ธรรมชาติของการก่อเกิดดาวฤกษ์ที่ดำเนินอยู่บริเวณใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์

นายปิยพงศ์ เขียวสะอาด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

THE NATURE OF ONGOING NUCLEAR STAR FORMATION IN ELLIPTICAL/S0 GALAXIES

Mr. Piyapong Kiawsaard

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Physics
Department of Physics
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ธรรมชาติของการก่อเกิดดาวฤกษ์ที่ดำเนินอยู่บริเวณใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์
โดย	นายปิยพงศ์ เขียวสะอาด
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.วิภู รุโจปการ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร.วิภู รุโจปการ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สันติพงศ์ บริบาล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อุเทน แสวงวิทย์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปิยพงศ์ เขียวสะอาด : ธรรมชาติของการก่อเกิดดาวฤกษ์ที่ดำเนินอยู่บริเวณใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์. (THE NATURE OF ONGOING NUCLEAR STAR FORMATION IN ELLIPTICAL/S0 GALAXIES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.วิภู รุโจปการ, 72 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวอย่างดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า ซึ่งคัดมาจากฐานข้อมูลสโลนดิจิตอลสกายเซอร์เวย์ที่ปล่อยข้อมูลเป็นครั้งที่ 8 และนาซ่าสโลนแอตลาส การคัดเลือกดาราจักรลักษณะดังกล่าวในงานวิจัยนี้ ใช้เทคนิคการเปรียบสีในสองบริเวณ คือ สีบริเวณใจกลางที่บันทึกโดยเส้นใยนำแสงของกล้องเอสดีเอสเอสและสีโดยรวมของดาราจักรที่ได้จากการคำนวณทางโฟโตเมตรี ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการค้นหาดาราจักรจำนวนมากที่แสดงลักษณะใจกลางมีสีฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้กำหนดค่าการเลื่อนไปทางแดง ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 0.01 กับ 0.02 เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณใจกลางของดาราจักร ผลลัพธ์ที่ได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและแมกนิจูดชี้ให้เห็นว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าส่วนใหญ่อยู่บนปริภูมิดัชนีสี-แมกนิจูดเดียวกับกลุ่มดาราจักรสีฟ้า นอกจากนี้อัตราการเกิดดาวฤกษ์ในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า มีค่าสูงกว่าดาราจักรแบบทรงรีที่ใจกลางมีสีแดง ดังนั้นผลที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามีสมมบัติใกล้เคียงกับดาราจักรแบบกังหัน แม้จะมีรูปร่างคล้ายกับดาราจักรแบบทรงรีก็ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา	ฟิสิกส์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	ฟิสิกส์	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา	2556	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5472031023 : MAJOR PHYSICS
KEYWORDS: BLUE CORE ELLIPTICAL/S0 / COLOR MAGNITUDE DIAGRAM (CMD) / STAR FORMATION RATE (SFR)

PIYAPONG KIAWSAARD: THE NATURE OF ONGOING NUCLEAR STAR FORMATION IN ELLIPTICAL/S0 GALAXIES. ADVISOR: SATHON VIJARNWANNALUK, Ph.D., CO-ADVISOR: WIPHU RUJOPAKARN, Ph.D., 72 pp.

This study present a sample of blue core elliptical/S0 galaxies (Blue Core Elliptical/S0, BCE) selected from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Data Release 8 and the NASA-Sloan Atlas. Our selection technique makes use of the difference between the synthesized color within the SDSS' spectroscopic fiber positioned at the core and the global, galaxy-wide color from photometric data. This method allows a large number of galaxies to be searched efficiently for the presence of blue cores. We limit our redshift range to $0.01 < z < 0.02$ to ensure that core of the galaxy is well-resolved. The result from color-magnitude suggest that a majority of BCE is located on blue cloud galaxy populations. Furthermore, the BCE have star formation rate higher than elliptical/S0 galaxies with red core. Thus, our results show that the BCE have characteristics similar to spiral galaxies despite being morphologically similar to the elliptical galaxies.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department:	Physics	Student's Signature	.....
Field of Study:	Physics	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2013	Co-Advisor's Signature	.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ เป็นเพราะได้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจจากทุกๆท่านดังนี้

ขอขอบพระคุณ อ. ดร. วิภู รุโจปการ และ อ. ดร. สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งคำแนะนำในด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการเป็นกรรมการสอบ รวมทั้งตรวจความถูกต้องของวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการแก้ไข

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ ที่ได้ตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณนางสาว จันจิรา ชูช่วย ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งเพื่อนๆนิสิตด้วย

สุดท้าย ขอขอบพระคุณพ่อ ปิ่น และคุณแม่ประไพ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ ข้าพเจ้ามาโดยตลอด ถ้าหากไม่ได้รับการสนับสนุนจากทั้งสองท่าน วิทยานิพนธ์ก็คงไม่สำเร็จได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

บทที่ 1 บทนำ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 การแบ่งประเภทดาราจักร 6

2.2 รูปแบบการกระจายแสงในดาราจักร 9

2.3 การเกิดดาวฤกษ์ในดาราจักร 10

บทที่ 3 ข้อมูลทางดาราศาสตร์ 11

3.1 ฐานข้อมูลทางดาราศาสตร์ 11

3.2 ระบบแมกนิจูด 12

3.3 ดัชนีสี 16

บทที่ 4 วิธีการเลือกตัวอย่างดาราจักร 17

4.1 การเลือกตัวอย่างดาราจักรกลุ่มหลัก 17

4.2 การเลือกตัวอย่างดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ 17

4.3 การเลือกตัวอย่างดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางสีฟ้า 21

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผล 33

5.1 การแบ่งประเภทของดาราจักรโดยใช้แผนภาพ 33

5.2 การเกิดดาวฤกษ์ในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า 38

5.3 ปริมาณธาตุหนักในดาราจักร 43

5.4 กระบวนการการเกิดดาวในใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ 49

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย 51

รายการอ้างอิง 52

ภาคผนวก 59

ก.การหาสมการเส้นตรงที่แบ่งระหว่างประชากรดาราจักรสีฟ้ากับดาราจักรสีแดงบนซีเอ็มดี 60

ข. สเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า 65

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าตัวแปรที่ใช้เลือกดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์.....18
ตารางที่ 4.2 แสดงรูปภาพดาราจักรที่คัดออกด้วยตา พร้อมทั้งการระบุเหตุผล.....25
ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติค่าตัวแปรต่างๆของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ ทั้ง 11 ดาราจักรที่ได้คัดเลือกจากขั้นตอนสุดท้าย.....31
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติค่าตัวแปรต่างๆของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ ที่คัดออกด้วยตา.....32
ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากำลังส่องสว่างของเส้นเปล่งออกไฮโดรเจนแอลฟาและอัตราการเกิดดาวฤกษ์ของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า.....41
ตารางที่ 5.2 สรุปผลการวัดฟลักซ์ของเส้นเปล่งออกในแต่ละดาราจักรพร้อมระบุค่าความไม่แน่นอน.....46
ตารางที่ 5.3 ปริมาณธาตุหนักในแต่ละดาราจักรที่ได้จากทรีมอนทริ.....47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แผนภาพส้อมเสียงของฮับเบิล.....7

ภาพที่ 2.2 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและแมกนิจูด.....8

ภาพที่ 2.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกลับค่าดัชนีเซอร์ซิก.....9

ภาพที่ 4.1 แสดงการแจกแจงในรูปฮิสโทแกรมดัชนีเซอร์ซิกของดาราจักร.....19

ภาพที่ 4.2 แสดงฮิสโทแกรมการแจกแจงของกลุ่มดาราจักรในช่วง z ต่างๆ.....20

ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเซอร์ซิกกับผลต่างของดัชนีสี.....23

ภาพที่ 4.4 แสดงภาพของดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ จำนวน 11 ดาราจักร.....28

ภาพที่ 4.5 แสดงตำแหน่งท้องฟ้าของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า.....30

ภาพที่ 5.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและความสว่างสัมบูรณ์.....35

ภาพที่ 5.2 แผนภาพบอลด์วิน ฟิลลิปส์แอนด์เทอเลวิช.....37

ภาพที่ 5.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีที่วัดในช่วงความยาวคลื่นยูวี และช่วงความคลื่นที่ตามองเห็นเทียบกับแมกนิจูดสัมบูรณ์.....39

ภาพที่ 5.4 แสดงการแจกแจงแบบฮิสโทแกรมของอัตราการเกิดดาวฤกษ์.....42

ภาพที่ 5.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุหนักเทียบกับมวลดาวฤกษ์.....45

ภาพที่ ก1 แสดงการแจกแจงแบบฮิสโทแกรมของดัชนีสีและแมกนิจูดสัมบูรณ์.....56

ภาพที่ ก2 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและแมกนิจูดสัมบูรณ์พร้อมกับเส้นแบ่งกลุ่มของดาราจักร.....58

ภาพที่ ข1 แสดงตัวอย่างแถบสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าที่ได้จากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส.....60

.

บทที่ 1
บทนำ

หลักการและเหตุผลของงานวิจัย

การจัดประเภทของดาราจักร (galaxies) โดยการใช้รูปร่าง (morphologies) เป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งดาราจักรออกเป็น 3 ประเภท คือ ดาราจักรแบบกังหัน (spiral galaxies) ดาราจักรแบบทรงรี (elliptical galaxies) และดาราจักรแบบไร้รูปทรง (irregular galaxies) การแบ่งประเภทในลักษณะดังกล่าวอาศัยผลการสังเกตการณ์ผ่านกล้องโทรทรรศน์ในระยะแรก (Hubble, 1926)ซึ่งข้อเสียของการใช้วิธีดังนี้ ไม่สามารถนำมาใช้กับดาราจักรจำนวนมากได้ แต่ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีของกล้องโทรทรรศน์ สามารถสังเกตการณ์และเก็บข้อมูลของวัตถุบนท้องฟ้าได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้น นักดาราศาสตร์จึงได้หาวิธีในการจัดประเภทของดาราจักรจำนวนมากเหล่านั้นโดยใช้สีเป็นเกณฑ์ และผลที่ได้ มี 2 กลุ่ม (Baldry และคณะ, 2004; Bell และคณะ, 2004; Hogg และคณะ, 2004) คือ กลุ่มดาราจักรสีแดง (red galaxies) และกลุ่มดาราจักรสีฟ้า (blue galaxies) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีก่อนหน้านี้พบว่า ดาราจักรสีแดงคือ กลุ่มที่ประกอบไปด้วยดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ โดยสีแดงแสดงให้เห็นว่า กลุ่มดาวฤกษ์ที่อยู่ภายในดาราจักรนี้มีอายุมาก ส่วนดาราจักรสีฟ้าคือ กลุ่มดาราจักรแบบกังหันและแบบไร้รูปทรง ซึ่งมีอายุน้อยกว่า (Blanton และ Moustakas, 2009) โดยทั่วไปบริเวณใจกลางของดาราจักรแบบกังหันและดาราจักรแบบทรงรีเป็นบริเวณที่สว่างที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณส่วนอื่นและมีสีออกไปทางสีแดง สำหรับดาราจักรแบบกังหันจะเรียกบริเวณใจกลางของดาราจักรว่า ส่วนโป่ง (bulge) และส่วนล้อมรอบส่วนโป่งเรียกว่า แผ่นจาน (disk) และสำหรับดาราจักรแบบทรงรีจะมีรูปร่างคล้ายกับส่วนโป่งของดาราจักรแบบกังหัน เพียงแต่มีขนาดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ สิ่งที่ยืนได้ว่าส่วนโป่งของดาราจักรแบบกังหันกับดาราจักรแบบทรงรีอาจมีสมบัติที่คล้ายคลึงกัน (Andredakis และคณะ, 1995) คือ สมการที่ใช้อธิบายรูปแบบการกระจายแสงจากดาวฤกษ์สมาชิกสามารถอธิบายด้วยสมการเดียวกัน

กระบวนการการเกิดดาวในดาราจักรแบบกังหันส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณส่วนแขน (spiral arms) (Elmegreen และ Elmegreen, 2011) แต่สำหรับดาราจักรแบบทรงรี กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับดาราจักรแบบกังหัน กาวิราจ (Kaviraj และคณะ, 2007) ได้พบว่ากระบวนการการเกิดดาวของดาราจักรแบบทรงรีเกิดขึ้นเพียง 30 % นอกจากนี้โครกเกอร์ (Crocker และคณะ, 2011) และยัง (Young และคณะ, 2011) ได้พบว่าดาราจักรแบบทรงรีสามารถมีโมเลกุลไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกับดาราจักรแบบกังหัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาจจะมีกระบวนการเกิดดาวเกิดขึ้นในดาราจักรนี้ แต่สำหรับส่วนโป่งของดาราจักรแบบกังหัน ฟอลคอน-บาร์โรโซ (Falcón-Barroso และคณะ, 2006) พบว่า อัตราการเกิดดาว (star formation rate, SFR) .ที่คำนวณเฉพาะบริเวณดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเกิดดาวของดาราจักรแบบกังหันที่บริเวณแขน หลายงานวิจัยที่ได้ศึกษา

ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเกิดดาวกับสมบัติทางกายภาพของส่วนโป่งดาราจักรแบบกังหัน ตัวอย่างเช่น กันนัพพัน (Kannappan และคณะ, 2004), ฟิชเชอร์ (Fisher และคณะ, 2009)

กันนัพพันได้ศึกษาตัวอย่างดาราจักรแบบกังหันและพบว่าส่วนโป่งมีการขยายตัว (bulge growth) พร้อมกับตั้งสมมุติฐานว่า การเกิดอันตรกิริยาระหว่างดาราจักรที่มีขนาดไม่เท่ากันหรือเรียกว่า การชนแบบไมเนอร์ (minor mergers) เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ส่วนโป่งมีการขยายตัว นอกจากนี้ ยังพบว่าส่วนโป่งของดาราจักรเหล่านั้นมีสีฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาจมีกระบวนการการเกิดดาวเกิดขึ้น กันนัพพันได้เลือกตัวอย่างดาราจักรที่มีลักษณะดังกล่าว โดยการเปรียบเทียบสีในสองบริเวณ คือ บริเวณใจกลางและขอบนอกของดาราจักร และนอกนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเกิดดาว ณ บริเวณใจกลางของดาราจักรแบบทรงรี คือ ซูห์ (Suh และคณะ, 2010) ซึ่งวิธีที่ใช้หาดาราจักรลักษณะดังกล่าวคือ การคำนวณความชันของเส้นกราฟที่พลอตบนความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีสี (color index) กับรัศมีของดาราจักรและได้นิยามว่า ความชันที่เป็นบวกแสดงว่า ใจกลางของดาราจักรมีสีฟ้า (blue cored) ในทางตรงกันข้าม เมื่อความชันเป็นลบใจกลางของดาราจักรจะมีสีแดง (red-cored)

กระบวนการการเกิดดาวในใจกลางดาราจักร โดยเฉพาะอย่างยิ่งดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ยังไม่มีคำตอบที่ชัดเจน จึงให้เกิดคำถามที่ว่า สาเหตุหรือกลไกใดที่ทำให้ดาวเกิดบริเวณใจกลางของดาราจักรทรงรีเหล่านั้นได้ ดังนั้น ปัญหาดังกล่าวจึงเป็นจุดเริ่มของการศึกษาในครั้งนี้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาวิธีการเลือกดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ อาทิเช่น อัตราการเกิดดาวฤกษ์ ปริมาณธาตุหนักของดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าและเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวกับดาราจักรรูปทรงอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กรอบแนวคิดในการวิจัย

การค้นหาดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าเบื้องต้นจะใช้การเปรียบเทียบดัชนีสีที่บริเวณใจกลางกับสีโดยรวมและกำหนดให้สีบริเวณใจกลางต้องมีสีฟ้ากว่าสีโดยรวมของทั้งดาราจักร โดยกำหนดช่วงการเลื่อนทางแดงของดาราจักรให้อยู่ระหว่าง 0.01 กับ 0.02

รูปแบบวิทยานิพนธ์

รูปแบบการทำวิทยานิพนธ์ได้แบ่งเป็นบทต่างๆ ดังต่อไปนี้

บทที่1 คือ การอธิบายที่มาและความสำคัญของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 คือ การอธิบายความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับดาราจักร

บทที่ 3 คือ บรรยายลักษณะฐานข้อมูลทางดาราศาสตร์และตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการศึกษา

บทที่ 4 คือ การอธิบายวิธีการหาดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์

บทที่ 5 คือ การวิเคราะห์ผลการศึกษา

บทที่ 6 คือ การสรุปผลลัพธ์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะเป็นการอธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการศึกษาในปัญหาที่สนใจ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อต้องการให้ผู้อ่านได้ทราบความเชื่อมโยงระหว่างของการแบ่งประเภทดาราจักรตามแบบฮับเบิลกับการแบ่งประเภทที่ได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและแมกนิจูด ซึ่งจะอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1 สำหรับหัวข้อ 2.2 จะเป็นอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง รูปแบบการกระจายแสงกับประเภทของดาราจักร และหัวข้อสุดท้าย 2.3 จะเป็นการอธิบาย การเกิดดาวในดาราจักร รวมทั้งสมการที่ใช้ในการคำนวณอัตราการเกิดดาวฤกษ์

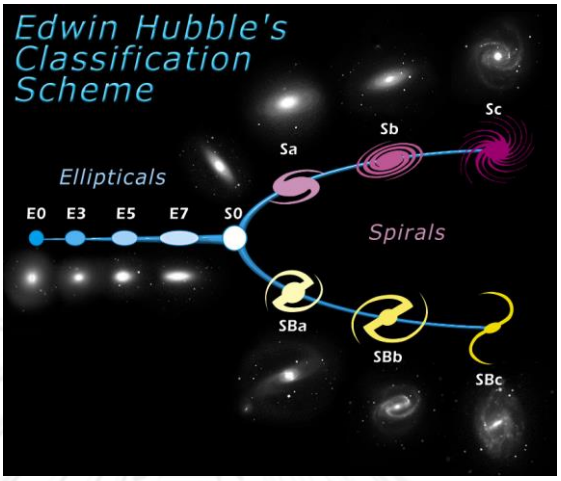
2.1 การแบ่งประเภทดาราจักร

การแบ่งประเภทของดาราจักรในอดีตที่ผ่านมาได้อาศัยการดูด้วยตาเปล่าผ่านกล้องโทรทรรศน์ แต่ด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถนำไปใช้กับการแบ่งดาราจักรที่มีจำนวนมากได้ การแบ่งด้วยตาเปล่าได้นำลักษณะรูปร่างภายนอกมาใช้เป็นเกณฑ์หลัก ในช่วงศตวรรษที่ 19 การแบ่งประเภทดาราจักรมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบคือ ระบบของฮับเบิล (Hubble, 1926) และระบบของเดอวาคูเลอรส์ (De Vaucouleurs, 1959) แต่ระบบที่คุ้นเคยและมีเป็นที่รู้จักกันดีก็คือ ระบบของฮับเบิล ในที่นี่จะอธิบายเพียงระบบนี้เท่านั้น กลุ่มดาราจักรที่ฮับเบิลได้ทำการแบ่งประเภทนั้น แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ

- ดาราจักรแบบกังหัน
- ดาราจักรแบบทรงรี
- ดาราจักรแบบไร้รูปทรง
- ดาราจักรแบบเอสศูนย์ (S0)

ดาราจักรทั้ง 4 ประเภท สามารถสร้างเป็นแผนภาพ (Kennicutt, 2006) ที่เรียกว่า แผนภาพส้อมเสียงของฮับเบิล (Hubble Tuning fork diagram) โดยทางด้านซ้ายของรูปเป็นกลุ่มของดาราจักรแบบทรงรีที่เรียงตามขนาดความรีจากมากไปน้อย และทางด้านขวาเป็นกลุ่มของดาราจักรแบบกังหัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าดาราจักรกลุ่มนี้แบ่งย่อยได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีแขน (Bars) กับกลุ่มที่ไม่มีแขน และกลุ่มสุดท้ายที่แยกออกมาคือ ดาราจักรแบบไร้รูปทรง และนอกจากนี้ฮับเบิล ยังเรียกกลุ่มดาราจักรที่อยู่ทางซ้ายว่า ดาราจักรลำดับต้น (early-type galaxies) และทางด้านขวามือคือ ดาราจักรลำดับท้าย (late-type galaxies) การเรียกชื่อในลักษณะดังกล่าวเป็นการเรียกตามลำดับการวิวัฒนาการ โดยฮับเบิลมีความเชื่อว่าดาราจักรแบบทรงรีจะวิวัฒนาการไปเป็นดาราจักรแบบกังหัน โดยมีดาราจักร

แบบเอสศูนย์ เป็นดาราจักรที่อยู่ในช่วงเฟสแทรนซิชัน (transition phases) แต่ในปัจจุบัน ได้ชี้ให้เห็นว่า แนวคิดของฮับเบิล ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยความเป็นจริงแล้ว ดาราจักรแบบกังหันจะวิวัฒนาการไปสู่ดาราจักรแบบทรงรี (Mihos และ Hernquist, 1996; Toomre และ Toomre, 1972)



ภาพที่ 2.1 แผนภาพส้อมเสียงของฮับเบิลที่ได้แสดงการแบ่งประเภทของดาราจักรตามรูปแบบของฮับเบิล โดยด้านซ้ายของภาพเรียกว่าดาราจักรลำดับต้น ซึ่งประกอบไปด้วยดาราจักรแบบทรงรีและทางด้านขวาคือ ดาราจักรลำดับท้าย ประกอบไปด้วยดาราจักรแบบกังหันรูปแบบต่างๆ จากแนวคิดของฮับเบิลนี้ เชื่อกันว่าดาราจักรจะมีวิวัฒนาการจากดาราจักรลำดับต้นไปยังดาราจักรลำดับท้าย แต่แนวคิดของฮับเบิลดังกล่าวไม่สอดคล้องกับผลที่ได้ในปัจจุบัน (Kennicutt, 2006)

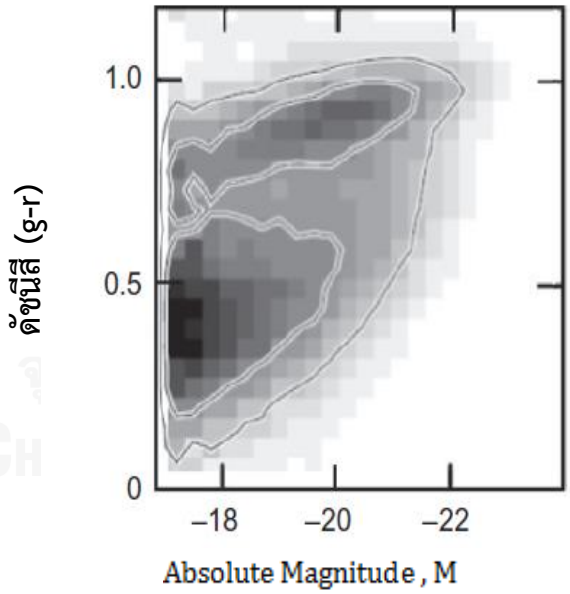
ดังที่กล่าวไปบทที่แล้วว่า การแบ่งดาราจักรโดยใช้ตาผ่านกล้องโทรทรรศน์ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับดาราจักรที่มีจำนวนมากได้ ดังนั้นนักดาราศาสตร์จึงได้พยายามหาวิธีที่ใช้กับดาราจักรจำนวนมาก หนึ่งในวิธีนั้นคือ การใช้สีที่ปรากฏออกมาเป็นตัวแบ่ง และต่อมาได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับค่าแมกนิจูด แผนภาพที่ 2.2 (Blanton และคณะ, 2001) เรียกว่าแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีสีกับแมกนิจูด (Color-Magnitude Diagram, CMD) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าบนปริภูมิบนแผนภาพดังกล่าวจะประกอบไปด้วยสองกลุ่ม (Baldry และคณะ, 2004; Blanton และคณะ, 2003; Strateva และคณะ, 2001) คือ กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มดาราจักรสีแดง ซึ่งอยู่ทางด้านบนขวามือของแผนภาพ และกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มดาราจักรสีฟ้า จะอยู่ทางด้านล่างทางซ้ายมือของแผนภาพ โดยที่

กลุ่มที่ 1 : เรดซีเควนซ์ (red sequence) หรือเรียกว่า ดาราจักรสีแดง (red galaxies) เป็นกลุ่มของดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ โดยทั่วไปดาราจักรกลุ่มเหล่านี้จะมีสีที่ปรากฏออกมา

ไปทางสีแดงที่เป็นผลมาจากกลุ่มประชากรดาวฤกษ์ในดาราจักรซึ่งกลุ่มดาวฤกษ์เหล่านั้นเป็นดาวที่มีอายุมาก

กลุ่มที่ 2 : บลูซีเควนซ์ (blue cloud) หรือเรียกว่า ดาราจักรสีฟ้า (blue galaxies) เป็นกลุ่มของดาราจักรแบบกังหันและแบบไร้รูปทรง สำหรับสีฟ้าที่ออกมาจากดาราจักรเหล่านี้ได้มาจากดาวฤกษ์อายุน้อย

