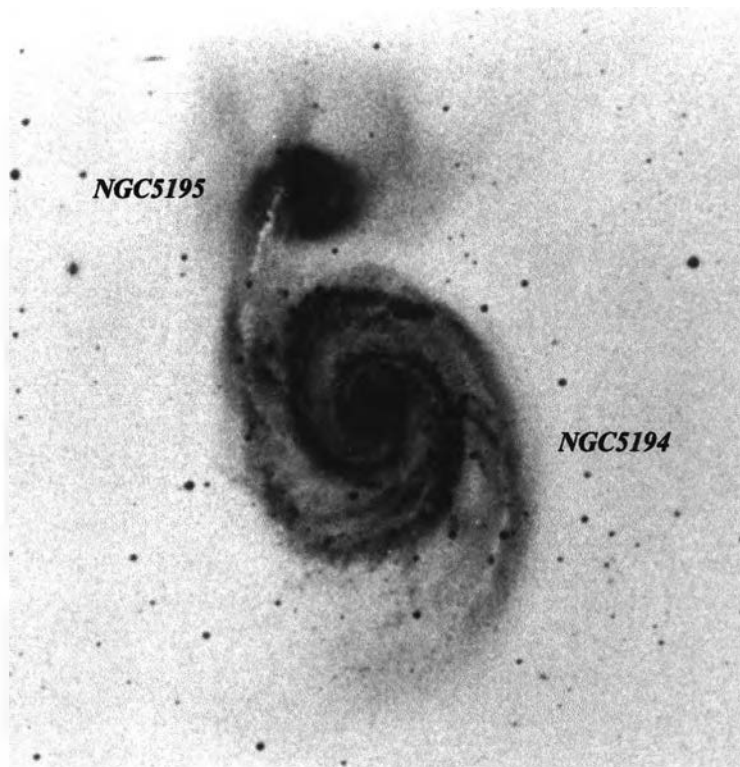


บทที่ 6

การจำลองภาพของดาราจักรตัวอย่างจากการสังเกต

ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองภาพดาราจักร โดยการทดลองกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ศึกษามาแล้วในบทที่ 5 จนกระทั่งได้ผลการจำลองออกมาใกล้เคียงกับภาพถ่ายที่ได้จากการสังเกต

6.1 ดาราจักรน้ำวน (Whirlpool, NGC5194 (M51) and NGC5195)



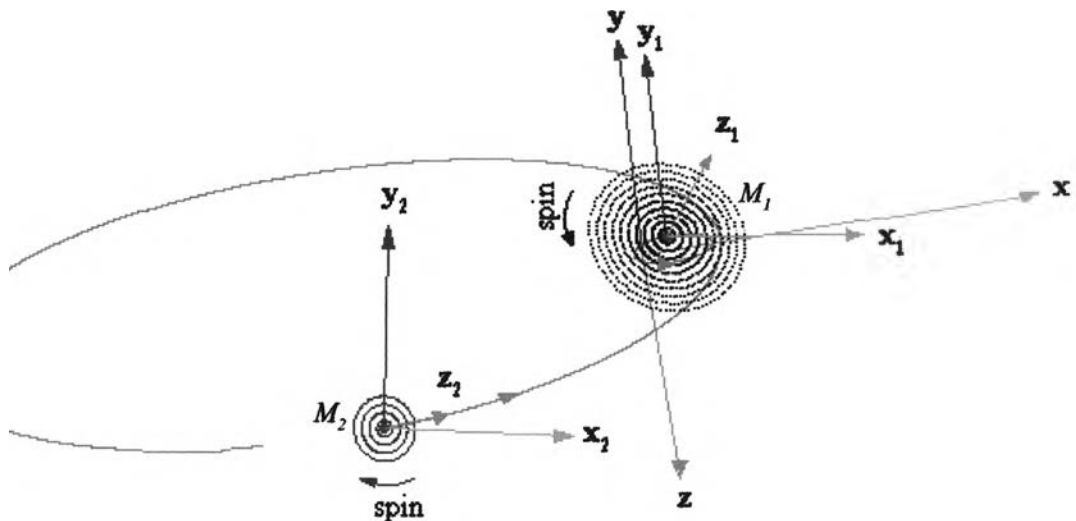
รูปที่ 6.1 ดาราจักรน้ำวน Arp85* (ภาพจาก[16])

ดาราจักรน้ำวน (M51) ปรากฏอยู่ในกลุ่มดาวหมีใหญ่(Ursa Major) มีระยะห่างจากโลกประมาณ 37 ล้านปีแสง ดาราจักรน้ำวนประกอบด้วยดาราจักร NGC5194 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า (มีขนาดปรากฏเป็น $11' \times 7.8'$) อยู่ด้านล่าง และดาราจักร NGC5195 (ขนาดปรากฏคือ $5.4' \times 4.3'$) อยู่ด้านบน อันตรกิริยาระหว่างดาราจักรทั้งสองทำให้ดาราจักรที่ใหญ่กว่าเกิดโครงสร้างสะพานและ

* Arp เป็นการระบุชื่อวัตถุในระบบแผนที่ดาราจักรรูปร่างแปลกประหลาด (Atlas of Peculiar Galaxies)

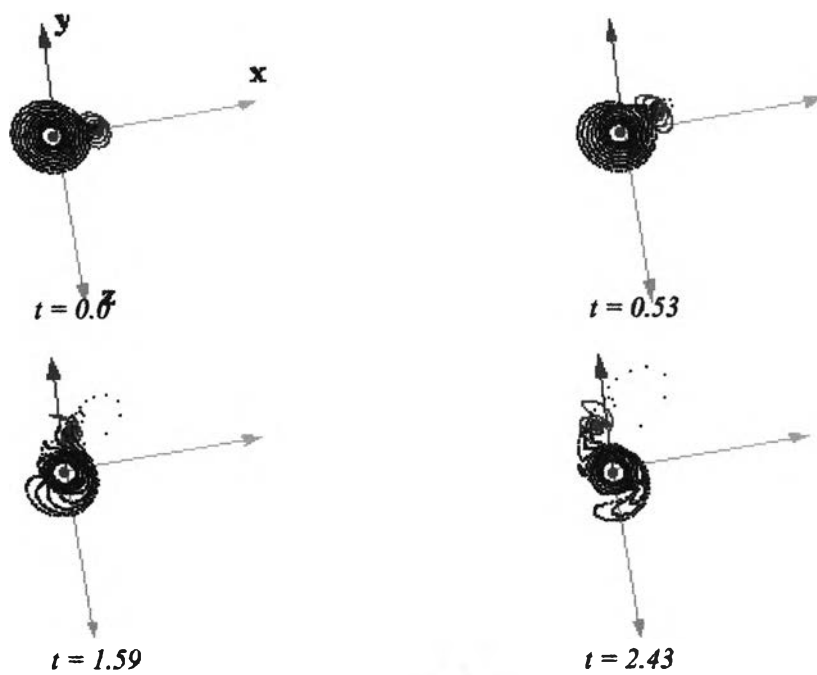
ทางที่ไม่ได้ยึดขาวออกมามากนักเนื่องจากมวลของอีกดาราจักรมีขนาดเล็กกว่า และระนาบของดาราจักรน่าจะทำมุมเอียงค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับระนาบวงโคจร ในส่วนของ NGC5195 ซึ่งมีมวลน้อยกว่าแต่กลับเห็นโครงสร้างทางไม่ชัดเจนแสดงว่าอาจจะมีการหมุนของดาวภายในดาราจักรแบบสวนทางกับทิศการหมุนสัมพัทธ์ระหว่างดาราจักร และความเอียงของดาราจักรก็ควรจะมีค่าค่อนข้างมากเช่นกัน

การจำลองจะกำหนดให้ค่าความรี $e = 0.8$ ทิศทางการวางตัวของระนาบของดาราจักรทั้งสองจะเป็น $i_1 = -80^\circ$, $i_2 = -60^\circ$, $\Omega_1 = -15^\circ$, $\Omega_2 = -20^\circ$ อัตราส่วนมวล $M_2/M_1 = 0.1$ ระยะจุดใกล้ $q = 1.1$ รัศมีของดาราจักร M_1 และ M_2 เท่ากับ 1.0 และ 0.4 ตามลำดับ และทิศทางการหมุนของดาวในดาราจักร M_2 จะเป็นแบบสวนทางกับทิศทางการหมุนสัมพัทธ์ระหว่างดาราจักร (การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับ ดาราจักรน้ำวน ดาราจักรหนู และดาราจักรหวนดแมลงจะเริ่มจากพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยพี่น้องทอมเรย์[2] หลังจากนั้นจึงค่อยปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อให้ได้ผลใกล้เคียงภาพถ่ายจากการสังเกตให้มากที่สุด) ผลการจำลองจะเป็นดังรูปที่ 6.2, 6.3 และ 6.4

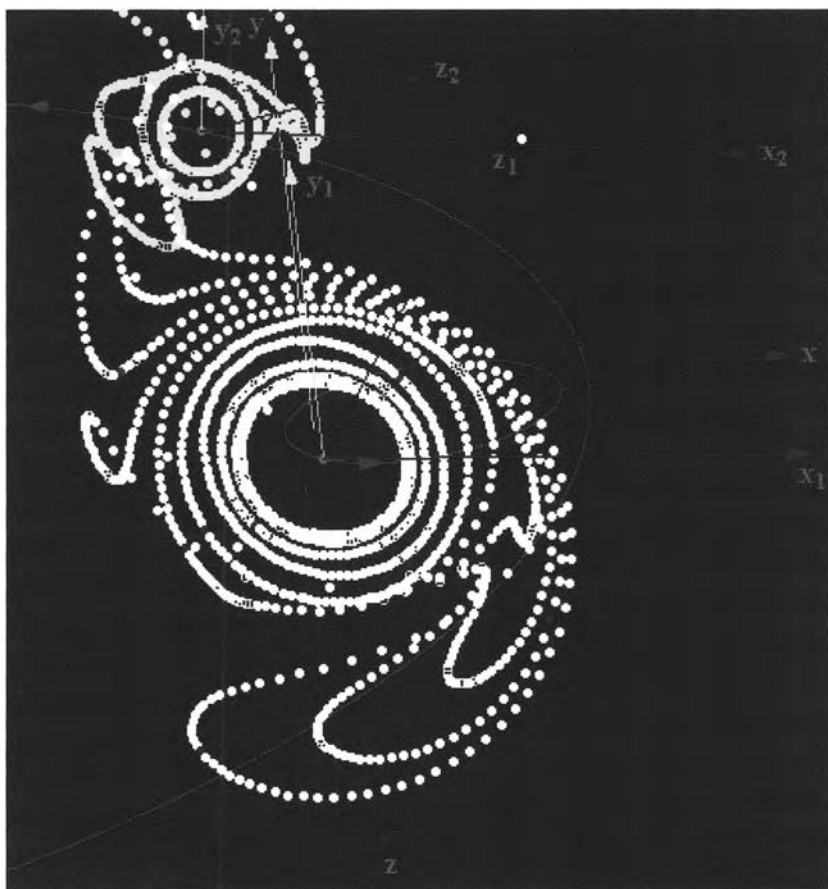


รูปที่ 6.2 ระบบตอนเริ่มต้น ทิศทางการมองคือ $\beta = 57^\circ$, $\lambda = -2^\circ$

จากรูปที่ 6.3 ดาราจักร M_2 จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อ $t = 0$ ซึ่งเป็นเวลาที่ดาราจักรอยู่ที่จุดใกล้ จนกระทั่งถึงเวลา $t = 2.43$ ก็จะได้ภาพจำลองของดาราจักรน้ำวน เมื่อขยายขนาดภาพนี้ 7 เท่าก็จะได้รูปที่ 6.4 ที่เวลานี้(ประมาณ 72 ล้านปีหลังจากผ่านจุดใกล้) ระยะห่างระหว่างดาราจักรทั้งสองคือ 22.3 kpc และกำลังเคลื่อนห่างจากกันด้วยอัตราเร็ว 184 km/s จากรูปจะเห็นว่าแรงไทดัลจะมีผลอย่างมากต่อดาว 4 วงโคจรนอกสุดของดาราจักร M_2 เท่านั้น ส่วนวงโคจรด้านในแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

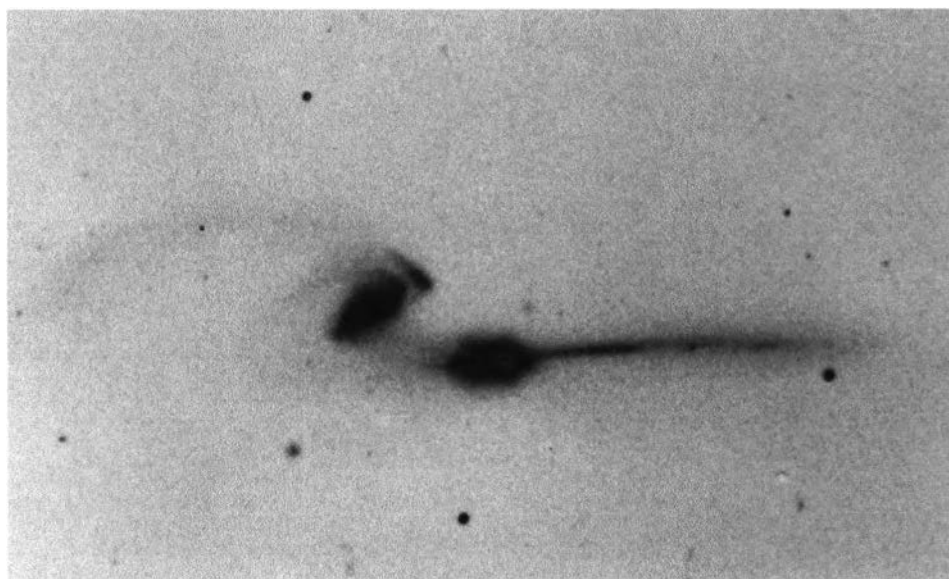


รูปที่ 6.3 แสดงกระบวนการเกิดคาราจักรน้ำวน ($\beta = 57^\circ$, $\lambda = -2^\circ$)



รูปที่ 6.4 ภาพของคาราจักรน้ำวนเมื่อเวลา $t = 2.43$ ($\beta = 57^\circ$, $\lambda = -2^\circ$)

6.2 คาราจักรหนู (The Mice, NGC4676)



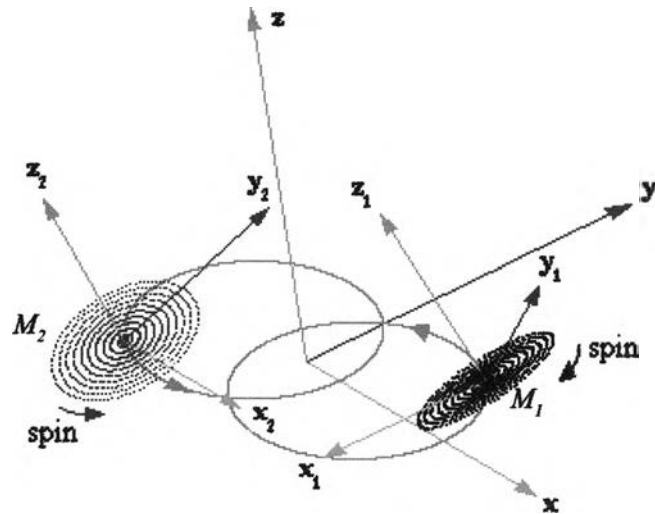
รูปที่ 6.5 คาราจักรหนู Arp242 (ภาพจาก[16])

คาราจักรหนูเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างคาราจักรที่มีมวลใกล้เคียงกัน แรงไทดัล ได้ยึดโครงสร้างของคาราจักรทั้งสองออกเป็นแนวยาว รูปที่ 6.5 เป็นมุมมองที่มองจากด้านบนของคาราจักรที่อยู่ทางด้านซ้ายของรูป และเป็นมุมมองที่มองจากด้านข้างของคาราจักรทางด้านขวาของรูป คาราจักรหนูอยู่ในกลุ่มดาวเส้นผมของเบเรนิซีส (Coma Berenices) มีขนาดปรากฏเป็น $2.2' \times 0.4'$ และอยู่ห่างจากโลก 300 ล้านปีแสง

