

Diss ETH No. 17832

APPLICATIONS OF HIGH-PRECISION  
POLARIMETRY TO EXTRASOLAR PLANET  
SEARCH AND SOLAR PHYSICS

A dissertation submitted to  
ETH ZÜRICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

C H R I S T I A N T H A L M A N N

Dipl. Phys., ETH Zürich

born

29.09.1979

citizen of

Wiezikon TG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Lilly

Prof. Dr. Jan Olof Stenflo

PD Dr. Hans Martin Schmid

Dr. Markus Feldt

2008



# Abstract

The thesis at hand is divided into two distinct parts, each of which concerns itself with a particular occurrence of scattering polarization in nature.

THE FIRST PART is dedicated to determining the feasibility of finding extrasolar planets by imaging polarimetry.

Direct detection of a mature extrasolar planet has not yet been achieved due to the prohibitive brightness contrast between the planet and its parent star (typically of the order  $10^{-8}$ ) and their small angular separation. However, the starlight reflected off such a planet's atmosphere is polarized due to Rayleigh scattering, providing a basic possibility of distinguishing it from the unpolarized direct starlight. The SPHERE instrument (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) currently being developed by ESO for the Very Large Telescope in Chile meets this challenge with an 8 m mirror, a high-end adaptive optics system, a stellar coronagraph, and a detector based on the Zurich Imaging Polarimeter (ZIMPOL) design operating at 600–900 nm.

ZIMPOL relies on polarization modulation at kHz frequencies and specialized demodulating CCD sensors, and has been proven to achieve sensitivities of  $10^{-5}$ . Since even small levels of background polarization ( $\sim 1\%$ ) significantly raise the level of detector noise in ZIMPOL, we developed and successfully tested a compensator device able to counteract a variable polarization background in real time, keeping it well below 0.1%. This work is described in Chapter 4.

In order to quantify and characterize the feasibility of planet detection with SPHERE, all components of the telescope and instrument must be taken into account. To this end, we carried out a detailed and comprehensive end-to-end computer simulation of such an observation. A specifically adapted diffraction code produces realistic broadband point-spread functions for both the coronagraphed target star and the off-axis planets, accounting for a plethora of parameters such as adaptive optics performance, atmospheric seeing, static aberrations, temporal and polarized differential aberrations, and coronagraph properties. A dedicated photometry and reduction code then implements photon noise and various properties of the detector, star and planets, applies calibration and signal enhancement methods, and computes the S/N for planet detection.

Using this code, we elaborated a comprehensive analysis of the expected system performance and its dependence on the various input parameters. We conclude that Jupiter-sized planets can indeed be detected with SPHERE around the eight nearest bright stars, using signal-switching calibration and angular differential imaging to suppress the spurious polarized background structures caused by aberrations.

Around  $\alpha$  Cen A/B and Sirius, even Neptune-sized planets and super-Earths can be discerned. This performance can be further improved by pushing the differential wedge behavior of the modulator and the surface roughness of the half-wave plate used for signal switching below the current specifications. The inclusion of a four-quadrant phase mask coronagraph is found to expand the target list for planet detection to over 20 stars. Finally, experimentation with different signal extraction methods yielded insights on desirable observation procedures. This work is presented in Chapter 5.

THE SECOND PART of this thesis describes a laboratory experiment intended to shed light on the causes of the enigmatic scattering polarization signature of the  $D_1$  lines in the solar spectrum.

Precise measurement of the scattering polarization at the solar limb as a function of wavelength reveals a spectrum as richly structured as the well-known intensity spectrum. Each spectral line leaves a characteristic signature in this “Second Solar Spectrum”, betraying the particular quantum nature of the underlying atomic or molecular transition as well as providing insight on the local temperature, density and magnetic field conditions. While most signatures have been understood by theory, a particular feature—the positive peak in the center of Na I  $D_1$  and Ba II  $D_1$ —has thus far obstinately resisted such attempts.

To determine whether the solution lies in solar or atomic physics, we isolated the pure  $D_1$  scattering event from its complex solar circumstances and investigated it under simple, well-defined laboratory conditions. We illuminated a sample of potassium vapor (whose K I  $D_1$  transition shares the exact same quantum properties of Na I  $D_1$ ) with a tunable solid-state laser, whose wavelength could be precisely scanned across the spectral line, and studied the polarized light scattered off the atoms at a right angle. Six different polarization states could be selected for the ingoing light, and a magnetic field could be applied to the vapor along any one of the three coordinate axes. This work is presented in Chapters 8 and 9.

While the measurements do not yet offer a solution to the solar  $D_1$  enigma, they unequivocally show that current theory is missing a crucial puzzle piece, and also imply that solar magnetic fields are likely involved. A promising new theoretical approach is now being developed on the basis of these measurements.

# Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in zwei Teile, die sich mit je einem spezifischen Auftreten von Streupolarisation in der Natur befassen.

DER ERSTE TEIL widmet sich einer Machbarkeitsstudie zum direkten Nachweis von extrasolaren Planeten durch bildgebende Polarimetrie.

Die direkte Detektion eines “kühlen” Planeten (der seine Entstehungswärme bereits abgestrahlt hat) ist auf Grund des extremen Helligkeitskontrasts zwischen Planet und Stern (typische Grössenordnung  $10^{-8}$ ) sowie des kleinen Winkelabstands noch nicht gelungen. Das von der Planetenatmosphäre reflektierte Sternlicht ist jedoch auf Grund der Rayleigh-Streuung polarisiert, was eine Unterscheidung vom unpolarisierten direkten Sternlicht ermöglicht. Das Instrument SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch), das zur Zeit von ESO für das Very Large Telescope in Chile entwickelt wird, stellt sich dieser Herausforderung mit einem 8m grossen Spiegel, einer hochgezüchteten adaptiven Optik, einem Sternkoronographen und einem Detektor, der auf dem Konzept des Zurich Imaging Polarimeter (ZIMPOL) basiert und den Bereich von 600–900 nm abdeckt.

ZIMPOL basiert auf Polarisationsmodulation im kHz-Bereich und speziellen demodulierenden CCD-Detektoren. Es erzielt nachweislich eine Empfindlichkeit von  $10^{-5}$ . Da in ZIMPOL bereits kleine Mengen von Hintergrundpolarisation ( $\sim 1\%$ ) das Detektorrauschen merklich verstärken, wurde ein Kompensationsgerät entwickelt, das einem veränderlichen Polarisationshintergrund in Echtzeit entgegenwirkt und ihn zuverlässig unterhalb 0.1% stabilisiert. Diese Arbeit wird in Kapitel 4 beschrieben.

Um die Machbarkeit der Planetendetektion mit SPHERE quantitativ und qualitativ abzuschätzen, müssen alle Komponenten von Teleskop und Instrument einbezogen werden. Dafür erstellten wir eine detaillierte und umfassende Computersimulation der gesamten Beobachtungssequenz. In einem ersten Schritt berechnet ein speziell dafür angepasster Diffraktionscode realistische, breitbandige Teleskopbilder (“Punktantworten”) sowohl für den koronographierten Zielstern wie auch für die weiter aussen liegenden Planeten. Dabei wird eine Vielzahl von Parametern wie die Leistung der adaptiven Optik, atmosphärisches Seeing, statische Aberrationen, zeitliche und polarisierte differentielle Aberrationen und Eigenschaften des Koronographen berücksichtigt. Ein eigener Code für Photometrie und Reduktion fügt dann Photonenrauschen und verschiedene Eigenschaften von Detektor, Stern und Planeten hinzu, wendet Kalibrations- und Bildbearbeitungsmethoden an, und errechnet die Detektierbarkeit der Planeten.

Mit Hilfe dieses Programms erarbeiteten wir eine umfassende Analyse der erwarteten Systemleistung und ihrer Abhängigkeit von den Eingabeparametern. Wir kommen zum Schluss, dass jupitergrosse Planeten der acht nächsten hellen Sterne tatsächlich mit SPHERE nachgewiesen werden können, indem die durch Aberrationen verursachten polarisierten Störsignale im Hintergrund mittels Signalaustausch-Kalibration und Ausnützung der Feldrotation unterdrückt werden. Bei  $\alpha$  Cen A/B und Sirius sind sogar neptungrosse Planeten und “Super-Erden” nachweisbar. Diese Leistung kann noch verbessert werden, indem man das differentielle Keilverhalten des Modulators und die Oberflächenrauheit der Halbwellenplatte, die für den Signalaustausch verwendet wird, stärker minimiert. Die Verfügbarkeit eines Vierquadranten-Phasenplatten-Koronographen erweitert die Kandidatenliste für die Planetensuche auf über 20 Sterne. Zudem führte das Experimentieren mit Signalextraktionsmethoden zu Erkenntnissen, wie die Beobachtungsabläufe gestaltet werden sollten. Diese Arbeit wird in Kapitel 5 vorgestellt.

DER ZWEITE TEIL dieser Dissertation beschreibt ein Laborexperiment, dessen Ziel es war, die Hintergründe einer rätselhaften Signatur in der Streupolarisation der  $D_1$ -Linien im Sonnenspektrum aufzudecken.

Hochpräzise Messungen der Streupolarisation am Sonnenrand als Funktion der Wellenlänge enthüllen eine Fülle an Informationen, die in ihrer reichhaltigen Struktur dem Intensitätsspektrum um nichts nachsteht. Jede Spektrallinie hinterlässt in diesem “Zweiten Sonnenspektrum” eine charakteristische Signatur, die die quantenmechanische Natur des verursachenden atomaren oder molekularen Übergangs offenbart und darüber hinaus Einblicke in die lokalen Temperatur-, Dichte- und Magnetfeldverhältnisse gewährt. Während die meisten Signaturen durch theoretische Überlegungen verstanden worden sind, trotz ein gewisses Signal – der positive Ausschlag im Linienzentrum von  $\text{Na I } D_1$  und  $\text{Ba II } D_1$  – bislang jedem Erklärungsversuch.

Um zu verstehen, ob die Ursache dafür in der Sonnen- oder der Atomphysik liegt, isolierten wir den  $D_1$  Streuprozess von der komplexen Umgebung der Sonnenatmosphäre und untersuchten ihn unter einfachen, nachvollziehbaren Laborbedingungen. Wir bestrahlten Kaliumdampf (dessen Übergang  $\text{K I } D_1$  exakt dieselben Quanteneigenschaften wie  $\text{Na I } D_1$  aufweist) mit einem abstimmbaren Festkörperlaser, dessen Wellenlänge präzise durch den Bereich der Spektrallinie gescannt werden konnte, und untersuchten das polarisierte Licht, das von den Atomen im rechten Winkel weggestreut wurde. Sechs verschiedene Polarisationszustände konnten für den eingehenden Strahl eingestellt werden, und ein Magnetfeld konnte entlang jeder der drei Koordinatenachsen angelegt werden. Diese Arbeit wird in den Kapiteln 8 und 9 vorgestellt.

Zwar haben die Messungen noch keine Lösung zum solaren  $D_1$ -Rätsel geliefert; fest steht jedoch, dass sie mit der gängigen Theorie nicht vereinbar sind und somit auf ein fehlendes Puzzleteil im heutigen Verständnis der Streuphysik hindeuten. Zudem lassen sie vermuten, dass Magnetfelder in der Sonnenatmosphäre am Phänomen beteiligt sind. Auf der Grundlage dieser Messungen wird nun ein vielversprechender neuer theoretischer Ansatz entwickelt.