หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎีของสเปคโตรกราฟ

สเปคโตรกราฟเป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่ใช้สังเกตการณ์การมีคที่ขอบดวงโดยรับแสงขาว (white light) ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ แล้วกระจายทิศทางลำแสงให้แยกจากกันตามความยาวคลื่น เมื่อนำฟิล์มไปรับแสงที่กระจายออกมาจะได้ภาพสเปคตรัม (spectrogram) สเปคโตรกราฟมีหลายแบบแบ่งออกตามลักษณะการใช้งาน หรือลักษณะของส่วนประกอบที่ใช้ โดยทั่วไปสเปคโตรกราฟมีส่วนประกอบสำคัญ 5 ส่วน ดังนี้

1. <u>ช่องเปิดแสงเข้า</u> (Entrance aperture)

ช่องเปิด (aperture) เป็นทางผ่านของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงภายนอกเข้าสู่ระบบทัศนอุปกรณ์ สำหรับสเปคโตรกราฟช่องเปิดนี้จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแคบและยาวเรียกว่า สลิต (slit) สลิตมักทำด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางหันขอบเข้าหากันเป็นแนวของช่องเปิด ขอบของช่องเปิดต้องเรียบและขนานกัน ผิวด้านหน้าของแผ่นโลหะทั้งสองซึ่งหันเข้าหาแหล่งกำเนิดแสงจะต้องเรียบและเป็นระนาบเดียวกัน ผิวด้านหลังนับจากขอบของช่องเปิดจะปาดเนื้อโลหะเฉียงออกข้างไปพอสมควร เพื่อให้เนื้อโลหะตรงขอบของช่องเปิดบางที่สุด จะได้ลดการสะท้อนแสงที่ขอบให้น้อยลง

2. <u>ตัวทำแสงขนาน</u> (Collimating element)

ตัวทำแสงขนานในสเปคโตรกราฟอาจเป็นเลนส์นูนหรือกระจกเว้า มีหน้าที่รับแสงจากจุดแต่ละจุดของสลิตแล้วปล่อยออกไปเป็นแสงขนาน เพื่อให้ทุกส่วนของลำแสงจากจุดเดียวกันกระทบตัวกระจาย (dispersive element) เป็นมุมเท่ากัน ในกรณีที่

แสงไม่ขนานเข้าสู่ตัวกระจายจะก่อให้เกิดความคลาดที่เรียกว่า แอสติกมาติซึม (astigmatism) กล่าวคือ จุดบนสลิตในแสงเอกรงค์จะไม่ปรากฏเป็นจุดบนระนาบโฟกัสที่เกิดสเปคตรัม แต่กลับกลายเป็นเส้นหรือจุดกลมพร่ามัวขนาดใหญ่กว่าที่ควรจะเป็นมาก เพราะลำแสงในระนาบที่ขนานและที่ตั้งฉากกับแนวกระจายแสงเมื่อผ่านตัวกระจายและตัวรวมแสง (focusing elemtnt) แล้วมีระนาบโฟกัสต่างกัน ดังนั้นการปรับให้ภาพในแนวหนึ่งชัดย่อมทำให้ภาพในอีกแนวหนึ่งพร่ามัวไป

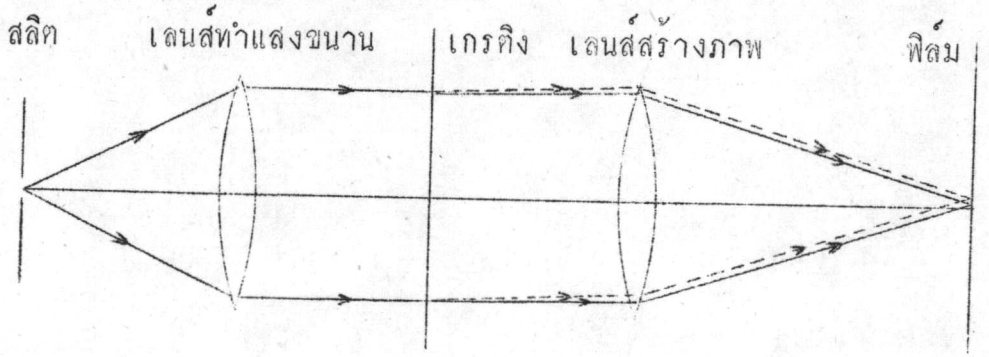
3. <u>ตัวกระจาย</u> (Dispersive element)