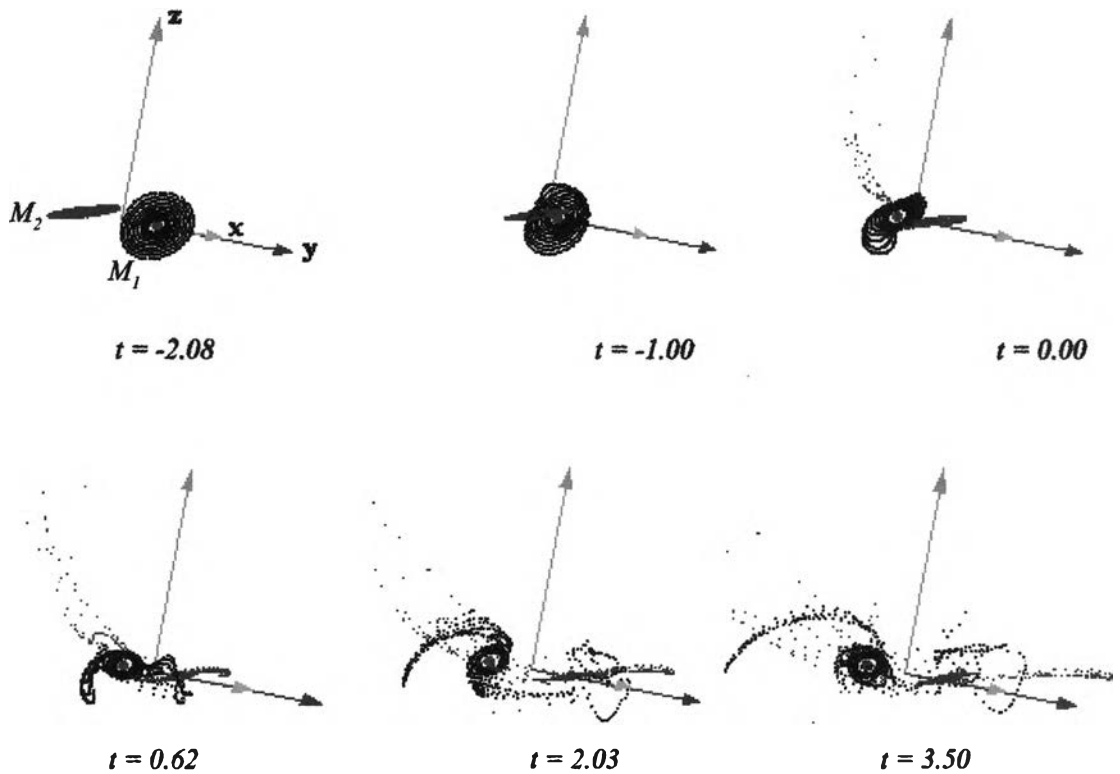
กำหนดให้ค่าความรี $e = 0.6$ อัตราส่วนมวล $M_2/M_1 = 1.0$ ระยะจุดใกล้ $q = 1.5$ ทิศทางการวางตัวของระนาบคาราจักรเป็น $i_1 = 50^\circ$, $i_2 = 20^\circ$, $\Omega_1 = -90^\circ$, $\Omega_2 = 0^\circ$ รัศมีของคาราจักรทั้งสองเท่ากับ 1.0 ผลการจำลองจะเป็นดังรูปที่ 6.6, 6.7 และ 6.8

จากรูปที่ 6.8 เนื่องจากคาราจักรมีความเอียงค่อนข้างมากและระยะจุดใกล้ที่มากเกือบสองเท่าของรัศมีคาราจักร แรงไทดัลจึงไม่มากอย่างกรณีระนาบคาราจักรที่ไม่ทำมุมเอียงกับระนาบวงโคจร ประกอบกับระยะเวลาหลังผ่านจุดใกล้ยังไม่มากนัก ทำให้โครงสร้างสะพานที่เชื่อมระหว่างคาราจักรยังคงเห็นได้อย่างชัดเจน

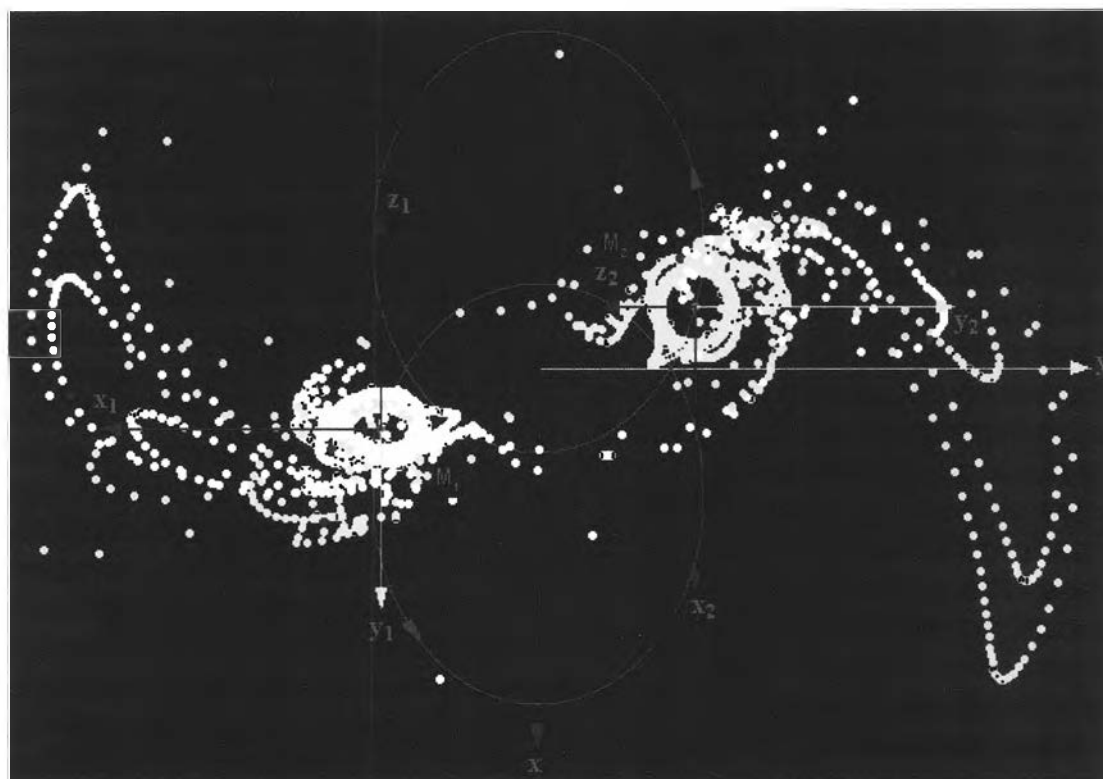
รูปที่ 6.8 คาราจักรทั้งสองอยู่ห่างกัน 30.4 kpc และเคลื่อนที่ห่างจากกันด้วย อัตราเร็ว 184 km/s



