สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบอุปกรณ์ และเครื่องมือที่สร้าง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดสอบเลนซ์วัตถุและเลนซ์ตาที่ได้จัดสร้างขึ้น และกล่าวถึงวิธีการใช้งานและการทดสอบของเครื่องมือ ออโตคอลลิเมเตอร์ และไมโครสเฟียโรมิเตอร์ ตามลำดับ

1. <u>การทดสอบเลนซ์วัตถุ</u>ของออโตคอลลิเมเตอร์ ได้แบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็นลำดับขั้นต่าง ๆ คือ

   1.1 การตรวจสอบค่ารัศมีความโค้งของผิวเลนซ์โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน (Newton's ring)

   1.2 การหาทางยาวโฟกัสจากสมการการหักเห

   1.3 การตรวจสอบคุณภาพของเลนซ์ จากการแกะรอยรังสีใกล้แกน

   1.4 การตรวจสอบทางยาวโฟกัสโดยวิธีกำลังขยาย (magnification method)

   1.5 การตรวจสอบคุณภาพของเลนซ์ โดยวิธีทดสอบด้วยดาว (star test)

   1.6 การตรวจสอบคุณภาพของเลนซ์ โดยวิธีทดสอบของฮาร์ทแมน (Hartman's test)

   1.7 การตรวจสอบคุณภาพของเลนซ์ โดยวิธี คมมีดของฟูโคลท์ (Foucoult's knife-edge test)

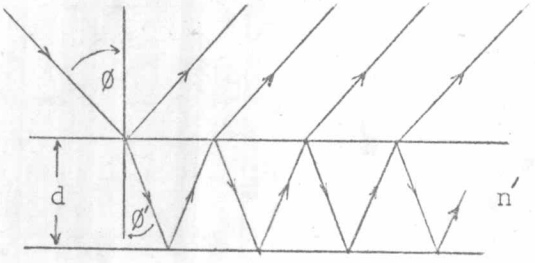
1.1 <u>การตรวจสอบค่ารัศมีความโค้งของผิวเลนซ์ โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน</u>

ในการสร้างเลนซ์ ค่าที่จำเป็นต้องทราบเป็นสิ่งแรก ก็คือค่ารัศมีความโค้งของผิวเลนซ์ นอกจากจะเป็นการตรวจสอบว่า เลนซ์ที่ได้ทำการฝนขึ้นนั้นมีรูปร่างตามที่กำหนดหรือออกแบบไว้หรือไม่แล้ว ยังเป็นค่าที่จำเป็นต่อการใช้หาค่าทางยาวโฟกัส กำลังของเลนซ์ และใช้ในสมการการแกะรอยรังสี เพื่อคำนวณหาคุณภาพของเลนซ์อีกด้วย ค่าความหนาของเลนซ์เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบเป็นลำดับถัดไป สำหรับค่าความหนาสามารถวัดหาได้โดยตรง จากการใช้ไมโครมิเตอร์ แต่สำหรับการหารัศมีความโค้ง แบบทั่วไปซึ่งใช้สเฟียโรมิเตอร์ นั้นจะไม่เหมาะสมต่อการวัดรัศมี ความโค้งของผิวเลนซ์ เนื่องจากอาจทำให้เกิดริ้วรอยขึ้นบนผิวเลนซ์ได้ วิธีที่นิยมใช้กันก็คือ วิธีวงแหวนของนิวตัน ซึ่งใช้หลักการของการแทรกสอด

ของแสงในฟิลม์อากาศบาง ๆ ที่อยู่ระหว่างผิวโค้ง 2 ผิว

วงแหวนของนิวตัน มีลักษณะเป็นริ้ววงกลมมืดสลับกับสว่าง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการแทรกสอดของแสง ที่สะท้อนจากผิวทั้งสองของฟิลม์อากาศบาง ๆ ถ้ามีผิวโค้ง 2 ผิว ซึ่งมีรัศมีความโค้ง แตกต่างกันมาวางสัมผัสกัน บริเวณใกล้ ๆ ส่วนตรงกลางของตำแหน่งที่วางซ้อน จะเป็นช่องว่างหรือฟิลม์อากาศบาง ๆ ในระหว่างผิวโค้งทั้งสอง เมื่อมีแสงส่องผ่านผิวโค้งแรก ส่วนหนึ่งจะสะท้อนที่ผิวโค้งนี้ และอีกส่วนจะหักเหผ่านฟิลม์อากาศไปยังผิวโค้งที่สอง แล้วสะท้อนกลับผ่านฟิลม์อากาศ หักเหกลับเข้าสู่ผิวโค้งแรกอีกครั้ง แสงที่สะท้อนครั้งแรกกับแสงที่หักเหผ่านฟิลม์อากาศ จะเกิดการแทรกสอดกัน ทำให้เกิดลักษณะวงแหวนของนิวตันขึ้น

ในส่วนตรงกลาง เมื่อพิจารณาในบริเวณแคบ ๆ ซึ่งผิวทั้งสองของฟิลม์อากาศเกือบจะขนานกัน ซึ่งทำให้เขียนลักษณะทางเดินแสงได้เช่นเดียวกับ ทางเดินแสงในฟิลม์บางที่มีผิวขนานกัน (plane parallel thin film) ดังภาพ 4-1



ภาพ 4-1 แสดงทางเดินของแสงในฟิลม์บางที่มีผิวขนานกัน

จากหลักการของการแทรกสอดของแสงในฟิลม์บาง[1] จะได้ความสัมพันธ์

สำหรับวงมืด $2n' d \cos \phi' = m\lambda$ 4.1

และสำหรับวงสว่าง $2n' d \cos \phi' = (m + \frac{1}{2})\lambda$ 4.2

เมื่อ d คือความหนาของฟิลม์

ϕ' คือมุมหักเหของรังสีแสงในฟิลม์บาง

m คือ ตัวเลขจำนวนเต็ม

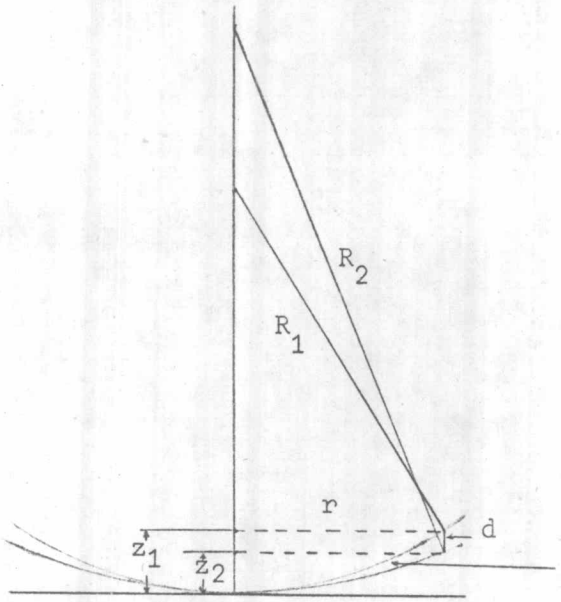
n' คือ ดรรชนีหักเหของตัวกลางหรือฟิลม์บาง

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีแสง

ในการทดลองวงแหวนของนิวตัน บริเวณของการแทรกสอด จะเป็นบริเวณแคบ ๆ และต้องใช้กล้องจุลทัศน์กำลังขยายต่ำส่องดู ซึ่งค่ามุม $\emptyset$ จะเล็กมาก ดังนั้น $\cos \emptyset \simeq 1$ ทำให้ได้ว่า

สำหรับวงมืด $2n'd = m\lambda$ 4.3

และสำหรับวงสว่าง $2n'd = (m + \frac{1}{2})\lambda$ 4.4



r คือ รัศมีของวงมืด

d คือ ความหนาของฟิลม์อากาศ

R_1 คือ รัศมีความโค้งของผิวที่หนึ่ง

R_2 คือ รัศมีความโค้งของผิวที่สอง

ภาพ 4-2 แสดงฟิลม์อากาศ ระหว่างผิวโค้งรัศมี R_1 และ R_2

จากภาพ 4-2

$$d = z_1 - z_2$$

แต่ $$z_1 = \frac{r^2}{2R_1}$$

และ $$z_2 = \frac{r^2}{2R_2}$$

ดังนั้น $$d = \frac{r^2}{2}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

$$d = \frac{r^2}{2}(c_1 - c_2)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าให้ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืด

$$d = \frac{D^2}{2}(c_1 - c_2)$$

และ ฟิล์มอากาศมีค่าดรรชนีหักเห (n') 1.00 ดังนั้น สมการของการแทรกสอดสำหรับวงมืด (สมการ 4.3) สามารถเขียนได้ คือ

$$2\,\frac{D^2}{8}(c_1 - c_2) = m\lambda$$

หรือ $$m = \frac{(c_1 - c_2)}{4\lambda} D^2 \quad \ldots\ldots\ldots 4.5$$

m คือ ลำดับของการแทรกสอด ซึ่งมีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืดลำดับที่ m

จากสมการ 4.5 จะได้ $m \propto D^2$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง m กับ D^2 จะได้กราฟเส้นตรง โดยมีค่าความชัน (K) คือ $\frac{c_1 - c_2}{4\lambda}$

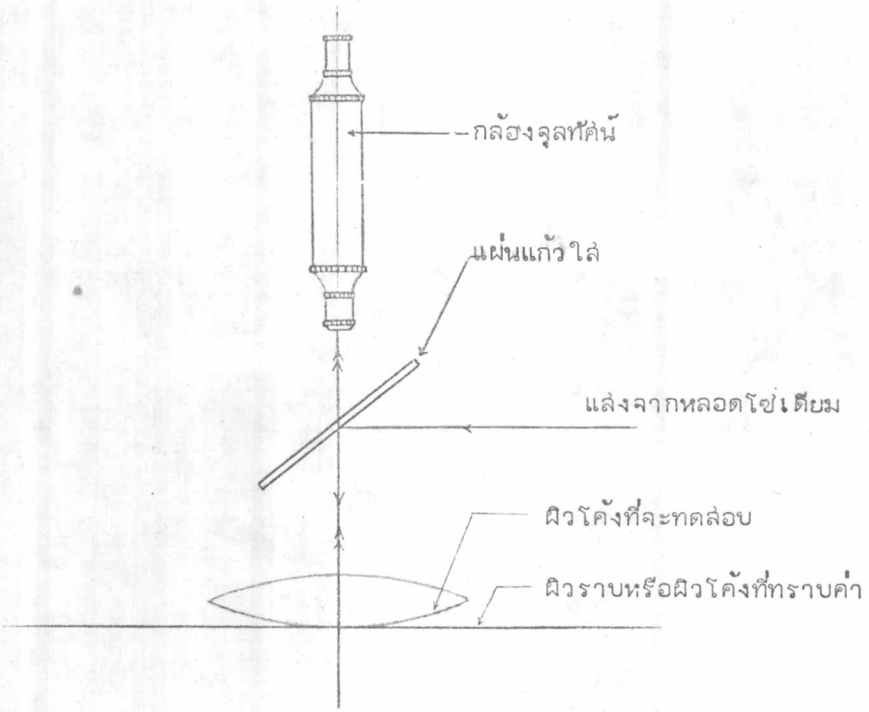
นั่นคือ $$c_1 - c_2 = 4\lambda . K \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 4.6$$

เมื่อ K คือ ความชันของกราฟระหว่าง m กับ D^2

ถ้าทราบค่ารัศมีความโค้ง R_2 ก็หาค่ารัศมีความโค้ง R_1 ได้จากค่าความชัน (K) และความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการแทรกสอด (λ) ตามสมการ 4.6 และในกรณีที่ใช้ผิวโค้งวางบนแผ่นราบ ซึ่งค่า c_2 เป็นศูนย์ จะได้

$$c_1 = 4\lambda . K \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 4.7$$

การทดลอบหาค่า



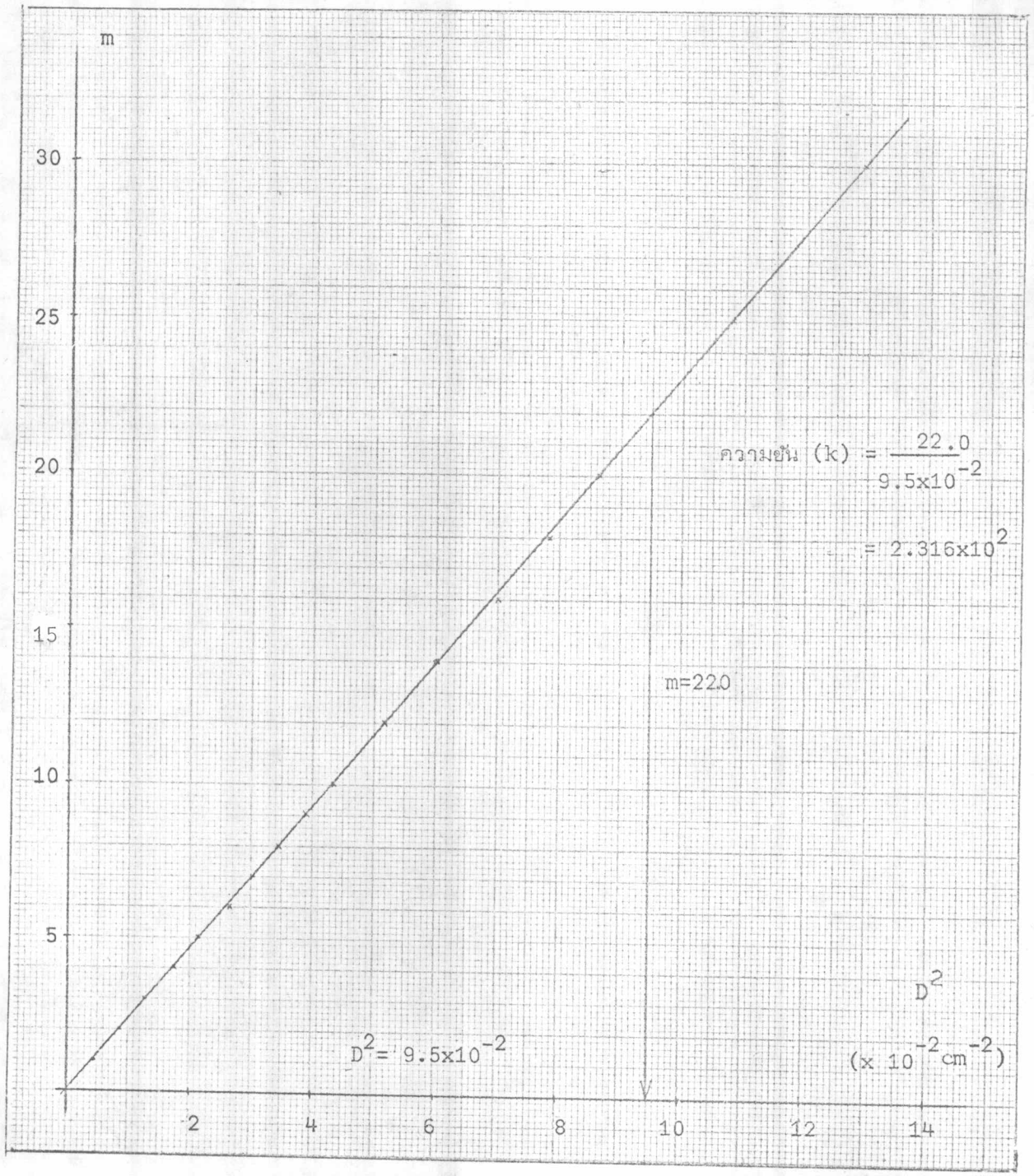
ภาพ 4-3 แสดงการจัดเครื่องมือสำหรับหาค่ารัศมีความโค้งโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

เมื่อจัดเครื่องมือดังภาพ 4-3 และทำการปรับโฟกัสของกล้องจุลทัศน์ ให้มองเห็นบริเวณตรงกลางของผิวโค้ง จะสังเกตเห็นวงแหวนของนิวตัน จากนั้นจึงวัดค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืดลำดับต่าง ๆ โดยใช้การกำหนดตำแหน่งของกล้องจุลทัศน์ เมื่อได้ค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) และลำดับที่ (m) ของวงมืด จึงนำมาเขียนกราฟระหว่าง m กับ D^2 หาค่าความชัน (K) แล้วจึงคำนวณหาค่ารัศมีความโค้ง (R) จากสมการ 4.6 หรือ 4.7

ข้อมูลของการทดลอบ ได้ทำการทดลอบผิวโค้งที่หนึ่ง และผิวโค้งที่สองของเลนซ์นูน โดยทำการวางสัมผัสกับแผ่นราบ ($c_2 = 0$) ตัวอย่าง ข้อมูลของการทดลอบสำหรับผิวโค้งที่หนึ่งกับแผ่นราบแสดงไว้ในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงข้อมูลของการวัดหาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันสำหรับผิวโค้งที่หนึ่งของเลนซ์บูน

ลำดับที่ของวง m	ตำแหน่งซ้ายของวงมืด D_1	ตำแหน่งขวาของวงมืด D_2	เส้นผ่าศูนย์กลาง $D=(D_2-D_1)$(cm)	D^2 ($\times 10^{-2}$cm^2)
1	1.548	1.614	0.066	0.435
2	1.533	1.625	0.092	0.846
3	1.523	1.636	0.113	1.276
4	1.515	1.646	0.131	1.716
5	1.508	1.655	0.147	2.161
6	1.501	1.663	0.162	2.624
7	1.495	1.669	0.174	3.028
8	1.489	1.675	0.186	3.460
9	1.483	1.680	0.197	3.881
10	1.478	1.686	0.208	4.326
12	1.468	1.696	0.228	5.198
14	1.459	1.704	0.245	6.002
16	1.448	1.713	0.265	7.002
18	1.440	1.720	0.280	7.840
20	1.433	1.727	0.294	8.644
25	1.417	1.745	0.328	10.76
30	1.402	1.762	0.360	12.96



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง m กับ D^{2-} ในการทดลองวงแหวนของนิวตัน

จากกราฟ ได้ค่าความชัน (K) 2.316×10^{2} เซนติเมตร$)^{-2}$ แต่ค่าความชันที่ได้จะไม่ละเอียดนัก เพื่อให้ได้ค่าความชันที่ละเอียดและแน่นอน ได้ทำการคำนวณหาค่าความชันจากข้อมูลตามหลักของการฟิตกราฟเส้นตรง(curve fitting) โดยใช้เครื่องคำนวณฮิวเล็ต - แพคการ์ดของภาควิชา ได้ค่าความชันของกราฟ 2.312×10^{2} (เซนติเมตร$)^{-2}$

แสงที่ใช้ในการทดลอง คือ แสงจากหลอดโซเดียม ซึ่งมีความยาวคลื่น (λ) 5893 อังสตรอม และจากค่าความชันของกราฟ (K) 231.2 (เซนติเมตร$)^{-2}$ จะหาค่ารัศมีความโค้งของผิวที่หนึ่งของเลนซ์นูน ได้จาก

$$c_1 = 4\lambda.K$$

$$c_1 = 4 \times 5.893 \times 10^{-5} \times 2.312 \times 10^{2}$$

$$c_1 = 5.445 \times 10^{-2} \quad cm^{-1}$$

$$R_1 = 18.37 \quad cm$$

ได้ทำการทดลองวัดค่ารัศมีความโค้ง โดยวิธีวางแหวนของผิวตันนี้ 8 ครั้ง จากค่ารัศมีความโค้งที่ได้แต่ละครั้ง นำมาหาค่าเฉลี่ย ข้อมูลสำหรับการทดลองหารัศมีความโค้งของผิวที่หนึ่งแสดงไว้ในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ข้อมูลในการทดลอบหารัศมีความโค้งของผิวที่หนึ่ง

ครั้งที่	K (cm^{-2})	c_1 (cm^{-1})	R_1 (cm)
1	2.312×10^{2}	5.445×10^{-2}	18.37
2	2.301×10^{2}	5.424×10^{-2}	18.44
3	2.306×10^{2}	5.435×10^{-2}	18.40
4	2.308×10^{2}	5.440×10^{-2}	18.38
5	2.298×10^{2}	5.403×10^{-2}	18.50
6	2.308×10^{2}	5.440 c 10^{-2}	18.38
7	2.321×10^{2}	5.471×10^{-2}	18.28
8	2.327×10^{2}	5.484×10^{-2}	18.23
		5.443×10^{-2}	18.37

สำหรับผิวที่สองของเลนซ์นูน ได้ทำการทดลอบในทำนองเดียวกัน ข้อมูลของการทดลอบหารัศมีความโค้ง สำหรับผิวที่สอง แสดงไว้ในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ข้อมูลในการทดลอบหารัศมีความโค้งของผิวที่สอง

ครั้งที่	K cm^{-2}	c_2 cm^{-1}	R_2 cm
1	2.186×10^{2}	5.153×10^{-2}	19.41
2	2.188×10^{2}	5.158×10^{-2}	19.39
3	2.191×10^{2}	5.165×10^{-2}	19.36
4	2.178×10^{2}	5.134×10^{-2}	19.48
5	2.162×10^{2}	5.096×10^{-2}	19.62
6	2.181×10^{2}	5.141×10^{-2}	19.45
7	2.219×10^{2}	5.231×10^{-2}	19.12
8	2.209×10^{2}	5.207×10^{-2}	19.20
		5.161×10^{-2}	19.38

สำหรับเลนซ์เว้าที่สร้างขึ้น เป็นเลนซ์เว้าแกมราบ ในการทดลอบหารัศมีความโค้งของผิวเว้า จำเป็นจะต้องอาศัยผิวโค้งอื่นมาวางสัมผัส อย่างเช่น ผิวโค้งของเลนซ์นูน โดยจะต้องทำการหารัศมีความโค้งนี้เสียก่อน ได้ค่าความโค้งของผิวเลนซ์นูน 8.798×10^{-2} เซนติเมตร$^{-2}$ ซึ่งจะนำไปใช้ในการทดลอบความโค้งของผิวเว้า สำหรับข้อมูลของการทดลอบของผิวเว้า แสดงไว้ในตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ข้อมูลการหารัศมีความโค้งของผิวเว้า

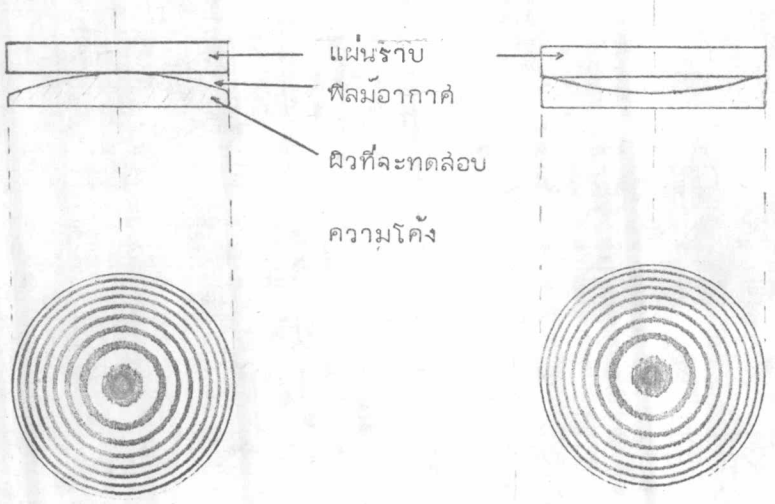
ครั้งที่	K (cm^{-2})	c_3 (cm^{-1})	R_3 (cm)
1	1.502×10^{2}	5.257×10^{-2}	19.02
2	1.527×10^{2}	5.199×10^{-2}	19.23
3	1.531×10^{2}	5.189×10^{-2}	19.27
4	1.551×10^{2}	5.142×10^{-2}	19.45
5	1.567×10^{2}	5.104×10^{-2}	19.59
6	1.515×10^{2}	5.227×10^{-2}	19.13
7	1.566×10^{2}	5.107×10^{-2}	19.58
8	1.568×10^{2}	5.102×10^{-2}	19.60
		5.166×10^{-2}	19.36

สำหรับการทดสอบผิวราบของเลนซ์เว้านั้น ทำการทดสอบได้โดยนำแผ่นราบ (test plate) มาวางสัมผัส พบวงแหวนของนิวตันปรากฏขึ้น แสดงว่า ผิวราบของเลนซ์เว้าไม่ราบเรียบจริง ๆ แต่เป็นผิวที่มีค่าความโค้งอยู่เล็กน้อย ทำให้มีฟิล์มอากาศอยู่ระหว่างผิวของเลนซ์ และแผ่นทดสอบ เนื่องจากผิวราบของเลนซ์เว้าดังกล่าว มีรัศมีความโค้งยาวมาก และบริเวณผิวหน้าเลนซ์เว้ามีขนาดเพียง 4.0 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่ารัศมีความโค้ง ดังนั้น การแทรกสอดของแสงในฟิล์มอากาศ ระหว่างผิวราบของเลนซ์เว้ากับแผ่นราบ จะเป็นไปตามสมการ 4.1 และ 4.2 กล่าวคือ

สำหรับวงมืด $2n' d \cos \phi = m\lambda$

และสำหรับวงสว่าง $2n' d \cos \phi = (m + \frac{1}{2})\lambda$

d คือ ความหนาของฟิล์มอากาศ



ลักษณะการแทรกสอดที่ได้ เมื่อวางแผ่นทดสอบสัมผัสกับผิวเลนซ์

ภาพ 4-4 แสดงการตรวจสอบสำหรับผิวที่มีรัศมีความโค้งยาวโดยใช้แผ่นราบทดสอบ

เมื่อใช้กล้องจุลทัศน์ส่องในแนวตั้งฉากกับผิว ($\phi = 0$) สำหรับวงมืด ลำดับที่ m ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง D จะมีความสัมพันธ์กันตามสมการ 4.5

$$m = \frac{D^2}{4\lambda}C$$

ดังนั้น

$$R = \frac{D^2}{4m\lambda} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4.8$$

โดยที่ R คือ รัศมีความโค้งของผิวที่จะทดสอบ

และ C คือ ความโค้งของผิวที่จะทดสอบ

จากสมการ 4.8 ถ้าทราบค่าลำดับของการแทรกสอด (m) และเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ของวงมืด จะสามารถหาค่า R ได้ ในการทดสอบ ได้ทำการตรวจสอบวัดลำดับของการแทรกสอด จากใจกลางเลนซ์จนถึง บริเวณขอบเลนซ์ในช่วงรัศมี 2 เซนติเมตร ได้ค่า m=96 ดังนั้น ค่ารัศมีความโค้งของผิวที่สองของเลนซ์เว้า จากสมการ 4.8 จะได้

$$R = \frac{(4.0)^2}{4 \times 96 \times 5.893 \times 10^{-5}}$$

$$R = 707.1 \quad \text{cm}$$

และ

$$C = 1.414 \times 10^{-3} \quad \text{cm}^{-1}$$

จากภาพ 4-4 กรณีผิวโค้งที่ทดสอบเป็นผิวเว้าหรือผิวนูนจะให้ลวดลายการแทรกสอดที่เหมือนกัน สำหรับการตรวจสอบว่าเป็นผิวโค้งเว้าหรือนูน ทำได้อย่างง่าย ๆ โดยการมองภาพวงแหวนของผิวตันในแนวทำมุมต่าง ๆ จากเส้นปกติ แล้วสังเกตุการเคลื่อนของวงแหวน ขณะที่เปลี่ยนมุมของการมอง ถ้าวงแหวนเคลื่อนออกขณะที่มองในมุมกว้างขึ้น แสดงว่า ผิวโค้งดังกล่าวเป็นผิวโค้งนูน แต่ถ้าวงแหวนเคลื่อนในทิศตรงกันข้าม ผิวโค้งนั้นจะเป็นผิวโค้งเว้า สำหรับผิวที่สองของเลนซ์เว้าดังกล่าว ผลของการทดสอบ พบว่า เป็นผิวโค้งนูน ดังนั้น ผิวที่สองจะมีค่ารัศมีความโค้ง -707.1 เซนติเมตร

ผลของการทดสอบหารัศมีความโค้ง จากวิธีวงแหวนของผิวตัน จะได้ค่ารัศมีความโค้งของผิวต่าง ๆ พร้อมทั้งความหนาของเลนซ์ (d)จากการใช้ไมโครมิเตอร์วัด ดังแสดงไว้ในตาราง 4.5

ตาราง 4.5 แสดงค่าความโค้ง รัศมีความโค้ง และความหนาของเลนซ์ที่สร้างขึ้น

	ผิวที่	C (cm^{-1})	R (cm)	d (cm)
เลนซ์นูน	1	5.445×10^{-2}	18.37	.6885
	2	-5.161×10^{-2}	-19.38	
เลนซ์เว้า	3	-5.166×10^{-2}	-19.36	.2530
	4	-1.414×10^{-3}	-707.1	

1.2 การหาทางยาวโฟกัสจากสมการการหักเห

จากค่ารัศมีความโค้งที่ได้ ค่าทางยาวโฟกัสของเลนซ์ที่สร้างขึ้น สามารถหาได้จากสมการของช่างทำเลนซ์ ในกรณี ที่คิดว่าเลนซ์ทั้งสองเป็นเลนซ์บาง และหาค่าได้จากการแกะรอยรังสี ในกรณีที่คิดความหนาของเลนซ์ด้วย

ในกรณีของเลนซ์บาง

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

$$f = \frac{1}{K}$$

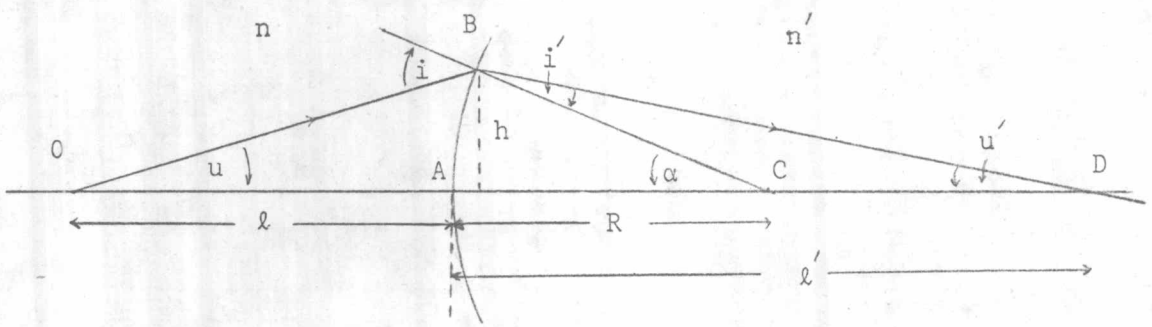
และ $$K_{รวม} = K_1 + K_2$$

ข้อมูลของการคำนวณหาทางยาวโฟกัส แสดงไว้ในตาราง 4.6

ตาราง 4.6 แสดงค่าทางยาวโฟกัสและกำลังของเลนซ์จากสมการของเลนซ์บาง

	n_D	c_1 (cm^{-1})	c_2 (cm^{-1})	K (cm^{-1})	f (cm)
เลนซ์นูน	1.62280	.05445	-.05161	.06606	15.14
เลนซ์เว้า	1.69865	-.05166	-.001414	-.03510	-28.49
เลนซ์ประกบ	-	.05445	-.001414	.03096	32.30

ในกรณีของเลนซ์หนา จะใช้การแกะรอยรังสีอย่างละเอียด โดยอาศัยสมการการหักเห และกฎของไซน์ (sine law)



ภาพ 4-5 แสดงทางเดินรังสีที่หักเหผ่านผิวโค้ง

ในการคำนวณจะต้องคำนึงถึงเครื่องหมายที่ได้กำหนดไว้ด้วย

จาก $i = \alpha - u$

และ $i' = \alpha - u'$

จะได้ $u' = u + (i - i')$ 4.9

จากกฎของไซน์ ในสามเหลี่ยม OBC

$$\frac{\sin(\pi - i)}{\ell - R} = \frac{\sin u}{R}$$

จะได้ $$\frac{\sin i}{\ell - R} = \frac{\sin u}{R}$$

ดังนั้น $$\sin i = \frac{\ell - R}{R} \sin u \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 4.10$$

จากค่า มุมตันของรังสีตกกระทบ ที่มาจากวัตถุ และค่าระยะวัตถุ จะสามารถหาค่าของมุม i ได้จากสมการ 4.10 (สำหรับกรณีที่รังสีแล่นขนานกับแนวแกน คือ เมื่อวัตถุอยู่ที่อนันต์ u=0 ทำให้ มุม i มีค่าเท่ากับมุม α ดังนั้น ในกรณี u=0 จะได้ $\sin i = \sin \alpha = \frac{h}{R}$)

เมื่อทราบค่ามุม i ก็หามุม i' ได้จากสมการการหักเห

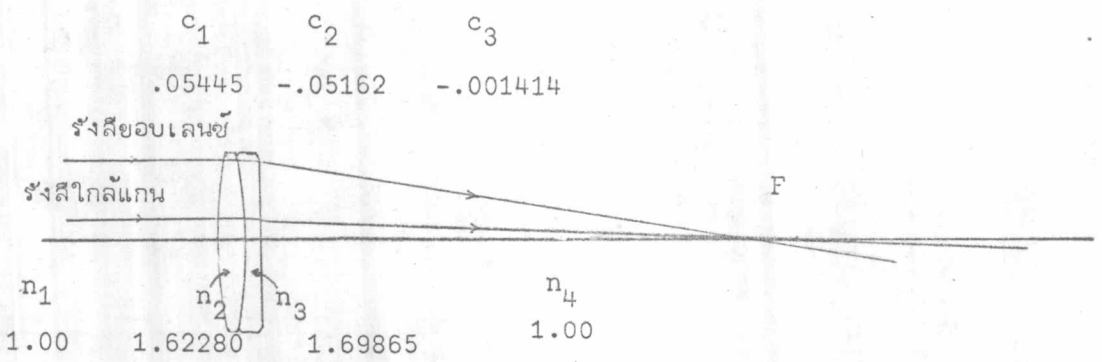
$$\sin i' = \frac{n}{n'} \sin i$$

จากค่ามุม i , i' และ u จะหาค่ามุม u' ได้จากสมการ 4.9 เมื่อทราบค่า u' และ i' หาค่า ℓ' จากกฎของไซน์ ในสามเหลี่ยม BCD

$$\frac{\sin i'}{\ell' - R} = \frac{\sin u'}{R}$$

จะได้ $$\ell' = R + \frac{R \sin i'}{\sin u'} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 4.11$$

ที่กล่าวมาเป็นการแกะรอยของรังสีที่ผิวโค้งแรก สำหรับผิวโค้งถัดไป รังสีตกกระทบของผิวที่สอง ก็คือรังสีหักเหจากผิวที่หนึ่ง ซึ่งมีความชัน u' หรือ u_{+1} สำหรับระยะวัตถุของผิวที่สอง ต้องคำนึงถึงความหนาหรือระยะระหว่างผิวทั้งสอง(d) ด้วย ค่า ℓ_{+1} จะได้จากค่า $\ell' - d$ ดังนั้นจะคำนวณหาค่ามุม i_{+1} ได้จากสมการ 4.10 แล้วจึงทำการแกะรอยรังสีต่อไป ตามวิธีการดังกล่าว ข้อมูลของการแกะรอยรังสี เพื่อหาทางยาวโฟกัสของเลนซ์ประกบ แสดงไว้ในตาราง 4.7 โดยจะทำการแกะรอยรังสีที่ตกกระทบขอบเลนซ์ซึ่งสูง 2 เซนติเมตร และบริเวณใกล้แกนในช่วง 0.1 เซนติเมตร



ภาพ 4-6 แสดงทางเดินรังสีแสงเพื่อหาจุดโฟกัส

ตาราง 4.7 แสดงการแกะรอยรังสี เพื่อหาตำแหน่งโฟกัส

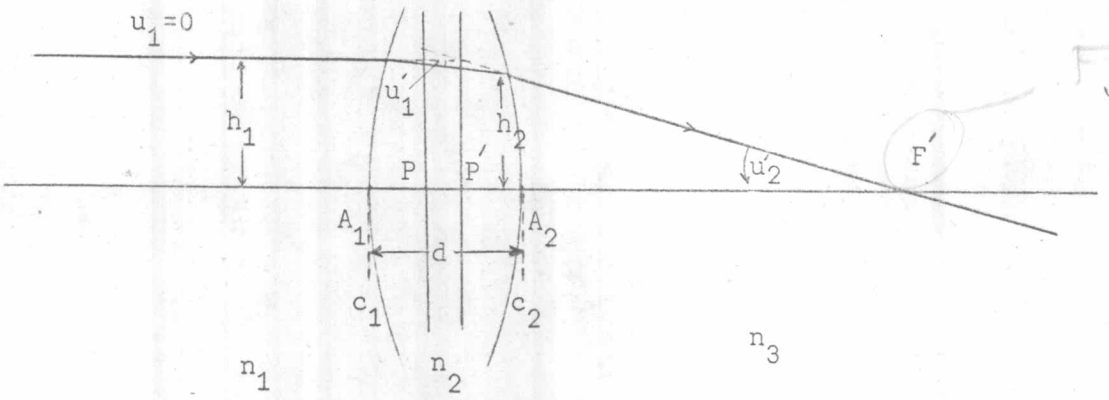
	รังสีใกล้แกน (h_1=0.1 cm)	รังสีขอบเลนซ์ (h_1= 2.0 cm)
u_1	0	0
$\sin i_1 = \frac{h_1}{r_1}$	5.445×10^{-3}	.1089
i_1	5.445×10^{-3}	.1091
$\sin i_1' = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$	3.355×10^{-3}	.06711
i_1'	3.355×10^{-3}	.06716
$u_2 = u_1' = u_1 + (i_1 - i_1')$	2.090×10^{-3}	.04194
$\sin u_1'$	2.090×10^{-3}	.04193
$\ell_1' = R_1 + R_1 \cdot \frac{\sin i_1'}{\sin u_1'}$	47.86	47.77

ตาราง 4.7 (ต่อ) แสดงการแกะรอยรังสี เพื่อหาตำแหน่งโฟกัส

	รังสีใกล้แกน (h_1 = 0.1 cm)	รังสีขอบเลนซ์ (h_1 = 2.0 cm)
$\ell_2 = \ell_1' - d_1$	47.17	47.08
$\sin i_2 = \frac{\ell_2 - R_2}{R_2} \cdot \sin u_2$	-7.177×10^{-3}	-.1438
i_2	-7.177×10^{-3}	-.1443
$\sin i_2' = \frac{n_2}{n_3} \cdot \sin i_2$	-6.857×10^{-3}	-.1374
i_2'	-6.857×10^{-3}	-.1378
$u_3 = u_2' = u_2 + (i_2 - i_2')$	1.770×10^{-3}	.03544
$\sin u_2'$	1.770×10^{-3}	.03543
$\ell_2' = R_2 + R_2 \cdot \frac{\sin i_2'}{\sin u_2'}$	55.70	55.78
$\ell_3 = \ell_2' - d_2$	55.45	55.53
$\sin i_3 = \frac{\ell_3 - R_3}{R_3} \cdot \sin u_3$	-1.909×10^{-3}	-.03821
i_3	-1.909×10^{-3}	-.03822
$\sin i_3' = \frac{n_3}{n_4} \cdot \sin i_3$	-3.242×10^{-3}	.06491
i_3'	-3.242×10^{-3}	-.06496
$u_4 = u_3' = u_3 + (i_3 - i_3')$	3.103×10^{-3}	.06218
$\sin u_3'$	3.103×10^{-3}	.06214
$\ell_3' = R_3 + R_3 \cdot \frac{\sin i_3'}{\sin u_3'}$	31.68	31.05
ทางยาวโฟกัสหลังเลนซ์	31.68 (cm)	31.05 (cm)

ข้อมูลในตาราง 4.7 แสดงถึง เมื่อวัตถุอยู่ที่อนันต์ ให้รังสีที่ขนานกับแนวแกน หลังจากหักเหผ่านเลนซ์ จะต้องตัดแนวแกนที่จุดโฟกัส ระยะ ℓ_3' เป็นระยะนับจากผิวหลังของเลนซ์ถึงจุดโฟกัส ซึ่งเป็นระยะที่เรียกกันว่า ทางยาวโฟกัสหลังเลนซ์ (back focal length) สำหรับทางยาวโฟกัสที่แท้จริงของระบบเลนซ์นั้น จะต้องนับจาก ระนาบมุขยสำคัญ (principal plane) ถึงจุดโฟกัส และเรียกกันว่า ทางยาวโฟกัสยังผล (effective focal length) ซึ่งจะทราบค่าทางยาวโฟกัสที่แน่นอน ต้องทราบถึงตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญเสียก่อน

การหาระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์[6] เริ่มจากพิจารณาเลนซ์หนาเดี่ยว มีรังสีตกกระทบในโซนใกล้แกน ในแนวขนานกับแกนมุขยสำคัญ ถ้าให้ P,P′ เป็นระนาบมุขยสำคัญทั้งสองของเลนซ์ จะแสดงทางเดินแสงได้ดังภาพ 4-7



ภาพ 4-7 แสดงทางเดินของแสง เมื่อมีการหักเหผ่านเลนซ์หนา

จากภาพ ทางยาวโฟกัสยังผล (e.f.ℓ) คือระยะ $P'F'$ ซึ่งเป็นทางยาวโฟกัสจริงของเลนซ์ (f')

และ ทางยาวโฟกัสหลังเลนซ์ (b.f.ℓ) คือระยะ A_2F'

พิจารณา เมื่อ u_2' เป็นมุมแคบ เนื่องจากเป็นรังสีใกล้แกน

$$f' = \text{e.f.}\ell = \frac{h_1}{-u_2'}$$

และ $$f_b = \text{b.f.}\ell = \frac{h_2}{-u_2'}$$

จากสมการเบื้องต้นของการหักเห

$$n_2u_1' = n_1u_1 + (n_2 - n_1)\,\alpha$$

$$n_2u_1' = n_1u_1 + (n_2 - n_1)\,h_1c_1$$

ถ้า $u_1 = 0$ $\quad n_2u_1' = (n_2 - n_1)h_1c_1$ 4.12

จากสมการส่งผ่าน

$$h_2 = h_1 - du_1' \qquad \text{..... 4.13}$$

และสมการหักเหที่ผิวที่สอง

$$n_3u_2' = n_2u_2 + (n_3 - n_2)h_2c_2$$

แทนค่า h_2 จากสมการ 4.13

$$n_3u_2' = n_2u_1' + (n_3 - n_2)h_1c_2 - (n_3 - n_2)d\,u_1'\,c_2$$

แทนค่า u_1' จากสมการ 4.12

$$n_3u_2' = (n_2 - n_1)h_1c_1 + (n_3 - n_2)h_1c_2 - (n_3 - n_2)d\,\frac{(n_2 - n_1)}{n_2}\,h_1c_1c_2$$

$$n_3\frac{u_2'}{h_1} = (n_2 - n_1)c_1 + (n_3 - n_2)c_2 - \frac{d(n_2 - n_1)c_1 \cdot (n_3 - n_2)c_2}{n_2}$$

ดังนั้น $\quad \frac{n_3}{f'} = (n_2 - n_1)c_1 + (n_3 - n_2)c_2 - \frac{d(n_2 - n_1)c_1 \cdot (n_3 - n_2)c_2}{n_2}$

กำหนดให้ $K = \frac{n_3}{f'}$, $K_1 = (n_2 - n_1)c_1$, $K_2 = (n_3 - n_2)c_2$

จะได้ $\quad K = K_1 + K_2 - \frac{dK_1K_2}{n_2}$ 4.14

จะพบว่า K คือ กำลังรวมของเลนซ์ K_1 คือกำลังของผิวโค้งที่ 1 และ K_2 คือกำลังของผิวโค้งที่สอง

$$K = \frac{n_3}{f'} = \frac{n_3 u_2'}{h_1}$$

$$u_2' = \frac{h_1 K}{n_3}$$

$$f_b = \frac{h_2}{u_2'}$$

$$f_b = \frac{h_1 - du_1'}{\frac{h_1 K}{n_3}}$$

$$f_b = \frac{n_3 h_1}{h_1 K} - \frac{n_3 d(\frac{n_2 - n_1}{n_2}) h_1 c_1}{h_1 K}$$

$$f_b = \frac{n_3}{K} - \frac{n_3}{K} \cdot \frac{d(n_2 - n_1)c_1}{n_2}$$

$$f_b = f' - \frac{f'.d.K_1}{n_2}$$

สำหรับในกรณีที่เลนซ์อยู่ในอากาศ ($n_1 = n_3 = 1.00$) ค่า f' และ f_b จะหาได้จากสมการ

$$K = \frac{1}{f'} = K_1 + K_2 - \frac{dK_1K_2}{n} \quad \text{.....4.15}$$

โดยที่ $K_1 = (n-1)\, c_1$

$K_2 = -(n-1)c_2$

n = ดรรชนีหักเหของเลนซ์

d = ความหนาของเลนซ์

และ $$f_b = f' - \frac{dK_1 . f'}{n} \quad \text{..... 4.16}$$

จากภาพ $f' = P'F$

$f_b = A_2F$

ดังนั้น $A_2P' = -(f' - fb)$

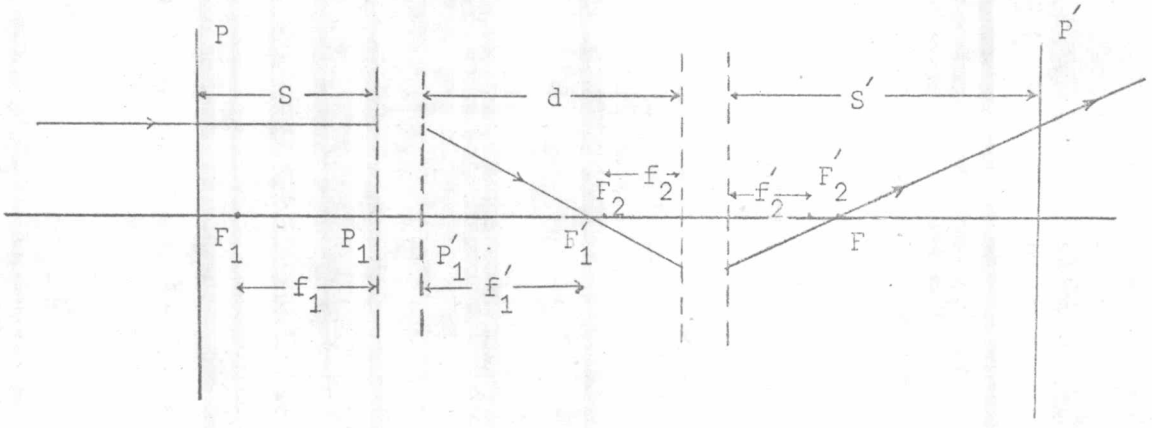
$$A_2P' = -\frac{dK_1f'}{n} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 4.17$$

A_2P' คือระยะจากผิวที่สอง (A_2) ถึงจุดมุขยสำคัญที่สอง (P')

ในทำนองเดียวกัน จะหาระยะจากผิวที่หนึ่ง (A_1) ถึงจุดมุขยสำคัญที่หนึ่ง (P) ได้จาก

$$A_1P = \frac{dK_2f'}{n} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4.18$$

ถ้ามีเลนซ์หนา 2 ชิ้น มาวางร่วมแนวแกนเดียวกัน ก็สามารถหาตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์ทั้งสองได้เช่นกัน จะเป็นการสะดวกเมื่อพิจารณาจากภาพ 4-8



ภาพ 4-8 แสดงระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์คู่

P_1, P_1' เป็นระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์ชิ้นที่หนึ่ง

P_2, P_2' เป็นระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์ชิ้นที่สอง

P , P' เป็นระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์คู่

d เป็นระยะระหว่าง P_1' กับ P_2

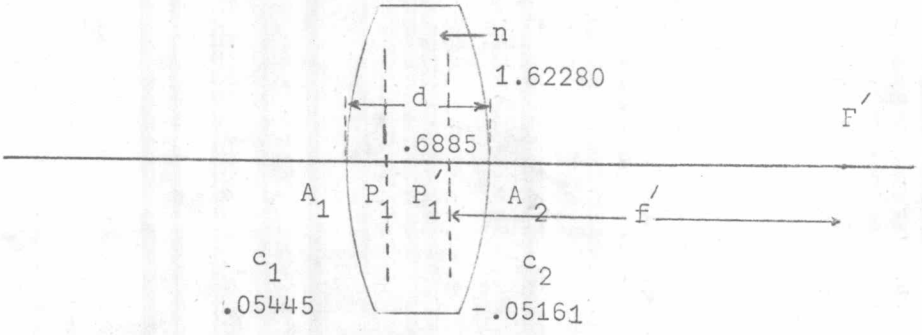
S และ S' เป็นระยะระหว่าง PP_1 และ $P'P_2'$

จากสักษณะทางเดินของแสงดังภาพ 4-8 จะสามารถคำนวณหาค่าของ S และ S' ได้จาก

$$S = - \frac{f_1 d}{d - f_1' + f_2} \qquad \text{.....4.19}$$

$$S' = \frac{f_2' d}{d - f_1' + f_2} \qquad \text{..... 4.20}$$

ข้อมูลของการหาระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์บูน , เลนซ์เว้า และเลนซ์ประกบเลนซ์บูน



ภาพ 4-9 แสดงตำแหน่งระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์บูนที่สร้างขึ้น

$K_1 = (n-1)c_1 = .03391 \quad cm^{-1}$

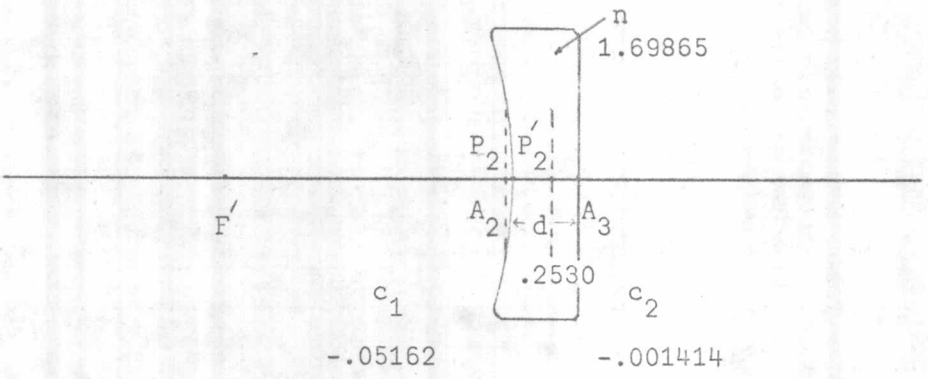
$K_2 = -(n-1)c_2 = .03215 \quad cm^{-1}$

$K = K_1 + K_2 - dK_1K_2 = .06531 \quad cm^{-1}$

$$f' = \frac{1}{K} = 15.31 \text{ cm}$$

$$A_2P_1' = -\frac{K_1 df'}{n} = -.2202 \text{ cm}$$

$$A_1P_1 = \frac{K_2 df'}{n} = .2088 \text{ cm}$$



ภาพ 4-10 แสดงตำแหน่งระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์เว้าที่สร้างขึ้น

$$K_1 = (n-1)c_1 = -.03606$$

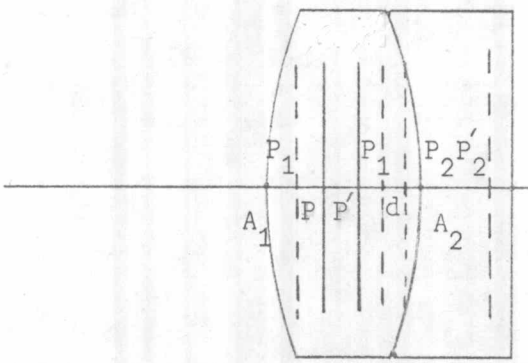
$$K_2 = -(n-1)c_2 = .0009878$$

$$K = K_1 + K_2 - \frac{dK_1K_2}{n} = -.03508$$

$$f' = \frac{1}{K} = -28.51$$

$$A_3P_2' = -\frac{K_1 df'}{n} = -.1500$$

$$P_2A_2 = \frac{K_2 df'}{n} = -.004195$$



$d = .2160$ cm

$f_1 = -.15.31$ cm

$f_2 = 28.51$ cm

$f_1' = 15.31$ cm

$f_2' = -28.51$ cm

ภาพ 4-11 แสดงภาพของเลนซ์ประกบ และระนาบมุขยสำคัญของเลนซ์ประกบ

จากภาพ 4-11

$$P_2'P' = S' = \frac{f_2'd}{d-f_1'+f_2} = -.4590 \text{ cm}$$

$$P_1P = S = -\frac{f_1d}{d-f_1'+f_2} = .2465 \text{ cm}$$

ดังนั้นจะได้ $A_3P' = P_2'P' - P_2'A_3 = -.6090$ cm

$A_1P = P_1P + A_1P_1 = .0373$ cm

เลนซ์นูนมีกำลัง (K_1) .06531 และเลนซ์เว้ามีกำลัง -.03508 หากำลังรวมของเลนซ์ประกบ ได้จาก

$$K = K_1 + K_2 = .03023 \text{ cm}^{-1}$$

$$f = \frac{1}{K} = 33.08 \text{ cm}$$

ทางยาวโฟกัสยังผล 33.08 เซนติเมตร

และ ทางยาวโฟกัสหลังเลนซ์ 32.47 เซนติเมตร

จากการแกะรอยรังสีใกล้แกนอย่างละเอียด ในตาราง 4.7 ได้ค่าทางยาวโฟกัสหลังเลนซ์ 31.68 เซนติเมตร ดังนั้น จะมีทางยาวโฟกัสยังผล 32.29 เซนติเมตร และจากการใช้สมการของเลนซ์บางในตาราง 4.6 ได้ค่าทางยาวโฟกัส 32.30 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่า เป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน

1.3 การตรวจสอบคุณภาพของเลนซ์จากการแกะรอยรังสีใกล้แกน

เนื่องจากเลนซ์ที่สร้างขึ้น มีค่ารัศมีความโค้ง และความหนาแตกต่างไปจากค่าที่ได้กำหนดออกแบบไว้ จึงต้องทำการตรวจสอบความคลาด โดยการแกะรอยรังสีอีกครั้ง โดยทำการแกะรอยในทำนองเดียวกับเลนซ์ที่ออกแบบ ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3 เพียงแต่ใช้ค่าของรัศมีความโค้ง และความหนาของเลนซ์ที่สร้างขึ้น แทนค่าที่ได้กำหนดออกแบบ ค่าต่าง ๆ ที่คำนวณได้จากการแกะรอย แสดงไว้ในตาราง 4.8

ตาราง 4.8 แสดงข้อมูลของการแกะรอยรังสีของเลนซ์วัตถุที่สร้างขึ้น

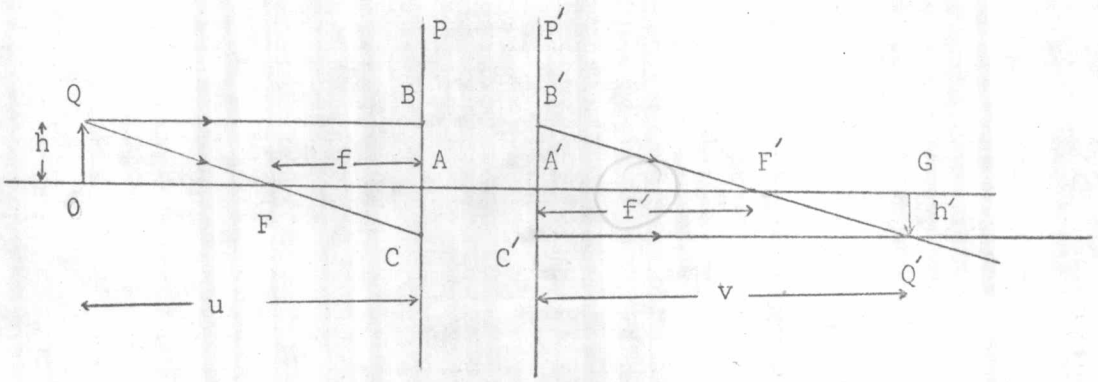
$u_1 = 0$ $\quad \bar{u}_1 = -.0150150$

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

d_1 d_2	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_2h_2 A_3h_3 (cm)	S_{I_1} S_{I_2} S_{I_3} (cm)
.6885 .2530	1.62280 1.69865	.05445 -.05162 -.001414	.108900 -.101754 -.00277465	.108900 -.232950 -.0648185	.0417937 .0353842 .0620439	2.00000 1.97122 1.96227	0 .0257541 .0208308 .0620439	.0257541 -.00492332 .0412131	.217800 -.459196 -.127191	6.10847×10^{-4} -5.26646×10^{-4} 3.39774×10^{-4}
			$\alpha = hc$	$A = n(\alpha - u)$	$u' = \alpha - \frac{A}{n}$	$h_{+1} = h - du'$				$S_I = \sum A^2 h \Delta(\frac{u}{n})$ $= 4.23975\times10^{-4}$
$\bar{\alpha}_1$ $\bar{\alpha}_2$ $\bar{\alpha}_3$	$\bar{A}_1$ $\bar{A}_2$ $\bar{A}_3$	$\bar{u}'_1 = \bar{u}_2$ $\bar{u}'_2 = \bar{u}_3$ $\bar{u}'_3 = \bar{u}_4$	$\bar{h}_1$ $\bar{h}_2$ $\bar{h}_3$ (cm)	S_{II_1} S_{II_2} S_{II_3} (cm)	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} (cm)	C_{T_1} C_{T_2} C_{T_3} (cm)	${}_0W_{40} = \frac{1}{8}S_I$ ${}_1W_{31} = \frac{1}{2}S_{II}$ ${}_\delta W_{20} = \frac{1}{2}C_L$ ${}_\delta W_{11} = C_T$ (cm)
0 -3.28838×10^{-4} -1.21747×10^{-5}	.0150150 .0144814 .0150193	-.00925253 -.00885406 -.0150314	0 .00637036 .00861014	8.42228×10^{-5} 3.27391×10^{-5} -7.87302×10^{-5}	0 .0109455 .0218191 0	.00674482 .0128449	.00674482 .00610008 -.0128449	1.46902×10^{-3} -2.80113×10^{-3} 1.63376×10^{-3}	2.02547×10^{-4} 1.74133×10^{-4} -3.78564×10^{-4}	5.29969×10^{-5} 1.91159×10^{-5} 15.0825×10^{-5} $.188400\times10^{-5}$
$\bar{\alpha} = \bar{h}c$	$\bar{A} = n(\bar{\alpha} - \bar{u})$	$\bar{u}' = \bar{u} - \frac{\bar{A}}{n}$	$\bar{h}_{+1} = \bar{h} - d\bar{u}'$	$S_{II} = \Sigma \bar{A} A h \Delta(\frac{u}{n})$ $= 3.82317\times10^{-5}$				$C_L = \Sigma A h \Delta(\frac{\delta n}{n})$ $= 3.0165\times10^{-4}$	$C_T = \Sigma \bar{A} h \Delta(\frac{\delta n}{n})$	

1.4 การหาทางยาวโฟกัสโดยวิธีทดลองกำลังขยาย

ในระบบของเลนซ์ เมื่อทราบถึงตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญ และตำแหน่งจุดโฟกัสของระบบแล้ว จะสามารถแสดงลักษณะทางเดินแสง เมื่อผ่านระบบ ได้ดังภาพ 4-12



ภาพ 4-12 แสดงทางเดินแสงเมื่อผ่านระบบ

จากลักษณะทางเดินแสงดังภาพ จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างทางยาวโฟกัส และกำลังขยายได้ พิจารณา $\Delta A'B'F'$ และ $\Delta G'F'Q'$ เป็นสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{h}{f'} = \frac{h'}{v-f'}$$

$$\frac{h'}{h} = \frac{v-f'}{f'}$$

$$m = \frac{v}{f'} - 1 \qquad \text{.....} \qquad 4.21$$

และจาก ΔOFG และ ΔFAC เป็นสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{1}{m} = \frac{u}{f} - 1 \qquad \text{.....} \qquad 4.22$$

โดยที่ m คือ กำลังขยาย ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความสูงของภาพ (h') ต่อความสูงของวัตถุ (h)

เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งวัตถุ ระยะภาพจะเปลี่ยนแปลงและกำลังขยายจะเปลี่ยนเช่นเดียวกัน ถ้าให้ m_1 คือกำลังขยาย เมื่อวัตถุอยู่ที่ตำแหน่งที่หนึ่ง และ m_2 เป็นกำลังขยายเมื่อวัตถุอยู่ที่ตำแหน่งที่สอง จากสมการ 4.21 จะได้

$$m_1 = \frac{v_1}{f'} - 1$$

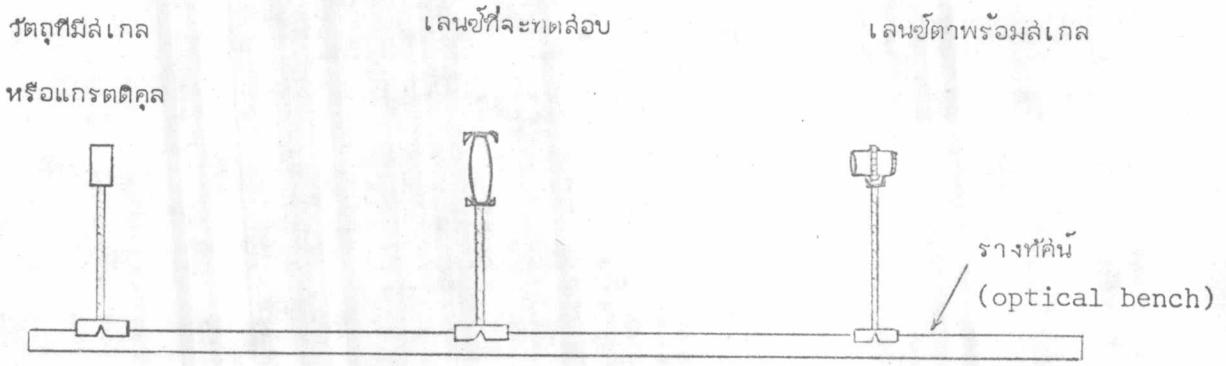
และ $$m_2 = \frac{v_2}{f'} - 1$$

ดังนั้น $$m_1 - m_2 = \frac{v_1 - v_2}{f'} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4.23$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการ 4.22 จะได้

$$\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2} = \frac{u_1 - u_2}{f} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 4.24$$

เมื่อระบบวางอยู่ในอากาศ $f = f'$ ดังนั้น จะสามารถหาค่าทางยาวโฟกัสของระบบ จากสมการ 4.23 หรือ 4.24 ก็ได้



ภาพ 4-13 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบโดยวิธีกำลังขยาย

การทำการทดลอบ เริ่มต้นโดยจัดเครื่องมือดังภาพ 4-13 ถ้าตำแหน่งโฟกัสของเลนซ์ตาเป็นตำแหน่งของภาพที่ได้จากเลนซ์ จะเห็นภาพสเกลของวัตถุอย่างชัดเจน จากสเกลของเลนซ์ตาจะสามารถทราบค่าขนาดของภาพได้ ทำการหาค่ากำลังขยาย แล้วเปลี่ยนตำแหน่งวัตถุไป (Δu) ซึ่งจะทำให้ระยะภาพและขนาดของภาพเปลี่ยนแปลง เลื่อนตำแหน่งเลนซ์ตา จนได้ภาพชัดเจน และหาค่ากำลังขยายที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน

จากสมการ $$u_1 - u_2 = f\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2}\right)$$

$$\Delta u = f\,\Delta\left(\frac{1}{m}\right)$$

เมื่อ $$\Delta u = u_1 - u_2$$

และ $$\Delta\left(\frac{1}{m}\right) = \frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2}$$

ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่าง Δu กับ $\Delta\left(\frac{1}{m}\right)$ จะได้กราฟเส้นตรง โดยมีความชันเป็นค่าทางยาวโฟกัส (f) ในทำนองเดียวกันจากสมการ 4.23 จะได้

$$\Delta v = f' \Delta m$$

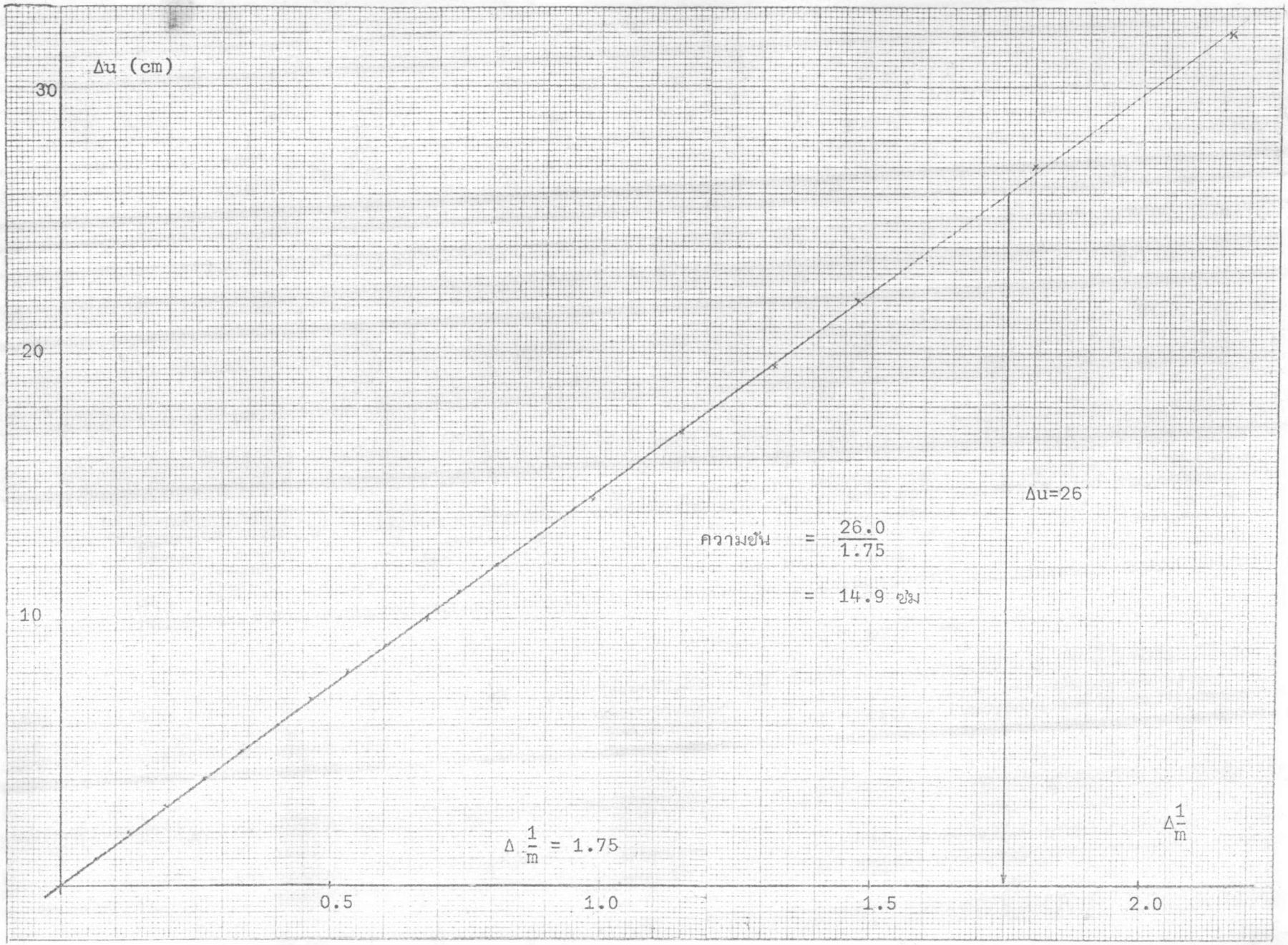
ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่าง Δv กับ Δm ก็จะได้กราฟเส้นตรง และมีความชันเป็นค่าทางยาวโฟกัสของเลนซ์ที่ทดลอบเช่นเดียวกัน

ในการทดลอบ ได้ทำการทดลอบเลนซ์นูนเดี่ยว เลนซ์เว้าเดี่ยว และเลนซ์ประกบ ซึ่งข้อมูลของการทดลอบ เลนซ์นูนเดี่ยว แสดงไว้ในตาราง 4-9

ตาราง 4.9 แสดงข้อมูลของการทดลอบหาโฟกัสของเลนซ์บูนโดยวิธีทดลอบกำลังขยาย

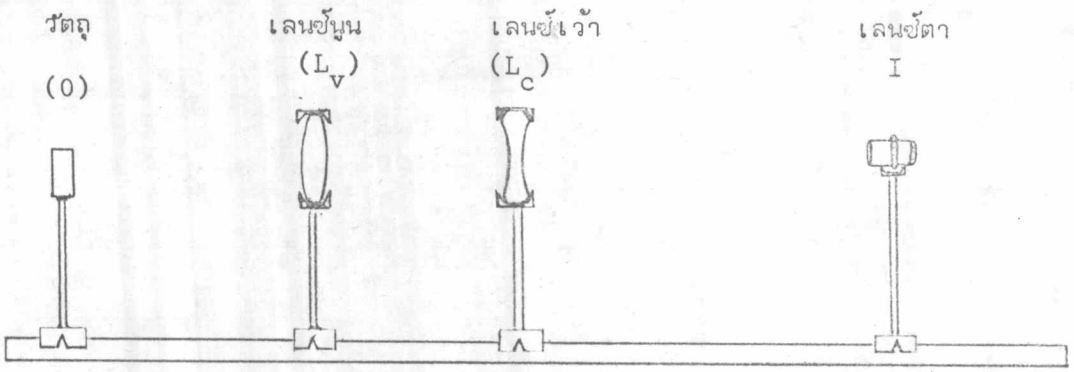
u	m	$\frac{1}{m}$	Δu	$\Delta\frac{1}{m}$
18.0	3.55	.282	0	0
18.5	3.18	.314	0.5	.032
19.0	2.88	.347	1.0	.065
20.0	2.45	.408	2.0	.126
21.0	2.10	.476	3.0	.194
22.0	1.82	.549	4.0	.267
23.0	1.62	.617	5.0	.335
24.0	1.46	.685	6.0	.403
25.0	1.34	.746	7.0	.464
26.0	1.23	.813	8.0	.531
27.0	1.13	.885	9.0	.603
28.0	1.04	.962	10.0	.680
29.0	0.980	1.02	11.0	.738
30.0	0.920	1.09	12.0	.808
32.5	0.790	1.27	14.5	.988
35.0	0.700	1.43	17.0	1.15
37.5	0.625	1.60	19.5	1.32
40.0	0.570	1.75	22.0	1.47
45.0	0.480	2.08	27.0	1.80
50.0	0.410	2.44	32.0	2.16

ได้ค่าความชันจากกราฟ 14.9 เซนติเมตร และเพื่อความละเอียดแน่นอน จึงทำการฟิตกราฟจากข้อมูล ได้ค่าความชัน 14.9 เซนติเมตร ดังนั้น เลนซ์บูนที่สร้างขึ้นมีทางยาวโฟกัส 14.9 เซนติเมตร



กราฟแสดงความสัมพันธ์ Δu กับ $\Delta\frac{1}{m}$ ในการทดลองเลนซ์บูน

สำหรับเลนซ์เว้า ซึ่งให้ภาพเล่มือนเล่มอนั้น การตรวจสอบโดยวิธีกำลังขยาย ทำได้โดยใช้เลนซ์นูนมาช่วยในการสร้างภาพ เพื่อใช้เป็นวัตถุเล่มือนสำหรับเลนซ์เว้าเสียก่อน เมื่อนำเลนซ์เว้ามาวางรับทางเดินแสง จะได้ภาพจริงเกิดขึ้น ทำการกำหนดตำแหน่งแรก เมื่อยังไม่มีเลนซ์เว้ามาวางรับแสง วัดขนาดของภาพที่ได้จากเลนซ์นูน ซึ่งจะเป็นขนาดของวัตถุเล่มือนสำหรับเลนซ์เว้า เมื่อนำเลนซ์เว้ามาวางรับแสงที่ออกจากเลนซ์นูน จะได้ภาพที่ตำแหน่งใหม่ หาขนาดของภาพ และคำนวณหาค่ากำลังขยายจากขนาดภาพที่ได้กับขนาดวัตถุเล่มือน เลื่อนตำแหน่งเลนซ์เว้าเป็นตำแหน่งต่าง ๆ และหาค่ากำลังขยายของแต่ละตำแหน่ง



ภาพ 4-14 การจัดเครื่องมือสำหรับหาทางยาวโฟกัสของเลนซ์เว้าโดยวิธีทดสอบกำลังขยาย

เมื่อทำการวางเฉพาะเลนซ์นูน บันทึกขนาดภาพหรือวัตถุเล่มือนของเลนซ์เว้า (i_1) เมื่อวางเลนซ์เว้า บันทึกตำแหน่งของเลนซ์เว้า (L_c) ตำแหน่งเลนซ์ตาที่รับภาพ (I) และขนาดของภาพ i_2 ข้อมูลสำหรับการทดสอบเลนซ์เว้า แสดงไว้ในตาราง 4.10

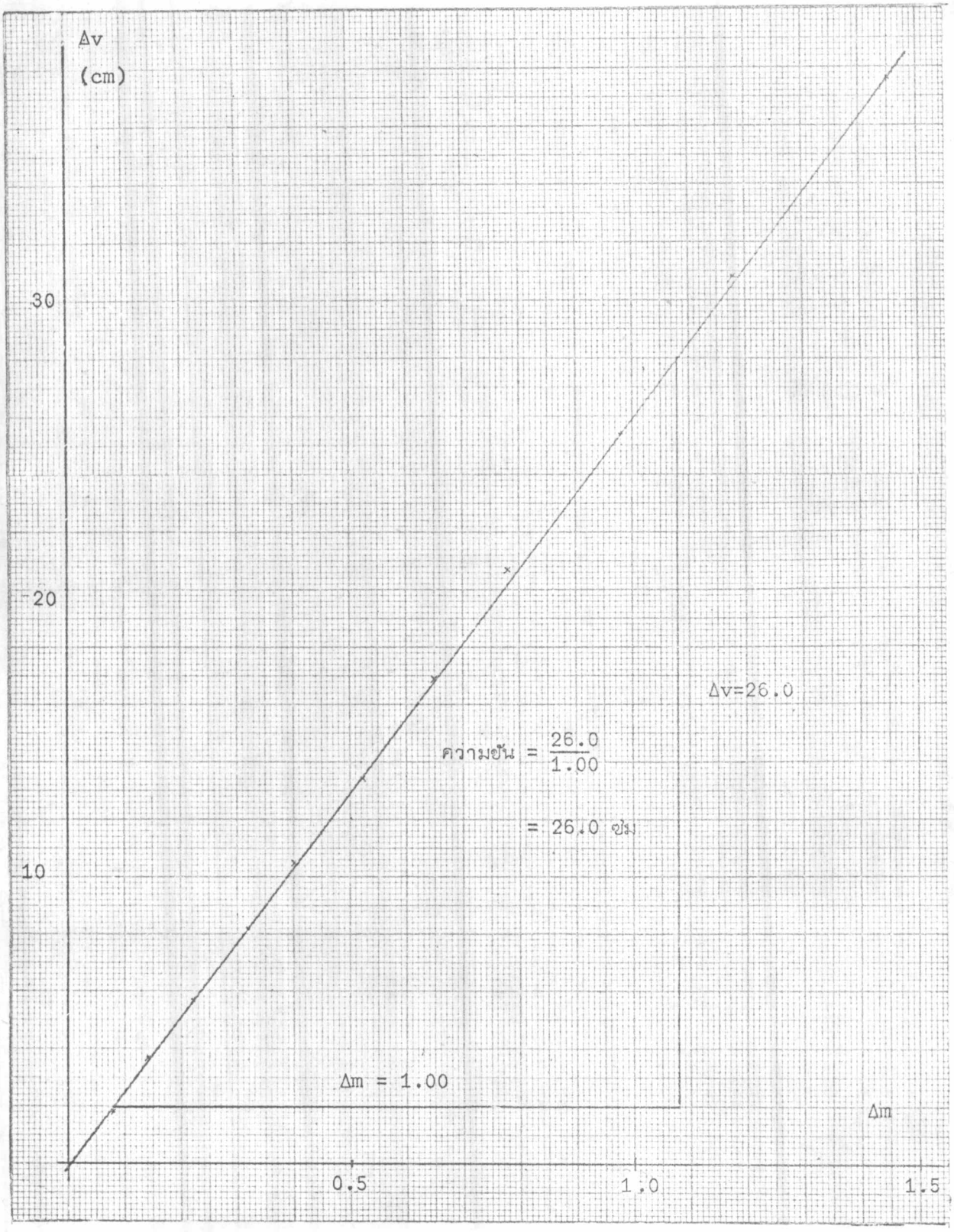
ตาราง 4.10 แสดงข้อมูลในการหาทางยาวโฟกัสของเลนซ์เว้าโดยวิธีทดลองกำลังขยาย

L_c	I_2	i_1 (mn)	i_2 (mn)	m	v (cm)	Δm	Δv (cm)
52.0	96.3	3.0	8.10	2.70	44.3	1.45	37.6
53.0	90.5	3.0	7.30	2.43	37.5	1.18	30.8
54.0	86.1	3.0	6.70	2.23	32.1	0.98	25.4
55.0	82.4	3.0	6.10	2.03	27.4	0.78	20.7
56.0	79.6	3.0	5.70	1.90	23.6	0.65	16.9
57.0	77.1	3.0	5.30	1.77	20.1	0.52	13.4
58.0	75.2	3.0	4.95	1.65	17.2	0.40	10.5
59.0	73.8	6.0	9.40	1.57	14.8	0.32	8.10
60.0	72.4	6.0	8.80	1.47	12.4	0.22	5.70
61.0	71.4	6.0	8.35	1.39	10.4	0.14	3.70
62.0	70.5	6.0	7.95	1.33	8.50	0.08	1.80
63.0	69.7	6.0	7.50	1.25	6.70	0	0

จากกราฟได้ค่าความชัน 26.0 เซนติเมตร

และ จากการพิตกราฟได้ค่าความชัน 26.2 เซนติเมตร

ดังนั้น เลนซ์เว้าที่สร้างขึ้น มีทางยาวโฟกัส 26.2 เซนติเมตร



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δv กับ Δm ในการทดลองเลนซ์เว้า

สำหรับเลนซ์ประกบ ลักษณะการจัดเครื่องมือและวิธีการทดลอง จะเหมือนกับการทดลองเลนซ์นูน ข้อมูลที่ได้แสดงไว้ในตาราง 4-11

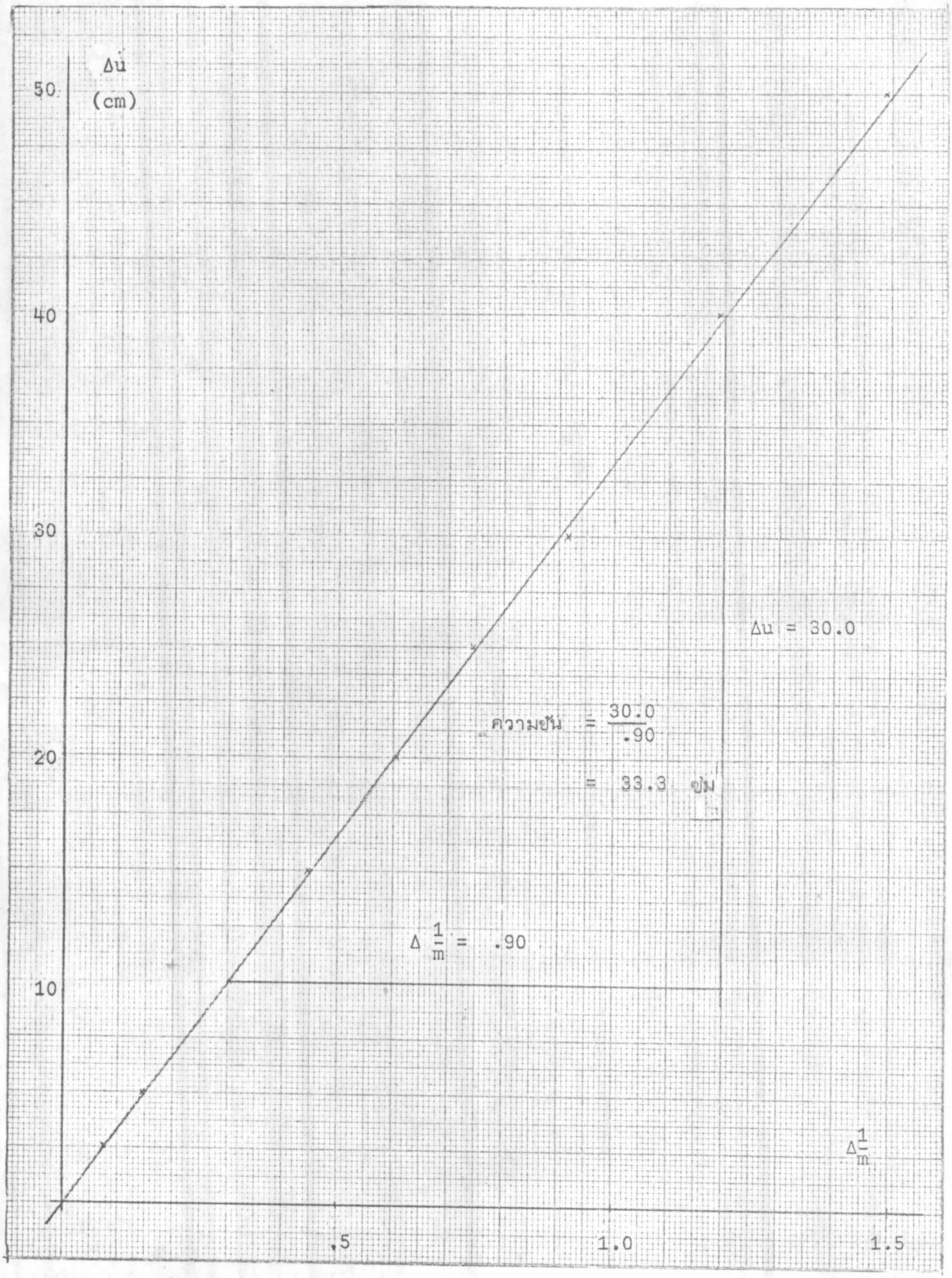
ตาราง 4.11 แสดงข้อมูลการหาค่าทางยาวโฟกัสของเลนซ์ประกบโดยวิธีทดลองกำลังขยาย

u (cm)	m	$\frac{1}{m}$	Δ u (cm)	Δ $(\frac{1}{m})$
50.0	1.87	.535	0	0
52.5	1.64	.610	2.5	.075
55.5	1.47	.680	5.0	.145
60.0	1.19	.840	10.0	.305
65.0	1.02	.980	15.0	.445
70.0	.880	1.14	20.0	.605
75.0	.780	1.28	25.0	.745
80.0	.692	1.45	30.0	.915
90.0	.578	1.73	40.0	1.19
100.0	.492	2.03	50.0	1.49

จากกราฟ ได้ค่าความชัน 33.3 เซนติเมตร

จากการพิตกราฟ ได้ค่าความชัน 33.3 เซนติเมตร

ดังนั้น เลนซ์ประกบที่สร้างขึ้น มีทางยาวโฟกัส 33.3 เซนติเมตร

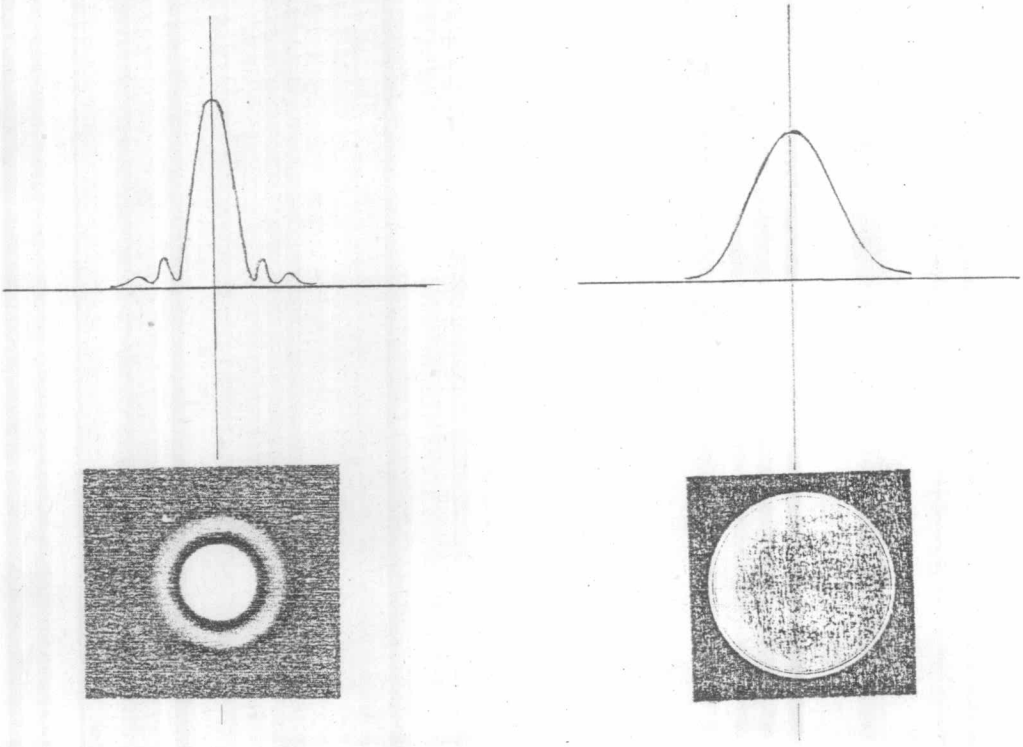


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δu กับ $\Delta\frac{1}{m}$ ในการทดลองเลนซ์ประกบ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 การทดสอบด้วยดาว

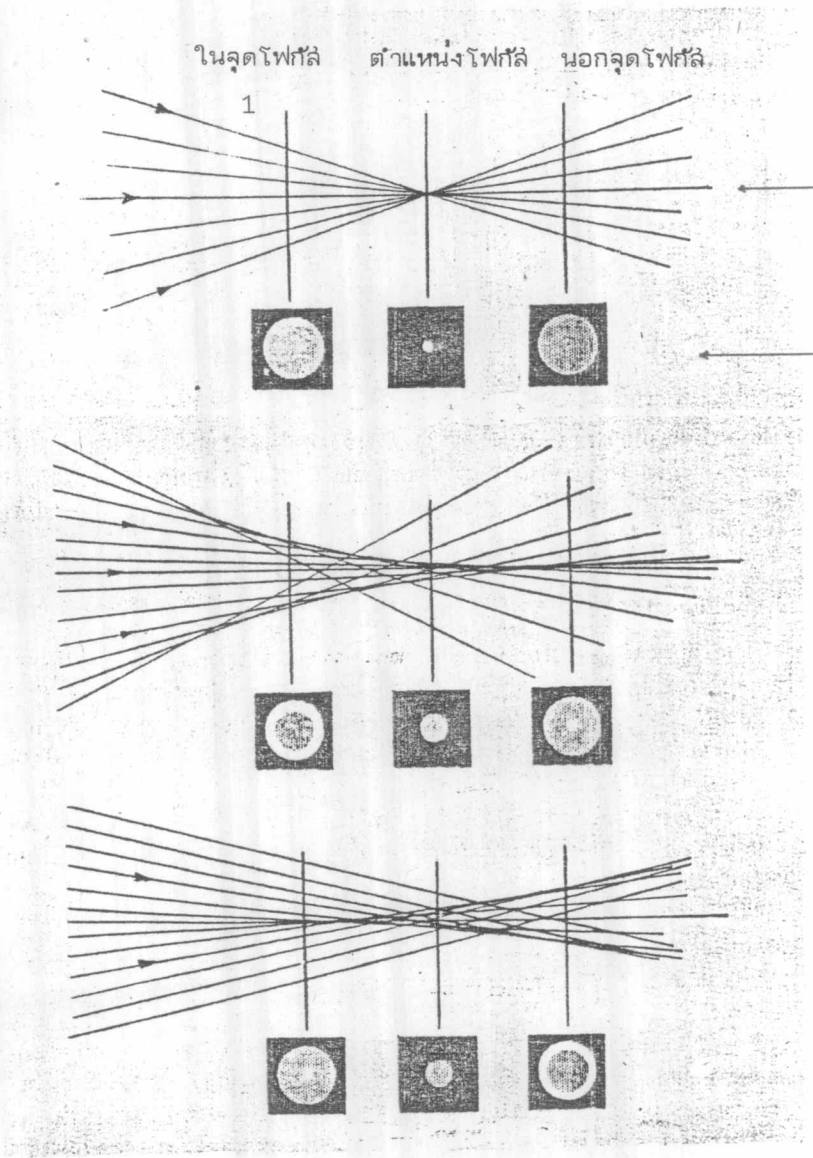
ดาวหรือจุดแสง (point source) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ที่จะให้รังสีเป็นสายขนานกัน หรือให้หน้าคลื่นที่เป็นระนาบ (plane wave front) ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทดสอบคุณภาพของเลนซ์ และยังใช้ในการหาตำแหน่งโฟกัสของเลนซ์ได้ด้วย ถ้าเลนซ์ที่จะทดสอบเป็นเลนซ์ที่สมบูรณ์ ไม่มีความคลาดใด ๆ เมื่อนำมารับรังสีขนาน รังสีที่เข้ามาจะหักเหไปรวมกันที่จุดโฟกัส และทำให้เกิดภาพของดวงกลมแอรี ซึ่งเป็นลักษณะของการกระจายความเข้มของคลื่นแสงอันเป็นผลมาจากการเลี้ยวเบน ดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 แต่ถ้าเลนซ์ที่ทดสอบมีความคลาด ลักษณะการกระจายความเข้มจะแตกต่างออกไป การบันทึกลักษณะของการกระจายความเข้มทำได้โดยใช้ฟิลม์บันทึกภาพ



เมื่อไม่มีความคลาด เมื่อมีความคลาด

ภาพ 4-15 แสดงภาพจุดแสงที่ตำแหน่งโฟกัส และการกระจายความเข้มของแสงบนภาพ

เมื่อพิจารณาลักษณะทางเดินแสงที่เข้ามาขนานกับแนวแกน แล้วหักเหผ่านเลนซ์ ดังภาพ 4-16

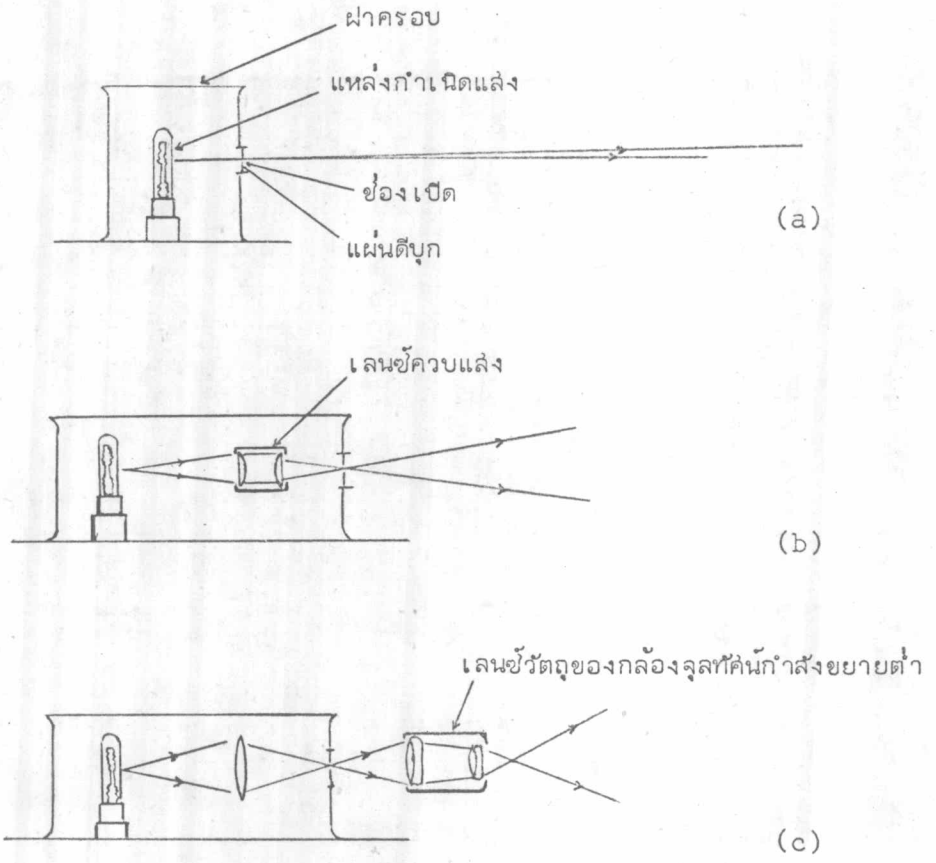


ภาพ 4-16 แสดงทางเดินแสง และลักษณะของจุดภาพที่ได้จากการทดลอบด้วยดาว กรณีเลนซ์ไม่มีความคลาด (a) มีความคลาดทรงกลมแบบแก้ขาด (b) และมีความคลาดทรงกลมแบบแก้เกิน (c)

เนื่องจากทางเดินรังสีแสงของส่วนบริเวณใกล้แกนจะอยู่ชิดกัน และโฟกัสที่จุดใกล้เคียงกัน รังสีแสงจากส่วนบริเวณใกล้แกน จะมีความเข้มสูงกว่าบริเวณอื่น ดังนั้น เมื่อพิจารณาในกรณีของเลนซ์ที่มีความคลาดทรงกลมแบบแก้ขาด (ภาพ b) เมื่อบันทึกภาพในบริเวณช่วงในจุดโฟกัส (ตำแหน่ง 1) รังสีจากส่วนใกล้แกน จะหนาแน่นที่บริเวณขอบนอก ซึ่งทำให้บริเวณขอบดวงมีความเข้มสูง และเมื่อบันทึกภาพในตำแหน่งนอกจุดโฟกัส พบว่า รังสีส่วนใกล้แกนจะรวมกันหนาแน่นที่บริเวณใจกลางดวง ทำให้บริเวณใจกลางดวง มีความเข้มสูงกว่าบริเวณอื่น

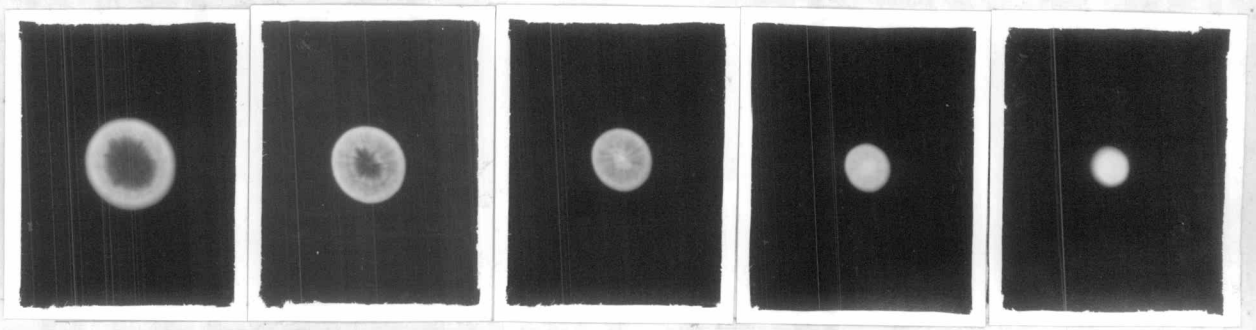
ดังนั้น สำหรับเลนซ์ที่มีความคลาดแบบแก้ขาด เมื่อทำการบันทึกภาพที่ตำแหน่งในจุดโฟกัส ภาพที่ได้ จะมีลักษณะเป็นดวงกลมมีขอบดวงล่างเป็นวง และที่ตำแหน่งนอกจุดโฟกัส ภาพที่ได้จะเป็นดวงกลม มีจุดล่างที่ใจกลางดวง ดังลักษณะจุดภาพที่แสดงไว้ในภาพ 4-15 (b) สำหรับเลนซ์ที่มีความคลาดแบบแก้เกิน สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน จากลักษณะของภาพของจุดแสงที่บันทึกที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะเป็นสิ่งที่แสดงถึง ลักษณะความคลาดที่เลนซ์มีอยู่

ภายในห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์ สามารถที่จะสร้างดาวหรือจุดแสง[7] ได้อย่างง่าย ๆ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูง เช่นหลอดไฟอาร์ค (arc lamp) หรือหลอดไฟฟ้าแบบสปาร์ค (condensed electric spark lamp) วางไว้ในฝาครอบที่มีช่องแสงออก ช่องดังกล่าวจะปิดไว้ด้วยแผ่นดีบุกบาง ๆ (tin foil) ที่ใช้ปลายเข็มเจาะรูเล็ก ๆ ไว้ แสงจากหลอดไฟ จะผ่านจุดที่เจาะไว้ออกมา ถ้ารูเข็มเล็กมาก และตั้งอยู่ในระยะที่ห่างมาก ก็พอจะถือได้ว่า รูที่เจาะเป็นจุดแสงที่ให้รังสีเป็นลำขนานออกมา แสงที่ได้อาจมีความเข้มต่ำ แต่สามารถเพิ่มความเข้มบริเวณจุดกำเนิดแสงได้ โดยใช้เลนซ์นูน หรือ เลนซ์ควบแสง (condenser lens) มาช่วยในการรวมแสงจากหลอดไฟ ให้โฟกัสที่ตำแหน่งจุดแสง ดังแสดงไว้ในภาพ 4-17 ซึ่งในงานวิจัยนี้ เลือกใช้จุดกำเนิดแสง แบบ (b)

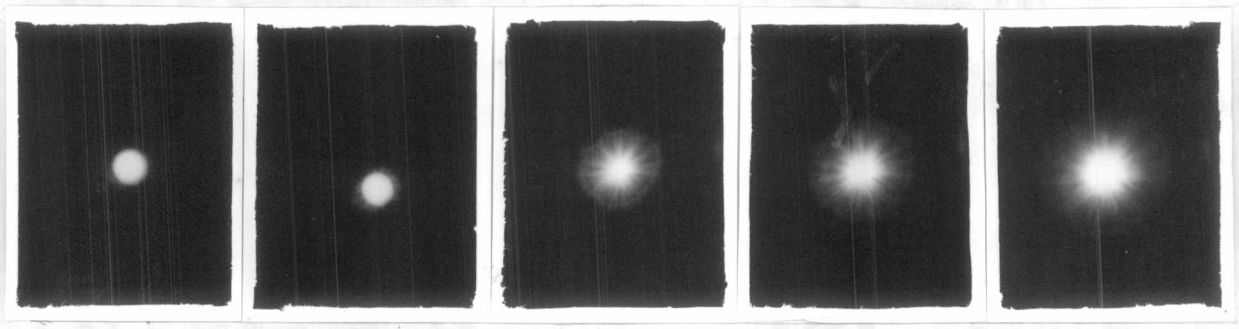


ภาพ 4-17 แสดงการจัดสร้างดาวสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ (a) จุดกำเนิดแสงอย่างง่าย (b) จุดกำเนิดแสงที่ใช้เลนซ์ควบแสงช่วย จะให้การกระจายแสงจากจุดแสงในมุมที่กว้างขึ้น และ (c) จุดกำเนิดแสงที่ใช้เลนซ์วัตถุของกล้องจุลทัศน์ช่วย เพื่อให้ได้จุดแสงที่มีขนาดเล็กมาก

จากจุดกำเนิดแสงที่สร้างขึ้น นำเลนซ์ที่จะทดสอบมาวางรับแสงขนาน ควรจัดวางเลนซ์ที่ทดสอบให้ห่างจากจุดแสงมาก ๆ อย่างน้อยควรเป็น 20 เท่าของทางยาวโฟกัสของเลนซ์ที่จะทดสอบ ทำการบันทึกภาพของจุดแสง ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในบริเวณช่วงระยะโฟกัสของเลนซ์ บันทึกตำแหน่งของฟิลม์ ในแต่ละตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพ จากภาพถ่ายที่ได้ จะแสดงถึงตำแหน่งโฟกัสและคุณภาพของเลนซ์ที่ทดสอบได้ ผลของการทดสอบสำหรับเลนซ์วัตถุที่สร้างขึ้น แสดงไว้ในภาพ 4-18



รูป 1 2 3 4 5



รูป 6 7 8 9 10

ภาพ 4-18 แสดงภาพถ่ายที่ได้จากการทดลอบด้วยดาว

รูป 1 - 5 เป็นภาพที่บันทึกในช่วงในโฟกัล

รูป 6 เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัล

รูป 7 - 10 เป็นภาพที่บันทึกในช่วงนอกโฟกัล

จากลักษณะของภาพที่ได้ พบว่า ความเข้มบนดวงกลม มีลักษณะแตกกระจัดกระจายกลืนกันไปหมด อันเป็นผลลับเนื่องจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

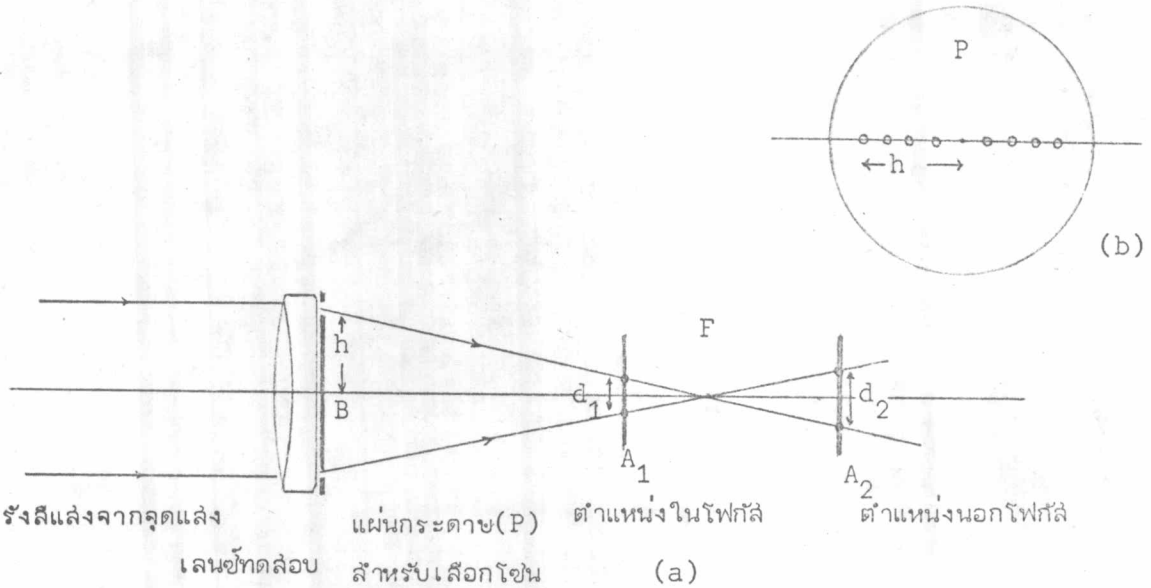
1. รูเข็มบนแผ่นตีบุก ไม่เป็นรูกลมอย่างแท้จริง ทำให้ลักษณะการกระจายความเข้ม อันเป็นผลลับเนื่องจากการเลี้ยวเบน ไม่เป็นไปในลักษณะที่ลมมาตร อันจะสังเกตได้จาก ภาพ 4-15 รูป 1 - 5

2. เลนซ์ที่ทดสอบมีความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาด โดยสังเกตุได้จากลักษณะของภาพที่ได้ โดยเฉพาะ รูปที่ 7 ใจกลางดวงจะเป็นภาพของจุดแสง ซึ่งเป็นตำแหน่งโฟกัสของส่วนใกล้แกน และมีรัวเป็นวงกลมรอบ อันเป็นลักษณะของช่วงนอกโฟกัสของรังสีแสงจากโซนขอบเลนซ์

ภาพที่แสดงไว้ เนื่องจากฟิลม์ที่ใช้นี้ไวต่อแสงนานเกินควร ลวดลายของการแทรกสอดจึงกลมกลืนกัน ไม่สามารถฮัดภาพให้เห็นรายละเอียดของลวดลายดังกล่าวได้

1.6 <u>การทดสอบโดยวิธีของฮาร์ทแมน</u>

จากจุดแสงที่สร้าง สามารถทำการทดสอบคุณภาพของเลนซ์ โดยการหาตำแหน่งโฟกัสจากแต่ละโซน บนผิวหน้าเลนซ์ได้ โดยหลักการง่าย ๆ ของฮาร์ทแมน จากค่าโฟกัสแต่ละโซนแสดงถึงลักษณะความคลาดทรงกลมของเลนซ์ที่สร้างขึ้น



ภาพ 4-19 แสดงหลักการทดสอบหาตำแหน่งโฟกัสโดยวิธีของฮาร์ทแมน
(a) และแผ่นกระดาษที่ใช้ในการเลือกโซนบนผิวเลนซ์ (b)

ทำการทดสอบ โดยวางเลนซ์ที่จะทดสอบรับรังสีขนานจากจุดแสง ด้านหลังของเลนซ์ปิดด้วยแผ่นกระดาษดำ ที่เจาะรูไว้เพื่อเลือกโซน รังสีแสงจากโซนที่เลือก จะไปตัดกันที่จุดโฟกัส (F) ของโซนนั้น การหาตำแหน่งจุด F สามารถหาได้จากสมการ

$$BF = BA_1 + \frac{d_1}{d_1 + d_2} A_1 A_2 \qquad \text{..... 4.25}$$

สำหรับระยะ d_1 และระยะ d_2 ทำการวัดหาค่าได้จากการใช้ฟิลม์บันทึกภาพที่ตำแหน่ง A_1 และ A_2 ซึ่งแต่ละตำแหน่ง จะให้ภาพจุด 2 จุดบนแผ่นฟิลม์ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดทั้งสองที่ตำแหน่ง A_1 และ A_2 ก็คือระยะ d_1 และ d_2 ตามลำดับ ซึ่งวัดหาค่าได้โดยใช้กล้องจุลทัศน์ชนิดเลื่อน บันทึกระยะ BA_1 และ BA_2 จากนั้น คำนวณหาค่าทางยาวโฟกัส ตามสมการของฮาร์ทแมน ได้ทำการทดลองโดยเลือกโซนต่าง ๆ 8 โซน ซึ่งข้อมูลของการทดลองแสดงไว้ในตาราง 4-12

ตาราง 4.12 แสดงข้อมูลการหาตำแหน่งโฟกัสของแต่ละโซนโดยวิธีของฮาร์ทแมน

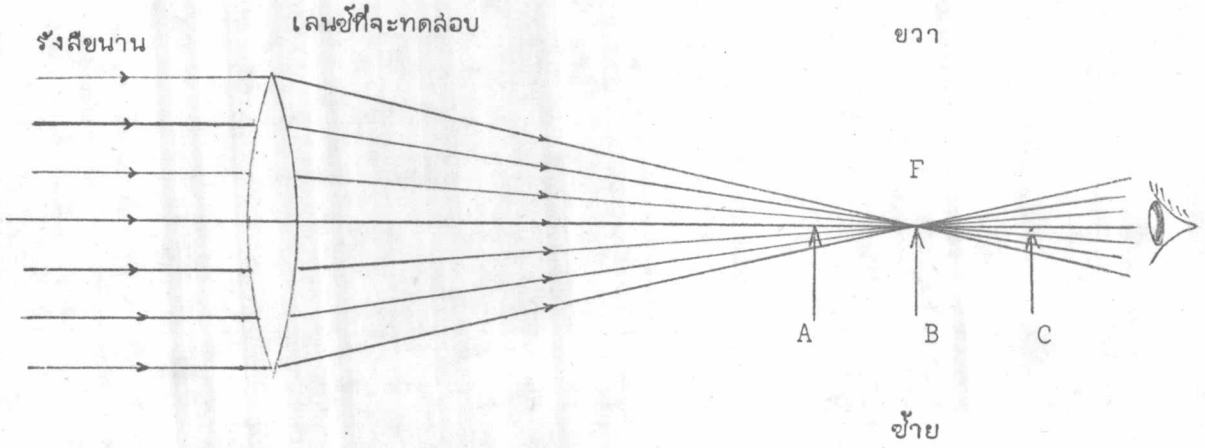
h (cm)	BA_1 (cm)	BA_2 (cm)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	$d_1 + d_2$ (cm)	BF (cm)
2.00	29.8	37.8	.240	.751	.991	31.7
1.75	29.5	37.5	.321	.565	.886	32.4
1.50	29.8	37.8	.312	.429	.741	33.2
1.25	29.5	37.5	.302	.306	.608	33.5
1.00	29.8	37.8	.241	.243	.484	33.8
0.75	29.5	37.5	.221	.156	.377	34.2
0.50	29.8	37.8	.126	.096	.222	34.3
0.25	29.5	37.5	.074	.045	.119	34.5

จากข้อมูลที่ได้ มีการเคลื่อนของจุดโฟกัสตามแนวแกน ซึ่งแสดงถึงความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาดของเลนซ์ที่สร้างขึ้น

1.7 การทดสอบโดยวิธีคมมีดของฟูโคลท์

จากจุดกำเนิดแสงที่สร้างขึ้น จะมีวิธีการทดสอบคุณภาพของเลนซ์ โดยอาศัยหลักการของฟูโคลท์ ซึ่งทำได้อย่างง่าย ๆ โดยใช้คมมีดตัดลำแสงที่บริเวณด้านหลังเลนซ์ และจะนำไปสู่ตำแหน่งโฟกัสของเลนซ์ได้ นอกจากนี้ วิธีการทดสอบ ยังแสดงถึงคุณภาพของเลนซ์เกี่ยวกับความคลาดทรงกลมอีกด้วย

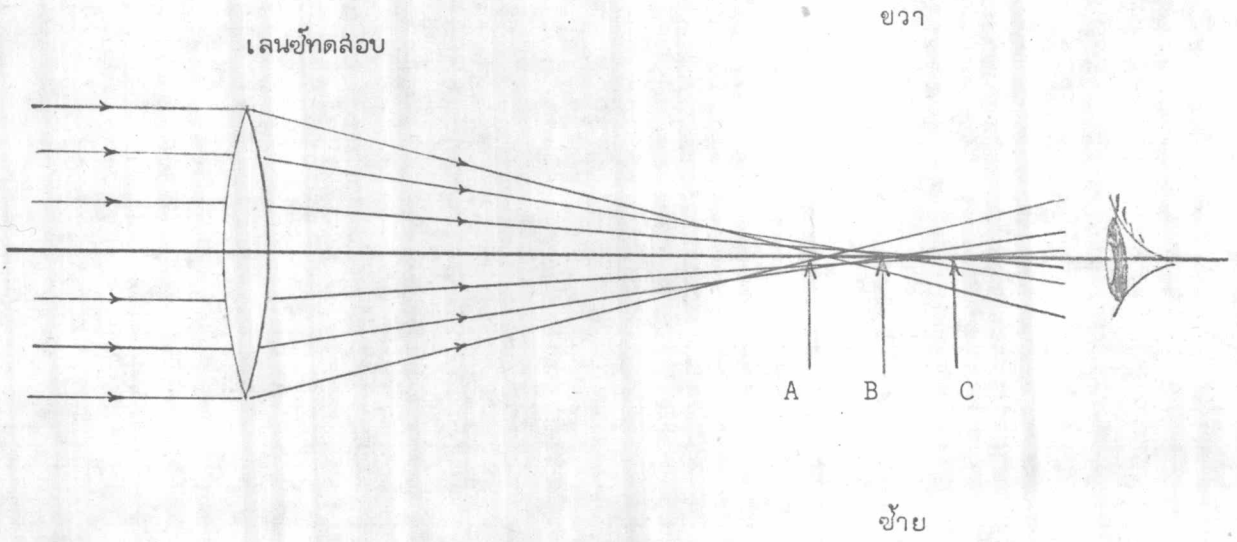
หลักการของการทดสอบ สามารถพิจารณาได้จากทางเดินรังสีที่ถูกใบมีดตัด โดยเริ่มต้นพิจารณากรณีที่เลนซ์ไม่มีความคลาดทรงกลม



ภาพ 4-20 แสดงการทดสอบโดยคมมีดของฟูโคลท์สำหรับเลนซ์ที่ไม่มีความคลาด

เมื่อนำเลนซ์ที่ไม่มีความคลาดมาวางรับรังสีขนาน รังสีจากทุกส่วนบนผิวหน้าเลนซ์จะหักเหไปรวมกันที่จุดโฟกัส (F) จุดเดียวกัน ดังทางเดินของแสงในภาพ 4-20 เมื่อใช้ตามองภาพที่ตามองเห็น จะมีลักษณะเป็นดวงสว่าง ขณะที่เลื่อนใบมีดเข้าตัดลำแสงทางด้านซ้าย เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่ง A ซึ่งเป็นช่วงภายในโฟกัส ลำแสงทางด้านซ้ายจะถูกบังโดยคมมีด ทำให้ภาพดวงสว่างที่ตามองเห็นมืดทางด้านซ้ายเข้ามา ยืนยันถึงตำแหน่งที่คมมีดอยู่ว่าเป็นตำแหน่งที่อยู่ภายในโฟกัสของเลนซ์ แต่ถ้าคมมีดอยู่ที่ตำแหน่ง C ซึ่งเป็นส่วนภายนอกโฟกัส รังสีแสงที่มาจากด้านขวาจะถูกบัง ภาพดวงสว่างที่ตามองจะมืดเข้าทางด้านขวา แต่ถ้าเลื่อนใบมีดมาที่ตำแหน่ง B แล้วทำการตัดลำแสงที่จุด F จะพบว่า ดวงสว่างจะมืดทันที เพราะลำแสงจากทุกส่วนถูกบังด้วยใบมีดจนหมด ยืนยันถึงตำแหน่งที่คมมีดอยู่ คือ ตำแหน่งโฟกัสของเลนซ์ที่ทดสอบพอดี ในกรณีที่เลนซ์มีความคลาดทรงกลม ลำแสง

จากแต่ละโซนของหน้าเลนซ์ จะไม่ไปตัดที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งทำให้หาตำแหน่งที่แน่นอนของจุดโฟกัสไม่ได้ เนื่องจากไม่สามารถหาตำแหน่งที่คมมีดตัดแสงจากทุกโซนหมดพร้อมกันได้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เลนซ์มีความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาด ซึ่งมีระยะโฟกัสของลำแสงจากโซนนอกสั้นกว่าโซนใน



ภาพ 4-21 แสดงการทดสอบโดยวิธีของฟูโคลท์สำหรับเลนซ์ที่มีความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาด

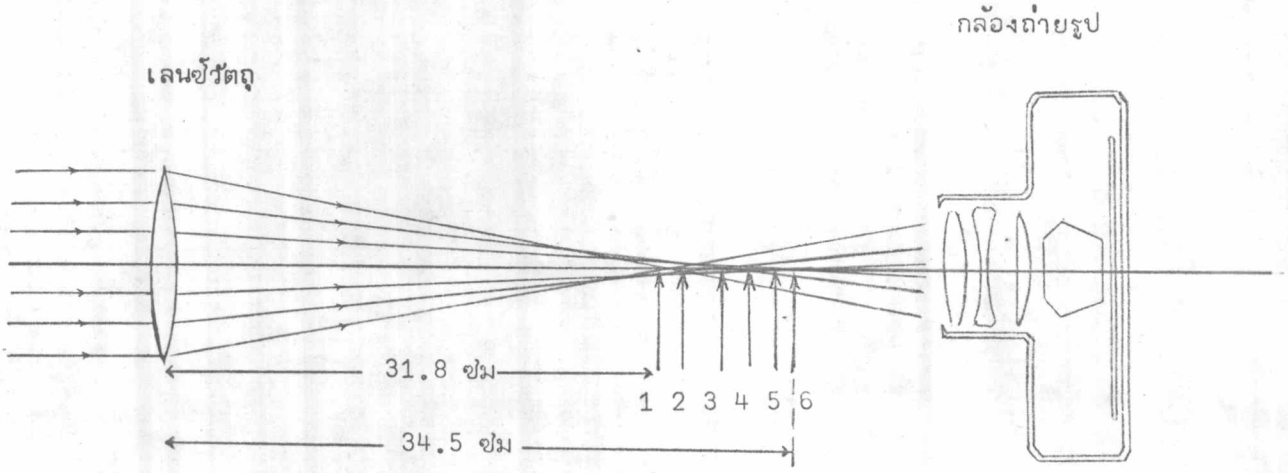
เมื่อใบมีดอยู่ที่ตำแหน่ง A ซึ่งเป็นช่วงภายในโฟกัสของลำแสงจากทุกโซน ภาพดวงสว่างที่เห็นจะมืดทางด้านซ้ายเข้ามา แต่ถ้าใบมีดอยู่ที่ตำแหน่ง C ซึ่งเป็นช่วงภายนอกโฟกัสของลำแสงจากทุกโซน ภาพดวงสว่างก็จะมืดทางด้านขวาเข้ามา และถ้าใบมีดอยู่ที่ตำแหน่ง B แสงจากโซนนอก จะถูกบังในช่วงภายนอกโฟกัส ทำให้ขอบของดวงสว่างมืดเข้าทางด้านขวา ขณะที่แสงจากโซนในจะถูกบังในช่วงภายในโฟกัส ภาพของดวงสว่างด้านใน จะมืดเข้าทางด้านซ้าย สำหรับเลนซ์ที่มีความคลาดรงค์แบบแก้เกิน จะให้ผลที่ตรงข้ามกัน ซึ่งจะทำให้สามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของเลนซ์ได้อย่างง่าย ๆ

ทำการทดลองโดย วางเลนซ์ที่จะทดสอบรับรังสีขนานจากจุดแสง วางแท่นใบมีดไว้ระหว่างตาและเลนซ์ทดสอบ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวควรจัดวางไว้บนรางทัศน์ เพื่อสะดวกในการเลื่อน และอ่านตำแหน่งของเลนซ์และใบมีด เลื่อนแท่นใบมีดไปมาตามรางทัศน์ ทดลองใช้ใบมีดตัดลำแสงที่ตำแหน่ง ต่าง ๆ

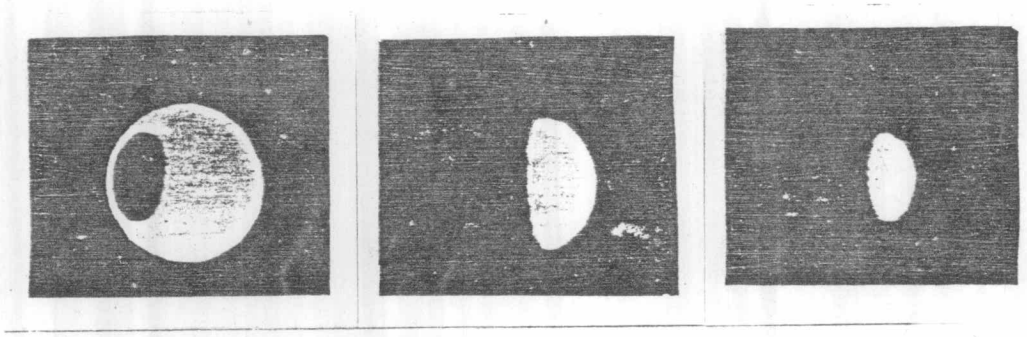
สังเกตลักษณะของดวงสว่าง เพื่อพิจารณาถึงความคลาดทรงกลมที่มีอยู่ ทำการบันทึกภาพของดวงสว่างด้วยกล้องถ่ายรูป

การหาโฟกัสของแต่ละโซน สามารถทำได้ โดยการลดขนาดของช่องรับแสงด้านหน้าของเลนซ์ลงจากลักษณะทางเดินแสงของเลนซ์ที่มีความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาด ดังภาพ 4-20 ภาพขอบของดวงสว่างนั้นได้มาจากรังสีแสงที่มาจากโซนนอกของหน้าเลนซ์ (บริเวณผิวเลนซ์ใกล้ขอบของช่องรับแสง) ดังนั้น จะหาตำแหน่งของจุดโฟกัส ของโซนขอบเลนซ์ได้โดยใช้คมมีดตัดลำแสง และสังเกตทิศทางการมืดของบริเวณขอบของดวงสว่าง

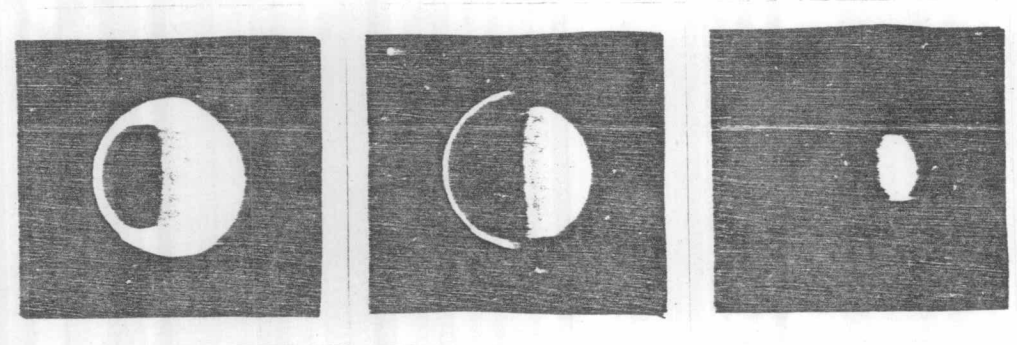
ผลของการทดสอบเลนซ์วัตถุ โดยวิธีคมมีด เมื่อเปิดหน้าเลนซ์รับแสงเต็มที่ ทำการบันทึกภาพดวงสว่างด้วยฟิลม์ อักฟา ไอโซแพน (Agfa isopan) ใช้เวลารับแสง 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำยาดี-72 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลานาน 5 นาที และแช่ในน้ำยาฟิกเซอร์ (fixer) นาน 5 นาที ใช้กระดาษอัดภาพ โดยฉายแสงนาน 8 วินาที แช่ในน้ำยาดี-72 ประมาณ 1 นาที แล้วแช่ในฟิกเซอร์อีก 5 นาที ผลการทดสอบ แสดงไว้ในภาพ 4-23



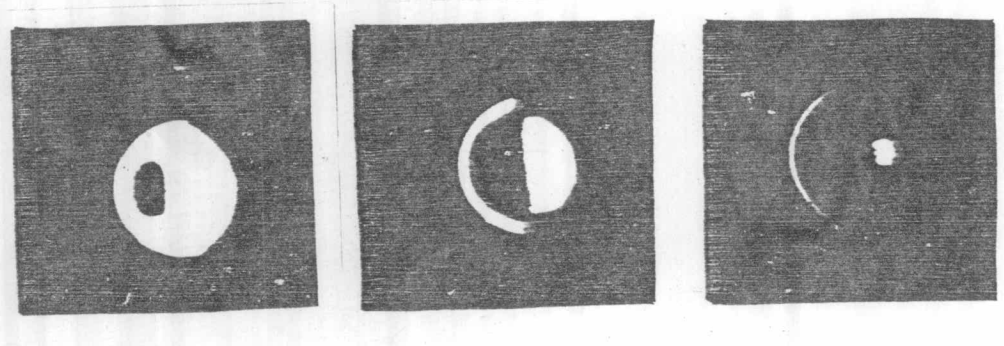
ภาพ 4-22 แสดงตำแหน่งที่ใช้คมมีดตัดทางเดินแสงในช่วง 31.8-34.5 เซนติเมตร จากหลังเลนซ์เป็นจำนวน 6 ครั้ง



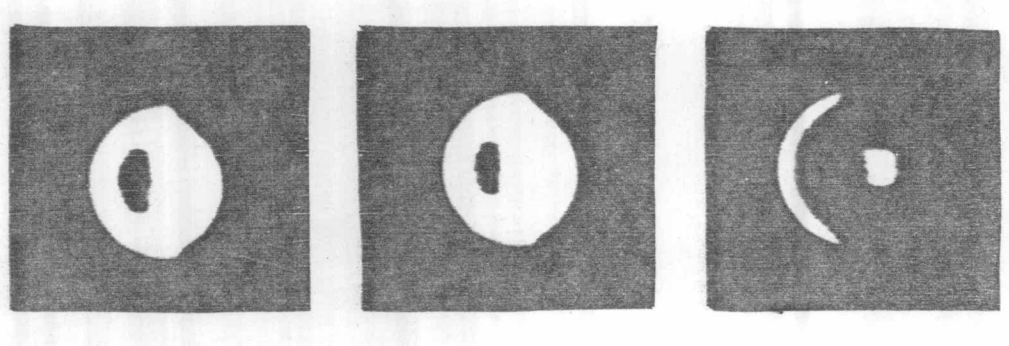
ตำแหน่ง 1 ระยะ 31.8 เซนติเมตร ตัดในส่วนในโฟกัสของรังสีจากทุกโซน



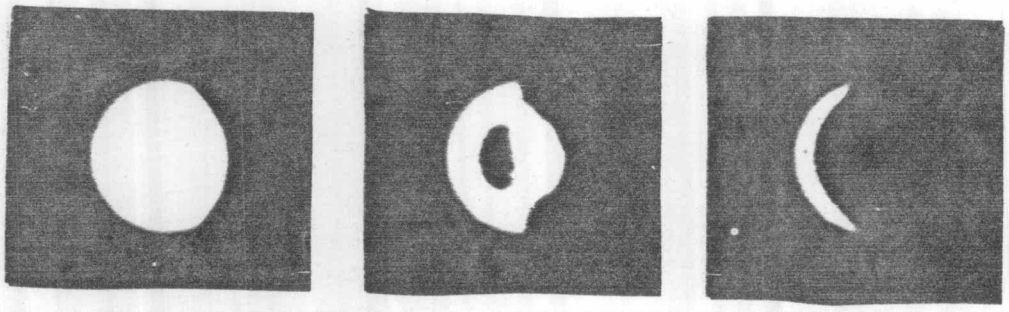
ตำแหน่ง 2 ระยะ 32.5 เซนติเมตร รังสีจากโซนในเป็นช่วงนอกโฟกัส แต่รังสีจากโซนในเป็นช่วงในโฟกัส



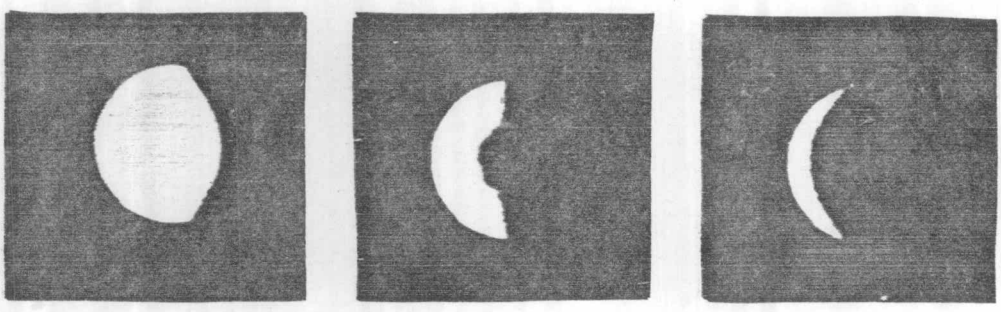
ตำแหน่ง 3 ระยะ 33.1 เซนติเมตร รังสีจากโซนในยังเป็นช่วงในโฟกัส



ตำแหน่ง 4 ระยะ 33.5 เซนติเมตร รังสีจากโซนในยังเป็นช่วงในโฟกัสเช่นเดิม



ตำแหน่ง 5 ระยะ 34.0 เซนติเมตร โซนในยังคงเป็นช่วงในโฟกัส

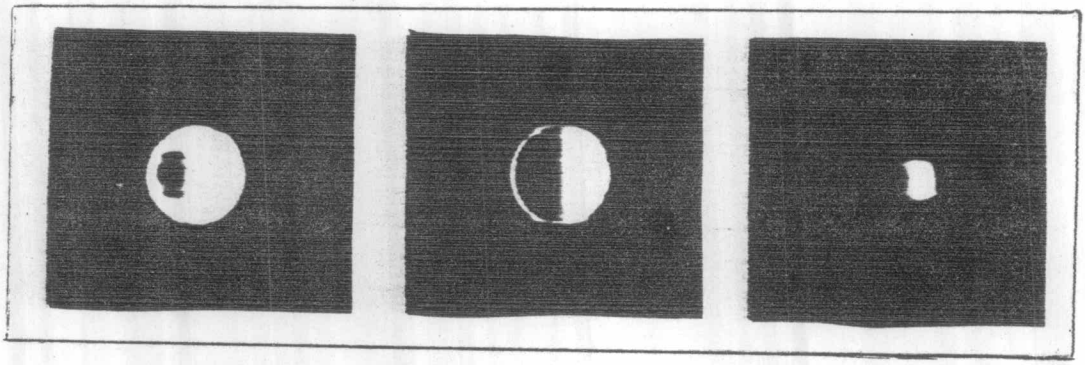


ตำแหน่ง 6 ระยะ 34.5 เซนติเมตร เป็นตำแหน่งที่พอดีแล่งจากทุกโซนเป็นช่วงภายนอกโฟกัส

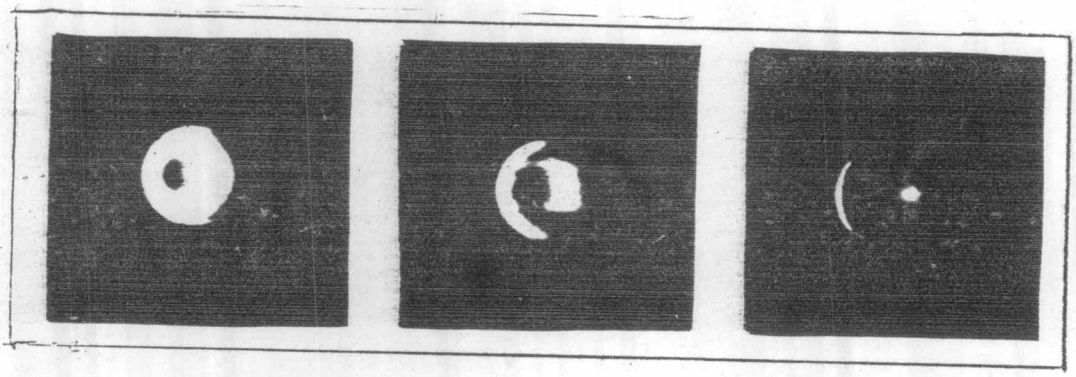
ภาพ 4-23 แล่ดงภาพที่บันทึกด้วยกล้องถ่ายรูป ในการทดล่อบโดยวิธีคมมีดตัดลำแล่ง ใน ช่วงบริเวณโฟกัส่ของเลนซ์วัตถุ 6 ตำแหน่ง

จากลักษณะภาพที่ได้ แล่ดงถึงเลนซ์วัตถุที่ล่ร้างมีความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาด และมีความคลาดรังสีตามแนวแกน เป็นระยะประมาณ 2.7 เซนติเมตร

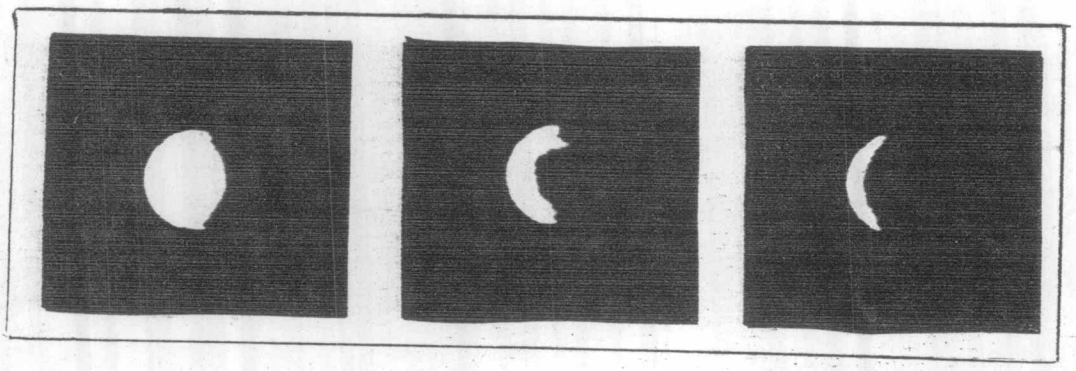
ต่อมาได้ทำการลดขนาดของช่องรับแล่งลง เพื่อหาตำแหน่งโฟกัส่ของแล่งจากแต่ละโซน ตัวอย่างของภาพถ่ายที่ได้จากการทดล่อบ เมื่อลดช่องรับแล่งเหลือกว้างเพียง 1.5 เซนติเมตร แล่ดงไว้ในภาพ 4-24



ตำแหน่ง 1 ระยะ 33.0 เซนติเมตร คมมีดตัดในระยะภายในโฟกัสของแสงจากทุกโซน



ตำแหน่ง 2 ระยะ 34.0 เซนติเมตร โซนนอกเป็นช่วงนอกโฟกัส โซนในเป็นช่วงในโฟกัส



ตำแหน่ง 3 ระยะ 34.5 เซนติเมตร คมมีดตัดในตำแหน่งที่พอดี ช่วงนอกโฟกัสของแสงจากทุกโซน

ภาพ 4-24 แสดงภาพดวงสว่าง เมื่อทำการลดขนาดช่องรับแสงเหลือกว้าง 1.5 เซนติเมตร

จากการสังเกตุทิศทางการมืดของบริเวณขอบดวง เมื่อใช้ใบมีดตัด พบว่าตำแหน่งโฟกัสของโซนนอก (บริเวณ 1.5 เซนติเมตรจากแนวแกน) จะอยู่ที่ตำแหน่ง 33.1 เซนติเมตร ทำการทดลองเช่นเดียวกัน สำหรับช่องรับแสงขนาดต่าง ๆ ได้ค่าทางยาวโฟกัสของแต่ละโซน ดังแสดงไว้ในตาราง 4.13 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีทดสอบของฮาร์ทแมนด้วย

ตาราง 4.13 แสดงค่าทางยาวโฟกัสของโซนต่าง ๆ ที่ได้จากวิธีของฟูโคลท์และฮาร์ทแมน

h (cm)	ทางยาวโฟกัส จากวิธีทดสอบของฟูโคลท์ (cm)	ทางยาวโฟกัส จากวิธีทดสอบของฮาร์ทแมน (cm)
2.00	31.8	31.7
1.75	32.6	32.4
1.50	33.1	33.2
1.25	33.6	33.5
1.00	34.0	33.8
0.75	34.2	34.2
0.50	34.4	34.3
0.25	34.5	34.5

เนื่องจากตำแหน่งดาวหรือจุดแสง อยู่ห่างจากหน้าเลนซ์ไม่มากนัก (ประมาณ 20 เท่าของทางยาวโฟกัสเท่านั้น) ค่าทางยาวโฟกัสที่ได้ จึงยังไม่ถูกต้อง ถ้าคิดว่าเลนซ์วัตถุเป็นเลนซ์บาง ค่าทางยาวโฟกัสที่ได้ความจริงจะเป็นระยะภาพ จากระยะวัตถุ และระยะภาพ สามารถคำนวณหาทางยาวโฟกัสที่แท้จริงของเลนซ์ ได้จากสมการเกาซ์เซียน

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} - \frac{1}{u}$$

u คือระยะวัตถุมีค่า -700 เซนติเมตร และ v คือระยะภาพมีค่า 34.5 เซนติเมตร

จะได้ $f = 32.9$ เซนติเมตร

2. <u>การทดสอบเลนซ์ตา</u> ได้แบ่งขั้นตอนการทดสอบตามลำดับ คือ

2.1 <u>การตรวจสอบหาค่ารัศมีความโค้งโดยวิธีวงแหวนของนิวตัน</u>

ในการตรวจสอบ ได้ทำการทดสอบผิวโค้งของเลนซ์เดี่ยวแต่ละชิ้น เช่นเดียวกับเลนซ์วัตถุ เนื่องจากเลนซ์เดี่ยวที่สร้างขึ้นเป็นแบบเลนซ์นูนแกมราบ ซึ่งมีขนาดเล็กมาก การวัดหาค่าความโค้งของผิวราบที่แน่นอน จัดทำได้ไม่สะดวกนัก ได้ทำการตรวจสอบความโค้งของผิวราบ โดยพิจารณาจากริ้วของการแทรกสอด เมื่อวางสัมผัสกับแผ่นทดสอบราบ (flat test plate) พบว่าบริเวณตรงกลางผิวจะเป็นผิวราบสนิท แต่บริเวณขอบของผิวเลนซ์จะลาดลง มีลักษณะเป็นผิวโค้งนูนเล็กน้อยที่ขอบวง ดังนั้นสำหรับผิวราบของเลนซ์ทั้งสองจะถือว่ามีค่าความโค้งเป็นศูนย์

ผลของการทดสอบ สำหรับผิวโค้ง คือ

เลนซ์ชิ้นที่หนึ่ง	c_1	=	.3505	ต่อเซนติเมตร
	R_1	=	2.853	เซนติเมตร
	c_2	=	0	
	c_1	=	.3551	ต่อเซนติเมตร
เลนซ์ชิ้นที่สอง	R_1	=	2.816	เซนติเมตร
	c_2	=	0	

2.2 การตรวจสอบหาทางยาวโฟกัส

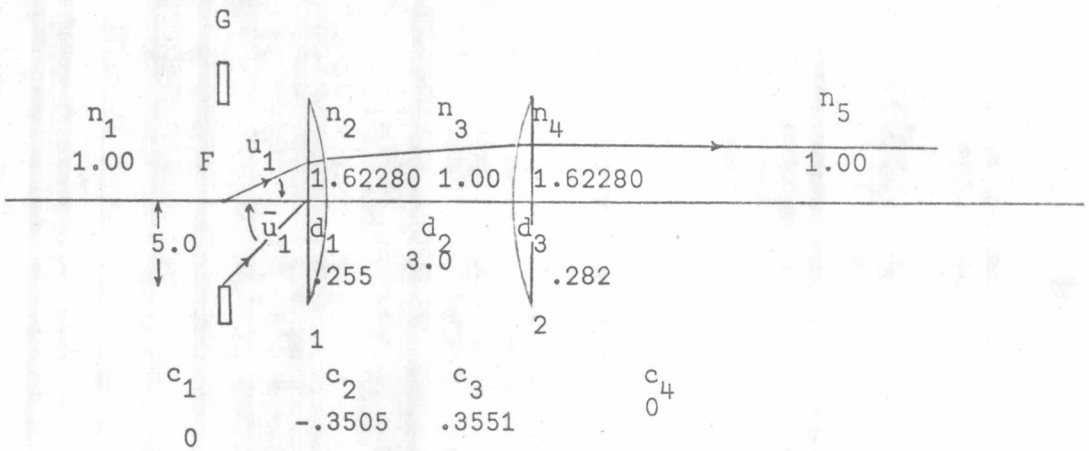
เมื่อพิจารณาเลนซ์ทั้งสองเป็นเลนซ์บาง จากค่ารัศมีความโค้งดังกล่าว ได้ค่าทางยาวโฟกัสของเลนซ์แต่ละชิ้น จากสมการของเลนซ์บาง คือ

เลนซ์ชิ้นที่หนึ่ง	K_1	=	.2183	ต่อเซนติเมตร
	f_1	=	4.581	เซนติเมตร
และ เลนซ์ชิ้นที่สอง	K_2	=	.2212	ต่อเซนติเมตร
	f_2	=	4.522	เซนติเมตร

จากทางยาวโฟกัสของเลนซ์ทั้งสอง เมื่อนำมาประกอบเป็นเลนซ์ตา ได้จัดวางเลนซ์ทั้งสองไว้ห่างกันเป็นระยะ 3.0 เซนติเมตร เพื่อประกอบเป็นระบบเลนซ์ตา

2.3 การตรวจสอบความคลาดของระบบเลนซ์ตาโดยการแกะรอยรังสี

ได้ทำการตรวจสอบ ในทำนองเดียวกับการตรวจสอบของเลนซ์ที่ออกแบบ โดยเริ่มต้นหาตำแหน่งจุดโฟกัสของระบบเสียก่อน โดยกลับทิศทางของเลนซ์ตา ได้ตำแหน่งจุดโฟกัสอยู่ห่างจากผิวหน้าเลนซ์เป็นระยะ .985191 เซนติเมตร แล้วจึงดำเนินการแกะรอยรังสีเพื่อหาความคลาด ซึ่งข้อมูลของการแกะรอยรังสีแสดงไว้ในตาราง 4-14



ภาพ 4-25 แสดงทางเดินแสงในการแกะรอยรังสีเพื่อหาความคลาดของเลนซ์ตาที่สร้างขึ้น

ตาราง 4.14 แสดงข้อมูลการแกะรอยรังสีสำหรับระบบเลนซ์ตาที่ล่างขึ้น

$u_1 = -.0620439$ $\quad \bar{u}_1 = -.507516$

$h_1 = .0611211$ $\quad \bar{h}_1 = 0$

d_1 d_2 d_3	n_1 n_2 n_3	c_1 c_2 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 (cm)	u_1/n_1 u_2/n_2 u_3/n_3 u_4/n_4 u_5/n_5	$\Delta_1(u/n)$ $\Delta_2(u/n)$ $\Delta_3(u/n)$ $\Delta_4(u/n)$	A_1h_1 A_2h_2 A_3h_3 A_4h_4 (cm)	S_{I_1} S_{I_2} S_{I_3} S_{I_4}
.255 3.00 .282	1.62280 1.00 1.62280	0 -.3505 .3551 0	0 -.0248401 .0747808 0	.0620439 .0217334 .121354 0	-.0382326 -.0465735 0 0	.0611211 .0708704 .210591 .210591	-.0620439 -.0235560 -.0465735 0 0	.0384879 -.0230175 .0465735 0	.00379219 .00154025 .0255561 0	$.905552\times10^{-5}$ $-.0770508\times10^{-5}$ 14.4440×10^{-5} 0
			$\alpha = hc$	$A = n(\alpha-u)$	$u' = \alpha-\frac{A}{n'}$	$h_{+1} = h-du'$				$S_I = \Sigma A^2 h\Delta(\frac{u}{n})$ $=15.3496\times10^{-5}$
$\bar{\alpha}_1$ $\bar{\alpha}_2$ $\bar{\alpha}_3$ $\bar{\alpha}_4$	$\bar{A}_1$ $\bar{A}_2$ $\bar{A}_3$ $\bar{A}_4$	$\bar{u}'_1 = \bar{u}_2$ $\bar{u}'_2 = \bar{u}_3$ $\bar{u}'_3 = \bar{u}_4$ $\bar{u}'_4 = \bar{u}_5$	$\bar{h}_1$ $\bar{h}_2$ $\bar{h}_3$ $\bar{h}_4$ (cm)	S_{II_1} S_{II_2} S_{II_3} S_{II_4} (cm)	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 -.0279520 .550430 0	.507516 .462156 1.04054 .147300	-.312741 -.490108 -.0907690 -.147300	0 .0797490 1.55007 1.57567	7.40737×10^{-5} -1.63847×10^{-5} 123.849×10^{-5} 0	0 .0109455 0 .0109455 0	.00674482 .00674482	.00674482 -.00674482 .00674482 -.00674482	2.55776×10^{-5} -1.03887×10^{-5} 17.2371×10^{-2} 0	20.9224×10^{-5} -22.0914×10^{-5} 147.798×10^{-5} -20.9225×10^{-5}	1.91869×10^{-5} 64.8090×10^{-5} 9.37800×10^{-5} 125.707×10^{-5}
$\bar{\alpha} = \bar{h}c$	$\bar{A} = n(\bar{\alpha}-u)$	$\bar{u}' = \bar{\alpha}-\frac{\bar{A}}{n'}$	$\bar{h}_{+1} = \bar{h}-d\bar{u}'$	$S_{II} = \Sigma\bar{A}Ah\,\Delta(\frac{u}{n})$ $=129.618\times10^{-5}$				$C_L = \Sigma Ah\Delta(\frac{\delta n}{n})$ $=18.7540\times10^{-5}$	$C_T = \Sigma\bar{A}h\Delta(\frac{\delta n}{n})$ $=125.707\times10^{-5}$	

ผลของการตรวจสอบ ได้ค่าสัมประสิทธิความคลาดต่าง ๆ คือ

$$_{o}W_{40} = 1.91869 \times 10^{-5} \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$_{1}W_{31} = 64.8090 \times 10^{-5} \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\delta W_{20} = 9.37800 \times 10^{-5} \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$\delta W_{11} = 125.707 \times 10^{-5} \quad \text{เซนติเมตร}$$

เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิความคลาดของเลนซ์ที่ออกแบบ ซึ่งมี $_{o}W_{40} = 1.86232 \times 10^{-5}$ $_{1}W_{31} = 66.6566 \times 10^{-5}$, $\delta W_{20} = 8.94450 \times 10^{-5}$ และ $\delta W_{11} = 126.107 \times 10^{-5}$ เซนติเมตร ได้ค่าความคลาดที่แตกต่างจากค่าของเลนซ์ที่ออกแบบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.4 <u>การทดสอบด้วยดาว</u>

ในการทดสอบ มีจุดมุ่งหมายเพื่อพิจารณาถึงลักษณะความคลาดทรงกลม และความคลาดรงค์ที่มีอยู่ในระบบเลนซ์ตา โดยนำเลนซ์ตาที่สร้างขึ้นมารับแสงขนานจากดาวหรือจุดแสง โดยต้องกลับทิศทางของระบบเลนซ์ตา เพื่อให้ถูกต้องตามลักษณะการใช้งาน ทำการสังเกตจุดภาพที่ได้จากการหักเหผ่านเลนซ์ตา เนื่องจากเลนซ์ตาที่สร้างมีขนาดเล็ก และทางยาวโฟกัสสั้นมาก จึงไม่สะดวกต่อการบันทึกภาพ เพื่อแสดงถึงผลของการทดสอบ

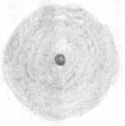
ผลของการทดสอบ โดยใช้เลนซ์ตายื่นอื่นสังเกตจุดภาพที่บริเวณภายในโฟกัส ที่ตำแหน่งโฟกัส และที่บริเวณภายนอกโฟกัส พอสรุปได้ว่า เลนซ์ตาที่สร้างขึ้น มีความคลาดทรงกลมแบบแก้ยาก และมีความคลาดรงค์อยู่อย่างเห็นได้ชัด

วงสว่างที่ขอบมีความเข้มสูง และมีริ้วของแสงสีต่าง ๆ ประกอบอยู่

(a)

จุดแสงสีเขียว และแดง

(b)



จุดแสงสียาวตรงกลางมีความเข้มสูง และแตกพร่าเล็กน้อย

(c)

ภาพ 4-26 แสดงลักษณะของจุดภาพที่สังเกตได้จากการทดสอบด้วยดาว - สำหรับเลนซ์ตาที่สร้างขึ้น ภาพภายในจุดโฟกัส (a) ภาพที่ตำแหน่งโฟกัส (b) และที่บริเวณนอกจุดโฟกัส(c)

2.5 <u>การตรวจสอบค่ากำลังขยายของเลนซ์ตา</u> จากค่ากำลังของเลนซ์เดี่ยวทั้งสอง และระยะห่างที่จัดวางเลนซ์ไว้ สามารถหากำลังรวมของระบบเลนซ์ตา ได้จาก

$$K = K_1 + K_2 - dK_1K_2$$

โดยที่ $K_1 = .2183\ cm^{-1}$, $K_2 = .2212\ cm^{-1}$ และ $d = 3.0\ cm$

ดังนั้นจะได้ $K = 0.295\ cm^{-1}$

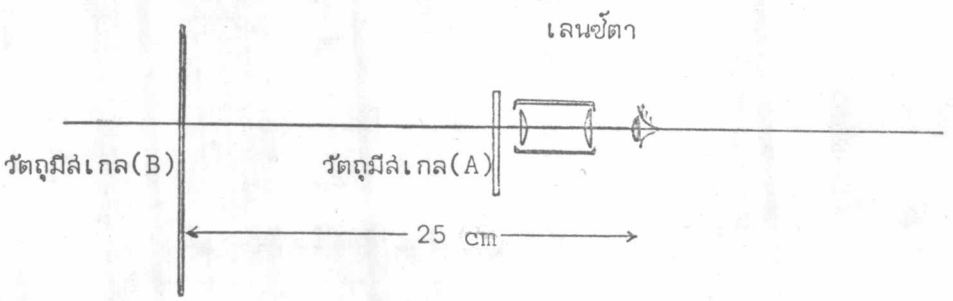
ค่าทางยาวโฟกัสยังผลของระบบเลนซ์ตา (fe) จะมีค่า 3.39 เซนติเมตร

ดังนั้น ถ้าพิจารณาว่า เลนซ์เดี่ยวทั้งสองเป็นเลนซ์บาง มีทางยาวโฟกัสยังผล 3.39 เซนติเมตร กำลังขยายของเลนซ์ตาหาได้จาก

$$m = \frac{25}{fe}$$

จะได้ $m = 7.37$

สำหรับการตรวจสอบ วัดหาค่ากำลังขยายของระบบเลนซ์ตา ได้ทำการวัดหาค่าโดยใช้วิธีตรวจกำลังขยายโดยตรง[4] (direct determination for magnifying power) ซึ่งทำได้โดยใช้เลนซ์ตาที่จะทดสอบ สังเกตภาพวัตถุมีสเกล (A) ให้ได้ภาพเสมือนที่ระยะ 25 เซนติเมตรจากตา ที่ตำแหน่งดังกล่าว วางวัตถุมีสเกล (B) ไว้ ขณะที่ตาข้างหนึ่งมองผ่านเลนซ์ตา จะเห็นภาพสเกลของวัตถุ A ปรากฏที่ตำแหน่งเดียวกับวัตถุ B ใช้ตาเปล่าอีกข้างมองสเกลของวัตถุ B ทำการเปรียบเทียบขนาดของช่องสเกลจากตาทั้งสอง อัตราส่วนระหว่างขนาดของช่องสเกลที่มองผ่านเลนซ์ตากับที่ใช้ตาเปล่ามอง ก็คือกำลังขยายของเลนซ์ตา



ภาพ 4-27 แสดงการจัดวางอุปกรณ์เพื่อตรวจสอบค่ากำลังขยายของเลนซ์ตาโดยการวัดโดยตรง

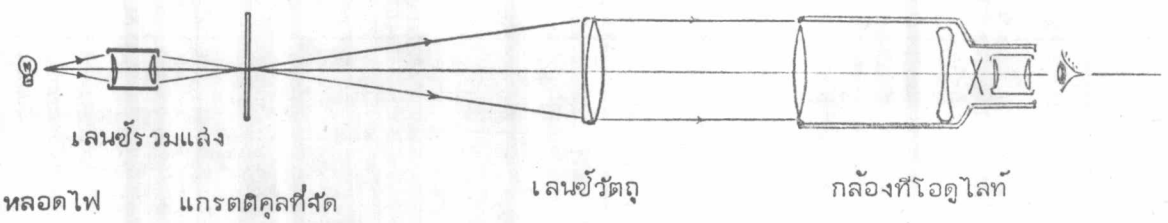
ผลของการทดลอบ จากการเปรียบเทียบสเกล เลนซ์ที่จัดสร้างขึ้นมีค่ากำลังขยาย 8.2 เท่า

3. การทดลอบการใช้งานของออโตคอลลิเมเตอร์

ออโตคอลลิเมเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมุมปริซึม ดังได้กล่าวไว้แล้ว โดยทั่ว ๆ ไป ปริซึมที่พบและใช้กันมาก คือ ปริซึมมุมฉาก และปริซึมด้านเท่า จึงได้นำปริซึมทั้งสองแบบ มาทำการทดลองวัดหาค่ามุม โดยใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์ ที่ได้สร้างไว้ แต่ก่อนจะทำการทดลอบ จำเป็นต้องทราบค่าที่แน่นอน ของมุมที่รองรับต่อการเปลี่ยงเบน 1 ช่อง ของสเกลบนแกรตติคูลเสียก่อน

3.1 การหาค่าของมุมเบี่ยงเบนบนสเกลของแกรตติคูล โดยใช้กล้องทีโอดูไลท์

จากค่าทางยาวโฟกัส ประมาณ 33 เซนติเมตร และค่าความสูง 1 ช่อง บนสเกลของแกรตติคูล เท่ากับ $\frac{1}{100}$ เซนติเมตร สามารถคำนวณได้ว่า มุมเบี่ยงเบนต่อ 1 ช่องบนสเกล จะมีค่าเท่ากับ 1.04 ลิบดา แต่ค่าที่ได้ยังไม่ละเอียด และแน่นอนนัก ค่ามุมที่ถูกต้องสามารถหาได้โดยใช้กล้องทีโอดูไลท์ (Theodolite telescope) มาทำการวัด โดยจัดวางเครื่องมือดังภาพ 4-28



ภาพ 4-28 แสดงการจัดเครื่องมือ เพื่อทำการวัดมุมเบี่ยงเบน

กล้องทีโอดูไลท์ เป็นกล้องสำหรับวัดมุมในแนวดิ่ง (azimuth angle) และมุมในแนวราบ (horizontal angle) ได้อย่างละเอียด เมื่อจัดกล้องดังภาพ ปรับโฟกัสของกล้องให้อยู่ที่ระยะ

อนันต์ จะเห็นภาพของสเกลบนแกรตติคูลอย่างชัดเจน ทำการวัดมุมที่รองรับระหว่างช่อง โดยอ่านจากสเกลในแนวราบของกล้องทีโอดูไลท์ ข้อมูลของการวัด แสดงไว้ในตาราง 4.15

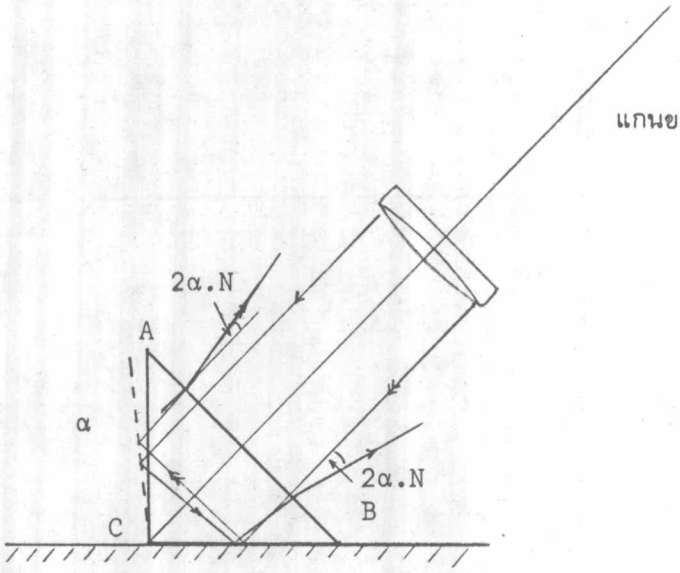
ตาราง 4.15 แสดงข้อมูล การวัดมุมเบี่ยงเบนโดยกล้องทีโอดูไลท์

สเกลที่	ตำแหน่งมุม	จำนวนช่อง	ค่ามุม		ค่ามุมเบี่ยงเบน/ช่อง
20	$267^{\circ}\ 31'\ 10''$	-	-	-	-
25	$267^{\circ}\ 36'\ 10''$	5	$0^{\circ}\ 5'\ 0''$	$5.00'$	$1.000'$
30	$267^{\circ}\ 41'\ 20''$	10	$0^{\circ}\ 10'\ 10''$	$10.17'$	$1.017'$
40	$267^{\circ}\ 51'\ 30''$	20	$0^{\circ}\ 20'\ 20''$	$20.53'$	$1.017'$
50	$268^{\circ}\ 1'\ 50''$	30	$0^{\circ}\ 30'\ 40''$	$30.67'$	$1.022'$
60	$268^{\circ}\ 12'\ 10''$	40	$0^{\circ}\ 41'\ 0''$	$41.00'$	$1.025'$
70	$268^{\circ}\ 22'\ 20''$	50	$0^{\circ}\ 51'\ 20''$	$51.33'$	$1.026'$
					$1.02'$

ค่ามุมเบี่ยงเบนของ ออโตคอลลิเมเตอร์ ที่สร้างขึ้น คือ 1.02 ลิบดา/ช่อง

3.2 หลักการใช้งานของ ออโตคอลลิเมเตอร์

3.2.1 ออโตคอลลิเมเตอร์ กับปริซึมมุมฉาก เริ่มต้นด้วยการวัดค่ามุมฉากของปริซึมเสียก่อน ทำได้โดยการวางปริซึมให้ด้านตรงข้ามมุมฉากรับแสงขนานจากออโตคอลลิเมเตอร์ ดังภาพ 4-29



ภาพ 4-29 แสดงทางเดินแสง เมื่อใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์ วัดค่ามุมฉาก (C) ของปริซึม

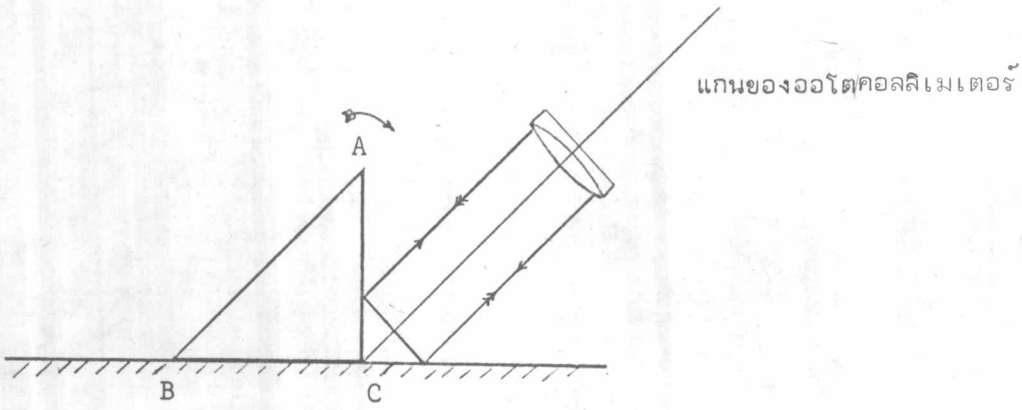
จากลักษณะทางเดินของแสง ดังภาพ 4-29 จะทำให้ปรากฏภาพของยีดศูนย์ 2 ภาพ บนแกรตติคูล ของ ออโตคอลลิเมเตอร์ ถ้ามุม C ของปริซึมมีค่าแตกต่างไปจากมุมฉาก ด้วยค่ามุม α มุมเบี่ยงเบน (D) ระหว่างภาพของยีดศูนย์ทั้งสอง จะวัดได้จากสเกลของแกรตติคูล ค่ามุม α ที่ผิดไปจะหาได้จาก

$$D = 4\alpha.N$$

$$\alpha = \frac{D}{4N}$$

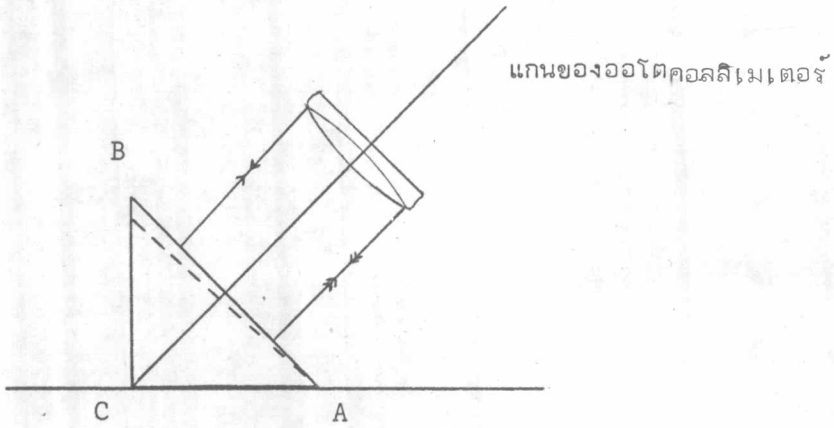
โดยที่ N คือ ดรรชนีหักเหของปริซึม

สำหรับปริซึมมุมฉาก ที่มีค่ามุม C เป็น $90^\circ + \alpha$ หรือ $90^\circ - \alpha$ ก็ตามจะให้ค่าการเบี่ยงเบนระหว่างภาพยีดศูนย์ทั้งสอง ด้วยมุม 4α.N เช่นเดียวกัน ทำการตรวจสอบว่ามุมฉากนั้นมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 90° ได้ โดยวัด ออโตคอลลิเมเตอร์ ดังภาพ 4-30



ภาพ 4-30 แสดงการตรวจสอบค่าที่แน่นอนสำหรับมุมฉากของปริซึม

เมื่อสังเกตบนแกรตติคูล จะเห็นภาพยืดคู่นย์ 2 ภาพเข้าหากัน โดยมีมุมเบี่ยงเบนไป 4α ทำการตรวจสอบว่ามุมของปริซึมมากกว่าหรือน้อยกว่า 90° ได้ โดยการเอียงปริซึมตามแนวลูกศร ถ้าภาพทั้งสองเคลื่อนเข้าหากัน แสดงว่ามุม C ของปริซึมนั้นน้อยกว่า 90° แต่ถ้าภาพทั้งสองแยกจากกันมากขึ้น มุม C ก็จะมากกว่า 90° ทำให้สามารถหาค่าที่แน่นอนของมุม C ได้ สำหรับการวัดค่าของมุมที่ฐานทั้งสองของปริซึม (มุม A และ B) ทำได้โดยใช้การเปรียบเทียบมุม เพื่อหาค่ามุมที่แตกต่างระหว่างมุมทั้งสอง ซึ่งทำได้โดยจัดเครื่องมือดังภาพ 4-31



ภาพ 4-31 แสดงการใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์ เปรียบเทียบมุม A กับมุม B ของปริซึม

รังสีแล่งจากคอลลิเมเตอร์ จะสะท้อนที่ผิว AB แล้ว ทำให้เกิดภาพยืดศูนย์ขึ้นบนแกรตติคูล และเพื่อป้องกันการรบกวนของแล่งที่จะสะท้อนจากผิว BC หรือ AC ควรทาวาล่สีนที่ผิวทั้งล่อง จะทำให้ปรากฏภาพของยืดศูนย์ ที่ได้จากการล่ะท้อนที่ผิว AB เท่านั้น บันทึกตำแหน่งของภาพยืดศูนย์ ทำการจัดวางปริซึมใหม่ ให้มุม B แทนที่มุม A จะเห็นภาพยืดศูนย์อีกครั้ง ถ้ามุม A และ B มีค่าแตกต่างกันด้วยขนาด α ภาพยืดศูนย์ของมุม A และ B จะเบี่ยงเบนจากกันด้วยมุม 2α ล่ามารถหาค่ามุม A และ B ได้จากล่มการ

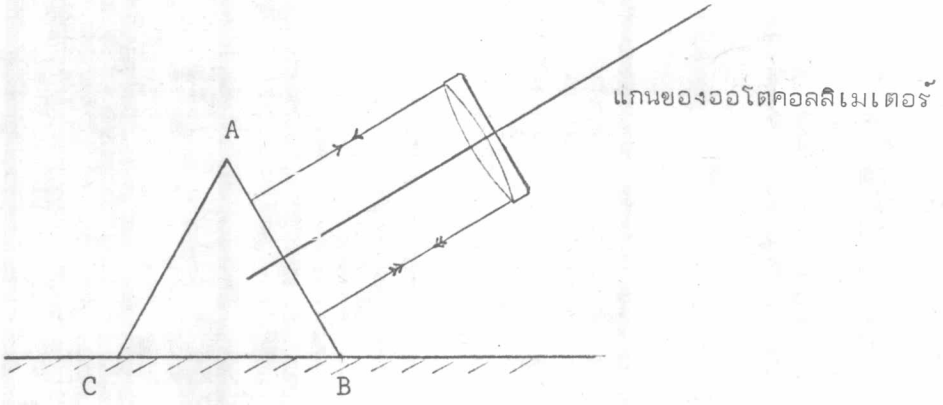
$$A - B = \alpha$$

$$A + B = 180^{\circ} - C$$

ค่ามุม C ล่ามารถทำการวัดหาค่าได้ตามวิธีดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้น จะล่ามารถหาค่าของมุม A และ B อย่างละเอียด ตามต้องการ

3.2.2 ออโตคอลลิเมเตอร์ กับปริซึมด้านเท่า

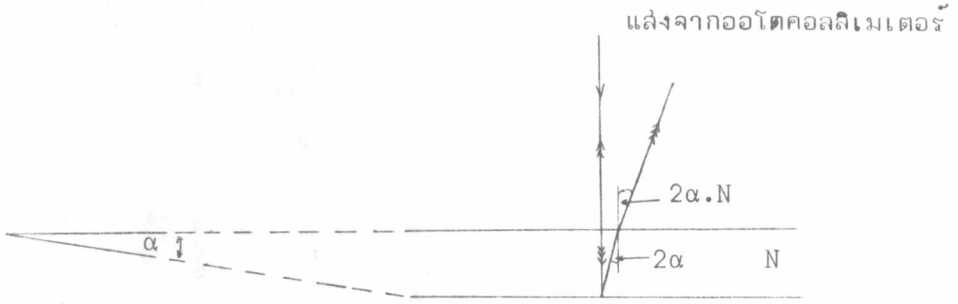
มุมทั้งล่ามของปริซึมด้านเท่า จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงทำการวัดมุมทั้งล่ามได้ โดยใช้การเปรียบเทียมมุม เพื่อหาค่าผลต่างระหว่างมุมคู่ใด ๆ ของมุมทั้งล่าม ในที่นี้จะใช้มุม B เป็นมุมเปรียบเทียบ โดยจัดเครื่องมือดังภาพ 4-32



ภาพ 4-32 แล่ดงการใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์ ในการเปรียบเทียบหาค่ามุมทั้งล่าม ของปริซึมด้านเท่า

ทำการบันทึกตำแหน่งของภาพยึดศูนย์เมื่อวางเครื่องมือดังภาพ 4-32 ต่อจากนั้น จึงเปลี่ยนเอามุม A และ C ของปริซึมมาวางแทนมุม B พร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งของภาพเพื่อหาค่าการเบี่ยงเบนตามลำดับ จากนี้ สามารถหาค่าผลต่างระหว่างมุม A กับ B และ A กับ C ได้ และจากสมการ $A + B + C = 180^{\circ}$ ทำให้สามารถหาค่าที่แน่นอนของมุมทั้งสามได้

3.3.3 ออโตคอลลิเมเตอร์กับผิวขนาน นอกจากจะใช้ในการวัดค่ามุมของปริซึมแล้ว ออโตคอลลิเมเตอร์ ยังสามารถใช้ทดสอบความขนาน (parallelism) ของแผ่นขนานได้อย่างดีอีกด้วย ลักษณะทางเดินแสง สำหรับการทดสอบความขนานของแผ่นขนาน แสดงได้ดังภาพ 4-33



ภาพ 4-33 แสดงทางเดินแสงเมื่อใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์ ตรวจสอบความขนาน

จากลักษณะทางเดินของแสง ดังภาพ 4-33 จะทำให้เกิด ภาพยึดศูนย์ขึ้น 2 ภาพ อันเป็นผลมาจากการสะท้อนจากผิวทั้งสอง ถ้าผิวทั้งสองทำมุมกันด้วยค่ามุม α จะทำให้ภาพยึดศูนย์เบี่ยงเบนจากกันด้วยมุม $2 .\alpha.N$ โดยที่ N คือดรรชนีหักเหของแผ่นขนาน ทำให้สามารถตรวจสอบความขนานของผิวทั้งสองได้

3.3 <u>การใช้งานของ ออโตคอลลิเมเตอร์</u>

ในการตรวจสอบการใช้งาน ได้นำปริซึมมุมฉาก และปริซึมด้านเท่าภายในห้องปฏิบัติการทัศนศาสตร์ มาทำการทดสอบวัดมุม โดยใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์ ที่สร้างขึ้น ซึ่ง ได้ข้อมูลของการตรวจสอบ คือ

ปริซึมมุมฉาก มีค่าดรรชนีหักเห 1.537 ทำการวัดมุมฉาก (C) ได้การเบี่ยงเบนของภาพยืดคู่นย์เป็น 5 ช่องสเกล

ดังนั้น มุมบ่ายเบน (D) = 5 x 1.02 ลิบดา

= 5.10 ลิบดา

$$\alpha = \frac{D}{4N}$$

= 0.83

จากการตรวจสอบทิศทาง พบว่า ค่ามุม C ต้องน้อยกว่า 90°

ดังนั้น จะได้ C = 89° 59′

ต่อมาทำการวัดมุมที่ฐาน โดยหาค่าการบ่ายเบน เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนที่ผิว AB ได้ระยะการบ่ายเบน มีค่า 6 ช่องสเกล

D = 6.12 ลิบดา

α = 3.06 ลิบดา

ตรวจสอบทิศทางการบ่ายเบนพบว่า B > A

B - A = 3.06′

และ B + A = 90° 0.83′

B = 45° 2

A = 44° 59

ปริซึมด้านเท่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมุม B กับ C จะได้ค่าเบี่ยงเบนเป็น 1.5 ช่อง ซึ่งหมายถึงค่ามุมเบี่ยงเบนเป็น 1.53 ลิบดา และจากการตรวจสอบทิศทางของการเบี่ยงเบนก็จะได้

B - C = 0.77′

เทียบมุม A กับ C ได้ค่าการเบี่ยงเบน 1 ช่อง หมายถึงค่ามุม 1.02 ลิบดา และพบว่า A > C ดังนั้น

$$A - C = .51'$$

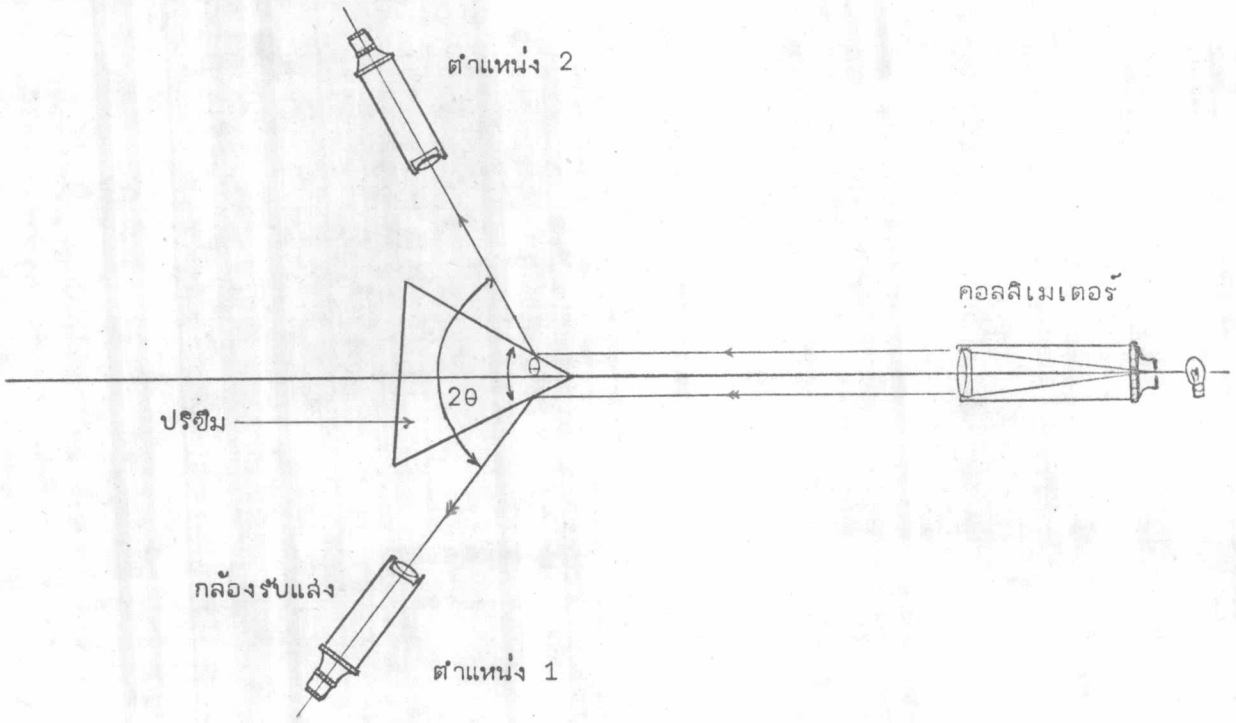
แต่ $A + B + C = 180^{\circ}$

$$A = 60^{\circ}\ 0'$$

$$B = 60^{\circ}\ 0'$$

$$C = 60^{\circ}\ 0'$$

ได้ทำการตรวจสอบมุมยอดของปริซึมที่ใช้ทดสอบ ด้วยสเปคโตรมิเตอร์ โดยอาศัยหลักของการสะท้อนแสง ดังภาพ 4-34



ภาพ 4-34 แสดงการวัดมุมยอดของปริซึมโดยใช้สเปคโตรมิเตอร์

ข้อมูลของการทดลอบวัดมุมโดยใช้สเปคโตรมิเตอร์ของปริซึมมุมฉาก และปริซึมด้านเท่า แสดงไว้ในตาราง 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ

ตาราง 4.16 แสดงผลการทดลอบวัดค่ามุมของปริซึมมุมฉากโดยใช้สเปคโตรมิเตอร์

มุม	ตำแหน่งมุม 1	ตำแหน่งมุม 2	มุมสะท้อน (2θ)	ค่ามุม (θ)
A	$71^{\circ}\ 20'$	$161^{\circ}\ 19'$	$89^{\circ}\ 59'$	$45^{\circ}\ 0'$
B	$67^{\circ}\ 29'$	$157^{\circ}\ 34'$	$90^{\circ}\ 5'$	$45^{\circ}\ 3'$
C	$36^{\circ}\ 34'$	$216^{\circ}\ 25'$	$179^{\circ}\ 55'$	$89^{\circ}\ 58'$

ตาราง 4.17 แสดงผลการทดลอบวัดค่ามุมของปริซึมด้านเท่าโดยใช้สเปคโตรมิเตอร์

มุม	ตำแหน่งมุม 1	ตำแหน่งมุม 2	มุมสะท้อน (2θ)	ค่ามุม (θ)
A	$53^{\circ}\ 22'$	$173^{\circ}\ 22'$	$120^{\circ}\ 0'$	$60^{\circ}\ 0'$
B	$67^{\circ}\ 29'$	$187^{\circ}\ 30'$	$120^{\circ}\ 1'$	$60^{\circ}\ 1'$
C	$49^{\circ}\ 18'$	$169^{\circ}\ 15'$	$119\ 57'$	$59^{\circ}\ 59'$

การเปรียบเทียบค่าของมุมที่ได้จากการตรวจสอบทั้งสองวิธีแสดงไว้ในตาราง 4.18 และ 4.19

ตาราง 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมของปริซึมมุมฉากจากการตรวจสอบทั้งสองวิธี

มุม	ค่าของมุม โดยใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์	ค่าของมุม โดยใช้สเปคโตรมิเตอร์
A	$44^{\circ}\ 59'$	$45^{\circ}\ 0'$
B	$45^{\circ}\ 2'$	$45^{\circ}\ 3'$
C	$89^{\circ}\ 59'$	$89^{\circ}\ 58'$

ตาราง 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมของปริซึมด้านเท่าจากการตรวจสอบทั้งสองวิธี

มุม	ค่าของมุม โดยใช้ ออโตคอลลิเมเตอร์	ค่าของมุม โดยใช้สเปคโตรมิเตอร์
A	$60^{\circ}\ 0'$	$60^{\circ}\ 0'$
B	$60^{\circ}\ 0'$	$60^{\circ}\ 1'$
C	$60^{\circ}\ 0'$	$59^{\circ}\ 59'$

จากการเปรียบเทียบค่ามุมที่ทำการวัดค่าโดยใช้เครื่องมือทั้งสอง จะให้ผลของการตรวจสอบ มีค่าใกล้เคียงกัน และถูกต้องพอสมควร

การทดสอบแผ่นขนาน ได้ทำการตรวจสอบ แผ่นทดสอบขนาน (parallel test plate) และแผ่นกระจกใส่ตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบคือ

แผ่นทดสอบ พบว่า ภาพของยีดศูนย์ที่สะท้อนจากผิวทั้งสองข้อนกันพอดี แสดงว่าทั้งสองด้านของแผ่นทดสอบขนานกัน

กระจกใส่ตัวอย่าง พบว่า บริเวณต่าง ๆ ของแผ่นกระจก ให้ระยะเบี่ยงเบนของภาพยีดศูนย์ไม่เท่ากัน ตำแหน่งที่ให้การเบี่ยงเบนมากที่สุด มีระยะเบี่ยงเบนถึง 4 ช่อง ซึ่งหมายถึงมุมเบี่ยงเบน 4.08 ลิบดา สำหรับกระจกใส่มีค่าดรรชนีหักเหประมาณ 1.5 ดังนั้นบริเวณที่มีการเบี่ยงเบนมากที่สุด ผิวทั้งสองจะทำมุมกันด้วยค่า 1.36 ลิบดา

4. <u>การทดสอบการใช้งานของไมโครสเพียโรมิเตอร์</u>

ในการตรวจสอบผิวโค้ง ของไมโครสเพียโรมิเตอร์ ได้ใช้ตัวอย่างผิวโค้งนูนจากผิวของลูกปืนเหล็ก (steel ball) มาทำการทดลองวัดค่า เริ่มต้นโดยทำการวัดค่า เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกกลมที่จะทดสอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์เสียก่อน แล้วคำนวณหาค่ารัศมีความโค้งจากเส้นผ่าศูนย์กลาง จากนั้นำลูกกลมตัวอย่างไปติดที่แกนของไมโครมิเตอร์ของไมโครสเพียโรมิเตอร์ หมุนแกนเพื่อปรับตำแหน่งของลูกกลมเหล็ก ให้ได้ภาพของยีดกากบาทชัดเจน อ่านตำแหน่งที่ทำให้ภาพยัดทั้งสองครั้ง หาค่ารัศมีความโค้ง ซึ่งผลของการทดสอบ แสดงไว้ในตาราง 4.20

ตาราง 4.20 แสดงผลการตรวจสอบหาค่ารัศมีของลูกปืนเหล็ก

ตัวอย่างที่	ตำแหน่งที่ภาพขัด		รัศมีของลูกกลมเหล็ก (mm)	รัศมีเฉลี่ย (mm)	รัศมีที่วัดได้จากไมโครมิเตอร์ (mm)
	1	2			
1	13.390 13.720 13.420	16.280 16.410 16.370	2.890 2.690 2.950	2.84	2.78
2	16.460 16.500 16.480	20.370 20.400 20.450	3.910 3.900 3.970	3.93	3.96
3	15.460 15.455 15.470	20.340 20.355 20.315	4.880 4.900 4.845	4.87	4.76
4	17.355 17.360 17.370	22.565 22.600 22.590	5.210 5.240 5.220	5.22	5.35
5	14.590 14.600 14.570	22.020 22.070 22.060	7.430 7.470 7.490	7.46	7.53
6	13.630 13.635 13.675	23.055 23.805 22.995	9.425 9.460 9.320	9.40	9.52
7	13.450 13.425 13.445	23.855 23.805 23.825	10.405 10.380 10.380	10.39	10.65

ค่ารัศมีความโค้งที่ทำการวัด มีความผิดพลาดคลาดเคลื่อน อันเนื่องจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการ คือ

- เนื่องจากความลึกของโฟกัสของเลนซ์วัตถุ (depth of focus of objective lens)
- เนื่องจากผิวของลูกกลมเหล็กสะท้อนแสงได้ไม่ดีนัก เพราะผิวของเหล็กมีความเรียบ และเป็นเงาน้อยกว่าผิวของแก้ว ทำให้ความคมชัดของภาพน้อยลง จึงทำให้การกำหนดตำแหน่งที่แน่นอน ซึ่งให้ภาพชัดที่สุด ต้องคลาดเคลื่อนไป อย่างไรก็ตาม ผลของการทดลองก็ให้ค่าที่ใกล้เคียงพอสมควร