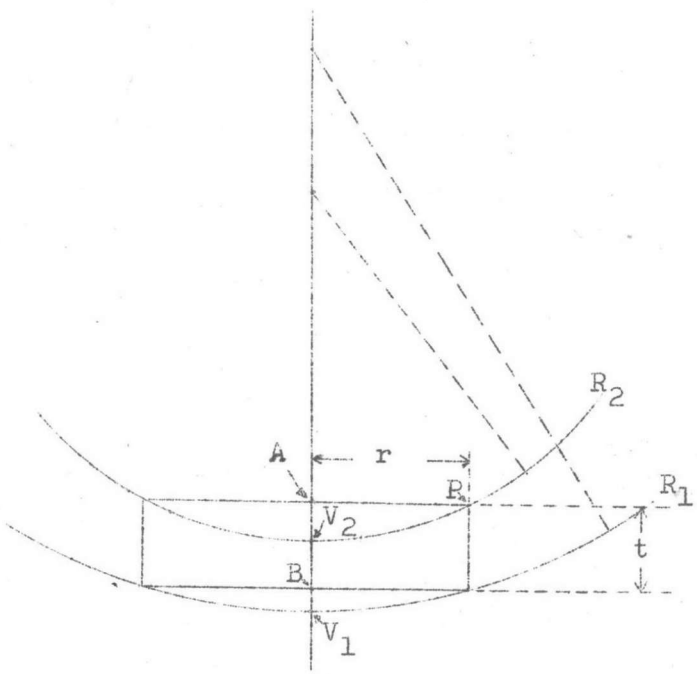
บทที่ 5

การทดสอบคุณภาพของเลนส์

1. การทดลองหาทางยาวโฟกัสของเลนส์

1.1 โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

การทดลองวิธีนี้ เป็นการหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์แต่ละผิว แล้วนำมาคำนวณหาค่าทางยาวโฟกัสของเลนส์ วิธีวงแหวนของนิวตันนี้ เป็นวิธีการที่อาศัยหลักของการแทรกสอดของแสงในแผ่นฟิล์มบาง คือ เมื่อมีผิวสองผิวที่อาจจะเป็นผิวระนาบกับผิวทรงกลม หรือผิวทรงกลมสองผิววางประกบกัน จะมีฟิล์มบางของอากาศระหว่างผิว เมื่อให้แสงสีเดียวผ่านเข้าไป จะเกิดการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวของฟิล์มบาง เกิดริ้วของการแทรกสอดเป็นวงแหวน โดยมีตำแหน่งจุดสัมผัสของผิวทั้งสองเป็นจุดศูนย์กลาง เรียกวงแหวนเหล่านี้ว่าวงแหวนของนิวตัน(9)



รูปที่ 5.1 การหารัศมีความโค้งของผิวโค้ง

เมื่อเกิดฟิล์มบางของอากาศระหว่างผิวแก้วสองผิว ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยมี

R_1 เป็น รัศมีความโค้งของผิวล่าง

R_2 เป็น รัศมีความโค้งของผิวบน

t เป็น ความหนาของฟิล์มบาง

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

โดยการแทรกสอดของแสง เกิดวงแหวนของนิวตันขึ้น

ถ้า r เป็น รัศมีของวงแหวนใด ๆ

ความหนาของฟิล์มบางที่จุด P หรือที่ $r = AP$ จะเป็น

$$t = AB = AV_2 + V_2V_1 - BV_1 \qquad (5.1)$$

คิดเฉพาะผิวโค้งผิวบน จะได้ว่า

$$(R_2 - AV_2)^2 + r^2 = R_2^2$$

$$r^2 = AV_2(2R_2 - AV_2)$$

แต่ $AV_2 \ll 2R_2$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$r^2 = 2R_2 \times AV_2$$

$$AV_2 = \frac{r^2}{2R_2}$$

ทำนองเดียวกัน เมื่อคิดเฉพาะผิวโค้งผิวล่าง จะได้ว่า

$$BV_1 = \frac{r^2}{2R_1}$$

ให้ $V_2V_1 = e$ ซึ่งเป็นความหนาของฟิล์มที่จุดศูนย์กลาง

จากสมการ (5.1) เขียนใหม่ได้เป็น

$$t = \frac{r^2}{2}\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + e$$

พิจารณากรณีที่เกิดวงมืดใด ๆ คือ $r = r_m$ ได้ว่า

$$2t\cos\theta = m\lambda$$

นั่นคือ

$$r_m^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)\cos\theta + 2e\cos\theta = m\lambda$$

เมื่อแสงตกตั้งฉาก มุมตกกระทบ $\theta = 0$ ได้ว่า

$$r_m^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + 2e = m\lambda \qquad (5.2)$$

พิจารณาวงมืดอันดับที่ m_i จากสมการ (5.2) เขียนได้เป็น

$$r_{m_i}^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + 2e = m_i\lambda \qquad (5.3)$$

พิจารณาวงมืดอันดับที่ m_j จากสมการ (5.2) เขียนได้เป็น

$$r_{m_j}^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + 2e = m_j\lambda \qquad (5.4)$$

สมการ (5.3) - สมการ (5.4) ได้เป็น

$$(r_{m_i}^2 - r_{m_j}^2)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) = (m_i - m_j)\lambda$$

หรือ

$$\frac{(d_{m_i}^2 - d_{m_j}^2)}{4}\left[\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right] = (m_i - m_j)\lambda$$

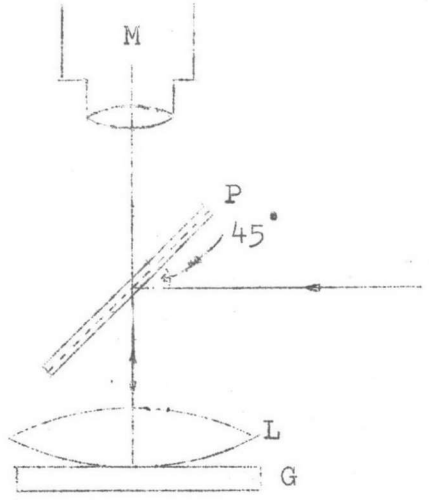
$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{4\lambda(m_i - m_j)}{(d_{m_i}^2 - d_{m_j}^2)} \qquad (5.5)$$

ในเมื่อ d_{m_i} เป็น เส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืดอันดับที่ m_i

d_{m_j} เป็น เส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืดอันดับที่ m_j

λ เป็น ความยาวคลื่นของคลื่นแสงที่มาตกกระทบบนผิวโค้ง

ดังนั้น เมื่อนำเอาเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นมาวางให้ผิวโค้งของเลนส์สัมผัสกับผิวเรียบของแผ่นแก้วใสนั่นคือ $R_1=\infty$ แล้วให้แสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียมตกตั้งฉากกับเลนส์ ดังรูปที่ 5.2[10] จะเห็นวงแหวนของนิวตัน ซึ่งที่จุดสัมผัสระหว่างผิวโค้งกับผิวเรียบของกระจกเป็นจุดมืด แล้วก็จะเป็นวงแหวนสว่างและมืดสลับกันไป



รูปที่ 5.2 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อให้เกิดวงแหวนของนิวตัน

จากรูปที่ 5.2 ให้แสงจากหลอดโซเดียมเป็นแสงที่มีความยาวคลื่น 589.3 นาโนเมตร ตกกระทบบนแผ่นแก้วใส P ซึ่งเอียงทำมุม 45 องศา กับแนวราบ จะได้แสงสะท้อนตกลงไปตั้งฉากกับเลนส์ L กับแผ่นแก้ว G ซึ่งวางประกบกัน เลนส์ L เป็นเลนส์ที่จะหารัศมีความโค้งของแต่ละผิว G เป็นแผ่นแก้วผิวเรียบ จากการ

แทรกสอดของแสง จะเกิดวงแหวนของนิวตันขึ้น วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืด (d_m) หลาย ๆ วง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลื่อนได้ M นำค่า d_m^2 มาเขียนกราฟเทียบกับค่า m จะได้เป็นกราฟเส้นตรง หาความชันของกราฟเส้นตรงได้เป็น

$$\tan\theta = \frac{m_i - m_j}{d_{m_i}^2 - d_{m_j}^2} \qquad (5.6)$$

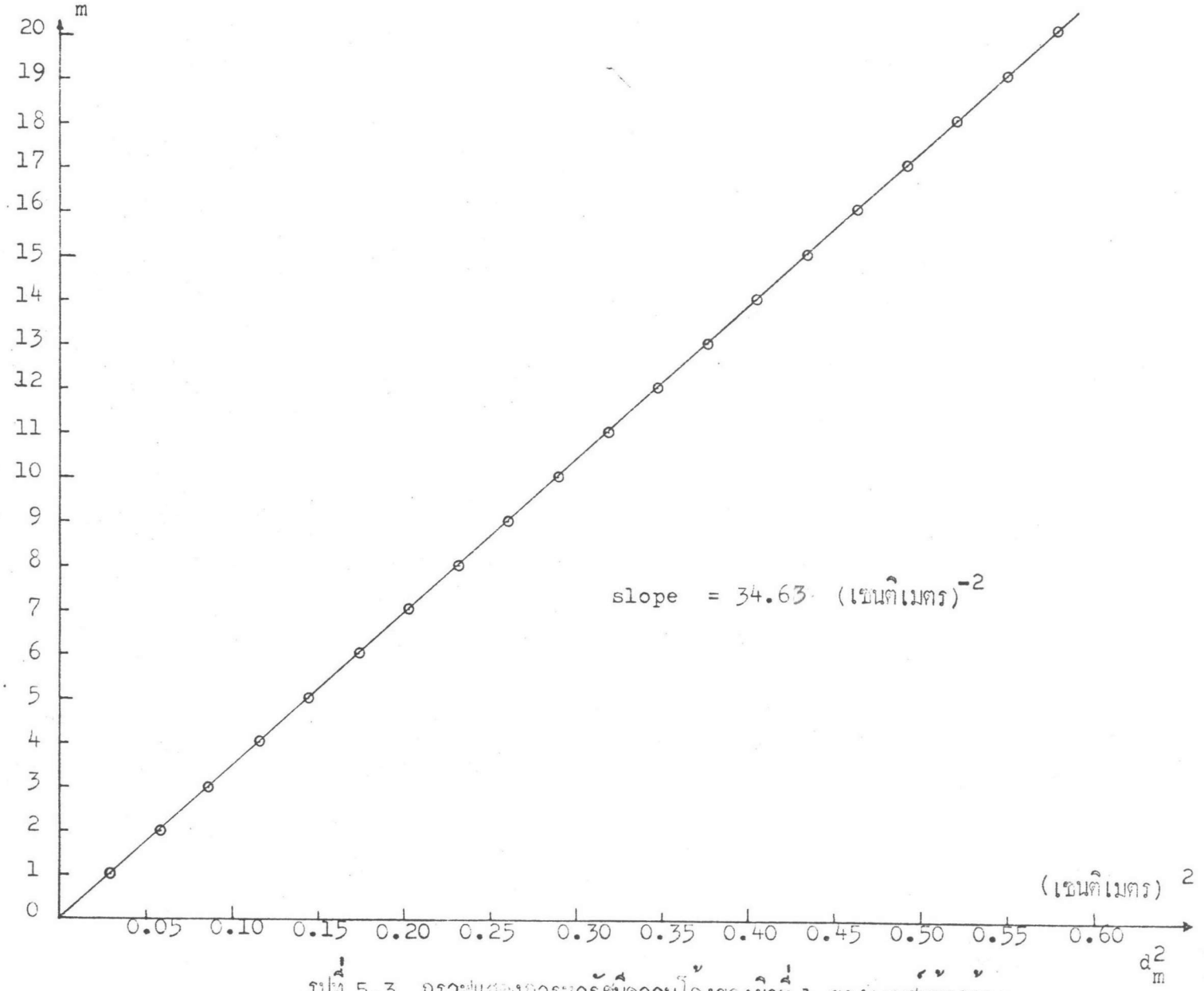
จากสมการ (5.5) และ (5.6) จะได้ว่า

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda \tan\theta \qquad (5.7)$$

