

SDO, SUNRISE und noch mehr Einblicke in die Zukunft der Sonnenbeobachtung (Teil 3)

Ulrich v. Kusserow

Die in den beiden ersten Teilen dieser Artikelserie beschriebenen Satelliten-Missionen HINODE und STEREO haben ihre wissenschaftlichen Arbeiten erfolgreich fortgesetzt und weitere Ergebnisse veröffentlicht (siehe http://solar-b.nao.ac.jp/latest_e/ und <http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/gallery.shtml>). So gelangen den beiden sich voneinander immer weiter entfernenden STEREO-Satelliten 3D-Aufnahmen, die mit Hilfe von zwei rot beziehungsweise cyan gefärbten „Brillengläsern“ einen beeindruckenden dreidimensionalen „Stereoblick“ auf die Sonne und ihre Magnetfelder zulassen (s. <http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/3dimages.shtml>).



Abb. 23: Polare Achse und Gabelmontierung für das neue Sonnenteleskop NST

© März 2007, DFM Engineering, Colorado

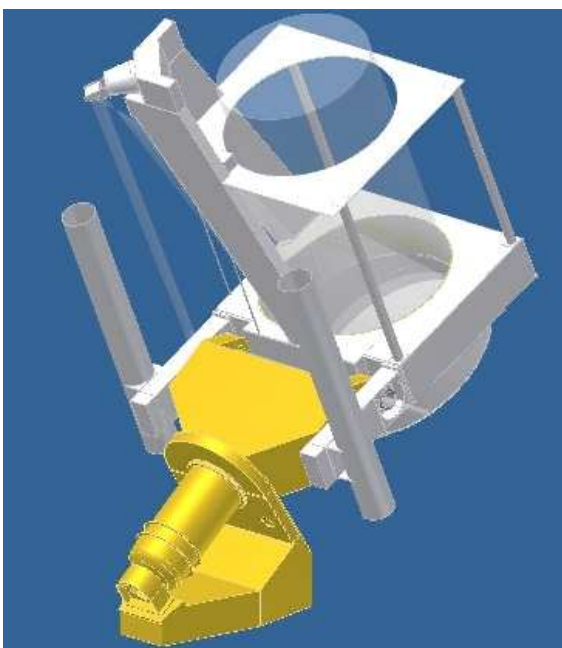


Abb. 24: Geplantes Aussehen des NST, © BBSO

Die Einbauarbeiten des New Solar Telescope (NST) im Big Bear Solar Observatory (BBSO) gehen offensichtlich zügig voran. Im September dieses Jahres wird wohl das Teleskop zusammengesetzt werden. Im Sommer laufen noch größere Tests der Optik im Spiegel-Labor an der Universität von Arizona.

Abb. 23 zeigt die polare Achse und Gabelmontierung des Teleskops, Abb. 24 das aktuell geplante Aussehen des NST. First Light wird es voraussichtlich schon im Herbst dieses Jahres geben.

Das GREGOR Teleskop ist weitgehend fertig gestellt. Inzwischen wurde schon ein großer Teil der Optik eingebaut und justiert. Es fehlen jedoch noch der Primärspiegel (Durchmesser 1500 mm) und der Sekundärspiegel (Durchmesser 420 mm). Auch die wissenschaftlichen Post-Fokus-Instrumente werden noch vor dem Einbau des Primärspiegels fertig gestellt sein. Der Einbau des Sekundärspiegels erfolgt voraussichtlich im Herbst dieses Jahres. Da die Entwicklung des 1,5 m Primärspiegels aus Silizium-Karbid doch eine große Herausforderung darstellt, verzögert sich dessen Lieferung noch bis Mitte 2008. Danach ist dann das „First Light“ zu erwarten.

In diesem dritten Teil der Artikelserie soll es vor allem um das zukünftige, im Weltraum stationierte Sonnenobservatorium SDO und das von einem Ballon in der Stratosphäre über den Polargebieten getragene SUNRISE-Teleskop gehen.

