

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E41049



MAGNETIC FIELD AND DYNAMIC STRUCTURE OF
STAR-FORMING REGIONS: S140-IRS1 AND W49 A

MISS KITIVANEE ASANOK

A THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
KHON KAEN UNIVERSITY

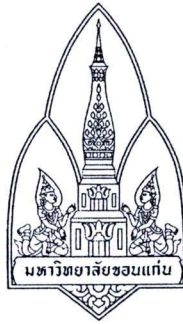
2010

600255467

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E41049



**MAGNETIC FIELD AND DYNAMIC STRUCTURE OF
STAR-FORMING REGIONS: S140-IRS1 AND W49 A**



MISS KITIYANEE ASANOK

**A THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
KHON KAEN UNIVERSITY**

2010

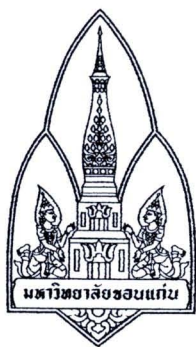
**MAGNETIC FIELD AND DYNAMIC STRUCTURE OF
STAR-FORMING REGIONS: S140-IRS1 AND W49 A**

MISS KITIYANEE ASANOK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN PHYSICS**

GRADUATE SCHOOL KHON KAEN UNIVERSITY

2010



THESIS APPROVAL
KHON KAEN UNIVERSITY
FOR
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN PHYSICS

Thesis Title: Magnetic Field and Dynamic Structure of Star-Forming Regions:
S140 – IRS1 and W49 A

Author: Miss Kitiyaneer Asanok

Thesis Examination Committee

Assoc.Prof.Dr. Boonrucksar Soonthornthum	Chairperson
Assist.Prof.Dr. Nipon Gasiprong	Member
Assoc.Prof.Dr. Wiwat Youngdee	Member
Assist.Prof.Dr. Eakpan Sawasitrank	Member
Dr. Suwit Nammahachak	Member

Thesis Advisors:

..... <i>Nipon Gasiprong</i>	Advisor
(Assist.Prof.Dr. Nipon Gasiprong)	
..... <i>Wiwat Youngdee</i>	Co-Advisor
(Assoc.Prof.Dr. Wiwat Youngdee)	
..... <i>Busaba Keen</i>	Co-Advisor
(Dr. Busaba Hutawarakorn Kramer)	
..... <i>MA</i>	Co-Advisor
(Dr. Malcolm D. Gray)	
..... <i>Peter Thomasson</i>	Co-Advisor
(Dr. Peter Thomasson)	

..... *L Manmart*

(Assoc.Prof.Dr. Lampang Manmart)

Dean, Graduate School

..... *K Sangaroon*

(Assist.Prof.Dr. Kiat Sangaroon)

Dean, Faculty of Science

กิตติยานี อาษานอก. 2553. สนามแม่เหล็กและโครงสร้างทางพลศาสตร์ของบริเวณเกิดดาว S140-IRS1 และ W49 A. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: ผศ. ดร. นิพนธ์ กสิพร็อง, รศ. ดร. วิวัชร์ ยังดี

บทคัดย่อ

E 41049

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโพลาริเซชันของไฮดรอกซิลเมเซอร์สภาวะพื้น (ground state) ณ ความถี่ 1.6 GHz และสภาวะกระตุ้น (excited state) ณ ความถี่ 6.0 GHz ในบริเวณเกิดดาว S140-IRS1 และ W49 A ตลอดจนศึกษาสมบัติของเมเซอร์ประเภทน้ำที่ความถี่ 22 GHz ในบริเวณเกิดดาว S140-IRS1 โดยใช้ข้อมูลจากเครือข่ายกล้องโทรทรรศน์วิทยุเมอร์ลิน (MERLIN: The Multi-Element Radio-linked Interferometer Network) ประเทศสหราชอาณาจักรพบว่า

