

## ใบความรู้ที่ 7

### เรื่อง เอกภพ

#### การเกิดและวิวัฒนาการของเอกภพ

##### 1. เอกภพ

ในอดีต มนุษย์สนใจศึกษาเกี่ยวกับดวงดาวบนท้องฟ้า และพยายามอธิบายถึงที่มาของดวงดาวต่างๆ ว่าเกิดขึ้นเอง หรือเกิดขึ้นตามคำบัญชาของพระเจ้า แต่ยังไม่มีการค้นพบหรือตั้งสมมติฐานที่เป็นที่น่าเชื่อถือได้ว่า ดวงดาวเกิดขึ้นได้อย่างไร ทำนองเดียวกันก็ยังไม่มีการสรุปว่าเอกภพกำเนิดมาจากที่ใดและดำรงอยู่อย่างไร

##### อริสโตเติล

เสนอว่า โลกเป็นศูนย์กลางของระบบสุริยจักรวาล โดยดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์และดาวเคราะห์ทั้งหลาย โคจรรอบโลก

##### นิโคเลาส์ โคเปอร์นิคัส

เสนอว่า โลกไม่ใช่ศูนย์กลางของเอกภพ ดาวเคราะห์ทุกดวงโคจรรอบดวงอาทิตย์ ดังนั้น ดวงอาทิตย์จึงเป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ ซึ่งโลกก็โคจรรอบดวงอาทิตย์เหมือนกับดาวเคราะห์ดวงอื่นด้วย

##### ไทโค บราห์

สร้างเครื่องวัดทางดาราศาสตร์ สังเกตการณ์เคลื่อนที่ของดาวเคราะห์และตำแหน่งของดาวฤกษ์

##### โยฮันส์ เคปเลอร์

เสนอว่า ดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ และคิดค้นกฎการโคจรของดาวเคราะห์รอบดวงอาทิตย์

##### ไอน์สไตน์

เสนอทฤษฎีของเอกภพว่า เอกภพไม่มีจุดกำเนิดเพราะเอกภพเป็นระบบปิด ซึ่งสม่ำเสมอและเหมือนกันทุกทิศทาง และเอกภพเกิดการหมุนเวียนกันตลอดเวลา มีกระจุกดาวที่เกิดขึ้น ในขณะที่เดียวกันมีกระจุกดาวที่ดับสูญ หมุนเวียนกันไปตลอดเวลา

##### เอ็ดวิน พี ฮับเบิล

เสนอว่า เอกภพประกอบด้วยดาวฤกษ์ที่กระจุกกระจายโดยทั่วไปและดาวฤกษ์เหล่านั้นได้รวมกันเป็นกลุ่ม เรียกว่า กาแล็กซี

##### เลอแม็ทร์

เสนอทฤษฎีการระเบิดใหญ่หรือทฤษฎีบิกแบง (big bang theory) กล่าวว่า เอกภพเกิดจากการระเบิดครั้งใหญ่ ทำให้เอกภพมีการขยายตัว และทำให้เอกภพเกิดการเคลื่อนที่ออกจากกัน ก่อให้เกิดกระจุกดาวที่มีมวลสาร ซึ่งก่อให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างมวลดึงเข้ามาเกิดเป็นกาแล็กซีและกาแล็กซีรูปร่างต่างๆ

### นักดาราศาสตร์

- เป็นนักวิทยาศาสตร์ที่ทำการค้นคว้าหาข้อเท็จจริงเกี่ยวกับดาราศาสตร์หรือฟิสิกส์ดาราศาสตร์
- ผู้ที่ให้ความสนใจกับปรากฏการณ์บนท้องฟ้าเป็นพิเศษ

### กฎการโคจรของดาวเคราะห์รอบดวงอาทิตย์ที่สำคัญของเคปเลอร์

- 1) ดาวเคราะห์โคจรรอบดาวฤกษ์เป็นวงรี โดยมีดาวฤกษ์อยู่ ณ โฟกัสหนึ่งของวงรี เรียกว่า กฎแห่งวงรี
- 2) ในเวลาที่เท่ากัน ดาวเคราะห์จะโคจรรอบดาวฤกษ์ก่อให้เกิดพื้นที่ที่เท่ากัน เรียก กฎแห่งพื้นที่
- 3) วงโคจรของดาวเคราะห์จะมีความสัมพันธ์กับเวลาโคจรรอบดาวฤกษ์ เรียกว่า กฎแห่งคาบ

