บทที่ 5

การดำเนินงานและผลการวิจัย

ได้นำอุปกรณ์ดังได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 มาเรียงเพื่อถ่ายภาพสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ทั้งในบริเวณสงบ (quiet region) และบริเวณกัมมันต์ (active region) อาณาบริเวณกัมมันต์หมายถึง จุดบนดวงอาทิตย์และปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่ปรากฏพร้อม ๆ กับจุดหรือกลุ่มจุด

1. การถ่ายภาพสเปกตรัม

อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพสเปกตรัมของดวงอาทิตย์คือ กล้องโทรทัศน์ สเปกโตรกราฟแบบลิตโทรว์ และฟิล์ม

การจัดเรียงแสดงในรูป 5.1 โดยจัดให้ภาพของดวงอาทิตย์จากกล้องโทรทัศน์โฟกัสบนระนาบของสลิทของสเปกโตรกราฟ (หากมิได้ระบุเป็นอย่างอื่น สเปกโตรกราฟ ในบทนี้ หมายถึงสเปกโตรกราฟแบบลิตโทรว์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้)

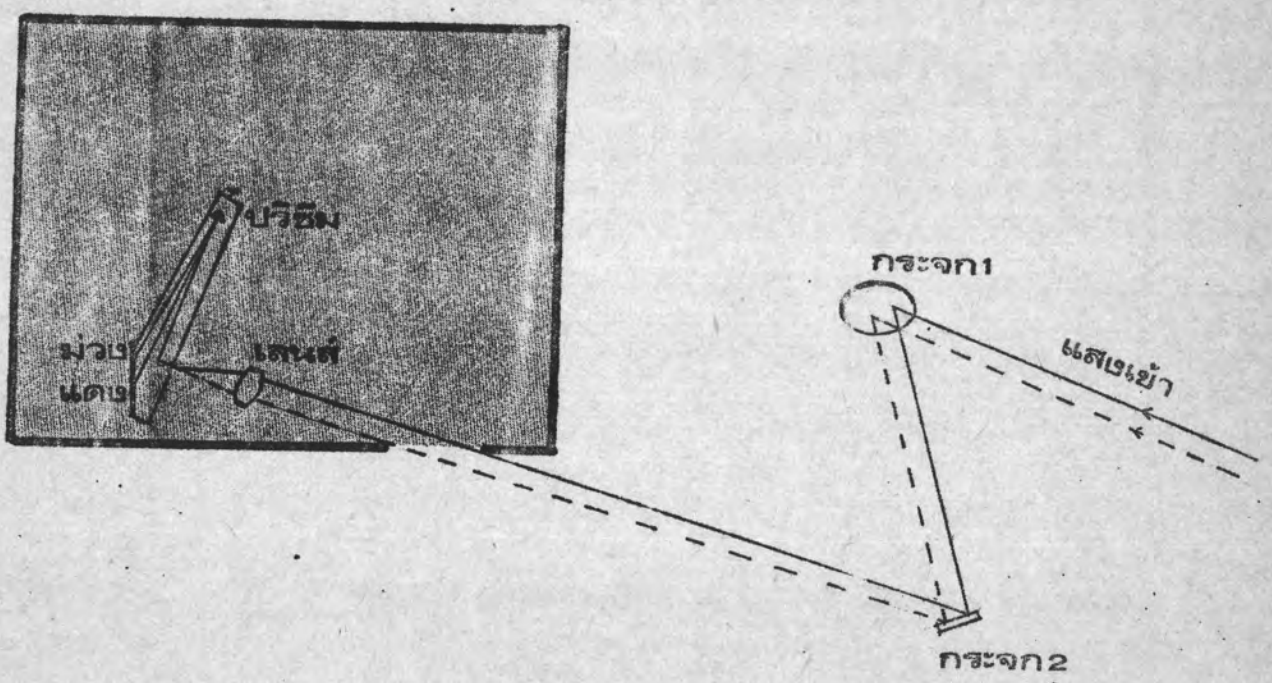
ภาพสเปกตรัมที่ได้แสดงทางเดินแสงได้ดังรูป 5.2 โดยมีส่วนสีแดงอยู่ไกลจากเลนส์โทรทัศน์ของสเปกโตรกราฟมากกว่าส่วนสีม่วง นั่นคือสีแดงมีระยะโฟกัสยาวกว่าระยะโฟกัสของแสงสีม่วง

เนื่องจากภาพสเปกตรัมที่ได้ไม่มีความเข้มพอที่จะตัดสินความชัดด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงต้องจัดโฟกัสด้วยการทดลองถ่ายภาพสเปกตรัมจนมีความชัดมากที่สุด ทั้งนี้ได้ดำเนินขั้นตอนดังนี้

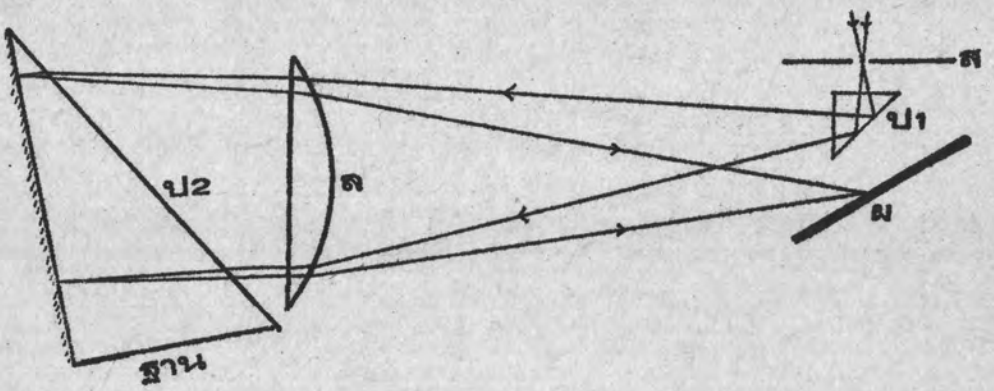
1) ปรับตำแหน่งของปริซึมจนกระทั่งได้ภาพสเปกตรัมช่วงยาวที่สุดโดยยึดด้านสีแดงเป็นหลัก ขั้นนี้ใช้สังเกตด้วยตาเปล่า

