บทความวิชาการ

หลุมดำในทฤษฎีสัมพัทธภาพและเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำ

สุพจน์ มุศิริ*

บทคัดย่อ

หลุมดำในฟิสิกส์ทฤษฎีเป็นผลที่ได้จากทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ซึ่งเป็นทฤษฎีที่รวมแรงโน้มถ่วงกับแรงไฟฟ้าแม่เหล็กเข้าด้วยกัน หลุมดำได้ทำให้เกิดข้อขัดแย้งหลายประการกับหลักการสำคัญทางฟิสิกส์ คือ กลศาสตร์ดั้งเดิม ไฟฟ้าแม่เหล็ก และกลศาสตร์ควอนตัม แต่กฎเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำ ที่กล่าวถึงในที่นี้และพิสูจน์โดยบีเคนสไตน์และฮ็อคกิงค์ โดยให้หลุมดำสามารถแผ่รังสีได้ในระดับจุลภาคหรือต้องใช้วิธีการทางควอนตัมมาอธิบาย ทำให้เทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำเป็นหลักการสำคัญที่ ทฤษฎีควอนตัม-กราวิตี้ (quantum-gravity) ที่ถูกเสนอขึ้นมาโดยต้องพิสูจน์กฎเหล่านี้ได้

คำสำคัญ: หลุมดำ เทอร์โมไดนามิกส์ การแผ่รังสีของหลุมดำ ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ทฤษฎีควอนตัม-กราวิตี้

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: suphot@swu.ac.th

Black Holes in Theory of Relativity and Its Thermodynamics

Suphot Musiri*

ABSTRACT

Black holes in theoretical physics are one of the result from theory of general relativity which combines gravitational and electromagnetic interactions together. Black holes have created many contradictions to classical and quantum mechanics. In this review, the black hole thermodynamic problem is described. Black hole thermal radiation proposed by Bekenstein and proved by Hawking becomes remedy to the problem with the help of quantum theory. Black hole thermodynamic laws have become the main principle of any quantum-gravity theory candidate.

Keywords: black hole, black hole thermodynamics, theory of general relativity and quantum-gravity theory

Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University
*Corresponding author, e-mail: suphot@swu.ac.th

บทนำ

หลุมดำ (black hole) คือ บริเวณที่ความโน้มถ่วงมีค่าสูงมากจนไม่มีสิ่งใดหนีรอดไปได้ แม้แต่แสง ทั้งสสารและพลังงาน จะถูกแรงโน้มถ่วงมหาศาลดึงดูดเข้าไปรวมกันที่จุดศูนย์กลางของหลุมดำ ทำให้โมเลกุล อะตอม และ นิวเคลียส ไม่เสถียร จึงสลายตัวเป็นอนุภาคพื้นฐาน (elementary particle) ตำแหน่งที่สสารหรือพลังงานเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอิทธิพลของหลุมดำแล้วไม่สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับออกมาได้เรียก ตำแหน่งนี้ว่า ฮอริซัน (horizon, r_H)

หลุมดำเป็นผลจากการมีจุดเอกฐาน (singularity) ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์ แต่แนวความคิดของหลุมดำได้มีการนำเสนอมาก่อน ในปี พ.ศ. 2327 (ค.ศ. 1784) โดย ลูมิเน็ต (Luminet) [1] ได้ศึกษาดาวฤกษ์ ที่มีแรงดึงดูดโน้มถ่วงสูงมากจนแสงหนีไปไม่ได้ และนิวตัน (Newton) [2] ได้คำนวณหารัศมีฮอริซัน ด้วยวิธีกลศาสตร์ดั้งเดิม และได้ให้แสงเป็นอนุภาค

หลุมดำและทฤษฎีสัมพัทธภาพ

ในปี พ.ศ. 2448 (ค.ศ. 1905) ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้เสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพเฉพาะ [3] (Special Relativity) ซึ่งเป็นทฤษฎีการแปลงสมการฟิสิกส์ ระหว่างพิกัดต่างๆ ด้วยการแปลงโลเร็นตซ์ (Lorentz transformation) ที่ใช้ได้ทั้งในกลศาสตร์ดั้งเดิมและในทฤษฎีไฟฟ้าแม่เหล็ก การแปลงนี้ได้มาจากการกำหนดให้ความเร็วแสงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละพิกัดที่มีความเร็วต่างๆ กัน ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลอง เช่น การทดลองของไมเคลสันกับมอร์ลีย์ (Michelson and Morley) [4] ในปี พ.ศ. 2430 (ค.ศ. 1887) เป็นต้น

ผลที่ได้จากทฤษฎีสัมพัทธภาพเฉพาะมีมากมาย อาทิเช่น เวลาและระยะทางมีค่าไม่เท่ากันในพิกัดที่มีความเร็วต่างกัน หรือเวลาและระยะทางยืดและหดได้เพื่อให้ความเร็วแสงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้เมื่อต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระยะทาง จำเป็นต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเวลาไปด้วย เท่ากับเป็นการขยายจำนวนมิติของพิกัดจาก 3 เป็น 4 มิติ ซึ่งเป็นการรวมเอาเวลาเข้าไว้ในพิกัดที่บอกทั้งตำแหน่งและเวลาเรียกพิกัดใหม่เป็น พิกัดของปริภูมิ-เวลา (space-time coordinate) และเรียกแต่ละจุดของพิกัดนี้เป็นเหตุการณ์ (event) การรวมเอาระยะทางกับเวลา หรือ ขยายจำนวนมิติของพิกัด สามารถทำได้กับปริมาณอื่นๆ ทางฟิสิกส์ เช่น พลังงานกับโมเมนตัม กำลังกับแรง ประจุไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า สนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก เป็นต้น การรวมปริมาณทางฟิสิกส์นี้ให้ความหมายว่าปริมาณทั้งสองเป็นปริมาณเดียวกัน เพียงแต่มีค่าต่างกันในพิกัดที่ต่างกันนั้นเอง เช่น มวล (m) เปลี่ยนเป็นพลังงาน (E) ได้ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่รู้จักกันดีคือ $E = mc^2$

