บทที่ 4

หลักการของสเปกโทรกราฟ

สเปกโทรกราฟ เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ศึกษาแสงความยาวคลื่นต่างๆที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงหนึ่งๆด้วยการกระจายแสงต่างความยาวคลื่นออกมาในทิศทางต่างๆกันเมื่อเรานำฟิล์มมารับแสง เราจะได้ภาพสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสเปกโทรแกรม(spectrogram) เราสามารถนำสเปกโทรแกรมนี้ไปศึกษาในรายละเอียด โดยหลักการทำงานแล้วสเปกโทรกราฟจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ 5 ส่วนคือ

ก) ช่องเปิดแสงเข้า(entrance aperture) เป็นส่วนนำแสงเข้าสู่ระบบสเปกโทรกราฟ ได้แก่ ช่องแคบเดี่ยว ขนาดและรูปร่างขึ้นกับงานที่จะใช้

ข) ส่วนสร้างแสงขนาน(collimating element) ได้แก่กระจกเว้า หรือเลนส์ มีหน้าที่จัดแสงที่มาจากช่องเปิดแสงเข้าให้เป็นแสงขนานก่อนเข้าสู่ส่วนกระจายแสง

ค) ส่วนกระจายแสง(dispersing element) มีหน้าที่แยกแสงที่มาจากส่วนสร้างแสงขนานออกเป็นแสงความยาวคลื่นต่างๆ ลักษณะการทำงานคือจะจัดให้แสงแต่ละความยาวคลื่นออกมาในทิศทางต่างๆกัน ส่วนนี้ของสเปกโทรกราฟจะได้แก่ ปริซึม เกรตติงแบบต่างๆ สำหรับในโครงงานวิจัยนี้เราใช้เกรตติงแสงผ่านเป็นส่วนกระจายแสง สำหรับสมบัติของเกรตติงจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดต่อไปข้างหน้า

ง) ส่วนสร้างภาพ(focusing element) ได้แก่เลนส์ หรือ กระจกเว้าที่จะรวมแสงขนานความยาวคลื่นต่างๆที่มาจากส่วนกระจายแสงให้เกิดเป็นสเปกโทรแกรม โดยทั่วไปมักจะได้แก่ เลนส์กล้องถ่ายรูป

จ) ช่องเปิดแสงออก(exit aperture) จะอยู่ที่ตำแหน่งเกิดภาพของส่วนสร้างภาพ ส่วนนี้อาจจะเป็นส่วนที่แสงออกจากสเปกโทรกราฟหรือเป็นตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูล เช่น แผ่นฟิล์ม หรือแผ่นภาพในกรณีที่ต้องการบันทึกสเปกโทรแกรม หรืออาจจะเป็นหัววัดแสงในกรณีที่ต้องการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆโดยตรง

ส่วนที่สำคัญที่สุดในการทำงานของสเปกโทรกราฟได้แก่ส่วนกระจายแสงที่มีหน้าที่แยกแสงความยาวคลื่นต่างๆออกจากกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงสมบัติต่างๆของเกรตติง อันเป็นส่วนกระจายแสงของงานวิจัยนี้

