หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

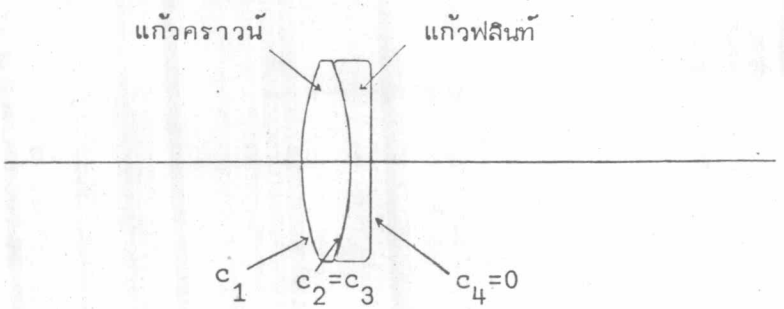
การสร้างอุปกรณ์ และ เครื่องมือ

1. การสร้างอุปกรณ์ และ เครื่องมือออโตคอลลิเมเตอร์

อุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับออโตคอลลิเมเตอร์ คือ เลนซ์วัตถุ เลนซ์ตา ปริซึม 45° ขนาดเล็ก แกรตติคุล ตัวกระบอกและฐานพร้อมแขนยึดตัวกระบอก ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ สามารถจัดสร้างขึ้นเองได้ โดยใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในภาควิชาฟิสิกส์ ยกเว้นแกรตติคุลเท่านั้น ที่ต้องอาศัยวัสดุและวิธีการที่ยุ่งยากเกินกว่าจะจัดสร้างขึ้นเองได้ รายละเอียดสำหรับการจัดสร้างอุปกรณ์ จะกล่าวถึงตามลำดับ ดังนี้

1.1 เลนซ์วัตถุของออโตคอลลิเมเตอร์

เลนซ์วัตถุที่จัดสร้างขึ้น เป็นเลนซ์อรงค์แบบง่าย โดยออกแบบให้เป็นเลนซ์ประกบที่มีรูปร่างเป็นเลนซ์นูนแกมราบ กำหนดให้มีค่าทางยาวโฟกัส 33.3 เซนติเมตร ในการสร้างเลนซ์ประกบ เลือกใช้แก้วเดนซ์แบเรียมคราวน์ (dense barium crown) ซึ่งมีค่าดรรชนีหักเห 1.62280 และค่าวี 56.9 ในการทำเลนซ์นูน และใช้แก้วเดนซ์ฟลินท์ (dense flint) ซึ่งมีค่าดรรชนีหักเห 1.69865 และค่าวี 32.02 ในการทำเลนซ์เว้า และกำหนดให้เลนซ์ที่จัดสร้างมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร



ภาพ 3-1 แสดงรูปร่างเลนซ์วัตถุที่ออกแบบ

1.1.1 การออกแบบเลนซ์ เริ่มด้วยการคำนวณหารัศมีความโค้งของผิวเลนซ์ จากค่าทางยาวโฟกัสรวม (F) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 33.3 เซนติเมตร

กำลังของเลนซ์ประกบ $(K) = \frac{1}{F}$

$K = .0300300 \quad cm.^{-1}$

ค่ากำลังของเลนซ์นูน (K_1) และของเลนซ์เว้า (K_2) หาได้จากสมการ

$$K_2 = -\frac{KV_2}{V_1 - V_2}$$

$$K_1 = K - K_2$$

$V_1 = 56.9$, $V_2 = 32.02$, $K = .0300300 \quad cm.^{-1}$

$K_2 = -.0386479 \quad cm.^{-1}$

$K_1 = .0686779 \quad cm.^{-1}$

หาค่ารัศมีความโค้ง และความโค้งจากสมการ

$$K_2 = (n_{D_2} - 1)(c_3 - c_4)$$

และ $R_3 = \frac{1}{c_3}$

ค่า $n_{D_2} = 1.69865$ และเนื่องจากผิวที่สี่เป็นผิวราบ ดังนั้น $c_4 = 0$

จะได้ $c_3 = -.0553179 \quad cm^{-1}$

$R_3 = -18.0773 \quad cm.^{-1}$

ในทำนองเดียวกัน $K_1 = (n_{D_1} - 1)(c_1 - c_2)$

ค่า $n_{D_1} = 1.62280$ และ $c_2 = c_3$

จะได้ $c_1 = .0549549$ $cm.^{-1}$

$R_1 = 18.1967$ cm.

เมื่อทราบค่ารัศมีความโค้งของเลนซ์ ดังกล่าว จะต้องทำการเลือกทูลเหล็ก (iron tool) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการฝนเลนซ์ ทูลเหล็กเป็นแท่นเหล็กที่มีรูปร่างเป็นผิวโค้งทรงกลม ใช้สำหรับการฝนแก้วให้มีผิวหน้าโค้งเป็นทรงกลมตามรูปทูล ขนาดความโค้งของทูลเหล็กนิยมบอกเป็นค่ากำลังของเลนซ์บาง แบบนูนแกมราบหรือแบบเว้าแกมราบ ที่ทำจากแก้วซึ่งมีดรรชนีหักเห 1.523 และมีรัศมีความโค้งเท่ากับทูล นั่นคือ บอกเป็น ไดออปเตอร์ (dioptor) เช่น ทูลขนาด + 1 ไดออปเตอร์ หมายถึง ทูลนี้จะมีค่ารัศมีความโค้ง เท่ากับ รัศมีความโค้งของเลนซ์นูนแกมราบ ที่ทำจากแก้วซึ่งมีดรรชนีหักเห 1.52300 และมีกำลัง 1 ไดออปเตอร์

ดังนั้นจากค่ากำลังของเลนซ์ จะหาค่ารัศมีความโค้งได้จากสมการ

$$K = (n - 1)(c_1 - c_2)$$

กรณีเลนซ์นูนแกมราบ $c_2 = 0$

$$c_1 = \frac{K}{n - 1}$$

ตัวอย่างเช่น K = 1 ไดออปเตอร์ เลนซ์นูนแกมราบดังกล่าวจะมีความโค้งของผิวนูน คือ

$c_1 = \frac{1}{.523000}$ เมตร$^{-1}$

$c_1 = 1.91205$ เมตร$^{-1}$

$R_1 = .523000$ เมตร

$R_1 = 52.3000$ เซนติเมตร

นั่นคือ ทูลขนาด + 1 ไดออปเตอร์ จะเป็นผิวทรงกลมเว้าที่มีรัศมีความโค้ง 52.3 เซนติเมตร สำหรับทูลขนาด - 1 ไดออปเตอร์ จะเป็นผิวทรงกลมนูนโดยมีรัศมีความโค้ง 52.3 เซนติเมตร เช่นกัน

สำหรับทูลขนาด K ไดออปเตอร์ หาค่าความโค้งและรัศมีความโค้งของผิวทูล ได้จากสมการ

$$c = \frac{K}{.523000} \quad \text{เมตร}^{-1}$$

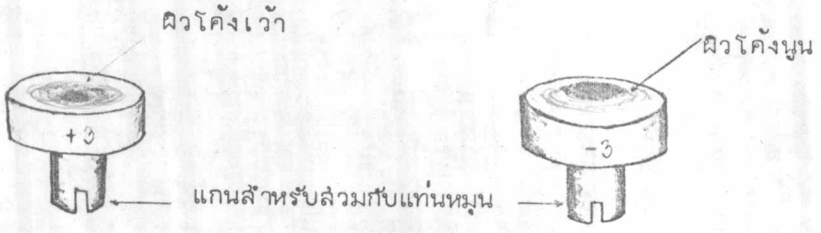
$$R = \frac{.523000}{K} \quad \text{เมตร}$$

ค่าความโค้ง และรัศมีความโค้ง ของทูลขนาดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 แสดงค่าความโค้งและรัศมีความโค้งของทูลเหล็กขนาดต่าง ๆ

ขนาดของทูล (ไดออปเตอร์)	ค่าความโค้ง (เมตร$^{-1}$)	ค่ารัศมีความโค้ง (เซนติเมตร)
±.5	±.956023	±104.600
±1.0	±1.91205	± 52.3000
±1.5	±2.86807	± 34.8667
±2.0	±3.82409	± 26.1500
±2.5	±4.78012	± 20.9200
±3.0	±5.73614	± 17.4333
±4.0	±7.64818	± 13.0750
±5.0	±9.56023	± 10.4600
±10.0	±19.1205	± 5.23000
±15.0	±28.6807	± 3.48667
±20.0	±38.2409	± 2.615000

