หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การทดสอบความคลาด

(Quantitative test)

เครื่องมือที่ใช้ในทางแสงมีอยู่หลายชนิด แต่ที่สำคัญและใช้ประโยชน์มาก ก็คือ เลนซ์ กระจกโค้ง ปริซึม เกรตติ้ง แต่อุปกรณ์ที่จะหามาทดสอบในที่นี้ คือ เลนซ์ ซึ่งใช้สำหรับรวมแสงให้เกิดภาพใด ๆ ที่ต้องการ เช่นใช้เป็นเลนซ์ของกล้องถ่ายรูป จุดประสงค์สำคัญของเลนซ์ถ่ายรูป คือ ถ่ายภาพได้ชัดเจนสวยงาม หรือเหมือนของเดิม ฉะนั้นเลนซ์ที่จะนำมาใช้จึงต้องมีคุณภาพดี ไม่มีความคลาด (Aberration) ดังนั้นจึงมีวิธีที่จะทดสอบคุณภาพของเลนซ์ถ่ายรูปหลายวิธี เช่น โดยการดูภาพที่ถ่ายโดยเลนซ์นั้น ๆ หรือเลนซ์ที่นำไปใช้ประกอบเป็นกล้องจุลทัศน์ หรือโทรทัศน์ ก็ต้องทดสอบคุณภาพเสียก่อนเช่นกัน มิฉะนั้นเมื่อนำไปใช้งานแล้ว จะทำให้เสียผลงาน ส่วนการทดสอบคุณภาพ มีอยู่หลายวิธี แล้วแต่จะทดสอบอะไร วิธีไหนจะสดวก และได้ผลรวดเร็วกว่า ดังจะอธิบายต่อไปนี้

<u>สตาร์เทสต์</u> (Star test)

เป็นวิธีทดสอบความคลาด (Aberration) ของเลนซ์ใกล้วัตถุของกล้องโทรทัศน์ (Telescope objective) โดยการสังเกตภาพของต้นแสงที่เป็นจุด (Real or artificial star) ซึ่งทำมุมเล็กมาก และเลนซ์ไม่สามารถแยกภาพให้เห็นชัดเจนได้ โดยที่กล้องโทรทัศน์จะต้องมีเลนซ์ใกล้วัตถุที่ไม่มีความคลาด ภาพที่ตรงจุดโฟคัส (focus) จะเป็นดวงกลม (central disc) ที่ล้อมรอบด้วยวงสว่างและวงมืดสลับกัน

เพื่อจะให้การทดลองเห็นชัดเจนกว่านี้ การทดสอบความคลาดทรงกลมของเลนซ์ใกล้วัตถุ ทำได้โดยการรับภาพที่ใกล้เคียงกับภาพตรงจุดโฟคัส เช่นที่จุดภายในและภายนอกจุดโฟคัส เช่นที่จุดภายในและภายนอกจุดโฟคัส นั่นคือระยะภาพที่รับได้ใกล้เข้ามาหรือห่างออกไปจากเลนซ์ใกล้วัตถุนั้นสังเกตได้จากวงมืดสว่าง (Diffraction ring pattern) จำนวนของวงมืดและสว่างเมื่อระยะห่างไปกว่าจุดโฟคัส ถ้าหากวงมืดสว่าง (Ring pattern)

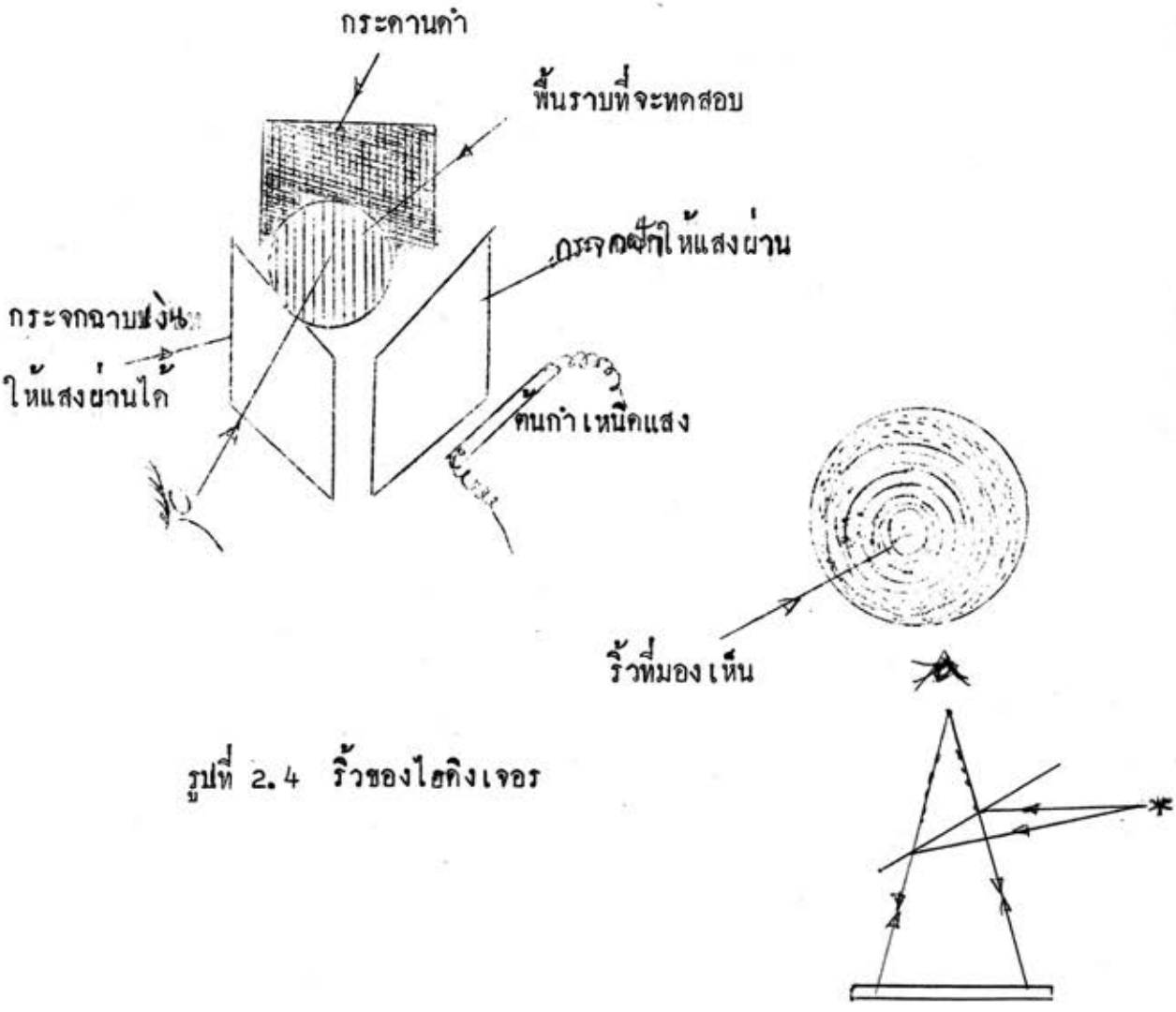
เหล่านี้เหมือนกันทุกประการทั้งภายในและภายนอกของจุดโฟคัส แสดงถึงคุณภาพดีของเลนซ์ใกล้วัตถุอันนั้น

ถ้าหากเลนซ์ใกล้วัตถุอันนั้นไม่มีความคลาด ที่จุดที่รับภาพทั้งภายในและภายนอกของจุดโฟคัสจะปรากฏว่าได้ภาพเหมือนกัน แต่หากเป็นแบบแก้เกินไป (Over correction) ภาพที่รับภายนอกจุดโฟคัสจะชัดเจนกว่าภาพที่รับที่จุดภายในโฟคัส ถ้าเป็นพวกแก้น้อยไป (Under correction) ภาพที่รับได้จะกลับกัน ซึ่งส่วนใหญ่ของการเกิดความคลาดก็คือภาพขาดความสมดุล (Symmetry) จุดประสงค์ในการทดลองก็เพื่อถ่ายภาพและบันทึกผลของภาพที่ถ่ายได้ ที่จุดใกล้กว่าโฟคัสและไกลกว่าจุดโฟคัสของเลนซ์ ใกล้วัตถุซึ่งหาได้เมื่อหาบความต่างของทางเดินของแสงระหว่างแสงตกใกล้ขอบเลนซ์ (Marginal ray) และแสงตกกลางเลนซ์ (Paraxial ray)

<u>ทดสอบโดยวิธีของฮาร์ตแมน</u> (Hartmann test)

Hartmann เป็นผู้คิดวิธีนี้ขึ้น จากสมมุติฐานที่เกี่ยวกับลำแสงทั้งหมดที่มาตัดแกน ซึ่งความจริงแล้ว อันนี้ห่างไกลกับที่เป็นจริง โดยเฉพาะในกรณีของกล้องดูดาวและกระจกโค้ง Hartmann test ใช้วิธีพิจารณาแต่ละลำแสง โดยคิดทั้งขนาดและทิศทาง ถ้าลำแสงทั้งหมดที่ออกจากเลนซ์หรือกระจกมาตัดแกนที่จุดใด ซึ่งถ้าเป็นลำแสงแคบ ๆ ที่ไม่ยุ่งยาก แต่ถ้าเลนซ์นี้มีรูรับแสง (Aperture) ใหญ่กว่า 4 นิ้ว และมีความผิดปกติในรูปร่างด้วยก็จะทำให้ลำแสงที่ออกมาจากเลนซ์ ไม่ตัดแกนทั้งหมด สำหรับกระจกโค้งอย่างใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องทำให้ถูกต้องในเรื่องรูปร่าง เพราะอาจจะเกิดเหตุดังกล่าวแล้วได้ และแสงสท้อนที่ตัดแกน

ก็จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อใช้วิธีของ Hartmann กับกล้องดูดาวขนาดใหญ่มักจะใช้เจาะรูเรียงเป็นแถว เพื่อให้แสงที่ตกลงมาพิจารณาง่ายขึ้น ฉะนั้นจึงสมมติรังษีแคบ ๆ ของแสงที่ผ่านรูที่เจาะไว้ตัดแกนทั้งหมด และจุดที่ตัดกันตามระยะแกนนอน อนุมานได้จากการวัดระยะจากจุดต่าง ๆ แต่ละคู่บนภาพถ่าย ภายในและภายนอกจุดโฟคัส การตัดกันของลำแสงแต่ละคู่ ที่แนวแกนถือคล้ายกับว่าเป็นโฟคัสของแต่ละแถบ (zone) โดยให้รูที่เจาะไว้ในแถบเหล่านี้ จะเห็นความคลาดแห่งแถบ (Zone aberration curve) ได้อย่างชัดเจน ความแตกต่างระหว่างจุดโฟคัสของแต่ละรู ในแต่ละแถบเกิดจากความความคลาดทรงกลม



รูปที่ 2.4 ริ้วของไฮดิงเจอร

การทดสอบกำลังแยก (Test of Resolution)

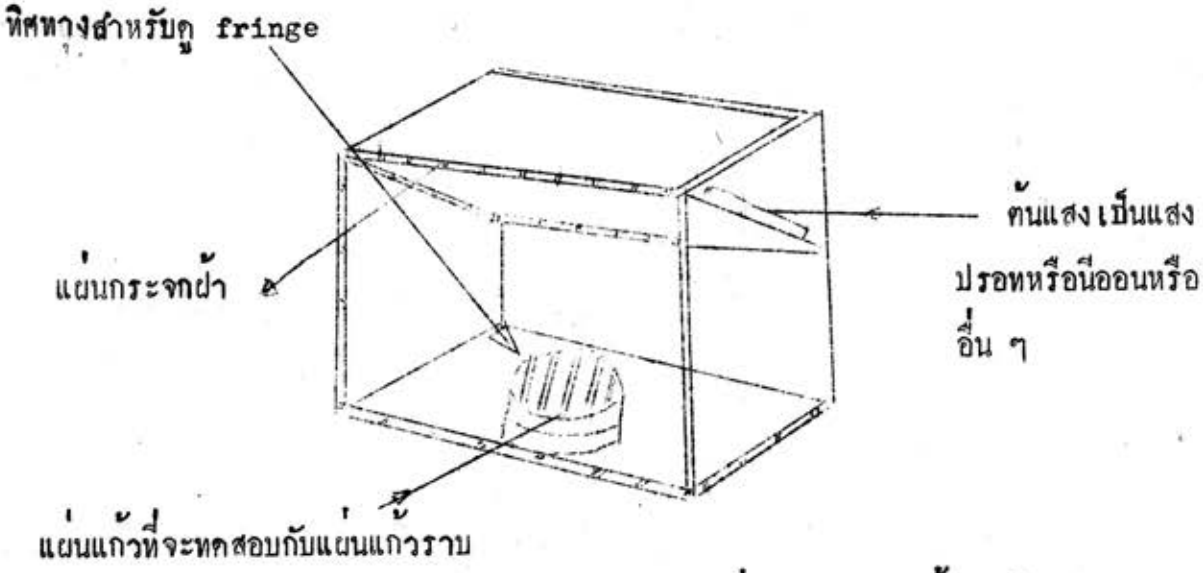
จากปรากฏการเลี้ยวเบนของแสง ภาพของวัตถุที่เป็นจุดจะไม่เป็นจุด แต่จะเกิดเป็นดวง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{1.22\lambda}{n'\text{Sin}.u'}$ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นของแสง n' เป็นดัชนี หักเหของตัวกลางที่ภาพอยู่ u' เป็นมุมที่รังสีลู่เข้ากระทำมุมโตที่สุดกับแกนในฝั่งภาพ เป็นที่ยอมรับแล้วว่า ภาพของวัตถุที่เป็นสองจุดที่อยู่ติดกัน ถือว่าแยกกันได้เมื่อจุดศูนย์กลางของภาพ อยู่ห่างกันเท่ากับรัศมีของ Airy disc= $\frac{0.61\lambda}{n'\text{Sin}.u'}$ ในการทดสอบกำลังแยกของเลนซ์ ทดสอบโดยการถ่ายภาพ เป็นการทดสอบที่เหมาะที่จะทราบกำลังแยกของเลนซ์ที่จะใช้ การที่ภาพเห็นเป็นดวงเนื่องจากแสงเลี้ยวมุมไปตัดกันเมื่อต้นแสงเป็นจุด ทำให้กำลังแยกลดน้อยลง และมีผลทำให้ภาพที่ได้มีความคมน้อยลง เพื่อหลีกเลี่ยงผลดังกล่าวจึงต้องทดสอบก่อน โดยการใช้เลนซ์ที่จะทดสอบถ่ายภาพของแผนภูมิของคอบบ์ ก็จะทราบกำลังแยกของเลนซ์ โดยนำฟิล์มที่ถ่ายภาพนั้นไปตรวจดูด้วยกล้องไมโครสโคป ก็จะทราบได้ทันทีว่า กำลังแยกของเลนซ์เป็นอย่างไร แม้ว่ากล้องที่ใช้ถ่ายภาพจะเป็นกล้องชั้นดีก็ตาม กำลังแยกก็ไม่สู้จะดีนัก

3. <u>ริ้วแบบนิวตัน</u> (Newton's fringe)

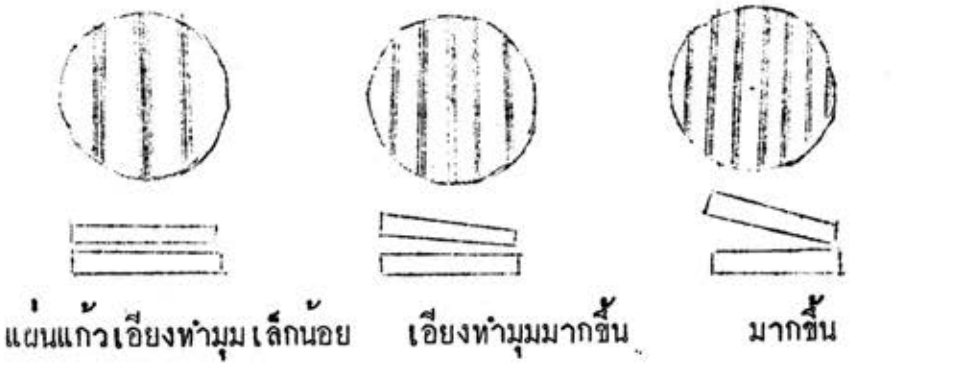
เป็นวิธีทดสอบเครื่องมือทางแสงอย่างง่าย ๆ เป็นพวกที่ใช้ต้นแสงเป็นแสงสีเดียวที่มีความยาวคลื่น λ ริ้วมืด - สว่าง (Fringe) ที่เราแลเห็นเกิดจากการแทรกสอดของแสงในช่องที่เป็นฟิล์มอากาศ (Air - film) ระหว่างพื้นแก้วซึ่งริ้วมืด - สว่าง เหล่านี้ แทนความห่างระหว่างสองผิวของแก้ว และระหว่างริ้วมืด - สว่าง ที่ติดกันสองริ้ว ความหนาของฟิล์มอากาศจะเปลี่ยนไปทีละ $\frac{\lambda}{2}$ และริ้วมืด - สว่างอาจจะแสดงถึงลักษณะของพื้นแก้วที่วางไว้ติดกัน อาจจะเป็นพื้นราบหรือพื้นโค้งที่จะทดสอบ ถ้าเป็นริ้วมืด - สว่าง ของแผ่นแก้วราบทั้งสอง จะเห็นเป็นเส้นตรงชัดเจน เมื่อเราเอียงแผ่นแก้วนั้นขึ้นเล็กน้อยและให้แสงสีเดียวตกกระทบจะเห็นกลุ่มของริ้วมืด - สว่าง ที่ขนานกัน มีระยะห่างเท่ากัน ถ้าเป็นพื้นโค้งหรือพื้นเว้า บนพื้นราบจะให้ริ้วมืด - สว่าง เป็นวงกลม ดังรูป 2.2 เป็นหีบกระจก สำหรับทดสอบคุณภาพของพื้นแก้ว ว่าอย่างไร เมื่อนำพื้นที่ที่ต้องการทดสอบไปวางบนพื้นราบมาตรฐาน จะเห็นริ้วมืด - สว่าง เป็นรูปต่าง ๆ ดังรูป (2.3) ซึ่งเป็นพื้นโค้งวางบนพื้นราบมาตรฐาน รูปร่างที่ปรากฏนั้นความแตกต่างในระยะระหว่างวงหนึ่ง ๆ กับวงถัดไปประมาณ $\frac{\lambda}{2}$ ซึ่งใช้หาว่าเป็นพื้นนูนหรือเว้า Newton's fringe นี้เหมาะสำหรับเปรียบเทียบหาความเรียบของพื้นผิวที่ต้องการหราบคุณภาพกับพื้นเรียบมาตรฐาน และอาจจะใช้ทดสอบพื้นผิวที่หราบรัศมีความโค้ง โดยวางบนแผ่นมาตรฐานที่หราบรัศมีความโค้งเหมือนกันแต่โค้งกลับกัน

4. <u>ริ้วแบบไฮดิงเจอร์</u> (Haidinger's fringe)

วิธีนี้เหมาะที่สุดสำหรับทดสอบคุณภาพของพื้นผิวเรียบขนานดังรูป 2.4 แสดงถึงริ้ว (Fringe) ที่สังเกตเห็นซึ่งมีรูปร่างดังรูป และทิศทางที่สะท้อนภาพสู่ตา ซึ่งริ้วเหล่านี้คล้ายกับริ้วแบบนิวตัน (Newton's fringe) ที่เกิด เนื่องจากพื้นโค้งบนพื้นราบแตกต่างกับริ้วแบบนิวตัน ตรงที่ริ้วแบบนิวตันสังเกตภาพที่ฟิล์มอากาศ (Air film) ระหว่างพื้นราบและพื้นโค้ง แต่ริ้วแบบไฮดิงเจอร์ (Haidinger fringe) สังเกตที่ระยะไกลสุด(Infinity) ด้วยตาเปล่าหรือกล้องโทรทัศน์ และริ้วแบบนิวตันแทนลำดับของจุดที่มีทางเดินของแสงเท่ากัน ส่วนริ้วแบบไฮดิงเจอร์แทนลำดับของจุดที่แสงเข้าตาเรา ทำมุมเท่ากันกับพื้นผิวราบขนาน และ



รูปที่ 2.2 การวัดริ้วของนิวตัน



รูปที่ 2.3 แสดงริ้วต่างๆเมื่อแผ่นแก้วทดลองทำมุมต่างๆ กับแผ่นแก้วราบ หรือพื้นหน้าโค้ง

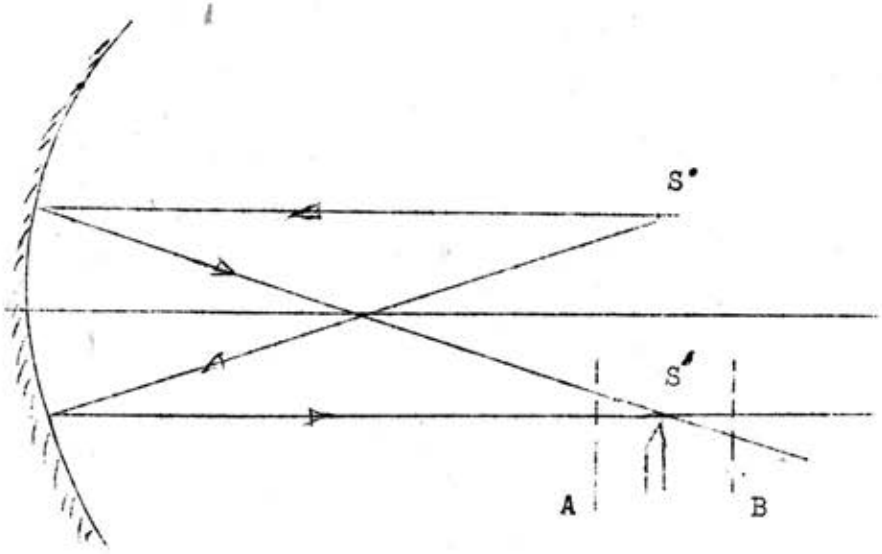
สังเกตุตรง ๆ โดยที่ระนาบของพื้นผิวขนานเลื่อนไปข้าง ๆ ได้ เพื่อทดสอบแต่ละพื้นที่ การที่ความหมายเปลี่ยนไปจากริมหนึ่งของพื้นผิวขนานไปถึงอีกริ่มหนึ่ง ริ้วที่แลเห็นจะปรากฏเป็นวงมืด - สว่าง สลับกันโดยมีทางเดินของแสงต่างกัน $\frac{\lambda}{2}$

5. การทดสอบแบบรอนชิ (Ronchi Test)

Ronchi เป็นคนคิดขึ้นโดยใช้เกรทติ้ง (Grating) ที่มีราคาถูกขนาดต่าง ๆ ทดสอบ ดังเช่นใช้เกรทติ้งที่มี 10 - 20 เส้น/ม.ม. วางเกรทติ้งไว้ในแนวแกนของแสง ถ้าหากเลนซ์ที่ทดสอบไม่มีความคลาด จุดโฟคัสที่ปรากฏบนฉากจะชัดเจนที่จุดเดียว เช่นเห็นจุดโฟคัสชัดและเงาของมันจะไม่บิดเบี้ยว (Undistorted) ปรากฏเป็นเส้นดำขาวสลับกัน แต่ถ้าเลนซ์มีความคลาดทรงกลม จะมีแสงตกเบี้องไปโฟคัสที่ต่างจุดกัน และผลของการบิดเบี้ยวจะแลเห็นในเส้นดำขาวสลับกันนั้น

6. การทดสอบโดยใช้ใบมีดของฟูโคลท์ (Foucault knife - edge - test)

ถ้าเป็นพื้นโค้งสท้อนแสงขนาดใหญ่ เช่นที่ใช้ในกล้องโทรทัศน์(Telescope mirrors) การทดสอบด้วยแผ่นทดสอบ (Test chart) มักไม่ค่อยสดวก พวกพื้นโค้งสท้อนแสงที่มีรัศมียาวมักจะใช้แบบใบมีดของโฟคอลท์ (Foucoult knife - edge) ดังรูป 2.5 เป็นต้นแสงรูเข็ม (Pin hole) เป็นโลหะบาง ๆ เจาะรู และใช้หลอดไฟเป็นต้นแสง และให้ภาพโดยกระจกโค้ง M ที่ S ตามองหลังภาพนี้จะแลเห็นแสงจากทุกจุดบนกระจก ถ้าใช้ใบมีด (knife-edge) ตัดแสงที่จุดโฟคัสจะแลเห็นแสงถูกตัดไปทั่วทั้งหมดอย่างสม่ำเสมอ ถ้าไปตัดที่ A เงาจะปรากฏเคลื่อนไปข้างบน ถ้าตัดที่ B เงาจะเคลื่อนที่ลง และเป็นการง่ายที่จะหาจุดที่แน่นอนของจุดโฟคัสของกระจกรูปทรงกลม และพิจารณาอย่างแน่นอน ถึงความแตกต่างของจุดโฟคัสของแต่ละแถบ โดยใช้กระดาษแข็งตัดเป็นช่อง ๆ บังให้แสงผ่าน แต่ละตอนที่ต้องการ เมื่อใบมีดตัดลำแสงใกล้หรือไกลกว่าจุดโฟคัส ซึ่งจะเห็นไม่เหมือนกัน

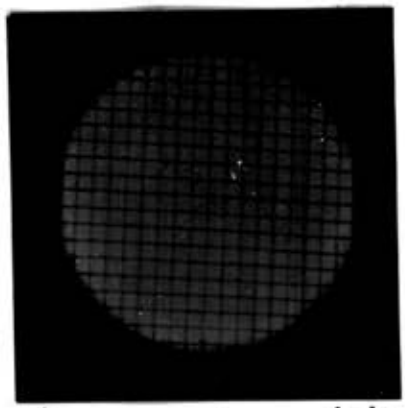


รูปที่ 2.5 Foucault knife - edge test

การทดสอบคุณภาพของกระจก

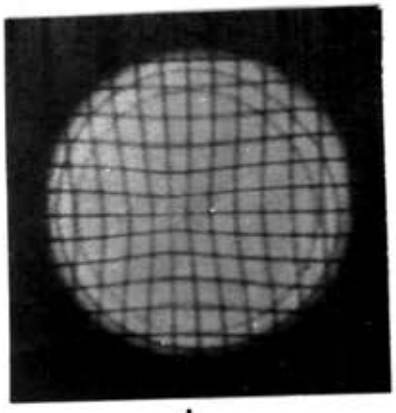
วิธีที่จะทดสอบพื้นผิวสท้อนโดยทั่วไป ใช้สังเกตการสท้อนจากกระจกของรูปตารางสี่เหลี่ยม กำลังขยายของกระจกใช้ประโยชน์ในการหารัศมีความโค้งได้ วิธีตรวจสอบที่ใช้วัดทางยาวโฟคัสที่ยาว ๆ ของกระจกโค้งได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกระจกที่ฉาบปรอทด้านหลัง ความบกพร่องของกระจกโค้งเช่น เนื่องจากความโค้ง (Curvature of field) ความบิดเบี้ยว (Distortions) ความเอียง (Astigmatism) มีริ้วรอย (Striae) อาจตรวจพบได้รวมทั้ง การขัดมันของผิวด้วย กระจกโค้งก็เป็นเครื่องมือสำคัญในระบบทัศนะที่จะต้องทดสอบให้ได้คุณภาพที่แน่นอน เช่นสมัยก่อนในการรบพุ่งทำสงคราม สิ่งสำคัญ ก็คือความลับ การที่ส่งความลับไปได้รวดเร็วนั้นอาศัยกระจก ส่งเป็นสัญญาณไปยังอีกแห่ง ฉะนั้นกระจกจึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ต้องตรวจสอบให้มีคุณภาพดี ถ้าหากกระจกมีความบิดเบี้ยวหรือพื้นผิวผิดปกติ การแผ่กระจายของแสงสท้อนไปในทิศต่าง ๆ จะเพิ่มขึ้นด้วย ลำแสงที่แผ่กระจายไปทั่วสัญญาณก็จะถึงทุกทิศทางและไปไม่ได้ไกลนัก คุณภาพโดยทั่วไปของพื้นผิวกระจกอาจจะสังเกตเห็นโดยการสท้อนจากรูปตารางรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส จะปรากฏความบิดเบี้ยวจะเป็นทั้งหมดหรือบางส่วนก็ตาม การทดสอบดังนั้นจะให้รายละเอียดที่แท้จริงของกระจกโค้งได้จากความสัมพันธ์ ของความเข้มของแสงที่สท้อนออกมาอาจจะคำนวณได้ที่ระยะใด ๆ

การทดสอบเกี่ยวกับความบกพร่องของกระจกโค้ง ที่มีทางยาวโฟคัสยาว ๆ อาจใช้วิธีดูกำลังขยาย ซึ่งเป็นไปได้ที่จะทดสอบได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง แม้กระจกจะมีทางยาวโฟคัสเท่าใดก็ตาม โดยการวาดวงกลมซ้อนสองวงบนฉาก (Test chart) และสังเกตการสท้อนของวงกลมเหล่านี้ก็จะทราบคุณภาพของกระจกนั้น และเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมเท่าใดเหมาะกับกระจกที่มีทางยาวโฟคัสเท่าใด อาจคำนวณหาได้

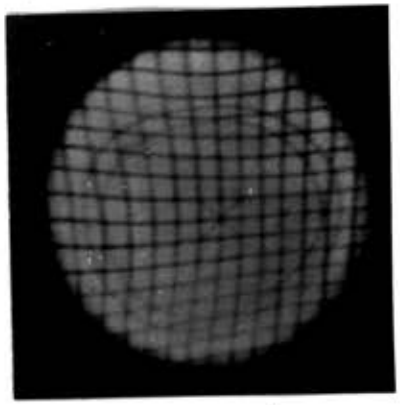


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.6 แสดงถึงกระจกที่ไม่มีความคลาด

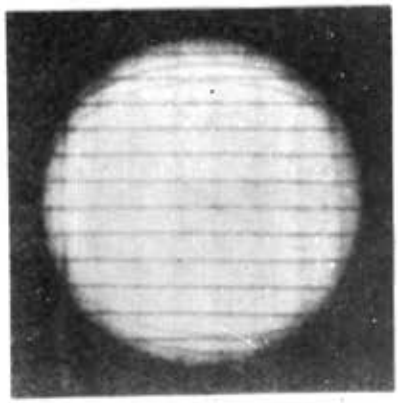


รูปที่ 2.6 ก.

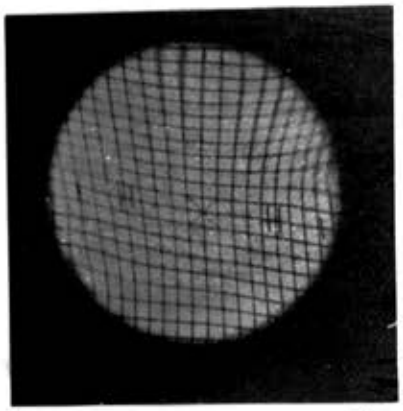


รูปที่ 2.6 ข.

แสดงถึงการสท้อนรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมของกระจกที่มีความคลาด



รูปที่ 2.6 ค. แสดงถึงกระจกที่มีเส้นขีดพื้นไม่เรียบ



รูปที่ 2.6 ง. แสดงถึงกระจกที่มี distortion

Transactions of the Optic Society by R. Kingslake

วิธีทดสอบ

วางกระจกขาตั้งที่จัดไว้ให้เหมาะ เพื่อว่าทิศทางของแสงสท้อนจะได้เดินใกล้เคียงกับแสงตก ส่วนฉาก (Board) ที่จะทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1 นิ้ว พร้อมกับวงกลมวางห่างไปประมาณ 50 ฟุต ให้ความเข้มของแสงตกลงบนฉากทดสอบ (Test chart) พอเหมาะโดยใช้ไฟสอง ส่วนผู้สังเกตยืนอยู่ตรงข้ามมองดูภาพสท้อน หรือจะใช้ถ่ายภาพ แล้วนำมาขยายดู จะสังเกตถ้าหากมีกำลังขยายมากกว่า 6 เท่า ถ้าหากการสท้อนของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบิดเบี้ยวไป ขอบวงกลมที่ปรากฏมีข้อบกพร่องในรูปร่าง หรือโค้งมากไปเว้ามากไป แสดงว่ากระจกก็มีข้อบกพร่อง

ข้อบกพร่องของกระจก (Defective mirrors)

มีอยู่หลายชนิด

1. ฉาบผิวปรอทหรือเงินไม่ดี (Bad Silvering)
2. การขัดผิวมันไม่เรียบสม่ำเสมอ (Bad Polish)
3. พื้นกระจกมีริ้วรอย (Striae)

จะทำให้ภาพบิดเบี้ยว (Distort) ขึ้นทั้งเฉพาะแห่งและโดยทั่วไป ทำให้แสงสท้อนของฉากทดสอบ (Test chart) เป็นคลื่นน้อย ๆ เฉพาะแห่งซึ่งมีผลเสียหายมาก เพราะว่าไม่เพียงแต่แสงจะกระจัดกระจายไม่ไปตรงตามทิศทางที่ต้องการ ถ้าใช้สังสัญญาณก็ทำให้ความลับรั่วไหลได้ เพราะแสงสท้อนไปเป็นมุมกว้าง

4. แอสติคมาติซึม (Astigmatism)

เห็นได้ชัดเจนจากภาพที่ขยายหรือย่อไม่เท่ากันในทิศทางใดทางหนึ่ง ซึ่งตั้งฉากกันโดยเส้นที่ปรากฏชัดเพียงทางเดียว และทางอื่นมัว

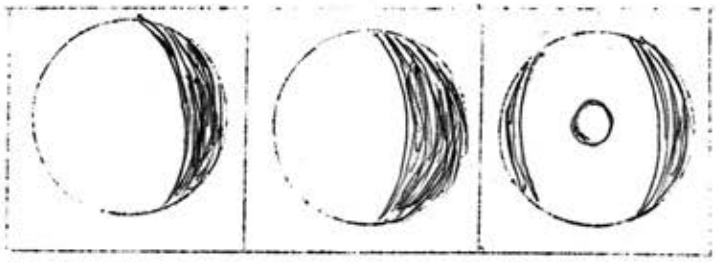
5. ความคลาดโค้ง (Curvature of field)

รัศมีความโค้งจะหาได้โดยการสังเกตปริมาณขยายหรือย่อของวงกลมบนฉากทดสอบ

I16710371X

การทดสอบของฟูโคลท์ (Foucault knife-edge-test)

นอกจากจะใช้ทดสอบกระจกโค้งแล้ว ยังใช้ทดสอบคุณภาพของเลนซ์ การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับเลนซ์ที่ใช้ รูรับแสงเล็กตั้งแต่ $\frac{1}{2}$ - 3 นิ้ว เครื่องมือที่ทดสอบนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกเลนซ์ใกล้ตาของกล้องโทรทัศน์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 $\frac{1}{2}$ นิ้ว เลือกที่มีราคาถูก จะได้มีความคลาด ทดสอบให้เห็นชัด เครื่องมือที่จะใช้ทดสอบก็ใช้เครื่องมืออันเดิมที่ใช้ทดสอบกระจกโค้ง ประกอบด้วยรางไม้ (Optical bench) สั้น ๆ ใช้สำหรับวางเลนซ์ที่ต้องการจะทดสอบ ในการนี้ใช้ต้นแสงเป็นแสงสีเดียว เช่น แสงโซเดียม ใบมีดโกน และเลนซ์ใกล้ตา ส่วนรางไม้ ไม่จำเป็นนัก แต่ทำให้สดวก เลนซ์ที่จะทำการทดสอบวางอยู่บนรางไม้ ที่จุดที่เหมาะซึ่งสามารถไขขึ้นลงให้ได้ระดับกับต้นแสง ด้วยการใช้เลนซ์ใกล้ตาช่วยจับต้นแสงให้เห็นชัด ส่วนตัวใบมีด วางอยู่บนที่จะทำให้ระนาบของใบมีดร่วมกันกับระนาบโฟคัส (Focal plane) ของเลนซ์ ตาที่จะมองดูหลังใบมีด (รูป 2.7) ตำแหน่งของใบมีดพบว่า ที่รับแสงหายไปหมดจะเป็นภาพสม่ำเสมอที่สุด จากผิวหลัง (Back surface) ของเลนซ์ ถ้าหากต้องการภาพถ่ายของภาพที่ปรากฏที่ผิวหลัง กล้องถ่ายภาพจะต้องวางข้างหลังของใบมีดและตรวจภาพที่ต้องการด้วยกระจกฝ้าก่อน



A B C

รูปที่ 2.7 ภาพของเงาที่แลเห็นเมื่อใช้ใบมีดตัดแสง

การทดลองประการแรก นำเลนซ์ที่ไม่มีความคลาดมาทดลองให้ใบมีดตัดแสงตรงจุดโฟกัส แสงจะหายไปอย่างสม่ำเสมอ ต่อไปนำเลนซ์ที่มีความคลาดทรงกลมมาให้ใบมีดตัด เช่นรูป (2.7_B) จะเห็นภาพชัดเจน โดยการใช้ใบมีด (Knife - edge) ทดสอบความคลาดต่าง ๆ ที่ปรากฏ ก็จะทราบว่ามีอะไรบ้าง เป็นอย่างรวมกัน หรืออย่างแยก การที่จะบอกว่ามีความคลาดอะไรบ้างที่พื้นผิวรองเลนซ์ เมื่อใบมีดตัดตรงโฟกัส ซึ่งมีความคลาดทรงกลม ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน ความเอียง ส่วนลูกศรแสดงถึงทิศทางที่เข้าใกล้ของใบมีด

รูป 2.8 A แสดงถึงความคลาดทรงกลมที่แก้น้อย (Under correction)

รูป 2.8 B เป็นรูปที่เป็นไปได้เนื่องจากความเอียงเมื่อใบมีดตัดลำแสงที่ตำแหน่ง ตามแกนระหว่างจุดโฟกัสทั้งสองของเส้นที่เกิดเอียง (Astig line) การตรวจสอบความเอียงจะแสดงถึงรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ในตำแหน่งของใบมีดไปตามแกน ถ้าหากตรงขอบปรากฏว่าถูกตัดเข้าไปในลำแสงขนานกันและในระนาบของโฟคอลไลน์ (Focal line) อันใดอันหนึ่ง เมื่อแสงจะจางหายไปอย่างสม่ำเสมอจากผิวของเลนซ์

รูป 2.8 C แสดงผลเนื่องจากความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน ตำแหน่งของมุมเกี่ยวพันกับรูรับแสงของเลนซ์ที่จะทดสอบ ภาพที่มีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน แสงจากจุด aa (รูป 2.8) ของรูรับแสงจะไปโฟกัสที่ aa แสงจาก bb ไปโฟกัสที่ bb แสงใกล้แกนจะไปโฟกัสที่จุดยอดของจุดความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma)

แต่โดยที่เป็นจริงแล้ว ไม่มีเลนซ์ที่ประกอบหยาบ ๆ สำหรับทดสอบความคลาด ผลที่ออกมาจะแสดงถึงความสำคัญของใบมีด (Knife - edge) ที่เลื่อนเข้าไปใกล้ทุกทิศทางก่อนที่จะเดาว่าความบกพร่องของระบบมีอะไรบ้าง จนกระทั่งได้สอบสวนให้แน่ชัดก่อน

รูป 2.8D (a) เช่นตัวอย่าง อาจเข้าใจผิดไปสำหรับความคลาดทรงกลม ซึ่งเมื่อดูให้ชัดจะเห็นว่า ผลของการเลื่อนทิศทางเข้าไปตัดใกล้ของใบมีด และผลบางอย่างเป็นลักษณะของแอสติกมาทิซึม (Astigmatism) ข้อสังเกตเหล่านี้เห็นได้จากรูป 2.8 E และ 2.8 F

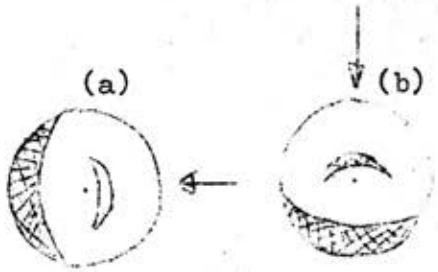


Fig 2.8$_A$ Spherical aberration

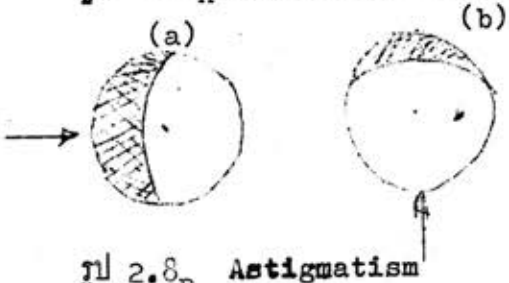


Fig 2.8$_B$ Astigmatism

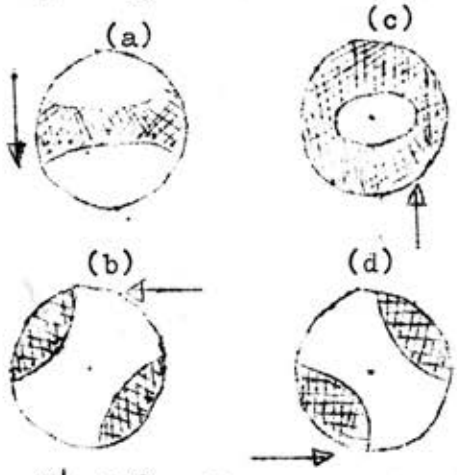


Fig 2.8$_C$ Coma

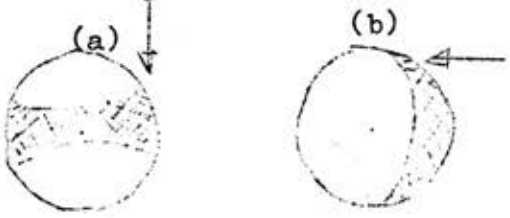
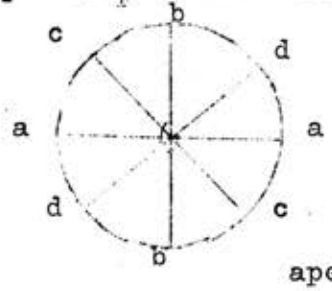
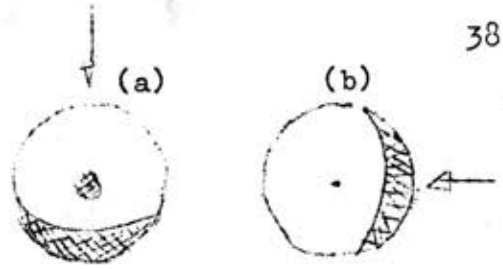


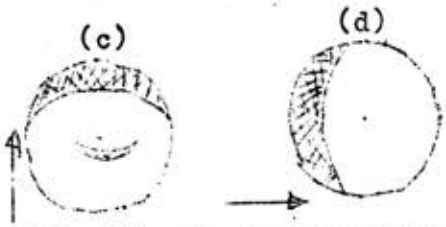
Fig 2.8$_F$ Coma + Astigmatism



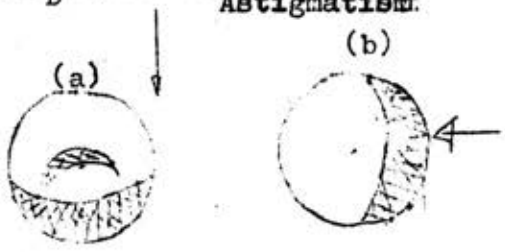
aperture

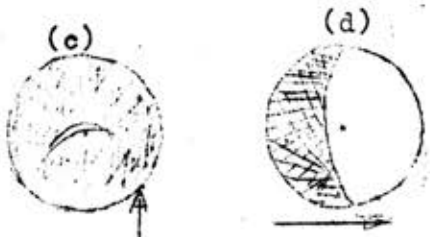
Fig 2.8$_H$



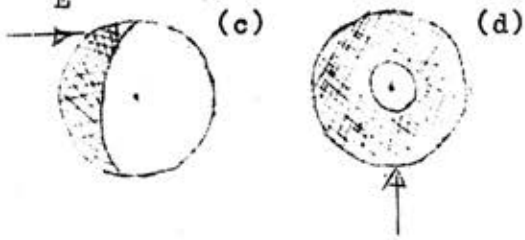


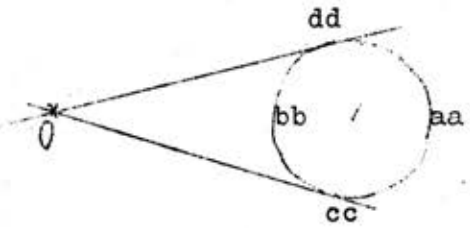
2.8$_D$ Spherical aberration & Astigmatism.





2.8$_E$ Spherical aberration & Coma





image

การทดลองอีกอย่างหนึ่งก็คือเปิดรูรับแสง ประมาณ 4 ม.ม. ภาพที่ถ่ายออกมาจะมีความคลาดทรงกลม ถ้าหากนำเลนซ์นี้มาเปลี่ยนค่ารูรับแสงจาก 1 - 22 ม.ม. ก็จะทราบค่าต้าทั้งหมด รวมทั้งความแตกต่างของทางเดินของแสง ของแต่ละค่าของรูรับแสง เมื่อทำงานแต่ละครั้ง เมื่อเราตั้งการทดลองอย่างระมัดระวังจะพบว่า รูรับแสงที่เล็กที่สุดทำให้แสงจางหายไปนั้นมีค่าความต่างของการเดินของแสงเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ของ Rayleigh limit.

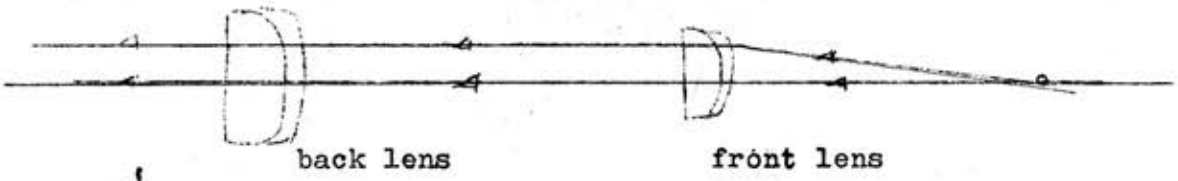
จากที่ Lord Rayleigh ว่า เครื่องมือทางแสงจะมีคุณภาพไม่เลวนัก ถ้าแสงที่มาถึงจุดโฟคัสที่เลือกและความต่างของทางเดินของแสงที่มากที่สุด ไม่มากกว่า $\frac{1}{4}\lambda$ การทดลองนี้ให้ความคิดอันหนึ่งว่า รูปร่างของภาพที่ปรากฏออกมานั้น เนื่องจากความแตกต่างของทางหัศนะที่ต่างกัน

<u>การทดสอบความคลาด เนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma)</u>

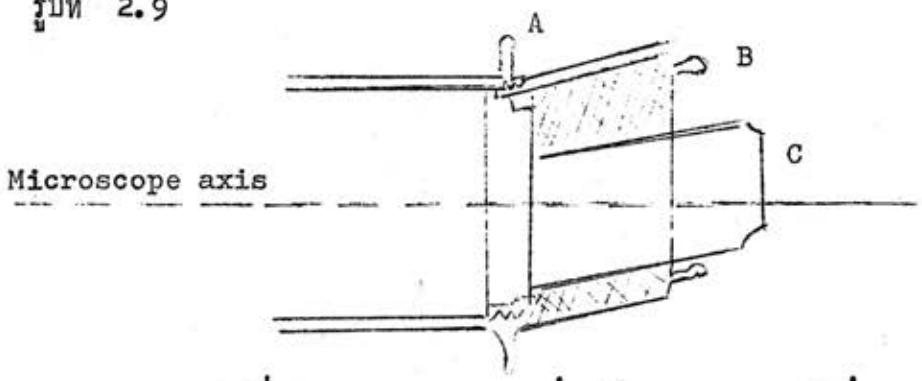
เมื่อต้องการจะตรวจดูแสงตกที่ให้ภาพที่มาจากต้นแสงเป็นจุด (Star) เมื่อภาพมีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) การใช้เลนซ์สองอันประกบกัน (Doublet lens) ของระบบแสงทำให้ไม่มีแอสติกมาติซึม (Astigmatism) และความคลาดทรงกลม (Spherical aberration) แต่ก็ยังมีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) เหลืออยู่ ฉะนั้นเลนซ์ที่เหมาะที่สุดที่จะไม่ให้มีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกนเป็นพวกเลนซ์ใกล้วัตถุของกล้องจุลทัศน์ (Microscope objective)

ในการออกแบบสร้างเลนซ์ ให้ได้คุณภาพดีขึ้นนั้น Prof. Conrady[10] ได้วางหลักเกี่ยวกับชนิดของระบบเลนซ์ไว้ ซึ่งพบว่าโดยการเปลี่ยนมาตราส่วน (Scale) เพื่อให้ส่วนโค้ง (Curve) ต่าง ๆ ของเครื่องมือค่อย ๆ เปลี่ยนรูปร่าง (อธิบายได้ด้วยการคำนวณ) ความคลาดทรงกลมและแอสติกมาติซึม อาจกำจัดได้เหลือแต่ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน

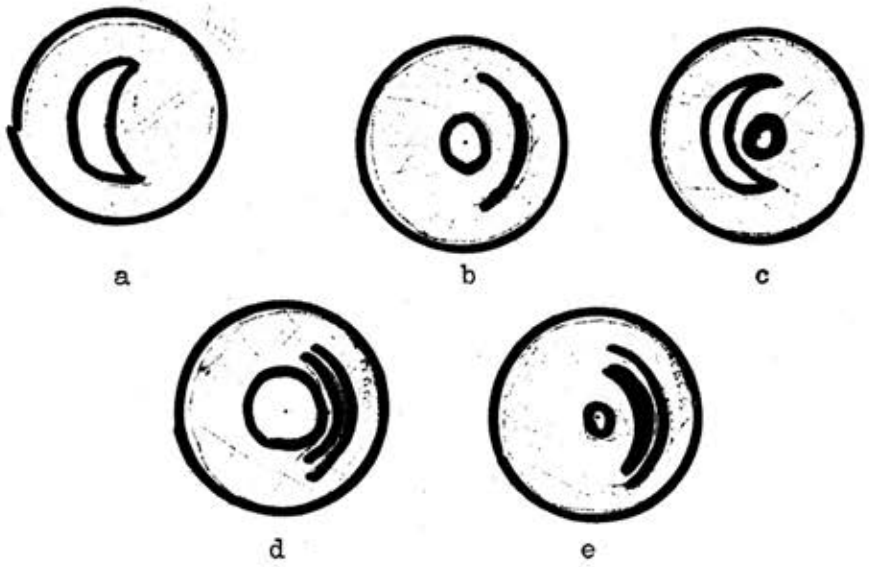
เมื่อทำการทดสอบเลนซ์จะให้ภาพที่ชัดเจนที่ตรงกลางและมีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) เล็กน้อยที่แขนของเลนซ์ต่างๆ ภาพที่มีความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน ไม่สามารถตรวจกับเลนซ์ใกล้วัตถุ (Objective) ในตำแหน่งปกติได้ นอกจากกับแสงที่เข้ามาเอียง ๆ ผ่านมาถึงเลนซ์ใกล้ตา (eye piece) ฉะนั้นจึงออกแบบสร้างให้เลนซ์ใกล้วัตถุวางอย่างพิเศษ ให้แกนของเลนซ์อาจวางที่มุมถึง 10° กับแนวแกนได้ ขณะที่จุดศูนย์กลางของรูรับแสง ยังวางอยู่บนแนวแกนของแสงของกล้องจุลทัศน์ รูป 2.10 แสดงการจัดกล้อง ที่จุด A ที่ปลายกล้องจุลทัศน์ ซึ่งมีชิ้นทรงกระบอกสั้น ๆ อยู่รับแกนเบน 5° กับแกนของกล้องจุลทัศน์ ที่จุด B ซึ่งสามารถหมุนภายในทรงกระบอกเจาะเป็นรูให้เลนซ์ใกล้ตาและเลนซ์ที่อยู่ในทรงกระบอก B ส่วนมุมอื่น ๆ อาจคำนวณได้จากมุมซึ่ง B ได้หมุนไป ภาพของวัตถุ (Star) ที่มองเห็น และภาพถ่ายออกมาดูว่ามีความคลาดประการใดบ้าง รูปที่ 2.11 พบว่าตำแหน่งที่หนึ่งของโฟคัสสอดคล้องกันอย่างดี เงาไปข้างหน้าของความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) ดังรูปเป็นรูปไฮเปอโบลา (Hyperbolic form) ของวงดำ (Dark ring) และค่าของความเข้มคงที่ของวงว่างวงแรก (First bright) เป็นครึ่งวงกลม



