บทที่ 3
ดาวคู่และกระจุกดาว

เมื่อเรามองท้องฟ้าในเวลากลางคืนของคืนเดือนมืด จำนวนดาวซึ่งเราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจะมีไม่เกิน 6,000 ดวง ในขณะที่ดาวทั้งหมดในดาราจักรทางช้างเผือกมีประมาณแสนล้านดวง ดาวฤกษ์ที่เห็นได้ประมาณ 6,000 ดวงนี้จะแผ่กระจายกันอยู่บนทรงกลมท้องฟ้า สมมติว่าดาวฤกษ์แต่ละดวงต่างอยู่โดดเดี่ยวในอวกาศที่ระยะไกล ๆ จากโลกหรือดวงอาทิตย์ โอกาสที่ดาวฤกษ์สองดวงจะมาปรากฏอยู่ใกล้กันภายในระยะสองสามอาร์กวินาทีจะมีน้อยมาก แต่จากการสำรวจท้องฟ้าจริง ๆ ด้วยอุปกรณ์ทางดาราศาสตร์กับพบว่ามีดาวฤกษ์ซึ่งอยู่ใกล้กันเป็นคู่ ๆ ในระยะสองสามอาร์กวินาทีมีอยู่เป็นจำนวนมากพอใช้ และในบางกรณีอยู่กันเป็นกลุ่มหลายดวงก็มี ซึ่งหมายความว่าดาวฤกษ์เกิดเป็นคู่หรือเป็นกลุ่มมากกว่าสองดวงจริง ๆ ในธรรมชาติ ดาวคู่ที่ตรวจพบครั้งแรกโดย **ริคชิโอลิ (Riccioi)** คือ **ดาวมิซาร์ (Mizar)** ซึ่งเป็นดาวใหญ่ในหมู่ดาวจระเข้หรือหมีใหญ่ในปี ค.ศ. 1821

ดาวคู่คือระบบที่ประกอบด้วยดาว 2 ดวงโคจรรอบจุดศูนย์มวลร่วมกันโดยมีแรงโน้มถ่วงกระทำซึ่งกันและกัน จากการศึกษาดาวคู่ทำให้นักดาราศาสตร์ได้รับข้อมูลที่มีประโยชน์มากมาย เพราะเมื่อนำผลจากการสังเกตการณ์มาประกอบเข้ากับกฎทางฟิสิกส์ซึ่งเราทราบแล้ว เราอาจหาสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญของดาวได้ เช่น มวล รัศมีหรือขนาด ความหนาแน่น อุณหภูมิพื้นผิวและความสว่าง แม้กระทั่งอัตราการหมุนรอบตัวเองของดาวด้วย

3.1 การจำแนกชนิดของดาวคู่

เราสามารถจำแนกดาวคู่ออกได้หลายประเภทตามวิธีทางสังเกตการณ์ ดังนี้

(1) ดาวคู่จักษุภาพ (Visual Binary) เป็นระบบดาวคู่ที่มองเห็นว่าแยกออกเป็นสองดวง ด้วยกล้องโทรทรรศน์หรือด้วยตาเปล่า ดาวทั้งสองมีวงโคจรรอบจุดศูนย์มวลร่วมกัน คาบของการโคจรที่สำรวจได้มีตั้งแต่หนึ่งปีจนถึงหลายพันปี

(2) ดาวคู่ดาราเมติ (Astrometric Binary) เป็นระบบดาวคู่ที่ปรากฏให้เห็นเพียงดวงเดียวส่วนอีกดวงหนึ่งมีแสงสลัวมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ในกล้องโทรทรรศน์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าดาวดวงหนึ่งมีความสว่างกว่าอีกดวงหนึ่งมาก ๆ จนแสงจากดาวที่สว่างน้อยกว่า

ถูกบดบังเสียหมด การที่เราสังเกตได้ว่าเป็นดาวคู่นั้นเป็นเพราะว่าดาวดวงที่มองเห็นได้ปรากฏการเคลื่อนที่เป็นรอบ ๆ ซึ่งแสดงว่ามันมีคู่ที่เรามองไม่เห็นและต่างก็กำลังโคจรรอบจุดศูนย์มวลร่วมจุดหนึ่ง

(3) **ดาวคู่สเปกโทรสโกปิก (Spectroscopic Binary)** ดาวคู่ในระบบนี้เราจะไม่เห็นดาวคู่แยกกันเป็นสองดวง เพราะว่าดาวทั้งสองอยู่ชิดกันมากเกินไป หรือระบบนี้อยู่ไกลออกไปมาก จนเราไม่สามารถใช้กล้องส่องขยายให้เห็นแต่ละดวงแยกจากกันได้ แต่ความเป็นคู่ของดาวจะแสดงให้เห็นจากการเลื่อนที่ไปของเส้นสเปกตรัมของดาวสองชุดในทิศทางตรงกันข้ามเสมอ (แต่ละชุดเกิดจากดาวแต่ละดวง) ซึ่งเกิดจากการโคจรของดาวสองดวงรอบจุดศูนย์มวลร่วมกัน ส่วนในบางกรณีเส้นสเปกตรัมของดาวดวงหนึ่งอาจจางมากจนมองไม่เห็นเหลือเพียงชุดเดียว แต่เส้นสเปกตรัมชุดเดียวนั้นมีการเลื่อนที่ไปมาเป็นรอบ ๆ ดาวคู่ประเภทนี้มีคาบนับเป็นชั่วโมงหรือสองสามเดือน

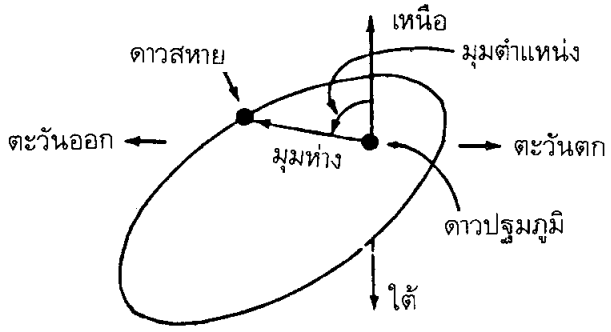
(4) **ดาวคู่สเปกตรัม (Spectrum Binary)** ระบบดาวคู่ประเภทนี้คล้ายกับดาวคู่สเปก-โทรสโกปิกมาก โดยที่เส้นสเปกตรัมของแต่ละดวงแยกไม่ออกจากกัน แต่มีลักษณะเป็นสเปกตรัมสองชนิดแตกต่างซ้อนกันอยู่อย่างแน่นอน

(5) **ดาวคู่อุปราคา (Eclipsing Binary)** เป็นระบบดาวคู่ซึ่งแนวเส้นสายตาจากโลกหรือดวงอาทิตย์อยู่ใกล้เคียงกับระนาบของวงทางโคจรของดาวคู่นี้รอบจุดศูนย์มวลร่วม ทำให้สังเกตเห็นความสว่างปรากฏรวมของดาวทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ๆ ทั้งนี้เนื่องจากดาวทั้งสองเคลื่อนที่ผลัดกันบังซึ่งกันและกันเป็นจังหวะ ดาวคู่อุปราคานี้อาจจะเป็นดาวคู่จักษุภาพ ดาวคู่ดารามิติ และดาวคู่สเปกโทรสโกปิกในขณะเดียวกันด้วยก็ได้

3.2 ดาวคู่จักษุภาพ

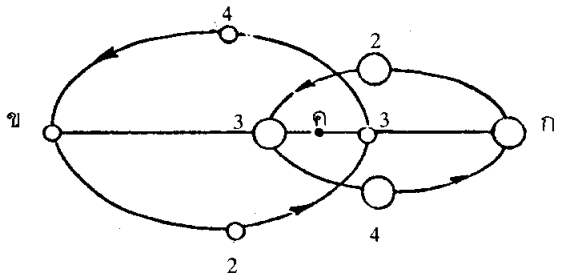
3.2.1 วงทางโคจรของดาวคู่จักษุภาพ

ในระบบดาวคู่จักษุภาพนั้นดาวแต่ละดวงจะมีความสว่างไม่เท่ากัน ดาวดวงที่สว่างกว่าเรียกว่า **ดาวปฐมภูมิ (Primary)** และดาวที่สลัวกว่าเรียกว่าดาวสหาย **(Companion)** จากรูป 3.1 ระยะห่างระหว่างดาวทั้งสองจะบอกเป็นค่ามุมห่าง (Separation) วัดเป็นหน่วยอาร์กวินาที เพราะเป็นระยะทางบนทรงกลมท้องฟ้า สำหรับการวางตำแหน่งของดาวทั้งสองบนทรงกลมท้องฟ้ากำหนดได้โดยลากเส้นบอกทิศทางไปสู่ขั้วฟ้าเหนือ แล้ววัดมุมระหว่างเส้นนี้กับเส้นมุมห่าง โดยวัดไปทางทิศตะวันออกเสมอ มุมนี้เรียกว่ามุมตำแหน่ง (Position Angle)



รูป 3.1 แสดงวงโคจรสัมพัทธ์ของดาวคู่จักษุภาพ

ถ้าเราทำการวัดมุมเหล่านั้นโดยเว้นระยะห่างเป็นเวลานานพอสมควร จุดซึ่งแสดงตำแหน่งของดาวจะแสดงวงทางโคจรสัมพัทธ์ของดาวคู่เป็นวงรี แต่โดยทั่วไปวงโคจรที่ปรากฏบนทรงกลมท้องฟ้าจะไม่ใช่วงทางโคจรที่แท้จริง เพราะว่าระนาบของวงโคจรไม่จำเป็นต้องตั้งฉากกับแนวเส้นสายตาหรือซ้อนกับระนาบท้องฟ้าเสมอไป ซึ่งอาจจะทำมุมเอียงใด ๆ กับระนาบท้องฟ้าก็ได้ ถ้ามันทำมุมเอียง 0 องศากับระนาบท้องฟ้า หมายความว่าระนาบทั้งสองทับกันเราจะเห็นวงทางโคจรที่แท้จริงได้ แต่ถ้าเอียงทำมุมเป็น 90 องศา เราก็จะเห็นวงทางโคจรของมันจากด้านข้าง การโคจรของดาวคู่รอบจุดศูนย์มวลร่วมกันก็เนื่องด้วยมันมีแรงโน้มถ่วงกระทำต่อกัน โดยมีหลักการเป็นไปตามกฎความโน้มถ่วงสากลของนิวตัน และเป็นเช่นเดียวกับกฎของเคเปลอร์ (Kepler's Laws) ที่ว่าด้วยการโคจรของดาวเคราะห์ ในกรณีนี้ดาวแต่ละดวงจะโคจรรอบดาวอีกดวงหนึ่งซึ่งอยู่ที่จุดโฟกัสของวงโคจรรูปวงรี ดาวทั้งสองจะเคลื่อนที่เป็นวงรีโดยมีจุดศูนย์มวลร่วมอยู่ที่จุดโฟกัสด้วย ในขณะใด ๆ ดาวทั้งสองจะอยู่บนเส้นตรงที่ลากผ่านจุดศูนย์มวลร่วม ซึ่งเป็นจุดคงที่เมื่อเทียบกับดาวทั้งสอง ในระบบดาวคู่จักษุภาพคู่ใด ๆ วงโคจรรูปวงรีทั้งสองจะมีรูปร่างเหมือนกันแต่มีขนาดต่างกันตามรูป 3.2 ซึ่งแสดงแผนภาพของวงโคจรแท้จริงของ