Das Solar Dynamics Observatory (SDO)

Der am 2.12.1995 gestartete Sonnensatellit SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) arbeitet seit nun schon beinahe 12 Jahren sehr erfolgreich. Fast alle Instrumente funktionieren noch einwandfrei und liefern den Wissenschaftlern wichtige Daten für die Erforschung der Vorgänge im Innern und in der Atmosphäre der Sonne. Aber auch dieser Satellit wird „in die Jahre kommen“ und sicherlich irgendwann in den nächsten Jahren abgeschaltet werden. In dem Programm „Living With a Star“ der NASA (<http://lws.gsfc.nasa.gov/>) ist deshalb für den August 2008 der Start eines neuen Sonnensatelliten mit dem Namen „Solar Dynamics Observatory“ (SDO) vorgesehen, der die zentralen Aufgaben des SOHO-Satelliten mit noch leistungsfähigeren Instrumenten übernehmen wird (siehe Abb. 25 und <http://sdo.gsfc.nasa.gov/mission/about.php>). Diese Mission hat eine Laufzeit von mindestens fünf Jahren, wird wahrscheinlich aber nach den Erfahrungen mit SOHO noch wesentlich länger arbeiten können. Genügend Treibstoff ist jedenfalls für zehn Jahre vorhanden.

Für den Start wird eine Atlas-V-(401)-Rakete (siehe Abb. 26) zum Einsatz kommen, die den Satelliten von Cape Canaveral aus in einen geostationären Transferorbit befördern wird.

Anschließend zünden eigene Raketentriebwerke, um SDO in die gewünschte endgültige Umlaufbahn zur ungestörten kontinuierlichen Beobachtung der Sonne zu bringen. Zweimal im Jahr wird der Sonnensatellit dabei aber zwei bis drei Wochen dauernde so genannte „Finsterniszeiten“ durchlaufen, in denen der freie Blick auf die Sonne durch die Erde für jeweils ungefähr 70 Minuten gestört wird. Solche Auszeiten, notwendige Manöver des Satelliten sowie technisch bedingte Unterbrechungen der Arbeit in der Bodenstation können die wissenschaftliche Beobachtung der Sonne für einige Zeit behindern.

