บทที่ 6

เส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ของดวงอาทิตย์

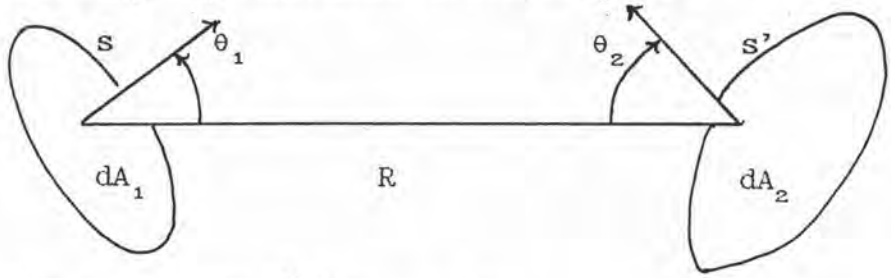
จากบทที่ 5 ได้กล่าวถึงรายละเอียดของโครงงานในด้านการออกแบบสร้างและการเทียบมาตรฐานสเปกโทรกราฟที่ได้สร้างขึ้น เพื่อทดสอบคุณภาพของสเปกโทรกราฟในการใช้งานจริง ในโครงงานนี้ได้เลือกที่จะศึกษาเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟรานโฮเฟอร์ของแคลเซียมไอออน(CaII)ที่ 3933.68 อังสตรอมหรือเส้น K (K line)เพื่อหารูปลักษณ์ของเส้นเท่าที่ขอบเขตของเครื่องมือจะอำนวย

เนื่องจากในบทนี้มีเนื้อความจำนวนมากที่กล่าวถึงปริมาณเฉพาะอันหนึ่ง เรียกว่าความเข้มจำเพาะ(specific intensity) ซึ่งมีความหมายแตกต่างจากคำว่าความเข้มที่ได้กล่าวถึงในบทอื่นข้างต้น จึงขอนิยามปริมาณที่เรียกว่า ความเข้มจำเพาะ ดังนี้

ความเข้มจำเพาะของแสงที่ตำแหน่ง r ในทิศทาง n ที่เวลา t ใดๆ หมายถึงปริมาณพลังงานของแสงต่อหน่วยความถี่ ที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแสงไปในมุมตันหนึ่งหน่วยในหนึ่งหน่วยเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่า ถ้าเส้นตั้งฉาก s ของพื้นที่ใดๆ dA ทำมุมกับแนวทิศของแสงเป็น θ ปริมาณพลังงานที่ผ่านพื้นที่ dA จะเป็น

$$dE = I(\nu,\mathbf{r},\mathbf{n},t)dA\cos\theta d\nu d\omega dt \qquad (6\text{-}1)$$

สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของความเข้มจำเพาะคือ ความไม่เปลี่ยนแปลงของความเข้มจำเพาะ คือถ้ามีตัวกลางที่ไม่ดูดกลืนและไม่เปล่งแสง แสงที่ผ่านพื้นที่ dA_1 ไปในทิศหนึ่งแล้วผ่านพื้นที่ dA_2 ที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะทาง R ดังรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 แสดงรูปของพื้นที่ dA_1 และ dA_2

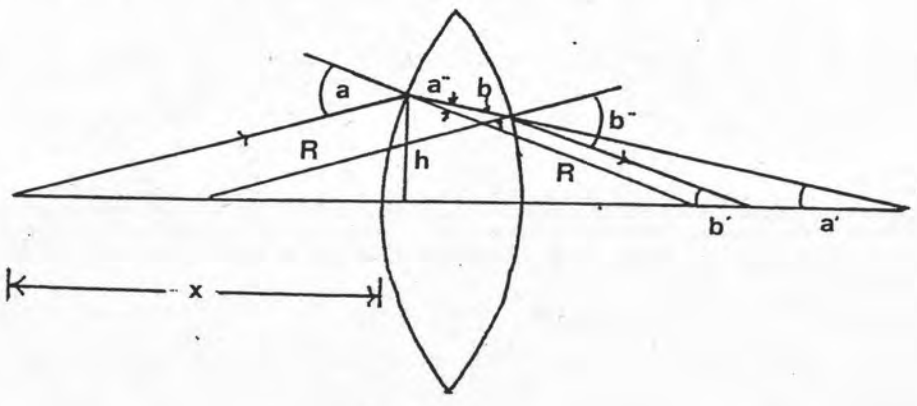
เนื่องจากตัวกลางที่แสงผ่านเป็นตัวกลางที่ไม่ดูดกลืนและไม่เปล่งแสง ดังนั้น พลังงานที่ผ่านพื้นที่ dA_1 และ dA_2 ต้องเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (6-1) ร่วมกับความสัมพันธ์ของมุมตันกับพื้นที่รองรับมุม ค่า $d\omega_1 = dA_2\cos\theta_2/R^2$ ทำนองเดียวกัน ค่า $d\omega_2 = dA_1\cos\theta_1/R^2$ ดังนั้น จาก $dE_1 = dE_2$ และสมการ(6-1) แทนค่าสมการทั้งสองข้างต้น จะได้ข้อสรุปที่ว่า

$$I_1(\nu,r_1,n_1,t) = I_2(\nu,r_2,n_2,t) \qquad (6\text{-}2)$$

สำหรับบทนี้จะได้กล่าวถึง การดูดกลืนความเข้มจำเพาะของแสงจากการสะท้อนและหักเหที่ผิวของเลนส์บาง การพิจารณาหาความสัมพันธ์ของความเข้มจำเพาะของแสงที่ผิวดวงอาทิตย์กับการให้แสงที่ระนาบฟิล์ม การสังเกตการณ์เพื่อเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์หาลักษณะของเส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ของแคลเซียมไอออนที่ 3933.68 อังสตรอมเท่าที่ขอบเขตของเครื่องสเปกโทรกราฟจะอำนวย

<u>การดูดกลืนความเข้มจำเพาะของแสงจากการสะท้อนและหักเหที่ผิวของเลนส์บาง</u>

พิจารณาเลนส์ที่มีรัศมีความโค้งที่ผิวทั้งสองเท่ากันเป็น R มีความยาวโฟกัส f มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D ตัวเลนส์สร้างจากวัสดุที่มีดัชนีหักเห n' แสงจากวัตถุที่อยู่ห่างจากหน้าเลนส์เป็นระยะ x ตกลงบนผิวหน้าของเลนส์ส่วนที่อยู่ห่างจากแกนมุขสำคัญของเลนส์เป็นระยะ h ทำมุมกับเส้นตั้งฉากของผิวเลนส์ส่วนนั้น a ดังภาพที่ 6-2



รูปที่ 6-2 แสดงแนวทางเดินของแสงที่เข้าและออกจากเลนส์บาง

ตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าพิจารณาการสะท้อนและหักเหที่รอยต่อผิวของตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน n และ n' โดยตกกระทบทำมุม i กับเส้นตั้งฉากของรอยต่อ และหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่สองด้วยมุมหักเห r จะสามารถหาสัดส่วนของพลังงานที่ผ่านเข้าสู่

ตัวกลางที่สองได้ด้วยสัมประสิทธิ์การให้แสงผ่าน(transmission coefficient) ที่จะมีความสัมพันธ์กับมุมทั้งสองดังนี้[12]

$$T(n,n',i,r) = 4(n/n')[(n\cos r/n'\cos i) + 1]^{-2} \qquad (6\text{-}3)$$

$$n\sin i = n'\sin r \qquad (6\text{-}4)$$

พิจารณาการหักเหที่ผิวแรกของเลนส์ ค่าสัมประสิทธิ์การให้แสงผ่านที่ผิวนี้เป็น

$$T(n,n',a,a'') = 4(n/n')[(n\cos a''/n'\cos a) + 1]^{-2} \qquad (6\text{-}5)$$

เมื่อ n เป็นดัชนีหักเหของอากาศ ความเข้มจำเพาะของแสงที่ตกกระทบเลนส์ทำมุม a จะถูกสมบัติการหักเหแสงเปลี่ยนทิศให้ผ่านมาในทิศทำมุม a' และลดขนาดลงตามสัดส่วนในสมการ(6-5) แล้วผ่านต่อไปในตัวกลางที่เป็นเนื้อวัสดุ ถ้าให้ $B(\nu)$ เป็นสัดส่วนของการให้แสงผ่านของเนื้อวัสดุ ความเข้มจำเพาะของแสงที่ผ่านไปถึงผิวที่สองของเลนส์โดยที่มีมุมตกกระทบเป็น b กับแนวเส้นตั้งฉากของผิวมีความสัมพันธ์กับความเข้มจำเพาะที่เข้าสู่ผิวแรกของเลนส์ ดังสมการ

$$I_1(\nu,b) = T_1(n,n',a,a'')B(\nu)I_o(\nu,a) \qquad (6\text{-}6)$$

เมื่อ $I_o(\nu,a)$ เป็นความเข้มจำเพาะของแสงที่ตกลงบนผิวแรกของเลนส์

และ $I_1(\nu,b)$ เป็นความเข้มจำเพาะของแสงที่มาถึงผิวที่สองของเลนส์

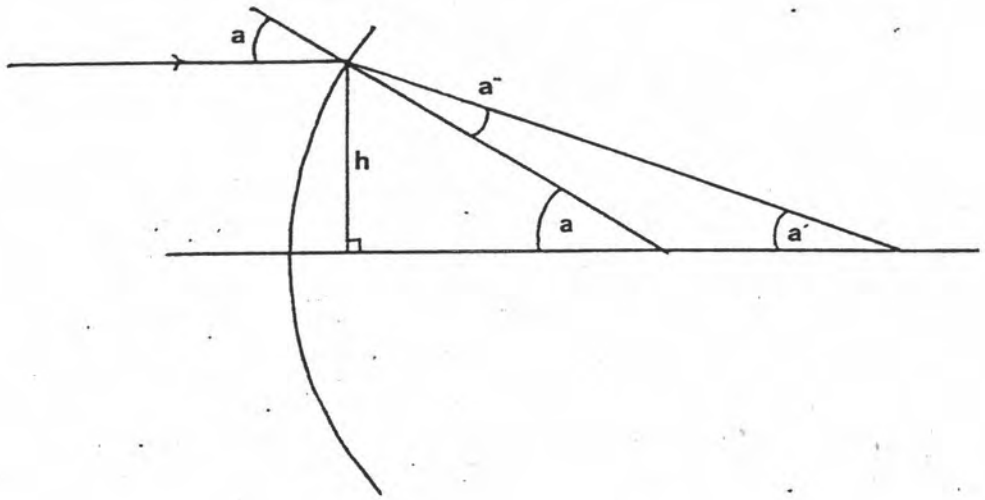
จากสมการ(6-3)และ(6-4) ถ้า b'' เป็นมุมหักเหของแสงที่ออกจากผิวที่สองของเลนส์ เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การให้แสงผ่านที่ผิวที่สองของเลนส์ได้ดังนี้

$$T_2(n',n,b,b'') = 4(n'/n)[(n'\cos b''/n\cos b) + 1]^{-2} \qquad (6\text{-}7)$$

ดังนั้นแสงที่ออกจากเลนส์จะมีความเข้มจำเพาะ $I(\nu,b'')$ และถ้าพิจารณาสมบัติความไม่เปลี่ยนแปลงของความเข้มจำเพาะแล้ว เราถือว่าความเข้มจำเพาะของแสงที่ไปปรากฏเป็นภาพที่ระยะภาพ ทำมุม b' กับแกนมุขสำคัญของเลนส์จะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มจำเพาะของแสงที่ออกจากเลนส์ ดังนั้นถ้าพิจารณาสมการ(6-6)และ(6-7)จะได้ว่าความเข้มจำเพาะของแสงที่ออกจากเลนส์เป็น

$$I(\nu,b'') = T_1(n,n',a,a'')T_2(n',n,b,b'')B(\nu)I_o(\nu,a) \qquad (6\text{-}8)$$

ในกรณีเฉพาะเช่น แสงตกกระทบเป็นแสงขนานที่เข้าสู่เลนส์ตามแกนมุขสำคัญของเลนส์เราพิจารณาการหักเหที่ผิวแรกของเลนส์ดังรูปที่ 6-3



รูปที่ 6-3 แสดงการหักเหที่ผิวแรกของเลนส์เมื่อแสงเข้าเป็นแสงขนานและอยู่ในแนวเดียวกับแกนมุขสำคัญของเลนส์

เลนส์ต่างๆที่ใช้ในโครงงานจะเป็นเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสมากเมื่อนำมาเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์หรือความหนาของเลนส์ นั้นคือจะถือได้ว่าเป็นเลนส์บางที่มีความยาวโฟกัสมาก และให้มีรัศมีความโค้งของผิวทั้งสองเท่ากัน

