

الجزء الثاني

الضوء الموجي

مقدمة

1- الطبيعة الموجية للضوء

في دروس سابقة أشرنا إلى طبيعة الضوء الموجية، عند حديثنا عن قرينة الانكسار وعلاقتها بطول الموجة وعند حديثنا عن تحليل الضوء، ويعود اكتشاف الطبيعة الموجية للضوء إلى تجارب التداخل والانعراج التي لا يمكن تفسيرها من دون نمذجة الضوء بموجة ضوئية. وقد تبين فيما بعد أن هذه الموجة كهريسية، أي إن المقادير المنتشرة هي حقل كهربائي \vec{E} وحقل مغناطيسي \vec{B} . قام مكسويل عام 1865 بوضع الأسس النظرية لانتشار الأمواج، وتحقق هرتز من ذلك عام 1887 عندما قام بتوليد أمواج كهريسية بمساعدة دارات كهريسية، وتحقق أن لهذه الأمواج خصائص مشابهة لخصائص الأمواج الضوئية. وقد بينت تجارب لاحقة في نهاية القرن التاسع عشر أن بالإمكان توليد أمواج متماثلة، إما بطرق كهريسية أو بطرق ضوئية وذلك في مجال الأشعة تحت الحمراء البعيدة ($\lambda=0.3\text{mm}$).

من ناحية ثانية اكتشف مكسويل المساواة بين سرعة انتشار الضوء في الخلاء والمقدار $\frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$ ، حيث μ_0 الثابتة المغناطيسية (نفوذية الخلاء)، ϵ_0 الثابتة الكهريسية (سماحية الخلاء) اللتين نقيسهما باستخدام قوانين الكهرياء الساكنة (بقياس شدة الحقل الكهريسي والحقل المغناطيسي في الخلاء مثلاً)، والمقدار $\frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$ يعبر عن سرعة انتشار الموجة الكهريسية في الخلاء ويُستنتج من معادلات مكسويل، وقد جرى التحقق حالياً بدقة نسبية أفضل من 10^{-2} من صحة العلاقة $C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$.

2- معادلات مكسويل - الموجة المستوية المتقدمة

تتناول دروس الكهريسية انتشار الأمواج بالتفصيل، وسنقتصر هنا على إعطاء بعض النتائج الضرورية لاستيعاب دروس الضوء الموجي.

إن حل معادلات مكسويل في الفراغ الخالي من الشحن والتيارات يُكتب في حلة موجة مستوية:

$$E = E_0 \cdot \cos(k_0 \cdot r - \omega t) \text{ مع}$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{k}}{\omega} \times \vec{E}$$

حيث \vec{E} الحق الكهربائي

\vec{B} الحقل المغناطيسي

r شعاع المسافة للنقطة التي نراقب فيها الموجة

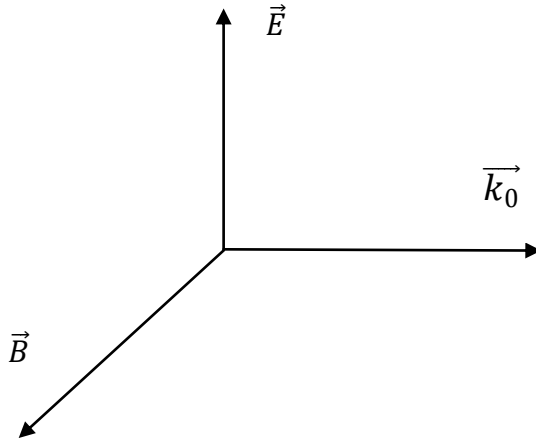
$\omega = 2\pi\nu$ نبض الموجة

\vec{k}_0 شعاع الموجة وهو شعاع اتجاهه باتجاه انتشار الموجة وطويلته تساوي $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{\omega}{c}$ مع λ طول الموجة.