ในบริเวณเกิดดาว S140-IRS1, สามารถตรวจวัดสัญญาณของไฮดรอกซิลเมเซอร์สภาวะพื้น ณ ความถี่เดียวคือ 1665 MHz เท่านั้น เมเซอร์อยู่ห่างจาก IRS1 ไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ประมาณ 2.5 ฟิลิปดาและแยกกันอยู่เป็นสองกลุ่มห่างจากกันประมาณ 1 ฟิลิปดา ตามแนวตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ จากการวิเคราะห์ข้อมูลโพลาริเซชันของไฮดรอกซิลเมเซอร์พบว่าให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง 5.2 - 6.9 mG (มีทิศพุ่งเข้าหาผู้สังเกต) มุมโพลาริเซชันมีทิศทางขนานไปตามทิศของลำก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) พวยพุ่งซึ่งสัมพันธ์กับบริเวณเกิดดาว IRS 1 เมเซอร์อีกประเภทหนึ่งที่ศึกษาในบริเวณเกิดดาวนี้คือเมเซอร์น้ำพบว่าเมเซอร์น้ำที่สว่างที่สุดมีตำแหน่งอยู่ภายในบริเวณ IRS 1 และแสดงแนวเกรเดียนต์ความเร็วดอปเปลอร์ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือไปยังทิศตะวันออกเฉียงใต้ เมเซอร์ประเภทน้ำกลุ่มเหล่านี้มีค่าการเคลื่อนที่เฉพาะ (proper motion) ประมาณ 18 ก.ม./วินาที ไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของไฮดรอกซิลเมเซอร์และเมเซอร์น้ำพบว่าอยู่ห่างกันมากกว่า 2 ฟิลิปดา นอกจากนั้นยังได้ค้นพบเมเซอร์น้ำแห่งใหม่ ณ บริเวณที่อยู่ห่างออกไปประมาณ 0.5 ลิปดา

ในบริเวณเกิดดาว W49 A, ได้วิเคราะห์ข้อมูลจากการสังเกตการณ์เฉพาะไฮดรอกซิลเมเซอร์เส้นรอง (satellite line) ณ ความถี่ 1612 และ 1720 MHz พบว่าบริเวณเกิดดาวนี้มีบริเวณย่อย ๆ แบ่งออกเป็น 3 บริเวณหลัก ๆ ได้แก่ W49 N, W49 SW และ W49 S การกระจายตำแหน่งและความเร็วของเมเซอร์มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับผลจากการสังเกตการณ์โดยใช้เครือข่ายกล้องโทรทรรศน์วิทยุแอลเอ (VLA: Very Large Array) โดย Argon et al. (2000) ในบริเวณ W49 S เมเซอร์มีลักษณะการกระจายตัวมีรูปร่างแบบพาราโบลาและแนวเกรเดียนต์ความเร็วจากทิศเหนือ

E 41049

ไปยังทิศใต้ซึ่งสนับสนุนแบบจำลองการเกิดโบว์ช็อคได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้ค้นพบกลุ่มเมเซอร์ใหม่ในบริเวณ W49 N และ W49 S อีกด้วย ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเมเซอร์เหล่านี้มีความเข้มพอที่จะเป็นปัจจัยสำคัญต่อขั้นตอนการเกิดดาวรวมไปถึงการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็กสามารถนำไปใช้พิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองทางทฤษฎีต่าง ๆ ต่อไปได้ในอนาคต

จากการศึกษาบริเวณเกิดดาวทั้งสองไม่มีบริเวณใดที่สามารถตรวจวัดสัญญาณไฮดรอกซิลค์เมเซอร์ที่ความถี่ 6 GHz ได้ ซึ่งถ้าหากใช้เครื่องมือที่มีความไวต่อการตรวจวัดสัญญาณมากกว่านี้ มันจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาทางทฤษฎีของการเกิด pumping เมเซอร์ได้

Kitiyanee Asanok. 2010. **Magnetic Field and Dynamic Structure of Star-Forming Regions: S140-IRS1 and W49 A.** Doctor of Philosophy in Physics, Graduate School, Khon Kaen University.

Thesis Advisors: Assist. Prof. Dr. Nipon Gasiprong,
Assoc. Prof. Dr. Wiwat Youngdee

ABSTRACT

E 41049

The star-forming regions, S140-IRS1 and W49A, have been studied by making use of observations with the Multi-Element-Radio-Link-Interferometer-Network (MERLIN). Polarization observations have been made of the 1.6 GHz and 6.0 GHz OH masers in both sources, and also of the 22 GHz H₂O masers in S140-IRS1.

In S140-IRS1, OH masers have only been detected in the ground-state 1665 MHz line. They lie in two distinct regions separated by approximately 1 arcsec along a north-east / south-west axis. Analysis of the OH maser polarization reveals magnetic field strengths of 5.2 - 6.9 mG (directed towards us). Two features show pure circular polarization and the linearly polarized features can be divided into two groups. The polarization position angles attest to a magnetic field which is preferentially orientated along the directions of the CO outflow associated with IRS1. The brightest H₂O masers coincide in position with IRS1, and show a gradient of increasing Doppler velocity from NW to SE. These water masers also have proper motions of $\sim 18 \text{ km s}^{-1}$ in a similar direction. The closest OH and H₂O masers are separated by more than 2 arcsec. H₂O masers have also been detected for the first time at several locations up to distances of ~ 0.5 arcmin from the already known masers.

W49 A can be divided into three regions, W49 N, W49 SW and W49 S. Observations of the OH-maser satellite lines at 1612 and 1720 MHz in these three regions have been analysed. The results show good agreement with the positions and velocities determined from previous observations with the Very Large Array (VLA) by Argon et al.. The distribution of OH masers in W49 S shows a parabolic shape and a velocity gradient from north to south, supporting a bow-shock model. New masers have also been discovered in W49 N and W49 S. The magnetic field strengths

deduced from Zeeman measurements have been found to be strong enough to play important roles in the star-formation process. The evidence for field reversal can be used to constrain the theoretical models.

No OH emission has been detected at 6.0 GHz, which, if it had been, would have been very useful in constraining the OH maser pumping model. Additional more-sensitive observations would be invaluable in this respect.

**Goodness Portion to the Present Thesis is Dedicated
for my Parents and Dr. Jim R. Cohen**

ACKNOWLEDGMENTS

I would like to thank all of my supervisors, Assist. Prof. Dr. Nipon Gasiprong, Assoc. Prof. Dr. Wiwat Youngdee, Dr. Busaba Hutawarakorn Kramer, Dr. Peter Thomasson, Dr. Malcolm Gray, Dr. Orrarujee Muanwong, and especially my late supervisor, Dr. R. J. Cohen for their kindness and helpful guidance. Special thank also goes to Dr. Sandra Etoke and Dr. Anita Richards for all their help and suggestions. During my visits to UK, I would like to thank Malcolm and Peter for accommodations, Sandra for being my temporary supervisor and Anita for teaching me how to calibrate data. I also thank Dr. Suwit Nammahajak for his help and support.

I would like to thank the Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University for the use of facilities and Jodrell Bank Centre for Astrophysics (JBCA), The University of Manchester for providing the data and work facilities. I gratefully acknowledge receipt of a Co-operative Research Network Scholarship (CRN) and a grant from the National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization).

I thank the Asanok family for great will-power, especially my father who always believes I can do it! I also thank my brothers and sisters for funding support and for doing many things for me. I also thank my friends such as Choong, Roong, Aor and Jit for talking to me. Thanks also to seniors and juniors in the Department of Physics, Faculty of Science, KKU. It was a wonderful experience when I stayed for a year in England. Thanks also to friends at the Jodrell Bank Centre for Astrophysics – Mhing, Dandan, Ralph, George, Czarek, Megan, Matt, Tao and everybody. Finally, thanks :-) my dearest for cheering me up and always understand in me.

Declaration: The observation and data reduction of the H₂O masers at 22 GHz were done by Dr. Anita Richard. They are included in this thesis for the completeness of S140 study.

Kitiyanee Asanok

TABLE OF CONTENTS

	Page
ABTRACT (IN THAI)	i
ABTRACT (IN ENGLISH)	iii
DEDICATION	v
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
LIST OF TABLES	vii
LIST OF FIGURES	ix
CHAPTER I INTRODUCTION	1
1.1 Background and Rationale of the Study	1
1.2 Objectives of the Study	2
1.3 Equipment, Observations and Data Processing	2
1.4 Outline of the Thesis	3
CHAPTER II LITERATURE REVIEWS	4
2.1 Star Formation	4
2.2 Bipolar Outflows	15
2.3 Astronomical Masers	17
CHAPTER III OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION	43
3.1 Radio Observations	43
3.2 MERLIN	44
3.3 The Observations	46
3.4 Data Reduction	51
3.5 Calibration	54
3.6 Mapping of Target Source	56
3.7 Map Analysis	57
CHAPTER IV S140-IRS1	64
4.1 Literature Reviews	64
4.2 OH Masers in S140-IRS1	65
4.3 H ₂ O Maser and the Radio Continuum Emission	74
4.4 Discussion	76
4.5 Summary	86

TABLE OF CONTENTS (Cont.)

	Page
CHAPTER V W49 A	88
5.1 Literature Reviews	88
5.2 OH Masers in W49 A	89
5.3 W49 S	89
5.4 W49 SW	105
5.5 W49 N	116
5.6 Summary	125
CHAPTER VI CONCLUSIONS AND FUTURE WORK	134
6.1 Summary of Results	134
6.2 The Absence of OH Masers	135
6.3 Future Work	135
REFERENCES	137
APPENDICES	154
VITAE	168

LIST OF TABLES

	Page
Table 1.1 The pointing position of star-forming regions S140-IRS1 and W49 A.	3
Table 2.1 Physical conditions for co-propagation of OH masers, from Gray et al. (1992)	24
Table 2.2 Zeeman splitting of the ${}^2\Pi_{3/2}$, $J = 3/2$ ground state of OH (σ components)	42
Table 3.1 Observing parameters for the MERLIN spectral-line polarization observations presented in this thesis. Time on source includes frequent short observations of the phase calibrator sources. Target source is S140-IRS1	47
Table 3.2 Observing parameters for the MERLIN spectral-line polarization observations presented in this thesis. Time on source includes frequent short observations of the phase calibrator sources. Target source is W49 A	48
Table 3.3 Key to antenna abbreviations	48
Table 4.1 OH maser features in S140-IRS1. Peak flux density, mean velocities and relative positions are given for each feature in both polarizations.	69
Table 4.2 The Stokes parameter flux densities and polarization properties of OH maser features in S140-IRS1	72
Table 4.3 H ₂ O masers observed towards S140	77
Table 5.1 OH maser features in W49 S	96
Table 5.2 The error of flux, the polarization position angles, and the percentage of polarization of each OH maser feature in W49 S	103
Table 5.3 Zeeman Pair Masers in W49 S	111
Table 5.4 OH maser features in W49 SW	112
Table 5.5 The error of flux, the polarization position angles, and the percentage of polarization of each OH maser feature in W49 SW	117

LIST OF TABLES (Cont.)

	Page
Table 5.6 Zeeman Pair Masers in W49 SW	118
Table 5.7 OH maser features in W49 N	122
Table 5.8 The error of flux, the polarization position angles, and the percentage of polarization of each OH maser feature in W49 N	126
Table 5.9 Zeeman Pair Masers in W49 N	129

LIST OF FIGURES

	Page
Figure 2.1 The evolutionary sequence for low-mass stars	7
Figure 2.2 Volume element, dV , in a spherical gas shell	9
Figure 2.3 Volume model	11
Figure 2.4 Shown angle ϕ from the axis to the particle as seen from the center.	15
Figure 2.5 The conceptualization of bipolar outflow by Pudritz and Norman (1986)	18
Figure 2.6 Schematic illustration of the model of Uchida and Shibata (1985)	19
Figure 2.7 The energy level of OH masers (taken from Hutawarakorn 1997)	21
Figure 2.8 Three colour GLIMPSE image of the G333.2-0.6 GMC where red=8.0- μm green=5.8- μm and blue=3.6- μm	24
Figure 2.9 G328.81+0.63 shows strong (400 Jy) class II methanol maser emission projected against the ultra-compact HII region	25
Figure 2.10 A “straw man” evolutionary sequence for masers in high-mass star formation regions (taken from Ellingsen et al. 2007)	25
Figure 2.11 Approximate parameter space plot of gas kinetic temperature Versus gas density for the OH and methanol maser transitions	27
Figure 2.12 Brightness temperatures for selected masers of OH versus hydrogen density n_H , for $T_k = 30$ K (left-hand panels) and $T_k = 150$ K (right-hand panels)	33
Figure 2.13 Relation of instantaneous electric field \mathbf{E} to polarization ellipse	34
Figure 2.14 Polarization ellipse at tilt angle τ	35
Figure 2.15 Change in direction of \mathbf{E} for left circular polarization	36
Figure 2.16 Relation of polarization-ellipse axes (x' , y') to reference axes (x , y)	37
Figure 3.1 A Simple two-element interferometer	45
Figure 3.2 Location and photographs of the MERLIN telescopes	46
Figure 3.3 The $u - v$ coverage at 1665MHz for the source S140-IRS1	49
Figure 3.4 The $u - v$ coverage at 1665MHz for the source W49 A	50

LIST OF FIGURES (Cont.)

	Page
Figure 3.5 Map of Stoke LL by using command KNTR from channel 280 to 304 which contains many components in the W49 A at 1665MHz	62
Figure 3.6 The position of maser in declination and right ascension (Motz and Duveen1977)	63
Figure 3.7 Relation between proper motion and velocity components of an object. The object is at a distance, d , from the Sun, and moves at an angular rate of μ radians/s	63
Figure 4.1 Multiple radio continuum sources detected toward S140-IRS 1A at different wavelengths	66
Figure 4.2 The systemic velocity of the source S140-IRS1	67
Figure 4.3 Contour map of S140 IRS 1A at 7 mm	68
Figure 4.4 The spectra of LCP and RCP for the ‘upper group’ and the ‘lower group’ of 1665MHz OH masers towards S140-IRS1	68
Figure 4.5 The distribution of 1665MHz OH masers towards S140-IRS1	70
Figure 4.6 The velocity distribution in RA and Dec of 1665MHz OH masers towards S140-IRS1	71
Figure 4.7 Percent of linear (m_L) versus circular (m_C) polarization of each Stokes I feature in S140-IRS1	73
Figure 4.8 The schematic map of the S140 region with polarization information	75
Figure 4.9 The velocity profiles of H ₂ O maser emission	76
Figure 4.10 The ‘flame’ scale shows 5-GHz continuum emission observed in 2000 using MERLIN	78
Figure 4.11 The distribution of OH masers in S140 region	79
Figure 4.12 H ₂ O maser components in the regions Q (left panel) and R (right panel) where proper motions were identified	83
Figure 4.13 The distribution of H ₂ O and OH masers in S140 region	84
Figure 5.1 The region of W49 A	90

LIST OF FIGURES (Cont.)

	Page
Figure 5.2 Overview image of W49 N continuum at 3.6 cm and 1.3 cm insets	91
Figure 5.3 The CO outflow model in the region G of W49 N	92
Figure 5.4 Scalar averaged cross-power spectrum of 1665 OH maser towards W49 A	93
Figure 5.5 Scalar averaged cross-power spectrum of 1667 OH maser towards W49 A	94
Figure 5.6 Velocity profiles of 1612 MHz OH masers in W49 S	97
Figure 5.7 Velocity profiles of 1720 MHz OH masers in W49 S	98
Figure 5.8 The 8.4 GHz of compact HII region in W49 S	99
Figure 5.9 Positions and velocities of the 1612 and 1720MHz OH masers from the MERLIN observations towards W49 S	100
Figure 5.10 Plot of radial velocity against declination, for the OH 1612- and 1720-MHz masers in W49 S. The dashed line shows trending of the north–south velocity gradient	101
Figure 5.11 Percentage of linear vs. circular polarization in W49 S	104
Figure 5.12 Histograms of percentage of polarization in W49 S	105
Figure 5.13 1612 and 1720 MHz OH masers with polarization information in W49 S	106
Figure 5.14 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_1 at 1612 MHz in W49 S	107
Figure 5.15 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_1 at 1720 MHz in W49 S	108
Figure 5.16 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_2 at 1720 MHz in W49 S	109
Figure 5.17 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_3 at 1720 MHz in W49 S	110
Figure 5.18 Velocity profiles of 1720 MHz OH masers in W49 SW	113
Figure 5.19 The 8.4 GHz of compact HII region in W49 SW	114

LIST OF FIGURES (Cont.)

	Page
Figure 5.20 Positions and velocities of the 1612 and 1720 MHz OH masers from MERLIN observations towards W49 SW	115
Figure 5.21 Percentage of linear vs. circular polarization	118
Figure 5.22 1720 MHz OH masers with polarization information in W49 SW	119
Figure 5.23 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_1 at 1720 MHz in W49 SW	120
Figure 5.24 Velocity profiles of 1720 MHz OH masers in W49 N	121
Figure 5.25 The 8.4 GHz of compact HII region in W49 N	123
Figure 5.26 Positions and velocities of the 1612 and 1720 MHz OH masers from MERLIN observations towards W49 N	124
Figure 5.27 Percentage of linear vs. circular polarization	127
Figure 5.28 Histograms of percentage of polarization in W49 N	128
Figure 5.29 1720 MHz OH masers with polarization information in W49 N	129
Figure 5.30 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_1 at 1720 MHz in W49 N	130
Figure 5.31 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_2 at 1720 MHz in W49 N	131
Figure 5.32 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_3 at 1720 MHz in W49 N	132
Figure 5.33 Velocity profiles of the Zeeman pair Z_4 at 1720 MHz in W49 N	133