الموجات الكهرومغناطيسية
Electromagnetic Waves

بعد أن يكمل القارئ هذا الفصل، ويستوعب المفاهيم والأفكار والمبادئ التي وردت خلاله، من المتوقع أن يكون قادراً على:

- أن يقرر أهمية التسمية المتعارف عليها "قوس قزح" ماكسويل ومدى تعبيرها عن حقيقة علاقتها بالموجات الكهرومغناطيسية.
- أن يعرف القارئ كيف تتولد وكيف تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية.
- أن يفسّر القارئ حقيقة انتقال الطاقة عن طريق الموجات الكهرومغناطيسية.
- أن يفسّر القارئ استقطاب الموجات الكهرومغناطيسية بواسطة الانعكاس.
- أن يعرف القارئ العلاقة الهامة بين نسبة المجال الكهربائي إلى المجال المغناطيسي بمفهوم سرعة الضوء.

الموجات الكهرومغناطيسية

Electromagnetic Waves

10-1 المقدمة *Introduction*:

كان إنجاز العالم الشهير ماكسويل *Maxwell* والمتمثل في إثباته أن الضوء المرئي *visible light* ينتمي إلى الموجات الكهرومغناطيسية، وأن انتقال حزمة من الضوء في حقيقتها هو انتقال لموجة من المجالين الاتجاهيين الكهربائي والمغناطيسي في آن معاً *magnetic field vectors and electric field vectors*.

إن الأشعة الضوئية المرئية والأشعة تحت الحمراء *infrared* والأشعة فوق البنفسجية *ultraviolet* كلها من أنواع الأشعة التي كانت معروفة في زمن ماكسويل إلا أن العالم هنري هيرتز *Heinrich Hertz* هو الذي اكتشف الأشعة الراديوية *radio wave* وأثبت أنها تسير بسرعة الضوء.

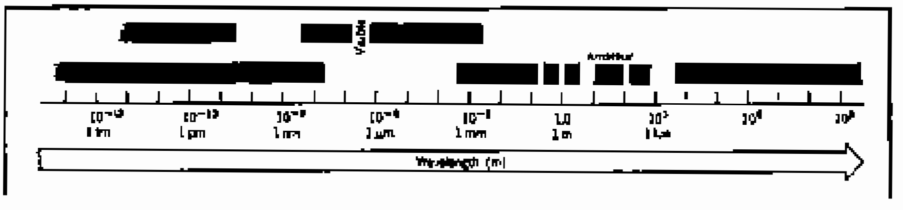
وبهدف التعرف على أجزاء الطيف المغناطيسي تأمل الشكل *(10-1)* لعلك تستنتج لماذا أسماه أحد الكتاب قوس قزح ماكسويل *Maxwell's rain bow*. إنه عبارة عن مقياس للطول الموجي، أو بتعبير آخر طيف الأمواج الكهرومغناطيسية *electromagnetic spectrum*، وواضح على الشكل أن نهايتي هذا الطيف ليستا مغلقتين، وهذه إشارة إلى أن الموجات الكهرومغناطيسية ليس لها نهاية عظمى أو نهاية صغرى، وقد تطالعنا الأبحاث يوماً ما بتسميات جديدة لموجات كهرومغناطيسية مكتشفة.

إن بعض أجزاء هذا الطيف تحمل أسمائها المعروفة بها، مثل أشعة إكس *x-ray*، والأمواج المايكروية *microwaves*، وغير ذلك، وهي تمثل مجال الأطوال الموجية الذي يمكننا أن نحصل خلاله على تلك الأمواج.

ونحن نتحدث عن الموجات الكهرومغناطيسية لا بد لنا أن نؤكد على الملاحظتين الهامتين الآتيتين بخصوص الطيف الكهرومغناطيسي:

1- لا يوجد أية فجوات أو انقطاع في الطيف الكهرومغاطيسي.

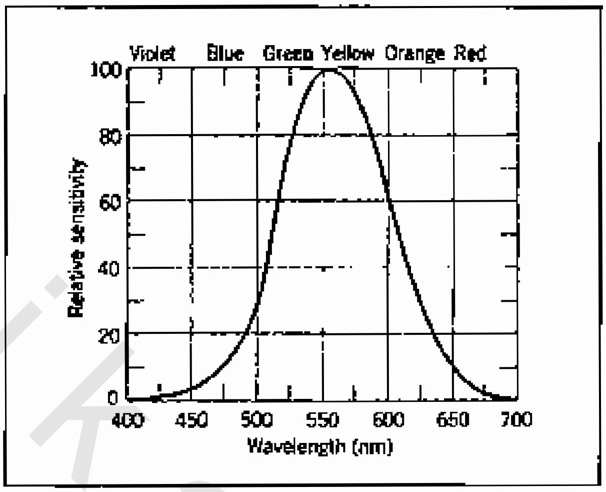
2- ن جميع أنواع الموجات المذكورة في الطيف الكهرومغناطيسي بلا استثناء تسير عبر الفراغ *vacuum* بسرعة الضوء *(c)*.



الشكل *(10-1)*

الطيف الكهرومغاطيسي *electromagnetic*، ويظهر من خلاله مجال الأطوال الموجية لكل نوع من هذه الأشعة

إن المنطقة التي تحظى بأهمية خاصة من الطيف الكهرومغناطيسي، ولا سيما في معامل البصريات، هي المنطقة المرئية *visible region* وهو ما يمكننا رؤيته عندما يمر الضوء عبر المنشور الزجاجي *prizm* حيث يتحلل إلى ألوانه الستة، وجميعها في حدود مقدرة العين البشرية للإبصار، ويقع هذا المجال عموماً بين الأطوال الموجية *(400-700 nm)*، تأمل الشكل *(10-2)*.



الشكل *(10-2)*

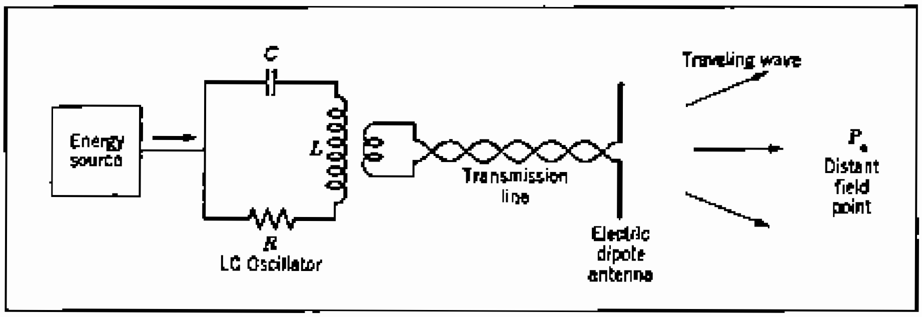
إحساس العين البشرية النسبي لمجموعة من الموجات الكهرومغناطيسية، ويلاحظ أنها مكونة من الطيف المرئي

10-2 توليد الأمواج الكهرومغناطيسية *Creating an Electromagnetic Wave*:

بدايةً ونحن نتحدث عن توليد الموجات الكهرومغناطيسية، لا بد من التأكيد على أن حجم مصدرها يكون بحدود حجم الذرة أو نواتها، وهذه مسألة فيزيائية يتم تفسيرها بواسطة ميكانيك الكم *quantum mechanics*، ومن الأمثلة عليها أشعة إكس *x-ray*، وأشعة كاما *gammc rays*، وطيف الضوء المرئي *visible light*.