<u>เกรตติงเลี้ยวเบน(diffraction grating)</u>

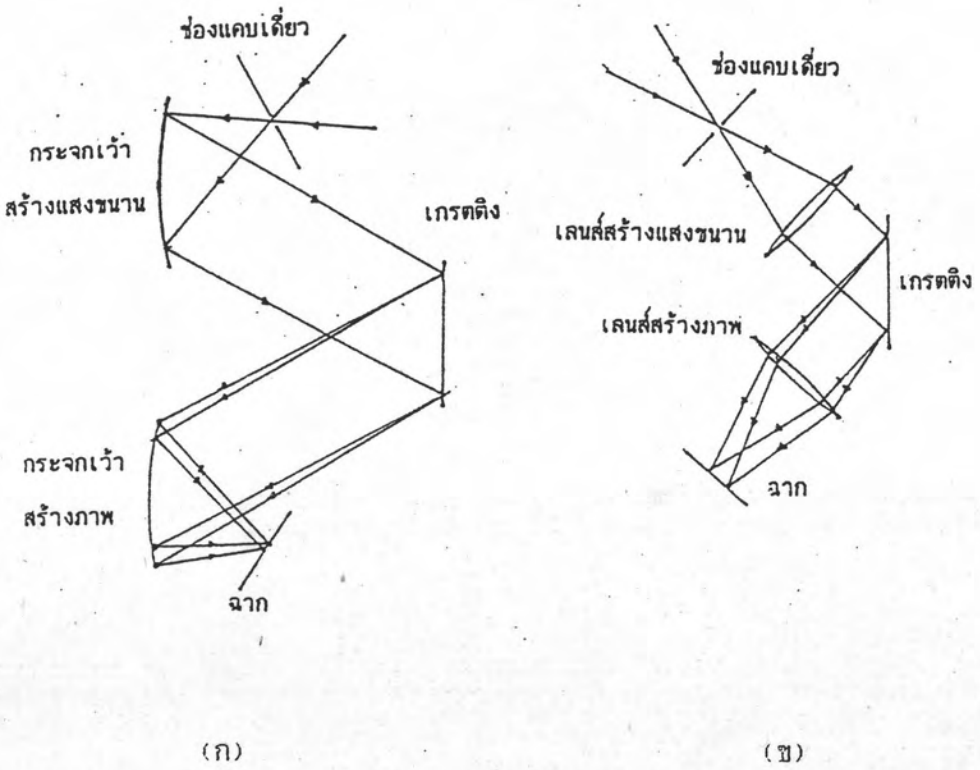
เกรตติงเลี้ยวเบน เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้เป็นส่วนกระจายแสงของสเปกโทรกราฟ เกรตติงอาจทำจากโลหะ แก้ว กระจก[10] นำมาขีดผิวหน้าเป็นร่อง(grooves) ร่องเหล่านี้จะทำหน้าที่เสมือนช่องแคบที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมาก ร่องเหล่านี้จะเรียงขนานอยู่ห่างเท่าๆกัน ระยะห่างนี้เรียก ค่าคงที่ของเกรตติง(grating constant) ค่าคงที่ของเกรตติงนี้ต้องมากกว่าหรืออย่างน้อยต้องเท่ากับความยาวคลื่นแสงที่จะกระจายเพื่อให้สามารถใช้งานได้ ในกรณีของเกรตติงที่ใช้กับแสงที่มองเห็น(visible light) มักมีจำนวนร่องประมาณ 200 ถึง 1200 ร่องต่อมิลลิเมตร

เกรตติงเลี้ยวเบนสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบ คือ เกรตติงแสงผ่าน (transmission grating) และเกรตติงสะท้อนแสง(reflection grating) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

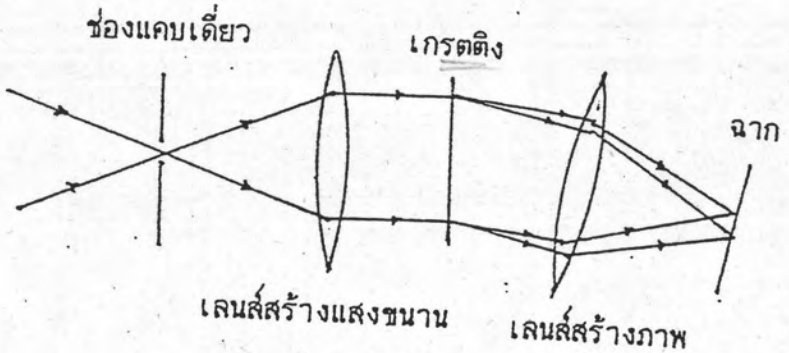
ก) เกรตติงสะท้อนแสง นิยมใช้ในทางดาราศาสตร์ เพราะสามารถใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง เกรตติงสะท้อนแสงอาจจะทำจากกระจกหรือแผ่นโลหะขัดมันที่นำมาขีดให้เป็นรอย เหตุที่นิยมใช้เกรตติงสะท้อนแสงเพราะสมบัติเชิงแสงของเนื้อวัสดุจะไม่มีผลต่อการกระจายแสง จึงสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างกว่าและถ้าใช้กระจกเว้าเป็นส่วนสร้างแสงขนานและส่วนสร้างภาพแล้ว เราก็จะสามารถตัดผลจากการดูดกลืนแสงของแก้วออกไปได้มาก ดังนั้นจะเหมาะแก่การใช้ในช่วงความยาวคลื่นที่อยู่นอกเหนือจากช่วงที่ตามองเห็น เช่น ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเลต ลักษณะการจัดอุปกรณ์สเปกโทรกราฟสำหรับเกรตติงสะท้อนแสงได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 (ก) และ (ข)