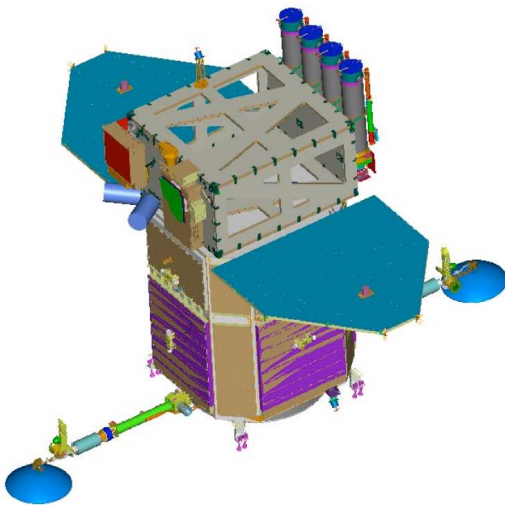


Abb. 25 : Geplantes Aussehen des Satelliten SDO
© SDO, NASA

Die gesamte Masse des Raumschiffes wird beim Start 3.200 kg betragen. Die Masse der wissenschaftlichen Nutzlast liegt bei etwa 270 kg, die des Treibstoffs beträgt 1.400 kg. Die Gesamtlänge des Satelliten entlang der auf die Sonne gerichteten Achse ist 4,5 Meter. Die Seitenlängen betragen jeweils 2,22 m. Die Spannweite der voll entfaltenen Sonnensegel liegt bei 6,25 m, die durch sie erzielte Leistung beträgt 1.540 Watt. Die Hochleistungsantennen rotieren einmal pro Umlauf, um der Erde zu folgen. Alle durch sie vom Satelliten gesendeten Daten werden von einer einzigen Bodenstation auf der White Sands Missile Range in Neu Mexiko aufgefangen, die speziell für die SDO-Mission mit zwei gleichwertigen 18-Meter-Antennen ausgerüstet ist. Die SDO-Mission ist entwickelt worden, um den Einfluss der Sonne auf die Erde und den erdnahen Weltraum besser zu verstehen. Zu diesem Zweck soll die Sonnenatmosphäre auf möglichst kleinen Raum- und Zeitskalen sowie in möglichst vielen wichtigen Wellenlängenbereichen simultan untersucht werden, sollen umfangreiche Daten über das Sonneninnere aus helioseismologischen Untersuchungen über möglichst lange Zeiträume gesammelt werden. SDO soll herausfinden, wie die Sonnenaktivität erzeugt wird, wie das Weltraumwetter durch diese Aktivität entsteht, wie Veränderungen der solaren Aktivität Einfluss auf das Leben auf der Erde nehmen und wie sie die vom Menschen konstruierten technologischen Systeme beeinflussen können.



Abb. 26 : Start des SDO-Satelliten mit einer Atlas-V-(401)-Rakete , © NASA

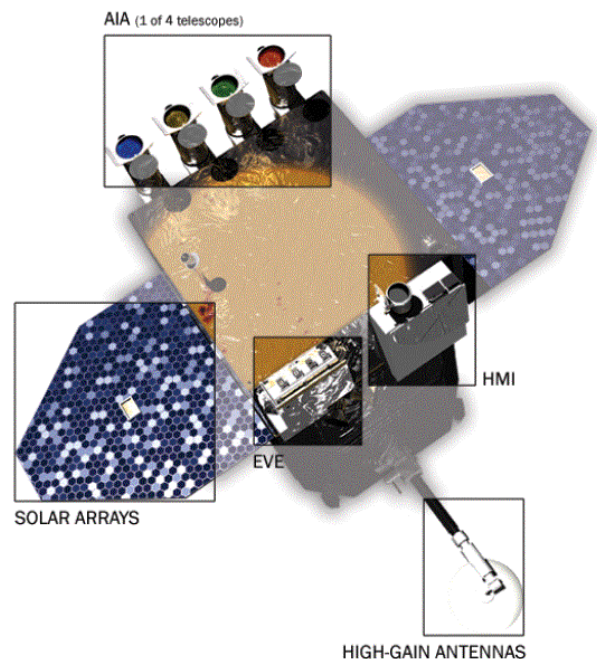


Abb. 27: Lage der Beobachtungsinstrumente, des Sonnensegels und der Hochleistungsantennen im SDO, © NASA

Die wissenschaftlichen Ziele dieses Satellitenprojekts sind es, insbesondere Antworten auf die folgenden Fragen zu finden:

- Welcher Mechanismus treibt den nahezu periodischen 11-jährigen Zyklus der Sonnenaktivität?
- Wie wird der magnetische Fluss in aktiven Gebieten erzeugt, konzentriert und in der Sonnenatmosphäre wieder aufgelöst?
- Wie reorganisiert die auf kleinen Längenskalen wirkende magnetische Rekonnexion die großskalige Topologie magnetischer Feldstrukturen und die in ihnen enthaltenen Stromsysteme neu?
- Wie signifikant erklärt das Einsetzen der magnetischen Rekonnexion die Aufheizung der Korona und die Beschleunigung des Sonnenwindes?
- Wo genau, in welchen solaren Strukturen, entsteht die beobachtete starke Variabilität der solaren Ausstrahlung im extremen ultravioletten Wellenlängenbereich?
- Wie hängt die Veränderung dieser hochenergetischen Strahlung mit dem magnetischen Aktivitätszyklus zusammen?
- Die Entwicklung welcher magnetischer Feldkonfigurationen führt zur Freisetzung gewaltiger magnetischer Energien in so genannten Flares, zur Eruption der als Protuberanzen bezeichneten solaren Gaswolken und zur Erzeugung koronaler Massenauswürfe? Welche Prozesse beschleunigen solare Teilchen auf hohe Energien, setzen hochenergetische Strahlung frei?
- Erklärt sich die Struktur und Dynamik des Sonnenwindes in der Nähe der Erde aus dem Ablauf der Entwicklung magnetischer Feldstrukturen in der Sonnenatmosphäre?
- Wann wird besonders intensive solare Aktivität entstehen? Wird es jemals möglich sein, akkurate und vertrauenswürdige Vorhersagen für das Weltraumwetter auf kurzen und langen Zeitskalen zu machen?

