การวิเคราะห์คาบการโคจรและพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem

Orbital Period Analysis and Absolute Parameters of the Eclipsing Binary V404 Gem

ปฐม์พงศ์ พันธ์พิบูลย์[1*], ทวีศักดิ์ สีหาบุญมาก[2] และ เอกพงศ์ แทนสา [2]
Patapong Panpiboon[1*], Thawisak Sihabunmak[2] and Ek-kapong Tansa[2]

[1]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
[1]Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University.
[2]Program of Physics, Faculty of Education, Rajabhat Mahasarakham University.
*Corresponding author. E-mail: patapong.pa@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์คาบการโคจรและพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem สังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร วัดโฟโตเมตรีด้วยกล้องซีซีดีผ่านแผ่นกรองแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินและแสงสีเหลือง ณ หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 9,10 และ 12 มกราคม พ.ศ. 2562 ปรับปรุงภาพถ่ายสู่ค่ามาตรฐานและวัดค่าโชติมาตรโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรีด้วยโปรแกรม SIRIL วิเคราะห์คาบการโคจรของระบบดาวคู่ด้วยแผนภาพ (*O - C*) สังเคราะห์กราฟแสงและทำนายพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่ด้วยโปรแกรม PHOEBE ผลจากการวิเคราะห์คาบการโคจรของระบบเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา dP/dt = 3.45(±0.20) x10^{-7} วันต่อปี ค่าอุณหภูมิยังผลของดาวปฐมภูมิ อุณหภูมิยังผลของดาวทุติยภูมิ มุมเอียงของระนาบวงโคจร ศักย์พื้นผิว และอัตราส่วนมวลมีค่า 5528 เคลวิน 5440(±15) เคลวิน 78.63(±0.37) องศา 7.21(±0.01) และ 3.43(±0.01) ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของคาบการโคจรทำให้ทราบว่าระบบดาวคู่นี้อยู่ในช่วงวิวัฒนาการที่ดาวสมาชิกทั้งสองกำลังเคลื่อนที่ออกห่างจากจุดศูนย์กลางมวล ผลเฉลยของพารามิเตอร์สัมบูรณ์แสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem จัดอยู่ในประเภท W Ursae Majoris ชนิด W-type

คำสำคัญ: ดาวคู่อุปราคา การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจร แบบจำลองกราฟแสง วิวัฒนาการของดาวฤกษ์

Abstract

In this research, we analyze the orbital period and absolute parameters of the eclipsing binary V404 Gem. This work used the 0.7-meter reflecting telescope with CCD photometric system in blue and visual bands. The photometric data were obtained in 9, 10 and 12 January 2019 at the Thai National Observatory, Nakhon Ratchasima (Chalermprakhiat Astronomical Observatory Commemorating King Bhumibhol's 7th Birthday Anniversary). The data reduction and measuring the magnitude were processed by differential photometric technique with SIRIL program. The orbital period was analyzed by Observed-minus-Calculated (*O-C*) diagram. The synthesizing light curves were predicted for absolute parameters with PHOEBE program. The results showed that the orbital period changes increased to dP/dt = 3.45(±0.20) x10^{-7} days per year. The effective temperature of the primary and secondary stars, the inclination, surface potential and the mass ratio were 5528 K, 5440(±15) K, 78.63(±0.37) degree, 7.21(±0.01) and 3.43, respectively. The increasing of orbital period revealed an evolutionary status of the eclipsing binary V404 Gem, which both components moving away from the center of mass. The solutions of absolute parameters showed that the classification of this system was a W-subtype of W Ursae Majoris binary star system.

Keywords: Eclipsing binary, Orbital period changes, Light curve modeling, Stellar evolution

บทนำ

การศึกษาระบบดาวคู่อุปราคาเป็นหัวข้อที่สำคัญในการวิจัยทางดาราศาสตร์ ดาวฤกษ์ที่ปรากฏบนท้องฟ้าส่วนใหญ่มีพฤติกรรมที่แสดงให้เราสังเกตเห็นผ่านกล้องโทรทรรศน์ได้ว่าเป็นระบบดาว ซึ่งประกอบด้วยดาวสมาชิก 2 ดวงหรือมากกว่า ระบบดาวฤกษ์นี้โคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน (Adams & Joy, 1919) เป้าหมายที่เลือกศึกษาในครั้งนี้คือระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem หรือ GSC1330-0287 อยู่ในกลุ่มดาวคนคู่ (Gemini constellation) มีตำแหน่งในพิกัดไรต์แอสเซนชัน (Right ascension; Ra) คือ α_{2000} = 06^{h}47^{m}02^s.81 และมีตำแหน่งในพิกัดเดคลิเนชัน (Declination; Dec) คือ b_{2000} = +15^{o}37’22’’.98 (Simbad, 2020) ดาวสมาชิกทั้งสองเป็นดาวแคระ (dwarfs) ซึ่งมีขนาดและความสว่างใกล้เคียงกัน

GSC1330-0287 ค้นพบครั้งแรกโดย Lasker et al. (1988) และบันทึกไว้ในฐานข้อมูล Guide Star Catalog (GSC) (Morrison et al., 2001) จากนั้น Ahterberg & Agerer (2005) พบว่า GSC1330-0287 เป็นระบบดาวคู่อุปราคาประเภท W Ursae Majoris (W UMa) หรือ EW type ซึ่งเป็นการค้นพบโดยบังเอิญเมื่อเป้าหมายหลักในขณะนั้นคือระบบดาวคู่อุปราคา KV Gem อีกทั้งยังยืนยันตำแหน่งของระบบดาวคู่ที่ค้นพบนี้จากการสำรวจของโครงการ ROTSE1 ซึ่งถูกบันทึกในฐานข้อมูล Northern Sky Variability Survey (NSVS) ด้วยชื่อ NSVS 9801698 ยิ่งไปกว่านั้นเขาได้คำนวณหาคาบการโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลของระบบดาวคู่นี้ได้เท่ากับ 0.348705 วัน และสามารถนำมาเขียนเป็นสมการ Linear Ephemeris ได้ดังสมการที่ (1):

$$Min.I = HJD2452690.5116 + {}^{d}0.348705 \times E \quad (1)$$

เมื่อ E คือ ค่ายุค (Epoch) ของการสังเกตการณ์ในขณะที่วัดแสงได้น้อยที่สุด (Times of Minimum; ToM) เนื่องจากการบังกันของดาวสมาชิกในระบบดาวคู่อุปราคา GSC1330-0287 Hübscher, et al. (2006, 2007, 2009, 2011, 2013, 2004) ได้รวบรวมค่าเวลา ToM จากวารสาร Bundesdeutsche Arbeitsgemeinschaft für Veränderliche Sterne e.V. (BAV) โดยรวบรวมข้อมูลการวิเคราะห์ของ Ageer and Tiefenbach (AG), Achterberg and Norderstedt (ATB) และ Quester and Esslingen (QU) เพื่อนำเสนอใหม่ในวารสาร Informetion Bulletin on Variable Stars (IBVS) จำนวน 6 ฉบับคือ IBVS 5731, IBVS 5761, IBVS 5874, IBVS 5984, IBVS 6070 และ IBVS 6118 จำนวน 26, 2, 12, 2, 3 และ 3 ข้อมูลตามลำดับ เราค้นพบว่าระบบดาวคู่นี้เปลี่ยนชื่อเป็น V404 Gem ครั้งแรกในวารสาร IBVS 6029 ซึ่งนำเสนอค่า ToM ไว้ 1 ข้อมูล (Diethelm, 2012) ยังมีการนำเสนอค่า ToM ของ V404 Gem โดย Nelson (2011, 2015) อีก 2 ข้อมูล ในวารสาร IBVS 5929 และ IBVS 6131 นอกจากนี้เราค้นพบข้อมูล ToM ในวารสาร Open European Journal on Variable Star (OEJV) จำนวน 1, 3 และ 11 ข้อมูลในฉบับที่ OEJV 0137, OEJV 0160 และ OEJV 0168 ตามลำดับ (Brát et al., 2011; Hoňková et al., 2013, 2015)

เนื่องจากค่า ToM ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem ที่ถูกบันทึกไว้ตั้งแต่ ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2014 ซึ่งผ่านมาแล้ว 8 ปี (ปัจจุบัน ค.ศ. 2022) ยังไม่มีการรายงาน ค่า ToM เพิ่มเติม อีกทั้งยังไม่พบการรายงานเกี่ยวกับการวิเคราะห์คาบการโคจรและพารามิเตอร์สัมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์คาบการโคจรและพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem โดยใช้ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์แบบสะท้อนแสง (reflecting telescope) วัดโฟโตเมตรี (photomety) โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรี (differential photometric technique) นำเสนอวิธีการวิเคราะห์คาบการโคจรจากค่า ToM อีกทั้งยังนำเสนอการสังเคราะห์กราฟแสง (Light

Curve; LC) และแสดงผลการทำนายพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem ด้วยวิธีการคำนวณบนพื้นฐานของระเบียบวิธีวิลสัน-เดวินนี่ (Wilson-Devinney method) (Wilson & Devinney, 1971) เพื่ออธิบายวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ซึ่งเป็นพื้นฐานของการศึกษาการกำเนิดเอกภพได้ ผลการวิจัยทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจและเป็นแนวทางในงานวิจัยทางดาราศาสตร์เกี่ยวกับระบบดาวคู่อุปราคาต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์คาบการโคจรและพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem โดยใช้ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ณ หอดูดาว เฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา จังหวัดนครราชสีมา ณ วันที่ 9,10 และ 12 มกราคม พ.ศ. 2562 วัดโฟโตเมตรีด้วยกล้องซีซีดี (Charge-Coupled Device; CCD) ผ่านแผ่นกรองแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (Blue filter, B) และแสงสีเหลือง (Visual filter, V) ปรับปรุงภาพถ่ายสู่ค่ามาตรฐาน (reduction) และวัดค่าโชติมาตร (Magnitude; M) โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมตรีด้วยโปรแกรม SIRIL (Freeastro, 2019) โดยเลือกดาวฤกษ์ที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกัน คือ ดาว TYC1330-1197-1 (a_{2000} = 06^{h}46^{m}54^{s}.90, b_{2000} = +15°38’5’’.86) และ TYC-1330-717-1 (a_{2000} = 06^{h}46^{m}31^{s}.60, b_{2000} = +15°40’36’’.13) (Simbad, 2020) เพื่อใช้เป็นดาวเปรียบเทียบ (comparison star) และดาวอ้างอิง (reference star) ตามลำดับ

วิเคราะห์หาค่า ToM ด้วยโปรแกรม MINIMA 27 (Nelson, 2019) นำเสนอวิธีการวิเคราะห์คาบการโคจรจากค่า ToM ผ่านแผนภาพ Observed-minus-Calculated (*O-C*) อีกทั้งยังนำเสนอการสังเคราะห์กราฟแสงและทำนายพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem บนพื้นฐานของระเบียบวิธีวิลสัน-เดวินนี่ ด้วยโปรแกรม PHOEBE (Prsa & Zwitter, 2005) และคำนวณค่าพารามิเตอร์กายภาพด้วยสูตรเอมไพริคอล (empirical formula) ของ Harmanec (1988) โดยคำนวณมวลของดาวฤกษ์ (M) ได้จากสมการที่ (2) คำนวณรัศมีของดาวฤกษ์ (R) ได้จากสมการที่ (3) และคำนวณค่าแมกนิจูดโบโลเมตริกของดาวฤกษ์ (M_{bol}) ได้จากสมการที่ (4) ดังนี้

$$\log M/M_{\odot} = [(1.77141X - 21.46965)X + 88.05700]X - 121.67820 \quad (2)$$

$$\log R/R_{\odot} = [(2.166639X - 26.91528)X + 112.10890]X - 156.11700 \quad (3)$$

$$M_{bol} = [(-10.8320X + 134.57640)X - 570.54460]X + 822.89520 \quad (4)$$

เมื่อ $X = \log T_{eff}$ โดยที่ T_{eff} คือ อุณหภูมิยังผลของดาวฤกษ์ ทั้งนี้เราใช้สูตรเอมไพริคอลดังกล่าวนี้คำนวณเฉพาะค่ามวล รัศมีและแมกนิจูดโบโลเมตริกของดาวปฐมภูมิเท่านั้น จากนั้นจึงนำมา

คำนวณเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนมวล (q = M_2/M_1) อัตราส่วนรัศมี (R_2/R_1) และอัตราส่วนแมกนิจูดโบโลเมตริก (M_{bol2}/M_{bol1}) ซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้าย (solutions) จากระเบียบวิธีวิลสัน-เดวินนี่ อีกทั้งคำนวณค่ากำลังส่องสว่างของดาวฤกษ์ (L) ได้จากสมการ $L/L_\odot = (R/R_\odot)^2(T/T_\odot)^4$ โดยคำนวณจากค่าอุณหภูมิยังผลและรัศมีของดาวสมาชิกทั้งสอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุดตั้งแต่ ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2019 ประเภทของอุปราคา ค่ายุค ค่า ($O - C$) และเอกสารอ้างอิง

ToM (HJD 245000+)	Error	Type	Epoch	($O - C$) Residuals		Reference
2359.4159	0.0069	II	-949.5	-0.0003	-0.0040	IBVS 5731
2690.3392	0.0010	II	-0.5	0.0020	-0.0006	IBVS 5731
2690.5116	0.0011	I	0.0	0.0000	-0.0026	IBVS 5731
2691.3847	0.0002	II	2.5	0.0013	-0.0013	IBVS 5731
2692.2576	0.0037	I	5.0	0.0025	-0.0001	IBVS 5731
2692.4307	0.0003	II	5.5	0.0012	-0.0014	IBVS 5731
2694.3485	0.0006	I	11.0	0.0012	-0.0014	IBVS 5731
2694.5234	0.0006	II	11.5	0.0017	-0.0009	IBVS 5731
2697.4853	0.0009	I	20.0	-0.0004	-0.0030	IBVS 5731
2707.4253	0.0005	II	48.5	0.0015	-0.0010	IBVS 5731
2713.3551	0.0021	II	65.5	0.0033	0.0008	IBVS 5731
2716.3170	0.0024	I	74.0	0.0012	-0.0013	IBVS 5731
2721.3747	0.0007	II	88.5	0.0027	0.0002	IBVS 5731
2722.4219	0.0014	II	91.5	0.0038	0.0013	IBVS 5731
2735.3237	0.0028	II	128.5	0.0035	0.0011	IBVS 5731
3007.4879	0.0013	I	909.0	0.0035	0.0017	IBVS 5731
3028.4116	0.0017	I	969.0	0.0049	0.0031	IBVS 5731
3055.4366	0.0007	II	1046.5	0.0052	0.0036	IBVS 5731
3070.4299	0.0009	II	1089.5	0.0042	0.0026	IBVS 5731
3088.3831	0.0021	I	1141.0	-0.0009	-0.0025	IBVS 5731
3407.4501	0.0014	I	2056.0	0.0010	0.0000	IBVS 5731
3408.4977	0.0021	I	2059.0	0.0025	0.0014	IBVS 5731

ตารางที่ 1(ต่อ) แสดงค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุดตั้งแต่ ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2019 ประเภทของอุปราคา ค่ายุค ค่า ($O - C$) และเอกสารอ้างอิง

ToM (HJD 245000+)	Error	Type	Epoch	($O - C$) Residuals		Reference
3410.4142	0.0005	II	2064.5	0.0011	0.0001	IBVS 5731
3410.4194	0.0042	II	2064.5	0.0063	0.0053	IBVS 5731
3760.3386	0.0008	I	3068.0	0.0001	-0.0007	IBVS 5731
3760.5120	0.0004	II	3068.5	-0.0009	-0.0017	IBVS 5731
4092.4798	0.0015	II	4020.5	-0.0003	-0.0011	IBVS 5761
4092.6554	0.0048	I	4021.0	0.0010	0.0001	IBVS 5761
4454.4391	0.0004	II	5058.5	0.0033	0.0020	IBVS 5874
4505.3493	0.0005	II	5204.5	0.0025	0.0012	IBVS 5874
4507.4419	0.0007	II	5210.5	0.0029	0.0016	IBVS 5874
4509.3602	0.0010	I	5216.0	0.0033	0.0020	IBVS 5874
4509.5339	0.0010	II	5216.5	0.0027	0.0013	IBVS 5874
4515.2880	0.0040	I	5233.0	0.0031	0.0018	IBVS 5874
4515.4626	0.0004	II	5233.5	0.0034	0.0020	IBVS 5874
4516.3342	0.0005	I	5236.0	0.0032	0.0019	IBVS 5874
4516.5090	0.0005	II	5236.5	0.0037	0.0023	IBVS 5874
4520.3448	0.0007	II	5247.5	0.0037	0.0024	IBVS 5874
4531.3273	0.0005	I	5279.0	0.0020	0.0006	IBVS 5874
4531.5030	0.0040	II	5279.5	0.0034	0.0020	IBVS 5874
5159.8652	0.0005	I	7081.5	-0.0009	-0.0038	IBVS 5929
5578.3124	0.0003	I	8281.5	0.0003	-0.0043	OEJV 0137
5578.3157	0.0025	I	8281.5	0.0036	-0.0009	IBVS 5984
5578.4866	0.0015	I	8282.0	0.0002	-0.0044	IBVS 5984
5956.3120	0.0004	II	9365.5	0.0037	-0.0027	OEJV 0160
5956.3127	0.0005	II	9365.5	0.0044	-0.0020	OEJV 0160
5956.3134	0.0010	II	9365.5	0.0051	-0.0013	OEJV 0160
5956.3134	0.0010	II	9365.5	0.0051	-0.0013	OEJV 0160
5968.6914	0.0005	I	9401.0	0.0041	-0.0024	IBVS 6029

ตารางที่ 1(ต่อ) แสดงค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุดตั้งแต่ ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2019 ประเภทของอุปราคา ค่ายุค ค่า ($O - C$) และเอกสารอ้างอิง

ToM (HJD 245000+)	Error	Type	Epoch	($O - C$)	Residuals	Reference
6001.2949	na	II	9494.5	0.0037	-0.0030	IBVS 6070
6001.4694	0.0005	I	9495.0	0.0038	-0.0029	IBVS 6070
6002.3453	0.0006	II	9497.5	0.0080	0.0013	IBVS 6070
6319.4920	0.0002	I	10407.0	0.0075	-0.0011	OEJV 0160
6319.4922	0.0003	I	10407.0	0.0077	-0.0009	OEJV 0160
6319.4923	0.0002	I	10407.0	0.0078	-0.0008	OEJV 0160
6643.4419	0.0027	I	11336.0	0.0104	-0.0003	IBVS 6118
6643.6172	0.0027	I	11336.5	0.0114	0.0006	IBVS 6118
6693.6557	0.0003	I	11480.0	0.0107	-0.0004	IBVS 6131
6694.3570	0.0005	I	11482.0	0.0146	0.0035	OEJV 0168
6703.4203	0.0003	I	11508.0	0.0115	0.0003	OEJV 0168
6703.4210	0.0001	I	11508.0	0.0123	0.0011	OEJV 0168
6709.3489	0.0001	I	11525.0	0.0122	0.0009	OEJV 0168
6709.3489	0.0002	I	11525.0	0.0122	0.0010	OEJV 0168
6729.3968	0.0003	II	11582.5	0.0096	-0.0018	OEJV 0168
6729.3975	0.0003	II	11582.5	0.0103	-0.0011	OEJV 0168
6729.3976	0.0005	II	11582.5	0.0103	-0.0011	OEJV 0168
6739.3385	0.0005	I	11611.0	0.0132	0.0017	OEJV 0168
6739.3388	0.0003	I	11611.0	0.0134	0.0019	OEJV 0168
6739.3389	0.0003	I	11611.0	0.0136	0.0021	OEJV 0168
8493.3419	0.0001	I	16641.0	0.0304	0.0011	This paper
8496.1305	0.0002	I	16649.0	0.0293	0.0000	This paper
8496.3072	0.0001	II	16649.5	0.0317	0.0023	This paper
8493.3388	0.0002	I	16641.0	0.0273	-0.0020	This paper
8496.1309	0.0003	I	16649.0	0.0297	0.0004	This paper
8496.3063	0.0001	II	16649.5	0.0308	0.0015	This paper

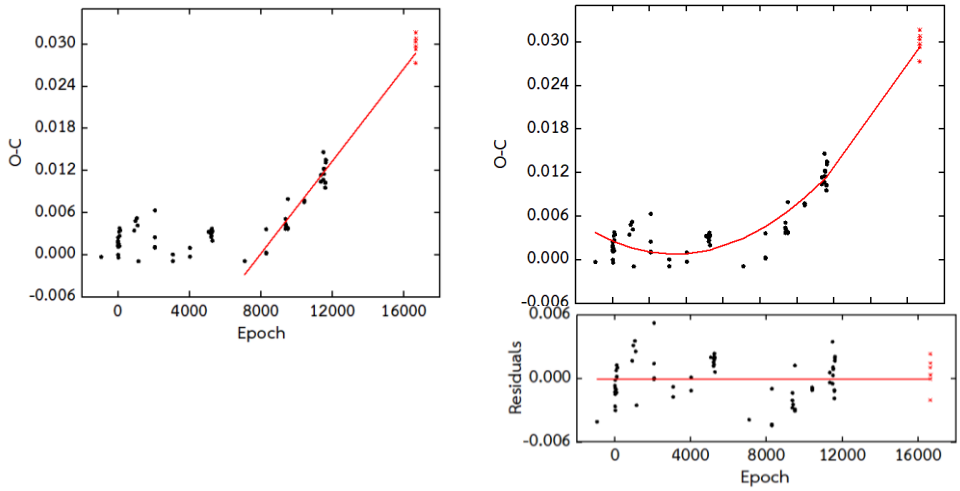
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิเคราะห์คาบการโคจรของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem เมื่อพิจารณาค่า ToM ที่ถูกบันทึกไว้ตั้งแต่ ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2014 นำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่า ToM จากข้อมูลโฟโตเมตรีของงานวิจัยนี้ในปี ค.ศ. 2022 เราคำนวณหาค่า ToM ด้วยโปรแกรม MINIMA 27 แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 เริ่มวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ด้วยการคำนวณหาค่ายุค (Epoch) ค่าผลต่างของช่วงเวลาที่แสงน้อยที่สุดในแต่ละยุคที่ทำการสังเกตการณ์กับช่วงเวลาที่แสงน้อยที่สุดในแต่ละยุค (Observed-minus-Calculated) ซึ่งคำนวณจากคาบการโคจรที่ใช้อ้างอิง (ค่าในเทอมที่ 2 ของสมการที่ (1)) จากนั้นเขียนแผนภาพ (*O-C*) ได้ดังภาพที่ 1 แสดงการกระจายของข้อมูลในการศึกษาในครั้งอดีตและข้อมูลของงานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) ในช่วงของข้อมูลที่มีความชันเป็นบวกเพื่อคำนวณหาสมการ Linear Ephemeris ใหม่หากมีการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่แสดงดังสมการที่ (5):

$$Min.I = HJD2458496.1306(\pm 0.00009) + {}^{d}0.348708(\pm 0.0000004) \times E \quad (5)$$

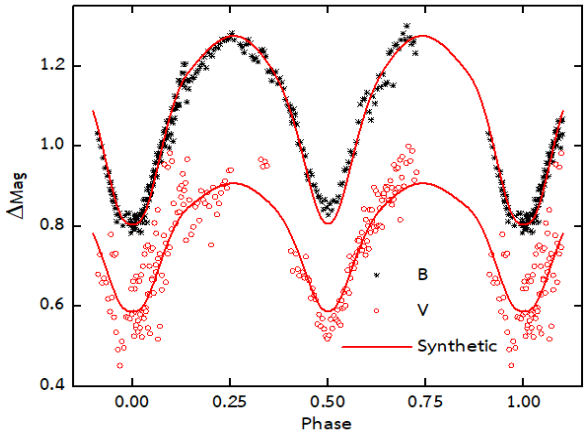
จากสมการที่ (5) พบว่าคาบการโคจรของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem ณ เวลาที่ทำการวิจัยเพิ่มขึ้นจาก $P = 0.348705$ วัน (Ahterberg & Agerer, 2005) เป็น $P = 0.348708(\pm 0.0000004)$ วัน ซึ่งสอดคล้องกับคาบการโคจรที่บันทึกไว้ในฐานข้อมูล The ASAS-SN Catalog of Variable Stars: II (Jayasinghe, et al., 2018) ดังภาพที่ 1 นอกจากนี้เรายังวิเคราะห์การถดถอยรูปแบบพหุนามกำลังสอง (Quadratic Regression Analysis) กับข้อมูลภาพรวมทั้งหมดเพื่อวิเคราะห์หาอัตราการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของคาบการโคจร (Long-term orbital period variations) แสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (6):

$$(O - C) = 1.65(\pm 0.09) \times 10^{-10} \times E^2 - 1.14(\pm 0.14) \times 10^{-6} \times E + 2.66(\pm 0.45) \times 10^{-3} \quad (6)$$



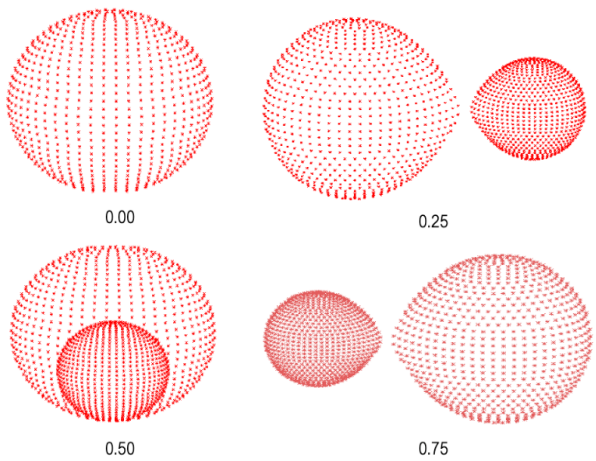
ภาพที่ 1 แผนภาพ (*O-C*) เมื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่ายในช่วงข้อมูลมีความชันเป็นบวก (ซ้าย) วิเคราะห์การถดถอยรูปแบบพหุนามกำลังสองกับข้อมูลภาพรวมทั้งหมด (ขวาบน) และกราฟประมาณค่าความคลาดเคลื่อน (ขวาล่าง)

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ในเทอมที่ 1 จากสมการที่ (6) มาคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอัตรา dP/dt = 3.45(±0.20) x10^{-7} วัน/ปี การวิเคราะห์พารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem ด้วยโปรแกรม PHOEBE เพื่อสร้างกราฟแสงสังเคราะห์และสร้างแบบจำลองของระบบดาวคู่ เราเลือกใช้แบบจำลองในโหมด Overcontact binary not in thermal contact แบบจำลองนี้ค่าศักย์พื้นผิวของดาวสมาชิกทั้งสอง (surface potential; W) มีค่าเท่ากัน ดาวสมาชิกทั้งสองมีค่าอุณหภูมิยังผล (effective temperature, T_{eff}) แตกต่างกัน เราใช้ค่าอุณหภูมิยังผลของดาวปฐมภูมิ T_1 = 5528 K จากตารางความสัมพันธ์ของ Flower (1996) เมื่อค่าดัชนีสี (B-V) = 0.708 ปรับค่าคงที่เริ่มจากค่าสัมประสิทธิ์การมืดคล้ำเนื่องจากความโน้มถ่วง (gravity darkening coefficients) ของดาวสมาชิก $g_1 = g_2$ = 0.32 (Lucy, 1967) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนโบโลเมตริก (bolometric albedo coefficient) ของดาวสมาชิก $A_1 = A_2$ = 0.5 (Rucinski,1969) ค่าสัมประสิทธิ์ความมืดคล้ำที่ขอบดาวฤกษ์ (logarithmic limb-darkening coefficients) ปรับตามตารางของ Van Hamme (1993) สมมติให้ระบบดาวคู่มีวงโคจรเป็นวงกลม (circular orbit) มีอัตราการหมุนรอบตัวเองของดาวสมาชิกเท่ากับอัตราการโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวล (synchronous rotation) ค่าความรีของวงโคจร (eccentricity; *e*) มีค่าเป็นศูนย์และค่าครึ่งแกนหลักของวงโคจร (semi-major axis; a) มีค่าเท่ากับ 1



ภาพที่ 2 กราฟแสงของข้อมูลสังเกตการณ์เปรียบเทียบกราฟแสงสังเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินและแสงสีเหลือง

จากนั้นคำนวณหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด (fitting curve) คำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดด้วยค่า cost function ที่ต่ำสุด บันทึกค่าผลลัพธ์จากการคำนวณนำมาเขียนกราฟแสงแสดงดังภาพที่ 2 และสร้างแบบจำลองโครงสร้างกายภาพของระบบดาวคู่แสดงดังภาพที่ 3 ส่วนผลเฉลยจากกระบวนการสังเคราะห์กราฟแสงดังตารางที่ 2 สุดท้ายเราคำนวณค่าพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem ด้วยสูตรเอมไพริคอลของ Harmanec (1988) แสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพ ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem

ตารางที่ 2 ผลเฉลยจากกระบวนการสังเคราะห์กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem

Parameters	Value
$q = M_2/M_1$	3.34(±0.01)
i (degree)	78.63(±0.37)
W	7.21(±0.01)
T_1 (K)	5528
T_2 (K)	5440(±15)

ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 2 และ 3 บ่งชี้ได้ว่าระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem เป็นระบบดาวคู่อุปราคาชนิด W Ursae Majoris ชนิด W-type เนื่องจากดาวสมาชิกมีมวลน้อย สเปกตรัมของดาวจะอยู่ในช่วง G ถึง K (Malatesta, 2021) อุปราคาปฐมภูมิจะเกิดจากการที่ดาวสมาชิกดวงที่มีขนาดใหญ่กว่าบังดาวสมาชิกดวงที่มีขนาดเล็กกว่า (occultation) โดยดาวสมาชิกดวงเล็กจะมีอุณหภูมิยังผลสูงกว่าดาวสมาชิกดวงใหญ่

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem

Parameters	Primary	Secondary
$M/M_\odot$	1.01	3.47
$R/R_\odot$	1.09	1.94
$T/T_\odot$	0.92	0.90
$L/L_\odot$	0.86	2.54
M_{bol}	4.68	7.11

สรุปผลและเสนอแนะ

การวิเคราะห์คาบการโคจรและพารามิเตอร์สัมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem พบว่าคาบการโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลของดาวสมาชิกทั้งสองเพิ่มขึ้นเป็น P = 0.348708 (±0.0000004) วัน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยอัตรา dP/dt = 3.45(±0.20) x10^{-7} วันต่อปี ค่าอุณหภูมิยังผลของดาวปฐมภูมิ อุณหภูมิยังผลของดาวทุติยภูมิ มุมเอียงของระนาบวงโคจร ค่าศักย์พื้นผิว และอัตราส่วนมวลมีค่า 5528 เคลวิน 5440(±15) เคลวิน 78.63(±0.37) องศา 7.21(±0.01) และ 3.43(±0.01) ตามลำดับ ภาพโครงสร้างกายภาพของระบบดาวคู่นี้เผยให้เห็นถึงการบังกันแบบเต็มดวงในอุปราคาปฐมภูมิ และการบังกันแบบเคลื่อนที่ผ่านในอุปราคาทุติยภูมิ ผลเฉลยค่าพารามิเตอร์สัมบูรณ์

คือมวล รัศมี อุณหภูมิยังผล กำลังส่องสว่าง และแมกนิจูดโบโลเมตริกของดาวสมาชิกทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem มีมวลและรัศมีมากกว่าดวงอาทิตย์แต่อุณหภูมิยังผลและกำลังส่องสว่างมีค่าน้อยกว่าดวงอาทิตย์ การเพิ่มขึ้นของคาบการโคจรทำให้ทราบว่าระบบดาวคู่นี้อยู่ในช่วงวิวัฒนาการที่ดาวสมาชิกทั้งสองกำลังเคลื่อนที่ออกห่างจากจุดศูนย์กลางมวล และยังพบว่าระบบดาวคู่นี้จัดอยู่ในประเภท W Ursae Majoris ชนิด W-type

เพื่อให้การศึกษาวิวัฒนาการของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นควรวิเคราะห์เกี่ยวกับตำแหน่งบนแผนภาพแฮรท์สชปรุง-รัสเซลล์ (Hertzsprung-Russell diagram) ระยะห่างจากโลก ความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวเล็งและแนวสัมผัส รวมถึงประเภทสเปกตรัมของดาวสมาชิกทั้งสอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมงานสังเกตการณ์ประจำหอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบพระชนมพรรษา จังหวัดนครราชสีมา สำหรับข้อมูลโฟโตเมตรี (photometry) ของระบบดาวคู่อุปราคา V404 Gem

เอกสารอ้างอิง

Adams, W.S., & Joy, A.H. (1919). The motions in space of some stars of high radial velocity. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America,* 5(7), 239-241.

Ahterberg, H., & Agerer, F. (2005). GSC 1330-0287 its ein Veranderlicher vom Typ EW. *BAV Rundbrief*, 3(1), 105.

Brát, L., Trnka, J., Smelder, L., Lehky, M., Kucakova, H., Lomoz, F., Hanzl, D., Vrastak, M., Corfini, G., Pribik, V., Dreveny, R., Ehrenberger, R., Kocian, R., Masek, M., Polak, J., Starzomski, J., Marchi, F., Poddany, S., Zejda, M., ... Zambelli, R. (2011). B.R.N.O. Contributions #37 Times of minima. *OEJV,* 137, 1-57.

Diethelm, R. (2012). Timings of minima of eclipsing. *IBVS,* 6029, 1-21.

Flower, P.J. (1996). Transformations from theoretical Hertzsprung-Russell diagrams to color-magnitude diagrams: effective temperatures, B-V colors, and bolometric corrections. *AJ*, 469(1), 355-365.

Freeastro. (2019). *Siril version 0.9.12*. https://free-astro.org/index.php?title=Siril.

Harmanec, P. (1988). Stellar masses and radii based on modern binary data. *Bull Astron Inst Czechosl*, 39(6), 329-345.

Hoňková, K., Jurysek, J., Lehky, M., Smelcer, L., Masek, M., Mazanec, J., Hanzl, D., et al. (2015). B.R.N.O. Contributions #39 Times of minima. *OEJV*, 168, 1-66.

Hoňková, K., Jurysek, J., Lehky, M., Smelcer, L., Trnka, J., Masek, M., Urbanik, M., et al. (2013). B.R.N.O. Contributions #38 Times of minima. *OEJV*, 160, 1-174.

Hübscher, J. (2011). BAV-results of observations photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *IBVS*, 5984, 1.

Hübscher, J. (2014). BAV-results of observations photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *IBVS*, 6118, 1.

Hübscher, J., & Lehmann, B. (2013). BAV-results of observations photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *IBVS*, 6070, 1.

Hübscher, J., & Walter, F. (2007). BAV-results of observations photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *IBVS,* 5761, 1.

Hübscher, J., Paschke, A., & Walter, F. (2006). BAV-results of observations photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *IBVS,* 5731, 1.

Hübscher, J., Steinbach, H.M., & Walter, F. (2009). BAV-results of observations photoelectric minima of selected eclipsing binaries and maxima of pulsating stars. *IBVS*, 5874, 1.

Jayasinghe, T., Stanek, K.Z., Kochanek, C.S., Shappee, B.J., Holoien, T.W.S., Thompson, T.A., Prieto J.L., Dong S., Pawlak, M., Pejcha, O., Shields, J.V., Pojmanski, G., Otero, S., Britt, C.A., & Will, D. (2018). The ASAS-SN catalog of variable stars II: uniform classification of 412,000 known variables. *Mon Not Roy Astron Soc*, 489(2), 1907-1943.

Lasker, B.M., Sturch, C.R., Lopez, C., Mallama, A.D., McLaughlin, S.F., Russell, J.L., Wisniewski, W.Z., Gillespie, B.A., Jenkner, H., Siciliano, El.D., Kenny, D., Baumert, J.H., Goldberg, A.M. ; Henry, G.W., Kemper, E., & Siegel, M.J. (1988). The guide star photometric catalog. *I. ApJS*, 68(1), 1-90.

Lucy, L.B. (1967). Gravity-darkening for stars with convective envelopes. *Z Astrophys*, 65(1), 89-92.

Malatesta, K. (2021). *W Ursae Majoris*. https://www.aavso.org/vsots_wuma.

Morrison, J.E., Roser, S., McLean, B., Bucciarelli, B., & Lasker, B. (2001). The guide star catalog, version 1.2: and astrometric recalibration and other refinements. *AJ*, 121(1), 1752-1763.

Nelson, B. (2011). CCD Minima for selected eclipsing binaries in 2009. *IBVS*, 5929, 1.

Nelson, B. (2015). CCD Minima for selected eclipsing binaries in 2014. *IBVS*, 6195, 1.

Nelson, B. (2019). *Software by Bob Nelson*. https://www.variablestarssouth.org /software-by-bob-nelson.

Prsa, A. & Zwitter, T. (2005). A computational guide to physics of eclipsing binaries. I. Demonstrations and perspectives. *ApJ,* 628(1), 426-438.

Rucinski, S.M. (1969). The proximity effects in close binary systems. II. The bolometric reflection effect for stars with deep convective envelopes. *AA*, 19(4), 245-255.

Simbad. (2020). *Tabular data*. เข้าถึงได้จาก http://cdsportal.ustrasbg.fr/?target=V*%20V404% 20Gem.

Van Hamme, W. (1993). New Limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves. *AJ*, 106(5), 2096-2117.

Wilson, R.E. & Devinney, E.J. (1971). Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni. *ApJ,* 166(3), 605-619.