2) เลื่อนระยะห่างของเลนส์ ด้วยปุ่มปรับระยะโฟกัสของเลนส์ (ดูรูป 3.3) ไปที่ระยะห่างจากแผ่นฟิล์มมากที่สุด จากนั้นถ่ายภาพสเปกตรัมที่ระยะห่างต่าง ๆ กันโดยเลื่อนตำแหน่งเลนส์เข้าไปหาฟิล์มทีละน้อยในแต่ละครั้ง

3) เลือกถ่ายภาพให้ขัดบริเวณสีแดงก่อน โดยใช้เวลาในการเปิดหน้ากล้องประมาณครึ่งวินาที ที่บริเวณสีแดงนี้ (ภาพที่ได้จากฟิล์มเป็นขาวดำ) จะได้เส้นไฮโดรเจน-อัลฟา ซึ่งรู้จักกันดี เลือกตำแหน่งของเลนส์ที่ทำให้ได้ภาพของเส้นไฮโดรเจน-อัลฟาที่ชัดเจนที่สุด



รูป 5.1 แผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพสเปกตรัมของดวงอาทิตย์มองจากด้านบน ส่วนที่อยู่ในกรอบอยู่ในห้องมืด



รูป 5.2 แผนภาพแสดงทางเดินของแสง (สีเดียว) ในสเปกโตรกราฟแบบลิทโทรว์ ส. คือสลิท ป.1 คือปริซึมฉาก ผ. คือแผ่นบันทึกภาพ ล. คือเลนส์คอลลิเมเตอร์ซึ่งเป็นตัวเดียวกับเลนส์โทรทัศน์ ป.2 คือปริซึมครึ่งมุมยอดประมาณ 30 องศา ที่การเบี่ยงเบนที่น้อยที่สุด ลำแสงในปริซึมจะขนานกับฐานของปริซึม

4) ที่ตำแหน่งของเลนส์ที่ให้ภาพด้านสีแดงชัดที่สุดนี้ ทำการถ่ายภาพสเปกตรัมอีก โดยเลื่อนมุมรับภาพของแผ่นฟิล์มในตำแหน่งต่าง ๆ (หมุนปุ่มปรับมุมรับภาพ หมายเลข 10 ในรูป 3.3

โดยใช้เวลาในการเปิดชัดเตอร์ประมาณ 1 - 2 วินาที สุดแต่ความเข้มของแสงอาทิตย์ ภาพที่ได้ซึ่งชัดเจนที่บริเวณสีแดงแล้วจะค่อย ๆ มีความชัดเจน (โฟกัส) ค่อนมาทางสีม่วง ตามลำดับ

5) ดำเนินการจนกระทั่งได้ภาพสเปกตรัมที่มีความชัดโดยเฉลี่ยทั่วทั้งแถบสเปกตรัม แล้วใช้ตำแหน่งของเลนส์และมุมรับภาพนี้เป็นตำแหน่งสำหรับการถ่ายสเปกตรัมในการวิจัยนี้ต่อ ๆ ไป

ขั้นตอนทั้งหมดตั้งแต่ 1) ถึง 5) นี้ต้องทำในห้องมืดเพื่องจากเป็นงานที่ต้องมีการเปลี่ยนฟิล์มสำหรับบันทึกภาพซึ่งไวต่อแสง

2. การล้างฟิล์ม

นำฟิล์มที่ถ่ายสเปกตรัมมาล้างด้วยน้ำยาล้างฟิล์ม D - 19 ชนิดกระป๋องผสมสำเร็จของโกดัก (Kodak) ใช้เวลาประมาณ 3 นาที และหยุดปฏิกิริยา (fixing) ด้วยการแช่ในน้ำยา F - 15 เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงนำไปแช่ในน้ำที่ไหลตลอดเวลา (running water) เป็นเวลา 30 นาที จึงนำขึ้นล้างด้วย Photo Flo 200 ของโกดัก แล้วผึ่งให้แห้ง

ทั้งหมดนี้ทำในห้องมืดที่อุณหภูมิประมาณ $24^{\circ}C$

สูตร Kodak fixing bath F - 5

1)	น้ำ $125^{\circ}F$ หรือ $50^{\circ}C$	600 cm^3
2)	Sodium Thiosulphate (Hypo)	240 gm
3)	Sodium Sulfite, disiccated	15 gm
4)	Acetic Acid 28 %	48 cm^2
5)	Boric Acid crystal	7.5 gm
6)	Potassium Alum	15 gm

ผสมน้ำจนครบ 1 ลิตร

ภาพที่ปรากฏบนฟิล์ม (ขาว - ดำ) นี้จะเป็นแถบยาวตามแนวยาวของแผ่นฟิล์ม ปรากฏเส้นขาวของเส้นดูดกลืน (absorbtion lines) ของสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ ทั้งนี้เพราะเป็นฟิล์มเนกาตีฟ (negative)

