บทที่ 5

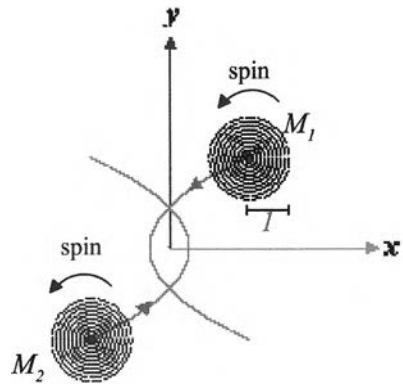
ผลและการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ในการจำลองอันตรกิริยาระหว่างดาราจักร

การจำลองภาพอันตรกิริยาระหว่างดาราจักรเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับภาพถ่ายจากการสังเกตนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดาราจักรก่อน โดยจะเริ่มด้วยกรณีพื้นฐานคือให้ระนาบดาราจักรและระนาบวงโคจรของดาราจักรเป็นระนาบเดียวกัน ดาราจักรทั้งสองมีมวลเท่ากัน ระยะจุดใกล้เท่ากับรัศมีดาราจักรคือ $q = 1$ และทางโคจรเป็นแบบพาราโบลา กำหนดให้ระยะห่างเริ่มต้น $R_0 = 6$ ซึ่งจะเป็นเวลาที่ $t_0 = -5.95$ ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 5.1 และ 5.2

จากรูปที่ 5.1 ที่เวลาเริ่มต้นดาราจักรมีลักษณะเป็นจานกลมแบน ที่เวลา $t = -1.17$ แรงไทดัลเริ่มทำให้ดาราจักรมีลักษณะเหมือนหยดน้ำ ที่เวลา $t = -0.7$ การรบกวนที่มากขึ้นทำให้ดาวบางส่วนเริ่มถูกเหวี่ยงออกจากดาราจักร ที่เวลา $t = 0.0$ หรือที่ระยะจุดใกล้ซึ่งเป็นจุดที่อันตรกิริยาระหว่างดาราจักรเกิดขึ้นรุนแรงที่สุด จานกลมของดาราจักรจะถูกแรงไทดัลยืดออกมากขึ้นจนเริ่มเห็นลักษณะของหางเกิดขึ้น ที่เวลา $t = 0.88$ จะเห็นลักษณะของหางที่ยืดยาวขึ้นและจะเห็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดาราจักรที่เรียกว่าสะพานอย่างชัดเจน จนกระทั่งที่เวลา $t = 1.50$ สะพานที่เชื่อมระหว่างดาราจักรจะม้วนตัวกลับเข้าสู่ดาราจักรทำให้โครงสร้างของสะพานเริ่มสลายตัว รูปที่ 5.2 เป็นภาพที่เวลา $t = 4.57$ ส่วนหางจะยาวขึ้นมาก แต่จะเห็นว่าสะพานได้สลายตัวไปแล้ว

ในส่วนต่อไปจะเป็นการทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวของกับการเกิดอันตรกิริยาระหว่างดาราจักร เพื่อจะศึกษาว่าลักษณะโครงสร้างของดาราจักรเช่นความยาวของหางหรือระยะเวลาของการคงอยู่ของสะพาน เปลี่ยนแปลงและสัมพันธ์กันอย่างไรกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

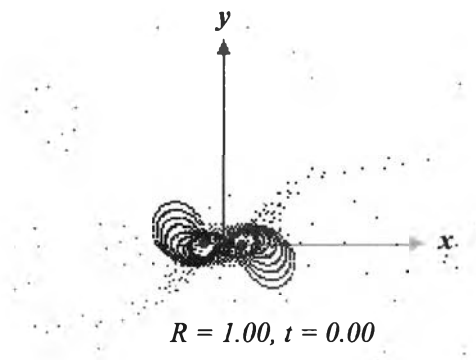
พารามิเตอร์ที่จะมีผลต่อรูปร่างของดาราจักรที่เกิดอันตรกิริยาประกอบด้วย ระยะจุดใกล้ q อัตราส่วนมวล M_2/M_1 เมื่อให้ M_2 และ M_1 เป็นมวลของดาราจักรตัวรบกวนและดาราจักรเป้าตามลำดับ ความเร็วสัมพัทธ์ในการชน v ทิศทางการหมุนของดาราจักร และความเอียงของระนาบดาราจักร



