ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของ

โนวา

(Introduction to Astrophysics
of nova eruption)

ฟ้ารุ่ง สุรินา บุญทิศ

สารบัญ

หน้า

คำนิยม ก

คำนำ ค

คำนำ (ฉบับปรับปรุงแก้ไขครั้งที่ 1) ช

สารบัญ ซ

สารบัญตาราง ฎ

สารบัญภาพ ฐ

บทที่ 1 บทนำสู่ความหมายของโนวา (Definition and Overview) 1

1.1 บทนำ 1

1.2 นิยามของโนวา 3

1.3 สัณฐานของโนวา 8

1.4 กราฟแสงของโนวา 11

1.4.1 ประเภทของโนวาเมื่อพิจารณาอัตราเร็วของการหรี่ลงของกราฟแสง 14

1.4.2 การกระจายตัวและความถี่ที่พบโนวาในดาราจักรทางช้างเผือก 15

1.5 การกระจายตัวของคาบการโคจรของโนวา 16

1.6 สรุป 20

1.7 เอกสารอ้างอิง 20

บทที่ 2	ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์รันอะเวย์ (Thermonuclear runaway)		23
2.1	เรขาคณิตของผิวห่อหุ้มโรช		24
	2.1.1	ประเภทของดาวคู่แบ่งตามสัณฐานการเต็มผิวห่อหุ้มโรช	27
	2.1.2	จุดลากรันจ์	29
	2.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมกับขนาดผิวห่อหุ้มโรชของดาวทุติยภูมิ	34
2.2	การเกิดจานรวมมวล		36
2.3	การถ่ายเทมวลสารสู่ดาวแคระขาว		39
2.4	เงื่อนไขในการเกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์รันอะเวย์		42
2.5	สรุป		44
2.6	เอกสารอ้างอิง		45
บทที่ 3	โนวาระเบิดซ้ำ (Recurrent novae)		47
3.1	ประเภทของโนวาระเบิดซ้ำ		48
	3.1.1	โนวาระเบิดซ้ำประเภท RS Oph	48
	3.1.2	โนวาระเบิดซ้ำประเภท U Sco	49
	3.1.3	โนวาระเบิดซ้ำประเภท T Pyx	49
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับอัตราเร็วของการหรี่ลง		51
3.3	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสีและแมกนิจูด		58
3.4	ความสำคัญของการศึกษาโนวาระเบิดซ้ำ		62
3.5	สรุป		63
3.6	เอกสารอ้างอิง		64
บทที่ 4	ความสัมพันธ์ระหว่างโนวาและซูเปอร์โนวาชนิด Ia (Relationship with SNe Ia)		67
4.1	ประเภทของซูเปอร์โนวา		69
4.2	ซูเปอร์โนวาชนิด Ia ในฐานะเทียนมาตรฐาน		72
4.3	ช่องทางการเกิดซูเปอร์โนวาชนิด Ia		74
	4.3.1	ช่องทางที่มีดาวแคระขาวเดี่ยว	74
	4.3.2	ช่องทางที่มีดาวแคระขาวคู่	77
4.4	หลักฐานและข้อโต้แย้งระหว่างช่องทาง SD และ DD		80

4.5 สรุป 81
4.6 เอกสารอ้างอิง 82

บทที่ 5 โนวาขณะระเบิด (Novae at Outburst) 87
5.1 กราฟแสงของโนวาขณะระเบิด 87
5.1.1 กราฟแสงช่วงชะงักก่อนจุดสูงสุดมีอยู่จริงหรือไม่ 88
5.1.2 การแกว่งกวัดของกราฟแสงก่อนถึงจุดสูงสุด 98
5.2 สเปกตรัมของโนวาขณะระเบิด 100
5.2.1 วิวัฒนาการของสเปกตรัมก่อนถึงจุดสูงสุด 100
5.2.2 ลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni 101
5.2.3 วิวัฒนาการของสเปกตรัมหลังจุดสูงสุด 105
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟแสง ความเร็วของสสารที่พุ่งออก และปริมาณการผ่รังสี 106
5.4 วิวัฒนาการกราฟแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ 111
5.5 สรุป 112
5.6 เอกสารอ้างอิง 112

บทที่ 6 โนวาขณะอยู่ในสภาวะเงียบ (Novae at Quiescence) 115
6.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ 116
6.1.1 กฎของสเตฟาน 116
6.1.2 กฎการกระจัดของของวีน 119
6.1.3 ทฤษฎีของพลังค์ 119
6.2 องค์ประกอบของสเปกตรัมของดาวฤกษ์ 121
6.3 สเปกตรัมของโนวาขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 123
6.3.1 สเปกตรัมของดาวแคระขาว 123
6.3.2 สเปกตรัมดาวทุติยภูมิ 126
6.3.3 สเปกตรัมของจานรวมมวล 135
6.3.4 ผลของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ 138
6.4 สรุป 140
6.5 เอกสารอ้างอิง 140

บทที่ 7 ฝึกปฏิบัติการเบื้องต้นเกี่ยวกับโนวา (D.I.Y. Labs) 143

7.1 การประมาณระดับชั้นสเปกตรัมและชั้นกำลังส่องสว่างของดาวทุติยภูมิ 143
7.2 การหารูปร่างของเปลือกโนวาด้วยโปรแกรม $SHAPE$ 154
7.3 การได้มาซึ่งกราฟแสงของระบบดาวคู่ในฐานข้อมูลกล้องโทรทรรศน์อวกาศเคปเลอร์ 155
7.4 คำถามที่น่าสนใจ 155
7.5 สรุป 157
7.6 อ้างอิง 157

บรรณานุกรม 159

อภิธานศัพท์ 171

ดัชนี 179

Index 185

ดัชนีวัตถุ 191

ประวัติผู้เขียน 193

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ประเภทของโนวาเมื่อพิจารณาอัตราเร็วของการหรี่ลงของกราฟแสง 15

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลการระเบิดโนวาระเบิดซ้ำทั้ง 10 ระบบในดาราจักรทางช้างเผือก 48

ตารางที่ 3.2 ค่าคงที่ต่าง ๆ ในความสัมพันธ์ MMRD 51

ตารางที่ 3.3 โนวาที่มีแอมพลิจูดการระเบิดต่ำ 55

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลกราฟแสงของโนวาที่ตรวจวัดได้ด้วยกล้อง Solar Mass Ejection Imager (SMEI) 88

ตารางที่ 5.2 ระดับของการไอออไนเซชันก่อนและหลังจุดสูงสุด ณ ตำแหน่งบนกราฟแสงที่มีความสว่างเท่ากัน 108

ตารางที่ 6.1 ประเภทของดาวฤกษ์ภูมิของโนวาแอมพลิจูดต่ำ 135

ตารางที่ 7.1 องค์ประกอบที่พบในเส้นสเปกตรัมของดาวสีแดง 145

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	โนวา Eta Car	1
รูปที่ 1.2	กราฟแสงของซูเปอร์โนวา SN2011fe	4
รูปที่ 1.3	กราฟแสงของโนวา V339 Del	5
รูปที่ 1.4	กราฟแสงของโนวาแคระ SS Cyg	5
รูปที่ 1.5	แผนภาพองค์ประกอบดาวแปรแสงคาทาคลิสมิก	7
รูปที่ 1.6	ผิวสมศักย์ของระบบดาวคู่	8
รูปที่ 1.7	กราฟแสงในอุดมคติของโนวา	11
รูปที่ 1.8	กราฟแสงช่วงชะงักก่อนจุดสูงสุด	13
รูปที่ 1.9	การกระจายตัวของโนวาในดาราจักรทางช้างเผือก	16
รูปที่ 1.10	การกระจายตัวของคาบการโคจรของดาวแปรแสงคาทาคลิสมิก	17
รูปที่ 1.11	การกระจายตัวของคาบการโคจรของโนวา	19
รูปที่ 2.1	โนวา GK Per	23
รูปที่ 2.2	พิกัดการโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลของระบบดาวคู่ใด ๆ	24
รูปที่ 2.3	ประเภทของดาวคู่แบ่งตามรูปร่างสัณฐานและลักษณะการเต็มผิวห่อหุ้มโรชของดาวทุติยภูมิ	26
รูปที่ 2.4	บ่อศักย์ของผิวห่อหุ้มโรช	28
รูปที่ 2.5	ผิวสมศักย์แสดงตำแหน่งของจุดลากรันจ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลกใน 2 และ 3 มิติ	30
รูปที่ 2.6	ผิวห่อหุ้มโรชของดาวคู่ที่มีค่าสัดส่วนมวลต่าง ๆ	31
รูปที่ 2.7	เรขาคณิตของผิวห่อหุ้มโรช	32
รูปที่ 2.8	การก่อตัวของวงแหวนและจานรวมมวล	33
รูปที่ 3.1	กราฟแสงของโนวาระเบิดซ้ำ RS Oph ทั้ง 9 ครั้งตั้งแต่ปี ค.ศ. 1898-2021	47

รูปที่ 3.2	กราฟแสงต้นแบบของโนวาระเบิดซ้ำในดาราจักรทางช้างเผือกทั้ง 10 ระบบ	50
รูปที่ 3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด (A') กับอัตราเร็วของการหรี่ลง (t_3) ของโนวาระเบิดซ้ำเมื่อเทียบกับโนวาทั่วไป	54
รูปที่ 3.4	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสีและแมกนิจูดในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดของโนวาระเบิดซ้ำและโนวาที่มีแอมพลิจูดต่ำ	60
รูปที่ 4.1	G229.2-2.9 เศษซากซูเปอร์โนวาชนิด Ia	67
รูปที่ 4.2	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียสเมื่อเทียบกับเลขมวลของธาตุต่าง ๆ	68
รูปที่ 4.3	กราฟแสงของซูเปอร์โนวาชนิด I และชนิด II	69
รูปที่ 4.4	สเปกตรัมของซูเปอร์โนวาชนิด Ia, Ib, Ic และชนิด II	71
รูปที่ 4.5	กราฟแสงต้นแบบของซูเปอร์โนวาชนิด Ia	73
รูปที่ 4.6	แผนภาพอธิบายวิวัฒนาการดาวคู่กระทั่งเกิดซูเปอร์โนวาชนิด Ia ผ่านช่องทาง SD	75
รูปที่ 4.7	แบบจำลองการเกิดซูเปอร์โนวาชนิด Ia ผ่านช่องทาง SD ภายใต้พื้นผิวของดาวแคระขาว	76
รูปที่ 4.8	แผนภาพอธิบายวิวัฒนาการดาวคู่กระทั่งเกิดซูเปอร์โนวาชนิด Ia	78
รูปที่ 5.1	ภาพถ่ายโนวา T Pyx ปี ค.ศ. 1997 เปรียบเทียบกันระหว่างการถ่ายจากภาคพื้นดินและจากอวกาศ	87
รูปที่ 5.2	กราฟแสงของโนวา T Pyx ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2011	90
รูปที่ 5.3	กราฟแสงของ T Pyx ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2011 ที่แสดงระยะเวลาช่วง PMH $\sim$ 10 วัน	91
รูปที่ 5.4	กราฟแสงของ V1280 Sco ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2007 ที่แสดงระยะเวลาช่วง PMH $\sim$ 0.42 วัน	91
รูปที่ 5.5	กราฟแสงของ V597 Pup ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2007 ที่แสดงระยะเวลาช่วง PMH $\sim$ 0.21 วัน	92
รูปที่ 5.6	กราฟแสงของ V5583 Sgr ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2009 ที่แสดงระยะเวลาช่วง PMH $\sim$ 0.21 วัน	92

รูปที่ 5.7 แบบจำลองกราฟแสงโนวาขณะระเบิดในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ยูวี และรังสีเอกซ์ที่ M_{WD} = 0.65$M_{\odot}$ 94

รูปที่ 5.8 แบบจำลองกราฟแสงโนวาขณะระเบิดในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ยูวี และรังสีเอกซ์ที่ M_{WD} = 1 $M_{\odot}$ 95

รูปที่ 5.9 แบบจำลองกราฟแสงโนวาขณะระเบิดในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ยูวี และรังสีเอกซ์ที่ M_{WD} = 1.40$M_{\odot}$ 96

รูปที่ 5.10 วิวัฒนาการของสเปกตรัมช่วงไฟบอลของโนวา T Pyx จากช่วงสว่างขึ้นตอนต้นถึงช่วง PMH 102

รูปที่ 5.11 กระบวนการเกิดลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni 103

รูปที่ 5.12 เส้นสเปกตรัมที่แสดงลักษณะแบบ P Cygni 104

รูปที่ 5.13 วิวัฒนาการของกราฟแสงของ T Pyx ในช่วงคลื่นต่าง ๆ 107

รูปที่ 5.14 กราฟแสงของโนวา T Pyx เปรียบเทียบกับความเร็วของสสารที่พุ่งออก และปริมาณการผ่รังสี 109

รูปที่ 5.15 กราฟแสงของโนวา V339 Del เปรียบเทียบกับความเร็วของสสารที่พุ่งออก และปริมาณการผ่รังสี 110

รูปที่ 5.16 วิวัฒนาการกราฟแสงของโนวาในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ 111

รูปที่ 6.1 แผนผังองค์ประกอบของสเปกตรัมของโนวาขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 115

รูปที่ 6.2 สเปกตรัมของการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิหนึ่ง ๆ 117

รูปที่ 6.3 องค์ประกอบของสเปกตรัม 122

รูปที่ 6.4 สเปกตรัมของดาวแคระขาว eg139 และดาวใต้แคระ eg158 125

รูปที่ 6.5 สเปกตรัมของโนวาระเบิดซ้ำ T CrB ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 127

รูปที่ 6.6 สเปกตรัมของโนวา EU Sct ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 128

รูปที่ 6.7 สเปกตรัมของโนวา V3964 Sgr ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 129

รูปที่ 6.8 สเปกตรัมของโนวา V3645 Sgr ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 130

รูปที่ 6.9 สเปกตรัมของโนวา AR Cir (A) ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 131

รูปที่ 6.10 สเปกตรัมของโนวาระเบิดซ้ำ CI Aql ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 132

รูปที่ 6.11 สเปกตรัมของโนวาระเบิดซ้ำ V2487 Oph ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 133

รูปที่ 6.12 สเปกตรัมของโนวาระเบิดซ้ำ V368 Aql ขณะอยู่ในสภาวะเงียบ 134

รูปที่ 6.13 ก๊าซในภาวะที่มีความลึกแสงหนาและที่มีความลึกแสงบาง 136

รูปที่ 6.14 ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ที่เกิดจากการมีอยู่ของจานรวมมวล 139

รูปที่ 7.1	นิยามของความกว้างสมมูล	149
รูปที่ 7.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง EW(CaT) กับ $log\ g$ ของดาวในแถบกระบวนหลัก (V) ดาวใต้ยักษ์ (IV) และดาวยักษ์แดง (III)	151
รูปที่ 7.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[TiO]_{8465}$ และ $[Na]_{8190}$ ของดาวในแถบกระบวนหลักและดาวยักษ์แดง	152
รูปที่ 7.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[TiO]_1$ และชั้นสเปกตรัมของดาวยักษ์แดง (III)	152
รูปที่ 7.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[TiO]_2$ และชั้นสเปกตรัมของดาวยักษ์แดง (III)	153
รูปที่ 7.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง [VO] และชั้นสเปกตรัมของดาวยักษ์แดง (III)	153
รูปที่ 7.7	ตัวอย่างรูปร่าง 3 มิติของโนวาที่สร้างโดยโปรแกรม $SHAPE$	154