ในช่วงเวลาที่มีการเสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพเฉพาะ อันตรกิริยาที่รู้จักกันดีคือ แรงโน้มถ่วงและแรงไฟฟ้าแม่เหล็ก ส่วนอันตรกิริยานิวเคลียร์หรือ แรงแข็งและแรงอ่อน (strong and weak forces) ยังไม่ได้มีการศึกษามากนัก ทฤษฎีสัมพัทธภาพเฉพาะเป็นการรวมกลศาสตร์ดั้งเดิมและทฤษฎีไฟฟ้าแม่เหล็กเป็นทฤษฎีหนึ่งเดียว แต่ยังไม่รวมเอาแรงโน้มถ่วงไว้ด้วย

ในปี พ.ศ. 2459 (ค.ศ. 1916) [5] ไอน์สไตน์ ได้เสนอทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ที่กล่าวถึงหลักการที่ว่า “มวลของอนุภาคในสนามโน้มถ่วงเท่ากับมวลเฉื่อยที่ต้านเคลื่อนที่ด้วยความเร่งของอนุภาค”

ไอน์สไตน์เรียกหลักการนี้ว่า หลักการสมมูล (Principle of Equivalence) หลักการนี้ทำให้กฎและสมการทางฟิสิกส์ไม่เปลี่ยนรูปในพิกัดใดๆ แม้พิกัดนั้นๆ มีความเร่ง และทำให้การแปลงระหว่างพิกัดต้องเป็นการแปลงแบบทั่วไป ไม่ใช่เป็นเพียงการแปลงแบบโลเรนต์ในทฤษฎีสัมพัทธภาพเฉพาะที่แปลงระหว่างพิกัดเฉื่อยที่เป็นปริภูมิ-เวลาราบ (flat space-time) ส่วนการแปลงแบบทั่วไประหว่างปริภูมิ ได้มีการศึกษาในวิชาเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (differential geometry) ซึ่งเป็นการศึกษาปริภูมิโค้ง (curved space) ทำให้ปริภูมิ-เวลาในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเป็นปริภูมิ-เวลาโค้ง (Curved space-time) ซึ่งเป็นผลจากการที่อนุภาค หรือพิกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร่งหรืออยู่ในสนามความโน้มถ่วง ผลของหลักการสมมูลทำให้ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปสามารถรวมแรงโน้มถ่วงและแรงไฟฟ้าแม่เหล็กไว้ด้วยกัน

สมการการเคลื่อนที่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเรียกว่า สมการไอน์สไตน์ (Einstein's equation) ซึ่งใช้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคและคลื่นในปริภูมิ-เวลาโค้งที่อยู่ในอิทธิพลของสนามโน้มถ่วงและสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก

ผลเฉลยของสมการไอน์สไตน์ ในกรณีที่ง่ายที่สุดคือ มวล M ที่มีค่ามหาศาลเป็นตัวที่สร้างความโค้งของปริภูมิ-เวลาในสุญญากาศ เรียกผลเฉลยนี้ว่า ผลเฉลยชวาร์ซชายด์ (Schwarzschild metric) ซึ่งค้นพบโดย ชวาร์ซชายด์ [6] ในปี พ.ศ. 2458 (ค.ศ. 1916) ผลเฉลยนี้มีภาวะเอกฐาน (singularities) ที่รัศมีเป็น $r = 0, \infty$ และ $r = 2M$ (เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณในที่นี้ได้กำหนดให้ $G = c = 1$ เมื่อให้ G คือ ค่าคงตัวโน้มถ่วงของนิวตัน และ c คือ อัตราเร็วแสง) ภาวะเอกฐาน ที่รัศมี $r = \infty$, $2M$ เป็นผลที่เกิดจากการเลือกพิกัดและสามารถกำจัดภาวะเอกฐานไปได้ ด้วยการแปลงสู่พิกัดใหม่ แต่ภาวะเอกฐานที่ $r = 0$ ไม่สามารถกำจัดไปได้ไม่ว่าจะแปลงไปสู่พิกัดใด ส่วนรัศมี $r = 2M$ แม้จะสามารถกำจัดภาวะเอกฐานไปได้ แต่ที่รัศมีนี้มีความหมายทางกายภาพ เพราะเป็นตำแหน่งที่ผลเฉลยเปลี่ยนเครื่องหมาย เรียกรัศมีนี้ว่า ฮอริซัน (horizon, r_H) มวลทุกมวลมีฮอริซัน เช่น โลกมี $r_H \approx 1$ เซนติเมตร ดวงอาทิตย์มี $r_H \approx 3$ กิโลเมตร วัตถุส่วนมากจะมีขนาดใหญ่กว่ารัศมีฮอริซันของมันเอง ดังนั้นเมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าไปภายในวัตถุโดยเข้าหาสู่จุดศูนย์กลางมวล มวลที่ส่งแรงกระทำต่อผู้สังเกตจะมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์ หรือ $r_H \Rightarrow 0$ ตามทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss' theorem) แต่ถ้ามวลของวัตถุนั้นมีขนาดเล็กกว่า รัศมีฮอริซันหรือมวลทั้งหมดไปกระจุกอยู่ภายในบริเวณเล็กๆ ความโค้งของปริภูมิ-เวลาในบริเวณนี้จะสูงมาก จนแม้กระทั่งแสงเมื่อเคลื่อนที่จากภายนอกผ่านฮอริซันเข้าไปแล้ว ก็ไม่สามารถรอดหลุดจากการไหลตกไปที่ภาวะเอกฐานที่ $r = 0$ เราเรียกบริเวณที่มีความโค้งค่าสูงนี้ และมีฮอริซันซึ่งเป็นเสมือนผิวที่ห่อหุ้มจุดเอกฐาน (singularity point) นี้ไม่ให้ผู้สังเกตภายนอกเห็นว่ามีหลุมดำ (black holes) โดยนักฟิสิกส์ชื่อ วิ่ลเลอร์ (Wheeler) [7] คือ ผู้เรียกเป็นหลุมดำเป็นคนแรก

