บทที่ 2
การเคลื่อนที่ของโลก

2.1 สัณฐานของโลก

โลกเป็นดาวเคราะห์ดวงหนึ่งในระบบสุริยะ โลกมีลักษณะสัณฐานเกือบเป็นรูปทรงกลมตัน โดยที่ตรงกลางนูนเล็กน้อยและขั้วป้านเล็กน้อย รูปทรงเช่นนี้เรียกว่า ทรงกลมแป้น (oblate spheroid) จากการคำนวณหาขนาดของโลกในปี ค.ศ. 1909 โดย U.S.Coast and Geodetic Survey ได้ค่าดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางที่เส้นศูนย์สูตรยาว 12,756.8 กิโลเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ขั้วของโลกยาว 12,713.8 กิโลเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองยาวต่างกัน 43.0 กิโลเมตร ค่าความแป้น (oblateness) หาได้จากผลต่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางที่เส้นศูนย์สูตรกับเส้นผ่านศูนย์กลางที่ขั้วโลกหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางที่เส้นศูนย์สูตร ค่าความแป้นของโลกมีค่าเท่ากับ 43/12,756.6 = 1/297 แสดงว่าโลกมีลักษณะป้านเล็กน้อย ความยาวหนึ่งองศาที่ขั้วโลกยาวกว่าที่เส้นศูนย์สูตรเล็กน้อย ความแปรผันของความยาวหนึ่งองศามีค่าตั้งแต่ 110.6 กิโลเมตรที่เส้นศูนย์สูตร จนถึง 111.7 กิโลเมตรที่ขั้วโลก ดังนั้นถ้าเราต้องการคำนวณตำแหน่งของดวงจันทร์ ดวงอาทิตย์อย่างแม่นยำ เราต้องแก้ค่าผิดพลาดเนื่องจากสัณฐานของโลกด้วย

2.2 การหมุนของโลก

จากบทที่ 1 เราจะเห็นได้ว่าโลกหมุนรอบแกนสมมติอันหนึ่ง ในขณะเดียวกันโลกเคลื่อนที่โคจรรอบดวงอาทิตย์ด้วย โลกหมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วที่เส้นศูนย์สูตรประมาณ 1,600 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 29.8 กิโลเมตรต่อวินาที ถ้าเราออกไปนอกโลกและมองตรงลงมาทางขั้วโลกเหนือ เราจะเห็นโลกหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และถ้าเรามองตรงขั้วโลกใต้เราจะเห็นโลกหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

การเคลื่อนที่ปรากฏของทรงกลมท้องฟ้าอาจจะแสดงถึงการหมุนที่แท้จริงของทรงกลมท้องฟ้ารอบโลกหรือเป็นการหมุนรอบตัวเองของโลกก็ได้ **โคเพอร์นิคัส** (Copernicus), **เคป-**

เลอร์ (Kepler), **กาลิเลโอ** (Galileo) และ **นิวตัน** (Newton) ได้วางรากฐานที่ทำให้เชื่อเกี่ยวกับการหมุนรอบตัวเองของโลก แต่อย่างไรก็ตาม การพิสูจน์ว่าโลกหมุนรอบตัวเองกระทำได้ในศตวรรษที่สิบเก้า การพิสูจน์ว่าโลกหมุนรอบตัวเองมี 3 วิธี คือ

1. **ปรากฏการณ์ลูกตุ้มแบบฟูโคลต์** (Foucault pendulum)

รูปที่ 2.1 การหมุนรอบตัวเองของโลกแสดงให้เห็นได้โดยปรากฏการณ์ลูกตุ้มแบบฟูโคลต์

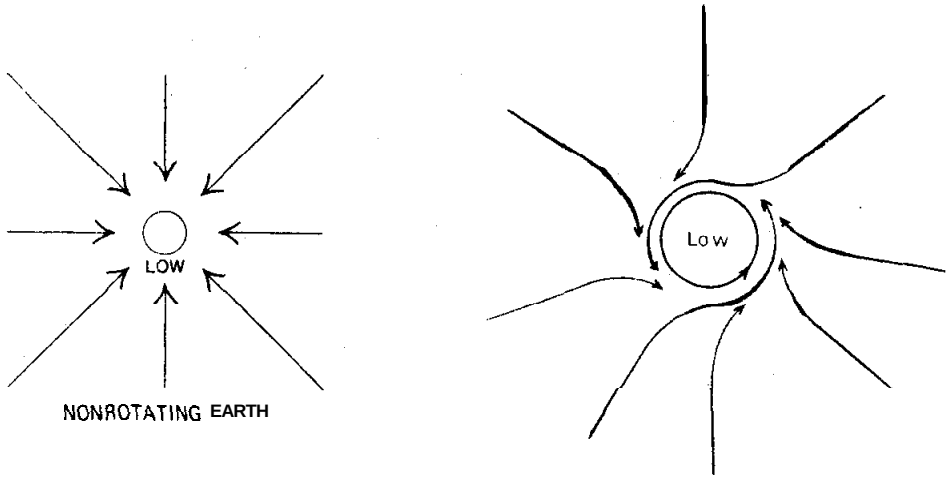
ในปี ค.ศ. 1951 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ **ชอง ฟูโคลต์** (Jean Foucault) ได้แขวนลูกตุ้มหนักประมาณ 25 กิโลกรัม ด้วยเส้นลวดยาว 50 เมตร จากเพดานของวิหารแพนธีออน (Pantheon) ในกรุงปารีส เขาได้ผลักลูกตุ้มให้แกว่งไป-มาในแนวทิศเหนือใต้โดยการดึงปลายเชือกที่ผูกกับลูกตุ้มเสร็จแล้วเผาเชือกเส้นนี้ ทิศทางการแกว่งของลูกตุ้มจะถูกบันทึกลงบนพื้นทรายที่อยู่บนโต๊ะข้างใต้ลูกตุ้ม ในการทดลองนี้เขาได้ควบคุมกระแสอากาศและอิทธิพลอื่น ๆ ที่จะไปรบกวนทิศทางการแกว่งของลูกตุ้ม เมื่อลูกตุ้มแกว่งสักพักหนึ่งปรากฏว่า ระนาบของ

การแกว่งกวัด (oscillation) เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับพื้นทรายหรือเทียบกับโลกนั่นเอง

ถ้าโลกหยุดนิ่งจะมีเพียงแรงเดียวที่กระทำต่อลูกตุ้มคือ แรงโน้มถ่วงระหว่างลูกตุ้มกับโลก และแรงนี้มีทิศทางชี้ลงในแนวดิ่ง ดังนั้นมันจะไม่มีแรงอื่นใดที่เป็นสาเหตุทำให้ระนาบของการแกว่งกวัดของลูกตุ้มเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งตรงกับกฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน และลูกตุ้มยังคงแกว่งในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่อง แต่ในความเป็นจริงลูกตุ้มมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการแกว่งกวัดอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับโลก ปรากฏการณ์นี้เป็นการพิสูจน์ว่าโลกหมุนรอบตัวเอง

เราสามารถเปรียบเทียบให้เห็นการทดลองลูกตุ้มแบบฟูโคลต์อย่างง่ายโดยทดลองที่ขั้วโลกเหนือ ณ ที่นี้ขอให้เราจินตนาการว่า ระนาบของการแกว่งของลูกตุ้มดำเนินต่อไปโดยมีทิศทางคงที่ในอากาศเมื่อเทียบกับดาวฤกษ์ ขณะที่โลกหมุนรอบตัวเองทุกวันที่ขั้วโลกเหนือ (หรือใต้) ลูกตุ้มจะปรากฏหมุนในระนาบของการแกว่งครบรอบสมบูรณ์ในเวลา 24 ชั่วโมง ที่สถานที่อื่น ๆ นอกจากที่ขั้วโลก ปัญหาจะยุ่งยากขึ้นเพราะว่าลูกตุ้มต้องแกว่งในระนาบแนวดิ่งเสมอ ซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางของโลก ระนาบของการแกว่งนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับดาวฤกษ์

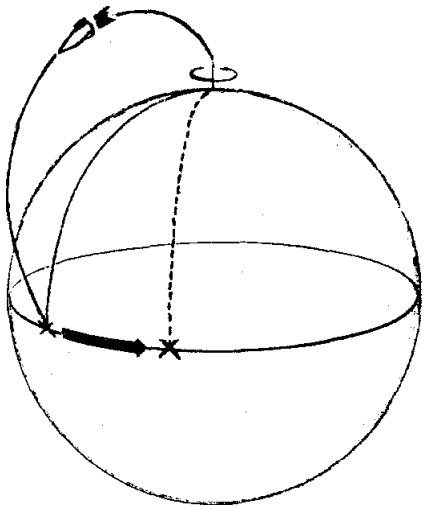
2. ปรากฏการณ์การหมุนของกระแสลมและกระแสน้ำ



รูปที่ 2.2 (ก) ถ้าโลกหยุดนิ่งไม่มีการหมุนรอบตัวเอง กระแสน้ำหรือกระแสอากาศจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงเข้าไปในพื้นที่ที่มีความกดดันต่ำทุกทิศทาง
(ข) การหมุนของลมรอบ ๆ พื้นที่ความกดดันต่ำในซีกโลกภาคเหนือ

จากรูปที่ 2.2 (ก) ถ้าโลกหยุดนิ่งไม่มีการหมุนรอบตัวเอง กระแสน้ำหรือกระแสอากาศจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงเข้าไปในพื้นที่ที่มีความกดดันต่ำทุกทิศทาง แต่เนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเองในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในซีกโลกภาคเหนือและหมุนตามเข็มนาฬิกาในซีกโลกภาคใต้ ดังนั้นทิศทางการหมุนของกระแสลมและกระแสน้ำในซีกโลกภาคเหนือจึงมีทิศการหมุนทวนเข็มนาฬิกา และในซีกโลกภาคใต้มีทิศการหมุนตามเข็มนาฬิกา เช่น การหมุนของพายุไซโคลน, พายุทอร์นาโด, พายุไต้ฝุ่น เป็นต้น

3. ปรากฏการณ์ผลโคริโอลิส (Coriolis effect)

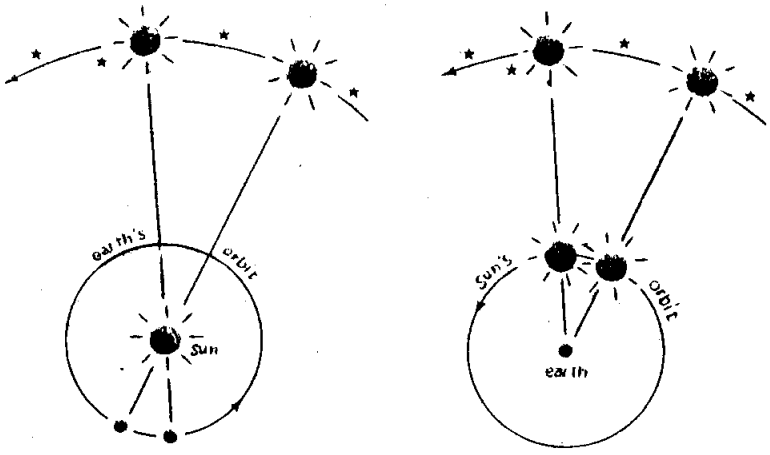


รูปที่ 2.3 การหมุนของโลกทำให้เกิดปรากฏการณ์ผลโคริโอลิส โดยจรวดปรากฏเบนไปทางทิศตะวันตก

จากรูปที่ 2.3 เนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบใช้เวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นความเร็วของพื้นผิวโลกที่บริเวณละติจูดต่าง ๆ จึงมีความเร็วไม่เท่ากัน ที่เส้นศูนย์สูตรมีความเร็วมากที่สุด ความเร็วจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนมีค่าเป็นศูนย์ที่ขั้วโลก ถ้าต้องการยิงจรวดที่ขั้วโลกเหนือไปยังเป้าหมายที่เส้นศูนย์สูตร (ตามเส้นไข่ปลา) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อยิงจรวดจากขั้วโลกเหนือจรวดต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย ดังนั้นขณะที่จรวดเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย โลกมีการหมุนรอบตัวเองด้วย จึงทำให้เป้าหมายเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ผลสุดท้ายจรวดจะตกลงสู่เป้าหมายใหม่ตามเส้นทึบ ซึ่งเป้าหมายใหม่นี้อยู่ทางซ้ายมือหรือทางทิศตะวันตกของเป้าหมายเดิม ปรากฏการณ์นี้มีชื่อเรียกว่า ผลโคริโอลิส

2.3 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

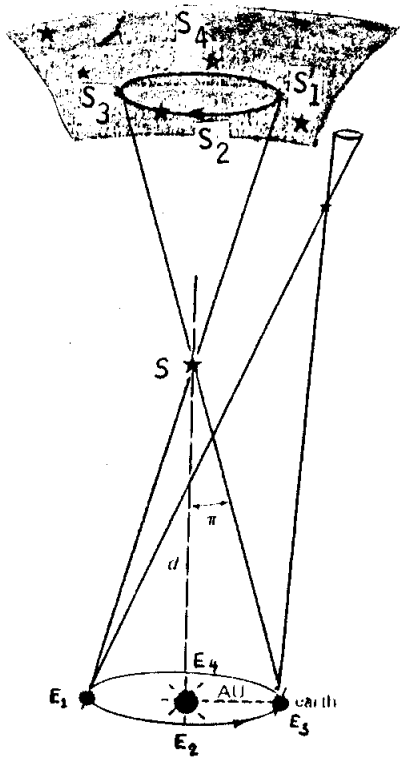
จากบทที่ 1 เราจะเห็นได้ว่าโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ปรากฏรายปีของดวงอาทิตย์ไปตามเส้นสุริยวิถี โดยใช้เวลาในการโคจรครบหนึ่งรอบ 365.2422 วัน อย่างไรก็ตาม เราอาจจะคิดว่าปรากฏการณ์ที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์นั้นเป็นเช่นเดียวกับปรากฏการณ์ที่ดวงอาทิตย์โคจรรอบโลกก็ได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 ขณะที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ ผู้สังเกตอยู่บนโลก จะสังเกตเห็นดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ปรากฏไปตามกลุ่มดาวฤกษ์ต่าง ๆ ที่อยู่เบื้องหลัง แต่ในขณะเดียวกันถ้าโลกหยุดนิ่งและดวงอาทิตย์เคลื่อนที่โคจรรอบโลก ผู้สงเกตก็จะสังเกตเห็นดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปตามกลุ่มดาวฤกษ์ที่อยู่เบื้องหลังเหมือนกับกรณีแรก การที่เราสามารถบอกได้ว่าโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ โดยอาศัยปรากฏการณ์หลาย ๆ อย่าง คือ 1. ความคลาดตำแหน่ง (parallax) 2. ความคลาดแสง (aberration of star light) 3. ผลดอปเพลอร์ (Doppler effect)



รูปที่ 2.4 โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์หรือดวงอาทิตย์โคจรรอบโลก ทางเดินปรากฏบนท้องฟ้าของดวงอาทิตย์ที่สังเกตเห็นบนโลกจะเหมือนกัน

1. ความคลาดตำแหน่ง

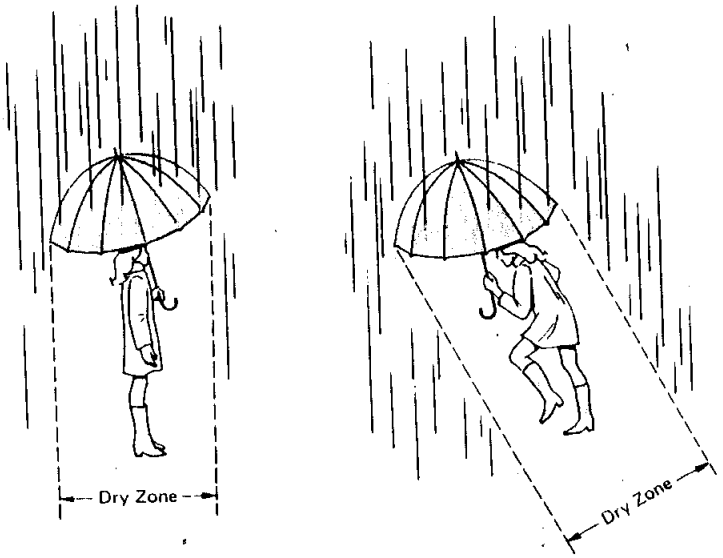
ให้เราจินตนาการว่ากำลังถือดินสอชูไว้ข้างหน้า หลังจากนั้นมองดินสอด้วยตาทีละข้าง เราจะเห็นแท่งดินสอเคลื่อนที่ไปมามากหรือน้อย (เทียบกับภาพที่อยู่เบื้องหลังไกลออกไป) ตามระยะทางระหว่างดวงตาทั้งสองและระยะทางระหว่างดวงตากับดินสอ หรือในขณะที่เราเดินทางไปต่างจังหวัดด้วยรถยนต์หรือรถไฟ ถ้าเรามองดูต้นไม้ที่อยู่ข้างหลังเราจะเห็นต้นไม้เหล่านี้มีทิศทางการเคลื่อนที่ไปข้างหลัง (เทียบกับภาพที่อยู่เบื้องหลังไกลออกไป) ปรากฏการณ์ที่วัตถุเคลื่อนที่เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งของการสังเกต มีชื่อเรียกว่า **ความคลาดตำแหน่ง**



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดความคลาดตำแหน่งของดาวฤกษ์ S เมื่อสังเกตจากโลก

จากรูปที่ 2.5 แสดงถึงทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นรูปวงรี S เป็นตำแหน่งของดาวฤกษ์ที่สุกสว่างดวงหนึ่ง โดยที่ดาว S อยู่ใกล้โลกมากกว่าดาวฤกษ์ที่อยู่เบื้องหลัง ค่าละติจูดท้องฟ้าของดาว S มีค่าเท่ากับ 90° หมายความว่า ดาว S เคลื่อนที่ที่สามารถใช้เป็นหลักเทียบกับดาวฤกษ์เบื้องหลังได้ เมื่อโลกอยู่ที่ตำแหน่ง E_1 ในวงโคจรรอบดวงอาทิตย์ เมื่อเราสังเกตดาว S ดาว S ปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง S_1 อีกสามเดือนต่อมาโลกเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ตำแหน่ง E_2 ดาว S ปรากฏเคลื่อนที่ไปทิศทางตรงข้ามไปอยู่ที่ตำแหน่ง S_2 ถ้าเราสังเกตตำแหน่งของดาว S อย่างสม่ำเสมอ ดาว S จะปรากฏเคลื่อนที่คล้ายกับวงโคจรของโลกที่มองจากดาว S มุมที่ตำแหน่งของดาวฤกษ์รองรับด้วยรัศมีวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ เรียกว่า มุมคลาดตำแหน่ง (parallactic angle) หรือความคลาดตำแหน่งรายปี (annual parallax) หรือความคลาดตำแหน่ง (parallax) ของดาวฤกษ์

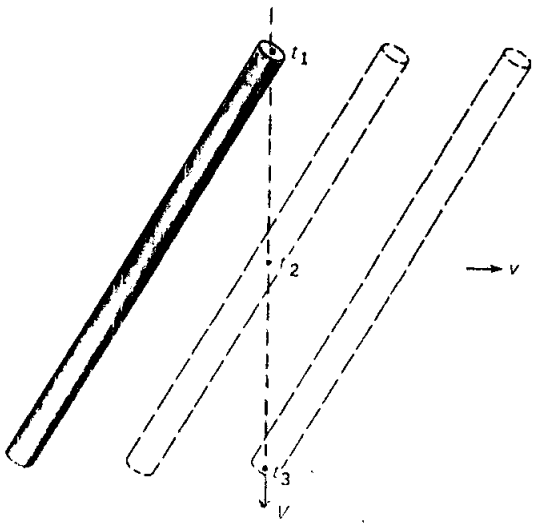
2. ความคลาดแสง



รูปที่ 2.6 แสดงความคลาดแสงเนื่องจากฝนตก

สมมติว่าในขณะที่ฝนกำลังตกลงมาในแนวดิ่ง (ไม่มีลมพัด) ถ้าเราไม่ต้องการให้ตัวเราเปียก เราจะต้องกางร่มและยกขึ้นในแนวดิ่ง แต่ถ้าเราเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและไม่ต้องการให้ตัวเราเปียก เราจะต้องยกร่มเอียงไปทางข้างหน้า *(ดังรูปที่ 2.6)* และถ้าเราเคลื่อนที่เร็วขึ้น เราจะต้องเอียงร่มมากขึ้นตามความเร็วที่เคลื่อนที่ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ความคลาดแสง (aberration)

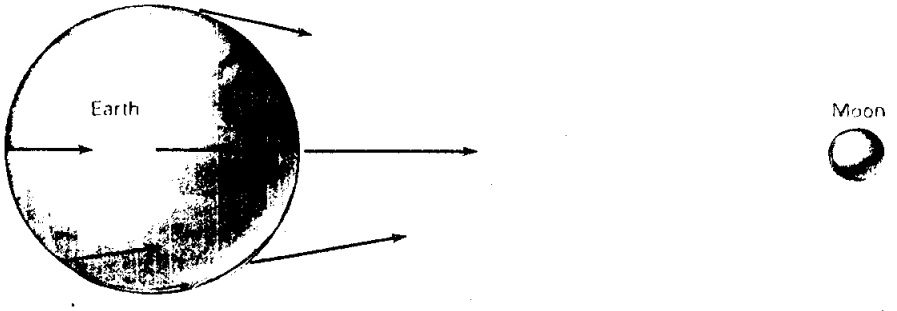
ปรากฏการณ์ความคลาดแสงค้นพบโดยนักดาราศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ **เจมส์ แบรดเลย์** (James Bradley) ในปี ค.ศ. 1728 โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ด้วยความเร็ว 29.78 กิโลเมตรต่อวินาที และแสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3×10^5 กิโลเมตรต่อวินาที ในขณะที่เราส่องกล้องโทรทรรศน์ดูดาวฤกษ์ แสงจากดาวฤกษ์เดินทางมาถึงเลนส์ใกล้วัตถุ ในระหว่างที่แสงเดินทางจากเลนส์ใกล้วัตถุไปสู่เลนส์ใกล้ตา กล้องโทรทรรศน์จะเคลื่อนที่ไปอยู่อีกตำแหน่งหนึ่งเนื่องจากความเร็วของโลก *(ดูรูปที่ 2.7)* ดังนั้นจึงทำให้เกิดความคลาดแสงขึ้น



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของหยดน้ำฝนเมื่อตกผ่านท่อน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v

ค่าความคลาดแสงขึ้นอยู่กับตัวประกอบ 3 อย่าง คือ 1. เป็นปฏิภาคโดยตรงกับอัตราความเร็วของโลก 2. เป็นปฏิภาคผกผันกับอัตราความเร็วของแสง 3. ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดาวฤกษ์

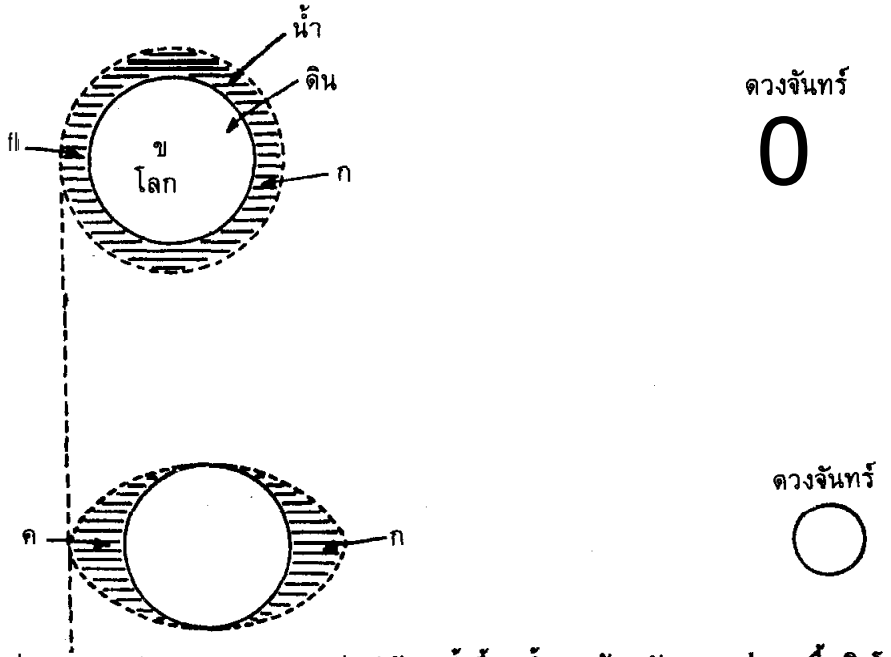
2.4 น้ำขึ้น - น้ำลงอุดมคติ



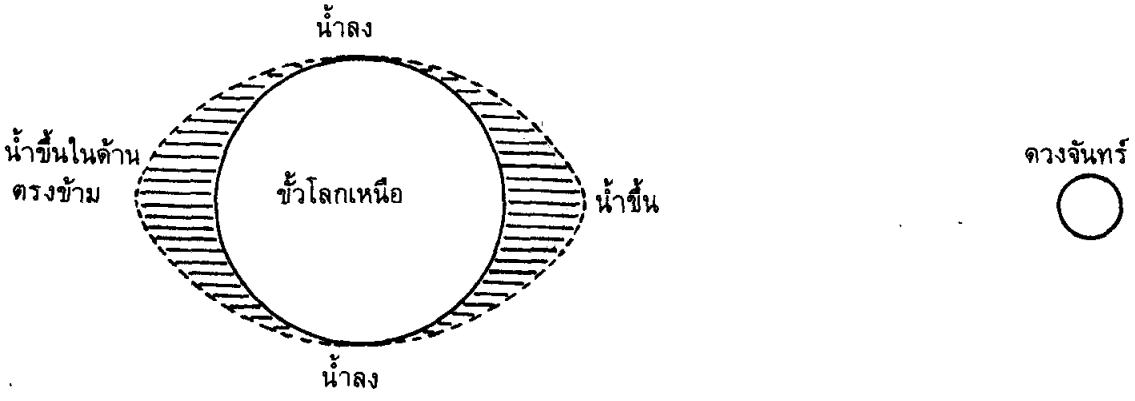
รูปที่ 2.8 แรงดึงดูดของดวงจันทร์ที่แตกต่างกันกระทำต่อส่วนต่าง ๆ ของโลก

เทห์ฟากฟ้าทุกชนิดที่อยู่ในระบบสุริยะของเรารวมตัวกันเป็นรูปร่างได้ด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แรงโน้มถ่วงที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อโลกมากที่สุดคือ แรงโน้มถ่วง

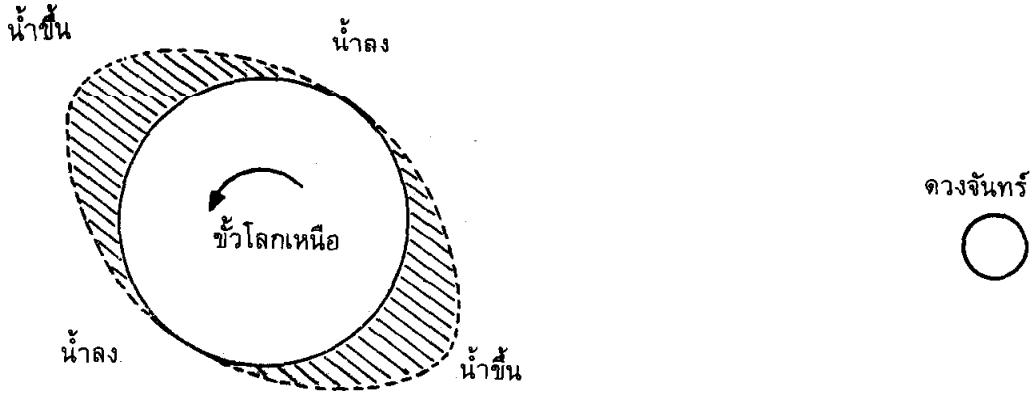
จากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ รูปที่ 2.8 แสดงถึงแรงดึงดูดของดวงจันทร์ที่กระทำต่อโลก แรงเหล่านี้แตกต่างกันเล็กน้อยบนพื้นผิวโลก เนื่องจากโลกมีขนาดขอบเขตจำกัด และทุก ๆ ส่วนบนโลกอยู่ห่างจากดวงจันทร์ไม่เท่ากัน แรงเหล่านี้มีทิศทางต่างกันด้วย ส่วนของโลกที่อยู่ใกล้ดวงจันทร์มากที่สุดจะถูกแรงดึงดูดจากดวงจันทร์มากที่สุด แต่เนื่องจากโลกเป็นของแข็งปกคลุมด้วยน้ำ (ผิวโลกประกอบด้วยน้ำ 3 ส่วน พื้นดิน 1 ส่วน) จากรูปที่ 2.9 สมมติว่าโลกและดวงจันทร์อยู่นิ่ง บริเวณของโลกที่อยู่ใกล้ดวงจันทร์มากที่สุดคือ บริเวณ (ก) ทำให้น้ำบริเวณ (ก) ถูกแรงดึงดูดจากดวงจันทร์มาก ดังนั้นพื้นน้ำบริเวณ (ก) จึงเคลื่อนที่เข้าหาดวงจันทร์มากกว่าน้ำที่อยู่บริเวณอื่น ๆ ของโลก ทำให้เกิดน้ำขึ้นที่บริเวณ (ก) ส่วนตัวโลก (ข) เป็นของแข็ง เมื่อดวงจันทร์ส่งแรงดึงดูดโลก จะทำให้โลก (หรือบริเวณ (ข)) เคลื่อนที่เข้าหาดวงจันทร์ทั้งก้อน แต่เนื่องจากบริเวณ (ก) เป็นน้ำซึ่งเป็นของเหลวและอยู่ใกล้ดวงจันทร์มากกว่าบริเวณ (ข) ดังนั้นบริเวณ (ข) จึงเคลื่อนที่เข้าหาดวงจันทร์น้อยกว่าบริเวณ (ก) ที่บริเวณ (ค) (อยู่ตรงข้ามกับดวงจันทร์) จะถูกแรงดึงดูดจากดวงจันทร์น้อยที่สุด นั่นคือ น้ำบริเวณ (ค) เคลื่อนเข้าหาดวงจันทร์เล็กน้อย แต่เนื่องจากบริเวณ (ข) เคลื่อนที่เข้าหาดวงจันทร์มากกว่าบริเวณ (ค) จึงทำให้เราเห็นว่าน้ำตรงบริเวณ (ค) เกิดโป่งออก นั่นคือแรงดึงดูดจากดวงจันทร์จะทำให้เกิดน้ำขึ้นสองแห่งพร้อมกัน คือ บริเวณทะเลหรือมหาสมุทรบนโลกที่อยู่ใต้ดวงจันทร์ และบริเวณทะเลหรือมหาสมุทรบนโลกที่อยู่ตรงข้ามกับดวงจันทร์ จากการที่เกิดน้ำขึ้นตรงบริเวณ (ก) และ (ค) จะทำให้น้ำที่อยู่ด้านบนและด้านล่างของบริเวณ (ข) เป็นน้ำลง แต่เนื่องจากโลกมีการหมุนรอบตัวเอง จึงทำให้น้ำขึ้นช้ากว่าที่ควรจะเป็น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10



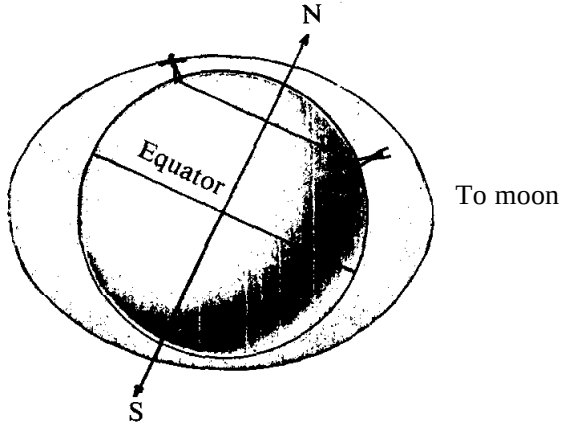
รูปที่ 2.9 แรงดึงดูดของดวงจันทร์ทำให้เกิดน้ำขึ้น-น้ำลงพร้อมกันสองแห่งบนพื้นผิวโลก



รูปที่ 2.10 (ก) ลักษณะการเกิดน้ำขึ้น-น้ำลงบริเวณเส้นศูนย์สูตรของโลกโดยที่โลกหยุดนิ่ง



(ข) โลกหมุนรอบตัวเองทำให้ตำแหน่งของน้ำขึ้น-น้ำลงไม่ตรงกับดวงจันทร์

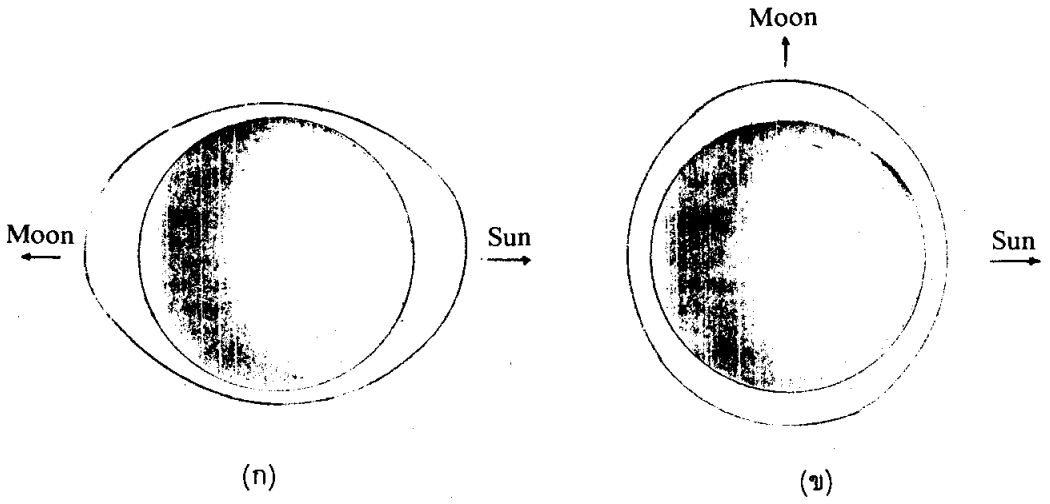


รูปที่ 2.11 ระดับน้ำขึ้น-น้ำลงสูงไม่เท่ากันในแต่ละวัน

ในแต่ละวันน้ำขึ้น-น้ำลงสองครั้ง ความสูงของระดับน้ำทั้งสองครั้งไม่จำเป็นต้องเท่ากัน เนื่องจากแกนหมุนของโลกเอียงจากแนวดิ่ง 23.5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ผู้สังเกตอยู่ทางซีกโลกภาคเหนือจะสังเกตเห็นความสูงของระดับน้ำทางด้านของโลกที่หันเข้าสู่ดวงจันทร์สูงกว่าความสูงของระดับน้ำขึ้นในอีกครึ่งวันต่อมา สำหรับผู้สังเกตทางซีกโลกภาคใต้จะเห็นปรากฏการณ์ตรงข้ามกับทางซีกโลกภาคเหนือ **นั่นคือ น้ำขึ้นสูงสุดเพียงหนึ่งครั้งในหนึ่งวัน**

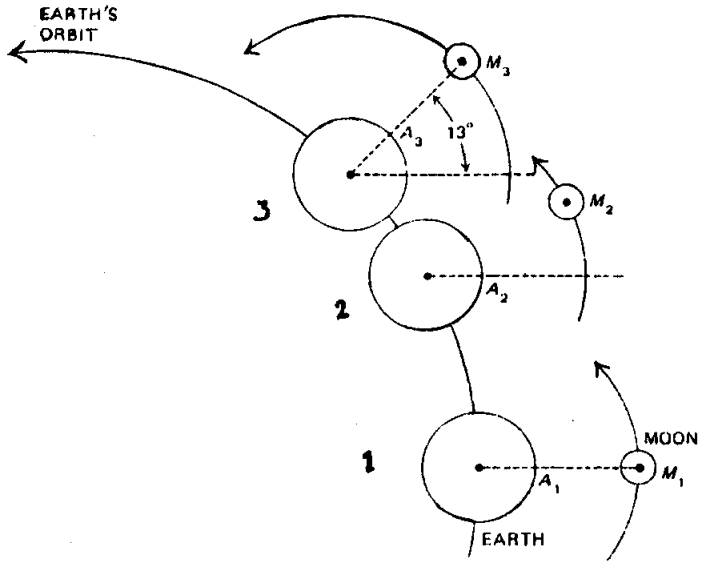
น้ำขึ้น-น้ำลงเนื่องจากดวงอาทิตย์

แรงดึงดูดที่ดวงอาทิตย์กระทำต่อโลกมีค่าประมาณ 180 เท่า ซึ่งมากกว่าแรงดึงดูดที่ดวงจันทร์กระทำต่อโลก เนื่องจากโลกอยู่ห่างไกลจากดวงอาทิตย์มากจนกระทั่งแรงดึงดูดที่ดวงอาทิตย์กระทำต่อทุก ๆ ส่วนบนพื้นผิวโลกเท่ากันหมด แต่โลกอยู่ใกล้กับดวงจันทร์มาก ดังนั้นแรงดึงดูดของดวงจันทร์ที่กระทำต่อส่วนต่าง ๆ บนพื้นผิวโลกจึงไม่เท่ากัน ถ้าไม่มีดวงจันทร์น้ำขึ้น-น้ำลงบนโลกจะน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำขึ้น-น้ำลงในปัจจุบัน **นั่นคือ ดวงจันทร์มีอิทธิพลต่อน้ำขึ้น-น้ำลงบนพื้นผิวโลกมากที่สุด** สำหรับอิทธิพลของดวงอาทิตย์ช่วยเสริมให้น้ำขึ้น-น้ำลงมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.12 (ก) แสดงน้ำขึ้น-น้ำลงแบบสปริง (ข) แสดงน้ำขึ้น-น้ำลงแบบนีพ

ในกรณีที่ดวงอาทิตย์และดวงจันทร์อยู่ในตำแหน่งเส้นตรงเดียวกับโลก ซึ่งได้แก่ วันจันทร์เต็มดวง (full moon) หรือวันเดือนใหม่ (new moon) ตรงกับประมาณวันแรม 1 ค่ำ และวันขึ้น 1 ค่ำ ทางเดือนจันทรคติ แรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ที่กระทำต่อโลกจะ **เสริม** กัน ทำให้น้ำขึ้น-น้ำลงมากกว่าปกติ ลักษณะน้ำขึ้น-น้ำลงชนิดนี้เรียกว่า **น้ำขึ้น-น้ำลงแบบสพริง** (spring tide) ในทำนองเดียวกัน ถ้าดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ทำมุมตั้งฉากกับโลกตรงกับประมาณวันขึ้น 8 ค่ำ และวันแรม 8 ค่ำ แรงดึงดูดของดวงอาทิตย์จะหักล้างแรงดึงดูดของดวงจันทร์ที่กระทำต่อโลกทำให้น้ำขึ้น-น้ำลงน้อยกว่าปกติ น้ำขึ้น-น้ำลงชนิดนี้เรียกว่า **น้ำขึ้น-น้ำลงแบบนีพ** (neap tide)



รูปที่ 2.13 การเกิดน้ำขึ้นบนผิวโลก จะปรากฏช้าลงวันละประมาณ 50 นาที

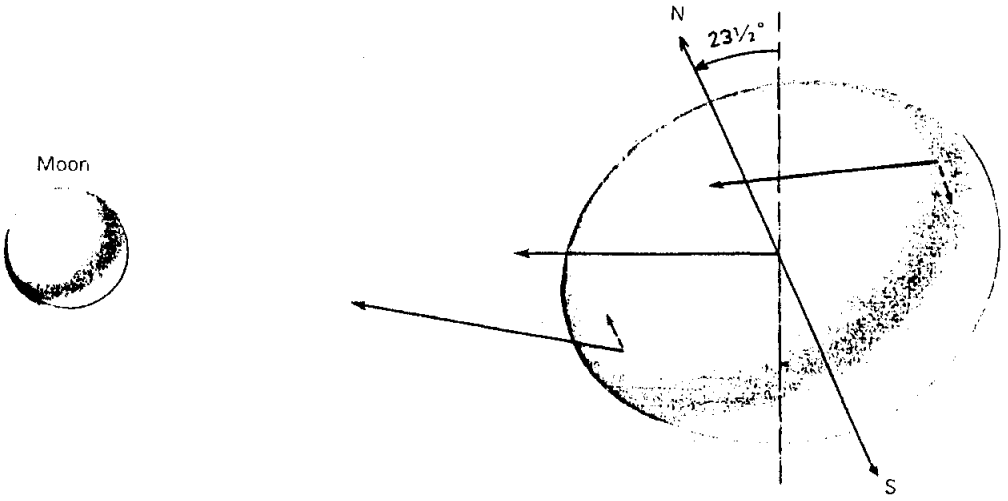
การขึ้นและลงของน้ำ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะภูมิประเทศบนพื้นผิวโลก, รูปลักษณะความลาดชันของพื้นดินใต้มหาสมุทร, รูปลักษณะความลาดชันของชายฝั่งทะเล และการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และดวงจันทร์รอบโลก จากรูปที่ 2.13 โลกอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 ที่จุด A_1 บนพื้นผิวโลกอยู่ใกล้ดวงจันทร์มากที่สุด (ที่ตำแหน่ง M_1) น้ำจะขึ้นสูงสุด ภายหลังจากนั้นอีก 24 ชั่วโมงต่อมา โลกจะเคลื่อนไปตำแหน่งที่ 2 ในทางโคจรรอบดวงอาทิตย์ และโลกจะหมุนรอบตัวเองครบหนึ่งรอบที่จุด A_2 ในช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมงนี้ ดวงจันทร์ได้เคลื่อนที่ไปในวงโคจรรอบโลกที่ตำแหน่ง M_2 จะเห็นได้ว่า ถ้าน้ำจะขึ้นอีกครั้งที่ตำแหน่ง A_2

จุด A_2 จะต้องเคลื่อนต่อไปยังจุด A_3 นั่นคือ โลกจะต้องหมุนรอบตัวเองไปอีกประมาณ 13° (มุม 13° ประมาณเท่ากับ 50 นาที) ตำแหน่ง A_3 จึงจะอยู่ตรงกับดวงจันทร์ สรุปได้ว่า **น้ำจะขึ้นในวันถัดไปทุก ๆ ประมาณ 24 ชั่วโมง 50 นาที**

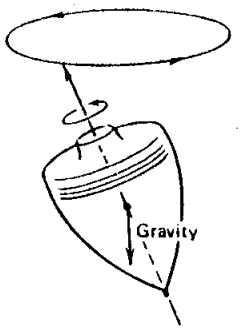
2.5 การหมุนควงของแกนหมุนของโลกและการเกิดฤดู

โลกมีการหมุนรอบตัวเองเร็วมาก สัณฐานของโลกไม่เป็นรูปทรงกลมสมบูรณ์ แต่เราอนุโลมให้เป็นรูปทรงกลมแป้น โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่เส้นศูนย์สูตรยาวกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ขั้วโลก 43 กิโลเมตร เราจะเห็นว่าระนาบของเส้นผ่านศูนย์กลางโลกโป่งออกเล็กน้อย และเอียงทำมุม 23.5 องศา กับระนาบของเส้นสุริยวิถี และมันเอียงทำมุม 5 องศา กับระนาบวงโคจรของดวงจันทร์รอบโลก แรงโน้มถ่วงแตกต่าง (differential gravitation force) หรือแรงไทด์ (tidal force : เป็นแรงที่ทำให้เกิดน้ำขึ้น-น้ำลงบนโลก) ของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ที่มีต่อโลก ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดน้ำขึ้น-น้ำลงเท่านั้น แต่มันพยายามดึงระนาบของเส้นศูนย์สูตรของโลกให้อยู่ในระนาบของเส้นสุริยวิถี ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ลูกศรทึบเป็นเวกเตอร์แทนแรงดึงดูดของดวงจันทร์ต่อส่วนต่าง ๆ ของโลก บริเวณเส้นศูนย์สูตรที่อยู่ใกล้กับดวงจันทร์มากที่สุดจึงถูกแรงดึงดูดมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ที่อยู่ไกลจากดวงจันทร์ออกไป ลูกศรประแสดงแรงโน้มถ่วงแตกต่างที่เทียบกับจุดศูนย์กลางของโลก เราจะเห็นว่าแรงฯ เหล่านี้ไม่เพียงแต่ดึงโลกให้เข้าสู่ดวงจันทร์เท่านั้น แต่มันยังดึงส่วนที่โป่งที่เส้นศูนย์สูตรของโลกให้อยู่ในระนาบของเส้นสุริยวิถี ดังนั้น แรงฯ ดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ที่กระทำต่อโลกในทางที่พยายามเปลี่ยนแปลงทิศทางของแกนหมุนของโลกเพื่อให้แกนนี้อยู่ในแนวดิ่ง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การหมุนควงดวงอาทิตย์-ดวงจันทร์ (lunisolar precession) ซึ่งเหมือนกับการหมุนควงของลูกข่างที่กำลังจะล้มลงสู่พื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การหมุนควงของแกนหมุนของโลกถ้าเกิดจากดาวเคราะห์มีชื่อเรียกว่า การหมุนควงดาวเคราะห์ (planetary precession)

ปรากฏการณ์การหมุนควงของแกนหมุนของโลกพบครั้งแรกโดยนักดาราศาสตร์ชาวกรีก ชื่อ **ฮิปพาราชัส** (Hipparachus) เมื่อสองพันปีล่วงมาแล้ว การหมุนควงของแกนหมุนของโลกใช้เวลาครบรอบประมาณ 26,000 ปี ช่วงระยะเวลานี้เรียกว่าวัฏจักรการหมุนควง การหมุนควงของแกนหมุนของโลกจะทำให้ตำแหน่งของขั้วท้องฟ้าเหนือและขั้วท้องฟ้าใต้เปลี่ยนแปลงไป โดยเคลื่อนรอบ ๆ ขั้วสุริยวิถี ในปัจจุบันนี้ขั้วท้องฟ้าเหนือชี้ไปที่ดาวโพลาริสโดยอยู่ห่างจากดาวโพลาริสประมาณหนึ่งองศา อีกประมาณ 12,000 ปี ขั้วท้องฟ้าเหนือจะชี้ไปที่ดาววีกาในกลุ่มดาวพิณ ดังรูปที่ 2.16 การหมุนควงของแกนหมุนของโลกทำให้จุดวสันตวิษุวัตเคลื่อน

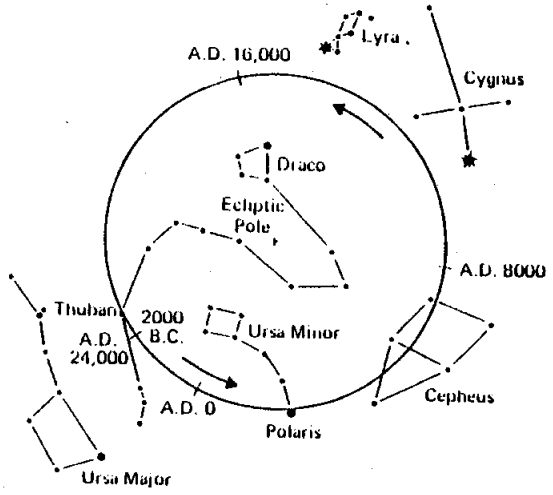


รูปที่ 2.14 แรงโน้มถ่วงแตกต่างของดวงจันทร์ที่กระทำต่อโลก ทำให้แกนหมุนของโลกเกิดการหมุนควง

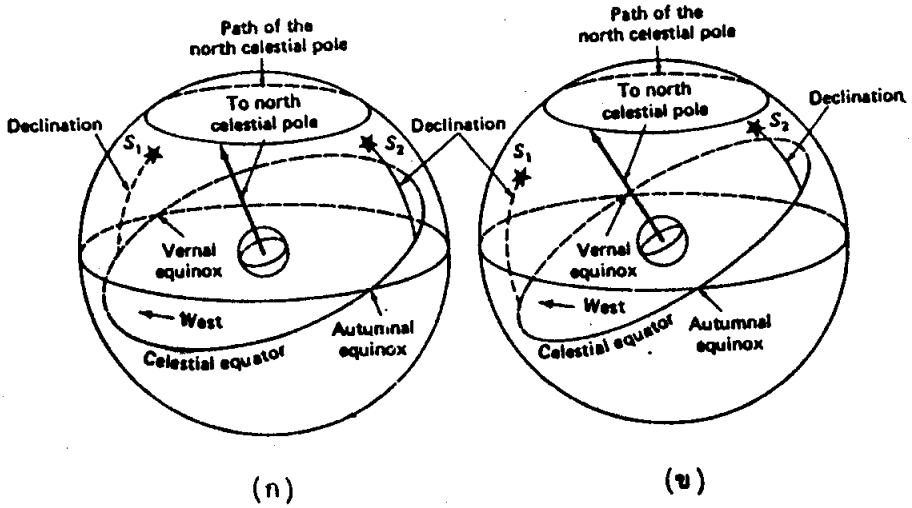


รูปที่ 2.15 การหมุนควงของลูกข่าง

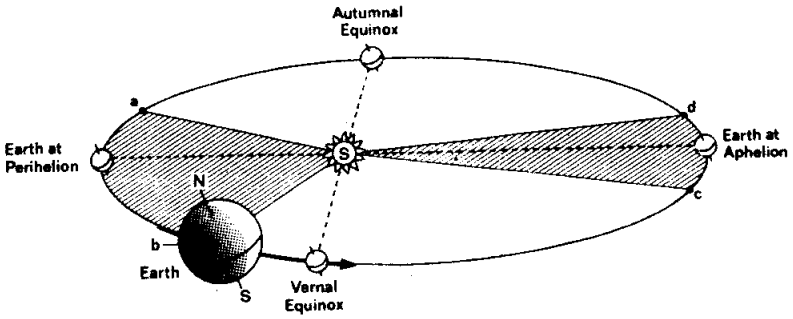
ที่ไปบนท้องฟ้าครบหนึ่งรอบใช้เวลา 26,000 ปีด้วย ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การหมุนควงของจุดวสันตวิษุวัต (precession of the equinox) และพบว่าจุดวสันตวิษุวัตเคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันตกตามเส้นสุริยวิถีด้วยอัตราเร็ว 50.3 วิลิปดาต่อปี การเคลื่อนที่ของจุดวสันตวิษุวัตมีผลทำให้ค่าพิกัดในระบบพิกัดเส้นศูนย์สูตรเปลี่ยนแปลงไป เมื่อประมาณสองพันปีที่แล้วจุดวสันตวิษุวัตมีตำแหน่งอยู่ที่กลุ่มดาวจักรราศีเมษ ปัจจุบันนี้ปรากฏที่กลุ่มดาวจักรราศีมีน และอีกประมาณ 600 ปี จะปรากฏที่กลุ่มดาวจักรราศีกุมภ์ ดังนั้นนักดาราศาสตร์จึงต้องเปลี่ยนพิกัดของเทห์ฟากฟ้าต่าง ๆ บนแผนที่ดาวทุก ๆ 50 ปี



รูปที่ 2.16 แสดงทางเดินของขั้วท้องฟ้าเหนือ เนื่องจากเกิดการหมุนควงของแกนหมุนของโลก รัศมีของวงกลมมีค่า 23.5 องศา รอบ ๆ ขั้วสุริยวิถี

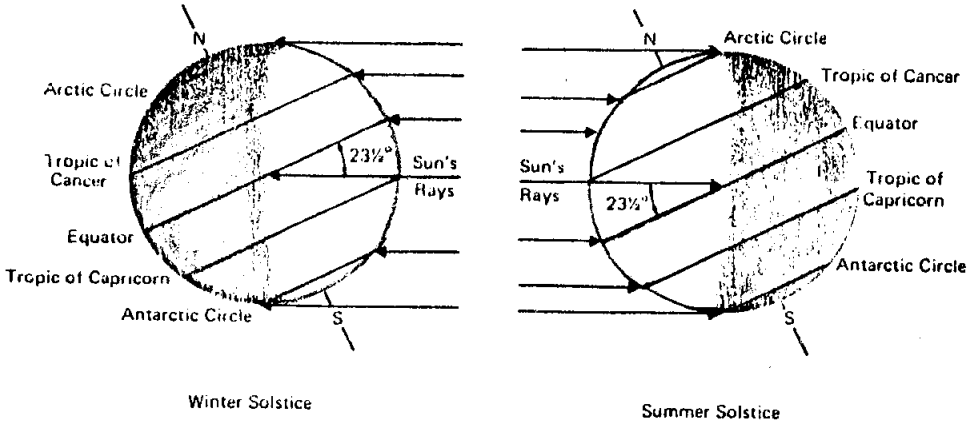


รูปที่ 2.17 ผลจากการหมุนควงของแกนหมุนของโลก จะทำให้ค่าไรท์แอสเซนชันและเดคลิเนชันของดาวฤกษ์บนท้องฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง จากรูป ค่าไรท์แอสเซนชันของดาวฤกษ์ทุกดวงมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเดคลิเนชันของดาวฤกษ์มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้จุดวสันตวิษุวัต (γ) และค่าเดคลิเนชันของดาวฤกษ์มีค่าลดลงสำหรับดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้จุดศารทวิษุวัต (Ω)



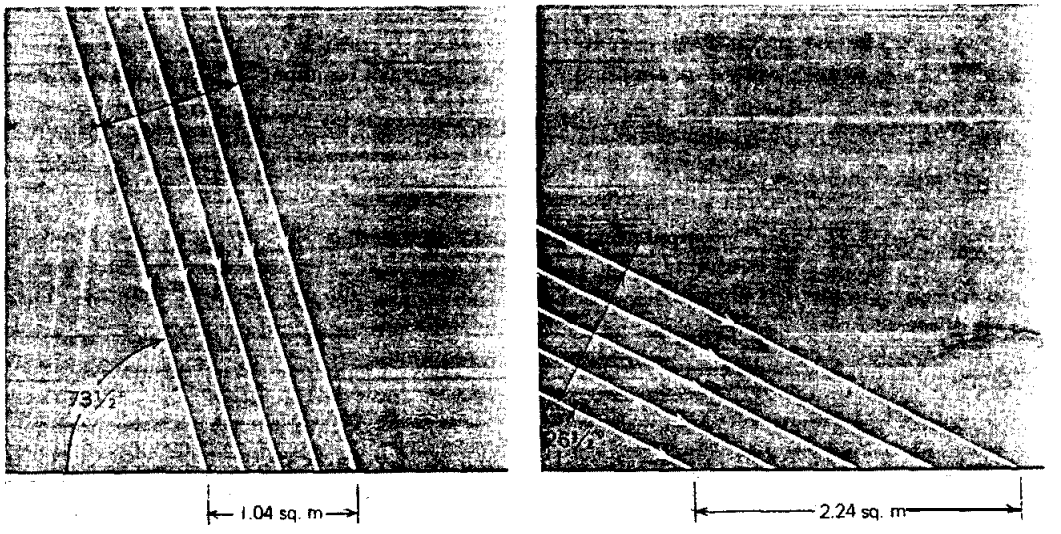
รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์

การเกิดฤดูร้อนและฤดูหนาว คนเป็นจำนวนมากมักจะเข้าใจว่าเกิดจากการที่โลกโคจรเข้าใกล้และไกลจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ความเป็นจริงแล้วโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งเพริฮีเลียน (perihelion : เป็นตำแหน่งที่โลกอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์มากที่สุด) ในวันที่ 4 มกราคม ในช่วงระยะเวลานี้ซีกโลกภาคเหนือเป็นฤดูหนาว โลกโคจรมาอยู่ที่ตำแหน่งแอฟีเลียน (aphelion : เป็นตำแหน่งที่โลกอยู่ไกลจากดวงอาทิตย์มากที่สุด) ในวันที่ 5 กรกฎาคม ในช่วงระยะเวลานี้ซีกโลกภาคเหนือเป็นฤดูร้อน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระยะห่างของโลกจากดวงอาทิตย์จึงไม่มีผลต่อการเกิดฤดูบนโลก



รูปที่ 2.19 ในฤดูร้อนขั้วเหนือของโลกชี้เข้าหาดวงอาทิตย์ดังแสดงในรูปขวามือ ทำให้ซีกโลกภาคเหนือได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาก ส่วนฤดูหนาวขั้วเหนือของโลกชี้ออกจากดวงอาทิตย์ จึงทำให้ซีกโลกภาคเหนือได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์น้อย

เนื่องจากแกนหมุนของโลกเอียงทำมุม 23.5 องศา กับแนวดิ่ง ทำให้เส้นศูนย์สูตรของโลกเอียงทำมุมกับเส้นสุริยวิถีหรือทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เท่ากับ 23.5 องศาด้วย ในฤดูร้อนขั้วโลกเหนือชี้เข้าหาดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่สู่ซีกโลกภาคเหนือทำให้เวลากลางวันยาวนานกว่าเวลากลางคืน ดังนั้นพื้นดินจึงได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาก จึงทำให้ซีกโลกภาคเหนือเป็นเวลาฤดูร้อน ส่วนในฤดูหนาวขั้วโลกใต้ชี้เข้าหาดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ทำให้ดวงอาทิตย์เคลื่อนสู่ซีกโลกภาคใต้ ทำให้ซีกโลกภาคเหนือมีช่วงเวลากลางวันสั้นกว่าเวลากลางคืน จึงทำให้ซีกโลกภาคเหนือได้รับพลังงานความร้อนน้อย ดังนั้นซีกโลกภาคเหนือจึงหนาวเย็น



รูปที่ 2.20 ผลของระดับความสูงของดวงอาทิตย์ เมื่อดวงอาทิตย์อยู่สูงจากเส้นขอบฟ้าไม่มากนัก (ในฤดูหนาว) แสงอาทิตย์ตกเอียงทำมุมกับพื้นดินน้อยกว่าตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่อยู่สูงจากเส้นขอบฟ้ามาก (ในฤดูร้อน)

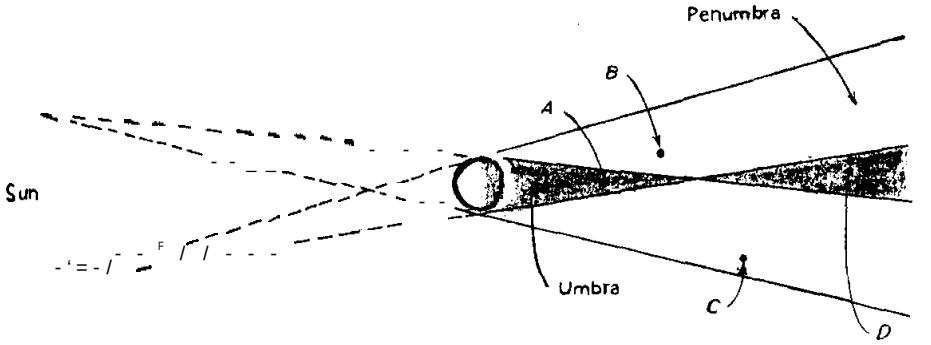
อีกสาเหตุหนึ่งก็คือ ความเข้มของแสงอาทิตย์อันเนื่องจากระดับความสูงของดวงอาทิตย์จากเส้นขอบฟ้า ถ้าดวงอาทิตย์ส่องตั้งฉากกับพื้นดิน ปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่พื้นดินได้รับจะมีค่ามากกว่าปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ที่พื้นดินได้รับเมื่อดวงอาทิตย์ส่องเอียงทำมุมกับพื้นดิน จากรูปที่ 2.20 เวลาเที่ยงวันปรากฏ *(โปรดดูรายละเอียดในบทที่ 3)* ในฤดูร้อนดวงอาทิตย์ปรากฏอยู่สูงจากเส้นขอบฟ้ามาก ลำแสงขนาดพื้นที่ 1 ตาราง-

เมตร ส่องลงมาสู่พื้นผิวโลกจะปรากฏพื้นที่ที่รับแสงอาทิตย์ประมาณ 1.04 ตารางเมตร (ตัวเลขนี้ขึ้นอยู่กับค่าละติจูดของตำบลที่รับแสงและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในวันนั้น) เวลาเที่ยงวันปรากฏในฤดูหนาวนั้น ดวงอาทิตย์อยู่สูงจากเส้นขอบฟ้าไม่มากนัก ลำแสงอาทิตย์ขนาดพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะคลุมพื้นผิวบนโลกประมาณ 2.24 ตารางเมตร ดังนั้นปริมาณความร้อนที่พื้นโลกได้รับในฤดูร้อนจึงมากกว่าในฤดูหนาว สรุปได้ว่า สาเหตุที่สำคัญ 2 ประการของการเกิดฤดู คือ

1. ผลจากช่วงระยะเวลาที่ดวงอาทิตย์ส่องแสงในแต่ละวัน
2. ผลจากระดับความสูงของดวงอาทิตย์จากเส้นขอบฟ้า

2.6 อุปราคา

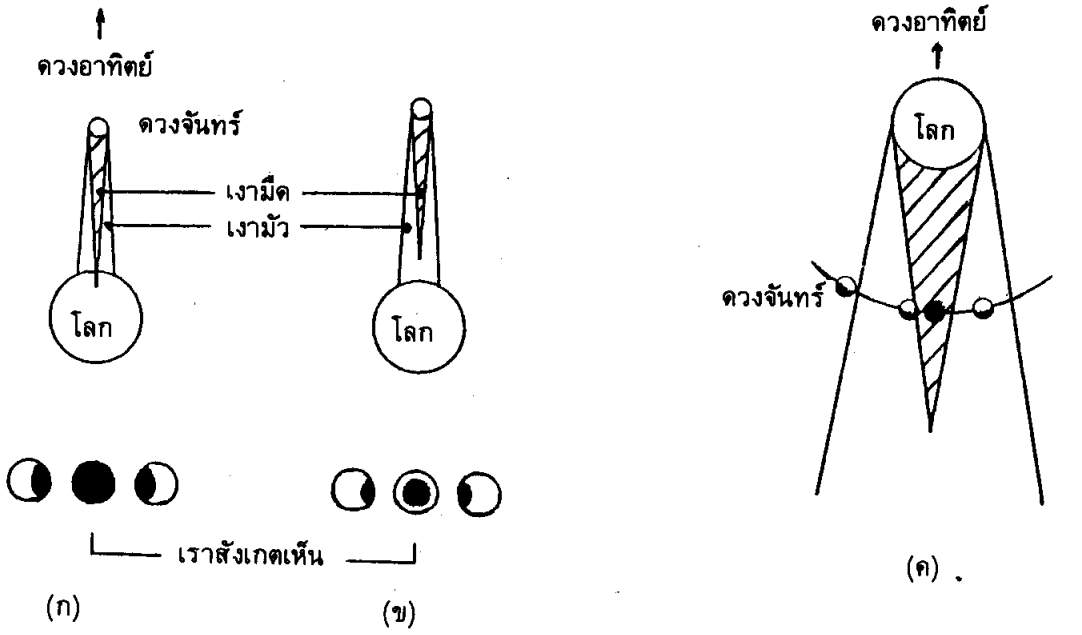
การเกิดอุปราคา (eclipse) เกิดขึ้นได้เมื่อวัตถุชนิดหนึ่งเคลื่อนเข้าไปในเงาของวัตถุอีกชนิดหนึ่ง โดยปกติเทอมนี้ใช้กับการเคลื่อนที่ของโลกและดวงจันทร์ ถ้าโลกเคลื่อนที่เข้าไปในเงาของดวงจันทร์ อุปราคาชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า สุริยุปราคา (solar eclipse) และเมื่อดวงจันทร์เคลื่อนที่เข้าไปในเงาของโลก อุปราคาชนิดนี้เรียกว่า จันทรุปราคา (lunar eclipse)



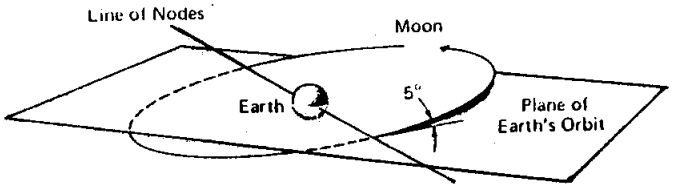
รูปที่ 2.21 เงาที่เกิดจากวัตถุทรงกลมวางขวางกั้นแสงอาทิตย์

เงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุทึบแสงที่ไปกั้นแสง เช่น แหล่งกำเนิดแสงของดวงอาทิตย์ เมื่อโลกหรือดวงจันทร์ไปบังแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดเงา ซึ่งมีสองลักษณะคือ เงามืด และเงามัว *(ดูรูปที่ 2.21)* ถ้าเงามัวของดวงจันทร์ทอดมาถึงโลก คนบนโลกส่วนนั้นจะเห็นสุริยุปราคาบางส่วน (partial eclipse) ได้แก่ บริเวณ B, C ถ้าเงามัว D ทอดมาถึงโลก คนบริเวณนั้นจะเห็นสุริยุปราคาแบบวงแหวน (annular eclipse) และถ้าเงามืดส่วนที่เป็นปลายแหลม (ได้แก่บริเวณ A) ทอดลงยังโลก คนบนโลกบริเวณนั้นจะเห็นสุริยุปราคา

เต็มดวง (total eclipse) คือ ดวงอาทิตย์จะมืดมิดหมดทั้งดวง แผนภาพของการเกิดอุปราคาที่เราสามารถสังเกตได้บนโลก ได้แสดงในรูปที่ 2.22

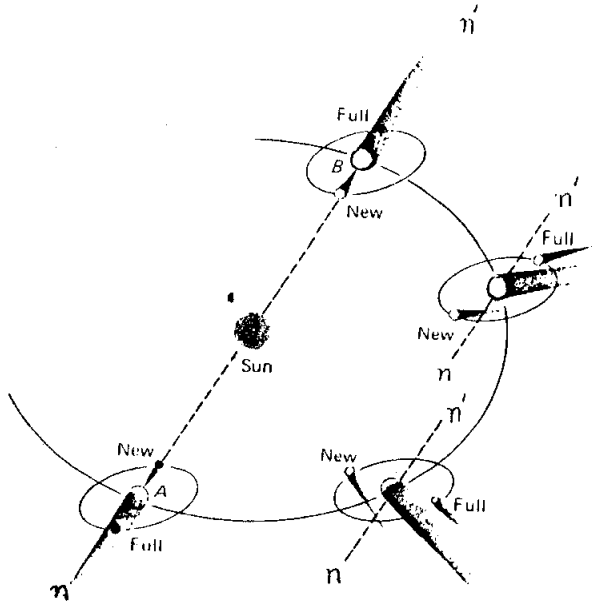


รูปที่ 2.22 แสดงการเกิด (ก) สุริยุปราคาเต็มดวง (ข) สุริยุปราคาแบบวงแหวน (ค) จันทรุปราคา



รูปที่ 2.23 เส้นของจุดตัด วงโคจรของดวงจันทร์มีความเอียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ระนาบของวงโคจรของดวงจันทร์ตัดกับระนาบของวงโคจรของโลกไปตามเส้นของจุดตัด

ปรากฏการณ์การเกิดสุริยุปราคาจะเกิดขึ้นเฉพาะวันเดือนใหม่ (new moon : ตรงกับวันขึ้น 1 ค่ำทางจันทรคติ) เมื่อดวงจันทร์อยู่ที่ตำแหน่งระหว่างดวงอาทิตย์กับโลกเท่านั้น ดวงจันทร์ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า ตำแหน่งร่วม (conjunction) สุริยุปราคาไม่ได้เกิดทุก ๆ วันเดือนใหม่ เนื่องจากวงโคจรของดวงจันทร์เอียงทำมุมกับระนาบของเส้นสุริยวิถี (หรือระนาบวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์) 5 องศา *(ดูรูปที่ 2.23)* จุดตัดกันของระนาบทั้งสองมีชื่อเรียกว่า จุดตัด (node) จุดที่ดวงจันทร์เคลื่อนที่ผ่านระนาบของเส้นสุริยวิถีจากทางใต้ไปทางเหนือ (หมายถึงจากทางใต้ของระนาบของเส้นสุริยวิถีขึ้นไปทางเหนือของระนาบของเส้นสุริยวิถี) จุดนี้มีชื่อเรียกว่า จุดตัดขึ้น (ascending node) ส่วนอีกจุดหนึ่งคือ จุดที่ดวงจันทร์เคลื่อนที่ผ่านเหนือระนาบของเส้นสุริยวิถีจากเหนือไปทางใต้ของระนาบของเส้นสุริยวิถี เรียก จุดตัดลง (descending node) ดังนั้น อุปราคาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อดวงจันทร์เคลื่อนเข้าใกล้หรืออยู่ที่จุดตัดทั้งสองเท่านั้น เส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลางของโลกเชื่อมกับจุดตัดของวงโคจรของดวงจันทร์มีชื่อเรียกว่า เส้นของจุดตัด (line of node) ถ้าทิศทางของดวงจันทร์อยู่หรืออยู่ใกล้กับเส้นของจุดตัดและเมื่อดวงจันทร์มืดเต็มดวงหรือสว่างเต็มดวงปรากฏอยู่หรือใกล้กับจุดตัดเหล่านี้ เป็นผลทำให้เกิด

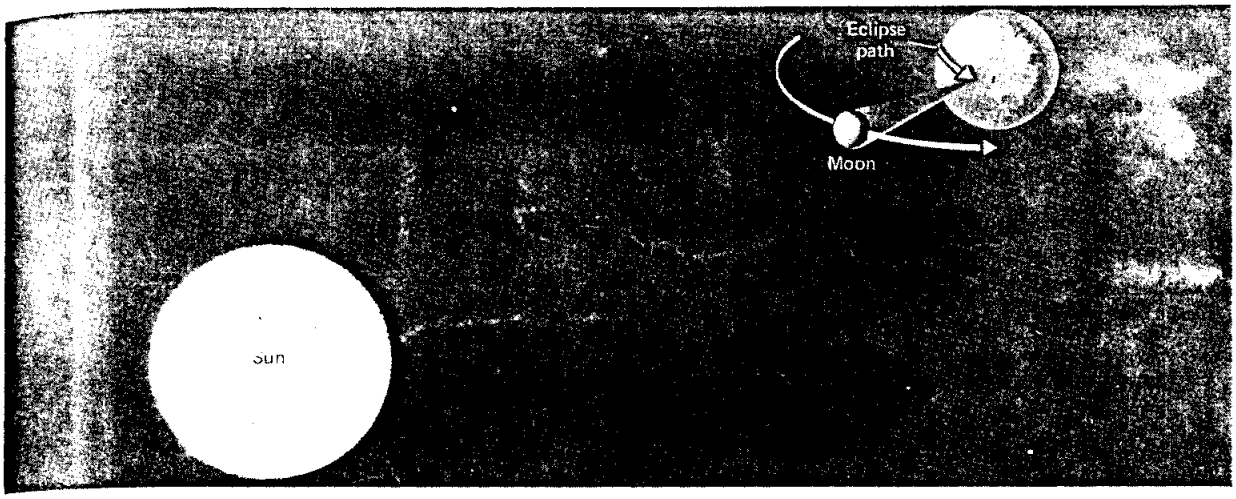


รูปที่ 2.24 อุปราคาจะสามารถปรากฏได้ต่อเมื่อดวงจันทร์สว่างเต็มดวง หรือมืดเต็มดวง หรือดวงจันทร์อยู่ใกล้เส้นของจุดตัดเท่านั้น ที่เวลาอื่น ๆ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์, ดวงจันทร์ และโลก ไม่มีโอกาสที่จะเกิดอุปราคาได้

อุปราคาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.24 เส้น nn′ เป็นเส้นของจุดตัดของวงโคจรของดวงจันทร์ เส้นของจุดตัด, nn′, จะมีความสัมพันธ์คงที่ระหว่างที่โลกหมุนโคจรรอบดวงอาทิตย์ จะมีสถานที่เพียง 2 แห่งในวงโคจรของโลก คือ จุด A และ B ที่ซึ่งทิศทางของดวงอาทิตย์อยู่บนเส้นของจุดตัด มันจะมีเพียงระยะเวลาในปีหนึ่งประมาณ 6 เดือนเท่านั้น ที่โลก-ดวงอาทิตย์อยู่ประมาณบนเส้นของจุดตัด ซึ่งอุปราคาก็จะเกิดขึ้นที่เวลานี้ เรียกว่า ฤดูอุปราคา (eclipse season)

เนื่องจากดวงจันทร์ถูกแรงดึงดูดของโลก, ดวงอาทิตย์, ดาวเคราะห์อื่น ๆ ทำให้วงโคจรของดวงจันทร์ถูกรบกวน เป็นผลให้วงโคจรของดวงจันทร์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย จากสาเหตุนี้ทำให้เส้นของจุดตัดเกิดการเคลื่อนไปทางทิศตะวันตกตามเส้นสุริยวิถีเล็กน้อย การเปลี่ยนไปนี้ครบรอบสมบูรณ์โดยใช้เวลา 18.6 ปี ดังนั้นฤดูอุปราคาจะปรากฏเร็วขึ้นประมาณ 20 วันในแต่ละปี เช่น ในปี ค.ศ. 1981 อุปราคาเกิดใกล้กับเดือนมกราคมและกรกฎาคม, ในปี ค.ศ. 1986 ฤดูอุปราคาจะเกิดใกล้กับเดือนเมษายนและตุลาคม และในปี ค.ศ. 1988 ฤดูอุปราคาเกิดในเดือนมีนาคมและปลายเดือนสิงหาคม กับต้นเดือนกันยายน

2.6.1 สุริยุปราคา



รูปที่ 2.25 ภาพแสดงการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง

ขนาดปรากฏของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์บนท้องฟ้ามีขนาดเกือบเท่ากัน (ความกว้างเชิงมุมประมาณ 1/2 องศา) เมื่อมองจากโลก ถึงแม้ว่าตามความเป็นจริงดวงอาทิตย์มีขนาดใหญ่กว่าดวงจันทร์ประมาณ 400 เท่า และอยู่ห่างกันประมาณ 400 เท่าก็ตาม

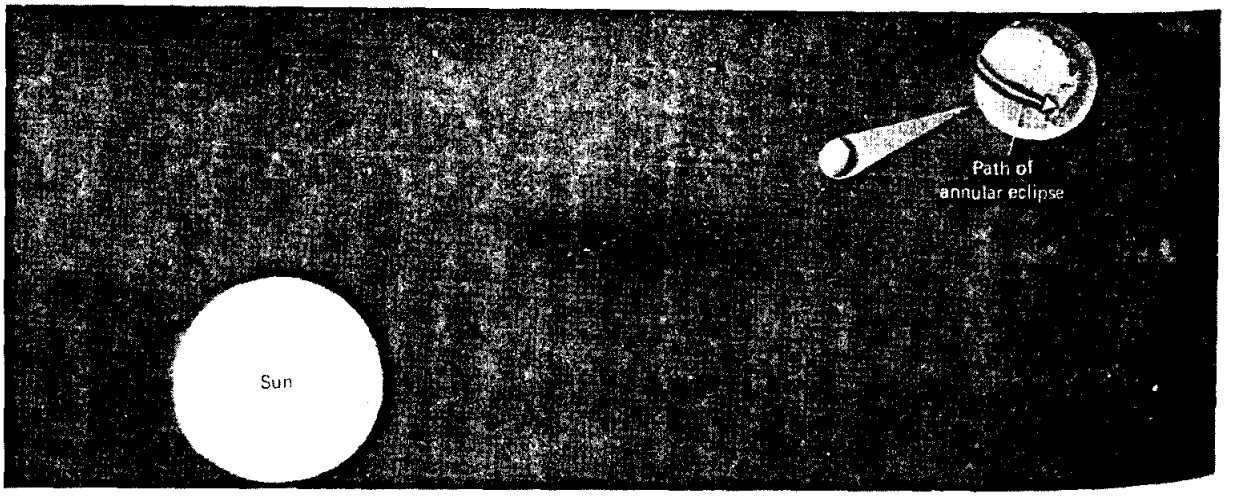
ขนาดปรากฏหรือขนาดเชิงมุมปรากฏของทั้งดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเป็นครั้งคราว ทั้งนี้เนื่องจากระยะของวัตถุทั้งสองอยู่ห่างจากโลกแตกต่างกันเป็นครั้งคราว เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงมุมปรากฏเฉลี่ยของดวงอาทิตย์ (เมื่อมองจากจุดศูนย์กลางของโลก) คือ 31′ 59″ และเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงมุมปรากฏเฉลี่ยของดวงจันทร์มีค่าน้อยกว่า 31′ 5″ เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ขนาดปรากฏของดวงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยไปประมาณ 1.7% และของดวงจันทร์ประมาณ 7% (ทั้งนี้เนื่องจากดวงจันทร์โคจรรอบโลกเป็นรูปวงรี และในขณะเดียวกันโลกก็โคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นรูปวงรีด้วย) ขนาดปรากฏของดวงจันทร์ที่ใหญ่ที่สุดคือ 33′16″ ที่ซึ่งใหญ่กว่าขนาดปรากฏของดวงอาทิตย์ที่ใหญ่ที่สุด เพราะฉะนั้น ถ้าเกิดสุริยุปราคาเมื่อดวงจันทร์อยู่ใกล้โลกมากกว่าระยะทางเฉลี่ยของมันแล้ว ดวงจันทร์จะสามารถบังดวงอาทิตย์ได้มิดหมดทั้งดวง กรณีนี้เรียกว่า สุริยุปราคาเต็มดวง หรือการปรากฏสุริยุปราคาเต็มดวงต่อเมื่อเงามืดของดวงจันทร์ทอดลงบนพื้นผิวโลกเท่านั้น

รูปที่ 2.25 แสดงการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง โลกต้องอยู่ในตำแหน่งวงโคจรที่ซึ่งทิศทางของดวงอาทิตย์เกือบอยู่ใกล้เส้นของจุดตัดของวงโคจรของดวงจันทร์ ยิ่งกว่านั้นดวงจันทร์จะต้องมีระยะห่างจากพื้นผิวของโลกน้อยกว่าความยาวของเงามืดของดวงจันทร์ ดังนั้นเมื่อดวงจันทร์อยู่ตำแหน่งวันเดือนใหม่ เงามืดของดวงจันทร์ตัดพื้นผิวของโลก คนที่อยู่ในบริเวณนี้ (บริเวณนี้มีขนาดเล็ก) จะมองเห็นสุริยุปราคาเต็มดวง ส่วนเงามัวของดวงจันทร์ครอบคลุมพื้นผิวโลกกว้างกว่า คนที่อยู่ในบริเวณเงามัวของดวงจันทร์จะมองเห็นสุริยุปราคาบางส่วน บริเวณของการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงและสุริยุปราคาบางส่วนตรงกับจุด A, B และ C ในรูปที่ 2.21

ขณะที่ดวงจันทร์เคลื่อนไปทางทิศตะวันออกในวงโคจรเมื่อเทียบกับดวงอาทิตย์ด้วยความเร็ว 3,400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เงาของมันจะกวาดไปทางทิศตะวันออกพาดไปตามโลกด้วยอัตราเร็วเดียวกัน ในขณะเดียวกันโลกก็มีการหมุนรอบตัวเองในทิศทางตะวันออกด้วย ดังนั้นอัตราเร็วของเงาที่พาดไปตามโลกจึงน้อยกว่า 3,400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราเร็วการหมุนของโลกที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรประมาณ 1,670 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในทิศทางตะวันออก เงาของดวงจันทร์จะเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับโลกด้วยอัตราเร็วประมาณ 1,730 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ละติจูดมากขึ้นอัตราเร็วของเงามีค่ามากขึ้นด้วย (เนื่องจากที่ละติจูดมากขึ้น อัตราเร็วของโลกในการหมุนรอบตัวเองจะช้าลง) โดยทั่วไปยอดของปลายเงากรวยของเงามืดของดวงจันทร์กวาดผ่านบนพื้นผิวโลกมีลักษณะเป็นแถบ ดังนั้นการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวงจะสามารถสังเกตได้ก็ต่อเมื่อเราอยู่ในแถบนี้เท่านั้น ทางเดินของสุริยุปราคาเต็มดวงที่พาดไปตามพื้นผิวของโลกที่สามารถเห็นได้เรียกว่า ทางเดินของสุริยุปราคาเต็มดวง (path of totality) แถบนี้อยู่ในช่วงยาวประมาณ

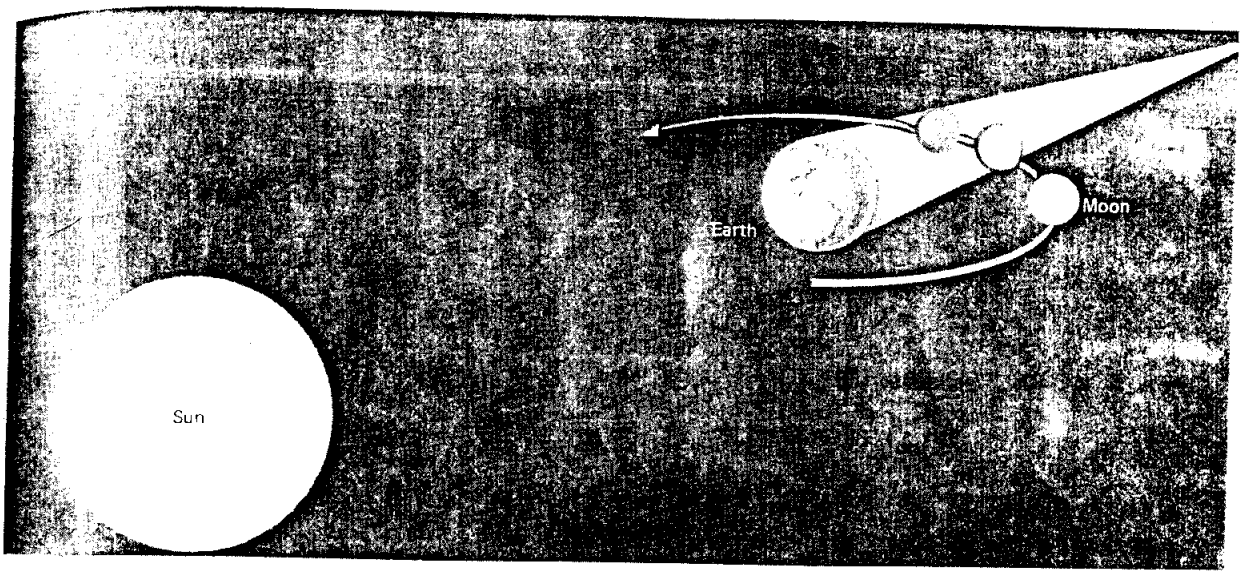
3,000 กิโลเมตรจากทั้งสองด้านของทางเดินอุปราคา สุริยุปราคาบางส่วนก็จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยเมื่อผู้สังเกตอยู่ในพื้นที่ของเงามัวของดวงจันทร์ที่ตกลงบนพื้นผิวของโลก

เนื่องจากเงามืดของดวงจันทร์นั้นเกือบจะตกไม่ถึงโลก ดังนั้นความกว้างของทางเดินอุปราคาจึงมีขนาดเล็กมาก ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่อำนวยให้ ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางของเงากรวยเท่ากับ 269 กิโลเมตรเมื่อเงานี้ตกตั้งฉากกับพื้นผิวโลกและอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลก ที่ละติจูดเหนือขึ้นไปหรือละติจูดใต้ลงไปมาก ๆ เงาของดวงจันทร์จะตกกระทบเอียงบนพื้นผิวโลกจะทำให้ความกว้างของเงากรวยมากกว่า 269 กิโลเมตร สำหรับช่วงระยะเวลาที่เกิดสุริยุปราคาเต็มดวงนั้นจะกินเวลาไม่เกิน $7\frac{1}{2}$ นาที



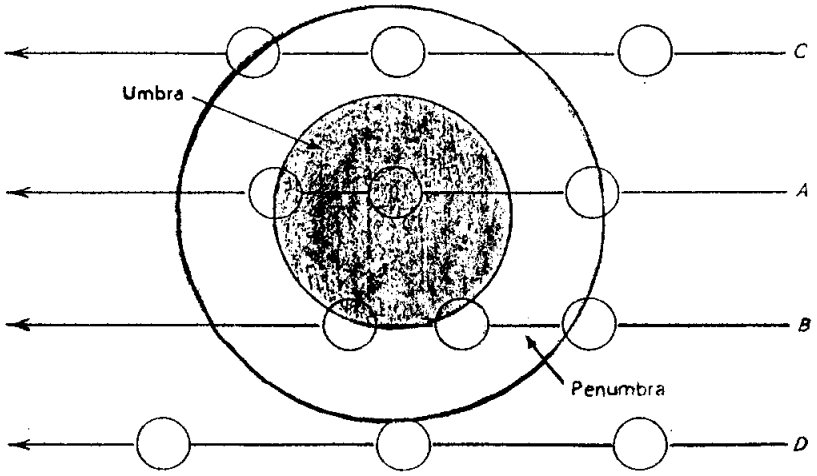
รูปที่ 2.26 *ภาพแสดงการเกิดสุริยุปราคาแบบวงแหวน*

ในกรณีที่ความยาวของเงามืดของดวงจันทร์สั้นกว่าระยะทางระหว่างดวงจันทร์และโลก เงามัวบริเวณ D *(ดูรูปที่ 2.26 และ 2.21 ประกอบ)* จะตกลงบนพื้นผิวโลก คนบนโลกที่บริเวณนี้จะเห็นสุริยุปราคาแบบวงแหวน รูปที่ 2.26 แสดงการเกิดสุริยุปราคาแบบวงแหวน ในขณะที่เกิดสุริยุปราคาแบบวงแหวนมันจะกวาดไปบนพื้นดินบนโลกเหมือนกับทางเดินของสุริยุปราคาเต็มดวง ช่วงระยะเวลาที่เกิดสุริยุปราคาแบบวงแหวนมากที่สุดประมาณ 12.5 นาที การเริ่มต้นเกิดและจุดสุดท้ายของการเกิดสุริยุปราคาแบบวงแหวนมีความเหมือนกับการเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงการเกิดจันทรุปราคา

สุริยุปราคาบางส่วนเกิดเมื่อเงามัวของดวงจันทร์ตกลงบนโลกเท่านั้น คนส่วนน้อยจะเห็นสุริยุปราคาเต็มดวงหรือแบบวงแหวน ในขณะที่คนส่วนใหญ่จะเห็นสุริยุปราคาบางส่วน

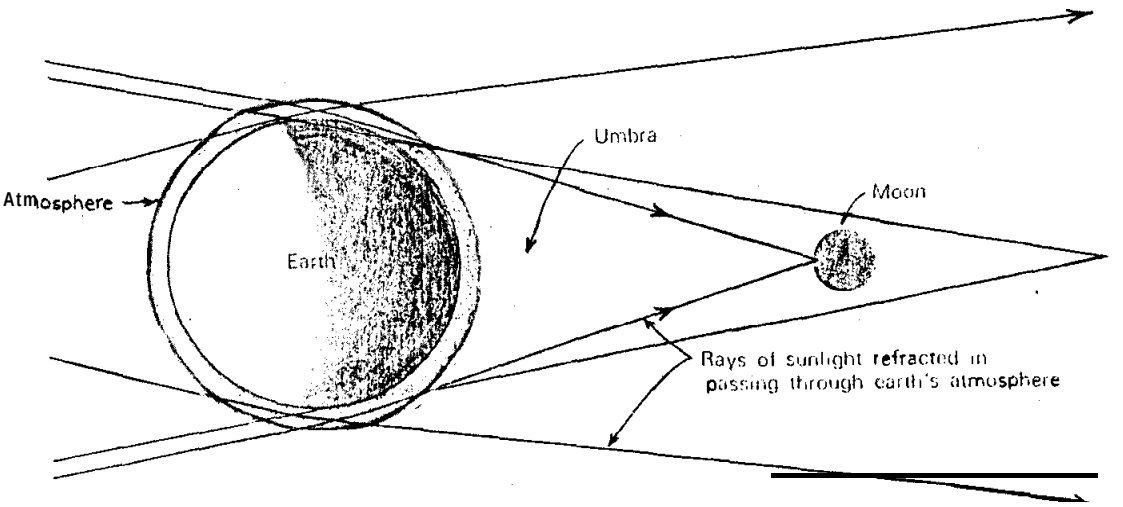


รูปที่ 2.28 ลักษณะความแตกต่างของการเกิดจันทรุปราคา

2.6.2 จันทรุปราคา

เกิดจากการที่ดวงจันทร์เคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในเงามืดของโลก ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะวันดวงจันทร์เต็มดวง (full moon : ตรงกับวันขึ้น 15 ค่ำ และแรม 1 ค่ำ ทางจันทรคติ) หรือวันที่ดวงจันทร์ปรากฏที่ตำแหน่งตรงข้าม (opposition) กับดวงอาทิตย์ และดวงอาทิตย์เคลื่อนมาอยู่ใกล้หรืออยู่ที่เส้นของจุดตัดเท่านั้น เนื่องจากโลกมีขนาดใหญ่กว่าดวงจันทร์ เงาของโลกจึงมีขนาดกว้าง (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 9,200 กิโลเมตร ที่ระยะทางของดวงจันทร์กับโลก เส้นผ่านศูนย์กลางของเงามืดมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของโลก-ดวงจันทร์ที่เปลี่ยนแปลงไป เงามัวของโลกมีค่าเฉลี่ยประมาณ 16,000 กิโลเมตร) คนบนโลกจึงเห็นจันทรุปราคาได้พร้อม ๆ กันในหลาย ๆ ประเทศ

ในรูปที่ 2.28 แสดงถึงลักษณะของทางเดินของดวงจันทร์ที่มีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่เงาของโลกได้ 4 แบบ จันทรุปราคาเต็มดวง (total lunar eclipse) เกิดเมื่อดวงจันทร์เคลื่อนเข้าสู่เงามืดอย่างสมบูรณ์ (ได้แก่ทางเดิน A) จันทรุปราคาบางส่วน (partial lunar eclipse) จะปรากฏต่อเมื่อดวงจันทร์เคลื่อนผ่านบางส่วนของเงามืด (ได้แก่ทางเดิน B) และจันทรุปราคามัว (penumbra eclipse) จะปรากฏ ถ้าดวงจันทร์เคลื่อนผ่านเงามัวหรือบางส่วนของดวงจันทร์ผ่านเงามัวซึ่งมันไม่ได้สัมผัสกับเงามืด (ได้แก่ทางเดิน C และ D)



รูปที่ 2.29 แสดงภาพของดวงจันทร์ขณะกำลังเกิดจันทรุปราคาเต็มดวง โดยมีแสงอาทิตย์ซึ่งถูกหักเหโดยบรรยากาศของโลกเข้าไปสู่เงาของโลก

ปกติจันทรุปราคามัวไม่สามารถสังเกตเห็นได้ จะมีเพียงช่วงประมาณ 1,100 กิโลเมตร ของเงามืดเท่านั้นเป็นความดำของเงามัวเพียงพอให้เกิดความดำที่สามารถสังเกตเห็นได้บนดวงจันทร์ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงความดำของพื้นผิวของดวงจันทร์สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องโฟโตมิเตอร์ (photometer)

การเกิดจันทรุปราคาเต็มดวง ถึงแม้ว่าดวงจันทร์จะเคลื่อนที่เข้าไปสู่ในเงามืดของโลกก็ตาม แต่เราก็ยังคงมองเห็นพื้นผิวของดวงจันทร์ได้ ซึ่งเป็นสีแดงแก่เหมือนสีทองแดง ทั้งนี้เนื่องจากแสงอาทิตย์สามารถหักเหผ่านบรรยากาศของโลกเข้าไปสู่เงามืดของโลกได้ *(ดูรูปที่ 2.29)* การที่มีสีแดงแก่เพราะว่าแสงสีแดงมีความยาวคลื่นยาวที่สุด (ในแสงทั้ง 7 สีที่ประกอบเป็นแสงสีขาว) ดังนั้นมันสามารถทะลุทะลวงผ่านบรรยากาศของโลกหักเหเข้าสู่ดวงจันทร์ได้ง่ายที่สุด ในขณะที่แสงสีอื่น ๆ จะถูกฝุ่นละออง, ไอน้ำ และอณูของอากาศกระเจิงไปในทิศทางอื่น ๆ

จันทรุปราคาจะดำที่สุด ถ้าดวงจันทร์ผ่านเงามืดเข้าไปใกล้กับจุดศูนย์กลางของเงามืด ความดำของจันทรุปราคาขึ้นอยู่กับสภาพของดินฟ้าอากาศล้อมรอบโลก เช่น ที่บริเวณเส้นระหว่างกลางวันและกลางคืนบนโลก แสงอาทิตย์สามารถผ่านบรรยากาศและหักเหเข้าไปในเงามืดของโลกได้ บริเวณกลุ่มเมฆที่มีความหนามาก ๆ