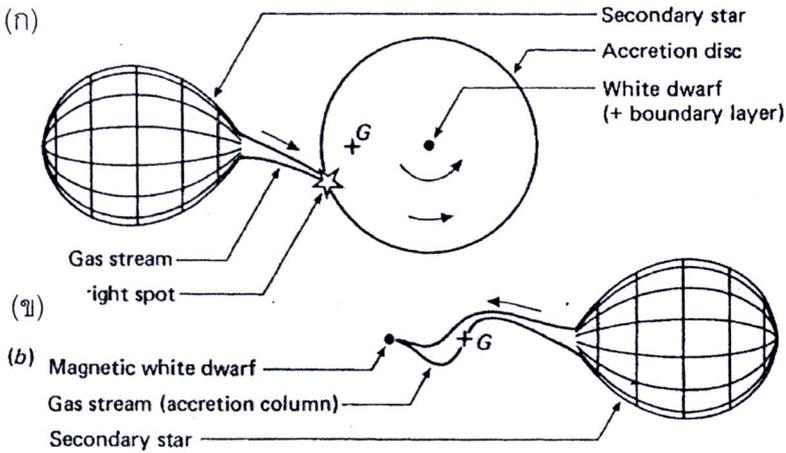


บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 Cataclysmic variables

CVs เป็นระบบดาวคู่แบบกึ่งแตงกัน (semi-detached binary systems) ประกอบด้วยดาวแคระขาวและดาวมวลต่ำในแถบชวอนหลัก (Patterson 1984; Smith & Dhillon 1998) โดยดาวแคระขาวจะมีรัศมีประมาณ 10^4 กิโลเมตร อุณหภูมิใจกลางของดาวแคระขาวมีค่าสูงประมาณ $10^6 - 10^7$ เคลวิน ในขณะที่อุณหภูมิพื้นผิวมีค่าประมาณ $10^4 - 10^5$ เคลวิน และมีมวลอยู่ในช่วงระหว่าง 0.3 - 1.3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ โดยเฉลี่ยแล้วดาวแคระขาวมักมีมวลอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 - 0.6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ส่วนดาวมวลต่ำซึ่งเป็นดาวที่มีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรช (Roche lobe) มีรัศมีประมาณ $7 \times 10^4 - 4 \times 10^5$ กิโลเมตร อุณหภูมิที่พื้นผิวมีค่าประมาณ 2900-4000 เคลวิน และมีมวลประมาณ 0.1-0.5 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (Hellier 2001) เป็นดาวที่พบบริเวณปลายล่างด้านขวามือของแผนภาพเฮิร์ตซ์สปริง-รัสเซลล์ (Hertzsprung-Russell diagram) ระบบมีคาบการโคจรอยู่ในช่วงระหว่างประมาณ 80 นาที ถึงประมาณ 10 ชั่วโมง แต่ยังมีบางระบบที่มีคาบการโคจรสั้นหรือยาวกว่าคาบการโคจรของ CVs ข้างต้น อัตราการส่งมวลของ CVs มีค่าประมาณ $10^{-11} - 10^{-8}$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ความเข้มของสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาวนั้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมมวลสารที่ถูกถ่ายเทมาจากดาวมวลต่ำ กล่าวคือถ้าสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาวมีความเข้มน้อยหรือไม่มีสนามแม่เหล็กเลย (รูปที่ 2.1 ก) การถ่ายเทมวลสารจะผ่านทาง accretion disc จุดที่สสารจากดาวมวลต่ำสัมผัสกับขอบด้านนอกของ disc จะทำให้เกิดการส่องสว่างขึ้นเรียกว่า จุดสว่าง (bright spot) แต่ในทางตรงข้ามกัน ถ้าดาวแคระขาวมีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้เกิดการก่อตัวของ disc สสารก็จะเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กไปสู่ขั้วของดาวแคระขาว (รูปที่ 2.1 ข)

