

5.2 สเปกตรัมของโนวาขณะระเบิด

จากตอนท้ายของหัวข้อ 5.1.1 ได้เกริ่นให้เราทราบแล้วว่าสาเหตุของ PMH คือ ความลึกแสง (optical depth) ที่ลดลง ในหัวข้อนี้เราจะมาทำความเข้าใจว่าความลึกแสงนี้เองยังมีผลต่อวิวัฒนาการของสเปกตรัมอีกด้วย และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการสูญเสียมวล (mass loss rate) ของดาวแคระขาว รวมทั้งรัศมีและอุณหภูมิยังผลของโฟโตสเฟียร์เทียม

5.2.1 วิวัฒนาการของสเปกตรัมก่อนถึงจุดสูงสุด

วิวัฒนาการของสเปกตรัมก่อนถึงจุดสูงสุดสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

- ทันทีที่ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ร้อนอะเวย์เริ่มเกิดขึ้นที่ผิวของดาวแคระขาว โนวาจะมีการขยายเปลือกออกเรื่อย ๆ เราจึงเรียกช่วงเวลานี้ว่า "การขยายตัวของโฟโตสเฟียร์เทียม"⁷ (pseudo - photosphere expansion)" โดยโนวาจะมีการแผ่รังสีคล้ายดาวที่มีสเปกตรัมประเภท A - F และมีลักษณะสเปกตรัมคล้ายสเปกตรัมของระเบิดอะตอมที่มนุษย์สร้างขึ้น นั่นคือ มีอุณหภูมิสูงและมีความลึกแสงมาก จึงเป็นที่มาที่เราเรียกระยะนี้ในอีกชื่อว่าระยะ "ไฟร์บอล (fireball) หรือลูกไฟ"⁸ ซึ่งสเปกตรัมช่วงนี้จะมีลักษณะกว้าง กระจายออก และแสดงองค์ประกอบของการดูดกลืนที่แสดงว่ามวลที่เสียไปขณะระเบิดมีความเร็วเป็นลบ (ดังแสดงในรูปที่ 5.10) โนวาในระยะนี้จะมีระดับไอออไนเซชันสูง เราจึงจะพบเส้นสเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบที่มีระดับไอออไนเซชันสูง (ดังแสดงในตารางที่ 5.2) ซึ่งพบได้ในช่วงที่โนวาสว่างขึ้นในตอนต้นจนถึงก่อนจุดสูงสุด
- ในช่วงเริ่มแรกของการระเบิด เอนเวลโลบของไฟร์บอลจะเริ่มจากมีขนาดเล็ก ความหนาแน่นสูง และอุณหภูมิสูงจนสามารถแผ่รังสีเอกซ์ได้ หลังจากนั้นเอนเวลโลบจะ

⁷เสนอครั้งแรกโดย Ney & Hatfield (1978)

⁸เสนอครั้งแรกโดย Gehrz (1988)

ขยายขนาดใหญ่ขึ้นและมีอุณหภูมิลดลงไปด้วยในขณะเดียวกัน ทำให้ความลึกแสงมีค่าสูงขึ้น มวลที่เสียไปขณะระเบิดจึงมีความทึบแสงค่อนข้างมากในช่วงเวลาแรกของการระเบิด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การแผ่รังสีมีการเลื่อนตำแหน่งของความยาวคลื่นที่มีปริมาณการแผ่รังสีสูงสุด (λ_{max}) ไปในทางที่ความยาวคลื่นมากขึ้น⁹ ทำให้ต่อมาเราเห็นกราฟแสงสว่างขึ้นสู่จุดสูงสุดในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น

- หลังจากระยะไฟร์บอลสิ้นสุดลง จะต่อด้วยระยะต่อไปซึ่งยังคงเป็นระยะที่มีความทึบแสงมากอยู่ เรียกว่าระยะ "ไอออนเคอร์เทน (iron curtain) หรือม่านเหล็ก"¹⁰ สาเหตุที่เรียกชื่อนี้เป็นเพราะเป็นระยะที่โฟโตสเฟียร์เทียมขยายขนาดจนมีอุณหภูมิต่ำสุด $\sim 10^4$ K ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้ทำให้เกิดการสร้างธาตุในกลุ่มเหล็กมาก จึงเกิดเส้นสเปกตรัมดูดกลืนถี่ ๆ ของเหล็กในแถบความยาวคลื่นใกล้ยูวี ดูแล้วคล้าย ๆ ผ้าม่านนั่นเอง ดังนั้นเมื่อเกิดบริเวณที่มีการดูดกลืนรังสียูวีอย่างหนาแน่นขึ้น จึงส่งผลให้ λ_{max} เลื่อนไปสู่ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้และช่วงอินฟราเรด ไอออนเคอร์เทนมักจะมีความเข้มสูงสุดในช่วงที่กราฟแสงอยู่ในช่วงสว่างขึ้นตอนปลาย

5.2.2 ลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni

ช่วงแรกของการระเบิดของโนวานั้น สสารจะพุ่งออกทุกทิศทาง ทำให้รูปร่างของเส้นสเปกตรัมมีการแสดงออกของทั้งการดูดกลืนและการแผ่รังสี ดังที่เรียกว่า "ลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni (P Cygni profile)"¹¹

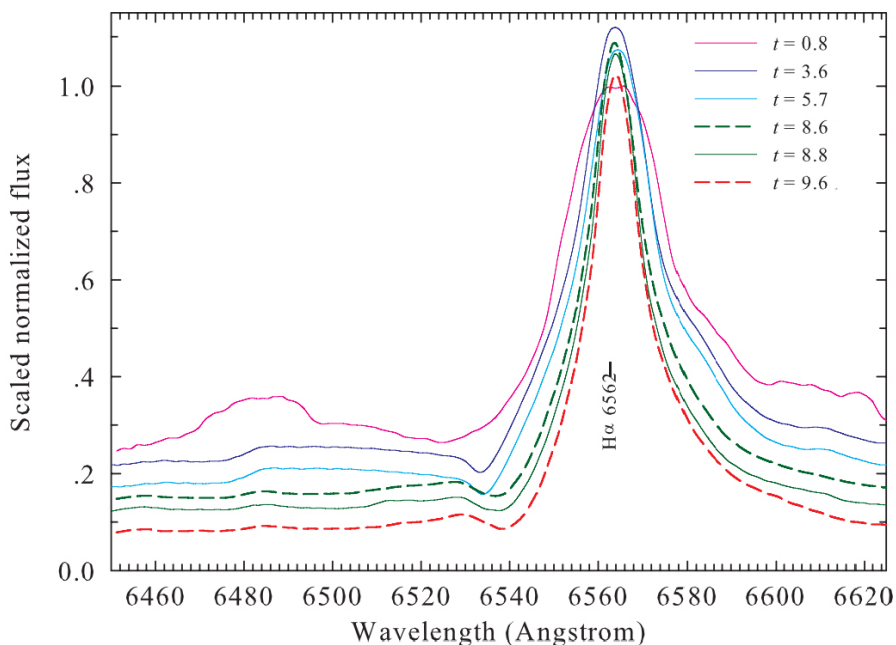
รูปที่ 5.11 อธิบายกระบวนการเกิดของลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni โดยเริ่มต้นจากช่วงแรกของการระเบิดที่สสารจะพุ่งออกทุกทิศทาง (แสดงด้วยเส้นลูกศรสีดำ รูปที่ 5.11 ก.) โดยตำแหน่งเส้นสีเหลือง คือตำแหน่งศูนย์กลางของโฟโตสเฟียร์ ดังนั้นก๊าซที่พุ่งออกจากดาวในแนวทิศตั้งฉากกับผู้สังเกตตามเส้นสีเหลืองนี้ ผู้สังเกตจะเห็นปริมาณการแผ่รังสีที่สูงที่สุดเนื่องจากไม่มีการ

⁹เสนอโดย Shore et al. (1994)

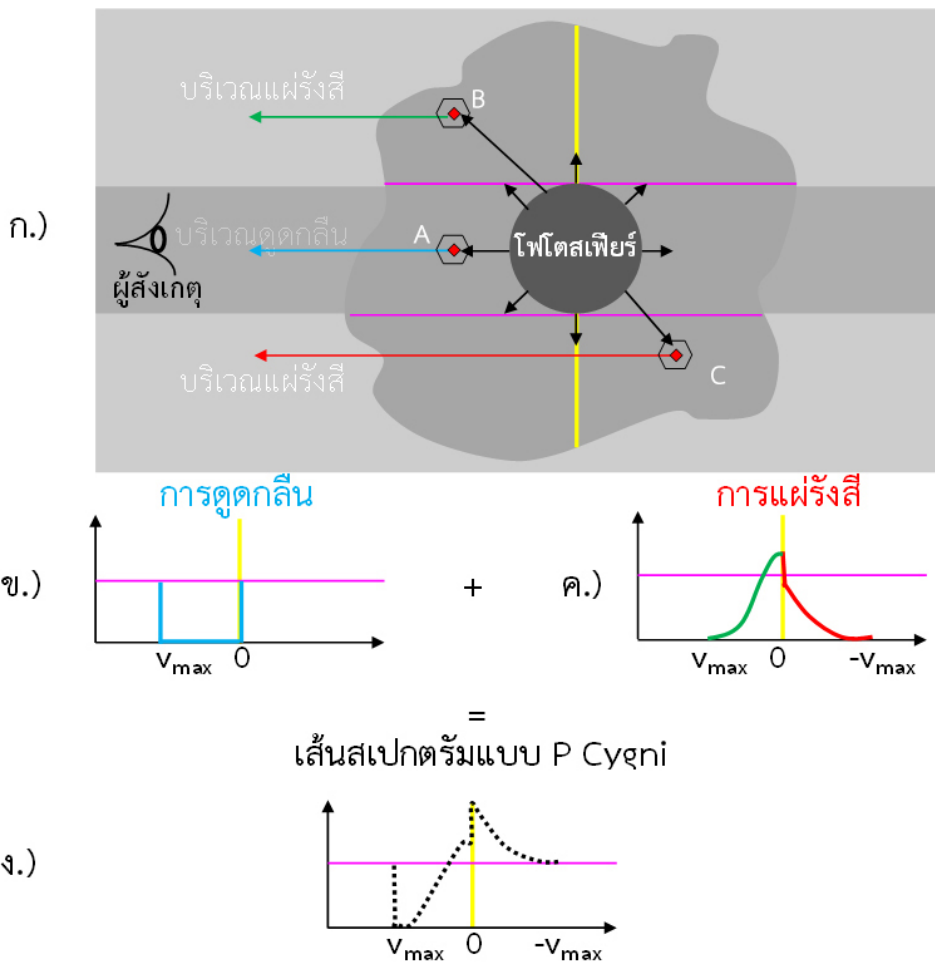
¹⁰สนับสนุนโดย Schwarz et al. (2001)