ตัวกระจายเป็นส่วนที่อาจจะกล่าวได้ว่าสำคัญที่สุดของสเปคโตรกราฟ เพราะเป็นตัวทำหน้าที่แยกลำแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันออกจากกัน โดยการรับแสงรวมหรือแสงขาวที่มีมุมตกกระทบก่าหนึ่ง แล้วจึงกระจายลำแสงออกเป็นมุมต่าง ๆ ตามลำดับความยาวคลื่น ตัวกระจายที่ใช้ในสเปคโตรกราฟอาจจะเป็นปริซึมหรือเกรติง ในงานนี้ใช้เกรติงจึงจะกล่าวถึงเฉพาะเกรติง

3.1 <u>เกรติง</u> (Grating) ดิฟแฟรกชันเกรติง (diffraction grating) หรือเรียกง่าย ๆ ว่าเกรติง คือร่อง (groove) หรือสลิตที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมาก ๆ วางเรียงขนานกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยมีระยะระหว่างร่องถัดกันคงที่ ระยะจากร่องถึงร่องนี้เรียกว่า ค่าคงที่ของเกรติง (grating constant) ค่าคงที่นี้จะต้องมีค่ามากกว่าหรืออย่างน้อยก็เท่ากับความยาวคลื่นของแสงที่ถูกกระจาย มิฉะนั้นเกรติงจะกลายเป็นกระจกหรือแผ่นแก้วธรรมดาไป ไม่สามารถกระจายแสงออกมาได้ เกรติงที่ใช้กับแสงช่วงที่ตาเห็น (visible light) จะมีจำนวนร่องประมาณ 200-1200 เส้นต่อมิลลิเมตร

เกรติงแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เกรติงแสงผ่าน (transmission grating) กับเกรติงสะท้อน (reflection grating) ซึ่งแบบหลังจะเป็นที่นิยมใช้กันมาก ลักษณะของเกรติงทั้ง 2 แบบพอจะกล่าวในรายละเอียดได้ดังนี้

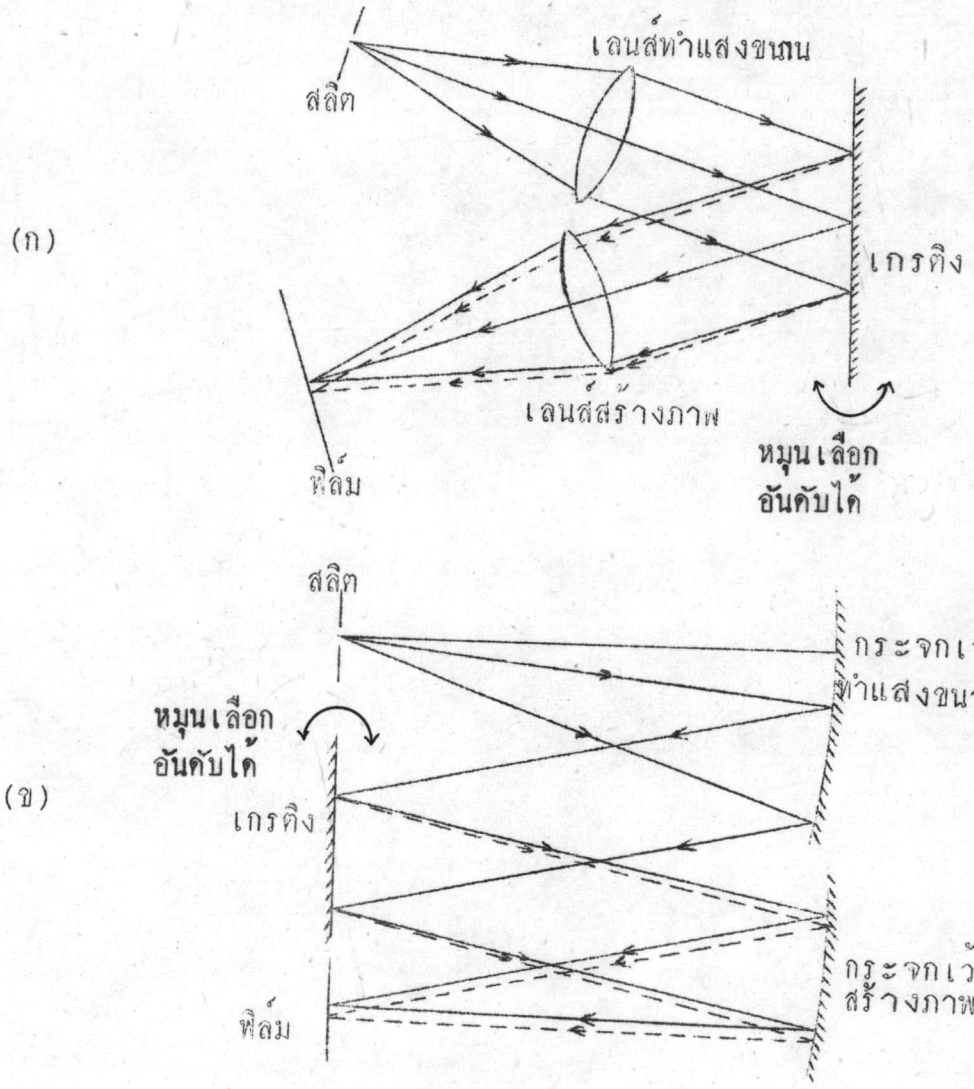
3.1.1 เกรติงแสงผ่าน วัสดุที่ใช้ทำมักเป็นแผ่นแก้ว ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้แสงผ่านตัวมันได้ทุกความยาวคลื่นในช่วงที่ตาเห็น แผ่นแก้วนี้จะถูกขีดเป็นร่องยาวสม่ำเสมอจำนวนมากเรียงขนานกันไป ร่องเหล่านี้จะทำหน้าที่เหมือนกับสลิตเล็ก ๆ เมื่อมีแสงตกกระทบเกรติงก็จะมีการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งของร่องแต่ละร่องนั้น แสงที่เลี้ยวเบนออกไปจะไปเกิดการแทรกสอดกันขึ้นทำให้แสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากันเลี้ยวเบนออกไปเป็นมุมเท่ากันจากเส้นตั้งฉากกับเกรติง ดังนั้นแสงแต่ละความยาวคลื่นจึงมีมุมเลี้ยวเบนไม่เท่ากัน เกรติงจึงสามารถแยกและกระจายแสงความยาวคลื่นต่างกันออกมาได้ ดูภาพที่ 3.1 ซึ่งแสดงการจัดวางเกรติงแสงผ่านแบบที่นิยมกันทั่วไป



ภาพที่ 3.1 แสดงการจัดเกรติงแสงผ่านแบบที่นิยมกัน

3.1.2 เกรติงสะท้อน ทำจากแผ่นโลหะหรือแผ่นแก้วเคลือบโลหะ ซึ่งถูกขีดเป็นร่องจำนวนมากเรียงขนานและมีระยะระหว่างร่องเท่ากันเช่นเดียวกับเกรติงแสงผ่าน เกรติงสะท้อนแบ่งออกเป็น 2 แบบตามลักษณะของผิวหน้าที่ใช้ กล่าวคือ ถ้าผิวหน้าเป็นผิวราบ เรียกว่าเกรติงระนาบ (plane grating) ถ้าผิวหน้าเป็นผิวโค้งเว้าก็เรียกว่าเกรติงเว้า (concave grating) ทั้งเกรติงสะท้อนและเกรติงแสงผ่านมีสมการของเกรติงเหมือนกัน แต่เกรติงแสงผ่านมีผู้นิยมใช้น้อยกว่าก็เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำมักจะเป็นแก้ว

ซึ่งยอมให้แสงผ่านในช่วงความยาวคลื่นที่ตาเห็นเท่านั้น และมักจะทึบต่อแสงอุลตราไวโอเลต ส่วนเกรติงสะท้อนเนื้อวัสดุไม่ค่อยเข้ามาเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในการกระจายแสง จึงมีช่วงที่ใช้งานได้กว้างกว่า เมื่อมีค่าคงที่ของเกรติงเท่ากันกับเกรติงแสงผ่าน ลักษณะการจัดวางเกรติงสะท้อนแบบระนาบแสดงอยู่ในภาพที่ 3.2ก และ ข. สำหรับในช่วงคลื่นอุลตราไวโอเลตจะใช้กระจกเว้าเป็นตัวทำแสงขนานและเป็นตัวสร้างภาพแทนเลนส์



