



การศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด
ในดาราจักรที่มีอัตราการกำเนิดของดาวฤกษ์สูง

THE STUDY OF ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES
IN HIGH STAR FORMATION RATE GALAXIES

กันยารัตน์ อำนวยจิตติเลิศ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2564

การศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด
ในดาราจักรที่มีอัตราการกำเนิดของดาวฤกษ์สูง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE STUDY OF ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES
IN HIGH STAR FORMATION RATE GALAXIES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Physics)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2021

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด

ในดาราจักรที่มีอัตราการกำเนิดของดาวฤกษ์สูง

ของ

กันยาร์ตัน อำนวนยจิตติเลิศ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.वासเทพ หลวงทิพย์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพิ่มวัย ชัยนะกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.นพมณี สุภนาม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.वासเทพ หลวงทิพย์)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ในดาราจักรที่มีอัตราการกำเนิดของดาวฤกษ์สูง
ผู้วิจัย	กันยารัตน์ อำนวยจิตติเลิศ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2564
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วาสุเทพ หลวงทิพย์

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (Ultraluminous X-ray source) คือแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด (X-ray point source) ที่ตรวจพบภายนอกดาราจักรทางช้างเผือกและมีกำลังส่องสว่างมากกว่า 10^{39} เอิร์กตอวินาที งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบภายในดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์สูง (high star forming galaxies) และมีระยะห่างจากผู้สังเกตการณ์ไม่เกิน 60 เมกะพาร์เซก จำนวน 5 ดาราจักร โดยใช้ข้อมูลการสังเกตการณ์จากกล้องโทรทรรศน์เอกซเรย์จันทรา (Chandra X-ray telescope) ผลการศึกษาทำให้สามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในทั้ง 5 ดาราจักรได้ทั้งสิ้น 54 แหล่งกำเนิด และจากการวิเคราะห์ค่า ฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแต่ละแหล่งกำเนิดทำให้สามารถนิยามแหล่งกำเนิดที่พบให้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้จำนวน 31 แหล่งกำเนิด หากพิจารณาอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ (star formation rate) ของทั้ง 5 ดาราจักรที่มีค่ารวมกันเท่ากับ 116 Solar mass per year ทำให้คิดเป็นสัดส่วนการพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดต่ออัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่เท่ากับ 0.27 แหล่งกำเนิดต่ออัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ 1 Solar mass per year โดยค่าที่ได้นี้ต่ำกว่าค่าที่พบในดาราจักรปกติถึงประมาณ 7.5 เท่า ยิ่งไปกว่านั้น หากพิจารณากำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักรที่ทำการศึกษาพบว่าดาราจักรส่วนใหญ่ (ดาราจักร NGC 7552, IC 5179, NGC 838 และ NGC 5653) แสดงการขาดหายไปของกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เทียบกับค่าคาดการณ์จากดาราจักรปกติถึง 38 – 77 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยไม่พบการขาดหายไปของกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp 299 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างที่ซับซ้อนของดาราจักร Arp 299 ทำให้เกิดความสับสนในการแยกแยะและระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ การขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดและกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์นั้นอาจจะอธิบายได้ด้วยสมมติฐานหลักที่ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดส่วนใหญ่ถูกบดบังจากการสังเกตการณ์ด้วยกลุ่มฝุ่นแก๊สที่มีลักษณะหนาแน่นในบริเวณที่มีกระบวนการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในอัตราที่สูง

คำสำคัญ : แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด, ดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูง, ระบบดาวคู่รังสีเอกซ์, การรวมมวล

Title	THE STUDY OF ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCES IN HIGH STAR FORMATION RATE GALAXIES
Author	KANYARAT UMNUAYJITTILERD
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2021
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Wasutep Luangtip

An ultraluminous X-ray source is an extragalactic, non-nuclear X-ray point source having an X-ray luminosity $> 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$. In this work, the ULXs in five nearby high star-forming galaxies were studied ($D < 60 \text{ Mpc}$) using the data obtained from the data archive of the Chandra X-ray telescope. The results indicated that 54 discrete X-ray sources that were detected. By calculating the flux and luminosity of each source, there were 31 sources that could be identified as ULXs. Given that the total star formation rate (SFR) of five sample galaxies was 116 Solar mass per year, the ULX detection rate is ~ 0.27 ULXs per unit star formation rate of one Solar mass per year and this rate was ~ 7.5 times lower than expected from a normal galaxy study. Furthermore, considering the total X-ray luminosity of the detected X-ray sources, it found that in most galaxy sample, i.e., NGC 7552, IC 5179, NGC 838 and NGC 5653, exhibited a lack of X-ray luminosity by $\sim 38 - 77\%$, compared to the predicted value from a normal galaxy study. However, for the galaxy Arp 299, no deficit of total X-ray luminosity was observed, probably because Arp 299 is merging galaxy and has a complex structure leading to the confusion of the detection and identification of the sources. The researcher argued that the main cause of this deficit in the number of ULXs and integrated X-ray luminosities might be because of a highly dense column of gas and dust in star-forming regions obscuring the number of ULXs and also absorbing the partial X-ray photons.

Keyword : Ultraluminous X-ray sources, Luminous infrared galaxies, X-ray binaries, Accretion

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาชี้แนะ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาสุเทพ หลวงทิพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพิ่มวัย ชัยนะกุล ผู้ทรงคุณวุฒิสอบปริญญาานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.นพมณี ศุภนาม ประธานกรรมการบริหารหลักสูตรฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญาานิพนธ์เล่มนี้มาโดยตลอด ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) ที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อ และสนับสนุนทุนการศึกษาจนจบหลักสูตร

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยฟิสิกส์ทฤษฎีพลังงานสูงและฟิสิกส์ดาราศาสตร์ หรือ Theoretical High Energy Physics and Astrophysics (THEPA) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้รับข้อมูลการสังเกตการณ์จาก Chandra Data Archive และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ CIAO ซึ่งจัดทำโดย Chandra X-ray Center

ขอขอบคุณ ปะป๊า หม่าม้า ผู้สนับสนุนหลักในทุกเรื่องและเป็นกำลังใจสำคัญ ขอขอบคุณ สวย canon nikon rollei leica จี๊ดจ๊ว ที่คอยปลอบประโลมเมื่อยามเศร้าใจ เป็นรอยยิ้มและเป็นพลังให้ฟันฝ่าทุกอุปสรรคที่เจอ

ขอขอบคุณสุรศักดิ์ ฤกษ์เกษิ, เกวดิน ทองโพธิ์ใหญ่, อัจฉรา เกื้อทาน, วรรัตน์ ตรีสุขรัตน์, กฤษฎิชนม์ ชนิลกุล, สัพพัญญู เมฆนิตติ และจนิษฐา ชูเลิศ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเนื้อหา ให้คำปรึกษา คอยชี้แนะในทุกๆเรื่องและให้กำลังใจกันเสมอมา และกัลยาณมิตรทุกคนที่รับฟัง ให้กำลังใจและเคียงข้างกันมาตลอด

ขอขอบคุณอภิวัชร เอื้อถาวรสุข, ตรัย ภูมิรัตน์ ผู้มอบพลังให้ข้าพเจ้าผ่านเสียงเพลง และบทเพลงทุกบทเพลงที่ข้าพเจ้าได้ฟังที่เป็นพลังและเคียงข้างข้าพเจ้าในทุกสถานการณ์

ขอขอบคุณ Han Seok Kyu ผู้เป็นที่ยึดเหนี่ยวและปลอบประโลมจิตใจ เป็นพลัง เป็นความหวัง และเป็นเหตุผลในการมีชีวิตอยู่ของข้าพเจ้า

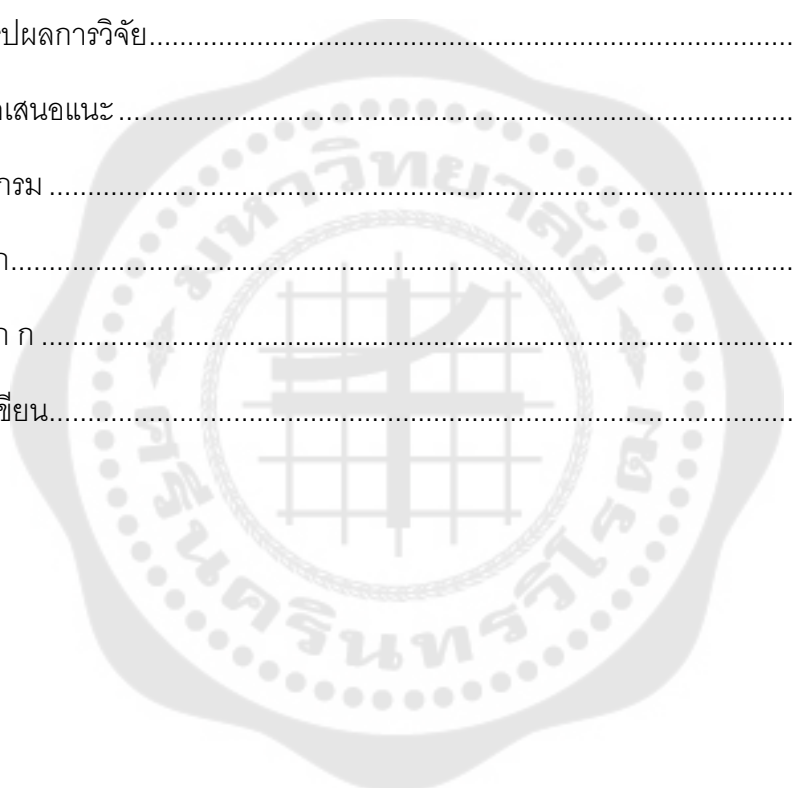
กันยารัตน์ อำนวยจิตติเลิศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 การเกิดหลุมดำในทางดาราศาสตร์.....	1
1.2 กระบวนการการถ่ายเทมวลและการรวมมวล	5
1.2.1 การถ่ายเทมวลในระบบดาวคู่ (Mass transfer in binary star system).....	5
1.2.2 กระบวนการรวมมวล (Mass accretion).....	8
1.3 ระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ (X-ray binaries)	10
1.4 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (Ultraluminous X-ray Source : ULXs) 10	
1.5 ดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด (Luminous Infrared Galaxies : LIRGs).....	12
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	14
ความสำคัญของงานวิจัย	14
ขอบเขตของงานวิจัย	15
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	16
2.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody radiation)	16

2.2 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)	19
2.3 อัตราการรวมมวลที่ขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน (Eddington accretion rate).....	21
2.4 การศึกษาเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 การเลือกตัวอย่างดาราจักร	31
3.2 การเตรียมข้อมูลการสังเกตการณ์ (Data reduction)	32
3.3 การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในดาราจักร	34
3.4 การเปรียบเทียบขนาดของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในดาราจักร	36
3.5 การคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในดาราจักร	37
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย	39
4.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร	39
4.1.1 ดาราจักร NGC 7552.....	40
4.1.2 ดาราจักร IC 5179	46
4.1.3 ดาราจักร Arp 299	53
4.1.4 ดาราจักร NGC 838.....	61
4.1.5 ดาราจักร NGC 5653.....	68
4.2 ฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร	72
4.2.1 ดาราจักร NGC 7552.....	73
4.2.2 ดาราจักร IC 5179	76
4.2.3 ดาราจักร Arp 299	78
4.2.4 ดาราจักร NGC 838.....	81
4.2.5 ดาราจักร NGC 5653.....	83

4.3 กำลังส่องสว่างรวมในย่านรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่	85
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย	88
5.1 อภิปรายผลการวิจัย	88
5.1.1 จำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด	88
5.1.2 กำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์	89
5.2 สรุปผลการวิจัย	93
5.3 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม	95
ภาคผนวก	100
ภาคผนวก ก	101
ประวัติผู้เขียน	108



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ข้อมูลพื้นฐานของดาราจักรที่ทำการศึกษา.....	33
ตาราง 2 ข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราจักรที่ทำการศึกษา	33
ตาราง 3 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552	44
ตาราง 4 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร IC 5179.....	51
ตาราง 5 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp 299	58
ตาราง 6 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 838	67
ตาราง 7 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 5653	71
ตาราง 8 ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552.....	74
ตาราง 9 ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร IC 5179.....	77
ตาราง 10 ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร Arp 299.....	79
ตาราง 11 ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร NGC 838.....	82
ตาราง 12 ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร NGC 5653.....	84
ตาราง 13 ผลรวมของกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักรในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์.....	87
ตาราง 14 จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในแต่ละดาราจักร.....	88

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบทางกายภาพในแต่ละชั้นของดาวฤกษ์ที่กำลังเข้าสู่ช่วงดาวยักษ์แดง (ภาพบน) ดาวฤกษ์ที่มีมวลไม่เกิน 6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และ (ภาพล่าง) ดาวฤกษ์ที่มีมวลมากกว่า 6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์	2
ภาพประกอบ 2 วิวัฒนาการของดาวฤกษ์ที่มีมวลต่างกัน	4
ภาพประกอบ 3 พื้นที่ขอบเขตโรเซ โลบในระบบดาวคู่ที่มีวัตถุสองวัตถุโคจรรอบจุดศูนย์กลางเดียวกัน.....	6
ภาพประกอบ 4 การถ่ายเทมวลในระบบดาวคู่ (ด้านบน) แสดงการถ่ายเทมวลผ่านลมดาวฤกษ์ (Stellar wind accretion) ซึ่งเป็นการถ่ายเทมวลในระบบของดาวฤกษ์ขนาดใหญ่ (HMXBs) (ด้านล่าง) แสดงการถ่ายเทมวลผ่านจุดลากรั้งเจียน L1 (Roche lobe overflow) ในระบบของ ดาวฤกษ์ขนาดเล็ก (LMXBs).....	7
ภาพประกอบ 5 การเกิดการรวมมวล (mass accretion) รอบหลุมดำและลักษณะของ จานรวมมวล	8
ภาพประกอบ 6 ดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการรวมกันของ ดาราจักรสองดาราจักรจากฐานข้อมูล The Great Observatory All-sky LIRG Survey (GOALS) ที่สังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิล	14
ภาพประกอบ 7 เส้นสเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ.....	18
ภาพประกอบ 8 อุณหภูมิของจานรวมมวลจากแบบจำลอง Multicolour Disc Blackbody โดยในแต่ละชั้นของจานรวมมวล (ด้านซ้าย) จะสอดคล้องกับลักษณะเส้นสเปกตรัม (ด้านขวา) ตาม ทฤษฎีจานรวมมวลแบบวัตถุดำหลากหลายสี.....	19
ภาพประกอบ 9 ปรากฏการณ์โฟโต้เล็กทริก	20
ภาพประกอบ 10 การดูดกลืนพลังงานของรังสีเอกซ์จากอะตอมของธาตุต่าง ๆ	21
ภาพประกอบ 11 อุณหภูมิของจานรวมมวลของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่ วิเคราะห์จากองค์ประกอบของสเปกตรัมในย่านพลังงานต่ำ	24

ภาพประกอบ 12 สเปกตรัมในช่วงพลังงาน 2-10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของ NGC 1313 X-2 ที่มี ความโค้งงอ.....	26
ภาพประกอบ 13 ลักษณะพื้นที่ขอบเขตของดาราจักร (วงรีสีเขียว) และตำแหน่งของแหล่งกำเนิด รังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่สามารถระบุได้ในแต่ละดาราจักร	35
ภาพประกอบ 14 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 7552	40
ภาพประกอบ 15 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 7552	41
ภาพประกอบ 16 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 7552	42
ภาพประกอบ 17 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร NGC 7552 ...	43
ภาพประกอบ 18 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร IC 5179.....	47
ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร IC 5179.....	48
ภาพประกอบ 20 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์	49
ภาพประกอบ 21 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร IC 5179	50
ภาพประกอบ 22 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร Arp 299	54
ภาพประกอบ 23 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร Arp 299	55
ภาพประกอบ 24 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 - 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร Arp 299	56
ภาพประกอบ 25 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร Arp299	57

ภาพประกอบ 26 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 838	62
ภาพประกอบ 27 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 838	63
ภาพประกอบ 28 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 838	64
ภาพประกอบ 29 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร NGC 838	65
ภาพประกอบ 30 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 5653	68
ภาพประกอบ 31 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 5653	69
ภาพประกอบ 32 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร NGC 5653 ...	70

บทที่ 1

บทนำ

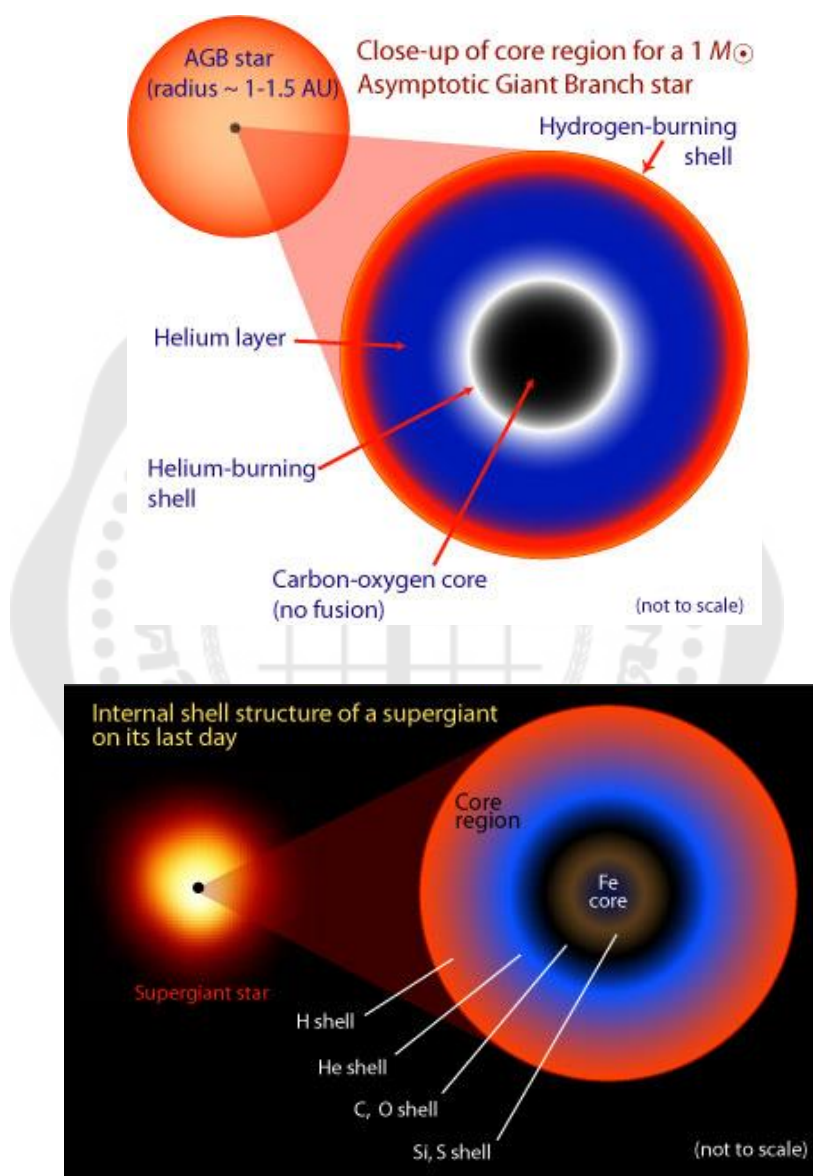
1.1 การเกิดหลุมดำในทางดาราศาสตร์

ดาวฤกษ์มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในไปตามลำดับเวลาในแต่ละช่วงอายุ โดยในช่วงลำดับหลัก (Main sequence) ของดาวฤกษ์จะมีการรักษาเสถียรภาพภายในดวงดาวระหว่างแรงดึงดูดเข้าอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงและแรงดันออกจากการแผ่รังสีที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์เพื่อให้ดาวฤกษ์สามารถคงรูปเป็นทรงกลมได้ (Hydrostatic equilibrium) โดยสมดุลของแรงทั้งสองแรงจะส่งผลให้ผิวของดาวฤกษ์มีลักษณะพองและยุบตัวเล็กน้อยอยู่ตลอดเวลา ต่อมาเมื่อดาวฤกษ์มีอายุมากขึ้น ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันที่แกนกลางจะเผาผลาญและสิ้นเปลืองไฮโดรเจนจนกลายเป็นฮีเลียมทั้งหมด ส่งผลให้แกนกลางดาวฤกษ์เกิดความไม่เสถียรและยุบตัวลง เพื่อรักษาสมดุลภายในดาวไว้ บริเวณเปลือกดาวที่ยังมีไฮโดรเจนเหลืออยู่จะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันขึ้นอีกครั้ง ซึ่งชั้นนอกของดาวจะขยายออกและเริ่มเข้าสู่ช่วงดาวยักษ์แดงหรือดาวยักษ์แดงใหญ่ จากนั้นเมื่อบริเวณแกนกลางยุบตัวลงจนมีอุณหภูมิสูงพอจะเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของฮีเลียม เกิดการสิ้นเปลืองฮีเลียมให้กลายเป็นคาร์บอนและจะเกิดการสิ้นเปลืองธาตุที่หนักขึ้นเรื่อย ๆ โดยขึ้นกับมวลของดาวฤกษ์

ในกรณีที่ดาวฤกษ์ที่มีมวลน้อยหรือปานกลาง (เช่น ดวงอาทิตย์) ที่มีมวลไม่เกิน 6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ จะสามารถสิ้นเปลืองธาตุที่เกิดการปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันที่แกนกลางได้ถึงแค่คาร์บอน ไม่สามารถสิ้นเปลืองธาตุที่หนักกว่านี้ได้ แกนกลางของดาวจะยุบตัวลงอย่างต่อเนื่องเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ทำให้ดาวฤกษ์เกิดความไม่เสถียร กลุ่มแก๊สบริเวณเปลือกดาวที่ไม่สามารถจุดปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้จะพุ่งกระจายปกคลุมรอบดาวฤกษ์ กลุ่มแก๊สนี้จะถูกเรียกว่า เนบิวลาดาวเคราะห์ (Planetary nebula) และการยุบตัวลงของแกนกลางจะถูกหยุดยั้งและกลับสู่สมดุลด้วยความดันดีเจนเนอเรซีของอิเล็กตรอน (Electron degeneracy pressure) แกนกลางของดาวฤกษ์จึงกลายเป็นวัตถุอัดแน่นที่เรียกว่า ดาวแคระขาว (White dwarf)

สำหรับดาวฤกษ์ที่มีมวลมาก (มีมวลมากกว่า 6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์) จะสามารถสิ้นเปลืองธาตุหนักที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันตั้งแต่ธาตุคาร์บอนจนถึง

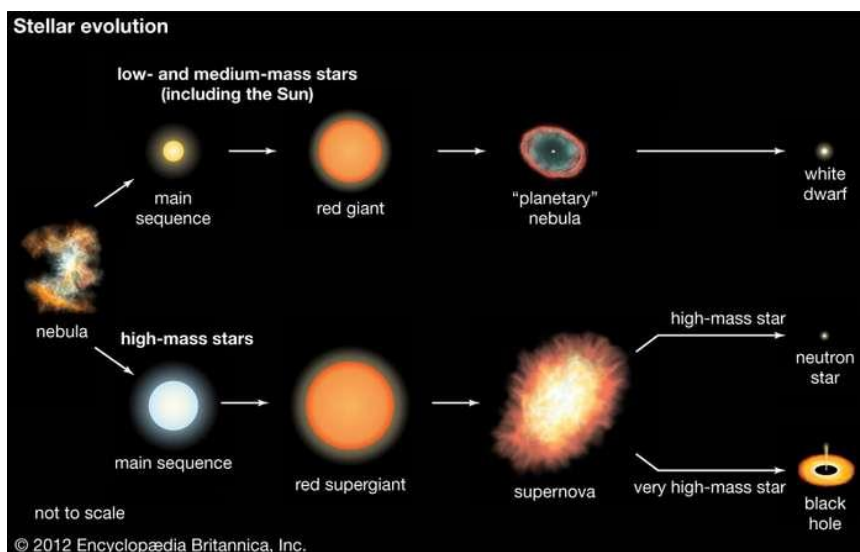
ธาตุเหล็กซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้ายจากปฏิกิริยาที่บริเวณแกนกลางของดาว โดยธาตุหนักที่สังเคราะห์ได้จะซ้อนทับกันเป็นชั้น ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบทางกายภาพในแต่ละชั้นของดาวฤกษ์ที่กำลังเข้าสู่ช่วงดาวยักษ์แดง (ภาพบน) ดาวฤกษ์ที่มีมวลไม่เกิน 6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และ (ภาพล่าง) ดาวฤกษ์ที่มีมวลมากกว่า 6 เท่าของมวลดวงอาทิตย์

ที่มา : <https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics>

สสารที่เหลืออยู่ไม่สามารถจุดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันได้อีก ดาวจะยุบตัวด้วยแรงโน้มถ่วง อนุภาคจะถูกบีบอัดกันแน่นขึ้น จนอนุภาคมิของอิเล็กตรอนที่แกนกลางสูงมาก ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของตัวเองได้ ซึ่งขีดจำกัดที่อิเล็กตรอนจะสามารถรักษาเสถียรภาพนี้ได้คือ ที่แกนกลางของดาวมีมวลไม่เกิน 1.4 เท่าของมวลดวงอาทิตย์หรือที่เรียกว่าขีดจำกัดจันทรสิขา (Chandrasekhar limit) โดยในกรณีนี้ดาวฤกษ์มวลมากจะมีมวลที่แกนกลางมากกว่าขีดจำกัดจันทรสิขา ทำให้ดาวยังคงยุบตัวต่อไปจนความดันดีเจนเนอเรซีของอิเล็กตรอนไม่สามารถต้านการยุบตัวไว้ได้ อิเล็กตรอนจะถูกบีบอัดจนเข้าไปรวมกับโปรตอนภายในนิวเคลียส กลายเป็นนิวตรอน การยุบตัวของดาวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดการปลดปล่อยพลังงานจำนวนมากที่ผิวดาวเกิดการระเบิดที่เรียกว่า ซูเปอร์โนวา (Supernova explosion) ถ้ามวลของดาวฤกษ์หลังการระเบิดอยู่ระหว่าง 1.4 – 3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ แกนกลางของดาวจะสามารถคงรูปอยู่ได้ด้วยแรงดันนิวตรอนดีเจนเนอเรซี (Neutron degeneracy pressure) เรียกว่าดาวนิวตรอน (Neutron star) แต่ถ้าหากว่ามีมวลหลังการระเบิดมากกว่า 3 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ จะเกิดการยุบตัวที่แกนกลางภายใต้แรงโน้มถ่วงมหาศาลที่แม้แต่แสงก็ไม่สามารถผ่านออกมาได้ เรียกวัตถุนิดนี้ว่า หลุมดำ (Black hole) โดยบริเวณขอบเขตของหลุมดำที่ความเร็วหลุดพ้นมีค่าเท่ากับความเร็วแสงพอดีจะเป็นบริเวณสุดท้ายที่นักดาราศาสตร์จะสามารถศึกษาหลุมดำได้ เรียกว่า ขอบฟ้าเหตุการณ์ (Event horizon) ซึ่งทั้งดาวแคระขาว ดาวนิวตรอนและหลุมดำ จะถูกเรียกรวม ๆ ว่า วัตถุอัดแน่นทางดาราศาสตร์ (Compact object) วิวัฒนาการของดาวฤกษ์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 วิวัฒนาการของดาวฤกษ์ที่มีมวลต่างกัน

ที่มา : <https://www.britannica.com/science/star-astronomy/Star-formation-and-evolution>

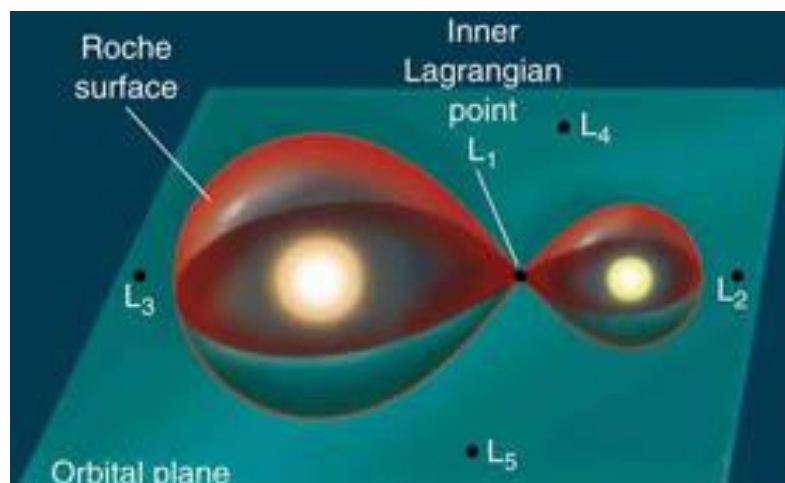
นักดาราศาสตร์ได้ทำการศึกษาหลุมดำและเชื่อว่าหลุมดำเป็นวัตถุหลักที่ให้พลังงานแก่แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด สามารถจำแนกประเภทของหลุมดำตามมวลได้เป็น หลุมดำที่เกิดจากการตายดาวฤกษ์ มีมวลเหลือหลังการระเบิดของซูเปอร์โนวาประมาณ 3 – 20 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ เรียกหลุมดำประเภทนี้ว่า หลุมดำมวลดาวฤกษ์ (Stellar-mass black holes : sMBHs) ประเภทต่อมาคือหลุมดำที่เกิดจากการตายของดาวฤกษ์มวลมากที่มีมวลหลังการระเบิด 20 – 10^2 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ เรียกหลุมดำแมสซีฟสเตลลาร์ (Massive stellar black holes : MsBHs) และหลุมดำมวลยวดยิ่งที่อยู่บริเวณใจกลางกาแลคซีที่มีมวลประมาณ $10^5 - 10^{10}$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (Supermassive black holes) นอกจากนี้ยังพบหลักฐานว่ามีหลุมดำอีกประเภทหนึ่งที่มวลปานกลางประมาณ $10^2 - 10^5$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ซึ่งนักดาราศาสตร์เชื่อว่าหลุมดำชนิดนี้เกิดจากดาวฤกษ์รุ่นแรก (Population III stars) ตั้งแต่มยุคกำเนิดจักรวาล และเรียกหลุมดำชนิดนี้ว่า หลุมดำอินเตอร์มีเดียทแมส (Intermediate mass black holes : IMBHs) มีความเป็นไปได้ที่หลุมดำชนิดนี้จะสามารถช่วยอธิบายถึงการกำเนิดของหลุมดำมวลยวดยิ่งที่ใจกลางดาราจักรได้ แต่อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของหลุมดำชนิดนี้ก็ยังไม่เป็นที่ยืนยันอย่างชัดเจน

1.2 กระบวนการการถ่ายเทมวลและการรวมมวล

จากหัวข้อที่แล้วที่กล่าวถึงการกำเนิดของหลุมดำที่อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงมีความมหาศาล ทำให้ไม่มีวัตถุใดหรือแม้กระทั่งแสงหลุดออกจากขอบฟ้าเหตุการณ์ได้ จึงไม่สามารถสังเกตการณ์ หลุมดำได้โดยตรง นักดาราศาสตร์จึงศึกษาหลุมดำที่มีปรากฏการณ์การเปล่งแสงและปลดปล่อย คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบของหลุมดำในระบบดาวคู่ ประกอบด้วยกระบวนการ การถ่ายเทมวลและการรวมมวล

1.2.1 การถ่ายเทมวลในระบบดาวคู่ (Mass transfer in binary star system)

ในระบบดาวคู่จะประกอบไปด้วยวัตถุสองวัตถุที่โคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลเดียวกัน วัตถุที่หนึ่งคือวัตถุอัดแน่นซึ่งในที่นี้คือหลุมดำ ส่วนอีกวัตถุหนึ่งคือดาวฤกษ์ที่อยู่ในช่วงลำดับหลัก ไปจนถึงกำลังเข้าสู่ช่วงดาวยักษ์แดง เรียกว่า ดาวผู้ให้ (Donor star) ด้วยอิทธิพลแรงโน้มถ่วงที่ มหาศาลของหลุมดำ จะเกิดการดึงดูดสสารจากดาวผู้ให้ให้ตกลงสู่ขอบเขตของหลุมดำ ขอบเขต ดังกล่าวนี้จะเกิดจากแรงโน้มถ่วงของวัตถุทั้งสองที่กระทำต่อกันทำให้บริเวณพื้นผิวรอบ ๆ วัตถุ ทั้ง สองมีค่าศักย์โน้มถ่วงเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว เรียกบริเวณพื้นผิวนี้อีกว่า พื้นผิวโรเช โลบ (Roche lobe surface) แนวคิดนี้เสนอโดยนักดาราศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ เอ็ดัวร์ โรเช (Edouard Roche) จุดที่ บริเวณพื้นผิวโรเช โลบของวัตถุทั้งสองสัมผัสกัน ทำให้รูปร่างของพื้นผิวโรเช โลบมีลักษณะคล้าย หยดน้ำจะเป็นบริเวณที่เกิดความสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงของดาวคู่ คือ ถ้ามีสสารใดอยู่ ณ จุดนี้ จะไม่ได้รับผลกระทบจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นจุดที่เกิดกระบวนการการถ่ายเทมวลของสสารและ เรียกจุดเชื่อมต่อนี้ว่าจุดลากรังเจียน L1 (Lagrange point L1) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3



