هذه الهوائيات الدائرية التي قطرها 25 m موجَّهةٌ لاستقبال موجات المذياع من الفضاء الخارجي. إنّ موجات الراديو هي موجات كهرومغناطيسية (EM)، وتتراوح تردداتها من مئات قليلة من الهيرتز إلى نحو 100 MHz. وهذه الهوائيات توصل معًا إلكترونيّا لتحقيق تفاصيل أكثر. وهي جزءٌ من مصفوفة ضخمة في نيومكسيكو تبحث عن معلومات حول الكون.
تنبّأ مكسويل بوجود موجات EM من معادلاته المشهورة، والتي تعدّ ملخصا رائعا للكهرومغناطيسية.

الفصل 22

الموجات الكهرومغناطيسية

الشكل 22- 1 جيمس كلارك مكسويل

لقد كانت ذروة النظرية الكهرومغناطيسية في القرن التاسع عشر مثلةً في التنبؤ، أو التحقق التجريبي بأنَّ موجات المجالات الكهرومغناطيسية تنتقل خلال الفضاء. وقد فتح هذا الإنجاز عالمًا واسعًا جديدًا من الاتصالات؛ ابتداء من التلغراف اللاسلكي، ومن ثَمَّ المذياع والتلفزيون، وحديثًا الهاتف المحمول، وأدوات التحكم عن بعد. وخلص إلى التنبؤ المثير للدهشة في أنّ الضوء موجة كهرومغناطيسية.
أمّا الإنجاز النظري للموجات الكهرومغناطيسية فيعزى إلى الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كلارك مكسويل (1831 - 1879؛ شكل 22 - 1)، الذي وحَّد في نظرية رائعة ظواهر الكهرباء والمغناطيسية كلّها.

22-1 المجالات الكهربائيّة المتغيرة
تنتج مجالات مغناطيسيّة، معادلات مكسويل

إنّ تَطَوُّرَ نظرية الكهرومغناطيسية في بداية القرن التاسع عشر من قِبلِ أورستد وأمبير، والآخرين، لم يكن في الحقيقة بدلالة المجالات الكهرومغناطيسية. لقد أدخلت فكرة المجال لاحقًا بواسطة فاراداي، ولم تُستعمل على نطاقٍ واسعٍ إلى أن برهن مكسويل أنّ الظواهر الكهربائيّة والمغناطيسية كلّها يمكن وصفها باستعمال أربع معادلات فقط تتضمّن المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي. وتُعرَف هذه المعادلات **بمعادلات مكسويل**، وهي المعادلات الأساسية للكهرومغناطيسية. إنّها أساسية كما هو الحال في قوانين نيوتن الثلاثة في الحركة، وقانون الجذب العام في الميكانيكا. وحتى يمكن القول إنّها أكثر أساسية لأنّها تتواءم مع نظرية النسبية (الفصل 26). أمّا قوانين نيوتن فليست كذلك؛ لأنّ الكهرباء والمغناطيسية كلّها محتواة في هذه المعادلات الأربع. وتعدّ معادلات مكسويل من أعظم انتصارات ذكاء الإنسان.

وعلى الرغم من عدم تقديمنا معادلات مكسويل بصورتها الرياضية لأنّها تتضمّن حساب التفاضل والتكامل، الاّ أنّنا سنلخّصها بالكلمات كما يلي:

معادلات مكسويل

1) شكل معمَّمٌ لقانون كولوم يُعرف بقانون غاوس (البند 16-10) يربط بين المجال الكهربائيّ ومصدره، الشحنة الكهربائيّة.

2) قانون مشابه للمجال المغناطيسيّ، ما عدا أنّ خطوط المجال المغناطيسيّ دائمًا مستمرة (متصلة) - لا تبدأ وتنتهي (كما تعمل خطوط المجال الكهربائيّ على الشحنات).

3) ينتج المجال الكهربائيّ من مجال مغناطيسيّ متغير (قانون فاراداي).

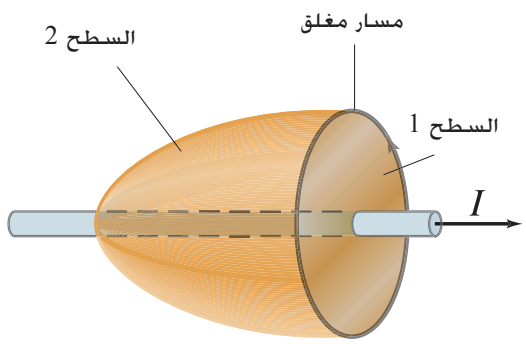
4) ينتج المجال المغناطيسيّ من تيّار كهربائيّ (قانون أمبير)، أو مجال كهربائيّ متغير.

قانون (3) هو قانون فاراداي (انظر الفصل 21، خاصة البند 21-4). الجزء الأول لقانون (4)، أي المجال المغناطيسيّ ينتج من تيّار كهربائي، اكتشفه أورستد. وتعطى العلاقة الرياضية بقانون أمبير (البند 20-8). أما الجزء الثاني من قانون (4) فهو موضوع جديد كليًّا تنبأ به مكسويل، الذي أشار إلى أنه إذا **كان المجال المغناطيسيّ المتغير ينتج مجالاً كهربائيًّا كما يعطي قانون فاراداي**، فإنّ العكس قد يكون صحيحًا أيضًا: سوف ينتج المجال الكهربائيّ المتغير مجالاً مغناطيسيًّا . وهذه هي نبوءة من مكسويل المعتمدة على مفهوم التماثل في الطبيعة.

تغيُّر $\vec{E}$
يُنتج $\vec{B}$

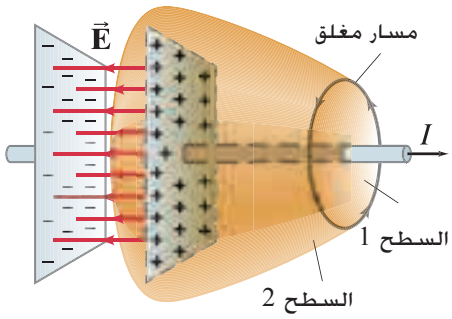
* معادلة مكسويل الرابعة (قانون أمبير بصورة موسعة)

لتتبُّع فكرة أنّ المجال الكهربائيّ يمكن أن ينتج مجالا مغناطيسيّا؛ نستعمل برهانًا غير مباشر الشيء ينص كما يلي: تبعًا لقانون أمبير (البند 20-8)، $\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0 I$. أي، قسّم أيّ مسار مقفل إلى أجزاء قصيرة Δl، ثمّ اضرب كلّ جزء في المركبة الموازية للمجال المغناطيسيّ B عند ذلك الجزء، ومن ثمّ اجمع هذه النواتج كلّها على المسار المقفل كاملا. عندئذٍ، سوف يساوي المجموع μ_0 مضروبًا في التّيّار الكلي الذي يمر خلال السطح المحاط بالمسار المقفل. عندما طبقنا قانون أمبير للمجال حول سلك مستقيم (البند 20-8)، تخيلنا أنّ التّيّار يمر عبر المساحة الدائرية المغلقة بالعروة الدائرية. تلك المساحة هي السطح المنبسط 1 المبين في (الشكل 22-2). وعلى أيّ حال، يمكننا أيضًا استعمال السطح الذي يشبه الكيس، السطح 2 في (الشكل 22-2) كسطح لقانون أمبير لأنّ التّيّار نفسه يخترقه أيضًا.



الشكل 22-2 قانون أمبير مطبق على سطحين مختلفين محاطين بالمسار المقفل نفسه.

وبالفعل، فإنّ الأثر في معظم الأحيان يكون صغيرًا بحيث أدرك مكسويل أنّ الكشف عنه بالتجربة سيكون صعبًا.



الشكل 22- 3. مواسع في أثناء التفريغ. لا يمر تيّار توصيل عبر السطح 2. حدّ إضافي نحتاج إليه في قانون أمبير.

والآن، تأمَّل المسار المقفل في الحالة المبيَّنة في (الشكل 22-3). حيث يجري تفريغ مواسع. ينطبق قانون أمبير على سطح 1(التّيّار I يمر خلال السطح 1) لكنّه لا ينطبق على سطح 2؛ لأنّه لا يُوجد تيّار يمر خلاله. هناك مجالٌ مغناطيسيّ حول السلك. لذا، فإنّ الجانب الأيسر من قانون أمبير ليس صفرًا حول المسار الدائري المغلق. وبما أنّه ليس هناك تيّار يتدفق خلال السطح 2، فإنّ الجانب الأيمن يساوي صفرًا لهذا السطح. ويبدو أنّ لدينا تناقضًا مع قانون أمبير. هناك مجال مغناطيسيّ موجود في (الشكل 22-3). فقط إذا كانت الشحنة تتدفق إلى صفيحتي المكثف أو بعيدًا عنهما. ويعني تغيّر الشحنة على الصفيحتين أنّ المجال الكهربائيّ بينهما متغيّر مع الزمن. حَلَّ مكسويل هذه المسألة في أنّ ليس هناك تيّار عبر السطح 2 في (الشكل 22-3) مفترضًا أنّ المجال الكهربائيّ المتغير بين الصفيحتين يكافئ تيّارًا كهربائيًا، سمّاه تيّار الإزاحة I_D. وهكذا، يُسَمّى التّيّار العادي "**تيار التوصيل**"، ويصبح قانون أمبير كما عممه مكسويل كما يلي:

$$\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0(I + I_D)$$

وسينطبق قانون أمبير أيضًا على السطح 2 في (الشكل 22-3)، حيث I_D يعود إلى المجال الكهربائيّ المتغيّر. وبجمع (المعادلة 17-7) للشحنة على مواسع، $Q = CV$، مع (المعادلة 17-4أ) $V = Ed$، (والمعادلة 17-8) $C = \epsilon_0 A/d$، يمكننا أن نكتب $Q = CV = (\epsilon_0 A/d)(Ed) = \epsilon_0 AE$ ويصبح عندها التّيّار I_D

$$I_D = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t}$$

حيث $\Phi_E = EA$ هو **التدفق الكهربائيّ**، يعرف بصورة مناظرة للتدفق المغناطيسيّ (البند 21-2). وهكذا يصبح قانون أمبير

(تعميم) قانون أمبير

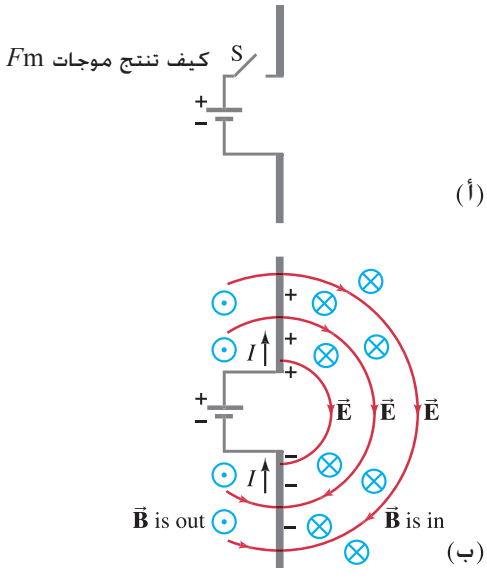
$$\Sigma B_{\parallel}\,\Delta l = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta t} \qquad \textbf{(1 -22)}$$

تتضمّن هذه المعادلة فكرة مكسويل في أنّ المجال المغناطيسيّ يمكن أن ينتج بواسطة مجال كهربائيّ متغير أو تغير تدفق كهربائي، وليس فقط بسبب تيّار توصيل عادي.

2-22 إنتاج الموجات الكهرومغناطيسية

وفقًا لما يراه مكسويل، فإنّ مجالًا مغناطيسيًّا سوف يُنْتَجُ في الفراغ بوجود مجالٍ كهربائيٍّ متغيّر. ومن هنا بدأ مكسويل استنتاجًا مدهشًا آخر: إذا كان المجال المغناطيسيّ المتغيّر ينتج مجالاً كهربائيًّا، فإنّ هذا المجال الكهربائيّ نفسه يكون متغيّرًا. وسوف ينتج هذا المجال الكهربائيّ المتغيّر بالتالي مجالاً مغناطيسيًّا متغيرًا كذلك، ينتج بدوره مجالاً كهربائيًّا، وهكذا دواليك. عندما اشتغل مكسويل بمعادلاته، وجد أنّ النتيجة المحصلة لهذه المجالات المتبادلة المتغيرة كانت موجة من المجالات الكهربائيّة والمغناطيسيّة التي يمكنها أن تنتشر في الفضاء! وسوف نختبر كيفية إنّتاج مثل هذه **الموجات الكهرومغناطيسيّة** بطريقة بسيطة الآن. تأمَّل قضيبين موصلين يمكن استخدامهما "كهوائي" (الشكل 22-4أ). وافرض أنّهما وُصلا بطرفي بطاريّة عبر مفتاح. سريعًا، يصبح القضيب العلوي مشحونًا بشحنةٍ موجبةٍ والسفلي بشحنة سالبة. تتكوّن خطوط مجال كهربائيّ كما هو مبيّن في (الشكل 22-4 ب). وفي أثناء سير الشحنات، يتكوّن تيّار يُشار إلى اتجاهه (مساره) بأسهمٍ سود. لذا، يتكوّن مجالٌ مغناطيسيّ حول الهوائي. تحيط خطوط المجال المغناطيسيّ بالهوائي ذي شكل القضيب. لذلك، في (الشكل 22-4)، $\vec{\mathbf{B}}$ يشير نحو الداخل (⊗) ونحو خارج الصفحة (⊙) على اليسار. والآن نسأل: على أيّ مسافة تمتد هذه المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية؟ في الحالة السكونية، تمتدّ المجالات إلى مسافات لا نهائية. ولكن عند غلق المفتاح (الشكل22-4) تظهر المجالات بسرعة في المناطق القريبة، إلا أنّها تحتاج إلى زمن للوصول إلى المناطق البعيدة. كلا المجالين؛ الكهربائيّ والمغناطيسي يخزنان طاقة، وهذه الطاقة يصعب نقلها إلى النقاط البعيدة بسرعة لا نهائية.

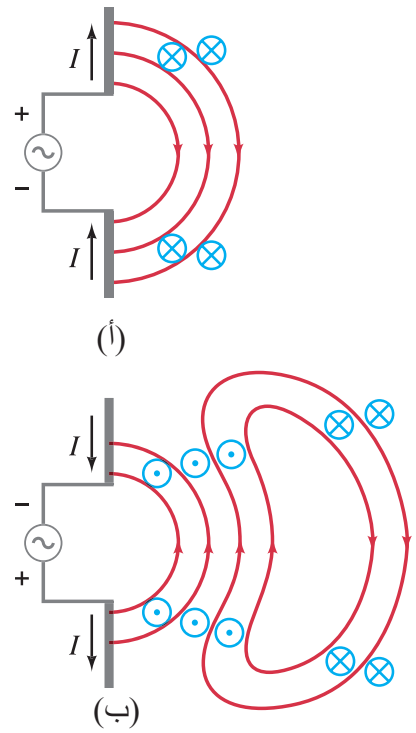
الشكل 22- 9. المجالات الناتجة من شحنة تتدفق خلال موصلات. إنّ انتقال المجالات $\vec{\mathbf{E}}$، $\vec{\mathbf{B}}$ إلى الخارج نحو نقاط بعيدة يستغرق وقتًا. المجالات مبينة إلى يمين الهوائي، ولكنها تتحرك في الاتجاهات جميعها بصورة متماثلة حول الهوائي (العمودي).



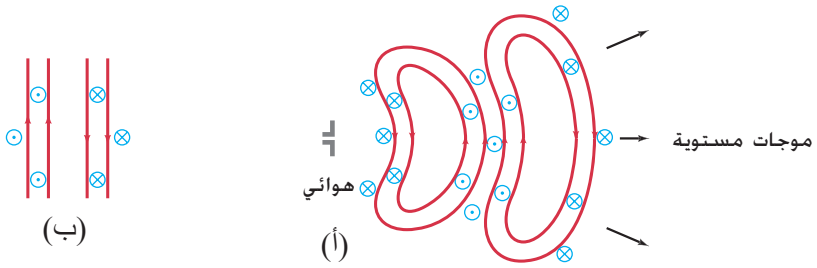
الآن، ننظر إلى الوضع في (الشكل 22-5)، حيث نصل الهوائيّ بمولّدٍ مُتناوب (متردد) (ac). في (الشكل 22-5أ)، التوصيل تم (للتو). تبدأ الشحنات بالتراكم وتتشكل المجالات كما في (الشكل 22-4 ب). الإشارتان + و – في (الشكل 22-5أ) تشيران إلى الشحنة النهائية على كلّ قضيب. وتشير الأسهم السود إلى اتجاه التّيّار. أما المجال الكهربائيّ، فتمثله الخطوط الحمراء في مستوى الصفحة. والمجال الكهربائيّ، تبعًا لقاعدة اليد اليمنى إلى داخل الصفحة في (الشكل 22 - 5ب) أو إلى خارجها. جهد المولد المتناوب انعكس اتجاهه؛ تغير اتجاه التّيّار والمجال المغناطيسيّ الجديد في الاتجاه المعاكس. ولأنّ المجالات الجديدة عكست اتجاهاتها، فإنّ الخطوط القديمة تنثني لتتصل ببعض الخطوط الجديدة، لتشكل حلقات (عُرى) مغلقة*. إنّ المجالات القديمة على أيّ حال لا تختفي فجأة، إنّها في طريقها إلى أماكن بعيدة. وبالفعل، ولأنّ المجال المغناطيسيّ المتغير ينتج مجالاً كهربائيًّا، والمجال الكهربائيّ المتغير ينتج مجالا مغناطيسيّا، فإنّ هذا الدمج من المجالات المتغيرة التي تتحرك بعيدًا بالفعل، تعتمد على نفسها، ولم تعد تعتمد على شحنات الهوائي.

تصبح المجالاتُ القريبةُ من الهوائيّ، والتي تُسَمّى المجالَ القريب، معقّدةً تمامًا، لكنّنا لسنا مهتمّين بها. إنّنا نهتمّ بصورة رئيسة بالمجالات البعيدة عن الهوائي (التي نستقبلها بشكل عام) المسماة "**مجال الاشعاع**". وتشكّل خطوط المجال الكهربائيّ عُرى كما هو موضّح في (الشكل 22-6). وتستمرُّ في الحركة نحو الخارج. في حين تشكل خطوط المجال المغناطيسيّ عُرى مُغلقة لكنّها ليست فقط على يمين المصدر، وتنتقل المجالات في الاتجاهات جميعها.

تكون شدة المجالات أكبر ما يمكن بالاتجاه العمودي على الشحنات المهتزة، وتقل للصفر في اتجاه الاهتزاز تحت الهوائي وفوقه في (الشكل 22 - 6).



الشكل 22- 5. يوضح التتابع مجالات كهربائية ومغناطيسية تنتشر على موصلين. (الهوائي) متصل بمصدر متردد (ac) انظر النص.



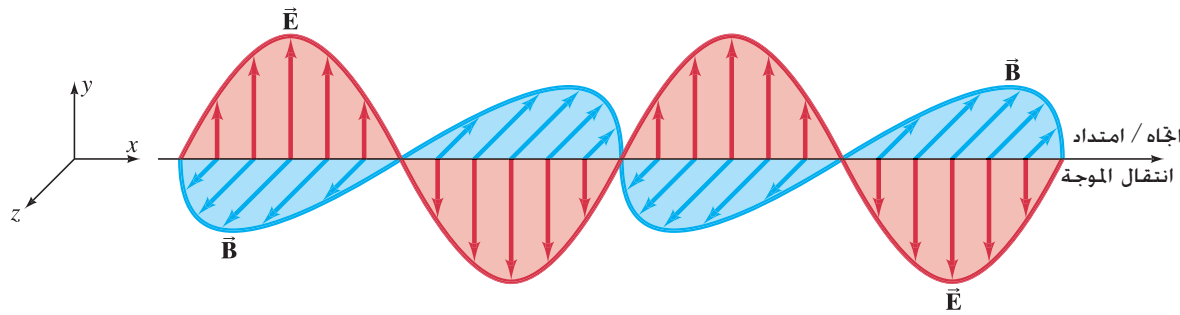
الشكل 22- 6 (أ) مجالات الإشعاع (بعيدًا عن الهوائي) ناتجة من إشارة جيبية في الهوائي. تمثل الحلقات الحمراء المغلقة خطوط مجالات كهربائية. خطوط المجال المغناطيسيّ، عمودية على الصفحة وتمثل بـ ⊙. و ⊗، زرقاء، وتشكل أيضًا حلقات مغلقة. (b) بعيدًا جدًّا عن الهوائي، تكون مقدمات الموجات (خطوط المجال) في الأساس منبسطة على مساحات واسعة، وتدعى موجات مستوية.

ولقد وجد أنّ مقادير كلٍّ من $\vec{\mathbf{E}}$، $\vec{\mathbf{B}}$ في مجال الإشعاع تقلّ مع المسافة على الصورة $1/r$. (قارن ذلك مع المجال الكهرسكوني في قانون كولوم. حيث $\vec{\mathbf{E}}$ تقل بصورة $1/r^2$). وتتناسب الطاقة التي تنقلها الموجة الكهرومغناطيسية (مثل أيّ موجة، الفصل 11) مع مربع الاتساع E^2 أو B^2، كما ستناقش في (البند 22 - 7). لذا، تقلّ شدة الموجة بصورة $1/r^2$.

ويمكن ملاحظة كثير من الأشياء عن مجال الإشعاع من (الشكل 22 - 6). أولا، يتبادل المجالان الكهربائيّ والمغناطيسيّ في الاتجاه عند أيّ نقطة، ويكونان عموديّان الواحد منهما على الآخر ($\vec{\mathbf{B}}$ يكون لداخل الصفحة عند بعض النقاط، وخارجها عند نقاط أخرى؛ $\vec{\mathbf{E}}$ يشير نحو الأعلى عند بعض النقاط، ونحو الأسفل عند نقاط أخرى). ولذلك، تختلف شدة المجال من أقصى قيمة باتجاه معين إلى صفر، ثم إلى قيمة قصوى باتجاه آخر. تكون المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية (بالطور نفسه)؛ أي أنّ طوريهما صفر عند النقاط نفسها، ويصلان إلى القيمة القصوى عند النقاط نفسها في الفضاء. وأخيرًا، بعيدًا جدًّا عن الهوائي (الشكل 22-6 ب)، تكون خطوط المجال مستقيمة خلال مساحة واسعة. لذا، تُسَمّى هذه الموجات **موجات مستوية**.

في موجات EM $\vec{\mathbf{E}} \perp \vec{\mathbf{B}} \perp \vec{\mathbf{v}}$

* نتعامل مع موجات تنتقل عبر الفضاء. ليست هناك شحنات كهربائية بحيث تبدأ بها خطوط المجال الكهربائيّ $\vec{\mathbf{E}}$ أو تنتهي. لذلك، تكون عُرى مقفلة. وتشكل خطوط المجال المغناطيسيّ عُرى مقفلة دائمًا.



الشكل 22-7 شدة المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي في موجة كهرومغناطيسية $\vec{\mathbf{E}}$ و $\vec{\mathbf{B}}$ بزاويا قائمة مع بعضهما. ويتحرك النمط كلّه في اتجاه عمودي على كليهما $\vec{\mathbf{E}}$ ، و $\vec{\mathbf{B}}$.

إذا كان جهد المصدر يتغيّر بصورةٍ جيبيّة، فإنّ شدّتي المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي سوف تتغيران جيبيّا أيضًا. السلوك الجيبي للموجات موضح في (الشكل 22-7). والذي يعرف شدة المجال كدالة بالمكان (بدلالة الموضع)على امتداد انتقال الموجة. لاحظ أنّ $\vec{\mathbf{E}}$ و $\vec{\mathbf{B}}$ عموديان على بعضهما وعلى اتجاه انتقال الموجة.

نسمّي هذه الموجات كهرومغناطيسية (EM). وهي موجات عرضية لأنّ الاتساع عموديٌّ على اتجاه انتقال الموجة. وعلى أيّ حال، فإنّ الموجات الكهرومغناطيسية دائمًا موجات مجالات، وليست مادِية (مثل الموجات في الماء أو الحبل). ولأنهما مجالان، فالموجات الكهرومغناطيسية يمكنها الانتقال في الفراغ.

تنتج موجات EM بواسطة الشحنات الكهربائية المتسارعة

وكما رأينا، تنتج موجات EM بواسطة شحنات مهتزة، لذلك تتسارع. وفي الواقع، نستطيع القول بشكل عام إنّ

الشحنات الكهربائيّة المتسارعة تنتج موجات كهرومغناطيسية.

اشتق مكسويل صيغة لسرعة موجات EM:

$$v = c = \frac{E}{B} \qquad \textbf{(2 - 22)}$$

c هو رمز خاص بسرعة الضوء.

حيث c هو الرمز الخاص بسرعة الموجات الكهرومغناطيسية في الفراغ، أما E، و B فهما مقدارا المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي عند النقطة نفسها في الفضاء. وبشكل خاص، فقد أمكن الاستنتاج أنّ

سرعة موجات EM

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \qquad \textbf{(3 - 22)}$$

عندما عوض مكسويل قيم ϵ_0، μ_0، وجد

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{(8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2/N \cdot m^2})(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{N \cdot s^2/C^2})}}$$
$$= 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s},$$

والتي تساوي سرعة الضوء المقيسة في الفراغ.

3-22 الضوء كموجة كهرومغناطيسية، والطيف الكهرومغناطيسي

إنّ تنبؤ مكسويل بوجود الموجات الكهرومغناطيسية كان مدهشًا. ومن اللافت للنظر أيضًا السرعة التي تتحرك بها موجات $3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$، تمامًا كالسرعة التي قيست للضوء.

لقد تبيَّن أنّ الضوء يتصرف كموجات قبل عمل مكسويل بستين عامًا (سنناقش ذلك في الفصل 24). ولكن لم يدرك أحد نوع هذه الموجات. ما الذي كان يهتز في الموجات الضوئية؟ قال مكسويل إنّ الضوء يجب أن يكون موجات كهرومغناطيسية، معتمدا على السرعة المحسوبة لموجات EM، وأصبحت هذه الفكرة مقبولة لدى العلماء، ولكن ليس بصورة كاملة، إلى أن أمكن الكشف عن موجات EM تجريبيّا. الموجات EM تمّ إنتاجها والكشف عنها تجريبيّا من قِبل هاينرش هيرتز (1857-1894) في عام 1887، بعد ثماني سنوات على وفاة مكسويل، استعمل هيرتز جهازًا لتوليد الشرارات عبر فجوة، مولدة موجات كان ترددها نحو 10^9 هيرتز (Hz). وكشف عنها على مسافة بعيدة باستعمال عروة (حلقة) من سلك حيث تولد منها قوة دافعة كهربائية (emf) عندما عبر خلالها مجال مغناطيسيّ متغير. وقد تبين لاحقًا أنّ هذه الموجات تنتقل بسرعة الضوء $3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$ وتظهر كلّ خصائص الضوء من انعكاس، وانكسار، وتداخل. أما الفرق الوحيد فهو أنها لم تكن مرئية. ولقد كانت تجربة هيرتز سندًا قويًّا لنظرية مكسويل.

تمّ قياس الأطوال الموجيّة للضوء المرئي في العقد الأول من القرن العشرين، قبل أن يتخيّل أحد أنّ الضوء كان موجة كهرومغناطيسية. وقد وجد أنّ الأطوال الموجية تتراوح بين $4.0 \times 10^{-7}\,\text{m}$ و $7.5 \times 10^{-7}\,\text{m}$؛ أو بين 400 nm و 750 nm ($1\,\text{nm} = 10^{-9}\,\text{m}$). ويمكن حساب ترددات الضوء المرئي باستعمال (المعادلة 12-11)، والتي نعيد كتابتها هنا كما يلي:

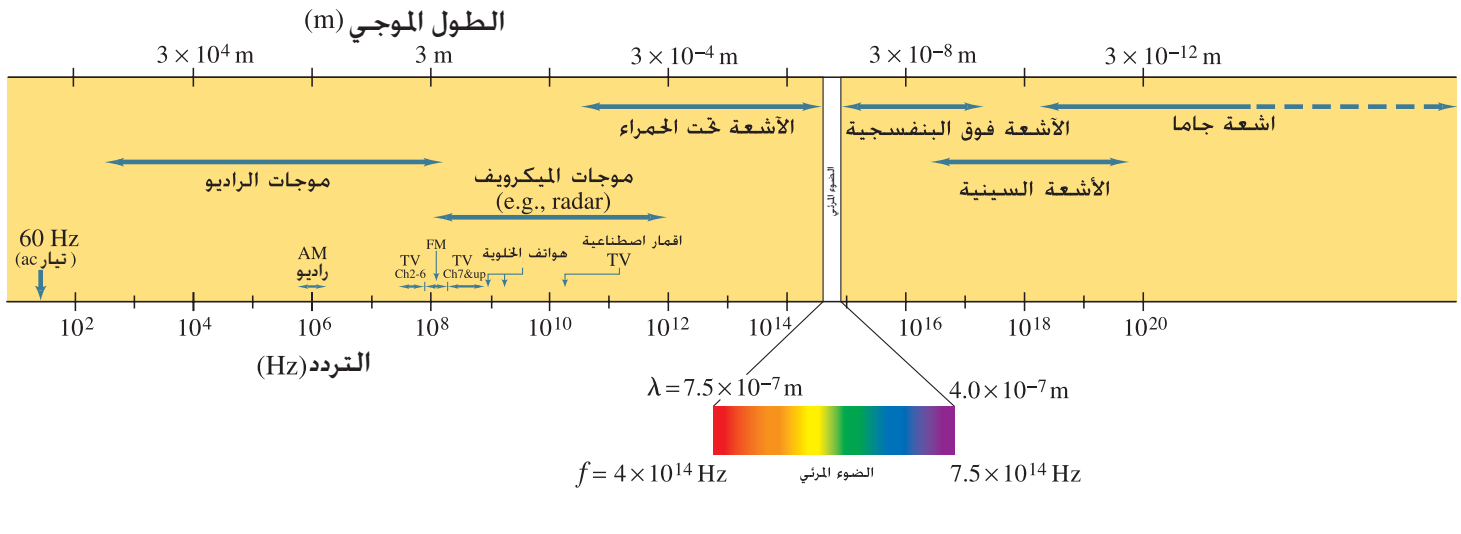
يرتبط طول الموجة والتردد بالسرعة

$$c = \lambda f, \qquad \textbf{(4-22)}$$

حيث f و λ هما التردد وطول الموجة، على الترتيب. أما c فهي سرعة الضوء، $3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s}$. وقد أخذت الرمز الخاص لأنّها تمثّل سرعة الموجات الكهرومغناطيسية كلّها في الفراغ. وتشير (المعادلة 22 - 4) إلى أنّ ترددات الضوء المرئي تتراوح بين $4.0 \times 10^{14}\,\text{Hz}$ و $7.5 \times 10^{14}\,\text{Hz}$ (تذكر أنّ 1 Hz يساوي 1 دورة/ ثانية $= 1\,\text{s}^{-1}$).

لكن الضوء المرئي هو فقط أحد أنواع موجات EM. وكما رأينا، فقد أنتج هيرتز موجات EM بترددات صغيرة $10^{9}\,\text{Hz}$. تُسَمّى هذه الآن **موجات الراديو**؛ لأنّ الترددات في هذا المدى تُستخدم للبثّ الإذاعي والتلفزيوني. الموجات الكهرومغناطيسية، أو إشعاع EM كما نسميه أحيانًا، تم إنتاجها واستقبالها على نطاق واسع من الترددات. وقد صُنِّفت في العادة كما في (الشكل 22 - 8)، الذي يُسَمّى **الطيف الكهرومغناطيسي.**

طيف EM



الشكل 22- 8 الطيف الكهرومغناطيسي.

يمكن توليد موجات الراديو والميكروويف في المختبر باستعمال أجهزة إلكترونية (الشكل 22 - 5). أمّا الموجات ذات التردّد العالي فيصعب توليدها إلكترونيًا. وتنتج هذه الموجات وموجات أخرى EM بعمليّات طبيعية، مثل الانبعاث من الذرات، والجزيئات، والأنوبة (المزيد عن هذا لاحقًا). ويمكن إنتاج موجات EM بتسارع الإلكترونات أو جُسيمات مشحونة أخرى، مثل الإلكترونات المتسارعة في هوائي (الشكل 22-5). وهناك مثال آخر هو الأشعة السينية (x) التي تنتج (الفصلان 25 و28)، عندما تتباطأ الإلكترونات السريعة نتيجة اصطدامها بهدف فلزي. حتى أنّ الضوء المرئي المنبعث عن مصباحٍ متوهّجٍ يعود إلى إلكترونات تتسارع داخل فتيل المصباح الحار.

سوف نصادف أنواعًا أخرى من موجات EM. ولكن من الجدير ذكره الآن أنّ الأشعة تحت الحمراء (IR) (موجات EM تردّدها مباشرة أقلّ من تردّد الضوء المرئي) مسؤولة بصورة رئيسة عن الأثر الحراري للشمس. تشع الشمس كميات ملموسة من IR و UV (فوق بنفسجية) وليس الضوء المرئي فقط. إنّ الجزيئات في جلودنا تستجيب للتردّدات تحت الحمراء، ولذلك فهذه هي التي تُمتصّ بصورة رئيسة، وبالتالي تدفئنا. يتعامل الإنسان مع موجات EM بصورة مختلفة تبعًا لأطوالها الموجية؛ فعيوننا تستقبل الموجات بين 4×10^{-7} و $7.5 \times 10^{-7}\,\text{m}$ (الضوء المرئي)، في حين تكشف جلودنا عن موجات (IR). ولكن هناك كثير من الأطوال الموجية لا نكشفها أبدًا.

ينتقل الضوء وموجاتٌ كهرومغناطيسيّةٌ أخرى بسرعة $3 \times 10^8\ \text{m/s}$. قارن هذا بالصوت، والذي يسير (انظر فصل 12) بسرعة 300 m/s تقريبا في الهواء، أبطأ بمليون مرة؛ أو مقارنة بالسرعة النمطيّة على الخط السريع 30 m/s، أي 10 ملايين مرة أبطأ من الضوء. تختلف موجات EM عن موجات الصوت بطريقة مهمة أخرى: حيث تنتقل موجات الصوت في وسط كالهواء، ويشمل ذلك حركة جزيئات الهواء. إنّ موجات EM لا تشمل أيّ مادة- فقط مجالات، وتستطيع هذه الانتقال في الفراغ.

تنويه:
موجات الصوت والموجات EM مختلفة تمامًا.

المثال 1-22 الأطوال الموجيّة لموجات EM

احسب طول موجة: (أ) EM وترددها 60-Hz، (ب) راديو FM وترددها 93.3-MHz، (ج) شعاع ضوئي أحمر مرئي من ليزر تردده $4.74 \times 10^{14}\text{Hz}$.

النّهج: هذه كلّها موجات كهرومغناطيسية. لذا، فإنّ سرعتها $c = 3.00 \times 10^8\ \text{m/s}$. ونحلّ لإيجاد λ في (المعادلة 22 - 4): $\lambda = c/f$

الحلّ: (أ)
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8\ \text{m/s}}{60\ \text{s}^{-1}} = 5.0 \times 10^6\ \text{m}$$

أو 5000 km. 60 Hz هو تردد التّيّار الكهربائيّ في الولايات المتحدة الأمريكية، وكما نرى فإنّ طول موجة واحدة يمتد على طول القارة الأمريكية.

(ب)
$$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\ \text{m/s}}{93.3 \times 10^6\ \text{s}^{-1}} = 3.22\ \text{m}$$

طول الهوائي لـ FM نحو نصف موجة $(\frac{1}{2}\lambda)$ أي $1\frac{1}{2}$ m

(ج)
$$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\ \text{m/s}}{4.74 \times 10^{14}\ \text{s}^{-1}} = 6.33 \times 10^{-7}\ \text{m}\ (= 633\ \text{nm})$$

التمرين A : ما هي ترددات: (أ) موجة راديو طولها 80-m؟ (ب) موجة أشعة x طولها $5.5 \times 10^{-11}\ \text{m}$ ؟

المثال 2-22 خمّن هوائي الهاتف المحمول

يكون طول هوائي الهاتف المحمول عادةً $\frac{1}{4}$ طول الموجة. طول هوائيٍّ خاصٍّ بهاتفٍ يساوي 8.5-cm. احسب، بالتقريب، التردد الذي يعمل به هذا الهوائي.

النّهج: المعادلة الأساسية التي تجمع سرعة الموجة، والتردد، وطول الموجة $c = \lambda f$؛ طول الموجة يساوي أربعة أمثال طول الهاتف.

الحلّ: طول الهوائي $\frac{1}{4}\lambda$ طول الموجة، ولذلك $\lambda = 4(8.5\ \text{cm}) = 34\ \text{cm} = 0.34\ \text{m}$. ثم

$$f = c/\lambda = (3.0 \times 10^8\ \text{m/s})/(0.34\ \text{m}) = 8.8 \times 10^8\ \text{Hz} = 880\ \text{MHz}$$

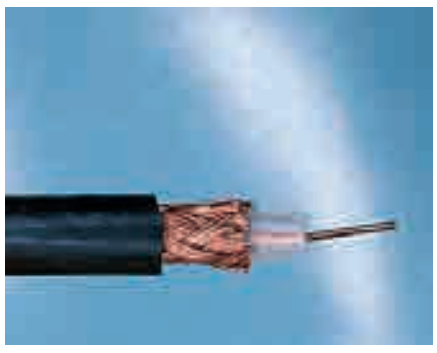
ملحوظة: هوائيات الراديو ليست موصلات مستقيمة دائمًا. ويمكن للموصل أن يكون عروةً دائريةً لتوفير الحيز. انظر (الشكل 22 - 17ب).

التمرين B: ما طول $\frac{1}{4}\lambda$- طول موجة هوائي لراديو طائرة يعمل على 165 MHz؟

يمكن أن تنتقل الموجات الكهرومغناطيسيّة عبر خطوط نقل كانتقالها في الفراغ. عند توصيل مصدر للجهد (emf) بخط نقل- سواء كان من سلكين متوازيين، أو كيبل متحد المحور (الشكل 22-9)- فإنّ المجال الكهربائيّ داخل السلك لا ينشأ فورًا عند كلّ نقاط السلكين. وهذا يعيدنا إلى المناقشة التي عرضناها في (البند 22 - 2) بالعودة (للشكل 22 - 5). في الواقع، يمكن إثبات أنّه إذا كانت الأسلاك مفصولة بالفراغ أو الهواء، فإنّ الإشارة الكهربائيّة تنتقل عبر الأسلاك بسرعة $c = 3.0 \times 10^8\ \text{m/s}$ فمثلا، عند تشغيل مفتاح الإنارة، يبدأ الضوء بعد ذلك بجزء صغير من الثانية. إذا كانت الأسلاك موضوعة في وسط سماحيته ϵ الكهربائيّة وقابليته المغناطيسيّة μ (البندان 17 - 8، و 20 – 12، على الترتيب) فإنّ السرعة لا تُعطى (بالمعادلة 22 - 3)، بل بـ

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

الشكل 22- 9 كيبل متحد المحور .



المثال 22-3 **خمِّن** **سرعة الصوت في الأسلاك**

عندما تتكلم بالهاتف من لوس أنجلوس مع صديق من نيويورك على بعد 4000 km تقريبًا، كم تستغرق الإشارة التي تحمل صوتك لتسير هذه المسافة؟

النّهج: تُحمَلُ الإشارة أمّا بسلك هاتف، أو في الهواء عبر الأقمار الصناعية. وفي الحالتين، هي موجات كهرومغناطيسية. الإلكترونيات والأسلاك أيضًا تبطئ الأشياء. ولكن بتقريب بسيط، نأخذ السرعة على أنّها تساوي $c = 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$.

الحلّ: بما أنّ السرعة = المسافة/الزمن، فإنّ الزمن = المسافة/السرعة $= (4.0 \times 10^6 \text{ m})/(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})$ $= 1.3 \times 10^{-2} \text{s}$ أي نحو من $\frac{1}{100}$ s الثانية.

ملحوظة: يمضي مثل هذا الوقت القصير عادة دون انتباه.

التمرين C: لو انتقل صوتك كموجة صوتية، فكم سيستغرق في (المثال 22-3)؟

22-4 قياس سرعة الضوء

حاول جاليليو قياس سرعة الضوء بمحاولة قياس الزمن اللازم للضوء لينتقل بين قمة جبلين. طلب إلى مساعده على قمة جبل وهو نفسه على جبل آخر أن يرفع غطاء مصباح عند رؤيته لضوء المصباح عند جاليليو. قاس جاليليو الوقت، فكان قصيرًا جدّا، فاستنتج أنّ ذلك يتضمن زمن ردّ فعل الإنسان. وعليه، فإنّ سرعة الضوء كبيرة جدّا.

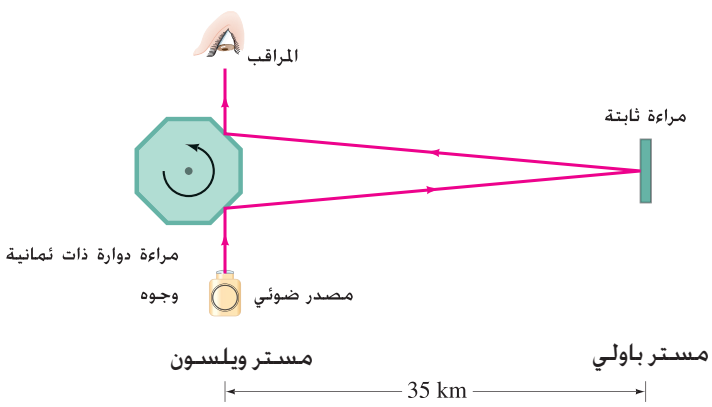
إنّ أول تجربةٍ ناجحة لقياس سرعة الضوء أعطت قيمة محددة لها كانت على يد العالم الهولندي رومر (1644 - 1710). لاحظ رومر أنّ الزمن الدوري الذي تمّ قياسه أيّ 10، لأحد أقمار المشتري كان بقيمة متوسطة 42.5 h، تتغير قليلاً، بالاعتماد على الحركة النسبية بين المشتري والأرض. عندما كانت الأرض تتحرك بعيدًا عن المشتري، كان الزمن الدوري أطول، ولكن عندما كانت الأرض تتحرك نحو المشتري، كان الزمن الدوري أقصر.

اعتبر هذا التغيّر في الزمن الدوري ناتجًا من التغير في المسافة بين الأرض والمشتري خلال دورة من دورات قمر المشتري، والزمن الذي استغرقه الضوء للانتقال عبر هذه المسافة. واستنتج رومر أنّ سرعة الضوء محددة، على الرغم من كبرها.

ميكلسون يقيس c.

ومنذ ذلك الحين، استُعمِلَت طرق كثيرة لقياس سرعة الضوء. ومن أهم هذه الطرق الطريقة التي استعملها العالم الأمريكي ألبرت ميكلسون (1852 - 1931). استعمل ميكلسون جهاز المرآة الدوارة المرسوم في (الشكل 22-10) لسلسلة من التجارب الدقيقة في الفترة من 1880 إلى 1920. الضوء الناتج من مصدر ما أُسقط على أحد أوجه مرآة دوّارة ذات ثمانية وجوه. ومن ثمَّ انتقل الضوء المنعكس إلى مرآة أخرى على بعد كبير، ثم عاد مرة أخرى كما هو مبيّن، إذا كانت المرآة الدوارة تدور بالمعدل الصحيح، فإنّ الضوء العائد سينعكس من أحد أوجه المرآة إلى تلسكوب ينظر المراقب من خلاله.

الشكل 22- 10. جهاز ميكلسون لقياس سرعة الضوء (الرسم ليس وفق مقياس الرسم)



لو كانت سرعة الدوران مختلفة قليلًا، فإنّ الشعاع سينحرف إلى جانب آخر ولا يلاحظه الشخص الناظر. ومن سرعة دوران المرآة والمسافة المعروفة للمرآة الثانية، يمكن حساب سرعة الضوء. في عام 1920 ثبت ميكلسون المرآة الدوارة على قمة جبل ويلسون في جنوب كاليفورنيا، ومن ثمَّ قاس لاحقًا سرعة الضوء في الفراغ باستخدام أنبوب طويل مفرغ.

هذه الأيام، سرعة الضوء c تؤخذ:

$$c = 2.99792458 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$$

وتعرف على أنّها تساوي هذه القيمة. وهذا يعني أنّ المعيار للطول، المتر، لم يعد يعرف بصورة منفصلة. بدلا من ذلك، وكما لاحظنا في (البند 1 - 5)، فإنّ المتر يعرف حاليًّا بالمسافة التي يقطعها الضوء في 1/299,792,458 في ثانية.

وعادة نقرب c إلى

$$c = 3.00 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$$

عندما لا نريد نتائج دقيقة جدّا. أما في الهواء، فتكون السرعة أقل قليلا من ذلك.

* 5-22 الطاقة في موجات EM

تحمل الموجات الكهرومغناطيسية طاقة، وتنقلها من منطقة إلى أخرى في الفضاء. هذه الطاقة ترافق المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي المتحركين. لقد رأينا في (البند 17 - 9) أنّ كثافة الطاقة $u_E\,(\mathrm{J/m^3})$ المختزنة في المجال الكهربائيّ E هي $u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ (المعادلة 17 - 11). وتُعطى كثافة الطاقة المُختزنة في مجال مغناطيسيّ B، كما ناقشنا في (البند 21 - 10)، بـ $u_B = \frac{1}{2}B^2/\mu_0$ (المعادلة 21-10). وهكذا، فإنّ الطاقة الكلية المختزنة لكلِّ وحدة حجم في منطقة من الفضاء حيث توجد موجة كهرومغناطيسية تساوي

$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} \qquad \textbf{(5 - 22)}$$

في هذه المعادلة، E، و B يمثلان شدتي المجالين الكهربائيّ والمغناطيسي للموجة عند أيّ لحظة في منطقة ضيقة من الفضاء. ويمكن كتابة (المعادلة 22 - 5) بدلالة المجال الكهربائيّ فقط إذا استعنا بالمعادلتين 22 - 2، $(B = E/c)$ ، و 22 - 3، $(c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ للحصول على

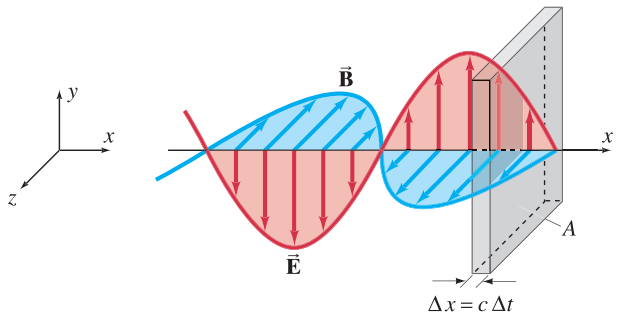
$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{\epsilon_0\mu_0 E^2}{\mu_0} = \epsilon_0 E^2 \qquad \textbf{(22- 6 أ)}$$

لاحظ هنا أنّ كثافة الطاقة المرافقة للمجال المغناطيسيّ B تساوي كثافة الطاقة المرافقة للمجال الكهربائيّ، E. ويمكننا كذلك كتابة كثافة الطاقة بدلالة المجال المغناطيسيّ فقط:

$$u = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 c^2 B^2 = \frac{B^2}{\mu_0} \qquad \textbf{(22- 6 ب)}$$

أو بحدٍّ واحدٍ يحتوي كلًّا من E، و B

$$u = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 EcB = \frac{\epsilon_0 EB}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}\,EB \qquad \textbf{(22- 6 ج)}$$



الشكل 22- 11 موجة كهرومغناطيسية تحمل طاقة عبر المساحة A

إنّ الطاقة التي تنقلها موجةٌ في وحدة الزمن لكلّ وحدة مساحة هي **الشدة** I، كما عرفناها في (البند 11 - 9 و 12 - 2).* وحدات I هي $\mathrm{W/m^2}$. الطاقة التي تعبر مساحة A في فترة زمنية Δt (انظر الشكل 22- 11) هي

$$\Delta U = u\,\Delta V = (u)(A\,\Delta x) = (\epsilon_0 E^2)(Ac\,\Delta t)$$

لأنّ $\Delta x = c\,\Delta t$. لذا، فإنّ مقدار الشدة (طاقة لكلّ وحدة مساحة في كلّ زمن Δt، أو قدرة لكلّ وحدة مساحة) هي

$$I = \frac{\Delta U}{A\,\Delta t} = \frac{(\epsilon_0 E^2)(Ac\,\Delta t)}{A\,\Delta t} = \epsilon_0 c E^2$$

شدة الموجات الكهرومغناطيسية

ومن (المعادلتين 22 - 2 و 22 - 3)، يمكن كتابة هذه المعادلة بالصورة الآتية:

$$I = \epsilon_0 c E^2 = \frac{c}{\mu_0} B^2 = \frac{EB}{\mu_0} \qquad \textbf{(7 -22)}$$

(الشدة المتوسطة خلال فترة زمنية كبيرة، إذا كان E، و B جيبيين بحيث $\overline{E^2} = E_0^2/2$. (تمامًا مثل التّيار الكهربائيّ والجهود، البند 18- 7) تساوي

الشدة المتوسطة

$$\bar{I} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2}\frac{c}{\mu_0} B_0^2 = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} \qquad \textbf{(8 -22)}$$

هنا E_o، و B_o هما القيمتان العظميان للمجالين الكهربائيّ E والمغناطيسي B. وعليه، يمكن كتابة بالصورة التالية:

$$\bar{I} = \frac{E_{\mathrm{rms}} B_{\mathrm{rms}}}{\mu_0}$$

حيث E_{rms} و B_{rms} هي $(E_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\overline{E^2}},\ B_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\overline{B^2}})$

المثال 22-4 E، و B من الشمس

يصل الإشعاع من الشمس الأرض (فوق الغلاف الجوي) بمعدّل يصل $1350\ \mathrm{J/s\cdot m^2}\ (=1350\ \mathrm{W/m^2})$ افرض أنّ هذه موجة EM منفردة. احسب القيم القصوى E، و B.

النّهج: أُعطينا الشدة $\bar{I} = 1350\ \mathrm{J/s\cdot m^2}$، ونحلّ (المعادلة 22-8) $(\bar{I} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2)$ لإيجاد E_0 بدلالة $\bar{I}$

الحلّ:

$$E_0 = \sqrt{\frac{2\bar{I}}{\epsilon_0 c}} = \sqrt{\frac{2(1350\ \mathrm{J/s\cdot m^2})}{(8.85\times10^{-12}\ \mathrm{C^2/N\cdot m^2})(3.00\times10^8\ \mathrm{m/s})}}$$
$$= 1.01\times10^3\ \mathrm{V/m}.$$

من (المعادلة 22-2)، $B = E/c$، لذلك

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{1.01\times10^3\ \mathrm{V/m}}{3.00\times10^8\ \mathrm{m/s}} = 3.37\times10^{-6}\ \mathrm{T}$$

ملحوظة: على الرغم من أنّ B ذات قيمة صغيرة بالمقارنة مع E (بسبب الطريقة في تعريف الوحدات المختلفة لكلّ من E، و B)، إلا أنّ B يساهم بالطاقة نفسها للموجة تمامًا كما يفعل E. كما رأينا سابقًا.

* تُسَمّى الشدّة I لموجة EM عادةً باسم **متجه بوينتنغ**، وتُعطى الرمز $\vec{\mathbf{S}}$. إنّ اتجاهها هو تمامًا الاتجاه الذي تنقل فيه الطاقة، وهو اتجاه انتقال الموجة، ومقدارها هو الشدة $(S = I)$.

* 6-22 نقل الزّخم وضغط الاشعاع

إذا كانت الموجات الكهرومغناطيسية تحمل طاقة، فمن الممكن التوقع بأنّها تحمل زخمًا خطيًّا أيضًا. عندما تصدم موجة كهرومغناطيسية سطح جسم، فتمتص أو تنعكس، فإنّ قوة سوف تؤثر في السطح كنتيجة لنقل الزخم $(F = \Delta p/\Delta t)$ تمامًا مثلما يصدم جسم متحرك سطحًا ما. تُسَمّى القوةُ لكلّ وحدة مساحة الناتجة من الموجات **ضغطَ الاشعاع**، وقد أثبت وجوده العالِم مكسويل، الذي بين أنّه إذا تم امتصاص إشعاع EM (ضوء، مثلا) بواسطة جسم، فإنّ الزخم المنقول يساوي

$$\Delta p = \frac{\Delta U}{c} \qquad \text{[الإشعاع الممتص]} \quad \textbf{(9-22 أ)}$$

حيث ΔU هي الطاقة الممتصّة بواسطة الجسم في الفترة Δt، أمّا c فهي سرعة الضوء. ولكن إذا انعكس الضوء، (افرض أنّ الجسم مرآة) فإنّ الزخم المنقول يساوي ضعف الزخم المذكور سابقًا، كارتداد كرة ارتدادًا مرنا عن السطح

$$\Delta p = \frac{2\Delta U}{c} \qquad \text{[الإشعاع المنعكس]} \quad \textbf{(9-22 ب)}$$

إذا امتصَّ السطح بعض الإشعاع، وعكس بعضه الآخر، عندها $\Delta p = a\ \Delta U/c$، حيث α تأخذ قيمة بين 1، و 2.

وباستعمال قانون نيوتن الثاني، يمكننا حساب القوة والضغط الناتجين من إشعاع EM على جسم. تعطى القوة F بـ $F = \dfrac{\Delta p}{\Delta t}$

يُعطى ضغط الإشعاع p (نفرض الامتصاص الكامل) بـ انظر (المعادلة 22-9 أ)

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A}\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1}{Ac}\frac{\Delta U}{\Delta t}$$

وقد ناقشنا في (البند 22-5) أنّ الشدة المتوسطة $\overline{I}$ تعرف بأنها الطاقة لكلّ وحدة مساحة

$$\overline{I} = \frac{\Delta U}{A\,\Delta t}$$

لذا، فإنّ ضغط الإشعاع هو

$$P = \frac{\overline{I}}{c} \qquad \textbf{(10-22أ)}$$

ضغط الاشعاع (امتُصَّ)

وإذا انعكس الإشعاع كاملا، فإنّ الضغط يساوي ضعف هذه الكمية

$$P = \frac{2\overline{I}}{c} \qquad \textbf{(10-22ب)}$$

ضغط الإشعاع (انعكس).

المثال 22-5 خمّن **ضغط الإشعاع الشّمسيّ**

إنّ الاشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض (بعد مروره بالغلاف الجوي الأرضي) ينقل الطاقة بمعدل $1000\ \mathrm{W/m^2}$ تقريبا. احسب، بالتقريب، الضغط والقوة التي تؤثر بها الشمس في يدك الممدودة.

النّهج: ينعكس جزء من الإشعاع، أما الجزء الآخر فيُمتص. لذا، دعنا نقدر ببساطة $P = \overline{I}/c$

الحلّ:
$$P \approx \frac{\overline{I}}{c} = \frac{1000\ \mathrm{W/m^2}}{3 \times 10^8\ \mathrm{m/s}} \approx 3 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/m^2}$$

تقريب لمساحة يدك الممدودة قد تكون نحو 10 cm في 20 cm، إذن $A = 0.02\ \mathrm{m^2}$. وعليه، فإنّ القوة هي

$$F = PA \approx (3 \times 10^{-6}\ \mathrm{N/m^2})(0.02\ \mathrm{m^2}) \approx 6 \times 10^{-8}\ \mathrm{N}$$

ملحوظة: هذه أرقام متناهية الصغر. إنّ قوة الجاذبية على يدك، للمقارنة، هي نصف باوند تقريبًا، أو باعتبار $m = 0.2\ \mathrm{kg}, mg \approx (0.2\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{m/s^2}) \approx 2\ \mathrm{N}$. أي أنّ ضغط الإشعاع على يدك ضئيل مقارنة بالجاذبية.

على الرغم من عدم شعورك بآثار ضغط الإشعاع مباشرةً، فإنّ الظاهرة تكون لافتةً للنظر عندما تطبّق على الذرّات المشعَّعَة بشعاعٍ مُركَّز من ليزر. كتلة الذرة نحو 10^{-27} kg والليزر يمكن أن يعطي طاقة بمعدّل $1000\ W/m^2$. هذه هي الشدة التي استعملت في (المثال 22 - 5) سابقًا. ولكن، يصبح ضغط إشعاع بقيمة $10^{-6}\ N/m^2$ مهمًا على جزيء كتلته بين 10^{-23}، و 10^{-26} kg. ويمكن تحريك الذرات والجزيئات بواسطة توجيهها بشعاع ليزر في أجهزة تُسَمّى "ملاقط ضوئية". ولهذه الملاقط بعض التطبيقات المهمّة. فهي مهمّة جدًّا للبيولوجيين، وخاصةً أنّها يمكن أن تتعامل مع الأعضاء المجهرية ومركبات الخليّة دون إتلافها. وقد تم استعمال هذه الملاقط الضوئية في قياس خصائص المرونة لـ DNA عن طريق سحب كلّ طرف من الجزيء بواسطة ملقط ليزري.

تطبيق الفيزياء
الملاقط الضوئية

7-22 المذياع والتلفزيون؛ الاتصالات اللاسلكية *

تُقَدِّمُ الموجاتُ الكهرومغناطيسيّةُ إمكانيّةَ نقلِ المعلوماتِ إلى مسافاتٍ بعيدة. ومن بين الأوائل الذين أدركوا ذلك، ووضعوها موضع التطبيق كان ماركوني (1874-1937)، الذي اخترع المذياع، وطور التلغراف اللاسلكي في نهاية القرن التاسع عشر. وبذلك أمكن إرسال الرسائل بسرعة الضوء دون استعمال الأسلاك. لقد كانت أولى الإشارات نبضاتٍ طويلةً وقصيرةً، يمكن ترجمتها إلى كلمات بواسطة الشيفرة، مثل "النقاط" و "الشرطات" في شيفرة موريس؛ كانت أرقامًا دون أسلاك، صدّق أو لا تصدّق. في عام 1895 أرسل ماركوني إشارات لا سلكيّة إلى مسافة كيلومتر أو اثنين. وبحلول عام 1901 أرسل إشارات تجريبية إلى مسافة 3000 km عبر المحيط من نيوفاوندلاند (كندا) إلى كورنوال، إنجلترا. وفي عام 1903 بعث أوّل الرسائل التجارية من "كيب كود"، ماتشوستس، إلى إنجلترا. كما أنّ صحيفة التايمز اللندنية طبعت مواضيع إخبارية عن طريق مراسلها في نيويورك. وفي العام نفسه كانت أول محاولة طيران للأخوين رايت.

تطبيق الفيزياء
الإرسال اللاسلكي

بصمات العصر الحديث- اتصال لاسلكي وطيران- تؤرّخ في العام نفسه.

إرسال موجات المذياع

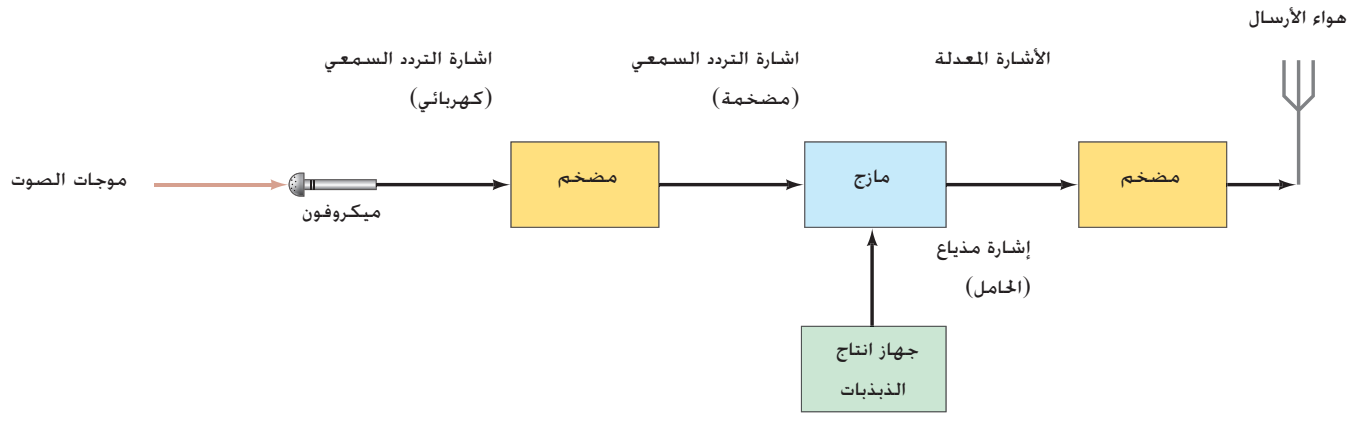
أما العقد التالي، فقد شهد تطور أنابيب التفريغ. ومن هذا العمل المبكر اخترع المذياع والتلفزيون. وسنناقش الآن باختصار كيفية انتقال إشارات المذياع والتلفزيون، وكيفية استقبالها في البيوت.

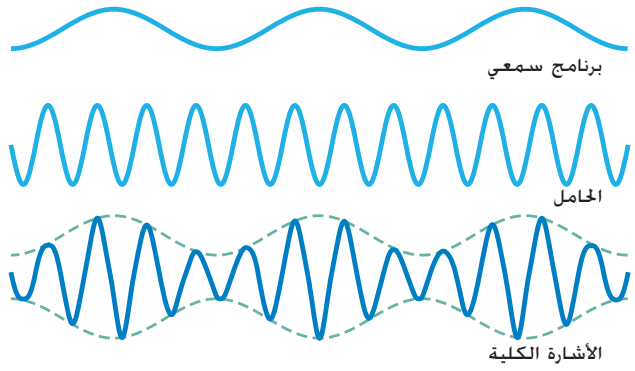
عملية البث الإذاعي للمعلومات (كلمات وموسيقى) مبينة في (الشكل 22 - 12). حُوِّل المعلومات الصوتية إلى إشارة كهربائية بالترددات نفسها، بواسطة ميكروفون أو رأس تسجيل. تُسَمّى هذه الإشارة إشارة التردد السمعي (AF) لأنّ الترددات في مدى الصوت (20 إلى 20,000 Hz). تكبر الإشارات إلكترونيًا، ثم تمزج بإشارة مذياع (RF) تُسَمّى تردد الناقل (الحامل) الذي يمثل تلك المحطة الإذاعية. محطات مذياع (AM) لها تردد حامل من نحو 530 kHz إلى 1700 kHz، مثلا "710" على قرص المذياع تعني محطة إذاعية ترددها 710 kHz. أما محطات "FM" فلها ترددات حمل أكبر بكثير، بين 88 MHz، و 108 MHz.

تردد الناقل

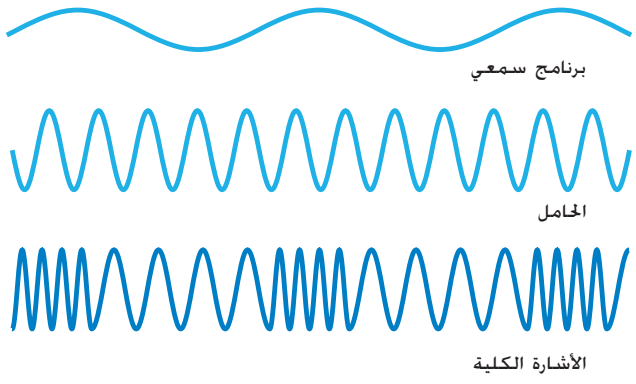
إنّ ترددات الحمل لمحطات TV في الولايات المتحدة الأمريكية، تقع بين 54 MHz، و 88 MHz، ثم بين 174 MHz، و 216 MHz، وكذلك بين 470 MHz، و 890 MHz.

الشكل 22- 12 مخطط جهاز إرسال مذياع





الشكل 22- 13 في تعديل (مزج) الاتساع (AM)، الاتساع للإشارة الحاملة يعمل بحيث يتغير بالتناسب مع اتساع الموجة الصوتية.



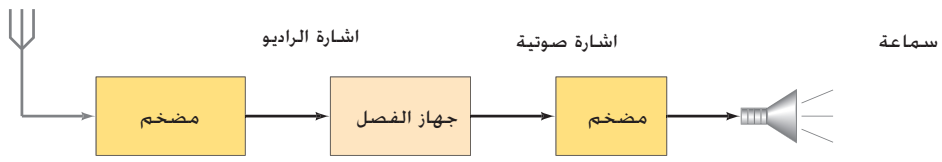
الشكل 22- 14 في تعديل (مزج) التردد (FM) يتغير تردد الموجة الحاملة بالتناسب مع تردد موجة الصوت. يستعمل هذا الأسلوب في محطات FMللمذياع والتلفزيون.

تطبيق الفيزياء
AM و FM

لقد تمّ مزج الترددات الصوتية والحاملة بطريقتين هما:أ- تعديل الاتساع (AM). وفيها يتغير اتساع الموجة الحاملة (ذات التردد العالي) بحيث يتناسب مع اتساع الموجة الصوتية. كما هو مبين في (الشكل 22 - 13). ويُسَمّى تعديل الاتساع لأنّ اتساع الموجة الحاملة يتغيّر (يتعدّل). ب- تعديل التردّد (FM). وفيها يتغيّر تردّد الموجة الحاملة بحيث يتناسب مع اتساع موجة الصوت. كما هو مبيّن في (الشكل 22 -14). يتمّ تكبير الإشارة المعدّلة ثمّ تُرسل إلى هوائي الإرسال. حيث يُبثّ المزيج المعقّد من الترددات على صورة موجات كهرومغناطيسيّة.

يعمل جهاز البثّ التلفزيوني بصورة مشابهة. حيث يستعمل FM للصوت. و AM للصورة (فيديو)؛ إشارتا الصوت والصورة (انظر البند 17-10) تمزجان بترددات حاملة.

هوائي الأستقبال

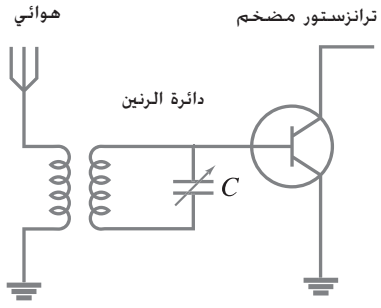


الشكل 22- 15
مخطط بسيط لجهاز استقبال مذياع.

تطبيق الفيزياء
جهازا استقبال مذياع وتلفزيون(*TV*).

دعنا الآن ننظر إلى الطرف الآخر من العملية، ألا وهو استقبال برامج المذياع والتلفزيون في البيت. جهاز استقبال مذياع بسيط موضّح في مخطّط (الشكل 22-15). يتمّ استقبال موجات *EM* المنبعثة من كلّ محطات المذياع بواسطة الهوائي. وتكون الإشارة التي يلتقطها الهوائي ضعيفة، وتحتوي على ترددّات كثيرة من محطّات متعدّدة. يختار المستقبل تردد مذياع *RF* معينًا (في الواقع مدى ضيّقًا من الترددات) يفحص محطة معينة باستعمال دارة رنين *LC* (البند 21-14). وهناك طريقة بسيطة لتوليف محطة معينة مبينة في (الشكل 22 - 16). يتم توليف محطة معينة "بواسطة تغير *C* أو *L*، بحيث يصبح تردد الرنين متفقًا مع تردد الناقل (الحامل) لمحطة الإرسال. ومن ثمّ تذهب هذه الإشارة "الحاملة " و"الصوتية " إلى الجزء الخاص بفصل الموجتين (الشكل 22 - 15). حيث "الفصل" يعني أنّ الموجة الحاملة تنفصل عن الموجة المحمولة (الصوتية). وأخيرا، تكبر الإشارة الصوتية وترسل إلى السماعات.

الشكل 22- 16.
دارة توليف بسيطة للمذياع.



تحتوي أجهزة الاستقبال الحديثة على مراحل أكثر من تلك المعروضة. وهناك طرق عدّة تُستعمل لزيادة الحساسية والانتقائية (القدرة على الكشف عن إشارات ضعيفة وتمييزها من محطات أخرى)، وتقليل التشويه في الإشارة الأصلية*.

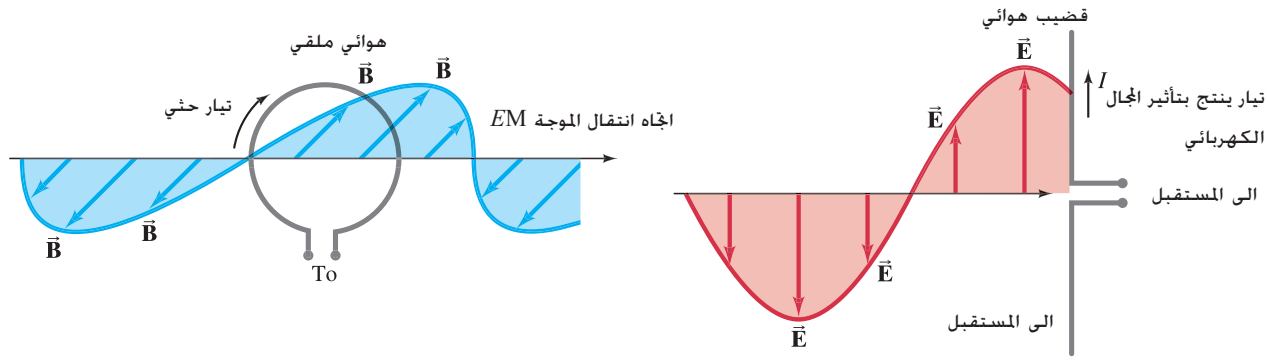
* البث الإذاعي من نوع FM، تحمل الموجة الحاملة إشارتين؛ تحتوي الإشارة الأولى على ترددات حتى 15 kHz، والتي تحتوي الترددات الصوتية كلّها. في حين تحتوي الإشارة الثانية على المدى نفسه من الترددات، ولكن يضاف إليها إشارة 19 kHz. يطرح جهاز استقبال ستيريو هذه الإشارة 19,000-Hz، ثم يوزع الإشارتين إلى القناتين اليمنى واليسرى. تتكون الإشارة الأولى من جمع الإشارتين اليمنى واليسرى (L + R). وكذلك المذياع الأحادي يكشف عن الصوت كلّه. أمّا الإشارة الثانية فهي الفرق بين اليسار واليمين (L - R). كذلك على الجهاز أن يجمع الإشارتين ويطرحهما للحصول على يسرى نقية، وأخرى نقية يمنى لكلّ قناة.

التلفزيون

يقوم جهاز الاستقبال التلفزيوني بعمل أشياء مشابهة لكلتا الإشارتين الصوتيّة والمرئيّة. تذهب الإشارة الصوتية أخيرًا إلى السماعات. أمّا المرئية فتذهب إلى جهاز العرض كأنبوب الأشعة المهبطيّة (CRT) أو شاشة LCD. (البندان 17- 10 و 24- 11).

صحن هوائي للأقمار الصناعية

يتكوّن أحد أنواع الهوائيات من قضيب موصل للكهرباء أو أكثر. يؤثر المجال الكهربائيّ في موجات EM بقوة في إلكترونات الموصل ممّا يؤدي إلى تحركها ذهابًا وإيابًا بتردّدٍ يساوي تردّدَ الموجات (الشكل 22- 17أ). وهناك نوعٌ آخر من الهوائيّات مؤلّفٍ من ملفٍّ أنبوبيٍّ من الأسلاك يكشف عن المجالات المغناطيسيّة للموجات؛ المجال المغناطيسيّ B المتغير بحيث يحرض قوة دافعة كهربائية في الملفّ (الشكل 22- 17ب). ويتكوّن صحن القمر الصناعي. (الشكل 22- 18). من عاكس قطعٍ مكافئٍ يجمع الموجات الكهرومغناطيسية على "البوق". ويشبه بذلك تلسكوب المرآة المقعرة. (الشكل25- 21)



الشكل 22- 17 الهوائيات. (أ) المجال الكهربائيّ لموجات EM ينتج تيّارا في الهوائي المكون من أسلاك مستقيمة أو قضبان. (ب) المجال المغناطيسيّ المتغير يحث قوة دافعة كهربائية (emf) وتيارًا في الهوائي الحلقي.

الشكل 22- 18
طبق الأقمار اللاقط

المثال 22-6 توليف محطة

احسب طول الموجة المنبعثة من مذياع FM يبث على 100 MHz.

النّهج: تبث موجات الراديو كموجة FM. لذا، فإنّ سرعتها $c = 3.0 \times 10^8\ \text{m/s}$. ونجد طول الموجة من (معادلة 22 - 4) $\lambda = c/f$.

الحلّ: تردد الموجة الحاملة $f = 100\ \text{MHz} = 1.0 \times 10^8\ \text{s}^{-1}$. لذلك

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{(3.0 \times 10^8\ \text{m/s})}{(1.0 \times 10^8\ \text{s}^{-1})} = 3.0\ \text{m}$$

ملحوظة: الأطوال الموجيّة لإشارات FM الأخرى (88 MHz إلى 108 MHz) قريبة من هذه القيمة 3.0-m لهذه المحطّة. هوائيات FM طولها النموذجي 1.5 m، أو نصف طول الموجة تقريبًا. يُختار هذا الطول بحيث يستجيب الهوائي بهيئة رنين، ولذلك يكون حسّاسًا أكثر لموجات FM. ويجب أن تكون هوائيات مذياع AM أطول بكثير لتساوي $\frac{1}{2}\lambda$ أو $\frac{1}{4}\lambda$.

تطبيق الفيزياء

الهواتف المحمولة، التحكم بالمذياع، التحكم عن بعد، تلفزيون الكيبل، وتلفزيون الأقمار والمذياع.

اتصالات موجات EM أخرى

تخصّص المناطق المختلفة لطيف موجات الراديو من هيئات حكومية لأغراض متعدّدة. بجانب ما ذكر أعلاه، هناك "نطاقات" مخصّصة لاستعمال السفن، والطائرات، والشرطة، والجيش، والهواة، والأقمار الصناعيّة، والفضاء، والرادار. إنّ أجهزة الهواتف المحمولة مثلا، هي أجهزة مذياع مرسلة ومستقبلة كاملة. وتعمل في الولايات المتحدة في نطاقين مختلفين هما: 800 MHz، و (1.9 GHz =) 1900 MHz، أما في أوروبا وآسيا فهما: 900-MHz و 1800-MHz وتستخدم في نظام دولي يُسَمّى GSM نظام الاتصالات العالمي للهواتف المحمولة (Communication Global system for Mobile). أمّا الألعاب التي يتحكم بها بواسطة موجات المذياع (سيارات، قوارب، لعب حيوانات آلية(روبوت)، وغيرها) فتستعمل ترددات تتراوح من 27 MHz إلى 75 MHz. ويمكن أن يعمل جهاز التحكم في السيارة عن بعد (دون مفاتيح) على نحو 300 MHz أو 400 MHz.

تُحمل قنوات التلفزيون بالكيبل كموجات كهرومغناطيسيّة على طول كيبل متحد المحور (انظر الشكل 22- 9) بدلاً من إرسالها وإعادة استقبالها في الهواء. القنوات ضمن الجزء نفسه من طيف EM، مئات MHz، ولكن بعضها على ترددات ليست متوافرة للبث التلفزيوني. التلفزيون الرقمي بالأقمار والراديو تحمل في قسم الميكروويف من الطيف (12 GHz إلى14، و 2.3 GHz على الترتيب).

ملخص

ابتكر مكسويل نظريةً رائعةً يمكن من خلالها وصف المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية باستعمال أربع معادلات. تُسَمّى الآن "**معادلات مكسويل**". تعتمد هذه المعادلات على أفكار سابقة. لكن مكسويل أضاف معادلة تنصّ على أنّ المجال الكهربائيّ المتغير يُنتج مجالاً مغناطيسيًّا .

توصلت نظريّة مكسويل إلى أنّه يمكن الحصول على موجات **عرضية كهرومغناطيسية** (EM) بتسارع شحنات كهربائية. وهذه الموجات تنقل عبر الفضاء بسرعة الضوء وتعطى بالعلاقة

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad \textbf{(3-22)}$$

المجالان: الكهربائيّ والمغناطيسي في موجة EM متعامدان وعموديّان على اتجاه انتقال الموجة. هذه الموجات هي موجات مجالات وليست موجات مادية. ويمكن أن تنتقل في الفراغ.

طول الموجة λ والتردد f لموجة EM ترتبط بسرعتها c حيث

$$c = \lambda f \quad \textbf{(4-22)}$$

تمامًا كالموجات الأخرى.

لقد أصبحت فكرة أنّ الضوء هو موجة EM (بتردد عال جدًّا) مقبولة إلى حدٍّ ما بعد الكشف عن موجات EM بالتجربة. يتضمّن الطيف الكهرومغناطيسي موجات EM بتشكيلة عريضة من الموجات. من المرئي والأشعة X وأشعة جاما. وكلّها تسير في الفضاء بسرعة. $c = 3.0 \times 10^8\ \text{m/s}$.

* [الشدة المتوسطة (W/m^2) لموجة EM هي

$$\overline{I} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2}\frac{c}{\mu_0}B_0^2 = \frac{1}{2}\frac{E_0 B_0}{\mu_0} \quad \textbf{(8-22)}$$

حيث E_o و B_o هي القيمة القصوى لكلٍّ من المجالات الكهربائيّة والمغناطيسية على الترتيب. في الموجة.]

[* موجات EM تحمل زخمًا وتؤثّر بضغط إشعاع يتناسب مع الشدة I للموجة].

أسئلة

1. يتحرّك المجال الكهربائيّ في موجة EM نحو الشمال يهتزُّ في مستوى شرق - غرب. صف اتجاه المجال المغناطيسيّ في هذه الموجة.
2. هل الصوت موجة كهرومغناطيسية؟ إذا كان الجواب بالنفي. فأي نوع من الموجات هو؟
3. هل تستطيع موجات EM أن تنتقل خلال فراغ تام؟ هل تستطيع موجات الصوت عمل ذلك؟
4. عندما تدير مفتاح مصباح الإضاءة ليعمل. فهل ينتشر الضوء مباشرة؟ فسّر.
5. هل الأطوال الموجية للمذياع والتلفزيون أطول من الموجات التي تراها العين. أم أقصر؟
6. عندما تصل سماعتين مع مخرج الصوت (output) لمكبر ستيريو. هل عليك التأكّد بأنّ أسلاك التوصيل متساوية في الطول بحيث لا يكون هناك تأخير زمني بين السماعتين؟ فسّر.
7. في الطيف الكهرومغناطيسي. ما نوع موجة EM التي طولها 10^3 km؟ 1 km؟ 1 m؟ 1 mm؟ 1 μm؟
8. هل يمكن لموجات المذياع أن يكون لها ترددات موجات الصوت نفسها (20 Hz–20,000 Hz)؟
* 9. هل تستطيع محطتا مذياع أو TV الإرسال على تردد الحامل نفسه؟ علّل.
* 10. إذا كان لمحطة إرسال مذياع هوائيّ عموديّ. فهل يجب أن يكون لجهاز الاستقبال هوائي (نوع القضيب الموصل) عمودي أو أفقي للحصول على أفضل استقبال؟
* 11. ترددات الحامل لإذاعة FM أكبر بكثير من إذاعة AM. اعتمادًا على ما تعلمته عن الحيود في (الفصل 11). فسّر لماذا يمكن الكشف عن موجات AM بصورة أيسر خلف الجبال أو النباتات؟
* 12. ناقش كيف تستعمل الهواتف اللاسلكية موجات EM. ماذا عن الهواتف المحمولة؟
* 13. قد يقوم شخص تائه بإعطاء إشارة فلاش (وميض) باستعمال شيفرة مورس. وهذه في الواقع موجة EM معدّلة: هل هي AM أم FM؟ ما هو تردد الحامل. بالتقريب؟

مسائل

22- 1 تغير $\vec{E}$ ينتج $\vec{B}$

* 1. (II) في لحظةٍ ما. يتدفّقُ تيّارٌ شدّتُهُ 1.8-A في أسلاك متصلة بمواسع كهربائيٍّ متوازي اللوحين. ما معدل تغيّر المجال الكهربائيّ بين اللوحين إذا كانا مربعين. وطول ضلع المربع 1.60 cm؟
* 2. (II) مواسع 1200-nF. لوحاه دائريّان. قطر كلٍّ منهما 2.0 cm. ويجمع شحنات بمعدّل 35.0 mC/s عند لحظة ما. ماذا سيكون مقدار المجال المغناطيسيّ التأثيري على بعد 10.0 cm من مركز اللوحين؟ ماذا سيكون مقدار المجال بعد أن يشحن المكثف بصورة كاملة؟

22- 2 موجات EM

3. (I) إذا كان للمجال المغناطيسيّ في موجة EM قيمة قصوى 17.5 nT عند نقطة معينة. فما أقصى قيمة للمجال الكهربائيّ؟
4. (I) في موجة EM تنتقل غربًا. يهتز المجال المغناطيسيّ عموديا بتردد 80.0 kHz. وشدة 6.75×10^{-9} T. ما تردد rms وشدته للمجال الكهربائيّ؟ وما اتجاهه؟ [مساعدة: انظر الشكل 22 - 7].

22- 3 و 22- 4 طيف EM والسرعة

5. (I) ما تردد موجة ميكروويف طولها 1.60 cm؟
6. (I) ما طول موجة رادار ترددها 29.75×10^9 Hz ؟
7. (I) موجة EM ترددها 9.66×10^{14} Hz. ما طول موجتها؟ وكيف تصنفها؟
8. (I) موجة EM طولها 650 nm. ما ترددها؟ وكيف تصنفها؟
9. (I) كم يستغرق الضوء ليصلنا من الشمس التي تبعد عنّا 1.50×10^8 km؟

10. (I) موجةٌ قصيرةٌ واسعةُ الانتشار لمذياعٍ، تُعرف بـ نطاق 49-m. ما تردد إشارة 49-m؟

11. (I) أقرب نجم إلينا (عدا الشمس) يبعد عنّا 4.2 سنة ضوئيّة. أي أنّ الضوء الذي يشعُّهُ يستغرق 4.2 سنة للوصول إلينا. كم يبعد النجم عنا بالأمتار؟

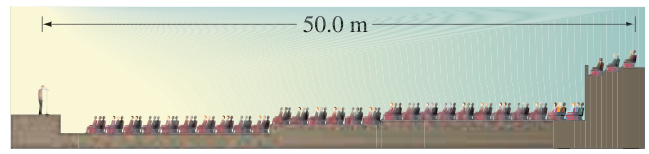
12. (I) السنة الضوئية هي وحدة مسافة (وليست للزمن). كم مترًا يسير الضوء في سنة؟

13. (II) كم الزمن الذي تستغرقه رسالة على صورة موجات مذياع من الأرض للوصول إلى المريخ عندما يكون: (أ) في أقرب مكان من الأرض؟ (ب) في أبعد مكان عن الأرض؟ [مساعدة: انظر الجدول 5 - 2 صفحة 125].

14. (II) ما أقلُّ سرعة زاوية كان على مرآة ميكلسون ذات الثمانية وجوه، أن تدور بها بالأوجه المتتابعة للمرآة (الشكل 22 - 10)؟

15. (II) يريد طالب ضبطَ أبعاد تجربة ميكلسون لقياس سرعة الضوء بحيث تتلاءم مع غرفته. تتوافر مرآة ذات ستة وجوه، ويجب وضع المرآة الثانية على بعد 12 m من المرآة الدوارة. فيما عدا ذلك، فإنّ الترتيب هو نفسه في (الشكل 22 - 10). ما أقل معدل يجب أن تدور به المرآة؟

16. (II) من سيسمع صوت المغني أولا: شخص يبعد عنه 50.0 m (الشكل 22-19) أم شخص في بيته على بعد 3000 km بجانب المذياع؟ كم الفرق في الزمن؟ افرض أنّ الميكروفون على بعد سنتيمترات من المغني، وأنّ درجة الحرارة 20°C.



الشكل 22- 19 (مسألة 16.)

17. (II) تنتج الليزرات الومضية المستعملة في العلوم والطب ومضات قصيرة من الموجات الكهرومغناطيسية. إذا كان طول موجة الليزر 1062 nm (هذا ناتج من نيوديميوم - ياغ ليزر) وتدوم النبضة 32 بيكوثانية، كم موجة موجودة في النبضة الضوئية؟ ما مدى قصر النبضة لتتواءم مع طول موجة واحدة؟

* 22-5 الطاقة في موجات EM

* 18. (I) في موجة EM، لشدّة المجال الكهربائيّ $\vec{\mathbf{E}}$ في الفراغ قيمة قصوى 21.8 mV/m. ما متوسط معدَّل التغير الذي تحمل فيه هذه الموجة الطاقة لكلّ وحدة مساحة لكلّ وحدة زمن؟

* 19. (II) في موجة EM متنقلة، شدة المجال المغناطيسيّ (rms) تساوي 28.5 nT. ما الزمن اللازم كي تنقل 235 J من الطاقة إلى $100\ cm^2$ من جدار تصطدم به عموديا؟

* 20. (II). ما مقدار الطاقة المنقولة عبر مساحة $1.00\text{-}cm^2$ في الساعة بواسطة موجة EM مجالها الكهربائيّ E، وقيمة rms لها تساوي 38.6 mV/m ؟

* 21. (II) تنتشر موجة EM كرويًّا من مصدر قدرته 1200-W. على بعد 10.0 m. ما متوسّط الشدّة I؟ وما قيمة rms للمجال الكهربائيّ؟

* 22. (II) ليزر قدرته 12.8 mW، يُصدر حزمةً ضوئيَّةً قطرها 1.75 mm. ما القيم المتوسطة (rms) للمجالين E، و B للشعاع؟

* 23. (II) احسب بالتقريب القدرة المتوسطة للشمس علمًا أنّ نحو $1350\ W/m^2$ تصل الغلاف الجوي للأرض.

* 24. (II) إذا كان مقدار المجال B لموجة EM هو $2.5 \times 10^{-7}\ T$: (أ) ما اتساع المجال E؟ (ب) ما مقدار القدرة المتوسطة لكلّ وحدة مساحة لموجة EM؟

* 25. (II) يصدر ليزر ذو طاقة عالية نبضة طولها 1.0-ns، وقدرتها المتوسطة $2.8 \times 10^{11}\ W$. نصف قطر الحزمة الضوئية $2.2 \times 10^{-3}\ m$. احسب: (أ) الطاقة الناتجة في كلّ نبضة. (ب) قيمة rms للمجال الكهربائيّ.

* 22-6 ضغط الإشعاع

* 26. (II) احسب، بالتقريب، ضغط الإشعاع الناتج من مصباح 100-W على بعد 8.0 cm من مركز المصباح. احسب القوة المؤثرة في رأس إصبعك إذا وضعته عند تلك النقطة.

* 22-7 المذياع والتلفزيون

* 27. (I) ما مدى الأطوال الموجية لكلّ من:
(أ) مذياع FM (88 MHz إلى 108 MHz) ؟
(ب) مذياع AM (535 kHz إلى 1700 kHz)؟

* 28. (I) احسب، بالتقريب، طول الموجة في هاتف محمول تردّده 1.9 GHz.

* 29. (I) قارن 940 على قرص AM بـ 94 على قرص FM. وأيهما له طول موجة أكبر؟ وبأي نسبة أكبر؟

* 30. (I) ما الأطوال الموجية لقناتي TV تبث على 54.0 MHz (القناة 2)، و 806 MHz (قناة 69)؟

* 31. (I) المكثّف المتغيّر في منغّم (tuner) AM مذياع مواسعته 2800 pF عندما يستقبل المذياع نغمة ترددها 550 kHz. كم يجب أن تكون مواسعة المكثف لنغمة 1610 kHz؟

* 32. (I) الدارة المهتزة لمحطة FM ترددها 96.1-MHz معامل الحثّ الذاتيّ (L) لها $1.8\ \mu H$. كم يجب أن تكون سعة المكثف؟

* 33. (II) لدارة توليف FM مذياع مواسع ثابت، وسعته $C = 840\ pF$. يتم التوليف عن طريق تغير المحاثة (L). ما المدى الذي يجب أن تكون عليه L بحيث يتم توليف محطات ترددتها بين 88 MHz، و 108 MHz؟

* 34. (II) يريد هاوٍ صُنْعَ مذياعٍ، يمكن أن يستقبل المدى 14.0 MHz إلى 15.0 MHz. مواسع متغير أقل سعة له 82. pF. (أ) ما القيمة المطلوبة للمحاثة (L)؟ (ب) ما أكبر سعة للمواسع المستعمل؟

* 35. (II) يوجه قمر صناعي إشعاع ميكروويف قدرته 10 kW نحو سطح الأرض، على بعد 550 km، عندما يصطدم الشعاع بالأرض قطره نحو 1500 m. جد قيمة المجال الكهربائيّ rms للشعاع.

* 36. (III). هوائي FM طوله 1.60-m، تم توجيهه موازيا للمجال الكهربائيّ لموجة EM. ما قيمة المجال الكهربائيّ بحيث يُنتج 1.00-mV (rms) بين طرفي الهوائي؟ ما معدّل نقل الطاقة لكلِّ مترٍ مربّع؟

مسائل عامة

37. إذا كان على الشمس أن تختفي أو يحدث تغيّرٌ جذريٌّ فيها، فما الزمن اللازم لنا لندرك ذلك؟

38. ينبعث الضوء من مصباح عادي بصورة قطار من الومضات تدوم كلّ واحدة $10^{-8}\,s$. ما الطول في الفضاء لمثل هذه القطارات؟

39. (أ) كم تستغرق رسالة لتصل من الأرض إلى رائد فضاء على سطح القمر؟ (ب) كم تستغرق رسالة لتصل من الأرض إلى أول رائد فضاء يحط على سطح المِرّيخ بفرض أنّ بعد المريخ $(78 \times 10^6\,km)$.

40. إشارة ضوئية لمذياع من طاقم أبوللو على سطح القمر (الشكل 20-22) موجه إلى حشد عبر مذياع. إذا كنت تقف على بعد 25 m من المذياع، فما مقدار التأخير في الزمن بين لحظة سماعك للرسالة ولحظة انطلاقها من القمر؟

الشكل 22- 20 (مسألة 40)

* **41.** إشعاع ميكروويف كوني يملأ الفضاء كلّه بكثافة طاقة متوسطة $4 \times 10^{-14}\,J/m^3$. (أ) جد قيمة (rms) للمجال الكهربائيّ لهذا الاشعاع. (ب) على أي بعد من مذياع قدرته 10-kW يشع بانتظام في الاتجاهات جميعها ستجد قيمة متماثلة للسابقة؟

* **42.** ما قيمة E_0 و B_o على بعد 2.00 m من مصدر ضوئي 95-W؟ افرض أنّ المصدر يشع ترددًا منفردًا في الاتجاهات جميعها.

* **43.** احسب، بالتقريب، قيمة (rms) للمجال الكهربائيّ لضوء الشمس الذي يصطدم بالمِرّيخ مع العلم أنّ الأرض تستقبل $1350\ W/m^2$، وأنّ المِرّيخ على بعد 1.52 مرة قدر بُعد الأرض عن الشمس.

* **44.** عند لحظة معينة، لوحظ أنّ موجة EM متحركة يكون مجالها المغناطيسيّ الأقصى نحو الغرب، وأنّ مجالها الكهربائيّ الأقصى نحو الجنوب. بأي اتجاه تتحرك الموجة؟ إذا كان معدل تدفق الطاقة $560\ W/m^2$، فما قيمة المجالين القصوى؟

* **45.** احسب، بالتقريب، الطول الذي يجب أن يكون عليه هوائي AM إذا كان: (أ) $\frac{1}{2}\lambda$ (ب) $\frac{1}{4}\lambda$. إشعاع AM تقريبًا 1 MHz (530 kHz إلى 1.7 MHz).

* **46.** ما مقدار (rms) لقوّةٍ دافعةٍ كهربائيةٍ ستتولّد في هوائيٍّ يتكوّن من 380 لفّةً دائريّةً من سلك قطره 2.2 cm إذا كان تردّد موجة EM هو 810 kHz، وينقل طاقة بمعدّل متوسّط $1.0 \times 10^{-4}\,W/m^2$ عند الهوائي؟ [مساعدة: يمكنك استعمال (المعادلة 21 - 5) للمولّد، لأنّه يمكن تطبيقها على مراقب يتحرّك مع الملفّ بحيث يهتزّ المجال المغناطيسيّ بتردّد $f = \omega/2\pi$]

* **47.** الشدّة المتوسّطة لإشارة محطّة تلفزيون هي $1.0 \times 10^{-13}\,W/m^2$ عند وصولها إلى هوائي قمر صناعي قطره 33-cm. (أ) احسب الطاقة الكلية التي يستقبلها الهوائي خلال ستّ ساعات من مشاهدة برامج هذه المحطة التلفزيونية. (ب) ما مقدار اتساع كلّ من المجالين E، و B لموجة EM هذه؟

* **48.** على بعد 15 km من هوائي محطّة بثٍّ إذاعي، يكون اتساع المجال الكهربائيّ 0.12 V/m. ما معدل متوسط القدرة الناتجة من محطة المذياع؟

* **49.** يتكوّن المكثّف المتغيّر في دارة توليف مذياع من ستّ صفائح تتداخل مع ستّ صفائح أخرى بالتبادل (الشكل 22 - 21) البعد بين كلّ صفيحتين متجاورتين هو 1.1 mm في الهواء. مجموعة من الصفائح يمكن تحريكها بحيث تتغير المساحة المشتركة من $1.0\ cm^2$ إلى $9.0\ cm^2$. (أ) هل هذه المكثفات متصلة على التوالي أم التوازي؟ (ب) احسب مدى قيمة السعة للمكثف. (ج) ما قيمة المحاثة اللازمة إذا كان المذياع سيستقبل محطات AM من 550 kHz إلى 1600 kHz؟

الشكل 22- 21 (مسألة 49)

* **50.** إذا كان يسمح لمحطّةِ مذياع أن تبثَّ بمعدّل قدرة لا يزيد على 25 kW. وإذا كان اتساع المجال الكهربائيّ 0.020 V/m مقبولًا للاستقبال، فاحسب بالتقريب البُعدَ الذي يمكن أن تكون عليه لسماع هذه الإذاعة.

* **51.** يطلق مصدرٌ ضوئيٌّ نقطيٌّ طاقةً ضوئيّةً منتظمةً في الاتجاهات جميعها بمعدّل قدرة P_0، وبتردد منفرد f. بيّن أنّ أكبر قيمة للمجال الكهربائيّ للموجة يعطى بالعلاقة

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 c P_0}{2\pi r^2}}$$

* **52.** افرض أنّ محطّة إذاعة تبثّ موجات EM 50 kw بانتظام في الاتجاهات جميعها. (أ) ما مقدار الطاقة في الثانية التي تعبر مساحة $1.0\text{-}m^2$ على بعد 100 m من هوائي الإرسال؟ (ب) ما مقدار (rms) للمجال الكهربائيّ عند هذه النقطة بفرض أنّ المحطة تعمل بكامل قدرتها؟ (ج) ما مقدار الجهد الحثي المتولد في هوائي سيارة طوله 1.0 m عمودي عند هذه المسافة؟

* **53.** أعد حلّ المسألة 52 عندما يكون البعد 100 km من المحطة.

* **54.** ما أقصى مستوى للقدرة لمحطة الإذاعة في (المسألة 52) لتجنب انهيار الهواء الكهربائيّ على بعد 1.0 m من الهوائي؟ افرض أن الهوائي مصدر نقطي؟ الهواء ينهار كهربائيًّا عند مجال كهربائيّ يقدّر بنحو $3 \times 10^6\,V/m$. [مساعدة: انظر المسألة 51].

إجابات التمارين

أ: (أ) 3.8×10^6 Hz (ب) 5.5×10^{18} Hz

ب: 45 cm

ج: 3 ساعات