



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

Cataclysmic variables ที่ค้นพบใหม่จาก INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey ในระนาบกาแล็กติกทางเหนือ ในฐานะตัวบ่งชี้วิวัฒนาการของดาวคู่แบบใกล้ชิด

New cataclysmic variables from the INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey of the northern galactic plan as tracers of close binary evolution

โดย

นางสาวอมรรัตน์ อังเวโรจน์วิทย์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

พฤษภาคม 2554

# รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

Cataclysmic variables ที่ค้นพบใหม่จาก INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey ในระนาบกาแล็กติกทางเหนือ ในฐานะตัวบ่งชี้วิวัฒนาการของดาวคู่แบบใกล้ชิด

New cataclysmic variables from the INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey of the northern galactic plan as tracers of close binary evolution

โดย

นางสาวอมรรัตน์ อังเวโรจน์วิทย์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา  
กับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ Assoc. Prof. Boris Gansicke และ รศ.บุญรักษา สุนทรธรรม สำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัย พร้อมกันนี้ขอขอบคุณศิริภา  
อาจโยธา ที่ช่วยปรับปรุงรูปแบบของรายงานการวิจัยและขอขอบคุณ คุณแพมมาลา อุทะกะ  
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ช่วยกรุณาประสานงานให้เป็นอย่างดี

## บทคัดย่อ

**Project Code:** MRG5180136

**Project Title:** Cataclysmic variables ที่ค้นพบใหม่จาก INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey ในระนาบกาแล็กติกทางเหนือ ในฐานะตัวบ่งชี้วิวัฒนาการของดาวคู่แบบใกล้ชิด

**Investigator:** ดร.อมรรัตน์ อังเวโรจน์วิทย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

**E-mail Address:** amornrata@hotmail.com, amornrata@nu.ac.th

**Project Period:** 15 พฤษภาคม 2551 - 15 พฤษภาคม 2553

เรานำเสนอการสังเกตการณ์ทางโฟโตเมตรีของ cataclysmic variables (CVs) อุปราคาในระบบที่ค้นพบใน จาก INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey ในระนาบกาแล็กติกทางเหนือ (IPHAS) คาบการโคจรของระบบถูกวิเคราะห์จากการแปรค่าทางโฟโตเมตรี ได้ผลดังนี้  $P_{orb} = 8.16$  ชั่วโมง สำหรับ IPHAS J0627+0148,  $P_{orb} = 3.59$  ชั่วโมง สำหรับ IPHAS J0130+6221,  $P_{orb} = 5.88$  ชั่วโมง สำหรับ IPHAS J0258+6352,  $P_{orb} = 4.94$  ชั่วโมง สำหรับ IPHAS J0518+2941,  $P_{orb} = 80.07$  นาที สำหรับ IPHAS J0528+2838 และ  $P_{orb} = 7.62$  ชั่วโมง สำหรับ IPHAS J1841+0538 เราทำการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ของ CVs ทั้งระบบจากรูปร่างของอุปราคาที่เกิดในกราฟแสง เราพบว่า IPHAS J0627+0148 เป็น intermediate polar (IP) ที่เกิดอุปราคาแบบลึกซึ่งจัดเป็นดวงที่ 4 ที่ถูกค้นพบ โดยมีคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว  $P_{spin} = 2210$  วินาที โมเมนต์แม่เหล็กของดาวแคระขาวใน IPHAS J0627+0148 มีค่า  $\mu_{wd} = 5 \times 10^{33} \text{ Gcm}^3$  ซึ่งเหมือนกับ IPs คาบการโคจรสั้นประเภท EX Hya ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า IPs คาบการโคจรยาวที่มีโมเมนต์แม่เหล็กในช่วงนี้และมี  $P_{spin}/P_{orb} \leq 0.1$  จะมีวิวัฒนาการไปเป็นระบบที่มีคาบการโคจรสั้นเช่นระบบที่เหมือนกับ EX Hya ที่มี  $P_{spin}/P_{orb} \sim 0.5$  ค่าความเอียงของระนาบวงโคจรของ IPHAS J0130+6221 และ IPHAS J0518+2941 ถูกคำนวณจากรูปร่างของอุปราคา ได้ผลดังนี้  $i = 83^\circ \pm 4^\circ$  และ  $i = 77^\circ \pm 2^\circ$  ตามลำดับ เราจัดประเภทของ IPHAS J0130+6221 ว่าเป็นสมาชิกของ novalike variables ประเภท SW Sex star เนื่องจากเราไม่พบการแปรค่าความสว่างของ IPHAS J0258+6352 ดังนั้นระบบอาจเป็น novalike variable สำหรับ IPHAS J0518+2941 เป็น dwarf nova เนื่องจากเราพบการระเบิดหนึ่งครั้งในช่วงการสังเกตการณ์ กราฟแสงของ IPHAS J0528+2838 แสดงให้เห็นถึงลำของไซโคลตรอน ซึ่งพบได้ใน CVs ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงมากหรือ polar

**คำหลัก:** Cataclysmic variables, IPHAS J0130+6221, IPHAS J0258+6352, IPHAS J0518+2941, IPHAS J0528+2838, IPHAS J0627+0148, IPHAS J1841+0538

## Abstract

**Project Code:** MRG5180136

**Project Title:** New cataclysmic variables from the INT/WFC Photometric HQ Survey of the northern galactic plane as tracers of close binary evolution

**Investigator:** Dr. Amornrat Aungwerojwit, Department of Physics, Naresuan University

**E-mail Address:** amornrata@hotmail.com, amornrata@nu.ac.th

**Project Period:** 15 May 2008 15 May 2010

We present follow-up time-resolved photometry of six eclipsing cataclysmic variables discovered from the INT/WFC Photometric HQ Survey of the northern galactic plane (IPHAS). The orbital periods determined from analyses of orbital photometric variability are  $P_{\text{orb}} = 8.16$  h for IPHAS J0627+0148,  $P_{\text{orb}} = 3.59$  h for IPHAS J0130+6221,  $P_{\text{orb}} = 5.88$  h for IPHAS J0258+6352,  $P_{\text{orb}} = 4.94$  h for IPHAS J0518+2941,  $P_{\text{orb}} = 80.07$  min for IPHAS J0528+2838, and  $P_{\text{orb}} = 7.62$  h for IPHAS J1841+0538. We investigated system parameters of these six CVs using eclipse profiles found in their light curves. IPHAS J0627+0148 is classified as the fourth deeply eclipsing intermediate polar with a spin period of  $P_{\text{spin}} = 2210$  s. The inferred magnetic moment of the white dwarf in IPHAS J0627 is  $\mu_{\text{wd}} = 5 \times 10^{33}$  Gcm<sup>3</sup> which is similar to that of the short-period intermediate polar EX Hya, compatible with the hypothesis that long-period intermediate polars with magnetic moments in that range and  $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} \leq 0.1$  will evolve into short-period EX Hya-like systems with  $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} \sim 0.5$ . The inclination of IPHAS J0130+6221 and IPHAS J0518+2941 were estimated from their eclipse profiles, resulting in  $i = 83^\circ \pm 4^\circ$  and  $i = 77^\circ \pm 2^\circ$ , respectively. We classified IPHAS J0130+6221 as a member of a growing subclass of novalike variables, SW Sex star. The lack of long-term variability in IPHAS J0258+6352 suggests that the system may be a novalike variable. We detected an outburst of IPHAS J0518+2941 and then classified the system as a dwarf nova. The light curves of IPHAS J0528+2838 are characterized by strong cyclotron beaming suggesting that the object is a strong magnetic CV, or a polar.

**Keywords:** Cataclysmic variables, IPHAS J0130+6221, IPHAS J0258+6352, IPHAS J0518+2941, IPHAS J0528+2838, IPHAS J0627+0148, IPHAS J1841+0538

## สารบัญ

บทที่	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
<b>1 บทนำ</b>	<b>1</b>
<b>2 การสังเกตการณ์และการรีดิวซ์ข้อมูล</b>	<b>3</b>
2.1. การสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี	3
2.2 ข้อมูลทางรังสีเอ็กซ์และอัลตราไวโอเล็ต	3
<b>3 การวิเคราะห์ข้อมูล</b>	<b>9</b>
3.1 IPHAS J0627	9
3.1.1 การวิเคราะห์กราฟแสง	9
3.1.2 ค่าความเอียงของระนาบวงโคจรและ accretion disc	14
3.1.3 การสังเกตการณ์รังสีเอ็กซ์จาก Swift	15
3.1.4 ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจาก Swift	16
3.2 IPHAS J0130	17
3.2.1 Eclipse ephemeris	17
3.2.2 กราฟแสงของ IPHAS J0130	17
3.2.3 ค่าความเอียงของระนาบวงโคจรของ IPHAS J0130	21
3.3 IPHAS J0258	23
3.4 IPHAS J0518	24
3.4.1. Eclipse ephemeris	24
3.4.2 กราฟแสงและการประมาณค่ามุมเอียง	25
3.5 IPHAS J0528	26
3.6 IPHAS J1841	29
3.6.1 Eclipse ephemeris	29

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	30
บรรณานุกรม	34
ภาคผนวก	41

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0627	6
2	ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0130	6
3	ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0258	7
4	ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0518	7
5	ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0528	8
6	ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J1841	8
7	กราฟแสงของ IPHAS J0627 พล็อตในรูปของเฟสการเคลื่อนที่	11
8	Scargle periodogram ของ IPHAS J0627	12
9	ข้อมูลจากการสังเกตพล็อตในรูปของเฟส ที่ความถี่ $39.088 \text{ d}^{-1}$	12
10	ข้อมูลจากการสังเกตพล็อตในรูปของเฟส หลังการทำ 'pre-whitening' ด้วย $P_{\text{spin}} = 2210 \text{ s}$	13
11	Swift XRT X-ray สเปกตรัมของ IPHAS J0627	15
12	กราฟแสงรังสีเอ็กซ์ของ IPHAS J0627 จาก Swift	16
13	กราฟแสง UV ของ IPHAS J0627 จาก Swift UVOT	16
14	periodogram ของ IPHAS CVs	19
15	Scargle periodogram และกราฟแสงของ IPHAS J0130	20
16	กราฟแสงที่นำมารวมกันแล้วของ IPHAS J0258	24
17	โครงสร้างอุปราคากระยะใกล้ของ IPHAS J0518	25
18	ORT periodogram ของ IPHAS J0528	26
19	กราฟแสงของ IPHAS J0528 folded บนคาบการโคจร $80.0668 \text{ นาที่}$	28
20	การกระจายตัวของ IPs จำนวน 45 ระบบในระนาบ $P_{\text{spin}} - P_{\text{orb}}$	32

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	รายละเอียดการสังเกตการณ์สำหรับ IPHAS J0627	4
2	รายละเอียดการสังเกตการณ์ PHAS J0130, IPHAS J0258, IPHAS J0518, IPHAS J0258, IPHAS J1841	5
3	Eclipse minimum และ O-C ของ IPHAS J0627	10
4	Eclipse minimum และ O-C ของ IPHAS CVS	18
5	คาบการโคจรของ IPs ในช่วง 6-10 ชั่วโมง	33

## บทที่ 1

### บทนำ

Cataclysmic variables (CVs) เป็นระบบดาวคู่แบบใกล้ชิดชนิดกึ่งแตงกัน (semi-detached close binary) ประกอบด้วยดาวแคระขาวและดาวมวลต่ำในแถบขบวนหลัก ซึ่งมีการถ่ายเทมวลสารจากดาวมวลต่ำสู่ดาวแคระขาว คาบการโคจรของดาวคู่ประเภทนี้มีค่าตั้งแต่ประมาณ 80 นาที ถึง 10 ชั่วโมง แบบจำลองมาตรฐานที่อธิบายวิวัฒนาการของ CVs หรือ disrupted magnetic braking ถูกเสนอขึ้นเพื่ออธิบายการขาดแคลนของระบบที่มีคาบการโคจรในช่วง 2-3 ชั่วโมง (period gap) ในบริบทของการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม ณ ตำแหน่งคาบการโคจรที่ประมาณ 3 ชั่วโมง (Rappaport และคณะ 1983; Spruit & Ritter 1983; Paczynski & Sienkiewicz 1983) ใจความสำคัญของแบบจำลองนี้คือ CVs มีวิวัฒนาการไปในทางที่มีคาบการโคจรสั้นลงเนื่องจากผลของการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยสองกลไกหลัก คือ magnetic braking ซึ่งมีอิทธิพลสำหรับระบบที่มีคาบการโคจรมากกว่า 3 ชั่วโมง (Verbunt & Zwaan 1981) และ gravitational radiation ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าและมีอิทธิพลต่อระบบที่มีคาบการโคจรน้อยกว่า 2 ชั่วโมง (Kraft และคณะ 1962)

Disrupted magnetic braking ทำนายว่า CVs ส่วนใหญ่ควรมีคาบสั้น หรือ  $P_{orb} < 2$  ชั่วโมง (เช่น Kolb 1993; Howell และคณะ 1997) และควรมี space density  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  พาร์เซก<sup>-3</sup> (สอดคล้องกับจำนวน 40-400 CVs ในรัศมี 100 พาร์เซก) (Ritter & Burkert 1986; de Kool 1992; Politano 1996) แต่ในทางปฏิบัติเราพบ CVs เพียง 1-10% ของค่าที่ทฤษฎีประมาณการไว้ และสิ่งที่สำคัญคือเราไม่พบระบบที่มีคาบการโคจรสั้นในอัตราส่วนที่มากตามที่ทฤษฎีทำนาย Gänsicke (2005) แสดงให้เห็นว่าประมาณ 75% ของ CVs ทั้งหมด ถูกค้นพบเนื่องจากการแปรแสง (variability) หรือ จากการส่องสว่างของรังสีเอ็กซ์ (X-ray emission) โดยกลุ่มแรกจะมีอิทธิพลในการค้นพบ dwarf novae ที่มีค่าการแปรแสงเนื่องจากการระเบิดอย่างสม่ำเสมอ และ classical novae ที่สว่างขึ้นมากกว่า 5 แมกนิจูดเมื่อเกิดการระเบิด ส่วนกลุ่มที่สองจะมีอิทธิพลต่อการค้นพบ magnetic CVs (CVs ที่มีสนามแม่เหล็กในระดับ 1-200 เมกะเกาส์) ซึ่งเป็นแหล่งของรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดเจนว่า CVs ที่มีค่าการแปรแสงน้อย หรือ CVs ที่ไม่ค่อยเกิดการระเบิด (infrequent outburst) รวมทั้ง CVs ที่มีการส่องสว่างของรังสีเอ็กซ์ต่ำ จะไม่ถูกค้นพบโดยง่าย ส่งผลให้กลุ่มตัวอย่างของ CVs ที่ค้นพบก่อนหน้านี้ไม่ได้แสดงถึงจำนวนประชากรของ CVs ในระนาบกาแลคติกที่แท้จริง โดยสมมติฐานแล้วเราน่าจะพบ CVs ที่มีค่าการแปรแสงต่ำ ไม่ค่อยระเบิด และมีการส่องสว่างของรังสีเอ็กซ์ต่ำ ซึ่งเป็นสมบัติโดยทั่วไปของ CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นและมีอัตราการส่งถ่ายมวลต่ำ ในจำนวนมากตามที่ทฤษฎีทำนาย ถ้าเราใช้วิธีที่เหมาะสมในการค้นหาระบบดังกล่าว

ตลอดระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา CVs ถูกค้นพบโดย (ก) variability surveys โดยการเฝ้าสังเกตของนักดาราศาสตร์มือสมัครเล่นจนถึงมืออาชีพ (ข) X-ray surveys เช่น ROSAT all sky survey ซึ่งเป็นเซอร์เวย์ภาพถ่ายสำหรับรังสีเอ็กซ์แบบอ่อน (soft X-rays) (Voges และคณะ 1999,2000) (ค) blue colour surveys เช่น Paloma Green Survey และ Edinburgh-Cape Survey ซึ่งคัดเลือก CVs โดยวิธี blue colour excess ภายใต้เงื่อนไข  $U-B < -0.4$  (Green และคณะ 1986) (ง) spectroscopic surveys เช่น Hamburg Quasar Survey (HQS, Hagen และคณะ 1995) ซึ่งคัดเลือก CVs บนพื้นฐานของสมบัติทั่วไปที่พบใน CVs ส่วนใหญ่ ซึ่งได้แก่การปรากฏของเส้นสว่างของบัลเมอร์ (Balmer emission lines) ในเส้นสเปกตรัม (Gänsicke และคณะ 2002) Augwerowjwit (2007) พบสิ่งที่น่าสนใจคือ HQS ไม่พบ CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นที่อยู่ใกล้ในอัตราส่วนที่มากตามที่ทฤษฎีทำนาย ทั้งๆ ที่วิธีดังกล่าวถูกคิดว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการค้นหา CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นและมีอัตราการถ่ายเทมวลต่ำ โดยอัตราส่วนของ CVs ที่มีคาบการโคจรสั้นต่อคาบการโคจรยาวใน HQS มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของ CVs ที่ถูกค้นพบก่อนหน้านี้ ในทางตรงกันข้าม HQS ค้นพบ CVs ที่มีคาบการโคจรยาวจำนวนมาก และส่วนใหญ่ของประชากรเหล่านี้มีคาบการโคจรในช่วง 3-4 ชั่วโมง (เช่น Gänsicke และคณะ 2004; Rodriguez-Gil 2005; Augwerowjwit และคณะ 2005; Rodriguez-Gill และคณะ 2007) CVs ใน HQS ให้ผลลัพธ์ที่สำคัญต่อการศึกษาด้าน CVs ทั้งในด้านทฤษฎีและการสังเกต รวมทั้งตอบย้ถึงปัญหารากลึกของเราก็ที่มีต่อความเข้าใจในวิวัฒนาการของ CVs และดาวคู่แบบใกล้ชิด

เพื่อแก้ปัญหาการหายไปของระบบที่มีคาบสั้น เราเริ่มทำการค้นหา CVs ใหม่ ๆ ใน INT/WFC Photometric HQ Survey ภายใต้เงื่อนไขการคัดเลือกการเกินของ HQ (HQ excess) หรือ ตัวปลดปล่อย HQ (HQ emitter) โดยที่ IPHAS สามารถ “มอง” ได้ไกลถึง  $r \simeq 20$  ครอบคลุมละติจูดที่  $-5 \leq |b| \leq 5$  (สำหรับรายละเอียดในส่วนบทนำของเซอร์เวย์ ดูได้ที่ Drew และคณะ 2005) ในงานวิจัยนี้เราค้นพบ CVs ใหม่ ๆ จำนวน 6 ระบบ ได้แก่ IPHAS J0627+0148 (IPHAS J0627), IPHAS J0130+6221 (IPHAS J0130), IPHAS J0258+6352 (IPHAS J0258), IPHAS J0518+2941 (IPHAS J0518), IPHAS J0528+2838 (IPHAS J0528), IPHAS J1841+0538 (IPHAS J1841) เราวัดคาบการโคจรและศึกษาสมบัติทางกายภาพของระบบเหล่านี้ดังรายละเอียดในบทต่อไป

## บทที่ 2

### การสังเกตการณ์และการรีดิวซ์ข้อมูล

#### 2.1. การสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรี

เราเก็บข้อมูลอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีของ IPHAS CVs ทั้ง 6 ดวง ในช่วงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2006 และเดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2009 ณ หอสังเกตการณ์ Roque de los Muchachos บนเกาะ La Palma โดยใช้กล้องโทรทรรศน์ Mercator ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร ต่อเข้ากับ ซีซีดี MEROPE ขนาดภาพ 2k x 2k พิกเซล (ตารางที่ 1 และ 2) และใช้ binning ขนาด 3 x 3 และใช้กล้องโทรทรรศน์ Liverpool ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ต่อกับ ซีซีดี RATCAM ขนาดภาพ 2k x 2k พิกเซล โดยเก็บข้อมูลสำหรับ IPHAS J0627, IPHAS J0130, IPHAS J0258, IPHAS J0518, IPHAS J0258, IPHAS J1841 ทั้งหมดประมาณ 27, 14.5, 16.1, 7.9, 17.8, 22 ชั่วโมง ตามลำดับ ข้อมูลทั้งหมดถูกรีดิวซ์โดยใช้โปรแกรมทางดาราศาสตร์ MIDAS ผ่านชุดคำสั่งในโปรแกรมย่อยที่เขียนขึ้นโดย Gänsicke et al. (2004) สำหรับการลบสัญญาณ bias การทำ flat-fielding และ aperture photometry ใช้ Sextractor (Bertin & Amouts 1996) ผลต่างแมกนิจูดของ CVs ถูกคำนวณเทียบกับดาวเปรียบเทียบที่ไม่มีการแปรแสง ตัวอย่างกราฟแสงของ CVs ทั้ง 6 ดวง แสดงในรูปที่ 1-6

#### 2.2 ข้อมูลทางรังสีเอ็กซ์และอัลตราไวโอเล็ต

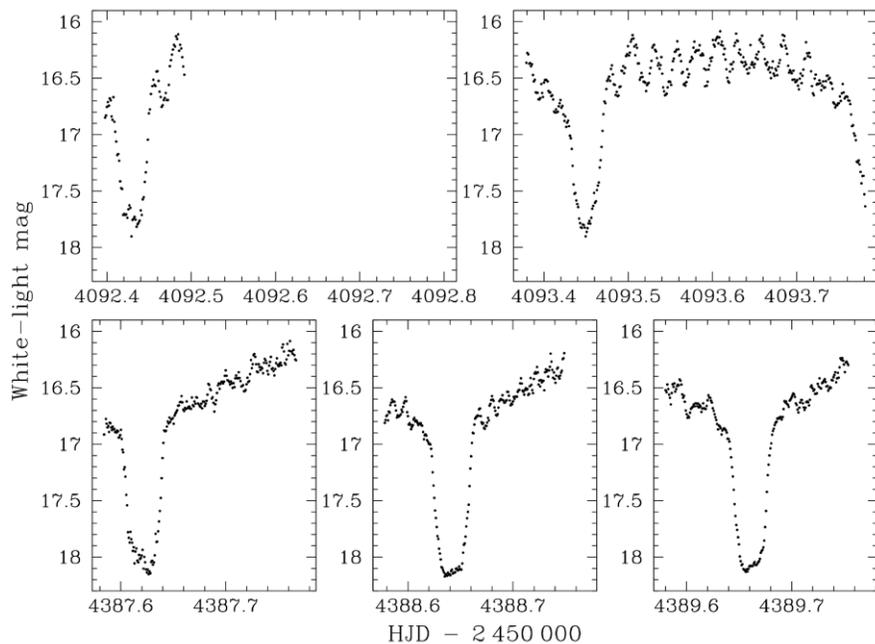
เราเก็บข้อมูลของ IPHAS J0627 โดยยานอวกาศ *Swift* (Gehrels et al. 2004) ทั้งหมด 9 ks ในวันที่ 23 พฤศจิกายน 2009 โดยใช้ช่วงเวลาในการถ่าย 0.2-1.5 ks และนอกจากนี้เรายังสังเกตการณ์ IPHAS 0627 ด้วย Ultraviolet/Optical Telescope (UVOT; Roming et al. 2005) โดยใช้ UVM2 ฟิลเตอร์ ซึ่งมีความยาวคลื่นกึ่งกลางที่ 217 nm และ FWHM ที่ 51 nm เราพบแหล่งกำเนิด UV ที่ตำแหน่งของ IPHAS 0627 ทั้ง 9 ภาพ และกราฟแสงถูกสร้างจากบริเวณรอบๆ แหล่งกำเนิดไป 5" โดยใช้ UVOTMAGHIST เวอร์ชัน 1.12 และ photometric calibration data จากข้อมูลวันที่ 22 พฤษภาคม 2007 (เวอร์ชัน 105)

**ตารางที่ 1 รายละเอียดการสังเกตการณ์สำหรับ IPHAS J0627**

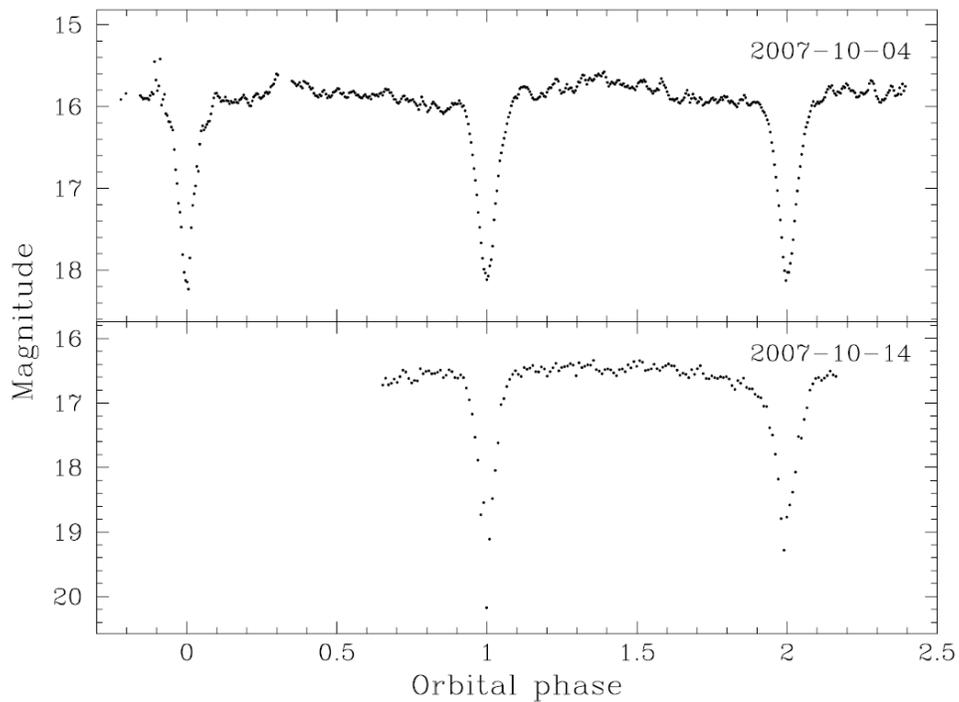
Date	UT	Exp.(s)	# Frames
2006 Dec 22	21:25-23:40	10-20	79
2006 Dec 23	20:58-06:37	5-10	372
2007 Oct 11	02:02-03:51	35	96
2007 Oct 14	01:59-06:23	35-45	225
2007 Oct 15	01:51-05:56	40	225
2007 Oct 16	01:53-06:04	45	210
2009 Nov 23	05:48-12:46	120	179

ตารางที่ 2 รายละเอียดการสังเกตการณ์สำหรับ IPHAS J0130, IPHAS J0258, IPHAS J0518,  
IPHAS J0258, IPHAS J1841

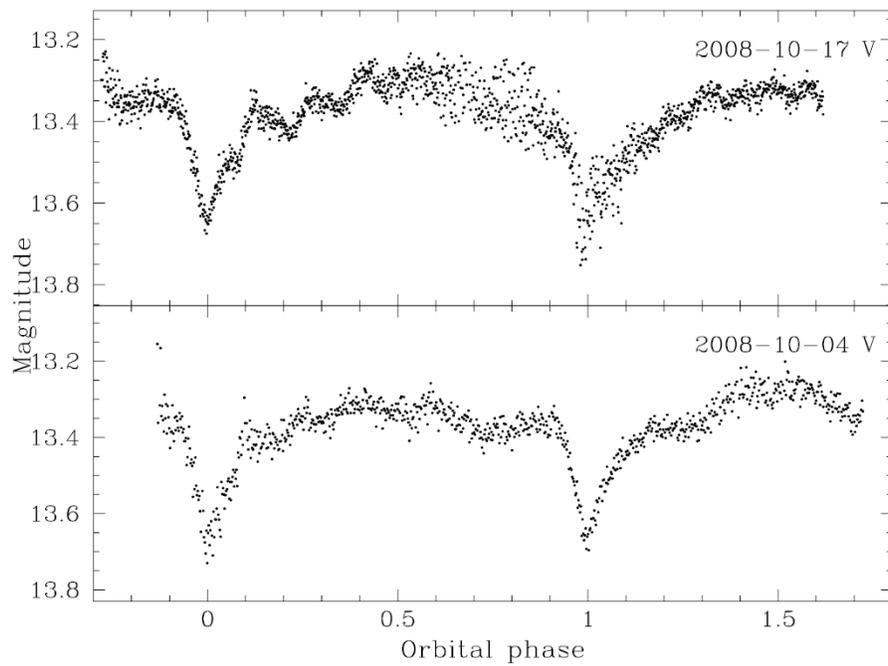
Date	UT	Filter	Exp. (s)	Frame
<b>IPHAS J0130</b>				
2006 Dec 22	19:42-21:22	Clear	10	68
2007 Oct 04	20:15-06:12	Clear	5-10	527
2007 Oct 14	19:48-22:42	Clear	35-45	151
2008 Sep 28	22:29-03:54	Clear		159
<b>IPHAS J0258</b>				
2007 Oct 05	20:10-06:08	Clear	10	449
2007 Oct 13	19:46-01:54	Clear	4-7	675
2008 Sep 26	19:34-04:19	<i>V</i>		786
2008 Oct 01	19:09-19:25	Clear		71
2008 Oct 03	23:39-09:23	Clear		491
2008 Oct 04	23:45-09:26	<i>V</i>		229
2008 Oct 09	20:20-05:06	Clear		860
2008 Oct 12	18:06-00:34	Clear		938
2008 Oct 17	17:27-04:37	<i>V</i>		1632
2008 Oct 18	17:33-01:02	<i>V</i>		608
2008 Oct 19	17:23-04:17	<i>V</i>		880
<b>IPHAS J0518</b>				
2006 Dec 22	23:44-06:11	Clear	15	210
2006 Dec 23	19:22-20:54	Clear	10-15	58
2008 Oct 10	04:09-09:40	Clear		156
<b>IPHAS J0528</b>				
2006 Dec 18	23:52-04:01	Clear	25-60	178
2006 Dec 21	19:39-02:23	Clear	15	227
2007 Oct 07	23:34-06:25	Clear	35	399
<b>IPHAS J1841</b>				
2007 Apr 28	01:21-03:26	<i>R</i>		106
2007 Apr 29	01:27-04:38	<i>R</i>		160
2007 May 01	01:29-04:40	<i>R</i>		160
2007 May 18	00:52-04:03	<i>R</i>		160
2007 Jun 06	00:55-03:37	<i>R</i>		136
2007 Jun 11	00:51-01:47	<i>R</i>		48
2007 Jun 14	00:52-04:03	<i>R</i>		160
2007 Jun 16	00:56-03:34	<i>R</i>		117
2007 Jun 22	00:41-02:07	<i>R</i>		68
2007 Jun 25	01:00-04:10	<i>R</i>		160
2007 Jun 30	22:21-01:32	<i>R</i>		160
2007 Jul 06	22:25-01:35	<i>R</i>		160



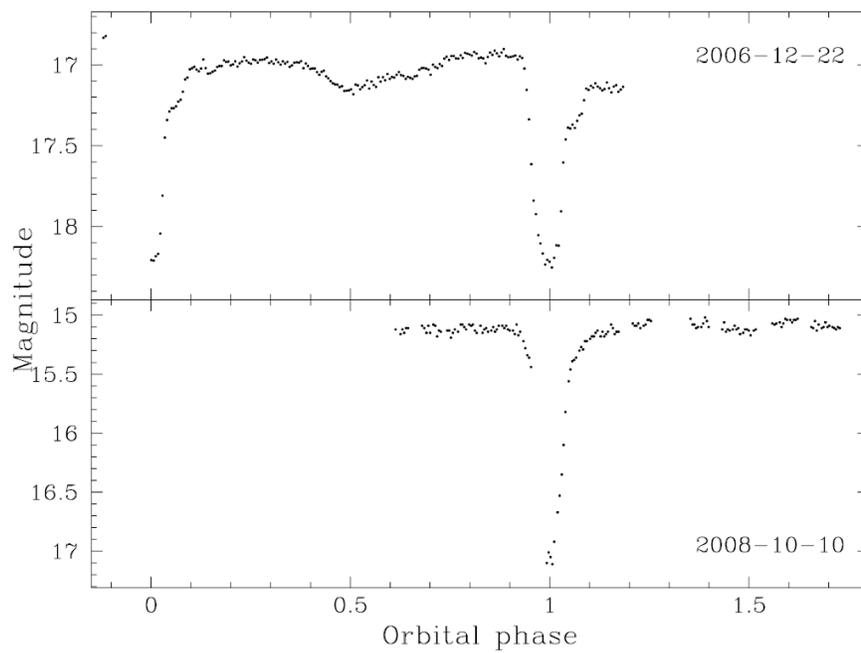
รูปที่ 1 ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0627



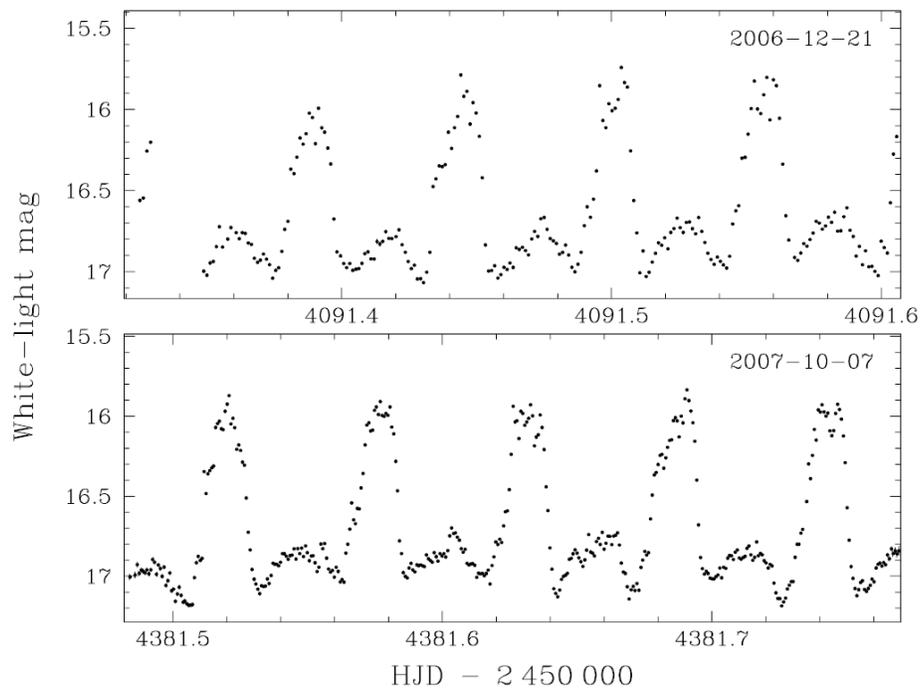
รูปที่ 2 ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0130



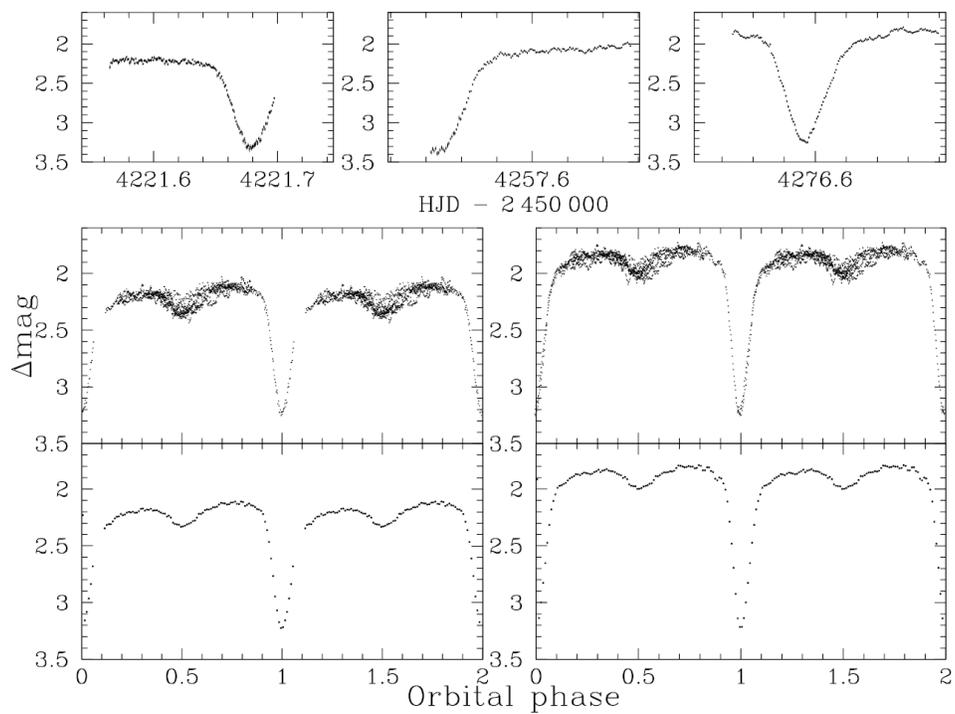
รูปที่ 3 ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0258



รูปที่ 4 ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0518



รูปที่ 5 ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0528



รูปที่ 6 ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J1841

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.1 IPHAS J0627

##### 3.1.1. การวิเคราะห์กราฟแสง

กราฟแสงในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นธรรมชาติของอุปราคาของ IPHAS J0627 ค้นพบโดย Witham et al. (2007) นอกจากนี้ข้อมูลในปี ค.ศ. 2006 ยังแสดงลักษณะอื่นๆ อีกสองประการ คือ quasi periodic oscillations และการแปรค่าความสว่างของบริเวณนอกอุปราคา เราทำการวิเคราะห์โครงสร้างของกราฟแสง 3 ลักษณะ ดังนี้

##### 1. รูปร่างของอุปราคาและ ephemeris

Witham et al. (2007) ใช้ eclipse minimum 2 จุด ในการประมาณคาบการโคจรของ IPHAS J0617 ไว้อย่างคร่าวๆ คือ 1.02 วัน, 0.51 วัน, 0.34 วัน และ 0.25 วัน เพื่อที่จะวัดคาบการโคจรของระบบอย่างแม่นยำเราใช้ทำการวิเคราะห์ตำแหน่งกึ่งกลางของอุปราคาโดยการกลับด้านข้อมูลเช่นเดียวกับภาพสะท้อนในกระจก และทำการเลื่อนตำแหน่งของภาพทั้งสอง (จากข้อมูลจริงและจากการสะท้อนข้อมูล) จนกระทั่งตำแหน่ง minimum ทั้งสองตรงกันและรูปร่างของอุปราคาทั้งสองเหมือนกันมากที่สุด เราใช้ ตำแหน่ง minimum ที่ได้จากการสังเกตการณ์ 6 จุด รวมกับข้อมูลของ Witham et. al. 2007 เราคำนวณ ephemeris ได้ดังนี้

$$T_0 = \text{HJD}2453340.50732(40) + 0.34008253(14) \times E \quad (1)$$

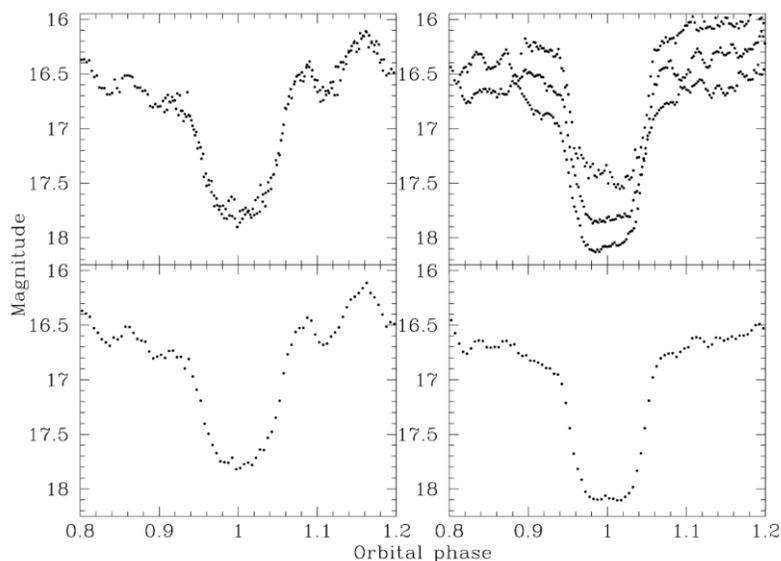
เมื่อ  $T_0$  คือ ช่วงเวลาตรงกลางที่ดาวทั้งสองดวงบังกัน ดังนั้นเราสรุปว่าคาบการโคจรของ IPHAS J0627 มีค่า  $P_{\text{orb}} = 8.1619807(3)$  ชั่วโมง จำนวนรอบของการเกิดอุปราคา และค่าจากการสังเกตการณ์ลบด้วยค่าจากการคำนวณ (O-C) ของการเกิดอุปราคา แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 Eclipse minimum และ O-C ของ IPHAS J0627

Date	Eclipse minima (HJD)	Cycle	O-C (s)	References
2004 Nov 30	2453340.507625	0	13	Witham et al. (2007)
2004 Dec 02	2453342.548045	6	6	Witham et al. (2007)
2006 Dec 22	2454092.429208	2211	-36	this work
2006 Dec 23	2454093.449513	2214	-31	this work
2007 Oct 14	2454387.621588	3079	39	this work
2007 Oct 15	2454388.641673	3082	25	this work
2007 Oct 15	2454389.661442	3085	-16	this work
2009 Nov 23	2455158.929160	5347	50	this work

กราฟแสงจาก Mercator พล็อตโดยใช้สมการที่ (1) แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุปราคา กราฟแสงที่ได้จากวันที่ 22 และ 23 ธันวาคม มีความสอดคล้องกัน อย่างสมบูรณ์ และฐานของอุปราคามีรูปร่างมน ในขณะที่ กราฟแสงจากปี 2007 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละคืนของรูปร่างของอุปราคา และฐานของอุปราคามีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม ปี 2006 อุปราคามีความลึกประมาณ  $1.3 \pm 0.1$  mag และมีความกว้างของอุปราคาที่มีความลึกครึ่งหนึ่ง (full-width of the eclipse at half depth)  $\Delta\phi_{1/2} = 0.115 \pm 0.006$  ในขณะที่ปี 2007 ความลึกของอุปราคามีค่าประมาณ  $1.43 \pm 0.05$  mag และ  $\Delta\phi_{1/2} = 0.106 \pm 0.002$  รูปร่างของกราฟแสงที่การสังเกตการณ์ในช่วงปี 2009 มีความคล้ายกับปี 2006

นอกจากการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของอุปราคาแล้ว เราพบว่าความสว่างนอกอุปราคาของ IPHAS J0627 แปรค่าอยู่ในช่วง 0.3 mag โดยระบบมี magnitude ดังนี้ 16.3, 16.5, 16.3 ในปี 2006, 2007 และ 2009 ตามลำดับ การลดลงของความสว่างของระบบและรูปร่างอุปราคาที่แคบลง ในปี 2007 แสดงให้เห็นว่า accretion disc ของระบบให้แสงน้อยกว่าปกติ รูปร่างที่ตัดแบนของอุปราคาด้านล่างแสดงให้เห็นว่าดาวเคราะห์และ accretion disc อาจถูกบังจนมืด



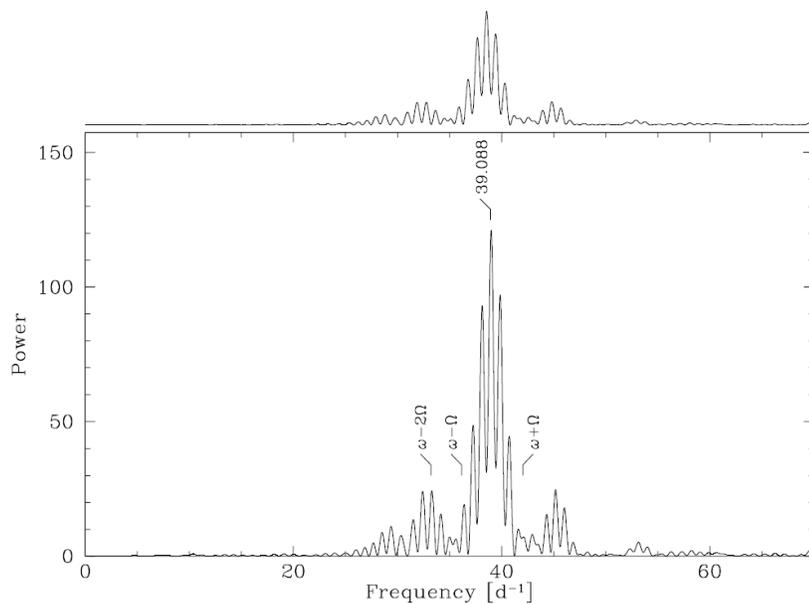
รูปที่ 7 กราฟแสงของ IPHAS J0627 พล็อตในรูปของเฟสการเคลื่อนที่ตามสมการที่ (1)

## 2. Spin modulation

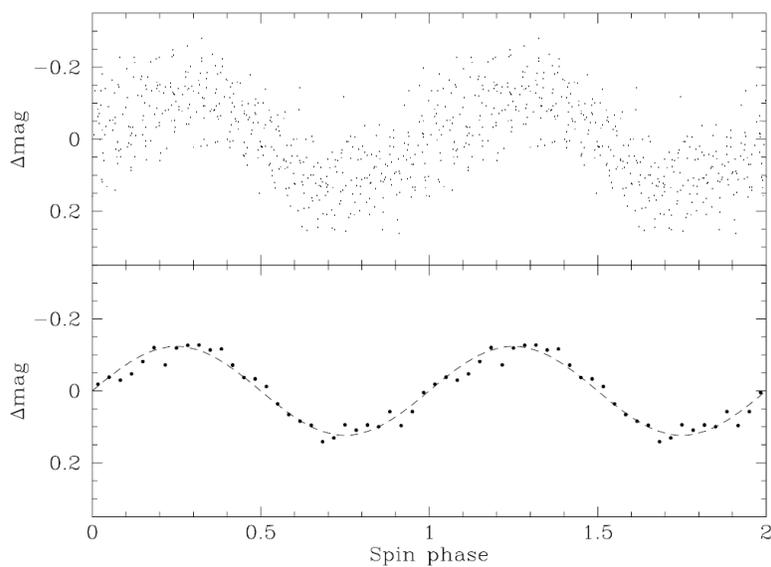
กราฟแสงของ IPHAS J0627 แสดงให้เห็นถึง quasi-periodic oscillation ในช่วงเวลา 40 นาที โดยมีแอมพลิจูดประมาณ  $0.4 - 0.5$  mag จากยอดถึงยอด ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกราฟแสงของวันที่ 23 ธันวาคมซึ่งครอบคลุมมากกว่าหนึ่งรอบ (รูปที่ 1) เนื่องจากเราพบ He II  $\lambda$  4686 ในสเปกตรัมของ IPHAS J0627 ดังนั้นเราจึงตั้งสมมติฐานว่า oscillation ที่พบเนื่องมาจากคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว

เราทำการวิเคราะห์ oscillation ที่พบในกราฟแสงวันที่ 22 และ 23 ธันวาคม 2006 โดยใช้การวิเคราะห์เชิงอนุกรมเวลา โดยใช้ MIDAS/TSA ก่อนทำการวิเคราะห์ เราทำการ 'pre-whitened' ข้อมูลโดยทำ sine ฟิต เราใช้ความถี่ 9 ฮาร์โมนิกในการลบผลของอุปราคาออกจากกราฟแสง จากนั้นทำการสร้าง Scargle (1982) periodogram ซึ่งให้พีคสูงสุดที่ความถี่  $39.088 \text{ d}^{-1}$  หรือ  $2210.34(87) \text{ s}$  (รูปที่ 8) นำข้อมูลจากการสังเกตมาพล็อตด้วยความถี่  $39.088 \text{ d}^{-1}$  จะได้กราฟรูปไซน์ที่มีแอมพลิจูดประมาณ  $0.2 \text{ mag}$  (รูปที่ 9) สิ่งเหล่านี้เป็นสัญลักษณ์ของ intermediate polars (IPs) เช่น FO Aqr (Patterson et al. 1998), AO Psc (Patterson & Price 1981), or MU Cam (Araujo-Betancor et al. 2003) โดยทั่วไป power spectra ของ IPs จะแสดงสัญญาณของคาบการโคจร  $\Omega$ , คาบการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว  $\omega$  และ orbital side-bands  $\omega \pm \Omega$  และ  $\omega - 2\Omega$  (เช่น Wanner 1986) จากการตรวจสอบ periodogram ในรูปที่ 7 เราพบสัญญาณที่ความถี่  $33.2 \text{ d}^{-1}$  และ  $36.1 \text{ d}^{-1}$  เราจึงตีความว่าสัญญาณที่มีความเข้มมากที่สุดที่พบใน periodogram เป็นความถี่การหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว และความถี่อีกสองความถี่ที่พบเป็น orbital side-bands  $\omega - 2\Omega$

และ  $\omega - \Omega$  ตามลำดับ ดังนั้นเราจึงสรุปว่า IPHAS J0627 เป็น eclipsing IP ที่มีคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวเคราะห์ขาว  $P_{\text{spin}} = 2210.34(87)$  s



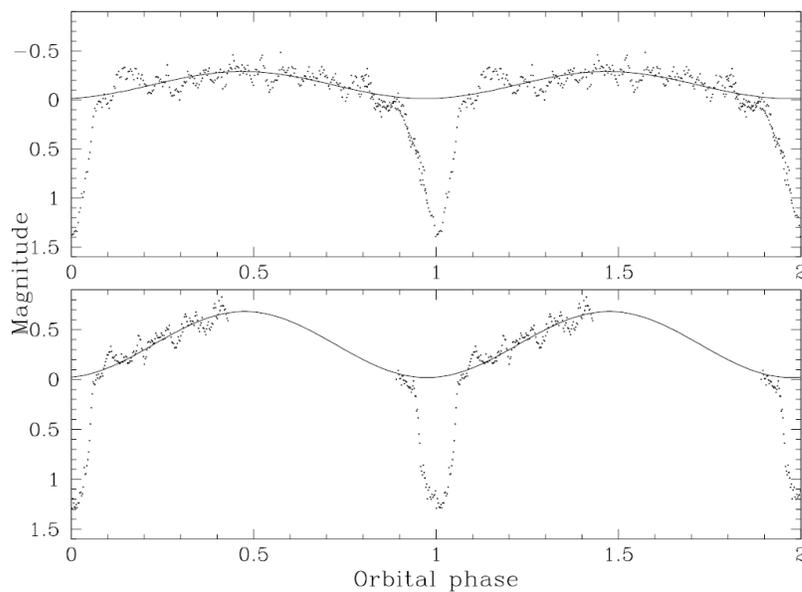
รูปที่ 8 Scargle periodogram ของ IPHAS J0627



รูปที่ 9 ข้อมูลจากการสังเกตพล็อตในรูปของเฟส ที่ความถี่  $39.088 \text{ d}^{-1}$

### 3. Orbital modulation: a reflection effect?

ลักษณะอีกหนึ่งอย่างที่พบในกราฟแสงวันที่ 23 ธันวาคม 2006 ของ IPHAS J0627 คือการแปรค่าความสว่างนอกอุปราคาซึ่งอาจเป็นผลมาจาก reflection effect จากความร้อนจากผิวด้านในของดาวฤกษ์อื่นเนื่องมาจากดาวเคราะห์ที่พบใน CVs (เช่น DD Cir; Woudt & Warner 2003) หรือ pre-CVs ที่ประกอบด้วยดาวเคราะห์ที่มีความร้อนสูง (เช่น HW Vir; Hilditch et al. (1996), HS1857+5144; Aungwerojwit et. al. 2007) เราตรวจสอบการแปรค่าความสว่างนี้ โดยการ 'pre-whitening' ข้อมูลวันที่ 23 ธันวาคม 2006 และ 14-16 ตุลาคม 2007 ด้วย  $P_{\text{spin}} = 2210$  s และพล็อตข้อมูลในรูปของเฟสด้วยคาบการโคจร  $P_{\text{orb}} = 8.16$  h กราฟแสงที่ได้แสดงในรูปที่ 10 โดยมีค่าความสว่างสูงสุดที่  $\phi = 0.5$  ซึ่งสอดคล้องกับความสว่างสูงสุดที่ตำแหน่ง superior conjunction ของดาวฤกษ์เมื่อพิจารณาผลของ reflection effect เมื่อพิตรกราฟรูปไซน์กับข้อมูลนอกอุปราคา เราพบว่าการแปรค่าความสว่างมีแอมพลิจูด 0.14 mag และ 0.33 mag สำหรับกราฟแสงปี 2006 และ 2007 ตามลำดับ แอมพลิจูดที่ใหญ่กว่าในปี 2007 อาจเป็นผลมาจาก accretion disc ที่สว่างน้อยกว่านั่นเอง



รูปที่ 10 ข้อมูลจากการสังเกตพล็อตในรูปของเฟส หลังการทำ 'pre-whitening' ด้วย

$$P_{\text{spin}} = 2210 \text{ s}$$

### 3.1.2 ค่าความเอียงของระนาบวงโคจรและ accretion disc

เราสามารถหาค่าความเอียงของระนาบวงโคจร ( $i$ ) ได้จากความสัมพันธ์

$$\left(\frac{R_2}{a}\right)^2 = \sin^2(\pi\Delta\phi_{1/2}) + \cos^2(\pi\Delta\phi_{1/2})\cos^2 i \quad (2)$$

เมื่อ  $R_2/a$  คือปริมาตรรัศมีของดาวพฤหัสบดี ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนมวล  $q = M_2/M_1$  เพียงอย่างเดียว (Eggleton 1983):

$$\left(\frac{R_2}{a}\right) = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})} \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta\phi_{1/2}$  คือความกว้างของอุปราคาที่มีความลึกครึ่งหนึ่ง (ดูตัวอย่างเช่น Dhillon et al. 1991; Rodriguez-Gil et al. 2004b) เราประมาณการ  $\Delta\phi_{1/2}$  สำหรับ IPHAS J0627 จากข้อมูลทั้งสามปีโดยใช้แมกนิจูดเฉลี่ยนอกอุปราคา  $16.5 \pm 0.1$ ,  $16.7 \pm 0.1$ ,  $16.6 \pm 0.1$  ตามลำดับ ได้ค่าดังนี้  $\Delta\phi_{1/2} = 0.115 \pm 0.006$ ,  $\Delta\phi_{1/2} = 0.106 \pm 0.002$ ,  $\Delta\phi_{1/2} = 0.120 \pm 0.005$  สำหรับปี 2006, 2007 และ 2009 ตามลำดับ

เพื่อคำนวณค่า  $i$  เราจำเป็นต้องกำหนดค่า  $q$  เราใช้ความสัมพันธ์ mass-period จาก Smith & Dhillon (1998),

$$\frac{M_2}{M_\odot} = (0.126 \pm 0.011)P_{\text{orb}} - (0.11 \pm 0.04) \quad (4)$$

เมื่อ  $P_{\text{orb}}$  ใช้ในหน่วยชั่วโมง เราพบว่า  $0.87 M_\odot \leq M_2 \leq 0.97 M_\odot$  สำหรับดาวพฤหัสบดีของ IPHAS J0627 Ramsy (2000) ประมาณมวลเฉลี่ยของดาวแคระขาวใน IPs มีค่าประมาณ  $M_1 = 0.85 \pm 0.21 M_\odot$  ซึ่งสอดคล้องกับมวลของดาวแคระขาวใน CVs ทั่วไป (Knigge 2006; Littlefair et al. 2008) สมมติว่าระบบมีการถ่ายเทมวลสารแบบคงที่ เราใช้  $0.85 M_\odot \leq M_2 \leq 1.06 M_\odot$  เราพบว่า  $0.8 \leq q \leq 1.0$  และ  $77^\circ \leq i \leq 84^\circ$  ซึ่งสอดคล้องเป็นอย่างดีกับวิธีของ Horne (1985)

เราคำนวณรัศมีของ accretion ของ IPHAS J0627 จากความสัมพันธ์ของ Dhillon et al. (1991)

$$R_D = a \sin(i) \sin(2\pi\Delta\phi) - R_C \quad (5)$$

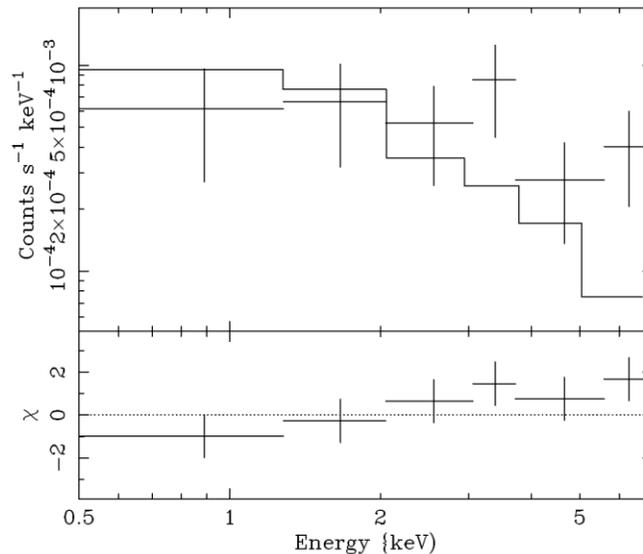
เมื่อ  $\Delta\phi$  คือ เฟสครึ่งหนึ่งของอุปราคาที่ความเข้มสูงสุด และ  $R_C$  เป็นค่าครึ่งคอร์ตของดาวพฤหัสบดี แสดงในเทอมของ  $i$  และ  $R_2/a$

$$\frac{R_C}{a} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{a}\right)^2 - \cos^2 i} \quad (6)$$

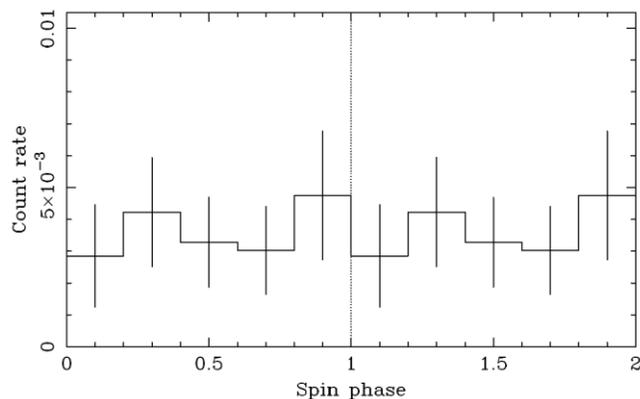
เราพบว่า  $\Delta\phi = 0.12 \pm 0.02$ ,  $\Delta\phi = 0.107 \pm 0.015$ ,  $\Delta\phi = 0.11 \pm 0.03$  และ  $R_D = 0.9 \pm 0.3R_{L1}$ ,  $R_D = 0.7 \pm 0.3R_{L1}$ ,  $R_D = 0.75 \pm 0.45R_{L1}$  สำหรับปี 2006, 2007 และ 2009 ตามลำดับ

### 3.1.3 การสังเกตการณ์รังสีเอ็กซ์จาก Swift

เราพบแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งของ IPHAS J0627 ด้วย count rate  $3.2 \pm 0.7 \text{ ks}^{-1}$  รูปที่ 11 แสดง X-ray สเปกตรัมเปรียบเทียบกับการฟิตที่ดีที่สุดจากแบบจำลอง optically thin thermal plasma (Mewe et al. 1986; Liedahl et al. 1995) ในการฟิตอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 80 keV ได้การฟิตที่ดีที่สุด  $N_H = 4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  ที่ 0.5–10 keV และฟลักซ์มีค่า  $2.2 \times 10^{-13} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่า IPs ทั่วไป รูปที่ 12 แสดงข้อมูลรังสีเอ็กซ์พล็อตในรูปของเฟสโดยใช้คาบการหมุนรอบตัวเองของดาวเคราะห์ที่ 2210 s



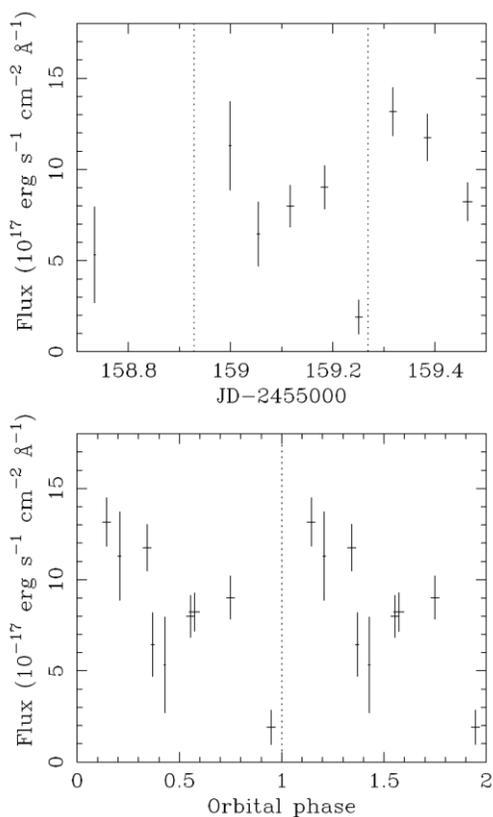
รูปที่ 11 Swift XRT X-ray สเปกตรัมของ IPHAS J0627



รูปที่ 12 กราฟแสงรังสีเอ็กซ์ของ IPHAS J0627 จาก Swift เมื่อ spin period = 2210 s

### 3.1.4 ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจาก Swift

รูปที่ 12 แสดงกราฟแสงย่านความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (UV) ของ IPHAS J0627 จาก Swift ฟลักซ์ที่ความยาวคลื่น 217 nm มีค่า  $5\text{--}13 \times 10^{-17} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$



รูปที่ 13 กราฟแสง UV ของ IPHAS J0627 จาก Swift UVOT รูปล่าง พล็อตโดยใช้ ephemeris ในสมการที่ (1)

## 3.2 IPHAS J0130

### 3.2.1 Eclipse ephemeris

กราฟแสงคืนแรกของ IPHAS J0130 ในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2006 แสดงให้เห็นแนวโน้มของแมกนิจูดที่ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการบังกันของระบบ ส่วนกราฟแสงในปี ค.ศ. 2007 และ ค.ศ. 2008 แสดงให้เห็นว่าระบบมีอุปราคาทีลึก (deep eclipses) โดยอุปราคาของระบบมีความสว่างลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 2.4-3.6 แมกนิจูด เราสังเกตการณ์อุปราคาอย่างต่อเนื่องและพบว่าคาบการโคจรของระบบโดยประมาณอยู่ที่ 3.6 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลในเบื้องต้นที่ได้จากข้อมูลความเร็วในแนวเล็งของ Witham et al. (2007) ซึ่งให้คาบการโคจรประมาณ 3.12 ชั่วโมง หรือ 3.58 ชั่วโมง

เราคำนวณ ephemeris ของ IPHAS J0130 จาก 6 eclipse minimum โดยวิธีการเดียวกับ IPHAS J0627 ได้ดังนี้

$$T_0 = \text{HJD}2454378.404149(23) + 0.149413882(45) \times E \quad (7)$$

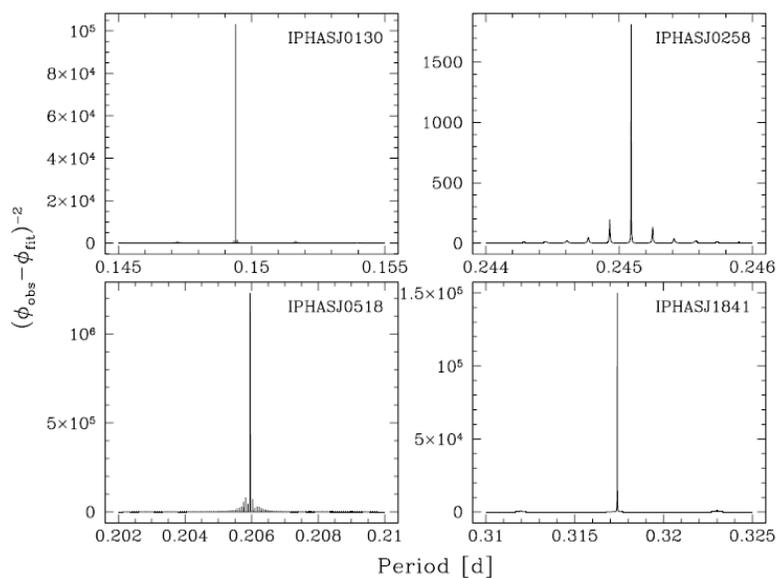
นั่นคือ  $P_{\text{orb}} = 3.5859332(11)$  ชั่วโมง โดยกำหนดให้  $T_0$  คือเวลาดังกล่าวของอุปราคา และความคลาดเคลื่อนแสดงในวงเล็บ จำนวนรอบของการเกิดอุปราคา และค่าจากการสังเกตการณ์ลบด้วยค่าจากการคำนวณ (O-C) ของการเกิดอุปราคา แสดงในตารางที่ 4 รูปที่ 14 แสดง periodogram ที่ได้จากการหา ephemeris ในสมการที่ (7)

### 3.2.2 กราฟแสง

ตัวอย่างกราฟแสงของ IPHAS J0130 ดังแสดงในรูปที่ 2 เฟสการโคจรถูกคำนวณตาม ephemeris ในสมการที่ (7) กราฟแสงของ IPHAS J0130 แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างของอุปราคาเป็นรูปตัว V ที่มีความลึกประมาณ 2.4-3.6 mag เวลาของการเกิดอุปราคาในแต่ละครั้งยาวนานประมาณ 0.2 เท่าของคาบการโคจร หรือประมาณ 40 นาที เราไม่พบลักษณะของ orbital hump ทั้งที่บริเวณก่อนและหลังอุปราคา อันเกิดขึ้นจากจุดสว่างเนื่องจากธารแก๊สที่ตกบริเวณขอบนอกของ accretion disk ซึ่งเป็นลักษณะกราฟแสงของ novalike variable ที่มีค่าความเอียงของระนาบวงโคจรสูง โดยกราฟแสงของ IPHAS J0130 มีลักษณะคล้ายกับกราฟแสงของ CVs ประเภท SW Sex ตัวอย่างเช่น DW UMa (Shafter et al. 1988), V1315 Aql (Dhillon et al. 1991), HS 0129+2933, HS 0220+0603, HS 0455+8315 (Rodríguez-Gil et al. 2007)

ตารางที่ 4 Eclipse minimum และ 0-C ของ IPHAS CVS

Date	Eclipse minima (HJD)	Cycle	0 – C (s)
<b>IPHAS J0130</b>			
2007 Oct 04	2454378.403963	0	-16
2007 Oct 05	2454378.553556	1	1
2007 Oct 05	2454378.703136	2	14
2007 Oct 14	2454388.414913	67	3
2008 Sep 28	2454738.491627	2410	2
2008 Sep 28	2454738.640995	2411	-2
<b>IPHAS J0258</b>			
2007 Oct 05	2454379.365104	0	101
2007 Oct 06	2454379.608729	1	-26
2007 Oct 13	2454387.451053	33	-86
2008 Sep 26	2454736.466507	1457	26
2008 Oct 04	2454743.575474	1486	132
2008 Oct 04	2454743.817825	1487	-105
2008 Oct 05	2454744.553807	1490	-44
2008 Oct 05	2454744.800607	1491	103
2008 Oct 09	2454749.459188	1510	258
2008 Oct 12	2454749.700849	1511	-39
2008 Oct 12	2454752.397702	1522	32
2008 Oct 17	2454757.298526	1542	-60
2008 Oct 18	2454757.541174	1543	-271
2008 Oct 18	2454758.278857	1546	-64
2008 Oct 19	2454758.525603	1547	79
2008 Oct 19	2454759.259778	1550	-17
2008 Oct 20	2454759.504827	1551	-21
<b>IPHAS J0518</b>			
2006 Dec 23	2454092.519486	0	7
2006 Dec 23	2454092.725311	1	-6
2006 Dec 23	2454093.343261	4	-1
2008 Oct 10	2454749.756260	3191	0
<b>IPHAS J1841</b>			
2007 May 01	2454221.679000	0	19
2007 Jun 06	2454257.546712	113	-54
2007 Jun 25	2454276.593006	173	36



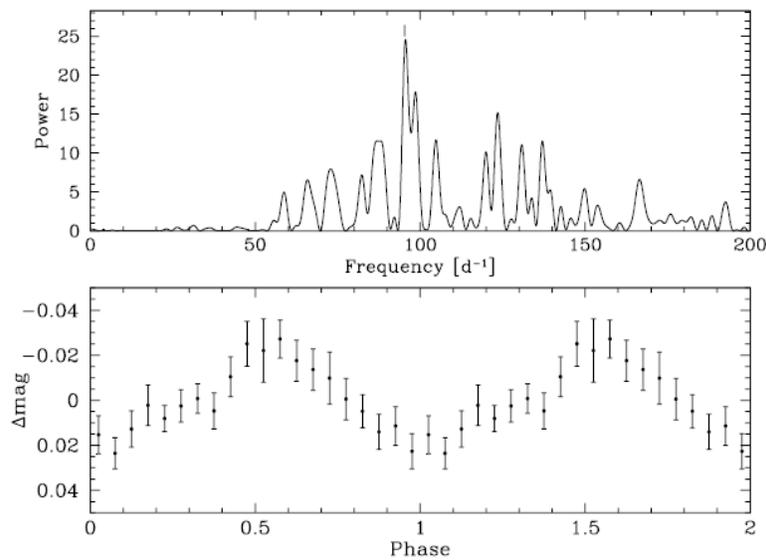
รูปที่ 14 periodogram ของ IPHAS CVs

- **Long-term variability**

IPHAS J0130 มี  $R = 16.9$  mag ในแค็ตตาล็อกของ USNO-A2.0 จากข้อมูลทางโฟโตเมตริกแสดงแนวโน้มการแปรแสงในระยะยาวของวัตถุ จากการสังเกตการณ์โดยใช้ฟิลเตอร์ของ IPHAS J0130 ในปี ค.ศ. 2006 และ ค.ศ. 2007 เราพบว่ามีแม็กนิจูดเฉลี่ยนอกช่วงการเกิดอุปราคา ประมาณ 15.9 แม็กนิจูดและประมาณ 16.5 mag ในช่วงปี ค.ศ. 2008 สิ่งที่น่าสนใจคือ ความลึกของอุปราคาของ IPHAS J0130 มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการสังเกตการณ์ ในช่วงปี ค.ศ. 2007 ความลึกของอุปราคาวัดได้ประมาณ 2.4 mag สำหรับปี ค.ศ. 2008 วัดจากความลึกของอุปราคาที่เกิดการตอเนื่องกันสองอุปราคา โดยอุปราคาครั้งแรกวัดได้ประมาณ 3.6 mag และครั้งที่สองวัดได้ประมาณ 2.7 mag อาจเป็นไปได้ว่าอุปราคาครั้งที่สองนั้นอาจไม่ได้สะท้อนให้เห็นความลึกที่แท้จริงของอุปราคาเนื่องจากช่วงเวลาที่เปิดหน้ากล้องนานเกินไป (low time resolution) แต่อย่างไรก็ตาม เป็นที่ชัดเจนแล้วว่าความลึกของอุปราคาที่เปลี่ยนแปลงของ IPHAS J0130 สัมพันธ์กับสถานะความสว่างของวัตถุ ซึ่งคล้ายกับ CVs ประเภท SW Sex ที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ DW UMa ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความลึกของอุปราคาในช่วงที่กว้างอันเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรัศมีของ accretion disc นั่นคือ ที่ความลึกประมาณ 1.2 แม็กนิจูดในสถานะที่ระบบมีความสว่างมาก และประมาณ 3.4 แม็กนิจูดในสถานะที่ระบบมีความสว่างปานกลาง (Stanishev et al. 2004)

- **Short time-scale variability**

กราฟแสงของ IPHAS J0130 แสดงให้เห็นการแปรแสงในระยะสั้นนอกบริเวณอุปราคมมีค่าประมาณ 10-15 นาที โดยเฉพาะในวันที่ 4 ตุลาคม ค.ศ. 2007 ซึ่งเป็นวันที่สังเกตการณ์นานที่สุด เพื่อค้นหาสัญญาณดังกล่าว เรานำโครงสร้างของอุปราคาออกจากกราฟแสงและ detrend ข้อมูลด้วยความถี่ของการโคจรและที่ความถี่ต่ำ ด้วยการนำไปคำนวณจนข้ามอันดับด้วยอนุกรมฟูเรียร์ ผลที่ได้พบว่า มี periodogram มีพีคสูงสุดที่ 15.0 นาที ตามด้วยพีคที่สองที่ 14.6 นาที (รูป 15 ช่องบน) นำข้อมูลที่ detrend แล้วไปพล็อตด้วยคาบดังกล่าวจะได้การแปรค่าแบบ quasi-sinusoidal modulations ที่ชัดเจนดังแสดงในรูป 15 ช่องล่าง



รูปที่ 15 ช่องบน: Scargle periodogram ที่คำนวณจากกราฟแสงของ IPHAS J0130 ในเดือน ตุลาคม ค.ศ. 2007 ช่องล่าง: กราฟแสงที่นำมา folded บนคาบที่ 15 นาที

quasi-periodic oscillation (QPOs) ที่มีคาบเวลาอยู่ในช่วง 10-30 นาที ซึ่งพบในดาว SW Sex จำนวนมาก (Patterson et al. 2002) ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดย accretion scenario ของ Rodríguez-Gil et al. (2001) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างมวลสารที่ล้นออกมากับกระแสของสนามแม่เหล็กที่ชั้น magnetosphere ของดาวแคระขาว รัศมีของการโคจรร่วมโดยประมาณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างคาบการโคจรและคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว (spin period) ดังนี้

$$P_1 = 0.31 f^{(3/2)} P_{\text{orb}} \quad (8)$$

โดยที่  $f \approx 0.4-0.6$  สำหรับ IPHAS J0130 เราได้ค่า  $P_1$  ประมาณ 17-31 นาที สำหรับ two-pole accretion สำหรับชั่วเดี่ยวดาค่าที่น่าจะมีช่วงเวลาที่เป็นครึ่งหนึ่งของ  $P_1$  นั่นคือประมาณ 9-16 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการแปรแสงในช่วงสั้นที่ประมาณ 15 นาที ซึ่งพบในกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตการณ์

### 3.2.3 ค่าความเอียงของระนาบวงโคจรของ IPHAS J0130

มุมเอียงของการโคจร (i) ของระบบดาวคู่ค้นหาได้จากเรขาคณิตของจุดที่เรียงกันของอุปราคาตามวัตถุทรงกลมผ่านความสัมพันธ์

$$\left(\frac{R_2}{a}\right)^2 = \sin^2(\pi\Delta\phi_{1/2}) + \cos^2(\pi\Delta\phi_{1/2})\cos^2 i$$

โดยที่  $\Delta\phi_{1/2}$  คือ full-width of eclipse at half depth และ  $R_2/a$  ปริมาตรรัศมีของดาวทุติยภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนมวล  $q = M_2/M_1$  เพียงอย่างเดียว (Eggleton 1983)

$$\left(\frac{R_2}{a}\right) = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})}$$

เราประมาณ  $\Delta\phi_{1/2}$  จากกราฟแสงของปี ค.ศ. 2007 และ ค.ศ. 2008 โดยสมมติให้แม็กนิจูดนอกบริเวณอุปราคามีค่า 15.85 mag และ 16.55 mag ตามลำดับ และแทนค่า  $\Delta\phi_{1/2} \approx 0.094 \pm 0.009$  สำหรับปี ค.ศ. 2007 และ  $\Delta\phi_{1/2} \approx 0.087 \pm 0.001$  สำหรับปี ค.ศ. 2008 ความคลาดเคลื่อนที่กว้างนี้เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่แน่นอนในการระบุตำแหน่งที่เข้าและออกของอุปราคา

เพื่อที่จะคำนวณหามุมเอียงของการโคจร เราประมาณมวลของดาวทุติยภูมิ ( $M_{\text{sec}}$ ) จากความสัมพันธ์เฉลี่ยของมวล-คาบ จากการสังเกตของ linear fit ของ Smith & Dhillon (1998)

$$\frac{M_{\text{sec}}}{M_{\odot}} = (0.126 \pm 0.011)P_{\text{orb}} - (0.11 \pm 0.04)$$

โดยที่  $P_{\text{orb}}$  แสดงหน่วยเป็นชั่วโมง สำหรับ IPHAS J0130 เราได้ค่า  $M_{\text{sec}} \sim 0.3 M_{\odot}$  และมวลเฉลี่ยของดาวปฐมภูมิของ CVs ที่อยู่เหนือ period gap มีค่าประมาณ  $M_{\text{WD}} \sim 0.8 M_{\odot}$  (ตัวอย่างเช่น

Webbink 1990; Gänsicke 1997; Smith & Dhillon 1998; Knigge 2006) เราประมาณว่ามวลของดาวปฐมภูมิของ IPHAS J0130 วางตัวอยู่ในช่วง  $M_{WD} = 0.6-1.0 M_{\odot}$  และได้ค่ามุมเอียงของระบบ  $i = 83^{\circ} \pm 4^{\circ}$  สำหรับ  $q=0.3-0.5$

นอกจากนี้ จากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตใน Dhillon et al. (1991) ให้การประมาณรัศมีของ accretion disc ( $R_D$ ) ผ่าน

$$R_D = a \sin(i) \sin(2\pi\Delta\phi) - R_C$$

โดยที่  $\Delta\phi$  คือ mean phase of half-width of eclipse at maximum intensity (นั่นคือ เวลาเริ่มต้นและท้ายสุดที่แตะอุปราคาและหารด้วย 2) และ  $R_C$  คือ ครึ่งคอร์ตของดาวทุติยภูมิแสดงในเทอมของ  $i$  และ  $R_2/a$

$$\frac{R_C}{a} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{a}\right)^2 - \cos^2 i}$$

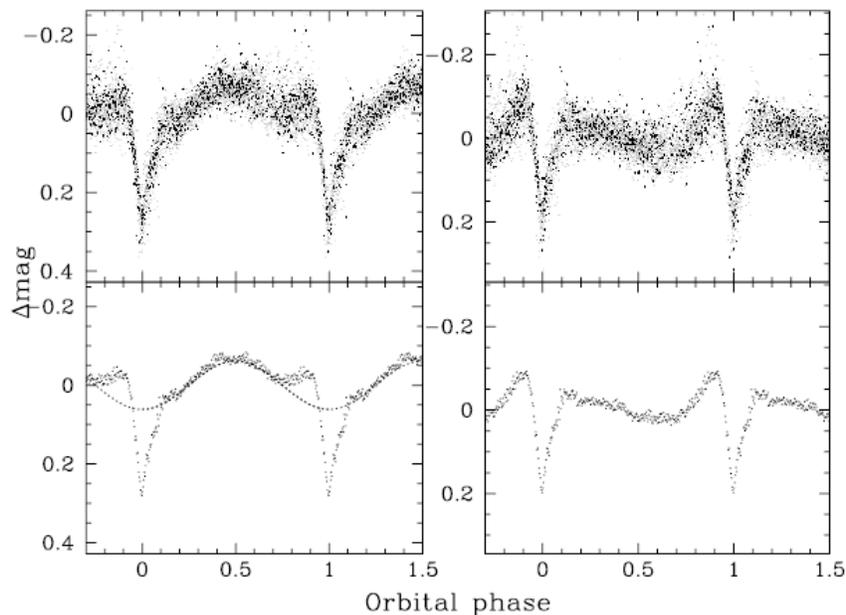
เราใช้กราฟแสงปี ค .ศ. 2007 และ ค .ศ. 2008 พบว่า  $\Delta\phi = 0.1 \pm 0.01$  และ  $\Delta\phi = 0.083 \pm 0.004$  ตามลำดับ เมื่อรวมค่า  $\Delta\phi$ ,  $q$  และ  $i$  จากข้างต้นเข้าด้วยกัน เราจะได้  $R_D = 0.65 \pm 0.15 R_{L1}$  สำหรับข้อมูลปี ค.ศ. 2007 และ  $R_D = 0.5 \pm 0.1 R_{L1}$  สำหรับข้อมูลปี ค.ศ. 2008 โดยที่  $R_{L1}$  คือปริมาตรรัศมีของผิวห่อหุ้มของโรซซ์ของดาวปฐมภูมิ เนื่องจากความไม่แน่นอนในการกำหนดตำแหน่งที่เริ่มเข้าและออกของอุปราคา การประมาณค่ามุมเอียงของระบบและรัศมีของ accretion disc จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนมาก แต่อย่างไรก็ตามจากการประมาณอย่างคร่าว ๆ ของเรา ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการแปรค่าความลึกของอุปราคาอาจมีผลมาจากขนาดที่ต่างกันของ accretion disc จากสภาวะความสว่างที่ต่างกัน นั่นคือ disc ทั้งหมดถูกบังระบบจึงอยู่ในสภาวะสลัวในปี ค .ศ. 2008 เมื่อส่วนนอกยังสามารถมองเห็นอยู่ระบบจึงอยู่ในสภาวะสว่างในปี ค .ศ. 2007 เพื่อที่จะให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนขึ้น การติดตามสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

จากผลของข้อมูลในขณะนี้ เราสามารถจำแนกประเภทให้ IPHAS J0130 เป็นสมาชิกของ CVs ประเภท SW Sex โดยอาศัยพื้นฐานของ (ก) โครงสร้างของอุปราคาลักษณะรูปตัว V ซึ่งพบในกราฟแสง (ข) quasi-periodic oscillations ที่ประมาณ 15 นาที นอกบริเวณที่เกิดอุปราคา (ค) คาบการโคจรประมาณ 3.6 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในช่วงคาบการโคจรส่วนใหญ่ของดาว SW Sex ที่มีช่วงคาบ 3-4 ชั่วโมง (ตัวอย่างเช่น Rodríguez-Gil et al. 2007) และ (ง) พิคเตียโนในแต่ละเส้นสเปกตรัม

### 3.3 IPHAS J0258

IPHAS J0258 นั้นถูกพิสูจน์ว่าเป็น CV candidate จากการปรากฏของสเปกตรัมเส้นสว่างในตระกูลบาร์เมอร์และเส้นสว่างฮีเลียม He I  $\lambda$  6678.2 โดย Witham et al. (2007) Identification spectrum ของวัตถุแสดงให้เห็นฟีก์ของเส้นสว่างในตระกูลบาร์เมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของ accretion disc ซึ่งถูกสังเกตที่มุมเอียงปานกลางถึงมุมเอียงสูง นอกจากนี้ยังตรวจพบเส้นสว่าง He II ที่มีความเข้มสูงและยังพบเส้นสว่างอื่นๆ อีก ในบทสรุป ผู้เขียนชี้ให้เห็นว่า IPHAS J0258 มีแนวโน้มว่าเป็นวัตถุที่มีความสว่างสูงที่เต็มไปด้วยธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนอย่างผิดปกติ

ในเดือนตุลาคม ค.ศ. 2007 และเดือนกันยายน/ตุลาคม ค.ศ. 2008 เราทำการสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีของ IPHAS J0258 ทั้งหมดจำนวน 87 ชั่วโมง ตัวอย่างกราฟแสงที่ folded บน ephemeris ในสมการ (9) ดังแสดงในรูปที่ 4 กราฟแสงของ IPHAS J0258 แสดงให้เห็นโครงสร้างอุปราคมี่ลักษณะเป็นรูปตัว “V” ที่ไม่สมมาตรโดยปราศจาก per-eclipse hump ที่ชัดเจน อันเนื่องมาจากจุดสว่าง ซึ่งเป็นลักษณะที่ถูกสังเกตได้ใน eclipsing novalike variables อุปราคมี่ที่ตื้นประมาณ 0.3-0.4 mag บ่งบอกถึง accretion disc บางส่วนถูกบัง การแปรแสงในช่วงสั้นประมาณ 30-50 นาที โดยมี amplitude ประมาณ 0.1 mag ซึ่งถูกตรวจพบจากกราฟแสงในบางวัน (ตัวอย่างเช่น วันที่ 26 กันยายน และวันที่ 17 ตุลาคม) การแปรแสงที่เกินจริงถูกทำให้ลดลงจากการรวมกราฟแสง ดังแสดงในรูปที่ 16 นอกจากนี้ การแปรค่าเนื่องจากการโคจรนอกบริเวณอุปราคมี่จากฟีก์ถึงฟีก์มี amplitude ประมาณ 0.1 mag โดยถูกตรวจพบในกราฟแสงที่นำมารวมกันแล้วอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากผลของการสะท้อนของดาวทุติยภูมิ กราฟแสงที่นำมารวมกันแล้วหลังจาก detrend ความถี่ของการโคจรตาม ephemeris แล้วเผยให้เห็น pre-eclipse hump ขนาดเล็กที่  $\phi \sim 0.7-0.9$



รูปที่ 16 สองช่องด้านซ้ายมือ: กราฟแสงที่นำมารวมกันแล้วของ IPHAS J0258 ที่ folded บนคาบการโคจร 5.8 ชั่วโมง สองช่องด้านขวามือ: กราฟแสงที่นำมารวมกันแล้วของ IPHAS J0258 หลังการ detrended ความถี่ของการโคจรที่  $4.08 \text{ d}^{-1}$

เราวัดคาบการโคจรของ IPHAS J0258 เช่นเดียวกับกับ IPHAS J0130 โดยใช้ 17 minima ที่ได้จากการคำนวณตาม ephemeris

$$T_0 = \text{HJD}2454379.36394(81) + 0.2450942(6) \times E \quad (9)$$

กล่าวคือ  $P_{\text{orb}} = 5.882261(14)$  ชั่วโมง periodogram แสดงในรูปที่ 2 และค่า O-C นั้นแสดงดังตารางที่ 2

ตลอดช่วงการสังเกตการณ์ของเรา ค่าเฉลี่ยของแมกนิจูดนอกบริเวณอุปราคาของ IPHAS J0258 มีค่าเป็น  $V = 13.3$  ซึ่งสอดคล้องกับแมกนิจูดจาก USNO-A2.0 การขาดแคลนของการแปรแสงในระยะยาวชี้ให้เห็นว่า IPHAS J0258 เป็น novalike variable candidate

### 3.4 IPHAS J0518

#### 3.4.1. Eclipse ephemeris

การสังเกตการณ์ทางโฟโตเมตรีของ IPHAS J0518 ดำเนินการในเดือนธันวาคม ค.ศ. 2006 และเดือนตุลาคม ค.ศ. 2008 กราฟแสงแรกของเราแสดงให้เห็นอุปราคาที่เกิดต่อเนื่องกัน 2 ครั้ง

โดยมีคาบการโคจรประมาณ 5 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลในเบื้องต้น ( $P_{orb} \sim 5.72$  ชั่วโมง,  $\sim 5.29$  ชั่วโมง,  $\sim 6.23$  ชั่วโมง และ  $\sim 4.92$  ชั่วโมง) จากข้อมูลความเร็วในแนวเล็งดังแสดงใน Witham et al. (2007)

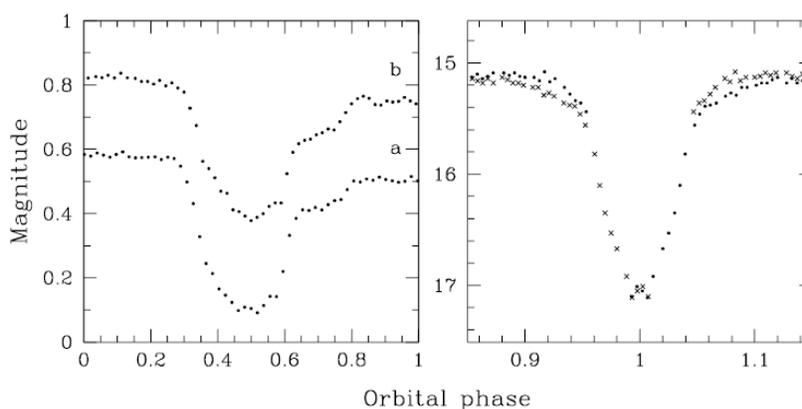
เพื่อหาคาบการโคจรของ IPHAS J0518 เราใช้เวลาที่กลางของอุปราคาทั้งหมด 4 อุปราคา ถูกคำนวณด้วยวิธีการเดียวกันกับ IPHAS J0130 periodogram ของ IPHAS J0518 แสดงในรูปที่ 14 และค่า O-C แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งได้จาก ephemeris ดังสมการ (10)

$$T_0 = \text{HJD}2454092.519410(41) + 0.20596565(3) \times E \quad (10)$$

หรือ  $P_{orb} = 4.94317560(61)$  ชั่วโมง

### 3.4.2 กราฟแสงและการประมาณค่ามุมเอียง

กราฟแสง ในช่วงการสังเกตการณ์ปี 2006 IPHAS J0518 แม็กนิจูดเฉลี่ยที่ถูกสังเกตได้มีค่าประมาณ 17.0 ซึ่งสลัวกว่าแม็กนิจูดจาก USNO-A2.0 ที่  $R = 14.8$  ในวันที่ 10 ตุลาคม ค.ศ. 2008 พบว่าวัตถุอยู่ในสภาวะที่สว่าง โดยมีแม็กนิจูดเฉลี่ยนอกบริเวณอุปราคาที่ 15.1 ตัวอย่างกราฟแสงที่ folded ตาม ephemeris ในสมการ (10) แสดงดังรูปที่ 4 และโครงสร้างระยะใกล้แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ภาพซ้ายมือ: โครงสร้างอุปราคาระยะใกล้ของ IPHAS J0518 สังเกตการณ์เมื่อ 22 ธันวาคม 2006 (a) และ 23 ธันวาคม 2006 (b) ภาพขวามือ: สังเกตการณ์เมื่อ 10 ตุลาคม 2008 เครื่องหมายกากบาทคือ mirrored data

กราฟแสงของในปี 2006 เผยให้เห็นอุปราคาที่มีความลึกประมาณ 1.4 mag มีอุปราคาทุติยภูมิที่ต้นมีความลึกประมาณ 0.2 mag โดยถูกตรวจพบอย่างชัดเจนที่เฟสประมาณ 0.5 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการสะท้อนของด้านที่ร้อนของดาวทุติยภูมิ ซึ่งถูกบังแบบบางส่วนด้วย accretion disc

โครงสร้างของอุปราคมักมีลักษณะไม่สมมาตร ซึ่งเป็นลักษณะของจุดสว่างอันเกิดจากตำแหน่งสุดท้ายของอุปราคา ที่พบใน dwarf novae ช่วงที่ไม่เกิดการระเบิด โครงสร้างอย่างคร่าวๆ ของดาวแคระขาวและจุดสว่างอันเกิดจากตำแหน่งแรกสุดและตำแหน่งสุดท้ายของอุปราคา สามารถดูได้จากโครงสร้างอุปราคาของวันที่ 23 ธันวาคม (รูปที่ 7) ซึ่งบางส่วนค่อนข้างคล้ายกับ Z Cha และ IY UMa ในช่วงที่ไม่เกิดการระเบิด (Bailey 1979; Patterson et al. 2000) แต่เป็นที่น่าเสียดายเนื่องจากเราไม่มีกราฟแสงที่เห็นโครงสร้างของอุปราคาในช่วงที่อยู่ในสภาวะสว่างทั้งหมด ครั้งที่สองของโครงสร้างแสดงให้เห็นความสว่างที่เพิ่มขึ้นอย่างเรียบเนียนจาก minimum ซึ่งดูคล้ายกับ dwarf novae ในช่วงที่เกิดการระเบิด ในบางครั้งอุปราคาที่มีความลึกเพิ่มขึ้นเป็น  $\sim 2.0$  mag การเพิ่มขึ้นของความลึกของอุปราคานี้เกิดขึ้นจากการระเบิดที่ถูกพบใน dwarf novae จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น EX Dra (Baptista et al. 2000)

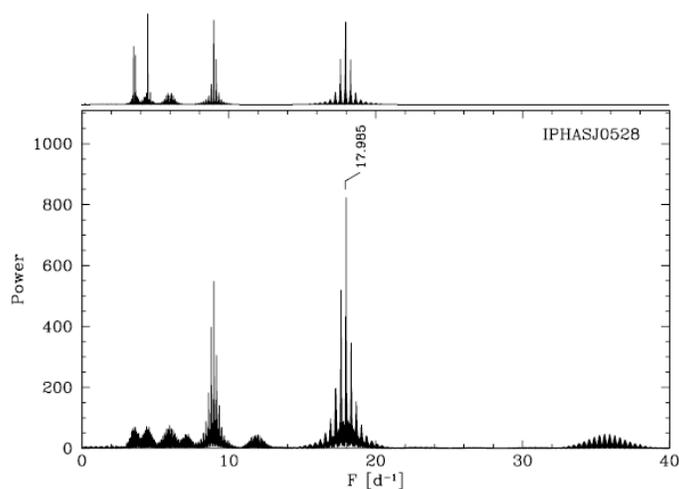
เป็นที่น่าสังเกตว่าเส้นสเปกตรัมของ IPHAS J0518 นั้นแสดงให้เห็นพีคคู่ของเส้นสว่างบาร์ลิเมอร์พร้อมกับการแปรค่าของเส้นสว่างฮีเลียม He II  $\lambda 4686$  (Witham et al. 2007) โดยเฉพาะในสเปกตรัมเฉลี่ย พบว่าความเข้มของเส้นสว่าง He II นั้นใกล้เคียงกับ H $\beta$  จากภาพโดยรวมของเส้นสว่างของ IPHAS J0518 นั้นคล้ายกับ dwarf novae ในช่วงที่เกิดการระเบิด ตัวอย่างเช่น IY UMa (Rolfe et al. 2005) IP Peg, GK Per (Morales-Rueda & Marsh 2002) และ novalike variables

**การประมาณมุมเอียงของระบบ** เพื่อที่จะประมาณค่ามุมเอียงของระบบอย่างคร่าวๆ ของ IPHAS J0518 เราจะสมมติว่าโครงสร้างของอุปราคาในสภาวะที่สว่างแสดงลักษณะที่ไม่สมมาตรจากการทำ mirroring ครั้งที่สองของโครงสร้างอุปราคา ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นประโยชน์นั้นหาได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับ IPHAS J0130 สำหรับ IPHAS J0518 มีค่า  $M_{\text{sec}} = 0.5M_{\odot}$  และกำหนดให้ค่าเฉลี่ยแมกนิจูดนอกบริเวณอุปราคามีค่า 15.1 เราได้  $\Delta\phi_{1/2} = 0.082 \pm 0.001$  และสุดท้ายเราได้ค่ามุมเอียง IPHAS J0518 เป็น  $i = 77^{\circ} \pm 2^{\circ}$  และ  $q = 0.5-0.8$

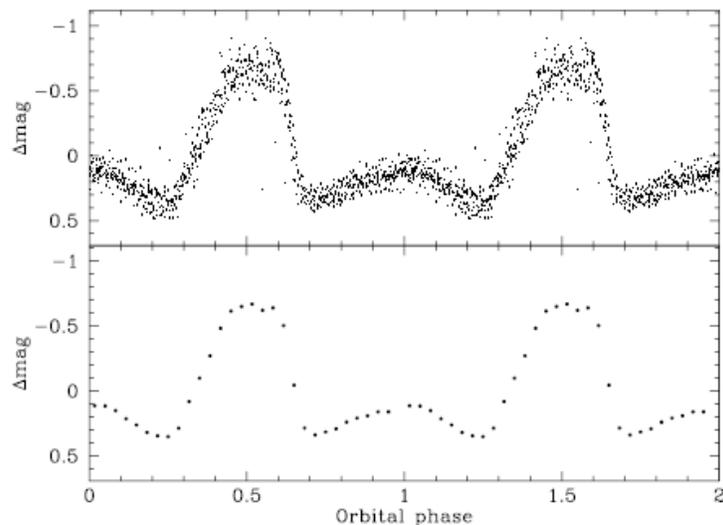
### 3.5 IPHAS J0528

Identification spectrum ของ IPHAS J0528 (Witham et al. 2007) แสดงให้เห็นเส้นสว่าง He II  $\lambda 4686$  อย่างชัดเจน ซึ่งมีความเข้มมากกว่าเส้นสว่าง H $\beta$  ซึ่งให้เห็นว่าระบบมีสมบัติทางแม่เหล็ก เราการสังเกตการณ์เชิงอนุกรมเวลาทางโฟโตเมตรีของ IPHAS J0528 ในช่วงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2006 และตุลาคม ค.ศ. 2007 ทั้งหมด 18 ชั่วโมง กราฟแสงแสดงให้เห็นสัญญาณที่คงตัวของพีคเดี่ยวเป็นคาบทุกๆ  $\sim 80$  นาที และมี amplitude  $\sim 1$  mag (ดังรูปที่ 5) จากข้อมูลข้างต้นระบบมีลักษณะคล้ายกับ polars ตัวอย่างเช่น WW Hor (Bailey et al. 1988), SDSS J0854+3905 (Dillon et al. 2008) แต่ of SDSS J0854+3905 นั้นมีพีคคู่

เพื่อที่จะได้คาบการโคจรที่ถูกต้อง เรารวมข้อมูลทั้งหมดหลังจากลบสัญญาณเฉลี่ยในแต่ละคืน และ periodogram ที่ถูกคำนวณใน MIDAS/TSA context บนพื้นฐานของ Scargle (1982) และ analysis-of-variance (AOV) method (Schwarzenberg-Czerny 1989) และ orthogonal trigonometric polynomials (ORT) (Schwarzenberg-Czerny 1996) ใน Scargle periodogram ประกอบด้วย 2 กระจุกสัญญาณที่บริเวณ  $15-21 \text{ d}^{-1}$  และ  $33-39 \text{ d}^{-1}$  โดยมีพีคที่สูงที่สุดในกลุ่มแรกที่  $17.985 \text{ d}^{-1}$  และมีพีคที่สูงที่สุดในกลุ่มที่สองที่  $35.615 \text{ d}^{-1}$  สัญญาณที่ชัดเจนที่  $17.985 \text{ d}^{-1}$  แสดงใน AOV periodogram และ ORT periodogram (รูปที่ 9 ช่องใหญ่) ที่ซึ่งกระจุกสัญญาณที่  $33-39 \text{ d}^{-1}$  ถูกลดทอนลงเป็นจำนวนมาก เราทดสอบสัญญาณโดยการสร้าง fake data จากกราฟรูปไซน์ด้วยความถี่  $17.985 \text{ d}^{-1}$  ถูกประเมินที่เวลาของการสังเกตการณ์ที่ถูกต้องแม่นยำ ORT periodogram ของ fake data ถูกสร้างขึ้นอีกครั้งตาม periodogram ที่ได้จากการสังเกตด้วยความถี่สัญญาณที่  $17.985 \text{ d}^{-1}$  และที่ความถี่ต่ำ (รูปที่ 18 ช่องบน) เราสรุปว่าคาบการโคจรของ IPHAS J0528 มีค่า  $80.0668(2)$  นาที



รูปที่ 18 ORT periodogram ของ IPHAS J0528



รูปที่ 19 ข้อมูลทางโฟโตเมตรีของ IPHAS J0528 folded บนคาบการโคจร 80.0668 นาที (ช่องบน) กราฟแสงเฉลี่ยของ IPHAS J0528 (ช่องล่าง)

รูปที่ 19 แสดงข้อมูลทั้งหมดนำมา folded บน  $P_{\text{orb}} = 80.0668$  นาที เฉลี่ยให้เป็น 30 phase bins ซึ่งสะท้อนให้เห็นโครงสร้างของกราฟแสงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจาก cyclotron beaming จาก accretion column บริเวณที่อยู่ใกล้ดาวแคระขาว และบริเวณ accretion ถูกบังโดยดาวแคระขาว คล้ายกับโครงสร้างของ AM Her (Gansicke et al. 2001) พลักซ์สูงสุดเกิดที่เฟส  $\phi = 0.5$  เมื่อเส้นแนวสายตาตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของ accretion column การเพิ่มขึ้นและลดลงของฟลักซ์ที่เฟส  $\phi = 0.3$  และ  $\phi = 0.7$  เกิดขึ้นช้าอย่างแม่นยำ แสดงให้เห็นว่า accretion region ถูกบังโดยดาวแคระขาว การแปรค่าที่เฟส  $\phi = 0.7 - 0.3$  เหมือนกับ SDSS J0854+3905 ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก accretion ที่เกิดขึ้นที่ขั้วอีกด้านหนึ่งของดาวแคระขาว หรืออาจจากผลของ projection ของ accretion stream

### 3.6 IPHAS J1841

#### 3.6.1 Eclipse ephemeris

เราสังเกตการณ์ทางโฟโตเมตรีของ IPHAS J1841 ในช่วงเดือนเมษายนและกรกฎาคม ปี ค.ศ. 2007 กราฟแสงแสดงในรูปที่ 6 เราเก็บข้อมูลได้อุปราคาปฐมภูมิ 3 จุด และ อุปราคาทุติยภูมิ 7 จุด เราวัดคาบการโคจรของระบบโดยวิธีเดียวกับ IPHAS J0130 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4 เราได้ ephemeris สำหรับ IPHAS J1841 ดังนี้

$$T_0 = \text{HJD}2454221.67878(75) + 0.317421(6) \times E \quad (11)$$

นั่นคือ  $P_{\text{orb}} = 7.61810(15)$  h

รูปที่ 6 (สี่รูปล่าง) แสดงข้อมูลทั้งหมด fold กับคาบการโคจรที่  $P_{\text{orb}} = 7.61810(15)$  ชั่วโมง และเฉลี่ยข้อมูลให้เหลือ 100 จุดในช่วงหนึ่งคาบการโคจร ด้านซ้ายมือเป็นกราฟแสงของอุปราคาปฐมภูมิในวันที่ 1 พฤษภาคม กับอุปราคาทุติยภูมิที่เราทำการเลื่อนจนตรงกับความสว่างนอกอุปราคา ด้านขวามือเป็นข้อมูลชุดเดียวกันที่ทำการเลื่อนอุปราคาทุติยภูมิจนสอดคล้องกับอุปราคาปฐมภูมิในวันที่ 6 และ 25 มิถุนายน โดยทั่วไปกราฟแสงแสดงให้เห็นถึงรูปร่างตัว V ที่มีการเปลี่ยนแปลงของความลึกและความกว้างของอุปราคา และไม่พบสัญญาณของ accretion disc ซึ่งไม่เหมือนกับกราฟแสงของ CVs ทั่วไป แต่คล้ายกับดาวคู่ประเภทอัลกอลที่มีคาบการโคจร  $P_{\text{orb}} > 0.6 \text{ d}^{-1}$  เช่น CL Aur (Lee et al. 2010)

## บทที่ 4

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจำนวน intermediate polars ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในรายการของ Mukai บันทึกจำนวน IPs ไว้ 36 ระบบ ในขณะที่ Ritter & Kolb (2003, v.7.12) แสดงจำนวน IPs ไว้มากกว่าประมาณสองเท่า ซึ่งชี้ให้เห็นถึงเงื่อนไขในการจำแนก IPs ที่แตกต่างกัน ลักษณะที่เด่นชัดอย่างหนึ่งของ IPs คือการปรากฏการแปรค่าความสว่างของ optical และ X-ray ในช่วงสั้นๆ ของการหมุนรอบตัวเองของดาวแคระขาว (Buckley 2000)

รายละเอียดของการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ CVs มาจากข้อมูลจากการสังเกตของระบบที่เป็นอุปราคา ในหน้า IP ของ Mukai มี IP ที่เป็นอุปราคาจำนวน 6 ดวง ซึ่ง 4 ดวงเป็นการอุปราคาบางส่วน ระบบเหล่านี้ได้แก่ FO Aqr (e.g. Hellier et al. 1990; Kruszewski & Semeniuk 1993), BG CMi (e.g. Patterson & Thomas 1993; Kim et al. 2005), TV Col (e.g. Hellier et al. 1991; Hellier 1993), EX Hya (e.g. Beuermann & Osborne 1988) DQ Her (e.g. Walker 1954, 1956) และ XY Ari (Patterson & Halpern 1990) เป็นเพียงสองระบบที่มีอุปราคาแบบลึก การตรวจพบ oscillation ที่ 71 s ในข้อมูลทางโฟโตเมตรีของ DQ Her (Walker 1956) มีบทบาทสำคัญในการสร้าง 'ภาพมาตรฐาน' ของ CVs การศึกษาทั้งทางทฤษฎีและการสังเกตการณ์ของ DQ Her ทำให้ได้ข้อจำกัดในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบ เช่น  $P_{orb}$ ,  $\Delta\phi_{1/2}$ ,  $q$ ,  $i$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ , and  $R_D$  (see e.g. Horne et al. 1993; Zhang et al. 1995) XY Ari เป็น X-ray eclipsing แบบลึก แต่เนื่องจากระบวงตัวอยู่ด้านหลังของกลุ่มเมฆโมเลกุล MBM12 ซึ่งทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้ในช่วงความยาวคลื่นแสง (Littlefair et al. 2001) และเร็วๆ นี้ nova V597 Pup ถูกรายงานว่าเป็น IP ที่มีความลึกของอุปราคาประมาณ 1 แมกนิจูด ซึ่งกำลังสลัวลงสู่สภาวะก่อนการระเบิดที่ความสว่างประมาณ  $V = 20$  (Warner & Woudt 2009a)

จากพื้นฐานของ  $P_{spin} = 2210$  s ที่พบในกราฟแสงปี 2006 เราจำแนก IPHAS J0627 ว่าเป็น IP ดวงที่ 4 ที่มีอุปราคาแบบลึก ซึ่งมีคาบการโคจรเท่ากับ  $P_{orb} = 8.162$  h ทำให้ IPHAS J0627 เป็นวัตถุที่หายากและน่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาต่อไปในรายละเอียด

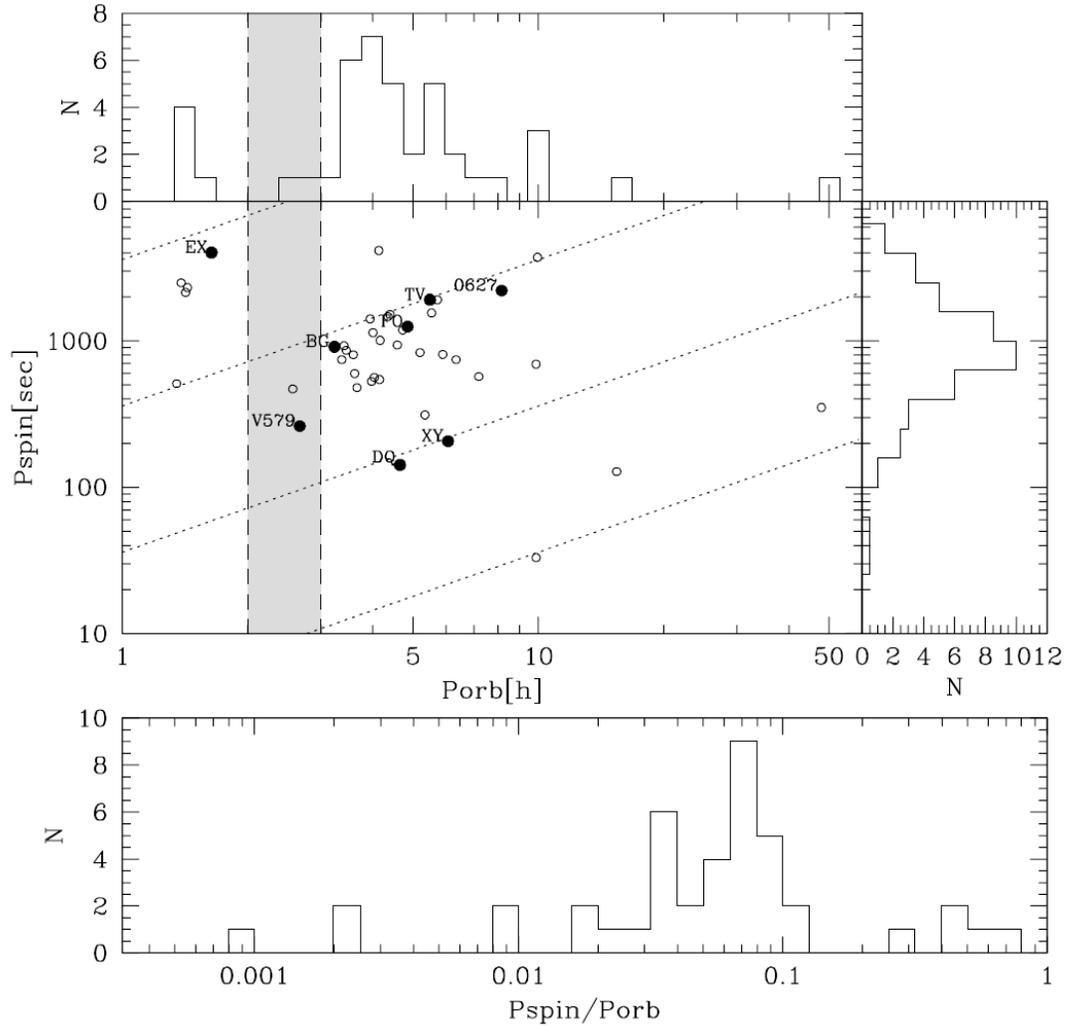
รูปที่ 20 แสดงการกระจายตัวของ IPs จำนวน 45 ระบบในระนาบ  $P_{spin} - P_{orb}$  ระบบที่เป็นอุปราคาแสดงด้วยจุดทึบ ซึ่งเราดัดแปลงมาจาก Fig. 23 ของ Gänsicke et al. (2005) โดยเราเพิ่ม IPs ใหม่ๆ เข้าไปคือ EIUMa ( $P_{orb} = 6.434$  h, Thorstensen 1986;  $P_{spin} = 745.7$  s, Reimer et al. 2008), RXJ2133+5107 ( $P_{orb} = 7.193$  h;  $P_{spin} = 570.82$  s, Bonnet-Bidaud et al. 2006), SDSS J2333+1522 ( $P_{orb} = 83.12$ min;  $P_{spin} = 41.66$ min, Southworth et al. 2007a), IGR J0022+6141 ( $P_{orb} = 4.033$  h;  $P_{spin} = 563.53$  s, Bonnet-Bidaud et al. 2007), IGRJ19267+1325 ( $P_{orb} = 4.58$  h;  $P_{spin} = 938.6$  s, Evans et al. 2008), IGRJ15094-6649 ( $P_{orb} = 5.89$  h;  $P_{spin} = 809.42$  s,

Pretorius 2009), XSS J00564+4548 (=1RXS J005528.0+461143), ( $P_{\text{orb}} = 2.568$  h;  $P_{\text{spin}} = 469.75$  s, Butters et al. 2008; Bonnet-Bidaud et al. 2009), V597 Pup ( $P_{\text{orb}} = 2.6687$  h;  $P_{\text{spin}} = 261.9$  s, Warner & Woudt 2009b), IGRJ16500-3307 ( $P_{\text{orb}} = 3.617$  h;  $P_{\text{spin}} = 597.92$  s Pretorius 2009), IGRJ17195-4100 ( $P_{\text{orb}} = 4.005$  h;  $P_{\text{spin}} = 1139.55$  s, Pretorius 2009) และ IPHAS J0627 ( $P_{\text{orb}} = 8.162$  h;  $P_{\text{spin}} = 2210.34$  s) จากงานของเรา สังเกตว่าเราไม่ได้รวม IPs ที่วัดค่าคาบการโคจรได้อย่างไม่แน่นอน เช่น SDSS J144659.95+025330.3 (Homer et al. 2006), Swift J0732-1331 (Butters et al. 2007), CXOPS J180354.3-300005 (Hong et al. 2009), AXJ1740.2-2903 (Gotthelf & Halpern 2010), และ IP candidates เช่น V426Oph and LS Peg (Ramsay et al. 2008) เป็นที่เห็นได้ชัดเจนนว่า IPs ส่วนใหญ่ (84%) มีคาบการโคจรมากกว่า period gap (2-3 ชั่วโมง) และมีเพียงจำนวนน้อยที่มีคาบการโคจรน้อยกว่า period gap และมีเพียงสองระบบที่มีคาบการโคจรยาวกว่าระบบทั่วไป ซึ่งได้แก่ GKPer ( $P_{\text{orb}} = 1.996$  d; Crampton et al. 1986) และ 1RXS J173021.5-055933 ( $P_{\text{orb}} = 15.42$  h; Gänsicke et al. 2005). Schenker et al. (2004) กล่าวถึงความเป็นไปได้ของ “IP period gap” ในช่วง 6–10 ชั่วโมง ซึ่งมี IPs เพียงไม่กี่ระบบที่อยู่ในช่วงนี้ ซึ่งในบรรดาระบบเหล่านี้มีเพียงสองระบบเท่านั้นที่อยู่ในช่วงดังกล่าวอย่างดี ซึ่งได้แก่ RXJ2133.7+5107 และ IPHAS J0627 นอกนั้นจะวางตัวอยู่บริเวณขอบของช่วงดังกล่าว ในตารางที่ 5 เรารวบรวม IPs ที่มีคาบการโคจรในช่วง 6-10 ชั่วโมง ในขณะที่ ‘IP period gap’ อาจจะมีสัมพันธ์กับวิวัฒนาการของ magnetic CVs แต่จำนวนประชากรของ IPs ใน period distribution ยังน้อยเกินกว่าที่จะทำการสรุปได้อย่างแน่ชัด

รูปที่ 20 แสดงให้เห็นถึง CVs จำนวนมาก ที่มี  $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} = 0.1$  ตามแนวโน้มที่ค้นพบก่อนหน้านี้ (เช่น Barrett et al. 1988; Norton et al. 2004; Gänsicke et al. 2005) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของดาวแคระขาวในสภาวะสมดุลใน magnetic CVs (King & Lasota 1991; Warner & Wickramasinghe 1991) แต่อย่างไรก็ตามขณะนี้เริ่มเห็นได้ชัดว่าเราพบ IPs ที่มีคาบการโคจรมากกว่า period gap ที่มี  $0.01 \leq P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} \leq 0.1$  ซึ่งรวมถึง IPHAS J0627 ซึ่งมี  $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} = 0.075$  ด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า IPHAS J0627 เป็นระบบที่มี disc-fed accretion (Norton et al. 2004, 2008) IPs ส่วนใหญ่ที่มี  $P_{\text{orb}} < 2$  h จะมี  $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} > 0.1$  ซึ่งเป็นไปตามคำทำนายของ King & Wynn (1999) ระบบที่มี  $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}} < 0.01$  พบที่คาบการโคจรยาวมากๆ และเป็นระบบที่มีอายุน้อยและยังไม่อยู่ในสภาวะสมดุล

Norton et al. (2004) แสดงให้เห็นถึงช่วงของ spin equilibria ในระนาบพารามิเตอร์ ( $P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}}, P_{\text{orb}}, \mu_{\text{wd}}, q$ ) เมื่อ  $\mu_{\text{wd}}$  เป็นโมเมนต์แม่เหล็กของดาวแคระขาว เราใช้รูปที่ 2 ของ Norton et al. (2004) ในการประมาณค่าโมเมนต์แม่เหล็กของ IPHAS J0627 เราพบว่า  $\mu_{\text{wd}} \sim 5 \times 10^{33}$  G cm<sup>3</sup> ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ตรงกลางระหว่าง IPs โดยส่วนใหญ่ในช่วง 6-10 ชั่วโมง และมีค่าเหมือนกับ IP คาบการโคจรสั้นเช่น EX Hya ตามการประมาณการของ Norton et al. (2004) IPs คาบการโคจรยาวที่

มี  $\mu_{\text{wd}} \geq 5 \times 10^{33} \text{ G cm}^3$  จะมีวิวัฒนาการไปเป็น polars ส่วน ระบบที่มี  $\mu_{\text{wd}} \leq 5 \times 10^{33} \text{ G cm}^3$  จะมีวิวัฒนาการไปเป็น IPs คาบการโคจรสั้นที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยอย่างเช่น EX Hya ซึ่งแนวคิดนี้ได้รับการสนับสนุนจากหลักฐานทางการสังเกตในงานของ Southworth et al. (2007a) ดังนั้นเราจึงสรุปว่า IPHAS J0627 อาจเป็นของบรรพบุรุษ IPs คาบการโคจรสั้นประเภท EX Hya



รูปที่ 20 การกระจายตัวของ IPs จำนวน 45 ระบบในระนาบ  $P_{\text{spin}} - P_{\text{orb}}$

ตารางที่ 5 คาบการโคจรของ IPs ในช่วง 6-10 ชั่วโมง

Star	$P_{\text{orb}}$ (h)	$P_{\text{spin}}$ (s)	$P_{\text{spin}}/P_{\text{orb}}$	Estimated magnetic moment	References
V1062 Tau	9.952	3726	0.104	$1.4 \times 10^{34}$	1, 2
AE Aqr	9.87973	33.0767	0.00093	$< 10^{32}$	2, 3, 4
NY Lup	9.87	693.01	0.0195	$< 4.1 \times 10^{32}$	5
IPHAS J0627	8.161978	2210.34	0.075	$\sim 5 \times 10^{33}$	this work
RX J2133.7+5107	7.193	570.823	0.02	$3 \times 10^{33} - 3 \times 10^{34}$	6, 7
EIUMa	6.434	745.7	0.032	$> (3.4 \pm 0.2) \times 10^{33}$	8, 9
XY Ari	6.0648	206.30	0.00945	$4.5 \times 10^{32}$	2, 10, 11
V2069 Cyg	7.480	743.2	0.0690		

- ข้อเสนอแนะสำหรับทำวิจัยในอนาคต

จากการวัดคาบการโคจรของ CVs ที่ค้นพบใหม่ใน IPHAS จำนวน 6 ดวง เราจะเห็นว่า มีเพียงระบบเดียวเท่านั้นที่มีคาบการโคจรน้อยกว่า period gap (IPHAS J0528;  $P_{\text{orb}} = 80.07$  นาที) ทั้งๆ ที่เราใช้วิธีค้นหา CVs ใหม่ๆ ที่เอื้อต่อระบบที่มีคาบการโคจรสั้น แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่เราจะทำการสรุปผลได้อย่างชัดเจนว่าเราไม่พบ CVs คาบการโคจรยาวในระนาบกาแล็กติกมากตามที่เป็นแบบจำลองมาตรฐานทำนาย เราจำเป็นต้องวัดคาบการโคจรของ CVs ทั้งหมดใน IPHAS ซึ่งมี candidates ประมาณ 43 ระบบ ซึ่งรวมไปถึงการวัดระยะทางที่แน่นอนของระบบ เพื่อทำการหาค่า space density ของ CVs ในระนาบกาแล็กติกต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- Araujo-Betancor, S., Gänsicke, B. T., Hagen, H.-J., Rodríguez-Gil, P., & Engels, D. 2003, A&A, 406, 213
- Aungwerojwit, A. 2007, PhD thesis, University of Warwick
- Aungwerojwit, A., Gänsicke, B. T., Rodríguez-Gil, P., Hagen, H.-J., Giannakis, O., Papadimitriou, C., Allende Prieto, C., & Engels, D. 2007, A&A, 469, 297
- Bailey, J. 1979, MNRAS, 187, 645
- Bailey, J., Wickramasinghe, D. T., Hough, J. H., & Cropper, M. 1988, MNRAS, 234, 19P
- Baptista, R., Catalán, M. S., & Costa, L. 2000, MNRAS, 316, 529
- Barrett, P., O'Donoghue, D., & Warner, B. 1988, MNRAS, 233, 759
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- Beuermann, K. & Osborne, J. P. 1988, A&A, 189, 128
- Bonnet-Bidaud, J. M., de Martino, D., Falanga, M., Mouchet, M., & Masetti, N. 2007, A&A, 473, 185
- Bonnet-Bidaud, J. M., de Martino, D., & Mouchet, M. 2009, The Astronomer's Telegram, 1895, 1
- Bonnet-Bidaud, J. M., Mouchet, M., de Martino, D., Silvotti, R., & Motch, C. 2006, A&A, 445, 1037
- Buckley, D. A. H. 2000, New Astronomy, 44, 63
- Burrows, D. N., Hill, J. E., Nousek, J. A., Kennea, J. A., Wells, A., Osborne, J. P., Abbey, A. F., Beardmore, A., Mukerjee, K., Short, A. D. T., Chincarini, G., Campana, S., Citterio, O., Moretti, A., Pagani, C., Tagliaferri, G., Giommi, P., Capalbi, M., Tamburelli, F., Angelini, L., Cusumano, G., Bräuninger, H. W., Burkert, W., & Hartner, G. D. 2005, Space Science Reviews, 120, 165
- Butters, O. W., Barlow, E. J., Norton, A. J., & Mukai, K. 2007, A&A, 475, L29
- Butters, O. W., Norton, A. J., Hakala, P., Mukai, K., & Barlow, E. J. 2008, A&A, 487, 271
- Choi, C. S., Dotani, T., & Agrawal, P. C. 1999, ApJ, 525, 399
- Crampton, D., Fisher, W. A., & Cowley, A. P. 1986, ApJ, 300, 788
- Cumming, A. 2002, MNRAS, 333, 589
- de Kool, M. 1992, A&A, 261, 188

- de Martino, D., Bonnet-Bidaud, J.-M., Mouchet, M., Gänsicke, B. T., Haberl, F., & Motch, C. 2006, *A&A*, 449, 1151
- Dhillon, V. S., Marsh, T. R., & Jones, D. H. P. 1991, *MNRAS*, 252, 342
- Dillon, M., Gänsicke, B. T., Aungwerojwit, A., Rodríguez-Gil, P., Marsh, T. R., Barros, S. C. C., Szkody, P., Brady, S., Krajci, T., & Oksanen, A. 2008, *MNRAS*, 386, 1568
- Drew, J. E., Greimel, R., Irwin, M. J., Aungwerojwit, A., Barlow, M. J., Corradi, R. L. M., Drake, J. J., Gänsicke, B. T., Groot, P., Hales, A., Hopewell, E. C., Irwin, J., Knigge, C., Leisy, P., Lennon, D. J., Mampaso, A., Masheded, M. R. W., Matsuura, M., Morales-Rueda, L., Morris, R. A. H., Parker, Q. A., Phillipps, S., Rodríguez-Gil, P., Roelofs, G., Skillen, I., Sokoloski, J. L., Steeghs, D., Unruh, Y. C., Viironen, K., Vink, J. S., Walton, N. A., Witham, A., Wright, N., Zijlstra, A. A., & Zurita, A. 2005, *MNRAS*, 362, 753
- Eggleton, P. P. 1983, *ApJ*, 268, 368
- Evans, P. A., Beardmore, A. P., & Osborne, J. P. 2008, *The Astronomer's Telegram*, 1669, 1
- Gänsicke, B. T. 1997, PhD thesis, Universität Göttingen
- Gänsicke, B. T. 2004, in *Compact Binaries and Beyond*, ed. G. Tovmassian & E. Sion, Conf. Ser. No. 20 (RMAA), 152-154
- Gänsicke, B. T. 2005, in *The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, ed. J.-M. Hameury & J.-P. Lasota (ASP Conf. Ser. 330), 3-16
- Gänsicke, B. T., Araujo-Betancor, S., Hagen, H.-J., Harlaftis, E. T., Kitsionas, S., Dreizler, S., & Engels, D. 2004, *A&A*, 418, 265
- Gänsicke, B. T., Fischer, A., Silvotti, R., & de Martino, D. 2001, *A&A*, 372, 557
- Gänsicke, B. T., Hagen, H. J., & Engels, D. 2002, in *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, ed. B.T. Gänsicke, K. Beuermann, & K. Reinsch (ASP Conf. Ser. 261), 190-199
- Gänsicke, B. T., Marsh, T. R., Edge, A., Rodríguez-Gil, P., Steeghs, D., Araujo-Betancor, S., Harlaftis, E., Giannakis, O., Pyrzas, S., Morales-Rueda, L., & Aungwerojwit, A. 2005, *MNRAS*, 361, 141
- Gehrels, N., Chincarini, G., Giommi, P., Mason, K. O., Nousek, J. A., Wells, A. A., White, N. E., Barthelmy, S. D., Burrows, D. N., Cominsky, L. R., Hurley, K. C., Marshall, F. E., Mészáros, P., Roming, P.W. A., Angelini, L., Barbier, L. M., Belloni, T.,

- Campana, S., Caraveo, P. A., Chester, M. M., Citterio, O., Cline, T. L., Cropper, M. S., Cummings, J. R., Dean, A. J., Feigelson, E. D., Fenimore, E. E., Frail, D. A., Fruchter, A. S., Garmire, G. P., Gendreau, K., Ghisellini, G., Greiner, J., Hill, J. E., Hunsberger, S. D., Krimm, H. A., Kulkarni, S. R., Kumar, P., Lebrun, F., Lloyd-Ronning, N. M., Markwardt, C. B., Mattson, B. J., Mushotzky, R. F., Norris, J. P., Osborne, J., Paczynski, B., Palmer, D. M., Park, H., Parsons, A. M., Paul, J., Rees, M. J., Reynolds, C. S., Rhoads, J. E., Sasseen, T. P., Schaefer, B. E., Short, A. T., Smale, A. P., Smith, I. A., Stella, L., Tagliaferri, G., Takahashi, T., Tashiro, M., Townsley, L. K., Tueller, J., Turner, M. J. L., Vietri, M., Voges, W., Ward, M. J., Willingale, R., Zerbi, F. M., & Zhang, W. W. 2004, *ApJ*, 611, 1005
- González-Solares, E. A., Walton, N. A., Greimel, R., Drew, J. E., Irwin, M. J., Sale, S. E., Andrews, K., Aungwerojwit, A., Barlow, M. J., van den Besselaar, E., Corradi, R. L. M., Gänsicke, B. T., Groot, P. J., Hales, A. S., Hopewell, E. C., Hu, H., Irwin, J., Knigge, C., Lagadec, E., Leisy, P., Lewis, J. R., Mampaso, A., Matsuura, M., Moont, B., Morales-Rueda, L., Morris, R. A. H., Naylor, T., Parker, Q. A., Prema, P., Pyrzas, S., Rixon, G. T., Rodríguez-Gil, P., Roelofs, G., Sabin, L., Skillen, I., Suso, J., Tata, R., Viironen, K., Vink, J. S., Witham, A., Wright, N. J., Zijlstra, A. A., Zurita, A., Drake, J., Fabregat, J., Lennon, D. J., Lucas, P. W., Martín, E. L., Phillipps, S., Steeghs, D., & Unruh, Y. C. 2008, *MNRAS*, 388, 89
- Gotthelf, J. P. & Halpern, E. V. 2010, *The Astronomer's Telegram*, 2681, 1
- Green, R.F., Schmidt, M., & Liebert, J. 1986, *ApJS*, 61, 305
- Hagen, H.-J., Groote, D., Engels, D., & Reimers, D. 1995, *A&A*, 111, 195
- Hellier, C. 1993, *MNRAS*, 264, 132
- Hellier, C. 2001, *Cataclysmic Variable Stars* (Springer)
- Hellier, C., Beardmore, A. P., & Mukai, K. 2002, *A&A*, 389, 904
- Hellier, C., Mason, K. O., & Cropper, M. 1990, *MNRAS*, 242, 250
- Hellier, C., Mason, K. O., & Mittaz, J. P. D. 1991, *MNRAS*, 248, 5P
- Hilditch, R. W., Harries, T. J., & Hill, G. 1996, *MNRAS*, 279, 1380
- Homer, L., Szkody, P., Henden, A., Chen, B., Schmidt, G. D., Fraser, O. J., & West, A. A. 2006, *AJ*, 132, 2743
- Hong, J. S., van den Berg, M., Laycock, S., Grindlay, J. E., & Zhao, P. 2009, *ApJ*, 699, 1053

- Horne, K. 1985, MNRAS, 213, 129
- Horne, K., Welsh, W. F., & Wade, R. A. 1993, ApJ, 410, 357
- Howell, S.B., Rappaport, S., & Politano, M. 1997, MNRAS, 287, 929
- Kamata, Y., Tawara, Y., & Koyama, K. 1991, ApJ Lett., 379, L65
- Katajainen, S., Butters, O. W., Norton, A. J., Lehto, H. J., & Piirola, V. 2007, A&A, 475, 1011
- Kim, Y. G., Andronov, I. L., Park, S. S., & Jeon, Y. 2005, A&A, 441, 663
- King, A. R. & Lasota, J. P. 1991, ApJ, 378, 674
- King, A. R. & Wynn, G. A. 1999, MNRAS, 310, 203
- Knigge, C. 2006, MNRAS, 373, 484
- Kolb, U. 1993, A&A 271, 149
- Koyama, K., Takano, S., Tawara, Y., Matsumoto, T., Noguchi, K., Fukui, Y., Iwata, T., Ohashi, N., Tatematsu, K., Takahashi, N., Umemoto, T., Hodapp, K. W., Rayner, J., & Makishima, K. 1991, ApJ, 377, 240
- Kraft, R.P., Mathews, J., & Greenstein, J. LI 1962, ApJ, 136,312
- Kruszewski, A. & Semeniuk, I. 1993, Acta Astron., 43, 127
- Lee, J. W., Kim, C., Kim, D. H., Kim, S., Lee, C., & Koch, R. H. 2010, AJ, 139, 2669
- Liedahl, D. A., Osterheld, A. L., & Goldstein, W. H. 1995, ApJ, 438, L115
- Littlefair, S. P., Dhillon, V. S., & Marsh, T. R. 2001, MNRAS, 327, 669
- Littlefair, S. P., Dhillon, V. S., Marsh, T. R., Gänsicke, B. T., Southworth, J., Baraffe, I., Watson, C. A., & Copperwheat, C. 2008, MNRAS, 388, 1582
- Mewe, R., Lemen, J. R., & van den Oord, G. H. J. 1986, A&AS, 65, 511
- Morales-Rueda, L. & Marsh, T. R. 2002, MNRAS, 332, 814
- Norton, A. J., Butters, O. W., Parker, T. L., & Wynn, G. A. 2008, ApJ, 672, 524
- Norton, A. J., Wynn, G. A., & Somerscales, R. V. 2004, ApJ, 614, 349
- Paczynski, B. & Sienkiewicz, R. 1983, ApJ, 268, 825
- Patterson, J. 1979, ApJ, 234, 978
- Patterson, J. & Halpern, J. P. 1990, ApJ, 361, 173
- Patterson, J., Kemp, J., Richman, H. R., Skillman, D. R., Vanmunster, T., Jensen, L., Buckley, D. A. H., O'Donoghue, D., & Kramer, R. 1998, PASP, 110, 415
- Patterson, J., Kemp, J., Jensen, L., Vanmunster, T., Skillman, D. R., Martin, B., Fried, R., & Thorstensen, J. R. 2000, PASP, 112, 1567

- Patterson, J., Masi, G., Richmond, M. W., Martin, B., Beshore, E., Skillman, D. R., Kemp, J., Vanmunster, T., Rea, R., Allen, W., Davis, S., Davis, T., Henden, A. A., Starkey, D., Foote, J., Oksanen, A., Cook, L. M., Fried, R. E., Husar, D., Novák, R., Campbell, T., Robertson, J., Krajci, T., Pavlenko, E., Mirabal, N., Niarchos, P. G., Brettman, O., & Walker, S. 2002, *PASP*, 114, 721
- Patterson, J. & Price, C. M. 1981, *ApJ Lett.*, 243, L83 Patterson, J. & Thomas, G. 1993, *PASP*, 105, 59
- Patterson, J., Thorstensen, J. R., Vanmunster, T., Fried, R. E., Martin, B., Campbell, T., Robertson, J., Kemp, J., Messier, D., & Armstrong, E. 2004, *PASP*, 116, 516
- Politano, M. 1996, *ApJ*, 465, 338
- Pretorius, M. L. 2009, *MNRAS*, 395, 386
- Ramsay, G. 2000, *MNRAS*, 314, 403
- Ramsay, G., Wheatley, P. J., Norton, A. J., Hakala, P., & Baskill, D. 2008, *MNRAS*, 387, 1157
- Rappaport, S., Joss, P.C., & Verbunt, F. 1983, *ApJ*, 275, 713
- Reimer, T. W., Welsh, W. F., Mukai, K., & Ringwald, F. A. 2008, *ApJ*, 678, 376
- Ritter, H. & Burkert, A. 1986, *A&A*, 158, 161
- Ritter, H. & Kolb, U. 2003, *A&A*, 404, 301
- Rodríguez-Gil, P. 2005, in *The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, ed. J.-M. Hameury & J.-P. Lasota (*ASP Conf. Ser.* 330), 377, 1747
- Rodríguez-Gil, P., Casares, J., Martínez-Pais, I. G., Hakala, P., & Steeghs, D. 2001, *ApJ Lett.*, 548, L49
- Rodríguez-Gil, P., Gänsicke, B. T., Araujo-Betancor, S., & Casares, J. 2004a, *MNRAS*, 349, 367
- Rodríguez-Gil, P., Gänsicke, B. T., Barwig, H., Hagen, H.-J., & Engels, D. 2004b, *A&A*, 424, 647
- Rodríguez-Gil, P., Gänsicke, B. T., Hagen, H.-J., Araujo-Betancor, S., Aungwerojwit, A., Allende Prieto, C., Boyd, D., Casares, J., Engels, D., Giannakis, O., Harlaftis, E. T., Kube, J., Lehto, H., Martínez-Pais, I. G., Schwarz, R., Skidmore, W., Staude, A., & Torres, M. A. P. 2007, *MNRAS*, 377, 1747
- Roming, P. W. A., Kennedy, T. E., Mason, K. O., Nousek, J. A., Ahr, L., Bingham, R. E., Broos, P. S., Carter, M. J., Hancock, B. K., Huckle, H. E., Hunsberger, S. D.,

- Kawakami, H., Killough, R., Koch, T. S., McLelland, M. K., Smith, K., Smith, P. J., Soto, J. C., Boyd, P. T., Breeveld, A. A., Holland, S. T., Ivanushkina, M., Pryzby, M. S., Still, M. D., & Stock, J. 2005, *Space Science Reviews*, 120, 95
- Rucinski, S. M. & Lu, W. 2000, *MNRAS*, 315, 587
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ*, 263, 835
- Schenker, K., Wynn, G. A., & Speith, R. 2004, in *Magnetic Cataclysmic Variables (IAU Colloq. 190)*, ed. S. Vrielmann & M. Cropper (ASP Conf. Ser. 315), 8–13
- Schwarzenberg-Czerny, A. 1989, *MNRAS*, 241, 153
- Schwarzenberg-Czerny, A. 1996, *ApJ Lett.*, 460, L107
- Shafter, A. W., Hessman, F. V., & Zhang, E.-H. 1988, *ApJ*, 327, 248
- Smith, D. A. & Dhillon, V. S. 1998, *MNRAS*, 301, 767
- Southworth, J., Gänsicke, B. T., Marsh, T. R., de Martino, D., & Aungwerojwit, A. 2007a, *MNRAS*, 378, 635
- Southworth, J., Gänsicke, B. T., Marsh, T. R., de Martino, D., Hakala, P., Littlefair, S., Rodríguez-Gil, P., & Szkody, P. 2006, *MNRAS*, 373, 687
- Southworth, J., Marsh, T. R., Gänsicke, B. T., Aungwerojwit, A., Hakala, P., de Martino, D., & Lehto, H. 2007b, *MNRAS*, 382, 1145
- Spruit, H.C. & Ritter, H. 1983, *A&A*, 124, 267
- Stanishev, V., Kraicheva, Z., Boffin, H. M. J., Genkov, V., Papadaki, C., & Carpano, S. 2004, *A&A*, 416, 1057
- Thorstensen, J. R. 1986, *AJ*, 91, 940
- Verbunt, F. & Zwaan, C. 1981, *A&A*, 100, L7
- Voges, W., Aschenbach, B., Boller, T., et al. 1999, *A&A*, 349, 389
- Voges, W., Aschenbach, B., Boller, T., et al. 2000, *IAU Circ.*, 7432
- Walker, M. F. 1954, *PASP*, 66, 230
- Walker, M. F. 1956, *ApJ*, 123, 68
- Warner, B. 1986, *MNRAS*, 219, 347
- Warner, B. 1995, *Cataclysmic Variable Stars* (Cambridge: Cambridge University Press)
- Warner, B. & Wickramasinghe, D. T. 1991, *MNRAS*, 248, 370
- Warner, B. & Woudt, P. A. 2009a, *MNRAS*, 397, 979
- Webbink, R. F. 1990, in *Accretion-Powered Compact Binaries*, 177–+

- Witham, A. R., Knigge, C., Aungwerojwit, A., Drew, J. E., Gänsicke, B. T., Greimel, R., Groot, P. J., Roelofs, G. H. A., Steeghs, D., & Woudt, P. A. 2007, *MNRAS*, 382, 1158
- Woudt, P. A. & Warner, B. 2003, *MNRAS*, 340, 1011
- Zhang, E., Robinson, E. L., Stiening, R. F., & Horne, K. 1995, *ApJ*, 454, 447