ภาพประกอบ 3 พื้นที่ขอบเขตโรเซ โลบในระบบดาวคู่ที่มีวัตถุสองวัตถุโคจรรอบจุดศูนย์กลาง
เดียวกัน

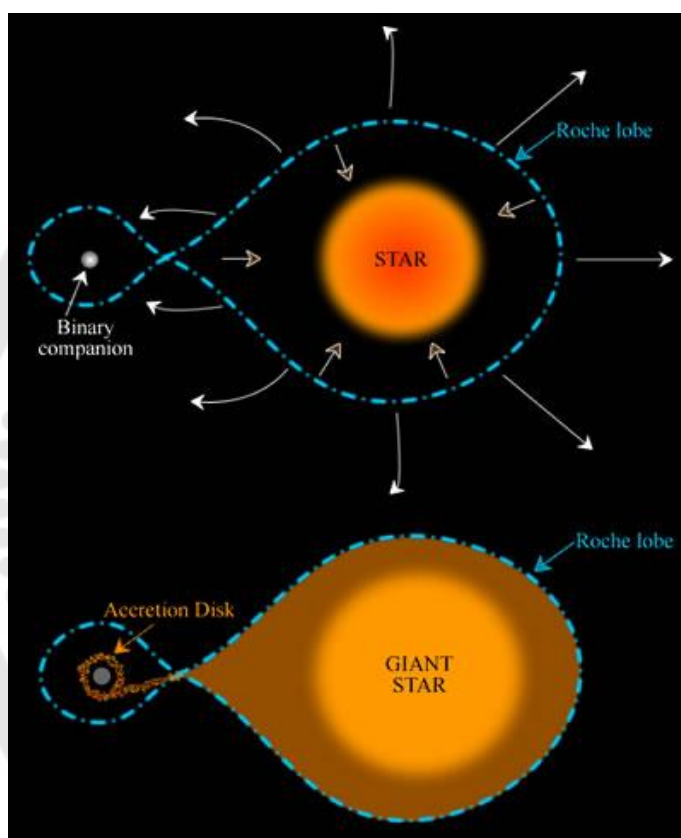
ที่มา : https://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/Roche_lobe.html

ส่วนวัตถุหรือสสารใด ๆ ที่อยู่นอกขอบเขตของพื้นผิวโรเซ โลบ จะมีความเป็นไปได้ 3 กรณีคือ วัตถุหลุดออกจากระบบ วัตถุโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวล หรือ วัตถุอาจตกลงไปในโรเซ โลบของดาวคู่ เมื่อพิจารณาผ่านพื้นผิวของโรเซ โลบ จะสามารถแบ่งการถ่ายเทมวลได้เป็น 2 กรณี ขึ้นกับมวลของดาวผู้ให้

กรณีที่ 1 มวลของดาวผู้ให้เป็นดาวฤกษ์ที่มีขนาดใหญ่ มีมวลประมาณมากกว่า 10 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (High mass X-ray binaries) ซึ่งดาวฤกษ์ขนาดใหญ่จะมีการไหลของสสารที่บรรยากาศชั้นนอกอย่างรุนแรงเนื่องจากความดันที่เกิดจากการแผ่รังสีของดาวฤกษ์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ลมดาวฤกษ์ (Stellar wind) ที่สามารถพัดพาสสารของดาวฤกษ์ออกนอกขอบเขตโรเซ โลบ สสารที่ถูกพัดพาออกจากโรเซ โลบบางส่วนจะถูกดึงดูดเข้าสู่หลุมดำทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา เรียกกระบวนการถ่ายเทมวลในลักษณะนี้ว่า การถ่ายเทมวลผ่านลมดาวฤกษ์ (Stellar wind accretion) ซึ่งจะใช้เวลาในการถ่ายเทมวลประมาณ 10^5 ปี ดังแสดงในภาพประกอบ 4

กรณีที่ 2 มวลของดาวผู้ให้เป็นดาวฤกษ์ขนาดเล็กที่มีมวลประมาณ 1 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (Low mass X-ray binaries) เนื่องจากดาวฤกษ์ชนิดนี้มีมวลไม่มาก ลมดาวฤกษ์ของดาวชนิดนี้จะไม่รุนแรงจนสามารถพัดพาสสารให้เกิดการถ่ายเทมวลไปสู่วัตถุอัดแน่นได้

กระบวนการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นภายในระบบนี้จึงจะเกิดขึ้นในช่วงที่ดาวฤกษ์ผู้ให้เริ่มเข้าสู่ช่วงดาวยักษ์แดง พื้นผิวด้านนอกของดาวขยายออกจนล้ำขอบเขตโรเซ โลบ สสารจะถูกถ่ายเทผ่านจุดลากรังเจียน L1 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีศักย์โน้มถ่วงต่ำสุดลงสู่หลุมดำ เรียกกระบวนการการถ่ายเทมวลในลักษณะนี้ว่า การถ่ายเทมวลผ่านจุดลากรังเจียน L1 (Roche lobe overflow) ใช้ระยะเวลาในการถ่ายเทมวลประมาณ $10^7 - 10^9$ ปี ดังแสดงในภาพประกอบ 4

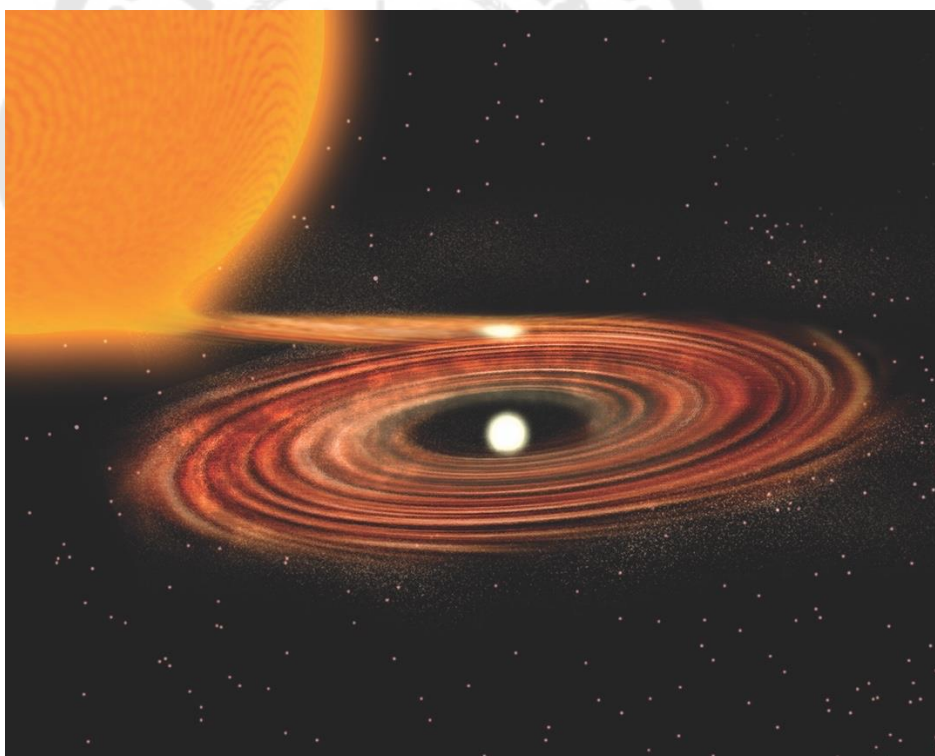


ภาพประกอบ 4 การถ่ายเทมวลในระบบดาวคู่ (ด้านบน) แสดงการถ่ายเทมวลผ่านลมดาวฤกษ์ (Stellar wind accretion) ซึ่งเป็นการถ่ายเทมวลในระบบของดาวฤกษ์ขนาดใหญ่ (HMXBs) (ด้านล่าง) แสดงการถ่ายเทมวลผ่านจุดลากรังเจียน L1 (Roche lobe overflow) ในระบบของดาวฤกษ์ขนาดเล็ก (LMXBs)

ที่มา : <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/r/roche-lobe>

1.2.2 กระบวนการรวมมวล (Mass accretion)

จากการถ่ายเทมวลในระบบดาวคู่ทั้ง 2 กรณี จะเกิดการส่งผ่านสสารจากดาวผู้ให้ตกลงสู่ขอบเขตโรเซ โลบของหลุมดำ สสารเหล่านั้นจะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของหลุมดำ เนื่องจากโดยปกติดาวฤกษ์มีการหมุนรอบตัวเองทำให้มีโมเมนตัมเชิงมุม เมื่อสสารถูกถ่ายเทเข้าสู่หลุมดำ สสารจะมีการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมทำให้เกิดการหมุนวนหรือโคจรรอบ ๆ ก่อนตกลงสู่หลุมดำ เมื่อสสารตกลงไปสู่ขอบเขตของหลุมดำมากขึ้นจนหนาแน่นจะเกิดการรวมมวลเป็นรูปวงคล้ายจานหมุนวนรอบหลุมดำเรียกว่า จานรวมมวล (accretion disc) หมุนวนรอบ ๆ หลุมดำ ดังแสดงในภาพประกอบ 5 โดยรูปแบบมาตรฐานของจานรวมมวลถูกคิดค้นขึ้นมาโดยซาคุระและชันเยฟ ในปี ค.ศ.1973 (Shakura & Sunyaev, 1973) และถูกเรียกว่าจานรวมมวลของซาคุระและชันเยฟ (Shakura & Sunyaev disc) หมุนวนรอบหลุมดำซึ่งจานรวมมวลนี้จะมีลักษณะเป็นวัตถุทึบแสงแต่มีรูปทรงเป็นแผ่นบาง (Optically thick and geometrically thin)



ภาพประกอบ 5 การเกิดการรวมมวล (mass accretion) รอบหลุมดำและลักษณะของ
จานรวมมวล

ที่มา : https://www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=66143

ในกรณีที่วัตถุหรือสสารที่โคจรรอบหลุมดำมีแรงหนีศูนย์กลางสมดุลกับแรงโน้มถ่วง สสารจะโคจรรอบหลุมดำเป็นวงกลมหรือวงรี อย่างไรก็ตามถ้าสสารนั้นเกิดการเสียดสีหรือชนกัน ระหว่างการโคจรรอบหลุมดำ จะทำให้เกิดแรงเสียดทาน สสารจะสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมทำให้วงโคจรมีขนาดเล็กลง เกิดการหมุนวนลักษณะกังหัน (Spiral) ก่อนที่สสารจะตกลงสู่หลุมดำ โดยระหว่างกระบวนการ พลังงานศักย์โน้มถ่วงของสสารส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์และพลังงานส่วนที่เหลือจะกลายเป็นการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ในหลายย่านความถี่ ซึ่งทำให้เกิดการเปล่งแสงของแก๊สที่โคจรรอบหลุมดำ กำลังส่องสว่าง (Luminosity) ที่เปล่งออกจากจานรวมมวลสามารถประมาณค่าได้ด้วยทฤษฎีไวเรียล (Virial theorem) ดังสมการ 1-1

$$L = \frac{GM_{BH} \dot{m}}{2R} \quad (1-1)$$

โดยที่

L คือ กำลังส่องสว่าง

G คือ ค่าโน้มถ่วงสากล (Gravitational constant)

มีค่าประมาณ $6.674 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-1}$

M_{BH} คือ มวลของหลุมดำ

\dot{m} คือ อัตราการตกของมวลที่ตกลงสู่หลุมดำต่อหน่วยเวลาหรือเรียกว่า accretion rate ($\dot{m} = \frac{dm}{dt}$)

R คือ รัศมีของวงโคจรสุดท้าย (Innermost stable circular orbit) ก่อนที่สสารจะตกลงสู่หลุมดำอย่างรวดเร็ว ในกรณีของหลุมดำที่ไม่มีโมเมนตัมเชิงมุม (Schwarzschild black hole) จะมีรัศมีของวงโคจรสุดท้ายเท่ากับ 6 เท่าของรัศมีตามแนวแรงโน้มถ่วงของหลุมดำ (Gravitational radius : R_g)

($R = 6R_g$) โดยที่ $R_g = \frac{GM_{BH}}{c^2}$

เมื่อ c คือ อัตราความเร็วแสง ($c = 3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที)

1.3 ระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ (X-ray binaries)

ระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ สามารถจำแนกตามมวลของดาวผู้ให้ได้ 2 ประเภทคือ ระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ที่ดาวผู้ให้มวลมาก (High mass X-ray binaries : HMXBs) คือเป็นดาวฤกษ์ประเภท O หรือ B (O-type, B-type star) และมีอายุ 10^7 ปี โดยประชากรส่วนใหญ่ถูกพบในดาราจักรประเภทกังหันหรือในดาราจักรไร้รูปร่างที่มีอัตราการฟอर्मตัวของดาวฤกษ์ค่อนข้างสูง อีกประเภทคือระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ที่ดาวผู้ให้มวลน้อย (Low mass X-ray binaries : LMXBs) เป็นดาวฤกษ์ที่พ้นจากช่วงลำดับหลักไปแล้วคือ อยู่ในสถานะดาวยักษ์แดง มีอายุ $\geq 10^9$ ปี พบในดาราจักรประเภททรงกลมที่มีอายุมาก (Old spheroidal galaxies) หรือในกระจุกดาวทรงกลม (Globular clusters)

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดซึ่งเป็นวัตถุที่เราสนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ ถูกคาดว่าเป็นระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ชนิดหนึ่งที่สามารถพบได้ในดาราจักรทุกประเภท โดยประชากรประมาณ 67% ของประชากรทั้งหมดถูกพบในดาราจักรประเภทวงรี มีกำลังส่องสว่างอยู่ในช่วง $\sim 2 - 10 \times 10^{39}$ เอิริกต์อวินาที ส่วนประชากรอีก 33% ถูกพบในดาราจักรประเภทกังหัน มีกำลังส่องสว่างอยู่ในช่วง $\geq 4 - 5 \times 10^{39}$ เอิริกต์อวินาที และมีประชากรประมาณ 10% ที่พบในดาราจักรรีที่มีกำลังส่องสว่างสูง $\geq 10^{40}$ เอิริกต์อวินาที (Swartz, Ghosh, Tennant, & Wu, 2004; Walton, Roberts, Mateos, & Heard, 2011)

จากการศึกษากำลังส่องสว่างของระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ทั้ง 2 ประเภทในดาราจักรชนิดต่าง ๆ ทำให้พบความสัมพันธ์ว่า กำลังส่องสว่างของระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ที่ดาวผู้ให้มวลมากจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ และกำลังส่องสว่างของระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ที่ดาวผู้ให้มวลน้อยจะเป็นสัดส่วนกับมวลของดาวฤกษ์ภายในดาราจักร (Gilfanov, Grimm, & Sunyaev, 2004)

1.4 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (Ultraluminous X-ray Source : ULXs)

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด หรือเรียกอย่างย่อว่า ยูแอลเอกซ์ ได้รับการนิยามว่าเป็นวัตถุนอกดาราจักรทางช้างเผือก (Extragalactic) ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบจุด (X-ray point-like source) ที่มีกำลังส่องสว่างในย่าน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) มากกว่าหรือเท่ากับ 10^{39} เอิริกต์อวินาที หรือสว่างเกินกว่าค่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน (Eddington

limit) สำหรับระบบการรวมมวลของหลุมดำที่มีมวลประมาณ 10 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และไม่ใช่แหล่งกำเนิดที่เกิดจากการรวมมวลเข้าสู่หลุมดำซูเปอร์แมสซีฟที่บริเวณใจกลางดาราจักร เนื่องจากแหล่งกำเนิดนี้มีกำลังส่องสว่างที่สูงมาก จึงมีข้อสันนิษฐานถึงความเป็นไปได้ว่า แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดนี้อาจจะเป็นหลุมดำ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ แหล่งกำเนิดที่เป็นหลุมดำอินเตอร์มีเดียที่มีมวลประมาณ $10^2 - 10^4$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ (Colbert & Mushotzky, 1999) ที่มีอัตราการรวมมวลไม่เกินค่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน หรือ แหล่งกำเนิดที่เป็นหลุมดำที่เกิดจากการตายของดาวฤกษ์ที่มีมวลประมาณ 3 – 20 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ที่มีสถานะทางฟิสิกส์ที่ทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างของจานรวมมวล ส่งผลให้เกิดการรวมมวลที่เสมือนเกินค่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันต่อผู้สังเกตการณ์ภายนอก นอกจากนี้นักดาราศาสตร์ยังได้สันนิษฐานว่า แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดอาจจะเป็นหลุมดำแมสซีฟสเตลลาร์ที่มีมวลประมาณ $20 - 10^2$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ซึ่งพบในดาราจักรที่มีสภาวะความเป็นโลหะต่ำ (Metal poor environment) และมีอัตราการรวมมวลประมาณขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน (Zampieri & Roberts, 2009) อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาล่าสุดมีการพบว่ามีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดภายในดาราจักร M82 นั้นมีการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบ pulse ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดที่ได้รับพลังงานจากดาวนิวตรอนที่มีอัตราการรวมมวลเกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน (Bachetti et al., 2014)

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดถูกค้นพบครั้งแรกโดยกล้องโทรทรรศน์เอกซเรย์ไอน์สไตน์ (Fabbiano, 1988, 1989) ซึ่งในเวลานั้นมีความคลุมเครือที่จะบอกความแตกต่างว่าแสงที่พบจากแหล่งกำเนิดนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงค้างฟ้า (Persistently luminous source) หรือ เป็นแหล่งกำเนิดแสงชั่วคราวจากการเกิดซูเปอร์โนวา (Young supernovae) เนื่องจากต้องใช้เวลาในการสังเกตการณ์นับปี ทศวรรษต่อมา จากการสังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์เอกซเรย์ ROSAT และ ASCA ยืนยันได้ว่าแหล่งกำเนิดแสงส่วนใหญ่ที่พบไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดชั่วคราวจากการระเบิดของซูเปอร์โนวา แต่เป็นแหล่งกำเนิดแสงค้างฟ้าที่เกิดจากการรวมมวลของวัตถุอัดแน่นในระบบดาวคู่ อีกทั้งยังพบว่า เป็นวัตถุที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีเอกซ์เกินกว่าขีดจำกัดเอ็ดดิงตันในระบบการรวมมวลของหลุมดำมวลดาวฤกษ์ ซึ่งในขณะนั้นนักดาราศาสตร์ได้มีการระบุชื่อของแหล่งกำเนิดนี้ในหลาย ๆ ชื่อ แต่ชื่อที่ได้รับการยอมรับและใช้ในการนิยามอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบันคือ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ที่เริ่มใช้ครั้งแรกโดยทีมวิจัยของ ASCA (Mizuno, Ohnishi, Kubota, Makishima, & Tashiro, 1999; Okada, Dotani, Makishima, Mitsuda, & Mihara, 1998)

1.5 ดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด (Luminous Infrared Galaxies : LIRGs)

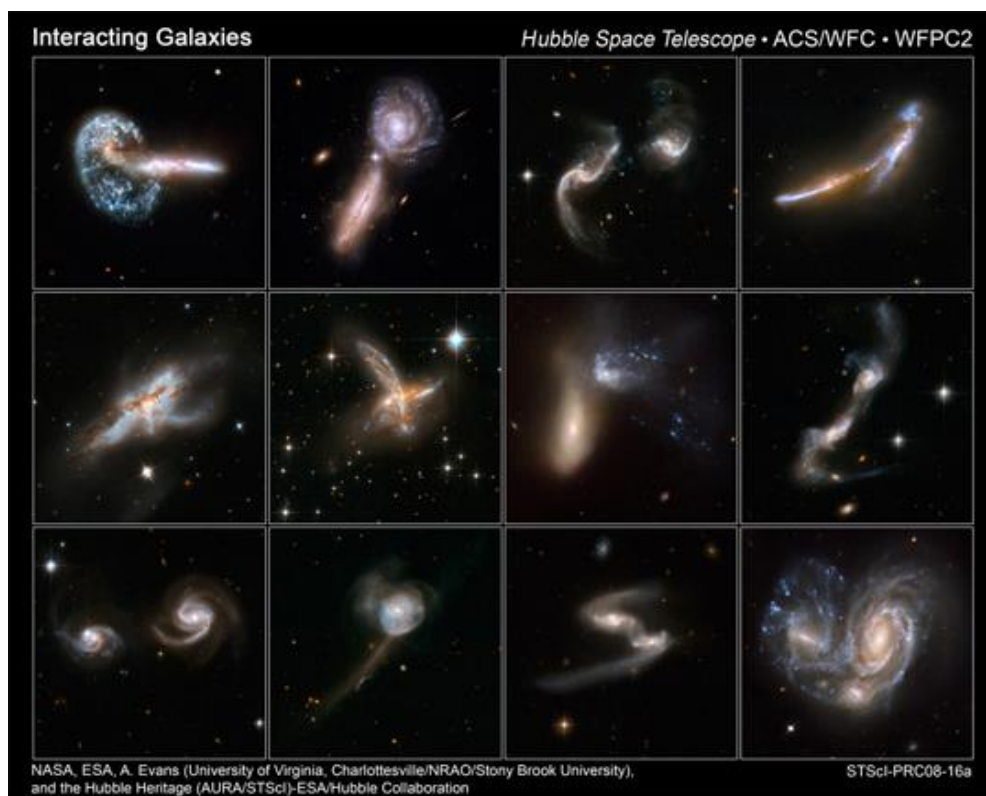
ดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดถูกค้นพบครั้งแรกโดยกล้องโทรทรรศน์รังสีอินฟราเรดไอราส (Infrared Astronomical Satellite : *IRAS*) ซึ่งเป็นกล้องโทรทรรศน์อวกาศลำแรกที่ทำการศึกษาวัตถุท้องฟ้าที่มีการแผ่รังสีอินฟราเรดและพบว่ามิดาราจักรรูปร่างกังหันจำนวนหนึ่งมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีอินฟราเรดจำนวนมากจนมีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด จึงได้นิยามลักษณะของดาราจักรชนิดนี้ว่า ดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด (Luminous Infrared Galaxies) โดยมีกำลังส่องสว่างมากกว่า 10^{11} เท่าของกำลังส่องสว่างของดวงอาทิตย์ ($L_{\odot} \approx 3.9 \times 10^{33}$ เอิริกต่อวินาที) กระบวนการภายในที่ทำให้ดาราจักรประเภทนี้มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดเป็นผลมาจากปริมาณของกลุ่มแก๊สและฝุ่นที่รวมตัวกันอย่างหนาแน่นปกคลุมทั่วดาราจักรจนเกิดการดูดกลืนแสงในย่านที่ตามองเห็นและย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดาวฤกษ์เกิดใหม่และปลดปล่อยพลังงานออกมาในย่านอินฟราเรด ทำให้แสงที่เดินทางมาถึงผู้สังเกตการณ์ไม่ใช่แสงโดยตรงจากดาวฤกษ์แต่เป็นแสงที่ผ่านการดูดกลืนและปลดปล่อยโดยกลุ่มฝุ่นแก๊สเหล่านี้ ซึ่งปริมาณของกลุ่มฝุ่นแก๊สที่หนาแน่นภายในดาราจักรนั้นบ่งบอกว่าดาราจักรมีการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ที่สูงมาก คือมีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ (Star formation rate) ประมาณ 10 – 100 เท่าของอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในดาราจักรทั่วไป (Normal star-forming galaxies) ที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ ≤ 2 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี และในงานวิจัยนี้จะเรียกดาราจักรประเภทนี้ว่า ดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับปกติ

ต่อมานักดาราศาสตร์ได้ใช้กล้องโทรทรรศน์ฮับเบิล (Hubble Space Telescope) ในการสังเกตการณ์ดาราจักรเหล่านี้ในย่านแสงที่ตามองเห็น ดังแสดงในภาพประกอบ 6 และพบว่าประชากรส่วนใหญ่ของดาราจักรประเภทนี้เกิดจากการรวมกันของดาราจักรกังหัน (Gas rich spiral galaxies) สองดาราจักร ซึ่งเมื่อเกิดการรวมตัวกันของกลุ่มฝุ่นแก๊สของทั้งสองดาราจักร กลุ่มแก๊สบางส่วนจะรวมตัวกันอย่างหนาแน่นจนเกิดเป็นบริเวณที่มีการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่เป็นเหตุให้ดาราจักรประเภทนี้มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด

จากการศึกษาดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับปกติที่กำลังส่องสว่างส่วนใหญ่ของดาราจักรไม่ได้มาจากบริเวณนิวเคลียสดาราจักรกัมมันต์ พบว่ากำลัง

ส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์นั้นปลดปล่อยมาจากระบบดาวคู่รังสีเอกซ์ ซูเปอร์โนวาและซากหลังการระเบิด (Supernovae and supernova remnant) กลุ่มแก๊สร้อนระหว่างดวงดาวที่มีอุณหภูมิประมาณ 0.2 – 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (Hot interstellar gas) และดาวฤกษ์ประเภท O (O-stars) (Fabbiano, 1989, 2006) ซึ่งจากการศึกษาของหลาย ๆ งานวิจัย พบว่า การปลดปล่อยพลังงานในย่านรังสีเอกซ์ของดาราจักรมีความสัมพันธ์กับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ (X-ray/SFR correlation) (Bauer et al., 2002; Gilfanov et al., 2004; Grimm, Gilfanov, & Sunyaev, 2003; Lehmer et al., 2008; Persic & Rephaeli, 2002, 2007; Ranalli, Comastri, & Setti, 2003) โดยคาดว่าความสัมพันธ์นี้เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานในย่านรังสีเอกซ์ของระบบดาวคู่รังสีเอกซ์เป็นหลัก เนื่องมาจากในช่วงรังสีเอกซ์พลังงานสูง (2 – 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) ความเข้มของการปลดปล่อยพลังงานที่มาจากส่วนกลุ่มแก๊สร้อนและดาวฤกษ์มีค่าน้อย ซึ่งแท้จริงแล้วโฟตอนพลังงานสูงเกิดจากปรากฏการณ์การกระเจิงแบบย้อนกลับของคอมป์ตัน (Inverse Compton scattering) ที่บริเวณจานรวมมวลของหลุมดำในระบบดาวคู่ ทำให้โฟตอนพลังงานสูงส่วนใหญ่มาจากระบบดาวคู่รังสีเอกซ์และพบว่าสัมพันธ์กับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ภายในดาราจักร (Persic & Rephaeli, 2002) ซึ่งกำลังส่องสว่างของรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานสูงนี้จะสะท้อนถึงจำนวนประชากรของหลุมดำในระบบดาวคู่ ทำให้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าจำนวนประชากรของดาวฤกษ์เกิดใหม่สัมพันธ์กับจำนวนประชากรของดาวฤกษ์ที่ตาย กล่าวอีกนัยหนึ่งคือระดับกำลังส่องสว่างของดาราจักรในย่านรังสีอินฟราเรดที่ปลดปล่อยมาจากบริเวณที่มีการก่อตัวของดาวฤกษ์มีความสัมพันธ์กับระดับกำลังส่องสว่างของดาราจักรในย่านรังสีเอกซ์ช่วงพลังงานสูงที่ปลดปล่อยมาจากบริเวณจานรวมมวลของหลุมดำในระบบดาวคู่ (Lehmer et al., 2010)

โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดภายในดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์มาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเพื่อหาจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณหา กำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์พลังงานสูงที่สัมพันธ์กับกำลังส่องสว่างของดาราจักรในย่านรังสีอินฟราเรด



ภาพประกอบ 6 ดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากการรวมกันของ ดาราจักรสองดาราจักรจากฐานข้อมูล The Great Observatory All-sky LIRG Survey (GOALS) ที่สังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิล

ที่มา : <https://hubblesite.org/contents/news-releases/2008/news-2008-16.html>

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาจำนวนประชากรและกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูง
- เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างในย่านอินฟราเรดกับกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานสูงของดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านอินฟราเรด

ความสำคัญของงานวิจัย

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดเป็นหนึ่งในวัตถุที่นักดาราศาสตร์ให้ความสนใจเพราะคาดว่าวัตถุจะมีการรวมมวลที่เกินขีดจำกัดของเอดดิงตันและเป็นแหล่งกำเนิดถาวร (Persistent source) ซึ่งการศึกษากระบวนการรวมมวลที่เกินขีดจำกัดของเอดดิงตันจาก

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดจะช่วยให้ นักดาราศาสตร์เข้าใจกระบวนการทางฟิสิกส์ของหลุมดำที่ให้พลังงานแก่ระบบนี้ และสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในวัตถุทางดาราศาสตร์อื่น ๆ ที่มีระบบการรวมมวลใกล้เคียงกัน อย่างเช่น ควาซาร์ (Quasar) ที่เป็นหลุมดำมวลยวดยิ่งที่มีกำลังส่องสว่างสูงที่พบบริเวณใจกลางดาราจักรที่เกิดจากการรวมกันของ 2 ดาราจักรที่อยู่ไกลออกไป ซึ่งนักดาราศาสตร์คาดว่าดาราจักรประเภทนี้เป็นวิวัฒนาการขั้นต้นของดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด

ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจากดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดที่มีระยะห่างจากดาราจักรทางช้างเผือกไม่เกิน 60 เมกะพาร์เซค (Mpc) ที่มีข้อมูลการสังเกตการณ์อยู่ในคลังข้อมูลของกล้องโทรทรรศน์รังสีเอกซ์จันทรา (Chandra X-ray telescope) เพื่อวิเคราะห์หาลำดับส่องสว่างและจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่มีอยู่ในดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดภายในดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด
- ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์และกำลังส่องสว่างในย่านรังสีอินฟราเรดที่เป็นผลมาจากกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในดาราจักร

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

การแผ่พลังงานในย่านรังสีเอกซ์เป็นปรากฏการณ์ที่สามารถสังเกตการณ์ได้จากวัตถุทางดาราศาสตร์ต่าง ๆ หลายประเภทโดยอาศัยการอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ด้วยหลักการทางฟิสิกส์ เช่น กระบวนการถ่ายเทมวลและการรวมมวลของระบบดาวคู่ ที่ดาวฤกษ์ผู้ให้จะถ่ายเทมวลสู่วัตถุอัดแน่นจนเกิดเป็นจานรวมมวลรอบ ๆ วัตถุอัดแน่นและปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายหลักการทางฟิสิกส์ที่ทำให้เกิดการแผ่พลังงานในย่านรังสีเอกซ์ของหลุมดำในระบบดาวคู่และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดซึ่งเป็นวัตถุที่เราสนใจในงานวิจัยนี้

2.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody radiation)

วัตถุดำเป็นวัตถุทางทฤษฎีที่ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ทุกย่านความถี่โดยไม่เกิดการสะท้อนกลับ เมื่ออยู่ในสมดุลความร้อนวัตถุดำจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในอัตราที่เท่ากับที่ดูดกลืนเข้าไป กระบวนการนี้คือการแผ่รังสีของวัตถุดำ หรือเรียกได้อีกอย่างว่า การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สเปกตรัมของวัตถุดำสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของพลังค์ (Planck's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่าการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิของวัตถุดำเพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่น รูปร่างลักษณะหรือองค์ประกอบของสสารที่ประกอบเป็นวัตถุดำ ดังสมการที่ 2-1

$$E_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (2-1)$$

โดยที่	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
	c	คือ อัตราความเร็วแสง ($c = 3 \times 10^8 \text{ เมตรต่อวินาที}$)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m)
	k	คือ ค่าคงที่โบลต์ซมานน์ (Boltzmann constant)

$$(\kappa = 1.380 \times 10^{-23} J/K)$$

T คือ อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ (เคลวิน ; K)

สเปกตรัมที่ได้จากวัตถุดำเป็นสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง จากภาพประกอบ 7 จะเห็นได้ว่า จุดสูงสุดของสเปกตรัมจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลงเมื่ออุณหภูมิของวัตถุดำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัตถุดำ (T) กับความยาวคลื่นที่ให้ค่าความเข้มสูงสุดของสเปกตรัมหรือจุดสูงสุดของสเปกตรัม (λ_{max}) ดังสมการที่ 2-2

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2-2)$$

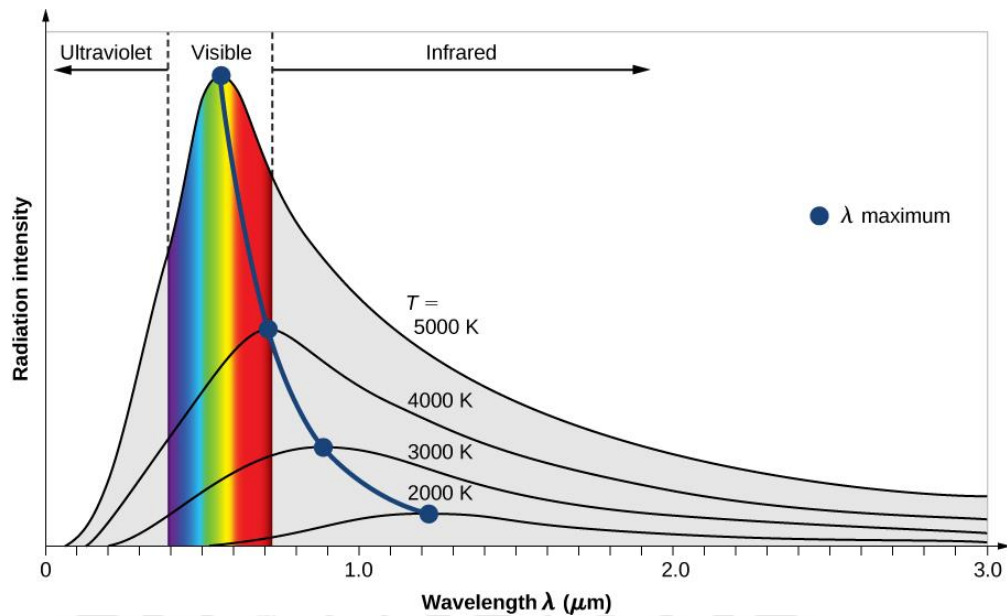
โดยที่ b คือ ค่าคงที่การกระจัดของวิน (Wien's displacement constant) ($b = 2.897 \times 10^{-3} km$)
 T คือ อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ (เคลวิน ; K)

เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎการกระจัดของวิน (Wien's displacement law) นอกจากนี้ กำลังส่องสว่างของการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิ T สามารถหาได้จากสมการที่ 2-3 และเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎของสเตฟาน-โบลท์มาน (Stefan-Boltzmann law)

$$L = A\sigma T^4 \quad (2-3)$$

โดยที่ σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์มานน์
 $(\sigma = 5.670 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$

T คือ อุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ (เคลวิน ; K)

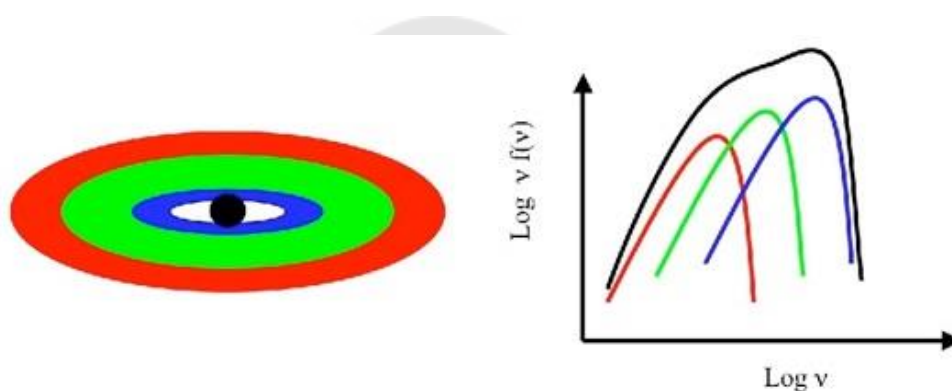


ภาพประกอบ 7 เส้นสเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา : https://phys.libretexts.org/TextMaps/General_Physics_Textmaps

ในธรรมชาติ สสารใด ๆ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute zero) จะมีการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา โดยการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุบางประเภทจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับการแผ่รังสีของวัตถุดำซึ่งจะขึ้นกับความสามารถในการแผ่รังสี (Emissivity, ϵ) โดยวัตถุที่มีความสามารถในการแผ่รังสีสูง ($\epsilon \approx 1$) จะมีการแผ่รังสีที่ใกล้เคียงกับวัตถุดำ แต่วัตถุที่มีความสามารถในการแผ่รังสีต่ำ ($\epsilon < 1$) จะมีการแผ่รังสีที่เบี่ยงเบนไปจากวัตถุดำ วัตถุทางดาราศาสตร์บางประเภท เช่น ดาวฤกษ์และจานรวมมวลของวัตถุอัดแน่น จะมีความสามารถในการแผ่รังสีสูง ($\epsilon \approx 1$) จึงมีการแผ่รังสีคล้ายคลึงกับวัตถุดำ ทำให้สามารถประมาณได้ด้วยสมการการแผ่รังสีของวัตถุดำ โดยในกรณีการแผ่รังสีของจานรวมมวลนั้น จะมีการแผ่รังสีตามทฤษฎีจานรวมมวลแบบวัตถุดำหลากหลายสี (Multicolour Disc Blackbody : MCD) ดังแสดงในภาพประกอบ 8 เนื่องจากแต่ละส่วนของจานรวมมวลมีอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน โดยอุณหภูมิในแต่ละ

ส่วนของจานรวมมวลจะขึ้นกับรัศมีของจานรวมมวล ถ้าระบบมีการรวมมวลแบบทั่วไปในระบบดาวคู่ อุณหภูมิในแต่ละส่วนของจานรวมมวลจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ $T(r) \propto r^{-3/4}$ โดยที่ $r = R/R_g$ (R_g คือรัศมีตามแนวแรงโน้มถ่วง gravitational radius : $R_g = GM/c^2$) โดยรัศมีชั้นในสุดของจานรวมมวลจะมีอุณหภูมิสูงสุดและมีความเร็วในการหมุนวนมากกว่ารัศมีชั้นนอกเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงที่สูงกว่าและลักษณะสเปกตรัมที่ได้จากการสังเกตการณ์จะเป็นไปตามภาพประกอบ 8 ด้านขวา

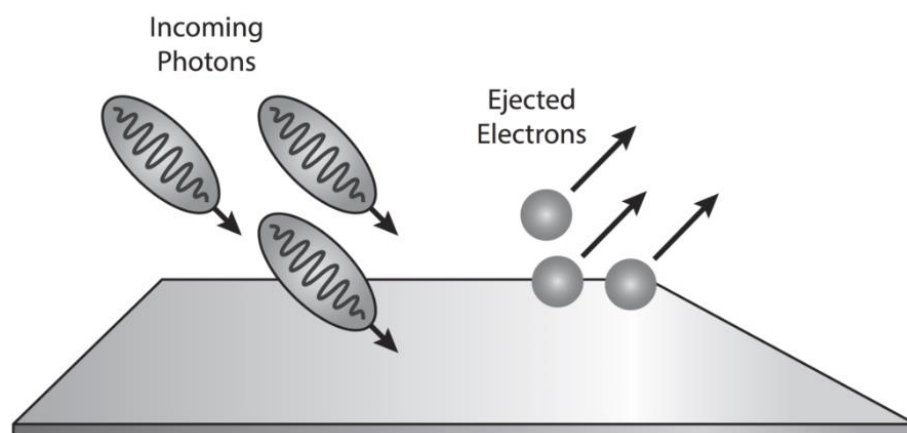


ภาพประกอบ 8 อุณหภูมิของจานรวมมวลจากแบบจำลอง Multicolour Disc Blackbody โดยในแต่ละชั้นของจานรวมมวล (ด้านซ้าย) จะสอดคล้องกับลักษณะเส้นสเปกตรัม (ด้านขวา) ตามทฤษฎีจานรวมมวลแบบวัตถุดำหลากหลายสี

ที่มา : <https://sites.ualberta.ca/~jgladsto/Site/accretion.html>

2.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

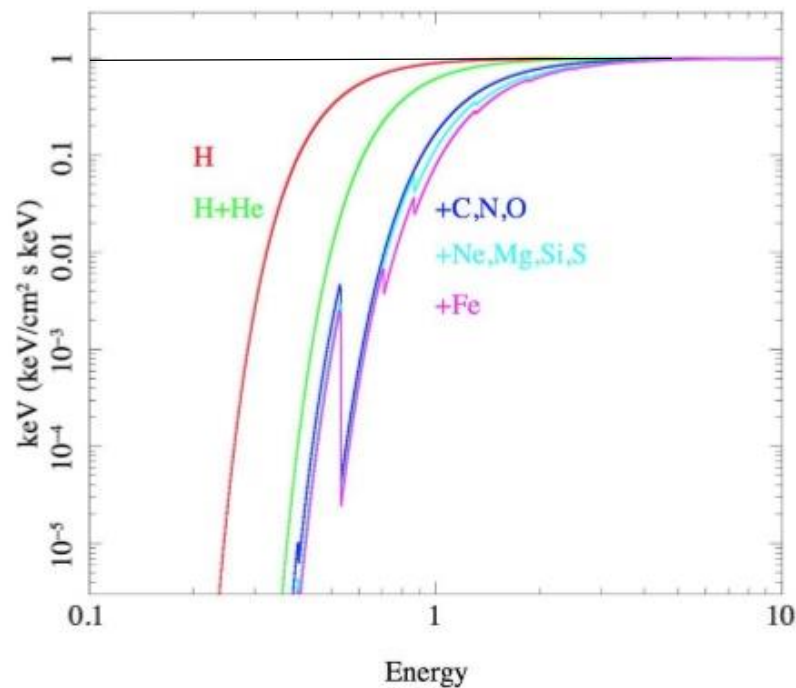
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมเมื่อโฟตอนที่มาตกกระทบกับอะตอมมีพลังงาน $E = h\nu$ มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและอิเล็กตรอน (Binding energy) เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J·s) และ ν คือความถี่ของโฟตอน โดยพลังงานของโฟตอนจะถูกถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) และอะตอมที่ถูกชนจะเปลี่ยนเป็นอะตอมที่มีประจุ (Ion) ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก

ที่มา : <http://scottbembenek.com/tag/photoelectric-effect/>

ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกมีความสำคัญต่อการศึกษาทางดาราศาสตร์เอกซเรย์ (X-ray Astronomy) เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดจะถูกดูดกลืนในระหว่างที่เดินทางผ่านกลุ่มแก๊สในอวกาศ ซึ่งทำให้สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ถูกบิดเบือนไป ภาพประกอบที่ 10 แสดงผลจากสเปกตรัมที่ได้จากการจำลอง (Simulation) จากภาพจะเห็นว่าเส้นสเปกตรัมสีดำนแทนสเปกตรัมจากแหล่งกำเนิดแสงที่เราสนใจที่ไม่ผ่านกลุ่มแก๊ส (ไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก) โดยจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง (เส้นสมมติ) แต่ถ้าแสงเดินทางผ่านแก๊สที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เส้นสเปกตรัมที่ได้จะมีความบิดเบือนไปจากเส้นตรง และจะมีการบิดเบือนที่แตกต่างออกไปเมื่อผ่านแก๊สที่มีธาตุองค์ประกอบหลักต่าง ๆ ตามภาพประกอบที่ 10 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก



ภาพประกอบ 10 การดูดกลืนพลังงานของรังสีเอกซ์จากอะตอมของธาตุต่าง ๆ

ที่มา : Done C., 2010, ArXiv e-prints, http://etheses.dur.ac.uk/11266/1/thesis_submitted.pdf

2.3 อัตราการรวมมวลที่ขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน (Eddington accretion rate)

อัตราการรวมมวลที่ขีดจำกัดเอ็ดดิงตัน ถูกเสนอโดยเซอร์อาร์เธอร์ เอ็ดดิงตัน (Sir Arthur Eddington) นักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษในปี ค.ศ. 1916 โดยนิยามว่าขีดจำกัดเอ็ดดิงตัน (Eddington limit) คือกำลังส่องสว่างในขณะที่ยุทธศาสตร์การรวมมวลอยู่ในสถานะสมดุลระหว่างแรงดันออกที่เกิดจากการแผ่รังสี (Outward pressure of the radiation) กับแรงดึงเข้าที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง (Inward gravitational force) ที่เกิดขึ้นบริเวณจานรวมมวล

จากการศึกษารังสีเอกซ์ที่ส่วนมากมาจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในระบบดาวคู่ พบว่ารังสีเอกซ์นั้นถูกปลดปล่อยออกมาจากบริเวณจานรวมมวล เนื่องมาจากเกิดการเสียดสีของสสาร

ภายในจานรวมมวลจะเกิดความร้อนและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน โดยโฟตอนจะเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคต่าง ๆ ออกไปยังพื้นผิวของจานรวมมวล เกิดการชนกับอิเล็กตรอนอิสระ และผลักให้เคลื่อนที่ขึ้นไปบนพื้นผิว (โฟตอนมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนเป็นส่วนมากอันเนื่องมาจาก Thomson scattering cross-section) ส่วนอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกโฟตอนชนและเคลื่อนที่นั้น มีสถานะเป็นไอออนประจุลบจึงเกิดการดึงดูดโปรตอนอิสระที่มีสถานะเป็นไอออนบวกทำให้เกิดแรงดันที่ผลักพื้นผิวของจานรวมมวลออก เรียกแรงดันโฟตอน (Photon radiation pressure) เพื่อรักษาสมดุลของจานรวมมวลไว้ แรงโน้มถ่วงอันเนื่องมาจากมวลของวัตถุอัดแน่นจะดึงดูดสสารต่าง ๆ ให้ตกลงสู่หลุมดำเพื่อต้านไม่ให้เกิดแรงดันโฟตอนที่มากเกินไป ซึ่งอัตราการรวมมวลที่ขีดจำกัดเอ็ดดิงตัน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_{edd} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \quad (2-4)$$

โดยที่ L_{edd} คือ กำลังส่องสว่างที่เป็นไปตามทฤษฎีของอัตราการรวมมวลที่ขีดจำกัดเอ็ดดิงตัน (erg s^{-1})

G คือ ค่าโน้มถ่วงสากล (Gravitational constant)

มีค่า $\approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-1}$

M คือ มวลของหลุมดำ

m_p คือ มวลของโปรตอน (1.6726×10^{-27} กิโลกรัม)

σ_T คือ Thomson scattering cross-section

c คือ อัตราความเร็วแสง ($c = 3 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที)

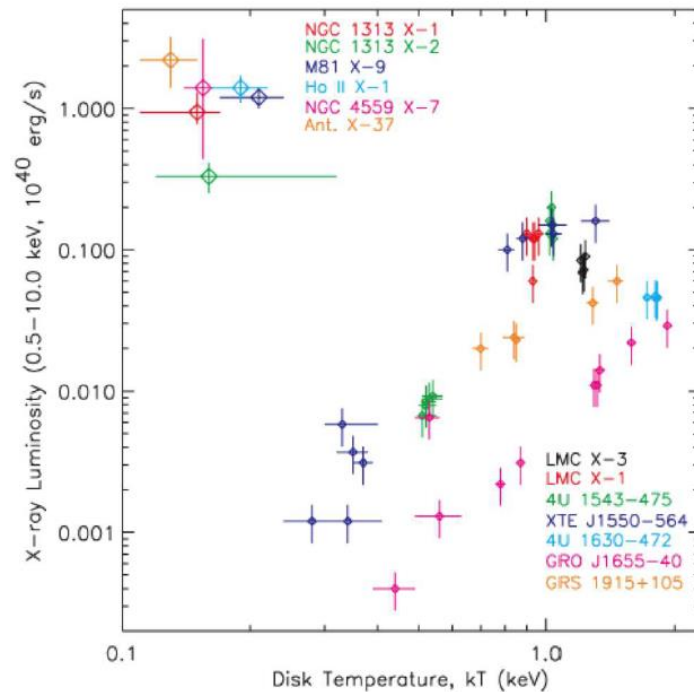
สำหรับสมการขีดจำกัดเอ็ดดิงตันข้างต้น เป็นสมการที่พิจารณาเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งค่าของสมการนี้สามารถคลาดเคลื่อนได้จากการที่สสารที่อยู่ภายในจานรวมมวลไม่ได้มีแต่อะตอมของไฮโดรเจน แต่ยังมีอะตอมของธาตุอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย

นอกจากนี้ยังพบว่าวัตถุที่ไม่เป็นไปตามขีดจำกัดการรวมมวลของเอ็ดดิงตัน คือ มีอัตราการรวมมวลที่สูงเกินกว่าขีดจำกัดการรวมมวลของเอ็ดดิงตัน (Super-Eddington rate) แต่ระบบยังคงรักษาสภาพสมดุลไว้ได้ ซึ่งก็คือ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่น่าจะมีการรวมมวลที่เปลี่ยนไปจากปกติที่เคยพบในระบบดาวคู่ ซึ่งนักดาราศาสตร์เชื่อว่ากระบวนการการพองตัวของจานรวมมวลเพื่อปรับรูปร่างจานรวมมวลให้มีส่วนมากขึ้น (Slim disc) และการไหลออกของสสารที่มีลักษณะเป็นก้อน (Clumpy) ที่มีความหนาแน่นสูงจากบริเวณภายนอกของจานรวมมวล หรือที่เรียกว่า การเกิดเอาท์โฟลว์อิง วินด์ (Outflowing wind) เป็นกระบวนการที่อยู่ในสถานะกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (Ultraluminous state)

2.4 การศึกษาเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด

ในปี ค.ศ. 2003 Miller, Fabbiano, Miller, and Fabian (2003) ได้ศึกษาลักษณะสเปกตรัมรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และพบว่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดมีลักษณะคล้ายคลึงสเปกตรัมของหลุมดำมวลดาวฤกษ์ที่พบได้ทั่วไป โดยสามารถอธิบายได้ว่าสเปกตรัมประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ คือ ส่วนพลังงานต่ำ (Soft component) เป็นส่วนที่มีพลังงานของโฟตอนต่ำประมาณไม่เกิน 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อธิบายด้วยแบบจำลองมัลติคัลเลอร์ดิสแบล็คบอดี้ (Multicolour disc blackbody model) และส่วนพลังงานสูง (Hard component) คือ ส่วนที่มีพลังงานของโฟตอนประมาณมากกว่า 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อธิบายด้วยแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ (Power-law model) ซึ่งในปีต่อมา Miller, Fabian, and Miller (2004) ได้วิเคราะห์สเปกตรัมในส่วนพลังงานต่ำด้วยแบบจำลองมัลติคัลเลอร์ดิสแบล็คบอดี้ พบว่าจานรวมมวลของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดมีอุณหภูมิต่ำมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิของจานรวมมวลของหลุมดำมวลดาวฤกษ์ในระบบดาวคู่ คือ มีค่าประมาณ 0.2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (แสดงในภาพประกอบ 11) จึงตีความอุณหภูมิของจานรวมมวลของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ด้วยจานรวมมวลของซาจูระและชันเยฟที่อธิบายไว้ว่า ในระบบการรวมมวลของจานรวมมวลมาตรฐาน อุณหภูมิของจานรวมมวลจะลดลงเมื่อหลุมดำของระบบการรวมมวลมีมวลมากขึ้น เพื่อให้ระบบยังคงมีอัตราการรวมมวลที่เท่าเดิม จึงเป็นไปได้ว่า

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้รับพลังงานมาจากหลุมดำประเภทอินเตอรัมีเดียท

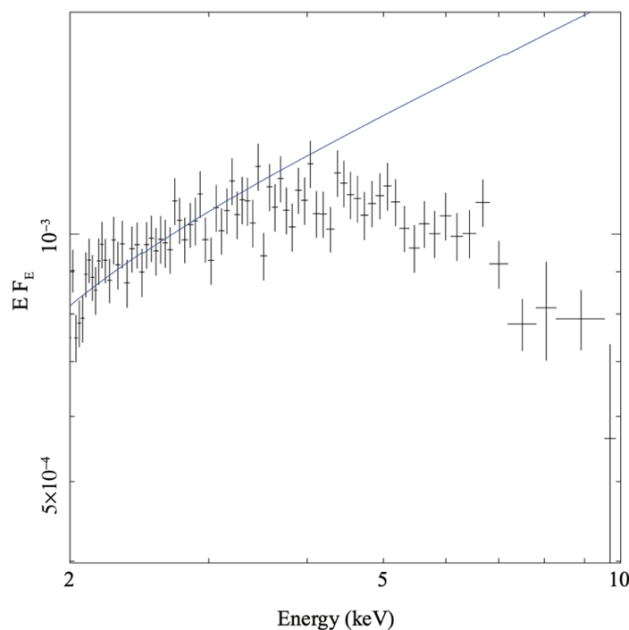


ภาพประกอบ 11 อุณหภูมิของจานรวมมวลของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่วิเคราะห์จากองค์ประกอบของสเปกตรัมในย่านพลังงานต่ำ

ที่มา : Miller et al., 2004

ในปี ค.ศ. 2006 Stobbart, Roberts, and Wilms (2006) ทำการศึกษาลักษณะเส้นสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่มีคุณภาพสูง และยืนยันการศึกษาว่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดนั้นมี 2 องค์ประกอบคือสเปกตรัมในส่วนพลังงานต่ำ และสเปกตรัมในส่วนพลังงานสูง ซึ่งลักษณะสเปกตรัมในช่วงพลังงานสูงที่พบนั้นมีลักษณะโค้งงอ ทำให้ไม่สามารถใช้การอธิบายด้วยแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ (Power-law model) ที่อธิบายสเปกตรัมด้วยสมการเส้นตรงในสเกลล็อก (Log scale) ได้

ในปี ค.ศ.2009 Gladstone, Roberts, and Done (2009) ได้แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมในช่วงพลังงานสูงที่มีความโค้งนั้นเป็นสเปกตรัมในสถานะที่แตกต่างจากสเปกตรัมโดยทั่วไปของหลุมดำมวลดาวฤกษ์ เรียกสเปกตรัมในสถานะนี้ว่า สถานะกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (Ultraluminous state) ในหลุมดำมวลดาวฤกษ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 12 ทำให้คาดว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดน่าจะเป็นระบบใหม่ในการรวมมวลของหลุมดำมวลดาวฤกษ์ที่มีมวลประมาณ $3 - 20 M_{\odot}$ ที่มีอัตราการรวมมวลสูงกว่าขีดจำกัดเอ็ดดิงตัน (Super-Eddington state) ซึ่งมีกระบวนการฟิสิกส์แบบใหม่ที่อธิบายกระบวนการลดแรงดันโฟตอน ทำให้ระบบสามารถมีกำลังส่องสว่างที่สูงเกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันได้ นั่นคือ การพองตัวของจานรวมมวลแบบซากุระและชั้นเยฟกลายเป็นจานรวมมวลที่มีลักษณะสมส่วนขึ้น (Slim disc) ซึ่งมีสัดส่วนของความกว้างต่อรัศมีของจานรวมมวล (Disc scale high) ประมาณ 1 ($H/R \sim 1$) อีกทั้งยังมีการปลดปล่อยเอาทโฟลว์อิง วินด์ ที่เกิดจากแรงดันภายในจานรวมมวลผลักกลุ่มแก๊สและสสารบริเวณพื้นผิวจานรวมมวลออกมา มีลักษณะเป็นก้อน (Clumpy) ที่มีความหนาแน่นสูง (Poutanen, Lipunova, Fabrika, Butkevich, & Abolmasov, 2007) พุ่งออกมาจากจานรวมมวล ทำให้พบการโค้งของสเปกตรัมในช่วงพลังงานสูง $\sim 3 - 7$ กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 สเปกตรัมในช่วงพลังงาน 2-10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของ NGC 1313 X-2
ที่มีความโค้งงอ

ที่มา : Gladstone et al., 2009

นอกจากนี้ ยังพบว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักร M82 มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคาบ (1 คาบใช้เวลาประมาณ 62 วัน) (Kaaret, Simet, & Lang, 2006) และในปี ค.ศ. 2014 บาเชติ (Bachetti et al., 2014) พบว่าการปลดปล่อยพลังงานนี้มาจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดภายในดาราจักร M82 จำนวน 2 แหล่งกำเนิด (M82 X-1 และ M82 X-2) ซึ่งมีลักษณะการปลดปล่อยพลังงานแบบ pulse เช่นเดียวกับลักษณะการปลดปล่อยพลังงานของดาวนิวตรอน จึงคาดว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบนี้ได้รับพลังงานจากดาวนิวตรอน อีกทั้งยังพบที่กำลังส่องสว่างที่เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบ pulse นั้นมีกำลังส่องสว่างประมาณ 1.8×10^{40} เวิร์กต่อวินาที ซึ่งสูงเกินขีดจำกัดของเฮดดิงตันของวัตถุที่มีมวลประมาณ 1.4 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ไปประมาณ 100 เท่า ทำให้เชื่อว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่ได้รับพลังงานมาจากดาวนิวตรอนนั้นสามารถพบได้ไม่ต่างจาก

ประชากรประเภทที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นแต่จะมีระบบการรวมมวลที่แตกต่างออกไปเพราะมีอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กของดาวเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ในปี ค.ศ. 2010 Lehmer et al. (2010) ได้ศึกษาดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด (Luminous Infrared Galaxies; LIRGs) ซึ่งเป็นดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ (Star formation rate; SFR) ในอัตราที่สูงกว่าดาราจักรทั่วไป จำนวน 17 ดาราจักรซึ่งอยู่ห่างจากโลกเป็นระยะทางไม่เกิน 60 เมกะพาร์เซค มีค่า Galactic column density $\lesssim 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ และทั้ง 17 ดาราจักรมีกำลังส่องสว่างในย่านรังสีอินฟราเรด (8 – 1000 ไมโครเมตร) อยู่ในช่วง $L_{IR} \approx (1 - 8) \times 10^{11} L_{\odot}$ (เมื่อ L_{\odot} คือกำลังส่องสว่างในย่านรังสีอินฟราเรดของดวงอาทิตย์ มีค่า $\approx 3.9 \times 10^{33}$ เอิร์กต่อวินาที) ที่สังเกตการณ์โดยกล้องโทรทรรศน์เอกซเรย์จันทรา จากสมมติฐานที่ว่ากำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงาน 2 – 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ นั้นมาจากองค์ประกอบ 2 ส่วนคือส่วนที่มาจากกาแล็กซีการปลดปล่อยพลังงานของหลุมดำในระบบดาวคู่ที่ดาวผู้ให้มวลมาก (High-mass x-ray binaries : HMXBs) และส่วนที่มีจากการปลดปล่อยพลังงานของหลุมดำในระบบดาวคู่ที่ดาวผู้ให้มวลน้อย (Low-mass x-ray binaries : LMXBs) ซึ่งจากการศึกษาของ Grimm et al. (2003) และ Gilfanov et al. (2004) พบว่าองค์ประกอบทั้ง 2 ส่วนนี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่และมวลของดาวฤกษ์ (stellar mass : M_{\star}) ตามลำดับ เขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่กับกำลังส่องสว่างของดาราจักรในย่านรังสีเอกซ์ (L_{HX}^{gal}) (X-ray/SFR correlation) ได้ดังสมการ

$$L_{HX}^{gal} = \alpha M_{\star} + \beta SFR \quad (2-5)$$

โดยที่	L_{HX}^{gal}	คือ กำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงาน 2 - 10 keV ของดาราจักร (erg s^{-1})
	M_{\star}	คือ มวลของดาวฤกษ์
	SFR	คือ อัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ ($M_{\odot} \text{yr}^{-1}$)

α และ β คือ ค่าคงที่ที่ได้จากความสัมพันธ์

และพบว่าสำหรับกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ต่อมวลของดาวฤกษ์ (SFR/M_\star) $\geq 5.9 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ นั้น พลังงานส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยออกมาจะมาจากหลุมดำในระบบดาวคู่ที่ดาวผู้ให้มวลมาก ส่วนดาราจักรที่มี $SFR/M_\star \geq 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$ กำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์จะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้า เนื่องมาจากหลุมดำในระบบดาวคู่ในดาราจักรประเภทนี้อยู่ภายในบริเวณที่มีการก่อตัวของดาวฤกษ์อย่างหนาแน่น พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจึงถูกดูดกลืนในช่วงพลังงาน 2 - 10 keV จากกลุ่มแก๊สหนาภายในบริเวณนั้น

ต่อมาในปี ค.ศ. 2015 Luangtip et al. (2015) ได้ทำการหาจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดทั้งหมดจากดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดจำนวน 17 ดาราจักรจากในงานวิจัยของ Lehmer et al. (2010) พบจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดทั้งสิ้น 53 แหล่งกำเนิด ซึ่งจาก Swartz et al., 2011 ที่สรุปเอาไว้ว่า ค่าเฉลี่ยของจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับปกติ มีค่าประมาณ $2 \text{ ULXs}/M_\odot \text{ yr}^{-1}$ Luangtip et al. จึงตั้งข้อสันนิษฐานว่า จะพบจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มากขึ้นในดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ที่สูงขึ้นและเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ คือควรจะมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดประมาณ 500 แหล่ง เมื่อเทียบกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ทั้ง 17 ดาราจักรมีค่า $\sim 260 M_\odot \text{ yr}^{-1}$

แต่จากการศึกษากลับพบว่ามีการขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดต่ออัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ในดาราจักรตัวอย่าง เมื่อเทียบกับดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวปกติ (LIRGsในงานวิจัยของ Luangtip et al. มีค่า $0.2 \text{ ULXs}/M_\odot \text{ yr}^{-1}$ แต่ค่าเฉลี่ยของดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวปกติในงานของ Swartz, Soria, Tennant, and Yukita (2011b) คือ $2 \text{ ULXs}/M_\odot \text{ yr}^{-1}$) ซึ่งการขาดหายไปนี้มาได้จากหลายปัจจัย เช่น สภาวะความเป็นโลหะภายในดาราจักร ความแตกต่างระหว่างการเริ่มต้นของการก่อตัวของดาวฤกษ์กับการปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด แต่ผลหลักของการขาดหายไปนั้นมาจากการมีกลุ่มแก๊สหนาภายในดาราจักรที่เป็นสสารต้นกำเนิดของการก่อตัวของ

ดาวฤกษ์มาดบังจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจากมุมมองของผู้สังเกตการณ์ภายนอก

ในปี ค.ศ. 2016 Anastasopoulou, Zezas, Ballo, and Della Ceca (2016) ทำการศึกษาดาราจักร Arp299 จากข้อมูลที่สังเกตการณ์ได้จากกล้องโทรทรรศน์เอกซเรย์จันทรา ซึ่งเป็นดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงสุดในกลุ่มตัวอย่างดาราจักรในงานวิจัยของ Lehmer et al. (2010); (Luangtip et al., 2015) ซึ่งดาราจักร Arp299 นั้นเกิดจากการรวมตัวกันของดาราจักร NGC 3690 กับ ดาราจักร IC 694

จากการศึกษาพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete X-ray source) ที่มีกำลังส่องสว่างสูงกว่า $L_x \sim 4.0 \times 10^{38}$ เอิร์กต่อวินาที จำนวน 25 แหล่งกำเนิดในบริเวณพื้นที่ของดาราจักร เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมในย่านพลังงานสูงของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไม่ต่อเนื่องสามารถระบุได้ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เหล่านี้เป็นหลุมดำในระบบดาวคู่ที่ดาวผู้ให้มวลมาก ซึ่งพบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจำนวน 20 แหล่งกำเนิด ในจำนวนนี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่มีลักษณะแบบจุด (Point-like x-ray sources) จำนวน 14 แหล่งกำเนิด อีก 6 แหล่งกำเนิดเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่มีลักษณะขยาย (Extended sources) นอกจากนี้จากการสังเกตการณ์ยังพบว่าการขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดเมื่อเทียบกับจำนวนประชากรที่คาดว่าจะพบที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหลุมดำในระบบดาวคู่กับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ของ Swartz et al. (2011b) คือควรจะพบประมาณ 65 – 178 แหล่งกำเนิด เมื่อพิจารณาจากอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์ของดาราจักรที่มีค่าประมาณ $33.06 - 88.89 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Luangtip ในปี ค.ศ. 2015 ที่สรุปว่าการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดนั้นเป็นผลจากการถูกบดบังการสังเกตการณ์ แต่ Anastasopoulou et al. คิดว่าปัจจัยนี้ไม่ใช่ปัจจัยหลัก เพราะเมื่อพิจารณาจากกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดทั้ง 20 แหล่งที่คำนวณได้จากแบบจำลองเทียบกับกำลังส่องสว่างที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างของหลุมดำในระบบดาวคู่กับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์จากในงานวิจัยของ Mineo, Gilfanov, and Sunyaev (2012a) ($L_{0.5-8.0\text{keV}}^{XRBS} (\text{ergs}^{-1}) = 2.61 \times 10^{39} \text{SFR} (M_{\odot} \text{yr}^{-1})$) ก็พบว่าไม่มีการขาดหายไปของจำนวนประชากร

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด จึงนำไปสู่ข้อสรุปว่าการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่สังเกตการณ์ได้นั้นเป็นผลมาจากความสับสนในการแยกแยะแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่อยู่ใกล้กันมากออกจากกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) ได้อธิบายถึงการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบจากในงานวิจัยของ Luangtip et al. (2015) เพียงดาราจักรเดี่ยวคือดาราจักร Arp299 ซึ่งเป็นดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงสุด ในงานวิจัยนี้จึงจะศึกษาจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจากดาราจักรตัวอย่างในงานวิจัยของ Luangtip เพื่อยืนยันจำนวนประชากรด้วยกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ช่วงพลังงานสูงและศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ช่วงพลังงานสูงและกำลังส่องสว่างในย่านรังสีอินฟราเรดของดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษาลักษณะการกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงซึ่งดาราจักรเหล่านี้เป็นดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรด โดยจะเลือกดาราจักรที่จะทำการศึกษามาจากกลุ่มตัวอย่างดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดที่ศึกษาไว้ในงานวิจัยของ Lehmer et al., (2010) โดยเลือกใช้ข้อมูลการสังเกตการณ์ที่ได้มาจากการสังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์รังสีเอกซ์จันทรา โดยจะมีขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและวิธีการดำเนินงานวิจัยดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 การเลือกตัวอย่างดาราจักร

