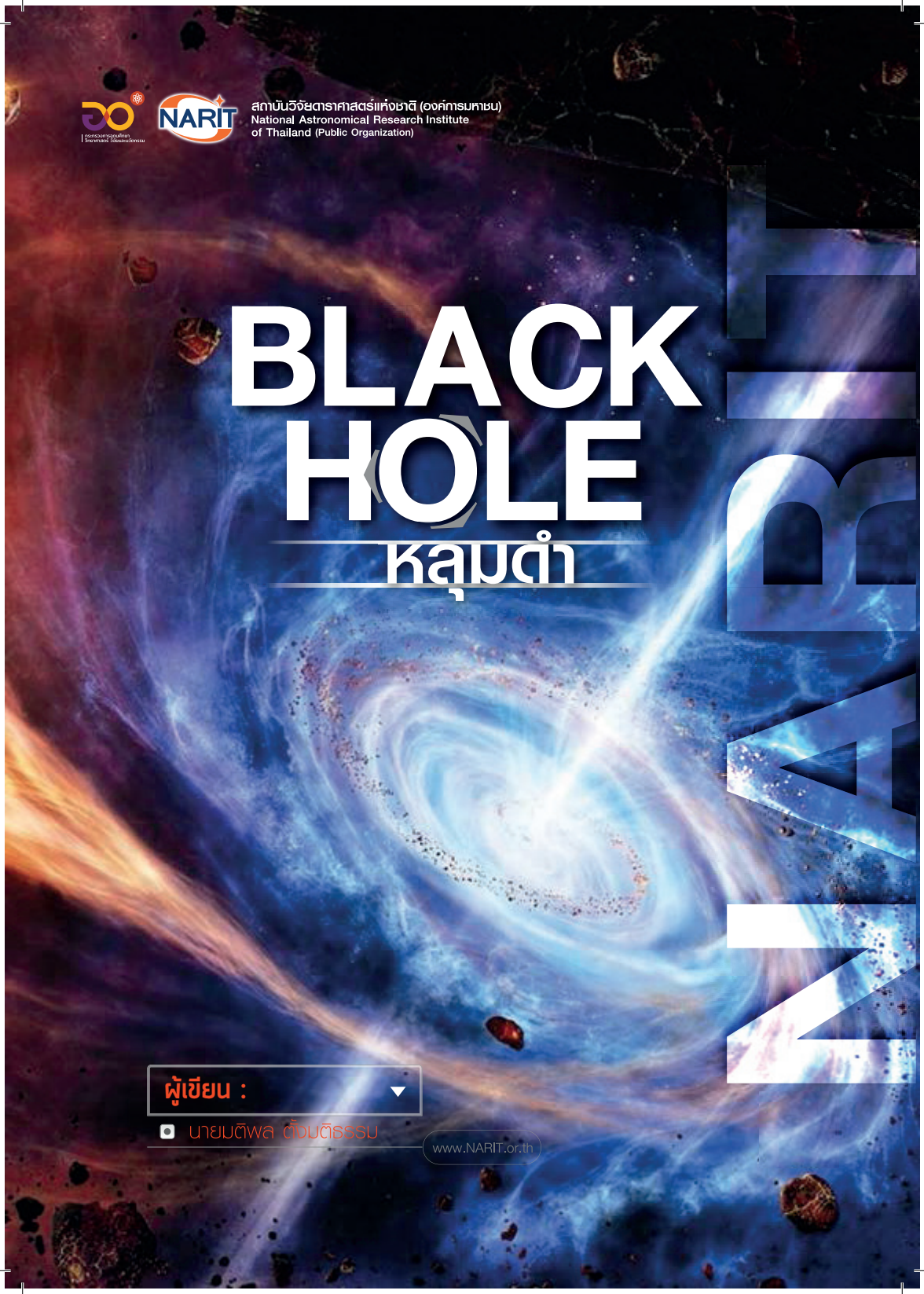

สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
National Astronomical Research Institute
of Thailand (Public Organization)
BLACK
HOLE
หลุมดำ
NARIT
ผู้เขียน :
นายมติพล ตั้งมติธรรม
www.NARIT.or.th

ความเป็นมา :

ตามที่คณะรัฐมนตรี มีมติเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2541 เห็นชอบในหลักการแก่กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการจัดตั้งสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติขึ้นในประเทศไทย เพื่อเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวในโอกาสฉลอง 200 ปีแห่งการพระราชสมภพในปี พ.ศ.2547 และพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชในวโรกาสเจริญพระชนมายุครบปีพระราชสมภพ 50 พรรษาในปี พ.ศ.2550

ภารกิจหลักประการหนึ่งของสถาบันฯ คือ การสร้างหอดูดาวแห่งชาติ ซึ่งจะตั้งอยู่ ณ สถานีทวนสัญญาน ทีโอที (กม. 44.4) อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ เนื่องจากมีทัศนวิสัยที่เหมาะสมต่อการสังเกตการณ์ทางด้านดาราศาสตร์สถาบันฯ ตั้งเป้าที่จะดำเนินการก่อสร้างหอดูดาวแห่งชาตินี้ให้แล้วเสร็จและเปิดเป็นทางการภายในปี พ.ศ.2554 เพื่อเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชในวโรกาส เจริญพระชนมายุครบปีพระราชสมภพ 84 พรรษา นอกจากนี้ยังมีการจัดตั้งศูนย์บริการสารสนเทศและฝึกอบรมทางดาราศาสตร์ ณ บริเวณที่ทำการอุทยานแห่งชาติ ดอยอินทนนท์ อีกด้วย เพื่อใช้ในการบริการวิชาการทางดาราศาสตร์แก่บุคคลทั่วไปที่สนใจ

วิสัยทัศน์

เป็นองค์กรที่มีความเป็นเลิศด้านดาราศาสตร์ ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

พันธกิจ

1. ค้นคว้า วิจัย และพัฒนาด้านดาราศาสตร์
2. สร้างเครือข่ายการวิจัยและวิชาการด้านดาราศาสตร์ในระดับชาติและนานาชาติกับสถาบันต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ
3. ส่งเสริมสนับสนุน และประสานความร่วมมือด้านดาราศาสตร์กับหน่วยงานอื่นของรัฐ สถาบันการศึกษาอื่นที่เกี่ยวข้อง และภาคเอกชนทั้งในประเทศและต่างประเทศ
4. บริการถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยีด้านดาราศาสตร์

หลุมดำ
Black Hole

หลุมดำคืออะไร? เนื่องจากไม่มีมนุษย์คนไหนเคยเห็นหลุมดำ จึงเป็นการยากที่จะอธิบายถึงรูปร่างของหลุมดำแต่โดยนิยามแล้ว หลุมดำก็คือวัตถุที่มีแรงโน้มถ่วงมากเสียจนไม่สามารถมีวัตถุอะไรหลุดออกมาจากแรงโน้มถ่วงของหลุมดำได้ แม้กระทั่งแสงเอง นี่เป็นที่มาของคำว่า **"หลุมดำ"**

เนื่องจากนิยามของหลุมดำเป็นเพียงนิยามทางฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ เราอาจไม่สามารถอธิบายได้ ว่าภายในหลุมดำ ควรจะมีหน้าตา หรือรูปร่างเป็นอย่างไร หลุมดำเองไม่ใช่วัตถุที่จับต้องได้ เราจึงไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่า หลุมดำเริ่มหรือสิ้นสุดตรงไหน แต่เราสามารถนิยามขอบเขตของหลุมดำได้ เรียกว่า **"ขอบฟ้าเหตุการณ์"** (Event Horizon) ซึ่งก็คือบริเวณที่ความเร็วหลุดพ้นเท่ากับความเร็วของแสงพอดี

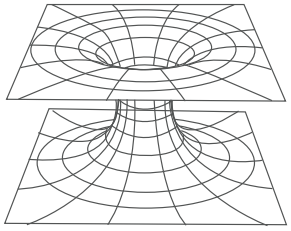
ในการอธิบายถึงหลุมดำ สามารถอธิบายได้ในหลายระดับขั้น ตั้งแต่ระดับง่ายไปจนถึงระดับที่ซับซ้อนมาก โดยเราสามารถเริ่มต้นได้ จากการอธิบายเรื่องของแรงโน้มถ่วง

ภาพที่ 1 : นักบินอวกาศกำลังโคจรและตกลงภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลกในภาพยนต์เรื่อง Gravity
(ภาพจากภาพยนต์เรื่อง Gravity โดย Warner Brothers Studio)

แรงโน้มถ่วง

แรงโน้มถ่วงเป็นแรงที่เราทุกคนรู้จักกันเป็นอย่างดี เป็นกฎธรรมชาติว่า วัตถุย่อมตกจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ แต่เซอร์ไอแซค นิวตัน เป็นมนุษย์คนแรก ที่สังเกตลูกแอปเปิ้ลหล่นจากต้นไม้ และตระหนักได้ว่า มันเป็นแรงเดียวกันกับที่ทำให้ดวงจันทร์โคจรอยู่รอบๆ โลกได้

ถึงแม้ว่าเราอาจจะไม่สามารถทราบได้อย่างแน่ชัด ว่ากลไกอะไร ที่ทำให้เกิดแรงโน้มถ่วง แต่เราสามารถอธิบายแรงโน้มถ่วงได้อย่างชัดเจน ไอแซค นิวตัน ได้ตั้งทฤษฎีแรงโน้มถ่วงว่า แรงโน้มถ่วงเป็นแรงระหว่างมวลสองมวลโดยแรงโน้มถ่วง จะแปรผันตามมวลทั้งสอง และแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง ดังที่อธิบายได้ด้วยสมการแรงโน้มถ่วงของนิวตัน



$$F = \frac{GM_1M_2}{R^2}$$

F = แรงโน้มถ่วง
G = ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ $6.67384 \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$
M_1, M_2 = มวลทั้งสอง
R = ระยะห่างระหว่างมวลทั้งสอง

ความเร็วหลุดพ้น

หากเราหยิบก้อนหินขึ้นมาก้อนหนึ่ง และโยนมันขึ้นฟ้า หินก้อนนั้นก็จะเคลื่อนที่ช้าลงเรื่อยๆ ด้วยแรงโน้มถ่วง จนหยุดนิ่ง และตกกลับลงมาอีกครั้งหลังจากเวลาผ่านไประยะหนึ่ง หากเราโยนหินก้อนนั้นด้วยความเร็วที่สูงขึ้น หินก้อนนั้น ก็จะใช้เวลานานขึ้นที่จะตกลงมา หากเราสามารถโยนหินก้อนนั้นด้วยความเร็วที่สูงมากค่าหนึ่ง เราจะพบว่าหินก้อนนั้นจะใช้เวลานานมากๆ จบเกือบเป็นอนันต์ กว่าจะตกลงมา หากเราโยนหินที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วค่านั้น เราจะพบว่าหินจะไม่มีวันตกกลับลงมาอีกเลย เราเรียกความเร็วต่ำที่สุดที่หินจะไม่ตกกลับลงมานี้ว่า “ความเร็วหลุดพ้น” (Escape Velocity)