إن السؤال الذي يحتاج إلى إجابة مناسبة بعد هذه المقدمة، هو كيف يتم توليد الموجات الكهرومغناطيسية؟

ولتسهيل الإجابة عن هذا السؤال فإننا سوف نأخذ مجالاً محدداً من الأطوال الموجية للطيف الكهرومغناطيسي، وتحديداً عند الطول الموجي *(λ=1m)* والتي يكون عندها الإشعاع الكهرومغناطيسي عبارة عن موجة راديوية قصيرة *shortwave radio* يمكن معاينتها والتحكم بها، ونشير هنا إلى أن مصدرها هو عبارة عن هوائي بسيط *antenna*، تأمل الشكل *(10-3)*.



الشكل *(10-3)*

يوضح الخطوط العريضة الخارجية لمولد الموجات القصيرة

نلاحظ في وسط هذا الجهاز وجود مولد الذبذبات من النوع LC

إن الشحنات التي تولد التيار الكهربائي في هذه الدائرة تتغير تغيراً جيبياً بمقدار التردد الزاوي لمولد الذبذبات $\omega = 1/\sqrt{LC}$ نفسه.

وكما هو واضح من الشكل *(10-3)* فإن وجود مصدر للطاقة – كأن يكون بطارية مثلاً – يعوض كلاً من الفقدان الحراري في الدائرة والطاقة التي تحملها الموجات الكهرومغناطيسية، كما يتضح أن مولد الذبذبات *LC oscillator* موصول بمحولة وخط نقل يغذي الهوائي الذي يتكون بدوره من قطعتين رقيقتين من مادة موصلة للتيار الكهربائي على شكل قضبان (هوائي ذو قطبين)، من خلال هذه الدائرة يُحدث التيار المتذبذب جيبياً *oscillate sinusoidally* حركة جيبية في شحنات الهوائي بمقدار التردد الزاوي للمتذبذب *(ω)* نفسه، والهوائي هنا له تأثير المزدوج الكهربائي والذي يتغير عزمه الكهربائي بشكل جيبي في المقدار والاتجاه على طول الهوائي. وبسبب هذا التغير لعزم المزدوج يتغير أيضاً المجال الكهربائي الناشئ مقداراً واتجاهاً.

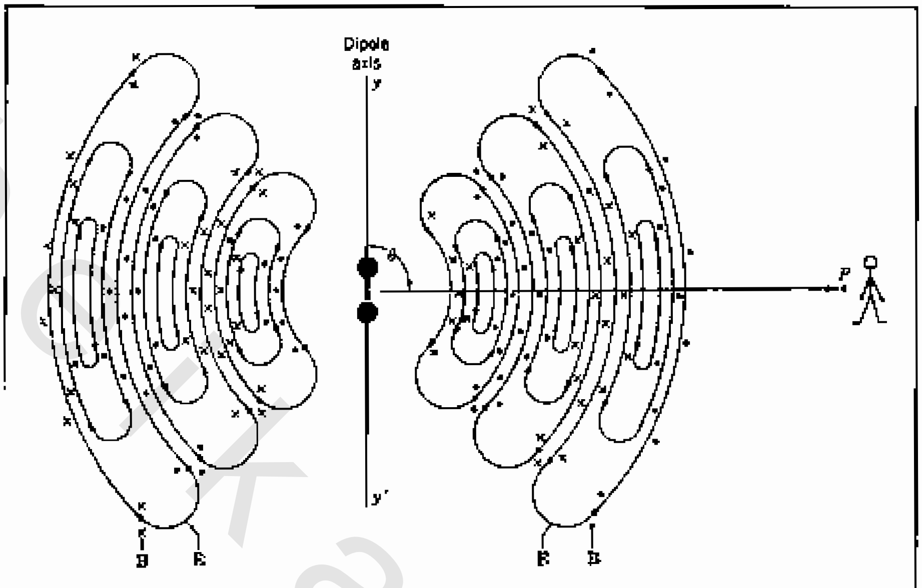
إن مرور التيار الكهربائي المتغير جيباً يولد مجالاً مغناطيسياً يتغير هو الآخر جيباً مقداراً واتجاهاً.

إن التغير الحاصل في كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي ينشأ عنه موجات كهرومغناطيسية تصدر عن الهوائي بسرعة الضوء وبتردد زاوي مساوي إلى تردد مولد الذبذبات *(ω)*.

ولمزيد من الإيضاح انظر الشكل *(10-4)* حيث يمكن رؤية كل من المجال الكهربائي *(E)* والمجال المغناطيسي *(B)* تتغير مع الزمن كموجة واحدة قبل أن تصل إلى نقطة الاستقبال *(P)*. كما يمكن رؤية شحنتي الهوائي ذو القطبين وكذلك التيار الكهربائي *(i)*.

وإذا تأملنا الشكل أكثر نجد أن المسارات الثلاثة تمثل كلاً من المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي عند ثلاث قيم مختلفة للزمن حدثت بواسطة الهوائي وهي متجهة نحو اليمين واليسار حيث يتجه المجال المغناطيسي إلى داخل الصفحة وخارجها على التناوب، بينما يتجه المجال

الكهربائي أعلى وأسفل الصفحة على التناوب أيضاً. والمجموعتان الموضحتان في الشكل (10-4) هي جزء من النموذج الكامل لتناوب المجالين، وهي تتجه كما أسلفنا سابقاً مبتعدة عن الهوائي بسرعة الضوء (c).



الشكل (10-4)

كل من المسارات الثلاثة حصلت عند زمن معين يبين هذا الشكل منظراً قريباً من الأعلى لمزدوج متذبذب يصدر أشعة كهرومغناطيسية، كما يوضح كلاً من خطوط المجالين الكهربائي والمغناطيسي المقترنة بها النقاط (•) توضح الموجات الخارجة والتقاطع × يوضح الموجات الداخلة إلى مستوى الورقة

وهكذا نرى كيف تمكنا عملياً من توليد الموجات الكهرومغناطيسية الراديوية ضمن الطول الطول الموجي الذي اخترناه مسبقاً.

10-3 انتقال الموجات الكهرومغناطيسية The Travelig Electromagnetic Wave :

إذا نظرنا إلى الشكل (10-4) مرة أخرى ولاحظنا النقطة (P)، إن هذه النقطة استُخدمت في حقيقة الأمر للإشارة إلى محطة الرصد للموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة عن الهوائي، وهي ليست قريبة كما يبدو، بل لابد من وجودها على بعد مناسب لعملية الاستقبال، كما يوضح الشكل أيضاً أنّ انتقال الموجات الكهرومغناطيسية إلى محطة الرصد يكون بشكل مستوٍ. ولابد من أن نؤكد حقيقةً أنّ كلاً من المجالين المغناطيسي (B) والكهربائي (E) يكونان دائماً في حالةٍ من التعامد أثناء انتقال الموجة الكهرومغناطيسية، كما أنهما متعامدان مع اتجاه انتشار الموجه ذ تها، ولمزيد من التوضيح فإن محطة الاستقبال عند أي مقدار للزمن (t) تستقبل الكميات التالية:

$\vec{E} = \vec{E}_m \sin(kx - \omega t)$ المجال الكهربائي (10-1)

$$\vec{B} = \vec{B}_m \sin(kx - \omega t)$$ المجال المغناطيسي (10-2)

حيث إن (E_m)، (B_m)، هما السعة العظمى لكلٍ من المجالين الكهربائي والمغناطيسي، كما أنّ (x) هي المسافة بين مصدر الموجة الكهرومغناطيسية ونقطة استقبال هذه الموجة في اتجاه انتشار الموجة الكهرومغناطيسية، أما سرعة الموجة فهي:

$$c = \frac{\omega}{k} \qquad (10\text{-}3)$$

حيث إن:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

وهو عبارة عن التردد الزاوي ويقاس بالراديان لكل ثانية، كما أن:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (10\text{-}4)$$

وهو عبارة عن العدد الموجي الزاوي ويقاس بالراديان لكل متر، أما التردد *frequency* فتعبر عنه بالعلاقة الرياضية:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \qquad (10\text{-}5)$$

ويقاس بالهرتز حيث:

(دورة لكل ثانية) $hertz = 1\ HZ = 1\ 1$

أما المقدار $(kx - \omega t)$ فهو عبارة عن طور الموجة الكهرومغناطيسية.

إن المعادلة الرياضية *(10-1)* تصف معدل التغير الزمني للمجال الكهربائي وفقاً لقانون ماكسويل للحث الكهرومغناطيسي، ولا بد أن نؤكد هنا أن المجال المغناطيسي المرتبط بها تمثله المعادلة *(10-2)*. بينما تمثل المعادلة الرياضية *(10-2)* معدل التغير الزمني للمجال المغناطيسي وفقاً لقانون فراداي للحث الكهرومغناطيسي ولا بد أيضاً أن نؤكد أن المجال الكهربائي المرتبط بها تمثله المعادلة *(10-1)*.

وهكذا نرى أن الموجة المنتشرة كهرومغناطيسياً بسرعة الضوء في الفراغ تعبِّر عن معدل التغير الزمني لكل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي وهذا في حقيقة الأمر ما يمكننا من التعبير عنها بواسطة معادلات ماكسويل *Maxwell's equations*.

وإذا اعتبرنا أن الشحنة الكهربائية $(q = 0)$ في الفراغ الحر تساوي إلى الصفر آخذين بالاعتبار أن التيار الكهربائي الحثي في هذه الحالة يساوي الصفر $(i = 0)$ فإن معادلات ماكسويل يمكن إعادة صياغتها على النحو الآتي:

$$\oint \bar{E}\,d\bar{s} = \frac{d\phi_B}{dt} \quad \text{قانون فراداي في الحث} \tag{10-6}$$

$$\oint \bar{E}\,d\bar{s} = \mu_0\,\varepsilon_0\,\frac{d\phi_E}{dt} \quad \text{قانون ماكسويل في الحث} \tag{10-7}$$

والسؤال المطروح الآن: هل أنْ وصف الموجات الكهرومغناطيسية المبيّن في المعادلتين $(10\text{-}1)$ و$(10\text{-}2)$ يتوافق مع معادلتي ماكسويل $(10\text{-}6)$ و$(10\text{-}7)$؟

إن الجواب الصحيح هنا: هو نعم يمكننا التأكيد على ذلك، شريطة أن نعبِّر عن سرعة الضوء بالمعادلة الرياضية:

$$c = \frac{\bar{E}_m}{\bar{B}_m} \tag{10-8}$$

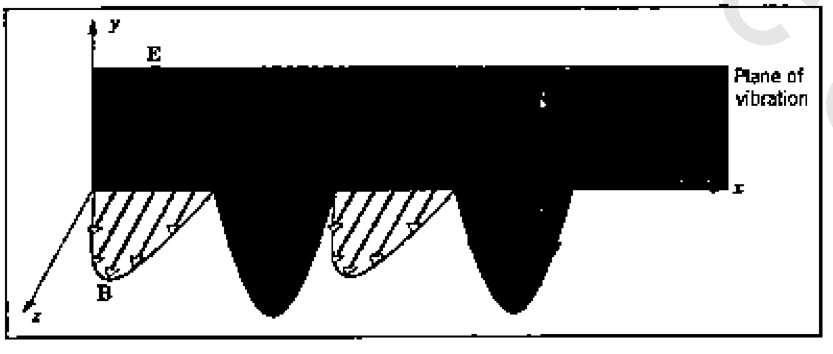
وهي نسبة السعتين العظمى لكلٍ من المجالين الكهربائي والمغناطيسي، كما يمكننا أن نعبِّر عن سرعة الموجة في الفراغ بالعلاقة الرياضية:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\,\varepsilon_0}} \tag{10-9}$$

وهي تساوي عددياً $(3\times10^8\ m/s)$.

حيث إن (μ_0) تمثل نفاذية الفراغ الحر، بينما تمثل (ε_0) نفاذية الفراغ الحر.

حيث (E_m) و(B_m) هما القيمتان العظمى لسعةِ كل من الموجتين الكهربائية والمغناطيسية، وهما ليستا مستقلتين عن بعضها البعض، انظر الشكل $(10\text{-}5)$.



الشكل $(10\text{-}5)$

يبيِّن الشكل أنَّ كلاً من المجالين الكهربائي والمغناطيسي يتذبذبان جيبياً،

الأول موازٍ للمحور (y) والثاني موازٍ للمحور (z) وهما متعامدان

10-4 انتقال الطاقة ومتجه هنري بوينتنغ Energy Transport and The Poynting Vector:

إن جميع الذين تعودوا على أخذ الحمامات الشمسية يعلمون أن أجسامهم تكتسب الطاقة المصاحبة للموجات الكهرومغناطيسية والتي يمكننا التعبير عنها بواسطة المتجه الذي يسمى متجه بوينتنغ نسبة إلى *John Henry Poynting*، والذي نعبّر عنه رياضياً على النحو الآتي:

$$\vec{S}=\frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B} \quad \text{متجه بوينتنغ} \qquad (10\text{-}10)$$

أمـا وحـدة القيـاس لهـذه الكميـة في النظـام الـدولي *(SI)* فهـي الـواط لكـل متر مربـع *Watts per square meter*، ومن الأهمية بمكان أن نلاحظ أنّ اتجاهه يعبِّر عن اتجاه نقل الطاقة بواسطة الموجة الكهرومغناطيسية عند النقطة التي تمثل استقبال الموجة.

إن كلاً من المتجهين $(\vec{E})$ و$(\vec{B})$ يتغيران أثناء انتقال الموجة الكهرومغناطيسية، الأول بين الزيادة و لنقصان في الاتجاه *(y)*، والثاني يتغير بين الزيادة والنقصان في الاتجاه *(z)*، ولكن ذلك لا يغـير مـن طبيعـة المتجـه وهـو دائمـاً باتجـاه المحـور *(x)* المتزايـد، أي باتجـاه انتشـار الموجـه الكهرومغناطيسية، ذلك أن حاصل الضرب الاتجاهي للمتجهين $(\vec{E}\times\vec{B})$ في كلا حالتي التغير يشير إلى الاتجاه العمودي على المستوى الذي يحتويهما، وهما كما أشرنا مسبقاً دائماً في حالة تعامد، وهذا ما يجعلنا نعيد صياغة المعادلة *(10-10)* رياضياً على النحو الآتي:

$$S=\frac{1}{\mu_0}E\,B \qquad (10\text{-}11)$$

ذلك أن مقدار جيب الزاوية بينهما *[sin (90)]* يساوي الواحد، ولابد من أن نلاحظ في المعادلة *(10-11)* أنّ كلاً من المتجهات الثلاثة $(\vec{B})$ و$(\vec{E})$ و$(\vec{S})$ تعبّر عن المقادير الآنية لها. وعلى الرغم من أن كلاً من المتجهين $(\vec{E})$ و$(\vec{B})$ متحدان تماماً إلا أن معظم أجهزة القياس المستخدمة في الدراسات الكهرومغناطيسية يستند تصميمها على رصد وقياس المجال الكهربائي $(\vec{E})$.

وبالعودة إلى المعادلة *(10-8)* التي توضح العلاقة الرياضية بين القيم العظمى لكلٍ من $(\vec{E}_m)$ و$(\vec{B}_m)$، نقول بإمكانية اعتمادها لتوضيح العلاقة الرياضية بين المقادير الآنية لكل من $(\vec{E})$ و$(\vec{B})$ على النحو الآتي:

$$\frac{\vec{E}_m}{\vec{B}_m}=\frac{\vec{E}}{\vec{B}}=c \qquad (10\text{-}12)$$

إن لعلاقة الرياضية *(10-12)* تمكننا من تعويض المقادير الآنية للمجالين المغناطيسي والكهربائي في المعادلة *(10-8)* بما يساويها وذلك على النحو الآتي:

$$\vec{B} = \frac{\vec{E}}{c} \qquad (10\text{-}13)$$

وهذا ما يؤدي إلى إمكانية إيجاد مقدار نسبة ا لانسياب اللحظي للطاقة، على النحو الآتي:

$$S = \frac{1}{c\,\mu_0} E^2 \qquad (10\text{-}14)$$

وبالإمكان استخدام معلوماتنا الأولية عن كلٍ من المجال الكهربائي والمغناطيسي والتحديد المجال المغناطيسي الوارد في المعادلة *(10-12)* وذلك لإعادة اشتقاقها من جديد، وتعريف ما يسمى معدل مقدار الانسياب اللحظي للطاقة $(\bar{S})$ المتغيرة بالنسبة للزمن، ويسمى هذا المعدل شدة الطاقة *energy intensity* والذي نعبِّر عنه رياضياً على النحو الآتي:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{c\,\mu_0} E_{rms}^2 \qquad (10\text{-}10)$$

حيث إن (E_{rms}) هي عبارة عن جذر المتوسط التربيعي للمجال الكهربائي، ويساوي رياضياً

$$E_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \qquad (10\text{-}16)$$

كما أنَّ:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{c\,\mu_0} \bar{E}^2 \qquad (10\text{-}17)$$

ولكن نحن نعلم أنَّ:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$

وبتعويض معدل مقدار الدالة الجيبية لنصف الفترة والذي يساوي العدد $\left(\frac{1}{2}\right)$، وكذلك المقدار $E_m = \sqrt{2}\, E_{rms}$، نحصل على:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0\, c} \overline{E_m^2 \sin^2(kx - \omega t)}$$

$$= \frac{1}{\mu_0\, c} (\sqrt{2}\, E_{rms})^2 \left(\frac{1}{2}\right)$$

$$I = \frac{1}{\mu_0\, c} E_{rms}^2 \qquad (10\text{-}18)$$

وهي العلاقة الرياضية التي تعبِّر عن معدل شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي بدلالة ثابت نفاذية الوسط الحر (μ_0) وسرعة الضوء (c)، وجذر المتوسط التربيعي للمجال الكهربائي (E_{rms}).

10-5 ضغط الإشعاع الكهرومغناطيسي Radation Pessure:

عندما يتقاطع سطح ما مع الإشعاع الكهرومغناطيسي فإن هناك قوةً وضغطاً كهرومغناطيسيين يتم تسليطهما على هذا السطح، وفي حالة امتصاص الإشعاع بشكل كامل فإن القوة المؤثرة يُعبّر عنها رياضياً بالمعادلة:

$$F = \frac{IA}{c} \quad \text{الامتصاص الكلي} \qquad (10\text{-}19)$$

حيث يمثل (I) معدل شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي، (A) المساحة العمودية لسطح الامتصاص، أما إذا ارتد الإشعاع كلياً عن السطح وفق المسار نفسه الذي سقط خلاله فإننا نعبّر عن القوة المؤثرة في هذه الحالة بالعلاقة الرياضية:

$$F = \frac{2IA}{c} \quad \text{الانعكاس الكلي على المسار نفسه} \qquad (10\text{-}20)$$

أما ضغط الإشعاع (P) فيعرّف على النحو الآتي:

$$P_r = \frac{I}{c} \quad \text{امتصاص كلي} \qquad (10\text{-}21)$$

وكذلك في حالة انعكاس الإشعاع الكلي:

$$P_r = \frac{2I}{c} \quad \text{الانعكاس الكلي على المسار نفسه} \qquad (10\text{-}22)$$

مثال (10-1) Example:

إذا علمت أن التقنية الحديثة تمكننا من الحصول على قدرة مقدارها $(100 \ \ TW)$ وذلك باستخدام عنصر النيوديميوم *neodymium* كمادة زجاجية لصناعة الليزر، وذلك خلال زمن مقداره $(1\ ns)$ بطول موجي يساوي $(0.26\ \mu m)$.