نلاحظ في حال موجة تنتشر وفق المحور ox أنه بإمكاننا كتابة عبارة E على الشكل:

$$E = E_0 \cdot \cos(k_0 \cdot x - \omega t)$$

نلاحظ من علاقة \vec{B} أن هذا الحقل عمودي على الحقل \vec{E} وعمودي أيضاً على \vec{k}_0 وبالإمكان تمثيل الموجة المستوية بشعاعين \vec{E} و \vec{B} كما في الشكل:



3- الشدة الضوئية

نعرف الشدة الضوئية في نقطة بأنها الاستطاعة التي تتلقاها واحدة السطح بجوار النقطة، ونحسبه كما يلي:
لتكن M النقطة المعتبرة و δS سطحاً صغيراً بجوار هذه النقطة ولتكن δW الاستطاعة التي يتلقاها هذا

$$I = \frac{\delta W}{\delta S}$$

السطح العنصري، فتكون الشدة الضوئية: $I = \frac{\delta W}{\delta S}$ من الواضح أن هذه الشدة تُقدر بـ W.m^{-2} .

من ناحية أخرى نبرهن أن الشدة الضوئية التي تتلقاها شاشة موضوعة في طريق حزمة ضوئية تتناسب مع مربع طولية الحقل E وتُكتب: $I = k|E|^2$ حيث k ثابت تناسب موجب.

4- استقطاب الموجة:

الضوء الطبيعي غير مُستقطب ويعني ذلك أن الحقل الكهربائي يغير جهته عشوائياً مع الزمن. نقول عن الضوء أنه مستقطب إذا حافظ الحقل على جهة ثابتة، فنقول إن الاستقطاب خطي، أو كان يُغير اتجاهه بانتظام، مثلاً في الاستقطاب الدائري يدور الحقل حول المحور المنطبق على جهة الانتشار محافظاً على طولته.

من الممكن تحويل الضوء الطبيعي إلى ضوء مستقطب وذلك باستخدام مُقطَّب وهو صفيحة شفافة تتمتع بخاصية تمرير الضوء إذا كان شعاع الحقل الكهربائي موازياً لمحورها، ومن ثم في حالة الضوء غير المستقطب لا يمرر المقطب إلا مركبة الحقل الكهربائي الموازية لمحوره ويحذف المركبة الأخرى فنحصل على ضوء مستقطب موازٍ لمحور الصفيحة (المقطب).

5- التقريب السلمي

عند التقاء موجتين ينتج الحقل الكلي من تركيب حقلتي الموجتين، فإذا كانت الموجتان تتمتعان بالاستقطاب نفسه، وكانت الزاوية بين جهتي الانتشار مهملة فإن للحقلين \vec{E}_1 و \vec{E}_2 اتجاه شعاع الواحدة \vec{u} نفسه تقريباً. ويُمكننا على هذا أن نكتب:

$$\vec{E}_2 = S_2 \vec{u} \quad , \quad \vec{E}_1 = S_1 \vec{u}$$

وَيُمكننا أن نكتب عبارة الحقل الكلي في منطقة تقاطع الحزمتين:

$$S_2 + S_1 = S \quad \text{مع} \quad \vec{E}_2 + \vec{E}_1 = (S_2 + S_1)\vec{u} = S\vec{u}$$

ولما كنا نهتم بالشدة الضوئية التي تكتب: $I = k|E^2| = k|S|^2$ فإننا نستطيع أن نكتفي بتمثيل الموجة الضوئية بمقدار سلمي S ، وهذا ما سنتبعه في دروسنا اللاحقة، ويُسمى التقريب السابق بالتقريب السلمي.