บนพื้นโลก เราจะพบว่าหากเราต้องการที่จะขว้างวัตถุให้หลุดออกไปจากแรงโน้มถ่วงของโลก เราจะต้องขว้างวัตถุด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่าความเร็วหลุดพ้นจากพื้นโลก 11.2 กม./วินาที (ในความเป็นจริงแล้ว จรวดที่ขึ้นจากพื้นโลก ไม่จำเป็นต้องมีความเร็วสูงขนาดนี้ เพราะว่าเราสามารถค่อยๆ ใช้เชื้อเพลิงขับดันจรวดขึ้นไปช้าๆ ก็ได้ ดังภาพที่ 2)

ภาพที่ 2: การปล่อยกระสวยอวกาศโคลัมเบีย ในการปล่อยจรวดให้หลุดพ้นจากแรงโน้มถ่วงของโลกนั้น เนื่องจากจรวดมีเชื้อเพลิงและมีแรงขับดันอยู่เสมอ จึงไม่จำเป็นต้องออกตัวออกจากพื้นโลกด้วยความเร็วหลุดพ้น (ภาพโดย องค์การอวกาศ NASA)

เนื่องจากความเร็วหลุดพ้นเป็นผลจากแรงโน้มถ่วง ความเร็วหลุดพ้นออกจากดาวดวงหนึ่ง จะขึ้นอยู่กับมวลของดาวดวงนั้น และแปรผกผันกับขนาด นั่นหมายความว่าวัตถุที่มีมวลมาก และขนาดเล็ก จะมีแรงโน้มถ่วง และต้องใช้ความเร็วหลุดพ้นที่สูงที่จะ

หลุดออกมาจากแรงโน้มถ่วงนั้นได้ สำหรับดวงอาทิตย์ของเรา มีความเร็วหลุดพ้นจากพื้นผิวเท่ากับ 617 กม./วินาที ในขณะที่ดาวแคระขาวจะมีความเร็วหลุดพ้นสูงถึงกว่า 1,000 กม./วินาที ในขณะที่ดาวนิวตรอนที่มีความหนาแน่นที่สุด จะมีความเร็วหลุดพ้นถึงในระดับ 100,000 กม./วินาที นักบินอวกาศที่โคจรอยู่รอบๆ ดาวเคราะห์ดวงหนึ่ง จะได้รับแรงโน้มถ่วงที่น้อย และจะต้องใช้ความเร็วเพียงนิดเดียว ที่จะหลุดพ้นไปจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของดาวเคราะห์ดวงนี้ แต่เมื่อนักบินอวกาศลดเพดานบินลงมาแรงโน้มถ่วงก็จะสูงขึ้น และนักบินอวกาศจะต้องใช้ความเร็วสูงกว่าเดิม ที่จะหลุดพ้นออกมาจากอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของดาวเคราะห์ดวงนี้ได้ โดยนักบินอวกาศจะพบแรงโน้มถ่วง และความเร็วหลุดพ้นมากที่สุด ที่บริเวณพื้นผิวของดาวพอดี เนื่องจากเป็นบริเวณที่ใกล้ที่สุด ที่นักบินอวกาศจะสามารถเข้าใกล้ดาวเคราะห์ดวงนี้ได้ เว้นเสียแต่ว่าเขาจะสามารถยุบดาวเคราะห์ทั้งดวงให้เล็กกว่านี้ได้

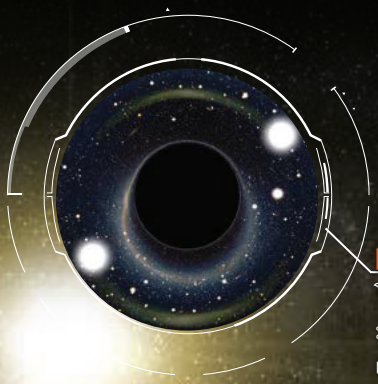
ภาพที่ 3: นักบินอวกาศในสถานีอวกาศนานาชาติ (ISS) อยู่ในสภาพแรงโน้มถ่วงน้อย (microgravity) นักบินอวกาศที่อยู่ในสถานีอวกาศนอกโลกนั้น ยังคงอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงโลก และไม่ได้อยู่ในสภาพไร้น้ำหนักอย่างแท้จริง วัตถุภายในสถานีอวกาศจะค่อยๆ ตกลงสู่ทิศทางของพื้นโลกอย่างช้าๆ เราเรียกว่าสภาพแรงโน้มถ่วงน้อย (microgravity)

อย่างไรก็ตาม ในบั้นปลายชีวิตของดาวมวลมากๆ บางดวง แรงโน้มถ่วงอันมหาศาลของดาวฤกษ์เอง อาจจะเพียงพอที่ทำให้พื้นผิวของดาวดวงนี้ยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว หากนักบินอวกาศสามารถ บินตามพื้นผิวที่กำลังยุบตัวลงอย่างรวดเร็วนี้ เขาจะสามารถสัมผัสกับแรงโน้มถ่วงที่สูงขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดเขาจะไปถึงบริเวณหนึ่ง ที่เขาจะต้องใช้ความเร็วมากกว่าความเร็วของแสง จึงจะสามารถหลุดออกจากแรงโน้มถ่วงอันมหาศาลนี้ได้ เราเรียกเขตแดนนี้ว่า “ขอบฟ้าเหตุการณ์” (Event Horizon)

ขอบฟ้าเหตุการณ์
Event Horizon

ขอบฟ้าเหตุการณ์ไม่ได้เป็นสถานที่พิเศษแต่อย่างใด ไม่ได้เป็นเส้นขอบฟ้าที่เราสามารถสังเกตเห็นได้ เช่นเดียวกับเส้นขอบฟ้าของโลก ขอบฟ้าเหตุการณ์ไม่ได้มีรูปร่าง ลักษณะ หรือสีที่แตกต่างออกไปจากบริเวณอื่นๆ รอบๆ หลุมดำ และหลุมดำก็ไม่ได้มีขอบเขตที่ชัดเจนที่เราสามารถสังเกตได้ และหากผู้สังเกตคนหนึ่งกำลังเคลื่อนที่ผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ เขาจะไม่รู้ตัวเลยด้วยซ้ำว่าได้ผ่านเขตนั้นมาแล้วหรือยัง

ขอบฟ้าเหตุการณ์เป็นเพียงบริเวณที่เรานิยามกันว่าเป็นขอบเขตที่บริเวณความเร็วหลุดพ้นมากกว่าความเร็วแสงถึงแม้ว่าเราจะสามารถคำนวณระยะของขอบฟ้าเหตุการณ์ได้อย่างชัดเจน แต่บริเวณนี้ก็ไม่ได้มีความพิเศษอย่างใดเมื่อเทียบกับบริเวณข้างเคียง อย่างไรก็ตามบริเวณที่ความเร็วหลุดพ้นเกินขอบเขตของความเร็วแสงนี้มีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากความเข้าใจในเอกภพปัจจุบันของมนุษย์ พบว่าไม่สามารถมีวัตถุหรือข้อมูลใด ที่สามารถเดินทางได้เร็วกว่าความเร็วแสงได้หากไม่มีวัตถุใดที่เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าแสงได้ ย่อมหมายความว่าไม่สามารถที่จะมีวัตถุใด ที่เมื่อหลุดเข้าไปภายในขอบฟ้าเหตุการณ์แล้วนั้น จะสามารถหลุดพ้นออกมาจากสนามแรงโน้มถ่วงมาสู่ภายนอกได้ แม้กระทั่งแสงเองการที่แสงไม่สามารถหลุดออกมาจากวัตถุได้ นั่นหมายความว่าวัตถุนี้จะไม่สามารถส่องแสงออกมา และมีสภาพดูมืดดำสนิท เราจึงมักจะใช้นิยามของขอบฟ้าเหตุการณ์นี้ในการนิยามขอบเขตของวัตถุที่เรารู้จักกันในนามของ “หลุมดำ”

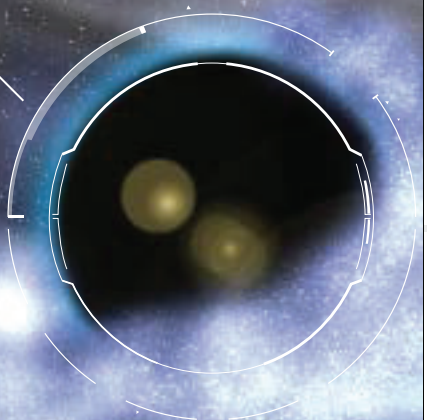


หลุมดำ (Black Hole)

โดยทางทฤษฎีแล้ว วัตถุใดก็ตามที่มีแรงโน้มถ่วงมากพอ ก็จะสามารถมีความเร็วหลุดพ้นที่มากกว่าความเร็วแสง มีขอบฟ้าเหตุการณ์เป็นของตัวเองได้ และนั่นก็คือ กลายเป็น “หลุมดำ” ซึ่งจากธรรมชาติของแรงโน้มถ่วงแล้วนั้น เราสามารถเพิ่มแรงโน้มถ่วงได้ โดยการเพิ่มมวลหรือลดขนาดของวัตถุ

หลุมดำในธรรมชาติ

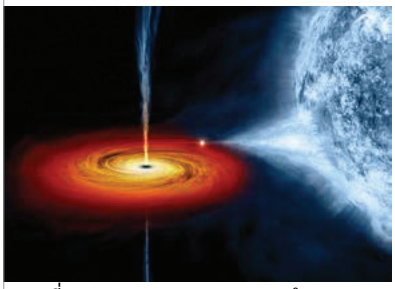
ในธรรมชาติ เราสามารถพบแรงโน้มถ่วงที่สูงพอที่จะกลายเป็นหลุมดำได้ในบั้นปลายสุดท้ายของดาวฤกษ์มวลมหาศาลเพียงเท่านั้น ในช่วงเริ่มต้นของอายุของดาวฤกษ์ แรงโน้มถ่วงของดาวจะบีบอัดให้ธาตุในแกนกลางของดาวรวมตัวกัน เกิดเป็นการระเบิดนิวเคลียร์ฟิวชั่น ซึ่งคอยต้านแรงโน้มถ่วงอันมหาศาลเอาไว้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ค่อยๆ หมดไป มวลสารในแกนของดาวฤกษ์ขนาดยักษ์เหล่านี้ก็จะยุบตัวลงอย่างรวดเร็วและแรงโน้มถ่วงเพิ่มขึ้นจนเกิดขอบฟ้าเหตุการณ์ และกลายเป็นหลุมดำ ไปในที่สุด เนื่องจากเราไม่สามารถเห็นแสง หรือได้รับข้อมูลข่าวสารใดๆ จากภายในขอบฟ้าเหตุการณ์ได้ เราจึงไม่สามารถสังเกตเห็นการมีอยู่ของหลุมดำได้โดยตรง



