

Article

หลุมดำ และโรเจอร์ เพนโรส

Black Holes and Roger Penrose

สุภคชัย พงศ์เลิศสกุล*

Supakchai Ponglertsakul

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Muang District,
Nakhon Pathom 73000, THAILAND

*Corresponding author E-mail: supakchai.p@gmail.com

วันที่รับบทความ: 28 กุมภาพันธ์ 2564, วันแก้ไขบทความ: 8 มีนาคม 2564, วันตอบรับบทความ: 11 มีนาคม 2564

Received: 28 February 2021, Revised: 8 March 2021, Accepted: 11 March 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้ถูกเรียบเรียงขึ้นเพื่อเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี ค.ศ. 2020 ที่มีการมอบให้กับงานวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องกับหลุมดำ โดยที่ในบทความชิ้นนี้จะเน้นไปในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแนวความคิดในเชิงทฤษฎีของหลุมดำ ตั้งแต่เริ่มต้นไปจนถึงงานวิจัยของโรเจอร์ เพนโรส (Roger Penrose) ที่มีส่วนทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปีนี้ จากนั้นจะกล่าวโดยคร่าวถึงงานวิจัยชิ้นอื่น ๆ ของเพนโรส ที่มีต่อวงการสัมพัทธภาพทั่วไปและหลุมดำ บทความนี้ถูกดัดแปลงมาจากสัมมนาพิเศษที่ผู้เขียนมีโอกาสได้ไปบรรยายที่ มหาวิทยาลัยศิลปากร และ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อวันที่ 20 และ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2563 ตามลำดับ

คำสำคัญ: รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์, หลุมดำ, โรเจอร์ เพนโรส

Abstract

The Nobel Prize in Physics 2020 is given to the research area related to black holes. The article primarily focuses on the theoretical development of black hole. The original idea of black hole will be discussed from the pioneer work of Michell and Laplace to the award-winning work of Roger Penrose. A very brief introduction toward several works of Penrose that have made a significant impact on general relativity and black holes is also discussed. This article is adapted and modified from the special seminars given by the author at Silpakorn University and Thammasat University on October 20th and 29th, 2020 respectively.

Keywords: The Nobel Prize in Physics, Black holes, Roger Penrose

บทนำ

จากผลการประกาศรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ปี ค.ศ. 2020 ที่มีการมอบให้กับงานวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องกับหลุมดำ เนื่องด้วยผู้เขียนมีความสนใจเป็นพิเศษเกี่ยวกับสาขาวิชานี้ และพอจะมีประสบการณ์การทำวิจัยมาบ้างในสาขาดังกล่าว ทำให้ผู้เขียนได้รับเกียรติจากกองบรรณาธิการวารสารฟิสิกส์ไทยให้เรียบเรียงบทความในหัวข้อที่เกี่ยวกับ หลุมดำ และงานของโรเจอร์ เพนโรส อย่างไรก็ตาม เนื่องด้วยงานเขียนชิ้นนี้เป็นงานเขียนชิ้นแรกของผู้เขียนมีโอกาสเรียบเรียงขึ้นมาเอง ถ้ามีข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนต้องขออภัยมาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ในบทความชิ้นนี้ผู้เขียนพยายามจะเรียบเรียงและบรรยายให้เห็นถึง การพัฒนาแนวความคิดของนักฟิสิกส์เพื่อที่จะเข้าใจในธรรมชาติของหลุมดำ ไปจนถึงงานวิจัยของโรเจอร์ เพนโรส ที่มีส่วนทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปีนี้ โดยมีการแบ่งรางวัลร่วมกับ นักดาราศาสตร์ฟิสิกส์ อีกสองท่าน คือ ไรน์ฮาร์ท เกนเซล (Reinhard Genzel) และ แอนเดรีย เกซ (Andrea Ghez)

โครงสร้างของบทความชิ้นนี้จะเริ่มจากการอธิบายอย่างง่ายว่า รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปีนั้นมอบให้แก่ใคร ในหัวข้ออะไร หลังจากนั้นในหัวข้อที่สองจะกล่าวถึงลำดับการพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับหลุมดำตั้งแต่ยุคเริ่มแรกไปจนถึงยุคทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป หัวข้อที่สามจะอธิบายเกี่ยวกับงานวิจัยของโรเจอร์ เพนโรส ที่มีส่วนทำให้เขาได้รับรางวัลโนเบล รวมถึงงานชิ้นอื่น ๆ ของเขาที่เกี่ยวข้องกับหลุมดำ และบทส่งท้ายในลำดับสุดท้าย

รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ (ค.ศ. 2020)

เมื่อวันอังคารที่ 6 ตุลาคม ค.ศ. 2020 ราชสถาบันวิทยาศาสตร์แห่งสวีเดน (The Royal Swedish Academy of Science) ได้ประกาศมอบรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ให้แก่ โรเจอร์ เพนโรส 50%, ไรน์ฮาร์ท เกนเซล 25% และ แอนเดรีย เกซ 25% [1] *โรเจอร์ เพนโรส (Roger Penrose (b. 1931))* ซึ่งเป็นนักคณิตศาสตร์ได้รับรางวัลจากการพิสูจน์ให้เห็นว่า คำทำนายของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเกี่ยวกับการก่อกำเนิดของหลุมดำนั้นมีความเป็นไปได้สูงมาก พูดอย่างง่ายก็คือ เพนโรสแสดงให้เห็นว่า ภายใต้งานไขบางอย่าง (ที่จะกล่าวต่อไปในบทความนี้) หลุมดำสามารถก่อตัวได้ภายใต้บริบทของสัมพัทธภาพทั่วไป ซึ่งนับเป็นการปฏิเสธความเชื่อของนักฟิสิกส์ (รวมทั้งไอน์สไตน์เอง) ว่าหลุมดำไม่น่าจะสามารถมีอยู่จริงได้ รางวัลโนเบลอีกครั้งหนึ่งถูกมอบให้กับสองนักดาราศาสตร์ฟิสิกส์ *ไรน์ฮาร์ท เกนเซล (Reinhard Genzel (b. 1952))* และ *แอนเดรีย เกซ (Andrea Ghez (b. 1965))* ซึ่งค้นพบวัตถุมวลยิ่งยวดอัดแน่น (Supermassive compact object) ณ ใจกลางกาแล็กซีทางช้างเผือก (Milky Way galaxy) ของเรา ซึ่งหลังจากตัดความเป็นไปได้อื่น ๆ ออกไป เราสามารถสรุปได้ว่า ณ ใจกลางกาแล็กซีทางช้างเผือกน่าจะมี *หลุมดำมวลยิ่งยวด (Supermassive black hole)* ที่มีมวลขนาดล้านถึงพันล้านเท่าของมวลดวงอาทิตย์ กล่าวโดยสรุปก็คือรางวัลโนเบลปีนั้นมอบให้กับ งานทางทฤษฎี และงานทางการสังเกตการณ์ที่ยืนยันถึงการมีอยู่ของหลุมดำ

หลุมดำ

จุดเริ่มต้นของความคิดเกี่ยวกับหลุมดำถือกำเนิดมาในช่วงปลายศตวรรษที่ 18 โดยงานของนักดาราศาสตร์และนักบวชชาวอังกฤษ จอห์น มิเชลล์ (John Michell) และนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ปีแอร์ ซิมอน ลาปลาซ (Pierre-Simon Laplace) (ลาปลาซคนเดียวกับ สมการ/การแปลง/ตัวดำเนินการ ลาปลาซ) ที่ทำงานเป็นอิสระจากกัน ในยุคนั้นเชื่อกันว่าแสงประกอบมาจากอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกกันว่า คอร์ปัสเคิล (Corpuscles) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย ไอแซค นิวตัน (Isaac Newton) จากความเป็นอนุภาคของแสงทำให้ทั้งคู่ (มิเชลล์และลาปลาซ) จินตนาการถึงดาวที่มีความโน้มถ่วงสูงจนสามารถกักแสงไว้ได้ ทำให้แสงไม่สามารถเดินทางพ้นออกมาจากดาวนั้น ๆ ได้ อาศัยเพียงแค่กลศาสตร์ของนิวตัน เราสามารถคำนวณรัศมีของดาวที่มีความเร็วหลุดพ้นที่พื้นผิวเท่ากับ

ความเร็วแสงได้ จากกฎอนุรักษ์พลังงานง่าย ๆ สำหรับอนุภาคมวล พลังงานจลน์ที่อนุภาคจำเป็นต้องมีเพื่อที่จะเอาชนะพลังงานศักย์โน้มถ่วงแบบพหุติจะเป็นไปตามสมการ

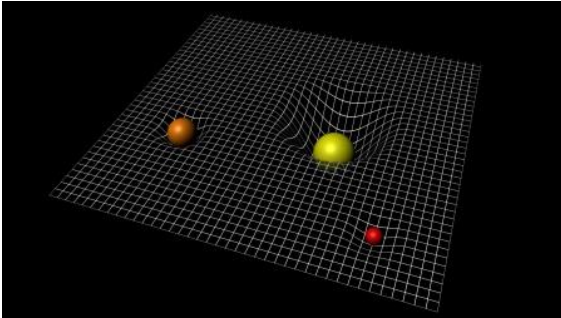
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \quad (1)$$

เมื่อ G คือค่าคงที่โน้มถ่วง, M คือมวลของดาว เมื่อกำหนดให้ความเร็วหลุดพ้น v มีค่าเท่ากับความเร็วแสง c เราสามารถเขียนรัศมีในรูป

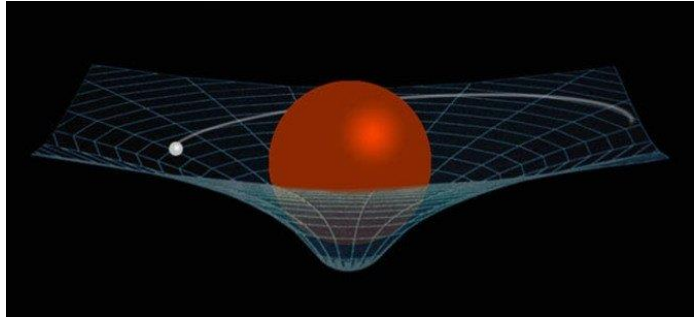
$$r = \frac{2GM}{c^2} \quad (2)$$

จะได้ว่าวัตถุมวล M ที่มีรัศมีเท่ากับหรือน้อยกว่ารัศมีในค่าที่แสดงดังสมการด้านบนจะมีความเร็วหลุดพ้นเทียบเท่าหรือมากกว่าความเร็วแสง แสดงว่าดาวที่มีรัศมีดังกล่าว (ถ้ามี) สามารถกักอนุภาคแสงไว้ได้ จึงมีลักษณะเป็นดาวมืด (Dark star) ยิ่งไปกว่านั้นมีเชลล์ได้คาดการณ์ไว้ว่า หากเราพบระบบดาวคู่ (Binary system) เราอาจจะสามารถตรวจวัดคุณสมบัติของดาวมืด จากการสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของคู่ดาวฤกษ์ที่เปล่งแสงที่โคจรรอบ ๆ ดาวมืดได้ ซึ่งนี่ก็คือแนวคิดที่นำไปสู่การค้นพบหลุมดำมวลยิ่งยวดของ เกนเซลและเกซ ในอีก 200 ปีให้หลังงานของมิเชลล์และลาปลาซนับเป็นการพิจารณาถึงวัตถุที่แปลกประหลาดอย่างหลุมดำอย่างเป็นวิทยาศาสตร์เป็นครั้งแรก อย่างไรก็ตามจากการที่แนวคิดคอร์ปัสเคิลของนิวตัน มีปัญหาที่ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การหักเห เลี้ยวเบน และแทรกสอดของแสงได้ ทำให้แนวคิดเรื่องแสงเป็นอนุภาคไม่ได้รับความสนใจมากนัก และการพัฒนาทฤษฎีคลื่นแสงโดย คริสเตียน ฮอยเกนส์ (Christiaan Huygens) นั้นทำให้นักฟิสิกส์เชื่อกันว่า แสงประพาศติตัวเป็นคลื่นมากกว่าที่จะเป็นอนุภาคที่มีมวล และเมื่อแสงมีความเป็นคลื่นทำให้ในยุคนั้นไม่ชัดเจนว่าความโน้มถ่วงมีอิทธิพลต่อแสงหรือไม่อย่างไร แนวคิดเรื่องดาวมืดของ มิเชลล์และลาปลาซ จึงไม่ได้รับความสนใจจากนักฟิสิกส์ในสมัยนั้น

เวลาล่วงเลยไปจากยุคมิเชลล์และลาปลาซมาจนถึงยุคของ อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ซึ่งได้ทำการเสนอ ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (GR: General relativity หรือ General theory of relativity) ในปี ค.ศ. 1915 ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปปฏิวัติแนวความคิดเกี่ยวกับความโน้มถ่วง ในมุมมองของกลศาสตร์นิวตัน (Newtonian mechanics) ความโน้มถ่วงนั้นเป็นแรงที่กระทำระหว่างมวล ขณะที่ในมุมมองของไอน์สไตน์ สิ่งที่เราพบเหมือนแรงโน้มถ่วง แท้จริงแล้วเป็นเพียงความบิดโค้งของกาลอวกาศ (Spacetime) โดยที่ความบิดโค้งของกาลอวกาศนั้นมีแหล่งกำเนิดจากมวลพลังงานและโมเมนตัมของสสาร โดยมากเรามักจินตนาการสิ่งที่เรียกว่า กาลอวกาศ ในลักษณะของแผ่นยางที่สามารถยืด ขยาย หดได้ ดังรูปที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ก) ความโค้งของกาลอวกาศขึ้นอยู่กับขนาดของมวลและพลังงานของแหล่งกำเนิด (เครดิตภาพจาก The European space agency) และ ข) ภาพสาธิตมวลก้อนเล็กโคจรรอบมวลก้อนใหญ่ไปตามเส้นทางจีโอเดสิกในอวกาศเวลา (เครดิตภาพจาก quora.com)

แนวคิดที่ว่ากาลอวกาศสามารถถูกทำให้โค้งงอได้ด้วยพลังงานโมเมนตัมของสสาร ถูกบรรยายได้ด้วยสมการสนามไอน์สไตน์ (Einstein's field equations)

$$G_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab} \quad (3)$$

ความโค้งของกาลอวกาศ (มักจะถูกเขียนอยู่ฝั่งซ้ายมือของสมการ) ถูกบรรยายด้วยปริมาณที่เรียกว่า เทนเซอร์ไอน์สไตน์ G_{ab} (Einstein tensor) ส่วนการกระจายตัวของพลังงานโมเมนตัมถูกแสดงได้โดย เทนเซอร์พลังงานโมเมนตัม (Energy-momentum tensor) T_{ab} ซึ่งไม่ว่ามวล พลังงาน และโมเมนตัมของสสารอย่างอนุภาคและรังสี ต่างก็เป็นองค์ประกอบ (Component) หนึ่งของปริมาณนี้ สมการสนามไอน์สไตน์เป็นกฎพื้นฐานในฟิสิกส์ของ GR มีลักษณะสำคัญว่า (ก) สามารถเขียนในรูปสมการเทนเซอร์ ซึ่งมีข้อดีคือหน้าตาของสมการจะไม่แปรเปลี่ยนไปตามระบบพิกัด (Coordinate system) ที่เราเลือกใช้ ซึ่งสะท้อนถึง หลักความไม่แปรเปลี่ยน (General covariance) ซึ่งเป็นหัวใจหลักของ GR ที่กล่าวว่า กฎทางฟิสิกส์จะต้องไม่แปรเปลี่ยนไปตามระบบพิกัดที่เราใช้บรรยาย และ (ข) สมการสนามไอน์สไตน์อยู่ในรูปสมการสนาม (Field equation) ที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่ไม่เชิงเส้น (Non-linear partial differential equations) ที่บรรยายพลวัต (Dynamics) ของสนามความโน้มถ่วง โดยสนามความโน้มถ่วงอยู่ในฐานะสภาพเรขาคณิตของกาลอวกาศ จากความสมมาตรของดัชนีเทนเซอร์ในสมการสนามไอน์สไตน์ ทำให้สามารถเขียนออกมาในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองได้ 6 สมการที่เป็นอิสระต่อกัน และคู่ควบ (Coupling) กัน ความเป็นสมการไม่เชิงเส้นที่คู่ควบกันทำให้การแก้สมการสนามเพื่อหาผลเฉลย (Solution) เป็นเรื่องที่ซับซ้อนและยุ่งยากมาก จนทำให้แม้แต่ไอน์สไตน์เองก็ไม่คิดว่าจะมีคนสามารถแก้สมการของเขาได้อย่างง่ายดายขนาดนี้

อย่างไรก็ตามภายในเวลาไม่กี่เดือนหลังจากที่ไอน์สไตน์ได้เผยแพร่สมการของเขา นักดาราศาสตร์ชาวเยอรมัน คาร์ล ชวาร์ซชิลด์ (Karl Schwarzschild) ได้ทำการเผยแพร่ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ในรูปแบบหนึ่งของสมการสนามไอน์สไตน์ออกมาในปี ค.ศ. 1916 [2] ว่า

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (4)$$

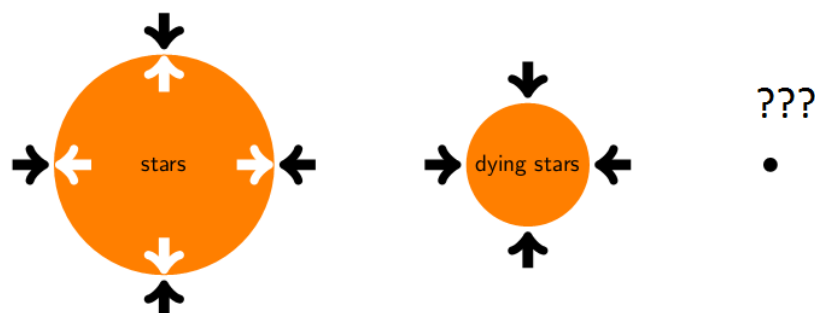
ผลเฉลยชวาร์ซชิลด์ข้างต้นอยู่ในรูปสมการเมตริก (Metric equation) ที่บรรยายถึงสภาพเรขาคณิต หรือความสัมพันธ์ของระยะเวลาระยะทางของเส้นทางต่าง ๆ ในกาลอวกาศ 4 มิติรอบ ๆ วัตถุทรงกลมที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและไม่มีการหมุน โดยที่ t เป็นพิกัดเวลาสำหรับผู้สังเกตที่อยู่ห่างไกลจากวัตถุทรงกลมดังกล่าวในระยะอนันต์ และ (r, θ, ϕ) เป็นพิกัดอวกาศในรูปแบบพิกัดทรงกลม ซึ่งมี r เป็นพิกัดรัศมีจากจุดศูนย์กลางไปยังภายนอกวัตถุทรงกลมดังกล่าว สมการนี้มีการใช้สัญลักษณ์ย่อ เช่น $ds^2 = (ds)^2$ สำหรับ ds เรียกว่า Interval ซึ่งเป็นปริมาณที่เปรียบเสมือนกับ “ระยะทาง” ในกาลอวกาศ 4 มิติที่มีค่าไม่แปรเปลี่ยนไปตามระบบพิกัดกาลอวกาศที่ใช้บรรยาย อย่างไรก็ตาม ผลเฉลยดังกล่าวกลับมี **จุดซิงกูลาริตี (Singularity)** หรือ **ภาวะเอกฐาน** ที่ซึ่งตัวผลเฉลยให้ค่าเป็นอนันต์ นั่นคือ จุดที่ $r=0$ และ $r=r_s = 2GM/c^2$ นักฟิสิกส์ค่อนข้างไม่สบายใจเวลาที่เรากำหนดการออกมาแล้วคำตอบที่ได้ให้ค่าเป็นอนันต์เนื่องจากเราไม่สามารถตีความหรือทำความเข้าใจถึงปริมาณทางฟิสิกส์ที่เป็นอนันต์ได้

เมื่อไอน์สไตน์ทราบถึงผลงานชิ้นนี้ของชวาร์ซชิลด์ ก็กล่าวชื่นชมว่า เขาไม่คิดว่าจะมีใครแก้สมการของเขาได้รวดเร็วขนาดนี้ เกร็ดเล็กน้อยเกี่ยวกับชวาร์ซชิลด์ก็คือเขาเผยแพร่ผลงานวิจัยถึง 3 ชิ้น (รวมถึงชิ้นที่ค้นพบผลเฉลยของสมการสนามไอน์สไตน์ด้วย) ในขณะที่อยู่ในหน่วยทหารปืนใหญ่ที่ทำการรบอยู่ในแนวหน้าในยุคสงครามโลกครั้งที่ 1 แต่ก็เป็นที่น่าเสียดายที่เขาได้เสียชีวิตลงภายหลังจากการเผยแพร่ผลเฉลยดังกล่าวได้เพียง 4 เดือนเท่านั้น โดยที่สาเหตุการเสียชีวิตเชื่อกันว่าเป็นโรคแพภูมิตัวเองชนิดหนึ่งที่ผิวหนังในระหว่างการรบนั่นเอง

ในขณะที่จุดซิงกูลาริตีที่ $r=0$ ค่อนข้างเป็นที่ยอมรับและเข้าใจตรงกันตั้งแต่ต้นว่าเป็นจุดซิงกูลาริตีแท้ (Essential singularity) นั่นคือเป็นจุดที่กาลอวกาศสิ้นสุดลงและมีความโค้งของกาลอวกาศเป็นอนันต์ กฎทางฟิสิกส์ใด ๆ ที่เรารู้จักไม่สามารถอธิบายหรือทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้ได้ อย่างไรก็ตามนักฟิสิกส์ใช้ความพยายามอยู่หลายปีกกว่าที่จะเข้าใจว่าที่ $r=r_s$ เป็นซิงกูลาริตีประเภทที่เกิดจากการเลือกใช้ระบบพิกัด (Coordinate singularity) ซึ่งสามารถถูกกำจัดไปได้หากเราเปลี่ยนระบบพิกัดที่ใช้ในการบรรยายผลเฉลยชวาร์ซชิลด์ แท้จริงแล้วไม่ได้มีอะไรพิเศษเกิดขึ้นที่ $r=r_s$ อนุภาคสามารถเดินทางไปถึงและผ่านเข้าไปได้ภายในเวลาจำกัด (Finite time) เพียงแต่อนุภาคหรือสิ่งใดก็ตามจะไม่สามารถเดินทางย้อนกลับออกมาจากจุดนั้นได้ ในปัจจุบันเราเรียกรัศมีที่ $r_s = 2GM/c^2$ ว่า **รัศมีชวาร์ซชิลด์ (Schwarzschild radius)** และนิยามพื้นผิวใด ๆ ในกาลอวกาศที่วัตถุสามารถข้ามผ่านได้ในทิศทางเดียวว่า **ขอบฟ้าเหตุการณ์ (Event horizon)** เป็นที่น่าสังเกตว่ารัศมีชวาร์ซชิลด์มีค่าเหมือนกับผลลัพท์ที่มีเซลล์และลาปลาซเสนอไว้ก่อนหน้านี้ (ดูสมการ $r = 2GM/c^2$ ในตอนต้น) แม้แต่การคำนวณความเร็วหลุดพ้นโดยใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปก็ยังพบว่ารัศมีของพื้นผิวตรงที่มีความเร็วหลุดพ้นเท่ากับความเร็วแสงก็คือรัศมีชวาร์ซชิลด์นั่นเอง ดูเหมือนว่า GR และผลเฉลยชวาร์ซชิลด์นั้นได้ทำนายถึงการมีอยู่ของหลุมดำ อีกทั้งยังมอบกฎเกณฑ์ที่จะอธิบายและทำนายถึงพฤติกรรมของหลุมดำอีกด้วย อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญที่นักฟิสิกส์ในยุคนี้ยังไม่ทราบคำตอบคือ แล้วกลไกใดในธรรมชาติที่จะสร้างวัตถุที่แปลกประหลาดและลึกลับแบบหลุมดำขึ้นมาได้