6- التمثيل العقدي

كثيراً ما نلجأ إلى التمثيل العقدي للموجة الكهرطيسية فنكتب شعاع الموجة على الشكل التالي:

$$\underline{E} = E_0 \exp [j(k_0 \cdot r - \omega t)]$$

في هذه الحالة يُكتب الحقل الحقيقي:

$$E = R_e(\underline{E}) = E_0 \cos (k_0 \cdot r - \omega t)$$

ويُكتب المقدار السلمي الموافق لـ E :

$$S = E_0 \exp [j(k_0 \cdot r - \omega t)]$$

ظاهرة التداخل

1- تعريف ظاهرة التداخل:

تنتج ظواهر التداخل بسبب الطبيعة الموجية للضوء. ويُمكن ملاحظة ظواهر التداخل في الحياة اليومية: ألوان فقاعات الصابون على سبيل المثال، أو ألوان البقع الزيتية أو النفطية على سطح الماء، وكذلك الألوان التي نراها على قرص سطح CD-ROM. سوف نتناول في هذا الفصل ظاهرة التداخل في إطار نموذج موجي مبسط للضوء.

نقول أنه لدينا تداخل بين موجتين إذا كانت الشدة الضوئية الناتجة عن تركيبهما لا تساوي مجموع الشدتين الضوئيتين.

2- التقريب السلمي:

نعمد عند دراسة التداخل على التقريب السلمي، حيث نتجاهل الخاصة الشعاعية للحقل الكهربائي ونعتبره سلمياً، فنكتب المطال العقدي للحقل الكهربائي على النحو:

$$E = E_0 \cdot e^{i[\omega t - \varphi(M)]}$$

بدلاً عن:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{i[\omega t - \varphi(M)]}$$

3- الحساسات الضوئية:

تقيس حساسات الطاقة الضوئية القيمة المتوسطة لمربع الحقل الكهربائي $E^2(M, t)$ ، فمن أجل موجة ضوئية وحيدة اللون نبضها ω ومطالها العقدي $\underline{E}(M, t) = \underline{E}(M) \cdot e^{i\omega t}$ نعبر عن الشدة الضوئية بـ:

$$I(M) = K \cdot |\underline{E}(M)|^2$$

حيث k ثابت حقيقي موجب تماماً.

4- شرط تداخل موجتين ضوئيتين:

لنعتبر المطالين العقديين التاليين لموجتين واردتين إلى نقطة المراقبة M :

$$\underline{E}_1 = a_1 \cdot e^{i[\omega_1 t - \varphi_1(M)]}$$

$$\underline{E}_2 = a_2 \cdot e^{i[\omega_2 t - \varphi_2(M)]}$$

حيث a_1 و a_2 ينتميان إلى المجموعة R^{+*} ويكون الحقل الكهربائي الكلي:

$$\underline{E}(M, t) = \underline{E}_1(M, t) + \underline{E}_2(M, t)$$

$$\underline{E}(M, t) = a_1 \cdot e^{i[\omega_1 t - \varphi_1(M)]} + a_2 \cdot e^{i[\omega_2 t - \varphi_2(M)]}$$

وتكون الشدة الضوئية الكلية هي: $I(M) = K \cdot |\underline{E}(M)|^2 = k \cdot \underline{E}(M, t) \cdot \underline{E}^*(M, t)$

$$I(M) = k \cdot \{ a_1 \cdot e^{i[\omega_1 t - \varphi_1(M)]} + a_2 \cdot e^{i[\omega_2 t - \varphi_2(M)]} \} \cdot \{ a_1 \cdot e^{-i[\omega_1 t - \varphi_1(M)]} + a_2 \cdot e^{-i[\omega_2 t - \varphi_2(M)]} \}$$

$$I(M) = k \cdot \{ a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 \cdot a_2 \cos [(\omega_2 - \omega_1)t - (\varphi_2(M) - \varphi_1(M))] \}$$

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1} \cdot \sqrt{I_2} \cdot \cos [(\omega_2 - \omega_1)t - (\varphi_2(M) - \varphi_1(M))]$$

$$I_1 = k \cdot a_1^2 \quad \text{حيث:}$$

$$I_2 = k \cdot a_2^2$$

أما الشدة الضوئية التي يتم تحسسها فهي:

$$\langle I \rangle = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1} \cdot \sqrt{I_2} \cdot \langle \cos [(\omega_2 - \omega_1)t - (\varphi_2(M) - \varphi_1(M))] \rangle$$

• إذا كان $\omega_2 \neq \omega_1$ فإن $\langle \cos [(\omega_2 - \omega_1)t - (\varphi_2(M) - \varphi_1(M))] \rangle = 0$ وبالتالي

فإن $\langle I \rangle = I_1 + I_2$ مما يؤكد عدم وجود تداخل بين الموجتين.