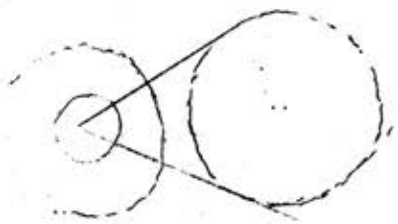
รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 แสดงภาพเครื่องมือหาความคลาดโคม่า



รูปที่ 2.11 ความคลาดโคม่า



รูปที่ 2.12 แสดงจุดโฟคัสของความคลาดโคม่า

จากภาพถ่ายรูปที่ 2.11 ที่จุดโฟคัสรูป 2.11 c ที่ระยะประมาณ 5 ม.ม. และ 1 ม.ม. (รูป 2.11 a,b) ข้างนอกจุดโฟคัสและข้างในจุดโฟคัส (รูป 2.11 d,e) ตำแหน่งนี้สอดคล้องกับความต่างของทางเดินของแสงประมาณ $\frac{1}{2}\lambda$, 1λ ระหว่างตรงจุดกลางเลนซ์และตรงขอบเลนซ์

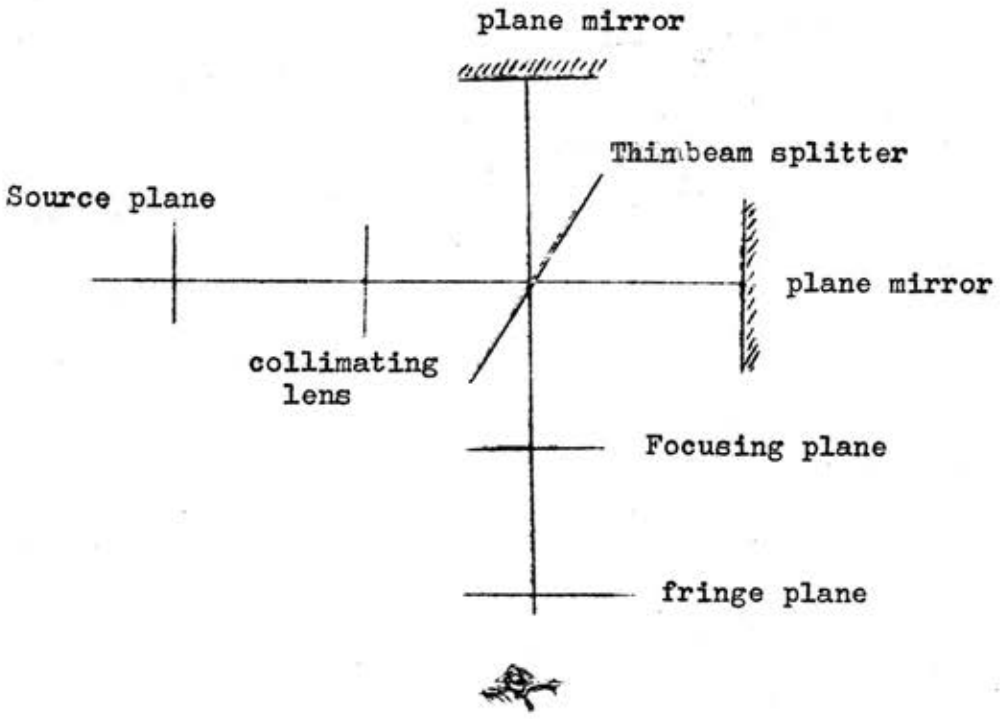
ส่วนจุดโฟคัสการแซกสอดของคลื่น (Interferent ring) ที่ปรากฏจะเอนไปข้างหน้า (ข้างหัว) ขณะที่ส่วนในจุดตรงกลางมุ่งตรงไปทางหาง (Tail) ส่วนอีกภาพจุดตรงกลางชัดเจนขึ้นและจางคลาย (Pattern) ค่อย ๆ จางลงไป คล้ายทรงกลมเมื่อความต่างวัตภาค (Phase) เนื่องจากความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับระยะจากจุดโฟคัส ในภาพถ่ายนั้นปรากฏว่าในรูป 2.11 a,e แสดงถึงภาพที่เห็นแสงเดินจากความสัมพันธ์ของความเข้มแสง ซึ่งไม่ค่อยจะเห็นชัดนักโดยภาพถ่ายรูป 2.12 อธิบายอยู่ในตัวแล้ว แสดงถึงจุดกลางหรือจุดโฟคัสของความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) เป็นรูปคร่าว ๆ ให้เห็นตำแหน่งและขนาด

จากการทดสอบด้วยดาว (Star) แสดงว่าเลนซ์ที่แก้ความคลาดแล้วจะให้ภาพชัดเจนที่จุดศูนย์กลาง แต่ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน จะทำให้ส่วนนอกออกไปผิดรูปจุดโฟคัสที่อยู่นอกแกน (Extra focal)

ที่ปรากฏจะแสดงถึงความคลาดทรงกลมแต่ละแถบ (Zonal spherical aberration) ที่เหลืออยู่ ซึ่งคิดว่ามาจากการคำนวณ อย่างไรก็ตามมักไม่ค่อยคิดถึงทั้งทางทฤษฎีและการปฏิบัติ

<u>ความคลาดที่ทดสอบโดยอินเตอรเพียโรมิเตอร</u> (The Interferometer Patterns due to the Primary Aberrations)

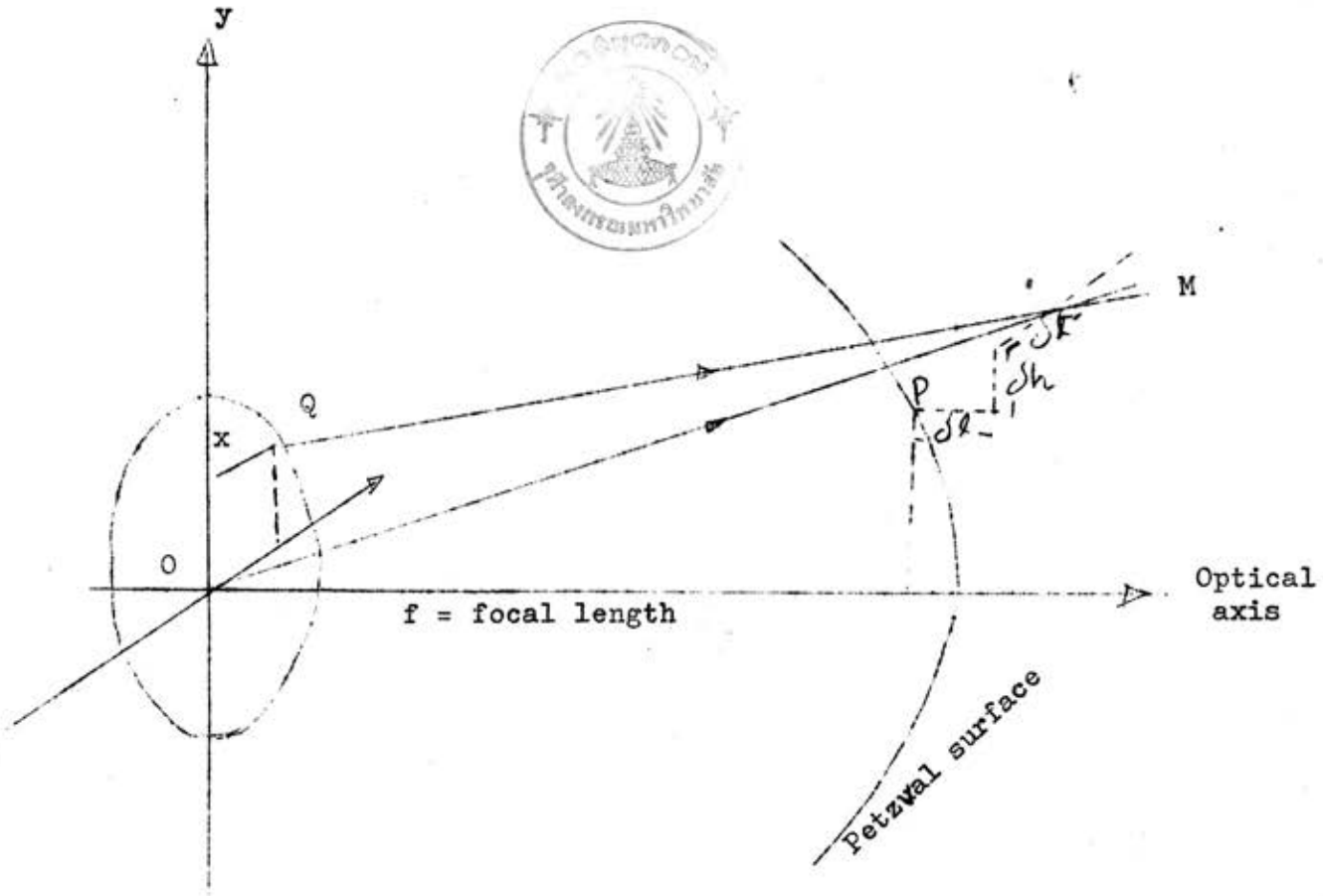
การตรวจสอบดูคุณภาพของเลนซ์อาจทำได้อย่างรวดเร็ว โดยสังเกตจากลวดลาย (Pattern) ในอินเตอรเพียโรมิเตอร (Interferometer) ผู้สังเกตจำเป็นจะต้องทราบว่าลวดลาย (Pattern) อย่างไหนเป็นสมบัติของความคลาด (Aberration) ชนิดใด ภายใต้เงื่อนไข (Condition) อะไรบ้าง วิธีอธิบายลวดลายเหล่านี้ผู้ที่ใช้อินเตอรเพียโรมิเตอรทดสอบเลนซ์นั้น จะต้องจดจำลวดลาย ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ว่าเนื่องจากอะไร ซึ่งบางทีก็มีความคลาดชนิดเดียว บางทีก็มีหลายชนิดผสมกันความรู้เกี่ยวกับลวดลายเนื่องจากความคลาดปฐมภูมิ (Primary Aberrations) ต่าง ๆ นี้ เป็นการช่วยอย่างมากในการที่จะจัดแยกบอกได้ว่า คุณภาพของเลนซ์เป็นอย่างไร และผู้ทดสอบจะต้องเข้าใจ ลวดลายในทันทีว่ามีความคลาดอะไรผสมกันมากน้อยแค่ไหน ซึ่งเป็นความประสงค์ของการทดสอบทางทฤษฎี และจะได้พิจารณาว่าลวดลายนั้น มีความคลาดอะไรอยู่โดยการ เขียน กราฟหารูปร่างได้อย่างถูกต้อง ซึ่งหลายกรณีที่เป็นความคลาดทรงกลม ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน และแอสติคมาทิซึม วิธีที่จะตีความหมายจากลวดลาย (Determined pattern) เหล่านี้ ซึ่งเนื่องจากระยะทางเดินของแสงต่างกัน (Optical path difference) โดยจะพิจารณาถึงแสงขนานที่ตกลงบนพื้นผิวของเลนซ์ เช่น บนเลนซ์ใกล้วัตถุ (Objective) ของกล้องโทรทัศน์ ขนาดเล็ก ในการทดลองนี้ใช้อินเตอรเพียโรมิเตอรแบบของไมเคลสัน (Compensate Michelson interferrometer) รูปที่ 2.13 ซึ่ง Prof.Twyman ได้นำมาดัดแปลง โดยใช้กระจกราบจัดให้ริ้ว (Fringe) เห็นชัด วางเลนซ์ที่จะทดสอบไว้ที่จุดที่แสงจะหักเหออกสู่ตาผู้สังเกต เพื่อว่าแนวแกนของแสงจะได้ตั้งฉากกับกระจกราบจัดให้ริ้ววงกลม (Circular fringe) เกิดขึ้นบนระนาบของจุดโฟคัส (Focal plane) ของมันเอง เรียกว่าเป็นริ้ว (Fringe) ที่แสงตกเป็นแสงขนานหรือริ้วของไฮดิงเจอร์ (Haidinger's fringe) เมื่อใช้เลนซ์ที่ไม่มีความคลาดมาทดสอบบนอินเตอรเพียโรมิเตอรจะเห็นริ้ว (Fringe) เป็นวงกลม แต่ถ้าหากใช้กระจกนูนเป็นตัวสะท้อนแสงที่ปลายแขนโดยให้



รูปที่ 2.13 แสดง Twyman and Green interferometer

จุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกนูนอยู่ที่เกี่ยวกันกับจุดโฟคัสของเลนซ์ที่จะทดสอบบนแนวแกนของเลนซ์ ถ้าไม่มีความคลาดใด ๆ แสงที่ตกผ่านเลนซ์และกระจกโค้งจะสท้อนกลับทางเดิมและไม่ให้ลวดลายใด ๆ แต่อย่างไรก็ตาม มักจะมีลวดลายเสมอเป็นเส้นหรือเห็นเป็นมืดและสว่างสลับกัน เมื่อเปลี่ยนระยะทางก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าตั้งกระจกโค้งให้เอียงเป็นมุมริ้ว (Fringe) ที่มีความเอียงเท่ากันจะคล้ายกัน ในไมเคลสันอินเตอรเฟียโรมิเตอร (Michelson Interferometer) การเคลื่อนที่ขนานของกระจกราบ จะสอดคล้องกับการเลื่อนไป (Shift) ของโฟคัสของเลนซ์ที่จะทดสอบ ในไมเคลสันอินเตอรเฟียโรมิเตอร ต้นแสงมีขนาด (Extended source) ของแสงสีเดียว (Monochromatic light) ที่วางที่ระนาบของโฟคัส (Focal plan:) ของเลนซ์จัดแสงขนาน (Collimating lens) เพื่อว่าคลื่นแสงที่มีทิศทางต่างกันจะได้ตกลงบนเลนซ์แยกลำแสง (Beam splitter lens) ทางด้านผู้สังเกต (Exit Aperture) จะรวมแสงให้ริ้ว (Fringe) เกิดขึ้น เช่นเดียวกับต้นแสงบนระนาบของโฟคัส (Focal plane) ของเลนซ์จัดแสงขนาน (Collimating lens) แต่ถ้าหากใช้ปริซึมแทนกระจกราบที่ปลายแขนของอินเตอรเฟียโรมิเตอร ริ้ว (Fringe) ที่ได้จะไม่เป็นวงกลม แต่จะเป็นรูปอีลิป (Ellips) หรือไฮเปอรโบลา (Hyperbola) ขึ้นกับความสัมพันธ์ของตำแหน่งของตัวสท้อนแสง (Reflecter) ถ้าปริซึมเอียงเป็นมุมที่เหมาะก็จะได้ริ้วเป็นรูปอีลิป (Ellips) ไฮเปอโบลา (Hyperbola)

การพิจารณาลวดลายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดนั้น จากรูป 2.14 เมื่อแสงขนานตกลงบนพื้นผิวของเลนซ์และไปถึงจุด M ซึ่งคิดว่าเคลื่อนที่จากจุดที่ควรจะเกิดภาพ P (Ideal paraxial Image Point P) ใน Petzval surface เป็นระยะ $\delta\ell$ ไปตามแกนของเลนซ์ δh เป็นความสูง h ที่เพิ่มขึ้นจากภาพ δt ตั้งฉากกับ $\delta\ell$ และ δh จะเห็นว่ามีความคลาดปฐมภูมิ (Primary Aberration) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จากความต่างของทางเดินของแสงที่มาถึงจุด O (Len's centre) และจุด Q ที่อยู่ในบริเวณรูรับแสงของ ล ที่จุดร่วมกำหนด (Co - ordinate) x, y ผลต่างของทางเดินของแสงที่มาถึงจุดศูนย์กลางกับทางเดินของแสงที่มาถึงจุด Q เขียนได้เป็น



h = image height

รูปที่ 2.14 แสดงทางเดินของแสงเมื่อผ่านเลนซ์ที่มีความคลาด

$$O.P.D. = \frac{a_1}{4}(x^2+y^2)^2 + \frac{h}{\ell} a_2 y (x^2+y^2) + \frac{1}{2}\left(\frac{h}{\ell}\right)^2 a_3 (x^2+3y^2) + \frac{1}{2}\frac{\delta\ell}{\ell^2}(x^2+y^2) + \frac{\delta hy}{\ell} + \frac{\delta t}{\ell} x \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

ℓ = ระยะของภาพจากผิวหลังของเลนซ์หรือเลนซ์ใกล้วัตถุซึ่งเกือบจะเท่ากับทางยาวโฟคัส f

a_1, a_2, a_3 เป็นฟังชั่น (Function) ของรัศมี (Radii) ดัชนีหักเห (Refractive Index) ความหนา (Thick ness) และระยะระหว่างเลนซ์ ฉนั้นค่าคงที่ (Constant) ของเลนซ์ทั้งระบบ (System) จะบอกถึงการจัดและขนาด (Construction & Size) ซึ่งเป็นค่าคงที่ของความคลาด

a_1 วัดเป็นค่าความคลาดทรงกลม

a_2 วัดเป็นค่าความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน

a_3 วัดเป็นค่าความคลาดเอียง

ค่าเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการวัดอย่างเรขาคณิตของความคลาด โดยมีความสัมพันธ์ โดยประมาณดังนี้

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= \frac{\text{ความคลาดทรงกลม}}{s^2 f^2} \\ a_2 &= \frac{\text{ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน}}{s^2 h} \\ a_3 &= \frac{\text{ระยะระหว่างแนวโฟคัส (Focal line)}}{2h^2} = \frac{1}{2f} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (2)$$

ส่วนความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน (Coma) ในที่นี้หมายถึงระยะระหว่างภาพของแสงตกกลางเลนซ์ (Paraxial Image Point) และจุดตัดกันของแสงตกของเลนซ์ (Two Extremities) ของ y - axis ของเลนซ์

s เป็นรัศมีของรูรับแสง

ซึ่งสมการเหล่านี้ใช้ได้กับรังษีของแสงตกลงมาทำมุมเล็กบนเลนซ์บางที่มีรูรับแสงเล็ก

ความคลาดอีก 2 อย่างคือคชามคลาดโค้ง (Curvature of field) และความบิดเบี้ยว (Distortion) ซึ่งความคลาดทั้งสองนี้ปรากฏในสมการ (1) ในเทอมของ δl , δh

เมื่อวางเลนซ์ในอินเตอรเพียโรมิเตอร ที่จะใช้ทดสอบลวดลาย (Pattern) ที่แลเห็น คล้ายกับเป็นวงคลื่นที่ออกมาจากเลนซ์ แต่ละวงจะผ่านจุดที่มีความต่างของทางเดินของแสงเท่ากัน แสงที่ผ่านเลนซ์ 2 ครั้ง O. P. D ของแต่ละวง (Band) จะเป็นครึ่งช่วงคลื่นมากหรือน้อยกว่า O. P. D. ของวงถัดไปของแต่ละข้าง สมการ (1) จะกลายเป็นสมการของเส้นโค้งที่ทำให้มีลวดลายที่เห็นในอินเตอรเพียโรมิเตอร ซึ่งแต่ละลวดลายนั้นเนื่องจาก O. P. D. ที่ต่างกันไป $\frac{\lambda}{2}$ ฉนั้นการที่ลวดลายจะเกิดเป็นรูปร่างอย่างไรนั้น ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเลนซ์ เมื่อวางเลนซ์ในอินเตอรเพียโรมิเตอร และจัดดีแล้ว สมมติว่าได้ค่าของ δl , δh, δt เราก็แทนลงในสมการ (1) แล้วเขียนกราฟผลของเส้นแต่ละเส้น จะมีเส้นโค้ง 1 เส้นแต่ละครั้งที่บวกเข้าไป $\frac{\lambda}{2}$ ในค่าของ O. P. D. (ต้องระวังให้ทั้งหมดอยู่ในหน่วยเดียวกันแม้แต่ความยาวคลื่น ค่า x, y ควรเป็น ซ.ม.) เราเขียนสมการ (1) ใหม่ เพื่อความสดวก

$$P = A(x^2+y^2)^2 + B(x^2+y^2)y + C(x^2+3y^2) + D(x^2+y^2) + Ey + Fx \ldots\ldots (3)$$

เมื่อค่า P, A, B ,..... อยู่ในเทอมของความยาวคลื่น ปริมาณ A, B, C วัดความคลาดทรงกลม ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน ความคลาดเอียง

D, E, F วัดการเลื่อนไปตามแนวแกน และแนวตั้งฉากของจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกโค้ง จากจุดที่เกิดภาพของแสงตกที่กลางเลนซ์ เมื่อคำนวณรูปร่างของลวดลายของเลนซ์ ได้ค่าเหล่านี้แล้วก็จะทราบคุณภาพของเลนซ์ได้

วิธีเขียนเส้นโค้ง (Curve)

อาจทำได้หลายวิธี แต่มีหลักสำคัญ 2 ประการคือ วิธีคาร์เทียน (Cartesian Method) ซึ่งแลเห็นได้ชัดเจนทุกจุดทุกเส้นโค้งอย่างถูกต้อง แต่วิธีโพลาร์ (Polar Method) ให้เส้นโค้งออกมาเป็นชุด ทีละ 20 - 30 เส้น เมื่อคำนวณเส้นโค้งเพียงเส้นเดียว ฉนั้นจึงใช้วิธีนี้เมื่อเป็นลวดลาย (Pattern) ง่าย ๆ ความถูกต้องก็มีพอสมควร ส่วนวิธีคาร์เทียนมีประโยชน์ทาง Curve tracing

จากสมการ (3) เมื่อมีค่า P ค่า y นอกในเทอม x หรือกลับกัน ถ้าเรากำหนดค่าให้เปลี่ยนไปหลายค่า เราก็มีสมการที่จะคำนวณหลายค่าตามตัวที่เปลี่ยนผ่านไป จุดที่ได้โดยการกำหนดค่าที่เปลี่ยนแปรไป จะอยู่บนเส้นโค้งเชื่อมติดต่อกันทุกจุดซึ่ง O.P.D. เท่ากัน หาได้โดยเลือกค่า P ค่าอื่น ๆ ของตัวเปลี่ยนค่าบนเส้นโค้งนี้ จะหาได้เมื่อได้จุดพอเพียงจึงเขียนเส้นโค้ง (Curve)

วิธีของโพลาร์ (Polar Method) เป็นวิธีการที่ใช้หาค่าของตัวแปรค่า ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าที่กำหนดให้ค่าอื่น ๆ แต่เพื่อความสดวกใช้สมการเป็นแบบโพลาร์ (Polar co - ordinate) โดยให้ $x = r\cos\theta$, $y = r\sin\theta$ ในสมการ (3) จะได้;

$$P = Ar^4 + Br^3\sin\theta + Cr^2(1+2\sin^2\theta) + Dr^2 + Er\sin\theta + Fr\cos\theta \quad ...(4)$$

ต่อไปเราเลือกอนุกรม (Series) ของค่า θ เช่น 0°, 20°, 40° ..... 160° และแต่ละค่าของ θ สมการจะเป็นแบบ,

$$P = Ar^4 + Cr^3 + Hr^2 + Jr \quad ..... \quad (5)$$

A วัดความคลาดทรงกลม

$c = B\sin\theta$ วัดค่าความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน

$H = C + D + 2C\sin^2\theta$ วัดค่าความคลาดเอียงและการเลื่อนไปของจุดโฟคัสตามแนวแกน

$J = E \sin\theta + F \cos\theta$ วัดค่าการเลื่อนไปของจุดโฟคัสตามแนวดิ่ง

โดยกำหนดค่าอนุกรม (series) ของ r ให้สอดคล้องกับค่า P อาจคำนวณได้โดยสมการ (4) และกราฟที่เขียนติดต่อ P และ r โดยเฉพาะค่า θ ให้ P เป็นแกนในแนวดิ่ง r เป็นแกนในแนวราบ ค่าของ r อ่านจากเส้นโค้งแต่ละค่าที่ต้องการของ P

สมมติว่า $P = \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda$ - - - - -

จนกระทั่ง r มีค่าเท่าครึ่งหนึ่งของรูรับแสงของเลนซ์ วิธีนี้นำซ้ำแต่ละค่า θ ที่เลือก ผลสุดท้ายจะได้เส้นลากไปตามเส้นรัศมีของมัน (Radial line) เส้นโค้งทั้งชุดที่ได้ได้รับโดยการลากจุดเชื่อมกัน หรือเป็นจุดที่มีค่า P เท่ากันตลอด Radial line เพื่ออ่านค่า r ให้สดวกขึ้น ณ จุดที่เราเลือกค่า P จะสดวกขึ้น ถ้า สำหรับลวดลาย (Pattern) ที่คำนวณให้ดูนี้ สมมติว่าเลนซ์มีทางยาวโฟคัส 25 ซ.ม. และเปิดหน้ากล้อง 3 ซ.ม. นำไปวางในอินเตอรเพียโรมิเตอร์โดยใช้แสงสีเขียวของปรอท (λ = 5461 A°) ทิศทางของแสงตกทำมุม 5° กับแกนของเลนซ์และเราจะสมมติว่าเลนซ์อันนี้มีค่าคงที่ (Constant) ดังนี้

a_1 = .00008 ซ.ม.

a_2 = .00125 ซ.ม.

a_3 = .01 ซ.ม.

ค่าเหล่านี้สอดคล้องคร่าว ๆ กับความคลาดของแสงตกของเลนซ์ที่จุดโฟคัสของ 2, 5, 7 เท่าของ Rayleigh quarter wave limit ซึ่งจำนวนลวดลายที่เป็นไปได้ของเลนซ์ ย่อมเป็นไปได้หลายชนิด บางชนิดก็ไม่เข้าเรื่องไหนเลย ในการที่จะเข้าใจถึงการตัดกันของแสง (Interference) ที่เกิดจากเลนซ์ที่ทดสอบ ผู้ทดลองต้องเข้าใจแม่นยำกับลักษณะของแต่ละลวดลายเนื่องจากความคลาดต่าง ๆ จะแทนค่าให้ดูดังต่อไปนี้ ในสมการ (1)

$$P = 0.4\,(x^2+y^2)^2 + 2y\,(x^2+y^2) + 0.5\,(x^2+3y^2) + 14.65\,\delta\ell\,(x^2+y^2) + 732.4\,(y\,\delta h + x\,\delta t) \quad \ldots\ldots (6)$$

เมื่อ P และตัวสัมประสิทธิทุกตัวเป็นเทอมของความยาวคลื่น

<u>ความคลาดทรงกลม</u> (Pure spherical aberration)

จากสมการ (2) เราจะเห็นว่า ถ้าสมมติให้ $a_1 = 0.00008$ ความคลาดตามแนวแกน (Longitudinal aberration) ของเลนซ์นี้ หรือระยะจากจุดโฟคัสของแสงตกของเลนซ์ ถึงจุดโฟคัสแสงตกกลางเลนซ์ = 0.11 ซ.ม. ฉนั้นลวดลายที่คำนวณได้ $\delta\ell = 0.1,\ 0,\ -0.1,\ -0.2$ ซ.ม. ซึ่งลวดลายเหล่านี้บนแถวภาพที่ได้มาโดยให้ $h = 0.002$ ในแต่ละกรณี ซึ่งค่าเหล่านี้เอามาเขียนเส้นโค้งแบบโพลาร์ (Polar co-ordinate) เช่น ในกรณีที่ $\delta\ell = 0$, $\delta t = 0$, $\delta h = .002$ เราจะได้สมการ

$$P = 0.4\,(x^2+y^2)^2 + 1.56y$$

หรือแบบโพลาร์

$$P = 0.4r^4 + 1.56\,r\sin\theta$$

ซึ่งใช้กราฟช่วยอีกอันเขียนแต่ละ 20° ของค่ามุม θ และค่า x ที่สอดคล้องกับ

$$P = 0,\ \pm\frac{1}{4},\ \pm\frac{1}{2},\ \pm 1,\ \pm\frac{3}{2} + \ldots\ldots$$

เมื่อเขียนจุดที่มีค่า P ค่าเดียวก็จะได้เส้นโค้งที่ต้องการ

จากผลการคำนวณเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จาก อินเตอรเฟียโรแกรม

$\delta h = .002,\ \delta\ell = 0.1$

$\delta\ell = 0$

$\delta\ell = -0.1$

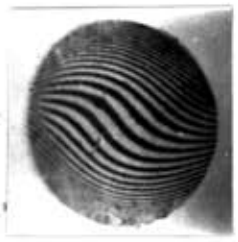
$\delta\ell = -1$

<u>ความคลาดเนื่องจากวัตถุอยู่นอกแกน</u> (Pure coma)

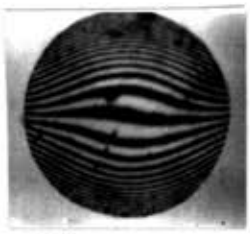
สำหรับกรณีนี้ สมการที่จะนำไปเขียนเส้นโค้ง

$$P = 2y(x^2+y^2) + 14.65\,\delta\ell\,(x^2+y^2) + 732.4\,(y\,\delta h + x\,\delta t)$$

มีอยู่ 8 กรณี ที่คำนวณออกมาได้ ค่า 4 อันแรก $\delta\ell = 0$ มีจุดศูนย์กลางของกระจกอยู่ที่เดียว (coincide) กับ จุดภาพของแสงตกกลางเลนซ์ และอีก 4 ค่า จุดศูนย์กลางเลื่อนไปเป็นระยะ $\delta\ell = .136$ แต่ละค่าของ $\delta\ell$ และลวดลายทั้ง 4 ที่คำนวณได้ มีทั้งค่า $h = 0$ or $\pm .0041$ ซ.ม. และ $\delta t = 0$ หรือ .002 ซ.ม. ผลของการคำนวณ กับภาพที่ได้จาก Interferogram เปรียบเทียบกันด้วย



$\delta\ell = 0$
$\delta h = .0041$

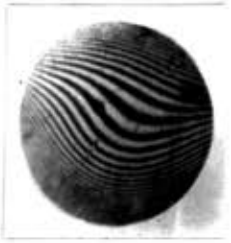


$\delta\ell = 0$
$\delta h = 0$

$\delta\ell = 0$
$\delta h = 0$

$\delta\ell = 0$ $\delta t = 0$
$\delta h = -.0041$

$\delta\ell = 0$, $\delta t = 0$
$\delta h = -.0041$



$\delta\ell = 0.136$ $\delta t = 0$
$\delta h = 0.0041$

$\delta\ell = 0$
$\delta h = 0$

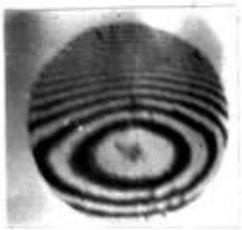
$\delta\ell = 0.136$ $\delta t = 0$
$\delta h = -.0041$

<u>แอสติกมาติซึม</u> (Pure astigmatism) เรามีสมการดังนี้

$$P = .7(x^2 + 3y^2) + 14.65\,\delta k\,(x^2+y^2) + 732.4\,(y\,\delta h + x\,\delta t)$$

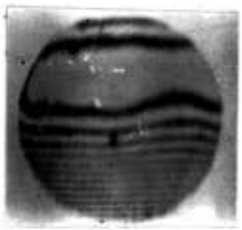
ลวดลายที่คำนวณได้ ต่างกัน 5 ตำแหน่ง ของกระจกตามแกนของเลนซ์ และมีลวดลายอื่นซึ่งคำนวณในแต่ละกรณี เพื่อแสดงผลของการเลื่อนไปเล็กน้อย คือ $\delta h = .002$

$\delta l = 0$



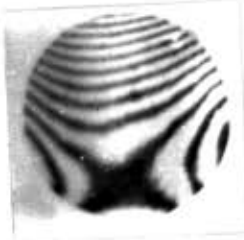
$\delta l = 0.1913$

$\delta l = 0$



$\delta l = -.0478$

$\delta l = -.1911$



$\delta l = -.0956$

$\delta l = -.1434$