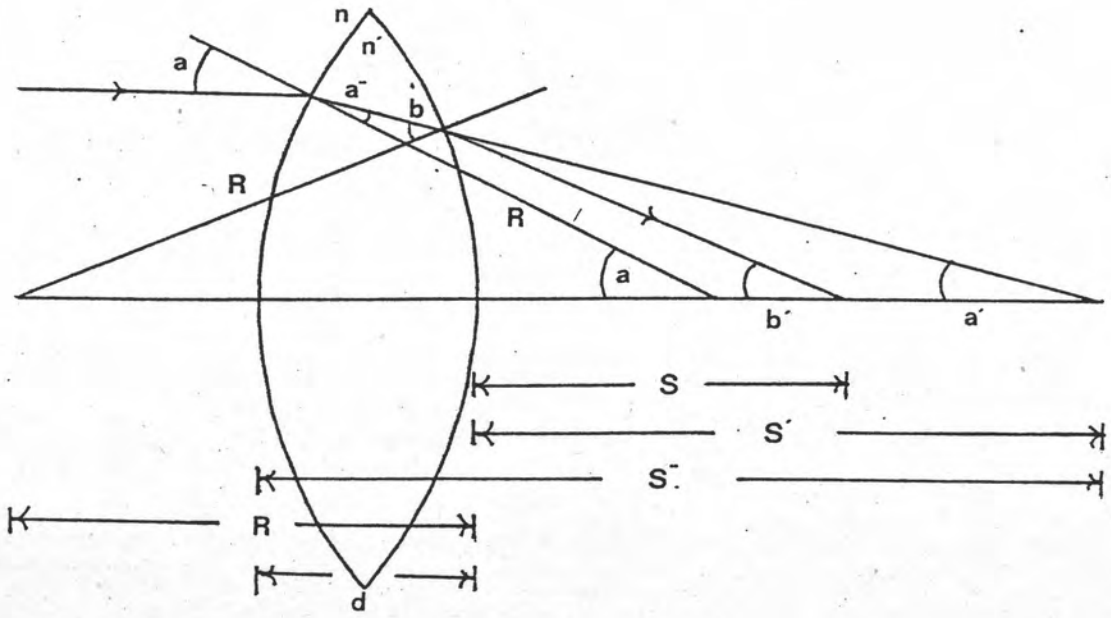
จากรูปที่ 6-3 ค่า sina = h/R

ในโครงงานนี้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสที่สั้นที่สุดคือ เลนส์ความยาวโฟกัส 600 มิลลิเมตร f:4 ถ้าพิจารณาค่า sina ที่มากที่สุด คือแสงตกกระทบที่ขอบเลนส์พอดีหรือ h = D/2 ค่า sina จะประมาณ D/2f (เลนส์บางที่มีรัศมีความโค้งสองผิวเท่าๆกันจะประมาณได้ว่ารัศมีความโค้งกับความยาวโฟกัสใกล้เคียงกัน) คือประมาณ 1/8 ที่เมื่อหาค่ามุม a จะมีค่าประมาณ 7.18 องศา และมีค่า cosa = 0.992

จากสมการที่(6-4)และค่ามุม a จะสามารถหาค่ามุม a" ได้ว่ามีค่าประมาณ 4.72 องศา สมมุติให้ดัชนีหักเหของแก้วที่ใช้ทำเลนส์เป็น 1.52 และดัชนีหักเหของอากาศเป็น 1 พบว่าค่า cosa"มีค่า0.997 และอัตราส่วนระหว่าง cosa" และ cosa จะมีค่าประมาณ 1.01 ได้ค่า $T_1(n,n',a,a")$ เป็น 0.952 เมื่อเทียบค่านี้กับกรณีที่แสงเข้าสู่เลนส์ในแนวตั้งฉากกับผิวที่มีค่า $T_1(n,n',0,0)$ เท่ากับ 0.960 จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้กัน โดยสรุปอาจกล่าวได้ว่าในกรณีที่เป็นเลนส์บางที่มีความยาวโฟกัสมาก และแสงที่เข้าสู่เลนส์

เป็นแสงขนานในแนวแกนมุขสำคัญ การสะท้อนที่ผิวแรกของเลนส์มีผลไม่ต่างจากการที่แสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวมากนัก นั่นคืออาจประมาณได้ว่าค่า $T_1(n,n',a,a")$ คงที่ขึ้นแต่เฉพาะกับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองเท่านั้น

พิจารณารูปที่ 6-4



รูปที่ 6-4 แสดงการหักเหที่ผิวที่สองของเลนส์มาเกิดภาพ

จากรูปที่ 6-4 เราสามารถหาความสัมพันธ์ต่อไปนี้ได้[10]

$a' = a - a"$

$s" = R(1 + \sin a"/\sin a')$

$s' = s" - d$

$\sin b = (R + s')\sin a'/R$

$\sin b" = (n/n')\sin b$

$b' = b" + a' - a$

จากสมการเหล่านี้ร่วมกับค่าประมาณของ a และ a" ข้างต้น และข้อสมมุติว่าเลนส์เป็นเลนส์บาง จะพบว่า มุม b" ประมาณ 14 องศา และมุม b ประมาณ 9 องศา ค่า $\cos b"/\cos b$ ประมาณ 0.98 ดังนั้นเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น เมื่อเลนส์เป็นเลนส์บางที่มีความยาวโฟกัสมาก ค่า $T_2(n',n,b,b")$ มีค่าเกือบคงที่ที่ตำแหน่งต่างๆ

ของเลนส์ โดยสรุป อาจกล่าวได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การให้แสงผ่าน ของเลนส์บาง ที่มีค่าความยาวโฟกัสมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเลนส์มาก(f:ratio สูง) จะประมาณว่าคงที่ทั้งสองผิวและสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้สร้างเลนส์และตัวกลางที่เลนส์วางอยู่เท่านั้น ดังนั้นค่าความเข้มจำเพาะของแสงที่ผ่าเลนส์ออกมา $I(\nu)$ จะสัมพันธ์กับความเข้มจำเพาะของแสงตกกระทบ $I_o(\nu)$ ดังนี้

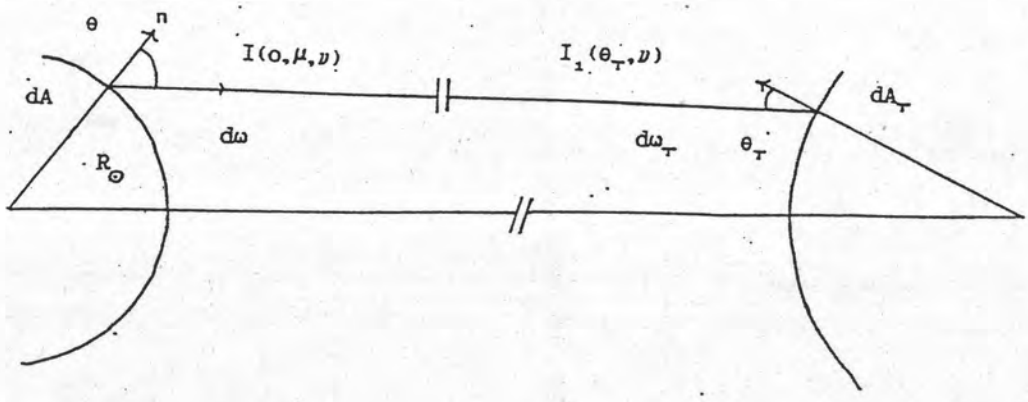
$$I(\nu) = K(n,n')B(\nu)I_o(\nu) \qquad (6\text{-}9)$$

$$K(n,n') = T_1(n,n')T_2(n',n)$$

ค่า $K(n,n')$ เป็นความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่เฉพาะกับดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองเท่านั้น

<u>ความสัมพันธ์ระหว่างการให้แสงแก่ฟิล์ม(exposure)และความเข้มจำเพาะที่ผิวดวงอาทิตย์</u>

ในการใช้งานสเปกโทรกราฟเพื่อบันทึกภาพสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ แสงที่ออกจากผิวดวงอาทิตย์ต้องเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ เลนส์ และอุปกรณ์ต่างๆจำนวนมากชิ้นก่อนจะตกลงบนแผ่นฟิล์ม ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างการให้แสงแก่ฟิล์มและความเข้มจำเพาะของแสงที่ผิวดวงอาทิตย์ ดังจะได้พิจารณาดังต่อไปนี้



รูปที่ 6-5 แสดงความเข้มจำเพาะของแสงที่ออกจากดวงอาทิตย์ และความเข้มจำเพาะของแสงที่เข้าสู่กล้องโทรทรรศน์

พิจารณารูปที่ 6-5 ให้แสงที่ออกจากพื้นที่ dA บนดวงอาทิตย์ในทิศ $d\omega$ ทำมุมกับแนวตั้งฉากของผิวเป็น θ ในช่วงความถี่ ν ถึง $\nu + d\nu$ ในช่วงเวลา dt ใดๆ มีค่าความเข้มจำเพาะ $I(0,\mu,\nu)$ เมื่อ μ คือ $\cos\theta$ แสงนี้มาถึงหน้ากล้องโทรทรรศน์ตกลงบนเลนส์ที่พื้นที่ dA_r เล็กๆในทิศ $d\omega_r$ ทำมุมกับแนวตั้งฉากของผิวหน้าเลนส์เป็น θ_r ที่ช่วงความถี่เดียวกัน โดยมีความเข้มจำเพาะที่เข้าสู่เลนส์เป็น $I_1(\theta_r,\nu)$ พิจารณาพลังงานที่ออกจากพื้นที่ dA มาในทิศทางที่จะเข้าสู่พื้นที่ dA_r จะมีสมการของพลังงานดังนี้

$$dE_o = I(0,\mu,\nu)dA\cos\theta d\omega d\nu dt \qquad (6\text{-}10)$$

และพลังงานที่เข้าสู่เลนส์กล้องโทรทรรศน์ dE_1 ดังนี้

$$dE_1 = I_1(\theta_1,\nu)dA_1\cos\theta_1 d\omega_1 d\nu dt \qquad (6\text{-}11)$$

เนื่องจากแสงที่ออกจากผิวดวงอาทิตย์ต้องเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก ดังนั้นสมมุติให้บรรยากาศของโลกดูดกลืนพลังงานแสงไปบางส่วน เหลือพลังงานที่มาถึงเลนส์เป็นสัดส่วน $B_{at}(\nu)$ ของพลังงานที่ออกจากผิวดวงอาทิตย์ ดังนี้

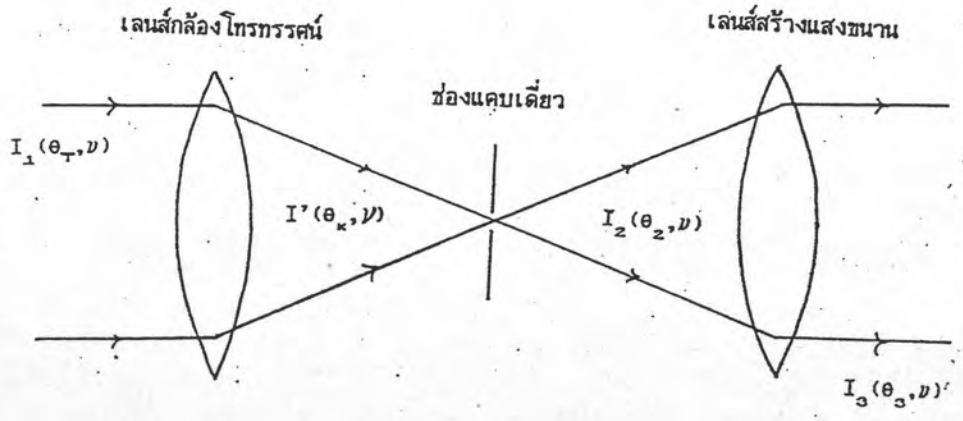
$$dE_1 = B_{at}(\nu)dE_o$$

แทนค่าด้วยสมการ (6-10) และ (6-11) และเนื่องจากความสัมพันธ์ของมุมตันกับพื้นที่รองรับ ที่ว่า $d\omega_1 = dA\cos\theta/R^2$ และ $d\omega = dA_1\cos\theta_1/R^2$ เมื่อ R เป็นระยะระหว่างพื้นที่ทั้งสอง ดังนั้นเมื่อทอนส่วนที่ซ้ำซ้อนกันออกไปสมการข้างต้นจะลดรูปเหลือ

$$I_1(\theta_1,\nu) = B_{at}(\nu)I(0,\mu,\nu) \qquad (6\text{-}12)$$

เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นวัตถุที่อยู่ไกลจากกล้องโทรทรรศน์มาก ดังนั้นถือว่าแสงที่เข้าสู่เลนส์หน้ากล้องโทรทรรศน์เป็นแสงขนาน แต่เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นวัตถุที่มีขนาดบนท้องฟ้า ถ้าจัดให้แกนมุขสำคัญของกล้องโทรทรรศน์ชี้สู่กลางดวงของดวงอาทิตย์ แสงจากตำแหน่งต่างๆของดวงจะเข้าสู่เลนส์โดยทำมุมกับแกนมุขสำคัญของเลนส์ มุมนี้จะมีค่าไม่เกินมุมรองรับเส้นผ่าศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ที่มีค่าประมาณครึ่งองศา ในกรณีนี้ได้จัดชุดสเปกโทรกราฟโดยใช้กระจกราบสะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่เลนส์ตามแนวแกนมุขสำคัญของเลนส์และถือว่ากระจกราบมีหน้าที่เพียงเบี่ยงเบนทางเดินของแสงไม่มีผลในทางดูดกลืนพลังงานของแสงอาทิตย์ ดังนั้นในทางปฏิบัติถือว่าแสงจากผิวดวงอาทิตย์เข้าสู่เลนส์หน้าของกล้องโทรทรรศน์ในแนวแกนมุขสำคัญของเลนส์