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า หลุมดำจะเกิดขึ้นเมื่อมวลทั้งหมดของวัตถุนั้นกระจุกตัวรวมกันอยู่ในบริเวณที่เล็กกว่ารัศมีฮอริซันของวัตถุนั้น เมื่อพิจารณาวัตถุที่มีมวลมหาศาลเพียงพอที่แรงโน้มถ่วงของมันจะชนะแรงนิวเคลียร์ ที่ผลักกันระหว่างอนุภาคในระดับจุลภาค ซึ่งได้แก่ ดาวฤกษ์ เช่น ดวงอาทิตย์มีมวลประมาณ 2×10^{30} กิโลกรัม หรือ 3 แสนเท่าของโลก และมีอายุประมาณ 4.5 พันล้านปี [8] โดยในอนาคตอีก 5 พันล้านปี ดวงอาทิตย์จะใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจนเกือบหมดในปฏิกิริยาการหลอมนิวเคลียส (fusion) แล้ว เริ่มใช้ฮีเลียมและนิวเคลียสที่มีมวลมากขึ้น เช่น คาร์บอนแทนปฏิกิริยาการหลอมนิวเคลียสของฮีเลียมขึ้นกับการเปลี่ยนของอุณหภูมิมาก การเพิ่มอุณหภูมิในปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยจะให้พลังงาน

และความร้อนออกมาอย่างมากมาย ทำให้ดวงอาทิตย์ขยายตัวจนมีรัศมี 250 เท่าของรัศมีปัจจุบัน และกลืนกินโลก นักวิทยาศาสตร์เรียกสภาวะนี้ของดาวอาทิตย์ว่า ยักษ์แดง (red giant) ซึ่งใจกลางมีอุณหภูมิสูงประมาณ 100 ล้านองศา (ปัจจุบันประมาณ 15 ล้านองศา) การขยายตัวอย่างรุนแรง ทำให้บริเวณชั้นนอกที่ของดวงอาทิตย์หลุดออกมาจากยักษ์แดงเป็น กลุ่มแก๊สร้อนที่เรียกว่า นีบูลา (nebula) ซึ่งเกิดในช่วงเวลาประมาณ 1 หมื่นปี จากนั้น ดวงอาทิตย์ก็จะเหลือแกนที่มีขนาดใหญ่ประมาณโลก เรียกดวงอาทิตย์ ณ สภาวะนี้ว่า แคระขาว (white dwarf) แต่ก็ยังมีความร้อนและพลังงานหลงเหลือ ซึ่งจะแผ่ออกมาจากปฏิกิริยาหลอมนิวเคลียส และดวงอาทิตย์จะค่อยเย็นลงอีกประมาณ 4 พันล้าน และในที่สุดจะมืดจนมองไม่เห็น เรียกว่า แคระดำ (black dwarf) รวมอายุขัยของดวงอาทิตย์ 14 พันล้านปี แต่เอกภพมีอายุประมาณ 13 พันล้านปี ดังนั้นดวงฤกษ์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของเอกภพและมีมวลใกล้เคียงของดวงอาทิตย์จะยังไม่เป็นแคระดำ แต่ 97 เปอร์เซ็นต์ของดาวฤกษ์ในเอกภพมีมวลใกล้เคียงดวงอาทิตย์ จะมีจุดจบเป็นแคระดำ

