# บทที่ 9
## ดาราจักรทางช้างเผือก

ในยามค่ำคืนเมื่อเราออกนอกตัวเมืองไปยังที่ซึ่งไม่มีแสงสว่างรบกวนมาก แล้วมองขึ้นไปดูท้องฟ้าโดยไม่ต้องใช้กล้องดูดาว ราจะเห็นดาวเคราะห์และดาวฤกษ์ต่าง ๆ จำนวนมาก นอกจากนี้เรายังเห็นแถบฝ้าสว่างแถบใหญ่พาดยาวตลอดท้องฟ้าเป็นทางรูปวงกลมใหญ่ เราเรียกแถบฝ้าสว่างนี้ว่าทางช้างเผือก (Milky Way) หลังจากได้พัฒนาระบบกล้องโทรทัศน์กำลังขยายสูงแล้ว นักดาราศาสตร์จึงทราบว่าแถบฝ้าสว่างนั้นประกอบด้วยดาวจำนวนมหาศาล ซึ่งอยู่ชิดติดกันมากและอยู่ห่างไกลจากเรามากจนมองแยกไม่ออกด้วยตาเปล่า ระบบสุริยะของเราก็เป็นสมาชิกระบบเล็ก ๆ อันหนึ่งอยู่ในระนาบตรงบริเวณขอบนอกของทางช้างเผือกนั่นเอง และดาวในแถบทางช้างเผือกเป็นส่วนหนึ่งของดาราจักรของเรา ดังนั้นเราจึงเรียกดาราจักรของเราว่าดาราจักรทางช้างเผือก จากการที่เราพบว่าดาวฤกษ์ในทางช้างเผือกที่เราสังเกตเห็นวางตัวปรากฏในแถบฝ้าสว่าง แสดงว่าดาราจักรน่าจะมีรูปร่างแบน และเรามองจากจุดที่อยู่ในระนาบนี้แต่ห่างจากจุดศูนย์กลางออกมามาก นอกจากดาวฤกษ์เป็นสมาชิกแล้วดาราจักรยังประกอบด้วยกลุ่มแก๊ส กระจุกดาวเปิดกระจุกดาวทรงกลม และเนบิวลาจำนวนมาก

### 9.1 รูปร่างและขนาดของดาราจักรของเรา

นักดาราศาสตร์คนแรกที่ได้รับเกียรติว่าเป็นผู้ค้นพบรูปร่างและขนาดที่แท้จริงของดาราจักรทางช้างเผือก คือ แชปเลย์ (Shapley) ผลจากการวิจัยทางช้างเผือกทำให้นักดาราศาสตร์พบว่า มีดวงดาวในดาราจักรทางช้างเผือกอยู่รวมตัวกันเป็นกระจุก ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ด้วยกันคือ 1. กลุ่มกระจุกดาวเปิด และ 2. กลุ่มกระจุกดาวทรงกลม

การศึกษาโครงสร้างของกระจุกดาวทั้งสองกลุ่มที่ทำให้นักดาราศาสตร์เกิดความเข้าใจโครงสร้างของดาราจักรทางช้างเผือกได้ชัดเจนเป็นผลงานของ แชปเลย์ ก็คือการวัดระยะทางของกระจุกดาวทรงกลม 69 กลุ่มด้วยกัน โดยวิธีหาความสว่างทั้งหมด วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดวงดาวและวัดความสว่างของดาวที่ส่องสว่างมากที่สุด 25 ดวงในกระจุกดาวกลุ่มนี้ จากการวิจัยของแชปเลย์ทำให้ทราบว่า จุดศูนย์กลางของดาราจักรทางช้างเผือกอยู่ในบริเวณกลุ่มดาวนายขมังธนู (Sagittarius) นอกจากนี้แชปเลย์ยังทำการวิจัยกระจุกดาวทรงกลม 93 กลุ่มและกระจุกดาวเปิดอีก 249 กลุ่ม และได้คำนวณพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของดาราจักร-

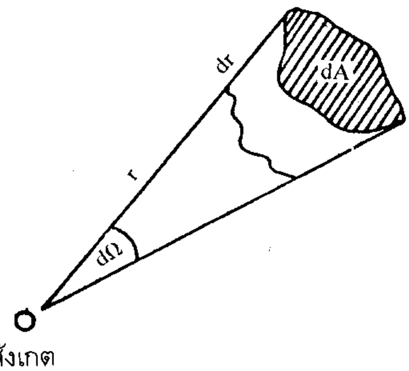
ทางช้างเผือกมีระยะทาง 70,000 พาร์เซก และความหนาของดาราจักรทางช้างเผือกมีระยะทางประมาณ 7,000 พาร์เซก และพบว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตั้งอยู่ในบริเวณแขนกังหันของดาราจักรทางช้างเผือก โดยอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของการกระจายของกระจุกดาวทรงกลม 200 กลุ่ม รอบดาราจักรเป็นระยะทางประมาณ 10 กิโลพาร์เซก

### 9.1.1 วิธีการนับดาว

วิธีการที่เราใช้ในการสำรวจหาขนาดและรูปร่างของดาราจักรทางช้างเผือกก็คือ การศึกษาการกระจายตัวของดาวในดาราจักรด้วยวิธีที่เรียกว่า การนับดาว (Star Counts) ซึ่งมีหลักการคร่าว ๆ ดังนี้คือ นับจำนวนของดาวในช่วงโชติมาตรปรากฏที่บริเวณกำหนดใด ๆ ในทิศทางต่าง ๆ แล้วนำมารวมกัน ซึ่งจะทำให้เราทราบถึงการแจกแจงของดาวฤกษ์ที่มีความสว่างปรากฏต่างกันในท้องฟ้า

จากลักษณะของทางช้างเผือกที่ปรากฏบนท้องฟ้าแสดงให้เห็นว่า ดาราจักรทางช้างเผือกน่าจะเป็นระบบที่มีรูปร่างแบน และเรากำลังมองจากตำแหน่งในระนาบดาราจักรที่อยู่ไกลออกมาจากจุดศูนย์กลาง จากที่เมื่อเรามองไปยังจุดในระนาบดาราจักรที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางหรือมองออกไปนอกดาราจักรจะพบว่าจำนวนดาวที่เรามองเห็นมีน้อยลง นั่นแสดงว่าความคิดข้างต้นเป็นจริง ดังนั้นเราจะอาศัยรูปแบบข้างต้นนี้พิจารณาศึกษาวิธีการนับดาว ดังนี้

ให้เราพิจารณาดาวฤกษ์ที่ปรากฏบนท้องฟ้าทรงกลมในบริเวณพื้นที่ dA ซึ่งรองรับมุมตัน $d\Omega$ ที่ระยะทางไลกเท่ากับ r ตามรูป 9.1 ดังนั้น




รูป 9.1 แสดงพื้นที่เล็ก ๆ ซึ่งดาวฤกษ์ปรากฏบนทรงกลมท้องฟ้าที่ผู้สังเกตเห็น

$$dA = r^2 d\Omega \tag{9.1}$$

ถ้าระยะทางเพิ่มขึ้นอีกด้วย dr ก็จะได้ปริมาตรในช่วง r ถึง r + dr เป็น

$$dV = r^2 d\Omega\ dr \tag{9.2}$$

ดังนั้นจำนวนของดาวที่ปรากฏในปริมาตรนี้เป็น

$$\begin{aligned} N(r) &= n(r)dV \\ &= n(r)r^2 d\Omega\ dr \end{aligned} \tag{9.3}$$

เมื่อ n(r) คือจำนวนของดาวต่อหน่วยปริมาตร หรือเรียกว่าความหนาแน่นของจำนวนดาวที่ระยะทาง r เพื่อความสะดวกเราสมมติว่าดาวทุกดวงมีโชติมาตรสัมบูรณ์เท่ากับ M และไม่มีการดูดกลืนหรือสะท้อนแสงเนื่องจากสสารระหว่างดาวอาศัยจากสมการ (2.23) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโชติมาตรปรากฏและระยะทาง ดังนั้นเราจะใช้โชติมาตรปรากฏแทนที่ระยะทาง คือ

$$(m + 1) - M = 5 \log (r_{m+1}) - 5 \tag{9.4}$$

$$m - M = 5 \log (r_m) - 5 \tag{9.5}$$

$r_{m+1}$ และ $r_m$ คือระยะทางของดาวที่มีโชติมาตรปรากฏเป็น m + 1 และ m ตามลำดับ ให้สมการ (9.5) ลบออกจากสมการ (9.4) เราจะได้

$$1 = 5 \log (r_{m+1}/r_m)$$

$$\frac{r_{m+1}}{r_m} = 10^{\frac{1}{5}} = 1.585 \tag{9.6}$$

จะเห็นได้ว่า เมื่อดาวมีระยะทางห่างไกลออกไป 1.585 เท่า โชติมาตรปรากฏของมันจะเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งโชติมาตร ต่อไปกำหนดให้ N(m + 1) และ N(m) เป็นจำนวนของดาวทั้งหมดที่มีโชติมาตรปรากฏเป็น m + 1 และ m ตามลำดับ จากสมการ (9.3) และ (9.6) เราเขียนใหม่ได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{N(m+1)}{N(m)} &= \frac{n(m+1)}{n(m)} \cdot \frac{r^2_{m+1}}{r^2_m} \\ &= 2.512\,\frac{n(m+1)}{n(m)} \end{aligned}$$

หรือ

$$\frac{n(m+1)}{n(m)} = 0.398\,\frac{N(m+1)}{N(m)} \tag{9.7}$$

ค่าของ N(m + 1) และ N(m) เป็นค่าที่เราสามารถนับได้ ดังนั้นสมการ (9.7) ทำให้เราทราบค่าความหนาแน่นของจำนวนดาวที่มีโชติมาตรสัมบูรณ์ M ที่บริเวณตำแหน่ง r ต่าง ๆ และถ้าดาวฤกษ์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นั่นคือความหนาแน่นของจำนวนดาวมีค่าสม่ำเสมอ เราจะได้

$$n(m + 1) = n(m) \tag{9.8}$$

เราจะนับดาวได้ว่า ดาวที่มีโชติมาตร (m + 1) มีจำนวนเป็น 2.512 เท่าของดาวที่มีโชติมาตร

m จากการนับดาวด้วยวิธีนี้ทำให้เราพบว่า ระบบสุริยะของเราอยู่ในบริเวณขอบนอกของระบบใหญ่โตของดาวที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 kpc และความหนาแน่นของจำนวนดาวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าใกล้ศูนย์กลางของดาราจักร