จากเนื้อหาในหัวข้อแรกได้แสดงไว้แล้วว่าในกรณีที่แสงขนานเข้าสู่เลนส์บางที่มีความยาวโฟกัสมากตามแนวแกนมุขสำคัญของเลนส์ ความเข้มจำเพาะที่ออกจากเลนส์จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มจำเพาะที่เข้าสู่เลนส์ตามสมการที่(6-9) โดยที่ความสัมพันธ์จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสองและการดูดกลืนพลังงานของวัสดุที่ใช้สร้างเลนส์ ถ้าความเข้มจำเพาะที่ออกจากเลนส์กล้องโทรทรรศน์ $I'(\theta_\kappa,\nu)$ ในทิศที่ทำมุมกับเส้นตั้งฉากของพื้นที่ dA' ในมุม θ_κ ไปสู่ช่องแคบเดี่ยวดังรูปที่ 6-6



รูปที่ 6-6 แสดงแนวทางเดินของแสงจากกล้องโทรทรรศน์จนกระทั่งออกจากเลนส์สร้างแสงขนาน

เนื่องจากเลนส์กล้องโทรทรรศน์มีความยาวโฟกัสถึง 12 เมตร f:60 และความหนาของเลนส์น้อยกว่าความยาวโฟกัสมาก จากสมการที่(6-9)และ(6-12) จะได้ว่า

$$I'(\theta_\kappa,\nu) = K_1(n,n')B_1(\nu)B_{at}(\nu)I(0,\mu,\nu)$$

จากสมบัติความไม่เปลี่ยนแปลงของความเข้มจำเพาะ(invariance of specific intensity) และถือว่าระยะระหว่างทัศนูปกรณ์ต่างๆสั้นมากดังนั้นอากาศที่อยู่ระหว่างทัศนูปกรณ์หนึ่งๆไม่มีผลต่อการดูดกลืนพลังงานแสงเช่นในกรณีของบรรยากาศที่หนามาก ดังนั้นถ้าพิจารณาความเข้มจำเพาะของแสงที่เข้าสู่พื้นที่ dA_3 บนช่องแคบเดี่ยว และผ่านช่องแคบเดี่ยวออกมาในอีกด้านหนึ่ง $I_2(\theta_2,\nu)$ ในทิศทางทำมุม θ_2 กับเส้นตั้งฉาก

ของพื้นที่ของช่องแคบเดี่ยว ค่าความเข้มจำเพาะที่ออกจากเลนส์หน้าของกล้องโทรทรรศน์จะเท่ากับความเข้มจำเพาะที่เข้าสู่ช่องแคบเดี่ยว ดังนั้น

$$I_2(\theta_2,\nu) = K_1(n,n')B_1(\nu)B_{at}(\nu)I(0,\mu,\nu) \qquad (6\text{-}13)$$

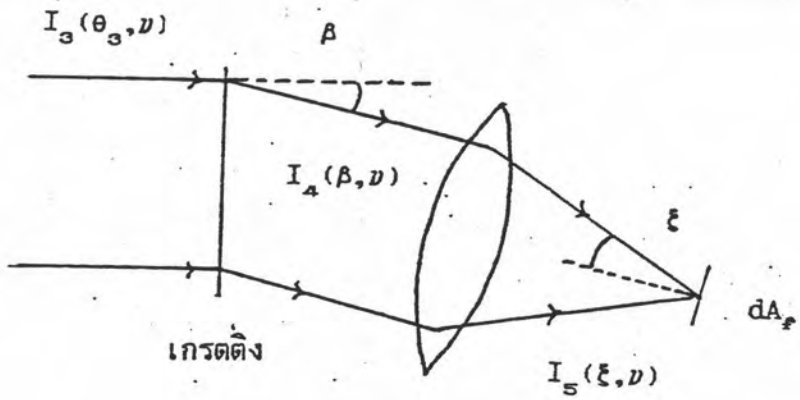
ทำนองเดียวกันแสงที่ผ่านเข้าเลนส์สร้างแสงขนาน(collimator lens)ก็จะมีความเข้มจำเพาะที่มีค่าเท่ากับ $I_2(\theta_2,\nu)$ เช่นกัน และเนื่องจากช่องแคบเดี่ยวถูกจัดอยู่ที่ระยะโฟกัสของเลนส์สร้างแสงขนาน ดังนั้นแนวทางเดินของแสงจึงจะเป็นในแนวกลับกับกรณีที่แสดงไว้ในหัวข้อแรก ในชุดสเปกโทรกราฟเลนส์สร้างแสงขนานที่ใช้มีความยาวโฟกัส 1200 มิลลิเมตร f:15 ดังนั้นถ้าพิจารณาในนัยกลับอาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วนของค่าความเข้มจำเพาะของแสงในสมการที่(6-9) ยังคงใช้ได้ดังนั้นแสงที่ออกจากพื้นที่ dA_3 ที่อีกด้านหนึ่งของเลนส์สร้างแสงขนาน ในทิศ $d\omega_3$ ทำมุม θ_3 กับเส้นตั้งฉากของผิวจะมีความเข้มจำเพาะเป็น

$$I_3(\theta_3,\nu) = K_{col}(n,n')B_{col}(\nu)I_2(\theta_2,\nu) \qquad (6\text{-}14)$$

ทั้งนี้ถือว่าวัสดุที่ใช้สร้างเลนส์สร้างแสงขนานมีดัชนีหักเหเช่นเดียวกับวัสดุที่ใช้สร้างเลนส์กล้องโทรทรรศน์

หลังจากแสงเดินทางผ่านเลนส์สร้างแสงขนานแล้ว จะผ่านเข้าส่วนกระจายแสง ในที่นี้ได้แก่เกรตติงแสงผ่าน โดยจัดให้แสงตกกระทบในแนวตั้งฉากกับผิวของเกรตติงแล้วจึงผ่านเข้าสู่เลนส์สร้างภาพ ในการนี้ถือว่าเกรตติงทำหน้าที่แต่เพียงเบี่ยงแนวทางเดินของแสงไปเป็นมุม β ตามสมการเกรตติง ในที่นี้เลือกใช้สเปกตรัมอันดับที่ 1 และสมมุติว่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการสะท้อนและดูดกลืนของวัสดุที่ใช้สร้างเกรตติงเป็น $B_{gra}(\nu)$ ถ้าพิจารณาเส้นทางเดินของแสงตามรูปที่ 6-7 ความเข้มจำเพาะของแสงที่เข้าสู่เกรตติงจะเท่ากับความเข้มจำเพาะของแสงที่ออกจากเลนส์สร้างแสงขนาน $I_3(\theta_3,\nu)$ และค่าความเข้มจำเพาะที่ออกจากเกรตติงในทิศทำมุม β กับเส้นแนวฉากกับผิวหน้าของเกรตติง $I_4(\beta,\nu)$ จะเป็น

$$I_4(\beta,\nu) = B_{gra}(\nu)I_3(\theta_3,\nu) \qquad (6\text{-}15)$$



รูปที่ 6-7 แสดงแนวทางเดินของแสงตั้งแต่เกรตติงจนกระทั่งถึงฟิล์ม

ในการจัดอุปกรณ์ได้จัดเลนส์สร้างภาพให้อยู่บนแท่นหมุนได้ โดยที่จุดหมุนอยู่ใต้หน้าเกรตติง ดังนั้นเราอาจจัดให้แสงในความยาวคลื่นที่ต้องการเข้าสู่เลนส์สร้างภาพในแนวเดียวกับแกนมุขสำคัญของเลนส์ได้หรืออย่างน้อยก็ในแนวที่ใกล้เคียงที่สุด เลนส์สร้างภาพที่ใช้ในที่นี้เป็นเลนส์หน้าของกล้องถ่ายรูปที่มีความยาวโฟกัส 600 มิลลิเมตร f:4 จากการพิจารณาในหัวข้อแรกได้แสดงให้เห็นว่า เลนส์นี้มีความยาวโฟกัสเพียงพอที่จะใช้สมการที่(6-9) และจากหลักการไม่เปลี่ยนแปลงของความเข้มจำเพาะ เช่นเดียวกับที่เคยแสดงมาแล้ว แสงที่ตกกระทบฟิล์มพื้นที่ dA_f ในทิศ $d\omega_f$ ที่ทำมุม ξ กับแนวตั้งฉากของฟิล์ม โดยอาศัยสมการที่(6-9) ได้

$$I_5(\xi,\nu) = K_{cam}(n,n')B_{cam}(\nu)I_4(\beta,\nu) \qquad (6\text{-}16)$$

ถ้าพิจารณาเป็นลำดับมาจนถึงสมการที่(6-16) ความเข้มจำเพาะของแสงที่มาถึงฟิล์มเมื่อเทียบกับความเข้มจำเพาะของแสงที่ออกจากผิวดวงอาทิตย์จะขึ้นกับสัมประสิทธิ์ที่สามารถจัดได้เป็นสองส่วน คือสัมประสิทธิ์ของการให้แสงผ่านที่เป็นผลมาจากการสะท้อนที่ผิวของตัวกลางต่างๆ และสัมประสิทธิ์ที่เป็นผลมาจากการดูดกลืนของวัสดุที่ใช้สร้างชิ้นส่วนต่างๆและบรรยากาศ ดังนั้นอาจจะรวบผลทั้งสองประการจากส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน เป็น

$$K(n,n') = K_1(n,n')K_{col}(n,n')K_{cam}(n,n')$$

$$B(\nu) = B_{at}(\nu)B_1(\nu)B_{col}(\nu)B_{gra}(\nu)B_{cam}(\nu)$$

โดยสรุปเราจะได้

$$I_s(\xi,\nu) = K(n,n')B(\nu)I(0,\mu,\nu) \qquad (6\text{-}17)$$

การให้แสงแก่ฟิล์ม(exposure) หมายถึงปริมาณพลังงานของแสงที่ตกลงบนฟิล์มต่อหน่วยพื้นที่ เมื่อเปิดหน้ากล้องนาน t วินาที ถ้าพิจารณาแสงที่ตกลงบนฟิล์มพื้นที่ dA_+ ในทิศทำมุม ξ กับเส้นตั้งฉากของระนาบฟิล์ม การให้แสงที่ความถี่ ν เป็น

$$E(\nu) = \int_0^t \int I_s(\xi,\nu)\cos\xi \, d\omega_+ dt \qquad (6\text{-}18)$$

ทั้งนี้ มุมตันที่พิจารณาคือมุมตันทั้งหมดที่แสงเข้ามาสู่ฟิล์ม ในกรณีที่เกรตติงมีขนาดใหญ่กว่าเลนส์สร้างภาพ และแสงที่เข้าสู่เลนส์สร้างภาพมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเลนส์ มุมตันที่รองรับนี้จะมีขนาดเป็นขนาดของเลนส์สร้างภาพ ในกรณีที่เกรตติงเล็กกว่าเลนส์สร้างภาพหรือแสงที่ออกจากเกรตติงมีขนาดเล็กกว่าขนาดของเลนส์สร้างภาพ มุมตันนี้จะเป็นมุมตันที่รองรับด้วยพื้นที่ทั้งหมดของเลนส์ที่ได้รับแสง ทั้งนี้จะพิจารณาในลักษณะที่ง่ายต่อการพิจารณาก่อน คือในกรณีที่เลนส์สร้างภาพได้รับแสงเต็มพื้นที่ และอาศัยข้อสมมุติบางประการดังนี้

(ก) ให้ความเข้มจำเพาะที่เข้าสู่ฟิล์มเปลี่ยนช้ามากเมื่อเทียบกับเวลา t สั้นๆ (ปรกติ เวลาที่เปิดหน้ากล้อง t จะน้อยกว่า 1 วินาที)

(ข) ในช่วงความถี่ที่พิจารณาช่วงหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ(โดยเฉพาะ$B(\nu)$) มีค่าคงที่

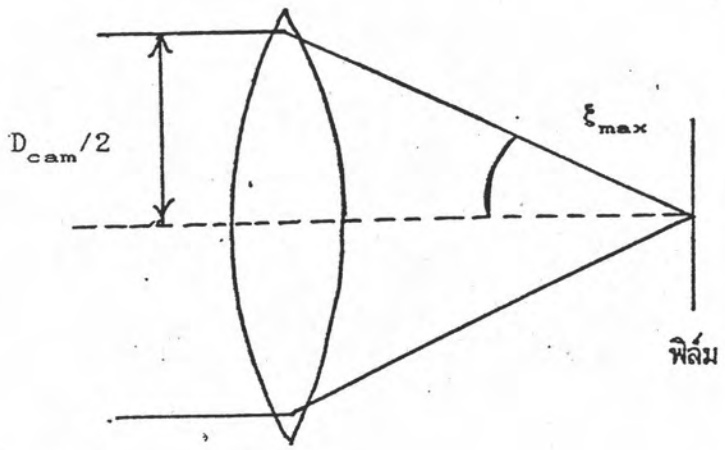
(ค) ความเข้มจำเพาะของแสงที่ตกลงสู่ฟิล์มในทิศทางต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากันดังนั้นสามารถลดรูป$I_s(\xi,\nu)$ เหลือเพียง $I_s(\nu)$

ดังนั้นถ้าพิจารณามุมตัน $d\omega_+$ ในพิกัดทรงกลม(spherical coordinate) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$d\omega_+ = \sin\xi \, d\xi d\phi \qquad (6\text{-}19)$$

เมื่อมุม ϕ เป็นมุมตามแนวระนาบของแผ่นฟิล์ม และ ξ คือมุมที่มุมตันกระทำกับแนวเส้นตั้งฉากของระนาบฟิล์ม มุม ξ จะมากที่สุดเมื่อแสงมาจากขอบของเลนส์ ดังในรูปที่(6-8) โดยที่ในกรณีที่แสงเข้าเป็นแสงขนาน ระยะภาพจะเท่ากับความยาวโฟกัสของเลนส์ ดังนั้นค่า x อาจกล่าวได้ว่าคือรัศมีความโค้งของเลนส์สร้างภาพ R_{cam} และเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์สร้างภาพเป็น D_{cam} ค่ามุม ξ ที่มากที่สุดจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sin\xi_{max} = D_{cam}/2R_{cam} \qquad (6\text{-}20)$$



รูปที่ 6-8 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม ξ ที่มากที่สุดและเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์สร้างภาพ D_{cam}

จากข้อสมมุติ (ก),(ข) และ(ค) เราสามารถหาการให้แสงที่ความถี่ ν ได้ดังนี้

$$E(\nu) = t\kappa(n,n')B(\nu)I(0,\mu,\nu)\pi[D_{cam}/2R_{cam}]^2 \qquad (6\text{-}21)$$

ถ้าพิจารณาตัวคูณตัวสุดท้ายจะเห็นได้ว่าคืออัตราส่วนของพื้นที่ของเลนส์สร้างภาพต่อรัศมีความโค้งของเลนส์สร้างภาพกำลังสอง(หรืออาจกล่าวว่าคือความยาวโฟกัสก็ได้ในกรณีที่เป็นเลนส์บางที่มีรัศมีความโค้งเท่ากัน) ในกรณีที่แสงตกลงบนเลนส์สร้างภาพไม่เต็มหน้าเลนส์ ถ้า A เป็นพื้นที่รับแสงของเลนส์สร้างภาพเราอาจกล่าวได้ว่าตัวคูณตัวสุดท้ายอาจเปลี่ยนได้เป็น A/R_{cam}^2 ดังนั้นถ้าพิจารณาแสงสองความถี่ ν_1 และ ν_2 ที่อยู่ในช่วงความถี่ตามข้อสมมุติข้อ(ข)ที่ไม่ห่างจากกันมากเราอาจหาอัตราส่วนของการให้แสงทั้งสองความถี่ได้ดังนี้

$$E(\nu_1)/E(\nu_2) = I(0,\mu,\nu_1)/I(0,\mu,\nu_2) \qquad (6\text{-}22)$$

การสังเกตการณ์เพื่อเก็บข้อมูลสเปกตรัมของแสงอาทิตย์และวิเคราะห์ในชั้นต้น

เพื่อเป็นการทดสอบใช้งานสเปกโทรกราฟสำหรับศึกษาดวงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นและได้ทำการเทียบมาตรฐานแล้วดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 5 จึงได้ทำการสังเกตการณ์และถ่ายภาพสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ด้วยสเปกโทรกราฟที่สร้างขึ้น แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ในชั้นต้น ในที่นี้ได้เลือกที่จะศึกษาเส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์ของแสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอมหรือ เส้นเค(K-line)ของแคลเซียมไอออน(CaII) ดังรายละเอียดการสังเกตการณ์ดังนี้

(1) ห้วงเวลาสังเกตการณ์และการเทียบมาตรฐานมาตรความทึบแสง

การสังเกตการณ์และบันทึกภาพได้กระทำในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน พ.ศ.2532 โดยทำการถ่ายภาพสเปกตรัมและอ่านค่าความทึบแสงของฟิล์มที่บันทึกภาพสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 3900 อังสตรอม ถึงประมาณ 4150 อังสตรอมที่ครอบคลุมเส้นสเปกตรัมดูดกลืนเฟราน์โฮเฟอร์ที่เห็นได้ชัดทั้งหมด 8 เส้น คือ เส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์ของธาตุเหล็กที่ 4045.83 , 4063.61 , 4071.75, 4132.07 และ 4143.88 อังสตรอม เส้นสเปกตรัมของแคลเซียมไอออนที่ 3933.68 และ 3968.49 อังสตรอม และเส้นสเปกตรัมของธาตุไฮโดรเจนที่ 4101.75 อังสตรอม (เส้น Hδ)

จากการสังเกตฟิล์มที่ได้ ฟิล์มข้อมูลชุดที่ดีที่สุดคือฟิล์มข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตการณ์ในวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ใช้ฟิล์มโกดัก ทีแมกซ์-100 1 ม้วนล้างด้วยสารทำให้เกิดภาพD-76 นาน 9 นาที แช่ในตัวตรึง F-5 นาน 15 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ฟิล์มข้อมูลสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ใช้ภาพที่ใช้เวลาเปิดหน้ากล้องนาน 1/30 วินาที ในฟิล์มรูปที่ 3 4 และ 10 จากทั้งหมด 36 รูป ฟิล์มที่ถ่ายภาพสเปกตรัมผ่านแผ่นบันไดทอนแสงเพื่อทำการเทียบมาตรฐานหาเส้นลักษณะของฟิล์มใช้ภาพที่เปิดหน้ากล้องนาน 1/15 วินาที ในลำดับฟิล์มรูปที่ 16-20 ตัวอย่างของภาพฟิล์มข้อมูลที่ถ่ายได้ได้แสดงไว้ในภาพที่ 6-9 ส่วนรูปที่เหลือในฟิล์มไม่ได้ใช้ประโยชน์ในวิทยานิพนธ์นี้

สำหรับการอ่านค่าความทึบแสงได้กำหนดไว้ให้มีการเทียบมาตรฐานของมาตรความทึบแสงทุกครั้งก่อนจะทำการอ่านความทึบแสงของฟิล์มข้อมูล ในที่นี้ได้นำผลการเทียบมาตรฐานจากการอ่านค่าทุกครั้งมาหาความสัมพันธ์ของความทึบแสงและศักย์ขาออก

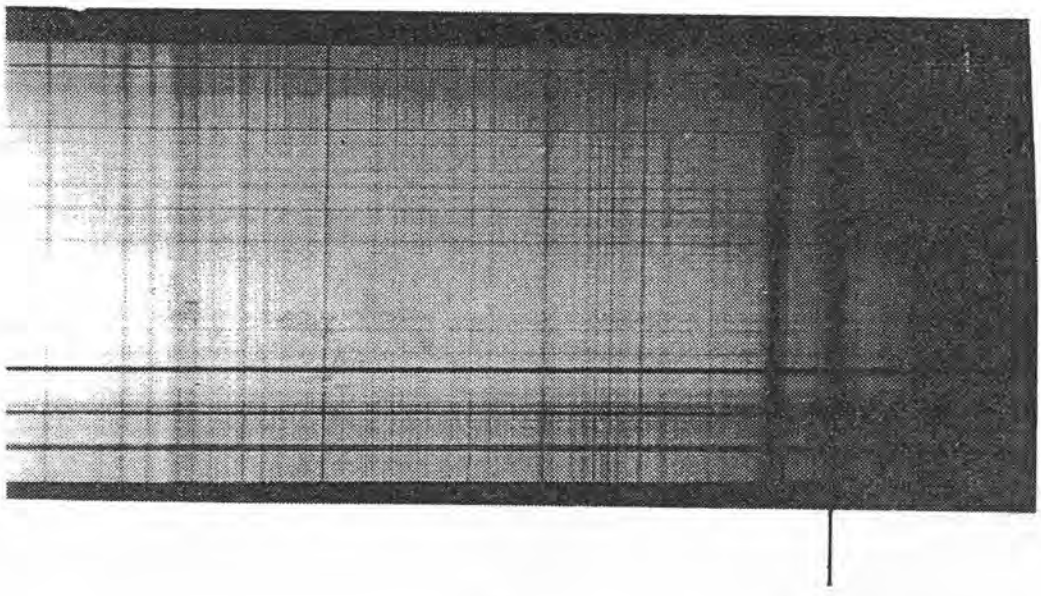
ด้วยวิธีปรับเส้นโค้งแบบกำลังสองน้อยที่สุดระหว่างความทึบแสงและค่าลอกริทึมฐานสิบของผลหารระหว่างผลต่างของศักย์ขาออกที่ตำแหน่งใดๆกับศักย์ขาออกเมื่อไม่มีแสงเข้าและค่าผลต่างระหว่างศักย์ขาออกที่ไม่มีความทึบแสงกับศักย์ขาออกที่ไม่มีแสงเข้า(ข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ความทึบแสง}(D) = 0.53\log_{10}[(R_o-R_b)/(R-R_b)] \quad (6\text{-}23)$$

เมื่อ R เป็นศักย์ขาออกที่วัดได้ที่ความทึบแสงใดๆ

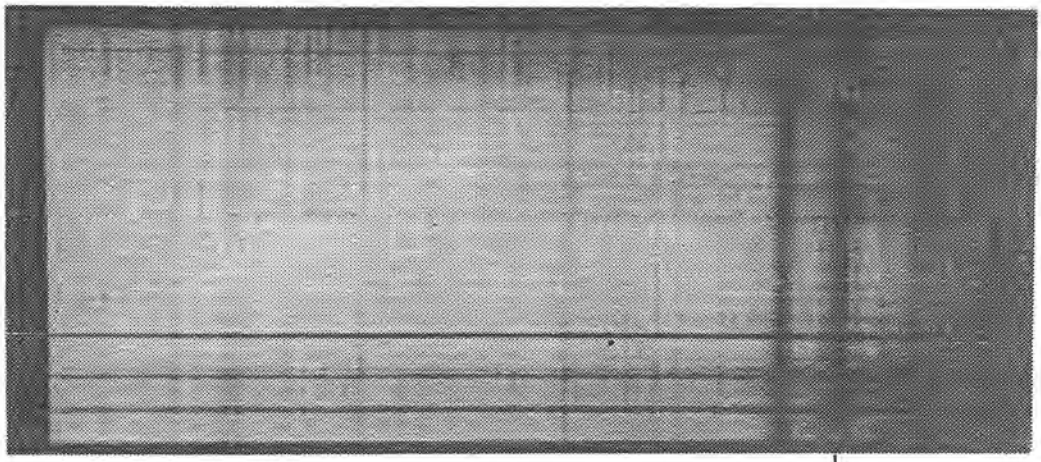
R_o เป็นศักย์ขาออกที่วัดได้เมื่อความทึบแสงเป็นศูนย์

R_b เป็นศักย์ขาออกที่วัดได้เมื่อไม่มีแสงเข้าสู่มาตรความทึบแสง



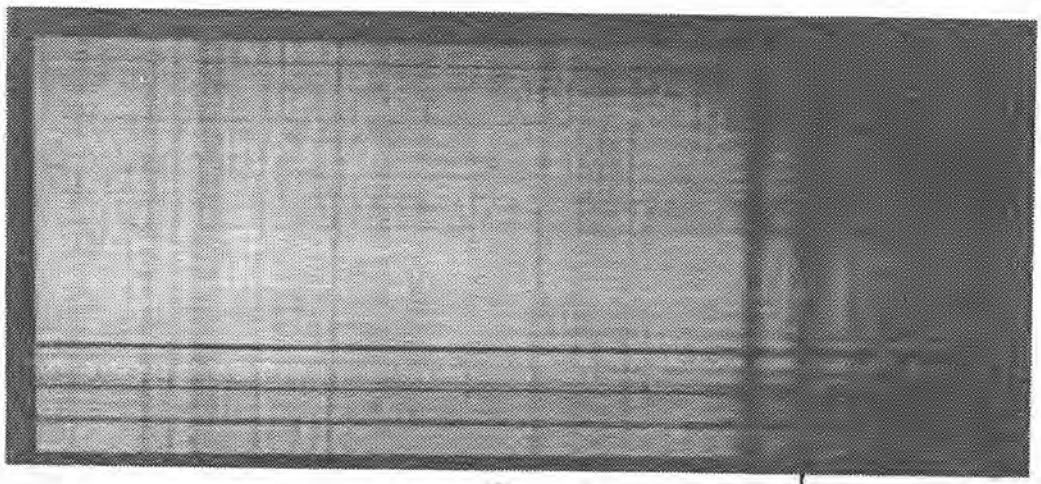
CaII(3933.68)

รูปที่ 6-9(ก) แสดงตัวอย่างภาพสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่บันทึกภาพเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ในฟิล์มรูปที่ 3



CaII(3933.68)

รูปที่ 6-9(ข) แสดงตัวอย่างภาพสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่บันทึกภาพ
เมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ในฟิล์มรูปที่ 4



CaII(3933.68)

รูปที่ 6-9(ค) แสดงตัวอย่างภาพสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่บันทึกภาพ
เมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ในฟิล์มรูปที่ 10

(2) <u>การหาเส้นลักษณะของฟิล์มที่ความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอม</u>

เนื่องจากเส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์เป็นเส้นสเปกตรัมดูดกลืน การหาเส้นลักษณะของฟิล์มที่ความยาวคลื่นนั้นๆจึงไม่อาจหาได้โดยตรง ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้เส้นลักษณะของฟิล์มที่ความยาวคลื่นอื่นห่างออกไปเล็กน้อยที่อยู่ไม่ตรงกับเส้นเฟรานโฮเฟอร์ใดๆและพ้นจากอิทธิพลของเส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ที่อยู่ใกล้เคียง ในที่นี้เลือกใช้วิธีประมาณค่าความทึบแสงของฟิล์มที่ความยาวคลื่นที่ต้องการทั้งนี้อาศัยหลักที่ว่าแสงที่มาถึงฟิล์มความยาวคลื่นต่างๆนั้น ถ้าในส่วนที่ถูกดูดกลืนเป็นเส้นเฟรานโฮเฟอร์ไม่ถูกดูดกลืนไปก่อนจะมีความต่อเนื่องกับแสงในส่วนความยาวคลื่นที่มิได้ถูกดูดกลืน และมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ทำให้สามารถประมาณหาระดับแสงต่อเนื่องที่ช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการได้ด้วยการเขียนเส้นกราฟของสเปกตรัมให้เป็นเส้นต่อเนื่องข้ามส่วนที่เป็นเส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ไป และใช้เส้นกราฟที่ประมาณนี้ในการประมาณค่าระดับแสงต่อเนื่องที่ความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น ใช้ประมาณระดับแสงต่อเนื่องที่ความยาวคลื่นต่างๆของสเปกตรัมที่ถ่ายผ่านบันไดทอนแสงขั้นต่างๆ แล้วนำค่าที่ประมาณได้ไปหาเส้นลักษณะของฟิล์ม การทำงานเพื่อหาความทึบแสงที่ตำแหน่งต่างๆบนฟิล์ม และการหาเส้นลักษณะของฟิล์ม สามารถจัดลำดับขั้นได้ดังนี้

(ก) นำฟิล์มที่บันทึกภาพสเปกตรัมทั้งที่เป็นฟิล์มข้อมูล และฟิล์มที่ถ่ายเพื่อเทียบมาตรฐานหาเส้นลักษณะของฟิล์มมาอ่านด้วยมาตรความทึบแสง เพื่อหาค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ผลเป็นรูปกราฟแสดงศักย์ขาออกของมาตรความทึบแสงดังรูปที่ 6-10

(ข) พิจารณากราฟของศักย์ขาออกที่ได้จากข้อ(ก) กำหนดตำแหน่งของเส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ที่ได้กล่าวถึงในข้อ(1) วัดระยะของเส้นสเปกตรัมเส้นต่างๆโดยอาศัยเส้น Hδ หลัก จากระยะที่วัดได้หาค่าการกระจายเชิงเส้นของกราฟชุดนั้นๆ

(ค) จากการกระจายเชิงเส้น และสมการที่(6-23)หาค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ เลือกความยาวคลื่นที่ไม่ตรงกับเส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์และมีความทึบแสงสูงสุด(มีการให้แสงมาก)ถือเป็นความทึบแสงที่สอดคล้องกับระดับแสงต่อเนื่องของสเปกตรัม ทำเช่นนี้ในฟิล์มทุกรูปทั้งฟิล์มข้อมูล และฟิล์มที่ถ่ายเพื่อใช้เทียบมาตรฐานหาเส้นลักษณะของฟิล์ม

(ง) ค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆที่อ่านมาจากฟิล์มที่ถ่ายเพื่อใช้เทียบมาตรฐานหาเส้นลักษณะของฟิล์ม ฟิล์มรูปหนึ่งๆอาจจะอ่านมากกว่า 1 ครั้ง ให้ทำการเฉลี่ยความทึบแสงที่อ่านได้เสียก่อน ตารางที่ 6-1 แสดงค่าความทึบแสงที่เฉลี่ยแล้วที่ความยาวคลื่นต่างๆสำหรับบันไดทอนแสงแต่ละขั้น นำค่าความทึบแสงเฉลี่ยเหล่านี้มาบันทึกบนกระดาษกราฟที่ความยาวคลื่นต่างๆ แล้วเขียนกราฟต่อเนื่องของความทึบแสงที่สอดคล้องกับระดับแสงต่อเนื่องสำหรับบันไดทอนแสงแต่ละขั้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6-11

(จ) จากกราฟในรูปที่ 6-11 นำมาหาค่าความทึบแสงที่ความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอมสำหรับแต่ละขั้นของบันไดทอนแสง ความทึบแสงและการให้แสงสัมพัทธ์ที่ความยาวคลื่นดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 6-2 และรูปที่ 6-12 แสดงกราฟเส้นลักษณะของฟิล์มที่ 3933.68 อังสตรอม ที่ได้จากการปรับเส้นโค้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

จากการปรับเส้นโค้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ได้สมการที่ใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างความทึบแสงและลอการิทึมของการให้แสงสัมพัทธ์ดังนี้

$$D = 0.47 + 1.9\log_{10}(\epsilon) + 2.4[\log_{10}(\epsilon)]^2 \quad (6\text{-}24)$$

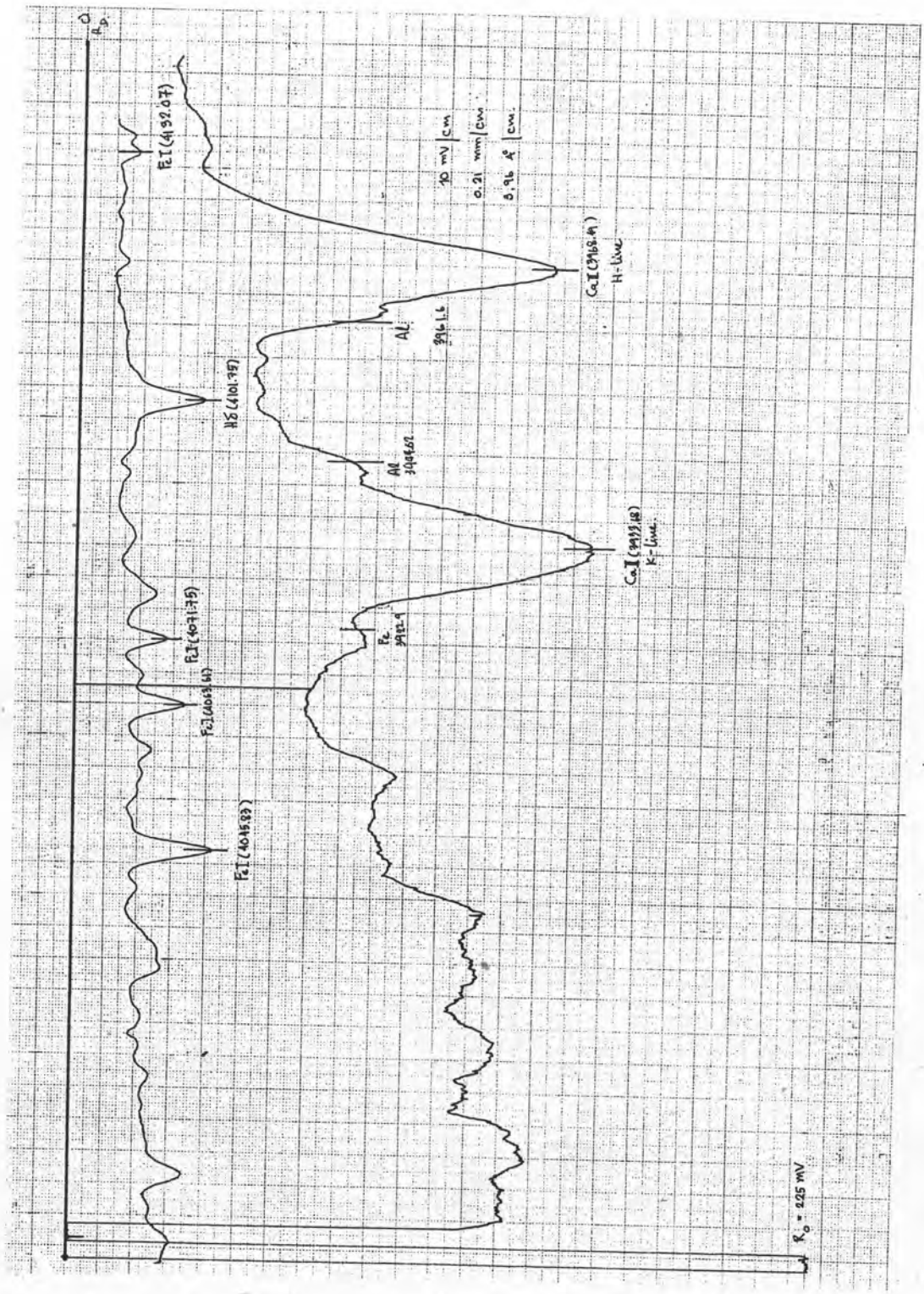
เมื่อ ϵ คือการให้แสงสัมพัทธ์ ระหว่างการให้แสงเมื่อแสงผ่านความทึบแสงขนาดหนึ่งเทียบกับเมื่อไม่ได้ผ่านความทึบแสงใดๆ

และ D คือความทึบแสง

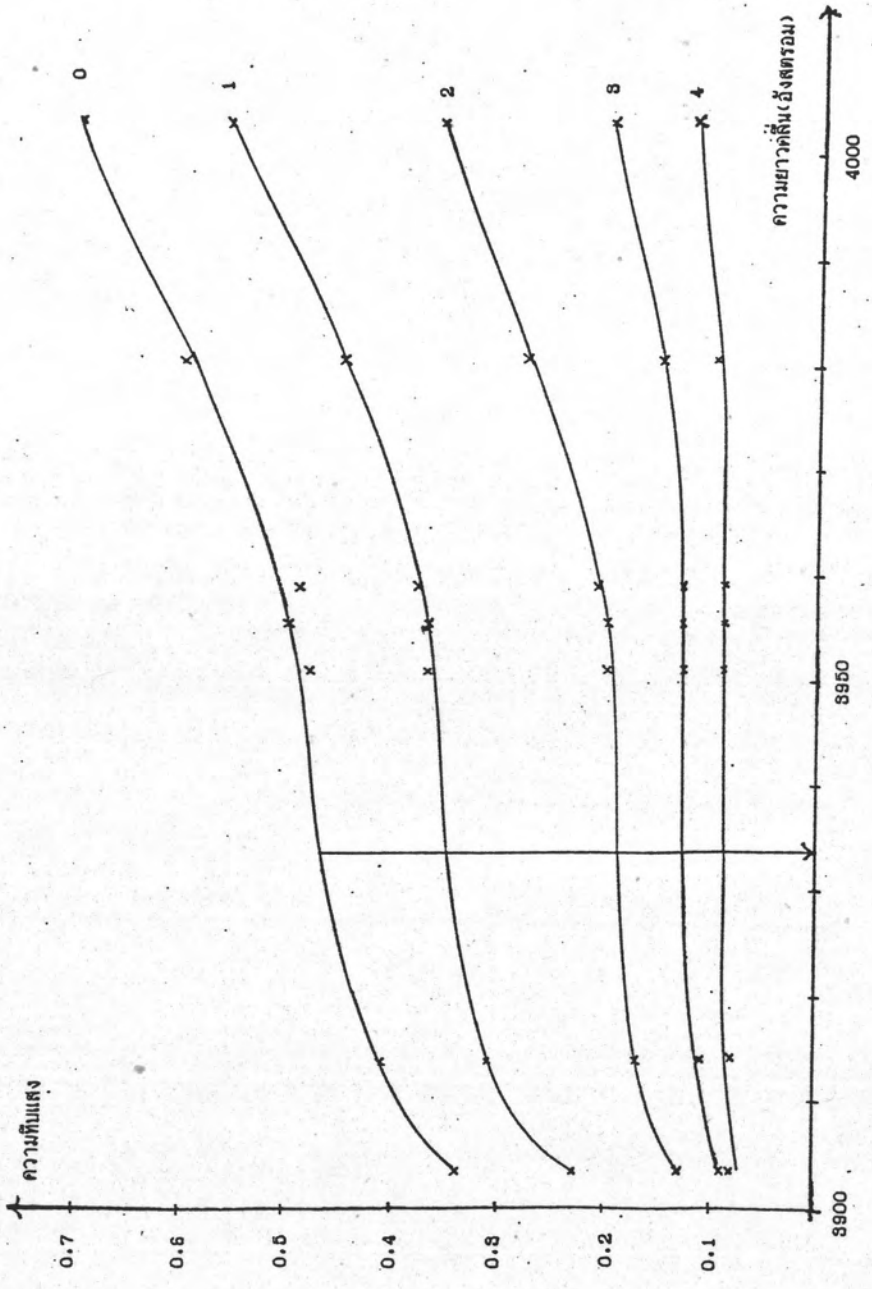
(3) <u>เส้นสเปกตรัมเฟรานโฮเฟอร์ของแคลเซียมไอออน ที่ความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอม</u>

เส้นลักษณะในข้อ(2) จะสามารถนำมาหาค่าการให้แสงสัมพัทธ์แก่ฟิล์มที่ความยาวคลื่นใดๆ λ ที่ห่างจากแกนของเส้น λ_o เป็น $\Delta\lambda$ ได้ แต่ในการนำเสนอลักษณะของเส้นสเปกตรัมนิยมใช้อัตราส่วนระหว่างการให้แสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นหนึ่งๆต่อการให้แสงของระดับแสงต่อเนื่องในช่วงความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมนั้นๆ หรือก็คืออัตราส่วนของความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งความยาวคลื่นนั้นๆเทียบกับความเข้มจำเพาะของระดับแสงต่อเนื่อง ดังนั้นการวิเคราะห์ฟิล์มในขั้นต้นจึงมีลำดับการดำเนินงานดังนี้

(ก) นำฟิล์มข้อมูลที่ถ่ายด้วยเวลาเปิดหน้ากล้อง 1/30 วินาที มาอ่านด้วยมาตรความทึบแสง จากกราฟแสดงศักย์ขาออกที่ได้ที่ความยาวคลื่นต่างๆ เปลี่ยนค่าเป็นค่าความทึบแสงด้วยสมการที่(6-23) เลือกตำแหน่งความยาวคลื่นที่ไม่ใช่เส้นเฟรานโฮเฟอร์



รูปที่ 6-10 กราฟแสดงศักย์ขาออกของมาตรความทึบแสงที่ตรงตำแหน่งความยาวคลื่นต่างๆ



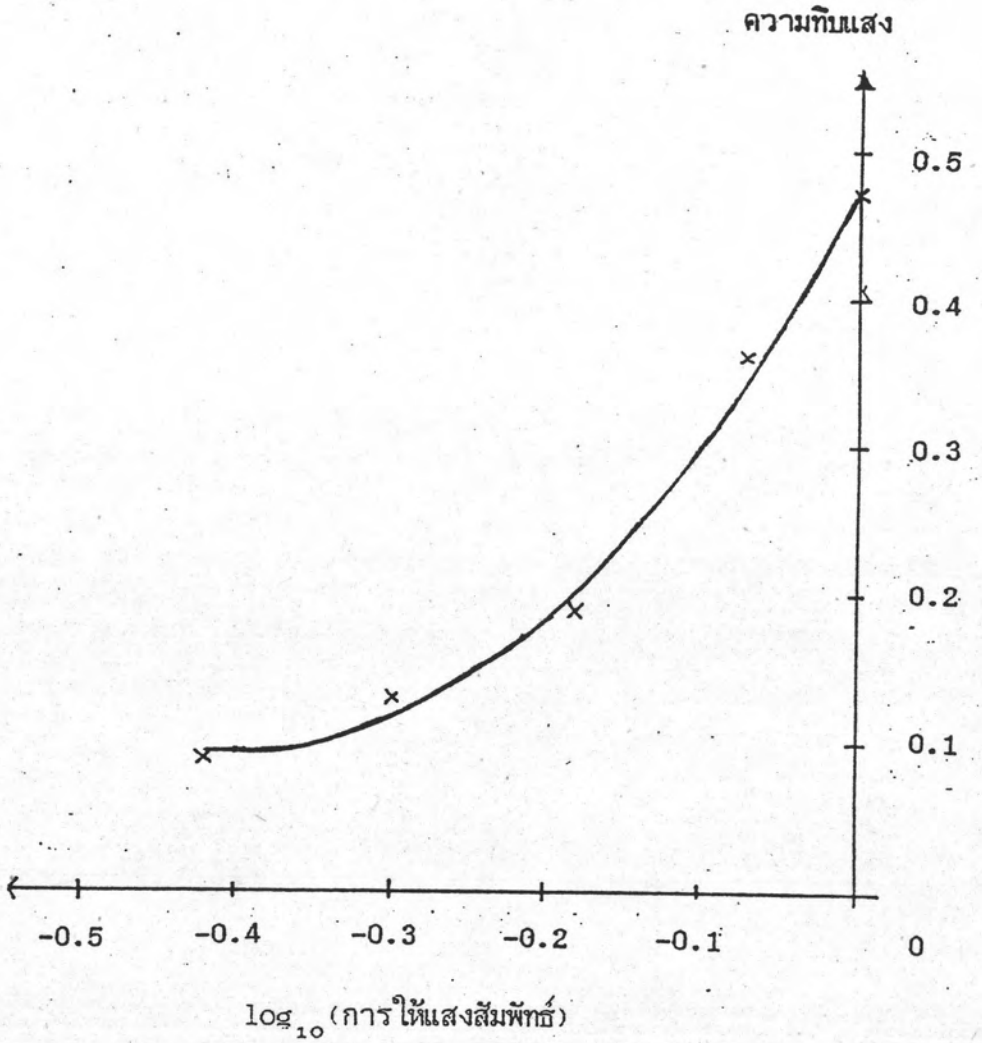
รูปที่ 6-11 กราฟแสดงความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องในแต่ละชั้นของบันไดทอนแสง

ตารางที่ 6-1 แสดงความทึบแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่นต่างๆสำหรับบันไดทอนแสงแต่ละขั้น

ความยาวคลื่น (อังสตรอม)	ความทึบแสงเฉลี่ยสำหรับบันไดทอนแสงขั้นที่				
	0	1	2	3	4
3903.63	0.34	0.23	0.13	0.09	0.08
3914.38	0.41	0.31	0.17	0.11	0.08
3950.99	0.48	0.37	0.20	0.13	0.09
3955.52	0.50	0.37	0.20	0.13	0.09
3958.86	0.49	0.38	0.21	0.13	0.09
3980.51	0.60	0.45	0.28	0.15	0.10
4002.75	0.70	0.56	0.36	0.20	0.12

ตารางที่ 6-2 แสดงค่าความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องที่อ่านได้กับลอการิทึมฐานสิบของการให้แสงสัมพัทธ์($\log_{10}(\epsilon)$) ที่ 3933.68 อังสตรอม

บันไดทอนแสงขั้นที่	ความทึบแสง	$\log_{10}(\epsilon)$
0	0.47	0.00
1	0.36	-0.07
2	0.19	-0.18
3	0.13	-0.30
4	0.09	-0.42



รูปที่ 6-12 แสดงเส้นลักษณะของฟิล์มที่ 3933.68 อังสตรอม

ดังเช่นในตอน(2)ข้อ(ค)

(ข) เขียนกราฟความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องกับความยาวคลื่น ตามข้อมูลที่อ่านได้จากข้อ(ก) อ่านค่าความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องจากกราฟที่ได้ ตรงความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอม เปลี่ยนค่าความทึบแสงเป็นการให้แสงสัมพัทธ์ด้วย เส้นลักษณะของฟิล์ม เรียกค่านี้ว่าการให้แสงสัมพัทธ์ของระดับแสงต่อเนื่อง($\epsilon_c(\lambda_o)$)

(ค) ที่ความยาวคลื่น λ ห่างจากแกนของเส้น(ในที่นี้คือความยาวคลื่น 3933.68 อังสตรอม)เป็นระยะ $\Delta\lambda$ หาค่าความทึบแสง จากเส้นลักษณะของฟิล์มที่ได้มาในตอนที่(2) โดยถือว่าเส้นลักษณะของฟิล์มไม่เปลี่ยนในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ เปลี่ยนค่าความทึบแสงไปเป็นการให้แสงสัมพัทธ์ เรียก การให้แสงสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง λ ($\epsilon(\lambda)$)

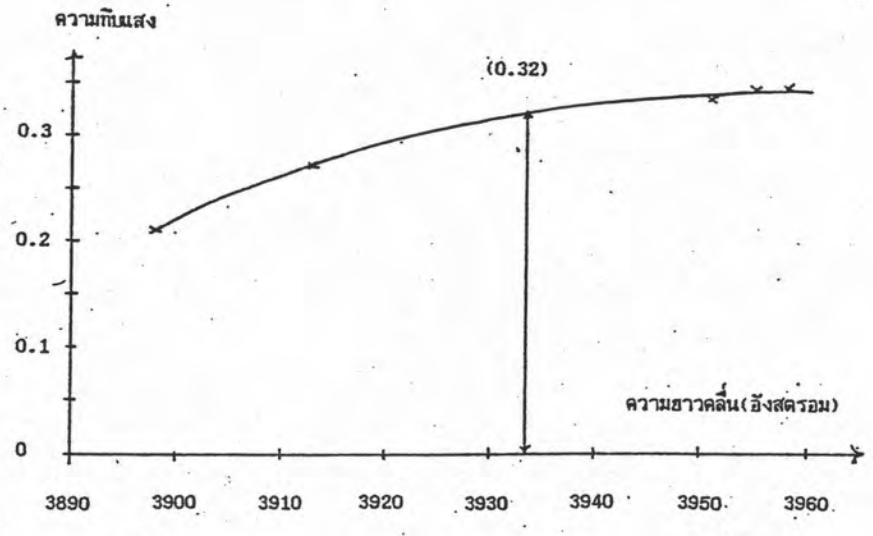
(ง) นำค่าการให้แสงสัมพัทธ์ของระดับแสงต่อเนื่อง $\epsilon_c(\lambda_o)$ ไปหารค่าการให้แสงสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง λ $\epsilon(\lambda)$ ผลที่ได้คือการให้แสงสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง λ เทียบกับระดับแสงต่อเนื่อง จากสมการ(6-22)ค่านี้ก็คืออัตราส่วนของความเข้มจำเพาะนั่นเอง เรียกว่า ความเข้มจำเพาะสัมพัทธ์ ใช้สัญลักษณ์ I/I_c นำค่าที่อ่านได้ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง จาก Photomatric Atlas of the Solar Spectra โดย Minnaert,M. , Muldus,G.F.W. และ Houtgast,J. [6]

เนื่องจากเส้นลักษณะของฟิล์มจะใช้งานได้ในขอบเขตความทึบแสงที่จำกัด คือต้องมีความทึบแสงมากกว่า 0.09 และน้อยกว่า 0.47 และค่าความทึบแสงของตัวฟิล์มเมื่อไม่ได้จัดให้รับแสงเลย(fog level)มีค่า 0.07 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ความทึบแสงน้อยกว่า 0.09 จะอยู่นอกเหนือขอบเขตที่จะใช้เส้นลักษณะได้ และเนื่องจากเส้นลักษณะที่หามาได้อยู่ในช่วงการให้แสงอ่อน ที่ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมฐานสิบของการให้แสงกับความทึบแสงมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง บริเวณที่มีความทึบแสงน้อยๆ เมื่อจะหาค่าลอการิทึมฐานสิบของการให้แสงสัมพัทธ์อาจผิดพลาดได้มาก การนำเส้นลักษณะของฟิล์มมาใช้ต้องระมัดระวังพอสมควร

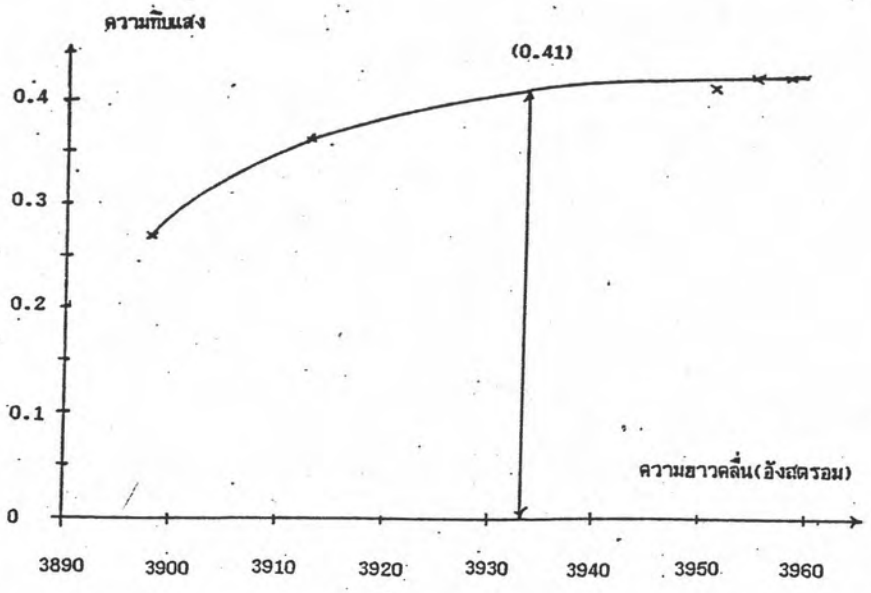
จากลำดับขั้นตอนข้างต้น ได้วิเคราะห์ฟิล์มข้อมูลสเปกตรัมที่ถ่ายเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ในรูปที่ 3,4 และ 10 เมื่อเปิดหน้ากล้องนาน 1/30 วินาที ได้กราฟแสดงความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องกับความยาวคลื่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6-13, 6-14 และ 6-15 ตารางค่าการให้แสงสัมพัทธ์ของแต่ละรูปแสดงไว้ในตารางที่ 6-3,6-4

และ 6-5 ตามลำดับ การลงจุดเปรียบเทียบกับรูปลักษณ์ของเส้นสเปกตรัมจากข้อมูลอ้างอิง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6-16

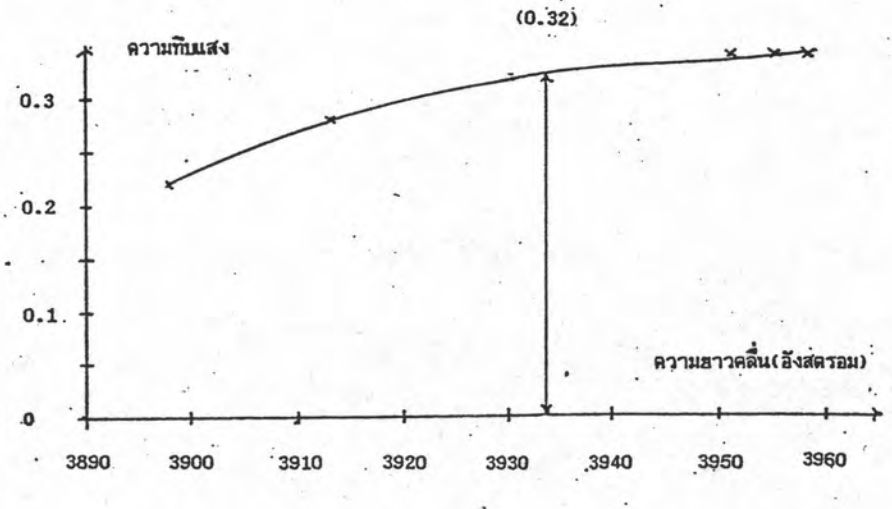
อนึ่ง เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลของข้อมูลอ้างอิงมีกำลังแยกที่สูงมาก ดังนั้นรูปลักษณ์ที่ได้จึงมีความละเอียดสูงพอจะแสดงความเปลี่ยนแปลงที่ช่วงความยาวคลื่นน้อยๆได้ ในรูปที่ 6-16 จะแสดงผลเฉพาะค่าสูงสุดโดยจะเฉลี่ยความเปลี่ยนแปลงที่เกิดในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 1 อังสตรอมไป แต่จะคงลักษณะของเส้นสเปกตรัมสำคัญที่อยู่ใกล้ๆเส้นสเปกตรัมของแคลเซียมไอออนไว้



รูปที่ 6-13 แสดงกราฟของความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องกับความยาวคลื่นจากฟิล์มข้อมูลของวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ฟิล์มรูปที่ 3



รูปที่ 6-14 แสดงกราฟของความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องกับความยาวคลื่น จากฟิล์มข้อมูลของวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ฟิล์มรูปที่ 4



รูปที่ 6-15 แสดงกราฟของความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่องกับความยาวคลื่น จากฟิล์มข้อมูลของวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ฟิล์มรูปที่ 10

ตารางที่ 6-3 แสดงความทึบแสงและค่าการให้แสงสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง λ และค่าเปรียบเทียบกับการให้แสงสัมพัทธ์ของแสงต่อเนื่อง ($\epsilon(\lambda)/\epsilon_c(\lambda_o)$) จากข้อมูลที่ถ่ายเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ฟิล์มรูปที่ 3

ความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่อง(D_c) = 0.32

การให้แสงสัมพัทธ์ของระดับแสงต่อเนื่อง($\epsilon_c(\lambda_o)$) = 0.81

ผลต่างความยาวคลื่น (อังสตรอม)	ความทึบแสง	$\log_{10} \epsilon(\lambda)$	$\epsilon(\lambda)$	$\epsilon(\lambda)/\epsilon_c(\lambda_o)$
-20	0.27	-0.13	0.75	0.93
-16	0.25	-0.14	0.72	0.89
-12	0.22	-0.17	0.68	0.83
-8.0	0.21	-0.18	0.66	0.82
-4.0	0.12	-0.29	0.51	0.63
0.0	0.086			
4.0	0.15	-0.24	0.58	0.71
8.0	0.22	-0.17	0.68	0.83
12	0.26	-0.13	0.74	0.92
16	0.32	-0.09	0.81	1.0

ตารางที่ 6-4 แสดงความทึบแสงและค่าการให้แสงสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง λ และค่าเปรียบเทียบกับการให้แสงสัมพัทธ์ของแสงต่อเนื่อง ($\epsilon(\lambda)/\epsilon_c(\lambda_o)$) จากข้อมูลที่ถ่ายเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ฟิล์มรูปที่ 4

ความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่อง(D_c) = 0.41

การให้แสงสัมพัทธ์ของระดับแสงต่อเนื่อง($\epsilon_c(\lambda_o)$) = 0.93

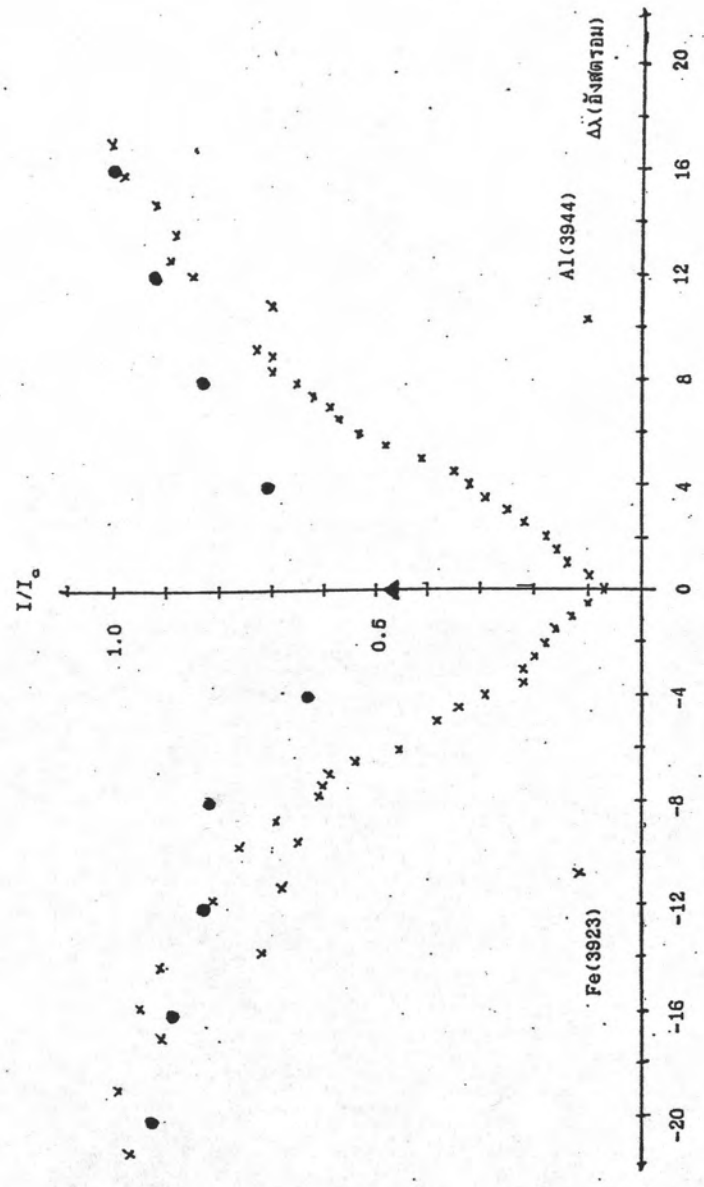
ผลต่างความยาวคลื่น (อังสตรอม)	ความทึบแสง	$\log_{10} \epsilon(\lambda)$	$\epsilon(\lambda)$	$\epsilon(\lambda)/\epsilon_c(\lambda_o)$
-21	0.36	-0.06	0.86	0.92
-15	0.33	-0.08	0.83	0.89
-11	0.28	-0.12	0.76	0.82
-7.8	0.28	-0.12	0.76	0.82
-3.9	0.16	-0.23	0.59	0.63
0.0	0.09			
3.9	0.17	-0.22	0.60	0.65
7.8	0.27	-0.13	0.75	0.81
10	0.28	-0.12	0.76	0.82
12	0.31	-0.10	0.80	0.86
16	0.38	-0.05	0.89	0.96

ตารางที่ 6-5 แสดงความทึบแสงและค่าการให้แสงสัมพัทธ์ที่ตำแหน่ง λ และค่าเปรียบเทียบกับการให้แสงสัมพัทธ์ของแสงต่อเนื่อง ($\epsilon(\lambda)/\epsilon_c(\lambda_o)$) จากข้อมูลที่ถ่ายเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ.2532 ฟิล์มรูปที่ 10 .

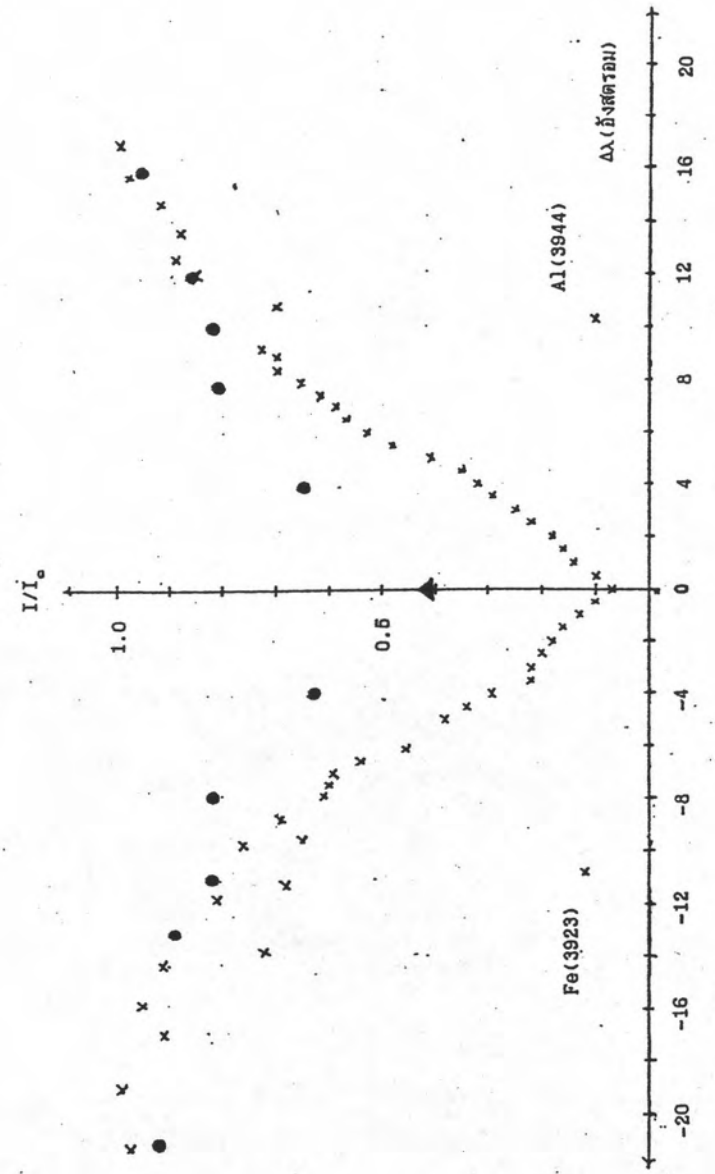
ความทึบแสงของระดับแสงต่อเนื่อง(D_c) = 0.32

การให้แสงสัมพัทธ์ของระดับแสงต่อเนื่อง($\epsilon_c(\lambda_o)$) = 0.81

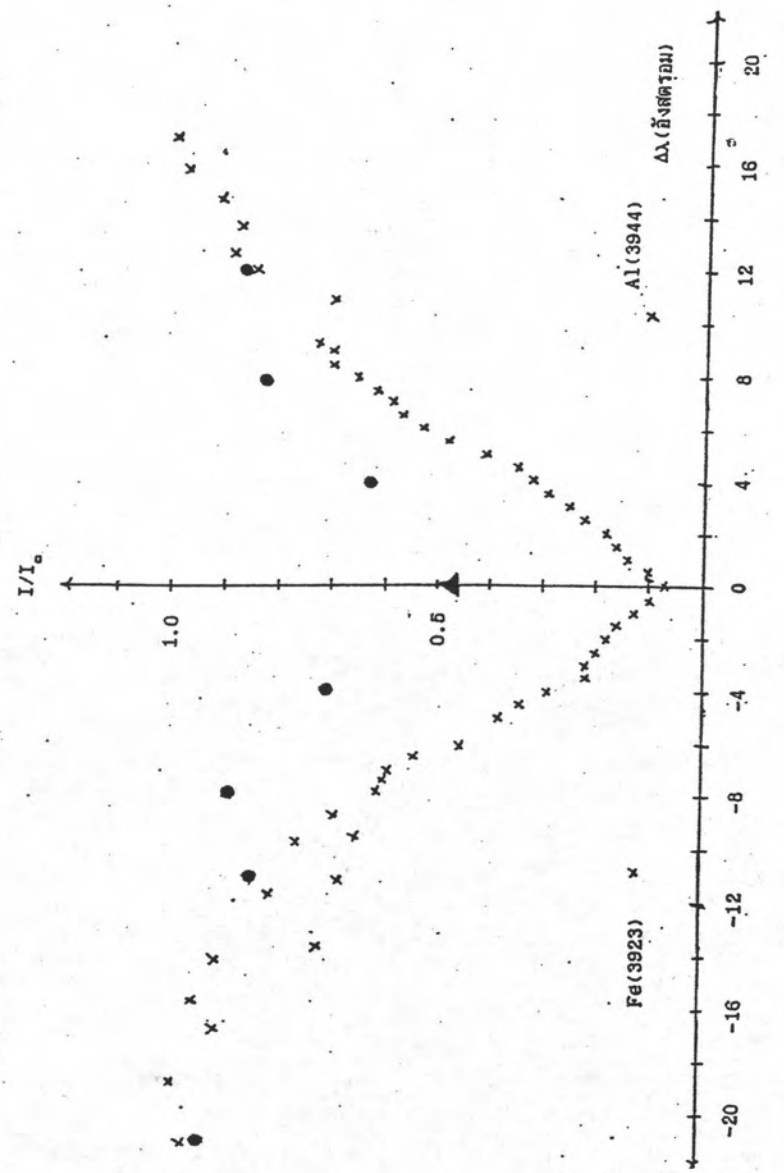
ผลต่างความยาวคลื่น (อังสตรอม)	ความทึบแสง	$\log_{10} \epsilon(\lambda)$	$\epsilon(\lambda)$	$\epsilon(\lambda)/\epsilon_c(\lambda_o)$
-21	0.28	-0.12	0.76	0.94
-11	0.23	-0.16	0.69	0.85
-7.8	0.25	-0.14	0.72	0.89
-3.9	0.15	-0.24	0.58	0.71
0.0	0.085			
3.9	0.12	-0.29	0.51	0.63
7.8	0.22	-0.17	0.68	0.83
12	0.24	-0.15	0.71	0.87



รูปที่ 6-16(ก) แสดงการลงจุดที่ได้จากการสังเกตการณ์เทียบกับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเมื่อสัญลักษณ์กากบาทแทนจุดของข้อมูลอ้างอิงและวงกลมทึบแทนข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตการณ์ในฟิล์มรูปที่ 3 สามเหลี่ยมทึบแทนขอบเขตบนของค่า I/I_c ที่จะเป็นได้ตรงแกนของเส้น



รูปที่ 6-16(ข) แสดงการลงจุดที่ได้จากการสังเกตการณ์เทียบกับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเมื่อสัญลักษณ์กากบาทแทนจุดของข้อมูลอ้างอิงและวงกลมทึบแทนข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตการณ์ในฟิล์มรูปที่ 4 สามเหลี่ยมทึบแทนขอบเขตบนของค่า I/I_c ที่จะเป็นได้ตรงแกนของเส้น



รูปที่ 6-16(ค) แสดงการลงจุดที่ได้จากการสังเกตการณ์เทียบกับข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงเมื่อสัญลักษณ์กากบาทแทนจุดของข้อมูลอ้างอิงและวงกลมทึบแทนข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตการณ์ในฟิล์มรูปที่ 10 สามเหลี่ยมทึบแทนขอบเขตบนของค่า I/I_0 ที่จะเป็นได้ตรงแกนของเส้น

สรุปและวิจารณ์ผลการสังเกตการณ์

จากรูปที่ 6-16 มีข้อควรสังเกตอยู่หลายประการ คือ

(1) ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์ไม่แสดงผลที่บริเวณแกนของเส้น(ในระยะ 4 อังสตรอมทั้งทางบวกและลบของแกน)

(2) ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ในส่วนถัดมามีค่าอัตราส่วนของการให้แสงที่ตำแหน่ง λ ต่อการให้แสงของระดับแสงต่อเนื่อง มากกว่าที่ได้จากข้อมูลอ้างอิงมาก

(3) ที่เส้นสเปกตรัมเฟราน์โฮเฟอร์ของเหล็ก และ อลูมิเนียม ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 3922.9 อังสตรอม และ 3944.02 อังสตรอมตามลำดับ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์ ไม่ปรากฏการดูดกลืนที่เด่นชัดเช่นในข้อมูลอ้างอิง

ข้อสังเกตทั้งสามข้ออาจอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากชุดสเปกโทรกราฟมีกำลังแยกในระดับปานกลาง(มีค่าความบริสุทธิ์ของสเปกตรัมเท่ากับ 2.5 อังสตรอม) รายละเอียดที่มีความเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2.5 อังสตรอมจึงถูกเฉลี่ยไปด้วยผลของกำลังแยก สำหรับเส้นสเปกตรัมของเหล็กและอลูมิเนียมที่ไม่ปรากฏเด่นชัดนั้นเนื่องจากเส้นสเปกตรัมมีขนาดใหญ่กว่าค่าความบริสุทธิ์ของสเปกตรัมไม่มากนัก จึงไม่ปรากฏอย่างเด่นชัดในรูปสเปกตรัม และยังถูกรบกวนจากแสงที่ความยาวคลื่นอื่นใกล้ๆ นอกจากนี้การรายงานผลข้อมูลจากการสังเกตการณ์ยังต้องรายงานในลักษณะเป็นจุด เพื่อให้ข้อมูลแต่ละจุดไม่มีผลต่อกันและเป็นตัวแทนของแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วงหนึ่งที่มากกว่าค่าความบริสุทธิ์ของสเปกตรัม

เหตุที่ไม่สามารถแสดงผลการสังเกตการณ์ในส่วนแกนของเส้นได้ ทั้งนี้เพราะในการเทียบมาตรฐานเพื่อหาเส้นลักษณะของฟิล์ม ได้เส้นลักษณะที่มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่ให้ผลความทึบแสงน้อยๆจะให้ผลเบี่ยงเบนได้มากในค่าลอการิทึมของการให้แสงสัมพัทธ์ เมื่อเปลี่ยนค่ามาเป็นค่าการให้แสงสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงได้มากขึ้นไปอีกมาก ในที่นี้ค่าความทึบแสงต่ำสุดในขอบเขตของเส้นลักษณะมีค่าเป็น 0.09 ที่สอดคล้องกับลอการิทึมฐานสิบของการให้แสงเป็น -0.42 ขณะที่เมื่อไม่มีการให้แสงเลย(ค่าลอการิทึมเป็นลบอนันต์) มีความทึบแสงเป็น 0.07 ที่ใกล้กันมากจึงไม่สามารถนำเส้นลักษณะของฟิล์มมาประมาณการให้แสงส่วนกลางเส้นได้ และยังมีผลให้ค่าการให้แสงในส่วนที่ใกล้แกนมีค่าเบี่ยงเบนไปได้อีก อีกประการหนึ่งการเปิดหน้ากล้องขณะการเทียบมาตรฐานน้อยเกินไปจนกระทั่งความทึบแสงของบันไดทอนแสงที่ใช้บังมีค่าเพียงแค่

0.42 ซึ่งจะไม่ครอบคลุมถึงความทึบแสงต่ำสุดที่ควรจะเป็นของเส้นสเปกตรัมแต่อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าที่ให้ขอบเขตบนของค่า I/I_c ค่าจริงจะต้องมีค่าที่น้อยกว่านี้ และในรูปที่ 6-16 ได้ใช้ค่าความทึบแสงสูงสุดของบันไดทอนแสงมาหาค่าขอบเขตบนของค่า I/I_c ที่ตำแหน่งแกนของเส้นและแสดงผลในกราฟด้วยจุดรูปสามเหลี่ยมทึบ

โดยสรุปสเปกโทรกราฟที่สร้างมีคุณภาพปานกลางไม่ละเอียดนัก ให้สเปกตรัมที่มีข้อมูลพอใช้ได้ โดยมีความสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงในส่วนที่ไกลจากแกนของเส้นมากๆ ในบริเวณใกล้แกนให้ผลที่ไม่ดี เนื่องจากการหาเส้นลักษณะของข้อมูลที่ยังทำได้ไม่ดีพอ และการที่สเปกโทรกราฟมีกำลังแยกน้อยทำให้รายละเอียดจำนวนมากของเส้นสเปกตรัมหายไป ข้อบกพร่องทั้งสองนี้อาจแก้ไขให้ดีขึ้นได้ด้วยการเปิดหน้ากล้องขณะเทียบมาตรฐานให้นานขึ้น เพื่อให้เส้นลักษณะอยู่ในส่วนที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง และการปรับปรุงกำลังแยกให้ดีขึ้น ดังนั้นผลการสังเกตการณ์จึงไม่อาจแสดงได้ว่าเบี่ยงเบนไปจากข้อมูลอ้างอิงมากน้อยเท่าใด เนื่องจากการเบี่ยงเบนไปที่ความยาวคลื่นต่างๆมีผลมาจากปัจจัยหลายประการประกอบกัน แต่ถ้าพิจารณาความเหมาะสมแล้ว สเปกโทรกราฟที่สร้างขึ้นเหมาะแก่การใช้งานเพื่อศึกษาเชิงคุณภาพมากกว่าในเชิงปริมาณ เนื่องจากการกระจายเชิงเส้นของสเปกตรัมที่มีค่าถึง 0.053 มิลลิเมตรต่ออังสตรอม เว้นแต่จะปรับกำลังแยกให้ดีขึ้นอีก เพื่อให้สเปกตรัมที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น