



บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของแสง

2.1 แนวความคิดที่เกี่ยวกับแสงที่ได้จากการแผ่รังสีแกมมา

2.1.1 การแผ่แบบเส้นตรง(Rectilinear Propagation) ในตัวกลางแบบเอกพันธ์(Homogeneous)แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง หลักการนี้เป็นหนึ่งในสามข้อของหลักการพื้นฐานทางทัศนศาสตร์ของแสงเชิงเรขาคณิต อีกสองข้อคือ กฎการสะท้อน และกฎการหักเห

2.1.2 กฎการสะท้อน(Law of Reflection) ระหว่างตัวกลางเอกพันธ์ เส้นปกติจะตั้งฉากกับระนาบระหว่างผิวของตัวกลาง จะกล่าวได้ว่า "รังสีสะท้อนอยู่ในระนาบของรังสีตก มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน "

2.1.3 กฎการหักเห(Law of Refraction) จากกฎการสะท้อน รังสีตก รังสีสะท้อน เส้นปกติ อยู่บนระนาบเดียวกัน รังสีสะท้อนจะมีความเข้มลดลงและมีรังสีส่วนหนึ่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง รังสีส่วนนี้จะมีการเปลี่ยนแนวทางเดินซึ่งแนวของรังสีนี้เรียกว่ารังสีหักเห

กฎการหักเห จะกล่าวได้ว่า

$$\frac{\sin\theta}{\sin\theta'} = \text{const}$$

θ, θ' คือมุมตกกระทบและมุมหักเหตามลำดับ
บางทีเรียกว่ากฎของสเนล(Snell's Law)

2.1.4 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับแสง จากการทบทวนการศึกษารังสีเกี่ยวกับแสงจนถึงปัจจุบันนี้ พอจะสรุปหลักอันเป็นธรรมชาติของแสงได้ดังนี้

- 2.1.4.1 อัตราเร็วของการแผ่กระจายของคลื่นแสงคงที่
- 2.1.4.2 การรับรู้เกี่ยวกับแสงสี
- 2.1.4.3 การแผ่กระจายของแสงเป็นเส้นตรง
- 2.1.4.4 เป็นไปตามกฎการสะท้อน
- 2.1.4.5 เป็นไปตามกฎของการหักเห
- 2.1.4.6 เกิดการแทรกสอด
- 2.1.4.7 เกิดการเลี้ยวเบน

2.2 แบบจำลองอนุภาคของคลื่น(The Particle Models)

มีนักฟิสิกส์หลายท่านได้ทำการศึกษาถึงความเป็นอนุภาคของคลื่น เช่น เดสคาร์ท(Descartes ชาวฝรั่งเศส) ปีแอร์ เดอ เฟอร์แมท(Pierre de Fermat ชาวฝรั่งเศส) และไอแซค นิวตัน(Isaac Newton ชาวอังกฤษ) เดสคาร์ทหลงตีพิมพ์เกี่ยวกับกฎการหักเห นิวตันตีพิมพ์ผลงานของเขาเกี่ยวกับการหักเหของแสงในตัวกลางเอกรงค์ เฟอร์แมท ได้ตีพิมพ์เกี่ยวกับหลักการ การใช้เวลาที่น้อยที่สุดของแสง (Principle of Least Time) ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาทฤษฎีสัมพัทธ์ใหม่

เฟอร์แมท ได้ให้หลักการไว้ว่าเมื่อแสงเดินทางระหว่างสองจุด ซึ่งมีทางเดินในหลายเส้นทาง แสงจะเลือกทางเดินที่ใช้เวลาน้อยที่สุด คือเป็นทางเดินที่มีความยาวเชิงทัศนศาสตร์ที่สั้นที่สุด(Optical Path Length) (วิชิต รักรัตนธรรม, ม.ป.ป.) หรือบางที่เรียกว่า Principle of Least Time หลักของเฟอร์แมท (Fermat's Principle) เป็นหลักการที่นำไปสู่การพัฒนาทฤษฎีสัมพัทธ์ใหม่ของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต คือ

2.2.1 ความยาวของทางเดินเชิงทัศนศาสตร์(Optical Path Length) คือผลคูณระหว่างค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงเดินทางกับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ในตัวกลางนั้นๆ และแสงจะเลือกเดินทางที่มี OPL ที่สั้นที่สุดเพื่อให้เป็นไปตามกฎการเดินทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด

2.2.2 คณิตศาสตร์จากหลักการของเฟอร์แมท

$$I = \text{OPL}(\text{Virtual}) - \text{OPL}(\text{True}) \quad (1)$$

$$\text{เราพบว่า} \quad I = \text{const.} \cdot \epsilon^2 \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 พิจารณา Taylor series จะได้

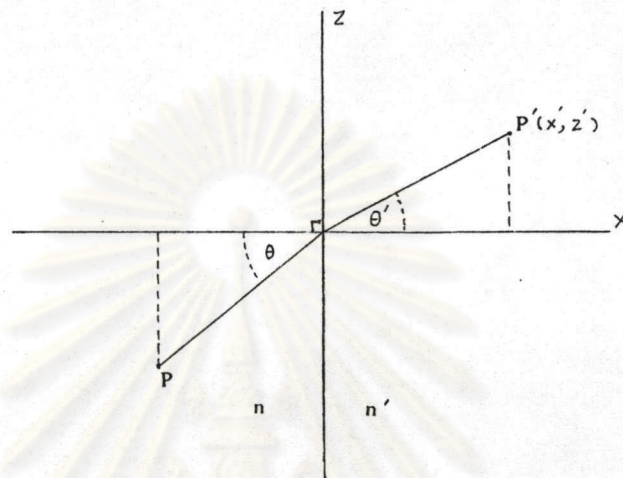
$$I(\epsilon) = \left. \frac{d[\text{OPL}]}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=0} \epsilon + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2[\text{OPL}]}{d^2\epsilon} \right|_{\epsilon=0} \epsilon^2 + \text{higher order}(3)$$

จากสมการที่ 3 จะได้ว่า

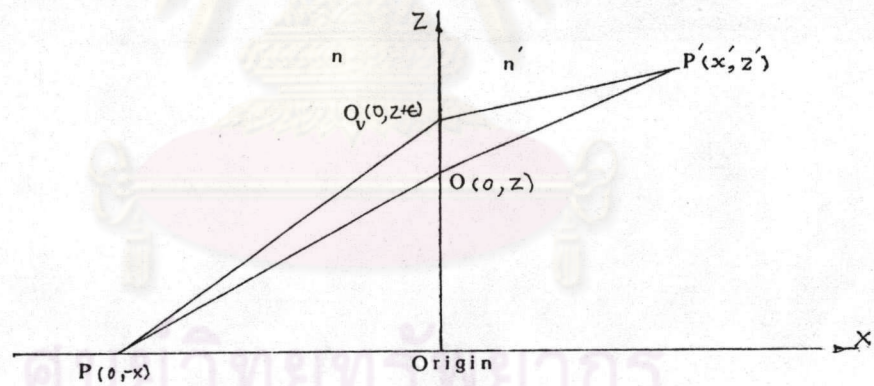
$$\left. \frac{d[\text{OPL}]}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=0} = 0 \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 แสดงว่า OPL มีค่าคงที่

2.2.3 กฎการหักเหที่ได้จากหลักการของเฟอร์แมท จากหลักการข้อที่ 2 ของเฟอร์แมทที่ว่า แสงจะเลือกทางเดินที่มีความยาวเชิงทัศนศาสตร์ที่สั้นที่สุด สามารถที่จะนำไปสู่กฎการหักเหได้



รูปที่ 2.1 แสดงแนวของรังสีของแสงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 แสดงหลักการของเฟอร์แมทในการเกิดการหักเห

จากรูป 2.2 ความยาวเชิงทัศนศาสตร์คือ

$$OPL(p_0, p') = n \sqrt{(z+\epsilon)^2 + x^2} + n' \sqrt{(z'-z-\epsilon)^2 + x'^2} \quad (5)$$

จากสมการที่ 4 และ 5 หาอนุพันธ์เทียบกับ ϵ ที่ $\epsilon = 0$ จะได้ว่า

$$\left. \frac{d[\text{OPL}]}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=0} = \frac{nz}{\sqrt{z^2+x^2}} - \frac{n'(z'-z)}{\sqrt{(z'-z)^2+x^2}} = 0 \quad (6)$$

จากรูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต คือ

$$\frac{z}{\sqrt{z^2+x^2}} = \sin \theta \quad (7a)$$

$$\frac{(z'-z)}{\sqrt{(z'-z)^2+x^2}} = \sin \theta' \quad (7b)$$

แทนค่าสมการที่ 7 ลงในสมการที่ 6 จะได้กฎการหักเห

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$

2.3 การแทรกสอด(Interference)

ในการศึกษาเกี่ยวกับแสงส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับความเป็นคลื่นของแสงซึ่งจะคล้ายกับปรากฏการณ์ของคลื่นไฟฟ้า(Klein & Furtak, 1986) คือเมื่อคลื่นหลายขบวน เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณและเวลาเดียวกัน สนามไฟฟ้าผลลัพธ์จะได้

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (1)$$

ซึ่งก็คือความคิดรวบยอดที่สำคัญของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ก็รวมทั้งผลต่างเฟส(Phase Difference) ขณะที่ส่วนอื่นๆเปลี่ยนไปเมื่อเกิดการรบกวนเชิงแสง(Optical Disturbance) หัวข้อที่เราจะมาสนับสนุนคือหลักของฮอยเกนส์(Huygen's Principle) และหลักของเฟอร์แมท(Fermat's Principle) โดยอาศัยหลักการซ้อนทับ(Superposition Principle) ที่เกิดจากการสะท้อนและการหักเห โดยจะแสดงให้เห็นถึงการเกิดภาพในทางทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์กรณีพิเศษของทัศนศาสตร์เชิงฟิสิกส์ ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต(Geometrical Optics) สามารถอธิบายตามวิธีของทัศนศาสตร์เชิงไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน



ก็ด้วยเหตุผลที่ว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต้องใช้สมการคลื่นของแมกซ์เวลล์
(Maxwell's Equation)

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบเวกเตอร์ซึ่งใช้อธิบายสนามไฟฟ้าเชิงทัศนศาสตร์เป็นลักษณะพิเศษที่สำคัญของสมการคลื่น และสอดคล้องกับคลื่นทุกชนิด ดังนั้นโดยอาศัยหลักการซ้อนทับสามารถศึกษาได้จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง

ถ้ามีแหล่งกำเนิดแสงมากกว่าหนึ่งจุดเคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณเดียวกัน และเกิดการซ้อนทับกันขึ้น การกระจายของแสงสามารถอธิบายโดยวิธีง่ายๆ การทำให้เกิดแหล่งกำเนิดแสงมากกว่าหนึ่งจุดนั้น อาจจะทำให้ได้โดยการแยกแสงออกจากแหล่งกำเนิดเดียวกันออกเป็นสองแหล่งกำเนิด แล้วทำให้เกิดการซ้อนทับกัน จะพบว่าความเข้มของแสงมีการเปลี่ยนแปลงไป บริเวณที่มีความเข้มสูงคือบริเวณที่มีการรวมกันแบบเสริมกัน และบริเวณที่มีความเข้มน้อยก็คือบริเวณที่เกิดการรวมกันแบบหักล้างกันของแสง ทำให้เกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่าง การเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการเกิดการแทรกสอด การพิจารณาจากกรณีที่ย่างที่สุดจากแสงเอกรงค์ที่ทำให้เกิดการแทรกสอด แต่อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการแทรกสอดไม่จำเป็นต้องเป็นแสงเอกรงค์ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงอาจมีแอมพลิจูดและเฟสเปลี่ยนแปลงไปไม่แน่นอน แต่อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์นั้นอย่างรวดเร็วจนทำให้สังเกตด้วยตาเปล่า หรือเครื่องมือทางฟิสิกส์แบบธรรมดาทั่วไปอาจตรวจวัดไม่ได้ ฉะนั้นในการศึกษาจึงต้องทำการศึกษาจากสิ่งที่เห็นได้ง่าย โดยถ้าเรามีแหล่งกำเนิดคลื่นแสงมาจากแหล่งกำเนิดเดียวกัน ลักษณะของคลื่นจะมีความสัมพันธ์กัน เรียกว่าแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent Light) อาจจะมีความสัมพันธ์กันทั้งหมดหรือมีความสัมพันธ์กันบางส่วน แต่ถ้ารังสีของแสงมาจากแหล่งกำเนิดที่ แตกต่างกันและไม่มีส่วนใดสัมพันธ์กันเลย เรียกแหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้ว่าแหล่งกำเนิดแบบอนาพันธ์ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดประเภทนี้เกิดการซ้อนทับ จะไม่สามารถสังเกตการได้จากเงื่อนไขการทดลองแบบธรรมดา

การแยกแหล่งกำเนิดแสงอันเดียวออกเป็นแหล่งแบบอาพันธ์หรือแยกออกเป็นแหล่งกำเนิดย่อยหลายแหล่ง เพื่อใช้ในการทดลองการแทรกสอด มีด้วยกัน 2 วิธี ดังนี้ คือ

1. โดยให้แหล่งกำเนิดแสงปรมาณูเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบ 2 ช่อง วิธีนี้เป็นการแบ่งหน้าคลื่น (Division of Wave Front)

2. โดยให้แหล่งกำเนิดแสงปรมาณูตกกระทบบนเครื่องแยกลำแสง (Beam Splitter) ซึ่งยอมให้มีแสงบางส่วนส่งผ่านไปได้ และมีลำแสงอีกส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนที่ผิวของเครื่องแยกลำแสง วิธีนี้เรียกว่าการแบ่งแอมพลิจูดของคลื่น (Division of Amplitude) วิธีการนี้แหล่งกำเนิดแสงควรเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูง

ทั้งสองวิธีนี้จะได้แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ เพื่อใช้ในการทดลองทำให้เกิดการซ้อนทับของคลื่นสองขบวน หรือทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่น (Two-Beam Interference) ซึ่งโดยทั่วไปเราจะศึกษาจากแหล่งกำเนิดเอกรงค์แบบสมบูรณ์ เพื่อจะนำทฤษฎีของแสงเอกรงค์นำไปอธิบายในการทดลองทำให้เกิดการแทรกสอด เพราะง่ายในการควบคุมตัวแปรต่างๆ เพื่อสร้างทฤษฎีพื้นฐานเพื่อจะได้นำไปใช้ใน ระดับที่สูงขึ้นต่อไป โดยทั่วไปแสงที่มีอยู่ในธรรมชาติไม่ได้เป็นแสงเอกรงค์เสมอไป การศึกษาต้องใช้ทฤษฎีของแสงเชิงเรขาคณิตเข้าช่วยด้วย

2.4 การแทรกสอดของคลื่นสองขบวน (Two-Beam Interference)

การทดลองการแทรกสอดของคลื่นสองขบวนที่เคลื่อนที่เข้ามาในบริเวณ เดียวกันและเกิดการซ้อนทับขึ้น ในทางปฏิบัติเมื่อคลื่นแสงสองขบวนจะมาจากที่ เดียวกัน คลื่นแสงสองขบวนมีผลต่างเชิงทัศนศาสตร์ที่จุดที่เกิดการรวมกันคลื่นอาจจะ มีเฟสต่างกัน และถ้าเป็นคลื่นแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแบบเอกรงค์ ผลต่างเฟส จะไม่ขึ้นกับเวลา พิจารณาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานของคลื่น

$$U = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} + \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} = \epsilon_0 \mu_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

$$U = \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

เมื่อ U ความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Density)

$$\langle U \rangle = \epsilon_0 \langle \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \rangle \quad (6)$$



เมื่อ E คือผลรวมของสนามเวกเตอร์ทางไฟฟ้าของคลื่นสองขบวน
ที่เกิดการซ้อนทับและ $E = E_1 + E_2$

$$\langle U \rangle = \epsilon_0 \langle E_1 \cdot E_1 + E_2 \cdot E_2 + 2 E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (7)$$

$$\langle U \rangle = \langle U_1 \rangle + \langle U_2 \rangle + 2\epsilon_0 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle \quad (8)$$

สองเทอมแรกในสมการ 8 เป็นความหนาแน่นของพลังงานเฉลี่ยของคลื่น
สองขบวนที่เป็นอิสระต่อกัน เทอมสุดท้ายคือเทอมที่แสดงว่าเกิดการแทรกสอด อาจจะ
เสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้ ถ้าสนามไฟฟ้าสองสนามตั้งฉากกัน เทอมสุดท้ายก็จะ
หายไป ทิศทางของโพลาริเซชันจะตั้งฉาก เทอมของการแทรกสอดจะหายไป
ในกรณีพิเศษจะสนใจเฉพาะคลื่นที่ซ้อนทับอย่างสมบูรณ์(คล้ายกัน เคลื่อนที่มาจากทิศ
ทางเดียวกัน) และเป็นแสงเอกรงค์ที่ไม่โพลาริซ์ เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่ใช้
ในการทดลองการแทรกสอด

