บทที่ ๒

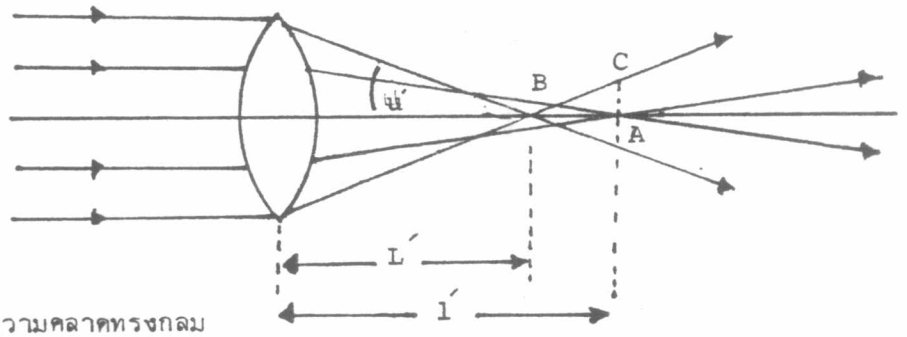
ทฤษฎีความคลาด การสร้างและการทดสอบคุณภาพของเลนส์

๑. ความคลาด (aberration)

เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุดผ่านเลนส์ จะไปตัดกันทำให้เกิดภาพเป็นจุดเหมือนวัตถุ ถ้าหากว่าระบบทัศนศาสตร์นั้นสมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติไม่มีทัศนอุปกรณ์ใดที่สมบูรณ์ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดเป็นจุดผ่านเลนส์แล้วภาพที่ได้จะพร่ามัวและบิดเบี้ยวเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระบบทัศนศาสตร์นั้นมีความคลาด

๑.๑ ความคลาดทรงกลม (spherical aberration)

ความคลาดทรงกลม เป็นความคลาดที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุอยู่บนแกนมุขยสำคัญ (principal axis) เนื่องจากการเป็นผิวโค้งรูปทรงกลมของผิวเลนส์เอง ทำให้แสงซึ่งมาตก ณ ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากแกนมุขยสำคัญต่างๆ กัน บนเลนส์ไม่ไปรวมกันที่จุดเดียวกัน ผลต่างของทางยาวโฟกัสของเลนส์ เมื่อแสงตกใกล้แกนกับเมื่อแสงตกที่ขอบเลนส์ คือความคลาดทรงกลม (รัชนี รักวีรธรรม)



รูปที่ ๒ ความคลาดทรงกลม

จากรูปที่ ๒ จะเห็นว่าเมื่อให้รังสีผ่านบริเวณใกล้แกนและใกล้แกนรังสีจะตัดกันที่จุด B,A ตามลำดับ นั่นคือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์จะแปรเปลี่ยนไปตามขนาดของหน้ารับแสง ทำให้เลนส์มีความคลาดทรงกลม (Jenkins and White, 1976)

ถ้าหากพิจารณาจากจุดตัดของรังสีไกลแกนและรังสีใกล้แกน จะพบว่ามีความคลาดทรงกลมสองแบบ คือ เมื่อจุดตัดของรังสีไกลแกนอยู่ทางขวาของจุดตัดรังสีใกล้แกน ความคลาดทรงกลมแบบนี้เรียกความคลาดทรงกลมแบบแก้เกิน (over-corrected) แต่เมื่อจุดตัดรังสีไกลแกนอยู่ทางซ้ายของจุดตัดรังสีใกล้แกน ความคลาดทรงกลมนี้เรียกความคลาดทรงกลมแบบแก้ขาด (under-corrected)

ถ้าพิจารณาจากรูปที่ ๒ จะเห็นว่าอาจบอกค่าความคลาดทรงกลมได้สองอย่างคือ

๑. ความคลาดทรงกลมตามแนวแกน = ระยะ AB = (l' - L')

๒. ความคลาดทรงกลมตามแนวดิ่ง = ระยะ AC = (l' - L') tan u'

ความคลาดทรงกลมของเลนส์จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเลนส์ การออกแบบรูปร่างเลนส์ให้เหมาะสม จะทำให้สามารถลดค่าความคลาดทรงกลมให้เหลือน้อยที่สุดได้

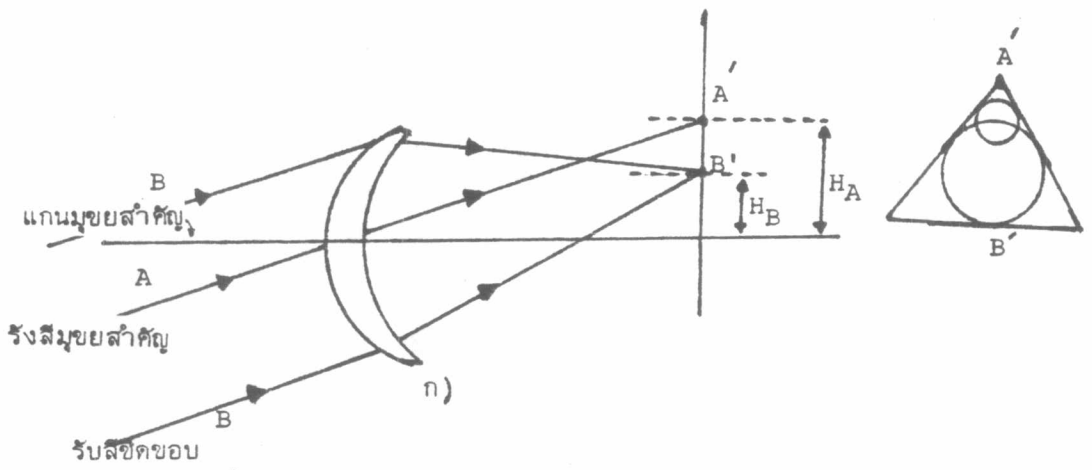
๑.๒ โคมา (Coma)

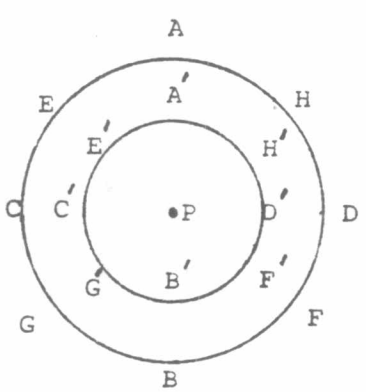
ก่อนจะกล่าวถึงโคมา เพื่อความสะดวกในการอธิบายเกี่ยวกับความคลาดของระบบทัศนศาสตร์ จึงจำเป็นกล่าวถึงระนาบ ๒ ระนาบ คือ

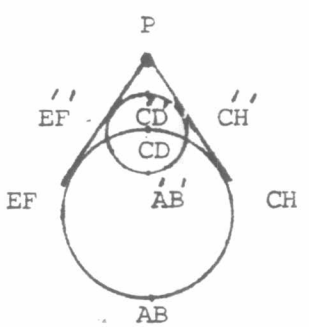
๑. ระนาบแทนเยนเชียล (tangential plane) คือระนาบที่ประกอบด้วยแกนมุขยสำคัญและรังสีมุขยสำคัญ (principal ray) ซึ่งเป็นรังสีที่ผ่านจุดศูนย์กลางของช่องแสงเข้า (entrance pupil)

๒. ระนาบซากิตตัล (sagittal plane) คือระนาบซึ่งตั้งได้ฉากกับระนาบแทนเยนเชียล โดยอยู่ในแนวรังสีมุขยสำคัญที่ลากไปยังวัตถุ

โคมา คือความคลาดของระบบทัศนศาสตร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแปรเปลี่ยนไปของกำลังขยายของระบบตามขนาดช่องเปิดรับแสง แต่ละรังสีเฉียง (oblique ray) ซึ่งเป็นรังสีที่เอียงทำมุมกับแกนมุขยสำคัญแต่ขนานกับรังสีมุขยสำคัญ เมื่อผ่านเลนส์จะให้ภาพที่มีความสูงต่างกันกับภาพที่ได้จากรังสีที่ผ่านกลางเลนส์ (Jenkins and White, 1976) ดังรูปที่ ๓ ก.







รูปที่ ๓ การเกิดโคมา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ๓ ก) แสดงการเกิดโคมาในระนาบแทนเยนเชียล รังสี B เป็นรังสีที่ผ่านบริเวณขอบเลนส์ให้ภาพที่ B' รังสี A เป็นรังสีผ่านบริเวณกลางเลนส์ให้ภาพเกิดที่ A' ส่วนรังสีที่อยู่ระหว่างรังสี A และรังสี B เมื่อผ่านเลนส์แล้วได้ภาพระหว่างจุด A' และจุด B' ภาพที่ได้จะมีลักษณะคล้ายดาวหาง โดยจุด A' เป็นหัวของดาวหาง ถ้า $H_{A'}$, $H_{B'}$ คือความสูงตำแหน่งภาพที่ได้จากรังสี A และรังสี B ที่อยู่สูงจากแกนมุขสำคัญ โคมาแทนเยนเชียลหาได้ดังนี้

โคมาแทนเยนเชียล = $H_{B'} - H_{A'}$

รูปที่ ๓ ข) และรูปที่ ๓ ค) แสดงถึงความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่แสงผ่านหน้ารับแสงของระบบทัศนศาสตร์กับตำแหน่งที่เกิดภาพดาวหาง เมื่อให้วัตถุเป็นจุดอยู่นอกแกนมุขยสำคัญและกำหนดให้เลนส์มีเพียงโคมาอย่างเดียวเท่านั้น

รูปที่ ๓ ข) วงกลมนอก แสดงตำแหน่ง A,B,C,D,E,F,G,H บนหน้าเลนส์รับแสงซึ่งเป็นบริเวณขอบเลนส์ และทำนองเดียวกัน ตำแหน่ง A',B',C',D',E',F',G',H' แสดงถึงตำแหน่งบนหน้าเลนส์ บริเวณถัดขอบเลนส์เข้ามา จุด P คือตำแหน่งกึ่งกลางเลนส์ รังสีที่ผ่านจุด A,B ซึ่งอยู่ในระนาบแทนเยนเชียล เมื่อผ่านเลนส์แล้ว จะหักเหไปตัดกันที่จุด AB ดังรูปที่ ๓ ค) ส่วนรังสีที่ผ่านจุด C,D ซึ่งอยู่ในระนาบซากิตตัล เมื่อผ่านเลนส์แล้วหักเหไปตัดกันที่จุด CD และทำนองเดียวกัน สำหรับรังสีที่ผ่านจุด A',B' และจุด C',D' ของหน้าเลนส์ เมื่อผ่านเลนส์แล้วจะหักเหไปตัดกันที่จุด A'B' และ C'D' ตามลำดับ

สำหรับจุด E,F,G,H และ E',F',G',H' ก็สามารถพิจารณาได้เช่นกัน ในที่สุดก็จะได้ดังรูปที่ ๓ ค) โดยจุด P คือ จุดหัวของดาวหาง ค่าของโคมาอาจบอกได้ ๒ แบบคือ

๑. โคมาแทนเยนเชียล (tangential coma) คือระยะจากจุด AB ถึงจุด P

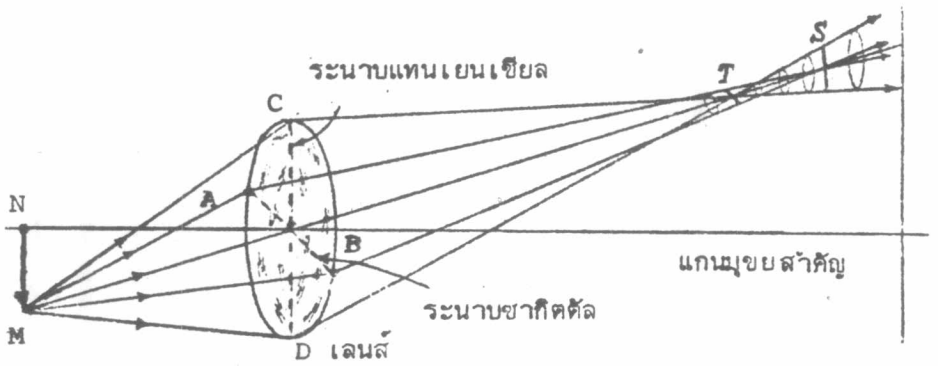
๒. โคมา ซากิตตัล (sagittal coma) คือระยะจากจุด CD ถึงจุด P

โคมาซากิตตัล = ๑/๓ ของโคมาแทนเยนเชียลเสมอและพลังงานส่วนใหญ่ในโคมานี้จะมารวมกันอยู่ในสามเหลี่ยมเล็ก ๆ ระหว่างจุด CD และจุด P ค่าของโคมาจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและตำแหน่งของเลนส์กับขนาดหน้ารับแสง ซึ่งเป็นตัวจำกัดลำแสงที่ผ่านเข้ามายังเลนส์ ฉะนั้น

การแก้โฟมา จึงขึ้นอยู่กับการเลือกรูปร่างของเลนส์ให้เหมาะสม

๑.๓ แอสติกมาติซึม (astigmatism)

เมื่อวัตถุอยู่นอกแกนมุขยสำคัญ ภาพที่ได้จากเลนส์ที่มีแอสติกมาติซึมจะชัดในระนาบใดระนาบหนึ่ง ส่วนระนาบที่ตั้งฉากจะพร่ามัว ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก กำลังของเลนส์ในแต่ละระนาบไม่เท่ากัน

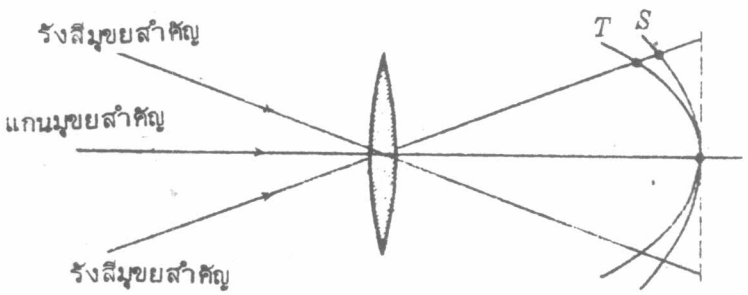


รูปที่ ๔ แอสติกมาติซึม

M เป็นจุดบนวัตถุที่อยู่นอกแกนมุขยสำคัญ รังสีจากจุด M ผ่านเลนส์ในระนาบแทนเยนเชียล CD แล้วทำให้เกิดภาพเป็นเส้นตรง T ส่วนรังสีผ่านเลนส์ในระนาบซากิตตัล AB จะทำให้เกิดภาพเป็นเส้นตรง S โดยที่ภาพเส้นตรง T ตั้งฉากกับระนาบแทนเยนเชียล และเส้นตรง S ตั้งฉากกับระนาบซากิตตัล (Jenkins and White, 1976)

แอสติกมาติซึม จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ห่างออกไปจากแกนมุขยสำคัญถ้าวัตถุเป็นจุด จุดภาพที่เกิดขึ้นจะอยู่ในเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งเป็นโลกัสของจุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ ๕ แต่ถ้าวัตถุมีขนาด ภาพที่ได้จะเป็นพื้นผิวโค้งรูปกะทะ

ค่าของความต่างแอสติกมาติซึม (astigmatism difference) ซึ่งคือระยะห่างของผิวโค้งแทนเยนเชียล T กับผิวโค้งซากิตตัล S โดยวัดตามแนวรังสีมุขสำคัญ ใช้เป็นค่าที่บอกแอสติกมาติซึมของเลนส์ ค่าความต่างของแอสติกมาติซึม จะเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่วัตถุอยู่ห่างจากแกนมุขยสำคัญ