ถ้าดาวฤกษ์มีมวลมากกว่าดวงอาทิตย์ประมาณ 1.5 ถึง 3 เท่าในช่วงเวลาที่ดาวเป็นซุปเปอร์ยักษ์แดง (super red giant) [8] มันจะขยายตัวมาก และมีการระเบิดภายในแกนอย่างรุนแรงมาก และในช่วงสุดท้ายของซุปเปอร์ยักษ์แดงจะเกิดการระเบิดอย่างรุนแรงของบริเวณชั้นนอกของซุปเปอร์ยักษ์แดง เรียกการระเบิดนี้ว่า ซุปเปอร์โนวา (supernova) ความรุนแรงของการระเบิด สามารถสังเกตเห็นได้ทั้งดาราจักร (galaxy) แกนกลางที่เหลืออยู่ถ้ามีมวลประมาณ 1.2 ถึง 2.1 เท่าของดวงอาทิตย์ แรงโน้มถ่วงมีค่าสูงมากและการไม่มีปฏิกิริยาหลอมนิวเคลียสที่มากเพียงพอจะต้านการยุบตัวของแกนที่เหลือ ทำให้เกิดการยุบตัวของอะตอม โดยอิเล็กตรอนจะรวมตัวกับโปรตอนเป็นนิวตรอน แต่นิวตรอนเป็นอนุภาคเฟร์มิออน ดังนั้นจากหลักการกีดกันเพาลี (Pauli exclusion principle) นิวตรอนไม่สามารถอยู่ในสถานะทางควอนตัมเดียวกัน ทำให้เกิดการผลักระหว่างอนุภาคนิวตรอนที่อยู่ใกล้กัน ซึ่งจะป้องกันการยุบตัวลงไปมากกว่านี้ เรียกดาวชนิดนี้ว่า ดาวฤกษ์นิวตรอน (neutron star) ซึ่งมีรัศมีประมาณ 12 กิโลเมตรซึ่งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับมวลของมัน ทำให้ดาวนิวตรอนมีความหนาแน่นสูงมากประมาณ 10^9 กิโลกรัมต่อเมตร^3 ที่เปลือกนอก และ 10^{17} กิโลกรัมต่อเมตร^3 ที่อยู่ภายในดาวนิวตรอน ที่ผิวดาวชนิดนี้มีสนามโน้มถ่วงมีค่าประมาณ 2×10^{11} เท่าบนผิวโลก และมีความเร็วหลบหนี (escape velocity) ประมาณ 1 ใน 3 ของความเร็วแสง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของแสงที่ผ่านใกล้ดาวฤกษ์นิวตรอน

ถ้าดาวฤกษ์มีมวลมากกว่า 3 เท่าของดวงอาทิตย์ [9] แรงดึงดูดโน้มถ่วงจะมีกำลังมากพอที่เอาชนะแรงนิวเคลียร์ที่ผลักกันระหว่างอนุภาคพื้นฐาน ทำให้อนุภาคทั้งหมดถูกดูดรวมอยู่ในบริเวณที่มีรัศมีน้อยกว่ารัศมีฮอริซัน และทำให้เกิดหลุมดำขึ้น โดยจะเกิดขึ้นในเสี้ยววินาทีหลังการระเบิดซุปเปอร์โนวา

หลุมดำเป็นวัตถุในอวกาศในทางทฤษฎี จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2514 (ค.ศ. 1971) [10] นักดาราศาสตร์ได้พบข้อมูลหลักฐาน ในเหตุการณ์ที่ดาวฤกษ์โคจรรอบๆ วัตถุที่มวลมีค่ามากๆ ซึ่งมองไม่เห็น และเนื้อสสารของดาวฤกษ์ไหลวนเข้าไปสู่บริเวณที่มองไม่เห็นนั้น ข้อมูลต่างๆ ของระบบนี้สอดคล้องกับปรากฏการณ์หลุมดำ ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป อีกทั้งยังพบหลุมดำขนาดมหึมา (supermassive black hole) ที่อยู่ในกลางดาราจักรส่วนใหญ่ ทำให้ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่า หลุมดำมีอยู่จริง แต่ในทางทฤษฎี หลุมดำไม่จำเป็นต้องเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการยุบตัวของวัตถุที่มีมวลมหาศาลเสมอ หลุมดำอาจปรากฏในการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคที่มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะทำให้มวลบางส่วนถูกอัดให้อยู่ใน

บริเวณที่เล็กกว่ารัศมีฮอริซันของมัน ทำให้เกิดหลุมดำจิ๋ว (mini black hole) [11] ตัวอย่างเช่น การชนกันของอนุภาคในเครื่องเร่งอนุภาคฮาดรอนขนาดใหญ่ (Large Hadron Collider, LHC) ที่เซิร์น (European Organization for Nuclear Research, CERN) ที่มีพลังงานในช่วง 10^{12} eV (อิเล็กตรอนโวลต์) ซึ่งมากพอที่จะผลิตหลุมดำจิ๋วได้

ปรากฏการณ์หลุมดำได้ทำให้เกิดข้อขัดแย้งหลายอย่างทั้งในกลศาสตร์ดั้งเดิม เทอร์โมไดนามิกส์ และความรู้นึกคิดโดยปกติของคนทั่วไป ดังเช่น

ปัญหาความขัดแย้งเรื่องเวลาและระยะทาง ณ บริเวณใกล้ๆ หลุมดำ ว่าเวลาจะเดินช้ามาก และระยะทางก็สั้นลงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาและระยะทางของผู้สังเกตที่อยู่บริเวณไกลจากหลุมดำ ผู้สังเกตจะเห็นเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหาหลุมดำนานเป็นอนันต์ แม้ว่าระยะทางระหว่างผู้สังเกตกับหลุมดำจะมีค่าจำกัด [12]

