Schichtzyklen, die acht bis sechzehn, im Mittel zwölf Warven enthielten (das entspricht einem Zeitraum von 19 000 Jahren) noch ein kürzeres, etwa 1 m langes Stück mit 1337 Warven. Diese Stücke wurden vermessen und statistisch ausgewertet. Die mittlere Zunahmeperiode ist mit 5.57 etwas kürzer als die mittlere Abnahmeperiode mit 6.45 Warvenjahren[2]. Aber auch die Schichtzyklen selbst sind nicht willkürlich angeordnet. So treten durchschnittlich alle 26 Zyklen besonders dicke Warven und durchschnittlich alle 13 Zyklen besonders viele Warven auf. Diese beiden Muster sind negativ korreliert: Die dicksten Warven findet man in der Regel in Zyklen mit der geringsten Warvenzahl, also in den kürzesten Zyklen. Es traten aber auch noch weitere, kompliziert ineinandergreifende Muster mit Perioden von 4 bis 720 Zyklen auf. Am auffälligsten ist jedoch der sogenannte Elatina-Zyklus aus ca. 26.1 zyklischen Einheiten mit im Mittel 12 Warvenjahren Dauer. Es ergibt sich also eine mittlere Dauer von 313 Warvenjahren, mit einer Schwankung von 275 bis 335 Warvenjahren.

Mehrere der anderen übergreifenden Muster könnten harmonische Oberschwingungen des Elatina-Zyklus mit mittleren Perioden von 45, 52, 63, 79, 105, 157 und 314 Warvenjahren sein. Zusätzlich ist dem Elatina-Zyklus ein sägezahnförmiges Muster überlagert, das aus einem typischen Wechsel von relativ breiten und relativ schmalen zwölfjährigen zyklischen Einheiten herrührt. Nach 9 bis 23, im Mittel 14.6 Zyklen kehrt sich diese Folge von schmalen und breiten Zyklen um (Phasenverschiebung um 180°). Damit ist die Periode für eine 360° Verschiebung mit 29.2 Warvenjahren um 3.1 Jahre länger als der Elatina-Zyklus, woraus eine allmähliche Verschiebung des Sägezahnmusters gegenüber dem Elatina-Zyklus resultiert.

Kommen wir zum Vergleich mit den Daten der Sonnenzyklen. Auch diese haben Perioden zwischen 9 und 14, 22 und 25 und zwischen 90 und 110 Jahren. Daß die mittlere Sonnenzyklusdauer mit elf Jahren etwas kürzer ist,

[2] Der Autor verwendet diesen vorsichtigen Ausdruck, da es noch keinen Beweis für die Übereinstimmung mit den Kalenderjahren gibt.

dürfte vernachlässigbar sein, denn dieser Wert ist nur der Mittelwert aus bisher 21 Zyklen. Die längeren Harmonischen des Elatina-Zyklus mit 157 und 314 Warvenjahren könnten mit periodischen Klimaschwankungen in Relation stehen. Beide Verteilungsmuster haben die Minima (die dünnsten Warven und die kleinsten Sonnenfleckenzahlen) auf ungefähr gleichbleibendem Niveau, während die Maxima stark schwanken. Die Amplituden beider Zyklen schwanken über längere Zeiträume systematisch, und beide verfügen über das Sägezahnmuster langer und kurzer Zyklen. Ebenso stimmen die positiv schräge Verteilung (die schnellere Zunahme zum Maximum und der anschließende langsamere Abfall) gut überein, und bei beiden sind die Zyklen mit ausgeprägten Einzelbändern nur relativ kurz.