พิจารณาในสนามเวกเตอร์

$$E = E_0 \cos \theta \quad \text{เมื่อ } \theta = \omega t - k \cdot r + \phi \quad (9)$$

$$B = B_0 \cos \theta = \frac{k \times E_0}{ck} \cos \theta \quad (10)$$

เมื่อ

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \times B \quad (11)$$

$$S = \frac{1}{\mu_0} E_0 \times \frac{(k \times E_0)}{ck} \cos^2 \theta \quad (12)$$

ค่าเฉลี่ยของ $\cos^2(\omega t - k \cdot r + \phi) = 1/2$

$$S = \frac{\epsilon_0 c}{2} |E_0|^2 \hat{s} \quad (13)$$

$$U = \epsilon_0 |E_0|^2 \cos^2 \theta \quad (14)$$

$$\langle U \rangle = \frac{\epsilon_0}{2} |E|^2 \quad (15)$$

ณนี้จะได้

$$\langle S \rangle = \langle U \rangle c = \frac{c\epsilon_0}{2} |E|^2 \quad (16)$$

สนามไฟฟ้าของคลื่นที่สอดคล้องกับสมการคลื่นของแมกเวลล์ มีสมการดังนี้

$$E = A e^{i\theta} \quad (17)$$

โดยที่เฟรมมีค่า

$$\theta = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{R}{\lambda} \right) + \phi \quad (18)$$

$$\theta = (\omega t - kR) + \phi \quad (19)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ f ความถี่เชิงมุม ω เลขคลื่น k ความยาวคลื่น λ คาบเวลา T และความเร็วเฟส v ของคลื่น คือ

$$\omega = 2\pi f$$

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

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$v = f\lambda$$

และความเร็วเฟสของคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืนในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n คือ

$$v = \frac{c}{n}$$

2.5 หลักการซ้อนทับของคลื่น (Superposition of Wave)

เมื่อคลื่นหลายขบวนเข้ามาในบริเวณเดียวกันและเกิดการซ้อนทับขึ้น (Meyer-Arendt, 1989) โดยจะแยกพิจารณาดังนี้

2.5.1 คลื่นที่มีเฟสและความถี่เท่ากันเกิดการซ้อนทับ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาจากทิศทางเดียวกันแอมพลิจูดผลลัพธ์ จะเป็น

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$$

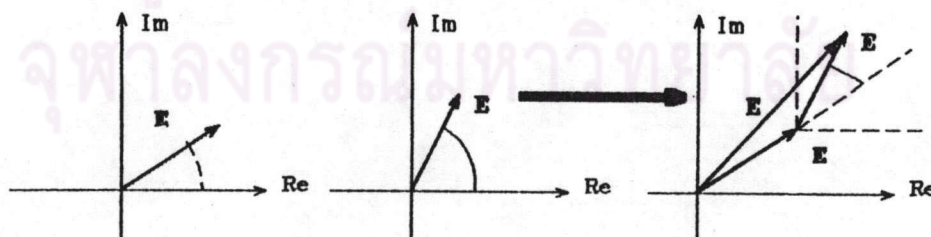
ความเข้มรวมของคลื่นจะแปรตรงกับผลรวมของแอมพลิจูดของคลื่นทั้งหมด ยกกำลังสอง

$$I \propto (A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n)^2$$

2.5.2 คลื่นที่ผลต่างเฟสคงที่เกิดการซ้อนทับ

การรวมเฟส (Phasor Addition) เมื่อพิจารณาจากคลื่นสองขบวน

$$E_1 = A_1 e^{i\theta_1} \quad \text{และ} \quad E_2 = A_2 e^{i\theta_2} \quad (20)$$



รูปที่ 2.3 แสดงการรวมเวกเตอร์ของ E_1 และ E_2

ถ้าผลต่างเฟส $\delta = \theta_1 - \theta_2$

$$E = E_1 + E_2 = A e^{i\theta} = A(\cos\theta + i\sin\theta) \quad (21)$$

แสดงการรวมเวกเตอร์บนระนาบเชิงซ้อน ขนาดของแอมพลิจูดและเฟส ผลลัพธ์สามารถแสดงได้ในเทอมของเฟสจริงและเฟสจินตภาพ ดังนี้

$$A = [(\operatorname{Re}E)^2 + (\operatorname{Im}E)^2]^{1/2} = [E E^*]^{1/2} \quad (22)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(\operatorname{Im}E)}{(\operatorname{Re}E)} \quad (23)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{(\operatorname{Re}E)}{A}$$

ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า

$$\operatorname{Re}E = A_1 \cos\theta_1 + A_2 \cos\theta_2 \quad (24)$$

$$\operatorname{Im}E = A_1 \sin\theta_1 + A_2 \sin\theta_2 \quad (25)$$

แทนสมการที่ 24,25 ลงในสมการ 22 จะได้

$$A = [A_1^2 \cos^2\theta_1 + A_2^2 \cos^2\theta_2 + 2A_1 A_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2 + A_1^2 \sin^2\theta_1 + A_2^2 \sin^2\theta_2 + 2A_1 A_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2]^{1/2} \quad (26)$$

$$A = [A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos\delta]^{1/2} \quad (27)$$

เมื่อ $\theta_1 = \omega t$, $\theta_2 = \omega t + \delta$ และ $\delta = \theta_2 - \theta_1$



$$\cos\theta = \frac{[\text{Re}E]}{A} = \frac{[(A_1 \cos\omega t + A_2 \cos(\omega t + \delta))]}{A} \quad (28)$$

เขียนใหม่ได้

$$\cos\theta = \frac{A_1}{A} \cos\omega t + \frac{A_2}{A} \cos\omega t \cos\delta - \frac{A_2}{A} \sin\omega t \sin\delta \quad (29)$$

$$\cos\theta = \cos\omega t \left[\frac{A_1}{A} + \frac{A_2}{A} \cos\delta \right] - \sin\omega t \left[\frac{A_2}{A} \sin\delta \right] \quad (30)$$

ให้ θ' คือมุมเฟสที่ไม่ขึ้นกับเวลา

$$\cos\theta' = \frac{A_1}{A} + \frac{A_2}{A} \cos\delta \quad (31)$$

$$\sin\theta' = \frac{A_2}{A} \sin\delta \quad (32)$$

$$\text{เมื่อ } \cos^2\theta' + \sin^2\theta' = 1$$

จะได้ว่า

$$\cos\theta = \cos\omega t \cos\theta' - \sin\omega t \sin\theta'$$

$$\cos\theta = \cos(\omega t - \theta')$$

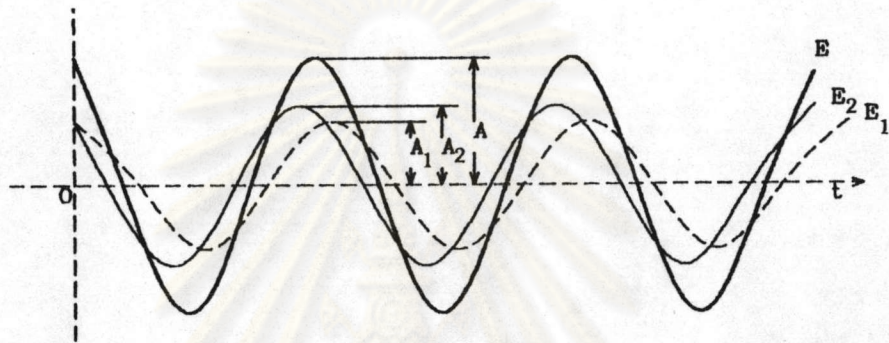
มุมเฟสรวม

$$\theta = \omega t + \theta'$$

ความหนาแน่นของกำลังเฉลี่ย

ในการเกิดการซ้อนทับของคลื่นสองขบวน ทำให้เกิดการรวมกันของความหนาแน่นของพลังงาน สามารถแทนปริมาณเชิงซ้อนด้วยฟังก์ชันตรีโกณมิติ จากสมการของความหนาแน่นของกำลังในรูปของสนามเวกเตอร์

$$\langle S \rangle = v \epsilon_0 \langle E^2 \rangle \quad (33)$$



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดการซ้อนทับของ $E_1(t)$ และ $E_2(t)$ ได้ผลรวมเป็น $E(t)$

$$E^2 = A^2 \cos^2(\omega t + \theta')$$

$$= A^2 [\cos \omega t \cos \theta' - \sin \omega t \sin \theta']^2$$

$$= A^2 [\cos^2 \omega t \cos^2 \theta' + \sin^2 \omega t \sin^2 \theta' - 2 \cos \omega t \sin \omega t \cos \theta' \sin \theta'] \quad (34)$$