¹¹เรียกชื่อตามดาว P Cygni ซึ่งเป็นดาวแรกที่พบว่าแสดงลักษณะเช่นนี้ในสเปกตรัม ลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni นี้สามารถใช้ศึกษาการขยายตัวของก๊าซ เปลือกโนวา หรือลมสุริยะกำลังแรงได้

ดูดกลืนใด ๆ และจะไม่สามารถรู้ว่าเส้นสเปกตรัมเคลื่อนที่ออกด้วยความเร็ว หรือเปรียบได้ว่าตำแหน่งเส้นสีเหลืองคือตำแหน่งที่มีความเร็วในแนวเล็ง (radial velocity) เป็นศูนย์ ขณะที่ตำแหน่ง A คือ บริเวณที่มีการแผ่รังสีเข้ามาสู่ผู้สังเกต (ลูกศรสีฟ้า) พลังงานจะถูกดูดกลืนไปโดยก๊าซที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดและผู้สังเกต ดังนั้นจึงแสดงเป็นเส้นสเปกตรัมการดูดกลืน (absorption line) ที่มีความเร็วติดลบมากที่สุด (ดังแสดงด้วยเส้นสีฟ้าในรูปที่ 5.11 ข.) ขณะที่ตำแหน่ง B คือ บริเวณที่สสารพุ่งเข้าสู่ตาผู้สังเกตในแนวเฉียง (ตามแนวลูกศรสีดำ) บริเวณ B จึงมีการแผ่รังสีที่กระจายตัวแบบระฆังคว่ำ ปรากฏเป็นเส้นสเปกตรัมการแผ่รังสี (emission line) โดยแสดงเพียงองค์ประกอบที่มีความเร็วเป็นลบ (ดังแสดงด้วยเส้นสีเขียวในรูปที่ 5.11 ค.) และตำแหน่ง C คือ บริเวณที่สสารพุ่งออกจากตาผู้สังเกตในแนวเฉียง (ตามแนวลูกศรสีดำ) มีการแผ่รังสีที่กระจายตัวแบบระฆังคว่ำที่แสดงเพียงองค์ประกอบที่มีความเร็วเป็นบวก (ดังแสดงด้วยเส้นสีเขียวในรูปที่ 5.11 ง.)

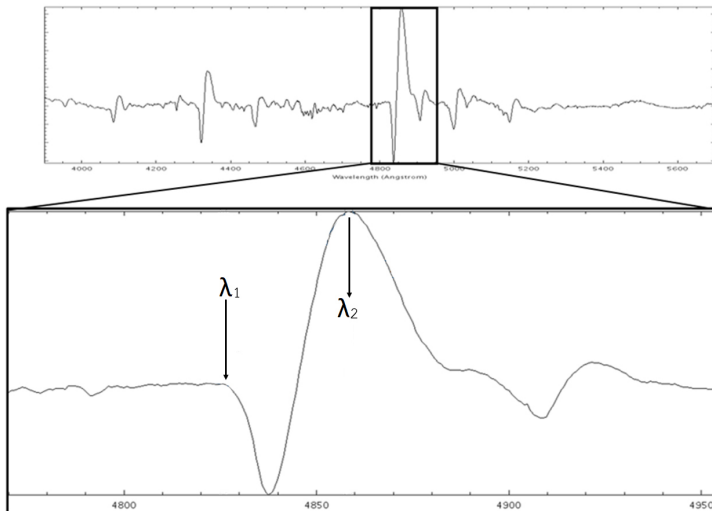


รูปที่ 5.10: วิวัฒนาการของสเปกตรัมช่วงไฟบอลของโนวา T Pyx จากช่วงสว่างขึ้นตอนต้น ($t = 0.8$ วัน) ถึงช่วง PMH ($t = 3.6-9.6$ วัน) แสดงวิวัฒนาการของลักษณะเส้นสเปกตรัมแบบ P Cygni (ที่มา : ดัดแปลงจากงานวิจัยผู้เขียนใน Surina et al., 2014b)



รูปที่ 5.11: กระบวนการเกิดลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni เมื่อสสารพุ่งออกจากโฟโตสเฟียร์ทุกทิศทาง (ก.) พลังงานของก๊าซที่พุ่งเข้าหาผู้สังเกตจะมีทั้งที่พุ่งออกมาแล้วถูกดูดกลืนไว้ด้วยกลุ่มก๊าซที่ขวางอยู่ (ลูกศรสีฟ้า) และทั้งที่แผ่รังสีออกจากกลุ่มก๊าซนั้น (ลูกศรสีเขียวและสีแดง) เมื่อรวมปริมาณการแผ่รังสี (สีฟ้าใน ข.) เข้ากับปริมาณการดูดกลืนรังสี (สีเขียวรวมกับสีแดงใน ค.) จะได้ผลลัพธ์เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni (เส้นประใน ง.) โดยเส้นสีเหลืองคือตำแหน่งแกนกลางของโฟโตสเฟียร์ที่มีความเร็วเท่ากับศูนย์

(ที่มา : วาดขึ้นใหม่โดยดัดแปลงจาก David Darling)



รูปที่ 5.12: เส้นสเปกตรัมที่แสดงลักษณะแบบ P Cygni ซึ่งเป็นรูปร่างที่แสดงถึงองค์ประกอบการดูดกลืนและการแผ่รังสี (ที่มา : ผู้เขียน)

เมื่อรวมปริมาณการแผ่รังสี (รูปที่ 5.11 ข.) เข้ากับปริมาณการดูดกลืนรังสี (รูปที่ 5.11 ค.) จะได้ผลลัพธ์เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีรูปร่างที่แสดงทั้งการดูดกลืนและการแผ่รังสี (รูปที่ 5.11 ง.) ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับสเปกตรัมจริงในรูปที่ 5.12

รูปที่ 5.12 แสดงตำแหน่งความยาวคลื่น ณ จุดที่มีการดูดกลืนและ ณ จุดที่มีการแผ่รังสี ทำให้เราสามารถคำนวณหาความเร็วของมวลที่เสียไปขณะระเบิด (ejection velocity, v_{ej}) ได้ ดังสมการที่ 5.2 จากผลของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler effect)

$$v_{ej} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} c \quad (5.2)$$

เมื่อ v_{ej} คือ ความเร็วของมวลที่เสียไปขณะระเบิดหรือความเร็วของสสารที่พุ่งออก

λ_1 และ λ_2 คือ ตำแหน่งความยาวคลื่น ณ จุดที่เริ่มมีการดูดกลืนและจุดที่มีการแผ่รังสีสูงสุด ตามลำดับ บนสเปกตรัมที่มีลักษณะสเปกตรัมแบบ P Cygni ดังแสดงในรูปที่ 5.12

c คือ ความเร็วแสง

เนื้อหาภายในของหนังสือเรื่อง “ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา” ไม่สามารถเผยแพร่ในรูปแบบ ไฟล์ pdf ได้
เนื่องจากมีเงื่อนไขลิขสิทธิ์กับผู้จัดจำหน่าย โดยสามารถสั่งซื้อหนังสือได้จากช่องทางต่อไปนี้

ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา

(Introduction to Astrophysics of Nova Eruption)

ผู้เขียน ฟาร์ุง สุรินา บุญทิศ
ISBN 978-616-590-386-8
พิมพ์ครั้งที่ 1 มีนาคม 2565 จำนวนพิมพ์ 20 เล่ม
พิมพ์ครั้งที่ 2 เมษายน 2565 จำนวนพิมพ์ 100 เล่ม (ฉบับปรับปรุง)

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

ฟาร์ุง สุรินา บุญทิศ.
ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา.-- เชียงราย : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, 2565.
219 หน้า.
1. ดาราศาสตร์ฟิสิกส์. 2. ซุปเปอร์โนวา. I. ชื่อเรื่อง.
523.01
ISBN 978-616-590-386-8

จัดพิมพ์โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟาร์ุง สุรินา บุญทิศ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
80 ม. 9 ต. บ้านดู่ อ. เมือง จ. เชียงราย 57100
โทรศัพท์ 08-8622-1950 อีเมล sc_farung@crru.ac.th

ภาพหน้าปก ชื่อภาพ : "Alongside"
ศิลปิน พุทธิรักษ์ ดาษดา
ผู้สะสม ฟาร์ุง สุรินา บุญทิศ

พิมพ์ที่ บริษัท ดีเอ็มเบอริ์ จำกัด
248/7 ซอยมิตตคาม ถนนสามเสน
แขวงวรวิหาร ศาลาเขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300
โทรศัพท์ 0 2884 5933-4, 0 85997 7220
อีเมล 4kumnum@gmail.com

การสั่งซื้อหนังสือ ร้านหนังสือคาน้ำ www.kumnum.com
เฟซบุคเพจ Astro-indy

ราคา 490 บาท

ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา
(Introduction to Astrophysics of Nova Eruption)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้ารุ่ง สุรินา บุญทิศ
วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ประกาศนียบัตรวิชาชีพครู มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
M.Sc. (Astronomy) Sejong University, Korea
Ph.D. (Astrophysics) Liverpool John Mores University, UK

Kumnum Publishing

2565

"... ข้า ฯ ขอประณตน์อมสั้กการ บุรพคณาจารย์
ผู้ก่อประโยชน์ศึกษา ..."

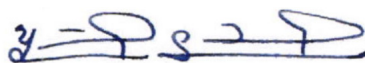
แต่ ด.ญ.แก้วประกายบุญ
และ ด.ญ.บุญประกายแก้ว

คำนิยม

โนวา เป็นปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์เกี่ยวกับความสว่างที่เพิ่มขึ้นอย่างเฉียบพลันของวัตถุท้องฟ้า คล้ายมีดาวฤกษ์เกิดขึ้นใหม่บนท้องฟ้า ซึ่งเป็นที่มาของชื่อวัตถุท้องฟ้าประเภทนี้ ความสว่างของโนวาจะลดลงเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่องในเวลาต่อมา โดยอาจใช้เวลาประมาณหลายสัปดาห์หรือหลายเดือน โนวาจึงเป็นวัตถุท้องฟ้าสำคัญชนิดหนึ่งที่นักดาราศาสตร์ให้ความสนใจศึกษาและค้นคว้าวิจัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาการวิวัฒนาการของระบบดาวฤกษ์

หนังสือ "ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา" เล่มนี้ ที่เรียบเรียงโดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฟ้ารุ่ง สุริยา บุญทิศ เป็นหนังสือดาราศาสตร์เล่มหนึ่งที่น่าสนใจ ที่อธิบายรายละเอียดขั้นตอนการเกิดปรากฏการณ์โนวาชนิดต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน ใช้ความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ รวมทั้งความรู้ที่ผู้เรียบเรียงศึกษาเล่าเรียนมา สัมผัสประสบการณ์จนมีความเชี่ยวชาญ มาประกอบในการอธิบายได้เป็นอย่างดี นอกจากการอธิบายในเชิงทฤษฎีและผลการสังเกตการณ์โนวาในแต่ละบทแล้ว ผู้เรียบเรียงยังเพิ่มบทการฝึกปฏิบัติเบื้องต้นเกี่ยวกับโนวาโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะทำให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจกลไกการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การถ่ายเทมวลสาร และการงอกพอกพูนมวลของระบบดาวได้อย่างชัดเจน

หนังสือ "ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา" เล่มนี้ จึงถือได้ว่าเป็นหนังสือที่เสริมความรู้ทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์ทั่วไปได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านการวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบใกล้ซึ่งยังเป็นโจทย์สำคัญในการศึกษาฟิสิกส์ดาราศาสตร์ในปัจจุบัน



รองศาสตราจารย์ บุญรักษา สุนทรธรรม
สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

คำนำ

หนังสือเล่มนี้มีแรงบันดาลใจจากประสบการณ์ตรง ที่ผู้เขียนได้สอนและทำงานวิจัยดาราศาสตร์ร่วมกับนักศึกษามากกว่า 10 ปี โดยที่ผ่านมาในทุก ๆ ปีจะมีนักศึกษาระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 วิชาเอกฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์จำนวนหนึ่ง เลือกทำวิทยาดาราศาสตร์เป็นการศึกษาอิสระในรายวิชาโครงการวิธีวิจัยฟิสิกส์ โดยที่นักศึกษาเหล่านั้นมีความรู้ด้านดาราศาสตร์เพียงพื้นฐานในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย แต่งานวิจัยด้านโนวาที่ผู้เขียนมีความถนัดนั้นแม้จะมีเนื้อหาที่ไม่ยาก แต่เนื้อหาทั้งหมดถือว่าเป็นเนื้อหาใหม่ที่นักศึกษาไม่เคยรู้มาก่อน ดังนั้น ผู้เขียนจึงจำเป็นต้องสอนเพื่อปูพื้นฐานความรู้ด้านฟิสิกส์และดาราศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับโนวาซ้ำ ๆ ในทุก ๆ ปีก่อนที่จะเริ่มทำงานวิจัย ทั้งนี้ หนังสือและเอกสารด้านโนวาที่เป็นภาษาไทยยังไม่เคยมีมาก่อน ส่วนหนังสือและงานวิจัยด้านนี้ในภาษาอังกฤษนั้น หากก้าวข้ามอุปสรรคด้านภาษาไปแล้วก็ยังมีเนื้อหาค่อนข้างขั้นสูงเกินกว่าที่นักศึกษาจะทำความเข้าใจได้ด้วยตัวเอง ประกอบกับในไม่กี่ปีที่ผ่านมาเอง โรงเรียนมัธยมศึกษาบางแห่งในภาคเหนือตอนบน เริ่มนำนักเรียนที่มีความสนใจเป็นพิเศษด้านดาราศาสตร์เข้าพบ เพื่อให้นักเรียนเหล่านั้นมีประสบการณ์ทำงานวิจัยด้านดาราศาสตร์ที่ลึกซึ้ง แสดงให้เห็นว่าการรวบรวมและเรียบเรียงความรู้พื้นฐานให้กับนักเรียนนักศึกษาที่สนใจจะศึกษาเรื่องโนวา จะก่อให้เกิดประโยชน์ที่จับต้องได้ต่อวงการวิชาการ

ผู้เขียนจึงเห็นเป็นโอกาสดีที่จะจัดทำหนังสือเล่มนี้ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายความรู้ด้านฟิสิกส์ดาราศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับโนวา โดยเนื้อหาทั้งหมดจะเป็นความรู้เบื้องต้น สำหรับผู้ที่สนใจดาราศาสตร์และมีพื้นฐานฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสามารถทำความเข้าใจได้ เหมาะแก่การอ่านก่อนที่จะเริ่มทำงานวิจัย และผู้เขียนสามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชาดาราศาสตร์1 (ร่วมกับเอกสารคำสอนวิชาดาราศาสตร์1) ใช้บางส่วนในวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์4 และวิชาวิธีวิจัยฟิสิกส์ได้ด้วย

โดยตลอดเล่มจะมีการแทรก "มุมคนชอบคำนวณ" (สำหรับผู้ที่ชื่นชอบการใช้คณิตศาสตร์

เพื่อหาคำตอบเป็นพิเศษ) และ "มุมมองของบราฮ์มา" (สำหรับผู้ที่ยังชื่นชอบเรื่องราวเบาสบาย แต่ยังคงเชื่อมโยงกับดาราศาสตร์ในหัวข้อนั้น ๆ) เพื่อตอบสนองรสนิยมการเรียนรู้ของแต่ละคนให้มากที่สุด

ผู้เขียนได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท เพื่อความเข้าใจง่ายและเพื่อเนื้อหาที่ครอบคลุมชัดเจน และได้แทรกงานวิจัยของตนเองในแต่ละบท ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 บทนำสู่ความหมายของโนวา : อธิบายว่าโนวาคืออะไร มีลักษณะกราฟแสงอย่างไร และแบ่งเป็นกี่ประเภทเมื่อใช้ลักษณะกราฟแสงเป็นเกณฑ์ (แทรกงานวิจัยลำดับที่ [8] และ [10])
- บทที่ 2 ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์รันอะเวย์ : อธิบายว่าโนวาระเบิดได้อย่างไร (แทรกงานวิจัยลำดับที่ [1] และ [2])
- บทที่ 3 โนวาระเบิดซ้ำ : อธิบายว่าโนวาระเบิดซ้ำคืออะไร และเหตุใดจึงมีความสำคัญ (แทรกงานวิจัยลำดับที่ [3], [5] และ [9])
- บทที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโนวาและซูเปอร์โนวาชนิด Ia : อธิบายว่าโนวาระเบิดซ้ำ มีความสัมพันธ์อย่างไรกับซูเปอร์โนวาชนิด Ia ซึ่งเป็นเสมือนเทียนมาตรฐานที่ใช้วัดระยะทางระหว่างดาราจักร จึงมีความสำคัญมากต่อในเอกภพวิทยา
- บทที่ 5 โนวาขณะระเบิด : อธิบายว่าเกิดอะไรขึ้นเมื่อโนวาระเบิด ทั้งด้านโฟโตเมตริกและสเปกโตรสโคปี (แทรกงานวิจัยลำดับที่ [4], [6], [8] และ [10])
- บทที่ 6 โนวาขณะอยู่ในสภาวะเงียบ : อธิบายว่าเราสามารถสังเกตเห็นอะไรบ้างขณะโนวาอยู่ในสภาวะเงียบ (แทรกงานวิจัยลำดับที่ [3] และ [7])
- บทที่ 7 ฝึกปฏิบัติการเบื้องต้นเกี่ยวกับโนวา : นำเสนอปฏิบัติการเบื้องต้นที่ผู้อ่านสามารถทดลองทำเองได้จากข้อมูลทางดาราศาสตร์ที่เผยแพร่ทางออนไลน์ (แทรกงานวิจัยลำดับที่ [11] และ [12])

โดยผลงานวิจัยของผู้เขียนทั้ง 12 รายการ ได้แก่

1. Surina, F. & Kang, Y. -W. (2009) "Absolute Dimensions of Four Eclipsing Binaries", *ASP. Conf. Ser.* **404** 178.
2. Kang, Y. -W., Surina, F. & Lee, J. J. (2009) "New Method of Light Curve Analyses of Eclipsing Binaries in the Small Magellan Cloud", *ASP. Conf. Ser.* **404** 184.
3. Surina, F., Bode, M.F., Darnley, M.J. (2012) "Investigation of the Progenitors of Nova Explosions" in The 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM2011) ed. S. Komonjinda, Yuri Y. Kovalev and D. Ruffolo. *NARIT Conf. Ser.* **1** 1.
4. Surina, F., Hounsell, R.A., Bode, M.F., Darnley, M.J., Harman, D.J., Walter, F.M. (2014) "Spectroscopic and Photometric Development of T Pyxidis (2011) from 0.8 to 250 Days after Discovery" in *Stella Novae: Past and Future Decades*, ed. P. A. Woudt and V. A. R. M. Ribeiro. *ASP. Conf. Ser.* **490** 169.
5. Darnley, M. J., Bode, M. F., Harman, D. J., Hounsell, R. A., Munari, U., Ribeiro, V. A. R. M., Surina, F., Williams, R. P., Williams, S. C. (2014) "On the Galactic Nova Progenitor Population" in *Stella Novae: Past and Future Decades*, ed. P. A. Woudt and V. A. R. M. Ribeiro. *ASP. Conf. Ser.* **490** 49.
6. Surina, F., Hounsell, R.A., Bode, M.F., Darnley, M.J., Harman, D.J., Walter, F.M. (2014) "A Detailed Photometric and Spectroscopic Study of the 2011 Outburst of the Recurrent Nova T Pyxidis from 0.8 to 250 Days after Discovery", *Astrophys. J.* **147** 107.
7. Surina, F., Bode, M.F., Darnley, M.J. (2015) "Investigation of Galactic Classical and Recurrent Novae with Ground-based Observations and the Solar Mass Ejection Imager (SMEI)", *Pub. of Korean Astron. Soc.* **30** 237.
8. Hounsell, R., Darnley, M. J., Bode, M. F., Harman, D. J., Surina, F., Starrfield, S., Holdsworth, D. L., Bewsher, D., Hick, P. P., Jackson, B. V. (2016) "Nova Light Curves from the Solar Mass Ejection Imager (SMEI). II. The Extended Catalog", *Astrophys. J.* **820** 2.
9. Thipboon, R., Kaewrakmuk, M., Surina, F. & Sanguansak, N. (2017) "Photometric Investigation of Novae T Pyx, BT Mon and V574 Pup at Quiescence by using the 2.4-m Thai National Telescope", *J. Phys. Conf. Ser.* **901** 012003.

10. Mueangkon, Y., Kamrat, S., Suekong, D., Aintawiphak, S., Jaiboe, A., Surina, F., Darnley, M.J., Bode, M.F. (2018) "Evolution of V339 Del (Nova Del 2013) since 0.37 – 75 Days after Discovery", *J. Phys. Conf. Ser.* **1144** 012014.
11. Sutham, S., Sobong, J., Surina, F. & Awipan, S. (2019) "Optical Morphology of the Ejected Shell of V339 Del using SHAPE", *J. Phys. Conf. Ser.* **1380** 2029.
12. Aindang, A., Inkum, R., Sarotsakulchai, T. & Surina, F. (2018) "Kepler-TESS Light Curve Analysis of KIC 10417986 as a Practical Example for Astronomical Research in Schools", *J. Phys. Conf. Ser.* **1719** 2017.

หนังสือเล่มนี้มีอาจทำสำเร็จขึ้นได้หากปราศจากผู้มีพระคุณ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ทรงคุณวุฒิ รองศาสตราจารย์ บุญรักษา สุนทรธรรม พร้อมกับศาสตราจารย์ ดร.บุรินทร์ กำจัดภัย และรองศาสตราจารย์ บุญยัง กฤตสัมพันธ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาอ่านตรวจทานหนังสือเล่มนี้ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้น

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่รายที่สนับสนุนการเขียนหนังสือและตำราวิชาการ และขอบพระคุณสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ผู้เขียนขอขอบคุณครอบครัว แบบแบมและบุญบุญที่เป็นแรงบันดาลใจในงานทุกอย่าง พ่อเต่า แม่ภา แม่ลีนา ยายติ่ม ตาอ๊อด ที่คอยเป็นกำลังเสริมช่วยเหลือหลาน และสุดท้ายแต่ไม่ท้ายสุดขอบคุณพี่ป๊ากามี่ที่น่ารัก ที่อยู่เคียงข้าง เลี้ยงลูก ให้กำลังใจ และเป็นหลักชีวิตให้กันมาโดยตลอดขอบคุณค่ะ

ฟ้ารุ่ง สุริยา บุญทิศ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

6 กุมภาพันธ์ 2565

คำนำ

(ฉบับปรับปรุงแก้ไขครั้งที่ 1)

หนังสือ "ฟิสิกส์ดาราศาสตร์เบื้องต้นของโนวา" ที่เผยแพร่เป็นครั้งที่สองนี้ได้มีการปรับปรุงเนื้อหาและแก้ไขคำพิมพ์ผิดในการพิมพ์ครั้งแรก นอกจากนี้ ยังได้เพิ่มเติมรายละเอียดเนื้อหาในแต่ละบทในด้านฟิสิกส์พื้นฐานมากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับผู้อ่านที่หลากหลายยิ่งขึ้น หนังสือเล่มนี้จึงเป็นหนังสือดาราศาสตร์ที่เหมาะสมกับผู้ที่มีความรู้พื้นฐานด้านดาราศาสตร์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายมาแล้ว โดยเฉพาะนักศึกษาในระดับปริญญาตรีที่สนใจศึกษาและโดยเฉพาะที่กำลังจะเริ่มทำงานวิจัยเกี่ยวกับการวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด ซึ่งยังเป็นโจทย์สำคัญในการศึกษาฟิสิกส์ดาราศาสตร์ในปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ บุญรักษา สุนทรธรรม ที่ให้ความกรุณาเขียนคำนิยมให้กับหนังสือเล่มนี้ ศาสตราจารย์ ดร.บุรินทร์ กำจัดภัย และรองศาสตราจารย์ บุญยัง กฤตสัมพันธ์ ที่ให้ข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงหนังสือเล่มนี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏ เชียงราย ที่ให้การสนับสนุนผู้เขียนระหว่างการปรับปรุงหนังสือเล่มนี้

ฟ้ารุ่ง สุริยา บุญทิศ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

30 เมษายน 2565

สารบัญ

	หน้า	
คำนิยาม	ก	
คำนำ	ค	
คำนำ (ฉบับปรับปรุงแก้ไขครั้งที่ 1)	ช	
สารบัญ	ซ	
สารบัญตาราง	ฅ	
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	ประเภทของโนวาเมื่อพิจารณาอัตราเร็วของการหริ่งของกราฟแสง	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	เรขาคณิตของผิวห่อหุ้มโรซ	24
2.1.1	ประเภทของดาวคู่แบ่งตามสัณฐานการเติมผิวห่อหุ้มโรซ	27
2.1.2	จุดลากรันจ์	29
2.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมกับขนาดผิวห่อหุ้มโรซของดาวทุติยภูมิ	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	ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับอัตราเร็วของการหลั่ง	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 และปริมาณการแผ่รังสี	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	สเปกตรัมของจันทรมวล	135
	6.3.4	ผลของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์	138
	6.4	สรุป	140
	6.5	เอกสารอ้างอิง	140
บทที่ 7		ฝึกปฏิบัติการเบื้องต้นเกี่ยวกับโนวา (D.I.Y. Labs)	143

7.1	การประมาณระดับชั้นสเปกตรัมและชั้นกำลังส่องสว่างของดาวฤกษ์	143
7.2	การหารูปร่างของเปลือกโนวาด้วยโปรแกรม <i>SHAPE</i>	154
7.3	การได้มาซึ่งกราฟแสงของระบบดาวคู่ในฐานะข้อมูลกล้องโทรทรรศน์อวกาศเคปเลอร์	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 ระบบในตารางจักรทางช้างเผือก	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	ประเภทของดาวทุติยภูมิของโนวาแอมพลิจูดต่ำ	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	ผิวสมคัณฑ์ของระบบดาวคู่	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	ประเภทของดาวคู่แบ่งตามรูปร่างสัญญาณและลักษณะการเต็ม ผิวห่อหุ้มโรซของดาวทุติยภูมิ	26
รูปที่ 2.4	บ่อศัณฑ์ของผิวห่อหุ้มโรซ	28
รูปที่ 2.5	ผิวสมคัณฑ์แสดงตำแหน่งของจุดลากรั้นจระหว่งดวงอาทิตย์ กับโลกใน 2 และ 3 มิติ	30
รูปที่ 2.6	ผิวห่อหุ้มโรซของดาวคู่ที่มีค่าสัดส่วนมวลต่าง ๆ	31
รูปที่ 2.7	เรขาคณิตของผิวห่อหุ้มโรซ	32
รูปที่ 2.8	การก่อตัวของวงแหวนและจานรวมมวล	33
รูปที่ 3.1	กราฟแสงของโนวาระเบิดซ้ำ RS Oph ทั้ง 9 ครั้งตั้งแต่ปี ค.ศ. 1898-2021	47

รูปที่ 3.2	กราฟแสงต้นแบบของโนวาระเบิดซ้ำในดารารัจกรทางช้างเผือก ทั้ง 10 ระบบ	50
รูปที่ 3.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด (A') กับอัตราเร็ว ของการทรึง (t_3) ของโนวาระเบิดซ้ำเมื่อเทียบกับโนวาทั่วไป	54
รูปที่ 3.4	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างสีและแมกนิจูดในช่วงความยาว- คลื่นใกล้อินฟราเรดของโนวาระเบิดซ้ำและโนวาที่มีแอมพลิจูด ต่ำ	60
รูปที่ 4.1	G229.2-2.9 เศษซากซูเปอร์โนวาชนิด Ia	67
รูปที่ 4.2	ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวในนิวเคลียสเมื่อเทียบกับเลขมวลของธาตุ ต่าง 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 ภาย ใต้พื้นผิวของดาวแคระขาว	76
รูปที่ 4.8	แผนภาพอธิบายวิวัฒนาการดาวคู่กระทั่งเกิดซูเปอร์โนวาชนิด Ia	78
รูปที่ 5.1	ภาพถ่ายโนวา T Pyx ปี ค.ศ. 1997 เปรียบเทียบกันระหว่าง การถ่ายจากภาคพื้นดินและจากอวกาศ	87
รูปที่ 5.2	กราฟแสงของโนวา T Pyx ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2011	90
รูปที่ 5.3	กราฟแสงของ T Pyx ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2011 ที่แสดง ระยะเวลาช่วง PMH ~ 10 วัน	91
รูปที่ 5.4	กราฟแสงของ V1280 Sco ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2007 ที่ แสดงระยะเวลาช่วง PMH ~ 0.42 วัน	91
รูปที่ 5.5	กราฟแสงของ V597 Pup ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2007 ที่แสดง ระยะเวลาช่วง PMH ~ 0.21 วัน	92
รูปที่ 5.6	กราฟแสงของ V5583 Sgr ขณะระเบิดในปี ค.ศ. 2009 ที่ แสดงระยะเวลาช่วง PMH ~ 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 จากช่วง สว่างขึ้นตอนต้นถึงช่วง 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 เปรียบเทียบกับความเร็วของสสาร ที่พุ่งออก และปริมาณการแผ่รังสี	109
รูปที่ 5.15	กราฟแสงของโนวา V339 Del เปรียบเทียบกับความเร็วของ สสารที่พุ่งออก และปริมาณการแผ่รังสี	110
รูปที่ 5.16	วิวัฒนาการกราฟแสงของโนวาในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ	111
รูปที่ 6.1	แผนผังองค์ประกอบของสเปกตรัมของโนวาขณะอยู่ในสภาวะ เงียบ	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 ขณะอยู่ในสภาวะ เงียบ	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 $EW(\text{CaT})$ กับ $\log g$ ของดาวในแถบ กระบวนหลัก (V) ดาวใต้ยักษ์ (IV) และดาวยักษ์แดง (III)	151
รูปที่ 7.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[\text{TiO}]_{8465}$ และ $[\text{Na}]_{8190}$ ของดาวในแถบ กระบวนหลักและดาวยักษ์แดง	152
รูปที่ 7.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[\text{TiO}]_1$ และชั้นสเปกตรัมของดาวยักษ์ แดง (III)	152
รูปที่ 7.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[\text{TiO}]_2$ และชั้นสเปกตรัมของดาวยักษ์ แดง (III)	153
รูปที่ 7.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง $[\text{VO}]$ และชั้นสเปกตรัมของดาวยักษ์แดง (III)	153
รูปที่ 7.7	ตัวอย่างรูปร่าง 3 มิติของโนวาที่สร้างโดยโปรแกรม <i>SHAPE</i>	154