ปัญหาทางควอนตัม เนื่องจากทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเป็นทฤษฎีระดับมหภาค (macroscopics) ที่ทำนายการมีอยู่ของหลุมดำ จากการปรากฏของจุดเอกฐาน เพราะมวลสารและพลังงานถูกอัดกระจุกตัวเป็นจุดด้วยแรงโน้มถ่วงมหาศาล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ในระดับจุลภาค แต่จุดเอกฐานในทฤษฎีจะไม่ควรมีความหมายทางกายภาพ กล่าวอีกนัยหนึ่งทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปยังไม่สมบูรณ์หรือไม่เป็นจริงที่บริเวณนี้ ดังนั้นเราควรที่จะหาหลักการหรือทฤษฎีใหม่ที่ครอบคลุมวิธีการแก้ปัญหาและอธิบายปรากฏการณ์หรือระบบที่มีพฤติกรรมทางควอนตัมภายใต้ความโน้มถ่วงสูงในระดับจุลภาคให้ได้ แต่ในปัจจุบันเรายังไม่มีหลักการหรือทฤษฎีที่ได้รับการทดสอบโดยการทดลอง ว่าใช้แก้ปัญหาดังกล่าวได้พร้อมกัน นักวิทยาศาสตร์เรียกหลักการหรือทฤษฎีที่รอการพิสูจน์นี้ว่า ควอนตัม-กราวิตี้ (quantum-gravity)

ปัญหาการสูญเสียข้อมูลในระดับควอนตัม เนื่องจากเป็นทฤษฎีระดับมหภาค ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ยังได้สร้างปัญหาต่อเนื่องที่สำคัญ คือ หลุมดำมีแต่ดูดสสารโดยไม่มีการคาย ดังนั้นผู้สังเกตภายนอกจะไม่สามารถรับทราบได้ว่าเกิดอะไรภายในหลุมดำ หรือการไม่ส่งข้อมูลอะไรออกมาเลยหลังเกิดเป็นหลุมดำ หรืออาจเรียกว่าเป็นการสูญเสียข้อมูลตลอดไป ทำให้ไม่ว่าหลุมดำจะดึงดูดสิ่งหรือระบบที่มีความซับซ้อนมาก ความซับซ้อนก็จะถูกทำลายไปตลาดกาล ทำให้สมบัติ (เช่น สปิน) และพฤติกรรมของหลุมดำไม่ขึ้นกับความซับซ้อนของระบบหรือข้อมูลที่มันดูดเข้าไป ณ วันนี้ ปริมาณทางกายภาพที่บ่งบอกถึงสมบัติและลักษณะเฉพาะของหลุมมีเพียง 3 ปริมาณ คือ มวล ประจุ และโมเมนตัมเชิงมุมของหลุมดำ นักฟิสิกส์เรียกหลักการที่หลุมดำไม่ขึ้นกับข้อมูลอื่น ว่าทฤษฎีบทไร้ขน (no hair theorem) หรือหลุมดำไม่มีขน (black holes have no hair) [13]

ต่อไปจะอธิบายปัญหาข้อขัดแย้งสำคัญ คือเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำ

เทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำ (Thermodynamics of Black Holes)

ปัญหาสำคัญ คือ ข้อขัดแย้งระหว่างสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำกับกฎเทอร์โมไดนิกส์ทั้งสามข้อ โดยขอทบทวนกฎทั้งสามข้อดังนี้

กฎข้อที่ 1 พลังงานภายในที่เปลี่ยนไปของระบบ (dE) เท่ากับ ผลรวมของการเปลี่ยนพลังงานความร้อน (dQ) กับงาน (dW) ในระบบ

$$dE = dQ + dW \tag{1}$$

กฎข้อที่ 2 กล่าวว่า ความยุ่งเหยิงของระบบหรือ เอนโทปี (dS) มีค่าไม่ลดลง

$$dS \geq 0 \tag{2}$$

โดย $dS = dQ/T$ เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K) S คือ เอนโทรปี (entropy) ซึ่งวัดความยุ่งเหยิงของระบบและมีหน่วยเป็นจูลต่อเคลวิน (J/K)

กฎข้อที่ 3 กล่าวว่า เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงเข้าสู่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T \Rightarrow 0$) แล้วเอนโทรปีจะมีค่าลดลงเข้าสู่ศูนย์ด้วย ($S \Rightarrow 0$) แต่จากกฎข้อที่ 2 เอนโทรปีไม่เคยลดลง ดังนั้นอุณหภูมิมีค่าไม่เป็นศูนย์องศาสัมบูรณ์

$$T \neq 0 \tag{3}$$

สมบัติและพฤติกรรมของหลุมดำในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ขัดแย้งกับกฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่ 3 เพราะหลุมดำมีแต่การดึงดูดมวลสารและพลังงานในระดับมหภาคเข้าไป แต่ไม่มีการปล่อยออกมาหรือไม่มีการแผ่รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังเป็นที่ทราบกันดีว่าในระดับจุลภาค (microscopic) ว่าสสารมีการแผ่รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิสูงศูนย์องศาสัมบูรณ์ และจากกฎข้อที่ 3 $T \neq 0$ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า วัตถุและสสารทุกชนิดมีการแผ่รังสี ซึ่งข้อแย้งกับหลุมดำซึ่งไม่มีการปลดปล่อย หรือแผ่สิ่งใดๆ ในระดับมหภาคออกมาเลย หรืออาจกล่าวได้ว่า **หลุมดำมีอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์** ซึ่งขัดกับกฎข้อที่ 3 นั่นเอง

