

学位論文の要旨

氏名

水野 いづみ

学位論文題目

Single-dish polarimetry using a software-based polarization spectrometer

本論文は、科学目標:[星形成の母胎である分子雲コアの磁場をCCS分子のゼーマン分裂から計測する]を達成するために開発したソフトウェア偏波分光計 (Polaris) と偏波較正手法をまとめたものである。

第1章では、星形成領域における磁場計測の重要性についてまとめ、我々の研究意義を述べた。星形成において磁場は重力収縮に対抗する斥力として働くと考えられており、星形成が完了のタイムスケールや物理プロセスを理解する上で基本的な物理量であるとされている。しかし、実際の星形成での磁場の役割は観測的に裏付けられておらず、その評価には、星形成の母胎となる分子雲コアの初期磁場の計測が重要である。Zeeman 分裂の計測により磁場強度の視線成分が計測できる。したがって複数の分子雲コアの磁場を計測することで統計的に磁場の強度を見積もることができる。CCS分子は初期の分子雲コアで存在量が多く、比較的ゼーマン分裂幅が大きいいため、磁場の役割の評価に有用なプローブと考えられてきた。しかし、Leven等によってCCS分子の計測は試みられたが、計測技術的困難さから有為に磁場は検出されておらず、70時間の観測を用いても、磁場の視線方向成分の上限値のみしか計測されていない。理論的に予想されている磁場強度 $100 \mu\text{G}$ ではCCS分子輝線に64 Hzのゼーマン分裂した数mKの円偏波 (Stokes V) スペクトルが生じると予想されている。よって我々は、CCS分子輝線の64 Hzのゼーマン分裂を 5σ の精度で検出するために、Zeeman 効果を効率的に検出可能な偏波計測装置を構築した。

第2章では偏波の定義をまとめた。Zeeman効果は偏波観測によって計測する。偏波とは電磁波の振動面が偏っていることである。偏波はStokes parameter (I, Q, U V)を用いて表す。電磁波の方程式を示し、受信する電磁波とStokes parameterの関係を示した。

第3章では、偏波観測に装置が及ぼす系統誤差をまとめ、Stokes Vの効率的な計測手法を示した。偏波計測では直交する2偏波を独立に処理し、その自己相関と相互相関を取得する。よって、3つの系統誤差、([1]2偏波間のケーブル長差等による相互相関における位相の系統誤差 [2]2偏波間での交差偏波 [3]2偏波における独立の利得変動)が生じる。受信する直交2偏波には、円偏波と直線偏波の2種類がある。Stokes Vの計測では、円偏波受信の場合(3)が大きな系統誤差をもたらす、その較正は困難であるため、直線偏波受信が適している。

第4章では、偏波分光計PolariSの開発と性能評価の結果をまとめた。PolariSはデジタイザK5VSSP/32、にGPU (graphics processing unit)を組み込んだ汎用PCで構築し、プログラムで信号制御する。K5VSSP/32で量子化した信号はGPUでFFT演算と相関積の計算が行われ、自己相関と相互相関を算出する。汎用の装置で構築しているため、安価で構築することができた。そのため、分光計の仕様の変更や、メンテナンスを容易に行うことができる。制御プログラムはGitHubで公開している。周波数分解能は、サイエンス要求である「64Hz以下の高周波数分解能」を達成するため、61 Hzとした。分光計の基本性能を計測して仕様と要求を満たすことを確認した。

第5章では我々が構築した偏波計測装置とその較正・計測結果についてまとめた。PolariSを国内最大級の口径をもつ野辺山45m鏡に組み込んで高感度(受信機雑音温度~50K)両直線偏波受信機Z45と接続し、偏波計測装置を構築した。偏波計測を行うために以下の3つの補正を行った。[A]SiOメーザーの観測を用いてStokes parameter と出力の対応付けをおこなった。[B]相互相関の位相の系統誤差をwire gridを用いた人工直線偏波源を用いて較正した。[C]交差偏波の見積もりを行った。さらに、開発したシステムを用いて実際に分子雲コアのCCS分子のゼーマン分裂の観測を行った。その結果、我々の構築した装置・手法を用いて54時間の観測時間で、我々が目標とする64Hzのゼーマンシフトを 5σ で検出できることが分かった。

第6章ではPolariSを用いて構築する偏波計測装置の有用性と実際の偏波計測精度についてまとめる。この論文の天文学におけるインパクトは、高性能の偏波分光を安価でかつ短い観測時間で達成することである。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Single-dish polarimetry using a software-based polarization spectrometer

Name: Izumi Mizuno

This thesis mainly addresses the development of software Polarization Spectrometer, PolariS and the optimization of the polarization calibration procedure to detect the Zeeman split of CCS molecular lines for the purpose of magnetic field measurement in pre star-forming cores.