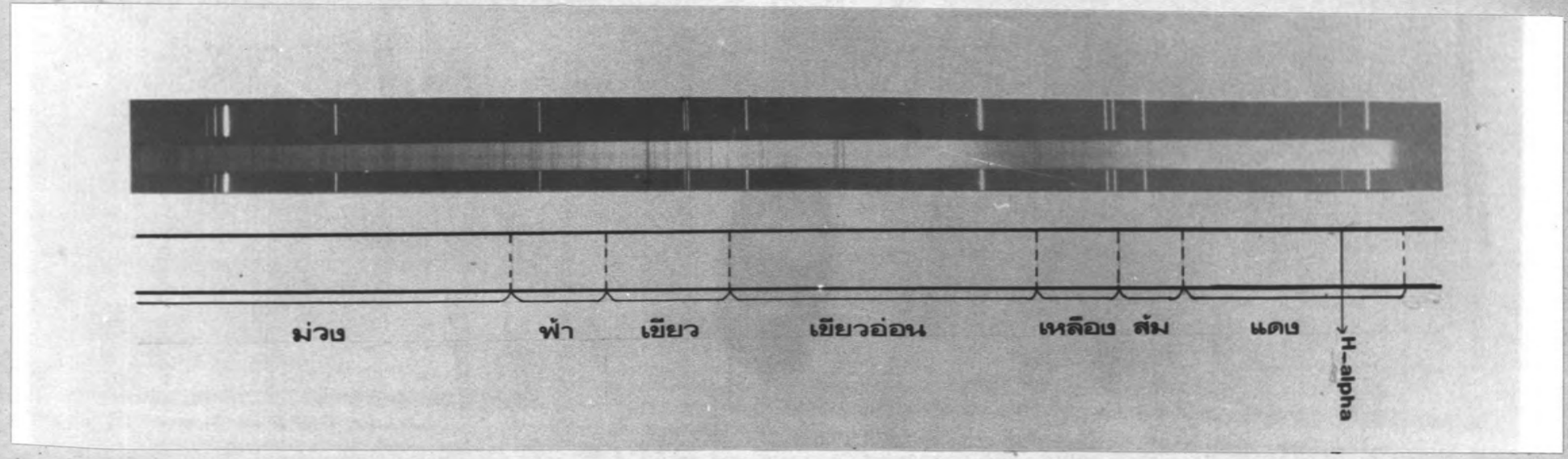
เนื่องจากฟิล์มมีความไวต่อแสงสีต่าง ๆ กันไม่เท่ากัน ดังนั้นแม้ว่าทั้งแถบสเปกตรัมจะมีเวลาในการถูกแสง (exposure time) เท่ากัน แต่จะพบว่ามีความเทาไม่เท่ากันจากฟิล์มที่ได้และการแบ่งเขตสีในสเปกตรัมด้วยตาเปล่า จะพบว่าบริเวณสีที่ฟิล์มมีความไวมาก

เรียงลำดับคือ สีแดง , เขียว , เหลือง และม่วง

จากการที่ฟิล์มมีความไวต่อแสงสีต่าง ๆ ไม่เท่ากันนี้ ทำให้การถ่ายภาพสเปกตรัมทั้งแถบ (จากสีแดงถึงสีม่วง) โดยให้มีความชัดเจนเท่า ๆ กันทำได้ยาก ดังนั้นหากต้องการศึกษาบริเวณสีใดเป็นการพิเศษจะต้องเลือกหาความเร็วในการเปิดชัตเตอร์ที่เหมาะสมเป็นเฉพาะบริเวณสีไป

เมื่อนำฟิล์มที่ได้มาทำภาพโพสิตีฟ (positive) จะได้ภาพสเปกตรัมขาว-ดำตามความเป็นจริง คือเห็นเส้นมืดของเส้นดูดกลืนในแนวดิ่งเป็นระยะตลอดแถบสเปกตรัม

ภาพสเปกตรัมที่ได้จากสเปกโตรกราฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความยาวประมาณ 21 เซนติเมตร ความกว้างนั้นขึ้นกับการเปิดความกว้างของสลิท



รูป 5.3 โพสิทีฟ (positive) ของสเปกตรัมและสเกลสีจากการแบ่งด้วยหาเปล่งโดยใช้เส้นไฮโดรเจน-อัลฟา (H - alpha) เป็นหลัก

3. กำลังขยายของสเปกโตรกราฟ

เพื่อการตรวจสอบกำลังขยายของสเปกโตรกราฟที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้ทดสอบหากำลังขยายของระบบเลนส์และปริซึมในสเปกโตรกราฟทั้งชุด โดยมีวิธีการดังนี้

ตัดกระดาษดำขนาดสูงประมาณ 1 เซนติเมตร ไปปิดไว้หน้าสลิทเพื่อบังแสงเข้าสลิท ทั้งนี้โดยเปิดความสูงของสลิทมากกว่า 1 เซนติเมตร จากนั้นจึงถ่ายภาพสเปกตรัมของดวงอาทิตย์โดยมีแผ่นกระดาษดังกล่าวบังสลิทบางส่วนอยู่

เมื่อนำแผ่นฟิล์มไปล้าง พบว่าแถบสเปกตรัมที่ได้มีทางยาวตามแนวยาวอยู่ระหว่างแถบสเปกตรัม อันแสดงว่าแถบขาวดังกล่าวเป็นผลมาจากการบังแสงด้วยแผ่นกระดาษดังกล่าว