ในอีกทางหนึ่ง ขณะนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าดาวฤกษ์เปล่งแสงและปลดปล่อยพลังงานออกมาจากกระบวนการนิวเคลียร์ฟิวชันที่แกนกลางของดาว ความร้อนและพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาสร้างความดันการแผ่รังสี (Radiation pressure) ที่คอยต่อต้านแรงโน้มถ่วงของตัวดาวฤกษ์เองที่พยายามดึงดูดทุกอย่างเข้าสู่ศูนย์กลาง อย่างไรก็ตาม เมื่อดาวฤกษ์เผาผลาญเชื้อเพลิงไปจนหมด ดาวจะเริ่มยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วงของตัวเอง (Gravitational collapse) ดาวฤกษ์ที่มีมวลประมาณมวลดวงอาทิตย์จะกลายเป็นดาวแคระขาว (White dwarf) ที่มีขนาดเล็กไม่ใหญ่ไปกว่าโลกมากนักแต่มีมวลประมาณดวงอาทิตย์ ดาวแคระขาวมีความหนาแน่นสูงมากจนอะตอมของสสารที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นเนื้อดาวอยู่ใกล้ชิดกันมาก จนกระทั่งอิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ใกล้กันได้มากไปกว่านี้เนื่องจากหลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) จึงเปรียบเสมือนอิเล็กตรอนสร้างความดันภายในที่คอยต่อต้านการยุบตัวของดาวแคระขาว เราเรียกสภาพนี้ว่า ความดันสภาพย้อนสถานะของอิเล็กตรอน (Electron degeneracy pressure) หากดาวฤกษ์มีมวลตั้งต้นมากกว่าไปกว่านั้น ความโน้มถ่วงจะสามารถเอาชนะแรงต้านจากสภาพย้อนสถานะอิเล็กตรอนและจะยุบตัวต่อไปจนทุก ๆ อิเล็กตรอนถูกบีบให้รวมกับโปรตอนภายในนิวเคลียสจนดาวทั้งดวงประกอบขึ้นมาจากนิวตรอนเพียงอย่างเดียว และเราจะเรียกดาวประเภทนี้ว่าดาวนิวตรอน (Neutron star) ซึ่งมีความดันสภาพย้อนสถานะของนิวตรอน (Neutron degeneracy pressure) คอยต้านทานการยุบตัวเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของดาว สุพราหมันยัน จันทระเศกษา (Subrahmanyan Chandrasekhar) นักฟิสิกส์ดาราศาสตร์ชาวอินเดียได้พบว่า หากดาวฤกษ์มีมวลมากกว่า 1.4 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ดาวแคระขาวจะไม่เสถียรและจะยุบตัวต่อไปกลายเป็นดาวนิวตรอน [3]

คำถามต่อไปที่น่าสนใจก็คือ หากดาวฤกษ์มีมวลมากพอที่จะเอาชนะความดันสภาพย้อนสถานะของนิวตรอนได้จะเกิดอะไรขึ้น กระบวนการการยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วงของตัวเองสามารถนำไปสู่หลุมดำได้หรือไม่ (ดูรูปที่ 2) โรเบิร์ต ออพเพนไฮม์เมอร์ (Robert Oppenheimer) และนักศึกษาของเขา ฮาร์ทแลนด์ ชไนเดอร์ (Hartland Snyder) ได้ศึกษาปัญหานี้ การคำนวณของพวกเขาในปี ค.ศ. 1939 [4] เปิดเผยว่า หากดาวฤกษ์มีมวลที่มากพอ การยุบตัวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนรัศมีของดาวมีขนาดเล็กกว่ารัศมีชวาร์ตสไชลด์ ทั้งคู่สรุปว่า เมื่อดาวยุบตัวจนผ่านรัศมีชวาร์ตสไชลด์ การสื่อสารใด ๆ จากภายในรัศมีชวาร์ตสไชลด์ กับผู้สังเกตที่อยู่ห่างออกไปจะถูกปิดกั้น จากงานของพวกเขาทำให้นักฟิสิกส์ทราบว่า กระบวนการยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วงของตัวเองสามารถสร้างขอบฟ้าเหตุการณ์ได้



รูปที่ 2 ดาวฤกษ์ยุบตัวเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของตัวเอง ลูกศรสีดำคือแรงโน้มถ่วง ลูกศรสีขาวแทนแรงดันการแผ่รังสี

อย่างไรก็ตาม งานของออฟเพนไฮม์เมอร์และชไนเดอร์นั้น มีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานที่สำคัญอยู่ข้อหนึ่งคือ ดาวจะต้องยุบตัวอย่างมีสมมาตรทรงกลม (Spherical symmetry) เนื่องจากสมมาตรทรงกลมเป็นสิ่งที่ทำได้ยากในธรรมชาติ ทำให้ข้อสรุปของทั้งคู่ถูกตั้งคำถามว่ามีความเป็นไปได้จริงมากน้อยแค่ไหน (แม้กระทั่งไอน์สไตน์เองก็

สงสัยเช่นกัน) จนกระทั่งนักฟิสิกส์จากสหภาพโซเวียต Evgeny Lifshitz และ Isaak Khalatnikov [5] พบว่าข้อสรุปของ ออฟเพนไฮม์เมอร์และซินเดออร์นั้นเป็นระบบอุดมคติไม่สามารถใช้งานได้จริงในธรรมชาติ ซึ่งทฤษฎีนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในสถานการณ์จริงภายใต้บริบทของสัมพัทธภาพทั่วไป ซึ่งทฤษฎีนี้ใน GR เป็นเพียงกรณีที่ยากของผลลัพธ์ที่เกิดจากการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับสมมาตรที่ไม่สมเหตุสมผล

