

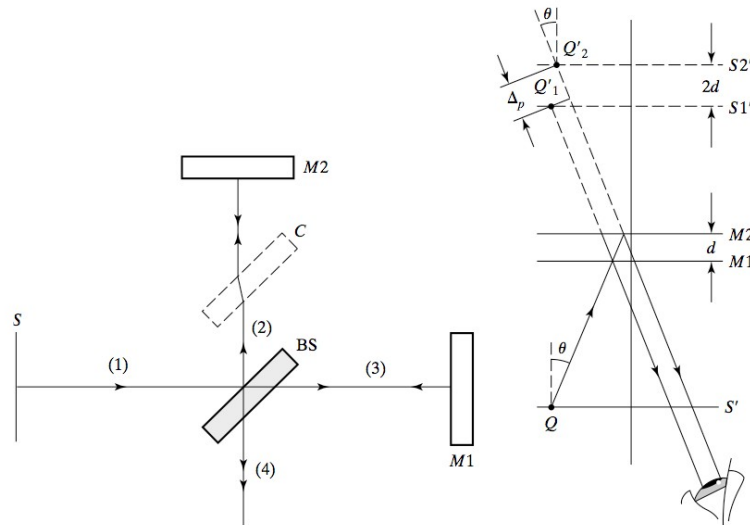
การแทรกสอดของแสง 3

10. การประยุกต์ใช้การแทรกสอดของแสง

เครื่องมือที่ใช้การแทรกสอดของแสงเรียกว่า interferometer (อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์) หลักการของ interferometer คือการแบ่งคลื่นแสงเป็นสองส่วนและให้คลื่นทั้งสองมี optical path ที่แตกต่างกัน ก่อนนำมารวมกันเป็นริ้วรอยการแทรกสอด โดยเราสามารถแยก interferometer ออกเป็นสองประเภท คือ ประเภทที่แบ่งหน้าคลื่นเป็นสองส่วน ซึ่งได้แก่ _____

และประเภทที่แบ่งแอมพลิจูดเป็นสองส่วน ซึ่งได้แก่ _____

11. การทดลองการแทรกสอดของไมเคิลสัน (Michelson interferometer)



แสงจากแหล่งกำเนิด (1) ไปตกกระทบบนตัวแยกแสง (Beam splitter) ซึ่งทำหน้าที่ _____

โดยลำแสงที่ (2) จะสะท้อนบนกระจก _____ และ _____

และลำแสงที่ (3) จะสะท้อนบนกระจก _____ และ _____

ไปเกิดเป็นการแทรกสอดกันได้

สังเกตว่าลำแสงที่ (2) เดินทางผ่านเนื้อแก้วของตัวแยกแสงเป็นจำนวน _____ ครั้ง

ในขณะที่ลำแสงที่ (3) เดินทางผ่านเนื้อแก้วของตัวแยกแสงเป็นจำนวน _____ ครั้ง

เพื่อเป็นการชดเชย optical path เราจึง _____

โดยเราอาจมองการทดลองนี้ได้ง่ายขึ้นโดยการย้ายกระจก _____ และแหล่งกำเนิดอยู่ในแนวเดียวกัน ดังภาพ เมื่อให้ระยะระหว่างกระจกทั้งสองมีค่าเท่ากับ _____ เราจะได้ความแตกต่างของ optical path เป็น

$$\Delta_p = 2d \cos \theta$$

เมื่อ θ คือมุมที่ลำแสงเอียงเทียบกับแกนแสง ความต่างเฟสจากการสะท้อนมีค่าเท่ากับ $\delta_p = \pi$ ทำให้เราได้เงื่อนไขของการเกิดแถบมืดเป็น

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

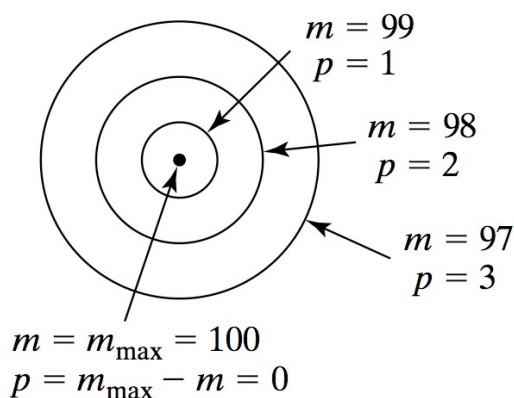
ดังนั้นที่จุดศูนย์กลางจะเป็นแถบมืดที่มีอันดับ

$$m_{\max} = \frac{2d}{\lambda}$$

แถบมืดที่วงกลมที่มีรัศมีกว้างขึ้นจะมีค่าอันดับลดลงเพราะ _____
เรานิยาม

$$p = m_{\max} - m = \frac{2d}{\lambda} - m$$

เราจะได้ p เป็นลำดับของแถบมืดเมื่อนับจากจุดศูนย์กลางดังภาพ



โดย p มีความสัมพันธ์กับมุมดังนี้

$$p\lambda = 2d(1 - \cos \theta)$$

การเลื่อนกระจกคือการ _____ และทำให้เกิดการเปลี่ยน _____

และได้ความสัมพันธ์ของรั้วที่เลื่อนไปกับระยะทางที่กระจกเลื่อนไปเป็น

$$\Delta m = \frac{2 \Delta d}{\lambda}$$

ตัวอย่าง พิจารณารี้วการแทรกสอดจากแสงความยาวคลื่นเดียวในการทดลองของไมเคิลสัน เมื่อเลื่อนกระจกไปเป็นระยะทาง 0.073 mm พบว่าจำนวนรี้วเลื่อนไป 300 รี้ว จงหาความยาวคลื่นแสง และจำนวนรี้วที่เพิ่มขึ้นเมื่อวางแผ่นแก้วดัชนีหักเห 1.5 และหนา 0.005 mm ไว้ที่แขนข้างหนึ่งของทางเดินแสง

12. การประยุกต์ใช้การแทรกสอดแบบไมเคิลสัน

สังเกตว่าในการทดลองไมเคิลสันเมื่อเปลี่ยน optical path ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงของรี้วรอย การแทรกสอด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในการดัชนีหักเหของแก๊ส

ในการหาดัชนีหักเหของแก๊ส เมื่อแก๊สมีความดันสูงก็จะมี _____
 ในขณะที่แก๊สที่มีความดันต่ำก็จะมี _____
 เมื่อวางโพรงแก๊ส (ซึ่งโพรงแสง) บรรจุแก๊สที่มีความดันและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่แขนด้านใดด้านหนึ่งของทางเดินแสง เมื่อค่อยๆนำแก๊สออก รี้วรอยก็จะเปลี่ยนไปเพราะ _____ โดยจำนวนรี้วรอยที่เปลี่ยนก็จะขึ้นกับความแตกต่างใน optical path เมื่อกำหนดให้ความยาวของโพรงเป็น L optical path ก็จะเป็น

$$\Delta d = n_2 L - n_1 L = (n - 1)L$$

จากสมการการเปลี่ยนแปลงรี้วรอย เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรี้วรอยที่เปลี่ยนแปลงไป (สังเกตได้) และดัชนีหักเห

$$n - 1 = \left(\frac{\lambda}{2L} \right) \Delta m$$

เราสามารถประยุกต์ใช้การทดลองนี้กับการหาความแตกต่างของความยาวคลื่นระหว่างเส้นสเปกตรัมที่อยู่ใกล้ๆกัน λ และ λ' แต่ละความยาวคลื่นก็จะสร้างรี้วรอยการแทรกสอดแบบวงกลมดังสมการ

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

เมื่อพิจารณารี้ววงกลมที่ใกล้กับจุดศูนย์กลางมากๆ นั่นคือ _____ ทำให้

$$2d \approx m\lambda \approx m'\lambda'$$

เราสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อรู้ทั้งสองซ้อนทับกันจะทำให้ลวดลายปรากฏชัดเจนขึ้น เมื่อพิจารณาการซ้อนทับกันครั้งแรกที่มีระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสองเป็น d_1 เราจะได้ว่าอันดับของความยาวคลื่น λ และ λ' ต้องห่างกันเป็นจำนวนเต็ม นั่นคือ

ทำให้

$$\frac{2d_1}{\lambda} = \frac{2d_1}{\lambda'} + N$$

เมื่อ N เป็นจำนวนเต็ม

เมื่อเลื่อนกระจกออกไปทำให้กระจกทั้งสองห่างกันเป็น d_2 และรู้รอยจากความยาวคลื่นทั้งสองซ้อนทับ กันอีกครั้ง นั่นคือ อันดับของความยาวคลื่น λ และ λ' ต้องห่างกันเป็นจำนวนเต็ม

ทำให้

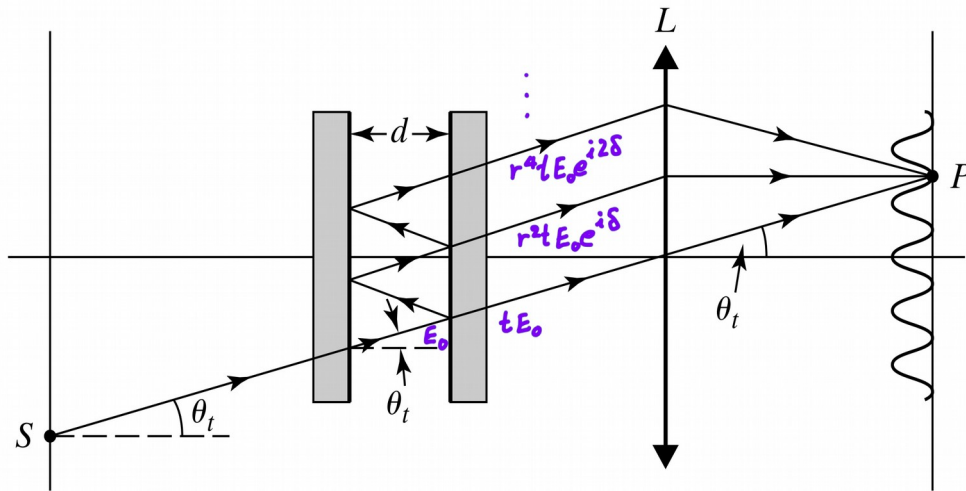
$$\frac{2d_2}{\lambda} = \frac{2d_2}{\lambda'} + N + 1$$

เราจะได้ความสัมพันธ์ของระยะที่กระจกถูกเลื่อนและความแตกต่างในความยาวคลื่นทั้งสองดังนี้

$$\lambda' - \lambda = \frac{\lambda\lambda'}{2\Delta d} \approx \frac{\lambda^2}{2\Delta d}$$

13 การแทรกสอดแบบเฟบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot interference)

การแทรกสอดชนิดนี้เกิดจากแสงที่สะท้อนไปมาระหว่างรอยต่อตัวกลางขนานสองเส้นดังภาพ โดยการแทรกสอดเกิดจากการรวมกันของแสงจำนวนมาก โดยเราจะพิจารณาคลื่นแสงโดยใช้ฟังก์ชันเชิงซ้อน



ถ้ากำหนดให้คลื่นแสงก่อนกระทบรอยต่อที่สองมีฟังก์ชันเป็น

$$\tilde{E}_{initial} = E_0 e^{i(\alpha - \omega t)}$$

เมื่อกำหนดให้สำหรับรอยต่อนี้ เมื่อแสงส่องผ่าน (transmission) จะมีแอมพลิจูดลดลงเป็น t เท่าของแสงตกกระทบ ในขณะที่เมื่อแสงสะท้อน (reflection) จะมีแอมพลิจูดลดลงเป็น r เท่าของแสงตกกระทบ ดังนั้นจากหลักการอนุรักษ์พลังงานเราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} E_0^2 &= r^2 E_0^2 + t^2 E_0^2 \\ 1 &= r^2 + t^2 \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาการส่องผ่านหนึ่งครั้ง เราจะได้ว่าคลื่นแสงแรกที่ออกไปรวมบนฉากคือ

$$\tilde{E}_0 = t E_0 e^{i(\alpha - \omega t)}$$

ในขณะที่คลื่นแสงที่สองที่ไปรวมบนฉากเกิดจากการสะท้อนภายในเพิ่มขึ้นอีกสองครั้ง รวมกับการเปลี่ยนเฟสเนื่องจากการเดินทางของแสงซึ่งเราเขียนเป็นเฟสที่เพิ่มขึ้นเป็น

$$\tilde{E}_1 = r^2 t E_0 e^{i(\alpha - \omega t + \delta)}$$

โดยเฟสที่เพิ่มขึ้นนั้นมีลักษณะเดียวกันกับการแทรกสอดของฟิล์มบางนั่นคือ

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \times (2d \cos \theta_t) = 2k d \cos \theta_t$$

เมื่อพิจารณาแสงที่ออกไปรวมบนฉากใดๆ

$$\tilde{E}_n = (r^2)^n t E_0 e^{i(\alpha - \omega t + n\delta)}$$

เมื่อใช้หลักการซ้อนทับของแสงเราจะได้ว่า

$$\tilde{E}_{total} = \tilde{E}_1 + \tilde{E}_2 + \dots = t E_0 e^{i(\alpha - \omega t)} (1 + r^2 e^{i\delta} + r^4 e^{2i\delta} + \dots) = t E_0 e^{i(\alpha - \omega t)} \sum_{n=0}^{\infty} (r^2 e^{i\delta})^n$$

และเพราะว่า $r < 1$ ผลรวมนี้สามารถหาค่าได้ และมีค่าเท่ากับ

$$\tilde{E}_{total} = \frac{t E_0 e^{i(\alpha - \omega t)}}{1 - r^2 e^{i\delta}}$$

เมื่อพิจารณาความเข้มแสงรวมที่เกิดขึ้นเราจะได้ว่า

$$I = \tilde{E}_{total} \tilde{E}_{total}^* = \frac{t^2 E_0^2}{(1 - r^2 e^{i\delta})(1 - r^2 e^{-i\delta})} = \frac{(1 - r^2) E_0^2}{1 + r^4 - 2r^2 \cos \delta}$$

ซึ่งเมื่อใช้ $\cos(\delta) = \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 1 - 2\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$

ความเข้มแสงจึงมีค่าเท่ากับ

$$I = \frac{I_0}{1 + \frac{4r^2}{(1 - r^2)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$

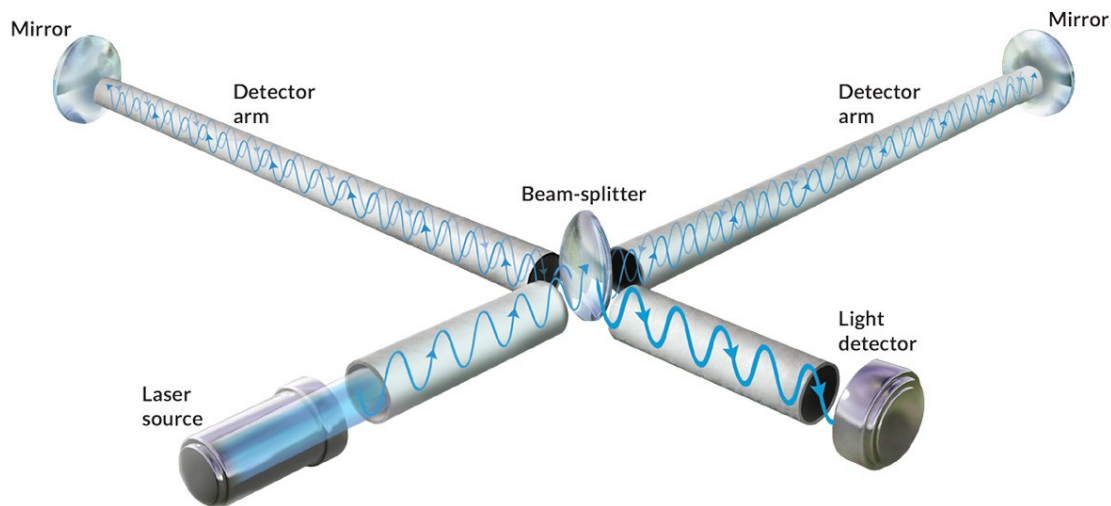
ซึ่งความเข้มแสงจะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$\sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0$$

นั่นคือเงื่อนไขของแถบสว่างจะเป็น

$$2d \cos \theta_t = m \lambda$$

14. การตรวจวัดคลื่นแรงโน้มถ่วงโดยใช้การแทรกสอดของแสง



คลื่นแรงโน้มถ่วงเป็นการทำนายผลของทฤษฎีแรงโน้มถ่วงของไอน์สไตน์ คลื่นชนิดนี้ทำให้อวกาศเกิดการสั่น ในการทดลองเพื่อค้นหาคลื่นแรงโน้มถ่วง เราก็สามารถประยุกต์ใช้การแทรกสอดในแบบเดียวกันกับที่เราศึกษาไปแล้วได้ จากภาพเมื่อคลื่นแรงโน้มถ่วงตกกระทบกับเครื่องมือทดลองก็จะทำให้เกิดการยืดขยายของความยาวของแต่ละแขน ทำให้เกิดการเลื่อนรื้อรอยของการแทรกสอดที่หัววัด อย่างไรก็ตามการขยับของอวกาศมีค่าน้อยมากๆ $\Delta d \sim 10^{-18} m$ เพื่อที่จะให้การทดลองเรามี sensitivity มากพอในการตรวจวัด การทดลอง LIGO (The Laser Interferometer Gravitation-Wave Observatory) จึงสร้างทางเดินของแสงแต่ละ ข้างยาว 4 km รวมทั้งเพิ่มความยาวนี้โดยการสร้างโพรง Fabry-Perot ซึ่งทำให้แสงสะท้อนไปมาประมาณ 280 ครั้งก่อนที่จะผ่านไปหัววัด ทำให้จริงๆ แล้วแสงเดินทางไปประมาณ 1000 km ก่อนไปแทรกสอดกัน