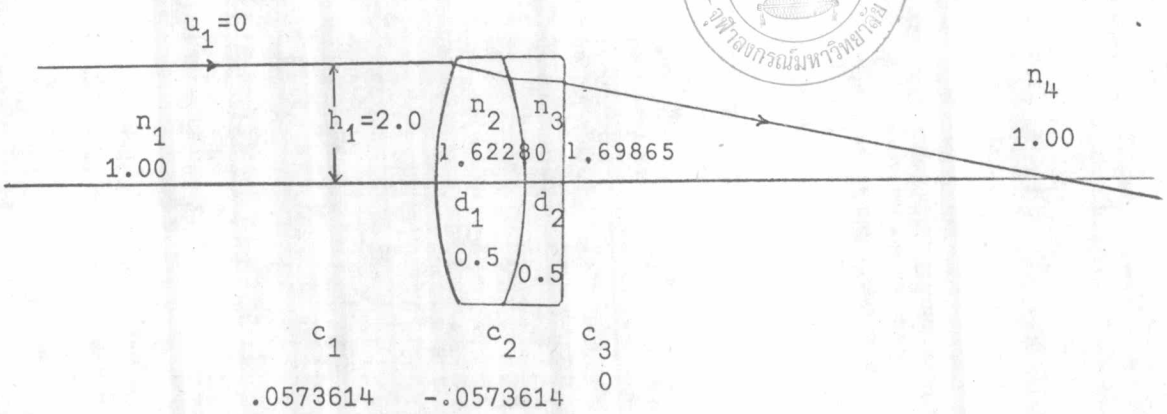
จากค่ารัศมีความโค้งที่ทำการออกแบบไว้ จำเป็นต้องปรับค่า เพื่อให้พอดีกับทูลที่มีอยู่ โดยกำหนด R_1 = 17.4333 เซนติเมตร และ $R_2 = R_3$ = -17.4333 เซนติเมตร กล่าวคือ เลือกใช้ทูลขนาด + 3 ไดออปเตอร์ สำหรับฝนเลนซ์นูน และ -3 ไดออปเตอร์ สำหรับการฝนผิวเว้า



ภาพ 3-2 ทูลเหล็กสำหรับการฝนเลนซ์

1.1.2 การตรวจสอบความคลาดของเลนซ์ที่ออกแบบ เนื่องจากเลนซ์ที่ทำการออกแบบสร้างเป็นเลนซ์คอลลิเมเตอร์ ซึ่งใช้ในงานที่มีส่นามหน้าเลนซ์แคบ ความคลาดที่ต้องคำนึงถึง ก็คือ ความคลาดทรงกลม , โคมา และความคลาดรงค์ ในการแกะรอยรังสีเพื่อตรวจสอบความคลาด ได้คำนวณหาเพียงค่าสัมประสิทธิความคลาดทรงกลม ($_0W_{40}$), โคมา ($_1W_{31}$), ความคลาดรงค์ตามแนวแกน (δW_{20}) และความคลาดรงค์ตามแนวขวาง (δW_{11}) เท่านั้น โดยดำเนินการแกะรอยรังสีดังต่อไปนี้

เริ่มจากรังสีใกล้แกนที่เข้ามาตกกระทบผิวโค้งแรก มีค่ามุมชัน (u_1) เป็น 0 และกำหนดให้ตกกระทบที่ขอบเลนซ์ ซึ่งมีความสูง (h) 2 เซนติเมตร และให้เลนซ์ทั้งสองมีความหนาเป็น 0.5 เซนติเมตร



ภาพ 3-3 แสดงการแกะรอยรังสีใกล้แกน

จาก สมการการแกะรอย $\alpha = hc$

$A = n(\alpha - u)$

$u' = \alpha - \frac{A}{n'}$

$h_{+1} = h - du'$

พิจารณาการหักเหที่ผิวโค้งที่ 1

$\alpha_1 = h_1 c_1 = .114723$

$A_1 = n_1(\alpha_1 - u_1) = .114723$

$u_2 = u_1' = \alpha_1 - \frac{A_1}{n_1'} = .0440284$

ผิวโค้งที่ 2 $h_2 = h_1 - d_1 u_1' = 1.97799$ cm

$\alpha_2 = h_2 c_2 = -.113460$

$A_2 = n_2(\alpha_2 - u_2) = -.255572$

$u_3 = u_2' = \alpha_2 - \frac{A_2}{n_2'} = .0369961$

$$h_3 = h_2 - d_2u_2' = 1.95949 \text{ cm}$$

ผิวโค้งที่ 3

$$\alpha_3 = h_3c_3 = 0$$

$$A_3 = n_3(\alpha_3 - u_3) = -.0628434$$

$$u_4 = u_3' = \alpha_3 - \frac{A_3}{n_3'} = .0628434$$

ต่อมาทำการหาค่า $\Delta\frac{u}{n}$ สำหรับผิวโค้งต่าง ๆ

ผิวโค้งที่ 1 $\Delta(\frac{u}{n}) = \frac{u_2}{n_2} - \frac{u_1}{n_1} = .0271311$

ผิวโค้งที่ 2 $\Delta_2(\frac{u}{n}) = \frac{u_3}{n_3} - \frac{u_2}{n_2} = -.00535140$

ผิวโค้งที่ 3 $\Delta_3(\frac{u}{n}) = \frac{u_4}{n_4} - \frac{u_3}{n_3} = .0410637$

แล้วคำนวณหาผลรวมยองไซเดิลยองรังสีใกล้แกน (S_I) จากค่าที่ได้จากการแกะรอย =

ผิวโค้งที่ 1 $S_{I_1} = A_1^2h_1\Delta_1(\frac{u}{n}) = 7.14163 \times 10^{-5}$ cm

ผิวโค้งที่ 2 $S_{I_2} = A_2^2h_2\Delta_2(\frac{u}{n}) = -6.91381 \times 10^{-5}$ cm

ผิวโค้งที่ 3 $S_{I_3} = A_3^2h_3\Delta_3(\frac{u}{n}) = 3.17776 \times 10^{-5}$ cm

ผลรวมยองไซเดิลสำหรับรังสีใกล้แกน

$$S_I = \Sigma A^2h\Delta(\frac{u}{n})$$

หรือ $S_I = S_{I_1} + S_{I_2} + S_{I_3}$

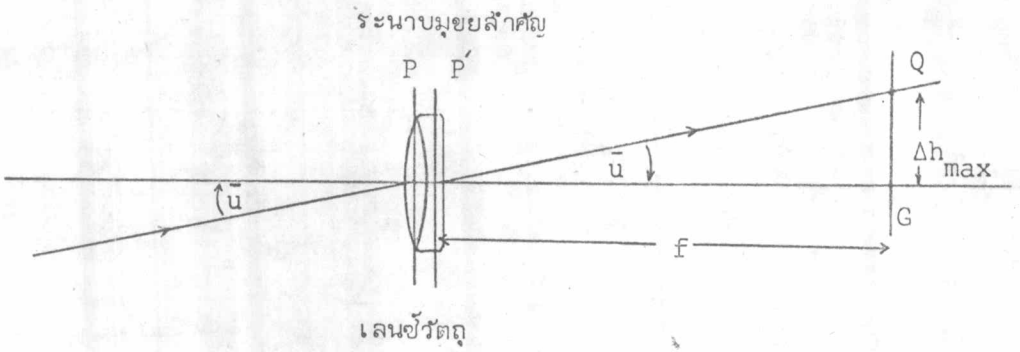
$$S_I = 3.40558 \times 10^{-5} \text{ cm.}$$

หา สัมประสิทธิความคลาดทรงกลม ($_oW_{40}$) จากความสัมพันธ์

$$_oW_{40} = \frac{1}{8} S_I$$

ดังนั้น $$_oW_{40} = 4.25698 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

สำหรับการแกะรอยรังสีมุขยสำคัญใกล้แกน จำเป็นต้องทราบถึงขนาดส่นามหน้าเลนซ์วัตถุ ถ้าให้ขนาดส่นามมีค่าเป็นมุม $\bar{u}$ จะพิจารณาขนาดส่นามของการใช้งานของออโต-คอลลิเมเตอร์ได้ จากภาพ 3-4



ภาพ 3-4 แสดงทางเดินของรังสีมุขยสำคัญที่มีมุมของส่นามด้วยค่า $\bar{u}$

ออโตคอลลิเมเตอร์ มีขอบเขตการใช้งานขึ้นอยู่กับขนาดของส่เกลบนแกรตติคุล ถ้ารังสีที่ส่ะท้อนกลับมาทำมุมกว้างเกินไป จนภาพมีตคู่นย์พ้นขอบส่เกล จะทำให้ไม่สามารถบันทึกค่าการบ่ายเบนได้ และเนื่องจากขนาดของส่เกลบนแกรตติคุลมีค่า 1 เซนติเมตร การเบี่ยงเบนจากแนวกลางของแกรตติคุลที่อ่านได้ (Δh_{max}) จะมีค่า 0.5 เซนติเมตร ขนาดของส่นาม ($\bar{u}$) ดังกล่าวส่ามารถหาได้จากค่า $\frac{\Delta h_{max}}{f}$ ในกรณี $\bar{u}$ เป็นมุมแคบ

ดังนั้นจะได้ $\bar{u} = .0150150$ เรเดียน

เมื่อคำนึงถึงข้อกำหนดของเครื่องหมายจะได้ $\bar{u} = -.0150150$ เรเดียน

จากสมการแกะรอย

$$\bar{\alpha} = \bar{hc}$$

$$\bar{A} = n(\bar{\alpha} - \bar{u})$$

$$\bar{u'} = \bar{\alpha} - \frac{\bar{A}}{\bar{n'}}$$

$$\bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u'}$$

ทำการแกะรอยรังสีมุขยสำคัญ ในลักษณะเดียวกับรังสีใกล้แกน รายละเอียดจะขอไม่กล่าวถึง ค่าที่คำนวณได้สำหรับการแกะรอย แสดงไว้ในตาราง 3.2

ในตาราง 3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิความคลาดที่คำนวณได้ คือ

$$_{o}W_{40} = 4.257 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร}$$

$$_{1}W_{31} = 2.845 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร}$$

$$\delta W_{20} = 2.279 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร}$$

$$\delta W_{11} = .0950 \times 10^{-5} \text{ เซนติเมตร}$$

ความคลาดดังกล่าว เป็นความคลาดหน้าคลื่นที่มีอยู่ของเลนซ์ที่ได้ทำการออกแบบ สำหรับค่าความคลาดที่อนุโลมให้มีได้ตามข้ออนุโลมของเรย์เลห์ (Rayleigh criterion) ซึ่งกำหนดไว้อย่างเข้มงวด กล่าวคือ ขนาดความคลาดหน้าคลื่นที่พออนุโลมได้ ต้องมีขนาดไม่เกิน $\frac{\lambda}{4}$ เมื่อ λ คือความยาวของคลื่นแสง โดยทั่วไป ค่าความยาวคลื่นที่ใช้ คือ ความยาวคลื่นของเส้นแสง D ซึ่งมีความยาวคลื่น 5893 อังสตรอม หรือ 5.893×10^{-5} เซนติเมตร ดังนั้นตามข้ออนุโลมของเรย์เลห์ จะยอมให้มีความคลาดด้วยค่า 1.473×10^{-5} เซนติเมตร เนื่องจากข้ออนุโลมของเรย์เลห์เป็นข้อกำหนดที่เข้มงวดมาก ดังนั้นค่าความคลาดที่ยอมรับให้มีได้ จะกำหนดไว้ด้วยค่า 1 λ แทน ซึ่งเลนซ์ที่ทำการออกแบบไว้ จะมีค่าความคลาดต่าง ๆ อยู่ในเกณฑ์ที่อนุโลมได้ โดยจะพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิที่คำนวณไว้ดังกล่าว

ตาราง 3.2 แสดงค่าที่คำนวณของการแกะรอยรังสี

$u_1 = 0$ $\quad \bar{u}_1 = -.0150150$

$h_1 = 2.0$ $\quad \bar{h}_1 = 0$

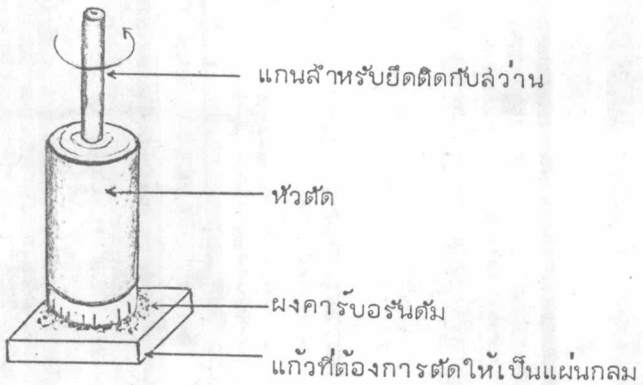
d_1 d_2 (cm)	n_2 n_3	c_1 c_2 c_3	α_1 α_2 α_3	A_1 A_2 A_3	$u'_1 = u_2$ $u'_2 = u_3$ $u'_3 = u_4$	h_1 h_2 h_3 (cm)	u_1/n_1 u_2/n_2 u_3/n_3 u_4/n_4	$\Delta_1(\frac{u}{n})$ $\Delta_2(\frac{u}{n})$ $\Delta_3(\frac{u}{n})$	A_1h_1 A_2h2 A_3h_3 (cm)	S_{I_1} S_{I_2} S_{I_3} (cm)
.5000 .5000	1.62280 1.69865	.0573614 -.0573614 0	.1147228 -.1134600 0	.1147228 -.2555722 -.0628434	.0440284 .0369961 .0628434	2.0 1.97799 1.95949	0 .0271311 .0217797 .0628434	.0271311 -.0053514 .0410637	.229446 -.505518 -.123141	7.14163×10^{-4} -6.91381×10^{-4} 3.17776×10^{-4}
			$\alpha = hc$	$A = n(\alpha - u)$	$u' = \alpha - \frac{A}{n}$,	$h_{+1} = h - du'$		$\Delta(\frac{u}{n}) = \frac{u}{n}_{+1} - \frac{u}{n}$		$S_I = \Sigma A^2 h \Delta(\frac{u}{n})$ $= 3.40558 \times 10^{-4}$
$\bar{\alpha}_1$ $\bar{\alpha}_2$ $\bar{\alpha}_3$	$\bar{A}_1$ $\bar{A}_2$ $\bar{A}_3$	$\bar{u}'_1 = \bar{u}_2$ $\bar{u}'_2 = \bar{u}_3$ $\bar{u}'_3 = \bar{u}_4$	$\bar{h}_1$ $\bar{h}_2$ $\bar{h}_3$	S_{II_1} S_{II_2} S_{II_3}	δn_1 δn_2 δn_3 δn_4	$(\delta n/n)_2$ $(\delta n/n)_3$	$\Delta_1(\frac{\delta n}{n})$ $\Delta_2(\frac{\delta n}{n})$ $\Delta_3(\frac{\delta n}{n})$	C_{L_1} C_{L_2} C_{L_3}	C_{T_1} C_{T_2} C_{T_3}	$W_{040} = \frac{1}{8}S_I$ $1W_{31} = \frac{1}{2}S_{II}$ $\delta W_{20} = \frac{1}{2}C_L$ $\delta W_{11} = C_T$
0 -.00265368 0	.0150150 .0145843 .0150351	-.00925253 -.00885119 -.0150351	0 .00462626 .00905184	9.34702×10^{-5} 3.94539×10^{-5} -7.60269×10^{-5}	0 .0109455 .0218191 0	.00674482 .0128450	.00674482 .00610018 -.0128450	1.54757×10^{-3} -3.08373×10^{-3} 1.58174×10^{-3}	2.02547×10^{-4} 1.75976×10^{-4} -3.78428×10^{-4}	4.25698×10^{-5} 2.84486×10^{-5} 2.27900×10^{-5} 0.0950000×10^{-5}
$\bar{\alpha} = \bar{h}c$	$\bar{A} = n(\bar{\alpha} - \bar{u})$	$\bar{u}' = \bar{\alpha} - \frac{\bar{A}}{n}$,	$\bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u}'$	$S_{II} = \Sigma \bar{A} h \Delta \frac{u}{n}$ $= 5.68972 \times 10^{-5}$				$C_L = \Sigma A h \Delta \frac{\delta n}{n}$ $= 4.55800 \times 10^{-5}$	$C_T = \Sigma \bar{A} h \Delta \frac{\delta n}{n}$ $= 9.50000 \times 10^{-7}$	

ดังนั้น ในการพิจารณาเลือกลักษณะรูปร่างของเลนซ์วัตถุ จึงได้เลือกรูปร่างของเลนซ์ให้เป็นไปตามค่าที่กำหนดในการออกแบบ ด้วยเหตุผลสำคัญ 2 ประการ คือ

- เลนซ์ที่ออกแบบ มีความคลาดหน้าคลื่นอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้

- สะดวกในการจัดหาทูลเหล็ก เพราะเลนซ์นูนเดี่ยวเป็นแบบเลนซ์นูนด้านเท่า สามารถใช้ทูลเหล็กชิ้นเดียวกัน และเลนซ์เว้าเป็นแบบเลนซ์เว้าแกมราบ ซึ่งทูลเหล็กดังกล่าว มีอยู่ในโรงงานออพติคล์ โดยไม่จำเป็นที่จะต้องจัดสร้างขึ้นใหม่

1.1.3 การจัดเตรียมแก้วที่ใช้ทำเลนซ์ แก้วที่ใช้ทำเลนซ์เป็นแก้วทางทางทัศนศาสตร์ที่มีค่าดรรชนีหักเห สม่ำเสมอทั่วทุกส่วน แก้วที่ใช้ในงานนี้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส กว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร และหนา 2 เซนติเมตร ต้องทำการตัดให้เหลือความหนาประมาณ 1 เซนติเมตรเสียก่อนโดยใช้เครื่องตัดแก้วในโรงงานทัศน์ (optical workshop) เสร็จแล้วจึงนำแผ่นแก้วสี่เหลี่ยมที่ได้ไปตัดให้เป็นแผ่นกลม โดยใช้หัวตัดโลหะรูปทรงกระบอก ยึดติดกับแกนหมุนของเครื่องเจาะโลหะ และใช้ผงคาร์บอรันดัม (carborundum) ชนิดหยาบที่สุดเป็นตัวกัดเซาะ ขณะที่หัวตัดหมุนจะกดผงคาร์บอรันดัมให้เคลื่อนตาม และเซาะผิวแก้วให้เป็นร่องลึกลงไป ในที่สุดจะตัดแก้วให้เป็นแผ่นกลมได้ตามต้องการ ต่อจากนั้นก็นำแผ่นแก้วกลมที่ได้ไปทำการเกลาผิวหน้าอย่างหยาบ ๆ ด้วยเครื่องเกลาผิว (surface grinding machine) ซึ่งจะทำการเกลาผิวหน้าของแผ่นแก้ว ให้มีความโค้งที่ใกล้เคียงกับผิวของทูลเหล็ก จะได้แผ่นแก้วที่มีผิวโค้ง สำหรับทำการฝนด้วยทูลเหล็ก ในขั้นต่อไป



ภาพ 3-5 แสดงการตัดแก้วให้เป็นแผ่นกลม

1.1.4 การฝนผิวแก้วโดยใช้ทูลเหล็ก เริ่มต้นโดยนำทูลเหล็กยึดติดกับแท่นหมุนของเครื่องฝนเลนซ์ ใส่ผงคาร์บอรันดัมลงบนทูลเหล็กเล็กน้อยพร้อมกับหยอดน้ำลงไป แล้ววางแผ่นแก้วที่เตรียมไว้ลงบนผิวทูล ขณะที่ทูลเหล็กหมุนก็ทำการฝนแผ่นแก้วไปมาในแนวตรงจนกระทั่งครบ 10 รอบ ซึ่งเรียกว่า 10 สโตรค แล้วจึงหมุนแผ่นแก้วไปประมาณ 30° ทำการฝนสโครคสลับกับการหมุนแผ่นแก้วเช่นนี้เรื่อย ๆ ด้วยวิธีการฝนดังกล่าว จะทำให้ผิวแก้วทุกส่วนถูกขัดอย่างทั่วถึง ทำการฝนตามวิธีการเช่นนี้ จนได้ผิวโค้งที่เรียบสม่ำเสมอ ใช้แว่นขยายส่องเพื่อตรวจสอบว่าไม่มีหลุมหรือรอยตำที่ใหญ่ผิดปกติ จึงทำการเปลี่ยนผงคาร์บอรันดัมให้เป็นผงที่ละเอียดขึ้น และก่อนทำการฝนต้องล้างผิวแก้วและทูลให้สะอาดจนแน่ใจว่าไม่มีผงขัดเดิมหลงเหลืออยู่ แล้วจึงดำเนินการฝนในลักษณะเดียวกัน ก็จะได้ผิวโค้งที่มีความเรียบมากขึ้นตามลำดับของผงขัด ภายหลังจากทำการฝนด้วยผงที่ละเอียดที่สุด ผิวโค้งที่ได้จะมีลักษณะเป็นฝ้าบาง ๆ ซึ่งพร้อมที่จะทำการขัดใส่ให้ผิวเรียบสนิทโดยใช้ยางมะตอย (pitch) ต่อไป

1.1.5 การขัดใส่โดยใช้ยางมะตอย เริ่มต้นโดยการเตรียมผิวยางมะตอยสำหรับการขัดใส่ โดยทำการหล่อยางมะตอยลงในเบ้าบนทูลเหล็ก ทิ้งไว้ให้เย็นตัวจะได้แผ่นยางมะตอยแข็ง ต่อจากนั้นทำให้ยางมะตอยอ่อนตัวโดยจุ่มลงในน้ำร้อน แล้วจึงนำแผ่นแก้วที่จะขัดใส่มากดลงบนผิวยางมะตอย เพื่อให้ยางมะตอยมีผิวโค้งที่พอดีกับผิวของแก้ว ทำการเซาะผิวยางมะตอยให้เป็นร่องตาราง ต่อจากนั้น จึงนำแท่นยางมะตอยไปยึดติดกับแท่นหมุนของเครื่องฝนเลนซ์ เพื่อใช้ในการขัดใส่ผิวแก้วต่อไป สำหรับด้านหลังของแผ่นแก้วที่จะขัดใส่ ควรหล่อทับด้วยขี้ผึ้ง แล้วยึดติดกับแท่นไม้ที่มีขนาดพอเหมาะมือ เพื่อใช้จับระหว่างทำการขัดใส่ ในการขัดใส่จะใช้ผงขัด ซึ่งเรียกว่าผงรูจ (rouge) แทนผงคาร์บอรันดัม ใส่ผงรูจลงบนผิวยางมะตอยหยอดน้ำเล็กน้อย วางแผ่นแก้วลงบนผิวยางมะตอย แล้วดำเนินการขัดใส่เช่นเดียวกับการฝน จนได้ผิวแก้วที่เรียบสนิท สามารถมองทะลุผ่านได้ สำหรับผิวโค้งอีกด้าน ก็ทำการฝนและขัดใส่เช่นเดียวกัน ในที่สุดจะได้เลนซ์เดี่ยวตามต้องการ ต่อจากนั้นจึงนำเลนซ์ที่ได้ไปทำการฝนขอบให้เรียบ จะได้เลนซ์วัตถุ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.3 เซนติเมตร

จากวิธีการฝนเลนซ์ดังกล่าว เมื่อได้เลนซ์มูน และเลนซ์เว้าเรียบร้อยแล้วจึงนำมาประกบติดกัน โดยใช้ซีเมนต์ (cement) สำหรับติดเลนซ์ ก็จะได้เลนซ์อ็อรงค์ สำหรับใช้เป็นเลนซ์วัตถุของออโต-คอลลิเมเตอร์ตามต้องการ แต่ก่อนจะทำการประกบ ต้องทำการทดสอบคุณภาพของเลนซ์ที่สร้าง

ชั้นแต่ละชั้นเสียก่อน รายละเอียดของการทดลอบจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

1.2 เลนซ์ตาแบบแรมส์เดน

เลนซ์ตาแบบแรมส์เดน ประกอบด้วยเลนซ์เดี่ยวแบบนูนแกมราบ 2 ชิ้น ซึ่งมีทางยาวโฟกัสเท่ากัน และเท่ากับโฟกัสยังผลของเลนซ์ตาด้วย เมื่อกำหนดกำลังขยายเป็น 6 เท่า ค่าทางยาวโฟกัสยังผล (f) หาได้จาก

$$f = \frac{25}{6} \quad cm$$

$$f = 4.16667 \quad cm$$

$$K = 0.240000 \quad cm^{-1}$$

แก้วที่ใช้ทำเลนซ์ตา คือ แก้วเดนซ์แบเรียมคราวน์ ซึ่งมีดรรชนีหักเห (n_D) 1.62280

$$K = (n_D - 1)(c_1 - c_2)$$

$c_2 = 0$, $n_D = 1.62280$, $K = 0.240000 \quad cm^{-1}$

ดังนั้น $c_1 = .385356 \quad cm^{-1}$

$R_1 = 2.59500 \quad cm$

จากตาราง 3.1 และค่ารัศมีความโค้งที่ออกแบบ จะต้องทำการเลือกทูลขนาด + 20 ไดออปเตอร์ ซึ่งมีค่ารัศมีความโค้ง และความโค้ง คือ

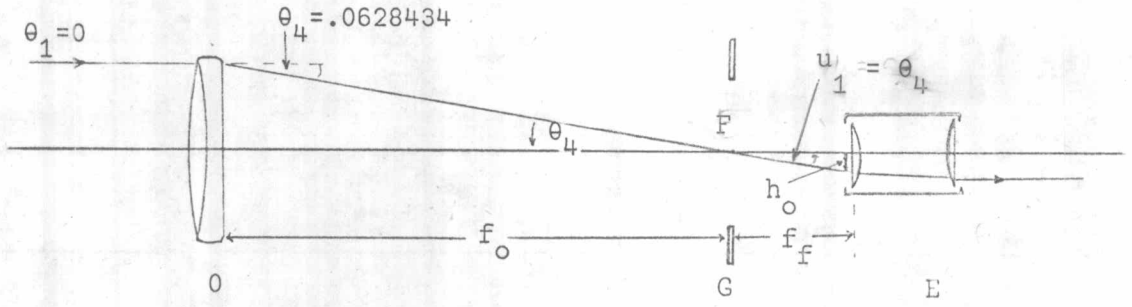
$$c = .382409 \quad cm^{-1}$$

$$K = 2.61500 \quad cm$$

สำหรับเลนซ์เดี่ยวแต่ละชิ้น จะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เซนติเมตร

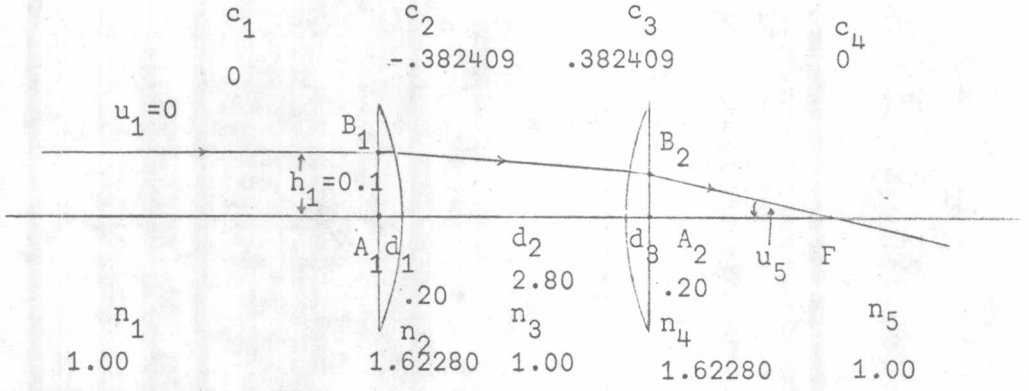
ทำการฝนเลนซ์เดี่ยวแบบนูนแกมราบทั้งสอง โดยวิธีการเช่นเดียวกับการฝนและขัดใส่ เลนซ์วัตถุ เมื่อได้เลนซ์เดี่ยวที่ต้องการแล้วจึงนำมาประกอบโดยวางห่างกันเป็นระยะ $\frac{2}{3}$ ของทางยาวโฟกัสเลนซ์เดี่ยว โดยวางผิวโค้งนูนเข้าหากัน ก็จะได้เลนซ์ตาตามต้องการ

จากค่ารัศมีความโค้งที่ทำการออกแบบไว้ เลนซ์เดี่ยวแต่ละอัน จะมีค่าทางยาวโฟกัส 4.19878 เซนติเมตร ซึ่งจะต้องทำการวางไว้ห่างกัน 2.8 เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางเดินแสงในระบบของออโตคอลลิเมเตอร์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบของกล้องโทรทัศน์ (telescopic system) ดังภาพ 3-6



ภาพ 3-6 แสดงทางเดินแสงภายในระบบของออโตคอลลิเมเตอร์

จากภาพ 3-6 ความสูงที่รังสีใกล้แกนของระบบตกกระทบที่ผิวแรกของเลนซ์ตาจะมีค่าเป็น h_o โดยที่ $h_o = u_1 . f_f$ เมื่อ f_f เป็นทางยาวโฟกัสหน้าเลนซ์ (front focal length) ของระบบเลนซ์ตา โดยที่จุด F คือตำแหน่งจุดโฟกัสของเลนซ์วัตถุ และเลนซ์ตา รังสีใกล้แกนเมื่อหักเหออกจากผิวสุดท้ายของเลนซ์ตาจะเป็นรังสีที่ขนานกับแนวแกน ดังนั้นเพื่อให้สะดวกในการแกะรอยสำหรับเลนซ์ตา จึงดำเนินการแกะรอยโดยกลับระบบเลนซ์ตา ให้ผิวที่สี่กลับเป็นผิวแรก โดยมีรังสีแสงมาตกกระทบในแนวขนานกับแนวแกน ($u_1 = 0$) และกำหนดให้เลนซ์ทั้งสองมีความหนา .20 เซนติเมตร เริ่มต้นแกะรอยรังสีใกล้แกน โดยมีความสูง (h_1) ของแนวรังสีด้วยค่า 0.1 เซนติเมตร เพื่อทำการหาตำแหน่งจุดโฟกัสที่แน่นอนของระบบเลนซ์ตาเสียก่อน



ภาพ 3-7 แสดงทางเดินรังสีในการแกะรอยเพื่อหาตำแหน่งจุดโฟกัสของระบบเลนซ์ตา

เริ่มต้นจาก $u_1 = .000000$, $h_1 = .100000$, $c_1 = .000000$

$$\alpha_1 = h_1 c_1 = = .000000$$

$$A_1 = n_1(\alpha_1 - u_1) = .000000$$

$$u_2 = u_1' = \alpha_1 - \frac{A_1}{n_1'} = .100000$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u_1' = .100000 \text{ cm}$$

$$\alpha_2 = h_2 c_2 = -.0382409$$

$$A_1 = n_2(\alpha_2 - u_2) = -.0620573$$

$$u_3 = u_2' = \alpha_2 - \frac{A_2}{n_2'} = .0238164$$

$$h_3 = h_2 - d_2 u_2' = .0333140 \text{ cm}$$

$$\alpha_3 = h_3 c_3 = .0127396$$

$$A_3 = n_3(\alpha_3 - u_3) = -.0110768$$

$$u_4 = u_3' = \alpha_3 - \frac{A_3}{n_3'} = .0195653$$

$$h_4 = h_3 - d_3 u_3' = .0294009 \text{ cm}$$

$$\alpha_4 = h_4 c_4 = .000000$$

$$A_4 = n_4(\alpha_4 - u_4) = -.0317506$$

$$u_5 = u_4' = \alpha_4 - \frac{A_4}{n_4'} = .0317506$$

จากภาพ 3-6 กรณี u_5 เป็นมุมแคบ พิจารณา ΔA_2B_2F จะได้

$$u_5 = \frac{A_2B_2}{A_2F}$$

ดังนั้น

$$A_2F = \frac{A_2B_2}{u_5} = \frac{h_4}{u_5}$$

จะได้

$$A_2F = .925996 \text{ cm}$$

ดังนั้น ตำแหน่งจุดโฟกัสของรังสีแสงในส่วนใกล้แกน จะอยู่ห่างจากผิวที่สี่เป็นระยะ .925996 เซนติเมตร

เมื่อเปรียบเทียบกับภาพ 3-6 ระยะ A_2F ก็คือ ระยะ f_f ดังนั้น จะได้

$$f_f = .925996 \text{ เซนติเมตร}$$

และ

$$h_o = .0581927 \text{ เซนติเมตร}$$

พิจารณาผิวที่สี่ของเลนซ์ตาในภาพ 3-7 (ผิวที่หนึ่งในภาพ 3-6) เมื่อทำการแกะรอยในช่วงความสูง 0.1 เซนติเมตร หลังจากรังสีแสงหักเหผ่านระบบเข้ามา จะตกกระทบผิวนี้ที่ความสูง .0294009 เซนติเมตร แต่เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางเดินแสงภายในระบบดังภาพ 3-6 ความสูงของรังสีใกล้แกนควรมีค่า .0581927 เซนติเมตร ดังนั้น จึงต้องทำการปรับช่วงความสูงของส่วนใกล้แกนจาก 0.1 เซนติเมตร ให้เพิ่มขึ้น โดยอาศัยสเกลแฟคเตอร์ (scale factor)

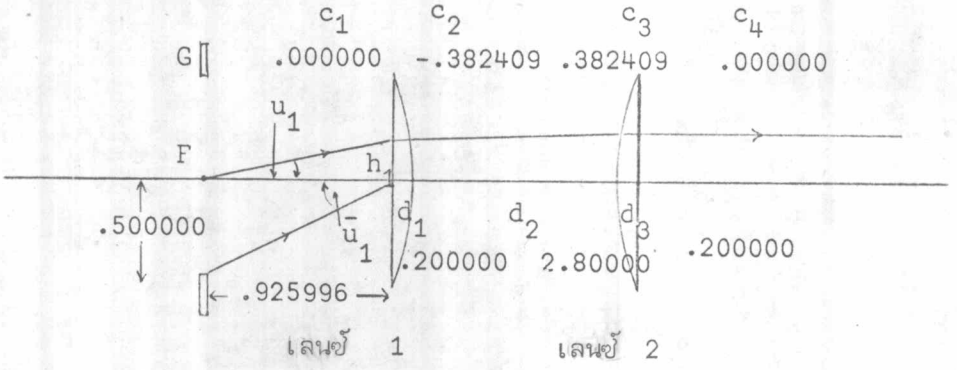
โดยความสัมพันธ์

$$x = \frac{h'_1}{\bar{h}_1} = \frac{h'_2}{\bar{h}_2} = \frac{h'_3}{\bar{h}_3} = \frac{h'_4}{\bar{h}_4}$$

เมื่อ x คือ สเกลแฟคเตอร์ ดังกล่าว ,h คือความสูงเดิม และ h' คือ ความสูงที่เปลี่ยนแปลง

ดังนั้น เมื่อต้องทำการเปลี่ยน ความสูงจาก h_4 ซึ่งมีค่า .0294009 เซนติเมตร เป็น h'_4 ด้วยค่า .0581927 เซนติเมตร จะมีค่าสเกลแฟคเตอร์ คือ 1.97928 และค่า h'_1, h'_2, h'_3 คือ .197928, .197928, .0650377 เซนติเมตร ตามลำดับ

จากข้อมูลดังกล่าว ในการแกะรอย เพื่อตรวจหาความคลาดของระบบเลนซ์ตา ตามลักษณะการใช้งานดังภาพ 3-6 จึงเริ่มต้นด้วย $u_1 = -.0628434$ และ $h_1 = .0581927$ สำหรับรังสีใกล้แกน ดังภาพ 3-8



ภาพ 3-8 แสดงทางเดินรังสีเพื่อตรวจสอบคุณภาพของเลนซ์ตาที่ออกแบบไว้

สำหรับ รังสีมุขยสำคัญ พิจารณาจากภาพ จะได้

$$\bar{u}_1 = \frac{.500000}{.925996} = .539959$$

และ $\bar{h}_1 = 0$

แล้วจึงดำเนินการแกะรอยเช่นเดียวกับเลนซ์วัตถุ ข้อมูลของการแกะรอย แสดงไว้ในตาราง 3-3 และผลของการแกะรอยที่ได้ คือ

ตาราง 3.3 แสดงข้อมูลของการแกะรอยสำหรับเลนซ์ตาที่ออกแบบ

$u_1 = -.0628434$ $\quad \bar{u}_1 = -.539959$

$h_1 = .0581922$ $\quad \bar{h}_1 = 0$

d_1 d_2 d_3	n_1 n_2 n_3	c_1 c_4 c_3 c_4	α_1 α_2 α_3 α_4	A_1 A_2 A_3 A_4	$u'_1 = u_2$ $u'_2 = u_3$ $u'_3 = u_4$ $u'_4 = u_5$	h_1 h_2 h_3 h_4	u_1/n_1 u_2/n_2 u_3/n_3 u_4/n_4 u_5/n_5	$\Delta_1(\frac{u}{n})$ $\Delta_2(\frac{u}{n})$ $\Delta_3(\frac{u}{n})$ $\Delta_4(\frac{u}{n})$	A_1h_1 A_2h_2 A_3h_3 A_4h_4	S_{I_1} S_{I_2} S_{I_3} S_{I_4}
.200000 2.80000 .200000	1.62280 1.00000 1.62280	0 -.382409 .382409 0	0 -.0252150 .0756894 0	.0628434 .0219245 .122829 0	-.0387253 -.0471395 0 0	.0581922 .0659373 .197928 .197928	-.0628434 -.0238633 -.0471395 0 0	.0389801 -.0232762 .0471395 0	.00365700 .00144564 .0243113 0	$.895834\times10^{-5}$ $-.0737738\times10^{-5}$ 14.765×10^{-5} 0
			$\alpha = hc$	$A = n(\alpha - u)$	$u' = \alpha - \frac{A}{n'}$	$h_{+1} = h - du'$				$S_I = \Sigma A^2 h \Delta(\frac{u}{n})$ $=14.8986\times10^{-5}$
$\bar{\alpha}_1$ $\bar{\alpha}_2$ $\bar{\alpha}_3$ $\bar{\alpha}_4$	$\bar{A}_1$ $\bar{A}_2$ $\bar{A}_3$ $\bar{A}_4$	$\bar{u}'_1 = \bar{u}_2$ $\bar{u}'_2 = \bar{u}_3$ $\bar{u}'_3 = \bar{u}_4$ $\bar{u}'_4 = \bar{u}_5$	$\bar{h}_1$ $\bar{h}_2$ $\bar{h}_3$ $\bar{h}_4$	S_{II_1} S_{II_2} S_{II_3} S_{II_4}	δn_1 δn_2 δn_3 δn_4 δn_5	$(\delta n/n)_2$ $(\delta n/n)_4$	$\Delta_1(\delta n/n)$ $\Delta_2(\delta n/n)$ $\Delta_3(\delta n/n)$ $\Delta_4(\delta n/n)$	C_{L_1} C_{L_2} C_{L_3} C_{L_4}	C_{T_1} C_{T_2} C_{T_3} C_{T_4}	${}_0W_{40} = \frac{1}{8} S_I$ ${}_1W_{31} = \frac{1}{2} S_{II}$ $\delta W_{20} = \frac{1}{2} C_L$ $\delta W_{11} = C_T$
0 -.0254480 .586636 0	.539959 .498662 1.11075 .158753	-.332733 -.524110 -.0978265 -.158753	0 .0665466 1.53405 1.55362	7.69713×10^{-5} -1.67795×10^{-5} 127.294×10^{-5} 0	0 .0109455 0 .0109455 0	.00674482 .00674482	.00674482 -.00674482 .00674482 -.00674482	2.46658×10^{-5} $-.975058\times10^{-5}$ 16.3975×10^{-5} 0	21.1932×10^{-5} -22.1772×10^{-5} 148.284×10^{-5} 21.1933×10^{-5}	1.86232×10^{-5} 66.6566×10^{-5} 8.944450×10^{-5} 126.107×10^{-5}
$\bar{\alpha} = \bar{h}c$	$\bar{A} = n(\bar{\alpha} - \bar{u})$	$\bar{u} = \bar{\alpha} - \frac{\bar{A}}{n'}$	$\bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u}'$	$S_{II} = \Sigma \bar{A} A h \Delta(\frac{u}{n})$ $=133.313\times10^{-5}$				$C_L = \Sigma A h \Delta(\frac{\delta n}{n})$ $=17.8890\times10^{-5}$	$C_T = \Sigma \bar{A} h \Delta(\frac{\delta n}{n})$ $=126.107\times10^{-5}$	

$_{o}W_{40}$ = 1.862 x 10^{-5} เซนติเมตร

$_{1}W_{31}$ = 66.66 x 10^{-5} เซนติเมตร

δW_{20} = 8.944 x 10^{-5} เซนติเมตร

δW_{11} = 126.1 x 10^{-5} เซนติเมตร

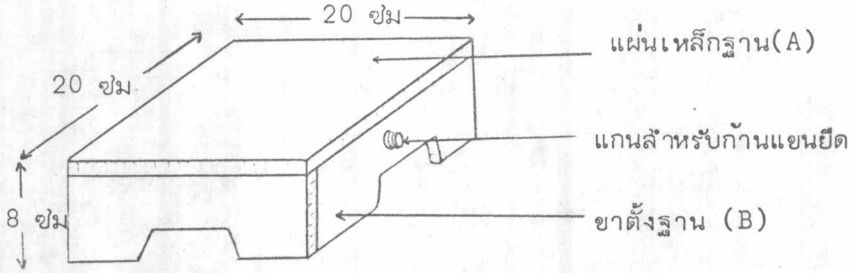
เลนซ์ตาแบบแรมส์เดนเป็นระบบที่มีความคลาดรงค์ และโคมาค่อนข้างสูง เนื่องจากไม่สามารถจัดวางเลนซ์ทั้งสองให้ห่างกันตามเงื่อนไขของการแก้ความคลาดรงค์ได้ และส่นามของระบบเลนซ์เป็นมุมกว้างมาก ซึ่งเป็นผลมาจาก ทางยาวโฟกัสหน้าเลนซ์มีค่าน้อย แม้ว่าวัตถุบนระนาบ ณ จุดโฟกัสจะออกจากแนวแกนไปเพียงเล็กน้อยก็ตาม มุมรองรับของส่นามจากเลนซ์หน้าก็จะเป็นมุมกว้าง จึงเป็นผลทำให้เลนซ์ตาที่ออกแบบ มีความคลาดสูงมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว

1.3 ปริซึม 45^{o} ขนาดเล็ก

เนื่องจากปริซึมสำหรับใช้ในการหักเหแสง เพื่อส่องส่ว่างแก่ยึดศูนย์บนแกรตติคูลนั้น มีขนาดเล็กมาก จำเป็นต้องจัดส่ร้างขึ้นเอง ซึ่งทำได้โดยนำแก้วขึ้นเล็ก ๆ มาแต่งให้เข้ารูปร่าง โดยใช้เครื่องกรอ ซึ่งใช้หินกรอทำจากแผ่นคาร์บอรันดัมแบบละเอียด จากนั้น นำแก้วที่ได้รูปร่างไปทำการขัดผิวหน้าด้วยทูลราบ ตามวิธีการฝนเลนซ์ เพื่อให้ผิวเรียบส่ม่ำเส่มอ แล้วจึงทำการขัดใส่อีกครั้งก็จะได้ปริซึมตามต้องการ ปริซึมดังกล่าวมีขนาดฐาน 0.4 เซนติเมตร และสูง 0.4 เซนติเมตร

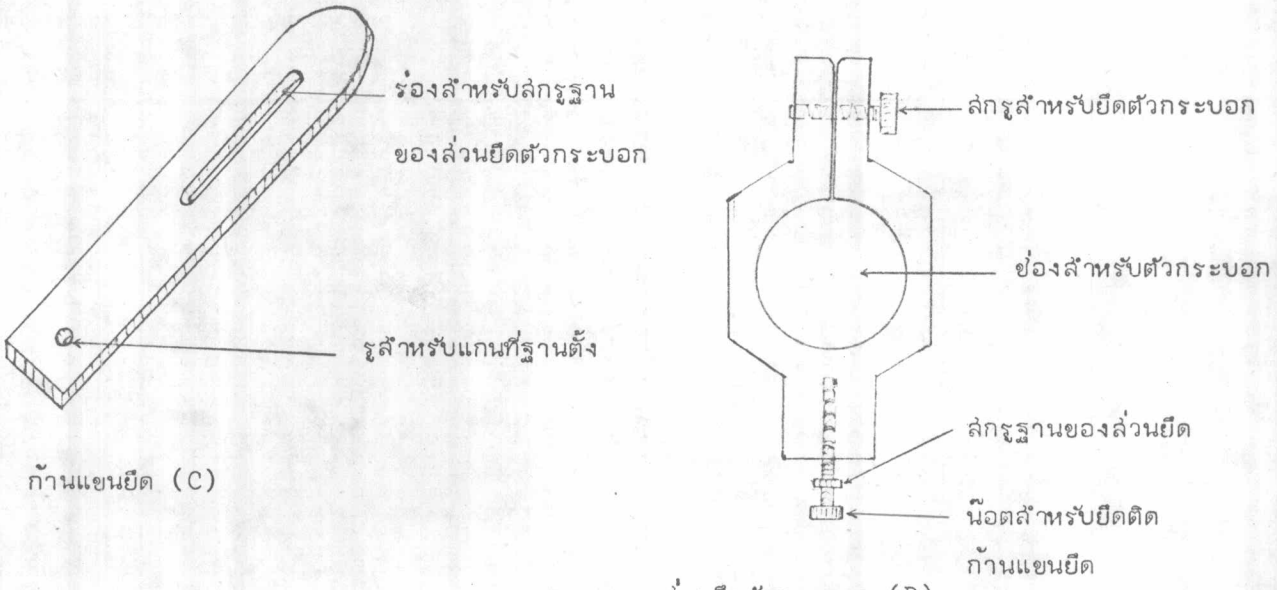
1.4 ฐานและแขนยึด

ฐานตั้งทำขึ้นจากเหล็กแผ่น หนา 1 เซนติเมตร ประกอบด้วยแผ่นเหล็กรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส (A) ยาวด้านละ 20 เซนติเมตร 1 ชิ้น และแผ่นเหล็กขาตั้ง (B) กว้าง 8 เซนติเมตร และยาว 20 เซนติเมตร อีก 4 ชิ้น สำหรับเป็นขาตั้งรองรับแผ่นเหล็ก A แผ่นเหล็ก B แผ่นหนึ่งจะมีรูตรงกลาง เพื่อใส่ลูกรูสำหรับเป็นแกนยึดก้านแขนยึด ดังภาพ 3-9



ภาพ 3-9 ฐานตั้งสำหรับออโต-คอลลิเมเตอร์

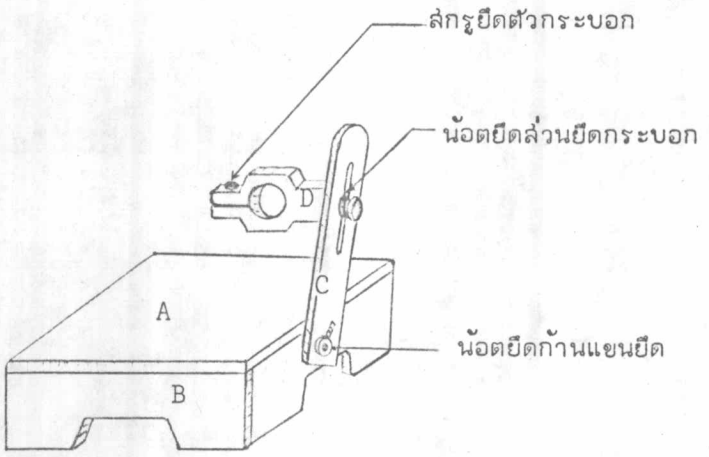
แขนยึดของออโต-คอลลิเมเตอร์ ประกอบด้วยก้านแขนยึด (C) และส่วนยึดตัวกระบอก (D) ดังภาพ 3-10



ภาพ 3-10 ส่วนประกอบของแขนยึดของออโต-คอลลิเมเตอร์

ก้านแขนยึด C ทำจากแผ่นเหล็กหนา 1 เซนติเมตร กว้าง 6 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร ตรงกลางเซาะร่องขนาด 1 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร สำหรับใส่สกรูฐานของส่วนยึด (D) ทำให้สามารถเลื่อนส่วนยึด (D) ไปมาได้ตามแนวของก้านแขนยึด ด้านล่าง

เจาะรูไว้เพื่อยึดติดกับฐานตั้ง สำหรับส่วนยึดตัวกระบอก (D) ทำจากอลูมิเนียม เพื่อให้มีน้ำหนักเบา โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 1 เซนติเมตร กว้าง 7.5 เซนติเมตร และยาว 12 เซนติเมตร ตรงกลางคว้านเป็นช่องสำหรับใส่ตัวกระบอก ด้านล่างใส่ลูกรู เพื่อเป็นแกนสำหรับยึดติดกับก้านแขนยึด (C) ส่วนด้านบนมีลูกรูสำหรับขันปลายเพื่อยึดตัวกระบอกให้แน่น



ภาพ 3-11 ฐานตั้งพร้อมแขนยึด

1.5 ส่วนประกอบอื่น ๆ

นอกจากอุปกรณ์ใหญ่ ๆ ดังกล่าว ยังมีส่วนประกอบเล็ก ๆ อย่างอื่นได้แก่ กรอบใส่เลนซ์ ตัวกระบอก หลอดไฟพร้อมแหล่งจ่ายไฟ รายละเอียดการจัดสร้างของกล่าวไว้อย่างสั้น ๆ ตามลำดับ คือตัวกรอบใส่เลนซ์ ใช้โลหะทองเหลือง ทำให้เข้ารูปร่างและขนาดที่ต้องการ โดยใช้เครื่องกลึงโลหะภายในโรงงานของภาควิชาฟิสิกส์ ตัวกระบอกใช้ท่ออลูมิเนียม เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ปลายข้างหนึ่งใส่น็อตขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการยึดกรอบของเลนซ์วัตถุ หลอดไฟใช้หลอดขนาด 6 โวลต์ เพื่อไม่ให้เกิดความร้อนมากเกินไป ในระหว่างการใช้งาน ส่วนแหล่งจ่ายไฟ ได้จากเครื่องแปลงไฟ (transformer) ที่ทำการแปลงค่าศักดาไฟฟ้า จาก 220 โวลต์ ลงมาเป็น 6, 9 และ 12 โวลต์ ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม กล่องของเครื่องแปลงไฟ จะยึดติดกับฐานตั้ง (A) เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้ายเครื่องมือ

2. การสร้างไมโครสเพียโรมิเตอร์

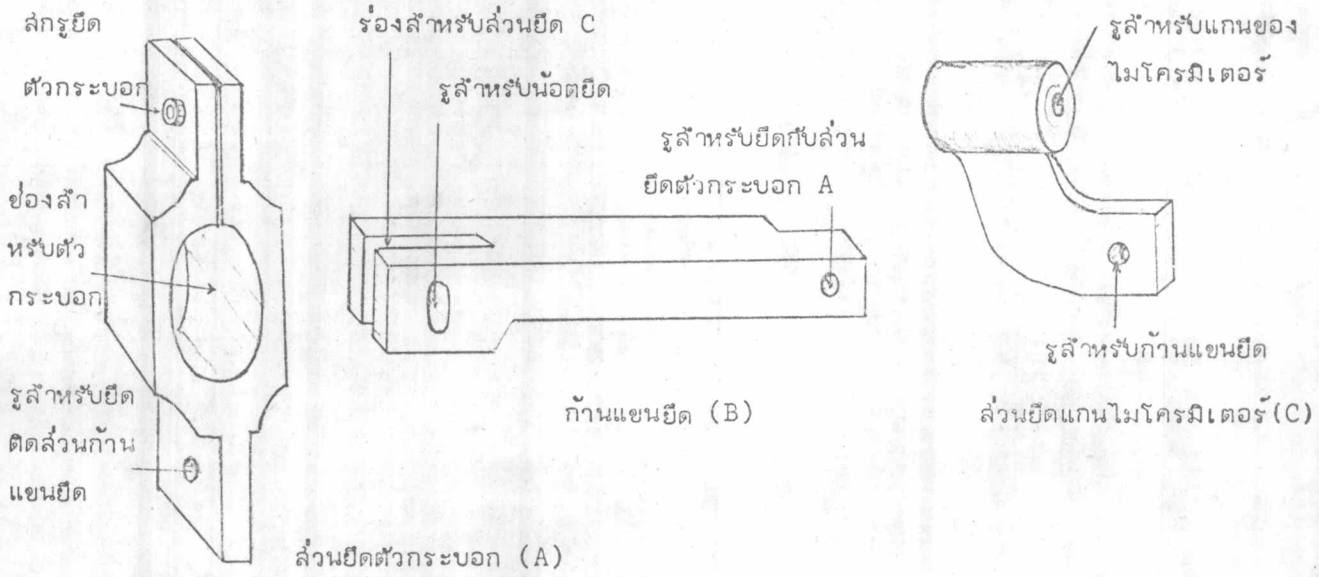
สำหรับการสร้างไมโครสเพียโรมิเตอร์ ได้ทำการดัดแปลงจากกล้องจุลทัศน์กำลังขยายต่ำ อุปกรณ์ที่สำคัญมีอยู่พร้อม มีการจัดสร้างส่วนประกอบเพิ่มเติมบางส่วน ได้แก่ส่วนติดตั้งกระจกใส สำหรับเบี่ยงเบนแสง แขนยึดตัวกล้องจุลทัศน์กับแกนไมโครมิเตอร์ และยึดกากบาท สำหรับใช้เป็นวัตถุ

2.1 ส่วนติดตั้งกระจกใส

การวางกระจกเอียงทำมุม 45° ภายในท่อทรงกระบอกหรือตัวกล้อง สามารถจัดทำได้อย่างสะดวก โดยจัดหาทรงกระบอกที่พอดีส่วมในท่อได้ ตัดทรงกระบอกดังกล่าวในแนวเฉียง 45° องศา ด้านหน้าส่วนที่ถูกตัด จะมีลักษณะเป็นวงรี ต่อจากนั้นนำแผ่นกระจกใสมาแต่งขอบให้เป็นวงรีตามหน้าตัดทรงกระบอก แล้วยึดติดด้วยกาวอีพ็อกซี (epoxy) ก็จะได้ส่วนติดตั้งกระจกใส ทำมุม 45° องศา เพื่อใช้ในการเบี่ยงเบนแสงตามต้องการ

2.2 ส่วนแขนยึด

ส่วนของแขนยึด ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้น คือ ส่วนยึดตัวกระบอก (A) สำหรับยึดตัวกระบอกของกล้องจุลทัศน์, ส่วนก้านแขนยึด (B) และส่วนยึดแกนไมโครมิเตอร์ (C) ดังภาพ 3-12



ภาพ 3-12 ส่วนประกอบแขนยึด

ส่วนยึดตัวกระบอก (A) ทำจากทองเหลือง ลักษณะเหมือนส่วนยึดตัวกระบอกของออโต-คอลลิเมเตอร์ แต่ส่วนฐานเจาะรูสำหรับใส่สกรูเพื่อใช้ยึดกับก้านแขนยึด (B) ก้านแขนยึด (B)นั้นทำจากแท่งทองเหลืองโดยปลายด้านหนึ่งบากให้เข้ากับฐานของส่วนยึด A พร้อมกับเจาะรูสำหรับสกรูยึด อีกปลายหนึ่งเซาะเป็นร่องลึก สำหรับใส่ส่วนยึดแกนไมโครมิเตอร์ C และเจาะรูสำหรับสกรูเช่นกัน ส่วนยึดแกนไมโครมิเตอร์ ดัดแปลงจากแขนของไมโครมิเตอร์ที่มีอยู่ ทำการตัดและแต่งความหนาให้พอดีกับร่องของแขนยึด เสร็จแล้วเจาะรูเพื่อยึดติดกับก้านแขนยึด B

2.3 ยึดกากบาท

ยึดกากบาท ใช้สำหรับเป็นวัตถุ ในไมโครสเพียโรมิเตอร์ ทำขึ้นโดยใช้เส้นใยเล็ก ๆ ของสายไฟฟ้า มาทำการขึงให้ตึงบนกรอบลวด วางสัมผัสบนกระบอกติดด้วยกาวอีพ็อกซี เมื่อกาวแห้งสนิท จึงตัดส่วนที่เหลือทิ้งไป ก็จะได้ยึดกากบาทตามต้องการ

เมื่อได้อุปกรณ์ครบถ้วนแล้ว ก็ทำการติดตั้งและประกอบเครื่องมือตามหลักการก็จะได้เครื่องมือที่สมบูรณ์ พร้อมที่จะนำไปทดสอบการใช้งานต่อไป