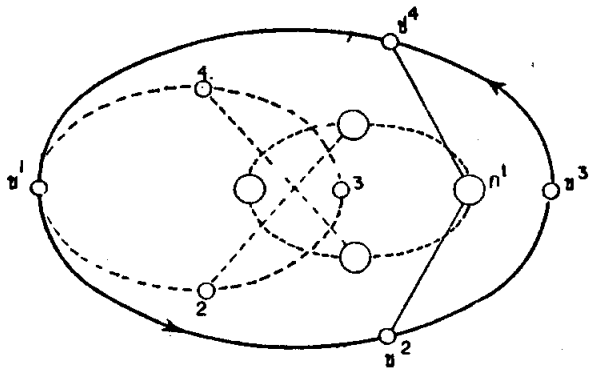


รูป 3.2 แสดงวงโคจรของดาวปฐมภูมิและดาวสหายรอบจุดศูนย์มวลร่วมในระบบดาวคู่จักษุภาพ

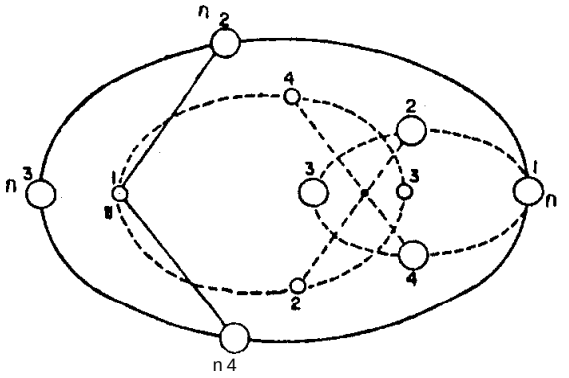
ดาวปฐมภูมิ ก และดาวสหาย ข รอบจุดศูนย์มวลร่วม ค. ตำแหน่งหมายเลข 1 เป็นตำแหน่งเมื่อดาวแต่ละดวงอยู่ที่จุดไกลสุดของจุดศูนย์มวลร่วม ตำแหน่งหมายเลข 3 เป็นตำแหน่งเมื่อดาว แต่ละดวงอยู่ที่จุดใกล้สุดของจุดศูนย์มวลร่วม สำหรับตำแหน่งหมายเลข 2 และ 4 เป็นตำแหน่งของดาวขณะเคลื่อนที่ในวงโคจรระหว่างหมายเลข 1 และ 3 จะเห็นได้ว่าในขณะใด ๆ เส้นที่ลากต่อระหว่างจุด ก ข ค จะเป็นเส้นตรงเสมอ และวงโคจรของทั้ง ก และ ข รอบจุด ค เป็นวงรีซึ่งมีจุด ค เป็นจุดโฟกัสร่วม และวงรีทั้งสองนี้มีรูปร่างเหมือนกันคือมีความเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity) เท่ากัน แต่มีขนาดต่างกัน

สมมุติว่าเราประสงค์จะพิจารณาวงโคจรของดาวสหาย ข รอบดาวปฐมภูมิ ก เมื่อกำหนดให้ ก. อยู่นิ่งที่จุดใดจุดหนึ่งในวงรี เช่นที่ตำแหน่งหมายเลข 1 ตำแหน่งของดาวสหาย ข เมื่อเทียบกับ ก. ในขณะที่ ข ไปอยู่ที่ตำแหน่งหมายเลข 2, 3 และ 4 ตามแผนภาพเดิมก็อาจหาใหม่ได้ โดยลากเส้นจากจุดหมายเลข 1 ของ ก ขนานกับแนวเส้นต่อระหว่าง ก และ ข ที่ตำแหน่ง 2, 3 และ 4 และให้ ข อยู่บนเส้นที่ลากนั้นห่างออกไปจาก ก เท่าเดิม ดังนั้นตำแหน่งของ ข ที่หมายเลข 1, 2, 3 และ 4 เมื่อเทียบกับ ก ซึ่งอยู่นิ่งในตำแหน่งหมายเลข 1 จะอยู่บนเส้นวงรีซึ่งมีแกนยาวเท่ากับผลบวกของระยะห่างที่สุดระหว่างดาวทั้งสองกับระยะใกล้ที่สุด ระหว่างดาวทั้งสอง และมีรูปร่างหรือความเยื้องศูนย์กลางเท่ากับความเยื้องศูนย์กลางของวงโคจรของดาวแต่ละดวงรอบจุดศูนย์มวลร่วม อนึ่งดาวปฐมภูมิ ก จะอยู่ที่จุดโฟกัสหนึ่งของวงรีนี้

ถ้าเราต้องการพิจารณาวงโคจรของดาวปฐมภูมิรอบดาวสหาย เราสามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน โดยกำหนดให้ดาวสหาย ข หยุดนิ่งที่ตำแหน่งหมายเลข 1 ในกรณีนี้เราเขียนเส้นขนานจากจุดหมายเลข 1 ของดาวสหาย เราจะพบว่าวงโคจรของดาวปฐมภูมิรอบดาวสหาย จะเป็นเช่นเดียวกับวงโคจรของดาวสหายรอบดาวปฐมภูมิ



รูป 3.3 แสดงวงโคจรของดาวสหายรอบดาวปฐมภูมิ



รูป 3.4 แสดงวงโคจรของดาวปฐมภูมิรอบดาวสหาย

3.2.2 การหามวลของดาวในระบบดาวคู่จักษุภาพ

การหามวลของดาวในระบบดาวคู่นั้นในขั้นแรกเราจะพิจารณาเฉพาะกรณีของวงโคจรที่แท้จริง ซึ่งเป็นวงรีปรากฏบนระนาบเดียวกับระนาบท้องฟ้า ดังนั้นเราอาจวัดค่ากึ่งแกนหลัก (Seminmajor Axis) a″ ของวงรีในวงโคจรของดาวคู่ในหน่วยของมุมที่กระทำกับตาของเราโดยตรง (กำหนดให้ดาวปฐมภูมิอยู่ที่จุดโฟกัสและดาวสหายเคลื่อนที่ไปรอบตามเส้นทางเป็นวงรี)

มวลของดาวคู่จะหาได้จากกฎข้อที่ 3 ของเคเปลอร์เกี่ยวกับวงโคจรซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\left(\frac{M_1 + M_2}{M_\odot}\right) P^2 = A^3 \qquad (3.1)$$

เมื่อ M_1 และ M_2 เป็นมวลของดาวปฐมภูมิและดาวสหายตามลำดับในหน่วยของมวลดวงอาทิตย์ P คือ คาบของการโคจรที่สังเกตค่าได้โดยตรง A คือระยะกึ่งแกนหลักในหน่วยของหน่วยดาราศาสตร์ซึ่งเราจะหาได้จากค่า a″ ถ้าเราทราบระยะทาง r ของดาวคู่หรือพารัลแลกซ์ของดาวคู่นั้นแล้ว ดังนี้

$$A = \frac{a''}{p}$$

โดยที่ a″ วัดในหน่วยของอาร์กวินาทีเช่นเดียวกับ p ดังนั้นสมการ (3.1) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{M_1 + M_2}{M_\odot}\right) P^2 = \left(\frac{a''}{p}\right)^3 \qquad (3.2)$$

สมการ (3.2) นี้ใช้หาค่ามวลรวมของดาวคู่ทั้งสอง เมื่อทราบค่า P a″ และ p

แต่ถ้าเราต้องการจะหามวลของดาวแต่ละดวงในระบบดาวคู่ เราจะต้องหาข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับดาวคู่จักษุภาพ ซึ่งประกอบด้วยการวัดวงโคจรสัมบูรณ์ของดาวแต่ละองค์ประกอบเทียบกับดาวพื้นหลัง แทนที่จะวัดวงโคจรสัมพัทธ์ขององค์ประกอบหนึ่งเทียบกับดาวอีกดวงหนึ่ง ถ้ากึ่งแกนหลักของวงโคจรสัมบูรณ์เหล่านั้นกำหนดด้วย a''_1 และ a''_2 ดังนั้น $a''_1 + a''_2 = a''$ เปรียบเทียบระยะทางของดาวแต่ละดวงจากจุดศูนย์กลางมวลของระบบ เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a''_2}{a''_1} = \frac{A_2}{A_1} \qquad (3.3)$$

ในทางปฏิบัติการสังเกตการณ์พบว่าดาวองค์ประกอบมีการเคลื่อนที่ไปบนทรงกลมท้องฟ้า เป็นเส้นทางคล้ายคลื่นสลับกันในลักษณะที่ทำให้จุดศูนย์กลางมวลรวมของมันเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เมื่อเราแก้การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลและแก้เรื่องความเอียงของระนาบวงโคจรแล้วก็จะได้ a''_1 และ a''_2 ซึ่งเป็นกึ่งแกนหลักของวงโคจรวงรีของดาวองค์ประกอบรอบจุดศูนย์กลางมวลในหน่วยอาร์กวินาที จากนั้นเราคำนวณค่า a''_1 / a''_2 ซึ่งเท่ากับ M_1 / M_2 เราก็จะหาค่า M_1 และ M_2 ได้

ตัวอย่างเช่น ถ้าดาวคู่จักษุภาพระบบหนึ่ง มีค่ากึ่งแกนหลักยาว 3″ ค่าพารัลแลกซ์ 0″.1 มีคาบเท่ากับ 30 ปี และระนาบวงโคจรอยู่ในระนาบท้องฟ้า เราสามารถหามวลของดาวคู่แต่ละดวงได้ดังนี้

จากสมการ (3.2)

$$M_1 + M_2 = \left\{ \left(\frac{3''}{0''.1} \right)^3 \Big/ (30)^2 \right\} M_\odot = 30\, M_\odot$$

และถ้าดาวสหายอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมวลเป็น 5 เท่าของดาวปฐมภูมิ เราจะได้

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{A_2}{A_1} = 5$$

$$M_1 = 5\, M_2$$

เราจะได้

$$5M_2 + M_2 = 30M_\odot$$

$$M_2 = 5M_\odot$$

และ

$$M_1 = 25M_\odot$$

ได้ผลลัพธ์คือ มวลของดาวปฐมภูมิเป็น 25เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และดาวสหายมีมวลเป็น 5 เท่าของดวงอาทิตย์

อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วระนาบของวงโคจรของดาวคู่จะไม่อยู่ในระนาบท้องฟ้า แต่จะเอียงทำมุม (Inclination) i กับแนวเส้นสายตา ดังนั้นค่ากึ่งแกนหลักของวงโคจรวงรีคือ a sini ดังนั้นสมการ (3.2) สามารถดัดแปลงใหม่เป็น

$$\left(\frac{M_1 + M_2}{M_\odot}\right) p^2 \sin^3 i = (a''\sin i)^3/p^3 \qquad (3.4)$$

และสมการ (3.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a''_2 \sin i}{a''_1 \sin i} \qquad (3.5)$$

ดังนั้นถ้าเราสามารถทราบมุมเอียง i ก็จะหามวลของดาวคู่แต่ละดวงออกมาได้ ซึ่งการหาค่ามุม i นั้นจำเป็นต้องอาศัยวิธีการทางสถิติเข้าช่วย เนื่องจากลักษณะการเอียงของระนาบวงโคจรของดาวคู่มีลักษณะไม่แน่นอน อย่างไรก็ตามเราจะพบว่าค่ามุม i มีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้ 90 องศา มากกว่า 0 องศา

3.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและสภาพส่องสว่าง

ในการหาสภาพส่องสว่างหรือโชติมาตรสัมบูรณ์ของดาวคู่ เราจะต้องทราบระยะทางและโชติมาตรปรากฏก่อน แต่ในหัวข้อ 3.2.2 ได้แสดงให้เห็นว่าในการหามวลของดาวคู่เราจะต้องทราบระยะทางของดาวคู่ก่อนซึ่งหาได้จากค่าพารัลแลกซ์ ดังนั้นเราเพียงแต่สังเกตการณ์หาค่าโชติมาตรปรากฏก็จะได้ค่าสภาพส่องสว่าง

เมื่อเราเขียนกราฟระหว่างมวลของดาวซึ่งคำนวณได้จากการสังเกตดาวคู่กับโชติมาตรโบโลมิติสัมบูรณ์ หรือสภาพส่องสว่างของดาวส่วนใหญ่ จะมีความสัมพันธ์ตามรูป 3.5 ซึ่งแกนนอนเป็นสเกลลอการิธึมของมวล คิดเป็นจำนวนเท่าของมวลดวงอาทิตย์ เราสังเกตได้ว่าดาวส่วนใหญ่ซึ่งเขียนแทนแต่ละดวงด้วยจุดเรียงรายอยู่เป็นแถบ เราเรียกว่าแถบขบวนหลัก ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์บางประการระหว่างมวลและสภาพส่องสว่างที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามกัน และเป็นไปตามสมการ

