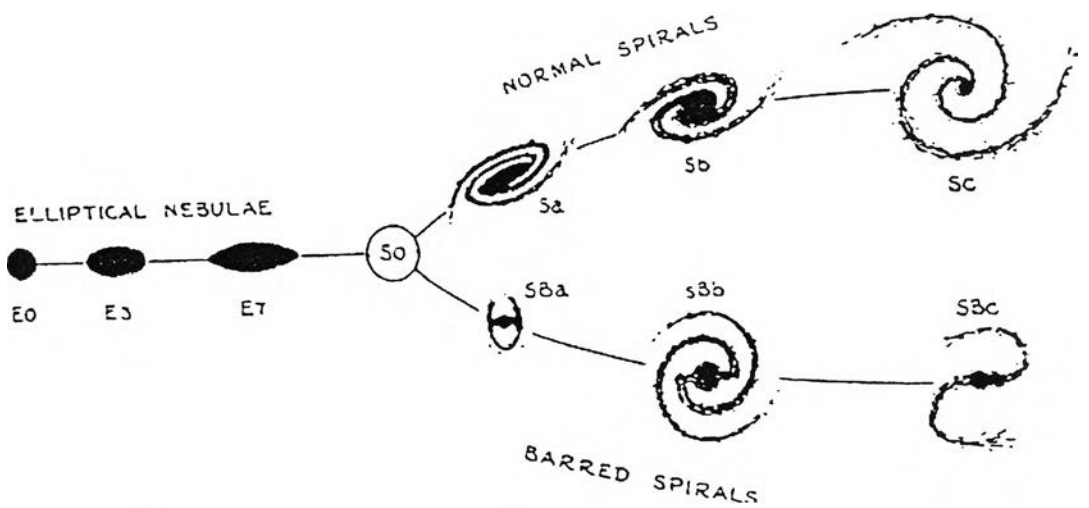
บทที่ 2

ดาราจักรและอันตรกิริยาระหว่างดาราจักร

2.1 ดาราจักร

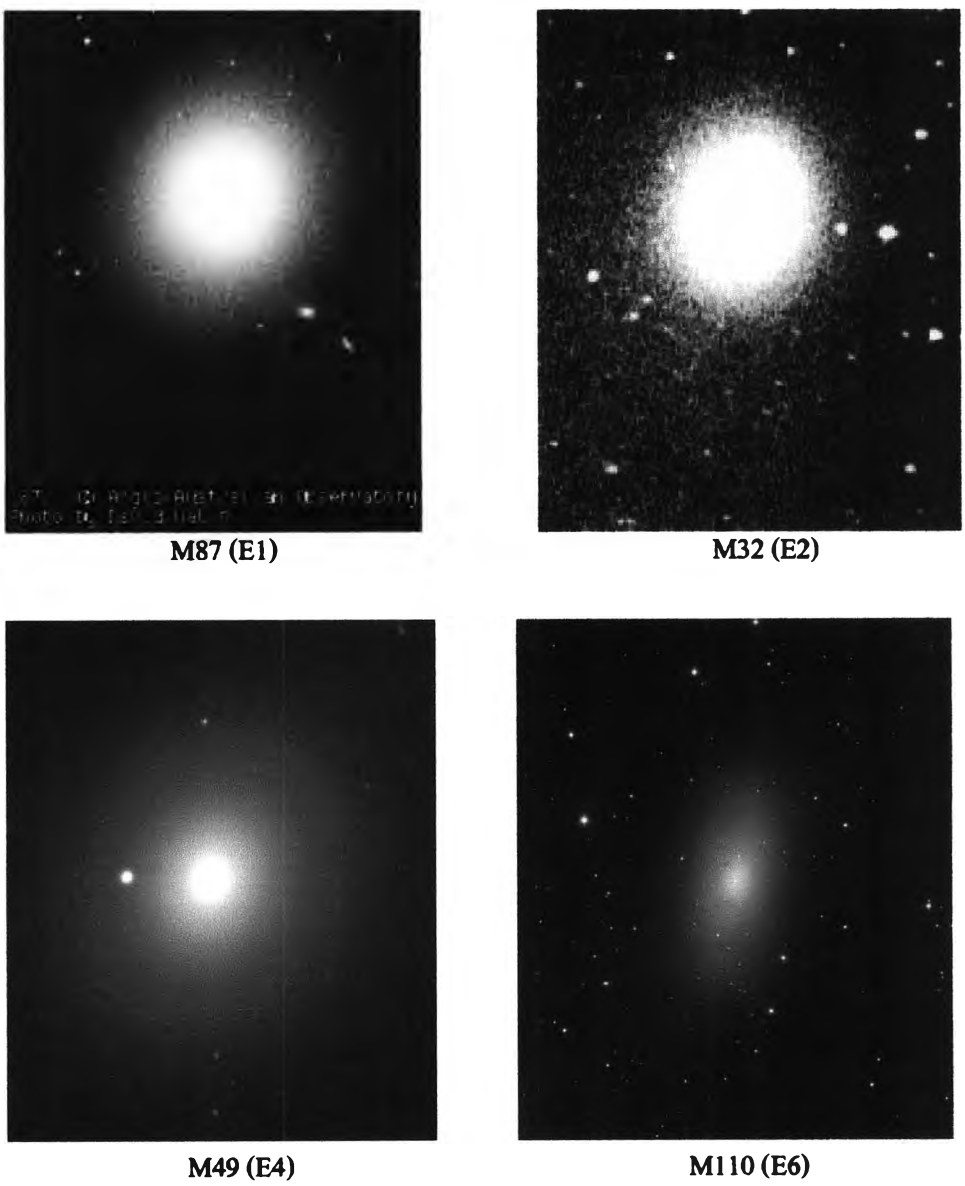
ระบบของวัตถุต่างๆในจักรวาลไม่ว่าจะเล็กหรือใหญ่ตั้งแต่ระบบสุริยะจนถึงดาราจักรและกระจุกดาราจักร สามารถรวมตัวกันอยู่ได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง โดยแรงโน้มถ่วงนี้ทำให้วัตถุต่างๆรวมตัวกันเป็นระบบที่ใหญ่ขึ้น ในการรวมตัวกันเป็นระบบที่ใหญ่ขึ้นวัตถุต่างๆภายในระบบต่างก็ออกแรงดึงดูดโน้มถ่วงกระทำต่อกัน ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงวัตถุเหล่านั้นให้เคลื่อนที่ไปเป็นวงโคจรรูปแบบต่างๆ

