

บทความวิชาการ

จากอนุภาคมูลฐาน ถึง หลุมดำ (II)

वासुเทพ หลวงทิพย์¹ สุพจน์ มุศิริ¹ เข้ม พุ่มสะอาด¹ นพมณี ศุภนาม^{1*}
และ ปฏิภาณ อุทัยรัตน์¹

ได้รับบทความ: 25 เมษายน 2561

ได้รับบทความแก้ไข: 8 ตุลาคม 2561

ยอมรับตีพิมพ์: 10 ตุลาคม 2561

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้เป็นบทความในตอนที่ 2 ซึ่งมีเนื้อหาต่อเนื่องจากบทความในตอนที่ 1 โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญและบทบาทของฟิสิกส์พลังงานสูงในยุคปัจจุบัน รวมไปถึงความท้าทายที่นักฟิสิกส์กำลังเผชิญอยู่ บทความในตอนที่ 2 นี้จะกล่าวถึงฟิสิกส์ของหลุมดำ โดยครั้งแรกของบทความที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและข้อขัดแย้งของหลุมดำในทฤษฎีสัมพัทธภาพกับทฤษฎีควอนตัม และหลักการการจัดข้อขัดแย้งดังกล่าวที่มีการเสนอขึ้น ซึ่งอาจใช้เป็นวิธีการพัฒนาทฤษฎีควอนตัม-กราวิตีได้ในอนาคต ในส่วนครึ่งหลังของบทความส่วนที่ 2 ได้กล่าวถึงกระบวนการในการตรวจหาและศึกษาหลุมดำโดยใช้การสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ รวมไปถึงปริศนาการเปล่งรังสีเอกซ์จากแก๊สรอบๆ หลุมดำที่มีความสว่างเกินกว่าปกติ

คำสำคัญ: หลุมดำ ระบบดาวคู่

¹หน่วยวิจัยฟิสิกส์ทฤษฎีพลังงานสูงและฟิสิกส์ดาราศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน: nopmanee@g.swu.ac.th

From Elementary Particles to Black Holes (II)

Wasutep Luangtip¹, Suphot Musiri¹, Kem Pumsa-ard¹,
Nopmanee Supanam^{1*}, and Patipan Uttayarat¹

Received: 25 April 2018

Revised: 8 October 2018

Accepted: 10 October 2018

ABSTRACT

This article is the second and final part of the two-article-series review on current knowledge in high-energy physics. The present article concerns the physics of black holes. The first part of the article deals with theoretical aspects of black holes and the apparent contradictions between quantum theory and general theory of relativities. Possible resolution, as well as its potential in the development of quantum gravity, is discussed. The second part of the article explains the astronomical methods for observing and studying black holes. It also discusses the puzzle of ultraluminous X-rays emitted from the gas clouds surrounding black holes.

Keywords: Black holes, Binary system

¹Theoretical High Energy Physics and Astrophysics research unit, Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University.

*Corresponding author: e-mail: nopmanee@g.swu.ac.th

1. บทนำ

หลุมดำ (Black holes) คืออาณาบริเวณใด ๆ ในกาลอวกาศที่ถูกนิยามว่าเป็นอาณาบริเวณที่มีอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงสูงมาก จนกระทั่งไม่มีสสารหรือสิ่งใด ๆ ในเอกภพ แม้กระทั่งแสง สามารถเดินทางออกมาจากอาณาบริเวณของหลุมดำได้ [1] และเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่ดูดซึบของหลุมดำ หลุมดำจึงเป็นวัตถุที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก นักฟิสิกส์สามารถใช้หลุมดำเพื่อทดสอบหรือพิสูจน์ทฤษฎีของแรงโน้มถ่วงซึ่งนำไปสู่องค์ความรู้ใหม่ ๆ อย่างมากมาย

ที่อาณาบริเวณของกาลอวกาศภายในขอบฟ้าเหตุการณ์ (Event horizon) ของหลุมดำ การศึกษาหลุมดำด้วยการสังเกตการณ์ไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากไม่มีวัตถุใด ๆ หรือแม้กระทั่งแสงสามารถหลุดออกมาได้ ดังนั้นการศึกษาหลุมดำในบริเวณดังกล่าวจึงทำได้เฉพาะในด้านทฤษฎี อย่างไรก็ตามที่บริเวณภายนอกขอบฟ้าเหตุการณ์ การสังเกตการณ์หลุมดำยังคงสามารถทำได้ ในบทความวิชาการนี้ จะกล่าวถึงการศึกษาหลุมดำในสองลักษณะคือ

1. การศึกษาหลุมดำที่บริเวณขอบและภายในขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำ ซึ่งจะกล่าวถึงการศึกษาหลุมดำทางด้านทฤษฎีรวมทั้งอธิบายประวัติความเป็นมาของการเริ่มต้นศึกษาทฤษฎีทางฟิสิกส์ที่นำไปสู่การศึกษาหลุมดำ

2. การศึกษาหลุมดำที่ภายนอกขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำ ซึ่งจะกล่าวถึงการเปล่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสสารที่อยู่ภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของหลุมดำ

2. การศึกษาหลุมดำทางด้านทฤษฎี

ในปี พ.ศ. 2448 (ค.ศ. 1905) Einstein ได้ตีพิมพ์ ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ (Special theory of relativity) [2] ที่ได้รวมเอากลศาสตร์แบบฉบับ (Classical mechanics) และทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic theory) ให้เป็นทฤษฎีเดียว โดยรวมเวลาเข้าเป็นส่วนหนึ่งของเวกเตอร์บอกตำแหน่งเพื่ออธิบายและศึกษาปรากฏการณ์ของระบบ ทำให้ต้องขยายมิติของปริภูมิใน 3 มิติ เป็น ปริภูมิเวลาใน 4 มิติ ซึ่งเป็นผลที่ทำให้ เวลาและระยะทาง ยืดและหดได้ตามความเร็วของอนุภาคหรือระบบที่แตกต่าง

ต่อจากนั้น ในปี พ.ศ. 2459 (ค.ศ. 1916) Einstein ได้ตีพิมพ์ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (General theory of relativity) [3] ซึ่งเป็นการศึกษาระบบที่มีความเร่ง โดยต้องมีการแปลงพิกัดแบบทั่วไประหว่างระบบที่มีความเร่งเหล่านั้น ซึ่งในทางทฤษฎีและคณิตศาสตร์เป็นสิ่งเดียวกันกับการที่ปริภูมิเวลาที่มีความโค้ง โดยสามารถแทนความเร่งและมวลของอนุภาคด้วยความโค้งของปริภูมิเวลาได้ ทำให้ระยะทางและเวลาของแต่ละระบบอาจไม่เท่ากันและยืดหดได้ และแทนอันตรกิริยาโน้มถ่วงด้วยความโค้งของปริภูมิเวลา โดยสมการไอน์สไตน์ (Einstein's equation) ที่แสดงความโค้งของปริภูมิเวลากับอันตรกิริยาในระบบ คือ

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

โดยในที่นี้ $R_{\mu\nu}$ คือ เทนเซอร์ของริกชี (Ricci's tensor) R คือ ความโค้งสเกลาร์ (Scalar curvature) $g_{\mu\nu}$ คือ เมตริกเทนเซอร์ (Metric tensor) $T_{\mu\nu}$ คือ เทนเซอร์ความเค้น-พลังงาน (Stress-energy tensor) G คือ ค่าคงตัวโน้มถ่วง (Gravitational constant) c คือ อัตราเร็วแสง ด้านซ้ายของสมการแสดงสมบัติทางเรขาคณิต (Geometry) และ ด้านขวาของสมการแสดงอันตรกิริยาในระบบในรูปของพลังงานและโมเมนตัม