จากแผนภาพซีเอ็มดียังแสดงให้เห็นอีกว่าดาราจักรที่มีความสว่างมากจะมีสีออกไปทางแสงสีแดง ส่วนดาราจักรที่มีความสว่างน้อยกว่าจะมีสีออกไปทางแสงสีน้ำเงิน อีกข้อสังเกตหนึ่งจะเห็นว่ากลุ่มดาราจักรสีแดงจะมีดัชนีสีไปทางสีแดงมากขึ้น (reddening) ซึ่งเกิดจากดาราจักรกลุ่มนี้ถูกบดบังไปด้วยฝุ่น (dust) และกระบวนการเกิดดาวที่เกิดได้น้อยลง นอกจากนี้ความสว่างของดาราจักรยังสัมพันธ์กับมวลดาวฤกษ์ที่อยู่ในดาราจักรอีกด้วย กล่าวคือ ดาราจักรที่มีความสว่างมากจะมีมวลดาวฤกษ์ที่มากกว่าดาราจักรที่มีความสว่างน้อย สำหรับค่าดัชนีสีในภาพที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าดาราจักรสีฟ้าจะมีช่วงสีที่แคบกว่าดาราจักรสีแดง ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการการเกิดดาวภายในดาราจักร โดยดาราจักรสีแดงกระบวนการการเกิดดาวส่วนใหญ่ได้สิ้นสุดลง จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของดัชนีสีน้อยกว่าดาราจักรที่ยังคงมีกระบวนการการเกิดดาวเกิดขึ้นอยู่ เช่น ดาราจักรแบบกังกันและแบบไร้รูปทรง



ภาพที่ 2.2 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสี (แกน y) และแมกนิจูดสัมบูรณ์ (แกน x) ที่สามารถแบ่งดาราจักรออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มดาราจักรสีฟ้าและกลุ่มดาราจักรสีแดง จากภาพแสดงให้เห็นว่า ดาราจักรที่ความสว่างมากจะมีสีออกไปทางแสงสีแดง ในทางตรงกัน ดาราจักรที่มีความสว่างน้อยกว่าจะมีสีออกไปทางแสงสีน้ำเงิน

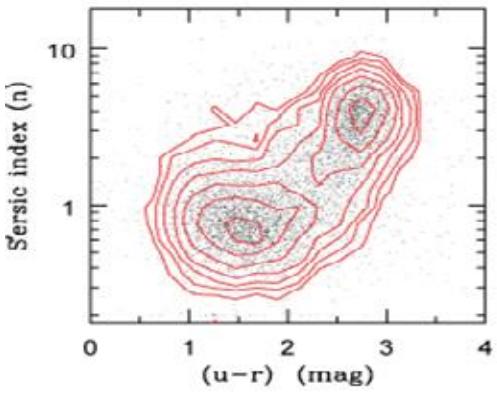
2.2 รูปแบบการกระจายแสงในดาราจักร

รูปร่างโดยทั่วไปในแต่ละดาราจักรมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนกลุ่มดาวฤกษ์สมาชิก (Jarrett, 2000) สำหรับแสงที่เห็นจากดาราจักรได้มาจากดาวฤกษ์ที่อัดแน่นนับล้านๆดวงและนอกจากนี้แสงยังแสดงอายุและอุณหภูมิของกลุ่มดาวเหล่านั้นอีกด้วย กล่าวคือ แสงที่ออกไปทางสีฟ้าแสดงถึงอุณหภูมิที่มาจากวัตถุอุณหภูมิสูง ซึ่งก็คือ ดาวอายุน้อย ในทางตรงกันข้าม แสงที่ออกไปทางสีแดงก็หมายถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่มาจากดาวอายุมาก (Chen และคณะ, 1995)

สมการที่ใช้อธิบายการกระจายตัวของแสงที่มาจากดาราจักร ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมการที่เรียกว่า เซอร์ซิกไลต์โพรไฟล์ (Sersic light profile) (Graham และ Driver, 2005; Sérsic, 1968) กำหนดโดยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$I(r) \propto \exp\left[-\left(\frac{r}{r_e}\right)\right]^{1/n} \qquad (2.1)$$

โดยที่ $I(r)$ คือ ความเข้มแสง (light intensity) ที่ระยะรัศมี r , r_e คือ รัศมียังผล (effective radius) หรือรัศมีที่ครอบคลุมปริมาณแสงเพียงครึ่งเดียวจากทั้งหมด (haft light radius) และตัวแปร n เราจะเรียกว่า ดัชนีเซอร์ซิก (Sersic Index) โดยค่า n นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่าง (shape) ของดาราจักร โดยมีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 10 สำหรับดาราจักรกังหันจะสอดคล้องกับค่า n=1 และมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เอกซ์โพเนนเชียล โพรไฟล์ (Exponential profile) และดาราจักรที่สอดคล้องกับค่า n=4 คือ ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์หรืออีกอย่างหนึ่งว่า เดอวาคูเลอรส์ โพรไฟล์ (de Vaucouleurs profile) (Caon และคณะ, 1993; Young และ Currie, 1994) ดังนั้น ค่า n จึงสามารถเป็นตัวแบ่งประเภทของดาราจักรได้อีกด้วย ไดรเวอร์ (Driver และคณะ, 2006) ได้ใช้ตัวอย่างดาราจักรจำนวน 10,095 ดาราจักร จากฐานข้อมูล มิลเลนเนียมกาแล็กซีแคตตาลอค (Millennium Galaxy Catalogue) (Liske และคณะ, 2003) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเซอร์ซิก (n) และดัชนีสี (u-r) สามารถแบ่งดาราจักรออกเป็นสองกลุ่มได้อย่างชัดเจน (ภาพที่ 2.3) ที่ค่า n ประมาณ 2 ดังนั้น ในกลุ่มของดาราจักรสีแดงจะมีค่า n สูงกว่ากลุ่มดาราจักรสีฟ้า



ภาพที่2.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับค่าดัชนีเซอร์ซิกแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีสี (แกน x) กับ ค่าดัชนีเซอร์ซิก (แกนy) ที่สามารถนำมาใช้แบ่งกลุ่มดาราจักรตามค่าค่าดัชนีเซอร์ซิกซึ่งพบว่ากลุ่มดาราจักรสีแดงจะมีค่าค่าดัชนีเซอร์ซิกที่สูงกว่ากลุ่มดาราจักรสีน้ำเงิน

2.3 การเกิดดาวฤกษ์ในดาราจักร

อะตอมในจักรวาล ที่มีมากที่สุดคือ ไฮโดรเจน H และสามารถอยู่ในรูปต่างๆ อาทิเช่น รูปของโมเลกุล H_2, รูปที่เป็นกลาง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ HI และรูปไฮโดรเจนที่แตกตัวเป็นไอออนที่ใช้สัญลักษณ์ HII สำหรับกระบวนการการเกิดดาว (star formation) จะเกิดขึ้นบริเวณที่มีอุณหภูมิและความหนาแน่นที่สูงมาก บริเวณดังกล่าวจะเรียกว่า กลุ่มก้อนโมเลกุลขนาดยักษ์ (giant molecular clouds, GMC) (Bergin และ Tafalla, 2007; Genzel และ Stutzki, 1989; Shu และคณะ, 1987) ในการศึกษาการเกิดดาวนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ (McKee และ Ostriker, 2007) คือ การศึกษาในระดับจุลภาค (Microscopic scale) (Shu และคณะ, 1987) และในระดับมหภาค (Macroscopic scale) การศึกษากระบวนการการเกิดดาวในระดับจุลภาคเป็นการศึกษา ในระดับขั้นตอนตั้งแต่การรวมและการยุบรวมของแก๊สจนกลายเป็นดาวต้นกำเนิด (proto stars) ไปจนถึงกระบวนการสิ้นอายุของดาว การศึกษาในระดับจุลภาคนี้ก็จะแยกไปเป็นอีกแขนงหนึ่งของวิชาดาราศาสตร์ อาจมีชื่อเรียกว่า การกำเนิดและการวิวัฒนาการของดาว (The stellar formation and evolution) แต่สำหรับระดับมหภาค จะเป็นการศึกษาการเกิดดาวที่พิจารณาโดยรวมทั้งดาราจักร (Kennicutt, 1998; Kennicutt และ Evans, 2012) หรือพิจารณาเฉพาะบางส่วนของดาราจักร เช่น ที่ขนาด 1 kpc (Leroy และคณะ, 2012; Leroy และคณะ, 2013; Sandstrom และคณะ, 2013) อาจจะบอกได้ว่า โดยเฉลี่ยหรือโดยรวมของดาราจักรหนึ่งๆนั้น จะมีการเกิดดาวขึ้นอยู่เท่าไรในหนึ่งปี โดยทั่วไปแล้ว การวัดอัตราการเกิดดาว (star formation rate, SFR) ดังกล่าวจะนิยมใช้หน่วยเป็นมวลดวงอาทิตย์ต่อปี ซึ่งเขียนแทนด้วย $\mathrm{M_{\odot}\cdot yr^{-1}}$

การศึกษาการเกิดดาวฤมักจะศึกษาใน 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงเวลาที่ดาวกำลังเกิดและหลังจากที่ดาวเกิดขึ้นได้ไม่นาน โดยช่วงอายุของดาวเหล่านั้นจะน้อยกว่า 10 ล้านปี (Calzetti, 2013) การศึกษาการเกิดดาวได้อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากบริเวณที่ดาวเกิดหรือมาจากดาวอายุน้อย ในปัจจุบันสามารถทำได้ทุกช่วงความยาวคลื่น ตั้งแต่ รังสีเอกซ์ไปจนถึงคลื่นวิทยุ (Alonso-Herrero และคณะ, 2006; Boquien และคณะ, 2010; Calzetti และคณะ, 2005; Ranalli และคณะ, 2003; Schmitt และคณะ, 2006) การหาอัตราการเกิดดาวฤกษ์ ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้เฉพาะช่วงคลื่นที่ตามองเห็นเท่านั้น โดยตัวชี้บ่งชี้ (star formation indicator) แหล่งกำเนิดดาวในช่วงคลื่นนี้ จะใช้คุณสมบัติเส้นเปล่งออกของเส้น $\mathrm{H\alpha}$ ที่ปรากฏบนแถบสเปกตรัม (Moustakas และคณะ, 2006; Rosa-González และคณะ, 2002) สำหรับการคำนวณ SFR งานวิจัยนี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากงานของเคนนิคัตต์ (Kennicutt, 1998) ที่กำหนดโดย

$$\mathrm{SFR}(M_{\odot}\ \mathrm{yr}^{-1}) = 7.9\times10^{-42}\ L(H\alpha) \qquad (2.2)$$

โดยที่ $\mathrm{L(H\alpha)}$ คือ กำลังส่องสว่าง (luminosity) ของเส้นเปล่งแสง $\mathrm{H\alpha}$ มีหน่วยเป็น $\mathrm{erg/s}$

บทที่ 3
ข้อมูลทางดาราศาสตร์

การสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพ นอกจากจะต้องอาศัยกล้องโทรทรรศน์ที่มีความทันสมัยและความคมชัดสูง ยังต้องมีการจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์สามารถตอบสนองความต้องการของนักดาราศาสตร์ได้เป็นอย่างดี และนอกจากนี้ การสังเกตการณ์วัตถุบนท้องฟ้ายังสามารถทำได้ทุกความยาวคลื่น ตั้งแต่คลื่นวิทยุไปจนถึงคลื่นรังสีแกมมา แต่ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้อาศัยผลของการสังเกตการณ์ที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible wavelength) สำหรับบทนี้จะนำเสนอการเข้าถึงและการใช้งานของฐานข้อมูลดาราศาสตร์ที่เก็บข้อมูลต่างๆของดาราจักรในช่วงการเลื่อนไปทางแดง (redshift, z) < 0.055 พร้อมทั้งคำอธิบายอย่างคราวๆ ในแต่ละฐานข้อมูล รวมทั้งระบบแมกนิจูดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.1 ฐานข้อมูลทางดาราศาสตร์

3.1.1 สโลนดิจิตอลสกายเซอร์เวย์ (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

สโลนดิจิตอลสกายเซอร์เวย์ หรือเอสดีเอสเอส (York และคณะ, 2000) คือ ฐานข้อมูลที่เก็บตัวอย่างข้อมูลของวัตถุบนท้องฟ้า ไม่ว่าจะเป็น ดาวฤกษ์ ดาราจักร หรือแม้แต่ ควอซาร์ เป็นต้น ซึ่งเอสดีเอสเอส ได้ใช้กล้องโทรทรรศน์มุมกว้างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5 เมตร (Gunn และคณะ, 2006) พร้อมด้วย ซีซีดี (CCD ขนาด) 2048x2048 พิกเซล (Gunn และคณะ, 1998) ที่ใช้ระบบโฟโตเมทริกผ่านฟิลเตอร์ 5 แถบ คือ u, g, r, i, z (Fukugita และคณะ, 1996) ที่มีความยาวคลื่นเฉลี่ยในแต่ละแถบเป็น 3551, 4686, 6166, 7480 และ 8932 $\mathring{A}$ ตามลำดับ และสำหรับการถ่ายสเปกตรัมได้ใช้เส้นใยนำแสง (fiber optics) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $180\ \mu m\ (3'')$ จำนวน 640 เส้น ที่ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกสเปกตรัม

3.1.2 นาซ่าสโลนแอตลาส (NASA-Sloan Atlas, NSA)

ฐานข้อมูลนาซ่าสโลนแอตลาสหรือ เอ็นเอสเอ (Blanton และคณะ, 2011) เป็นฐานข้อมูลที่เปิดให้ใช้ข้อมูลได้ฟรี เช่นเดียวกับเอสดีเอสเอส โดยที่ เอ็นเอสเอ สร้างขึ้นมาจากการรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของดาราจักรที่มีค่าการเลื่อนไปทางแดง < 0.055 ที่มีจำนวนดาราจักรทั้งหมดประมาณ 140,000 ดาราจักร รูปแบบการทำงานของเอ็นเอสเอเป็นการรวบรวมข้อมูลของวัตถุในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ที่ได้จาเอสดีเอสเอส ดีอาร์ 8 (Aihara และคณะ, 2011; Eisenstein และคณะ, 2011) และข้อมูลของวัตถุที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลต ที่ได้จากกาแล็กซี อีโวลูชั่น เอ็กโพรเลอร์ (galaxy evolution explorer, GALEX) (Martin และคณะ, 2005; Morrissey และคณะ, 2007) และนอกจากนี้เอ็นเอสเอ ยังทำการวิเคราะห์ข้อมูลใหม่ทั้งภาพถ่ายและสเปกตรัมใหม่อีกครั้ง

3.2 ระบบแมกนิจูด

3.2.1 แมกนิจูดปรากฏ

การวัดความสว่างของวัตถุในทางดาราศาสตร์จะใช้วิธีการบอกเป็นระดับความสว่างของวัตถุ เนื่องจากในอดีต นักดาราศาสตร์ได้ แบ่งระดับความสว่างหรือแมกนิจูดของวัตถุออกเป็น 6 ระดับ ซึ่งเรียกแมกนิจูดดังกล่าวจะเรียกว่า แมกนิจูดปรากฏ (apparent magnitude, m) โดยที่วัตถุมีแมกนิจูด 1 (m=1) จะเป็นวัตถุที่สว่างกว่าวัตถุที่มีแมกนิจูด 6 (m=6) ซึ่งมีความสว่างน้อยที่สุด ต่อมาพอกซัน (Pogson, 1856) ได้ให้นิยามใหม่ว่า วัตถุที่มีแมกนิจูด 1 กับ แมกนิจูด 6 จะมีความสว่างต่างกัน 100 เท่า ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการในรูปของ ลอกาลิทึมได้เป็น

$$m_1 - m_2 = -2.5log(\frac{f_1}{f_2}) \tag{3.1}$$

โดยที่ m_1 และ m_2 คือ แมกนิจูด ของวัตถุที่ 1 และวัตถุที่2 ตามลำดับ

f_1 และ f_2 คือ ค่าฟลักซ์โปรตอนของวัตถุที่ 1 และวัตถุที่2 ตามลำดับ โดยกำหนดให้เป็น พลังงานที่ปล่อยออกมาจากดาวฤกษ์ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร $(W \cdot m^{-2})$

โดยทั่วไปบอกลำดับความสว่างของวัตถุใดๆ เช่น ดาราจักร หรือดาว จะวัดเทียบกับวัตถุอ้างอิง Oke และ Gunn (1983) ได้ใช้วัตถุอ้างอิงที่มีค่าแมกนิจูด เป็น 0 และมีฟลักซ์เท่ากับ

$$f_\nu = 3631\ \mathrm{Jy}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ Jy หรือ Jansky เป็น หน่วยฟลักซ์โปรตอนของวัตถุ ส่วนมากจะนิยมในดาราศาสตร์วิทยุ (radio astronomy) สำหรับระบบ SI 1 Jy จะเท่ากับ $10^{-26}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}}$ แต่ในระบบของ cgs ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้ในทางดาราศาสตร์ จะเท่ากับ $10^{-23}\ \mathrm{erg \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot Hz^{-1}}$ ดังนั้นสมการที่ 3.1 จะเขียนให้ในรูปของระบบ cgs ได้เป็น

$$f_\nu = 3.631 \times 10^{-20}\ \mathrm{erg \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot Hz^{-1}} \tag{3.3}$$

ดังนั้นสมการที่ 3.1 จะมีแมกนิจูด m_1 ซึ่งเป็นของวัตถุที่เราสนใจเทียบกับแมกนิจูดของวัตถุอ้างอิง m_2 ที่กำหนดให้เท่ากับ 0 จะเขียนได้เป็น

$$m_1 - 0 = -2.5\log\left(\frac{f_1\ [erg\cdot s^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot Hz^{-1}]}{3.631\times10^{-20}\ [erg\cdot s^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot Hz^{-1}]}\right) \quad (3.4)$$

และรูปแบบทั่วไป

$$m = -2.5\log(f) \quad (3.5)$$

โดยที่ f คือ ฟลักซ์โปรตอนของวัตถุที่สนใจเทียบกับฟลักซ์โปรตอนของวัตถุอ้างอิงในสมการที่ 3.3 และกำหนด f มีหน่วยเป็นแมกกี (maggy) และเรียกแมกนิจูด m นี้ว่า แมกนิจูดเอบี (AB magnitude)

โดยทั่วไปการวัดความสว่างของวัตถุ จะทำการวัดผ่านฟิลเตอร์ (filters) โดยหน้าที่ของฟิลเตอร์ คือ กรองช่วงความถี่หรือช่วงความยาวคลื่น ดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 3.1.2 ทั้งเอสดีเอสเอสและเอ็นเอสเอใช้ฟิลเตอร์ 5 ตัวที่ใช้สัญลักษณ์ u, g, r, i และ z ซึ่งแต่ละฟิลเตอร์ในแต่ละตัวจะมีความยาวคลื่นเฉลี่ยเป็น 3551, 4686, 6166, 7480 และ 8932 Å ตามลำดับ ปริมาณในสมการที่ 3.5 เมื่อวัดผ่านฟิลเตอร์ใดๆ (x) จะเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$m_x = -2.5\log(f_x) \quad (3.6)$$

ดังนั้นแมกนิจูดปรากฏ (m) ที่วัดผ่านฟิลเตอร์ u, g, r, i และ z จะเขียนให้อยู่ในรูปตามสมการ 3.6 ได้เป็น

$$\left.\begin{aligned} m_u &= -2.5\log(f_u)\\ m_g &= -2.5\log(f_g)\\ m_r &= -2.5\log(f_r)\\ m_i &= -2.5\log(f_i)\\ m_z &= -2.5\log(f_z) \end{aligned}\right\} \quad (3.7)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากสมการที่ 3.7 เพื่อความสะดวกในการเขียนสัญลักษณ์ของแมกนิจูดที่วัดผ่านฟิลเตอร์ทั้ง 5 ฟิลเตอร์ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะกำหนดสัญลักษณ์ใหม่ เป็น

$$\left.\begin{aligned} m_u &\equiv u \\ m_g &\equiv g \\ m_r &\equiv r \\ m_i &\equiv i \\ m_z &\equiv z \end{aligned}\right\} \qquad (3.8)$$

3.2.2 แมกนิจูดสัมบูรณ์

การบอกระดับความสว่างหรือแมกนิจูดของวัตถุบนท้องฟ้าเป็นเพียงการบอกว่า วัตถุนั้นมีความสว่างเทียบกับวัตถุอ้างอิงอยู่เท่าไร เมื่อเราอยู่บนพื้นโลก ซึ่งเราได้เรียกแมกนิจูดในลักษณะดังกล่าวว่า *แมกนิจูดปรากฏ* แต่เนื่องจากระยะทางของวัตถุทั้งสองไม่ได้อยู่ในระยะเดียวกันเมื่อวัดจากโลก ดังนั้นความสว่างจริงจะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการเปรียบเทียบความสว่างในระยะเดียวกัน คือที่ระยะ 10 pc และเรียกแมกนิจูดที่ระยะทางนี้ว่า *แมกนิจูดสัมบูรณ์* (Absolute magnitude, M) โดยที่ pc คือ หน่วยวัดระยะทางในทางดาราศาสตร์ มีค่าประมาณ 3.086×10^{18} cm

$$\mathrm{M_x} = m_x - 5\log_{10}\left(\frac{D_L}{10\ pc}\right) - k_x(z) \qquad (3.9)$$

โดยที่ D_L คือ ระยะทางสภาพส่องสว่าง (luminosity distance) และ m_x คือ แมกนิจูดปรากฏที่วัดผ่านฟิลเตอร์ x ใดๆ สำหรับปริมาณ $k_x(z)$ คือ เคคอลเลคชัน (K-correction) ซึ่งคำนวณได้จากซอฟแวร์เคคอลเลคชัน เวอร์ชัน 4.2 (Blanton และ Roweis, 2007) สมการที่ 3.9 ในการทำวิจัยในครั้งนี้ จะคำนวณเฉพาะในฟิลเตอร์ r เท่านั้น ดังนั้นแมกนิจูดสัมบูรณ์ในฟิลเตอร์ r จะถูกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathrm{M_r}$

3.2.3 เพโทรเซียนฟลักซ์

การวัดฟลักซ์ของดาราจักรโดยทั่วไปทำได้ยากกว่าของดาวฤกษ์ เนื่องจากรูปร่างของดาวฤกษ์มีลักษณะเป็นทรงกลมและการกระจายตัวของแสงตามแนวรัศมีมีขอบเขตที่ชัดเจน ซึ่งแตกต่างกับดาราจักรที่มีรูปร่างและขอบที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดาราจักร นอกจากนี้รูปร่างของดาราจักรบางชนิดไม่เป็นทรงกลม ดังนั้นจึงยากต่อการวัดปริมาณใดๆ ที่ต้องอาศัยการคำนวณเกี่ยวกับทรงกลม เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องหาวิธีการวัดฟลักซ์ของดาราจักร โดยทางเอสดีเอสเอสจึงได้ดัดแปลงวิธีของ Petrosian (1976) ซึ่งวิธีนี้ได้วัดปริมาณฟลักซ์ภายในทรงกลมช่องเปิดที่มีรัศมีที่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ และนอกจากนั้นทางเอสดีเอสเอส ยังได้กำหนดสัดส่วนของความเข้มแสง (light intensity) ที่คงที่ในสองบริเวณ ที่เรียกว่า สัดส่วนเพโทรเซียน (Petrosian ratio), $\mathrm{R_p(r)}$ (Blanton และคณะ, 2001; Yasuda และคณะ, 2001)

$$\mathrm{R_p(r)} \equiv \frac{\int_{r\alpha_{lo}}^{r\alpha_{hi}} dr' 2\pi r' I(r') / [\pi(\alpha_{hi}^2 - \alpha_{lo}^2) r^2]}{\int_0^r dr' 2\pi r' I(r') / \pi r^2} \qquad \textbf{(3.10)}$$

สำหรับตัวแปร α_{hi} และ α_{lo} ทางเอสดีเอสเอสได้กำหนดเป็นค่าตัวเลขคือ 1.25 และ 0.8 ตามลำดับ สำหรับรัศมีเพโทรเซียน (r_p) คือรัศมีที่ทำให้ $\mathrm{R_p(r)} = 0.2$ และพีโทรเซียนฟลักซ์ $(\mathrm{F_p})$ ได้จากการวัดฟลักซ์ภายในรัศมี N_p เท่าของ r_p เขียนสมการได้เป็น

$$\mathrm{F_p} \equiv \int_0^{N_p r_p} 2\pi r' dr' I(r') \qquad \textbf{(3.11)}$$

สำหรับค่า N_pทางเอสดีเอสเอส ได้ใช้ค่าเท่ากับ 2 ดังนั้นแมกนิจูดเพโทรเซียนจะเขียนแทนด้วย $\mathrm{m_{Petrosian}}$ ซึ่งคำนวณได้มาจากการแทน $\mathrm{F_p}$ จากสมการที่ 3.11 ลงไปในสมการ 3.5

Chulalongkorn University

3.2.4 ไฟเบอร์ฟลักซ์ (Fiber Flux)

กล้องของเอสดีเอสเอสประกอบด้วยเส้นใยนำแสงจำนวน 640 เส้น ซึ่งแต่เส้นจะคอยเก็บข้อมูลของวัตถุได้ 1 ชนิด ไม่ว่าจะเป็นดาวฤกษ์ หรือ ดาราจักร ดังนั้น ฟลักซ์ที่วัดผ่านไฟเบอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $180\ \mu m\ (3'')$ ทั้ง 5 ฟิลเตอร์ จะเรียกว่า ไฟเบอร์ฟลักซ์ (fiber flux) และเมื่อคำนวณเป็นแมกนิจูดจะเรียกว่า ไฟเบอร์แมกนิจูด เขียนด้วย m_{fiber} การวางตำแหน่งของเส้นใยนำแสงจะวางที่บริเวณใจกลางของวัตถุ (Choi และคณะ, 2007; Simard และคณะ, 2011; Wyder และคณะ, 2007) ดังนั้น งานวิจัยจึงได้ใช้ไฟเบอร์แมกนิจูดในการวัดดัชนีสีบริเวณใจกลางของดาราจักร