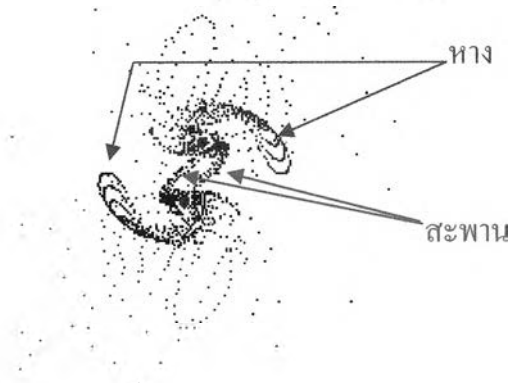
R = 6.00, t = -5.95

R = 1.84, t = -1.17

R = 1.39, t = -0.7



R = 1.00, t = 0.00



R = 1.55, t = 0.88

R = 2.17, t = 1.50

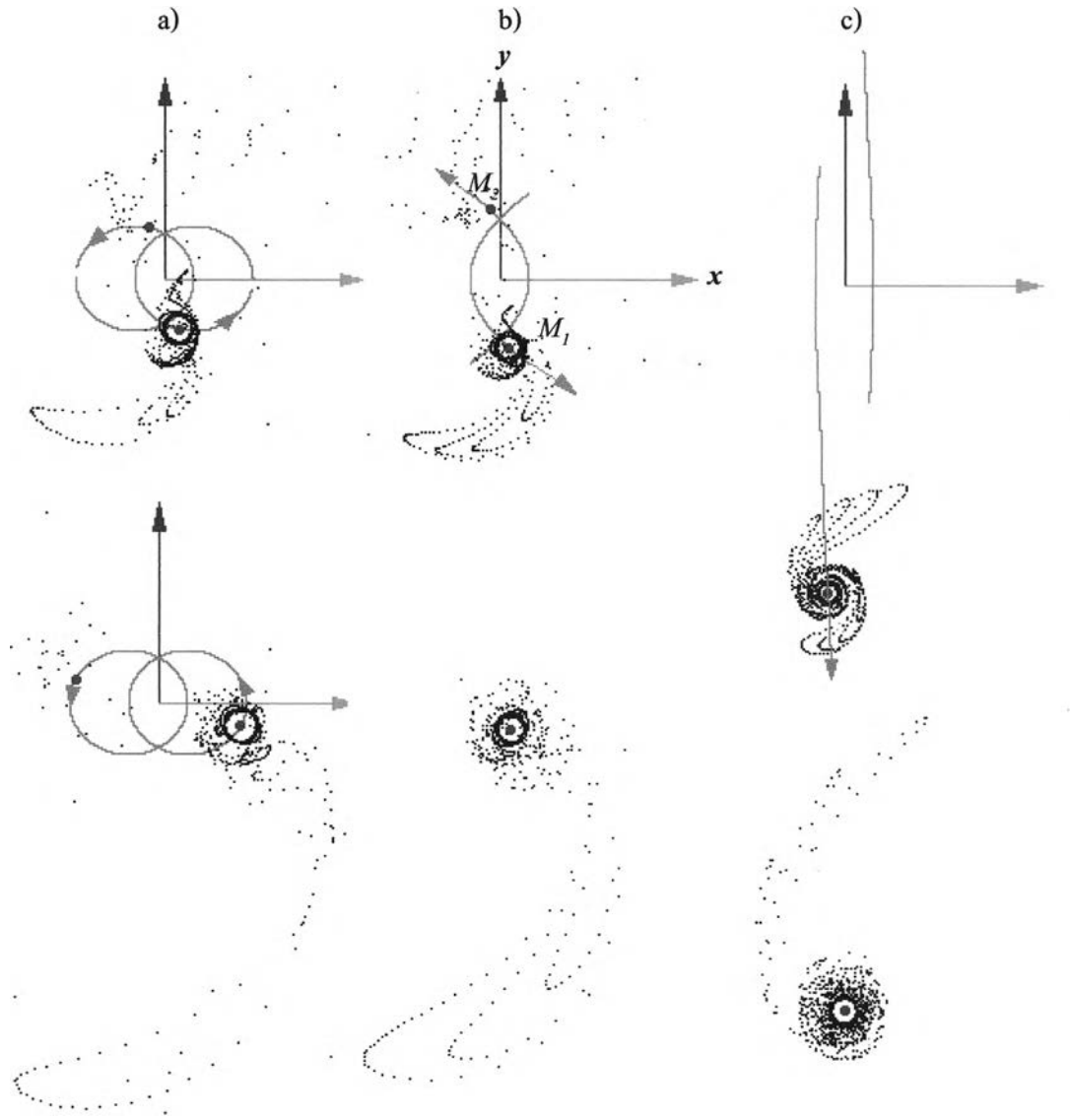
รูปที่ 5.1 แสดงผลการจำลอง $R_0 = 6$ เริ่มต้นที่เวลา $t_0 = -5.95$ จนถึง $t = 1.50$ แต่ละดาราจักรประกอบด้วยดาว *1,030* ดวง ภาพนี้เป็นการมองตั้งฉากกับระนาบวงโคจรของดาราจักร

รูปที่ 5.2 เป็นภาพกระบวนการเดียวกันกับรูปที่ 5.1 แต่เป็นภาพเมื่อ $R = 4.14$ และ $t = 4.57$ สเกลการแสดงผลจะเหมือนกับรูป 5.1 แต่จะขยายขนาดของจุดดาวให้ใหญ่ขึ้น

5.1 ผลของความเร็วการชน

พารามิเตอร์ตัวแรกที่มีความสำคัญต่อการรบกวนของดาราจักรก็คือความเร็วในการชน ความเร็วการชนก็คือความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างดาราจักรเมื่อดาราจักรอยู่ที่จุดใกล้ของวงโคจร ถ้ากำหนดให้มวลของดาราจักรและระยะจุดใกล้เป็นค่าคงที่แล้ว ความเร็วในการชนจะขึ้นกับค่าความรี e (สมการที่ 3.10, 3.11 และ 3.12) ซึ่งหมายความว่าวงโคจรแบบไฮเปอร์โบลาจะมีความเร็วสูงที่สุด รองลงมาจะเป็นพาราโบลาและวงรีตามลำดับ ดังนั้นหัวข้อนี้จะเป็นการจำลองเปรียบเทียบผลระหว่าง 3 วงโคจรนี้(รูปที่ 5.3) โดยกำหนดให้ระยะห่างเริ่มต้นเป็น $R_0 = 6.0$ $M_2/M_1 = 1$ และ $q = 1.5$

จากรูปที่ 5.3 วงโคจรไฮเปอร์โบลาจะทำให้เกิดอันตรกิริยารุนแรงน้อยที่สุดโดยสังเกตจากโครงสร้างสะพานที่ยังคงสภาพให้เห็นอย่างชัดเจนได้นานกว่าทางโคจรอื่น และที่ $t = 9$ จะเห็นว่าสะพานยังคงอยู่แต่ส่วนหางกลับหายไป ส่วนวงโคจรวงรีจะเกิดอันตรกิริยารุนแรงที่สุดเห็นได้จากสะพานที่หายไปอย่างรวดเร็วและส่วนหางที่ยาวมากกว่าวงโคจรแบบอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ด้วยความเร็วสูงมากกว่าจะทำให้อันตรกิริยาเกิดรุนแรงน้อยกว่าเพราะช่วงเวลาที่ดาราจักรผ่านบริเวณจุดใกล้(เป็นบริเวณที่แรงไทดัลมีค่ามากที่สุด) จะน้อยกว่านั่นเอง



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบอันตรกิริยาระหว่าง 3 วงโคจร a) วงโคจรวงรี $e = 0.5$, อัตราเร็วการชน $v_q = 294$ km/s b) วงโคจรพาราโบลา $e = 1.0$, $v_q = 340$ km/s c) วงโคจรไฮเปอร์โบลา $e = 20.0$, $v_q = 1{,}101$ km/s แถวบนเป็นเวลา $t = 3$ แถวล่าง $t = 9$

5.2 ผลของระยะจุดใกล้

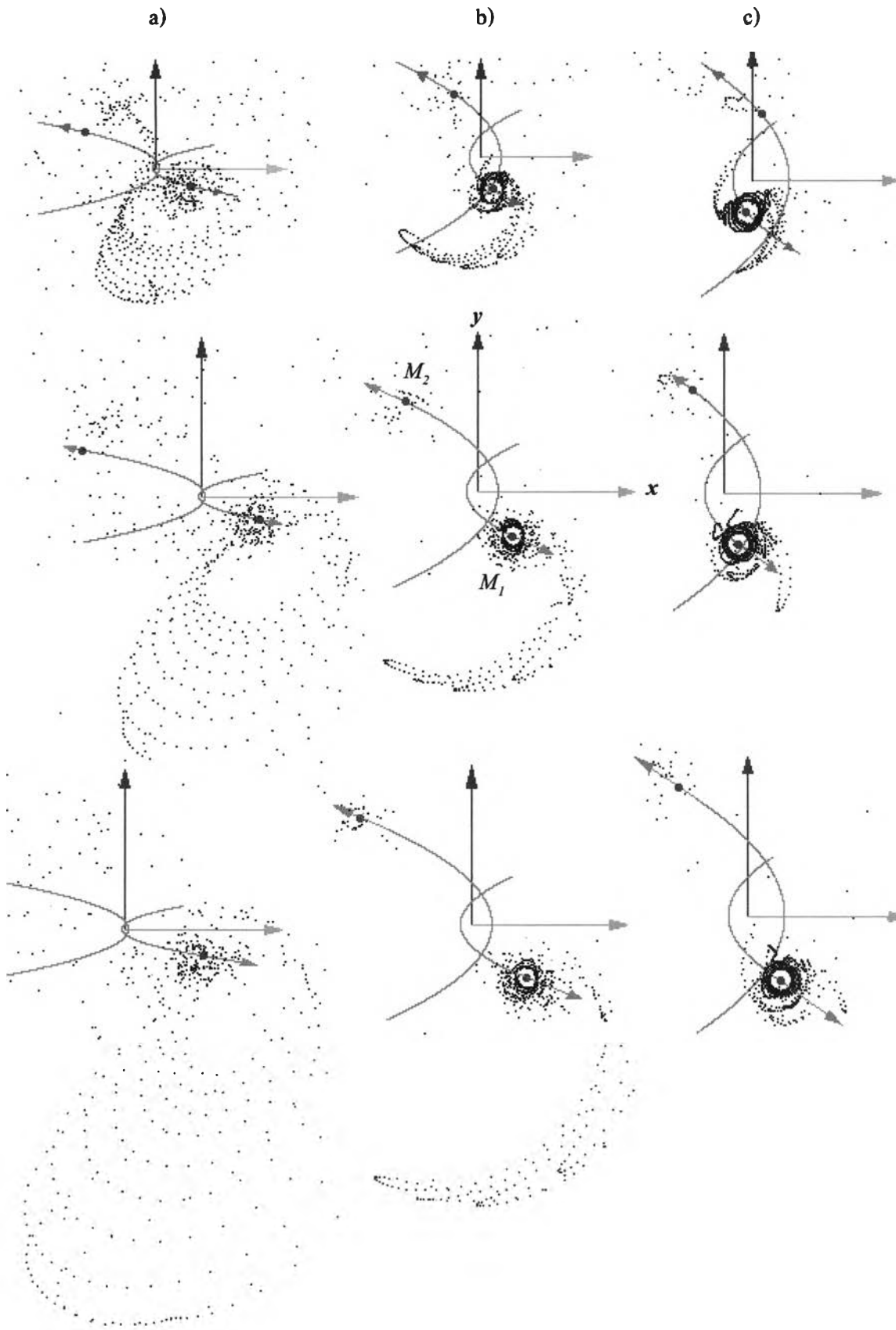
กำหนดให้วงโคจรเป็นแบบพาราโบลา $M_2/M_1 = 0.5$ ระนาบดาราจักรเป็นระนาบเดียวกันกับระนาบวงโคจรของดาราจักร รัศมีดาราจักรเท่ากับ *1* และระยะห่างเริ่มต้นของดาราจักรคือ $R_0 = 6$ ผลของอันตรกิริยาที่มีค่า q ต่างกันจะเป็นดังรูปที่ 5.4

จากรูปที่ 5.4 รูป a) $q = 0.2$ ที่เวลา $t = 3$ การที่ดาราจักรทั้งสองเข้ามาใกล้กันมากทำให้แรงไทดัล(สมการที่ 2.4) มากจนทำให้ดาราจักรเป้าสูญเสียดาวออกไปมาก สังเกตว่าที่เวลานี้ไม่เห็นสะพานแล้ว ส่วนที่เป็นหางก็จะม้วนตัวจนปลายของหางจะบรรจบกับศูนย์กลางของดาราจักรเป้า และตรงกลางของหางจะมีความหนามากกว่าส่วนอื่น ทำให้ดาราจักรเป้ามีลักษณะเหมือนรวงผึ้งที่มีรูโหว่อยู่ตรงกลาง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดของรวงผึ้งนี้ก็จะขยายใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ

รูป b) เมื่อระยะจุดใกล้ของดาราจักรมากขึ้นเป็น $q = 1.0$ จะเห็นลักษณะของหางชัดเจน แต่สะพานจะไม่สามารถคงตัวอยู่ได้เป็นเวลานานดังในรูปที่เวลา $t = 3$ ซึ่งสะพานได้สลายตัวไปแล้ว และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นส่วนของหางก็จะมีความยาวและความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

รูป c) เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างดาราจักรมากขึ้นไปอีกเป็น $q = 1.8$ ลักษณะของหางจะเรียวเล็กลงและสั้นลงด้วย แต่ที่เห็นชัดเจนมากขึ้นคือสะพานที่ยังคงตัวอยู่ได้นานมากกว่ากรณีที่ระยะห่างระหว่างดาราจักรมีค่าน้อยกว่า จะเห็นว่าที่เวลา $t = 3$ สะพานก็ยังสามารถคงสภาพอยู่ได้ แต่ส่วนหางกลับค่อยๆรวมตัวกับศูนย์กลางของดาราจักรเป้าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่เวลา $t = 9$ ส่วนหางและสะพานจะมีลักษณะเหมือนเป็นแขนเกลียวในดาราจักรเกลียวเท่านั้น

สังเกตว่าการเพิ่มหรือลดระยะจุดใกล้จะทำให้อัตราเร็วการชนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อผลการจำลองได้ อย่างไรก็ตามจากผลการจำลองในรูปที่ 5.4 ยังคงแสดงให้เห็นผลของการเพิ่มหรือลดลงของแรงไทดัลได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงไม่คำนึงถึงอัตราเร็วในการชนทั้งในหัวข้อนี้และหัวข้อต่อไป

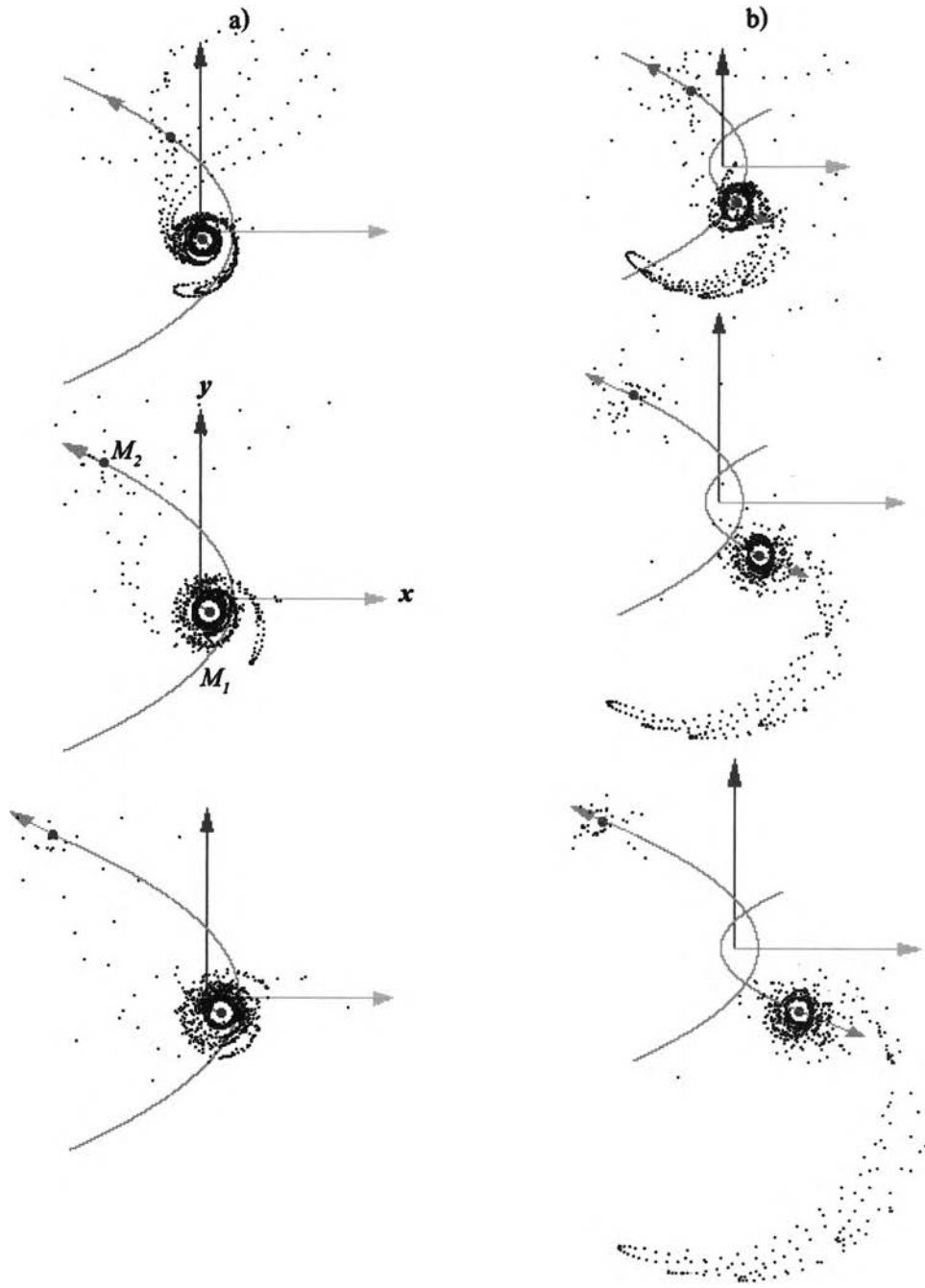


รูปที่ 5.4 ภาพอันตรกิริยาระหว่างดาราจักรเมื่อมองตั้งฉากกับระนาบวงโคจรของดาราจักร โดยแถวบนเป็นภาพที่เวลา $t = 3$ แถวกลาง $t = 6$ แถวล่าง $t = 9$ และภาพตามแนวหลัก a) $q = 0.2$ b) $q = 1.0$ c) $q = 1.8$

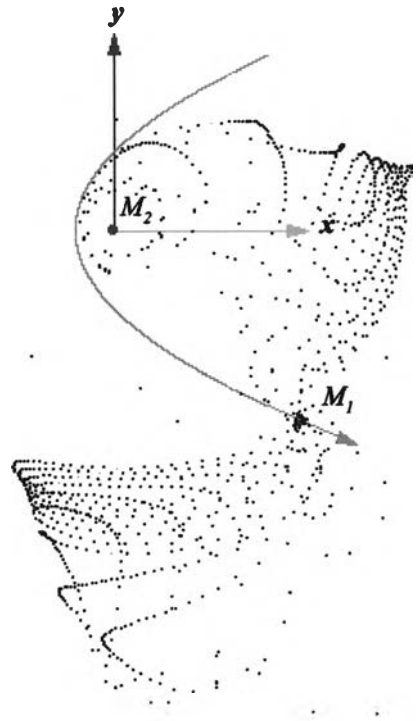
I 25199729

5.2 ผลของอัตราส่วนมวล

กำหนดให้วงโคจรเป็นแบบพาราโบลา $q = 1.0$ ระนาบดาราจักรเป็นระนาบเดียวกันกับระนาบวงโคจรของดาราจักร รัศมีดาราจักรเท่ากับ 1 และระยะห่างเริ่มต้นของดาราจักรคือ $R_0 = 6$ ผลของอันตรกิริยาที่มีค่า M_2/M_1 ต่างกันจะเป็นดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงภาพอันตรกิริยาระหว่างดาราจักรที่มีค่าอัตราส่วนมวล M_2/M_1 ต่างกัน a) 0.1 b) 0.5 แถวบน $t = 3$ แถวกลาง $t = 6$ แถวล่าง $t = 9$



รูปที่ 5.6 ภาพอันตรกิริยาเมื่ออัตราส่วนมวล $M_2/M_1 = 100$ ที่เวลา $t = 1$

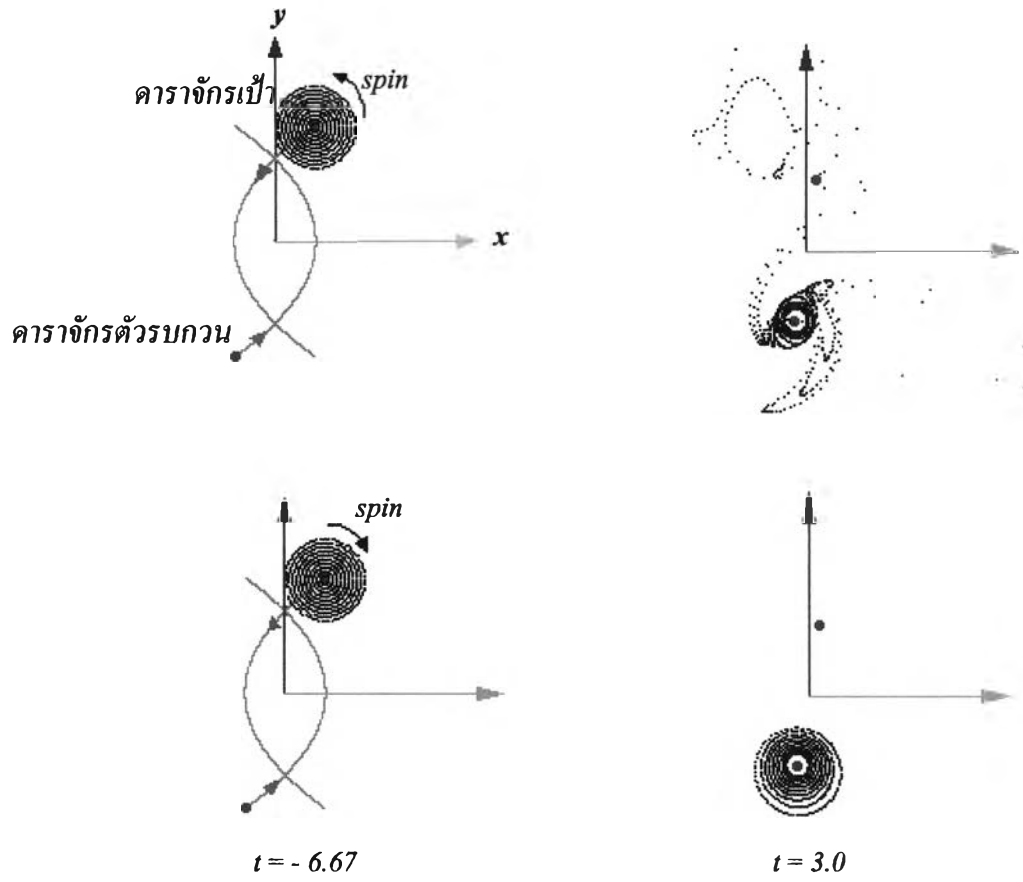
จากรูปที่ 5.5 จะเห็นแนวโน้มที่คล้ายกับกรณีการลดค่า q คือถ้าเพิ่มค่าอัตราส่วนมวล M_2/M_1 แรงไทดัลจะมากขึ้นทำให้สะพานคงตัวอยู่ได้ในเวลาไม่นานและส่วนของหางก็จะยาวขึ้น แต่สิ่งที่แตกต่างกันของกรณีการลดค่า q กับกรณีการเพิ่มอัตราส่วนมวลคือ เมื่อเพิ่มแรงรบกวนโดยเพิ่มอัตราส่วนมวลดังรูปที่ 5.6 ส่วนปลายของหางจะไม่บรรจบกับแก่นของดาราจักรเป้าอย่างในกรณีการลดค่า q

5.4 การหมุนทางเดียวกันและการหมุนสวนทางกัน

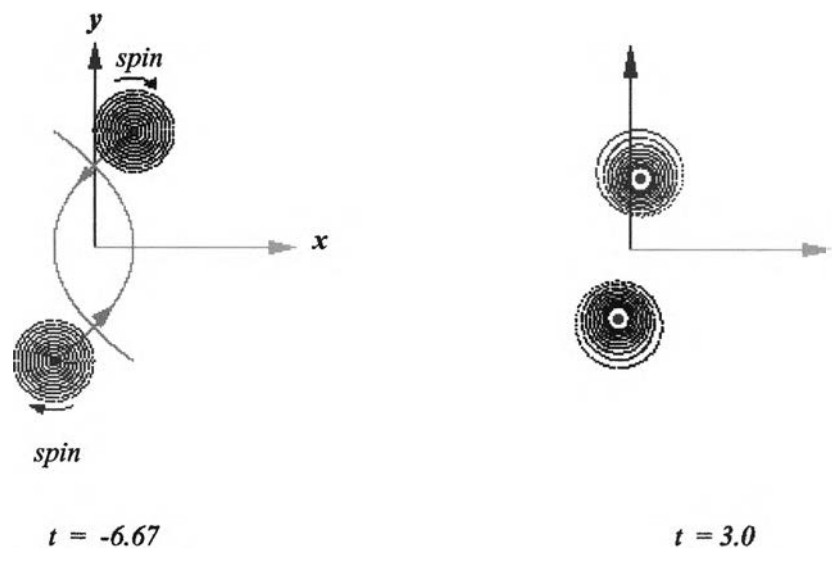
กำหนดให้วงโคจรเป็นแบบพาราโบลา $q = 2.0$ ระนาบดาราจักรเป็นระนาบเดียวกันกับระนาบวงโคจรของดาราจักร รัศมีดาราจักรเท่ากับ 1 ดาราจักรทั้งสองมีมวลเท่ากับ 1 และระยะห่างเริ่มต้นของดาราจักรคือ $R_0 = 6$ การหมุนของดาวภายในดาราจักรเทียบกับการหมุนสัมพัทธ์กันระหว่างดาราจักรจะมีสองแบบคือหมุนในทิศทางเดียวกัน(prograde) และหมุนสวนทางกัน(retrograde) ซึ่งทั้งสองกรณีจะให้ผลการจำลองที่ออกมาแตกต่างกันมาก

จากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าการหมุนแบบสวนทางกันจะทำให้ดาราจักรถูกรบกวนน้อยกว่ากรณีการหมุนทิศทางเดียวกันมาก การรบกวนจะเกิดชัดเจนกับ 3 วงโคจรนอกสุดของดาราจักรเท่านั้น และการรบกวนก็เพียงแต่ทำให้วงโคจรของดาวมีลักษณะกลายเป็นวงรีเล็กน้อยแตกต่างจาก

ตอนเริ่มต้นซึ่งกำหนดให้เป็นวงโคจรวงกลม เหตุการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาให้ดาวโคจรเป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของตัวเป้าซึ่งมีอัตราเร็วเชิงมุมเฉลี่ยเป็น $\omega_s = \sqrt{(GM/r^3)}$ และอัตราเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของดาราจักรเป็น $\omega_G = \sqrt{2GM(1+e)/q^3}$ (ค่านี้เป็นอัตราเร็วเชิงมุมเฉลี่ยของดาราจักรตัวรบกวนเมื่อดาราจักรมีตำแหน่งอยู่บริเวณใกล้ๆกับจุดใกล้ ของวงโคจร โดยคำนวณจากค่าโมเมนตัมเชิงมุมในตารางที่ ก.1 สมมติให้มวลของดาราจักรทั้งสองมีค่าเท่ากันและระยะห่างระหว่างดาราจักรคือ q)[5] e คือค่าความรี q คือระยะจุดใกล้ และ M คือมวลของดาราจักรเป้าและดาราจักรตัวรบกวน ในกรณีที่ทิศทางการหมุนของดาวในดาราจักรเป้าเป็นทิศทางเดียวกันกับการหมุนของดาราจักรตัวรบกวน ถ้าให้ $e = 1$ อัตราเร็วเชิงมุมของทั้งสองจะเท่ากัน (resonance) สำหรับดาวที่อยู่ที่ระยะ $r \approx 0.4q$ ที่ตำแหน่งนี้จะเกิดการรบกวนมากที่สุด เพราะด้านที่ถูกแรงไทดัลดึงออกจากจุดศูนย์กลางมากที่สุด(ดาวมีตำแหน่งอยู่บนเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างดาราจักร)ก็จะถูกดึงออกตลอดเวลา ด้านที่ถูกแรงไทดัลดึงเข้ามากที่สุด(เป็นจุดที่มีตำแหน่งเชิงมุม บริเวณ 90° และ 270° เทียบกับเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างดาราจักร)ก็จะถูกดึงเข้าสู่ศูนย์กลางดาราจักรเป้าตลอดเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าทิศทางการหมุนของดาวในดาราจักรเป้าและดาราจักรตัวรบกวนเป็นแบบสวนทางกัน ดาวในดาราจักรเป้าจะมีตำแหน่งเชิงมุมเปลี่ยนไปตามเวลา สลับกันระหว่างตำแหน่งที่ถูกแรงไทดัลดึงออกจากศูนย์กลางของดาราจักรเป้ากับตำแหน่งที่ถูกแรงไทดัลดึงเข้าสู่จุดศูนย์กลาง ดาวที่มีทิศทางการหมุนแบบสวนทางเหล่านี้จะถูกแรงไทดัลดึงเข้าและดึงออกจากศูนย์กลางดาราจักรสลับกันไปมาอย่างรวดเร็ว ทำให้ผลการรบกวนสุทธิเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย[5] รูปที่ 5.8 เป็นกรณีที่ให้ดาราจักรทั้งสองมีดาวโคจรอยู่โดยรอบ ดาราจักรทั้งสองจะถูกรบกวนด้วยแรงรบกวนที่เหมือนกัน ทำให้รูปร่างภายหลังจากการรบกวนของดาราจักรทั้งสองเหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 5.7 รูปบนจะเป็นกรณีการหมุนทิศเดียวกัน รูปล่างจะเป็นการหมุนสวนทางกันโดยวงโคจรสัมพัทธ์ของดาราจักรจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาแต่ดาวในดาราจักรจะหมุนตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.8 การหมุนสวนทางกรณีที่ดาราจักรทั้งสองมีดาวโคจรอยู่โดยรอบ

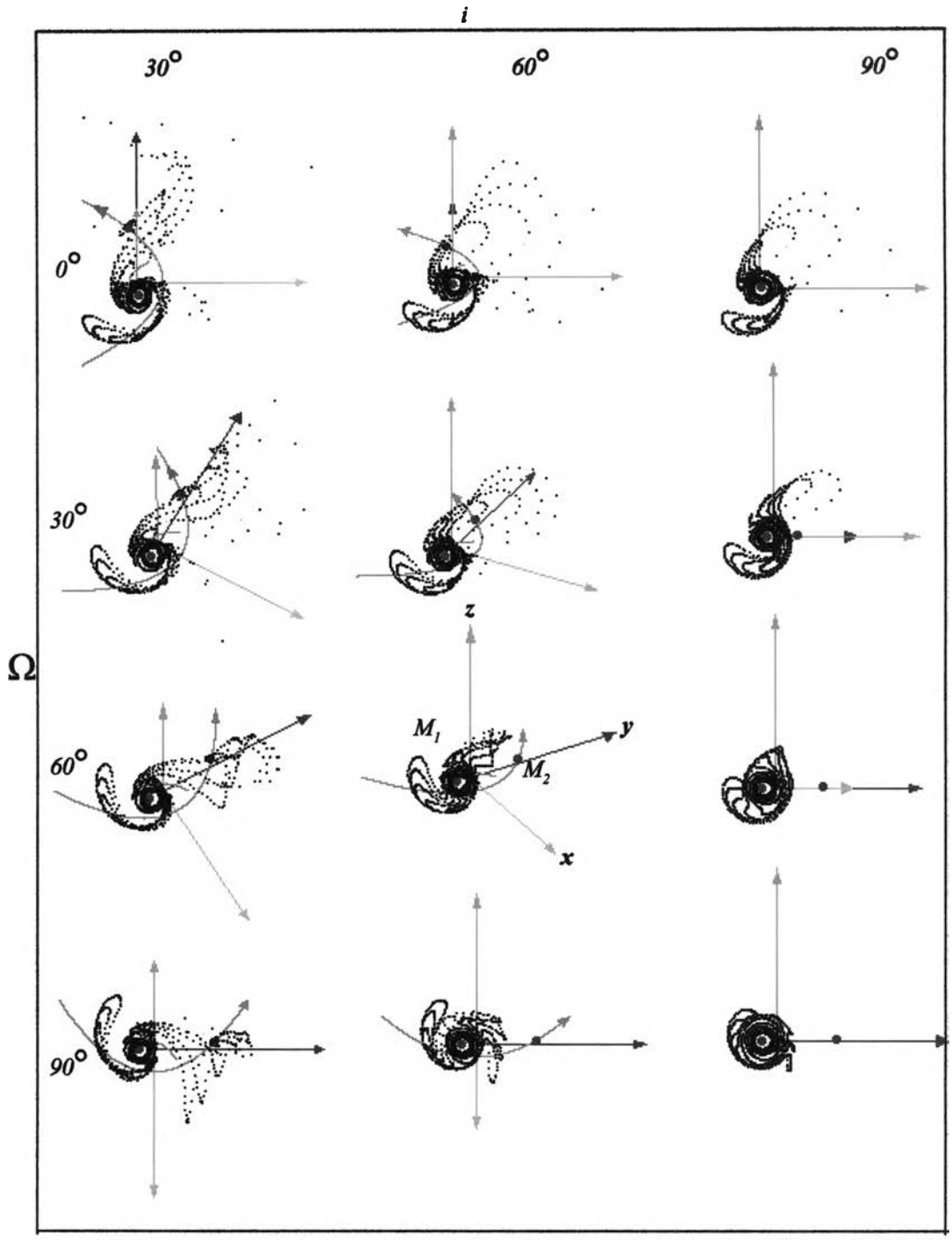
5.5 ผลของความเอียงของระนาบดาราจักรเทียบกับระนาบวงโคจร

หัวข้อที่ผ่านมาเป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างดาราจักรในกรณีพิเศษที่ระนาบดาราจักรและระนาบวงโคจรสัมพัทธ์ระหว่างดาราจักรเป็นระนาบเดียวกัน แต่โดยทั่วไประนาบทั้งสองมักจะทำมุมเอียง โดยทิศทางการวางตัวของระนาบดาราจักรสัมพัทธ์กับระนาบวงโคจรจะระบุเป็นมุมเอียง i และระยะมุมของเส้นตัดระนาบ Ω ดังรูปที่ 3.2 ในหัวข้อนี้จะจำลองภาพอันตรกิริยาที่มีค่าพารามิเตอร์ระบุทิศทางของระนาบดาราจักร i และ Ω ที่แตกต่างกันไป ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 5.9

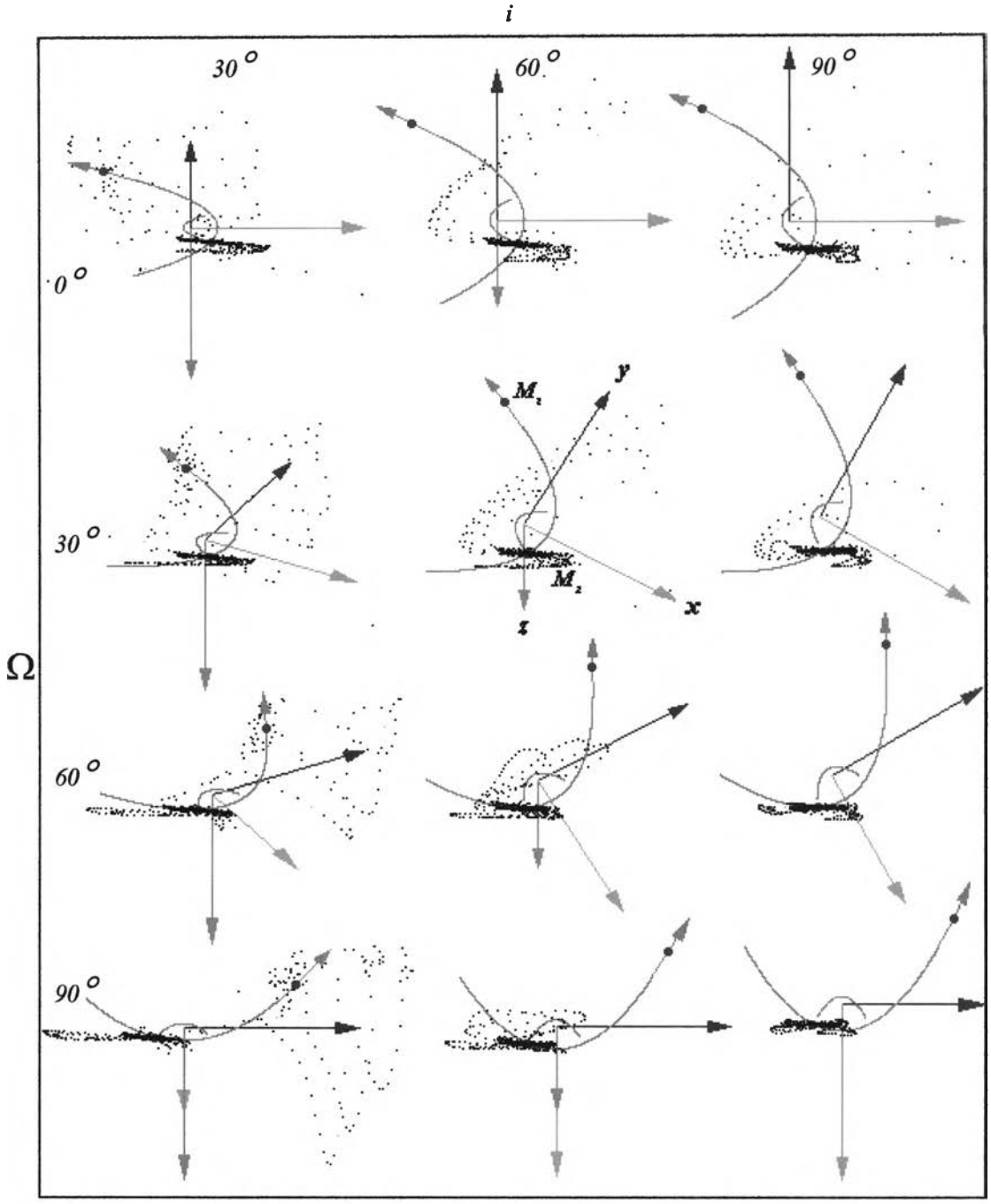
ในรูปที่ 5.9 จะเป็นการจำลองที่มีค่า i เท่ากับ 30° ถึง 90° และค่า Ω เท่ากับ 0°ถึง 90° ผลการจำลองที่ i มีค่าน้อย $(i = 30^\circ)$ เมื่อเพิ่มค่า Ω ผลที่ได้ก็ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เช่นเดียวกันกับกรณีที่ Ω มีค่าน้อย $(\Omega = 0^\circ)$ เมื่อเพิ่ม i ก็ไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน แต่ถ้า i และ Ω มีค่ามาก $(i \geq 60^\circ, \Omega \geq 30^\circ)$ อันตรกิริยาจะมีความรุนแรงลดลงเมื่อ i และ Ω มีค่ามากขึ้น

เมื่อเปลี่ยนมุมมองมาเป็นทิศทางจากด้านข้างดาราจักรดังรูปที่ 5.10 สังเกตว่าการกระจายตัวของดาวในทิศทางตั้งฉากกับระนาบดาราจักรจะเกิดขึ้นได้มากในกรณีของสะพาน แต่ในกรณีของหางจะเห็นว่าการกระจายตัวของดาวในทิศตั้งฉากกับระนาบของดาราจักรเกิดขึ้นไม่มากนัก ความหนาของหางไม่มาก และแนวหางก็จะเบี่ยงเบนออกจากระนาบดาราจักรไม่มากนัก โดยเฉพาะกรณีที่ $\Omega = 90^\circ$

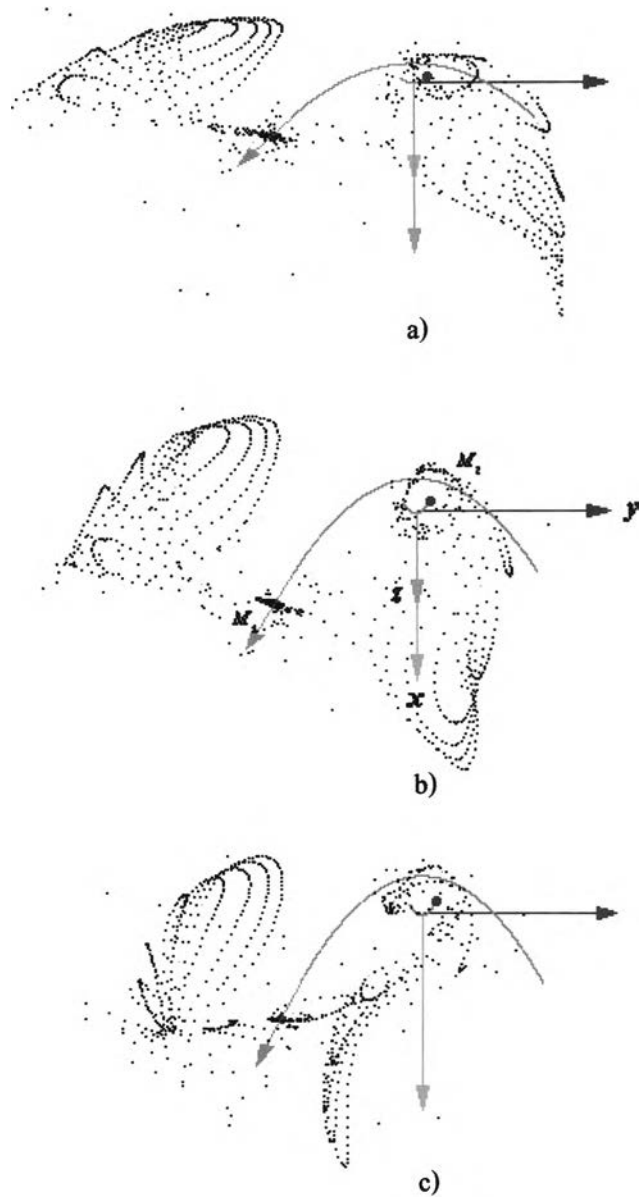
รูปที่ 5.10 นั้น ดาราจักรเป้ามีมวลมากกว่าดาราจักรตัวรบกวนถึง 4 เท่า แรงไทดัลจึงไม่มากนัก ในกรณีที่เพิ่มแรงไทดัลให้มากขึ้นเช่นเพิ่มมวลของดาราจักรตัวรบกวนให้มากขึ้น ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งให้ดาราจักรตัวรบกวนมีมวลมากกว่าดาราจักรเป้า 10 เท่า จะเห็นว่าแรงรบกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้ดาวในส่วนหางมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในทิศทางตั้งฉากกับระนาบดาราจักรมากขึ้น และหางจะไม่มีลักษณะเป็นแถบบางอีกต่อไป



รูปที่ 5.9 การจำลองที่มีค่า i เท่ากับ 30° ถึง 90° และค่า Ω เท่ากับ 0° ถึง 90° กำหนดให้ $R_0 = 4.0$, $M_2/M_1 = 0.25$, $q = 1.0$, $e = 1.0$ รูปนี้เป็นการแสดงผลขณะเวลา $t = 2.0$ และมุมมองภาพจะเป็น $\beta = -i$, $\lambda = -\Omega$ ซึ่งเป็นมุมมองที่ตั้งฉากกับระนาบดาราจักร M_1



รูปที่ 5.10 เป็นรูปเดียวกันกับรูปที่ 5.8 แต่เป็นเวลา $t_0 = 6.0$ และมองจากด้านข้างของดาราจักร M_1 โดยกำหนดทิศทางการมองเป็น $\beta = 90^\circ - i$, $\lambda = -\Omega$



รูปที่ 5.11 เป็นภาพที่เวลา $t = 2.0$ **เมื่อมองจากด้านข้างของดาราจักร** M_1 **การกำหนดค่าพารามิเตอร์เหมือนกับ รูปที่ 5.8 แต่จะกำหนดให้** $M_2/M_1 = 10$ **รูปทั้งสามมี** $\Omega = 90^{o}$ **แต่มีค่า** i **ต่างกันคือ a)** $i = 30^{o}$ **b)** $i = 60^{o}$ **c)** $i = 90^{o}$