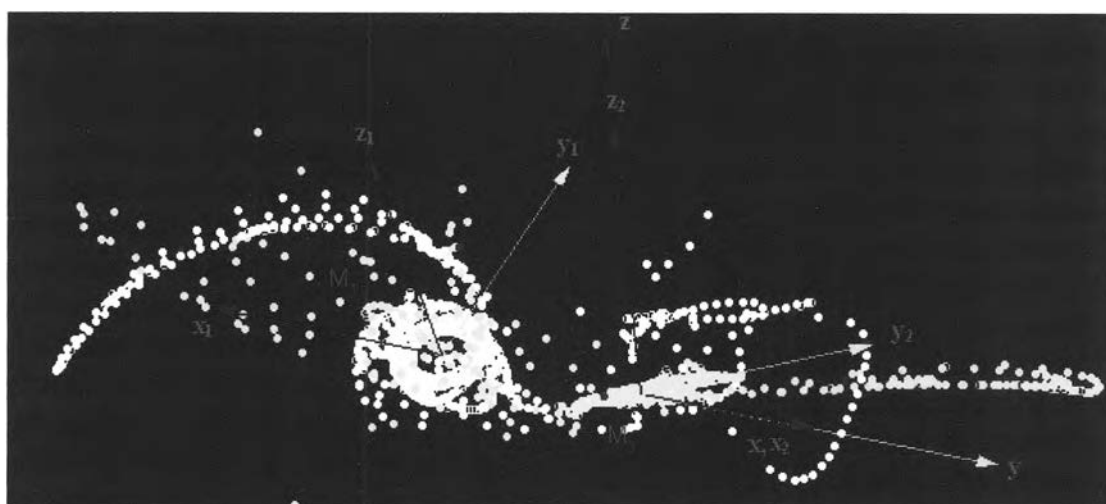
รูปที่ 6.6 ระบบตอนเริ่มต้นการจำลองการจักรหนู ทิศทางการมองคือ $\beta = -61^\circ$, $\lambda = -59^\circ$
ระยะห่างระหว่างดาวจักรคือ $R_0 = 5.0$



รูปที่ 6.7 ภาพการจำลองการเกิดดาวจักรหนูตั้งแต่ $t = -2.08$ ถึงเวลาสิ้นสุดที่ $t = 3.50$ มุมมองของภาพเป็น $\beta = -90^\circ$, $\lambda = -59^\circ$



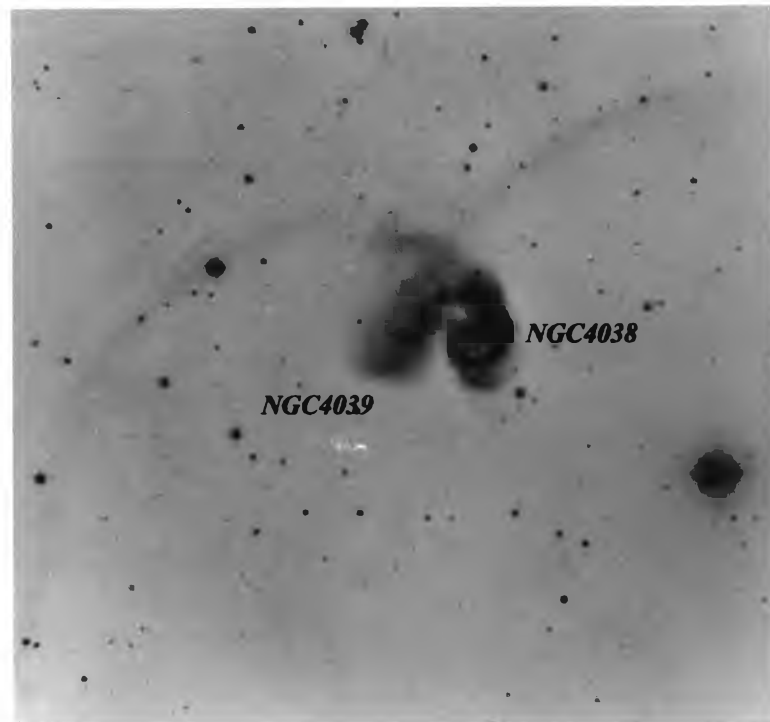
a)



b)

รูปที่ 6.8 ภาพขยายของรูปที่ 6.7 ณ เวลา $t = 3.50$ a) เป็นภาพฉายลงบนระนาบวงโคจร ($\beta = 0^\circ$, $\lambda = -90^\circ$) b) เป็นภาพที่มุมมอง $\beta = -90^\circ$, $\lambda = -59^\circ$

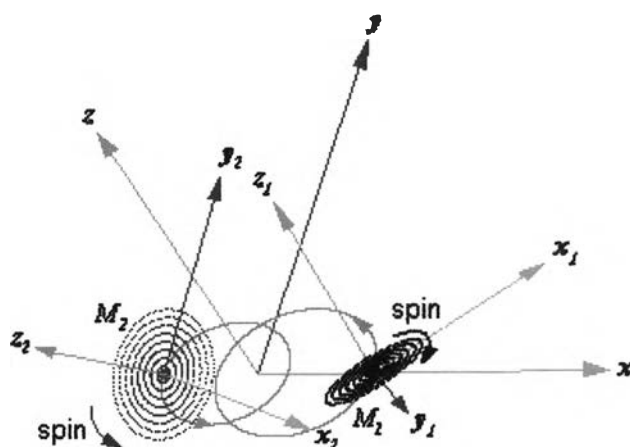
6.3 คารากักรหนดแมลง (The Antennae, NGC 4038 and NGC 4039)



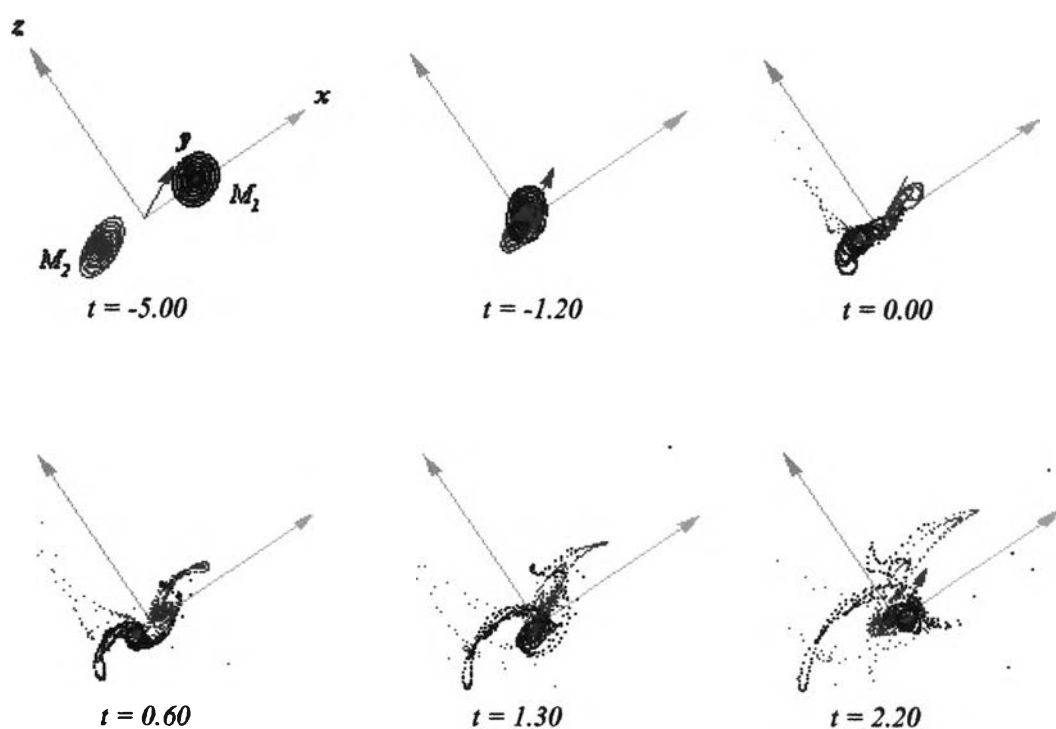
รูปที่ 6.9 คารากักรหนดแมลง Arp244 (ภาพจาก[16])

คารากักรในรูปที่ 6.9 คือคารากักรหนดแมลงซึ่งประกอบด้วย NGC4038 และ NGC4039 ขนาดปรากฏของคารากักรทั้งสองคือ $5.3 \times 3.1'$ และ $3.1 \times 1.6'$ ตามลำดับ มีตำแหน่งปรากฏอยู่ในกลุ่มดาวนกกา(Corvus) คารากักรนี้อยู่ห่างจากโลก 63 ล้านปีแสง ลักษณะเด่นของคารากักรนี้คือเป็นคารากักรที่มีหางยาวสองคารากักรไขว้กันอยู่ทำให้เกิดลักษณะคล้ายหอคอยหางของคารากักรทั้งสองมีลักษณะที่ต่างกันที่สำคัญประการหนึ่งคือ NGC4039 มีหางสั้นกว่าและชี้ขึ้นด้านบน ส่วน NGC4038 หางจะชี้ลงด้านล่าง ซึ่งเป็นไปได้ว่าขณะที่คารากักรทั้งสองอยู่ที่จุดใกล้ ด้านไกลของคารากักร NGC4039 (เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางมวลของระบบคารากักร)จะชี้ขึ้นจากระนาบวงโคจร ส่วนคารากักร NGC4038 จะมีด้านไกลชี้ลงด้านล่าง