### 9.1.2 ดาวสว่างและกระจุกดาว

ดาวที่สว่างมากและกระจุกดาวสามารถปรากฏให้เห็นได้ที่ระยะทางห่างไกลจากระบบสุริยะของเรามาก ตัวอย่างเช่นดาวประเภท B ที่มีโชติมาตรสัมบูรณ์ $M = -5.0$ จะปรากฏให้เห็นได้ไกลถึง 100 kpc ดาวประเภท O และประเภท B ซึ่งเป็นดาวที่เกิดภายหลังและมีอายุน้อย มักจะเกิดในกระจุกดาวหนาแน่นน้อยเล็ก ๆ ที่เรียกว่า สมาคมดาว (Association) นอกจากนี้แสงจากความสว่างมากและความร้อนสูงของดาวเหล่านี้จะทำให้แก๊สไฮโดรเจนรอบข้างของดาวแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นบริเวณ HII ทั้งสมาคมดาวและบริเวณ HII เหล่านี้มักจะจัดเรียงตัวอยู่กันเป็นรูปแขนกังหันในแผ่นจานของดาราจักรทางช้างเผือก

กระจุกดาวทรงกลมจะมีความสว่างมาก ซึ่งมีโชติมาตรสัมบูรณ์ประมาณ $M \approx -4$ ถึง $-10$ ประกอบด้วยดาวสมาชิกประมาณ $10^5$ ถึง $10^6$ ดวง สำหรับดาราจักรทางช้างเผือกจะมีอยู่ประมาณ 120 กลุ่ม ซึ่งแชปเลย์ได้ใช้กระจุกดาวทรงกลมเหล่านี้เป็นเครื่องมือในการวัดขนาดของดาราจักรทางช้างเผือก สำหรับระยะทางไปยังกระจุกดาวทรงกลมเราอาจหาได้จาก (1) การซ้อนแถบขบวนหลัก (2) การทราบค่าโชติมาตรปรากฏของดาวชนิดที่รู้จักกันดีในกระจุกดาว และ (3) การทราบค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเชิงมุมของกระจุกดาวเมื่อเราทราบระยะวัดขนาดของดาราจักรทางช้างเผือก สำหรับระยะทางไปยังกระจุกดาวทรงกลมเราอาจหาได้จากว่ามีกระจุกดาวทรงกลมอยู่กันอย่างหนาแน่นเป็นระบบทรงกลมที่มีรัศมีประมาณ 15 kpc และมีจุดศูนย์กลางของระบบอยู่ไกลจากกลุ่มดาวนายขมังธนู 10 ± kpc

## 9.2 ประชากรดาวในดาราจักรทางช้างเผือก

จากการศึกษาโครงสร้างของดาราจักรทางช้างเผือกและการเปรียบเทียบกับดาราจักรอื่น ๆ ทำให้นักดาราศาสตร์พบว่า การกระจายของดาวประชากรประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นดาวที่มีปริมาณธาตุหนักหรือโลหะอยู่มาก และดาวประชากรประเภทที่ 2 ซึ่งเป็นดาวที่มีโลหะอยู่น้อยอยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ กันไป คือบริเวณใจกลางของดาราจักรทางช้างเผือกมักจะพบว่า มีดาวประชากรทั้งสองประเภทปนกันอยู่ ส่วนในบริเวณที่เป็นแผ่นจานหรือแขนกังหันของดาราจักรมักจะพบแต่ดาวประชากรประเภทที่ 1 และในบริเวณแฮโล (Halo) ซึ่งเป็นบริเวณล้อมรอบดาราจักรจะพบว่าดาวประชากรส่วนมากเป็นประชากรประเภทที่ 2 ดังนั้นเราจึงพบว่า ปริมาณโลหะของดาวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้แผ่นจานและระนาบของดาราจักร ดาวในแผ่นจานของ

ดาราจักรจะมีปริมาณโลหะมากกว่าดาวประชากรประเภทที่ 2 เราเรียกว่าดาวประชากรแผ่นจาน (Disk Population) ในการจัดประชากรของดาวที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ของดาราจักรนอกจากจะพิจารณาตามปริมาณของธาตุหนักแล้ว เรายังสามารถพิจารณาประชากรของดาวโดยอาศัยลักษณะการโคจรเคลื่อนที่ (Orbital Characteristics) ของดาวในดาราจักรได้อีกด้วย ลักษณะอย่างหนึ่งของระบบดาวฤกษ์ล้อมรอบ (Bound Stellar System) ก็คือการเคลื่อนที่ของดาวแต่ละดวงก่อให้เกิดแรงต้านไม่ให้ดาวทั้งหมดต้องยุบตัวลงมารวมกันที่ใจกลางของระบบเนื่องจากแรงโน้มถ่วงระหว่างดาว ภายในแผ่นจานของดาราจักรเกือบทั้งหมดประกอบด้วยดาวฤกษ์และกลุ่มแก๊สและฝุ่นขนาดต่าง ๆ อยู่เป็นจำนวนมากซึ่งโคจรรอบจุดศูนย์กลางของดาราจักรเกือบเป็นวงกลม (Circular Orbit) โดยมีอัตราเร็วเชิงมุมสูง เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Motion) ของดาวฤกษ์ ซึ่งเป็นผลให้รูปร่างของการกระจายดาวเริ่มแบนราบลง และมีลักษณะคล้ายจานในที่สุด สำหรับบริเวณใจกลางของดาราจักร ซึ่งประกอบด้วยดาวที่มีอัตราเร็วเชิงมุมน้อย ดังนั้นดาวในบริเวณนี้จึงมีการแจกแจงเชิงทรงกลม (Spherical Distribution) ส่วนในบริเวณแฮโลจะประกอบด้วยดาวที่มีอัตราเร็วแบบสุ่มสูงมาก ทำให้ดาวเหล่านี้ได้รับแรงยึดเหนี่ยวจากดาราจักรน้อยกว่าดาวในบริเวณใจกลาง

## 9.3 พลศาสตร์ของดาราจักรทางช้างเผือก

จากที่เราได้ทราบแล้วว่าดาวและกระจุกดาวต่าง ๆ มีการเคลื่อนที่ ดังนั้นในการศึกษาพลศาสตร์ของดาราจักรทางช้างเผือกซึ่งประกอบด้วยดาวและกระจุกดาวต่าง ๆ จำนวนมหาศาล เราจะสมมติว่ารูปร่างของดาราจักรทางช้างเผือกเป็นระบบที่ดาวทั้งหลายและกลุ่มแก๊สต่าง ๆ รวมกันอยู่ด้วยความโน้มถ่วงของมันเอง ส่วนที่เป็นทรงกลมของระบบก็คือแฮโลที่ประกอบด้วยกระจุกดาวทรงกลม ซึ่งดูคล้ายกับกระจุกดาวทรงกลมขนาดใหญ่ล้อมรอบดาราจักรไว้ แต่ส่วนที่คล้ายกับเป็นแผ่นจานมีลักษณะเหมือนกับสิ่งที่หมุนรอบตัวเอง เราจะสมมติว่าดาวในระนาบดาราจักรโคจรเป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง และดาวทุกดวงในดาราจักรมีการเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของความโน้มถ่วงที่เกิดจากดาวดวงอื่น ๆ อัตราเร็วเชิงมุม $\omega$ ของการโคจรของดาวในบริเวณใจกลางมีค่าเกือบคงที่ โดยมีการหมุนรอบตัวเองแบบเดียวกับวัตถุเกร็ง (Rigid Body) ทั่วไป ส่วนบริเวณภายนอกออกมาอัตราเร็วเชิงมุมจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางจากจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าดาวที่อยู่ห่างจากใจกลางออกมามากเราอาจถือว่ามีวงโคจรเป็นแบบเคเปลอร์รอบใจกลางที่มีมวล $M_G$ เนื่องจากความเร่งสู่ศูนย์กลางที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงระหว่างดาวที่ห่างไกลและใจกลางของดาราจักร ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM_G}{R^2} \tag{9.9}$$

เมื่อ R คือระยะห่างของดาวภายนอกถึงจุดศูนย์กลางของดาราจักร

V คืออัตราเร็วเชิงเส้นของดาว

G คือค่าคงที่ของความโน้มถ่วง

และ $M_G$ คือมวลยังผลของดาราจักร

สมมติว่าดาวที่เรากำลังพิจารณาคือดวงอามทิตย์ ซึ่งมีอัตราเร็วเชิงเส้นประมาณ 250 กิโลเมตรต่อวินาที ชี้ไปในทิศลองติจูด ($\ell$) 90 องศา และดวงอาทิตย์มีวงโคจรที่มีรัศมี 10 กิโลพาร์เซก ดังนั้นเราสามารถหามวลยังผลของดาราจักรได้จากสมการ (9.9) ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} M_G &= \frac{V_\odot^2 R_\odot}{G} \\ &= \frac{(2.5 \times 10^5 \text{ m/s})^2 (3.1 \times 10^{20} \text{ m})}{6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}} \\ &= 2.9 \times 10^{41} \text{ กิโลกรัม} \\ &= 1.5 \times 10^{11} M_\odot \end{aligned} \tag{9.10}$$

จากสมการ (9.10) จะเห็นได้ว่าดาราจักรทางช้างเผือกจะประกอบด้วยดาวทั้งหมดประมาณหนึ่งแสนล้านดวง และจากสมการ (9.9) บ่งบอกว่าอัตราเร็วในวงโคจรจะลดลงเมื่อระยะทางจากจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ดังนั้น

$$v \propto R^{-\frac{1}{2}} \tag{9.11}$$

จากที่เราทราบว่าดวงอาทิตย์มีการโคจรรอบจุดศูนย์กลางดาราจักรเป็นวงกลม ดังนั้นดวงอาทิตย์จะใช้เวลาโคจรครบรอบในเวลาเท่ากับ

$$\begin{aligned} T &= \frac{2\pi R_\odot}{V_\odot} \\ &= \frac{2\pi\ (3.1 \times 10^{20} \text{ m})}{(2.5 \times 10^5 \text{ m/s})} \\ &\approx 250 \text{ ล้านปี} \end{aligned}$$

ซึ่งดาวดวงอื่น ๆ ในดาราจักรก็ควรจะใช้เวลาโคจรครบรอบใกล้เคียงกัน และเราทราบว่าดาราจักรมีอายุประมาณ $10^{10}$ ปี ดังนั้นดาราจักรได้หมุนไปแล้วประมาณ 40 รอบ ดังนั้นแขนกังหันของดาราจักรต้องเป็นปรากฏการณ์ทางพลศาสตร์ของแผ่นจานของดาราจักร ทั้งนี้เพราะว่าถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแขนกังหันจะหมุนแน่นเข้าสู่ใจกลางจนสลายตัวไปภายในเวลาที่ดาราจักร

หมุนไปได้ไม่กี่รอบ และควรจะสลายตัวไปนานแล้ว ในปัจจุบันเราเชื่อว่าแขนกังหันของดาราจักรเกิดจากคลื่นความหนาแน่น (Density Wave) ซึ่งเป็นคลื่นประเภทเดียวกับคลื่นเสียงที่หมุนไปในแผ่นจาน

## 9.4 การหมุนของดาราจักร

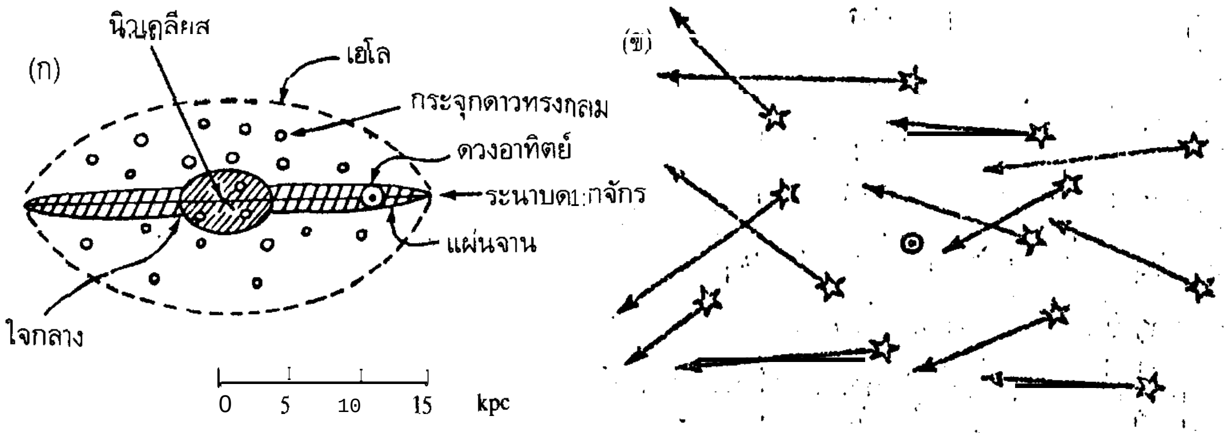
การหมุนของดาราจักรที่มีการศึกษามากที่สุดก็คือบริเวณแผ่นจานของดาราจักร โดยที่บริเวณแผ่นจานจะมีการหมุนเชิงอนุพันธ์ (Differential Rotation) ซึ่งเป็นการหมุนที่ความเร็วเชิงมุมขึ้นกับระยะทางจากจุดศูนย์กลาง กล่าวคือการหมุนของดาวฤกษ์และกลุ่มแก๊สรอบจุดศูนย์กลางของดาราจักรไม่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับวัตถุเกร็งทั้งหลาย แต่ละตำแหน่งจะโคจรด้วยความเร็วที่ต่างกัน โดยการเคลื่อนที่ครบรอบของส่วนในจะใช้เวลาสั้นกว่าส่วนนอก นักดาราศาสตร์ผู้ที่เริ่มศึกษาสังเกตการเคลื่อนที่ของระบบดาวในบริเวณใกล้เคียงกับดวงอาทิตย์ ซึ่งเชื่อมโยงไปถึงการหมุนรอบตัวเองของดาราจักรก็คือ ลินด์แบลด (Lindblad) และอูร์ต (Oort)

### 9.4.1 ระบบแอลเอสอาร์พลศาสตร์

ส่วนที่สร้างความยุ่งยากในการวัดการหมุนของแผ่นจานในดาราจักรก็คือ การที่ดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่รอบดาราจักรและดวงอาทิตย์ก็เป็นสมาชิกในแผ่นจานด้วย โดยมีอัตราการเคลื่อนที่เกือบเท่ากับการเคลื่อนที่เฉลี่ยของดาวและกลุ่มเมฆต่าง ๆ ในแผ่นจาน นั่นหมายความว่าดาวต่าง ๆ พร้อมทั้งกลุ่มเมฆทั้งหลายเกือบจะหยุดนิ่งเมื่อเทียบกับกับระบบสุริยะ ดังนั้นนักดาราศาสตร์จึงได้กำหนดกรอบมาตรฐานขึ้นมาอันหนึ่งสำหรับกรอบมาตรฐานแอลเอสอาร์ที่กล่าวในบทที่ 2 นั้นเป็นระบบแอลเอสอาร์จลศาสตร์ (Kinematical LSR) เพราะคิดจากการเคลื่อนที่เฉลี่ยของดาวที่อยู่รอบ ๆ ดวงอาทิตย์โดยไม่คำนึงถึงแรงที่กระทำให้ดาวเคลื่อนที่ สำหรับกรอบมาตรฐานที่คิดจากการโคจรของดาวรอบจุดศูนย์กลางของดาราจักรโดยแรงโน้มถ่วง เรียกว่าระบบแอลเอสอาร์พลศาสตร์ (Dynamical LSR) ซึ่งกำหนดให้เป็นระบบอ้างอิงที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ดวงอาทิตย์ และระบบนี้จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของดาราจักรด้วยอัตราเร็วที่คล้องจองกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ดังนั้นดาวทุกดวงในบริเวณใกล้เคียงกับดวงอาทิตย์ซึ่งมีวงโคจรเป็นวงกลมจะปรากฏอยู่นิ่งเทียบกับระบบแอลเอสอาร์พลศาสตร์นี้ ส่วนดาวที่มีวงโคจรผิดไปจงวงกลมจะแสดงให้เห็นการเคลื่อนที่เฉพาะตัวเมื่อเทียบกับแอลเอสอาร์พลศาสตร์

นักดาราศาสตร์พบว่าในบริเวณใกล้กับระบบสุริยะของเราจะมีดาวฤกษ์เพียงไม่กี่ดวงเท่านั้นที่มีความเร็วสูงเมื่อเทียบกับระบบแอลเอสอาร์พลศาสตร์ และดาวที่มีความเร็วสูงเหล่านี้

จะแสดงลักษณะอสมมาตร (Asymmetry) กล่าวคือมันจะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวเมื่อเทียบกับดวงอาทิตย์ แทนที่จะเคลื่อนที่กระจัดกระจายไปทั่วทุกทิศทางตามรูป (9.2) ลินแบลดได้ให้ความเห็นว่าดาวเหล่านี้เป็นดาวในบริเวณแฮโล ซึ่งเป็นดาวที่มีความเร็วเชิงมุมต่ำเมื่อเทียบกับความเร็วเนื่องจากการหมุนของดาวในแผ่นจานของดาราจักร นอกจากนี้ยังมีทิศทางการเคลื่อนที่ไม่สอดคล้องกับทิศทางการหมุนของดาราจักรอีกด้วย ดังนั้นเมื่อมองจากระบบสุริยะของเราจึงเสมือนเห็นว่าดาวเหล่านี้มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง




รูป 9.2 แสดงรูปร่างของดาราจักรและบริเวณแฮโล ดาวจะมีความเร็วในทิศทางต่าง ๆ กัน

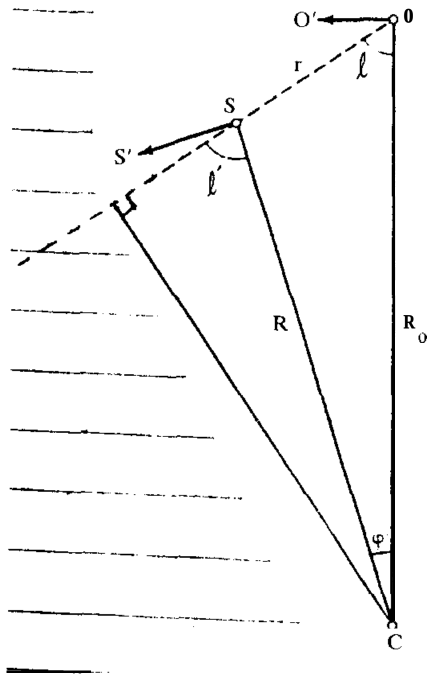
### 9.4.2 สูตรการหมุนของอูร์ต

การศึกษาผลของการโคจรเคลื่อนที่ของดาวต่าง ๆ ในดาราจักรนั้น นักดาราศาสตร์สามารถทำได้เฉพาะในบริเวณใกล้ ๆ ระบบสุริยะของเราเท่านั้น ด้วยอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ทำให้นักดาราศาสตร์สามารถศึกษาการเคลื่อนที่ของดาวที่อยู่ไกลถึงหลายพันปีแสงได้ และได้สรุปว่าการเคลื่อนที่ของดาวมี 2 ชนิดคือ

(1) **การหมุนเฉลี่ย (Mean Rotation)** ของดาวต่าง ๆ รอบจุดศูนย์กลางของดาราจักรขึ้นอยู่กับระยะทางจากจุดศูนย์กลางของดาราจักร ซึ่งเป็นการหมุนเชิงอนุพันธ์

(2) **การเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Motion)** ดาวแต่ละดวงไม่ว่าจะอยู่ห่างจากศูนย์กลางของดาราจักรมากน้อยเท่ากันหรือไม่ก็ตาม จะมีการเคลื่อนที่ในทิศทางต่าง ๆ ด้วยความเร็วที่ต่างกันด้วย

อูร์ตได้วิเคราะห์การหมุนเชิงอนุพันธ์ของดาวในบริเวณที่มีการเคลื่อนที่เฉลี่ยเท่ากับการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์หรืออยู่นิ่งเทียบกับระบบแอลเอสอาร์พลศาสตร์นั้น ให้เราพิจารณาวงโคจรรูปวงกลมในระนาบดาราจักรตามรูป 9.3




รูป 9.3 แสดงการหมุนของดาวในดาราจักรเทียบกับดวงอาทิตย์

ในรูป 9.3 จุด 0 คือ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และ S เป็นตำแหน่งของดาวที่อยู่ใกล้ ทั้งสองต่างเคลื่อนที่ในระนาบของกระดาษด้วยวงโคจรเป็นวงกลมรอบ ๆ จุด C ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของดาราจักร เรากำหนดให้อัตราเร็วในวงโคจรของดวงอาทิตย์และดาวเป็น $v_o$ และ $v$ ไปในทิศทาง O O′ และ SS′ ตามลำดับ โดยที่ทิศทางเหล่านี้ตั้งฉากกับรัศมี $R_o$ และ $R$ ระยะทางระหว่างดาวและดวงอาทิตย์เป็น $r$ และสำหรับ $\ell$ คือลองจิจูดของดาวในดาราจักรที่จุด S $\varnothing$