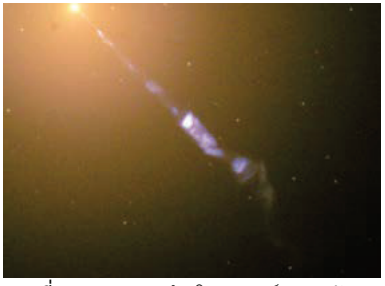
ในปัจจุบัน เราได้พบหลักฐานมากมาย ที่ยืนยันการมีอยู่ของหลุมดำ

01 **จานพอกพูนมวล (Accretion Disk)** เราสามารถพบเห็นรังสีเอ็กซ์ที่ปล่อยออกมาจากสสารในขณะที่กำลังค่อยๆ หมุนวนและตกลงสู่วัตถุที่มีขนาดเล็ก แต่มีแรงโน้มถ่วงสูง สอดคล้องกับลักษณะของหลุมดำ (ภาพที่ 4)

02 **Cygnus X-1** เป็นระบบดาวคู่ในกลุ่มดาวหงส์ โดยนักดาราศาสตร์ได้ตรวจพบแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่แตกต่างจากปรกติและไม่สอดคล้องกับวัตถุใดๆ ในบริเวณนั้น จากการคำนวณพบว่า วัตถุนี้จะต้องมีขนาดเล็กมาก ทำให้กลายเป็นวัตถุแรกที่สันนิษฐานกันว่า น่าจะเป็นหลุมดำที่กำลังกลืนกินมวลที่ออกมาจากดาวฤกษ์ที่โคจรอยู่รอบๆ ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่า Cygnus X-1 เป็นหลุมดำที่มีมวล 15 เท่าของดวงอาทิตย์ และมีรัศมีเส้นขอบฟ้าเหตุการณ์ขนาดประมาณ 44 กม.



ภาพที่ 4: ภาพจำลองจานพอกพูนมวลในระบบดาว Cygnus X-1 เมื่อมวลหมุนเข้าสู่หลุมดำ โมเมนตัมเชิงมุมบางส่วนจะถูกดีดออกไปตามแกนการหมุน ปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสีเอ็กซ์ (ภาพวาดโดย องค์การอวกาศ NASA)



ภาพที่ 5: ภาพจากกล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิล แสดงเจ็ทของสสารที่ถูกดีดออกมาจากหลุมดำขนาดยักษ์ ภายในแก่นดาราจักรกัมมันต์

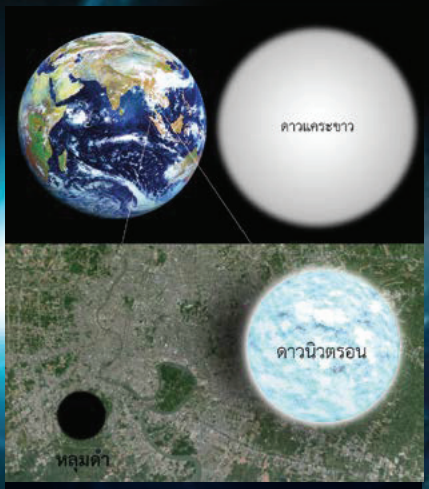
03 **แก่นดาราจักร (Galactic Nuclei)** ในปัจจุบันนี้นักดาราศาสตร์เชื่อแล้วว่าในแกนกลางของดาราจักรทุกดาราจักร จะมีหลุมดำขนาดยักษ์ (supermassive black hole) อยู่โดยในกาแล็กซีทางช้างเผือกเองนักดาราศาสตร์ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของดาวฤกษ์รอบๆ บริเวณที่เรียกว่า Sagittarius A* และพบว่าดาวฤกษ์รอบๆ ศูนย์กลางของกาแล็กซีทางช้างเผือกได้มีการเคลื่อนที่รอบๆ วัตถุอย่างหนึ่ง ซึ่งมีมวลถึง 4.3 ล้านเท่าของมวลดวงอาทิตย์ แต่มีขนาดเพียงไม่ถึง 0.002 ปีแสง วัตถุที่มีความหนาแน่นมากเช่นนี้ น่าจะเป็นสิ่งอื่นใดไปไม่ได้นอกจากหลุมดำ (ภาพที่ 5)

Accretion disk

การเกิดหลุมดำ ในธรรมชาติ

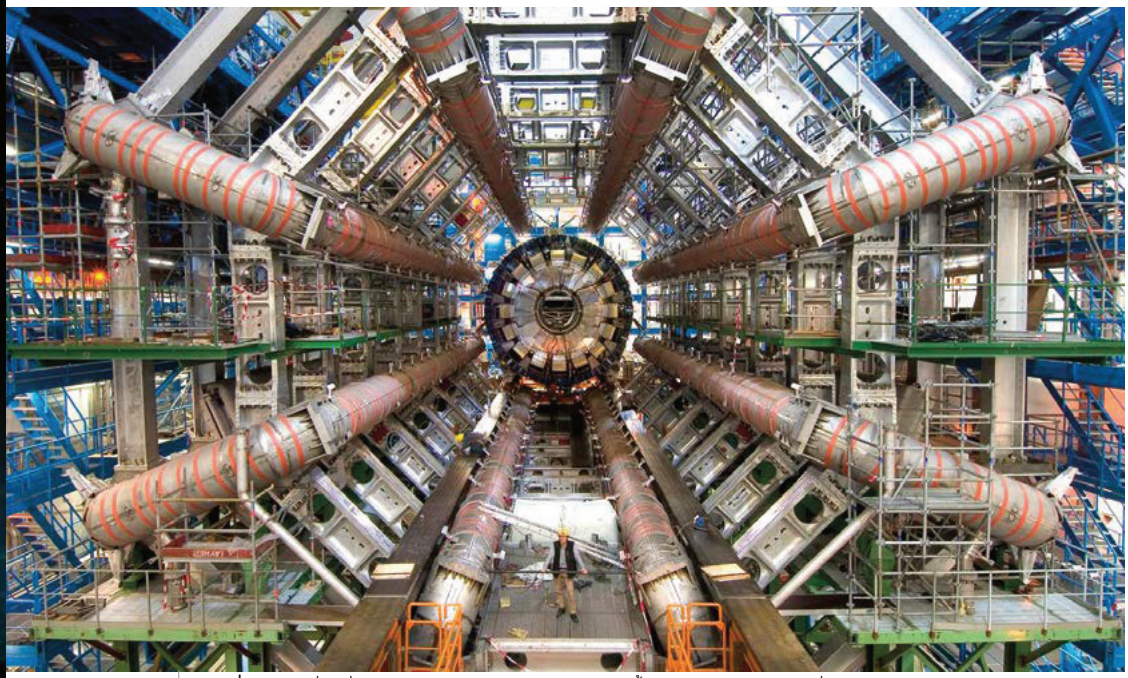
เราพบว่า ยิ่งดาวฤกษ์มีมวลมากเท่าใด ปั้นปลายชีวิตของมันก็จะจบลงโดยกลายเป็นวัตถุที่มีความหนาแน่นมากเท่านั้น โดยดาวฤกษ์ที่มีมวลไม่เกิน 10 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ จะกลายเป็นดาวแคระขาว (white dwarf) ซึ่งมีมวลพอๆ กับมวลดวงอาทิตย์ แต่ขนาดใกล้เคียงกับโลก (ภาพที่ 6) ซึ่งเกิดจากการที่มวลทั้งหมดในดาวถูกบีบอัดรวมกัน จนพยุงตัวอยู่ได้ด้วยแรงดันดีเจอเนอเรซี (degeneracy pressure) หากเปรียบเทียบแล้ว มวลของดาวแคระขาวขนาดหนึ่งกลักไม้ขีดจะมีมวลประมาณ 250 ตัน

ดาวฤกษ์ที่มีมวลมากกว่า 10 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ จะสามารถยุบตัวลงต่อไปจนแม้กระทั่งอิเล็กตรอนก็ยังถูกบีบอัดเข้าไปรวมกับโปรตอนในนิวเคลียส กลายเป็นวัตถุที่ประกอบไปด้วยนิวตรอนเป็นส่วนมาก พยุงตัวเอาไว้ได้ด้วยแรงดีเจเนเรซีระหว่างอนุภาคนิวตรอน เรียกว่าดาวนิวตรอน (neutron star) โดยดาวนิวตรอนทั่วๆไป จะมีมวลประมาณ 1.4 ถึง 3.2 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ แต่มีรัศมีเพียงประมาณ 10 กิโลเมตร (ภาพที่ 6) กลักไม้ขีดที่เต็มไปด้วยสสารจากดาวนิวตรอนจะมีมวลประมาณ 5 พันล้านตัน นับเป็นวัตถุที่หนาแน่นที่สุดในเอกภพที่เรารู้จักในปัจจุบัน



ภาพที่ 6: แสดงขนาดของดาวแคระขาวเมื่อเทียบกับโลก (บน) และขนาดของดาวนิวตรอน และหลุมดำขนาดมวลเท่าดวงอาทิตย์ เมื่อเทียบกับลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณกรุงเทพมหานคร (ล่าง)

แต่หากดาวฤกษ์ที่มีมวลตั้งแต่ 20 เท่าของมวลดวงอาทิตย์เป็นต้นไปเกิดการระเบิดแล้วนั้น จะไม่มีแรงใดอีกในดาวฤกษ์ที่จะต้านการยุบตัวของมวลภายใต้แรงโน้มถ่วงได้ เมื่อแกนกลางของดาวยุบตัวลงอย่างรวดเร็ว และหากแกนกลางที่เหลืออยู่มีมวลมากกว่า 4-5 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ แม้กระทั่งนิวตรอนก็จะไม่สามารถต้านทานแรงบีบอัดอันมหาศาลของแรงโน้มถ่วงได้ จนกระทั่งไม่มีแรงใดอีกในเอกภพ ที่จะต้านทานการยุบตัวลงไปได้ จึงเกิดเป็นวัตถุที่มีความหนาแน่นและแรงโน้มถ่วงอันมหาศาล ที่แม้กระทั่งแสงก็ไม่สามารถหลีกหนีออกมาได้กลายมาเป็นหลุมดำ โดยหากเราสามารถบีบอัดมวลของดวงอาทิตย์ให้กลายเป็นหลุมดำได้ หลุมดำนี้จะมีรัศมีเพียงประมาณ 3 กิโลเมตร (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 7: วันหนึ่งเครื่องตรวจวัด ATLAS อาจจะพบการเกิดขึ้นของหลุมดำขนาดเล็ก ที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคใน Large Hadron Collider (LHC) ที่ CERN, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