ข) เกรตติงแสงผ่าน(transmission grating) มักจะทำจากแผ่นแก้วที่ยอมให้แสงผ่านได้ในทุกความยาวคลื่นที่ตามองเห็น นำมาขีดเป็นร่องยาวสม่ำเสมอจำนวนมากขนานกันไป ร่องเหล่านี้จะทำหน้าที่เสมือนช่องแคบเล็กๆที่จะให้แสงความยาวคลื่นต่างต่างผ่านออกไปแทรกสอดกัน มุมที่แสงแต่ละความยาวคลื่นจะเลี้ยวเบนไปแทรกสอดเสริมกันนั้นจะขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงดังนั้นจึงสามารถแยกแสงแต่ละความยาวคลื่นออกจากกัน

ได้ รูปที่ 4-2 แสดงการจัดสเปกโทรกราฟสำหรับเกรตติงแสงผ่านแบบที่นิยมกันทั่วไป



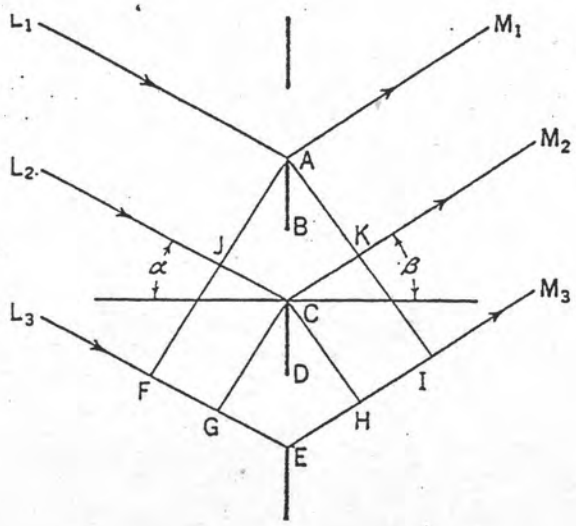
รูปที่ 4-1 การจัดสเปกโทรกราฟสำหรับเกรตติงสะท้อนแสง (ก) แบบใช้กับกระจกเว้า (ข) แบบใช้กับเลนส์



รูปที่ 4-2 แสดงการจัดสเปกโทรกราฟสำหรับเกรตติงแสงผ่านแบบที่นิยมกัน

สมการเกรตติง(grating equation)[7]

สมการเกรตติง เป็นสมการที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและมุมเลี้ยวเบนที่แสงความยาวคลื่นนั้นออกจากเกรตติง ในที่นี้จะแสดงการหาสมการเกรตติงในกรณีของเกรตติงแสงผ่าน โดยพิจารณาจากภาคตัดขวางของเกรตติงแสงผ่านที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 แสดงภาคตัดขวางของเกรตติงแสงผ่าน และแนวทางเดินของแสง

จากภาพ ถ้าแสงเอกรงค์(monochromatic light) ความยาวคลื่น λ ตามแนว L_1, L_2 และ L_3 ตกกระทบเกรตติงแสงผ่านที่มีระยะระหว่างร่อง(คิดเป็นระยะจากตำแหน่งที่คิดว่าแสงตกไปยังจุดเดียวกันของร่องถัดไป) เป็น a คือระยะ AC แล้วเลี้ยวเบนไปเป็นแสง M_1, M_2 และ M_3 ตามลำดับ มีมุม α เป็นมุมตกกระทบ มุม β เป็นมุมเลี้ยวเบน ทั้ง 2 มุมวัดจากเส้นแนวฉากของเกรตติง แสง M_1, M_2 และ M_3 ไปแทรกสอดเกิดเป็นริ้วรอยบนฉาก