ในการทดลองหารัศมีความโค้งของผิวหนึ่งของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงมืดจำนวน 20 วง 3 ครั้ง โดยที่แต่ละครั้งจะต้องหมุนเลนส์ เพื่อวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนในหลาย ๆ แนว ซึ่งผลจากการวัดนี้จะบอกถึงความเป็นทรงกลมของผิวโค้งที่ทำการวัดหารัศมีความโค้งนั้นด้วย ถ้าผลของการวัดทั้งสามครั้งนี้ได้เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนแต่ละวงเท่ากัน หรือเกือบเท่ากัน ก็กล่าวได้ว่า ผิวโค้งนั้นเป็นส่วนหนึ่งของผิวของทรงกลม แต่ถ้าค่าที่ได้ต่างกันมาก ผิวโค้งนั้นจะไม่เป็นผิวของทรงกลมอย่างแท้จริง นำค่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนทั้ง 3 ครั้งนี้มายกกำลังสอง แล้วหาค่า d_m^2 (เฉลี่ย) ได้ดังตารางที่ 5.1 จากนั้นนำค่า d_m^2 (เฉลี่ย) กับค่า m มาเขียนกราฟ ได้ดังรูปที่ 5.3

m	$d_m(1)$ เซนติเมตร	$d_m(2)$ เซนติเมตร	$d_m(3)$ เซนติเมตร	$d_m^2(1)$ เซนติเมตร^2	$d_m^2(2)$ เซนติเมตร^2	$d_m^2(3)$ เซนติเมตร^2	d_m^2 (เฉลี่ย) เซนติเมตร^2
1.	0.1699	0.1701	0.1699	0.0289	0.0289	0.0289	0.0289
2	0.2402	0.2403	0.2405	0.0577	0.0577	0.0578	0.0577
3	0.2942	0.2943	0.2946	0.0866	0.0866	0.0868	0.0867
4	0.3399	0.3398	0.3399	0.1155	0.1154	0.1155	0.1155
5	0.3802	0.3800	0.3798	0.1446	0.1444	0.1442	0.1444
6	0.4159	0.4174	0.4155	0.1730	0.1742	0.1726	0.1733
7	0.4495	0.4494	0.4499	0.2021	0.2020	0.2024	0.2022
8	0.4804	0.4809	0.4806	0.2308	0.2313	0.2310	0.2310
9	0.5101	0.5106	0.5087	0.2602	0.2607	0.2588	0.2599
10	0.5375	0.5374	0.5373	0.2889	0.2888	0.2887	0.2888
11	0.5642	0.5636	0.5631	0.3183	0.3176	0.3171	0.3177
12	0.5886	0.5894	0.5881	0.3464	0.3474	0.3459	0.3466
13	0.6122	0.6139	0.6121	0.3748	0.3769	0.3747	0.3755
14	0.6358	0.6356	0.6361	0.4042	0.4040	0.4046	0.4043
15	0.6583	0.6580	0.6583	0.4334	0.4330	0.4334	0.4333
16	0.6798	0.6797	0.6797	0.4621	0.4620	0.4620	0.4620
17	0.7007	0.7005	0.7006	0.4910	0.4907	0.4908	0.4908
18	0.7209	0.7210	0.7210	0.5197	0.5198	0.5198	0.5198
19	0.7407	0.7408	0.7407	0.5486	0.5488	0.5486	0.5487
20	0.7599	0.7601	0.7600	0.5774	0.5778	0.5776	0.5776

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันของผิวที่หนึ่งของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์หน้ากล้อง
โดยวิธีวางแหวนของนิวตัน

จากรูป 5.3 ได้กราฟเป็นรูปเส้นตรง คำนวณหาความชันของกราฟเส้นตรง โดยใช้เครื่องคำนวณของฮิวเลต–แพกการ์ด รุ่น เอช พี97ได้ค่าความชัน = 34.63 (เซนติเมตร)$^{-2}$ โดยมีค่าสหสัมพันธ์ = 1.0000

จากสมการ (5.7), $\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda \times \tan\theta$

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม=589.3 นาโนเมตร

$\tan\theta$ คือ ความชันของกราฟเส้นตรง = 34.63 (เซนติเมตร)$^{-2}$

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4 \times 5.893 \times 10^{-5} \times 34.63 \text{ (เซนติเมตร)}^{-1}$$

ในที่นี้ ผิวสัมผัสผิวล่าง เป็นผิวราบของกระจกใส นั่นคือ $R_1 = \infty$

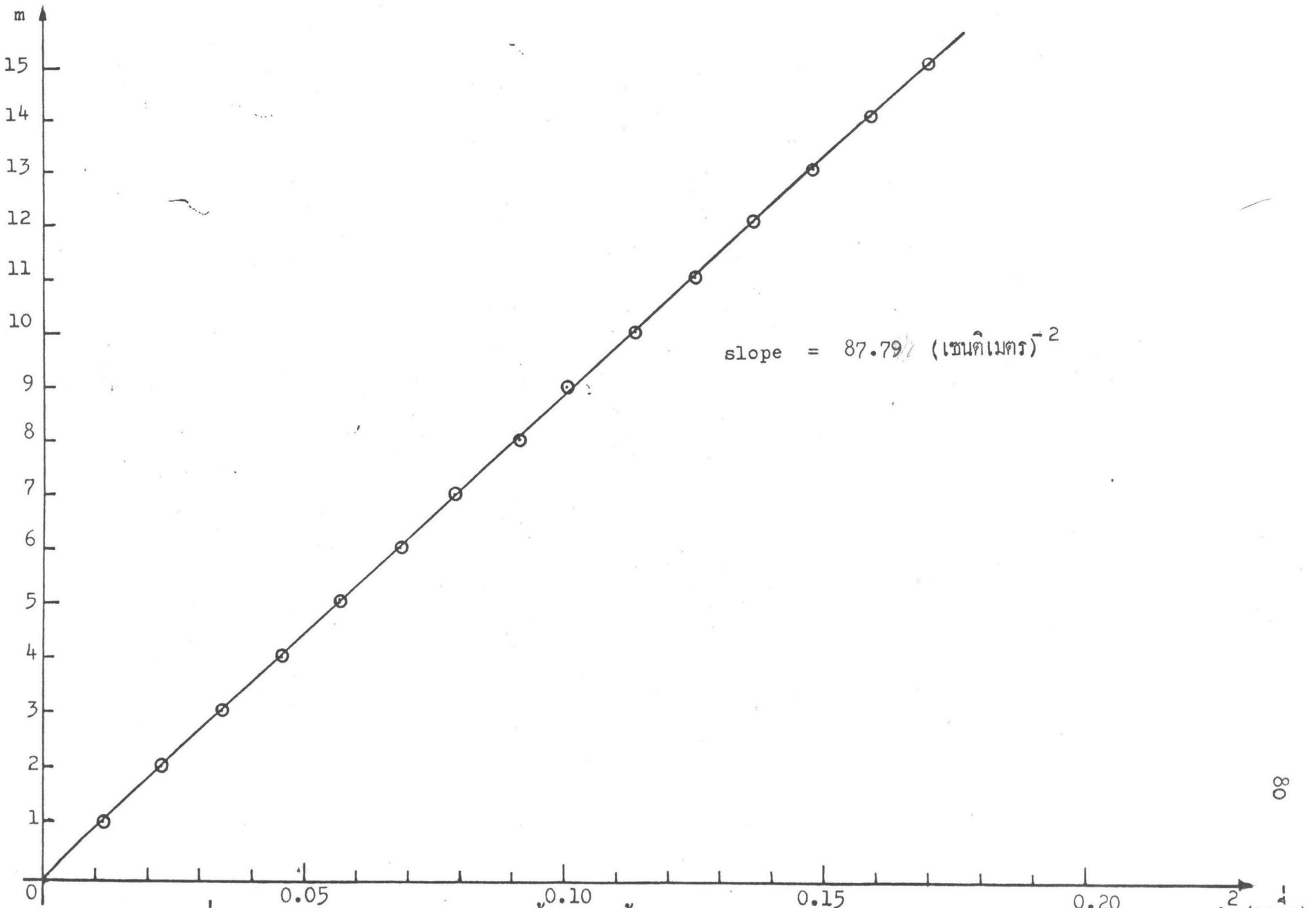
เพราะฉะนั้น R_2 = 122.5 เซนติเมตร

นั่นคือ รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นมา = 122.5 เซนติเมตร

ต่อไปเป็นการหารัศมีความโค้งของผิวที่สอง เนื่องจากผิวนี้มีความโค้งน้อยมากจนเกือบเป็นผิวราบ จึงต้องใช้ผิวล่างเป็นผิวโค้งนูนเข้าช่วยในการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 เพราะฉะนั้น จึงต้องหารัศมีความโค้งของผิวโค้งนูนนี้ก่อน จากการทดลองวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนของนิวตัน ได้ผลดังตารางที่ 5.2 แล้วนำค่า m และ d_m^2 (เฉลี่ย) จากตารางที่ 5.2 มาเขียนกราฟ ได้ดังรูปที่ 5.4

m	$d_m(1)$ เซนติเมตร	$d_m(2)$ เซนติเมตร	$d_m(3)$ เซนติเมตร	$d_m^2(1)$ เซนติเมตร^2	$d_m^2(2)$ เซนติเมตร^2	$d_m^2(3)$ เซนติเมตร^2	d_m^2(เฉลี่ย) เซนติเมตร^2
1	0.1063	0.1082	0.1058	0.0113	0.0117	0.0112	0.0114
2	0.1509	0.1507	0.1513	0.0228	0.0227	0.0229	0.0228
3	0.1847	0.1844	0.1857	0.0341	0.0340	0.0345	0.0342
4	0.2138	0.2137	0.2133	0.0457	0.0457	0.0454	0.0456
5	0.2383	0.2392	0.2381	0.0568	0.0572	0.0567	0.0569
6	0.2619	0.2612	0.2615	0.0686	0.0682	0.0684	0.0684
7	0.2830	0.2821	0.2823	0.0801	0.0796	0.0797	0.0798
8	0.3023	0.3018	0.3018	0.0914	0.0911	0.0911	0.0912
9	0.3164	0.3167	0.3170	0.1001	0.1003	0.1005	0.1003
10	0.3372	0.3378	0.3375	0.1137	0.1141	0.1139	0.1139
11	0.3543	0.3544	0.3537	0.1255	0.1256	0.1251	0.1254
12	0.3696	0.3699	0.3700	0.1366	0.1368	0.1369	0.1368
13	0.3852	0.3851	0.3846	0.1484	0.1483	0.1479	0.1482
14	0.3999	0.3992	0.3994	0.1599	0.1594	0.1595	0.1596
15	0.4136	0.4130	0.4135	0.1711	0.1706	0.1710	0.1709

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันของผิวโค้งนูนที่จะใช้ช่วยในการหารัศมีความโค้งของผิวที่สองของเลนส์หน้ากล้อง



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวโค้งนน โดยวิธีวงแหวนของนิวตัน

จากรูปที่ 5.4 ได้กราฟเป็นรูปเส้นตรง คำนวณหาความชันของกราฟเส้นตรง เช่นเดียวกับรูปที่ 5.3 ได้ค่าความชัน = 87.79 (เซนติเมตร)$^{-2}$

โดยมีค่าสหสัมพันธ์ = 0.9999

จากสมการ (5.7), $\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda \times \tan\theta$

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม = 589.3นาโนเมตร

$\tan\theta$ คือ ความชันของกราฟเส้นตรง = 87.79 (เซนติเมตร)$^{-2}$

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4 \times 5.893 \times 10^{-5} \times 87.79 \text{ (เซนติเมตร)}^{-1}$$

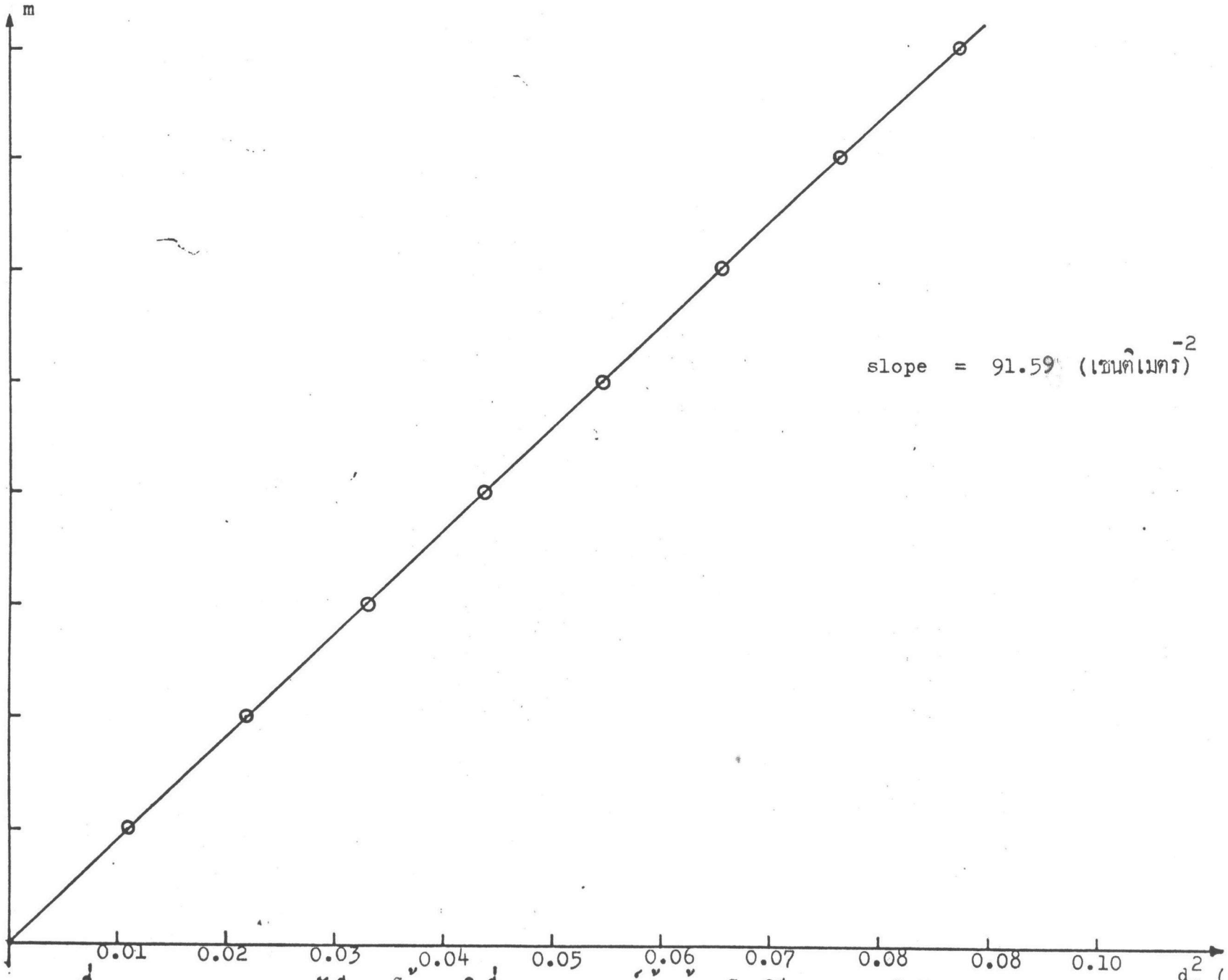
ผิวสัมผัสผิวล่าง เป็นผิวราบของกระจกใส นั่นคือ $R_1 = \infty$

ได้ว่า $R_2 = 48.325$ เซนติเมตร

ต่อไปก็ใช้ผิวโค้งนูนนี้เป็นผิวสัมผัสด้านล่าง นำเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นมาวางบนผิวโค้งนูนนี้โดยให้ผิวที่ 2 ของเลนส์หน้ากล้องสัมผัสกับผิวโค้งนูนนี้ ทำการทดลองวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนของนิวตันได้ดังตารางที่ 5.3 จากนั้นนำค่า m และค่า d_m^2(เฉลี่ย) มาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.5

m	$d_m(1)$ เซนติเมตร	$d_m(2)$ เซนติเมตร	$d_m(3)$ เซนติเมตร	$d_m^2(1)$ เซนติเมตร^2	$d_m^2(2)$ เซนติเมตร^2	$d_m^2(3)$ เซนติเมตร^2	d_m^2(เฉลี่ย) เซนติเมตร^2
1	0.1039	0.1044	0.1054	0.0108	0.0109	0.0111	0.0109
2	0.1466	0.1473	0.1489	0.0215	0.0217	0.0222	0.0218
3	0.1806	0.1806	0.1814	0.0326	0.0326	0.0329	0.0327
4	0.2090	0.2083	0.2090	0.0437	0.0434	0.0437	0.0436
5	0.2337	0.2328	0.2341	0.0546	0.0542	0.0548	0.0545
6	0.2555	0.2559	0.2563	0.0653	0.0655	0.0657	0.0655
7	0.2759	0.2762	0.2771	0.0761	0.0763	0.0768	0.0764
8	0.2953	0.2951	0.2959	0.0872	0.0871	0.0876	0.0873

ตารางที่ 5.3 ผลการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตันของผิวโค้งที่ 2 ของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการหาอัตราความโค้งของเบ้าที่ 2 ของเลนส์หมายเลข โดยวิธีวางแนวตามขอบเบ้าตัน

จากรูปที่ 5.5 ได้กราฟเป็นรูปเส้นตรง เมื่อคำนวณหาความชันของกราฟได้ค่า

ความชัน = 91.59 (เซนติเมตร)$^{-2}$ โดยมีค่าสหสัมพันธ์ = 1.0000

จากสมการ (5.7) $\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda \times \tan\theta$

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม = 589.3 นาโนเมตร

$\tan\theta$ หรือ ความชันของกราฟเส้นตรง = 91.59 (เซนติเมตร)$^{-2}$

R_1 คือ รัศมีความโค้งของผิวโค้งนูนที่วางอยู่ด้านล่าง = -48.325 เซนติเมตร

$$\frac{1}{R_2} + \frac{1}{48.325} = 4 \times 5.893 \times 10^{-5} \times 91.59 \text{ (เซนติเมตร)}^{-1}$$

$$\frac{1}{R_2} = 8.971 \times 10^{-4} \text{ (เซนติเมตร)}^{-1}$$

$$R_2 = 1115. \text{ เซนติเมตร}$$

นั่นคือ รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น = 1115. เซนติเมตร

สรุป จากผลการทดลองวัดรัศมีความโค้งของผิวเลนส์แต่ละผิวได้ค่ารัศมีความโค้งเป็นค่าบวกทั้งสองผิว แสดงว่าผิวโค้งทั้งสองผิวนี้เป็นผิวนูน แต่เมื่อพิจารณาในกรณีของเลนส์ จะต้องพิจารณาเครื่องหมายของรัศมีความโค้งตามแบบของเลนส์ คือ ถ้าผิวโค้งนูนไปทางซ้าย รัศมีความโค้งจะเป็นค่าบวก และถ้าผิวโค้งนูนไปทางขวา รัศมีความโค้งจะเป็นค่าลบ ดังนั้น เลนส์หน้ากล้องแบบเลนส์เดี่ยวที่สร้างขึ้น จะมีรัศมีความโค้งของผิวที่หนึ่งเท่ากับ 122.5 เซนติเมตร รัศมีความโค้งของผิวที่สองเท่ากับ -1115. เซนติเมตร

เนื่องจากเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นนี้มีความหนาเท่ากับ 0.8 เซนติเมตร ซึ่งถือได้ว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับทางยาวโฟกัสของเลนส์ ดังนั้น กล่าวได้ว่าเลนส์เดี่ยวที่สร้างขึ้นนี้เป็นเลนส์บาง (thin lens) จากการคิดว่าหน้ารับแสงของเลนส์บางทั้งหมดอยู่ภายในบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ ก็จะหาทางยาวโฟกัสของเลนส์บางในอากาศได้จากสูตร[2]

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \qquad (5.8)$$

โดยที่ f เป็น ทางยาวโฟกัสของเลนส์บาง

n เป็น ค่าดรรชนีหักเหของแก้ว

r_1 เป็น รัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์บาง

r_2 เป็น รัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์บาง

ในที่นี้ แก้วที่ใช้สร้างเลนส์มีดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.516 และจากการวัดรัศมีความโค้งของผิวเลนส์ โดยใช้วิธีวางแหวนของนิวตัน ได้ $r_1 = 122.5$ เซนติเมตร $r_2 = -1115.$ เซนติเมตร แทนค่าลงในสมการ (5.8) ได้ว่า

$$\frac{1}{f} = (1.516 - 1)\left(\frac{1}{122.5} + \frac{1}{1115.}\right)$$

$$= 214. \text{ เซนติเมตร}$$

นั่นคือ เลนส์หน้ากล้องของกล้องโทรทรรศน์แบบเลนส์เดี่ยวที่สร้างขึ้นมาจะมีทางยาวโฟกัสเท่ากับ 214. เซนติเมตร

1.2 <u>โดยการใช้ใบมีดตัดแสง</u> (knife-edge test)

วิธีนี้วางเลนส์หน้ากล้องที่จะทดสอบให้ห่างจากจุดกำเนิดแสงในระยะที่ใกล้เคียงกับทางยาวโฟกัสโดยประมาณ แล้วนำกระจกราบมาวางไว้ด้านหลังเลนส์ แสงจากจุดกำเนิดจะผ่านเลนส์ออกไป แล้วสะท้อนที่กระจกราบกลับมาผ่านเลนส์ไปรวมกันได้ภาพเกิดขึ้น พยายามปรับระยะของเลนส์และกระจกราบจนกระทั่งได้จุดภาพเกิดขึ้นที่ระนาบเดียวกับจุดกำเนิดแสง ในการสังเกตภาพ ต้องให้นัยน์ตาของผู้สังเกตอยู่หลังตำแหน่งของภาพพอดี เพื่อจะได้รับรังสีจากทุกจุดบนเลนส์ ซึ่งจะทำให้เห็นสว่างตลอดหน้าเลนส์ จากนั้นใช้ใบมีดตัดที่ตำแหน่งของภาพ ถ้าเลนส์ไม่มีความคลาด เมื่อใบมีดตัดผ่านจุดโฟกัส รังสีทุกรังสีจะถูกตัดออกหมด ไม่มีรังสีผ่านเข้าตา นั่นคือ จะเห็นหน้าเลนส์มืดสนิทพร้อมกันทันที แต่ถ้าเลนส์มีความคลาด เมื่อใช้ใบมีด

ตัดผ่านจุดโฟกัส จะเห็นบริเวณหนึ่งของหน้าเลนส์สว่างในขณะที่บริเวณอื่นมืด เมื่อเลื่อนใบมีดไปจนตัดรังสีบริเวณนั้น ก็จะไม่มีรังสีใดมาเข้าตาได้เลย จะเห็นหน้าเลนส์มืดทั้งหน้า แต่ถ้าไม่ใช่จุดโฟกัส จะเห็นจุดภาพนั้นค่อย ๆ มืดทีละส่วน ในขณะที่เลื่อนใบมีดผ่านตำแหน่งภาพ ถ้าใช้ใบมีดตัดผ่านตำแหน่งภาพที่อยู่ภายในจุดโฟกัส เมื่อเลื่อนใบมีดจากซ้ายไปขวา จะเห็นภาพค่อย ๆ มืดจากซ้ายไปขวาด้วย และถ้าใช้ใบมีดตัดผ่านตำแหน่งนอกจุดโฟกัส เมื่อเลื่อนใบมีดจากซ้ายไปขวา จะเห็นภาพค่อย ๆ มืดจากขวามาซ้าย (8)

จากการทดลองเพื่อสะดวกต่อการพิจารณาหาจุดโฟกัส ได้ใช้กระดาษดำปิดเลนส์ไว้ให้เหลือหน้ารับแสงที่ตรงกลางเลนส์ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ทำการทดลอง 3 ครั้ง ได้ค่าทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้อง 3 ค่า ดังตารางที่ 5.4

ครั้งที่	ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องในบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ (เซนติเมตร)
1	213.8
2	213.4
3	213.6

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องโดยใช้ใบมีดตัดแสง

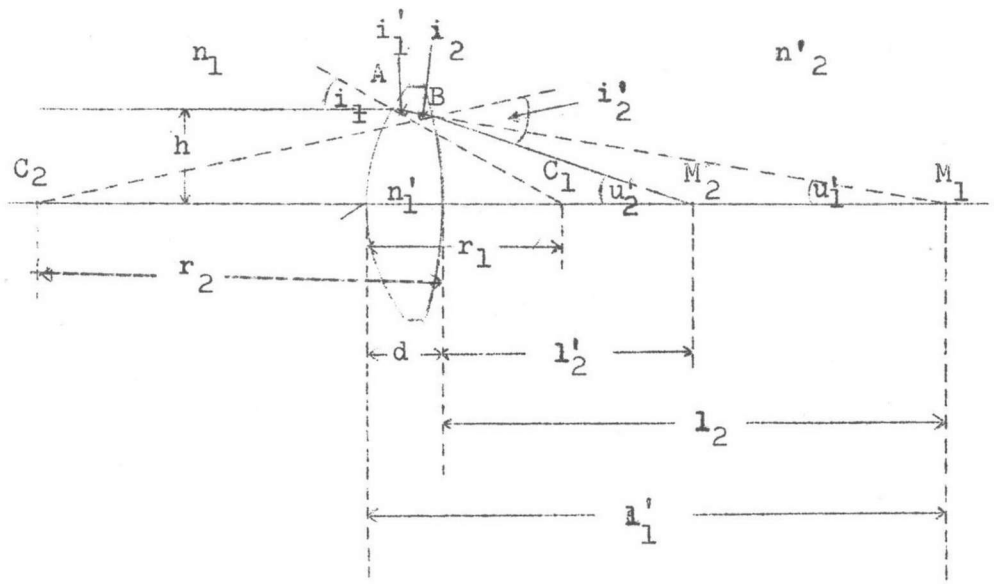
นำค่าจากตารางที่ 5.4 มาเฉลี่ย แล้วหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้ว่า ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นมาเท่ากับ 213.6 ± 0.2 เซนติเมตร

2. <u>การคำนวณหาปริมาณของความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น</u>

ในการคำนวณหาปริมาณของความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นนี้ จะใช้วิธีการติดตามรังสีขนานที่ตกกระทบเลนส์ในบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ และบริเวณขอบเลนส์ ทำให้

ทราบค่าความแตกต่างระหว่างทางยาวโฟกัสของเลนส์ในบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญกับที่ขอบเลนส์ ซึ่งก็คือ ปริมาณของความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องแบบความคลาดรังสีนั่นเอง เนื่องจากวิธีการแบบนี้ค่อนข้างยุ่งยากและช้า ดังนั้น ในการออกแบบรูปร่างของเลนส์ จึงใช้วิธีการติดตามรังสีหาความคลาดต่าง ๆ แบบความคลาดหน้าคลื่น ซึ่งกระทำได้สะดวกและง่ายกว่า ภายหลังเมื่อได้สร้างเลนส์ขึ้นมา และได้หารัศมีความโค้งของผิวเลนส์แล้ว จึงจะใช้วิธีการติดตามรังสีเพื่อให้ได้ความคลาดทรงกลมแบบความคลาดรังสีสำหรับใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเลนส์ที่ได้สร้างขึ้นมา

ในการติดตามรังสีแบบนี้ ให้แสงมาจากทางซ้ายมือเป็นลำแสงขนานตกกระทบเลนส์ ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การติดตามรังสีขนาน

จากรูปที่ 5.6 h เป็น ระยะที่วัดจากแกนมุขสำคัญไปยังรังสีตกกระทบ

n เป็น ดรรชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่ทางด้านซ้ายของผิวโค้ง

n' เป็น ดรรชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่ทางด้านขวาของผิวโค้ง

i เป็น มุมตกกระทบของรังสีบนผิวหักเหแสง

i' เป็น มุมหักเหของรังสี

u เป็น มุมชัน คือ มุมที่รังสีทำกับแกนมุขสำคัญ

d เป็น ระยะระหว่างผิวโค้ง

M เป็น จุดที่เกิดภาพ

l เป็น ระยะที่วัดจากผิวโค้งไปยังจุดที่รังสีตกตัดแกนมุขสำคัญ เรียกระยะวัตถุ

l' เป็น ระยะที่วัดจากผิวโค้งไปยังจุดที่รังสีหักเหตัดแกนมุขสำคัญ เรียกระยะภาพ

r เป็น รัศมีความโค้งของผิวเลนส์

สัญญลักษณ์ที่ไม่มีขีดข้างบน เช่น n, c, u จะเป็นค่าทางด้านวัตถุ (object space) ถ้ามีขีดข้างบนเช่น n', c', u' จะแสดงถึงค่าทางด้านภาพ (image space) เมื่อมีผิวสองผิว ค่าต่าง ๆ สำหรับผิวที่หนึ่งจะมีเลข 1 ห้อยท้าย เช่น u_1, u_1', n_1, n_1' เป็นต้น และถ้าเป็นค่าสำหรับผิวที่สองจะมีเลข 2 ห้อยท้าย ตัวอย่างเช่น u_2, u_2', n_2, n_2' สัญญลักษณ์ที่ใช้ในรูปที่ 5.6 เหมือนกับที่เคยใช้ในรูปที่ 3.4

สำหรับค่าต่าง ๆ ได้กำหนดเครื่องหมายไว้ว่า[2]

1. มุมชันเป็นบวก เมื่อวัดจากแกนมุขสำคัญไปยังแนวรังสีในทิศทวนเข็มนาฬิกา และมีค่าไม่เกิน $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

2. มุมตกกระทบและมุมหักเหเป็นบวก เมื่อวัดจากเส้นปกติไปยังแนวรังสีในทิศทวนเข็มนาฬิกา และมุมมีค่าไม่เกิน $\frac{\pi}{2}$ เรเดียน

3. ระยะวัตถุเป็นบวก เมื่อวัดจากผิวโค้งไปทางซ้าย

4. ระยะภาพเป็นบวก เมื่อวัดจากผิวโค้งไปทางขวา

จากรูปที่ 5.6

$$\sin i_1 = \frac{h}{r_1} \qquad (5.9)$$

จากกฎของสเนล $n_1 \sin i_1 = n_1' \sin i_1'$

$$\sin i_1' = \frac{n_1}{n_1'} \sin i_1 \qquad (5.10)$$

จากรูปที่ 5.6 ได้ว่า $i_1' + (-u_1') = i_1$

$$u_1' = i_1' - i_1 \qquad (5.11)$$

จาก $\Delta C_1 A M_1$, $\frac{\sin u_1'}{r_1} = \frac{\sin i_1'}{r_1 - l_1'}$

$$l_1' = r_1 - r_1 \frac{\sin i_1'}{\sin u_1'} \qquad (5.12)$$

ภาพของผิวโค้งผิวแรกจะเป็นวัตถุของผิวโค้งที่ 2 ดังนั้น ระยะวัตถุของผิวโค้งที่ 2 คือ

$$l_2 = d - l_1' \qquad (5.13)$$

จาก $\Delta C_2 B M_1$ $\frac{\sin (\pi - i_2)}{r_2 + l_2} = \frac{\sin u_1'}{r_2}$

$$\sin i_2 = \frac{r_2 + l_2}{r_2} \sin u_1' \qquad (5.14)$$

จากกฎของสเนล $\sin i_2' = \frac{n_2}{n_2'} \sin i_2 \qquad (5.15)$

u_2' เป็นมุมภายนอกของ $\Delta M_1 M_2 B$

เพราะฉะนั้น $u_2' = u_1' + i_2' - i_2 \qquad (5.16)$

จาก $\Delta C_2 M_2 B$ $\frac{\sin u_2'}{r_2} = \frac{\sin (\pi - i_2')}{r_2 - l_2'}$

$$l_2' = r_2 - r_2 \frac{\sin i_2'}{\sin u_2'} \qquad (5.17)$$

สมการที่ (5.9) ถึง (5.17) เป็นสมการที่ใช้ในการติดตามรังสีขนานที่ตกกระทบบนเลนส์ เพื่อหาตำแหน่งที่เกิดภาพสุดท้าย

ในที่นี้เลนส์หน้ากล้องของกล้องโทรทรรศน์ที่สร้างขึ้นมา มีรัศมีความโค้งแต่ละผิว ดังนี้

r_1 = 122.5 เซนติเมตร

r_2 = -1115 เซนติเมตร

แก้วที่ใช้สร้างเลนส์หน้ากล้องมีค่าดรรชนีหักเห = 1.516

เลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นมามีความหนา = 0.8 เซนติเมตร

รังสีขนานที่จะติดตามมี 2 รังสี คือ รังสีขนานที่ผ่านขอบเลนส์ นั่นคือ h = 5 เซนติเมตร กับรังสีขนานที่ผ่านบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ ให้ h = 0.1 เซนติเมตร ผลการติดตามรังสีขนาน 2 รังสีนี้ บันทึกไว้ในตารางที่ 5.5

จากตารางที่ 5.5 จะได้ว่า ระยะ l'_2 ก็คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องนั่นเอง ดังนั้น จากการติดตามรังสีผ่านขอบเลนส์ จะได้ทางยาวโฟกัสของเลนส์เท่ากับ 213.35 เซนติเมตร และจากการติดตามรังสีใกล้แกนมุขสำคัญจะได้ทางยาวโฟกัสของเลนส์เท่ากับ 213.47 เซนติเมตร และความคลาดทรงกลมของเลนส์คือ ความแตกต่างของทางยาวโฟกัสของบริเวณขอบเลนส์กับบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ ดังนั้น ความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นนี้เท่ากับ 213.47 - 213.35 = 0.12 เซนติเมตร

3. <u>การทดสอบความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น</u>

ได้ทำการทดสอบความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องโดยวิธีต่าง ๆ 3 วิธีด้วยกัน คือ ใช้ใบมีดตัดแสง ทดสอบด้วยดาว (star test) และวิธีของฮาร์ตแมน (Hartman test) ซึ่งวิธีแรกและวิธีสุดท้ายสามารถบอกบริมาณของความคลาดได้ ส่วนวิธีที่สองบอกได้แต่เพียงว่าเลนส์มีความคลาดอยู่หรือไม่

3.1 <u>โดยใช้ใบมีดตัดแสง</u>

ทำการทดลองวิธีเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 1.2 ของบทที่ 5 โดยการเปิดหน้ารับแสงให้แสงผ่านเข้าเฉพาะบริเวณตรงกลางเลนส์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และเฉพาะบริเวณขอบเลนส์ แล้วใช้ใบมีดตัดแสงหาตำแหน่งจุดโฟกัสของภาพ

	รังสีผ่านขอบเลนส์ (h = 5 เซนติเมตร)	รังสีใกล้แกนมุขสำคัญ (h = 0.1 เซนติเมตร)
$\sin i_1 = \frac{h}{r_1}$	0.040816326	8.1632653×10^{-4}
$\sin i'_1 = \frac{n_1}{n'_1} \sin i_1$	0.026923697	5.3847396×10^{-4}
i_1	2.3392530	0.04677207
i'_1	1.5428006	0.03085229
$u'_1 = i'_1 - i_1$	-0.7964524	-0.01591978
$\sin u'_1$	-0.013900269	$-2.7785257 \times 10^{-4}$
$r_1 - l'_1 = r_1 \frac{\sin i'_1}{\sin u'_1}$	-237.2725939	-237.403095
l'_1	359.7725939	359.903095
$l_2 = d - l'_1$	-358.9725939	-359.103095
$\frac{r_2 + l_2}{r_2}$	1.321948513	1.322065556
$\sin i_2 = \frac{r_2 + l_2}{r_2} \sin u'_1$	-0.018375439	$-3.6733931 \times 10^{-4}$
$\sin i'_2 = \frac{n_2}{n'_2} \sin i_2$	-0.027857165	$-5.5688639 \times 10^{-4}$
i'_2	-1.5963045	-0.031907242
u'_1	-0.7964524	-0.01591978
i_2	-1.0528944	-0.021046993
$u'_2 = i'_2 + u'_1 - i_2$	-1.3398625	-0.026780029
$\sin u'_2$	-0.023382881	$-4.6739966 \times 10^{-4}$
$r_2 - l'_2 = r_2 \frac{\sin i'_2}{\sin u'_2}$	-1328.353806	-1328.474061
l'_2	213.353806	213.474061

ตารางที่ 5.5 ผลการติดตามรังสีผ่านขอบเลนส์และรังสีใกล้แกนมุขสำคัญ

ที่ได้จากแสงที่ผ่านแต่ละแถบของเลนส์ ได้ผลการทดลองดังนี้

เมื่อให้แสงผ่านเฉพาะบริเวณตรงกลางเลนส์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 1.2 ของบทที่ 5 ได้ทางยาวโฟกัสของเลนส์เท่ากับ 213.6 $\pm$ 0.2 เซนติเมตร

เมื่อปิดกลางเลนส์ด้วยกระดาษดำ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ให้แสงผ่านเฉพาะบริเวณขอบเลนส์ ซึ่งกว้าง 1 เซนติเมตรเท่านั้น ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.6

	ทางยาวโฟกัสของเลนส์เมื่อแสงผ่านบริเวณขอบเลนส์ (เซนติเมตร)
1	207.7
2	208.2
3	207.8

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองหาทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้อง เมื่อให้แสงผ่านบริเวณขอบเลนส์โดยใช้ใบมีดตัดแสง

จากตารางที่ 5.6 ได้ว่าทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้อง เมื่อให้แสงผ่านเฉพาะบริเวณขอบเลนส์ เท่ากับ 207.9 $\pm$ 0.2 เซนติเมตร ดังนั้น ความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น = 213.6 - 207.9 เซนติเมตร

= 5.7 เซนติเมตร

3.2 โดยวิธีการทดสอบด้วยดาว(1),(3)

วิธีนี้เป็นการทดสอบความคลาดของเลนส์หน้ากล้องของกล้องโทรทรรศน์ โดยการสังเกตภาพของต้นกำเนิดแสงที่เป็นจุด (artificial star) ซึ่งอยู่ในระยะไกล จะได้ภาพจานกลมแอรี่ดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4 บทที่ 1 โดยขอบของเลนส์ทำหน้าที่เป็นช่องเปิดรูปวงกลม (circular aperture) ในการทดสอบนี้ต้นกำเนิดแสงที่เป็นจุดและเลนส์ควรจะอยู่ห่างกันมากกว่า หรือเท่ากับ 40 เท่าของทางยาวโฟกัสของเลนส์ หรืออาจจะสร้างต้นกำเนิดแสงสีเดียวให้เป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เมื่อมองผ่านเลนส์แล้วไม่เห็นรอยเส้นรอบวงของจุดกำเนิดแสงนั้น คือ เห็นเป็นประกายแสงกลายกับรูปดาวจริง ๆ และเมื่อมองที่ตำแหน่งภาพจะเห็นภาพจานกลมแอรี่(1)

ถ้าหากเลนส์ที่ทดสอบนั้นไม่มีความคลาด ภาพที่ภายในและภายนอกจุดโฟกัสจะเหมือนกัน แต่ถ้าเป็นเลนส์แบบแก้ขาด จะได้ภาพที่ภายในจุดโฟกัสชัดเจนกว่าภาพที่ภายนอกจุดโฟกัสและถ้าเป็นเลนส์แบบแก้เกินก็จะได้ภาพที่ภายนอกจุดโฟกัสชัดเจนกว่าภาพที่ภายในจุดโฟกัส

ในการทดสอบเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นนี้ วางหลอดโซเดียมไว้ข้างหลังรูเข็มที่เจาะบนกระดาษอลูมิเนียม ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดแสง ให้แสงผ่านเลนส์หน้ากล้อง บันทึกภาพที่ตำแหน่งโฟกัสและตำแหน่งก่อนกับหลังตำแหน่งโฟกัสเล็กน้อย ซึ่งเรียกว่าตำแหน่งภายในและภายนอกโฟกัสของภาพบนฟิลม์โกดักไตร-เอกซ์ แพน (Kodak Tri-X pan) ให้ฟิล์มรับภาพเป็นเวลา 5 นาที ล้างฟิล์มด้วยน้ำยาดี 76 (D-76) ของบริษัทโกดักเป็นเวลา 8 นาที อัดภาพบนกระดาษโกดักเบอร์ 2 ล้างด้วยน้ำยาดี 72 (D-72) ของบริษัทโกดักด้วยขนาดขยาย 12 เท่า ได้ภาพดังรูปที่ 5.7 รูปที่ 5.7 (ก) ถึงรูปที่ 5.7 (จ) แสดงถึงภาพที่ได้เมื่อวางฟิล์มที่ตำแหน่งภายในโฟกัส แล้วค่อย ๆ เลื่อนออกครั้งละระยะเท่า ๆ กันจนถึงตำแหน่งภายนอกโฟกัส

รูปที่ 5.7 (ค) เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัสพอดี จากรูปจะเห็นว่า รูปที่ 5.7 (ก) ชัดเจนกว่ารูปที่ 5.7 (จ) และรูปที่ 5.7 (ข) ชัดเจนกว่ารูปที่ 5.7 (ง) หรือนั่นก็คือ ภาพภายในโฟกัสชัดเจนกว่าภาพภายนอกโฟกัส จึงสรุปได้ว่า เลนส์หน้ากล้องที่สร้างนี้ยังคงมีความคลาดทรงกลมอยู่ และเป็นความคลาดแบบแก้ขาดนั่นเอง

รูปที่ 5.7 แสดงถึงภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบด้วยดาว

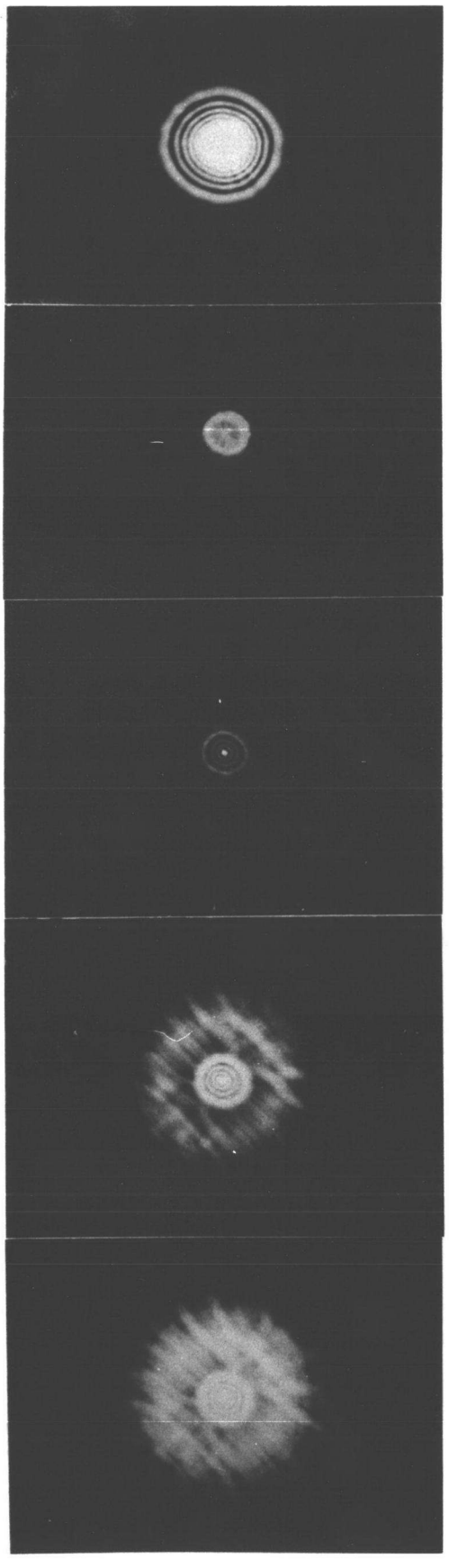
รูปที่ 5.7 (ก), (ข) เป็นภาพภายในโฟกัส

รูปที่ 5.7 (ค), เป็นภาพที่ตำแหน่งโฟกัส

รูปที่ 5.7 (ง), (จ) เป็นภาพภายนอกโฟกัส

โดยที่ รูปที่ 5.7 (ก), (จ) และรูปที่ 5.7 (ข), (ง) อยู่หางจากตำแหน่งโฟกัสเท่ากัน

(ภาพขยายจากของจริง 12 เท่า)



ก.

ข.

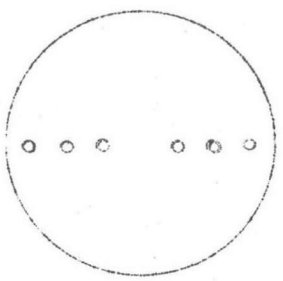
ค.

ง.

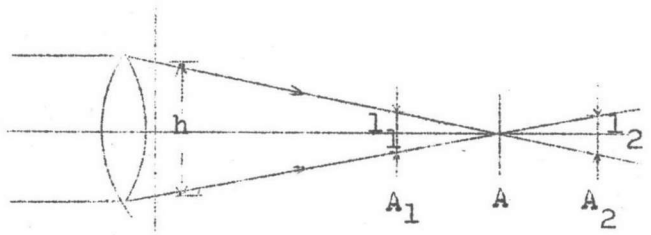
จ.

3.3 โดยวิธีของฮาร์ตแมน

ตัดกระดาษดำให้เป็นแผ่นวงกลมขนาดเท่าเลนส์ที่จะทดสอบ บนเส้นผ่าศูนย์กลางของกระดาษดำวงกลมนี้เจาะรูให้เป็นคู่ ๆ โดยให้จุดศูนย์กลางเป็นจุดแกน ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ก) รูที่เจาะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ $\frac{1}{200}$ เท่า ของทางยาวโฟกัสของเลนส์ที่จะทดสอบ(3) แล้ววางกระดาษดำนี้ไว้ข้างหลังเลนส์ที่จะทดสอบ ต้นกำเนิดแสงเป็นจุดอยู่ไกล เมื่อเปิดรูที่เจาะไว้ทีละคู่ จะเสมือนกับให้แสงผ่านแต่ละแถบของเลนส์ ลำแสงจะมาตัดกันที่จุดโฟกัสของเลนส์ (A) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ข) โดยที่ A_1 คือ ตำแหน่งภายในโฟกัส A_2 ก็อตำแหน่งภายนอกโฟกัส



รูปที่ 5.8 (ก) กระดาษดำเจาะเป็นรูให้แสงผ่าน



รูปที่ 5.8 (ข) การทดสอบแบบฮาร์ตแมน

จากรูปที่ 5.8 (ข) h เป็น ระยะห่างระหว่างรูสองรูบนกระดาษดำที่เปิดให้แสงผ่าน

l_1 เป็น ระยะห่างระหว่างภาพจุดสว่างสองจุดที่เกิดบนฉากซึ่งอยู่ภายในโฟกัส

l_2 เป็น ระยะห่างของภาพจุดสว่างสองจุดที่เกิดบนฉาก ซึ่งอยู่ภายนอกโฟกัส

จากสามเหลี่ยมเท่ากัน 2 รูป จะได้ว่า

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{A_2 - A}{A - A_1}$$

$$Al_2 - A_1 l_2 = A_2 l_1 - Al_1$$

$$A(l_1 + l_2) = A_1 l_2 + A_2 l_1$$

$$= A_1(l_1 + l_2) + l_1(A_2 - A_1)$$

$$A = A_1 + \frac{l_1(A_2 - A_1)}{(l_1 + l_2)} \qquad (5.18)$$

โดยการเปิดให้ลำแสงผ่านรูทีละรู แล้ววัดระยะ l_1 กับ l_2 ที่ตำแหน่ง A_1 กับ A_2 ตามลำดับ ก็สามารถคำนวณหาตำแหน่งจุดโฟกัสของเลนส์เมื่อแสงผ่านแต่ละแถบของเลนส์ได้จากสมการ (5.18) เพราะฉะนั้นเมื่อให้ลำแสงผ่านบริเวณขอบเลนส์กับบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ นำผลมาคำนวณค่าความคลาดทรงกลมของเลนส์ที่ทดสอบนั้นได้

จากการทดลองหาความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นโดยวิธีทดสอบแบบฮาร์ตแมน ได้ผลดังตารางที่ 5.7

h เซนติเมตร	A_1 เซนติเมตร	A_2 เซนติเมตร	l_1 เซนติเมตร	l_2 เซนติเมตร	A เซนติเมตร
9.0	200.0	220.0	0.265	0.365	208.4
5.0	205.0	225.0	0.146	0.254	212.3
2.0	205.0	225.0	0.079	0.107	213.5

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องโดยวิธีของฮาร์ตแมน

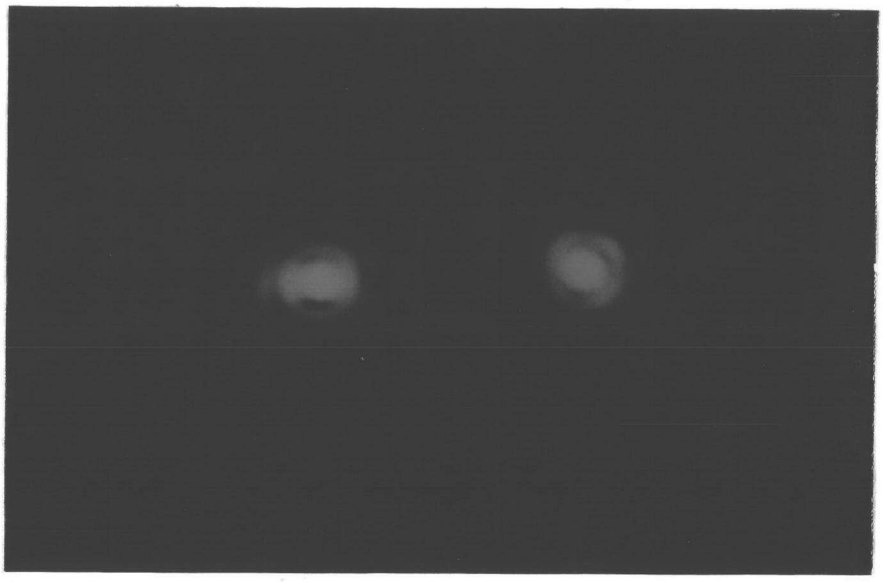
รูปที่ 5.9 แสดงถึงภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบแบบฮาร์ตแมน

รูปที่ 5.9 (ก) เป็นภาพจุดสว่างที่ตำแหน่งภายนอกโฟกัส (A_2) เมื่อให้แสงผ่านขอบเลนส์

รูปที่ 5.9 (ข) เป็นภาพจุดสว่างที่ตำแหน่งภายนอกโฟกัส (A_2) เมื่อให้แสงผ่านบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ

(ภาพขยายจากของจริง 20 เท่า)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5.9 (ก)

5.9 (ข)

โดยวิธีทดสอบแบบฮาร์ตแมน ได้ค่าความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องเท่ากับ

213.5 - 208.4 = 5.1 เซนติเมตร

ได้ทำการบันทึกภาพวงสว่างที่มองเห็นลงบนฟิล์มโกดัก ไตร-เอกซ์ แพน ใช้เวลารับแสง 30 นาที ล้างฟิล์มและอัดภาพขยาย 20 เท่า โดยวิธีเดียวกับหัวข้อที่ 3.2 ของบทที่ 5 ได้ภาพดังรูปที่ 5.9 รูปที่ 5.9 (ก) เป็นภาพวงสว่างที่ A_2 เมื่อให้แสงผ่านขอบเลนส์ รูปที่ 5.9 (ข) เป็นภาพวงสว่างที่ตำแหน่ง A_2 เมื่อให้แสงผ่านบริเวณใกล้แกนมุขสำคัญ

4. <u>การทดสอบกำลังแยกของเลนส์</u>

ค่ากำลังแยกของเลนส์ตามทฤษฎีจะหาได้จากสมการ (1.6) ในบทที่ 1 คือ

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

กำลังแยกของเลนส์ที่สร้างจะหาได้ในเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์เท่ากับ 10 เซนติเมตร และแสงที่ใช้เป็นแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม มีความยาวคลื่น 589.3นาโนเมตร นั่นคือ

$$\theta = \frac{1.22 \times 589.3 \times 10^{-7}}{10} \text{ เรเดียน}$$

หรือ $= 1.5$ ฟิลิปดา

ในการทดลองใช้แสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียมเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุด 2 จุด อยู่ห่างกันเท่ากับ 0.027 เซนติเมตร แสงจาก 2 จุดนี้ เมื่อผ่านเลนส์ไปเกิดเป็นภาพ จะได้เป็นภาพจานกลมแอรี่ 2 ภาพ ปรับประยะระหว่างวัตถุกับเลนส์ จนกระทั่งสามารถเห็นวัตถุ 2 จุดนั้นพอดีแยกจากกันด้วยตาเปล่า คือ จุดศูนย์กลางของจุดสว่างกลางภาพของจานกลมแอรี่จุดแรกอยู่ที่ตำแหน่งมืดที่สุดอันดับแรกของภาพจานกลมแอรี่ของจุดที่สอง ดังนั้น มุมที่เลนส์รองรับวัตถุ 2 จุดนี้ หรือมุมที่เลนส์รองรับภาพจานกลมแอรี่ได้พอดี ก็คือ กำลังแยกของเลนส์ วัดระยะจากวัตถุจนถึงเลนส์ได้ 15.30 เมตร และวัตถุ 2 จุดนี้อยู่ห่างกันเท่ากับ 0.027 เซนติเมตร

เพราะฉะนั้น กำลังแยกของเลนส์ $= \frac{0.027}{1530} = 1.8 \times 10^{-5}$ เรเดียน

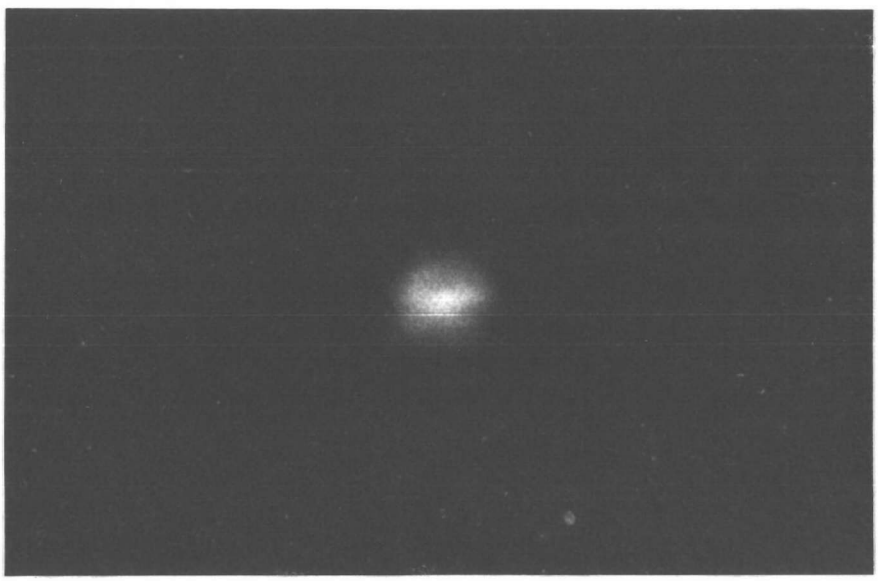
$= 3.6$ ฟิลิปดา

ณ ตำแหน่งที่ผู้สังเกตมองเห็นว่า วัตถุ 2 จุดนั้นพอดีแยกจากกัน เมื่อถ่ายภาพออกมาปรากฏว่าภาพที่ได้มองไม่เห็นลักษณะของจุด 2 จุดที่พอดีแยกจากกัน ดังรูปที่ 5.10 ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาพที่พอดีแยกจากกัน จึงจำเป็นต้องปรับตำแหน่งของเลนส์โดยการเลื่อนเลนส์ให้ใกล้วัตถุเข้าไป ได้ทำการเลื่อนเลนส์เข้าไปครั้งละ 10 เซนติเมตร แล้วทำการบันทึกภาพในแต่ละตำแหน่งของเลนส์ เพื่อหาตำแหน่งที่จะได้ภาพของจุด 2 จุดนี้พอดีแยกจากกัน ปรากฏว่าได้ภาพของจุด 2 จุดพอดีแยกออกจากกันนี้เมื่อเลนส์อยู่ห่างจากวัตถุเท่ากับ 12.80 เมตร ดังรูปที่ 5.11 (ก) รูปที่ 5.11 (ข) ถึงรูปที่ 5.11 (ง) เป็นการแสดงให้เห็นภาพของจุด 2 จุดที่เริ่มแยกจากกันจนถึงแยกออกจากกันเป็น 2 จุดตามลำดับ

กำลังแยกของเลนส์โทยฟิล์ม $= \frac{0.027}{1280} = 2.1 \times 10^{-5}$ เรเดียน

$= 4.4$ ฟิลิปดา

ในการบันทึกภาพกำลังแยกของเลนส์นี้ ใช้ฟิล์มโกดัก แพนโครมาติก (Kodak Pan-Chromatic) ของบริษัทโกดัก ใช้เวลารับแสง 8 นาที ล้างฟิล์มและอัดขยาย 22 เท่า ลงบนกระดาษอัดภาพของบริษัทโกดัก โดยวิธีเดียวกับหัวข้อที่ 3.2 ของบทที่ 5



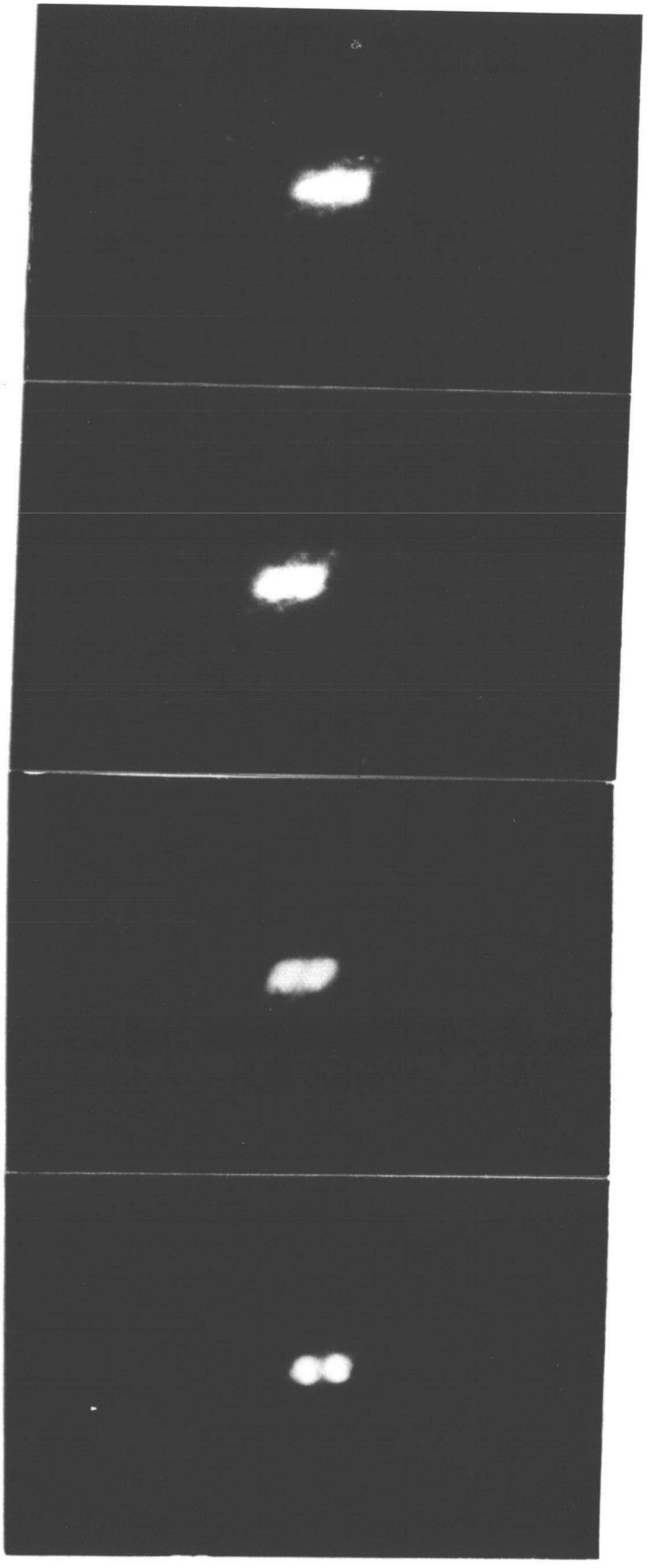
รูปที่ 5.10 แสดงถึงภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบกำลังแยกของเลนส์

รูปที่ 5.11 แสดงถึงภาพถ่ายของกำลังแยกของเลนส์โดยฟิล์ม

รูปที่ 5.11 (ก) เป็นภาพของจุด 2 จุด ที่พอดีแยกจากกัน

รูปที่ 5.11 (ข) ถึงรูปที่ 5.11 (ง) แสดงถึงภาพของจุด 2 จุด ที่เริ่มแยกจากกันจนถึงแยกจากกันออกเป็น 2 จุด

(ภาพขยายจากของจริง 22 เท่า)



ก.

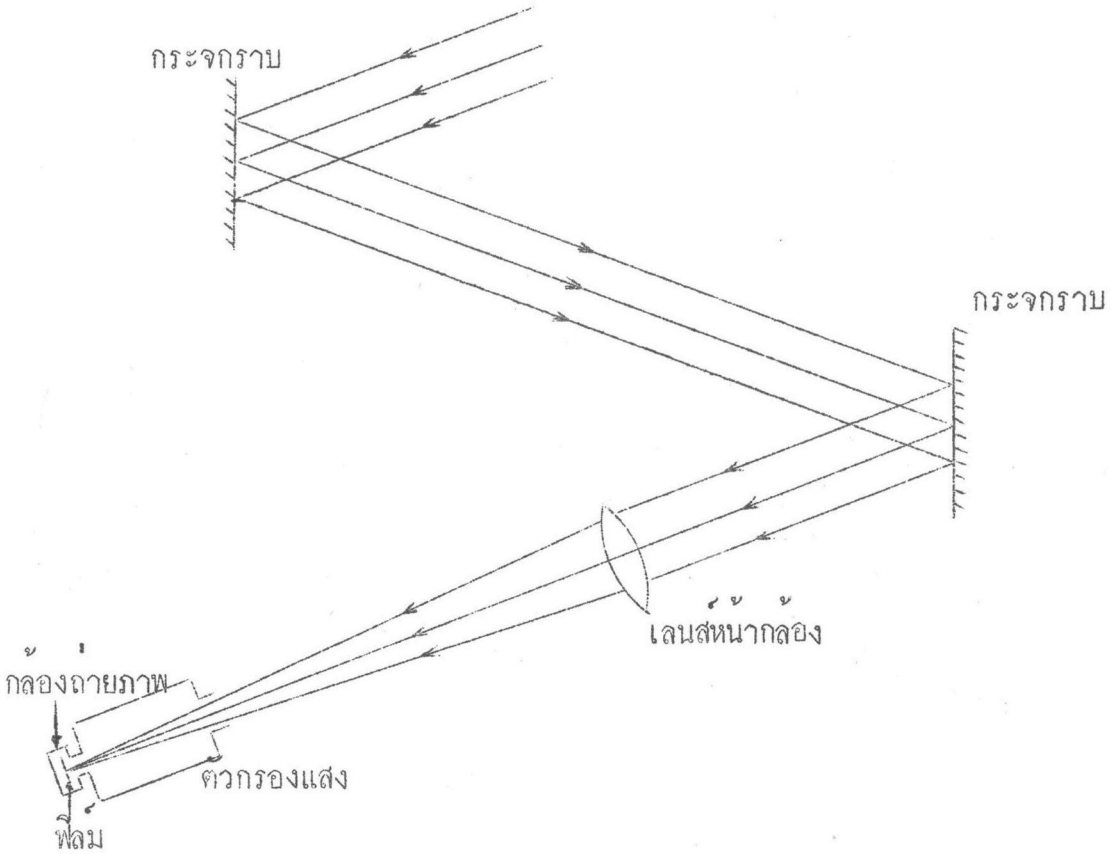
ข.

ค.

ง.

5. <u>การทดสอบคุณภาพของเลนส์โดยการถ่ายภาพดวงอาทิตย์</u>

ในการทดสอบเลนส์หน้ากล้องโดยการถ่ายภาพดวงอาทิตย์ ได้ทำการจัดเครื่องมือดังรูปที่ 5.12



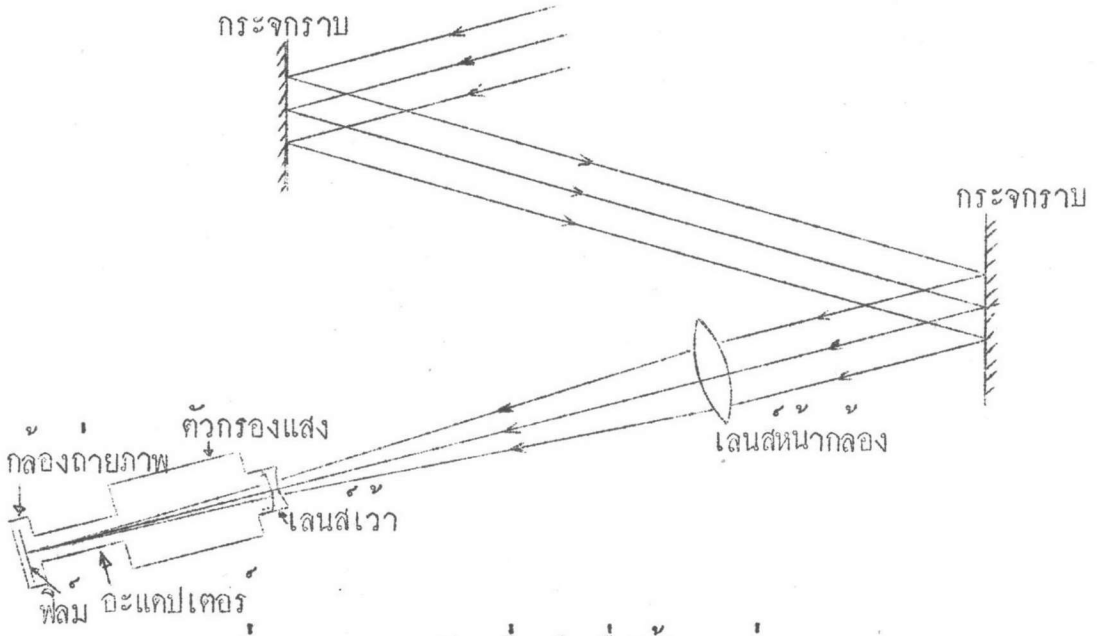
รูปที่ 5.12 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้ในการถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง

จากรูปที่ 5.12 กระจกราบเป็นกระจกเงารูปวงกลมที่ทำจากแก้วเซรามิก

ด้านหน้าฉาบด้วยอลูมินัมและซิลิคอนออกไซด์ ซึ่งจะไม่ขยายตัวตลอดเวลาที่ใช้เครื่องมือ (zero expansion glass ceramic first surface mirror) กระจกรามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\frac{1}{20}\lambda$ ใช้กระจกรานี้เป็นตัวสะท้อนแสงขนานจากดวงอาทิตย์ ให้ตกผ่านเลนส์หน้ากล้องแล้วผ่านตัวกรองแสงไปได้ภาพของดวงอาทิตย์บนฟิล์มในกล้องถ่ายภาพ ซึ่งติดตั้งไว้หลังตัวกรองแสง โดยให้ฟิล์มอยู่ที่ตำแหน่งของระนาบโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องพอดี

กระจกรานที่รับแสงขนานจากดวงอาทิตย์อันแรกจะต่ออยู่กับระบบที่ควบคุมให้กระจกรานเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ตลอดเวลา สำหรับตัวกรองแสงใช้ตัวกรองแสงของบริษัทไซส์ (Zeiss) จะให้แสงที่ผ่านออกมาเป็นแสงสีเดียวคือ ไฮโดรเจนอัลฟา (H_α) มีความยาวคลื่น 656.3 นาโนเมตร ซึ่งเป็นเส้นสเปกตรัมในชุดสเปกตรัมบาล์มเมอร์ (Balmer series) ตัวกรองแสงนี้สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ ± 16 อังสตรอม จากเส้นไฮโดรเจนอัลฟา และเลือกความกว้างของช่องคลื่นได้ 2 ขนาด คือ 0.50 และ 0.25 อังสตรอม

การจัดเครื่องมือดังรูปที่ 5.12 นี้ จะได้ภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง เมื่อต้องการภาพขนาดขยาย จะต้องเพิ่มเลนส์เว้าเข้าช่วยโดยการติดไว้หน้าตัวกรองแสง ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 การจัดเครื่องมือเพื่อใช้ในการถ่ายภาพขนาดขยายของดวงอาทิตย์

บันทึกภาพดวงอาทิตย์ด้วยกล้องถ่ายภาพ ซึ่งติดอยู่ที่ปลายสุดของตัวกรองแสง โดยใช้อะแดปเตอร์ (adapter) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างตัวกรองแสงกับกล้องถ่ายภาพ โดยที่อะแดปเตอร์สำหรับถ่ายภาพขยายกลางดวงจะยาวกว่าอะแดปเตอร์สำหรับถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง

ในการทดลองถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง และขนาดขยายกลางดวง ได้ทำการจัดเครื่องมือ ดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ ได้ถ่ายภาพโดยเปลี่ยนขนาดความยาวคลื่นตั้งแต่ ±1.0, ±0.75, ±0.5, ±0.25 อังสตรอม จากเส้นไฮโดรเจนอัลฟา และที่เส้นไฮโดรเจนอัลฟา การถ่ายภาพใช้เวลาในการเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพแตกต่างกันในแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เพื่อทดสอบคุณภาพของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น ได้ทำการทดลองถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง และขนาดขยายกลางดวง โดยการเปิดหน้ารับแสงของเลนส์หน้ากล้อง 3 ขนาด คือ 5, 7.5, 10 เซนติเมตร ตามลำดับ ในวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 โดยใช้เวลาในการเปิดหน้ากล้อง ดังนี้

1. บันทึกภาพดวงอาทิตย์ โดยเปิดหน้ารับแสงของเลนส์เท่ากับ 5 เซนติเมตร ใช้ความกว้างของช่องคลื่น เท่ากับ 0.25 อังสตรอม

ก. เมื่อถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง

ความยาวคลื่น	เวลาเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพ
H_α ±1Å, H_α ±0.75Å	$\frac{1}{30}$ วินาที
H_α ±0.5Å	$\frac{1}{15}$ วินาที
H_α ±0.25Å, H_α	$\frac{1}{8}$ วินาที

ข. เมื่อถ่ายภาพขนาดขยายกลางดวงอาทิตย์

ความยาวคลื่น	เวลาเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพ
H_α ±1Å, H_α ±0.75Å	$\frac{1}{8}$ วินาที
H_α ±0.5Å, H_α ±0.25Å	$\frac{1}{4}$ วินาที
H_α	$\frac{1}{2}$ วินาที

2. บันทึกภาพดวงอาทิตย์ โดยเปิดหน้ารับแสงของเลนส์เท่ากับ 7.5 เซนติเมตร ใช้ความกว้างของช่องกลิ้นเท่ากับ 0.25 อังสตรอม

ก. เมื่อถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง

ความยาวกลิ้น	เวลาเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพ
H_α ±1Å , H_α ±0.75Å	$\frac{1}{60}$ วินาที
H_α ±0.5Å	$\frac{1}{30}$ วินาที
H_α ±0.25Å, H_α	$\frac{1}{15}$ วินาที

ข. เมื่อถ่ายภาพขนาดขยายกลางดวงอาทิตย์

ความยาวกลิ้น	เวลาเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพ
H_α ±1Å, H_α ±0.75Å	$\frac{1}{15}$ วินาที
H_α ±0.5Å, H_α ±0.25Å	$\frac{1}{8}$ วินาที
H_α	$\frac{1}{4}$ วินาที

3. บันทึกภาพดวงอาทิตย์ โดยเปิดหน้ารับแสงของเลนส์เท่ากับ 10 เซนติเมตร ใช้ความกว้างของช่องกลิ้นเท่ากับ 0.25 อังสตรอม

ก. เมื่อถ่ายภาพดวงอาทิตย์เต็มดวง

ความยาวกลิ้น	เวลาเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพ
H_α ±1Å, H_α ±0.75Å	$\frac{1}{125}$ วินาที
H_α ±0.5Å	$\frac{1}{60}$ วินาที
H_α ±0.25Å, H_α	$\frac{1}{30}$ วินาที

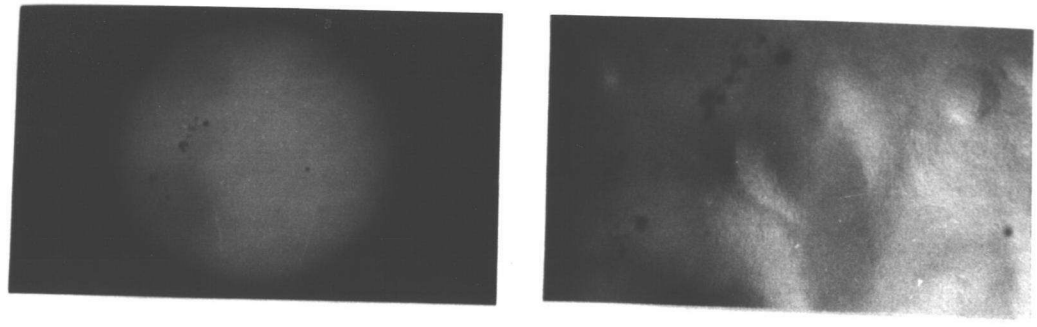
ข. เมื่อถ่ายภาพขนาดขยายกลางดวงอาทิตย์

ความยาวกลิ้น	เวลาเปิดหน้ากล้องถ่ายภาพ
H_α ±1Å, H_α ±0.75Å	$\frac{1}{30}$ วินาที
H_α ±0.5Å, H_α ±0.25Å	$\frac{1}{15}$ วินาที
H_α	$\frac{1}{8}$ วินาที

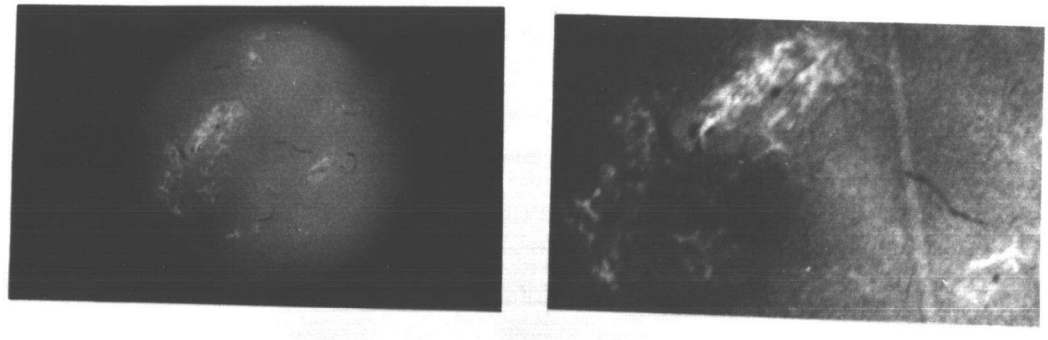
ในการบันทึกภาพดวงอาทิตย์ทั้งหมดนี้ ใช้กล้องถ่ายภาพมินอลต้า (Minolta) และฟิล์มถ่ายภาพชนิดโกดาลิทแพน ฟิล์ม 2568 (Kodalith Pan Film 2568) ขนาด 35 มิลลิเมตร ล้างฟิล์มด้วยน้ำยาดี 19 (D-19) ตามสูตรของบริษัทโกดัก ใช้เวลา 2 นาที และน้ำยาเอฟ 5 (F-5) เวลา 15นาที การอัดขยายภาพลงบนกระดาษ ใช้น้ำยาล้างรูปดี 72 (D-72) ตามสูตรของบริษัทโกดัก 2 นาที และน้ำยาเอฟ 1 (F-1) เวลา 15 นาที

ผลการบันทึกภาพทั้งหมดได้ว่า เมื่อเปิดหน้ารับแสงของเลนส์เท่ากับ 10 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร การหาตำแหน่งโฟกัสของภาพดวงอาทิตย์กระทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้นนี้มีความคลาดทรงกลมอยู่มาก ดังนั้น ภาพที่ได้จากการเปิดหน้ารับแสง 10 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร จึงมีความพร่ามัว รูปที่ 5.14 เป็นการแสดงถึงภาพถ่ายดวงอาทิตย์ เมื่อเปิดหน้ารับแสง 10 เซนติเมตร เมื่อทำการลดขนาดของหน้ารับแสงให้เหลือเท่ากับ 5 เซนติเมตร การหาตำแหน่งโฟกัสของภาพดวงอาทิตย์กระทำได้ง่ายขึ้น ภาพที่ได้มีความคมชัดกว่ามาก ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งเป็นภาพถ่ายดวงอาทิตย์เมื่อเปิดหน้ารับแสง 5 เซนติเมตร ทั้งนี้เพราะการลดขนาดของหน้ารับแสงของเลนส์ ก็คือการทำให้ความคลาดทรงกลมของเลนส์ลดลง

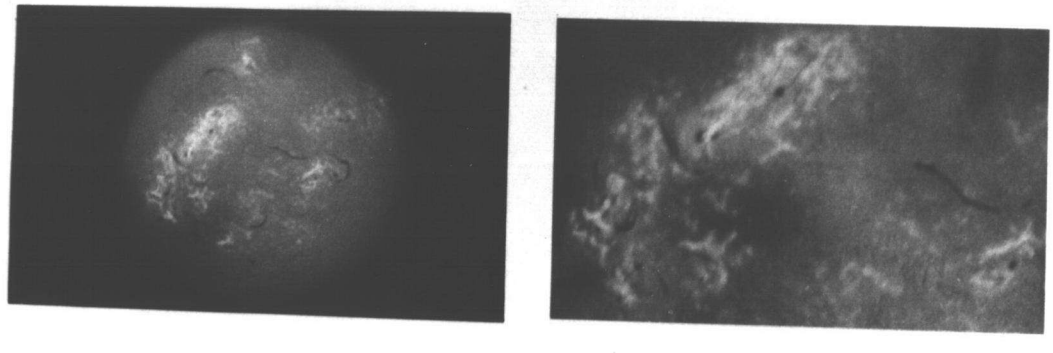
รูปที่ 5.14 แสดงถึงภาพถ่ายดวงอาทิตย์ เมื่อเปิดหน้ารับแสง 10 เซนติเมตร
โดยเปลี่ยนความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน
ภาพด้านซ้ายเป็นภาพถ่ายดวงอาทิตย์เต็มดวงขนาดขยาย 1.5 เท่า
ภาพด้านขวาเป็นภาพถ่ายบริเวณกลางดวงอาทิตย์ขนาดขยาย 4.5 เท่า



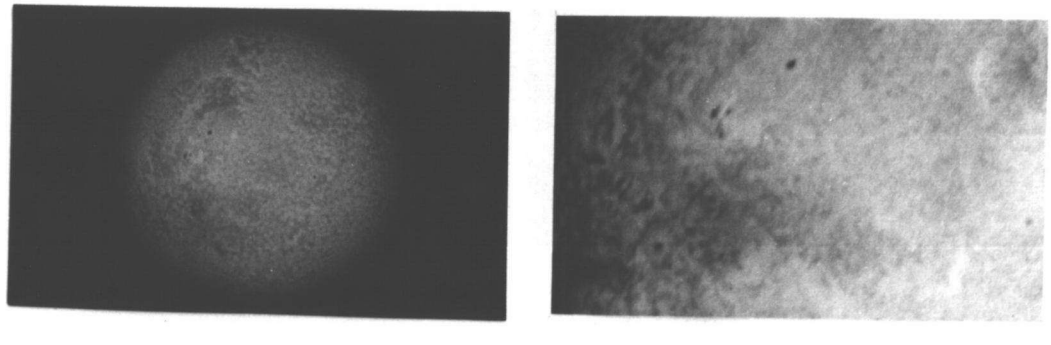
ก. $H_\alpha + 1.0$ Å



ข. $H_\alpha + 0.25$ Å

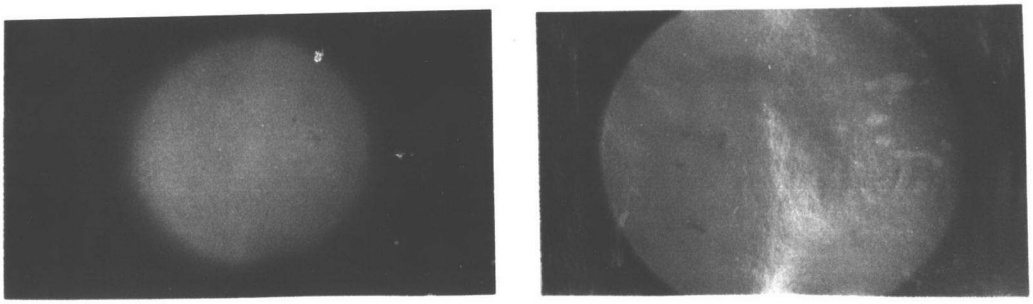


ก. H_α

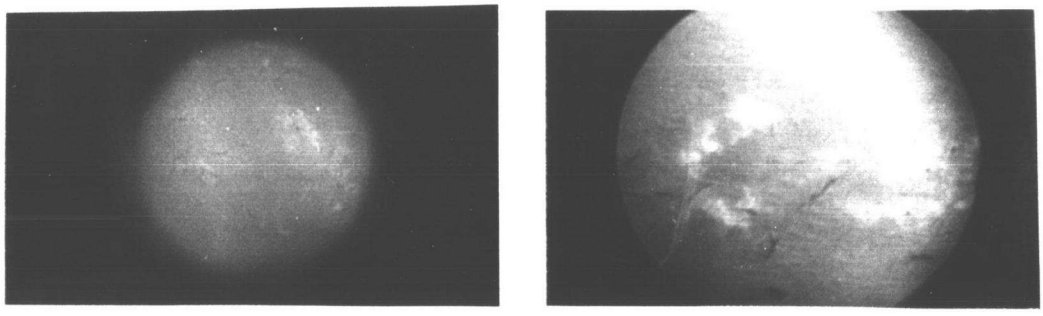


ง. $H_\alpha - 0.5$ Å

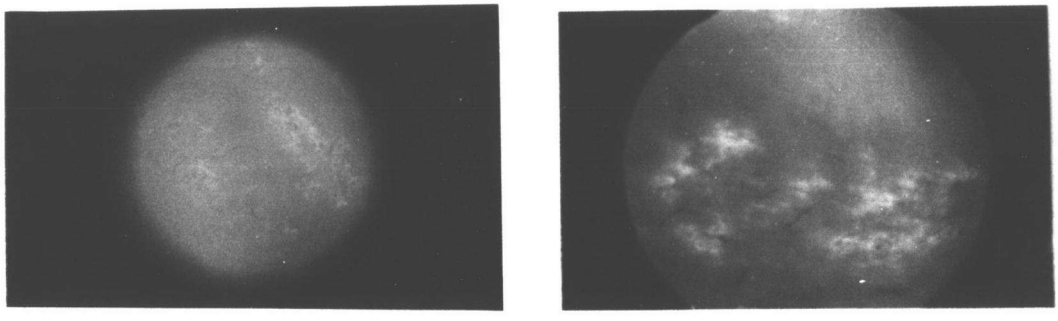
รูปที่ 5.15 แสดงถึงภาพถ่ายดวงอาทิตย์ เมื่อเปิดหน้ารับแสง 5 เซนติเมตร
โดยเปลี่ยนความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน
ภาพด้านซ้ายเป็นภาพถ่ายดวงอาทิตย์เต็มดวงขนาดขยาย 1.5 เท่า
ภาพด้านขวาเป็นภาพถ่ายบริเวณกลางดวงอาทิตย์ขนาดขยาย 9 เท่า



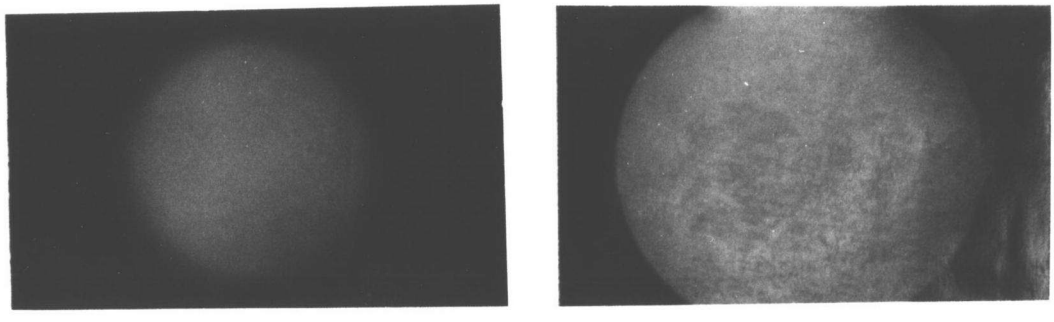
ก. H_{α} + 1.0 Å



ข. H_{α} - 0.25 Å



ค. H_{α}



ง H_{α} + 0.5 Å