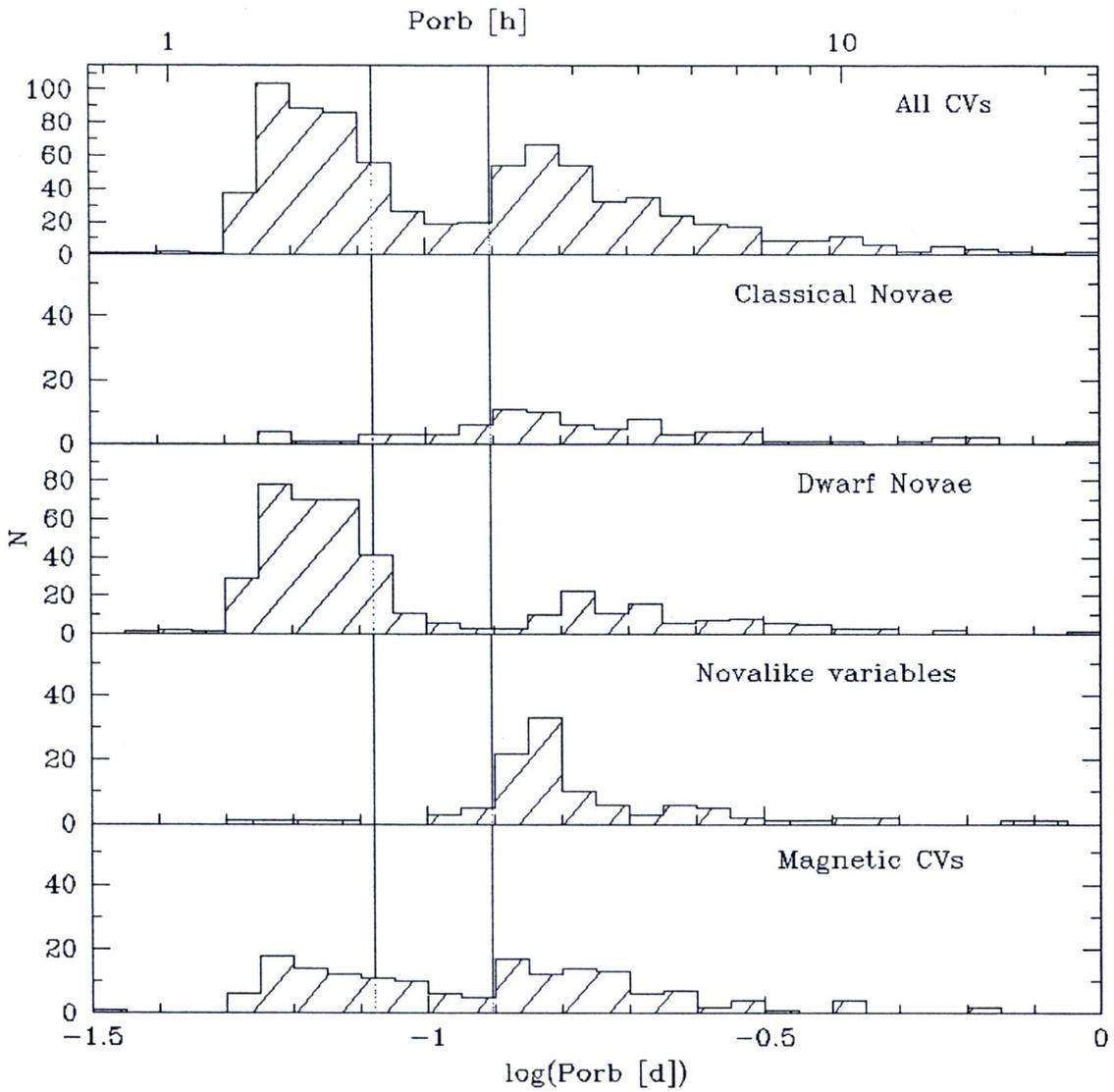


รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของ (ก) CV ที่มีสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มน้อยหรือไม่มีสนามแม่เหล็กเลย และ (ข) CV ที่มีสนามแม่เหล็กมีความเข้มมาก ในกรณีที่ระบบมีสนามแม่เหล็กน้อยหรือไม่มีสนามแม่เหล็กเลย accretion disc จะก่อตัวขึ้นรอบ ๆ ดาวแคระขาว สสารที่ถูกถ่ายเทมาจะตกลงที่ขอบนอกของ accretion disc ส่งผลให้เกิดจุดสว่าง (bright spot) ในกรณีที่ระบบมีสนามแม่เหล็กความเข้มมาก จะสามารถยับยั้งการก่อตัวของ accretion disc ได้ สสารก็จะเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กไปสู่ขั้วของดาวแคระขาว (ดัดแปลงจาก Aungwerojwit 2007)

2.2 การกระจายตัวของคาบการโคจร (orbital period distribution) ของ CV

เนื่องจากแบบจำลองมาตรฐานของวิวัฒนาการของ CVs ทำนายว่า CVs มีวิวัฒนาการจากคาบการโคจรยาวไปหาคาบการโคจรสั้น ดังนั้น orbital period distribution ของ CVs ที่ได้จากการสังเกตจึงเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองมาตรฐานของวิวัฒนาการของ CVs รูปที่ 2.2 (บน) แสดง orbital period distribution ของ CVs ที่ค้นพบก่อนหน้านี้ รวมทั้งหมด 820 ระบบจาก Ritter & Kolb catalogue (2010, Edition 7.12) ซึ่ง period distribution ดังกล่าว มีลักษณะที่เห็นได้ชัดดังต่อไปนี้ คือ

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



รูปที่ 2.2 (รูปบน) orbital period distribution ของ CVs ทั้งหมด 820 ระบบ จาก Ritter & Kolb (2010, Edition 7.12) (รูปล่างทั้ง 4 รูป) orbital period distribution ของ CVs ในแต่ละประเภท

Gänsicke (2005) แสดงให้เห็นว่าผลของการเลือกสังเกต (observational selection effects) มีผลกับจำนวน CVs ในแต่ละประเภท โดยจำแนก CVs ใน period distribution ตามวิธีที่ถูกลักษณะ ดังต่อไปนี้

1. การแปรค่าความสว่างของระบบ (variability)
2. การปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ (X-ray emission)
3. การเป็นวัตถุสีน้ำเงิน (blue colour objects)
4. สมบัติทางสเปกโตรสโคปี (spectroscopic characteristic)

และพบว่า CVs ที่ถูกค้นพบโดยวิธีที่ 1 (variable CVs) ประกอบด้วย dwarf novae/classical novae มากถึง 85% (ดูรายละเอียดการจำแนกประเภทของ CVs ในหัวข้อถัดไป) ส่วน CVs ที่ถูกค้นพบโดยวิธีที่ 2 (X-ray CVs) ประกอบด้วย CVs ที่มีสนามแม่เหล็ก (magnetic CVs) มากกว่า 50% และ CVs ที่ถูกค้นพบโดยวิธีที่ 3 (colour-selected CVs) ประกอบด้วย novalike variable เกือบ 50% ส่วน CVs ที่ถูกค้นพบโดยวิธีที่ 4 (spectroscopic CVs) ประกอบด้วย CVs ประเภทต่างๆ อย่างละเท่าๆ กัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการคัดเลือก CVs โดยอาศัยสมบัติทางสเปกโตรสโคปีเป็นวิธีที่ปราศจากผลของการเลือกสังเกต

การสร้างแบบจำลองมาตรฐานของวิวัฒนาการของ CVs จะประสบความสำเร็จก็ต่อเมื่อสามารถอธิบายลักษณะสำคัญของ period distribution จากการสังเกต ซึ่งต้องสอดคล้องกับ period distribution ของ CVs ประเภทต่างๆ ที่ปราศจากผลของการเลือกสังเกต

2.3 การจำแนกประเภทของ CV

เราสามารถจำแนก CVs ตามสมบัติทางกายภาพที่สังเกตได้ ดังนี้

2.3.1 Classical novae

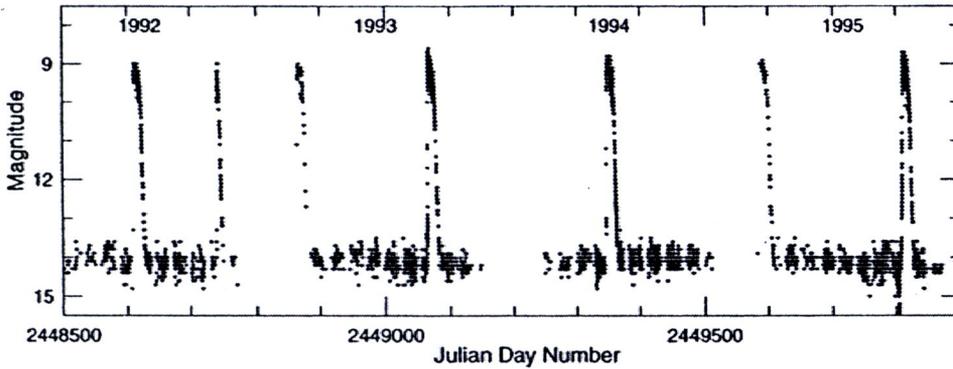
เป็น CV ประเภทที่มีความสว่างมากที่สุด ในระหว่างที่เกิดการระเบิดระบบจะสว่างขึ้น 6-19 แมกนิจูด การระเบิดในแต่ละครั้งระบบจะสว่างยาวนานเป็นสัปดาห์ถึงยาวนานเป็นปี สาเหตุที่ทำให้เกิดการระเบิดนี้เกิดจาก ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ของไฮโดรเจนที่สะสมอยู่บนผิวของ accretion disc ของดาวแคระขาว ที่ระบบมีอัตราในการส่งถ่ายมวลต่ำกว่า 10^9 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี (Cassisi et al. 1998) เมื่อ accretion disc ขยายใหญ่ขึ้นจนมีความร้อนและหนาแน่นมากพอจะทำให้เกิดการลุกไหม้ของไฮโดรเจน ซึ่งทำให้เกิดการระเบิดขึ้น การระเบิดซ้ำอีกรอบของ classical novae ใช้เวลาประมาณ $10^3 - 10^4$ ปี (Patterson 1984; Downes 1986) นั่นคือ ในหนึ่งช่วงชีวิตคนเราจะสามารถสังเกต classical nova หนึ่งๆ เกิดการระเบิดได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น จาก Ritter & Kolb catalogue (2003, Edition 7.5) แสดงให้เห็นว่าจำนวนประชากรของ CVs ประเภทนี้มีประมาณ 12% ของจำนวนประชากรทั้งหมดของ CVs (รูปที่ 2.2 หน้าต่างที่ 2) มีคาบการโคจรตั้งแต่ 1.4 - 16 ชั่วโมง โดยพบมากที่สุดช่วงคาบการโคจร 3-5 ชั่วโมง (Diaz & Bruch 1997; Warner 2002)

2.3.2 Dwarf novae

เป็นกลุ่มย่อยของ CVs ที่มีจำนวนมากที่สุด (ประมาณ 46% ของ CVs ทั้งหมด) CVs ประเภทนี้ ประกอบด้วยดาวแคระขาวที่ไม่มีสนามแม่เหล็กหรือประกอบด้วยดาวแคระขาวที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กระดับอ่อน (<1 เมกกะเกาส์) dwarf novae จะถูกสังเกตพบในขณะที่มีการระเบิด ซึ่งจะเกิดขึ้นเป็นประจำ โดยระบบจะสว่างขึ้นประมาณ 2-5 แมกนิจูด การระเบิดในแต่ละครั้งระบบจะสว่างยาวนานเป็นวันถึงยาวนานเป็นสัปดาห์ การระเบิดซ้ำอีกรอบของ dwarf novae ใช้

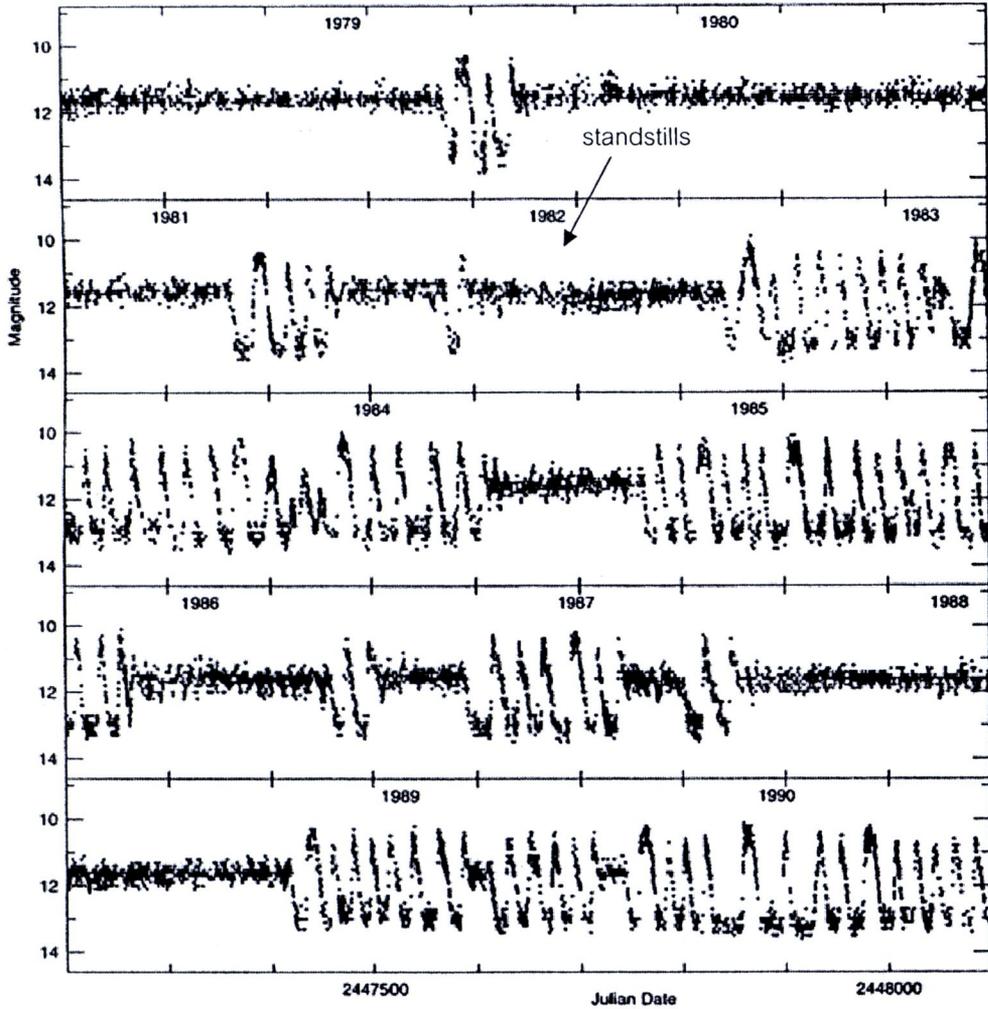
เวลาเป็นสัปดาห์ถึงเป็นปี สาเหตุของการระเบิดนี้เกิดจากการไม่เสถียรทางความร้อน (thermal instability) ใน accretion disc ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออนเพียงบางส่วน เราสามารถแบ่ง dwarf novae ตามลักษณะของการระเบิด ได้ 3 กลุ่มย่อย ดังนี้

1. dwarf novae ประเภท U Gem dwarf novae ประเภทนี้มีแสดงการระเบิดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งไม่แสดงลักษณะของ dwarf novae ประเภท Z Cam และ SU UMa เราพบว่า U Gem ส่วนใหญ่มีคาบการโคจรอยู่ในช่วงที่มากกว่า period gap



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างกราฟแสงของ dwarf novae ประเภท U Gem (ดัดแปลงจาก Hellier 2001)