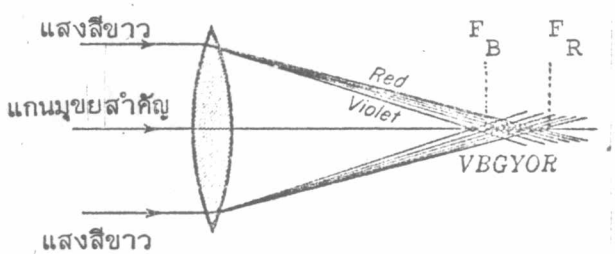


รูปที่ ๕ โลกัสของภาพในระนาบแทนเยนเชียล (T) และระนาบซากิตตัล (S)

โดยทั่วไป ค่าแอสติกมาติซึมของเลนส์นูนจะเป็นบวก มีผิวโค้ง T อยู่ทางซ้ายของผิวโค้ง S ส่วนเลนส์เว้าจะมีแอสติกมาติซึมเป็นลบ เมื่อผิวโค้ง T อยู่ทางด้านขวาของผิวโค้ง S

๑.๔ ความคลาดรงค์ (chromatic aberration)

ถ้าให้ลำแสงขนานซึ่งเป็นแสงขาว ผ่านระบบทัศนศาสตร์แล้ว แสงขาวกระจายเป็นแสงสีต่าง ๆ และแสงแต่ละสีรวมกันที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน เรียกระบบทัศนศาสตร์นั้นว่ามีความคลาดรงค์ ค่าของความคลาดรงค์ก็คือระยะจากตำแหน่งที่แสงแดงมารวมกัน กับตำแหน่งที่แสงสีน้ำเงินมารวมกัน



รูปที่ ๖ ความคลาดรงค์

สำหรับเลนส์บาง เราสามารถพิจารณาสมการที่แสดงว่าทางยาวโฟกัสของเลนส์นี้ขึ้นอยู่กับค่าดรรชนีหักเหของแก้วที่ทำเลนส์นั้น

$$\frac{1}{F} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \qquad \text{----------(2.1)}$$

F = ทางยาวโฟกัสของเลนส์

n = ดรรชนีหักเหของแก้วที่ทำเลนส์

R_1 = รัศมีความโค้งของผิวที่ ๑ ของเลนส์

R_2 = รัศมีความโค้งของผิวที่ ๒ ของเลนส์

เมื่อพิจารณาสมการ (๒.๑) เราจะพบว่า สำหรับเลนส์อันหนึ่งจะมีค่ารัศมีความโค้ง R_1, R_2 คงที่ จึงทำให้ค่าทางยาวโฟกัสของเลนส์ขึ้นอยู่กับดรรชนีหักเหของแก้วเท่านั้น ถ้าหากแก้วที่นำมาทำเป็นเลนส์ มีค่าดรรชนีหักเหของแก้วมีค่ามาก ทางยาวโฟกัสจะมีค่าน้อยและดรรชนีหักเหแก้วมีค่าน้อยทางยาวโฟกัสจะมีค่ามาก

แต่ค่าดรรชนีหักเหของแก้วนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ผ่านเลนส์ดังสมการต่อไปนี้ (Monk, 1937)

$$n = n_0 + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \ldots\ldots\ldots \qquad \text{----------(2.2)}$$

004197

n เป็นค่าดรรชนีหักเหของตัวกลาง

n_0, B, C เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางนั้น ๆ

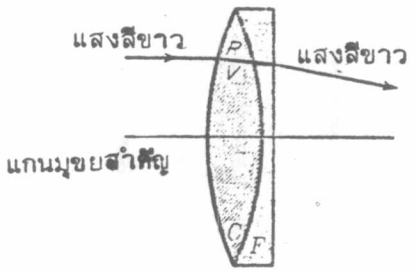
λ เป็นความยาวคลื่นของแสง

จากสมการ (๒.๒) ถ้าหากแสงมีความยาวคลื่นสั้น ค่าดรรชนีหักเหของตัวกลางจะมีค่ามาก สำหรับคลื่นที่มีความยาวคลื่นมาก ค่าดรรชนีหักเหตัวกลางจะมีค่าน้อย

ถ้าแสงมีความยาวคลื่นสั้นกว่า มารวมกันทางด้านซ้ายของจุดรวมของแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า ความคลาดรงค์จะเป็นความคลาดรงค์แก้ขาด (under corrected chromatic aberration) ค่าของความคลาดจะเป็นลบ เมื่อแสงความยาวคลื่นสั้นกว่ามารวมกันอยู่ทางด้านขวาของจุดรวมของแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าความคลาดนั้นเรียกความคลาดรงค์แก้เกิน (over corrected chromatic aberration) มีค่าเป็นบวก (รัชนี รักวีรธรรม)

ถ้าพิจารณาจากรูปที่ ๖ ลักษณะของภาพจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของฉากรับภาพนั้น ถ้าวางฉากไว้ที่จุดโฟกัสของแสงสีน้ำเงิน (F_B) จะเห็นจุดกลางของภาพเป็นสีน้ำเงินล้อมรอบด้วยวงแหวนสีเหลือง ถัดออกมาเป็นวงแหวนสีแดง ถ้าวางฉากไว้ที่จุดโฟกัสของแสงสีแดง (F_R) จะได้จุดแดงกลางภาพ ล้อมรอบด้วยวงแหวนสีเหลืองและสีน้ำเงิน (รัชนี รักวีรธรรม)

การแก้ความคลาดรงค์นั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมกันมากที่สุดคือ นำแก้ว ๒ ชนิดที่มีดรรชนีหักเหต่างกัน มาออกแบบเป็นเลนส์บาง แล้วนำเลนส์ทั้งสองประกอบกัน แก้วที่นิยมใช้คือ แก้วฟลินท์ (flint glass) และแก้วคราวน์ (crown glass) โดยแก้วฟลินท์ทำเป็นเลนส์เว้ามีกำลังเป็นลบ ส่วนแก้วคราวน์ทำเป็นเลนส์นูน มีกำลังเป็นบวกดังแสดงในรูปที่ ๗ เลนส์ทั้งสองนี้มีค่าการกระจายเท่ากัน กำลังรวมของเลนส์ทั้งสองนี้มีค่าเป็นบวก เลนส์ประกบคู่นี้เรียกว่าเลนส์อรงค์ (achromatic lens)



รูปที่ ๗ เลนส์อรงค์

๒. การออกแบบเลนส์

เลนส์หน้ากล้องโทรทรรศน์ที่สร้างขึ้นนี้ใช้ควบกับตัวกรองแสง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องแก้ความคลาดสี เลนส์ที่จะสร้างขึ้นเป็นเลนส์เดี่ยวจากแผ่นแก้วคราวน์ (crown glass) ซึ่งบอกว่ามีดรรชนีหักเห ๑.๖๐ หนา ๑ เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๘.๖ เซนติเมตร โดยกำหนดให้เลนส์มีทางยาวโฟกัส ๓ เมตร ฉะนั้น จากสูตรของเลนส์บางในอวกาศ จากสมการ(๒.๑)

$$\frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

$$= (n-1)(C_1 - C_2) \qquad \text{----------(2.3)}$$

โดยที่ $\frac{1}{R_1} = C_1$, $\frac{1}{R_2} = C_2$

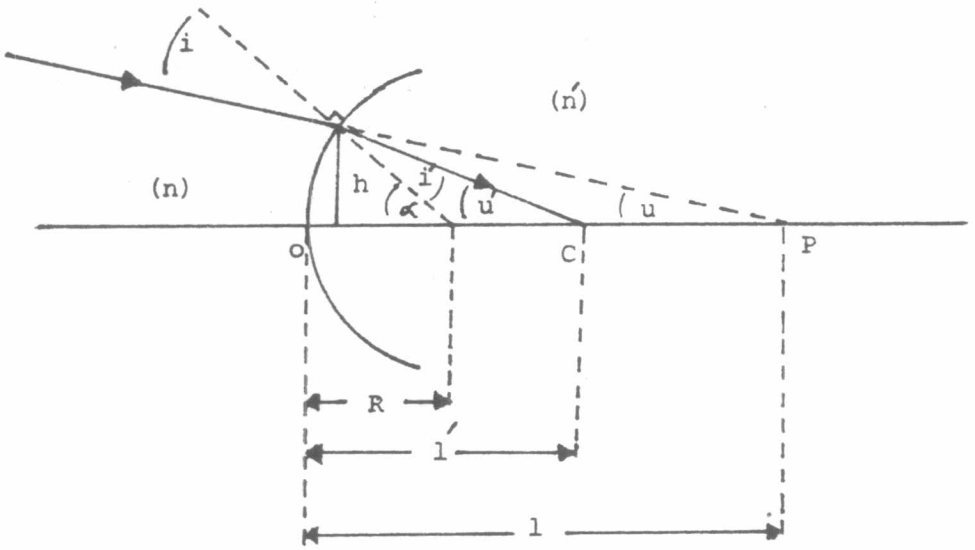
หรือ $R_1 = \frac{2F\,(n-1)}{q+1}$ ----------(2.4)

$R_2 = \frac{2F\,(n-1)}{q-1}$ (Jenkins and White, 1976)-----(2.5)

โดยที่ $q = \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}$ เรียกว่าตัวประกอบรูปร่างของเลนส์

(shape factor)

สำหรับเลนส์บางเดี่ยวที่เป็นเลนส์บาง เมื่อเปลี่ยนรูปร่างของเลนส์จะไม่ทำให้ความคลาดหลายอย่างเปลี่ยนไปได้ เช่น ความคลาดรงค์ตามยาว ความคลาดเอียง และความโค้งของสนาม แต่ความคลาดทรงกลม และโคมา จะเปลี่ยนค่าไปมาก เราสามารถจัดค่าของคู่ C_1, C_2 ได้มากมาย สำหรับเลนส์ที่มีกรรชนีหักเหค่าหนึ่ง เพื่อที่จะได้เลนส์ที่มีทางยาวโฟกัลค่าหนึ่ง เลนส์ที่มี C_1,C_2 ต่างกันนี้จะให้ความคลาดทรงกลมต่างกันไปและขณะเดียวกันโคมาก็จะต่างกันไปด้วย จากหลักการดังกล่าวมานี้ เป็นหลักเบื้องต้นในการออกแบบ ทางทัศนศาสตร์ เพื่อที่จะลดความคลาดทรงกลมให้เหลือน้อยที่สุดได้ เพราะตราบใดที่ผิวเลนส์ยังคงเป็นผิวทรงกลม ความคลาดทรงกลมไม่มีโอกาสจะเป็นศูนย์ได้ แต่โดยการจัดรูปร่างของเลนส์ให้ถูกต้องจะทำให้โคมาเป็นศูนย์ได้ ดังนั้นในการออกแบบเลนส์ เราต้องการเลนส์ที่มีความคลาดทรงกลมน้อยสุดและมีโคมาเป็นศูนย์ ซึ่งจะได้ต่อเมื่อเลนส์มีรูปร่างเหมาะสม วิธีที่นิยมคือวิธีการติดตามรังสี (ray tracing) ๒ รังสี ด้วยกันใช้หารูปร่างของเลนส์คือ รังสีใกล้แกนมุขยสำคัญ (paraxial ray) ซึ่งเป็นรังสีจากวัตถุผ่านระบบทัศนศาสตร์ ภายในบริเวณใกล้แกนมุขยสำคัญ และรังสีมุขยสำคัญ ซึ่งเป็นรังสีจากวัตถุผ่านจุดกลางของช่องแสงเข้าของระบบทัศนศาสตร์ สำหรับกล้องโทรทรรศน์เลนส์หน้ากล้องเองจะทำหน้าที่เป็นช่องแสงเข้าด้วย



รูปที่ ๘ สัญญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตามรังสี

รูปที่ ๘ แสดงการหักเหของแสงเมื่อผ่านผิวโค้งเดี่ยวโดยที่

u เป็นมุมที่รังสี ทำกับแกนมุขยสำคัญ

i เป็นมุมตกกระทบของรังสี

i' เป็นมุมหักเหของรังสี

α เป็นมุมที่เส้นปรกติของจุดที่รังสีตกกระทบผิวโค้งทำกับแกนมุขยสำคัญ

n และ n' เป็นดรรชนีหักเหของตัวกลางที่อยู่ทางด้านซ้ายผิวโค้งและตัวกลางที่ทำผิวโค้ง

R เป็นรัศมีความโค้งของผิวโค้ง

l เป็นระยะที่วัดจากผิวโค้งไปยังจุดที่รังสีตกตัดแกนมุขยสำคัญ

l' เป็นระยะทางจากผิวโค้งไปยังจุดที่รังสีหักเหตัดแกนมุขยสำคัญ

h เป็นระยะจากแกนมุขยสำคัญถึงจุดที่รังสีตกบนผิวโค้ง

รูปที่ ๘ เมื่อมุมต่าง ๆ เป็นมุมเล็ก

$$u' = hc - \frac{n(hc - u)}{n'} \qquad \text{----------(2.6)}$$

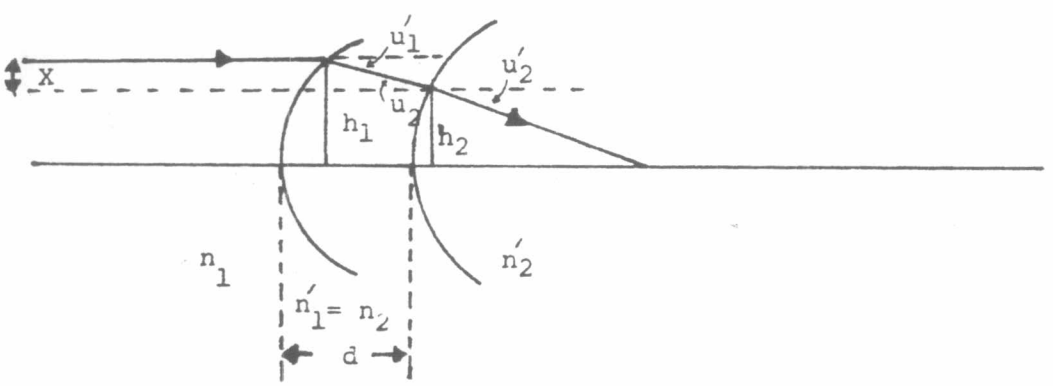
และ $\alpha = \frac{h}{R} = hc$

$$\therefore \quad u' = \alpha - \frac{n(\alpha - u)}{n'} \qquad \text{----------(2.7)}$$

ให้ $A = n(\alpha - u)$

จะได้ $u' = \alpha - \frac{A}{n'}$ ----------(2.8)

ถ้ามีหลาย ๆ ผิวเราสามารถติดตามรังสีต่อไปได้ เมื่อรังสีผ่าน ๒ ผิวจากซ้ายไปขวา ที่อยู่ห่างกันเป็นระยะ d



รูปที่ ๙ การติดตามรังสีสำหรับ ๒ ผิว

จากรูปที่ ๔ $u_2 = u_1'$

$$h_2 = h_1 - x$$

$$= h_1 - du_2$$

$$= h_1 - du_1' \qquad \text{----------(2.9)}$$

ดังนั้น เราสามารถหาผลรวมไซเดิล (seidel sums) ซึ่งก็คือผลที่ได้จากการรวมความคลาดไซเดิลหรือความคลาดปฐมภูมิ ที่มีที่แต่ละผิวของระบบเข้าด้วยกัน