Augenscheinlich deutet dies darauf hin, daß es zwischen der Warvendicke und der Sonnenaktivität einen Zusammenhang gibt, vermittelt durch Temperaturschwankungen (große Aktivität → hohe Temperatur → viel Schmelzwasser → dicke Ablagerungsschicht). Diese Zusammenhangskette kann man bei neuzeitlichen Warven, zum Beispiel am Skilak-(Gletscher)See in Alaska nachvollziehen. Allerdings ist der „solare Code“ hier nur undeutlich zu erkennen. Diese Diskrepanz ist jedoch nicht mehr so verwunderlich, wenn man die klimatischen Verhältnisse im Präkambrium berücksichtigt. Aufgrund des damals geringen Sauerstoffgehalts der Atmosphäre konnte die UV-Strahlung der Sonne tief in die Atmosphäre eindringen, bevor sie von O_2 absorbiert wurde und sich O_3 bildete. Daher spielten sich Temperaturveränderungen nebst anderen Prozessen in der Ozonschicht näher am Boden ab und beeinflußten somit die Bodentemperaturen weit stärker als dies heute der Fall ist. Mit dem Abklingen der Eiszeit und dem Aufkommen von Pflanzen wurde der Sauerstoff dann aus dem Kohlenstoffdioxid freigesetzt, wodurch die Ozonschicht nach oben wanderte und dort einen geringeren Einfluß auf die bodennahen Schicht hat. Diesem Modell zufolge wäre die UV-Strahlung das wichtigste Transmissionsmedium zwischen der solaren Periodizität und dem iridischen Klima.

Weitere Konsequenzen aus den Untersuchungen der Elatina-Schichten: Die Sonnenaktivität hat sich während der letzten 700 Millionen Jahre nicht wesentlich geändert, was darauf hindeutet, daß die Prozesse in der Sonne ihren Ursprung in einem solaren Dynamo haben. Es treten zwar in den Elatina-Daten schwache Zyklusamplituden auf, „Aussetzer“ wie das Maunder-Minimum aber zeigen sie nirgendwo. Was bedeuten könnte, daß das Maunder-Minimum eher meßtechnische Gründe denn reale physikalische Ursachen haben könnte.

Ob diese Deutung der Sedimente ihre Richtigkeit hat, kann erst durch weitere Verfolgung der Sonnenaktivität und ihres Vergleichs mit den Vorhersagen dieser Interpretation entschieden werden. Falls das Maximum der Sonnenaktivität von 1957 einem Maximum der 314 Warvenjahre langen Periode der Elatina-Formation entspricht, sollten die Amplituden der Sonnenzyklen in Zukunft wieder kleiner werden und nach etwa neun Zyklen ein tiefes Minimum erreichen. Innerhalb der nächsten Zyklen sollte eine Phasenverschiebung in der Sägezahnstruktur um 180° stattfinden: dort kommt eine solche Verschiebung im Mittel alle 14.6 Zyklen vor, bei der Sonne blieb während der letzten 13 Zyklen die Abfolge konstant. Und zuguter Letzt sollte die Periodenlänge des Sonnenzyklus in den nächsten hundert Jahren ansteigen, was mit einer Abnahme der Amplitude einhergehen müßte.

Literatur

[1] G. E. Williams, C. P. Sonett: *Solar signature in sedimentary cycles from the late Precambrian Elatina Formation, Australia*; Nature **318** (12/1985)

[2] G. A. Chapman: *Variations of solar irradiance due to magnetic activity*; Ann. Rev. Astron. Astrophys. **25** 633–67 (1987)

[3] G. E. Williams: *Sunspot periods in the late Precambrian glacial climate and solar-planetary relations*; Nature **291** (6/1981)

[4] Gordon Newkirk, Jr.: *Variations in solar luminosity*; Ann. Rev. Astron. Astrophys. **21** 429–67 (1983)

[5] H. Scheffler, H. Elsässer: *Physik der Sonne und der Sterne*; B.I. Verlag

Sonneberg threatened

Sonneberg Observatory, renowned for variable-star research is threatened with closure shortly. The Sky Patrol would cease, the priceless plate archive, the invaluable bibliographic catalogue, and the human expertise would be dispersed who knows where.

If anyone (professional or amateur) would like to offer general support they are invited to contact:

Freunde der Sternwarte Sonneberg
Sternwarte Sonneberg
Sternwartestrasse 32
DO - 6400 Sonneberg

If anyone wants more details, or would be prepared to write direct to some of the German national and regional governmental organisations involved, I shall be happy to provide more information. I do have an email address for Sonneberg, but it is indirect, and it might be better not to swamp them with messages. If anyone has direct Internet access, and wants to contact me, my address is:

`SDUNLOP@STARLINK.SUSSEX.AC.UK`

Storm Dunlop

Keck's first light

Astronomers have unveiled the first operational image acquired with the Keck Observatory in Hawaii. The 10-meter Keck reflector was completed a year ago, but none of its instruments were ready then. Recently the first such instrument arrived on the mountain: a near-infrared camera with an indium antimonide detector array arranged in 256 by 256 pixels. Coupled to the Keck telescope and cooled to near absolute zero by liquid helium, the camera is sensitive enough to detect the heat of a single candle flame on the Moon.

The first-light image was of the unusual galaxy 4C 41.17 in Auriga. With a redshift of 3.8 it is – aside from a handful of quasars – the most distant galaxy known. The light captured in the image left the object when the universe was less than a quarter of its present age. It started out as blue light at a wavelength of 4580 Å, but by the time it splashed onto the Keck's segmented primary mirror it had been redshifted to 2.2 microns (22 000 Å) in the near infrared. *S&T News Bull. May, 8*

Gauging the Universe

S&T Technical Editor Rick Fienberg has just returned from a meeting in California of the American Astronomical Society. He reports that astronomers are beginning to home in on the true age of the universe, which is actually very uncertain and thought to be between 10 and 20 billion years. Thanks to the Hubble Space Telescope, observers have now been able to monitor certain variable stars called Cepheids in the galaxy M81. This is the same galaxy in which a bright supernova recently appeared. Cepheid variables periodically brighten and fade, and the length of these cycles depend on the stars' intrinsic brightness. So Hubble's data on the Cepheid periods allowed astronomers to determine their true brightness. Then comparing that with how bright they appear from Earth yielded the actual distance. Previously, M81 had been an estimated 4.5 to 18 million light-years away. The new Hubble result is 11 million light-years. Similar measurements of Cepheids in other galaxies should eventually refine the Hubble constant, a measure of the cosmic expansion rate, and pinpoint the age of the universe to within about 1.5 billion years. *S&T News Bull. Jun, 12*

One + One = One

Hubble has found evidence that elliptical galaxies result from the merger of two spirals. The telescope has revealed what looks like a face-on spiral galaxy in the core of NGC 7252, a disturbed galaxy in Aquarius some 300 000 light-years away. This feature is only 10 000 light-years across and rotates opposite to the rest of the system. Astronomers believe that the whirling disk of stars, gas, and dust was created by infalling material from the two parent galaxies. Many bright, bluish knots surround the minispiral in the Hubble image. A few of the brightest ones were first seen 11 years ago by Francois Schweizer, who suggested they might be new globular clusters formed in the merger. *S&T News Bull. Jun, 5*

Magellanic cannibalism

The Large Magellanic Cloud is being torn apart by the Milky Way and will eventually lose its identity as a separate galaxy. That's the word from astronomers at the University of California who claim to have measured, for the first time, the Cloud's motion through space in three dimensions. They used photographs taken with the 4-meter reflector in Chile to track the LMC's proper motion across the sky from 1974 to 1989. Over this 15-year interval the stars appeared to shift due eastward by 3/100 of an arc second. This implies that the LMC is crossing the sky at more than 200 km/sec, assuming it is 170 000 light-years away. This result puts the LMC at the leading edge of the Magellanic Stream, a 100°-long ribbon of stars and gas arcing over the south galactic pole and headed for the galactic plane. Team member Douglas Lin predicts that the LMC will eventually merge with our galaxy. *S&T News Bull. Jun, 19*

Fomalhaut's dusty disk

Astronomers Alan Stern, Michel Festou, and David Weintraub announce that the bright star Fomalhaut in the southern constellation Piscis Austrinus is surrounded by a huge disk of matter. They observed the star at the far-infrared wavelength of 1.3 mm. Fomalhaut is a 1^{st}-magnitude A3 star lying 22 light-years away. The disk is tilted to our line of sight and extends about 1 arc minute from the star. It apparently consists of cold dust grains orbiting the star. The only other main-sequence star to have such a disk is β Pictoris, which is 2 1/2 times farther away. *S&T News Bull. Apr, 3*

Supernova revisited

Remember Supernova 1987A, the brightest flare in nearly 400 years? Back in early 1987 this dazzler in the southern sky peaked at magnitude 2.9. Now the Hubble Space Telescope has checked up on it, using an instrument called the High-Speed Photometer. Observations made last June, in November, and in March show that the star's dying glow is not periodic anywhere from 400 μs to a half second. Its visual magnitude has now plummeted to about 18.2. Incidentally, the High Speed Photometer will be removed from the Hubble observatory later this year, in order to make room for a module that will focus the telescope's vision for three remaining instruments. *S&T News Bull. Jun, 5*