ข้อมูลการสังเกตการณ์ในย่านรังสีเอกซ์ของดาราจักรที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้จะทำการสืบค้นมาจากฐานข้อมูล Chandra Data Archive¹ ซึ่งเป็นฐานข้อมูลการสังเกตการณ์ที่เปิดให้เข้าถึงข้อมูลการสังเกตการณ์ได้โดยตรงอย่างเป็นทางการ โดยข้อมูลการสังเกตการณ์ที่ผู้วิจัยเลือกมาทำการศึกษาคือข้อมูลการสังเกตการณ์ที่ถูกสังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์รังสีเอกซ์จันทรา โดยใช้ detector ACIS-S (Advanced CCD Imaging Spectrometer) มีระยะเวลาในการสังเกตการณ์ที่ไม่ต่ำกว่า 10 กิโลวินาที (ks) ในกรณีที่ดาราจักรที่เลือกมาศึกษานั้นมีข้อมูลการสังเกตการณ์หลายข้อมูลการสังเกตการณ์ จะเลือกจากข้อมูลที่มีระยะเวลาการสังเกตการณ์ที่ยาวนานที่สุดของดาราจักรนั้นๆ นอกจากนี้ดาราจักรที่ถูกสังเกตการณ์จะต้องมีระยะห่างจากผู้สังเกตการณ์ไม่เกิน 60 เมกะพาร์เซค ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกดาราจักรจากกลุ่มตัวอย่างของดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดจากในงานวิจัยของ Lehmer et al. (2010) มาจำนวน 5 ดาราจักร ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยดาราจักรแรกที่เลือกมาศึกษาคือ ดาราจักร Arp 299 ซึ่งเป็นดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ที่สูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่างของ Lehmer et al. (2010) และพบความสับสนในการแยกแยะแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในงานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) ในส่วนของ 4 ดาราจักรที่เหลือจะเลือกจากดาราจักรที่อยู่ใกล้กับดาราจักร Arp 299 และเป็นดาราจักรที่ไม่มีรายงานการตรวจพบนิวเคลียสดาราจักรกัมมันต์

¹ <http://cda.harvard.edu/chaser/mainEntry>

(Active Galactic Nuclei) เพื่อลดความสับสนในการแยกแยะแหล่งกำเนิดได้แก่ ดาราจักร NGC 7552 , ดาราจักร IC 5179 , ดาราจักร NGC 838 และดาราจักร NGC 5653

3.2 การเตรียมข้อมูลการสังเกตการณ์ (Data reduction)

เนื่องจากข้อมูลที่เรานำมาศึกษาเป็นข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์โดยตรง (RAW data) จึงต้องทำการรีโพรเซสซิงข้อมูล (Reprocessing data) เพื่อทำการเตรียมข้อมูลก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์ โดยจะทำการลดทอนข้อมูลการสังเกตการณ์ (Data reduction) ผ่านชุดคำสั่ง *chandra_repro* ซึ่งเป็นชุดคำสั่งย่อยใน Chandra Interactive Analysis of Observations (CIAO)² ที่ทำงานร่วมกับไฟล์คาลิเบชัน (Calibration file) เวอร์ชันล่าสุดของอุปกรณ์ ชุดคำสั่งดังกล่าวจะทำการสร้างไฟล์ bad pixel และทำการคัดเกรด (Grade) ของโฟตอนที่ตกบนซีซีดี โดยโฟตอนที่ใช้งานได้โดยจะต้องมี grades=0, 2, 3, 4, 6 และอยู่ใน status = 0 ซึ่งจะได้ออกมาเป็นไฟล์ข้อมูลที่ผ่านการคาลิเบชัน (Event level-2 file) จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลนี้ไปตัดข้อมูลส่วนที่มีการรบกวนสูงจากพื้นหลังคอสมิกจากรังสีเอกซ์โดยจะตัดข้อมูลการสังเกตการณ์ช่วงที่มีอัตราการตกของโฟตอนบนซีซีดี (CCD) มากเกินไป โดยนิยามคือข้อมูลที่มีอัตราการตกของโฟตอนมาก และน้อยเกินกว่าขอบเขตค่าเฉลี่ย $\pm 3\sigma$ โดยใช้ชุดคำสั่ง *deflare* เพื่อให้ได้ไฟล์การสังเกตการณ์ที่มีข้อมูลที่ใช้งานได้ (Good time interval : GTI) ในการนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราจักรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

² <http://cxc.harvard.edu/ciao/index.html>

ตาราง 1 ข้อมูลพื้นฐานของดาราจักรที่ทำการศึกษา

ดาราจักร (1)	RA (2)	DEC (3)	R ₂₀ ellipse parameters			D _L (Mpc) (7)	N _H (10 ²⁰ cm ⁻²) (8)	SFR (M _☉ yr ⁻¹) (9)
			a	b	P.A.			
			(arcmin) (4)	(arcmin) (5)	(deg) (6)			
NGC 7552	23:16:11	-42:35:05	2.21	1.30	95	21.6	1.95	9.5
IC 5179	22:16:09	-36:50:37	1.48	0.56	55	47.2	1.16	13.5
Arp 299	11:28:30	+58:34:10	1.42	1.25	28	48.2	1.05	73.2
NGC 838	02:09:39	-10:08:46	0.62	0.43	95	50.8	2.23	8.5
NGC 5653	14:30:10	+31:12:56	0.76	0.70	75	55.5	1.20	11.0

หมายเหตุ ข้อมูลพื้นฐานของดาราจักรที่ทำการศึกษา (อ้างอิงจากตารางที่ 1 ของงานวิจัยของ Lehmer et al., 2010) คอลัมน์ที่ 1 : ชื่อดาราจักร คอลัมน์ที่ 2 : ค่า Right Ascension มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที คอลัมน์ที่ 3 : ค่า Declination มีหน่วยเป็นองศา ลิปดา และฟิลิปดา คอลัมน์ที่ 4-6 : พารามิเตอร์ R₂₀ region ของแต่ละดาราจักรซึ่งประกอบด้วยค่า semimajor axis , ค่า semiminor axis และค่ามุมตำแหน่ง (position angle) ตามลำดับ คอลัมน์ที่ 7 : ระยะห่างของดาราจักร คอลัมน์ที่ 8 : ค่า Galactic column density คอลัมน์ที่ 9 : ค่าอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่

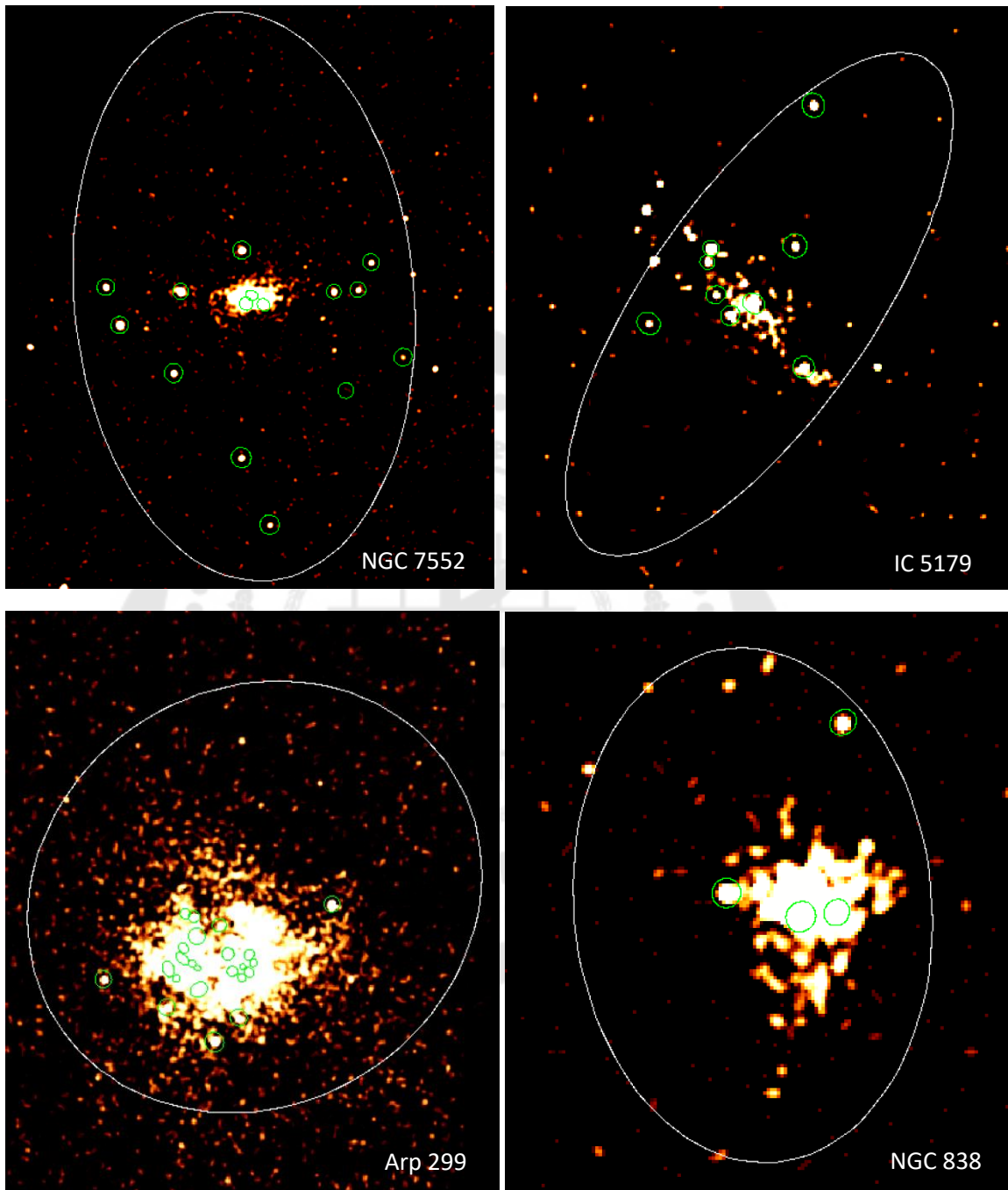
ตาราง 2 ข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราจักรที่ทำการศึกษา

ดาราจักร	หมายเลข การสังเกตการณ์	วันและเวลาที่เริ่มทำ การสังเกตการณ์ (UT)	ระยะเวลา ^a การสังเกตการณ์สุทธิ (ks)
NGC 7552	21675	2018/08/24, 00:12	64.22
IC 5179	10392	2009/06/21, 13:50	11.96
Arp 299	15077	2013/03/13, 21:55	51.63
NGC 838	10394	2008/11/23, 09:03	13.57
NGC 5653	10396	2009/04/11, 05:45	16.01

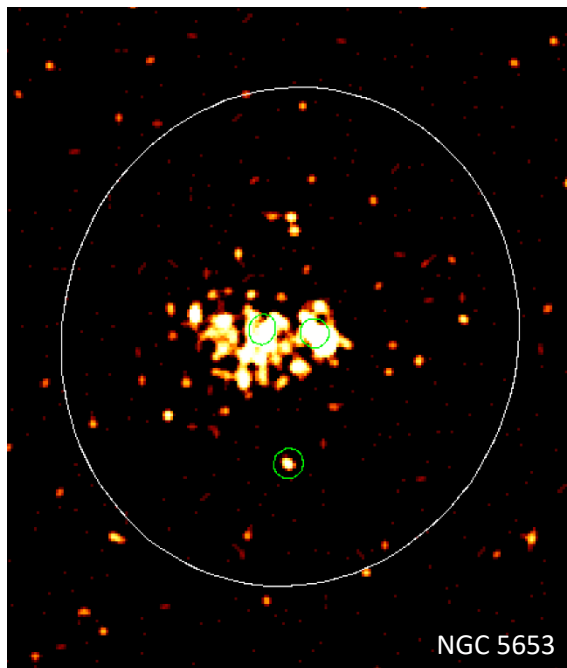
หมายเหตุ ^aระยะเวลาการสังเกตการณ์ที่เหลือหลังทำการตัดข้อมูลที่มีการรบกวนสูงโดยรังสีพื้นหลังคอสมิกออก (ดูหัวข้อ 3.2)

3.3 การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในดาราจักร

ไฟล์ที่ได้จากการเตรียมข้อมูลในหัวข้อที่ 3.2 จะถูกนำมาทำการสร้างไฟล์ภาพของข้อมูลการสังเกตการณ์ในแต่ละช่วงพลังงานผ่านชุดคำสั่ง fluximage โดยจะแบ่งช่วงพลังงานออกเป็น 3 ช่วงพลังงานคือ ช่วงพลังงานต่ำ (Soft energy band) คือ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์, ช่วงพลังงานสูง (Hard energy band) คือ 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และช่วงพลังงานทั้งหมด (Full energy band) คือ 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหตุผลที่ต้องแบ่งช่วงพลังงานในการระบุแหล่งกำเนิดออกเป็น 3 ช่วงพลังงานเพื่อให้การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มีความละเอียดแม่นยำและช่วยให้สามารถแยกโฟตอนในช่วงพลังงานที่ไม่ต้องการออกไป เช่น การแยกโฟตอนพลังงานต่ำบางส่วนที่ปลดปล่อยมาจากกระบวนการการก่อตัวของดาวฤกษ์หรือปลดปล่อยจากกลุ่มฝุ่นแก๊สและพลาสมาภายในดาราจักร จากนั้นระบุตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete X-ray source) ในแต่ละช่วงพลังงานด้วยชุดคำสั่ง wavdetect แล้วทำการรวมแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในทั้ง 3 ช่วงพลังงานเข้าด้วยกัน โดยพิจารณาจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางร่วมของแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ทั้ง 3 ช่วงพลังงาน ณ ตำแหน่งปรากฏเดียวกัน ในกรณีที่แหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในแต่ละช่วงพลังงานนั้นมีตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่ไม่ตรงกันแต่มีพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดซ้อนทับกัน ผู้วิจัยจะทำการหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งจุดศูนย์กลางเพื่อหาจุดศูนย์กลางร่วมของตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดนั้นๆ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบทั้งหมดในดาราจักรที่ทำการศึกษาดูถูกแสดงในภาพประกอบที่ 13



ภาพประกอบ 13 ลักษณะพื้นที่ขอบเขตของดาราจักร (วงรีสีขาว) และตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่สามารถระบุได้ในแต่ละดาราจักร



ภาพประกอบ 13 (ต่อ) ลักษณะพื้นที่ขอบเขตของดาราจักร (วงรีสีขาว) และตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่สามารถระบุได้ในแต่ละดาราจักร

3.4 การเปรียบเทียบขนาดของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในดาราจักร

เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ตรวจพบในหัวข้อที่ 3.3 อาจเป็นแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะแบบขยาย (Extended source) ผู้วิจัยจึงได้ใช้ชุดคำสั่ง srcextent เพื่อพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุด (Point spread function) ของกล้องโทรทรรศน์จันทรา โดยใช้ค่าสถิติ Z (Z-test) ในการเปรียบเทียบเพื่อทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด (Point like source) หรือเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย (extended source) ดังสมการ

$$Z = \frac{|S-P|}{\sigma} \times 1.96 \quad (3-1)$$

เมื่อ Z คือ ค่าสถิติ z-test

- S คือ ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดที่ได้จากการคำนวณด้วยชุดคำสั่ง *srcextent*
- P คือ ขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา
- σ คือ ความคลาดเคลื่อนของขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดที่ความเชื่อมั่น 90 เปอร์เซ็นต์ (1.96 σ) จากการคำนวณด้วยชุดคำสั่ง *srcextent*

สำหรับค่าสถิติ Z ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ผู้วิจัยจะเชื่อถือการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดจากค่าสถิติ Z โดยพิจารณาว่าหากขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดมีค่ามากกว่าขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดเกินกว่า 99.7% (3 σ) ขึ้นไป จะถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย และค่าสถิติ Z ที่คำนวณได้ในแต่ละดาราจักรจะแสดงในหัวข้อที่ 4.1

3.5 การคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในดาราจักร

หลังจากที่ได้ทำการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในแต่ละดาราจักรและแยกแยะชนิดของแหล่งกำเนิดไปแล้ว ขั้นตอนต่อมาผู้วิจัยจะทำการคำนวณค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทุกแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในช่วงพลังงาน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยกำหนดให้แต่ละแหล่งกำเนิดมีการกระจายตัวของโฟตอนเป็นไปตามแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืน (Absorbed power-law model) โดยมีค่า photon index (Γ) = 2 และค่าการดูดกลืนเนื่องจากแก๊สที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดกับผู้สังเกตการณ์ (Column density; N_H) = $1.5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ (Swartz et al., 2004) ในการคำนวณจะใช้คำสั่ง *srcflux* ซึ่งจะคำนวณโดยคิดถึงผลของการกระจายตัวของโฟตอนเนื่องจากฟังก์ชันการกระจายจุด (Point spread function) ในพื้นที่ที่ใช้คำนวณด้วย ทำให้ได้ผลที่แม่นยำขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้พื้นที่ของแหล่งกำเนิด (Source region) มีขนาดเท่ากับพื้นที่ที่คำนวณได้จากคำสั่ง *wavdetect* (ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3) ในขณะที่พื้นที่พื้นหลัง (Background region) ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่จะนำมาคำนวณด้วยจะพิจารณาจากตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์นั้นๆ คือในกรณีที่แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์อยู่ในบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงจะกำหนดให้พื้นที่พื้น

หลังมีรูปร่างวงกลม (Circle) และกำหนดให้อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ แต่ไม่ทับซ้อนกับพื้นที่ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ข้างเคียง ส่วนในกรณีของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่อยู่ในบริเวณความหนาแน่นต่ำหรือ source-free region จะกำหนดให้พื้นที่พื้นหลังมีลักษณะวงแหวน (Annulus) ครอบคลุมพื้นที่ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ณ ตำแหน่งนั้น และขนาดของพื้นที่พื้นหลังทั้ง 2 รูปร่างจะต้องมีรัศมีใหญ่กว่ารัศมีของพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดไม่เกิน 5 พิลิปดา (Arcsec) และจากผลการคำนวณที่ได้ ผู้วิจัยกำหนดว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างที่คำนวณได้ $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาที จะถูกนิยามให้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (ดังจะแสดงผลที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.1) ยิ่งไปกว่านั้น ผู้วิจัยยังได้แสดงความคลาดเคลื่อนของจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในแต่ละดาราจักร โดยคำนวณมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังส่องสว่างที่คำนวณได้ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งเมื่อคิดผลของความคลาดเคลื่อนของกำลังส่องสว่าง จะทำให้กำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดบางแหล่งมีค่ามากกว่าและน้อยกว่า 10^{39} เอิร์กต่อวินาที ตามลำดับ

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยจะคำนวณกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้กับค่ากำลังส่องสว่างรวมที่คาดการณ์ได้จากการศึกษาในดาราจักรปกติเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในดาราจักร

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

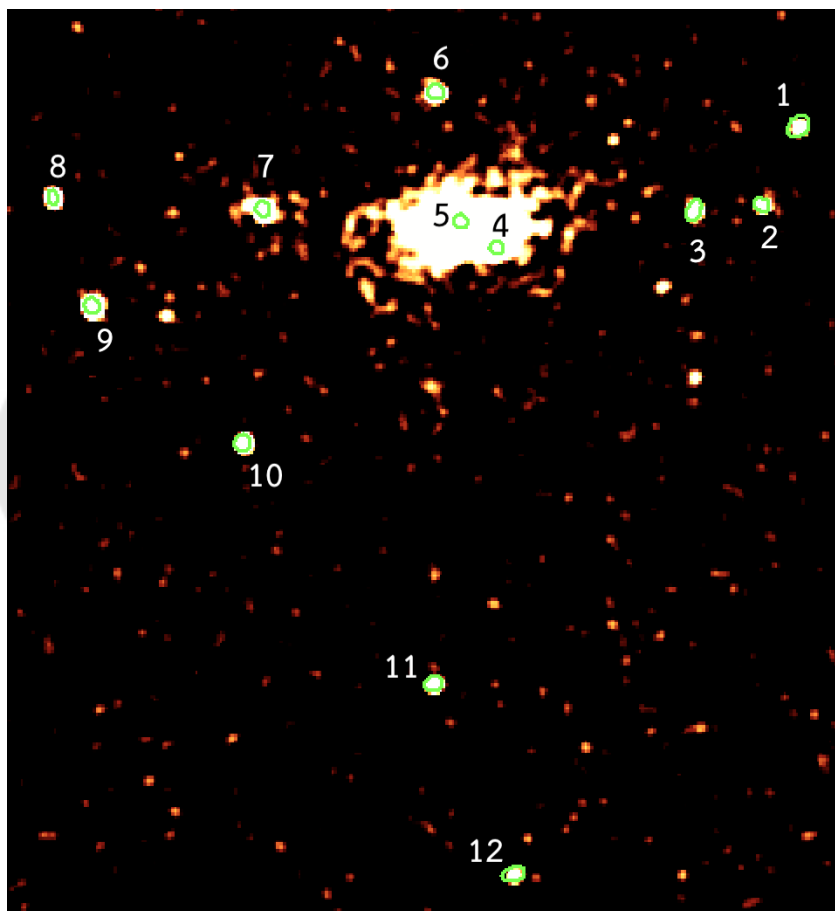
หลังจากที่ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมข้อมูลการสังเกตการณ์ให้พร้อมสำหรับการวิเคราะห์ผล ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการสังเกตการณ์เพื่อทำการระบุตำแหน่งและประเภท ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในแต่ละดาราจักร จากนั้นจึงคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างเพื่อใช้ในการ นิยามว่าแหล่งกำเนิดใดเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด และทำการ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลัง ส่องสว่างยิ่งยวดกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในดาราจักรและเทียบกับผลจาก การศึกษาในดาราจักรปกติ

4.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร

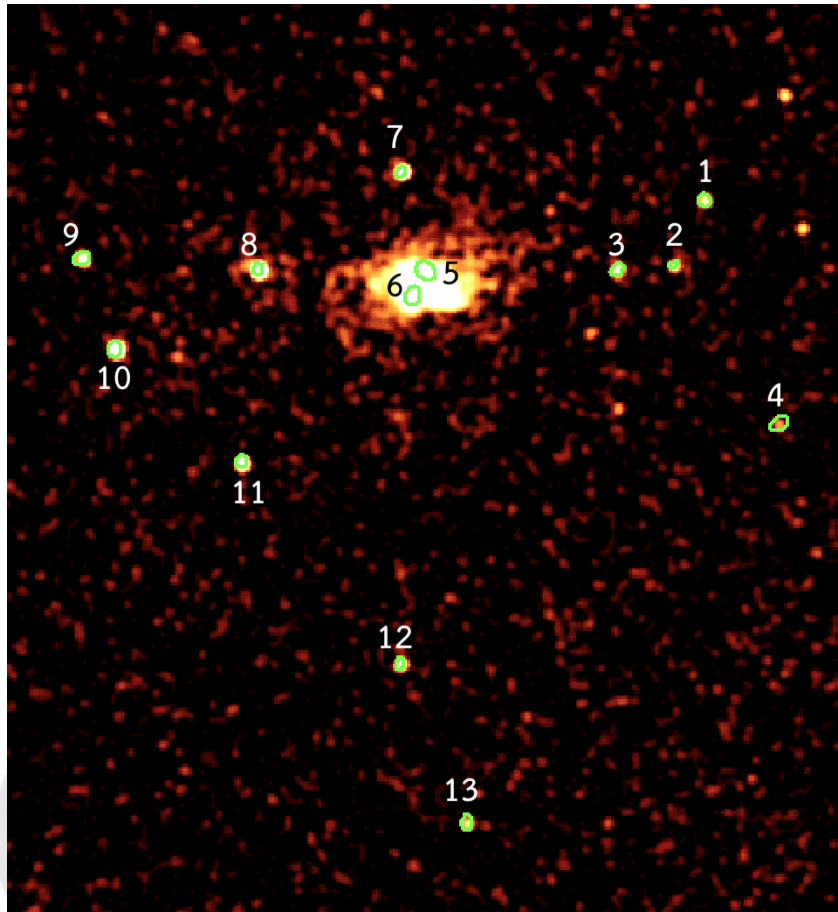
ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการสังเกตการณ์เพื่อทำการระบุตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร โดยจะพิจารณาจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิด รังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในแต่ละช่วงพลังงานทั้ง 3 ช่วงพลังงาน ได้แก่ ช่วงพลังงานต่ำ (Soft energy) 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์, ช่วงพลังงานสูง (Hard energy) 2.0 – 8.0 กิโล อิเล็กตรอนโวลต์ และช่วงพลังงานทั้งหมด (Full energy) 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้น ทำการรวมตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบใน 3 ช่วงพลังงานเข้าด้วยกัน (ดังที่ได้อธิบาย วิธีการไปในหัวข้อที่ 3.3) เพื่อให้ได้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบทั้งหมดในดาราจักร และเนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักรเหล่านี้มีความเป็นไปได้ที่จะเป็น แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบจุดหรืออาจเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย ผู้วิจัยจึงทำ การพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เพื่อระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ พบ ซึ่งจะเป็นส่วนช่วยในการนิยามแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสี เอกซ์ที่มี กำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่ผู้วิจัยสนใจในการศึกษานี้หรือไม่ และจะแสดงผลที่ได้จากการระบุ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ใน 3 ช่วงพลังงานในดาราจักรทั้ง 5 ดาราจักรที่ ทำการศึกษา รวมถึงผลที่ได้จากการพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยจะ เรียงลำดับการอธิบายตามระยะห่างของดาราจักรทั้ง 5 ดาราจักร ดังที่ได้แสดงไปในตารางที่ 1

4.1.1 ดาราจักร NGC 7552

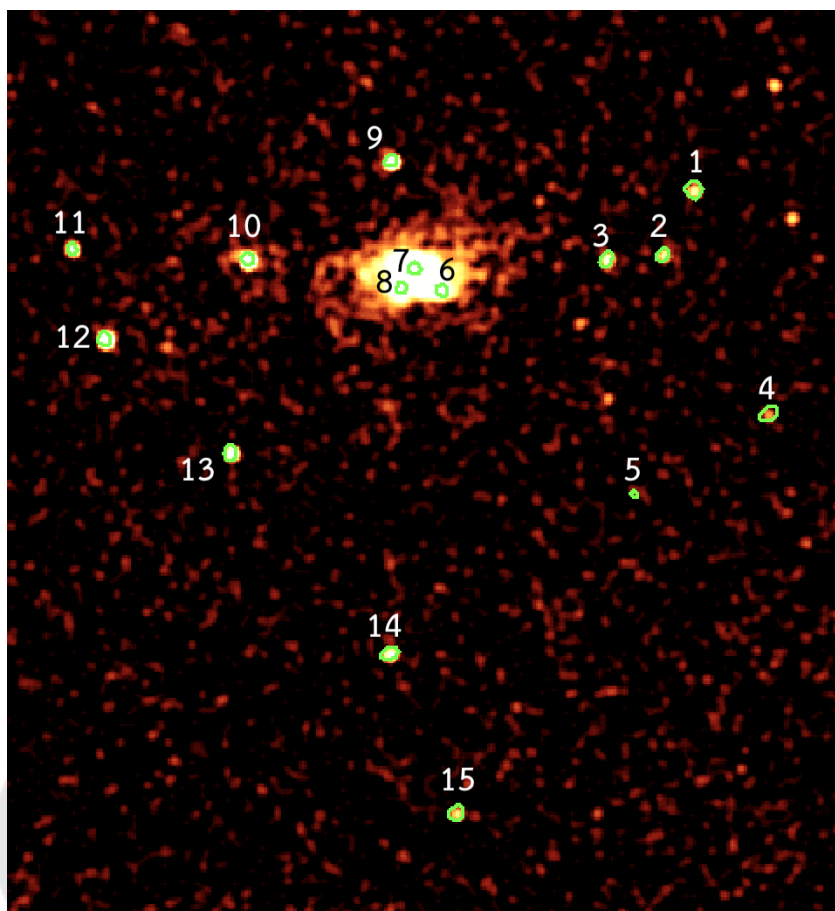
จากการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในแต่ละช่วงพลังงานทั้ง 3 ช่วง พลังงานนั้น ผู้วิจัยสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานต่ำได้ทั้งสิ้น 12 แหล่งกำเนิด ในช่วงพลังงานสูงพบ 13 แหล่งกำเนิด และในช่วงพลังงานทั้งหมดพบ 15 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 14, 15 และ 16



ภาพประกอบ 14 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ใน ช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 7552

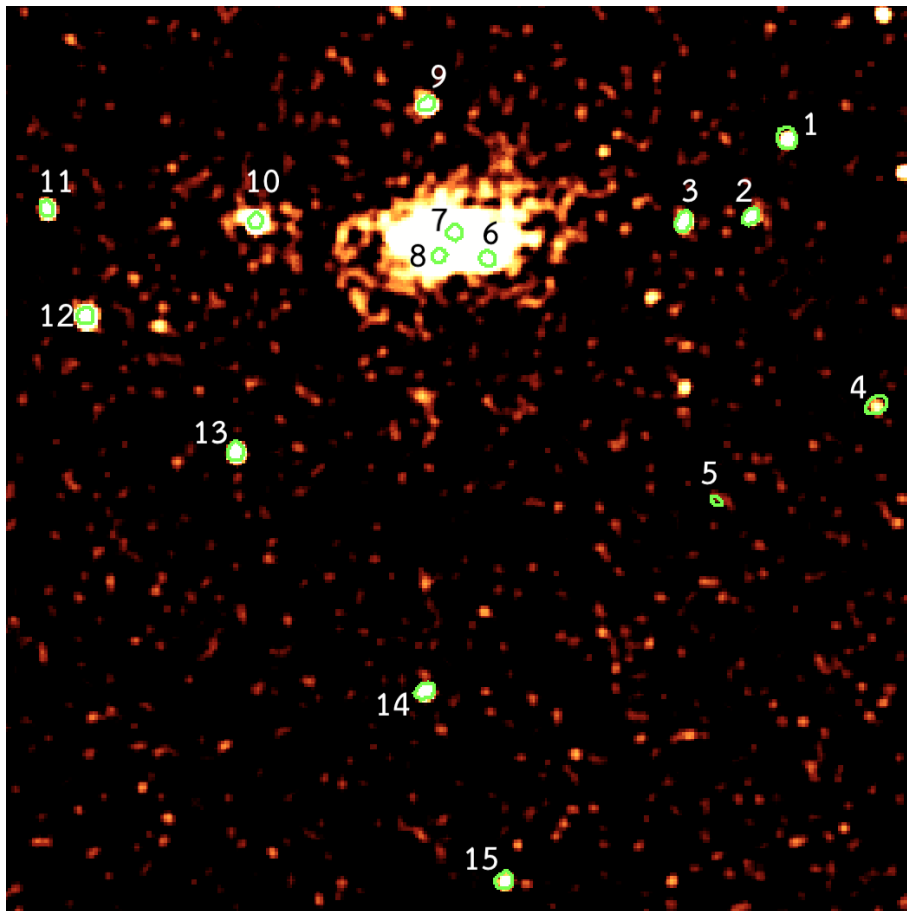


ภาพประกอบ 15 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 7552



ภาพประกอบ 16 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 7552

เมื่อพิจารณาจากพิกัดของแหล่งกำเนิดทั้ง 3 ช่วงพลังงาน ผู้วิจัยพบว่าตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดที่พบในช่วงพลังงานต่ำและพลังงานสูงนั้นอยู่ในบริเวณเดียวกับตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดที่พบในช่วงพลังงานทั้งหมด โดยพิจารณาจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางและรัศมีของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ ยกเว้นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ตำแหน่งที่ 5 ที่พบในช่วงพลังงานทั้งหมดเพียงช่วงพลังงานเดียว และเมื่อทำการรวมแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ทั้งหมดเข้าด้วยกัน (ดังอธิบายรายละเอียดไปในหัวข้อที่ 3.3) ทำให้สามารถระบุแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552 ได้ทั้งสิ้น 15 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 17 และตารางที่ 3 ซึ่งแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในพิกัด RA DEC และจำนวนโฟตอนสุทธิภายในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้



ภาพประกอบ 17 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร NGC 7552

จากนั้นได้ทำการพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดที่ระบุได้เทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา เพื่อทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ลักษณะใด ดังแสดงผลในตารางที่ 3

ตาราง 3 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552

แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กัมมันตภาพ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)	กัมมันตภาพ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)		
1*	23:16:05.73	-42:34:49.11	22.1 ± 5.2	-	1.12	1.12	-	ใช่
2*	23:16:06.28	-42:35:01.90	17.4 ± 4.4	-	1.11	1.11	-	ใช่
3	23:16:07.28	-42:35:02.74	33.9 ± 6.0	0.46 ^{+0.13} _{-0.13}	1.10	1.10	9.71	ใช่
4*	23:16:04.40	-42:35:32.95	10.9 ± 3.7	-	1.14	1.14	-	ใช่
5*	23:16:06.78	-42:35:48.73	3.8 ± 2.0	-	1.12	1.12	-	ใช่
6	23:16:10.19	-42:35:08.89	93.6 ± 9.8	0.95 ^{+0.17} _{-0.16}	1.10	1.10	1.71	ใช่
7	23:16:10.68	-42:35:04.57	482.9 ± 22.1	2.40 ^{+0.07} _{-0.08}	1.10	1.10	31.63	ไม่ใช่
8	23:16:10.90	-42:35:08.42	185.1 ± 13.8	2.40 ^{+0.07} _{-0.08}	1.10	1.10	31.63	ไม่ใช่
9	23:16:11.09	-42:34:43.51	83.8 ± 9.2	0.46 ^{+0.08} _{-0.08}	1.12	1.12	15.98	ใช่
10	23:16:13.64	-42:35:02.65	263.6 ± 16.3	0.51 ^{+0.04} _{-0.05}	1.13	1.13	33.15	ใช่