S_I คือ ผลรวมไซเดิลของความคลาดทรงกลม

โดยที่ $S_I = \sum_{1}^{k} A^2 \, h\Delta\left(\frac{u}{n}\right)$ ----------(2.10)

k - เป็นจำนวนของผิวโค้ง

$$\Delta\left(\frac{u}{n}\right) = \frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \qquad \text{----------(2.11)}$$

ถ้าหากรังสีตกกระทบขนานกับแกนมุขสำคัญแล้วจะได้ $u = 0$ จากนั้นเราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลม $({}_oW_{40})$ ได้

$${}_oW_{40} = \frac{1}{8} S_I \qquad \text{----------(2.12)}$$

สำหรับสัมประสิทธิ์ของโคมา $({}_1W_{31})$ เราสามารถหาได้จากการติดตามรังสีมุขยสำคัญ ซึ่งใช้สูตรเดียวกับสูตรรังสีใกล้แกนมุขยสำคัญโดยใช้เครื่องหมายบาร์ (-) กำกับ

$$\bar{u}' = \bar{\alpha} - \frac{\bar{A}}{n'} \qquad \text{----------(2.13)}$$

โดยที่ $\bar{\alpha} = \bar{h}c$

$$\bar{A} = n(\bar{\alpha} - \bar{u}) \qquad \text{----------(2.14)}$$

โดยที่ $\bar{h}$ เป็นระยะที่วัดในแนวดิ่งจากแกนมุขยสำคัญถึงตำแหน่งที่รังสีมุขยสำคัญตัดผิวโค้ง จากนั้นก็สามารถหาผลรวมไซเดิล S_{Π}

S_{Π} คือ ผลรวมของไซเดิลของโคมา

โดยที่ $$S_{\Pi} = \sum_{1}^{k} A \bar{A} h \Delta\left(\frac{u}{n}\right) \qquad \text{----------(2.15)}$$

จากนั้นเราสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของโคมา $({}_1W_{31})$

โดยที่ $${}_1W_{31} = \frac{1}{2} S_{\Pi} \qquad \text{----------(2.16)}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความคลาดทั้งสองที่กล่าวมานี้จะมีค่าต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของเลนส์ถ้าหากเราเปลี่ยนรูปร่างของเลนส์ไป แล้วคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ ควบคู่กันไป โดยแต่ละครั้ง ยังทำให้ค่าทางยาวโฟกัสคงที่ (Jenkins and White, 1976)

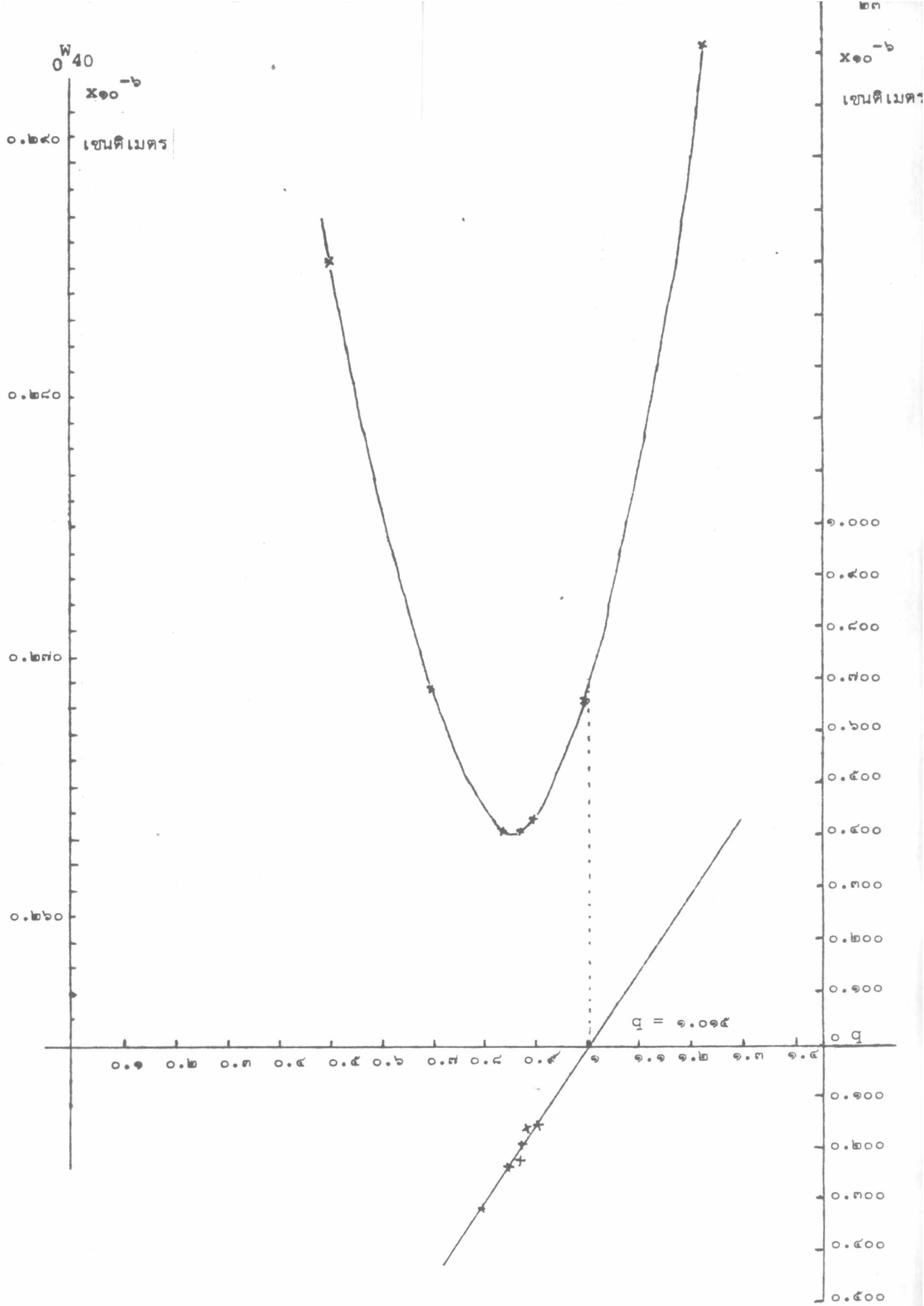
จากนั้นนำค่า ${}_0W_{40}$, ${}_1W_{31}$ และค่า q ไปเขียนกราฟ จะทำให้เราสามารถเลือกรูปร่างของเลนส์ที่เหมาะสมได้จากกราฟ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C_1 เซนติเมตร$^{-๑}$	C_2 เซนติเมตร$^{-๑}$	$q=\frac{R_2+R_1}{R_2-R_1}$	$_0W_{40}$ เซนติเมตร	$_1W_{31}$ เซนติเมตร
๔.๓๔๗๘๒ X ๑๐$^{-๓}$	-๑.๒๐๗๖ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๕๖๕	๒.๘๕๕๓ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๗๙๙๗๙ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๗๖๑๙๐ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๗๙๓๖๕ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๗๑๔	๒.๖๙๐๑ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๕๐๒๖๐ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๐๐๐๐๐ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๕๕๕๕๕ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๐๐	๒.๖๔๔๖ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๓๓๓๘๗ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๑๒๘๐๐ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๔๒๗๓๓ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๔๘	๒.๖๓๕๒ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๒๔๒๒๖ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๑๕๔๖๓ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๔๐๐๙๑ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๕๖	๒.๖๓๔๗ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๒๒๓๓๘ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๑๘๑๓๔ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๓๗๔๒๐ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๕๖	๒.๖๓๔๔ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๒๐๔๒๖ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๒๐๘๓๓ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๓๔๗๒๒ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๗๕	๒.๖๓๔๗ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๑๘๕๐๐ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๒๓๕๖๐ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๓๑๙๙๕ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๘๕	๒.๖๓๕๕ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๑๖๕๐๐ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๒๔๓๘๓ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๓๑๑๗๑ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๘๘	๒.๖๓๕๘ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๑๕๙๖๒ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๒๔๖๕๘ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๓๐๘๙๖ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๘๘	๒.๖๓๖๐ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๑๕๗๖๖ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๒๖๓๑๕ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๒๙๒๔๐ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๘๙๕	๒.๖๓๖๘ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๑๔๕๘๒ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๒๙๑๐๐ X ๑๐$^{-๓}$	-๐.๒๖๔๔๕ X ๑๐$^{-๓}$	๐.๙๐๕	๒.๖๓๘๕ X ๑๐$^{-๖}$	-๐.๑๒๕๙๑ X ๑๐$^{-๖}$
๔.๕๕๕๕๕ X ๑๐$^{-๓}$	๐	๑.๐๐	๒.๖๗๙๖ X ๑๐$^{-๖}$	+๐.๐๖๓๒๔๐X ๑๐$^{-๖}$
๖.๒๕๐๐๐ X ๑๐$^{-๓}$	+๐.๖๔๔๕๐ X ๑๐$^{-๓}$	๑.๒๕	๓.๐๐๑๔ X ๑๐$^{-๖}$	+๐.๕๖๐๘๓ X ๑๐$^{-๖}$

ตารางที่ ๑ แสดงค่าตัวประกอบรูปร่าง-สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและโคมา

ของเลนส์ที่ออกแบบ



รูปที่ ๑๐ กราฟแสดงความคลาดทรงกลมและโคมาที่ได้จากการคำนวณเพื่อใช้ในการ

เมื่อพิจารณาจากกราฟแล้ว จะเห็นได้ว่า ขณะที่โคมาเป็นศูนย์ สัมประสิทธิ์ความคลาดทรงกลมจะเป็น ๐.๒๖๘ x $๑๐^{-๖}$ เซนติเมตร แต่ที่ซึ่งสัมประสิทธิ์ความคลาดทรงกลมมีค่าน้อยสุดคือ ๐.๒๖๓ x $๑๐^{-๖}$ เซนติเมตร โคมาจะมีค่าเป็น - ๐.๒๐๐ x $๑๐^{-๖}$ เซนติเมตร ดังนั้นจึงควรเลือกรูปร่างของเลนส์ ที่จะให้โคมาเป็นศูนย์ เพราะถึงแม้ค่าความคลาดทรงกลมจะเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งหลังก็เป็นค่าที่น้อยมาก แต่เลนส์จะไม่มีโคมา ณ ตำแหน่งนี้ (q_o = 1.015) นำค่า q_o มาคำนวนหารัศมีความโค้งได้

$$R_1 = \frac{2F(n - 1)}{q_0 + 1}$$

$$= \frac{2 \times 300 \ (1.6 - 1)}{1.015 + 1}$$

$$= 179 \quad \text{เซนติเมตร}$$

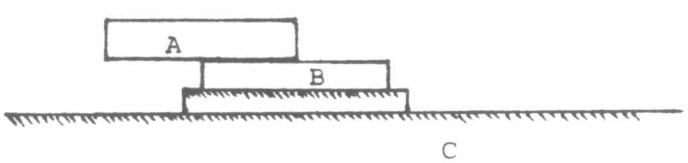
$$R_2 = \frac{2F(n - 1)}{q_o - 1}$$

$$= \frac{2 \times 300 \ (1.6 - 1)}{1.015 - 1}$$

$$= 24,000 \quad \text{เซนติเมตร}$$

๓. ทฤษฎีของการฝนเลนส์

๓.๑ ทิศทางการเคลื่อนที่ในการฝน



รูปที่ ๑๑ การฝนเลนส์

A และ B คือแก้วกลมสองแผ่นที่จะนำมาฝนเพื่อให้เป็นเลนส์ หรือกระจกตามแต่ต้องการ โดยแก้ว B ยึดให้แน่นบนแท่น C แก้วทั้งสองนี้จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ในการฝนนั้นใช้มือจับแก้ว A เคลื่อนที่ไปมาและระหว่างผิวสัมผัสของแก้วทั้งสองนั้นเราใส่ผงคาร์โบรันดัม (carborundum) ปนน้ำ

ทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับการฝนเลนส์ ซึ่งมีการเคลื่อนที่อยู่ ๓ แบบคือ

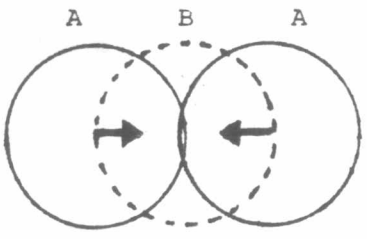
ขั้นที่ ๑ ฝนแก้ว A ไปข้างหน้าแล้วกลับมาข้างหลังในแนวเส้นตรงเดียวกัน เรียก ๑ สโตรก (stroke) และทำแบบนี้จะทำให้เกิดส่วนโค้ง (curve) ขึ้น ซึ่งจะฝนประมาณ ๘ - ๑๐ สโตรก

ขั้นที่ ๒ หมุนแก้ว A ประมาณ ๑๕ องศา ไปทางทิศทางตามเข็มนาฬิกา เมื่อฝนครบ ๘ - ๑๐ สโตรกแล้ว ทั้งนี้เพื่อให้เกิดส่วนโค้งตลอดหน้า

ขณะเดียวกัน ตัวผู้ฝนก็เดินรอบแท่นหมุนไป ๑๕ องศา ในทิศทวนเข็มนาฬิกา ทั้งนี้เพื่อให้แก้วถูกฝนรอบ ๆ เหมือนกันตลอดหน้า จากนั้นก็ฝนอีก ๘ - ๑๐ สโตรก ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ (Allyn, 1947)

๓.๒ ความยาวของสโตรก

ความยาวของสโตรกนี้ขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของแก้วทั้งสองที่นำมาฝน ซึ่งแบ่งได้ดังนี้



รูปที่ ๑๒ แสดงความยาวของสโตรก

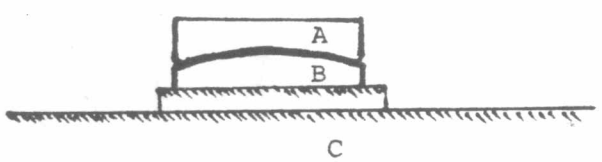
๑ สโตรก เต็มเส้นผ่าศูนย์กลาง (full-diameter stroke) หมายถึงขณะที่ฝนจุดศูนย์กลางของแก้ว A จะเคลื่อนที่ไปมาบนแก้ว B ยาวประมาณเส้นผ่าศูนย์กลางดังรูปที่ ๑๒ สโตรกนี้ เหมาะสมสำหรับการฝนอย่างหยาบในตอนแรกที่ใช้ผงคาร์โบรันดัมเบอร์ ๑๒๐

๒ สโตรกครึ่งเส้นผ่าศูนย์กลาง (one-half diameter stroke) จุดศูนย์กลางของแก้ว A เคลื่อนที่บนแก้ว B ไปเป็นระยะทางครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลาง

๓ สโตรกหนึ่งในสามของเส้นผ่าศูนย์กลาง (one-third diameter stroke) จุดศูนย์กลางของแก้ว A เคลื่อนที่บนแก้ว B เป็นระยะทางหนึ่งในสามของเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งสองสโตรกหลังนี้นิยมใช้ในการฝนละเอียด (Allyn, 1947)

๖.๓ การเกิดส่วนโค้งบนหน้าของแก้วที่ฝน

ระหว่างการฝนแผ่นแก้วทั้งสองนั้น ผงคาร์โบรันดัมและน้ำ ที่อยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง จะกลิ้งไปมาแล้วกระแทกกับผิวแก้ว แล้วตัวคาร์โบรันดัมจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ปะปนออกมากับน้ำมีลักษณะคล้ายโคลนรอบ ๆ แก้ว B ถ้าจะพิจารณาแรงกดต่อหน่วยพื้นที่ที่มีต่อแก้ว A และ B เราจะพบว่า แก้ว B นั้นจะมีแรงกดต่อพื้นที่และการสึกกร่อนมากขึ้นยังบริเวณขอบส่วนแก้ว A นั้นจะมากขึ้นยังบริเวณศูนย์กลาง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผิวของแก้วแผ่น A เป็นผิวเว้าส่วนแผ่นแก้ว B เป็นผิวนูน