Nova Aquilae 1993

A relatively bright nova, visible in binoculars and small telescopes, has been discovered in the constellation of Aquila. Japanese observer Minoru Yamamoto found the star photographically on May 14th, when it was magnitude 7.6. Since then it was dimmed to approximately magnitude 8. Prediscovery images taken in April show no stars in the nova's position brighter than 12th magnitude. A spectrum taken by Mark Wagner (Ohio State University) and S. J. Austin and Sumner Starrfield (Arizona State University) shows it to be a nova of class Fe II, discovered soon after it reached maximum brightness. You'll find the nova about 3 degrees southwest of the 3^{rd}-magnitude star Delta Aquilae. The exact position, in equinox 2000 coordinates, is right ascension $19^h13^m2^s$, declination $+1°33'9''$. Until May 14th the nova has faded to roughly magnitude 8.5. A finder chart appears on page 8 in the July issue of Sky&Telescope magazine. *S&T News Bull. May, 22&29*

Uranus sees spots

Astronomers using near-infrared detectors and adaptive-optics technology have discovered a dark spot in the atmosphere of Uranus. The team was able to achieve a resolution of about half an arc second, wheras the planet's disk is currently 4 arc seconds across. The spot is located just south of the planet's equator. The development is important because the disk of Uranus has traditionally appeared very bland, even when viewed from close up in 1986 by Voyager 2. *S&T News Bull. Jun, 26*

Jupiter breaks out

Meanwhile, there is activity brewing on Jupiter itself. Jose Olivarez of the Association of Lunar and Planetary Observers reports that the planet's South Equatorial Belt has erupted. This is the 20th such outbreak since 1919. The disturbance, says Olivarez, shows up nicely in telescopes with apertures of at least 4 inches. Larger instruments should show a hint a bluish color. The SEB had faded to near invisibility in past months, but this new eruption is pumping dark material back into it. Olivarez notes that the dark outbreak contrasts beautifully with the rather pale Great Red Spot, which lags the center of the disturbance by about 28 degrees in longitude (17 and 45 degrees, respectively, in System II). *S&T News Bull. Apr, 17*

Jupiter's SEB & GRS

Jupiter's South Equatorial Belt has erupted with activity. The disturbance shows up nicely as a dark stripe, even though the SEB was much lighter some months ago. We've also received a report that the color of the Great Red Spot has intensified. Go check it out and let us know what you find. Just a note: every issue of Sky&Telescope lists times when the Red Spot is centered on Jupiter's disk. Over time the spot has shifted in longitude, as it often does; so the times we list are too early by about 16 minutes. *S&T News Bull. May, 8*

Ice on Io?

Researchers from NASA's Ames Research Center announced on June 8th that they have detected what may be water ice on the surface of Jupiter's moon Io. As evidence they cite new infrared spectra obtained with NASA's Kuiper Airborne Observatory, a jet transport that carries a large telescope. The team found that sunlight reflected from Io has a strong absorption at 2.79 μm, a feature shown by laboratory studies to be due to OH radicals and, by implication, water ice. The spectral feature implies that individual water molecules are trapped in the crystal structure of solid sulfur dioxide. Therefore, the water must exist only in minute quantities compared with the more pervasive sulfur-dioxide frost believed to coat Io's surface. If this absorption really is due to water ice, as opposed to other less likely compounds, the most likely sources are volcanic outgassing, the reaction of oxygen with protons captured from the solar wind, and cometary impacts. *S&T News Bull. Jun, 19*

A bizarre comet

The observations also continue to roll in for Comet Shoemaker-Levy, discovered on March 25th. It now appears that the comet was spotted independently a few days beforehand by S. Otomo in Japan and by Eleanor

Helin and two colleagues on Palomar Mountain. As reported last week, Comet 1993e is an amazing object. The "nucleus" is actually a bar of material one arc minute across, in which is embedded 16 or 17 separate little nuclei. The 12th-magnitude comet is located a few degrees from Jupiter in the sky right now, and apparently it broke apart after passing near that planet.

Brian Marsden of the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics cannot yet calculate an accurate orbit because 1993e is still well within the gravitational grip of Jupiter. But for now he estimates that the comet has a 43-year orbit that carries it between 4.0 and 5.7 a.u. from the Sun. Perihelion would have occurred in late 1988 and the close pass to Jupiter in mid-1992.
S&T News Bull. Apr, 3

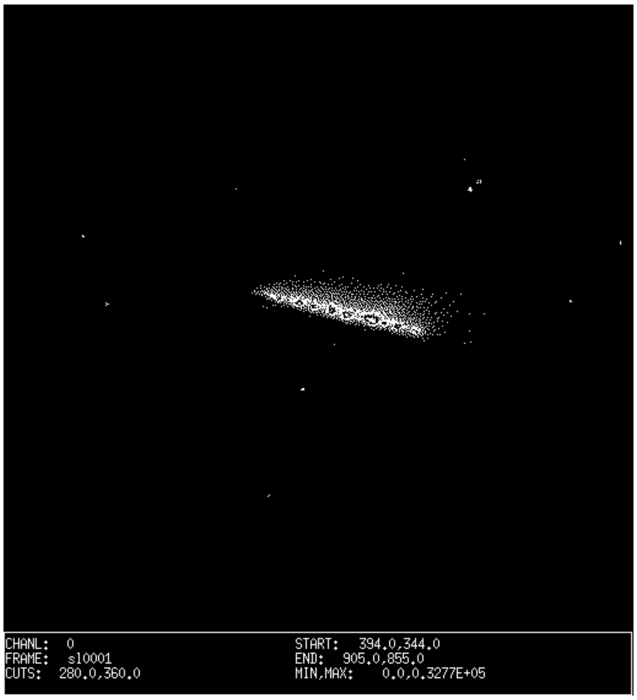

Abb. 1: CCD-Aufnahme des Kometen Shoemaker-Levy. Die einzelnen Nuklei des zerbrochenen Kometen sind in der auseinandergezogenen Struktur deutlich zu erkennen.

Comet Shoemaker-Levy

The nucleus watch for comet 1993e, Shoemaker-Levy, has reached a count of 20, according to observers Jane Luu and David Jewitt. This remarkable and unprecedented object is 12th magnitude and located a few degrees from Jupiter in the sky. In fact, its motion is mimicking that of Jupiter so closely that this gaggle of comet fragments may well have been captured into a loose orbit around the planet. If so, says Brian Marsden, 1993e would now be about its farthest from Jupiter, roughly 46 million kilometers. That's twice as far away as the most distant of Jupiter's known satellites. *S&T News Bull. Apr, 17*

Kamikaze comet

It now seems even more certain that Comet Shoemaker-Levy (1993e) suffered a wrenching near-miss as it passed extremely close to Jupiter last year, tearing it apart into a row of individual comets. The picture on the cover of our July issue, now in the mail, shows it looking like "pearls on a string." Calculations by Brian Marsden at the Smithsonian Astrophysical Observatory and Syuichi Nakano in Japan now reveal yet another surprise this enigmatic object has in store for us. More than 200 observations received in the last two months allowed them to refine its present orbit considerably. They find that there will be *another* close encounter with Jupiter around the end of July 1994! This one will be even more devastating than the last. Marsden estimates that more than half of the "nuclear train" could collide with Jupiter during a 3-day interval. Currently this unique "comet-ensemble" lies about 4° WSW of Jupiter, at right ascension $12^h 6\overset{m}{.}0$, declination $-1°53'$ (2000 coordinates). It is only magnitude 13.7, putting it beyond reach of most amateur telescopes, except those equipped with CCD cameras. *S&T News Bull. May, 29*

1993 KA2 Buzzes Earth

A tiny asteroid hurtled between the Earth and Moon last May 20th, but wasn't discovered until *after* passing through the neighborhood. Astronomer Tom Gehrels found it with the 36-inch Spacewatch telescope on Kitt Peak, on a number of images taken May 21st and 22nd. These were enough for Brian Marsden at the Minor Planet Center in Massachusetts to conclude that on May 20th 1993 KA2 missed colliding with Earth by only 95 000 miles. Shining at only magnitude 18.5 when first detected, the object is probably no bigger than 15 to 30 feet across. That makes it the smallest alien body ever detected outside the Earth's atmosphere. 1993 KA2 travels in an orbit inclined only 3° to the ecliptic, and it ducks inside the orbit of Venus every 3.3 years. In fact, prior to the discovery it was approaching Earth from the general direction of the Sun, making it impossible to detect ahead of time. *S&T News Bull. Jun 26*