การเกิดหลุมดำ ด้วยวิธีอื่นๆ

เนื่องจากแรงโน้มถ่วงขึ้นอยู่กับมวลและระยะทาง หลุมดำจึงไม่จำเป็นต้องเป็นวัตถุที่มีมวลมากเสมอไป แต่จำเป็นต้องบีบอัดให้มีความหนาแน่นมากพอเท่านั้นก็จะสามารถเป็นหลุมดำได้ ด้วยเหตุนี้ หากเราสามารถนำอนุภาคความเร็วสูงสองอนุภาคมาชนกันและเปลี่ยนพลังงานจากการชนทั้งหมดไปเป็นมวลที่ถูกบีบอัดอยู่ในขนาดที่เล็กกว่าอะตอมล้านล้านล้านล้านเท่า เราก็จะสามารถสร้างหลุมดำขึ้นมาได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเรายังไม่มีเทคโนโลยีเพียงพอที่จะบีบอัดพลังงานมหาศาลเช่นนั้นลงไปในขนาดที่เล็กเท่านั้นได้ และหลุมดำประเภทนี้จะมีขนาดเล็กเกินกว่าที่จะสามารถดูดมวลอะไรเข้าไปได้ (เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าอะตอม) และจะสลายตัวลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะสามารถสร้างอันตรายใดๆ ต่อโลกของเราได้

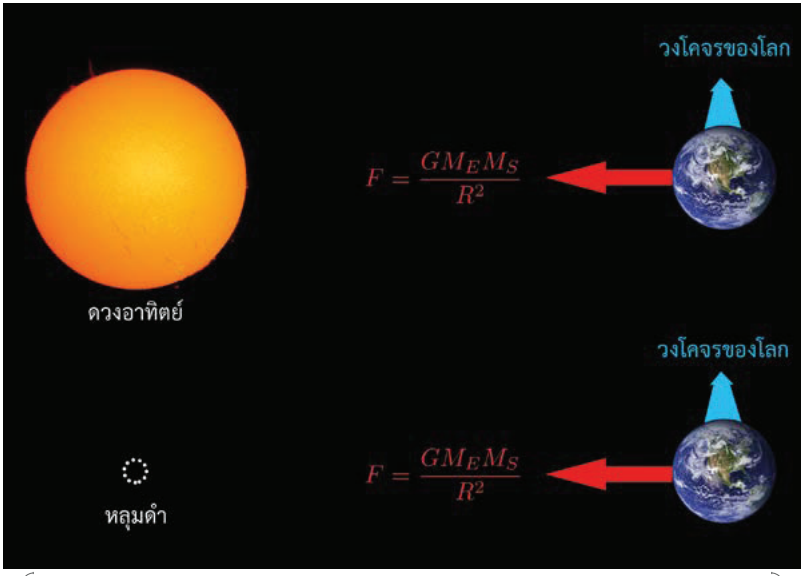
นอกจากนี้ นักดาราศาสตร์ฟิสิกส์ Stephen Hawking ยังมีการสันนิษฐานถึงหลุมดำขนาดเล็ก (เล็กกว่าหลุมดำที่เกิดได้จากการยุบตัวของดาวฤกษ์) ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบิ๊กแบงในตอนกำเนิดเอกภพ (Primordial BlackHoles) อย่างไรก็ตามนักดาราศาสตร์ยังไม่พบหลักฐานของหลุมดำดังกล่าว และยังคงเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาต่อไป

หลุมดำจอมดูด?

ในนิยายวิทยาศาสตร์ทั่วๆ ไป เมื่อพูดถึงหลุมดำ เรามักจะนึกถึงภาพของยานอวกาศหรือดาวเคราะห์ขนาดยักษ์ที่กำลังโดนหลุมดำดูด และกลืนกินลงไปสู่ห้วงความมืดมิด เป็นวัตถุอันตรายที่จะทำลายล้างทุกอย่างที่อยู่รอบๆ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วหลุมดำไม่ได้มีอันตรายเช่นนั้นเลย

เพื่อที่จะพิจารณาว่า บริเวณรอบๆ หลุมดำ จะเป็นอย่างไร ให้ลองสมมติว่า หากเราสามารถบีบอัดดวงอาทิตย์ของเราจนมีความหนาแน่นมากพอกลายเป็นหลุมดำที่มีมวลเท่ากับมวลดวงอาทิตย์ อยู่ที่ศูนย์กลางของระบบสุริยะ จะเกิดอะไรขึ้นกับวงโคจรของโลกของเรา? โลกของเราจะถูกดูดกลืนเข้าไปหรือไม่?

เราอาจจะคิดว่า ในเมื่อไม่มีอะไรหลุดรอดออกมาจากหลุมดำอันทรงพลังได้ และในเมื่อหลุมดำมีแรงดึงดูดอันทรงพลังขนาดนั้น โลกของเราก็น่าจะถูกค่อยๆ ดูดเข้าไปด้วยแรงโน้มถ่วงของหลุมดำที่ศูนย์กลางของระบบสุริยะ



ภาพที่ 8: หากเราสามารถบีบอัดดวงอาทิตย์ของเราให้กลายเป็นหลุมดำ เราจะพบว่าแรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ที่มีต่อโลกจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เนื่องจากทั้งมวลของดวงอาทิตย์ และระยะห่างจากโลกยังเท่าเดิม ดังนั้น วงโคจรของโลกจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป และโลกจะไม่ถูกดูดเข้าไปในหลุมดำดวงอาทิตย์

แต่หากเราพิจารณาดีๆ แล้ว เราจะพบว่าความจริงไม่สามารถเป็นเช่นนั้นได้ เนื่องจากแรงที่ดึงดูดโลกของเราให้โคจรไปรอบๆ ดวงอาทิตย์ก็คือแรงโน้มถ่วง หากเราแทนที่ดวงอาทิตย์ด้วยหลุมดำที่มีความหนาแน่นสูง แต่ยังมีมวลรวมเท่าเดิม ที่ระยะทางเท่าเดิม ก็ย่อมที่จะมีแรงโน้มถ่วงเท่าเดิม (ภาพที่ 8) นั่นหมายความว่า หากดวงอาทิตย์ของเรายุบตัวลงเป็นหลุมดำในเวลานี้ สิ่งเดียวที่จะเกิดขึ้นกับโลกของเราก็คือ ท้องฟ้าในเวลากลางวันที่มืดลง แต่โลกก็ยังคงโคจรต่อไป และทุกสิ่งบนโลกก็ยังคงดำเนินต่อไปภายใต้ความมืดมิดที่ปราศจากแสงอาทิตย์ ไม่ได้มีหายนะ แผ่นดินไหว ฯลฯ ไม่ส่งผลถึงแม้กระทั่งปรากฏการณ์น้ำขึ้นน้ำลงที่เกิดขึ้นเป็นปัจจุบัน

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่จะแตกต่างจากดวงอาทิตย์เดิม จะเริ่มขึ้นเมื่อเราเข้าไปใกล้หลุมดำมากกว่านี้ เนื่องจากก่อนหน้านี้เราไม่สามารถเข้าใกล้ศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ได้ เนื่องจากพื้นผิวและก๊าซร้อนของดวงอาทิตย์ได้ห่อหุ้มเอาไว้ (หากเราสามารถดำลงไปในพลาสมาพื้นผิวได้ แรงโน้มถ่วงก็จะลดลงอยู่ดี เนื่องจากแรงดึงดูดจากมวลบางส่วนด้านบนจะคอยฉุดเราออกมาจากศูนย์กลาง) แต่เมื่อมวลทั้งหมดได้ยุบรวมกันไปที่จุดศูนย์กลาง ทำให้เราสามารถเข้าไปใกล้ศูนย์กลางมวล และเข้าไปสู่บริเวณที่มีแรงโน้มถ่วงเพิ่มขึ้นอย่างที่เราไม่เคยเข้าไปได้ถึงมาก่อน

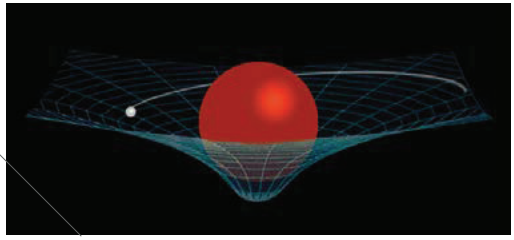
และที่รัศมี 3 กม. จากศูนย์กลางหลุมดำซึ่งเคยเป็นดวงอาทิตย์มาก่อนจะเป็นบริเวณของขอบฟ้าเหตุการณ์ และวัตถุใดที่เดินทางเข้ามาใกล้หลุมดำมากกว่าบริเวณนี้จะไม่สามารถหลุดพ้นออกไปจากแรงโน้มถ่วงของหลุมดำนี้ได้ ส่วนภายในขอบฟ้าเหตุการณ์นั้นปัจจุบันนี้เราไม่มีทฤษฎีใดที่จะสามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นภายในนี้ได้ แต่ทฤษฎีได้บอกเราเอาไว้ว่าเราไม่มีทางที่จะทราบถึงสิ่งที่เกิดขึ้นภายใน เนื่องจากไม่มีสสารหรือข้อมูลใดที่สามารถเดินทางได้เร็วพอที่จะเกินความเร็วหลุดพ้นที่มากกว่าความเร็วแสงได้

แต่ด้วยแรงในเอกภพทั้งสิ้นที่เรารู้จัก ไม่มีแรงใดที่สามารถต้านแรงโน้มถ่วงอันมหาศาลภายในหลุมดำได้ เราจึงสันนิษฐานว่าสสารทั้งหมดภายในหลุมดำ น่าจะถูกบีบอัดรวมเข้าอยู่ในจุดเพียงจุดเดียว เรียกจุดนี้ว่า “ซิงกูลาริตี้” (Singularity) ซึ่งโดยนิยามแล้วเป็นจุดที่มวลทั้งหมดของหลุมดำ ถูกบีบอยู่ใน จุดเพียงหนึ่งจุด ที่มีขนาดความกว้าง ยาว และสูงเป็นศูนย์

ทฤษฎีสัมพัธภาพทั่วไปและหลุมดำ

ในพื้นที่บริเวณรอบๆ หลุมดำ เป็นบริเวณที่มีสนามแรงโน้มถ่วงสูง และเป็นบริเวณที่ความรู้ความเข้าใจในกลศาสตร์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่สามารถนำมาใช้อธิบายได้อีกต่อไป เราจึงจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่สามารถอธิบายถึงสิ่งที่เกิดขึ้นกับสสาร ในสภาวะที่มีสนามแรงโน้มถ่วงสูง ซึ่งทฤษฎีนี้ก็คือ ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ที่อัลเบิร์ต ไอสไตน์ คิดค้นเอาไว้เมื่อปี ค.ศ. 1916

ในทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตัน กล่าวเอาไว้ว่าวัตถุที่มีมวลจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน แต่ทฤษฎีของนิวตันไม่สามารถอธิบายได้ว่า แรงนี้มาจากไหน? และวัตถุที่อยู่ห่างไกลกันเป็นอย่างมาก เช่น โลกและดวงอาทิตย์ โลกทราบได้อย่างไรว่ามีมวลดวงอาทิตย์ขนาดมากอยู่ในทิศทางนั้น? และตามทฤษฎีของนิวตัน แรงโน้มถ่วงนี้เป็นแรงที่เกิดขึ้นอย่างเฉียบพลัน หากเกิดอะไรขึ้นกับมวลของดวงอาทิตย์ มวลของโลกและทุกดาราจักรในเอกภพก็ควรที่จะทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงโน้มถ่วงได้อย่างเฉียบพลัน ซึ่งเท่ากับว่าข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของมวลจะต้องสามารถถ่ายทอดไปทั่วทั้งเอกภพได้ในเวลาที่เร็วกว่าความเร็วแสง ท้ายที่สุด ทฤษฎีของนิวตันไม่สามารถอธิบายได้ว่า ทำไมวงโคจรของดาวพุธจึงมีการส่ายไปมากกว่าที่ทำนายได้ ด้วยทฤษฎีของนิวตัน