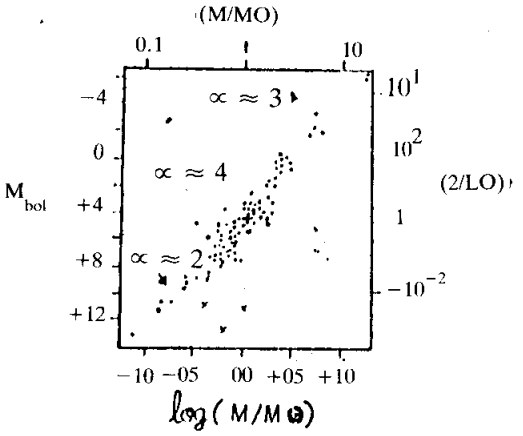
$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^\alpha \qquad (3.6)$$

โดยที่ $\alpha \approx 3$ สำหรับดาวที่มีความสว่างและมวลมาก

$\alpha \approx 4$ สำหรับดาวที่มีความสว่างและมวลใกล้เคียงกับดวงอาทิตย์

$\alpha \approx 2$ สำหรับดาวที่มีความสว่างและมวลน้อย

สำหรับที่เขียนกากบาทไว้สามแห่งนั้นแทนค่าของดาวแคระขาวสามดวง ซึ่งปรากฏอยู่นอกแถบขบวนหลัก แสดงว่ามันไม่มีความสัมพันธ์ตามหลักเกณฑ์เดียวกับดาวฤกษ์ส่วนใหญ่ นั่นคือดาวที่มีวิวัฒนาการไปไกลแล้ว เช่น ดาวแคระขาว ดาวยักษ์แดง เป็นต้น ไม่เป็นไปตามกฎแห่งความสัมพันธ์นี้ ซึ่งใช้ได้เฉพาะดาวในแถบขบวนหลักเท่านั้น



รูป 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลและสภาพส่องสว่างของดาว ($M/M_{\odot}$) คือมวลของดาวคิดเป็นจำนวนเท่าของมวลดวงอาทิตย์ M_{bol} คือโชติมาตรโบโลมิติสัมบูรณ์ ($L/L_{\odot}$) คือ สภาพส่องสว่างคิดเป็นจำนวนเท่าของดวงอาทิตย์ สำหรับกากบาทคือดาวแคระขาว

3.2.4 พารัลแลกซ์พลศาสตร์

ความสัมพันธ์ระหว่างมวลและสภาพส่องสว่างข้างต้นอาจนำมาใช้ในการหาระยะทางหรือพารัลแลกซ์ของดาวในแถบขบวนหลักได้ ค่าพารัลแลกซ์ที่หาได้ด้วยวิธีนี้เรียกว่าพารัลแลกซ์พลศาสตร์ (Dynamical Parallax)

จากสมการ (3.2) เราสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$p = \frac{a''}{\left[\frac{(M_1 + M_2)}{M_{\odot}} P^2\right]^{\frac{1}{3}}} \qquad (3.7)$$

ค่า a″ และ P เราสามารถหาได้จากการสังเกตโดยตรงแต่ผลรวมของมวลเรายังไม่ทราบ ดังนั้นเราต้องหาค่า p โดยวิธีการทดลองและทำซ้ำ ๆ ดังนี้

ในขั้นแรกเราประมาณว่าดาวแต่ละดวงมีมวลเท่ากับมวลของดวงอาทิตย์ ดังนั้นเราจะได้ค่าพารัลแลกซ์ p ชั่วคราวซึ่งยังไม่ใช่ค่าถูกต้อง ต่อไปนำค่า p ชั่วคราวนี้ไปหาค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ จากสมการ

$$M = m + 5 + 5 \log (p)$$

ทั้งนี้ค่าโชติมาตรปรากฏหาได้จากการสังเกตการณ์ ต่อจากนั้นนำค่าโชติมาตรสัมบูรณ์ที่คำนวณได้ไปอ่านค่ามวลของดาวแต่ละดวงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับสภาพส่องสว่าง ค่ามวลที่ได้นับเป็นค่าที่ถูกต้องกว่าเดิม

ในขั้นต่อไปเรานำค่าผลบวกของมวลที่อ่านได้แทนลงในสมการ (3.7) อีกครั้งหนึ่ง ก็จะได้ค่าพารัลแลกซ์ครั้งที่สองซึ่งถูกต้องกว่าครั้งแรก นำค่าพารัลแลกซ์ครั้งที่สองนี้ไปหาโชติมาตรสัมบูรณ์และหามวลใหม่เป็นครั้งที่สองซึ่งจะได้ค่าที่ถูกต้องกว่าเดิมอีก และทำซ้ำเช่นนี้หลายหลายครั้งจนได้ค่ามวลของดาวแต่ละดวงและค่าพารัลแลกซ์ที่ได้ใหม่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อไปอีกจึงถือเป็นอันยุติ ก็จะได้พารัลแลกซ์พลศาสตร์ที่ต้องการ

ตัวอย่างเช่น ดาวคู่จักษุภาพที่ชื่อ 70 โอฟิอูชิ (Ophiuchi) มีคาบ 87.7 ปี กึ่งแกนหลักของวงโคจร a″ = 4″.5 เมื่อเราแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการ (3.7) และกำหนดให้ $M_1 + M_2 = 2M_\odot$ เราจะได้

$$p = \frac{4''.5}{[(2)(87.7)^2]^{\frac{1}{3}}} = 0''.18$$

เป็นค่าพารัลแลกซ์ชั่วคราว จากปฏิทินดาวคู่ 70 โอฟิอูชิมีองค์ประกอบคือ ดาว K_1 มีโชติมาตรจักษุภาพปรากฏ $m_{1v} = 4.2$ และดาว K_2 มี $m_{2v} = 6.0$ ดังนั้น

$$M_{1v} = 4.2 + 5 + 5 \log (0''.18)$$
$$= 4.2 + 5 - 3.7 = 5.5$$
$$M_{2v} = 6.0 + 5 - 3.7 = 7.3$$

ค่า M_{1v} และ M_{2v} ที่ได้นี้เป็นค่าโชติมาตรจักษุภาพสัมบูรณ์ชั่วคราว สำหรับดาวองค์ประกอบของระบบดาวคู่นั้น นำค่าทั้งสองนี้ไปหาค่า M_{1bol} และ M_{2bol} จากสมการโชติมาตรโบโลมิติที่บอกตัวแก้โบโลมิติ BC สำหรับดาวซึ่งมีสเปกตรัมชนิดเดียวกัน เราพบว่าสำหรับดาว K_1 ได้ $(BC)_1 = -0.10$ และดาว K_2 ได้ $(BC)_2 = -0.71$

สมการตัวแก้โบโลมิติทั่วไปเขียนได้เป็น

$$BC = M_{bol} - M_v$$

ดังนั้น $M_{1bol} = (BC)_1 + M_{1v} = -0.10 + 5.5 = 5.4$

และ

$$M_{2bol} = (BC)_2 + M_{2v} = -0.71 + 7.3 = 6.6$$

นำค่าที่ได้ทั้งสอง M_{1bol} และ M_{2bol} ไปอ่านค่า $\log (M/M_\odot)$ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับสภาพส่องสว่างในรูป 3.5 จะได้ค่ามวล ดังนี้

$$\log (M_1/M_\odot) = -0.10 \text{ หรือ } M_1 = 0.8\, M_\odot$$

$$\log (M_2/M_\odot) = -0.24 \text{ หรือ } M_2 = 0.58 M_\odot$$

ซึ่งทำให้เราใช้ผลบวกของมวล $M_1 + M_2 = 1.38\, M_\odot$ นำไปแทนค่าลงในสมการ (3.7) อีกครั้งเพื่อหาค่าพารัลแลกซ์ p ที่ถูกต้องกว่าเดิมเราจะได้

$$p = \frac{4.5}{[(1.38)(87.8)^2]^{\frac{1}{3}}}$$

$$= 0''.20$$

จากค่าพารัลแลกซ์นี้ เราจะได้โชติมาตรจักษุภาพสัมบูรณ์เป็น

$$M_{1v} = 4.2 + 5 + 5 \log (0''.2)$$

$$= 5.7$$

$$M_{2v} = 6.0 + 5 + 5\log (0''.2)$$

$$= 7.5$$

จะได้ $M_{1bol} = 5.6$

$M_{2bol} = 6.8$

นำไปหาค่ามวลจากกราฟรูป 3.5 อีกได้เป็น

$$\log (M_1/M_\odot) = -0.11 \text{ หรือ } M_1 = 0.78 M_\odot$$

$$\log (M_2/M_\odot) = -0.26 \text{ หรือ } M_2 = 0.55\, M_\odot$$

เราได้ผลรวมของมวล $M_1 + M_2 = 1.33\, M_\odot$ ทำการคำนวณจากสมการ (3.7) อีกเป็นครั้งที่สาม เราได้

$$p = 0''.21$$

ต่อไปจะได้ค่าโชติมาตร $M_{1v} = 5.78$

$M_{2v} = 7.58$

และหาโชติมาตรโบโลมิติ $M_{1bol} = 5.7$

$M_{2bol} = 6.9$

ได้มวลเป็น $\log (M_1/M_\odot) = -0.12$ หรือ $M_1 = 0.76\ M_\odot$

ได้มวลเป็น $\log (M_2/M_\odot) = -0.27$ หรือ $M_2 = 0.54\ M_\odot$

ดังนั้น $M_1 + M_2 = 1.30\ M_\odot$

นำไปหาค่าพารัลแลกซ์ในสมการ (3.7) อีกจะได้

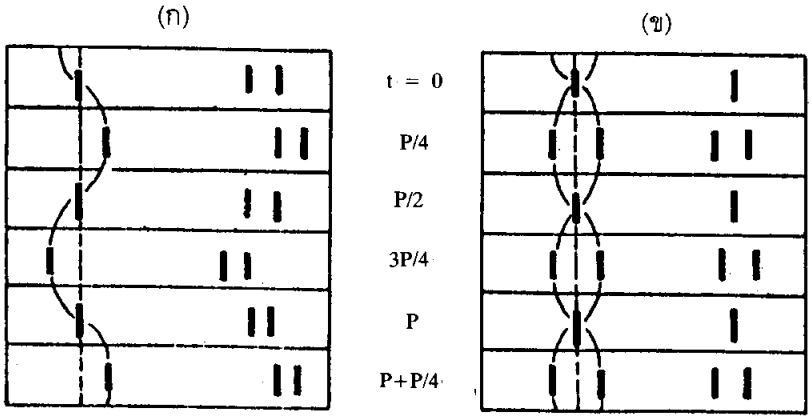
$$p = 0''.21$$

ในขณะนี้เราได้ p ไม่เปลี่ยนแปลงค่าไปจากเดิมแล้วก็นับว่าเป็นค่าพารัลแลกซ์ที่ใช้ได้

3.3 ดาวคู่สเปกโทรสโกปิก

ดาวคู่ในระบบนี้มักจะอยู่ใกล้ชิดกันมากและโคจรด้วยความเร็วสูง กล้องโทรทรรศน์ไม่สามารถแยกให้เห็นดาวองค์ประกอบของมันได้ แต่เราอาจพบหลักฐานว่ามันเป็นระบบดาวคู่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของมัน ซึ่งถ้าหากว่าสเปกตรัมปรากฏว่าเป็นสองชนิดซ้อนกันอยู่ เราก็รู้ว่ามันคือดาวคู่และจัดดาวคู่ระบบนี้อยู่ในจำพวกดาวคู่สเปกตรัม ในกรณีของดาวคู่จำพวกนี้เราจะตรวจพบว่า ระนาบวงโคจรทำมุมเอียงกับระนาบท้องฟ้าไม่เป็นศูนย์เสมอ และระยะห่างเฉลี่ยของดาวองค์ประกอบจะน้อยกว่า 1 หน่วยดาราศาสตร์ ทำให้เวลาโคจรครบรอบสั้นเป็นชั่วโมงถึงหลายเดือน

เส้นสเปกตรัมของดาวคู่สเปกโทรสโกปิกจะแสดงการเลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นรอบ ๆ ซึ่งแสดงลักษณะความเป็นคู่ของระบบ ในกรณีที่ดาวองค์ประกอบทั้งสองมีความสว่างมากพอ ๆ กัน เราสามารถตรวจพบสเปกตรัมของมันทั้งสองชุดซ้อนกัน ซึ่งเส้นสเปกตรัมของแต่ละชุดนั้นจะปรากฏเลื่อนที่ในเฟสตรงกันข้ามเสมอ โดยผลของดอปเปลอร์ ทั้งนี้เพราะว่าในวงโคจรของดาวซึ่งฉายบนทรงกลมท้องฟ้า ดาวองค์ประกอบจะมีความเร็วในแนวสายตาตรงกันข้ามตลอดเวลา ดังนั้นภาพถ่ายสเปกตรัมในขณะต่าง ๆ กันเมื่อนำมาเรียงกันก็จะเห็นเส้นสเปกตรัมแต่ละเส้นปรากฏแยกออกเป็นสองเส้นเลื่อนที่ห่างออกจากกันแล้วกลับเข้ารวมกันใหม่สลับกันไปในแต่ละรอบของการโคจร เราเรียกระบบดาวคู่เช่นนี้ว่า ดาวคู่สเปกโทรสโกปิกเส้นคู่ (Double line Spectroscopic Binary) สำหรับในกรณีที่ดาวสหายมีความสว่างจางมากจนเราไม่สามารถจะตรวจพบสเปกตรัมได้ สเปกตรัมของดาวคู่ระบบนี้จึงปรากฏเป็นเส้นเดี่ยวซึ่งเลื่อนที่ไปมาเป็นรอบ ๆ เราเรียกระบบดาวคู่นี้ว่า ดาวคู่สเปกโทรสโกปิกเส้นเดี่ยว (Single Line Spectroscopic Binary)



รูป 3.6 แสดงสเปกตรัมของดาวคู่ รูปซ้ายมือเป็นสเปกตรัมของดาวคู่สเปกโทรสโกปิกเส้นเดี่ยว จะแสดงเส้นสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไปมาเพียง 1 ชุด และรูปขวามือเป็นสเปกตรัมของดาวคู่สเปกโทรสโกปิกเส้นคู่ ปรากฏเส้นสเปกตรัมสองชุดแสดงการเลื่อนที่แยกจากกันแล้วกลับเข้ามารวมกันใหม่สลับกันไปเป็นรอบ ๆ ซึ่งมีความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปมา

3.3.1 เส้นโค้งความเร็ว

วงโคจรของดาวในระบบดาวคู่สเปกโทรสโกปิกมักจะทำมุมเอียงกับระนาบท้องฟ้า ถ้าทำมุมเอียงมากก็จะทำให้เกิดมีองค์ประกอบของความเร็วในแนวสายตาขึ้น ซึ่งมีผลทำให้เส้นสเปกตรัมมีค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนไป นอกจากนี้จุดศูนย์กลางมวลของระบบก็อาจจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกันด้วย ดังนั้นเส้นสเปกตรัมทุกเส้นก็อาจจะเลื่อนที่ไปพร้อมกันและเลื่อนไปไกลเท่ากันในหน่วยความยาวคลื่น พร้อม ๆ กับเลื่อนที่กลับไปกลับมาเนื่องจากความเร็วในวงโคจรมีค่ามาก

จากสูตรการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นเลื่อนไปเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเปลอร์เขียนได้เป็น

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_e} = \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{v_R}{c} \qquad (3.8)$$

โดยที่ λ_e คือความยาวคลื่นที่แหล่งกำเนิดแสงส่งออกมา

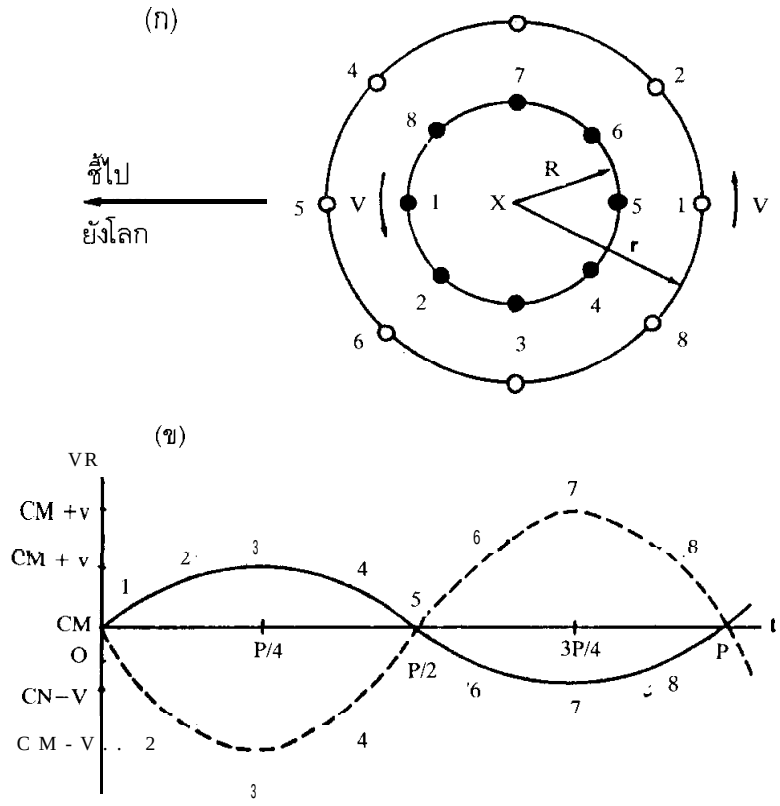
$\lambda_\odot$ คือความยาวคลื่นที่ผู้สังเกตรับได้

v_R คืออัตราเร็วในแนวสายตาหรือในแนวรัศมี (Radial Speed) ของดาว

และ c คืออัตราเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^5 กิโลเมตร/วินาที

เมื่อเราเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในแนวสายตา v_R เทียบกับเวลา t จะได้เส้นโค้งความเร็ว (Velocity Curve) ตามรูป 3.7 ซึ่งแสดงถึงความเร็วของคู่สเปกโทรสโกปิกในวงโคจร

เป็นวงกลม และค่ามุมเอียง 90 องศา กรณีนี้เส้นโค้งทั้งสองเส้นเป็นรูปไซน์ที่มีเฟสตรงกันข้าม เมื่อเราวัดเทียบกับความเร็วของจุดศูนย์กลางมวลและวัดคาบของดาวคู่ได้เท่ากับ P ระยะทางจากดาวไปยังจุดศูนย์กลางมวลเป็น R สำหรับดาวปฐมภูมิ และ r สำหรับดาวสหาย



รูป 3.7 แสดงเส้นโค้งความเร็วของดาวคู่ รูปบน (ก) ดาวปฐมภูมิ ● และดาวสหาย o โคจรรอบจุดศูนย์-กลางมวล X เป็นวงกลมที่ทำมุม i = 90° กับระนาบท้องฟ้า รูปล่าง (ข) แสดงเส้นโค้งความเร็วของดาวองค์ประกอบ จะเห็นได้ว่าจุดศูนย์กลางมวลกำลังเคลื่อนที่หนีออกจากเราด้วยความเร็วคงที่ โดยที่ดาวปฐมภูมิมีอัตราเร็ว V และดาวสหายมีอัตราเร็ว v เทียบกับจุดศูนย์กลางมวล

เราสามารถหาค่า R และ r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$V = \frac{2\pi R}{P} \qquad (3.9)$$

$$v = \frac{2\pi r}{P} \qquad (3.10)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad R = \frac{VP}{2\pi} \tag{3.11}$$

และ

$$r = \frac{vP}{2\pi} \tag{3.12}$$

กำหนดให้ดาวสหายมีมวลเป็น M_2 และดาวปฐมภูมิมีมวลเป็น M_1 ดังนั้น อัตราส่วนของมวลของดาวคู่จะเป็น

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r}{R} = \frac{v}{V} \tag{3.13}$$

และกึ่งแกนหลักสัมพัทธ์ คือ

$$A = R + r \tag{3.14}$$

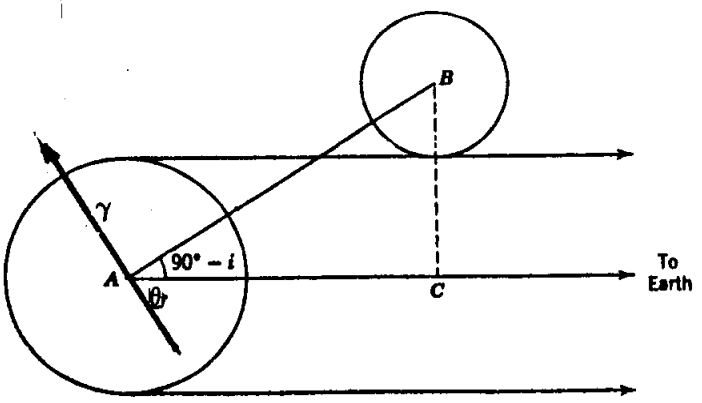
นอกจากนี้เรายังใช้สมการ (3.1) ซึ่งแสดงผลบวกของมวล คือ

$$\left(\frac{M_1 + M_2}{M_\odot}\right) = \frac{A^3}{P^2}$$

ดังนั้นเราจะหาค่ามวลของดาวแต่ละดวงของดาวคู่ได้

3.4 ดาวคู่อุปราคา

ในกรณีเมื่อวงโคจรของดาวคู่เอียงทำมุมกับระนาบท้องฟ้ามีค่าเกือบจะเท่ากับ 90 องศา ดาวจะเคลื่อนที่เข้าบังซึ่งกันและกันได้เมื่อมองจากโลก เราเรียกระบบดาวคู่ประเภทนี้ว่า ดาวคู่อุปราคา



รูป 3.8 แสดงการเกิดอุปราคาของดาวคู่เมื่อมองจากด้านข้างและแสดงขีดจำกัดของการบัง

จากรูป 3.8 ดาวทรงกลมสองดวงซึ่งเราสมมติให้มีวงโคจรเป็นวงกลมล้อมรอบซึ่งกันและกัน โดยที่ B คือดาวสหายและ A คือดาวปฐมภูมิ ระนาบวงโคจรของดาวสหายทำมุม $90^\circ - i$ กับแนวที่ชี้มายังโลก ถ้าเราสร้างทรงกระบอกทรงกลมรอบ ๆ ดาวปฐมภูมิและขยายออกมายังโลก ดังนั้นการบังจะเกิดขึ้นเมื่อดาวอีกดวงหนึ่งตัดเข้าไปในทรงกระบอกนี้ รูปภาพได้แสดงขีดจำกัดของการบังนี้ มุม BAC เป็นมุมซึ่งระนาบของวงโคจรเอียงทำมุมกับเส้นแนวสายตา และมีค่าเท่ากับ $(90^\circ - i)$ ระยะทาง AB คือ a ซึ่งเป็นรัศมีของวงโคจร และ BC คือผลบวกของรัศมีของดาวทั้งสอง $R_1 + R_2$ การบังจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมุม $(90^\circ - i)$ น้อยกว่ามุมจำกัดที่แสดงไว้ เนื่องจากไซน์ของมุมจำกัด คือ $BC/AB = (R_1 + R_2)/a$ ดังนั้นการบังจะเกิดขึ้นถ้า

$$\sin (90^\circ - i) = \cos i < \frac{R_1 + R_2}{a} \qquad (3.15)$$

ในสมการ (3.15) การที่เราบอกเป็นค่าสัมบูรณ์ของฟังก์ชันตรีโกณมิตินั้นก็ เนื่องจาก i สามารถมีค่าใด ๆ ในช่วงระหว่าง $0-180^\circ$ ดังนั้น cosi สามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ (ค่า i จะเป็นค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 90° ขึ้นกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวงโคจรและเป็นไปตามกฎมือขวา ดังนั้นถ้าการเคลื่อนที่ของวงโคจรในรูป 3.8 ไปตามเข็มนาฬิกา เมื่อเรามองจากโลก i จะเป็นมุมโตกว่า 90°)

