

Diss ETH No.

Molecular Processes and Turbulent Magnetic Fields in the Solar Atmosphere

A dissertation submitted to the

ETH Zürich

for the degree of
Doktor der Naturwissenschaften

Presented by

Alexander I. Shapiro

Dipl. Astron. St. Petersburg State University
born March 17, 1982
from Saint-Petersburg, Russia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. S. V. Berdyugina, examiner
Prof. Dr. J. O. Stenflo and
Prof. Dr. J. R. Kuhn, co-examiners

Zürich, 2008

Abstract

Coherent scattering in the solar atmosphere leads to the formation of the linearly polarized solar spectrum, just like Rayleigh scattering leads to the polarization of the blue sky. One of the most prominent features of the linearly polarized solar spectrum is the CN violet system as it is also in the unpolarized spectrum. This thesis is devoted to the modeling and interpretation of this system in both spectra and developing it into a very sensitive tool for studying the magnetic fields and the temperature structure of the solar atmosphere.

The understanding of the solar magnetic field structure is very important as it is connected with and even controls most of the solar activity phenomena. Zeeman effect diagnostics allows to measure strong directed magnetic fields which only cover about 1% of the solar atmosphere. The remaining part is occupied by weak entangled magnetic fields with mixed polarity, which might significantly contribute to the overall solar magnetic energy. These fields are invisible to the Zeeman effect due to signal cancellation.

Therefore the discovery of the linearly polarized solar spectrum opened a new epoch in solar physics. The polarization due to the scattering processes is modified by weak entangled magnetic fields via the Hanle effect and thus, provides us with a unique possibility to access and study such “hidden” magnetic fields.

Molecular lines are very useful for probing magnetic fields as, due to their strong temperature sensitivity, different molecules sample different, narrow layers of the solar atmosphere. Therefore the extension of the atomic Hanle effect to molecular lines can provide the 3D structure of the solar turbulent magnetic field. Moreover, due to the broad range of magnetic sensitivities within narrow spectral regions molecular lines can be used for employing the differential Hanle effect technique, which allows dramatically reduced model dependence of the obtained magnetic

field.

This thesis consists of two main parts which reflect the two consecutive steps in the modeling of the polarized solar spectrum. First, the physical properties of the molecular scattering process have to be understood. For the CN violet system, it implies taking into account the Paschen-Back effect on the fine structure (which results in a change of intensities and line positions) and interference effects between the fine structure components itself. Both effects influence the Hanle effect and lead to the consequences which are analyzed in detail in the first part of this thesis.

Then, to connect the coherent scattering and physical properties of the solar plasma with the emerged solar radiation, which is measured by our detectors, radiative transfer theory has to be applied. The presence of the scattering processes implies the non-equilibrium nature of the problem. Its self-consistent solution is especially complicated for molecular bands as they usually consist of a huge number of transitions which couple the numerous vibrational-rotational molecular levels. This, for example, makes the two-level approximation, often used in atomic calculations unsuitable. Moreover, there is a strong lack of information about the molecular collision rates so they basically enter the calculations as additional free parameter.

In the second part of the thesis we present two radiative transfer models with different degrees of complexity and applicability. These models allow us to successfully fit the observations of the CN violet system in both polarized and unpolarized spectra and provide us with a magnetic field estimation. We discuss in detail the model-dependence of our results and general problems of the 1D solar spectrum modeling.

The enormous potential of the linearly polarized solar spectrum makes it one of the main tools for studying solar magnetic fields, which becomes very urgent nowadays, as they can affect the Earth's climate and, hence, our life.

Zusammenfassung

Koherente Streuung in der Sonnenatmosphäre führt zu einem linear polarisierten Spektrum, genauso wie der blaue Himmel durch die Rayleigh Streuung polarisiert wird. Eines der herausstechendsten Merkmale des linear polarisierten (wie auch des unpolarisierten) Sonnenspektrums ist das sogenannte CN violet-System. Diese Doktorarbeit befasst sich mit der Modellierung und Interpretation dieses Systems in beiden Spektren um es zu einem sehr empfindlichen Werkzeug zur Untersuchung der Magnetfeld- und Temperaturstruktur der Sonnenatmosphäre weiter zu entwickeln.

Das Verständnis der Magnetfeldstruktur ist sehr wichtig, da sie einen Grossteil der Sonnenaktivität beeinflusst oder sogar kontrolliert. Die bislang bewährte Anwendung des Zeeman Effekts erlaubte es lediglich starke, gerichtete Magnetfelder, welche nur gerade 1% der Sonnenoberfläche bedecken, zu untersuchen. Die restlichen 99% enthalten schwache Felder unterschiedlicher Richtung, welche für den Zeeman Effekt nicht sichtbar sind, die aber durchaus einen namhaften Beitrag zur gesamten magnetischen Energie in der Sonnenatmosphäre liefern können.

Deshalb hat die Entdeckung des linear polarisierten Spektrums eine neue Epoche der Sonnenphysik eingeläutet. Die Polarisation welche beim Streuprozess entsteht wird durch die schwachen Magnetfelder via Hanle Effekt beeinflusst und erlaubt es uns deshalb in einzigartiger Weise diese bislang unzugänglichen Magnetfelder zu studieren.

Moleküllinien sind dazu besonders geeignet, da sie ihren Einfluss aufgrund ihrer stark temperaturabhängigen Häufigkeit jeweils nur in einer dünnen Athmosphärenschicht ausüben. Verschiedene Moleküle können so verschiedene Bereiche der Sonnenatmosphäre zugänglich machen. Deshalb ist die Erweiterung der Modellierung des atomaren Hanle Effekts auf Moleküle ein wichtiges Anliegen durch welches eine 3D-Rekonstruktion der Magnetfeldstruktur ermöglicht wird. Darüber hinaus

erlaubt die unterschiedliche magnetische Empfindlichkeit verschiedener Linien innerhalb eines engen Spektralbereichs die Anwendung des sogenannten differentiellen Hanle Effekts, welcher eine dramatisch reduzierte Modellabhängigkeit ermöglicht.

Die vorliegende Doktorarbeit ist in zwei Teile aufgeteilt, welche die beiden Schritte bei der Modellierung wiedergeben. Zuerst müssen die physikalischen Eigenschaften der molekularen Streuung genau verstanden werden. Für das CN violet-System bedeutet dies die Berücksichtigung sowohl des Paschen-Back Effekts, welcher Intensität und Position einer Linie beeinflusst, als auch die der Interferenzen zwischen den Feinstrukturturniveaux. Der Einfluss dieser beiden Effekte wird im ersten Teil im Detail untersucht.

Als zweites muss die Strahlungstransporttheorie angewendet werden. Sie verbindet Streuprozesse und Zustand des solaren Plasmas mit der ausgehenden Strahlung, die von einem Detektor gemessen werden kann. Die Streuprozesse führen zu einem Nicht-Gleichgewichtszustand des Plasmas. Die selbst-konsistente Lösung des Strahlungstransportes für Molekülbanden wird dadurch und zusätzlich durch die zahlreichen Übergänge, welche die verschiedenen Rotations- und Vibrationszustände miteinander koppeln, besonders kompliziert. Dies verhindert insbesondere die im atomaren Fall häufig verwendete 2-Level Approximation. Darüber hinaus sind die Stossraten für Moleküle so ungenau bekannt, dass sie lediglich als freier Parameter des Modell behandelt werden können.

Im zweiten Teil werden zwei unterschiedlich komplexe Strahlungstransportmodelle verwendet. Die gute Übereinstimmung der Modelle mit dem polarisierten und dem unpolarisierten Spektrum ermöglicht eine Abschätzung des Magnetfeldes. Die Modellabhängigkeit der Resultate und allgemeine Probleme bei der eindimensionalen planparallelen Modellierung des Strahlungstransports werden im Detail untersucht.

Im linear polarisierten Spektrum als Tool zur Untersuchung von Magnetfeldern liegt noch erhebliches weiteres Potential. Dies ist heutzutage besonders wichtig, da die durch die Magnetfelder verursachte Sonnenaktivität auch das Erdklima—und damit unser Leben—beeinflussen kann.