

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ระบบดาวคู่ (Binary Systems)

ระบบดาวคู่ เป็นระบบที่ประกอบด้วยสมาชิก 2 ดวง อยู่ภายใต้สนามความโน้มถ่วงซึ่งกันและกัน สมาชิกของระบบดาวคู่แต่ละดวงต่างก็โคจรรอบจุดศูนย์กลางของมวลร่วมกัน ในบรรดาดาวฤกษ์ทั้งหมดพบว่าประมาณครึ่งหนึ่งหรือมากกว่าเป็นระบบดาวคู่

การศึกษาระบบดาวคู่เป็นเรื่องที่น่าสนใจและมีความสำคัญด้วยเหตุผล ดังนี้

(ก) การศึกษาวงโคจรของระบบดาวคู่ทำให้สามารถวัดมวลของดาวฤกษ์ได้อย่างแม่นยำ การทราบมวลของดาวฤกษ์ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของดาวฤกษ์ทำให้นักดาราศาสตร์สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติอื่นๆต่อไปของดาวฤกษ์ได้

(ข) ระบบดาวคู่ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นดาวฤกษ์หลายประเภทไม่ว่าจะเป็น ดาวฤกษ์ปกติ ดาวยักษ์ ดาวยักษ์ใหญ่ ดาวแคระขาว ดาวนิวตรอน หรือแม้แต่หลุมดำ ดังนั้น การศึกษาระบบดาวคู่ทำให้นักดาราศาสตร์มีโอกาสที่จะศึกษาดาวได้หลากหลายประเภท

(ค) ระบบดาวคู่เป็นเสมือนห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่ที่นักดาราศาสตร์สามารถศึกษาค้นคว้า กลไกและปรากฏการณ์ต่างๆ ตลอดจนผลทางกายภาพอันเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสมาชิกในระบบดาวคู่ประเภทต่างๆได้ รวมทั้งความเข้าใจในวงจรชีวิตและแนวทางการวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ได้อย่างถูกต้อง

การจำแนกระบบดาวคู่

ระบบดาวคู่ที่ปรากฏโดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ คือ

1. ระบบดาวคู่แบบมองเห็นแยกกัน (Visual Binary Systems) เป็นระบบดาวคู่ที่มองดูผ่านกล้องโทรทรรศน์หรือบางกรณีด้วยตาเปล่า จะเห็นเป็นดาวสองดวงอย่างชัดเจน

2. ระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด (Close Binary Systems) เป็นระบบดาวคู่ที่มองดูด้วยตาเปล่า หรือผ่านกล้องโทรทรรศน์ขนาดใหญ่เพียงใดก็ตาม จะเห็นเป็นดาวเพียงดวงเดียวเท่านั้น เนื่องจากดาวทั้งสองดวงอยู่ใกล้กันมาก จนกล้องโทรทรรศน์ไม่สามารถแยกภาพได้

การจำแนกตามลักษณะที่ค้นพบหรือลักษณะที่ศึกษา มีดังนี้

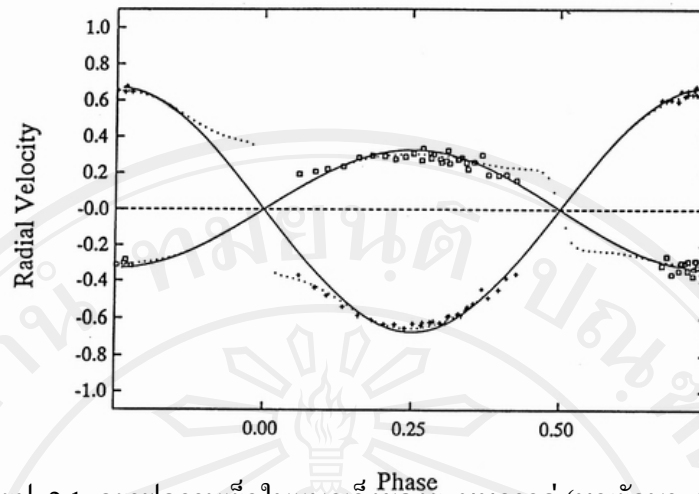
1. ระบบดาวคู่ที่มีการเคลื่อนที่เฉพาะร่วมกัน (Common Proper Motion Pairs) ซึ่งเป็นสมาชิกสองดวง ที่มองเห็นแยกกันและมีการเคลื่อนที่ในแนวขวางไปพร้อมๆ กัน มีคาบวงโคจรรยาวนานมาก จนไม่อาจสังเกตการเคลื่อนที่บนวงโคจรรอบกันได้

2. ระบบดาวคู่แบบมองเห็นแยกกัน (Visual Binaries) ซึ่งเป็นสมาชิกสองดวงที่มองเห็นแยกกันได้และสามารถสังเกตเห็นการ โคจรของสมาชิกทั้งสองดวงรอบกันได้

3. ระบบดาวคู่แบบการวัดดาราศาสตร์ (Astrometric Binaries) ซึ่งสมาชิกดวงหนึ่งมีความสว่างมากกว่าสมาชิกอีกดวงหนึ่ง ทำให้สังเกตเห็นสมาชิกดวงที่สว่างได้เพียงดวงเดียวเท่านั้น จากการสังเกตการณ์สมาชิกดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่ส่ายเป็นคาบ (Oscillatory Motion) รอบสมาชิกอีกดวงหนึ่งซึ่งมองไม่เห็น

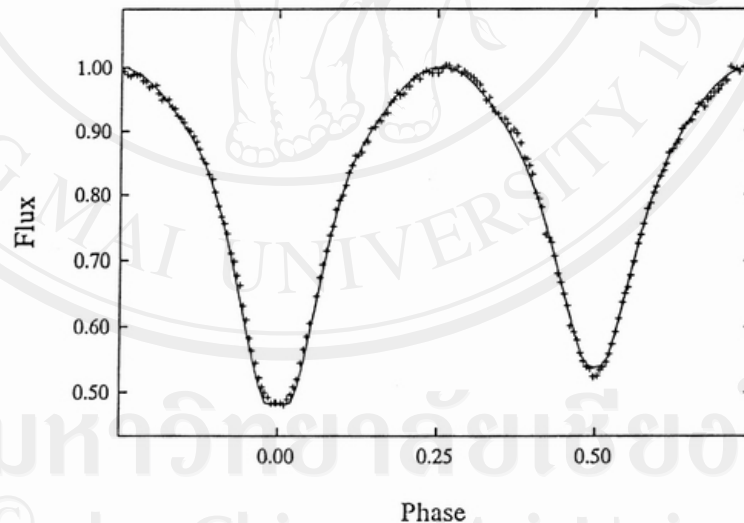
4. ระบบดาวคู่สเปกตรัม (Spectrum Binaries) จะไม่สามารถสังเกตเห็นสมาชิกทั้งสองดวงแยกกันได้ (เห็นเป็นดาวเพียงดวงเดียว) แต่เมื่อถ่ายสเปกตรัมพบว่า มีชุดสเปกตรัม 2 ชุดซ้อนกันอยู่และเป็นอิสระต่อกัน อีกทั้งยังเป็นชั้นสเปกตรัมที่แตกต่างกันด้วย และมีการเลื่อนของดอปเปลอร์ในทิศตรงกันข้าม แต่สมาชิกทั้งสองดวงในระบบดาวคู่นี้อาจมีวงโคจรรอบกันที่ยาวมาก จึงไม่อาจสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบของความเร็วในแนวเล็ง (Radial Velocity) ของสมาชิกแต่ละดวงได้

5. ระบบดาวคู่สเปกโทรสโคปี (Spectroscopic Binaries) ไม่สามารถสังเกตเห็นสมาชิกทั้งสองดวงแยกกันได้เช่นกัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบของความเร็วในแนวเล็งของสมาชิกแต่ละดวง ซึ่งสามารถนำมาสร้าง “กราฟความเร็วในแนวเล็ง (Radial Velocity Curve)” ได้ การสังเกตการณ์ระบบดาวคู่สเปกโทรสโคปีจำเป็นต้องใช้เครื่องสเปกโตรกราฟความละเอียดสูงกับกล้องโทรทรรศน์ขนาดใหญ่



รูป 2.1 กราฟความเร็วในแนวเล็งของระบบดาวคู่ (บุญรักษา สุนทรธรรม, 2550)

6. ระบบดาวคู่อุปราคา (Eclipsing Binaries) จะสังเกตเห็นเป็นดาวดวงเดียวเท่านั้น เนื่องจากสมาชิกทั้งสองดวงอยู่ใกล้กันมาก ระนาบวงโคจรของระบบดาวคู่เกือบอยู่ในแนวสายตา ทำให้สามารถสังเกตเห็นการแปรแสงอันเป็นผลมาจากดาวทั้งสองดวงเคลื่อนที่บังกัน (Eclipse) สามารถนำมาสร้าง “กราฟแสง (Light Curve)” ได้ (บุญรักษา สุนทรธรรม, 2550)



รูป 2.2 กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคา (บุญรักษา สุนทรธรรม, 2550)

2.2 ผลของแรงโน้มถ่วงต่อระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดและผิวห่อหุ้มของโร

การใช้อุปกรณ์บันทึกสัญญาณทั้งโฟโตมิเตอร์และสเปกโตรกราฟ จะทำให้นักดาราศาสตร์สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบวงโคจรของระบบดาวคู่และได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพตลอดจนการเปลี่ยนแปลงพลศาสตร์ของระบบดาวคู่

ระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดสามารถจำแนกได้ตามลักษณะของกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตการณ์ได้เป็น 3 ประเภท คือ

(ก) ประเภทอัลกอล (Algol) หรือเรียกว่าชั้น EA เป็นระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดที่มีจำนวนมากที่สุด โดยที่ดาวดวงหนึ่งจะอยู่ในแถบลำดับหลัก (Main Sequence) จะมีสเปกตรัมชนิด A หรือ B และอีกดวงหนึ่งจะมีขนาดที่เต็มผิวห่อหุ้มโรซ (Roche Lobe) จะมีสเปกตรัมชนิด G หรือ K ซึ่งจัดเป็นดาวประเภทดาวยักษ์เล็ก (Subgiant) ในอดีตทฤษฎีการวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ นั้น เชื่อว่าดาวที่มีมวลมากกว่าจะเป็นปัจจัยหลักในการวิวัฒนาการของระบบดาวคู่จากดาวเกิดจนถึงดาวตาย ซึ่งดาวที่มีความหนาแน่นมากกว่านี้จะหลอมไฮโดรเจนได้เร็วกว่าเพราะว่าดาวที่มีความหนาแน่นมากกว่านั้นจะมีความร้อนมากกว่ารวมถึงสเกลเวลาจะสั้นด้วยส่วนดาวที่มีความหนาแน่นน้อยกว่านั้นจะมีการหลอมของไฮโดรเจนที่ช้ากว่า แต่เมื่อได้สังเกตพบปรากฏการณ์ที่ดาวสมาชิกที่มีมวลมากกว่ากลับมีวิวัฒนาการช้ากว่าคู่ของมันที่มีมวลน้อยกว่า (Algol Paradox) ซึ่งขัดแย้งกับวิวัฒนาการของดาวเดี่ยว นักดาราศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้ได้ จนกระทั่งหลังจากที่ Kuiper (1941) อาศัยแบบจำลองของโรซ (Roche's Model) อธิบายความเป็นไปได้เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของระบบดาวคู่ และยังกำหนดจุดลากรางจ์ (Lagrangian Point) ขึ้นมาอธิบายสมดุลของระบบ ทำให้การวิวัฒนาการของระบบดาวคู่เป็นไปอย่างง่ายขึ้น ต่อมา Crawford(1955) และ Morton(1960) ได้อธิบาย Algol paradox โดยแนวความคิดของการถ่ายเทมวลสารของดาวมากกว่าที่มีวิวัฒนาการออกจากแถบลำดับหลักเป็นดาวยักษ์แดงไปสู่คู่ของมันที่มีมวลน้อยกว่าผ่านจุดลากรางจ์ด้านใน (Inner Lagrangian Point) การถ่ายเทมวลสารภายในระบบดาวคู่มีวิวัฒนาการต่างไปจากดาวเดี่ยว หลังจากนั้น Mirek Plavec(1983) ได้ให้นิยามของคำว่า “ผู้สูญเสีย (Loser) ” และ “ผู้ได้รับ (Gainer) ” ในการนำมาอธิบายกลไกการถ่ายเทมวล สำหรับสมาชิกของระบบดาวคู่ที่สูญเสียมวลจะใช้คำว่า “ดาวที่เสียมวล” (The Mass - Losing Components) และสำหรับสมาชิกที่ได้รับมวลจะใช้คำว่า “ดาวที่ได้รับมวล” (The Mass - Gaining Components) โดยเขาได้อธิบายไว้ว่า ดาวยักษ์เล็กซึ่งเป็นผู้สูญเสียมวลมีขนาดที่เต็มผิวห่อหุ้มโรซ ทำให้มีมวลก๊าซไหลออกจากดาวยักษ์เล็กอย่างรวดเร็วผ่านจุดลา กรางจ์ด้านใน (L_1) อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นมวลสารไหลจากจุดลากรางจ์ด้านใน (L_1) ไปยังดาวที่เป็นผู้รับซึ่งเป็นดาวในแถบลำดับหลัก (Main - Sequence Star) อย่างช้าๆ ซึ่งแบบจำลองวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ โดยพิจารณาถึงผลจากการถ่ายเทมวลสารระหว่างดาวสมาชิกและเงื่อนไขขอบเขตทางฟิสิกส์ได้ถูกนำเสนอโดย Paczynski(1966-1967) และ Kippenhahn et al.(1967) โดยได้คำนึงถึงหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมเป็นสำคัญ ทำให้แบบจำลองวิวัฒนาการของดาวคู่ดังกล่าวนี้ไม่สามารถรวมเป็นดาวดวง

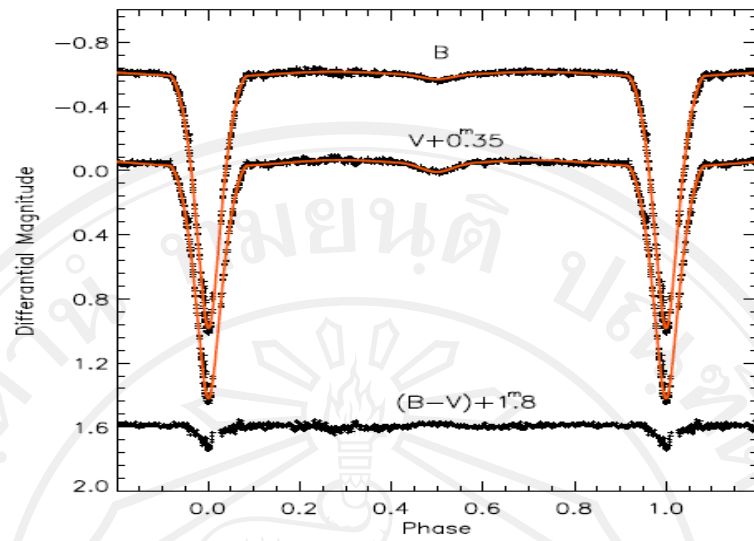
เดียวกันได้ แต่การวิวัฒนาการจะสิ้นสุดที่ดาวสมาชิกดวงใดดวงหนึ่งกลายเป็นซากดาวและไม่เป็นคู่อีกต่อไป

(ข) ประเภทบีตา ไลรี (Beta Lyrae) หรือเรียกว่าชั้น EB ประกอบด้วยสมาชิก 2 ดวงที่เป็นดาวยักษ์ (Giants) หรือดาวยักษ์ใหญ่ (Super - Giants) ที่มีความหนาแน่นต่ำและมีขนาดไม่เท่ากัน สมาชิกอยู่ไม่ห่างกันมาก ก่อให้เกิดแรงโน้มถ่วงระหว่างกันสูง ทำให้ดาวมีรูปร่างรี (Oval Shape) เมื่อพิจารณาลักษณะกราฟแสงจะมีความโค้งสม่ำเสมอ และอุปราคาทุติยภูมิเห็นได้ชัดขึ้นกว่าประเภทอัลกอลมาก

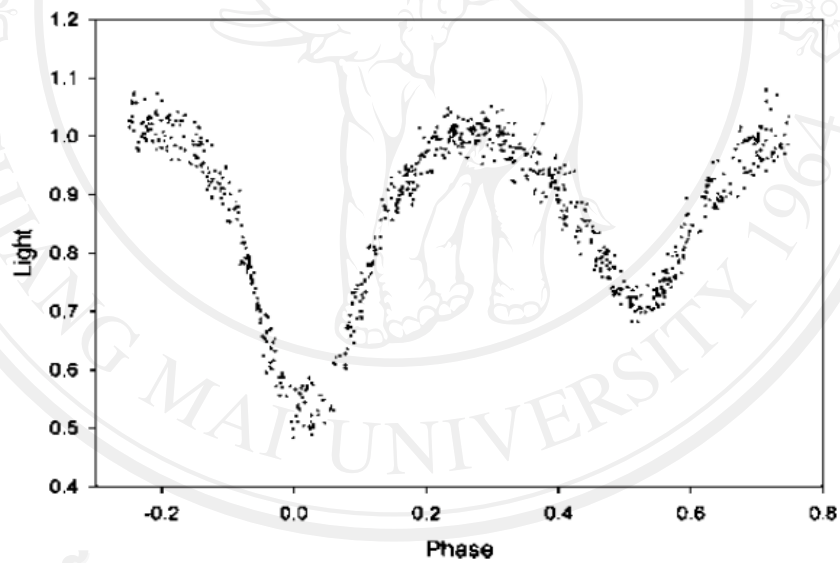
(ค) ประเภทดับเบิลยู เออร์ซา เมเจอร์ (W Ursa Majoris) หรือเรียกว่าชั้น EW เป็นระบบดาวที่มีคาบการแปรแสงน้อยกว่า 1 วัน มีสมาชิกทั้งสองดวงเป็นดาวแคระ (Dwarfs) มีขนาดและอุณหภูมิพื้นผิวใกล้เคียงกันมาก จนบางครั้งเป็นระบบดาวคู่แบบแตะกัน (Contact Binaries) รูปร่างของดาวทั้งสองจึงบิดเบี้ยวมาก เมื่อพิจารณากราฟแสงจะโค้งสม่ำเสมอ และความลึกของอุปราคาปฐมภูมิ (Primary Eclipse) และอุปราคาทุติยภูมิ (Secondary Eclipse) มีค่าใกล้เคียงกัน แต่จากการสังเกตการณ์จะพบความไม่สมมาตรของกราฟแสงในระบบดาวคู่ประเภทนี้มาก ทั้งนี้เนื่องจากดาวทั้งสองดวงมีบรรยากาศร่วมกันและระบบไม่อยู่ในสมดุลความร้อน จึงส่งผลให้ระบบต้องปรับสภาพเข้าสู่สมดุล จึงเกิดการถ่ายมวลสารระหว่างดาวสมาชิก ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของดาวทั้งสองไม่เท่ากัน โดยทั่วไปดาวสมาชิกทั้งสองจะมีชนิดสเปกตรัมอยู่ในระหว่าง F ถึง K โดยสมาชิกทั้งสองจะมีชนิดสเปกตรัมที่ใกล้เคียงกัน

ระบบดาวคู่อุปราคาประเภท W UMa นี้ สามารถจำแนกออกได้เป็นสองชนิด คือ ชนิด A (A-Subtype) และชนิด W (W-Subtype) โดยชนิด A นั้นสมาชิกดวงที่สว่างกว่าซึ่งถูกบังในช่วงเกิดอุปราคาปฐมภูมิจะมีมวลมากและขนาดใหญ่กว่าสมาชิกอีกดวง ทำให้กราฟแสงช่วงอุปราคาทุติยภูมิมีความแบนกว่าในในช่วงเกิดอุปราคาปฐมภูมิ ส่วนชนิด W สมาชิกดวงที่สว่างกว่าจะมีมวลน้อยและขนาดเล็กกว่าสมาชิกอีกดวงทำให้กราฟแสงอุปราคาปฐมภูมิมีความแบนมากกว่าในช่วงอุปราคาทุติยภูมิ

นอกจากนี้ยังพบว่าระบบดาวคู่แบบแตะกันบางระบบอาจเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา ระหว่างชนิด A ชนิด W ได้อีกด้วย

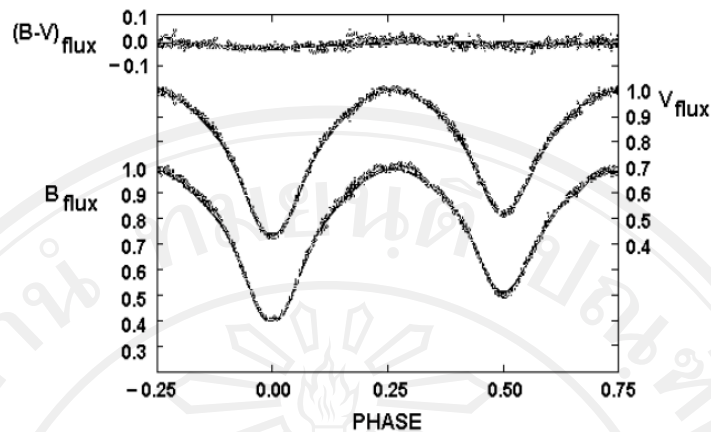


รูป 2.3 กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาประเภท Algol (E. Soyduğan et al.2002)



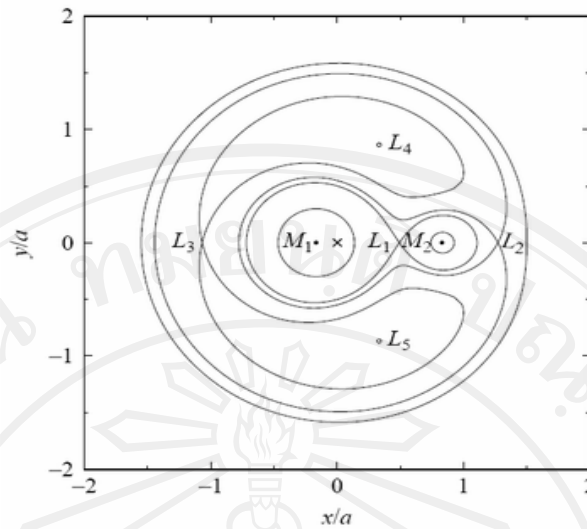
รูป 2.4 กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาประเภท Beta Lyrae (Dirk

Terrell,2001)



รูป 2.5 กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาประเภท W Ursa Majoris (Dirk Terrell, 2001)

เมื่อดาว 2 ดวงอยู่ใกล้ชิดกันมาก จนกระทั่งระยะห่างระหว่างดาวทั้ง 2 ดวง มีขนาดพอๆ กับเส้นผ่านศูนย์กลางของดาวดวงใหญ่ ในกรณีเช่นนี้แรงโน้มถ่วงจะทำให้ผิวดาวทั้งคู่มีลักษณะบิดเบี้ยว มีรูปร่างคล้ายหยดน้ำตา (Teardrop Shape) และขณะที่ดาวมีการหมุนรอบกัน แรงดึงดูดจะทำให้ดาวสมาชิกที่เป็นคู่ซึ่งกันและกันได้รับแรงไทดัล (Tidal Force) ทำให้ ณ ตำแหน่งใดๆ บนผิวดาวมีการยุบ-ขยายตัวในลักษณะคล้ายน้ำขึ้น-น้ำลงที่เกิดบนผิวโลก ลักษณะเช่นนี้จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งระบบอยู่ในสมดุล กล่าวคือ พลังงานของระบบมีค่าน้อยที่สุดและโมเมนตัมเชิงมุมคงค่าอันเป็นผลให้ระบบดาวคู่เข้าสู่สภาวะการโคจรแบบซิงโครนัส (Synchronous Rotation) โดยที่อัตราการหมุนรอบตัวเองของดาวจะเท่ากับอัตราการโคจรรอบกันพอดี และวงโคจรจะเป็นวงกลม (Circular Orbit) แรงโน้มถ่วงระหว่างสมาชิกทั้ง 2 ดวงของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด อาจทำให้เกิดการส่งถ่ายมวล (Mass Transfer) จากสมาชิกดวงหนึ่งไปสู่อีกดวงหนึ่งได้



รูป 2.6 แนวเส้นสมศักย์ สำหรับระบบดาวคู่แบบใกล้เคียงแสดงให้เห็น “จุดลากรางจ์”

จำนวน 5 จุด (บุญรักษา สุนทรธรรม, 2550)

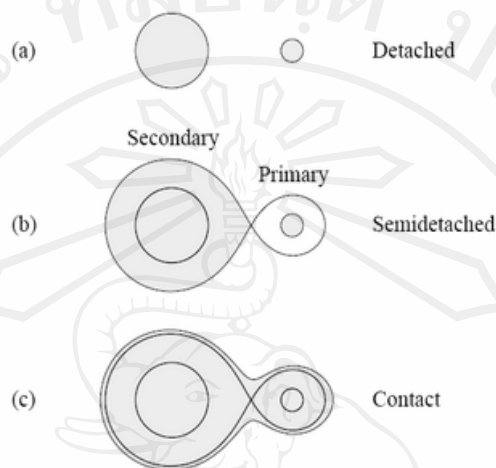
ในระบบดาวคู่แบบใกล้เคียงใดๆ อาจสร้างผิวสมมติบริเวณระบบดาวคู่ดังกล่าว ซึ่งทุกจุดบนผิวสมมตินี้ จะมีค่าศักย์เท่ากันหมด เรียกผิวสมมติในลักษณะเช่นนี้ว่า “ผิวสมศักย์ (Equipotential Surface)” และรูปที่ 2.6 แสดงแนวเส้นสมศักย์ของผิวสมศักย์ในระนาบ 2 มิติ ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณใกล้ดาวแต่ละดวงมากๆ ผิวสมศักย์จะมีลักษณะเป็นผิวทรงกลมรอบมวล M_1 และ M_2 ณ จุดที่ไกลออกมาผลของความโน้มถ่วงของดาวแต่ละดวงมีลักษณะเป็น “หยดน้ำตา (Teardrop Shapes)” ถ้ายิ่งห่างออกมาเรื่อยๆ ผิวสมศักย์รูปหยดน้ำตาจะแตกกันที่จุดลากรางจ์ด้านใน ทำให้เกิดแนวเส้นสมศักย์ที่มี “รูเลขแปด (Figure-Eight)” เรียกผิวห่อหุ้มนี้ว่า “ผิวห่อหุ้มของโรช (Roche Lobes)” หรืออาจเป็นผิวสมศักย์ “รูปดัมเบล (Dumbbell Shapes)” หากพิจารณาบริเวณที่ยิ่งห่างออกมาอีก

จากแบบจำลองของโรชเราสามารถจำแนกระบบดาวคู่ได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ระบบดาวคู่แบบแยกกัน (Detached Binary) เป็นระบบดาวคู่ที่สมาชิกทั้งสองดวงยังเล็กกว่าผิวห่อหุ้มของโรช ดังนั้น ดาวทั้งสองดวงยังแยกกันโดยเด็ดขาด และมีปฏิริยาต่อกันได้ด้วยแรงดึงดูดระหว่างกันเท่านั้น

2. ระบบดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน (Semi-detached Binary) เป็นระบบดาวคู่ที่มีสมาชิกดวงหนึ่งบรรจุอยู่เต็มผิวห่อหุ้มของโรช เรียกว่า Contact Component ส่วนสมาชิกอีกดวงยังไม่เต็ม เรียกว่า Detached Component ระบบดาวคู่ชนิดนี้จะมีการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) ไปยังคู่ของมันได้ และเนื่องจากการวิวัฒนาการของดาวจึงทำให้ดาวเกิดการขยายตัวออกอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงจุด L_1 ซึ่งการขยายตัวนี้จะเป็นไปตามสมดุลทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrostatic Equilibrium) ณ จุดนี้ก๊าซของ Contact Component จะถูกส่งถ่ายไปยัง Detached Component อย่างรวดเร็ว

แต่เนื่องจากระบบดาวมีการหมุนรอบซึ่งกันและกัน ดังนั้น จึงเกิดแรง Colioris ที่ทำธารของก๊าซนี้ ไม่ตกลงสู่ Detached Component โดยตรง แต่บางส่วนจะวกกลับสู่ Contact Component และ บางส่วนก็จะวนเข้าสู่ Detached Component



รูป 2.7 การจำแนกชนิดของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด 3 ชนิด คือ ระบบดาวคู่แบบแยกกัน ระบบดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน และระบบดาวคู่แบบแตะกัน (บุญรักษา สุนทรธรรม, 2550)

3. ระบบดาวคู่แบบแตะกัน (Contact Binary) ระบบดาวคู่ประเภทนี้สมาชิกทั้งสองดวง จะบรรจุอยู่เต็มผิวห่อหุ้มของโรซ และอาจล้นออกมาจากภายนอก ทำให้เกิดผิวห่อหุ้มร่วม (Common Envelope) ล้อมรอบดาวทั้งสอง (อานัส เกษา , 2550)

2.3 การสร้างกราฟแสง

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบวงโคจรและคุณสมบัติทางกายภาพ ตลอดจนการสร้างแบบจำลองของระบบดาวคู่อุปราคานั้น สิ่งสำคัญจะต้องสร้างกราฟแสงจากการสังเกตการณ์ (Observational Light Curves) ดังกล่าวในหัวข้อที่แล้วก่อน อย่างไรก็ตาม ในแกนนอนของกราฟแสง ซึ่งเดิมกำหนดในรูปของ “เวลา” นั้น นักดาราศาสตร์นิยมกำหนดในรูปของ “เฟส (Phase)” แทน ส่วนแกนตั้งอาจอยู่ในรูปของ “กำลังส่องสว่าง” หรือ “แมกนิจูด” ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สังเกตการณ์

นักดาราศาสตร์นิยามเฟสของวงโคจร (Orbital Phase) ของระบบดาวคู่อุปราคา ดังนี้คือ ในขณะที่ดาวดวงที่สว่างกว่าในระบบดาวคู่นี้ ถูกบังโดยสมาชิกอีกดวงหนึ่งที่สว่างน้อยกว่า ซึ่งเป็นช่วงเกิดอุปราคาปฐมภูมิ (Primary Minimum) เฟส จะมีค่าเท่ากับ 0 และค่าจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนค่าความสว่างมากที่สุด ที่เฟสมีค่าเท่ากับ 0.25 ซึ่งเป็นช่วงที่ดาวทั้งสองไม่บังกัน หลังจากนั้นค่าความสว่างจะลดลง จนความสว่างน้อยที่สุดอีกครั้ง ในช่วงเกิดอุปราคาทุติยภูมิ โดยตำแหน่งนี้ เฟสจะมีค่าเท่ากับ 0.5 หลังจากเฟสนี้ความสว่างจะเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดอีกครั้ง ที่เฟสมีค่าเท่ากับ 0.75 แล้วกลับไปสู่อุปราคาปฐมภูมิ เป็นการโคจรครบ 1 รอบพอดี และเริ่มนับเฟส 0 ใหม่ในการโคจรบังกันในรอบต่อไป ดังนั้นช่วงเฟสของวงโคจรจึงมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

การวิเคราะห์เฟสของระบบดาวคู่อุปราคา จะต้องคำนวณวันจูเลียน (Julian Date, JD) และวันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (Heliocentric Julian Date) โดยมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$HJD = JD + \Delta t \quad (2.1)$$

โดย Δt เป็นค่าการแก้ศูนย์กลางสุริยะ (Heliocentric Correction) ซึ่งแปลงเวลาการสังเกตการณ์บนโลก ให้เป็นเวลาการสังเกตการณ์เมื่อยึดตำแหน่งของดวงอาทิตย์เป็นจุดอ้างอิง สำหรับการคำนวณค่า Δt นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta t (\text{วัน}) = -0.0057755[(\cos \sigma \cos \alpha)X + (\tan \varepsilon \sin \sigma + \cos \sigma \sin \alpha)Y] \quad (2.2)$$

ซึ่ง X, Y เป็นพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate) ของดวงอาทิตย์ ณ วันที่พิจารณา

α, σ เป็นค่าไรต์ แอสเซนชันและเดคลิเนชันของดาว ณ วันที่พิจารณา

ε เป็นค่ามุมเอียงของอิกลิปติก ซึ่งมีค่า $23^\circ 27'$

การหาค่าพิกัดฉาก X และ Y ของดวงอาทิตย์ ณ วันที่ทำการสังเกตการณ์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

1. พิจารณาค่าศตวรรษจูเลียนสัมพัทธ์ (Relative Julian Century) จาก

$$T = (J.D. - 2415020)/36525 \quad (2.3)$$

2. หาค่าลองจิจูดสุริยะเฉลี่ย (Mean Solar Longitude) จาก

$$L = 279^\circ .696678 + 36000.76892T + 0.000303T^2 - P \quad (2.4)$$

$$P = [1.396041 + 0.000308(T + 0.5)] [T - 0.49998] \quad (2.5)$$

เมื่อ L เป็นค่าลองจิจูดสุริยคติ (Mean Solar Longitude) มีหน่วยเป็นองศา โดย L มีค่าน้อยกว่า 360°

P เป็นค่าการส่าย (Precession) ของแกนหมุนของโลก จากปี ค.ศ. 1950 ถึงวันสังเกตการณ์

3. หาค่าอะนอมัลลีสุริยคติ (Mean Solar Anomaly) จาก

$$G = 358^\circ.475833 + 35999.04975T - 0.00015 T^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ G เป็นค่าอะนอมัลลีสุริยคติ (Mean Solar Anomaly) มีหน่วยเป็นองศา และต้องมีค่าน้อยกว่า 360° ถ้าผลการคำนวณโดยอาศัยสมการ (2.6) มีค่ามากกว่า 360° ต้องลบออกจากค่าจำนวนเต็มของ ต้องลบออกจากค่าจำนวนเต็มของ 360

4. ในที่สุดก็อาจหาค่า X และ Y สำหรับปี ค.ศ. 1950.0 จาก

$$X = 0.99986 \cos L - 0.025127 \cos(G - L) + 0.008374 \cos(G + L) + 0.000105 \cos(2G + L) + 0.000063 T \cos(G - L) + 0.000035 \cos(2G - L) \quad (2.7)$$

$$Y = 0.917308 \sin L + 0.023053 \sin(G - L) + 0.007683 \sin(G + L) + 0.000097 \sin(2G + L) - 0.000057 T \sin(G - L) - 0.000032 \sin(2G + L) \quad (2.8)$$

ค่า X และ Y ดังกล่าวแทนในสมการที่ (2.2) ทำให้สามารถหาค่า Δt และจากสมการ (2.1) จะสามารถหาค่าวันจูเลียนศูนย์สุริยคติได้หรือเปลี่ยนวันจูเลียน (JD) เป็นวันจูเลียนศูนย์สุริยคติ (HJD)

โดยใช้โปรแกรม Excel จาก <http://www.physics.sfasu.edu/astro/javascript/hjd.html>

การคำนวณเฟสของวงโคจรของระบบดาวคู่อุปราคาแบบใดก็ตาม จำเป็นต้องเทียบวันจูเลียนศูนย์สุริยคติ ณ เวลาที่แสงของระบบดาวคู่อุปราคานั้นน้อยที่สุด ที่เคยมีผู้สังเกตการณ์หาไว้แล้วในอดีต เรียกค่าเวลาดังกล่าวว่า “ยุค (Epoch)” ของการสังเกตการณ์กับค่าวันจูเลียนศูนย์สุริยคติ ณ เวลาที่แสงน้อยที่สุดในการสังเกตการณ์ครั้งล่าสุด (HJD) รวมทั้งคาบ (Period) ของวงโคจร

สำหรับการคำนวณค่าเฟส (Phase) ของระบบดาวคู่ แบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ

ก. เมื่อ HJD น้อยกว่า Epoch

$$\text{Phase} = 1 - \text{Fraction Part of } [\text{HJD} - \text{Epoch/Period}] \quad (2.9)$$

ข. เมื่อ HJD มากกว่า Epoch

$$\text{Phase} = \text{Fraction Part of } [\text{HJD} - \text{Epoch/Period}] \quad (2.10)$$

(บุญรักษา สุนทรธรรมและคณะ , 2545)

2.4 การเปลี่ยนแปลงคาบและการวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบวงโคจรของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน (Semi-detached Binary Systems) และระบบดาวคู่แบบแตะกัน (Contact Binary Systems) พบว่าคาบการโคจรของระบบดาวคู่เหล่านี้มีแนวโน้มลดลง หมายความว่า สมาชิกทั้ง 2 ดวงของระบบดาวคู่มีแนวโน้มที่จะอยู่ใกล้กันขึ้นเรื่อยๆ ประเด็นดังกล่าวนี้เป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ในการดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับการวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ กล่าวคือกลไกของการโคจรรอบกันของระบบดาวคู่เนื่องจากความโน้มถ่วงระหว่างกัน ตลอดจนผลกระทบอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กของดาวเอง หรือผลอันเนื่องมาจากลมดาวฤกษ์ (Stellar Wind) รวมทั้งกลไกการถ่ายเทมวลสารภายในระบบดาวคู่ อาจทำให้ดาวคู่มีการวิวัฒนาการจากระบบดาวคู่แบบแยกกัน เป็นดาวคู่แบบกึ่งแยกกัน แล้วเป็นดาวคู่แบบแตะกัน และในที่สุดอาจหลอมรวมกันเป็นดาวเดี่ยว (Single Star)

เมื่อพิจารณาระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด ในระยะที่ยังเป็นระบบดาวคู่แบบแยกกัน สมาชิกทั้ง 2 ดวงโคจรรอบกัน ในขณะที่แต่ละดวงมีการวิวัฒนาการตามลำดับ โดยสมาชิกที่มีมวลมากกว่า (More Massive Component) จะวิวัฒนาการได้เร็วกว่าสมาชิกที่มีมวลน้อยกว่า (Less Massive Component) และขยายตัวเต็มผิวห่อหุ้มของโรซ ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวลจะมีผลให้คาบการโคจรของระบบดาวคู่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจพิจารณาได้จากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบดาวทั้ง 2 ดวง ดังนี้

$$I = \frac{m_1 m_2 a^2}{m_1 + m_2} \quad (2.11)$$

โดย m_1 และ m_2 เป็นมวลของสมาชิกแต่ละดวง

a เป็นระยะห่างระหว่างสมาชิกทั้งสอง

และจากสมการของโมเมนตัมเชิงมุม (L) และความเร็วเชิงมุม (ω) ของการโคจรที่มีคาบ (P) ดังนี้

$$\begin{aligned} L &= I\omega \\ \text{และ} \quad \omega &= \frac{2\pi}{P} \\ \text{ทำให้ได้สมการ ดังนี้} \quad L &= \frac{2\pi m_1 m_2 a^2}{P(m_1 + m_2)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

และจากกฎข้อที่ 3 ของเคปเลอร์

$$a^3 = \frac{P^2 G(m_1 + m_2)}{4\pi^2} \quad (2.13)$$

เมื่อรวมสมการ (2.12) และ (2.13) จะได้

$$L^3(m_1 + m_2) = \frac{m_1^3 m_2^3 P G^2}{2\pi} \quad (2.14)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.14) เทียบกับเวลา โดยพิจารณาภายใต้เงื่อนไขว่าระบบดาวคู่ อนุรักษ์และไม่มีการสูญเสียมวลสารออกจากระบบดาวคู่ กล่าวคือ

$$\frac{dm_1}{dt} = -\frac{dm_2}{dt} = \frac{dm}{dt} \quad (2.15)$$

ทำให้ได้

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_1 m_2}{3P(m_1 - m_2)} \frac{dP}{dt} \quad (2.16)$$

จากสมการ (2.16) แสดงให้เห็นว่า การถ่ายเทมวลจากสมาชิกดวงหนึ่งไปสู่สมาชิกอีกดวง หนึ่งแล้ว ทำให้คาบการโคจรของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดเปลี่ยนแปลงได้

เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบของระบบดาวคู่ โดยอาศัยการปรับกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างระหว่างเวลาแสงน้อยที่สุดจากการสังเกตการณ์(Observed,O) กับ

เวลาแสงน้อยที่สุดจากการคำนวณ(Calculated,C) และเวลาที่ระบบดาวคู่ดังกล่าวนี้ถูกสังเกตการณ์ (Epoch, E) โดยใช้สมการโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 (Second-order Polynomial Fitting) ดังนี้

$$(O - C) = aE^2 + bE + c \quad (2.17)$$

ซึ่งถ้ากำหนดว่า

T_0 เป็นเวลาแสงน้อยที่สุด ณ Epoch (E) = 0

P_c เป็นคาบของระบบดาวคู่ที่ใช้ในการคำนวณ (เป็นค่าคงที่)

P_0 เป็นคาบของระบบดาวคู่ที่สังเกตได้ในการวิจัยแต่ละครั้ง ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของ E

กล่าวคือ

$$P_0 = P(E) \quad (2.18)$$

ซึ่งพบว่า

$$O = T_0 + P_0 E$$

$$O = T_0 + P(E)E \quad (2.19)$$

และ

$$C = T_0 + P_c E \quad (2.20)$$

ดังนั้น (2.19) – (2.20) ได้

$$O - C = \{P(E) - P_c\}E \quad (2.21)$$

ซึ่งจากสมการ (2.17) และ (2.21) พบว่า

$$\{P(E) - P_c\}E = aE^2 + bE + c \quad (2.22)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.22) เทียบกับ E ได้

$$\frac{dP}{dE} E + \{P(E) - P_c\} = 2aE + b \quad (2.23)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ในสมการ (2.23) ได้

$$\frac{dP}{dE} = 2a \quad (2.24)$$

$$\text{และ} \quad P(E) - P_c = b \quad (2.25)$$

โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ $\frac{dP}{dE}$ (ในหน่วย days/ cycle)

จะใช้การพิจารณาแผนภาพ O – C โดยหาค่า a จากการใช้ Quadratic Polynomial Fitting method แล้วแทนค่าสมการ (2.24) ต่อไป (ศิริมาศ โกมลจินดา, 2546)

2.5 เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรี

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรีเป็นเทคนิคการวัดค่าความสว่างของดาวแบบหนึ่ง ซึ่งทำได้ง่าย แต่สามารถลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากเครื่องมือวัดแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ด้วยการวัดข้อมูลแสงออกมาเป็นค่าผลต่างระหว่างโชติมาตรของวัตถุท้องฟ้าที่ต้องการเก็บข้อมูลกับดาวเทียบเคียง (Comparison Star) ที่อยู่ใกล้เคียงในเฟรมของภาพถ่ายเดียวกัน

เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรีนิยมใช้มากในการพิจารณาวิวัฒนาการตามเวลาของความสว่างในดาวแปรแสง (Variable Stars), ดาวคู่อุปราคา (Eclipsing Binaries) หรือวัตถุอื่นบนท้องฟ้า เช่น ดาวหาง และดาวเคราะห์น้อย เป็นต้น

สมบัติที่สำคัญสำหรับการเลือกดาวเทียบเคียง คือ ต้องเลือกดาวเทียบเคียงที่อยู่ใกล้กับดาวที่ต้องการข้อมูลให้มากที่สุด ซึ่งระยะห่างระหว่างดาวที่ดีที่สุดควรอยู่ในช่วงห่างกันไม่เกิน 1 องศา และดาวเทียบเคียงที่เลือกต้องไม่เป็นดาวแปรแสง เพราะจะทำให้ข้อมูลผิดพลาดได้ โดยสามารถตรวจสอบการแปรแสงของดาวเทียบเคียงที่เลือกได้จากดาวตรวจสอบ (Check Star)

เนื่องจากดาวที่ต้องการข้อมูลกับดาวเทียบเคียงอยู่ห่างกันไม่เกิน 1 องศา ดังนั้นในการหาค่าผลต่างโชติมาตรระหว่างดาวทั้งสองจึงสามารถหักลบเงื่อนไขการลดลงของแสงดาวเนื่องจากผลของบรรยากาศโลกทิ้งไปได้ เพราะผลต่างของค่ามวลาอากาศระหว่างดาวที่ต้องการข้อมูลกับดาวเทียบเคียงมีค่าเป็นศูนย์ (อาทิตย์ ลภีรัตนากุล, 2545)

2.6 สมาชิกดวงที่สาม (Third Body)

ในระบบดาวคู่บางระบบอาจไม่ได้ประกอบไปด้วยสมาชิกเพียงสองดวงเท่านั้น แต่อาจมีดาวฤกษ์หรือดาวเคราะห์ดวงอื่นร่วมอยู่ในระบบด้วย เรียกว่าเป็นดาวพหุ (Multiple system) โดยพบว่าประมาณ 1 ใน 5 ของระบบดาวคู่จะเป็นระบบดาวพหุ ซึ่งสมาชิกที่เพิ่มเข้ามานี้โดยมากจะอยู่ห่างจากระบบดาวคู่พอสมควร ดังนั้นถึงแม้สมาชิกดวงที่เพิ่มเข้ามานี้จะได้รับอิทธิพลจากแรงโน้ม

ถ่วงของระบบดาวคู่ แต่วงโคจรมักจะเสถียรและไม่ได้รับผลกระทบจากวิวัฒนาการของระบบดาวคู่มากนัก

ในการพิจารณาคาบการโคจรของระบบดาวคู่เป็นเวลานาน จะพบการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่นี้ในลักษณะเป็นคาบ ซึ่งมีค่าเท่ากับคาบการโคจรของสมาชิกดวงที่สาม นอกจากนี้การมีอยู่ของสมาชิกดวงที่สามยังทำให้สมบัติทางกายภาพบางประการของระบบดาวคู่มีค่าเปลี่ยนไป เช่น มวลรวมจะประกอบด้วยมวลของสมาชิกดวงที่หนึ่ง สองและสาม ปริมาณแสงที่สังเกตการณ์ได้จะประกอบไปด้วยแสงที่มาจากสมาชิกดวงที่หนึ่ง สอง และสาม ซึ่งปริมาณแสงที่มาจากสมาชิกดวงที่สามนั้นถือว่ามีค่าคงที่

$$\frac{(M_3 \sin i')^3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2} = \frac{4\pi^2}{GP'^2} (a' \sin i')^3 \quad (2.26)$$

โดย P' คือ คาบการของสมาชิกดวงที่สาม

a' คือ รัศมีวงโคจรของสมาชิกดวงที่สาม

i' คือ มุมเอียงของระนาบวงโคจรของสมาชิกดวงที่สามกับแนวสายตา

ดังนั้น ถ้าแผนภาพ O-C มีลักษณะเป็นคาบหรือมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเป็นคาบ ซ้อนอยู่ในแผนภาพ จะสามารถหาสมการฟังก์ชันคาบ (Periodic Function) มาอธิบายได้โดยที่คาบของฟังก์ชันนี้จะมีค่าเท่ากับคาบการโคจรของสมาชิกดวงที่สาม ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หามวลของสมาชิกดวงที่สามได้ต่อไป (ศิริมาศ โกมลจินดา, 2546)

สมมติฐานเกี่ยวกับสมาชิกดวงที่สามในระบบดาวคู่

การเปลี่ยนแปลงคาบของระบบดาวคู่ โดยการถ่ายเทมวลทั้ง 2 กรณี คือ กรณีอนุรักษ์การถ่ายเทมวลและกรณีที่ไม่อนุรักษ์การถ่ายเทมวล

กรณีไม่อนุรักษ์การถ่ายเทมวลนั้น ดาวสมาชิกทั้งสองดวงมีการขยายตัวล้นผิวห่อหุ้มของโรซ ทำให้ดาวทั้งสองดวงอยู่ในสภาพที่แตะกันมากขึ้นเรื่อยๆ (Over-contact Phase) ดังนั้น นอกจากการถ่ายเทมวลระหว่างดาวทั้งสองดวงผ่านจุดลากรางจ์ L_1 แล้วก็มีความเป็นไปได้อย่างสูงที่จะมีการสูญเสียมวล (Mass Loss) ออกนอกระบบผ่านจุดลากรางจ์ L_2 โดยกลไกของลมดาวฤกษ์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก (Magnetic Stellar Winds) มวลที่สูญเสียออกนอกระบบอาจก่อให้เกิดสมาชิกดวงที่ 3 (Third Body) ในระบบดาวคู่ ผลของสมาชิกดวงที่ 3 มีดังนี้

1. คาบการโคจร (Period) ของสมาชิกดวงที่ 3 ทำให้ทราบว่าสมาชิกดวงที่

3 โคจรห่างจากระบบดาวคู่มากน้อยเท่าใด และมีผลต่อวงโคจรหลักของระบบดาวคู่อย่างไร

2. มวล (Mass) ของสมาชิกดวงที่ 3 ทำให้ทราบว่าสมาชิกดวงที่ 3 มีสภาพเป็นอย่างไร เช่น ดาวเคราะห์ หรือซากของดาวฤกษ์

3. มุมเอียงของการโคจร (Inclination) ทำให้ทราบว่าสมาชิกดวงที่ 3 มีวงโคจรทำมุมเท่าใดกับวงโคจรหลักของระบบดาวคู่ ซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปว่าสมาชิกดวงที่ 3 น่าจะเกิดจากการสูญเสียมวลของระบบดาวคู่เอง (ในกรณีที่มุมเอียงมีค่าประมาณ 0 องศา กล่าวคืออยู่ในระนาบใกล้เคียงกับระนาบวงโคจรของระบบดาวคู่หลัก) หรือน่าจะเกิดจากกระบวนการจับสมาชิกดวงที่ 3 จากภายนอก (ในกรณีที่มุมเอียงมีค่ามากกว่า 0 องศา กล่าวคืออยู่ในระนาบที่ต่างจากวงโคจรของระบบดาวคู่หลักมาก) (บุญรักษา สุนทรธรรมและคณะ, 2548)

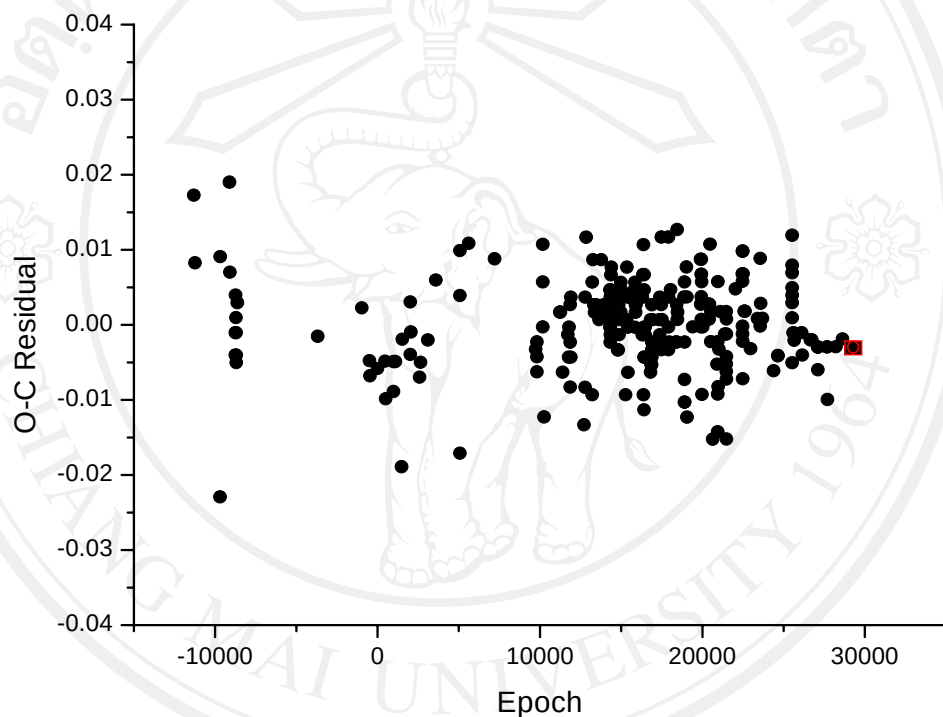
ผลของสมาชิกดวงที่สามที่มีต่อวงโคจรของระบบดาวคู่

ระบบดาวคู่ที่มีอยู่ทั้งหมดประมาณ 20% มีสมาชิกดวงที่ 3 (Triple System) หรืออาจมีสมาชิกมากกว่า 3 ดวง (Multiple System) ดังนั้นระบบดาวคู่ทั้งสองดวงหลักก็จะโคจรร่วมกับสมาชิกดวงที่ 3 รอบจุดศูนย์กลางร่วมของระบบ (Barycentre) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วในวงโคจรของระบบดาวคู่และเกิดผลที่เรียกว่า “ผลของเวลาที่แสงเดินทาง (Light-Time Effect)” ต่อข้อมูลที่สังเกตการณ์ได้ในกราฟแสงและกราฟความเร็วในแนวตั้งของระบบดาวคู่ เนื่องจากคาบวงโคจรของสมาชิกดวงที่ 3 มักจะมีค่ามาก ดังนั้น จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการโคจรของระบบดาวคู่หลักค่อนข้างน้อย และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวงโคจรหลักในลักษณะการแกว่งที่เป็นคาบ (Periodic Oscillation) ที่มีค่าครึ่งแอมพลิจูด (Semi-amplitude, K_3) โดยอนุโลมว่าระนาบวงโคจรของสมาชิกดวงที่ 3 ต่างจากระนาบวงโคจรของดาวคู่หลักมาก ค่าครึ่งแอมพลิจูดของการแกว่งที่เป็นคาบก็จะลดลง

ลักษณะการแกว่งเป็นคาบเนื่องจากการโคจรของสมาชิกดวงที่ 3 รอบดาวคู่หลักเช่นนี้ ไม่ได้สังเกตได้จากกราฟความเร็วในแนวตั้ง (Radial Velocity Curve) เท่านั้น แต่อาจสังเกตเห็นได้ในกราฟ O-C ของระบบดาวคู่แบบใกล้เคียงได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าผลของสมาชิกดวงที่ 3 อาจทำให้มุมเอียงของระนาบวงโคจรของระบบดาวคู่หลักเปลี่ยนไปได้ด้วย ทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกของอุปราคาอย่างต่อเนื่อง (บุญรักษา สุนทรธรรมและคณะ, 2548)

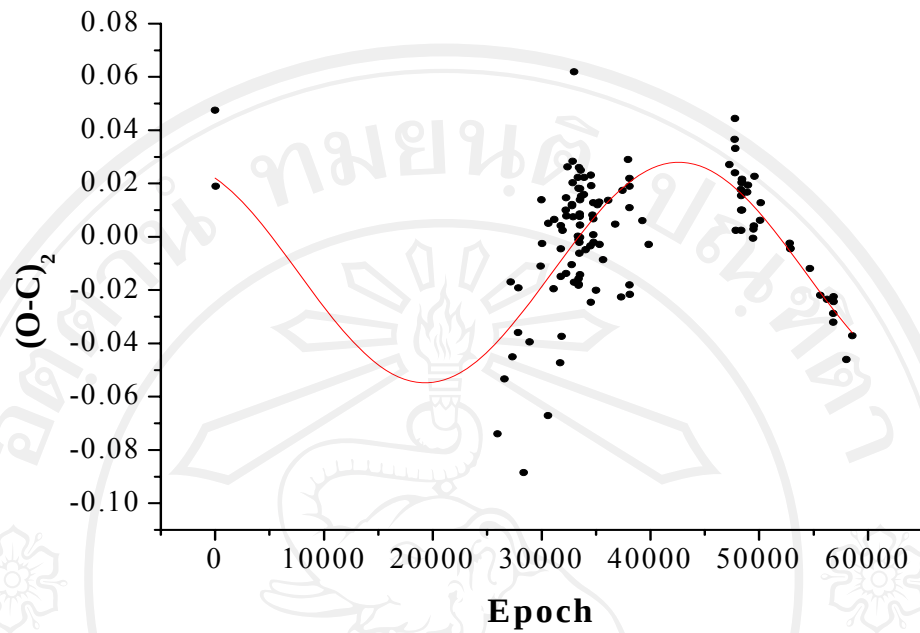
2.7 การวิเคราะห์คาบการโคจรเนื่องมาจากการมีอยู่ของวัตถุอื่นหรือผลของ สนามแม่เหล็กของสมาชิกในระบบดาวคู่จากกราฟ O-C Residual

การพิจารณาคาบการโคจรเนื่องมาจากการมีอยู่ของวัตถุอื่นหรือผลของ
สนามแม่เหล็กของสมาชิกในระบบดาวคู่จากกราฟ O-C Residual นั้นถ้ากราฟ O-C Residual ที่ได้มี
การกระจายของข้อมูลไม่มากโดยมีแนวโน้มยังกระจายเกาะกลุ่มดังรูป2.8



รูป2.8 กราฟ O-C Residual ของข้อมูลที่มีแนวโน้มกระจายเกาะกลุ่ม

แสดงว่าคาบการโคจรไม่มีผลของการมีอยู่ของวัตถุอื่นหรือผลของสนามแม่เหล็กของสมาชิกใน
ระบบดาวคู่แต่ถ้ากราฟ O-C Residual ที่ได้มีการกระจายของข้อมูลเป็นรูปลักษณะ sin wave ดัง
แสดงในรูป2.9



รูป 2.9 กราฟ O-C Residual ของข้อมูลที่มีแนวโน้มกระจายเป็นรูป sin wave
(วนิดา ปิงสุแสน , 2551)

แสดงว่าคาบการ โคจรของระบบดาวคู่ที่ศึกษามีผลมาจากการมีอยู่ของวัตถุอื่นหรือผลของ
สนามแม่เหล็ก ของสมาชิกในระบบดาวคู่