การดึงดูดสสารและพลังงานเข้าไปสะสมในหลุมดำหรือใต้ผิวฮอริซันโดยไม่มีการปล่อยออกทำให้ความยุ่งเหยิงหรือเอนโทรปีของหลุมดำมีค่าสูงมากถึงอนันต์ ทำให้พจน์ของพลังงานความร้อนในกฎข้อที่ 2 $dQ = TdS$ เป็นการคูณกันระหว่างปริมาณที่ค่าเข้าสู่ศูนย์กับปริมาณที่มีค่าเข้าสู่อนันต์ ทำให้ปริมาณนี้หาค่าไม่ได้ว่าเป็นศูนย์หรือค่าคงตัวหรือค่าอนันต์

การขจัดข้อขัดแย้งได้เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2515 (ค.ศ. 1972) โดยบีเคนสไตน์ [14] ได้สังเกตเห็นความคล้ายคลึงระหว่างพื้นที่ผิวของหลุมดำที่ไม่มีการลดลงกับเอนโทรปี และได้เสนอให้เอนโทรปีของหลุมดำแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของมัน แต่ความคิดนี้ขัดแย้งกับวิธีคิดแบบดั้งเดิมที่ให้เอนโทรปีเป็นฟังก์ชันของปริมาตรมิใช่พื้นที่

ในปี พ.ศ. 2517 (ค.ศ. 1974) ฮ็อคกิงค์และคณะ [15] ได้พิสูจน์กฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่สองคือ

$$\delta A \geq 0 \tag{4}$$

และยังได้เสนอกฎข้อที่สาม เมื่อ $T > 0$ โดย S คือ เอ็นโทรปีของหลุมดำ, A คือ พื้นที่ผิวของหลุมดำ ซึ่งมีค่าเป็น

$$S \propto A \tag{5}$$

และ อุณหภูมิที่ผิวฮอริซันแปรผันตรงกับปริมาณที่เรียกว่าสนามโน้มถ่วงที่ผิว (surface gravity, κ) ซึ่งมีค่าคงตัวของที่ผิวฮอริซัน

$$T = \frac{\kappa}{2\pi} \tag{6}$$

เช่น ในกรณีของหลุมดำชวายชายด์ $S \approx 2 \times 10^{16}$ (มวลหลุมดำ)^2/(มวลดวงอาทิตย์) จูล/เคลวิน, $T \approx 6 \times 10^{-8}$ x (มวลดวงอาทิตย์)/(มวลหลุมดำ) เควิน

ผลงานของฮ็อคกิงค์สอดคล้องกับผลงานของบีเคนสไตน์ โดยค่าเอนโทรปีและอุณหภูมิใหม่ที่พบนี้เป็นผลทางควอนตัมของระบบ โดย $S \propto 1/h$ และ $T \propto h$, h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ และมีค่า h เป็น 6.626×10^{-34} จูล-วินาที ทำให้เขียนกฎข้อที่หนึ่งของหลุมดำ คือ

$$\delta M = \frac{\kappa}{8\pi} \delta A \tag{7}$$

ดังนั้น เราอาจสรุปได้ว่า ข้อขัดแย้งได้ถูกจำกัดออกไป แต่อย่างไรก็ตามได้มีคำถามเพิ่มขึ้นอย่างน้อยอีก 3 ข้อ ข้อแรกคือ อายุของหลุมดำที่มีการแผ่รังสีอย่างเดียว ในการแผ่รังสีของหลุมดำ จะทำให้มวลของหลุมดำลดลงและรัศมีฮอริซันลดลงด้วย แต่ผลรวมของเอนโทรปีมีค่าไม่ลดลง ดังนั้น หลุมดำจะหดตัวลงเรื่อยๆ จนหายไป โดยอัตราการสูญเสียมวลต่อเวลามีค่าผกผันกับมวลกำลังสอง ทำให้เวลาที่หลุมดำที่มีมวลเท่ากับดวงอาทิตย์ใช้ในการระเหยไปจนหมดจะนานกว่าเวลาของเอกภพ [13] แต่ในกรณีของหลุมดำจิ๋วที่มีมวลเท่ากับมวลพลังค์ (Planck mass, 2×10^{-8} กิโลกรัม) จะระเหยในเวลาประมาณ 10^{-43} วินาที [16]

ข้อที่สองคือ เอนโทรปีของระบบในฟิสิกส์ดั้งเดิมเป็นฟังก์ชันของปริมาตรไม่ใช้พื้นที่ แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าทฤษฎีสัมพัทธภาพเป็นหลักการที่ครอบคลุมฟิสิกส์ดั้งเดิมทั้งหมด ดังนั้นจึงมีแนวคิดว่าแท้จริงแล้วเอนโทรปีเป็นฟังก์ชันของพื้นที่ และปริมาตรในปริภูมิ 3 มิติ คือ พื้นที่ในปริภูมิที่มิติตั้งแต่ 4 ขึ้นไป ดังนั้น ทำให้มีการเสนอหลักการโฮโลกราฟิก (holographic principle) [17] ซึ่งแถลงว่า ฟิสิกส์ใน n+1 มิติได้ถูกกำหนดด้วยฟิสิกส์บนขอบเขตของระบบที่มีมิติเป็น n ทำให้มีการตีความถึงการมีมิติที่มากกว่า 4 (extra dimension)