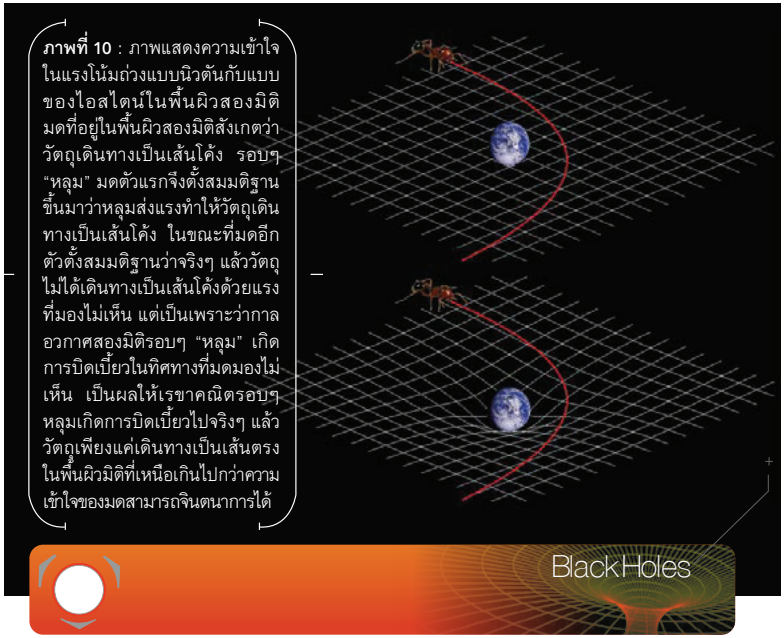


ภาพที่ 9 : แสดงการตกลงของวัตถุภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงในแนวคิดแบบทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอสไตน์

อัลเบิร์ต ไอสไตน์ จึงได้เสนอมาว่า แท้ที่จริงแล้วแรงโน้มถ่วง เกิดจากการที่มวลบิดกาลอวกาศ (spacetime)และการที่วัตถุเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งไปรอบๆ มวลนั้น แท้ที่จริงแล้วเป็นเพียงเพราะวัตถุพยายามที่จะเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในมิติทั้งสี่ของกาลอวกาศ ทฤษฎีนี้เป็นเรื่องที่ไม่ค่อยจะคุ้นเคยเท่าใดนักสำหรับมนุษย์ เพราะว่ามนุษย์ถือกำเนิดขึ้นมาในโลกสามมิติ เรารู้จักทิศทาง ซ้าย-ขวา หน้า-หลัง และ บน-ล่าง มิติที่สี่จึงเป็นสิ่งที่ไม่สามารถจินตนาการได้ด้วยสามัญสำนึกของมนุษย์ ในการจะอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับกาลอวกาศในแบบที่สามารถจินตนาการได้ เราจึงจำเป็นที่จะต้องใช้ “การทดลองทางความคิด” (thought experiment) เพื่อช่วยประกอบการอธิบาย

สมมติว่ามีมดตัวหนึ่งที่ใช้ชีวิตอยู่บนแผ่นกระดาษหนึ่งแผ่น มดตัวนี้รู้จักทิศทางแค่ หน้า-หลัง และ ซ้าย-ขวา หากเราพยายามจะไปอธิบายให้มดตัวนี้เข้าใจว่า ในเอกภพยังมีทิศทาง บน-ล่าง อยู่อีก ซึ่งตั้งฉากกับทั้งด้านหน้า-หลัง และ ซ้าย-ขวา ไปพร้อมๆ กัน มดตัวนี้ก็จะไม่เข้าใจ และเถียงว่ามันมีทิศทางอยู่แค่สองมิติเท่านั้น มิติที่สามมันจะเป็นไปได้อย่างไร

เมื่อมดตัวนั้นเดินผ่านแผ่นกระดาษเข้ามาในยังบริเวณหนึ่งที่เป็นหลุมในสามมิติ (ภาพที่ 10) เนื่องจากมดตัวนี้ไม่สามารถสังเกตเห็นรูปร่างของหลุมนี้ได้ แต่เห็นได้แต่เพียงพื้นที่กระดาษแบนๆที่อยู่ตรงหน้า มดตัวนี้ไม่ทราบถึงการมีอยู่ของหลุม แต่มดตัวนี้สังเกตได้ว่าเมื่อเดินเข้าไปใกล้ๆ บริเวณหนึ่ง มดตัวนี้จะเดินเป็นเส้นโค้งเอง ไปรอบๆ ทิศทางหนึ่ง มดตัวนี้จึงเริ่มเรียกทิศทางนั้นว่า “หลุม” และตั้งกฎขึ้นมาว่า “หลุมจะส่งแรงกระทำ ทำให้ทิศทางของวัตถุต้องเลี้ยวตาม” จนเป็นกฎที่มดทุกตัวนำมาใช้คำนวณ และก็ได้ผลที่น่าเชื่อถือได้ตลอดมาต่อมาภายหลัง มีมดอีกตัวหนึ่ง ออกมาตั้งข้อสงสัยว่า แล้วเราทราบได้อย่างไรว่าบริเวณใดมีหลุม? แรงที่เกิดจากหลุมมาจากไหน? แล้วถ้าหลุมหายไปแรงนี้จะหายไปด้วยทันทีหรือไม่? มดตัวนี้จึงตั้งทฤษฎีใหม่ขึ้นมาเพื่ออธิบายว่า จริงๆ แล้ว “หลุม” มันไม่ได้สร้างแรงอะไรหรอก เพียงแต่ว่า “หลุม” ทำให้แผ่นกระดาษที่มดทุกตัวอาศัยอยู่ บิดเบี้ยวไปในทิศทาง “ลง” ที่มดทุกตัวไม่สามารถเห็นได้ และมดทุกตัวก็แค่เพียงเคลื่อนตัวไปเป็นเส้นตรงบนแผ่นกระดาษที่บิดเบี้ยวนี้ จึงแลดูเป็นเส้นโค้งในสองมิติที่เหล่ามดอยู่เท่านั้นเอง



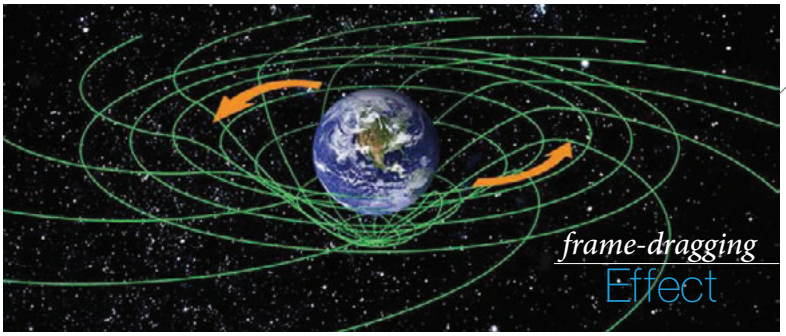
ภาพที่ 10 : ภาพแสดงความเข้าใจในแรงโน้มถ่วงแบบนิวตันกับแบบของไอสไตน์ในพื้นผิวสองมิติ มดที่อยู่ในพื้นผิวสองมิติสังเกตว่าวัตถุเดินทางเป็นเส้นโค้ง รอบๆ “หลุม” มดตัวแรกจึงตั้งสมมติฐานขึ้นมาว่าหลุมส่งแรงทำให้วัตถุเดินทางเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่มดอีกตัวตั้งสมมติฐานว่าจริงๆ แล้ววัตถุไม่ได้เดินทางเป็นเส้นโค้งด้วยแรงที่มองไม่เห็น แต่เป็นเพราะว่ากาลอวกาศสองมิติรอบๆ “หลุม” เกิดการบิดเบี้ยวในทิศทางที่มดมองไม่เห็น เป็นผลให้เรขาคณิตรอบๆ หลุมเกิดการบิดเบี้ยวไปจริงๆ แล้ววัตถุเพียงแค่เดินทางเป็นเส้นตรงในพื้นผิวมิติที่เหนือเกินไปกว่าความเข้าใจของมดสามารถจินตนาการได้

นิทานเรื่องมดสองมิตินี้ เป็นสิ่งเดียวที่เกิดขึ้นกับมนุษย์สามมิติอย่างพวกเรา อัลเบิร์ต ไอสไตน์ อธิบายแรงโน้มถ่วงว่า เกิดจากการบิดเบี้ยวของกาลอวกาศ (ซึ่งเปรียบได้กับแผ่นกระดาษของมด) วัตถุดูเหมือนเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งตามแรงโน้มถ่วงของโลก ประหนึ่งมีแรงที่มองไม่เห็นมากระทำ เพียงเพราะว่าวัตถุกำลังพยายามจะเดินทางเป็นเส้นตรงในกาลอวกาศสี่มิติ แต่เนื่องจากเราไม่สามารถสังเกต หรือจินตนาการถึงมิติที่สี่ได้ (เช่นเดียวกับที่มดสองมิติไม่สามารถจินตนาการถึงมิติที่ 3 ได้) เราจึงเพียงสังเกตว่าวัตถุเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งในสามมิติที่เราอาศัยอยู่

แต่ทฤษฎีสัมพัทธภาพไม่ได้เป็นเพียงแค่นิทานหรือทฤษฎีเพ้อฝัน เพราะทฤษฎีวิทยาศาสตร์ที่ดีจะต้องสามารถสร้างคำทำนายที่สามารถพิสูจน์ได้ และไอสไตน์ได้เสนอคำทำนายเอาไว้สามประการที่ทฤษฎีเดิมของนิวตันไม่มีทางที่จะสามารถอธิบายได้ นั่นคือ

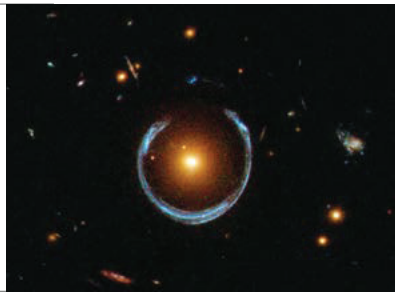
- **การบิดของวงโคจรดาวพุธ** – เนื่องจากทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตัน ทำนายเอาไว้เพียงว่าดาวเคราะห์ควรจะโคจรเป็นวงรีรอบดวงอาทิตย์ แต่ไม่สามารถอธิบายได้ว่าวงรีนั้นจะมีการส่ายได้อย่างไร
- **การเลี้ยวเบนของแสงรอบๆ ดวงอาทิตย์** – เนื่องจากแสงไม่มีมวล จึงไม่ควรจะได้รับอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วง แต่หาก “แรงโน้มถ่วง” เกิดจากการบิดงอของกาลอวกาศ แสงย่อมที่จะได้รับผลกระทบและเลี้ยวเบนในลักษณะเดียวกัน
- **การเลื่อนทางแดงของแสง** – ไอสไตน์ทำนายเอาไว้ว่า หากแรงโน้มถ่วงสามารถบิดงอกาลอวกาศ แสงที่หลุดออกมาจากกาลอวกาศที่บิดงอนั้น ก็ควรที่จะมีการยืดออกไปในทางแสงสีแดงเช่นเดียวกัน ซึ่งทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของนิวตันไม่สามารถอธิบายได้

