

SECOND EDITION

CLINICAL OPTICS

THE LECTURE NOTE

นพ.เชาว์ เจริญกิจขจร

CLINICAL OPTICS

THE LECTURE NOTE

ฉบับปรับปรุง (second edition)



นายแพทย์เชาว์ เจริญกิจขจร

Clinical Optics: The Lecture Note (second edition) e-book

ทัศนศาสตร์คลินิก (ฉบับปรับปรุง) หนังสืออิเล็กทรอนิกส์

© 2024 Chaow Charoenkijajorn

สงวนลิขสิทธิ์หนังสือเล่มนี้ตามพระราชบัญญัติ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558

ห้ามคัดลอกเนื้อหา ภาพประกอบ รวมทั้งดัดแปลงเป็นแถบบันทึกเสียง วิดีทัศน์ หรือเผยแพร่ด้วย
รูปแบบและวิธีการอื่นใดก่อนได้รับอนุญาต

ผู้เขียน: เซาว์ เจริญกิจจจร

ออกแบบหน้าปก: เซาว์ เจริญกิจจจร

ภาพประกอบในเล่ม: เซาว์ เจริญกิจจจร

250 หน้า.

พิมพ์ครั้งที่ 1 มีนาคม 2568

ติดตามข่าวสารได้ที่ facebook page: eyecyclopedia

www.eye-cyclopedia.com

ราคา 990 บาท

หนังสือเล่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่หนังสือมาตรฐานแนวทางการรักษาผู้ป่วย เนื่องจาก
ความรู้ทางการแพทย์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ผู้จัดทำพยายามอย่างสุดความสามารถที่จะถ่ายทอด
ข้อมูลที่ถูกต้องและทันสมัย ผู้จัดทำไม่สามารถรับผิดชอบต่อผลที่ตามมาจากการนำข้อมูลในหนังสือไปใช้ได้
หากผู้อ่านพบข้อผิดพลาดหรือมีข้อชี้แนะประการใด ผู้จัดทำยินดีรับฟังด้วยความยินดี

คำนำ (ฉบับปรับปรุง second edition)

ผมเริ่มเขียนหนังสือเล่มนี้ตอนอายุ 29 เริ่มจากความคิดว่าจะเขียนหนังสือคู่มือเตรียมสอบ เล่มเล็ก ๆ รวบรวมสูตรคำนวณต่าง ๆ ในวิชา clinical optics สำหรับแพทย์ประจำบ้าน แต่พอเริ่มเขียนจริง ๆ ก็รู้สึกว่าเป็นความคิดที่ไม่ดีนัก เพราะถ้าเขียนหนังสือที่แค่เอาข้อเท็จจริงหรือสูตรมาเรียงต่อ ๆ กัน เวลาอ่านก็ไม่ต่างอะไรกับการท่องหนังสือไปสอบ ไม่ได้ก่อให้เกิดความเข้าใจ แถมยังน่าเบื่อและไม่มีประโยชน์ ผมคิดว่าผู้อ่านควรจะต้องเห็นที่มาที่ไป ต้องเข้าใจความรู้พื้นฐานเพื่อที่จะสามารถต่อยอดความรู้ไปเรื่อย ๆ เพื่อในที่สุดจะได้เห็นภาพรวมและเห็นความเชื่อมโยงของความรู้ต่าง ๆ

ผมเชื่อว่าเราทุกคนกำลังอยู่บนเส้นทางเพื่อเป็นตัวเองในรูปแบบที่ดีที่สุด ความสนุกของการเรียนหนังสือคือการได้เห็นตนเองเป็นคนที่เก่งขึ้น ได้เห็นว่าเรากำลังค่อย ๆ เข้าใกล้ตัวตนในรูปแบบที่เราอยากจะเป็น เราอยากเรียนวิชา optics ให้ได้ดี เพราะเราเชื่อมั่นว่ามันคือองค์ประกอบหนึ่งที่จะทำให้เราเป็นหมอตาทิเก่งและนำความรู้ไปช่วยเหลือคนอื่นได้ ถ้าจะเขียนหนังสือสักเล่ม มันควรจะเป็นหนังสือที่ช่วยพาผู้คนไปยังจุดนั้น

หนังสือจึงถูกวางโครงร่างใหม่และจัดวางลำดับเนื้อหาให้เป็นเรื่องราว ผมตั้งใจใช้ภาษาที่อ่านแล้วเข้าใจได้ง่ายและวาดรูปประกอบทั้งหมดกับมือ จนสุดท้ายออกมาเป็นหนังสือจริง ๆ จัง ๆ เล่มหนึ่งเล่ม

หลังจากหนังสือถูกเผยแพร่ออกไป สิ่งที่ผมดีใจที่สุดคือการได้พบกับแพทย์ประจำบ้านและทราบว่าหนังสือมีประโยชน์ในการเรียนกับหลาย ๆ คน บางคนส่งข้อความพร้อมกับถ่ายรูปหนังสือที่มีรอยขีดเขียนและปากกาเน้นข้อความมาให้ดูว่าอ่านหนังสือจบแล้ว แม้แต่นักศึกษาศึกษาต่อมาก็เคยมาบอกผมว่าได้อ่านหนังสือจนจบ ซึ่งเป็นสิ่งที่ผมไม่คิดมาก่อนว่าหนังสือจะสามารถมีบทบาทในวงการทัศนมาตรด้วย

หนังสือเล่มนี้ได้เปิดประตูแห่งโอกาสหลาย ๆ บานให้กับผม โอกาสเหล่านี้เป็นสิ่งที่ผมไม่เคยคาดคิดในขณะที่เขียนหนังสือ ทั้งโอกาสการเป็นวิทยากรในงานประชุมราชวิทยาลัยจักษุแพทย์แห่งประเทศไทยหลายครั้ง การติวสอบวุฒิปดฺตรให้แพทย์ประจำบ้านชั้นปีที่ 3 ติดต่อกันทุกปีจนถึงปัจจุบัน รวมถึงการได้รับเชิญไปเป็นอาจารย์พิเศษสอนนักศึกษาคณะทัศนมาตรศาสตร์

นอกจากนั้นหนังสือยังได้ถูกแปลเป็นภาษาอังกฤษและเปิดตัวในงานประชุมจักษุแพทย์ที่ประเทศมาเลเซีย ปี 2566 ปัจจุบันมีผู้อ่านหนังสือแล้วมากกว่า 40 ประเทศทั่วโลก

ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่ยืนยันโอกาสมาให้ ผมดีใจที่ได้พบปะกับทุกคนระหว่างการเดินทางที่ผ่านมา และรู้สึกตื่นเต้นกับประสบการณ์ใหม่ ๆ ที่จะมาถึงในอนาคตข้างหน้าด้วย

แน่นอนว่าหนังสือเล่มนี้เติบโตไปพร้อม ๆ กับตัวผม หนังสือ second edition นี้คือพัฒนาการของหนังสือเล่มแรก เนื้อหามีความเข้มข้นมากขึ้น โดยผมได้เพิ่มเติมเนื้อหาที่นำรู้ แกไขจุดบกพร่อง และนำประสบการณ์การสอนมาใช้ในการพัฒนาหนังสือให้สามารถช่วยผู้อ่านในการเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ผมเชื่อว่านี่คือเวอร์ชันของหนังสือที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ ณ เวลานี้ และภูมิใจมากที่จะได้เผยแพร่ออกไปให้ทุกคนได้เห็น ขอขอบคุณผู้อ่านที่เชื่อมั่นในหนังสือเล่มนี้ และขอให้สนุกกับการผจญภัยในโลกของ optics ครับ

ยินดีที่ได้พบกัน

นพ.เชาว์ เจริญกิจขจร

5 พฤศจิกายน 2567

คำนำ (ฉบับ first edition)

“Optics อ่านเล่มไหนดี?” เป็นคำถามที่ผมได้รับจากเพื่อนและน้อง ๆ แพทย์ประจำบ้าน จักษุวิทยาหลายครั้งในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทุกครั้งที่ได้ยินคำถามนี้ก็จะนึกย้อนกลับไปถึงตัวเอง ช่วงที่เริ่มอ่าน optics ครั้งแรกสมัยเป็นแพทย์ใช้ทุน ในตอนนั้นเลือกอ่านหนังสือ clinical optics ของ basic & clinical science course (AAO) เป็นเล่มแรก ซึ่งเป็นหนังสือที่เรียบเรียงมาอย่างดี แต่ด้วยความที่เป็นเนื้อหาที่ไม่ได้คุ้นเคยมาก่อน คำศัพท์ต่าง ๆ ไม่เคยได้ยิน และด้วยประสบการณ์ทาง จักษุวิทยาที่ยังมีไม่มากในตอนนั้น ทำให้อ่านแล้วก็นึกภาพตามไม่ออก ต้องหาวิดีโอใน YouTube ดู สลับไป ๆ มา ๆ จำได้ว่ากว่าจะอ่านจบใช้เวลาานและมีความท้อทรมานพอสมควร

ผมคิดว่าคงจะดีถ้ามีหนังสือที่เน้นอธิบายใจความสำคัญ และเขียนด้วยภาษาที่เข้าใจง่าย เหมือนเวลาเราจดเลกเชอร์ในห้องเรียน ที่เราก็นัดเฉพาะส่วนเนื้อหาที่เป็นประเด็นสำคัญเพื่อกลับไปอ่านทบทวน ไม่ได้จดทุกคำพูดทุกประโยค น่าจะช่วยให้สามารถเข้าใจบทเรียนได้ง่ายขึ้นมาก ผมจึงตัดสินใจเขียนหนังสือ “Clinical Optics : the lecture note” เล่มนี้และวาดรูปประกอบในเล่ม ด้วยตนเองทั้งหมด ด้วยความหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นคำตอบของคำถามข้างต้นสำหรับใครหลาย ๆ คนครับ

ผมเขียนหนังสือเล่มนี้ขึ้นโดยมีเป้าหมายสำหรับแพทย์ประจำบ้านจักษุวิทยา จักษุแพทย์ หรือผู้ที่สนใจศึกษาวิชาทัศนศาสตร์คลินิก ตลอดจนการเขียนผมได้พยายามหาจุดสมดุลในการทำให้เนื้อหา มีความกระชับ อ่านแล้วจับประเด็นที่สำคัญได้ง่าย แต่ก็ต้องไม่สั้นจนเกินไปจนไม่เห็นถึงที่มาที่ไป เพราะผมเชื่อว่าการมองเห็นถึงเหตุผลที่มาที่ไปจะเป็นการเรียนรู้ด้วยความเข้าใจ ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีกว่าการท่องจำที่จำได้ไม่นานก็ลืม รวมถึงผมพยายามที่จะทำให้อ่านหนังสือเล่มนี้เป็นหนังสือที่อ่านได้ทั้งผู้ที่เพิ่งเริ่มต้นศึกษาไปจนถึงใช้ในการทบทวนสำหรับผู้ที่มีความคุ้นเคยกับเนื้อหามาแล้วด้วย

อย่างไรก็ตามวิชา clinical optics มีเนื้อหาที่กว้างและมีรายละเอียดมาก ในการศึกษา clinical optics ให้ได้ผลดี ผมแนะนำให้ใช้หนังสือเล่มนี้สำหรับช่วยทำความเข้าใจสาระสำคัญหรือสำหรับอ่านทบทวน แต่ไม่ควรใช้หนังสือเล่มนี้เป็นแหล่งค้นคว้าเพียงเล่มเดียว ควรศึกษาจากแหล่งอื่น ๆ ประกอบไปด้วยครับ

ผมขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนให้หนังสือเล่มนี้เกิดขึ้น ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยสนับสนุนให้
ทำในสิ่งที่ชอบ ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาจุฬารัตนวิทยา โรงพยาบาลวราวุฒิตกท่นที่เป็นผู้ให้
ความรู้และอบรมฝึกฝนจนผมได้มาเป็นจักษุแพทย์ในวันนี้ ขอขอบคุณผู้ร่วมงานที่โรงพยาบาลหาดใหญ่
ที่คอยช่วยเหลือให้การทำงานเป็นไปอย่างราบรื่น และสุดท้ายขอขอบคุณผู้อ่านทุกท่านที่ให้ความ
ไว้วางใจเลือกอ่านหนังสือเล่มนี้ครับ

ผมหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะสามารถทำประโยชน์ให้กับสังคมได้อย่างเต็มที่ หาก
มีข้อผิดพลาดประการใด ผมยินดีน้อมรับคำแนะนำ ดิชมจากผู้อ่านทุกท่านเพื่อปรับปรุงและพัฒนา
หนังสือให้ดียิ่งขึ้นต่อไปครับ

นายแพทย์เชาว์ เจริญกิจขจร

7 มิถุนายน 2564

สารบัญ

Chapter 1: Geometrical Optics	1
Chapter 2: Mirrors	27
Chapter 3: Prisms	39
Chapter 4: Optics of the Human Eye	53
Chapter 5: Astigmatism	69
Chapter 6: Clinical Refraction	83
Chapter 7: Correction of Ametropia & Lens Effectivity	105
Chapter 8: Accommodation & Bifocals	117
Chapter 9: Contact Lens	131
Chapter 10: Intraocular Lens	141
Chapter 11: Ophthalmic instruments & Visual Aids	155
Chapter 12: Physical Optics	175
Self-Assessment	191
Assessment A	192
Assessment B	200
Answer keys	209
Assessment A	210
Assessment B	222
ดัชนี (index)	231
กิตติกรรมประกาศ	235
ประวัติผู้เขียน	237



Chapter 1

GEOMETRICAL OPTICS



Geometrical optics หรือทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต เป็นการศึกษาการเดินทางของแสงที่อยู่ในรูปแบบของลำแสง (light ray) มีประโยชน์ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแสง และการเกิดภาพเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางต่าง ๆ เช่น อากาศ น้ำ และเลนส์

ลักษณะของลำแสง

- แสงเดินทางเร็วที่สุดในสุญญากาศ โดยมีความเร็วเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที
- ลำแสงเดินทางเป็นเส้นตรงเสมอเมื่อเดินทางอยู่ในตัวกลาง (media) หนึ่ง ๆ
- เส้นทางการเดินทางของลำแสงจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อลำแสงเกิดการหักเห (refraction) หรือการสะท้อน (reflection)
- เมื่อแสงเดินทางในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ความเร็วของแสงจะลดลง (ดังนั้น ความเร็วของแสงในอากาศ > ของเหลว > ของแข็ง)
- อัตราส่วนความเร็วของแสงในสุญญากาศต่อความเร็วของแสงในตัวกลางหนึ่ง ๆ เรียกว่า ดัชนีหักเห (refractive index, n)

$$\text{Refractive index (n)} = \frac{\text{speed of light in vacuum}}{\text{speed of light in a media}}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า refractive index ของตัวกลางหนึ่ง ๆ ที่ไม่ใช่สุญญากาศ จะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ เนื่องจากแสงเดินทางในตัวกลางอื่นช้ากว่าในสุญญากาศแน่นอน

ตัวกลาง (media)	ดัชนีหักเห (refractive index)
Vacuum	1.00
Air	1.00029 (~1.00)
Water (25 °C)	1.334
Crystalline lens	1.41
Crown glass	1.523
Polycarbonate	1.586

ตารางที่ 1 แสดงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่าง ๆ

การหักเหของแสงบนพื้นผิวระนาบ (refraction on flat surface)

การหักเห (refraction) คือ การเบี่ยงเบนของลำแสงออกจากทิศทางเดิมเมื่อแสงผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่งที่มีดัชนีหักเหไม่เท่ากัน การหักเหของแสงจะเป็นไปตาม Snell's law ซึ่งกล่าวว่า

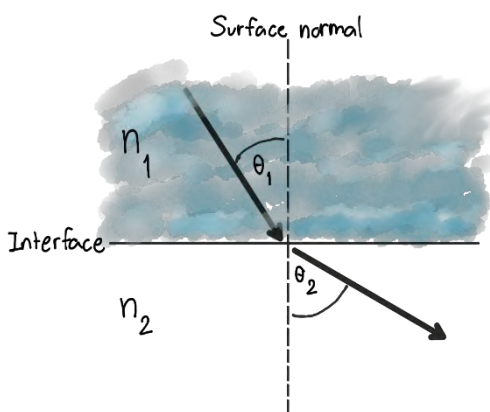
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

θ_1 = มุมตกกระทบ (angle of incidence) θ_2 = มุมหักเห (angle of refraction)

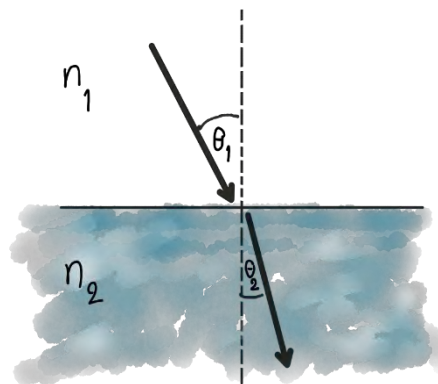
n_1 = refractive index of the first media n_2 = refractive index of the second media

โดยมุมตกกระทบและมุมหักเห คือ มุมที่แสงกระทำกับ surface normal (เส้นสมมุติที่ลากตั้งฉากกับพื้นผิว) ไม่ใช่ interface

สังเกตว่าการหักเหของแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสองประการ คือ ดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสอง และ ขนาดของมุมตกกระทบ



เมื่อแสงเดินทางจาก n มาก $\rightarrow$ n น้อย
ลำแสงจะเบน “ออกจาก” surface normal



เมื่อแสงเดินทางจาก n น้อย $\rightarrow$ n มาก
ลำแสงจะเบน “เข้าหา” surface normal

ตัวอย่าง แสงเดินทางจากอากาศ (refractive index = 1.00) ตกกระทบผิวน้ำ (refractive index = 1.3) โดยทำมุม 30 องศา กับเส้นปกติ จงหาทิศทางการเดินทางของแสงในน้ำ (กำหนด $\sin 30 = 0.5$, $\sin 60 = 0.87$)

จาก Snell's law: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

$$(1.00)(\sin 30) = (1.3) \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_2 = 0.385$$

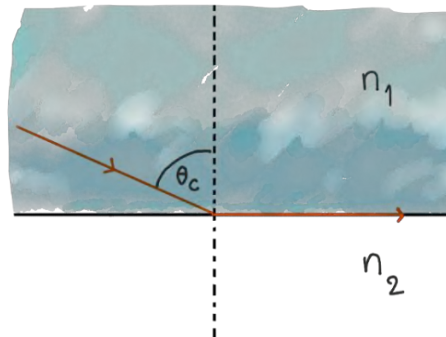
$$\theta_2 = \arcsin 0.385 \approx 22.6 \text{ degrees}$$

ดังนั้น แสงจะเดินทางในน้ำโดยทำมุมประมาณ 22.6 องศา กับเส้นปกติ

Total internal reflection

ปรากฏการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห มากไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อย

เมื่อขนาดของมุมตกกระทบมากเกินไป มุมวิกฤต (critical angle ; θ_{crit}) จะทำให้แสงเกิดการสะท้อนอยู่ ภายในตัวกลางเดิม และไม่สามารถ เดินทางไปยังตัวกลางที่สองได้



Total internal reflection

เราสามารถหาค่าของมุมวิกฤตของแต่ละพื้นผิวได้จาก Snell's law; $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

ในกรณี total internal reflection มุมสะท้อนจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา ($\theta_2 = 90 \text{ degrees}$)

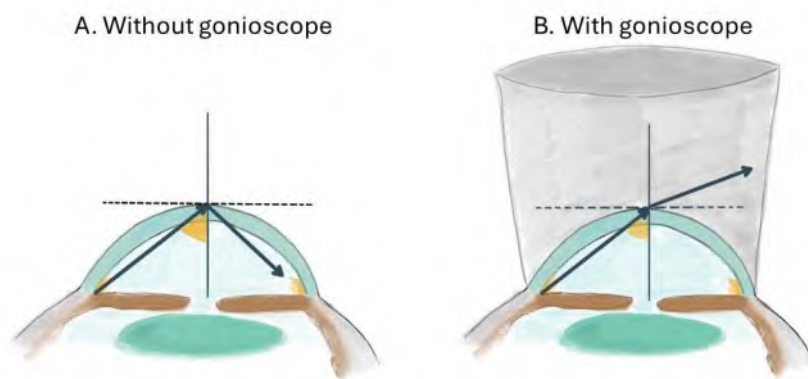
$$n_1 \sin \theta_{\text{crit}} = n_2 \sin 90 \quad ; \sin 90 = 1.0$$

$$\sin \theta_{\text{crit}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{critical angle } (\theta_{\text{crit}}) = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Total internal reflection เป็นสาเหตุว่าทำไมเราถึงไม่สามารถมองเห็น anterior chamber angle จากการมองด้วยตาเปล่าได้ เนื่องจากแสงที่วิ่งมาจาก angle จะตกกระทบ cornea-air interface (ซึ่งมีดัชนีหักเหเท่ากับ 1.376 และ 1 ตามลำดับ) ด้วยมุมที่มีขนาดเกิน critical angle ทำให้เกิด total internal reflection แสงไม่สามารถผ่านออกมาเข้าตาของผู้ตรวจได้

ในการตรวจ anterior chamber angle เราจึงต้องใช้ gonioscope ซึ่งมีดัชนีหักเหมากกว่าอากาศเป็นการสร้าง interface ใหม่ที่มี critical angle มากกว่า angle of incidence ทำให้แสงจาก angle สามารถผ่านออกมาเข้าสู่ตาของเราได้ ดังรูป



การหักเหบนพื้นผิวโค้ง (refraction on a single curved surface)

พื้นผิวที่มีความโค้งเป็นพื้นผิวที่มีกำลังในการหักเหแสง (refractive power) โดยกำลังของพื้นผิวโค้งจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่าง คือ **รัศมีความโค้ง** (radius of curvature) และ **ความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างตัวกลางทั้งสอง** ตามสมการ

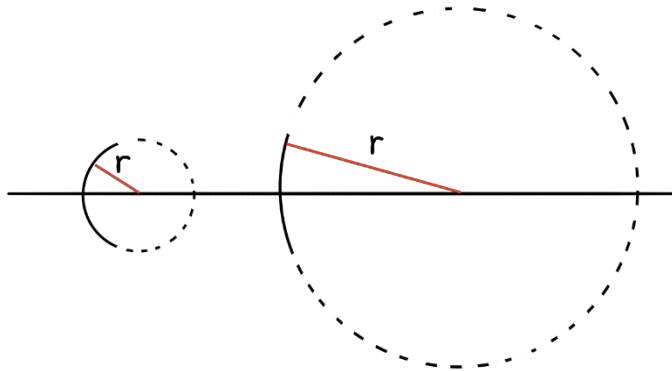
$$\text{Power of curved surface (P)} = \frac{n_2 - n_1}{r}$$

n_2 = refractive index of the second media

n_1 = refractive index of the first media

r = radius of curvature

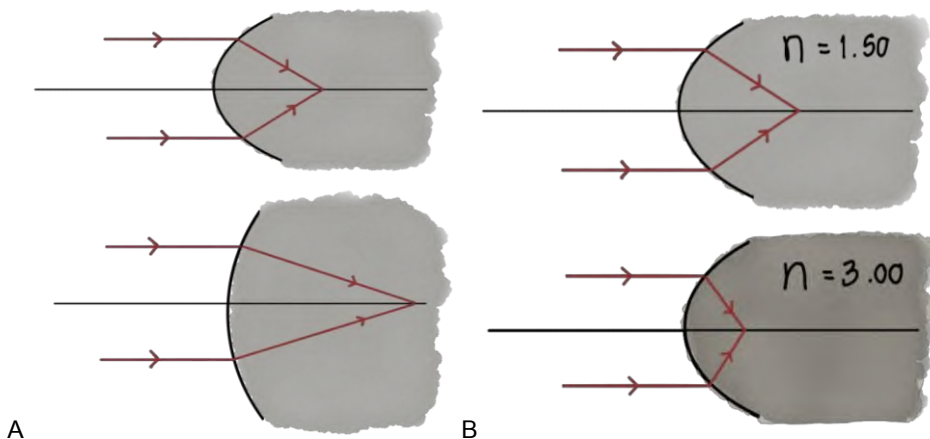
รัศมีความโค้ง (radius of curvature) คือ ระยะทางที่วัดจากพื้นผิวจนถึงจุดศูนย์กลางความโค้ง



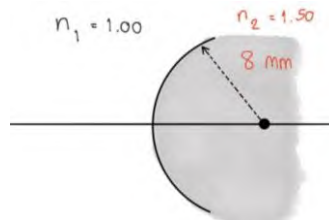
Radius of curvature มีค่ามาก $\rightarrow$ พื้นผิวโค้งน้อย

Radius of curvature มีค่าน้อย $\rightarrow$ พื้นผิวโค้งมาก

จากสมการจะเห็นว่าพื้นผิวที่มี radius of curvature น้อย จะมี refractive power มาก (รูป A) และ refractive power ของพื้นผิวยังขึ้นกับความต่างของ refractive index ระหว่างตัวกลางทั้งสองด้วย (รูป B)



ตัวอย่าง วัตถุโปร่งแสงพื้นผิวโค้งทำจากวัสดุที่มี refractive index = 1.50 และ radius of curvature = 8.0 มิลลิเมตร จงหา refractive power ของพื้นผิวนูนเมื่อวัตถุวางอยู่ในอากาศ ($n = 1.0$)



Refractive power ของ single curved surface = $\frac{n_2 - n_1}{r}$

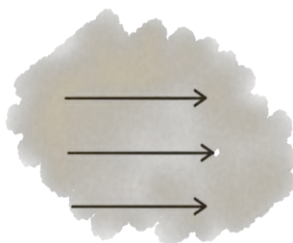
$$= \frac{1.50 - 1.00}{0.008}$$

$$= +62.5 \text{ diopters}$$

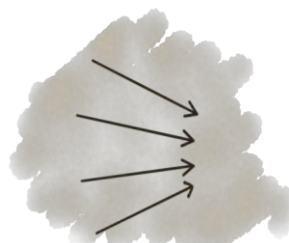
Vergence

ในการคำนวณทาง geometrical optics จะกำหนดทิศทางของแสงที่กระทำกับ optical axis ได้ 3 ลักษณะ ได้แก่

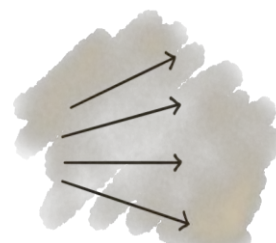
1. Parallel ray = ลำแสงที่วิ่งขนานกับ optical axis (vergence = 0)
2. Convergence ray = ลำแสงที่มีทิศทางวิ่งเข้าหา optical axis (positive vergence)
3. Divergence ray = ลำแสงที่มีทิศทางวิ่งออกจาก optical axis (negative vergence)



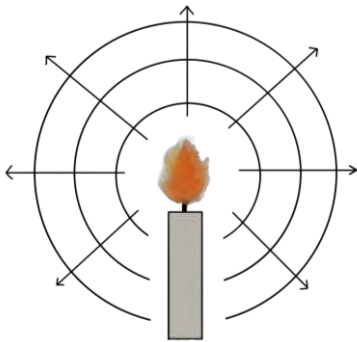
Parallel ray
(vergence = 0)



convergence
(positive vergence)



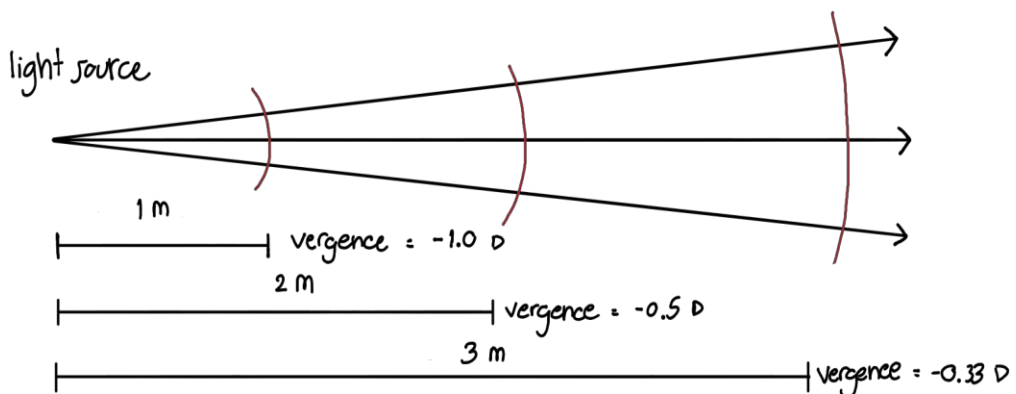
divergence
(negative vergence)



ลำแสงที่ออกมาจากวัตถุที่ทำให้กำเนิดแสงทุกชนิด เช่น เทียนไข หรือ พระอาทิตย์ จะเป็นลำแสงที่มีทิศทางวิ่งออก ห่างจากกัน (divergence) พุ่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงเสมอ ในขณะที่ convergence ray จะเกิดขึ้นใน lens system เท่านั้น (เช่น เมื่อแสงวิ่งผ่านเลนส์นูน)

เราสามารถคำนวณ vergence ของแสงได้จาก

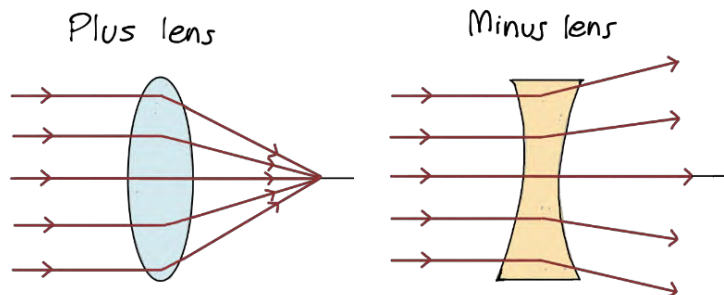
$$\text{vergence} = \frac{\text{refractive index of media}}{\text{distance from reference point (m)}} = \frac{n}{r} \text{ (หน่วย } \frac{1}{m} \text{ หรือ diopter)}$$



รูปแสดง divergence ray ที่วิ่งออกจาก light source ในตัวกลางที่เป็นอากาศ ($n = 1.00$) vergence ของแสงในแต่ละตำแหน่งขึ้นกับระยะห่างของตำแหน่งนั้นกับ reference point (ในที่นี้คือ light source) และสังเกตว่าเมื่อแสงวิ่งออกห่างจาก reference point มากขึ้น vergence จะมีค่าเข้าใกล้ 0 มากขึ้น และลำแสงจะมีลักษณะขนานกับ optical axis มากขึ้นเรื่อย ๆ

Lens system & vergence equation

หลังจากที่ผู้อ่านได้ทำความรู้จักกับ vergence แล้ว ต่อไปเรามาทำความรู้จักกับสิ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง vergence ของแสงซึ่งก็คือเลนส์นั่นเอง เลนส์ประกอบด้วยพื้นผิวโค้ง 2 พื้นผิว คือพื้นผิวของเลนส์ด้านหน้าและด้านหลัง เมื่อแสงตกกระทบกับเลนส์ แสงจะเกิดการหักเหและเกิดการเปลี่ยนแปลง vergence ของแสง ดังนี้



สังเกตว่าเมื่อแสงขนานวิ่งมาจากระยะอนันต์ (infinity) convex lens จะเปลี่ยนทิศทางของแสงเข้าสู่ optical axis (converging) ในขณะที่ concave lens จะเปลี่ยนทิศทางของแสงให้วิ่งออกจาก optical axis (diverging)

Convex lenses add vergence, concave lenses reduce vergence.

ใน geometric optics เมื่อมีระบบที่ประกอบด้วยเลนส์และมีแสงจากวัตถุที่เข้ามาตกกระทบ เราสามารถคำนวณตำแหน่งและลักษณะของภาพที่เกิดได้โดยใช้ “vergence equation”

6 cardinal points

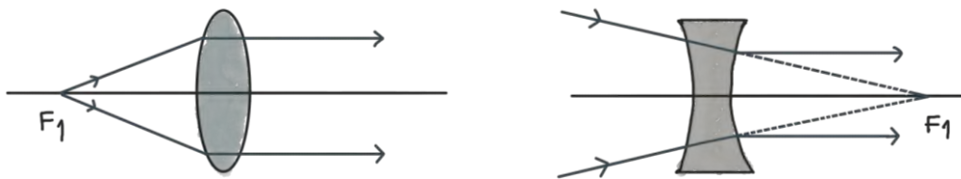
ในการคำนวณ vergence equation จะมีการกำหนดจุดใน lens system 6 จุด (3 คู่) ได้แก่ focal points, principal points และ nodal points

1. Focal points

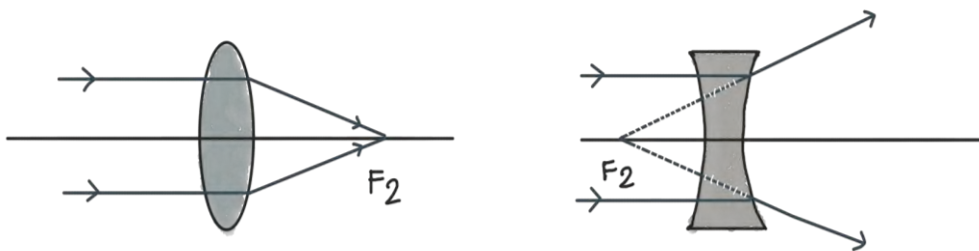
เลนส์หนึ่ง ๆ จะประกอบด้วย primary focal point และ secondary focal point

Clinical Optics: The Lecture Note

Primary focal point (F_1) คือ ตำแหน่งของวัตถุที่จะให้ภาพเป็นแสงขนาน (parallel ray)



Secondary focal point (F_2) คือ ตำแหน่งของภาพเมื่อแสงขนานตกกระทบบนเลนส์นั้น ๆ



Convex lens มี primary focal point อยู่ทางซ้าย secondary focal point อยู่ทางขวาของเลนส์
Concave lens มี primary focal point อยู่ทางขวา secondary focal point อยู่ทางซ้ายของเลนส์

ระยะทางระหว่าง focal point กับ principal plane (ระนาบที่แสงเกิดการหักเห) เรียกว่า focal length (f) หรือระยะโฟกัส ถ้าเราทราบ focal length จะสามารถคำนวณ power ของ lens ได้จาก

$$\text{Power (diopter)} = \frac{1}{\text{focal length (m)}}$$

ตัวอย่าง แสงจาก infinity ตกกระทบบน convex lens เกิดเป็นจุดโฟกัสห่างจากเลนส์ 25 เซนติเมตร จงหา refractive power ของเลนส์นี้

$$\begin{aligned}\text{Power(diopter)} &= \frac{1}{\text{focal length(m)}} \\ &= \frac{1}{0.25} = +4.00 \text{ diopters}\end{aligned}$$

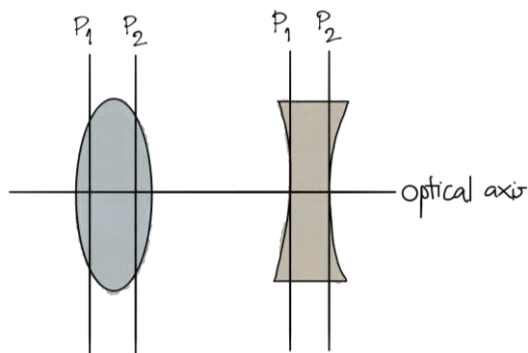
2. Principal points

Principal points คือ จุดบน optical axis ที่ principal plane ตัดผ่าน โดย principal plane คือ ระนาบที่กำหนดขึ้นให้เป็นระนาบที่ลำแสงเกิดการหักเห

เมื่อแสงวิ่งผ่านเลนส์ใด ๆ ก็ตามที่มีความหนา แสงต้องหักเหสองครั้ง ครั้งแรกเมื่อผ่านจากภายนอกเข้าสู่ภายในเลนส์ที่พื้นผิวของเลนส์ด้านหน้า และครั้งที่สองจากภายในเลนส์สู่ภายนอกบริเวณพื้นผิวเลนส์ด้านหลัง ดังนั้นใน thick lens จะประกอบไปด้วย 2 principal planes คือ front principal plane และ rear principal plane

ตำแหน่งของ principal plane ทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างของเลนส์ (เช่น biconvex, plano-convex หรือ meniscus lens) และอาจจะอยู่ภายนอกเลนส์ก็ได้ เช่น ใน meniscus lens

Principal plane มีความสำคัญในการใช้เป็น reference plane ในการคำนวณ เช่น การกำหนดระยะวัตถุหรือระยะภาพใน vergence equation จะใช้ระยะที่วัดจาก principal plane ไปถึงวัตถุหรือภาพตามลำดับ



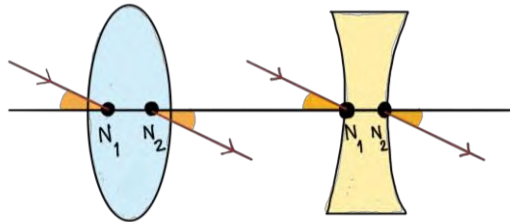
รูปแสดง principal plane ของ biconvex และ biconcave lenses

3. Nodal points

Nodal points คือ ตำแหน่งบน optical axis ที่ลำแสงที่ผ่านเข้าและออกจากจุดนี้จะทำมุมกับ optical axis เท่ากัน ถ้าเลนส์ถูกล้อมรอบด้วยตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเท่ากัน (ทั้งข้างหน้าและ ข้างหลังเลนส์) nodal points ทั้งสองจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกับ principal points

Clinical Optics: The Lecture Note

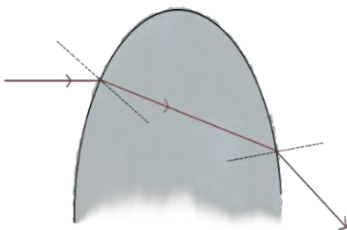
Nodal points มีประโยชน์ในการคำนวณ retinal image size ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4
optics of the human eye



รูปแสดง nodal points ของ biconvex และ biconcave lenses

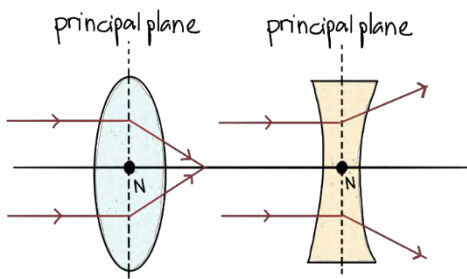
Thin lens approximation

เนื่องจากเลนส์ทุกชนิดบนโลกมีความหนาไม่มากนักน้อย การที่แสงจะวิ่งผ่านเลนส์ได้ แสงจะต้องหักเหครั้งแรกที่พื้นผิวด้านหน้าของเลนส์ (anterior curvature) เข้าสู่ภายในเลนส์ แล้ววิ่งผ่านระยะความหนาของเลนส์ เพื่อไปหักเหครั้งที่สองที่พื้นผิวด้านหลังของเลนส์ (posterior curvature) ซึ่งทำให้การคำนวณมีความยุ่งยากซับซ้อน

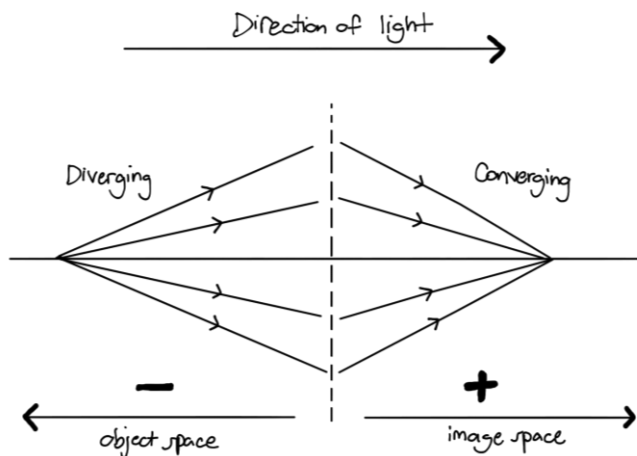


รูปแสดงการหักเหของแสงผ่าน thick lens ที่การเปลี่ยนแปลง vergence ของแสงจะขึ้นอยู่กับ การหักเหบริเวณ anterior lens surface ระยะทาง ความหนาของเลนส์ที่แสง จะต้องวิ่งผ่าน และการหักเหบริเวณ posterior lens surface

Thin lens approximation คือ การคำนวณโดยอนุมานว่าเลนส์เปรียบเสมือนระนาบบาง ๆ ไม่มีความหนา แสงจะหักเหที่ระนาบระนาบเดียว (มี principal plane เดียว) ทำให้การคำนวณง่ายขึ้น ดังรูป



รูปแสดง principal planes ของเลนส์ในการคำนวณ ด้วย thin lens approximation

ข้อกำหนดของการคำนวณ vergence equation

- แสงเดินทางจากซ้ายไปขวาเสมอ
- Divergence ray มีค่า vergence เป็นลบ ส่วน convergence ray มีค่า vergence เป็นบวก
- ระยะทางที่อยู่ทางซ้ายของ principal plane จะมีค่าเป็นลบ
- ระยะทางที่อยู่ทางขวาของ principal plane จะมีค่าเป็นบวก
- Image ที่เกิดจาก convergence ray เป็น real image (สามารถเอามาจับได้)
- Image ที่เกิดจาก divergence ray เป็น virtual image

Vergence equation

$$U + P = V \quad \text{หรือ} \quad \frac{n}{u} + P = \frac{n}{v}$$

$$U = \text{object vergence} = \frac{n}{u}$$

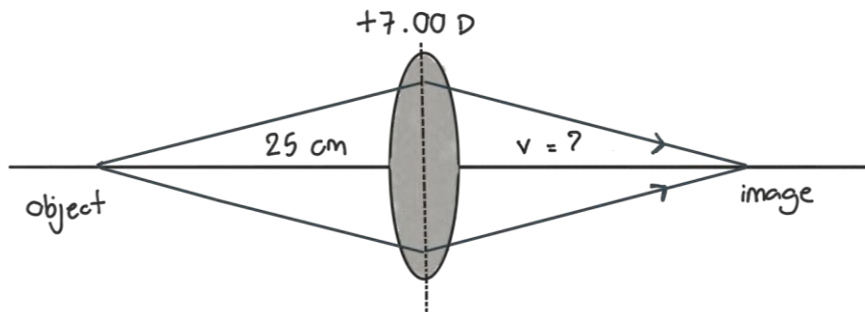
u = object distance คือ ระยะทางระหว่าง object กับ reference plane หน่วยเป็นเมตร

P = lens power

$$V = \text{image vergence} = \frac{n}{v}$$

v = image distance คือ ระยะทางระหว่าง image กับ reference plane หน่วยเป็นเมตร

ตัวอย่าง วัตถุวางอยู่ห่างจากเลนส์นูน +7.00 diopters เป็นระยะ 25 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งของภาพที่เกิดขึ้น (กำหนดให้ทั้ง system วางอยู่ในอากาศ ซึ่งมีดัชนีหักเห = 1)



จาก vergence equation; $U + P = V$

$$\frac{1}{u} + P = \frac{1}{v}$$

$$\left(\frac{1}{-0.25}\right) + (+7.0) = \frac{1}{v}$$

(สังเกตว่าระยะวัตถุ (u) = -0.25 m เนื่องจากวัตถุอยู่ทางซ้ายต่อ principal plane)

$$(-4) + 7 = \frac{1}{v}$$

$$+3 = \frac{1}{v}$$

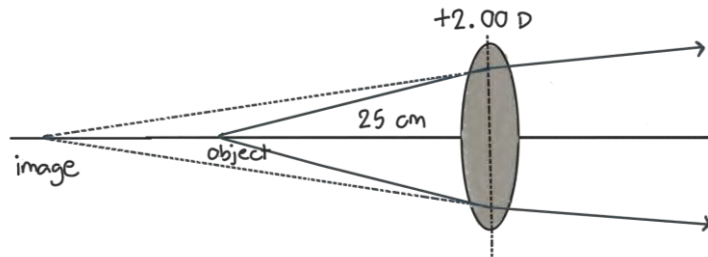
$$\therefore v = +0.33 \text{ m}$$

Image distance (v) มีค่าเป็นบวก หมายความว่าภาพอยู่ทางด้านขวาต่อ principal plane เป็นระยะ 33 เซนติเมตร

คำถาม: ภาพที่เกิดขึ้นเป็น real image หรือ virtual image

สังเกตจาก image vergence (V) มีค่าเป็นบวก (+3) หมายความว่า image vergence เป็น convergence ray ซึ่งจะให้ real image (แสงวิ่งมารวมกันจริง ๆ)

ตัวอย่าง วัตถุวางอยู่ห่างจากเลนส์นูน +2.00 diopters เป็นระยะ 25 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งของภาพ (ทั้ง system อยู่ในอากาศ; $n = 1$)



จาก vergence equation; $U + P = V$

$$\frac{1}{u} + P = \frac{1}{v}$$

$$\left(\frac{1}{-0.25}\right) + (+2.0) = \frac{1}{v}$$

$$(-4) + 2 = \frac{1}{v}$$

$$-2 = \frac{1}{v}$$

$$\therefore v = -0.50 \text{ m}$$

Image distance มีค่าเป็นลบ หมายความว่า ภาพอยู่ทางด้านซ้ายต่อ principal plane (ด้านเดียวกับวัตถุ) เป็นระยะ 50 เซนติเมตร

คำถาม: ภาพที่เกิดขึ้นเป็น real image หรือ virtual image

สังเกตจาก image vergence (V) มีค่าเป็นลบ = -2 หมายความว่า image vergence เป็น divergence ray ซึ่งจะให้ virtual image