ภาพที่ 3.2 แสดงการจัดวางเกรติงสะท้อนแบบระนาบที่นิยมกันทั่วไป

3.2 <u>สมการของเกรติง</u> (Grating equation) เกรติงทำหน้าที่กระจายแสง โดยที่เมื่อมีแสงตกลงบนหน้าที่มีร่องนั้น แสงจะสะท้อนหรือหักเหออกเป็นมุมต่าง ๆ กัน มุมออกนี้จะสัมพันธ์กับระยะห่างของร่องถัดกันของเกรติงกับมุมที่แสงตกกระทบเกรติง และกับความยาวคลื่นของแสงที่ถูกแยก ดังนั้นแสงจะถูกแยกออกเป็นสีต่าง ๆ ตามลำดับความยาวคลื่น สมการซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ข้างต้น เรียกว่า สมการของเกรติงเป็นดังนี้

$$m\lambda = b(\sin\theta \pm \sin\phi) \qquad (3.1)$$

โดยที่ m เป็นอันดับของสเปคตรัม (spectral order) มีค่าเป็นจำนวนเต็ม

λ เป็นความยาวคลื่นของแสง

b เป็นระยะห่างระหว่างร่องถัดกันของเกรติง เรียกว่าค่าคงที่ของเกรติง (grating constant)

θ เป็นมุมตกกระทบเกรติงของลำแสงเข้า

ϕ เป็นมุมเลี้ยวเบนจากเกรติงของลำแสงออก

เครื่องหมายบวก ใช้ในกรณีที่ลำแสงเข้าและลำแสงออกอยู่ข้างเดียวกันของเส้นตั้งฉากกับหน้าเกรติง และเครื่องหมายลบใช้เมื่อลำแสงเข้าและลำแสงออกอยู่คนละด้านของเส้นตั้งฉากกับหน้าเกรติง

3.3 <u>การกระจาย</u> (dispersion) สำหรับเกรติงการกระจายคือการแยกแสงออกตามความยาวคลื่น โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของแสง การกระจายเชิงมุมของแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันเมื่อผ่านเกรติงจะหาได้จากสมการต่อไปนี้ คือ

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{m}{b\cos\phi} \qquad (3.2)$$

ซึ่งได้จากการหาอนุพันธ์เทียบกับค่า ϕ ของสมการ (3.1) เมื่อกำหนดให้มุมตกกระทบ θ เป็นค่าคงที่ ในสมการ (3.2) ค่าทางซ้ายมือคือการกระจายจะมากขึ้น ถ้าค่าทางขวามือ

คือ m มีค่ามากขึ้น และ/หรือ b มีค่าน้อยลง อย่างไรก็ดี ทั้งค่า m และ b จะมีค่าจำกัดอยู่ กล่าวคือถ้า m มีค่ามากขึ้นจะทำให้มุมเลี้ยวเบน ϕ มีค่ามากขึ้นไปด้วยตามสมการ (3.1) ซึ่งมุมตกกระทบ θ กับมุมเลี้ยวเบน ϕ จะมีค่าได้อย่างมากที่สุดเท่ากับ 90 องศา สำหรับค่า b ก็น้อยที่สุดจะต้องไม่สั้นกว่าความยาวคลื่นแสงที่เลี้ยวเบน มิฉะนั้นแสงที่ตกกระทบจะไม่ถูกกระจายและเกรติงจะมีสภาพเป็นกระจกหรือแผ่นแก้วขนานแทน ตัวอย่างเช่น เกรติงแสงผ่านที่ทำด้วยวัสดุที่มีดัชนีหักเห 1.556 จะมีจำนวนร่องได้สูงสุดเพียง 900 เส้นต่อมิลลิเมตร (Richardson, 1969) สำหรับการกระจายเชิงเส้นมีค่าเท่ากับผลคูณของการกระจายเชิงมุมกับความยาวโฟกัสของเลนส์กล้องถ่ายภาพซึ่งแทนด้วย f ดังนั้นสมการการกระจายเชิงเส้นจะเป็น

$$\frac{dl}{d\lambda} = f\frac{m}{b\cos\phi} \qquad (3.3)$$

การกระจายเชิงเส้นจะบอกให้ทราบถึงตำแหน่งของแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ บนระนาบโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ

3.4 <u>กำลังแยก</u> (Resolving power) กำลังแยกของเกรติงหมายถึงความสามารถของเกรติงที่จะแยกเส้นสเปคตรัม 2 เส้น ที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันให้ออกห่างจากกันพอที่จะสังเกตได้ กำลังแยกเขียนแทนได้ด้วย $\lambda/\Delta\lambda$ โดยที่ $\lambda+\Delta\lambda$ เป็นความยาวคลื่นของเส้นสเปคตรัมที่พอดีแยกออกจากเส้นที่มีความยาวคลื่น λ สมการกำลังแยกของเกรติงเป็น

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \qquad (3.4)$$

ซึ่งเท่ากับผลคูณของอันดับของสเปคตรัมกับจำนวนเส้นทั้งหมดของเกรติง (N) จากสมการ (3.1) หาค่า m แล้วแทนค่าลงในสมการ (3.4) จะได้

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{Nb\,(\sin\theta \pm \sin\phi)}{\lambda} \qquad (3.5)$$

จะเห็นว่ากำลังแยกจะขึ้นกับจำนวนร่องและระยะระหว่างร่องของเกรติง และมุมตกกับมุมเลี้ยวเบนของเกรติงอีกด้วย ถ้าพิจารณาเฉพาะสมการ (3.4) อาจคิดได้ว่ากำลังแยกทางทฤษฎีของเกรติงหน้ากว้างคงที่อันหนึ่งจะมีค่าไม่จำกัด โดยการทำให้จำนวนร่องมากขึ้น แต่ในสมการ (3.5) ถ้าให้ w เป็นความกว้างของหน้าเกรติงซึ่งเท่ากับ Nb จะได้สมการในรูป

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{w}{\lambda}(\sin\theta \pm \sin\phi) \qquad (3.6)$$

ค่าของผลบวกในวงเล็บจะไม่เกิน 2 ดังนั้นกำลังแยกสูงสุดที่ความยาวคลื่นใด ๆ สำหรับเกรติงที่มีหน้ากว้าง w จะมีค่าไม่เกิน $2w/\lambda$ เช่นแสงความยาวคลื่น 5,000 อังสตรอม และเกรติงกว้าง 150 มิลลิเมตร จะมีกำลังแยกสูงสุดทางทฤษฎีไม่เกิน 600,000 โดยไม่ต้องคำนึงถึงอันดับของสเปกตรัมและจำนวนร่องของเกรติงเลย และกำลังแยกจะมีค่าลดลงถ้าความเรียบของระนาบกับความสม่ำเสมอในระยะระหว่างร่องของเกรติงไม่สมบูรณ์

4. <u>ตัวรวมแสง</u> (Focusing element)

ตัวรวมแสงจะเป็นกระจกเว้าหรือเลนส์นูนเช่นเดียวกับตัวทำแสงขนาน แต่มีหน้าที่ตรงข้ามกัน กล่าวคือตัวรวมแสงจะรับแสงขนานที่เลี้ยวเบนออกจากตัวกระจายแล้วรวมแสงให้ไปเกิดเป็นภาพบนฟิล์ม คุณภาพและคุณสมบัติของตัวรวมแสงจะเป็นเช่นเดียวกับตัวทำแสงขนาน แต่ความชัดเจนของเส้นสเปกตรัมซึ่งเสียไปเพราะความคลาดรงค์ของเลนส์รวมแสงนั้น แก้ไขได้โดยการปรับระนาบของฟิล์มให้เอียงพอดีกับระนาบของโฟกัสที่เอียงไปนั้น เลนส์รวมแสงมักจะเรียกว่าเลนส์สร้างภาพ (camera lens)

5. <u>ฟิล์ม</u> (Film)

ฟิล์มเป็นส่วนสุดท้ายของสเปคโตรกราฟที่จะต้องให้ความสำคัญไม่น้อยที่เดียว เพราะข้อมูลจากสังเกตการณ์ที่ทำจะถูกบันทึกไว้ที่ส่วนนี้สำหรับนำไปวิเคราะห์ ข้อมูล...

I 16439737.

วิเคราะห์ออกมาได้จะหยาบหรือละเอียดก็ขึ้นอยู่กับเนื้อฟิล์มด้วยเป็นสำคัญ ดังนั้นการเลือกใช้ฟิล์มจึงต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ที่มีอยู่และจะเกิดต่อไปด้วย ในทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์สเปคโตรกราฟที่ใช้มักมีปัญหาเกี่ยวกับเวลาที่ให้แสง ซึ่งต้องใช้เวลานาน เนื่องจากมีความเข้มแสงน้อย จึงต้องใช้ฟิล์มที่มีความไวสูงซึ่งมักจะมีเนื้อฟิล์มหยาบเป็นข้อจำกัดในการบันทึกรายละเอียด แต่สำหรับดวงอาทิตย์ให้แสงที่มีความเข้มสูงมากจึงสามารถเลือกใช้ฟิล์มที่มีเนื้อละเอียดมีความไวต่ำแทนได้ รายละเอียดในด้านคุณสมบัติของฟิล์มจะได้กล่าวถึงในบทที่ 5