ตาราง 3 (ต่อ) ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552

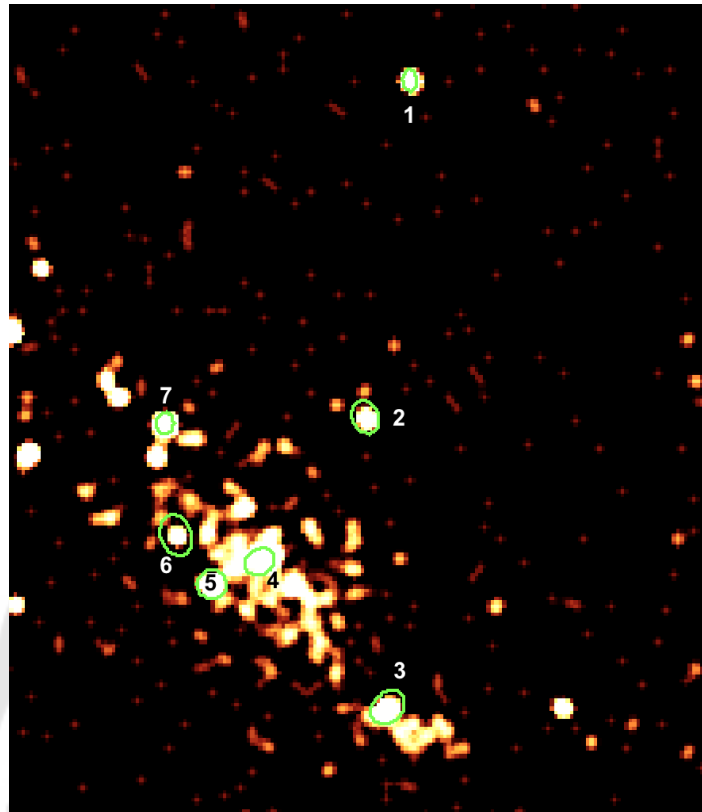
แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (พิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (พิลิปดา) (f)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (พิลิปดา) (f)		
11	23: 16: 16.74	-42: 35: 00.64	37.5 ± 6.2	0.51 ^{+0.14} _{-0.14}	1.19	1.19	9.52	ใช่
12	23: 16: 16.17	-42: 35: 18.31	208.5 ± 14.5	0.46 ^{+0.05} _{-0.06}	1.17	1.17	27.19	ใช่
13	23: 16: 13.94	-42: 35: 40.60	54.7 ± 7.5	0.50 ^{+0.11} _{-0.10}	1.14	1.14	11.43	ใช่
14	23: 16: 11.12	-42: 36: 19.92	34.9 ± 6.0	0.49 ^{+0.11} _{-0.12}	1.16	1.16	11.88	ใช่
15*	23: 16: 09.94	-42: 36: 51.03	16.4 ± 4.4	-	1.22	1.22	-	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : ค่า Right Ascension มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที, คอลัมน์ c : ค่า Declination มีหน่วยเป็นองศา ลิปดา และพิลิปดา, คอลัมน์ d : จำนวนโฟตอนสุดท้ายในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้, คอลัมน์ e : ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ด้วยชุดค่าตั้ง srcextent, คอลัมน์ f : ขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์เงินทรา, คอลัมน์ g : ค่าสถิติ z-test ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์, คอลัมน์ h : ประเภทของแหล่งกำเนิดซึ่งพิจารณาจากค่าสถิติ z-test ในคอลัมน์ g, * : แหล่งกำเนิดที่ 1, 2, 4, 5 และ 15 ไม่สามารถหาขนาดปรากฏผ่านชุดค่าตั้ง srcextent ได้ เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน

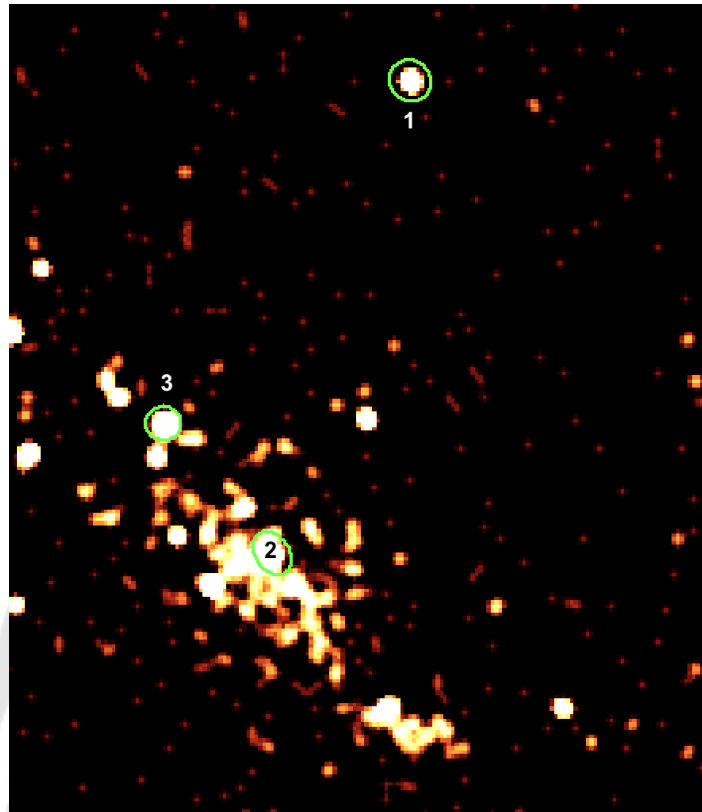
จากผลในคอลัมน์ h ของตารางที่ 3 พบว่าจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบทั้ง 15 แหล่งกำเนิดนั้น มีจำนวน 8 แหล่งกำเนิดที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด ได้แก่ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ตำแหน่งที่ 3, 6, 9, 10, 11, 12, 13 และ 14 และมี 2 แหล่งกำเนิดที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยายคือ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ตำแหน่งที่ 7 และ 8 ซึ่งอยู่ในบริเวณใจกลางของดาราจักร ส่วนอีก 5 แหล่งกำเนิดที่ไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้อันเนื่องมาจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยจะนิยามให้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดและจะถูกนำไปพิจารณาค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างในหัวข้อต่อไปเพื่อพิจารณาว่ามีกำลังส่องสว่างในช่วงพลังงาน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สูงมากพอที่จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยังยวดตามนิยามหรือไม่

4.1.2 ดาราจักร IC 5179

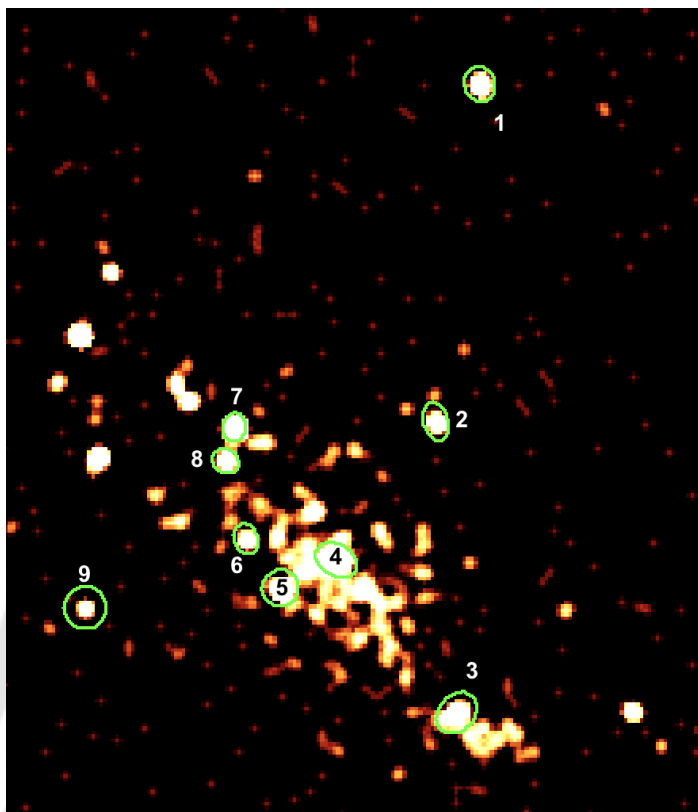
สำหรับข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราจักร IC 5179 นี้เป็นข้อมูลการสังเกตการณ์ที่มีระยะเวลาการสังเกตการณ์สุทธิน้อยที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษา คือมีระยะเวลาการสังเกตการณ์สุทธิประมาณ 12 กิโลวินาที โดยผู้วิจัยสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานต่ำได้ทั้งสิ้น 7 แหล่งกำเนิด ในช่วงพลังงานสูงพบ 3 แหล่งกำเนิด และในช่วงพลังงานทั้งหมดพบ 9 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 18, 19 และ 20



ภาพประกอบ 18 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร IC 5179

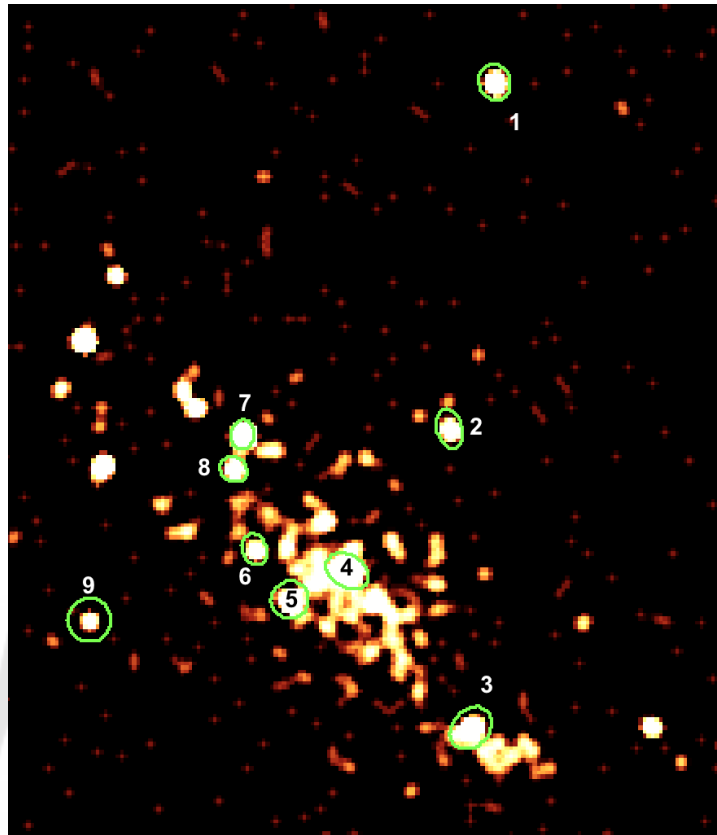


ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร IC 5179



ภาพประกอบ 20 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้
ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

จากนั้นพิจารณาพิกัดของแหล่งกำเนิดทั้ง 3 ช่วงพลังงาน พบว่าตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดที่พบในช่วงพลังงานต่ำและพลังงานสูงนั้นอยู่ในบริเวณเดียวกับตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดที่พบในช่วงพลังงานทั้งหมด ยกเว้นแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 6, 8 และ 9 ซึ่งพบในช่วงพลังงานทั้งหมดเพียงช่วงพลังงานเดียว ทำให้เมื่อรวมแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในทุกช่วงพลังงานเข้าด้วยกัน จึงมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ทั้งสิ้น 9 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 21 และตารางที่ 4 ซึ่งแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในพิกัด RA DEC และจำนวนโฟตอนสุทธิภายในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้



ภาพประกอบ 21 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร IC 5179

ต่อมาทำการพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดที่ระบุได้เทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา เพื่อทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ลักษณะใด ดังแสดงผลในตารางที่ 4

ตาราง 4 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดารากัมมันตรังสี IC 5179

แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
				ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)		
1*	22: 16: 07.65	-36: 49: 37.39	18.8 ± 4.4	-	1.14	-	ใช่
2*	22: 16: 08.11	-36: 50: 19.48	8.8 ± 3.0	-	1.10	-	ใช่
3*	22: 16: 07.90	-36: 50: 55.82	16.4 ± 4.1	-	1.10	-	ใช่
4	22: 16: 09.14	-36: 50: 36.75	33.7 ± 6.1	1.01 ^{+0.28} _{-0.27}	1.10	0.64	ใช่
5*	22: 16: 09.72	-36: 50: 40.25	17.2 ± 4.4	-	1.11	-	ใช่
6*	22: 16: 10.08	-36: 50: 34.13	7.3 ± 3.1	-	1.11	-	ใช่
7	22: 16: 10.20	-36: 50: 20.19	42.1 ± 6.6	0.44 ^{+0.10} _{-0.10}	1.11	12.04	ใช่
8*	22: 16: 10.29	-36: 50: 24.39	6.5 ± 2.7	-	1.11	-	ใช่

ตาราง 4 (ต่อ) ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เนดราจักษ์ IC 5179

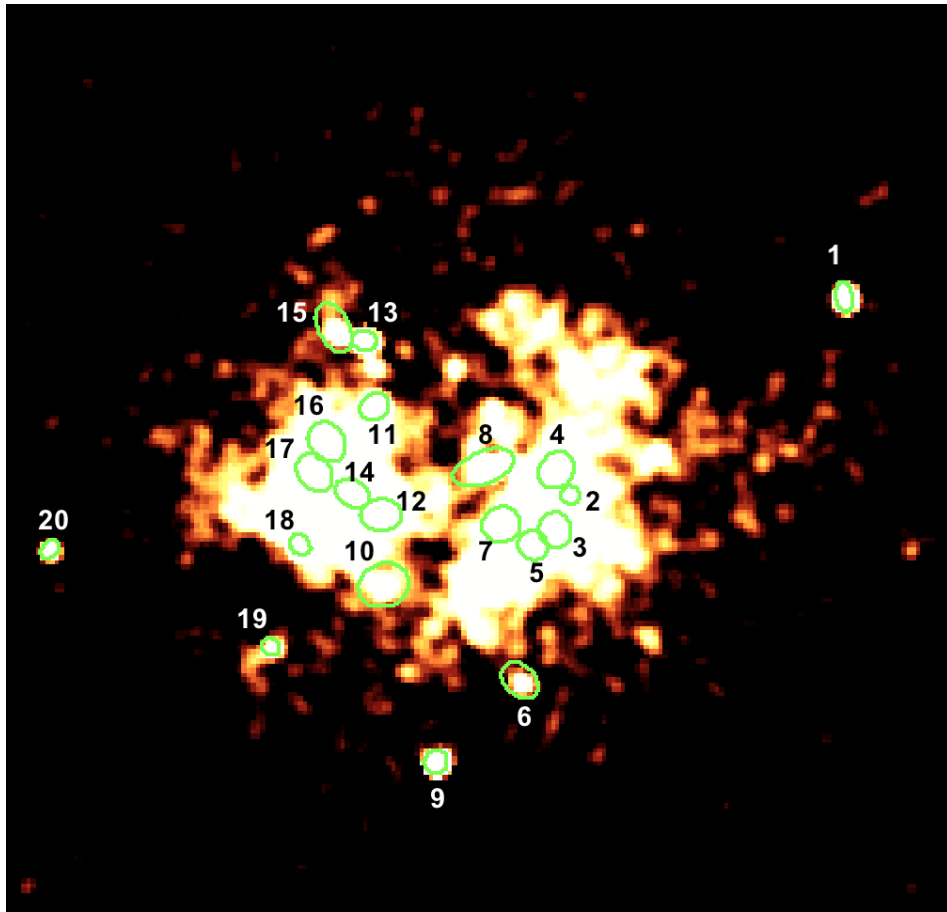
แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)		
9*	22: 16: 11.75	-36: 50: 42.68	4.9 ± 2.2	-	1.13	-	ใต้	

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เนดราจักษ์ IC 5179 ที่ระบุได้เมื่อนับด้วยมือ, คอลัมน์ b : ค่า Right Ascension มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที, คอลัมน์ c : ค่า Declination มีหน่วยเป็นองศา ลิปดา และฟิลิปดา, คอลัมน์ d : จำนวนโฟตอนสุทธิที่ระบุได้ในแหล่งกำเนิด คอลัมน์ e : ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ด้วยชุดคำสั่ง srcextent, คอลัมน์ f : ขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา, คอลัมน์ g : ค่าสถิติ z-test ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์, คอลัมน์ h : ประเภทของแหล่งกำเนิดซึ่งพิจารณาจากค่าสถิติ z-test ในคอลัมน์ g. * : แหล่งกำเนิดที่ 1, 2, 3, 5, 6, 8 และ 9 ไม่สามารถหาขนาดปรากฏผ่านชุดคำสั่ง srcextent ได้ เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน

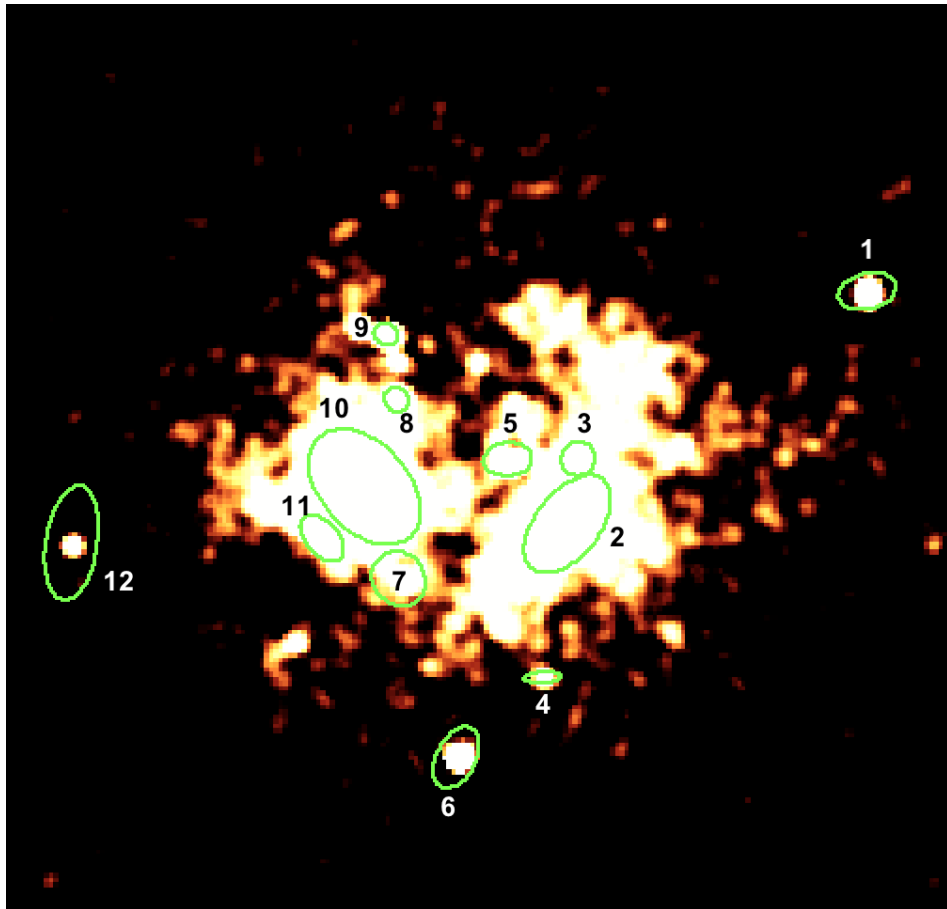
จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าสามารถหาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ได้เพียง 2 แหล่งกำเนิด (แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 4 และ 7) โดยที่ทั้ง 2 แหล่งกำเนิดนั้นเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด แต่สำหรับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในตำแหน่งที่ 4 อยู่ในบริเวณใจกลางของดาราจักร และในส่วนของแหล่งกำเนิดตำแหน่งอื่นๆที่ไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้ ผู้วิจัยจะนิยามให้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เหล่านี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดและจะถูกนำไปพิจารณาค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างในหัวข้อต่อไปด้วยเพื่อพิจารณาว่ามีกำลังส่องสว่างในช่วงพลังงาน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มากพอที่จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดตามนิยามหรือไม่

4.1.3 ดาราจักร Arp 299

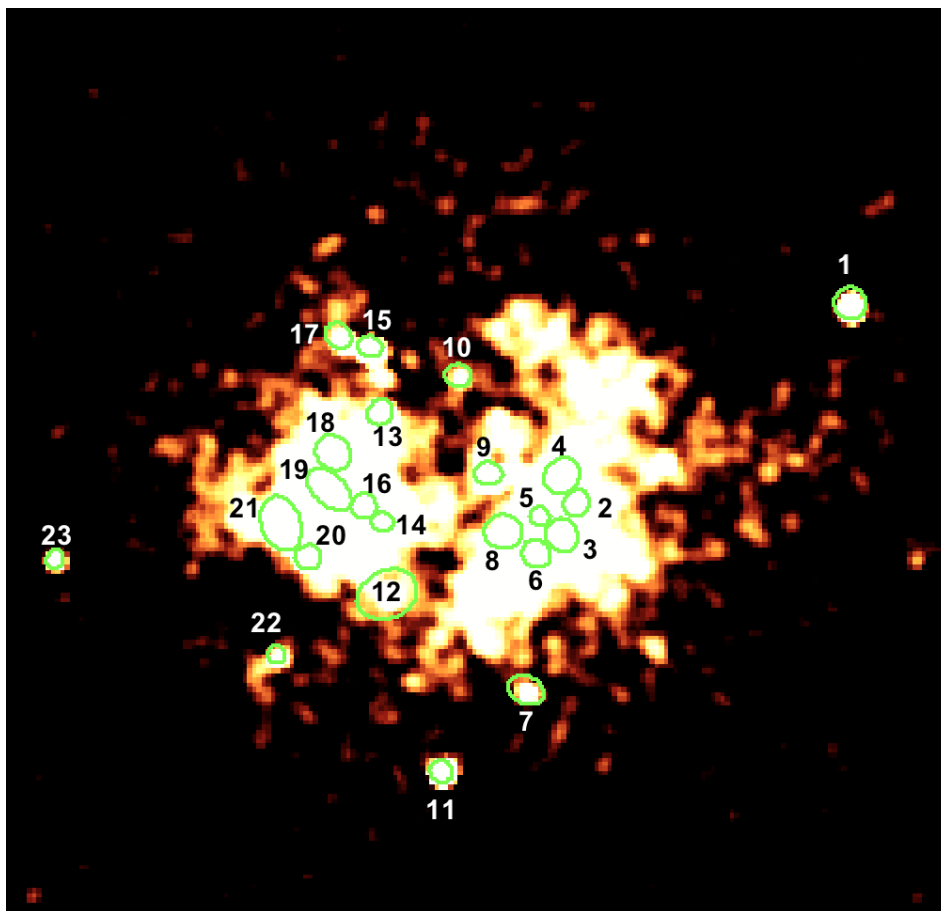
ดาราจักร Arp 299 เป็นดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่างที่ทำการศึกษา อันเนื่องมาจากดาราจักรนี้เกิดจากการรวมตัวกันของ 2 ดาราจักร คือ ดาราจักร NGC 3690 กับ ดาราจักร IC 694 อีกทั้งยังเป็นดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์สูงเป็นอันดับ 2 จากในกลุ่มดาราจักรท้องถิ่นที่มีระยะห่างไม่เกิน 50 เมกะพาร์เซค (Heckman, Armus, Weaver, & Wang, 1999; A. L. Zezas, Georgantopoulos, & Ward, 1998) ทำให้โครงสร้างของดาราจักรนี้มีความซับซ้อนและหนาแน่นมากกว่าอีก 4 ดาราจักรในกลุ่มตัวอย่าง โดยในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในแต่ละช่วงพลังงานนั้น ผู้วิจัยสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดในช่วงพลังงานต่ำได้ 20 แหล่งกำเนิด ในช่วงพลังงานสูงระบุได้ 12 แหล่งกำเนิด และในช่วงพลังงานทั้งหมดสามารถระบุได้ 23 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 22, 23 และ 24



ภาพประกอบ 22 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร Arp 299



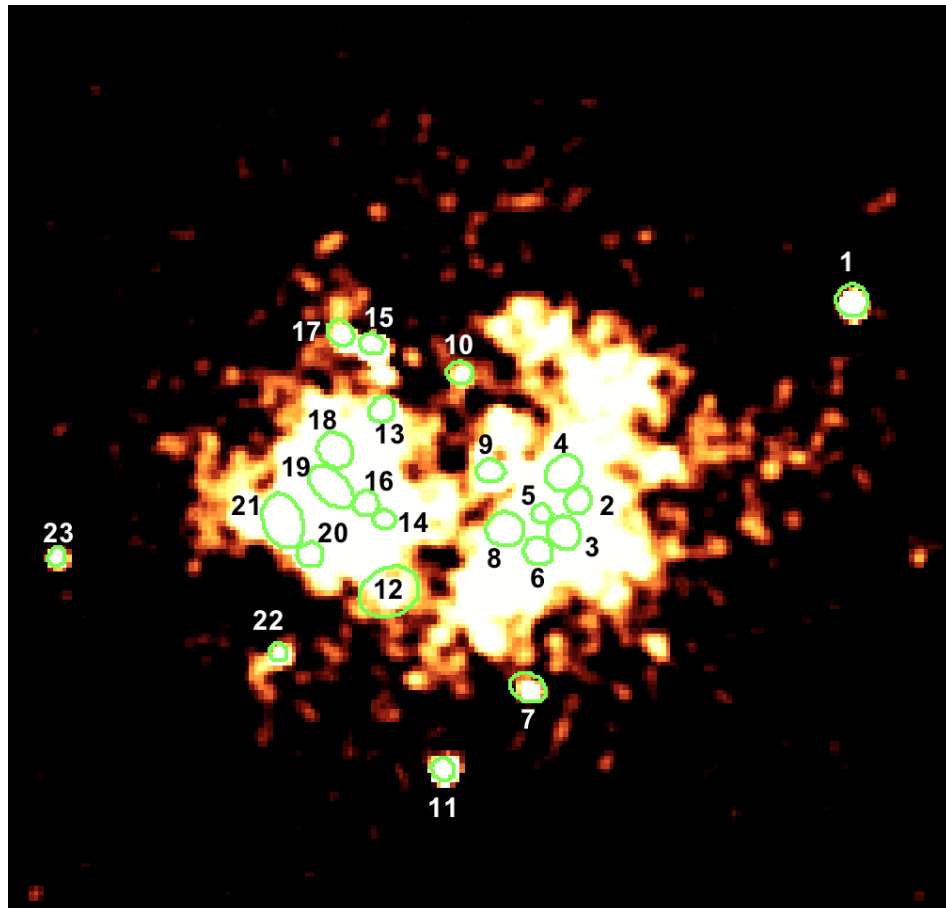
ภาพประกอบ 23 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร Arp 299



ภาพประกอบ 24 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 - 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร Arp 299

พิจารณาดำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่พบในช่วงพลังงานสูงนั้น จะเห็นว่าแหล่งกำเนิด ตำแหน่งที่ 2 และ 11 ซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในอีก 2 ช่วงพลังงาน จะพบว่าพื้นที่ของทั้ง 2 แหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในช่วง พลังงานสูงนี้ครอบคลุมตำแหน่งของแหล่งกำเนิดในอีก 2 ช่วงพลังงานอยู่หลายแหล่งกำเนิด แต่ เมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำและในช่วงพลังงานทั้งหมดที่ผู้วิจัยทำการระบุตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดได้นั้นพบว่ามีคุณสมบัติคล้ายกันทั้งจำนวนที่พบและตำแหน่งของแหล่งกำเนิด เหล่านั้นและยังสอดคล้องกับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่ระบุได้จากในงานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) ผู้วิจัยจึงยึดตำแหน่งที่ได้จากช่วงพลังงานต่ำและช่วงพลังงาน ทั้งหมด เมื่อทำการรวมแหล่งกำเนิดที่ระบุในทุกช่วงพลังงานเข้าด้วยกัน จึงสามารถระบุ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ได้ทั้งสิ้น 23 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 25 และตารางที่ 5 ซึ่ง

แสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในพิกัด RA DEC และจำนวนโฟตอนสุทธิภายในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้



ภาพประกอบ 25 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร Arp299

จากนั้นทำการพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดที่ระบุได้เทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดสอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา เพื่อทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ลักษณะใด ดังแสดงผลในตารางที่ 5

ตาราง 5 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp 299

แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดที่สอดคล้อง			ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
				ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	กัมมันตภาพ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)	ขนาดที่สอดคล้อง		
1	11: 28: 26.78	+58: 34: 07.23	74.9 ± 8.8	0.53 ^{+0.07} _{-0.07}	1.16	17.53	ใช่	
2	11: 28: 30.46	+58: 33: 46.21	377.7 ± 19.7	0.41 ^{+0.03} _{-0.03}	1.12	46.39	ใช่	
3	11: 28: 30.66	+58: 33: 42.84	747.7 ± 27.6	1.93 ^{+0.07} _{-0.06}	1.12	26.56	ไม่	
4	11: 28: 30.66	+58: 33: 49.11	708.5 ± 27.0	2.12 ^{+0.07} _{-0.06}	1.12	32.35	ไม่	
5	11: 28: 30.96	+58: 33: 44.81	167.7 ± 13.1	0.41 ^{+0.05} _{-0.05}	1.12	27.68	ใช่	
6	11: 28: 31.00	+58: 33: 40.87	722.8 ± 27.1	0.48 ^{+0.02} _{-0.02}	1.12	62.33	ใช่	
7	11: 28: 31.14	+58: 33: 26.59	20.7 ± 5.8	0.50 ^{+0.14} _{-0.13}	1.12	8.68	ใช่	
8	11: 28: 31.44	+58: 33: 43.21	91.3 ± 11.3	0.76 ^{+0.16} _{-0.16}	1.11	9.71	ใช่	
9	11: 28: 31.64	+58: 33: 49.35	138.1 ± 12.5	0.48 ^{+0.04} _{-0.05}	1.11	30.97	ใช่	
10	11: 28: 32.05	+58: 33: 59.66	14.0 ± 4.6	0.59 ^{+0.17} _{-0.17}	1.11	5.99	ใช่	
11	11: 28: 32.28	+58: 33: 18.00	110.9 ± 10.6	0.46 ^{+0.05} _{-0.05}	1.12	25.83	ใช่	

ตาราง 5 (ต่อ) ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เนตาราจักร Arp299

แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)		
12	11:28:33.01	+58:33:36.62	82.5 ± 11.0	0.45 ^{+0.07} _{-0.08}	1.10	1.10	18.31	ใช่
13	11:28:33.10	+58:33:55.75	98.3 ± 11.0	0.44 ^{+0.04} _{-0.05}	1.10	1.10	32.59	ใช่
14	11:28:33.07	+58:33:44.29	89.2 ± 10.0	0.60 ^{+0.07} _{-0.07}	1.10	1.10	14.08	ใช่
15	11:28:33.24	+58:34:02.67	107.7 ± 10.7	0.48 ^{+0.04} _{-0.05}	1.10	1.10	30.72	ใช่
16	11:28:33.32	+58:33:45.95	425.5 ± 21.1	0.49 ^{+0.03} _{-0.03}	1.10	1.10	39.98	ใช่
17	11:28:33.65	+58:34:03.82	32.5 ± 6.3	0.49 ^{+0.09} _{-0.09}	1.10	1.10	13.42	ใช่
18	11:28:33.73	+58:33:51.54	246.7 ± 16.2	2.46 ^{+0.08} _{-0.08}	1.10	1.10	33.30	ไม่
19	11:28:33.78	+58:33:47.64	745.2 ± 27.5	2.46 ^{+0.08} _{-0.08}	1.10	1.10	33.30	ไม่
20	11:28:34.07	+58:33:40.55	102.0 ± 10.5	0.38 ^{+0.06} _{-0.05}	1.10	1.10	23.42	ใช่
21	11:28:34.43	+58:33:44.07	140.6 ± 13.1	2.14 ^{+0.28} _{-0.28}	1.10	1.10	7.31	ไม่

ตาราง 5 (ต่อ) ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp299

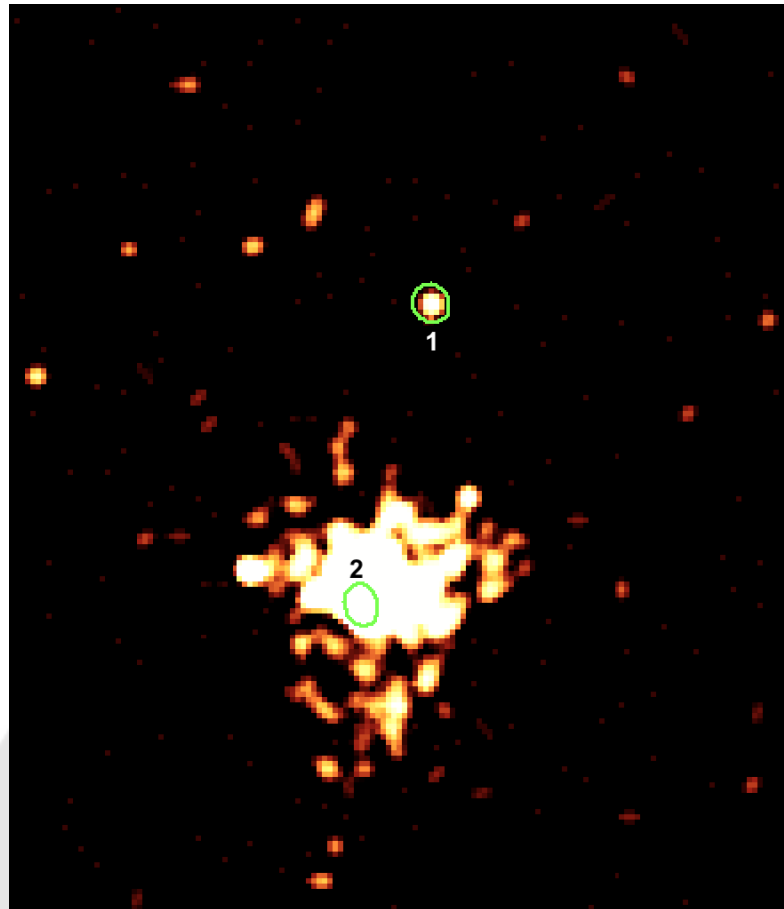
แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)		
22*	11: 28: 34.49	+58: 33: 30.27	13.9 ± 4.0	-	1.10	-	-	ใช่
23	11: 28: 37.47	+58: 33: 40.34	23.2 ± 4.9	0.45 ^{+0.11} _{-0.11}	1.10	11.49	11.49	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp 299 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : ค่า Right Ascension มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที, คอลัมน์ c : ค่า Declination มีหน่วยเป็นองศา ลิปดา และฟิลิปดา, คอลัมน์ d : จำนวนโฟตอนสุทธิที่ระบุได้ในแหล่งกำเนิด คอลัมน์ e : ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ด้วยชุดคำสั่ง srcextent, คอลัมน์ f : ขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์เงินทรา, คอลัมน์ g : ค่าสถิติ z-test ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์, คอลัมน์ h : ประเภทของแหล่งกำเนิดซึ่งพิจารณาจากค่าสถิติ z-test ในคอลัมน์ g.* : แหล่งกำเนิดที่ 22 ไม่สามารถหาขนาดปรากฏผ่านชุดคำสั่ง srcextent ได้ เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน

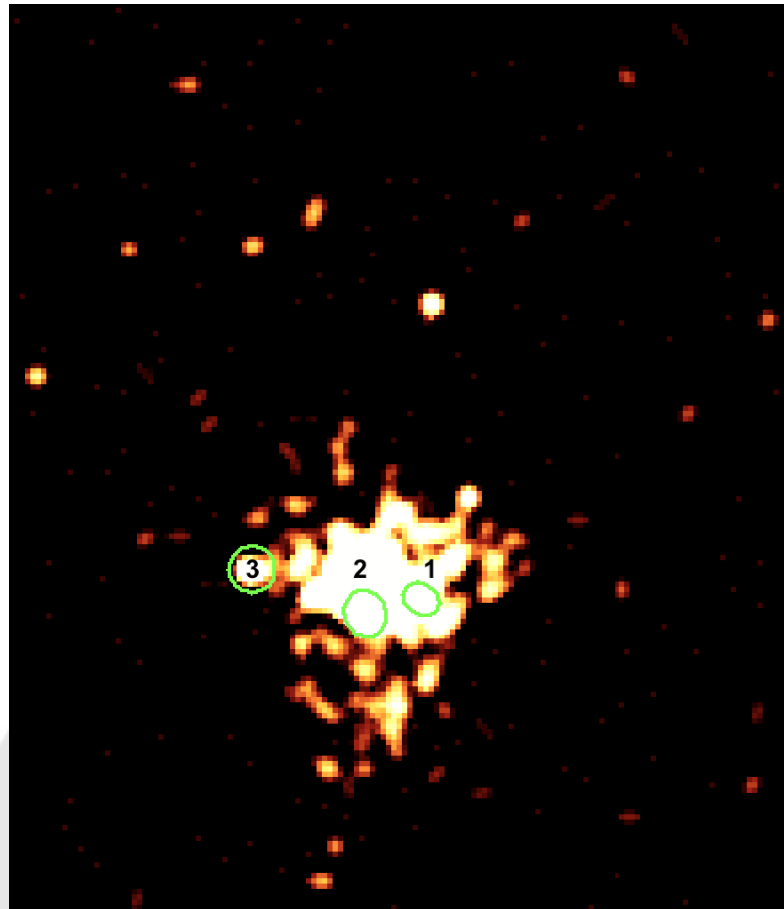
จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าสามารถหาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดได้ 22 จาก 23 แหล่งกำเนิด โดยพบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยายจำนวน 5 แหล่งกำเนิด (แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 3, 4, 18, 19 และ 21) และแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 22 ไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้เนื่องจากแหล่งกำเนิดนี้มีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน แต่ผู้วิจัยจะนิยามให้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ตำแหน่งนี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด และแหล่งกำเนิดทั้ง 23 แหล่งกำเนิด จะถูกนำไปพิจารณาค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างในขั้นตอนต่อไป เพื่อพิจารณาว่ามีกำลังส่องสว่างในช่วงพลังงาน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มากพอที่จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยังยวดตามที่ได้นิยามไว้หรือไม่

4.1.4 ดาราจักร NGC 838

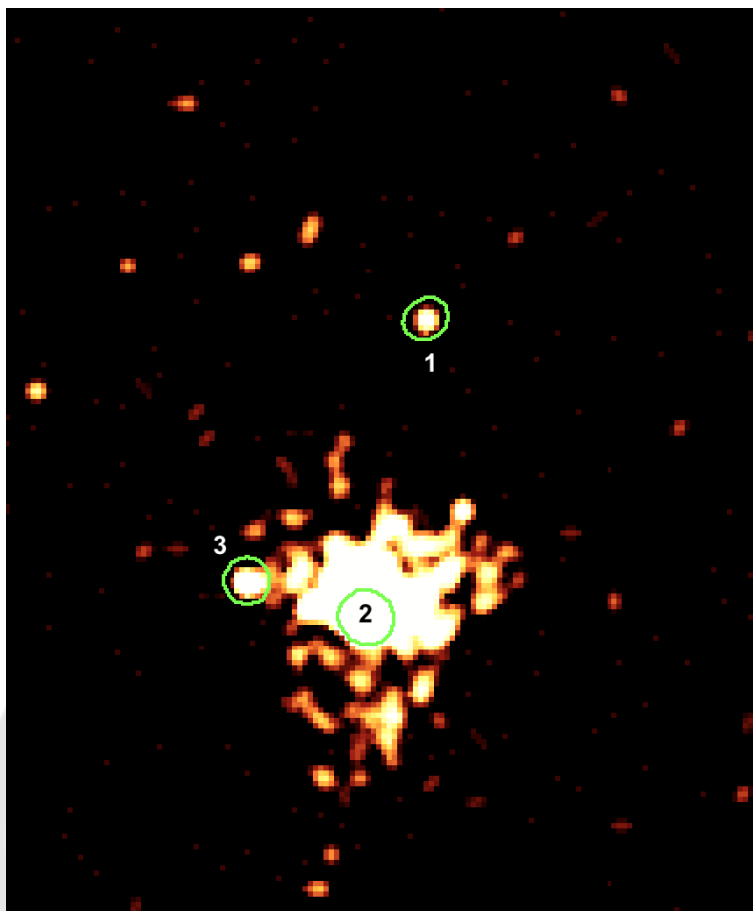
การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละช่วงพลังงานสำหรับดาราจักรนี้ ผู้วิจัยสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงานต่ำได้ 2 แหล่งกำเนิด ในช่วงพลังงานสูงระบุตำแหน่งได้ 3 แหล่งกำเนิด และในช่วงพลังงานทั้งหมดสามารถระบุได้ 3 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 26, 27 และ 28



ภาพประกอบ 26 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ในดาราจักร NGC 838



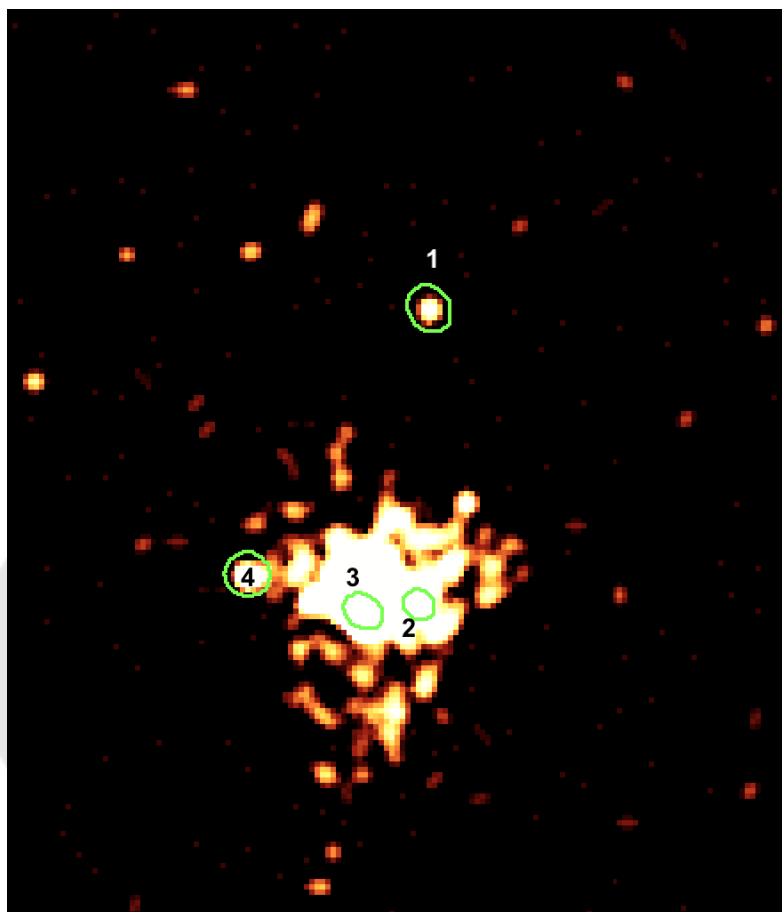
ภาพประกอบ 27 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานสูง 2.0 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 838



ภาพประกอบ 28 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 838

ซึ่งจากภาพประกอบที่ 26, 27 และ 28 จะเห็นว่า ตำแหน่งปรากฏของแหล่งกำเนิดที่ระบุในแต่ละช่วงพลังงานนั้น มีแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 2 ของทั้ง 3 ช่วงพลังงาน เป็นแหล่งกำเนิดเดียวที่สามารถระบุได้ในทั้ง 3 ช่วงพลังงาน อีกทั้งยังเป็นแหล่งกำเนิดที่อยู่ในบริเวณใจกลางของดาราจักร ส่วนแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุตำแหน่งได้ใน 2 ช่วงพลังงาน ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 1 ซึ่งพบในช่วงพลังงานต่ำและในช่วงพลังงานทั้งหมด รวมถึงแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 3 ที่พบในช่วงพลังงานสูงและในช่วงพลังงานทั้งหมด นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุตำแหน่งได้เพียงช่วงพลังงานเดียวคือ แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 1 ที่พบในช่วงพลังงานสูง ทำให้เมื่อรวมแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ในทุกช่วงพลังงานเข้าด้วยกัน จึงมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ทั้งสิ้น 4 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 29 และตารางที่ 6 ซึ่งแสดงตำแหน่งของ

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในพิกัด RA DEC และจำนวนโฟตอนสุทธิภายในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้



ภาพประกอบ 29 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร NGC 838

จากนั้นทำการพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้เทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดสอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา เพื่อทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ลักษณะใด ดังแสดงผลในตารางที่ 6

และจากตารางที่ 6 พบว่าแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 3 ที่พบอยู่บริเวณใจกลางของดาราจักรนั้น เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย ส่วนแหล่งกำเนิดอีก 3 แหล่งกำเนิดไม่สามารถระบุประเภทได้เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน ซึ่งผู้วิจัยจะนิยามให้แหล่งกำเนิดทั้ง 3 แหล่งกำเนิดนี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด และแหล่งกำเนิด

รังสีเอกซ์ทั้ง 4 แหล่งกำเนิดนี้จะถูกนำไปพิจารณาค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างเพื่อพิจารณาว่าแหล่งกำเนิดเหล่านี้ว่ามีกำลังส่องสว่างมากพอจะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดหรือไม่



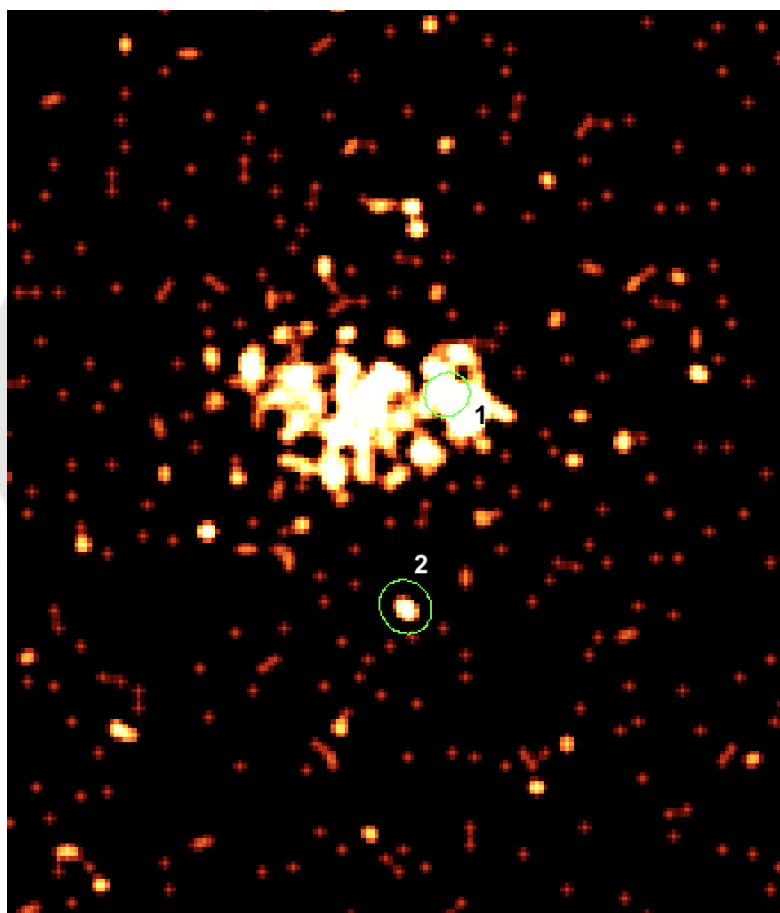
ตาราง 6 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 838

แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (พิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (พิลิปดา) (f)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (พิลิปดา) (f)		
1*	02:09:38.12	-10:08:19.60	4.9 ± 2.2	-	1.10	-	1.10	ใช่
2*	02:09:38.18	-10:08:47.04	9.8 ± 3.2	-	1.10	-	1.10	ใช่
3	02:09:38.53	-10:08:47.65	80.9 ± 9.1	1.38 ^{+0.18} _{-0.18}	1.10	3.011	1.10	ไม่
4*	02:09:39.26	-10:08:44.21	12.5 ± 3.6	-	1.10	-	1.10	ใช่

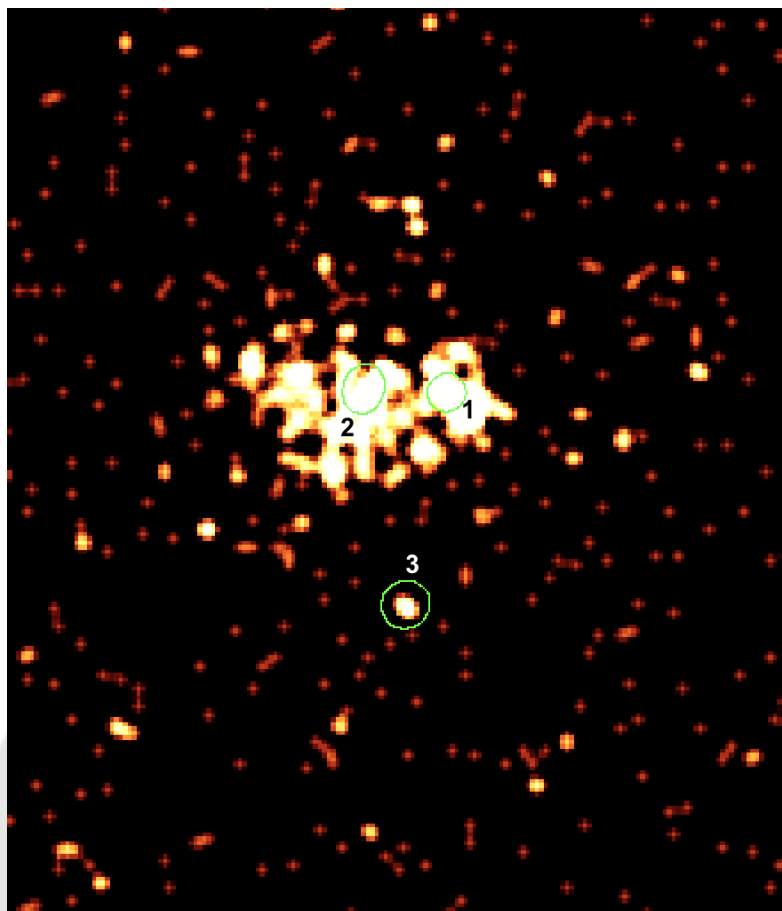
หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 838 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : ค่า Right Ascension มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที, คอลัมน์ c : ค่า Declination มีหน่วยเป็นองศา ลิปดา และพิลิปดา, คอลัมน์ d : จำนวนโฟตอนสุทธิที่ระบุได้ในแหล่งกำเนิด คอลัมน์ e : ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ด้วย ชุดคำสั่ง srcextent, คอลัมน์ f : ขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา, คอลัมน์ g : ค่าสถิติ z-test ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์, คอลัมน์ h : ประเภทของแหล่งกำเนิดซึ่งพิจารณาจากค่าสถิติ z-test ในคอลัมน์ g. * : แหล่งกำเนิดที่ 1,2 และ 4 ไม่สามารถหาขนาดปรากฏผ่านชุดคำสั่ง srcextent ได้ เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน

4.1.5 ดาราจักร NGC 5653

สำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในแต่ละช่วงพลังงานของดาราจักรนี้ ผู้วิจัยสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดได้ใน 2 ช่วงพลังงานคือ ช่วงพลังงานต่ำ และช่วงพลังงานทั้งหมด ส่วนในช่วงพลังงานสูง ไม่สามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ได้ โดยในช่วงพลังงานต่ำ สามารถระบุได้ 2 แหล่งกำเนิด และในช่วงพลังงานทั้งหมดสามารถระบุได้ 3 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 30 และ 31

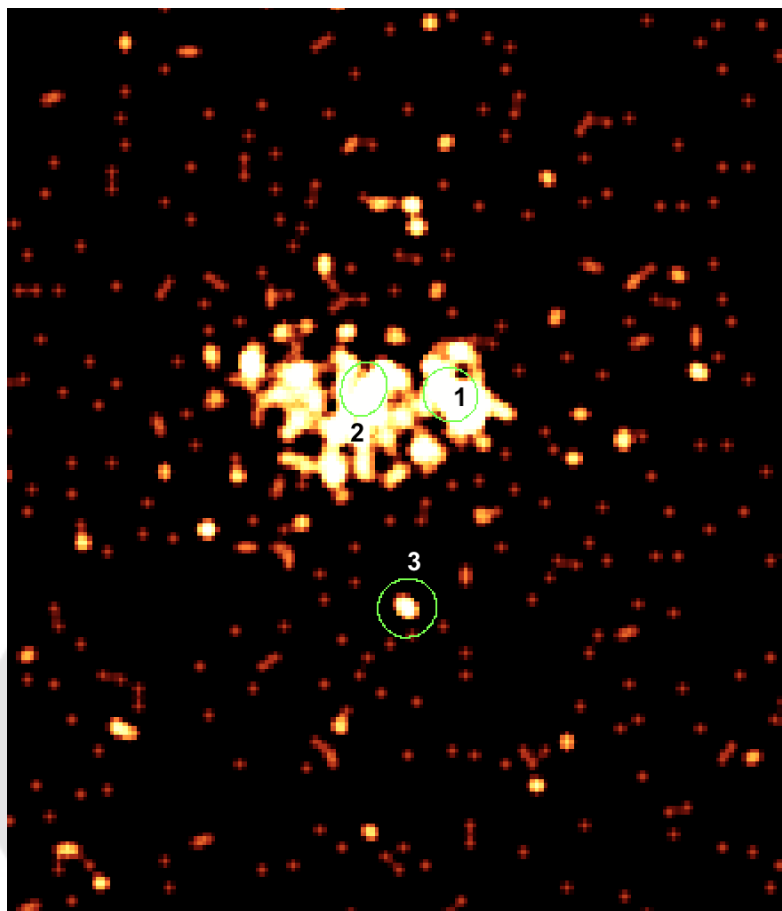


ภาพประกอบ 30 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานต่ำ 0.3 – 2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 5653



ภาพประกอบ 31 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (วงรีสีเขียว) ที่ระบุได้
ในช่วงพลังงานทั้งหมด 0.3 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในดาราจักร NGC 5653

จากภาพประกอบที่ 30 และ 31 แสดงให้เห็นว่า แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 1 ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานต่ำและในช่วงพลังงานทั้งหมด เป็นแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุได้ที่ตำแหน่งเดียวกัน และแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 2 ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานต่ำกับแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 3 ที่ระบุได้ในช่วงพลังงานทั้งหมด เป็นแหล่งกำเนิดที่ระบุได้ที่ตำแหน่งเดียวกัน ส่วนแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 2 ที่พบในช่วงพลังงานทั้งหมดนั้นสามารถระบุตำแหน่งได้ในช่วงพลังงานทั้งหมดเพียงช่วงพลังงานเดียวและแหล่งกำเนิดนี้ยังอยู่ในบริเวณใจกลางของดาราจักรด้วย เมื่อทำการรวมแหล่งกำเนิดทั้งหมดที่ระบุได้ทั้ง 2 ช่วงพลังงานเข้าด้วยกัน จึงมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งสิ้น 3 แหล่งกำเนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 32 และตารางที่ 7 ซึ่งแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในพิกัด RA DEC และจำนวนโฟตอนสุทธิภายในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้



ภาพประกอบ 32 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่ระบุได้ในดาราจักร NGC 5653

จากนั้นทำการพิจารณาขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดที่สามารถระบุได้เทียบกับขนาดของแหล่งกำเนิดสอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา เพื่อทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ลักษณะใด ดังแสดงผลในตารางที่ 7

ซึ่งจากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่า แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย ส่วนแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 3 นั้นไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยเกินกว่า 20 โฟตอน

ตาราง 7 ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 5653

แหล่งกำเนิด (a)	RA (b)	DEC (c)	Net counts ± error (d)	ขนาดปรากฏ (ฟิลิปดา) (e)	ขนาดที่สอดคล้อง		ค่าสถิติ Z (g)	เป็นแหล่งกำเนิด แบบจุดหรือไม่ (point-like source) (h)
					กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)	กับฟังก์ชันการ กระจายจุด (ฟิลิปดา) (f)		
1	14: 30: 09.68	+31: 12: 56.92	35.6 ± 6.1	1.91 ^{+0.41} _{-0.41}	1.10	1.10	3.871	ไม่
2	14: 30: 10.40	+31: 12: 57.33	15.2 ± 4.0	2.83 ^{+0.77} _{-0.78}	1.10	1.10	4.342	ไม่
3*	14: 30: 10.04	+31: 12: 33.28	3.9 ± 2.0	-	1.09	-	-	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 838 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : ค่า Right Ascension มีหน่วยเป็นชั่วโมง นาที และวินาที, คอลัมน์ c : ค่า Declination มีหน่วยเป็นองศา ลิปดา และฟิลิปดา, คอลัมน์ d : จำนวนโฟตอนสุทธิที่ระบุได้ในแหล่งกำเนิด คอลัมน์ e : ขนาดปรากฏของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้ด้วย ชุดคำสั่ง srcextent, คอลัมน์ f : ขนาดของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกับฟังก์ชันการกระจายจุดของกล้องโทรทรรศน์จันทรา, คอลัมน์ g : ค่าสถิติ z-test ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์, คอลัมน์ h : ประเภทของแหล่งกำเนิดซึ่งพิจารณาจากค่าสถิติ z-test ในคอลัมน์ g* : แหล่งกำเนิดที่ 3 ไม่สามารถหาขนาดปรากฏผ่านชุดคำสั่ง srcextent ได้ เนื่องจากมีจำนวนโฟตอนน้อยกว่า 20 โฟตอน

จากการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบใน 5 ดาราจักรที่ทำการศึกษา ผู้วิจัยสามารถระบุแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ได้ทั้งสิ้น 54 แหล่งกำเนิด โดยพบว่ามี 10 แหล่งกำเนิดที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย, มี 27 แหล่งกำเนิดที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบจุด และอีก 17 แหล่งกำเนิดที่ไม่สามารถระบุประเภทได้ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยจะทำการคำนวณค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดทั้ง 54 แหล่งกำเนิดที่ระบุได้นี้เพื่อพิจารณาว่ามีกี่แหล่งกำเนิดที่มีกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์มากพอที่จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ดังจะแสดงผลการคำนวณในหัวข้อต่อไป

4.2 ฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร

หลังจากที่ได้จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบทั้งหมดใน 5 ดาราจักรตัวอย่างมาเรียบร้อยแล้วนั้น ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะทำการคำนวณฟลักซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในช่วงพลังงาน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (ออกมา 2 ค่าคือ 1.) Instrument flux หรือที่ใน CIAO package เรียกว่า `flux_aper` เป็นการคำนวณฟลักซ์จากพลังงานของโฟตอนที่ซีดีของกล้องรับได้โดยตรง เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่มาจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มากที่สุด โดยในตารางแสดงผลการคำนวณด้านล่าง จะเรียกค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีนี้ว่า ฟลักซ์สุทธิ (Net flux) 2.) การคำนวณฟลักซ์โดยใช้การพิจารณาผ่านแบบจำลองทางฟิสิกส์ หรือที่ใน CIAO package เรียกว่า `Mflux_aper` โดยผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืน (Absorbed power-law model) ที่เป็นแบบจำลองพื้นฐานสำหรับอธิบายแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดและคำนึงถึงผลจากการดูดกลืนของกลุ่มแก๊สในอวกาศ โดยจะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืนนี้ ให้มีค่า photon index (Γ) = 2 และค่าการดูดกลืนเนื่องจากแก๊สที่อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดกับผู้สังเกตการณ์ (Column density; N_H) = $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ (Swartz et al., 2004) และจะเรียกค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองทางฟิสิกส์นี้ในตารางแสดงผลการคำนวณด้านล่างว่า net model flux ซึ่งการคำนวณฟลักซ์ทั้ง 2 ค่านี้นำมาดำเนินการผ่านชุดคำสั่ง `srcflux` และค่าฟลักซ์ทั้ง 2 ค่านี้จะถูกนำมาคำนวณร่วมกับระยะทางระหว่างดาราจักรถึงผู้สังเกต (D_L) โดยอาศัยข้อมูลจากคอลัมน์ที่ 7 ในตารางที่ 1 เพื่อหาลำดับส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร

4.2.1 ดาราจักร NGC 7552

อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ได้คำนวณค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดในทุกดาราจักรออกมาแล้วนั้น ผู้วิจัยพบว่าผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืนให้ผลที่สอดคล้องกับผลจากในงานวิจัยของ Luangtip et al. (2015) ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาการเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจากค่ากำลังส่องสว่างที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืน

จากตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาค่ากำลังส่องสว่างที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืนในคอลัมน์ f จะพบว่ามี 6 แหล่งกำเนิดที่กำลังส่องสว่างมีค่า $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาทีขึ้นไป คือ แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 6, 7, 8, 9, 10 และ 12 โดยแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 6, 9, 10 และ 12 เป็นแหล่งกำเนิดที่ผู้วิจัยสามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด ซึ่งตรงกับเงื่อนไขที่ได้นิยามไว้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ในส่วนของแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 7 และ 8 ที่แม้จะพบว่ามีกำลังส่องสว่าง $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาทีขึ้นไปเช่นกัน แต่แหล่งกำเนิดทั้ง 2 แหล่งกำเนิดนี้ถูกระบุว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย อีกทั้งยังเป็นแหล่งกำเนิดที่อยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักร แต่เนื่องจากดาราจักร NGC 7552 เป็นดาราจักรที่ไม่มีรายงานการตรวจพบนิวเคลียสดาราจักรกัมมันต์ แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 7 และ 8 จึงถูกนิยามเป็นเพียงแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าในดาราจักร NGC 7552 ผู้วิจัยสามารถระบุแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้ 4 แหล่งกำเนิด

ตาราง 8 ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาวจักร NGC 7552

แหล่งกำเนิด (a)	Net rate (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$ (b)	Net flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$ (c)	Net model flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$ (d)	Net lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$ (e)	Net model lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$ (f)	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างเพียงพอ หรือไม่ (g)
1	$0.366^{+0.160}_{-0.130}$	$0.930^{+0.406}_{-0.331}$	$0.471^{+0.205}_{-0.168}$	$0.518^{+0.227}_{-0.184}$	$0.263^{+0.114}_{-0.094}$	ไม่
2	$0.321^{+0.147}_{-0.115}$	$1.118^{+0.512}_{-0.402}$	$0.412^{+0.188}_{-0.148}$	$0.623^{+0.286}_{-0.224}$	$0.230^{+0.104}_{-0.083}$	ไม่
3	$0.575^{+0.186}_{-0.154}$	$3.230^{+1.043}_{-0.863}$	$0.799^{+0.258}_{-0.214}$	$1.800^{+0.582}_{-0.481}$	$0.445^{+0.144}_{-0.119}$	ไม่
4	$0.181^{+0.120}_{-0.093}$	$0.340^{+0.227}_{-0.173}$	$0.234^{+0.156}_{-0.120}$	$0.190^{+0.126}_{-0.097}$	$0.130^{+0.087}_{-0.066}$	ไม่
5	$0.070^{+0.083}_{-0.048}$	-	$0.091^{+0.107}_{-0.062}$	-	$0.051^{+0.059}_{-0.035}$	ไม่
6	$1.614^{+0.279}_{-0.277}$	$1.468^{+0.254}_{-0.252}$	$2.048^{+0.354}_{-0.352}$	$0.818^{+0.142}_{-0.140}$	$1.142^{+0.197}_{-0.197}$	ใช่
7	$8.374^{+0.633}_{-0.630}$	$8.354^{+0.632}_{-0.628}$	$10.649^{+0.806}_{-0.801}$	$4.657^{+0.352}_{-0.351}$	$5.936^{+0.449}_{-0.447}$	ไม่
8	$3.266^{+0.403}_{-0.400}$	$4.010^{+0.494}_{-0.491}$	$4.154^{+0.512}_{-0.509}$	$2.235^{+0.276}_{-0.274}$	$2.315^{+0.286}_{-0.283}$	ไม่
9	$1.482^{+0.269}_{-0.267}$	$1.314^{+0.238}_{-0.237}$	$1.886^{+0.343}_{-0.340}$	$0.732^{+0.133}_{-0.132}$	$1.051^{+0.191}_{-0.189}$	ใช่
10	$4.596^{+0.470}_{-0.466}$	$6.900^{+0.705}_{-0.700}$	$5.855^{+0.598}_{-0.594}$	$3.846^{+0.393}_{-0.390}$	$3.264^{+0.333}_{-0.332}$	ใช่
11	$0.664^{+0.200}_{-0.167}$	$0.670^{+0.202}_{-0.169}$	$0.851^{+0.256}_{-0.214}$	$0.373^{+0.113}_{-0.094}$	$0.474^{+0.143}_{-0.119}$	ไม่
12	$3.574^{+0.410}_{-0.407}$	$5.550^{+0.636}_{-0.633}$	$4.595^{+0.527}_{-0.524}$	$3.094^{+0.354}_{-0.353}$	$2.561^{+0.294}_{-0.292}$	ใช่
13	$0.940^{+0.213}_{-0.212}$	$1.534^{+0.348}_{-0.346}$	$1.214^{+0.275}_{-0.274}$	$0.855^{+0.194}_{-0.193}$	$0.677^{+0.153}_{-0.153}$	ไม่

ตาราง 8 (ต่อ) ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาวจักร NGC 7552

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net model flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด หรือไม่
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
14	$0.605^{+0.190}_{-0.157}$	$0.757^{+0.237}_{-0.197}$	$0.786^{+0.246}_{-0.204}$	$0.422^{+0.132}_{-0.110}$	$0.438^{+0.137}_{-0.114}$	ไม่
15	$0.276^{+0.141}_{-0.112}$	$0.487^{+0.250}_{-0.197}$	$0.365^{+0.188}_{-0.148}$	$0.271^{+0.140}_{-0.109}$	$0.203^{+0.105}_{-0.082}$	ไม่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาวจักร NGC 7552 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองพลาสมา, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่เข้ามาจากพลักซ์ที่คำนวณของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากพลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองพลาสมา, คอลัมน์ g : แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดหรือไม่โดยพิจารณาจากผลในคอลัมน์ f

4.2.2 ดาราจักร IC 5179

จากค่ากำลังส่องสว่างที่คำนวณได้จากแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืนในคอลัมน์ f ของตารางที่ 9 จะเห็นว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทุกแหล่งกำเนิดมีกำลังส่องสว่าง $\geq 10^{39}$ เอิริกต์อวีนานี ที่ซึ่งจากหัวข้อที่แล้วที่ได้ทำการระบุประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักรนี้ไป ผู้วิจัยพบว่ามีเพียง 2 แหล่งกำเนิด (ตำแหน่งที่ 4 และ 7) ที่สามารถระบุประเภทได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด แต่สำหรับแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 4 ที่อยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักรนั้น ถึงแม้ผู้วิจัยจะพบว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด และมีกำลังส่องสว่างสูงพอที่จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด แต่เพราะตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่อยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักร จึงมีความเป็นไปได้ว่าแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 4 นี้ อาจเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่อยู่ในบริเวณที่มีการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ที่บริเวณใจกลางดาราจักร ทำให้ไม่สามารถนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้ ในส่วนของแหล่งกำเนิดตำแหน่งอื่นๆที่อยู่ในหัวข้อที่แล้วไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้เนื่องจากจำนวนโฟตอนที่น้อยเกินไปนั้น แต่เมื่อพิจารณากำลังส่องสว่างก็พบว่าแหล่งกำเนิดเหล่านี้ (ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 5, 6, 8 และ 9) มีกำลังส่องสว่างที่มากพอที่จะนิยามให้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด และจากภาพประกอบที่ 21 ก็ จะเห็นว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดทั้ง 7 แหล่งกำเนิดไม่อยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักรหรือทับซ้อนกัน ผู้วิจัยจึงนิยามให้แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 5, 6, 8 และ 9 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดเช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 7 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าในดาราจักร IC 5179 ผู้วิจัยสามารถระบุแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้ 8 แหล่งกำเนิด

ตาราง 9 ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาวจักร IC 5179

แหล่งกำเนิด	Net rate ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$	Net model flux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$	Net lux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างเพียงพอ หรือไม่
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	$1.776^{+0.771}_{-0.597}$	$1.457^{+0.632}_{-0.490}$	$1.438^{+0.624}_{-0.484}$	$3.881^{+1.684}_{-1.305}$	$3.831^{+1.662}_{-1.290}$	ใช่
2	$0.827^{+0.567}_{-0.388}$	$0.351^{+0.240}_{-0.165}$	$0.671^{+0.460}_{-0.315}$	$0.935^{+0.639}_{-0.439}$	$1.788^{+1.225}_{-0.840}$	ใช่
3	$1.497^{+0.715}_{-0.544}$	$0.913^{+0.436}_{-0.332}$	$1.273^{+0.607}_{-0.463}$	$2.432^{+1.162}_{-0.884}$	$3.391^{+1.617}_{-1.233}$	ใช่
4	$2.987^{+0.978}_{-0.820}$	$1.356^{+0.444}_{-0.372}$	$2.426^{+0.794}_{-0.666}$	$3.612^{+1.183}_{-0.991}$	$6.463^{+2.115}_{-1.774}$	ไม่
5	$1.561^{+0.756}_{-0.591}$	$0.917^{+0.444}_{-0.347}$	$1.269^{+0.614}_{-0.480}$	$2.443^{+1.183}_{-0.925}$	$3.381^{+1.635}_{-1.279}$	ใช่
6	$0.651^{+0.570}_{-0.415}$	$0.317^{+0.278}_{-0.202}$	$0.530^{+0.464}_{-0.338}$	$0.844^{+0.741}_{-0.538}$	$1.412^{+1.236}_{-0.901}$	ใช่
7	$3.852^{+1.077}_{-0.915}$	$2.638^{+0.737}_{-0.627}$	$3.135^{+0.877}_{-0.745}$	$7.028^{+1.963}_{-1.671}$	$8.352^{+2.336}_{-1.985}$	ใช่
8	$0.656^{+0.557}_{-0.371}$	$0.514^{+0.437}_{-0.290}$	$0.533^{+0.454}_{-0.301}$	$1.369^{+1.164}_{-0.772}$	$1.420^{+1.209}_{-0.802}$	ใช่
9	$0.609^{+0.590}_{-0.356}$	$0.341^{+0.329}_{-0.199}$	$0.498^{+0.482}_{-0.291}$	$0.908^{+0.877}_{-0.530}$	$1.327^{+1.284}_{-0.776}$	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาวจักร IC 5179 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณแบนแบริจาดองเพาเวอร์ลอร์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากพลักซ์ที่คำนวณจากพลักซ์ที่คำนวณแบนแบริจาดองเพาเวอร์ลอร์, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ไม่ได้พิจารณาจากคอลัมน์ f โดยพิจารณาจากคอลัมน์ f
รังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างเพียงพอหรือไม่โดยพิจารณาจากคอลัมน์ f

4.2.3 ดาราจักร Arp 299

จากตารางที่ 10 เมื่อพิจารณากำลังส่องสว่างในคอลัมน์ที่ 6 พบว่า จากทั้งหมด 23 แหล่งกำเนิด มี 21 แหล่งกำเนิดที่มีกำลังส่องสว่าง $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาที สำหรับแหล่งกำเนิด ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ที่ในหัวข้อที่แล้วสามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย อีกทั้งทั้ง 2 แหล่งกำเนิดนี้ยังอยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักร ทำให้แหล่งกำเนิดทั้ง 2 แหล่งกำเนิดนี้ไม่ถูกนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ต่อมาคือ แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 6 ที่ถูกระบุว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด และเมื่อพิจารณากำลังส่องสว่างก็สูงพอที่จะถูกนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด แต่แหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 6 อยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักร อีกทั้งตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนี้ยังตรงกับตำแหน่งที่ในหลายงานวิจัยระบุว่า ที่ ณ ตำแหน่งนี้ คือ นิวเคลียสดาราจักรกัมมันต์ของดาราจักร NGC 3690 (Ballo et al., 2004; Ptak et al., 2015; A. Zezas, Ward, & Murray, 2003) ทำให้สรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 6 เป็นนิวเคลียสดาราจักรกัมมันต์ ต่อมาคือแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 18, 19 และ 21 ที่ถูกระบุว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย และกำลังส่องสว่างที่คำนวณได้ของแหล่งกำเนิดทั้ง 3 แหล่งกำเนิดนี้ $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาที อีกทั้งยังพบว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดทั้ง 3 แหล่งกำเนิดนี้อยู่ในบริเวณที่เป็นใจกลางดาราจักร IC 694 ทำให้แหล่งกำเนิดทั้ง 3 แหล่งกำเนิดนี้ถูกนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย ส่วนแหล่งกำเนิดที่มีกำลังส่องสว่างต่ำกว่า 10^{39} เอิร์กต่อวินาที อย่างแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 10 และ 22 นั้นจะถูกนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด สรุปได้ว่าในดาราจักร Arp 299 มีแหล่งกำเนิดที่ผู้วิจัยสามารถระบุได้ว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดอยู่ทั้งสิ้น 15 แหล่งกำเนิด

ตาราง 10 ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาวจักร Arp 299

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^3 \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net model flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด หรือไม่
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	1.649 ^{+0.319} _{-0.317}	1.983 ^{+0.384} _{-0.382}	1.495 ^{+0.290} _{-0.287}	5.502 ^{+1.006} _{-1.060}	4.148 ^{+0.805} _{-0.796}	ใช่
2	8.302 ^{+0.713} _{-0.709}	6.397 ^{+0.549} _{-0.546}	7.517 ^{+0.646} _{-0.641}	17.750 ^{+1.523} _{-1.515}	20.857 ^{+1.793} _{-1.778}	ใช่
3	15.437 ^{+0.942} _{-0.935}	15.096 ^{+0.921} _{-0.915}	13.961 ^{+0.852} _{-0.846}	41.887 ^{+2.555} _{-2.539}	38.738 ^{+2.364} _{-2.348}	ไม่
4	14.775 ^{+0.929} _{-0.923}	11.606 ^{+0.730} _{-0.725}	13.368 ^{+0.840} _{-0.835}	32.203 ^{+2.026} _{-2.011}	37.092 ^{+2.331} _{-2.317}	ไม่
5	3.816 ^{+0.493} _{-0.489}	3.480 ^{+0.449} _{-0.447}	3.451 ^{+0.446} _{-0.442}	9.656 ^{+1.246} _{-1.240}	9.575 ^{+1.238} _{-1.226}	ใช่
6	15.068 ^{+0.932} _{-0.926}	32.851 ^{+2.031} _{-2.020}	13.627 ^{+0.843} _{-0.837}	91.152 ^{+5.635} _{-5.605}	37.811 ^{+2.339} _{-2.323}	ไม่
7	0.427 ^{+0.218} _{-0.185}	3.631 ^{+1.862} _{-1.572}	0.386 ^{+0.198} _{-0.167}	10.075 ^{+5.166} _{-4.362}	1.071 ^{+0.549} _{-0.463}	ใช่
8	1.923 ^{+0.391} _{-0.390}	2.213 ^{+0.452} _{-0.448}	1.741 ^{+0.355} _{-0.353}	6.140 ^{+1.255} _{-1.243}	4.831 ^{+0.985} _{-0.980}	ใช่
9	3.087 ^{+0.460} _{-0.457}	2.876 ^{+0.428} _{-0.426}	2.796 ^{+0.417} _{-0.414}	7.980 ^{+1.188} _{-1.182}	7.758 ^{+1.157} _{-1.149}	ใช่
10	0.293 ^{+0.178} _{-0.142}	0.884 ^{+0.537} _{-0.429}	0.265 ^{+0.161} _{-0.129}	2.453 ^{+1.490} _{-1.191}	0.735 ^{+0.447} _{-0.358}	ไม่
11	2.487 ^{+0.394} _{-0.391}	3.525 ^{+0.557} _{-0.554}	2.248 ^{+0.355} _{-0.354}	9.781 ^{+1.545} _{-1.537}	6.238 ^{+0.985} _{-0.983}	ใช่
12	1.671 ^{+0.368} _{-0.365}	3.526 ^{+0.772} _{-0.772}	1.510 ^{+0.333} _{-0.330}	9.784 ^{+2.153} _{-2.142}	4.190 ^{+0.924} _{-0.916}	ใช่
13	2.072 ^{+0.382} _{-0.380}	3.092 ^{+0.571} _{-0.567}	1.872 ^{+0.346} _{-0.343}	8.579 ^{+1.585} _{-1.573}	5.194 ^{+0.960} _{-0.951}	ใช่

ตาราง 10 (ต่อ) ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร Arp 299

แหล่งกำเนิด	Net rate ($0.3 - 10.0$ keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux ($0.3 - 10.0$ keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$	Net model flux ($0.3 - 10.0$ keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$	Net lux ($0.3 - 10.0$ keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux ($0.3 - 10.0$ keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างเพียงพอ หรือไม่
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
14	$2.033^{+0.378}_{-0.376}$	$1.407^{+0.262}_{-0.260}$	$1.835^{+0.341}_{-0.339}$	$3.904^{+0.727}_{-0.721}$	$5.092^{+0.946}_{-0.941}$	ใช่
15	$2.419^{+0.396}_{-0.394}$	$2.252^{+0.369}_{-0.367}$	$2.191^{+0.359}_{-0.357}$	$6.249^{+1.023}_{-1.019}$	$6.079^{+0.996}_{-0.990}$	ใช่
16	$9.023^{+0.738}_{-0.733}$	$8.546^{+0.698}_{-0.695}$	$8.160^{+0.667}_{-0.663}$	$23.713^{+1.936}_{-1.929}$	$22.642^{+1.850}_{-1.840}$	ใช่
17	$0.680^{+0.235}_{-0.200}$	$2.863^{+0.989}_{-0.840}$	$0.615^{+0.212}_{-0.181}$	$7.944^{+2.744}_{-2.331}$	$1.706^{+0.589}_{-0.502}$	ใช่
18	$5.418^{+0.586}_{-0.583}$	$3.638^{+0.394}_{-0.391}$	$4.887^{+0.529}_{-0.525}$	$10.094^{+1.094}_{-1.085}$	$13.560^{+1.468}_{-1.457}$	ไม่
19	$16.127^{+0.983}_{-0.978}$	$17.150^{+1.046}_{-1.040}$	$14.549^{+0.887}_{-0.882}$	$47.586^{+2.902}_{-2.886}$	$40.369^{+2.461}_{-2.447}$	ไม่
20	$2.164^{+0.367}_{-0.365}$	$3.459^{+0.586}_{-0.583}$	$1.953^{+0.331}_{-0.330}$	$9.598^{+1.626}_{-1.618}$	$5.419^{+0.918}_{-0.916}$	ใช่
21	$3.039^{+0.466}_{-0.464}$	$2.000^{+0.302}_{-0.308}$	$2.743^{+0.421}_{-0.418}$	$5.549^{+0.838}_{-0.854}$	$7.611^{+1.168}_{-1.160}$	ไม่
22	$0.308^{+0.170}_{-0.129}$	$0.162^{+0.090}_{-0.068}$	$0.279^{+0.153}_{-0.117}$	$0.450^{+0.249}_{-0.189}$	$0.774^{+0.425}_{-0.324}$	ไม่
23	$0.530^{+0.207}_{-0.166}$	$0.403^{+0.156}_{-0.127}$	$0.484^{+0.188}_{-0.152}$	$1.118^{+0.433}_{-0.352}$	$1.343^{+0.522}_{-0.422}$	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp 299 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองพลาสมาออร์ดิเออร์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากพลักซ์ที่คำนวณจากพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากพลักซ์ที่คำนวณแบบจำลองพลาสมาออร์ดิเออร์, คอลัมน์ g : แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างเพียงพอหรือไม่โดยพิจารณาจากผลในคอลัมน์ f

4.2.4 ดาราจักร NGC 838

จากผลการคำนวณกำลังส่องสว่างจากแบบจำลองในคอลัมน์ f ตารางที่ 11 พบว่า แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทุกแหล่งกำเนิดมีกำลังส่องสว่าง $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาที สำหรับแหล่งกำเนิด ตำแหน่งที่ 3 ที่ผู้วิจัยระบุได้ในหัวข้อที่แล้วว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย และเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่อยู่ในบริเวณใจกลางดาราจักร จึงสามารถนิยามได้ว่าแหล่งกำเนิด ตำแหน่งที่ 3 นี้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย ในส่วนแหล่งกำเนิดอีก 3 แหล่งกำเนิด (ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 4) ที่ไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดในหัวข้อที่แล้วได้ แต่เมื่อพิจารณาที่กำลังส่องสว่างก็พบว่าแหล่งกำเนิดทั้ง 3 แหล่งกำเนิดมีกำลังส่องสว่างที่มากพอที่จะนิยามให้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ทำให้สามารถสรุปได้ว่าในดาราจักร NGC 838 ผู้วิจัยสามารถระบุแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้ 3 แหล่งกำเนิด

ตาราง 11 ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาวจักร NGC 838

แหล่งกำเนิด	Net rate ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net model flux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net lux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux ($0.3 - 10.0 \text{ keV}$) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างถึงยวด หรือไม่
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	$0.418^{+0.408}_{-0.250}$	$0.151^{+0.146}_{-0.091}$	$0.362^{+0.354}_{-0.216}$	$0.466^{+0.451}_{-0.281}$	$1.117^{+1.093}_{-0.666}$	ใช่
2	$0.902^{+0.574}_{-0.407}$	$1.269^{+0.808}_{-0.573}$	$0.727^{+0.462}_{-0.328}$	$3.916^{+2.494}_{-1.768}$	$2.244^{+1.425}_{-1.013}$	ใช่
3	$6.549^{+1.210}_{-1.203}$	$4.841^{+0.895}_{-0.889}$	$5.280^{+0.976}_{-0.970}$	$14.939^{+2.762}_{-2.743}$	$16.294^{+3.012}_{-2.993}$	ไม่
4	$1.022^{+0.576}_{-0.426}$	$1.953^{+1.099}_{-0.813}$	$0.825^{+0.464}_{-0.344}$	$6.027^{+3.391}_{-2.509}$	$2.546^{+1.432}_{-1.062}$	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาวจักร NGC 838 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณแบนแบริจาดของเพอร์ลอร์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากพลักซ์ที่คำนวณแบนแบริจาดของเพอร์ลอร์, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ไม่โดยพิจารณาจากผลในคอลัมน์ f รังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างหรือไม่โดยพิจารณาจากผลในคอลัมน์ g : แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พิจารณาเป็นแหล่งกำเนิด

4.2.5 ดาราจักร NGC 5653

จากผลการคำนวณกำลังส่องสว่างจากคอลัมน์ f ในตารางที่ 12 พบว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้ง 3 แหล่งกำเนิด มีกำลังส่องสว่าง $\geq 10^{39}$ เอิร์กต่อวินาที โดยจากหัวข้อที่แล้วที่พบว่าแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 1 และ 2 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย ซึ่งแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 2 เป็นแหล่งกำเนิดที่พบในบริเวณใจกลางดาราจักร จึงสามารถนิยามได้ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย ส่วนแหล่งกำเนิดตำแหน่งที่ 3 ที่ไม่สามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดได้ในหัวข้อที่แล้ว แต่จากการคำนวณกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดนี้ พบว่ามีกำลังส่องสว่างสูงพอที่จะเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด



ตาราง 12 ค่าพลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาวจักร NGC 5653

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$	Net model flux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2}$	Net lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.3 – 10.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด หรือไม่
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	$2.403^{+0.741}_{-0.621}$	$6.689^{+2.062}_{-1.729}$	$1.944^{+0.600}_{-0.502}$	$24.636^{+7.594}_{-6.368}$	$7.160^{+2.210}_{-1.849}$	ไม่
2	$1.140^{+0.569}_{-0.435}$	$0.627^{+0.313}_{-0.239}$	$0.923^{+0.461}_{-0.352}$	$2.309^{+1.153}_{-0.880}$	$3.399^{+1.698}_{-1.296}$	ไม่
3	$0.536^{+0.492}_{-0.313}$	$0.345^{+0.315}_{-0.202}$	$0.435^{+0.398}_{-0.254}$	$1.271^{+1.160}_{-0.744}$	$1.602^{+1.466}_{-0.935}$	ใช่

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาวจักร NGC 5653 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าพลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากพลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่คำนวณจากพลักซ์ที่คำนวณจากผลในคอลัมน์ f
รังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดหรือไม่โดยพิจารณาจากผลในคอลัมน์ f

4.3 กำลังส่องสว่างรวมในย่านรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่องสว่างกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่

จากการศึกษาการปลดปล่อยพลังงานในดาราจักรปกติ พบว่าการปลดปล่อยพลังงานในย่านรังสีเอกซ์ของดาราจักรมีความสัมพันธ์กับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในดาราจักรนั้นๆ ดังที่ได้รับการยืนยันจากในหลายงานวิจัย (Gilfanov et al., 2004; Grimm et al., 2003; Lehmer et al., 2008; Mineo et al., 2012a; Persic & Rephaeli, 2002, 2007; Ranalli et al., 2003) ซึ่งจากการศึกษาของ Mineo et al. (2012a) ที่ระบุว่าในดาราจักรปกตินั้น กำลังส่องสว่างรวมในย่านรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ ดังสมการ

$$L_{0.5-8.0keV}^{XRBs} (ergs^{-1}) = 2.61 \times 10^{39} SFR (M_{\odot}yr^{-1}) \quad (4-1)$$

เมื่อ $L_{0.5-8.0keV}^{XRBs}$ คือ กำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์
ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
 SFR คือ อัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในหน่วย $M_{\odot}yr^{-1}$

เนื่องจากดาราจักรที่ผู้วิจัยเลือกมาทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ที่สูงกว่าดาราจักรปกติคือ มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับ $10 M_{\odot}yr^{-1}$ ขึ้นไป โดยผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าเมื่อทำการพิจารณา กำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักรเหล่านี้จะมีค่าเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ที่ 4-1

เนื่องจากสมการ 4-1 พิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังส่องสว่างในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผู้วิจัยจึงทำการคำนวณกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทุกแหล่งกำเนิด โดยจะคำนวณจากพัลส์ที่ได้จากแบบจำลองเพาเวอร์ลॉว์ที่มีการดูดกลืนในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อให้ช่วงพลังงานสอดคล้องกับสมการ 4-1 โดยกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองเป็นค่าเดียวกับที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.2 ในส่วนของตารางรายละเอียดค่าพัลส์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดจะแสดงในภาคผนวก ก จากนั้นจึงทำการหาผลรวมของกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่พบในดาราจักรทั้ง

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด, แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะขยาย และ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (ยกเว้นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในบริเวณใจกลางดาราจักร) โดยจะใช้การคำนวณ 2 แบบด้วยกันคือ 1.) การคำนวณหา กำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด และ 2.) การคำนวณหา กำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดและแบบขยาย และในส่วนของกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จากในสมการความสัมพันธ์ที่ 4-1 จะคำนวณจากค่าอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ของแต่ละดาราจักรจากคอลัมน์ที่ 7 ในตารางที่ 1 ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 13

จากตารางที่ 13 จะพบว่ากำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดของดาราจักรทั้ง 5 ดาราจักร มีค่าน้อยกว่ากำลังส่องสว่างรวมที่คาดการณ์จากสมการที่ 4-1 อยู่ประมาณ 38 – 96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับกำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดในแต่ละดาราจักร ที่พบว่ามีค่าน้อยกว่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์ได้อยู่ที่ประมาณ 38 – 77 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ในส่วนของดาราจักร Arp 299 ผู้วิจัยพบว่ากำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดมีค่าน้อยกว่ากำลังส่องสว่างรวมที่คาดการณ์ได้ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าของกำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่พบในดาราจักรกลับพบว่ามีความมากกว่ากำลังส่องสว่างรวมที่คาดการณ์ได้อยู่ที่ 13.74 เปอร์เซ็นต์

จากผลการวิจัยที่ได้อธิบายไปทั้ง 3 หัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะทำการอภิปรายและสรุปผลการวิจัยในบทต่อไป

ตาราง 13 ผลรวมของกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักรในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

ดาราจักร (a)	กำลังส่องสว่างรวม		กำลังส่องสว่างรวม		เปอร์เซ็นต์สัดส่วนต่าง	
	ที่คาดการณ์จากดาราจักรปกติ (0.5 – 8.0 keV) 10^{39} ergs $^{-1}$ (b)	ที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุด (0.5 – 8.0 keV) 10^{39} ergs $^{-1}$ (c)	ที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมด (0.5 – 8.0 keV) 10^{39} ergs $^{-1}$ (e)	เปอร์เซ็นต์สัดส่วนต่าง (%) (d)	ที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมด (0.5 – 8.0 keV) 10^{39} ergs $^{-1}$ (f)	เปอร์เซ็นต์สัดส่วนต่าง (%) (f)
NGC 7552	24.795	$9.54^{+1.79}_{-1.61}$	$9.54^{+1.79}_{-1.61}$	$75.24^{+2.94}_{-2.96}$	$9.54^{+1.79}_{-1.61}$	$61.53^{+6.50}_{-7.22}$
IC 5179	35.235	$21.63^{+11.04}_{-8.19}$	$21.63^{+11.04}_{-8.19}$	$38.62^{+23.25}_{-31.34}$	$21.63^{+11.04}_{-8.19}$	$38.62^{+23.25}_{-31.34}$
Arp 299	191.052	$95.59^{+14.67}_{-14.14}$	$95.59^{+14.67}_{-14.14}$	$49.97^{+7.40}_{-7.68}$	$217.30^{+23.59}_{-23.00}$	$-13.74^{+12.34}_{-10.49}$ *
NGC 838	22.185	$5.23^{+3.80}_{-2.61}$	$5.23^{+3.80}_{-2.61}$	$76.41^{+11.75}_{-17.14}$	$5.23^{+3.80}_{-2.61}$	$76.41^{+11.75}_{-17.14}$
NGC 5653	28.71	$0.93^{+1.15}_{-0.66}$	$0.93^{+1.15}_{-0.66}$	$96.75^{+2.31}_{-3.98}$	$6.55^{+3.13}_{-2.27}$	$77.18^{+7.91}_{-10.92}$

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ชื่อดาราจักร, คอลัมน์ b : กำลังส่องสว่างรวมของดาราจักรที่คาดการณ์จากความสัมพันธ์ของดาราจักรปกติที่แสดงในสมการ 4-1, คอลัมน์ c : กำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดที่พบในดาราจักร, คอลัมน์ d : เปอร์เซ็นต์ส่วนของกำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดที่พบในดาราจักรเทียบกับกำลังส่องสว่างรวมของดาราจักรที่คาดการณ์จากความสัมพันธ์ของดาราจักรปกติ, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่พบในดาราจักร, คอลัมน์ f : เปอร์เซ็นต์ส่วนของกำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่พบในดาราจักรเทียบกับกำลังส่องสว่างรวมของดาราจักรที่คาดการณ์จากความสัมพันธ์ของดาราจักรปกติ, * : เครื่องหมายลบ แสดงถึงกำลังส่องสว่างรวมที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่พบในดาราจักร Arp 299 มีค่าสูงกว่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์จากสมการ 4-1

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 จำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด

จากหัวข้อที่ 4.1 ที่ผู้วิจัยทำการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักรทั้ง 5 ดาราจักร จำนวน 54 แหล่งกำเนิด เมื่อพิจารณากำลังส่องสว่างของแต่ละแหล่งกำเนิดเหล่านั้นในหัวข้อที่ 4.2 ทำให้สามารถระบุจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้ทั้งสิ้น 31 แหล่งกำเนิด ในคอลัมน์ที่ 3 ของตารางที่ 14 จะแสดงจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในแต่ละดาราจักรร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนของจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ได้มาจากค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังส่องสว่าง

ตาราง 14 จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในแต่ละดาราจักร

ดาราจักร	จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบ	จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบ ^a	จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในงานวิจัย Luangtip et al. 2015 ^a
NGC 7552	15	4^{+0}_{-2}	2^{+3}_{-1}
IC 5179	9	8^{+0}_{-4}	8^{+0}_{-3}
Arp 299	23	15^{+1}_{-3}	8^{+1}_{-0} [14]*
NGC 838	4	3 ± 1	2^{+1}_{-0}
NGC 5653	3	1 ± 1	1 ± 1
รวม	54	31^{+3}_{-11}	21^{+6}_{-5}

หมายเหตุ^a : ค่าความคลาดเคลื่อนในคอลัมน์ที่ 3 และ 4 คำนวณมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (ดูเพิ่มเติมในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5), * : จำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในงานวิจัยของ Anastosopoulou et al. 2016

จากตารางที่ 14 เมื่อพิจารณาจำนวนของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับในงานวิจัยของ Luangtip et al. (2015) พบว่าส่วนมากมีจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดที่สอดคล้องกัน แต่ในส่วนของดาราจักร Arp 299 ผู้วิจัยพบว่าจำนวนประชากรที่พบในงานวิจัยนี้มีจำนวนมากกว่าในงานวิจัย Luangtip et al. (2015) ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการใช้ข้อมูลการสังเกตการณ์ที่มีระยะเวลาการสังเกตการณ์ที่ยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตาม จำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดที่พบในงานวิจัยนี้ยังคงสอดคล้องกับจำนวนประชากรที่พบในงานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) ที่พบจำนวนประชากรประมาณ 14 แหล่งกำเนิด

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในดาราจักรที่ได้จากการศึกษาดาราจักรปกติของ Swartz et al. (2011b) แสดงให้เห็นว่าจะสามารถพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจำนวน 2 แหล่งกำเนิด ต่ออัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับ $1 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยพบว่าดาราจักรทั้ง 5 ดาราจักรที่ทำการศึกษามีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่รวมกันเท่ากับ $116 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ถ้าหากพิจารณาตามความสัมพันธ์ของ Swartz et al. (2011b) ผู้วิจัยควรจะพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดประมาณ 232 แหล่งกำเนิด แต่ผลจากการศึกษากลับพบจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราจักรทั้ง 5 ดาราจักรเพียง 31 แหล่งกำเนิด คิดเป็นสัดส่วน 0.27 แหล่งกำเนิด ต่ออัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ในระดับ $1 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ซึ่งค่าที่ได้นี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่พบในดาราจักรปกติอยู่ประมาณ 7.5 เท่า แสดงให้เห็นถึงการขาดหายไปของจำนวนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดและผลของการขาดหายไปของจำนวนประชากรนี้ก็ยังคงสอดคล้องกับผลที่พบในงานวิจัยก่อนหน้า (Anastasopoulou et al., 2016; Luangtip et al., 2015)

5.1.2 กำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์

ในส่วนของการพิจารณาค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้ นั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาขั้นตอนการคำนวณค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างจากในงานวิจัยของ Luangtip et al. (2015) และงานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) พบว่า

งานวิจัยทั้ง 2 ชิ้นนี้มีวิธีการในการคำนวณค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน

โดยในงานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) ที่ทำการศึกษาดาราจักร Arp 299 ใช้วิธีการคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างผ่านการวิเคราะห์สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ร่วมกับแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่เป็นแบบจำลองที่มีความหมายทางฟิสิกส์บนโปรแกรม XSPEC ซึ่งในงานวิจัยของ Anastasopoulou et al. (2016) นี้เลือกใช้ข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราศาสตร์ Arp 299 จำนวน 2 ข้อมูลการสังเกตการณ์ (หมายเลขการสังเกตการณ์ 15619 และ 15077) ซึ่งเป็นข้อมูลการสังเกตการณ์ที่มีระยะเวลาการสังเกตการณ์สุทธิที่ 38.49 กิโลวินาที และ 51.88 กิโลวินาที ตามลำดับ เมื่อทำการรวมข้อมูลการสังเกตการณ์ทั้ง 2 ข้อมูลเข้าด้วยกัน ทำให้มีระยะเวลาการสังเกตการณ์รวมทั้งสิ้น 90.37 กิโลวินาที ด้วยระยะเวลาการสังเกตการณ์รวมที่สูงมากนี้ ส่งผลให้จำนวนโฟตอนในแต่ละแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ระบุได้มีจำนวนโฟตอนเฉลี่ยประมาณ 50 โฟตอนขึ้นไป ทำให้สามารถทำการรวมกลุ่มโฟตอน (spectral binning) เพื่อวิเคราะห์ผลในรูปแบบของสเปกตรัมได้ ซึ่งปัจจัยนี้เองที่ไม่เหมือนกับข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราศาสตร์ IC 5179, NGC 838 และ NGC 5653 ที่มีระยะเวลาสังเกตการณ์สุทธิเพียงประมาณ 12 – 16 กิโลวินาที และมีจำนวนโฟตอนเฉลี่ยในแต่ละแหล่งกำเนิดไม่มากเพียงพอที่จะสร้างสเปกตรัมของข้อมูลขึ้นมาโดยตรง ยิ่งไปกว่านั้นผลการศึกษางานวิจัยนี้พบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราศาสตร์ Arp 299 ทั้งสิ้น 14 แหล่งกำเนิด ซึ่งแสดงถึงการขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด แต่เมื่อพิจารณากำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เทียบกับอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่พบว่าไม่ได้ขาดหายไป Anastasopoulou et al. (2016) จึงสรุปว่าปัจจัยที่ทำให้พบการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นผลมาจากความสับสนในการแยกแยะแหล่งกำเนิดที่อยู่ใกล้กัน

ต่อมาในส่วนของงานวิจัยของ Luangtip et al. (2015) ใช้วิธีการคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแต่ละแหล่งกำเนิดโดยใช้ web interface version of the Portable Interactive Multi-Mission Simulator (WEBPIMMs) ในการแปลง count rate ที่คำนวณได้ในช่วงพลังงาน 0.3 – 10.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของแต่ละแหล่งกำเนิดร่วมกับการใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ที่มีการดูดกลืนมาพิจารณาค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากการงานวิจัยนี้คือพบการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในกลุ่มดาราศาสตร์ตัวอย่างที่

ทำการศึกษานี้ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พบการขาดหายไปนั้นคาดว่ามาจากการถูกบดบังการสังเกตการณ์โดยกลุ่มแก๊สหนาภายในดาราจักร

อย่างไรก็ตาม จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวិธีการวิเคราะห์ข้อมูลการสังเกตการณ์โดยใช้ชุดคำสั่งต่างๆใน package ของ CIAO และวิธีการดำเนินงานของทั้ง 2 งานวิจัยก่อนหน้านี้ ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไปข้างต้น ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกใช้วิธีการคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างโดยใช้ชุดคำสั่งใน package ของ CIAO ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังที่ได้อธิบายวิธีการคำนวณไปในบทที่ 3 ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับข้อมูลการสังเกตการณ์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้

จากผลการวิจัยในหัวข้อที่ 4.3 ที่ทำการคำนวณกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบทั้งหมด และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์จากสมการผู้วิจัยพบว่าผลรวมของกำลังส่องสว่างที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบจุดที่พบในแต่ละดาราจักร มีค่าน้อยกว่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์อยู่ประมาณ 38 – 96 เปอร์เซ็นต์ และผลรวมของกำลังส่องสว่างที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดของดาราจักรทั้ง 4 ดาราจักรคือ ดาราจักร NGC 7552, IC 5179, NGC 838 และ NGC 5653 มีค่าน้อยกว่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์อยู่ประมาณ 38 – 77 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่ากำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากค่าคาดการณ์ในดาราจักรปกติ ซึ่งการที่พบการขาดหายไปของกำลังส่องสว่างรวมจากค่าคาดการณ์ในดาราจักรปกตินั้น สอดคล้องกับที่พบการขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราจักรเหล่านี้เช่นกัน อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลที่พบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Luangtip et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยกลับพบว่าผลรวมของกำลังส่องสว่างที่คำนวณได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมด (รวมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะแบบขยาย) ของดาราจักร Arp 299 มีค่ามากกว่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์อยู่ที่ประมาณ 13.74 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลรวมของกำลังส่องสว่างที่ในงานวิจัยของ (Anastasopoulou et al., 2016) คำนวณได้ และแสดงให้เห็นว่าสำหรับดาราจักร Arp 299 นั้นพบการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด แต่ไม่พบการขาดหายไปของกำลังส่องสว่างรวม จากภาพประกอบที่ 13 ในบทที่ 3 จะเห็นว่าโครงสร้างและลักษณะการแผ่รังสีของดาราจักร Arp 299 มีความซับซ้อนและหนาแน่นมากกว่าอีก 4 ดาราจักรที่ทำการศึกษา และหากพิจารณาจากโครงสร้างและตำแหน่งที่พบแหล่งกำเนิดในดาราจักรทั้ง 4 นี้ จะพบว่ามีความซับซ้อนการแผ่รังสีในตำแหน่งที่ไม่ซับซ้อนและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดค่อนข้างอยู่อย่างเป็นอิสระต่อกัน (ไม่ซ้อนทับกัน) ทำให้การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดมีความแม่นยำ

สูง และหากพิจารณาเฉพาะผลการวิจัยที่ได้จากดาราจักรทั้ง 4 ดาราจักร (ดาราจักร NGC 7552, IC 5179, NGC 838 และ NGC 5653) ผลที่ได้ชี้ไปในทิศทางเดียวกันคือกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มีค่าต่ำกว่าค่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์จากดาราจักรปกติและสอดคล้องกับการพบการขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด ผลที่ได้นี้ยืนยันว่าสำหรับดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดส่วนใหญ่ (ยกเว้นดาราจักร Arp 299) กำลังส่องสว่างและจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จะขาดหายไปเมื่อเทียบกับค่าคาดการณ์ในดาราจักรปกติ

โดยปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการขาดหายไปของทั้งจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดและกำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของดาราจักรที่ทำการศึกษา มีความเป็นไปได้ว่าอาจจะมาจากสภาวะความเป็นโลหะสูงภายในดาราจักรที่ทำให้กระบวนการที่ก่อให้เกิดประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดลดลง (Basu-Zych, Lehmer, Hornschemeier, Bouwens, et al., 2013 ; Basu-Zych, Lehmer, Hornschemeier, Gonçalves, et al., 2013; Brorby, Kaaret, & Prestwich, 2014; Mapelli, Ripamonti, Zampieri, & Colpi, 2011; Prestwich et al., 2013) ความเป็นไปได้ต่อมาคืออายุของดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดที่น้อยเกินไปส่งผลให้กระบวนการการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ไม่สัมพันธ์กับการปรากฏของประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด (Clemens, Scaife, Vega, & Bressan, 2010; Goldader, Joseph, Doyon, & Sanders, 1997; Linden et al., 2010; Vega et al., 2008) อย่างไรก็ตาม Luangtip et al. (2015) สรุปว่าปัจจัยทั้ง 2 นี้ไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวด แต่สาเหตุหลักน่าจะเกิดจากการถูกบดบังการสังเกตการณ์จากกลุ่มฝุ่น (dust) และแก๊สที่หนาแน่นที่ปกคลุมรอบบริเวณที่มีการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ที่ปกคลุมรอบดาราจักร เนื่องจากกลุ่มฝุ่นและแก๊สเหล่านี้ที่บดบังแสงต่อรังสียูวีและรังสีเอกซ์ ทำให้รังสีเอกซ์บางส่วนถูกดูดกลืนผ่านกระบวนการ photoionization และพลังงานส่วนที่ถูกดูดกลืนไปจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในย่านรังสีอินฟราเรดผ่านทางกระบวนการ thermal radiation ซึ่งกระบวนการนี้เองที่ส่งผลให้กำลังส่องสว่างในย่านรังสีเอกซ์ของดาราจักรลดลงในขณะที่กำลังส่องสว่างในย่านรังสีอินฟราเรดของดาราจักรมีค่าเพิ่มมากขึ้น

5.2 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลการสังเกตการณ์ของดาราจักรที่มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงจำนวน 5 ดาราจักร ได้แก่ ดาราจักร NGC 7552, ดาราจักร IC 5179, ดาราจักร Arp 299, ดาราจักร NGC 838 และ ดาราจักร NGC 5653 ที่ถูกสังเกตการณ์โดยกล้องโทรทรรศน์เอกซเรย์จันทรา จากนั้นผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม CIAO โดยเริ่มจากการลดทอนข้อมูลการสังเกตการณ์ที่ถูกบดบังจากรังสีคอสมิกพื้นหลัง แล้วจึงทำการระบุตำแหน่งและประเภทของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในแต่ละดาราจักร

โดยผู้วิจัยสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในทั้ง 5 ดาราจักรได้ทั้งสิ้น 54 แหล่งกำเนิด จากนั้นคำนวณฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแต่ละแหล่งกำเนิดทำให้สามารถนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดได้จำนวน 31 แหล่งกำเนิด เมื่อพิจารณาจากอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ของทั้ง 5 ดาราจักรที่มีค่ารวมกันเท่ากับ $116 \text{ M}_{\odot} \text{yr}^{-1}$ คิดเป็นสัดส่วนที่จะพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดจำนวน 0.27 แหล่งกำเนิดต่ออัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ $1 \text{ M}_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ซึ่งค่าที่ได้นี้ต่ำกว่าค่าที่พบในดาราจักรปกติถึงประมาณ 7.5 เท่า ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณากำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักรที่ทำการศึกษาค้นคว้าสำหรับดาราจักร Arp 299 ซึ่งเป็นดาราจักรที่สองดาราจักรกำลังรวมตัวกันทำให้มีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์สูง พบว่ามีการขาดหายไปของจำนวนประชากรแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดเช่นเดียวกับที่พบในอีก 4 ดาราจักรที่ทำการศึกษาค้นคว้า แต่สำหรับดาราจักรนี้กลับไม่พบการขาดหายไปของกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทั้งหมดที่พบ อย่างไรก็ตามสำหรับกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่พบในดาราจักรที่เหลืออีก 4 ดาราจักรมีค่าน้อยกว่ากำลังส่องสว่างที่คาดการณ์จากดาราจักรปกติอยู่ประมาณ 38 – 77 เปอร์เซ็นต์ โดยการขาดหายไปของจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดและกำลังส่องสว่างรวมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์นั้นอาจจะอธิบายได้ด้วยสมมติฐานหลักที่ว่า แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดส่วนใหญ่ถูกบดบังการสังเกตการณ์จากกลุ่มฝุ่นแก๊สที่มีลักษณะหนาแน่นในบริเวณที่มีกระบวนการการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่ของดาราจักร

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้แสดงผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้และอภิปรายเพื่อสรุปผลการวิจัยไปแล้วนั้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่า ถ้าทำการศึกษากลุ่มตัวอย่างของดาราจักรที่มีกำลังส่องสว่างสูงในย่านรังสีอินฟราเรดอันเนื่องมาจากมีอัตราการก่อตัวของดาวฤกษ์เกิดใหม่สูงด้วย

จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่มากขึ้น จะสามารถวิเคราะห์แนวโน้มของผลการวิจัยเพื่อนำไปสู่การหาสมการความสัมพันธ์ของการจะพบจำนวนประชากรของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างยิ่งยวดในดาราจักรเหล่านี้ได้ เช่นเดียวกับที่ได้จากการศึกษาดาราจักรปกติ



บรรณานุกรม

- Anastasopoulou, K., Zezas, A., Ballo, L., & Della Ceca, R. (2016). A deep Chandra observation of the interacting star-forming galaxy Arp 299. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(4), 3570-3586.
- Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J., Grefenstette, B. W., Chakrabarty, D., Furst, F., . . . Zhang, W. W. (2014). An ultraluminous X-ray source powered by an accreting neutron star. *Nature*, 514(7521), 202-+.
- Ballo, L., Braitto, V., Della Ceca, R., Maraschi, L., Tavecchio, F., & Dadina, M. (2004). Arp 299: A Second Merging System with Two Active Nuclei? *The Astrophysical Journal*, 600, 634-639.
- Basu-Zych, A. R., Lehmer, B. D., Hornschemeier, A. E., Bouwens, R. J., Fragos, T., Oesch, P. A., . . . Zezas, A. (2013). The X-Ray Star Formation Story as Told by Lyman Break Galaxies in the 4 Ms CDF-S. *The Astrophysical Journal*, 762, 45.
- Basu-Zych, A. R., Lehmer, B. D., Hornschemeier, A. E., Gonçalves, T. S., Fragos, T., Heckman, T. M., . . . Schiminovich, D. (2013). Evidence for Elevated X-Ray Emission in Local Lyman Break Galaxy Analogs. *The Astrophysical Journal*, 774, 152.
- Bauer, F. E., Alexander, D. M., Brandt, W. N., Hornschemeier, A. E., Vignali, C., Garmire, G. P., & Schneider, D. P. (2002). The Chandra Deep Field North Survey. XII. The Link between Faint X-Ray and Radio Source Populations. *The Astronomical Journal*, 124, 2351.
- Brorby, M., Kaaret, P., & Prestwich, A. (2014). X-ray binary formation in low-metallicity blue compact dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441, 2346-2353.
- Clemens, M. S., Scaife, A., Vega, O., & Bressan, A. (2010). Starburst evolution: free-free absorption in the radio spectra of luminous IRAS galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405, 887-897.
- Colbert, E. J. M., & Mushotzky, R. F. (1999). The Nature of Accreting Black Holes in Nearby Galaxy Nuclei. *The Astrophysical Journal*, 519(1), 89-107.

- Fabbiano, G. (1988). The X-Ray Emission of M81 and Its Nucleus. *The Astrophysical Journal*, 325, 544.
- Fabbiano, G. (1989). X Rays From Normal Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 27(1), 87-138.
- Fabbiano, G. (2006). Populations of X-Ray Sources in Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 44, 323.
- Gilfanov, M., Grimm, H.-J., & Sunyaev, R. (2004). Statistical properties of the combined emission of a population of discrete sources: astrophysical implications. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351, 1365.
- Gladstone, J. C., Roberts, T. P., & Done, C. (2009). The ultraluminous state. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 397(4), 1836-1851.
- Goldader, J. D., Joseph, R. D., Doyon, R., & Sanders, D. B. (1997). Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies at 2 Microns. III. Analysis for Galaxies with $\log(L_{\text{IR}}/L_{\odot}) > \sim 11.2$. *The Astrophysical Journal*, 474, 104-120.
- Grimm, H.-J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. (2003). High-mass X-ray binaries as a star formation rate indicator in distant galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 339, 793.
- Heckman, T. M., Armus, L., Weaver, K. A., & Wang, J. (1999). An X-Ray and Optical Investigation of the Starburst-driven Superwind in the Galaxy Merger Arp 299. *The Astrophysical Journal*, 517(1), 130-147.
- Kaaret, P., Simet, M. G., & Lang, C. C. (2006). A 62 Day X-Ray Periodicity and an X-Ray Flare from the Ultraluminous X-Ray Source in M82. *The Astrophysical Journal*, 646, 174.
- Lehmer, B. D., Alexander, D. M., Bauer, F. E., Brandt, W. N., Goulding, A. D., Jenkins, L. P., . . . Roberts, T. P. (2010). A Chandra perspective on galaxy-wide X-ray binary emission and its correlation with star formation rate and stellar mass: New results from luminous infrared galaxies. *The Astrophysical Journal*, 724(1), 559-571.
- Lehmer, B. D., Brandt, W. N., Alexander, D. M., Bell, E. F., Hornschemeier, A. E., McIntosh,

- D. H., . . . Wolf, C. (2008). Tracing the Mass-Dependent Star Formation History of Late-Type Galaxies Using X-Ray Emission: Results from the Chandra Deep Fields. *The Astrophysical Journal*, 681, 1163.
- Linden, T., Kalogera, V., Sepinsky, J. F., Prestwich, A., Zezas, A., & Gallagher, J. S. (2010). The Effect of Starburst Metallicity on Bright X-ray Binary Formation Pathways. *The Astrophysical Journal*, 725, 1984-1994.
- Luangtip, W., Roberts, T. P., Mineo, S., Lehmer, B. D., Alexander, D. M., Jackson, F. E., . . . Fischer, J. L. (2015). A deficit of ultraluminous X-ray sources in luminous infrared galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(1), 470-492.
- Mapelli, M., Ripamonti, E., Zampieri, L., & Colpi, M. (2011). Remnants of massive metal-poor stars: Viable engines for ultra-luminous X-ray sources. *Astronomische Nachrichten*, 332, 414.
- Miller, J. M., Fabbiano, G., Miller, M. C., & Fabian, A. C. (2003). X-Ray Spectroscopic Evidence for Intermediate-Mass Black Holes: Cool Accretion Disks in Two Ultraluminous X-Ray Sources. *The Astrophysical Journal*, 585(1), L37-L40.
- Miller, J. M., Fabian, A. C., & Miller, M. C. (2004). A Comparison of Intermediate-Mass Black Hole Candidate Ultraluminous X-Ray Sources and Stellar-Mass Black Holes. *The Astrophysical Journal*, 614(2), L117-L120.
- Mineo, S., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. (2012a). X-ray emission from star-forming galaxies – I. High-mass X-ray binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(3), 2095-2115.
- Mineo, S., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. (2012b). X-ray emission from star-forming galaxies — II. Hot interstellar medium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426(3), 1870-1883.
- Mizuno, T., Ohnishi, T., Kubota, A., Makishima, K., & Tashiro, M. (1999). ASCA Observations of Two Ultra-Luminous Compact X-Ray Sources in the Edge-On Spiral Galaxy NGC 4565. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 51, 663.
- Okada, K., Dotani, T., Makishima, K., Mitsuda, K., & Mihara, T. (1998). ASCA Observation

- of Bright X-Ray Sources in the Nearby Spiral Galaxy IC 342. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 50, 25.
- Persic, M., & Rephaeli, Y. (2002). X-ray spectral components of starburst galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 382, 843.
- Persic, M., & Rephaeli, Y. (2007). Galactic star formation rates gauged by stellar end-products. *Astronomy and Astrophysics*, 463, 481.
- Poutanen, J., Lipunova, G., Fabrika, S., Butkevich, A. G., & Abolmasov, P. (2007). Supercritically accreting stellar mass black holes as ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 377(3), 1187-1194.
- Prestwich, A. H., Tsantaki, M., Zezas, A., Jackson, F., Roberts, T. P., Foltz, R., . . . Kalogera, V. (2013). Ultra-luminous X-Ray Sources in the Most Metal Poor Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 769, 92.
- Ptak, A., Hornschemeier, A., Zezas, A., Lehmer, B., Yukita, M., Wik, D., . . . Zhang, W. W. (2015). A Focused, Hard X-Ray Look at Arp 299 with NuSTAR. *The Astrophysical Journal*, 800, 104.
- Ranalli, P., Comastri, A., & Setti, G. (2003). The 2-10 keV luminosity as a Star Formation Rate indicator. *Astronomy and Astrophysics*, 399, 39.
- Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. (1973). Reprint of 1973A&A....24..337S. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astronomy and Astrophysics*, 500, 33.
- Stobbart, A. M., Roberts, T. P., & Wilms, J. (2006). XMM–Newton observations of the brightest ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368(1), 397-413.
- Swartz, D. A., Ghosh, K. K., Tennant, A. F., & Wu, K. (2004). The Ultraluminous X-Ray Source Population from the Chandra Archive of Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 154, 519.
- Swartz, D. A., Soria, R., Tennant, A. F., & Yukita, M. (2011a). A COMPLETE SAMPLE OF ULTRALUMINOUS X-RAY SOURCE HOST GALAXIES. *The Astrophysical Journal*, 741(1), 49.
- Swartz, D. A., Soria, R., Tennant, A. F., & Yukita, M. (2011b). A Complete Sample of

- Ultraluminous X-ray Source Host Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 741, 49.
- Vega, O., Clemens, M. S., Bressan, A., Granato, G. L., Silva, L., & Panuzzo, P. (2008).
Modelling the spectral energy distribution of ULIRGs. II. The energetic environment
and the dense interstellar medium. *Astronomy and Astrophysics*, 484, 631-653.
- Walton, D. J., Roberts, T. P., Mateos, S., & Heard, V. (2011). 2XMM ultraluminous X-ray
source candidates in nearby galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical
Society*, 416, 1844.
- Zampieri, L., & Roberts, T. P. (2009). Low-metallicity natal environments and black hole
masses in ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical
Society*, 400(2), 677-686.
- Zezas, A., Ward, M. J., & Murray, S. S. (2003). Chandra Observations of the X-Ray-
luminous Star-forming Galaxy Merger Arp 299. *The Astrophysical Journal*, 594,
L31-L34.
- Zezas, A. L., Georgantopoulos, I., & Ward, M. J. (1998). ROSATASCA observations of X-
ray luminous starburst galaxies: NGC 3310 and 3690. *Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society*, 301, 915-925.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการคำนวณค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทุกแหล่งกำเนิดที่พบในแต่ละดาราจักรด้วยแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

ตาราง ก (ต่อ) ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร NGC 7552 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด (a)	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$ (b)	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (c)	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (d)	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$ (e)	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$ (f)
1	$0.343^{+0.153}_{-0.124}$	$0.585^{+0.260}_{-0.211}$	$0.392^{+0.175}_{-0.141}$	$0.326^{+0.145}_{-0.118}$	$0.219^{+0.097}_{-0.079}$
2	$0.323^{+0.146}_{-0.114}$	$0.218^{+0.099}_{-0.077}$	$0.369^{+0.166}_{-0.131}$	$0.122^{+0.055}_{-0.043}$	$0.206^{+0.092}_{-0.073}$
3	$0.529^{+0.178}_{-0.147}$	$0.569^{+0.191}_{-0.158}$	$0.655^{+0.220}_{-0.182}$	$0.317^{+0.107}_{-0.088}$	$0.365^{+0.123}_{-0.101}$
4	$0.153^{+0.108}_{-0.079}$	$0.141^{+0.100}_{-0.073}$	$0.176^{+0.125}_{-0.091}$	$0.079^{+0.055}_{-0.041}$	$0.098^{+0.070}_{-0.051}$
5	$0.010^{+0.059}_{-0}$	$0.015^{+0.085}_{-0}$	$0.012^{+0.067}_{-0}$	$0.008^{+0.048}_{-0}$	$0.007^{+0.037}_{-0}$
6	$1.607^{+0.278}_{-0.277}$	$1.390^{+0.240}_{-0.240}$	$1.815^{+0.315}_{-0.312}$	$0.775^{+0.134}_{-0.134}$	$1.012^{+0.175}_{-0.174}$
7	$8.407^{+0.636}_{-0.632}$	$8.226^{+0.623}_{-0.618}$	$9.520^{+0.720}_{-0.716}$	$4.585^{+0.347}_{-0.344}$	$5.306^{+0.402}_{-0.399}$
8	$3.249^{+0.402}_{-0.399}$	$3.901^{+0.483}_{-0.479}$	$3.680^{+0.455}_{-0.453}$	$2.174^{+0.270}_{-0.267}$	$2.051^{+0.254}_{-0.252}$
9	$1.470^{+0.265}_{-0.264}$	$1.283^{+0.231}_{-0.230}$	$1.665^{+0.301}_{-0.298}$	$0.715^{+0.129}_{-0.128}$	$0.928^{+0.168}_{-0.166}$
10	$4.574^{+0.471}_{-0.469}$	$4.866^{+0.502}_{-0.498}$	$5.187^{+0.535}_{-0.531}$	$2.712^{+0.280}_{-0.277}$	$2.891^{+0.298}_{-0.296}$
11	$0.659^{+0.197}_{-0.164}$	$0.539^{+0.161}_{-0.134}$	$0.752^{+0.226}_{-0.187}$	$0.300^{+0.090}_{-0.074}$	$0.419^{+0.126}_{-0.104}$
12	$3.505^{+0.409}_{-0.406}$	$3.733^{+0.435}_{-0.433}$	$4.011^{+0.467}_{-0.465}$	$2.081^{+0.242}_{-0.242}$	$2.236^{+0.260}_{-0.259}$
13	$0.932^{+0.212}_{-0.210}$	$1.467^{+0.334}_{-0.331}$	$1.071^{+0.244}_{-0.242}$	$0.818^{+0.186}_{-0.185}$	$0.597^{+0.136}_{-0.135}$

ตาราง ก (ต่อ) ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร NGC 7552 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
14	$0.585^{+0.185}_{-0.154}$	$0.754^{+0.239}_{-0.197}$	$0.676^{+0.214}_{-0.177}$	$0.420^{+0.133}_{-0.110}$	$0.377^{+0.119}_{-0.099}$
15	$0.278^{+0.136}_{-0.104}$	$0.270^{+0.133}_{-0.100}$	$0.328^{+0.160}_{-0.123}$	$0.150^{+0.075}_{-0.055}$	$0.183^{+0.089}_{-0.069}$

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 7552 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณจากพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์

ตาราง ข ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ใน
ดาราจักร IC 5179 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
1	$1.533^{+0.737}_{-0.562}$	$1.228^{+0.591}_{-0.450}$	$1.127^{+0.542}_{-0.413}$	$3.271^{+1.575}_{-1.198}$	$3.002^{+1.444}_{-1.100}$
2	$0.820^{+0.589}_{-0.410}$	$0.297^{+0.212}_{-0.149}$	$0.604^{+0.434}_{-0.302}$	$0.791^{+0.565}_{-0.397}$	$1.609^{+1.156}_{-0.804}$
3	$1.540^{+0.745}_{-0.567}$	$0.828^{+0.400}_{-0.305}$	$1.184^{+0.572}_{-0.436}$	$2.206^{+1.065}_{-0.813}$	$3.154^{+1.524}_{-1.161}$
4	$2.865^{+0.984}_{-0.816}$	$1.343^{+0.461}_{-0.382}$	$2.113^{+0.725}_{-0.602}$	$3.578^{+1.228}_{-1.018}$	$5.629^{+1.931}_{-1.604}$
5	$1.559^{+0.805}_{-0.633}$	$0.904^{+0.466}_{-0.367}$	$1.151^{+0.594}_{-0.468}$	$2.408^{+1.242}_{-0.977}$	$3.066^{+1.583}_{-1.246}$
6	$0.544^{+0.537}_{-0.363}$	$0.202^{+0.199}_{-0.135}$	$0.402^{+0.396}_{-0.269}$	$0.538^{+0.530}_{-0.360}$	$1.071^{+1.055}_{-0.717}$
7	$3.760^{+1.092}_{-0.916}$	$2.590^{+0.752}_{-0.631}$	$2.778^{+0.806}_{-0.677}$	$6.900^{+2.003}_{-1.681}$	$7.401^{+2.147}_{-1.804}$
8	$0.642^{+0.562}_{-0.374}$	$0.333^{+0.290}_{-0.194}$	$0.474^{+0.415}_{-0.276}$	$0.887^{+0.773}_{-0.517}$	$1.263^{+1.105}_{-0.736}$
9	$0.536^{+0.521}_{-0.315}$	$0.315^{+0.306}_{-0.185}$	$0.398^{+0.386}_{-0.234}$	$0.839^{+0.815}_{-0.493}$	$1.060^{+1.029}_{-0.623}$

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร IC 5179 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอร์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณจากพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอร์

ตาราง ค ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ใน

ดาราจักร Arp 299 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
1	1.615 ^{+0.321} _{-0.319}	1.923 ^{+0.382} _{-0.380}	1.322 ^{+0.263} _{-0.261}	5.336 ^{+1.060} _{-1.055}	3.668 ^{+0.730} _{-0.724}
2	8.286 ^{+0.720} _{-0.716}	6.371 ^{+0.553} _{-0.550}	6.775 ^{+0.589} _{-0.585}	17.678 ^{+1.534} _{-1.526}	18.799 ^{+1.634} _{-1.624}
3	15.313 ^{+0.972} _{-0.966}	14.213 ^{+0.902} _{-0.896}	12.506 ^{+0.794} _{-0.788}	39.437 ^{+2.503} _{-2.486}	34.700 ^{+2.204} _{-2.186}
4	14.641 ^{+0.958} _{-0.952}	8.770 ^{+0.574} _{-0.571}	11.961 ^{+0.782} _{-0.778}	24.334 ^{+1.593} _{-1.584}	33.188 ^{+2.170} _{-2.159}
5	3.806 ^{+0.498} _{-0.494}	3.463 ^{+0.452} _{-0.450}	3.109 ^{+0.406} _{-0.404}	9.609 ^{+1.254} _{-1.249}	8.627 ^{+1.126} _{-1.121}
6	15.063 ^{+0.964} _{-0.957}	21.625 ^{+1.383} _{-1.375}	12.301 ^{+0.787} _{-0.782}	60.003 ^{+3.837} _{-3.815}	34.132 ^{+2.183} _{-2.170}
7	0.403 ^{+0.221} _{-0.184}	0.179 ^{+0.097} _{-0.082}	0.329 ^{+0.180} _{-0.150}	0.497 ^{+0.269} _{-0.228}	0.913 ^{+0.499} _{-0.416}
8	1.911 ^{+0.407} _{-0.404}	0.911 ^{+0.193} _{-0.193}	1.563 ^{+0.332} _{-0.330}	2.528 ^{+0.535} _{-0.536}	4.337 ^{+0.921} _{-0.916}
9	3.070 ^{+0.466} _{-0.463}	2.858 ^{+0.434} _{-0.441}	2.511 ^{+0.381} _{-0.379}	7.930 ^{+1.204} _{-1.224}	6.967 ^{+1.057} _{-1.051}
10	0.259 ^{+0.174} _{-0.134}	0.242 ^{+0.162} _{-0.125}	0.212 ^{+0.141} _{-0.110}	0.671 ^{+0.450} _{-0.346}	0.588 ^{+0.391} _{-0.305}
11	2.370 ^{+0.388} _{-0.386}	3.485 ^{+0.571} _{-0.567}	1.934 ^{+0.317} _{-0.314}	9.670 ^{+1.584} _{-1.573}	5.366 ^{+0.880} _{-0.871}
12	1.591 ^{+0.370} _{-0.368}	0.327 ^{+0.077} _{-0.075}	1.298 ^{+0.302} _{-0.300}	0.907 ^{+0.214} _{-0.208}	3.602 ^{+0.838} _{-0.833}
13	1.970 ^{+0.388} _{-0.385}	1.678 ^{+0.330} _{-0.328}	1.608 ^{+0.316} _{-0.315}	4.656 ^{+0.916} _{-0.910}	4.462 ^{+0.877} _{-0.874}
14	2.036 ^{+0.382} _{-0.379}	1.368 ^{+0.256} _{-0.255}	1.660 ^{+0.312} _{-0.309}	3.796 ^{+0.710} _{-0.708}	4.606 ^{+0.866} _{-0.857}
15	2.347 ^{+0.389} _{-0.388}	2.281 ^{+0.379} _{-0.376}	1.919 ^{+0.319} _{-0.317}	6.329 ^{+1.052} _{-1.043}	5.325 ^{+0.885} _{-0.880}
16	9.027 ^{+0.765} _{-0.761}	7.874 ^{+0.667} _{-0.664}	7.372 ^{+0.625} _{-0.621}	21.848 ^{+1.851} _{-1.842}	20.455 ^{+1.734} _{-1.723}
17	0.573 ^{+0.224} _{-0.185}	0.487 ^{+0.190} _{-0.157}	0.468 ^{+0.182} _{-0.151}	1.351 ^{+0.527} _{-0.435}	1.299 ^{+0.505} _{-0.419}
18	5.144 ^{+0.571} _{-0.567}	2.611 ^{+0.289} _{-0.288}	4.190 ^{+0.465} _{-0.462}	7.245 ^{+0.802} _{-0.799}	11.626 ^{+1.290} _{-1.282}
19	15.793 ^{+0.982} _{-0.976}	17.081 ^{+1.062} _{-1.056}	12.866 ^{+0.800} _{-0.795}	47.395 ^{+2.946} _{-2.930}	35.699 ^{+2.220} _{-2.206}
20	2.071 ^{+0.370} _{-0.368}	2.432 ^{+0.435} _{-0.431}	1.687 ^{+0.302} _{-0.299}	6.748 ^{+1.207} _{-1.196}	4.681 ^{+0.838} _{-0.830}
21	2.873 ^{+0.458} _{-0.455}	2.000 ^{+0.318} _{-0.317}	2.342 ^{+0.373} _{-0.371}	5.549 ^{+0.883} _{-0.879}	6.498 ^{+1.035} _{-1.029}

ตาราง ค (ต่อ) ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ใน
ดาราจักร Arp 299 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
22	$0.308^{+0.181}_{-0.137}$	$0.105^{+0.062}_{-0.047}$	$0.252^{+0.147}_{-0.113}$	$0.291^{+0.172}_{-0.130}$	$0.699^{+0.408}_{-0.313}$
23	$0.523^{+0.210}_{-0.166}$	$0.402^{+0.161}_{-0.128}$	$0.431^{+0.172}_{-0.137}$	$1.115^{+0.447}_{-0.355}$	$1.196^{+0.477}_{-0.380}$

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร Arp 299 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณจากพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอว์

ตาราง ง ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร NGC 838 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
1	$0.409^{+0.447}_{-0.278}$	$0.150^{+0.164}_{-0.102}$	$0.322^{+0.351}_{-0.219}$	$0.463^{+0.506}_{-0.315}$	$0.994^{+1.083}_{-0.676}$
2	$0.875^{+0.595}_{-0.412}$	$1.253^{+0.853}_{-0.590}$	$0.640^{+0.436}_{-0.301}$	$3.867^{+2.632}_{-1.821}$	$1.975^{+1.346}_{-0.929}$
3	$6.398^{+1.244}_{-1.237}$	$4.575^{+0.890}_{-0.884}$	$4.686^{+0.911}_{-0.906}$	$14.118^{+2.747}_{-2.728}$	$14.461^{+2.811}_{-2.796}$
4	$1.001^{+0.607}_{-0.444}$	$0.823^{+0.500}_{-0.365}$	$0.734^{+0.445}_{-0.325}$	$2.540^{+1.543}_{-1.127}$	$2.265^{+1.373}_{-1.003}$

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 838 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอร์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณจากพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอร์

ตาราง ๑ ค่าฟลักซ์และกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่สามารถระบุได้ในดาราจักร NGC 5653 ในช่วงพลังงาน 0.5 – 8.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

แหล่งกำเนิด	Net rate (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-3} \text{ cs}^{-1}$	Net flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$	Net model flux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{-14} \text{ ergs}^{-1}\text{cm}^{-2}$	Net lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$	Net model lux (0.5 – 8.0 keV) $\times 10^{39} \text{ ergs}^{-1}$
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
1	$2.077^{+0.735}_{-0.595}$	$0.625^{+0.221}_{-0.179}$	$1.526^{+0.540}_{-0.437}$	$2.302^{+0.814}_{-0.659}$	$5.620^{+1.989}_{-1.609}$
2	$1.123^{+0.567}_{-0.426}$	$0.653^{+0.330}_{-0.247}$	$0.826^{+0.417}_{-0.313}$	$2.405^{+1.215}_{-0.910}$	$3.042^{+1.536}_{-1.153}$
3	$0.344^{+0.423}_{-0.245}$	$0.052^{+0.065}_{-0.037}$	$0.253^{+0.311}_{-0.180}$	$0.192^{+0.239}_{-0.137}$	$0.932^{+1.145}_{-0.663}$

หมายเหตุ คอลัมน์ a : ตัวเลขแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในดาราจักร NGC 5653 ที่ระบุได้ในงานวิจัยนี้, คอลัมน์ b : จำนวนโฟตอนสุทธิต่อวินาทีที่ระบุได้ในพื้นที่ขอบเขตของแหล่งกำเนิด, คอลัมน์ c : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ d : ค่าฟลักซ์สุทธิที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอร์, คอลัมน์ e : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณจากพลังงานของโฟตอน, คอลัมน์ f : กำลังส่องสว่างที่ได้มาจากฟลักซ์ที่คำนวณผ่านแบบจำลองเพาเวอร์ลอร์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กันยารัตน์ อำนวยจิตติเลิศ
วัน เดือน ปี เกิด	4 กันยายน 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลอานันทมหิดล จังหวัดลพบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	37/6 ม.1 ตำบลหนองม่วง อำเภอหนองม่วง จังหวัดลพบุรี 15170