ดาราจักรเป็นระบบของดาวฤกษ์ขนาดใหญ่ นอกจากดาวฤกษ์แล้วดาราจักรยังประกอบไปด้วยฝุ่น กลุ่มก๊าซ และอนุภาคต่างๆมากมาย การจำแนกรูปร่างของดาราจักรมีหลายวิธี วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือระบบการจำแนกแบบฮับเบิล (Hubble's classification scheme)(รูปที่ 2.1) ดาราจักรจะแบ่งออกเป็น ดาราจักรทรงรี(Ellipticals, E) ดาราจักรเลนส์(Lenticulars, S0) ดาราจักรเกลียว(Spirals, S) และดาราจักรไร้รูปทรง(Irregulars, Irr) เรียงลำดับจากซ้ายไปขวาของแผนภาพในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพแบบง่ามของฮับเบิล (Hubble's tuning-fork diagram)(ภาพจาก[3])

ดาราจักรทรงรี(รูปที่ 2.2) จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ E0 ถึง E7 ขึ้นกับความรีของดาราจักร โดย E0 มีความรี(ellipticity)น้อยที่สุดคือจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วน E7 จะมีความรีมากที่สุด อัตราส่วนของดาราจักรทรงรีต่อดาราจักรทั้งหมดมีค่าตั้งแต่ 10% ในบริเวณที่มีความหนาแน่นของดาราจักรต่ำ ไปจนถึง 40% ในบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงของกระจุกดาราจักร องค์ประกอบภายในของดาราจักรทรงรีมักไม่พบดาวที่มีอายุน้อย และมีองค์ประกอบที่เป็นฝุ่นและก๊าซน้อย[5]



M87 (E1) M32 (E2)

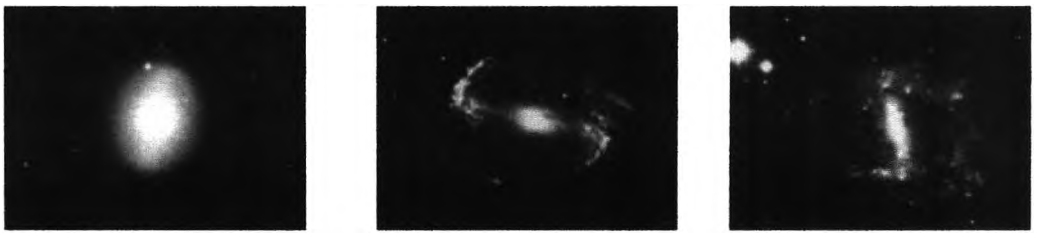
M49 (E4) M110 (E6)

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างดาราจักรทรงรี[6] สัญลักษณ์นอกวงเล็บคือชื่อวัตถุตามระบบเมสสิเออร์

ดาราจักรเกลียว(รูปที่ 2.3) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นแก่นซึ่งมีลักษณะเป็นกระเปาะวงรีที่มีความสว่างมาก ส่วนที่เป็นแผ่นจานกลม(disc)บางๆรอบแก่น และส่วนฮาโล(halo)ซึ่งอยู่บริเวณทรงกลมรอบๆดาราจักร บริเวณแก่นจะเป็นบริเวณที่มีความสว่างและความหนาแน่นของดาวมากที่สุด บริเวณแผ่นจานกลมจะมีโครงสร้างแขนเกลียว(spiral arms) ซึ่งในบริเวณนี้จะปรากฏกลุ่มก๊าซและฝุ่นจำนวนมากและดาวส่วนใหญ่ก็มีอายุไม่มากนัก ส่วนบริเวณฮาโลจะมีความหนาแน่นของดาวน้อยกว่าบริเวณอื่นมากและมักจะเป็นดาวที่มีอายุมาก พบว่า 80% ของดาราจักรในบริเวณที่มีความหนาแน่นของดาราจักรต่ำจะเป็นดาราจักรเกลียว แต่จะมีสัดส่วนเพียง 10% ในบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงเช่นบริเวณแก่นของกระจุกดาราจักร[5] ดาราจักรเกลียวแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ดาราจักรเกลียวธรรมดา(normal spiral galaxies) แทนด้วยสัญลักษณ์Sa, Sb, Sc และดาราจักรเกลียวแบบแท่ง(barred spiral galaxies)(รูปที่ 2.4) ซึ่งบริเวณแก่นของดาราจักรจะมีโครงสร้างแท่งพาดอยู่ ส่วนปลายของแท่งนี้จะเชื่อมต่อกับแขนเกลียว ดาราจักรเกลียวแบบแท่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์ SBa, SBb, SBc สัญลักษณ์อักษรตัวเล็กจาก a ถึง c จะบอกถึงอัตราส่วนของขนาดของแก่นเทียบกับขนาดของแผ่นจานกลมที่ลดลง สัดส่วนของก๊าซ ฝุ่น และดาวอายุน้อยที่เพิ่มขึ้น แขนเกลียวที่แยกออกจากกันชัดเจนมากขึ้น และความสว่างที่ลดลง[1]

M104(Sa) M101(Sc)

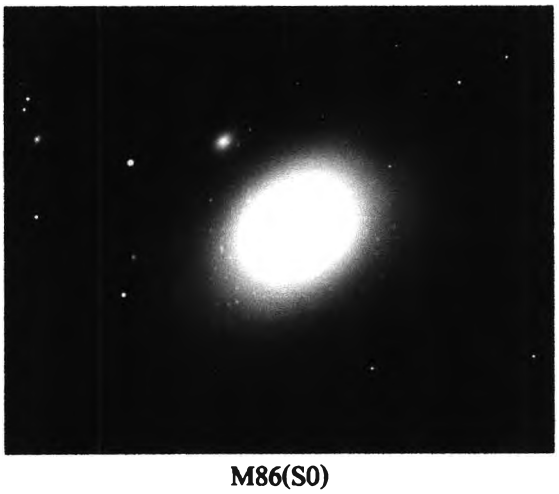
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างดาราจักรเกลียว[6]



NGC 1291 (SBa) NGC 1300 (SBb) NGC 7741 (SBc)

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างดาราจักรเกลียวแบบแท่ง[7] สัญลักษณ์นอกวงเล็บเป็นชื่อวัตถุตามระบบรายชื่อทั่วไปแบบใหม่(New General Catalog)

ช่วงรอยต่อระหว่างดาราจักรทรงรีและดาราจักรเกลียวคือดาราจักรเลนส์(รูปที่ 2.5) ดาราจักรชนิดนี้จะมีแก่นกลางขนาดใหญ่ และก็มีแผ่นจานกลมโดยรอบเหมือนกับดาราจักรเกลียว แต่ไม่ปรากฏลักษณะของแขนเกลียว ก๊าซ ฝุ่น และดาวอายุน้อย ดาราจักรเลนส์นี้จะพบน้อยในบริเวณที่มีความหนาแน่นของดาราจักรต่ำ โดยมีอัตราส่วนเพียง 10 % ของดาราจักรทั้งหมดแต่จะมีสัดส่วนถึงครึ่งหนึ่งในบริเวณที่มีความหนาแน่นของดาราจักรสูง[5]



M86(S0)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างดาราจักรเลนส์[6]

ยังมีดาราจักรอีกประเภทที่ไม่สามารถจัดเข้ากับดาราจักรประเภทต่างๆข้างต้นได้ เรียกดาราจักรแบบนี้ว่าดาราจักรไร้รูปทรง(Irr) สมาชิกส่วนหนึ่งของดาราจักรไร้รูปทรงคือดาราจักรเกลียวและดาราจักรวงรีที่เพิ่งจะผ่านการเกิดอันตรกิริยามา แต่สมาชิกส่วนใหญ่จะเป็นพวกที่มีความสว่างน้อยและประกอบด้วยก๊าซจำนวนมากดังเช่นเมฆแมกเจลแลนใหญ่(Large Magellanic

Cloud) (รูปที่ 2.6) ดาราจักรไร้รูปทรงกลุ่มนี้จะใช้สัญลักษณ์ Im หรือ Sm กำลังส่องสว่าง (luminosity)ของ Im จำนวนมากมาจากดาวมวลมากที่มีอายุน้อย และกลุ่มก๊าซไฮโดรเจนขนาดใหญ่ (large HII regions) บ่อยครั้งที่จะพบสสารระหว่างดาวมีอัตราส่วนถึง 30% ของมวลสารทั้งหมดในดาราจักรแบบนี้[5]

รูปที่ 2.6 เมฆแมกเจลแลนใหญ่[6]

2.2 อันตรกิริยาระหว่างดาราจักร

ดาราจักรต่างๆไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในจักรวาล ส่วนใหญ่จะรวมตัวกันเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ตั้งแต่ระบบคู่ขึ้นไป ถ้าดาราจักรรวมกันเป็นกลุ่มขนาดเล็กจะเรียกว่ากลุ่มดาราจักร(groups of galaxies) ถ้ามีจำนวนสมาชิกมากจะเรียกว่ากระจุกดาราจักร(clusters of galaxies)ซึ่งอาจมีจำนวนสมาชิกถึงหลักพัน ดาราจักรทางช้างเผือกของเราเป็นดาราจักรแขนเกลียวแบบแท่งและอยู่ในกลุ่มที่เรียกว่ากลุ่มท้องถิ่น(local group) ซึ่งมีจำนวนสมาชิก 30 ถึง 40 ดาราจักร ตัวอย่างของดาราจักรในกลุ่มท้องถิ่นนี้เช่น ดาราจักรแอนโดรเมดา กลุ่มเมฆแมกเจลแลน เป็นต้น ซึ่งในขณะนี้ดาราจักรทางช้างเผือกอยู่ในกระบวนการที่กำลังกลืนดาราจักรทรงรีแคระซาจิตทาริอัส (Sagittarius dwarf elliptical galaxy)

ข้อแตกต่างระหว่างดาราจักรและกระจุกดาราจักรที่สำคัญประการหนึ่งคืออัตราส่วนปริมาตร(fractional volume) อัตราส่วนปริมาตรของดาราจักรเทียบกับกระจุกดาราจักรมีค่าประมาณ 10^{-3} ในขณะที่อัตราส่วนปริมาตรของดาวเทียบกับดาราจักรมีค่าประมาณ 10^{-22} จะเห็นว่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของกระจุกดาราจักรมีค่ามากกว่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของดาราจักรมาก

ดังนั้นอันตรกิริยาระหว่างดาราจักรภายในกระจุกดาราจักรจึงเกิดได้มากกว่าและมีความสำคัญมากกว่าอันตรกิริยาระหว่างดาวภายในดาราจักร[5]

2.2.1 การจำแนกรูปประเภทของดาราจักรรูปร่างประหลาด

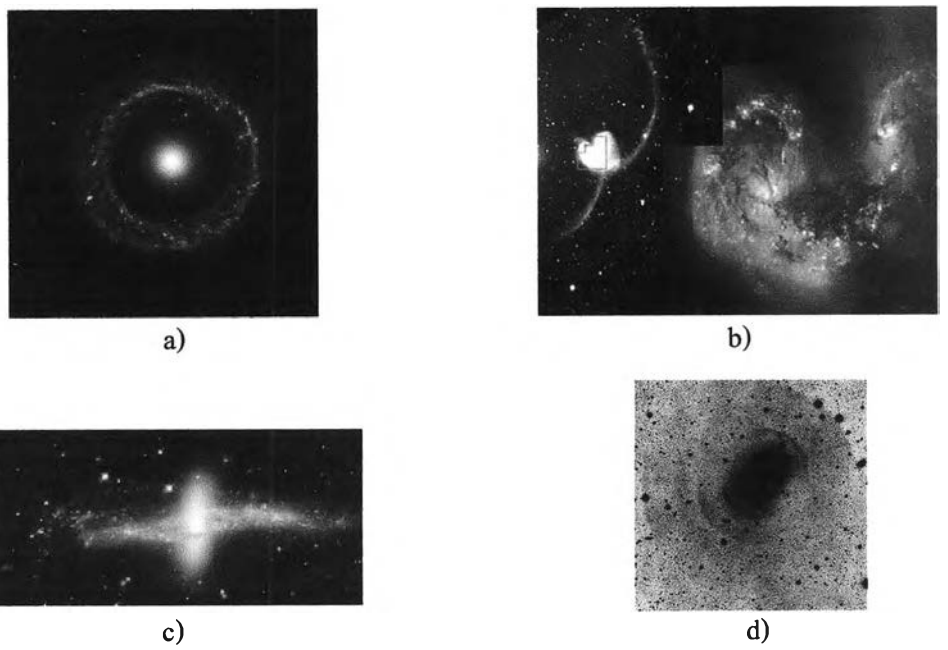
เมื่อดาราจักรเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากจนต่างก็ออกแรงรบกวนซึ่งกันและกัน แรงรบกวนจะทำให้รูปร่างของดาราจักรเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงไป บางครั้งเกิดเป็นรูปร่างที่แปลกประหลาด เรียกดาราจักรเหล่านี้ว่าดาราจักรรูปร่างประหลาด รูปร่างของดาราจักรรูปร่างประหลาดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของดาราจักรและพารามิเตอร์ของกระบวนการเกิดอันตรกิริยา เช่นอัตราส่วนมวลระหว่างดาราจักรที่ชนกัน ทิศทางการชน ความเร็วสัมพัทธ์ ระยะเข้าใกล้ เป็นต้น เราสามารถจำแนกรูปร่างประหลาดออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ(รูปที่ 2.9) ดังนี้

1) กลุ่มดาราจักรวงแหวน (Ring Galaxies) เป็นกลุ่มที่วิถีการชนของดาราจักรตัวรบกวนเกือบตั้งฉากกับระนาบของดาราจักรเป้าและผ่านใกล้จุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้า ซึ่งถือเป็นการชนที่มีความเร็วสูง ผลการรบกวนจากการชนจะเกิดขึ้นเล็กน้อย โดยจะมีการสั่นของดาวในแนวรัศมีทำให้เกิดคลื่นความหนาแน่น(density wave)เคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้า บริเวณยอดคลื่นนี้ก็คือโครงสร้างวงแหวนของดาราจักรนั่นเอง

2) กลุ่มดาราจักรแบบสะพานและหาง (Bridges and Tails) ความเร็วการชนจะน้อยกว่ากลุ่มแรก การรบกวนจะทำให้โครงสร้างของดาราจักรถูกยืดยาวออกโดยแรงไทดัล ส่วนโครงสร้างยืดยาวที่อยู่บริเวณเชื่อมต่อระหว่างดาราจักรที่ชนกันเรียกว่าสะพาน ส่วนด้านไกลของดาราจักรทั้งสองเรียกว่าหาง

3) กลุ่มดาราจักรวงแหวนแบบมีขั้ว (Polar Ring Galaxies) กลุ่มนี้การชนจะคล้ายกับกลุ่มที่ 2 แต่ว่าความแตกต่างของมวลของดาราจักรทั้งสองจะมีค่ามากๆ ขนาดของแรงรบกวนจากดาราจักรที่มีมวลมากกว่ามีค่ามาก จะดึงโครงสร้างของดาราจักรมวลน้อยให้ยืดออก หลังจากนั้นดาวเหล่านี้ก็จะไปโคจรรอบดาราจักรมวลมากแทน เกิดเป็นวงแหวนล้อมรอบดาราจักรจานแบนมวลมาก

4) กลุ่มดาราจักรแบบมีเปลือก (Shell Galaxies) เป็นกรณีของดาราจักรวงรีชนกับดาราจักรจานแบนที่มีมวลน้อยกว่ามากๆ วิถีการชนจะคล้ายกับกลุ่มแรกคือมีวิถีค่อนข้างตรง แรงดึงดูดของดาราจักรวงรีมวลมากจะดูดเอาดาวจากดาราจักรจานแบนมาโคจรรอบตัวมันเองทำให้เกิดชั้นของดาวคล้ายเปลือกหุ้มอยู่รอบดาราจักรวงรี



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างดาราจักรที่เกิดอันตรกิริยารูปแบบต่างๆ a) วัตถุของโฮก (Hoag's object) เป็นตัวอย่างกลุ่มดาราจักรวงแหวน[9] b) ดาราจักรหนวดแมลง(Antennae) อยู่ในกลุ่มสะพานและหาง[10] c) NGC 4605 ตัวอย่างวัตถุในกลุ่มดาราจักรวงแหวนแบบมีขั้ว[11] d) NGC 3923 เป็นตัวอย่างของดาราจักรแบบมีเปลือก[12]

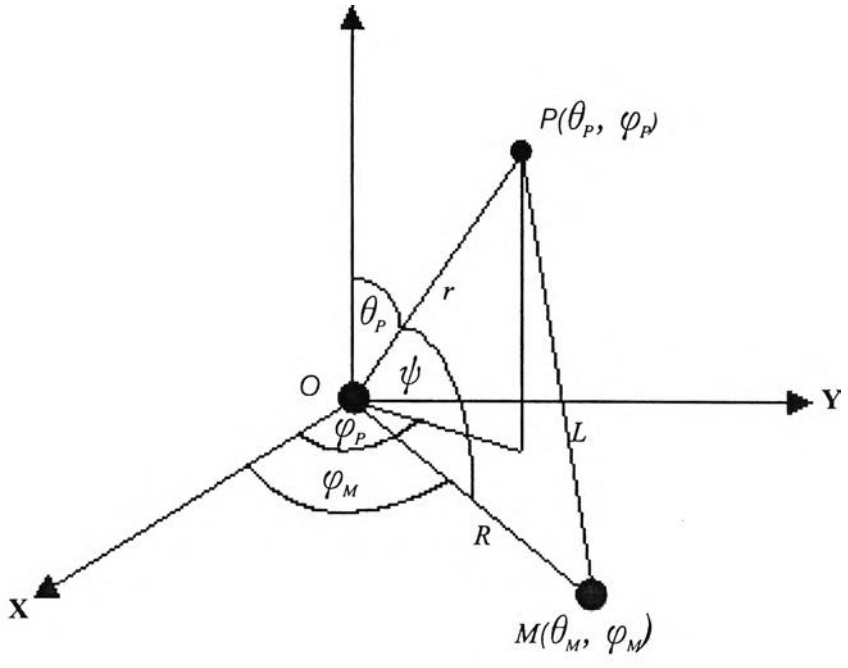
2.2.2 แรงไทดัล[1][8]

โครงสร้างสะพานและหางของดาราจักรเกิดขึ้นได้อย่างไรเราจะอธิบายด้วยแรงไทดัล พิจารณาดาราจักรมวล M (ดาราจักรตัวรบกวน)ที่ตำแหน่ง(θ_M, φ_M) อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง O ของดาราจักรที่ถูกรบกวน(ดาราจักรเป้า)ด้วยระยะทาง R (รูปที่ 2.8) ให้จุด $P(\theta_P, \varphi_P)$ เป็นดาวที่โคจรอยู่โดยรอบแก่นของดาราจักรเป้า มีระยะห่างจากจุด O และจุด M เป็นระยะทาง r และ L ตามลำดับ

ศักย์ที่ตัวรบกวนกระทำต่อจุด P คือ

$$V = -GM(r^2 + R^2 - 2rR\cos\psi)^{-1/2} \qquad (2.1)$$

เมื่อ ψ คือมุมที่วัดระหว่าง r และ R G คือค่าคงที่ความโน้มถ่วงสากล ดาราจักรตัวรบกวนไม่ได้ออกแรงกระทำต่อจุด P เท่านั้น แต่ยังออกแรงกระทำต่อแก่นของดาราจักรเป้าด้วย เพราะฉะนั้นถ้าให้จุด O เป็นจุดศูนย์กลางของกรอบอ้างอิง แรงเฉื่อยที่กระทำต่อกรอบอ้างอิงนี้คือ $-GM\mathbf{u}/R^2$ เมื่อ $\mathbf{u}$



รูปที่ 2.8

เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยชี้จากจุด O ไปยัง M ดังนั้นศักย์อันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยสำหรับอนุภาคที่จุด P คือ $GMR^{-2}r\cos\psi$ ถึงตอนนี้เราสามารถแสดงศักย์ของแรงไทดัล ณ จุดใดๆของดาราจักรเป้าในกรอบอ้างอิงของ O เป็น

$$V_{tide} = -GM\,(r^2 + R^2 - 2rR\cos\psi)^{-1/2} + GMR^{-2}r\cos\psi \qquad (2.2)$$

ถ้า $R >> r$ และวัตถุทุกชิ้นอยู่ในระนาบเดียวกันแล้ว สมการข้างต้นสามารถกระจายแบบทวินามได้

$$V_{tide} = -\frac{GM}{R}\left(1 + \frac{r}{R}\cos\psi + \frac{3r^2}{4R^2}\cos 2\psi + \frac{r^2}{4R^2} + \cdots\right) + \frac{GM\,r}{R^3}\cos\psi$$

$$= constant - \frac{GM}{R}\frac{r^2}{R^2}\left(\frac{1}{4} + \frac{3}{4}\cos 2\psi\right) + O\left(\frac{r^3}{R^3}\right) \qquad (2.3)$$

แรงไทดัล(ในวิทยานิพนธ์นี้เมื่อกล่าวถึงแรงจะหมายถึงแรงต่อหนึ่งหน่วยมวล)ในแนวรัศมีของกรอบอ้างอิงของ O ที่กระทำต่อดาวที่โคจรรอบแก่นของดาราจักรเป้าคือ

$$F_r = \frac{GMr}{R^3}(3\cos^2\psi - 1) \qquad (2.4)$$

จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง $\psi = \pi/2,\ 3\pi/2$ อนุภาคจะถูกแรงไทดัลบีบเข้าสู่จุดศูนย์กลางมากที่สุด ในขณะที่ตำแหน่ง $\psi = 0,\ \pi$ อนุภาคจะถูกแรงไทดัลดึงออกจากจุดศูนย์กลางมากที่สุด ทำให้ดาวที่

บริเวณนี้จะถูกขีดออกเป็นทางยาว โครงสร้างยืดยาวที่อยู่ระหว่างดาราจักร(ด้านใกล้)จะเรียกว่า สะพาน ส่วนที่อยู่ด้านไกลของดาราจักรจะเรียกว่าหาง

สมการที่ (2.4) เป็นกรณีพิเศษที่ระนาบของดาราจักรเป้าและระนาบวงโคจรของดาราจักรเองเป็นระนาบเดียวกัน แต่โดยทั่วไประนาบของดาราจักรเป้ามักจะทำมุมเอียงกับระนาบวงโคจรของดาราจักรเอง ดังนั้นแรงไทดัลในกรณีของระนาบเอียงจะต้องแสดงอยู่ในรูปของละติจูด θ และลองกิจูด φ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และจากกฎโคซายน์จะได้ว่า

$$\cos\psi = \cos\theta_p \cos\theta_M + \sin\theta_P \sin\theta_M \cos(\varphi_P - \varphi_M) \qquad (2.5)$$

เนื่องจากกำหนดให้วงโคจรของดาราจักรอยู่ในระนาบ x-y ทำให้ $\theta_M = \pi/2$ และ

$$\cos\psi = \sin\theta_p \cos(\varphi_P - \varphi_M) \qquad (2.6)$$

แทนค่าสมการที่(2.6) ลงใน (2.4) จะได้

$$F_r = \frac{GMr}{R^3}\left[3\sin^2\theta_P \cos^2(\varphi_P - \varphi_M) - 1\right] \qquad (2.7)$$

ถ้ากำหนดให้ $\theta_P = \pi/2$ เสมอ สมการที่(2.8) ก็คือสมการที่(2.4) นั่นเอง

ความรุนแรงของแรงไทดัลนอกจากจะขึ้นกับตำแหน่งเชิงมุมและรัศมีของดาวเทียบกับศูนย์กลางของดาราจักรเป้าแล้ว ยังมีค่าขึ้นกับพารามิเตอร์หลายตัว โดยแรงไทดัลจะแปรผันตรงกับมวลของดาราจักรตัวรบกวน และแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างดาราจักร R ยกกำลังสาม เนื่องจากโดยทั่วไปวงโคจรของดาราจักรจะไม่เป็นวงกลม ซึ่ง R จะไม่เป็นค่าคงที่ระหว่างเกิด อันตรกิริยา ดังนั้นจะใช้ระยะจุดใกล้ (pericenter) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แรงไทดัลมีค่ามากที่สุดเป็นตำแหน่งอ้างอิงเมื่อจะพิจารณาความรุนแรงของแรงไทดัลสำหรับการเกิดอันตรกิริยาที่มีการกำหนดชุดพารามิเตอร์หนึ่งๆ

2.2.2 การชนอัตราเร็วสูง

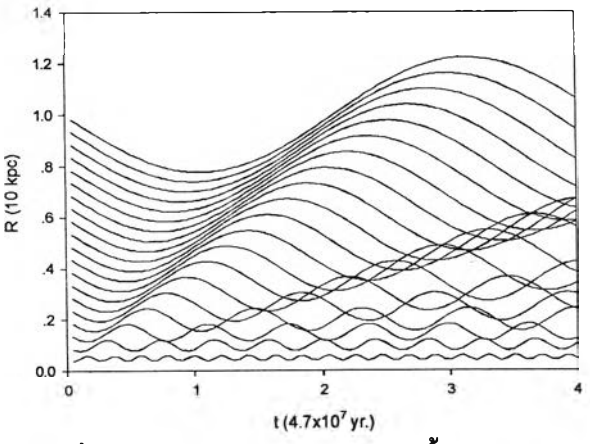
ในกรณีของการชนที่วิถีการเคลื่อนที่ของดาราจักรตัวรบกวนเกือบตั้งฉากกับระนาบดาราจักรเป้าและผ่านใกล้จุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้ามากๆ ทำให้อัตราเร็วสัมพัทธ์ระหว่างดาราจักรมีค่ามากส่งผลให้การรบกวนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ประกอบกับวิถีการชนวิถีตรง(head-on collisions)ที่เกือบตั้งฉากและใกล้จุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้า แรงที่ดาราจักรตัวรบกวนกระทำต่อระบบของดาราจักรเป้าจะค่อนข้างสมมาตรทำให้เกิดโครงสร้างคล้ายวงแหวนล้อมรอบจุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้าเรียกดาราจักรประเภทนี้ว่าดาราจักรวงแหวน ปรากฏการณ์นี้จะอธิบายด้วย

วิธีการที่เรียกว่าการประมาณแบบคล (Impulse Approximation)[5] ซึ่งจะประมาณว่าวิถีการเคลื่อนที่ของดาราจักรตัวรบกวนตั้งฉากและพุ่งผ่านจุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้า การรบกวนนี้จะเกิดขึ้นน้อยและถือว่าเกิดขึ้นทันทีทันใด ณ เวลาที่ ดาราจักรตัวรบกวนและดาราจักรเป้ามีตำแหน่งทับกันพอดี ผลของการรบกวนจะทำให้ดาวใน ดาราจักรเป้าเกิดการสั่นเข้าออกในแนวรัศมีของดาราจักรเป้าโดยมีตำแหน่ง ณ เวลา t ใดๆเป็น[5]

$$R = R_0[\,1 - \frac{\pi v_c}{\sqrt{2V}} \sin(\frac{\sqrt{2v_c t}}{R_0})] \qquad (2.8)$$

R คือรัศมีของดาววัดจากจุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้า ณ เวลา t ใดๆ R_0 คือรัศมีของดาว ณ เวลาเริ่มต้น(ก่อนการรบกวน) V คืออัตราเร็วการชน v_c คืออัตราเร็วการหมุนรอบแก่นดาราจักรของดาวในดาราจักรเป้า โดยจะกำหนดให้เท่ากันสำหรับดาวทุกดวง

จากสมการที่ (2.8) ดาวในดาราจักรเป้าที่ตำแหน่งเริ่มต้นของดาวมีระยะห่างจากแก่นน้อยจะสั่นด้วยความถี่มากและแอมพลิจูดน้อย ส่วนดาวที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางมากกว่าจะสั่นด้วยความถี่น้อยกว่าแต่แอมพลิจูดมากกว่า ถ้านำสมการที่ (2.8) มาพลอตกราฟสำหรับดาวหลายๆวงโคจร (รูปที่ 2.9) พบว่าความแตกต่างของความถี่และแอมพลิจูดในการสั่นของดาวแต่ละวงโคจรจะทำให้เกิดบริเวณที่มีความหนาแน่นของดาวมากกว่าปกติ บริเวณความหนาแน่นมากนี้จะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของดาราจักรเป้า เรียกลักษณะอย่างนี้ว่าคลื่นความหนาแน่น โดยคลื่นจะเกิดขึ้นหลายลูก คลื่นลูกที่สองจะมีความหนาแน่นมากที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่ดาวแต่ละวงโคจรมีทิศทางการสั่นแบบสวนทางกัน(crossing orbit)[3] ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นส่วนวงแหวนของดาราจักรวงแหวนนั่นเอง



รูปที่ 2.9 กราฟของสมการที่ 2.8 แกนนอนคือเวลาและแกนตั้งคือตำแหน่งรัศมีของดาว 20 วงโคจร (การรบกวนไม่ขึ้นกับตำแหน่งเชิงมุมของดาวดังนั้นดาวที่มีระยะห่างจากศูนย์กลางดาราจักรเป้าเท่ากันจะมีการสั่นในแนวรัศมีเหมือนกัน) กำหนดให้ v_c = 220 km/s และ v_c/V = 0.1