أوجد حسابياً طاقة النبضة الواحدة؟

الحل Solution:

القدرة الناشئة تساوي إلى:

$$P = 100 \times 10^{12}\ W$$

في الفترة الزمنية:

$$\Delta T = 1 \times 10^{-9}\ s$$

إذن: طاقة النبضة الواحدة تساوي إلى:

$$E = P\,\Delta T = 100 \times 10^{-12}\ W \times 1 \times 10^{-9}\ s$$
$$= 1 \times 10^{5}\ Joule$$

مثال (10-2) Example:

أوجد حسابياً معدل شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي لموجة مستوية، إذا كانت القيمة العظمى لسعة المجال المغناطيسي ($B_m = 1\times10^{-4}\ T$).

الحل Solution:

من المعادلة الرياضية *(10-10)* نجد أنَّ:

$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0}\left|\vec{E}\times\vec{B}\right|$$

$$= \frac{E_{av}\,B_{av}}{\mu_0} = \frac{(E_m/\sqrt{2})(B_m/\sqrt{2})}{\mu_0}$$

$$= \frac{E_m\,B_m}{2\,\mu_0}$$

ولكن لدينا:

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

$$E_m = c\,B_m$$

والآن نجد أنَّ شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي يساوي إلى:

$$I = \frac{c\,B_m^2}{2\,\mu_0} = \frac{(3\times10^8\ m/s)(1\times10^{-4}\ T)^2}{2(1.26\times10^{-6}\ H/m)^2}$$

$$= 1.2\times10^6\ W/m^2$$

مثال (10-3) Example:

موجة كهرومغناطيسية مستوية تبلغ القيمة العظمى لمركبة مجالها الكهربائي ($E_m = \pm 2\times10^{-4}\ V/m$).

أوجد حسابياً القيمة العظمى لمركبة مجالها المغناطيسي

الحل Solution:

من المعلوم أن العلاقة الرياضية التي تربط كلاً من (E_m) و(B_m) هي:

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

$$B_m = \frac{E_m}{c} = \frac{3.2\times10^{-4}\ V/m}{3.2\times10^8\ m/s}$$

$$= 1.07\times10^{-12}\ T$$

مثال Example (10-4):

أوجد حسابياً الطول الموجي (λ) لموجة كهرومغناطيسية تنبعث من مولد ذبذبات هوائي من النوع LC حيث تبلغ محاثة ملفه $(L = 0.253\ \mu H)$، أما سعة مكثفه $(C = 250\ PF)$

الحل Solution:

من المعلوم أن التردد الزاوي لمولد الذبذبات (LC) نعبّر عنه بالمعادلة:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\omega = 2\pi f$$

ولكن:

$$c = \lambda f$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

وهكذا نجد أن الطول الموجي للأشعة الكهرومغناطيسية في هذه الحالة يساوي إلى:

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{LC} = 4.7\ m$$

مثال Example (10-5):

إذا كانت القيمة العظمى لمركبة المجال الكهربائي لموجة راديوية مستوية تساوي إلى $(5\ V/m)$.

1- أوجد حسابياً القيمة العظمى لمركبة المجال المغناطيسي.

2- أوجد معدل الإشعاع للموجة الكهرومغناطيسية.

الحل Solution:

-1

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

$$B_m = \frac{E_m}{c} = \frac{5\ V/m}{3\times 10^8\ m/s} = 1.67\times 10^{-8}\ T$$

-2

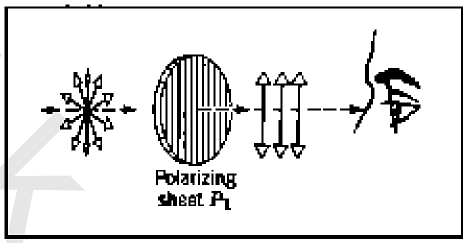
$$I = \bar{S} = \frac{E_m^2}{2\mu_0 c}$$

$$= \frac{(5\ V/m)^2}{2(1.26\times 10^{-6}\ H/m)(3\times 10^8\ m/s)}$$

$$= 3.31\times 10^{-2}\ W/m^2$$

10-6 الاستقطاب Polarization:

إن المقصود باستقطاب موجة الأشعة الكهرومغناطيسية هو أن تكون جميع المتجهات التي تمثل المجال الكهربائي في حالة توازٍ *inparallel*، ونطلق في هذه الحالة على اتجاه المجال الكهربائي اسم اتجاه الاستقطاب *polarization direction*، كما نطلق على المستوى الذي يحوي كلاً من متجه المجال الكهربائي ومتجه انتشار الموجة الكهرومغناطيسية مستوى التذبذب الموجي *plane of vibration*. ومن الناحية التقنية يمكننا الحصول عملياً على أشعة كهرومغناطيسية مُستقطبة وذلك باستخدام ما نسميه بصفيحة الاستقطاب *polarizing sheet*، انظر الشكل *(10-6)*.

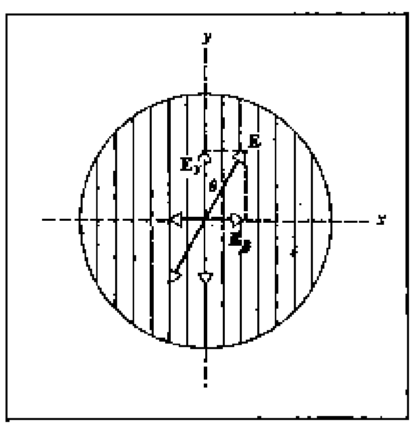


الشكل *(10-6)*

يصبح الضوء مُستقطباً بعد مروره خلال صفيحة الاستقطاب، ويكون اتجاهه باتجاه محور الاستقطاب للصفيحة وتمثله في الشكل الخطوط المتوازية

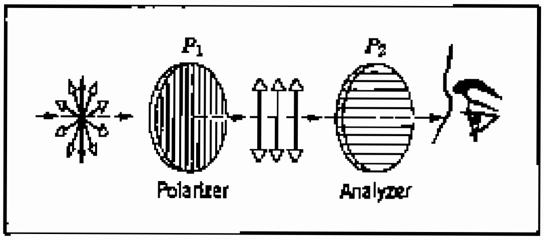
تسمح صفيحة الاستقطاب بمرور مركبات الأشعة الكهرومغناطيسية الاتجاهية خلال خطوط استقطابها، حيث يخرج الضوء المُستقطب من الجهة المقابلة بشدة إضاءة مساوية لنصف شدة الإضاءة الأصلية للأشعة الساقطة على المُستقطب. وبحالة عامة نعبِّر رياضياً عن شدة الإضاءة الناتجة بعد مرور الإشعاع خلال المُستقطب بالعلاقة الرياضية الآتية:

$$I = I_m \cos^2 \theta \qquad (10\text{-}23)$$



الشكل *(10-7)*

يبين كيف يتحلل المجال الكهربائي *(E)* إلى مركبتين *(Ez)* و*(Ey)*



الشكل *(10-8)*

يبين عدم مرور الضوء المستقطب في صفيحة الاستقطاب *analyzer (P_2)*،

بعد أن تمّ استقطابه بواسطة صفيحة الاستقطاب *polarizer (P_1)*

حيث إن:

(I_m) هي شدة الإضاءة الأصلية للأشعة الساقطة.

(θ): هي الزاوية بين اتجاه خطوط الاستقطاب للصفيحة واتجاه شعاع الضوء الساقط، انظر الشكل *(10-7)* حيث يوضح هذه الكميات كما يوضح أن المجال الكهربائي قد تحلل إلى مركبتين إحداهما موازية لمحور الاستقطاب والأخرى عمودية عليه، بينما يوضح الشكل *(10-8)* أن الضوء المستقطب الذي حصلنا عليه بعد مروره بالمُستقطب *polarizer* لا يمكنه المرور عندما يعترض طريقه صفيحة استقطاب أخرى والذي نسميه هنا المحلل *analyzer*، وذلك عندما تكون محاور الاستقطاب لكلٍ من المُستقطب والمحلل عموديتان *crossed* على بعضهما البعض. أما إذا كان وضع محاور المحلل بزاوية *(θ)* فإن شدة الإضاءة تخضع للقانون المبين في المعادلة *(10-23)*.

مسائل عامة محلولة

solved problems

10-1 أوجد حسابياً مقدار الجزء الذي يمتصه قرص الأرض الذي يتقاطع مع الأشعة الصادرة عن الشمس، إذا علمت أن معدل نصف قطر الأرض يساوي $(6.37\times10^{6}\ m)$ وأن معدل المسافة بين الشمس والأرض تساوي $(1.5\times10^{8}\ km)$.

الحل:

إن مساحة قرص سطح الأرض الذي يتقاطع مع أشعة الشمس هو عبارة عن مساحة الدائرة الآتية:

$$Area_e = \pi r_e^2$$

حيث (r_e) معدل نصف قطر الأرض الذي يساوي إلى $(6.3\times10^{6}\ m)$.

أما مساحة الكرة الإشعاعية الموجودة بين الأرض والشمس فهي:

$$Area_{es} = 4\pi r_{es}^2$$

حيث معدل المسافة بين الشمس والأرض $(1.5\times10^{11}\ m)$، وعليه فإن الجزء الإشعاعي الذي يمتصه قرص الأرض هو عبارة عن:

$$Fraction = \frac{\pi r_e^2}{4\pi r_{es}^2}$$

$$= \frac{1}{4}\left(\frac{6.37\times10^{6}\ m}{1.5\times10^{11}\ m}\right)^2$$

$$= 4.51\times10^{-10}$$

وكما يلاحظ فهو جزء صغير للغاية من مجموع الإشعاع الشمسي الكلي.

10-2 تبلغ شدة الإشعاع الشمسي الذي يصلنا إلى الأرض والنافذ من الغلاف الجوي في يوم صيفي $(100\ W/m^2)$. من ناحية أخرى تبلغ قدرة سخان كهربائي الحرارية $(1\ kW)$.

أوجد المسافة التي يجب أن تفصلنا عن السخان الكهربائي كي نستقبل نفس مقدار شدة الإشعاع الشمسي الواصل إلينا.

الحل:

إن القدرة الكهربائية الناتجة عن السخان الكهربائي (P_h) هي:

$$P_h = 1\times10^{3}\ W$$

أما القدرة الكهربائية الناتجة عن الإشعاع الشمسي (P_{sun}) فهي:

$$P_{sum} = I\,(4\pi r^2)$$

وحتى تتساوى القدرتان نجد أنَّ:

$$P_h = P_{sum}$$
$$1\times 10^3\,W = 4\pi r^2 (100 W/m^2)$$
$$r = \left[\frac{1\times 10^3\,W}{4\pi(100 W/m^2)}\right]^{\frac{1}{2}}$$
$$= 0.89\,m$$

10-3 أثبت أنَّ متوسط معدل شدة الطاقة المنتقلة خلال وحدة المساحة لأشعة كهرومغناطيسية تنتقل في المستوى يمكننا أن نعبِّر عنها رياضياً بالمعادلة الرياضية:

$$\bar{S} = \frac{E^2 m}{2\mu_0 c} = \frac{cB^2 m}{2\mu_0}$$

الحل:

من المعروف لدينا أن معدل شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي نعبِّر عنه بالعلاقة الرياضية:

$$\bar{S} = \frac{1}{\mu_0}|E\times B|_{av}$$
$$= \frac{1}{\mu_0}(EB)_{av}$$
$$= \frac{E_{av} B_{av}}{\mu_0} = \frac{(E_m/\sqrt{2})(B_m/\sqrt{2})}{\mu_0}$$
$$= \frac{E_m B_m}{2\mu_0} = \frac{E^2 m}{2\mu_0 c} = \frac{c^2 B^2 m}{2\mu_0 c}$$
$$= \frac{cB^2 m}{2\mu_0}$$

10-4 استخدم النتيجة التي حصلنا عليها في المسألة السابقة *(10-3)*، أوجد حسابياً متوسط شدة الطاقة لأشعة كهرومغناطيسية تنتقل في المستوى، وذلك عندما تكون القيمة العظمى لمركبة المجال المغناطيسي هي:

$$B_m = 1\times 10^{-4}\,T$$

الحل:

بالرجوع إلى المسألة المذكورة *3(10-)* نجد أنَّ:

$$I = \bar{S} = \frac{cB^2 m}{2\mu_0}$$

حيث إنَّ:

$$c = 3\times 10^8\,m/s$$
$$\mu_0 = 1.26\times 10^{-6}\,H/m$$
$$I = \bar{S} = \frac{(3\times 10^8\,m/s)(1\times 10^{-4}\,T)^2}{2(1.26\times 10^{-6}\,H/m)}$$
$$= 1.2\times 10^6\,W/m2$$

10-5 إذا كانت القيمة العظمى لمركبة المجال الكهربائي لموجة راديوية هي:

$$E_m = 5\ V/m$$

أوجد حسابياً:

1– القيمة العظمى لمركبة المجال المغناطيسي لهذه الموجة.

2– مقدار شدة طاقتها.

الحل:

1– نحن نعلم أنّ العلاقة الرياضية التي تربط بين القيمة العظمى لمركبتي الموجة الكهرومغناطيسية (E_m) و(B_m) هي:

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

حيث إن (c) هي سرعة الضوء.

$$B_m = \frac{E_m}{c} = \frac{5\ V/m}{3\times 10^{8}\ m/s} = 1.67\times 10^{-8}\ T$$

2– من المسائل السابقة $(10\text{-}3)$ و$(10\text{-}4)$ وجدنا أنّ شدة الطاقة للموجة الكهرومغناطيسية هي عبارة عن:

$$I = \bar{S} = \frac{E^2 m}{2\mu_0 c}$$
$$= \frac{(5\ V/m)^2}{2(1.26\times 10^{-6}\ H/m)(3\times 10^{8}\ m/s)}$$
$$= 3.31\times 10^{-2}\ W/m^2$$

10-6 قطعة من الكرتون الأسود تبلغ مساحتها $(A=2\times 10^{-4}\ m^2)$ تعترض طريق أشعة ضوئية شدتها $(10\ W/m^2)$ تتغير بين النور والظلام تبعاً لعمل الكاميرا.

أوجد حسابياً ضغط هذه الأشعة الضوئية على قطعة الكرتون بافتراض أنها تمتص الأشعة الساقطة عليها امتصاصاً كلياً.

الحل:

نحن نعلم أنّ العلاقة الرياضية التي تربط بين شدة الإضاءة (I) وضغط الإشعاع (P_r) هي:

$$\frac{I}{P_r} = c$$

حيث إن (c) هي سرعة الضوء المعروفة.

$$P_r = \frac{I}{c}$$
$$= \frac{(10\ W/m^2)}{(3\times 10^8\ m/s)}$$
$$= 3.3\times 10^{-8}\ N/m^2$$
$$= 3.3\times 10^{-8}\ Pa$$

10-7 تستخدم أشعة الليزرات لضغط بلازما الغاز عن طريق ضغط الإشعاع، إذا استخدمنا أشعة ليزر تولد نبضات إشعاعية طاقتها عند الذروة تساوي $(1.5\times 10^3\ MW)$ للتأثير على مساحة من سطح البلازما الغازية تمتلك كثافة إلكترونية عالية بحيث نستطيع اعتبار معامل الانعكاس للأشعة الليزرية تساوي الواحد.

أوجد حسابياً الضغط الإشعاعي الليزري على سطح البلازما المذكور.

لحل:

في هذه الحالة وضمن مواصفات البلازما الغازية هذه نجد أنها تؤدي إلى انعكاس كل لطاقة الساقطة عليها بفعل الإشعاع الليزري، أي أن الضغط الإشعاعي هو:

$$P_r = \frac{2I}{c}$$

حيث إن (I) هي شدة الإضاءة وتساوي:

$$I = \frac{P}{A}$$

حيث إن:

(P) هي الطاقة الليزرية.

(A) المساحة المتأثرة.

وبالتعويض نجد أنَّ:

$$P_r = \frac{2P}{cA}$$
$$= \frac{2(1.5\times 10^9\ W)}{(3\times 10^8\ m/s)(1\times 10^{-6}\ m^2)}$$
$$= 1\times 10^7\ Pa = 10\ MPa$$

10-8 موجة كهرومغناطيسية لديك المعلومات الآتية عن مجالها المغناطيسي:

$$B_x = B\sin(k_y + \omega t)$$
$$B_y = B_z = 0$$

1- حدد اتجاه انتشار هذه الموجة الكهرومغناطيسية.

2- صف رياضياً مركبات مجالها الكهربائي.

3- هل هذه الموجة الكهرومغناطيسية مستقطبة؟ إذا كانت كذلك حدد اتجاهها.

الحل:

1- بما أن الموجة الكهرومغناطيسية التي تنتشر بالاتجاه (y) الموجب هي:

$$B_x = B \sin (ky - \omega t)$$

والمركبة السينية للموجة الكهرومغناطيسية في هذه المسألة هي:

$$B_x = B \sin (kx + \omega t)$$

نلاحظ أن:

$$-(-\omega = \frac{-2\pi}{T} = -2\pi f$$

وعليه فإن اتجاه الانتشار هو الاتجاه (y) السالب.

2- من الواضح أن:

$$E_x = E_y = 0$$
$$E_z = -cB \sin (kx + \omega t)$$

ذلك أنَّ:

$$E_{z\,max} = -cB$$

3- بما أنَّ مركبتي الأشعة الكهرومغناطيسية للمجالين الكهربائيين بالاتجاه (y) و (x) تساوي الصفر، إذن الأشعة مُستقطبة وعلى طول المحور (z).

10-9 تم تمرير أشعة ضوئية مُستقطبة خلال صفيحتي استقطاب، بحيث يصنع محور استقطاب الصفيحة الأولى زاوية مقدارها (θ) مع اتجاه انتشار الأشعة، بينما يصنع محور استقطاب الصفيحة الثانية زاوية مقدارها $(90°)$ مع اتجاه الانتشار ذاته. إذا علمت أنَّ (0.1) فقط من الأشعة الساقطة على صفائح الاستقطاب التي تمر خلالها.

أوجد حسابياً مقدار الزاوية (θ).

الحل:

بفرض أن شدة إشعاع الضوء الابتدائية هي (I_0) فإن مقدار الأشعة التي تنفذ من الصفيحة المُستقطبة الأولى هو:

$$I_1 = I_0 \cos^2 \theta$$

من المعلوم أن الزاوية بين صفيحتي الاستقطاب هي: $(90° - \theta)$

وعليه فإن الأشعة التي تنفذ من الصفيحة المُستقطبة الثانية هي:

$$I_2 = I_1 \cos^2 (90° - \theta)$$

ونكننا نعلم من قوانين الزوايا في المثلثات أنّ:

$$\cos (90° - \theta = \sin \theta$$

$$I_2 = I_0 \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

كما نعلم أيضاً من قوانين الزوايا في المثلثات أنَّ:

$$2 \cos \theta \sin \theta = \sin 2\theta$$

أي أن المقدار:

$$\frac{4}{4} \cos^2 \theta \sin^2 \theta = \frac{\sin^2(2\theta)}{4}$$

$$I_2 = \frac{I_0}{4} \sin^2(2\theta)$$

$$I_2 = 0.1(I_0)$$

$$0.1(I_0) = \frac{I_0}{4} \sin^2(2\theta)$$

$$\sin^2(2\theta) = 0.4$$

$$\sin(2\theta) = 0.63$$

$$2\theta = \sin^{-1}(0.63) = 39.2$$

$$\theta = \frac{39.2}{2} = 19.6°$$

10-10 تم تمرير أشعة ضوئية مستقطبة عمودياً في الاتجاه الأفقي، تبلغ شدتها ($43\ W/m^2$) خلال صفيحتي استقطاب، بحيث يصنع محور استقطاب الصفيحة الأولى مع الاتجاه العمودي زاوية مقدارها ($70°$)، بينما يقع محور استقطاب الصفيحة الثانية على المحور الأفقي لانتشار الأشعة الضوئية.

أوجد حسابياً مقدار شدة الأشعة النافذة عبر صفيحتي الاستقطاب.

الحل:

من الواضح أن شدة إضاءة الأشعة قبل المرور بأيٍ من صفيحتي الاستقطاب هي: (I_0)

وأن زاوية محور الاستقطاب للصفيحة الأولى: ($70° - \theta$)

وأن زاوية الاستقطاب للصفيحة الثانية: ($20° = 70° - 90° = \theta_1$)

إذن:

$$I_1 = I_0 \cos^2 (70°)$$
$$I_2 = I_1 \cos^2 (20°)$$

أي أنَّ:

$$I_2 = I_0 \cos^2 (70°) \cos^2 (20°)$$
$$= (43\ W/m^2) \cos^2 (70°) \cos^2 (20)$$
$$= 4.4\ W/m^2$$

10-11 في المسألة السابقة *(10-10)* افرض أن الأشعة الساقطة على صفيحتي الاستقطاب من النوع غير المستقطب.

أوجد حسابياً مقدار شدة الأشعة النافذة.

الحل:

من المعلوم لدينا أن الأشعة الضوئية الساقطة على صفيحة الاستقطاب الأولى في هذه الحالة سوف يمر نصف شدتها خلال الصفيحة الأولى، أما الأشعة المارة من الصفيحة الثانية للاستقطاب فهي:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

إذن:

$$I_1 = \left(\frac{1}{2}\right) I_0$$

بفرض أنَّ شدة الأشعة الساقطة على الصفيحة الأولى هي (I_0).

$$I_2 = \left(\frac{1}{2}\right) I_0 \cos^2 (20°)$$
$$= \left(\frac{1}{2}\right) (43\ W/m^2) \cos^2 (20°)$$
$$= 19\ W/m^2$$

وبمقارنة هذه النتيجة مع نتيجة المسألة السابقة *(10-10)* نجد الاختلاف كبير، وذلك عندما تكون الأشعة الساقطة على صفيحتي الاستقطاب غير مستقطبة.

مسائل وتمارين الفصل العاشر

Chapter Ten Exercises & Problems

10-1 موجة كهرومغناطيسية تسير في الاتجاه السالب للمحور (y). وذلك في زمن وموقع محددين، حيث يشير المجال الكهربائي على طول المحور (z) الموجب ويساوي إلى $(100\ V/m)$.
أوجد حسابياً مقدار واتجاه مركبة المجال المغناطيسي في ذات زمن وموقع المجال الكهربائي.

10-2 يبلغ معدل شدة الإشعاع الكهرومغناطيسي الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض $(1.4\ KW/m^2)$.
أوجد حسابياً مقدار كلٍ من مركبتي المجالين الكهربائي والمغناطيسي العظميين (E_m) و (B_m) لهذا الإشعاع على افتراض أن موجته موجة مستوية.

10-3 إذا كانت القيمة العظمى للمجال المغناطيسي على بعد $(10\ m)$ من مصدر ضوئي تساوي إلى $(2\ V/m)$.
أوجد حسابياً كلاً من:
1- مقدار القيمة العظمى للمجال المغناطيسي.
2- مقدار معدل شدة الإشعاع للمصدر الضوئي.
3- مقدار طاقة المصدر الضوئي.

10-4 إذ كان معدل شدة الإشعاع الشمسي الساقط عمودياً على الغلاف الجوي من الخارج يساوي إلى $(1.4\ KW/m^2)$.
1- أوجد حسابياً مقدار ضغط الإشعاع الساقط على السطح بافتراض أن الامتصاص كامل.
2- قارن بين مقدار هذا الضغط مع مقدار الضغط الجوي عند سطح البحر والذي يساوي $(P_o = 1\times10^5\ N/m^2)$.

10-5 إذا كان معدل شدة الإشعاع الشمسي الساقط عمودياً على الغلاف الجوي من الخارج يساوي إلى $(1.4\ KW/m^2)$.
1- افرض أنَّ كلاً من الأرض والغلاف الجوي تأخذ شكل قرص دائري عمودي على الإشعاع الشمسي، وأن الامتصاص كامل.
أوجد حسابياً القوة المؤثرة على الأرض بسبب ضغط الإشعاع.
2- قارن مقدار هذه القوة بقوة التجاذب بين الشمس والأرض (استخدم قانون الجذب العام لنيوتن).

10-6 حزمة من الأشعة الضوئية غير المُستقطبة يبلغ معدل شدتها $(10\ mW/m^2)$، سقطت على صفيحة استقطاب بشكل عمودي.

1– أوجد حسابياً مقدار القيمة العظمى لأشعة المجال الكهربائي النافذة من المُستقطب.

2– أوجد حسابياً مقدار ضغط الإشعاع الناشئ على صفيحة الاستقطاب.

10-7 حزمة من الأشعة الضوئية غير المُستقطبة سقطت على صفيحتين مُستقطبتين الثانية فوق الأولى.

أوجد حسابياً مقدار الزاوية بين اتجاه خطوط الاستقطاب للمستقطبين إذا كانت شدة الإضاءة للضوء النافذ من المستقطب الثاني تساوي ثلث شدة الإضاءة الأصلية الساقطة على المستقطب الأول.

10-8 مجموعة استقطاب مكونة من أربعة مُستقطبات مرتبة بحيث أن الزاوية بين كل مُستقطبين متجاورين تساوي $(30°)$. سقطت عليها أشعة ضوئية غير مُستقطبة.

أوجد حسابياً شدة الضوء النافذ من مجموعة الاستقطاب.

الخلاصة

Summary

- إنّ طيف الأشعة الكهرومغناطيسية والذي تبدأ معرفتنا به من الأمواج الطويلة حيث يصل طولها الموجي إلى $(10^{8}\ m)$، وينتهي عند $(10^{-15}\ m)$ عند أمواج أشعة كاما، يجمع كثير من العلماء بضرورة إبقاء طرفي هذا الطيف مفتوحين وذلك لاحتمال اكتشاف أنواع جديدة من الأشعة الكهرومغناطيسية.
- على الرغم من أنَّ بعض الإشعاعات الكهرومغناطيسية يمكن أن تصدر عن مصادرها الطبيعية على اختلاف أنواعها، إلا أنه من الممكن عملياً توليد الأشعة الكهرومغناطيسية تقنياً.
- كما يمكن من الناحية العملية استقبال هذه الأشعة تقنياً بواسطة محطات استقبال خاصة بكل نوع من هذه الأشعة.
- تتكون الأشعة الكهرومغناطيسية من كميتين اتجاهيتين أحدهما هو المجال الكهربائي والآخر هو المجال المغناطيسي، وهما متعامدان على بعضهما البعض وبسعات متغيرة تبدأ من الصفر ثم تزداد لتبلغ قيمتها العظمى، ثم تبدأ بالتناقص التدريجي وصولاً على الصفر، وهكذا وفقاً لمقدار ترددها الزاوي، وتستمر في حركتها هذه على طول محور انتشارها.
- إن متجه العالم بوينتنغ يربط رياضياً بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي، كما أنَّ سرعة الضوء تمثل النسبة بين المجال الكهربائي والمجال المغناطيسي في الفراغ الحر.
- إن ضغط الإشعاع الكهرومغناطيسي هو عبارة عن معدل شدة الإشعاع مقسوماً على سرعة الضوء في حالة الامتصاص الكلي للإشعاع، بينما يساوي ضعف هذه النسبة عند الانعكاس الكلي للإشعاع.
- يمكننا من الناحية التقنية عزل المجال المغناطيسي عن المجال الكهربائي وذلك باستخدام تقنية الاستقطاب، كما يمكننا أن نتحكم بشدة الإشعاع النافذ من جهة المُستقطب الثانية باستخدام مجموعة من المستقطبات.