กำหนดให้ระยะจุดใกล้ $q = 1.0$ ค่าความรี $e = 0.5$ รัศมีของคารากักร M_1 และ M_2 มีค่าเท่ากับ 0.7 และ 0.8 ตามลำดับ ทิศทางการวางตัวของระนาบคารากักรคือ $i_1 = -60^\circ$, $i_2 = 30^\circ$, $\Omega_1 = 40^\circ$, $\Omega_2 = -20^\circ$ อัตราส่วนมวลของคารากักร $M_1/M_2 = 0.8$ ผลการจำลองจะเป็นดังรูปที่ 6.10, 6.11 และ 6.12



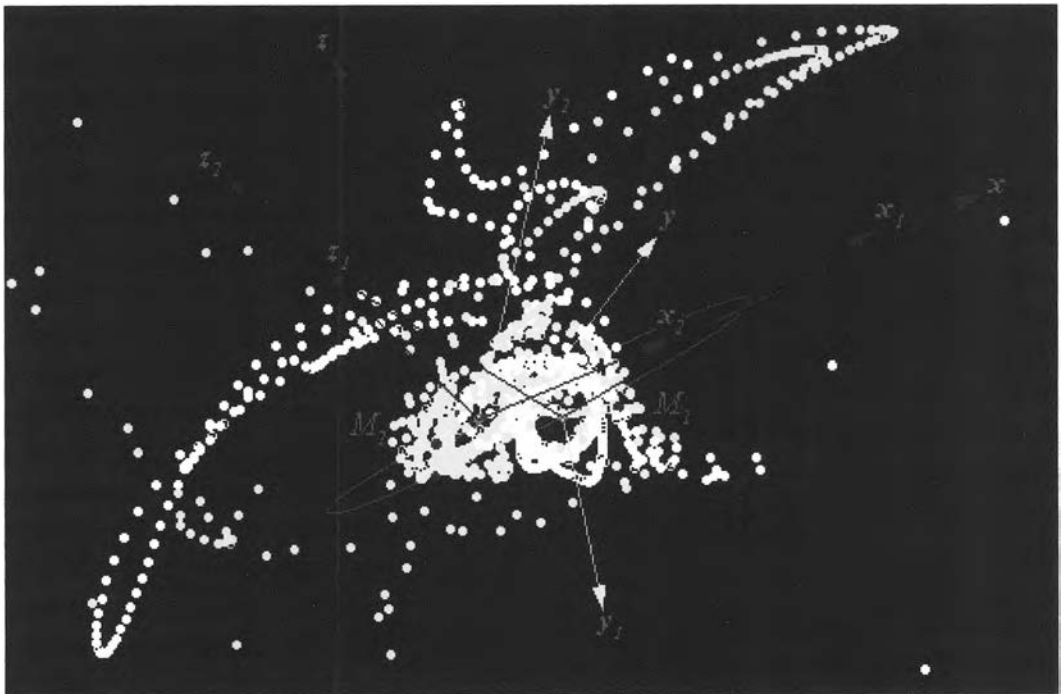
รูปที่ 6.10 ที่เวลาเริ่มต้นการจำลองการจักรหนวดแมลง ระยะห่างเริ่มต้น $R_0 = 3.0$ มุมมองของภาพ คือ $\beta = -45^\circ$, $\lambda = -43^\circ$



รูปที่ 6.11 ภาพการจำลองการจักรหนวดแมลงตั้งแต่เวลา $t = -5.00$ สิ้นสุดที่เวลา $t = 2.20$ และเป็นมุมมองที่มองจากด้านข้างระนาบวงโคจรของการจักร ($\beta = -83^\circ$, $\lambda = -15^\circ$)



a)



b)

รูปที่ 6.12 ภาพขยายของรูปที่ 6.11 ที่เวลา $t = 2.20$ a) เป็นภาพที่ฉายลงบนระนาบวงโคจรของ
 ดาราจักร b) เป็นมุมมอง $\beta = -83^\circ$, $\lambda = -15^\circ$

ผลการจำลองทำให้ได้ลักษณะของดาราจักรที่มีหางยาวและไขว้กัน ที่แตกต่างจากภาพถ่ายจริงก็คือหางของดาราจักร M_2 ในภาพถ่ายดาราจักร M_2 จะมีส่วนปลายของหางที่ไม่ชี้ขึ้นสูงมากนัก แต่ผลการจำลองได้หางที่ชี้สูงขึ้นด้านบนค่อนข้างมาก

รูปที่ 6.12 ดาราจักรทั้งสองอยู่ห่างกัน 19.7 kpc และเคลื่อนที่ห่างจากกันด้วยอัตราเร็ว 201 km/s

6.4 ดาราจักรลูกอ๊อด (Tadpole Galaxy, Arp188)

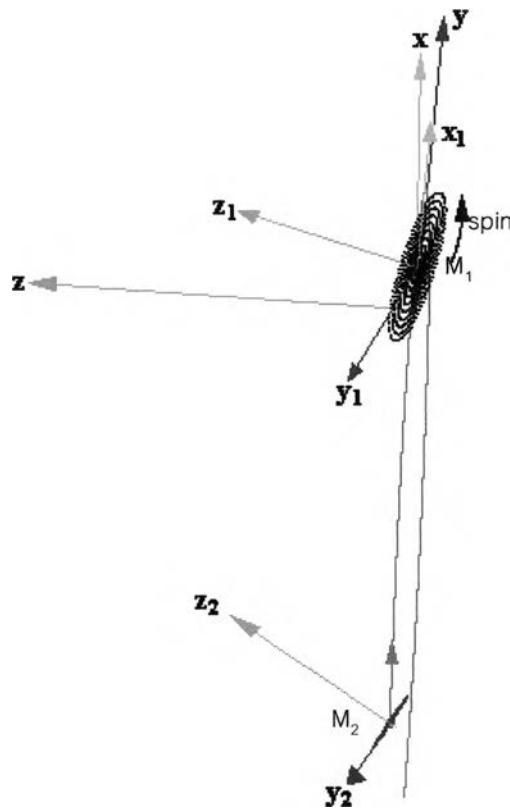


รูปที่ 6.13 ดาราจักรลูกอ๊อด (ภาพจาก[16])

ดาราจักรลูกอ๊อดประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนหัวซึ่งเป็นดาราจักรมวลมาก และส่วนหางเป็นดาราจักรที่มีมวลน้อยกว่า ดาราจักรนี้มีตำแหน่งอยู่ในกลุ่มดาวมังกร (Draco) อยู่ห่างจากโลก 450 ล้านปีแสง และมีขนาดปรากฏเป็น $3.6 \times 0.8'$ ความเป็นไปได้ของการเกิดดาราจักรลูกอ๊อดอย่างหนึ่งตามข้อเสนอของบริกส์ (Bridges) และคณะก็คือดาราจักรมวลน้อยเคลื่อนที่จากทางด้านล่าง

