



จุดมืด

จุดมืด (sunspot) หมายถึงบริเวณที่มีกัมมันตภาพ (activity) สูงของดวงอาทิตย์ สังเกตในแสงขาวจะมีลักษณะเป็นเงามืด (umbra) ตรงกลางและมีเงามัว (penumbra) อยู่รอบนอก เมื่อแรกเกิดจะเห็นแต่เงามืดเป็นจุดเล็ก ๆ ไม่มีเงามัว เรียกรูมืด (pore) จุดมืดอาจอยู่เป็นจุดเดี่ยว ๆ หรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่มก็ได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะทางสถิติ คุณสมบัติและสนามแม่เหล็กของจุดมืด รวมถึงแบบจำลองของจุดมืดด้วย ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตัวเลขจุดมืด (Sunspot number)

เพื่อความสะดวกในการศึกษาลักษณะทางสถิติต่าง ๆ ของจุดมืด ในปัจจุบันเรานิยมบอกปริมาณกัมมันตภาพของจุดมืดที่ปรากฏบนตัวดวงในซีกที่มองเห็นจากโลกให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยกำหนดตัวเลขจุดมืดตามสมการ

$$R = k(10g + f) \quad (\text{Kiepenheuer, 1965}) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $R$  = ตัวเลขจุดมืด

$g$  = จำนวนกลุ่มจุดมืดที่มองเห็น

$f$  = จำนวนจุดมืดที่มองเห็น

$k$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้สังเกตการณ์ วิธีสังเกตการณ์ และการแบ่งกลุ่มจุดมืดของแต่ละบุคคล โดยปกติ  $k$  มีค่าประมาณ 1

เราอาจกำหนดตัวเลขจุดมืดด้วย  $f, g+f$  และ  $g$  ซึ่งให้ผลในทางสถิติไม่แตกต่างจากการกำหนดด้วย  $k(10g + f)$  มากนัก พื้นที่รวมของจุดมืดจะแปรผันโดยตรงกับตัวเลขจุดมืดซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$A = 16.7R \quad (\text{Kiepenheuer, 1965}) \quad (2.2)$$

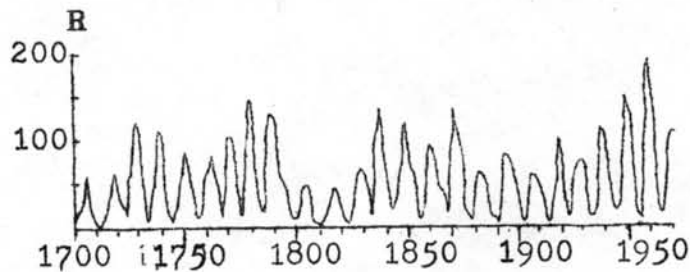
เมื่อ  $A =$  พื้นที่จริงของจุดมืดในซีกที่มองเห็นทั้งหมดรวมกัน มีหน่วยเป็นหนึ่งในส่วน  
ของพื้นที่ที่สว่างในซีกที่มองเห็น

$R =$  ตัวเลขจุดมืดจากสมการ 2.1

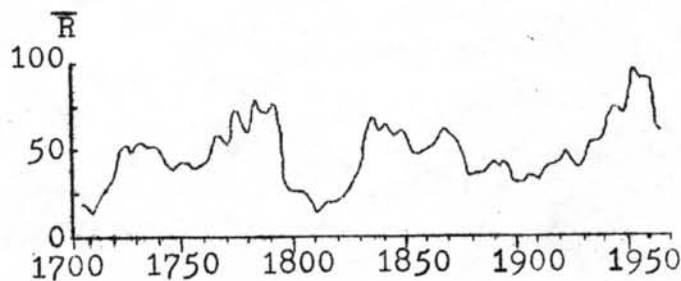
พื้นที่จุดมืดมีค่าขึ้นกับสภาพสังเกตการณ์ (seeing) น้อยกว่าตัวเลขจุดมืด เช่น ถ้าสภาพ  
สังเกตการณ์ไม่ดีการนับจำนวนจุดมืดขนาดเล็กที่อยู่ใกล้กันจะเกิดความผิดพลาดมาก อีกทั้ง  
ในการวัดพื้นที่จุดมืดขนาดใหญ่จะได้ค่าเป็นตัวเลขมากกว่าการนับเป็นจำนวนจุด ดังนั้น  
ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.2 จึงใช้ได้กับค่าเฉลี่ยเป็นปี (Kiepenheuer, 1965)

## 2. วัฏจักรจุดมืด (Sunspot cycle)

จากการสังเกตการณ์จุดมืดเป็นเวลาหลายสิบปี พบว่าค่าเฉลี่ยของตัวเลขจุดมืดใน  
แต่ละปีมีความเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ (period) ถ้านำค่าเฉลี่ยนี้มาเขียนกราฟกับเวลาจะ  
ได้กราฟตามรูป 2.1 ก. จากกราฟจะเห็นการเพิ่มขึ้นและลดลงของตัวเลขจุดมืดเป็นคาบ  
โดย 1 คาบใช้เวลาประมาณ 11 ปี ถ้าพิจารณาการเพิ่มขึ้นและลดลงของแต่ละคาบจะพบว่า  
ส่วนมากมีลักษณะอสมมาตร (asymmetry) โดยที่ระยะเวลาที่ตัวเลขจุดมืดเพิ่มขึ้นจาก  
จุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดสั้นกว่าระยะเวลาที่จุดมืดลดลงจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบ  
ว่า ยิ่งจุดสูงสุดมีค่ามาก ระยะเวลาที่ตัวเลขจุดมืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุดถึงจุดสูงสุดยิ่งมีค่า  
น้อยและกราฟของคาบนั้นจะมีลักษณะอสมมาตรยิ่งขึ้น โดยปกติค่าของจุดสูงสุดในแต่ละคาบ  
จะไม่เท่ากัน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็น  
ชัดเจนขึ้นโดยการนำค่าเฉลี่ยของ  $R$  ในแต่ละคาบ 11 ปี มาเขียนกราฟกับเวลาซึ่งจะได้  
กราฟตามรูป 2.1 ข. จากกราฟจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของ  $R$  ในแต่ละคาบ 11 ปี ของตัวเลข  
จุดมืดมีความเปลี่ยนแปลงเป็นคาบซึ่งมีลักษณะไม่ค่อยสม่ำเสมอ (irregular) นัก  
โดย 1 คาบใช้เวลาประมาณ 80 - 100 ปี (Dodson and Hedeman, 1972)



ก.