ความเอียงของระนาบวงโคจรก็คือมุมระหว่างเส้นของแนวสายตากับแนวตั้งฉากกับวงโคจร ดังนั้น i สามารถกำหนดด้วยมุม θ ซึ่งให้มีแกน z ชี้มายังโลก และ r คือเส้นแนวตั้งฉากกับวงโคจรความน่าจะเป็นของ i ในช่วงใด ๆ จะแปรโดยตรงกับมุมตันที่สอดคล้องกับมุมนี้ ซึ่งเป็นไปตามสมการ (3.15) ถ้าให้ L และ U เป็นขีดจำกัดล่างและบนของ i ตามลำดับ ดังนั้นเราจะได้

$$\text{ความน่าจะเป็นของการบัง} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varnothing \int_L^U \sin i \, di}{\int_0^{2\pi} d\varnothing \int_0^{\pi} \sin i \, di} = \frac{1}{2}(\cos L - \cos U)$$

จากสมการ (3.15) และรูป 3.8 ปรากฏว่า $\cos L = -\cos U = \frac{R_1 + R_2}{a}$

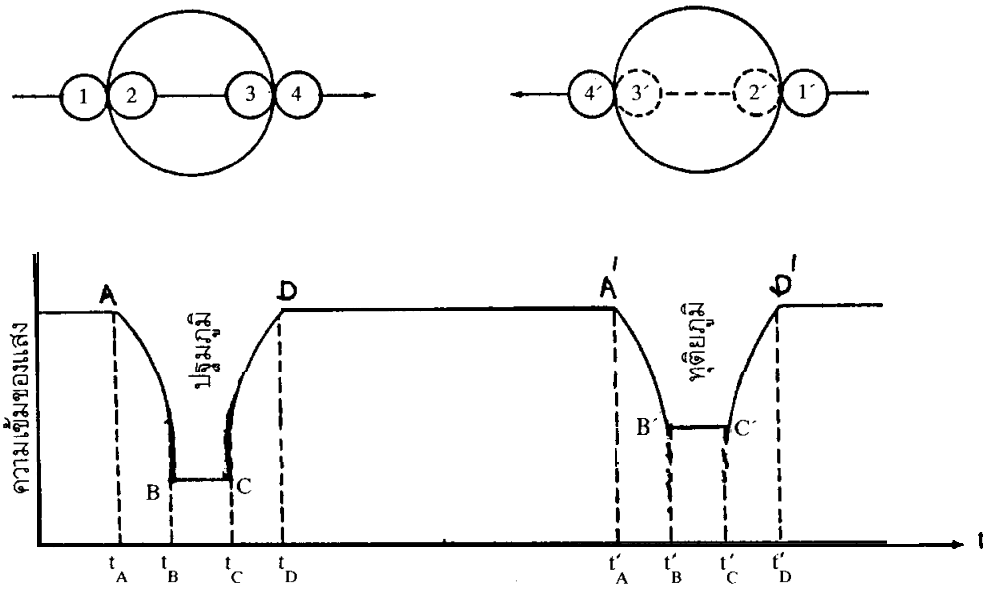
ดังนั้น

$$\text{ความน่าจะเป็นของการบัง} = \frac{R_1 + R_2}{a} \qquad (3.16)$$

สมการ (3.16) แสดงให้เห็นว่าดาวคู่อุปราคาเป็นดาวใหญ่ที่มีวงโคจรแคบ ๆ แต่สำหรับดาวคู่จักษุภาพนั้นมีวงโคจรใหญ่ ดังนั้นดาวคู่จักษุภาพจึงไม่อาจทำตัวเหมือนกับดาวคู่อุปราคาที่ดี ตัวอย่างเช่น ดาวประเภทดวงอาทิตย์สองดวงอยู่ห่างกันด้วยระยะทาง 10 หน่วยดาราศาสตร์ มีรัศมีประมาณ $R_1 = R_2 = 10^{-3}a$ และจากสมการ (3.16) บ่งชี้ว่าดาวคู่ชนิดนี้จะมีความน่าจะเป็นเอียงทำมุมให้เกิดการบังเมื่อมองจากโลกเพียง หนึ่งใน 500 เท่านั้น ซึ่งดาวคู่จักษุภาพส่วนใหญ่จะมีระยะห่างระหว่างดาวทั้งสองมากกว่านี้

3.4.1 เส้นโค้งของแสง

ดาวคู่อุปราคาจะมีความสว่างที่เรามองเห็นหรือความสว่างปรากฏเปลี่ยนแปรไปตามเวลาเป็นรอบ ๆ เนื่องจากการบังซึ่งกันและกันของดาวคู่องค์ประกอบนั้น ถ้าเราวัดความสว่างของดาวติดต่อกันไป แล้วนำผลที่ได้มาเขียนเส้นโค้งระหว่างความสว่างปรากฏกับเวลา เราจะได้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่าเส้นโค้งความสว่าง (Light Curve) ซึ่งแสดงค่าความสว่างต่ำสุด 2 ครั้ง ที่มีความลึกไม่เท่ากันโดยสอดคล้องกับการเกิดอุปราคา 2 ครั้งในเวลา 1 รอบ ดูรูป 3.9 ขณะยังไม่เกิดอุปราคา ความสว่างปรากฏมีค่าคงที่ แต่เมื่อดาวสหายเข้าบังในตำแหน่ง A ถึง B ความสว่างปรากฏจะลดลงจนถึงความสว่างต่ำสุดที่ตำแหน่ง $B \rightarrow C$ ซึ่งตรงกับการเกิดอุปราคาปฐมภูมิ (Primary Eclipse) โดยมีดาวสหายบังอยู่ข้างหน้าดาวปฐมภูมิ อุปราคาซึ่งเกิดในลักษณะนี้เรียกว่า อุปราคาวงแหวน (Annular Eclipse) หรืออุปราคาเต็มดวง หลังจากนั้นดาวสหายจะเคลื่อนที่มาแตะขอบดาวปฐมภูมิที่ตำแหน่ง C แล้วเริ่มออกจากการบังความสว่างปรากฏของดาวจะเพิ่มขึ้นจนถึงความสว่างสูงสุดตามเดิม ดาวสหายจะเคลื่อนที่ต่อไปในวงโคจรถึงตำแหน่ง A´ ความสว่างปรากฏยังมีค่าคงที่ตลอด หลังจากนั้นดาวสหายจะเคลื่อนที่ไปด้านหลังของดาวปฐมภูมิ ทำให้ความสว่างลดลงอีกครั้งหนึ่ง จนกระทั่งดาวปฐมภูมิบังดาวสหายจนมิด ความสว่างปรากฏจะลดลงสู่ค่าต่ำสุดอีกครั้งจนกว่าดาวสหายจะเริ่มโผล่ออกจากด้านหลังของดาวปฐมภูมิ ซึ่งตรงกับการเกิดอุปราคาทุติยภูมิ (Secondary Eclipse) ต่อจากนั้นดาวสหายจะค่อย ๆ หนีออกจากการบังของดาวปฐมภูมิ ความสว่างก็จะเพิ่มขึ้นอีกจนถึงค่าสูงสุดเมื่อดาวสหายปรากฏเต็มดวงแล้ว



รูป 3.9 แสดงเส้นโค้งของแสงในขณะเกิดอุปราคาเมื่อดาวทั้งสองเข้าบังกัน โดยเปรียบเทียบความเข้มของแสงกับเวลาที่เข้าบังกันทั้งแบบปฐมภูมิและแบบทุติยภูมิ

ระบบดาวคู่เช่นเดียวกันนี้ ถ้าหากระนาบของวงโคจรต่างจาก 90° (กับระนาบท้องฟ้า) มากกว่ากรณีข้างบนในลักษณะที่ดาวสหายโคจรเข้าบังดาวปฐมภูมิเพียงบางส่วน หรือถูกดาวปฐมภูมิบังเพียงบางส่วน เราเรียกว่าเกิดอุปราคาเพียงบางส่วน แต่สำหรับ i = 90° จะเกิดอุปราคาเต็มดวงหรืออุปราคาวงแหวน ซึ่งรวมเรียกว่า อุปราคาศูนย์กลาง (Central Eclipse) เนื่องจากดาวดวงหนึ่งโคจรผ่านเส้นผ่าศูนย์กลางของดาวอีกดวงหนึ่งพอดี ให้สังเกตว่าในการเกิดอุปราคาทุกแบบ พื้นที่ของดาวที่ถูกบังจะเท่ากันไม่ว่าจะเป็นอุปราคาปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ

เรามาพิจารณาเส้นโค้งความสว่างในรูป (3.9) ซึ่งสมมติว่าวงโคจรเป็นวงกลม จะเห็นได้ว่าขอบของดาวทั้งสองสัมผัสกัน 4 ครั้ง การสัมผัสครั้งแรก (ที่เวลา t_A) เกิดเมื่อเริ่มต้นอุปราคาและแสงเริ่มสลัวลง การสัมผัสครั้งที่ 2 (ที่ t_B) เกิดเมื่อแสงสว่างเริ่มเข้าถึงค่าต่ำสุด การสัมผัสครั้งที่ 3 (ที่ t_C) เกิดเมื่อแสงเริ่มสว่างขึ้นจากค่าต่ำสุด และการสัมผัสครั้งที่ 4 (ที่ t_D) เกิดเมื่ออุปราคาสิ้นสุดพอดี เส้นโค้งความสว่างในระหว่างเกิดอุปราคาเต็มดวงหรือวงแหวนจะเป็นเส้นตรงในแนวราบ (B → C) อุปราคาปฐมภูมิและอุปราคาทุติยภูมิจะเกิดในเวลาห่างกันเป็นครึ่งหนึ่งของคาบการโคจรของดาวพอดี ดังนั้น

$$\frac{t'_C - t'_B}{2} - \frac{t_C - t_B}{2} = P/2 \qquad (3.17)$$

ถ้าเราให้ R_1 เป็นรัศมีของดาวปฐมภูมิ R_2 เป็นรัศมีของดาวสหาย และ v คืออัตราเร็วสัมพัทธ์ในวงโคจรของดาวทั้งสอง เราจะเห็นได้ว่า

$$2R_2 = v\,(t_B - t_A)$$
$$= v\,(t_D - t_C) \qquad (3.18)$$
$$2\,(R_1 + R_2) = v\,(t_D - t_A) \qquad (3.19)$$

รัศมี a ของวงโคจรสัมพัทธ์จะเป็น

$$a = \frac{vP}{2\pi} \qquad (3.20)$$

อาศัยจากสมการ (3.18) (3.19) และ (3.20) เราจะได้อัตราส่วนระหว่างรัศมีของดาวกับรัศมีของวงโคจรสัมพัทธ์ เป็น

$$\frac{R_2}{a} = \frac{\pi\,(t_B - t_A)}{P} \qquad (3.21)$$

$$\frac{R_1}{a} = \frac{\pi\,(t_D - t_B)}{P} \qquad (3.22)$$

นอกจากนี้เรายังหาค่าอัตราส่วนของอุณหภูมิพื้นผิวของดาวได้ โดยให้ T_1 และ T_2 เป็นอุณหภูมิพื้นผิวของดาวทั้งสอง ดังนั้นฟลักซ์พลังงานที่ผิวของดาวจะมีค่าเป็น σT_1^4 และ σT_2^4 เป็นไปตามกฎ การแผ่รังสีวัตถุดำของ สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ เนื่องจากการเกิดอุปราคาแต่ละครั้งจะมีพื้นที่ที่ถูกบังเท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ πR_2^2 ทำให้อัตราส่วนของความลึกในเส้นโค้งความสว่างเมื่อเกิดอุปราคาเท่ากับ $(T_1/T_2)^4$

3.5 การกำเนิดและวิวัฒนาการของดาวคู่

3.5.1 การกำเนิดของระบบดาวคู่

ดาวสองดวงซึ่งมีระยะห่างใกล้ชิดกันมากในอวกาศเมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างดาวทั่ว ๆ ไป เราอาจจะถือได้ว่าดาวทั้งสองมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ในขณะที่ดาวฤกษ์เริ่มก่อตัวขึ้นจากกลุ่มแก๊สไฮโดรเจนนั้น ดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้กันจะมีแนวโน้มจับกันเป็นกลุ่มเป็นระบบเพื่อรักษาเสถียรภาพทางพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างกันในกรณีที่อาจจะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากกลไกใด ๆ ก็ตามในกลุ่มแก๊สเหล่านั้น

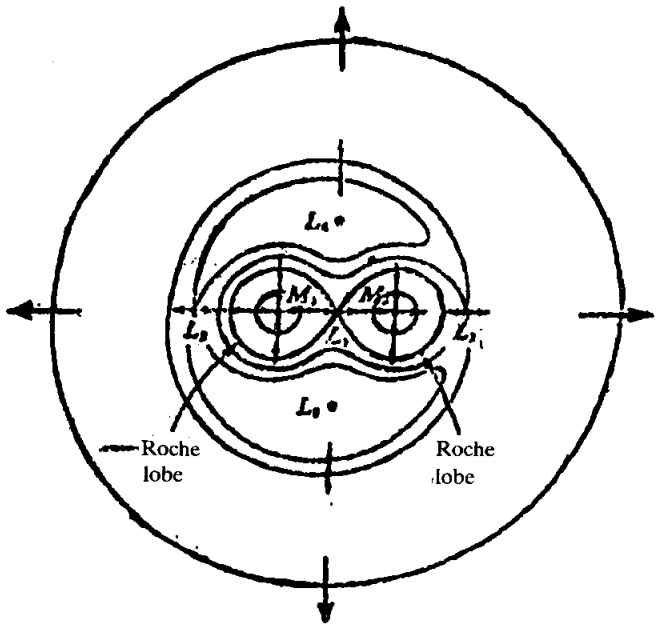
จากการศึกษาดาวฤกษ์ต่าง ๆ ในดาราจักรของเราพบว่าดาวส่วนใหญ่เป็นระบบดาวคู่ แอปต์ (Apt) และเลวี (Levy) ได้ศึกษาดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้ระบบสุริยะของเราและมีลักษณะคล้ายกับดวงอาทิตย์มาก พวกเขาสรุปว่าประมาณ 57 เปอร์เซ็นต์ของดาวประเภทนี้จะเป็นระบบดาวคู่ที่สามารถสังเกตได้ และจากข้อมูลทั้งหมดสามารถชี้ให้เห็นว่าดาวคู่แบ่งออกเป็น

2 ชนิดแตกต่างกัน คือ ดาวคู่ที่มีคาบสั้นกว่า 100 ปี มวลของดาวองค์ประกอบทั้งสองมีขนาดพอ ๆ กัน และดาวคู่ที่มีคาบยาวกว่า 100 ปี มวลของดาวองค์ประกอบทั้งสองดูเหมือนว่าจะไม่ขึ้นต่อกันเลย เขาทั้งสองอธิบายว่า การเกิดดาวคู่คาบสั้นนั้นเนื่องจากการแตกมวลออกของดาวมวลใหญ่ที่มีการหมุนรอบตัวเองอย่างรวดเร็ว ทำให้มวลแยกออกเป็นสองส่วนพอ ๆ กัน หลังจากนั้นมวลทั้งสองจะมีการยุบตัวลงและเกิดเป็นระบบดาวคู่ในที่สุด สำหรับกรณีการเกิดดาวคู่คาบยาวพวกเขาอธิบายว่า การเกิดดาวแต่ละดวงจะดำเนินไปโดยไม่ขึ้นต่อกัน ทำให้มวลของดาวทั้งคู่ไม่เท่ากัน

3.5.2 การจำแนกชนิดของดาวคู่แบบใกล้ชิด

พิจารณาระบบของดาวคู่ซึ่งมีวงโคจรเป็นวงกลม เราสามารถกำหนดผิวสมศักย์ (Equipotential Surface) ของดาวคู่ในระบบนี้ในพจน์ของความโน้มถ่วงยังผล (Effective Gravity) ณ จุดใด ๆ ในบริเวณที่อยู่ใกล้กับดาวทั้งสองดวงนี้

ความโน้มถ่วงยังผลเราสามารถพิจารณาได้จากความโน้มถ่วงจริง และผลเนื่องจากการหมุนรอบของดาวทั้งสองดวง ซึ่งก็คือแรงสู่ศูนย์กลางนั่นเอง ที่บริเวณใกล้ ๆ จุดศูนย์กลางของดาวแต่ละดวงความโน้มถ่วงเนื่องจากแรงดึงดูดจะมีค่ามากจนสามารถไม่ต้องคำนึงถึงแรงสู่ศูนย์กลาง หรือแรงดึงดูดจากดาวอีกดวงหนึ่ง ดังนั้นทิศทางของแรงลัพธ์ที่บริเวณใกล้ ๆ ใจกลางของดาวจะมีทิศชี้เข้าในแนวรัศมี (Radially Inward) และผิวสมศักย์จะมีลักษณะเป็นผิวทรงกลมล้อมรอบดาวแต่ละดวง (ดูรูป 3.10) ในทางตรงกันข้ามถ้าเราพิจารณาตำแหน่งที่ห่างไกลจากดาวแต่ละดวงมาก ๆ ความโน้มถ่วงยังผลจะขึ้นอยู่กับแรงสู่ศูนย์กลางเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งผิวสมศักย์จะมีลักษณะเป็นผิวที่ห่อหุ้มดาวทั้งสองในขณะเดียวกัน และค่าวิกฤตสำหรับทั้งสองกรณีก็คือผิวห่อหุ้มโรช (Roche Lobes) ซึ่งเมื่อเรามองในรูปสองมิติจะมีลักษณะคล้ายเลขแปดตะแคง โดยมีจุดตัดอยู่ที่ L_1 ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความโน้มถ่วงยังผลเป็นศูนย์ เราเรียกจุดนี้ว่าจุดลากรานจ์ (Lagrangian Point) ซึ่งมีอยู่ห้าจุดในรูป (3.10)



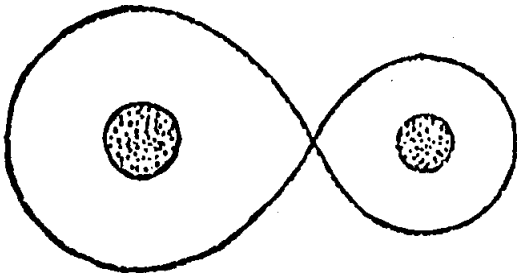
รูป 3.10 แสดงผิวสมศักย์และจุดลากรานจ์ในระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด

เมื่อเราพิจารณาบรรยากาศในชั้นโฟโตสเฟียร์ (Photosphere) ของดาวฤกษ์อย่างหยาบ ๆ พบว่า มันเป็นผิวที่มีความหนาแน่นคงที่ซึ่งมีค่าเกือบเป็นศูนย์ และเราอาจถือได้ว่าเป็นผิวสมศักย์ตาม "แบบจำลองโรช" (Roche Model) จากแนวความคิดนี้ทำให้โคปาล (Kopal) สามารถจำแนกดาวคู่แบบใกล้ชิด (Close Binary) ได้ 3 แบบ คือ (ดูรูป 3.11)

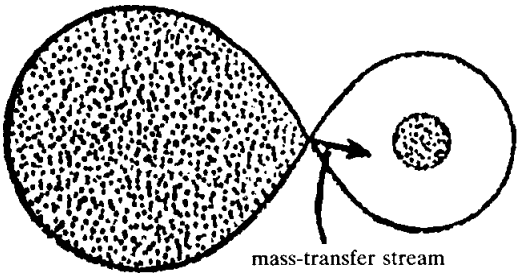
(1) **ดาวคู่แบบแยก** **(Detached Binary)** เป็นระบบดาวคู่ที่ชั้นบรรยากาศโฟโตสเฟียร์ของดาวทั้งสองดวงมีขนาดเล็กกว่าผิวห่อหุ้มโรช ดาวคู่ทั้งสองดวงจึงแยกจากกันโดยเด็ดขาด และดาวทั้งสองดวงจะมีอันตรกิริยาต่อกันได้ด้วยแรงดึงดูดระหว่างกันเท่านั้น

(2) **ดาวคู่แบบกึ่งแยก** **(Semidetached Binary)** เป็นระบบดาวคู่ซึ่งดาวดวงหนึ่งมีบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์เล็กกว่าผิวห่อหุ้มโรช เรียกดาวดวงนี้ว่าดาวองค์ประกอบแยก (Detached Component) และดาวอีกดวงหนึ่งมี บรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์ บรรจุเต็มผิวห่อหุ้มโรชพอดี เรียกดาวดวงนี้ว่าดาวองค์ประกอบสัมผัส (Contact Component) ดังนั้นจึงเรียกดาวคู่แบบนี้ว่าดาวคู่แบบกึ่งแยก ดาวคู่ชนิดนี้น่าสนใจมากเพราะว่ามันมีการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) จากดาวดวงหนึ่งไปยังดาวอีกดวงหนึ่งได้

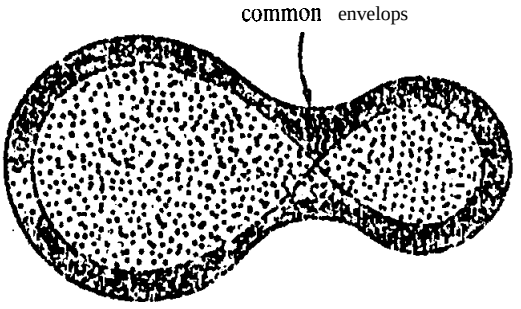
(3) **ดาวคู่แบบสัมผัส** **(Contact Binary)** เป็นระบบดาวคู่ที่มีบรรยากาศชั้นโฟโตสเฟียร์บรรจุเต็มผิวห่อหุ้มโรชทั้งสองดวงพร้อมกัน และในบางกรณีอาจจะล้นออกมานอกผิวห่อหุ้มโรชด้วย ซึ่งในกรณีนี้จะมีผิวห่อหุ้มร่วม (Common Envelope) ล้อมรอบดาวทั้งสองในขณะเดียวกันด้วย ทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นเป็นดาวคู่ได้



(a) detached binary



(c) semidetached binary



(c) contact binary

รูป 3.11 แสดงดาวคู่แบบใกล้ชิดทั้งสามแบบ (a) คือแบบแยก (b) แบบกึ่งแยก และ (c) แบบสัมผัส

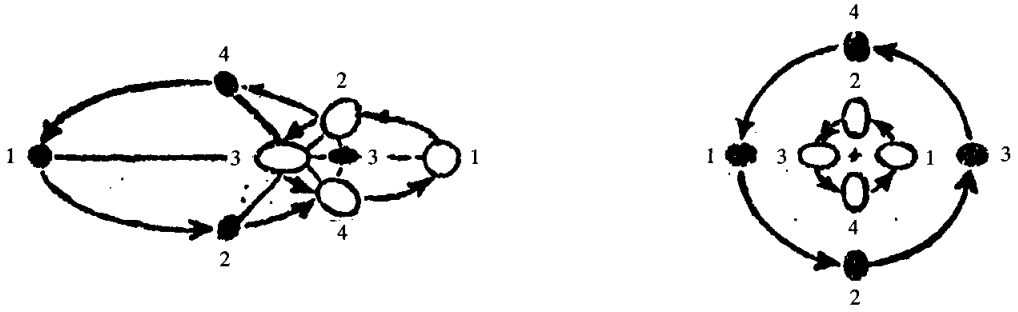
จากดาวคู่ทั้งสามแบบจะเห็นได้ว่าดาวคู่แบบกึ่งแยกจะมีการส่งถ่ายมวลจากดวงหนึ่งไปยังอีกดวงหนึ่งได้ ซึ่งเจอราร์ด คุยเปอร์ (Gerard Kuiper) เป็นผู้เสนอความคิดนี้เราลองมาพิจารณาว่าอะไรจะเกิดขึ้นถ้าดาวที่มีมวลมากในระบบดาวคู่แบบแยกเริ่มมีการขยายตัว เมื่อแกนของดาวมีการวิวัฒนาการ โฟโตสเฟียร์ของดาวจะเคลื่อนที่ออกจากใจกลางของดาวเรื่อย ๆ จนกระทั่งเต็มผิวห่อหุ้มโรช ซึ่งในขณะนี้ดาวจะกลายเป็นดาวคู่แบบกึ่งแยก และดาวดวงเดียวกันนี้จะเริ่มถ่ายเทมวลให้กับดาวอีกดวงหนึ่ง กลไกการถ่ายเทมวลของดาวเราสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในบรรยากาศของดาวตามปกติทั่วไปจะอยู่ในสภาวะสมดุลทางอุทกสถิตศาสตร์ (Hydrostatic Equilibrium) กล่าวคือ แรงดันจากภายในจะเท่ากับแรงดันจากภายนอก แต่ใน

ขณะที่แกนของดาวมีการวิวัฒนาการในขั้นตอนต่าง ๆ ดาวสามารถขยายตัวออกไปได้อย่างช้า ๆ จนกระทั่งถึงจุดลากรานจ์ L_1 ซึ่งจุดนี้แรงโน้มถ่วงยังผลมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นดาวจะส่งถ่ายมวลเข้าไปในผิวห่อหุ้มโรชของดาวอีกดวงหนึ่งอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากแรงดึงดูดของดาวจะทำให้มวลถูกดึงดูดเข้าไปได้เร็วยิ่งขึ้นอีก

3.5.3 การวิวัฒนาการของวงโคจรของดาวคู่

ระบบดาวคู่ที่มีคาบน้อยกว่าหรือประมาณ 10 วันจะมีวงโคจรเป็นวงกลม นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของดาวในแง่ของการแผ่รังสีเนื่องจากผลของการหมุนยังพบว่า ดาวคู่มีการหมุนแบบคล้องจองกัน (Synchronized Spins) ซึ่งหมายความว่าลักษณะการหมุนรอบตัวเองและทางโคจรของดาวคล้องจองกันพอดี ทำให้ดาวดวงนั้นหันหน้าเดิมเข้าหาคู่ของมันเสมอ เช่นเดียวกับกรณีของดวงจันทร์ที่หันหน้าเดียวเข้าหาโลกเสมอ ปัญหาที่เกิดขึ้นก็คือกลไกเช่นนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร ที่จริงแล้วกลไกนี้มีความสลับซับซ้อนมาก แต่เราจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดมากนัก เพียงกล่าวกลไกอย่างคร่าว ๆ ง่าย ๆ โดยอาศัยจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ และกฎสากลแห่งความโน้มถ่วงเท่านั้น

พิจารณาจากรูป 3.12 ถ้าดาวทั้งสองดวงอยู่ใกล้กันเพียงพอมันจะส่งแรงดึงดูดกระทำต่อกัน จนสามารถทำให้รูปร่างของดาวเกิดการบิดเบี้ยวไป (Distortion) คราวนี้ถ้าหากว่าวงโคจรของดาวคู่ไม่เป็นวงกลม หรือการหมุนไม่คล้องจองกันแล้ว ปรากฏการณ์ไทด์ (Tidal Effect) ที่เกิดขึ้นจะทำให้สสารแต่ละแห่งภายในดาวฤกษ์มีการเคลื่อนที่ต่าง ๆ กัน ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงเสียดทาน และมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความร้อนขึ้นในที่สุด ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะสูญเสียไปในอวกาศรอบด้าน ทำให้พลังงานของวงโคจร (Orbital Energy) และพลังงานการหมุนรอบตัวเอง (Spin Energy) ลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบทั้งระบบอยู่ในสถานะพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งหมายความว่าระบบจะเป็นไปตามหลักการคงตัวของโมเมนตัมเชิงมุม อันเป็นผลให้วงโคจรของดาวคู่เป็นวงกลม และมีการหมุนแบบคล้องจองกันในที่สุด



รูป 3.12 แสดงปรากฏการณ์ไทด์ของดาวคู่ (ก) แสดงแรงเสียดทานไทด์และการสูญเสียพลังงานทำให้วงโคจรเปลี่ยนไปเป็นวงกลมและมีการหมุนแบบคล้องจองกันในรูป (ข)

3.5.4 การวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบกึ่งแยก

ดาวคู่แบบกึ่งแยกมีสมบัติหลายอย่างที่ทำให้นักดาราศาสตร์ให้ความสนใจศึกษาค้นคว้าเพื่อความเข้าใจอย่างแท้จริงเกี่ยวกับกลไกของดาวคู่ประเภทนี้ ในกรณีของดาวคู่แบบสัมผัสพบว่า ดาวแต่ละดวงที่ประกอบเป็นดาวคู่จะมีลักษณะคล้ายกัน และมีวิวัฒนาการไปพร้อม ๆ กัน แต่สำหรับดาวคู่แบบกึ่งแยกดาวดวงที่มีขนาดเล็กกว่าผิวห่อหุ้มโรชนั้นอาจจะเป็นดาวปกติ ดาวแคระขาว ดาวนิวตรอน หรือกระทั่งอาจจะเป็นหลุมดำก็ได้ ดังนั้นการส่งถ่ายของดาวดวงใหญ่ที่เป็นคู่ของมันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสถานะของดาวดวงเล็กนั้นเป็นหลัก ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) กรณีที่ดาวดวงเล็กเป็นดาวปกติ ตัวอย่างเช่น ดาวอัลโกล (Algol) ซึ่งเป็นดาวในระบบดาวคู่ประเภทนี้ พบว่าดาวดวงเล็กเป็นดาวที่มีมวลมากกว่าและสว่างกว่าดาวดวงใหญ่ ดังนั้นในขณะที่เกิดการบังกันโดยที่ดาวดวงเล็กอยู่ข้างหลังของดาวดวงใหญ่ เส้นโค้งความสว่างของการเกิดอุปราคาปฐมภูมิจะมีความลึกมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความสว่างปรากฏของระบบดาวคู่จะลดลงมาก ดาวอัลโกลจะมีดาวดวงเล็กเป็นดาวสีน้ำเงิน ซึ่งมีระดับความสว่างของสเปกตรัมเป็น B8 ส่วนดาวดวงใหญ่เป็นดาวใต้ยักษ์ (Subgiant) ซึ่งมีระดับความสว่างของสเปกตรัมเป็น K0 และมีความสว่างน้อยกว่าดาวดวงเล็กด้วย จากผลของการสังเกตและการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวอัลโกล พบว่าดาวดวงเล็กมีมวลประมาณ 3.7 เท่าของมวลดวงอาทิตย์ และดาวดวงใหญ่มีมวลเพียง 0.8 เท่าของมวลดวงอาทิตย์เท่านั้น แต่จากทฤษฎีการวิวัฒนาการของดาวฤกษ์กล่าวว่า ดาวมวลมากจะมีวิวัฒนาการเร็วกว่าดาวมวลน้อย ซึ่งตรงกันข้ามกับผลที่สังเกตได้จากระบบดาวคู่อัลโกล นักดาราศาสตร์จึงต้องพยายามหาวิธีอธิบายข้อขัดแย้งดังกล่าวนี้

โกปาลและวูด (Wood) ได้ให้ข้อคิดเห็นว่า ดาวใต้ยักษ์ในระบบดาวคู่แบบอัลโกลนั้นมีการขยายตัวเนื่องจากการวิวัฒนาการจนเต็มผิวห่อหุ้มโรช แล้วมีการถ่ายเทมวลไปให้กับคู่ของมัน ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าในช่วงแรกนั้นดาวใต้ยักษ์อาจจะมีมวลมากกว่าดาวอีกดวงหนึ่งได้ และผิวห่อหุ้มโรชของดาวใต้ยักษ์จะมีขนาดใหญ่กว่าดาวอีกดวงหนึ่ง ซึ่งในระยะนี้การถ่ายเทมวลจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งมวลของดาวใต้ยักษ์เริ่มน้อยกว่าดาวคู่ของมัน การถ่ายเทมวลจึงเป็นไปอย่างเชื่องช้า ซึ่งเป็นลักษณะที่สังเกตได้จากระบบดาวคู่แบบอัลโกลทั่ว ๆ ไปนั่นเอง

(2) ในกรณีที่ดาวดวงเล็กเป็นดาวที่มีการวิวัฒนาการไปแล้ว เช่น ดาวแคระขาว ดาวนิวตรอน หรือหลุมดำ ดาวเหล่านี้จะมีขนาดเล็กและสนามโน้มถ่วงสูงมาก เมื่อดาวที่เป็นคู่

ของดาวเหล่านี้มีการขยายตัวเนื่องจากการวิวัฒนาการจนกระทั่งเต็มผิวห่อหุ้มโรช จะเกิดการถ่ายเทมวลมาสู่ดาวแคระขาวหรือดาวนิวตรอนหรือหลุมดำขึ้น แต่เนื่องจากดาวเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก มวลที่ถ่ายเทมาจากดาวดวงใหญ่ไม่สามารถชนดาวเหล่านี้ได้โดยตรง ทำให้มวลเหล่านี้โคจรรอบดาวแคระขาวหรือดาวนิวตรอนหรือหลุมดำเป็นลักษณะคล้ายแผ่นวงแหวนเนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วง เราเรียกแผ่นวงแหวนเหล่านี้ว่า แอคครีชัน ดิสค์ (Accretion Disks) การหมุนวนของสารรอบดาวอาจทำให้เกิดการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) หรือรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถสังเกตได้

ในกรณีที่ดาวดวงเล็กเป็นดาวแคระขาว มวลที่ถ่ายเทเข้ามาจากดาวคู่ของมัน อาจก่อให้เกิดการระเบิดที่ผิวของดาวแคระขาว ทำให้เราสามารถสังเกตเห็นระบบดาวคู่ประเภทนี้มีการแปรแสงอย่างรวดเร็ว คล้ายกับ การเกิด นวดารา (Nova) แบบต่าง ๆ เราเรียกดาวประเภทนี้ว่า ดาวแปรแสงแบบระเบิด (Cataclysmic Variables)

3.6 กระจุกดาว

กระจุกดาวเป็นระบบของดาวจำนวนมากที่อยู่ใกล้กัน ดาวสมาชิกต่าง ๆ จะมีการเคลื่อนที่คล้องจองกันด้วยความเร็วเท่ากันหมด กระจุกดาวบางกลุ่มมีดาวสมาชิกอยู่กันอย่างกระจัดกระจายหลวม ๆ แต่บางกลุ่มก็อยู่รวมกันอย่างหนาแน่น จากสังเกตการณ์ชี้ให้เห็นว่าดาวสมาชิกของกระจุกดาวแต่ละดวงน่าจะมีจุดกำเนิดร่วมกัน หมายความว่าดาวแต่ละดวงเกิดจากการยุบตัวของกลุ่มแก๊สไฮโดรเจนกลุ่มใหญ่ ณ บริเวณต่าง ๆ ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นองค์ประกอบต่าง ๆ และอายุของดาวสมาชิกในกระจุกดาวจะคล้ายกันมาก อย่างไรก็ตามเราพบว่าดาวสมาชิกทั้งหลายในกระจุกดาวมีมวลไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลให้การวิวัฒนาการของดาวแต่ละดวงแตกต่างกันไป

จากการสังเกตกระจุกดาวต่าง ๆ ทำให้นักดาราศาสตร์สามารถจัดแบ่งกระจุกดาวออกได้ 2 จำพวกคือ **1. กระจุกดาวเปิด (Open Cluster) หรือ กระจุกดาวกาแลกติก (Galactic Cluster) 2. กระจุกดาวทรงกลม (Globular Cluster)**

3.6.1 กระจุกดาวเปิด

กระจุกดาวเปิดเป็นกระจุกดาวที่มีสมาชิกอยู่กันอย่างหลวม ๆ ซึ่งสามารถมองเห็นดาวแต่ละดวงแยกกันอย่างชัดเจน พบมากแถวบริเวณระนาบของดาราจักร ตัวอย่างของกระจุกดาวเปิดที่สำคัญ เช่น กระจุกดาวฮายเอดส์ในกลุ่มดาววัว กระจุกดาวลูกไก่ (Pleiades) กระจุกดาวในกลุ่มดาวเปอซิอุส (Perseus) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบกระจุกดาวบางกลุ่มที่ อยู่นอกระนาบของดาราจักรออกไป เช่น กระจุกดาวโคมา เบเรนีส (Coma Berenices) สำหรับกระจุก

ดาวที่อยู่ใกล้เรามากที่สุดมีสมาชิกที่มีการเคลื่อนที่ปรอเปอร์มากจนสังเกตได้ง่าย บางครั้งเราเรียกกระจุกดาวเหล่านี้ว่ากระจุกดาวเคลื่อนที่ (Moving Cluster)

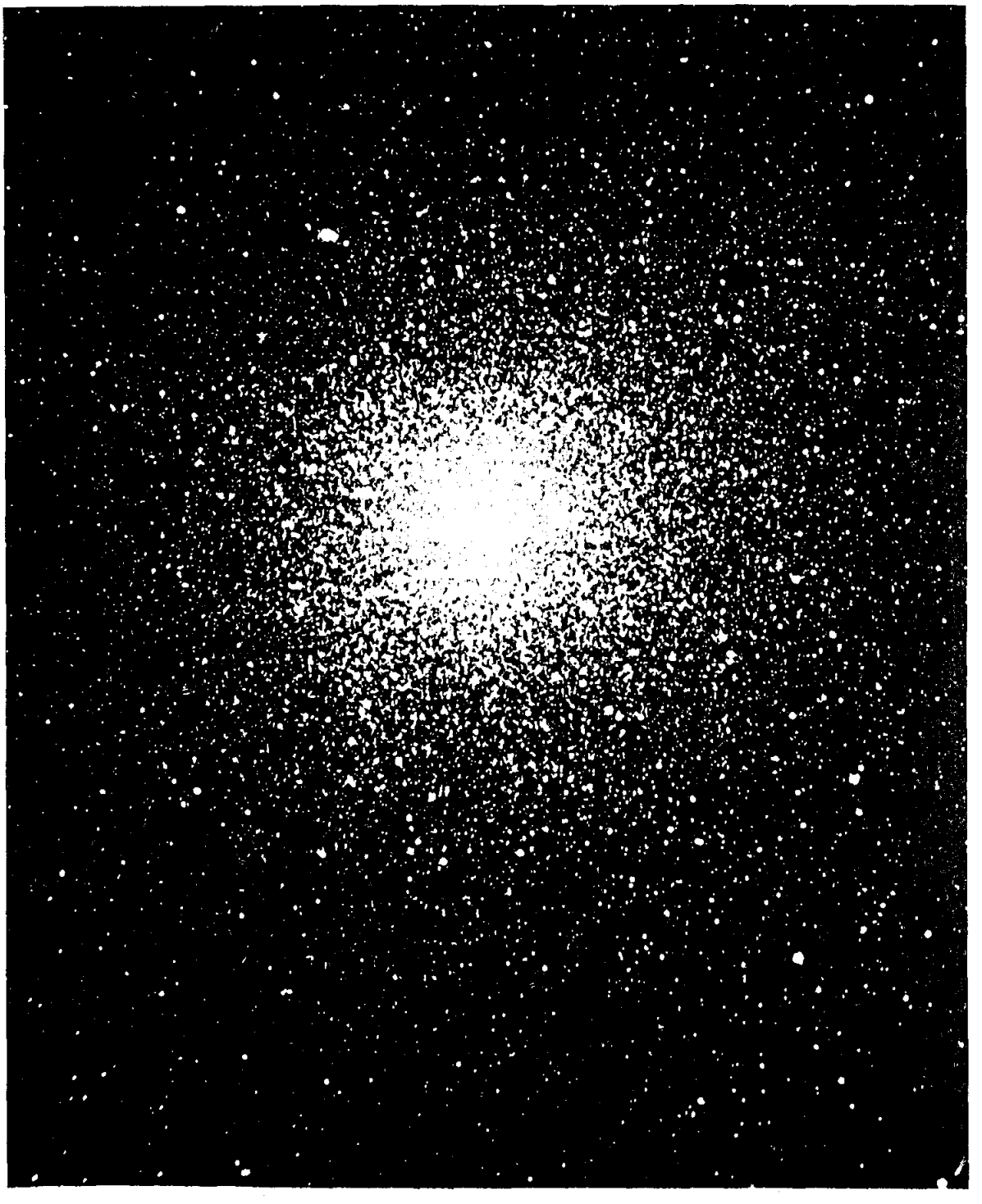
สำหรับกระจุกดาวทั่ว ๆ ไปเนื่องจากระยะห่างระหว่างดาวสมาชิกในกระจุกดาวน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะทางจากกระจุกดาวถึงโลกเรา ดังนั้นเราจึงถือว่าดาวสมาชิกทุกดวงในกระจุกดาวแต่ละจุดอยู่ห่างจากโลกหรือดวงอาทิตย์เท่ากันหมด ถ้าให้ m เป็นโชติมาตรปรากฏของดาวเหล่านี้ และ M เป็นโชติมาตรสัมบูรณ์ ดังนั้นผลต่างของค่าโชติมาตร (m-M) ของดาวแต่ละดวงในกระจุกดาวจะมีค่าเท่ากัน เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโชติมาตรปรากฏกับค่าชนิดของสเปกตรัมของดาวแต่ละดวงในกระจุกดาวต่าง ๆ จะพบว่ามีรูปร่างคล้ายกันต่างกันที่ค่าของ (m-M) ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่านั้น ในการหาความสัมพันธ์นี้บางครั้งเราอาจใช้ค่าดัชนีสีแทนค่าชนิดของสเปกตรัมก็ได้ เรียกความสัมพันธ์นี้ว่าแผนภาพสี-โชติมาตรปรากฏ (Color-Apparent Magnitude Diagram)

การหาระยะทางของกระจุกดาวนั้น เราใช้วิธีเปรียบเทียบแผนภาพสี-โชติมาตรปรากฏของดาวฤกษ์ในกระจุกดาวกับแผนภาพสี-โชติมาตรปรากฏของกระจุกดาวมาตรฐาน ค่าความแตกต่างระหว่างโชติมาตรของดาวทั้งสองกระจุกนี้จะเท่ากับ (m−M) นั่นเอง ดังนั้นเราจึงสามารถหาระยะทางของกระจุกดาวได้ อย่างไรก็ตามเราต้องคิดถึงผลของการลดลงของแสงดาวเนื่องจากสสารระหว่างดาวด้วย

3.6.2 กระจุกดาวทรงกลม

กระจุกดาวทรงกลมเป็นกระจุกดาวที่มีสมาชิกอยู่รวมกันอย่างหนาแน่น และมีรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกลม เมื่อใช้กล้องโทรทรรศน์ตรวจสอบบริเวณใจกลางของกระจุกดาวพบว่าไม่สามารถมองเห็นดาวแต่ละดวงแยกออกจากกันได้ชัดเจน ตำแหน่งของกระจุกดาวประเภทนี้มักจะพบในบริเวณแฮโล (Halo) ของดาราจักร ดังนั้น สมาชิกในกระจุกดาวทรงกลมจะเป็นดาวประชากรประเภทที่ 2 (Populatian II) ซึ่งเป็นดาวที่มีโลหะอยู่มากและมีอายุมาก ในปัจจุบันมีการพบกระจุกดาวทรงกลมประมาณ 120 กลุ่มในดาราจักรทางช้างเผือก และมีบางกระจุกดาวสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า

กระจุกดาวทรงกลมที่อยู่ใกล้โลกมากที่สุดและสว่างที่สุดมีสองกระจุกดาว คือ โอเมกา-เซนทอรี (Omega Centauri) และ 47 ทูคานี (Tucanae) กระจุกดาวทั้งสองอยู่ห่างจากโลกเราประมาณ 6,700 พาร์เซ็ก ปรากฏให้เห็นได้ด้วยตาเปล่าโดยมีค่าโชติมาตรปรากฏประมาณ 4 กระจุกดาวอื่นที่น่าสนใจได้แก่ M_5 ในกลุ่มดาวงูใหญ่ (Serpens) M_{13} ในกลุ่มดาวเฮอร์คิวลีส และ M_{22} ในกลุ่มดาวราศีธนู (Sagittarius) เป็นต้น



รูป 10.13 แสดงกระจุกดาวทรงกลม เป็นกระจุกดาวที่มีดาวอยู่กันอย่างหนาแน่นบริเวณจุดศูนย์อย่างน้อย 50,000 ดวง กระจุกดาวนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 ปีแสง มีระยะทางห่างจากเราประมาณ 25,000 ปีแสง

แบบฝึกหัดที่ 3

3.1 ผลรวมของมวลของดาวคู่จักษุภาพระบบหนึ่งมีค่าเท่ากับ 1.5 เท่าของมวลดวงอาทิตย์มีคาบการครบรอบเท่ากับ 700 ปี และมีระยะห่างเชิงมุมเฉลี่ย 24 อาร์กวินาที จงหาพารัลแลกซ์ของดาวคู่นี้

3.2 ดาวคู่จักษุภาพระบบหนึ่งมีคาบครบรอบ 40 ปี กึ่งแกนหลัก 5″ พารัลแลกซ์เท่ากับ 0.3″ และมุมเอียงของวงโคจรเป็น 0° จงหาผลบวกของมวลของดาวคู่

3.3 ดาวคู่สเปกโทรสโกปิกระบบหนึ่งมีเส้นโค้งความเร็วแบบสองเส้นเป็นรูปไซน์ ด้วยอัมปลิจูด 20 กม./วินาที และ 60 กม./วินาที และคาบครบรอบเท่ากับ 1.5 ปี

(1) ดาวดวงไหนมีมวลมากกว่า

(2) จงหาอัตราส่วนของมวลของดาวคู่นี้

(3) ถ้ามุมเอียงของวงโคจรเป็น 90° จงหาค่ากึ่งแกนหลักของวงโคจรสัมพัทธ์ และหามวลของดาวแต่ละดวง

3.4 จงคำนวณหามวลของดาวซีรีอุสซึ่งมีระยะกึ่งแกนหลัก 7″.62 มีคาบครบรอบ 49.9 ปี และมีพารัลแลกซ์ 0″.379 และมุมเอียงของวงโคจรเป็น 0°

3.5 ดาวคู่อุปราคาระบบหนึ่งมีอุณหภูมิพื้นผิวเป็น 15,000 K และ 5,000 K ดาวที่เย็นกว่าเป็นดาวยักษ์มีรัศมีเป็น 4 เท่าของดาวดวงที่ร้อนกว่า

(1) จงหาอัตราส่วนของความสว่างของดาว

(2) ขณะเมื่อเกิดอุปราคาปฐมภูมิดาวดวงไหนถูกบัง

(3) อุปราคาปฐมภูมิเป็นแบบเต็มดวงหรือวงแหวน

(4) เส้นโค้งความสว่างมีความลึกเท่าไรที่อุปราคาปฐมภูมิเทียบกับอุปราคาทุติยภูมิ

3.6 ดาวคู่อุปราคามีคาบเป็น 2 วัน 22 ชั่วโมง อุปราคาแต่ละครั้งกินเวลาทั้งหมด 18 ชั่วโมง และช่วงที่เป็นอุปราคาเต็มดวงใช้เวลา 4.7 ชั่วโมง

(1) จงหาอัตราส่วนของรัศมีของดาวเทียบกับรัศมีของวงโคจร

(2) จากข้อมูลทางสเปกตรัมของดาวคู่ระบบนี้ เราพบว่าความเร็วสัมพัทธ์ในวงโคจรเป็น 200 กม./วินาที จงหารัศมีของดาวทั้งสองในหน่วยความยาวสัมบูรณ์ เป็นกิโลเมตร และ $R_\odot$

3.7 ดาวซีรีอุส เอ (Sirius A) เป็นดาวคู่ของดาวซีรีอุส บี (Sirius B) โดยที่ซีรีอุส เอ มีรัศมี 1.8 $R_\odot$ และ $M_{bol} = 1.4$ ส่วนซีรีอุสบีมีรัศมี 0.01 $R_\odot$ และ $M_{bol} = 11.5$

(1) จงหาอัตราส่วนของความสว่างของดาวทั้งสอง

(2) จงหาอัตราส่วนของอุณหภูมิพื้นผิว

(3) ถ้า $i = 90°$ ดาวดวงไหนจะถูกบังเมื่อเกิดอุปราคาปฐมภูมิ

3.8 ในการศึกษาวงโคจรของดาวคู่ที่มีคาบครบรอบน้อยกว่า หรือประมาณ 10 วัน พบว่าดาวคู่มักมีวงโคจรเป็นวงกลมและมีการหมุนแบบคล้องจองกัน ถามว่าการหมุนแบบคล้องจองกันของดาวคู่นั้นเป็นอย่างไร และเป็นเพราะเหตุใดที่ดาวคู่แบบนี้มีวงโคจรเป็นวงกลม และมีการหมุนแบบคล้องจองกัน