ซึ่งทั้งสามข้อที่ไอสไตน์ทำนายเอาไว้ ก็ได้รับการยืนยันด้วยการสังเกตเป็นที่เรียบร้อย นอกจากนี้การทดลองสมัยใหม่ยังได้พบหลักฐานอีกมากมาย ที่ยืนยันถึงทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอสไตน์ เช่น การเลี้ยวเบนของแสงจนเกิดเลนส์แรงโน้มถ่วงรอบกระจุกดาราจักร ยานอวกาศ Gravity Probe B ที่ยืนยันผลของการเกิด frame-dragging effect ฯลฯ จนถึงทุกวันนี้ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปเป็นทฤษฎีแรงโน้มถ่วงที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางในหมู่นักวิทยาศาสตร์ และยังไม่มีการทดสอบใดที่บ่งชี้ถึงการเบี่ยงเบนไปจากธรรมชาติที่ทำนายเอาไว้ในทฤษฎีสัมพัทธภาพอย่างมีนัยสำคัญ



การยืดออกของเวลาและการหดสั้นของความยาว

ผลพวงอย่างหนึ่งของการบิดของกาลอวกาศก็คือ เมื่อมิติกาลอวกาศเกิดการบิดขึ้น ทำให้ความยาวในยานอวกาศลำหนึ่งสามารถหดสั้นลง และเวลาเดินนานขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์การยืดออกของเวลา และหดสั้นของความยาวนี้ ได้รับการยืนยันและทดสอบอย่างถี่ถ้วนทั้งในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ และสัมพัทธภาพทั่วไปการที่ขนาดและเวลาของวัตถุสามารถเปลี่ยนแปลงได้ อาจจะขัดกับสามัญสำนึกในชีวิตประจำวัน เนื่องจากในชีวิตประจำวันเราไม่เคยต้องพบกับสภาวะความเร็วเข้าใกล้แสง หรือสภาวะแรงโน้มถ่วงสูงบริเวณรอบๆ ดาวนิวตรอนหรือหลุมดำ และปรากฏการณ์การยืดออกของเวลาและหดสั้นของความยาวในสภาพแวดล้อมในชีวิตประจำวันนั้น เกิดขึ้นน้อยเกินกว่าที่ประสาทสัมผัสของมนุษย์จะรับรู้ได้



ภาพที่ 11 : แรงโน้มถ่วงมหาศาลของกาแล็กซี LRG 3-757 ทำให้เกิดเลนส์แรงโน้มถ่วง บิดงอให้แสงจากกาแล็กซีเบื้องหลังโค้งไปในรูปของวงแหวนไอสไตน (Einstein Ring) (ภาพจากกล้องโทรทรรศน์อวกาศ Hubble)

แม้กระนั้นก็ตาม การทดลองเป็นจำนวนมากก็ได้ยืนยันว่าปรากฏการณ์การยืดออกของเวลานั้นมีอยู่จริง ในเดือนตุลาคม ปี ค.ศ. 1971 Joseph C. Hafele และ Richard E. Keating ได้นำนาฬิกาอะตอมบินรอบโลกไปกับเครื่องบินพาณิชย์ ทั้งทางทิศตะวันออก และทิศตะวันตก และเทียบนาฬิกากับนาฬิกาอีกเครื่องที่ประจำอยู่ที่หอดูดาวกองทัพเรือสหรัฐ และพบว่านาฬิกาทั้งสามได้เดินเหลื่อมเวลาไปตามที่ทำนายเอาไว้ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษ และทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (ภาพที่ 12) นอกจากนี้การสร้างอนุภาคมิวออนในห้องปฏิบัติการ

ภาพที่ 12 : Joseph C. Hafele และ Richard E. Keating กับนาฬิกาอะตอมบนเครื่องบินโดยสาร ในการทดลองเพื่อยืนยันการยืดออกของเวลาตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอสไตน์

พบว่าอนุภาคนี้มีครึ่งชีวิตแค่เพียง 2.22 ไมโครวินาที แต่การพบอนุภาคมิวออนที่มาจากรังสีคอสมิคยืนยันว่า ถึงแม้ว่าอนุภาคนี้จะใช้เวลานานกว่านั้นในการเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก แต่เวลาที่ผ่านไปในตัวอนุภาคเองนั้นผ่านไปเพียงหนึ่งในห้า และในปี ค.ศ. 2010 ได้มีการตรวจพบการยืดออกของเวลาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามโน้มถ่วงของโลกที่ความสูงต่างกันเพียงหนึ่งเมตร ซึ่งอันที่จริงแล้ว หากนาฬิกาบนระบบดาวเทียม GPS ที่เราใช้ระบุตำแหน่งไม่ได้มีการทดเวลาที่เกิดจากการยืดออกจากในทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและสัมพัทธภาพทั่วไป เราจะพบว่านาฬิกาบนดาวเทียม GPS เหล่านี้จะค่อยๆ คลาดเคลื่อนออกไปเรื่อยๆ ด้วยเหตุผลที่ไม่สามารถอธิบายได้ และเมื่อเวลาผ่านไปตำแหน่งที่คำนวณได้บน GPS จะผิดเพี้ยนขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้น เราอาจสามารถกล่าวได้ว่า การที่ดาวเทียม GPS ยังใช้งานได้อย่างแม่นยำ นั่นเท่ากับว่านาฬิกาบนดาวเทียม GPS ทุกดวงที่กำลังโคจรอยู่เหนือพื้นโลกกำลังทำการทดสอบ และยืนยันผลของทฤษฎีสัมพัทธภาพอยู่อย่างต่อเนื่องนั่นเอง

ภาพที่ 13 : ภาพจำลองอิทธิพลการเลี้ยวเบนของแสงรอบๆ หลุมดำ หากสังเกตหลุมดำขนาดมวล 10 เท่ามวลดวงอาทิตย์ ด้วยระยะห่าง 600 กม. โดยมีทางช้างเผือกเป็นฉากหลัง (ภาพโดย Ute Kraus, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik)

ตกลงสู่หลุมดำ

จะเกิดอะไรขึ้นกับนักบินอวกาศที่กำลังตกลงสู่หลุมดำ? ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปทำนายเอาไว้ว่า เมื่อความเข้มของสนามแรงโน้มถ่วงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะเกิดการหดสั้นลงของความยาวในทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง และเวลาที่ยืดออกขึ้นเรื่อยๆ เมื่อสนามแรงโน้มถ่วงสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การหดสั้นของความยาวและยืดออกของเวลานี้ เป็นสิ่งที่สามารถสังเกตได้โดยผู้สังเกตภายนอกเพียงเท่านั้น สำหรับผู้สังเกตที่อยู่ในยานอวกาศที่กำลังตกลงสู่หลุมดำจะไม่สังเกตความผิดพลาดใดๆ ในตัวยานอวกาศ เนื่องจากทั้งความยาว และเวลาของผู้สังเกตในยาน ก็หดสั้น และยืดออก ไปพร้อมๆ กับยานที่เขานั่งไปด้วยนั่นคือ ทั้งไม้บรรทัด

และนาฬิกาของนักบินอวกาศที่อยู่ในยานอวกาศ ก็หดสั้นและยืดออกไปพร้อมๆ กับสิ่งทุกอย่างในยานลำนั้น หากนักบินอวกาศจะวัดความยาวของยาน เขาก็จะไม่พบว่าความยาวของยานเปลี่ยนไปแต่อย่างใด เนื่องจากทั้งตัวยานและไม้บรรทัด ก็ได้หดสั้นลงไปในอัตราที่เท่ากัน เช่นเดียวกับเวลา หากนักบินอวกาศสังเกตเข็มนาฬิกา เขาก็จะไม่รู้สึกผิดปรกติแต่อย่างใด เนื่องจากทั้งนาฬิกา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสมองของเขา ก็ได้ยืดออกไปในเวลาที่เท่าๆ กัน

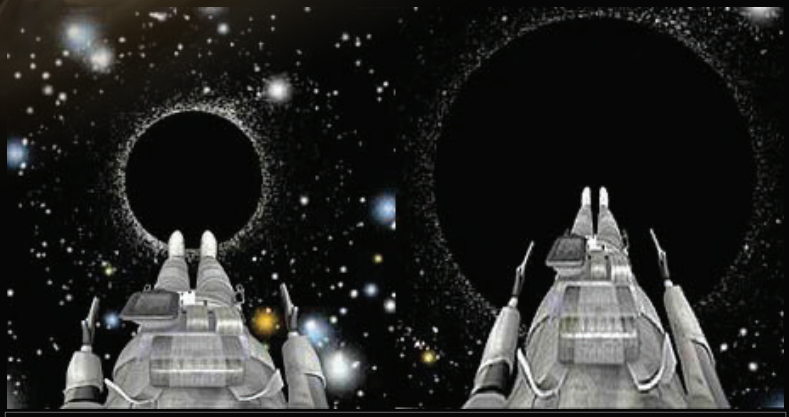
แต่สำหรับผู้สังเกตที่อยู่ภายนอกหลุมดำนี้ เขาจะสังเกตเห็นยานอวกาศลำที่กำลังตกลงสู่หลุมดำค่อยๆ แบนลงเรื่อยๆ และทุกอย่างที่เกิดขึ้นในยาน รวมทั้งนาฬิกาภายในยานก็จะเดินช้าลงเรื่อยๆ และเมื่อยานอวกาศเข้าใกล้หลุมดำมากขึ้น แรงโน้มถ่วงอันมหาศาลก็จะทำให้ความยาวคลื่นของแสงที่ส่องออกมายืดออก ทำให้ภาพยานอวกาศที่เห็น ค่อยๆ มืดและดูแดงขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อยานอวกาศลำนั้นเข้าใกล้สู่ขอบฟ้าเหตุการณ์ ความยาวของยานจะหดสั้นลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ผู้สังเกตภายนอกจะเห็นยานอวกาศลำนั้นกลายเป็นแผ่น และเวลายืดออกเป็นอนันต์จนเหมือนกับหยุดนิ่ง เป็นแผ่นแบนราบ มืด และดูออกแดง ดูเสมือนใช้เวลาชั่วกัลปาวสานในการตกลงสู่ภายในหลุมดำ ติดอยู่ที่ขอบฟ้าเหตุการณ์จวบจนสิ้นสุดของกาลเวลา