ถ้าพิจารณาแสง L_1AM_1 และ L_2CM_2 ถ้าแสงทั้งสองไปแทรกสอดกันบนฉากได้ริ้วสว่าง เราสรุปได้ว่า แสง L_1AM_1 และ L_2CM_2 ต้องมีมุมเฟส(phase angle)เท่ากันที่ฉาก นั่นคือ ผลต่างของเส้นทางเดินของแสงทั้งสองต้องเป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความยาวคลื่น ดังนั้น

$JCK = n\lambda$ เมื่อ $n = 1,2,3,...$

แต่ JCK สามารถเขียนได้ในรูปของ AC คือ

$JCK = AC(\sin\alpha + \sin\beta)$

นั่นคือ

$a(\sin\alpha + \sin\beta) = n\lambda$ เมื่อ $n = 1,2,3,...$ (4-1)

เรียกค่า n ว่า ค่าอันดับของสเปกโทรแกรม

ทำนองเดียวกันถ้าพิจารณาคู่ L_1AM_1 กับ L_3EM_3 ที่มีระยะ FEI = 2JCK และ AE = 2AC = 2a ก็จะได้สมการ(4-1)เช่นเดียวกัน สมการนี้เรียกว่า สมการเกรตติง (grating equation) สมการนี้จะบอกความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบ,มุมเลี้ยวเบน และความยาวคลื่น เครื่องหมายในวงเล็บของสมการจะเป็นลบถ้าแสงที่ตกกระทบเกรตติงอยู่ในด้านตรงข้ามกันเมื่อเทียบกับเส้นแนวฉากของหน้าเกรตติง ถ้าแสงที่ตกกระทบอยู่ในแนวตั้งฉากกับหน้าเกรตติง ค่ามุมตกกระทบจะเป็นศูนย์ สมการ 4-1 จะลดรูปเป็น

$a\sin\beta = n\lambda$ $n = 1,2,3,...$ (4-2)

<u>การกระจายของสเปกโทรกราฟ(dispersion of spectrograph)</u>

เมื่อมีแสง 2 ความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ตกลงบนหน้าเกรตติง แล้วเลี้ยวเบนออกในมุม β_1 และ β_2 ตามลำดับ ค่ามุมเลี้ยวเบนทั้งสองจะต่างกันมากน้อยเท่าใดขึ้นกับค่าการกระจายของสเปกโทรกราฟ ค่านี้จะบ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนมุมเลี้ยวเบนต่อการเปลี่ยนความยาวคลื่นด้วยการหาอนุพันธ์ของสมการ(4-1)เทียบกับความยาวคลื่น เราจะได้

$a\cos\beta\, d\beta/d\lambda = n$

$d\beta/d\lambda = n/a\cos\beta$ (4-3)

ค่า $d\beta/d\lambda$ นี้ เราเรียกว่าค่าการกระจายเชิงมุม(angular dispersion)

แสงที่ออกมาจากเกรตติงจะผ่านเข้าสู่ส่วนสร้างภาพอันมักจะได้แก่ กระจกเว้า หรือ เลนส์ ที่มีความยาวโฟกัสเป็น F ดังนั้นภาพที่เกิดขึ้นบนฉากจะมีการกระจายของระยะบนฉากเทียบกับความยาวคลื่นเป็น

$dx/d\lambda = Fd\beta/d\lambda = Fn/a\cos\beta$ (4-4)

เรียกค่า $dx/d\lambda$ นี้ว่า ค่าการกระจายเชิงเส้นของสเปกโตรกราฟ(linear dispersion of spectrograph)

<u>กำลังแยกของสเปกโทรกราฟ(resolving power of spectrograph)</u>

กำลังแยกของสเปกโทรกราฟ หมายถึงความสามารถของสเปกโทรกราฟที่จะแยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันออกจากกันได้ โดยนิยามกำลังแยกเชิงสี(chromatic resolving power) อันมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นดังนี้

กำลังแยกเชิงสี(R) = $\lambda/\Delta\lambda$

เมื่อ $\Delta\lambda$ คือค่าช่วงความยาวคลื่นน้อยที่สุดที่แยกออกจากกันได้ สำหรับกรณีของเกรตติง ค่ากำลังแยกของเกรตติง

$R = nN$

เมื่อ n คืออันดับของสเปกโทรแกรมที่พิจารณา และ N คือจำนวนเส้นที่รับแสงของหน้าเกรตติง ถ้าบริเวณที่ได้รับแสงของเกรตติงมีความกว้าง W ค่า N จะเป็น W/a เมื่อ a คือค่าคงที่เกรตติง จากสมการเกรตติง(4-1) ค่ากำลังแยกเชิงสีจะเป็น

$R = W(\sin\alpha + \sin\beta)/\lambda$

ตามสภาพความเป็นจริงการจัดเครื่องมือตามรูปที่ 4-2 นั้น เราไม่สามารถหาค่ากำลังแยกเพียงจากสมบัติของเกรตติงแต่เพียงอย่างเดียวได้ เพราะในการใช้งานเราได้สร้างภาพของแหล่งกำเนิดแสงลงบนช่องแคบเดี่ยวเพื่อให้ช่องแคบเดี่ยวเป็นแหล่งกำเนิดแสงใหม่ให้กับระบบ ช่องแคบเดี่ยวนี้จะมีขนาดความกว้างขนาดหนึ่ง เมื่อแสงที่มาจากช่องแคบเดี่ยวผ่านระบบ จะไปปรากฏเป็นภาพของช่องแคบบนฉาก ความกว้างของภาพนี้จะมีขนาดเทียบได้กับช่วงความยาวคลื่นช่วงหนึ่ง ถ้าแสงเข้าสู่ระบบสองความยาวคลื่นมีผลต่างความยาวคลื่นน้อยกว่าค่านี้แล้ว ภาพของช่องแคบที่ความยาวคลื่นทั้งสองจะปรากฏอยู่ติดกันยากที่ผู้สังเกตจะแยกออกจากกันได้ เขาจะเห็นว่าเสมือนเป็นภาพของช่องแคบเดี่ยวเพียงอันเดียว ในกรณีที่กล่าวมานี้สเปกโทรกราฟจะไม่สามารถแยกแสงสองความยาวคลื่นนั้นออกจากกันได้ ดังที่เราจะพิจารณากันในรายละเอียดดังต่อไปนี้[11]

สมมุติระบบสเปกโทรกราฟประกอบด้วยช่องแคบเดี่ยวความกว้าง w' ส่วนสร้างแสงขนานเป็นเลนส์ความยาวโฟกัส F_{coll} ส่วนสร้างภาพเป็นเลนส์ความยาวโฟกัสเท่ากับ F_{cam} พิจารณามุมรองรับช่องแคบเดี่ยวที่เลนส์สร้างแสงขนาน ค่ามุมรองรับนี้จะมีค่า

$d\alpha = w'/F_{coll}$

แสงขนานที่ออกจากเลนส์สร้างแสงขนานจะเข้าสู่เกรตติง แต่แสงที่ออกจากขอบด้านหนึ่งของช่องแคบเดี่ยวจะเข้าสู่เกรตติงในมุมตกกระทบที่ต่างจากอีกขอบหนึ่งเป็น $d\alpha$ ดังนั้นจากสมการของเกรตติง(4-1) เราสามารถหามุมเลี้ยวเบนที่ต่างกันได้ดังนี้

$$\cos\alpha\, d\alpha = -\cos\beta\, d\beta$$

แสงที่เลี้ยวเบนออกมาจากเกรตติงในมุมที่ต่างกัน $d\beta$ นี้ จะไปปรากฏเป็นภาพของช่องแคบเดี่ยวที่มีขนาดความกว้างของภาพเป็น w ที่มีขนาด

$$w = F_{cam}d\beta = -[F_{cam}\cos\alpha/F_{coll}\cos\beta]w'$$

จากการกระจายของเกรตติง จะได้ว่า

$$w = -[a\cos\alpha w'/nF_{coll}]dx/d\lambda \qquad (4\text{-}5)$$

เมื่อ $dx/d\lambda$ คือค่าการกระจายเชิงเส้นของสเปกตรัม ถ้าพิจารณาค่า $wd\lambda/dx$ ค่านี้คือค่าช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับขนาดความกว้างของช่องแคบเดี่ยว เราเรียกค่านี้ว่า ค่าความบริสุทธิ์ของสเปกตรัม(spectral purity) ใช้สัญลักษณ์ $\delta\lambda$ เราสามารถเขียนสมการ(4-5)ได้ใหม่เป็น