ในปี พ.ศ. 2459 (ค.ศ. 1916) Schwarzschild [4] ทำการแก้สมการไอน์สไตน์และได้ผลเฉลยของสมการสำหรับระบบที่มีมวลขนาดใหญ่ (M) ที่ทำให้เกิดความโค้งในปริภูมิเวลา แต่ก็ค้นพบสภาพเอกฐาน (Singularity) ที่กล่าวว่าถ้ามวลทั้งหมดของอนุภาคหดอัดไปรวมตัวกันและมีรัศมีน้อยกว่า $r_H = 2GM/c^2$ จะทำให้เกิดความโน้มถ่วงที่สูงมาก โดยมีอัตราเร็วหลุดพ้น (Escape speed) ณ รัศมีนี้มีค่าเท่ากับอัตราเร็วแสง ซึ่งหมายความว่าไม่มีอนุภาคหรือพลังงานใดหลุดพ้นได้เมื่อผ่านเข้าไปในรัศมีนี้ และทำให้ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปลู่ออกที่จุดศูนย์กลาง เราเรียก r_H ว่า รัศมีชวาร์ซชิลด์ หรือ รัศมีขอบฟ้าเหตุการณ์ (Horizon radius) และเรียกบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์นี้ว่า หลุมดำ (Black hole) ซึ่งต่อมา Einstein ได้ทำนายถึงการมีอยู่ของหลุมดำ โดยสมบัติหลุมดำที่เป็นผลเฉลยของสมการไอน์สไตน์ ขึ้นกับ มวล ประจุไฟฟ้า การหมุนของหลุมดำ ซึ่งเป็นสมบัติของวัตถุก่อนจะเป็นหลุมดำและสมบัติของหลุมดำจะไม่เปลี่ยนแปลงหลังเกิดหลุมดำ หรือหมายความว่า หลุมดำไม่ว่าจะถูกรบกวนอย่างไร สมบัติต่างๆ ของหลุมดำจะไม่เปลี่ยนแปลงตามสิ่งที่มารบกวนหรือสภาพแวดล้อม และเรียกหลักการที่หลุมดำไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมหรือการรบกวนว่า ทฤษฎีบทไม่มีขน (No-hair theorem)

ในปี พ.ศ. 2462 (ค.ศ. 1919) Kaluza ได้คำนวณหาสเกลาร์ความโค้งที่ขยายจำนวนมิติ เป็น 5 มิติ ด้วยวิธีของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป โดยได้เพิ่มมิติที่ 5 เป็นศักย์ไฟฟ้าแม่เหล็ก ได้ผลเป็นสมการไอน์สไตน์และสมการแมกซ์เวลล์ใน 4 มิติ ซึ่งทำให้เกิดแนวความคิดของการรวมทฤษฎีทางฟิสิกส์ไว้เป็นทฤษฎีเดียวด้วยวิธีการเพิ่มมิติ

ในปี พ.ศ. 2469 (ค.ศ. 1926) Klein [5] ได้ขยายแนวความคิดและวิธีการของ Kaluza โดยเสนอให้ปริภูมิเวลาใน 4 มิติ โค้งเป็นทรงกระบอกใน 5 มิติ ทำให้เกิดการเป็นคาบในมิติที่ 5 และไม่มีปริมาณทางกายภาพใดขึ้นกับมิติที่ 5 ซึ่งวิธีการนี้ เรียกว่า การลดมิติ (Compatification)

จากผลทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป การที่บริเวณขอบฟ้าเหตุการณ์มีอัตราเร็วหลุดพ้นเท่ากับอัตราเร็วแสง ทำให้ไม่มีสิ่งใดสามารถหลุดออกมาได้ ถ้าเกิดการไหลเข้าไปภายในหลุมดำและจะอยู่ในหลุมดำตลอดไป ซึ่งเมื่อพิจารณาผลดังกล่าวในมุมมองของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) อนุภาคในระบบจุลภาคที่ต้องศึกษาโดยใช้วิธีทางควอนตัม จะมีข้อมูลที่ติดไปกับตัวเอง เช่น สปินของอนุภาคเหมือน (Identical particles) ข้อมูลของอนุภาคที่อยู่ในหลุมดำจะถูกกักเก็บไว้ในหลุมดำตลอดไป ทำให้ไม่สามารถสื่อสารหรือมีปฏิสัมพันธ์กับอนุภาคภายนอกได้ ซึ่งหมายความว่า ความยุ่งเหยิงหรือเอนโทรปี (Entropy) ของหลุมดำจะต้องมีค่าที่สูงมาก หรืออาจเป็นอนันต์ ในทางกลับกัน เมื่อไม่มีอนุภาคใดส่งออกมาหรือไม่มีการแผ่รังสีออกมาเลย จะหมายความว่า อุณหภูมิที่รัศมีขอบฟ้าเหตุการณ์เป็นศูนย์ ซึ่งขัดแย้งกับ กฎข้อที่ 3 ทางอุณหพลศาสตร์

หลุมดำในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปได้สร้างข้อขัดแย้งกับกลศาสตร์ควอนตัม โดยในกลศาสตร์ควอนตัม คู่อนุภาคเสมือนที่ถูกสร้างขึ้นใกล้หลุมดำที่มีข้อมูลอยู่ เช่น มีสปินที่มีทิศตรงกันข้ามกัน แต่ไม่สามารถระบุสปินของแต่ละตัวได้ทันที และสปินของแต่ละอนุภาคต้องเขียนได้ในรูปผลรวมของความน่าจะเป็นของทุกสปินที่เป็นไปได้ ซึ่งจะสามารถระบุได้ชัดเจนว่าอนุภาคมีสปินเป็นเท่าใดก็ต่อเมื่อทำการวัดสปินของอนุภาค การวัดหรือการสังเกตในกลศาสตร์ควอนตัมจะทำให้ระบบควอนตัมเปลี่ยนไปหรือผู้สังเกตก็เป็นส่วนหนึ่งของระบบเช่นกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อจะทำการวัดสปินของอนุภาคตัวหนึ่ง ก่อนการวัดมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคสามารถมีสปินใด ๆ ก็ได้ การวัดจะทำลายความเป็นได้ของการมีสปินได้ทุกค่าให้เหลือ

เพียงค่าเดียว ในกรณีนี้ ถ้ากำหนดให้ผลของการวัดสปินมีทิศชี้ขึ้น ก็จะทราบทันทีว่าอนุภาคอีกตัวมีสปินชี้ลง ในทำนองเดียวกัน เมื่อทำการวัดสปินของอนุภาคที่อยู่ห่างจากหลุมดำแล้วได้ผลว่ามีสปินชี้ขึ้น ก็จะทราบทันทีว่าอนุภาคอีกตัวในหลุมดำมีสปินชี้ลง แต่เนื่องจากในทฤษฎีสัมพัทธภาพ เมื่ออนุภาคเข้าไปในหลุมดำแล้วข้อมูลจะถูกเก็บเอาไว้ ไม่ถูกส่งออกมา (เพราะความเร็วหลุดพ้นจากผิวหลุมดำคือความเร็วแสง และในทฤษฎีสัมพัทธภาพไม่มีสิ่งใด หรือ อนุภาคใดมีความเร็วมากกว่าความเร็วแสง) มีผลให้อนุภาคทั้งสองไม่สามารถสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ และทำให้ไม่สามารถระบุสปินหรือสมบัติของอนุภาคทั้งสองได้อย่างชัดเจน ซึ่งขัดแย้งกับความรู้สึกและประสบการณ์ของผู้สังเกตที่ใช้หลักการของฟิสิกส์แบบฉบับ ที่ว่าอนุภาคมีสปินชัดเจนอยู่แล้ว แต่ผู้สังเกตไม่ทราบแต่แรกเองและจะทราบได้ต้องทำการวัดว่ามีสปินขึ้นหรือลง โดยไม่ต้องส่งสัญญาณข้อมูลให้กับอนุภาคอีกตัวในหลุมดำ ทำให้แนวความคิดแบบฟิสิกส์แบบฉบับขัดแย้งกับแนวความคิดทางควอนตัมที่ต้องรวมความเป็นไปทุกกรณีของสมบัติอนุภาคก่อนทำการวัดและมีโอกาสเป็นไปได้แทบทุกกรณี หรืออาจกล่าวสรุปได้ว่า หลุมดำในฟิสิกส์แบบฉบับจะเก็บข้อมูลไว้ตลอดไปไม่สามารถเรียกกลับได้หรือกล่าวได้ข้อมูลสูญหายในหลุมดำ (เมื่อเวลาผ่านหลุมดำดูเอกสารพลังงานเข้าไป ทำให้มีข้อมูลมหาศาลในหลุมดำ เอนโทรปีควรจะสูงมากและที่ผิวต้องไม่มีอะไรหลุดออกมาได้หรือหมายความว่า อุณหภูมิที่ผิวหลุมดำต้องเข้าสู่ศูนย์) แต่หลุมดำในหลักการกลศาสตร์ควอนตัม ข้อมูลไม่สูญหายไปไหนหรือมีการเรียกกลับได้ หรืออีกนัยหนึ่งหลุมดำสามารถส่งอนุภาคออกมาได้

