



สมบัติทางกายภาพของ Cataclysmic Variables คาบการโคจรสั้นจากเซอร์เวย์การแปรค่า  
ความสว่าง



รุ่งนภา คงประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

สมบัติทางกายภาพของ Cataclysmic Variables คาบการโคจรสั้นจากเซอร์เวย์การแปรค่า  
ความสว่าง



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "สมบัติทางกายภาพของ Cataclysmic Variables คาบการโคจรสั้นจากเซอร์เวย์  
การแปรค่าความสว่าง"  
ของ รุ่งนภา คงประดิษฐ์  
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

**คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์**

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี ขำล้ำเลิศ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ อังเวโรจน์วิทย์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก)

**อนุมัติ**

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	สมบัติทางกายภาพของ Cataclysmic Variables คาบการโคจรสั้น จากเซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง
ผู้วิจัย	รุ่งนภา คงประดิษฐ์
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ อังเวโรจน์วิทย์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2564
คำสำคัญ	SU UMa, Dwarf novae, Cataclysmic Variables

### บทคัดย่อ

เราศึกษาสมบัติทางกายภาพของ Cataclysmic Variables ที่ค้นพบใหม่ 2 ระบบ ขณะเกิดการระเบิดใหญ่ ได้แก่ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci ซึ่งถูกตรวจพบโดย The Catalina Real-Time Transient Survey และ All-Sky Automated Survey for SuperNovae ตามลำดับ การสังเกตการณ์ทางโฟโตเมตรีดำเนินการโดยใช้กล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 ขนาด 0.6 เมตร ตั้งอยู่ ณ หอดูดาวเซอร์โร โทโลโล อินเตอร์อเมริกัน สาธารณรัฐชิลี และกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO ขนาด 0.7 เมตร ตั้งอยู่ ณ หอดูดาวเกาเหมยกุ๋ สาธารณรัฐประชาชนจีน กราฟแสงของทั้ง 2 ระบบปรากฏโครงสร้าง Superhump อย่างชัดเจน เราวัดคาบ Superhump โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลา พบว่า คาบ Superhump ของ CSS160215:100655-142538 มีค่าเท่ากับ  $P_{sh} = 86.49 \pm 0.05$  นาที และ ASASSN-17ci มีค่าเท่ากับ  $P_{sh} = 83.70 \pm 0.02$  นาที จากสมบัติทางการระเบิดและโครงสร้าง Superhump ที่พบขณะเกิดการระเบิดใหญ่ เราจัดประเภทของ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci เป็น Dwarf novae ประเภท SU UMa ที่มีคาบการโคจรสั้น

<b>Title</b>	PHYSICAL PROPERTIES OF SHORT-PERIOD CATAclySMIC VARIABLES FROM TRANSIENT SURVEYS
<b>Author</b>	RUNGNAPHA KHONGPRADIT
<b>Advisor</b>	Assistant Professor Amornrat Aungwerojwit, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	M.S. Thesis in Physics, Naresuan University, 2021
<b>Keywords</b>	SU UMa, Dwarf novae, Cataclysmic Variables

### ABSTRACT

We study the physical properties of two new Cataclysmic Variables: CSS160215:100655-142538 and ASASSN-17ci, during superoutbursts, which detected by The Catalina Real-Time Transient Survey and All-Sky Automated Survey for Supernovae, respectively. The photometric observations were carried out using the 0.6-m PROMPT8 telescope located at Cerro Tololo Inter-American Observatory, Chile, and the 0.7-m TRT-GAO telescope located at Gaomeigu Observatory, China. The light curves of these two systems reveal prominent superhump structures. Superhump periods of the systems were determined from time-series analysis technique which were found to be  $P_{sh} = 86.49 \pm 0.05$  mins for CSS160215:100655-142538, and  $P_{sh} = 83.70 \pm 0.02$  mins for ASASSN-17ci. According to outburst property and superhump structure detected during the superoutbursts, we classified CSS160215:100655-142538 and ASASSN-17ci to be short-period SU UMa-type dwarf novae.

## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถช่วยเหลือ แนะนำ และให้คำปรึกษา อย่างดี ยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ อังเวโรจน์วิทย์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ทั้งด้านวิชาการ การเขียน และการใช้ชีวิต ด้วยความเอาใจใส่ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิราณี ขำล้ำเลิศ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำถ่ายทอดวิธีความรู้ แนวคิด และวิธีการ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงขอขอบพระคุณ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลอันเป็นที่รักทั้งหลาย ที่ให้โอกาสผู้เขียนได้เลือกทำตามเส้นทางของตัวเอง และให้คำแนะนำส่งกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

หากมีสิ่งที่ขาดตกบกพร่องหรือมีความผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และผู้เขียนคาดหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจค้นคว้าหาความรู้ด้านดาราศาสตร์ฟิสิกส์ในอนาคตต่อไป

รุ่งนภา คงประดิษฐ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
ประกาศคุณูปการ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	4
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
สมบัติทางกายภาพของ CVs.....	5
แบบจำลองของโรซ.....	6
กลไกการถ่ายเทมวลสารของ CVs.....	9
วิวัฒนาการของ CVs.....	10
การจำแนกประเภทของ CVs.....	12
โครงสร้าง Superhump ใน Dwarf novae ประเภท SU UMa.....	18
จำนวนประชากรของ CVs ที่ค้นพบจากการสังเกต.....	21

เซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง .....	22
เทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลโฟโตเมตรี .....	26
บทที่ 3 การสังเกตการณ์ และการรีดิวซ์ข้อมูล .....	28
การสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี.....	28
สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเกตการณ์ .....	30
ขั้นตอนการสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี.....	30
การรีดิวซ์ข้อมูล.....	31
บทที่ 4 ผลจากการสังเกตการณ์และการวิเคราะห์คาบการโคจร .....	35
กราฟแสงของระบบที่ได้จากการสังเกตการณ์.....	35
การวิเคราะห์คาบ Superhump.....	43
บทที่ 5 บทสรุป .....	47
อภิปรายผล.....	47
สรุปผล.....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก .....	56
ประวัติผู้วิจัย.....	63



## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ข้อมูลการสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี.....	29
---	----



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 แสดงการถ่ายเทมวลสารจากดาวมวลต่ำไปยังแผ่นสะสมมวลสารรอบดาวแคระขาว .....	2
ภาพ 2 แสดงการกระจายเชิงพื้นที่ของการสุ่มเลือกตัวอย่าง CVs จำนวน 42 ระบบ ภายใต้ ระยะห่าง 150 พาร์เซค โดยแสดงบนพิกัดเส้นศูนย์สูตร (ด้านบน) และพิกัดกาแลกติก ละติจูด (ด้านล่าง).....	3
ภาพ 3 องค์ประกอบของ CVs โดย (ก) เป็นระบบที่ไม่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือมี สนามแม่เหล็กน้อยมาก และ (ข) เป็นระบบที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก .....	6
ภาพ 4 แสดงภาพตัดขวางสองมิติของแบบจำลองของโรซในระนาบการโคจรของระบบดาว คู่แบบใกล้เคียงที่มีผิวสัมผัสเท่ากันตลอดผิวของดาวสองดวงกับจุดลากราง์ทั้ง 5 จุด.....	7
ภาพ 5 แสดงแบบจำลองของผิวห่อหุ้มของโรซในแต่ละช่วงวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ โดย (ก) ระบบดาวคู่แบบแยกกัน (ข) ระบบดาวคู่กึ่งแตะกัน (ค) ระบบดาวคู่แบบแตะกัน..	8
ภาพ 6 ตัวอย่างกราฟแสงของ SS Cygni.....	13
ภาพ 7 ตัวอย่างกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท Z Cam.....	14
ภาพ 8 ตัวอย่างกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท SU UMa ในขณะเกิดการระเบิดใหญ่ .....	15
ภาพ 9 ตัวอย่างโครงสร้าง Superhump ขณะเกิดการระเบิดใหญ่.....	15
ภาพ 10 ตัวอย่างกราฟแสงของ ER UMa.....	16
ภาพ 11 ตัวอย่างกราฟแสงของ WZ Sge.....	16
ภาพ 12 แบบจำลองของแผ่นสะสมมวลสารที่มีการส่ายและมีรูปร่างผิดปกติ โดยแสดงแผ่น สะสมมวลสารในเฟสที่ 0.1 จนครบรอบการเกิด Superhump ซึ่งแสดงตามลำดับคือจาก ซ้ายบนลงซ้ายล่างและจากขวาบนลงขวาล่าง.....	19

ภาพ 13 แสดงการเคลื่อนที่ตามวงโคจรของระบบที่มีการสิ้นฟุ้งของวงโคจร .....	20
ภาพ 14 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของ CVs ที่ค้นพบจากการสังเกต .....	21
ภาพ 15 แสดงกล้องโทรทรรศน์ทั้ง 3 ตัวของ CRTS ได้แก่ (ก) Catalina Schmidt (ข) Mt. Lemmon Survey และ (ค) Uppsala Schmidt .....	23
ภาพ 16 แสดงกล้องโทรทรรศน์ Brutus (ก) และ Cassius (ข).....	24
ภาพ 17 แสดงแผนที่สำรวจท้องฟ้าทั้งหมดที่ครอบคลุมช่วงเวลา 365 วัน ในวันศุกร์ที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2558 (ก) และวันจันทร์ที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 (ข).....	25
ภาพ 18 แสดงตัวอย่างกราฟแสงของวัตถุที่สังเกตการณ์ (ภาพบน) และดาวเปรียบเทียบ (ภาพล่าง).....	27
ภาพ 19 แสดงภาพถ่ายของ CSS160215:100655-142538 โดย (ก) ระบบก่อนเกิดระเบิดใหญ่ ขนาด 5x5 arcmins และ (ข) ระบบขณะเกิดการระเบิดใหญ่ ขนาด 5x5 arcmins.....	29
ภาพ 20 แสดงภาพถ่ายของ ASASSN-17ci โดย (ก) ระบบก่อนเกิดระเบิดใหญ่ ขนาด 5x5 arcmins และ (ข) ระบบขณะเกิดการระเบิดใหญ่ (มาจากการ trim ภาพขนาด 25.1x25.1 arcmins).....	30
ภาพ 21 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายซีซีดีประเภทต่างๆ จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO .....	32
ภาพ 22 แสดงการวัดปริมาณแสงของ CSS160215:100655-142538 .....	33
ภาพ 23 แสดงการวัดปริมาณแสงของ ASASSN-17ci .....	34
ภาพ 24 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	36
ภาพ 25 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	36

ภาพ 26 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	37
ภาพ 27 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	37
ภาพ 28 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	38
ภาพ 29 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	38
ภาพ 30 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	39
ภาพ 31 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	39
ภาพ 32 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 21 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	40
ภาพ 33 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ .....	40

ภาพ 34 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้อง โทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของ ดาวเปรียบเทียบ .....	41
ภาพ 35 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้อง โทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของ ดาวเปรียบเทียบ .....	41
ภาพ 36 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้อง โทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของ ดาวเปรียบเทียบ .....	42
ภาพ 37 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2560 จากกล้อง โทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของ ดาวเปรียบเทียบ .....	42
ภาพ 38 แสดง Scargle periodogram ของ CSS160215:100655-142538.....	44
ภาพ 39 แสดงเฟสการโคจรของ CSS160215:100655-142538 (ภาพบน) และค่าเฉลี่ย ของเฟสการโคจรเทียบกับกราฟคลื่นรูปไซน์ (ภาพล่าง).....	45
ภาพ 40 แสดง Scargle periodogram ของ ASASSN-17ci .....	45
ภาพ 41 แสดงเฟสการโคจรของ ASASSN-17ci (ภาพบน) และค่าเฉลี่ยของเฟสการโคจร เทียบกับกราฟคลื่นรูปไซน์ (ภาพล่าง) .....	46
ภาพ 42 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของ SU UMa ที่ค้นพบจากการสังเกตจาก Ritter & Kolb catalogue (July 2013, Version 7.20).....	48

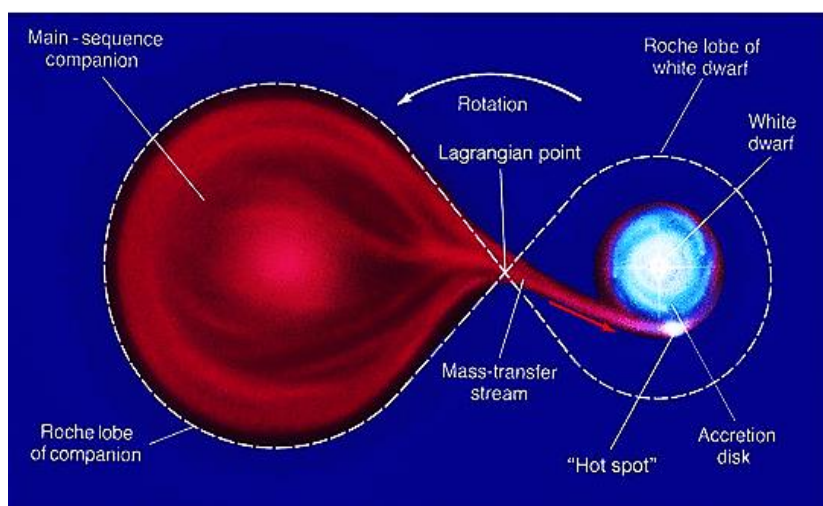
# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญ

ดาวฤกษ์บนท้องฟ้าที่เรามองเห็นในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นระบบดาวคู่ (Binary systems) ซึ่งบางระบบเราไม่สามารถมองเห็นคู่ของมันได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากดาวดวงที่สว่างกว่าบดบังคู่ของมันนั่นเอง โดยระบบดาวคู่เหล่านี้ เป็นระบบที่อยู่ภายใต้แรงโน้มถ่วงซึ่งกันและกัน สมาชิกของระบบดาวคู่แต่ละดวงจะโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน โดยทั่วไปดาวฤกษ์มากกว่า 50% จะมีอันตรกิริยาต่อกันในระหว่างเกิดการวิวัฒนาการของดาวทั้งสองดวง และยังมีมีการถ่ายเทมวลสารไปยังคู่ของมันภายใต้ระบบของดาวคู่ ทำให้ดาวฤกษ์มีวิวัฒนาการไปเป็นวัตถุที่น่าสนใจหลากหลายประเภทในกาแล็กซี เช่น Cataclysmic variables, Millisecond pulsars, Low-mass X-ray binaries, Galactic black hole, Double degenerate systems เป็นต้น ในการศึกษาวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ เราสามารถใช้ระบบของ Cataclysmic variables (CVs) ศึกษาวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ที่อยู่ในระบบดาวคู่ เนื่องจากมีจำนวนมากเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ มีระยะทางค่อนข้างใกล้โลกในระดับ ~100 พาร์เซก และเป็นระบบที่ค่อนข้างสว่าง มีค่าประมาณ 12 - 20 แมกนิจูด ส่วนใหญ่มีคาบการโคจร (Orbital period;  $P_{orb}$ ) ระหว่าง ~80 นาทีถึง ~10 ชั่วโมง โดย CVs เกิดจากระบบดาวคู่ที่ห่างกัน และมีวิวัฒนาการจนกลายเป็นระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด ซึ่งประกอบไปด้วยดาวแคระขาว (White dwarf) และดาวมวลต่ำในแถบลำดับหลัก (Low-mass main sequence stars) แสดงดังภาพ 1 โดยดาวมวลต่ำจะมีวิวัฒนาการจนมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรช (Roche lobe) ซึ่งมีผิวการพาห่อหุ้มร่วมกัน (Common envelope) และมีการถ่ายเทมวลสารไปยังดาวแคระขาว ทำให้เกิดพฤติกรรมที่หลากหลาย มวลสารจากดาวมวลต่ำจะถูกถ่ายเทผ่านแผ่นสะสมมวลสาร (Accretion disc) รอบดาวแคระขาว มีผลทำให้สสารในแผ่นสะสมมวลสารมีความไม่เสถียรทางความร้อนจึงเกิดการระเบิดขึ้น (1) ทำให้ระบบสว่างขึ้นหลายแมกนิจูด ซึ่งเป็นสิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนที่สุดของ CVs โดยเราสามารถจำแนกประเภทของ CVs ได้จากคุณสมบัติทางการระเบิดและความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสัมพันธ์กับคาบการโคจรของระบบ สมบัติทางกายภาพเหล่านี้แสดงถึงวิวัฒนาการของ CVs ในเชิงเอกภพวิทยา CVs ยังมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการระเบิดของซูเปอร์โนวาชนิด Ia (Type Ia supernovae) ซึ่งเกิดจากการระเบิดอย่างรุนแรงของดาวแคระขาวที่มีมวลเกินขีดจำกัดค่ามวลจันทรเสกข์ (Chandrasekhar mass limit) เนื่องจากมีการถ่ายเทมวลสารจากดาวมวลต่ำไปสะสมที่ดาวแคระขาวมากเกินไปนั่นเอง และซูเปอร์โนวาชนิด Ia ยังสามารถใช้เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดระยะทาง

ของกาแลกซีที่อยู่ห่างไกลออกไป ดังนั้น จะเห็นว่า CVs มีความสำคัญต่อการศึกษาภาพรวมของวิวัฒนาการของเอกภพ

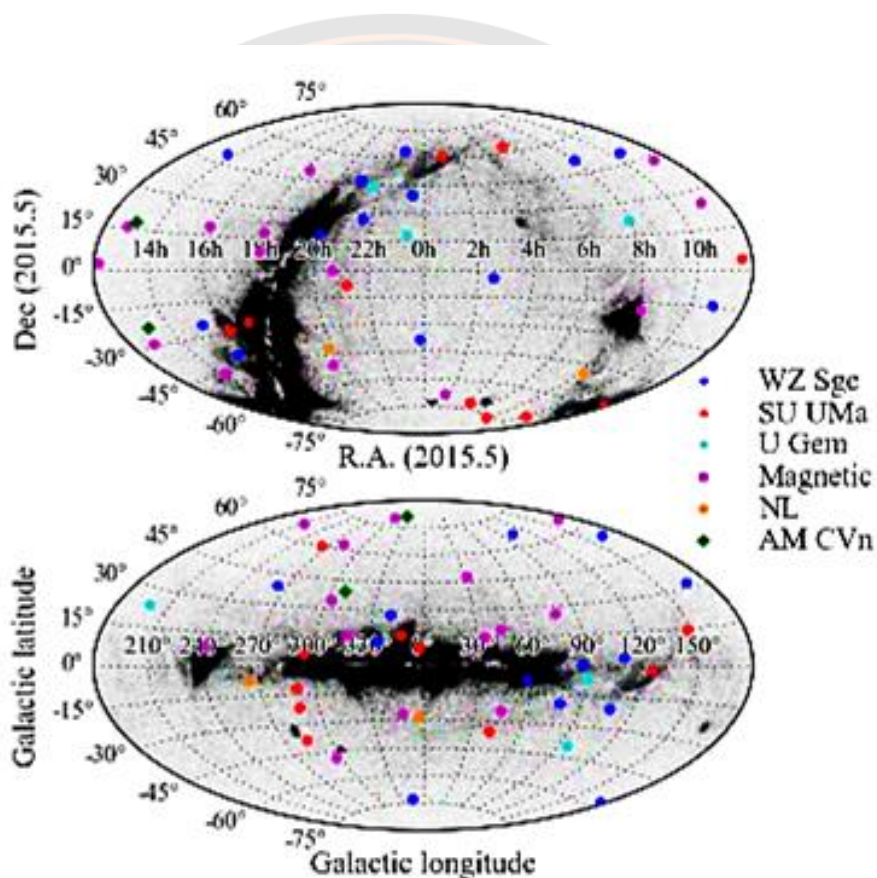


ภาพ 1 แสดงการถ่ายเทมวลสารจากดาวมวลต่ำไปยังแผ่นสะสมมวลสารรอบดาวแคระขาว (2)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่า CVs มีความสำคัญอย่างมากในการศึกษาวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ แต่เนื่องจากวิวัฒนาการของ CVs มีระยะเวลาดำเนินข่างยาวนานกว่าช่วงชีวิตของมนุษย์ ทำให้เรายังขาดความเข้าใจในระบบเหล่านี้ ในทางทฤษฎี วิวัฒนาการของ CVs มีการทำนายว่า CVs ควรจะมีวิวัฒนาการไปทางคาบการโคจรสั้น ( $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง) จนถึงคาบการโคจรที่สั้นที่สุด (Minimum period) ซึ่งมีค่าประมาณ 65 นาที แต่จากการสังเกต เรากลับพบ CVs คาบการโคจรที่สั้นที่สุดประมาณ 75 - 80 นาที และนอกจากนี้ แบบจำลองมาตรฐานได้ประมาณจำนวนประชากรของ CVs คาบการโคจร  $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง มากถึง 99% (3, 4, 5) โดย ~70% ของ CVs คาบการโคจรสั้นเหล่านี้ ควรมีวิวัฒนาการผ่านคาบการโคจรที่สั้นที่สุดไปแล้ว แต่ในทางปฏิบัติ เรากลับพบ CVs คาบการโคจรที่สั้นเพียง 71% และแทบไม่พบระบบที่มีวิวัฒนาการผ่านคาบการโคจรที่สั้นที่สุดไปแล้ว

A. F. Pala และคณะ (2019) แสดงตัวอย่างการค้นหา CVs ระบบใหม่ โดยกำหนดเงื่อนไขภายใต้ระยะทาง 150 พาร์เซก ดังภาพ 2 ความหนาแน่นของจำนวนประชากรของ CVs ที่ค้นพบภายใต้ระยะทาง 150 พาร์เซก ถูกแสดงผลในเทอมของการกระจายตัวเชิงพื้นที่ โดยเลือกสุ่มตัวอย่างจำนวนประชากรของ CVs ภายใต้เงื่อนไขจำนวน 42 ระบบ และกำหนดรหัสสี ดังนี้ สีแดงคือ SU UMa 10 ระบบ สีน้ำเงินคือ WZ Sge 12 ระบบ สีฟ้าคือ U Gem 3 ระบบ สีม่วงคือ Magnetic CV 15 ระบบ สีเหลืองคือ Novae-like variable 2 ระบบ สีเขียวคือ AM CVn 2 ระบบ (ไม่นำมานับรวม) จากการสุ่มตัวอย่างเหล่านี้ พบว่ามีจำนวนประชากรของ CVs คาบการโคจรสั้นทั้งหมด 83% โดยพบ SU UMa มากถึง 52% ของ CVs จำนวน 42 ระบบ ซึ่งประมาณ 91% เป็น SU UMa ที่มี

คาบการโคจรสั้นน้อยกว่า 2 ชั่วโมง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ เราจึงมุ่งค้นหา CVs คาบการโคจรสั้นจาก เซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง (Transient surveys) ได้แก่ The Catalina Real-time Transient Survey (CRTS) และ All Sky Automated Survey for SuperNovae (ASASSN) โดยอาศัยสมบัติทางการระเบิดใหญ่ของ SU UMa กล่าวคือเราจะทำการคัดเลือกระบบที่มีความสว่างเพิ่มขึ้น 3 - 5 แมกนิจูดขึ้นไป และให้ความสำคัญกับระบบที่มีค่าความสว่าง <math>< 17</math> แมกนิจูด เป็นลำดับแรก เพื่อให้สามารถสังเกตการณ์ได้ด้วยกล้องโทรทรรศน์ขนาด 0.5 - 0.7 เมตร โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวัดคาบ Superhump ของระบบที่ค้นพบใหม่เหล่านี้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคาบการโคจรที่แท้จริงของระบบ



ภาพ 2 แสดงการกระจายเชิงพื้นที่ของการสุ่มเลือกตัวอย่าง CVs จำนวน 42 ระบบ ภายใต้ระยะห่าง 150 พาร์เซค โดยแสดงบนพิกัดเส้นศูนย์สูตร (ด้านบน) และพิกัดกาแล็กติกละติจูด (ด้านล่าง) (6)



### จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี (Photometry) ของ CVs ที่ถูกค้นพบใหม่จาก เซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง ได้แก่ CRTS และ ASASSN
2. เพื่อสร้างกราฟแสงของระบบที่ถูกค้นพบใหม่ ขณะเกิดการระเบิดใหญ่
3. เพื่อวิเคราะห์คาบ Superhump ขณะเกิดการระเบิดใหญ่

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. เก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีของ CVs ที่ค้นพบใหม่ โดยใช้วิธีการคัดเลือกจาก เซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง ได้แก่ CRTS และ ASASSN
2. ใช้กล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO ขนาด 0.7 เมตร ตั้งอยู่ ณ หอดูดาวเกาเหมยกุ่ มณฑลยูนนาน สาธารณรัฐประชาชนจีน และกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 ขนาด 0.6 เมตร ตั้งอยู่ที่หอดูดาว เซอร์โร โทโลโล อินเตอร์อเมริกัน (CTIO) สาธารณรัฐชิลี
3. วัดคาบ Superhump จากโครงสร้าง Superhump ที่ปรากฏในกราฟแสงของระบบ ขณะเกิดการระเบิดใหญ่

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

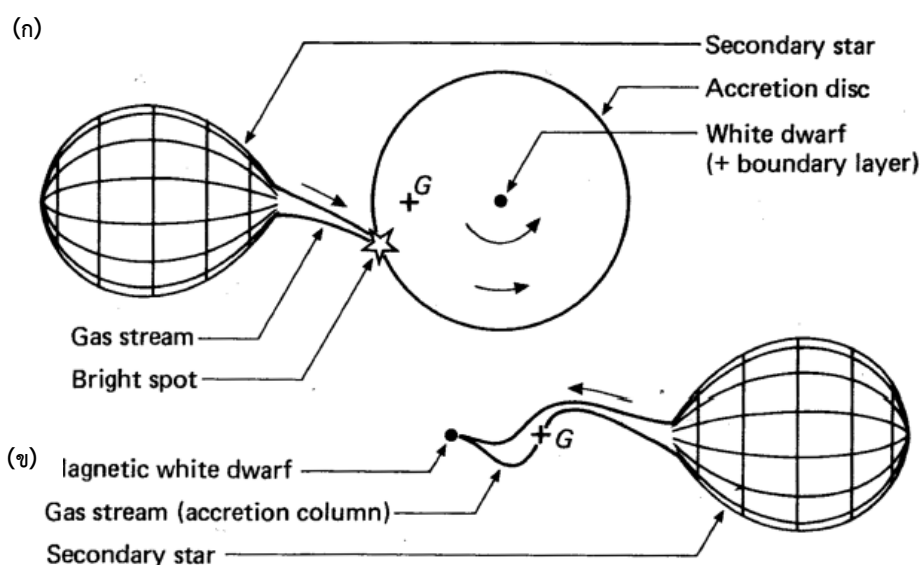
1. ทำให้ได้กลุ่มตัวอย่างของ CVs ที่ผ่านการคัดเลือกแบบเดียวกัน ภายใต้เงื่อนไขของเซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิวัฒนาการของ CVs ต่อไป
2. ทำให้ทราบถึงคาบ Superhump ของระบบที่ค้นพบใหม่

