

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลสังเกตการณ์

การวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี สำหรับอธิบายและตอบปัญหาของวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้สำหรับการวิจัยนี้ แบ่งเป็น 6 หัวข้อ คือ 5.1 การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ และเฟสการโคจร ของข้อมูลสังเกตการณ์ดาวคู่บีตา ไลรี, 5.2 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ, 5.3 การวิเคราะห์ความผันแปรของความยาวคลื่น ความเร็วในแนวเส้นสายตา ความกว้าง และรูปร่างโปรไฟล์ ของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์, และ 5.4 ตารางข้อมูลผลการวัด และการคำนวณ จากการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมของผลสังเกตการณ์ดาวคู่บีตา ไลรี

5.1 การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ และเฟสการโคจร ของข้อมูลสังเกตการณ์ดาวคู่บีตา ไลรี

ประกอบด้วย 5.1.1 การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ, และ 5.1.2 การคำนวณเฟสการโคจร

5.1.1 การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ

ตัวอย่าง การคำนวณวันจูเลียนศูนย์สุริยะ (H.J.D.) ของภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่ถ่ายในวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ณ เวลา 20 :10:42 น. ซึ่งหาได้โดยใช้สมการ(2.1) ถึง (2.11) ดังนี้

เริ่มจากเวลาโซนมาตรฐาน (S.T.Z.) ที่ถ่ายภาพสเปกตรัมรูปนี้ ตรงกันกับเวลาบนนาฬิกาที่เราใช้ดูประจำวัน ที่หอดูดาวสิรินธร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นระบบเวลาเดียวกันทั่วประเทศ ดังนั้น เวลาโซนมาตรฐาน คือ 20 ชั่วโมง 10 นาที 42 วินาที ของวันที่ 12 ตุลาคม ค.ศ. 2000 และทราบว่าการสังเกตของหอดูดาวสิรินธร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เท่ากับ $98^{\circ}56'08''.07$ ตะวันออก เพราะฉะนั้น เวลาสากล (U.T.) หาได้ โดยแทน S.T.Z. และ Zone Number = -7 ในสมการ(2.3) จะได้

$$\begin{aligned} \text{U.T.} &= (20 \text{ ชั่วโมง } 10 \text{ นาที } 42 \text{ วินาที}) - (7 \text{ ชั่วโมง}) \\ &= 13 \text{ ชั่วโมง } 10 \text{ นาที } 42 \text{ วินาที} \\ &= 0.5490972 \text{ วัน} \end{aligned}$$

หาวันจูเลียน (J.D.) ที่เวลา 0 ชั่วโมง 0 นาที 0 วินาที (0^{h} U.T.) หรือ 00:00:00 น. ที่กรีนิช จากสมการ(2.2) จะได้

$$\begin{aligned} \text{J.D. (12 ค.ศ. 2000, ที่ } 0^{\text{h}} \text{ U.T.)} &= 2415020 + 365(2000-1900)+284+26+0.5 \\ &= 2451829.5 \text{ วัน} \end{aligned}$$

เมื่อ ปี ค.ศ. ของการสังเกตการณ์ คือ 2000 (ตรงกับปี พ.ศ. 2543), จำนวนวันนับจากวันเริ่มต้นปีใหม่ของปี 2000 คือ 284 วัน เป็นจำนวนวันนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม แต่ไม่นับวันสังเกตการณ์ (เมื่อวันสังเกตการณ์ คือ 12 ตุลาคม ค.ศ. 2000) ซึ่งแต่ละเดือนมีจำนวนวันแตกต่างกัน คือ เดือนมกราคมมี 31 วัน, กุมภาพันธ์มี 28 วัน, มีนาคมมี 31 วัน, เมษายนมี 30 วัน, พฤษภาคมมี 31 วัน, มิถุนายนมี 30 วัน, กรกฎาคมมี 31 วัน, สิงหาคมมี 31 วัน, กันยายนมี 30 วัน, ตุลาคมมี 31 วัน, พฤศจิกายนมี 30 วัน, และธันวาคมมี 31 วัน, และ

จำนวนปี ค.ศ. ที่หารด้วยเลข 4 ลงตัว นับตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1900 คือ 26 ปี ซึ่งนับรวมปี ค.ศ. 1900 และปี
สังเกตการณ์ด้วยถ้าหารด้วย 4 ลงตัว

หาวันจูเลียนที่แทนสถานะของข้อมูลดาราศาสตร์ของภาพสเปกตรัมนี้ที่ถ่าย ณ เวลา U.T. =
0.5490972 วัน ของวันที่ 12 ตุลาคม ค.ศ. 2000 ได้โดยบวกค่า J.D. ที่เวลา 0^h U.T. กับเวลา U.T. ของข้อมูล
สังเกตการณ์ที่คำนวณได้ข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned} \text{J.D. (12 ต.ค. 2000, 0.5490972 วัน U.T.)} &= 2451829.5 + 0.5490972 \text{ วัน} \\ &= 2451830.049 \text{ วัน} \end{aligned}$$

หา Δt จากสมการ(2.5) โดยต้องคำนวณหา X , Y , α , δ ก่อนจากสมการ(2.6) ถึง (2.11) แล้วจึง
แทนลงในสมการ(2.5) ของ Δt ซึ่งมีวิธีการคำนวณตามลำดับ คือ

(1). หา α , δ

$$\begin{aligned} \alpha &= 18 \text{ ชั่วโมง } 50 \text{ นาที } 06 \text{ วินาที} \\ \delta &= +33^{\circ} 22' 07'' \end{aligned}$$

เมื่อ α , δ เป็นค่าไรต์แอสเซนชัน และเดคลิเนชัน ตามลำดับ ของดาวคูบีดา ไลรี ณ วันสังเกตการณ์
ที่ J.D. = 2451830.049 วัน และตำแหน่งหอดูดาวสิรินธร ตั้งอยู่ที่ลองจิจูด $98^{\circ} 56' 08'' .07$ ตะวันออก และ
ละติจูด $18^{\circ} 47'$ เหนือ ซึ่งสามารถหา α , δ ของดาวเป้าหมายได้โดยใช้โปรแกรม RedShift 3 (หรือโปรแกรม
แผนที่ดาวทั่วไป) หรือคู่มือแผนที่ดาวทางดาราศาสตร์ ปกติในหนึ่งรอบปี ค่านี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
เนื่องมาจากการส่ายของแกนหมุนของโลก ดังนั้น การคำนวณทั้งหมดต่อไปผู้เขียนจะกำหนดให้มันมีค่า
คงตัว ตลอดเวลาปฏิบัติการสังเกตการณ์จากวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ถึง 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543

(2). หา X , และ Y จากสมการ(2.6) และ(2.7) โดยแทนด้วยค่า T ของสมการ(2.8), p ของสมการ(2.10),
 L ของสมการ(2.9) และ G ของสมการ(2.11) มีลำดับดังนี้

จากสมการ(2.8)

$$\begin{aligned} T &= (2451830.049 - 2415020) / 36525 \\ &= 1.007804219 \end{aligned}$$

จากสมการ(2.10)

$$\begin{aligned} p &= [1.396041 + 0.000308(1.007804219 + 0.5)] [1.007804219 - 0.49998] \text{ องศา} \\ &= 0.709179266 \text{ องศา} \end{aligned}$$

จากสมการ(2.9)

$$\begin{aligned} L &= 279.696678 + 36000.76892(1.007804219) + 0.000303(1.007804219)^2 - 0.709179266 \text{ องศา} \\ &= 36560.71416 \text{ องศา} \end{aligned}$$

จากสมการ(2.11)

$$\begin{aligned} G &= 358.475833 + 35999.04975(1.007804219) - 0.00015(1.007804219)^2 \text{ องศา} \\ &= 36638.4699 \text{ องศา} \end{aligned}$$

แล้วแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ(2.6) และ(2.7) จะได้

$$\begin{aligned} X &= 0.99986 \cos L - 0.025127 \cos(G - L) + 0.008374 \cos(G + L) + \\ &\quad 0.000105 \cos(2G + L) + 0.000063T \cos(G - L) + 0.000035 \cos(2G - L) \\ &= -0.944503855 \\ Y &= 0.917308 \sin L + 0.023053 \sin(G - L) + 0.007683 \sin(G + L) + \\ &\quad 0.000097 \sin(2G + L) - 0.000057T \sin(G - L) - 0.000032 \sin(2G - L) \\ &= -0.295222704 \end{aligned}$$

แล้วแทนค่า X, Y, α, δ , และ ε ลงในสมการ(2.5) จะได้ Δt คือ

$$\begin{aligned} \Delta t (\text{วัน}) &= -0.0057755[(\cos \delta \cos \alpha)X + (\tan \varepsilon \sin \delta + \cos \delta \sin \alpha)Y] \\ &= 0.0000199142 \text{ วัน} \end{aligned}$$

สุดท้ายแทนค่า J.D. และ Δt จากข้างต้น ลงในสมการ(2.1) จะได้ ค่าวันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ สำหรับวันสังเกตการณ์ 12 ตุลาคม ค.ศ. 2000 ณ เวลา U.T. = 0.5490972 วัน มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{H.J.D.} &= 2451830.049 + 0.0000199142 \text{ วัน} \\ &= 2451830.0490199142 \text{ วัน} \end{aligned}$$

และสำหรับการคำนวณ H.J.D. ของภาพสเปกตรัมอื่นๆ จากการสังเกตการณ์ ของดาวคู่บีตา ไลรี ก็สามารถคำนวณได้ ในทำนองเดียวกัน และแสดงผลการคำนวณไว้ใน ตารางที่ 5-2 ของหัวข้อที่ 5.4 ในบทที่ 5 นี้

5.1.2 การคำนวณเฟสการโคจร

การคำนวณเฟสการโคจร (phase) ของดาวคู่บีตา ไลรี สำหรับข้อมูลสังเกตการณ์ที่เวลา H.J.D. ต่างๆ ในหัวข้อที่แล้ว สามารถหาได้โดยใช้สมการ(2.12) หรือ(2.13) เมื่อผู้เขียนใช้ค่า Epoch และ Period ของดาวคู่บีตา ไลรี จากการวัดที่ได้มาตรฐานของ Henden and Kaitchuck (1982) ด้วย Epoch = 2436379.532 วัน และ Period = 12.93016 วัน ซึ่งเห็นว่า วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (H.J.D.) สำหรับข้อมูลสังเกตการณ์ในงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าค่าอีพอช(Epoch) ดังนั้น จึงคำนวณเฟสได้จากสมการ(2.13)

ตัวอย่าง การคำนวณเฟส สำหรับข้อมูลที่ถ่าย ณ เวลา 20:10:42 น. ของวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 หรือ ที่ U.T. = 0.5490972 วัน ซึ่งตรงกับ H.J.D. = 2451830.0490199142 วัน เมื่อแทนค่า Epoch และ Period จากข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned} \text{Phase} &= \text{Fractional part of } \frac{2451830.0490199142 - 2436379.532}{12.93016} \\ &= \text{Fractional part of } 1194.920799 \\ &= 0.920799 \end{aligned}$$

และสำหรับการคำนวณ Phase ที่ H.J.D. อื่นๆ ของข้อมูลสังเกตการณ์ทั้งหมด ก็หาได้ในทำนองเดียวกัน และแสดงผลการคำนวณนี้ไว้ใน ตารางที่ 5-2 ของหัวข้อที่ 5.4

5.2 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุ

การวิเคราะห์ชนิดของธาตุจากภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่สังเกตการณ์ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (visible spectrum) จาก 560 ถึง 734 นาโนเมตร สำหรับเกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร สามารถดำเนินการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับใน หัวข้อที่ 3.2.1 (การทดลองหาชนิดสเปกตรัมเปรียบเทียบ) และจากการพิจารณาโปรไฟล์ของภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ตลอดจนของการสังเกตการณ์ พบว่า เส้นสว่างที่เกิดขึ้นมีความเข้มและค่าความยาวคลื่นผันแปรกับเวลาสังเกตการณ์ แต่รูปแบบของสเปกตรัมยังคงมีลักษณะเดิม ดังรูปที่ 4-18 ถึง 4-45 เพราะฉะนั้น จึงสรุปว่าบรรยากาศของระบบดาวคู่บีตา ไลรี ประกอบด้วยธาตุบางชนิดที่แน่นอนจากการพิจารณาเส้นสว่าง (หรือเส้นดูดกลืน) เทียบกับสเปกตรัมต่อเนื่อง เมื่อเราทราบความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดและสเปกตรัมจาก กฎ 3 ข้อ ของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff) นั่นคือ

1. ถ้าความหนาแน่นสูงและร้อน หรือวัตถุของแข็งร้อน จะให้สเปกตรัมต่อเนื่อง โดยปราศจากสเปกตรัมมีด
2. ถ้าความหนาแน่นต่ำและร้อน จะให้เส้นสเปกตรัมสว่าง
3. ถ้าความหนาแน่นต่ำและเย็นที่อยู่ด้านหน้าของแหล่งกำเนิดสเปกตรัมต่อเนื่อง จะให้เส้นมีด

และจากที่อธิบายในหัวข้อที่ 4.2.3 ด้วย

ด้วยเหตุผลข้างต้น ดังนั้น การวิเคราะห์หาชนิดของธาตุในบรรยากาศของระบบดาวคู่บีตา ไลรี จึงสามารถพิจารณาจากภาพสเปกตรัมเพียง 1 รูป ก็ได้

ตัวอย่าง ณ ที่นี้ ขอเลือกภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่ถ่ายเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 เวลา 20:10:42 น. หรือที่ H.J.D. = 2451830.049 วัน ดังรูปที่ 5-1 โดยมีลำดับการพิจารณาดังนี้

- (1) กำหนดสเกลในหน่วยนาโนเมตร (nm) ให้กับภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ด้วยสเปกตรัมเปรียบเทียบ นีออนที่ถ่ายในขบวนการเดียวกัน โดยวิธีการเดียวกันกับที่อธิบายในหัวข้อที่ 4.1.1 (ดังรูปที่ 4-1 ถึง 4-3 หรือ 4-4) และได้ผลการวัดหรือกำหนดสเกลในหน่วยนาโนเมตร ดังรูปที่ 5-1
- (2) จากรูปที่ 5-1 พบว่า มีเส้นสว่างเกิดขึ้น 4 เส้น (หรือแต่ละเส้นอาจมีการแยกเป็นคู่ที่บางเฟสของการโคจร ถ้ามีการเลือนคอปเปอร์) ทำการวัดค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่างเหล่านี้ได้ว่า
 - เส้นที่ I มีค่าความยาวคลื่น เท่ากับ 587.68 นาโนเมตร
 - เส้นที่ II มีค่าความยาวคลื่น เท่ากับ 656.46 นาโนเมตร
 - เส้นที่ III มีค่าความยาวคลื่น เท่ากับ 668.10 นาโนเมตร
 - เส้นที่ IV มีค่าความยาวคลื่น เท่ากับ 706.61 นาโนเมตร

จากทฤษฎีสเปกโตรสโคปีที่อธิบายการกำเนิดเส้นสเปกตรัมในหัวข้อที่ 2.2, หรือกฎของเคอร์ชอฟฟ์, หรือข้อเท็จจริงที่ว่า อะตอมแต่ละชนิดจะมีรูปแบบสเปกตรัมไม่เหมือนกัน, และข้อสรุปข้างต้นที่ว่า เส้นสว่าง (หรือดูดกลืน) เหล่านี้แสดงสถานะของธาตุในบรรยากาศที่ห่อหุ้มระบบดาว ดังนั้น ค่าความยาวคลื่นของแต่ละเส้นจึงสัมพันธ์กับชนิดของธาตุที่แน่นอน ซึ่งสามารถระบุชนิดของธาตุอย่างง่ายได้ 2 วิธี คือ

(2.1).การเทียบค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่างเหล่านี้กับค่าของเส้นสเปกตรัมมาตรฐานของธาตุต่างๆ ซึ่งผู้เขียนใช้ค่ามาตรฐานสำหรับเทียบจาก Weast et al. (1986-1987) ที่แสดงไว้ในตารางที่ ข-1 ของภาคผนวก ข พบว่า เส้นที่ I ความยาวคลื่น 587.68 nm ตรงกันกับธาตุ HeI, เส้นที่ II ความยาวคลื่น 656.46 nm ตรงกันกับธาตุ H α , เส้นที่ III ความยาวคลื่น 668.10 nm ตรงกันกับธาตุ HeI, และเส้นที่ IV ความยาวคลื่น 706.61 nm ตรงกันกับธาตุ HeI และสรุปผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 5-1 เมื่อให้ทราบว่า ผลของการวัดไม่ได้ตรงกันทีเดียวในจุดทศนิยมกับค่าความยาวคลื่นอ้างอิง เพราะว่าเป็นผลกระทบจากการเลื่อนคอปเปอร์ของดาวคู่บีตา ไกลรี

(2.2).การคำนวณจากทฤษฎีอะตอม ซึ่งผู้เขียนทำการพิสูจน์ไว้ในทฤษฎีหัวข้อที่ 2.2.4 เรื่องทฤษฎีอะตอมไฮโดรเจนและฮีเลียมแล้วในส่วนของการเปลี่ยนสถานะ (transition) ระหว่างระดับพลังงานของอะตอม ในหน้าที่ 15 สำหรับอะตอมไฮโดรเจน และในหน้าที่ 18, 19 สำหรับอะตอมฮีเลียม ที่พิจารณาผลกระทบของ LS coupling ด้วย แต่ผลจากการวัดของซีซีดีสเปกโตรกราฟสำหรับเกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร นี้ไม่สามารถแยกให้เห็นผลกระทบของ LS coupling ตามที่พิสูจน์ได้ ดังนั้นการพิจารณาเพียงการเปลี่ยนสถานะระหว่างเลขควอนตัมหลัก (n) ก็เพียงพอ แต่การพิจารณา LS coupling ด้วย ก็ช่วยให้เราทราบว่า เส้นสเปกตรัมอื่นๆ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างวงโคจรหรือเทอร์มิมซิมโบลโคบ้างของอะตอม ภายใต้กฎการเลือก ในสมการ(2.37) และ(2.38) ที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2.4 ของบทที่ 2 และจากการทราบว่าองค์ประกอบหลักของสารที่อยู่ภายในและในบรรยากาศของดาวประกอบด้วยธาตุพื้นฐาน 2 ชนิด คือ ธาตุไฮโดรเจน และฮีเลียม ดังนั้น เราจึงอาจคาดหมายได้ว่าเส้นสว่างที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นผลมาจาก 2 ธาตุนี้ แล้วจึงดำเนินการคำนวณ

สำหรับอะตอมไฮโดรเจน เราสามารถคำนวณหาความยาวคลื่นของเส้นสว่างที่เป็นไปได้โดยอาศัยสมการ(2.45) สำหรับเลขควอนตัมหลัก n และ $\lambda = hc/\Delta E$ ภายใต้กฎการเลือกของสมการ(2.37) เราจะได้ค่าความยาวคลื่น ดังในรูปที่ 2-4 และทำให้ทราบว่าเส้นสว่างที่เราวัดได้ เท่ากับ 656.46 nm คือ H α ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่าง $n=3$ ไปสู่ $n=2$ หรือระหว่างเทอร์มิมซิมโบลที่เป็นไปได้ คือ

$$3s \ ^2S_{1/2} \rightarrow 2p \ ^2P_{3/2}, \text{ หรือ } 2p \ ^2P_{1/2}$$

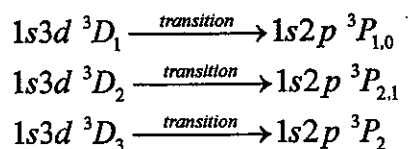
$$3d \ ^2D_{5/2} \rightarrow 2p \ ^2P_{3/2}$$

$$3d \ ^2D_{3/2} \rightarrow 2p \ ^2P_{3/2}, \text{ หรือ } 2p \ ^2P_{1/2}$$

เป็นเส้นสว่าง และแสดงผลการพิสูจน์ไว้ในตารางที่ 5-1

สำหรับอะตอมฮีเลียมนั้นผู้เขียนไม่ได้พิสูจน์หาค่าพลังงานของอะตอมไว้ แต่ได้พิสูจน์ให้เห็นเฉพาะว่า เส้นสว่างที่เป็นไปได้เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างวงโคจรใดในหน้าที่ 18 สำหรับ singlet state และหน้า 19 สำหรับ triplet state ภายใต้กฎการเลือกของสมการ(2.38) แล้วใช้ผลการทดลองและคำนวณไว้เป็นอย่างดีแล้วในรูปที่ 2-6 ก็จะทำให้ทราบว่า

เส้นที่ I ความยาวคลื่น 587.68 nm ตรงกันกับธาตุ HeI ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างเทอร์มิมซิมโบลที่เป็นไปได้ คือ



เป็นเส้นสว่าง สำหรับ Triplet state,

เส้นที่ III ความยาวคลื่น 668.10 nm ตรงกันกับธาตุ HeI ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างเทอร์มิมไบลที่เป็นไปได้ คือ



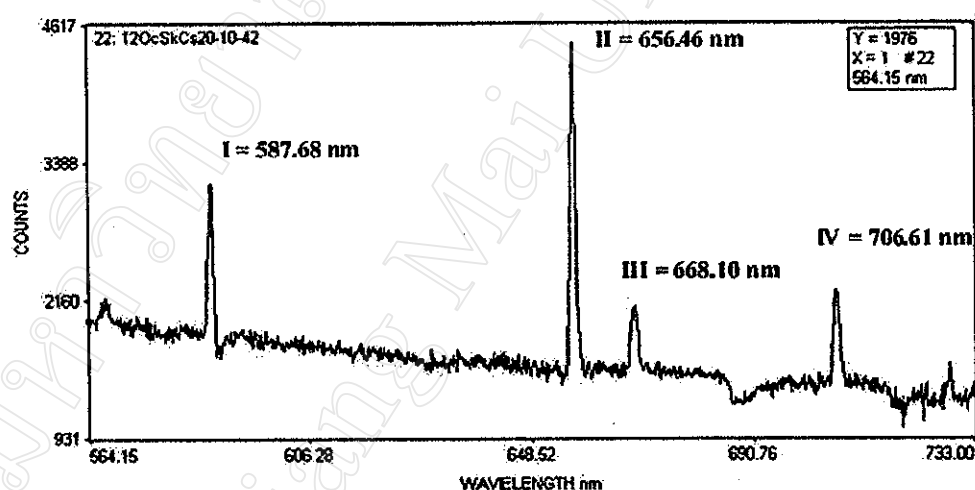
เป็นเส้นสว่าง สำหรับ Singlet state และ

เส้นที่ IV ความยาวคลื่น 706.61 nm ตรงกันกับธาตุ HeI ที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างเทอร์มิมไบลที่เป็นไปได้ คือ



เป็นเส้นสว่าง สำหรับ Triplet state

และแสดงผลการพิสูจน์นี้ในตารางที่ 5-1



รูปที่ 5-1 Calibrated spectrum ของดาวคู่บีตา ไลรี ที่ 12 ตุลาคม 2543 ณ 20:10:42 น. หรือ H.J.D. = 2451830.049 วัน, ซึ่งตรงกับ Phase = 0.920798902 ที่ถ่ายด้วย Exposure time = 60 วินาที

ตารางที่ 5-1 ผลการวิเคราะห์ชนิดของธาตุสำหรับเส้นสว่างย่านที่มองเห็นได้ในบรรยากาศของดาวคู่บีตา ไลรี

เส้นที่	ความยาวคลื่นที่วัดได้ (nm)	ความยาวคลื่นอ้างอิง (nm)	ชนิดของธาตุ	การเปลี่ยนสถานะ
I	587.68	587.57	He I	$n = 3$ ไปสู่ $n = 2$
II	656.46	656.28	H α	$n = 3$ ไปสู่ $n = 2$
III	668.10	667.82	He I	$n = 3$ ไปสู่ $n = 2$
IV	706.61	706.52	He I	$n = 3$ ไปสู่ $n = 2$

เมื่อ

- เส้นที่ I, II, III, IV ในคอลัมน์ที่ 1 เป็นสัญลักษณ์ที่ผู้เขียนกำหนดขึ้นแทนเส้นสว่าง เมื่อไม่ทราบชนิดของธาตุในตอนแรก ดังรูปที่ 4-5
- ความยาวคลื่นที่วัดได้ เป็นการวัดตามวิธีในข้อที่ (1) อยู่ในหน่วยนาโนเมตร (nm)
- ความยาวคลื่นอ้างอิง เป็นความยาวคลื่นของเส้นสว่างหรือเส้นดูดกลืนมาตรฐาน ในหน่วยนาโนเมตร ของ ORC Handbook of Chemistry and Physics ที่แสดงไว้ใน ตารางที่ ข-1 (หรือจากการคำนวณทางทฤษฎี)
- ชนิดของธาตุ เป็นผลสรุปที่ได้จากการเทียบค่าความยาวคลื่นมาตรฐานในตารางที่ ข-1 (หรือจากการคำนวณทางทฤษฎี) เมื่อเลข I หลังสัญลักษณ์ธาตุ หมายถึง อะตอมนั้นอยู่ในสภาพไอออนในเซชันที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral atom), II หมายถึง อะตอมอยู่ในสภาพไอออนในเซชันที่สูญเสียอิเล็กตรอน 1 ตัว (singly ionized atom), III หมายถึง อะตอมอยู่ในสภาพไอออนในเซชันที่สูญเสียอิเล็กตรอน 2 ตัว (doubly ionized atom), และ α หมายถึง เส้นสเปกตรัมที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่าง $n=2$ และ $n=3$ ของอนุกรมบาลเมอร์ (Balmer series) ของอะตอมไฮโดรเจน
- การเปลี่ยนสถานะ แทนพฤติกรรมของอะตอมในการเปลี่ยนสถานะระหว่างเลขควอนตัมหลัก (n)

สรุปว่า ธาตุโดยส่วนใหญ่ในย่านความยาวคลื่นที่มองเห็นได้สำหรับเส้นสว่างที่ห่อหุ้มระบบดาวคู่บีตา ไตรี คือ ไฮโดรเจน และฮีเลียม ที่มีความหนาแน่นต่ำและร้อนมาก เป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของเคอร์ชอฟฟ์ มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า สำหรับเส้นดูดกลืนก็เป็นตัวบ่งชี้เหมือนกันว่าบรรยากาศของระบบประกอบด้วยธาตุใด ซึ่งขบวนการเกิดเส้นดูดกลืนสามารถดูได้จากหัวข้อที่ 2.2.7 และ 4.2.3 ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 3 ของเคอร์ชอฟฟ์ และใช้วิธีที่ (2.1) ก็จะทราบชนิดของธาตุ

5.3 การวิเคราะห์ความผันแปรของความยาวคลื่น ความกว้าง และรูปร่างโปรไฟล์ ของเส้นสเปกตรัม กับเวลาสังเกตการณ์

ประกอบด้วย 5.3.1 ความผันแปรของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์, 5.3.2 ความผันแปรของความกว้างของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์, และ 5.3.3 ความผันแปรของรูปร่างโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์ ดังนี้

5.3.1 ความผันแปรของความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์

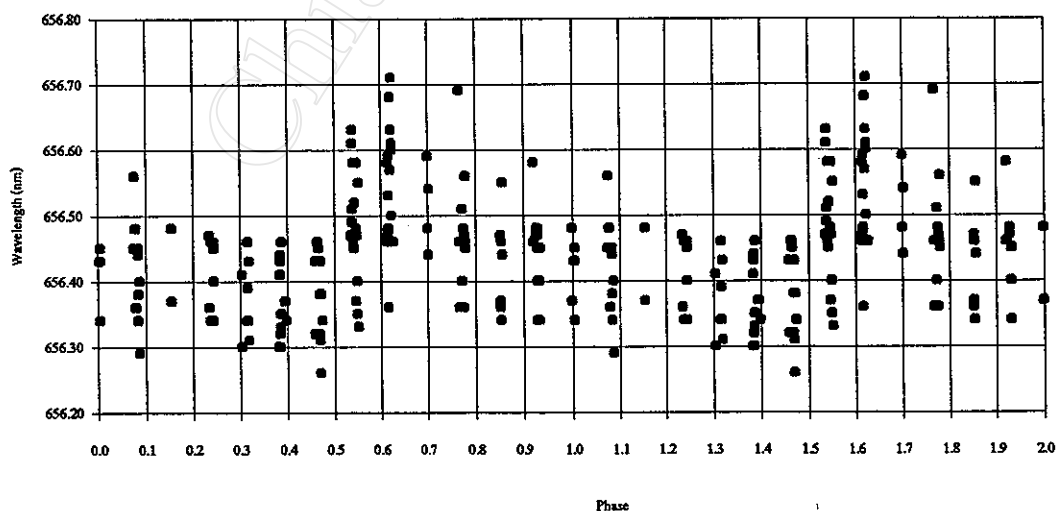
ประกอบด้วย 5.3.1.1 ความผันแปรของความยาวคลื่น, และ 5.3.1.2 ความผันแปรของความเร็วในแนวเส้นสายตา

5.3.1.1 ความผันแปรของความยาวคลื่น

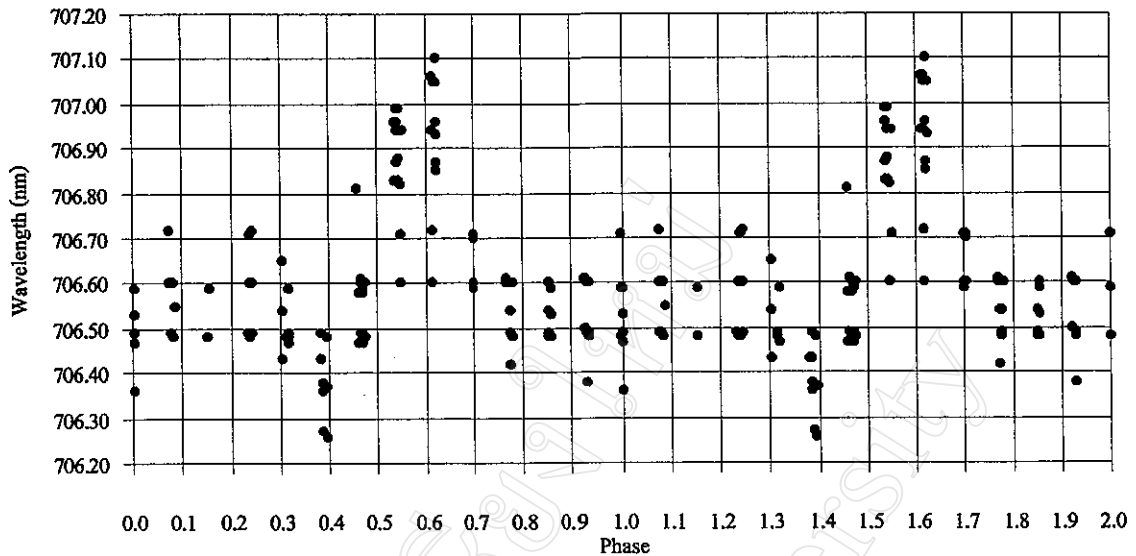
ทำการวัดความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมสว่างในทุกๆ ภาพสเปกตรัมของดาวคู่บีตา ไตรี จากวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 ถึง 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 จำนวน 187 รูป ของเส้นที่ I [หรือที่เส้นประมาณ 587.57 nm (HeI)], เส้นที่ II [หรือที่เส้นประมาณ 656.28 nm ($H\alpha$)], เส้นที่ III [หรือที่เส้นประมาณ 667.82 nm (HeI)], และเส้นที่ IV [หรือที่เส้นประมาณ 706.52 nm (HeI)] ในหน่วยนาโนเมตร โดยวัดค่า

ความยาวคลื่นเหล่านี้จากภาพสเปกตรัมที่ไม่ผ่านการทำ Renormalize และกำหนดสเกลที่ Setup menu option: X-axis calibration ในโปรแกรมแคสเทรลสเปก ด้วยค่าความยาวคลื่นมาตรฐานในตารางที่ ข-1 ของภาคผนวก ข (คู่มืออธิบายเหตุผลนี้เพิ่มเติมได้ที่ หัวข้อที่ 4.1.1 ของบทที่ 4) ได้ผลการวัด ดังตารางที่ 5-2 ในหัวข้อที่ 5.4 และจากการพิจารณาค่าความยาวคลื่นที่ H.J.D. หรือ Phase ใดๆ พบว่า มีบางช่วง เส้นเหล่านั้นแสดงการแยกออกเป็นเส้นคู่ ได้แก่ เส้น ~ 587.57 nm (HeI) และ ~ 667.82 nm (HeI) ปรากฏการณ์เช่นนี้มีความหมายว่า ระบบแหล่งกำเนิดแสงที่เราวัดจากฟลักพื้นเป็นระบบดาวที่ประกอบด้วย วัตถุสองสว่างขนาดใหญ่ 2 ดวง ซึ่งทั้งสองดวง คือ ดาวฤกษ์ในระบบดาวคู่ ซึ่งเราเรียกระบบดาวคู่นี้ว่า ดาวคู่บีตา โลรี ($\alpha = 18$ ชั่วโมง 50 นาที 06 วินาที, $\delta = +33^{\circ}22'07''$) โดยผลสะท้อนที่แสดงให้เห็นว่าเป็นดาวคู่ คือ เกิดการเลื่อนของสเปกตรัม (spectrum shift) ที่มีมาจากหลายสาเหตุตามที่อธิบายไว้ในทฤษฎีหัวข้อที่ 2.2.5.1 [จากสมการ(2.47)], และ 2.2.7 [จากสมการ(2.55) ถึง (2.59)] , แต่ผลกระทบที่ชัดเจนในการเลื่อนสเปกตรัม คือ การเลื่อนดอปเปลอร์ (Doppler shift) ที่เนื่องมาจากการโคจรของดาวสมาชิกรอบจุดศูนย์กลางมวลของระบบ แต่ที่เส้น ~ 656.28 nm และ ~ 706.52 nm ไม่แสดงการเลื่อนให้เห็น อาจเป็นเพราะว่า กำลังการแยกภาพของเกรตติงต่ำ (เกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร) หรือ linear dispersion มีค่ากว้างเกินไป (~ 0.11 nm/pixel) และรวมถึงดาวสมาชิกในระบบดาวคู่ดวงใดดวงหนึ่งมีความสว่างน้อยเมื่อเทียบกับอีกดวง

ถ้านำค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่าง (หรือ $\Delta\lambda$ จากสมการ(2.47) ก็ได้) สำหรับที่เส้น ~ 656.28 nm และ ~ 706.52 nm มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับเฟสการโคจรของระบบดาวคู่บีตา โลรี ที่คำนวณได้จากหัวข้อที่ 5.1.2 เราจะได้ผลการสร้างกราฟ ดังรูปที่ 5-2 และ 5-3 ตามลำดับ และสาเหตุที่เลือกเส้นสว่าง 2 เส้นนี้มาสร้างกราฟ เพื่อให้การพิจารณาแนวโน้มของการผันแปรง่ายขึ้นและเส้นทั้งสองไม่แสดงการแยกเป็นคู่ ตามคุณลักษณะของอุปกรณ์สังเกตการณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพสเปกตรัม ได้แก่ ขนาดเกรตติง, ความละเอียดของฟิสิกเซลล์ของกล้องซีซีดี เป็นต้น



รูปที่ 5-2 แสดงค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่าง H α ที่ผันแปรกับเฟสการโคจรของระบบดาวคู่บีตา โลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการเลื่อนดอปเปลอร์ที่เนื่องมาจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์



รูปที่ 5-3 แสดงค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่าง HeI ที่เส้น ~ 706.52 nm ที่ผันแปรกับเฟสการโคจรของระบบดาวคู่บีตา ไลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการเลื่อนดอปเปลอร์ที่เนื่องมาจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

จาก รูปที่ 5-2 และ 5-3 สามารถวิเคราะห์ได้ว่า

- (1). สำหรับเส้นสว่าง $H\alpha$ ดังรูปที่ 5-2 เห็นว่าค่าความยาวคลื่นของเส้นนี้มีการเลื่อนขึ้นลงสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่นอ้างอิง 656.28 nm และให้รูปร่างของกราฟใกล้เคียงกับรูปที่ 2-19 (สำหรับกรณีความเร็วในแนวเส้นสายตา) ในทฤษฎีบทที่ 2 นั้นแสดงว่า ความรีของวงโคจร e ไม่เท่ากับศูนย์ (เมื่อ $e < 1.0$ หมายถึงวงโคจรเป็นแบบวงรี, $e = 0.0$ หมายถึงวงโคจรเป็นแบบวงกลม, $e = 1.0$ หมายถึงวงโคจรเป็นแบบพาราโบลา, และ $e > 1$ หมายถึงวงโคจรเป็นแบบไฮเพอร์โบลา) และเนื่องจากมันมีการเลื่อนแบบเป็นคาบ ดังนั้น แสดงว่า ระบบดาวคู่บีตา ไลรี มีขอบเขตหรือ bound ตามทฤษฎีบทไวเรียล ของหัวข้อที่ 2.3.2 และมีวงโคจรเป็นแบบวงรี และเห็นอีกว่า ที่เฟส ประมาณ 0.6 จะมีการเลื่อนไปทางสีแดง (redshift) มากที่สุด และที่เฟส ประมาณ 0.3 ถึง 0.4 จะมีการเลื่อนไปทางสีน้ำเงิน (blueshift) มากที่สุด แต่ค่าความยาวคลื่นนี้ที่ทุกๆ เฟสต่างก็เลื่อนไปทางสีแดงทั้งหมดเทียบกับค่าอ้างอิง 656.28 nm
- (2). สำหรับเส้นสว่าง He I ที่เส้น ~ 706.52 nm เห็นว่าการเลื่อนของเส้นสเปกตรัมนี้ไม่เ้มามากเท่ากับกรณีของเส้นสว่าง $H\alpha$ และการเลื่อนไปทางสีน้ำเงินสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วงของเฟสที่ค่อนข้างแคบอยู่ที่เฟสประมาณ 0.4 และมีการเลื่อนไปทางสีแดงสูงสุดที่เฟส ประมาณ 0.6

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นของเส้น $H\alpha$ (~ 656.28 nm) และเส้น He I (~ 706.52 nm) สรุปได้ว่า ดาวเป้าหมายของงานวิจัยนี้ที่ $\alpha = 18$ ชั่วโมง 50 นาที 06 วินาที, $\delta = +33^\circ 22' 07''$ พบว่า เป็นดาวคู่สเปกโตรไคปี ตามที่นิยามในหัวข้อที่ 2.4.1 ของบทที่ 2 มีคาบการโคจรสั้น ประมาณ 13 วัน (เมื่อค่าคาบการโคจรที่นำมาพิจารณาเฟสในหัวข้อที่ 5.1.2 เท่ากับ 12.93016 วัน) จากปรากฏการณ์การเลื่อนสเปกตรัม, และมีดาวสมาชิกดวงหนึ่งมีความสว่างต่างกันมากในระดับที่ทำให้เส้นสว่างของ $H\alpha$ และเส้น He I (~ 706.52 nm) ไม่สามารถสังเกตเห็นการแยก สำหรับเกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร

5.3.1.2 ความผันแปรของความเร็วในแนวเส้นสายตา

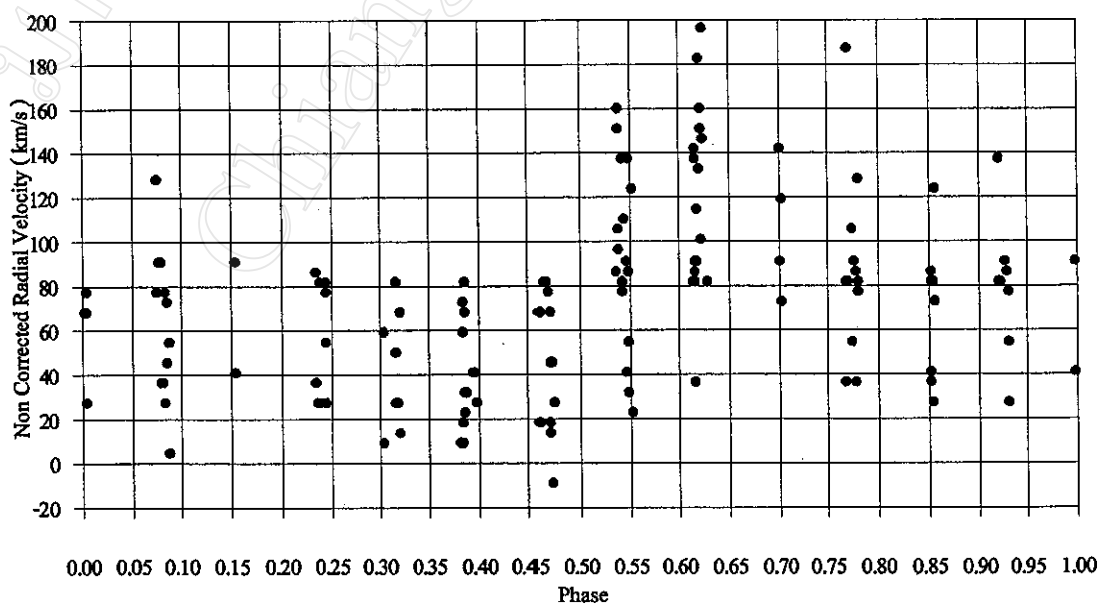
ประกอบด้วย 5.3.1.2.1 ความเร็วในแนวเส้นสายตาที่ไม่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลก, และ 5.3.1.2.2 ความเร็วในแนวเส้นสายตาที่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ดังนี้

5.3.1.2.1 ความเร็วในแนวเส้นสายตาที่ไม่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลก

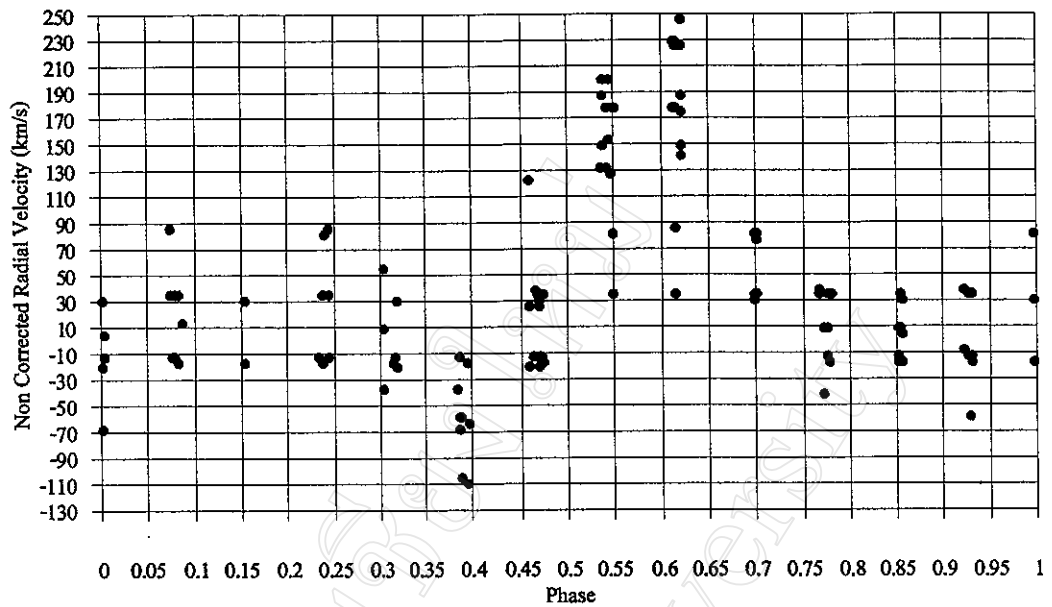
ความเร็วในแนวเส้นสายตาจากการเลื่อนดอปเปลอร์ที่ไม่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลก แทนด้วย $V_{r, non-corrected, \beta Lyrae}$ และสามารถหาผลการคำนวณได้จากสมการ(2.47) เมื่อ $v_r \ll c$ นั่นคือ

$$v_r = c(\lambda_{obs} - \lambda_{rest})/\lambda_{rest} = c \Delta\lambda/\lambda_{rest} \quad (5.1)$$

เมื่อ v_r เป็นความเร็วในแนวเส้นสายตา, λ_{obs} เป็นความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมจากดาวเป้าหมายที่เราวัดได้ในตารางที่ 5-2, λ_{rest} เป็นความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมเดียวกันที่วัดในห้องปฏิบัติการหรือความยาวคลื่นอ้างอิง (ได้จากตารางที่ ข-1 ของภาคผนวก ข), และ c เป็นความเร็วแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.99792458×10^5 km/s ผลกระทบของ v_r ที่เนื่องจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์มีมาก และสามารถแก้ไขได้ตามวิธีการในหัวข้อที่ 5.3.1.2.2 โดยปกติถ้าได้ v_r มีค่าเป็นลบ หมายความว่าดาวนั้นกำลังเคลื่อนที่เข้าหาเรา และถ้ามีค่าเป็นบวกจะหมายความว่า ดาวนั้นกำลังเคลื่อนที่ถอยห่างออกไปจากเรา และถ้าพิจารณารูปที่ 5-2 ของเส้น $H\alpha$ พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่ผันแปรกับเฟสการโคจรที่ทุกๆ เฟสเกิดการเลื่อนไปทางสีแดงเทียบกับค่าอ้างอิง 656.28 nm นั้นแสดงว่า ศูนย์กลางมวลของระบบดาวคู่เคลื่อนที่ถอยออกไปจากโลกในแนวเส้นสายตา หรืออาจเกิดจากผลกระทบอื่นที่มาจากกลุ่มก๊าซขนาดใหญ่รอบๆ ดาวคู่บีตา โลรี ก็ได้ เพราะว่า มีผลลัพธ์ของการเลื่อนสเปกตรัมที่ต่ำกว่าค่าอ้างอิงด้วย ดังรูปที่ 5-3 สำหรับเส้น HeI (~706.52 nm) และถ้าแทน λ_{obs} , λ_{rest} , และ c ในสมการ(5.1) สำหรับกรณี $H\alpha$ และ He I (~706.52 nm) โดยไม่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลก จะได้ความเร็วในแนวเส้นสายตา ดังรูปที่ 5-4 และ 5-5 ตามลำดับ



รูปที่ 5-4 ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง $H\alpha$ ของดาวคู่บีตา โลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลก



รูปที่ 5-5 ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง HeI (~706.52 nm) ของดาวคู่บีตาโลรี ที่ไม่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลก

เมื่อ non corrected radial velocity แทนด้วย $V_{r, non-corrected, \beta Lyrae}$ หรือ v_r มีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อวินาที (km/s) และสามารถวิเคราะห์กราฟได้ในเบื้องต้น ดังนี้ คือ

- (1). สำหรับรูปที่ 5-4 เป็นเส้น H α พบว่า มีรูปร่างแบบเดียวกันกับรูปที่ 5-2 แต่รูปที่ 5-4 อยู่ในรูปของความเร็ว หน่วยเป็น km/s ดังนั้น การวิเคราะห์กราฟความเร็วในแนวเส้นสายตาก็ได้ข้อสรุปที่เสริมกัน จากรูปเห็นว่า ความเร็วที่เลื่อนไปทางสีแดงสูงสุดมีค่าตรงกับเฟสประมาณ 0.60 ถึง 0.65 ซึ่งเพิ่มขึ้นค่อนข้างชันเริ่มจากเฟส 0.50 ถึง 0.60, และในช่วงเฟส 0.65 ถึง 0.95 เห็นว่าความเร็วลดลงค่อนข้างช้า
- (2). สำหรับรูปที่ 5-5 เป็นเส้น He I (~706.52 nm) มีรูปร่างแบบเดียวกันกับรูปที่ 5-3 ซึ่งพบว่า มีการเลื่อนของความเร็วไปทางสีแดง และสีน้ำเงินชัดเจนเทียบกับความเร็ว 0 km/s โดยความเร็วที่เลื่อนไปทางสีแดงสูงสุดมีค่าตรงกับเฟสประมาณ 0.60 ถึง 0.65 และความเร็วที่เลื่อนไปทางสีน้ำเงินสูงสุดมีค่าตรงกับเฟสประมาณ 0.38 ถึง 0.40, และความเร็วประมาณเท่ากับศูนย์ที่เฟสประมาณ 0.0 ถึง 0.1

5.3.1.2.2 ความเร็วในแนวเส้นสายตาที่คิดผลกระทบจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

พิจารณาการแก้ไขความเร็วในแนวเส้นสายตา (radial velocity correction) ที่เนื่องมาจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ สำหรับองค์ประกอบการเคลื่อนที่ในแนวเส้นสายตา แทนด้วย V_{rE} ให้โดย Schlesinger ในปี พ.ศ. 2442 [Lang, 1980] คือ

$$\begin{aligned} V_{rE} &= -V_E \cos \beta \sin(L - \lambda) + V_E e \sin(\Gamma - \lambda) \cos \beta \quad \text{หรือ} \\ &= -V_E \cos \beta \cos \lambda (\sin L - e \sin \Gamma) + V_E \cos \beta \sin \lambda (\cos L - e \cos \Gamma) \end{aligned} \quad (5.2)$$

เมื่อ V_E เป็นอัตราเร็วในการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์, λ และ β เป็นพิกัดอิกลิปติก (ecliptic coordinates) ของวัตถุท้องฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ α และ δ ของดาวในระบบเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า และ e เป็นค่ามุมเยื้องของอิกลิปติกมีค่าเท่ากับ $23^\circ 27'$ คือ

$$\cos\beta \cos\lambda = \cos\delta \cos\alpha, \quad \text{และ}$$

$$\cos\beta \sin\lambda = \sin\delta \sin\alpha + \cos\delta \cos\epsilon \sin\alpha, \quad (5.3)$$

L เป็นลองจิจูดของดวงอาทิตย์ที่อีพ็อก (Epoch) สำหรับตำแหน่ง λ และ β ได้จากสมการ(2.9), Γ เป็นลองจิจูดของดวงอาทิตย์ที่ perigee กำหนดได้จาก

$$\begin{aligned} \Gamma &= 281^{\circ}13'15.00'' + 6,189.03''T_0 + 1.63''T_0^2 + 0.012''T_0^3 \quad \text{หรือ} \\ &= 281^{\circ}.2208333 + 1.719175 T_0 + 0.000452778 T_0^2 + 3.33333 \times 10^{-6} T_0^3 \end{aligned} \quad (5.4)$$

เมื่อ T_0 เป็นจำนวน tropical centuries นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 (สัมพันธ์กับอีพ็อก) ซึ่งถ้าเทียบเคียงกับสมการ(2.8) จะได้

$$T_0 = (\text{J.D.} - 2415020) / 36524.219879 \quad (5.5)$$

เมื่อตัวส่วน 36524.219879 มาจาก one tropical year = 365.24219879 วัน, $e = 0.0167$ เป็นความรีของวงโคจรโลก, และ V_E เป็นอัตราเร็วในการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ กำหนดได้จาก

$$V_E = \frac{2\pi a}{P(1-e^2)^{1/2}} \approx 2.9974 \text{ km sec}^{-1}$$

เมื่อระยะครึ่งแกนเอกของโลกคือ $a = 1.49597892 \times 10^7 \text{ km}$, และจำนวน mean sidereal seconds ใน solar year คือ $P = 31,470,758$ วินาที เพราะฉะนั้น ความเร็วในแนวเส้นสายตาของดาวคู่บีตา ไลรี ที่คิดผลกระทบของการโคจรของโลกแล้ว $V_{r,corrected,\beta\text{Lyrae}}$ มีค่าเท่ากับ

$$V_{r,corrected,\beta\text{Lyrae}} = V_{r,non-corrected,\beta\text{Lyrae}} + V_{rE} \quad (5.6)$$

ตัวอย่าง การคำนวณหา $V_{r,corrected,\beta\text{Lyrae}}$ ของเส้นสว่าง $H\alpha$ สำหรับภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่ถ่ายเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2543 เวลา 20:10:42 น. หรือที่ H.J.D. = 2451830.049 วัน ดังนี้

(1). เริ่มจากหาความเร็วในแนวเส้นสายตาของโลกรอบดวงอาทิตย์ (V_{rE}) จากสมการ(5.2)

(1.1). หา L ได้จากสมการ(2.9) ซึ่งคำนวณไว้แล้วสำหรับการคำนวณ H.J.D. ในหัวข้อที่ 5.1.1 โดย

$$L = 638.10465 \text{ เรเดียน} \quad \text{สำหรับ H.J.D.} = 2451830.049 \text{ วัน}$$

(1.2). หา T_0 จากสมการ(5.5) จะได้

$$T_0 = (2451830.049 - 2415020) / 36524.219879 = 1.0078257 \text{ สำหรับ J.D.} = 2451830.049 \text{ วัน}$$

(1.3). หา $V_E = 2.9974 \text{ km/s}$, $e = 0.0167$

(1.4). หา $\cos\beta\cos\lambda$, $\cos\beta\sin\lambda$ จากสมการ(5.3) เมื่อ $\alpha = 18$ ชั่วโมง 50 นาที 06 วินาที, และ $\delta = +33^{\circ}22'07''$ จะได้

$$\cos\beta\cos\lambda = 0.1837229, \text{ และ } \cos\beta\sin\lambda = -0.5285221$$

(1.5). ใช้ T_0 ที่คำนวณได้แทนลงในสมการ(5.4) จะได้

$$\Gamma = 282.9539254 \text{ องศา}$$

(1.6). แล้วแทนค่า V_E , $\cos\beta\cos\lambda$, $\cos\beta\sin\lambda$, L , e , และ Γ ลงในสมการ(5.2) จะได้

$$V_{rE} = 1.673535103 \text{ km/s}$$

(1.7). หา $V_{r,non-corrected,\beta\text{Lyrae}}$ จากสมการ(5.1) ของหัวข้อที่ 5.3.1.2.1 นั่นคือ

$$V_{r,non-corrected\beta Lyrae} = [(656.46-656.28)/656.28][2.99792458 \times 10^5] \text{ km/s}$$

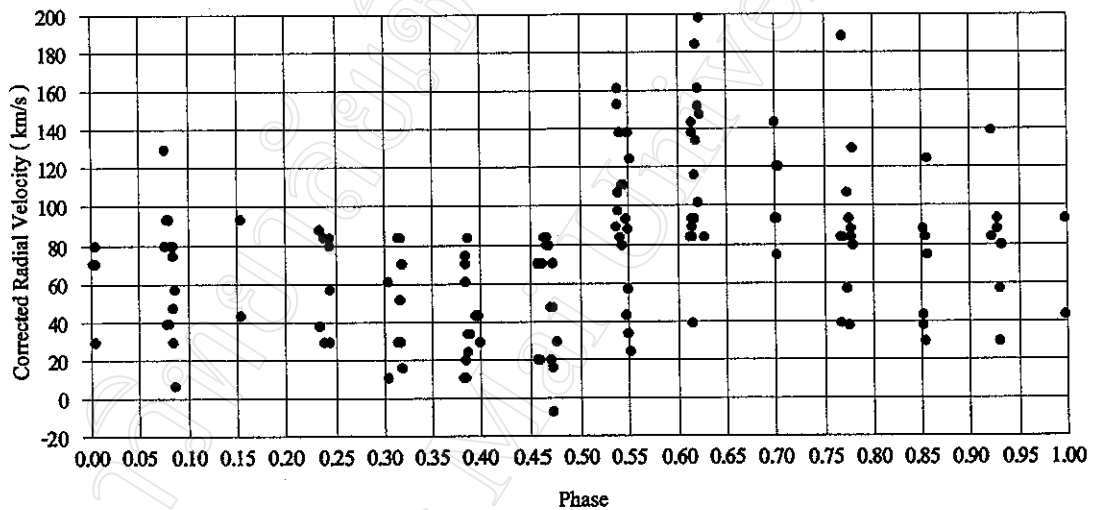
$$= 82.22502962 \text{ km/s} \text{ สำหรับ H}\alpha \text{ ที่ H.J.D.} = 2451830.067 \text{ วัน}$$

(2). และหา $V_{r,corrected,\beta Lyrae}$ โดยแทน V_{TE} และ $V_{r,non-corrected\beta Lyrae}$ ลงในสมการ(5.6) จะได้

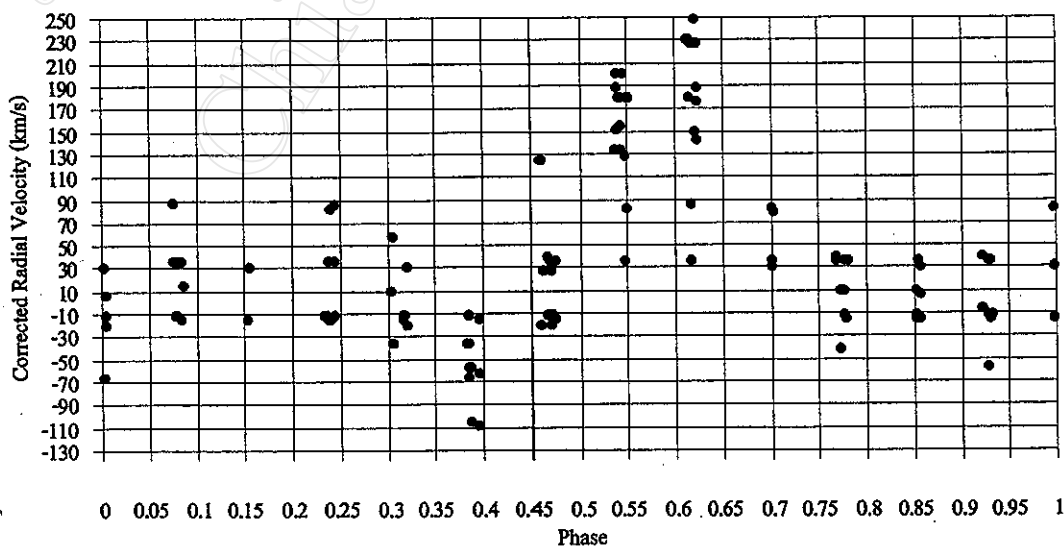
$$V_{r,corrected,\beta Lyrae} = 83.89856472 \text{ km/s}$$

และการหาค่า $V_{r,corrected,\beta Lyrae}$ สำหรับเส้นสว่างของ H α และเส้น He I อื่นๆ ที่ H.J.D. ต่างๆ สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งแสดงผลการคำนวณ $V_{r,corrected,\beta Lyrae}$ (ที่แทนด้วย RV) ไว้ในตารางที่ 5-2

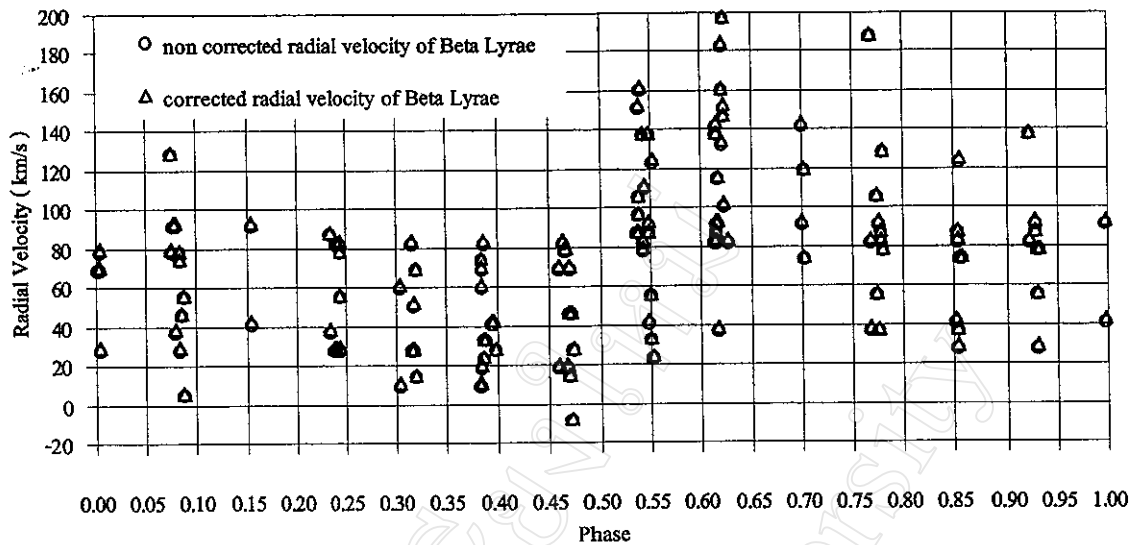
ถ้าเรานำค่า $V_{r,corrected,\beta Lyrae}$ พล็อตกราฟกับเฟสการโคจร สำหรับเส้นสว่าง H α และ HeI ที่เส้นสว่าง $\sim 706.52 \text{ nm}$ จะได้ รูปที่ 5-6 และ 5-7 ตามลำดับ และถ้านำ $V_{r,corrected,\beta Lyrae}$ และ $V_{r,non-corrected\beta Lyrae}$ ของเส้น H α มาพล็อตอยู่บนสเกลเฟสการโคจรของรูปเดียวกัน จะได้ผลการเปรียบเทียบนี้ ดังรูปที่ 5-8



รูปที่ 5-6 ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง H α ของดาวคู่บีตา โลรี ที่คิดผลกระทบบจากการโคจรของโลก



รูปที่ 5-7 ผลการคำนวณความเร็วในแนวเส้นสายตาของเส้นสว่าง HeI($\sim 706.52 \text{ nm}$) ของดาวคู่บีตา โลรี ที่คิดผลกระทบบจากการโคจรของโลก



รูปที่ 5-8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง $V_{r, \text{corrected } \beta \text{ Lyrae}}$ และ $V_{r, \text{non-corrected } \beta \text{ Lyrae}}$ ของเส้นสว่าง H α ของดาวคู่อุปตา โลรี

- จากรูปที่ 5-6, 5-7, และ 5-8 เมื่อทำเป็น corrected radial velocity แล้วจะสามารถวิเคราะห์กราฟเหล่านี้ได้ว่า
- (1) สำหรับรูปที่ 5-6 เป็นเส้นสว่าง H α มีการเลื่อนไปทางสีแดงมากที่สุดที่เฟส ประมาณ 0.62 ด้วยความเร็วในแนวเส้นสายตาสัมพันธ์กับเรา ประมาณ 150 km/s (จากกลุ่มข้อมูล), และมีการเลื่อนไปทางสีน้ำเงินมากที่สุดที่เฟส ประมาณ 0.38 ด้วยความเร็วในแนวเส้นสายตาสัมพันธ์กับเรา ประมาณ 24 km/s
 - (2) สำหรับรูปที่ 5-7 เป็นเส้นสว่าง He I (~706.52 nm) มีการเลื่อนไปทางสีแดงมากที่สุดที่เฟส ประมาณ 0.62 ด้วยความเร็วในแนวเส้นสายตาสัมพันธ์กับเรา ประมาณ 226 km/s, และมีการเลื่อนไปทางสีน้ำเงินมากที่สุดที่เฟส ประมาณ 0.38 ด้วยความเร็วในแนวเส้นสายตาสัมพันธ์กับเรา ประมาณ -104 km/s
 - (3) สำหรับรูปที่ 5-8 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง $V_{r, \text{corrected } \beta \text{ Lyrae}}$ และ $V_{r, \text{non-corrected } \beta \text{ Lyrae}}$ ของเส้น H α มีผลต่างของความเร็วที่คำนวณได้เป็น V_{re} (km/s) ผันแปรตามเฟส เห็นว่า ไม่มีผลกระทบต่อการรูปร่างของเส้นแนวโน้มของเส้นโค้งความเร็ว แต่จะมีผลกระทบกับข้อมูลเชิงตัวเลขที่ทำให้การวัดความเร็วในแนวเส้นสายตามีความถูกต้องมากขึ้น

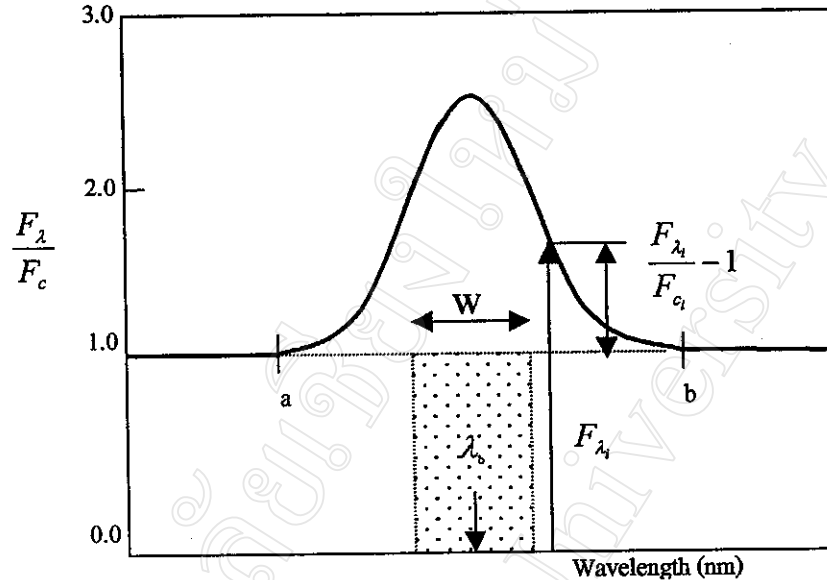
5.3.2 ความผันแปรของความกว้างของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์

เนื่องจากการข้อมูลของเราอยู่ในรูปของเส้นสเปกตรัมสว่าง ดังนั้น เราจึงต้องนิยามความกว้างสมมูล (equivalent width) W ของสมการ (2.54) ดังรูปที่ 2-10 ซึ่งอยู่ในรูปของการวิเคราะห์เส้นดูดกลืนให้มาอยู่ในรูปของการวิเคราะห์เส้นสเปกตรัมสว่าง และรวมถึงการพิจารณาหา Full width at Half Maximum [FWHM ที่แทนด้วย $(\Delta\lambda)_{1/2}$] ของเส้นสเปกตรัมสว่างด้วย

ด้วยเหตุผลข้างต้น ดังนั้น จึงแยกพิจารณาได้เป็น 2 หัวข้อ คือ 5.3.2.1 ความกว้างสมมูลของเส้นสเปกตรัมสว่าง, และ 5.3.2.2 การวิเคราะห์ FWHM (Full Width at Half Maximum) ของเส้นสเปกตรัมสว่าง ดังนี้

5.3.2.1 ความกว้างสมมูลของเส้นสเปกตรัมสว่าง

เริ่มจาก การพิจารณาโปรไฟล์ของเส้นสว่างที่ถูก normalized แล้วด้วยสเปกตรัมต่อเนื่องมีค่าเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 5-9 เมื่อขบวนการทำ normalized spectrum สามารถดูได้จากหัวข้อที่ 4.2.3 ของบทที่ 4



รูปที่ 5-9 แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับการนิยาม W

ขนาดของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมส่วนที่แรเงา = กว้าง $\times$ ยาว

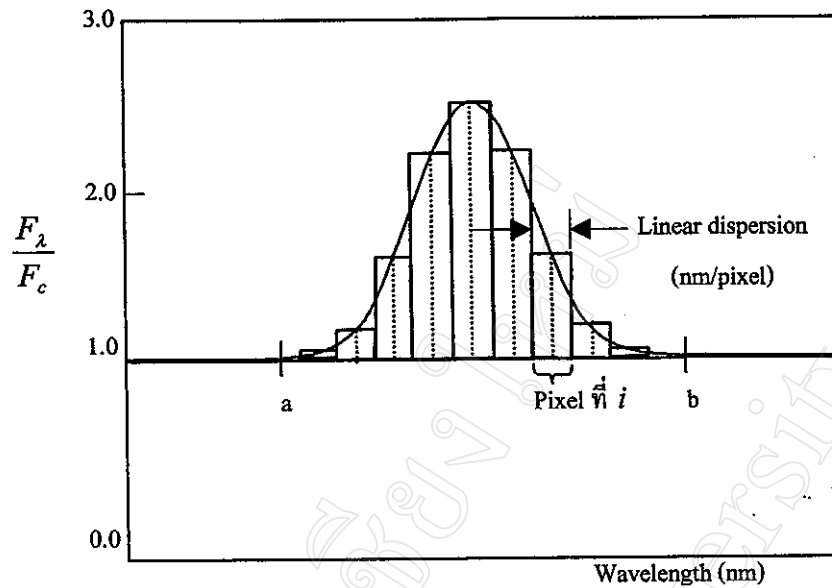
$$\begin{aligned}
 &= W_\lambda \times \left(\frac{F_\lambda}{F_c} = 1 \right) \\
 &= W_\lambda
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

จะเห็นว่า พื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมนั้น มีค่าเท่ากับขนาดของความกว้างสมมูล W_λ สำหรับภาพสเปกตรัมที่ถูก normalized แล้ว เมื่อ W_λ มีหน่วยเป็นนาโนเมตร ซึ่งมีวิธีการคำนวณ W_λ ดังนี้ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดฟลักซ์ของเส้นสว่างที่ λ ใดๆ ภายในเส้นเทียบกับระดับสเปกตรัมต่อเนื่องที่ถูก normalized แล้ว ด้วยการคำนวณผลต่างของฟลักซ์ระหว่างของเส้นที่ λ_i (แทนด้วย F_{λ_i} หรือ $F_{\text{cfLyrae},i}$) กับระดับสเปกตรัมต่อเนื่อง (หรือเส้นฐาน) ที่ λ_i เดียวกัน (แทนด้วย F_{c_i} หรือ $F_{\text{Baseline},i}$) ของ calibrated spectrum แล้วหารด้วยฟลักซ์ของสเปกตรัมต่อเนื่องของ calibrated spectrum ที่ λ_i เดียวกันอีก เช่นเดียวกับสมการ(4.5) จะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{F_{\lambda_i} - F_{c_i}}{F_{c_i}} &= F_{\text{normalized}} \\
 &= \frac{F_{\lambda_i}}{F_{c_i}} - 1
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

ดังแสดงในรูปที่ 5-9 และจากการนิยามความกว้างสมมูล W_λ ของเส้นตามสมการ(5.7) ที่ว่า W_λ มีค่าเท่ากับขนาดของพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมส่วนที่แรเงาที่ normalized แล้ว ดังรูปที่ 5-9 ดังนั้น เราจะสามารถคำนวณ W_λ ได้จากการอินทิเกรตหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งของโปรไฟล์ของเส้นสว่างนี้ นั่นคือ

$$W_\lambda = \int_a^b \left(\frac{F_\lambda}{F_c} - 1 \right) d\lambda \tag{5.9}$$



รูปที่ 5-10 แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับแสดงการวิเคราะห์หา W ซึ่งมี linear dispersion (nm/pixel) คงตัว

รูปที่ 5-10 ต้องการชี้ให้เห็นว่า ข้อมูลของภาพสเปกตรัมจากการถ่ายจะมีความละเอียดมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่เรากำหนดในเครื่องมือซีซีดีสเปกโตรกราฟ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ภาพสเปกตรัมที่มี linear dispersion ประมาณ 0.10 ถึง 0.11 nm และทำการ renormalize ให้มี linear dispersion คงตัว เท่ากับ 0.11 nm ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 โดยถ้า linear dispersion มีค่าน้อยความละเอียดก็ยิ่งมาก และจากรูปที่ 5-10 แต่ละช่วง λ_i ต่อ pixel ที่ i จะให้พื้นที่ของรูปแท่งสี่เหลี่ยมย่อย มีค่าเท่ากับ

$$(\text{linear dispersion})_i \times \left(\frac{F_{\lambda_i}}{F_{c_i}} - 1 \right)$$

ดังนั้น พื้นที่ของโปรไฟล์ของเส้นสว่างจาก λ_a ถึง λ_b จากการกำหนดได้ในสมการ(5.9) จะมีค่าเท่ากับ

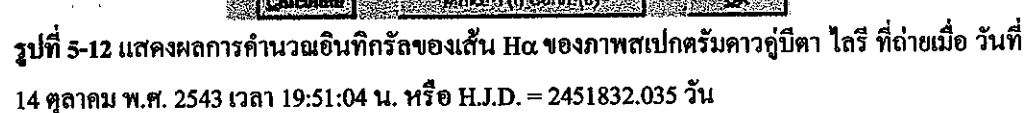
$$W_\lambda = \sum_{i=a}^{i=b} (\text{linear dispersion})_i \times \left(\frac{F_{\lambda_i}}{F_{c_i}} - 1 \right) \quad (5.10)$$

ตัวอย่าง การคำนวณหา W_λ ของเส้นที่ II($\sim 656.28\text{nm}$) หรือ H α สำหรับรูปที่ 4-20 ซึ่งเป็นภาพ Normalized spectrum ของดาวคู่บีตา ไกลรี ถ่ายเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2543 เวลา 19:51:04 น. หรือ H.J.D. = 2451832.035 วัน ซึ่งตรงกับ Phase = 0.074413018 ด้วย linear dispersion คงตัว = 0.11 nm ซึ่งความยาวคลื่นของเส้นสว่างนี้ มีค่าวัดได้เท่ากับ 656.56 nm และจากสมการ(5.10) จะคำนวณ W ได้เท่ากับ

$$W_{656.56} = (\text{linear dispersion}) \times \sum \left(\frac{F_{\lambda_i}}{F_{c_i}} - 1 \right)$$

$$= 2.112 \text{ nm}$$

และสำหรับการคำนวณความกว้างสมมูล (W) ของเส้นสว่างอื่นๆ ก็ทำได้ในนองเดียวกัน ซึ่งแสดงผลการคำนวณทั้งหมดไว้ใน ตารางที่ 5-2 ของหัวข้อที่ 5.4 โดยการคำนวณเหล่านี้สามารถใช้โปรแกรม เคสเทรลสเปกช่วยในการหาได้ สำหรับเส้นเดียวกันนี้ อย่างเป็นลำดับขั้น ดังนี้

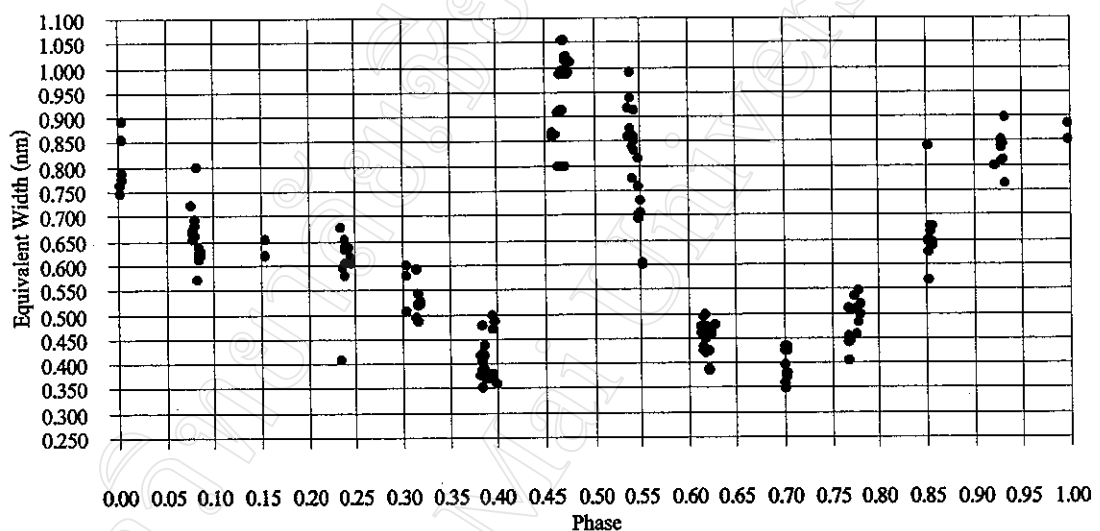


และมีข้อสังเกตเพิ่มเติมจากสมการ(5.10)ว่า ถ้าหากเส้นสเปกตรัมที่วัดได้มีรูปร่างที่แทนด้วยฟังก์ชัน
แน่นอน $f(x)$ ที่ linear dispersion เข้าใกล้ศูนย์ เช่น Gaussian function ก็สามารคำนวณ W_λ ด้วยสมการ

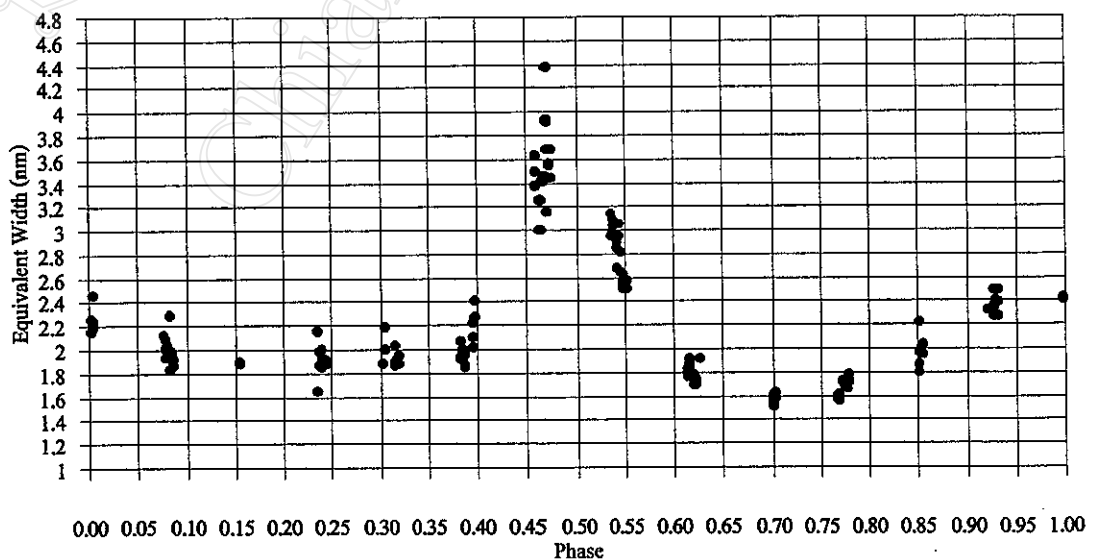
$$W_\lambda = \int_{line} f(x) dx$$

เมื่อ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันเส้นโค้งที่แทนโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัม

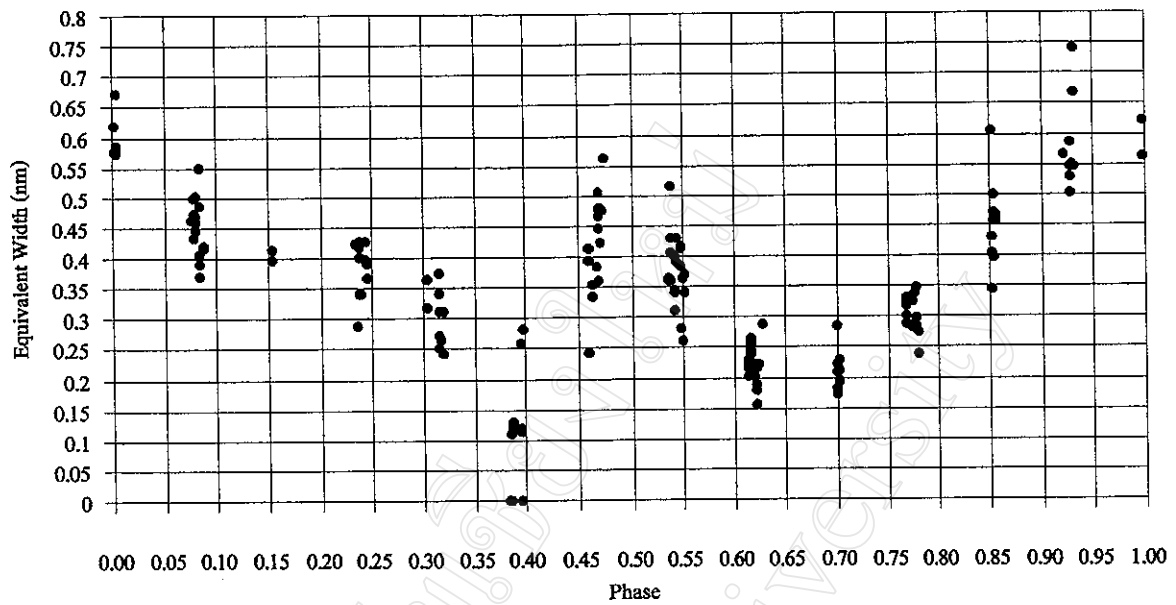
ถ้านำผลการคำนวณความกว้างสมมูล W ของเส้นสว่างทั้ง 4 เส้น ที่ให้ไว้ในตารางที่ 5-2 มาพล็อต
กราฟกับเฟสการโคจร จะได้กราฟสำหรับเส้นที่ HeI (~587.57 nm) ดังรูปที่ 5-13, เส้นที่ H α (~656.28 nm)
ดังรูปที่ 5-14, เส้นที่ HeI (~667.82 nm) ดังรูปที่ 5-15, เส้นที่ HeI (~706.52 nm) ดังรูปที่ 5-16, และต้องการ
แสดงการเปรียบเทียบของทั้ง 4 เส้น จึงนำมาพล็อตไว้ในสเกลเดียวกัน ดังรูปที่ 5-17



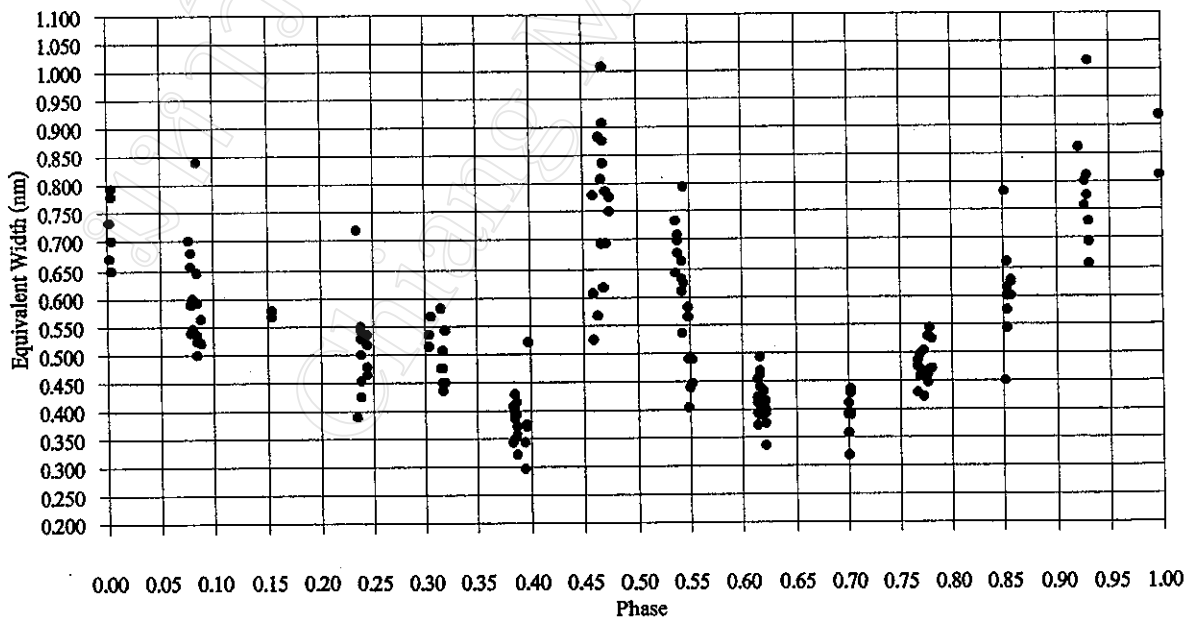
รูปที่ 5-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง
HeI (~587.57 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี



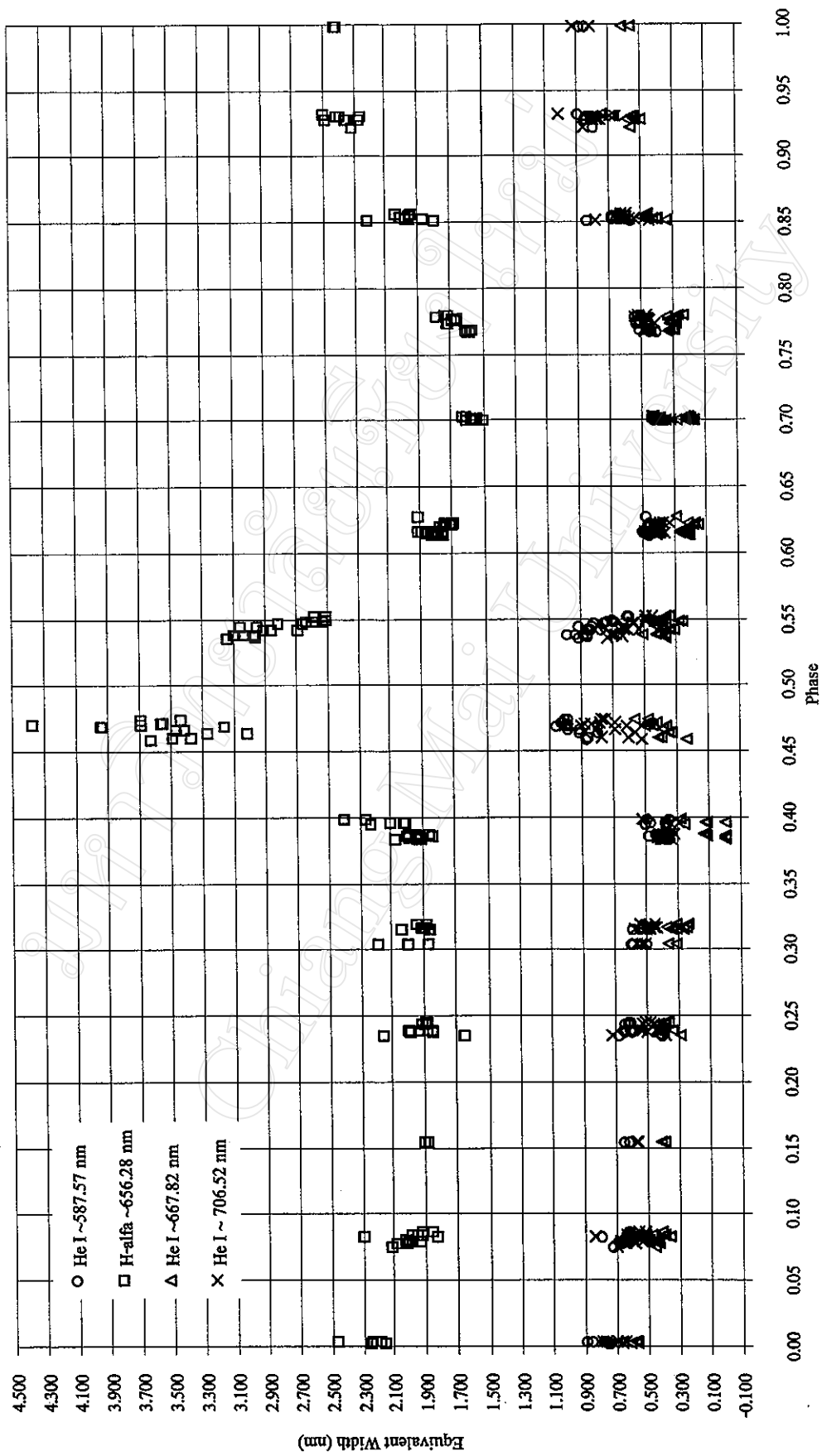
รูปที่ 5-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง
H α (~656.28 nm) ของดาวคู่บีตา ไลรี



รูปที่ 5-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง
HeI (~667.82 nm) ของดาวคูบีตา ไครี



รูปที่ 5-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W และเฟสของการโคจร สำหรับเส้นสว่าง
HeI (~706.52 nm) ของดาวคูบีตา ไครี



รูปที่ 5-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง W ของเส้นสว่างทั้ง 4 เส้นของรูปที่ 5-13 ถึง 5-16 กับเฟสของการโคจร ของดาวคู่บีตา ไครี

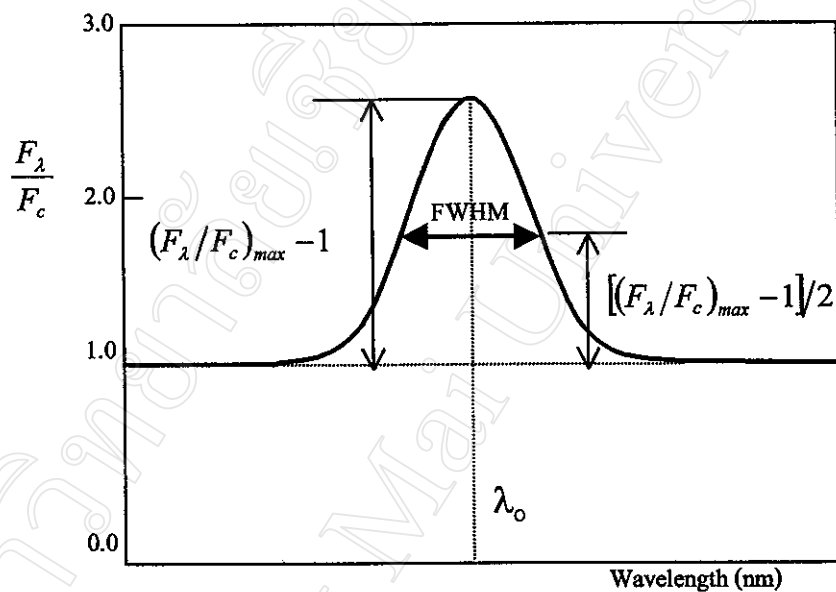
จากรูปที่ 5-13 ถึง 5-17 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ความกว้างสมมูล (W) กับเฟส การโคจรของระบบดาวคู่บีตา ไครี โดยมีหลักการคิดว่า ความแรงของเส้นสเปกตรัมจากค่าความกว้างสมมูล และความกว้างสมมูลมีค่ามากจะแสดงว่าปริมาณสารในบรรยากาศที่ห่อหุ้มระบบที่สร้างเส้นสเปกตรัมนั้นๆ มีค่ามาก (ดูจากรูปที่ 2-12 และ 2-13)

- (1).จากรูปที่ 5-13 สำหรับเส้น HeI (~ 587.57 nm) เห็นว่า ความกว้างสมมูลมีค่ามากที่สุดที่เฟสประมาณ 0.46 ด้วย $W \sim 1.024$ nm และความกว้างลดลงค่อนข้างช้าที่เฟสเพิ่มขึ้นถึงเฟสประมาณ 0.55 แล้วก็ตกลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีความกว้างต่ำที่สุดที่เฟสประมาณ 0.70 ด้วย $W \sim 0.36$ nm แล้วก็เพิ่มขึ้นเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นจนถึงเฟส 1.0 หรือ 0.0 ด้วย $W \sim 0.88$ nm เมื่อเฟสเพิ่มจากเฟส 0.0 จะเห็นว่าความกว้างสมมูลจะค่อยๆ ลดลงจนถึงตำแหน่งต่ำที่สุดที่เฟสประมาณ 0.38 ด้วย $W \sim 0.366$ nm และเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจะเห็นว่าความกว้างสมมูลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
- (2).จากรูปที่ 5-14 สำหรับเส้น H α (~ 656.28 nm) เห็นว่า ความกว้างสมมูลมีค่ามากที่สุดที่เฟสประมาณ 0.47 ด้วย $W \sim 4.37$ nm แล้วมีค่าลดลงเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นและถึงจุดต่ำสุดที่เฟสประมาณ 0.7 ด้วย $W \sim 1.54$ nm และเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นความกว้างสมมูลก็เพิ่มขึ้นมากที่สุดอีกครั้งที่เฟส ประมาณ 0.93 ด้วย $W \sim 2.499$ nm ถึงเฟส 0.0 ด้วย $W \sim 2.46$ nm แล้วค่อยลดลงจนต่ำสุดอีกที่เฟสประมาณ 0.23 ด้วย $W \sim 1.648$ nm หลังจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเฟสเพิ่มขึ้นจนถึงที่เฟส 0.4 แล้วจากเฟส 0.4 ถึง 0.47 เห็นว่า ความกว้างสมมูลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าการลดลงที่เฟสจาก 0.47 ถึง 0.70
- (3).จากรูปที่ 5-15 สำหรับเส้น HeI (~ 667.82 nm) เห็นว่า ความกว้างสมมูลมีค่าสูงสุดอยู่ที่เฟสใกล้เคียงศูนย์ โดยที่เฟส 0.93 มี $W \sim 0.74$ และที่เฟส 0.0 มี $W \sim 0.67$ nm และจากเฟสที่ 0.0 ถึง 0.4 ความกว้างสมมูลมีค่าลดลงค่อนข้างเป็นเส้นตรงถึงจุดต่ำสุดที่เฟส 0.38 ถึง 0.40 ด้วย $W \sim 0$ nm หลังจากนั้นก็มีความกว้างสมมูลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วให้ค่าสูงสุดเป็นฟิที่อยู่ที่เฟสประมาณ 0.47 ด้วย $W \sim 0.56$ nm (แต่มีค่าน้อยกว่าที่เฟสใกล้เคียงศูนย์) แล้วลดลงเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นจนถึงจุดต่ำสุดอีกครั้งที่เฟส 0.62 ด้วย $W \sim 0.157$ nm แล้วก็มีค่ามากขึ้นเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นจนถึงเฟส 0.93
- (4).จากรูปที่ 5-16 สำหรับเส้น HeI (~ 706.52 nm) เห็นว่าความกว้างสมมูลมีค่าสูงสุดที่เฟสประมาณ 0.46 ด้วย $W \sim 1.008$ nm และมีค่าลดลงทั้งสองข้างเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยความกว้างสมมูลลดลงค่อนข้างช้าสำหรับเฟสที่เพิ่มขึ้น จนถึงจุดต่ำสุดที่เฟส 0.7 ด้วย $W \sim 0.318$ nm แล้วกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อเฟสเพิ่มขึ้นจนถึงเฟส 1.0 หรือ 0.0 ด้วย $W \sim 0.92$ nm หลังจากนั้นก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ ถึงความกว้างต่ำสุดที่เฟส 0.395 ด้วย $W \sim 0.295$ nm
- (5).จากรูปที่ 5-17 สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความกว้างสมมูลจากทั้ง 4 เส้น เห็นว่า ความกว้างสมมูลของ H α ที่ทุกๆ เฟส มีค่ามากกว่าเส้นสว่างของ He I ทั้ง 3 เส้น และสำหรับเส้นของ He I ทั้ง 3 เส้นจะมีความกว้างสมมูลที่อยู่ในแนวเดียวกันด้วยค่า W เหลือกันโดยเส้น ~ 587.57 nm มีค่าสูงกว่า แล้วลดลงสำหรับเส้น ~ 706.52 nm และต่ำสุดสำหรับเส้น ~ 667.82 nm และเห็นด้วยว่า รูปร่างของกราฟของทั้ง 4 เส้นจะมีความคล้ายคลึงกันสำหรับที่เฟสต่างๆ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่า อะตอมของธาตุ

แต่ละชนิดมีพฤติกรรมหรือแสดงผลกระทบที่เฟสการโคจรหนึ่งๆ คล้ายคลึงกัน ที่มาจากดาวคู่บีตา ไตรี เพียงแต่ปริมาณของอะตอมแต่ละชนิดไม่เท่ากันตามค่าความกว้างสเปกตรัมที่วัดได้ต่างกัน

5.3.2.2 การวิเคราะห์ FWHM (Full Width at Half Maximum) ของเส้นสเปกตรัมสว่าง

จากหัวข้อที่ 2.2.7 นิยามของ FWHM คือ ความกว้างของเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของเส้นที่มีความลึก $[1 - (F_\lambda/F_c)_{\min}]/2$ ซึ่งแทนด้วย $(\Delta\lambda)_{1/2}$ แต่เนื่องจากการศึกษาเส้นสว่าง ดังนั้น ความลึกของเส้นก็เปลี่ยนเป็นความสูงซึ่งมีค่าเท่ากับ $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2$ ดังรูปที่ 5-18

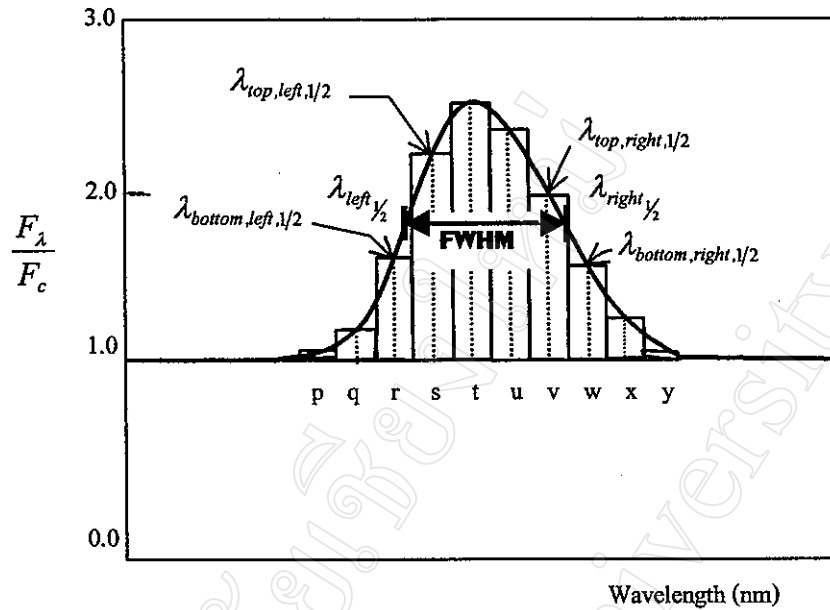


รูปที่ 5-18 แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับการนิยาม FWHM

ซึ่งประโยชน์ของการทราบ $(\Delta\lambda)_{1/2}$ นี้ คือ จะทำให้สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อมรอบดาวที่เส้นสเปกตรัมถูกสร้างขึ้น ได้ด้วยสมการ(2.57) ที่เนื่องมาจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ ที่อยู่ในรูปของ Voigt profile ดังรูปที่ 2-11 เมื่อ Voigt profile เป็นโปรไฟล์ของเส้นที่เป็นผลลัพธ์จากการรวมกันของโปรไฟล์ชนิด Doppler และ Damping

ในการวิเคราะห์หา FWHM ของเส้นสเปกตรัมสว่างต่างๆ ที่แต่ละเฟสการโคจร จากภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไตรี จำนวน ประมาณ 187 รูป จะพิจารณาเพียงเส้น H α และ HeI (~706.52 nm) อันเนื่องมาจากทั้งสองเส้นไม่แสดงการแยกเป็นเส้นคู่

เริ่มจาก การพิจารณาโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่างทั่วไป ดังรูปที่ 5-19 เพื่อคำนวณหา FWHM



รูปที่ 5-19 แผนภาพโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมสว่าง สำหรับแสดงการคำนวณ FWHM

จากรูปที่ 5-19 เป็นเส้นสว่างที่ให้โปรไฟล์แบบไม่สมมาตรกับแกนกลางของเส้น ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมของอะตอมไฮโดรเจน ที่อาจเป็นผลมาจากการเลื่อนดอปเปลอร์ของการโคจรของดาวสมาชิกหรืออาจเกิดจากการเคลื่อนที่เชิงความร้อนของอนุภาค พร้อมกับกำหนดให้ภาพสเปกตรัมนี้มีคุณลักษณะด้วย linear dispersion = 0.11 nm เหมือนกันกับภาพสเปกตรัมที่ได้จากการถ่ายด้วยเครื่องมือซีดีสเปกโตรกราฟของเรา ซึ่งมีความละเอียดน้อย จึงทำให้ค่าความยาวคลื่นที่ขอบซ้ายที่ความเข้มครึ่งค่า แทนด้วย $\lambda_{left, 1/2}$ และค่าความยาวคลื่นที่ขอบขวาที่ความเข้มครึ่งค่า แทนด้วย $\lambda_{right, 1/2}$ ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังรูปที่ 5-19 ถ้าใช้โปรแกรมเคสเทรลสเปกช่วยคำนวณในส่วนนี้ ดังนั้น จึงคิดวิธีการคำนวณนี้ได้ 2 วิธี คือ

1. สำหรับกรณี linear dispersion มีค่าต่ำหรือละเอียดมากพอ จะถือว่า $\lambda_{left, 1/2}$ และ $\lambda_{right, 1/2}$ ตรงกับ pixels a และ b ตามลำดับ ซึ่งทั้งค่าความยาวคลื่นนาโนเมตรและพิกเซลต่างมีฟังก์ชันเป็น $[(F_\lambda / F_c)_{max} - 1]/2$ จะได้

$$FWHM = |\lambda_b - \lambda_a|$$

2. สำหรับกรณี linear dispersion ไม่ต่ำหรือละเอียดเพียงพอ เช่น 0.11 nm สำหรับงานวิจัยนี้ที่ใช้เกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร ดังนั้น จึงตัดสินใจคำนวณที่ภาพสเปกตรัมโดยตรงด้วยการเฉลี่ยค่าความยาวคลื่นระหว่างพิกเซล ด้วย $\lambda_{left, 1/2}$ และ $\lambda_{right, 1/2}$ ตรงกับ $[(F_\lambda / F_c)_{max} - 1]/2$ จะได้

$$FWHM = |\lambda_{right, 1/2} - \lambda_{left, 1/2}| \quad (5.11)$$

ด้วยสาเหตุนี้ ทำให้การวิเคราะห์หา FWHM จึงต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ถ้าข้อมูลสังเกตการณ์ของเรา มีมาก แต่ถ้าเป็นกรณี linear dispersion ที่ละเอียดมาก (high resolution) ขอเสนอว่า ควรจะใช้โปรแกรม

เคสเทรลสเปกแสดงค่า $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2$ ซึ่งให้ $\lambda_{\text{left},1/2}$ หรือ $\lambda_{\text{right},1/2}$ ใกล้เคียงที่สุด แล้วหา FWHM ของทุกภาพสเปกตรัมเพื่อหาค่าเฉลี่ยเส้นแนวโน้ม ซึ่งจะบ่งบอกถึงจำนวนประชากรของอะตอมที่ทำให้กำเนิดเส้นนี้แม่นยำยิ่งขึ้นตามหลักสถิติ

ตัวอย่าง การหา FWHM ของ H α ของภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา โลรี เช่น ณ วันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2543 เวลา 19:39:26 น. หรือ H.J.D. = 2451844.027 วัน ตรงกันกับ Phase = 0.001799855 ดังนี้ คือ

(1). วัดค่าฟลักซ์สูงสุดของเส้น H α พบว่า $(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1 = 2.052185$ (ตรงกับ $\lambda = 656.44$ nm), และถ้าหารด้วย 2 จะได้ $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2 = 1.0260925$

(2). วัดค่าความยาวคลื่นที่ขอบของเส้นที่ความเข้มสูง $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2 = 1.0260925$ แต่เราไม่สามารถวัดจากโปรแกรมเคสเทรลสเปกได้โดยตรง อันเนื่องมาจากความละเอียดของ linear dispersion ของสเกลบนแกน x ของภาพสเปกตรัม nm/s มีช่วงกว้าง ซึ่งแก้ปัญหานี้โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์พื้นฐานด้วยการเฉลี่ย ด้วยวิธีการ ดังนี้

(2.1). วัดค่าฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกับ $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2$ ที่สุดสำหรับขอบซ้ายของเส้น จะได้เป็นฟลักซ์ขอบเขตบน และฟลักซ์ขอบเขตล่าง ของขอบด้านซ้ายของเส้นสเปกตรัม แทนด้วย $F_{\text{top, left}, 1/2}$ และ $F_{\text{bottom, left}, 1/2}$ ตามลำดับ และวัดค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งฟลักซ์นั้นๆ ซึ่งแทนด้วย $\lambda_{\text{top, left}, 1/2}$ และ $\lambda_{\text{bottom, left}, 1/2}$ ตามลำดับ แล้วมาเขียนความสัมพันธ์ดังข้างล่างนี้ โดยให้ค่าความยาวคลื่นที่ $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2$ ที่เราต้องการเป็นตัวแปร $\lambda_{\text{left}, 1/2}$ และหา $\lambda_{\text{left}, 1/2}$ ได้จากความสัมพันธ์

$$\lambda_{\text{left}, 1/2} = \lambda_{\text{top, left}, 1/2} - \frac{(\lambda_{\text{top, left}, 1/2} - \lambda_{\text{bottom, left}, 1/2}) \{F_{\text{top, left}, 1/2} - [(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2\}}{F_{\text{top, left}, 1/2} - F_{\text{bottom, left}, 1/2}} \quad (5.12)$$

ฟลักซ์	ความยาวคลื่น (nm)
$F_{\text{top, left}, 1/2} = 1.049637$	$\lambda_{\text{top, left}, 1/2} = 655.89$
$[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2 = 1.0260925$	$\lambda_{\text{left}, 1/2}$
$F_{\text{bottom, left}, 1/2} = 0.85109$	$\lambda_{\text{bottom, left}, 1/2} = 655.78$

จากสมการ(5.12) จะได้ $\lambda_{\text{left}, 1/2} = 655.87696$ nm

(2.2). วัดค่าฟลักซ์ที่ใกล้เคียงกับ $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2$ ที่สุดสำหรับขอบขวาของเส้น จะได้เป็นฟลักซ์ขอบเขตบน และฟลักซ์ขอบเขตล่าง ของขอบด้านขวาของเส้นสเปกตรัม แทนด้วย $F_{\text{top, right}, 1/2}$ และ $F_{\text{bottom, right}, 1/2}$ ตามลำดับ และวัดค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งฟลักซ์นั้นๆ ซึ่งแทนด้วย $\lambda_{\text{top, right}, 1/2}$ และ $\lambda_{\text{bottom, right}, 1/2}$ ตามลำดับ แล้วมาเขียนความสัมพันธ์ดังข้างล่างนี้ โดยให้ค่าความยาวคลื่นที่ $[(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2$ ที่เราต้องการเป็นตัวแปร $\lambda_{\text{right}, 1/2}$ และหา $\lambda_{\text{right}, 1/2}$ ได้จากความสัมพันธ์

$$\lambda_{\text{right}, 1/2} = \lambda_{\text{top, right}, 1/2} - \frac{(\lambda_{\text{top, right}, 1/2} - \lambda_{\text{bottom, right}, 1/2}) \{F_{\text{top, right}, 1/2} - [(F_\lambda/F_c)_{\max} - 1]/2\}}{F_{\text{top, right}, 1/2} - F_{\text{bottom, right}, 1/2}} \quad (5.13)$$

ฟลักซ์	ความยาวคลื่น (nm)
$F_{top, right, 1/2} = 1.218712$	$\lambda_{top, right, 1/2} = 656.77$
$[(F_\lambda / F_c)_{max} - 1]/2 = 1.0260925$	$\lambda_{right, 1/2}$
$F_{bottom, right, 1/2} = 0.969623$	$\lambda_{bottom, right, 1/2} = 656.88$

จากสมการ(5.13) จะได้ $\lambda_{right, 1/2} = 656.85506 \text{ nm}$

(3).แล้วใช้ผลการคำนวณจากสมการ(5.12) และ(5.13) แทนลงในสมการ(5.11) จะได้

$$FWHM = |\lambda_{right, 1/2} - \lambda_{left, 1/2}| = |656.85506 - 655.87696| \text{ nm}$$

$$= 0.9781068 \text{ nm} \quad \text{สำหรับ Phase} = 0.001799855$$

และการหา FWHM ของเส้นสว่าง H α (~656.28 nm) และของเส้นสว่าง HeI (~706.52 nm) ที่เฟสอื่นๆ ก็สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกัน และแสดงผลการคำนวณไว้ใน ตารางที่ 5-3 ในหัวข้อที่ 5.4

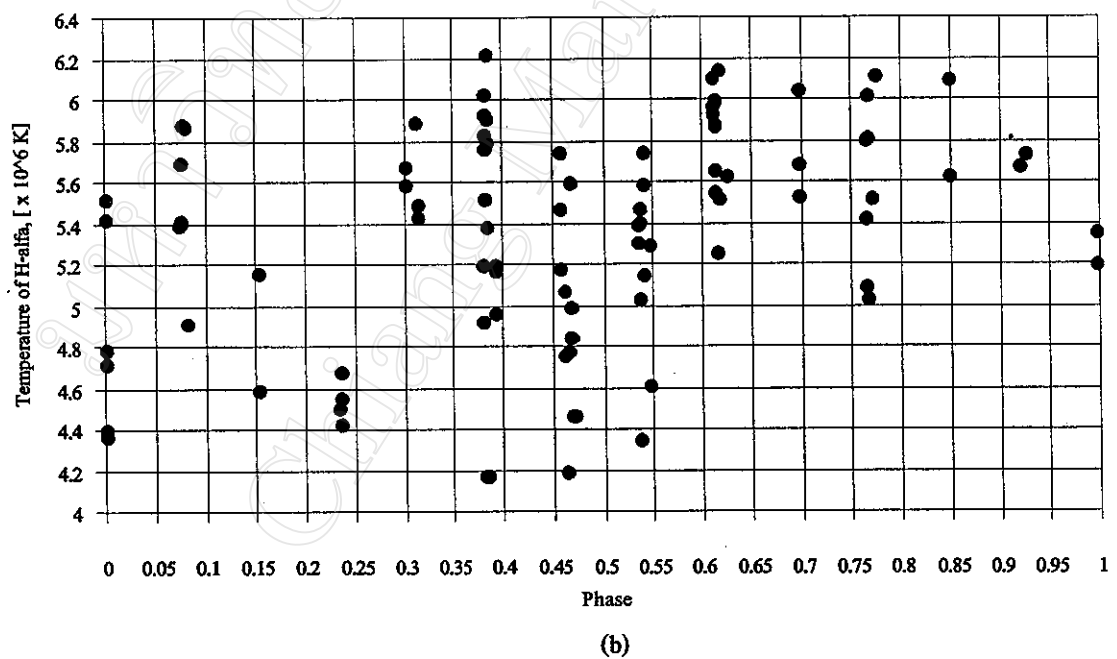
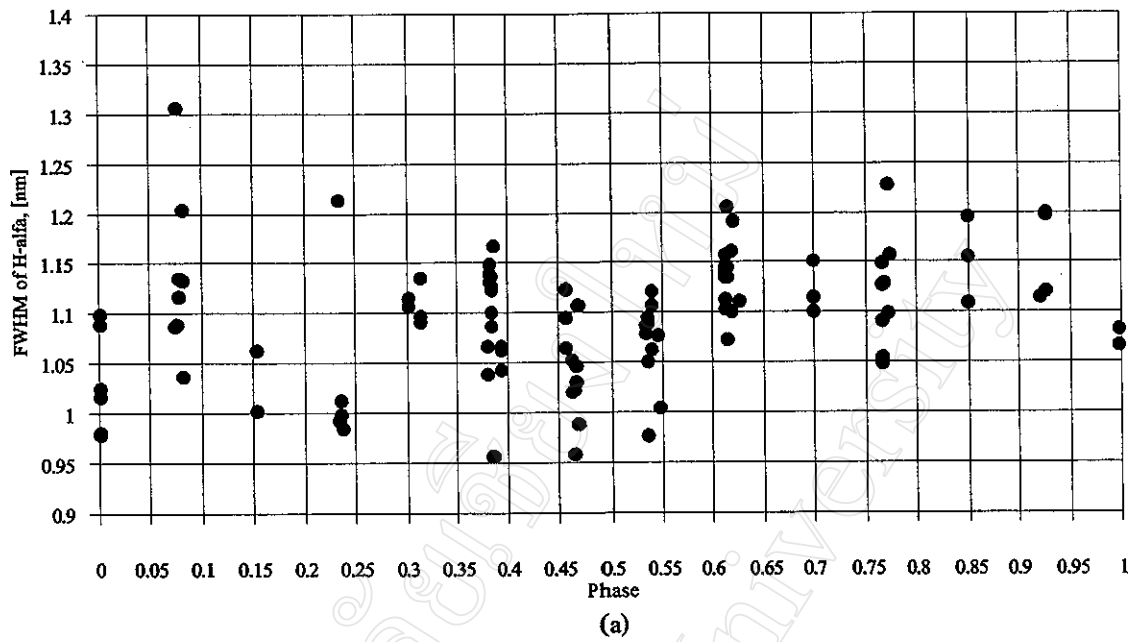
จากสมการ(2.57) ในหัวข้อที่ 2.2.7 ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของ FWHM [หรือ $(\Delta\lambda)_{1/2}$] กับอุณหภูมิ (T) สำหรับกรณีความกว้างของเส้นสเปกตรัมโดยปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler broadening) ดังนั้น ถ้าเราหา FWHM ได้แล้วตั้งในตารางที่ 5-3 เราก็แทนค่าลงในสมการ(2.57) หรือแทนลงในสมการที่เขียนอยู่ในรูปตัวแปร $(\Delta\lambda)_{1/2}$ นั่นคือ

$$T = \frac{mc^2 [(\Delta\lambda)_{1/2}]^2}{8 \ln(2) k \lambda^2} \quad (5.14)$$

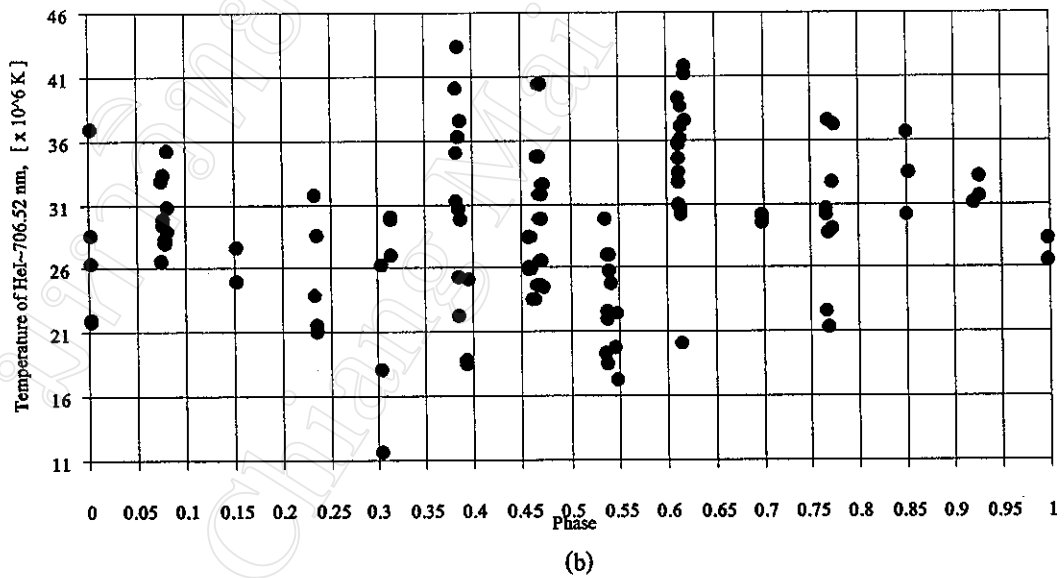
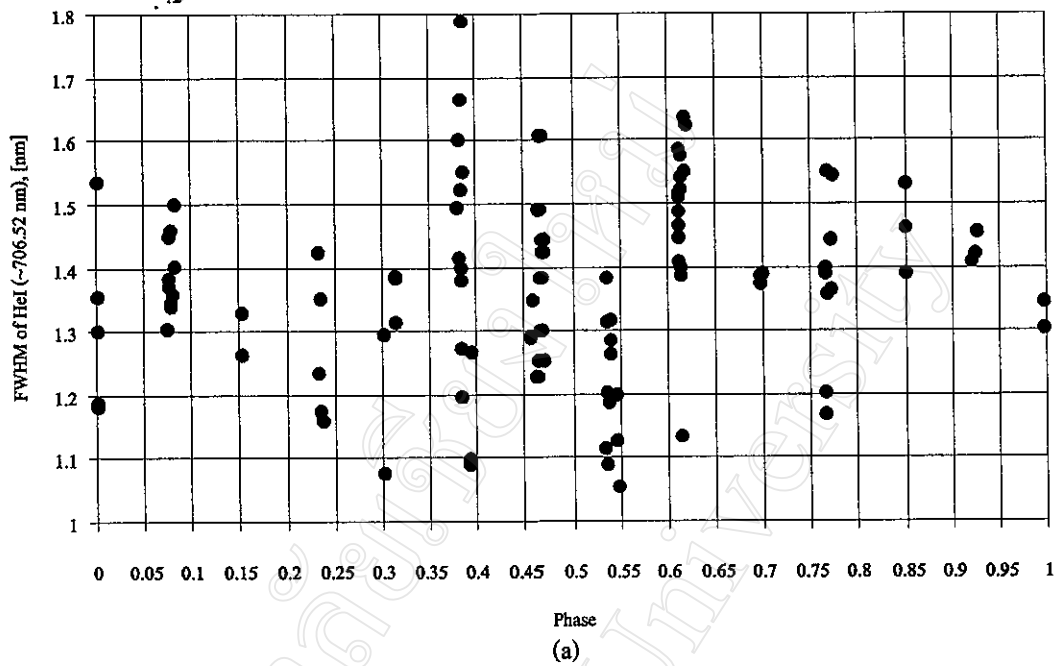
เมื่อ m เป็นมวลของอะตอม (สำหรับมวลของอะตอม H α เท่ากับ $1.673534 \times 10^{-24} \text{ g}$, และมวลของอะตอม HeI เท่ากับ $6.64832 \times 10^{-24} \text{ g}$), c เป็นความเร็วแสง เท่ากับ $2.99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, $(\Delta\lambda)_{1/2}$ เป็น FWHM มีหน่วยเป็นนาโนเมตร, λ เป็นความยาวคลื่นของเส้นสว่างที่ฟลักซ์สูงสุด มีหน่วยเป็นนาโนเมตร, k เป็นค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ เท่ากับ $1.380658 \times 10^{-20} \text{ gm}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, และ T เป็นอุณหภูมิ หน่วยเคลวิน (K) โดยสาเหตุที่เลือกคำนวณหาอุณหภูมิในบรรยากาศของดาวของเส้น H α และ HeI (~706.52 nm) จากค่า FWHM เพราะว่า ค่านี้เป็นความกว้างของเส้นที่ฟลักซ์สูงครึ่งค่าของเส้นสว่าง ซึ่งผลกระทบที่เนื่องมาจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์จะแรงกว่าปรากฏการณ์ที่เนื่องมาจาก Damping profile ดังรูปที่ 2-11 สำหรับ Voigt profile ซึ่งเราวัดได้ ดังนั้น การวัดความกว้างที่ฟลักซ์ครึ่งค่านี้จึงเป็นการวัดความกว้างที่แท้จริงที่มีสาเหตุมาจากการเลื่อนดอปเปลอร์เชิงความร้อน และทำให้ได้ค่า T ออกมาถูกต้อง และสาเหตุที่ไม่เลือกคำนวณหา T จากความกว้างสมมูล W เพราะว่า ที่ปลายปีกของเส้นทั้งสองด้านที่เนื่องมาจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์มีความแรงน้อยกว่ากรณีปรากฏการณ์ Damping จึงทำให้การวัดความกว้างสมมูลที่เกิดจากการหาพื้นที่ใต้โปรไฟล์ของเส้นสว่างที่ normalized แล้วแสดงผลกระทบที่มาจากปรากฏการณ์ทั้งสองร่วมกัน

เมื่อแทนค่า มวล, $(\Delta\lambda)_{1/2}$, และ λ ลงในสมการ(5.14) สำหรับเส้น H α และ HeI (~706.52 nm) ที่เฟสการโคจรที่เลือกไว้ เราจะได้ค่าอุณหภูมิ T นี้ ดังแสดงในตารางที่ 5-3 ของหัวข้อที่ 5.4

ถ้านำค่า FWHM และค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากสมการ(5.14) มาพล็อตกราฟกับเฟสการโคจร เราจะได้กราฟ ดังรูปที่ 5-20 และ 5-21 สำหรับเส้นสว่าง H α และ HeI (~706.52 nm) ตามลำดับ



รูปที่ 5-20 (a).กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM ของเส้นสว่าง $H\alpha$ กับเฟสการโคจร ของดาวคู่บีตา ไถรี, และ (b). กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (ที่คำนวณจากค่า FWHM) ของเส้นสว่าง $H\alpha$ กับเฟสการโคจร



รูปที่ 5-21 (a).กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM ของเส้นสว่าง HeI (~706.52 nm) กับเฟสการโคจรของดาวคู่ ไถรี, และ (b). กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (ที่คำนวณจากค่า FWHM) ของเส้นสว่าง HeI (~706.52 nm) กับเฟสการโคจร

จากรูปที่ 5-20 และ 5-21 สามารถวิเคราะห์ได้ ดังนี้

- 1). จากรูปที่ 5-20(a) สำหรับ FWHM ของเส้นสว่าง H α หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm) พบว่า FWHM มีค่าต่ำสุดที่เฟส ~ 0.46 ด้วย $(\Delta\lambda)_{1/2} \sim 0.95$ nm และมีแนวโน้มสูงสุดที่เฟส ~ 0.61 ซึ่งถ้าดูสมการ(2.57) จะเห็นว่า $(\Delta\lambda)_{1/2} \propto \sqrt{T}$ เมื่อ T เป็นอุณหภูมิของระบบที่สร้างเส้น H α นี้ ดังนั้น ความผันแปรของ FWHM จะเป็นตัวบอกให้ทราบอุณหภูมิของบรรยากาศที่สร้างเส้นนี้ขึ้นมาที่เฟสต่างๆ ของดาวคู่บีตา ไลรี ซึ่งแตกต่างกันชัดเจน และสามารถนำอุณหภูมิไปวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบดาวคู่บีตา ไลรี ต่อไปได้
- 2). จากรูปที่ 5-20(b) สำหรับอุณหภูมิของเส้นสว่าง H α หน่วยเป็นเคลวิน (K) มีออร์เดอร์ 10^6 K สัมพันธ์กับ FWHM ที่เฟสใดๆ พบว่า อุณหภูมิผันแปรตามเฟส ด้วยค่าต่ำสุดที่เฟส ~ 0.45 ถึง ~ 0.50 และอุณหภูมิเพิ่มสูงอย่างมากที่เฟส ~ 0.38 และรองลงมาที่เฟส ~ 0.61
- 3). จากรูปที่ 5-21(a) สำหรับ FWHM ของเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) พบว่า FWHM มีค่าต่ำสุดที่เฟส ~ 0.54 และมีค่าสูงสุดที่เฟส ~ 0.38 และรองลงมาที่เฟส ~ 0.61
- 4). จากรูปที่ 5-21(b) สำหรับอุณหภูมิ ของเส้นสว่าง HeI (~ 706.52 nm) พบว่า มีค่าต่ำสุดที่เฟส ~ 0.54 และมีค่าสูงที่เฟส ~ 0.38 และรองลงมาที่เฟส ~ 0.6 ตามลำดับ โดยออร์เดอร์อุณหภูมิของเส้น HeI (~ 706.52 nm) นี้ สูงกว่ากรณี H-alpha ประมาณ 10 เท่า

จากข้างต้น ถ้าเทียบกับรูปที่ 1-1 ของบทที่ 1 อาจกล่าวว่า อุณหภูมิสูงมาจากบริเวณที่อยู่ระหว่างดาวทั้งสอง ที่สังเกตได้ที่เฟสประมาณ 0.38 หรือ 0.6 แต่ที่เฟส ~ 0.46 ถึง ~ 0.5 พบว่า มี FWHM และอุณหภูมิ มีค่าต่ำ วัดได้เมื่อดาวปฐมภูมิเป็นฝ่ายบังทุติยภูมิ และสำหรับที่เฟส ~ 0.0 อุณหภูมิลดต่ำเช่นกันแต่ไม่มากเท่ากับเฟส 0.4 ถึง 0.5 เพราะฉะนั้น สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่วัดจากเส้นทั้งสองแสดงผลกระทบที่เฟสใกล้เคียงกันหรืออาจตรงกัน เพียงแต่ออร์เดอร์ของอุณหภูมิต่างกัน

5.3.3 ความผันแปรของรูปร่างโปรไฟล์ของเส้นสเปกตรัมกับเวลาสังเกตการณ์

จากการพิจารณารูปร่างโปรไฟล์และค่าความยาวคลื่นของเส้นสว่างทั้ง 4 เส้น ที่กำเนิดมาจากระบบดาวคู่บีตา ไลรี ที่อธิบายในหัวข้อที่ 5.3.1.1 พบว่าเป็นดาวคู่ชนิดสเปกโตรสโคปี และจากรูปที่ 4-18 ถึง 4-45 ที่แสดงภาพสเปกตรัมเฉลี่ยต่อหนึ่งวันสังเกตการณ์ ของบทที่ 4 และจากข้อมูลในตารางที่ 5-2 ในหัวข้อที่ 5.4 พบว่า มีเส้นสว่างแสดงการแยกเป็นคู่ที่บางเฟสการโคจร คือ เส้น HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm แต่อีกสองเส้นที่เหลือไม่แสดงการแยกให้เห็นซึ่งขึ้นกับอยู่กับ resolution ของเครื่องมือวัด และพบด้วยว่า เส้นที่เกิดการแยกทั้งสองเส้นนั้น โดยส่วนใหญ่จะแสดงการแยกให้เห็นที่เฟสตรงกัน

ในที่นี้จะขอวิเคราะห์รูปร่างของเส้นสว่างแบบโดยรวม ทั้ง 4 เส้น ตามรูปที่ 4-18 ถึง 4-45 ของบทที่ 4 เริ่มจาก

- (1). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.00 ได้แก่ รูปที่ 4-20, 4-39, 4-27, 4-28 พบว่า ทั้ง 4 เส้นไม่มีการแยกเป็นคู่ให้เห็น
- (2). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.10 ได้แก่ รูปที่ 4-19, 4-29 พบว่า ทั้ง 4 เส้นไม่มีการแยกเป็นคู่ให้เห็น

- (3). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.20 ได้แก่ รูปที่ 4-30, 4-40 พบว่า ทั้ง 4 เส้นไม่มีการแยกเป็นคู่ให้เห็น
- (4). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.30 ได้แก่ รูปที่ 4-21, 4-41 พบว่าเริ่มมีการแยกให้เห็นที่เส้น HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm
- (5). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.40 ได้แก่ รูปที่ 4-22, 4-23, 4-31, 4-32, 4-42 เห็นชัดเจนว่า ที่เส้น HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm แสดงการแยกเป็นคู่และความเข้มฟลักซ์มีค่าลดลงที่ทุกๆ เส้นและลดลงน้อยมากที่เส้น He I ~ 667.82 nm เมื่อเทียบกับสเปกตรัมต่อเนื่อง
- (6). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.50 ได้แก่ รูปที่ 4-24, 4-33, 4-43, 4-44 พบว่า เส้น HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm แสดงการแยกให้เห็นมากที่สุดเมื่อเทียบกับเฟสอื่นๆ
- (7). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.60 ได้แก่ รูปที่ 4-25, 4-34, 4-45 พบว่า เส้น HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm แสดงการแยกให้เห็นมากพอๆ กับที่เฟส ~ 0.50
- (8). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.70 ได้แก่ รูปที่ 4-35 พบว่า ไม่มีการแยกเป็นคู่
- (9). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.80 ได้แก่ รูปที่ 4-26, 4-36, 4-37 พบว่า ไม่มีการแยกเป็นคู่ และเห็นว่าฟลักซ์ของเส้นสว่างต่างๆ เพิ่มขึ้น
- (10). ภาพสเปกตรัมดาวคู่บีตา ไลรี ที่เฟส ~ 0.90 ได้แก่ รูปที่ 4-18, 4-38, พบว่า ไม่มีการแยกเป็นคู่ และเห็นว่าฟลักซ์ของเส้นสว่างต่างๆ เพิ่มขึ้นกว่าที่เฟส ~ 0.80

จากการวิเคราะห์รูปร่างแบบง่ายข้างต้น เพียงพิจารณาว่ามีการเลื่อนหรือไม่ และเลื่อนที่เฟสใด ก็ทำให้เราสามารถนำข้อมูลตรงนี้ไปเชื่อมโยงกับ รูปที่ 1-1 ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นแผนภาพสรุปผลการวิจัยของนักดาราศาสตร์จากอดีตถึงปัจจุบันของดาวคู่บีตา ไลรี ในรูปโครงสร้างความโน้มถ่วงแบบใกล้ชิด และกับ รูปที่ 2-33 ในทางทฤษฎีของบทที่ 2, และกับรูปที่ 3-1 สำหรับกราฟแสงของดาวคู่บีตา ไลรี ที่สังเกตการณ์ไว้โดย Aslan และคณะ เมื่อปี พ.ศ. 2522 และ 2524 มีดังนี้

- สำหรับการเปรียบเทียบกับรูปที่ 1-1 จะเห็นว่า ที่เฟส ~ 0.00 ดาวฤกษ์อยู่ด้านหน้า หรือกำลังบังดาวปฐมภูมิ ซึ่งดาวฤกษ์เป็นฝ่ายรับมวลที่ถ่ายมาจากดาวปฐมภูมิที่มีขนาดโคเค็มโรโลป ถ้าเป็นกรณีกราฟแสงจะได้ฟลักซ์ต่ำสุด เรียกว่า อุปราคาปฐมภูมิ (ดังรูปที่ 3-1) ที่บ่งบอกว่าดาวที่ถูกบังมีความร้อนมากกว่า ที่เฟส ~ 0.00 นี้เราเข้าใจตรงกันตามทฤษฎีว่าจะไม่มีการเลื่อนคอปเปอร์ที่เนื่องมาจากการโคจรของดาวสมาชิกแต่ละดวงรอบจุดศูนย์กลางมวลของระบบ รวมถึงที่เฟส ~ 0.50 ด้วย ซึ่งจากการวิเคราะห์รูปร่างของเส้นสว่างพบว่า ที่เฟส ~ 0.00 ไม่มีการแยกเป็นเส้นคู่ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี แต่ที่เฟส ~ 0.50 กลับพบว่าที่เส้น HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm มีการแยกเป็นเส้นคู่ ซึ่งทำให้เกิดคำถามว่าการแยกของเส้นทั้งสองนี้มาจากผลกระทบใด ระหว่างการเคลื่อนที่แบบวงโคจรของดาวสมาชิก หรือมาจากกลไกอื่น ซึ่งกลไกดังกล่าวผู้เขียนคาดหมายว่า น่าจะเกิดจากกระแสธารของก๊าซที่ไหลจากดาวปฐมภูมิไปสู่ดาวฤกษ์ ซึ่งพบด้วยว่า มีการแยกของเส้นสว่างเริ่มจากเฟส ~ 0.3 ถึง ~ 0.6 จากการวิเคราะห์รูปร่าง ในรูปที่ 4-18 ถึง 4-45 นอกเหนือจากนี้ อาจเป็นผลกระทบที่มาจากจุดลากรานเจียน L_2 ก็ได้ ซึ่งอาจมีการไหลออกของมวลที่มาจากดาวปฐมภูมิดำเนินมีขนาดโตกว่าโรโลป (ความ

หมายของจุดลากรางเจียนและโรสโลป สามารถดูได้ที่หัวข้อ 2.5.1 ดังรูปที่ 2-25 และ 2-26) ซึ่งโครงสร้างความโน้มถ่วงของระบบดาวคู่บีตา ไลรี นี้เกิดจากอันตรกิริยาไทดอล (tidal interaction) เช่นเดียวกันกับกรณีที่เกิดกับโลกและดวงจันทร์ในหัวข้อที่ 2.3.3 ถ้าดูรูปที่ 2-15(b) ที่เป็นผลกระทบของแรงไทดอล ซึ่งสำหรับกรณีดาวคู่บีตา ไลรี ที่ดาวทุติยภูมิมีมวลมากกว่าดาวปฐมภูมิ ตรงนี้ยังจะมีผลกระทบต่อรูปร่างของดาวปฐมภูมิมากและโอกาสที่ก๊าซที่ฉีกออกมาจากโรสโลปของดาวปฐมภูมิจะไหลผ่านจุด L_2 ย่อมมีมากขึ้นด้วย เพราะฉะนั้น อาจสรุปได้ว่า ที่เฟส ~ 0.30 ถึง ~ 0.60 ผลของการเลื่อนของสเปกตรัมมาจากมวลที่ไหลออกจากจุดลากรางเจียนชั้นใน L_1 ไปยังดาวทุติยภูมิ และจากจุด L_2 ที่อยู่ด้านเดียวกันกับดาวปฐมภูมิ และสำหรับที่เฟส $\sim 0.1, \sim 0.2, \sim 0.7$ ถึง ~ 0.9 พบว่าไม่มีการแยกของเส้นแสดงว่า เส้นสว่างของ HeI ~ 587.68 nm และ HeI ~ 667.82 nm ไม่ได้มีผลสะท้อนที่มาจากแอคครีชันดิสก์ (ยกเว้นที่ hot spot ซึ่งเห็นได้ที่เฟส ~ 0.25 ถึง ~ 0.5)

- สำหรับการเปรียบเทียบกับรูปที่ 2-33 พบว่า ไม่สอดคล้องกัน เมื่อเส้นสว่างในทฤษฎี ดังรูปที่ 2-33 นั้นเกิดจากการโคจรของแอคครีชันดิสก์รอบดาวแม่และแสดงการแยกเป็นเส้นคู่ที่เฟส ~ 0.75 และ ~ 0.25 เพราะฉะนั้น ผลกระทบที่ทำให้เกิดการแยกของเส้นที่เนื่องมาจากการหมุนของแอคครีชันดิสก์ไม่มีหรือมีน้อยจนไม่สามารถวัดได้สำหรับเกรตติงขนาด 600 ช่องต่อมิลลิเมตร
- สำหรับการเปรียบเทียบกับรูปที่ ง-1 ซึ่งเป็นกราฟแสงของดาวคู่บีตา ไลรี ที่วัดผ่านแผ่นกรองแสงสีน้ำเงิน (B) และสีเหลือง (V) ซึ่งสามารถทำความเข้าใจเรื่องแผ่นกรองแสงได้ที่หัวข้อ 2.2.3 ของบทที่ 2 จากการเปรียบเทียบสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์กราฟแสงอย่างง่าย ๆ ซึ่งเห็นว่าที่อุปราคาปฐมภูมิที่ เฟส = 0.0 และที่อุปราคาทุติยภูมิที่เฟส 0.5 พบว่า ช่วงเฟสที่บังกันสูงสุดมีช่วงสั้นมาก ดังนั้น อาจแสดงว่าดาวทั้งสองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเกือบเท่ากัน หรือระนาบของการโคจรของระบบดาวคู่บีตา ไลรี ทำมุม (i) กับระนาบท้องฟ้าน้อยกว่า 90° ค่อนข้างมาก (ดูรูปที่ 2-23 เทียบได้) จากเหตุผลตรงนี้ ทำให้วิเคราะห์ได้ว่า เส้นสว่างที่มาจากระบบดาวคู่บีตา ไลรี สามารถปรากฏให้เห็นได้ตลอดเวลา แต่การเลื่อนดอปเปลอร์ของการโคจรของเส้นสว่างบางเส้นที่กล่าวไปข้างต้นอาจมองไม่เห็นสำหรับบางเฟส

5.4 ตารางข้อมูลผลการวัด และการคำนวณ จากการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมของผลสังเกตการณ์

ดาวคู่บีตา ไลรี

จากข้อมูลทั้งหมด ของผลการวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโคปีสำหรับฟิสิกส์ดาราศาสตร์เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของสารที่ห่อหุ้มระบบดาวคู่บีตา ไลรี จากเส้นสเปกตรัมสว่างที่พิจารณาแล้วทั้งในบทที่ 4 สำหรับการวัดค่าความยาวคลื่น และในบทที่ 5 สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบของสารที่ห่อหุ้มระบบ สามารถสรุปข้อมูลเหล่านี้ไว้ในรูปของตารางข้อมูล ประกอบด้วย ตารางที่ 5-2 สำหรับแสดงผลการวัดและการคำนวณ H.J.D., Phase, Wavelength, Equivalent width (W), และ Corrected radial velocity ของเส้นสเปกตรัมสว่าง จากการสังเกตการณ์ดาวคู่บีตา ไลรี และตารางที่ 5-3 สำหรับแสดงผลการคำนวณ FWHM, และอุณหภูมิ (T) เฉพาะที่เส้น H α และ HeI (~ 706.52 nm) ที่ได้จากความสัมพันธ์ของสมการ(5.14)

ตารางที่ 5-2 ผลการวัดและการคำนวณ H.J.D., Phase, Wavelength, Equivalent Width (W), และ Corrected Radial Velocity (RV) ของเส้นสเปกตรัมสว่าง จากการสังเกตการณ์ด้วยตาโลรี

เวลาสังเกตการณ์			ที่เส้นประมาณ 587.57 nm (I)				ที่เส้นประมาณ 656.28 nm (II)				ที่เส้นประมาณ 667.82 nm (III)				ที่เส้นประมาณ 706.52 nm (IV)			
วันที่ d-m-yr	ณ เวลา hr:min:sec	H.J.D. (2451800+)	Phase	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)			
12-Oct-43	20:02:27	30.043	0.920355842	587.68	**	*	656.46	**	83.8986	668.10	**	*	706.50	**	-6.8129			
	20:03:49	30.044	0.920429238	587.68	**	*	656.58	**	138.7152	668.10	**	*	706.61	**	39.8626			
	20:08:56	30.048	0.920704025	587.68	**	*	656.46	**	83.8986	667.98	**	*	706.61	**	39.8626			
	20:10:42	30.049	0.920798902	587.68	0.800	*	656.46	2.319	83.8986	668.10	0.566	*	706.61	0.860	39.8626			
13-Oct-43	19:42:51	31.03	0.996637491	587.64	**	*	656.48	**	93.0337	667.77	**	*	706.71	**	82.2938			
	19:43:14	31.03	0.996658078	587.41	**	*	656.37	**	42.7850	667.99	**	*	706.59	**	31.3751			
	19:46:52	31.033	0.996853204	587.52	**	*	656.48	**	93.0337	667.99	**	*	706.59	**	31.3751			
	19:47:30	31.033	0.996887216	587.52	**	*	656.37	**	42.7850	667.99	**	*	706.71	**	82.2938			
14-Oct-43	19:50:30	31.035	0.997048329	587.64	**	*	656.37	**	42.7850	667.99	**	*	706.59	**	31.3751			
	19:51:20	31.036	0.997093083	587.64	**	*	656.37	**	42.7850	667.88	**	*	706.71	**	82.2938			
	19:53:09	31.037	0.997190646	587.75	0.886	*	656.37	2.407	42.7850	667.88	0.561	*	706.48	0.813	-15.3004			
	19:54:40	31.038	0.997272098	587.64	0.851	*	656.48	2.426	93.0336	667.99	0.621	*	706.48	0.919	-15.3004			
14-Oct-43	19:39:12	32.027	0.073775726	587.66	**	*	656.45	**	79.3280	668.20	**	*	706.60	**	35.6168			
	19:43:00	32.03	0.073979802	587.77	**	*	656.45	**	79.3280	668.08	**	*	706.60	**	35.6168			
	19:44:29	32.031	0.074059464	587.66	**	*	656.45	**	79.3280	667.97	**	*	706.60	**	35.6168			
	19:51:04	32.035	0.074413018	587.54	0.723	*	656.56	2.112	129.5766	668.08	0.463	*	706.72	0.703	86.5355			
15-Oct-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
16-Oct-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
17-Oct-43	18:40:45	34.986	0.302639491	587.53	0.505	*	656.41	1.877	61.0483	668.15	0.316	*	706.54	0.512	10.1500			
	18:45:09	34.989	0.30287579	586.97, 587.59	0.581	*	656.30	1.997	10.7997	667.81	***	*	706.43	0.534	-36.5255			
	18:48:56	34.992	0.303078971	587.53	0.599	*	656.41	2.187	61.0483	668.26	0.365	*	706.65	0.568	56.8255			
	18-Oct-43	19:16:12	36.011	0.381877582	587.08, 587.65	0.415	*	656.30	1.915	10.7961	***	0	*	***	0.408	***		

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

เวลาที่สังเกตการณ์			ที่เส้นประมาณ 587.57 nm (I)			ที่เส้นประมาณ 656.28 nm (II)			ที่เส้นประมาณ 667.82 nm (III)			ที่เส้นประมาณ 706.52 nm (IV)			
วันที่ d-m-yr	เวลา hr:min:sec	H.J.D. (2451800+)	Phase	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)
19-Oct-43	19:20:27	36.014	0.382105825	587.08, 587.65	0.378	*	656.30	1.937	10.7961	***	0	*	706.43	0.344	-36.5290
	19:32:18	36.022	0.382742222	586.97, 587.65	0.353	*	656.41	2.074	61.0447	***	0	*	***	***	***
	19:36:56	36.025	0.382991052	***	***	*	***	***	***	***	***	*	***	***	***
	19:41:45	36.029	0.383249728	586.97, 587.65	0.403	*	656.41	1.911	61.0447	***	***	*	***	0.426	***
	19:45:50	36.032	0.383469021	586.86, 587.53	0.351	*	656.30	1.985	10.7961	***	0	*	706.43	0.386	-36.5291
	19:52:51	36.036	0.383845846	587.07, 587.41	0.390	*	656.44	1.911	74.7488	***	0	*	706.49	0.402	-11.0698
	19:59:31	36.041	0.384203875	586.86, 587.65	0.420	*	656.32	1.946	19.9321	***	0	*	706.36	0.350	-66.2317
	20:01:09	36.042	0.384291593	586.75, 587.54	0.479	*	656.43	2.001	70.1808	***	0	*	706.36	0.396	-66.2317
	20:07:56	36.047	0.384655887	586.85, 587.53	0.382	*	656.33	1.926	24.5002	***	0	*	706.38	0.389	-57.7453
	18:54:29	36.996	0.458045581	586.97, 587.65	0.867	*	656.32	3.625	19.9283	667.84	0.241	*	706.81	0.525	124.7097
20-Oct-43	19:01:16	37.001	0.458409875	587.65	0.860	*	656.43	3.487	70.1769	668.07	0.392	*	706.47	0.606	-19.5600
	19:05:06	37.003	0.458615742	587.65	0.863	*	656.43	3.376	70.1769	667.16, 668.41	0.412	*	706.58	0.780	27.1154
	18:47:33	37.991	0.535007517	586.80, 587.70	0.917	*	656.47	3.138	88.4447	668.44	0.365	*	706.83	0.734	133.1917
	18:53:39	37.995	0.535335114	586.80, 587.70	0.860	*	656.47	2.958	88.4447	668.33	0.360	*	706.83	0.641	133.1917
	19:18:48	38.013	0.536685779	586.71, 587.62	0.991	*	656.61	3.095	152.3974	668.35	0.405	*	706.96	0.697	188.3535
	19:23:47	38.016	0.536953406	586.83, 587.73	0.863	*	656.49	2.966	97.5807	668.35	0.361	*	706.96	0.708	188.3535
21-Oct-43	19:29:06	38.02	0.537238934	586.62, 587.52	0.937	*	656.51	3.087	106.7168	668.26	0.429	*	706.87	0.676	150.1645
	19:30:41	38.021	0.537323966	586.85, 587.64	0.876	*	656.63	3.034	161.5335	668.37	0.515	*	706.99	0.699	201.0832
	18:45:42	38.99	0.612242461	586.90, 587.80	0.474	*	656.46	1.761	83.8717	666.97, 668.55	0.215	*	707.06	0.412	230.7810
	18:49:39	38.992	0.612454593	586.78, 587.69	0.461	*	656.46	1.835	83.8717	667.08, 668.55	0.201	*	706.94	0.419	179.8622
	18:59:36	38.999	0.612988952	586.78, 587.69	0.455	*	656.46	1.810	83.8717	666.97, 668.43	0.222	*	706.94	0.421	179.8622
	19:03:04	39.002	0.613175127	586.78, 587.80	0.459	*	656.46	1.788	83.8717	666.97, 668.43	0.228	*	706.94	0.369	179.8622
	19:10:07	39.007	0.613553743	586.80, 587.70	0.475	*	656.58	1.803	138.6883	667.08, 668.44	0.219	*	707.06	0.410	230.7809

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

เวลาสังเกตการณ์			ที่เส้นประมาณ 587.57 nm (I)						ที่เส้นประมาณ 656.28 nm (II)			ที่เส้นประมาณ 667.82 nm (III)			ที่เส้นประมาณ 706.52 nm (IV)		
วันที่ d-m-yr	ณ เวลา hr:min:sec	H.J.D. (2451800+)	Phase	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)		
	19:13:41	39.009	0.613745289	586.80, 587.70	0.471	*	656.47	1.759	88.4397	667.08, 668.44	0.217	*	707.06	0.454	230.7809		
	19:14:48	39.01	0.613805259	586.80, 587.70	0.475	*	656.47	1.819	88.4397	667.08, 668.33	0.238	*	706.94	0.393	179.8621		
	19:20:43	39.014	0.614123009	586.82, 587.73	0.465	*	656.59	1.860	143.2564	667.09, 668.44	0.265	*	706.94	0.409	179.8621		
	19:22:01	39.015	0.614192825	586.82, 587.73	0.496	*	656.48	1.825	93.0077	667.09, 668.44	0.240	*	706.94	0.438	179.8621		
	19:29:46	39.02	0.614609034	586.91, 587.70	0.425	*	656.47	1.770	88.4396	666.97, 668.44	0.260	*	706.72	0.468	86.5111		
	19:31:10	39.021	0.61468422	586.91, 587.82	0.435	*	656.36	1.791	38.1910	666.97, 668.33	0.253	*	706.60	0.387	35.5924		
	19:40:17	39.027	0.615173825	586.82, 587.73	0.451	*	656.53	1.851	115.8479	666.97, 668.33	0.226	*	707.05	0.490	226.5375		
	19:41:35	39.028	0.615243641	586.82, 587.73	0.421	*	656.48	1.920	93.0077	666.97, 668.44	0.266	*	707.05	0.460	226.5375		
	19:42:51	39.029	0.615311666	586.82, 587.73	0.500	*	656.48	1.889	93.0077	666.97, 668.50	0.246	*	707.05	0.458	226.5375		
22-Oct-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
23-Oct-43	18:28:17	40.977	0.765975738	587.82	0.406	*	656.36	1.575	38.1799	668.33	0.328	*	706.60	0.485	35.5812		
	18:31:50	40.98	0.766166388	587.70	0.452	*	656.36	1.596	38.1799	668.44	0.330	*	706.60	0.426	35.5812		
	18:39:54	40.985	0.766599604	587.80	0.441	*	656.46	1.573	83.8604	668.32	0.318	*	706.61	0.473	39.8244		
	18:43:29	40.988	0.766792044	587.80	0.510	*	656.46	1.575	83.8604	667.98	0.324	*	706.61	0.494	39.8244		
	18:49:45	40.992	0.767128592	587.80	0.446	*	656.69	1.610	188.9257	668.32	0.301	*	706.61	0.471	39.8244		
	18:53:03	40.995	0.767305817	587.80	0.445	*	656.46	1.564	83.8603	668.32	0.287	*	706.61	0.457	39.8244		
24-Oct-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
25-Oct-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
26-Oct-43	19:27:20	44.018	0.001150031	587.63	0.761	*	656.43	2.251	70.1353	667.84	0.618	*	706.36	0.668	-66.2772		
	19:30:57	44.021	0.001344262	587.52	0.745	*	656.43	2.153	70.1353	667.84	0.576	*	706.59	0.734	31.3170		
	19:39:26	44.027	0.001799855	587.63	0.858	*	656.43	2.219	70.1352	667.89	0.573	*	706.47	0.650	-19.6018		
	19:43:18	44.029	0.002007512	587.52	0.774	*	656.43	2.194	70.1352	667.95	0.577	*	706.53	0.795	5.8576		
	19:51:35	44.035	0.002452363	587.66	0.894	*	656.34	2.462	29.0227	667.86	0.584	*	706.49	0.779	-11.1154		

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

เวลาสังเกตการณ์			ที่เส้นประมาณ 587.57 nm (I)			ที่เส้นประมาณ 656.28 nm (II)			ที่เส้นประมาณ 667.82 nm (III)			ที่เส้นประมาณ 706.52 nm (IV)			
วันที่	ณ เวลา	H.J.D.	Phase	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)
5-Nov-43	20:06:45	53.045	0.699277115	587.84	0.424	*	656.48	1.582	92.8875	666.97, 668.44	0.207	*	706.71	0.411	82.1477
	20:31:55	53.063	0.70062868	586.86, 587.76	0.374	*	656.44	1.543	74.6151	666.95, 668.53	0.195	*	706.71	0.391	82.1475
	20:33:01	53.063	0.700687755	587.76	0.382	*	656.44	1.579	74.6151	667.06, 668.42	0.193	*	706.60	0.389	35.4720
	20:41:26	53.069	0.701139769	587.74	0.434	*	656.54	1.613	120.2956	668.40	0.228	*	706.70	0.434	77.9042
	20:44:39	53.071	0.701312518	587.63	0.424	*	656.54	1.625	120.2956	668.29	0.210	*	706.70	0.426	77.9042
	18:38:07	53.984	0.771851696	587.64	0.536	*	656.51	1.714	106.5804	668.26	0.323	*	706.54	0.501	10.0015
	18:41:15	53.986	0.772019971	587.86	0.508	*	656.40	1.728	56.3317	668.26	0.280	*	706.42	0.422	-40.9172
	19:32:11	54.021	0.774755324	587.73	0.511	*	656.48	1.676	92.8758	668.33	0.337	*	706.60	0.526	35.4604
	19:36:12	54.024	0.774971038	587.73	0.459	*	656.36	1.691	38.0590	668.33	0.288	*	706.49	0.446	-11.2151
	19:47:56	54.032	0.775601172	587.70	0.482	*	656.47	1.660	88.3076	668.33	0.297	*	706.60	0.458	35.4603
6-Nov-43	19:52:59	54.036	0.77587238	587.70	0.481	*	656.47	1.693	88.3075	668.33	0.285	*	706.54	0.467	10.0009
	20:15:15	54.051	0.777068202	587.79	***	*	656.46	***	83.7393	668.31	***	*	706.48	***	-15.4587
	20:19:38	54.054	0.777303607	587.68	0.545	*	656.46	1.786	83.7392	668.31	0.347	*	706.60	0.542	35.4600
	20:43:36	54.071	0.778590727	587.66	0.498	*	656.56	1.732	129.4196	668.31	0.274	*	706.60	0.522	35.4598
	20:47:07	54.073	0.778779589	587.77	0.518	*	656.45	1.711	79.1710	668.31	0.238	*	706.60	0.470	35.4598
	18:57:21	54.997	0.850219241	587.75	0.839	*	656.37	2.222	42.6149	667.88	0.606	*	706.48	0.783	-15.4705
	19:00:42	54.999	0.850399152	587.75	0.569	*	656.37	1.796	42.6149	667.99	0.345	*	706.48	0.450	-15.4705
	19:10:39	55.006	0.850933513	587.82	0.644	*	656.36	1.871	38.0468	667.99	0.402	*	706.49	0.572	-11.2274
	19:13:48	55.008	0.851102682	587.82	0.625	*	656.47	1.974	88.2954	668.10	0.429	*	706.54	0.597	9.9887
	19:22:33	55.014	0.851572597	587.81	0.650	*	656.46	1.977	83.7272	667.87	0.398	*	706.54	0.543	9.9887
5-Nov-43	19:26:07	55.017	0.851764144	587.81	0.679	*	656.46	1.956	83.7272	667.98	0.470	*	706.54	0.660	9.9886
	19:34:33	55.023	0.852217053	587.79	0.666	*	656.46	1.977	83.7271	667.97	0.456	*	706.48	0.614	-15.4708
	19:38:07	55.025	0.852408599	587.57	0.677	*	656.34	2.007	28.9104	667.91	0.499	*	706.60	0.597	35.4479

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

เวลาที่สังเกตการณ์			ที่เส้นประมาณ 587.57 nm (I)			ที่เส้นประมาณ 656.28 nm (II)			ที่เส้นประมาณ 667.82 nm (III)			ที่เส้นประมาณ 706.52 nm (IV)			
วันที่	เวลา	H.J.D.	Phase	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)
7-Nov-43	20:18:19	55.053	0.854567525	587.77	0.676	*	656.55	1.955	124.8393	668.19	0.467	*	706.53	0.626	5.7449
	20:21:44	55.055	0.854751015	587.65	0.643	*	656.44	1.950	74.5906	667.74	0.456	*	706.59	0.623	31.2043
	20:25:11	55.058	0.854936296	587.65	0.638	*	656.44	2.041	74.5906	667.96	0.461	*	706.48	0.600	-15.4713
	18:35:36	55.982	0.926385823	587.61	0.808	*	656.48	2.277	92.8508	668.22	0.528	*	706.60	0.759	35.4355
	18:39:02	55.984	0.926570209	587.61	0.842	*	656.48	2.362	92.8508	667.88	0.585	*	706.49	0.800	-11.2400
	18:47:49	55.99	0.927041915	587.70	0.850	*	656.47	2.485	88.2827	667.87	0.503	*	706.38	0.778	-57.9156
	18:51:30	55.993	0.927239727	587.59	0.835	*	656.47	2.344	88.2826	667.87	0.544	*	706.60	0.812	35.4354
	19:31:31	56.021	0.929388808	587.57	0.842	*	656.34	2.406	28.8975	667.97	0.549	*	706.48	0.696	-15.4837
	19:34:59	56.023	0.929574984	587.62	0.811	*	656.40	2.394	56.3058	667.97	0.667	*	706.60	0.731	35.4350
	19:42:51	56.028	0.92999746	587.66	0.761	*	656.45	2.264	79.1460	667.97	0.545	*	706.60	0.656	35.4349
8-Nov-43	19:46:25	56.031	0.930189007	587.54	0.895	*	656.45	2.499	79.1460	667.86	0.741	*	706.49	1.016	-11.2406
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9-Nov-43	18:47:03	57.99	0.081670156	587.54	0.798	*	656.45	2.295	79.1194	668.08	0.550	*	706.60	0.841	35.4082
	18:50:27	57.992	0.081852751	587.54	0.570	*	656.45	1.835	79.1193	668.20	0.369	*	706.60	0.498	35.4082
	18:59:10	57.998	0.082320877	587.66	0.636	*	656.34	1.989	28.8706	668.08	0.391	*	706.60	0.643	35.4081
	19:02:43	58	0.082511529	587.66	0.613	*	656.45	1.990	79.1192	668.08	0.485	*	706.60	0.593	35.4080
	19:10:09	58.006	0.082910734	587.65	0.620	*	656.44	1.921	74.5511	668.08	0.403	*	706.60	0.534	35.4080
	19:13:31	58.008	0.083091539	587.65	0.625	*	656.38	1.956	47.1427	668.19	0.406	*	706.48	0.524	-15.5108
	20:01:17	58.041	0.085656833	587.51	0.627	*	656.29	1.922	6.0297	668.04	0.418	*	706.55	0.520	14.1913
	20:04:36	58.043	0.085834954	587.63	0.622	*	656.40	1.867	56.2783	668.15	0.421	*	706.55	0.563	14.1913
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10-Nov-43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11-Nov-43	18:45:36	59.988	0.236261837	587.57	0.594	*	656.34	1.857	28.8418	667.97	0.399	*	706.48	0.424	-15.5394
	18:49:18	59.991	0.236460545	587.57	0.637	*	656.34	1.991	28.8418	667.97	0.426	*	706.60	0.499	35.3792

ตารางที่ 5-2 (ต่อ)

เวลาสังเกตการณ์			ที่เส้นประมาณ 587.57 nm (I)			ที่เส้นประมาณ 656.28 nm (II)			ที่เส้นประมาณ 667.82 nm (III)			ที่เส้นประมาณ 706.52 nm (IV)			
วันที่	ณ เวลา	H.J.D.	Phase	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)	Wavelength (nm)	Width (nm)	RV (km/s)
d-m-yr	hr:min:sec	(2451800+)													
	18:45:44	62.988	0.46827361	586.85, 587.64	0.800	*	656.38	3.162	47.0675	668.34	0.361	*	706.49	0.616	-11.3428
	19:16:44	63.01	0.469938459	586.96, 587.75	1.015	*	656.26	3.550	-7.7496	668.12	0.478	*	706.49	0.788	-11.3431
	19:20:22	63.012	0.470133586	586.40, 587.64	1.024	*	656.38	3.559	47.0671	668.00	0.423	*	706.49	0.695	-11.3432
	20:15:32	63.051	0.473096302	586.89, 587.57	0.991	*	656.34	3.438	28.7942	668.09	0.476	*	706.60	0.775	35.3317
	20:18:53	63.053	0.473276213	586.89, 587.57	1.012	*	656.34	3.683	28.7942	667.97	0.562	*	706.48	0.753	-15.5870
15-Nov-43	19:11:15	64.006	0.546978929	586.80, 587.70	0.692	*	656.47	2.526	88.1633	668.33	0.415	*	706.60	0.401	35.3161
	19:14:59	64.009	0.547179427	586.69, 587.59	0.700	*	656.58	2.564	138.4119	668.44	0.281	*	706.94	0.487	179.5857
	19:23:18	64.014	0.547626072	586.79, 587.70	0.730	*	656.35	2.632	33.3465	668.32	0.262	*	706.94	0.438	179.5856
	19:26:39	64.017	0.547805983	586.79, 587.70	0.706	*	656.40	2.510	56.1868	668.21	0.362	*	706.71	0.491	81.9914
	20:16:44	64.052	0.550495701	586.74, 587.65	0.598	*	656.33	2.511	24.2098	668.42	0.369	*	706.94	0.447	179.5850
	20:20:21	64.054	0.550689933	586.74, 587.65	0.603	*	656.55	2.577	124.7070	668.42	0.342	*	706.94	0.487	179.5850
16-Nov-43	19:43:15	65.028	0.626032477	586.79, 587.70	0.478	*	656.46	1.917	83.5781	668.32	0.286	*	***	***	***

เมื่อกำหนดให้

วันที่ เป็นวันสังเกตการณ์ หน่วยเป็น วัน-เดือน-ปี พ.ศ. (d-m-yr) เมื่อ Oct-43 เท่ากับ เดือนตุลาคม พ.ศ. 2543, และ Nov-43 เท่ากับ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2543

ณ เวลา ที่องศาเงาของสังเกตการณ์ (L.M.T.) หน่วยเป็น ชั่วโมง: นาที: วินาที (hr: min: sec)

H.J.D. เป็นวันจูเลียนศูนย์กลาง เมื่อ H.J.D. = ค่าในตาราง + 2451800 หน่วยเป็น วัน

Phase เป็นเฟสการโคจรของดาวคู่บีตา 1c

Wavelength เป็นความยาวคลื่น หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)

Width เป็นความกว้างสมมูล (equivalent width) หน่วยเป็น นาโนเมตร (nm)

RV เป็นค่าความเร็วในแนวเส้นสายตาที่แก้ไขจากการเลื่อนดอปเปลอร์เนื่องจากการโคจรของโลกแล้ว มีหน่วยเป็น กิโลเมตร ต่อ วินาที (km/s)

- หมายถึง ไม่ได้สังเกตการณ์

* หมายความว่า ค่าที่ไม่น่าเชื่อถือ เนื่องมาจาก การเลื่อนของสเปกตรัม (spectrum shift) แยกออกเป็น 2 เส้น

** หมายความว่า ค่าที่ไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากไม่ใช่อุปกรณ์ถ่ายภาพด้วย Exposure Time = 60 วินาที ยกเว้น การวิเคราะห์ความยาวคลื่น และความเร็วในแนวเส้นสายตา

*** หมายความว่า ค่าที่ไม่น่าเชื่อถือ เนื่องจากมีหลายสาเหตุ เช่น สภาวะอากาศที่ล้อมรอบหอดูดาวไม่ดี, หรือ เกิดจากพฤติกรรมของระบบดาวคู่เอง

ตารางที่ 5-3 ผลการคำนวณ FWHM และ T ของเส้นสเปกตรัมสว่าง H- α และ He I (~706.52 nm)

จากการสังเกตการณ์ดาวคู่บีตา โลรี

เวลาดังเหตุการณ์			Phase	ที่เส้น H- α		ที่เส้น HeI (~706.52 nm)	
วันที่	ณ เวลา	HJD.		FWHM	T	FWHM	T
d-m-yr	hr:min:sec	(2451800+)					
				(nm)	($\times 10^{-6}$ K)	(nm)	($\times 10^{-6}$ K)
12-Oct-43	20:10:42	30.049	0.920798902	1.114766686	5.665683026	1.408860658	31.02707322
13-Oct-43	19:53:09	31.037	0.997190646	1.066722301	5.18784581	1.302367035	26.52202897
	19:54:40	31.038	0.997272098	1.082650042	5.343926848	1.345791989	28.32016846
14-Oct-43	19:51:04	32.035	0.074413018	1.086695011	5.383933129	1.305007069	26.61308667
17-Oct-43	18:40:45	34.986	0.302639491	1.115293703	5.671041305	1.295123492	26.22782741
	18:45:09	34.989	0.30287579	2.05538755	19.26068612	0.864701455	11.69155654
	18:48:56	34.992	0.303078971	1.106627889	5.58325589	1.077095189	18.13480537
18-Oct-43	19:16:12	36.011	0.381877582	1.066507003	5.185751883	1.494628602	34.97418928
	19:20:27	36.014	0.382105825	1.038837331	4.920162041	301.5994927	1422780
	19:41:45	36.029	0.383249728	1.130574159	5.827501847	1.600592469	40.04665674
	19:45:50	36.032	0.383469021	1.139485715	5.921716918	0.209149477	0.684208979
	19:52:51	36.036	0.383845846	1.149395615	6.023145883	1.413723602	31.25136363
	19:59:31	36.041	0.384203875	1.100047936	5.515209242	1.664026455	43.32423745
	20:01:09	36.042	0.384291593	0.956275842	4.167783412	1.195085398	22.34644048
	20:07:56	36.047	0.384655887	1.123556335	5.755380173	1.522495747	36.26792013
19-Oct-43	18:54:29	36.996	0.458045581	1.094377969	5.460331303	1.28699958	25.88369836
	19:01:16	37.001	0.458409875	1.122046207	5.739919407	1.291919891	26.09823423
	19:05:06	37.003	0.458615742	1.065202295	5.171338427	1.349167534	28.45355211
20-Oct-43	18:47:33	37.991	0.535007517	1.087070102	5.387650474	1.112603411	19.33815816
	18:53:39	37.995	0.535335114	1.078169983	5.300437439	1.382660715	29.86521056
	19:18:48	38.013	0.536685779	1.049691981	5.021836067	1.203197234	22.60855567
	19:23:47	38.016	0.536953406	1.094526416	5.461812731	1.313388584	26.93925881
	19:29:06	38.02	0.537238934	0.975593103	4.337866834	1.088221331	18.49987539
	19:30:41	38.021	0.537323966	1.088147195	5.398332172	1.188100678	22.04477426
21-Oct-43	18:45:42	38.99	0.612242461	1.156831424	6.101329291	1.407084728	30.92001296
	18:49:39	38.992	0.612454593	1.139784922	5.922841706	1.445043621	32.60062594
	18:59:36	38.999	0.612988952	1.143415533	5.960634414	1.586017339	39.28393924
	19:03:04	39.002	0.613175127	1.134272284	5.865687892	1.514416926	35.81707188
	19:10:07	39.007	0.613553743	1.145912973	5.986701198	1.487431473	34.5519929
	19:13:41	39.009	0.613745289	1.102176469	5.53842884	1.510073766	35.60084862
	19:14:48	39.01	0.613805259	1.113471836	5.652528802	1.463613937	33.45432265
	19:20:43	39.014	0.614123009	1.102619099	5.541020975	1.522266891	36.1893491
	19:22:01	39.015	0.614192825	1.145636634	5.983814137	1.541467366	37.11957569
	19:29:46	39.02	0.614609034	354961.1989	5.74E+11	1.387302856	30.07544628
	19:31:10	39.021	0.61468422	1.135030693	5.875503424	1.132388325	20.04451228
	19:40:17	39.027	0.615173825	1.07306377	5.247951791	1.574153111	38.6984092
	19:41:35	39.028	0.615243641	1.204501687	6.61231597	1.399013659	30.55680439

ตารางที่ 5-3 (ต่อ)

เวลาดังเหตุการณ์			Phase	ที่เส้น H-alfa		ที่เส้น HeI (~706.52 nm)	
วันที่	ณ เวลา	H.J.D.		FWHM	T	FWHM	T
d-m-yr	hr:min:sec	(2451800+)					
	19:42:51	39.029	0.615311666	1.204481803	6.612097659	-	-
23-Oct-43	18:28:17	40.977	0.765975738	1.055422732	5.078520365	1.389748607	30.1909808
	18:31:50	40.98	0.766166388	1.127636258	5.795312189	1.203331883	22.63474333
	18:39:54	40.985	0.766599604	1.089796246	5.41470656	1.399914151	30.6342699
	18:43:29	40.988	0.766792044	1.04943778	5.021086463	1.168793023	21.35403488
	18:49:45	40.992	0.767128592	1.148528385	6.012045218	1.356049282	28.74456054
	18:53:03	40.995	0.767305817	1.128233427	5.803396403	1.550768762	37.59229284
26-Oct-43	19:27:20	44.018	0.001150031	1.09944767	5.5110384	1.535660939	36.88636675
	19:30:57	44.021	0.001344262	0.980841647	4.386136126	1.353690727	28.64465754
	19:39:26	44.027	0.001799855	0.978106789	4.361710709	1.299185321	26.39259936
	19:43:18	44.029	0.002007512	1.023998774	4.779006776	1.18732175	22.04330968
	19:51:35	44.035	0.002452363	1.08919142	5.410511147	1.179574856	21.75659703
	19:55:18	44.038	0.002651965	1.016481008	4.710671808	0.744805904	8.674134983
27-Oct-43	18:45:18	44.989	0.076227037	1.306508674	7.782316787	1.449171534	32.83821518
	19:01:01	45	0.077071092	1.089086879	5.405847928	1.370194871	29.34738448
	19:04:51	45.003	0.077276959	1.088255682	5.397599533	1.382151445	29.86180059
	19:12:29	45.008	0.077686903	1.117190747	5.690349885	0.044860625	0.031458309
	19:16:13	45.01	0.0778874	1.93801228	17.12369011	1.45842251	33.24845314
	19:27:06	45.018	0.078471883	274845.2416	-	1.338000208	27.99318516
	19:30:36	45.02	0.078659848	1.134834229	5.871501333	1.346047434	28.33092043
28-Oct-43	18:37:27	45.983	0.153139859	1.062904101	5.15077378	1.329180718	27.61676419
	18:41:24	45.986	0.153351991	1.003401848	4.590226369	1.263681258	24.96202513
29-Oct-43	19:30:35	47.02	0.233327777	1.2129677	6.710090001	1.423760409	31.69668031
	19:34:00	47.023	0.233511267	0.993285101	4.498131559	1.235461942	23.86704755
31-Oct-43	18:41:24	48.986	0.38535532	1.137529637	5.901403551	1.399625678	30.64072291
	18:52:47	48.994	0.385966656	1.126903235	5.78972001	1.270974831	25.2667338
	18:54:01	48.995	0.386032891	1.086357005	5.378781602	1.38019811	29.79600655
	19:01:46	49	0.386449101	1.166902426	6.21010521	1.785806561	49.91310582
	19:05:27	49.003	0.386646913	0.956233817	4.170211382	1.549411298	37.5615851
1-Nov-43	18:50:03	49.992	0.463154352	1.021343761	4.755850472	1.227727035	23.56913227
	18:54:03	49.995	0.46336917	1.053441056	5.059467272	1539657.781	3.71E+13
	19:35:40	50.024	0.465604173	0.957638457	4.181070273	1.25435148	24.59479574
	19:36:52	50.025	0.465668619	1.0224467	4.766127608	1.490290425	34.71734851
	20:16:06	50.052	0.467775626	1.045671211	4.986779616	1.382528896	29.88741743
	20:17:24	50.053	0.467845442	0.046283834	0.009769864	1.605936457	40.31451522
	20:38:02	50.067	0.468953545	1.107023669	5.587250251	1.424722685	31.72965907
	20:39:19	50.068	0.469022466	0.59989273	1.641258813	2.406136647	90.27176982
2-Nov-43	18:51:05	50.993	0.540544361	1.121598156	5.733414579	1.314922395	27.00221638
	18:52:23	50.994	0.540614177	1.061681996	5.138936084	1.283549366	25.73709269

ตารางที่ 5-3 (ต่อ)

เวลาดังกล่าวการณ			Phase	ที่เส้น H-alpha		ที่เส้น HeI (~706.52 nm)	
วันที่	ณ เวลา	H.J.D.		FWHM	T	FWHM	T
d-m-yr	hr:min:sec	(2451800+)					
				(nm)	($\times 10^6$ K)	(nm)	($\times 10^6$ K)
3-Nov-43	19:02:50	51.001	0.541175389	1.106939652	5.584530441	1.261881957	24.87549864
	19:08:39	52.005	0.618822311	1.100138455	5.516116932	1.550630326	37.55049922
	19:10:01	52.006	0.618895707	1.160451357	6.137516242	1.635069129	41.73844475
4-Nov-43	19:35:14	52.023	0.620249957	1.19133562	6.468551299	1.622925658	41.14637563
	19:54:33	53.037	0.698621919	1.115558061	5.673730041	1.374083701	29.51420595
	19:55:45	53.037	0.698686365	1.100393028	5.52051978	1.385900834	30.02403374
5-Nov-43	20:04:10	53.043	0.699138378	1.150494244	6.034665619	1.389872749	30.19637476
	18:38:07	53.984	0.771851696	1.227659623	6.866717877	1.443700616	32.59074129
	18:41:15	53.986	0.772019971	1.099343192	5.50999105	1.362657646	29.03444107
6-Nov-43	19:32:11	54.021	0.774755324	1.157494065	6.106274427	1.543910632	37.26053128
	18:57:21	54.997	0.850219241	1.155580661	6.086103076	1.388566817	30.14904224
	19:00:42	54.999	0.850399152	1.19466346	6.509101345	1.530152914	36.610834
7-Nov-43	19:10:39	55.006	0.850933513	1.109768283	5.614989234	1.463033967	33.45904534
	18:35:36	55.982	0.926385823	1.200108989	6.56417499	1.421783065	31.59885898
	18:39:02	55.984	0.926570209	1.120528276	5.724399714	1.454487184	33.07956219
9-Nov-43	18:47:49	55.99	0.927041915	1.197999362	6.543309815	1.456741421	33.15026341
	18:47:03	57.99	0.081670156	1.133862505	5.861450464	1.358212817	28.83635581
	18:50:27	57.992	0.081852751	1.03749894	4.907492378	1.402046867	30.72768128
11-Nov-43	18:59:10	57.998	0.082320877	1.203450802	6.605208843	1.498593617	35.10528343
	18:45:36	59.988	0.236261837	0.998479533	4.545300957	1.35254437	28.61397849
	18:49:18	59.991	0.236460545	1.012349446	4.672455889	1.173919486	21.54176827
12-Nov-43	19:00:46	59.999	0.237076359	0.984361362	4.417671589	1.15847992	20.9853867
	18:53:35	60.994	0.314025412	1.13563816	5.881794231	1.313619396	26.9739055
	18:57:55	60.997	0.314258133	1.096354008	5.480067751	1.381193106	29.82969131
13-Nov-43	19:08:05	61.004	0.314804131	1.090963908	5.426315942	1.385508097	30.01636456
	19:43:47	62.029	0.394056263	1.042338044	4.955038709	1.089910648	18.57469736
	19:47:18	62.031	0.394245124	1.067148567	5.193733286	1.097874635	18.85888348
14-Nov-43	19:54:57	62.036	0.394655966	1.063389147	5.157204104	1.266846842	25.1028731
	18:45:44	62.988	0.46827361	1.030584661	4.842299629	1.301535102	26.48815601
	19:16:44	63.01	0.469938459	0.09133511	0.03802019	1.252646885	24.53563376
15-Nov-43	19:20:22	63.012	0.470133586	0.988794415	4.459045277	1.443012135	32.54952788
	19:11:15	64.006	0.546978929	1.07738995	5.292125697	1.126180964	19.82536039
	19:14:59	64.009	0.547179427	1.004904934	4.602446297	1.198016635	22.41428377
16-Nov-43	19:23:18	64.014	0.547626072	0.269026344	0.329969601	1.052615398	17.30368523
	19:43:15	65.028	0.626032477	1.110268885	5.618173035	-	-

เมื่อกำหนดให้

FWHM เป็น Full width at half maximum หน่วยนาโนเมตร (nm)

T ($\times 10^6$) เป็นอุณหภูมิ หน่วยเป็นเคลวิน (K) ตามนิยามสมการ(5.14)