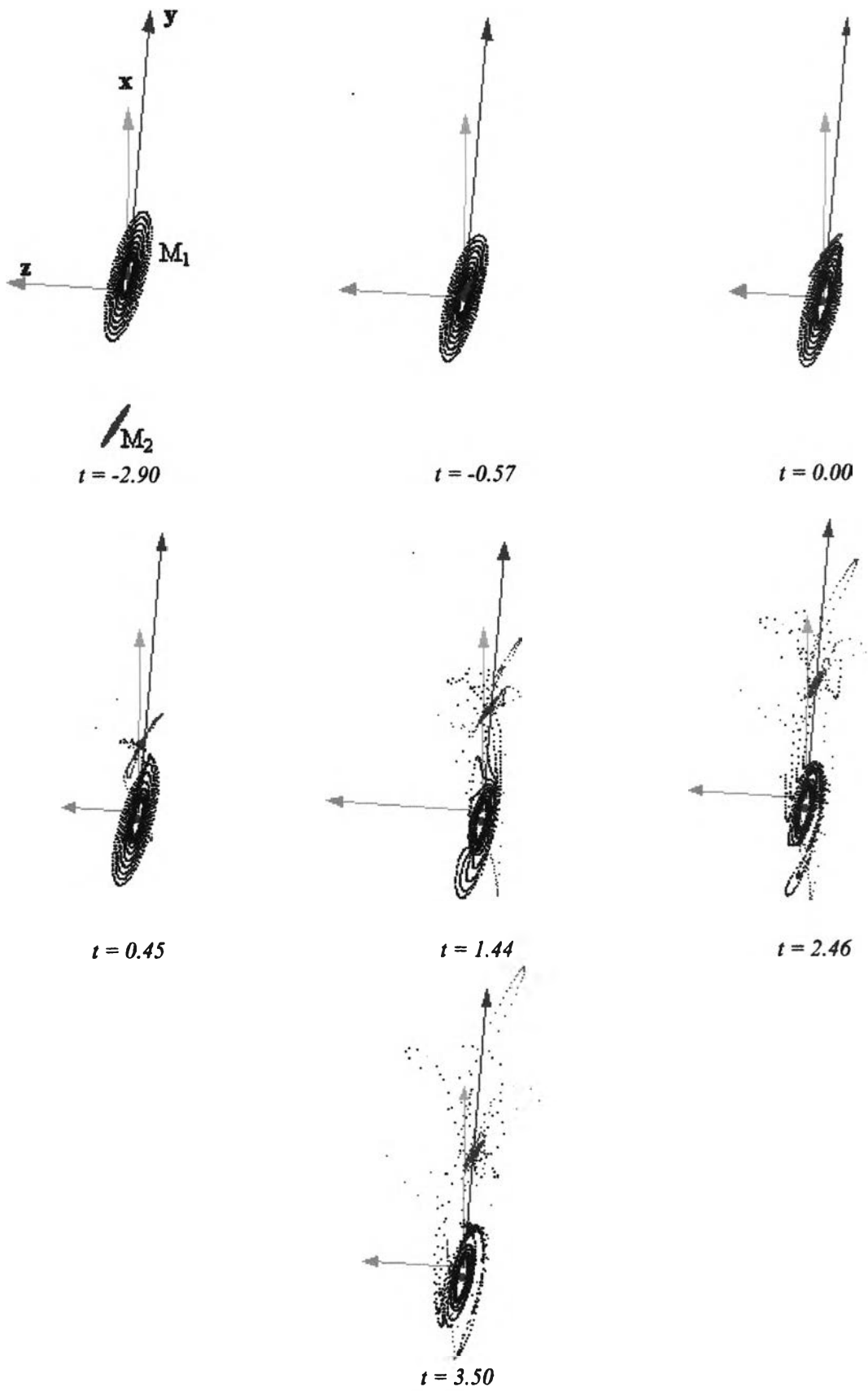
ของรูปที่ 6.13 ขึ้นไปทางด้านบน เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงจุดใกล้ด้านเหนือสุดของดาราจักรมวลมากก็จะเคลื่อนที่วกกลับไปทางด้านล่างและเข้าไปอยู่ด้านหลังของดาราจักรมวลมาก[17] ส่วนหางที่ยืดยาวมากบ่งบอกถึงความแตกต่างของมวลดาราจักรที่ค่อนข้างมาก และความบางของหางแสดงว่าน่าจะเป็นมุมมองที่มองจากด้านข้างของระนาบดาราจักรมวลน้อย

การจำลองจะกำหนดให้ ระยะจุดใกล้ $q = 1.25$ อัตราส่วนมวล $M_2/M_1 = 0.1$ ทิศทางการวางตัวของระนาบดาราจักรเป็น $i_1 = 20^\circ$, $i_2 = 30^\circ$, $\Omega_1 = 90^\circ$, $\Omega_2 = 140^\circ$ รัศมีของดาราจักร M_1 และดาราจักร M_2 เท่ากับ 1.0 และ 0.4 ตามลำดับ ส่วนวงโคจรกำหนดให้เป็นวงโคจรแบบวงรีที่มีค่าความรี $e = 0.8$ ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 6.14, 6.15 และ 6.16

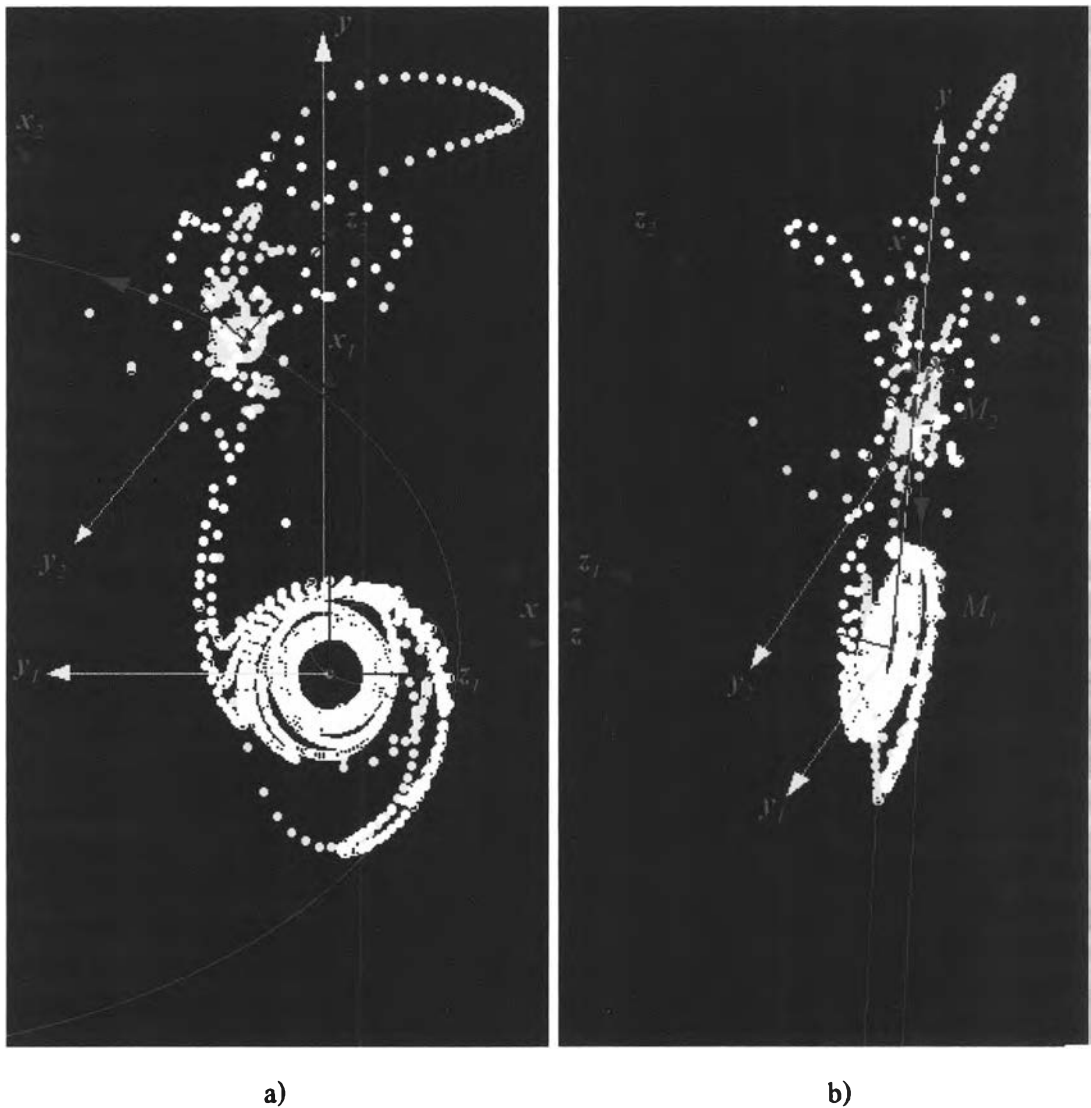


รูปที่ 6.14 ที่เวลาเริ่มต้นของการจำลองการเกิดดาราจักรลูกอืด ระยะห่างและเวลาเริ่มต้นคือ

$$R_0 = 6.0, t_0 = -10.74 \text{ มุมมองของรูปเป็น } \beta = 92^\circ, \lambda = 123^\circ$$



รูปที่ 6.15 แสดงการจำลองการเกิดดาวจักรกลูกยัด ตั้งแต่เวลา $t = -2.90$ ถึงเวลาที่เวลา $t = 3.50$ โดยภาพนี้เป็นมุมมองที่ $\beta = 92^\circ$, $\lambda = 123^\circ$

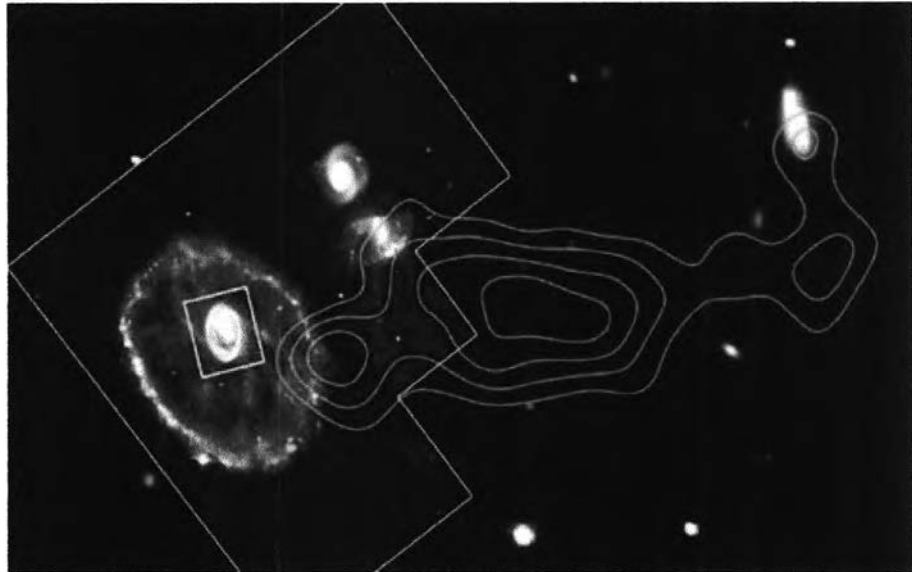


รูปที่ 6.16 รูปร่างของกระจุกดาวฤกษ์อีกที่เวลา $t = 3.50$ a) เป็นมุมมองค้ำจากกับระนาบวงโคจรของกระจุกดาวฤกษ์ b) เป็นมุมมอง $\beta = 92^\circ$, $\lambda = 123^\circ$

จากรูปที่ 6.16 เมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายในรูปที่ 6.13 จะเห็นว่าส่วนหางของ M_2 จะไม่เป็นเส้นบางเหมือนในภาพถ่าย หากต้องการให้ส่วนหางนี้บางลงจะต้องกำหนดให้ค่าความเอียง $i_2 = 0^\circ$ แต่จะทำให้ส่วนหางมีลักษณะไม่เป็นเส้นโค้งอย่างในภาพถ่าย และข้อแตกต่างกับการอธิบายของ Briggs และคณะก็คือตำแหน่งของกระจุกดาวฤกษ์มวลน้อยซึ่งจากผลการจำลองจะเห็นว่ากระจุกดาวฤกษ์มวลน้อยไม่ได้มีตำแหน่งอยู่ด้านหลังของกระจุกดาวฤกษ์มวลมาก

ในรูปที่ 5.23 a) กระจุกดาวทั้งสองอยู่ห่างกัน 28.4 kpc และกำลังเคลื่อนที่ห่างจากกันด้วยอัตราเร็ว 161 km/s แต่จากมุมมองบนระนาบท้องฟ้า (รูปที่ 5.23 b)) จะมองเห็นกระจุกดาวทั้งสองกำลังเคลื่อนที่เข้าหากัน

5.2.5 คาราจักรล้อเกวียน (Cartwheel Galaxy)

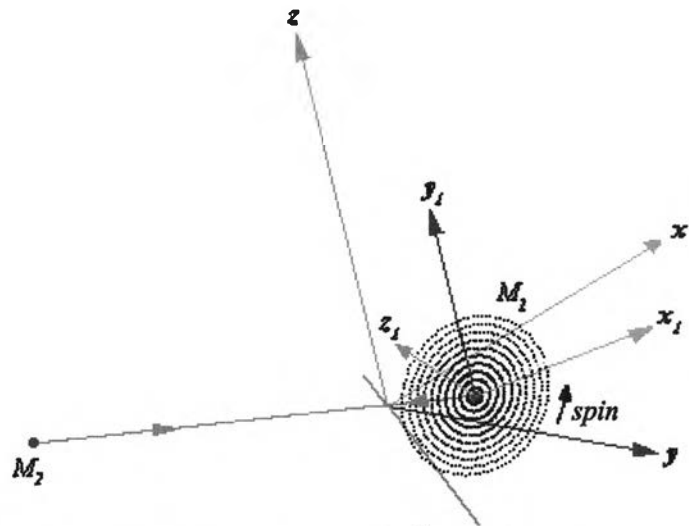


รูปที่ 6.17 คาราจักรล้อเกวียน (ภาพจาก [10])

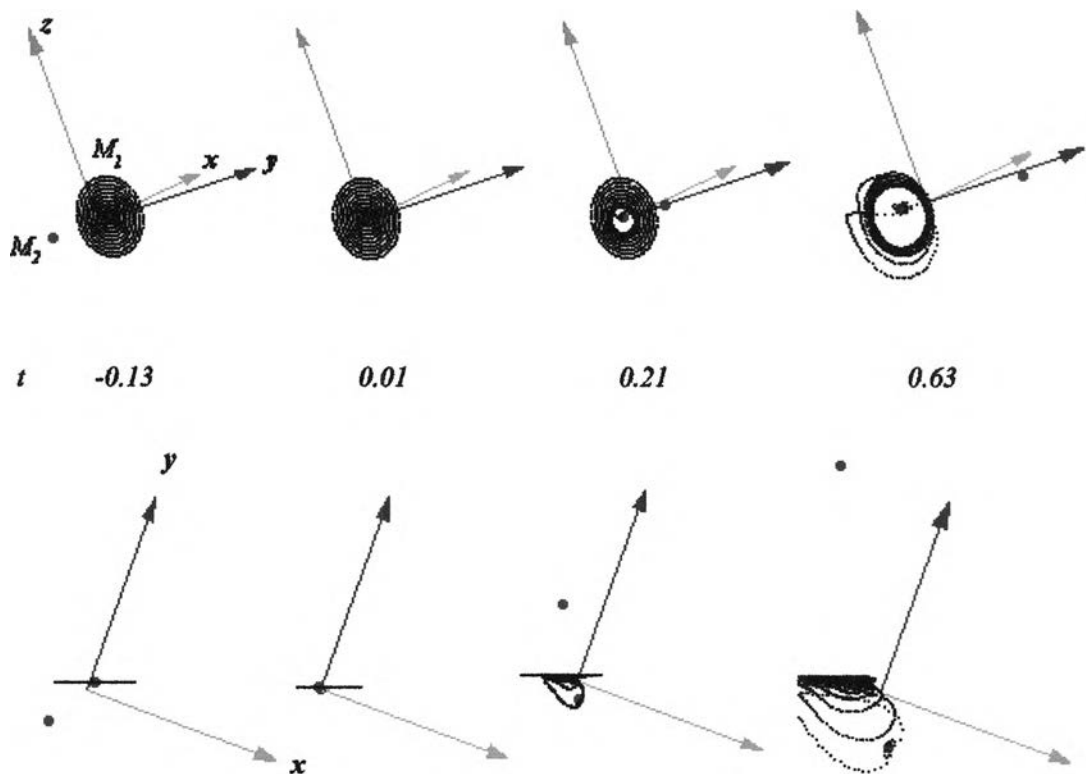
คาราจักรล้อเกวียนคือคาราจักรขนาดใหญ่ทางซ้ายสุดของรูปที่ 6.17 ซึ่งเป็นคาราจักรรูปร่างประหลาดในกลุ่มคาราจักรวงแหวน จากการสังเกตการณ์ช่วงคลื่นวิทยุของก๊าซไฮโดรเจน (เส้นคอนทัวร์สีเขียว) ที่อยู่ระหว่างคาราจักร ทำให้เป็นไปได้ว่าคาราจักรล้อเกวียนถูกชนโดย คาราจักรขนาดเล็กกว่าซึ่งปรากฏอยู่ทางขวาของรูป[10] คาราจักรล้อเกวียนปรากฏอยู่ในกลุ่มดาวช่างแกะสลัก(Sculptor) มีขนาดปรากฏ $1.1' \times 0.9'$ และอยู่ห่างจากโลก 652 ล้านปีแสง

การจำลองจะกำหนดให้วงโคจรเป็นแบบไฮเปอร์โบล่าที่มีค่าความรี $e = 2.0$ อัตราส่วนมวล $M_2/M_1 = 0.25$ ระยะจุดใกล้ $q = 0.01$ ทิศทางการวางตัวของคาราจักร M_1 คือ $i_1 = 90^\circ$, $\Omega_1 = 20^\circ$ รัศมีของคาราจักร M_1 เท่ากับ 1.0 ส่วนคาราจักร M_2 จะสมมติให้เป็นจุดมวลที่ไม่มีดาวโคจรอยู่โดยรอบ ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 6.18, 6.19, 6.20 และ 6.21

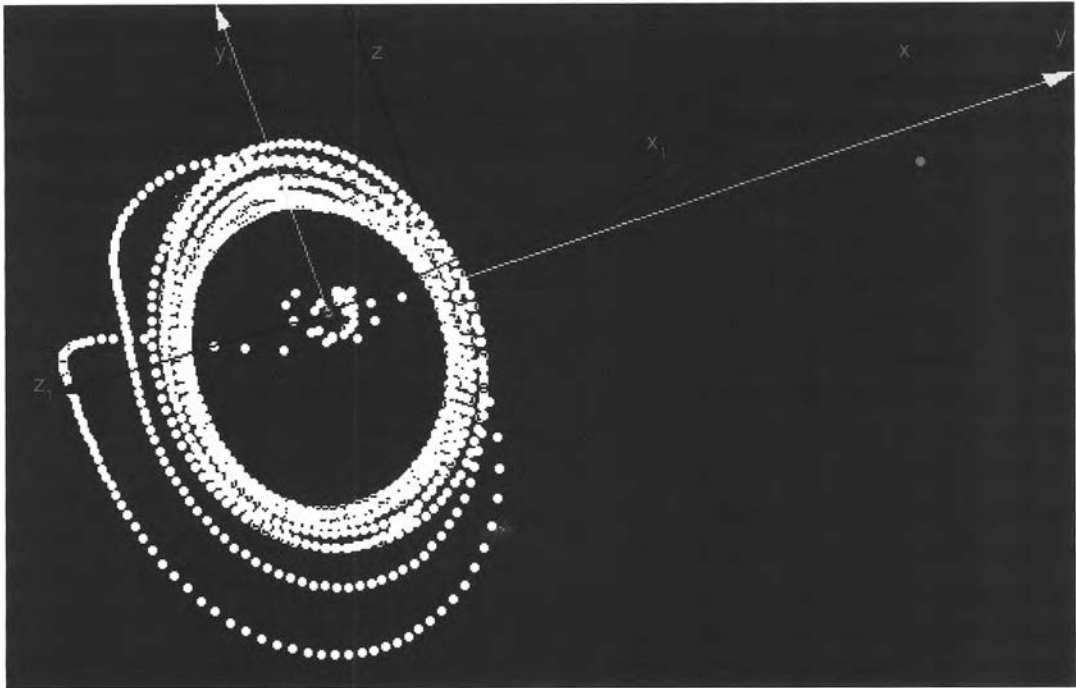
จากผลการจำลองในรูปที่ 6.19 การรบกวนจะเกิดขึ้นหลังจากคาราจักรเคลื่อนที่ผ่านจุดใกล้ไปแล้ว แลวบนของรูปจะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของคาราจักรซึ่งจะเห็นเป็นลักษณะของวงแหวนที่มีความหนาแน่นของดาวมากเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของคาราจักร รูปที่ 6.20 เป็นรูปที่เวลา 29.6 ล้านปีหลังจากคาราจักรทั้งสองชนกัน ระยะห่างระหว่างคาราจักรที่เวลานี้คือ 71 kpc และคาราจักรทั้งสองกำลังเคลื่อนที่ห่างจากกันด้วยอัตราเร็ว $2,329 \text{ km/s}$ ซึ่งเป็นความเร็วที่มากกว่ากรณีอื่นๆข้างต้นซึ่งเป็นกลุ่มของคาราจักรที่มีสะพานและหางกว่า 10 เท่า



รูปที่ 6.18 เริ่มต้นการจำลองที่เวลา $t = -0.52$ คาราจักรทั้งสองอยู่ห่างกัน $R_0 = 6.0$ และทิศทางการมองคือ $\beta = -111^\circ$, $\lambda = -39^\circ$



รูปที่ 6.19 ภาพจำลองการเกิดคาราจักรล้อนเกิดขึ้นตั้งแต่เวลา $t = -0.13$ จนถึง 0.63 แลวบนเป็นภาพที่มุมมอง $\beta = -93^\circ$, $\lambda = -56^\circ$ ส่วนแลวล่างเป็นภาพที่มองจากด้านข้างของคาราจักร ($\beta = 0^\circ$, $\lambda = -56^\circ$) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งฉากกับระนาบวงโคจร



รูปที่ 6.20 ภาพขยายของรูปที่ 6.19 (แถวบน) ณ เวลา $t = 0.63$

จากรูปที่ 6.20 ดูเหมือนว่าการจำลองภาพการจักรลือเกี่ยวกันจะเป็นที่น่าพอใจ แต่เมื่อพิจารณาผลการจำลองแถวล่างของรูปที่ 6.19 ซึ่งเป็นมุมมองจากทางด้านข้างของการจักร พบว่าหลังจากการจักรตัวครบวงหนึ่งรอบผ่านการจักรเป้าแล้ว แผ่นจานแบนของดาวที่เคลื่อนที่รอบการจักรเป้าจะเคลื่อนห่างจากจุดศูนย์กลางไปมาก ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการคำนวณที่ใช้ศักย์แบบเคปเลอร์ ($V \propto r^{-1}$) เพราะถ้าปกติแล้วการชนอัตราเร็วสูงที่เกือบตั้งฉากกับระนาบการจักรและผ่านใกล้กับจุดศูนย์กลางของระนาบการจักรนั้น การเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของดาวในแนวตั้งฉากกับระนาบการจักรจะเกิดขึ้นน้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองการจักรวงแหวนโดยลินคส์และทอมเร[18] ที่เพิ่มซอฟเทนนิ่งพารามิเตอร์ (softening parameter, \mathcal{E}) เข้าไปในตัวส่วนของศักย์แบบเคปเลอร์ ($V \propto (r^2 + \mathcal{E}^2)^{-1/2}$) ผลการจำลองยืนยันว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดาวในแนวตั้งฉากกับระนาบการจักรเกิดขึ้นไม่มากนัก จึงสรุปได้ว่าศักย์แบบเคปเลอร์ไม่เหมาะกับการจำลองอันตรกิริยาระหว่างการจักรในกรณีที่มีวิถีการชนผ่านใกล้จุดศูนย์กลางมาก