Um der Beantwortung dieser Fragen näher zu kommen, sollen in dem Solar Dynamics Observatory die folgenden Messungen und Darstellungen gemacht werden:

- Messung der extrem ultravioletten Ausstrahlung der Sonne in kurzen Zeitabständen
- Messung der Dopplerverschiebungen von Wellenlängen auf Grund der Oszillation der Sonne über die gesamte Sonnenscheibe hinweg
- Hochauflösende Messungen des dreidimensionalen magnetischen Feldvektors sowie des in Beobachtungsrichtung wirkenden so genannten longitudinalen Magnetfeldes über die gesamte Sonnenscheibe hinweg
- So genannte Filtergramme, Bilder der Chromosphäre und inneren Korona in verschiedenen

Wellenlängen, bei verschiedenen Temperaturen über die gesamte Sonnenscheibe hinweg

Alle diese Messungen und Abbildungen sollen kontinuierlich über einen großen Zeitraum durchgeführt beziehungsweise erzeugt werden, um die signifikanten Variationen der Sonne für möglichst viele verschiedene, jeweils charakteristische Zeitpunkte im Laufe des Sonnenzyklus ermitteln zu können.

Abbildung 27 veranschaulicht die Lage der folgenden drei Beobachtungsinstrumente an Bord des Sonnensatelliten sowie des Sonnensegels und der Hochleistungsantennen:

1. Helioseismic and Magnetic Imager (HMI)

Dieses Instrument wird den Ursprung der Sonnenaktivität durch Analyse des Sonneninneren mit Hilfe helioseismologischer Untersuchungen sowie durch Messung der verschiedenen Komponenten des solaren Magnetfeldes erforschen. Hierdurch soll ein besseres Verständnis für die folgenden, miteinander verbundenen Prozesse erzielt werden: Wirkung des Sonnendynamos und die Dynamik in der Konvektionszone, Ursprung und Entwicklung der Sonnenflecken und aktiven Gebiete, Quellen und Treiber der solaren Aktivität sowie Verbindungen zwischen dem Sonneninneren und der Dynamik der Sonnenkorona sowie der Heliosphäre. HMI wird dabei die Fähigkeiten eines ähnlichen Instrumentes an Bord des Satelliten SOHO durch kontinuierliche Beobachtung und Vermessung der gesamten Sonnenscheibe mit höherer Auflösung übertreffen.

2. Atmospheric Imaging Assembly (AIA)

Dieses Instrument wird die gesamte Sonnenatmosphäre in insgesamt 10 verschiedenen Wellenlängen alle 10 Sekunden aufnehmen. Mit diesen Abbildungen können Veränderungen koronaler magnetischer Bögen beobachtet werden, die Flares, Eruptionen der Protuberanzen sowie koronalen Massenauswürfen vorangehen. Dadurch, dass dieses Instrument die gesamte Sonnenscheibe beobachtet, können einander beeinflussende Variationen der Feldstrukturen in selbst weit auseinanderliegenden Gebieten verfolgt werden. Dadurch, dass AIA auch im extrem ultravioletten Wellenlängenbereich (EUV) arbeitet, können anhand von besonderen Aufhellungen in den von diesem Instrument erzeugten Abbildungen die Orte identifiziert werden, die große Energien in diesem Spektralbereich freisetzen. In diesem Zusammenhang ergänzt AIA die Arbeit des dritten Instruments.

3. Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE)

Dieses Instrument wird die globale Ausstrahlung der Sonne im extrem ultravioletten Wellenlängenbereich mit bisher nicht erreichter spektraler Auflösung,

schneller Zeitabfolge und Präzision messen. Erzielt werden soll ein besseres Verständnis von Variationen auf Zeitskalen, in denen der erdnahe Weltraum möglicherweise auch das Erdklima beeinflusst.

Das ballongetragene SUNRISE-Observatorium

Schon im Oktober dieses Jahres soll es einen Vortest mit einem kleineren 0.20 m Teleskop geben. Aber erst für den Juni 2009 ist der erste Start des ballongetragenen Observatoriums mit dem leichtgewichtigen 1 m SUNRISE-Teleskop geplant.

Der Ballon (s. Abb. 28) mit dem in einer Gondel arretierten Teleskop (s. Abb. 29) wird in der schwedischen Station namens ESRANGE nahe Kiruna (67.89°N , 21.10°O) in die Stratosphäre in eine Höhe von 35-40 km aufsteigen. Der Flug über die Arktis wird 5 Tage dauern, die Landung soll im nördlichen Kanada erfolgen. In dieser Zeit wird das Teleskop ununterbrochen auf die Sonne ausgerichtet sein und Beobachtungen und Messungen im ultravioletten und sichtbaren Wellenlängenbereich machen. Ein zweiter, 9 bis 12 Tage dauernder Flug des Observatoriums ist für ein Zeitfenster zwischen Dezember und Januar in einem der folgenden Jahre mit einer zirkumpolaren Flugbahn über der Antarktis geplant. Startplatz wird hierbei Williams Field in der Nähe von McMurdo (77.86°S , 167.13°O) sein. Bei beiden Flügen in der Nähe der Polgebiete in der jeweiligen Sommerzeit kann die Sonne ohne Unterbrechungen beobachtet werden, variieren die thermischen Bedingungen nur wenig, bleibt die Flughöhe nahezu konstant.



Abb. 28: Das Sunrise-Observatorium wird mit einem solchen Ballon in die Stratosphäre getragen werden
© Columbia Scientific Ballooning Facility, NASA

Unter der Gesamtleitung von Sami K. SOLANKI vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Katlenburg-Lindau arbeiten Wissenschaftler vom Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik in Freiburg, von der Universität in Utrecht (Niederlande), vom High Altitude Observatory in Boulder (USA), vom Instituto de Astrofísica de Canarias (Spanien) und vom Lockheed-Martin Solar & Astrophysics Laboratory in Palo Alto (USA) am

SUNRISE-Projekt mit. Nähere Informationen über dieses Projekt findet man im Internet unter <http://www.mps.mpg.de/en/projekte/sunrise/> sowie <http://star.mpae.gwdg.de/Sunrise/index.html>. SUNRISE wird im Rahmen des LDB (Long Duration Balloon)-Programms der NASA fliegen.

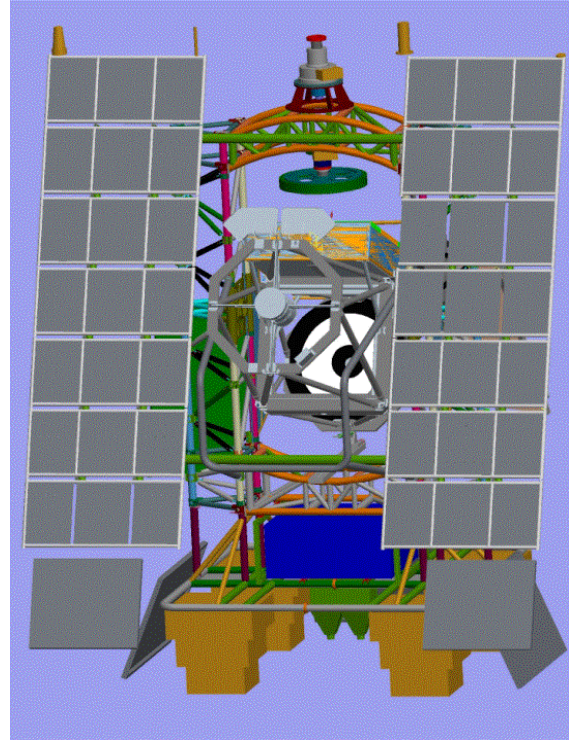


Abb. 29: Aufhängung des Spiegelteleskops in einer Gondel, © MPS



Abb. 30: Die Gondel des SUNRISE-Observatoriums
©High-Altitude Observatory (NCAR, Boulder, Colorado/USA)

Zentrales Ziel des SUNRISE-Projektes ist es, die Struktur und Dynamik magnetischer Felder in der Sonnenatmosphäre besser zu verstehen. Die magnetischen Felder sind bekanntlich die Quellen der Sonnenaktivität. In der Sonne entwickeln sich intensive Feldkonzentrationen auf typischen Längenskalen von unter 100 km, die die Dynamik und Energetik der gesamten Sonnenatmosphäre wesentlich mitbestimmen. Ein im ultravioletten Wellenlängenbereich ungestört von den in der tieferen Atmosphäre der Erde üblichen Turbulenzen arbeitendes 1 m-Teleskop könnte bis zu 35 km kleine Strukturen auflösen und wesentlich zur Beantwortung der folgenden Fragestellungen beitragen:

- Wie wird das solare magnetische Feld durch die Sonnenoberfläche in die Sonnenatmosphäre gebracht? Wie entwickelt es sich, wie entweicht es wieder?
- Welches sind der Ursprung und die Eigenschaften der in der Photosphäre überall sporadisch auftauchenden magnetischen Feldstrukturen?
- Wie verläuft die Wechselwirkung der magnetischen Feldstrukturen mit den konvektiven Plasmaströmungen?
- Wie bewerkstelligt das solare Magnetfeld den Transport von Impuls und Energie in die äußere Sonnenatmosphäre?
- Welches sind die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse für Veränderlichkeit der solaren UV-Strahlung?
- Was ist die physikalische Natur der solaren Chromosphäre, wie wird sie geheizt?

Abbildung 30 zeigt das über 5 m hohe Gondelgerüst, an dem das Teleskop mit dem Instrumententisch sowie die mit Solarzellen bedeckten Sonnensegel befestigt werden (siehe auch Abbildung 29). Die Ballongondel richtet das Teleskop präzise auf die Sonne aus. Die Ausrichtung und Scharfstellung des Bildes erfolgt dabei durch ein innovatives Kontrollsystem, beruhend auf einem Wellenfrontsensor.

Die Bildstabilität wird durch den Einsatz eines so genannten „Correlation Tracker“ bewerkstelligt, der einen mit Hochgeschwindigkeit schwenkbaren Spiegel kontrolliert. Die bei der Beobachtung gewonnenen wissenschaftlichen Daten werden auf Festplatten abgespeichert. Über Satellitenfunkverbindungen kann das Experiment gesteuert werden.

Der bei der Firma SAGEM in Frankreich aus Zerodur gefertigte parabolische 1 m-Hauptspiegel des Teleskops (siehe Abbildung 31) hat eine Masse von nur 44 kg und eine Brennweite von 2,5 m. Im Primärfokus ist ein Wärmeabweiser platziert, der 99% des Sonnenlichts aus dem Teleskop lenkt und dadurch die Wärmebelastung auf etwa 10 Watt reduziert.

Er begrenzt dabei das auf der Sonne zu beobachtende Feld auf eine Länge von 148.000 km.