คำถามสุดท้าย คือ ในการแผ่รังสีของหลุมดำได้มีการปล่อยข้อมูลออกมาหลังจากการดูดกลืนหรือไม่ ในวิชาควอนตัมเป็นที่ทราบกันดีว่า ข้อมูลของอนุภาคหรือคลื่น จะต้องมีการอนุรักษ์เสมอ เพราะเราสามารถหาตัวดำเนินการเปลี่ยนเวลา (time-evolution operator) ที่ทำให้ฟังก์ชันคลื่นแทนอนุภาคเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ตัวดำเนินการนี้เป็นตัวดำเนินการยูนิแทรี (unitary operator) ที่ไม่เป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป

(non-decaying with time) หรือเราสามารถทำให้มันกลับอยู่ในสถานะเดิมได้หรือเรียกข้อมูลกลับมาได้ แต่จากผลเฉลยชวาร์ซชายด์ในทฤษฎีสัมพัทธทั่วไป ตัวดำเนินการเปลี่ยนเวลาของสถานะทางควอนตันของระบบในปริภูมิ-เวลาชวาร์ซชายด์ไม่ใช่ตัวดำเนินการยูนิแทรี ทำให้เป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป (decaying with time) ซึ่งเป็นสาเหตุให้ฮ็อคกิงค์ (Hawking) เดิมพันกับเพรสกิล (Preskill) ด้วยสารานุกรมเบสบอลว่าข้อมูลจะสูญหายในหลุมดำ มีแต่รังสีเนื่องจากความร้อนเท่านั้นที่แผ่ออกมาไม่ข้อมูลใดๆ ปนออกมา [18]

เนื่องจากหลุมดำมีการแผ่รังสีในระดับจุลภาค เพราะผลทางควอนตัม และเนื่องจากหลุมดำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการมีความโน้มถ่วงสูงมาก ทำให้กฎเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำดังที่กล่าวแล้วเป็นหลักการพื้นฐานสำคัญของทฤษฎีควอนตัม-กราวิตี้ (quantum-gravity theory) ที่ทฤษฎีใหม่ๆ ที่รวมเอาแรงทุกชนิดเข้าด้วยกัน จำต้องอธิบายกฎเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำให้ได้

จากที่กล่าวมาแล้ว ฟิสิกส์เป็นการศึกษาสสาร พลังงาน และ อันตรกิริยาต่างๆ หลักการสำคัญที่ใช้ศึกษานี้คือ กลศาสตร์ดั้งเดิม ไฟฟ้าแม่เหล็ก และควอนตัม แต่ไอน์สไตน์ ได้รวมกลศาสตร์และไฟฟ้าแม่เหล็กไว้ในทฤษฎีสัมพัทธภาพ แต่ในขณะเดียวกัน กลศาสตร์ควอนตัมใช้ศึกษาระบบในระดับจุลภาคและอนุภาคในระดับนี้มีความเร็วสูงมาก เพื่อให้ทฤษฎีมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จึงมีการนำกลศาสตร์ควอนตัมมาปรับรวมกับทฤษฎีสัมพัทธภาพเฉพาะ เรียกหลักการนี้ว่า ทฤษฎีสนามควอนตัม (quantum field theory) ซึ่งสามารถไปใช้ศึกษาและทำนายปรากฏการณ์แรงไฟฟ้าแม่เหล็กและแรงนิวเคลียร์ในระดับที่เล็กกว่าอะตอมได้อย่างประสบความสำเร็จ

เราจึงอาจกล่าวได้ว่า ฟิสิกส์มีหลักการสำคัญเพียงสองทฤษฎี คือ ทฤษฎีสัมพัทธภาพ และทฤษฎีควอนตัม ซึ่งใช้อธิบายเหตุการณ์ต่างกัน นั่นคือ เมื่อระบบที่มีความโน้มถ่วงสูงหรือความเร่งสูง เราใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพศึกษา ส่วนระบบจุลภาค ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปริภูมิเวลาราบ เราใช้ทฤษฎีควอนตัม แต่ถ้ามีระบบในระดับจุลภาคที่มีปริภูมิเวลาโค้งสูงมาก ซึ่งเท่าที่ทราบในธรรมชาติมี 2 ปรากฏการณ์ คือ หลุมดำและบิกแบงค์ (big bang) เราจำเป็นจะต้องมีทฤษฎีที่รวมสัมพัทธภาพและควอนตัมไว้ด้วยกันใช้ศึกษา นั้นก็คือ ควอนตัม-กราวิตี้ (quantum-gravity) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (ซึ่งเคยเรียกกันว่า Theory of Everything) เพราะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ทุกอย่างได้ด้วยหลักการหรือทฤษฎีเดียว