ข.

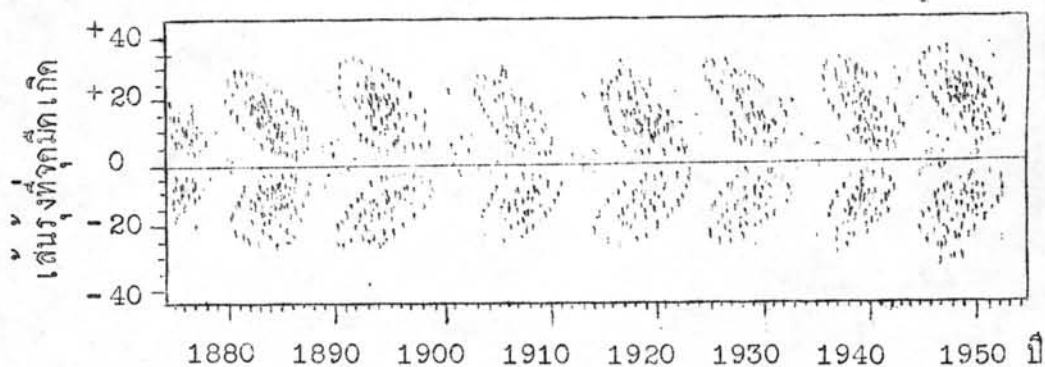
- รูป 2.1 ก. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวเลขจุดมืด (R) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1700 - 1950
- ข. กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของ R ในแต่ละคาบ 11 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1700 - 1950,  $\bar{R}$  = ค่าเฉลี่ยตัวเลขจุดมืด (R) ในแต่ละคาบ 11 ปี

(Dodson and Hedeman, 1972)

### 3. การกระจายของจุดมืดบนตัวดวง

จุดมืดปรากฏบนตัวดวงในแถบแคบ ๆ มีความกว้างประมาณ 15 - 20 องศาขนานกับแนวศูนย์สูตร (equator) ของดวงอาทิตย์เท่านั้น แถบนี้จะอยู่ทั้งในซีกเหนือและซีกใต้ของดวงอาทิตย์โดยอยู่ต่ำกว่าเส้นรุ้ง (latitude) 45 องศา ลักษณะของการกระจายของจุดมืดในบริเวณดังกล่าวแปรเปลี่ยนเป็นคาบซึ่งสอดคล้องกับวัฏจักรจุดมืด เมื่อเริ่มต้นคาบจุดมืดจะเกิดในบริเวณเส้นรุ้ง 30 องศาเหนือและใต้ เมื่อเวลาผ่านไป

จุดมืดจะเกิดบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรมากขึ้น ในขณะที่มีจุดมืดสูงสุดจะพบจุดมืดเกิดหนาแน่น  
 ในบริเวณเส้นรุ้ง 15 องศาเหนือและใต้ การกระจายของจุดมืดจะมาถึงจุดต่ำสุดที่บริเวณ  
 เส้นรุ้ง 8 องศาเหนือและใต้ นับเป็นคาบหนึ่ง และจะเริ่มคาบใหม่ที่บริเวณเส้นรุ้ง 30  
 องศาเหนือและใต้อีก ระยะเวลาของแต่ละคาบมีความแตกต่างกันน้อยกว่าคาบของวัฏจักร  
 ของจุดมืด การกระจายของจุดมืดแสดงให้เห็นเป็นแผนภูมิในรูป 2.2 ซึ่งเรียกว่าแผนภูมิ  
 ปีกผีเสื้อ (butterfly diagram) จุดมืดอาจเกิดนอกบริเวณเส้นรุ้งที่ 40 องศาเหนือ  
 และใต้ได้ แต่พบไม่บ่อยนักและมีอายุสั้น (Kiepenheuer, 1965)



รูป 2.2 แสดงแผนภูมิปีกผีเสื้อซึ่งแสดงการเกิดจุดมืดที่เส้นรุ้งต่างๆ ตั้งแต่ปี ค. ศ.  
 1880-1950 (Gibson, 1973)

#### 4. พัฒนาการของจุดมืดและกลุ่มจุดมืด

จุดมืดเมื่อแรกเกิดมีลักษณะคล้ายรูมีด (pore) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  
 เพียง 2-5 มิลลิเมตร รูมีดมีลักษณะเหมือนกับบริเวณระหว่างคอกดวง (granules) )  
 ของโฟโตสเฟียร์แต่มีอายุยาวกว่า รูมีดที่มีขนาดโตขึ้นจะพัฒนาต่อไปเป็นกลุ่มจุดมืดเล็กๆซึ่ง

ส่วนมากมีอายุต่ำกว่า 1 วัน ส่วนกลุ่มจุกมีที่สามารถพัฒนาต่อไปจะมีลักษณะแตกต่างกัน  
จำแนกออกตามแบบซูริคซ์ (Zürich) ได้เป็น 9 แบบ ดังนี้

4.1 แบบเอ (Class A) มีลักษณะเป็นรูมีดเดี่ยว ๆ หรือเป็นกลุ่มของรูมีด รูมีด  
นี้ไม่ปรากฏลักษณะขั้วคู่ (bipolar)

4.2 แบบบี (Class B) มีลักษณะเป็นกลุ่มของรูมีดที่รวมกันอยู่แบบขั้วคู่ คือแยก  
กันเป็นกลุ่มนำอยู่ข้างหน้า และกลุ่มตามอยู่ข้างหลัง โดยเรียงกันอยู่ในแนวเส้นรุ้งของ  
ดวงอาทิตย์

4.3 แบบซี (Class C) มีลักษณะเป็นกลุ่มแบบขั้วคู่ แต่จะต้องมีจุกมีด 1 จุดที่มี  
เงามัว (penumbra)