3.3 ดัชนีสี

ดัชนีสี (color index) คือ ค่าตัวเลขที่ใช้บอกสีของวัตถุ เช่น ดาว หรือ ดาราจักร ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างสองแมกนิจูดที่วัดผ่านฟิลเตอร์ที่ความยาวคลื่นต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น สมมุติว่า เราวัดแมกนิจูดของดาวดวงหนึ่งโดยใช้ฟิลเตอร์วี (V) ที่มีความยาวคลื่นเฉลี่ย 540 นาโนเมตร $(\mathrm{m_V})$ และทำนองเดียวกัน เราก็วัดแมกนิจูดของดาวดวงเดิม แต่เปลี่ยนไปใช้ฟิลเตอร์ตัวใหม่คือ ฟิลเตอร์บี (B) ที่มีความยาวคลื่นเฉลี่ย 442 นาโนเมตร $(\mathrm{m_B})$ (*Johnson* และ *Morgan,* 1953) ดังนั้น เราจะเขียนดัชนีสีของดาวดวงนั้นได้เป็น

$$\text{ดัชนีสี} \equiv \mathrm{m_B} - \mathrm{m_V} \qquad \textbf{(3.12)}$$

จากสมการที่ 3.12 อาจจะเขียนรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\text{ดัชนีสี} \equiv (B - V) \qquad \textbf{(3.13)}$$

ดัชนีสีของดาวหรือดาราจักรจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิว หมายความว่า วัตถุใดที่มีอุณหภูมิสูงจะมีค่าดัชนีสีที่*น้อยกว่า*ค่าดัชนีสีของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อความเข้าใจที่มากขึ้น กำหนดให้ดาวมีการแผ่รังสีคล้ายกับการแผ่รังสีวัตถุดำ (black body radiation) กล่าวคือ ดาวสีฟ้าจะมีอุณหภูมิที่สูงและมีค่าดัชนีสี $(B - V)$ ติดลบ เพราะว่า ดาวดวงนี้มีความสว่างในแสงสีฟ้า (แสงที่ผ่านฟิลเตอร์บี) มากกว่าความสว่างในแสงสีเหลือง (แสงที่ผ่านฟิลเตอร์วี) หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า ค่าแมกนิจูด B น้อยกว่าแมกนิจูด V . และในทางตรงกันข้าม สำหรับดาวที่มีอุณหภูมิพื้นผิวต่ำ เช่น ดาวสีแดง จะมีค่าดัชนีสี $(B - V)$ เป็นบวก เพราะว่า ดาวสีแดงมีความสว่างในแสงสีเหลืองกว่าความสว่างในแสงสีฟ้า สำหรับดวงอาทิตย์จะมีค่าดัชนีสี $(B - V)$ เท่ากับ +0.656 (Gray, 1992) และดาวไรเจลมีค่าดัชนีสี $(B - V)$ เท่ากับ -0.03 (Nicolet, 1978)

สำหรับการนิยามดัชนีสี ที่ใช้ในงานวิจัยจะกำหนดให้เป็น

- เพโทรเซียนแมกนิจูดที่วัดผ่าน 2 ฟิลเตอร์คือ g และ r จะเขียนดัชนีสีได้เป็น

$$\text{ดัชนีสี} \equiv (\mathrm{g} - \mathrm{r})_{\mathrm{Petrosian}}$$

- ไฟเบอร์แมกนิจูดที่วัดผ่าน 2 ฟิลเตอร์ คือ g และ r จะเขียนดัชนีสีได้เป็น

$$\text{ดัชนีสี} \equiv (\mathrm{g} - \mathrm{r})_{\mathrm{fiber}}$$

บทที่ 4
วิธีการเลือกตัวอย่างดาราจักร

ในบทนี้จะแสดงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของการเลือกดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยในครั้งนี้ โดยหัวข้อ 4.1 จะเป็นการเลือกดาราจักรกลุ่มหลักที่พิจารณา z เฉพาะบางช่วง หลังจากนั้นหัวข้อ 4.2 จะเป็นนำดาราจักรในกลุ่มหลักมาคัดเลือกให้เหลือเฉพาะดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ ซึ่งทั้งสองขั้นตอนดังกล่าวจะทำการคัดดาราจักรที่ไม่ต้องการออกไป เช่น ดาราจักรแบบกังหันและดาราจักรแบบไร้รูปทรง และหัวข้อ 4.3 จะเป็นพิจารณาดูว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ใดบ้างที่มีใจกลางเป็นสีฟ้า โดยการใช้แผนภาพและตาเป็นตัวคัดกรอง และรายละเอียดได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

4.1 การเลือกตัวอย่างดาราจักรกลุ่มหลัก

เนื่องจากจำนวนดาราจักรในฐานข้อมูลเอ็นเอสเอ มีประมาณ 140,000 ดาราจักร ที่มีค่าการเลื่อนไปทางแดงหรือ z น้อยกว่า 0.05 ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณา z เฉพาะบางช่วงเท่านั้น โดยช่วงของ z จะอยู่ระหว่าง 0.01 กับ 0.02 และพบว่ามีจำนวนดาราจักรที่สอดคล้องกับเงื่อนไข z ดังกล่าวเพียง 12,940 ดาราจักร นอกจากนี้ ตัวอย่างที่เลือกมาทั้งหมดจะถูกกำหนดให้มีคุณภาพของสเปกตรัมที่ถ่ายโดยใช้ปริมาณที่เรียกว่า *อัตราสัญญาณต่อการรบกวน* (signal to noise ratio) หรือ S/N และใช้ค่าที่มากกว่า 5 ขึ้นไป

4.2 การเลือกตัวอย่างดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์

จากหัวข้อ 4.1 เมื่อได้ตัวอย่างดาราจักรในกลุ่มหลักมาแล้ว ขั้นถัดไปคือ การเลือกเอาเฉพาะดาราจักรที่เป็นแบบทรงรีและเอสศูนย์ เนื่องจากในกลุ่มหลักมีดาราจักรทั้งแบบทรงรีและแบบกังหันปะปนกัน แต่สำหรับดาราจักรแบบไร้รูปทรงนั้น จะพบได้น้อยมาก เพราะว่า ได้ทำการลดจำนวนดาราจักรในกลุ่มนั้นไปแล้วตามขั้นตอนในข้อ 4.1 ดังนั้น ในขั้นตอนในหัวข้อนี้ เป้าหมายหลักคือ การลดจำนวนดาราจักรแบบกังหัน โดยใช้ตัวแปรดังต่อไปนี้เป็นเกณฑ์

- มวลดาวฤกษ์ (Stellar masses) , $\mathbf{M_{\star}}$

  โดยทั่วไปดาราจักรจะประกอบไปด้วย ดาว ฝุ่น แก๊ส และสสารมืด สำหรับการคำนวณมวลของดาราจักรจะไม่สามารถคำนวณมวลที่แท้จริงได้เนื่องจากว่า สสารที่อยู่ในดาราจักรหรือในจักรวาลมีทั้งส่วนที่มองเห็นและมองไม่เห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสสารที่มองไม่เห็น หรือเรียกว่า สสารมืด ยังเป็นสิ่งที่ไม่สามารถวัดปริมาณทางฟิสิกส์ใดๆได้ ดังนั้นสิ่งที่สามารถวัดได้ต้องมาจากวัตถุที่มองเห็น หรือ ที่กำลังส่องสว่าง นั้นคือมาจากกลุ่มดาวหรือกลุ่มฝุ่นละอองแก๊ส การหามวลของดาราจักรนั้นได้จากการรวมกันของมวลดาวที่อยู่ในดารา

จักรซึ่งเป็นเพียงวิธีทางอ้อม และเป็นที่นิยมอย่างมากในการศึกษาการกำเนิดและการวิวัฒนาการของดาราจักรในปัจจุบัน โดยทั่วไปมวลดาวฤกษ์ในดาราจักรแบบกังหันจะมีค่าน้อยกว่ามวลดาวฤกษ์ของดาราจักรแบบทรงรี สำหรับในงานวิจัยนี้เราจะเลือกใช้มวลดาวฤกษ์ที่นำจากฐานข้อมูลเอ็นเอสเอ โดยหน่วยของ $\mathrm{M}_{\star}$ จะมีหน่วยเป็น $h^{-2}M_{\odot}$ โดยที่ $M_{\odot}$ คือ มวลของดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ $1.989 \times 10^{30}\ \mathrm{kg}$ จากงานวิจัยของ (Blanton และ Roweis, 2007; Blanton และคณะ, 2005) ได้กำหนดค่า $h = 1$ ซึ่งค่า h ได้จากความสัมพันธ์ที่ว่า $h = 100H_0^{-1}$ โดยตัวแปร H_0 คือ ตัวแปรฮับเบิล

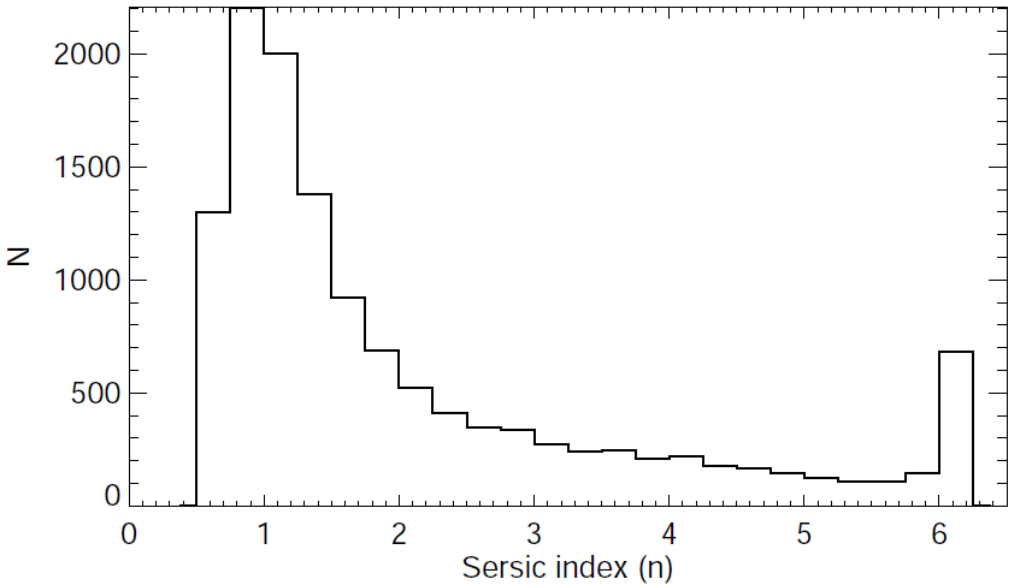
- ดัชนีเซอร์ซิก (Sersic Index)

  ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เราสามารถใช้ดัชนีเซอร์ซิก (n) เป็นตัวแปรในการระบุรูปร่างของดาราจักรได้อย่างคร่าวๆ กล่าวคือ ดาราจักรที่มีค่า n สูง จะมีรูปร่างลักษณะคล้ายดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ (bulge-dominated galaxies) และ ดาราจักรที่มีค่า n ต่ำจะมีรูปร่างลักษณะคล้ายดาราจักรแบบกังหัน (disk-dominated galaxies) Hogg และคณะ (2004) ได้ชี้ให้เห็นว่า $n > 2$ สามารถแยกกลุ่มดาราจักรสีแดง ออกจากกลุ่มดาราจักรสีฟ้าได้ แต่เนื่องจากว่า เงื่อนไขดังกล่าวไม่สามารถแยกดาราจักรทั้งสองกลุ่มออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้ค่า n ที่มีค่าขอบเขตต่ำสุดคือ $n = 4$ ไปจนถึงค่าขอบเขตสูงสุดที่ $n = 5.9$ จากภาพถ่ายเอสดีเอสเอสพบว่า ดาราจักรที่มีค่า n น้อยกว่า 4 ลงมา ยังพบดาราจักรแบบกังหันปะปนกับดาราจักรแบบทรงรีอยู่ ซึ่งขัดแย้งกับเป้าหมายของวิทยานิพนธ์นี้ ที่ต้องการดาราจักรแบบทรงรีหรือแบบเอสศูนย์ให้มากที่สุด ดังนั้น เราจึงเลือกค่า n .ให้สูงขึ้น สำหรับค่าดัชนีเซอร์ซิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้นำมาจากเอ็นเอสเอ และเอ็นวายยูแวลูแอดกาแล็กซี แคตตาลอก (NYU Value-Added Galaxy Catalog) (Blanton และคณะ, 2005) หรือ เอ็นวายยู-วีเอจีซี (NYU-VAGC) การคำนวณค่าดัชนีเซอร์ซิกได้ใช้แถบฟิลเตอร์ r วัดค่าดังกล่าว

ปริมาณทั้งสองตัวดังที่กล่าวไว้ด้านบนนั้น เป็นการอธิบาย เพราะเหตุใดเราจึงใช้ตัวแปรดังกล่าวที่ใช้หาดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ สำหรับค่าในแต่ละตัวแปรที่ใช้เลือกดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่นำมาจากตัวอย่างดาราจักรกลุ่มหลัก (หัวข้อ 4.1) เราเขียนสรุปไว้ในรูปแบบของตารางข้างนี้

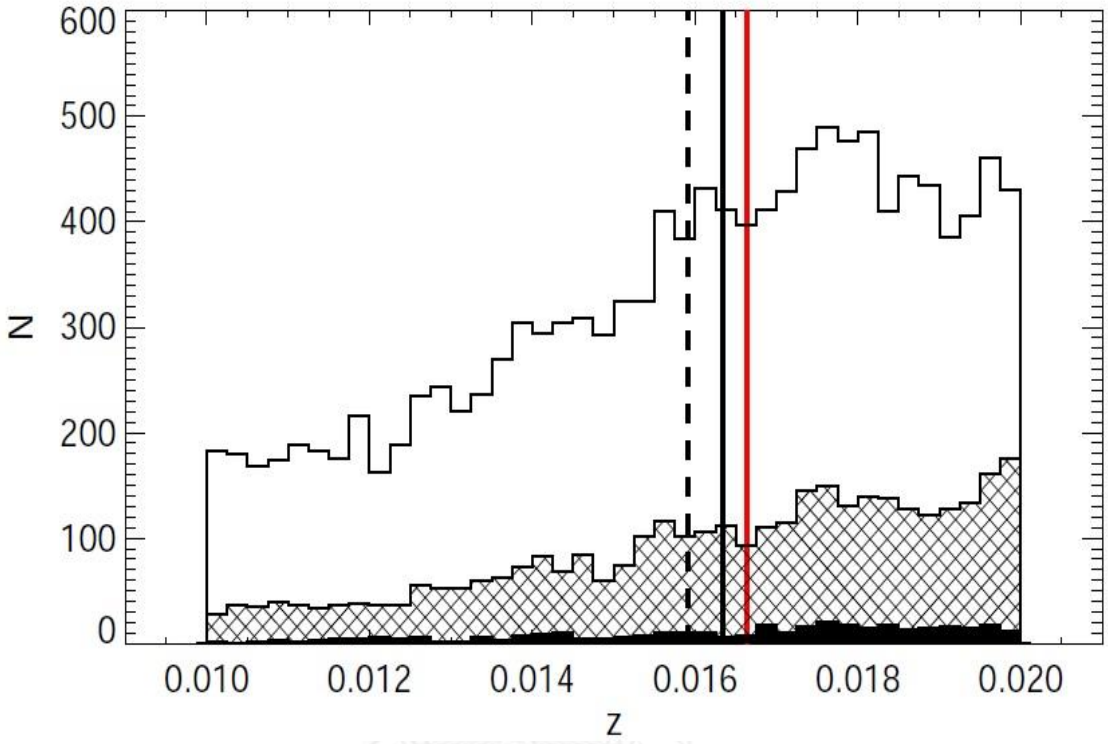
ตารางที่ 4.1 สรุปค่าตัวแปรที่ใช้เลือกดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์

ชื่อตัวแปร	เกณฑ์
มวลดาวฤกษ์	$\log(\mathrm{M}_{\star}/\mathrm{M}_{\odot}) > 9.0$
ดัชนีเซอร์ซิก	$4.0 < n < 5.9$



ภาพที่ 4.1 แสดงการแจกแจงในรูปฮิสโตแกรมดัชนีเซอร์ซิกของดาราจักรที่อยู่ในช่วง z ระหว่าง 0.01 กับ 0.02 โดยส่วนใหญ่ดาราจักรแบบกังกันจะมีค่าดัชนีเซอร์ซิกประมาณ 2 และดาราจักรแบบทรงรีจะมีค่าดัชนีเซอร์ซิกประมาณ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.2 แสดงการแจกแจงของกลุ่มตัวอย่างดาราจักรในช่วง z ต่างๆกันในรูปแบบของฮิสโทแกรม ค่าเฉลี่ยของดาราจักรทั้งหมดที่เลือกมาจากเอ็นเอสเอในช่วง z ตั้งแต่ 0.01ถึง 0.02 จะแสดงด้วยเส้นประสีดำ สำหรับดาราจักรที่เลือกตามวิธีในหัวข้อ 4.1 แสดงด้วยเส้นทึบสีดำ และกลุ่มดาราจักรที่เลือกเฉพาะดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ตามวิธีในหัวข้อ 4.2 แสดงด้วยเส้นประสีแดง

จากภาพที่ 4.2 แสดงการแจกแจงของกลุ่มตัวอย่างดาราจักรในช่วง z ต่างๆกันในรูปแบบของฮิสโทแกรมของดาราจักรที่อยู่ในช่วง z ระหว่าง 0.01 ถึง 0.02 สำหรับดาราจักรที่เลือกจากเอ็นเอสเอที่พิจาณาค่า z ในบางช่วงดังกล่าวจะแสดงรูปแบบฮิสโทแกรมสีขาวที่มีค่าเฉลี่ย z เท่ากับ 0.0159 (เส้นประสีดำ) ดาราจักรที่ถูกเลือกโดยใช้วิธีในหัวข้อ 4.1 จะแสดงด้วยฮิสโทแกรมลายและมีค่าเฉลี่ย z ของกลุ่มดาราจักรนี้เท่ากับ 0.0163 (เส้นทึบสีดำ) และขั้นตอนสุดท้ายของการคัดเลือก ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่คัดเลือกด้วยวิธีในหัวข้อ 4.2 จะแสดงด้วยฮิสโทแกรมสีดำ และมีค่าเฉลี่ย z เท่ากับ 0.0166 (เส้นทึบสีแดง) ภาพรวมที่ได้จากภาพที่ 4.2 ก็คือว่า ดาราจักรที่งานวิจัยนี้นำมาศึกษาส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง z ที่สูงขึ้น และนอกจากนั้น จำนวนดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์จะพบได้มากเมื่อมีค่า z สูงกว่าค่าเฉลี่ย

4.3 การเลือกตัวอย่างดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางสีฟ้า

สำหรับในหัวข้อย่อยนี้ จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการค้นหาว่า ประชากรดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ใดบ้างที่จะพบลักษณะที่ใจกลางที่เป็นสีฟ้า โดยขั้นตอนและวิธีในการเลือกดาราจักรในลักษณะดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 2 วิธีย่อย คือ วิธีที่1 จะเป็นการค้นหาด้วยแผนภาพ โดยการใช้ดัชนีเซอร์ซิกเป็นเกณฑ์หลัก (ดูหัวข้อ 2.2) แต่วิธีนี้จะไม่สามารถคัดดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าออกได้ครบทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีที่ 2 คือ การคัดเลือกด้วยตา โดยที่วิธีนี้ส่วนใหญ่แล้วดาราจักรที่คัดทิ้งจะเป็นดาราจักรที่มีความสว่างน้อยหรือภาพที่ถ่ายออกมาคุณภาพไม่ดี เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของวิธีต่างๆ จะแสดงดังต่อไปนี้

4.3.1 การคัดเลือกด้วยแผนภาพ

เมื่อได้ดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์จากหัวข้อ 4.2 จะพบว่าส่วนใหญ่ใจกลางของดาราจักรเหล่านี้จะมีสีออกแดง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปที่จะพบได้ในกลุ่มดาราจักรสีแดง โดยหัวย่อยนี้จะอธิบายวิธีการเลือกดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า ให้ออกจากกลุ่มดาราจักรทรงรีแบบทั่วไป วิธีที่ตรงไปตรงมามากที่สุดคือ การดูว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ใดบ้างที่มีใจกลางเป็นสีฟ้า (Kannappan และคณะ, 2004; Suh และคณะ, 2010) ซึ่งดาราจักรดังกล่าวได้หามาจากขั้นตอนในหัวข้อ 4.2 ด้านบนก่อนหน้านี้ คำอธิบายนิยามของดัชนีสี คือค่าความแตกต่างระหว่าง สองแมกนิจูดที่วัดผ่าน 2 ฟิลเตอร์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ทั้งหมด ผู้วิจัยจะทำการหาค่าดัชนีสีใน 2 บริเวณ คือ ใจกลางและสีโดยรวม การวัดดัชนีโดยรวมผู้วิจัยจะเลือกใช้แมกนิจูดเพโทรเซียน (หัวข้อ 3.2.3) ที่ผ่านแถบฟิลเตอร์ g และ r ดังนั้น ดัชนีสีในระบบเพโทรเซียนคือ $(\mathrm{g\text{-}r})_{\mathrm{Petrosian}}$ สำหรับดัชนีสีบริเวณใจกลาง ผู้วิจัยได้เลือกใช้แมกนิจูดที่วัดผ่านเส้นใยนำแสงของเอสดีเอสเอส ในแถบฟิลเตอร์ g และ r ดังนั้น ดัชนีของบริเวณใจกลางคือ $(\mathrm{g\text{-}r})_{\mathrm{fiber}}$

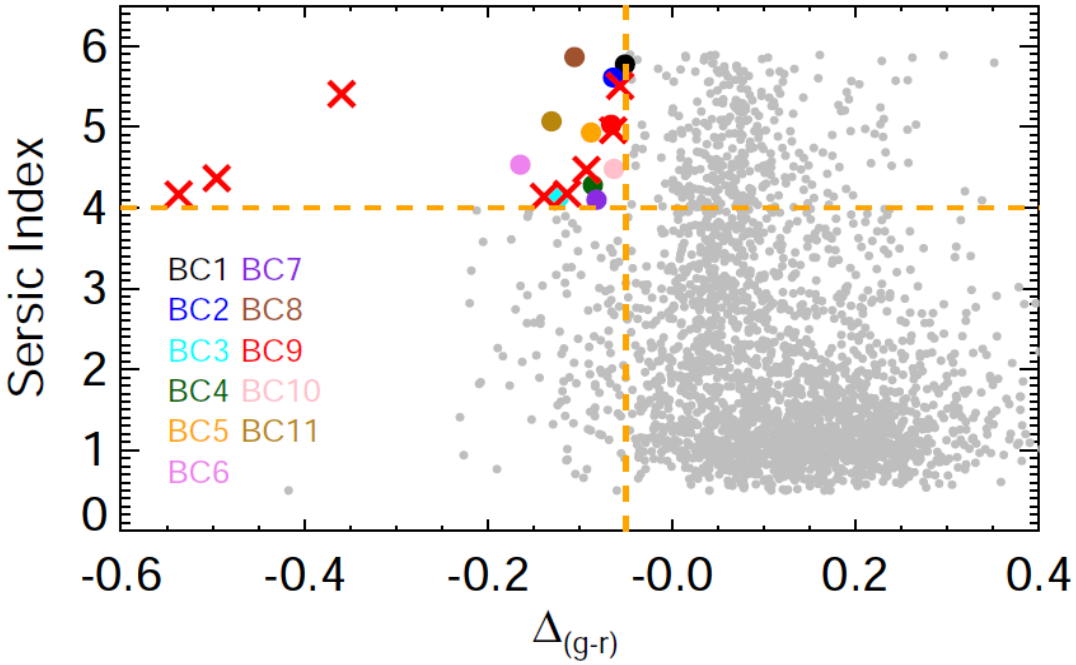
ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางสีฟ้า (blue core E/S0, BC) คือ ดาราจักรที่ต้องการ ดังนั้น ผู้วิจัยจะกำหนดให้บริเวณตรงกลางของดาราจักรต้องมีสีฟ้ากว่า (ค่าดัชนีสีน้อย) สีโดยรวมทั้งดาราจักร (ค่าดัชนีสีมาก) และเขียนเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ดังนั้น

$$\Delta_{(g\text{-}r)} \equiv (g\text{-}r)_{fiber} - (g\text{-}r)_{Petrosian}$$

สำหรับค่า Δ_{color} งานวิจัยได้พบว่า ค่าที่เหมาะสมกำหนดให้เท่ากับ

$$\Delta_{(g-r)} < -0.05$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีเซอร์ซิก (แกน x) และความต่างของดัชนีสี (แกน y) โดยกำหนดให้ดาราจักรบีซี อยู่บริเวณด้านซ้ายของเส้นประสีส้ม ซึ่งตัดกับแกน $\Delta_{(g-r)}$ ที่ค่า -0.05 และดาราจักรบีซี จำนวน 19 ดาราจักร จะแสดงด้วยจุดสีต่างๆ โดยเรียงตามลำดับชื่อ สำหรับบริเวณด้านขวาของเส้นประคือ กลุ่มดาราจักรแบบทรงรีหรือเอสศูนย์ทั่วไปซึ่งโดยส่วนใหญ่ดาราจักรเหล่านี้จะมีใจกลางเป็นสีแดงและเส้นประสีส้มในแนวนอนคือขอบเขตต่ำสุดของดัชนีเซอร์ซิก n ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าตั้งแต่ 4 ขึ้นไป และดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ที่คัดทิ้งจะแสดงด้วย กากบาทสีแดง

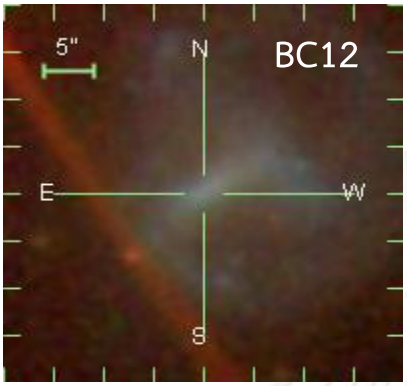
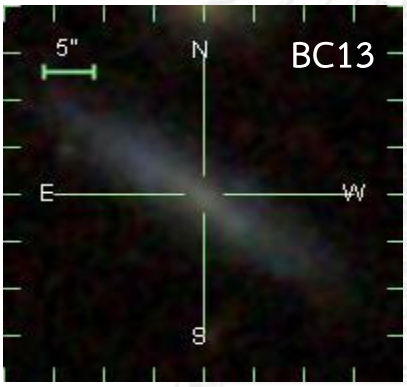
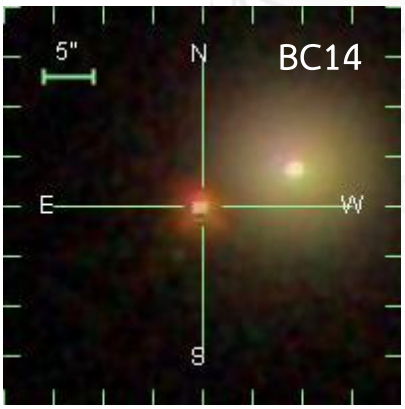
4.3.2 การคัดเลือกด้วยตา

ดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้นว่า งานวิจัยนี้มีความจำเป็นที่ต้องใช้วิธีการเลือกดาราจักรที่ต้องการด้วยตาเปล่า การเลือกตัวอย่างดาราจักรสำหรับในบางงานวิจัยที่ได้ใช้วิธีการเลือกด้วยตาเป็นหนึ่งในวิธีการเลือก ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของลินทอตต์ (Lintott และคณะ, 2008), บอลล์ (Ball และคณะ, 2008), ยาชูดะ (Yasuda และคณะ, 2001) และ ลินทอตต์ (Lintott และคณะ, 2011) จากขั้นตอนในหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งเป็นการเลือกด้วยแผนภาพ (ภาพที่ 4.3) ผลที่ได้พบว่า มีดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าอยู่จำนวนทั้งหมด 19 ดาราจักร และมีอยู่จำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์แบบทั่วไปซึ่งมีอยู่จำนวน 351 ดาราจักร

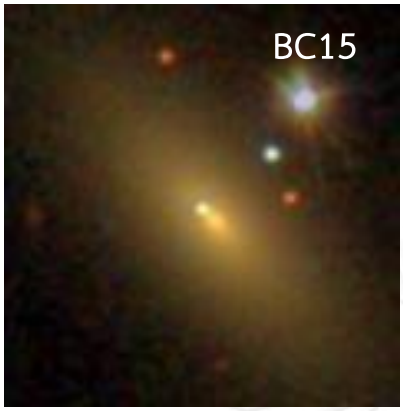
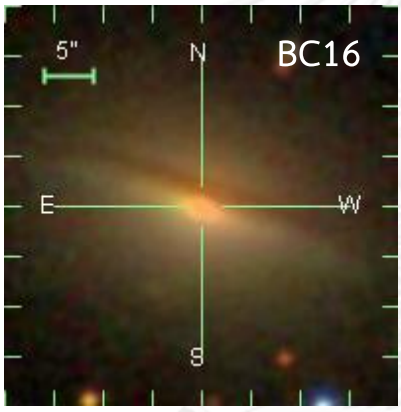
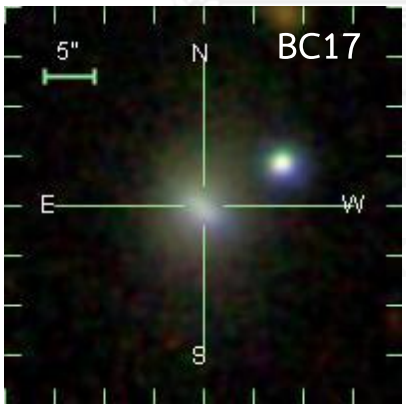
ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า ทั้ง 19 ดาราจักร เมื่อดูภาพถ่ายที่ได้จากเอสดีเอสเอส พบว่ามีดาราจักรจำนวนบางส่วน ไม่ใช่ดาราจักรที่ต้องการซึ่งได้ปะปนเข้ามา ยกตัวอย่างเช่น ดาราจักรที่คล้ายกับดาราจักรแบบไร้รูปทรงซึ่งจะสังเกตได้จากความสว่างที่น้อยกว่าดาราจักรชนิดอื่นๆ และนอกจากนั้นยังพบว่า มีดาราจักรแบบทรงรีทั่วไปที่ใจกลางมีสีแดงได้ปะปนเข้ามาด้วยเช่นกัน ดังนั้นในขั้นตอนสุดท้าย จะคัดดาราจักรเหล่านั้นออกไปด้วยตา ซึ่งดาราจักรที่คัดทิ้ง (ภาพที่ 4.2 กากบาทสีแดง) มีจำนวนทั้งหมด 8 ดาราจักร สำหรับคำอธิบายพร้อม เหตุผลที่คัดดาราจักรเหล่านั้นทิ้งไปได้อธิบายไว้แล้วในตารางที่ 4.2 สุดท้ายจะได้ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่มีใจกลางสีฟ้าจำนวน 11 ดาราจักร ภาพถ่ายที่ได้จากเอสดีเอสเอสของดาราจักรทั้ง 11 จะแสดงไว้ในภาพที่ 4.4 และจะนำดาราจักรเหล่านี้ไปทำวิเคราะห์ต่อ เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

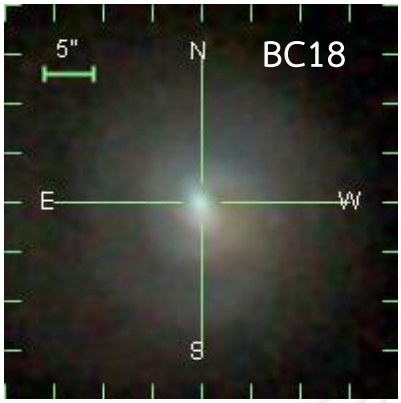
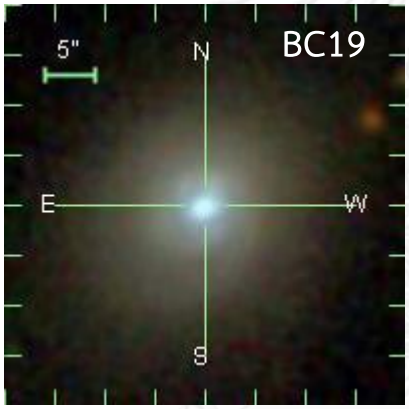
ตารางที่ 4.2 แสดงรูปภาพดาราจักรที่คัดออกด้วยตา พร้อมทั้งการระบุเหตุผล

ดาราจักรที่คัดออก	เหตุผล
	จากภาพที่ถ่ายโดย เอสดีเอสเอส นี้จะเห็นลำแสงสีแดงทางด้านซ้ายของภาพ ซึ่งเป็นลำแสงที่ไม่ทราบแหล่งที่มา รวมทั้งภาพได้จะมีสีออกแดง ซึ่งไม่ใช่สีจากดาราจักรและจะส่งผลต่อวัดค่าแมกนิจูด
	ลักษณะของดาราจักรนี้ จะสังเกตเห็นว่าไม่ใช่ดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ซึ่งโดยรวมสีของดาราจักรนี้ควรมีสีออกแดง แต่สำหรับดาราจักรในภาพนี้ เป็นสีฟ้าที่บริเวณด้านหัวท้าย ซึ่งตรงกับลักษณะของดาราจักรแบบกังหัน
	การวางตำแหน่งของเส้นใยนำแสงไม่ได้ว่างอยู่ที่ดาราจักรแบบทรงรีด้านขวา

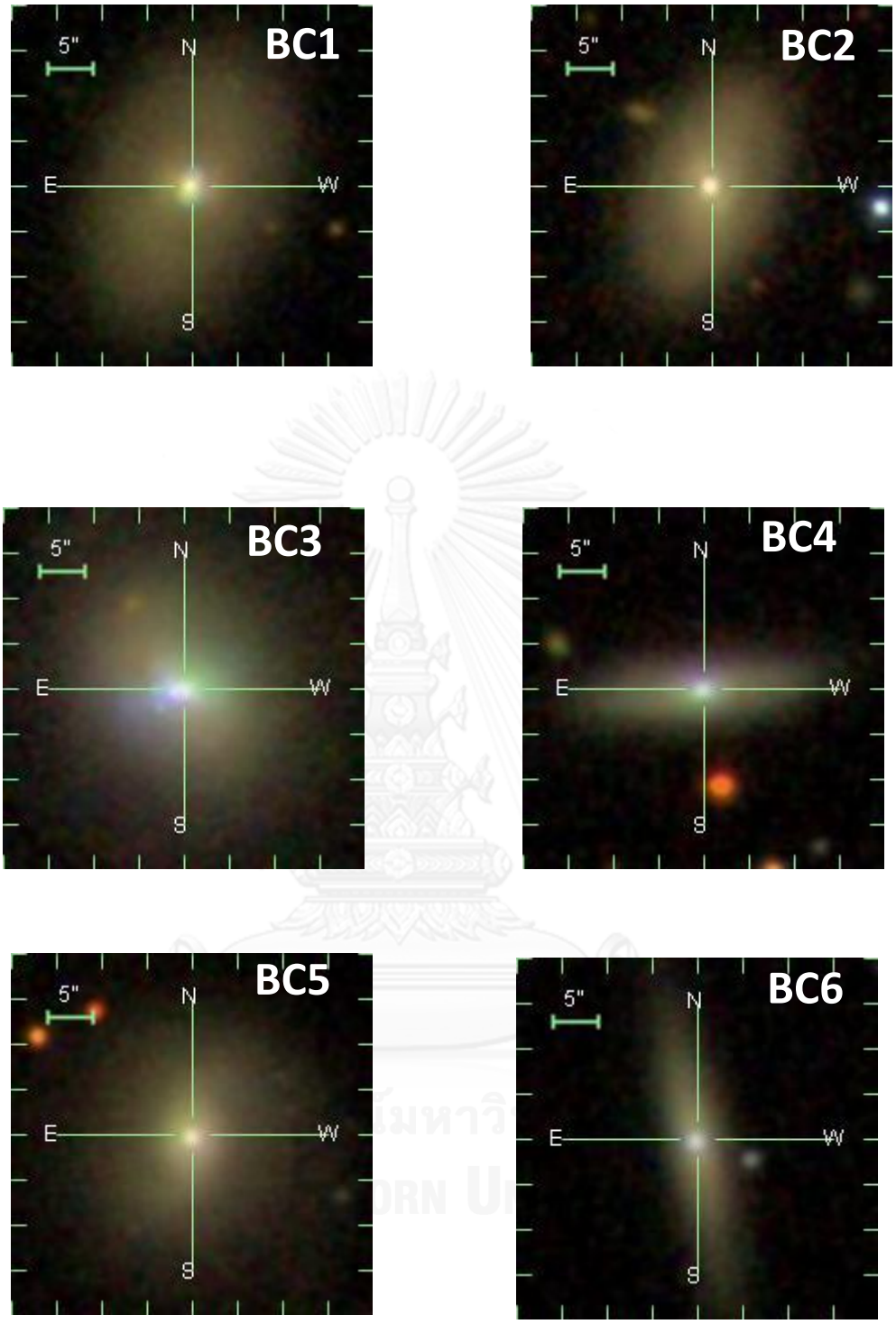
ตารางที่ 4.2(ต่อ) แสดงรูปภาพดาราจักรที่คัดออกด้วยตา พร้อมทั้งการระบุเหตุผล

ดาราจักรที่คัดออก	เหตุผล
	ดาราจักรในภาพนี้เป็นแบบทรงรีที่ใจกลางเป็นสีแดงซึ่งสีที่ต้องการคือ สีฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่ามีวัตถุบางอย่างทางด้านขวาบนของภาพที่ความสว่างใกล้เคียงกับใจกลางของดาราจักรนั้น
	ดาราจักรในภาพนี้เป็นดาราจักรแบบทรงรีที่มีใจกลางเป็นสีแดง
	ภาพถ่ายนี้ประกอบไปด้วย 2 วัตถุ โดยวัตถุที่มีเส้นใยนำแสงวางอยู่คือดาราจักร และอีกวัตถุคือ ไม่ทราบที่มา แต่ผลที่เกิดขึ้นคือ แสงที่มาจากวัตถุนั้น อาจส่งผลต่อการวัดค่าแมกนิจูด

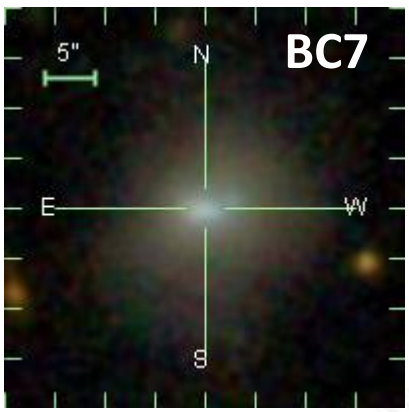
ตารางที่ 4.2(ต่อ) แสดงรูปภาพดาราจักรที่คัดออกด้วยตา พร้อมทั้งการระบุเหตุผล

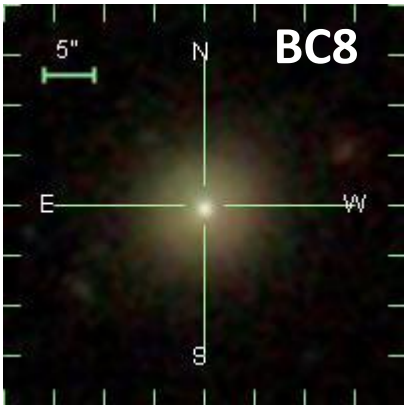
ดาราจักรที่คัดออก	เหตุผล
	ดาราจักรในภาพนี้ เป็นดาราจักรที่มีใจกลางเป็นสีฟ้า แต่ไม่ใช้ ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ โดยสังเกตว่ามีแขนที่บริเวณตรงกลาง
	เช่นเดียวกับภาพก่อนหน้านี้ ดาราจักรในภาพเป็นดาราจักรที่มีใจกลางเป็นสีฟ้า แต่ไม่ใช้ ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่เราต้องการ โดยสังเกตว่ามีแขนที่บริเวณตรงกลาง

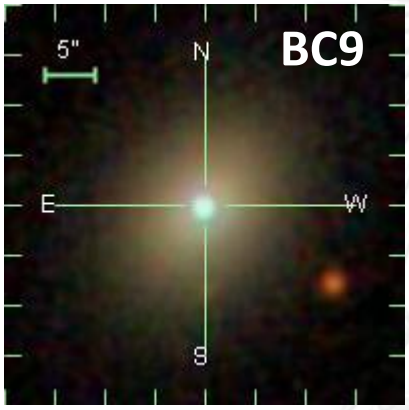
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

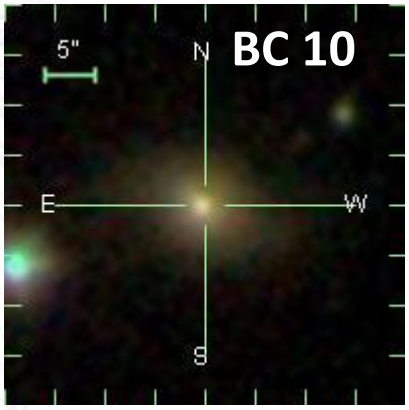


ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ได้จากการคัดเลือกในขั้นตอนสุดท้าย

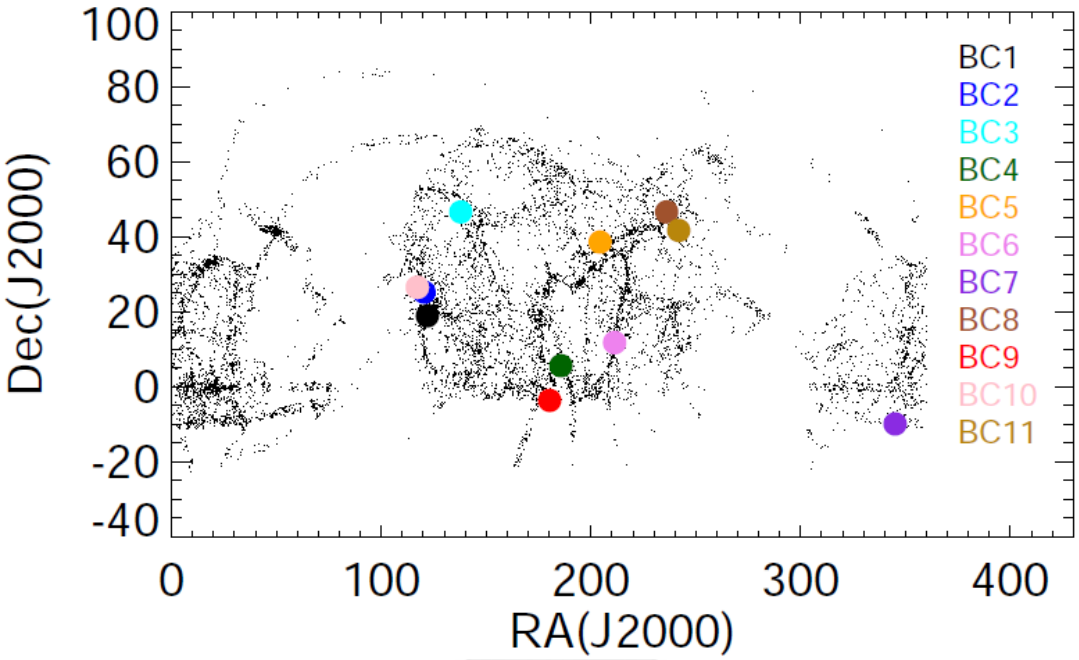








รูปที่ 4.4 (ต่อ) : ภาพถ่ายในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นของดาราจักรแบบทรงรีและเอส ศูนย์ที่ได้จากการคัดเลือกในขั้นตอนสุดท้าย



ภาพที่ 4.5 แสดงตำแหน่งท้องฟ้าของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักร โดยแกน x คือ ไรซ์แอสซันชัน และแกน y คือ เดคคิเนชัน ซึ่งทั้งสองมีหน่วยเป็นองศา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติค่าตัวแปรต่างๆของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ทั้ง 11 ดาราจักร ที่ได้คัดเลือกจากขั้นตอนสุดท้ายในหัวข้อ 4.3

ชื่อ	ชื่อของ SDSS	ไรซ์แอสซันชัน (R.A.)	เดคลิเนชัน (DEC).	มวลดาว $\log(M_\star/M_\odot)$	ดัชนีเซอร์ซิก n	$\Delta_{(g-r)}$	M_r
BC1	SDSS J080753.09+185442.4	121.97123	18.911805	9.66	5.775	-0.051	-19.29
BC2	SDSS J080142.44+251424.9	120.42688	25.240265	9.67	5.611	-0.064	-19.35
BC3	SDSS J091139.73+463823.1	137.9156	46.639758	9.69	4.127	-0.123	-19.75
BC4	SDSS J122247.61+053624.2	185.69837	5.6067558	9.12	4.279	-0.086	-18.47
BC5	SDSS J133727.01+383656.4	204.36259	38.615656	9.39	4.931	-0.088	-18.52
BC6	SDSS J140510.39+114616.9	211.29334	11.771371	9.10	4.533	-0.165	-18.20
BC7	SDSS J230013.20-095639.4	345.05500	-9.9442913	9.142	4.097	-0.082	-18.70
BC8	SDSS J154425.44+463934.0	236.10599	46.659454	9.222	5.865	-0.106	-18.64
BC9	SDSS J120114.35-034041.1	180.30982	-3.67811	9.752	5.029	-0.066	-19.89
BC10	SDSS J074842.59+263223.10	117.17751	26.539765	9.013	4.480	-0.063	-17.39
BC11	SDSS J160723.18+414232.1	241.84670	41.70898	9.529	5.069	-0.131	-19.30

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติค่าตัวแปรต่างๆของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่คัดออก

ชื่อ	ชื่อของ SDSS	ไรซ์แอสซันชัน (R.A.)	เดคลิเนชัน (DEC).	มวลดาว $\log(M_\star/M_\odot)$	ดัชนีเซอร์ซิก n	$\Delta_{(g-r)}$	M_r
BC12	SDSS J135756.29+072559.9	209.48455	7.43332	10.49	4.165	-0.537	-20.72
BC13	SDSS J141205.26+545036.8	213.02192	54.84356	9.56	5.407	-0.359	-19.16
BC14	SDSS J011151.93-003753.1	17.96639	-0.63144	10.00	4.136	-0.139	-19.73
BC15	SDSS J031552.15+415127.7	48.96732	41.85769	10.20	5.506	-0.056	-20.32
BC16	SDSS J160449.82+082851.9	241.20759	8.48109	10.26	4.365	-0.496	-19.52
BC17	SDSS J234042.68-092336.6	355.17783	-9.39350	9.01	4.469	-0.093	-18.20
BC18	SDSS J125905.29+273839.8	194.77206	27.64440	9.63	4.958	-0.064	-19.67
BC19	SDSS J125905.29+273839.8	186.49399	4.47397	9.31	4.173	-0.114	-19.71

บทที่ 5
การวิเคราะห์ผล

ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าที่อยู่ในช่วง z ระหว่าง 0.01 ถึง 0.02 พบว่ามีอยู่จำนวน 11 ดาราจักร แต่เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนดาราจักรทั้งหมดที่อยู่ในช่วง z ดังกล่าวมีอยู่จำนวนน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับกันนัพพัน (Kannappan และคณะ, 2004) ที่ว่า ดาราจักรแบบกังหันที่ใจกลางมีสีฟ้าที่เลือกมาจาก ฐานข้อมูล nearby field galaxy survey จะพบเพียง 10 % จากดาราจักรทั้งหมดในฐานข้อมูลดังกล่าว สำหรับในบทที่ 5 นี้จะเป็นการนำดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้งหมดมาวิเคราะห์หาปริมาณและความสัมพันธ์ต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับดาราจักรแบบทรงรีทั่วไป

5.1 การแบ่งประเภทของดาราจักรโดยใช้แผนภาพ

สำหรับหัวข้อย่อยนี้เป็นการนำแผนภาพต่างๆมาใช้ในการแบ่งประเภทของดาราจักรโดยแผนภาพแรกจะเป็นการแบ่งโดยใช้ดัชนีสีและแมกนิจูดเป็นเกณฑ์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่มคือ ดาราจักรสีแดงและดาราจักรสน้ำเงิน และแผนภาพที่สองคือแผนภาพ บอลด์วิน ฟิลลิปส์แอนด์เทอเลวิช (Baldwin, Phillips & Terlevich, BPT) โดยแผนภาพนี้จะอาศัยความสามารถในการปล่อยพลังงาน เพื่อที่ใช้ในการไอออไนซ์ ธาตุต่างๆ ให้กลายเป็นไอออน สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมได้แสดงไว้ดังต่อไปนี้

5.1.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและแมกนิจูดสัมบูรณ์

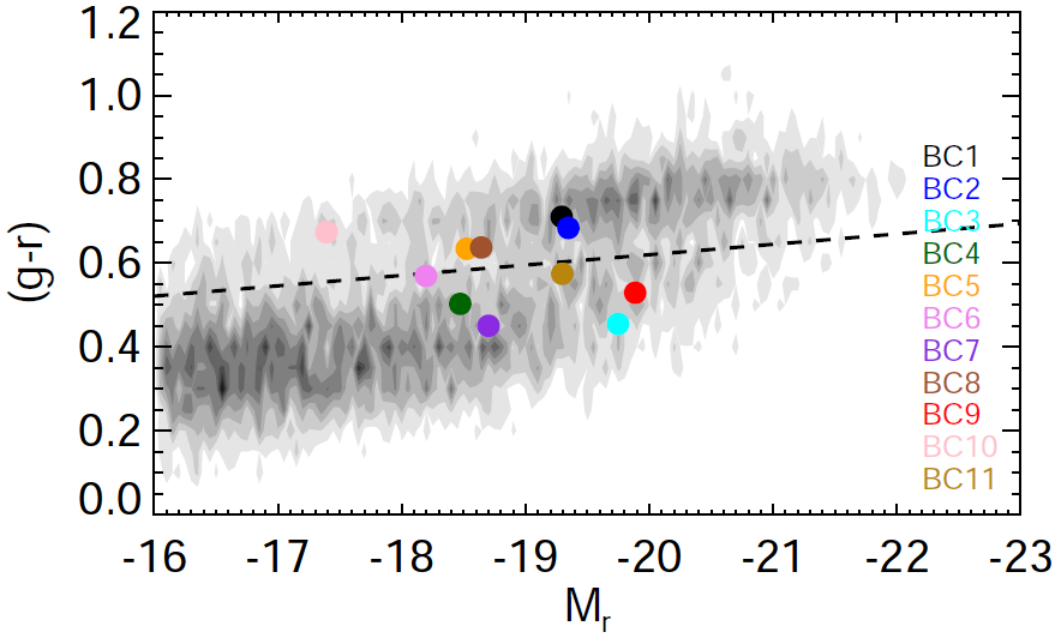
แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและแมกนิจูดสัมบูรณ์สามารถแบ่งออกเป็นสองบริเวณใหญ่ๆ คือ กลุ่มดาราจักรสีน้ำเงิน (เช่น ดาราจักรแบบกังหันและไร้รูปทรง) และ กลุ่มดาราจักรสีแดง (เช่น ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์) (Baldry และคณะ, 2004; Strateva และคณะ, 2001) โดยมีสมการเส้นแบ่งระหว่างกลุ่มดาราจักรทั้งสอง คือ

$$(g\text{-}r)=-0.025\,M_r+0.126 \qquad (5.1)$$

สำหรับคำอธิบายในการหาสมการดังกล่าว ผู้วิจัยได้ให้อธิบายไว้ในภาคผนวกด้านท้าย สมการเส้นตรง (สมการที่ 5.1) ที่แสดงด้วยเส้นประสีดำในภาพที่ 5.1 ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เป็นเส้นแบ่งระหว่าง

กลุ่มดาราจักรทั้งสองประเภท สำหรับดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ทั้ง 11 ดาราจักร จะเห็นได้ชัดว่ามีการกระจายออกไปทั้งสองกลุ่มรวมทั้งรอยต่อระหว่างกลุ่มทั้งสอง แต่โดยส่วนใหญ่จะอยู่กลุ่มของดาราจักรสีฟ้า และชี้ให้เห็นว่า แม้รูปร่างของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าจะเป็นแบบดาราจักรทรงรีทั่วๆไป แต่ผลที่ได้กลับพบว่า ลักษณะรูปร่างไม่ได้เป็นตัวกำหนดตำแหน่งบนปริภูมิของซีเอ็มดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



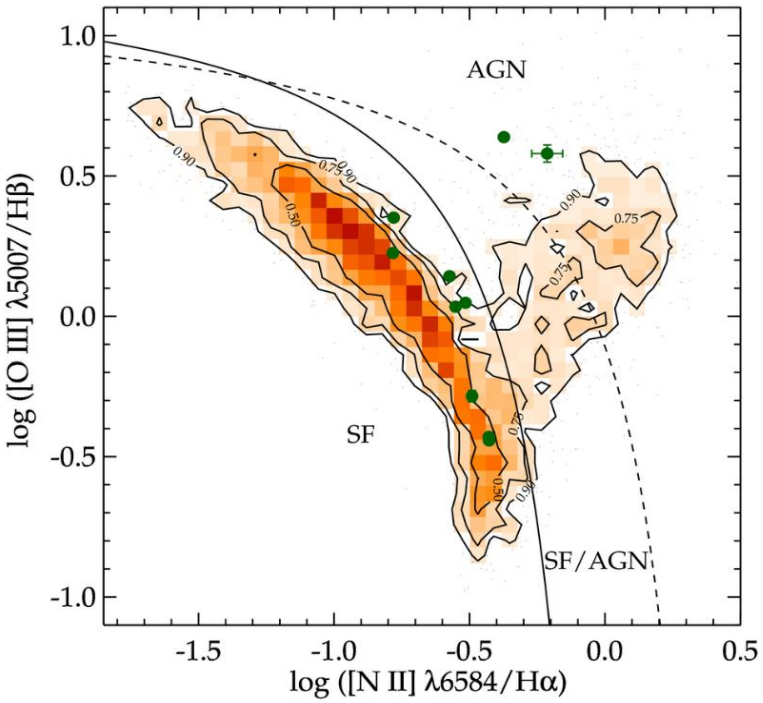
ภาพที่ 5.1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับความสว่างสัมบูรณ์ เส้นตรงที่ได้จากสมการที่ 5.1 ในงานวิจัยกำหนดให้เป็นเส้นแบ่งประชากรของดาราจักร โดยด้านบนและด้านล่างของเส้นตรงคือ ดาราจักรสีแดงและดาราจักรสีฟ้า ตามลำดับ และดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าจะแสดงด้วยจุดสีต่างๆ พร้อมกับชื่อดาราจักร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1.2 แผนภาพบอลด์วิน ฟิลลิปส์แอนด์เทอเลวิช

หัวข้อก่อนหน้านี้ได้อาศัยตัวแปรทางกายภาพคือ ดัชนีสีและแมกนิจูดสัมบูรณ์ เป็นเกณฑ์ในการแบ่งดาราจักร แต่สำหรับหัวข้อนี้ได้ใช้ความสามารถในการปล่อยพลังงาน โดยทั่วไปดาราจักรจะปล่อยพลังงานออกมาจากกลุ่มดาวจำนวนมาก โดยดาราจักรที่มีการกำเนิดดาว อย่างเช่น ดาราจักรแบบกังหันหรือดาราจักรแบบไร้รูปทรง ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่มาจากดาวอายุน้อยๆ ดังนั้นจะเรียกดาราจักรกลุ่มนี้ในอีกรูปแบบหนึ่งคือ ดาราจักรที่มีการกำเนิดดาว (star forming galaxies) หรือเรียกอย่างย่อว่า *เอสเอฟ* (SF) นอกจากนี้ยังมีดาราจักรอีกจำพวกหนึ่งที่มีการปล่อยพลังงานออกมามากกว่าปกติ โดยดาราจักรลักษณะดังกล่าวมีชื่อว่า ดาราจักรกัมมันต์ (active galaxies) พลังงานสูงที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในความยาวคลื่นรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา โดยบริเวณที่ปล่อยพลังงานออกมาคือ จุดศูนย์กลางดาราจักรกัมมันต์ และเราจึงเรียกบริเวณนี้ว่า แก่นดาราจักรกัมมันต์ (active galactic nuclei) หรือเรียกอย่างย่อว่า เอจีเอ็น (AGN) และนอกจากกนี้ภายในแก่นดาราจักรกัมมันต์ยังเป็นที่อยู่ของหลุมดำมวลยิ่งยวด (supermassive black hole) อีกด้วย (Ferrarese และ Merritt, 2000; Gebhardt และคณะ, 2000)

บอลด์วินและคณะได้สร้างแผนภาพที่อาศัยความสามารถในการกระตุ้นให้อะตอมของธาตุให้แตกตัวเป็นไอออน และแผนภาพดังกล่าวนั้นถูกเรียกว่า *แผนภาพบอลด์วิน ฟิลลิปส์แอนด์เทอเลวิช* หรือเรียกอย่างย่อว่า *บีพีที* ในต่อมา คิวลีย์ (Kewley และคณะ, 2001) และคอฟฟ์มานน์ (Kauffmann และคณะ, 2003) ได้สร้างเส้นแบ่งระหว่างเอสเอฟกับเอจีเอ็น ภาพที่ 5.2 แสดงให้เห็นได้ว่าดาราจักรส่วนใหญ่ของงานวิจัยนี้คือ ดาราจักรที่มีการกำเนิดดาว โดยดาราจักรชนิดนี้จะพบ เส้นเปล่งออกของ $\mathrm{H}\alpha$ และ $\mathrm{H}\beta$ ได้เป็นจำนวนมากซึ่งเกิดมาจากบริเวณที่ไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออนที่อยู่รอบดาวอายุน้อย (H II regions) ดังนั้นจึงทำให้ดาราจักรกลุ่มนี้อยู่บริเวณด้านซ้ายของแผนภาพเป็นส่วนใหญ่ แต่สำหรับเอจีเอ็นที่มีการปล่อยพลังงานสูงออกมาในย่านรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา จึงทำให้มีความสามารถพอที่จะทำให้ธาตุไนโตรเจนและออกซิเจนแตกตัวเป็นไอออนได้ จึงทำให้ดาราจักรกลุ่มนี้อยู่บนด้านขวาบนของแผนภาพ สำหรับดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าโดยส่วนใหญ่จะเป็นเอสเอฟ อยู่ 8 ดาราจักร และที่เหลืออีก 2 ดาราจักรจะประพฤติตัวเป็นเอจีเอ็น จากแผนภาพนี้สรุปได้ว่าสีฟ้าที่อยู่บริเวณตรงกลางของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ ส่วนใหญ่ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของเอจีเอ็น แต่มาจากกลุ่มดาวอายุน้อยที่อยู่ในบริเวณดังกล่าว



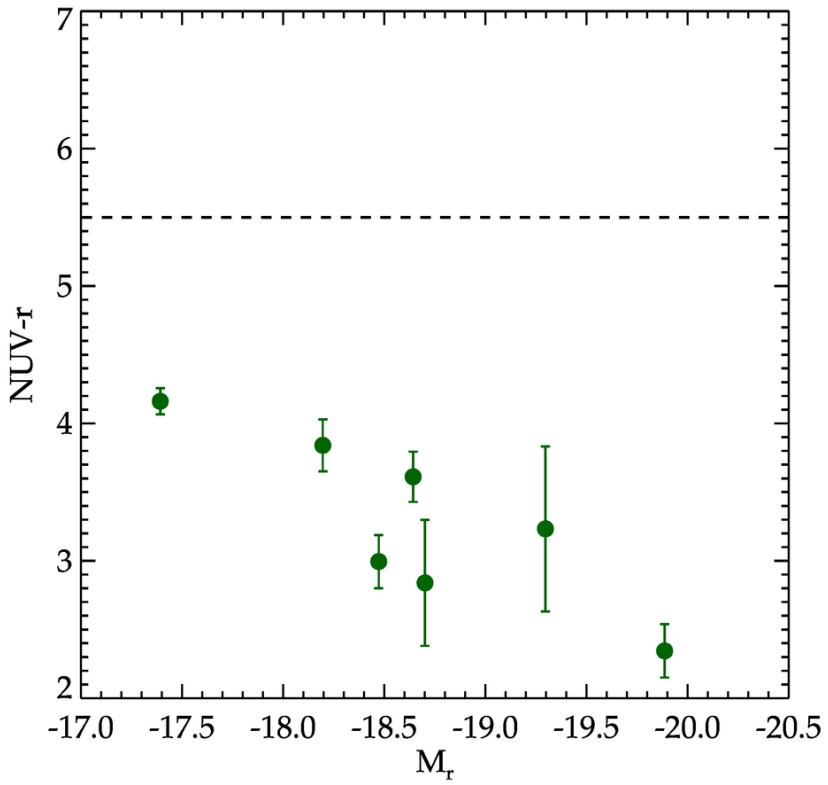
ภาพที่ 5.2 ดาราจักรที่มี z ระหว่าง 0.01 กับ 0.02 ส่วนใหญ่คือดาราจักรที่มีดาวเกิดใหม่ (SF) ซึ่งอยู่ในกลุ่มด้านล่างซ้ายของภาพ โดยเป็นเพราะว่าดาราจักรกลุ่มนี้มีเส้นเปล่งแสงของไฮโดรเจนอยู่มากที่มาจากบริเวณที่แก๊สไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออน (HII regions) แต่ในทางตรงกันข้าม แก่นดาราจักรกัมมันต์หรือเอจีเอ็นที่มีการปล่อยพลังงานออกมามากกว่าปกติ พลังงานสูงนั้นจะทำให้ธาตุไนโตรเจนและออกซิเจนแตกตัวเป็นไอออนและทำให้เอจีเอ็นอยู่ทางด้านบนขวาของแผนภาพ

5.2 การเกิดดาวฤกษ์ในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า

การศึกษาการเกิดดาวในดาราจักรแบบทรงรี วิธีที่เป็นที่นิยมคือ การศึกษาโมเลกุลไฮโดรเจนผ่านกล้องโทรทรรศน์วิทยุและผ่านทางรังสีอัลตราไวโลเลต (UV) .ในการตรวจหาแหล่งกำเนิดดาวในดาราจักร สำหรับโมเลกุลไฮโดรเจนจะไม่สามารถสังเกตการณ์ผ่านช่วงคลื่นวิทยุได้ ดังนั้นนักดาราศาสตร์จึงได้ใช้โมเลกุลแก๊สที่พบได้มากรองจากโมเลกุลของไฮโดรเจนคือ คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) และใช้เป็นตัวแทนในการตรวจหาแหล่งกำเนิดดาวผ่านกล้องโทรทรรศน์วิทยุ (Crocker และคณะ, 2011) และวิธีที่สองคือ การใช้รังสียูวี ที่มาจากการแผ่รังสีของดาวอายุน้อย โดยในงานวิจัยได้อาศัยวิธีดังกล่าวนี้ในการตรวจหาการเกิดดาวในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า สำหรับรังสียูวีที่ใช้ในงานวิจัย ได้นำมาจากฐานข้อมูลเอ็นเอสเอ โดยใช้คลื่นยูวีแบบใกล้ (near UV) ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1750 ถึง 2850 อังสตรอม

จากภาพที่ 5.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและความสว่างสัมบูรณ์ โดยดัชนีสีที่ใช้ในแผนภาพคือความแตกต่างระหว่างแมกนิจูดในช่วงคลื่นรังสียูวีแบบใกล้กับแมกนิจูดที่วัดผ่านในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นผ่านทางฟิลเตอร์ของเอสดีเอสเอส ในแถบฟิลเตอร์ r ยี (Yi และคณะ, 2005) และกาวิราจ (Kaviraj และคณะ, 2007) ได้ชี้ให้เห็น ดาราจักรลำดับต้น (ตัวอย่างเช่น ดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์) ที่มีค่า NUV-r น้อยกว่า 5.5 ลงมา จะพบว่ามีกระบวนการเกิดดาวเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 1 พันล้านปีที่มา ถึงแม้ดาราจักรลำดับต้นนี้จะมีแสงสีแดงที่มาจากดาวอายุมาก แต่ถ้ามีสัญญาณของรังสียูวีก็อาจบอกได้ว่า ดาราจักรเหล่านี้มีดาวฤกษ์ที่เกิดขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ สำหรับดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักร พบว่ามีเพียง 7 ดาราจักรเท่านั้น ที่สามารถวัดแมกนิจูดในช่วงคลื่นรังสียูวีแบบใกล้ได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากแผนภาพ 5.3 แสดงให้เห็นว่า ดาราจักรทั้ง 7 มีค่าดัชนีสี NUV-r ต่ำกว่า 5.5 ซึ่งอาจบอกได้ว่า ดาราจักรทั้ง 7 มีแนวโน้มที่จะพบการเกิดดาวฤกษ์ในช่วงไม่กี่พันล้านปีที่ผ่านมา และเมื่อเราย้อนกลับไปดูภาพ 4.3 ซึ่งถ่ายจากเอสดีเอส จะพบว่าสีฟ้าที่เห็นบริเวณตรงกลางของแต่ละดาราจักร อาจเป็นหลักฐานที่อาจยืนยันได้ว่าแสงสีฟ้าอาจมาจากกลุ่มประชากรดาวอายุน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 5.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีในช่วงความยาวคลื่นยูวีและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและความสว่างสัมบูรณ์ที่วัดในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักรพบว่ามีเพียง 7 ดาราจักรที่สามารถวัดฟลักซ์ในช่วงความยาวคลื่นยูวีแบบใกล้ได้ ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ดาราจักรดังกล่าวมีค่าดัชนีสี NUV-r ที่น้อยกว่า 5.5 (เส้นประ) เป็นดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าอาจมีกระบวนการการเกิดดาวเกิดขึ้นในช่วงพันล้านปีที่ผ่านมา

ก่อนหน้านี้เราได้ใช้แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีและความสว่างสัมบูรณ์ ที่วัดในช่วงความยาวคลื่นรังสียูวีแบบใกล้กับความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็น ผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า อาจพบกระบวนการการเกิดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่น้อยกว่า 1 พันล้านปีที่ผ่านมาก จากข้อสมมุติฐานนี้ จะนำไปสู่การคำนวณอัตราการเกิดดาวของดาราจักรชนิดนี้ และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับกลุ่มดาราจักรแบบทรงรีทั่วไป การคำนวณอัตราการเกิดดาวฤกษ์ในงานวิจัยได้อาศัยตัวชี้บอก (indicators) ของเส้นเปล่งออกของเส้นไฮโดรเจนแอลฟา และการคำนวณอัตราการเกิดดาวฤกษ์ได้ใช้สมการของเคนนิคัตต์ Kennicutt (1998) สมการที่ 2.3 และทำการแบ่งดาราจักรออกเป็นสองกลุ่ม คือ ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าและดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์แบบทั่วไปที่ใจกลางมีสีแดง ซึ่งแสดงด้วยฮิสโทแกรมสีน้ำเงินและสีแดงตามลำดับ จากภาพที่ 5.4 ผลจากการคำนวณ พบว่าอัตราการเกิดดาวโดยเฉลี่ยแล้ว ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดดาวของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์แบบทั่วไปที่ใจกลางมีสีแดง และจากค่าเฉลี่ยของ $\mathbf{SFR}$ ในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์แบบทั่วไปที่ใจกลางมีสีแดง มีค่า $\log \mathbf{SFR} = -0.063 \pm 0.02\ \mathbf{M_{\odot}/yr}$ หรือ $SFR \approx 0.86\ \mathbf{M_{\odot}/yr}$ และ ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามีค่า $\log \mathbf{SFR} = -1.298 \pm 0.01\ \mathbf{M_{\odot}/yr}$ หรือ $\mathbf{SFR} \approx 0.05\ \mathbf{M_{\odot}/yr}$ นอกจากนี้ค่า $\mathbf{SFR}$ ของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ $\mathbf{SFR}$ ของดาราจักรทางช้างเผือกซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.68 - 1.45\ \mathbf{M_{\odot}/yr}$ (Robitaille และ Whitney, 2010)

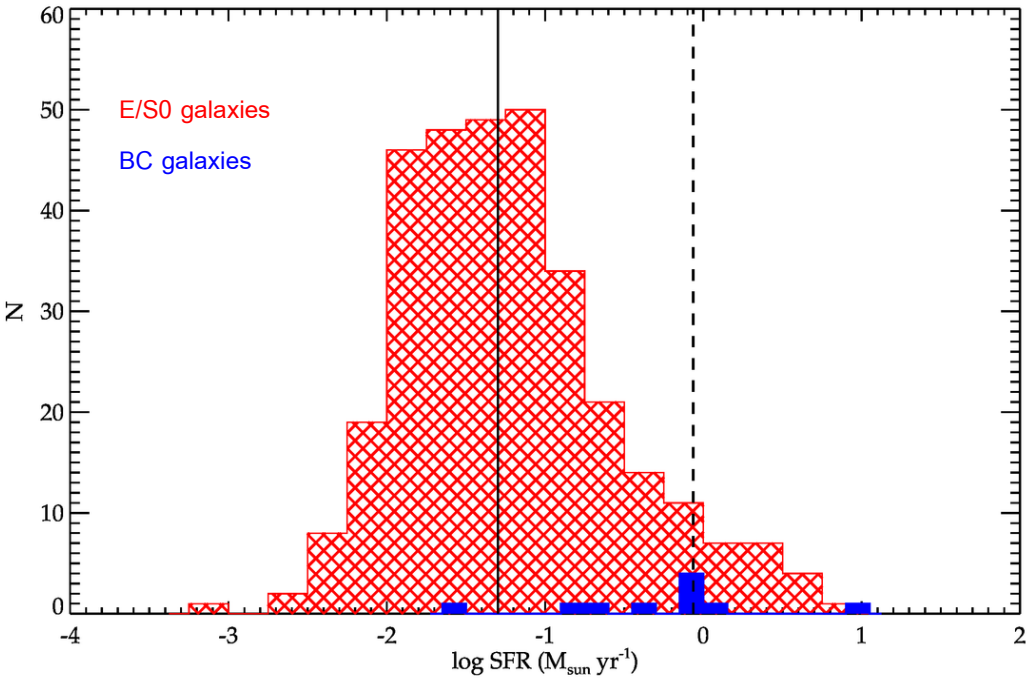
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากำลังส่องสว่างของเส้นเปล่งออกไฮโดรเจนแอลฟาและอัตราการเกิดดาวของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักร

ชื่อดาราจักร	$L(\alpha)$ $[erg \cdot s^{-1}]$	Log SFR $[M_{\odot}/yr]$
BC1	$(1.24 \pm 0.01) \times 10^{41}$	-0.009 ± 0.002
BC2	$(3.83 \pm 0.22) \times 10^{39}$	-1.519 ± 0.025
BC3	$(1.59 \pm 0.01) \times 10^{39}$	-1.901 ± 0.004
BC4	$(5.04 \pm 0.06) \times 10^{40}$	-0.399 ± 0.005
BC5*	-	-
BC6	$(1.60 \pm 0.03) \times 10^{40}$	-0.898 ± 0.008
BC7	$(1.17 \pm 0.01) \times 10^{41}$	-0.034 ± 0.003
BC8	$(1.09 \pm 0.01) \times 10^{41}$	-0.065 ± 0.005
BC9	$(1.39 \pm 0.01) \times 10^{42}$	1.041 ± 0.002
BC10	$(3.02 \pm 0.03) \times 10^{40}$	-0.622 ± 0.004
BC11	$(1.07 \pm 0.01) \times 10^{41}$	-0.073 ± 0.004

*สำหรับดาราจักร BC5 พบว่าค่าฟลักซ์มีค่าเป็นลบดังนั้น จึงไม่ได้นำมาคำนวณอัตราการเกิดดาว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 5.4 การแจกแจงแบบฮิสโทแกรมของ SFR ที่คำนวณจากสมการที่ 2.2 โดยกลุ่มดาราจักรแบบทรงรีและเอสที่ใจกลางมีสีฟ้าจะแสดงด้วยฮิสโทแกรมสีน้ำเงินและเส้นทึบสีดำคือค่ามัธยฐาน SFR ของกลุ่มดังกล่าว สำหรับกลุ่มดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ทั่วไปจะแสดงด้วยฮิสโทแกรมสีแดงและเส้นประสีดำแสดงค่ามัธยฐาน SFR ของกลุ่มเหล่านั้น จากฮิสโทแกรมทั้งสองได้ชี้ให้เห็นว่าว่า ในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามี SFR ที่สูงกว่า ถึงแม้จะลักษณะรูปร่างจะมีความคล้ายคลึงกันอย่างมากก็ตาม

5.3 ปริมาณธาตุหนักในดาราจักร

ธาตุหนัก (heavy elements) ในทางดาราศาสตร์คือ ธาตุใดๆก็ตามที่หนักกว่า ไฮโดรเจนและฮีเลียม ตัวอย่าง เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน หรือ ออกซิเจน เป็นต้น การวัดปริมาณธาตุหนักจะเป็นการวัดจำนวนอะตอมของธาตุหนักเทียบกับจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนในหนึ่งหน่วยปริมาตร และโดยทั่วไปการบอกปริมาณธาตุหนักของวัตถุใดๆจะนิยมเทียบกับปริมาณธาตุหนักของดวงอาทิตย์ มีด้วยกัน 2 แบบคือ แบบที่ 1 คือ ปริมาณธาตุหนัก โดยโลหะที่นำมาวัดเทียบกับไฮโดรเจนคือ เหล็ก (Irons, Fe) ซึ่งดาวที่มีอายุน้อยจะมีปริมาณธาตุหนักที่น้อยกว่าดาวที่มีอายุมาก และแบบที่ 2 คือ ปริมาณธาตุหนักของดาราจักรและธาตุหนักที่นำมาวัดเทียบกับไฮโดรเจนคือ ออกซิเจน ซึ่งจะพบได้มากในเนบิวลาที่อยู่ในดาราจักรและนอกจากนี้ออกซิเจนยังเป็นธาตุที่พบได้มากรองจากไฮโดรเจนและฮีเลียมอีกด้วย การกำเนิดธาตุธาตุหนักในดาราจักรเป็นผลมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นภายในดาวแต่ละดวง และเมื่อดาวดวงนั้นสิ้นอายุขัยก็จะกลายเป็นเนบิวลาร์ดาวเคราะห์ (planetary nebular), ดาวแคระขาว (white dwarf) หรือ อาจเกิดการระเบิดเป็นซูเปอร์โนวา (supernova) ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับมวลเริ่มต้นในช่วงที่ดาวเกิดใหม่ สำหรับธาตุหนักที่เกิดในช่วงกระบวนการดังกล่าวนั้นจะถูกปลดปล่อยไปในสสารระหว่างดาว (interstellar medium) ผ่านทางดาราวาต (stellar winds) หรือ การระเบิดซูเปอร์โนวา (Larson, 1974; Larson และ Dinerstein, 1975) ยิ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นมากเท่าใด ก็ยิ่งเป็นการเพิ่มปริมาณธาตุหนักให้กับดาราจักรมากเท่านั้น

ในการคำนวณปริมาณธาตุหนักโดยส่วนใหญ่ได้จากเส้นเปล่งแสงต้องห้าม (forbidden emission lines) ตัวอย่างเช่นเส้น [O II] พบได้ที่ความยาวคลื่น 3726 และ 3729 อังสตรอม เส้น [O II] พบได้ที่ความยาวคลื่น 3869 อังสตรอม และเส้น [O III] จะพบได้ที่ความยาวคลื่น 4959 และ 5007 อังสตรอม เส้นดังกล่าวเหล่านั้นจะพบได้มากในเนบิวลาภายในดาราจักร การคำนวณปริมาณธาตุหนักจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย 12 +log(O/H) และงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี R23 (Alloin และคณะ, 1979; Pagel และคณะ, 1979) ในการคำนวณปริมาณธาตุหนัก ซึ่งหาได้จากสมการ

$$R23 = \log\left(\frac{[O\ II]\ \lambda 3727 + [O\ III]\ \lambda 4959 + [O\ III]\lambda 5007}{H\beta}\right) \qquad (5.2)$$