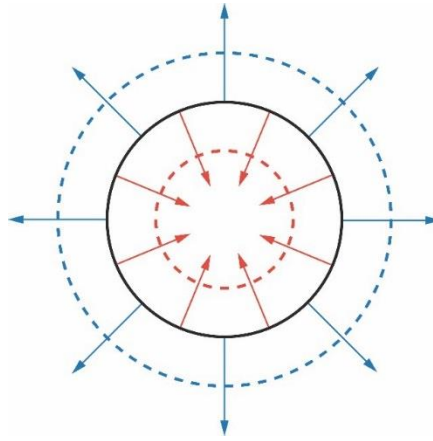
ในขณะที่นักฟิสิกส์ทฤษฎีกำลังปวดหัวกับปัญหาการยุบตัวของดาวฤกษ์ ในช่วงปลายของยุค 1950 นักดาราศาสตร์วิทยุค้นพบแหล่งกำเนิดวิทยุถูกส่งมาจากอวกาศห้วงลึก แต่ความสว่าง (Luminosity) ที่วัดได้กลับมีความสว่างมากกว่าดวงดาวทุกดวงในกาแล็กซีรวมกัน การตรวจสอบเพิ่มเติมพบว่าวัตถุแปลกประหลาดดังกล่าวยังปลดปล่อยลำของอนุภาคพลังงานสูงออกมา (Relativistic jets) และเรายังสามารถพบการปลดปล่อยพลังงานที่รุนแรงเหล่านี้ได้ ณ ใจกลางของกาแล็กซีต่าง ๆ เราเรียกวัดูละเหล่านี้ว่า ควาซาร์ (Quasar: quasi-stellar object) สิ่งที่ทำให้นักฟิสิกส์สงสัยก็คือ ปฏิกริยานิวเคลียร์ฟิวชันเหมือนที่เกิดขึ้น ณ ใจกลางของดาวฤกษ์ทั่ว ๆ ไป ดูจะไม่เพียงพอที่จะสร้างและปลดปล่อยพลังงานมหาศาลอย่างที่เราวัดได้จากควาซาร์เหล่านี้ เพื่อที่จะปลดปล่อยพลังงานขนาดนั้นออกมา พวกมันต้องเป็นวัตถุที่มีมวลมากและอัดแน่นอยู่ภายในบริเวณเล็ก ๆ ที่มีขนาดไม่เกินระบบสุริยะของเรา ขบวนการค้นพบควาซาร์ ทำให้ จอห์น วิลเลอร์ (John Wheeler) นักฟิสิกส์ทฤษฎีที่มีชื่อเสียงชาวอเมริกันหันกลับมาสนใจปัญหาเรื่องกระบวนการยุบตัวเนื่องจากแรงโน้มถ่วง พร้อมกับนำปัญหานี้มาปรึกษากับ โรเจอร์ เพนโรส ที่ขณะนั้นดำรงตำแหน่งศาสตราจารย์ทางด้านคณิตศาสตร์ ณ วิทยาลัยเบิร์กเบค (Birkbeck College) กรุงลอนดอน

โรเจอร์ เพนโรส

โรเจอร์ เพนโรส เป็นนักคณิตศาสตร์ที่สนใจในสาขาคณิตศาสตร์บริสุทธิ์โดยเฉพาะสาขาที่เกี่ยวข้องกับเรขาคณิต (Geometry) หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีระดับเกียรตินิยมทางด้านคณิตศาสตร์ที่ ยูนิเวอร์ซิตีคอลลิจลอนดอน (University College London) เพนโรสเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอกที่ มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ (Cambridge University) ทางด้านคณิตศาสตร์ และเป็นที่เคมบริดจ์นี่เองที่ทำให้เพนโรสหันเหความสนใจจากคณิตศาสตร์บริสุทธิ์มาสู่ฟิสิกส์ทฤษฎีและฟิสิกส์เชิงคณิตศาสตร์ คนที่มีอิทธิพลทำให้เพนโรสเปลี่ยนความสนใจมายังฟิสิกส์ก็คือ เดนนีส สเกียมา (Dennis Sciama) ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาระดับปริญญาเอกของ *สตีเฟน ฮอว์กิง (Stephen Hawking)* เพนโรสเริ่มครุ่นคิดเกี่ยวกับปัญหาที่ว่าหลุมดำสามารถกำเนิดมาจากการยุบตัวของดาวฤกษ์ได้หรือไม่ ในช่วงปลายปี ค.ศ. 1964 ในขณะที่กำลังหยุ่ตรอสัญญาณไฟเพื่อที่จะข้ามถนน เพนโรสเกิดแนวคิดขึ้นมาที่จะพิสูจน์ปัญหาดังกล่าวโดยใช้เทคนิคทางทอพอโลยี (Topology) ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์ที่ศึกษาสมบัติของวัตถุเรขาคณิตที่ไม่แปรเปลี่ยนภายใต้การบิด ดึง บีบ ยุบ หด [6]

ก่อนหน้าเพนโรส การศึกษาเกี่ยวกับการยุบตัวของดาวที่นำไปสู่หลุมดำภายใต้บริบทของสัมพัทธภาพทั่วไปนั้นมักจะพึ่งพาเงื่อนไขเกี่ยวกับระบบที่มีสมมาตรสูง เช่น สมมาตรทรงกลมในงานของออฟเพนไฮม์เมอร์และซินเดออร์ ทำให้เกิดข้อโต้แย้งว่าการยุบตัวที่มีสมมาตรสูงไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในธรรมชาติ เพนโรสต้องการละทิ้งการพึ่งพาเงื่อนไขเกี่ยวกับสมมาตรเหล่านี้ และไม่ต้องการที่จะพิจารณาถึงเรขาคณิตของกาลอวกาศ เขาจึงได้สร้างเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า *พื้นผิวกักขัง (Trapped surface)* และตั้งสมมติฐานเพียงแค่ว่า สสารของดาวที่กำลังยุบตัวจะต้องมีมวลเป็นจำนวนบวก (Non-negative mass) พื้นผิวกักขัง คือ พื้นผิวที่ปิดสองมิติใด ๆ ที่มีคุณสมบัติว่ารังสีแสง (Light rays) ที่กำเนิดออกมาจากพื้นผิวนี้อาจจะลู่เข้าหากัน เพื่อให้เข้าใจมากขึ้นลองจินตนาการถึงทรงกลมที่เปล่งแสงสว่างออกมาจากพื้นผิว ส่วนหนึ่งของแสงที่เปล่งออกมาจะเคลื่อนตัวออกจากทรงกลม และรังสีแสงจะลู่ออกจากกัน พื้นผิวของหน้าคลื่น (Wavefronts) ก็จะขยายขนาดตามเวลา (วงเส้นประสีน้ำเงิน) ดัง

รูปที่ 3 แสงอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่เข้าไปในทรงกลมและมีพื้นที่ของหน้าคลื่นที่เล็กลง (วงเส้นประสีแดง) นั้นหมายความว่ารังสีแสงลู่เข้าหากัน



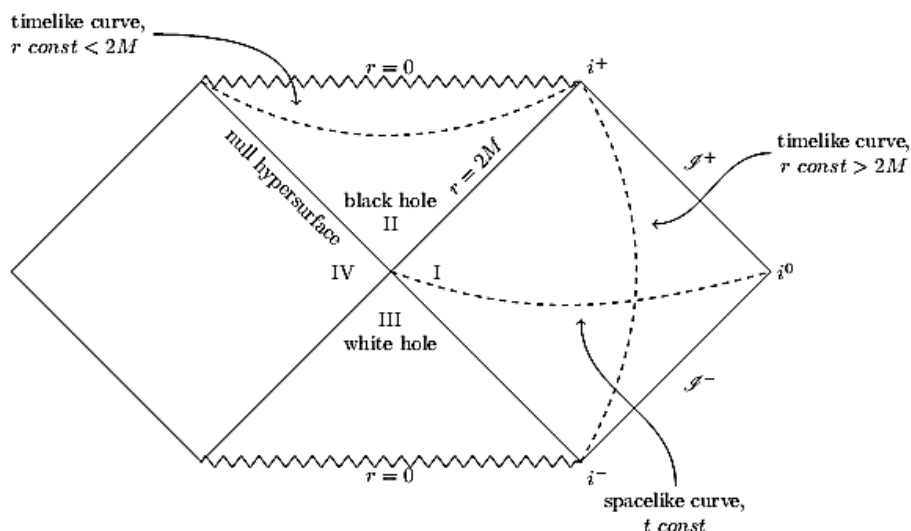
รูปที่ 3 พื้นผิวกักขัง

แต่สำหรับบริเวณที่สนามโน้มถ่วงมากพออย่างเช่นภายในรัศมีชวาร์ซชิลด์ ไม่ว่าแสงทั้งส่วนที่เคลื่อนที่ออกและเข้าจะมีพื้นที่ของหน้าคลื่นลดลง และนี่ก็คือ พื้นผิวกักขัง (ทั้งวงเส้นประสีน้ำเงินและแดงต่างก็มีขนาดลดลง) ขอบันติกไว้เล็กน้อยว่าพื้นผิวกักขังมีความหมายไม่เหมือนกันกับขอบฟ้าเหตุการณ์ที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ ถึงแม้บริเวณทั้งสองของหลุมดำอยู่ใกล้กันก็ตาม เพนโรสได้พิสูจน์ว่า ภายใต้บริบทของ GR หากพื้นผิวกักขังเกิดขึ้นมาแล้ว การยุบของสสารที่มีมวลเป็นบวกจะนำไปสู่จุดซิงกูลาริตีอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในการพิสูจน์นี้ เพนโรสได้อาศัยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ในงานของนักฟิสิกส์ชาวอินเดีย **อามาล กุมาร์ เรชาว์ฮูรี (Amal Kumar Raychaudhuri)** ที่ศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อยู่ใกล้ชิดกันในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป

ผู้เขียนต้องขอขยาดความเทคนิคนี้เล็กน้อยว่า ใน GR อนุภาคอิสระจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่เราเรียกว่า **เส้นจีโอเดสิก (Geodesic)** หรืออีกนัยหนึ่ง หากไม่มีแรงภายนอกใด ๆ มากระทำ อนุภาคจะตกอย่างอิสระ (Free fall) ไปตามเส้นทางจีโอเดสิก เส้นจีโอเดสิกถือเป็น “เส้นตรง” ในกาลอวกาศโค้ง สำหรับในอวกาศโค้ง เส้นจีโอเดสิกเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด เช่น เส้น Great circle บนผิวทรงกลมอย่างผิวโลก แต่เส้นจีโอเดสิกในกาลอวกาศโค้งเปลี่ยนจากระยะทางสั้นที่สุดเป็นระยะ Interval ที่เสถียร (Stationary interval) ต่อการแปรผันเส้นทางไปรอบ ๆ ถ้าเป็นเส้นจีโอเดสิกของแสงไม่มีระยะ Interval ก็ใช้พารามิเตอร์อื่นในการลำดับจุดบนเส้นทางแทน สมการเรชาว์ฮูรี (Raychaudhuri's equation) ศึกษาคุณสมบัติของเส้นจีโอเดสิกส์ (Geodesics congruence) ว่าภายใต้กาลอวกาศที่โค้งงอ กลุ่มของจีโอเดสิกส์มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ในกาลอวกาศปกติทั่วไป เส้นจีโอเดสิกส์จะสามารถขยายไปได้เรื่อย ๆ โดยไร้ขีดจำกัด อย่างไรก็ตาม เพนโรสพบว่าเมื่อพื้นผิวกักขังเกิดขึ้นมา กลุ่มของเส้นทางของแสงที่วิ่งออกมาจากพื้นผิวนี้นั้น (กลุ่มของเส้นจีโอเดสิกส์ของอนุภาคแสง) จะถูกโฟกัสมารวมตัวกัน ณ จุด ๆ หนึ่ง และเส้นของจีโอเดสิกส์เหล่านี้ไม่สามารถถูกขยายต่อออกไปได้อีก ราวกับว่าอนุภาคแสงได้เดินทางมาจนถึงจุดสิ้นสุดของกาลอวกาศ ความไม่สมบูรณ์ของเส้นจีโอเดสิกส์ (Geodesic incompleteness) คือสิ่งที่ปัจจุบันเราใช้นิยาม **ภาวะเอกฐาน (Singularity)** หรืออาจจะพูดได้ว่ากาลอวกาศที่เส้นจีโอเดสิกส์ไม่สามารถขยายออกไปได้เรื่อย ๆ อย่างไร้ขีดจำกัดเป็นเพราะว่ามีจุดซิงกูลาริตีนั้นเอง

สรุปสิ่งที่เพนโรสทำก็คือ เขาพิสูจน์ว่า ภายใต้ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปและสมมติฐานเกี่ยวกับสสารที่สมเหตุสมผล (แค่สสารปกติที่มีมวลเป็นจำนวนบวก) หากพื้นผิวกักขังเกิดขึ้นแล้ว สสารจะยุบตัวและภาวะเอกฐานเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ [7] งานของเพนโรสชิ้นนี้บอกกับเราว่า หลุมดำ สามารถเกิดขึ้นได้จริงในธรรมชาติผ่านทางกระบวนการยุบตัวเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โดยที่ไม่ต้องสนใจว่าสมมาตรจะเป็นอย่างไร ภายหลังเพนโรสและฮอว์คิงได้ขยายแนวความคิดเกี่ยวกับความไม่สมบูรณ์ของเส้นจีโอเดสิกส์ และแสดงให้เห็นว่า จักรวาลของเรากำเนิดมาจากจุดซิงกูลาริตีที่มีความหนาแน่นเป็นอนันต์ [8] ซึ่งก็คือจุดกำเนิดของ *ทฤษฎีบิกแบง (Big bang)* นั่นเอง นอกเหนือจากงานที่เพนโรสทำเกี่ยวกับซิงกูลาริตีแล้ว เขายังมีงานสำคัญอีกหลายชิ้นเกี่ยวกับทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปและหลุมดำ ผู้เขียนขอถือโอกาสเลือกงานของเพนโรสอีกสามชิ้นที่ผู้เขียนเห็นว่ามีความสำคัญต่อการฟิสิกส์หลุมดำมาเล่าให้ทุกท่านได้อ่านกัน

จากที่กล่าวไปข้างต้น หลุมดำเป็นผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ของสมการสนามไอน์สไตน์ และสิ่งที่ผลเฉลยบอกกับเราก็คือเรขาคณิตของกาลอวกาศประเภทนั้น ๆ ซึ่งเปรียบเสมือนกับเวทีที่ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ต่าง ๆ จะเกิดขึ้น และตัวเวทีเองก็มีบทบาทสำคัญในการกำหนดหรือควบคุมปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในอีกทางหนึ่ง การทำความเข้าใจโครงสร้าง “ทั้งหมด” ของเวที จึงมีความสำคัญ เพนโรสได้ออกแบบวิธีที่จะช่วยให้เราเห็นภาพโครงสร้างของเวที (กาลอวกาศ) ทั้งหมด ซึ่งเราเรียกแผนภาพที่จะบรรยายถึงโครงสร้างทั้งหมดของกาลอวกาศนี้ว่า *แผนภาพเพนโรส (Penrose diagram)* (ดูรูปที่ 4) โดยการใช้เทคนิคที่เรียกว่า แมกซิมอล อนาไลติก เอ็กซ์เทนชัน (Maximal analytic extension) ซึ่งเป็นการกำจัดซิงกูลาริตีประเภทที่เกิดจากการเลือกใช้ระบบพิกัดทุกอันออกจากผลเฉลยของสมการสนามผ่านการแปลงระบบพิกัดที่เหมาะสม และทำการเลือกฟังก์ชันเหมาะสม ๆ ที่จะย้ายจุดที่อยู่ห่างไกลเป็นอนันต์มาอยู่ในบริเวณขอบเขตที่จำกัด



รูปที่ 4 แผนภาพเพนโรสของหลุมดำแบบชาร์ชิลด์ แกนตั้ง คือ เวลา ส่วนแกนนอน คือ ตำแหน่ง (ภาพดัดแปลงจาก Lecture note on black hole โดย P. Townsend)

ข้อดีอีกประการของแผนภาพเพนโรส คือ ในแผนภาพประเภทนี้ แสงจะเคลื่อนที่ทำมุม 45 องศาเสมอ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ถึงตำแหน่งของขอบฟ้าเหตุการณ์เป็นไปได้ง่ายดาย จากแผนภาพในรูปที่ 4 จะเห็นว่า ตำแหน่งของ ขอบฟ้าเหตุการณ์ คือ ตำแหน่งที่ $r=2M$ (เมื่อกำหนดให้ $G=1$ และ $c=1$ เพื่อความง่าย) ซึ่ง

เป็นพื้นผิวสุดท้ายที่แสงจะสามารถหนีออกไปยังระยะอนันต์ได้ บริเวณที่อยู่ตอนนั้น จะแสดงด้วย ตัวอักษรที่มีตัว ยกบวกกำกับอยู่ และเราจะทราบได้ทันทีว่าจุดเอกฐาน ที่แสดงด้วย เส้นแนวนอนซิกแซก จะอยู่ในอนาคตของ ผู้สังเกตหรืออะไรก็ตามที่เคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณหลุมดำ สำหรับผู้สังเกตโชคร้ายที่หลุดเข้าไปในหลุมดำ จุดซิงกูลา ริตี้จะเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เปรียบเปรยเหมือนกับว่าคุณไม่สามารถหาทางหนีจากวันจันทร์ที่กำลังจะมาถึงได้ (ผู้เขียนอาจจะลองเขียนบทความเกี่ยวกับแผนภาพเพนโรสอย่างละเอียดอีกครั้งหนึ่ง ถ้ามีโอกาสและผู้สนใจ) ปัจจุบัน นักฟิสิกส์มักจะใช้แผนภาพของเพนโรสในการวิเคราะห์ถึงฟิสิกส์ของหลุมดำประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ต้องพิจารณาโครงสร้างความสัมพันธ์เชิงเหตุและผล (Causal structure) ภายในกาลอวกาศ (หลุมดำแต่ละ ประเภทจะมีหน้าตาของแผนภาพที่แตกต่างกันออกไป แต่หลักการคร่าว ๆ จะยังเหมือนกันอยู่)

หลักการที่สำคัญอย่างหนึ่งในฟิสิกส์ยุคคลาสสิก (รวมถึงสัมพัทธภาพทั่วไปด้วย) คือ หลักนิยัตินิยม (Determinism) โดยคร่าว ๆ หลักการนี้กล่าวว่า กฎทางฟิสิกส์ต้องเป็นไปตามเหตุและผล (Cause and effect) นั่นคือเราต้องสามารถคาดการณ์ ทำนาย หรือล่วงรู้ถึงเหตุการณ์ในอนาคต จากข้อมูลที่เรามีในอดีตหรือปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น หากเรารู้ความเร็วและทิศทางของอนุภาค รวมทั้งแรงทั้งหมดที่กระทำกับมัน ณ เวลาหนึ่ง เราจะสามารถบอกได้ว่าอนุภาคนั้นจะเปลี่ยนไปอย่างไรเมื่อเวลาผ่านไป (ผ่านทางสมการการเคลื่อนที่) อย่างไรก็ตาม การมีอยู่ของภาวะเอกฐานใน GR ทำให้เราสูญเสียความสามารถที่จะทำนายปรากฏการณ์เหล่านี้ไป เนื่องจาก สมการสนามไอน์สไตน์ไม่สามารถใช้งานได้ที่จุดซิงกูลาริตี้ ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ทั้งหมดดูเหมือนจะเดินทางมา เจอทางตัน ณ จุดนี้ เพนโรสจึงเสนอทางแก้ในปี ค.ศ. 1969 [9] ที่บอกว่าเราจะไม่สามารถสังเกตจุดซิงกูลาริตี้ เหล่านี้ได้โดยตรง ทุก ๆ ซิงกูลาริตี้จะถูกซ่อนอยู่ภายใต้ขอบฟ้าเหตุการณ์ ปรากฏการณ์ใด ๆ ที่เกิดขึ้นภายในขอบฟ้า เหตุการณ์จะไม่สามารถส่งผลกระทบต่อเราที่อยู่ภายนอกได้ ดังนั้นแม้ว่า GR จะไม่เป็นไปตามหลักนิยัตินิยม มันก็ยังไม่ กระทบกับเราอยู่ดี เราเรียกแนวคิดดังกล่าวว่า ข้อคาดการณ์การเซ็นเซอร์คอสมิก (Cosmic censorship conjecture) อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันหัวข้อดังกล่าวยังคงมีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง และมีการค้นพบสถานการณ์ที่ ซิงกูลาริตี้เปลือย (Naked singularity) ซึ่งหมายถึง ซิงกูลาริตี้ที่ไม่ถูกปกปิดด้วยขอบฟ้าเหตุการณ์ ว่าสามารถมีอยู่ได้ (อย่างน้อยก็ในเชิงทฤษฎี) แต่ในเชิงสังเกตการณ์เรายังไม่ค้นพบการมีอยู่ของซิงกูลาริตี้เปลือยแต่อย่างใด

งานอีกชิ้นที่เพนโรสเสนอไว้ในปี ค.ศ. 1971 [10] คือกระบวนการเพนโรส (Penrose process) เพนโรส เสนอความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีว่าเราสามารถดึงเอาพลังงานการหมุน (Rotational energy) ของหลุมดำออกมา ได้โดยการส่งอนุภาคเข้าไปโคจรใกล้กับขอบฟ้าเหตุการณ์ในบริเวณที่เรียกว่า เออโกสเฟียร์ (Ergosphere) ความ พิเศษของบริเวณทรงกลมนี้คือ อนุภาคสามารถมีพลังงานติดลบได้เมื่อวัดจากผู้สังเกตที่อยู่ห่างไกลออกไป เพนโรส จินตนาการว่า เราส่งอนุภาคเข้าไปในบริเวณดังกล่าวทำให้อนุภาคถูกหมุนเนื่องจากโมเมนตัมเชิงมุมของหลุมดำ ถ้าจินตนาการต่อว่าอนุภาคเกิดแตกตัวออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งจะตกลงไปในหลุมดำพร้อมกับพลังงานติดลบ และอีกส่วนจะหนีออกมาด้านนอก เมื่ออนุภาคที่พลังงานติดลบตกลงไปในขอบฟ้าเหตุการณ์ มวลและโมเมนตัม เชิงมุมของหลุมดำจะลดลง ในขณะที่อนุภาคที่สามารถหลุดออกมาด้านนอกได้ จะมีพลังงานมากกว่าพลังงานรวม ของอนุภาคทั้งหมดตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน ยกตัวอย่างเช่น

$$E_A = E_B + E_C \quad (5)$$

หากสมมติให้ E_A คือพลังงานของอนุภาค A เมื่ออนุภาค A แตกตัวเป็นอนุภาค B และ C ที่เออโกสเฟียร์ จากนั้นให้อนุภาค C ตกลงไปในหลุมดำด้วยพลังงาน $E_C < 0$ ในขณะที่อนุภาค B หนีออกมาด้วยพลังงานที่มากขึ้น $E_B > E_A$ จากงานชิ้นนี้ของเพนโรสทำให้ โรเจอร์ แบลนด์ฟอร์ด และ โรมัน ชนาเจค (Roger Blandford and

