

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 เวลาทางดาราศาสตร์	4
2.1.1 วันจูเลียนศูนย์สุริยะ	4
2.1.2 เฟสการโคจรของดาวคู่	5
2.2 ทฤษฎีสเปกโตรสโคปี	6
2.2.1 สเกลของแมกนิจูด	6
2.2.2 การแผ่รังสีของวัตถุดำ	7
2.2.3 ดัชนีสี	9
2.2.4 ทฤษฎีอะตอมไฮโดรเจน และฮีเลียม	10
2.2.5 สเปกตรัมของดาว	20
2.2.5.1 การเลื่อนดอปเปลอร์	20
2.2.5.2 การเกิดของเส้นสเปกตรัมของดาว	21
2.2.6 แผนภาพเฮิร์ตซสปริง-รัสเซลล์	24
2.2.7 โครงสร้างของเส้นสเปกตรัม	25
2.3 ทฤษฎีกลศาสตร์	29
2.3.1 กฎสามข้อของเคปเลอร์	29
2.3.2 ทฤษฎีบทไวก์เรียล	30
2.3.3 แรงไทดัล	30
2.4 ชนิดของระบบดาวคู่	34
2.4.1 การจำแนกชนิดของระบบดาวคู่	34
2.4.2 ระบบดาวคู่สเปกโตรสโคปีอุปราคา	35
2.5 วิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด	41
2.5.1 โครงสร้างความโน้มถ่วงของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด	41

2.5.2	วิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบความมวลมาก	46
2.5.3	วิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบความมวลน้อย	46
2.6	ระบบดาวคู่ที่มีสมาชิกเป็น Compact Objects	47
2.6.1	แอคครีชันดิสก์	47
2.6.2	ระบบดาวคู่ที่มีสมาชิกดวงหนึ่งเป็นดาวแคระขาว	52
2.6.3	ระบบดาวคู่ที่มีสมาชิกดวงหนึ่งเป็นดาวนิวตรอน หรือหลุมดำ	53
บทที่ 3	การเตรียมสังเกตการณ์	54
3.1	อุปกรณ์สังเกตการณ์	54
3.2	ขั้นตอนเตรียมสังเกตการณ์	58
3.2.1	การทดลองหาชนิดสเปกตรัมเปรียบเทียบ	59
3.2.1.1	ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรมเคสเทรลสเปก และสเปกตรัมทดสอบที่เหมาะสม	59
3.2.1.2	เตรียมอุปกรณ์ชุดทดลอง	60
3.2.1.3	การทดลองและผลการทดลอง	62
3.2.1.3.1	Alignment ระบบซีซีดีสเปกโตรกราฟ	62
3.2.1.3.2	ถ่ายภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบ	66
3.2.1.3.3	สรุปผลการทดลองถ่ายภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบ	68
3.2.2	การ Alignment ระบบการเชื่อมต่อกล้องโทรทรรศน์และซีซีดีสเปกโตรกราฟ	69
3.3	เทคนิคและวิธีสังเกตการณ์ถ่ายภาพสเปกตรัม	71
3.3.1	เทคนิคการสังเกตการณ์	71
3.3.1.1	การปรับกล้องโทรทรรศน์ค้นหาดาวเป้าหมาย	72
3.3.1.2	แนวคิดของเทคนิคการสังเกตการณ์	72
3.3.2	วิธีการสังเกตการณ์ที่เหมาะสม	75
3.3.2.1	วิธีการปกติในการถ่ายภาพสเปกตรัม	75
3.3.2.2	วิธีการไม่ปกติในการถ่ายภาพสเปกตรัม	75
3.3.3	ตัวอย่างการถ่ายภาพสเปกตรัมของดาวคู่บีตา ไลรี	76
บทที่ 4	ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน และผลสังเกตการณ์ที่แก้ไขสำหรับการวิเคราะห์	80
4.1	ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน	80
4.1.1	ตัวอย่างผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐาน	80
4.1.2	ผลสังเกตการณ์ขั้นพื้นฐานทั้งหมด	83
4.2	ผลสังเกตการณ์ที่แก้ไขสำหรับการวิเคราะห์	84
4.2.1	หา Sensitivity Correction ของกล้องซีซีดีโดยใช้ความมาตรฐานเซตาเพกาซี	85
4.2.2	หา Calibrated Spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี	89
4.2.3	หา Normalized Spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี	91

4.2.4	ประมวลภาพ Normalized Spectrum ของดาวคู่บีตา ไถรี ต่อวันสังเกตการณ์	93
บทที่ 5	การวิเคราะห์ผลสังเกตการณ์	104
5.1	การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ และเฟสการ โคจร ของข้อมูลสังเกตการณ์ดาวคู่บีตา ไถรี	104
5.1.1	การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ	104
5.1.2	การคำนวณเฟสการ โคจร	106
5.2	การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ	107
5.3	การวิเคราะห์ความผันแปรของความยาวคลื่น ความกว้าง และรูปร่างโปรไฟล์ ของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์	110
5.3.1	ความผันแปรของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์	110
5.3.1.1	ความผันแปรของความยาวคลื่น	110
5.3.1.2	ความผันแปรของความเร็วในแนวเส้นสายตา	113
5.3.1.2.1	ความเร็วในแนวเส้นสายตาที่ไม่คิดผลกระทบจากการ โคจร ของโลก	113
5.3.1.2.2	ความเร็วในแนวเส้นสายตาที่คิดผลกระทบจากการ โคจร ของโลกรอบดวงอาทิตย์	114
5.3.2	ความผันแปรของความกว้างของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์	117
5.3.2.1	ความกว้างสมมูลของเส้นสเปกตรัมสว่าง	118
5.3.2.2	การวิเคราะห์ FWHM (Full Width at Half Maximum) ของเส้น สเปกตรัมสว่าง	125
5.3.3	ความผันแปรของรูปร่างโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์	131
5.4	ตารางข้อมูลผลการวัด และการคำนวณ จากการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมของผลสังเกตการณ์ ดาวคู่บีตา ไถรี	133
บทที่ 6	สรุป	146
บทที่ 7	การวิจารณ์	148
บรรณานุกรม		150
ภาคผนวก		152
ภาคผนวก ก	การใช้คำสั่งของโปรแกรมเคสเทรลสเปก	153
ก.1	หลักการทำงานของโปรแกรมเคสเทรลสเปก	153
ก.2	คำสั่งที่สำคัญของโปรแกรมเคสเทรลสเปก	153
ก.3	ทฤษฎีการแก้ไขเส้นฐาน	160
ก.4	การใช้โปรแกรมอื่นร่วมกับโปรแกรมเคสเทรลสเปก ได้แก่ โน้ตแพด, เวิร์ดแพด, และ ไมโครซอฟท์เอ็กเซล	161
ภาคผนวก ข	ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของอะตอมไฮโดรเจน, ฮีเลียม, และนีออน	163

ภาคผนวก ค ข้อมูลสเปกตรัมมาตรฐานของดาวเซตาเพกาซี	166
ภาคผนวก ง ข้อมูลกราฟแสงของดาวคูบีตา ไถรี ในปี พ.ศ. 2522 และ 2524	169
ภาคผนวก จ ค่าคงที่	170
ประวัติผู้เขียน	172

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 การจำแนกชนิดสเปกตรัมของดาวแบบฮาร์วาร์ด	21
5-1 ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุสำหรับเส้นสว่างย่านที่มองเห็นได้ในบรรยากาศของดาวคู่อปีตา ไกลรี	109
5-2 ผลการวัดและการคำนวณ H.J.D., Phase, Wavelength, Equivalent Width (W), และ Corrected Radial Velocity (RV) ของเส้นสเปกตรัมสว่าง จากการสังเกตการณ์ดาวคู่อปีตา ไกลรี	134
5-3 ผลการคำนวณ FWHM และ T ของเส้นสเปกตรัมสว่าง H-alfa และ HeI (~706.52 nm) จากการสังเกตการณ์ดาวคู่อปีตา ไกลรี	143
ก-1 พารามิเตอร์ของกล้องซีซีดี	157
ข-1 ข้อมูลความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของอะตอมไฮโดรเจน ฮีเลียม และนีออน	163
ค-1 ข้อมูลสเปกตรัมมาตรฐานของดาวเซตาเพกาซี มี linear dispersion เท่ากับ 1.6 นาโนเมตร	167

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1-1 แผนภาพสรุปผลการวิจัยของนักดาราศาสตร์จากอดีตถึงปัจจุบันของดาวคู่บีตา ไกรี ในรูปโครงสร้างความโน้มถ่วงแบบใกล้ชิด (ไม่ใช่สเกลจริง)	3
2-1 สเปกตรัมของวัตถุดำ ตามฟังก์ชันของแฟลนค์ $B_\lambda(T)$	8
2-2 แบบจำลองโครงสร้างความเป็นไปได้ในการครอบครองวงโคจรของอิเล็กตรอนในอะตอม	11
2-3 ระดับพลังงานต่ำของอะตอมไฮโดรเจน รวมถึงผลกระทบที่เกิดจาก j-splitting	16
2-4 แผนภาพโกรเทรียน (Grotrian diagrams) ของ H ของ Moore และ Merrill ในปี พ.ศ. 2511	16
2-5 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมฮีเลียมและแสดงการเปลี่ยนสถานะระหว่างบางวงโคจร	19
2-6 แผนภาพโกรเทรียนของ He I ของ Moore และ Merrill ในปี พ.ศ. 2511	20
2-7 N_2/N_{total} ของ H จากสมการโบลทซ์มานน์และซาฮา	24
2-8 ความแรงของเส้นสเปกตรัมที่ขึ้นกับอุณหภูมิ	24
2-9 แนวรัศมีคงตัวของดาวบนแผนภาพเอช-อาร์	25
2-10 รูปร่างของเส้นสเปกตรัมทั่วไป	25
2-11 แสดง line profiles ชนิด Doppler และ damping เมื่อความกว้างสมมูลมีค่าเท่ากัน	28
2-12 Voigt profiles ของเส้น K ของ Ca II โดยเส้นต้นที่สุดสร้างขึ้นจากอะตอมที่เป็นตัวดูดกลืนต่อพื้นที่ขนาดหนึ่งหน่วย จำนวน $N_a = 3.4 \times 10^{11} \text{ ions cm}^{-2}$ และเส้นโปรไฟล์ที่กว้างกว่าออกไปจะมีแบนด์เพิ่มขึ้นทีละ 10 เท่า ตามลำดับ	29
2-13 เส้นโค้งของการเติบโตของเส้น K ของ Ca II ขณะที่ N_a เพิ่มขึ้นจะทำให้ฟังก์ชัน $\log_{10} W$ เปลี่ยนไป	29
2-14 เรขาคณิตของแรงไทดอลที่กระทำบนโลกที่เนื่องมาจากดวงจันทร์	31
2-15 แรงโน้มถ่วงคิเพอเรนเชียลของดวงจันทร์ที่กระทำบนโลก	33
2-16 ผลของแรงเสียดทานไทดอลบนโลก	34
2-17 วงโคจรแบบวงรีที่โปรเจกชันบนระนาบของท้องฟ้าจะได้วงโคจรแบบวงรีที่สังเกตเห็นเห็นว่า จุดโฟกัสของวงรีเดิมไม่ได้โปรเจกชันบนจุดโฟกัสของวงรีที่สังเกตเห็น	36
2-18 (a). วงโคจรแบบวงกลม 2 วง ที่ระนาบการโคจรอยู่ในแนวเส้นสายตาของผู้สังเกต (b). เส้นโค้งความเร็วในแนวเส้นสายตาที่สังเกตได้ เมื่อ v_1, v_2 , และ v_{com} เป็นความเร็วของดาว 1, ดาว 2, และศูนย์กลางมวล ตามลำดับ	36
2-19 ความรีและทิศทางของวงโคจรเป็นตัวกำหนดรูปร่างของเส้นโค้งความเร็วในแนวเส้นสายตาในกรณีนี้ $M_1=0.5M_{Sun}, M_2=2.0M_{Sun}, a=2AU, e=0.3, i=30^\circ$ พร้อมกับการหมุนแกน $=45^\circ$	37
2-20 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและกำลังความส่องสว่าง ของ Popper	39
2-21 เรขาคณิตของระบบดาวคู่สเปกโตรสโคปีอุปราคา ที่มุมอินคลิเนชันต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 90°	39

- 2-22 กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาสำหรับ $i = 90^\circ$ เวลาที่แสดงบนกราฟแสงตรงกันกับตำแหน่งของดาวดวงเล็กกว่าเทียบกับดาวดวงใหญ่กว่า โดยรูปนี้เป็นตัวอย่างจากการสมมติว่าดาวดวงเล็กร้อนกว่าดาวดวงใหญ่ 40
- 2-23 กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาบางส่วน (partially eclipsing binary) โดยรูปนี้เป็นตัวอย่างจากการสมมติว่าดาวดวงเล็กร้อนกว่าดาวดวงใหญ่ 40
- 2-24 แสดงพิกัดแบบหมุนพร้อมกัน ของระบบดาวคู่ 42
- 2-25 คำนวณโน้มน้าวสัมฤทธิ์ Φ สำหรับดาว 2 ดวง มวล $M_1 = 0.85M_{\text{Sun}}$, $M_2 = 0.17M_{\text{Sun}}$ บนแกน x กำหนดให้ระยะห่างกันของดาวสมาชิกเท่ากับ $a = 5 \times 10^{10} \text{ cm} = 0.718R_{\text{Sun}}$ พร้อมกับจุดศูนย์กลางมวลของระบบอยู่ที่จุดกำเนิด แกน x อยู่ในหน่วยของ a และ Φ แสดงในหน่วยของ $G(M_1 + M_2)/a = 2.71 \times 10^{15} \text{ ergs g}^{-1}$ เส้นประคือ ค่า Φ ที่จุดลากรานเจียนชั้นใน ถ้าพลังงานรวมต่อกรัมของอนุภาคเกินค่า Φ นี้ อนุภาคนั้นจะสามารถไหลผ่านจุดลากรานเจียนชั้นในระหว่างดาว 2 ดวง 43
- 2-26 คำนวณพิกัดสมมติ สำหรับระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด มวล $M_1 = 0.85M_{\text{Sun}}$, $M_2 = 0.17M_{\text{Sun}}$ และ $a = 5 \times 10^{10} \text{ cm} = 0.718R_{\text{Sun}}$ แกนอยู่ในหน่วยของ a พร้อมกับจุดศูนย์กลางมวลของระบบ ($\times$) อยู่ที่จุดกำเนิด เริ่มจากคอนทัวร์ (เส้นโค้ง) ด้านบนของรูปและเลื่อนลงมาที่จุดศูนย์กลางมวล ค่าของ Φ (ในหน่วยของ $G(M_1 + M_2)/a = 2.71 \times 10^{15} \text{ ergs g}^{-1}$) สำหรับเส้นโค้งสมมติ $\Phi = -1.875, -1.768, -1.583, -1.583, -1.768$ (รูปคัมภ์เบลล์), -1.875 (รูปโรซโลบ), และ -3 (รูปทรงกลม) จุด L_4 และ L_5 เป็นคีย์สูงสุดเฉพาะที่ด้วย $\Phi = -1.431$ 44
- 2-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกันของดาวสมาชิก กับอัตราส่วนมวลของดาวทั้งสองในระบบดาวคู่ 45
- 2-28 ชนิดของระบบดาวคู่ (a) แสดงระบบดาวคู่แบบแยกกัน, (b) แสดงระบบดาวคู่แบบกึ่งแยกกันที่ดาวทุติยภูมิขยายตัวเต็มโรซโลบของมัน, และ (c) แสดงระบบดาวคู่แบบติดกัน 45
- 2-29 ดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน ที่แสดงแอครีชันดิสก์ล้อมรอบดาวปฐมภูมิ และมี hot spot ซึ่งเป็นตำแหน่งที่กระแสมวลที่ไหลมาจากจุดลากรานเจียนชั้นในตกกระทบบนดิสก์ 47
- 2-30 วงแหวน (จินตนาการ) วงหนึ่งในแอครีชันดิสก์ 48
- 2-31 อุณหภูมิของแอครีชันดิสก์ ที่คำนวณจาก dwarf nova Z Chamaeleontis รัศมี r อยู่ในหน่วย L_1 ซึ่งเป็นระยะทางจากดาวแคระขาวถึงจุดลากรานเจียนชั้นใน อุณหภูมิตกลงทันทีที่บริเวณใกล้กับผิวดาวปฐมภูมิ ซึ่งเป็นดาวแคระขาว โดยเป็นวัตถุจากการสมมติขึ้น 49
- 2-32 อนุภาคมวล m เคลื่อนที่ผ่านจุดลากรานเจียนชั้นใน L_1 เมื่อมองจากกรอบอ้างอิงที่ดาวปฐมภูมิอยู่นิ่งที่จุดกำเนิด 50
- 2-33 เส้นสว่างของการเลือนคอปเปอเรที่ลำดับต่างกันของการบังแอครีชันดิสก์ ระบบดาวคู่โคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลของระบบ ($\times$) และมีทิศการหมุนตามทศลูกศร 51

- 2-34 กราฟแสงของการบังของแอคครีชันดิสก์ในระบบดาวคู่ LX Serpentis เส้นหยักเป็นกราฟแสงที่สังเกตการณ์ได้ และเส้นเรียบเป็น fit curve ที่คำนวณได้ ของ Rutten และคณะ ในปี พ.ศ. 2535 52
- 3-1 อุปกรณ์สังเกตการณ์ (a).แผนภาพแสดงอุปกรณ์สังเกตการณ์, (b).แผนภาพแสดงแนวรังสีขนานของแสงดาวบนอุปกรณ์สังเกตการณ์, และ (c).ภาพถ่ายอุปกรณ์สังเกตการณ์ขณะทำการถ่ายสเปกตรัมของ Uniform light source 54-55
- 3-2 ภาพสเปกตรัมทดสอบของนีออนสำหรับเกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร เมื่อค่าความยาวคลื่นบนแกน x มีหน่วยเป็นอังสตรอม แต่สำหรับค่าที่กำกับบนแต่ละเส้นสเปกตรัมอยู่ในหน่วยของนาโนเมตร และค่าบนแกน y คือความเข้มสัมพัทธ์ (พล็อตของรังสี) 60
- 3-3 (a.1).และ (a.2).ภาพถ่ายแสดงชุดการทดลอง หา Alignment ระบบซีซีดีสเปกโตรกราฟและชนิดสเปกตรัมเปรียบเทียบ, และ (b).แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องมือซีซีดีสเปกโตรกราฟแบบแยกส่วนและแบบสมบูรณ์ 61
- 3-4 Alignment ระบบซีซีดีสเปกโตรกราฟ โดยใช้สเปกตรัมทดสอบของนีออนเป็นตัวทดสอบ (a).ภาพสเปกตรัมทดสอบของนีออนในไฟล์ Curve สำหรับ non alignment เมื่อค่าเริ่มต้นคือ Created 02/23/2000 at 11:17:11; Exp: 0.20 secs; Temp: -10.5C; Binning: 1 x 32; Image Size: 1536 x 32; Origin: 1,1, (b).ภาพสเปกตรัมทดสอบของนีออนในไฟล์ Image สำหรับ non alignment [เป็นภาพเดียวกันกับรูปที่ 3-4(a)] เมื่อค่าเริ่มต้นเหมือนกับรูปที่ 3-4(a) ด้วย, และ (c).ภาพสเปกตรัมทดสอบของนีออนในไฟล์ Curve สำหรับระบบซีซีดีสเปกโตรกราฟมี alignment แล้ว เมื่อค่าเริ่มต้นคือ Created 03/05/2000 at 19:12:31; Exp: 0.02 secs; Temp: -11.0C; Binning: 1 x 32; Image Size: 1536 x 32; Origin: 1,1 65-66
- 3-5 ภาพแสดงขบวนการถ่ายภาพสเปกตรัมหาชนิดสเปกตรัมเปรียบเทียบ โดยใช้สเปกตรัมทดสอบของนีออนเป็นตัววัด เมื่อระบบมี alignment แล้ว (a).ภาพสเปกตรัมทดสอบของนีออนใช้กำหนดสเกลพื้นที่รับภาพ เมื่อค่าเริ่มต้นคือ Created 03/05/2000 at 19:12:31; Exp: 0.02 secs; Temp:-11.0C; Binning: 1 x 32; Image Size: 1536 x 32; Origin: 1,1, (b).ภาพการกำหนดสเกลให้แก่พื้นที่รับภาพ, และ (c).ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบ ในสเกลนาโนเมตรจากการกำหนดสเกลโดยสเปกตรัมทดสอบของนีออนรูปที่ 3-5(a) เมื่อค่าเริ่มต้นคือ Created 03/05/2000 at 19:17:53; Exp: 0.02 secs; Temp: -11.0C; Binning: 1 x 32; Image Size: 1536 x 32; Origin: 1,1 67-68
- 3-6 เส้นสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนและความยาวคลื่นอ้างอิงจากผลการทดลอง สำหรับระบบซีซีดีสเปกโตรกราฟมี alignment , ด้วย Exposure time = 0.02 วินาที, เกรตติง ขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร, เมื่อค่าตัวเลขกำกับที่แต่ละเส้นเป็นความยาวคลื่นในหน่วย นาโนเมตรที่ใช้อ้างอิง 69
- 3-7 แสดงลักษณะของภาพดาวที่เกิดขึ้นที่ระยะต่างกัน เมื่อ A เป็นภาพเมื่อดำแหน่งรับภาพ A อยู่สั้นกว่าระยะโฟกัส, B เป็นภาพเมื่อดำแหน่งรับภาพ B อยู่ที่ระยะโฟกัสพอดี, และ C เป็นภาพเมื่อดำแหน่งรับภาพ C อยู่ไกลจากระยะโฟกัส 69

3-8	ภาพถ่ายสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออน ลำดับที่ 1 ด้วย Exp. 0.02 วินาที, สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	77
3-9	ภาพถ่ายสเปกตรัมดาวคูบีตา ไลรี ลำดับที่ 2 ที่ 2451840.958 H.J.D. ด้วย Exp. 60 วินาที, สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	77
3-10	ภาพถ่ายสเปกตรัมท้องฟ้าพื้นหลัง ลำดับที่ 3 ด้วย Exp. 60 วินาที, สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	78
3-11	ภาพถ่ายสเปกตรัมดาวคูบีตา ไลรี ลำดับที่ 4 ที่ 2451840.988 H.J.D. ด้วย Exp. 60 วินาที, สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	78
3-12	ภาพถ่ายสเปกตรัมท้องฟ้าพื้นหลัง ลำดับที่ 5 ด้วย Exp. 60 วินาที, สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	78
3-13	ภาพถ่ายสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออน ลำดับที่ 6 ด้วย Exp. 0.02 วินาที, สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	79
3-14	(a).ภาพตัวอย่างการตรวจสอบความถูกต้องของการถ่ายภาพสเปกตรัมต่อหนึ่งขบวนการ, และ (b).ภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไลรี ที่เป็น non Calibrated Spectrum จากการนำ รูปที่ 3-9 ลงด้วย รูปที่ 3-10 ซึ่งจะถือว่าเป็นภาพดาวคูบีตา ไลรี ณ 2451840.985 H.J.D. ของข้อมูลหลังขบวนการถ่าย สำหรับตัวอย่างของหัวข้อที่ 3.3.3	79
4-1	ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนของรูปที่ 3-8 ที่แสดงค่าพิกเซลบนเส้นสว่าง	81
4-2	ภาพการกำหนดสเกลบนแกน x ของภาพสเปกตรัมให้อยู่ในหน่วยนาโนเมตร โดยใช้ค่าความยาวคลื่นนาโนเมตรของเส้นสว่างจากรูปที่ 3-6 ที่ตรงกับค่าพิกเซลของเส้นสว่างจากรูปที่ 4-1	82
4-3	ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.985 H.J.D. ในหน่วยนาโนเมตร เมื่อใช้ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนของรูปที่ 4-1 หรือ 3-8 เป็นตัวกำหนดสเกล	82
4-4	ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.988 H.J.D. ในหน่วยนาโนเมตร เมื่อใช้ภาพสเปกตรัมเปรียบเทียบนีออนของรูปที่ 4-1 หรือ 3-8 เป็นตัวกำหนดสเกล	82
4-5	ภาพสเปกตรัมของดาวคูบีตา ไลรี สำหรับกำหนดหรือนิยามสัญลักษณ์ของเส้นสว่าง แทนด้วยตัวเลขโรมัน I (~587.57nm), II (~656.28nm), III (~667.82nm), และ IV (~706.52nm) ดังในรูป	83
4-6	ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ด้วย linear dispersion = 1.6 nm	86
4-7	(a). หน้าต่างแสดงการ Renormalize ภาพสเปกตรัมของรูปที่ 4-6 ด้วย Interval per pixel = 0.11 nm และเลือกช่วงความยาวคลื่นเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536), และ (b). ภาพสเปกตรัมที่เกิดจากการ Renormalize ภาพสเปกตรัมของรูปที่ 4-6 ด้วย Interval per pixel = 0.11 nm และเลือกช่วงความยาวคลื่นเป็น 564.15 nm (พิกเซลที่ 1) ถึง 733.00 nm (พิกเซลที่ 1536)	87
4-8	ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี สำหรับเทียบมาตรฐาน ด้วย linear dispersion = 0.11 nm ซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้ายที่เกิดจากการทำ Smooth บนกราฟของรูปที่ 4-7(b)	87

4-9	ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ที่ถ่ายโดยกล้องซีซีดีของเรา ณ วันที่ 12 พ.ย. 2543 เวลา 19:15:11 น. ด้วย Exposure Time = 60 วินาที ที่ยังไม่ผ่านการ Renormalize	88
4-10	ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวเซตาเพกาซี ที่ถ่ายโดยกล้องซีซีดีของเรา ณ วันที่ 12 พ.ย. 2543 เวลา 19:15:11 น. ด้วย Exposure Time = 60 วินาที ที่ผ่านการ Renormalize ด้วย linear dispersion = 0.11 nm จากรูปที่ 4-9 และผ่านการ Smooth 1 ครั้ง	88
4-11	ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.985 H.J.D. ที่ผ่านการ Renormalize ด้วย linear dispersion = 0.11 nm	89
4-12	ภาพ non Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.988 H.J.D. ที่ผ่านการ Renormalize ด้วย linear dispersion = 0.11 nm	90
4-13	ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.985 H.J.D. ด้วย linear dispersion = 0.11 nm	90
4-14	ภาพ Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ในหน่วยนาโนเมตร ที่ 2451840.988 H.J.D. ด้วย linear dispersion = 0.11 nm	90
4-15	ภาพการสร้างเส้นฐาน สำหรับ Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.985 H.J.D., และ linear dispersion = 0.11 nm	92
4-16	(a).ภาพสเปกตรัมเส้นฐานที่สร้างจาก Calibrated Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.985 H.J.D., และ linear dispersion = 0.11 nm, และ (b).ภาพแสดงการเปรียบเทียบระหว่างเส้นฐานกับสเปกตรัมเดิมของรูปที่ 4-15 (หรือ 4-13)	93
4-17	ภาพ Normalized Spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 2451840.985 H.J.D., และ linear dispersion = 0.11 nm	93
4-18	Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 12 ต.ค.2543 ณ 20:10:42 น. หรือ H.J.D. = 2451830.049 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.920798902	94
4-19	Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 13 ต.ค.2543 ณ 19:54:40 น. หรือ H.J.D. = 2451831.038 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.997272098	94
4-20	Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 14 ต.ค.2543 ณ 19:51:04 น. หรือ H.J.D. = 2451832.035 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.074413018	94
4-21	Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 17 ต.ค.2543 ณ 18:40:45 น. หรือ H.J.D. = 2451834.986 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.302639491	95
4-22	Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 18 ต.ค.2543 ณ 19:16:12 น. หรือ H.J.D. = 2451836.011 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.381877582	95
4-23	Normalized spectrum ของดาวคูบีตา ไลรี ที่ 19 ต.ค.2543 ณ 19:05:06 น. หรือ H.J.D. = 2451837.003 วันซึ่งตรงกับ Phase = 0.458615742	95

4-24	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 20 ค.ศ.2543 ณ 19:29:06 น. หรือ H.J.D. = 2451838.02 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.537238934	96
4-25	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 21 ค.ศ.2543 ณ 19:10:07 น. หรือ H.J.D. = 2451839.007 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.613553743	96
4-26	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 23 ค.ศ.2543 ณ 18:43:29 น. หรือ H.J.D. = 2451840.988 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.766792044	96
4-27	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 26 ค.ศ.2543 ณ 19:39:26 น. หรือ H.J.D. = 2451844.027 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.001799855	97
4-28	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 27 ค.ศ.2543 ณ 19:16:13 น. หรือ H.J.D. = 2451845.01 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.0778874	97
4-29	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 28 ค.ศ.2543 ณ 18:37:27 น. หรือ H.J.D. = 2451845.983 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.153139859	97
4-30	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 29 ค.ศ.2543 ณ 19:34:00 น. หรือ H.J.D. = 2451847.023 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.233511267	98
4-31	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 31 ค.ศ.2543 ณ 19:05:27 น. หรือ H.J.D. = 2451849.003 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.386646913	98
4-32	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 1 พ.ย.2543 ณ 18:50:03 น. หรือ H.J.D. = 2451849.992 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.463154352	98
4-33	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 2 พ.ย.2543 ณ 19:32:16 น. หรือ H.J.D. = 2451851.021 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.542756093	99
4-34	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 3 พ.ย.2543 ณ 19:10:01 น. หรือ H.J.D. = 2451852.006 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.618895707	99
4-35	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 4 พ.ย.2543 ณ 20:41:26 น. หรือ H.J.D. = 2451853.069 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.701139769	99
4-36	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 5 พ.ย.2543 ณ 20:43:36 น. หรือ H.J.D. = 2451854.071 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.778590727	100
4-37	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 6 พ.ย.2543 ณ 19:34:33 น. หรือ H.J.D. = 2451855.023 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.852217053	100
4-38	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 7 พ.ย.2543 ณ 19:46:25 น. หรือ H.J.D. = 2451856.031 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.930189007	100
4-39	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไสรี ที่ 9 พ.ย.2543 ณ 18:59:10 น. หรือ H.J.D. = 2451857.998 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.082320877	101

4-40	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 11 พ.ย.2543 ณ 20:48:42 น. หรือ H.J.D. = 2451860.074 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.24287289	101
4-41	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 12 พ.ย.2543 ณ 19:08:05 น. หรือ H.J.D. = 2451861.004 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.314804131	101
4-42	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 13 พ.ย.2543 ณ 19:54:57 น. หรือ H.J.D. = 2451862.036 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.394655966	102
4-43	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 14 พ.ย.2543 ณ 20:15:32 น. หรือ H.J.D. = 2451863.051 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.473096302	102
4-44	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 15 พ.ย.2543 ณ 19:14:59 น. หรือ H.J.D. = 2451864.009 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.547179427	102
4-45	Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 16 พ.ย.2543 ณ 19:43:15 น. หรือ H.J.D. = 2451865.028 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.626032477	103
5-1	Calibrated spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 12 ตุลาคม 2543 ณ 20:10:42 น. หรือ H.J.D. = 2451830.049 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.920798902 ที่ถ่ายด้วย Exposure time = 60 วินาที	109
5-2	แสดงค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่าง $H\alpha$ ที่ผันแปรกับเฟสการโคจรของระบบดาวคู่บีตา ไลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการเลื่อนดอปเปลอร์ที่เนื่องมาจากการ โคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์	111
5-3	แสดงค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่าง HeI ที่เส้น ~ 706.52 nm ที่ผันแปรกับเฟสการ โคจรของ ระบบดาวคู่บีตา ไลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการเลื่อนดอปเปลอร์ที่เนื่องมาจากการ โคจรของ โลกรอบดวงอาทิตย์	112
5-4	ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง $H\alpha$ ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการ โคจรของโลก	113
5-5	ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการ โคจรของโลก	114
5-6	ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง $H\alpha$ ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่คิดผลกระทบจากการ โคจรของโลก	116
5-7	ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่คิดผลกระทบจากการ โคจรของโลก	116
5-8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง $V_{r, corrected \beta_{Ly\alpha}}$ และ $V_{r, non-corrected \beta_{Ly\alpha}}$ ของเส้นสว่าง $H\alpha$ ของดาวคู่บีตา ไลรี	117
5-9	แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับการนิยาม W	118
5-10	แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับแสดงการวิเคราะห์หา W ซึ่งมี linear dispersion (nm/pixel) คงตัว	119

5-11	ภาพแสดงการเลือกช่วงของการอินทิกรัลของเส้น $H\alpha$ สำหรับหา W ของภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่ถ่ายเมื่อ วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2543 เวลา 19:51:04 น. หรือ H.J.D. = 2451832.035 วัน	120
5-12	แสดงผลการคำนวณอินทิกรัลของเส้น $H\alpha$ ของภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่ถ่ายเมื่อ วันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2543 เวลา 19:51:04 น. หรือ H.J.D. = 2451832.035 วัน	120
5-13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง HeI (~ 587.57 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี	121
5-14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง $H\alpha$ (~ 656.28 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี	121
5-15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง HeI (~ 667.82 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี	122
5-16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี	122
5-17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W ของเส้นสว่างทั้ง 4 เส้นของรูปที่ 5-13 ถึง 5-16 กับเฟสของการโคจร ของดาวคู่บีตา ไลรี	123
5-18	แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับการนิยาม FWHM	125
5-19	แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับการแสดงการคำนวณ FWHM	126
5-20	(a). กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM ของเส้นสว่าง $H\alpha$ กับเฟสการโคจร ของดาวคู่บีตา ไลรีและ (b). กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (ที่คำนวณจากค่า HWHM) ของเส้นสว่าง $H\alpha$ กับเฟสการโคจร	129
5-21	(a). กราฟความสัมพันธ์ระหว่างFWHM ของเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) กับเฟสการโคจร ของดาวคู่บีตา ไลรี และ (b). กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (ที่คำนวณจากค่า HWHM) ของเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) กับเฟสการโคจร	130
ก-1	หน้าต่างปฏิบัติการของโปรแกรมเคสเทรลสเปก	154
ก-2	แสดง Baseline corrected integral ระหว่างพิกเซลที่ 1 และ 2 แทนด้วยพื้นที่ที่บี	160
ก-3	การแก้ไขเส้นฐานแบบเส้นฐาน 2 จุด	160
ก-4	การแก้ไขเส้นฐานแบบเส้นฐานหลายจุด	161
ก-5	ภาพเส้นฐานของสมการกำลังสาม, สมการกำลังสี่, สมการกำลังสอง	161
ง-1	กราฟแสงของดาวคู่บีตา ไลรี ปี พ.ศ. 2522 (ค.ศ. 1979) และ 2524 (ค.ศ. 1981) สำหรับแผ่นกรองแสง B-V, B, และ V	169