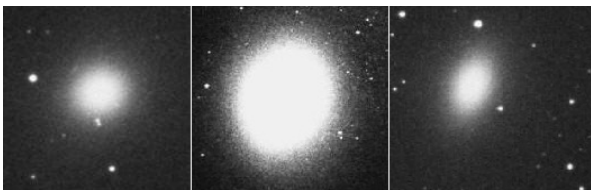


การก่อกำเนิดดาราจักรรี: จากเอกภพสู่แบบจำลองทางฟิสิกส์

ธีรวุฒิ วรจิพูนผล¹

ลักษณะทั่วไปของดาราจักรรี

ดาราจักรรี (elliptical galaxy) ได้ถูกสังเกตการณ์มาเป็นเวลานาน และเป็นหนึ่งในดาราจักรชนิดหลักของลำดับฮับเบิล (Hubble sequence) ร่วมกับดาราจักรก้นหอย (spiral galaxy) ซึ่งในกลุ่มของดาราจักรรี เราสามารถจำแนกระดับของความรีที่ปรากฏบนท้องฟ้า ได้ตั้งแต่ E0 (วงกลม) จนถึง E7 (วงรี) โดยที่ จำนวนเต็ม คือตัวเลขที่ระบุความรี คำนวณจากค่าความรีของเส้นไอโซโฟต (isophote) คูณด้วยจำนวนเต็ม 10 หรืออีกนัยหนึ่ง ค่าความรีของดาราจักรสามารถบอกได้โดยอ้างอิงกับความรีของมวลส่องสว่างนั่นเอง เหตุผลที่เราไม่สามารถพบดาราจักรรีที่มีความรีมากกว่า E7 เชื่อว่า ยิ่งดาราจักรมีความรีมาก มันจะยังไม่เสถียรและมันจะม้วนตัวเพื่อลดความรีของตัวเอง ในขณะที่ดาราจักรชนิด E3 เป็นชนิดที่ถูกสังเกตเห็นได้มากที่สุด ตัวอย่างของดาราจักรรี ที่มีค่าความรีต่างๆ แสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 ดาราจักร M89 (ซ้าย), M32 (กลาง) และ NGC4621 (ขวา) ซึ่งเป็นชนิด E0, E2 และ E7 ตามลำดับ (รูปภาพโดย <http://cas.sdss.org/dr6/en/proj/basic/galaxies/ellipticals.asp>)

ถึงแม้ดาราจักรรีจะถูกค้นพบได้โดยทั่วไป แต่ความเข้าใจในวิวัฒนาการของรูปร่างยังคงเป็นปริศนาสำหรับนักดาราศาสตร์จนถึงทุกวันนี้ หนึ่งในคำถามที่ยังคงรอการพิสูจน์คือค่าความสว่าง

ของดาราจักรรีที่เป็นเอกลักษณ์เด่นชัด คือ ความส่องสว่างพื้นผิวจะลดลงตามระยะจากจุดศูนย์กลางตาม กฎของเดอ วาคูเลออร์ (de Vaucouleurs' law) [1] ซึ่งกล่าวไว้ว่า ค่าลอการิทึมของความส่องสว่างของพื้นผิวจะแปรผกผันกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางยกกำลัง 1/4 อย่างไรก็ตาม ถึงแม้กฎนี้จะเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง แต่นักดาราศาสตร์ก็ยังไม่สามารถอธิบายในเชิงทฤษฎีได้ว่าดาราจักรรีมีความส่องสว่างเป็นลักษณะนี้ได้อย่างไร คำอธิบายที่ใกล้เคียงที่สุด คือ หากความหนาแน่นของดาราจักรลดลงตามรัศมีในลักษณะที่แปรผกผันกับรัศมียกกำลัง 4 ระบบจะสามารถให้ค่าความส่องสว่างพื้นผิวที่มีลักษณะดังที่สังเกตเห็นซึ่งการพิสูจน์ดังกล่าวเป็นเพียงการประมาณทางอ้อม โดยอิงกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น นอกจากนี้ การจำลองทางคอมพิวเตอร์มากมายแสดงให้เห็นว่า ไม่ใช่ทุกระบบที่สามารถวิวัฒนาการเข้าสู่ความหนาแน่นดังกล่าว เลขยกกำลังของความหนาแน่นเทียบกับรัศมีสามารถอยู่ในช่วง 3-4 ขึ้นกับเงื่อนไขเริ่มต้น

ในเชิงกลศาสตร์สถิติ สมดุลหลักของระบบไม่ว่าจะเป็นระบบที่อยู่ภายใต้อันตรกิริยาใดๆ คือ สมดุลอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic equilibrium) ซึ่งเป็นสมดุลที่มีเอนโทรปีของโบลซ์มานน์ (Boltzmann entropy) สูงสุด ในทางดาราศาสตร์ หากพิจารณาว่าระบบดาราจักรเป็นระบบที่มีแรงดึงดูดในตัวเอง สมดุลอุณหพลศาสตร์ของระบบดังกล่าว คือ 'ทรงกลมไอโซเทอร์มอล' (isothermal sphere) [2] ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญ คือ ความหนาแน่นจะแปรผกผันกับรัศมีของระบบจากจุดศูนย์กลางยกกำลัง 2 แต่ในทางปฏิบัติ การจะพิสูจน์ว่าดาราจักรอยู่ในสถานะทรงกลมไอโซเทอร์มอลหรือไม่ ค่อนข้างเป็นไปได้ยาก เพราะเราไม่สามารถวัดความหนาแน่นของดาราจักรได้โดยตรง นอกจากนี้ จากที่กล่าวมาข้างต้น ระบบจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ให้ความหนาแน่น

¹ อาจารย์ (ดร.) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ที่แปรผกผันกับรัศมีเป็นเลขยกกำลังในช่วง 3-4 ซึ่งจะชันกว่าที่ทฤษฎีทรงกลมไอโซเทอร์มอลทำนายไว้ นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์อายุของดาราจักร ยิ่งทำให้ยิ่งชัดเจนว่า ดาราจักรไม่มีทางที่จะอยู่ในสถานะทรงกลมไอโซเทอร์มอลได้ เพราะมีอายุน้อยกว่าระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลอุณหพลศาสตร์มาก ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวมีค่านานกว่าอายุของเอกภพ

ทฤษฎีที่สำคัญในยุคแรก

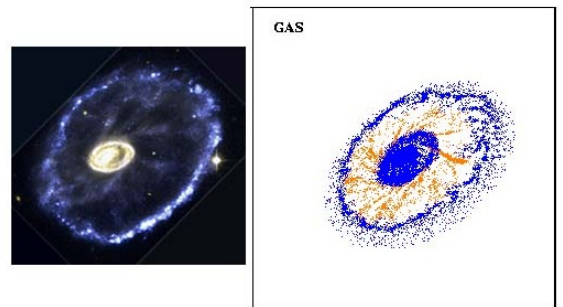
หนึ่งในทฤษฎีทางเลือกยุคแรกเริ่มที่พยายามจะอธิบายการกระจายตัวของความสว่าง ได้ถูกเสนอโดย โดนัลด์ ลินเดน-เบลล์ (Donald Lynden-Bell) [3] ซึ่งกล่าวว่า ดาราจักรที่สังเกตเห็นในปัจจุบัน อยู่ใน **สถานะกึ่งหยุดนิ่ง (quasi-stationary state)** เป็นผลจากการผ่อนคลายแบบไม่มีการชน (collisionless relaxation) ของกลุ่มแก๊สก่อนดาราจักร ซึ่งสถานะดังกล่าวเป็นสถานะกึ่งกลางก่อนที่จะวิวัฒนาการต่อไปสู่สมดุลอุณหพลศาสตร์ เหตุผลที่ทฤษฎีนี้มีความเป็นไปได้ คือ อายุของสถานะดังกล่าวจากการประมาณการโดยการแกว่งกวัดของสนามศักย์ พบว่าสั้นกว่าอายุของเอกภพมาก และมีค่าน้อยกว่าอายุของดาราจักร นอกจากนี้ ลินเดน-เบลล์ ยังได้ทำนายฟังก์ชันการกระจายตัวสำหรับดาราจักรรีไว้ด้วย โดยที่ ฟังก์ชันการกระจายตัว ที่ลินเดน-เบลล์ทำนายไว้มีลักษณะคล้ายกับสถิติของเฟอร์มี-ดิแรก เนื่องจากลินเดน-เบลล์มองว่า วิวัฒนาการของดาราจักรในช่วงแรกเป็นไปตาม หลักการกีดกันของเพาลี นั่นคือ แต่ละส่วนประกอบของดาราจักรไม่สามารถอยู่ในตำแหน่งและความเร็วเหมือนกันได้ และเคลื่อนที่อยู่ภายใต้สนามเฉลี่ย (mean-field) ของทั้งระบบ โดยที่อิทธิพลของสนามแรงจากอนุภาคข้างเคียงเกือบจะไม่มีผลในวิวัฒนาการ แต่จากความซับซ้อนในเงื่อนไขทางสถิติของทฤษฎีของลินเดน-เบลล์ และข้อจำกัดในการสังเกตการณ์ ทำให้การพิสูจน์ทฤษฎีของเขาเกี่ยวกับดาราจักรรีเกือบจะเป็นไปไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ทฤษฎีของเขายังไม่สามารถถูกตรวจสอบจากข้อมูลเชิงปริมาณ แต่แนวคิดที่ว่าดาราจักรรีเป็นสถานะกึ่งสถิตยซึ่งเป็นผลจากการผ่อนคลายแบบไม่มีการชนภายใต้สนามเฉลี่ย ยังคงได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ทั้งในสาขาดาราศาสตร์ และสาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

ถึงแม้นักดาราศาสตร์ยังไม่สามารถอธิบายการกระจายความสว่างของดาราจักรรีได้อย่างละเอียด แต่ปัญหาการเกิดรูปร่าง

รีก็ถูกศึกษากันอย่างกว้างขวางโดยละเว้นข้อสงสัยในการกระจายตัวของความสว่างไว้ สมมุติฐานของการก่อกำเนิดรูปร่างรีแบ่งเป็นสองกลุ่มหลัก คือ

- 1) การชนและการรวมกันของดาราจักร
- 2) การยุบตัวอย่างรุนแรงของกลุ่มแก๊สเริ่มต้น

สมมุติฐานแรก จะมุ่งเน้นไปที่ดาราจักร 2 อัน (หรือมากกว่านั้น) เข้าชนกันและรวมกันเป็นดาราจักรสุดท้ายที่มีความรีจากสมมุติฐานนี้ ทำให้เกิดแบบจำลองการชนมากมาย และให้ผลลัพธ์ที่มีความรีคล้ายกับดาราจักรที่สังเกตเห็นบนท้องฟ้า เหตุผลที่มองว่าดาราจักรรีสามารถเกิดจากการชนกัน คือ การชนและรวมกันอย่างรุนแรงของดาราจักร ทำให้วงโคจรของดาวฤกษ์ในดาราจักรมีลักษณะไม่เป็นระเบียบและกระจายตัวอยู่ทุกทิศทาง ซึ่งสอดคล้องกับวงโคจรของดาวฤกษ์ในดาราจักรรีที่สังเกตเห็น ยิ่งไปกว่านั้น แบบจำลองการชนของดาราจักร สามารถจำลองการเกิดดาราจักรแปลกอีกบางอัน เช่น ดาราจักรล้อเกวียน (cartwheel galaxy) [4] ซึ่งผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถเปรียบเทียบกับ การสังเกตการณ์ดังแสดงใน รูปที่ 2



รูปที่ 2 (ซ้าย) ภาพดาราจักรล้อเกวียนที่สังเกตเห็นในปัจจุบัน (ขวา) ภาพจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงตำแหน่งของแก๊สในระบบ (ภาพ จาก Horellou & Combes, 2000 [4] หรือ <http://aramis.obspm.fr/~combes>)

นอกจากนี้ การจำลองที่มีความซับซ้อนขึ้น เช่น การใส่แก๊สร้อนหรือการจำลองแบบอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamics) หรือการหาอัลกอริทึมในการจำลองระบบที่ประหยัดเวลามากขึ้น ก็ได้มีการพัฒนาขึ้นเช่นกันเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของดาราจักรจริงที่มี

แก๊สร้อนเป็นส่วนประกอบ มีจำนวนดาวฤกษ์มาก และมีการก่อกำเนิดของดาวฤกษ์ภายใน อย่างไรก็ตาม ถึงแม้การศึกษาดารจักรในแบบจำลองนี้สามารถสร้างดาราจักรที่มีความหลากหลาย แต่กรอบความเข้าใจยังคงขึ้นกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นหลัก