Roman Znajek) เสนอว่าหลุมดำที่กำลังหมุนสามารถเป็นตัวป้อนพลังงานให้กับลำอนุภาคพลังงานสูงที่พุ่งออกมาจากหลุมดำมวลยิ่งยวดที่ใจกลางควาซาร์ [11] โดยที่สนามแม่เหล็กกรอบ ๆ หลุมดำจะถูกลากให้หมุนไปในทิศเดียวกับการหมุนของหลุมดำและสนามแม่เหล็กที่อยู่ในบริเวณเออโกสเฟียร์จะดึงเอาพลังงานการหมุนออกมาจากหลุมดำ ในปัจจุบันกลไกแบบลันด์ฟอร์ด-ซนาเจค (Blandford-Znajek mechanism) ได้รับการยอมรับว่าเป็นหนึ่งในกลไกที่มีบทบาทสำคัญต่อหลุมดำและการเกิดลำอนุภาคพลังงานสูงโดยเฉพาะจากควาซาร์ที่สังเกตเห็นได้โดยนักดาราศาสตร์ฟิสิกส์

บทส่งท้าย

หากเปรียบหลุมดำเหมือนสัตว์ลึกลับในนิยายแฟนตาซี เช่น ม้ายูนีคอร์น เราจะพบว่า มนุษย์เราเริ่มจินตนาการถึงม้ายูนีคอร์น เมื่อ 230 ปีที่แล้วโดยมิเชลล์และลาปลาซ จากไอน์สไตน์และชวาร์ซชิลด์ เราเริ่มจะมีทฤษฎี (ที่ถูกต้อง) ที่ทำนายถึงการมีอยู่และพฤติกรรมของม้ายูนีคอร์นเมื่อ 105 ปีที่ผ่านมา และ 56 ปีที่แล้วเพนโรสบอกกับพวกเราว่า ยูนีคอร์นนั้นสามารถมีอยู่จริงและน่าจะอยู่ในป่า (ถ้ายูนีคอร์นอยู่ในป่า) ที่ไหนสักแห่ง เกนเซลและเกซใช้เวลาอีก 27 ปีต่อมาจากยุคของเพนโรส เพื่อแสดงให้เห็นว่าม้ายูนีคอร์นนี้อาศัยอยู่กลางป่าลึกที่ห่างไกลออกไปโดยอาศัยเพียงหลักฐานแวดล้อมรอบ ๆ เช่น การขยับของต้นไม้หรือการเคลื่อนที่ของสัตว์ป่าชนิดอื่น ๆ เมื่อ 6 ปีที่แล้วเราเพิ่งจะยืนยันว่ายูนีคอร์นนี้นั้นมีอยู่จริงจากการ “ฟังเสียง” ที่มีลักษณะเฉพาะตัวของมัน (Gravitational waves by LIGO) และเมื่อสองปีที่ผ่านมาเองที่นักสำรวจสามารถถ่ายภาพม้ายูนีคอร์นภาพแรกได้ด้วยกล้องถ่ายภาพระยะไกลกำลังขยายสูง (Black hole shadow by EHT)

จะเห็นได้ว่าเราใช้เวลากว่า 200 ปีในการยืนยันว่ายูนีคอร์นนี้นั้นมีอยู่จริงผ่านทางการสู้รบทางสติปัญญาอย่างหนักหน่วง เราเพิ่งจะอยู่ในยุคที่ม้ายูนีคอร์นไม่ใช่สัตว์ในจินตนาการอีกต่อไป มันมีอยู่จริง เราไม่แน่ใจว่าเมื่อศึกษายูนีคอร์นเหล่านี้ไปอย่างต่อเนื่อง สุดท้ายแล้วยูนีคอร์นจะมีคุณสมบัติหรือพฤติกรรมตรงตามที่เราเข้าใจหรือทำนายไว้หรือไม่ หรือสิ่งที่หน้าตาเหมือนยูนีคอร์นนี้นั้นแท้จริงอาจจะไม่ใช่ม้ายูนีคอร์น แต่เป็นม้าเพกาซัส มังกรหรืออื่น ๆ ที่อยู่นอกเหนือจินตนาการของเราก็เป็นได้ ถ้าจะมีอะไรก็ตามที่มนุษย์ได้เรียนรู้จากการศึกษาธรรมชาติก็คือ ทุกครั้งที่เหมือนว่าเราจะเข้าใจธรรมชาติอย่างสมบูรณ์แล้ว ธรรมชาติมักจะมีคำตอบลับซ่อนไว้อีกชั้นรอการค้นพบถัดไปเสมอ และการค้นพบถัดไปก็จะนำไปสู่ความเข้าใจในธรรมชาติที่ลึกซึ้งมากขึ้นกว่าเดิม และเราหวังว่าครั้งนี้ก็เช่นกัน

หมายเหตุ

ผู้เขียนหวังว่าผู้อ่านคงพอจะได้เห็นการพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับหลุมดำตั้งแต่เริ่มแรกจนมาถึงปัจจุบันแน่นอนว่าผู้เขียนไม่สามารถครอบคลุมเนื้อหาได้ทั้งหมด จึงได้เลือกมาเล่าเฉพาะส่วนที่ผู้เขียนคิดว่าน่าสนใจและเกี่ยวข้องกับเพนโรส สำหรับผู้อ่านที่สนใจอยากอ่านเกี่ยวกับหลุมดำมากขึ้นผู้เขียนขอแนะนำให้เริ่มจากบทความที่ผู้เขียนใช้อ้างอิงเพื่อเขียนเป็นบทความนี้ขึ้นมาจำนวน 3 บทความ [12-14]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ. ชาญกิจ คันฉ่อง และทีมงานวารสารฟิสิกส์ไทยที่เชิญชวนให้มาเขียนบทความนี้และยังช่วยแนะนำในการเรียบเรียงและแก้ไขบทความนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบคุณ คุณปานิสราลัคนทินพร สำหรับการช่วยอ่านบทร่างและวาดภาพประกอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] “The Nobel Prize in Physics 2020”, from <http://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary>.
- [2] K. Schwarzschild, “Über das gravitationsfeld eines massenpunktes nach der Einstein’schen theorie”, Sitzungsberichte der Königlich-Preußischen Akademi der Wissenschaften. (Berlin), 189-190 (1916).
- [3] S. Chandrasekhar, “The dynamics of stellar systems. I–VIII”, The Astrophysical Journal, 90, 1-154 (1939).
- [4] J. R. Oppenheimer and H. Snyder, “On continued gravitational contraction”, Physical Review, 56, 455-459 (1939).
- [5] E. M. Lifshitz and L. M. Khalatnikov, “Investigations in relativistic cosmology”, Advances in Physics, 12, 185-249 (1963).
- [6] S. Yoo-Kong, “ทอพอโลยีคณิตศาสตร์อันไร้ประโยชน์ในอดีตแต่โคตรมีประโยชน์ในปัจจุบัน”, from <http://www.sikarinyookong.com>, 2020.
- [7] R. Penrose, “Gravitational collapse and space-time singularities”, Physical Review Letters, 14, 57-59 (1965).
- [8] S. Hawking and R. Penrose, “The singularities of gravitational collapse and cosmology”, Proceedings of the Royal Society of London A, 314, 529-548 (1970).
- [9] R. Penrose, “Gravitational collapse: The role of general relativity”, La Rivista del Nuovo Cimento, 1, 252-276 (1969).
- [10] R. Penrose and R. M. Floyd, “Extraction of rotational energy from a black hole”, Nature Physical Science, 229, 177-179 (1971).
- [11] R. D. Blandford and R. L. Znajek, “Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 179, 433-456 (1977).
- [12] “Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2020”, from <https://www.nobelprize.org/uploads/2020/10/advanced-physicsprize2020.pdf>.
- [13] “2020 Nobel Prize for Physics: Black Holes and the Milky Way’s Darkest Secret”, from <https://www.nobelprize.org/uploads/2020/10/popular-physicsprize2020-1.pdf>.
- [14] อรรถกฤต ฉัตรภูติ และ พิเชษฐ กิจธรา, “รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ 2020”, from <http://www.thaiphysoc.org/article/293/>.