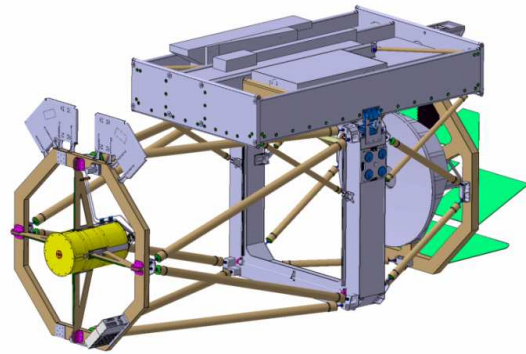


Abb. 31: Das SUNRISE-Teleskop mit der aufgesetzten Instrumentenplattform, © Kayser-Threde GmbH, München

Der typisch für ein Gregory-System (siehe hierzu auch den Strahlengang des GREGOR-Teleskops in Abb. 20 der ON 217) hinter dem Primärfokus gelegene elliptische Sekundärspiegel wird hinsichtlich seines Abstandes vom Primärspiegel durch ein Servosystem auf Basis der Daten vom Wellenfrontsensor gesteuert. Er erweitert die effektive Brennweite des optischen Systems auf 25 m. Der geeignete Abstand der beiden bildgebenden gewölbten Spiegel wird dabei durch einen Wellenfrontsensor ermittelt und realisiert. Zwei hinter der zentralen Durchbohrung des Primärspiegels gelegene Planspiegel lenken das Licht zur Instrumentenplattform. Zur Ermittlung der Stärke und Ausrichtung der magnetischen Feldstrukturen müssen Polarisationsmessungen des Lichtes durchgeführt werden. Da die beiden Planspiegel zusätzlich eine konstante instrumentelle Polarisation hervorrufen, muss dieser Effekt bei der Vermessung der Polarisation hinter dem Sekundärfokus berücksichtigt werden. Das gesamte Teleskop, das bei der Firma KAYSER-THREDE in München gebaut wird, hat eine Länge von 4 m, eine Breite von 1,4 m und vergrößert durch die Instrumentenplattform eine Höhe von 2 m.

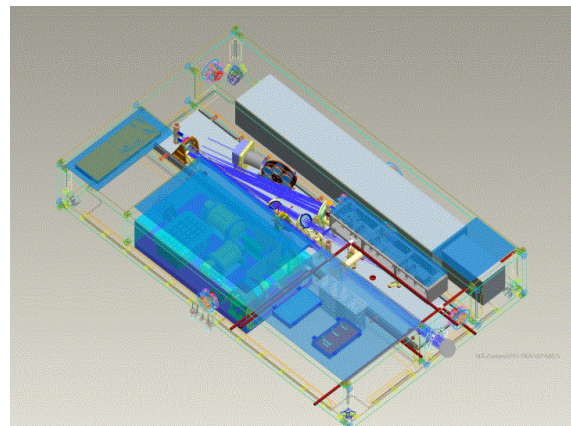


Abb. 32: Instrumentenplattform des SUNRISE-Observatoriums, © MPS

Neben dem Correlation Tracker und dem Wellenfrontsensor sind auf der Instrumentenplattform die folgenden drei Beobachtungsinstrumente installiert (siehe Abbildung 32):

1. SUNRISE Polarimetric Spectrograph (SUPOS)

Dieses Instrument besteht aus einem so genannten Echelle-Spektrographen, mit dem die Messung des chromosphärischen Magnetfeldes anhand der Ca II – Linie bei 854 nm erfolgen soll.

2. SUNRISE Filter Imager (SUFI)

Dieses Instrument beobachtet die Photosphäre der Sonne in vier verschiedenen Wellenlängenbändern. Der Kanal bei 225 nm im Ultravioletten erlaubt beispielsweise Studien der Photosphäre und unteren Chromosphäre mit einer räumlichen Auflösung von 35 km. Beobachtungen im OH-Band bei 312 nm und dem CN-Band bei 388 nm sind auf Grund eines hohen Kontrastes besonders empfindlich für thermische Inhomogenitäten in der Photosphäre.

Um möglichst präzise, nur beugungsbegrenzte Beobachtungsergebnisse zu erhalten, werden mit den Daten so genannte „Phase-Diversity“-Bildrekonstruktionen durchgeführt. Für diese Rekonstruktionsmethode werden gleichzeitig sowohl eine optimal fokussierte Abbildung als auch eine mit einem bekannten Grad der Defokussierung erzeugte Abbildung desselben Objekts benötigt.

Das vierte Linienband, in dem dieses Instrument die Sonne beobachtet, liegt bei 300 nm.