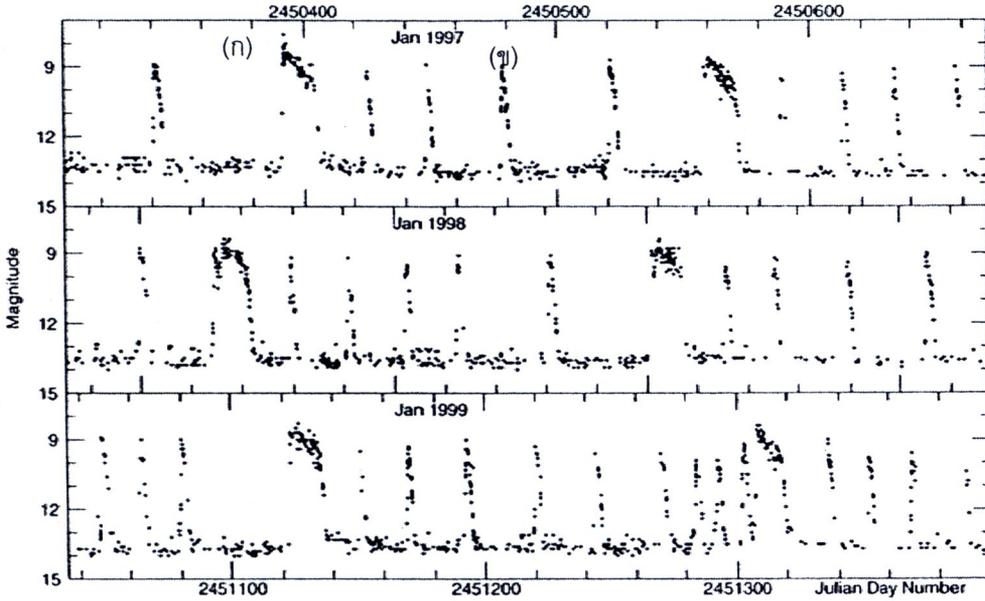
2. dwarf novae ประเภท Z Cam dwarf novae ประเภทนี้มีลักษณะการระเบิดอย่างฉับพลันแทรกอยู่ระหว่างความสว่างที่ค่อนข้างคงที่ซึ่งวางตัวอยู่ในระดับกึ่งกลางระหว่างความสว่างสูงสุดและต่ำสุดของการระเบิด ซึ่งเรียกว่า standstills (ดังรูปที่ 2.4) โดยทั่วไป standstills จะสลัวกว่าความสว่างสูงสุดประมาณ 0.7 แมกนิจูด การระเบิดในแต่ละครั้งระบบจะสว่างยาวนานเป็น 10 วันถึงเป็นปี Smak (1983) เสนอว่า Z Cam เป็นดาวที่แสดงสมบัติอยู่ระหว่าง novaelike variable และ dwarf novae ที่มีอัตราการส่งถ่ายมวลอยู่ในช่วงค่าวิกฤต จะทำให้มันเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นจาก CV ประเภทหนึ่งเป็นอีกประเภทหนึ่งได้ (เช่น Schreiber et al. 2002) dwarf novae ชนิดนี้ มีคาบการโคจรอยู่ในช่วงที่มากกว่า period gap



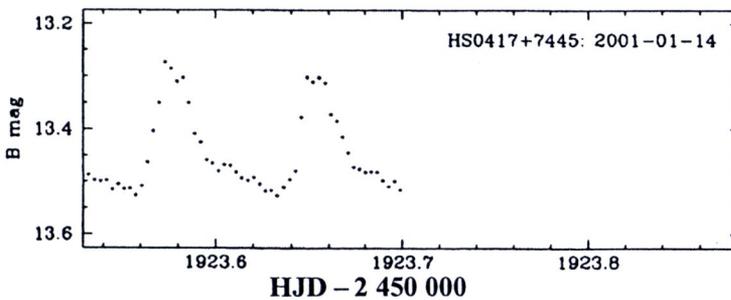
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟแสงของ dwarf novae ประเภท Z Cam
(ดัดแปลงจาก Hellier 2001)

3. dwarf novae ประเภท SU UMa เป็น dwarf novae ที่มีการระเบิดใหญ่ (superoutbursts) เป็นครั้งคราว นอกเหนือจากการระเบิดแบบปกติ โดยการระเบิดใหญ่จะเกิดขึ้นน้อยกว่าการระเบิดแบบปกติแต่จะมีความสว่างมากกว่าประมาณ 0.7 แมกนิจูด และมีระยะของการระเบิดที่ยาวนานกว่าถึง 5 เท่า (ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5) ในระหว่างที่มีการระเบิดใหญ่ เราสามารถพบโครงสร้างที่เรียกว่า superhump (ดังรูปที่ 2.6) ซึ่งเกิดจากรูปร่างที่บิดเบี้ยวของ accretion disc ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดไทดัลจากดาวมวลต่ำ (Whitehurst 1988; Hirose & Osaki 1990; Lubow 1991) โดยทั่วไปคาบของ superhump (superhump period) จะยาวนานกว่าคาบการโคจรของระบบ (orbital period) เล็กน้อย การระเบิดใหญ่ซ้ำอีกครั้งจะเกิดขึ้นภายในช่วงเวลา 200-300 วัน แต่บางระบบ เช่น ดาว ER UMa มีคาบการระเบิดใหญ่ทุกๆ 20-50 วัน และหลังจากนั้นจะเกิดการระเบิดแบบปกติต่อเนื่องทันที โดยการระเบิดแบบปกติจะเกิดซ้ำทุก 2-3 วัน ส่วนดาว WZ Sge จะมี

การระเบิดใหญ่ไม่บ่อยนักโดยอยู่ในช่วง 2-3 ปี จนถึงหลายสิบปี และในระหว่างนั้นจะไม่มีการระเบิดแบบปกติเกิดขึ้นเลย โดย dwarf novae ชนิด SU UMa ทั้งหมดมีคาบการโคจรอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า period gap



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟแสงของ dwarf novae ประเภท SU UMa ในขณะที่เกิด (ก) การระเบิดใหญ่ (superoutbursts) และ (ข) การระเบิดแบบปกติ (normal outbursts) (ดัดแปลงจาก Hellier 2001)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ superhump ในระหว่างที่มีการระเบิดใหญ่ (ดัดแปลง จาก Aungwerojwit et al. 2006)

2.3.3 Novalike variables

CVs ประเภทนี้เป็น CVs ซึ่งไม่มีการระเบิดให้เห็น (non-eruptive CVs) มีทั้งหมดประมาณ 15% ของระบบทั้งหมด ลักษณะพิเศษของ novalike variables คือ เป็น CVs ประเภทที่มีความสว่างค่อนข้างคงที่ เนื่องจากมีอัตราการส่งถ่ายมวลที่สูงเกินกว่าค่าวิกฤติของความไม่เสถียรของ accretion disc (disc instability) เป็นผลให้ระบบเกิดการระเบิดอย่างถาวรเรียกว่า “permanent outburst” เราแบ่ง novalike variables ออกเป็นหลายประเภทเช่น UX UMa, RW Tri, VY Scl และ SW Sex โดย CVs ประเภทนี้พบมากในช่วงคาบการโคจร 3-5 ชั่วโมง (รูปที่ 2.2 หน้าต่างที่ 4)

2.3.4 Magnetic CVs

CVs ประเภทนี้เป็นระบบที่ประกอบด้วยดาวแคระขาวที่มีสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มตั้งแต่ 1-200 เมกะเกาส์ ซึ่งจะมีผลต่อมวลสารที่ถ่ายเทมายังดาวแคระขาว magnetic CVs มีจำนวนประมาณ 22% ของ CVs ทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามความเข้มของสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว

1. Polars หรือ AM Her ประกอบด้วยดาวแคระขาวที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ในช่วง 10-200 เมกะเกาส์ ด้วยความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับนี้ ทำให้มวลสารที่ถูกส่งถ่ายมาจากดาวมวลต่ำจะไม่สามารถก่อตัวเป็น accretion disc รอบๆ ดาวแคระขาวได้ แต่ในทางตรงข้ามกัน สสารจะเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กไปยังขั้วของดาวแคระผ่าน shock standing เนื้อพื้นผิวของดาวแคระขาว ทำให้ Polars เป็นแหล่งกำเนิดของรังสีเอ็กซ์ สมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งของ Polars คือ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงของดาวแคระขาวจะกระทำกับสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มอ่อนกว่าของดาวมวลต่ำ ทำให้การหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาวถูกล็อคให้มีการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กับการเคลื่อนที่ของระบบ หรือ $P_{\text{spin}} = P_{\text{orb}}$ (เมื่อ P_{spin} คือ คาบการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว (spin period) และ P_{orb} คือ คาบการโคจรของระบบ (orbital period)) คาบการโคจรของ Polar นั้นจะอยู่ในช่วงน้อยกว่า period gap

2. Intermediate polars (IPs) หรือดาว DQ Her เป็นระบบที่สนามแม่เหล็กของดาวแคระขาวมีความเข้มอ่อนกว่าชนิด polars โดยมีความเข้มตั้งแต่ 1-10 เมกะเกาส์ ซึ่งความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับนี้ไม่สามารถรบกวนมวลสารที่ถ่ายเทมาจากดาวมวลต่ำทั้งหมดได้ จึงทำให้สสารก่อตัวเป็น accretion disc รอบๆ ดาวแคระขาว โดยที่สสารด้านในของ accretion disc จะถูกรบกวนโดยสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว โดยทั่วไป อัตราการส่งถ่ายมวลใน IPs จะสูงกว่าใน Polars จึงทำให้ IPs เป็นแหล่งของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานสูงกว่าที่พบใน Polars เนื่องจากสนามแม่เหล็กของดาวแคระขาว ใน IPs มีค่าน้อยกว่า Polars มาก ดังนั้นดาวแคระขาวใน IPs จึงไม่ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับระบบ นั่นคือ ไม่เกิดการหมุนแบบ synchronous Patterson (1994) พบว่า การหมุนรอบตัวเองส่วนใหญ่มีค่าเท่ากับ $P_{\text{spin}} \sim 0.1P_{\text{orb}}$ ในปัจจุบันมีการค้นพบ IPs ซึ่งได้รับการยืนยันแล้วประมาณ 30 ระบบ โดยมีคาบการโคจรอยู่ในช่วงที่มากกว่า period gap (Norton et al. 2004; Gänsicke et al. 2005a)

2.4 แบบจำลองของโรซ

ในระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด (close binary system) ลักษณะและรูปร่างของระบบจะถูกอธิบายได้โดย equipotential surface ซึ่งเป็นบริเวณที่ศักย์หรือแรงกระทำมีค่าเท่ากันตลอดผิว ซึ่งพิจารณาได้จากผลรวมของพลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วง (gravitational potentials) ของดาวสองดวงและ พลังงานศักย์เนื่องจากการหมุน (rotational potential) ของระบบ รูปร่างของ equipotential surface ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนมวล (mass ratio; $q = M_2/M_1$) ของระบบเพียงอย่างเดียว และขนาดที่แท้จริงของ equipotential surface จะขึ้นอยู่กับคาบการโคจรหรือค่าการแยกของระบบ (binary separation, a) รูปที่ 2.7 แสดงภาคตัดขวางของ equipotential surface ในระนาบของการโคจรของดาวสองดวง โดยที่ M_1 คือมวลของดาวปฐมภูมิ (primary star) และ M_2 คือมวลของดาวทุติยภูมิ (secondary star) ถ้าดาวมีรัศมีน้อย รูปร่างของดาวจะเป็นทรงกลมและดาวทั้งสองจะแยกกันอย่างชัดเจน แสดงได้ดัง equipotential surface ที่อยู่ใกล้บริเวณ M_1 และ M_2 สำหรับดาวที่มีขนาดใหญ่ขึ้นรูปร่างของดาวจะไม่เป็นทรงกลมและถูกทำให้บิดเบี้ยวไปตาม equipotential surface ของดาว เราเรียก equipotential surface ดาว 2 ดวงที่แตะกันที่จุด L_1 หรือ inner Lagrangian point ว่าผิวห่อหุ้มของโรซ (มีลักษณะคล้ายเลขแปดตะแคง) โดยผิวที่ห่อหุ้มของโรซเป็นตัวกำหนดปริมาตรสูงสุดของดาวแต่ละดวงในระบบและสสารที่สมาชิกแต่ละดวงจะสามารถครอบครองไว้ได้ภายใต้แรงดึงดูดของตนเอง ถ้าสมาชิกดวงใดดวงหนึ่งมีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ จะมีการถ่ายเทมวลสารไปยังคู่ของมันผ่านทางจุด L_1 โดยระบบที่มีสมาชิกดวงหนึ่งเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ เรียกว่า ระบบดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน (semi-detached binary system) เช่น CV เป็นต้น และเรียกระบบที่มีสมาชิกทั้งสองดวงเต็มผิวห่อหุ้มของโรซว่า ระบบดาวคู่แบบแตะกัน (contact binary system) สำหรับระบบที่มีสมาชิกทั้งสองดวงยังไม่เต็มผิวห่อหุ้มของโรซ เรียกว่า ระบบดาวคู่แบบแยกกัน (detached binary system)

ใน CVs ดาวมวลต่ำเป็นดาวที่มีขนาดเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ และถ่ายเทมวลสารไปยังผิวห่อหุ้มของโรซของดาวแคระขาวผ่านทางจุด L_1 โดยที่รัศมีของผิวห่อหุ้มของดาวทั้งสองดวงเป็นไปตามการประมาณการของ Eggleton (1983) นั่นคือ

$$\frac{R_{L_1}}{a} = 0.5 - 0.227 \log q \tag{2.1}$$

และ

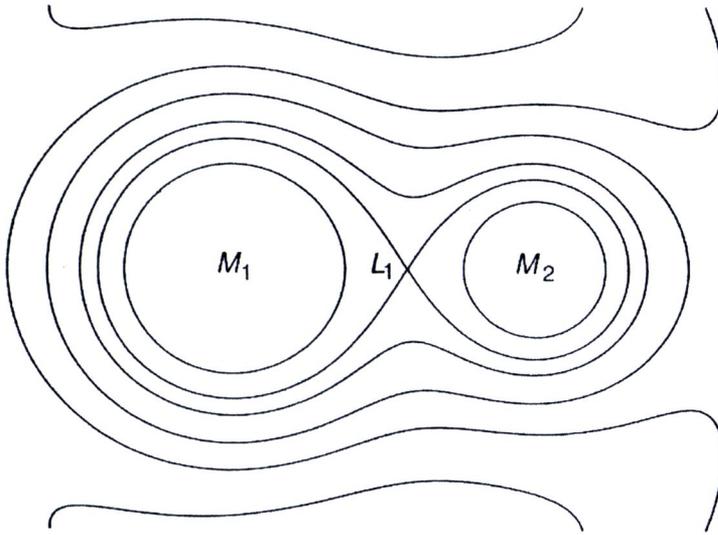
$$\frac{R_{L_2}}{a} = \frac{0.49 q^{2/3}}{0.6 q^{2/3} + \ln(1+q)^{1/3}} \tag{2.2}$$

- เมื่อ R_{L_1} = รัศมีของผิวห่อหุ้มของโรซของดาวแคระขาว
- R_{L_2} = รัศมีของผิวห่อหุ้มของโรซของดาวมวลต่ำ
- q = อัตราส่วนมวล = M_2/M_1
- a = ค่าการแยกของระบบซึ่งหาได้จากได้จากกฎข้อที่ 3 ของเคปเลอร์

$$P_{orb}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)} \quad (2.3)$$

หรือ

$$a = 3.35 \times 10^{10} \left(\frac{M_1}{M_\odot} \right)^{1/3} (1+q)^{1/3} P_{orb}^{2/3} \text{ (h)} \quad \text{cm.} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.7 equipotential surface ของระบบดาวคู่ (จาก Hellier 2001)

2.5 การถ่ายเทมวลสารของ CVs

การส่งถ่ายมวลที่เกิดขึ้นระหว่างดาวสองดวงในระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด มีผลทำให้ขนาดของผิวห่อหุ้มของโรซและคาบการโคจรของระบบเปลี่ยนไป ในบริบทของ CVs การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นใน 2 ช่วงที่ต่างกันของวิวัฒนาการ นั่นคือ ช่วงก่อนการเป็น CV (pre-CV phase) และช่วงที่เป็น CV (CV phase) (ดูหัวข้อ 2.6 สำหรับวิวัฒนาการของระบบเหล่านี้) ในช่วงก่อนการเป็น CV ระบบประกอบด้วย ดาวในแถบขบวนหลัก (main-sequence) ที่มีมวลต่างกันเล็กน้อย 2 ดวง เมื่อสมาชิกที่มีมวลมากกว่ามีวิวัฒนาการออกจากแถบขบวนหลัก มันจะขยายตัวเติมผิวห่อหุ้มของโรซ และถ่ายเทมวลสารให้กับสมาชิกดวงที่มีมวลน้อยกว่า เนื่องจากดาวมวลมากที่มีมวลเติมผิวห่อหุ้มของโรซ อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางมวลของระบบ ดังนั้นมวลสารที่ถูกถ่ายเทไปยังดาวมวลน้อยจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไกลออกไปจากจุดศูนย์กลางมวล ทำให้โมเมนตัมเชิงมุมของสสารเพิ่มขึ้น เพื่อที่จะอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม ค่าการแยกกันของระบบ (a) จะลดลง ทำให้ผิวห่อหุ้มของโรซลดลง ตามสมการ (2.1) และ (2.2) เป็นผลทำให้สสารล้นผิวห่อหุ้มของโรซของดาวทั้งสองดวง ทำให้เกิดผิวห่อหุ้มร่วม (common envelope) ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เสถียร ดังนั้นการถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้จะ



เป็นไปอย่างรวดเร็วและรุนแรง สำหรับ CVs มวลสารจะถูกถ่ายเทจากดาวมวลต่ำในแถบชนวนหลัก ไปสู่ดาวแคระขาว ในกรณีนี้ดาวมวลต่ำอยู่ไกลจากศูนย์กลางมวล ดังนั้นมวลสารที่ถูกถ่ายมาจะ ลื่นสุดใกล้ๆ กับจุดศูนย์กลางมวล เป็นสาเหตุให้มวลสารที่ถูกถ่ายเทมานั้นสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม และเพื่อที่จะอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม ค่าการแยกของระบบ (a) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ผิวห่อหุ้มของ โรหมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ดาวมวลต่ำไม่เต็มผิวห่อหุ้มของโรห ทำให้การถ่ายเทมวลหยุดลง การ ถ่ายเทมวลของ CVs จะดำเนินต่อไปได้ ถ้าดาวมวลต่ำมีการขยายตัวจนเต็มผิวห่อหุ้มของโรห ซึ่งเป็นผลมาจากวิวัฒนาการทางนิวเคลียร์ของดาวมวลต่ำ หรืออาจจะเป็นการหดตัวของผิวห่อหุ้ม ของโรห อันเนื่องมาจากการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมผ่านกระบวนการ magnetic braking หรือ gravitational radiation แต่อย่างไรก็ตามเราพบว่า ดาวที่มีมวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรหใน CVs ส่วน ใหญ่ เป็นดาวมวลต่ำที่มีมวลน้อยกว่ามวลดวงอาทิตย์ ซึ่งต้องใช้เวลาอันเกินกว่าอายุของเอกภพ เพื่อที่จะมีวิวัฒนาการเข้าสู่ช่วงที่มีการขยายตัวตามวิวัฒนาการทางนิวเคลียร์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดงานวิจัย
 วันที่..... 7 S.A. 2555
 เลขทะเบียน..... 190957
 เลขเรียกหนังสือ.....

2.6 วิวัฒนาการของ CVs

2.6.1 วิวัฒนาการช่วงก่อนการเป็น CVs

CVs เป็นระบบที่มีวิวัฒนาการมาจาก post common envelope binaries (PCEBs) ระบบ เหล่านี้มีวิวัฒนาการมาจากระบบดาวคู่ที่อยู่ห่างกัน (wide binaries) ซึ่งผ่านการสูญเสียโมเมนตัม เชิงมุมในช่วง common envelope (Paczynski 1976; Iben & Livio 1993; Iben & Tutukov 1993) มวลเริ่มต้นของดาวทั้งสองใน PCEBs ประกอบด้วยดาวที่มีมวลขนาดกลางๆ ในแถบชนวนหลัก (~1- 10 เท่าของมวลดวงอาทิตย์) เรียกว่า ดาวปฐมภูมิ (primary star) และดาวมวลต่ำในแถบชนวน หลัก (≤ 1 เท่าของมวลดวงอาทิตย์) เรียกว่า ดาวทุติยภูมิ (secondary star) ซึ่งมีคาบการโคจรหลาย สิบปี ดาวปฐมภูมิมีวิวัฒนาการเร็วกว่า กลายเป็นดาวยักษ์แดงซึ่งขยายเต็มผิวห่อหุ้มของโรห การ ถ่ายเทมวลสารจากดาวมวลมากไปสู่ดาวมวลน้อยเป็นขบวนการที่ไม่เสถียรผลของการถ่ายเทมวล สารด้วยอัตราสูง ซึ่งอาจมากถึง 0.1 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี จะทำให้ดาวทุติยภูมิอยู่ในสภาวะ ไม่สมดุลทางความร้อน ทำให้เกิดการขยายตัวเต็มและล้นผิวห่อหุ้มของโรห เกิดเป็นช่วง common envelope แรงเสียดทานระหว่าง envelope และระบบ ทำให้ดาวทั้งสองถ่ายเทโมเมนตัมเชิงมุม ให้กับ envelope และเริ่มหมุนเข้าหากัน ผลลัพธ์คือ ค่าการแยกของระบบจะลดลงจากประมาณ 100 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ เหลือประมาณ 1 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ ภายในเวลา 10^3 ปี ถ้าพลังงาน ของ envelope มีมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว common envelope จะถูกทำให้กระจายออกไปสู่อวกาศระบบอาจจะปรากฏให้เห็นเป็นเนบิวลาดาวเคราะห์ (planetary nebula) ที่มีระบบดาวคู่ที่ ประกอบด้วย subdwarf หรือดาวแคระขาวกับดาวมวลต่ำในแถบชนวนหลักอยู่ตรงกลาง เช่น MT Ser (Grauer & Bond 1983; Green et al. 1984), UU Sge (Miller et al. 1976; Pollacco & Bell 1993, 1994), Abell 65 (Hilditch et al. 1996), and KV Vel (Hilditch et al. 1996; Wood et al. 1995; Ferguson et al. 1999) เมื่อเปลือกของเนบิวลาดาวเคราะห์ค่อยๆ กระจายตัวสู่อวกาศ ดาว ปฐมภูมิจะค่อยๆ เย็นตัวลงและวิวัฒนาการสู่ดาวแคระขาว ซึ่งทำให้ระบบกลายเป็นระบบดาวคู่แบบ

แยกกันคาบการโคจรสั้น ที่ประกอบด้วยดาวแคระขาวและดาวมวลต่ำในแถบชนวนหลัก ระบบจะมีวิวัฒนาการไปเป็น CVs เมื่อมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมผ่าน magnetic braking และ/หรือ gravitational radiation ซึ่งจะทำให้ค่าการแยกกันของระบบลดลงจนกระทั่งทำให้ดาวทุติยภูมิสัมผัสกับผิวห่อหุ้มของโรซ และเริ่มถ่ายเทมวลสารสู่ดาวแคระขาว ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาประมาณ 2 พันล้านปี (Schreiber & Gänsicke 2003)

2.6.2 Disrupted magnetic braking

disrupted magnetic braking เป็นแบบจำลองที่สร้างเพื่ออธิบายการขาดแคลนของระบบที่มีคาบการโคจรในช่วง 2-3 ชั่วโมง หรือ period gap ในรูปที่ 2.2 (Rappaport et al. 1983; Spruit & Ritter 1983; Paczynski & Sienkiewicz 1983; Patterson 1984) ใจความสำคัญของแบบจำลองนี้คือ CVs มีวิวัฒนาการไปทางที่มีคาบการโคจรสั้นลง อันเนื่องมาจากผลของการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยสองกลไกหลัก คือ magnetic braking (Verbunt & Zwaan 1981) และ gravitational radiation (Kraft et al. 1962) ขึ้นอยู่กับการโคจรของระบบ โดยที่กระบวนการ magnetic braking ซึ่งเป็นการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมเนื่องจาก stellar wind และสนามแม่เหล็กของดาวทุติยภูมิที่มีการหมุนรอบตัวเองอย่างรวดเร็ว กระบวนการดังกล่าวจะมีอิทธิพลกับระบบที่มีคาบการโคจรมากกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งในขณะนั้นดาวมวลน้อยยังเป็นดาวที่มีแกนกลางเป็น radiative core ส่วนกระบวนการ gravitational radiation นั้นจะมีอิทธิพลต่อระบบที่มีคาบการโคจรน้อยกว่า 2 ชั่วโมง

ที่คาบการโคจรมากกว่า 3 ชั่วโมงขึ้นไป มีอัตราการถ่ายเทมวลสารประมาณ $10^{-9} - 10^{-8}$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ส่งผลให้ดาวมวลต่ำอยู่ในสภาวะไม่สมดุลทางความร้อน ทำให้ดาวขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่คาบการโคจรประมาณ 3 ชั่วโมง ดาวมวลต่ำจะกลายเป็นดาวที่มีการถ่ายเทความร้อน/พลังงานแบบการพาความร้อน (convective star) (ที่มีมวลประมาณ 0.2-0.3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์) อย่างสมบูรณ์ ทำให้กระบวนการ magnetic braking สิ้นสุดลงหรือลดลงอย่างมาก (Rappaport et al. 1983; Spruit & Ritter 1983; Taam & Spruit 1989) ผลที่ตามมาคือ ทำให้อัตราการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมลดลงและทำให้การส่งถ่ายมวลลดลงด้วยเช่นกัน ทำให้ดาวทุติยภูมิหรือดาวที่มวลเต็มผิวห่อหุ้มของโรซมีเวลาปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน ทำให้ดาวหดตัวลงและมีรัศมีเหมือนดาวในแถบชนวนหลักทั่วไป ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าผิวห่อหุ้มของโรซ ในที่สุดการส่งถ่ายมวลก็จะสิ้นสุดลงอย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ระบบเริ่มเข้าสู่ช่วง period gap ที่คาบการโคจรประมาณ 3 ชั่วโมงนี้ CVs ในช่วงนี้จะกลายเป็นระบบที่แยกกัน จึงทำให้ยากต่อการสังเกตการณ์ (ทำให้ระบบในช่วง period gap มีจำนวนน้อย) หลังจากนั้นกระบวนการ gravitational radiation จะมีอิทธิพลทำให้ระบบมีวิวัฒนาการสู่คาบการโคจรที่สั้นลง และเมื่อผิวห่อหุ้มของโรซหดตัวลงจนสามารถสัมผัสกับดาวมวลต่ำได้อีกครั้งหนึ่งที่คาบการโคจรประมาณ 2 ชั่วโมง การส่งถ่ายมวลก็จะเริ่มขึ้นอีกครั้ง และที่คาบการโคจรที่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง การส่งถ่ายมวลก็ยังคงเกิดจากกระบวนการ gravitational radiation ด้วยอัตราที่ลดลงเหลือเพียง $10^{-11} - 10^{-10}$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ซึ่ง

อัตราการถ่ายเทมวลที่ต่ำเช่นนี้ทำให้วิวัฒนาการของระบบที่มีคาบการโคจรสั้นยาวนานกว่าในช่วง magnetic braking มาก โดยทั่วไปเวลาที่ CVs ใช้ในการวิวัฒนาการจากคาบการโคจรประมาณ 10 ชั่วโมงถึงคาบการโคจรประมาณ 3 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 10^8 ปี และประมาณ 10^9 ปี ในการวิวัฒนาการผ่าน period gap นั้น Kolb และ Stehle (1996) ได้คำนวณโครงสร้างทางอายุของ CVs ในระนาบกาแลคติกโดยใช้แบบจำลองมาตรฐาน พบว่า ระบบที่มีคาบการโคจรที่มากกว่า period gap นั้นมีอายุน้อยกว่า 1.5×10^9 ปี ในขณะที่ระบบที่มีคาบการโคจรน้อยกว่า period gap มีอายุถึง $3-4 \times 10^9$ ปี

ที่คาบการโคจรน้อยกว่า 2 ชั่วโมง ดาวมวลต่ำจะเหลือมวลน้อยกว่า 0.08 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ปฏิกริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวชันของไฮโดรเจนจะหยุดลง แต่ดาวมวลต่ำยังมีวิวัฒนาการต่อไปและเริ่มมีพฤติกรรมที่คล้ายกับดาวแคระขาว โดยมีรัศมีเพิ่มขึ้น แต่มีมวลลดลง ผลที่ตามมาคือทำให้เกิด CVs ที่มีคาบการโคจรที่สั้นที่สุด (period minimum) ที่ประมาณ 65 นาที (Kolb & Ritter 1992; Howell et al. 1997; Kolb & Baraffe 1999) ภายในเวลาประมาณ 10^9 ปี CVs จะมีวิวัฒนาการวกกลับสู่คาบการโคจรยาว ด้วยอัตราการถ่ายเทมวลสารที่ลดลงอย่างมากจากประมาณ 10^{-10} เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปีไปเป็นประมาณ 10^{-12} เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ซึ่งใช้เวลาประมาณ 10^{10} ปี และระบบจะสลัวเกินกว่าที่จะสังเกตเห็น ในที่สุดมวลของดาวทุดิยภูมิจะลดลงเหลือประมาณมวลของดาวพฤหัสบดี (Jupiter-like object) ซึ่งโคจรรอบๆ ดาวแคระขาว ตัวอย่างของ CVs ที่เชื่อว่ามีวิวัฒนาการผ่าน period minimum มาแล้วคือ WZ Sge ซึ่งมีคาบการโคจรประมาณ 81.6 นาที และดาวทุดิยภูมิมีมวลประมาณ 0.06 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (Smak 1993; Patterson et al. 2002)

2.7 วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (Heliocentric Julian Date: H.J.D.)

วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ คือ เวลาทางดาราศาสตร์ที่นับจำนวนเป็นวัน มีค่าบ่งเวลาของวันในรูปของทศนิยมของวัน เริ่มนับวันใดวันหนึ่งในอดีตเป็นเวลาเริ่มต้น มีดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลางคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$H.J.D. = J.D. + \Delta t \tag{2.5}$$

เมื่อ H.J.D. เป็นวันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ J.D. เป็นวันจูเลียน (Julian date) ที่มีความหมายเหมือนกันกับวันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะแต่ใช้การกำหนดวันโดยโลกเป็นศูนย์กลาง (Geocentric) ซึ่งวันจูเลียนคำนวณได้จากสมการ (2.6)

$$J.D. = 2415020 + 365 (\text{ปี ค.ศ.} - 1900) + \text{จำนวนวันนับจากวันเริ่มต้นปีใหม่} \\ + \text{จำนวนปี ค.ศ. ที่หารด้วย 4 ลงตัวนับตั้งแต่ปี ค.ศ.1900} - 0.5 \tag{2.6}$$

และ Δt เป็นผลต่างของเวลาที่แสงใช้เดินทางข้ามวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นวัน คำนวณได้จากสมการ (2.7)

$$\Delta t = -0.0057755[(\cos\delta\cos\alpha)X + (\tan\varepsilon\sin\delta + \cos\delta\sin\alpha)Y] \quad (2.7)$$

เมื่อ X, Y เป็นพิกัดฉากของดวงอาทิตย์ ณ เวลาที่พิจารณา α, δ เป็นค่าไรแอสเซนชัน (Right Ascension) และเดคลิเนชัน (Declination) ของดาว ณ วันที่พิจารณา ε เป็นค่ามุมเอียงของอิกลิปติก ซึ่งมีค่า $23^{\circ}27'$ ซึ่งค่า X และ Y สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ

$$X = 0.99986\cos L - 0.025127\cos(G - L) + 0.008374\cos(G + L) + 0.000105\cos(2G + L) + 0.000068T\cos(G - L) + 0.000035\cos(2G - L) \quad (2.8)$$

$$Y = 0.917308\sin L + 0.023053\sin(G - L) + 0.007683\cos(G + L) + 0.000097\sin(2G + L) - 0.000057T\sin(G - L) + 0.000032\sin(2G - L) \quad (2.9)$$

เมื่อ T เป็นศตวรรษจูเลียนสัมพัทธ์ (relative Julian century) คำนวณได้จากสมการ (2.10)

$$T = (J.D. - 2415020)/36525 \quad (2.10)$$

L เป็น ค่าลองจิจูดสุริยะเฉลี่ย (mean solar longitude) มีหน่วยเป็นองศา โดย L ต้องมีค่าน้อยกว่า 360° คำนวณได้จากสมการ (2.11)

$$L = 279.696678 + 3600.76892T + 0.000303T^2 - P \quad (2.11)$$

เมื่อ p เป็นค่าการส่าย (precession) ของแกนหมุนโลก จากปี ค.ศ. 1950 ถึงวันที่ทำการสังเกตการณ์ ซึ่งคำนวณค่าการส่ายได้จากสมการ (2.12)

$$p = [1.396041 + 0.000308(T + 0.5)][T - 0.49998] \quad (2.12)$$

และ G เป็นค่าอะนอมัลลีสุริยะเฉลี่ย (mean solar anomaly) มีหน่วยเป็นองศา โดย G ต้องมีค่าน้อยกว่า 360° คำนวณได้จากสมการ (2.13)

$$G = 358°.475833 + 35999.04975T - 0.00015T^2 \quad (2.13)$$

2.8 เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรี

ดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรีเป็นเทคนิคการวัดค่าความสว่างของดาว 2 ดวงใดๆ เทียบกัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการแปรค่าความสว่างตามเวลา การพิจารณาดาวแปรแสง (variables stars), ดาวคู่อุปราคา (eclipsing binaries) หรือวัตถุบนท้องฟ้าอื่นๆ เช่น ดาวหาง และ ดาวเคราะห์น้อย เป็นต้น โดยข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของผลต่างระหว่างแมกนิจูดของดาวที่ต้องการศึกษากับดาวเปรียบเทียบ (comparison star) ที่อยู่ในเฟรมของภาพถ่ายเดียวกัน ตามสมการ

$$\Delta m = m_{\text{target}} - m_{C_1} \quad (2.14)$$

เมื่อ m_{target} = แมกนิจูดปรากฏของดาวที่ต้องการศึกษา

m_{C_1} = แมกนิจูดปรากฏของดาวเปรียบเทียบ

สิ่งที่สำคัญในการเลือกดาวเปรียบเทียบ คือ ดาวเปรียบเทียบต้องอยู่ไม่ไกล (<1 องศา) จากดาวที่ต้องการศึกษาและดาวเปรียบเทียบที่เลือกต้องไม่แปรแสงและต้องเป็นดาวที่มีความสว่างคงที่หรือไม่มีการแปรแสง ซึ่งสามารถตรวจสอบการแปรแสงของดาวเปรียบเทียบที่เลือกได้จากดาวตรวจสอบ (check star) โดยที่ผลต่างของดาวเปรียบเทียบและดาวตรวจสอบต้องมีค่าคงที่ นั่นคือ

$$m_{C_1} - m_{C_2} = \text{คงที่}$$

เมื่อ m_{C_2} = ดาวตรวจสอบ