### กำเนิดเอกภพ

เอกภพ (universe) คือ ระบบซึ่งเป็นผลรวมของกาแล็กซีทั้งหมดทุกสิ่งทุกอย่างในอวกาศประกอบด้วย กาแล็กซีต่างๆ กลุ่มแก๊ส ฝุ่นละอองในอวกาศ ระบบดวงดาว ระบบสุริยะ และโลก หรือ วัตถุทั้งหลายที่มองเห็น และมองไม่เห็นในอวกาศ รวมถึงกลุ่มพลังงาน และกาแล็กซี ซึ่งแต่ละกาแล็กซีประกอบด้วย ดาวฤกษ์ ดาวบริวาร กลุ่มแก๊ส และฝุ่นละอองในอวกาศ

- เอกภพมีรัศมีไม่น้อยกว่า 12,000 ปีแสง

- ประกอบด้วยกาแล็กซีจำนวนมากเป็นแสนล้านแห่ง ภายในกาแล็กซีประกอบด้วย ดาวฤกษ์จำนวนมาก รวมถึงแหล่งกำเนิดดาวฤกษ์ที่เรียกว่า เนบิวลา

-เอกภพมีอายุนานกว่า 13,000 ล้านปี

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายกำเนิดของเอกภพในปัจจุบัน

ไอน์สไตน์ได้นำทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปมาสร้างแบบจำลองเกี่ยวกับเอกภพ โดยมีความคิดว่าเอกภพไม่หยุดนิ่ง สม่่าเสมอทุกทิศทาง เรียกว่า เอกภพปิด หรือกฎของเอกภพ

ฟรีดมันได้คำนวณเกี่ยวกับแบบจำลองเอกภพ โดยใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ พบว่า เอกภพมีสภาพไม่คงที่ แต่จะขยายหรือหดตัวอย่างใดอย่างหนึ่ง

เอ็ดวิน พี ฮับเบิล ได้สำรวจเอกภพด้วยกล้องโทรทรรศน์ พบว่า เอกภพกำลังขยายตัว ไม่หยุดนิ่ง

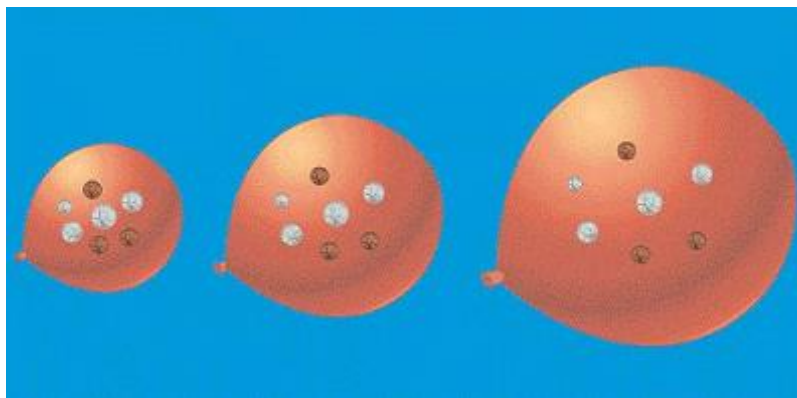
เลอแมทร์ ได้เสนอทฤษฎีการระเบิดใหญ่หรือทฤษฎีบิกแบง ซึ่งกล่าวว่า เอกภพเกิดจากการระเบิดใหญ่ หรือที่เรียกว่า บิกแบง จากก้อนทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6,400 กิโลเมตร เลอแมทร์เรียกทรงกลมที่เป็นจุดกำเนิดของสสารนี้ว่า อะตอมเริ่มแรกหรืออะตอมดึกดำบรรพ์ ทฤษฎีบิกแบงนี้จัดเป็นทฤษฎีที่เชื่อถือได้มากที่สุดในปัจจุบัน

### เอกภพ

เอกภพ (Universe) หรือที่เรียกในภาษาทั่วไปว่า จักรวาล หมายถึงทั้งหมดทุกสรรพสิ่ง นักดาราศาสตร์พยายามศึกษาว่า เอกภพกว้างใหญ่เพียงใด มีกาแล็กซีอยู่จำนวนเท่าใด ปัจจุบันเราทราบว่า กาแล็กซีไม่ได้กระจายตัวกันในเอกภพ หากแต่อยู่รวมกลุ่มเป็นกระจุก กระจุกกาแล็กซีทั้งหลายกำลังเคลื่อนที่ออกจากโลกในทุกทิศทาง แสดงว่า เอกภพกำลังขยายตัว นักดาราศาสตร์ศึกษาอัตราการขยายตัวของเอกภพโดยใช้กฎของฮับเบิล แล้วคำนวณย้อนกลับพบว่า เอกภพมีอายุประมาณ 13,000 ล้านปี ซึ่งอธิบายโดยใช้ทฤษฎีบิกแบง

### ทฤษฎีบิกแบง

คำว่า "เอกภพ" หรือ "จักรวาล" เป็นคำเดียวกันตรงกับคำว่า "Universe" ซึ่งหมายถึง ทั้งหมดของสรรพสิ่งทั้งสิ้นทั้งปวง เอกภพเป็นคำที่ใช้ในภาษาวิชาการ ส่วนคำว่าจักรวาลเป็นที่นิยมใช้แพร่หลายทั่วไป นักดาราศาสตร์ทำการสำรวจการเลื่อนแดงของกระจุกกาแล็กซีและพบว่า กระจุกกาแล็กซีทั้งหลายกำลังเคลื่อนที่ออกห่างจากโลกมากขึ้นในทุกทิศทาง จึงตั้งสมมติฐานว่า เอกภพกำลังขยายตัว โดยเปรียบเทียบว่า ถ้าลูกโป่งคือเอกภพ และจุดบนผิวลูกโป่งคือกระจุกกาแล็กซี เมื่อเราเป่าลูกโป่ง จุดแต่ละจุดบนผิวลูกโป่งจะมีระยะทางห่างจากกันมากขึ้นดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การขยายตัวของลูกโป่ง

ดังนั้นหากทราบอัตราการเคลื่อนที่ของกระจุกกาแล็กซี เราก็สามารถคำนวณย้อนกลับ หาเวลาเริ่มต้น

ที่กระจุกกาแล็กซีทั้งหลายเคยอยู่รวมกัน เราเรียกทฤษฎีนี้ว่า “บิกแบง” (Big Bang) โดยมีสมมติฐานว่า นี่คือจุดเริ่มต้นของเอกภพและกาลเวลา จุดที่เวลาของเอกภพ  $T = 0$ , สสารและพลังงานคือหนึ่งเดียว เรียกว่า “ซิงกูลาริตี” (Singularity)

กำหนดให้  $T_0 =$  เวลาเริ่มต้น กระจุกกาแล็กซีทั้งหลายเคยเป็นหนึ่งเดียวกัน  
 $=$  ความเร็วในการถอยห่างของกาแล็กซี  
 $H =$  ค่าคงที่ของฮับเบิล  $= 71 \text{ km/s/b}$  (กิโลเมตร/วินาที/ล้านพาร์เซก)  
 $d =$  ระยะทางจากโลกถึงกระจุกกาแล็กซี

สูตร  $T_0 = d/V$

$$T_0 = d/H_0d = 1/H_0$$

$$= 1 / (71 \text{ km/s/Mpc})$$

$$= (1/71)(\text{Mpc-s/km}) \times (3.09 \times 10^{19} \text{ km}/1 \text{ Mpc}) \times (1 \text{ year} / 3.156 \times 10^7 \text{ s})$$

$$= 1.3 \times 10^{10} \text{ ปี}$$

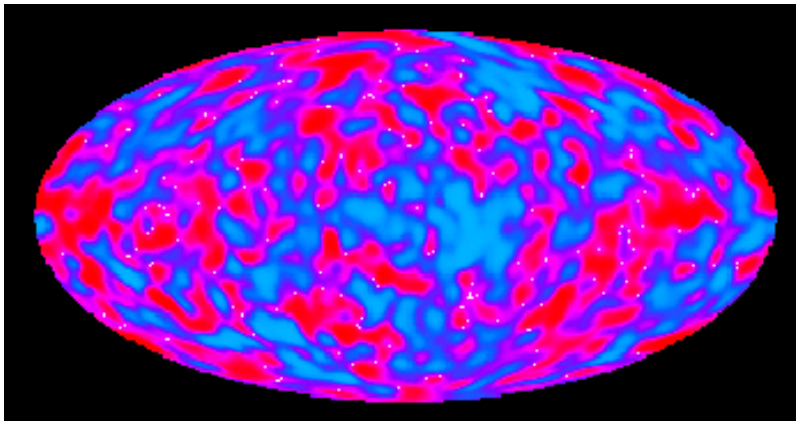
ผลลัพธ์ที่ได้คือ เอกภพเกิดขึ้นเมื่อ 13,000 ล้านปีมาแล้ว

### รังสีไมโครเวฟพื้นหลังของเอกภพ

รังสีไมโครเวฟพื้นหลังของเอกภพ (Cosmic Microwave Background Radiation) หรือเรียกสั้นๆ ว่า CMB (ควีนหลงของบิกแบง) เป็นสิ่งที่มีการเลือนทางแดงมากที่สุดในเอกภพ นั้นหมายความว่า CMB เป็นปรากฏการณ์ที่เก่าแก่ที่สุดในเอกภพ และเป็นหลักฐานยืนยันทฤษฎีบิกแบง ในปี ค.ศ. 1989 NASA ได้ส่งยานอวกาศ Cosmic Background Explorer (COBE) ขึ้นไปศึกษาพบว่า CMB ความยาวคลื่นเข้มสุด 1.06 mm จึงสามารถใช้กฎของวิน (wein's law) คำนวณหาอุณหภูมิของเอกภพได้  $T = 0.0029 / \lambda_{\text{max}} = 0.0029 / 1 \times 10^{-9} = 2.726 \text{ K}$

นี่คืออุณหภูมิที่เอกภพเย็นตัวลงนับจากตอนที่เอกภพมีอายุประมาณ 300,000 ปี (ช่วงเวลาของกำเนิดอะตอม) ซึ่งในปัจจุบันลดลงเหลือเพียง 2.726 K ยานอวกาศ COBE ได้ทำแผนที่แสดงอุณหภูมิของ

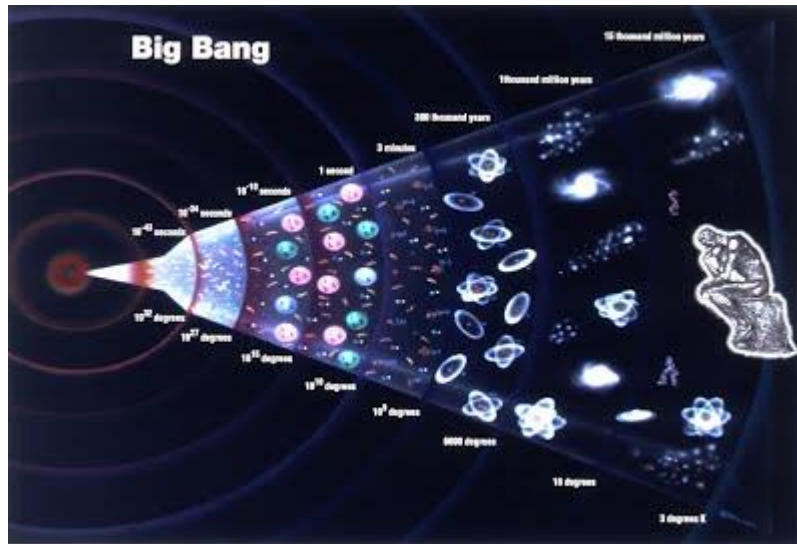
เอกภพ ดังที่แสดงในภาพที่ 2 สีแดงเป็นบริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ย  $10^{-4}$  K สีน้ำเงินเป็นบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ย  $10^{-4}$  K แม้ว่าอุณหภูมิจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ก็ยังเป็นหลักฐานยืนยันว่า แต่ละอาณาบริเวณของเอกภพเย็นตัวลงไม่พร้อมกัน กาแล็กซีจึงก่อตัวเป็นหย่อมๆ เป็นกระจุก ไม่กระจายตัวเท่าๆ กันในเอกภพ



ภาพที่ 2 แผนที่อุณหภูมิของ CMB

นักวิทยาศาสตร์ได้สร้างแบบจำลองอายุของเอกภพในแต่ละขั้นตอน อธิบายตามภาพที่ 3 ได้ดังนี้ (คลิกที่ภาพเพื่อดูภาพใหญ่)

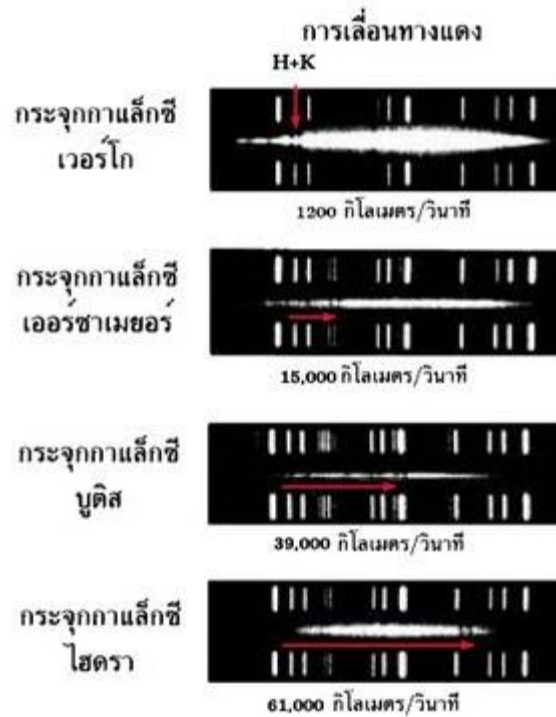
- $10^{-43}$  วินาที เอกภพมีอุณหภูมิสูงถึง  $10^{32}$  K จึงยังไม่มีอนุภาคใดๆ เกิดขึ้น
- $10^{-10}$  วินาที อุณหภูมิลดลงเหลือ  $10^{32}$  K กำเนิดอนุภาคขนาดเล็ก
- 1 วินาที อุณหภูมิ  $10^{10}$  K กำเนิดโปรตรอนและอิเล็กตรอน
- 3 นาที อุณหภูมิ  $10^9$  K โปรตรอนและนิวตรอนรวมกันเป็นนิวเคลียส
- 300,000 ปี อุณหภูมิลดลงเหลือ 6,000 K กำเนิดอะตอม
- 1,000 ล้านปี อุณหภูมิลดลงเหลือ 18 K อะตอมรวมตัวเป็นโมเลกุล กำเนิดกาแล็กซีและดาวฤกษ์
- 13,000 ล้านปี อุณหภูมิลดลงเหลือ 3 K เอกภพในสภาพปัจจุบัน



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงประวัติของเอกภพ

### กฎของฮับเบิล

นักดาราศาสตร์ศึกษาการเคลื่อนที่ของกาแล็กซีโดยใช้ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) เป็นเครื่องมือ ในต้นศตวรรษที่ 20 เอ็ดวิน ฮับเบิล (Edwin Hubble) นักดาราศาสตร์ชาวอเมริกันได้ ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระยะทางของกระจุกกาแล็กซีกับการเลื่อนทางแดง (Redshift) แล้วพบว่า “การ เลื่อนทางแดงของกระจุกกาแล็กซีที่อยู่ห่างไกล แปรผันตามระยะทางระหว่างโลกถึงกระจุกกาแล็กซี” นั้น หมายความว่า กาแล็กซีที่อยู่ห่างไกลเท่าไร การเลื่อนทางแดงก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ตัวอย่างเช่น สเปกตรัมใน ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์การเคลื่อนทางแดงที่เส้นสเปกตรัม Calcium H และ Calcium K (H+K) พบว่า กระจุกกาแล็กซีเวอร์โก (Virgo cluster) ซึ่งอยู่ห่างจากโลกประมาณ 50 – 70 ล้านปีแสง เคลื่อนที่ออกจากโลกด้วยความเร็ว 1,200 กิโลเมตรต่อวินาที ส่วนกระจุกกาแล็กซีไฮดราซึ่งอยู่ห่างเกือบหนึ่ง พันล้านปีแสง เคลื่อนที่ออกจากโลกด้วยความเร็ว 61,000 กิโลเมตรต่อวินาที



ภาพที่ 1 กระจุกกาแล็กซีที่อยู่ห่างไกล ปรากฏการณ์เลื่อนทางแดงก็ยิ่งมากขึ้น

เอ็ดวิน ฮับเบิล วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางของกาแล็กซีกับความเร็วในการถอยห่าง ด้วยสมการกราฟเส้นตรงในภาพที่ 2 ซึ่งต่อมาถูกเรียกว่า “กฎฮับเบิล” (Hubble Law)

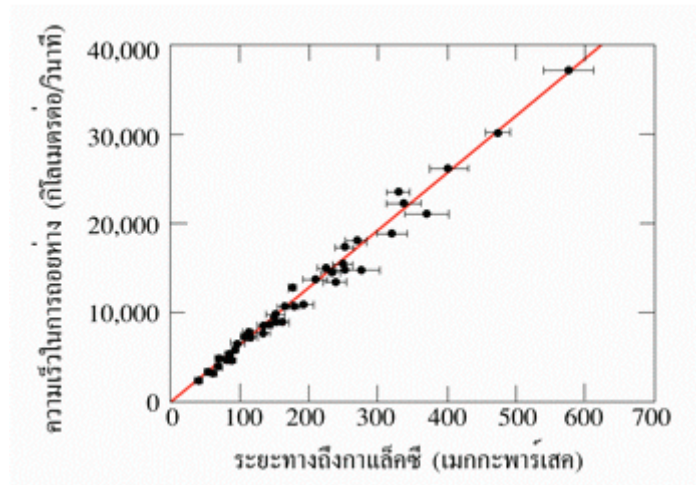
$$V = H_0 d$$

$V$  = ความเร็วในการถอยห่างของกาแล็กซี

$H_0$  = ค่าคงที่ของฮับเบิล

= 71 km/s/Mpc (กิโลเมตร/วินาที/พาร์เซก)

$d$  = ระยะทางจากโลกถึงกาแล็กซี



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางถึงกาแล็กซี กับความเร็วในการถอยห่าง

เราสามารถหาการเลื่อนทางแดงของวัตถุโดยใช้สูตร

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = \Delta \lambda / \lambda_0$$

$z$  = การเลื่อนทางแดง

$\lambda_0$  = ความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมโดยปกติ

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมขณะที่สังเกตวัตถุนั้น

เนื่องจากอัตราส่วนของ  $\Delta \lambda / \lambda_0$  เท่ากับ  $v / c$  (ความเร็วถอยห่าง/ความเร็วแสง) จึงสามารถเขียนสูตรได้ว่า  $z = v / c$  อย่างไรก็ตามสมการนี้ใช้ได้ในกรณีที่ความเร็วถอยห่างของกาแล็กซี น้อยกว่า 0.1 เท่าของความเร็วแสง โดยสรุป สูตรได้ว่า  $d = zc / H_0$



ตัวอย่างที่ 1 เส้นสเปกตรัม K เป็นแคลเซียมไอออนไนซ์ มีความยาวคลื่น 393.3 nm แต่เมื่อศึกษาสเปกตรัมของกาแล็กซีทรงรีขนาดใหญ่ NGC 4889 พบว่ามีเส้นสเปกตรัมของแคลเซียมไอออนไนซ์ที่มีความยาวคลื่น 401.8 nm การเลื่อนทางแดงของกาแล็กซี NGC 4889 มีค่าการเลื่อนทางแดงเท่าไร เคลื่อนที่ห่างจากโลกด้วยความเร็วเท่าใด และอยู่ห่างจากโลกกี่ปีแสง

$$\begin{aligned} \text{ค่าการเลื่อนแดง } z &= (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \\ &= (401.8 \text{ nm} - 393.3 \text{ nm}) / 393.3 \text{ nm} \\ &= 0.0216 \end{aligned}$$

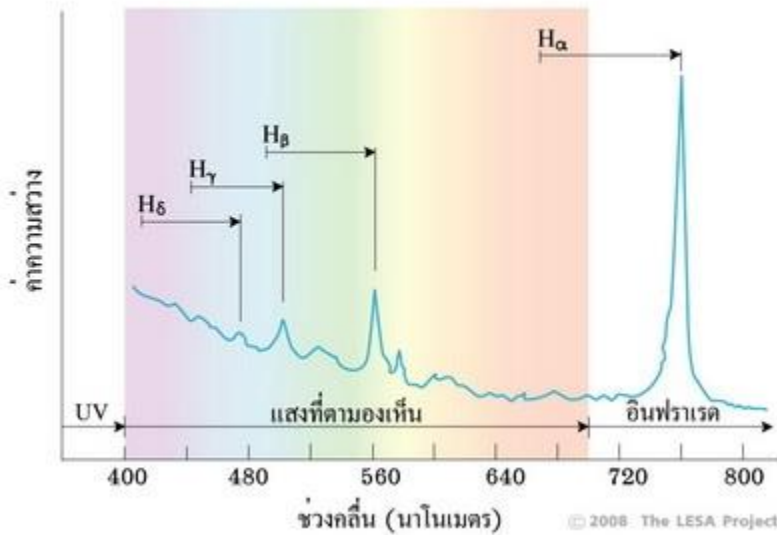
NGC 4889 กำลังเคลื่อนที่ห่างจากโลกด้วยความเร็ว

$$\begin{aligned} V &= zc = (0.0216)(3 \times 10^5 \text{ km/s}) \\ &= 6,500 \text{ km/s} \end{aligned}$$

ถ้า  $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$  เราจะสามารถหาระยะห่างของกาแล็กซี NGC 4889 ได้จากกฎของฮับเบิล

$$\begin{aligned} d &= zc/H_0 \\ &= (6,500 \text{ km/s}) / (71 \text{ km/s/Mpc}) \\ &= 92 \text{ เมกะพาร์เซค หรือ } 300 \text{ ล้านปีแสง} \end{aligned}$$

วัตถุที่อยู่ห่างจากโลกมากจะปรากฏการเลื่อนทางแดงด้วยความเร็วสูงมาก ตัวอย่างเช่น คอซาร์ 3C 273 อยู่ห่างจากโลก 1,200 เมกะพาร์เซค (Mpc) หรือ 4,000 ล้านปีแสง เคลื่อนที่ถอยห่างด้วยความเร็ว 45,000 km/s หรือ 15% ของความเร็วแสง การเลื่อนทางแดงมีค่า  $z = 0.158$  ทำให้จนเส้นสเปกตรัม  $H\alpha$  เลื่อนจากช่วงคลื่นที่ตามองเห็นไปสู่ช่วงรังสีอินฟราเรด ดังที่แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเลื่อนทางแดงของอะตอมไฮโดรเจน

ในกรณีที่วัตถุความเร็วต่ำของกาแล็กซีมากกว่า 0.1 เท่าของความเร็วแสง จะต้องคำนวณโดยใช้สูตร

$$z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$
 เนื่องจากมีเรื่องของทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์ (เวลาช้าลงเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยสามารถแสดงให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของความเร็วเข้าใกล้แสงและการเลื่อนทางแดงได้ว่า

$$\frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

ตัวอย่างที่ 2 ควอซาร์ PKS 2000-330 มีเส้นสเปกตรัมแฟรงก์ลี Lyman-alpha ของธาตุไฮโดรเจน ซึ่งสังเกตพบที่ความยาวคลื่น 582.5 nm และจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า เส้นสเปกตรัม Lyman-alpha อยู่ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 121.6 nm ควอซาร์ PKS 2000-330 จะมีการเลื่อนทางแดงเท่าใด และมีความเร็วในการเคลื่อนที่ออกจากโลกเท่าไร