4.4 แบบดี (Class D) มีลักษณะเป็นกลุ่มแบบขั้วคู่ โดยจุกใหญ่ของกลุ่มมีเงามัว  
และความยาวของกลุ่มตามแนวเส้นรุ้งของดวงอาทิตย์น้อยกว่า 10 องศา

4.5 แบบอี (Class E) มีลักษณะเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ แบบขั้วคู่ มีโครงสร้างซับซ้อน  
จุกใหญ่ในกลุ่มนำและกลุ่มตามมีเงามัว ระหว่างกลุ่มนำและกลุ่มตามมีจุกมีด เล็ก ๆ  
อยู่เรียงราย ความยาวของกลุ่มมากกว่า 10 องศา

4.6 แบบเอฟ (Class F) มีลักษณะเป็นกลุ่มจุกแบบขั้วคู่ขนาดใหญ่และซับซ้อนมาก  
มีความยาวมากกว่า 15 องศา

4.7 แบบจี (Class G) มีลักษณะเป็นกลุ่มจุกแบบขั้วคู่ ไม่มีจุกมีดเล็ก ๆ เรียง  
รายอยู่ระหว่างกลุ่มนำและกลุ่มตาม มีความยาวของกลุ่มมากกว่า 10 องศา

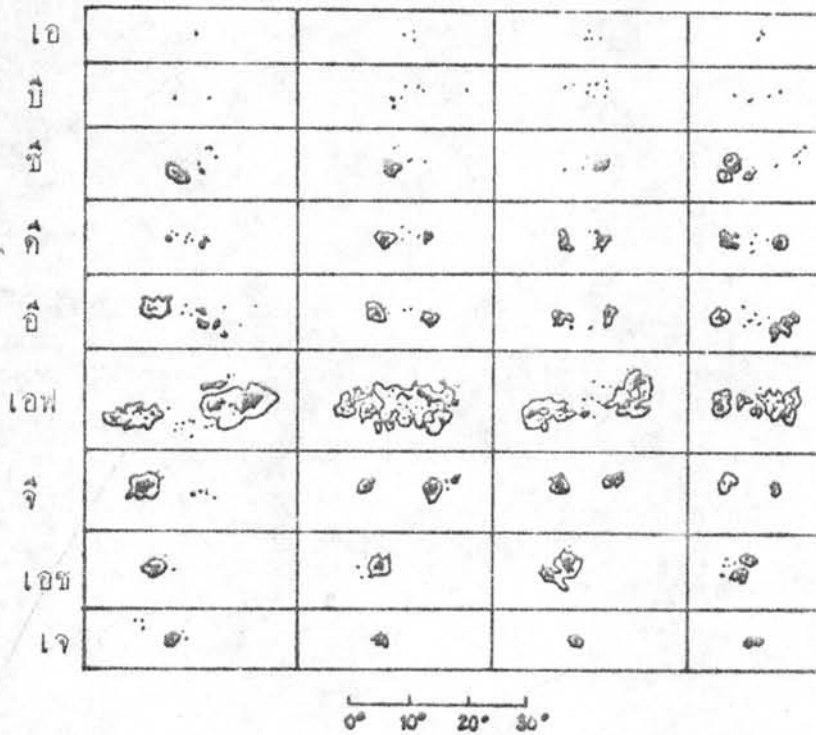
4.8 แบบเอช (Class H) มีลักษณะเป็นจุกมีดแบบขั้วเดี่ยว (unipolar) ซึ่ง  
มีเงามัว อาจมีโครงสร้างซับซ้อน มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2.5 องศา

4.9 แบบเจ (Class J) มีลักษณะเป็นจุกมีดแบบขั้วเดี่ยว (unipolar) ซึ่ง  
มีเงามัวค่อนข้างกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 2.5 องศา

ลักษณะของกลุ่มจุกมีดแบบต่าง ๆ ที่กล่าวไปแล้วแสดงไว้ในรูป 2.3 กลุ่มจุกมีด  
ขนาดใหญ่จะพัฒนามานทุกแบบตั้งแต่เริ่มต้นจนสลายตัว ส่วนกลุ่มจุกมีดขนาดปานกลางจะพัฒนา



ผ่านเสียงบางแบบตามลำดับขั้นดังนี้ เอ-บี-ซี-ดี-อี-เอฟ-เจ-เอ หรือ เอ-บี-ซี-บี-เอ  
เป็นต้น กรณีที่กลุ่มจุดมีขนาดเล็กอาจพบบางแบบต่างๆดังนี้ เอ-บี-เอ หรือบางครั้ง  
พินาโตไม่เกิดแบบเอ กลุ่มจุดมีจำนวนมากเริ่มต้นและสิ้นสุดของการพินาโตที่แบบเอ กลุ่ม  
จุดมีคตินาจากแบบเอถึงแบบอีไ้รวดเร็ว และใช้เวลานานมากอยู่ในแบบจี ถึง เจ



รูป 2.3 แสดงลักษณะของกลุ่มจุดมีคตินาแบบต่างๆ ซึ่งจำแนกตามแบบซูริคซ์  
สเถลข้างล่างแทนขนาดเชิงมุมตามแนวเส้นรุ้งของดวงอาทิตย์

(Bray and Loughhead, 1964)

006221

## 5. อายุและพื้นที่ของกลุ่มจุกมึก

ในการศึกษาของกลุ่มจุกมึกจำนวน 3000 กลุ่มในช่วงปี ค.ศ. 1912-1934 พบว่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของจุกมึกมีอายุน้อยกว่า 2 วัน และมากกว่าร้อยละ 90 มีอายุน้อยกว่า 11 วัน กลุ่มจุกมึกที่อยู่ในบริเวณเส้นรุ้งสูงๆมีอายุสั้นกว่ากลุ่มจุกมึกที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ พบว่าพื้นที่ของกลุ่มจุกมึกขณะมีค่าสูงสุดมีความสัมพันธ์กับอายุของกลุ่มจุกมึกตามสมการ

$$T = 0.1 A_m \quad (\text{Bray and Loughhead, 1964}) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $A_m$  = พื้นที่ของกลุ่มจุกมึกขณะมีค่าสูงสุด มีหน่วยเป็นหนึ่งในล้านส่วนของพื้นที่ดวงอาทิตย์ในซีกที่มองเห็น