3. Imaging Magnetograph Experiment (IMAX).

Dieses Instrument ist ein hinsichtlich der Polarisation des Lichtes sensibler Filtergraph für die Beobachtung von Dopplerverschiebungen und Zeeman-Aufspaltungen empfindlicher Linien (Fe I bei 525,06 nm). Hiermit können Geschwindigkeiten und zweidimensionale Bilder des vollständigen magnetischen Feldvektors erstellt werden.

Bei hoher räumlicher Auflösung und zufriedenstellendem großen Beobachtungsfeld kann SUNRISE die Entwicklung großräumig strukturierter solarer Magnetfelder über eine genügend lange Beobachtungszeit durch simultane Beobachtung photosphärischer und chromosphärischer Vorgänge gleichzeitig mit drei leistungsfähigen Instrumenten verfolgen.

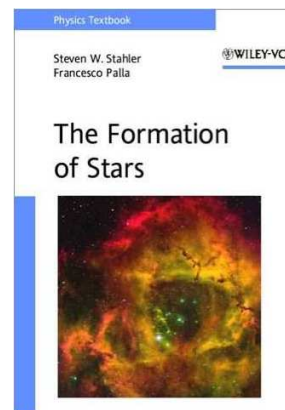
Die bei erfolgreichen Ballonflügen erworbenen Erkenntnisse könnten wesentliche Grundlagen für die Entwicklung eines für die Zukunft geplanten Weltraum-Sonnenteleskops sein.

(Fortsetzung folgt)



Bücher, Bücher:

The Formation of Stars



Steven W. Stahler,
Francesco Palla
Verlag: WILEY-VCH
Physics Textbook 2004
852 Seiten
ISBN 3-527-40559-3

Das Verständnis davon, wie Sterne entstehen, von der interstellaren Wolke bis zum Protostern, ist ein Forschungsgebiet, das zur Zeit intensiv mit dem

Hubble Space Telescope sowie anderen erd- und orbitgestützten Instrumenten betrieben wird.

Das vorliegende Lehrbuch wendet sich vor allem an Physik- bzw. Astronomiestudenten nach dem Vordiplom („Undergraduate“). Aber auch für den fortgeschrittenen Amateurastronomen ist dieses Buch zu empfehlen. Die beiden Autoren – anerkannte Experten auf dem Gebiet der Sternbildung – setzen in ihrem Buch keine speziellen astronomischen Vorkenntnisse voraus. Vielmehr werden die physikalischen Grundlagen der Sternbildung systematisch und gut verständlich hergeleitet. Dabei werden stets die theoretischen Stern-Modelle mit den experimentellen Fakten verglichen. Auch schwierigere Zusammenhänge sind didaktisch gut erläutert und anschaulich illustriert. Zu bemerken ist allerdings, dass in diesem Lehrbuch keine Übungsaufgaben angeboten werden, die das erworbene Wissen vertiefen könnten.

Faszinierende Fotos von Sternentstehungsgebieten motivieren die erklärenden Texte, Diagramme und Formeln. Randbedingungen für die Sternentstehung wie das Jeans-Kriterium und die Vorgänge in den Staub- und Gaswolken bei der Sternentstehung sind gut erklärt und im Modell dargestellt. Für die Zeitskalen der Sternentstehung gibt es extra Kapitel z.B. zur Herleitung der freien Fallzeit bis zur Bildung der Protosterne. Geburtslinien der Sterne mit verschiedenen Anfangsmassen werden anhand des Hertzsprung-Russell-Diagramms erläutert. Die Autoren gehen insbesondere auf die wichtige Rolle der Magnetfelder bei der Sternentstehung ein. T-Tauri-Sterne und ihre Veränderlichkeit werden durch die Vorgänge, die bei der Sternentstehung zur Kernfusion führen, verständlich.

Fazit: Dieses Lehrbuch sollte in keiner Fachbibliothek fehlen, die von naturwissenschaftlich interessierten Lesern aufgesucht wird.