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### สมบัติทางกายภาพของ CVs

CVs เป็นระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด (Close binary systems) ประกอบด้วยดาวแคระขาวและดาวมวลต่ำในแถบลำดับหลักที่มีมวลขยายเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ และมีการถ่ายเทมวลสารไปยังดาวแคระขาวผ่านแผ่นสะสมมวลสารรอบดาวแคระขาว (7, 8) โดยดาวแคระขาวจะมีรัศมีประมาณ 0.01 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิบริเวณใจกลางของดาวแคระขาวมีค่าประมาณ  $10^6 - 10^7$  เคลวิน ในขณะที่อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวมีค่าประมาณ  $10^4 - 10^5$  เคลวิน และมีมวลอยู่ในช่วงระหว่าง 0.3 - 1.3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ส่วนดาวมวลต่ำที่มีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ เป็นดาวที่พบบริเวณปลายล่างทางขวาของแผนภาพเฮิร์ตสปริง - รัสเซลล์ (Hertzsprung - Russell diagram) มีรัศมีประมาณ 0.1 - 0.6 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิบริเวณพื้นผิวมีค่าประมาณ 2,900 - 4,000 เคลวิน และมีมวลประมาณ 0.1 - 0.5 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ อัตราการถ่ายเทมวลสารของ CVs มีค่าประมาณ  $10^{-11} - 10^{-8}$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี โดยทั่วไปมีคาบการโคจรอยู่ในช่วงระหว่าง ~80 นาทีถึง ~10 ชั่วโมง แต่ยังมีบางระบบที่มีคาบการโคจรสั้นหรือยาวกว่าคาบการโคจรของ CVs ที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งค่าการแยกของระบบ มีค่าน้อยกว่ารัศมีของดวงอาทิตย์เล็กน้อย การถ่ายเทมวลสารของระบบขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว หากดาวแคระขาวมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่า 1 เมกกะเกาส์ หรือไม่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเลย มวลสารที่ถูกถ่ายเทจะเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวของดาวแคระขาวผ่านแผ่นสะสมมวลสาร และมวลสารจากดาวมวลต่ำจะสัมผัสกับขอบด้านนอกของแผ่นสะสมมวลสาร ส่งผลให้เกิดความสว่างขึ้น เรียกว่า จุดสว่าง (Bright spot) และตกลงสู่พื้นผิวที่อยู่บริเวณขอบเขตเส้นศูนย์สูตรของดาวแคระขาว แต่ในทางกลับกัน หากดาวแคระขาวมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก แผ่นสะสมมวลสารด้านในจะถูกรบกวนโดยความเข้มของสนามแม่เหล็ก เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่า 10 เมกกะเกาส์ อาจทำให้ไม่เกิดการก่อตัวของแผ่นสะสมมวลสาร เนื่องจากการสะสมของมวลสารที่เพิ่มขึ้นจะถูกถ่ายเทและบังคับให้เคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก และตกลงสู่พื้นผิวบริเวณใกล้กับขั้วแม่เหล็กของดาวแคระขาว แสดงดังภาพ 3



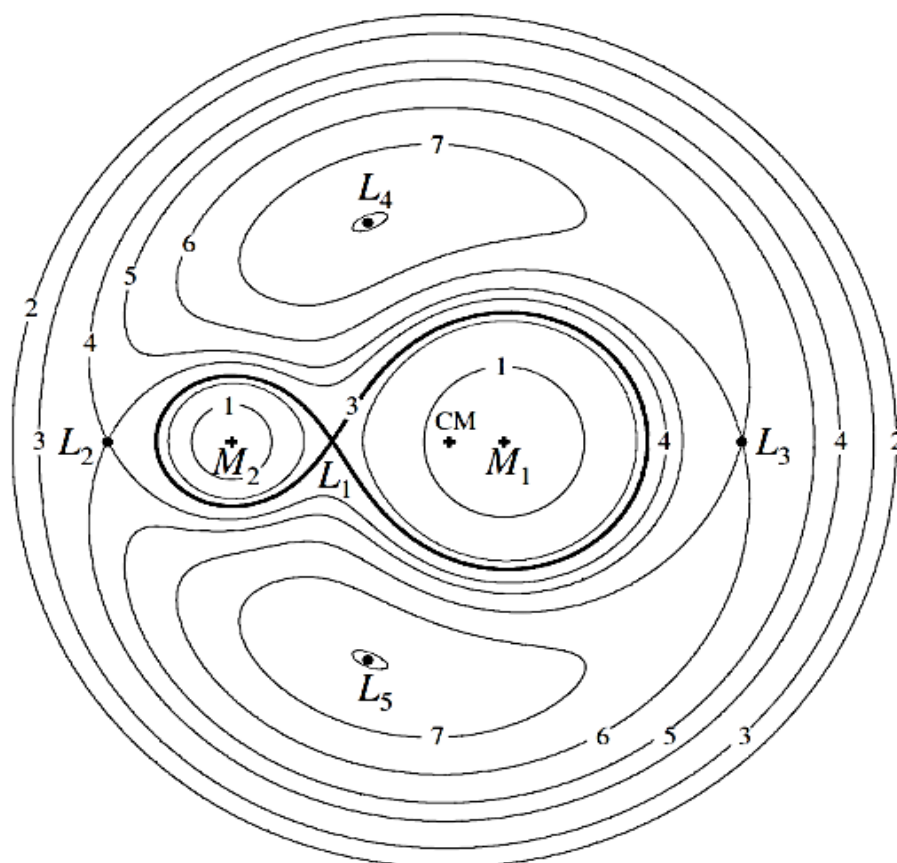
ภาพ 3 องค์ประกอบของ CVs โดย (ก) เป็นระบบที่ไม่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือมีสนามแม่เหล็กน้อยมาก และ (ข) เป็นระบบที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก (9)

### แบบจำลองของโรซ

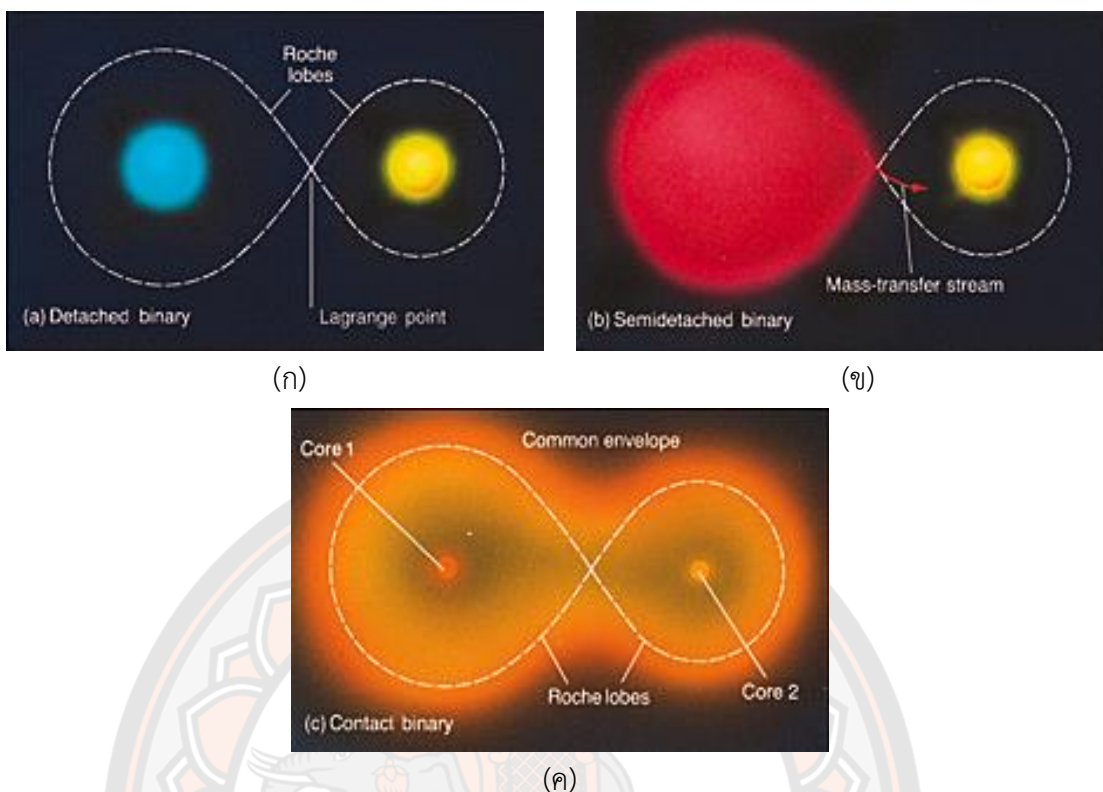
ในระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดใช้แบบจำลองของโรซในการบ่งชี้ลักษณะและรูปร่างของระบบ เราสามารถพิจารณาได้จากผลรวมของพลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravity potentials) ระหว่างดาวทั้งสองดวง และพลังงานศักย์เนื่องจากการหมุน (Rotational potential) ของระบบ เมื่อนำมารวมกับกฎข้อที่ 3 ของเคปเลอร์ จะได้พลังงานศักย์ทั้งหมดเท่ากัน เรียกว่า ผิวสมศักย์ (Equipotential surface) ดังนั้น พลังงานศักย์จึงมีค่าคงที่ตลอดพื้นผิว ซึ่งลักษณะของผิวสมศักย์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนมวล  $q = M_2 / M_1$  (Mass ratio;  $q$ ) ของระบบเพียงอย่างเดียว และขนาดที่แท้จริงของผิวสมศักย์จะขึ้นกับคาบการโคจรหรือค่าการแยกกันของระบบ (Binary separation;  $a$ )

จากภาพ 4 แสดงภาพตัดขวางของผิวสมศักย์ในระนาบการโคจรของดาวสองดวง โดยที่  $M_1$  คือมวลของดาวปฐมภูมิ และ  $M_2$  คือมวลของดาวทุติยภูมิ ซึ่งดาวทั้งสองดวงจะแยกกันอย่างชัดเจน แสดงได้ตั้งผิวสมศักย์ที่อยู่ใกล้บริเวณ  $M_1$  และ  $M_2$  สำหรับดาวที่มีขนาดใหญ่ขึ้น รูปร่างของดาวจะไม่เป็นทรงกลมและถูกทำให้บิดเบี้ยวไปตามผิวสมศักย์ของดาว โดยรูปร่างที่มีลักษณะคล้ายเลขแปดตะแคงของผิวสมศักย์ดาว 2 ดวงที่แตงกันที่จุด  $L_1$  (Inner lagrangian point) เรียกว่า ผิวห่อหุ้มของโรซ ซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาตรสูงสุดของดาวแต่ละดวงในระบบและสสารที่สมาชิกแต่ละดวงจะสามารถครอบครองไว้ได้ภายใต้แรงดึงดูดของตนเอง ถ้าสมาชิกดวงใดดวงหนึ่งมีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ จะมีการถ่ายเทมวลสารไปยังคู่ของมันผ่านจุด  $L_1$  โดยระบบที่สมาชิกดวงหนึ่งเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ เรียกว่า ระบบดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน (Semi-detached binary system) และระบบที่มีสมาชิกทั้ง

สองดวงเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ เรียกว่า ระบบดาวคู่แบบแตะกัน (Contact binary system) สำหรับระบบที่สมาชิกทั้งสองดวงยังไม่เต็มผิวห่อหุ้มของโรซ เรียกว่า ระบบดาวคู่แบบแยกกัน (Detached binary system) ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองของโรซได้ดังภาพ 5



ภาพ 4 แสดงภาพตัดขวางสองมิติของแบบจำลองของโรซในระนาบการโคจรของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดที่มีผิวสัมผัสเท่ากันตลอดผิวของดาวสองดวงกับจุดลากรางก์ทั้ง 5 จุด (11)



ภาพ 5 แสดงแบบจำลองของผิวห่อหุ้มของโรชในแต่ละช่วงวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ โดย (ก) ระบบดาวคู่แบบแยกกัน (ข) ระบบดาวคู่กึ่งแตะกัน (ค) ระบบดาวคู่แบบแตะกัน(12)

ในระบบของ CVs ดาวมวลต่ำที่มีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรชจะมีการถ่ายเทมวลสารไปยังผิวห่อหุ้มของโรชของดาวแคระขาวผ่านจุด  $L_1$  เป็นผลมาจากการวิวัฒนาการของดาวฤกษ์หรือการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมของระบบนั่นเอง จึงทำให้เกิดการหดตัวของวงโคจรหรือมีคาบการโคจรที่สั้นลง และยังส่งผลให้ค่าการแยกของระบบลดลงด้วย ซึ่งเป็นไปตามรัศมีของผิวห่อหุ้มของโรชของดาวฤกษ์ โดย Eggleton (13) ตั้งสมการ 1 และ 2

$$\frac{R_{L1}}{a} = 0.5 - 0.227 \log q \quad (1)$$

$$\frac{R_{L2}}{a} = \frac{0.49 q^{2/3}}{0.6 q^{2/3} + \ln(1+q)^{1/3}} \quad (2)$$

เมื่อ  $R_{L1}$  คือ รัศมีของผิวห่อหุ้มของโรชของดาวแคระขาว

$R_{L2}$  คือ รัศมีของผิวห่อหุ้มของโรชของดาวมวลต่ำ

$q$  คือ อัตราส่วนมวล  $q = M_2 / M_1$

$a$  คือ ค่าการแยกของระบบ

ซึ่งหาได้จากกฎข้อที่ 3 ของเคปเลอร์ ดังนี้

$$P_{\text{orb}}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)}$$

ดังนั้น ค่าการแยกของระบบ มีค่าดังสมการ 3

$$a = 3.35 \times 10^{10} \left(\frac{M_1}{M_\odot}\right)^{1/3} (1 + q)^{1/3} P_{\text{orb}}^{2/3} (\text{h}) \quad (3)$$

### กลไกการถ่ายเทมวลสารของ CVs

การส่งถ่ายมวลสารที่เกิดขึ้นระหว่างดาวสองดวงในระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด มีผลทำให้ขนาดของผิวห่อหุ้มของโรซและคาบการโคจรของระบบเปลี่ยนไป ในบริบทของ CVs การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นใน 2 ช่วงต่างกันของวิวัฒนาการ นั่นคือช่วงก่อนการเป็น CVs (Pre-CVs phase) และช่วงเป็น CVs (CVs phase) ในช่วงก่อนการเป็น CVs ระบบ ประกอบด้วยดาวฤกษ์ในแถบลำดับหลักที่มีมวลต่างกันเล็กน้อย 2 ดวง เมื่อสมาชิกที่มีมวลมากกว่ามีวิวัฒนาการออกจากแถบลำดับหลักมันจะขยายตัวจนเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ และถ่ายเทมวลสารให้สมาชิกดวงที่มีมวลน้อยกว่า เนื่องจากดาวมวลมากที่มีผิวห่อหุ้มของโรซอยู่ใกล้จุดศูนย์กลางมวลของระบบ ดังนั้น มวลสารที่ถูกถ่ายเทไปยังดาวมวลน้อยจะทำให้เคลื่อนที่ออกไปจากจุดศูนย์กลางมวลทำให้โมเมนตัมเชิงมุมของระบบเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม ค่าการแยกกันของระบบจะลดลง ทำให้ผิวห่อหุ้มของโรซลดลง ตามสมการ 1 และ 2 ส่งผลทำให้สสารล้นผิวห่อหุ้มของโรซของดาวทั้งสองดวง ทำให้เกิดผิวห่อหุ้มร่วมกัน ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียรอย่างมาก ดังนั้น การถ่ายเทมวลสารในช่วงเวลานี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็วและรุนแรง

ในระบบสำหรับ CVs มวลสารจะถูกถ่ายเทจากดาวมวลต่ำในแถบลำดับหลักไปสู่ดาวแคระขาว ในกรณีที่ดาวมวลต่ำอยู่ในจุดศูนย์กลางมวล มวลสารที่ถูกถ่ายเทจะสิ้นสุดบริเวณใกล้ๆ จุดศูนย์กลางมวล ทำให้มวลสารที่ถูกถ่ายเทมานั้นสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม และเพื่อที่จะอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม ค่าการแยกกันของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ผิวห่อหุ้มของโรซมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ดาวมวลต่ำไม่เต็มผิวห่อหุ้มของโรซหยุดการถ่ายเทมวลลง การถ่ายเทมวลสารของ CVs จะดำเนินต่อไปได้อย่างต่อเนื่องนั้น ดาวมวลต่ำต้องมีการขยายตัวจนเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ ซึ่งเป็นผลมาจากวิวัฒนาการทางนิวเคลียร์ของดาวมวลต่ำ หรืออาจจะเป็นการหดตัวของผิวห่อหุ้มของโรซ อันเนื่องมาจากการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมผ่านกระบวนการ Magnetic braking หรือ Gravitational radiation นอกจากนี้ยังพบว่า วิวัฒนาการทางนิวเคลียร์ส่วนใหญ่ยังไม่สามารถอธิบายระบบของ CVs ได้

เนื่องจากดาวมวลต่ำที่มีมวลน้อยกว่าดวงอาทิตย์ต้องใช้เวลานานเกินกว่าอายุของเอกภพที่จะมีวิวัฒนาการเข้าสู่ช่วงที่เกิดการขยายตัวตามวิวัฒนาการทางนิวเคลียร์

## วิวัฒนาการของ CVs

### 1. วิวัฒนาการช่วงก่อนเป็น CVs

CVs เป็นระบบที่มีวิวัฒนาการมาจาก Post common envelope binaries (PCEBs) ระบบเหล่านี้มีวิวัฒนาการมาจากระบบดาวคู่ที่ห่างกัน (Wide binaries) ซึ่งผ่านการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมในช่วงที่มีผิวดาวพาท่อหุ้มร่วมกัน (14, 15, 16) มวลเริ่มต้นของดาวทั้งสองใน PCEBs ประกอบด้วยดาวที่มีขนาดกลางในแถบลำดับหลัก ( $\sim 1 - 10$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์) เรียกว่า ดาวปฐมภูมิ (Primary star) และดาวมวลต่ำในแถบลำดับหลัก ( $\leq 1$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์) เรียกว่า ดาวทุติยภูมิ (Secondary star) ซึ่งมีคาบการโคจรมากกว่าสิบปี ดาวปฐมภูมิมีวิวัฒนาการเร็วกว่ากลายเป็นดาวยักษ์แดงซึ่งขยายตัวเติมผิวห่อหุ้มของโรซ การถ่ายเทมวลสารจากดาวมวลมากไปสู่ดาวมวลน้อยในกระบวนการที่ไม่เสถียร ผลของการถ่ายเทมวลสารด้วยอัตราสูง ซึ่งอาจมากถึง 0.1 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี จะทำให้ดาวทุติยภูมิอยู่ในสภาวะไม่สมดุลทางความร้อน และส่งผลให้เกิดการขยายตัวเติมจนล้นผิวห่อหุ้มของโรซ เกิดเป็นช่วงที่มีผิวดาวพาท่อหุ้มร่วมกัน แรงเสียดทานระหว่างผิวห่อหุ้มและระบบ ทำให้ดาวทั้งสองดวงถ่ายเทโมเมนตัมเชิงมุมให้กับผิวห่อหุ้มและเริ่มหมุนเข้าหากัน ผลลัพธ์คือค่าการแยกของระบบจะลดลงจากประมาณ 100 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ เหลือประมาณ 1 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ ภายในเวลา  $10^3$  ปี ถ้าพลังงานของผิวห่อหุ้มมีมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว ผิวดาวพาท่อหุ้มร่วมกันจะถูกทำให้กระจายออกไปสู่อวกาศ ระบบจะปรากฏให้เห็นเนบิวลาดาวเคราะห์ (Planetary nebula) ที่มีระบบดาวคู่ที่ประกอบด้วย Sub-dwarf หรือดาวแคระขาวกับดาวมวลต่ำในแถบลำดับหลักอยู่ตรงกลาง เมื่อเปลือกของเนบิวลาดาวเคราะห์ค่อยๆ กระจายตัวสู่อวกาศ ดาวปฐมภูมิจะค่อยๆ เย็นตัวลงและวิวัฒนาการสู่ดาวแคระขาว ซึ่งทำให้ระบบกลายเป็นระบบดาวคู่แบบแยกกันที่มีคาบการโคจรสั้น โดยประกอบด้วยดาวแคระขาวและดาวมวลต่ำในแถบลำดับหลัก ระบบจะมีวิวัฒนาการไปเป็น CVs เมื่อมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมผ่าน Magnetic braking หรือ Gravitational radiation ซึ่งทำให้ค่าการแยกกันของระบบลดลง จนกระทั่งทำให้ดาวทุติยภูมิสัมผัสกับผิวห่อหุ้มของโรซ และเริ่มถ่ายเทมวลสารสู่ดาวแคระขาว ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาประมาณ 2 พันล้านปี (17)

### 2. Disrupted magnetic braking

Disrupted magnetic braking เป็นแบบจำลองที่สร้างเพื่ออธิบายการขาดแคลนของระบบที่มีคาบการโคจรในช่วง Period gap ( $P_{\text{orb}} = 2 - 3$  ชั่วโมง) ความสำคัญของแบบจำลองนี้คือ CVs มีวิวัฒนาการไปทางคาบการโคจรที่สั้นลง อันเนื่องมาจากผลของการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยสอง

กลไกหลักคือ Magnetic braking (18) หรือ Gravitational radiation (19) ขึ้นอยู่กับการโคจรของระบบ โดยที่กระบวนการ magnetic braking ซึ่งเป็นการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม เนื่องจากลมดาวฤกษ์ (Stellar wind) และสนามแม่เหล็กของดาวฤกษ์ที่มีการหมุนรอบตัวเองอย่างรวดเร็ว กระบวนการดังกล่าวจะมีอิทธิพลกับระบบที่มีคาบการโคจรมากกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งในขณะนั้นดาวมวลน้อยเป็นดาวที่มีแกนกลางเป็น Radiative core ส่วนกระบวนการ Gravitational radiation นั้นจะมีอิทธิพลต่อระบบที่มีคาบการโคจรน้อยกว่า 2 ชั่วโมง

สำหรับคาบการโคจรมากกว่า 3 ชั่วโมง ( $P_{orb} > 3$  ชั่วโมง) ระบบจะมีอัตราการถ่ายเทมวลสารประมาณ  $10^{-9} - 10^{-8}$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ส่งผลให้ดาวมวลต่ำอยู่ในสภาวะไม่เสถียรทางความร้อน ทำให้ดาวขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่คาบการโคจรประมาณ 3 ชั่วโมง ดาวมวลต่ำจะกลายเป็นดาวที่มีการถ่ายเทความร้อนหรือพลังงานแบบการพาความร้อน (Convective star) อย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีมวลประมาณ 0.2 - 0.3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ทำให้กระบวนการ Magnetic braking ลึกลงหรือลดลงอย่างมาก (20, 21, 22) ส่งผลให้อัตราการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมลดลง และการถ่ายเทมวลก็ลดลงด้วยเช่นกัน และดาวฤกษ์หรือดาวมวลต่ำที่มีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรซมีช่วงเวลาปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งดาวมวลต่ำจะหดตัวลงและมีรัศมีเหมือนดาวฤกษ์ในแถบลำดับหลักทั่วไป ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าผิวห่อหุ้มของโรซ และสุดท้ายการส่งถ่ายมวลก็ลึกลงอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ระบบเริ่มเข้าสู่ช่วง Period gap ที่คาบการโคจรประมาณ 3 ชั่วโมงนี้ CVs ในช่วงนี้จะกลายเป็นระบบที่แยกกันจึงทำให้ยากต่อการสังเกตการณ์ ทำให้ระบบในช่วง Period gap มีจำนวนน้อย หลังจากนั้นกระบวนการ Gravitational radiation จะมีอิทธิพลส่งผลให้ระบบมีวิวัฒนาการสู่คาบการโคจรที่สั้นลง และเมื่อผิวห่อหุ้มของโรซหดตัวลงจนสามารถสัมผัสกับดาวมวลต่ำได้อีกครั้งหนึ่งที่คาบการโคจรประมาณ 2 ชั่วโมง การส่งถ่ายมวลก็จะเริ่มต้นขึ้นอีกครั้ง และคาบการโคจรที่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง การส่งถ่ายมวลก็ยังคงเกิดจากกระบวนการ Gravitational radiation ด้วยอัตราที่ลดลงเหลือเพียง  $10^{-11} - 10^{-10}$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลที่ต่ำเช่นนี้ ทำให้วิวัฒนาการของระบบที่มีคาบการโคจรสั้นยาวนานกว่าในช่วง Magnetic braking มาก โดยทั่วไปเวลาที่ CVs ใช้ในวิวัฒนาการของคาบการโคจรประมาณ 10 ชั่วโมงจนถึงคาบการโคจรประมาณ 3 ชั่วโมง มีค่าประมาณ  $10^8$  ปี จนถึงประมาณ  $10^9$  ปี ในวิวัฒนาการผ่านช่วงเวลา 2 - 3 ชั่วโมง Kolb และ Stehle (23) ได้คำนวณโครงสร้างทางอายุของ CVs ในระนาบกาแลคติกโดยใช้แบบจำลองมาตรฐานพบว่า ระบบที่มีคาบการโคจรมากกว่า Period gap มีอายุถึง  $3 - 4 \times 10^9$  ปี

สำหรับคาบการโคจรน้อยกว่า 2 ชั่วโมง ( $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง) มวลของดาวมวลต่ำจะมีน้อยกว่า 0.08 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวชั่นของไฮโดรเจนจะหยุดลงแต่ดาวมวลต่ำยังมีวิวัฒนาการต่อไปและเริ่มมีพฤติกรรมที่คล้ายกับดาวแคระขาว โดยมีรัศมีที่เพิ่มขึ้นแต่มีมวลน้อยลงทำให้เกิด CVs ที่มีคาบการโคจรที่สั้นที่สุดที่ประมาณ 65 นาที (5, 24, 25) ภายในเวลาประมาณ  $10^9$



ปี CVs จะมีวิวัฒนาการวกกลับเข้าสู่คาบการโคจรยาวด้วยอัตราการถ่ายเทมวลสารที่ลดลงอย่างมาก จากประมาณ  $10^{-10}$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ไปเป็นประมาณ  $10^{-12}$  เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ซึ่งใช้เวลาประมาณ  $10^{10}$  ปี และระบบจะสลัวเกินกว่าที่จะสังเกตเห็น ในที่สุดมวลของดาวพฤหัสบดีจะลดลงเหลือประมาณมวลของดาวพฤหัสบดี (Jupiter-like object) ซึ่งโคจรรอบๆ ดาวแคระขาว ตัวอย่างของ CVs ที่เชื่อว่ามีวิวัฒนาการผ่านคาบการโคจรที่สั้นที่สุดมาแล้วคือ WZ Sge ซึ่งมีคาบการโคจรประมาณ 81.6 นาที และดาวพฤหัสบดีมีมวลประมาณ 0.06 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (26, 27)

### การจำแนกประเภทของ CVs

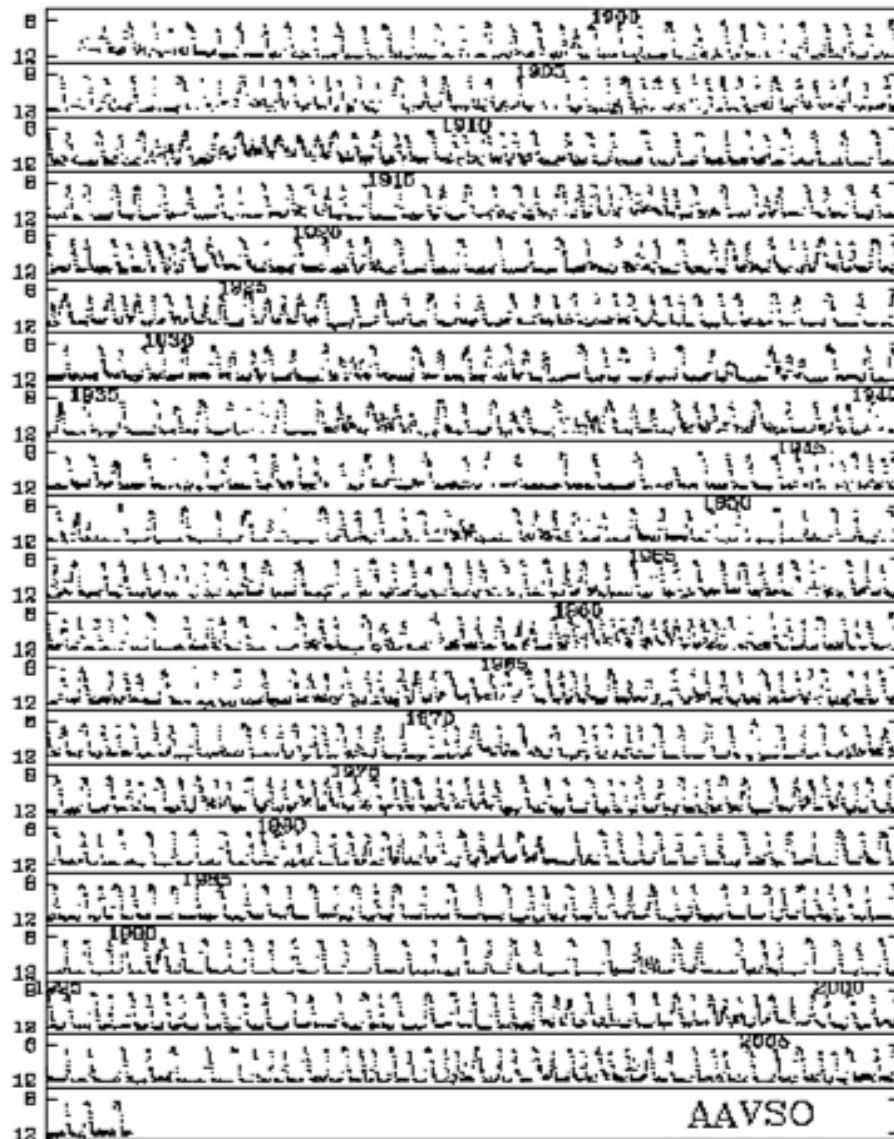
เราสามารถจำแนก CVs ตามสมบัติหลักทางกายภาพ เช่น คาบการโคจรของระบบ อัตราการถ่ายเทมวลสาร ความเข้มของสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว และคุณสมบัติทางการระเบิด ดังนี้

1. Classical novae เป็น CVs ที่ระบบมีความสว่างที่สุดในขณะที่เกิดการระเบิดระบบมีความสว่างเพิ่มขึ้น 6 - 19 แมกนิจูด ความสว่างของระบบจะอยู่ยาวนานเป็นสัปดาห์จนถึงเป็นปี สาเหตุที่ทำให้เกิดการระเบิดนี้เกิดจากการสะสมของไฮโดรเจนจำนวนมากบริเวณพื้นผิวของแผ่นสะสมมวลสารรอบๆ ดาวแคระขาว จากการทำปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ภายในดาวฤกษ์หรือดาวมวลต่ำที่กำลังถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะถูกระดมเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่า  $10^{-9}$  เท่าของดวงอาทิตย์ต่อปี (28) เมื่อแผ่นสะสมมวลสารขยายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีความหนาแน่นเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ของไฮโดรเจน หรือทำให้เกิดการระเบิดขึ้นบริเวณขอบของแผ่นสะสมมวลสารนั่นเอง การเกิดระเบิดซ้ำอีกของ Classical novae อยู่ในช่วงเวลา  $\sim 10^3 - 10^4$  ปี (29, 30) ซึ่งในช่วงชีวิตของมนุษย์ จะสามารถพบการระเบิดของ Classical novae ได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น Ritter & Kolb catalogue (July 2013, Version 7.20) ในปัจจุบันพบจำนวนประชากรของ CVs ประเภทนี้ประมาณ 1.47% ของจำนวนประชากรของ CVs ทั้งหมด ซึ่งระบบนี้มีคาบการโคจรตั้งแต่ 1.4 - 16 ชั่วโมง (26, 31)

2. Dwarf novae เป็น CVs ที่พบมากที่สุดประมาณ 61.86% ของจำนวนประชากรของ CVs ทั้งหมด ดาวแคระขาวใน Dwarf novae มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่อ่อนมาก ( $< 1$  เมกะเกาส์) หรือไม่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเลย สมบัติที่สำคัญของ Dwarf novae คือการเกิดการระเบิดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในระหว่างเกิดการระเบิดนั้นระบบจะสว่างขึ้นประมาณ 2 - 5 แมกนิจูด การระเบิดในแต่ละครั้งระบบจะสว่างยาวนานเป็นวันจนถึงสัปดาห์ การระเบิดซ้ำอีกครั้งของ Dwarf novae ใช้ระยะเวลาเป็นสัปดาห์หรือเป็นปี สาเหตุของการระเบิดนี้เกิดจากบริเวณรอบๆ แผ่นสะสมมวลสารที่มีความไม่เสถียรทางความร้อน (Thermal instability) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออนเพียงบางส่วน เราสามารถแบ่ง Dwarf novae ตามลักษณะการระเบิดได้ 3 ประเภทย่อยดังนี้

- Dwarf novae ประเภท U Gem

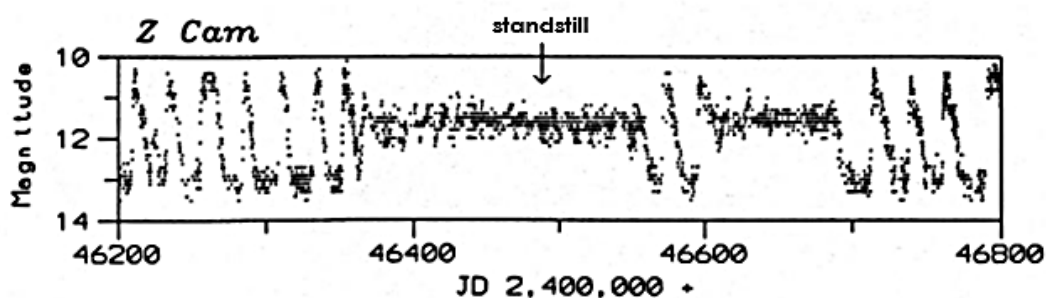
Dwarf novae ประเภทนี้มีการระเบิดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งไม่แสดงลักษณะของ Dwarf novae ประเภท Z Cam และ SU UMa เราพบว่า U Gem ส่วนใหญ่มีคาบการโคจรมากกว่าช่วง Period gap ( $P_{orb} = 2 - 3$  ชั่วโมง) โดยตัวอย่างของ Dwarf novae ประเภทนี้ ได้แก่ SS Cygni ซึ่งได้รับการสังเกตอย่างต่อเนื่องมานานกว่าศตวรรษ ดังภาพ 6 แสดงตัวอย่างกราฟแสงของ SS Cygni ที่ได้จากการสังเกตการณ์ในปี 1896 - 2006



ภาพ 6 ตัวอย่างกราฟแสงของ SS Cygni (9)

- Dwarf novae ประเภท Z Cam

Dwarf novae ประเภทนี้เป็นระบบที่มีแผ่นสะสมมวลสารที่มีความร้อนสูง มีการระเบิดอย่างฉับพลันแทรกอยู่เป็นระยะภายในระบบที่มีความสว่างที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งเป็นแนวเส้นคงที่อยู่ในระดับกึ่งกลางระหว่างความสว่างสูงสุดและต่ำสุดของการระเบิด เรียกว่า Standstills โดยทั่วไป Standstills จะเกิดขึ้นระหว่างการเกิดการระเบิดครั้งใหม่ และจะสลัวกว่าความสว่างสูงสุดประมาณ 0.7 แมกนิจูด ตัวอย่างกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท Z Cam แสดงดังภาพ 7 พบ Standstills แทรกอยู่ระหว่างการระเบิดแบบฉับพลัน โดยการระเบิดแต่ละครั้งอาจทำให้ระบบสว่างยาวนานเป็น 10 วันจนถึงเป็นปี ในปี 1983 Smak (26) เสนอว่า Z Cam เป็นระบบที่แสดงสมบัติอยู่ระหว่าง Novae-like variable และ Dwarf novae เนื่องจากอัตราการถ่ายเทมวลที่มีความผันผวนอยู่ในช่วงค่าวิกฤตที่สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมของ Z Cam จาก CVs ประเภทหนึ่งไปเป็นอีกประเภทหนึ่งได้

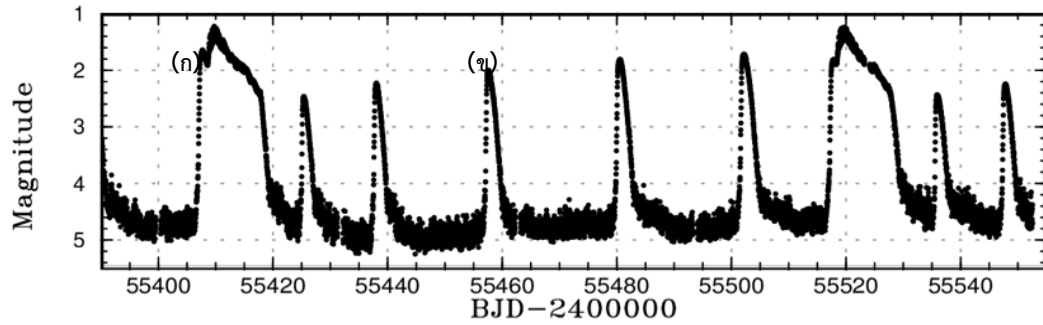


ภาพ 7 ตัวอย่างกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท Z Cam (32)

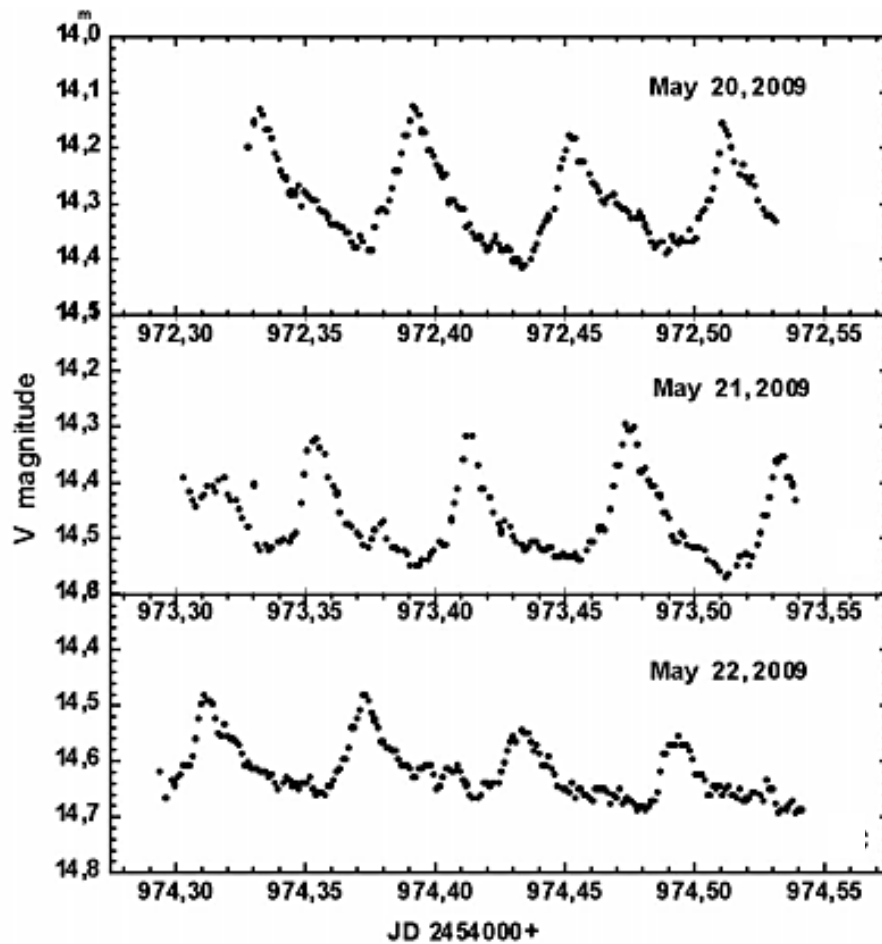
- Dwarf novae ประเภท SU UMa

SU UMa เป็นระบบที่พบการระเบิดใหญ่ (Superoutburst) สลับกับการระเบิดแบบปกติ (Normal outburst) โดยการระเบิดใหญ่จะเกิดขึ้นน้อยครั้งกว่าการระเบิดแบบปกติ ซึ่งมีระยะของการระเบิดที่ยาวนานกว่าการระเบิดปกติถึง 5 เท่า ในขณะที่เกิดการระเบิดใหญ่ความสว่างของระบบจะสว่างขึ้นประมาณ 3 - 5 แมกนิจูด การระเบิดใหญ่ซ้ำอีกครึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 200 - 300 วัน หรือใช้เวลาเป็นปี โดยตัวอย่างกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท SU UMa ดังภาพ 8 กราฟแสงแสดงโครงสร้างของการระเบิดใหญ่ (ก) สลับกับการระเบิดแบบปกติ (ข) ซึ่งการระเบิดใหญ่มีความสว่างยาวนานประมาณ 14 - 15 วัน และใช้เวลาในการเกิดการระเบิดซ้ำอีกครึ่งเพียง ~97 วัน และภาพ 9 แสดงตัวอย่างโครงสร้าง Superhump ขณะเกิดการระเบิดใหญ่ สังเกตว่า

ระบบมีความสว่างลดลงวันละ 0.1 - 0.3 แมกนิจูด เนื่องจากระบบกำลังกลับสู่สภาวะสงบ โดยทั่วไปคาบ Superhump (Superhump Period;  $P_{sh}$ ) จะยาวนานกว่าคาบการโคจรของระบบเล็กน้อย ส่วนใหญ่คาบการโคจรมีค่าประมาณ 80 - 150 นาที

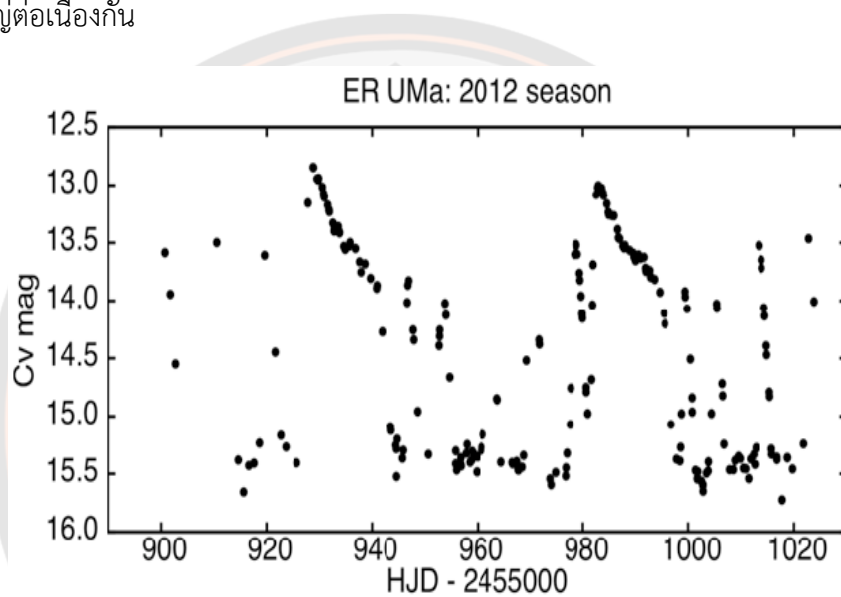


ภาพ 8 ตัวอย่างกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท SU UMa ในขณะเกิดการระเบิดใหญ่ (33)

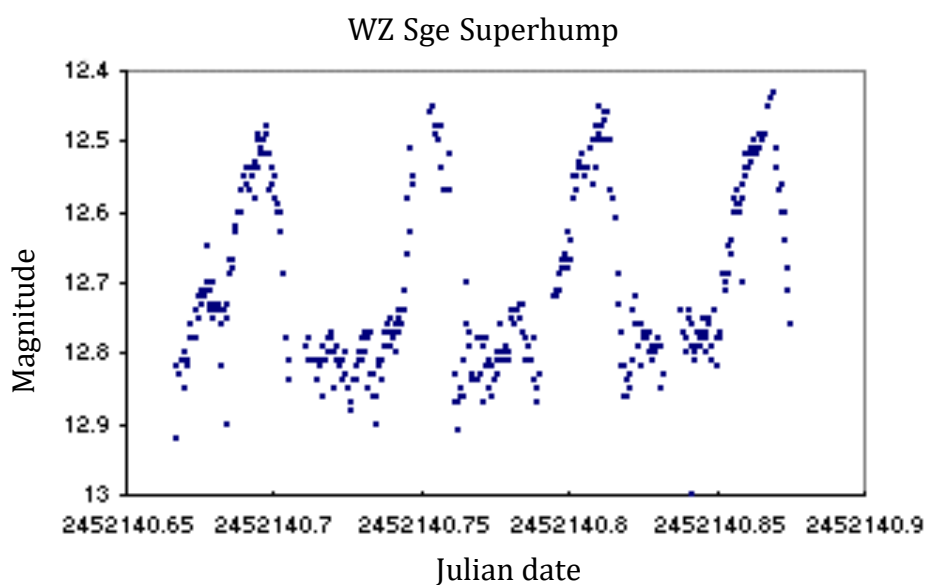


ภาพ 9 ตัวอย่างโครงสร้าง Superhump ขณะเกิดการระเบิดใหญ่ (34)

นอกจากนี้ ยังมี SU UMa บางระบบที่มีลักษณะแตกต่างจากระบบปกติ ได้แก่ ER UMa มีการระเบิดใหญ่ทุกๆ 20 - 50 วัน และหลังจากนั้นจะเกิดการระเบิดแบบปกติต่อเนื่องทันที โดยการระเบิดแบบปกติจะเกิดซ้ำทุกๆ 2 - 4 วัน ตัวอย่างกราฟแสงของ ER UMa ดังภาพ 10 แสดงการเกิดการระเบิดใหญ่ซ้ำอีกครั้งของ ER UMa ซึ่งมีระยะเวลาห่างกันประมาณ 40 วัน และ SU UMa อีกระบบคือ WZ Sge เป็นระบบที่มีการระเบิดใหญ่ไม่บ่อยนัก โดยการระเบิดใหญ่จะอยู่ในช่วง 2 - 3 ปี จนถึง 10 ปี และในระหว่างนั้นจะไม่มีเกิดการระเบิดแบบปกติเกิดขึ้นเลย ส่วนใหญ่มีคาบการโคจรน้อยกว่าช่วง Period gap (35) แสดงตัวอย่างกราฟแสงของ WZ Sge ดังภาพ 11 พบว่าระบบมีการระเบิดใหญ่ต่อเนื่องกัน



ภาพ 10 ตัวอย่างกราฟแสงของ ER UMa (35)



ภาพ 11 ตัวอย่างกราฟแสงของ WZ Sge (36)

3. Novae-like variable เป็น CVs ที่ไม่มีการเกิดการระเบิด ทำให้ความสว่างของระบบมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากอัตราการถ่ายโอนมวลที่สูงกว่าค่าวิกฤติของความไม่เสถียรของแผ่นสะสมมวลสาร (Disc instability) ส่งผลให้เป็นระบบที่มีการระเบิดแบบถาวร (Permanent outburst) ซึ่งมีจำนวนประชากรของ CVs ประเภทนี้ประมาณ 27.01% ของจำนวนประชากรของ CVs ทั้งหมด เราแบ่ง Novae-like variable ออกเป็นหลายประเภท เช่น UX UMa, RW Tri, VY Scl และ SW Sex โดย CVs ประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีคาบการโคจรอยู่ในช่วงระยะเวลามากกว่า Period gap

4. Magnetic CVs เป็นระบบที่ประกอบด้วยดาวแคระขาวที่มีสนามแม่เหล็กระดับกลางถึงระดับสูง (1 - 200 เมกกะเกาส์) ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทมวลสารไปยังดาวแคระขาว Magnetic CVs มีจำนวนประชากรของ CVs ประเภทนี้ประมาณ 9.66% ของจำนวนประชากรของ CVs ทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามความเข้มของสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว ดังนี้

- Polars หรือ AM Her ประกอบด้วยดาวแคระขาวที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง 10 - 200 เมกกะเกาส์ ซึ่งในระบบเหล่านี้ จะไม่สามารถสร้างแผ่นสะสมมวลสารรอบๆ ดาวแคระขาวได้ เนื่องจากมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก ดังนั้น ดาวแคระขาวจะสามารถควบคุมการไหลของมวลสารโดยบังคับให้ไหลวนตามแนวสนามแม่เหล็กไปยังขั้วของดาวแคระขาวผ่าน Shock standingเหนือพื้นผิวของดาวแคระขาว ทำให้เกิดการกระแทกที่ด้านบนใกล้กับขั้วสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว ทำให้ Polars เป็นแหล่งกำเนิดของรังสีเอ็กซ์ คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งคือ การหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาวที่ถูกบังคับให้มีการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กับการเคลื่อนที่ของระบบ หรือคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว (Spin Period) เท่ากับคาบการโคจรของระบบ ( $P_{\text{spin}} = P_{\text{orb}}$ ) เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงของดาวแคระขาวจะกระทำกับสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มอ่อนกว่าของดาวมวลต่ำ จึงทำให้คาบการโคจรของ Polars นั้นอยู่ในช่วงประมาณ 80 นาที และอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า Period gap

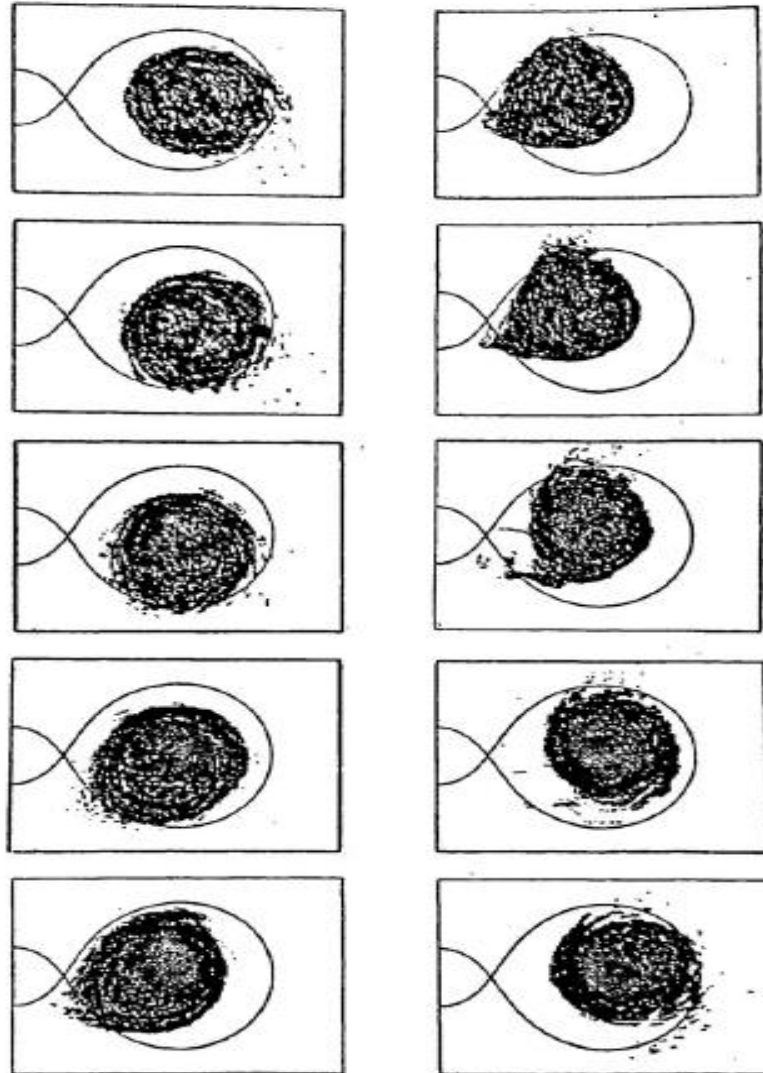
- Intermediate polars (Ips) หรือ DQ Her เป็นระบบที่สนามแม่เหล็กของดาวแคระขาวมีความเข้มอ่อนกว่าชนิด Polars โดยมีความเข้มตั้งแต่ 1-10 เมกกะเกาส์ โดยทั่วไปความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับนี้ไม่มีความเข้มมากพอที่จะยับยั้งมวลสารที่ถ่ายเทมาจากดาวมวลต่ำทั้งหมดได้ จึงทำให้สสารก่อตัวเป็นแผ่นสะสมมวลสารรอบๆ ดาวแคระขาว ซึ่งมวลสารบริเวณด้านในของแผ่นสะสมมวลสารจะถูกยับยั้งโดยสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว และอัตราการส่งถ่ายมวลใน IPs จะสูงกว่าใน Polars จึงทำให้ IPs เป็นแหล่งของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงกว่าที่พบใน Polars เนื่องจากสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว IPs มีค่าน้อยกว่า Polars มาก ดังนั้น ดาวแคระขาวใน IPs จึงไม่ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปพร้อมระบบ จึงไม่เกิดการหมุนแบบซิงค์โรนัส ในปัจจุบันมีการค้นพบ IPs ซึ่งได้รับการยืนยันแล้วประมาณ 30 ระบบ โดยมีคาบการโคจรอยู่ในช่วงที่มากกว่า Period gap (37, 38, 39)

## โครงสร้าง Superhump ใน Dwarf novae ประเภท SU UMa

Dwarf novae เป็นระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด และถูกจัดอยู่ในประเภทของ CVs ประกอบด้วยดาวแคระขาวที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่า 1 เมกกะเกาส์ และดาวมวลต่ำที่มีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ ซึ่งมีการถ่ายเทมวลสารไปยังดาวแคระขาว และมีการก่อตัวเป็นแผ่นสะสมมวลสารไหลวนรอบดาวแคระขาว ในขณะที่มีการสะสมมวลสารไปเรื่อยๆ แผ่นสะสมมวลสารจะมีความหนืดต่ำและมีการสะสมของมวลสาร ซึ่งยังคงเย็นตัวและสลัวมาก เมื่อความหนาแน่นของพื้นผิวของแผ่นสะสมมวลสารถึงค่าวิกฤตความหนืดจะเพิ่มขึ้น และมวลสารจะไหลผ่านแผ่นสะสมมวลสารไปยังดาวแคระขาวอย่างรวดเร็ว แผ่นสะสมมวลสารจะอุณหภูมิสูงขึ้นและไม่เสถียรทางความร้อน ส่งผลให้เกิดการส่องสว่างหรือเกิดการระเบิดขึ้น (40) ในบรรดา Dwarf novae ทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ U Gem, Z Cam และ SU UMa พบว่า SU UMa เป็นระบบที่เกิดการระเบิดบ่อยที่สุด ซึ่งพบทั้งการระเบิดแบบปกติและการระเบิดใหญ่ โดยขณะเกิดการระเบิดใหญ่ จะปรากฏโครงสร้าง Superhump ในกราฟแสงของระบบ

โครงสร้าง Superhump เป็นโครงสร้างที่ปรากฏในกราฟแสงของ Dwarf novae ประเภท SU UMa ในขณะที่ระบบเกิดการระเบิดใหญ่ โครงสร้าง Superhump นี้เกิดจากการส่ายของแผ่นสะสมมวลสารในระหว่างการโคจรรอบกันของระบบ ทำให้แผ่นสะสมมวลสารมีรูปร่างผิดปกติ โดย Nicholas Vogt เสนอว่า โครงสร้าง Superhump เกิดจากแผ่นสะสมมวลสารที่มีรูปร่างผิดปกติขณะเกิดการระเบิดใหญ่ (9) เมื่อมีการโคจรรอบกันของระบบ แรงโน้มถ่วงของดาวมวลต่ำจะดึงแผ่นสะสมมวลสารบริเวณขอบนอกให้ยืดออก ทำให้แผ่นสะสมมวลสารมีรูปร่างที่บิดเบี้ยวผิดปกติ เนื่องจากแผ่นสะสมมวลสารมีการส่ายอย่างเป็นคาบ ภายในแผ่นสะสมมวลสารรอบดาวแคระขาวมีการโคจรเป็นวงกลม แต่บริเวณขอบของแผ่นสะสมมวลสารจะถูกทำให้บิดเบี้ยวมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมวลสารในแผ่นสะสมมวลสารถูกดึงโดยแรงโน้มถ่วงของดาวมวลต่ำให้ไปตามทิศทางโคจรของดาวมวลต่ำ ส่งผลให้แผ่นสะสมมวลสารมีการยืดออกเล็กน้อย การโคจรของแผ่นสะสมมวลสารนั้นเร็วกว่าการโคจรของดาวมวลต่ำ ดังนั้น ส่วนที่นูนหรือยืดออกของแผ่นสะสมมวลสารก็พยายามจะหนีออกจากดาวมวลต่ำ ซึ่งการโคจรของระบบจะเหวี่ยงให้แผ่นสะสมมวลสารยืดออกและแรงโน้มถ่วงของดาวมวลต่ำก็ดึงให้แผ่นสะสมมวลสารกลับมา ดังภาพ 12 ผิวห่อหุ้มของโรซของดาวมวลต่ำอยู่ทางด้านซ้าย ดังที่เห็นจากรอบเริ่มต้น เมื่อมีการโคจรของระบบที่รวดเร็ว การส่ายจะทำให้รูปร่างของแผ่นสะสมมวลสารผิดปกติไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของวงโคจร ดังที่เห็นได้จากดาวมวลต่ำที่เคลื่อนที่เร็วขึ้น ความบิดเบี้ยวของแผ่นสะสมมวลสารดูเหมือนหมุนไปในทางตรงกันข้าม นั่นก็หมายความว่าทิศทางที่แผ่นสะสมมวลสารถูกยืดออกจะทำให้มีคาบการโคจรที่ยาวกว่าคาบการโคจรของระบบ ในขณะที่มีการสะสมของมวลสารภายในแผ่นสะสมมวลสารเพิ่มขึ้น ระบบก็มีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม ดังนั้น เพื่อที่จะรักษาสมดุลของระบบ การดึงโดยแรงโน้มถ่วงของดาวมวลต่ำทำให้สสารใน

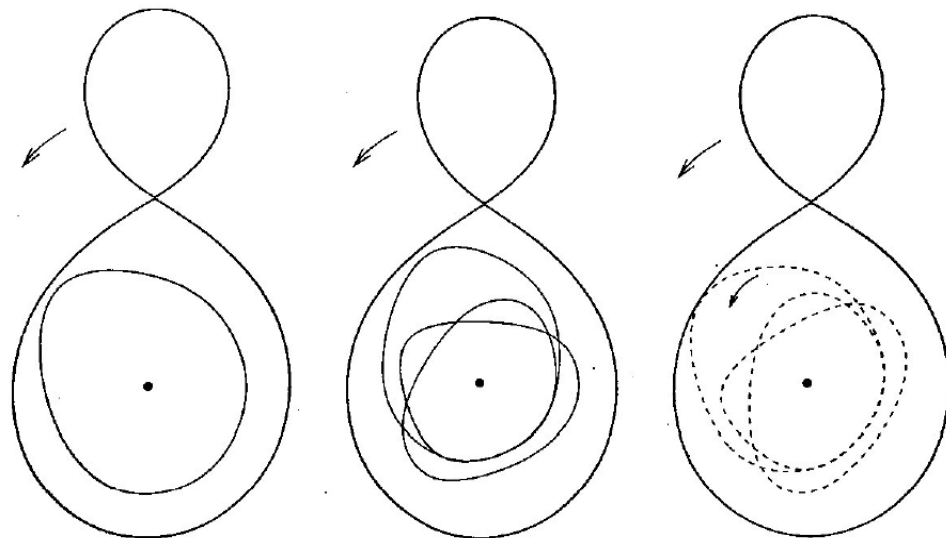
แผ่นสะสมมวลสารเคลื่อนที่ช้าลง ทำให้โมเมนตัมเชิงมุมลดลงด้วย ส่งผลให้การสะสมมวลและขนาดของแผ่นสะสมมวลสารที่เพิ่มขึ้นหยุดลง และเริ่มการสะสมมวลสารจากการถ่ายเทมวลสารของระบบอีกครั้ง



ภาพ 12 แบบจำลองของแผ่นสะสมมวลสารที่มีการส่ายและมีรูปร่างผิดปกติ โดยแสดงแผ่นสะสมมวลสารในเฟสที่ 0.1 จนครบรอบการเกิด Superhump ซึ่งแสดงตามลำดับคือจากซ้ายบนลงซ้ายล่างและจากขวาบนลงขวาล่าง (9)



ตามแบบจำลองของแรงไทดัล โครงสร้าง Superhump เกิดจากการรบกวนของสนามแรงโน้มถ่วงจากดาวมวลต่ำ เมื่อการโคจรของแผ่นสะสมมวลสารกับการเคลื่อนที่ตามวงโคจรของดาวมวลต่ำมีการสั่นพ้องของวงโคจร (Orbital resonance) เป็น 3:1 ซึ่งจังหวะของวงโคจรและคาบการส่ายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ เนื่องจากการโคจรที่ขอบของแผ่นสะสมมวลสารเร็วกว่าการโคจรของดาวมวลต่ำ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบที่มีอัตราส่วนมวล  $q \leq 0.33$  แสดงดังภาพ 13 ในระบบที่มีอัตราส่วนมวลสูงวงโคจรในแผ่นสะสมมวลสารด้านนอกจะบิดเบี้ยวจากแรงโน้มถ่วงของดาวมวลต่ำ และมีการยืดขึ้นไปทางดาวมวลต่ำเล็กน้อย หากมีการตั้งค่าการสั่นพ้องของวงโคจร โดยเพิ่มเป็น 3 วงโคจร ซึ่งจะมีการส่ายอย่างช้าๆ มันจะแสดงให้เห็นว่าแผ่นสะสมมวลสารที่มีการส่ายนั้นมีรูปร่างบิดเบี้ยวไปตามวงโคจรของระบบ แต่หากสมมติว่าแผ่นสะสมมวลสารกับดาวมวลต่ำมีการสั่นพ้องของวงโคจรเป็น 2:1 มันจะถูกดึงกลับทุกๆ วนาที่มีการโคจร ซึ่งยังคงสามารถขับเคลื่อนแผ่นสะสมมวลสารที่บิดเบี้ยวได้ แม้ว่ารัศมีของวงโคจรดังกล่าวจะใหญ่กว่าผิวห่อหุ้มของโรซของดาวแคระขาวใน CVs ส่วนใหญ่ แต่แผ่นสะสมมวลสารที่มีการเกิดการสั่นพ้องของวงโคจรเหล่านี้จะต้องอยู่ภายในรัศมีการตัดทอนแรงไทดัล (Tidal truncation radius) ของแผ่นสะสมมวลสาร (41) ซึ่งเป็นไปได้เฉพาะในอัตราส่วนมวล  $q \leq 0.025$  โดยจะเกิดขึ้นได้ในระบบที่มีวิวัฒนาการผ่านช่วงคาบการโคจรที่สั้นที่สุดไปแล้วเท่านั้น

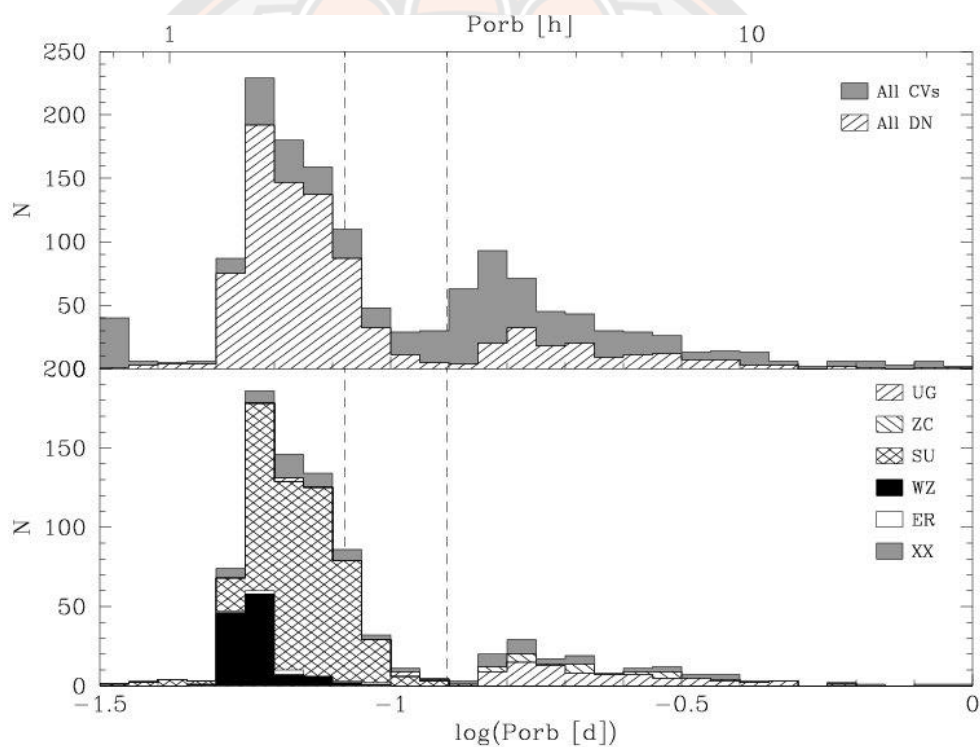


ภาพ 13 แสดงการเคลื่อนที่ตามวงโคจรของระบบที่มีการสั่นพ้องของวงโคจร (9)

### จำนวนประชากรของ CVs ที่ค้นพบจากการสังเกต

แบบจำลองมาตรฐานเกี่ยวกับวิวัฒนาการของ CVs แสดงให้เห็นว่า CVs มีวิวัฒนาการจากคาบการโคจรยาวไปหาคาบการโคจรสั้น แต่ในทางปฏิบัติ เรากลับไม่พบ CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นตามสัดส่วนที่ทฤษฎีทำนาย ภาพ 14 (ด้านบน) แสดงแผนภาพการกระจายตัวของ CVs ที่ค้นพบจากการสังเกต จาก Ritter & Kolb catalogue (July 2013, Version 7.20) ซึ่งมีลักษณะที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ

1. การลดลงอย่างกะทันหันของระบบที่มีคาบการโคจรประมาณ 80 นาที
2. การขาดแคลนของระบบในช่วง Period gap ( $P_{orb} = 2 - 3$  ชั่วโมง)
3. การลดจำนวนลงของระบบที่มีคาบการโคจรยาว ( $P_{orb} > 6$  ชั่วโมง)



ภาพ 14 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของ CVs ที่ค้นพบจากการสังเกต  
(Period gap คือช่วงเวลา  $P_{orb} = 2 - 3$  ชั่วโมง ตามแนวเส้นประ)

โดยจำนวนประชากรของ CVs ที่ค้นพบจนถึงปัจจุบัน มีจำนวนทั้งหมด 1,429 ระบบ (42) ประกอบด้วย Dwarf novae 852 ระบบ (59.6%) Novae-like variables 167 ระบบ (11.7%) Magnetic CV 232 ระบบ (16.2%) และ Classical novae 24 ระบบ (1.7%) จากภาพ 14 (ด้านล่าง) แสดงจำนวนประชากรตามคาบการโคจรของ Dwarf novae ดังนี้

- ระบบที่อยู่ในช่วงคาบการโคจรสั้น ( $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง) 607 ระบบ (71%)
- ระบบที่อยู่ในช่วง Period gap ( $P_{orb} = 2 - 3$  ชั่วโมง) 51 ระบบ (6%)
- ระบบที่อยู่ในช่วงคาบการโคจรยาว ( $P_{orb} > 3$  ชั่วโมง) 194 ระบบ (23%)

และจำนวนประชากรของ Dwarf novae ตามลักษณะทางกายภาพ มีดังนี้ U Gem 85 ระบบ (10%) SU UMa 498 ระบบ (58.5%) ER UMa 8 ระบบ (0.9%) WZ Sge 121 ระบบ (14.2%) Z Cam 23 ระบบ (2.7%) และระบบที่ยังไม่สามารถจำแนกประเภทได้ 117 ระบบ (13.7%) โดยเราสามารถแสดงจำนวนประชากรตามคาบการโคจรของ SU UMa ได้ดังนี้

- ระบบที่อยู่ในช่วงคาบการโคจรสั้น 552 ระบบ (88%)
- ระบบที่อยู่ในช่วง Period gap 44 ระบบ (7%)
- ระบบที่อยู่ในช่วงคาบการโคจรยาว 31 ระบบ (5%)

ในบรรดา CVs ทั้งหมด Dwarf novae เป็นระบบที่สามารถตรวจพบได้ง่าย เนื่องจากขณะเกิดการระเบิดแต่ละครั้ง ระบบจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น 1 - 3 แมกนิจูด สำหรับการระเบิดแบบปกติ (Normal outburst) และระบบจะมีความสว่างเพิ่มขึ้น 3 - 5 แมกนิจูด สำหรับการระเบิดใหญ่ (Superoutburst) ซึ่งสว่างมากพอสำหรับการสังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์ขนาดเล็ก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้เราจึงอาศัยสมบัติทางการระเบิดของ Dwarf novae ในการค้นหา CVs คาบการโคจรสั้น และเนื่องจากจำนวนของ Dwarf novae ประเภท SU UMa ที่ถูกค้นพบเป็นระบบที่มีคาบการโคจรสั้นที่มีมากถึง 88% ดังนั้น การค้นหา SU UMa ระบบใหม่ๆ อาจทำให้เรามีโอกาสที่จะค้นพบ CVs คาบการโคจรสั้นมากขึ้น ซึ่ง CVs คาบการโคจรสั้นที่ยังไม่ถูกค้นพบนี้ อาจเป็น CVs ส่วนใหญ่ตามแบบจำลองมาตรฐาน

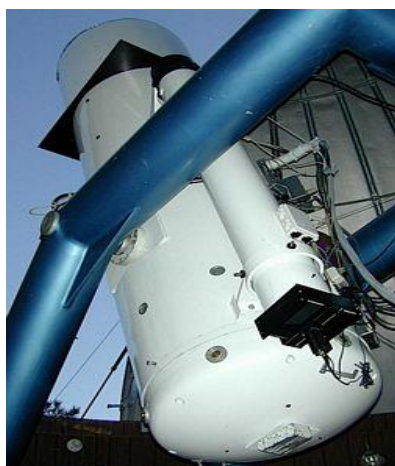
### เซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง

ในงานวิจัยนี้ เราใช้เซอร์เวย์ขนาดใหญ่ในการค้นหา CVs ที่มีความสลัวมากกว่า 17 แมกนิจูด ซึ่งระบบที่ขณะเกิดการระเบิดใหญ่จะมีความสว่างเพิ่มขึ้น ทำให้เซอร์เวย์เหล่านี้สามารถตรวจจับการแปรแสงของระบบได้ โดยมีรายละเอียดของเซอร์เวย์ต่างๆ ดังนี้

#### 1. The Catalina Real-Time Transient Survey (CRTS)

The Catalina Real-Time Transient Survey (CRTS) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับการสำรวจท้องฟ้า โดยสังเกตการณ์จากกล้องโทรทรรศน์ 3 ตัว ได้แก่ Catalina Schmidt ขนาด 0.68 เมตร ที่สถานี Catalina และ Mt. Lemmon Survey ขนาด 1.5 เมตร ตั้งอยู่บนภูเขาเลมมอน รัฐแอริโซนา สหรัฐอเมริกา และ Uppsala Schmidt ขนาด 0.5 เมตร ที่หอดูดาว Siding Spring รัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลีย โดยกล้องแต่ละตัวไม่มีแผ่นกรองแสง ดังภาพ

15 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ทั่วท้องฟ้าทั้งหมด 30,000 ตารางองศา โดยมีระนาบกาแลคติก  $|b| < 10^\circ - 15^\circ$  และมีความสามารถในการตรวจวัดความสลัวของวัตถุมากถึง  $\sim 20 - 21$  แมกนิจูด หากรวมข้อมูลของกล้องโทรทรรศน์ทั้ง 3 ตัว จะสามารถครอบคลุมท้องฟ้าได้มากถึง  $\sim 2000$  ตารางองศา และวัดความสลัวได้ลึกมากถึง  $\sim 23$  แมกนิจูด



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพ 15 แสดงกล้องโทรทรรศน์ทั้ง 3 ตัวของ CRTS ได้แก่ (ก) Catalina Schmidt (ข) Mt. Lemmon Survey และ (ค) Uppsala Schmidt (43)

## 2. All Sky Automated Survey for Supernovae (ASASSN)

การสำรวจท้องฟ้าของ ASASSN เป็นการทำงานแบบระบบอัตโนมัติโดยถ่ายภาพท้องฟ้าที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนในทุกคืน มีความสามารถสังเกตการณ์วัตถุที่มีความสลัวมากถึง  $\sim 17$  แมกนิจูด โดยหอดูดาว 2 สถานีแรกคือ Brutus อยู่ที่ฮาวาย สหรัฐอเมริกา และ Cassius อยู่ที่ Cerro Tololo Observatory ประเทศชิลี แสดงดังภาพ 16 ซึ่งครอบคลุมท้องฟ้าทั้งซีกฟ้าเหนือและซีกฟ้าใต้

จึงทำให้สามารถเข้าถึงพื้นที่ทั่วท้องฟ้าได้ทั้งหมด และอยู่ในความรับผิดชอบของหอดูดาว Las Cumbres Observatory Global Network (LCOGT) ในปี พ.ศ. 2560 มีการสร้างหอดูดาวเพิ่มเติม 5 สถานี มีกล้องโทรทรรศน์รวมทั้งหมด 24 ตัว โดยกล้องโทรทรรศน์แต่ละตัวประกอบด้วย กล้องโทรทรรศน์ 4 ตัว ที่มีเลนส์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร และเลนส์แต่ละตัวมีระบบระบายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก มีการติดตั้ง ProLine CCD camera ขนาด 2kx2k พิกเซล ซึ่งมี Pixel scale เท่ากับ  $\sim 8''$  พิกเซล Field of view ของกล้องแต่ละตัวเท่ากับ  $4.5 \times 4.5$  องศา และ FWHM ของภาพเท่ากับ  $\sim 2$  พิกเซล ส่วนใหญ่ใช้แผ่นกรองแสง V โดยกล้องโทรทรรศน์ 4 ตัวจะถูกกำหนดให้หันไปในทิศทางที่แตกต่างกันเล็กน้อย เพื่อให้มีการทับซ้อนกันเล็กน้อยระหว่างเขตข้อมูลของกล้องโทรทรรศน์แต่ละตัว เป็นผลให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 104 ตารางองศาต่อคืน และจาก แสดงจำนวนการสังเกตต่อเขตพื้นที่ตลอดทั้งปี แถบสีต่างๆ แสดงจำนวนครั้งของช่วงเวลาที่สังเกตจากสี่ชมพู (น้อย) จนถึงสีม่วง (มาก) จะเห็นว่า ในปี พ.ศ. 2558 มีการสำรวจท้องฟ้าในซีกโลกเหนือมากกว่าในซีกโลกใต้ เนื่องจากเรามีกล้องโทรทรรศน์เพียงสองตัวในประเทศชิลีจนถึงประมาณกลางปี พ.ศ. 2558 และในปัจจุบันเรามีกล้องโทรทรรศน์ที่สำรวจครอบคลุมทั่วท้องฟ้า จะเห็นว่าในปี พ.ศ. 2563 การสำรวจกระจายครอบคลุมทั่วทุกพื้นที่

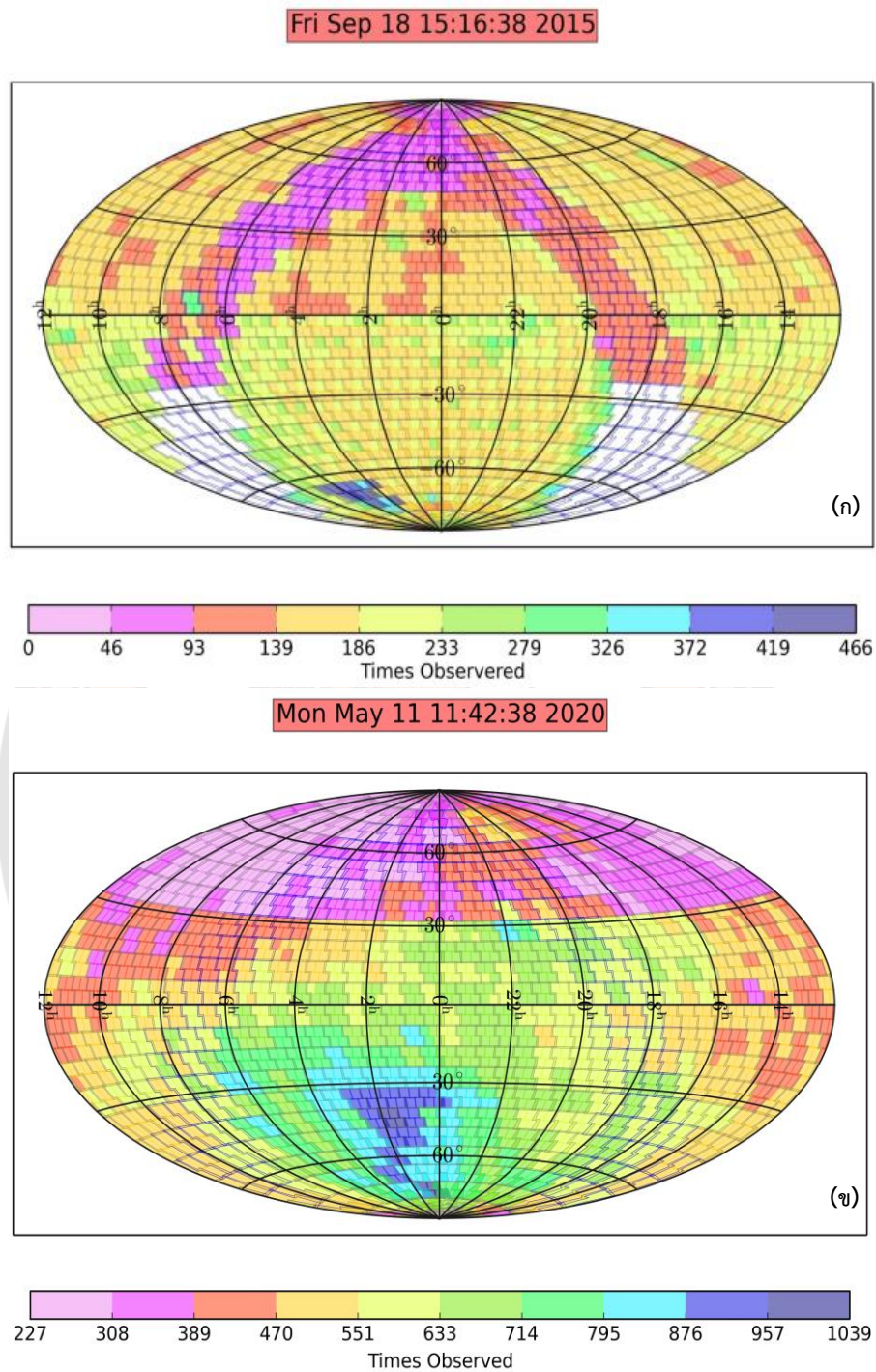


(ก)



(ข)

ภาพ 16 แสดงกล้องโทรทรรศน์ Brutus (ก) และ Cassius (ข) (44)



ภาพ 17 แสดงแผนที่สำรวจท้องฟ้าทั้งหมดที่ครอบคลุมช่วงเวลา 365 วัน ในวันศุกร์ที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2558 (ก) และวันจันทร์ที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 (ข) (45)

### เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรี

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรีเป็นเทคนิคการวัดค่าความสว่างของดาว 2 ดวงใดๆ เทียบกัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการแปรค่าความสว่างตามเวลา โดยการพิจารณาดาวแปรแสง (Variable stars) ดาวคู่อุปราคา (Eclipsing binaries) หรือวัตถุบนท้องฟ้าอื่นๆ เช่น ดาวหาง และดาวเคราะห์น้อย เป็นต้น โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปผลต่างของแมกนิจูดของดาวที่ต้องการศึกษากับดาวเปรียบเทียบ ( $C_1$ ) ที่อยู่ในเฟรมของภาพถ่ายเดียวกัน ตามสมการ 4

$$\Delta m = m_{\text{obj}} - m_{c1} \quad (4)$$

เมื่อ  $m_{\text{obj}}$  คือ แมกนิจูดปรากฏของดาวที่ต้องการศึกษา

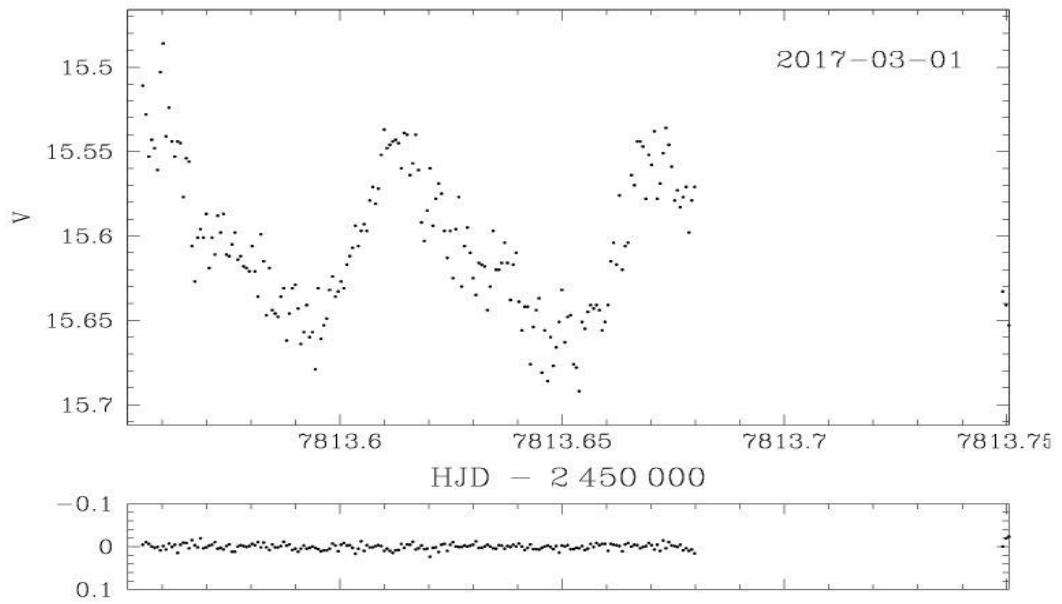
$m_{c1}$  คือ แมกนิจูดปรากฏของดาวเปรียบเทียบ

สิ่งสำคัญในการเลือกดาวเปรียบเทียบคือ การเลือกดาวเปรียบเทียบที่อยู่ใกล้กับวัตถุที่สังเกตการณ์ (Obj) ต้องไม่มีการแปรแสง กล่าวคือเป็นดาวที่มีความสว่างคงที่ ซึ่งสามารถตรวจสอบการแปรแสงของดาวเปรียบเทียบที่เลือกได้จากดาวตรวจสอบ ( $C_2$ ) โดยที่ผลต่างของดาวเปรียบเทียบและดาวตรวจสอบต้องมีค่าคงที่ ซึ่งเป็นไปตามสมการ 5 เมื่อวัดปริมาณแสงดาวทั้งสองดวงต้องมีปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ตกลงบนชิพซีซีดีไม่เกิน 20,000 – 30,000 Counts เพื่อหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวของชิพซีซีดีในแต่ละพิกเซล ซึ่งมีค่าอิ่มตัว ~65,000 Counts (46) โดยดาวเปรียบเทียบและดาวตรวจสอบต้องอยู่ในเฟรมของภาพถ่ายเดียวกันด้วย

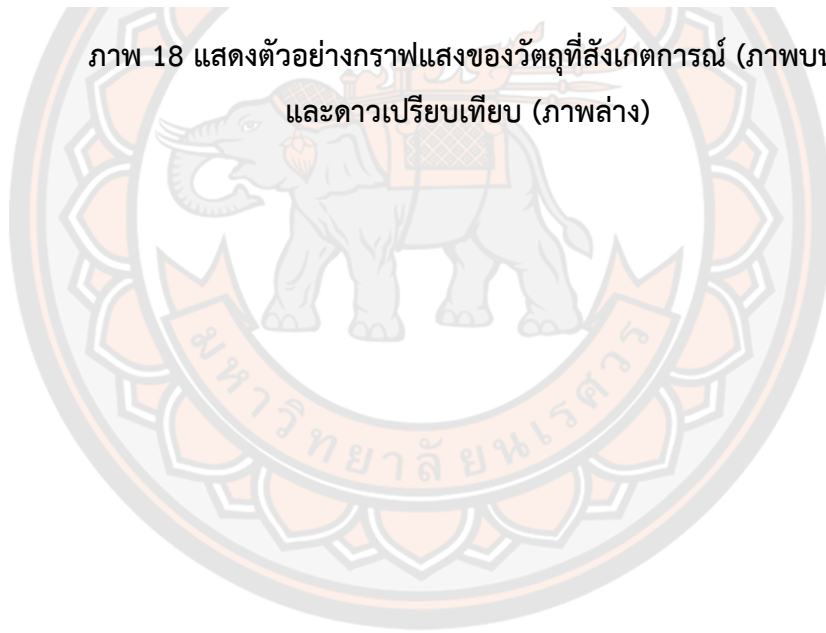
$$m_{c1} - m_{c2} = \text{คงที่} \quad (5)$$

เมื่อ  $m_{c2}$  คือ ดาวตรวจสอบ

โดยตัวอย่างกราฟแสงของวัตถุที่สังเกตการณ์และดาวเปรียบเทียบ แสดงดังภาพ 18



ภาพ 18 แสดงตัวอย่างกราฟแสงของวัตถุที่สังเกตการณ์ (ภาพบน)  
และดาวเปรียบเทียบ (ภาพล่าง)





### บทที่ 3

#### การสังเกตการณ์ และการรีดิวซ์ข้อมูล

##### การสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี

เราสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีของ CVs ที่ค้นพบใหม่นี้ จำนวน 2 ระบบ คือ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci ซึ่งตรวจพบจากเซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง ได้แก่ CRTS และ ASASSN โดยติดตามสังเกตการณ์ทันที เมื่อระบบถูกพบว่าเกิดการระเบิดใหญ่ ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละระบบ ดังนี้

##### 1. CSS160215:100655-142538

CSS160215:100655-142538 ก่อนการเกิดการระเบิดใหญ่ วัตถุมีความสว่างประมาณ  $>21$  แมกนิจูด ซึ่งมีพิกัดบนท้องฟ้าอยู่ที่ RA = 10 06 55 และ Dec = -14 25 38 ระบบเกิดการระเบิดใหญ่ในวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 ตรวจพบโดย CRTS ระบบมีความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 16.98 แมกนิจูด ดังภาพ 19 เราได้ดำเนินการเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีเพื่อติดตามการระเบิดของวัตถุ ตั้งแต่วันที่ 18 - 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 โดยใช้กล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO ขนาด 0.7 เมตร และกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 ขนาด 0.6 เมตร ซึ่งไม่มีการใส่แผ่นกรองแสง และเปิดหน้ากล้องเป็นเวลา 80 วินาที และ 100 วินาที ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ Signal to Noise ในแต่ละคืน

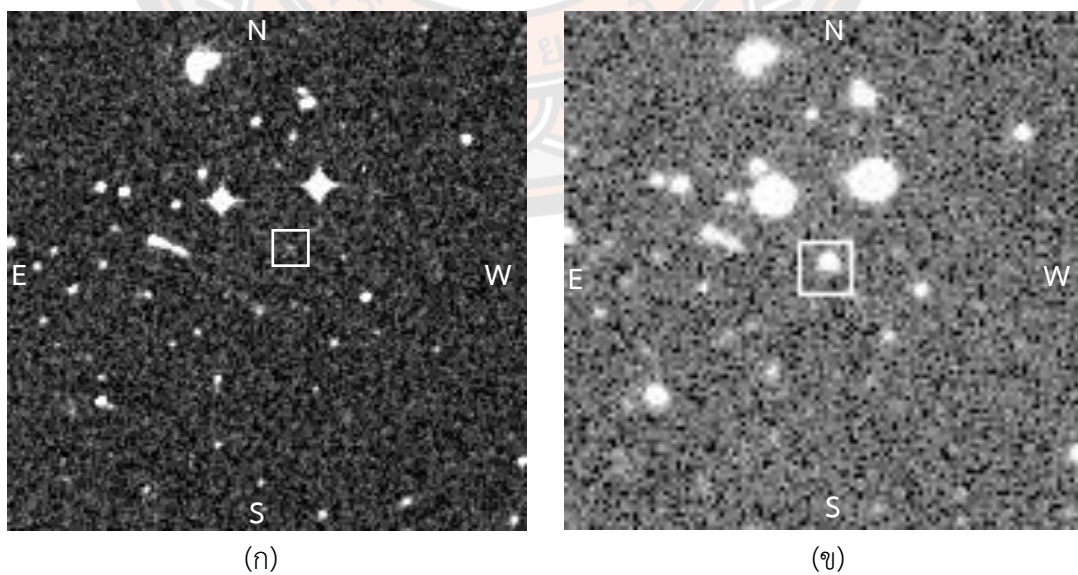
##### 2. ASASSN-17ci

ระบบนี้ ถูกค้นพบจาก ASASSN เมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2560 มีพิกัดบนท้องฟ้าอยู่ที่ RA = 10 10 18 และ Dec = -47 0 4.7 โดยระบบก่อนเกิดการระเบิดใหญ่ มีความสว่างประมาณ  $>17.2$  แมกนิจูด และขณะเกิดการระเบิดใหญ่ มีความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 14.17 แมกนิจูด เราใช้กล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 ในการเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีทันที ในวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ซึ่งระบบมีความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 13.9 แมกนิจูด ดังภาพ 20 จนถึงวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2560 โดยข้อมูลที่มีความไม่ต่อเนื่องกัน เนื่องจากสภาพอากาศหรือทัศนวิสัยรอบหอสังเกตการณ์ไม่ดี มีการใช้แผ่นกรองแสง V และใช้เวลาในการเปิดหน้ากล้องเป็นเวลา 20 วินาที 30 วินาที และ 40 วินาที ตามลำดับ

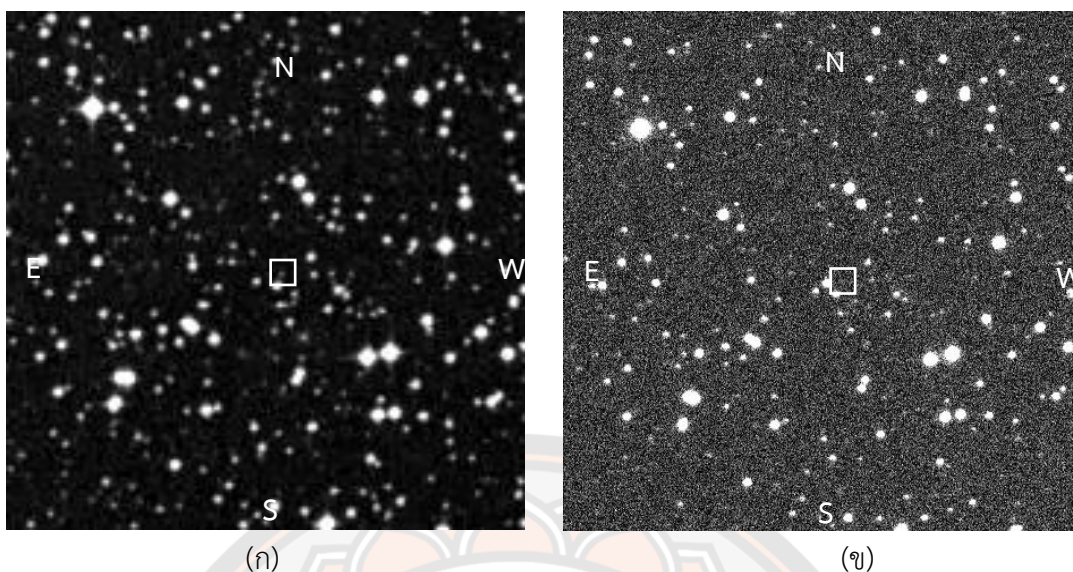
โดยตาราง 1 แสดงรายละเอียดของการสังเกตการณ์ของ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci

ตาราง 1 ข้อมูลการสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี

วันที่สังเกตการณ์	เวลา (UT)	กล้อง โทรทรรศน์	แผ่นกรอง แสง	เวลาที่เปิด หน้ากล้อง (วินาที)	จำนวน (ภาพ)	Magnitude
<b>CSS160215:100655-142538</b>						
20160218	07:27:39.85-08:59:35.46	PROMPT8	Clear	100	46	16.7
20160218	16:28:34.98-21:24:16.96	TRT-GAO	Clear	80,100	209	16.9
20160219	01:23:00.95-07:19:59.69	PROMPT8	Clear	80,100	154	16.8
20160219	17:27:15.00-19:24:27.96	TRT-GAO	Clear	100	66	17.0
20160220	03:01:32.62-08:37:01.31	PROMPT8	Clear	80	140	16.9
<b>ASASSN-17ci</b>						
20170216	03:29:40.27-08:52:04.88	PROMPT8	V	20	300	13.7
20170217	01:29:25.35-05:41:11.96	PROMPT8	V	20	400	13.9
20170219	01:32:35.86-05:17:51.15	PROMPT8	V	20	300	14.4
20170221	02:16:28.21-06:54:56.33	PROMPT8	V	20	60	14.8
20170222	06:58:21.96-07:55:03.10	PROMPT8	V	20	61	14.9
20170226	04:10:53.73-06:46:18.45	PROMPT8	V	30	50	15.3
20170227	05:59:23.62-09:10:43.24	PROMPT8	V	30	172	15.4
20170228	01:09:58.95-06:19:48.95	PROMPT8	V	30	250	15.5
20170301	01:15:02.21-05:59:18.95	PROMPT8	V	40	200	15.6



ภาพ 19 แสดงภาพถ่ายของ CSS160215:100655-142538 โดย (ก) ระบบก่อนเกิดระเบิดใหญ่ (47) ขนาด 5x5 arcmins และ (ข) ระบบขณะเกิดการระเบิดใหญ่ ขนาด 5x5 arcmins



ภาพ 20 แสดงภาพถ่ายของ ASASSN-17ci โดย (ก) ระบบก่อนเกิดระเบิดใหญ่ (48) ขนาด  $5 \times 5$  arcmins และ (ข) ระบบขณะเกิดการระเบิดใหญ่ (มาจากการ trim ภาพขนาด  $25.1 \times 25.1$  arcmins)

#### สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการสังเกตการณ์

การระเบิดใหญ่ของ CVs ระบบใหม่ ถูกค้นพบโดยเซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง ได้แก่ The Catalina Real-time Transient Survey (CRTS) และ All-Sky Automated Survey for SuperNovae (ASASSN) ซึ่งเป็นเซอร์เวย์ขนาดใหญ่ที่มีการสำรวจพื้นที่ครอบคลุมทั่วท้องฟ้า และสามารถตรวจจับการแปรค่าความสว่างของระบบได้มากถึง 17-20 แมกนิจูด โดยดำเนินการสังเกตการณ์จากกล้องโทรทรรศน์ขนาดเล็ก จำนวน 2 ตัว คือ กล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO ขนาด 0.7 เมตร บนตัวกล้องติดตั้ง Andor DW432 CCD camera ความละเอียดสูงขนาด  $2048 \times 2048$  พิกเซล ซึ่งตั้งอยู่ ณ หอดูดาวเกาเหมยกุ่ มณฑลยูนนาน สาธารณรัฐประชาชนจีน และกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 ขนาด 0.6 เมตร และมีการติดตั้ง Apogee Alta F42 CCD camera ขนาด  $2048 \times 2048$  พิกเซล ตั้งอยู่ที่หอดูดาว Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) สาธารณรัฐชิลี (49, 50)

#### ขั้นตอนการสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี

ในการเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี เราจำเป็นต้องถ่ายภาพซีซีดีทั้งหมด 4 ประเภทคือ ไบแอสเฟรม (Bias frames) ดาร์กเฟรม (Dark frames) และแฟลตฟิลด์เฟรม (Flat-field frames) และภาพถ่ายของวัตถุที่ต้องการศึกษา (Science frames) เนื่องจากต้องใช้ในการ

รีดิวซ์ข้อมูลหรือลบสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการทำงานหรือโครงสร้างของซีพซีดี โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ถ่ายไบแอสเฟรม ควรถ่ายภายในเวลา 0 วินาที และปิดชัตเตอร์ อย่างน้อย 10 ภาพ
2. ถ่ายดาร์กเฟรม ใช้เวลาในการถ่ายเท่ากับเวลาที่ใช้ถ่ายภาพของวัตถุที่เราศึกษา พร้อมปิดชัตเตอร์ อย่างน้อย 10 ภาพ
3. ถ่ายแฟลตฟิลด์เฟรม ควรถ่ายท้องฟ้าในช่วงที่ดวงอาทิตย์กำลังขึ้นหรือตกจากขอบฟ้า (Twilight) เนื่องจากต้องการให้แสงมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วท้องฟ้า อย่างน้อย 10 ภาพ
4. ถ่ายภาพของวัตถุที่ต้องการศึกษา ถ่ายอย่างต่อเนื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการเปิดหน้ากล้อง ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศหรือทัศนวิสัย (Seeing) รอบหอสังเกตการณ์ ขนาดของกล้องโทรทรรศน์ที่ใช้ และเครื่องมือติดตั้ง รวมถึงความสว่างของวัตถุด้วย

### การรีดิวซ์ข้อมูล

เมื่อได้เก็บข้อมูลดังกล่าวทั้งหมดแล้ว เราจะนำ ไบแอสเฟรม ดาร์กเฟรม และแฟลตฟิลด์เฟรม แต่ละประเภทมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยจะได้ Master bias frame Master dark frame และ Master flat-field frame จากนั้นจึงนำไปลบสัญญาณรบกวนออกจากภาพถ่ายของวัตถุที่ศึกษา เรียกว่า การรีดิวซ์ข้อมูล (Data reduction) ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านชุดคำสั่งย่อยในโปรแกรม MIDAS (51) โดยทั่วไปมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. การลบสัญญาณไบแอส (Bias subtraction) เนื่องจากในซีซีดีมีการบ่อนค่าระดับไบแอส (Bias level) ซึ่งเป็นค่าชดเชยทางอิเล็กทรอนิกส์ที่บ่อนให้ซีซีดีเพื่อป้องกันสัญญาณที่เป็นลบที่อาจเกิดขึ้นขณะการแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลของซีซีดี ดังนั้นเพื่อให้ทราบค่าสัญญาณที่แท้จริงของซีซีดีเราจึงต้องลบสัญญาณไบแอสออกจากซีซีดีแต่ละพิกเซล โดยการนำ Master bias frame ไปลบออกจาก Science frames

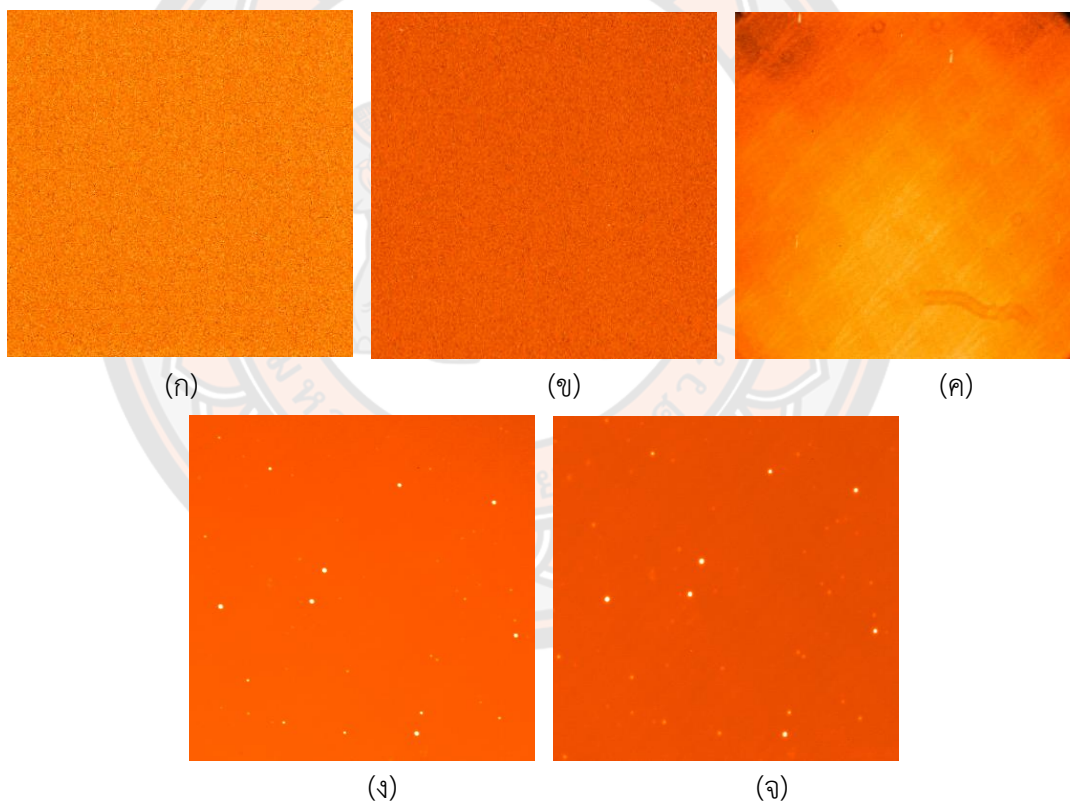
2. การลบกระแสมืด (Dark-current subtraction) กระแสมืด (Dark current) เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนของซีซีดีซึ่งทำให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนในซีซีดี นั่นคือผลของกระแสมืดทำให้จำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในแต่ละพิกเซล ในทางปฏิบัติเราสามารถลดผลของกระแสมืดได้โดยการเติมไนโตรเจนเหลวเพื่อทำให้ซีซีดีถูกหล่อเย็นตลอดคืนสังเกตการณ์ซึ่งจะทำให้ไม่มีกระแสมืด ในกรณีที่ซีซีดีไม่ได้ถูกหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว เราจำเป็นต้องลบผลของกระแสมืดโดยใช้ Master dark frame ลบออกจาก Science frames

3. การทำแฟลตฟิลด์ (Flat-fielding) เนื่องจากแต่ละพิกเซลของซีซีดีมีความไวต่อแสงไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตซีซีดีหรือเกิดจากการสะสมของฝุ่นบนกระจกของกล้อง ในทางปฏิบัติเราสามารถ “ปรับ” ความไวต่อแสงของซีซีดีให้เท่ากันทุกพิกเซลได้โดยกระบวนการทำ

แพลตฟอร์ม โดยนำ Master flat-field frame ไปหาร Science frames ที่ลบ Master bias frame และ Master dark frame เรียบร้อยแล้ว (1) ตามสมการ 6

$$\text{Reduced images} = \frac{\text{Science frames} - \text{Master bias} - \text{Master dark}}{\text{Master flat field}} \quad (6)$$

จากภาพ 21 แสดงตัวอย่างของภาพถ่ายซีซีดีชนิดต่างๆ โดย (ก) Master bias frame (ข) Master dark frame (ค) Master flat-field frame ซึ่งได้จากการเฉลี่ยภาพถ่ายซีซีดีแต่ละประเภท คือ ไบแอสเฟรม 11 ภาพ ดาร์กเฟรม 11 ภาพ และ แพลตฟิลด์เฟรม 33 ภาพ ตามลำดับ (ง) ภาพถ่ายตัวอย่างของ CSS160215:100655-142538 ที่ยังไม่ผ่านการรีดิวซ์ข้อมูล (Raw image) และ (จ) ภาพที่ผ่านการรีดิวซ์ข้อมูลแล้ว (Reduced image) ตามลำดับ



ภาพ 21 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายซีซีดีประเภทต่างๆ จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO

เราวัดปริมาณแสงดาวแต่ละดวง เพื่อต้องการสร้างกราฟแสงของระบบ โดยใช้โปรแกรม SExtractor (52) ซึ่งดำเนินการภายใต้ MIDAS/TSA package โดยการวัดปริมาณแสงของวัตถุเทียบกับปริมาณแสงของดาวเปรียบเทียบในเทอมของผลต่างแมกนิจูด ซึ่งเป็นไปตามสมการ 4 จากภาพ 22 และ 23 แสดงดาวเปรียบเทียบ ( $C_1, C_2$ ) และดาวตรวจสอบ ( $C_3, C_4$ ) ที่เลือกใช้ในการวัดปริมาณแสงของวัตถุ (Obj) สำหรับ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci ตามลำดับ

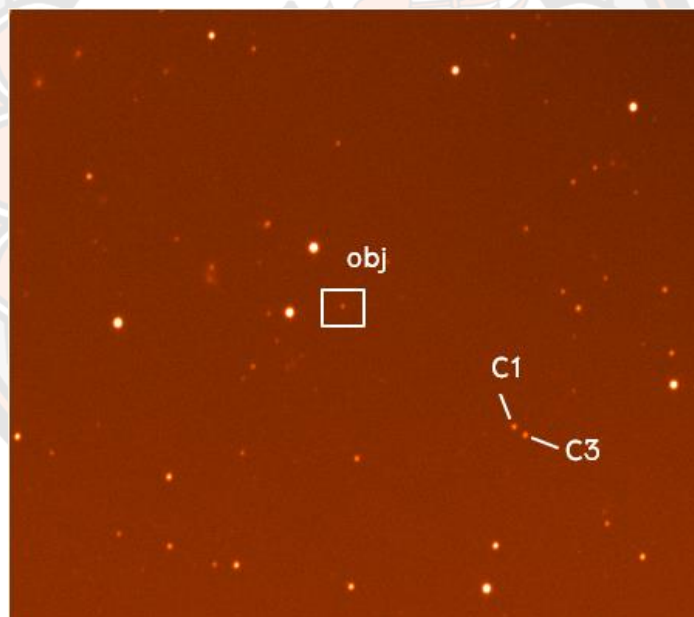
เมื่อ  $C_1$  คือ USNO-A2.0: 0750-07140991;  $m_{c1} = 15.9$  mag

$C_2$  คือ USNO-A2.0: 0375-70330358;  $m_{c2} = 12.9$  mag

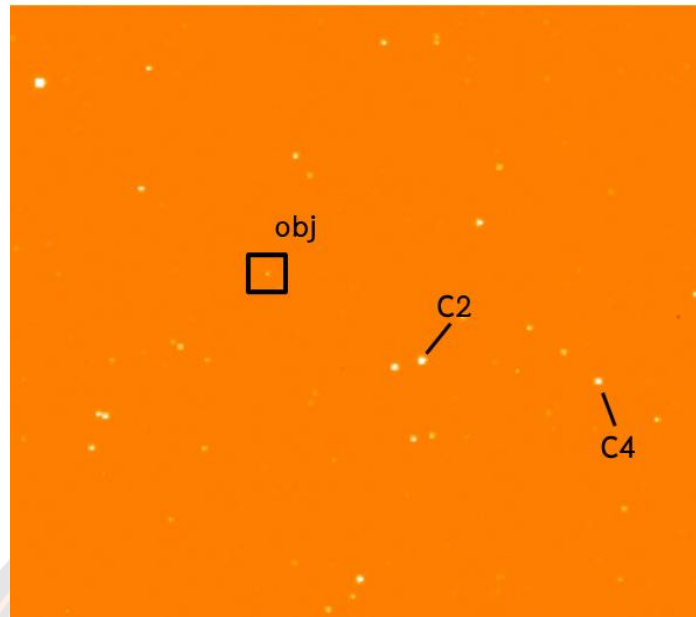
$C_3$  คือ USNO-A2.0: 0750-07140995;  $m_{c3} = 16.0$  mag

$C_4$  คือ USNO-A2.0: 0375-10322840;  $m_{c4} = 13.7$  mag

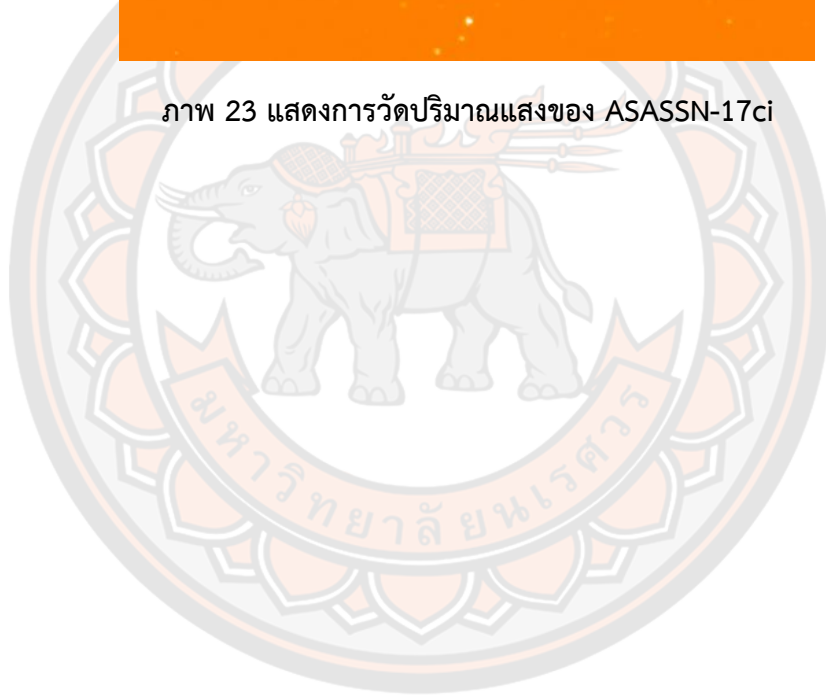
กราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci แสดงดังภาพ 24 - 37 ตามลำดับ



ภาพ 22 แสดงการวัดปริมาณแสงของ CSS160215:100655-142538



ภาพ 23 แสดงการวัดปริมาณแสงของ ASASSN-17ci



## บทที่ 4

### ผลจากการสังเกตการณ์และการวิเคราะห์คาบการโคจร

#### กราฟแสงของระบบที่ได้จากการสังเกตการณ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ เราเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีของ CVs ขณะเกิดการระเบิดใหญ่ จำนวน 2 ระบบ ได้แก่ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci โดยเก็บข้อมูลเป็นเวลาหลายคืน ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2559 และ พ.ศ. 2560 จึงนำข้อมูลจากการวัดปริมาณแสงของแต่ละระบบมาสร้างกราฟแสงจากการสังเกต โดยมีรายละเอียดของกราฟแสงดังนี้

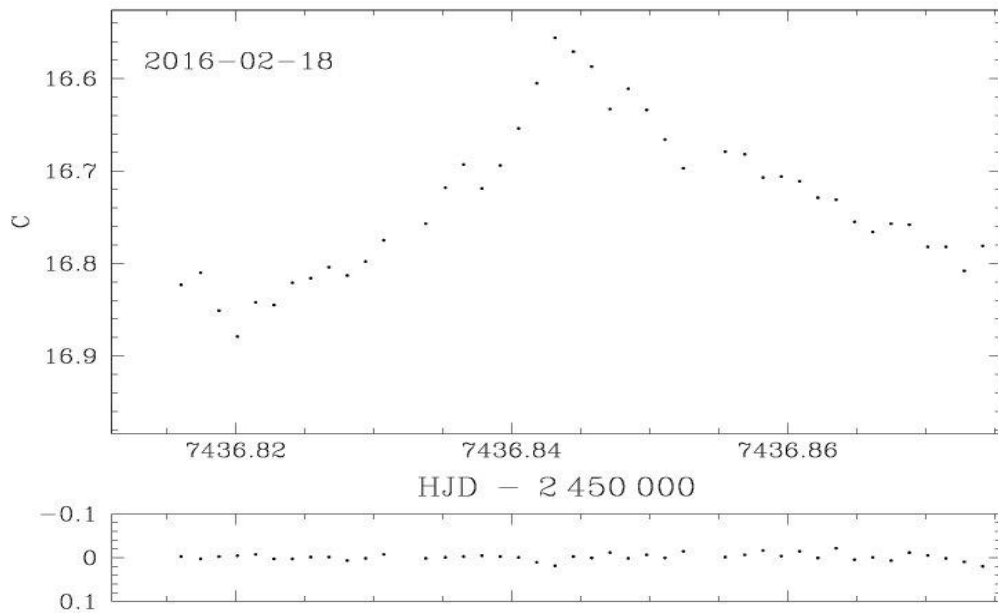
#### 1. กราฟแสงของ CSS160215:100655-142538

เรานำข้อมูลจากการสังเกต CSS160215:100655-142538 ขณะเกิดการระเบิดใหญ่ จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO และกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 มาสร้างกราฟแสงโดยสังเกตการณ์ตั้งแต่วันที่ 18 - 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 ดังภาพ 24 - 28 จะเห็นว่าพบโครงสร้าง Superhump ในกราฟแสงของระบบ ซึ่งจะปรากฏในขณะที่ระบบเกิดการระเบิดใหญ่เท่านั้น โดยเฉพาะวันที่ 18 - 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 แสดงสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลื่นรูปไซน์ และในวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เริ่มมีการกระจายตัวของข้อมูล และแมกนิจูดมีการลดลงจากวันแรกประมาณ 0.3 แมกนิจูด แสดงว่าระบบอาจกำลังกลับเข้าสู่สภาวะสงบ ซึ่งแมกนิจูดในแต่ละคืนจะค่อยๆ ลดลงประมาณ 0.1 - 0.2 แมกนิจูด

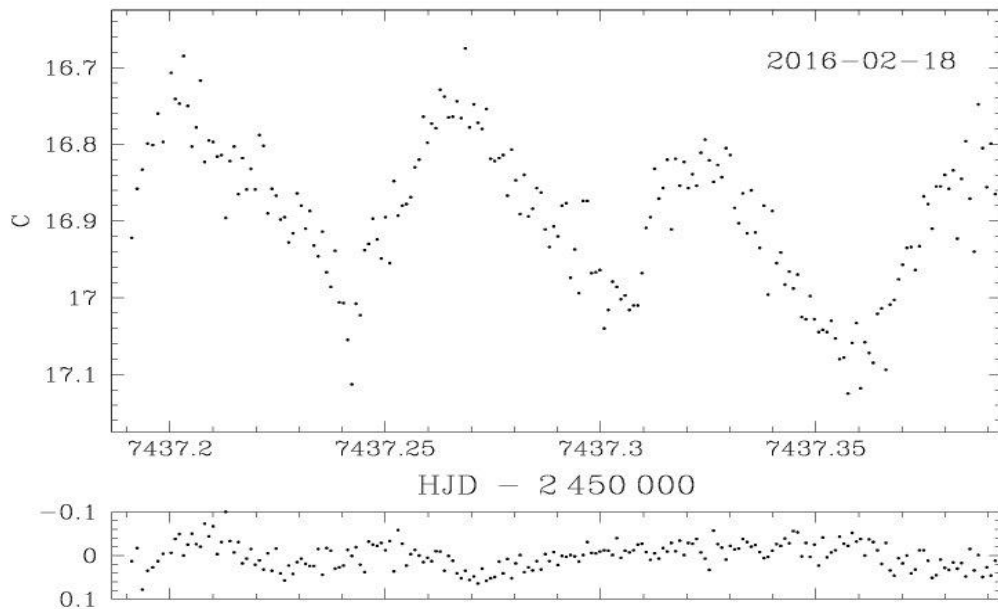
#### 2. กราฟแสงของ ASASSN-17ci

กราฟแสงของ ASASSN-17ci ได้รับการสังเกตการณ์ตั้งแต่วันที่ 16 กุมภาพันธ์ จนถึง 1 มีนาคม พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 จากภาพ 29 - 33 แสดงกราฟแสงของระบบในคืนวันที่ 16 - 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ซึ่งมีความสว่างของวัตถุเกือบจะคงที่ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งคืน เราเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟแสงในคืนวันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ดังภาพ 34 ความสว่างของระบบลดลงจากวันแรกประมาณ 1.5 แมกนิจูด และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเป็นโครงสร้าง Superhump ดังภาพ 35 - 37 ในวันที่ 27 - 28 กุมภาพันธ์ ถึง 1 มีนาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งระบบในแต่ละคืนมีค่าความสว่างลดลงประมาณ 0.2 - 0.5 แมกนิจูด

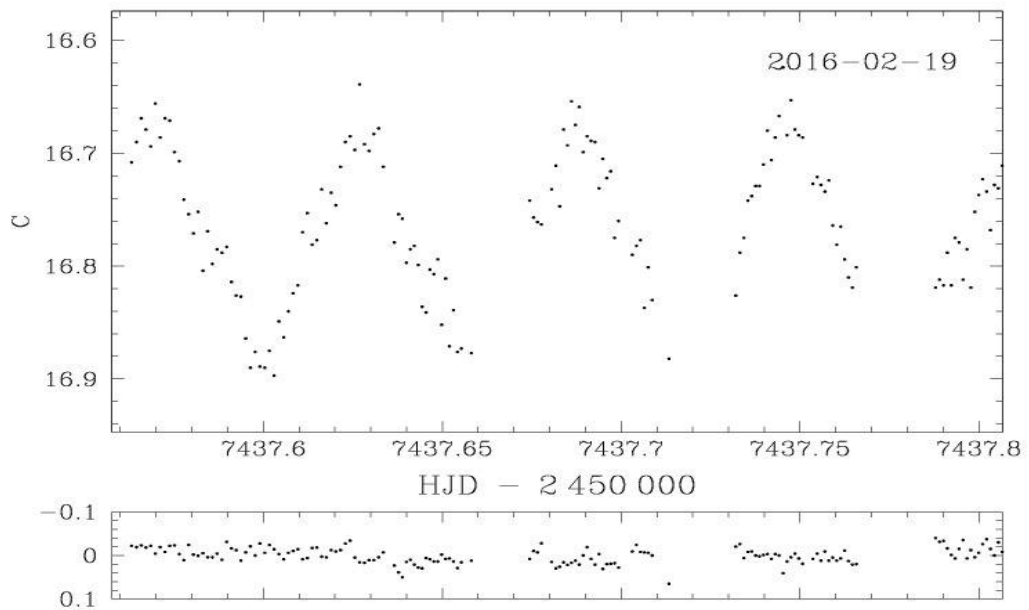




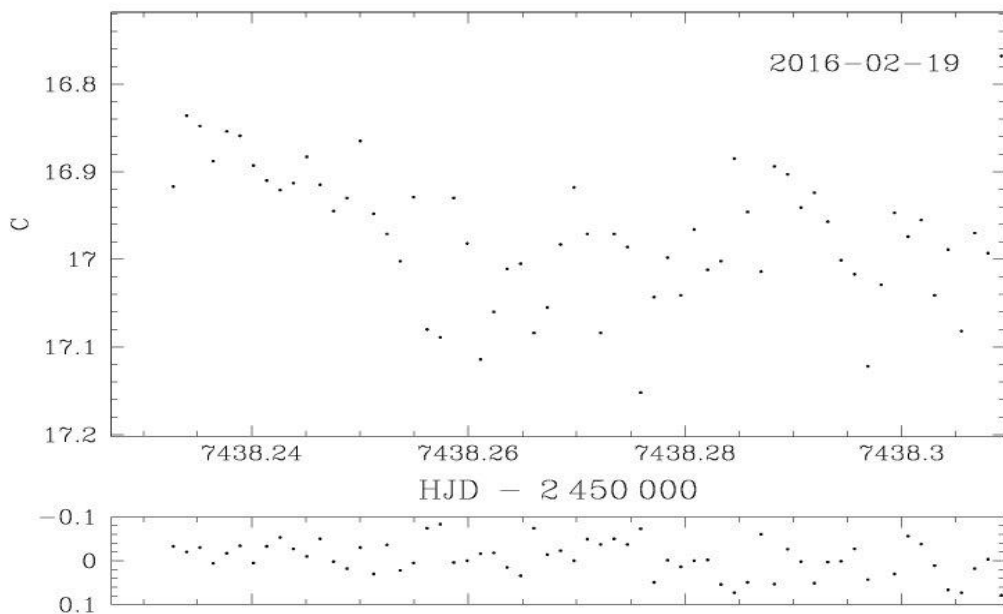
ภาพ 24 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



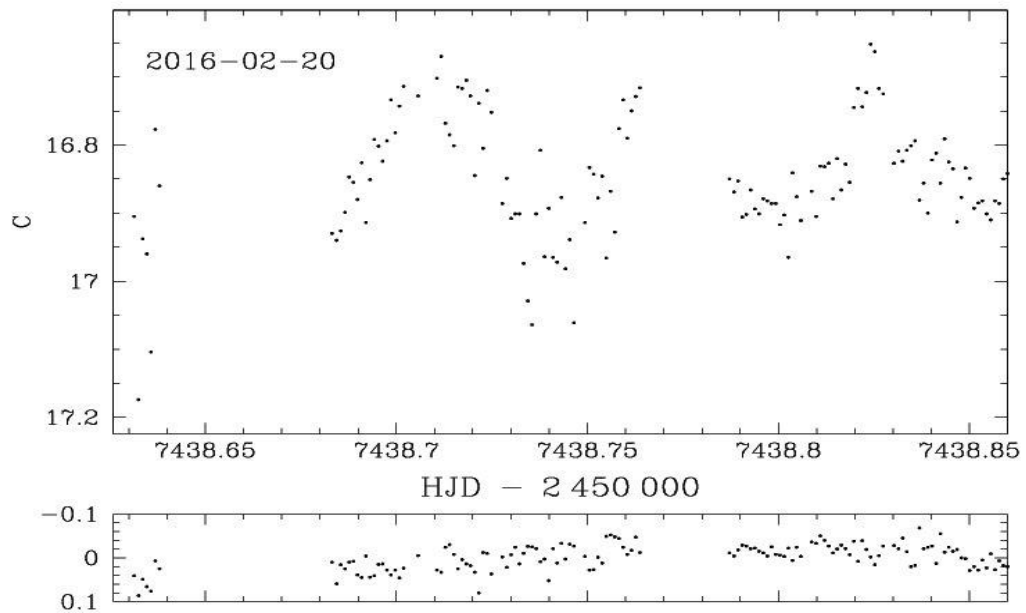
ภาพ 25 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



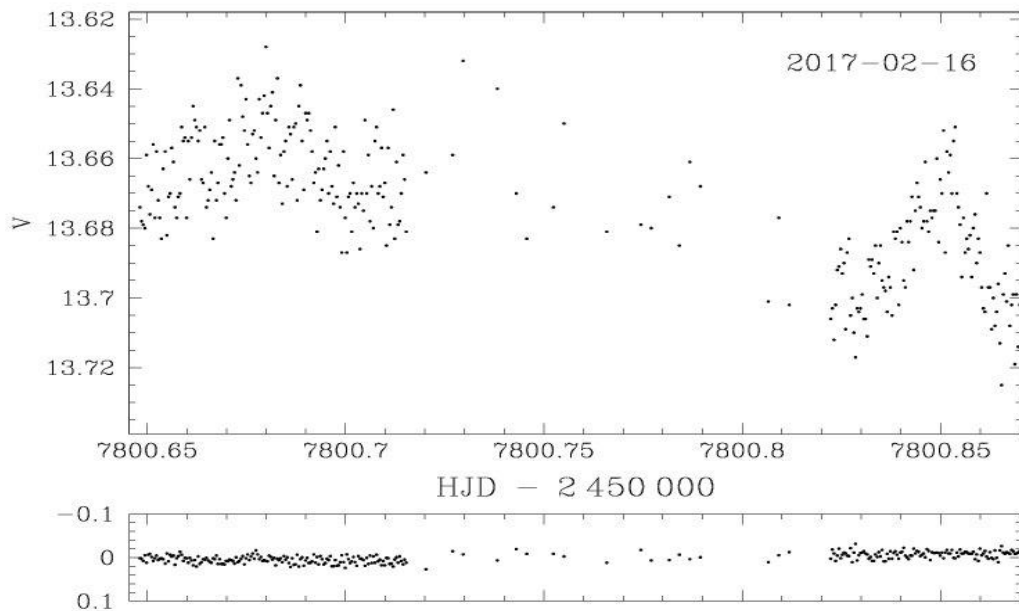
ภาพ 26 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



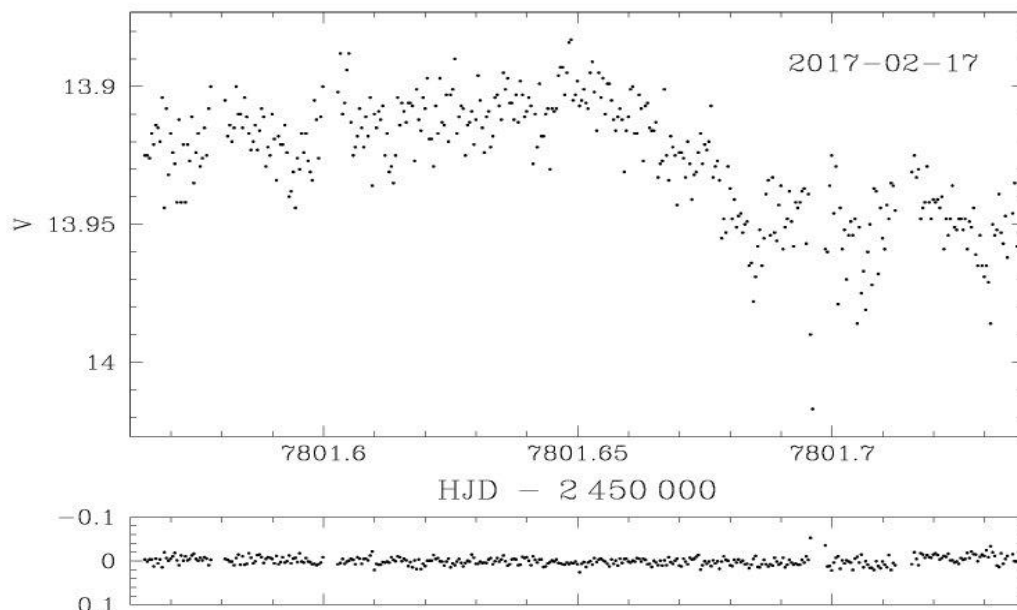
ภาพ 27 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



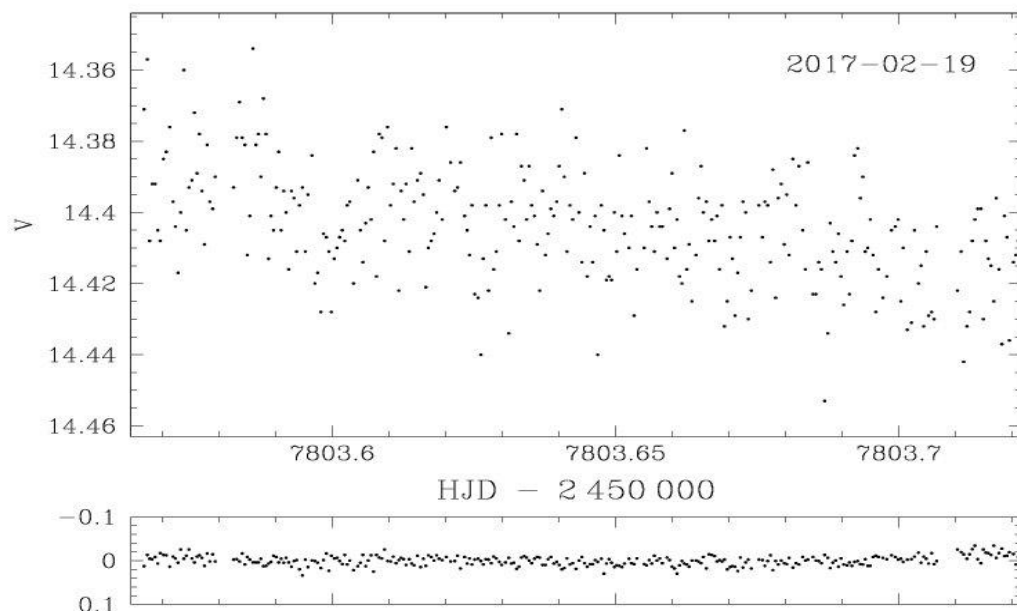
ภาพ 28 แสดงกราฟแสงของ CSS160215:100655-142538 วันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



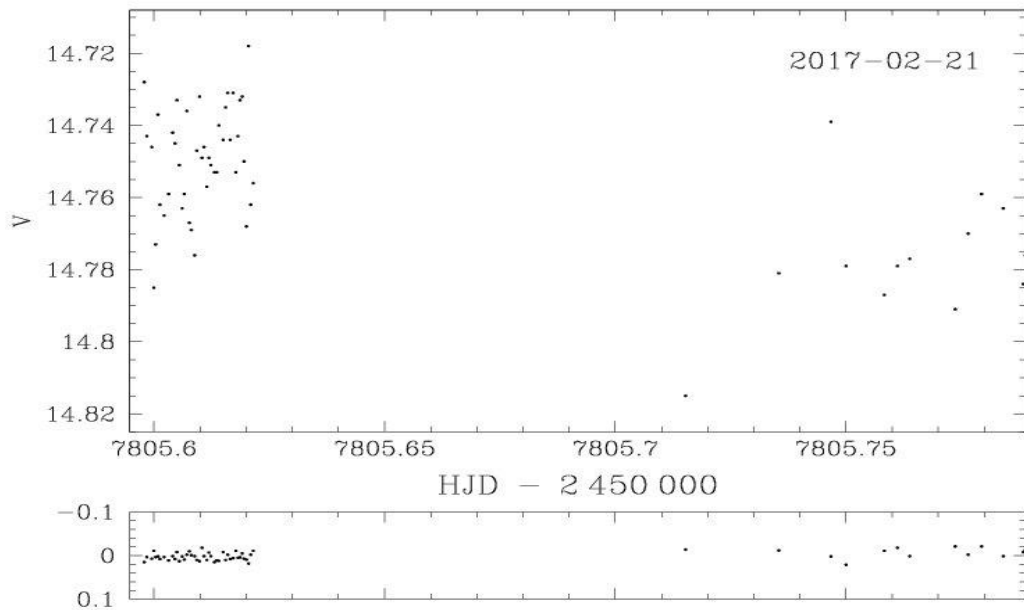
ภาพ 29 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



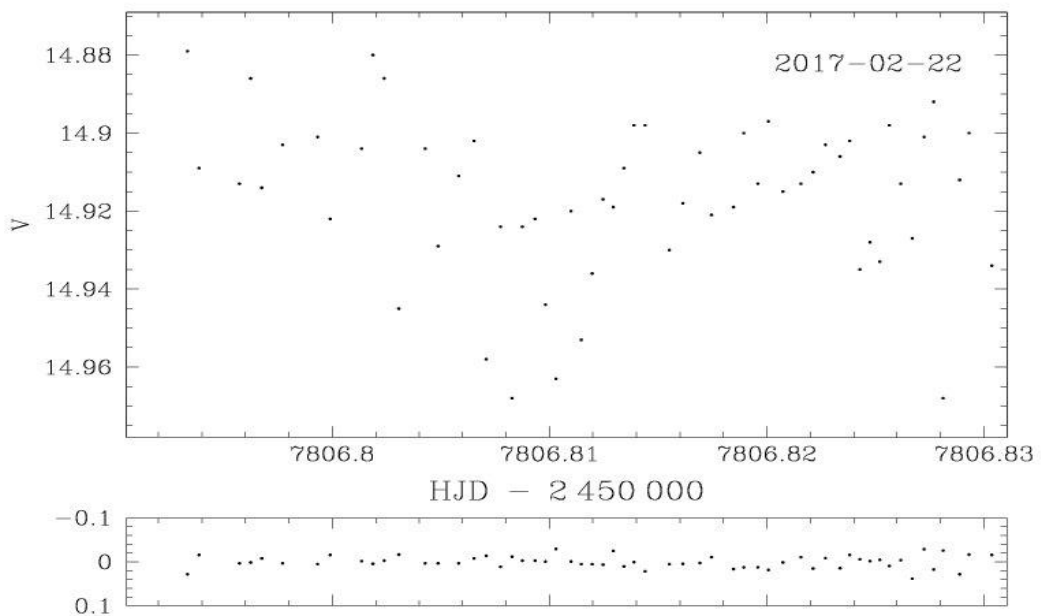
ภาพ 30 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



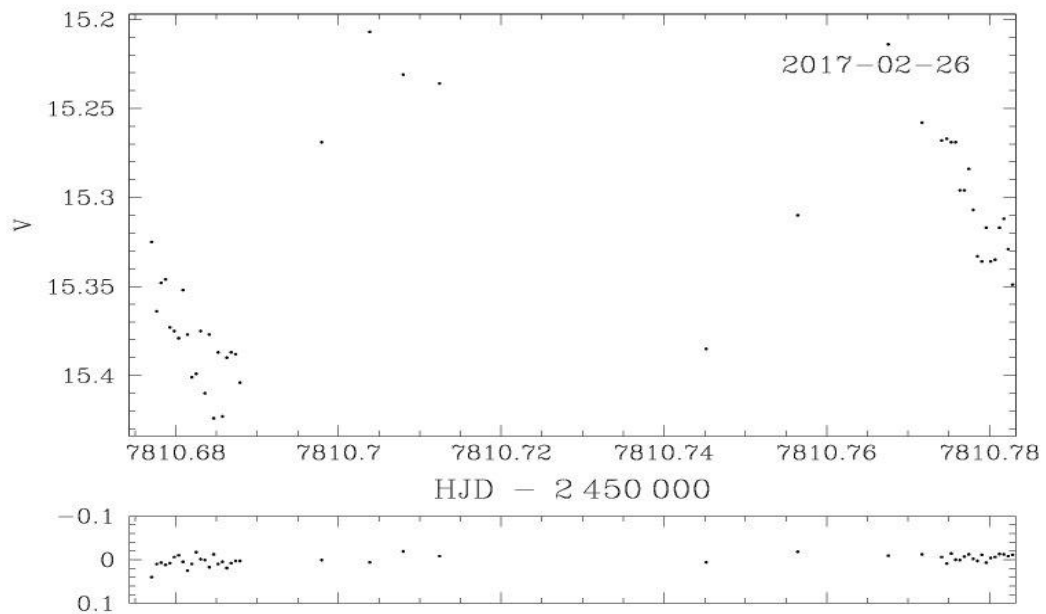
ภาพ 31 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



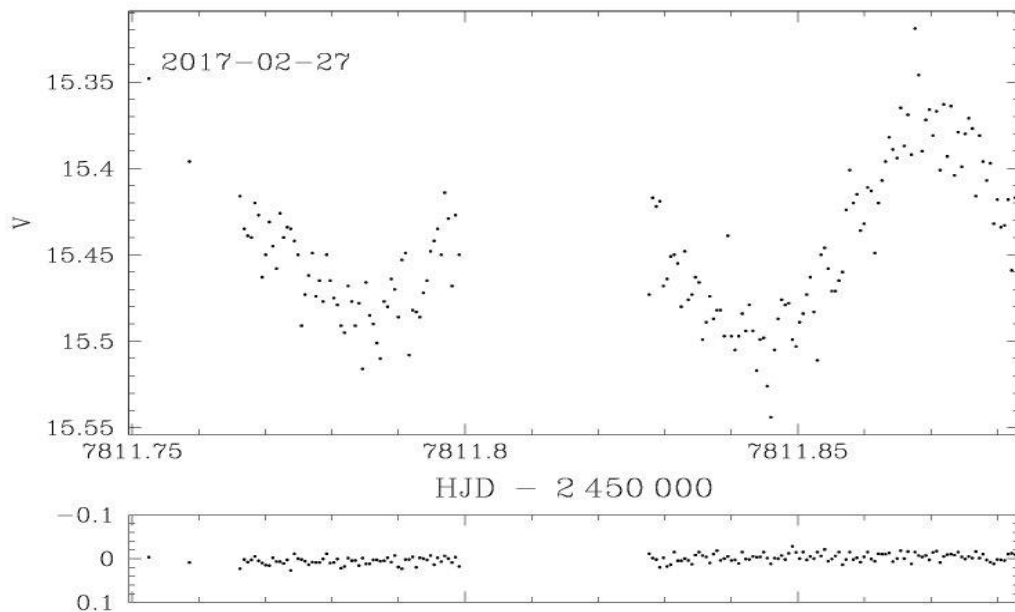
ภาพ 32 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 21 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



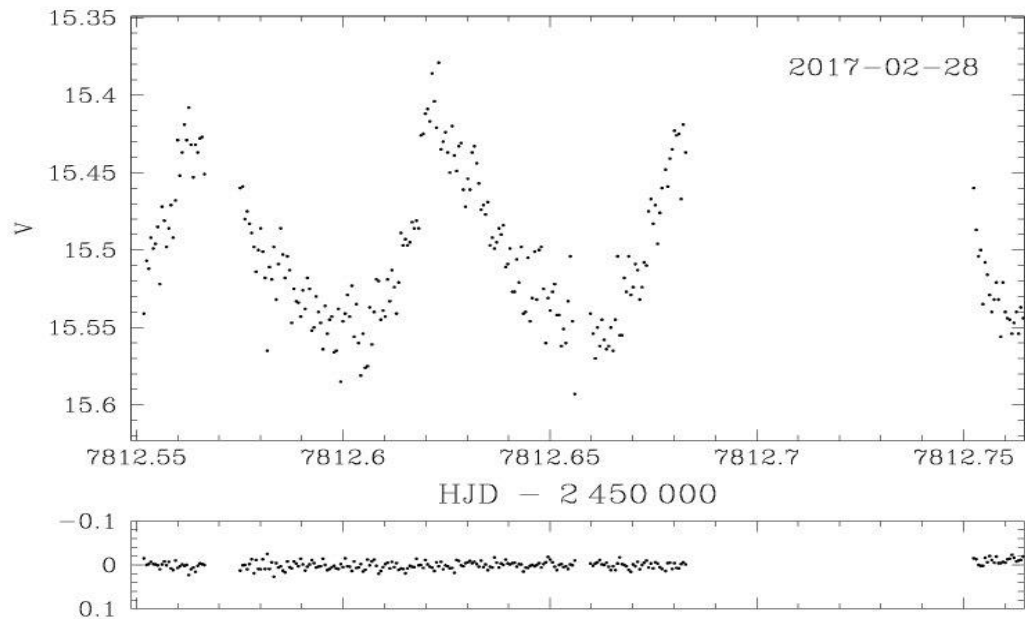
ภาพ 33 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



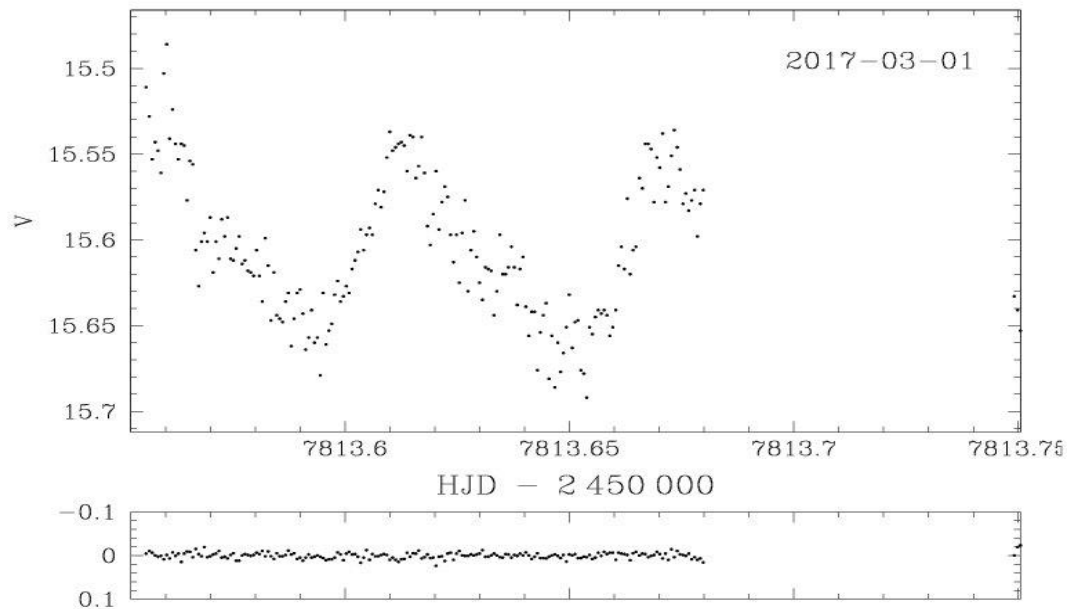
ภาพ 34 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



ภาพ 35 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



ภาพ 36 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ



ภาพ 37 แสดงกราฟแสงของ ASASSN-17ci วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2560 จากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 โดยภาพบนคือกราฟแสงของระบบ และภาพล่างคือกราฟแสงของดาวเปรียบเทียบ

## การวิเคราะห์คาบ Superhump

เราทำการวิเคราะห์กราฟแสงที่ได้จากการสังเกตในแต่ละวัน ซึ่งใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (Time-series analysis) ผ่านคำสั่งย่อย Time-Series Analysis ในโปรแกรม MIDAS (MIDAS/TSA package) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ (Fourier analysis) (53) โดยจะมีการแปลงข้อมูลอนุกรมเวลาจากการแปรค่าความสว่างของระบบในกราฟแสงที่ได้ตามฟังก์ชันของเวลาให้อยู่ในรูปของความถี่ เรียกว่า Scargle periodogram (54) ซึ่งจะแสดงความถี่ในช่วงคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ศูนย์จนถึงอนันต์ และความสูงของแอมพลิจูดของความถี่แต่ละแอมพลิจูด (Power spectrum) บ่งบอกว่า ความถี่ในการโคจรครบรอบต่อวัน ( $f/d$ ) ในช่วงนี้มีมากเท่าไร หรือบอกความน่าจะเป็นที่เป็นไปได้มากที่สุดว่า คาบ Superhump จะอยู่ในช่วงความถี่ใดมากที่สุด ซึ่งแอมพลิจูดที่สูงที่สุดคือคาบการโคจรที่แท้จริงของระบบ

ในการวัดคาบ Superhump ของระบบนั้น เราทำการพิตช่วงความถี่สูงสุด และคำนวณคาบ Superhump จากข้อมูลทั้งหมดภายใต้บริบท MIDAS/TSA โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์ ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal signals) เนื่องจากระบบที่เราศึกษาให้สัญญาณที่มีการแปรค่าคล้ายสัญญาณคลื่นรูปไซน์ และนำข้อมูลทั้งหมดมาทำ Phase-folded หรือเฟสการโคจร (Orbital phase) เพื่อตรวจสอบว่าคาบ Superhump ที่ได้นั้นถูกต้องหรือไม่ โดยการนำกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตในแต่ละคืนมาซ้อนทับกับเฟสการโคจรตั้งแต่เฟส 0 จนถึง 1 หากคาบการโคจรที่คำนวณได้นั้นถูกต้อง กราฟแสงจะซ้อนทับกันพอดีกับเฟสการโคจรเดิมทุกครั้ง และนำกราฟของเฟสการโคจรหาค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบกับกราฟคลื่นรูปไซน์ เพื่อสังเกตแนวโน้มรูปร่างของโครงสร้าง Superhump นั้นเอง

### 1. CSS160215:100655-142538

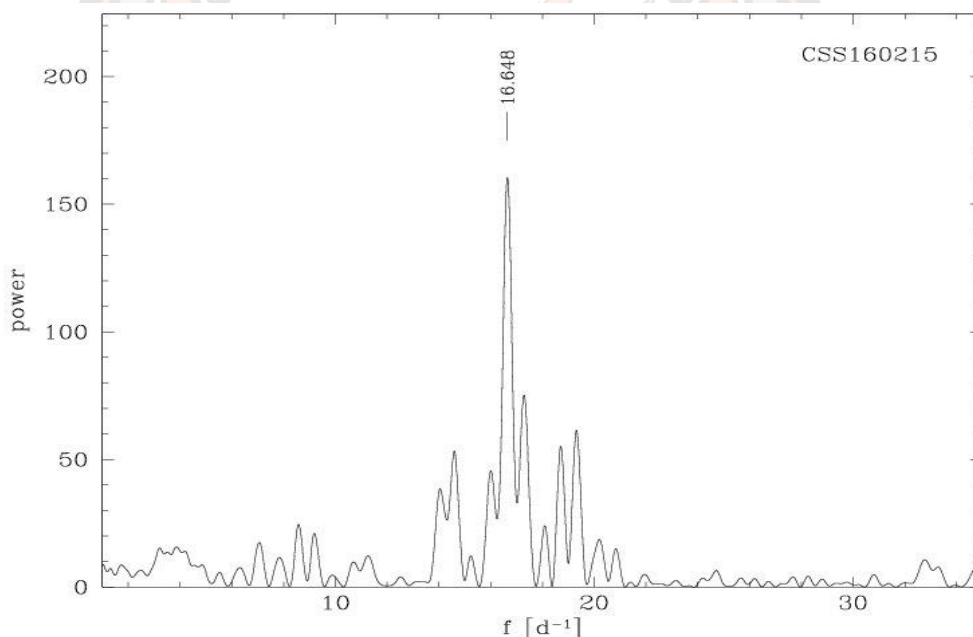
จากการคำนวณกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตจากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO และ PROMPT8 ตลอด 3 คืน แสดงให้เห็นถึงการแปรค่าความสว่างของระบบ เนื่องจากการโคจรรอบกันของดาวทั้งสองดวง โดยเราเลือกใช้ข้อมูลในวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 จากกล้องโทรทรรศน์ TRT-GAO และจากกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 ในวันที่ 18 - 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 เพื่อนำมาวิเคราะห์เป็น Scargle periodogram ซึ่งแสดงความถี่สูงสุดอยู่ที่  $f = 16.648 \text{ d}^{-1}$  (ดังภาพ 38) ดังนั้น เมื่อวิเคราะห์คาบ Superhump ซึ่งได้จากการพิตค่าความถี่สูงสุด มีค่าเท่ากับ  $P_{sh} = 86.49 \pm 0.05$  นาที โดยสามารถตรวจสอบความถูกต้องของคาบ Superhump ได้จากเฟสการโคจรหรือการทำ Phase-folded จากภาพ 39 ด้านบนคือกราฟของเฟสการโคจร แสดงให้เห็นว่า คาบ Superhump มีความถูกต้อง เนื่องจากข้อมูลของกราฟแสงซ้อนทับกันพอดีในเฟสการโคจรที่ 0 ถึง 1



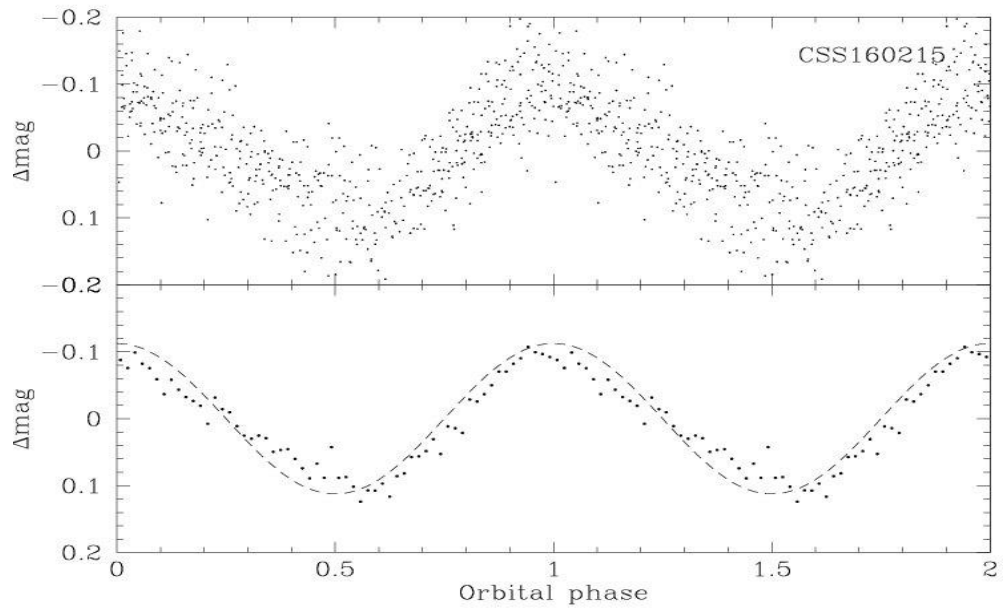
และด้านล่างคือค่าเฉลี่ยที่ได้จากกราฟของเฟสการโคจร ซึ่งทำให้เห็นแนวโน้มของโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกราฟคลื่นรูปไซน์ชัดเจนขึ้น โดยใน 1 เฟส มีค่าเท่ากับ 30 bin/phase

## 2. ASASSN-17ci

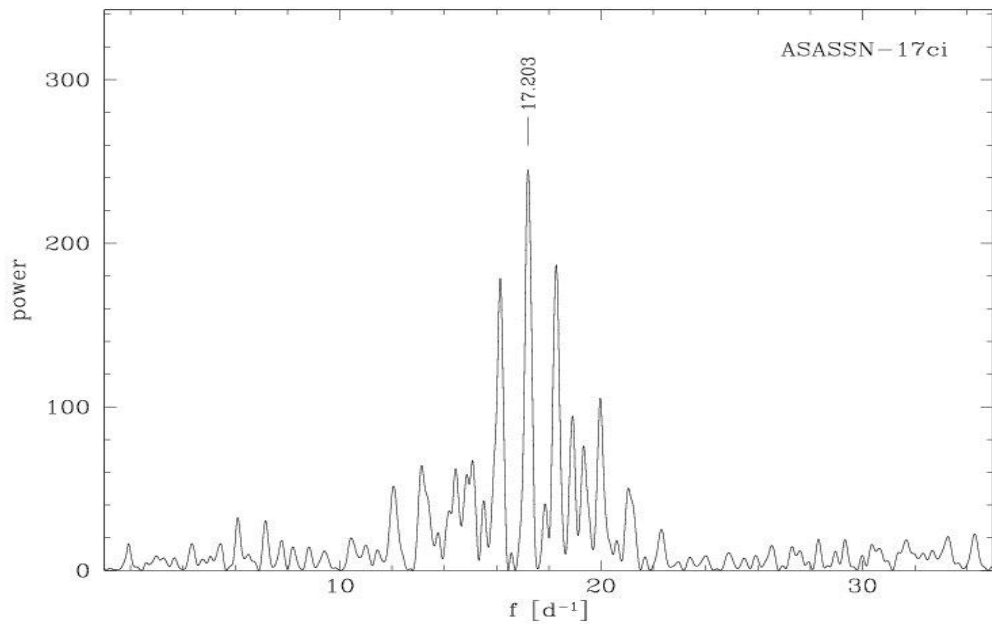
การคำนวณกราฟแสงของระบบนี้ Scargle periodogram มีความถี่สูงสุดอยู่ที่  $f = 17.203 \text{ d}^{-1}$  จากการสังเกตการณ์ทั้งหมด 9 คีน โดยกล้องโทรทรรศน์ PROMPT8 เราใช้ข้อมูลเพียง 3 คีนในการนำมาวิเคราะห์ Scargle periodogram ได้แก่ วันที่ 27 - 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 และวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2560 เนื่องจากข้อมูลในการสังเกตการณ์ช่วงแรกไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงการแปรแสงของวัตถุ เมื่อทำการวิเคราะห์คาบ Superhump มีค่าเท่ากับ  $P_{sh} = 83.70 \pm 0.02$  นาที และทำการตรวจสอบความถูกต้องจากกราฟเฟสการโคจรได้ว่า กราฟแสงในแต่ละคีนมีการซ้อนทับกันในเฟสที่ตรงกันพอดี และค่าเฉลี่ยที่ได้จากกราฟเฟสการโคจรมีลักษณะคล้ายกราฟคลื่นรูปไซน์ โดยมีการเฉลี่ยเป็น 30 bin/phase เช่นกัน (ดังภาพ 40 และ 41)



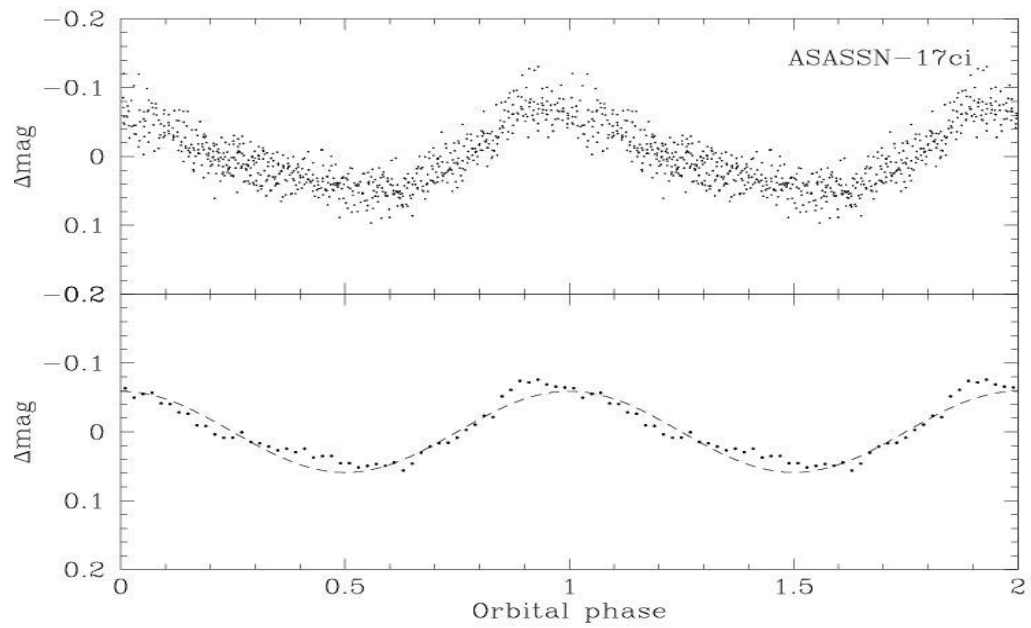
ภาพ 38 แสดง Scargle periodogram ของ CSS160215:100655-142538



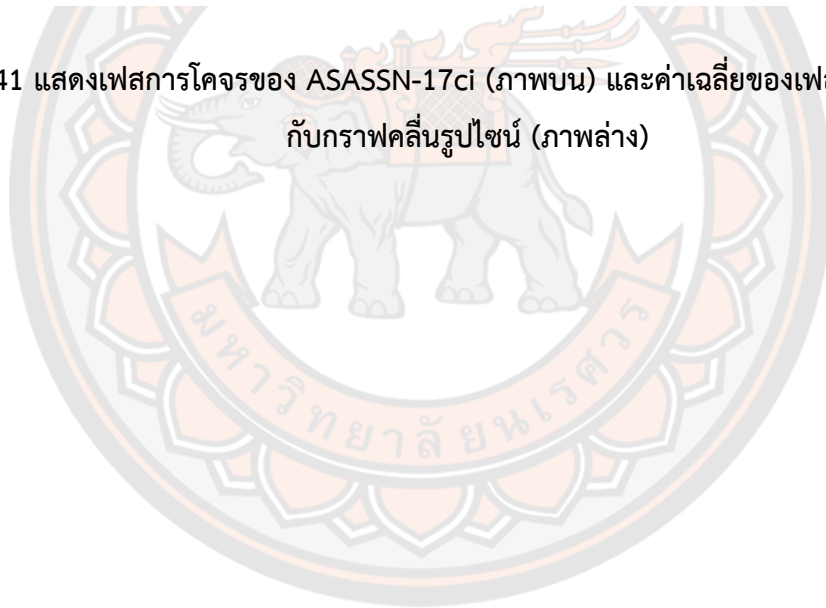
ภาพ 39 แสดงเฟสการโคจรของ CSS160215:100655-142538 (ภาพบน) และค่าเฉลี่ยของเฟสการโคจรเทียบกับกราฟคลื่นรูปไซน์ (ภาพล่าง)



ภาพ 40 แสดง Scargle periodogram ของ ASASSN-17ci



ภาพ 41 แสดงเฟสการโคจรของ ASASSN-17ci (ภาพบน) และค่าเฉลี่ยของเฟสการโคจรเทียบกับกราฟคลื่นรูปไซน์ (ภาพล่าง)



## บทที่ 5

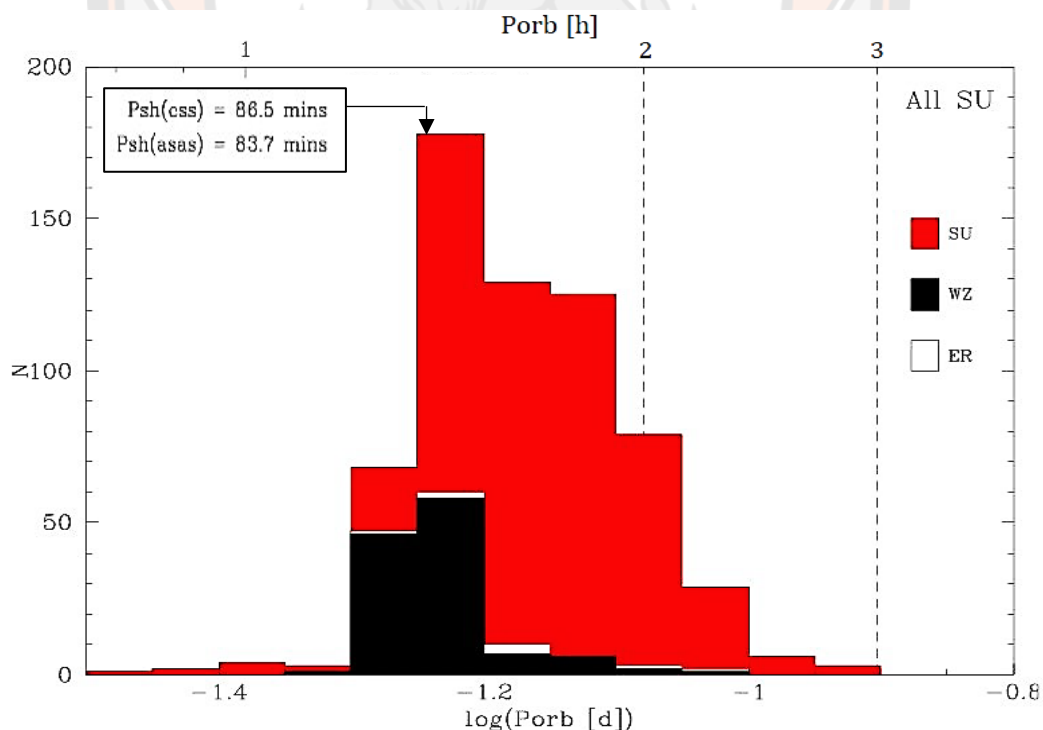
### บทสรุป

#### อภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ เราค้นพบ CVs คาบการโคจรสั้นจากสมบัติการแปรค่าความสว่าง โดยศึกษาจากระบบที่มีการระเบิดใหญ่ ซึ่งถูกตรวจพบจากเซอร์เวย์การแปรค่าความสว่าง ได้แก่ CRTS และ ASASSN จำนวน 2 ระบบ คือ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci ตามลำดับ เราเริ่มสังเกตการณ์และติดตามการระเบิดใหญ่ของระบบทันที เพื่อเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี และนำไปสร้างกราฟแสงของระบบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรี ซึ่งในกราฟแสงของระบบเหล่านี้จะพบโครงสร้าง Superhump ที่เกิดขึ้นในขณะที่ระบบเกิดการระเบิดใหญ่ โดยเราวัดคาบ Superhump จากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์ใน MIDAS/TSA package ได้ ดังนี้ CSS160215:100655-142538 มีคาบ Superhump เท่ากับ  $P_{sh} = 86.49 \pm 0.05$  นาที และ ASASSN-17ci มีคาบ Superhump เท่ากับ  $P_{sh} = 83.70 \pm 0.02$  นาที จากโครงสร้าง Superhump ที่พบในกราฟแสง เราจึงจัด CVs ทั้ง 2 ระบบเป็น Dwarf novae ประเภท SU UMa ที่มีคาบการโคจรสั้น ( $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง)

Ritter & Kolb catalogue (July 2013, Version 7.20) แสดงรายละเอียดของ CVs ที่ค้นพบจากการสังเกต จำนวน 1,429 ระบบ โดยมีจำนวนประชากรของ Dwarf novae ทั้งหมด 852 ระบบ ซึ่งประกอบด้วย SU UMa มากถึง 627 ระบบ (73% ของจำนวนประชากรของ Dwarf novae ทั้งหมด) โดยแผนภาพการกระจายตัวของจำนวนประชากรของ SU UMa เหล่านี้แสดงในภาพ 42 ซึ่งมีลักษณะเด่นสอดคล้องกับแผนภาพการกระจายตัวของจำนวนประชากรของ CVs ทั้งหมด (ภาพ 14 บน) กล่าวคือ การลดจำนวนลงของระบบที่มีคาบการโคจรประมาณ 80 นาที การขาดแคลนของระบบในช่วง Period gap ( $P_{orb} = 2 - 3$  ชั่วโมง) และการลดจำนวนลงของระบบที่มีคาบการโคจรยาว ( $P_{orb} > 6$  ชั่วโมง) โดยมีระบบที่มีคาบการโคจร  $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง ~88% ประกอบด้วย SU UMa ~58% และ WZ Sge (SU UMa ที่มีคาบการเกิดการระเบิดใหญ่ซ้ำยาวนาน) ~14% และ ER UMa (SU UMa ที่มีคาบการเกิดการระเบิดใหญ่ซ้ำ 20-50 วัน) ~1%

งานวิจัยของ A. F. Pala และคณะ (2019) พบว่า ในการเลือกศึกษา CVs ภายใต้ระยะทาง 150 พาร์เซก จำนวน 42 ระบบ ซึ่งมีการกระจายตัวของ CVs บนระนาบกาแล็กซีอย่างสม่ำเสมอ พบว่ามี SU UMa ประมาณ 88% ของ Dwarf novae จำนวน 25 ระบบ ซึ่งประกอบด้วย SU UMa 40% และ WZ Sge 48% โดยพบระบบที่มีคาบการโคจร  $P_{orb} < 2$  ชั่วโมงประมาณ 91% และพบระบบที่มีคาบการโคจรสั้นที่สุดคือ QZ Virginis มีคาบการโคจรของระบบประมาณ  $P_{orb} = 84.7$  นาที และมีคาบ Superhump ประมาณ  $P_{sh} = 88.1$  นาที (55) นั่นคือคาบ Superhump มีค่ามากกว่าคาบการโคจรของระบบประมาณ 3.4 นาที เนื่องจากคาบ Superhump ของ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci มีค่าใกล้เคียงกับคาบ Superhump ของ QZ Virginis และโดยทั่วไปคาบ Superhump จะยาวกว่าคาบการโคจรของระบบประมาณ 3 - 5 นาที ดังนั้น เราจึงประมาณการคาบการโคจรของ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci จากคาบ Superhump ที่วัดได้ โดยมีค่าประมาณ  $78 \leq P_{orb} \leq 83$  นาที ซึ่งจัดเป็นระบบที่มีคาบการโคจรใกล้เคียงกับคาบการโคจรที่น้อยที่สุดส่วนใหญ่ของระบบที่ได้จากการสังเกต ทั้งนี้ เพื่อให้ทราบคาบการโคจรที่แท้จริงของระบบ เราจำเป็นต้องเก็บข้อมูลทางโฟโตเมตรีและสเปกโตร สโคปีขณะที่ระบบไม่เกิดการระเบิดใหญ่ ซึ่งข้อมูลที่เราได้รับจากงานวิจัยฉบับนี้ สามารถใช้ในการศึกษาระบบเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตได้



ภาพ 42 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของ SU UMa ที่ค้นพบจากการสังเกตจาก Ritter & Kolb catalogue (July 2013, Version 7.20)

## สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ เราค้นพบ CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นระบบใหม่ขณะเกิดการระเบิดใหญ่ ซึ่งถูกตรวจพบโดย CRTS และ ASASSN จำนวน 2 ระบบ คือ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci ตามลำดับ เราเก็บข้อมูลเชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2559 และ ปี พ.ศ. 2560 เราพบโครงสร้าง Superhump ในกราฟแสงของระบบเหล่านี้ และวัดคาบ Superhump ของระบบจากโครงสร้าง Superhump โดย CSS160215:100655-142538 มีคาบ Superhump เท่ากับ  $P_{sh} = 86.49 \pm 0.05$  นาที และ ASASSN-17ci มีคาบ Superhump เท่ากับ  $P_{sh} = 83.70 \pm 0.02$  นาที เราจัดประเภทของ CSS160215:100655-142538 และ ASASSN-17ci เป็น Dwarf novae ประเภท SU UMa ที่มีคาบการโคจรสั้น ( $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง) ซึ่งการค้นพบนี้เป็น การเพิ่มจำนวนประชากรในแผนภาพการกระจายตัวของจำนวนประชากรของ CVs และสามารถใช้อ้างอิงในการค้นหา CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นต่อไป



# บรรณานุกรม



1. Aungwerojwit A. *The properties of a spectroscopically selected sample of cataclysmic variables* (Doctoral dissertation). Coventry CV4 7AL, University of Warwick. 2007.
2. Coto RL. *Introduction to Cataclysmic Variable Stars*. In *Very-high-energy Gamma-ray Observations of Pulsar Wind Nebulae and Cataclysmic Variable Stars with MAGIC and Development of Trigger Systems for IACTs 2017* (pp. 167-172). Springer, Cham.
3. de Kool M. *Statistics of cataclysmic variable formation*. *Astronomy and Astrophysics*. 1992 Jul; 261:188-202.
4. Kolb U. *A model for the intrinsic population of cataclysmic variables*. *Astronomy and Astrophysics*. 1993 Apr; 271:149.
5. Howell SB, Nelson LA, Rappaport S. *An exploration of the paradigm for the 2-3 hour period gap in cataclysmic variables*. *The Astrophysical Journal*. 2001 Apr 1;550(2):897.
6. Pala AF, Gänsicke BT, Breedt E, Knigge C, Hermes JJ, Fusillo NP, Hollands MA, Naylor T, Pelisoli I, Toonen S, Aungwerojwit A. *The space density of cataclysmic variables from Gaia DR2*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019 Jul 30.
7. Patterson J. *The evolution of cataclysmic and low-mass X-ray binaries*. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 1984 Apr; 54:443-93.
8. Smith DA, Dhillon VS. *The secondary stars in cataclysmic variables and low-mass X-ray binaries*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1998 Dec 11;301(3):767-81.
9. Hellier C. *Cataclysmic Variable Stars-how and why they vary*. Springer Science & Business Media; 2001 Feb 23. 75-80.
10. Baum R. *The strange case of pseudo-twilight on the Moon*. *Journal of the British Astronomical Association*. 2010 Dec; 120:258-360.
11. Oddelek za fiziko. *Binary star systems: Roche lobe*. [cited July 12, 2020]. Available from: [http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2017\\_2018/BINARY\\_STAR\\_SYSTEMS.pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2017_2018/BINARY_STAR_SYSTEMS.pdf)



12. SAWAS. *The evolution of binary star system*. [cited July 12, 2020]. Available from: <https://lifeng.lamost.org/courses/astrotoday/CHAISSON/AT320/HTML/AT32006.HTM>
13. Eggleton PP. *Approximations to the radii of Roche lobes*. The Astrophysical Journal. 1983 May; 268:368.
14. Paczynski B. *Common envelope binaries*. In Symposium-International Astronomical Union 1976 (Vol. 73, pp. 75-80). Cambridge University Press.
15. Iben I, Livio M. *Common envelopes in binary star evolution*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1993 Dec; 105(694):1373.
16. Iben Jr I, Tutukov AV. *Formation and evolution of binary planetary nebula nuclei and related objects*. The Astrophysical Journal. 1993 Nov; 418:343.
17. Schreiber MR, Gänsicke BT. *The age, life expectancy, and space density of Post Common Envelope Binaries*. Astronomy & Astrophysics. 2003 Jul 1; 406(1):305-21.
18. Verbunt F, Zwaan C. *Magnetic braking in low-mass X-ray binaries*. Astronomy and Astrophysics. 1981 Jul; 100: L7-9.
19. Kraft RP, Mathews J, Greenstein JL. *Binary Stars among Cataclysmic Variables. II. Nova WZ Sagittae: a Possible Radiator of Gravitational Waves*. The Astrophysical Journal. 1962 Jul; 136:312-5.
20. Rappaport S, Verbunt F, Joss PC. *A new technique for calculations of binary stellar evolution, with application to magnetic braking*. The Astrophysical Journal. 1983 Dec; 275:713-31.
21. Spruit HC, Ritter H. *Stellar activity and the period gap in cataclysmic variables*. Astronomy and Astrophysics. 1983 Aug; 124:267-72.
22. Taam RE, Spruit HC. *The disrupted magnetic braking hypothesis and the period gap of cataclysmic variables*. The Astrophysical Journal. 1989 Oct; 345:972-7.
23. Kolb U, Stehle R. *The age of cataclysmic variables*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1996 Oct 11; 282(4):1454-60.
24. Kolb U, Ritter H. *Advantages and limitations of the bipolytrope model for computing the secular evolution of cataclysmic binaries*. Astronomy and Astrophysics. 1992 Feb; 254:213.

25. Kolb U, Baraffe I. *Brown dwarfs and the cataclysmic variable period minimum*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1999 Nov 11;309(4):1034-42.
- Smak J. *WZ SGE as a dwarf nova*. Acta Astronomica. 1993 Apr; 43:101-19.
26. Smak J. *On the nature of dwarf novae*. The Astrophysical Journal. 1983 Sep; 272:234-7.
27. Cassisi S, Iben Jr I, Tornambè A. *Hydrogen-accreting carbon-oxygen white dwarfs*. The Astrophysical Journal. 1998 Mar 20;496(1):376.
28. Goliašch J, Nelson L. *Population synthesis of cataclysmic variables. I. Inclusion of detailed nuclear evolution*. The Astrophysical Journal. 2015 Aug 12;809(1):80.
29. Downes RA. *The space density of classical novae*. The Astrophysical Journal. 1986 Aug; 307:170-177.
30. Diaz MP, Bruch A. *The orbital period distribution of novae*. Astronomy and Astrophysics. 1997 Jun;322: 807-816.
31. Warner B. *General properties of quiescent novae*. In AIP Conference Proceedings 2002 Nov 5 (Vol. 637, No. 1, pp. 3-15). American Institute of Physics.
32. Sibyl Miles. *Variable stars*. (2016). [cited August 17, 2020]. Available from: <https://slideplayer.com/slide/4399806/>
33. Osaki Y, Kato T. *Study of superoutbursts and superhumps in SU UMa stars by the Kepler light curves of V344 Lyrae and V1504 Cygni*. arXiv preprint arXiv:1305.5877. 2013 May 25.
34. Voloshina IB. *Superhumps in SU uma dwarf novae*. Accretion Processes in Cosmic Sources, 2016 Sep 5-10, Saint Petersburg, Russia. 1-10.
35. de Miguel E, Patterson J, Kemp J, Stein W, Roberts G, Campbell T, Hamsch FJ, Krajci T, Dvorak S, Koff RA, Morelle E. *ER Ursae Majoris: A dwarf nova with surprises*. In Society for Astronomical Sciences Annual Symposium 2012 May (Vol. 31, pp. 79-88).
36. Kate Davis. *Variable Star of the Month: WZ Sagittae*. [cited July 10, 2020]. Available from: [https://www.aavso.org/vsots\\_wzsge](https://www.aavso.org/vsots_wzsge)
37. Patterson J. *The DQ Herculis stars*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1994 Mar;106(697):209.

38. Norton AJ, Wynn GA, Somerscales RV. *The spin periods and magnetic moments of white dwarfs in magnetic cataclysmic variables*. The Astrophysical Journal. 2004 Oct 10;614(1):349.
39. Gänsicke BT, Marsh TR, Edge A, Rodríguez-Gil P, Steeghs D, Araujo-Betancor S, Harlaftis E, Giannakis O, Pyrzas S, Morales-Rueda L, Aungwerojwit A. *Cataclysmic variables from a ROSAT/2MASS selection—I. Four new intermediate polars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005 Jul 21;361(1):141-54.
40. Uemura M, Arai A, Kato T, Maehara H, Nogami D, Kubota K, Moritani Y, Imada A, Omodaka T, Oizumi S, Ohsugi T. *Dwarf Novae in the Shortest Orbital Period Regime. IA New Short Superhump Period Dwarf Nova, OT J055717+683226*. Publications of the Astronomical Society of Japan. 2010 Feb 25;62(1): 187-99.
41. Martin RG, Lubow SH. *Tidal truncation of circumplanetary discs*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2011 May 11;413(2):1447-61.
42. Ritter H. and Kolb U. (2013). *Catalogue of cataclysmic binaries, LMXBs, and related objects*. Catalogs Version 7.20. Astronomy and Astrophysics. 1-6.
43. Djorgovski SG, Drake AJ, Mahabal AA, Graham MJ, Donalek C, Williams R, Beshore EC, Larson SM, Prieto J, Catelan M, Christensen E. *The Catalina Real-Time Transient Survey (CRTS)*. arXiv preprint arXiv:1102.5004. 2011 Feb 24.
44. Kochanek CS, Shappee BJ, Stanek KZ, Holoiien TS, Thompson TA, Prieto JL, Dong S, Shields JV, Will D, Britt C, Perzanowski D. *The all-sky automated survey for supernovae (ASAS-SN) light curve server v1. 0*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2017 Aug 24;129(980):104502.
45. Shappee BJ. *The all-sky automated survey for supernovae (ASAS-SN)*. [cited July 10, 2020]. Available from: <http://www.astronomy.ohio-state.edu/asasn/index.shtml>
46. Bolte M. *Signal-to-noise in optical astronomy*. Lecture Notes-AY-257-Modern Observational Techniques-University of California Observatories-Keck Observatory. 2006. 1-16.
47. CRTS Transient. *Finding chart of CSS160215:100655-142538*. (2020). [cited August 17, 2020]. Available from: <http://nessi.cacr.caltech.edu/catalina/20160215/1602150150534145601.html>

48. Javier Méndez. *Finding Chart Generator*. Astronomy Organisation. (2020). [cited August 17, 2020]. Available from: [http://catserver.ing.iac.es/dss1/cgi-bin/multi\\_dss1.cgi](http://catserver.ing.iac.es/dss1/cgi-bin/multi_dss1.cgi)
49. Gao Mei Gu Observatory. *Thai Robotic Telescope*. [cited August 11, 2020]. Available from: <https://trt.narit.or.th/obsinfo/gao>
50. Apogee Alta Series. *Andor and Oxford Instruments Company*. [cited August 11, 2020]. Available from: [https://andor.oxinst.com/assets/uploads/products/andor/documents/apogee\\_alta\\_f42\\_specifications.pdf](https://andor.oxinst.com/assets/uploads/products/andor/documents/apogee_alta_f42_specifications.pdf)
51. Gänsicke BT. *Observational studies of Cataclysmic Variable evolution: Of samples, biases and surprises*. In International Astronomical Union Colloquium 2004 (Vol. 194, pp. 152-154). Cambridge University Press.
52. Bertin E, Arnouts S. *SExtractor: Software for source extraction*. Astronomy and astrophysics supplement series. 1996 Jun 1;117(2):393-404.
53. Pinij Kamhom. *Fourier Analysis*. [cited Jan 22, 2021]. Available from: [http://webstaff.kmutt.ac.th/~thorin.the/ENE208/Lectures/dft\\_fft\\_pinit.pdf](http://webstaff.kmutt.ac.th/~thorin.the/ENE208/Lectures/dft_fft_pinit.pdf)
54. Scargle JD. *Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data*. The Astrophysical Journal. 1982 Dec; 263:835-53.
55. Imada, A., Kato, T., Isogai, K., Hambsch, F. J., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., ... & Kiyota, S. *The 2015 superoutburst of QZ Virginis: Detection of growing superhumps between the precursor and main superoutburst*. Publications of the Astronomical Society of Japan; (2017). 69(4), 72.
56. FindLight Blog. *Charge Coupled Devices and CMOS Sensors for Superior Imaging*. [cited May 19, 2020]. Available from: <https://www.findlight.net/blog/2019/04/24/charge-coupled-devices-cmos-silicon/>
57. Digital Image Processing. [cited May 19, 2020]. Available from: <http://aivpnathanstrang.blogspot.com/2014/11/lecture-digital-image-processing.html>

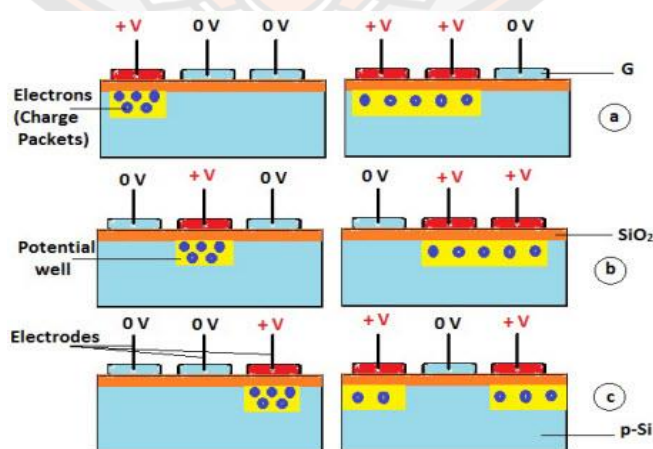


ภาคผนวก

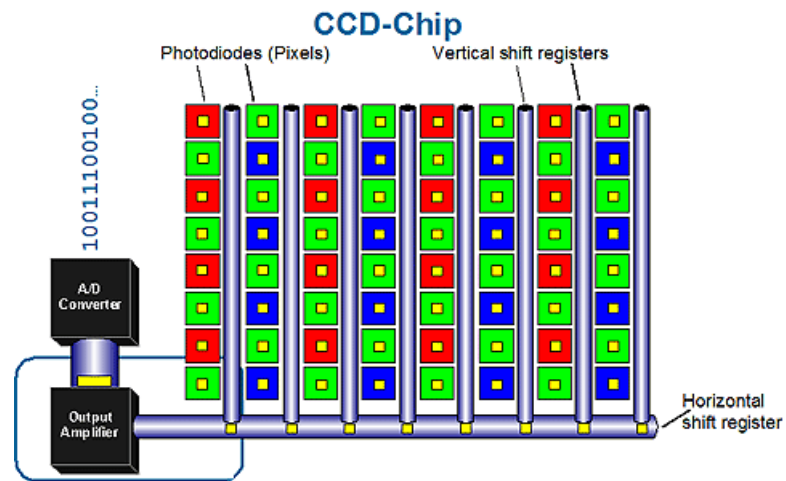
## ภาคผนวก ก หลักการทำงานของซีพซีซีดี (Charge-coupled device operation)

ในการถ่ายภาพข้อมูลอนุกรมเวลาทางโพโตเมตรี สิ่งสำคัญในการตรวจวัดแสงจากดาวฤกษ์คือซีพซีซีดีซึ่งถูกบรรจุอยู่ในกล้องโทรทรรศน์ที่เราใช้เก็บข้อมูลนั่นเอง ดังนั้น เราควรมีความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของซีพซีซีดีดังต่อไปนี้

เมื่อแสงตกกระทบบนพิกเซลแต่ละตัวบนซีพซีซีดีโดย 1 พิกเซลจะถูกแปลงเป็นอิเล็กตรอน 1 ตัวหรือมากกว่า 1 ตัว ผ่าน  $\text{SiO}_2$  หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะค่อย ๆ สะสมและเพิ่มจำนวนอยู่ในบ่อพลังงานศักย์ (Potential well) ดังภาพ 1ก เนื่องจากมีการจ่ายแรงดันศักย์ไฟฟ้าประจุบวกกับอิเล็กโทรดเชิงบวก (P-type เป็นองค์ประกอบอยู่ในพิกเซลที่เกิดจาก Si กับ Al ทำให้เกิดช่องว่าง เรียกว่า Hole มีประจุบวกมากกว่าประจุลบ 1 ตัว นั่นคืออิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโทรดที่เป็นประจุบวก และถูกสะสมอยู่ในบ่อพลังงานศักย์นั่นเอง) ซึ่งบ่อพลังงานศักย์ทำหน้าที่นับจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา หากปล่อยแรงดันศักย์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง อาจทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาสะสมในบ่อพลังงานศักย์มากเกินไป ดังนั้น เราควรจะปิดชุดเตอร์หน้ากล้องเพื่อให้อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายประจุไปยังพิกเซลถัดไปที่ติดกันได้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า Shift register โดยมีการทำงานอยู่ใน 2 รูปแบบ คือทำการเลื่อนแบบ Parallel register ไปตามแต่ละแถวของพิกเซลก่อน จากนั้นจึงทำการเลื่อนแบบ Serial register ไปตามแต่ละคอลัมน์ของพิกเซล ดังภาพ 2ก ในกระบวนการสุดท้าย เมื่อมีการเคลื่อนย้ายประจุอิเล็กตรอนทั้งหมดออกมาแล้ว อิเล็กตรอนจะถูกแปลงเป็นสัญญาณข้อมูลแบบแอนะล็อก และถูกส่งผ่านตัวขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณและแปลงข้อมูลเป็นสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัล โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของกล้อง ทำให้เราได้ภาพถ่ายของวัตถุในเฟรมที่ต้องการ



ภาพ 1ก แสดงการสะสมของอิเล็กตรอนในบ่อพลังงานศักย์ในพิกเซลแต่ละตัวบนซีพซีซีดี (56)



ภาพ 2ก แสดงการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนไปยังพิกเซลถัดไป และถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล [57]



## ภาคผนวก ข วิธีการแปลงค่า JD เป็น HJD

### 1. วันจูเลียน (Julian Date: JD)

วันจูเลียน คือ เวลาทางดาราศาสตร์ที่นับเป็นจำนวนวัน มีค่าเวลาบอกอยู่ในรูปทศนิยม เริ่มนับมาจากวันที่ 1 มกราคม 4713 ปีก่อนคริสตกาล ในเวลาเที่ยงวัน มีการกำหนดวันโดยใช้โลกเป็นจุดศูนย์กลางคำนวณได้จากสมการ 1

$$JD = 2415020 + 365 (\text{ปี ค.ศ.} - 1900) + \text{จำนวนวัน นับจากวันเริ่มต้นปีใหม่} \\ + \text{จำนวนปี ค.ศ. ที่หารด้วย 4 ลงตัว นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900} - 0.5 \quad (1)$$

เมื่อ 2415020 คือ ระยะเวลาที่เริ่มนับมาจากวันที่ 1 มกราคม 4713 ปีก่อนคริสตกาล ในเวลาเที่ยงวัน นับจนมาถึงปีคริสต์ศักราช 1900

365(ปี ค.ศ. - 1900) คือ จำนวนวันใน 1 ปี คูณกับปีคริสต์ศักราชของการสังเกตการณ์ และลบด้วยปีคริสต์ศักราชปัจจุบัน

จำนวนวัน นับจากวันเริ่มต้นปีใหม่ คือ วันที่เริ่มนับตั้งแต่ 1 มกราคมของปีที่เริ่มต้นใหม่ มาจนถึงวันที่สังเกตการณ์

จำนวนปี ค.ศ. ที่หารด้วย 4 ลงตัว นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 คือ ระยะเวลา 1 ปี ในทางดาราศาสตร์มี 365.25 วัน เมื่อเวลาผ่านไป 4 ปี เศษ 0.25 วัน จะเท่ากับ 1 วัน ดังนั้น ทุกๆ 4 ปี จะมีปีหนึ่งมี 366 วัน จึงนำปี ค.ศ. ที่หารด้วย 4 ลงตัวมาหาร

0.5 คือ เวลาในเมืองกรีนิชที่เริ่มการนับตั้งแต่เที่ยงวันจนถึงเที่ยงคืน เท่ากับ 12 ชั่วโมง ซึ่งใน 1 วัน มี 24 ชั่วโมง จะได้ว่า  $12/24$  เท่ากับ 0.5

### 2. วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (Heliocentric Julian Date: HJD)

วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ คือ เวลาทางดาราศาสตร์ที่นับเป็นจำนวนวัน มีค่าเวลาบอกอยู่ในรูปทศนิยม เริ่มนับมาจากวันที่ 1 มกราคม 4713 ปีก่อนคริสตกาล ในเวลาเที่ยงวัน มีการกำหนดวันโดยใช้ดวงอาทิตย์เป็นจุดศูนย์กลางคำนวณได้จากสมการ 2

$$HJD = JD + \Delta t \quad (2)$$

เมื่อ  $\Delta t$  คือ ค่าผลต่างของระยะเวลาที่แสงเดินทางผ่านวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นวัน คำนวณได้จากสมการ 3



$$\Delta t = - 0.0057755 [(\cos\delta \cos\alpha) X + (\tan\varepsilon \sin\delta \cos\delta \sin\alpha) Y] \quad (3)$$

เมื่อ X,Y คือ พิกัดฉากของดวงอาทิตย์ในวันที่ใช้คำนวณ

$\alpha$  คือ Right ascension ของดาวในวันที่ใช้คำนวณ

$\delta$  คือ Declination ของดาวในวันที่ใช้คำนวณ

$\varepsilon$  คือ ค่ามุมเอียงของระนาบอิกลิปติก ซึ่งมีค่า  $23^{\circ} 27'$

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่า X และ Y ได้จากสมการ 4 และ 5

$$X = 0.9998 \cos L - 0.025127 \cos (G - L) + 0.008374 \cos (G - L) + 0.000105 \cos (2G - L) \\ + 0.000068T \cos (G - L) + 0.000035 \cos (2G - L) \quad (4)$$

$$Y = 0.9173 \sin L - 0.023053 \sin (G - L) + 0.007683 \cos (G + L) + 0.000097 \sin (2G + L) \\ + 0.000057T \sin (G - L) + 0.000032 \cos (2G - L) \quad (5)$$

เมื่อ T คือ ค่าศตวรรษจูเลียนสัมพัทธ์ (Relative Julian Century) สามารถคำนวณได้จากสมการ 6

$$T = \frac{JD - 2415020}{36525} \quad (6)$$

L คือ ค่าลองจิจูดสุริยะเฉลี่ย (mean solar longitude) มีหน่วยเป็นองศา โดย L มีค่าน้อยกว่า  $360^{\circ}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 7

$$L = 279.^{\circ}696678 + 36000.76892T + 0.000303T^2 - p \quad (7)$$

เมื่อ p คือ ค่าการส่าย (precession) ของแกนหมุนโลก จากปี ค.ศ. 1950 ถึงวันที่ทำการสังเกตการณ์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 8

$$p = [1.296041 + 0.000308 (T + 0.5)] [T - 0.49998] \quad (8)$$

และ G คือ ค่า mean solar anomaly มีหน่วยเป็นองศา โดย G มีค่าน้อยกว่า  $360^{\circ}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 9

$$G = 358.^{\circ}475833 + 35999.04975T - 0.00015T^2 \quad (9)$$

## ภาคผนวก ค การหาเฟสการโคจรของดาวคู่

เฟสการโคจร (Orbital phase) คือตำแหน่งการโคจรของดาวคู่ที่มีการโคจรเปลี่ยนตำแหน่งตามคาบการโคจรตั้งแต่เฟส 0 จนถึงเฟส 1 เมื่อเวลาผ่านไปเฟสการโคจรจะกลับมาตำแหน่งเดิมทุกครั้ง เช่น หากดาว A มีคาบการโคจร 2 ชั่วโมง ณ เวลา 18.00 น. เฟสจะเริ่มต้นที่ 0 เวลา 18.30 น. เฟสจะเท่ากับ 0.25 เวลา 19.00 น. เฟสจะเท่ากับ 0.5 เวลา 19.00 น. เฟสจะเท่ากับ 0.75 และเวลา 20.00 น. เฟสจะเท่ากับ 1 ซึ่งกลับมาตำแหน่งเดิมที่เฟสเท่ากับ 0 โดยการคำนวณเฟสการโคจร แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1. วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (Heliocentric Julian date; HJD) มีค่าน้อยกว่าค่า Epoch สามารถคำนวณได้จากสมการ 10

$$\text{Phase} = 1 - \text{Fractional part of } \frac{\text{HJD} - \text{Epoch}}{\text{Period}} \quad (10)$$

2. วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (Julian date; JD) มีค่ามากกว่าค่า Epoch สามารถคำนวณได้จากสมการ 11

$$\text{Phase} = \text{Fractional part of } \frac{\text{HJD} - \text{Epoch}}{\text{Period}} \quad (11)$$

เมื่อ Fractional part of (...) คือ คัดเฉพาะผลการคำนวณที่เป็นเลขทศนิยม

Epoch คือ วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (HJD) ในขณะที่ยอดดาวแปรแสงมีความสว่างน้อยที่สุด

Period คือ คาบการแปรแสง



ประวัติผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยสุรินทร์