กำเนิดเอกภพ

บรรจง ทองสร้าง*

หลุมดำ (Black Hole)

คำว่า "หลุมดำ" (Black Hole) บัญญัติขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน จอห์น วีเลอร์ เมื่อปี ค.ศ. 1969 เพื่อใช้เรียกความคิดที่มีต้นกำเนิดมานานกว่าสองร้อยปีก่อนหน้านั้น โดยในยุคนั้นมีทฤษฎีเกี่ยวกับแสงอยู่สองทฤษฎีคือ

ทฤษฎีแรก ยืนยันว่าแสงมีสมบัติเป็นคลื่นจากการทดลองเรื่อง Interference ของ Thomas Young เมื่อ ค.ศ. 1800 และ

ทฤษฎีที่สอง ยืนยันว่าแสงมีสมบัติเป็นอนุภาค จากการทดลองของ A.H. Compton เมื่อ ปี ค.ศ. 1923 (Compton's Effects)

หนึ่งปีหลังการทดลองของ Compton คือปี ค.ศ. 1924 ทฤษฎีทั้งสองได้รับการยืนยันว่าแสงมีสมบัติคู่ (Dual Properties) โดย Louis Victor De Brogile นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ที่นำเอาทฤษฎีของไอน์สไตน์ที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับสสาร กับ ทฤษฎีพลังงานของ Plank ที่ว่าด้วยพลังงาน 1 ควอนตัมมาใช้กับแสง ได้สมการคลื่นสสาร (Matter Wave) คือ

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นสสาร

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Plank's constant : 6.63 x 10-34 J.s)

p คือ โมเมนตัมของก้อนพลังงานแสง (Photon)

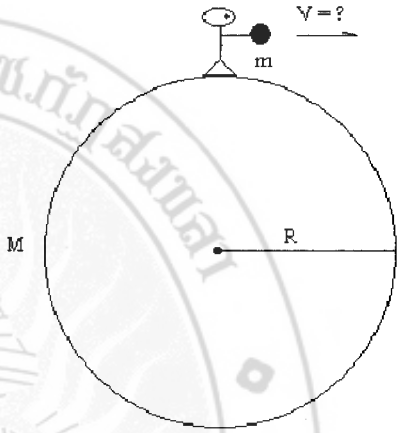
และจากความรู้ตามทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics) ในปัจจุบันนั้นยืนยันว่าทฤษฎีทั้งสองถูกต้องทั้งคู่ เพราะอนุภาคและคลื่นมีความเหมือนกันและสามารถแทนกันได้ แม้ทฤษฎีที่ว่าแสงเป็นคลื่นชนิดหนึ่งนั้น จะไม่มีคำอธิบาย

*อาจารย์ประจำโปรแกรมวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ที่ชัดเจนว่ามันมีอันตรกิริยากับแรงโน้มถ่วงอย่างไร แต่หากแสงเป็นอนุภาคแล้วมันจะมีอันตรกิริยากับแรงโน้มถ่วงทันทีโดยเฉพาะก่อนหน้าการค้นพบความเร็วแสงของโรเมอร์ เรามีความเชื่อว่าแสงเดินทางด้วยความเร็วไม่จำกัด ดังนั้นแรงโน้มถ่วงจึงไม่สามารถดึงให้แสงชะลอความเร็วลงไปได้ แต่ภายหลังการค้นพบของโรเมอร์ที่พบว่าแสงเดินทางด้วยความเร็วค่าหนึ่งที่วัดได้ นั่นแสดงว่าแรงโน้มถ่วงน่าจะมีผลต่อความเร็วแสงด้วย

ซึ่งสมมติฐานดังกล่าวมีการพูดถึงก่อนการทดลองของทั้ง Thomas Young และ Compton คือบทความของ จอห์น มิเชลล์ แห่งมหาวิทยาลัยแคมบริดจ์ ที่ตีพิมพ์ในวารสาร *Philisophical Transactions of the Royal Society of London* เมื่อ ค.ศ. 1728 โดยมิเชลล์ เสนอความคิดว่าดาวฤกษ์ที่มีมวลมากและหนาแน่นเพียงพอ อาจจะมีสนามโน้มถ่วงมากจนแม้แต่แสงก็ไม่สามารถเล็ดลอดออกมาได้เพราะแสงที่ดาวนั้นเปล่งออกมาจะถูกดึงกลับด้วยความเข้มของสนามโน้มถ่วงของตัวมันเองเสมอ โดยดาวประเภทนี้อาจจะมีอยู่เป็นจำนวนมากเพียงแต่เรามองมันไม่เห็นเท่านั้นเอง

แนวคิดที่สำคัญที่ถือเป็นต้นรากของหลุมดำ ได้รับการเสนอโดยนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส Pierre-Simon Laplace เมื่อ ค.ศ. 1798 โดย Laplace ตั้งคำถามว่า หากต้องปาอนุภาคมวล m ออกจากผิววัตถุทรงกลมมวล M รัศมี R ด้วยความเร็วต้น v แล้ว จะต้องมีเงื่อนไขทางฟิสิกส์อย่างไรจึงจะทำให้อนุภาคมวล m หลุดพ้นจากผิวทรงกลมมวล M ได้ (ทรงกลมมวล M มีศักย์โน้มถ่วงอยู่ค่าหนึ่งตามกฎของนิวตัน)



รูปที่ 1 *แสดงแบบจำลองของ Laplace*

และจากการคำนวณ Laplace พบว่า เงื่อนไขทางฟิสิกส์ที่จำเป็นและเพียงพอที่อนุภาคมวล m จะหลุดพ้นออกไปได้ หรือโอกาสที่จะหลุดพ้นแน่ๆ คือ พลังงานจลน์ของอนุภาคมวล m ต้องมีค่ามากกว่าพลังงานศักย์เนื่องจากสนามโน้มถ่วงของวัตถุมวล M หรือเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ คือ

$$P_E = 1$$

ก็ต่อเมื่อ

$$R \rangle \frac{2GM}{v^2}$$

เมื่อ P_E คือ โอกาสที่อนุภาคมวล m จะหลุดพ้นจากผิวทรงกลมมวล M

G คือ ค่านิจโน้มถ่วงสากล (Universal Gravitational Constant) มีค่าเท่ากับ 6.6 x 108 $cm3/g/s^2$

ประเด็นที่เป็นปัญหาในขณะนั้นคือ หากให้ความเร็วต้นของวัตถุมวล m มีค่าเท่ากับความเร็วแสง (c : 2.998 x 10^8 m/s) แล้ว (ก่อนหน้านั้นมีทฤษฎีเกี่ยวกับแสงอยู่แล้ว ๒ ทฤษฎีคือ ทฤษฎีแรก ที่ว่าแสงประกอบขึ้นจากอนุภาคซึ่งนิวตันเห็นด้วย และทฤษฎีที่สอง คือ แสงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง) ดังนั้นจากหลักการข้างต้นจะทำให้ เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้ผู้สังเกตที่อยู่นอกทรงกลมมวล M มองไม่เห็นมวล M นั้น ทั้งนี้เพราะแสงไม่สามารถหลุดรอดออกจากผิวทรงกลมมวล M ได้ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่า R และ M แปรผกผันซึ่งกันและกัน คือ ทรงกลมนั้นมีขาดที่เล็กมาก (R มีค่าน้อย) ในขณะที่มีมวลมหาศาล เมื่อเป็นเช่นนี้จึงเกิดปัญหาขึ้น 3 ประการ คือ

1. วัตถุที่มีมวลมหาศาลแต่มีขนาดเล็กมาก มีอยู่จริงในธรรมชาติหรือไม่ และเราสามารถตรวจพบได้อย่างไร

2. การมีอยู่ของวัตถุดังกล่าว มีขอบเขตจำกัดแค่ไหน เพียงไร

3. เมื่อเปลี่ยนมวล m มาเป็นแสงแล้ว กฎเกณฑ์ของพลังงานศักย์โน้มถ่วงยังใช้ได้อยู่หรือไม่

แรงพื้นฐาน (Fundamental Force)

กิจกรรมของวัตถุธาตุทั้งในระดับจุลภาค(Microscopic) และระดับมหภาค (Macroscopic) ของจักรวาลต่างดำเนินไปด้วยปัจจัยของแรงพื้นฐาน 4 แรง (Fundamental Force) คือ

1. *แรงโน้มถ่วง* (Gravitational Force) เป็นแรงระหว่างอะตอมของสสาร ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมภายในมวลนั้น และเป็นแรงที่ผูกมัดให้ดวงดาว ต่าง ๆ ในจักรวาลเคลื่อนที่ภายในวงโคจรที่จำเพาะของมัน รวมทั้งเป็นแรงที่ดึงดาวฤกษ์ไม่ให้ระเบิดออก แรงนี้ครอบคลุมระยะทางทั่วทั้งจักรวาล พร้อมทั้งควบคุมทิศทางการเคลื่อนตัวของกาแลกซี่ทั้งหมด และเป็นแรงที่ทำให้แอบเปิลหล่นใส่ศีรษะของนิวตัน แต่เมื่อเทียบกับแรงทั้ง 4 แล้วแรงโน้มถ่วงจัดเป็นแรงที่อ่อนมาก แต่เป็นแรงที่ส่งอิทธิพลกว้างที่สุด เช่น ดวงอาทิตย์มีมวลมากก็สามารถดึงให้ดาวนพเคราะห์โคจรรอบตัวเอง หรือ โลกที่ส่งแรงไปดึงดวงจันทร์ให้โคจรรอบโลก โดยแรงโน้มถ่วงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมวลและระยะห่างระหว่างมวล ตามความสัมพันธ์

$$F=G\frac{M_1M_2}{r^2}$$

เมื่อ G คือ ค่านิจโน้มถ่วง (Gravitational constant : 6.67 x 10-11 $N.m^2/kg^2$)

M_1 คือ มวลก้อนที่ 1

M_2 คือ มวลก้อนที่ 2

r คือ ระยะห่างระหว่างมวลก้อนที่ 1 และก้อนที่ 2 แรงโน้มถ่วงจัดเป็นแรงดูดอย่างเดียว

2. *แรงแม่เหล็กไฟฟ้า* (Electromagnetic Force) เป็นแรงระหว่างประจุไฟฟ้า โดยแรงดังกล่าวจะเป็นแรงผลักเมื่อประจุเหมือนกัน และเป็นแรงดูดเมื่อประจุต่างชนิดกัน เช่น แรงระหว่างโปรตอนกับโปรตอน และ อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนเป็นแรงผลัก แต่โปรตอนกับอิเล็กตรอนเป็นแรงดูด ปริมาณและทิศทางของแรงเป็นไปตามกฎคูลอมบ์ (Culomb,s Law) คือ

$$F=k\frac{q_1q_2}{r^2}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่แรงคูลอมบ์ (Coulomb force constant :8.987 x 109 $nt.m^2/coul^2$)

q_1 คือ ค่าประจุของประจุที่ 1

q_2 คือ ค่าประจุของประจุที่ 2

r คือ ระยะห่างระหว่างประจุที่ 1 และประจุที่ 2

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแรงที่กำหนดโครงสร้างการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนภายในอะตอม ดังนั้นจึงเป็น

แรงที่ทำให้อะตอมคงสภาพอยู่ได้และมีส่วนในการกำหนดกฎทางเคมีด้วย ผลดังกล่าวจึงเป็นไปในทำนองเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงที่ทำให้ดาวเคราะห์ในระบบสุริยะคงวิถีการโคจรอยู่ได้

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเป็นทั้งแรงดูดและแรงผลัก แต่ทั้งแรงโน้มถ่วงและแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจัดเป็นแรงที่ส่งอิทธิพลไกล (Long Range Fore) และมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงประมาณ 1037 เท่า ตัวอย่างอิทธิพลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ชนะแรงโน้มถ่วงคือกรณีที่ การถูหวีไปมาหลาย ๆ ครั้ง หวีสามารถดึงเศษกระดาษขึ้นจากพื้นได้ ในขณะที่แรงโน้มถ่วงพยายามดึงเศษกระดาษให้ตกลงบนพื้น แต่ภายในนิวเคลียสของอะตอมแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกล้างด้วยแรงนิวเคลียร์ชนิดอ่อนและแรงนิวเคลียร์ชนิดเข้ม

3. *แรงนิวเคลียร์ชนิดเข้ม* (Strong Nuclear Force) คือแรงหรือพลังที่ยึดโปรตอนและนิวตรอนไว้ในนิวเคลียส จากข้อมูลเกี่ยวกับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ว่าแรงระหว่างประจุที่เหมือนกันจะผลักกันนั้น พบว่าภายในนิวเคลียสประกอบด้วยนิวตรอนซึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า และโปรตอนที่มีประจุบวก ดังนั้น การที่ประจุบวกจำนวนมากอัดแน่นกันอยู่ภายในนิวเคลียสของอะตอมที่มีลักษณะทรงกลมรัศมีประมาณ $R \cong 1.2 \times 10^{-13} A^{1/3}$ เซนติเมตร (A คือเลขมวลหรือจำนวนโปรตอนรวมกับจำนวนนิวตรอน) แสดงว่าจะต้องมีแรงมหาศาลยึดโปรตอนไว้ เรียกแรงนี้ว่าแรงนิวเคลียร์อย่างแรง ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 100 เท่า ดังนั้นหากไม่มีแรงนิวเคลียร์ชนิดเข้มนิวเคลียสจะถูกฉีกออกเป็นเสี่ยง ๆเนื่องจากแรงผลักคูลอมบ์ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงมีธาตุเพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่สามารถรักษาสมดุลระหว่างแรงผลักคูลอมบ์และแรงนิวเคลียร์ชนิดเข้ม และเป็นเหตุที่สามารถอธิบายได้ว่าทำไมธาตุที่รู้จักในธรรมชาติจึงมีเพียงร้อยกว่าชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะหากนิวเคลียสมีโปรตอนมากกว่า 100 ตัวขึ้นไปแล้วแรงผลักทางไฟฟ้าจะชนะแรงนิวเคลียร์ชนิดเข้ม และนั่นหมายถึงนิวเคลียสจะถูกฉีกออก ดังนั้นหากสลายแรงนี้ออกจะทำให้เกิดการคายพลังงานมหาศาล และเป็นแรงสำคัญในการพัฒนานวตกรรมทางด้านนิวเคลียร์ เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$E=mc^2$$

หรือเท่ากับพลังงานที่เกิดจากมวลพร่อง (Mass Defect) หรือมวลส่วนที่หายไปภายหลังการแตกตัวของนิวเคลียส แรงนิวเคลียร์ชนิดเข้มจัดเป็นแรงระยะสั้น (Short Range Force) และมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงประมาณ 1039 เท่า

4. แรงนิวเคลียร์ชนิดอ่อน (Weak Nuclear Force) แรงนี้เกือบจะไม่เป็นพลัง และเป็นปฏิสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดการสลายตัวให้อนุภาคบีต้า (และเป็นแรงที่ทำงานอยู่ระหว่าง Leptons และ Hadrons มีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงประมาณ 1025 เท่า แรงนิวเคลียร์ชนิดอ่อนเมื่อรวมอยู่กับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่าแรง electro-weak

กฎของฮับเบิล (Hubble's Law)

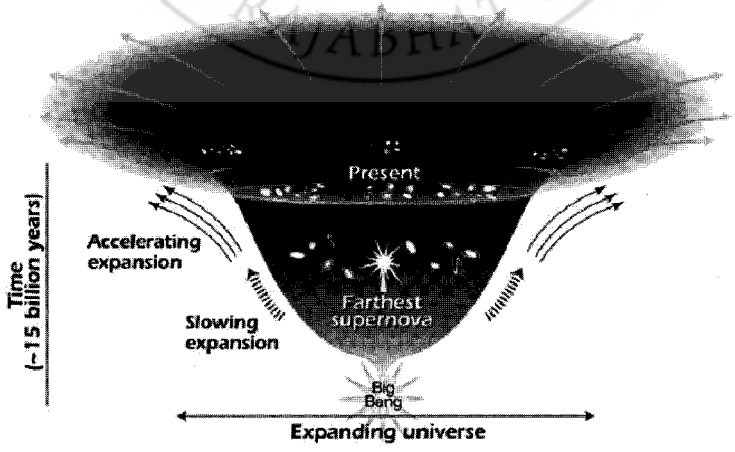
แนวความคิดเรื่องเอกภพมีสถานะคงที่ (Steady State Theory) เป็นแนวคิดที่ได้รับการยอมรับมานาน เพราะส่วนหนึ่งเป็นสิ่งที่สอดคล้องกับประสบการณ์ในชีวิตประจำวันที่ไม่ว่ามองขึ้นไปบนฟ้าในคืนใดดวงดาวต่าง ๆยังคงตำแหน่งแห่งที่ที่แน่นอน ประกอบกับความเชื่อทางศาสนาที่เกี่ยวกับ

พระผู้สร้างด้วยแล้ว ทำให้แนวคิดดังกล่าวได้รับการยอมรับมานานนับพันปี แม้กระทั่ง ไอน์สไตน์ เองยังเชื่อในทฤษฎีดังกล่าวถึงกับยอมนำค่าคงที่จักรวาลใส่ลงไปในสมการขณะที่คิดเรื่องของทฤษฎีสัมพัทธภาพ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวหยุดยั้งการขยายตัวของเอกภพ และแม้ว่าไอน์สไตน์จะยอมรับในภายหลังว่าการใส่ค่าคงที่ดังกล่าวลงไปในสมการถือเป็นความผิดพลาดครั้งยิ่งใหญ่ แต่ดูเหมือนตลอดชีวิตของไอน์สไตน์เองก็ยังเชื่อในทฤษฎีพระผู้สร้าง

จนกระทั่งปี ค.ศ. 1929 ฮับเบิล (Hubble) ได้ศึกษาความเร็วของดาราจักรต่าง ๆจำนวน 46 ดาราจักรที่เคลื่อนที่ถอยห่างจากดาราจักรทางช้างเผือก ฮับเบิลพบว่ากราฟระหว่างระยะห่างจากทางช้างเผือก กับความเร็วในการร่นถอยจากโลกมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (linear relationship) ซึ่งจากกราฟดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ยิ่งดาราจักรอยู่ห่างออกไปไกลมากเท่าไร ก็จะยิ่งเคลื่อนที่ห่างจากโลกด้วยความเร็วสูงเท่านั้น การค้นพบครั้งนี้จึงเป็นการปฏิวัติความเชื่อในทฤษฎีสถานะคงตัวของเอกภพ เพราะแทนที่เอกภพจะมีสภาวะอยู่นิ่ง คงที่ กลับกลายเป็นว่าเอกภพที่เราอาศัยอยู่ในปัจจุบันนั้นกำลังขยายตัวอยู่ตลอดเวลา ผลดังกล่าวทำให้นักวิทยาศาสตร์หันมาค้นหาสภาพที่แท้จริงของเอกภพว่าเป็นอย่างไรกันแน่ โดยเฉพาะคำถามมากมายที่ตามมา เช่น ณ จุดเริ่มต้น ก่อนการขยายตัวเอกภพอยู่ในสภาวะอย่างไร และในอนาคตเอกภพจะเป็นอย่างไร และการตอบคำถามดังกล่าวนำไปสู่ข้อสรุปประการหนึ่งของการเกิดของเอกภพคือทฤษฎีอภิมหาอุบัติ (Big Bang Theory) ที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน

อภิมหาอุบัติ (Big Bang)

จากการศึกษาผลย้อนหลังของสเปกตรัมต่าง ๆที่ตรวจพบในปัจจุบัน ได้ข้อสรุปว่าเมื่อสองหมื่นล้านปีล่วงแล้ว มวลสารทั้งหมดของเอกภพอัดแน่นรวมกันในลักษณะของอะตอมปฐม แน่นทึบความหนาแน่นสูงอนันต์ มีสภาพแบบหลุมดำ อุณหภูมิสูงอนันต์ แรงทั้งสี่รวมเป็นแรงเดียวกัน ณ ขณะหนึ่งมวลสารดังกล่าวเกิดระเบิดเป็นอภิมหาอุบัติ (Big Bang) ผ่านเวลาและการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ



รูปที่ 2 แสดงการขยายตัวของเอกภพภายหลังอภิมหาอุบัติ

หมายเหตุ *Big Bang เป็นคำพูดเชิงประชดประชันของ Fred Hoyle ต่อแนวคิดที่ว่าจักรวาลเริ่มตั้งต้นจากจุดเล็ก ๆ ทั้งนี้เพราะ Fred Hoyle เชื่อในทฤษฎีสถานะคงตัวของจักรวาล (Steady State Theory) ที่ว่าจักรวาลในปัจจุบันเป็นอย่างไร อดีตก็เป็นอย่างนั้นมาก่อนแล้ว และแม้จักรวาลจะขยายตัวตลอดเวลา แต่จักรวาลก็ผลิตสสารมาเพิ่มให้กับจักรวาลเพื่อให้จักรวาลเหมือนเดิมทุกประการ แต่แม้จะเป็นคำพูดแกมประชดประชัน กลายเป็นว่าคำ ๆนี้ฟังง่ายดีในทัศนะของสื่อมวลชน จึงติดปากและกลายเป็นชื่อของทฤษฎีมาจนปัจจุบัน*

เวลา	อุณหภูมิ (°K)	ขนาด ศ.ก. (cm)	สิ่งที่เกิดขึ้น
ก่อน Big Bang			
ไม่มี	อนันต์	จุด	สภาพSingularity
หลัง Big Bang			
10^{-43} วินาที		10^{-33} (เล็กกว่าโปรตอน)	เอกภพสมมาตรสมบูรณ์แบบแรงโน้มถ่วงควอนตัม (quantum gravity) เป็นแรงหลักแรงทั้งสี่ยังรวมกันอยู่
	10^{32} (10^{27} เท่าของดวงอาทิตย์)		แรงโน้มถ่วงแยกออกจากแรงทั้งสี่
10^{-35} วินาที		เท่าลูกโบว์ลิ่ง	แรงนิวเคลียร์ชนิดเข้มแยกออกจากแรงทั้งสาม เอกภพขยายขนาดขึ้นหนึ่งเท่าตัวในทุก ๆ 10-35 วินาที หรือขยายตัวด้วยอัตราเร่ง (exponential expansion)
10^{-9} วินาที	10^{15}		แรง electro-weak แตกออกเป็นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงนิวเคลียร์ชนิดอ่อน เอกภพ ประกอบด้วยอนุภาค ควาร์ก เล็ปตอน และ โฟตอน ในลักษณะที่รวมกันเหมือน “ซุป”
หลังมาเล็กน้อย	เย็นตัวลงตามลำดับ		อนุภาคควาร์กรวมตัวกันเป็นโปรตอนและนิวตรอน สนามหยาง-มิลล์ควบแน่นกลายเป็น “กาว” เหนียว ๆ ทำหน้าที่เชื่อมควาร์กเป็นอนุภาคแฮดดรอน และควบแน่นกลายเป็นโปรตอนและนิวตรอน และรวมเป็นนิวเคลียสในท้ายที่สุด (คำว่า“ควาร์ก” (quark) มาจากบทประพันธ์ชื่อ Finnegans Wake ของ James Joice ในประโยค“Three quarks for Muster Mask!)
180 วินาที			นิวเคลียสที่มีเสถียรภาพเริ่มก่อตัว เกิด โฟตอน อิเล็กตรอน โฟสิตรอน และนิวตริโน แสงที่ถูกผลิตขึ้นยังไม่สามารถวิ่งทะลุสนามโน้มถ่วงออกมาได้ อวกาศมีสภาพขุ่นมัวคล้ายหมอกหนา ๆ
300,000 ปี	3,000		เกิดอะตอมไฮโดรเจน และฮีเลียม เอกภพมีสภาพโปร่งใส แสงสามารถเดินทางไปได้ไกลหลายปีแสง
100 ล้านปี			กาแลกซีเริ่มจับกลุ่มกระจุกตัว
ปัจจุบัน	3 (ใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์)	.....	เอกภพดูไร้ความสมมาตร แรงทั้งสี่แยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด

ภายหลังการเกิดขึ้นของของไฮโดรเจนและฮีเลียมแล้ว ก๊าซเหล่านั้นล่องลอยไปในอวกาศปะปนกับฝุ่นอวกาศ (dusts) อยู่ทั่วไป หลังจากนี้จึงเป็นห้วงเวลาแห่งการก่อกำเนิดของดวงดาวทั้งหมดที่สุกสกาวอยู่บนท้องฟ้า ให้เราจินตนาการถึงอะไรต่ออิอะไรได้สารพัด โดยไฮโดรเจนและฮีเลียม รวมตัวกันเป็นกลุ่มกาซ (gas clouds) ที่เบาบางอยู่ทั่วไปในอวกาศ และเรียกกลุ่มก๊าซเหล่านี้ว่า เนบิวลา (Nebula) (คำว่า"เนบิวลา" เป็นภาษาละตินแปลว่า "เมฆ") โดยเนบิวลามีความหนาแน่นของก๊าซประมาณ 1-10 อนุภาค/ลูกบาศก์เซนติเมตร และฝุ่นอวกาศประมาณ 1 อนุภาค/ 1 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซที่เราหายใจอยู่บนโลก (อากาศที่หายใจบนโลก 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรมีอนุภาคของก๊าซเท่ากับ 2.7x1018 อนุภาค) และอุณหภูมิของเนบิวลามีค่าต่ำมาก และความหนาแน่นในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน เหตุการณ์หลังจากนี้จึงเป็นวิวัฒนาการของดวงดาว (จากการสังเกตการณ์เกิดดาวฤกษ์มวลมากเดี่ยว ๆ ดวงหนึ่ง โมเลกุลซึ่งก่อตัวเป็นดาวฤกษ์ประกอบด้วยเม็ดฝุ่นและโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ เช่น โมเลกุลของไฮโดรเจน อนุมูลไฮดรอกซิล (CH) ไฮโดรเจนไซยาไนน์ (HCN) และคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) โดยโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจน ฝุ่นและก๊าซผสมกันด้วยอัตราเฉลี่ยประมาณ ฝุ่น 1 เม็ดต่อโมเลกุลก๊าซทุก ๆ 1012 อะตอม มีความหนาแน่น 1,000 โมเลกุล/ลูกบาศก์เซนติเมตร)โดยจะเรียงลำดับเหตุการณ์ ดังนี้

กำเนิดดาว

ขั้นตอนที่หนึ่ง บริเวณที่มีก๊าซหนาแน่นมีแรงโน้มถ่วงสูงกว่าบริเวณข้างเคียง แรงโน้มถ่วง จึงดึงเอาก๊าซบริเวณข้างเคียงมารวมกันตามกฎความโน้มถ่วงของนิวตัน (The law of gravitation) คือ

$$F=G\frac{Mm}{r^2}$$

โดยมีค่าความเร่งหรือค่า *"ความโน้มถ่วง"* เท่ากับ

$$g(r)=G\frac{M(r)}{r^2}$$

เมื่อมวลเข้ามารวมกันมากขึ้นแรงโน้มถ่วงก็มากขึ้นตาม และหากบริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิประมาณ 10-30 เคลวิล (-260 องศาเซลเซียส) ก๊าซจะรวมกันได้ แต่หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ก๊าซที่เข้ามารวมกันจะกลับไปล่องลอยตามเดิม (พลังงานศักย์โน้มถ่วงต้องมากกว่าพลังงานจลน์ของกาซ)

ขั้นตอนที่สอง ภายหลังที่ก๊าซเข้ามารวมกันพลังงานศักย์โน้มถ่วง (gravitational potential energy) ของโมเลกุลก๊าซเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งจะแผ่ออกสู่อวกาศ และอีกส่วนหนึ่งไปเพิ่มอุณหภูมิให้กับกลุ่มก๊าซซึ่งเป็นไปตามกฎของ Virial Theorem คือ (เงื่อนไขคือถ้าสมมติว่าก๊าซนั้นเป็นก๊าซอุดมคติ (perfect gas) ที่ไม่มีการหมุน ไม่มีสนามแม่เหล็ก)

$$2U+\Omega=0$$

เมื่อ U คือ พลังงานความร้อนทั้งหมดของดาว (total thermal energy of star)

Ω คือ พลังงานศักย์ทั้งหมดที่เกิดจากความโน้มถ่วงของดาว (total gravitational potential energy of star)

จากความสัมพันธ์ข้างต้นพบว่าเมื่อ

Ω ลดลง ๑ ส่วน U จะเพิ่มขึ้น ½ ส่วน แต่จากเงื่อนไขของกฎการถ่วงของพลังงานที่ว่าผลรวมของพลังงานทั้งหมดต้องมีค่าคงที่ ดังนั้นพลังงานอีก ½ ส่วน จะต้องแผ่ออกสู่อวกาศ

ผลดังกล่าวทำให้ที่แกนกลางอุณหภูมิสูงกว่า 50 เคลวิล ซึ่งในช่วงนี้ยังไม่สามารถเห็นการรวมกันของกลุ่มก๊าซได้ แต่สามารถมองผ่านกล้องถ่ายภาพในช่วงคลื่นอินฟาเรด ซึ่งกระบวนการรวมตัวทั้งหมดใช้เวลานับสิบล้านปี เว้นแต่หากกลุ่มก๊าซมีความหนาแน่นสูงเวลาอาจลดลงเหลือนับแสนปี ซึ่งในเนบิวลาหนึ่งๆ จะมีกลุ่มก๊าซที่มีความหนาแน่นสูงนับร้อยกลุ่ม

ขั้นตอนที่สาม การรวมตัวของกลุ่มก๊าซดำเนินต่อไปจนกระทั่งความหนาแน่นสูงเกินกว่าความร้อนจะแผ่ออกมาได้ ดังนั้นความร้อนทั้งหมดจึงทำให้แกนกลางเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เป็นปัญหาสำหรับการรวมตัว เพราะความโน้มถ่วงมีอิทธิพลมากกว่าความร้อน กาซจึงยุบตัวเข้าสู่ศูนย์กลาง และเริ่มเรืองแสงให้มองเห็น และส่องให้เห็นเนบิวลาข้างๆสว่างขึ้นด้วย แกนก๊าซร้อนที่เรืองแสงนี้เรียกว่า โปรโตสตาร์ (Protostar คำว่า Proto- เป็นคำอุปสรรคในภาษาละติน แปลว่า *"ก่อน"*) ตัวอย่างเนบิวลาที่แกนกลางส่องสว่างคือ เนบิวลาสว่างใหญ่ในกลุ่มดาวนายพราน เนบิวลาดอกกุหลาบ เนบิวลาอีตา และเนบิวลาคารินี

ความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับอุณหภูมิบริเวณแกนกลางของดาว เป็นไปตามสมการ

$$T_c = 14 \times 10^6 m^{\frac{1}{3}}$$

เมื่อ T_c คือ อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางดาวในหน่วยเคลวิล

m คือ มวลของดาวในหน่วยมวลดวงอาทิตย์ (Solar mas)

ขั้นตอนที่สี่ เมื่อโปรโตสตาร์ยุบตัวลงอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดผล ๓ ประการ คือ

1. โปรโตสตาร์มีขนาดเล็กลง
2. แกนกลางร้อนและเรืองแสงสว่างมากขึ้น
3. โปรโตสตาร์เริ่มหมุนรอบตัวเอง

และตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Angular Momentum) เมื่อขนาดของโปรโตสตาร์เล็กลงก็จะต้องหมุนรอบตัวเองเร็วขึ้น ผลการหมุนทำให้กลุ่มก๊าซที่มีรูปร่างไม่ชัดเจนหรือมีรูปร่างกลม จะแบนลงเป็นแผ่นราบคล้ายจานเรียกว่า จานมวลรวม (Accretion Disk)

ขั้นตอนที่ห้า เมื่อแกนกลางของโปรโตสตาร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับล้านองศาเคลวิล โปรโตสตาร์ จะปล่อยกระแสอนุภาคพลังงานสูงคล้ายลมสุริยะ เรียก Protostellar Wind ออกมาโดยรอบ กระแสอนุภาคดังกล่าวแสดงว่าก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา แต่อุณหภูมิขนาดนี้ยังน้อยกว่าที่จะต้านการยุบตัวเนื่องจากสนามโน้มถ่วง โปรโตสตาร์จึงยังคงยุบตัวต่อไป และในช่วงท้ายๆของการยุบตัวจะเห็นลำของกระแสอนุภาคพุ่งขึ้นจากจานมวลรวมในแนวแกนหมุน

การหมุนรอบตัวเองและมวลแบนตัวลงเป็นรูปจาน เพราะต้องอนุรักษ์กฎการทรงโมเมนตัม จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมวัตถุทั้งหมดในจักรวาลจึงหมุนตัวและมีลักษณะแบนๆ ไม่กลมซะทีเดียว และในบางโอกาสหากโปรโตสตาร์หมุนรอบตัวเองเร็วเกินไป มวลบางส่วนจะหลุดออกไปและไปก่อเป็นดาวฤกษ์อีกดวงหนึ่งข้างๆดวงเดิม และกลายเป็นระบบ

ดาวคู่แบบใกล้ชิดกัน (Close Binary System) ซึ่งผิวดาวจะอยู่ใกล้ชิดกันจนสามารถถ่ายเทมวลซึ่งกันและกันได้

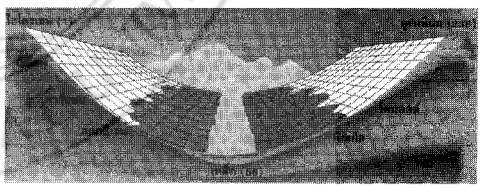
ขั้นตอนที่หก เมื่อโปรโตสตาร์ยุบตัวต่อไปจนกระทั่งแกนกลางมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 10 ล้านองศาเคลวิล ที่อุณหภูมิระดับนี้จะก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบฟิวชัน (Fusion) ขึ้น ปฏิกิริยาดังกล่าวไปเพิ่มอุณหภูมิให้กับแกนกลางและมีความดันสูงมากพอที่จะต้านแรงโน้มถ่วงได้ เมื่อเป็นเช่นนี้การยุบตัวก็จะหยุดลงทันที เนื่องจากเกิดสมดุลระหว่างแรงยุบกับแรงต้าน ดาวก็เกิดสมดุล ดังนั้นการจุดระเบิดของนิวเคลียร์ฟิวชันที่แกนกลางถือเป็นจุดเริ่มต้นของชีวิตดาว และพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ก็เข้ามารับช่วงในการผลิตความร้อนให้กับดาวแทนความร้อนอันเนื่องมาจากการยุบตัวเนื่องจากสนามโน้มถ่วง

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันหลัก ๆที่ก่อให้เกิดพลังงานของดาวฤกษ์

$$^{2}H+^{2}H \longrightarrow ^{3}He-^{1}n+3.25MeV$$
$$^{2}H+^{2}H \longrightarrow ^{3}He-^{1}p+4.0MeV$$
$$^{2}H+^{3}H \longrightarrow ^{4}He-^{1}n+17.6MeV$$
$$^{2}H+^{3}H \longrightarrow ^{3}He-^{1}p+18.3MeV$$

แต่ในความเป็นจริงปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ถูกจุดขึ้นนั้นสูงเกินความจำเป็นของการคงสภาพชีวิตดาว ทำให้ดาวขยายตัวออกเล็กน้อย เมื่อเป็นเช่นนี้อุณหภูมิก็ลดลง ปฏิกิริยานิวเคลียร์ก็ลดลง เนื้อสารจึงยุบตัวกดลงมาทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และไปเพิ่มให้อัตราการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้สูงขึ้นสลับกันไปอย่างนี้ ดังนั้นขนาดของดาวฤกษ์ทุกดวงรวมทั้งดวงอาทิตย์จึงมีขนาดไม่คงที่ ยุบ ๆพอง ๆอยู่ตลอดเวลา

เงื่อนไข โปรโตสตาร์จะยุบตัวลงมาเป็นดาวฤกษ์ที่สุกสว่างได้นั้น มวลของเนบิวลาที่ยุบรวมกันจะต้องมากกว่า 0.08 เท่า แต่ต้องไม่เกิน 100 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ เพราะถ้าน้อยกว่า 0.08 เท่าความหนาแน่นเนื่องจากการยุบตัวให้ความร้อนไม่มากพอที่จะจุดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชั่นได้ ในกรณีนี้เมื่อยุบตัวจนมีความร้อนค่าหนึ่งแล้วค่อย ๆ เย็นตัวมืดลงและหายไปในอวกาศ กลายเป็นดาวแคระขาว (Brown Dwarf) ที่เงียบสงบตลอดกาล(ดาวแคระน้ำตาลคือสมาชิกที่อยู่ระหว่างดาวเคราะห์ขนาดใหญ่กับดาวฤกษ์ขนาดเล็ก) แต่หากมวลมากกว่า 100 เท่าของดวงอาทิตย์แกนกลางมีอุณหภูมิสูงมาก ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชั่นเกิดขึ้นสูงเกินกว่าที่จะรักษาสมดุลได้ ดาวก็จะระเบิดและจบชีวิตลง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าดาวฤกษ์ทุกดวงมีมวลอยู่ระหว่าง 0.08-100 เท่าของมวลดวงอาทิตย์เสมอ(ดาวพฤหัสบดีไม่สามารถก่อตัวเป็นดาวฤกษ์ได้เพราะมวลเพียง 1 ใน 1,050 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ ซึ่งหากดาวพฤหัสบดีจะก่อตัวเป็นดาวฤกษ์ได้ต้องเอาดาวพฤหัสบดี 85 ดวงมารวมกันจึงจะมีมวล 0.08 เท่าของมวลดวงอาทิตย์



รูปที่ 3 แสดงการก่อตัวเป็นธาตุหนักของปฏิกิริยานิวเคลียร์

กระจุกดาวเปิด

ภายหลังที่เนบิวลาก่อตัวเป็นดาวฤกษ์และเข้าสู่เสถียรภาพ กาซที่เคยกระจายอยู่ส่วนใหญ่จะเข้าไปรวมตัวเป็นดาวเกือบทั้งหมดส่วนที่เหลือก็จะถูกดาราวาต (Stellar Wind) พัดออกไปจึงทำให้

เราสามารถเห็นครอบครัวของดาวฤกษ์ขนาดใหญ่ที่เรียกว่า กระจุกดาวเปิด (Open Cluster) กระจุกดาวลูกไก่ (Pleiades) ซึ่งหากมองด้วยตาเปล่าเราจะเห็นเพียง 6-8 ดวง แต่มองมองผ่านกล้องจะเห็นนับร้อยดวง (คำว่า Pleiades มาจากภาษากรีก แปลว่า "ห่าน" มาจากตำนานกรีกที่ว่านายพราน (Orion) แอบหลงรักและตามจีบเจ็ดสาวน้อย (Seven Sisters) จนเจ็ดสาวน้อยรำคาญ เทพซูส จึงช่วยโดยการเสกให้เป็นห่านแล้วมาอยู่บนสวรรค์เป็นดาวลูกไก่) นอกจากกระจุกดาวลูกไก่ก็มี กระจุกดาววัว (Hyades) กระจุกดาวรวงผึ้ง (Beehive Cluster) อยู่ตรงกลางของกลุ่มดาวปู และกระจุกดาวเปิดคู่ (Double Clusters) ในกลุ่มดาวเปอร์ซิอุส

ในกระจุกดาวเปิดจะเกาะกันหลวม ๆด้วยแรงโน้มถ่วง และเมื่อเวลาผ่านไปก็จะแยกครอบครัวออกไปเป็นอิสระ เช่น ดวงอาทิตย์ของเราเคยอยู่ในกระจุกดาวเปิดมาก่อน แต่หลังจากอายุผ่านไปประมาณ 4,600 ล้านปี และโคจรรอบศูนย์กลางของดาราจักรทางช้างเผือกมาแล้วไม่น้อยกว่า 15 รอบ ก็จากพี่จากน้องมาและไม่ได้หวนหกลับไปอีกเลย ดังนั้นอีกฟากหนึ่งของดาราจักรทางช้างเผือก พี่น้องของดวงอาทิตย์อาจจะผลิตสิ่งมีชีวิตเช่นมนุษย์บนโลกเราก็ได้

ดาราจักร (Galaxy)

หลังจากดาวก่อกำเนิดขึ้นแล้ว ก็รวมตัวอยู่กันเป็นกระจุกหลาย ๆกระจุกรวมกันเป็นดาราจักร ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันในทางดาราศาสตร์ว่าเอกภพทั้งหมดมี 1011 ดาราจักร (ในแต่ละดาราจักรมีดาวฤกษ์ 1011 ดวงซึ่งเท่ากับเซลประสาทในร่างกายคนหนึ่งคนที่มี 1011 เซล) และมีรูปร่างแตกต่างกัน ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. ดาราจักรกลมรี (elliptical galaxies) จัดเป็นดาราจักรที่มีสมมาตรสูง มีรูปร่างตั้งแต่เป็นทรงกลม จนถึงเกือบเป็นแผ่นกลมราบ สสารระหว่างดาวเป็นพวกมีมวลสูง ในเอกภพมีประมาณ 30%

2. ดาราจักรก้นหอย (spiral galaxies) เป็นดาราจักรที่มีแขนก้นหอย ซึ่งประกอบด้วยดาวฤกษ์ ก๊าซ และฝุ่น แผ่ตัวเป็นวงออกจากศูนย์กลาง ในเอกภพมีประมาณ 40%

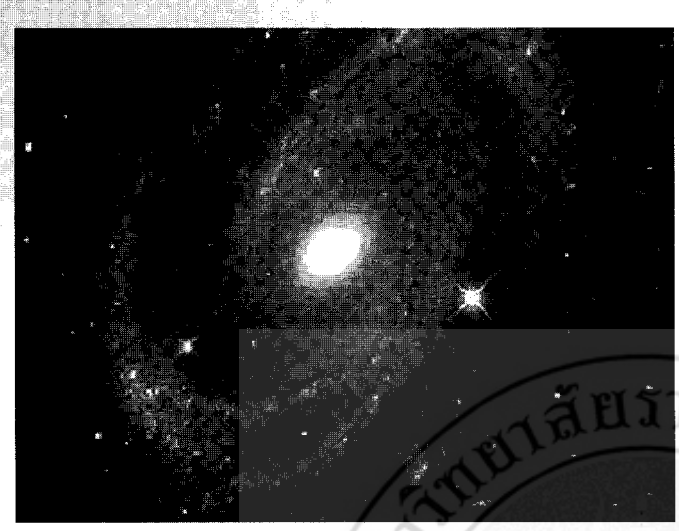
ดาราจักรทางช้างเผือกอยู่ในรูปนี้ และดาราจักรใกล้เคียงที่มีลักษณะเดียวกันคือ ดาราจักรแอนโดรมีดา (Andromeda Galaxy) มีขนาดใหญ่กว่าดาราจักทางช้างเผือกประมาณ 2 เท่า ห่างจากเรา 2.2 ล้านปีแสง และกำลังเคลื่อนที่เข้าหาดาราจักรทางช้างเผือกด้วยความเร็ว 140 กิโลเมตร/วินาที ดังนั้นมีจะชนกับเราในอีก 3,000 ล้านปีข้างหน้า และรวมกันเป็นดาราจักรกลมรีขนาดใหญ่

3. ดาราจักรไร้รูป (irregular galaxies) มีประมาณ 30%

สำหรับดาราจักรที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามี 3 ดาราจักร คือ ดาราจักรแอนโดรเมด้า (Andromeda Galaxy) ดาราจักร เมฆแมกเจลแลนใหญ่ (Large Magellanic Cloud) และ ดาราจักรเมฆแมกเจลแลนเล็ก (Small Magellanic Cloud)

ดาราจักรทางช้างเผือก (The Milky Way Galaxy)

ทางช้างเผือก (Milky Way) ชาวตะวันตกเรียกทางน้ำนมมานานแล้ว หากพิจารณาจากรากศัพท์ภาษาอังกฤษคำว่า "Galaxy" มาจากภาษากรีกว่า "Galaktos" แปลว่า *"น้ำนม"* และนักดาราศาสตร์คนแรกที่ส่องกล้องขึ้นสังเกตทางช้างเผือกคือ กาลิเลโอ กาลิเลอี (Galileo Galilei) เมื่อปี ค.ศ. 1610 และพบว่าทางช้างเผือกประกอบด้วยดาวจำนวนมากมายมหาศาล



รูปที่ 4 ดาราจักรทางช้างเผือก

ดาราจักรทางช้างเผือก

1. เป็นดาราจักรแบบก้นหอย หรือกังหันบาร์ (Barred Spiral Galaxy)

2. เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 100,000 ปีแสง

3. ความหนาเฉลี่ยประมาณ 1,000 ปีแสง ซึ่งค่อนข้างบาง

4. มีสมาชิกดาวประมาณ 200,000 ล้านดวง

5. มวลรวมประมาณ 750,000-1,000,000 เท่าของดวงอาทิตย์

6. ดาวส่วนใหญ่อยู่ที่ความหนาประมาณ 1,000 ปีแสง เรียก ระนาบดาราจักร

7. ส่วนกลางที่โป่งออกเรียกว่า ส่วนโป่ง (Bulge) มีแรงโน้มถ่วงสูงและสว่างมาก

8. บริเวณรอบ ๆส่วนโป่งเรียกแขนกังหัน (Spiral Arms) แขนที่อยู่ใกล้สุริยะเรา ซึ่งตั้งชื่อตามที่กลุ่มดาวนั้น ๆพาดผ่านเมื่อมองจากโลก เช่น

แขนเพอร์เซอุส (Perseus Arm)

แขนแซจิตทาเรียส (Sagittarius Arm)

แขนคารินา (Carina Arm)

9. ดวงอาทิตย์ของเราอยู่ในแขนออไรน์ (Orion Arm) ซึ่งห่างจากศูนย์กลางของดาราจักรประมาณ 28,000 ปีแสง หรือระยะทางประมาณ 3 ใน 5 ของรัศมีดาราจักร

10. ดาวฤกษ์ที่เราเห็นด้วยตาเปล่าส่วนใหญ่อยู่ในรัศมี 1,000- 2,000 ปีแสงรอบ ๆดวงอาทิตย์ของเรา ซึ่งนับว่าแคบมากเมื่อเทียบกับรัศมี 50,000 ปีแสง

11. ดวงอาทิตย์ของเราโคจรรอบจุดศูนย์กลางของทางช้างเผือกด้วยความเร็วประมาณ 220 กิโลเมตร/วินาที ดังนั้นครบ 1 รอบเท่ากับ 250 ล้านปี เหตุดังกล่าวทำให้ตำแหน่งดาวที่เราสังเกตเห็นในปัจจุบันจะเปลี่ยนตำแหน่งในอีกไม่กี่ล้านปีข้างหน้า และท้ายที่สุดเราจะเห็นดาวใหม่ที่เราไม่รู้จักอีกเลย

12. ที่ศูนย์กลางของดาราจักรทางช้างเผือกเป็นที่อยู่ของหลุมดำยักษ์ที่มีมวลมากกว่า 3 ล้านเท่าของมวลดวงอาทิตย์

13. ศูนย์กลางทางช้างเผือกอยู่ระหว่างกลุ่มดาวคนยิงธนู (Sagittarius) กับกลุ่มดาวแมงป่อง (Scorpius) บริเวณรอบหลุมดำยักษ์เมื่อมองในภาพมุมกว้างมีขนาดเท่ากับเหรียญบาทที่วางอยู่ห่างออกไป 25 กิโลเมตร)

14. แถบสีดำที่มองเห็นคือฝุ่นระหว่างดวงดาว ที่กระเจิงแสงในย่านที่สายตามองเห็น จึงเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมแม้ดาวฤกษ์จะมาก แต่ท้องฟ้ายามค่ำคืนก็ไม่สว่าง

และเป็นที่อยู่ของมนุษย์เราในปัจจุบัน ซึ่งหากโอกาสการเกิดของโลกและสิ่งมีชีวิตเป็นไปตามข้อมูลที่นักวิทยาศาสตร์ทั้งหลายประมวลมาดังที่กล่าวแล้ว ย่อมเป็นไปได้ว่าจะยังมีสังคมของสิ่งมีชีวิตเช่นเดียวกับมนุษย์เราอยู่ที่ดาวดวงใดอีกดวงหนึ่งนั้น ย่อมเป็นไปได้

เอกสารอ้างอิง

ธวัช ชิตตระการ. (2541). **การตรวจและการวัดรังสี**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บัญชา ธนบุสมบัติ. (2548). **จากอณูถึงอนันต์ วิทยาศาสตร์ต้องรู้**. แปลจาก "Almost Everyone's Guide to Science" ของ John Gribbin.

ระวี ภาวิไล. (2522). **ดาราศาสตร์และอวกาศ**. บริษัทศึกษิตสยาม จำกัด.

วิภู รุโจปการ. (2547). **เอกภพเพื่อความเข้าใจในจักรวาล**. บริษัทนานมีบุ๊คส์ จำกัด.

วรพจน์ อารมณ์ดี. (2521). **ความลับของเอกภพและเวลา**. แปลจาก "A Brief History of Time" ของ Stephen W.Hawking.

สุรีย์พร สราภิรมย์. (2543). **การศึกษาข้อมูลดวงอาทิตย์จากข้อมูลบนอินเตอร์เนต**, รายงานการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำราญ เพชรรัตน์. (2521). **แนวความคิดในทางดาราศาสตร์เกี่ยวกับหลุมดำ**, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การสอนฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สว่าง พงศ์ศิริพัฒน์. (2548). **เหนือมิติที่สี่ของไอน์สไตน์** แปลจาก "Beyond Einstein" ของ Michio Kaku และ Jennifer Thompson.

ไสว กว้าเครือ. (2523). ไม่ปรากฏชื่อเรื่อง, การวิจัยวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การสอนฟิสิกส์), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (เอกสารถ่ายสำเนา)

เย็นใจ เลาหวณิช. ไม่ปรากฏปี พ.ศ. (เอกสารถ่ายสำเนา).

D. Halliday., R. Resnick. and J. Walker. (2001). **Fundamentals of Physics**. John Wiley @ Sons, Inc. Sixth Edition.

K. Krane. (1996). **Modern Physics**. Department of Physics Oregon State University. Second Edition.