$T$  = อายุของกลุ่มจุกมึก มีหน่วยเป็นวัน

กลุ่มจุกมึกขนาดใหญ่อาจมีอายุถึง 100 วัน ในขณะที่ดวงอาทิตย์มีกัมมันตภาพสูง บางครั้งมีกลุ่มจุกมึกปรากฏ 4 กลุ่มพร้อมกันบนตัวดวงในซีกที่มองเห็นได้จากโลก กลุ่มจุกมึกส่วนมากมีพื้นที่น้อยกว่า  $250 \times 10^{-6}$  เท่าของพื้นที่ดวงอาทิตย์ในซีกที่มองเห็นได้จากโลก (Bray and Loughhead, 1964)

## 6. แนวการเรียงตัวของกลุ่มจุกมึก

กลุ่มจุกมึกกลุ่มหนึ่งๆมีแนวการเรียงตัวเบนท่ามุมกับเส้นรุ้งของดวงอาทิตย์เล็กน้อย จุดนำหน้าจะอยู่ในเส้นรุ้งที่ต่ำกว่าจุดตาม มุมเบนนี้ขึ้นกับขั้นตอนของพัฒนาการของจุกมึก มุมเบนจะลดลงเล็กน้อยขณะที่กลุ่มจุกมึกพัฒนาจากแบบบีไปเป็นแบบเอฟ กลุ่มจุกมึกที่อยู่ในเส้นรุ้ง 10-14 องศาจะมีมุมเบนประมาณ 5-6 องศา (Bray and Loughhead, 1964)

## 7. การเคลื่อนที่ของจุกมึกไปตามผิวดวง

นอกจากจุกมึกจะเคลื่อนที่ไปตามการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์แล้ว ยังมีการเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นรุ้งและเส้นแวงของดวงอาทิตย์ด้วย กล่าวคือจุกมึกจะมีการ

เคลื่อนที่เทียบกับนิวตริโนความถี่ควาย จุกมีคชนิดนี้จะมี การเคลื่อนที่ของจุกนำและจุกตาม แยกออกจากกันใบนแนวเส้นรุ้ง การเคลื่อนที่นี้สังเกตได้ชัดในขณะที่กลุ่มจุกมีคเริ่มเกิดขึ้น ใหม่ๆ โดยจุกนำจะเคลื่อนที่ไปทางตะวันตกของดวงอาทิตย์ด้วยความเร็วลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เกี่ยวกับจุกตามยังคงอยู่กับที่หรือเคลื่อนไปทางตะวันออกของดวงอาทิตย์อย่างช้าๆ ดังนั้นจุกนำและจุกตามของกลุ่มจุกมีคจึงแยกห่างออกจากกัน สำหรับจุกมีคที่มีอายุยาวๆจะ เคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นรุ้งไคอย่างมากที่สุดประมาณ 1 องศาต่อการหมุนรอบตัวเองของ ดวงอาทิตย์ 1 รอบ นอกจากนี้จุกมีคยังมีการเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นแวงของดวงอาทิตย์ ภาย โดยใน 1 วันจะเคลื่อนที่ไคประมาณ 0.6 องศา การเคลื่อนที่ของจุกมีคในแนวเส้น รุ้งชี้ว่าการเคลื่อนที่ในแนวเส้นแวงมาก (Kiepenheuer, 1965)

## 8. โครงสร้างของจุกมีค

โดยทั่วไปจุกมีคแต่ละจุกมีลักษณะที่เด่นชัดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ เงามีค และเงามัว ในแต่ละส่วนมีโครงสร้างต่างๆดังจะแยกกล่าวต่อไปนี้

8.1 เงามีค เป็นบริเวณส่วนกลางของจุกมีคโดยมีคกว่าบริเวณอื่นของจุกมีค ถ้า สังเกตการแผ่รังสีของโทรทรรศน์ที่มีกำลังแยกสูงในขณะที่สภาพสังเกตการณ์ดีจะพบว่า มี คอกดวง (granule) ปรากฏในบริเวณเงามีค โดยปกติจะเห็นคอกดวงได้เมื่อเงามีค มีขนาดโตกว่า 4 ฟิลิปดา คอกดวงนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับคอกดวงในโฟโตสเฟียร์ คอกดวง ในเงามีคมีอายุประมาณ 15-30 นาทีและมีขนาดเฉลี่ย 2-3 ฟิลิปดา ส่วนคอกดวงของ โฟโตสเฟียร์มีอายุประมาณ 10 นาทีและมีขนาดเฉลี่ย 2.9 ฟิลิปดา สนามแม่เหล็กของ เงามีคมีอิทธิพลต่ออายุของคอกดวงในเงามีค นอกจากนี้จุกมีคที่มีลักษณะซับซ้อนภายใน เงามีคยังอาจปรากฏเป็นแนวสว่างซึ่งเรียกว่า สะพานสว่าง (light-bridge) ยื่น ออกมาจากขอบของเงามีค บางครั้งยื่นออกมาจากทั้งสองด้านของขอบเงามีค แล้วเชื่อม ต่อเข้าด้วยกัน สะพานสว่างมีพัฒนาการช้ามาก โดยมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในช่วงเวลาหลายชั่วโมง สะพานสว่างอาจมีความสว่างมากกว่าหรือน้อยกว่าความสว่าง ของโฟโตสเฟียร์ก็ได้และมีอายุอยู่ไคหลายวัน (Bray and Loughhead, 1964)