สำหรับสมมุติฐานที่สอง คือ การยุบตัวของกลุ่มแก๊สก่อนดาราจักร จะมุ่งเน้นไปที่ระบบโคจรเดี่ยว ที่อยู่ภายใต้แรงดึงดูดที่ไม่เสถียรกับการยุบตัว หรือในอีกความหมายหนึ่งก็คือ แนวคิดนี้ศึกษาการเกิดเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นทรงรีของระบบที่ยุบตัวลงจากแรงดึงดูดนั่นเอง ซึ่งระบบเริ่มต้นในแบบจำลองนี้ มักจะมีสมมาตรทรงกลม การยุบตัวของระบบ สามารถมองได้ว่าเป็นระบบ 'ไอโซทรอปิก' ที่มีการเคลื่อนที่พุ่งเข้าในแนวรัศมีเป็นหลัก (radially anisotropic) ซึ่งนักดาราศาสตร์เชื่อว่าระบบดังกล่าวจะไม่เสถียรต่อการเปลี่ยนรูปร่าง ระบบจึงสามารถวิวัฒนาการไปสู่รูปร่างทรงรีได้ ซึ่งสมมุติฐานนี้ ได้รับการพิสูจน์ด้วยการจำลองคอมพิวเตอร์ และพบว่า ระบบในสมมาตรทรงกลมที่เย็น จะยุบตัวลงในแนวรัศมีและผลลัพธ์ที่ได้คือระบบมีความรีเกิดขึ้น ซึ่งความรียิ่งจะขึ้นกับตัวแปรเริ่มต้นของระบบต่างๆ เช่น ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นในแนวรัศมี การแพร่กระจายของความเร็ว เป็นต้น ซึ่งการก่อกำเนิดรูปร่างรีจากระบบที่ยุบตัวในแนวรัศมีนี้ นักดาราศาสตร์หลายคนเชื่อว่าเชื่อมโยงกับความไม่เสถียรที่รู้จักในชื่อ 'ความไม่เสถียรของวงโคจรในแนวรัศมี' (radial orbit instability) [5] ซึ่งกล่าวว่า ในสมมูลของระบบที่มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีเป็นหลัก ระบบจะไม่เสถียร และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างมาก

ถึงแม้ความไม่เสถียรดังกล่าว จะเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าเป็นต้นกำเนิดของรูปร่างรี (หรือรูปร่างอสมมาตร) ของระบบ แต่การพิสูจน์ในเชิงทฤษฎีอย่างรัดกุมของความไม่เสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวยังคงไม่สามารถพิสูจน์ได้โดยตรง ในปัจจุบัน ทฤษฎีดังกล่าวสามารถอนุมานได้โดยอ้อมจากข้อสรุปดังต่อไปนี้

ก) ในระบบที่ไอโซทรอปิกในเชิงทั่วไป ระบบจะมีเสถียรภาพเสมอหากฟังก์ชันการกระจายตัว (distribution function) เป็นฟังก์ชันลดกับพลังงาน [6]

ข) ในระบบที่ไม่ไอโซทรอปิกที่เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นชนิดโพลีโทรป (polytrope) ซึ่งมีสมการสถานะ (equation of state)

ระหว่างความดัน และความหนาแน่น เป็นสมการยกกำลัง (power law) จากการศึกษาพบว่า หากการกระจายตัวของความเร็วอยู่ในแนวรัศมีทั้งหมด ระบบจะไม่มีเสถียรภาพต่อการรบกวนภายนอก [7]

ค) ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ หากระบบอนุภาคมีวงโคจรส่วนใหญ่อยู่ในแนวรัศมี หรือระบบมีวิวัฒนาการโดยการยุบตัว ระบบจะสูญเสียรูปร่างเดิมซึ่งอาจเป็นรูปร่างใหม่ที่มีลักษณะสามแกน (triaxial) [8] ซึ่งก็คือทรงรีที่มีแกนหลักสามแกนที่ยาวไม่เท่ากันนั่นเอง