ภาพที่ 14 : ผู้สังเกตจากภายนอก จะเห็นนาฬิกาที่ตกลงหลุมดำ เดินช้าลงเรื่อยๆ เมื่อเข้าใกล้ขอบฟ้าเหตุการณ์ และผู้สังเกตจะสังเกตเห็นนาฬิกาสีแดงมากขึ้น และเดินช้าลงจนหยุดนิ่ง อยู่ที่ขอบฟ้าเหตุการณ์ และไม่เคยข้ามพ้นไป (ภาพจาก hubblesite.org)

แต่สำหรับนักบินอวกาศที่กำลังตกลงสู่หลุมดำ เขาจะสังเกตเห็นเหตุการณ์ทุกอย่างในเอกภพภายนอกหลุมดำดำเนินไปในอัตราที่เร็วขึ้นเรื่อยๆ (เนื่องจากเวลาของเขาเดินช้าลง) แต่เขาจะไม่ทราบเลยว่า เส้นขอบฟ้าเหตุการณ์หรือขอบเขตของหลุมดำ อยู่ตรงไหน เนื่องจากบริเวณเส้นขอบฟ้าเหตุการณ์ไม่ได้มีความพิเศษอะไรสำหรับนักบินอวกาศที่กำลังตกลงไปในหลุมดำ สิ่งแรกที่เขาจะรู้สึก ก็คือแรงไทดัล (Tidal Force) ที่แรงมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากปลายเท้าของนักบินอวกาศ ถูกดึงด้วยแรงโน้มถ่วงที่มากกว่าตัวของเขา ตัวนักบินอวกาศจึงถูกยืดออกเหมือนเส้นสปาเก็ตตี้ (จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ spaghettification) ยานและนักบินอวกาศทั่วๆ ไป จึงน่าจะถูกทำลายไปตั้งแต่ยังไม่ได้เข้าไป

spaghettication

เสียดายซ้ำแต่หากสมมติว่าเราสามารถสร้างยานอวกาศที่แข็งแรงพอ และนักบินอวกาศสามารถรอดชีวิตจากแรงไทดัลอันมหาศาลนี้ได้ (หรือหากเขาตกลงในหลุมดำที่มีมวลมากๆ จนแรงไทดัลไม่มากจนเกินไปที่บริเวณขอบฟ้าเหตุการณ์) สิ่งที่เขาจะสังเกตก็คือ เขาจะตกลงไปอย่างต่อเนื่อง และไม่มีความเปลี่ยนแปลงอะไร นักบินอวกาศจะไม่สามารถทราบได้เลยว่า เขาได้ผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ไปแล้วหรือยัง จนกระทั่งเขาเอาเครื่องมือออกมาเพื่อวัดระยะทางถึงศูนย์กลางของหลุมดำ จึงได้ทราบว่าเขาเข้ามาอยู่ในบริเวณหลุมดำเป็นที่เรียบร้อย



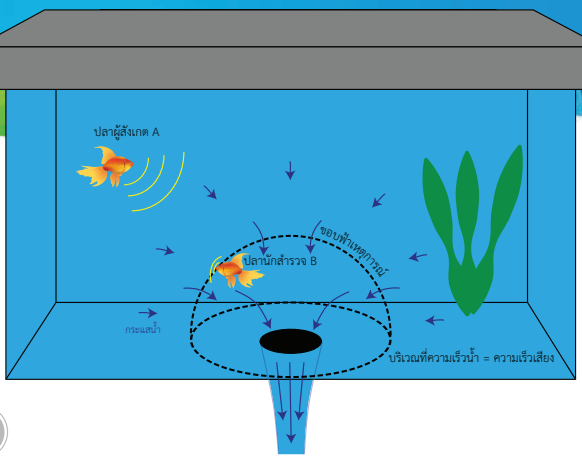
ภาพที่ 15 : นักบินอวกาศที่กำลังตกลงสู่หลุมดำจะไม่สังเกตเห็นการผิดปรกติอะไรของนาฬิกาของเขา แต่เขาจะพบกับแรงไทดัลอันมหาศาลที่พยายามจะฉีกทึ้งขาของเขาออกเป็นชิ้นตกลงสู่หลุมดำ (ภาพจาก hubblesite.org)

นักบินอวกาศอาจจะพยายามส่งสัญญาณออกไปเพื่อรายงานผู้สังเกตภายนอกหลุมดำว่าเขาได้เข้ามาในหลุมดำเป็นที่เรียบร้อย อย่างไรก็ตาม สัญญาณนั้นไม่มีวันที่จะสามารหลุดรอดออกไปจากหลุมดำได้ และในขณะที่เขาเข้าไปอยู่ในหลุมดำ ผู้สังเกตภายนอก รวมไปถึงทั้งเอกภพก็ได้ดับสิ้นไปเรียบร้อยแล้วอาจจะเป็นเรื่องแปลกประหลาด ที่สำหรับผู้สังเกตภายนอกนั้น นักบินอวกาศไม่เคยผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ไปได้และแค่ติดอยู่เหนือขอบฟ้าเหตุการณ์ไปชั่วกัลปาวสาน แต่สำหรับนักบินอวกาศแล้วนั้น เขาใช้เวลาเพียงแค่ไม่กี่นาทีในการตกลงผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ ทำไมเหตุการณ์ที่นักบินอวกาศผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ถึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้สำหรับผู้สังเกตภายนอก แต่เกิดขึ้นได้สำหรับผู้สังเกตภายใน? เราอาจจะสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ ด้วยนิทานอีกเรื่องหนึ่ง

Spaghettification

นิทานเรื่อง

ปลาท่องที่ตกลงสู่หลุมดำ



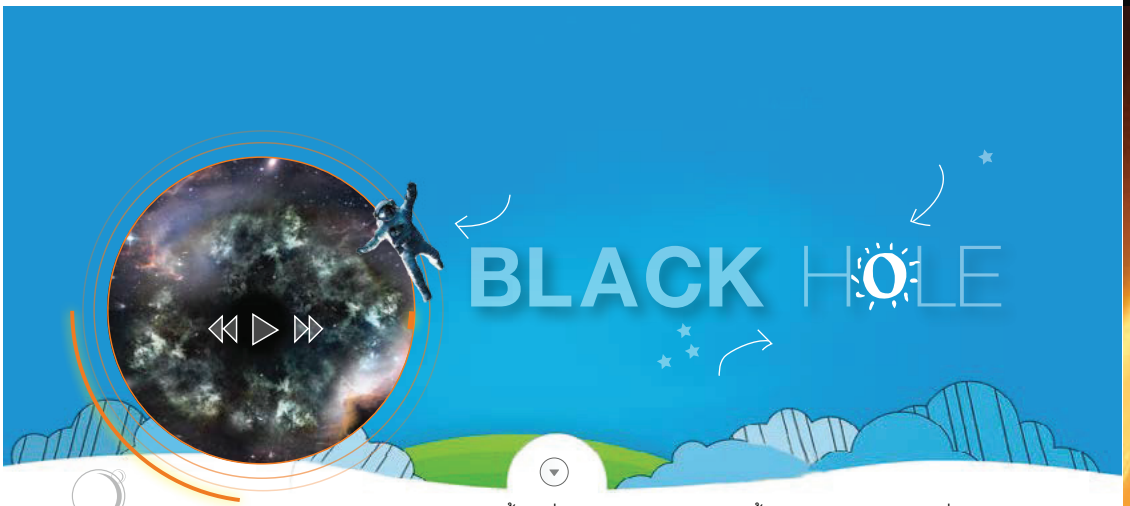
ภาพที่ 16 : ภาพแสดงการเปรียบเทียบขอบฟ้าเหตุการณ์กับตู้ปลาสมมติ เมื่อเปิดให้น้ำไหลออกจากตู้ปลา ในลักษณะความเร็วน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆ บริเวณใกล้รูระบายน้ำ ในบริเวณที่ความเร็วน้ำเท่ากับความเร็วคลื่นเสียงในน้ำจะเปรียบได้กับขอบฟ้าเหตุการณ์ในหลุมดำ เนื่องจากเสียงที่ปลานักสำรวจ B ส่งออกมาจากภายในขอบฟ้าเหตุการณ์ จะไม่มีวันส่งไปถึงปลาผู้สังเกต A ได้

สมมติว่ามีปลาทองสองตัวอยู่ในตู้ปลา คือปลาผู้สังเกต A และปลานักสำรวจ B ปลาสองตัวนี้ตาบอด และสามารถสื่อสาร และรับรู้ถึงกันได้ด้วยการส่งเสียงหากันเพียงเท่านั้น เมื่อปลาตัวหนึ่งส่งเสียง ปลาอีกตัวหนึ่งก็จะรับรู้ และทราบถึงตำแหน่งของปลาอีกตัวนั้นได้

ต่อมา รูระบายน้ำที่ก้นตู้ปลาได้ถูกเปิดขึ้น ทำให้น้ำเกิดการไหลออกไปในลักษณะที่ความเร็วน้ำสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อเข้าใกล้รูระบายน้ำ (ภาพที่ 16) ปลานักสำรวจ B ค่อยๆ ว่ายเข้าไปสำรวจบริเวณใกล้รูระบายน้ำ ในขณะที่ปลาผู้สังเกต A คอยสังเกตอยู่ห่างๆ ปลานักสำรวจส่งเสียงรายงานสภาพ และบอกตำแหน่งเป็นระยะๆ

ในขณะที่ยังห่างจากรูระบายน้ำ ความเร็วของน้ำยังมีไม่มาก ทำให้ปลาสองตัวสามารถสื่อสารกันและได้รับสัญญาณตามปรกติ เมื่อปลานักสำรวจ B เข้าใกล้รูระบายน้ำมากขึ้น ความเร็วของน้ำเริ่มเร็วมากขึ้น เสียงสัญญาณที่ปลานักสำรวจ B อ่านออกมา เริ่มห่างกันมากขึ้น ทำให้ปลาผู้สังเกต A สังเกตว่า เวลาของปลานักสำรวจ B เริ่มเดินช้ากว่าเวลาของมัน

ปลานักสำรวจ B เคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ จนถึงระยะหนึ่งซึ่งความเร็วของน้ำไหลเท่ากับความเร็วที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านกระแสน้ำ เนื่องจากปลานักสำรวจ B ลอยไปพร้อมกับกระแสน้ำนั้น มันจึงไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงใดๆ น้ำบริเวณรอบๆ ก็ยังคงเหมือนเดิม และปลานักสำรวจ B ก็ยังคงอ่านสัญญาณจากนาฬิกาอยู่เป็นระยะๆ