8.2 เงามัว เป็นบริเวณที่ล้อมรอบเงามืด มีคกว่าพื้นผิวโฟโตสเฟียร์ทั่วไปแต่สว่างกว่าเงามืด จากการศึกษางามัวโดยละเอียดพบว่า เงามัวมีโครงสร้างเป็นเส้นสาย (filamentary structure) ประกอบด้วยเส้นสายมืดและเส้นสายสว่าง เส้นสายสว่างมีความกว้างเชิงมุมน้อยกว่า 1 พิลิปดา มีความยาวมากน้อยขึ้นกับขนาดและความซับซ้อนของจุดมืด เส้นสายสว่างขนาดใหญ่อาจมีความยาวเชิงมุมถึง 10 พิลิปดา เส้นสายสว่างมักยื่นออกจากเงามัวเข้าไปยังพื้นผิวโฟโตสเฟียร์ปกคลุม จุดมืดที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนเส้นสายสว่างจะเรียงตัวเป็นระเบียบตามแนวรัศมีของจุดมืด ส่วนจุดมืดที่มีรูปร่างซับซ้อนเส้นสายสว่างจะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบและมีทิศทางไม่แน่นอน แต่อย่างไรก็ตามปลายสุดของเส้นสว่างด้านที่อยู่ติดกับเงามืดจะตั้งฉากกับขอบของเงามืดนั้น (Bray and Loughhead, 1964) ระหว่างเส้นสายสว่างจะเป็นเส้นสายมืด มีความกว้างเชิงมุมประมาณ 0.5 พิลิปดา จากการคำนวณในทางทฤษฎี (Danielson, 1961) อธิบายว่าเส้นสายสว่างและเส้นสายมืดเป็นการไหลวนของสสารจากชั้นล่างขึ้นสู่ชั้นบนและไหลกลับลงสู่ชั้นล่างอีกครั้งคล้ายกับการเกิดคอกวงของโฟโตสเฟียร์แต่เกิดเป็นทางยาวในแนวรัศมีของจุดมืด (convection roll) โดยบริเวณที่สสารไหลขึ้นจะเป็นเส้นสายสว่างและบริเวณที่สสารไหลกลับลงสู่ชั้นล่างจะเป็นเส้นสายมืด

จากการศึกษาในทางสถิติพบว่า จุดมืดที่มีรูปร่างกลมจะมีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเงามัวต่อเงามืดมีค่าประมาณ 2.4 ขณะที่จุดมืดเคลื่อนที่จากขอบดวงด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งความการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์จะพบว่า ความกว้างของเงามัวด้านใกล้ขอบดวงจะกว้างกว่าด้านที่อยู่ใกล้กับกลางดวง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ผลวิลสัน (Wilson effect) (Bray and Loughhead, 1964)

## 9. การเคลื่อนที่ภายในของจุดมืด

เอเวอร์เชด (Evershed) แสดงให้เห็นเป็นครั้งแรกว่า เส้นเฟรอนโตเฟอร์จากสเปกตรัมของจุดมืดมีการเลื่อนไปอย่างเป็นระบบ ถ้านำช่องแคบ (slit) ของสเปกโตรกราฟวางลงบนภาพของจุดมืดตามแนวรัศมีของตัวดวงจะพบว่า ขอบของจุดมืดด้านใกล้กลางดวงแสดงการเลื่อนคอปเปลอร์ (Doppler shift) ไปทางเส้นสีม่วงและขอบ

จุดมืดค่านิโกล์ขอบวงแสดงการเคลื่อนคอปเปอไปทางสีแดง ทั้งนี้บ่งบอกว่ามีการเคลื่อนที่ของสสารภายในจุดมืดตามแนวรัศมีค่อนข้างขนานกับผิววง ต่อมาแซนต์จอห์น (St. John) พบว่าเฉพาะเส้นจาง (weak line) เท่านั้นที่แสดงการไหลออก เส้นหนัก (strong line) ของโลหะไม่แสดงการไหลออก ส่วนเส้นหนักมากแสดงการเคลื่อนที่ไหลเข้า (Kiepenheuer, 1965) จากการศึกษาจุดมืดขนาดใหญ่ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนโดยละเอียด คินแมน (Kinman) พบว่า การเคลื่อนที่ดังกล่าวพบเฉพาะในแนวรัศมีของจุดมืดเท่านั้น ไม่พบความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นสัมผัส (tangential) หรือแนวคิ่งของจุดมืดเลย ความเร็วในแนวรัศมีที่พบจะเพิ่มขึ้นจาก 1 กิโลเมตรต่อวินาทีที่ขอบของเงามืดไปจนถึงค่าสูงสุดที่กึ่งกลางของเงามืดและความเร็วเป็นศูนย์ที่พื้นผิวโฟโตสเฟียร์นอกเงามืด นอกจากนี้ในการศึกษาจุดมืดลักษณะไม่ซับซ้อนหลายจุดยังพบว่า ความเร็วสูงสุดมีค่าขึ้นกับขนาดของจุดมืด โดยแปรผันโดยตรงกับรัศมีของเงามืด จุดมืดขนาดใหญ่ความเร็วสูงสุดจะอยู่ในบริเวณเงามืด จุดมืดขนาดเล็กความเร็วสูงสุดจะอยู่นอกเงามืด การเคลื่อนที่นี้พบว่ามีความเร็วต่อเนื่องออกมาจนถึงภายนอกขอบของเงามืด (Bray and Loughhead, 1964)

#### 10. สนามแม่เหล็กของจุดมืด

จากการตรวจสอบผลเซมาน (Zeeman effect) ของสเปกตรัมจากธาตุบางชนิดในบริเวณจุดมืดพบว่าในบริเวณจุดมืดมีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงกว่าบริเวณพื้นผิวโฟโตสเฟียร์ทั่วไป สภาพขั้ว (polarity) และความเข้มสนามแม่เหล็กของกลุ่มจุดมืดแต่ละกลุ่มจะมีลักษณะแตกต่างกัน จุดมืดทุกจุดที่สังเกตการณ์ได้จะตรวจพบสนามแม่เหล็กเสมอ สำหรับคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กที่สำคัญของจุดมืดจะกล่าวถึงต่อไปนี้

10.1 การจำแนกกลุ่มจุดมืดตามคุณสมบัติทางแม่เหล็ก จากการศึกษาคุณสมบัติทางสนามแม่เหล็กของจุดมืดที่หอสังเกตการณ์ภูเขาวิลสัน (Mount Wilson) ได้จำแนกกลุ่มจุดมืดออกเป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

10.1.1 แบบขั้วเดี่ยว (Unipolar) เป็นกลุ่มจุดมืดที่ประกอบด้วยจุดมืดหนึ่งจุดหรือหลายจุดที่มีสภาพขั้วเหมือนกัน แต่อาจมีจุดมืดขนาดเล็ก ๆ ที่มีสภาพขั้วตรงข้ามอยู่ได้บ้างเล็กน้อย กลุ่มจุดมืดแบบขั้วเดี่ยวสามารถแบ่งตามแฟลคคิวเลในเส้นแคลเซียมเค (calcium faculae) ที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มจุดมืดนั้นได้ 3 แบบดังนี้

ก) อัลฟา ( $\alpha$ ) เป็นกลุ่มจุดมีคแบบขั้วเดี่ยวที่แผลควิเวในเส้นแผลควิเวเชื่อมเค  
กระจายนำหน้าและตามหลังกลุ่มจุดมีคในลักษณะที่สมมาตร

ข) อัลฟาพี ( $\alpha p$ ) มีแผลควิเวในเส้นแผลควิเวเชื่อมเคยี้คยาวตามหลังจุดมีค

ค) อัลฟาเอฟ ( $\alpha f$ ) มีแผลควิเวในเส้นแผลควิเวเชื่อมเคยี้คยาวนำหน้า  
จุดมีค

10.1.2 แบบขั้วคู่ (Bipolar) ประกอบด้วยจุดมีค 2 กลุ่มคือ จุดนำและจุด  
ตามซึ่งมีสภาพขั้วตรงข้าม อาจจะมีจุดมีคขนาดเล็กอยู่ระหว่างจุดนำและจุดตาม โดยมีสภาพ  
ขั้วเหมือนกับจุดหลักที่มีอยู่ไกล กลุ่มจุดมีคที่เห็นเป็น 2 กลุ่มแยกกัน อาจจะไม่เป็นแบบขั้วคู่  
ก็ได้ ทั้งนี้ต้องตรวจสอบสภาพขั้วก่อนจึงจะทราบแน่นอน กลุ่มจุดมีคแบบขั้วคู่แบ่งตามการ  
กระจายของความเข้มสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

ก) เบตา ( $\beta$ ) กลุ่มนำและกลุ่มตามมีพื้นที่เท่ากันโดยประมาณ

ข) เบตาพี ( $\beta p$ ) กลุ่มนำเป็นกลุ่มหลักของกลุ่มจุดมีคทั้งกลุ่ม

ค) เบตาเอฟ ( $\beta f$ ) กลุ่มตามเป็นกลุ่มหลักของกลุ่มจุดมีคทั้งกลุ่ม

ง) เบตาแกมมา ( $\beta \gamma$ ) มีลักษณะเป็นขั้วคู่แต่ไม่สามารถแยกบริเวณที่มี  
สภาพขั้วต่างกันออกจากกันได้ รวมถึงกลุ่มจุดมีคซึ่งในกลุ่มตามหรือกลุ่มนำมีจุดมีคเล็ก ๆ ที่  
มีสภาพขั้วต่างจากที่ควรจะเป็นตามกฎของเฮลควย

10.1.3 แบบขั้วผสม (Complex) หรือแบบแกมมา ( $\gamma$ ) มีลักษณะสภาพขั้ว  
กระจายกันอยู่ไม่แน่นอน ไม่มีลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งเหมือนแบบขั้วคู่เลย

แบบข้าวคู	เบตา	
	เบตาพี	
	เบตาเอฟ	
	เบตาแกมมา	
แบบข้าวเดี่ยว	อัลฟา	
	อัลฟาพี	
	อัลฟาเอฟ	
แบบข้าวผสม	แกมมา	

ตะวันตก

ตะวันออก

รูป 2.4 แสดงกลุ่มจุกมึกแบบต่าง ๆ แบ่งตามคุณสมบัติทางแม่เหล็ก "น" แทนข้าวเหนียว แม่เหล็ก "ค" แทนข้าวไร่แม่เหล็ก พื้นที่แลเงาแสดงแพคคิวเลินเส้น แคลเซียมเค ( Bray and Loughhead, 1964)

10.2 กฎของสภาพข้าว จุกมึกปรากฏมากขึ้นเป็นไปตามวัฏจักรจุกมึก จุกมึกส่วนใหญ่ เป็นแบบข้าวคู สภาพข้าวของจุกนำและจุกตามในแต่ละซีกเหนือใต้เป็นไปตามกฎของเฮล ( Hale ) ดังนี้

1) จุดมึกซึ่งอยู่ในซีกเหนือจะมีสภาพขั้วของจุดนำและจุดตามตรงกันข้ามกับจุดมึกซึ่งอยู่ในซีกใต้ของดวงอาทิตย์

2) สภาพขั้วในข้อ 1) จะคงที่ตลอดเวลา 1 คาบ 11 ปี ของวัฏจักรจุดมึกและจะเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามเมื่อเริ่มทวนวัฏจักรใหม่

( Kiepenheuer, 1965)

10.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็กภายในจุดมึก จุดมึกทุกจุดที่สังเกตการณ์ได้จะตรวจพบสนามแม่เหล็กเสมอ โดยปกติ ความเข้มสนามสูงสุดจะอยู่ที่กลางเงามืดของจุดมึก จุดมึกขนาดเล็กมากจะมีความเข้มสนามที่กลางเงามืดระดับ 100 เกาส์ ความเข้มสนามที่กลางเงามืดของจุดมึกขนาดใหญ่มีค่าได้ถึง 400 เกาส์ แต่จุดมึกส่วนมากมีความเข้มสนามที่กลางเงามืดไม่เกิน 200 เกาส์ ในทางสถิติจุดมึกประมาณร้อยละ 20 มีความเข้มสนามที่กลางเงามืดมากกว่า 2000 เกาส์ และเพียงร้อยละ 5 มีความเข้มสนามที่กลางเงามืดถึง 3000 เกาส์ จากการสังเกตการณ์จุดมึกเป็นจำนวนมาก พบว่าความเข้มสนามที่กลางเงามืดมีความสัมพันธ์กับพื้นที่จุดมึกตามสมการ

$$H_m = 3700 \frac{A}{A+66} \quad (\text{Bray and Loughhead, 1964}) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $H_m$  = ความเข้มสนามที่กลางเงามืด (เกาส์)

$A$  = พื้นที่จริงของจุดมึกมีหน่วยเป็นหนึ่งในล้านส่วนของพื้นที่ตัวดวงในซีกที่มองเห็น

(Bray and Loughhead, 1964)

จากการสังเกตการณ์จุดมึกเป็นจำนวนมากพบว่าโดยเฉลี่ย ความเข้มสนามมีค่าสูงสุดที่ศูนย์กลางของเงามืดแล้วค่อย ๆ ลดลงจนถึงขอบของเงามืด ต่อจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงขอบนอกของเงามืด สนามแม่เหล็กของจุดมึกไม่เพียงแต่พบในบริเวณจุดมึกเท่านั้น หากยังแผ่ออกไปยังพื้นผิวโฟโตสเฟียร์รอบ ๆ จุดมึกและบางครั้งไปรวมกับสนามแม่เหล็กของแฟกคิวเลควัย ความเข้มสนามตรงตำแหน่งต่าง ๆ ในจุดมึกมีความสัมพันธ์กับขนาดของจุดมึกและความเข้มสนามสูงสุดของจุดมึกตามสมการ



$$H(r) = H_m \left(1 - \frac{r^2}{b^2}\right) \quad (\text{Kiepenheuer, 1965}) \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $H(r)$  = ความเข้มสนามที่ระยะ  $r$  จากศูนย์กลางของจุดมืด (เกาส์)  
 $H_m$  = ความเข้มสนามสูงสุด (ที่ศูนย์กลางจุดมืด) (เกาส์)  
 $b$  = รัศมีของจุดมืดวัดจากศูนย์กลางของจุดมืดถึงขอบนอกของเงามัว (กิโลเมตร)  
 $r$  = ระยะทางจากศูนย์กลางของจุดมืดถึงจุดที่วัดสนามแม่เหล็ก  $H(r)$  (กิโลเมตร)  
 (Kiepenheuer, 1965)

เส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศอยู่ในแนวตั้งตรงบริเวณศูนย์กลางของจุดมืด แล้วค่อย ๆ เบนออกจากแนวตั้งเมื่อห่างออกมา ตรงขอบในของเงามัวเส้นแรงแม่เหล็กจะเบนออกจากแนวตั้งประมาณ 25 องศา มุมที่เบนออกมานี้ขึ้นกับระยะจากศูนย์กลางของจุดมืดโดยมีความสัมพันธ์อย่างคร่าว ๆ ตามสมการ

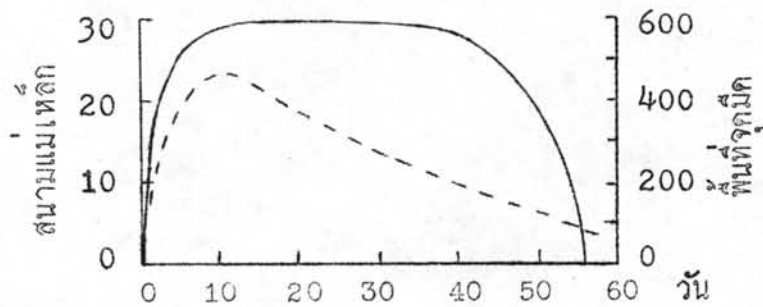
$$\theta = 70 \frac{r}{b} \quad (\text{Bray and Loughhead, 1964}) \quad (2.6)$$

- เมื่อ  $\theta$  = มุมที่เส้นแรงแม่เหล็กเบนออกจากแนวตั้ง (องศา)  
 $r$  = ระยะทางจากศูนย์กลางของจุดมืดถึงจุดที่วัด  $\theta$  (กิโลเมตร)  
 $b$  = รัศมีของจุดมืดวัดจากขอบนอกของเงามัว (กิโลเมตร)

(Bray and Loughhead, 1964)

10.4 อายุของสนามแม่เหล็กของจุดมืด เมื่อจุดมืดเริ่มก่อตัวสนามแม่เหล็กที่บริเวณศูนย์กลางของจุดมืดจะมีความเข้มต่ำ ต่อมาเมื่อจุดมืดมีพื้นที่เพิ่มขึ้น ความเข้มสนามที่บริเวณศูนย์กลางของจุดมืดจะสูงขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของพื้นที่จุดมืดอย่างรวดเร็วทั้งคถึงจุดสูงสุดในเวลาใกล้เคียงกัน ความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณศูนย์กลางของจุดมืดจะมีค่าคงที่อยู่ที่ค่าสูงสุดหลายวัน และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อจุดมืดใกล้สลายตัว แต่พื้นที่ของจุดมืดเมื่อถึงจุดสูงสุดจะเริ่มลดลงช้า ๆ จนกระทั่งสลายตัว ซึ่งแสดงให้เห็นได้ในกราฟรูป 2.5

(Kiepenheuer, 1965)



รูป 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ศูนย์กลางของจุดมืด (กราฟเส้นทึบ) และพื้นที่จุดมืด (กราฟเส้นประ) ตามลำดับวันต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มเกิดจนถึงสลายตัว สเกลของความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น 100 เกาส์และของพื้นที่จุดมืดมีหน่วยเป็นหนึ่งในล้านส่วนของพื้นที่ตัวดวงในซีกที่มองเห็น

( Kiepenheuer, 1965 )

#### 11. จุดมืดและบริเวณกัมมันตภาพ

บริเวณกัมมันตภาพ ( active region ) คือบริเวณบางแห่งในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ที่มีปรากฏการณ์กัมมันตภาพต่าง ๆ เกิดขึ้น เช่น จุดมืด พลาจ การลุกจ้า การปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความเข้มสูงตั้งแต่ความยาวคลื่นสั้นจนถึงความยาวคลื่นยาว และการปล่อยอนุภาคความเร็วสูงออกสู่อวกาศโดยรอบ เป็นต้น สนามแม่เหล็กมีบทบาทสำคัญต่อปรากฏการณ์เหล่านี้ บริเวณกัมมันตภาพมีพื้นที่โดยประมาณไม่เกิน  $\frac{1}{10}$  ของพื้นที่ตัวดวงในซีกที่มองเห็นได้จากโลก และมีอายุได้ตั้งแต่ 2 - 3 สัปดาห์ จนถึง 100 - 200 วัน บนตัวดวงในซีกที่มองเห็นได้จากโลก อาจมีบริเวณกัมมันตภาพได้หลายแห่งพร้อมกัน

สนามแม่เหล็กเป็นพื้นฐานของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในบริเวณกัมมันตภาพ จากการศึกษาบริเวณกัมมันตภาพ พบว่าบริเวณกัมมันตภาพมักเริ่มต้นโดยเกิดบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงขึ้นก่อน บริเวณสนามแม่เหล็กความเข้มสูงนี้เป็นบริเวณแคบ ๆ ต่อเนื่องกัน สภาพขั้วของสนามแม่เหล็กเป็นแบบขั้วคู่ และเปลี่ยนแปลงไปตามกฎของเฮล สามารถกระจายอยู่ตามแนวเส้นรุ้งต่าง ๆ ไคสูงกว่าจุดมืด เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณสนามแม่เหล็กขั้วคู่ ( bipolar magnetic region ) ถ้าสนามแม่เหล็กในบริเวณนี้มีความเข้มสูงกว่า

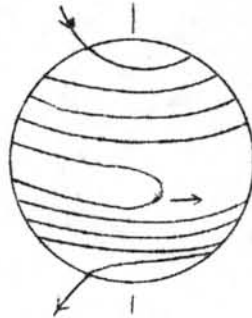
2 เกาส์จะเกิดพลาจขึ้น เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มเพิ่มขึ้นไปอีกจะเกิดจุดมืดขึ้น บริเวณสนามแม่เหล็กขั้วคู่ในระยะแรก ๆ มีความเข้มสนามค่าและมีพื้นที่น้อย ต่อมาจะพัฒนาขึ้นโดยมีพื้นที่เพิ่มขึ้นและสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้วจึงลดลงถึงแม่จุดมืดและพลาจจะสลายตัวไป แต่สนามแม่เหล็กยังคงมีอยู่ และค่อย ๆ สลายไปภายหลัง ( Aller, 1963 )

## 12. ทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเกิดสนามแม่เหล็กในจุดมืด

สนามแม่เหล็กมีบทบาทสำคัญและเป็นพื้นฐานของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในบริเวณกัมมันตภาพ จึงได้มีความพยายามที่จะใช้สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์อธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ การเกิดสนามแม่เหล็กในจุดมืดอาจอธิบายได้โดยทฤษฎีของแบบคอค ( H.W. Babcock ) ซึ่งเป็นทฤษฎีหนึ่งที่ยังอธิบายได้ก็พอสมควร ทฤษฎีดังกล่าวมีสาระสำคัญดังนี้ ดวงอาทิตย์มีขั้วแม่เหล็กอยู่ที่บริเวณขั้วเหนือใต้ โดยมีเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมต่อระหว่างขั้วทั้งสองอยู่ที่ผิวดวง เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเก็บกักประจุของตัวกลางซึ่งมีสถานะพลาสมาเอาไว้ เริ่มแรกเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในระนาบเมอริเดียนของดวงอาทิตย์โดยจะอยู่ใกล้ผิวดวงที่บริเวณระหว่างเส้นรุ้งที่ 30 องศาเหนือ กับ 30 องศาใต้ ในบริเวณเส้นรุ้งนอกแถบนี้เส้นแรงแม่เหล็กจะอยู่ลึกจากผิวดวงมาก เนื่องจากความเร็วของการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ที่เส้นรุ้งต่าง ๆ ไม่เท่ากัน จึงเกิดแรงค้ำตามผิวดวงให้เส้นแรงแม่เหล็กดังกล่าวยึกตัวและบิดเป็นเกลียวพันวนไปที่ผิวดวง มีลักษณะตามรูป 2.6 เมื่อเวลาผ่านไป เส้นแรงแม่เหล็กจะพันวนไปหลายรอบและสนามแม่เหล็กมีความซับซ้อนขึ้นเรื่อย ๆ จนทำให้บางส่วนของเส้นแรงแม่เหล็กที่เก็บกักประจุเกิดอเสถียรภาพ ( instability ) และลอยตัวขึ้นมายังพื้นผิว เกิดเป็นบริเวณสนามแม่เหล็กขั้วคู่ขึ้น ถ้าสนามแม่เหล็กในบริเวณนี้มี ความเข้มสูงก็จะเกิดจุดมืดขึ้น เนื่องจากบริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กอยู่ใกล้ผิวดวง เป็นบริเวณระหว่างเส้นรุ้งที่ 30 องศาเหนือกับ 30 องศาใต้ และอนุพันธ์ของการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ ( differential rotation ) มีค่าสูงสุดที่บริเวณเส้นรุ้ง 30 องศาเหนือใต้ ดังนั้น บริเวณที่เส้นแรงแม่เหล็กพันวนอยู่นานนั้น จึงเกิดขึ้นในบริเวณนี้ก่อน จุดมืดจึงเริ่มต้นเกิดในบริเวณนี้ก่อนบริเวณอื่น ทฤษฎีของแบบคอคสามารถใช้อธิบายลักษณะทางสถิติของจุดมืดได้ก็พอสมควร แต่ยังไม่สามารถให้คำตอบที่

ชัดเจนเกี่ยวกับแหล่งที่มาของพลังงานซึ่งทำให้อัศจรรย์การหมุนรอบตัวเองที่เส้นรุ้งต่างก็มีค่าไม่เท่ากัน อันเป็นผลทำให้เกิดการยืดตัวของเส้นแวงแม่เหล็กและทำให้เกิดจุดมืดขึ้น

( Aller, 1963)



รูป 2.6 แสดงแบบจำลองของการเกิดจุดมืด (Gibson, 1973)