$$\delta\lambda = -aw'\cos\alpha/nF_{coll} \qquad (4\text{-}6)$$

ในกรณีที่แสงตกตั้งฉากกับเกรตติง $\cos\alpha$ เป็นศูนย์ สมการ(4-6)จะลดรูปเป็น

$$\delta\lambda = -aw'/nF_{coll} \qquad (4\text{-}7)$$

ในสมการ(4-7)นี้ค่า $\delta\lambda$ จะคงที่ ถ้าแสงที่เข้าสู่ระบบสองความยาวคลื่นมีค่าผลต่างความยาวคลื่นมากกว่าค่า $\delta\lambda$ เส้นสเปกตรัมของแสงทั้งสองนั้นจะปรากฏแยกกันบนฉาก ค่า $\delta\lambda$ นี้จะเป็นตัวกำหนดกำลังแยกจริงของสเปกโตรกราฟในกรณีที่ช่องแคบเดี่ยวที่เราใช้มีขนาดกว้างขนาดหนึ่ง

เราสามารถใช้หลักการนี้ในการหาค่าความกว้างของช่องแคบเดี่ยวได้ โดยการนำเอาเกรตติงออกจากระบบ ภาพที่เกิดบนฉากจะเป็นภาพของช่องแคบเดี่ยวที่มีความกว้าง

$$w = (F_{cam}/F_{coll})w' \qquad (4\text{-}8)$$

ถ้าเราใช้วิธีถ่ายภาพของช่องแคบเดี่ยวนี้แล้ว ก็จะสามารถหาขนาดความกว้างของช่องแคบเดี่ยวออกมาได้

หลักการเบื้องต้นในการเก็บข้อมูลสเปกตรัมของดาวฤกษ์

ในการเก็บข้อมูลสเปกตรัมของดาวฤกษ์นั้น ถ้าเราใช้สเปกโทรกราฟในลักษณะของรูปที่4-2 นั้นจะต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลลงแผ่นภาพหรือแผ่นฟิล์มนานมาก มิฉะนั้นก็ต้องใช้อุปกรณ์วัดความเข้มแสงเป็นพิเศษ เพราะดาวฤกษ์เป็นวัตถุที่อยู่ไกล แสงที่มาถึงโลกจึงมีความเข้มแสงต่ำ และก็สามารถทำการเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งละ 1 ดวงเท่านั้น ระบบสเปกโทรกราฟลักษณะนี้จึงเหมาะในการเก็บข้อมูลที่ต้องการความละเอียด ในกรณีที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนักนิยมนำปริซึมขนาดใหญ่มาวางหน้าเลนส์ที่ใช้ถ่ายภาพ แล้วจัดมุมให้สามารถถ่ายภาพสเปกตรัมของดาวฤกษ์ในบริเวณที่ต้องการศึกษา วิธีที่กล่าวถึงนี้เรียกว่าวิธี objective prism ข้อดีคือใช้เวลาน้อยกว่าในการบันทึกภาพ และสามารถบันทึกภาพสเปกตรัมของดาวฤกษ์หลายๆดวงได้พร้อมๆกัน สำหรับในโครงงานวิจัยนี้ได้นำหลักการข้างต้นมาดัดแปลงเล็กน้อย คือ ใช้เกรตติงวางข้างหน้าเลนส์แทนที่จะใช้ปริซึม แสงจากดาวฤกษ์จะเข้าสู่เกรตติงเต็มหน้า แล้วเลี้ยวเบนผ่านเลนส์ไปเกิดภาพที่ระนาบแผ่นฟิล์มของกล้องถ่ายภาพ การบันทึกภาพจะปล่อยให้ดาวฤกษ์เคลื่อนที่ไปในแนวขนานกับร่องบนหน้าของเกรตติงเพื่อให้สเปกโทรแกรมที่ได้มีลักษณะเป็นแถบอยู่บนแผ่นฟิล์ม