เมื่อนำแผ่นกระดาษที่ใช้บังแสงที่หน้าสลิทมาเทียบกับขนาดของแถบขาวบนฟิล์มพบว่ามีขนาดเท่ากันพอดี แสดงว่าสเปกโตรกราฟที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่มีการขยายภาพ หรือคือมีกำลังขยายเป็น 1

ได้ทดลองวิธีนี้หลายครั้งเพื่อยืนยันข้อสรุป และผลก็ยังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

4. การคำนวณหาความยาวคลื่นของเส้นต่าง ๆ

เส้นขาวในฟิล์มแต่ละเส้นแสดงถึงการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กันโดยบรรยากาศของดวงอาทิตย์ เพื่อให้ทราบค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งเส้นต่าง ๆ นั้น ได้ใช้วิธีการและสูตรของฮาร์ทแมน (Hartmann)

4.1 สูตรของฮาร์ทแมน กล่าวไว้ดังนี้

$$\lambda = \lambda_o + \frac{C}{d_o - d} \qquad \text{(Sawyer, 1951)} \qquad (5.1)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นที่ระยะทาง d ซึ่งต้องการทราบค่า

λ_o คือ ค่าคงที่

C คือ ค่าคงที่

d_o คือ ค่าคงที่

d คือ ระยะทางซึ่งทราบค่าจากการวัด

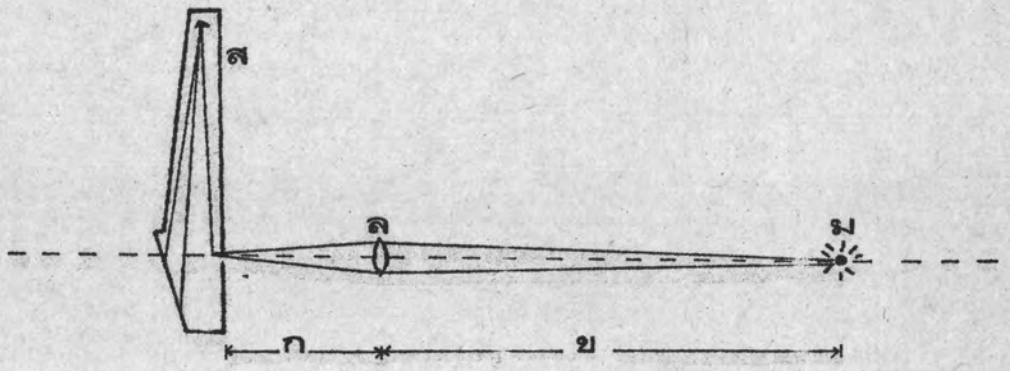
จากสูตรนี้จะเห็นได้ว่าต้องการค่า λ และ d ที่ควบคู่กัน 3 ชุด จึงจะได้ค่าคงที่ต่าง ๆ ครบ 3 ตัว กล่าวคือต้องมีเส้นมาตรฐานที่รู้ค่าความยาวคลื่น (λ) และระยะทาง (d) จำนวน 3 เส้น

อนึ่ง กรณีที่ระยะทางของเส้นที่ 1 (เขียนย่อ ๆ ว่า d_1) ไม่เท่ากับ 0 ตัวคงที่ d_o จะเปลี่ยนเป็น $\bar{d}_o$ โดยที่ $\bar{d}_o = d_o + d_1$ ตัวอย่างการคำนวณจะได้แสดงในลำดับต่อไป

4.2 <u>การบันทึกเส้นมาตรฐาน</u> เส้นมาตรฐาน ซึ่งหมายถึงเส้นสเปกตรัมที่ทราบค่าความยาวคลื่นและสามารถวัดระยะทางได้นี้ ได้จากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานดังที่กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 5 บทที่ 3

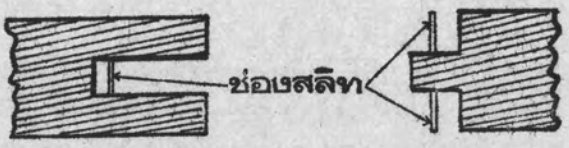
ได้นำแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแทนภาพจากดวงอาทิตย์ โดยมีเลนส์ขนาดเล็กทำหน้าที่โฟกัสภาพของหลอดกำเนิดแสงลง ณ ระนาบของสลิท โดยที่ภาพของหลอดกำเนิดแสงทับกับแนวยาวของสลิท และแนวทางเดินของแสงขนานกับทางเดินของแสงอาทิตย์ขณะถ่ายสเปกตรัมของดวงอาทิตย์

การจัดเรียงอุปกรณ์แสดงไว้ในรูปที่ 5.4



รูป 5.4 แผนภาพแสดงการจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับการถ่ายสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ ม. คือแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน ล. คือเลนส์สำหรับรวมแสงไปโฟกัสที่สลิทของสเปกโตรกราฟ (ส) ระยะ ก ยาวประมาณ 15 ซ.ม. ระยะ ข ยาว 60 ซ.ม. เส้นประเป็นแนวทางเดินของแสงอาทิตย์จากกล้องโทรทัศน์

เนื่องจากการถ่ายภาพสเปกตรัมนี้จะต้องถ่ายทั้งจากแสงอาทิตย์และแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานหลาย ๆ แหล่งลงในแผ่นฟิล์มเดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาพที่แสดงการฟาดของเส้นมาตรฐานโดยชัดเจน จึงใช้กระดาษดำตัดเป็นรูปดังแสดงในรูป 5.5 เพื่อปิดหน้าสลิทขณะถ่ายสเปกตรัมของดวงอาทิตย์และสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง โดยที่ลักษณะของกระดาษที่ปิดจะทำให้ได้ภาพที่สะดวกแก่การพิจารณา



ก ข

รูป 5.5 แสดงการบังแสงด้วยกระดาษดำ (ก) ใช้ในการถ่ายสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ (ข) ใช้ในการถ่ายสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน

ได้ทดลองใช้เวลาในการเปิดชัตเตอร์ต่าง ๆ กันสำหรับแหล่งกำเนิดแสงต่าง ๆ กัน ผลปรากฏว่าเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้การถ่ายสเปกตรัมทั้งหมดลงในแผ่นฟิล์มเดียวกันเป็นไปโดยสมบูรณ์ที่สุดคือ

หลอดไฮโดรเจน	ใช้เวลา	20	นาที
หลอดปรอท	ใช้เวลา	10	นาที
หลอดยีเลียม	ใช้เวลา	10	นาที

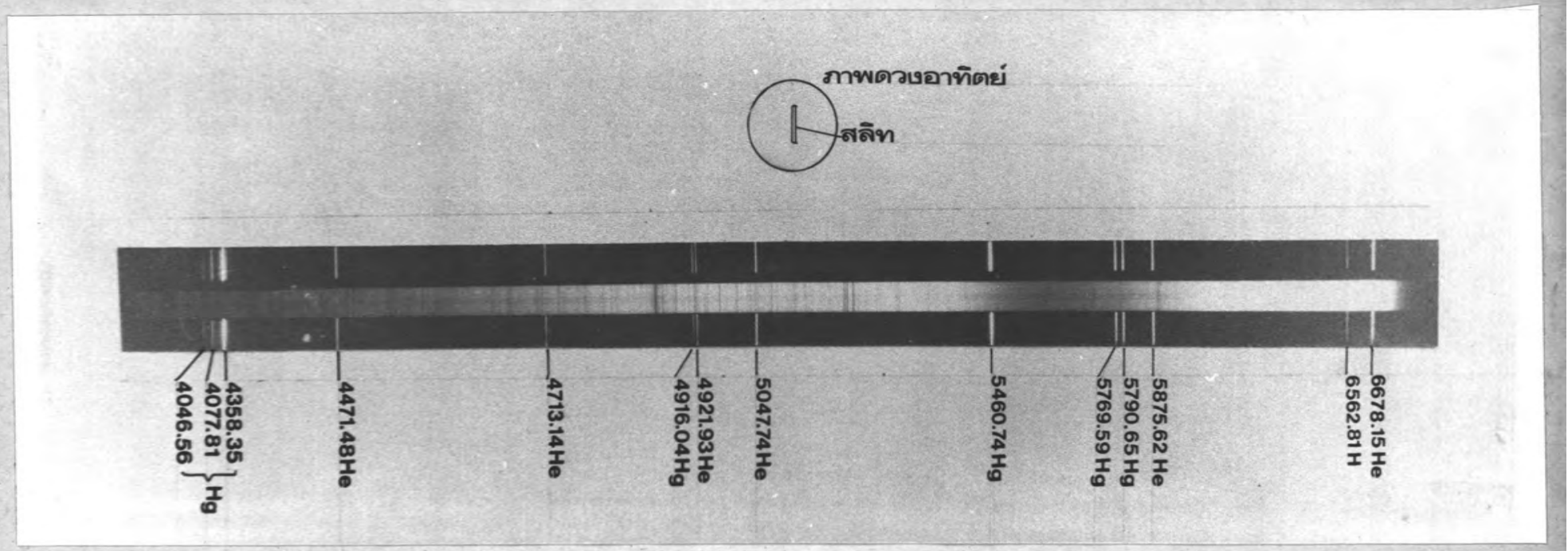
ขั้นตอนที่สะดวกแก่การถ่ายภาพสเปกตรัมคือ ถ่ายสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ก่อน แล้วจึงถ่ายสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานทั้ง 3 ต่อไป

จากตาราง 3.1 ในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิดทั้ง 3 มีการกระจายในแถบสเปกตรัมดีพอสมควร และครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นจากสีม่วงจนถึงสีแดง ซึ่งเป็นขอบเขตของสเปกตรัม

ภาพสเปกตรัมที่ได้และความยาวคลื่นมาตรฐาน ได้แสดงไว้ในรูป 5.6 เส้นของแหล่งกำเนิดแสงเป็นเส้นสว่าง (emission line) จึงมีสีดำ ในแผ่นฟิล์ม เมื่อนำมาถ่ายเป็นโพสิตีฟจะเห็นเป็นเส้นขาว

อนึ่งภาพที่ได้นี้ไม่สามารถถ่ายทุกเส้นของแหล่งกำเนิดได้ เพราะเวลาที่ใช้น้อยกว่าที่ต้องการ (กรณีไฮโดรเจน) แต่หากมากไปก็จะเกิดปัญหาเส้นมีขนาดใหญ่ในกรณีของหลอดที่สว่างมาก ๆ (กรณีซีเลียมและปรอท) และเกิดปัญหาแสงที่เล็ดลอดในขณะดำเนินงานด้วยเพราะห้องถ่ายที่ใช้ไม่อาจทำให้มืดสนิทได้

อย่างไรก็ตามภาพที่ได้ก็มีคุณภาพและขอบเขตที่เพียงพอที่จะใช้คำนวณหาค่าความยาวคลื่นของเส้นต่าง ๆ ในสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ได้



รูป 5.6 โพสิตีฟของสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ (แถบกลาง) และเส้นมาตรฐานบางเส้นจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน สเปกตรัมดวงอาทิตย์นี้ถ่ายจากบริเวณสงบกลางดวงอาทิตย์ สัญญลักษณ์ท้ายความยาวคลื่นเป็นอังสตรอม คือธาตุที่ใช้เป็นแหล่งให้แสง

4.3 <u>การวัดระยะของเส้น</u> เครื่องมือที่ใช้ในการวัดระยะของเส้นสเปกตรัมโดยตรงจากแผ่นฟิล์ม คือ กล้องจุลทัศน์ชนิดเลื่อนได้[1] แต่พบปัญหาคือขนาดของเส้นจากแหล่งกำเนิดเช่นเส้นของซีเลียมและปรอทมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับขีดสำหรับวัดระยะในกล้องจุลทัศน์ของไมโครมิเตอร์ ดังนั้นการวัดจึงมีความผิดพลาดมาก เพราะบอกได้ยากว่าส่วนใดของเส้นคือตำแหน่งของความยาวคลื่นนั้น จึงเปลี่ยนมาใช้การวัดจากกราฟที่ได้จากเครื่องไมโครเดนซิโตมิเตอร์แทน

เมื่อสแกน (scan) วัดความเทาของสเปกตรัมตามแนวตั้งฉากกับเส้นสเปกตรัม จะได้กราฟแสดงความเทาของบริเวณต่าง ๆ ที่ผ่านไป โดยการสแกนเส้นมาตรฐานและสเปกตรัมของดวงอาทิตย์ลงบนแผ่นกราฟเดียวกันก็จะได้กราฟแสดงความเทาของฟิล์มและแสดงตำแหน่งของเส้นมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะยอดกราฟของเส้นมาตรฐานที่ได้มีความแหลมชัดเจน

รายละเอียดตัวแปรของไมโครเดนซิโตมิเตอร์ขณะใช้งาน มีดังนี้

ช่วงของเวดจ์ (wedge range) 2.34 D (wedge Number F 1086)

ความกว้างของสลิทที่ใช้สแกนฟิล์ม 5×10^{-3} มิลลิเมตร

อัตราส่วนระหว่างระยะบนฟิล์มต่อระยะบนแผ่นกราฟ เท่ากับ 1 ต่อ 10

ในกรณีที่ฟิล์มแผ่นใดมีความแตกต่างของความเทามากกว่า 2.34 D จะต้องเปลี่ยนนิวตรัล ฟิลเตอร์ (neutral filter) จาก 1 D เป็น 3 D จากอัตราส่วน 1 ต่อ 10 ข้างต้น แสดงว่าระยะบนฟิล์ม 1 เซนติเมตร จะปรากฏเป็นกราฟออกมายาวถึง 10 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องของการวัดมีมากขึ้น

เมื่อสแกนแผ่นฟิล์มแล้วได้กราฟยาว 203 เซนติเมตร นับจากความยาวคลื่น 6678.15 อังสตรอมของซีเลียม ซึ่งกำหนดให้มีระยะทางเป็นศูนย์จนถึงที่ความยาวคลื่น 4024.82 อังสตรอม

เฉลี่ยแล้วสเปกโตรกราฟนี้สามารถกระจายแสงได้ 130 อังสตรอมต่อเซนติเมตร หรือ 13 อังสตรอมต่อมิลลิเมตร

---

(1) traveling microscope

การวัดระยะทางจากกราฟที่ได้ใช้วิธีขีดเส้นตามแนวยาวตรงกลางแผ่นกราฟเป็นเส้นหลัก จากนั้นจึงวัดระยะทางของจุดยอดของกราฟซึ่งแสดงตำแหน่งของเส้นในสเปกตรัมโดยลากเส้นตั้งฉากกับเส้นหลักข้างต้น

ทั้งนี้โดยกำหนดความยาวของเส้นฮีเลียม 6678.19 อังสตรอมเป็น 0.00 เซนติเมตร

ค่าความยาวที่วัดได้มีโอกาสคลาดเคลื่อนได้ $\pm$ 0.01 เซนติเมตร

4.4 <u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> จากระยะทางและความยาวคลื่นมาตรฐาน ได้ทำการคำนวณหาค่าคงที่ของสมการสูตรของฮาร์ทแมน (5.1) โดยที่แบ่งช่วงของสเปกตรัมออกเป็น 6 ช่วงเพื่อให้สามารถคำนวณค่าความยาวคลื่นจากระยะทางของเส้นอื่น ๆ ที่ต้องการทราบค่าได้ถูกต้องมากเท่าที่จะเป็นไปได้

ช่วงที่และความยาวคลื่นมาตรฐานและระยะทางที่วัดได้มีดังนี้

ช่วงที่	ความยาวคลื่น (อังสตรอม)	ระยะทาง (เซนติเมตร)
1	6678.15	0.00
	6562.81	4.61
	5875.62	39.55
2	5875.62	39.55
	5790.65	44.85
	5769.59	46.19
3	5769.59	46.19
	5460.74	67.91
	5047.74	108.42
4	5047.74	108.42
	4921.93	118.40
	4916.04	118.99
5	4916.04	118.99
	4713.14	143.75
	4471.48	178.48
6	4713.14	143.75
	4471.48	178.48
	4358.35	197.18

เนื่องจากการคำนวณหาค่าคงที่ในสูตรของฮาร์ทแมนสำหรับช่วงต่าง ๆ นั้นเป็นไปในทำนองเดียวกันจึงจะแสดงรายละเอียดเพียงสองครั้ง สำหรับกรณีระยะทางของเส้นที่ 1 เป็นศูนย์ และไม่เป็นศูนย์

ช่วงที่ 1

$\lambda_1 = 6678.19$ $\quad d_1 = 0.00$

$\lambda_2 = 6562.81$ $\quad d_2 = 4.61$

$\lambda_3 = 5875.62$ $\quad d_3 = 39.55$

$\lambda_2 - \lambda_1 = -115.38$ $\quad d_2 - d_1 = 4.61$

$\lambda_3 - \lambda_1 = -802.57$ $\quad d_3 - d_1 = 39.55$

$$\frac{d_2 - d_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = a = -0.0399549$$

$$\frac{d_3 - d_1}{\lambda_3 - \lambda_1} = b = -0.0492791$$

$$a - b = 9.32429 \times 10^{-3}$$

$$\frac{d_3 - d_2}{a - b} = \frac{C}{d_o} = 3747.2019 \qquad (5.2)$$

$$\lambda_o = \lambda_1 - \frac{C}{d_o} = 2930.988$$

$$d_o = a(\lambda_2 - \lambda_o) = -145.10906$$

แทนค่า d_o ใน (5.2) ได้ $C = -543753.03$ (5.3)

แทนค่าคงที่คือ λ_o , d_o และ C ที่ได้ในสูตรของฮาร์ทแมน (5.1) จะได้

$$\lambda = 2930.988 + \frac{543753.03}{145.10908 + d} \quad (5.4)$$

ช่วงที่ 2

$\lambda_1 = 5875.62$ $d_1 = 39.55$

$\lambda_2 = 5790.65$ $d_2 = 44.85$

$\lambda_3 = 5769.59$ $d_3 = 46.19$

เมื่อคำนวณตามขั้นตอนเดียวกับช่วงที่ 1 แล้ว จะได้ค่าคงที่ ดังนี้

$\lambda_o = 491.62287$

$d_o = -330.52628$

$C = -1779552.5$

แต่กรณีนี้ $d_1 \neq 0$ จึงต้องกำหนดตัวคงที่ (d_o) ขึ้นใหม่โดยที่

$\bar{d}_o = d_o + d_1$

$= -290.97628$

สูตรของฮาร์ทแมน กรณี $d_1 \neq 0$ ∴ เป็น

$$\lambda = \lambda_o + \frac{C}{d_o - d} \qquad \text{(Sawyer, 1951)} \qquad (5.5)$$

เมื่อแทนค่าคงที่จะได้

$$\lambda = 491.62287 + \frac{1779552.5}{290.97628 + d} \qquad (5.6)$$

4.5 สูตรฮาร์ทแมนสำหรับช่วงต่าง ๆ ได้คำนวณค่าคงที่ในสูตรของฮาร์ทแมนในช่วงต่าง ๆ ทั้ง 6 ผลการคำนวณสรุปได้ดังนี้

ช่วงที่ 1 (0.00 - 39.55 ซม.)

$$\lambda = 2930.988 + \frac{543753.03}{145.10908 + d} \qquad (5.7)$$

ช่วงที่ 2 (39.55 - 46.19ซม.)

$$\lambda = 491.62287 + \frac{1779552.5}{290.97628 + d} \qquad (5.8)$$

ช่วงที่ 3 (46.19 - 108.42 ซม.)

$$\lambda = 3219.9534 + \frac{401782.45}{111.3942 + d} \qquad (5.9)$$

ช่วงที่ 4 (108.42 - 118.99 ซม.)

$$\lambda = 4416.0466 + \frac{25336.952}{d - 68.315428} \qquad (5.10)$$

ช่วงที่ 5 (118.99 - 178.48 ซม.)

$$\lambda = 1969.6235 + \frac{986438.65}{215.80268 + d} \qquad (5.11)$$

ช่วงที่ 6 (143.75 - 197.18 ซม.)

$$\lambda = 1980.1345 + \frac{97937.59}{214.63113 + d} \qquad (5.12)$$

จากสมการ (5.7) ถึง (5.12) นี้ เมื่อทราบค่าระยะทาง (d) ของเส้นในหน่วยเซนติเมตร แทนค่าลงในสมการสำหรับช่วงระยะทางนั้น ๆ ก็จะได้ค่าความยาวคลื่นเป็นอังสตรอมของเส้นสเปกตรัมนั้น ๆ

4.6 เปรียบเทียบค่าจากการคำนวณและค่าที่แท้จริง จากค่าความยาวคลื่นที่ได้จากการใช้สูตรของฮาร์ทแมน ได้นำมาเปรียบเทียบกับ Photometric Atlas of the Solar Spectrum ของ M. Minnaert , G.F. W. Mulders และ J. Houtgast ซึ่งเป็นกราฟมาตรฐานแสดงลักษณะและความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมของดวงอาทิตย์

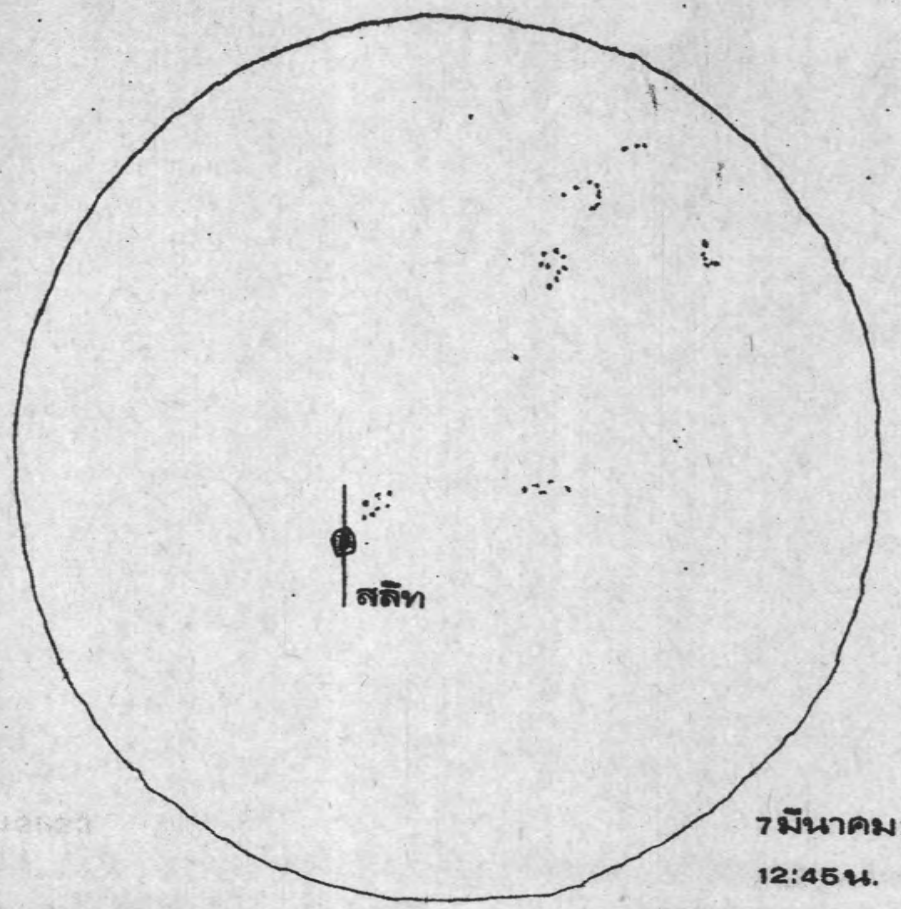
สำหรับเส้นที่ความยาวคลื่นซึ่งมีความเข้ม (intensity) สูงมากจนสังเกตได้ชัดเจน ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแสดงไว้ในตาราง 5.1

ตาราง 5.1 เปรียบเทียบความยาวคลื่นคำนวณและแท้จริง

ชื่อเส้นฟรอนฮอฟเฟอร์	ความยาวคลื่น (Å)		ผิดพลาด (Å)
	ค่าคำนวณ	ค่าแท้จริง	
H_α	6559.42	6562.81	+3.39
D_1	5894.40	5895.94	+1.54
D_2	5889.08	5889.97	+0.89
b_1	5197.68	5183.62	-14.06
b_2	5187.51	5172.70	-14.81
b_3	5182.80	5167.33	-15.47
H_β	4862.04	4861.34	-0.7

5. การถ่ายภาพสเปกตรัมของอาณาบริเวณกัมมันต์

เนื่องจากจุดบนดวงอาทิตย์เป็นอาณาบริเวณกัมมันต์ [redacted] ที่สังเกตได้ง่ายด้วยตาเปล่าเมื่อมองภาพของดวงอาทิตย์จากกล้องโทรทัศน์และจุดยังเป็นศูนย์กลางของปรากฏการณ์อื่น ๆ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นใกล้เคียงกับจุด ดังนั้นการถ่ายภาพสเปกตรัมของอาณาบริเวณกัมมันต์ในการวิจัยนี้จึงหมายถึงการถ่ายภาพสเปกตรัมของจุดโดยที่อาจได้สเปกตรัมของปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ถ่ายภาพนั้นด้วย



รูป 5.7 สเปกตรัมของจุดบนดวงอาทิตย์ ภาพบนแสดงตำแหน่งของจุดในภาพดวงอาทิตย์ และตำแหน่งของสลิทขณะถ่ายภาพสเปกตรัม

สำหรับการถ่ายสเปกตรัมของจุดนี้ได้ใช้อุปกรณ์เช่นเดียวกับการถ่ายสเปกตรัมในข้อ 1) แต่จะต้องใช้เลนส์กล้องโทรทัศน์ขนาด 8 นิ้วทางยาวโฟกัส 12 เมตร ซึ่งจะให้ภาพดวงอาทิตย์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.5 เซนติเมตร และสำหรับจุดหรือกลุ่มจุดที่มีขนาดใหญ่บางจุดจะสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 เซนติเมตร

การถ่ายภาพสเปกตรัมของจุดจะต้องจัดภาพของดวงอาทิตย์บริเวณจุดตกลงตรงกลางสลิท แล้วถ่ายโดยใช้เวลาในการถ่ายประมาณ 30 วินาที ทั้งนี้ขึ้นกับความต้องการที่จะได้ภาพบริเวณแสงสีใดในสเปกตรัม

ภาพที่ได้จะแลเห็นความแตกต่างของความเข้มของแสงบริเวณจุดและบริเวณนอกจุดอย่างชัดเจน ดังนั้นเพื่อให้ได้สเปกตรัมของจุดที่มีคุณภาพดี เพื่อการสแกนในเครื่องไมโครเดนซิโตมิเตอร์ จึงจะต้องยอมให้สเปกตรัมของบริเวณนอกจุดอยู่ในสภาพได้รับแสงเกินพอ (over exposure) หรือเกือบเกินพอ

การวิเคราะห์สเปกตรัมของจุดทำโดยนำไปสแกนด้วยเครื่องไมโครเดนซิโตมิเตอร์ และนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของบริเวณสงบ