



Doctoral Thesis

Radiative transfer with polarized scattering in the magnetized solar atmosphere

Author(s):

Fluri, Dominique Martin

Publication Date:

2003

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004522903> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss ETH No. 15007

Radiative Transfer with Polarized Scattering in the Magnetized Solar Atmosphere

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doktor der Naturwissenschaften

Presented by

Dominique M. Fluri

Dipl. Phys. ETH
born November 10, 1972
from Luterbach, SO

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J.O. Stenflo, examiner
Dr. S.V. Berdyugina and
Dr. M. Faurobert, co-examiners

Zurich, 2003

Abstract

This thesis is devoted to the interpretation of the linearly polarized solar spectrum, which is formed in coherent scattering. The theoretical tool applied and further developed is radiative transfer.

Scattering polarization offers a wide range of diagnostic opportunities. It gives additional constraints on chemical or thermodynamic properties of stellar atmospheres like abundances, temperature, and density. The most promising diagnostic potential of scattering polarization is the possibility to use the Hanle effect to explore magnetic field regimes that remain inaccessible for the Zeeman effect. In particular, scattering polarization is sensitive to weak turbulent magnetic fields.

Before these diagnostic tools can be applied it is essential to fully understand the underlying physics. The Sun serves as a convenient laboratory where the nature of the involved processes can be studied in detail. The spectral structure of scattering polarization results in general from a combination of various contributing physical mechanisms. In this thesis we study different contributions in detail and we are thus guided towards a more complete interpretation of scattering polarization.

The first emphasis is put onto the continuum radiation, which in the solar atmosphere is mainly polarized by Rayleigh scattering at neutral hydrogen and by Thomson scattering at free electrons. The key physical quantities that determine the degree of the emergent polarization turn out to be the scattering coefficient and the temperature gradient in the layer where the polarization is formed. We derive an analytical function that approximates well the center-to-limb variation of the continuum polarization in the visible solar spectrum, which can serve as a guide to determine the zero-level of the polarization scale.

A ubiquitous contribution to the spectral structure of scattering polarization is depolarization in spectral lines. We present a detailed study and interpretation of depolarizing lines. It turns out that the degree of

depolarization depends strongly on the atomic properties of the involved transition and on the thermal stratification of the atmosphere. For lines with intrinsic polarization we find that the coupling between continuum and line polarization can be neglected.

The Na I D_2 and D_1 lines are particularly challenging to model. Their structure results from many different contributions that appear to involve even new atomic physics. We show that the triplet peak structure of the D_2 line can be explained at least qualitatively by radiative transfer effects with partial frequency redistribution. Hyperfine-structure splitting leads to a reduced core polarization in D_2 while lower-level polarization enhances the core peak, but the qualitative structure is not altered. The degree of polarization in the wings is dominated by the elastic collision rate, while the minima are due to the anisotropy of the radiation field. However, the D_1 line core remains an enigma and cannot be convincingly modeled within our current theoretical framework.

Such open questions only emphasize the need for new and efficient algorithms to compute scattering polarization. We present a fast, generalized iteration method that solves the polarized line transfer equation with coherent scattering for a two-level atom in an arbitrarily oriented, weak magnetic field. The polarized redistribution matrix employed accounts self-consistently for collisions as well as the presence of a weak magnetic field responsible for the Hanle effect.

The field of scattering polarization became a quickly growing field in solar physics in the last years that only just starts to expand to non-solar applications. The many open questions and its diagnostic potential guarantee that scattering polarization will remain an interesting and promising field of research in the future.

Zusammenfassung

Die vorliegende Doktorarbeit ist der Interpretation des linear polarisierten Sonnenspektrums gewidmet, das durch kohärente Streuprozesse entsteht. Strahlungstransport ist das theoretische Instrument, welches angewandt und weiterentwickelt wird.

Streupolarisation eröffnet eine weit reichende Palette von diagnostischen Möglichkeiten. Sie erlaubt zusätzliche Eingrenzungen von chemischen und thermischen Eigenschaften von Sternatmosphären wie z.B. Häufigkeiten, Temperatur und Dichte. Das vielversprechendste diagnostische Potenzial der Streupolarisation ist die Möglichkeit, den Hanle Effekt zu benutzen, um Konfigurationen und Stärken magnetischer Felder in Bereichen zu erforschen, welche durch den Zeeman Effekt unerreichbar bleiben. Streupolarisation ist insbesondere empfindlich auf schwache, turbulente Magnetfelder.

Bevor diese diagnostischen Instrumente angewandt werden können, ist es wichtig, die zugrunde liegende Physik vollständig zu verstehen. Die Sonne dient als praktisches Labor, in welchem die Natur der involvierten Prozesse im Detail untersucht werden können. Die spektrale Struktur der Streupolarisation resultiert in der Regel aus einer Kombination verschiedenster, physikalischer Mechanismen. In dieser Doktorarbeit studieren wir unterschiedliche Beiträge im Detail, wodurch wir zu einem vollständigeren Verständnis der Streupolarisation geleitet werden.

Als Erstes konzentrieren wir uns auf die Kontinuumsstrahlung, welche in der Sonnenatmosphäre vor allem durch Rayleigh Streuung an neutralem Wasserstoff und durch Thomson Streuung an freien Elektronen polarisiert wird. Als die wichtigsten physikalischen Größen ergeben sich der Streukoeffizient und der Temperaturgradient in jenen atmosphärischen Schichten, in welchen die Polarisation entsteht. Wir leiten eine analytische Funktion her, welche den Zentrum-Rand-Verlauf der Kontinuumpolarisation im sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums beschreibt.

Diese Funktion kann dazu beitragen, das Nullniveau der Polarisationskala zu bestimmen.

Ein allgegenwärtiger Beitrag zur spektralen Struktur der Streupolarisation ist die Depolarisation in Spektrallinien. Wir präsentieren eine detaillierte Studie über depolarisierende Linien. Es ergibt sich, dass der Polarisationsgrad stark von den atomaren Eigenschaften des betrachteten Übergangs und vom Temperaturverlauf in der Atmosphäre abhängt. Wir zeigen, dass in Linien mit intrinsischer Polarisierbarkeit die Kopplung zwischen Kontinuums- und Linienpolarisation vernachlässigt werden kann.

Das Modellieren der Na I D_2 und D_1 Linien ist besonders anspruchsvoll. Deren Struktur resultiert von vielen verschiedenen Beiträgen, welche vielleicht auch neue Atomphysik beinhalten. Wir zeigen, dass die Triplettstruktur der D_2 Linie zumindest qualitativ durch Strahlungstransporteffekte mit partieller Frequenzumverteilung erklärt werden kann. Hyperfeinstruktur führt zu einer kleineren Polarisation im Kern von D_2 , während atomare Polarisation im unteren Energieniveau die Polarisation im Kern erhöht, was jedoch die qualitative Struktur der D_2 Linie nicht beeinflusst. Der Polarisationsgrad in den Linienflügeln wird durch elastische Stöße dominiert, während die Minima auf die Anisotropie des Strahlungsfeldes zurückgeführt werden können. Der Linienkern der D_1 Linie bleibt hingegen unerklärt und kann innerhalb der aktuellen Theorie nicht zufriedenstellend modelliert werden.

Solche offenen Fragen bekräftigen den Bedarf an neuen, effizienten Algorithmen zur Berechnung der Streupolarisation. Wir stellen eine schnelle, verallgemeinerte Iterationsmethode vor, welche die polarisierte Strahlungstransportgleichung unter Berücksichtigung kohärenter Streuung in einem Zweiniveaumatom und in einem beliebig ausgerichteten, schwachen Magnetfeld löst. Die angewandte Umverteilungsmatrix beschreibt selbstkonsistent den Einfluss von Stößen und die Präsenz schwacher Magnetfelder, welche für den Hanle Effekt verantwortlich sind.

Streupolarisation hat sich in den letzten Jahren zu einem schnell wachsenden Bereich der Sonnenphysik entwickelt und beginnt nun, sich auf andere Gebiete der Astrophysik auszudehnen. Die vielen offenen Fragen und das diagnostische Potenzial garantieren, dass Streupolarisation auch in Zukunft ein spannender und vielversprechender Forschungsbereich bleiben wird.