เป็นมุมรองรับระหว่างดาวและดวงอาทิตย์ที่จุดศูนย์กลางดาราจักร $\omega$ คืออัตราเร็วเชิงมุมของดาว และ $\omega_o$ เป็นอัตราเร็วเชิงมุมของดวงอาทิตย์หรือแอลเอสอาร์ ดังนั้นจากรูป 9.3 เราจะเห็นได้ว่าอัตราเร็วเฉพาะตัวในแนวเส้นสายตาของดาวเมื่อเทียบกับแอลเอสอาร์ เป็น $v_r$ ซึ่งเป็นผลต่างของส่วนประกอบในแนวสายตาของอัตราเร็วในวงโคจรของดาวและดวงอาทิตย์ นั่นคือ

$$v_r = v \sin \ell' - \sin \ell \tag{9.12}$$

และจากกฎของไซน์เมื่อใช้กับ $\triangle OSC$ จะได้

$$\sin(\pi - \ell') = \frac{R_o}{R} \sin \ell$$

หรือ

$$\sin \ell' = \frac{R_o}{R} \sin \ell \tag{9.13}$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ของอัตราเร็วในแนวสายตาสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$v_r = v\frac{R_o}{R}\sin\ell - v_o\sin\ell$$

$$v_r = \left(v\frac{R_o}{R} - v_o\right)\sin\ell \qquad (9.14)$$

เนื่องจากอัตราเร็วทั้งหลายโดยทั่วไปแล้วเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับตำแหน่ง และเราสมมติว่าดาราจักรมีความสมมาตรตามแกน (Axial Symmetry) นั่นหมายความว่า มุมตามแกน $\varnothing$ ดังแสดงในรูป 9.3 ไม่ได้ปรากฏในตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นตัวแปรเหล่านี้จึงขึ้นกับรัศมี R เท่านั้น เราสามารถเขียนการกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Expansion) สำหรับ v ไดดังนี้

$$v(R) = v_o + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}(R - R_o) + \qquad (9.15)$$

เนื่องจาก $r << R_o$ ดังนั้นมุม $\varnothing$ จะเป็นมุมแคบมาก ๆ ดังนั้นจากรูป 9.3 เราจะเห็นได้ว่า

$$R_o - R \approx r\cos\ell$$

พจน์ที่เป็นอันดับสูงในสมการ (9.15) ซึ่งเราเขียนด้วย (.....) จะประกอบด้วยผลคูณของส่วนที่มีค่าน้อยมาก ๆ สองปริมาณ ดังนั้นเราสามารถละทิ้งพจน์เหล่านั้นได้ สมการ (9.15) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$v(R) = v_o - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o} r\cos\ell \qquad (9.16)$$

เมื่อ $(dv/dR)_{R_o}$ เราหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วเมื่อเทียบกับระยะทางโดยคิดที่ระยะทาง $R = R_o$ นอกจากนี้เรายังใช้การประมาณว่า

$$\frac{R_o}{R} \cong R_o(R_o - r\cos\ell)^{-1}$$

$$\approx 1 + \frac{r}{R_o}\cos\ell \qquad (9.17)$$

อาศัยจากสมการ (9.16) และ (9.17) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในแนวสายตาจะกลายเป็น

$$v_r = \left[\left(v_o - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o} r\cos\ell\right)\left(1 + \frac{r}{R_o}\cos\ell\right) - v_o\right]\sin\ell \qquad (9.18)$$

กระจายผลคูณของพจน์ภายในวงเล็บแล้วละทิ้งพจน์ที่มีค่าน้อยมากไป เราจะได้

$$v_r = \frac{1}{2}\left[\frac{v_o}{R_o} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}\right] r\sin 2\ell \qquad (9.19)$$

อัตราเร็วเฉพาะตัว $v_t$ ของดาวฤกษ์ในระนาบท้องฟ้าเทียบกับแอลเอสอาร์ที่สังเกตได้สำหรับดาวมีค่าเป็นผลต่างระหว่างองค์ประกอบในระนาบท้องฟ้าของอัตราเร็วในวงโคจรทั้งสอง ดังนั้น

$$v_t = v\cos\ell' - v_o\cos\ell \tag{9.20}$$

แต่จากรูป 9.3 เราเห็นได้ว่า $\ell' = \ell + \varnothing$ ดังนั้น

$$\begin{aligned}\cos\ell' &= \cos(\ell + \varnothing)\\ &= \cos\ell\cos\varnothing - \sin\ell\sin\varnothing \end{aligned}\tag{9.21}$$

แต่มุม $\varnothing$ เป็นมุมแคบมาก ดังนั้น $\cos\varnothing \approx 1$ และจากกฎของไซน์ที่ใช้กับรูป $\triangle OSC$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\sin 0 &\approx \frac{r}{R}\sin\ell\\ &= r(R_o - r\cos\ell)^{-1}\sin\ell\\ &\approx \frac{r}{R_o}\sin\ell\end{aligned}\tag{9.22}$$

ดังนั้น
$$\cos\ell' = \cos\ell - \frac{r}{R_o}\sin^2\ell \tag{9.23}$$

เมื่อใช้สมการ (9.16) และ (9.23) แทนลงในสมการ (9.20) เราจะพบว่า

$$v_t = \left(v_o - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o} r\cos\ell\right)\left(\cos\ell - \frac{r}{R_o}\sin^2\ell\right) - v_o\cos\ell$$

$$= -\left[\frac{v_o}{R_o}\sin^2\ell + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}\cos^2\ell\right] r$$

แต่เนื่องจาก $\sin^2\ell = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\ell)$ ; $\cos^2\ell = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\ell)$

ดังนั้นอัตราเร็วในระนาบท้องฟ้าสามารถเขียนใหม่กลายเป็น

$$v_t = \left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{v_o}{R_o} + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}\right] + \frac{1}{2}\left[\frac{v_o}{R_o} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}\right]\cos 2\ell\right\} r \tag{9.24}$$

สมการ (9.19) และ (9.24) เป็นความสัมพันธ์ที่กำหนดสำหรับอัตราเร็วในแนวสายตาและอัตราเร็วในระนาบท้องฟ้าที่สังเกตได้ มันสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย โดยกำหนดปริมาณ A และ B ขึ้นมา ดังนี้

$$A = \frac{1}{2}\left[\frac{v_o}{R_o} - \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}\right] \text{ และ } B = \frac{1}{2}\left[\frac{v_o}{R_o} + \left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o}\right] \tag{9.25}$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (9.19) และ (9.24) ได้ใหม่เป็น

$$v_r = Ar \sin 2\ell \qquad (9.26)$$

$$v_t = Br + Ar \cos 2\ell \qquad (9.27)$$

ความเร็วในระนาบท้องฟ้าเราไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้นโดยทั่วไปสมการ (9.26) จึงเขียนแทนด้วยสมการสำหรับการเคลื่อนที่ปรอเปอร์ โดยใช้สมการ (2.53) และจากสมการ (9.26) เขียนใหม่เป็น

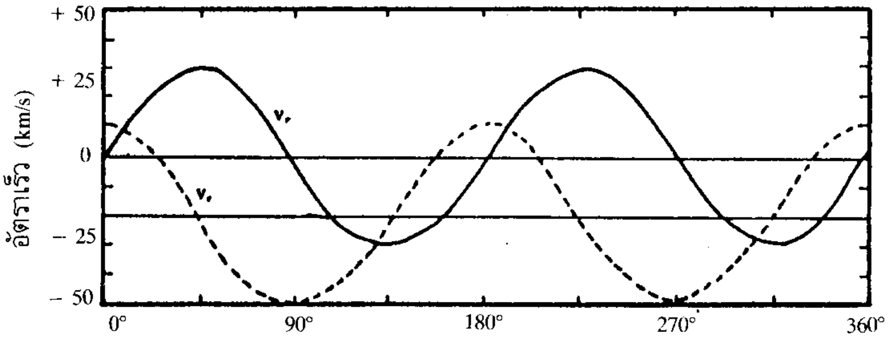
$$\mu = 0.211 \, (B + A \cos 2\ell) \qquad (9.28)$$

ค่าตัวเลขที่เป็นตัวร่วมเกิดจากการเคลื่อนที่ปรอเปอร์ที่วัดในหน่วยอาร์กวินาทีต่อปี ( $''/yr$ ) อัตราเร็วมีหน่วยเป็นกิโลเมตรต่อวินาที และระยะทางวัดเป็นพาร์เซก หน่วยของ A และ B คือ กิโลเมตรต่อวินาที พาร์เซก ดังนั้นมิติของมันจึงเป็น (เวลา)$^{-1}$

สมการ (9.26) ถึง (9.28) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของอูร์ต ซึ่งเป็นสมการการหมุนเชิงอนุพันธ์ของดาราจักร ค่า A และ B เรียกว่าค่าคงที่อูร์ต ดาวทั้งหลายที่มีวงโคจรต่าง ๆ กันในดาราจักรจะมีอัตราเร็วในวงโคจรต่างกัน และสมการอูร์ตแสดงความแตกต่างเหล่านี้ด้วยฟังก์ชันของปริมาณต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณามันได้ สูตรของอูร์ตเราสามารถเห็นได้ชัดเจนโดยไม่มีความยุ่งยากแต่อย่างไร ตัวอย่างเช่น ดาวดวงหนึ่งอยู่ที่ลองจิจูด $\ell = 0$ (หรือ $\ell = \pi$) มีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับดวงอาทิตย์แต่เคลื่อนที่เร็วกว่า (หรือช้ากว่ามาก) เนื่องจากวงโคจรของมันเล็กกว่า (หรือใหญ่กว่า) ดังนั้นอัตราเร็วในแนวสายตาที่สังเกตเห็นได้จะเป็นศูนย์ เนื่องจากอยู่ในแนวเดียวกับดวงอาทิตย์จากจุดศูนย์กลางดาราจักรสำหรับทิศทางทั้งเข้าหาหรือออกจากจุดศูนย์กลางดาราจักร ทำนองเดียวกันสำหรับดาวที่มี $\ell = \pm \frac{\pi}{2}$ จะมีอัตราเร็วในวงโคจรเดียวกัน และยังคงรักษาระยะทางห่างจากดวงอาทิตย์เท่าเดิม ดังนั้นอัตราเร็วในแนวสายตาจะเป็นศูนย์สำหรับทิศทางเหล่านี้ด้วย ผลก็คือจะมีแนวตามทิศทางทั้งสี่ที่ผู้สังเกตเห็นอัตราเร็วในแนวสายตาเป็นศูนย์ และสมการ (9.25) จึงอธิบายความสัมพันธ์รูปไซน์คู่ (Double Sine) เป็นอย่างดี การเคลื่อนที่ปรอเปอร์ของดาวด้วย $\ell = \pm \frac{\pi}{2}$ จะอธิบายได้ดังนี้คือ มันจะปรากฏเคลื่อนที่ไปเป็นรอบทรงกลมท้องฟ้าระหว่างคาบของวงโคจร นั่นคือการเคลื่อนที่ปรอเปอร์ของ $(v_o/R_o)$ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที และสมการ (9.25) และ (9.28) ทำนายได้เมื่อใช้หน่วยปรอเปอร์

จากผลการตรวจสอบจำนวนมากได้แสดงว่า สมการการหมุนเชิงอนุพันธ์ของดาราจักรนี้ถูกต้อง โดยใช้วิธีทั่ว ๆ ไปคือ แบ่งดาวต่าง ๆ ออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามระยะทางของมัน ถ้าเรา

เขียนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในแนวสายตาเทียบกับลองจิจูดของดาราจักร $\ell$ ก็จะได้รูปไซน์คู่เหมือนในสมการ (9.26) (เส้นโค้งรูปไซน์ที่มีคาบเป็น 180°) อัตราเร็วเฉพาะตัวจะสร้างการกระทำเช่นนี้บนยอดของเส้นโค้งนี้ แต่อัมปลิจูดของมัน (Ar) จะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ถ้าเราสามารถวัดอัมปลิจูดนี้ได้ (โดยที่ Ar เป็นค่าที่ทราบสำหรับกลุ่มที่กำลังตรวจสอบ) และถ้าทราบระยะทางสัมพัทธ์ของกลุ่มดาว 2 กลุ่มที่กำลังตรวจสอบ เราก็จะทราบค่าของ A ด้วย ทั้งค่าของ A และ B สามารถหาได้จากอัตราเร็วปรอเปอร์ จากสมการ (9.28) แสดงให้เห็นว่า ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ปรอเปอร์ไม่ขึ้นกับระยะทางเหมือนที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แต่การกระทำซึ่งเกิดจากความเร็วเฉพาะตัวจะลดลงตามระยะทาง การเคลื่อนที่ที่สังเกตได้จะสอดคล้องกับการสังเกตการณ์อื่น ๆ รวมทั้งผลงานของแชปเลย์ในกระจุกดาวทรงกลมที่พิจารณาทิศทางของศูนย์กลางดาราจักร ซึ่งยังมีปัญหาเล็กน้อยที่ว่าการสมมติวงโคจรเกือบเป็นวงกลมรอบ ๆ จุดศูนย์กลางเป็นการถูกต้องขั้นพื้นฐานเท่านั้น




รูป 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลองจิจูด ($l$) กับอัตราเร็วในแนวสายตาและในระนาบท้องฟ้าเป็นเส้นโค้งรูปไซน์คู่

เป็นการโชคไม่ดีที่การวัดค่าคงที่อูร์ทมีความไม่แน่นอนค่อนข้างมาก ส่วนใหญ่เกิดจากการพิจารณาระยะทางที่ผิดพลาด ซึ่งเกิดเนื่องจากความไม่แน่นอนในโชติมาตรสัมบูรณ์ และในการแก้การดูดกลืนเนื่องจากสสารระหว่างดาว มันอาจเกิดขึ้นจากวงโคจรโดยทั่วไปผิดไปจากรูปวงกลมมากกว่าที่สมมติไว้มากด้วย ตัวเลขที่ดีที่สุดของ A และ B คือ

$$\begin{aligned} A &= 15 \text{ กม./(วินาที กิโลพาร์เซก)} = 0.49 \times 10^{-15} \text{ วินาที}^{-1} \\ B &= -10 \text{ กม./(วินาที กิโลพาร์เซก)} = -0.32 \times 10^{-15} \text{ วินาที}^{-1} \end{aligned} \tag{9.29}$$

จากสมการ (9.25) เราพบว่า

$$A + B = -\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o} \; ; \qquad A - B = \frac{v_o}{R_o} \tag{9.30}$$

วงโคจรวงกลมวงหนึ่งรัศมี $R_0$ จะมีเส้นรอบวงเท่ากับ $2\pi R_0$ และมีอัตราเร็ว $v_o$ วงโคจรนี้จะมีคาบเวลาในหนึ่งรอบเท่ากับ

$$P = 2\pi \frac{R_o}{v_o} = \frac{2\pi}{A - B} \tag{9.31}$$

จากค่าของ A และ B ในสมการ (2.29) จะให้คาบเวลาเท่ากับ $7.8 \times 10^{15}$ วินาที หรือเท่ากับ $2.5 \times 10^{8}$ ปี
ให้สังเกตว่า

$$\left(\frac{dv}{dR}\right)_{R_o} = -5 \text{ กิโลเมตร/(วินาที กิโลพาร์เซก)} \tag{9.32}$$

นี่หมายความว่า อัตราเร็วในวงโคจรรูปวงกลมมีค่าลดลงเมื่อระยะทางห่างจากจุดศูนย์กลางของดาราจักรมากขึ้น ดังสมการ (9.11) ดังนั้นดาราจักรจึงไม่ได้หมุนเหมือนกับวัตถุแข็งที่มี v แปรตาม R

ปริมาณ $v_o$ และ $R_o$ สามารถหาได้จากการสังเกตการณ์จากรายงานของ บอค (Bok's Report) ซึ่งหาค่าดังกล่าวโดยการวัดจากอัตราเร็วในแนวสายตาอย่างไม่ละเอียดพบว่า

$$R_o = 10 \text{ กิโลพาร์เซก และ } v_o = 250 \text{ กิโลเมตรต่อวินาที} \tag{9.33}$$

### 9.4.3 เส้นกราฟการหมุนของดาราจักร

จากการวัดอัตราเร็วของการหมุนรอบดาราจักรในลักษณะเปรียบเทียบกับดวงอาทิตย์ของดาวหรือกลุ่มดาวที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน เมื่อรวมเข้ากับรูปทรงทางเรขาคณิตของวงโคจรของดาวต่าง ๆ รอบดาราจักร ทำให้เราสามารถหาอัตราการหมุนสัมบูรณ์ (Absolute Rotational Speed) ของดาวหรือกลุ่มดาวได้ และโดยการใช้กล้องโทรทัศน์วิทยุทำการสังเกตกลุ่มดาวที่จุดสัมผัสวงโคจรด้วยค่าลองจิจูดของดาราจักร ($l$) ต่าง ๆ กัน ทำให้เราสามารถสร้างกราฟการหมุนของดาราจักรทางช้างเผือกได้

พิจารณาจากรูป 9.3 เราจะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดค่าลองจิจูดให้ อัตราเร็วสูงสุดในแนวสายตา $r_{r\,max}$ จะเกิดขึ้นที่จุดซึ่งเส้นแนวสายตาเข้าใกล้จุดศูนย์กลางดาราจักรมากที่สุด ($R = R_{min}$) ที่จุดนี้เส้นแนวสายตาจะสัมผัสกับวงโคจรของรัศมี $R_{min}$ และเราได้ว่า

$$R_{min} = R_o \sin \ell \tag{9.34}$$

อาศัยจากสมการ (9.14)

$$v_{r\,max} = \left(\frac{R_o v}{R_{min}} - v_o\right) \sin \ell \tag{9.35}$$

แทนค่าสมการ (9.34) ลงในสมการ (9.35) เราจะได้

$$v_{r\,max} = v(R_{min}) - v_o \sin \ell \tag{9.36}$$

เนื่องจากการหมุนของดาราจักรเป็นแบบอนุพันธ์ ดังนั้น $\omega = \omega(R)$ และ $v = v(R)$ และจาก $\omega = v/R; \omega_o = v_o/R_o$ และ

$$\omega(R_{min}) = \frac{v(R_{min})}{R_{min}}$$

ดังนั้น สมการ (9.36) เขียนใหม่ได้เป็น

$$v_{r\,max} = \omega(R_{min})\, R_{min} - \omega_o R_o \sin \ell$$

$$= [\omega(R_{min}) - \omega_o]\, R_o \sin \ell$$

หรือ

$$\omega(R_{min}) = \omega_o + \frac{v_{r\,max}}{R_o \sin \ell} \tag{9.37}$$

$v_{r\,max}$ เป็นค่าที่สามารถสังเกตได้ และ $R_{min}$ ก็สามารถหาได้จากสมการ (9.34) ดังนั้นเราสามารถหาค่าของ v และ $\omega$ ในวงโคจรรัศมี $R = R_{min}$ ในทิศทางที่มีค่าลองจิจูด ($\ell$) ต่าง ๆ ได้

อาศัยจากสมการ (9.26) และความสัมพันธ์ $R_o - R \cong r \cos \ell$ เราจะได้

$$v_{r\,max} = Ar\, 2 \sin \ell \cos \ell$$

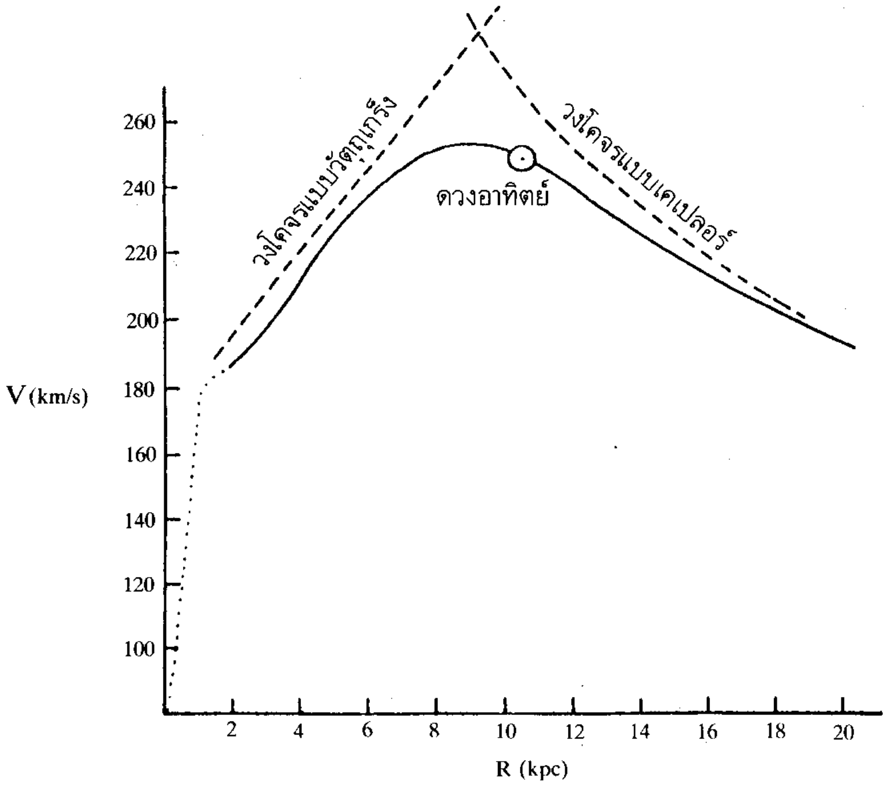
$$= 2A\,(R_o - R_{min}) \sin \ell$$

$$= 2A\,(R_o - R_o \sin \ell) \sin \ell$$

$$v_{r\,max} = 2AR_o \sin \ell\,(1 - \sin \ell) \tag{9.38}$$

$v_{r\,max}$ เป็นค่าซึ่งเราสามารถหาได้จากสเปกตรัมของดาวที่มีค่า $\ell$ ตั้งแต่ $-90°$ ถึง $+90°$ เพราะว่าเส้นในแนวสายตาจะสัมผัสกับวงโคจรได้ก็ต่อเมื่อวงโคจรนั้นอยู่ภายในระยะทาง $R_o$ (ดูรูป 9.3) ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณหาค่าผลคูณของ $AR_o$ ได้จากสมการ (9.38)

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว v และระยะทาง R ได้แสดงไว้ในรูป 9.5 จะเห็นได้ว่าบริเวณใจกลางของดาราจักรการหมุนจะเป็นแบบวัตถุเกร็ง ส่วนบริเวณขอบนอกการหมุนเป็นแบบเคเปลอร์ (Keplerian)




รูป 9.5 เส้นโค้งแสดงการหมุนของดาราจักร เส้นทึบเป็นเส้นที่ได้จากสังเกตการณ์ ส่วนเส้นจุดเป็นเส้นที่คาดว่าน่าจะเป็น และเส้นประแสดงการหมุนแบบวัตถุเกร็งและแบบเคเปลอร์

## 9.5 แบบจำลองของดาราจักร

จากความรู้ต่าง ๆ เกี่ยวกับดาราจักรที่เราได้พิจารณาในหัวข้อที่แล้ว ทำให้เราพอจะสรุปและสร้างแบบจำลองของดาราจักรขึ้น ดังนี้

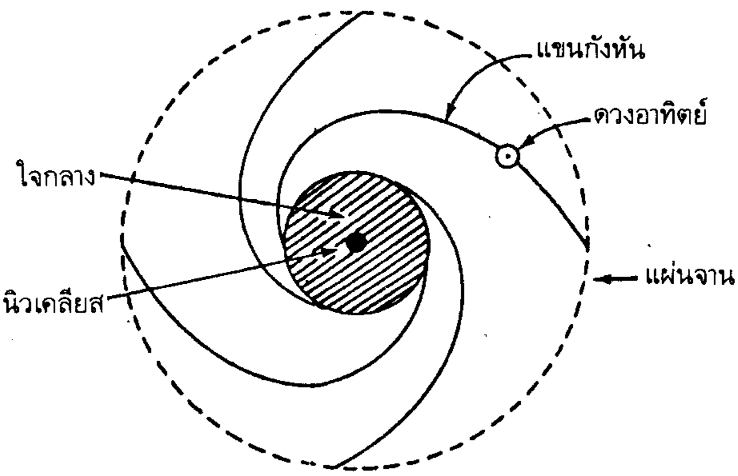
ดาราจักรทั้งหมดจะอยู่ภายในแฮโลที่มีรูปเป็นทรงกลมซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 กิโลพาร์เซก บริเวณแฮโลจะประกอบด้วย (1) ดาวประชากรประเภทที่ 1 และ (2) กระจุกดาวทรงกลมประมาณ 120 กระจุกกระจายกันอย่างหลวม ๆ โดยที่วัตถุเหล่านี้มีวงโคจรแบนมากและมีเวลาครบรอบประมาณร้อยถึงสามร้อยล้านปี [$(1 \rightarrow 3) \times 10^8$ ปี]

ระนาบดาราจักรซึ่งมีรูปร่างเป็นวงกลมจะตัดแบ่งแฮโลออกเป็น 2 ซีก เมื่อระยะทางเข้าใกล้ระนาบดาราจักร ความหนาแน่นของจำนวนดาวจะเพิ่มขึ้น และปริมาณโลหะในดาวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ในระนาบดาราจักรขอบนอกซึ่งเป็นแผ่นจานดาราจักรมีความหนาประมาณ 1 กิโลพาร์เซก และในบริเวณใจกลางซึ่งล้อมรอบจุดศูนย์กลางจะมีความหนาแน่นดาวสูงมาก

และมวลส่วนใหญ่ของดาราจักร ($\approx 10^{11}$ $M_{\odot}$) จะอยู่ที่ใจกลางนี้ และบนแผ่นจานซึ่งมีวงโคจรเกือบเป็นวงกลม

ระนาบดาราจักรประกอบด้วยแขนกังหันซึ่งเป็นบริเวณที่หนาประมาณ 500 พาร์เซก แขนกังหันประกอบด้วยดาวประชากรประเภทที่ 1 ที่เกิดขึ้นใหม่ แต่มีอายุสั้น ดาวพวกนี้มีความสว่างมาก นอกจากนี้ในระนาบดาราจักรยังประกอบด้วยกลุ่มแก๊สไฮโดรเจนและฝุ่นซึ่งมักจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มเมฆใกล้แขนกังหัน บริเวณระหว่างแกนกังหันยังมีดาวประชากรแผ่นจานและดาวประชากรประเภทที่ 1 อยู่บ้าง

ดวงอาทิตย์ของเราเป็นดาวฤกษ์ดวงหนึ่ง นับเป็นดาวประชากรประเภทที่ 1 มีอายุประมาณห้าพันล้านปี และอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางดาราจักรประมาณ 10 กิโลพาร์เซก ในแขนกังหันแขนหนึ่ง ตามรูป 9.6 ดวงอาทิตย์ปรากฏว่าไม่ได้อยู่ในระนาบดาราจักรพอดี แต่จะอยู่เหนือขึ้นไปเล็กน้อย และมีการโคจรรอบจุดศูนย์กลางดาราจักรเกือบเป็นวงกลมด้วยเวลาครบรอบ 250 ล้านปี มีความเร็วชี้ไปในทิศลองจิจูด $\ell = 90°$




รูป 9.6 แสดงแบบจำลองของดาราจักรของเรา มองจากด้านบนจะเห็นแขนกังหันในแผ่นจาน และแสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์และนิวเคลียสของดาราจักร

## 9.6 ดาราจักรอื่น ๆ

ดาราจักรซึ่งเราทราบแล้วว่าเป็นระบบดวงดาวขนาดมหึมา นอกเหนือไปจากการมีดวงดาวจำนวนมากมายมหาศาลแล้ว ในดาราจักรหนึ่ง ๆ ยังมีแก๊สและฝุ่นที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ กระจายอยู่กันเป็นกลุ่มและเป็นกระจุกตลอดทั่วอวกาศอันกว้างใหญ่ไพศาล ดวงดาว

นับเป็นจำนวนล้าน ๆ ดวงประกอบกันเป็นทางช้างเผือก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของดาราจักรทางช้างเผือกที่ระบบ สุริยะของเราเป็นสมาชิกอยู่ด้วย นอกจากดาราจักรทางช้างเผือกแล้ว นักดาราศาสตร์ยังมองเลยออกไปนอกดาราจักรของเราและพบว่า เต็มไปด้วยดาราจักรและวัตถุอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีรูปร่างต่าง ๆ กัน ดาราจักรทั้งหมดจะเรียงตัวกันเป็นกลุ่ม ๆ หรือเป็นกระจุก แต่ละกลุ่มอาจประกอบด้วยดาราจักรเพียงสองสามดาราจักรจนถึงจำนวนหลายพันดาราจักร รูปร่างของดาราจักรต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของมวลภายในและอัตราส่วนของมวลของดาวกับแก๊สดาราจักรอื่นที่อยู่ใกล้เรามากที่สุดคือ ดาราจักรเมฆแมกเจลแลนนิก ซึ่งอยู่ห่างจากโลกของเราประมาณ 150,000 ปีแสง

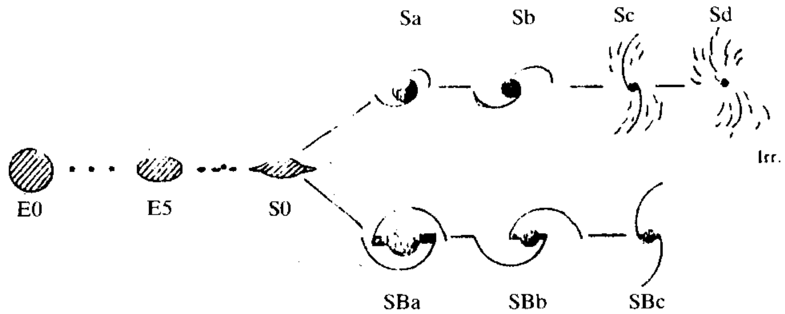
### 9.6.1 การแบ่งประเภทของดาราจักร

ในปี ค.ศ.1926 ฮับเบิลซึ่งเป็นนักดาราศาสตร์คนแรกที่ได้เสนอวิธีการแบ่งประเภทของดาราจักรออกตามรูปร่างที่ปรากฏแก่สายตา ซึ่งทำเป็นแผนภาพรูปคล้ายส้อมเสียงดังแสดงในรูป 9.5 โดยแบ่งดาราจักรออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 3 ประเภท คือ