รูปที่ ๑๓ แสดงการสึกกร่อนของแก้วที่นำมาฝน

ถ้าหากว่าเราเพิ่มสโตรกให้เร็วขึ้น จะมีผลเพียงแต่ทำให้ผงคาร์โบรันดัมแตกเร็วขึ้น แต่การสึกกร่อนของแก้วจะลดลง และถ้าหากเพิ่มแรงกดต่อพื้นที่จะทำให้ผงคาร์โบรันดัมแตกเร็วขึ้นและเพิ่มการสึกกร่อนด้วย

แต่ถ้าใส่ผงคาร์โบรันดัมมากเกินไปจะทำให้ผงนั้นรวมตัวและกลิ้งไปมาไม่สะดวก แล้วก็จะถูกผลักออกมารอบ ๆ แผ่นแก้ว B พร้อมกับน้ำและส่วนของคาร์โบรันดัมที่แตกแล้ว ซึ่งทั้งหมดนี้จะนำมาใช้อีกไม่ได้ผล (Allyn, 1947)

ถ้าหากเป็นการสร้างเลนส์รวงค์ ซึ่งทำจากแก้วคราวน์ (crown glass) และแก้วฟลินท์ (flint glass) โดยเลนส์ที่ทำจากแก้วคราวน์จะมีกำลังเป็นบวก ขณะที่ฝนนั้นแก้วคราวน์ (B) จะถูกยึดบนแท่น (C) ส่วนแก้วฟลินท์จะทำเป็นเลนส์ที่มีกำลังเป็นลบ จะวางอยู่บนแก้วคราวน์ ซึ่งใช้เป็นแก้วสำหรับฝนไปมา (A) เราเรียกแก้วที่เป็นตัวสำหรับฝนนี้ว่า ทูล (tool)

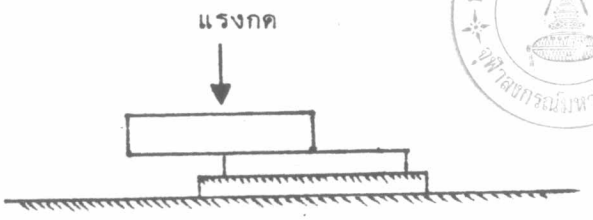
แต่ถ้าหากสร้างเลนส์เดี่ยวที่มีกำลังเป็นบวกจากแก้วคราวน์สำหรับทูลนั้น เราจะใช้กระจกธรรมดาตัดให้เป็นวงกลมโดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเลนส์ที่เราจะสร้าง

๔. การฝนเลนส์

การฝนเลนส์ซึ่งเราพอที่จะแบ่งขั้นตอนออกเป็น ๒ ขั้นตอนคือ

๔.๑ การฝนเลนส์อย่างหยาบ (rough grinding)

ขั้นแรกต้องยึดแก้ว บนแท่นฝนให้แน่นแล้วจึงเริ่มการฝนได้ ซึ่งจะใช้ผงคาร์โบรันดัมจากเบอร์ ๘๐, ในการฝนอย่างหยาบนี้จะต้องใช้สโตรกเต็มเส้นผ่าศูนย์กลาง เพื่อให้เกิดการสึกกร่อนได้เร็วขึ้น เมื่อความโค้งได้ใกล้ตามที่ต้องการ ก็ให้ใช้สโตรกครึ่งเส้นผ่าศูนย์กลาง ในขณะที่ฝนจะต้องออกแรงกดที่จุดศูนย์กลางของแผ่นแก้วอันบนและในการฝนทุกสโตรก จุดศูนย์กลางของแก้วแผ่นบนจะต้องเคลื่อนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของแก้วแผ่นล่างด้วย ขณะเดียวกัน ก็คอยเติมผงคาร์โบรันดัมด้วยเสมอ



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ๑๔ แสดงตำแหน่งออกแรงกด

จากนั้นเราสามารถตรวจความโค้งของแผ่นแก้ว ว่าได้ตามที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งเป็นการตรวจสอบอย่างคร่าว ๆ โดยใช้สเฟียร์โรมิเตอร์ (spherometer)

$$R = \frac{L^2}{6d} + \frac{d}{2} \qquad \text{----------(2.16)}$$

R - คือรัศมีความโค้ง

L - คือระยะระหว่างสองขานอกของสเฟียร์โรมิเตอร์

d - คือระยะที่โค้งต่ำลงกว่าระนาบ ซึ่งอ่านได้จากขากลางของสเฟียร์โรมิเตอร์ (Allyn, 1947)

๔.๒ การฝนเลนส์อย่างละเอียด (fine grinding)

การฝนละเอียดนี้เราเริ่มจากการใช้ผงคาร์โบรันดัมเบอร์ ๑๒๐, ๒๒๐, ๓๒๐ และ ๖๐๐ ตามลำดับ แต่ก่อนที่จะฝนเบอร์ ๑๒๐ นั้น ต้องใช้แว่นขยาย ตรวจดูหลุมบนแก้วนั้นว่าหลุมมีขนาดโตเท่ากันหมดหรือไม่ ทุกครั้งก่อนที่จะเปลี่ยนเบอร์ผงขัด ต้องตรวจสอบว่าหลุมบนแก้วมีขนาดเท่ากันเสียก่อน และเมื่อใช้เบอร์ ๒๒๐, ๓๒๐, และ ๖๐๐ ขนาดของหลุมก็จะเล็กลงไปตามลำดับ

ในการฝนอย่างละเอียดนี้ เราจะใช้สโตรกหนึ่งในสามเส้นผ่าศูนย์กลาง ทั้งนี้เพื่อให้ผิวโค้งทั้งสองของแก้วนั้นเป็นผิวของทรงกลมอย่างแท้จริง และสัมผัสกันทั่วทุกแห่ง

เพื่อให้รัศมีความโค้งของผิวแก้วทั้งสอง ยังมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวน ในระหว่างการฝน จะต้องมีการกลับตำแหน่งของแผ่นแก้ว คือแผ่นแก้วที่ยึดอยู่กับแท่นจะนำมาเป็นแผ่นแก้วสำหรับฝนด้านบน ส่วนแผ่นแก้วที่ฝนอยู่เดิมนั้นจะถูกยึดอยู่บนแท่นแทน ซึ่งถ้าทำเช่นนี้แล้ว จะทำให้รัศมีความโค้งของเลนส์เปลี่ยนไปจากที่ออกแบบไว้ประมาณ๔.๕ - ๑๒.๕ เซนติเมตร แต่ถ้าต้องการให้เปลี่ยนไป ๒.๕ - ๕.๐ เซนติเมตร ก็ควรจะใช้สโตรกที่สั้นลงกว่านี้

ก่อนที่จะเปลี่ยนเบอร์ผงคาร์โบรันดัมใหม่ ทุกครั้งจะต้อง ล้าง อุปกรณ์, แผ่นแก้ว และมือให้สะอาดทุกครั้ง มิฉะนั้นแล้วหากมีเม็ดผงคาร์โบรันดัม ขนาดโตปะปนเข้าไป เมื่อฝนแล้วจะทำให้เกิดรอยยาวและเป็นหลุมลึกบนแก้วที่ฝน ซึ่งจะทำให้เสียเวลาที่จะต้องมาฝนอย่างหยาบใหม่

๕. การขัดมัน (polishing)

เมื่อทำการฝนอย่างละเอียดเสร็จแล้ว ตรวจดูเป็นที่น่าพอใจแล้วจึงเตรียมการขัดมัน

การเตรียมการทำเป็นขั้น ๆ ดังนี้

- การเตรียม พิตช์ แลพ (pitch lap)
- การขัดมัน

๕.๑ การเตรียมพิตช์ แลพ

เตรียมทูล (tool) ที่ทำด้วยไม้หนาประมาณ ๒.๕ เซนติเมตร ตัดเป็นแผ่นกลมให้เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณเส้นผ่าศูนย์กลางเลนส์ที่สร้าง ล้างน้ำให้สะอาด ตัดกระดาษชนิดหนา กว้าง ๔.๐ เซนติเมตร ยาวเท่าเส้นรอบวงของทูล ชุบน้ำให้เปียกแล้วใช้ห้อมทูลไว้ดังรูปที่ ๑๕

ไม้ กระดาษแข็ง ไม้ที่หุ้มด้วยกระดาษแข็งชุบน้ำแล้ว

รูปที่ ๑๕ การเตรียมการสำหรับทำพิซต์แลพ

จากนั้นก็หลอมพิตซ์ในกระป๋องหรือภาชนะอื่น ๆ ในที่นี้พิตซ์เราใช้ยางมะตอย ขณะที่หลอมนี้จะต้องระวังจับกระป๋องให้แน่น คอยคนอยู่เสมอ เพื่อไม่ให้เกิดฟองขึ้น ในขณะที่หลอมซึ่งจะทำให้ได้พิตซ์มีคุณภาพไม่ดี พิตซ์ที่จะใช้ในการขัดมันนี้ จะต้องมีความอ่อนพอเหมาะ ซึ่งเราทดสอบได้ดังนี้ หยดยางมะตอยลงบนแผ่นกระจก ปล่อยไว้จนเย็น แล้วใช้เล็บหัวแม่มือกด ถ้าหากยางมะตอยนั้นแข็งเกินไป เมื่อใช้เล็บกดแล้วจะแตกออกเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย เพื่อลดความแข็งของยางมะตอย เราสามารถเติมน้ำมันสนลงไปทีละหยด แล้วทดสอบความแข็งของยางมะตอยอีก ทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งได้ยางมะตอยที่มีความอ่อนพอเหมาะ คือ เมื่อใช้เล็บหัวแม่มือกดแล้วยางมะตอยจะมีความหยุ่นตาม แล้วจึงแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

เมื่อได้ยางมะตอยหลอมตามที่ต้องการแล้ว ยกออกมาจากเตา ตั้งทิ้งไว้ครู่หนึ่ง แล้วจึงเทลงบนทูลที่เราเตรียมไว้แล้ว โดยเทจนกระทั่งยางมะตอยถึงขอบกระดาษที่เราหุ้มทูลไว้ สังเกตเมื่อผิวหน้ายางมะตอยเป็นมัน ให้แกะกระดาษออก ขณะที่ยางมะตอยกำลังอุ่นอยู่นั้น เราใช้ไม้กดให้เป็นร่องลึกบนแลพ (lap) โดยให้จุดศูนย์กลางอยู่ที่มุมหนึ่งของสี่เหลี่ยม เราจะได้พิตซ์แลพสำหรับการขัดเลนส์ ดังรูปที่ ๑๖

รูปที่ ๑๖ พิตช์แลพ

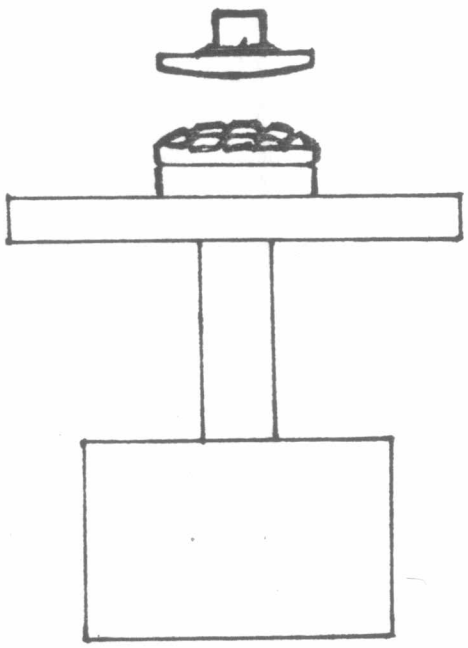
ต้องมีการตรวจสอบว่า ผิวของแก้วที่จะขัดมัน และพิตช์แลพมีการสัมผัสกันทุกจุด โดยการนำพิตช์แลพจุ่มลงในน้ำร้อน เพื่อให้ยางมะตอยมีการอ่อนตัว จากนั้นเราใช้แก้ววางบนพิตช์แลพ แล้วใช้น้ำหนักประมาณ ๕-๖ กิโลกรัมวางทับบนแก้วอีกที ทิ้งไว้ประมาณ ๒๐-๓๐ นาที เราก็จะได้พิตช์แลพและแก้วมีผิวสัมผัสกันทุกจุด

๕.๒ ทฤษฎีการขัดมัน

แก้วที่เราฝนละเอียดเสร็จแล้ว นำมาตรวจดูผิวหน้าของแก้วได้ โดยการใช้แว่นขยายส่องดู เราจะพบหน้าแก้วมีความขรุขระเป็นหลุมขนาดเล็กปรากฏทั่วบริเวณหน้าของแก้ว ถ้าหากว่าขนาดของหลุมโดยทั่วไปยังมีขนาดไม่เท่ากัน เราจะต้องทำการฝนละเอียดต่อไป จนกระทั่งปรากฏหลุมเหล่านั้นมีขนาดเท่ากัน ทฤษฎีของการขัดมันมีอยู่ว่า ถ้าหากทำให้แก้วส่วนที่ยื่นออกของผิวขรุขระนั้นร้อน อุณหภูมิประมาณ ๑,๐๐๐ องศาเซนติเกรด แก้วส่วนนี้ก็จะหลอมละลาย ปิดส่วนลึกของผิวแก้วได้ (Allyn, 1947)

ความร้อนที่ใช้ในการหลอมนี้เราได้จากแรงเสียดทานของผิวสัมผัสสองผิว ก็คือ ผิวหน้าแก้วและพิตช์ ซึ่งอาจเป็นยางมะตอยหรือขี้ผึ้ง แต่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองนี้ เกิดแรงเสียดทานไม่เพียงพอจึงใช้ผงบาร์เนสไซต์ (barnesite) เป็นผงสีน้ำตาลแกมแดงไม่แข็ง มีคุณสมบัติเมื่ออยู่บนผิวของพิตช์ จะทำให้เกิดแรงเสียดทานได้มาก โดยนำผงบาร์เนส ไซต์ มาละลายด้วยน้ำในขวด แล้วใช้พู่กันระบายบนหน้าของพิตช์แล้วใช้แก้วที่จะขัดวางทับด้านบน ก็พร้อมที่จะขัดได้

ขณะที่ขัดนั้นต้องออกแรงอย่างมาก และเลนส์ที่จะสร้างก็เป็นเลนส์บาง เพื่อความสะดวกในการขัด แก้วที่จะนำมาขัดนั้นต้องทำด้ามด้วยไม้ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ๓.๐ เซนติเมตร และยาวประมาณ ๕.๐ เซนติเมตร ยึดด้ามไม้กับแก้วนี้ โดยยางมะตอย



รูปที่ ๑๗ แสดงการขัดมัน

๕.๓ วิธีการขัดมัน

สิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งก่อนลงมือขัด จะต้องล้างอุปกรณ์ต่าง ๆให้สะอาด มิฉะนั้นแล้ว ถ้าหากมีผงคาร์โบรันดัมอยู่ระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง จะทำให้เกิดรอยเป็นทางยาวบนหน้าของเลนส์ การใส่ผงบาร์เนสไซต์ บนพิตช์แลพ ก็จะต้องให้สม่ำเสมอทั่วหน้า จากนั้นจึงวางแก้วที่จะขัดมันลงบนพิตช์แลพ แล้วก็เริ่มขัดมันได้

การขัดมันนี้เราใช้สโตรกหนึ่งในสามเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อให้หน้าเลนส์มีความใสทั่วหน้าพร้อม ๆ กัน หรืออาจจะใช้สโตรกซิกแซก (W-stroke) ก็ได้ โดยดันแก้วไปมาแบบซิกแซกให้ขอบของแก้วยื่นออกมาครึ่งหนึ่งของทุก ๆ ข้างของพิตช์แลพ ทางเดินของจุดศูนย์

กลางของแก้วแสดงโดยเส้นประดังรูปที่ ๑๘ (Allyn, 1947)

รูปที่ ๑๘ แสดงการใช้สโตรกซิกแซก

การเคลื่อนที่มี ๓ ลักษณะเหมือนตอนฝนคือขัดประมาณ ๘-๑๐ สโตรก หมุนแก้วในทิศตามเข็มนาฬิกา ประมาณ ๑๕ องศา และขณะเดียวกันตัวผู้ขัดก็เดินไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา ๑๕ องศาเช่นกัน แล้วก็ขัด ๘-๑๐ สโตรกต่อไปอีก

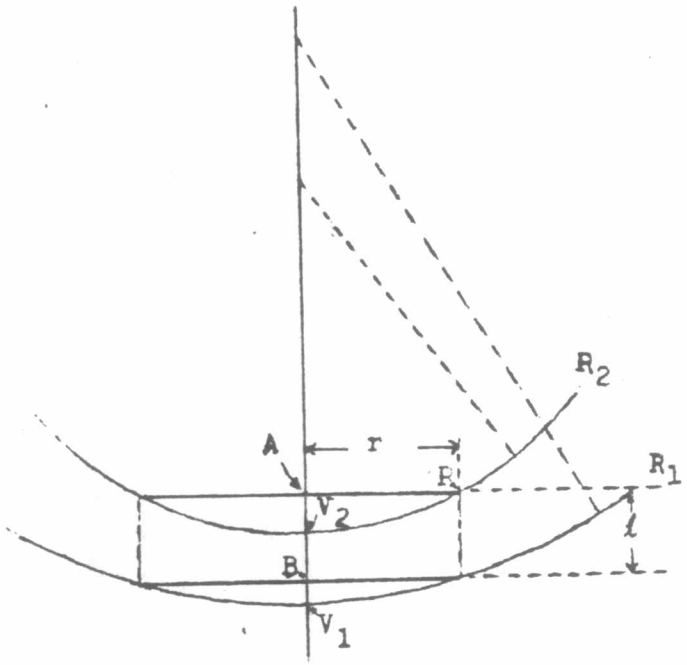
การตรวจสอบว่าการขัดมันเกิดขึ้นทั่วหน้าของแผ่นแก้ว กระทำโดยใช้แว่นขยายส่องดูหลุม เราจะพบว่าบริเวณขอบ ๆ ของแผ่นแก้วยังไม่เป็นผิวขัดมันที่สมบูรณ์ดี ปัญหาเช่นนี้แก้ได้โดยการลดสโตรกให้สั้นลง แล้วขัดต่อไป ก็จะได้ผิวขัดมันที่สมบูรณ์ และในทำนองเดียวกัน สำหรับการขัดมันอีกหน้าหนึ่งของแก้ว จากนั้นเราก็จะได้เลนส์ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปทดสอบคุณภาพได้

๖. การทดสอบคุณภาพเลนส์ที่สร้างขึ้น

ทดสอบคุณภาพเลนส์เพื่อทราบคุณภาพและรูปร่างของเลนส์ที่สร้างขึ้น

๖.๑ การทดลองหาทางยาวโฟกัสโดยวิธีวงแหวนนิวตัน

จากการทดลองนี้ เราสามารถหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์แต่ละผิวได้ โดยอาศัยหลักการของการแทรกสอดของแสงในแผ่นฟิล์มบาง เช่น เมื่อนำเอาผิวทรงกลมกับผิวทรงกลมหรือผิวทรงกลมกับผิวระนาบสองผิวมาวางประกบกัน ในระหว่างผิวทั้งสองนั้นจะเกิดเป็นฟิล์มบางของอากาศ เมื่อให้แสงสีเดียวผ่านเข้าไปจะทำให้เกิดการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากผิวของฟิล์มบาง ผลจากการแทรกสอดนี้จะทำให้เกิดเป็นริ้วของการแทรกสอดเป็นวงแหวน โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งจุดสัมผัสของผิวทั้งสอง วงแหวนนี้เรียกว่าวงแหวนของนิวตัน (Valasek, 1949)



รูปที่ ๑๙ การหารัศมีความโค้งของผิว โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

พิจารณาจากรูปที่ ๑๙

R_1 เป็นรัศมีความโค้งของผิวล่าง

R_2 เป็นรัศมีความโค้งของผิวบน

ℓ เป็นความหนาของฟิล์มบางอากาศ

r เป็นรัศมีของวงแหวนใด ๆ

จากรูปที่ ๑๙ จะได้ว่า

$$\ell = AB = AV_2 + V_2V_1 - BV_1 \qquad \text{----------(2.17)}$$

จากผิวโค้งด้านบน

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

แต่ $AV_2 < 2R_2$

$$\therefore r^2 = 2R_2 . AV_2$$

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

สำหรับผิวโค้งผิวล่าง ก็หาได้ทำนองเดียวกัน

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

แทนค่า AV_2 , BV_1 ในสมการ (๒.๑๗)

$$\therefore \quad \ell = \frac{r^2}{2}\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + V_2V_1 \qquad \text{----------(2.18)}$$

r_m เป็นรัศมีวงแหวนนิวตันใด ๆ สำหรับวงมืดจากหลักการแทรกสอดชัดกันของฟิล์มบางอากาศจะได้

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

$$m = 1, 2, 3.....,(\text{ค่าอันดับของการแทรกสอด})$$

แทนค่า ℓ ในสมการ (๒.๑๘)

$$r_m^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)\cos\theta + 2V_2V_1\cos\theta = m\lambda$$

เมื่อแสงตกตั้งฉาก มุมตกกระทบ $\theta = 0$

$$\therefore \quad r_m^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + 2V_2V_1 = m\lambda \qquad \text{----------(2.19)}$$

จากสมการ (๒.๑๙) ถ้าพิจารณาวงมืดอันดับ m_i และ m_j

$$r_{m_i}^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + 2V_1V_2 = m_i\lambda \qquad \text{----------(2.20)}$$

$$r_{m_j}^2\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) + 2V_1V_2 = m_j\lambda \qquad \text{----------(2.21)}$$

i 17700061

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการ (๒.๒๐)-สมการ (๒.๒๑) และ d_{m_i} , d_{m_j} เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางวงแหวนนิวตัน อันดับ i, j ตามลำดับ จะได้

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{4\lambda(m_i - m_j)}{(d^2_{m_i} - d^2_{m_j})} \qquad \text{----------(2.22)}$$

พิจารณาจากสมการ (๒.๒๒) ถ้า นำค่า d_m^2 มาเขียนกราฟเทียบ

กับค่า m แล้วจะได้กราฟเส้นตรงซึ่งค่าของ

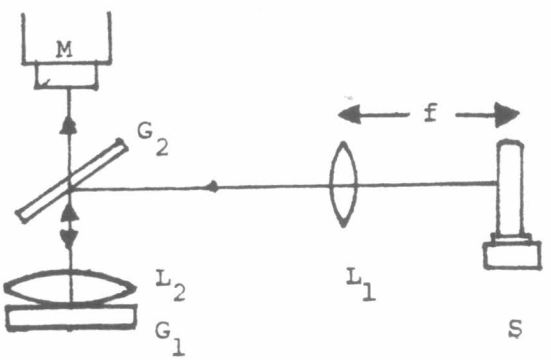
ความชัน $= \dfrac{m_i - m_j}{d^2_{m_i} - d^2_{m_j}}$

$\tan \beta = \dfrac{m_i - m_j}{d^2_{m_i} - d^2_{m_j}}$

จากสมการ (๒.๒๒)

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda \tan \beta \qquad \text{----------(2.23)}$$

๖.๑.๑ การจัดเครื่องมือเพื่อให้เกิดวงแหวนนิวตัน



รูปที่ ๒๐ การทดลองวงแหวนนิวตัน

รูปที่ ๒๐ เป็นการจัดเครื่องมือเพื่อทำให้เกิดวงแหวนนิวตัน ซึ่งประกอบด้วย

G_1 คือแผ่นแก้วซึ่งวางประกบด้านล่างของเลนส์
(กระจกผิวเรียบซึ่งถือว่า ทำให้ค่า $R_1 = \alpha$)

L_2 คือ เลนส์ที่นำมาทดสอบคุณภาพ

L_1 คือ เลนส์คอลลิเมเตอร์

f คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ คอลลิเมเตอร์

G_2 คือ แผ่นกระจกใส เอียงทำมุม ๔๕ องศากับ แนวระดับ

M คือ กล้องจุลทัศน์ชนิดเลื่อนได้

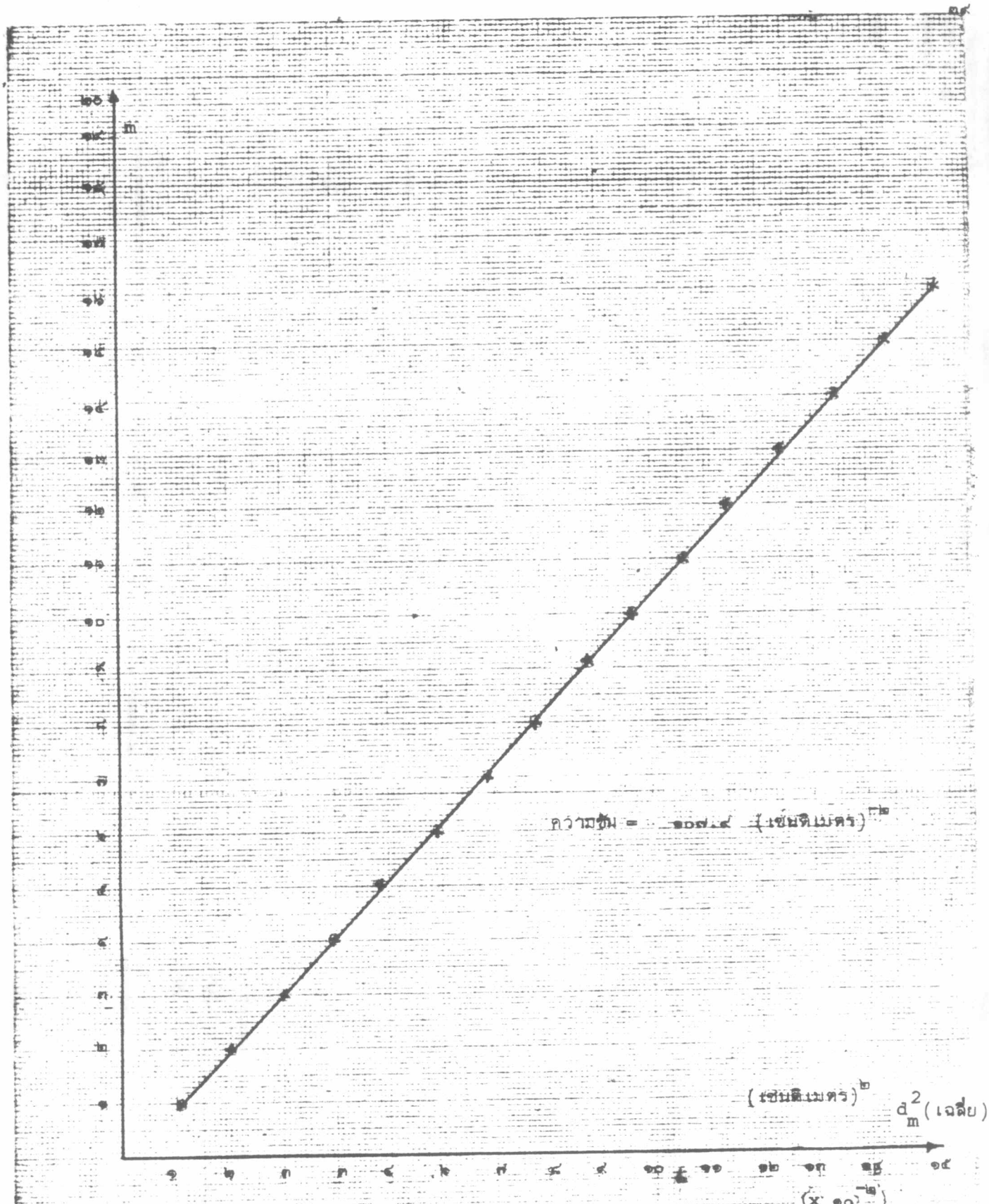
S คือ หลอดโซเดี่ยมซึ่งให้แสงสีเหลือง ซึ่งมีความยาวคลื่น ๕๘๙๓ อังสตรอม

อาศัยกล้องจุลทัศน์ชนิดเลื่อนได้ หาค่าเส้นผ่าศูนย์กลางวงมืดของวงแหวนนิวตันที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงจากผิวทั้งสองของฟิล์มบางอากาศ โดยวัดทั้งหมด ๓ ชุด ชุดละ ๓๐ วง

การวัดแต่ละชุด หมุนเลนส์ไปจากเดิมประมาณ ๖๐ องศา เพื่อจะหาเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตัน ๓ แนว เนื่องจากผิวโค้งนี้ไม่ได้เป็นผิวของทรงกลมอย่างแท้จริง ค่าที่วัดได้จึงแตกต่างกัน ดังนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยกำลังสองของเส้นผ่าศูนย์กลางมาเขียนกราฟกับค่าอันดับของการแทรกสอดได้ดังแสดงในรูปที่ ๒๑ และรูปที่ ๒๒

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
๑	๐.๑๑๒๑	๐.๑๐๓๕	๐.๑๒๑๔	๐.๐๑๒๖๐	๐.๐๑๐๗๐	๐.๐๑๒๔๐	๐.๐๑๑๔๐
๒	๐.๑๔๙๐	๐.๑๓๔๖	๐.๑๔๕๑	๐.๐๒๒๐๐	๐.๐๑๘๒๐	๐.๐๒๑๑๐	๐.๐๒๐๔๐
๓	๐.๑๗๗๐	๐.๑๖๗๘	๐.๑๗๔๖	๐.๐๓๑๓๐	๐.๐๒๘๒๐	๐.๐๓๐๕๐	๐.๐๓๐๐๐
๔	๐.๒๐๑๑	๐.๑๙๕๖	๐.๑๙๘๙	๐.๐๔๐๔๐	๐.๐๓๘๒๐	๐.๐๓๙๖๐	๐.๐๓๙๔๐
๕	๐.๒๒๓๙	๐.๒๑๔๗	๐.๒๒๐๐	๐.๐๕๐๑๐	๐.๐๔๖๑๐	๐.๐๔๘๔๐	๐.๐๔๘๒๐
๖	๐.๒๔๓๕	๐.๒๓๕๐	๐.๒๔๘๘	๐.๐๕๙๓๐	๐.๐๕๕๒๐	๐.๐๖๑๙๐	๐.๐๕๘๘๐
๗	๐.๒๖๒๘	๐.๒๕๔๗	๐.๒๖๙๒	๐.๐๖๙๑๐	๐.๐๖๔๙๐	๐.๐๗๒๕๐	๐.๐๖๘๘๐
๘	๐.๒๘๐๖	๐.๒๗๓๑	๐.๒๘๕๘	๐.๐๗๘๗๐	๐.๐๗๔๖๐	๐.๐๘๑๗๐	๐.๐๗๘๓๐
๙	๐.๒๙๔๓	๐.๒๙๐๘	๐.๓๐๐๐	๐.๐๘๖๖๐	๐.๐๘๔๖๐	๐.๐๙๐๐๐	๐.๐๘๗๑๐
๑๐	๐.๓๐๘๖	๐.๓๐๖๔	๐.๓๑๕๐	๐.๐๙๕๒๐	๐.๐๙๓๙๐	๐.๐๙๙๒๐	๐.๐๙๖๑๐
๑๑	๐.๓๒๑๒	๐.๓๒๐๖	๐.๓๓๖๐	๐.๑๐๓๒	๐.๑๐๒๙	๐.๑๑๒๙	๐.๑๐๖๓
๑๒	๐.๓๕๕๘	๐.๓๓๖๒	๐.๓๔๐๑	๐.๑๑๒๘	๐.๑๑๓๐	๐.๑๑๕๗	๐.๑๑๓๘
๑๓	๐.๓๕๐๙	๐.๓๕๐๐	๐.๓๕๗๖	๐.๑๒๓๑	๐.๑๒๒๕	๐.๑๒๗๙	๐.๑๒๔๕
๑๔	๐.๓๖๔๑	๐.๓๖๓๐	๐.๓๖๙๔	๐.๑๓๒๖	๐.๑๓๑๘	๐.๑๓๖๔	๐.๑๓๓๖
๑๕	๐.๓๗๘๘	๐.๓๗๘๐	๐.๓๘๓๑	๐.๑๔๓๕	๐.๑๔๒๙	๐.๑๔๖๘	๐.๑๔๔๔
๑๖	๐.๓๘๙๖	๐.๓๘๙๓	๐.๓๙๓๘	๐.๑๕๑๘	๐.๑๕๑๕	๐.๑๕๕๑	๐.๑๕๒๘
๑๗	๐.๔๐๐๑	๐.๓๙๘๑	๐.๔๐๔๕	๐.๑๖๐๐	๐.๑๕๙๑	๐.๑๖๓๖	๐.๑๖๐๙
๑๘	๐.๔๑๑๒	๐.๔๐๙๘	๐.๔๑๗๓	๐.๑๖๙๐	๐.๑๖๗๙	๐.๑๗๔๑	๐.๑๗๐๓
๑๙	๐.๔๒๘๓	๐.๔๑๘๕	๐.๔๒๔๕	๐.๑๘๓๔	๐.๑๗๕๑	๐.๑๘๐๒	๐.๑๗๙๖
๒๐	๐.๔๓๓๕	๐.๔๒๙๕	๐.๔๓๘๕	๐.๑๘๗๙	๐.๑๘๔๕	๐.๑๙๒๓	๐.๑๘๘๒
๒๑	๐.๔๔๕๑	๐.๔๔๐๖	๐.๔๔๘๕	๐.๑๙๘๑	๐.๑๙๔๑	๐.๒๐๑๑	๐.๑๙๖๙
๒๒	๐.๔๕๖๒	๐.๔๕๑๗	๐.๔๕๘๙	๐.๒๐๘๑	๐.๒๐๔๐	๐.๒๑๐๖	๐.๒๐๗๖
๒๓	๐.๔๖๖๔	๐.๔๖๒๑	๐.๔๖๘๒	๐.๒๑๗๕	๐.๒๑๓๕	๐.๒๑๙๒	๐.๒๑๖๗
๒๔	๐.๔๗๖๖	๐.๔๗๑๙	๐.๔๗๖๙	๐.๒๒๗๑	๐.๒๒๖๗	๐.๒๒๗๔	๐.๒๒๗๐
๒๕	๐.๔๘๔๖	๐.๔๘๑๙	๐.๔๘๕๐	๐.๒๓๔๘	๐.๒๓๒๒	๐.๒๓๕๒	๐.๒๓๔๑
๒๖	๐.๔๙๓๔	๐.๔๙๑๙	๐.๔๙๔๙	๐.๒๔๓๔	๐.๒๔๑๙	๐.๒๔๔๙	๐.๒๔๓๔
๒๗	๐.๕๐๒๓	๐.๕๐๑๓	๐.๕๐๔๓	๐.๒๕๒๓	๐.๒๕๑๓	๐.๒๕๔๓	๐.๒๕๒๖
๒๘	๐.๕๑๐๘	๐.๕๑๑๙	๐.๕๑๒๑	๐.๒๖๐๙	๐.๒๖๒๐	๐.๒๖๒๒	๐.๒๖๑๗
๒๙	๐.๕๑๙๙	๐.๕๒๐๘	๐.๕๒๑๐	๐.๒๗๐๓	๐.๒๗๑๒	๐.๒๗๑๔	๐.๒๗๑๐
๓๐	๐.๕๒๗๒	๐.๕๓๐๒	๐.๕๓๑๒	๐.๒๗๗๙	๐.๒๘๑๑	๐.๒๘๒๒	๐.๒๘๐๔

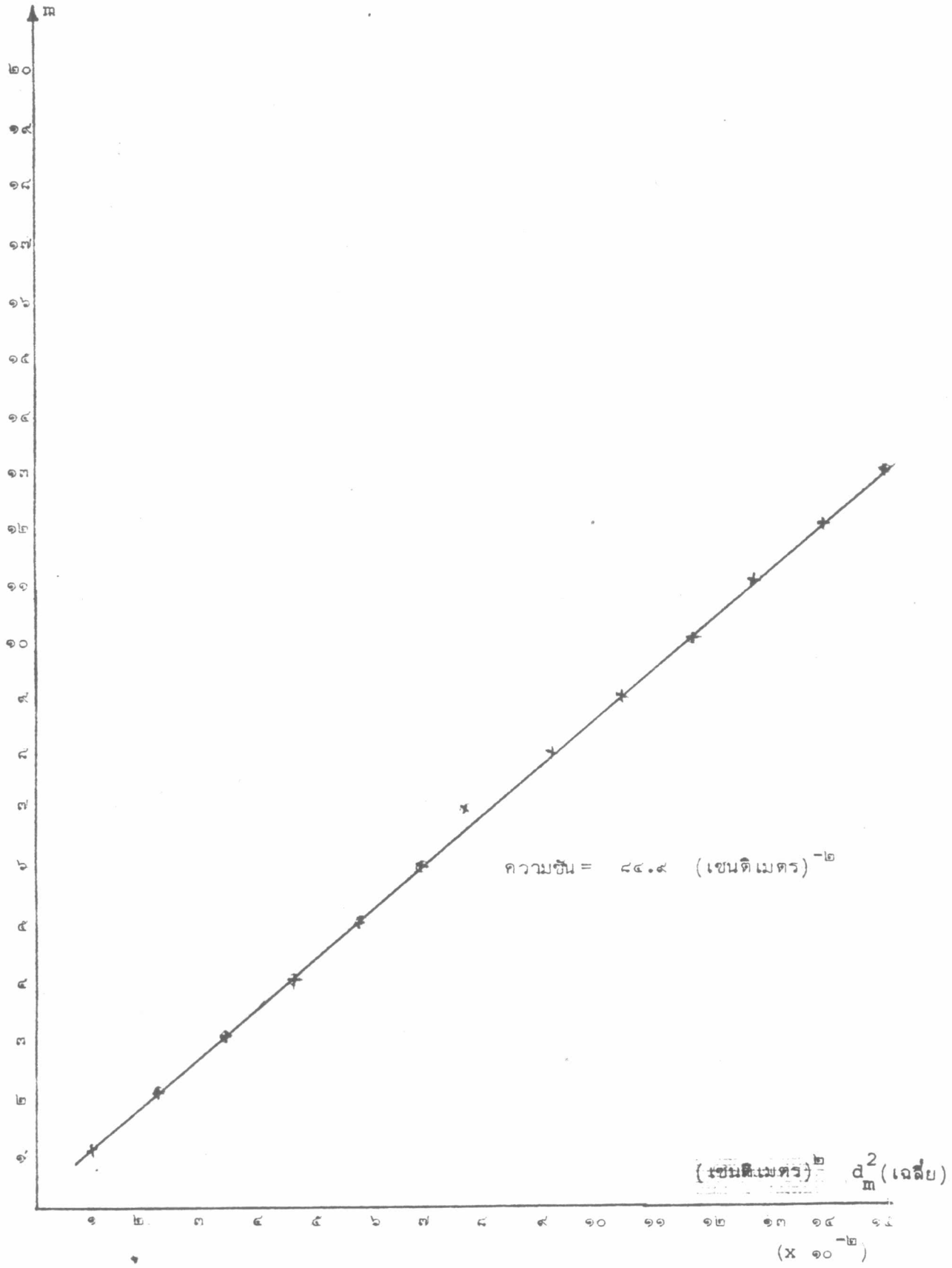
ตารางที่ ๒ แสดงค่าความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวคัลของผิวโค้งที่ ๑



รูปที่ ๒๑ กราฟแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ ๑ ของเลนส์หนีจากล้อง โดยวิธีวงแหวนนิวตัน

m	$d_m(1)$ เซนติเมตร	$d_m(2)$ เซนติเมตร	$d_m(3)$ เซนติเมตร	$d_m^2(1)$ เซนติเมตร	$d_m^2(2)$ เซนติเมตร	$d_m^2(3)$ เซนติเมตร	d_m^2(เฉลี่ย) เซนติเมตร
๑	๐.๐๙๗๓๐	๐.๑๐๑๐	๐.๑๑๑๘	๐.๐๐๙๕๐๐	๐.๐๑๐๒	๐.๐๑๒๕๐	๐.๐๑๐๗๐
๒	๐.๑๔๖๓	๐.๑๕๐๓	๐.๑๕๒๖	๐.๐๒๑๔๐	๐.๐๒๒๖	๐.๐๒๓๓๐	๐.๐๒๒๔๐
๓	๐.๑๘๐๖	๐.๑๘๖๕	๐.๑๘๖๗	๐.๐๓๒๖๐	๐.๐๓๔๘	๐.๐๓๔๘๐	๐.๐๓๔๑๐
๔	๐.๒๑๓๙	๐.๒๑๓๒	๐.๒๑๗๔	๐.๐๔๕๘๐	๐.๐๔๕๕	๐.๐๔๗๓๐	๐.๐๔๖๒๐
๕	๐.๒๔๑๒	๐.๒๔๐๖	๐.๒๔๐๖	๐.๐๕๘๒๐	๐.๐๕๗๙	๐.๐๕๗๙๐	๐.๐๕๘๐๐
๖	๐.๒๖๔๒	๐.๒๖๒๔	๐.๒๖๓๑	๐.๐๖๙๘๐	๐.๐๖๘๙	๐.๐๖๙๒๐	๐.๐๖๙๓๐
๗	๐.๒๘๔๙	๐.๒๘๕๐	๐.๒๘๔๓	๐.๐๘๑๒๐	๐.๐๘๑๒	๐.๐๖๗๙๐	๐.๐๗๖๘๐
๘	๐.๓๐๔๓	๐.๓๐๓๓	๐.๓๐๔๔	๐.๐๙๒๖๐	๐.๐๙๓๒	๐.๐๙๒๖๐	๐.๐๙๒๘๐
๙	๐.๓๒๒๕	๐.๓๒๔๑	๐.๓๒๘๙	๐.๑๐๔๐	๐.๑๐๕๐	๐.๑๐๘๒	๐.๑๐๕๗
๑๐	๐.๓๓๙๐	๐.๓๔๕๐	๐.๓๔๗๓	๐.๑๑๔๙	๐.๑๑๙๐	๐.๑๒๐๖	๐.๑๑๘๒
๑๑	๐.๓๕๕๓	๐.๓๖๐๔	๐.๓๖๑๗	๐.๑๒๖๒	๐.๑๒๙๙	๐.๑๓๐๘	๐.๑๒๙๐
๑๒	๐.๓๗๕๑	๐.๓๗๕๖	๐.๓๗๗๙	๐.๑๔๐๗	๐.๑๔๐๓	๐.๑๔๒๘	๐.๑๔๑๒
๑๓	๐.๓๘๖๖	๐.๓๙๐๖	๐.๓๙๒๖	๐.๑๔๙๕	๐.๑๕๒๖	๐.๑๕๔๑	๐.๑๕๒๑
๑๔	๐.๔๐๕	๐.๔๐๓๔	๐.๔๐๑๓	๐.๑๖๔๐	๐.๑๖๒๗	๐.๑๖๑๐	๐.๑๖๒๖
๑๕	๐.๔๒๐๕	๐.๔๑๘๖	๐.๔๑๕๖	๐.๑๗๖๘	๐.๑๗๕๒	๐.๑๗๒๗	๐.๑๗๔๙
๑๖	๐.๔๓๓๓	๐.๔๓๑๑	๐.๔๓๘๗	๐.๑๘๗๗	๐.๑๘๕๘	๐.๑๙๒๕	๐.๑๘๘๗
๑๗	๐.๔๔๗	๐.๔๔๔๔	๐.๔๕๒๐	๐.๑๙๙๘	๐.๑๙๗๕	๐.๒๐๔๓	๐.๒๐๐๕
๑๘	๐.๔๖๐๓	๐.๔๕๖๓	๐.๔๖๓๒	๐.๒๑๑๙	๐.๒๐๘๒	๐.๒๑๔๖	๐.๒๑๑๖
๑๙	๐.๔๗๑๓	๐.๔๗๐๘	๐.๔๗๔๙	๐.๒๒๒๑	๐.๒๒๑๗	๐.๒๒๕๕	๐.๒๒๓๑
๒๐	๐.๔๘๑๓	๐.๔๘๙๘	๐.๔๘๖๓	๐.๒๓๑๖	๐.๒๓๙๙	๐.๒๓๖๕	๐.๒๓๖๐
๒๑	๐.๔๙๔๗	๐.๔๙๖๑	๐.๔๙๘๙	๐.๒๔๔๗	๐.๒๔๖๑	๐.๒๔๘๙	๐.๒๔๗๓
๒๒	๐.๕๐๖๓	๐.๕๐๖๐	๐.๕๑๒๓	๐.๒๕๖๓	๐.๒๕๖๐	๐.๒๖๒๔	๐.๒๕๙๖
๒๓	๐.๕๑๘๒	๐.๕๑๘๐	๐.๕๒๑๘	๐.๒๖๘๕	๐.๒๖๘๓	๐.๒๗๒๒	๐.๒๖๙๗
๒๔	๐.๕๒๘๘	๐.๕๓๓๕	๐.๕๒๘๔	๐.๒๗๙๖	๐.๒๘๔๖	๐.๒๗๙๒	๐.๒๘๑๑
๒๕	๐.๕๔๑๒	๐.๕๔๒๗	๐.๕๔๓๔	๐.๒๙๒๙	๐.๒๙๔๕	๐.๒๙๕๓	๐.๒๙๔๒
๒๖	๐.๕๔๘๙	๐.๕๕๓๔	๐.๕๕๑๕	๐.๓๐๑๓	๐.๓๐๖๒	๐.๓๐๔๒	๐.๓๐๓๙
๒๗	๐.๕๕๘๒	๐.๕๖๓๘	๐.๕๖๒๙	๐.๓๑๑๖	๐.๓๑๗๙	๐.๓๑๖๘	๐.๓๑๕๔
๒๘	๐.๕๖๘๔	๐.๕๗๓๖	๐.๕๗๓๘	๐.๓๒๓๑	๐.๓๒๙๐	๐.๓๒๙๒	๐.๓๒๗๑
๒๙	๐.๕๗๘๙	๐.๕๘๗๓	๐.๕๘๓๐	๐.๓๓๕๑	๐.๓๔๔๙	๐.๓๓๙๙	๐.๓๓๙๙
๓๐	๐.๕๘๙๕	๐.๕๙๔๔	๐.๕๙๓๕	๐.๓๔๗๕	๐.๓๕๓๓	๐.๓๕๒๒	๐.๓๕๑๐

ตารางที่ ๓ แสดงค่าความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนนิวตัน ของผิวโค้งที่ ๒



รูปที่ ๒๒ กราฟแสดงการหารัศมีความโค้งของผิวที่ ๒ ของเลนส์หน้ากล้องโดยวิธีวงแหวนนิวตัน

เมื่อทราบค่าความชันของกราฟ (tan β) จะคำนวนหารัศมีความโค้งของแต่ละผิวได้จาก สมการ (๒.๒๓)

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = 4\lambda \tan\beta$$

การทดลองแต่ละครั้ง ใช้เลนส์นูนที่ทราบรัศมีความโค้งวางไว้บน รัศมีความโค้งที่ทราบแล้วมีค่า ๔๙.๔๐ เซนติเมตร ซึ่งทราบได้จากการทดลองโดยวิธีวงแหวนนิวตัน

สำหรับผิวโค้งผิวที่ ๑ ของเลนส์ที่นำมาทดสอบ

λ คือความยาวคลื่นของแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม

มีค่า = ๕๘๙.๓ นาโนเมตร

λ = ๕.๘๙๓ x $๑๐^{-๕}$ เซนติเมตร

tan β หรือ ความชันมีค่า

= ๑๐๗.๙๔ (เซนติเมตร)$^{-๒}$

$$\therefore \frac{๑}{๔๙.๔๐} - \frac{๑}{R_1} = ๔ \times ๕.๘๙๓ \times ๑๐^{-๕} \times ๑๐๗.๙๔$$

$$R_1 = -๑๘๖.๕๐ \text{ เซนติเมตร (ผิวนูน)}$$

ทำนองเดียวกันจากกราฟ การหารัศมีความโค้งของผิวที่ ๒ ของเลนส์ที่มีความชัน = ๘๔.๙๕ (เซนติเมตร)$^{-๒}$ สามารถคำนวนจากสูตรเดียวกัน ได้รัศมีความโค้ง

$$\frac{๑}{๔๙.๔๐} - \frac{๑}{R_2} = ๔ \times ๕.๘๙๓ \times ๑๐^{-๕} \times ๘๔.๙๕$$

$$R_2 = +๑๐๗๘.๗ \text{ เซนติเมตร (ผิวเว้า)}$$

เลนส์ที่สร้างนี้มีความหนา ๑ เซนติเมตรเมื่อเทียบกับทางยาวโฟกัสที่ออกแบบไว้ ๓๐๐ เซนติเมตร จึงได้ว่าเป็นเลนส์บาง เราสามารถคำนวนหาทางยาวโฟกัส โดยใช้สูตรเลนส์บางได้ เมื่อทราบรัศมีความโค้งของแต่ละผิว จากสูตร

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

f = ทางยาวโฟกัสของเลนส์บาง

n = ดรรชนีหักเหของแก้ว

R_1, R_2 = รัศมีความโค้งของเลนส์ผิวที่ ๑ และ ๒ ตามลำดับ

$$\therefore \frac{1}{f} = (1.60 - 1)\left(\frac{1}{+186.5} - \frac{1}{(-10778.7)}\right)$$

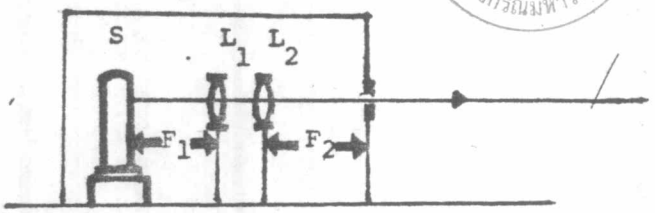
f = 310.8 เซนติเมตร

๖.๒ การทดสอบด้วยดาว (star test)

การทดสอบด้วยดาว เป็นการทดสอบคุณภาพเลนส์ที่นิยมอีกแบบหนึ่งโดยวางแหล่งกำเนิดแสงเป็นจุด (artificial star) ห่างจากเลนส์ที่จะทดสอบอย่างน้อยเป็นระยะทาง ๔๐ เท่าทางยาวโฟกัสของเลนส์ เนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของแสง (diffraction) ที่ช่องเปิดรูปวงกลม ภาพของจุดกำเนิดแสงจะเป็นจานกลม แอรี (Airy's disk) ซึ่งเป็นวงสว่างกลมอยู่ตรงกลาง แล้วสลับด้วยวงมืดวงสว่างโดยวงสว่างวงนอก ๆ ความเข้มจะลดลงอย่างรวดเร็ว

แหล่งกำเนิดแสงที่ทำขึ้นนั้น ประกอบด้วย หลอดโซเดียม ซึ่งให้แสงสีเหลือง มีความยาวคลื่น ๕๘๙๓ อังสตรอม และแผ่นอลูมิเนียม (aluminium foil) ที่เจาะรูด้วยปลายเข็มขนาดเล็กติดอยู่บนกล่องที่เจาะรู ระหว่างแผ่นอลูมิเนียมและหลอดโซเดียม มีเลนส์นูนทางยาวโฟกัสสั้นสองตัววางอยู่ดังรูปที่ ๒๓

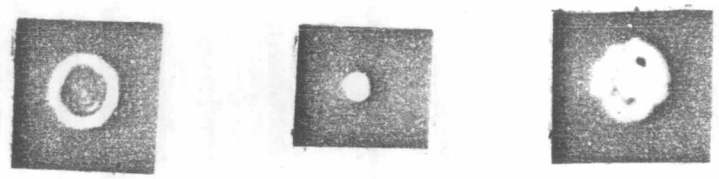
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



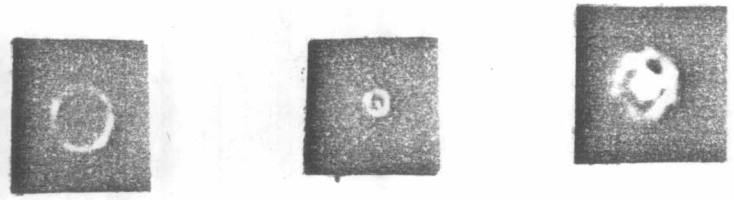
รูปที่ ๒๓ แหล่งกำเนิดของแสงของการทดสอบด้วยดาว

ถ้าหากเลนส์ไม่มีความคลาดทรงกลมอยู่เลย ภาพภายในจุดโฟกัสและนอกโฟกัสจะเหมือนกัน แต่ถ้าเลนส์มีความคลาดทรงกลมชนิดแก้ขาด จะได้ภาพ ภายในโฟกัสชัดเจนกว่าภาพนอกโฟกัส แต่ถ้าเลนส์มีความคลาดทรงกลมชนิดแก้เกิน ภาพภายนอกโฟกัส จะชัดเจนกว่าภาพภายในโฟกัส

จัดให้แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดผ่านเลนส์แล้วบันทึกภาพไว้ ๒ ชุดโดยบันทึกที่ตำแหน่งในโฟกัส ตำแหน่งโฟกัสและนอกโฟกัสตามลำดับ โดยใช้โคดาลิธแพนฟิล์ม (Kodalith Plan Film) ให้ฟิล์มรับภาพเป็นเวลา ๑๕ และ ๕ นาที ล้างด้วยน้ำยาดี ๑๙ (D-19) อัตขยายภาพประมาณ ๖ เท่า แสดงดังรูปที่ ๒๔



รับแสง ๑๕ นาที



รับแสง ๕ นาที

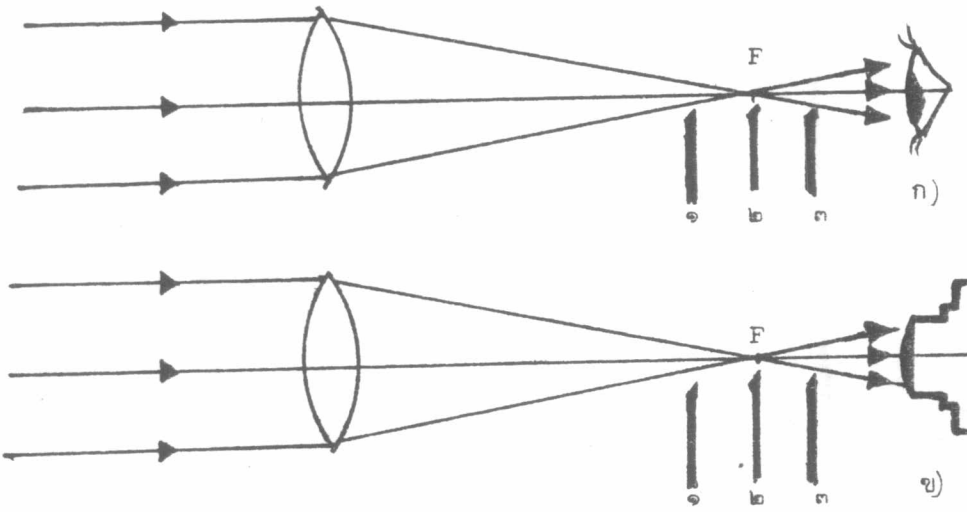
ในโฟกัส โฟกัส นอกโฟกัส

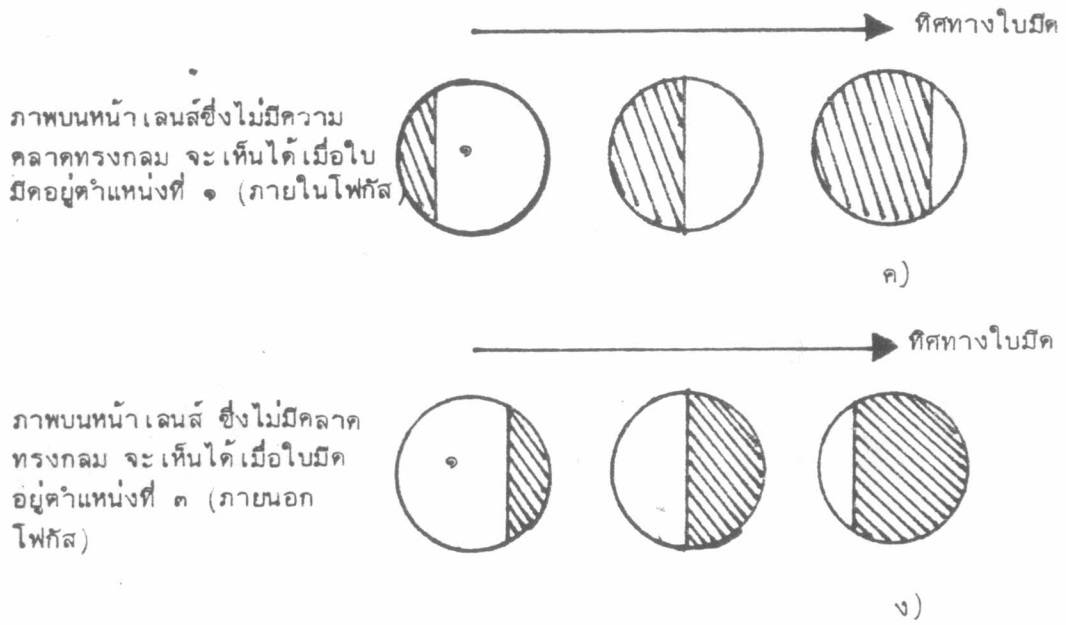
รูปที่ ๒๔ ภาพถ่ายที่ได้จากการทดสอบด้วยดาว

พิจารณาจากรูปที่ ๒๔ จะเห็นว่าภาพนอกโฟกัสมีความชัดเจนมากกว่าภาพในโฟกัส จึงแสดงว่าเลนส์หน้ากล้องมีความคลาดทรงกลมแบบแก้เกิน

๖.๓ การทดสอบด้วยคมมีด (knife-edge test)

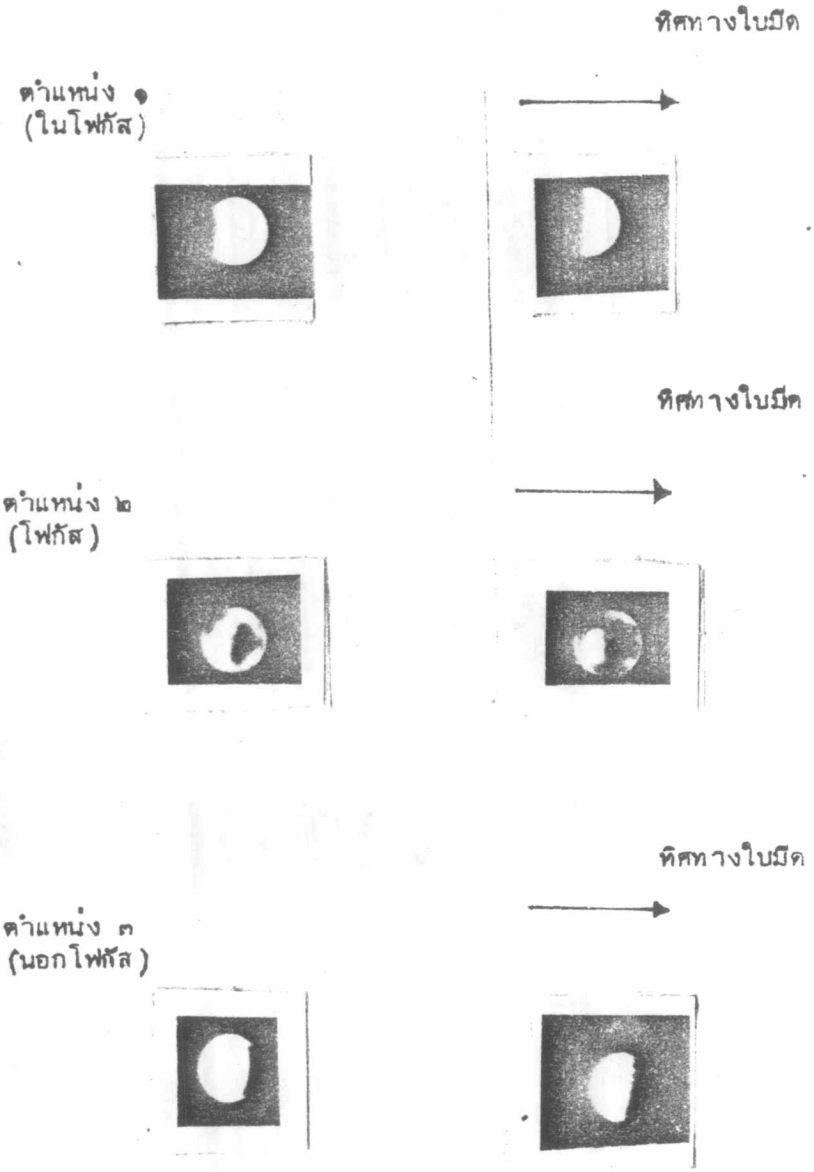
แหล่งกำเนิดแสงเป็นจุด เช่นเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงการทดสอบด้วยดาว แสงจากแหล่งกำเนิด เมื่อผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ จะให้ภาพที่ระนาบโฟกัสของเลนส์ ตาของผู้สังเกตอยู่ทางด้านหลังตำแหน่งที่ต้องการสังเกตพอดี ดังรูปที่ ๒๔ ก) เพื่อรับรังสีจากทุกจุดบนเลนส์ จึงทำให้เห็นหน้าเลนส์สว่างสม่ำเสมอ ถ้าต้องการถ่ายภาพ เลนส์ของกล้องจะต้องวางไว้แทนตำแหน่งของตา ดังรูป ๒๔ ข ปรับเลนส์ของกล้องถ่ายภาพให้เห็นหน้าเลนส์ที่จะทดสอบได้ชัดเจน เมื่อเอาคมมีดซึ่งเป็นขอบตรงทึบแสงเคลื่อนที่ผ่านจุดโฟกัส ถ้าหากเลนส์ไม่มีความคลาด ขณะที่ใบมีดเลื่อนตัดที่ตำแหน่งโฟกัส รังสีจะถูกตัดออกหมด ไม่มีรังสีเข้าสู่ตา จะทำให้หน้าเลนส์มืดอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าหากเลนส์มีความคลาดอยู่รังสีจะถูกตัดออกไปไม่หมด หน้าเลนส์จะไม่มืดสม่ำเสมอ





รูปที่ ๒๕ การทดลองด้วยคมมีด

การทดสอบเลนส์ที่สร้างขึ้นนี้ โดยการบันทึกภาพเงามืดและสังเกตลักษณะเมื่อคมมีดอยู่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้โคดาลิธแพลนฟิล์มของบริษัทโกดัก บันทึกภาพ ๑๘ นาที ล้างฟิล์มด้วยน้ำยาดี ๑๙ (D–19) เป็นเวลา ๕ นาที แล้วอัดภาพลงบนกระดาษอัดรูปชนิดมันบาง เบอร์ ๓ ของบริษัทโกดัก โดยใช้น้ำยาดี ๗๒ (D–72) ภาพที่ได้แสดงในรูปที่ ๒๖ แสดงว่าเลนส์หน้ากล้องที่ทดสอบนี้มีความคลาดทรงกลม



รูปที่ ๒๖ แสดงเงามืดบนหน้าเลนส์ เมื่อคมมีดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

จากหลักการทดสอบด้วยคมมีดนี้ นอกจากการใช้หาความคลาดยังสามารถใช้หาทางยาวโฟกัสของเลนส์ แต่ละโซนได้ด้วย การตัดกระดาษดำให้เป็นวงกลม ๒ ขนาดดังรูปที่ ๒๗ แล้วใช้ปิดหน้าเลนส์ให้แสงผ่านเฉพาะบริเวณขอบเลนส์และกลางเลนส์ ทำการทดลอง ๓ ครั้ง ได้ทางยาวโฟกัสดังนี้

ภาพ ๒๗ แสดงการปิดหน้าเลนส์ให้แสงผ่านแต่ละโซน

(บริเวณแลเงา คือกระดาษดำที่ใช้ปิด)

บริเวณแสงผ่าน	ครั้งที่	F (เซนติเมตร)	F เฉลี่ย
ขอบเลนส์	๑	๓๑๑.๗	๓๑๑.๗
	๒	๓๑๑.๘	
	๓	๓๑๑.๗	
กลางเลนส์	๑	๓๐๗.๑	๓๐๗.๑
	๒	๓๐๗.๒	
	๓	๓๐๗.๐	

ตารางที่ ๔ แสดงค่าทางยาวโฟกัสของเลนส์บริเวณขอบเลนส์และกลางเลนส์โดยวิธีทดสอบด้วยคมมีด

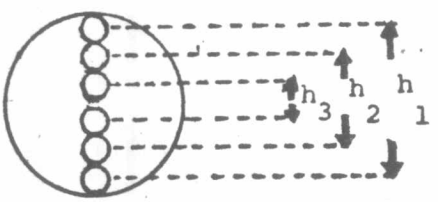
ค่าความคลาดทรงกลม = ๓๑๑.๗ - ๓๐๗.๑ เซนติเมตร

= ๔.๖ เซนติเมตร

สำหรับขนาดของกระดาษดำ ดังรูปที่ ๒๗ นี้ ถ้าหากเราลดขนาดแต่ละโซนเล็กไปกว่านี้แล้ว จะไม่สะดวกในการทดลอง เนื่องจากเลนส์มีทางยาวโฟกัสมาก ดังที่กล่าวมาแล้ว จึงทำให้ความเข้มของแสงที่ตำแหน่งโฟกัสน้อย จึงทำให้ไม่สะดวกในการทดลอง

๖.๔ การทดสอบโดยวิธีฮาร์ตแมน

โดยการจัดให้ต้นกำเนิดแสงที่เป็นจุด อยู่ไกลมาก ให้แสงผ่านเลนส์แต่ละแบบ โดยการตัดกระดาษดำเป็นวงกลมให้มีขนาดเท่ากับขนาดของเลนส์ เจาะรูบนกระดาษดำ โดยแต่ละรูมีเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ $\pm \frac{1}{200}$ เท่า ของทางยาวโฟกัสของเลนส์ที่จะทดสอบ ดังรูปที่๒๘ ก) แล้ววางกระดาษดำนี้ไว้หลังเลนส์ที่เรานำมาทดสอบดังรูปที่ ๒๘ ข)



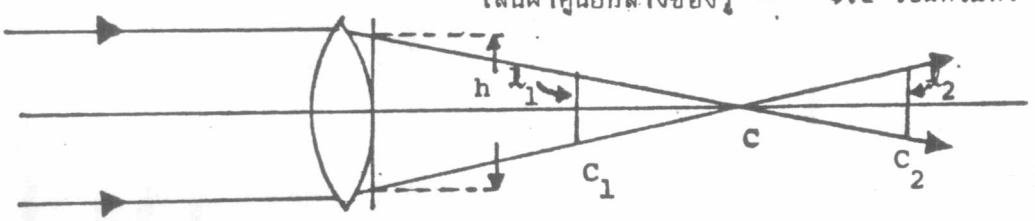
ก)

h_1 = ๗.๒ เซ็นติเมตร

h_2 = ๔.๔ เซ็นติเมตร

h_3 = ๑.๕ เซ็นติเมตร

เส้นผ่าศูนย์กลางของรู = ๑.๔ เซ็นติเมตร



ข)

รูปที่ ๒๘ การทดสอบโดยวิธีฮาร์ตแมน

h คือ ระยะห่างระหว่างสองรู บนกระดาษดำ

C_1, C_2 คือ ตำแหน่งในโฟกัสและนอกโฟกัส

C คือ ตำแหน่งโฟกัสของเลนส์

ℓ_1, ℓ_2 คือ ระยะห่างระหว่างภาพจุดสองภาพที่เกิดบนฉากภายในและภายนอกจุดโฟกัส

พิจารณาจากสามเหลี่ยม (คล้าย) จะได้

$$\frac{C - C_1}{C_2 - C} = \frac{\ell_1}{\ell_2} \qquad (2.24)$$

หรือ $$C = C_1 + \frac{(C_2 - C_1)}{(\ell_1 + \ell_2)} \qquad (2.25)$$

เราสามารถคำนวนหาทางยาวโฟกัสของเลนส์แต่ละแถบได้ โดยฉากที่รับก็คือฟิล์มถ่ายรูป ค่า ℓ_1 ℓ_2 หาได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเลื่อนได้ในการวัดค่า C_1,C_2 นั้นหาได้โดยการอ่านตำแหน่งบนรางเลื่อน

ผลการทดลองหาความคลาดทรงกลมของเลนส์หน้ากล้องที่สร้างขึ้น แสดงได้ในตารางที่ ๕

h เซนติเมตร	C_1 เซนติเมตร	C_2 เซนติเมตร	ℓ_1 เซนติเมตร	ℓ_2 เซนติเมตร	C เซนติเมตร
๗.๒	๓๐๑.๐	๓๑๔.๕	๐.๖๔๐	๐.๑๙๖	๓๑๑.๕
๔.๔	๓๐๑.๐	๓๑๔.๕	๐.๓๐๐	๐.๑๘๒	๓๐๙.๔
๑.๕	๓๐๑.๐	๓๑๔.๕	๐.๐๘๗	๐.๑๑๗	๓๐๖.๘

ตารางที่ ๕ แสดงค่าทางยาวโฟกัสจากการทดสอบโดยวิธีฮาร์ดแมน

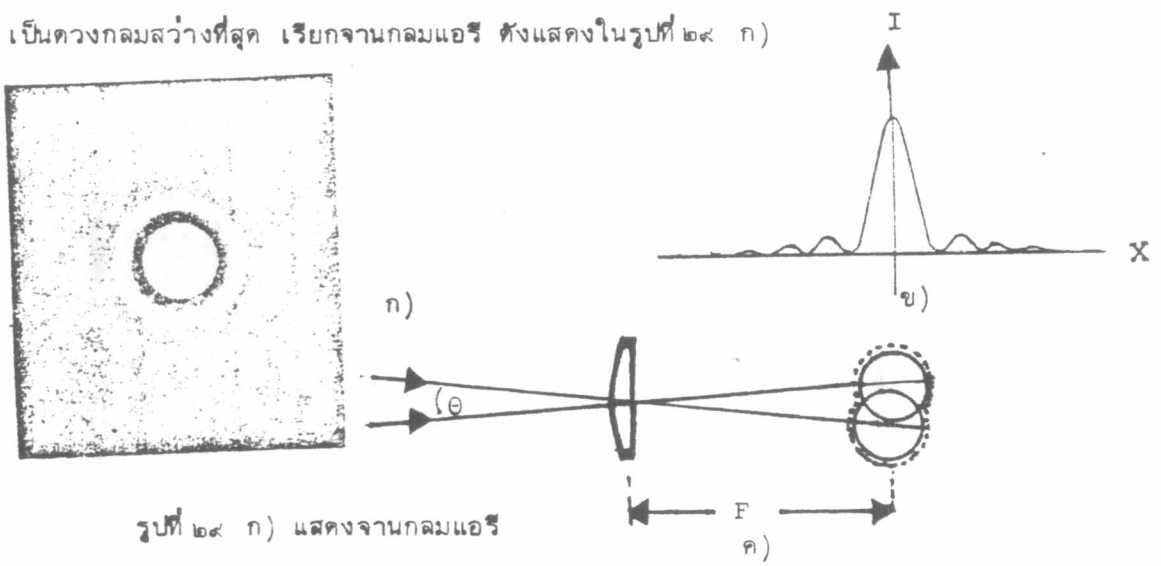
ผลจากการทดลองโดยวิธีฮาร์ตแมนนี้ เลนส์หน้ากล้องมีความคลาดทรงกลม = ๓๑๑.๕-๓๐๖.๘ เซนติเมตร = ๔.๗ เซนติเมตร

การทดลองนี้ทำโดยการถ่ายภาพ ณ ตำแหน่ง C_1 และ C_2 โดยใช้โคดาลิธแพนฟิล์ม ในการถ่ายภาพโดยเปิดหน้ากล้องเป็นเวลา ๔๕ นาที ล้างฟิล์มโดยใช้น้ำยา ดี ๑๙ จากนั้นวัดระยะ ℓ_1 และ ℓ_2 บนฟิล์ม

๖.๕ กำลังแยก (resolution power)

ในการใช้กล้องโทรทรรศน์ ศึกษาเกี่ยวกับดวงอาทิตย์ หรือดวงดาวต่าง ๆ นั้น ค่าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องกล่าวถึง คือ กำลังแยกของเลนส์หน้ากล้องหรือเรียกว่ากำลังแยกของกล้อง

กำลังแยกของกล้องโทรทรรศน์คือ ค่ามุมที่รับภาพของวัตถุที่เป็นจุด ๒ อัน อยู่ที่ระยะไกลมากให้เห็นแยกออกจากกันได้พอดี ณ ตำแหน่งหน้ากล้อง (Jenkins and White, 1967) ซึ่งจะเป็นเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่อจุดศูนย์กลางของภาพจานกลมแอรีที่ ๑ อยู่ที่จุดกึ่งกลางของวงมืดแรกของจานกลมแอรีที่ ๒ หรือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของจานกลมแอรีทั้งสองเท่ากับรัศมีของวงมืดแรกของจานกลมแอรี ดังแสดงในรูปที่ ๒๙ ค) จานกลมแอรีคือภาพที่เกิดขึ้นเมื่อให้แสงจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุดผ่านช่องเปิดที่เป็นรูปวงกลม ผลที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจะทำให้เกิดภาพเป็นวงมืดวงสว่างสลับกัน ตรงกลางจะปรากฏเป็นดวงกลมสว่างที่สุด เรียกจานกลมแอรี ดังแสดงในรูปที่ ๒๙ ก)



รูปที่ ๒๙ ก) แสดงจานกลมแอรี

ข) การกระจายของความเข้มการส่องสว่างบนฉากของจานกลมแอรี

ค) แสดงการเริ่มแยกของจานกลมแอรี ๒ อัน

เมื่อ

θ = กำลังแยกเชิงมุมของเลนส์

λ = ความยาวคลื่นของแสงที่ผ่านเลนส์

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์

ทางทฤษฎี ค่ากำลังแยกของเลนส์ มีความสัมพันธ์กับขนาดของเลนส์และความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \qquad \text{----------(2.26)}$$

เลนส์ที่สร้างขึ้นมีเส้นผ่าศูนย์กลาง ๘.๖ เซนติเมตรแสงที่ใช้ในการทดลองหากำลังแยกเป็นแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม มีความยาวคลื่น ๕๘๙๓ อังสตรอม ฉะนั้นเราหากำลังแยกตามสูตรได้

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

$$= \frac{1.22 \times 5893 \times 10^{-8}}{8.6} \text{ เรเดียน}$$

$$= 835.98 \times 10^{-8} \text{ เรเดียน}$$

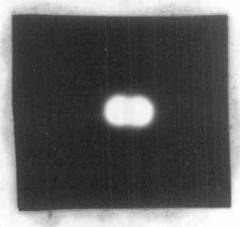
หรือ = 1.7 พิลิปดา

จากการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นจุด ๒ จุด ซึ่งได้จากการเจาะรูบนแผ่นอลูมิเนียมห่างกัน ๐.๑๑ เซนติเมตร แล้ววางกั้นแสงสีเหลืองที่มาจากหลอมโซเดียม เมื่อให้แสงผ่านเลนส์หน้ากล้อง แสงเกิดการเลี้ยวเบนทำให้เกิดภาพจานกลมแอรี ๒ ภาพ แหล่งกำเนิดแสงห่างจากเลนส์เป็นระยะทาง ๔๐ เมตร

ภาพจานกลมแอรีทั้งสองยังไม่แยกจากกัน เราเริ่มถ่ายภาพแรก โดยใช้ฟิล์มรับภาพเป็นเวลา ๒๐ นาที จากนั้นเลื่อนแหล่งกำเนิดแสงเข้ามาหาเลนส์หน้ากล้องเป็นระยะ ๑๐ เซนติเมตร (ให้เลนส์หน้ากล้องอยู่กับที่) จากนั้นก็บันทึกภาพอีก ทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งเห็นภาพจานกลมแอรีแยกจากกันเด็ดขาด เมื่อนำฟิล์มไปล้างแล้วตรวจสอบหาตำแหน่งเริ่มแยกของภาพจานกลมแอรีจากฟิล์มได้ตำแหน่งเริ่มแยกที่ระยะห่างระหว่างเลนส์และแหล่งกำเนิดแสง ๗๘.๓ เมตร มุมที่เลนส์รองรับวัตถุสองจุดนี้คือมุมที่รองรับภาพที่เลนส์หรือกำลังแยกของเลนส์ ซึ่งได้

$$\theta = \frac{0.11}{7830} \quad \text{เรเดียน}$$

$$= 2.89 \quad \text{พิลิปดา}$$



รูปที่ ๓๐ แสดงการเริ่มแยกของจานกลมแอรีจากการทดลองกำลังแยก