ในปัจจุบันได้มีความพยายามพัฒนาทฤษฎีควอนตัม-กราวิตี้หลายทฤษฎี โดยทฤษฎีที่ประสบความสำเร็จและเป็นที่รู้จักกันมากที่สุดคือ ทฤษฎีซุปเปอร์สตริง หรือทฤษฎีสายพลังงานยวดยิ่ง (Superstring theory) ซึ่งสามารถพิสูจน์กฎเทอร์โมไดนามิกส์ของหลุมดำได้ [11] และ ผลสำคัญชิ้นหนึ่งคือ หลักการการสมนัยกันระหว่างฟิสิกส์ในปริภูมิ-เวลา แอนไทดิซิเตอร์ กับทฤษฎีสนามคงรูป (correspondence between anti de Sitter space-time and conformal field theory, AdS/ CFT) โดยปริภูมิ-เวลา แอนไทดิซิเตอร์ มีมิติเป็น n+1 ฟิสิกส์ที่ขอบเขตในปริภูมิ-เวลานี้จะมีธรรมชาติของฟิสิกส์เหมือนกับทฤษฎีสนามคงรูปใน n มิติ ในปริภูมิ-เวลา แอนไทดิซิเตอร์ เราสามารถหาแบบจำลองของเอกภพที่ตัวดำเนินการยูนิแทรีไม่เป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป หรือข้อมูลไม่ได้สูญหายไป แต่อาจอยู่ในสถานะที่พัวพัน (entangled information) กับข้อมูลอื่นๆ ได้ ดังนั้นฮ็อคกิงค์จึงยอมรับว่าตนแพ้พนันและจะส่งสารานุกรมให้กับเพรสคิล โดยจะเผาสารานุกรมก่อน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการดูดกลืนสารานุกรมในระดับมหภาคของหลุมดำ แต่ข้อมูลในสารานุกรมไม่ได้สูญหายไปไหน เพราะถูกปลดปล่อยในระดับจุลภาคเป็นขี้เถ้าและแก๊สจากการเผา ซึ่งยากต่อการแปลข้อมูลกลับ [17]

สรุป

ปัจจุบันได้มีการศึกษาหลุมดำอย่างกว้างขวาง ด้วยวิธีการใหม่ๆ เนื่องจากพฤติกรรมหลายประการของหลุมดำไม่เป็นไปตามกฎฟิสิกส์ในปริภูมิเวลาราบที่เราคุ้นเคย ซึ่งเป็นการยืนยันว่า เราไม่อาจยึดถือสำนึกสามัญ (common sense) และสัญชาติญาณ (instinct) ที่ถูกวิวัฒนาการมาพร้อมกับมนุษย์บนปริภูมิ-เวลาราบ เพื่อใช้ในการเข้าใจธรรมชาติได้ ผลที่ได้การศึกษาหลุมดำได้เปลี่ยนทัศนคติของมนุษย์ต่อธรรมชาติและมีผลถึงมุมมองต่อธรรมชาติในปรัชญา เรากำลังจะก้าวสู่ฟิสิกส์อีกยุคที่ทัศนคติและปรัชญาพื้นฐานต่อธรรมชาติจะถูกปฏิวัติอีกครั้ง ดังที่ทฤษฎีสัมพัทธภาพและกลศาสตร์ควอนตัม ได้เคยทำมาแล้วเมื่อ 80-100 ปีที่แล้ว

เอกสารอ้างอิง

1. Luminet, J. P. 1998. Black Holes: A General Introduction. In: Hehl, F. W., Kiefer, C., and Metzler, R. J. K., Editors. Black Holes: Theory and Observation. Germany. Springer Publisher.
2. Hall, A. R., and Schofield, R. E. 1994. All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks. *American Journal of Physics* 62: 1051.
3. Einstein, A. 1905. On the Electrodynamics of Moving Bodies. *Annalen der Physik* 17.
4. Michelson, A. A., and Morley, E. W. 1887. On the Relative Motion of the Earth and Luminiferour Ether. *American Journal of Science.* 35: 333-45.
5. Einstein, A. 1916. The Foundation of the General Theory of Relativity. *Annalen der Physik* 49.
6. Bergmann, P. G. 1942. Introduction to the Theory of Relativity. U.S.A. Prentice-hall. p. 203.
7. Wheeler, J. A. 1968. *American Scientists* 56: 1.
8. Seeds, M. A. 2003. Stars and Galaxies. 3rd Edition. Victoria, Australia. Brooks/Cole Thomson Learning.
9. Chandraslkhar, S. 1992. The Mathematical Theory of Black Holes. U.S.A. Oxford Science publications.
10. McClintock, J. E. 2004. Black Hole. ได้จาก http://www.nasa.gov/worldbook/blackhole_worldbook. html. 20 June 2009.
11. Giddings, S. B., and Thomas, S. 2002. High Energy Colliders as Black Hole Factories: The End of Short Distance Physics. *Physical Review D* 65(5): 056010.
12. Misner, C. W., Thorne, C. W., and Wheeler, J. A. 1973. Gravitation. San Francisco. W. H. Freeman and Company.
13. Wald, R. W. 1984. General Relativity. U.S.A. The University of Chigaco Press.
14. Bekenstein, J. D. 1972. Black Holes and the Second Law. *Journal Lettere Al Nuovo Cimento* 4(15): 737-740

15. Bardeen, J. M., Carter, B., and Hawking, S. W. 1973. The Four Laws of Black Hole Mechanics. *Communications in Mathematical Physics* 31(2): 161-170.
16. Koch, B., Bleicher, M., and Stoecker, H. 2009. Exclusion of Black Hole Disaster Scenarios at the LHC. *Physics Letters B* 672: 71.
17. Susskind, L. 1995. The World as a Hologram. *Journal of Mathematical Physics* 36: 6377-6396.
18. Hawking, S. W. 2005. Information Loss in Black Holes. *Physical Review D* 72: 084013.
19. Strominger; A., and Vafa, C. 1996. Microscopic Origin of the Bekenstein-Hawking Entropy. *Physics Letters B* 379(1): 99-104.

ได้รับบทความวันที่ 6 สิงหาคม 2552
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 10 กันยายน 2552