แต่สำหรับปลาภายนอกแล้วนั้น เมื่อความเร็วของกระแสน้ำเร็วเท่ากับความเร็วที่เสียงสัญญาณของปลานักสำรวจ B ส่งออกมา สัญญาณนั้นจึงเดินทางช้าลงเรื่อยๆ เมื่อความเร็วของน้ำเข้าใกล้ความเร็วเสียง ปลาผู้สังเกต A จึงสรุปว่า ปลานักสำรวจ B ติดอยู่ที่บริเวณที่ความเร็วน้ำไหลเท่ากับความเร็วเสียง (เนื่องจากสัญญาณที่ส่งออกมาดูเหมือนจะติดอยู่ที่บริเวณนั้น) ปลาผู้สังเกต A เรียกบริเวณนี้ว่า “ขอบฟ้าเหตุการณ์” เนื่องจากเหตุการณ์สุดท้ายที่มันสังเกตเห็น ก็คือปลานักสำรวจ B ติดอยู่ที่ขอบฟ้าเหตุการณ์

แต่สำหรับปลานักสำรวจ B แล้ว มันก็ยังคงส่งสัญญาณต่อไป และสภาพน้ำรอบๆ ก็ยังคงเหมือนเดิม จนกระทั่งปลานักสำรวจ B ได้ตกลงไปในรูระบายน้ำ ส่วนคำถามที่ว่าเกิดอะไรขึ้นเมื่อปลานักสำรวจ B เดินทางไปถึงรูระบายน้ำ? ปลาผู้สังเกต A ไม่มีวันที่จะสามารถตอบได้ เนื่องจากไม่มีทางใดที่ข่าวสารจากปลานักสำรวจ B จะสามารถเดินทางไปถึงมัน ก็คงจะมีแต่ปลานักสำรวจ B เท่านั้น ที่จะทราบว่าเกิดอะไรขึ้นต่อไป

นิทานเรื่องนี้สามารถช่วยอธิบายถึงสิ่งที่เกิดขึ้น ในขณะที่นักบินอวกาศ หล่นผ่านขอบฟ้าเหตุการณ์ของหลุมดำนั่นก็คือผู้สังเกตภายนอกจะสังเกตเห็นแสงสุดท้ายที่นักบินอวกาศส่งออกมา ขณะที่ติดอยู่ที่เหนือขอบฟ้าเหตุการณ์ และแสงสุดท้ายนั้นก็จะค่อยๆ ปล่อยออกมาไปจนสิ้นสุดของกาลเวลา ค่อยๆ หรี่มืดและแดงลงไปเรื่อยๆ แต่ไม่ว่าจะอย่างไร ผู้สังเกตภายนอกก็จะไม่มีวันที่จะสังเกตเห็นเหตุการณ์ที่นักบินอวกาศเดินทางไปถึงขอบฟ้าเหตุการณ์ แต่นิทานเรื่องปลากับตู้ปลานี้ ก็เป็นแค่เพียงนิทาน สิ่งที่แตกต่างกันกับความเป็นจริงก็คือในความเป็นจริงแล้วนั้น นาฬิกาของผู้สังเกตภายนอก และบริเวณใกล้ๆหลุมดำเดินด้วยอัตราที่ต่างกันจริงๆ ตามที่ยืนยันแล้วด้วยการทดสอบทางวิทยาศาสตร์นานับประการ ต่างกับนิทานตู้ปลาที่เวลาของปลาทั้งสองก็ยังคงเดินทางไปด้วยอัตราเดียวกันนั่นหมายความว่าสำหรับนักบินอวกาศที่กำลังตกลงไปในหลุมดำนั้น สำหรับเขาแล้วเขาได้สังเกตเห็นเหตุการณ์ของเอกภพภายนอกนับหมื่นล้านปี ดาวฤกษ์ ชีวิต และอารยธรรมต่างดาวจำนวนมากไปจนถึงกาแล็กซี และกระจุกกาแล็กซี ได้ถือกำเนิดขึ้น แล้วก็สูญสิ้น ดับไป ในเวลาเพียงชั่ววินาทีที่เขากำลังตกลงไปในหลุมดำ

อภิธานศัพท์

- **บิ๊กแบง (Big Bang)** • ทฤษฎีกำเนิดเอกภพที่สันนิษฐานว่า เอกภพเกิดจากการระเบิดครั้งยิ่งใหญ่เมื่อ 13,800 ล้านปีที่แล้ว ซึ่งเริ่มมาจากจุดเพียงหนึ่งจุด และขยายใหญ่ขึ้นเป็นเอกภพที่เราอาศัยอยู่
- **หลุมดำ (Black Hole)** • วัตถุที่มีแรงโน้มถ่วงสูงมากจนความเร็วหลุดพ้นมากกว่าความเร็วแสง
- **แรงดันดีเจเนเรซี (Degeneracy Pressure)** • เป็นแรงดันที่เกิดจากการที่อนุภาคต่อต้านการที่จะถูกบีบอัดให้เข้ามาอยู่ในสถานภาพทางควอนตัมเดียวกัน เกิดขึ้นเมื่อวัตถุถูกบีบอัดด้วยแรงดันมหาศาล หรือใกล้กันมาก เช่น ภายในดาวแคระขาว
- **ความเร็วหลุดพ้น (Escape Velocity)** • ความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้วัตถุสามารถหลุดออกจากอิทธิพลแรงโน้มถ่วงของวัตถุได้
- **ขอบฟ้าเหตุการณ์ (Event Horizon)** • บริเวณรอบๆ วัตถุที่มีความเร็วหลุดพ้นเท่ากับความเร็วแสงเท่ากับว่าไม่มีวัตถุใดสามารถหลุดออกมาจากภายในขอบฟ้าเหตุการณ์ได้ มักจะใช้เป็นนิยามในการอธิบายขอบเขตของหลุมดำ
- **ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป (General Relativity)** • ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของไอสไตน์ที่อธิบายว่าแรงโน้มถ่วงเกิดจากมวลทำให้กาลอวกาศเกิดการบิดออกในสี่มิติ และการบิดของกาลอวกาศทำให้ทิศทางของมวลเคลื่อนที่ออกไป
- **แรงโน้มถ่วง (Gravity)** • แรงดึงดูดระหว่างมวลของวัตถุสองมวล
- **ดาวนิวตรอน (Neutron Star)** • หากแกนกลางของดาวฤกษ์มีขนาดมากพอ เมื่อเผาผลาญเชื้อเพลิงหมดไปแล้ว แม้กระทั่งอิเล็กตรอนก็จะสามารถถูกดูดเข้าไปรวมกับนิวเคลียสได้ เกิดเป็นดาวที่ประกอบไปด้วยนิวตรอนเป็นส่วนมาก เป็นวัตถุที่มีความหนาแน่นมากที่สุดในเอกภพที่สามารถสังเกตได้ มีขนาดเท่าเมืองเล็กๆ หนึ่งเมือง
- **นิวเคลียร์ฟิวชั่น (Nuclear Fusion)** • พลังงานที่เกิดจากการรวมตัวของธาตุน้ำหนักเบาสองธาตุให้ธาตุที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และปลดปล่อยพลังงานอันมหาศาลออกมา เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นภายในดาวฤกษ์ ทำให้ดาวฤกษ์ส่องแสง และสามารถต้านทานแรงโน้มถ่วงเอาไว้ได้
- **Primordial Black Hole** • หลุมดำขนาดเล็กที่สันนิษฐานว่าอาจจะเกิดขึ้นและหลงเหลืออยู่จากบิ๊กแบงที่ถือกำเนิดมาเป็นเอกภพ
- **ซิงกูลาริตี้ (Singularity)** • หรือภาวะเอกฐาน เป็นแนวคิดทางทฤษฎีที่มวลทั้งหมดของวัตถุถูกรวมไว้ที่จุดๆ เดียวกัน ไร้ซึ่งขนาด และ ปริมาตรแต่เป็นจุดหนึ่งจุดตามนิยามทางคณิตศาสตร์ เราเชื่อว่ามวลของวัตถุภายในขอบฟ้าเหตุการณ์น่าจะถูกรวมกันเอาไว้ในซิงกูลาริตี้ เช่นเดียวกับมวลทั้งหมดที่ก่อกำเนิดมาเป็นเอกภพเมื่อเกิดบิ๊กแบง
- **กาลอวกาศ (Spacetime)** • ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป มิติของทิศทางและเวลาเป็นส่วนหนึ่งของมิติทั้งสี่ที่รวมกัน เรียกว่ากาลอวกาศเป็นมิติที่วัตถุในเอกภพอาศัยอยู่
- **ความเร็วแสง (Speed of light)** • ความเร็วที่แสงใช้ในการเดินทางผ่านสูญญากาศ มีความเร็ว 2.998×10^8 เมตรต่อวินาที
- **แรงไทดัล (Tidal Force)** • แรงที่เกิดจากการที่แรงโน้มถ่วงของวัตถุในส่วนที่อยู่ใกล้มวล แตกต่างจากแรงโน้มถ่วงในส่วนที่อยู่ไกลจากมวล จึงทำให้เกิดแรงไทดัลยืดออกในสองทิศทาง รู้จักกันอีกชื่อในนามของแรงน้ำขึ้นน้ำลง
- **ดาวแคระขาว (White Dwarf)** • เมื่อดาวฤกษ์ขนาดไม่เกิน 10 เท่าของดวงอาทิตย์เผาผลาญจนเชื้อเพลิงหมด มวลภายในแกนจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิวชั่นได้อีก จึงถูกบีบอัดลงจนมีขนาดประมาณเท่ากับโลก แต่มีมวลไม่เกิน 1.4 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ พยุงตัวเอาไว้ด้วยแรงดันดีเจเนเรซี เป็นดาวแคระขาว
- **รังสีเอ็กซ์ (X-ray)** • รังสีพลังงานสูงประเภทเดียวกับที่ใช้ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ ในธรรมชาติเกิดขึ้นจากวัตถุที่พลังงานสูงมากๆ เช่น อนุภาคมีประจุที่กำลังหมุนวนเข้าสู่หลุมดำ

Black Hole

สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

National Astronomical Research Institute of Thailand (Pubilc Organization)

สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อุทยานดาราศาสตร์สิรินธร เลขที่ 260 หมู่ 4 ต.ดอนแก้ว อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่ 50180
โทรศัพท์ : 0-5312-1268-9 โทรสาร : 0-5312-1250

สำนักงานประสานงาน กรุงเทพฯ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
ชั้น 2 เลขที่ 75/47 กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร วิจัยและนวัตกรรม ซอยโยธี ถนนพระรามที่ 6
แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 โทรศัพท์ : 0-2354-6652 โทรสาร : 0-2354-7013

หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา ฉะเชิงเทรา
เลขที่ 999 หมู่ 3 ต.วังเย็น อ.แปลงยาว จ.ฉะเชิงเทรา 24190 โทรศัพท์ : 0-3858-9396 โทรสาร : 0-3858-9395

หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา นครราชสีมา
เลขที่ 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ : 0-4421-6254 โทรสาร : 0-4421-6255

หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา สงขลา
เลขที่ 79/4 หมู่ 4 ต.เขารูปช้าง อ.เมือง จ.สงขลา 90000 โทรศัพท์ : 0-7430-0868 โทรสาร : 0-7430-0867

E-mail : info@narit.or.th www.NARIT.or.th

พิมพ์ครั้งที่ 4
ตุลาคม 2563