[Chapter 1] We review the basic of star formation, the role of the magnetic fields in star formation, and the method to measure the magnetic fields. The magnetic field is thought to be a key control parameter that can mediate gravitational collapse of these cores. Otherwise to date the role of magnetic field haven't been examined yet. To examine the role, magnetic field measurement in star-forming cores in early stage is important. Magnetic field strength along line of sight can be estimate by Zeeman shift measurement. Therefore a total magnetic field strength can be obtained by statistically studies of a large population of Zeeman shift measurement. The CCS radical is one of the best molecules for measurements of the magnetic-field strength because it is abundant in dark cloud cores in early stage and presents the Zeeman split with a relatively large magnitude of $0.64 \text{ Hz}/\mu\text{G}$. In earlier study, only upper limit of magnetic field strength along line of sight in a core had been measured by a Zeeman shift estimation in CCS molecule with 70 hr observation time because of technical difficulty. With the gravity-equivalent magnetic field strength of $\sim 100 \mu\text{G}$, we expect the Zeeman shift of $\sim 64\text{Hz}$ between two orthogonal circular polarization. Hence our science goal is to detect the 64 Hz Zeeman split of the CCS molecular line with 5σ level.

[Chapter 2] We revisit convention of polarization description. Polarization is known as a property of oscillating electric field. The Stokes parameters, (I, Q, U, V), are conventionally indicate Polarization. We show the relation between electric field and Stokes parameter.

[Chapter 3] We summarize the systematic effect in polarization measurement and show the method for accurate circular polarization (Stokes V) measurement. In polarization observation, (1) radio waves from sky are separated two orthogonal polarizations, (2)each polarization is processed individually and (3) cross- and auto- correlation spectra are estimated in spectrometer. Instrumental polarization is due to the 3 components (instrumental phase, cross-talk and gain variations) in these procedures. There are two kinds of separation of polarizations, orthogonal circular and linear polarizations. In case of circular reception, Stokes V has a large error owing to gain variations that is difficult to calibrate. Hence linear polarization reception is better for accurate Stokes V measurement.

[Chapter 4] We show design, development, and commissioning of the polarization spectrometer (PolariS) for the science goal. Full Stokes spectra can be measured using a polarization spectrometer which calculates auto- and cross-correlation spectra of 2 orthogonal polarizations. PolariS consists of the VLBI digitizer, K5/VSSP32 for data acquisition, and a general-purpose personal computer (PC) equipped with a graphic procession unit (GPU) that proceeds FFT (fast-Fourier transform) and correlation. The software implementation yields some advantages. It is flexible and scalable when modification of specifications are required. The source codes in programming language are readable, verifiable, and can be shared or updated via a public repository. The processors are off-the-shelf products, which allows us to build copies or to prepare spares at a reasonable cost. PolariS achieves 61 Hz spectral resolution to meet the science requirement of the frequency resolution ($< 61 \text{ Hz}$). Through engineering tests, we have verified basic performances of PolariS.

[Chapter 5] We report the results of test polarization observations. We establish polarimetry device equipped with PolariS and dual linear receiver Z45 at Nobeyama 45m telescope. To estimate Stokes V we have 3 calibrations:(A)We had labeling obtained polarizations and polarizations defined in Stokes parameter equation using SiO maser observations. (B)We calibrated systematic phase using artificial linear polarized continuum source. (C) We estimated cross-talk effect to Stokes V measurement. In addition, we measured a Zeeman shift of CCS molecule toward a pre star-forming core. And we can estimate the observation time, 54 hours to achieve our science goal.

[Chapter 6] We summarize polarimetry using PolariS about utilities and accuracy. The impact of this thesis offers high-precision polarization spectroscopy with a reasonable cost and efficient telescope time.