فالشرط الأول لحدوث التداخل الضوئي هو أن يكون للموجتين المتداخلتين نفس النبض.

• إذا كان $\omega_2 = \omega_1$ يكون عندها:

$$\langle I \rangle = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1} \cdot \sqrt{I_2} \cdot \langle \cos ((\varphi_2(M) - \varphi_1(M))) \rangle$$

فإذا كان فرق الصفحة $(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))$ عشوائياً فإنه لا يوجد علاقة بين المنبعين، وعندئذ تكون

$$\langle \cos ((\varphi_2(M) - \varphi_1(M))) \rangle = 0 \quad \text{القيمة المتوسطة للتجيب معدومة:}$$

وبالتالي تكون الشدة الضوئية التي يتم تحسسها في هذه الحالة هي مجموع الشدتين الضوئيتين

$$\langle I \rangle = I_1 + I_2 \quad \text{مما يدل على عدم وجود تداخل بين المنبعين.}$$

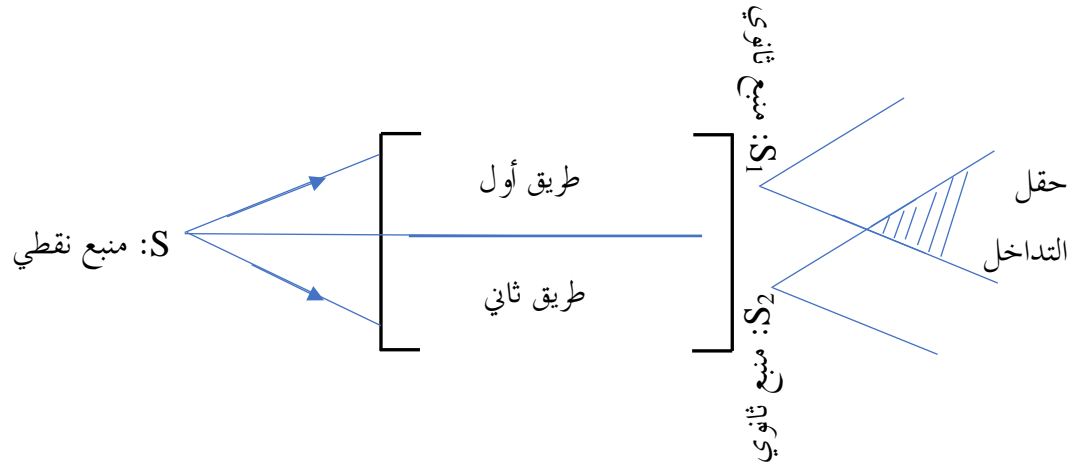
ومنه الشرط الثاني في حدوث التداخل الضوئي هو أن تكون الموجتان مترابطتين أي أن يكون فرق الصفحة

$$(\varphi_2(M) - \varphi_1(M)) \quad \text{معرفاً}$$

لا بد من أن تُذكر هنا بميكانيكية إرسال الضوء: تُهَيَّج أحد ذرات المنبع الضوئيين من وقت إلى آخر فترسل إشعاعاً قصير الأمد أو ما ندعوه بقطار الموجة، تعود هذه الذرة بعد ذلك إلى حالتها الأساسية ثم تُهَيَّج من جديد وترسل قطار موجة آخر... وهكذا. إن زمن قطار الموجة الواحد τ_R هو نفسه زمن الحياة الإشعاعية للحالة المهيجة الذي من مرتبة 10^{-6} s إلى 10^{-9} s هذه المرتبة الصغيرة جداً بالنسبة لزمن مراقبة الظاهرة. تتغير الصفحة من إرسال ضوئي لآخر ومن ذرة لأخرى بحيث يتغير فرق الصفحة $(\varphi_2 - \varphi_1)$ عشوائياً خلال الزمن وتكون بالتالي القيمة المتوسطة للتجيب معدومة أي أن $\langle \cos((\varphi_2(M) - \varphi_1(M))) \rangle = 0$ مما يُعَلِّل عدم مُلاحظة ظاهرة التداخل.

حتى يُمكن مُلاحظة ظاهرة التداخل الضوئي كظاهرة مُستقرة يجب أن يبقى فرق الصفحة $(\varphi_2 - \varphi_1)$ ثابتاً خلال الزمن في كل نقطة M من الشاشة، ندعو في هذه الحالة منبعي الاهتزازين الضوئيين بالمنبعين المترابطين. لا يُمكن في الحالة العامة مواقنة منبعين ضوئيين مختلفين لكن يُمكن أن نحصل على ظاهرة تداخل لموجتين صادرتين من نفس المنبع بعد تعرضهما لشروط انتشار مختلفة بحيث لا يعتمد الحد $(\varphi_2 - \varphi_1)$ سوى على المسيرين الهندسيين.

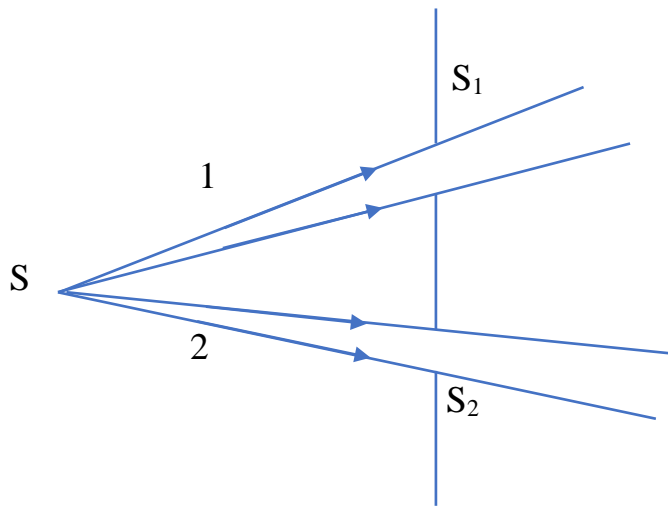
النتيجة: إن الموجتين الناتجتين عن منبعين ضوئيين مُختلفين تكونان غير مُترابطتين، أي لا يُمكن أن نحصل على أي شكل تداخلي باستخدام منبعين مُستقلين، من أجل الحصول على شكل تداخلي نستخدم منبعاً وحيداً وأداة ذات طريقتين تُسميها بجهاز التداخل.



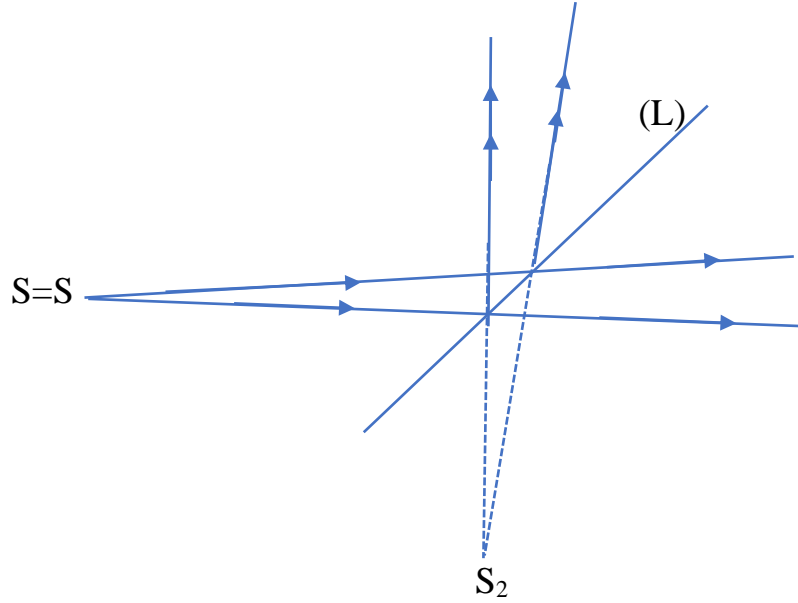
الشكل 1: جهاز التداخل

للحصول على موجتين انطلاقاً من نفس المنبع الضوئي يُمكن استخدام أحد النموذجين التاليين الموضحين في الشكلين (2) و (3):

- أجهزة التداخل بقسمة سطح الموجة: نقسم مكانياً موجة صادرة عن منبع (S) إلى جزئين يتداخلان فيما بعد. كأمثلة عن هذه الأجهزة: مرآتا فرينل، شقا يونغ، عدستا بيلليه، مرآة لويدي.
- أجهزة التداخل بقسمة سعة الموجة: نفصل موجة صادرة عن منبع (S) إلى موجتين باستخدام صفيحة نصف عاكسة (L) بحيث يُمكن للموجتين المنعكسة والمارة أن تتداخلوا. كأمثلة عن هذه الأجهزة: التداخلات في الصفائح الرقيقة المسؤولة عن تلون فقاعات الصابون، جهاز تداخل مايكلسون.



الشكل 2: قسمة سطح الموجة



الشكل 3: قسمة سعة الموجة

5- تعاريف وعلاقات أساسية في التداخل:

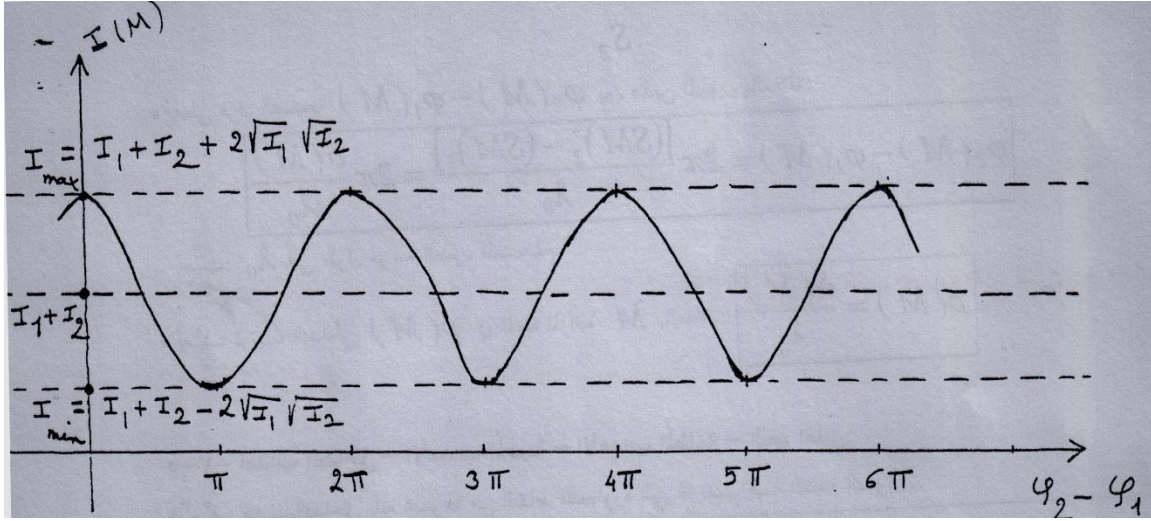
5-1- حقل التداخل: هو منطقة من الفراغ تلتقي فيها الموجتان المتداخلتان.

5-2- التداخل غير المتنوع: هو التداخل الذي تكون من أجله الأهداب مرئية في كل منطقة حقل التداخل.

5-3- عبارة ومنحني الشدة الضوئية: وجدنا سابقاً أن الشدة الضوئية في النقطة M من حقل التداخل تُعطى بالعبارة:

$$I(M) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1} \cdot \sqrt{I_2} \cdot \cos[(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))]$$

ويُعطي الشكل 4 منحني الشدة الضوئية $I(M)$ بدلالة فرق الصفحة $(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))$ بين المنبعين المتداخلين.



الشكل 4: منحني الشدة الضوئية بدلالة فرق الصفحة بين المنبعين المتداخلين

4-5- التباين أو معامل الوضوح C :

يُعرف التباين أو معامل الوضوح بالعلاقة: $C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \in [0,1]$ حيث I_{min} و I_{max} هما الحدان الأعلى والأدنى لتابع الشدة الضوئية $I(M)$.

5-5- حالة خاصة: الموجتان المتداخلتان متساويتا السعة:

عندما يكون للموجتين المتداخلتين نفس السعة يكون لدينا $I_1 = I_2$ وبالتالي تُصبح عبارة الشدة الضوئية الكلية:

$$I(M) = 2I_1[1 + \cos[(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))]]$$

أما النهايتان المحليتان العظمى والصغرى فهما:

$$\cos[(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))] = 1 \text{ توافق} \quad I_{max} = 4I_1$$

$$\cos[(\varphi_2(M) - \varphi_1(M))] = -1 \text{ توافق} \quad I_{max} = 0$$

يكون بالتالي التباين $C=1$.

5-6 - فرق المسير الضوئي - فرق الصفحة - ترتيب التداخل:

- يُعطى فرق المسير الضوئي $\delta(M)$ بين المنبعين S_1 و S_2 بالعلاقة:

$$\delta(M) = (SM)_2 - (SM)_1$$
حيث $(SM)_1 = (SS_1) + (S_1M)$ هو الطريق الضوئي للشعاع الذاهب من المنبع S إلى نقطة المراقبة M مروراً بالطريق الأول عبر المنبع الثانوي S_1
 $(SM)_2 = (SS_2) + (S_2M)$ هو الطريق الضوئي للشعاع الذاهب من المنبع S إلى نفس نقطة المراقبة M مروراً بالطريق الثاني عبر المنبع الثانوي S_2
- يُعطى فرق الصفحة $\varphi_2(M) - \varphi_1(M)$ بين هذين المنبعين بالعلاقة:

$$\varphi_2(M) - \varphi_1(M) = 2\pi \frac{(SM)_2 - (SM)_1}{\lambda_0} = 2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda_0}$$
حيث λ_0 هي طول موجة الضوء المستخدم.
- يُعرف ترتيب التداخل $P(M)$ في نقطة المراقبة M بالعلاقة:

$$P(M) = \frac{\delta(M)}{\lambda_0}$$

5-7 - أهداب التداخل - الأهداب المضيئة - الأهداب المظلمة - البعد الهدي:

يُعرّف هدب التداخل بأنه مجموعة من النقاط المتجاورة التي لها نفس قيمة الشدة الضوئية.

- تكون الشدة عظمى من أجل الأهداب المضيئة التي يكون من أجلها:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi k \iff \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$$

$$(k \in Z) \quad \delta = k \cdot \lambda_0 \iff$$
- تكون الشدة صغرى من أجل الأهداب المظلمة التي يكون من أجلها:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi(2k + 1) \iff \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$$

$$(k \in Z) \quad \delta = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda_0 \iff$$
- البعد الهدي: هو البعد بين مركزي هديين متتاليين من نفس النوع.

5-8 - الأشكال الهندسية لأهداب التداخل:

لنعتبر هدباً مضيئاً مُمثلاً بفرق مسير ضوئي $\delta = p \cdot \lambda_0$ حيث $p \in Z$ و λ_0 هو طول موجة الضوء المستخدم في الخلاء.

لدى غمر جهاز التداخل في وسط متجانس ومُتكافئ المناحي قرينة انكساره n يكون فرق المسير الضوئي هذا

$$\delta = (S_1M) - (S_2M) = n.S_1M - n.S_2M = n.(S_1M - S_2M) \quad \text{هو:}$$

$$S_1M - S_2M = \frac{\delta}{n} \quad \text{ومنه نجد أن}$$

$$S_1M - S_2M = \frac{p.\lambda_0}{n} = p.\lambda \quad \text{فيكون لدينا بالتالي من أجل الهدب المضيء المدروس}$$

$$\text{حيث: } \lambda = v.T = \frac{c}{n} T = \frac{\lambda_0}{n}$$

يتألف هذا الهدب من مجموعة النقط M التي تُحقق $S_1M - S_2M = cte$ ، هذه المجموعة هي سطوح

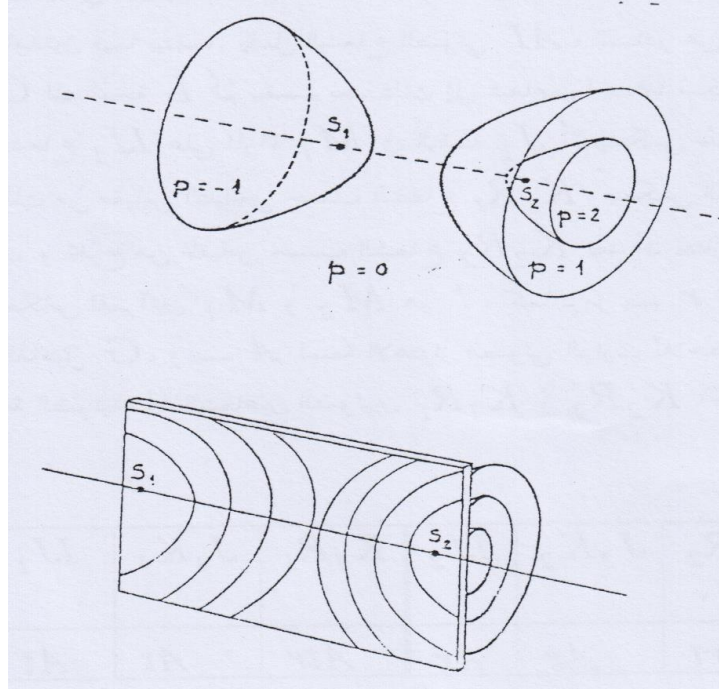
دورانية زائدية محرقاها هما S_1 و S_2 . يُعطي تقاطع هذه السطوح الدورانية مع مستوي الشاشة الموازي

للمستقيم $\overrightarrow{S_1 S_2}$ أهداباً مُضيئة ومُظلمة على شكل فروع من قطوع زائدة. بسبب الامتداد الصغير لمنطقة

التداخل تُمثّل فروع القطوع الزائدة هذه بمماساتها، لهذا السبب تظهر الأهداب على شكل مستقيمات. كما

يُعطي تقاطع هذه السطوح الدورانية مع مستوي الشاشة العمودي على المستقيم $\overrightarrow{S_1 S_2}$ دوائر متمركزة على

المستقيم $\overrightarrow{S_1 S_2}$.



الشكل 5: الأشكال الهندسية لأهداب التداخل

6- أجهزة التداخل

للحصول إذاً على حزمتين مترابطتين لابد أن نأخذهما من المنبع نفسه، وهنا لدينا طريقتان: إما بقسمة مطال الموجة أو بقسمة سطح الموجة.

6-1- أجهزة التداخل بقسمة سطح الموجة

6-1-1- مرآتا فرينل

6-1-2- شقا يومغ *Young*

6-1-3- عدستا بيبه *Billet*

6-1-4- موشور فرينل الثنائي *Fresnel*

6-1-5- مرآتا لويدي *Lloyd*

6-2- أجهزة التداخل بقسمة سعة الموجة

6-2-1- مقياس تداخل مايكلسون:

6-2-2- الصفيحة متوازية الوجهين

6-2-3- حلقات نيوتن