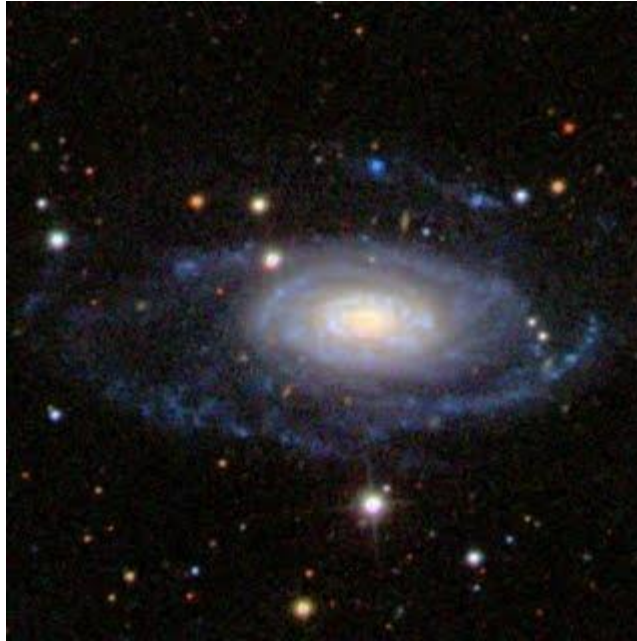
$$\begin{aligned} \text{การเลื่อนทางแดง } z &= (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \\ &= (582.5 \text{ nm} - 121.6 \text{ nm}) / 121.6 \text{ nm} \\ &= 3.78 \end{aligned}$$

$$\frac{v}{c} = \frac{(4.78)^2 - 1}{(4.78)^2 + 1} = \frac{21.85}{23.85} = 0.92$$

การเคลื่อนที่ปรากฏออกจากโลกที่ความเร็ว 92% ของความเร็วแสง

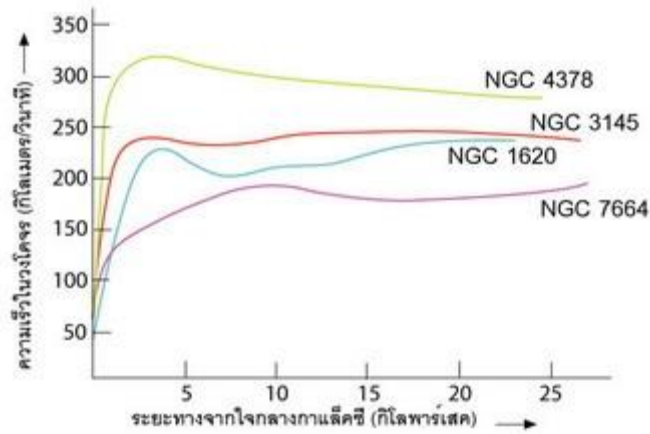
## สสารมืด

หากมองดูภาพถ่ายอวกาศจะเห็นว่า จักรวาลเต็มไปด้วยความว่างเปล่าและมีกระจุกกาแล็กซีอยู่เพียงประปราย ทว่าความเป็นจริง มีเหตุผลหลายประการที่ทำให้นักดาราศาสตร์เชื่อว่าต้องมี สสารมืด (Dark Matter) ซึ่งยังไม่สามารถตรวจจับได้ อยู่มากมายในเอกภพ ถ้าอวกาศเป็นเพียงความว่างเปล่า กระจุกกาแล็กซีทั้งหลายก็คงไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ จะต้องมีอะไรที่คอยประคับประคองให้กระจุกกาแล็กซีรักษารูปทรง ไม่ให้แตกตัวไปจากกัน นักดาราศาสตร์เชื่อว่าภายในกระจุกกาแล็กซียังมีมวลอีก 10 เท่าที่เรา มองไม่เห็น



ภาพที่ 1 กาแล็กซี NGC 7664

ตัวกาแล็กซีเองก็เช่นกัน หากอวกาศว่างเปล่า ทำไมสสารทั้งหลายของกาแล็กซีจึงไม่ยุบรวมกัน หรือกระจายตัวไปในอวกาศ เมื่อพิจารณาการหมุนรอบตัวเองของกาแล็กซีด้วยกฎของเคปเลอร์ข้อที่ 3 ( $p^2/a^3 = k$ ) จะพบว่า หากมวลส่วนใหญ่ของกาแล็กซีอยู่ที่ศูนย์กลางแล้ว ความเร็วที่ปลายแขนของกาแล็กซีควรมีความเร็วในวงโคจรช้ากว่าบริเวณใกล้กับศูนย์กลาง ในทำนองเดียวกับการที่ดาวเคราะห์ชั้นนอกมีความเร็วในวงโคจรช้ากว่าดาวเคราะห์ชั้นใน แต่ผลจากการวิเคราะห์ความเร็วในการการหมุนรอบตัวเองของกาแล็กซีกัณฑ์ NGC 4378, NGC 3145, NGC 1620 และ NGC 7664 (ภาพที่ 1) ดังกราฟในภาพที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในวงโคจรภายในแขนกัณฑ์ไม่ว่าจะอยู่ใกล้หรือไกลจากศูนย์กลาง ไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่ามีสสารมืดที่มองไม่เห็นโอบอุ้มแขนกัณฑ์ไว้



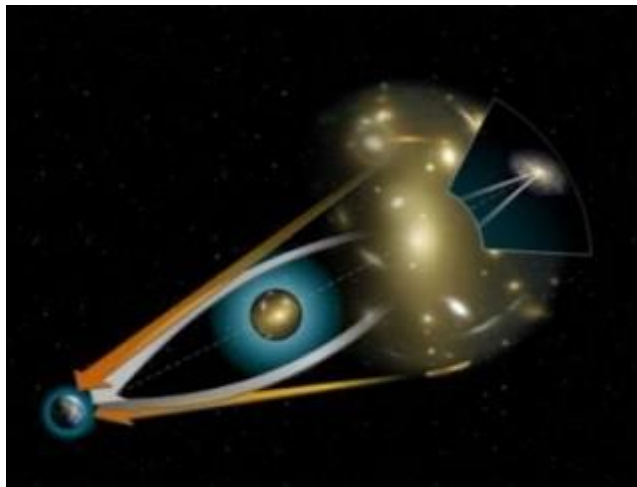
ภาพที่ 2 กราฟแสดงความเร็วของการหมุนรอบตัวเองของกาแล็กซีก้างหัน

กล้องโทรทรรศน์อวกาศฮับเบิลถ่ายภาพห้วงอวกาศลึกโดยการเปิดหน้ากล้องเป็นระยะเวลาานหลายชั่วโมงเพื่อให้ได้ภาพกระจุกกาแล็กซี Abell 2218 ซึ่งอยู่ห่างไกล 5,000 ล้านปีแสง ดังในภาพที่ 3 ซึ่งมีกาแล็กซีสีเหลืองซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วไป และกลุ่มกาแล็กซีสีน้ำเงินซึ่งเรียงตัวเป็นอาร์ควงกลม



ภาพที่ 3 กระจุกกาแล็กซี Abell 2218 (ที่มา: [NASA](https://www.nasa.gov))

ภาพที่ 4 เป็นภาพแสดงมุมมองด้านข้างอธิบายให้เห็นว่า กระจุกกาแล็กซีสีเหลืองที่อยู่ด้านหน้า มีกาแล็กซีสีน้ำเงินอยู่ลึกเข้าไปข้างหลังเป็นระยะทาง 2 เท่าตัว กาแล็กซีที่อยู่ด้านหลังมีสีน้ำเงินเพราะเป็นภาพย้อนอดีตขณะที่กาแล็กซียังมีอายุน้อย จึงมีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น (แสงสีน้ำเงิน) ส่วนกระจุกกาแล็กซีสีเหลืองเป็นภาพใหม่กว่า (อยู่ใกล้โลกมากกว่า แสงจึงใช้เวลาเดินทางมาถึงโลกน้อยกว่า) กาแล็กซีเย็นตัวลงแล้วจึงแผ่รังสีคลื่นยาวกว่า (แสงสีเหลือง) สิ่งที่น่าสนใจในภาพนี้ก็คือ ระหว่างกลุ่มกาแล็กซีทั้งสองจะต้องมีสสารมืดที่มีความโน้มถ่วงสูงมากดึงให้อวกาศโค้ง ทำให้เรามองเห็นกาแล็กซีสีน้ำเงินที่อยู่ด้านหลังปรากฏตัวเป็นโค้งอาร์ควงกลม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “เลนส์ความโน้มถ่วง” (Gravitational Lensing) ซึ่งเป็นหลักฐานแสดงให้เห็นว่า สสารมืดมีอยู่จริง และภูมิภาคของจักรวาลมีความโค้ง แสงจึงเดินทางเป็นเส้นโค้ง



ภาพที่ 4 ปรากฏการณ์เลนส์ความโน้มถ่วง (ที่มา: [NASA](http://www.lesa.biz))

ที่มา <http://www.lesa.biz/astro-events/day-night>