(1) **ดาราจักรรูปวงรี (Elliptical Galaxies)**

(2) **ดาราจักรรูปกังหัน (Spiral Galaxies)**

(3) **ดาราจักรอสัณฐาน (irregular Galaxies)**




รูป 9.7 แผนภาพรูปส้อมเสียงของฮับเบิลแสดงรูปร่างของดาราจักรแบบต่าง ๆ

**(1) ดาราจักรรูปวงรี** เป็นดาราจักรที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมแป้น (Oblate Spheroid) แต่เรามองเห็นเป็นวงรีบนท้องฟ้าเพื่อแสดงความเยื้องศูนย์กลางของดาราจักร เราจะใช้อักษร E นำหน้าตัวเลขตั้งแต่ 0 ถึง 7 ดังนี้คือ ถ้าให้ a และ b เป็นระยะกึ่งแกนหลัก และกึ่งแกนรองของรูปวงรีตามลำดับ ดังนั้น $10(a - b)/a$ ก็จะแสดงเป็นความเยื้องศูนย์กลางของรูปดาราจักรที่ปรากฏแก่สายตา เช่น ดาราจักร $E_0$ จะปรากฏให้เห็นเป็นแผ่นกลมดาราจักร $E_1$ ถึง $E_7$ ก็จะมีความเยื้องศูนย์กลางมากขึ้นจนถึงความเยื้องศูนย์กลางมากที่สุดเท่าที่พบคือ $E_7$ สำหรับความเยื้องศูนย์กลางที่แท้จริงของดาราจักรจะไม่สามารถหาได้ เพราะว่าเราไม่สามารถทราบว่า

แกนของดาราจักรชี้ไปในทางทิศใด บางครั้งในกระจุกดาราจักรบางกระจุกจะมีดาราจักรรูปวงรีขนาดใหญ่ที่เรียกว่าดาราจักรวงรียักษ์ เช่นดาราจักรวงรียักษ์แบบ D ซึ่งมีนิวเคลียสเป็นรูปวงรี นอกจากนี้ดาราจักรรูปวงรีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะพบว่าเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุด้วย

(2) **ดาราจักรรูปกังหัน** นักดาราศาสตร์พบว่า ดาราจักรส่วนมากจะมีรูปร่างแบบ

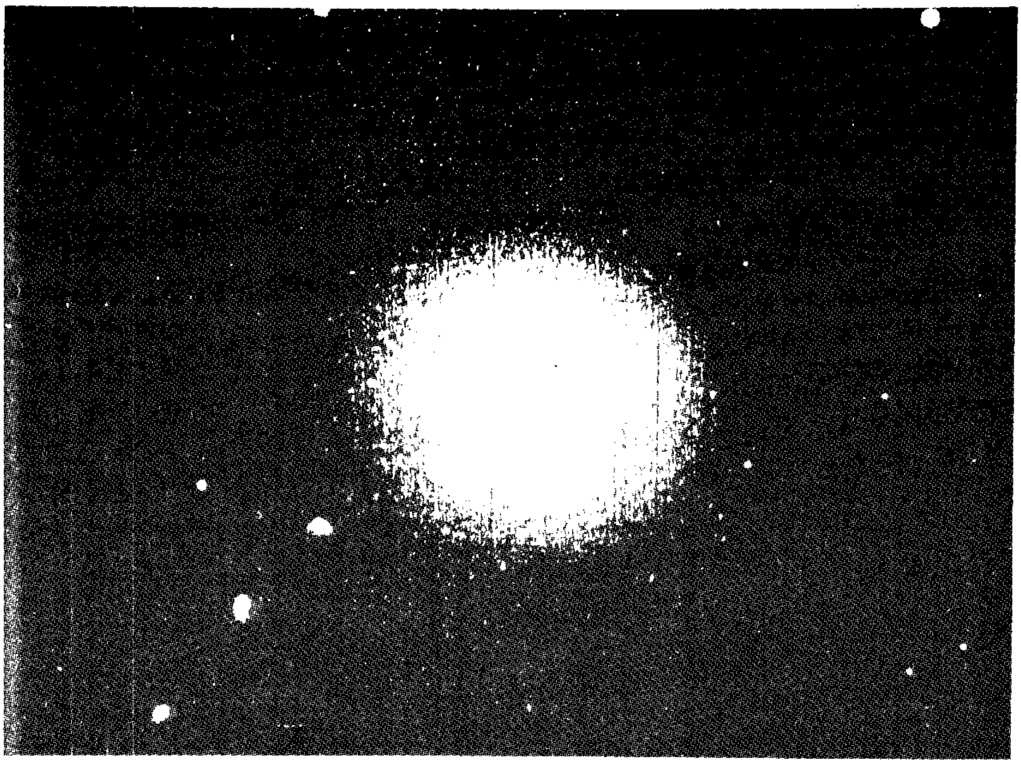
รูป 9.8 ดาราจักรแอนโดรมีดา ซึ่งเป็นดาราจักรรูปกังหันมีลักษณะเช่นเดียวกับดาราจักรทางช้างเผือกของเรา แต่มีขนาดใหญ่กว่า

กังหันรวมทั้งดาราจักรทางช้างเผือกด้วย ดาราจักรรูปกังหันมีสองชนิดคือ ชนิดปกติ (Normal) และชนิดแขนกังหันมีแกน (Barred) ดาราจักรทั้งสองชนิดมีแขนเป็นรูปกังหัน โดยมากจะมี 2 แขนที่สมมาตรกัน ในดาราจักรกังหันปกติแขนกังหันจะชี้ออกจากนิวเคลียสโดยตรง แต่ในดาราจักรกังหันชนิดมีแกน แขนกังหันจะชี้ออกจากปลายแท่งแกนที่พาดผ่านจุดศูนย์กลาง นอกจากนี้ดาราจักรกังหันทั้งสองชนิดยังแบ่งย่อยออกเป็นแบบ a, b, c และ d ซึ่งแบ่งตาม (ก) ความแน่นของการขดของแขนกังหัน (ข) ความชัดเจนของการเห็นแขนกังหัน และ (ค) ขนาดของนิวเคลียส ดาราจักรกังหันชนิดปกติจะใช้อักษร S นำหน้า เช่น ดาราจักรกังหันปกติแบบ Sa จะมีแขนกังหันที่พันแน่นรอบนิวเคลียสจนเกือบจะเป็นวงแหวน ดาราจักรกังหันแบบ Sb มีแขนคลายหลวมขึ้น และเราจะมองเห็นบริเวณ HII และสมาคมดาวในแขน ดาราจักรแบบ Sc จะมีแขนคลายหลวมยิ่งขึ้น และมีนิวเคลียสเล็กมาก เราจะมองเห็นดาวอยู่รวมกันเป็นกลุ่มมากยิ่งขึ้น สำหรับดาราจักรชนิดมีแกนใช้อักษร SB นำหน้า เช่น ดาราจักรแบบ SBa, SBb และ SBc ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแบบ Sa, Sb และ Sc ตามลำดับ แต่ต่างกันตรงที่ดาราจักรแบบ SB มีแกนพาดกลางนิวเคลียส แต่ดาราจักรแบบ S ไม่มี

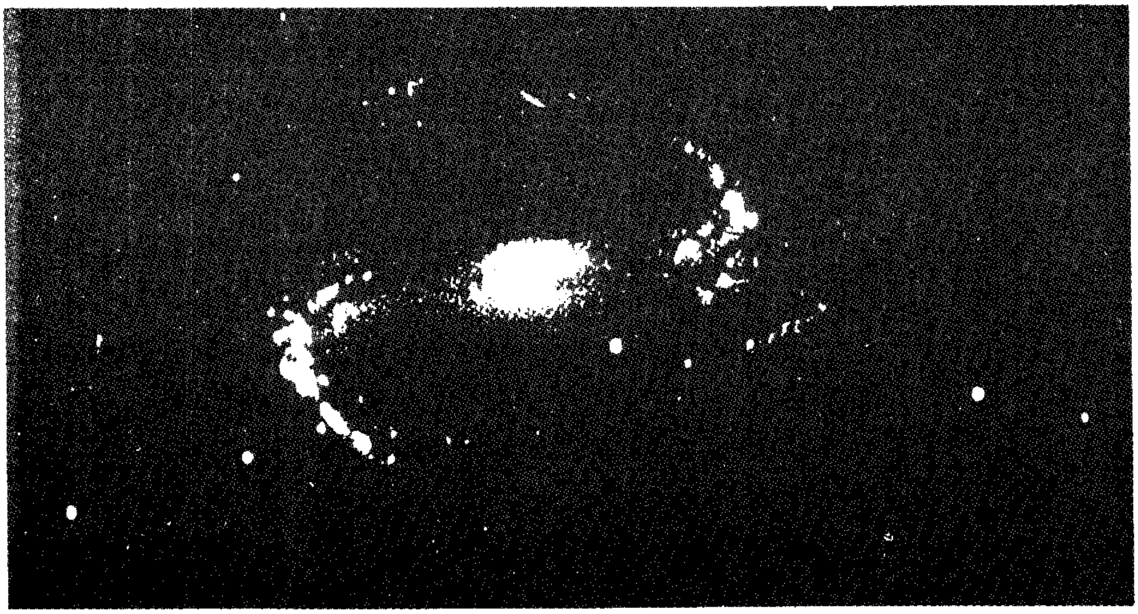
ยังมีดาราจักรอีกแบบหนึ่งซึ่งเป็นแบบพิเศษ เรียกว่าแบบ So ดาราจักรแบบ So เป็นดาราจักรที่มีรูปร่างอยู่ระหว่างกลางของดาราจักรวงรี $E_7$ และดาราจักรรูปกังหัน Sa และ SBa โดยที่ดาราจักรแบบ So จะมีความเยื้องศูนย์กลางมากกว่าแบบ $E_7$ แต่ว่าไม่ใช่ดาราจักรรูปวงรี เพราะว่ามันมีนิวเคลียสเป็นรูปคล้ายเลนซ์ และมีแผ่นจานแบนคาดกลางซึ่งไม่ปรากฏในดาราจักรรูปวงรี

(3) **ดาราจักรอสัณฐาน** เป็นดาราจักรที่ไม่มีรูปร่างแน่นอนแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ (i) ดาราจักรอสัณฐาน I (IrrI) จะประกอบด้วยดาวประเภท O และ B และบริเวณ HII ตัวอย่างเช่น ดาราจักรเมฆแมกเจลแลนนิกทั้งสอง ในดาราจักรอสัณฐานบางดาราจักรอาจปรากฏแขนกังหันให้เห็นได้ราง ๆ (ii) ดาราจักรอสัณฐาน II (IrrII) เป็นดาราจักรที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน และไม่ปรากฏให้เห็นดาวแยกออกเป็นดวง ๆ แต่ประกอบด้วยแก๊สและฝุ่นเป็นปริมาณมาก ตัวอย่างเช่น ดาราจักร M82

ยังมีดาราจักรรูปร่างประหลาดอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นระบบดาราจักรที่มีความหนาแน่นมาก จัดเป็นประเภทอัดแน่น (Compact) คือมีขนาดเล็กแต่มีความสว่างมากจนมองดูคล้ายกับว่าเป็นดาวดวงหนึ่งมากกว่าจะเป็นดาราจักร ในบางครั้งอาจมีบริเวณแสงสลัวอยู่ล้อมรอบนิวเคลียสที่สว่างมาก แต่เมื่อใช้กล้องสเปกโทรสโกปวิเคราะห์จึงทราบว่าเป็นดาราจักรที่มีโครงสร้างหนาแน่นมาก



(ก) ดาราจักรรูปวงรี



(ข) ดาราจักรรูปกังหันมีแกนพาดผ่านศูนย์กลาง เป็นชนิด SB (NGC 1300)

รูป 9.9 แสดงรูปร่างของดาราจักร (ก) ชนิดรูปวงรี (ข) รูปกังหันที่มีแกนพาดผ่านศูนย์กลาง

ในบรรดาดาราจักรประเภทต่าง ๆ ยังมีดาราจักรบางประเภทส่งคลื่นวิทยุกำลังสูงออกมา เราเรียกว่าดาราจักรวิทยุ (Radio Galaxy) ซึ่งมีลักษณะแปลกประหลาด เช่นมีกลุ่มเมฆและทางยาวของละอองฝุ่นพุ่งตัวออกมา หรือไม่ก็มีแก๊สที่มีความร้อนสูงเป็นทางยาวพุ่งตัวออกมาจากจุดศูนย์กลางของดาราจักร จากโครงสร้างแปลกประหลาดนี้รวมกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องสเปกโทรสโกปแสดงให้เห็นว่า บริเวณภายในใจกลางของดาราจักรประเภทนี้มีการระเบิดอย่างรุนแรง

ในปี ค.ศ.1953 นักดาราศาสตร์ชาวออสเตรเลียเป็นคนแรกที่ตรวจพบคลื่นวิทยุความยาวคลื่น 21 ซม. ส่งออกมาจากกลุ่มเมฆไฮโดรเจนในอวกาศขณะทำการศึกษาดาราจักรเมฆแมกเจลแลนนิก และต่อมานักดาราศาสตร์คนเดียวกันนี้ได้ทำการค้นหาการกระจายตัวของไฮโดรเจนด้วยคลื่นวิทยุ เขาพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในดาราจักรเมฆแมกเจลาแลนนิกใหญ่มีอยู่ประมาณร้อยละสิบของมวลทั้งหมดของดาราจักรดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนทั้งหมดในดาราจักรเมฆแมกเจลแลนนิกเล็กมีน้อยกว่าในดาราจักรเมฆแมกเจลแลนนิกใหญ่

### 9.6.2 กระจุกดาราจักร

ดาราจักรส่วนใหญ่จะปรากฏอยู่รวมกันเป็นกระจุก ประมาณกันว่าอย่างน้อยครึ่งหนึ่งของดาราจักรทั้งหมดจะเป็นสมาชิกในกระจุกดาราจักร เช่น ดาราจักรทางช้างเผือกก็เป็นสมาชิกของกระจุกดาราจักรที่เรียกว่ากลุ่มท้องถิ่น (Local Group) ซึ่งมีสมาชิกทั้งหมดอยู่ประมาณ 24 ดาราจักร ส่วนใหญ่เป็นดาราจักรรูปวงรีแคระและดาราจักรอสัณฐาน แต่ก็ยังมีดาราจักรรูปกังหัน ได้แก่ ดาราจักรทางช้างเผือก ดาราจักร M31 และ M33

นักดาราศาสตร์ชื่อ แอเบลล์ (G.O. Abell) ได้แบ่งกระจุกดาราจักรออกเป็นแบบปกติ (Regular) และแบบไม่ปกติ (Irregular) กระจุกดาราจักรแบบปกติโดยมากจะมีขนาดใหญ่รูปร่างมีสมมาตรเชิงทรงกลม ซึ่งดาราจักรจะอยู่รวมกันมากในบริเวณศูนย์กลาง กระจุกดาราจักรแบบปกติประกอบด้วยสมาชิกดาราจักรหลายพันดาราจักร โดยมีประมาณหนึ่งพันดาราจักรที่มีความสว่างมากกว่าโชติมาตรสัมบูรณ์ - 15 สมาชิกส่วนใหญ่จะเป็นดาราจักรรูปวงรี หรือ So

ดาราจักรแบบไม่ปกติโดยมากจะมีขนาดเล็กและประกอบด้วยกระจุกย่อย ๆ หลายกระจุกอยู่รวมกันอย่างหลวม ๆ หรือบางทีเป็นกระจุกขนาดใหญ่แต่มีสมาชิกจำนวนน้อย ตัวอย่างเช่น กลุ่มดาราจักรท้องถิ่น ซึ่งแยกกันอยู่เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มที่อยู่ใกล้ดาราจักรทางช้างเผือกกลุ่มหนึ่ง และอยู่ใกล้ดาราจักรแอนโดรเมดา (M31) อีกกลุ่มหนึ่ง

## แบบฝึกหัดที่ 9

9.1 จงอธิบายวิธีการสำรวจดาราจักรทางช้างเผือกโดยการใช้ความยาวคลื่นในช่วงที่มองเห็นได้และโดยการใช้ความยาวคลื่นวิทยุ และทำไมการสำรวจด้วยคลื่นวิทยุจึงดีกว่าการสำรวจด้วยคลื่นที่มองเห็นได้

9.2 ทำไมบริเวณแฮโลของดาราจักรจึงประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นดาวฤกษ์ประชากรประเภทที่ 2 ในขณะที่บริเวณแขนกังหันของดาราจักรรูปกังหันประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นดาวฤกษ์ประชากรประเภทที่ 1 หรือเป็นดาวเกิดใหม่ และทำไมที่บริเวณใจกลางของดาราจักรจึงพบดาวประชากรทั้งสองประเภทปนกันอยู่

9.3 กระจุกดาวทรงกลมกระจุกหนึ่งมีวงโคจรรูปวงรี $(e = 0.9)$ รอบจุดศูนย์กลางดาราจักร และมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางมากที่สุดเท่ากับ 20 kpc จงหาระยะที่อยู่ใกล้จากศูนย์กลางมากที่สุด และคาบของการโคจร

9.4 กำหนดให้แอลเอสอาร์โคจรรอบจุดศูนย์กลางดาราจักรเป็นวงกลมด้วยอัตราเร็ว 250 กิโลเมตรต่อวินาที จงหาอัตราเร็วหลุดพ้นจากดาราจักรของดาวในบริเวณใกล้เคียงกับดวงอาทิตย์

9.5 ถ้าถือว่าใจกลางของดาราจักรเป็นกระจุกดาวทรงกลมขนาดใหญ่ที่มีรัศมี $R$ และความหนาแน่นสม่ำเสมอ $\rho$

(ก) จงหามวล $(M)$ ของกระจุกดาวนี้

(ข) จงหามวลที่อยู่ภายในทรงกลมที่มีรัศมี $r < R$

(ค) จงหาอัตราเร็วเชิงมุม $w$ ของดาวที่โคจรเป็นวงกลม รัศมี $r(< R)$ รอบจุดศูนย์กลางของกระจุกดาว

(ง) คำตอบในข้อ (ค) แสดงถึงการหมุนแบบวัตถุเกร็งหรือไม่

9.6 ถ้าระยะทางจากดวงอาทิตย์ถึงใจกลางดาราจักรมีค่าเป็น 10 kpc และคาบการหมุนของดาราจักรมีค่าเท่ากับ 250 ล้านปี จงคำนวณอัตราเร็วเชิงเส้นของดวงอาทิตย์ในวงโคจรรอบจุดศูนย์กลางดาราจักร

9.7 สมมติว่าดาราจักรของเรามีมวล $1.5 \times 10^{11}\ M_{\odot}$ และมวลทั้งหมดนี้อยู่รวมกันที่จุดศูนย์กลาง

(ก) จงเขียนเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว $v$ เทียบกับ $R$ ของดาราจักร

(ข) จงหาคาบของการหมุนที่ $R = 5, 10, 15$ และ 20 kpc

(ค) จงหาอัตราเร็วหลุดพ้นที่ $R = 10$ kpc

9.8 ดาวดวงหนึ่งโคจรรอบจุดศูนย์กลางดาราจักรในวงโคจรแบบเคเปลอร์ที่มีความเยื้องศูนย์กลาง 0.8 และระยะกึ่งแกนหลักเป็น 7 kpc มีจุดอโพกาแลกติคอน (ระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมากที่สุด) ของวงโคจรอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับดวงอาทิตย์ จงหาความเร็วเฉพาะตัวของดาวเทียบกับแอลเอสอาร์ เมื่อมันอยู่ที่จุดอโพกาแลกติคอน

9.9 ถ้าดวงอาทิตย์อยู่ที่จุดศูนย์กลางของดาราจักรทางช้างเผือกซึ่งอยู่ไกลจากโลก 10 kpc จงหาค่าโชติมาตรปรากฏของดวงอาทิตย์

9.10 ถ้าดาราจักรทางช้างเผือกประกอบด้วยดาวทั้งหมด $1.5 \times 10^{11}$ ดวง และสมมติว่าดาวทุกดวงมีโชติมาตรสัมบูรณ์เท่ากันหมดคือ $M_{bol} = 4.7$ จงหาโชติมาตรสัมบูรณ์ของทั้งดาราจักรและเปรียบเทียบคาที่ได้กับโชติมาตรปรากฏของดวงอาทิตย์

9.11 เราจะมีวิธีอย่างไรที่จะใช้คลื่นวิทยุความยาวคลื่น 21 เซนติเมตร ซึ่งปล่อยออกมาจากกลุ่มแก๊สไฮโดรเจนในอวกาศเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่เชิงอนุพันธ์ของดาราจักร และการศึกษาการหมุนของดาราจักร ณ บริเวณที่อยู่ไกลจากระบบสุริยะมาก ๆ นั้น สามารถทำได้อย่างไร

9.12 ถ้าดาราจักรทางช้างเผือกและดาราจักรแอนโดรเมดา ($M_{31}$) เป็นระบบดาราจักรคู่ และต่างก็โคจรรอบซึ่งกันและกันเป็นเส้นทางรูปวงกลม จงหา

(ก) ระยะทางของจุดศูนย์มวลวัดจากดาราจักรทางช้างเผือก

(ข) คาบของการโคจร

---