ในปี พ.ศ. 2515 (ค.ศ. 1972) Benkenstein [6] ได้เสนอ กฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำที่เอนโทรปีแปรผันกับพื้นที่ผิวของขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำ ซึ่งมีค่าสูงมากแต่ไม่เป็นอนันต์ จากนั้นในปี พ.ศ. 2526 (ค.ศ. 1983) Hawking [7] ได้ทำการศึกษาคู่อนุภาคที่เกิดขึ้นใกล้หลุมดำเพื่อหาเอนโทรปีและอุณหภูมิของหลุมดำ ด้วยวิธีของทฤษฎีสถานควอนตัมในปริภูมิเวลาที่มีความโค้ง ซึ่งได้ผลตามที่ Bekenstein ทำนายไว้ คือเอนโทรปีมีค่าสูงมากและมีอุณหภูมิที่ต่ำมาก [7] การมีอุณหภูมิของหลุมดำหมายความว่ามีการแผ่รังสีหรือมีการปล่อยอนุภาคออกมา เป็นปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดการแผ่อนุภาคในระดับจุลภาคที่มีปริมาณน้อยมาก ถ้าหลุมดำไม่ดูดกลืนอะไรเข้าไป หลุมดำจะมีขนาดเล็ก จนกระทั่งอาจระเหิดหายไป โดยเวลาของการระเหิดของหลุมดำจนหมดไปจะใช้เวลาประมาณอายุของจักรวาล

การคำนวณและการค้นพบของ Hawking ทำให้ข้อขัดแย้งของอุณหพลศาสตร์หมดไป เพราะเมื่อสังเกตจากภายนอกหลุมดำมีทั้งเอนโทรปีและอุณหภูมิ แต่เมื่อแก้ปัญหาหนึ่งก็ทำให้เกิดคำถามต่อไปเพิ่มคือ ในทางอุณหพลศาสตร์ของระบบในกลศาสตร์แบบฉบับ เอนโทรปีจะแปรผันหรือเป็นฟังก์ชันของปริมาตรวัด แต่ไม่ใช่พื้นที่ผิวของวัตถุ และยังมีคำถามเกี่ยวกับข้อมูลที่ถูกลดกลืนไปพร้อมกับอนุภาคต่างๆ จะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับการแผ่รังสีของหลุมดำหรือไม่ ซึ่งในทางกลศาสตร์ควอนตัม ข้อมูลไม่ได้สูญหายไปไหน แต่ Hawking ยังโต้แย้งว่า ข้อมูลได้ถูกหลุมดำทำลาย และไม่มีการปล่อยออกมาพร้อมกับการแผ่รังสี ซึ่งก็เป็นปัญหาของหลุมดำในฟิสิกส์ทฤษฎีต่างๆ

ในปี พ.ศ. 2548 (ค.ศ. 2005) Hawking ได้ตีพิมพ์งานวิจัย [8] ที่ยืนยันว่า ข้อมูลไม่ได้สูญหายในหลุมดำแต่ปล่อยออกมาพร้อมกับการแผ่รังสี และจะมีการปนกันของข้อมูลที่ซับซ้อนซึ่งยากแก่การแปลความหมายมาก ทำให้ยุติข้อโต้แย้งกับ John Preskill และส่งสารานุกรมเบสบอลให้เพื่อแสดงการยอมรับ โดยยังได้อ้างอิงงานวิจัยของ Juan Maldacena [9] ที่กล่าวถึงการสมนัยกันระหว่างทฤษฎีสัมพัทธภาพที่มีหลุมดำในปริภูมิเวลาแอนไทดิซเซอร์ (Anti de Sitter spacetime) ในมิติ $d+1$ กับ ทฤษฎี

สนามคงตัว (Conformal field theory) ใน d มิติ เช่น ทฤษฎีสัมพัทธภาพใน 5 มิติ สมัยหรือสอดคล้องกับทฤษฎีควมตัมสนามใน 4 มิติที่ผิวขอบเขตของระบบ 5 มิติ และได้ใช้หลักการนี้คำนวณหาเอนโทรปีของหลุมดำและได้ผลเช่นเดียวกับที่ Hawking เคยคำนวณไว้ ซึ่งให้ความหมายว่าเอนโทรปีของหลุมดำที่แปรผันกับพื้นที่ผิวหลุมดำใน $n+1$ มิติ คือ ปริมาตรใน n มิติ เช่น ในกรณีที่เป็นฟังก์ชันของปริมาตรใน 3 มิติ ก็อาจกล่าวได้ว่าเอนโทรปีเป็นฟังก์ชันพื้นที่ใน 4 มิติ

ในปี พ.ศ. 2556 (ค.ศ. 2013) Maldacena และ Susskind [10] ได้ศึกษาแบบจำลองรูหนอน (Worm hole) หรือสะพานไอน์สไตน์-โรเซน (Einstein-Rosen bridge) ที่เชื่อมต่อกับหลุมดำ และได้เสนอวิธีการแก้ข้อขัดแย้งของการส่งข้อมูลระหว่างอนุภาคนอกหลุมดำกับอนุภาคในหลุมดำ โดยให้ส่งข้อมูลของอนุภาคในหลุมดำไปสู่อนุภาคนอกหลุมดำผ่านรูหนอน ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังอนุภาคนอกหลุมดำได้รวดเร็วขึ้น และยังทำให้สมบัติต่างๆ ของอนุภาคภายนอกหลุมดำ (ที่ต้องเกี่ยวพันกันของอนุภาคทั้งสอง เช่น การวัดสปิน) สามารถทำการวัดได้เสมือนกับอนุภาคภายนอกหลุมดำนั้นทราบสมบัติของอนุภาคภายในหลุมดำก่อนหน้าที่จะทำการวัดอยู่แล้ว เป็นผลให้หลุมดำสูญเสียข้อมูล มีการระเหย (Evaporation) และลดขนาดของขอบฟ้าเหตุการณ์ลง

3. การศึกษาหลุมดำด้วยการสังเกตการณ์

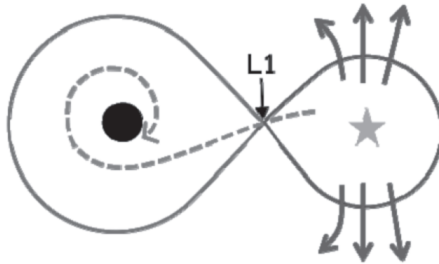
จากการที่ไม่มีสิ่งใดที่หลุดเข้าไปในขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำแล้วสามารถกลับออกมาจากหลุมดำได้ การศึกษาหลุมดำด้วยการสังเกตจึงไม่สามารถทำได้ แต่เราสามารถทำได้ด้วยวิธีทางอ้อมจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายนอกขอบฟ้าเหตุการณ์ ในกรณีที่หลุมดำอาศัยอยู่หรือเคลื่อนตัวผ่านบริเวณที่มีสสารอยู่โดยรอบ อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงจากหลุมดำจะดึงดูดให้สสารเหล่านั้นมาโคจรโดยรอบและตกลงสู่หลุมดำในที่สุด ระหว่างที่สสารโคจรรอบหลุมดำจากวงโคจรชั้นนอกเข้าสู่วงโคจรชั้นใน พลังงานศักย์โน้มถ่วงบางส่วนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ปรากฏการณ์ที่สสารมีโคจรก่อนที่จะตกลงสู่หลุมดำนี้ถูกเรียกว่าการรวมมวล (Accretion) และเรียกสสารที่รวมกันเหล่านี้ว่าจานรวมมวล (Accretion disc) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากการรวมมวลนี้เองที่ทำให้เราสามารถสังเกตการณ์หลุมดำได้

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการและเงื่อนไขทางฟิสิกส์ที่ทำให้เกิดการรวมมวล ลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวล และการรวมมวลของหลุมดำในกรณีที่อัตราการรวมมวล (Accretion rate) มีค่าสูงสุด

3.1 การรวมมวลของหลุมดำ (Black hole accretion)

เพื่ออธิบายว่าเหตุใดจึงเกิดการรวมมวลขึ้นรอบหลุมดำ ในที่นี้เราจะพิจารณาการรวมมวลของหลุมดำที่เกิดในระบบดาวคู่ (Binary system) กล่าวคือ ในกรณีของระบบดาวคู่ที่ประกอบไปด้วยดาวฤกษ์สองดวงที่มีมวลต่างกัน ดาวฤกษ์ดวงที่มีมวลมากกว่าจะมีปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่รวดเร็วและรุนแรงกว่า ทำให้มีการเผาผลาญแก๊สไฮโดรเจนไปเป็นธาตุหนักด้วยอัตราที่เร็วกว่า ดาวฤกษ์ดวงที่มีมวลมากกว่าจะมีวิวัฒนาการที่รวดเร็วกว่าดาวฤกษ์ดวงที่มีมวลน้อยกว่า ทำให้อาจจะสามารถวิวัฒนาการกลายเป็นหลุมดำได้ก่อน (ถ้ามวลส่วนที่เหลือมีค่ามากพอ) ในขณะที่ดาวฤกษ์อีกดวงกำลังเผาผลาญแก๊สไฮโดรเจนอยู่ในช่วงชีวิตหลัก (Main sequence star) หรือในช่วงดาวยักษ์แดง (Red giant star) ระบบที่ประกอบไปด้วยดาวฤกษ์สองดวงที่มีลักษณะเช่นนี้ จะเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดการรวมมวลได้

เพื่อทำความเข้าใจถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะทำให้ก๊าซจากดาวฤกษ์ดวงที่มีมวลน้อยกว่าสามารถถูกส่งผ่านเข้าสู่หลุมดำได้นั้น เราจะพิจารณาดังหลักการของโรเซิลอป (Roche lobe) ซึ่งเป็นพื้นผิวสมมติรอบ ๆ ระบบดาวคู่ที่โคจรรอบจุดศูนย์กลางมวลซึ่งกันและกันด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง (รูปที่ 1) ลักษณะโดยทั่วไปของพื้นผิวโรเซิลอปจะคล้ายกับรูปหยดน้ำสองหยดติดกันโดยที่ขนาดของหยดน้ำจะแปรผันตรงกับขนาด มวลของดาวฤกษ์และหลุมดำ หยดน้ำแต่ละหยดจะบ่งบอกถึงอิทธิพลแรงโน้มถ่วงของดาวฤกษ์และหลุมดำต่อสสารโดยรอบ จุดที่หยดน้ำสองหยดเชื่อมต่อกันจะเป็นจุดลากรางจ์เจียนแอล 1 (L1) ซึ่งเป็นจุดที่แรงโน้มถ่วงจากดาวฤกษ์และหลุมดำหักล้างกันพอดี สสารใด ๆ ที่อยู่ในพื้นที่ผิวของหยดน้ำจะถูกกักขังอยู่ภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของดาวฤกษ์หรือหลุมดำนั้น ๆ ในทางตรงกันข้าม ด้วยเหตุผลใดก็ตาม หากสสารใด ๆ มีความเร็วที่จะสามารถหลุดออกไปจากพื้นผิวของหยดน้ำได้ สสารนั้นอาจหลุดออกไปจากระบบดาวคู่ หรือออกไปโคจรรอบระบบดาวคู่แทน นอกไปจากนั้นยังมีความเป็นไปได้ว่าสสารที่หลุดออกไปนั้น อาจตกลงสู่อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของดาวฤกษ์หรือหลุมดำอีกดวงในระบบดาวคู่



รูปที่ 1 พื้นผิวโรเซิลอปในระบบดาวคู่ แสดงให้เห็นการถ่ายเทมวลที่เกิดจากลมของดาวฤกษ์ (ลูกศร) และการถ่ายเทมวลผ่านจุดลากรางจ์เจียนแอล 1 หรือโรเซิลอปโอเวอร์โฟล (เส้นประ)

พิจารณาจากรูปที่ 1 กรณีที่ดาวฤกษ์มีขนาดใหญ่และมีมวลมาก เช่นดาวฤกษ์แบบโอ (O-type star) หรือแบบบี (B-type star) ชั้นบรรยากาศของดาวฤกษ์จะมีพลังงานและมีกำลังส่องสว่างสูงทำให้เกิดแรงดันโฟตอน (Photon radiation pressure) ผลักแก๊สที่ชั้นบรรยากาศให้ออกสู่ด้านนอกของดาวฤกษ์ทำให้เกิดลมของดาวฤกษ์ (Stellar wind) ขึ้น ในกรณีที่ลมของแก๊สเหล่านี้มีพลังงานสูงพอที่จะหลุดออกจากพื้นผิวโรเซิลอปได้ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แก๊สบางส่วนจะถูกถ่ายโอนลงสู่หลุมดำด้วยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงทำให้เกิดการถ่ายเทแก๊สไปสู่หลุมดำ ในกรณีที่ดาวฤกษ์มีขนาดเล็ก ลมของดาวฤกษ์มักจะไม่มีความเร็วพอที่จะหลุดออกจากพื้นผิวโรเซิลอปได้ อย่างไรก็ตาม ในระหว่างวิวัฒนาการของระบบดาวคู่ ถ้าระบบดาวคู่เข้าใกล้กันเนื่องจากการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมหรือเกิดการขยายตัวของดาวฤกษ์เนื่องจากดาวฤกษ์เข้าสู่ช่วงดาวยักษ์แดง (Red giant star) ทั้งสองกรณีนี้อาจทำให้แก๊สที่ผิวด้านนอกของดาวฤกษ์หลุดออกจากพื้นผิวโรเซิลอปผ่านทางจุดลากรางจ์เจียนแอล 1 และทำให้แก๊สตกลงสู่หลุมดำได้ การถ่ายโอนของแก๊สลงสู่หลุมดำผ่านทางจุดลากรางจ์เจียนแอล 1 นี้เรียกว่าโรเซิลอปโอเวอร์โฟล (Roche lobe overflow) อย่างไรก็ตาม แก๊สที่ถูกถ่ายโอนจากดาวฤกษ์สู่หลุมดำไม่ว่าจะผ่านลมของดาวฤกษ์หรือโรเซิลอปโอเวอร์โฟลจะไม่สามารถตกลงสู่หลุมดำได้โดยตรงเนื่องจากแก๊สดังกล่าวได้โคจรรอบดาวฤกษ์มาก่อนที่จะ

ตกลงสู่หลุมดำทำให้มีโมเมนตัมเชิงมุมอยู่ด้วย เมื่อแก๊สที่มีโมเมนตัมเชิงมุมถูกถ่ายโอนสู่หลุมดำ แก๊สเหล่านี้จะอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมด้วยการโคจรรอบหลุมดำในขณะที่แรงโน้มถ่วงจากหลุมดำจะดึงดูดให้แก๊สตกลงสู่หลุมดำ ผลที่เกิดขึ้นคือแก๊สจะโคจรรอบหลุมดำและมีรัศมีลดลงเรื่อย ๆ เป็นวงคล้ายกับรูปก้นหอยจนกระทั่งตกลงไปในขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำ กระบวนการที่แก๊สตกลงสู่หลุมดำแบบนี้ถูกเรียกว่า การรวมมวล

รูปแบบของการรวมมวลแบบทั่วไปที่เกิดขึ้นในระบบดาวคู่ได้ถูกเสนอโดย Shakura และ Sunyaev [11] ในการรวมมวลตามทฤษฎีของ Shakura และ Sunyaev จะตั้งสมมติฐานให้แก๊สเหล่านี้มีความหนาแน่นสูงมาก (นั่นคือไม่โปร่งแสงหรือเรียกว่า Optically thick) และโคจรรอบหลุมดำโดยมีลักษณะเป็นแผ่นจานรวมมวลที่มีลักษณะบาง (Geometrically thin) พิจารณาแก๊สที่จุดใดจุดหนึ่งบนจานรวมมวล ถ้าแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการโคจรมีค่าเท่ากับแรงโน้มถ่วงของหลุมดำ ในกรณีนี้แก๊สจะสามารถโคจรรอบหลุมดำโดยมีรัศมีคงที่และไม่ตกลงสู่หลุมดำดังเช่นการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ แต่ในกรณีของจานรวมมวลแก๊สจะต้องมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมเพื่อที่จะโคจรเข้าใกล้หลุมดำเรื่อย ๆ จนกระทั่งตกลงสู่หลุมดำ Shakura และ Sunyaev เสนอว่าเหตุผลหลักที่ทำให้แก๊สสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมคือแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากการเสียดสีกันของแก๊สที่อยู่ในวงโคจรชั้นในซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมที่มากกว่าแก๊สที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอก ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมที่น้อยกว่า การลดลงของรัศมีวงโคจรของแก๊สเหล่านี้ทำให้แก๊สสูญเสียพลังงานศักย์โน้มถ่วง โดยพลังงานศักย์โน้มถ่วงของแก๊สที่ลดลงนี้ ส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ทำให้แก๊สเคลื่อนที่เร็วขึ้นเมื่อรัศมีวงโคจรน้อยลง ในขณะที่พลังงานศักย์โน้มถ่วงส่วนที่เหลือจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแก๊สในจานรวมมวลมีลักษณะทึบแสงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวลจึงมีลักษณะคล้ายกับการเปล่งแสงจากวัตถุดำ (black body radiation) คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวลนี้จะถูกกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป เราสามารถใช้ทฤษฎีของไวเรียล (Virial theorem) ในการประมาณค่ากำลังส่องสว่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวลของหลุมดำได้ โดยประมาณว่าครึ่งหนึ่งของพลังงานศักย์โน้มถ่วงที่แก๊สได้รับจะถูกเปลี่ยนไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กำลังส่องสว่าง (L) ของหลุมดำสามารถเขียนได้ดังสมการ $L = GM(dm/dt) / 2R$ เมื่อ G คือค่าโน้มถ่วงสากล M คือมวลของหลุมดำ dm/dt คืออัตราการรวมมวลของหลุมดำ และ R คือรัศมีสุดท้ายที่แก๊สโคจรก่อนจะตกลงสู่หลุมดำ (Last stable orbit) จากสมการ พิจารณาที่หลุมดำมวลคงที่อันใดอันหนึ่ง จะเห็นได้ว่ากำลังส่องสว่างของหลุมดำจะแปรผันตรงกับอัตราการรวมมวลหรืออัตราการตกของแก๊สลงสู่หลุมดำ ยังมีแก๊สตกลงไปมาก หลุมดำก็จะมีกำลังส่องสว่างเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม กำลังส่องสว่างที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้แก๊สมีแรงดันที่เกิดจากการส่องสว่าง (Radiation pressure) เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยปกติ จาการวมมวลแบบ Shakura และ Sunyaev จะคงรูปอยู่ได้ก็ต่อเมื่อแรงดันที่เกิดจากการกำลังการส่องสว่างมีค่าไม่มากไปกว่าแรงดึงดูดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง อัตราการรวมมวลที่ทำให้แรงดันที่เกิดจากการการส่องสว่างมีค่าเท่ากับแรงดึงดูดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของหลุมดำถูกเรียกว่าอัตราการรวมมวลเอ็ดดิงตัน (Eddington accretion rate) อย่างไรก็ตาม การรวมมวลที่มากเกินไปของเอ็ดดิงตัน (Eddington limit) อาจสามารถเกิดขึ้นได้ เราจะกล่าวอัตราการรวมมวลแบบพิเศษนี้ในหัวข้อ 3.3

นอกจากนี้ในทางตรงกันข้าม หลุมดำยังสามารถรวมมวลที่อัตราการรวมมวลต่ำมาก ๆ ได้เช่นกัน จากข้อมูลการสังเกตการณ์พบว่า ที่อัตราการรวมมวลที่ต่ำมาก ๆ หลุมดำมีพฤติกรรมการรวมมวลที่ต่ำออก

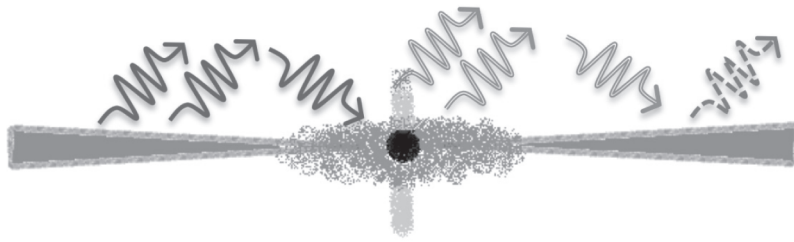
ไปจากสมมติฐานที่ได้จากทฤษฎีของ Shakura และ Sunyaev หนึ่งในทฤษฎีที่ถูกใช้ในการอธิบายการรวมมวลของหลุมดำที่อัตราต่ำคือ advection-dominated accretion flow (ADAF) [12] โดยทฤษฎีนี้อธิบายว่าที่อัตราการรวมมวลต่ำ ๆ แก๊สรอบ ๆ หลุมดำจะมีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นแก๊สในจานรวมมวลจะมีลักษณะค่อนข้างโปร่งแสง (Optically thin) และมีลักษณะทางกายภาพหนา (Geometrically thick) ลักษณะเช่นนี้จะทำให้การแลกเปลี่ยนพลังงานกันระหว่างโปรตอนและอิเล็กตรอนขาดประสิทธิภาพ โปรตอนส่วนมากที่ได้รับพลังงานจากความโน้มถ่วงจะตกลงสู่หลุมดำแทนที่ถ่ายทอดไปสู่อิเล็กตรอนและปลดปล่อยเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากจานรวมมวล ทำให้จานรวมมวลมีกำลังส่องสว่างที่ต่ำ

3.2 สเปกตรัมที่เปล่งออกจากจานรวมมวลของหลุมดำ

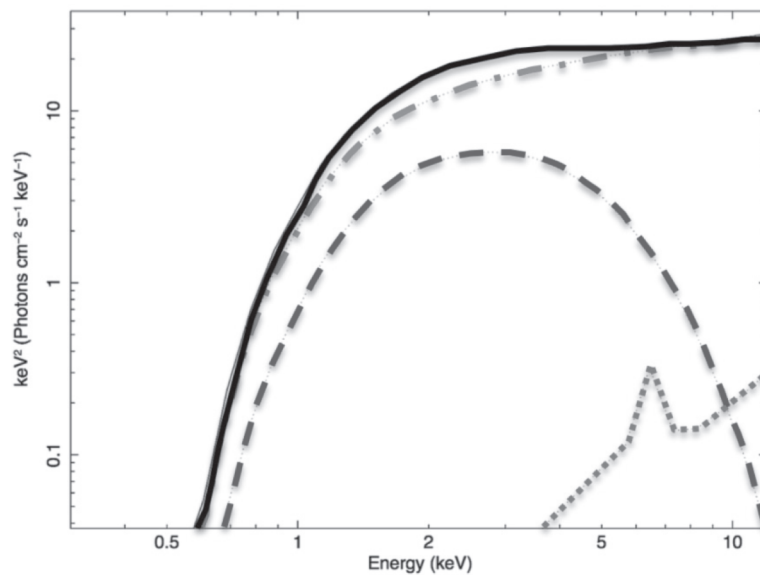
ในหัวข้อ 3.1 เราได้กล่าวถึงการรวมมวลที่เกิดขึ้นรอบ ๆ หลุมดำ ซึ่งส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากจานรวมมวล อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมที่เกิดจากจานรวมมวลนั้น จะมีลักษณะต่างกัน ขึ้นอยู่กับมวลของหลุมดำและกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในจานรวมมวล ในกรณีของจานรวมมวลที่เกิดจากหลุมดำในระบบดาวคู่ (Binary black hole) การปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากจานรวมมวลจะมีกำลังการส่องสว่างสูงในย่านรังสีเอกซ์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะและการเกิดของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวลของหลุมดำที่เกิดในระบบดาวคู่

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวลนั้น จะประกอบไปด้วยโฟตอน ที่หลากหลาย [13] ทั้งโฟตอนที่เปล่งออกมาจากจานรวมมวลโดยตรง และโฟตอนจากจานรวมมวลที่ถูกแปรสภาพอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมภายในและรอบ ๆ จานรวมมวลก่อนที่จะมาถึงผู้สังเกตบนโลก ภาพที่ 2(ก) แสดงองค์ประกอบหลักของโฟตอนที่เกิดจากจานรวมมวล ซึ่งแบ่งได้สามองค์ประกอบได้แก่ โฟตอนดั้งเดิมที่เกิดจากจานรวมมวล โฟตอนที่ถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริง (Compton upscattered photons) และโฟตอนที่ถูกสะท้อน (Reflected photons)

โฟตอนดั้งเดิมที่เกิดจากจานรวมมวลนั้นเกิดจากการเปล่งแสงเชิงความร้อน (Thermal emission) อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานจากแก๊สที่อยู่ในชั้นวงโคจรติดกัน เนื่องจากแก๊สในจานรวมมวลมีลักษณะทึบแสง (Optically thick) จานรวมมวลจึงเกิดการเปล่งแสงเชิงความร้อนในย่านความถี่รังสีเอกซ์ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับการเปล่งแสงของวัตถุดำ อย่างไรก็ตาม แก๊สที่อยู่วงโคจรชั้นในกว่าจะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีความถี่หรือพลังงานสูงกว่าแก๊สที่อยู่วงโคจรชั้นนอกเนื่องจาก แก๊สชั้นในได้รับพลังงานศักย์โน้มถ่วงมากกว่า ดังนั้น ตามทฤษฎีของ Shakura และ Sunyaev [11] จะตั้งสมมติฐานให้การเปล่งแสงของจานรวมมวลมีลักษณะเป็นผลรวมของการเปล่งแสงของวัตถุดำที่เกิดจากการปลดปล่อยโฟตอนของแก๊สในแต่ละชั้นของวงโคจรรอบหลุมดำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยจากจานรวมมวลจะมีพลังงานประมาณ 0.1 ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูป 2(ข) (เส้นประ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) โครงสร้างของจันรวมมวลและโฟตอนที่ถูกเปล่งออกมาจากจันรวมมวลของหลุมดำ เส้นทึบแสดงโฟตอนที่เปล่งออกมาจากจันรวมมวลโดยตรงในขณะที่เส้นคู่และเส้นประแสดงให้เห็นถึงโฟตอนที่ถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริงและถูกสะท้อนตามลำดับ (ข) สเปกตรัมในย่านรังสีเอกซ์ของการรวมมวลที่สอดคล้องกับการเปล่งแสงของจันรวมมวลในรูป (ก) เส้นประ (---) แสดงสเปกตรัมที่เปล่งออกมาจากจันรวมมวลโดยตรง เส้นประ-จุด (- · - · -) และเส้นจุด (·····) แสดงสเปกตรัมของโฟตอนส่วนที่ถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริงและถูกสะท้อนตามลำดับ เส้นทึบ (—) แสดงสเปกตรัมรวมจากทั้งสามองค์ประกอบที่สังเกตการณ์ได้จากผู้สังเกตบนโลก

โฟตอนส่วนที่ถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริงนั้นจะเกิดจากโฟตอนที่กำเนิดมาจากจานรวมมวลแล้วเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของแก๊สและพลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำแต่มีพลังงานสูง โฟตอนเหล่านี้มีโอกาสที่จะถูกชนโดยอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานสูงกว่า โฟตอนและอิเล็กตรอนจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน ทำให้หลังการชนโฟตอนจะมีพลังงานสูงขึ้นและอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลง กระบวนการนี้ถูกเรียกว่ากระบวนการคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริง (Compton upscattering) โฟตอนที่ถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริงนั้นจะมีพลังงานโดยเฉลี่ยสูงกว่าพลังงานของโฟตอนดั้งเดิมที่กำเนิดมาจากจานรวมมวล โดยมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (เส้นประ-จุด) โฟตอนส่วนสุดท้ายที่เป็นโฟตอนที่ถูกสะท้อนนั้นจะเกิดจากโฟตอนคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริงแล้วแต่ไม่ได้หลุดออกจากระบบและเดินทางมาสู่ผู้สังเกตบนโลกโดยตรงในทางตรงกันข้าม อาจชนกับอิเล็กตรอนในกลุ่มแก๊สความหนาแน่นต่ำแล้วเปลี่ยนทิศทางการเดินทางทำให้มาตกกระทบและสะท้อนออกจากจานรวมมวล โฟตอนที่ถูกสะท้อนเหล่านี้จะมีลักษณะที่สำคัญคือจะมีความเข้มแสงสูง (Peak) ที่ค่าระดับการคายพลังงานของธาตุหรือแก๊สที่เป็นองค์ประกอบของจานรวมมวลทำให้เห็นเป็นเส้นสเปกตรัมการเปล่งแสง (Emission line) (เส้นจุด)

โดยทั่วไป สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากการรวมมวลของหลุมดำที่เราสังเกตได้จะเป็นผลรวมโฟตอนที่มาจากทั้งสามองค์ประกอบนี้ รูปทรงของสเปกตรัมจะถูกกำหนดโดยปัจจัยหลักก็คืออัตราการรวมมวลซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดจำนวนสัดส่วนของโฟตอนในแต่ละองค์ประกอบที่จะรวมกันเป็นสเปกตรัม ที่อัตราการรวมมวลสูงใกล้ขีดจำกัดเอ็ดดิงตัน สเปกตรัมจะมีสัดส่วนของโฟตอนที่มาจากจานรวมมวลสูงมากทำให้สเปกตรัมที่เราสังเกตได้มีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมที่มาจากจานรวมมวลอย่างเดียว ที่อัตราการรวมมวลต่ำลงมา แก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำเริ่มกำเนิดที่ชั้นในของจานรวมมวลของหลุมดำทำให้โฟตอนมีโอกาสถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริง ดังนั้น สเปกตรัมของหลุมดำที่มีอัตราการรวมมวลต่ำที่เราสังเกตได้จะมีลักษณะเป็นสเปกตรัมรวมที่มาจากโฟตอนที่เกิดจากจานรวมมวลและโฟตอนที่ถูกคอมพ์ตันอัพสแกตเตอร์ริงรวมทั้งโฟตอนที่สะท้อนจากจานรวมมวลด้วย โดยทั่วไปการรวมมวลของหลุมดำสามารถเกิดเป็นวงจรได้โดยเปลี่ยนอัตราการรวมมวลกลับไปกลับมา จากมากถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ของขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันลดลงไปถึงน้อยราว ๆ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน และกลับมาอีกครั้ง [14]

3.3 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดและการรวมมวลของหลุมดำในระดับที่เกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน

ในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 เราได้กล่าวถึงการรวมมวลและสเปกตรัมของจานรวมมวล ในระดับที่ไม่เกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน อย่างไรก็ตาม การรวมมวลในระดับที่เกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันนั้นอาจเป็นไปได้ในบางหลุมดำ แนวคิดการรวมมวลที่มากเกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันนั้น เกิดขึ้นหลังจากการค้นพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด (Ultraluminous X-ray source) ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกำลังส่องสว่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านพลังงานระหว่าง 0.3 ถึง 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์มากกว่า 10^{39} เอิร์กต่อวินาที (erg s^{-1}) หรือเท่ากับ 10^{32} วัตต์ [15] อาจเรียกได้ว่ามีค่ามากกว่ากำลังการส่องสว่างของหลุมดำที่มีมวลขนาด 10 เท่าของดวงอาทิตย์ที่กำลังรวมมวลที่อัตราเท่ากับขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน ในช่วงแรกของการค้นพบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด นักดาราศาสตร์พบกับปัญหาในการตีความเนื่องจากไม่สามารถแยกแยะได้ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดนี้จะเป็นแหล่งกำเนิดแสงชั่วคราว (Transient event) เช่น ซุปเปอร์โนวา (Supernova) หรืออาจจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงถาวร (Persistent

source) เช่น หลุมดำที่กำลังรวมมวล อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากได้มีการค้นพบและมีข้อมูลการสังเกตการณ์ มากขึ้นทำให้นักดาราศาสตร์ทราบว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดเป็นแหล่งกำเนิดแสงถาวร

ในช่วงปลายของศตวรรษที่ 20 ได้มีการส่งดาวเทียมที่ได้ทำการติดตั้งกล้องดูดาวในย่านรังสีเอกซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น กล้องจันทรา (Chandra telescope) และกล้องเอกซ์เอ็มเอ็ม นิวตัน (XMM-Newton telescope) ขึ้นไปสังเกตการณ์ ทำให้นักดาราศาสตร์ได้ข้อมูลภาพและสเปกตรัมซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด เนื่องจากกำลังส่องสว่างที่สูงมากของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด การวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงต้นของศตวรรษที่ 20 นำไปสู่แนวคิดที่ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดน่าจะเป็นหลุมดำที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 100 ถึง 1000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ [16-18] ที่กำลังรวมมวลในอัตราที่ต่ำกว่าขีดจำกัดของเฮ็ดดิงตัน อย่างไรก็ตาม มวลของหลุมดำที่คาดนี้ เป็นมวลของหลุมดำที่มากกว่าจะเกิดจากการยุบตัวของดาวฤกษ์ที่กำเนิดในยุคเอกภพยุคปัจจุบัน การตีความว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดน่าจะเป็นหลุมดำที่มีมวลประมาณ 100 ถึง 1000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์จึงนำไปสู่การค้นพบที่สำคัญทางดาราศาสตร์ เนื่องจากการยืนยันถึงการมีอยู่จริงของดาวฤกษ์ประเภทที่ 3 (Population III star) ซึ่งคาดว่าเป็นดาวฤกษ์ขนาดใหญ่ที่เกิดในยุคแรก ๆ ที่เอกภพเริ่มก่อกำเนิดดาวฤกษ์ นอกจากนี้ นักดาราศาสตร์ยังคาดว่าหลุมดำที่มีมวลประมาณ 100 ถึง 1000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์น่าจะเป็นหลุมดำต้นกำเนิดของหลุมดำมวลยิ่งยวด (Supermassive black hole) ที่อยู่ใจกลางของดาราจักร ดังนั้น การค้นพบหลุมดำที่มีมวลประมาณ 100 ถึง 1000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อองค์ความรู้ทางดาราศาสตร์

อย่างไรก็ตาม ในเวลาต่อมา จากการศึกษาสเปกตรัมคุณภาพสูงของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดทำให้นักดาราศาสตร์เริ่มตั้งคำถามถึงการแปลความมวลของหลุมดำที่ให้พลังงานแก่แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด ตามทฤษฎี ถ้าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดคือหลุมดำที่มีมวลประมาณ 100 ถึง 1000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์และกำลังรวมมวลในอัตราที่ไม่เกินขีดจำกัดของเฮ็ดดิงตัน การรวมมวลของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดจะต้องมีกลไกเดียวกันกับการรวมมวลของหลุมดำที่เกิดจากการยุบตัวของดาวฤกษ์ทั่วไป (Stellar mass black hole) ดังนั้นสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดจะต้องมีลักษณะเป็นไปตามที่คาดการณ์เมื่อสมมติให้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดมีกลไกการรวมมวลเดียวกัน อย่างไรก็ตาม หลาย ๆ การศึกษาแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดโดยใช้สเปกตรัมที่มีคุณภาพสูง (ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัย [19-21]) พบว่าเส้นสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดมีลักษณะสำคัญที่ต่างจากสเปกตรัมของหลุมดำที่เกิดจากการยุบตัวของดาวฤกษ์ทั่วไปจึงนำไปสู่สมมติฐานที่ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดน่าจะเป็นหลุมดำที่เกิดจากการยุบตัวของดาวฤกษ์ทั่วไป (Stellar mass black hole) ที่กำลังรวมมวลที่อัตราสูงเกินกว่าขีดจำกัดของเฮ็ดดิงตัน

สมมติฐานข้างต้นนำไปสู่การเสนอแนวคิดการรวมมวลของหลุมดำที่มากกว่าขีดจำกัดของเฮ็ดดิงตันที่อัตราการรวมมวลที่เกินขีดจำกัดนี้ แรงดันจากโฟตอนจะมีค่าสูงจนอาจทำให้จานรวมมวลแบบ Shakura และ Sunyaev ไม่มีเสถียรภาพและไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ ดังนั้นทฤษฎีการรวมมวลของหลุมดำที่มีอัตรามากกว่าขีดจำกัดของเฮ็ดดิงตันจะต้องอธิบายวิธีการลดแรงดันจากโฟตอนที่เกิดในจานรวมมวล งานวิจัย [22] ได้เสนอสองกระบวนการที่จะใช้ลดแรงดันจากโฟตอนในจานรวมมวลที่มีอัตราการรวมมวลสูง กระบวนการ

แรกคือหลุมดำจะเพิ่มขนาดความหนาของจานรวมมวล (Slim disc model) [23] โดยปกติจานรวมมวลแบบ Shakura และ Sunyaev จะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการรวมมวลที่สูง จานรวมมวลจะมีความหนาเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดันจากโฟตอนจะดันให้จานหนาขึ้น การหนาขึ้นของจานรวมมวลจะทำให้โฟตอนที่กำเนิดที่จุดที่อยู่ไกลจากผิวนอกของจานใช้เวลาเดินทางมากขึ้นก่อนจะหลุดออกจากจาน ผลที่เกิดขึ้นคือโฟตอนบางส่วนจะตกลงสู่หลุมดำก่อนจะหลุดออกจากจานทำให้จานมีแรงดันโฟตอนลดลง กระบวนการที่สองที่หลุมดำใช้ในการลดแรงดันโฟตอนคือการกำเนิดของลม (Outflowing wind) ที่บริเวณผิวนอกของจานรวมมวล การเกิดขึ้นของลมเหล่านี้จะทำให้แก๊สและโฟตอนบางส่วนที่อยู่ที่ผิวนอกของจานรวมมวลถูกสลัดออกไปจากจานรวมมวล ทำให้แก๊สและโฟตอนหลักที่เหลืออยู่ในจานรวมมวลมีแรงดันลดลง งานวิจัย [22] เสนอว่าหลุมดำจะใช้สองกระบวนการนี้ร่วมกันในการรวมมวลที่อัตราสูงกว่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน

นักดาราศาสตร์พยายามศึกษาสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดอย่างต่อเนื่องเพื่อยืนยันว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดคือหลุมดำที่กำลังรวมมวลที่อัตราสูงกว่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน งานวิจัย [20-21] พบว่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดมีความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของหลุมดำที่รวมมวลที่อัตราต่ำกว่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน หลาย ๆ การศึกษาพยายามที่จะยืนยันการมีอยู่จริงของลมที่เกิดจากจานรวมมวล [24-25] นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยที่เสนอว่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก โดยขึ้นกับอัตราการรวมมวลและมุมที่จานรวมมวลทำกับผู้สังเกตบนโลก [26-27] ที่อัตราการรวมมวลซึ่งไม่เกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันมากเกินไป สเปกตรัมของหลุมดำจะมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของจานรวมมวลที่กำลังรวมมวลที่อัตราประมาณขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการรวมมวลสูงกว่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตันมาก ๆ ลมจะถูกปล่อยออกจากจานรวมมวลทำให้สเปกตรัมของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดมีลักษณะเป็นสเปกตรัมที่มาจากโฟตอนสององค์ประกอบ คือโฟตอนพลังงานสูงที่มาจากจานรวมมวลและโฟตอนพลังงานต่ำที่มาจากลม สเปกตรัมจะมีโฟตอนจากองค์ประกอบใดมากกว่าขึ้นอยู่กับมุมที่จานรวมมวลทำกับผู้สังเกตบนโลก แนวคิดนี้ได้รับการสนับสนุนจากการศึกษาการแปรผันของสเปกตรัม (Spectral variability) ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด โดยมีการสรุปว่าเนื่องจากจานรวมมวลมีการส่าย (Precession) มุมที่จานรวมมวลทำกับผู้สังเกตบนโลกจึงมีการเปลี่ยนแปลงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของโฟตอนที่มาจากทั้งสององค์ประกอบในสเปกตรัม [28] ยิ่งไปกว่านั้น หลักฐานการมีอยู่จริงของลมที่เกิดจากจานรวมมวลถูกตรวจวัดได้โดยตรงและได้รับการยืนยันด้วยงานวิจัย [29] แล้วเมื่อไม่นานมานี้

จนถึงปัจจุบัน นักดาราศาสตร์เชื่อว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดส่วนใหญ่ น่าจะเป็นหลุมดำที่กำลังรวมมวลที่อัตราสูงกว่าขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน หลาย ๆ งานวิจัยได้ทำการวัดมวลของหลุมดำ และยืนยันว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดมีมวลเท่ากับหลุมดำที่เกิดจากการยุบตัวของดาวฤกษ์ที่มีมวลอยู่ในระดับปกติ (Stellar mass black hole) [30-32] อย่างไรก็ตาม ยังมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดบางแหล่งกำเนิดที่นักดาราศาสตร์พบว่าสเปกตรัมมีความสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่าพวกมันน่าจะเป็นหลุมดำที่มีมวลประมาณ 100 ถึง 1000 เท่าของมวลดวงอาทิตย์และกำลังรวมมวลที่อัตราไม่เกินขีดจำกัดของเอ็ดดิงตัน ยกตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวด HLX-1 ในดาราจักร ESO 243-49 [33] รวมถึงตัวอย่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดที่รายงานในงานวิจัย [34] นอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดอย่างน้อยสามแหล่งกำเนิดคือ

ดาวนิวตรอนที่กำลังรวมมวลที่อัตราสูงกว่าขีดจำกัดของเฮ็ดดิงตัน [35] ดังนั้นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีความสว่างยิ่งยวดจึงเกิดจากวัตถุที่มีความหลากหลาย และเป็นหนึ่งในวัตถุที่น่าสนใจอย่างมากในทางดาราศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

1. Wald, R. (1984). *General relativity*. 1st Ed. Chicago. University of Chicago Press.
2. Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 322(10), 891–921.
3. Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–822.
4. Schwarzschild, K. (1916). On the gravitational field of a mass point according to Einstein's theory. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften (Physikalisch-Mathematische)*, 7, 189-196.
5. Klein, O. (1926). The atomicity of electricity as a quantum theory law. *Nature*, 118, 516.
6. Bekenstein, J. D. (1972). Black holes and the second law. *Lettere Al Nuovo Cimento*, 4(15), 737–740.
7. Hawking, S. W. & Page, D. N. (1983). Thermodynamics of black holes in anti-de sitter space. *Communications in Mathematical Physics*, 87(4), 577–588.
8. Hawking, S. W. (2005). Information loss in black holes. *Physical Review D*, 72(8), 084013-084016.
9. Maldacena, J. (2003). Eternal black holes in anti-de sitter. *Journal of High Energy Physics*, 0304, 021-037.
10. Maldacena, J. & Susskind, L. (2013). Cool horizons for entangled black holes. *Fortschritte der Physik*, 61(9), 781–811.
11. Shakura, N. I. & Sunyaev, R. (1973). Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astronomy and Astrophysics*, 24, 337–355.
12. Narayan, R. & Yi, I. (1995). Advection dominated accretion: Underfed black holes and neutron stars. *Astrophysical Journal*, 452, 710-735.
13. Gilfanov, M. (2010). X-ray Emission from Black-hole Binaries. In: Belloni, T., editor. *The Jet Paradigm*. Heidelberg. Springer. p. 17–51.
14. Belloni, T. M. (2010). States and transitions in black hole binaries. In: Belloni, T., editor. *The Jet paradigm*. Heidelberg. Springer. p. 53–84.
15. Feng, H. & Soria, R. (2011). Ultraluminous X-ray sources in the Chandra and XMM-Newton Era. *New Astronomy Reviews*, 55(5), 166–183.

16. Colbert, E. J. & Mushotzky, R. F. (1999). The nature of accreting black holes in nearby galaxy nuclei. *Astrophysical Journal*, 519(1), 89-107.
17. Miller, J., Fabbiano, G., Miller, M., & Fabian, A. (2003). X-ray spectroscopic evidence for intermediate-mass black holes: Cool accretion disks in two ultraluminous X-ray sources. *Astrophysical Journal Letters*, 585(1), L37-L40.
18. Miller, J., Fabian, A., & Miller, M. (2004). Revealing a cool accretion disk in the ultraluminous X-ray source M81 X-9 (Holmberg ix x-1): Evidence for an intermediate-mass black hole. *The Astrophysical Journal*, 607(2), 931-938.
19. Roberts, T., Warwick, R., Ward, M., Goad, M., & Jenkins, L. (2005). Xmm-Newton epic observations of the ultraluminous X-ray source NGC 5204 x-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 357(4), 1363–1369.
20. Stobbart, A.-M., Roberts, T., & Wilms, J. (2006). Xmm-Newton Observations of the brightest ultraluminous X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368(1), 397–413.
21. Gladstone, J. C., Roberts, T. P., & Done, C. (2009). The ultraluminous state. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 397(4), 1836–185.
22. 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.
23. Abramowicz, M., Czerny, B., Lasota, J., & Szuszkiewicz, E. (1988). Slim Accretion Disks. *Astrophysical Journal*, 332, 646–658.
24. Walton, D., Miller, J., Harrison, F., Fabian, A., Roberts, T., Middleton, M., & Reis, R. (2013). X-ray outflows and super-eddington accretion in the ultraluminous X-ray source Holmberg IX X-1. *Astrophysical Journal Letters*, 773(1), L9-L13.
25. Middleton, M. J., Walton, D. J., Roberts, T. P., & Heil, L. (2014). Broad absorption features in wind-dominated ultraluminous X-ray sources? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 438(1), L51–L55.
26. Middleton, M. J., Heil, L., Pintore, F., Walton, D. J., & Roberts, T. P. (2015). A spectral-timing model for ULXs in the supercritical regime. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 447(4), 3243–3263.
27. Sutton, A. D., Roberts, T. P., & Middleton, M. J. (2013). The ultraluminous state revisited: Fractional variability and spectral shape as diagnostics of super-eddington accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(2), 1758–1775.

28. Luangtip, W., Roberts, T. P., & Done, C. (2016). The X-ray spectral evolution of the ultraluminous X-ray source Holmberg IX X-1. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460(4), 4417–4432.
29. Pinto, C., Middleton, M. J., & Fabian, A. C. (2016). Resolved atomic lines reveal outflows in two ultraluminous X-ray sources. *Nature*, 533(7601), 64–67.
30. Middleton, M. J., Miller-Jones, J. C., Markoff, S., Fender, R., Henze, M., Hurley-Walker, N., Scaife, A. M., & Grainge, K. (2013). Bright radio emission from an ultraluminous stellar-mass microquasar in M 31. *Nature*, 493(7431), 187–190.
31. Liu, J.-F., Bregman, J. N., Bai, Y., Justham, S., & Crowther, P. (2013). Puzzling accretion onto a black hole in the ultraluminous x-ray source M 101 ULX-1. *Nature*, 503(7477), 500–503.
32. Motch, C., Pakull, M., Soria, R., Grisé, F., & Pietrzyński, G. (2014). A mass of less than 15 solar masses for the black hole in an ultraluminous X-ray source. *Nature*, 514(7521), 198–201.
33. Farrell, S. A., Webb, N. A., Barret, D., Godet, O., & Rodrigues, J. M. (2009). An intermediate-mass black hole of over 500 solar masses in the galaxy ESO 243-49. *Nature*, 460(7251), 73–75.
34. Sutton, A. D., Roberts, T. P., Walton, D. J., Gladstone, J. C., & Scott, A. E. (2012). The most extreme ultraluminous X-ray sources: Evidence for intermediate-mass black holes? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423(2), 1154–1177.
35. Bachetti, M., Harrison, F., Walton, D., Grefenstette, B., Chakrabarty, D., Fürst, F., Barret, D., Zhang, W. W. (2014). An Ultraluminous X-ray source powered by an accreting neutron star. *Nature*, 514(7521), 202–204.