จะเห็นได้ว่า ในข้อพิสูจน์ 3 ข้อดังกล่าว ไม่มีส่วนใดที่สามารถบอกได้ว่า ความไม่เสถียรของระบบจากการที่มีวงโคจรในแนวรัศมีเป็นหลัก จะเชื่อมโยงโดยตรงกับการเปลี่ยนของรูปร่างหรือ วงโคจรในแนวรัศมีจะทำให้เกิดรูปร่างรีได้เลย สิ่งนี้นักดาราศาสตร์ทราบ ได้มาจากการอนุมานทางอ้อมกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น นอกจากนี้ รูปร่างแท้จริง (intrinsic shape) ในสามมิติ ก็ยังคงเป็นปัญหาที่นักดาราศาสตร์ไม่สามารถตอบได้ชัดเจน เนื่องจากสิ่งนี้นักดาราศาสตร์สามารถสังเกตเห็นคือรูปร่างที่ปรากฏใน 2 มิติเท่านั้น ที่ปรากฏเป็นวงรี ซึ่งรูปร่างแท้จริงสามารถเป็นได้ทั้งแบบทรงกลมยืด (prolate) ทรงกลมแบน (oblate) หรือแบบสามแกน (triaxial) [9]

ถึงแม้ความเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีความไม่เสถียรกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะไม่เด่นชัด นักดาราศาสตร์ก็ยังคงพยายามศึกษาเงื่อนไขของเสถียรภาพอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการจำลองทางคอมพิวเตอร์เป็นหลัก ในการกำหนดขีดจำกัดของความเสถียรภาพในช่วงต้น นักดาราศาสตร์หลายกลุ่มได้กำหนดตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาเพื่อทำการศึกษ ตัวแปรที่พื้นฐานที่สุด คือ อัตราส่วนไวเรียล (virial ratio) ซึ่งคำนวณจากสองเท่าของพลังงานจลน์หารด้วยพลังงานศักย์ของระบบ [10] ในกรณีที่เงื่อนไขเริ่มต้นมีอัตราส่วนไวเรียลต่ำ ระบบจะยุบตัวในแนวรัศมี ซึ่งในกรณีนี้จะคล้ายกับกรณีที่ระบบอยู่ในสถานะที่วงโคจรส่วนใหญ่อยู่ในแนวรัศมีและมีการวิวัฒนาการ จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่า วิวัฒนาการที่เกิดจากการยุบตัวของระบบ สามารถนำไปสู่ระบบสุดท้ายที่มีลักษณะทรงรีใน 3 มิติได้ จากการทดลองโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหลายกลุ่ม พบว่า ขีดจำกัดของอัตราส่วนไวเรียลสูงสุดที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบที่มีความ

หนาแน่นเริ่มต้นต่างๆ อยู่ที่ประมาณ 0.1 (หมายเหตุ ที่สมดุลเชิงพลวัต (dynamical equilibrium) อัตราส่วนไวเรียลมีค่าเท่ากับ 1 ระบบในภาพรวมจะหยุดนิ่ง) ในกรณีที่มีการกระจายความเร็วแบบไอโซโทรปิก เมื่ออัตราส่วนไวเรียลมีค่าสูงกว่านี้จะเกิดการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของระบบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการกระจายความเร็วที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนไวเรียลมีผลคล้ายกับการเพิ่มความดันของแก๊สตามทฤษฎีจลน์ เพื่อด้านการยุบตัวจากแรงดึงดูด ระบบเลขเสถียรต่อการเปลี่ยนรูปร่างนั่นเอง

นอกจากอัตราส่วนไวเรียล ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถใช้ศึกษา และมีความเชื่อมโยงมากกว่า คือ อัตราส่วนความไม่ไอโซโทรปี (anisotropic ratio) ของระบบเริ่มต้น [11] โดยคำนวณจากอัตราส่วนของพลังงานจลน์ในแนวรัศมีต่อพลังงานจลน์ในแนวเส้นสัมผัสวง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 (การเคลื่อนที่ทั้งหมดอยู่ในแนวเส้นสัมผัสผิวทรงกลม) จนถึง อนันต์ (การเคลื่อนที่ทั้งหมดอยู่ในแนวรัศมี) จากการศึกษา พบว่า หากระบบมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวสูง ซึ่งหมายถึงวงโคจรของอนุภาคอยู่ในแนวรัศมีเป็นหลัก ระบบจะมีโอกาสการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมาก อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ผลดังกล่าวจะเป็นที่คาดการณ์ได้ แต่จุดแบ่งเฟส ซึ่งสามารถมองว่าเป็นเส้นแบ่งระหว่าง สถานะที่เกิดวิวัฒนาการรูปร่าง กับ สถานะที่รูปร่างเสถียร สามารถอนุมานโดยอ้อมจากการจำลองคอมพิวเตอร์เท่านั้น เงื่อนไขของความไม่เสถียรภาพที่แน่ชัดยังไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง

การศึกษาทางทฤษฎีในยุคปัจจุบัน

ต่อมา การศึกษาเสถียรภาพเริ่มมีความซับซ้อนมากขึ้น นักดาราศาสตร์บางกลุ่มได้เชื่อมโยง ระดับความไม่เสถียรกับค่าการกระเพื่อมของความหนาแน่นเริ่มต้น (initial density fluctuation) ของเงื่อนไขเริ่มต้นในระบบอนุภาค N ตัว โดยเสนอว่า ยิ่งการกระเพื่อมของความหนาแน่นมีแอมพลิจูดสูง ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงตาม การศึกษาในหัวข้อนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 มุมมอง คือ

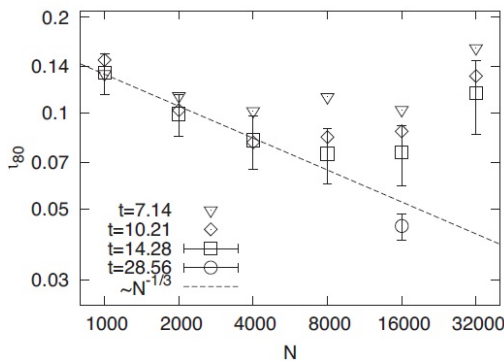
1) การกระเพื่อมของความหนาแน่นในระดับมหัพภาค (macroscopic) ซึ่งสามารถศึกษาสร้างได้จากความหนาแน่นเริ่มต้นที่ไม่สม่ำเสมอ เช่น ความหนาแน่นแบบตัวประกอบกำลัง (power-law) แบบกระจุก (clumpy) [12] จากการศึกษา พบว่า ความไม่

สม่ำเสมอของความหนาแน่น ดังกล่าว (ซึ่งอาจมองได้ว่าเป็นการกระเพื่อมในระดับมหัพภาค) ทำให้เกิดการยุบตัวอย่างรุนแรงและเกิดแกนกลางที่มีความหนาแน่นสูงมากและมีรูปร่างเบี่ยงจากทรงกลม ความไม่สม่ำเสมอนี้ ถูกมองว่าเป็นแหล่งกำเนิดของความไม่เสถียร โดยจะหายไปเมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นมีความหนาแน่นที่สม่ำเสมอ

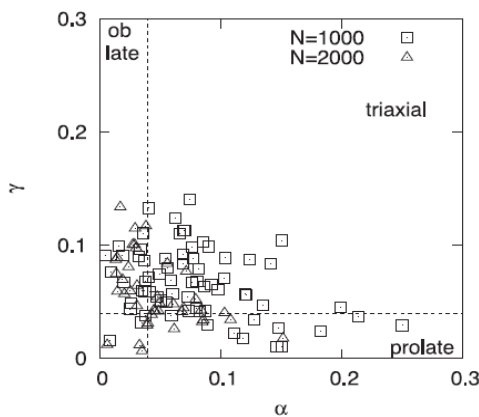
2) ในกรณีความหนาแน่นสม่ำเสมอ การกระเพื่อมของความหนาแน่นในระดับมหัพภาคหายไป แต่จะเกิดการกระเพื่อมของความหนาแน่นในระดับจุลภาค (microscopic) ขึ้นมาอย่างเด่นชัด [13] ซึ่งแอมพลิจูดการกระเพื่อมในระดับนี้ สามารถประมาณการได้ด้วย การกระเพื่อมแบบปัวซอง (Poisson fluctuation) ซึ่งจะลดลงตามจำนวนอนุภาคในระบบ หากพิจารณา ระบบ ‘เย็น’ หรือระบบที่ไม่มีความเร็วเริ่มต้นอยู่เลย จะพบว่าระบบจะวิวัฒนาการในลักษณะการยุบตัวอย่างรุนแรงเนื่องจากอนุภาคไม่มีความเร็วที่จะต้านแรงดึงดูดสู่ศูนย์กลาง

จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของการยุบตัว พบว่า แอมพลิจูดของการกระเพื่อมของความหนาแน่นเริ่มต้น สามารถเชื่อมโยงกับการกระเพื่อมของความเร็วที่ตกลงสู่จุดศูนย์กลางได้ ซึ่งการกระเพื่อมของความเร็วนี้ ทำให้ระบบเดิมที่อยู่ในสมมาตรทรงกลมสามารถวิวัฒนาการไปสู่ทรงรีได้เนื่องจากอนุภาคพุ่งออกด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันในสมมติฐานที่ว่า อนุภาคที่พุ่งออกด้วยความเร็วสูงสุดจะสร้างแกนที่ยาวที่สุด (major axis) และอนุภาคที่พุ่งออกด้วยความเร็วต่ำสุดจะกลายเป็นแกนที่สั้นที่สุด (minor axis) ของรูปร่างสุดท้าย ซึ่งค่าความรี สามารถทำนายได้ว่าแปรผกผันกับจำนวนอนุภาคยกกำลัง $1/3$ ซึ่งการทำนายนี้สอดคล้องกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในช่วงอนุภาคตั้งแต่ 1,000-16,000 ตัว ซึ่งรายละเอียดของความรี หรือความแบน (flattening) ของระบบที่จำนวนอนุภาคต่างๆ แสดงอยู่ใน รูปที่ 3 ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่า ยิ่งระบบมีจำนวนอนุภาคสูง ระบบจะมีแนวโน้มค่าที่เบี่ยงออกจากสมมาตรทรงกลม เป็นสาเหตุจากแอมพลิจูดของการกระเพื่อมของความหนาแน่นที่ลดลง อันเนื่องมาจากหลักพื้นฐานของกลศาสตร์สถิติของระบบอนุภาค N ตัว เมื่อในระบบมีการกระจายตัวแบบสุ่ม เราจะได้ว่าค่าการกระเพื่อมของความหนาแน่นในบริเวณใดๆ จะลดลงตาม N เสมอ

นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าระบบเริ่มต้นจะมีสมมาตรทรงกลมเหมือนกัน แต่จากการกระเพื่อมของความหนาแน่นที่สถานะเริ่มต้น ซึ่งได้กระจายตัวแบบสุ่มในแต่ละตัวอย่าง (realization) ก็สามารทำให้รูปร่างสุดท้ายมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งรูปร่างสุดท้ายอาจใกล้เคียงทรงกลม เป็นทรงกลมยัด เป็นทรงกลมแบน หรือมีลักษณะสามแกน รูปร่างสุดท้ายของตัวอย่างทั้งหมด 110 ตัวอย่าง (70 ตัวอย่างสำหรับระบบ 1000 อนุภาค และ 40 ตัวอย่างสำหรับระบบ 2000 อนุภาค) ซึ่งเริ่มจากสมมาตรทรงกลมได้สรุปอยู่ในแผนภูมิที่ 4 ซึ่งแบ่งระบบสุดท้ายออกเป็น 4 รูปร่างซึ่งจากแผนภูมิ จะเห็นได้ว่ารูปร่างสุดท้ายของระบบมีความแตกต่างกันอย่างมากตั้งแต่ทรงกลม จนถึงรูปร่างสามแกน



รูปที่ 3 ค่าความแบน (i_{80}) ของระบบอนุภาคที่มีจำนวนอนุภาค (N) ต่างๆ (ภาพจาก Worrakitpoonpon, 2015 [13])



รูปที่ 4 ค่าดัชนีรูปร่างของระบบ 110 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งรูปร่างสุดท้ายออกเป็น ใกล้เคียงทรงกลม (บริเวณล่างซ้าย) ทรงกลมยัด (prolate) ทรงกลมแบน (oblate) และสามแกน (triaxial) (ภาพจาก Worrakitpoonpon, 2015 [13])

นอกจากนี้ สิ่งที่เกิดขึ้นเสมอเมื่อระบบมีการยุบตัวอย่างรุนแรงก่อนเข้าสู่สมดุลเชิงพลวัต คือ โครงสร้างของระบบสุดท้ายจะมีลักษณะเป็นแบบ ‘แก่น-แฮโล’ (core-halo) ซึ่งประกอบด้วยแกนกลางที่มีความหนาแน่นสูง หรือ ‘แก่น’ ล้อมรอบด้วยบริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำที่มีบริเวณกว้าง หรือ ‘แฮโล’ ซึ่งจากการศึกษา พบว่า แก่นจะตรงกับสถานะดีเจเนอเรท (degenerate state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่สามารถถูกบีบอัดในปริภูมิเฟสได้อีก และบริเวณแฮโล จะมีความหนาแน่นต่ำและคงที่ [14] และในระหว่างที่ระบบวิวัฒนาการสู่สถานะดังกล่าว จะมีการคายมวลและพลังงานออกมาบางส่วน [15] ซึ่งทำให้มวลและพลังงานของสถานะสมดุลเชิงพลวัตลดลงจากเงื่อนไขเริ่มต้น ซึ่งมวลและพลังงานที่คายออกมานี้ก็สัมพันธ์กับการกระเพื่อมของความหนาแน่นด้วยเช่นกัน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าถึงแม้นักดาราศาสตร์จะมีทฤษฎีมากมายที่ใช้ศึกษาดาราจักรรี แต่ความเข้าใจในวิวัฒนาการของรูปร่างยังคงจำกัดเนื่องจากปัจจัยหลักคือ ข้อจำกัดในการสังเกตการณ์ ทำให้การเปรียบเทียบทฤษฎีเป็นไปได้ยาก การศึกษาในเชิงทฤษฎีส่วนใหญ่จึงขึ้นอยู่กับการเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในส่วนตัวของทฤษฎีเองก็ยังคงไม่สมบูรณ์อีกหลายส่วน และอยู่ในระหว่างการพัฒนาเช่นกัน สุดท้ายนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความนี้เป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจในทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์ไม่มากนักน้อยเพื่อเป็นรากฐานในการพัฒนาทั้งในด้านการเรียนการสอนและการวิจัยด้านฟิสิกส์ดาราศาสตร์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] G. de Vaucouleurs, “On the distribution of mass and luminosity in elliptical galaxies”, MNRAS 113, 134 (1953).
 [2] V.A. Antonov, “English translation in dynamics of globular clusters”, IAU Symp. 113, eds. J. Goodman and P. Hut (Reidel, Dordrecht), 1985, Vestn. Leningrad Gos. Univ. 7:135, 1962.
 [3] D. Lynden-Bell, “Statistical mechanics of violent relaxation in stellar systems”, MNRAS 136, 101 (1967).
 [4] C. Horellou and F. Combes, “A model for the cartwheel ring galaxy”, Ap&SS 276, 1141 (2001).

- [5] V. Antonov, in G. Omarov, ed., “The dynamics of galaxies and star clusters”, Nauka, Alma Ata, 139, 1973.
- [6] V. Antonov, “Remarks on the problem of stability in stellar dynamics”, SvA 4, 859 (1961).
- [7] M. Hénon, “Numerical experiments on the stability of spherical stellar systems”, A&A 24, 229 (1973).
- [8] V.L. Polyachenko, “Nonlinear evolution of spherical stellar systems”, Sov. Astron. Lett. 7, 142 (1981).
- [9] L.A. Aguilar and D. Merritt, “The structure and dynamics of galaxies formed by cold dissipationless collapse”, ApJ 354, (33) 1990.
- [10] K.W. Min and C.S. Choi, “Cold collapse of a spherical stellar system”, MNRAS 238, 253 (1989).
- [11] D. Merritt and L.A. Aguilar, “A numerical study of the stability of spherical galaxies”, MNRAS 217, 787 (1985).
- [12] F. Roy and J. Perez, “Dissipationless collapse of a set of N massive particles”, MNRAS 348, 62 (2004).
- [13] T. Worrakitpoonpon, “Spherical symmetry breaking in cold gravitational collapse of isolated systems”, MNRAS 446, 1335 (2015).
- [14] Y. Levin, R. Pakter and F.B. Rizzato, “Collisionless relaxation in gravitational systems: from violent relaxation to gravothermal collapse”, Phys. Rev. E 78, 021130 (2008).
- [15] M. Joyce, B. Marcos and F. Sylos Labini, “Energy ejection in the collapse of a cold spherical self-gravitating cloud”, MNRAS 397, 775 (2009).