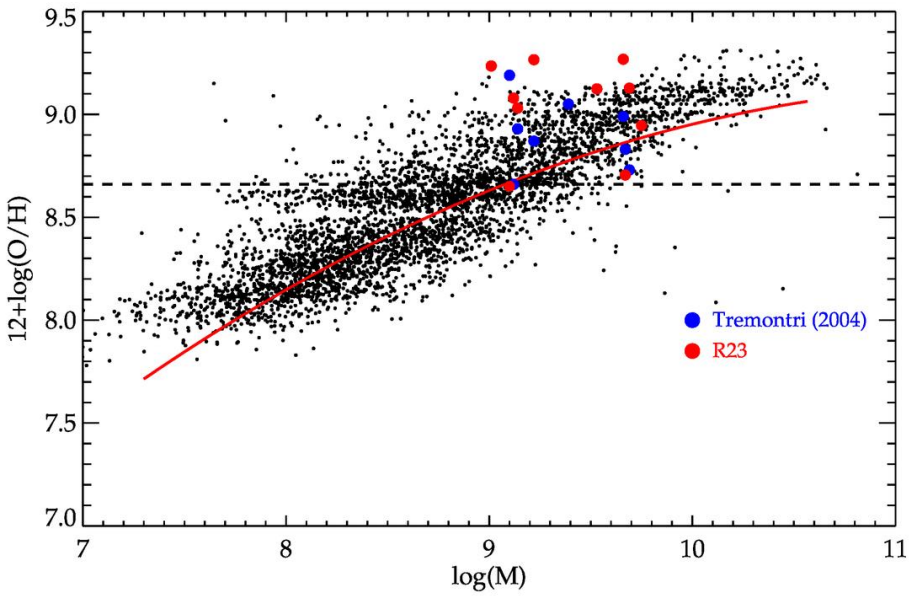
โดยที่ [O II] และ [O III]คือ ฟลักซ์โปรตอนของเส้นเปล่งออกของออกซิเจนที่แตกตัวเป็นไอออน 1 และ 2 ครั้งตามลำดับ และ $H\beta$ คือ ฟลักซ์โปรตอนของเส้นเปล่งออกไฮโดรเจนบีตา

ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้วิธี $\mathbf{R23}$ ในการคำนวณปริมาณธาตุหนักคือ ไม่สามารถวัดฟลักซ์โปรตอนของเส้น [O II] ที่ความยาวคลื่น 3727 อังสตรอมนี้ได้ เนื่องจากตัวอย่างดาราจักรที่ใช้ในงานวิจัยมีค่า z น้อยเกินไป และนอกจากนี้ในฐานข้อมูลจากเอ็นเอสเอ ไม่ได้มีการวัดฟลักซ์ของเส้น [O III] ที่ความยาวคลื่น 4959 อังสตรอมอีกด้วย ดังนั้นการคำนวณฟลักซ์ของเส้นที่เหลือได้นำมาจากฐานข้อมูลของเอสดีเอสเอสดีอาร์แปด มาคำนวณแทนข้อมูลที่ได้จากเอ็นเอสเอ สำหรับปริมาณธาตุหนักได้นำจากสมการพหุนามของ Tremonti และคณะ (2004) มาใช้ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$12 + \log(\mathrm{O/H}) = 9.185 - 0.313\mathrm{x} - 0.264\mathrm{x}^2 - 0.321\mathrm{x}^3 \qquad \textbf{(5.3)}$$

โดยที่ $\mathbf{x}$ คือ $\mathbf{R23}$ ที่ได้จากสมการที่ 5.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุหนัก (แกน y) กับมวลดาวฤกษ์ (แกน x) โดยจุดสีดำคือ ดาราจักรทั้งหมดที่อยู่ในช่วง z ระหว่าง 0.01 กับ 0.02 โดยปริมาณธาตุ 12 +log (O/H) ได้นำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส ดีอาร์แปดที่ใช้รูปแบบการคำนวณของทรีมอนทริและเส้นสีแดงคือตัวแทนชุดข้อมูลที่ดีที่สุดที่อยู่ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสาม (สมการที่ 5.3) เส้นประคือ ปริมาณธาตุหนักของดวงอาทิตย์ที่มีค่า 12 +log (O/H) = 8.66 ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าได้ใช้ปริมาณธาตุหนักเป็นสองแบบคือ แบบที่ 1 ได้จากฐานข้อมูล เอสดีเอสเอสดีอาร์แปดและ แบบที่ 2 คำนวณจากสมการที่ 5.3 ข้อมูลจาก เอสดีเอสเอสดีอาร์ 8 พบว่ามีเพียง 8 ดาราจักรที่ตรงกับดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางสีฟ้าทั้ง 10 ดาราจักร

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการวัดฟลักซ์ของเส้นเปล่งออกในแต่ละดาราจักร พร้อมค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากฐานข้อมูลเอ็นเอสเอ นอกจากนี้ยังพบว่ามีเพียง 1 ดาราจักรคือ BC5 มีค่าฟลักซ์ของเส้นไฮโดรเจนบีตามีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณค่า R23 ในสมการที่ 5.2 ได้

ชื่อวัตถุ	F($\mathbf{H\alpha}$)*	F($\mathbf{H\beta}$)*	F([OIII])*	F([OIII])*	F ([N II])*
BC1	2,261.61 ± 15.36	612.01 ± 6.52	73.49 ± 3.60	221.07 ± 4.66	845.03 ± 7.78
BC2	71.04 ± 4.13	23.73 ± 3.91)	33.74 ± 5.28	90.15 ± 6.33	43.51 ± 5.14
BC3	3,515.60 ± 33.05	949.10 ± 13.37	340.09 ± 11.30	1026.81 ± 16.61	987.66 ± 13.63
BC4	697.83 ± 8.12	217.26 ± 4.99	94.63 ± 4.52	301.77 ± 7.11	186.26 ± 4.49
BC5	-0.18 ± 5.47	-14.03 ± 5.94	4.43 ± 4.23	8.65 ± 4.55	-2.07 ± 3.79
BC6	235.14 ± 4.30	65.01 ± 3.05	93.45 ± 3.88	282.676 ± 5.59	99.60 ± 3.12
BC7	1,699.40 ± 11.16	535.99 ± 5.61	295.14 ± 4.47	900.46 ± 8.17	280.31 ± 3.29
BC8	1,284.89 ± 14.38	342.34 ± 5.78	40.90 ± 3.58	127.29 ± 4.59	479.16 ± 5.91
BC9	16,212.50 ± 87.89	4,438.13 ± 37.60	3,139.76 ± 33.14	9,966.67 ± 74.62	2,691.80 ± 37.59
BC10	559.55 ± 5.66	138.89 ± 3.48	19.15 ± 2.76	72.17 ± 3.38	180.95 ± 3.28
BC11	1,446.97 ± 14.26	441.47 ± 7.48	154.87 ± 5.66	493.22 ± 8.53	442.54 ± 7.00

* ฟลักซ์ของแต่เส้นมีหน่วยเป็น $10^{-17} \cdot \mathrm{erg} \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{cm}^{-2}$

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณของปริมาณธาตุหนักในแต่ละดาราจักรที่ได้จากทรีมอนติซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการสร้างแบบจำลองของเส้นสเปกตรัมและค่าที่ได้จากคำนวณในสมการที่ 5.3 ในคอลัมน์ของ Tremontri (2004) เครื่องหมาย “-” แสดงดาราจักรที่ไม่พบในการคำนวณของทรีมอนทริ แต่สำหรับดาราจักรบีซี 5 ไม่สามารถคำนวณค่าสภาพโลหะได้ เนื่องจาก ฟลักซ์โปรตอนในเส้นไฮโดรเจนบีตามีค่าเป็นลบ

ชื่อ วัตถุ	12+log (O/H)	
	Tremontri (2004)	R23
BC1	8.99	9.27±0.04
BC2	-	8.71±0.12
BC3	8.83	9.13±0.06
BC4	8.73	9.08±0.06
BC5	-	-
BC6	-	8.65±0.03
BC7	-	9.03±0.02
BC8	8.66	9.27±0.06
BC9	9.05	8.95±0.01
BC10	8.93	9.24±0.15
BC11	8.87	9.12±0.07

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับปริมาณธาตุหนักหรือ $12 + \log(O/H)$ ของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักรได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 การหาปริมาณธาตุหนักมี 2 ค่าคือ ค่าที่ได้จากทรีมอนติและ ค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 5.3 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ทั้งสองแบบนั้นมีความแตกต่างกัน ทั้งที่ความจริงทั้งสองค่าควรมีค่าเท่ากัน โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่าง เกิดจากค่าที่ได้จากทรีมอนติได้มาจากการทำแบบจำลองสเปกตรัมดาราจักร และทำการลบส่วนที่เป็นเส้นดูดกลืน (absorption) ออกจากแถบสเปกตรัมนั้นและคงเหลือแต่เส้นเปล่งแสงไว้ ซึ่งวิธีนี้จะได้ค่าฟลักซ์ที่มีความแม่นยำกว่าเส้นสเปกตรัมที่ได้จากวัดจากดาราจักรโดยตรง

จากภาพที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุหนักและมวลของดาวฤกษ์ในดาราจักร จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามีปริมาณธาตุหนักที่อยู่ห่างจากค่าเฉลี่ยและสูงกว่าปริมาณธาตุหนักของดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปจะพบว่าดาราจักรแบบกังหันหรือดาราจักรแบบไร้รูปทรงมีปริมาณธาตุหนักน้อยกว่าดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ ซึ่งหมายความว่า ปริมาณธาตุไฮโดรเจนและฮีเลียมในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ถูกใช้ไปเกือบหมด นอกจากนี้ งานวิจัยของพีเพิลส์ (Peeples และคณะ, 2008) ได้ทำการศึกษากลุ่มดาราจักรที่อยู่บริเวณด้านบนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุหนักและมวลของดาวฤกษ์ หรือบริเวณที่กลุ่มดาราจักรมีปริมาณธาตุหนักสูง โดยพีเพิลส์ได้ให้ข้อสรุปว่า กลุ่มดาราจักรที่อยู่ในบริเวณดังกล่าวมีปริมาณธาตุหนักสูงเพราะมีสัดส่วนของแก๊ส (gas fraction) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง (fuels) ในการกำเนิดดาวน้อย และผลที่ตามทำให้ดาราจักรกลุ่มนี้อยู่ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการเกิดดาวหรือการเกิดดาวกำลังจะหยุดลงเนื่องจากแก๊สที่ใช้ในการเกิดเหลือน้อย และหลังจากนั้นดาราจักรกลุ่มนี้ก็จะวิวัฒนาการไปสู่ดาราจักรแบบทรงรีโดยสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4 กระบวนการการเกิดดาวในใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์

ส่วนโป่งของดาราจักรแบบกังหันในบางดาราจักรพบว่ามีสีฟ้า (Kannappan และคณะ, 2004) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการการเกิดดาวและการไหลของแก๊สเย็น (cold gas flow) จากแผ่นจานของดาราจักรแบบกังหันลงสู่ใจกลางดาราจักร โดยแก๊สเย็นดังกล่าวได้สูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยไทดัลทอร์ก (tidal torque) กันนัพพันได้ตั้งสมมุติฐานว่า กระบวนการดังกล่าวเป็นการวิวัฒนาการของดาราจักรแบบเชิงลำดับชั้น (hierarchical) (Kauffmann, 1996) มากกว่าการวิวัฒนาการแบบโมโนลิทิก (monolithic) (Eggen และคณะ, 1962) และนอกจากนี้กันนัพพันได้พบว่าดาราจักรแบบกังหันที่ส่วนโป่งมีสีฟ้านั้นเป็นผลมาจาก อันตรกิริยาและการชนของดาราจักร (interaction/mergers galaxies) ซึ่งเป็นหนึ่งในรูปแบบการวิวัฒนาการแบบเชิงลำดับชั้น การศึกษาอันตรกิริยาและการชนของดาราจักรสามารถสังเกตได้ 2 วิธีคือ การดูความผิดปกติของรูปร่าง (morphological peculiarities) และการหาความใกล้ชิดของสองดาราจักร (close companions) (Barton และคณะ, 2000)

รูปแบบการชนของดาราจักรแบ่งออกเป็น 2 แบบ (Steinmetz และ Navarro, 2002) คือ การชนแบบไมเนอร์ (minor mergers) เป็นการชนกันระหว่างสองดาราจักรที่มีมวลต่างกัน โดยการชนในลักษณะนี้แผ่นจานของดาราจักรแบบกังหันจะยังไม่ถูกทำลาย และการชนอีกรูปแบบหนึ่งคือ การชนแบบเมเจอร์ (major mergers) เป็นการชนกันของสองดาราจักรที่มีมวลใกล้เคียงกัน ซึ่งการชนในลักษณะนี้สามารถทำลายแผ่นจานของดาราจักรแบบกังหันได้ (Lin และคณะ, 2008; Moster และคณะ, 2011) และนอกจากนี้การชนแบบเมเจอร์ระหว่างสองดาราจักรแบบกังหัน สามารถกลายมาเป็นดาราจักรแบบทรงรีได้ (Barnes และ Hernquist, 1992; Mihos และ Hernquist, 1996; Toomre และ Toomre, 1972)

การวิเคราะห์ผลของการเกิดอันตรกิริยาและการชนของดาราจักรที่ส่วนโป่งมีสีฟ้า กันนัพพันให้ข้อสรุปว่า อันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์จะทำให้เกิดสีฟ้าในส่วนโป่งของดาราจักรแบบกังหัน ได้สำหรับกรณีของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์พบว่า ใจกลางสามารถมีสีฟ้าได้เช่นเดียวกับส่วนโป่งซึ่งแผนภาพบีพีที (ภาพที่ 5.2) ในงานวิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่า สีฟ้าในใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์เป็นผลมาจาก กระบวนการเกิดดาว สมมุติฐานเบื้องต้นของสาเหตุที่ทำให้กระบวนการเกิดดาวเกิดขึ้นในใจกลางได้นั้น อาจพิจารณาได้เช่นเดียวกันกับกรณีที่เกิดขึ้นในส่วนโป่งของดาราจักรแบบกังหัน ซึ่งก็คือ ผลของการเกิดอันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์ สำหรับการหาว่าดาราจักรใดที่เคยเกิดหรือกำลังเกิดอันตรกิริยาและการชน สามารถสังเกตได้สองวิธีตามที่กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ แต่เนื่องจากว่าในการทำวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้ใช้วิธีการหาความใกล้ชิดกันของสองดาราจักร ดังนั้นจึงเหลือเพียง 1 วิธีคือ การดูความผิดปกติของรูปร่าง และจากภาพถ่ายของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้งหมดไม่พบความผิดปกติใดๆ กล่าวคือ ไม่พบหางไทดัล (tidal tails) โดยลักษณะรูปร่างที่เห็นบนภาพถ่าย ดาราจักรทั้งหมดมีลักษณะทรงรีหรือทรงกลมซึ่งเป็นลักษณะ

ปกติของดาราจักรแบบทรงรีและเอศศูนย์ ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้ จึงยังไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดว่า การเกิดอันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์อาจทำให้ดาวเกิดในใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ได้หรือไม่ งานวิจัยของกาวิราจ (Kaviraj และคณะ, 2009) สามารถยืนยันได้ว่า กระบวนการเกิดดาวในใจกลางดาราจักรที่เป็นผลมาจากการชนควรเป็นแบบไมเนอร์มากว่าแบบเมเจอร์ ซึ่งกาวิราจได้ศึกษาผ่านทางแบบจำลองการชนกันแบบไมเนอร์ของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์และพบว่าผลจากการชนกันจะทำให้เกิดดาวฤกษ์ในอัตราที่น้อยกว่า $1\ M_{\odot} \cdot yr^{-1}$ ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์ โดยการคำนวณพบว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดดาวฤกษ์ในดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า มีค่าประมาณ $0.86\ M_{\odot} \cdot yr^{-1}$

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแนวทางที่อาจนำไปสู่ข้อสรุปของประเด็นที่ว่า อันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์สามารถทำให้เกิดกระบวนการเกิดดาวที่ใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและแบบเอสศูนย์ได้ ซึ่งถ้าหากข้อสรุปนี้ถูกต้อง การเกิดอันตรกิริยาและการชนจะต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและอีกแนวทางหนึ่งคือ อันตรกิริยาและการชนไม่ใช่สาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้ดาวเกิดในกลางของดาราจักรได้ ซึ่งสองแนวทางนี้สังเกตได้จากภาพถ่ายเอสดีเอสเอสของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักร ไม่พบลักษณะรูปร่างที่เป็นผลมาจากอันตรกิริยาหรือการชนของดาราจักร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ มีจุดมุ่งหมายหลักคือ คิดค้นวิธีที่ใช้หาดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่มีกระบวนการการเกิดดาว ณ ใจกลาง ที่อยู่ในช่วงการเลื่อนไปทางแดงระหว่าง 0.01 กับ 0.02 และในงานวิจัยนี้ ได้เรียกชื่อดาราจักรที่มีลักษณะดังกล่าวว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า ผลที่ได้พบว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามีอยู่จำนวนเพียง 11 ดาราจักร หรือคิดเป็น 0.085 % ของดาราจักรทั้งหมดที่อยู่ในช่วงการเลื่อนไปทางแดงดังกล่าว นอกจากนี้ แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสีกับแมกนิจูดสัมบูรณ์ได้แสดงให้เห็น ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า ได้กระจายตัวทั้งในปริภูมิของกลุ่มดาราจักรสีแดง (เช่น ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์) และปริภูมิของกลุ่มดาราจักรสีฟ้า (เช่น ดาราจักรแบบกังหันและแบบไร้รูปทรง) และบางดาราจักรได้อยู่ในช่วงรอยต่อระหว่างกลุ่มดาราจักรทั้งสอง ซึ่งผลดังกล่าว ได้ชี้ให้เห็นว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าได้รวมสมบัติของกลุ่มดาราจักรสีแดงและดาราจักรสีฟ้าเข้าไว้ด้วยกัน ถึงแม้ลักษณะรูปร่างภายนอกจะเป็นลักษณะของดาราจักรแบบทรงรีแบบทั่วไปก็ตาม แต่เมื่อพิจาณาในส่วนของการเกิดดาวในดาราจักร พบว่า ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า มีค่าสูงกว่าดาราจักรทรงรีแบบทั่วไป ในแผนภาพบีพีที ได้เผยให้เห็นอีกว่าดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าส่วนใหญ่เป็นดาราจักรกำเนิดดาวหรือเอสเอฟ แต่มีเพียง 2 ดาราจักรที่ประพฤติตัวในลักษณะของดาราจักรกัมมันต์หรือเอจีเอ็น นอกจากนี้ แผนภาพบีพีที ยังยืนอีกว่าสีฟ้าที่เห็นในกลางของดาราจักรเกิดจากกระบวนการการเกิดดาว ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของแก่นดาราจักรกัมมันต์ จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุหนักและมวลของดาวฤกษ์ พบว่าดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้ามีปริมาณธาตุหนักสูงกว่าค่าเฉลี่ยของดาราจักรแบบกังหันและดวงอาทิตย์ สำหรับข้อสมมุติฐานเบื้องต้นของกลไกที่ทำให้ดาวเกิดในใจกลางดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ทั้ง 11 ดาราจักรได้นั้น อาจเป็นผลมาจากอันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์ที่ทำให้แก๊สตกลงไปในใจกลางดาราจักรและก่อให้เกิดกระบวนการเกิดดาวเกิดขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะว่าสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้นอาจยังไม่แน่ชัด เพราะยังขาดผลสนับสนุนข้อสมมุติฐานบางส่วน แต่ยังมีสองแนวทางที่อาจเป็นไปได้ว่า อันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์จะต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถสังเกตได้ในภาพถ่ายเอสดีเอสเอสหรืออีกแนวทางหนึ่งคือ อันตรกิริยาและการชนแบบไมเนอร์อาจไม่ใช่สาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้ดาวเกิดในใจกลางของดาราจักร

รายการอ้างอิง

Aihara, H., Prieto, C. A., An, D., Anderson, S. F., Aubourg, É., Balbinot, E., . . . Zehavi, I. (2011). The Eighth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Data from SDSS-III. *ApJS, 193*(2), 29.

Alloin, D., Collin-Souffrin, S., Joly, M., & Vigroux, L. (1979). Nitrogen and oxygen abundances in galaxies. *A&A, 72*(2), 200.

Alonso-Herrero, A., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Colina, L., P?rez-Gonz?lez, P. G., & Ryder, S. D. (2006). Near-Infrared and Star-forming Properties of Local Luminous Infrared Galaxies. *ApJ, 650*(2), 835.

Andredakis, Y. C., Peletier, R. F., & Balcells, M. (1995). The Shape of the Luminosity Profiles of Bulges of Spiral Galaxies. *MNRAS, 275*, 874.

Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Nichol, R. C., & Szalay, A. S. (2004). Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies. *ApJ, 600*(2), 681.

Ball, N. M., Loveday, J., & Brunner, R. J. (2008). Galaxy colour, morphology and environment in the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS, 383*(3), 907-922. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12627.x

Barnes, J. E., & Hernquist, L. (1992). DYNAMICS OF INTERACTING GALAXIES. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 30*, 705-742.

Barton, E. J., Geller, M. J., & Kenyon, S. J. (2000). Tidally Triggered Star Formation in Close Pairs of Galaxies. *The Astrophysical Journal, 530*(2), 660.

Bell, E. F., Wolf, C., Meisenheimer, K., Rix, H.-W., Borch, A., Dye, S., . . . McIntosh, D. H. (2004). Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since z ~ 1. *ApJ, 608*(2), 752.

Bergin, E. A., & Tafalla, M. (2007). Cold Dark Clouds: The Initial Conditions for Star Formation. *ARA&A, 45*(1), 339-396. doi: doi:10.1146/annurev.astro.45.071206.100404

Blanton, M. R., Dalcanton, J., Eisenstein, D., Loveday, J., Strauss, M. A., SubbaRao, M., . . . York, D. G. (2001). The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data. *ApJ, 121*(5), 2358.

Blanton, M. R., Hogg, D. W., Bahcall, N. A., Baldry, I. K., Brinkmann, J., Csabai, I., . . . Weinberg, D. H. (2003). The Broadband Optical Properties of Galaxies with Redshifts 0.02 < z < 0.22. *ApJ, 594*(1), 186.

Blanton, M. R., Kazin, E., Muna, D., Weaver, B. A., & Price-Whelan, A. (2011). Improved Background Subtraction for the Sloan Digital Sky Survey Images. *ApJ, 142*(1), 31.

Blanton, M. R., & Moustakas, J. (2009). Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies. *ARA&A, 47*(1), 159-210. doi: doi:10.1146/annurev-astro-082708-101734

Blanton, M. R., & Roweis, S. (2007). K-Corrections and Filter Transformations in the Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared. *ApJ, 133*(2), 734.

Blanton, M. R., Schlegel, D. J., Strauss, M. A., Brinkmann, J., Finkbeiner, D., Fukugita, M., . . . Zehavi, I. (2005). New York University Value-Added Galaxy Catalog: A Galaxy Catalog Based on New Public Surveys. *ApJ, 129*(6), 2562.

Boquien, M., Calzetti, D., Kramer, C., Xilouris, E. M., Bertoldi, F., Braine, J., . . . Verley, S. (2010). 100 μm and 160 μm emission as resolved star-formation rate estimators in M 33 (HERM33ES) *. *A&A, 518*, L70.

Calzetti, D. (2013). *star formation rate indicators*: cambridge university press.

Calzetti, D., R. C. Kennicutt, J., Bianchi, L., Thilker, D. A., Dale, D. A., Engelbracht, C. W., . . . Lindler, D. (2005). Star Formation in NGC 5194 (M51a): The Panchromatic View from GALEX to Spitzer. *ApJ, 633*(2), 871.

Caon, N., Capaccioli, M., & D'Onofrio, M. (1993). On the Shape of the Light Profiles of Early Type Galaxies. *MNRAS, 265*, 1013.

Chen, H., Myers, P. C., Ladd, E. F., & Wood, D. O. S. (1995). Bolometric temperature and young stars in the Taurus and Ophiuchus complexes. *ApJ, 445*, 377.

Choi, Y.-Y., Park, C., & Vogeley, M. S. (2007). Internal and Collective Properties of Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *ApJ, 658*(2), 884.

Crocker, A. F., Bureau, M., Young, L. M., & Combes, F. (2011). Molecular gas and star formation in early-type galaxies. *MNRAS, 410*(2), 1197-1222. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17537.x

De Vaucouleurs, G. (1959). Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik, 53*, 275.

Driver, S. P., Allen, P. D., Graham, A. W., Cameron, E., Liske, J., Ellis, S. C., . . . Couch, W. J. (2006). The Millennium Galaxy Catalogue: morphological classification and bimodality in the colour-concentration plane. *MNRAS, 368*(1), 414-434. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10126.x

Eggen, O. J., Lynden-Bell, D., & Sandage, A. R. (1962). Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. *ApJ, 136*, 748.

Eisenstein, D. J., Weinberg, D. H., Agol, E., Aihara, H., Prieto, C. A., Anderson, S. F., . . . Zhao, B. (2011). SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems. *ApJ, 142*(3), 72.

Elmegreen, B. G., & Elmegreen, B. G. (2011). Star Formation in Spiral Arms. *European Astronomical Society Publications Series, 51*, 19-30. doi: doi:10.1051/eas/1151002

Falcón-Barroso, J., Bacon, R., Bureau, M., Cappellari, M., Davies, R. L., de Zeeuw, P. T., . . . Sarzi, M. (2006). The SAURON project - VII. Integral-field absorption and emission-line kinematics of 24 spiral galaxy bulges. *MNRAS, 369*, 529.

Ferrarese, L., & Merritt, D. (2000). A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. *The Astrophysical Journal Letters, 539*(1), L9.

Fisher, D. B., Drory, N., & Fabricius, M. H. (2009). Bulges of Nearby Galaxies with Spitzer: The Growth of Pseudobulges in Disk Galaxies and its Connection to Outer Disks. *ApJ, 697*(1), 630.

Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., & Schneider, D. P. (1996). The Sloan Digital Sky Survey Photometric System. *AJ, 111*, 1748.

Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., . . . Tremaine, S. (2000). A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. *The Astrophysical Journal Letters, 539*(1), L13.

Genzel, R., & Stutzki, J. (1989). The Orion Molecular Cloud and Star-Forming Region. *ARA&A, 27*(1), 41-85. doi: doi:10.1146/annurev.aa.27.090189.000353

Graham, A. W., & Driver, S. P. (2005). A Concise Reference to (Projected) Sérsic R 1/n Quantities, Including Concentration, Profile Slopes, Petrosian Indices, and Kron Magnitudes. *PASA, 22*(02), 118-127. doi: doi:10.1071/AS05001

Gray, D. F. (1992). The Inferred Color Index of the Sun. *PASP, 104*, 1035.

Gunn, J. E., Carr, M., Rockosi, C., Sekiguchi, M., Berry, K., Elms, B., . . . Brinkman, J. (1998). The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera. *ApJ, 116*(6), 3040.

Gunn, J. E., Siegmund, W. A., Mannery, E. J., Owen, R. E., Hull, C. L., Leger, R. F., . . . Wang, S.-i. (2006). The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey. *ApJ, 131*(4), 2332.

Hogg, D. W., Blanton, M. R., Brinchmann, J., Eisenstein, D. J., Schlegel, D. J., Gunn, J. E., . . . Meiksin, A. (2004). The Dependence on Environment of the Color-Magnitude Relation of Galaxies. *ApJ, 601*(1), L29.

Hubble, E. P. (1926). Extragalactic nebulae. *ApJ, 64*, 321-369.

Jarrett, T. H. (2000). Near-infrared galaxy morphology atlas. *PASA, 112*, 1008.

Johnson, H. L., & Morgan, W. W. (1953). Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas. *ApJ, 117*, 313.

Kannappan, S. J., Jansen, R. A., & Barton, E. J. (2004). Forming Young Bulges within Existing Disks: Statistical Evidence for External Drivers. *ApJ, 127*(3), 1371.

Kauffmann, G. (1996). The age of elliptical galaxies and bulges in a merger model. *MNRAS, 281*(2), 487-492.

Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., . . . Schneider, D. P. (2003). The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 346*(4), 1055-1077. doi: 10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x

Kaviraj, S., Peirani, S., Khochfar, S., Silk, J., & Kay, S. (2009). The role of minor mergers in the recent star formation history of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 394*(4), 1713-1720. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14403.x

Kaviraj, S., Schawinski, K., Devriendt, J. E. G., Ferreras, I., Khochfar, S., Yoon, S.-J., . . . Szalay, A. (2007). UV-Optical Colors as Probes of Early-Type Galaxy Evolution. *ApJS, 173*(2), 619.

Kennicutt, R. C. (1998). Star formation in galaxies along the Hubble sequence. *ARA&A, 36*, 189-231. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.189

Kennicutt, R. C. (2006). Astronomy: Young spirals get older. *Nature, 442*(7104), 753-754.

Kennicutt, R. C., & Evans, N. J. (2012). Star Formation in the Milky Way and Nearby Galaxies. *ARA&A, 50*(1), 531-608. doi: doi:10.1146/annurev-astro-081811-125610

Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., & Trevena, J. (2001). Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. *The Astrophysical Journal, 556*(1), 121.

Larson, R. B. (1974). Effects of supernovae on the early evolution of galaxies. *MNRAS, 169*, 229-246.

Larson, R. B., & Dinerstein, H. L. (1975). Gas loss in groups of galaxies. *PASP, 87*, 911-915.

Leroy, A. K., Bigiel, F., Blok, W. J. G. d., Boissier, S., Bolatto, A., Brinks, E., . . . Walter, F. (2012). Estimating the Star Formation Rate at 1 kpc Scales in nearby Galaxies. *ApJ, 144*(1), 3.

Leroy, A. K., Walter, F., Sandstrom, K., Schruba, A., Munoz-Mateos, J.-C., Bigiel, F., . . . Usero, A. (2013). Molecular Gas and Star Formation in nearby Disk Galaxies. *ApJ, 146*(2), 19.

Lin, L., Patton, D. R., Koo, D. C., Casteels, K., Conselice, C. J., Faber, S. M., . . . Cooper, M. C. (2008). The Redshift Evolution of Wet, Dry, and Mixed Galaxy Mergers from Close Galaxy Pairs in the DEEP2 Galaxy Redshift Survey. *The Astrophysical Journal, 681*(1), 232.

Lintott, C., Schawinski, K., Bamford, S., Slosar, A., Land, K., Thomas, D., . . . Vandenberg, J. (2011). Galaxy Zoo 1: data release of morphological classifications for nearly 900 000 galaxies. *MNRAS, 410*(1), 166-178. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17432.x

Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., Land, K., Bamford, S., Thomas, D., . . . Vandenberg, J. (2008). Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from

the Sloan Digital Sky Survey. *MNRAS, 389*(3), 1179-1189. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13689.x

Liske, J., Lemon, D. J., Driver, S. P., Cross, N. J. G., & Couch, W. J. (2003). The Millennium Galaxy Catalogue: 16 ⩽ BMGC < 24 galaxy counts and the calibration of the local galaxy luminosity function. *MNRAS, 344*(1), 307-324. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06826.x

Martin, D. C., Fanson, J., Schiminovich, D., Morrissey, P., Friedman, P. G., Barlow, T. A., . . . Wyder, T. K. (2005). The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission. *ApJ, 619*(1), L1.

McKee, C. F., & Ostriker, E. C. (2007). Theory of Star Formation. *ARA&A, 45*(1), 565-687. doi: doi:10.1146/annurev.astro.45.051806.110602

Mihos, J. C., & Hernquist, L. (1996). Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers. *ApJ, 464*, 641.

Morrissey, P., Conrow, T., Barlow, T. A., Small, T., Seibert, M., Wyder, T. K., . . . Yi, S. K. (2007). The Calibration and Data Products of GALEX. *ApJS, 173*(2), 682.

Moster, B. P., Macciò, A. V., Somerville, R. S., Naab, T., & Cox, T. J. (2011). The effects of a hot gaseous halo in galaxy major mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415*(4), 3750-3770. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18984.x

Moustakas, J., Robert C. Kennicutt, J., & Tremonti, C. A. (2006). Optical Star Formation Rate Indicators. *ApJ, 642*(2), 775.

Nicolet, B. (1978). Catalogue of homogeneous data in the UBV photoelectric photometric system. *A&AS, 34*, 1.

Oke, J. B., & Gunn, J. E. (1983). Secondary standard stars for absolute spectrophotometry. *ApJ, 226*, 713.

Pagel, B. E. J., Edmunds, M. G., Blackwell, D. E., Chun, M. S., & Smith, G. (1979). On the composition of H II regions in southern galaxies. I - NGC 300 and 1365. *MNRAS, 189*, 95-113.

Peeples, M. S., Pogge, R. W., & Stanek, K. Z. (2008). Outliers from the Mass-Metallicity Relation. I. A Sample of Metal-Rich Dwarf Galaxies from SDSS. *The Astrophysical Journal, 685*(2), 904.

Petrosian, V. (1976). Surface brightness and evolution of galaxies. *AJ, 209*, 2.

Pogson, N. (1856). Magnitudes of Thirty-six of the Minor Planets for the first day of each month of the year 1857. *MNRAS, 17*, 12.

Ranalli, P., Comastri, A., & Setti, G. (2003). The 2-10 keV luminosity as a Star Formation Rate indicator *A&A, 399*, 99.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Robitaille, T. P., & Whitney, B. A. (2010). The Present-Day Star Formation Rate of the Milky Way Determined from Spitzer-Detected Young Stellar Objects. *ApJ, 710*(1), L11.

Rosa-González, D., Terlevich, E., & Terlevich, R. (2002). An empirical calibration of star formation rate estimators. *MNRAS, 332*(2), 283-295. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05285.x

Sandstrom, K. M., Leroy, A. K., Walter, F., Bolatto, A. D., Croxall, K. V., Draine, B. T., . . . Vigroux, L. (2013). The CO-to-H2 Conversion Factor and Dust-to-gas Ratio on Kiloparsec Scales in Nearby Galaxies. *ApJ, 777*(1), 5.

Schmitt, H. R., Calzetti, D., Armus, L., Giavalisco, M., Heckman, T. M., R. C. Kennicutt, J., . . . Meurer, G. R. (2006). Ultraviolet-to-Far-Infrared Properties of Local Star-forming Galaxies. *ApJ, 643*(1), 173.

Sérsic, J. L. (1968). Atlas de Galaxias Australes. *Cordoba Observatorio Astronomico*.

Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. (1987). Star Formation in Molecular Clouds: Observation and Theory. *ARA&A, 25*(1), 23-81. doi: doi:10.1146/annurev.aa.25.090187.000323

Simard, L., Mendel, J. T., Patton, D. R., Ellison, S. L., & McConnachie, A. W. (2011). A Catalog of Bulge+disk Decompositions and Updated Photometry for 1.12 Million Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *ApJS, 196*(1), 11.

Steinmetz, M., & Navarro, J. F. (2002). The hierarchical origin of galaxy morphologies. *New Astronomy, 7*(4), 155-160. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S1384-1076(02)00102-1

Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Narayanan, V. K., Strauss, M. A., Gunn, J. E., . . . York, D. (2001). Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. *ApJ, 122*(4), 1861.

Suh, H., Jeong, H., Oh, K., Yi, S. K., Ferreras, I., & Schawinski, K. (2010). Demography of Sloan Digital Sky Survey Early-Type Galaxies from the Perspective of Radial Color Gradients. *ApJS, 187*(2), 374.

Toomre, A., & Toomre, J. (1972). Galactic Bridges and Tails. *ApJ, 178*, 623.

Tremonti, C. A., Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., . . . Brinkmann, J. (2004). The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal, 613*(2), 898.

Wyder, T. K., Martin, D. C., Schiminovich, D., Seibert, M., Budavári, T., Treyer, M. A., . . . Yi, S. K. (2007). The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. I. Basic Properties. *ApJS, 173*(2), 293.

Yasuda, N., Fukugita, M., Narayanan, V. K., Lupton, R. H., Strateva, I., Strauss, M. A., . . . York, D. G. (2001). Galaxy Number Counts from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *ApJ, 122*(3), 1104.

Yi, S. K., Yoon, S.-J., Kaviraj, S., Deharveng, J.-M., Rich, R. M., Salim, S., . . . Wyder, T. K. (2005). Galaxy Evolution Explorer Ultraviolet Color-Magnitude Relations and Evidence of Recent Star Formation in Early-Type Galaxies. *The Astrophysical Journal Letters, 619*(1), L111.

York, D. G., Adelman, J., John E. Anderson, J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., . . . Yasuda, N. (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *ApJ, 120*(3), 1579.

Young, C. K., & Currie, M. J. (1994). A New Extragalactic Distance Indicator Based on the Surface Brightness Profiles of Dwarf Elliptical Galaxies. *MNRAS, 268*, L11.

Young, L. M., Bureau, M., Davis, T. A., Combes, F., McDermid, R. M., Alatalo, K., . . . Weijmans, A.-M. (2011). The ATLAS3D project – IV. The molecular gas content of early-type galaxies. *MNRAS, 414*(2), 940-967. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18561.x

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ก.การหาสมการเส้นตรงที่แบ่งระหว่างประชากรดาราจักรสีฟ้ากับดาราจักรสีแดงบนซีเอ็มดี

ในภาคผนวกนี้ จะเป็นการอธิบายที่มาของสมการเส้นตรงบนแผนภาพซีเอ็มดี ในรูปที่ 5.1 ก่อนหน้านี้ วัตถุประสงค์หลักของการหาสมการเส้นตรงดังกล่าวนั้น ก็เพื่อจะหาจุดที่ใช้เป็นบรรทัดฐานในแบ่งกลุ่มดาราจักรสีฟ้าให้ออกจากกลุ่มดาราจักรสีแดง และเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า บนปริภูมิของซีเอ็มดี ที่เป็นการแจกแจงแบบฮิสโทแกรมนั้น จะเห็นได้ว่า สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม ซสำหรับงานวิจัยที่มีการหาสมการที่ใช้แบ่งกลุ่มดาราจักรดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น Strateva และคณะ (2001), Baldry และคณะ (2004) และ Bell และคณะ (2004)

ขั้นตอนการหาสมการเส้นตรง ในงานวิจัยนี้จะอาศัยเทคนิคเฉพาะและตัวอย่างดาราจักรที่นำมาใช้จะนำมาจากเอ็นเอสเอ และมีค่า z อยู่ระหว่าง 0.01 กับ 0.02 สำหรับตัวแปรที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือ ค่าแมกนิจูดสัมบูรณ์ $(\mathrm{M_r})$ และ ดัชนีสี $(\mathrm{g-r})$ โดยผู้วิจัยจะอธิบายเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างตารางแจกแจงความถี่ของข้อมูลโดยทำการแบ่ง $\mathrm{M_r}$ ออกเป็นช่วงต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ดังตารางข้างล่างนี้

$\mathrm{M_r}$	จำนวนดาราจักร
[-15.75,-16.25]	10,965
[-16.25,-16.75]	9,648
[-16.75,-17.25]	8,394
[-17.25,-17.75]	72,72
[-17.75,-18.25]	6,141
[-18.25,-18.75]	5,048

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณา $\mathrm{M_r}$ ที่ละช่วง ต่อจากการนั้นสร้างการแจกแจงในรูปแบบของฮิสโทแกรมของค่า $(\mathrm{g-r})$ และจะต้องเป็นค่าที่ได้จากดาราจักรที่อยู่ในช่วง $\mathrm{M_r}$ ดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 3 จากขั้นตอนที่ 2 จะเห็นได้ชัดว่ามีกลุ่มของดาราจักรที่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้อย่างชัดเจน โดยที่กลุ่มดาราจักรสีแดงจะอยู่ทางจุดยอดด้านขวาของฮิสโทแกรม (ภาพที่ ก1) และกลุ่มดาราจักรสีฟ้าจะอยู่ที่บริเวณด้านซ้ายของฮิสโทแกรม พิจารณาเฉพาะกลุ่มดาราจักรสีแดง หลักจากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวสร้างการแจกแจงแบบเกาส์ สิ่งที่ได้จากการแจกแจงดังกล่าวคือ ค่าเฉลี่ย (μ) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) เป็นต้น

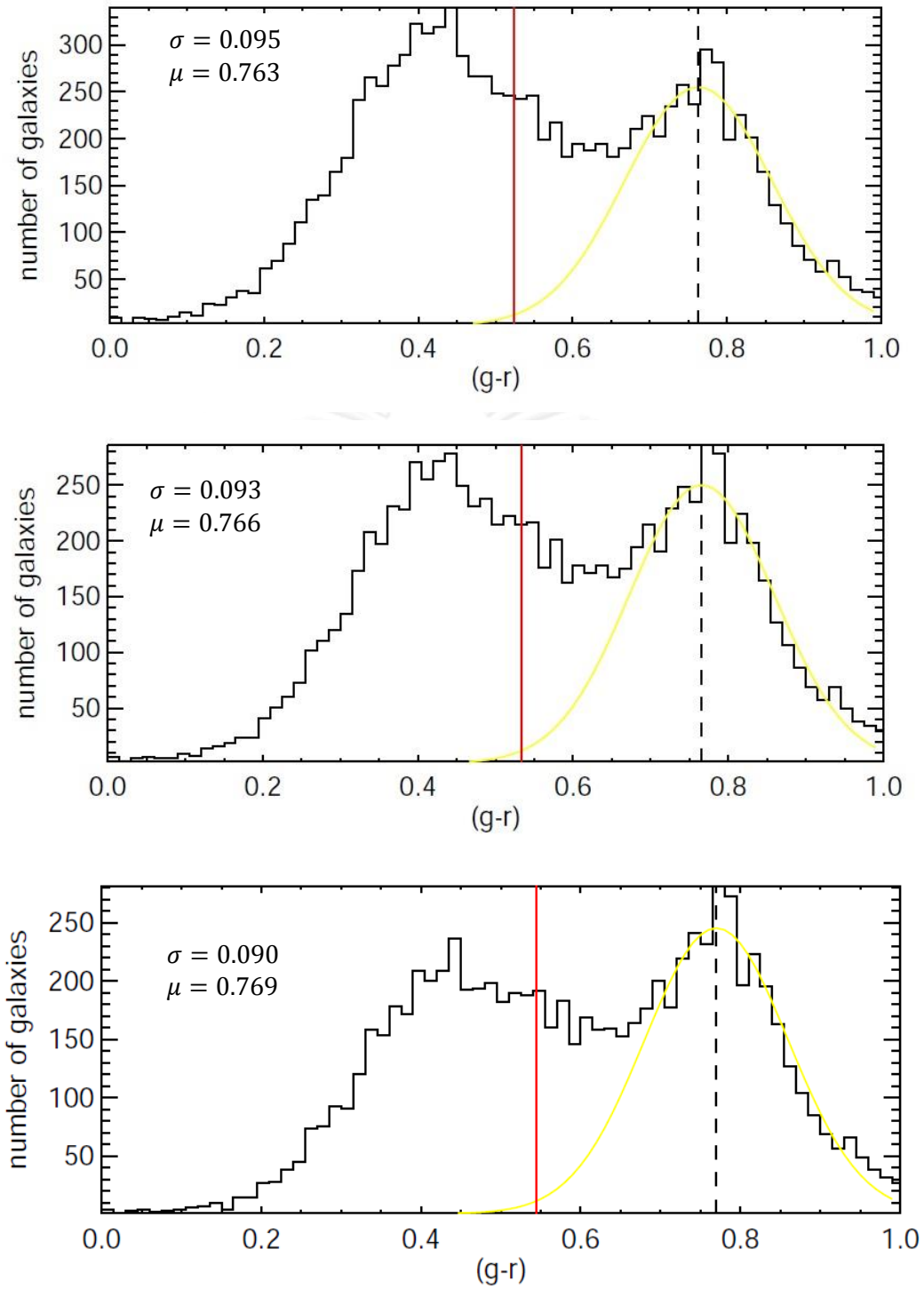
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นตอนที่ 4 การแจกแจงแบบเกาส์ซึ่งเป็นแบบระฆังคว่ำ โดยมีจุดยอดกราฟเป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลและสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือค่าที่อยู่สูงกว่าค่าเฉลี่ยและค่าที่อยู่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย ในงานวิจัยนี้จะพิจาณาจุดที่ทำให้ข้อมูลต่ำสุดที่ห่างจากค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือ 2.5σ สุดท้ายจะได้จุดหนึ่งจุดในแต่ละช่วง M_r ต่อจากนั้นก็ย้อนกลับไปทำในช่วง M_r ถัดไป และทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2-4

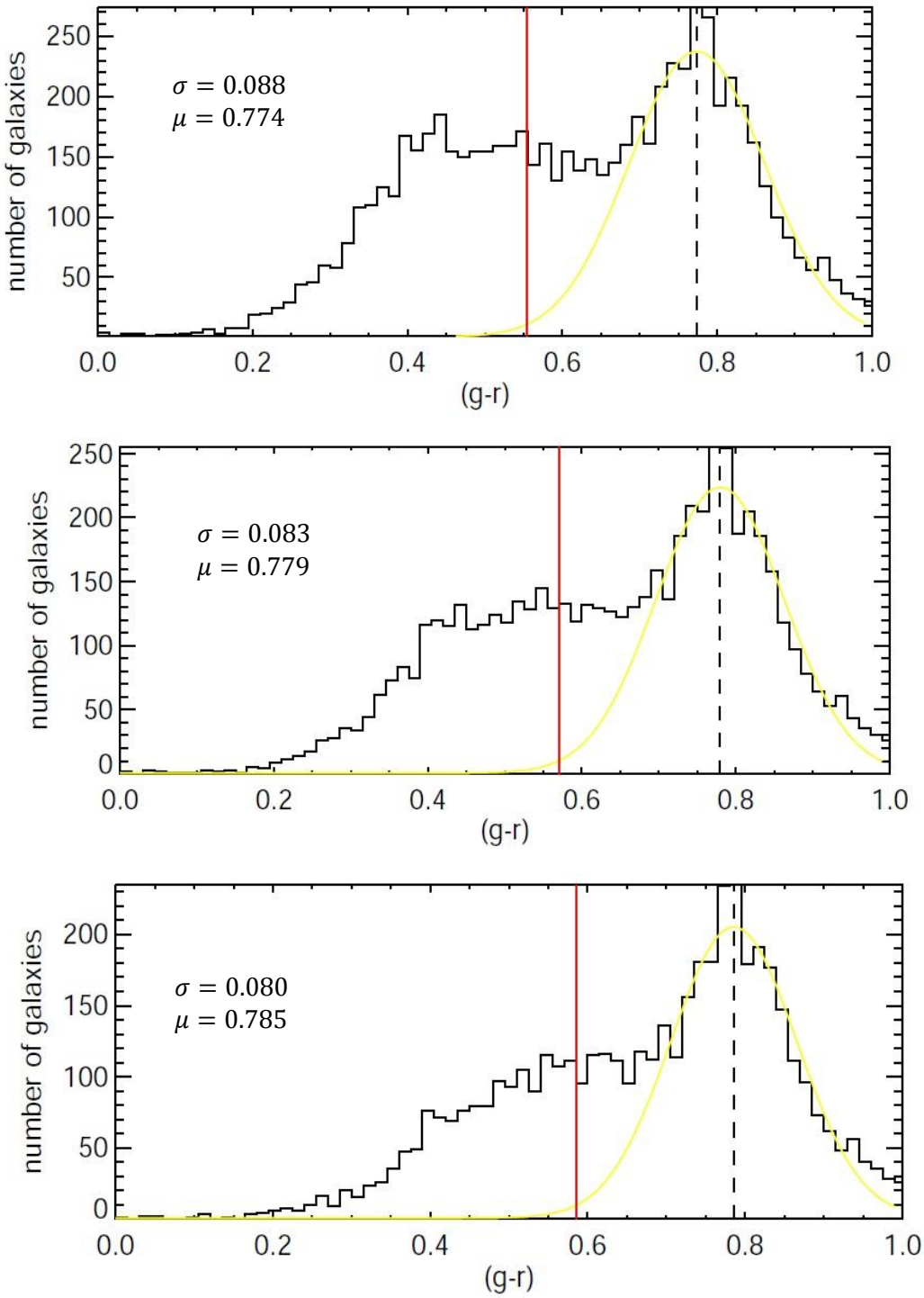
ขั้นตอนที่ 5 เมื่อได้จุดต่ำสุดของกลุ่มดาราจักรสีแดงทั้ง 7 จุดมาแล้ว ขั้นตอนมา ทำการหาสมการเส้นตรงที่ดีที่สุดที่ผ่านทั้ง 7 จุดนั้น แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแผนภาพซีเอ็มดี และสมการที่แบ่งกลุ่มดาราจักรทั้งสองคือ

$$(g\text{-}r)=-0.025\ M_r+0.126$$

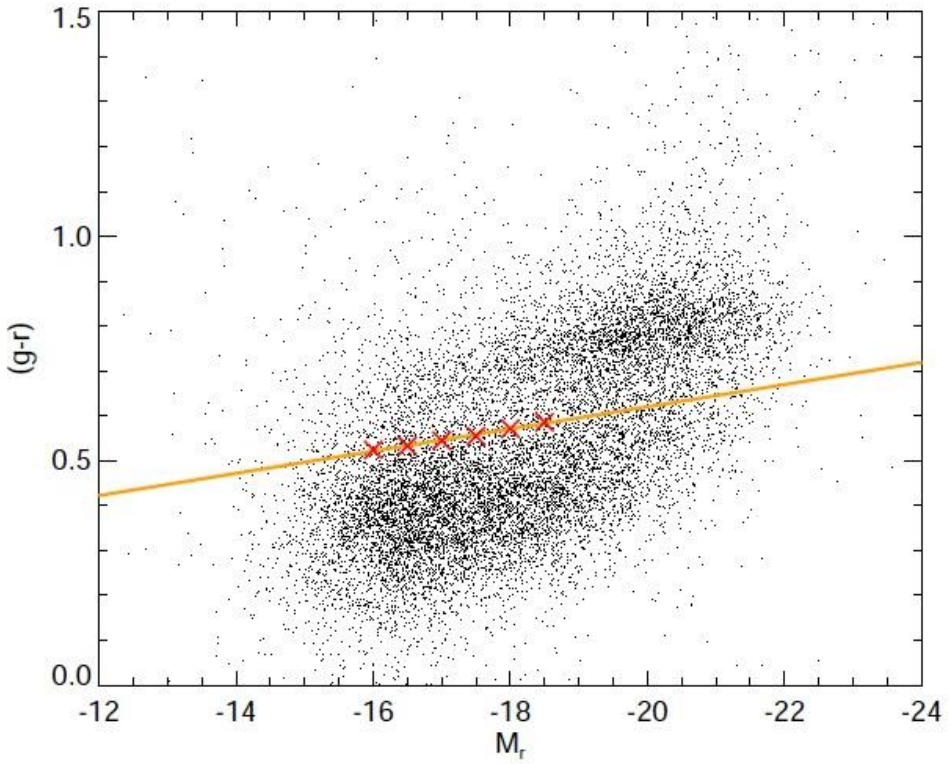
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ ก1 แสดงการแจกแจงแบบฮิสโทแกรมของข้อมูล $(g-r)$ ในแต่ละช่วงของ M_r ซึ่งในแต่ละช่วงจะมีจำนวนดาราจักรไม่เท่ากัน การแจกแจงแบบเกาส์ (เส้นสีเหลือง) ได้เลือกเฉพาะกลุ่มดาราจักรสีแดงเท่านั้น และค่าเฉลี่ยข้อมูลที่บริวณจุดยอดของกราฟแสดงด้วยเส้นประสีดำ สำหรับจุดต่ำสุดของข้อมูลคือ 2.5σ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ว่าค่าที่ต่ำกว่าจุดนี้ จะพบดาราจักรสีแดงได้น้อยที่สุด



ภาพที่ ก1(ต่อ) แสดงการแจกแจงแบบฮิสโทแกรมของข้อมูล $(g-r)$ ในแต่ละช่วงของ M_r ซึ่งในแต่ละช่วงจะมีจำนวนดาราจักรไม่เท่ากัน การแจกแจงแบบเกาส์ (เส้นสีเหลือง) ได้เลือกเฉพาะกลุ่มดาราจักรสีแดงเท่านั้น และค่าเฉลี่ยข้อมูลที่บริวณจุดยอดของกราฟแสดงด้วยเส้นประสีดำ สำหรับจุดต่ำสุดของข้อมูลคือ 2.5σ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ว่าค่าที่ต่ำกว่าจุดนี้ จะพบดาราจักรสีแดงได้น้อยที่สุด



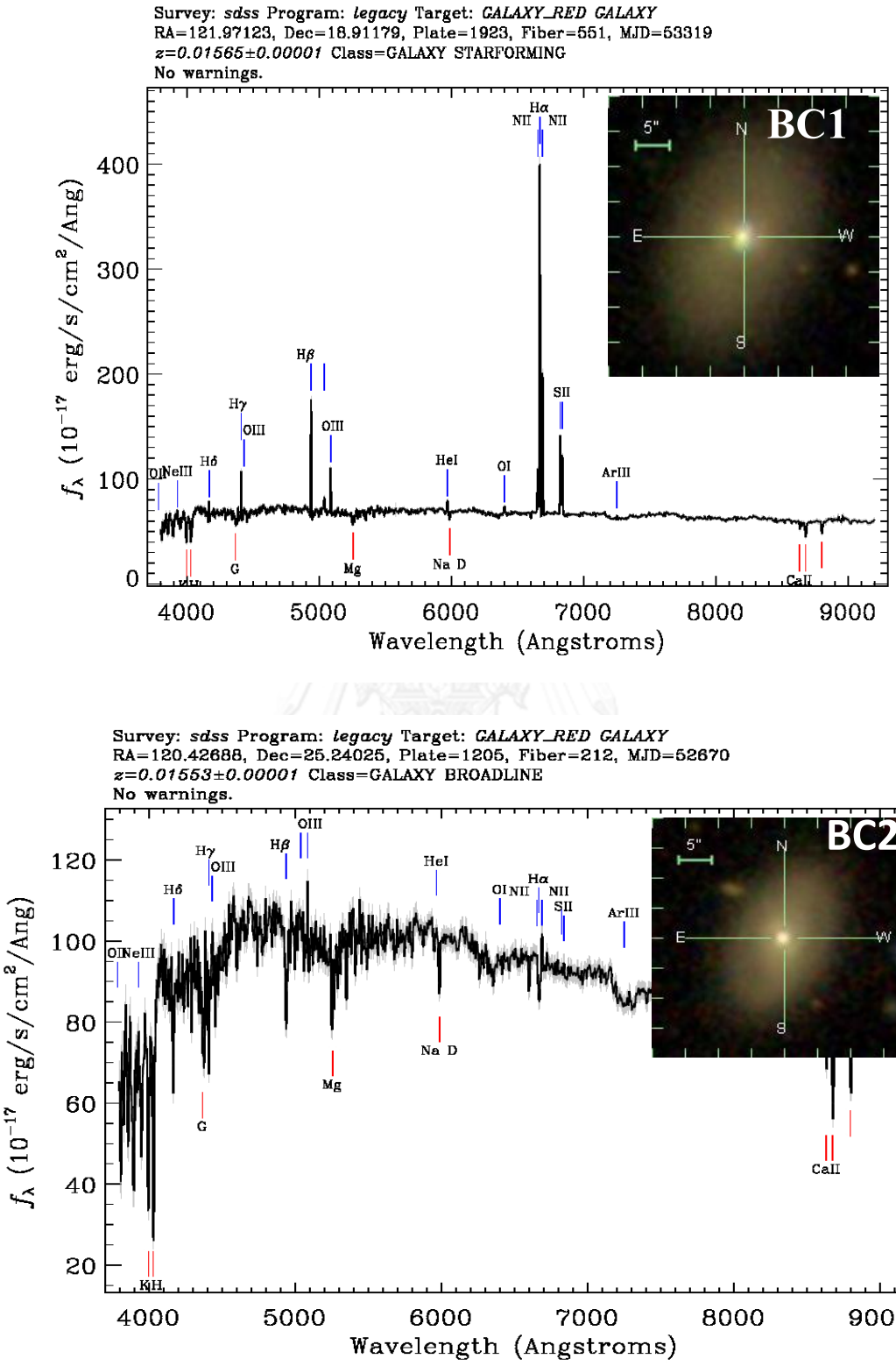
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ ก2 แผนภาพซีเอ็มดี พร้อมสมการเส้นตรงที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นโดยจุดกากบาทสีแดงคือจุดต่ำสุดของแต่ละช่วง M_r

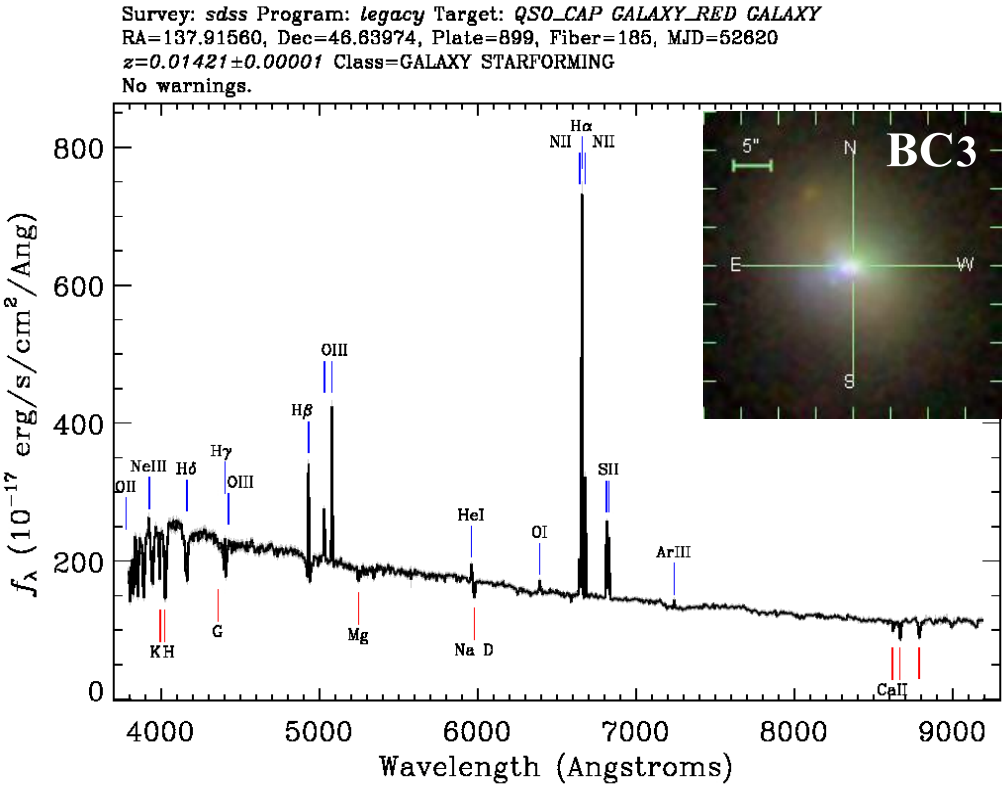
ข. สเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า

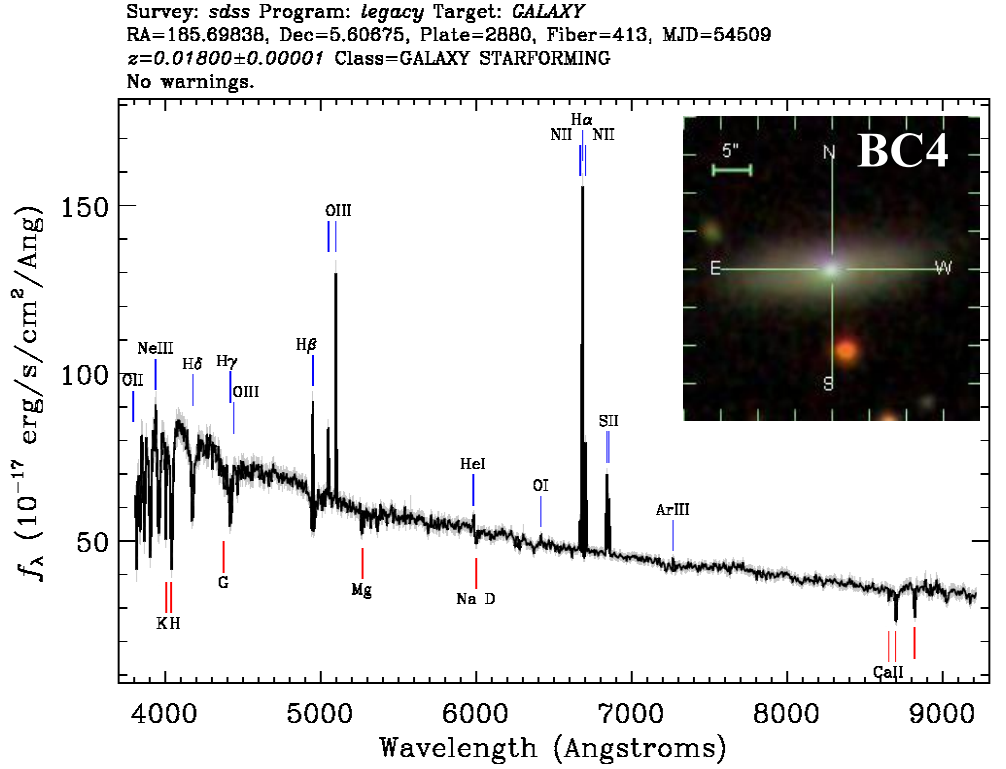
ความแตกต่างระหว่างดาราจักรแบบกังหันกับดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ นอกจากรูปร่างและสีแล้ว ยังมีลักษณะสเปกตรัมที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ดาราจักรแบบกังหันและแบบไร้รูปทรงจะมีสเปกตรัมที่มีลักษณะต่อเนื่องและพบเส้นปล่อนออกอยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับรูปร่างโดยรวมทั้งสเปกตรัมของดาราจักรดังกล่าวจะมีจุดยอดค่อนไปทางแถบความยาวคลื่นน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุดังกล่าวเป็นวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง ในทางตรงกันข้าม ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์จะมีลักษณะสเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่อง และพบเส้นดูดกลืน (absorption lines) อยู่เป็นจำนวนมากและมีจุดยอดของเส้นสเปกตรัมค่อนไปทางแถบความยาวคลื่นมากซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดาราจักรเหล่านั้นเป็นดาราจักรที่มีอุณหภูมิต่ำ ดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าทั้ง 11 ดาราจักร พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน และมีเพียงสเปกตรัมของดาราจักร 2 ดาราจักรคือ BC 2 และ BC 6 ที่พบว่ามีลักษณะที่คล้ายกับดาราจักรแบบทรงรีที่พบได้ทั่วไป สเปกตรัมของดาราจักรที่เหลือจะมีลักษณะผสมกันระหว่างสเปกตรัมของดาราจักรแบบกังหันกับดาราจักรแบบทรงรี และพบเส้นเปล่งออกปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจน แต่สิ่งหนึ่งที่พบได้เกือบทุกสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้าคือเส้นปล่อยออกของ $H\alpha$ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 6564 Å โดยเส้นเปล่งออกดังกล่าวจะพบได้เฉพาะดาราจักรที่มีกระบวนการเกิดดาวเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

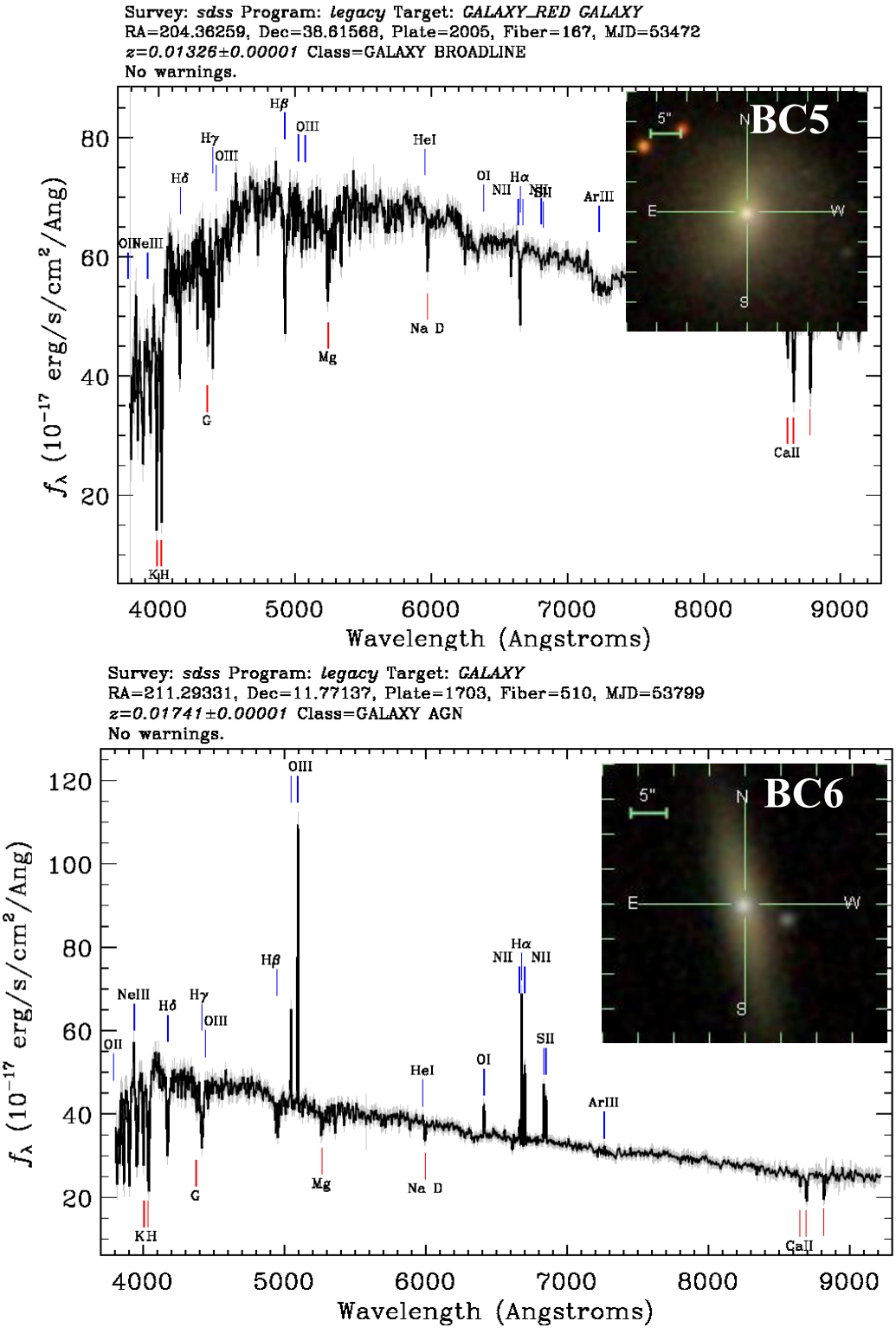


ภาพที่ ข1 แสดงสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า โดยนำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส

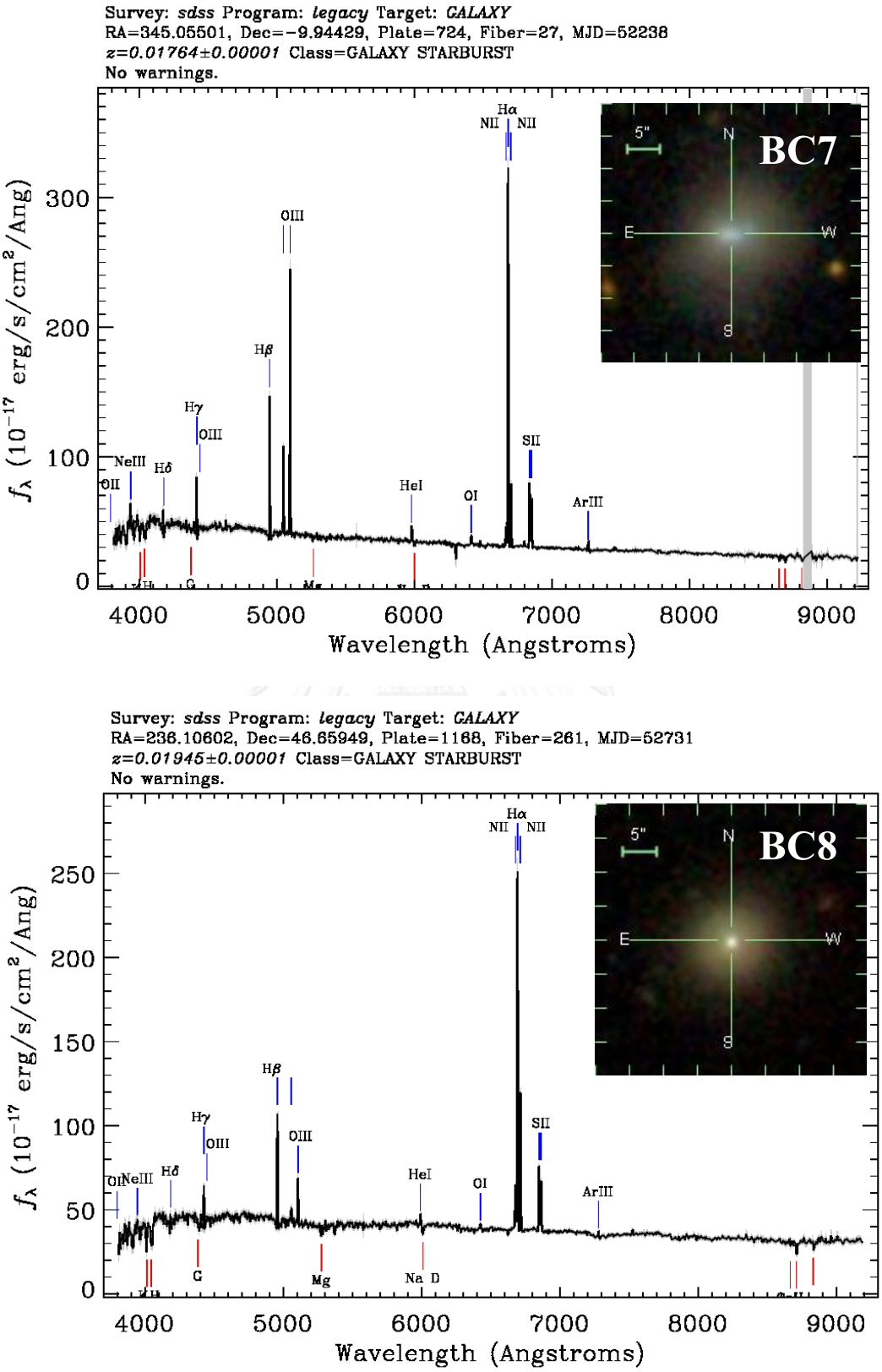




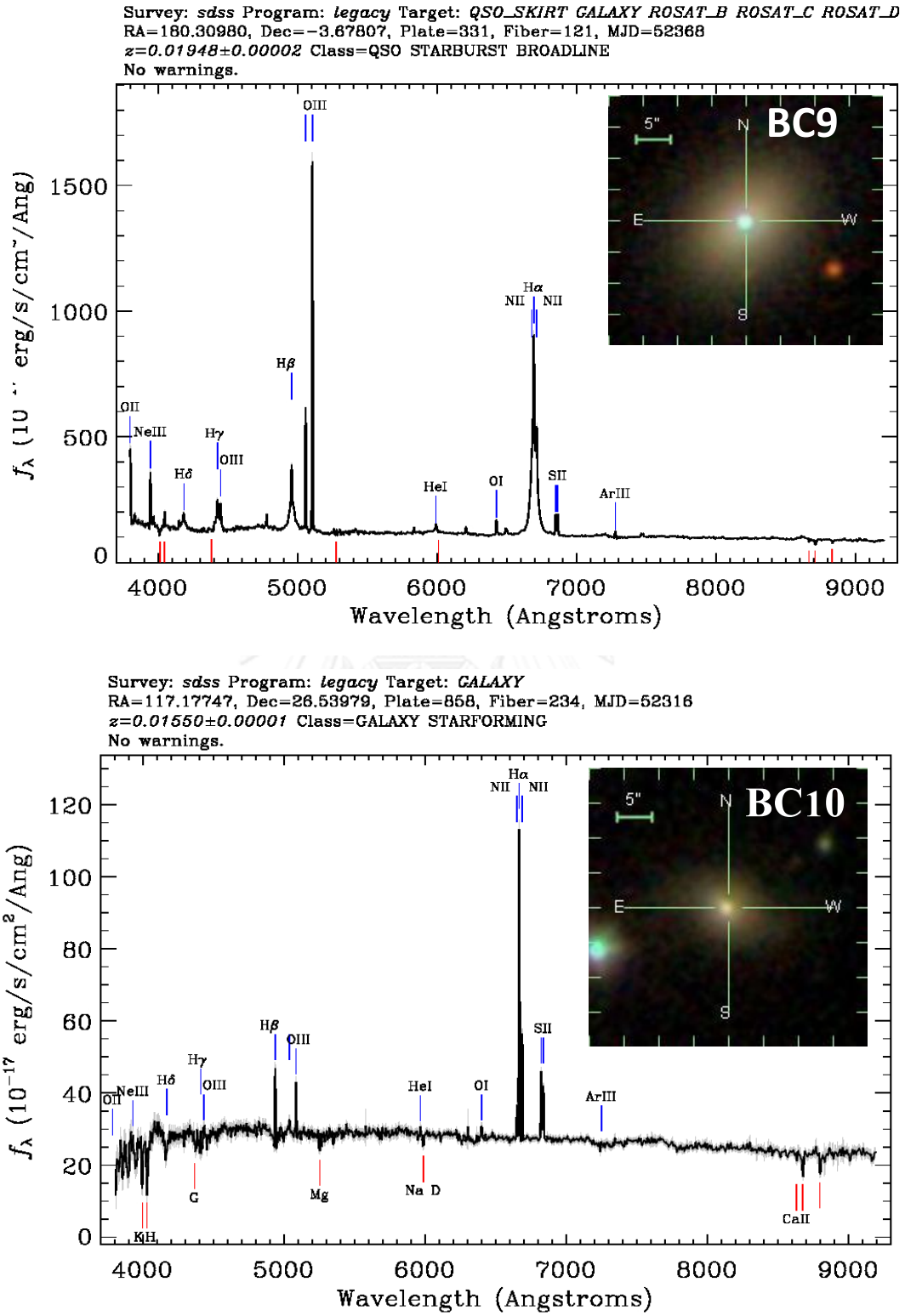
ภาพที่ ข (ต่อ) แสดงสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า โดยนำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส



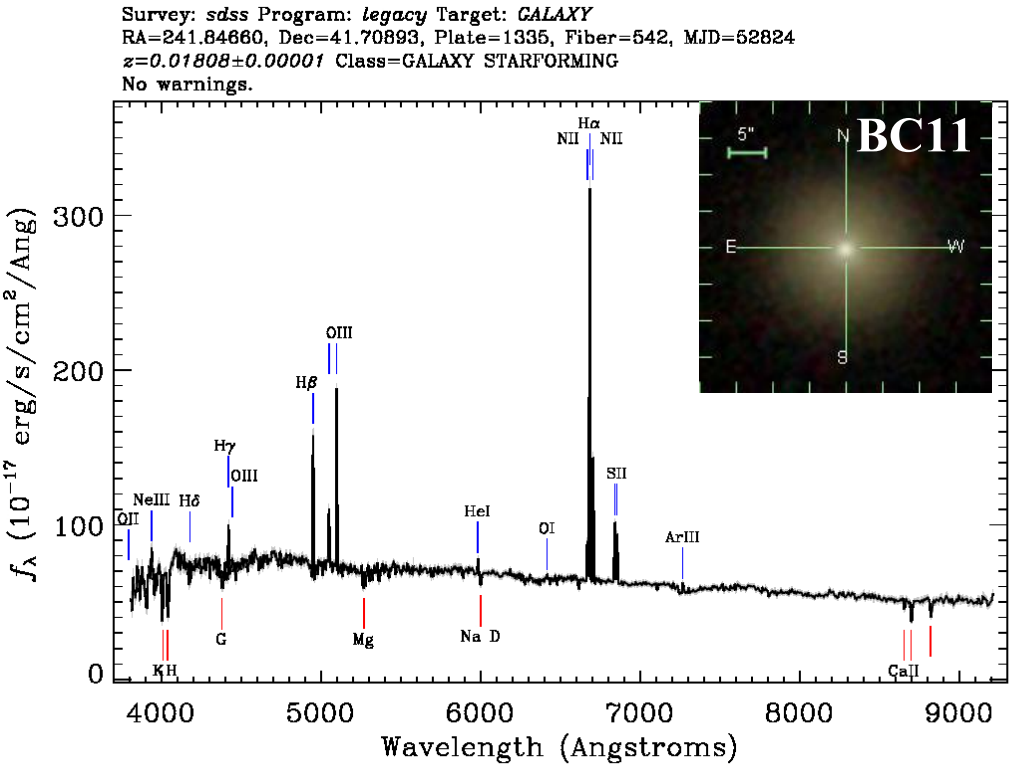
ภาพที่ ข (ต่อ) แสดงสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า โดยนำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส



ภาพที่ ข (ต่อ) แสดงสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า โดยนำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส



ภาพที่ ข (ต่อ) แสดงสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า โดยนำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส



ภาพที่ ข (ต่อ) แสดงสเปกตรัมของดาราจักรแบบทรงรีและเอสศูนย์ที่ใจกลางมีสีฟ้า โดยนำมาจากฐานข้อมูลเอสดีเอสเอส

Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปิยพงศ์ เขียวสะอาด เกิดเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่ตำบลด่านทับตะโก อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2553

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University