เวลาเฉลี่ยของ $\langle \sin^2 \omega t \rangle = \langle \cos^2 \omega t \rangle = 1/2$

และ $\langle \cos \omega t \sin \omega t \rangle = 0$

ดังนั้น

$$\langle E^2 \rangle = A^2 \left[\frac{1}{2} (\cos^2 \theta' + \sin^2 \theta') \right] \quad (35)$$

ดังนั้น

$$\langle S \rangle = \frac{VE}{2} A^2 \quad (36)$$

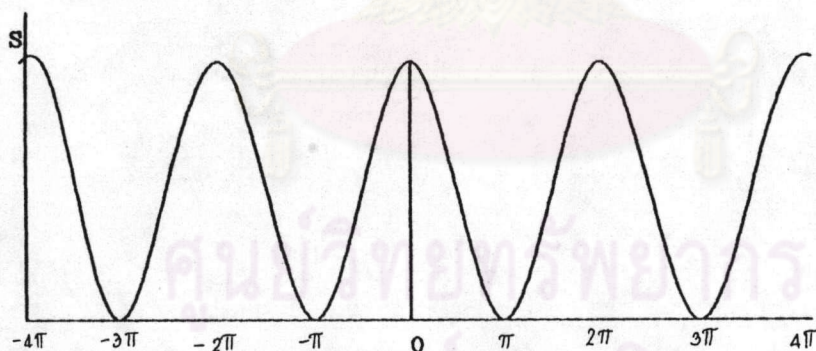
$$\langle S \rangle = \langle S_1 \rangle + \langle S_2 \rangle + 2 \sqrt{\langle S_1 \rangle \langle S_2 \rangle} \cos \delta \quad (37)$$

กรณีพิเศษที่ $A_1 = A_2$

$$S = 2S_1 [1 + \cos \delta]$$

$$S = 4S_1 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (38)$$

นำสมการที่ 38 มาเขียนกราฟดังนี้



รูปที่ 2.5 การกระจายของความหนาแน่นของกำลัง

2.5.3 การซ้อนทับที่เกิดจากคลื่นที่มีความถี่ต่างกัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจริงในธรรมชาติและยากในการนำมาทดลองเพื่อให้เข้าใจทฤษฎีพื้นฐาน

2.5.4 การซ้อนทับที่เกิดจากคลื่นที่ผลต่างเฟสแบบไม่คงที่ การแทรกสอดไม่สามารถสังเกตได้ผลรวมของความเข้มจะพบว่า

$$\sum A^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2$$

2.6 การแทรกสอดของคลื่นหลายขบวน(Multiple Beam Interference)

จากที่ได้กล่าวถึงปรากฏการณ์เกี่ยวกับการแทรกสอดของคลื่นสองขบวนจากแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดที่มีผลต่างเฟสคงที่ ถ้าผิวของตัวกลางที่แสงตกกระทบมีการสะท้อนน้อยมาก ตัวกลางนั้นเป็นตัวกลางโปร่งใสแอมพลิจูดของการส่งผ่านมีค่าเกือบจะคงที่ แต่ถ้าผิวของตัวกลางสะท้อนแสงได้ดีมาก แอมพลิจูดของคลื่นส่งผ่านจะลดลงมาก เหตุที่ต้องทำการศึกษาจากคลื่นที่ส่งผ่านตัวกลางเพราะทำได้ง่ายกว่า เริ่มด้วยนิยามความสะท้อน(Reflectance) R

$$R = \frac{\text{reflected energy}}{\text{incident energy}} = \frac{\text{พลังงานของการสะท้อน}}{\text{พลังงานตกกระทบ}}$$

ปกติความสะท้อนมีค่าน้อยกว่า 1 ถ้าจะพิจารณาการสะท้อน ความเข้มของแอมพลิจูดของการสะท้อน สามารถเขียนในเทอมของสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนของการสะท้อน(Complex Coefficient of Reflection)

$$r = \rho e^{-i\phi'}$$

$$R = rr^* = \rho^2$$

การสะท้อนบนแก้ว r เป็นค่าจริง(Francon, 1966) ($\phi' = 0$ หรือ $\phi' = \pi$) ในโลหะค่า r เป็นค่าเชิงซ้อน และนิยามของความส่งผ่าน(Transmittance) แสดงได้ดังนี้



$$T = \frac{\text{transmitted energy}}{\text{incident energy}} = \frac{\text{พลังงานที่ส่งผ่าน}}{\text{พลังงานตกกระทบ}}$$

ถ้า τ คือแอมพลิจูดของการส่งผ่านสามารถเขียนสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านเชิงซ้อน (Complex Transmission Coefficient)

$$t = \tau e^{-i\phi'}$$

$$T = tt^* = \tau^2$$

ในตัวกลางโปร่งใส ค่า t เป็นค่าจริงโดยที่ $t = \tau$ ในฟิล์มโลหะค่า t เป็นค่าเชิงซ้อน ถ้าตัวกลางเป็นตัวกลางโปร่งใส พลังงานตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและการส่งผ่าน จะเป็นไปตามหลักอนุรักษ์พลังงาน คือ

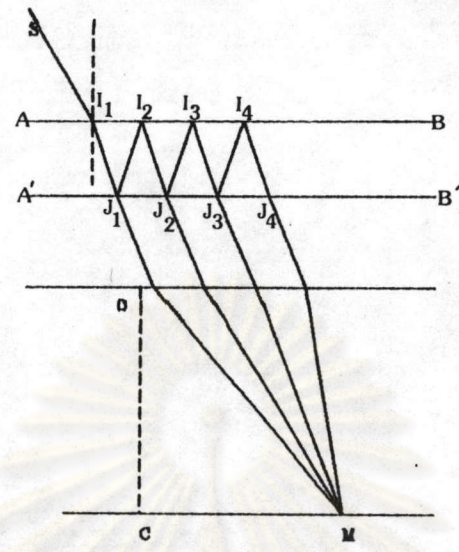
$$R + T = 1$$

การสะท้อนบนฟิล์มโลหะจะมีการดูดกลืนพลังงาน A ฉะนั้น หลักของการอนุรักษ์พลังงานเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$R + T + A = 1$$

2.6.1 รั่วที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นส่งผ่านบนแผ่นระนาบขนานพิจารณาแผ่นขนาน AB และ $A'B'$ รั้งสี่ตกกระทบในแนว SI_1 จะทำให้เกิดอนุกรมของการสะท้อน $J_1 I_2, I_2 J_2, J_2 I_3, \dots$ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สามารถที่จะคำนวณหาค่าแอมพลิจูดเชิงซ้อนของรั้งสี่เหล่านี้ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 การเกิดการแทรกสอดเนื่องจากการส่งผ่านของคลื่นหลายขบวน

แอมพลิจูดและความเข้มของรังสีตกในแนว SI สมมติให้มีค่าเป็น 1 หน่วย AB และ A'B' อยู่ห่างกัน h สัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน t และสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน r มีความสัมพันธ์กับแนวรังสีดังนี้

<u>รังสี</u>	<u>แอมพลิจูด</u>
$I_1 J_1$	t
$J_1 I_2$	tr
$I_2 J_2$	tr^2
$J_2 I_3$	tr^3
.	.

การเปลี่ยนแอมพลิจูดทำให้เกิดการเลื่อนเฟส เนื่องจากการสะท้อนและการส่งผ่านระหว่างผิวขนานทั้งสอง คลื่นส่งผ่านในแต่ละแนวรังสีเขียนได้ดังนี้

$$t^2, t^2 r^2 e^{-i\phi}, t^2 r^4 e^{-2i\phi}, \dots$$

ซึ่งสอดคล้องกับ

$$\Delta Y = 2nh \cos \theta$$

$$\delta = \frac{(2\pi 2nh \cos \theta)}{\lambda}$$

เมื่อ n คือดรรชนีหักเห แหล่งกำเนิดแสงขนานมาจากระยะไกลมาก ในการสังเกตปรากฏการณ์การแทรกสอดที่เกิดจากจุดโฟกัสของเลนส์ O ที่จุด M บนระนาบโฟกัส แอมพลิจูดรวมมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$U_M = t^2 + t^2 r^2 e^{-i\phi} + t^2 r^4 e^{-2i\phi} + \dots$$

จำนวนรังสีจนถึงระยะอนันต์

$$U = \frac{t^2}{1 - r^2 e^{-i\phi}}$$

ถ้า ϕ' คือเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการสะท้อน ความเข้มที่ M มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_M = \frac{t^2}{1 - r^2 e^{-i\phi}} \cdot \frac{(t^*)^2}{1 - (r^*)^2 e^{i\phi}}$$

$$= \frac{T^2}{1 - 2R \cos(\phi + 2\phi') + R^2}$$

กำหนดให้

$$\delta = \phi + 2\phi'$$

$$1 + R^2 - 2R\cos\delta = (1 - R)^2 + 4R\sin^2\frac{\delta}{2}$$

$$I_M = \frac{T^2}{(1 - R)^2} \left| 1 + \frac{4R}{(1 - R)^2} \sin^2\frac{\delta}{2} \right|^{-1}$$

จากสมการบน เมื่อ $\sin^2\delta/2 = 0$ ความเข้มสูงสุด

$$I_0 = \frac{T^2}{(1 - R)^2}$$

ถ้ากำหนดให้

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}$$

รูปสมการเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$I_M = \frac{I_0}{1 + F\sin^2\delta/2}$$

สมการนี้คือสูตรของแอรีย์ (Airy's Formula) จะเกิดริ้วของแถบสว่างที่ M ถ้า $\sin^2(\delta/2) = 0$

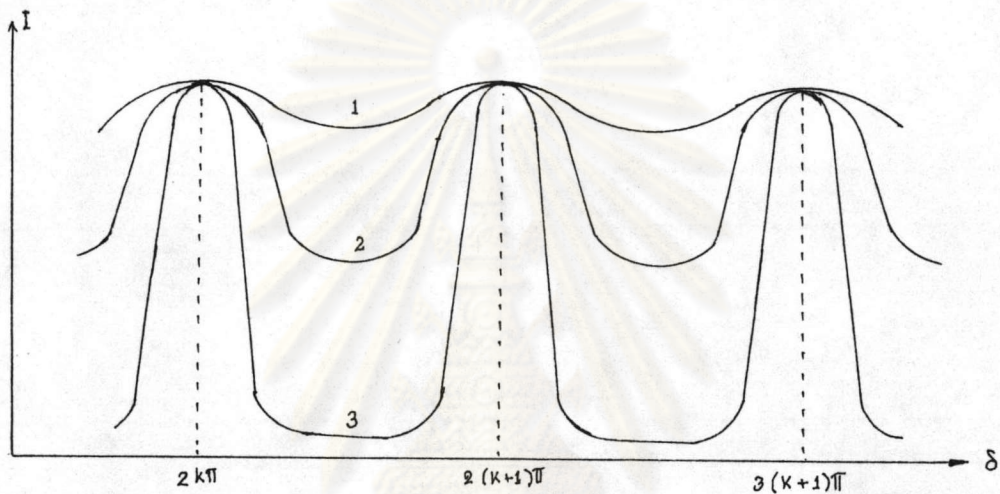
$$\frac{\delta}{2} = \frac{2\pi n h \cos\theta}{\lambda} + \phi' = K\pi$$

และในทานองเดียวกันจะเกิดเป็นค่าต่ำสุดเมื่อ $\sin^2(\delta/2) = 1$ ความเข้มก็คือ $I_0/(1 + F)$ และ ค่าเปรียบเทียบต่าง (Contrast) ของริ้วคือ

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} = \frac{F}{1 + F} = \frac{4F}{(1 + R)^2}$$



ค่าเปรียบเทียบนี้จะ เป็นปริมาณที่ จะบรรยายความหนาของรี้วที่เกิดจากการแทรกสอดที่ได้ส่งผ่าน และ $I = f(\delta)$ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแจกแจงรี้วแสดงความเข้มของคลื่น

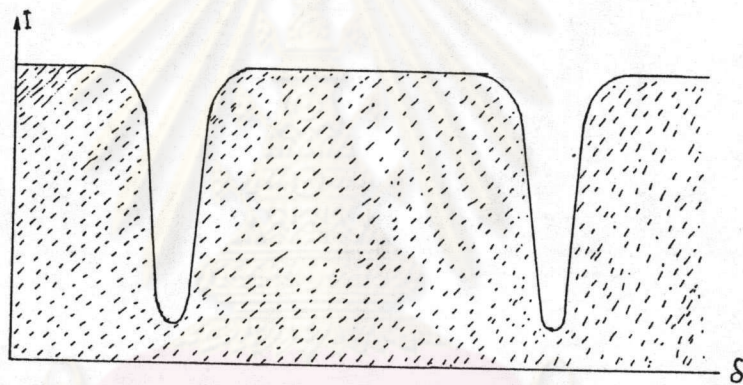
จากกราฟเส้นที่ 1 , 2 และ 3 แสดงลักษณะของรี้วที่ค่า R ต่างๆกัน ถ้า R มีค่าสูง รี้วที่เกิดจะเส้นคมชัด เป็นรี้วของแถบสว่างอยู่บนพื้นทึบแสง (แถบมืดมีขนาดใหญ่) ถ้า m คือลำดับที่ของการเกิดการแทรกสอดที่จุด M ซึ่งอยู่บนระนาบโฟกัสของเลนส์

$$m = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{2nh\cos\theta'}{\lambda} + \frac{\phi'}{2\pi}$$

ที่จุดศูนย์กลางของเลนส์ ที่ C

$$m = \frac{2nh}{\lambda} + \frac{\phi'}{2\pi}$$

2.6.2 ริ้วของการแทรกสอดที่เกิดจากการสะท้อนบนแผ่นระนาบขนาน จากการพิจารณาในการส่งผ่านของคลื่นจะได้ว่าเมื่อ $\sin^2(\delta/2) = 0$ จะได้เป็นค่าความเข้มสูงที่สุดขณะนั้นตามกฎการอนุรักษ์ของพลังงาน สำหรับการสะท้อนก็จะให้ค่าต่ำที่สุดคือเป็นแถบมืดแทน จากค่าเปรียบเทียบต่างได้อธิบายว่าเป็นตัวบรรยายความหนาของริ้ว ถ้าค่าความสะท้อน R มีค่าสูงจะได้ริ้วของแถบสว่างที่มีขนาดแคบและคมชัด ในทางตรงกันในการสะท้อน ถ้า R มีค่าสูงจะได้เส้นที่คมชัดเป็นแถบสว่างแทน จากรูปที่ 2.8 เป็นรูปแสดงริ้วที่เกิดจากการสะท้อนจะมีลักษณะกลับหัวกับรูปที่เกิดจากการส่งผ่าน



รูปที่ 2.8 ริ้วของการแทรกสอดที่เกิดจากแสงสะท้อนบนระนาบ

2.6.3 ริ้วที่เกิดจากการสะท้อนและการดูดกลืนบนผิวของฟิล์มเงิน ในปี ค.ศ. 1946 โทแลนสกี (Tolansky, 1955) ได้แสดงให้เห็นว่าตัวการดูดกลืนเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพราะว่าถ้าตัวกลางที่มีการสะท้อนได้ดีน่าจะได้แสงที่เกิดจากการสะท้อนมีความเข้มสูงในอันดับต่อไป แต่กลับพบว่าความเข้มของแสงเนื่องจากการสะท้อนครั้งแรกจะมีค่ามากแต่ในลำดับถัดไปมีน้อยมาก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะตัวกลางที่มีความสะท้อนสูงก็จะมี การดูดกลืน สูงตามไปด้วย ทำให้ความเข้มของแสงลดลง ขนาดของการดูดกลืนไม่มีผลต่อความกว้างของริ้ว แต่อาจจะทำให้ความเข้มของริ้วลดลงบ้างแต่ยังมองเห็นได้อย่างชัดเจน

ด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างบนนี้จึงมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มเงินเพื่อช่วยในการสะท้อนเพราะฟิล์มเงินมีค่าการสะท้อนถึง 95 % ทำให้ริ้วที่เกิดขึ้นมีความคมชัดมี

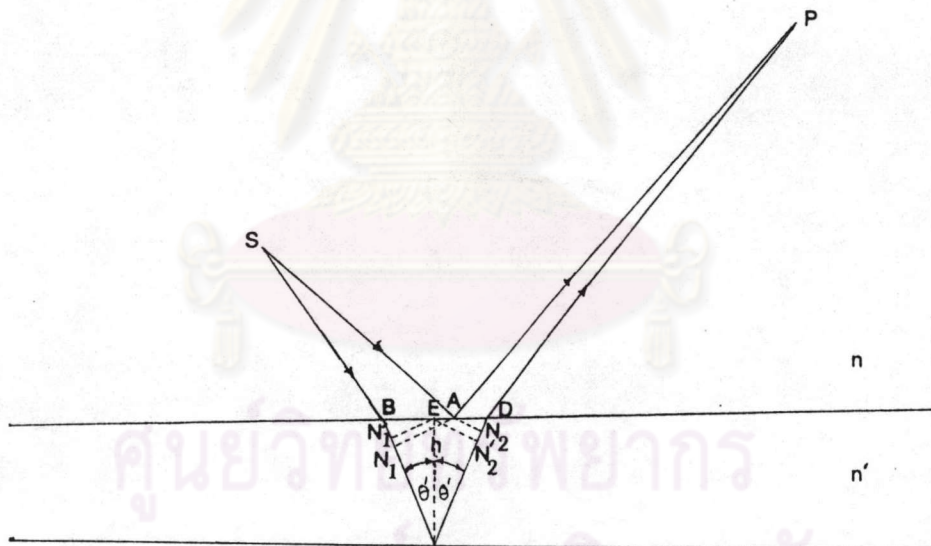


ขนาดแคบๆ และมีการหักเหที่ตีทำให้การสะท้อนในลำดับหลังๆ ไม่มีผลต่อการเกิดริ้ว เพราะถ้าการสะท้อนในลำดับหลังๆ จะทำให้เกิดริ้วแล้วไปซ้อนกับริ้วที่เกิดจากการสะท้อนครั้งแรกจะทำให้เกิดการเลื่อนของริ้ว

2.7 ริ้วที่เกิดจากฟิล์มบาง

การซ้อนทับที่เกิดกับฟิล์มบาง ทำได้โดยวางฟิล์มบนระยะนาบที่ทำให้เกิดการสะท้อน S คือแหล่งกำเนิดแสงเอกรงค์ (Born & Wolf, 1957) เมื่อแสงเดินทางจากแหล่งกำเนิด S ถึงจุด P โดยผ่านเส้นทาง SAP และ SBDP ผลต่างของระยะทางเชิงแสง(OPL) จากจุด S ถึงจุด P

$$\Delta Y = n(SB + DP - SA - AP) + (BC + CD) \tag{39}$$



รูปที่ 2.9 แสดงแนวทางเดินของระยะทางเชิงแสง(OPL)

n และ n' เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางและฟิล์มบางตามลำดับ ค่า ΔY จะยากแก่การคำนวณถ้าฟิล์มบางไม่มีความต่อเนื่อง แต่ถ้าฟิล์มบางมีความต่อเนื่องและ A, B และ D อยู่บนผิวด้านเดียวกัน

$$nSA \sim nSB + n'BN_1$$

$$nAP \sim nDP + n'N_2D \quad (40)$$

โดยที่ AN_1 และ AN_2 ตั้งฉากกับ BC และ CD ตามลำดับ 39 และ 40

$$\Delta Y \sim n'(N_1C + CN_2)$$

มุมระหว่างผิวของฟิล์มมีค่าน้อยมาก

$$N_1C + CN_2 \sim N_1'C + CN_2'$$

เมื่อ N_1' , N_2' คือจุดที่ลากจากจุด E มาตั้งฉากกับ BC และ CD และ E คือจุดตัดที่เกิดจากเส้นปกติของผิวล่างที่จุด C

$$N_1'C = CN_2' = h \cos \theta'$$

เมื่อ $h = CE$ คือความหนาของฟิล์มบางที่จุด C, θ' คือมุมสะท้อนในแผ่นฟิล์มสำหรับฟิล์มบางมุม θ มีค่าเล็กน้อย

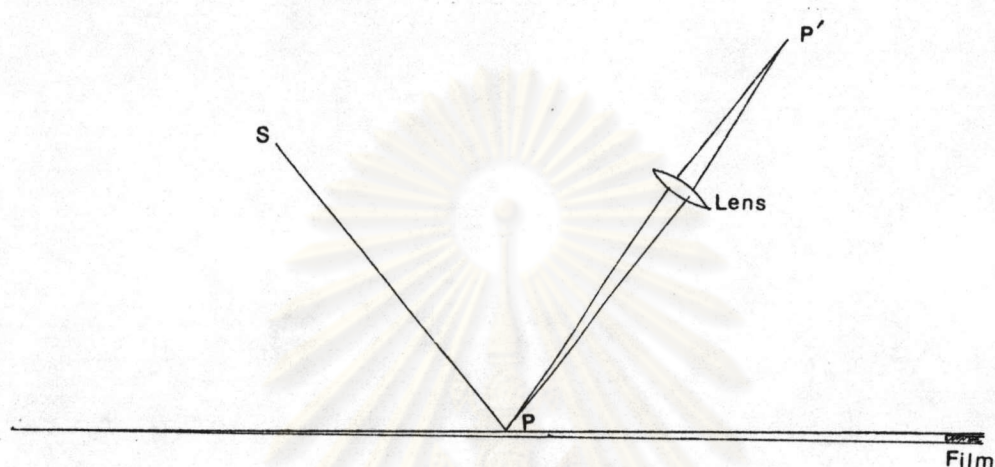
$$\Delta Y = 2n'h \cos \theta' \quad (41)$$

และจะได้ผลต่างเฟสเป็น

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n'h \cos \theta' \quad (42)$$

พิจารณาที่จุด P ทั้งค่า h และ θ' จะเปลี่ยนไปตามการเปลี่ยนตำแหน่ง S และ S เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด พิสัยของ δ ที่ P มีค่ามากจะทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นริ้วของการแทรกสอดได้ แต่ถ้าพิจารณาจุดที่อยู่บนฟิล์มบางเมื่อสังเกตที่

จุดโฟกัสของเลนส์อยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยในทางปฏิบัติแล้ว h คือระยะระหว่างผิวที่ทำให้เกิดรังสีสะท้อนของคลื่นสองขบวนที่เดินทางจาก P ถึง P' ถ้าค่า $\cos\theta'$ มีค่าเล็กน้อย ฟิล์มของ δ มีค่าน้อยกว่า 2π และถ้าแหล่งกำเนิดแสงมีความเข้มสูงจะทำให้สังเกตเห็นการแทรกสอดได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.10 การตกกระทบของแสงบนฟิล์มบาง

เงื่อนไขที่เมื่อ $\cos\theta'$ มีค่าเล็กมากพอ จะทำให้รังสีตกเกือบอยู่ในแนวเดียวกับเส้นปกติ และเมื่อแสงตกกระทบแล้วทำให้เกิดการสะท้อน แล้วทำให้มุมเฟสเปลี่ยนไป π ฉะนั้น

ความเข้มสูงสุดที่จุด P เกิดขึ้นเมื่อ

$$2n'h\overline{\cos\theta'} \mp \frac{\lambda}{2} = m\lambda_0 \quad \text{โดยที่ } m = 0, 1, 2, \dots \quad (43)$$

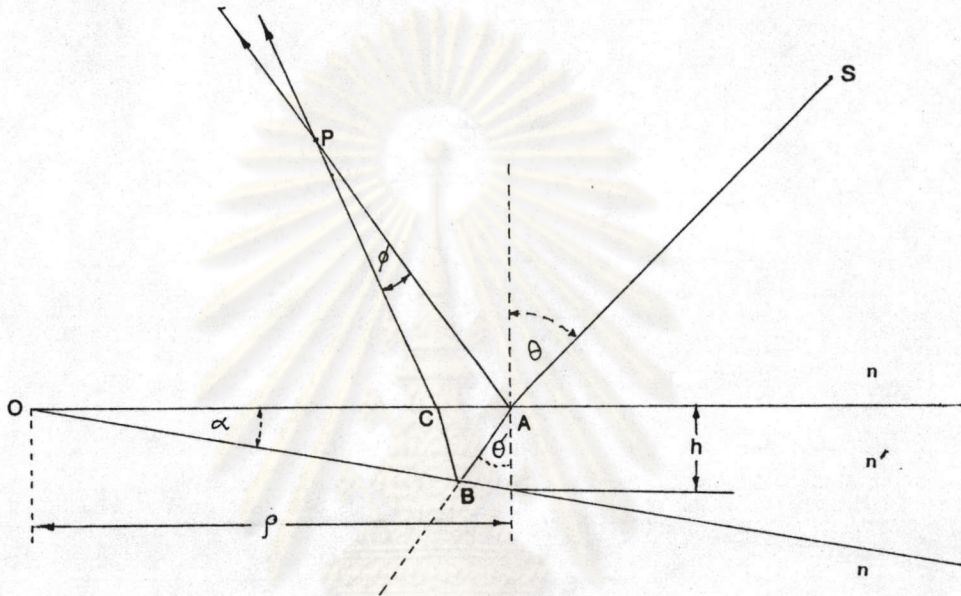
ความเข้มต่ำสุด เกิดขึ้นเมื่อ

$$2n'h\overline{\cos\theta'} \mp \frac{\lambda}{2} = m\lambda_0 \quad \text{โดยที่ } m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots \quad (44)$$

โดยที่ $\overline{\cos\theta'}$ คือค่าเฉลี่ยของ $\cos\theta'$ และ $n'h$ มีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มที่จุด P ถ้าเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด รังสีตกที่จุด P ทำให้เกิดการแทรกสอด ถ้า $\cos\theta'$ มีค่าคงที่ ทางเดินของจุดที่จะแสดงไว้ที่ความหนาเชิงแสงคงที่ก็จะมีค่าคงที่ด้วย



พิจารณารั้วที่เกิดจากการสะท้อนและทำให้เกิดการแทรกสอดที่ผิววัตถุ
 ไปรับแสงที่มีดัชนีหักเห n' ถ้ามุมระหว่างแผ่นระนาบทั้งสองทำมุม α เล็กๆ และแผ่น
 ระนาบมีดัชนีหักเห n และให้ S เป็นแหล่งกำเนิดแสงเอกรงค์แบบจุด



รูปที่ 2.11 แสดงแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดที่ทำให้เกิดการแทรกสอด

เมื่อแสงตกกระทบที่ A และทำให้เกิดรังสีสะท้อนที่ผิวในแนว AP และ
 ส่วนหนึ่งทะลุผ่านเข้าไปทำให้เกิดการหักเหและกลายเป็นรังสีตกให้กับผิวล่างที่จุด B
 และสะท้อนกลับในแนว BC เป็นรังสีตกที่ผิวด้านล่างของแผ่นบนที่จุด C เกิด
 การหักเหออกมาในแนว CP และรังสีคลื่นสองขบวนพบกันที่จุด P ทำให้เกิด
 การแทรกสอด

ถ้า ρ คือระยะจาก A ถึง O และ θ, θ' คือมุมตกกระทบ และ
 มุมหักเหที่ A ตามลำดับ ϕ คือมุม APC มุมสะท้อนที่ B คือ $(\theta' - \alpha)$ และมุมที่ C
 คือ $(\theta - \phi)$ พิจารณาในทางเรขาคณิต

$$AB = \frac{\rho \sin \alpha}{\cos(\theta' - \alpha)} \quad (45)$$

$$\frac{BC}{AB} = \frac{\cos\theta'}{\cos(\theta' - 2\alpha)} \quad (46)$$

$$\frac{AC}{AB} = \frac{\sin 2(\theta' - \alpha)}{\cos(\theta' - 2\alpha)} \quad (47)$$

$$\frac{AP}{AC} = \frac{\cos(\theta - \phi)}{\sin\phi} \quad (48)$$

$$\frac{CP}{AC} = \frac{\cos\theta}{\sin\phi} \quad (49)$$

จากกฎของสเนล(Snell's Law) สำหรับการหักเหที่จุด A และ C

$$n'\sin\theta' = n\sin\theta \quad (50)$$

$$n'\sin(\theta' - 2\alpha) = n\sin(\theta - \phi) \quad (51)$$

จากสมการ 50 และ 51 จะได้ว่า

$$\sin a - \sin b = 2\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)\sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \quad (52)$$

$$\sin\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{n'\sin\alpha\cos(\theta' - \alpha)}{n\cos(\theta - \phi/2)} \quad (53)$$

โดยที่ θ มีค่าไม่มากกว่า $\pi/2$ และ α มีค่าน้อยๆ

$$\phi = \frac{2n'\alpha\cos\theta'}{n\cos\theta} \quad (54)$$

จากสมการ 45, 47 และ 48

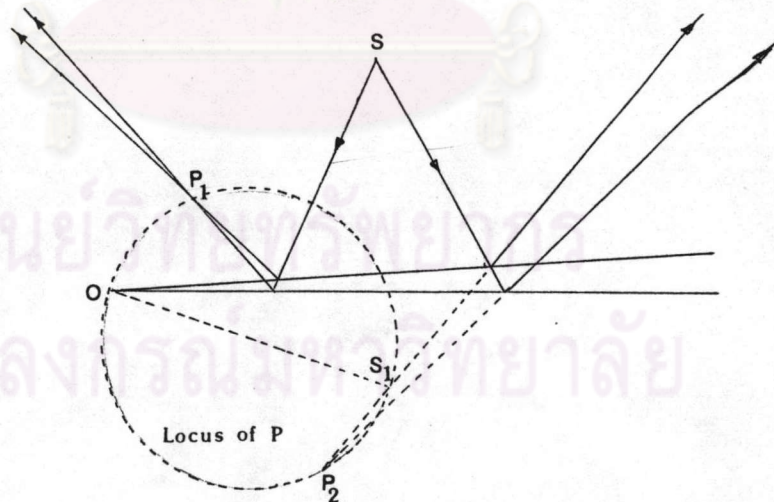
$$AP = \frac{2p \sin \alpha \sin(\theta' - \alpha) \cos(\theta - \phi)}{\cos(\theta' - 2\alpha) \sin \phi} \quad (55)$$

สำหรับ α มีค่าน้อยๆ จากสมการ 54

$$AP \sim \frac{pn^2 \sin \theta \cos^2 \theta}{n'^2 - n^2 \sin^2 \theta} \quad (56)$$

ถ้าขอบของฟิล์มเป็นฟิล์มอากาศที่อยู่ระหว่างแผ่นแก้ว และถือว่ามุมหักเหมีค่าน้อยๆ เราจะได้ว่า $n = n' = 1$ ในสมการที่ 56 เราจะพบว่า $AP \sim p \sin \theta$ ดังนั้นมุม $OPA \sim \pi/2$ ทางเดินของจุด P จะเป็นวงกลมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง OS_1 โดยที่ S_1 คือ จินตภาพของการสะท้อนที่จุด S

ถ้า S อยู่ไกลพอ รั้งสีตกจะถือว่าเป็นรั้งสีขนานถึง SA θ, θ' และ ϕ ไม่ขึ้นกับ p จะพบว่า AP เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ p

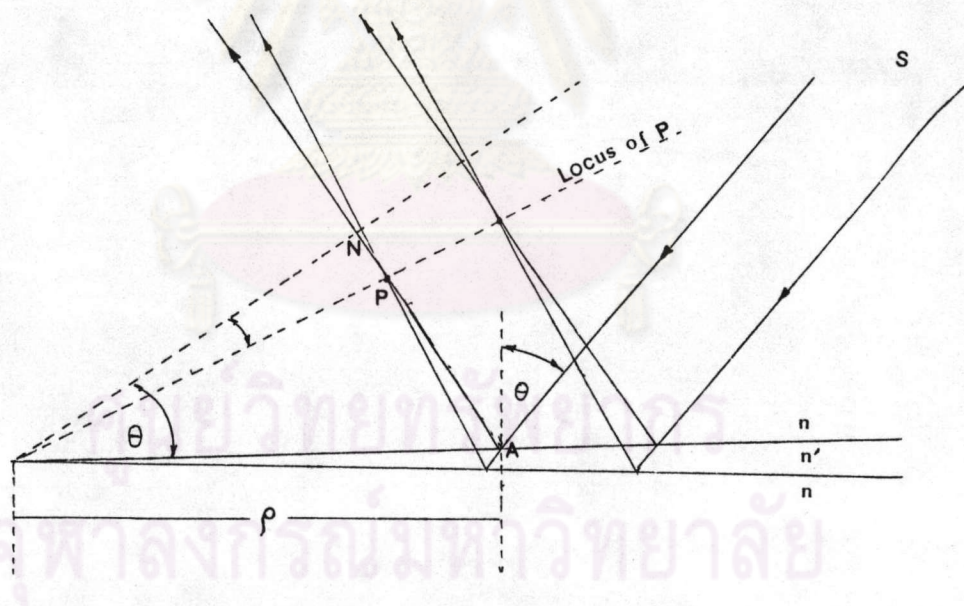


รูปที่ 2.12 ภาพหน้าตัดของการเกิดรั้งเนื่องจากฟิล์มอากาศ

ทางเดินของ P จะผ่านที่จุด O และผ่านขอบฟิล์มด้วย มุม γ คือ มุมระหว่างระยะทางของ P กับระยะทางในแนวเส้นปกติของของรังสีสะท้อน ในสมการที่ 56 ซึ่งมีความสัมพันธ์ $AN = \rho \sin \theta$

$$\tan \gamma = \frac{AN - AP}{ON} \quad (57)$$

$$\tan \gamma = \frac{n'^2 - n^2}{n'^2 - n^2 \sin^2 \theta} \tan \theta \quad (58)$$



รูปที่ 2.13 การเกิดริ้วของฟิล์มเมื่อแหล่งกำเนิดแสงอยู่ไกลมาก



เมื่อพิจารณาที่ $\theta = 0$ และ $\alpha \approx 0$ หรือมีรังสีตกในแนวของเส้นปกติ
 จะได้ว่าผลต่างของทางเดินเชิงทัศนศาสตร์ ΔY ที่ P จากรูป 2.11

$$\Delta Y = n'(AB + BC) + n(CP - AP) \tag{59}$$

โดยสมการ 45,46 สำหรับ α ที่มีค่าน้อยๆ และ θ' มีค่าไม่มากกว่า $\pi/2$

$$AB + BC = \frac{2p \sin \alpha \cos \alpha}{\cos(\theta' - 2\alpha)} \tag{60}$$

$$AB + BC \approx \frac{2h}{\cos \theta'} \tag{61}$$

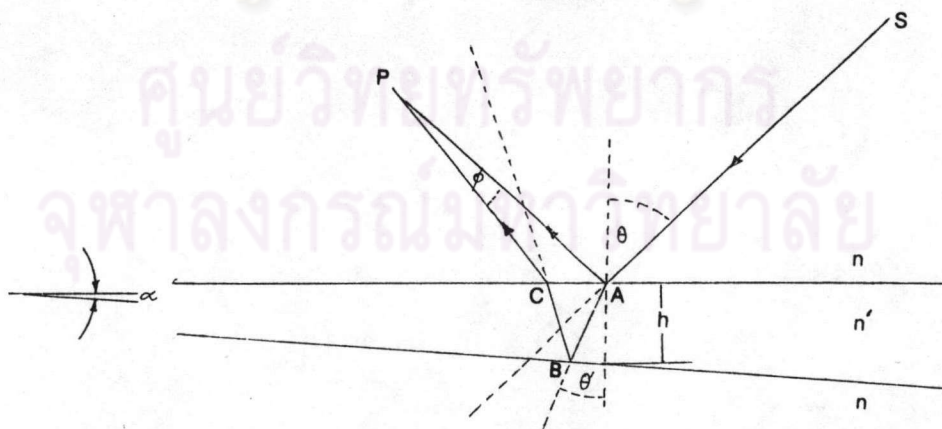
ดังนั้น

$$h = p \tan \alpha \tag{62}$$

โดยที่ h คือความหนาของฟิล์มที่ A

$$CP - AP = \frac{-2p \sin \alpha \sin(\theta - \phi/2) \sin(\theta' - \alpha)}{\cos(\phi/2) \cos(\theta' - 2\alpha)}$$

$$CP - AP \approx \frac{-2h \sin \theta \sin \theta'}{\cos \theta'} \tag{63}$$



รูปที่ 2.14 หน้าคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดหลังการสะท้อน

จากสมการข้างบน

$$\Delta Y \sim 2n'h \cos\theta' \quad (64)$$

ผลต่างเฟสที่ P

$$\delta \sim \frac{4\pi}{\lambda_0} n'h \cos\theta' \quad (65)$$

$$\delta = \frac{4\pi h}{\lambda_0} \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2\theta} \quad (66)$$

และเมื่อเกิดการสะท้อนทำให้มุมเฟสเปลี่ยนไป π ฉะนั้นความเข้มสูงสุดที่ P เกิดขึ้นเมื่อ

$$2n'h \cos\theta' \mp \frac{\lambda}{2} = m\lambda_0 \quad \text{โดยที่ } m = 0, 1, 2, \dots \quad (67)$$

และความเข้มต่ำที่สุด เมื่อ

$$2n'h \cos\theta' \mp \frac{\lambda}{2} = m\lambda_0 \quad \text{โดยที่ } m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$2n'h \cos\theta' \mp \frac{\lambda}{2} = (m - \frac{1}{2})\lambda_0 \quad \text{โดยที่ } m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{หรือ } 2n'h \cos\theta' = m\lambda_0 \quad \text{โดยที่ } m = 1, 2, 3, \dots$$

ถ้า n' คือดัชนีหักเหของฟิล์มอากาศ $n'=1$ รั้งสีตกทามุม 90 องศา และ รั้วที่กำลังพิจารณามี $m=1$ จะได้ว่าความสูง h



$$h = \frac{\lambda_0}{2} \quad (70)$$

และจากสมการที่ 62 เมื่อ α มีค่าเล็กมากจะได้ว่า

$$h = \frac{\lambda_0}{2} = \alpha \rho \quad (71)$$

ดังนั้นความหนาของฟิล์มบางที่เปลี่ยนไป

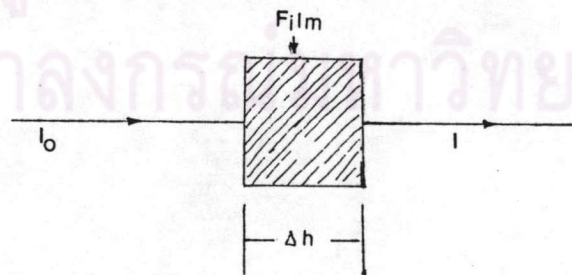
$$\Delta h = \alpha \Delta \rho \quad (72)$$

แทนค่าในสมการที่ 72 ด้วยสมการ 71 จะได้ว่า

$$\Delta h = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (73)$$

2.8 การดูดกลืน(Absorption)

จากการศึกษาการดูดกลืนแสงของสารตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านไปนั้นพบว่าในตัวกลางที่มีความต่อเนื่อง การดูดกลืนแสงเป็นไปตามกฎเอกซ์โพเนนเชียล (The Exponential Law) (Max, 1965) สมมติให้แผ่นของตัวกลางที่แสงเดินทางผ่านไปนั้นวางอยู่ในแนวแกน Y แล้วให้แสงเคลื่อนที่ไปในทิศทาง + X ผ่านตัวกลางที่หนา Δh ให้แสงจากแหล่งกำเนิดมีความเข้มแสง I_0 ตกกระทบผิวด้านแรกของตัวกลาง และ I คือความเข้มของแสงที่วัดได้เมื่อผ่านทะลุสารตัวกลางแล้ว



รูปที่ 2.15 แสดงการดูดกลืนแสงของตัวกลาง

$$I - I_0 = -\Delta I \quad (74)$$

ขนาดของความเข้มของแสงที่สูญเสียไปเนื่องจากถูกดูดกลืนจากสารตัวกลาง พบว่าขึ้นกับความหนา Δh

$$-\Delta I \propto I_0 \Delta h \quad (75)$$

$$-\Delta I = \mu I_0 \Delta h$$

μ คือค่าคงที่เรียกว่า สภาพดูดกลืน (Absorptivity) หรือสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของสารตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน

ถ้าความหนาของฟิล์มมีค่าน้อยๆ แล้ว Δh คือ dh พบว่าการสูญเสียความเข้มของแสงในตัวกลาง

$$\frac{dI}{I_0} = -\mu dh \quad (76)$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I_0} = -\mu \int_0^h dh \quad (77)$$

และจากผลทางคณิตศาสตร์

$$\int_a^b \frac{df(x)}{dx} dx = f(b) - f(a) \quad \text{และ} \quad \int \frac{dx}{x} = \ln x$$

ฉะนั้นสมการที่ 4 จะได้ผลลัพธ์

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\mu h \quad (78)$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu h} \quad (79)$$

และจะได้สมการแสดงการดูดกลืนของแสงดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu h} \quad (80)$$

สมการที่ 7 คือกฎการดูดกลืนแบบเอกซ์โพเนนเชียล(Exponential Law of Absorption)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย