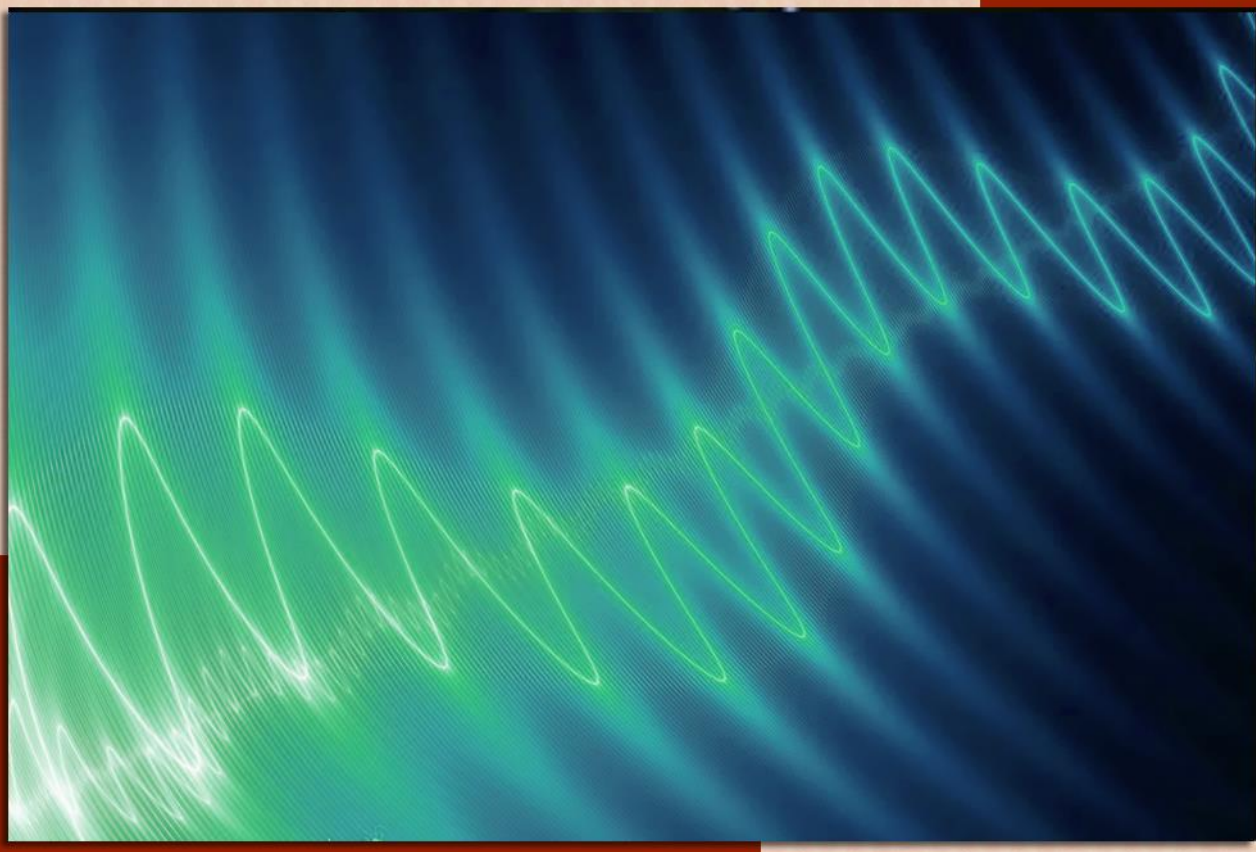
من اصدارات المركز العلمي للترجمة

الأمواج الكهرومغناطيسية

الفصل السادس من كتاب المغناطيسية والتيار المتردد



إعداد وترجمة

الدكتور حازم فلاح سكيك

www.trgma.com

إهداء إلى أبنائي

وطلابي

ومحبي الفيزياء

دكتور حازم فلاح سكيك

www.hazemsakeek.net

مقدمة

كان في قديم الزمان يعتقد العلماء ان الكهربية والمغناطيسية قوى منفصلة عن بعضها البعض، حتى جاء العالم الاسكتلندي الفيزيائي جيمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell بنظرية وحدت القوة الكهربية والمغناطيسية في نظرية سميت بالنظرية الكهرومغناطيسية. تتعامل النظرية الكهرومغناطيسية مع كيف تتفاعل الجسيمات المشحونة كهربائيا مع بعضها البعض ومع المجال المغناطيسي.

هناك اربعة انواع من التفاعلات الكهرومغناطيسية الاساسية وهي على النحو التالي:

(١) قوة التجاذب أو التنافر بين الشحنات الكهربائية تتناسب عكسيا مع المسافة بينها.

(٢) تأتي الاقطاب المغناطيسية في ازواج تتجاذب وتتنافر مع بعضها البعض كما تفعل الشحنات الكهربائية.

(٣) ينتج التيار الكهربي المار في سلك مجالا مغناطيسيا اتجاها يعتمد على اتجاه التيار الكهربي.

(٤) المجال الكهربي المتغير يولد مجالا مغناطيسيا والعكس صحيح.

طور العالم ماكسويل مجموعة من الصيغ الرياضية تعرف باسم معادلات ماكسويل Maxwell's equations لوصف هذه الظواهر.

في هذا الفصل من كتاب المغناطيسية والتيار المتردد سوف ننقوم بشرح الامواج الكهرورمغناطيسية. هي شكل من اشكال الطاقة تحيط بنا من كل جانب وتأخذ اشاكل مختلفة مثل امواج الراديو والميكروويف واشعة اكس واشعة جاما .كما ان اشعة الشمس هي شكل من طاقة الاشعة الكهرومغناطيسية لكنها ضوء مرئي وهي تشكل جزء بسيط من الطيف الكهرومغناطيسي الكلي الذي يحتوي على مدى واسع من الاطوال الموجية.

هذه ترجمة للفصل الرابع والثلاثون من كتاب الفيزياء للعلوم والهندسة مع الفيزياء الحديثة Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics للمؤلف ريموند سيروي Raymond A. Serway وتأتي هذه الترجمة ضمن نشاطات المركز العلمي للترجمة في نشر العلوم باللغة العربية وتبسيطها.

أتمنى ان يكون هذا العمل في خدمة أبنائنا الطلبة في مختلف الكليات العلمية ليكون لهم مرجعا رئيسيا دراسة الفيزياء.

مع خالص تحياتي

د. حازم فلاح سكيك

جامعة الأزهر – غزة

غزة في 25-6-2020

www.hazemsakeek.net

المغناطيسية والتيار المتردد

Magnetism and Alternating Current

الفصل السادس: الأمواج الكهرومغناطيسية

Electromagnetic Waves

ترجمة وإعداد
الدكتور حازم فلاح سكيك

الأمواج الكهرومغناطيسية

Electromagnetic Waves

7	Displacement Current and the General Form of Ampère's Law	1.6 تيار الازاحة والصيغة العامة لقانون أوم
11	Maxwell's Equations and Hertz's Discoveries	2.6 معادلات ماكسويل واكتشافات هيرتز
16	Plane Electromagnetic Waves	3.6 أمواج كهرومغناطيسية مستوية
23	Energy Carried by Electromagnetic Waves	4.6 الطاقة المحمولة بواسطة الأمواج الكهرومغناطيسية
28	Momentum and Radiation Pressure	5.6 كمية الحركة وضغط الاشعاع
31	Production of Electromagnetic Waves by an Antenna	6.6 انتاج أمواج كهرومغناطيسية بواسطة انتينا
34	The Spectrum of Electromagnetic Waves	7.6 طيف الأمواج الكهرومغناطيسية

الأمواج التي نعرفها مثل الأمواج الصوتية وأمواج الماء والأمواج المنتشرة في حبل هي أمواج ميكانيكية وتتطلب وجود وسط لتنتقل فيه. في هذا الفصل سوف نركز على دراسة خواص الأمواج الكهرومغناطيسية والتي تختلف عن الأمواج الميكانيكية حيث انها تنتشر في الفراغ.

سوف نبدأ من خلال مساهمة العالم ماكسويل في تعديل قانون أمبير والذي قمنا بدراسته في الفصل الثاني من هذا الكتاب. ومن ثم سوف ندرس معادلات ماكسويل والتي تشكل الاساس النظري لكل الظواهر الكهرومغناطيسية. تتوقع هذه المعادلات بوجود أمواج كهرومغناطيسية تنتشر خلال الفراغ بسرعة الضوء c. لقد أكد العالم هيرتز توقعات ماكسويل عندما قام بتوليد ورصد أمواج كهرومغناطيسية في العام 1887. لقد أدى هذا الاكتشاف إلى الكثير من انظمة الاتصالات العملية مثل الراديو والتلفزيون وأجهزة الجوال والاتصال اللاسلكي بالانترنت والالكترونيات الضوئية.

فيما بعد سوف نتعلم كيف ان هذه الأمواج الكهرومغناطيسية تتولد من خلال الشحنات الكهربية المتذبذبة. تشع الأمواج من شحنات متذبذبة يمكن رصدها على مسافات بعيدة. علاوة على انه بسبب ان الأمواج الكهرومغناطيسية تحمل طاقة وكمية حركة فانها تؤثر بضغط على السطح. نستنتج من هذا الفصل ان الترددات العديدة التي تغطيها الأمواج الكهرومغناطيسية.

هذه الصورة لسديم السرطان التي التقطت بواسطة الضوء المرئي تبين الوان مختلفة، وكل لون يمثل طول موجي مختلف.

1.6 تيار الازاحة والصيغة العامة لقانون أمبير
The Displacement Current and the General Form of Ampère's Law

استخدمنا قانون أمبير في الفصل الثاني (المعادلة 13.2) لتحليل المجالات المغناطيسية المتولدة عن التيار الكهربي

$$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 I$$

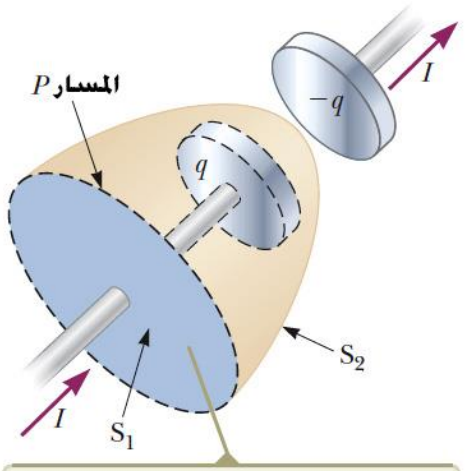
يكون التكامل الخطي في هذه المعادلة على اي مسار مغلق يمر من خلاله تيار التوصيل، حيث ان تيار التوصيل يعرف من خلال المعادلة $I = dq/dt$. (في هذا الفصل سوف نستخدم تيار التوصيل *conduction current* للاشارة إلى التيار الذي ينتقل من خلال حاملات الشحنة في السلك لنميزه عن نوع جديد من التيار سوف نتحدث عنه بعد قليل). الان سوف نبين ان قانون أمبير في هذه الصيغة يكون متحققا فقط اذا وجدت مجالات كهربائية ثابتة في الزمن. تعرف جيمس كلارك ماكسويل على هذا القصور وقام بتعديل قانون أمبير ليشمل ايضا المجالات الكهربية المتغير في الزمن.

جيمس كلارك ماكسويل James Clerk Maxwell

فيزيائي نظري اسكتلندي (1831-1879)

طور العالم ماكسويل النظرية الكهرومغناطيسية للضوء والنظرية الحركية للغازات. التفسير الناجح لماكسويل للمجال الكهرومغناطيسي نتج عنه معادلات المجال والتي تعرف باسمه.

اعتبر مكثف مشحون كما هو موضح في الشكل 1.6. عندما يتواجد تيار التوصيل، فان الشحنة على اللوح الموجب تتغير، لكن لا يوجد تيار توصيل في الفجوة بين اللوحين لعدم وجود حاملات شحنة في الفجوة. اعتبر الآن السطحين S_1 وS_2 في الشكل 1.6، مرتبطين بواسطة نفس المسار P. ينص قانون أمبير على ان $\oint \vec{B}.d\vec{s}$ حول هذا المسار يجب ان يساوي $\mu_0 I$، حيث ان I هو مقدار التيار الكلي خلال اي سطح محدد بهذا المسار P.



تيار التوصيل I في السلك يمر فقط خلال S_1، وهذا يؤدي إلى تناقض في قانون امبير والذي تم حله من خلال افتراض تيار الازاحة خلال S_2.

الشكل 1.6 سطحين S_1 وS_2 بالقرب من لوح مكثف مرتبطين بنفس المسار P.

عند اعتبار المسار P هو حد السطح S_1 فان $\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 I$ لان تيار التوصيل I يمر من خلال S_1. عند اعتبار المسار P حدا للسطح S_2 فان $\oint \vec{B}.d\vec{s} = 0$ لعدم مرور تيار توصيل من خلال S_2. لهذا يوجد لدينا هنا حالة تعارض تنتج من عدم الاستمرارية للتيار! قام العالم ماكسويل بحل هذه المشكلة من خلال افتراض حد اضافي على الجانب الأيمن من قانون أمبير ، والذي يشتمل على معامل يعرف بتيار الازاحة *dispalcement current* ويرمز له بالرمز I_d ويعرف على النحو التالي:

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \qquad (6.1)$$

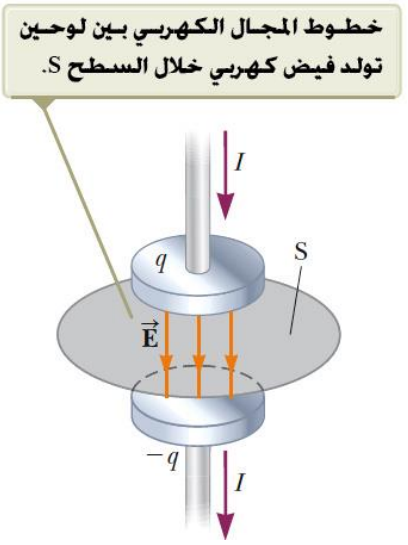
حيث ان ε_0 هو ثابت السماحية للفراغ و$\Phi_E = \int \vec{E}.d\vec{A}$ هو الفيض الكهربي خلال السطح المحدد بمسار التكامل.

عند شحن المكثف أو تفريغه، فان التغير في المجال الكهربي بين اللوحين يمكن اعتباره مكافئ للتيار الذي يعد كاستمرار لتوصيل التيار في السلك. عند اضافة تيار الازاحة

المعطى بالمعادلة 1.6 إلى تيار التوصيل على الجانب الايمن من قانون أمبير ، فان الصعوبة الممثلة في الشكل 1.6 تصبح محلولة. وهنا لا يهم اختيار اي سطح محدد بالمسار P ، سواء كان تيار التوصيل أو تيار الازاحة هو الذي يمر من خلاله. مع هذا الحد الجديد I_d، يمكننا ان نعبر عن الصيغة الجديدة لقانون أمبير والذي يعرف في بعض الاحيان بقانون أمبير – ماكسويل *Ampere-Maxwell law* على النحو التالي:

$$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0(I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \qquad (6.2)$$

يمكننا ان نفهم معنى هذه الصيغة بالاشارة إلى الشكل 2.6. الفيض الكهربي خلال S هو $\Phi_E = \int \vec{E}.d\vec{A} = EA$ حيث ان A هي مساحة لوحي المكثف وE هي مقدار المجال الكهربي المنتظم بين لوحي المكثف. اذا كانت q هي الشحنة على لوحي المكثف عند اي لحظة، فان $E = q/(\varepsilon_0 A)$. لهذا فان الفيض الكهربي خلال S هو



الشكل 2.6 عندما يوجد تيار توصيل في الاسلاك فان المجال الكهربي المتغير $\vec{E}$ يوجد بين لوحي المكثف.

$$\Phi_E = EA = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

وعليه فان تيار الازاحة خلال السطح S يكون على النحو التالي:

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{dq}{dt} \qquad (6.3)$$

هذا يعني ان تيار الازاحة I_d خلال السطح S يساوي بدقة تيار التوصيل في السلك المتصل مع المكثف!

من خلال اعتبار السطح S، يمكننا ان نعرف تيار الازاحة على انه مصدر المجال المغناطيسي على حدود السطح. يمتلك تيار الازاحة اساسه الفيزيائي في المجال الكهربي

المتغير مع الزمن. النقطة الأساسية لهذه الشكلية هو ان المجالات المغناطيسية تتولد بواسطة كلا من تيارات التوصيل والمجالات الكهربية المتغيرة في الزمن. ان هذه النتيجة كانت مثال واضح للعمل النظري الذي قام به العالم ماكسويل، والتي ساهمت في التقدم الكبير في فهم الكهرومغناطيسية.

سؤال للتفكير 1.6

في دائرة مكثف ومقاومة، حيث يبدأ المكثف بالتفريغ. (i) خلال عملية التفريغ، في منطقة من الفراغ بين لوحي المكثف هل يكسون هناك (a) تيار توصيل ولكن بدون تيار ازاحة، (b) تيار ازاحة ولكن بدون تيار توصيل، (c) تيار توصيل وتيار ازاحة، (d) لا يوجد تيار من هذا النوع؟ (ii) في نفس المنطقة من الفراغ هي يكون هناك (a) مجال كهربي ولكن بدون مجال مغناطيسي (b) مجال مغناطيسي ولكن بدون مجال كهربي، (c) مجال كهربي ومجال مغناطيسي، (d) لا يوجد مجال من هذا النوع؟

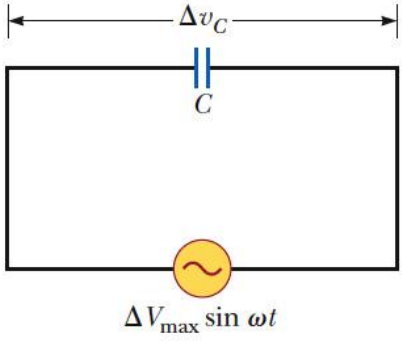
مثال 1.6 تيار الازاحة في المكثف Displacement Current in a Capacitor

تم تطبيق جهد متغير بدالة جيبية على لوحي مكثف كما هو موضح في الشكل 3.6. سعة المكثف $C = 8.00\ \mu F$، والتردد للجهد المطبق هو $f = 3.00\ kHz$، وسعة الجهد هي $\Delta V_{max} = 30.0\ V$. أوجد تيار الازاحة في المكثف.

الحل:

تصور المسألة: يمثل الشكل 3.6 الدائرة التي تمثل هذه الحالة. يوضح الشكل 2.6 صورة مكبرة للمكثف والمجال الكهربي بين اللوحين.

تصنيف المسألة: سوف نقوم بحساب المطلوب باستخدام المعادلات التي تم عرضها في هذا



الشكل 3.6

الفصل، لذا فاننا نصنف هذا المثال على انه مسألة تعويض مباشر.

نحسب التردد الزاوي للمصدر على النحو التالي:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(3.00 \times 10^3 \text{Hz}) = 1.88 \times 10^4 \text{s}^{-1}$$

استخدم المعادلة 20.5 لايجاد فرق الجهد على طرفي المكثف كدالة في الزمن

$$\Delta v_C = \Delta V_{max} \sin \omega t = 30.0 \sin(1.88 \times 10^4\, t)$$

استخدم معادلة 3.6 لايجاد تيار الازاحة كدالة في الزمن. لاحظ ان الشحنة على المكثف هي $q = C\,\Delta v_C$:

$$I_d = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(C\Delta v_C) = C\frac{d}{dt}(\Delta v_C)$$
$$= (8.00 \times 10^{-6}\text{F})\frac{d}{dt}[30.0 \sin(1.88 \times 10^4\, t)]$$
$$= 4.52 \cos(1.88 \times 10^4\, t)$$

2.6 معادلات ماكسويل واكتشافات هيرتز
Maxwell's Equations and Hertz's Discoveries

سوف نعرض الان اربعة معادلات تعتبر هذه المعادلات هي الاساس لكل الظواهر الكهربية والمغناطيسية (الكهرومغناطيسية). لقد طور هذه المعادلات العالم ماكسويل لتكون اساس كافة الظواهر الكهرومغناطيسية ومثلما تعتبر قوانين نيوتن الاساس للظواهر الميكانيكية فان معادلات ماكسويل تعبر الأساس لكافة الظواهر الكهرومغناطيسية. تعد نظرية ماكسويل في الحقيقة اكثر بكثير مما توقعها العالم ماكسويل شخصيا لانها جاءت متفقة مع النظرية النسبية الخاصة لاينشتين التي طرحها العالم اينشتين في العام 1905.

تمثل معادلات ماكسويل قوانين الكهربية والمغناطيسية ولكن لها نتائج مهمة إضافية، وللتبسيط سوف نعرض معادلات ماكسويل في حالة الفراغ، أي في حالة غياب مادة عازلة أو مادة مغناطيسية. المعادلات الاربعة هي على النحو التالي:

قانون جاوس $\oint \vec{E}.d\vec{A} = \frac{q}{\varepsilon_0}$ (6.4)

قانون جاوس في المغناطيسية $\oint \vec{B}.d\vec{A} = 0$ (6.5)

قانون فارادي $\oint \vec{E}.d\vec{s} = -\frac{d\Phi_E}{dt}$ (6.6)

قانون أمبير –ماكسويل $\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 I + \varepsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$ (6.7)

المعادلة 4.6 هي قانون جاوس Gauss's law: الفيض الكهربائي الكلي خلال اي سطح مغلق يساوي الشحنة الكلية داخل سطح مقسوما على ε_0. هذا القانون يربط المجال الكهربي مع توزيع الشحنة التي انشأت هذا المجال.

المعادلة 5.6 هو قانون جاوس في المغناطيسية، وينص على ان الفيض المغناطيسي الكلي خلال سطح مغلق يساوي صفر. هذا يعني ان عدد خطوط المجال المغناطيسي التي تدخل حجم مغلق يجب ان تساوي عدد الخطوط التي تترك هذا الحجم، وهذا يعني ان خطوط المجال المغناطيسي لا يمكن ان تبدأ أو تنتهي عند اي نقطة. اذا حدث وان بدأ المجال أو انتهى من عند نقطة فان هذا يعني وجود اقطاب مغناطيسية احادية عند هذه النقطة. ان الحصول على اقطاب مغناطيسية احادية لم يتم اكتشافها في الطبيعة وهذا دليل على صحة المعادلة 5.6.

المعادلة 6.6 هي قانون فارادي للحث، والتي تصف انتاج مجال كهربي من التغير في الفيض المغناطيسي. ينص هذا القانون على ان القوة الدافعة الكهربية (emf)، والذي هو عبارة عن التكامل الخطي للمجال الكهربي حول مسار مغلق، يساوي معدل التغير في الفيض المغناطيسي خلال اي سطح يحيط به هذا المسار. من احد استنتاجات قانون فارادي هو ان التيار الكهربي يتولد بالحث في حلقة موصلة موضوعة في مجال مغناطيسي متغير مع الزمن.

المعادلة 7.5 هو قانون أمبير –ماكسويل، وهي تصف انتاج مجال مغناطيسي من خلال التغير في المجال الكهربي والتيار الكهربي: التكامل الخطي للمجال المغناطيسي حول اي مسار مغلق هو عبارة عن حاصل جمع μ_0 مضروبا في التيار الكلي خلال هذا المسار مع

$\varepsilon_0\mu_0$ مضروبا في معدل التغير في الفيض الكهربي خلال اي سطح محاطا بهذا المسار.

بمجرد معرفة المجال الكهربي والمجال المغناطيسي عند نقطة محددة في الفراغ، فان القوة المؤثرة على جسم مشحون q يمكن ان تحسب من المعادلة التالية:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \qquad (6.8)$$

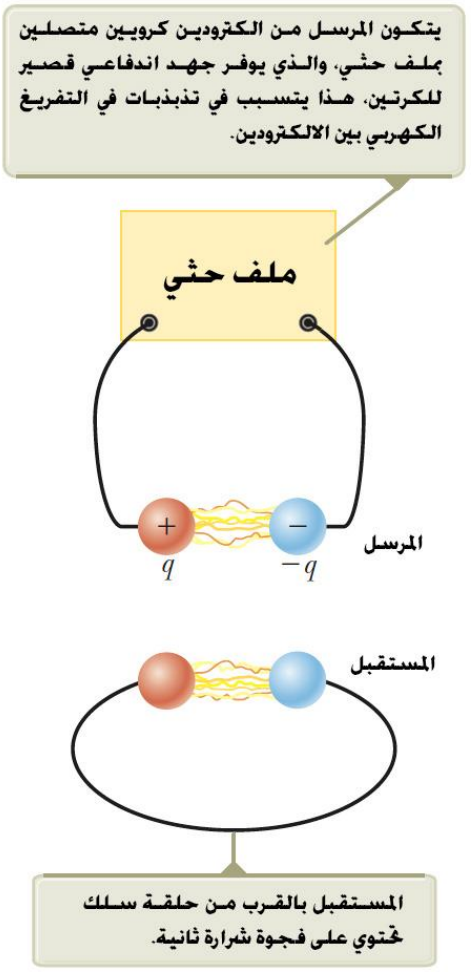
تعرف هذه العلاقة بقانون قوة لورنتز Lorentz force law (انظر المعادلة 6.1) معادلات ماكسويل مع قانون القوة يصفوا بالكامل كل التفاعلات الكهرومغناطيسية الكلاسيكية في الفراغ.

لاحظ التماثل في معادلات ماكسويل. المعادلتين 4.6 و5.6 متماثلتين فيما عدا غياب أحد الاقطاب المغناطيسية الاحادية في المعادلة 5.6. كما ان المعادلتين 6.6 و7.6 متماثلتين في التكامل الخطي لـ $\vec{E}$ و$\vec{B}$ حول مسار مغلق وارتباطهما مع التغير في الفيض المغناطيسي والفيض الكهربي على التوالي. لا تعد معادلات ماكسويل هامة للكهرومغناطيسية فقط ولكن لكل العلوم.

في الجزء التالي سوف نبين ان المعادلتين 6.6 و7.6 يمكن دمجهما للحصول على معادلة موجية لكلا من المجال الكهربي والمجال المغناطيسي. في الفراغ حيث يكون $q = 0$ و $I = 0$ فان الحل لهاتين المعادلتين يبين ان السرعة التي تنطلق بها الموجة الكهرومغناطيسية تساوي سرعة الضوء. هذه النتيجة دفعت العالم ماكسويل ليتوقع ان أمواج الضوء هي نوع من الاشعاع الكهرومغناطيسي.

اجرى العالم هيرتز العديد من التجارب التي اكدت توقعات ماكسويل. لقد كانت التجهيزات العملية التي استخدمها هيرتز لتوليد ورصد أمواج كهرومغناطيسية موضحة في الشكل 4.6. ملف حثي متصل مع باعث مصنوع من الكترودين كرويين يفصلهما فجوة ضيقة. يوفر الملف جهد اندفاعي قصير للالكترود، مما يجعل احدهما موجب والاخر سالب.

تتولد شرارة بين الكرتين عندما يكون المجال الكهربي بالقرب من اي من الالكترودين يفوق شدة العزل للهواء وهي القيمة 3×10^6 V/m، وتتسارع الالكترونات الحرة في المجال الكهربي القوي وتكتسب طاقة كافية لتأين اي من الجزيئات التي تصطدم بها. يوفر هذا التأين المزيد من الالكترونات، والتي يمكنها ان تتسارع وتتسبب في المزيد من التأيين. مع تأين الهواء في الفجوة، يصبح الهواء موصل جيد للكهرباء والتفريغ الكهربي بين الالكترودين يكون على شكل تذبذبي عند تردد عالي جدا. من وجهة نظر الدائرة الكهربية فان هذه التجهيزات العملية تكافئ دائرة مكثف وملف حثي بحيث ان معامل الحث متعلق بالملف والسعة بسبب الالكترودين الكرويين.



الشكل 4.6 مخطط لادوات هيرتز لتوليد وكشف الأمواج الكهرومغناطيسية.

حيث ان L وC في تجربة هيرتز صغيرتين فان تردد التذبذب يكون عالي في حدود 100 MHz حيث ان $\omega = 1/\sqrt{LC}$ (انظر المعادلة 22.4) لدائرة المكثف والملف الحثي. تشع أمواج كهرومغناطيسية عند هذا التردد كنتيجة لتذبذب (وبالتالي التسارع) الشحنات الحرة في دائرة الارسال. تمكن هيرتز من رصد هذه الأمواج باستخدام حلقة واحدة من سلك مع فجوة شرارة خاصة بها وهو المستقبل. تثبت حلقة المستقبل على بعد عدة امتار من المرسل ويمتلك المستقبل معامل حث وسعة وتردد طبيعي للتذبذب. في

تجربة هيرتز تولدت شرارة في الفجوة بين الكترودي الاستقبال عندما يكون تردد المستقبل مضبوطا ليتطابق مع تردد المرسل. بهذه الطريقة تمكن هيرتز من اثبات ان التيار المتذبذب المستحث في المستقبل قد نتج عن أمواج كهرومغناطيسية صدرت من المرسل. تعد تجربة هيرتز مناظرة لظاهرة ميكانيكية متمثلة في اهتزاز شوكة رنانة كاستجابة لاهتزازات صوتية من شوكة رنانة اخرى مماثلة للأولى.

بالاضافة إلى هذا فان هيرتز قد وضح من خلال سلسلة من التجارب بان الاشعاع الناتج من جهاز فجوة الشرارة يظهر خواص التداخل الموجي والحيود والانعكاس والانكسار والاستقطاب، وهذه كلها هي خواص الضوء ايضا. لهذا اصبح من المؤكد ان أمواج الراديو التي نتجت عن تجربة هيرتز لها نفس الخواص أمواج الضوء وتختلف فقط في التردد والطول الموجي. ربما تكون اكثر تجربة مقنعة هي قياس سرعة هذا الاشعاع. لقد تم قياس سرعة الاشعاع عن طريق انعكاس أمواج ذات تردد معروف على صفحية معدنية وتكون أمواج موقوفة يمكن تحديد نقاط العقد لها. ان قياس المسافة بين نقاط العقد للموجة الموقوفة تمكننا من تحديد الطول الموجي λ. باستخدام العلاقة $v = \lambda f$، تمكن هيرتز من تحديد قيمة v وكانت قريبة جدا من 3×10^8 m/s، وهي سرعة الضوء c.

هنريتش رودلف هرتز Heinrich Rudolf Hertz

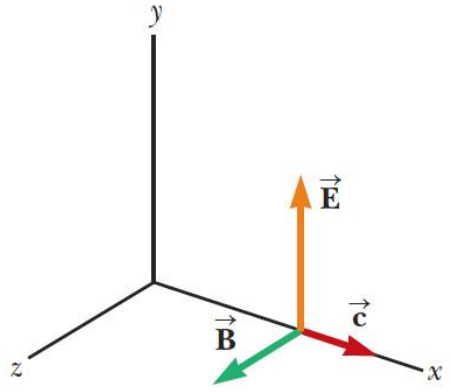
فيزيائي الماني (1857-1894)

أثبت بتجاربه وجود الأمواج الراديوية وبين أن خصائصها شبيهة بخصائص الأمواج الضوئية .وقد كان لتجاربه فضل كبير في اختراع التلغراف اللاسلكي. وقد سميت وحدة التردد بالهيرتز تمجيدا لأعماله والهيرتز يساوي اهتزازة كاملة أو دورة لكل ثانية.

3.6 أمواج كهرومغناطيسية مستوية Plane Electromagnetic Waves

يمكن استنتاج خواص الأمواج الكهرومغناطيسية من معادلات ماكسويل. ان احد الطرق المتبعة للحصول على هذه الخواص هو حل المعادلة التفاضلية من الرتبة الثانية الناتجة عن معادلتي ماكسويل الثالثة والرابعة. ان المعاجلة الرياضية المعقدة من هذا النوع هي خارج نطاق هذا الكتاب. لهذا السبب سوف نقوم بالتحايل على هذه المشكلة، دعنا نفترض متجه المجال الكهربي ومتجه المجال المغناطيسي في الموجة الكهرومغناطيسية تمتلك سلوك مكان وزمن محدد ويتوافق مع معادلات ماكسويل.

لفهم توقعات الأمواج الكهرومغناطيسية بشكل اكثر دقة، دعنا نركز اهتمامنا على الموجة الكهرومغناطيسية التي تتحرك في اتجاه محور x وهو اتجاه انتشار الموجة. لهذه الموجة يكون المجال الكهربي $\vec{E}$ في اتجاه محور y والمجال المغناطيسي $\vec{B}$ في اتجاه محور z كما هو موضح في الشكل 5.6. مثل هذه الأمواج التي يكون فيها المجالين الكهربي والمغناطيسي محددين في اتجاه موازي لمحورين متعاميدن، تسمى بالأمواج المستقطبة خطيا linearly polaraized waves. علاوة على ذلك دعنا نفترض مقداري المجال الكهربي E والمغناطيسي B يعتمدان على x وt فقط، أي انهما لا يعتمدان على المحورين y أو z.



الشكل 5.6 المجال الكهربي والمجال المغناطيسي لموجة كهرومغناطيسية تتحرك بسرعة c في اتجاه محور x الموجب. متجهات المجال موضحة عند لحظة من الزمن وعند موضع محدد في الفراغ. هذين المجالين يعتمدان على x وt.

دعنا ايضا نتخيل ان مصدر الأمواج الكهرومغناطيسية عبارة عن موجة تشع من اي موضع في مستوى yz (ليس فقط من نقطة الاصل كما هو مقترح في الشكل 5.6) وتنتشر الموجة في اتجاه محور x وكل هذه الأمواج تنبعث ولها نفس الطور. اذا قمنا بتعريف الشعاع ray على انه الخط الذي تنتشر على امتداده الموجة، فان كل الاشعة لهذه الأمواج سوف تكون متوازية. ان كل مجموعة

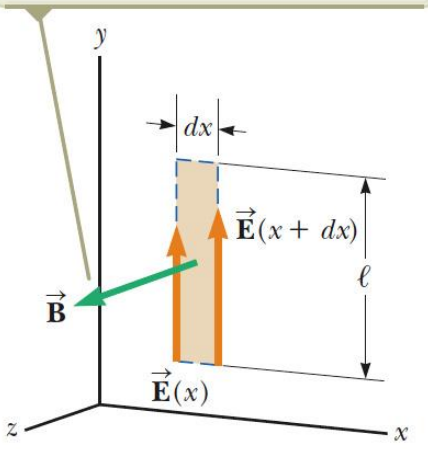
الأمواج هذه تعرف بالموجة المستوية plane wave. السطح الذي يصل نقاط لها نفس الطور لكل الموجات تشكل مستوى وتعرف باسم جبهة الموجة wave front. للمقارنة فان مصدر اشعاع نقطي يرسل موجات في كل الاتجاهات القطرية. السطح الذي يصل نقاط لها نفس الطور في هذه الحالة يكون له شكل كروي، لذلك فان هذه الموجة تعرف باسم موجة كروية spherical wave.

للحصول على توقعات الأمواج الكهرومغناطيسية سوف نبدأ بقانون فارادي والمتمثل في المعادلة 6.6 على النحو التالي:

$$\oint \vec{E}.d\vec{s} = -\frac{d\Phi_E}{dt}$$

دعنا مرة اخرى نفترض ان الموجة الكهرومغناطيسية تتحرك في اتجاه محور x، ويكون المجال الكهربي $\vec{E}$ في اتجاه محور y موجب والمجال المغناطيسي $\vec{B}$ في اتجاه محور z الموجب.

طبقا للمعادلة 11.6، فان هذا التغير المكاني في المجال الكهربي يولد مجالا مغناطيسيا متغيرا مع الزمن على امتداد محور z.



الشكل 6.6 عند لحظة ما عندما تتحرك موجة مستوية في اتجاه x الموجب تمر من خلال مسار مستطيل عرضه dx يقع في المستوى xy، المجال الكهربي في اتجاه y يتغير من $\vec{E}$ إلى $\vec{E}(x+dx)$

اعتبر مستطيل عرضه dx وارتفاعه l يقع في المستوى xy كما هو موضح في الشكل 6.6. لتطبيق المعادلة 6.6 دعنا أولا نحسب مقدار التكامل الخطي لـ $\vec{E}.d\vec{s}$ حول هذا المستطيل في اتجاه عكس عقارب الساعة عند لحظة من الزمن تمر فيها الموجة من خلال المستطيل. المشاركتين من اعلى واسفل المستطيل تساوي صفر لان $\vec{E}$ يكون عموديا على $d\vec{s}$ لهذين المسارين. يمكننا ان نعبر عن المجال الكهربي على الجانب الايمن من المستطيل على

النحو التالي:

$$E(x+dx) \approx E(x) + \left.\frac{dE}{dx}\right|_{t\ constant} dx = E(x) + \frac{\partial E}{\partial x} dx$$

حيث ان $E(x)$ هو المجال على الجانب الايسر من المستطيل عند هذه اللحظة. لهذا فان التكامل الخطي على كل المستطيل يكون مساويا تقريبا لـ

$$\oint \vec{E}.d\vec{s} = [E(x+dx)]l - [E(x)]l \approx l\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) dx \qquad (6.9)$$

بما ان المجال المغناطيسي يكون في اتجاه محور z، فان الفيض المغناطيسي خلال مستطيل مساحته $l\ dx$ يكون تقريبا $\Phi_B = Bldx$ (بافتراض ان dx صغيرة جدا بالمقارنة مع الطول الموجيل للموجة). باخذ مشتقة الزمن للفيض المغناطيسي نحصل على ما يلي:

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = ldx\left.\frac{dB}{dt}\right|_{x\ constant} = ldx\frac{\partial B}{\partial t} \qquad (6.10)$$

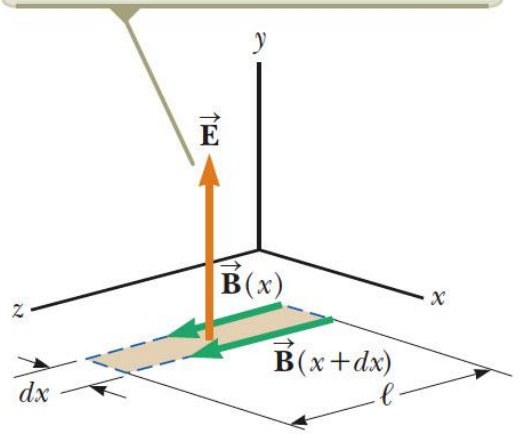
بالتعويض من المعادلة 9.6 والمعادلة 10.6 في المعادلة 6.6

$$l\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right) dx = -ldx\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \qquad (6.11)$$

بطريقة مماثلة يمكننا اشتقاق معادلة ثانية باستخدام معادلة ماكسويل الرابعة (المعادلة 7.6). في هذه الحالة نحسب التكامل الخطي لـ $\vec{B}.d\vec{s}$ حول مستطيل يقع في المستوى xz وعرضه dx وطوله l كما هو موضح في الشكل 7.6. لاحظ ان مقدار المجال المغناطيسي يتغير من $B(x)$ إلى $B(x+dx)$ على العرض dx واتجاه

طبقا للمعادلة 14.6، فان هذا التغير المكاني في المجال المغناطيسي يولد مجالا كهربيا متغيرا مع الزمن على امتداد محور y.



الشكل 7.6 عند لحظة ما عندما تمر الموجة المستوية خلال مسار مستطيل عرضه dx يقع على المستوى xz، والمجال المغناطيسي في اتجاه محور z يتغير من $\vec{B}(x)$ إلى $\vec{B}(x+dx)$.

التكامل الخطي يكون في اتجاه عكس عقارب الساعة عندما ينظر له من الاعلى في الشكل 7.6، ولقد وجد ان التكامل الخطي على هذا المستطيل يساوي تقريبا

$$\oint \vec{\boldsymbol{B}}.d\vec{\boldsymbol{s}} = [B(x)]l - [B(x+dx)]l \approx -l\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)dx \qquad (6.12)$$

الفيض الكهربي خلال المستطيل هو $\Phi_E = Eldx$ والذي عندما نفاضله بالنسبة للزمن نحصل على

$$\frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = l\,dx\frac{\partial E}{\partial t} \qquad (6.13)$$

بالتعويض من المعادلة 12.6 والمعادلة 13.6 في المعادلة 7.6 نحصل على

$$-l\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)dx = \mu_0\varepsilon_0\, l\, dx\, \left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E}{\partial t} \qquad (6.14)$$

باخذ مشتقة المعادلة 11.6 بالنسبة لـ x ودمج النتيجة مع المعادلة 14.6 نحصل على ما يلي:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(-\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \qquad (6.15)$$

بنفس الطريقة، نقوم باخذ مشتقلة المعادلة 14.4 بالنسبة إلى x ودمجها مع المعادلة 11.6 نحصل على

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \qquad (6.16)$$

كلا من المعادلتين 15.6 و16.6 لهما شكل معادلة الموجة العامة بموجة لها سرعة v استبدلت بـ c حيث ان

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \qquad (6.17)$$

دعنا نحسب هذه السرعة عدديا:

$$c = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7}\mathrm{T.m/A})(8.854 \times 10^{-12}\mathrm{C^2/N.m^2})}}$$

$$= 2.997 \times 10^{8}\mathrm{m/s}$$

حيث ان هذه السرعة هي بالضبط نفس سرعة الضوء في الفراغ، فان هذا يدفعنا لان نعتقد بشكل صحيح ان الضوء هو موجة كهرومغناطيسية.

الحل الاسهل للمعادلة 15.6 والمعادلة 16.6 هو موجة جيبية يكون فيها مقدار المجال الكهربي ومقدار المجال المغناطيسي متغيرا مع x وt حسب المعادلتين التاليتين

$$E = E_{max}\cos(kx - \omega t) \qquad (6.18)$$

$$B = B_{max}\cos(kx - \omega t) \qquad (6.19)$$

حيث ان E_{max} وB_{max} هما اقصى قيمة للمجال الكهربي والمجال المغناطيسي على التوالي. العدد الموجي الزاوي k والذي يساوي $2\pi/\lambda$، حيث ان λ هي الطول الموجي. التردد الزاوي $\omega = 2\pi f$، حيث ان f هي تردد الموجة. النسبة ω/k تساوي سرعة الموجة الكهرومغناطيسية c:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c$$

حيث ان $v = c = \lambda f$ وهي معادلة تربط بين السرعة والتردد والطول الموجي للموجة المتصلة. لهذا فانه للأمواج الكهرومغناطيسية تكون العلاقة بين الطول الموجي والتردد لهذه الأمواج على النحو التالي:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^{8}\mathrm{m/s}}{f} \qquad (6.20)$$

يوضح الشكل 8.6 صورة تمثل الموجة الجيبية المستقطبة خطيا للموجة الكهرومغناطيسية تتحرك في اتجاه محور x الموجب.

باخذ الاشتقاق الجزئي للمعادلة 18.6 بالنسبة لـ x وللمعادلة 19.6 بالنسبة لـ t فنحصل على ما يلي:

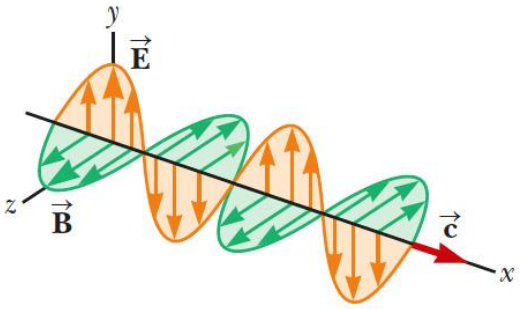
$$\frac{\partial E}{\partial x} = -kE_{max}\sin(kx-\omega t)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_{max}\sin(kx-\omega t)$$

بالتعويض عن هاتين النتيجتين في المعادلة 11.6 نحصل على

$$kE_{max} = \omega B_{max}$$

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = \frac{\omega}{k} = c$$



الشكل 8.6 موجة كهرومغناطيسية جيبية تتحرك في اتجاه محور x الموجب بسرعة c.

باستخدام هذه النتائج مع المعادلتين 18.6 و19.6 نحصل على

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = \frac{E}{B} = c \qquad (6.21)$$

هذا يعني انه عند اي لحظة تكون النسبة بين مقدار المجال الكهربي ومقدار المجال المغناطيسي في الموجة الكهرومغناطيسية يساوي سرعة الضوء.

في النهاية لاحظ ان الأمواج الكهرومغناطيسية تخضع لمبدأ تراكب الموجات لان المعادلات التفاضلية التي تشتمل على E وB تكون معادلات خطية. على سبيل المثال يمكننا ان نجمع موجتين لهما نفس التردد والاستقطاب بسهولة من خلال جمع مقداري المجالين الكهربائيين لهما جمعا جبريا.

ملاحظة: هل المجال الكهربي اكبر كثيرا من المجال المغناطيسي؟ لان قيمة سرعة الضوء c كبيرة جدا فان بعض من الطلبة قد يعتقد كاستنتاج من المعادلة 21.6 ان المجال الكهربي اكبر بكثير من المجال المغناطيسي. ان المجالين الكهربي والمغناطيسي يقاسان بوحدات مختلفة وسوف نرى في الفصل 4.6 ان المجالين الكهربي والمغناطيسي يشاركان بشكل متساوي في طاقة الموجة.

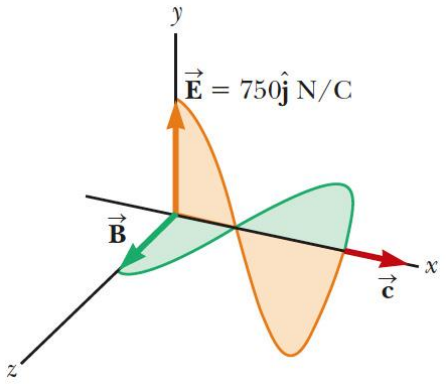
سؤال للتفكير 2.6

ما هو فرق الطور بين التذبذب الجيبي للمجالين الكهربي والمغناطيسي في الشكل 8.6؟

(a) 180^{o} (b) 90^{o} (c) 0 (d) لا يمكن ان نحدد.

مثال 2.6 موجة كهرومغناطيسية An Electromagnetic Wave

موجة كهرومغناطيسية جيبية لها تردد 40.0 MHz تتحرك في الفراغ في اتجاه محور x الموجب كما هو موضح في الشكل 9.6. (A) حدد الطول الموجي والزمن الدوري للموجة. (B) عند نقطة ما ولحظة ما كان المجال الكهربي يمتلك قيمة عظمى مقدارها 750 N/C وفي اتجاه محور y. احسب مقدار واتجاه المجال المغناطيسي عند هذا الموضع وتلك اللحظة من الزمن.



الشكل 9.6 عند لحظة ما، تتحرك موجة كهرومغناطيسية مستوية في اتجاه محور x الموجب لها مجال اقصى قيمة له هي 750 N/C في اتجاه محور y الموجب.

الحل:

تصور المسألة: تخيل الموجة في الشكل 9.6 تتحرك إلى اليمين على امتداد محور x، مع تذبذب كلا من المجالين الكهربي والمغناطيسي بنفس الطور.

تصنيف المسألة: سوف نقوم بايجاد النتائج المطلوبة باستخدام المعادلات التي تم اشتقاقها في هذا الفصل، لذلك فاننا نصنف هذا المثال كمسألة تعويض مباشرة.

باستخدام المعادلة 20.6 لايجاد الطول الموجي للموجة

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^{8}\text{m/s}}{40.0 \times 10^{6}\text{Hz}} = 7.5\text{m}$$

نحسب الزمن الدوري T للموجة من مقلوب التردد:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40.0 \times 10^6 \text{Hz}} = 2.50 \times 10^{-8}\text{s}$$

الحل (B)

باستخدام المعادلة 21.6 لايجاد مقدار المجال المغناطيسي على النحو التالي

$$B_{max} = \frac{E_{max}}{c} = \frac{750\text{N/C}}{3.00 \times 10^8 \text{m/s}} = 2.50 \times 10^{-6}\text{T}$$

حيث ان $\vec{E}$ و$\vec{B}$ يجب ان يكونا متعامدين على بعضهما البعض ومتعامدين على اتجاه انتشار الموجة وهو اتجاه المحور x في هذا المثال، نستنتج من ذلك ان $\vec{B}$ سيكون في اتجاه محور z.

4.6 الطاقة المحمولة بواسطة الأمواج الكهرومغناطيسية Energy Carried by Electromagnetic Waves

ان الاشعاع الكهرومغناطيسي هو صورة من صور انتقال الطاقة عبر حدود نظام محدد. مقدار الطاقة المنتقلة بواسطة الأمواج الكهرومغناطيسية، ومعدل انتقال الطاقة بواسطة الموجة الكهرومغناطيسية يوصف بالمتجه $\vec{S}$ ويعرف باسم متجه بوينتينج Poynting vector، ويعرف من خلال هذه المعادلة:

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0}\vec{E} \times \vec{B} \qquad (6.22)$$

يمثل مقدار متجه بوينتينج معدل مرور الطاقة خلال وحدة المساحة السطحية عموديا على اتجاه انتشار الموجة. لهذا فان مقدار المتجه $\vec{S}$ يمثل القدرة لكل وحدة مساحة. اتجاه المتجه يكون على امتداد اتجاه انتشار الموجة كما هو موضح في الشكل 10.6. وحدة المتجه $\vec{S}$ هي $\text{J/s.m}^2 = \text{W/m}^2$.

كمثال، دعنا نحسب مقدار المتجه $\vec{S}$ لموجة كهرومغناطيسية مستوية حيث ان $|\vec{E} \times \vec{B} = EB|$. في هذه الحالة،

$$S = \frac{EB}{\mu_0} \qquad (6.23)$$

وذلك لان $B = E/c$، كما يمكننا ايضا ان نعبر عن هذه النتيجة على النحو التالي:

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

هاتين المعادلتين لـ S تطبقان عند اي لحظة من الزمن وتمثل المعدل اللحظي التي عندها تعبر الطاقة خلال وحدة المساحة.

من اهم الامور للموجة الكهرومغناطيسية المستوية الجيبية هو المتوسط الزمنى لـ S لدورة واحدة أو اكثر، والتي تعرف باسم شدة الموجة *wave intensity* ويرمز لها بالرمز I. عندما نأخذ المتوسط فاننا نحصل على صيغة تشتمل على متوسط الزمن لـ $\cos^2(kx - \omega t)$، والتي تساوي ½. وبالتالي فان متوسط قيمة S أو بمعنى اخر شدة الموجة يكون على النحو التالي:

$$I = S_{avg} = \frac{E_{max}B_{max}}{2\mu_0} = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_{max}^2}{2\mu_0} \qquad (6.24)$$

نتذكر الان الطاقة لكل وحدة حجوم والتي هي كثافة الطاقة اللحظية u_E المرتبطة بالمجال الكهربي والتي تعطى بالمعادلة:

$$u_E = \frac{1}{2}\mu_0 E^2$$

كذلك نتذكر كثافة الطاقة اللحظية u_B المرتبطة بالمجال المغناطيسي والتي تعطى بالمعادلة التالية:

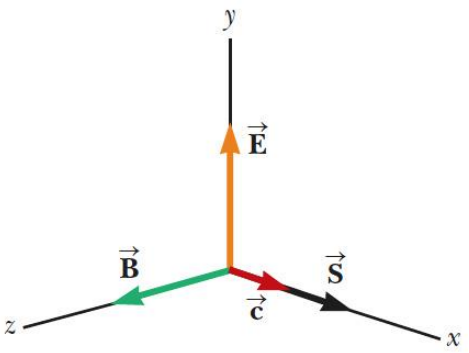
$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

لان كلا من E وB تتغير مع الزمن للموجة الكهرومغناطيسية، وكثافة الطاقة تتغير ايضا مع الزمن. باستخدام العلاقتين $B = E/c$ و$c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$، وبالتالي فان الصيغة u_B تصبح على النحو التالي:

$$u_B = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0\varepsilon_0}{2\mu_0}E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$$

بمقارنة هذه النتيجة مع الصيغة الخاصة لـ u_E نجد ان

هذا يعني ان كثافة الطاقة اللحظية المرتبطة مع المجال المغناطيسي لموجة كهرومغناطيسية تساوي كثافة الطاقة اللحظية المرتبطة مع المجال الكهربي. وعليه فانه لحجم ما تكون الطاقة مشتركة بين المجالين.



الشكل 10.6 متجه بوينتينج $\vec{S}$ لموجة كهرومغناطيسية مستوية على امتداد اتجاه انتشار الموجة.

كثافة الطاقة اللحظية الكلية u تساوي مجموع كثافة الطاقة المرتبطة بالمجالين الكهربي والمغناطيسي:

$$u = u_E + u_B = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

عندما نأخذ متوسط كثافة الطاقة اللحظية الكلية هذه على دورة أو اكثر لموجة كهرومغناطيسية فاننا نحصل مرة اخرى على معامل في ½. وعليه فانه لاي موجة كهرومغناطيسية فان متوسط الطاقة الكلي لكل وحدة حجوم تكون على النحو التالي:

$$u_{avg} = \varepsilon_0 (E^2)_{avg} = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_{max}^2 = \frac{B_{max}^2}{2\mu_0} \qquad (6.25)$$

بمقارنة هذه النتيجة مع المعادلة 24.6 لمتوسط قيمة S نحصل على ما يلي:

$$I = S_{avg} = cu_{avg} \qquad (6.26)$$

بمعنى اخر فان شدة الموجة الكهرومغناطيسية تساوي متوسط كثافة الطاقة مضروبة في سرعة الضوء.

تعطى الشمس ما يقارب 10^3 W/m^2 من الطاقة لسطح الأرض من خلال الاشعاع الكهرومغناطيسي. دعنا نقوم الان بحساب القدرة الكلية التي تسقط على سطح منزل. مساحة السطح هي 8.00 m×20.0 m. نفترض ان متوسط مقدار متجه بوينتينج لاشعاع الشمس عند سطح الأرض وهو S_{avg} = 1000 W/m^2. تمثل هذه القيمة المتوسطة القدرة لكل وحدة مساحة، أو شدة الضوء. افترض ان الاشعاع يسقط عموديا على السطح،

وبالتالي نحصل على ما يلي:

$$P_{avg} = S_{avg}A = (1000\text{W/m}^2)(8.00\text{m} \times 20.0\text{m}) = 1.60 \times 10^5\text{W}$$

هذه القدرة كبيرة بالمقارنة مع القدرة اللازمة لمنزل عادى. اذا استمرت هذه القدرة الثابتة لمدة 24 ساعة لكل يوم ويمكن للطاقة ان تمتص وتصبح متوفرة لاجهزة الكهربية، فانها تزود المنزل بطاقة اكثر من كافية، الا انه ليس من السهل حصد الطاقة الشمسية بسهولة وان التفكير في استخدام مساحات كبيرة لتحويل الطاقة الشمسية ليست بالطريقة المجدية كما نستنتج من الحسابات.

سؤال للتفكير 3.6

تنتشر موجة كهرومغناطيسية في اتجاه محور y السالب. واتجاه المجال الكهربي عند نقطة في الفراغ وفي لحظة ما في اتجاه محور x الموجب. في اي اتجاه يكون المجال المغناطيسي عند تلك النقطة وفي تلك اللحظة؟(a) اتجاه محور x السالب (b) اتجاه محور y الموجب (c) اتجاه محور z الموجب (d) اتجاه محور z السالب.

مثال 3.6 المجالات على الصفحة Fields on the page

قدر اقصى مقدار لكلا من المجالين الكهربي والمغناطيسي لضوء يسقط على هذه الصفحة والناتج عن الضوء المرئي القادم من مصباح المكتب. تعامل مع المصباح الكهربي كمصدر نقطي للاشعاع الكهرومغناطيسي له كفاءة تصل إلى 5% في تحويل الطاقة الكهربي إلى طاقة ضوئية.

الحل:

تصور المسألة: تقوم فتيلة المصباح بالتوهج وتنبعث منها الاشعة الكهرومغناطيسية. كلما كان الضوء اكثر توهجا كلما كان مقدار المجالين الكهربائي والمغناطيسي اكبر.

تصنيف المسألة: سوف نتعامل مع المصباح الكهربي كمصدر نقطي، لذا فانه يبعث اشعاع

متساوي في كل الاتجاهات، وبالتالي فاننا نعتبر الاشعاع الكهرومغناطيسي على انه موجة كروية.

تحليل المسألة: من العلاقة التي تربط بين شدة الموجة ومتوسط القدرة وهي $I = P_{avg}/4\pi r^2$ حيث ان P_{avg} هو متوسط القدرة الصادرة من المصدر و$4\pi r^2$ هي مساحة كرة نصف قطرها r مركزها هو المصدر.

نقوم الان باستخدام المعادلة 24.6 لعلاقة القدرة مع شدة الضوء I ونساويها مع المعادلة اعلاه نحصل على

$$I = \frac{P_{avg}}{4\pi r^2} = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c}$$

بايجاد الحل بالنسبة لمقدار المجال الكهربي نحصل على

$$E_{max} = \sqrt{\frac{\mu_0 c P_{avg}}{2\pi r^2}}$$

دعنا نقوم ببعض الافتراضات حول تقدير قيم المتغيرات في المعادلة اعلاه. لنفترض ان المصباح الكهربي يعمل على 60 W بكفاءة تحويل تصل إلى 5% وهذا يعني ان 3.0 W من الضوء تنتج من تحويل الطاقة الكهربية إلى طاقة ضوئية. الطاقة المتبقية تتحول إلى حرارة وإلى اشعاع غير مرئي. لنفترض ايضا ان المسافة بين المصباح الكهربي والورقة هو ما يقارب 0.30 cm.

بالتعويض عن هذه القيم في المعادلة اعلاه نحصل على ما يلي

$$E_{max} = \sqrt{\frac{(4\pi \times 10^{-7}\text{T.m/A})(3.00 \times 10^8\text{m/s})(3.0\text{W})}{2\pi(0.30\text{m})^2}} = 45\ \text{V/m}$$

استخدم المعادلة 21.6 لايجاد مقدار المجال المغناطيسي:

$$B_{max} = \frac{E_{max}}{c} = \frac{45\ \text{V/m}}{3.00 \times 10^8\text{m/s}} = 1.5 \times 10^{-7}\ \text{T}$$

الخلاصة: هذه القيمة لمقدار المجال المغناطيسي أصغر من المجال المغناطيسي للأرض.

5.6 كمية الحركة وضغط الاشعاع Momentum and Radiation Pressure

تنقل الأمواج الكهرومغناطيسية كمية الحركة الخطية والطاقة. عند امتصاص كمية حركة الأمواج الكهرومغناطيسية هذه بواسطة سطح ما، فانها سوف تبذل ضغط على السطح. في هذه المناقشة سوف نفترض ان الموجة الكهرومغناطيسية تصطدم بالسطح بزاوية قائمة وتنقل طاقة كلية مقدارها T_{ER} إلى السطح في فترة زمنية مقدارها Δt. لقد بين العالم ماكسويل انه اذا امتص السطح كل الطاقة الساقطة عليه T_{ER} في تلك الفترة الزمنية كما يحدث في حالة الجسم الاسود، فان كمية الحركة الكلية $\vec{\mathbf{P}}$ التي تنتقل إلى السطح يكون لها المقدار التالي:

$$p = \frac{T_{ER}}{c} \qquad \text{امتصاص كامل} \qquad (6.27)$$

يعرف الضغط P المبذول على السطح على انه القوة لكل وحدة مساحة F/A، والتي عندما ندمجها مع قانون نيوتن الثاني نحصل على

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A}\frac{dp}{dt}$$

بالتعويض من المعادلة 27.6 في هذه الصيغة للضغط P نحصل على

$$P = \frac{1}{A}\frac{dp}{dt} = \frac{1}{A}\frac{d}{dt}\left(\frac{T_{ER}}{c}\right) = \frac{1}{c}\frac{(dT_{ER}/dt)}{A}$$

نعلم ان $(dT_{ER}/dt)/A$ هي معدل وصول الطاقة إلى السطح لكل وحدة مساحة، والتي هي مقدار متجه بوينتينج . لهذا فان ضغط الاشعاع p المبذولة على سطح ماص تام تكون على النحو التالي:

$$P = \frac{S}{c} \qquad (6.28)$$

اذا كان السطح عاكس تام مثل المرآة وكان الشعاع يسقط عموديا على السطح فان كمية الحركة التي تنتقل إلى السطح في فترة زمنية Δt تكون اكبر بمرتين مما هو معطى بالمعادلة 27.6. هذا يعني ان كمية الحركة التي تنتقل إلى السطح عن طريق الضوء الساقط تساوي $p = T_{ER}/c$ والتي تنتقل عن طريق انعكاس الضوء تساوي $p = T_{ER}/c$ لهذا فان

$$p = \frac{2T_{ER}}{c} \qquad \text{انعكاس كامل} \qquad (6.29)$$

ضغط الاشعاع المبذول على سطح عاكس لموجة تسقط عموديا عليه يساوي

$$P = \frac{2S}{c} \qquad (6.30)$$

الضغط على سطح يمتلك انعكاسية بين قيمتين قصوتين هما S/c و$2S/c$ يعتمد على خواص السطح.

بالرغم من ان ضغط الاشعاع يكون صغيرا جدا ويصل حوالي إلى 5×10^{-6} N/m^2 لاشعة الشمس المباشرة، الا ان وكالة الفضاء ناسا تدرس امكانية الاعتماد على فكرة الابحار الشمسي كوسيلة قليلة التكلفة لارسال السفن الفضائية إلى الكواكب. يتم استخدام الواح كبيرة تتعرض لضغط اشعة من الشمس وتستخدم لتحريك السفن الفضائية مثل تحريك القوارب الشراعية بطاقة الرياح. في العام 1973 استفاد علماء ناس من كمية الحركة لاشعة الشمس المصطدمة الالواح الشمسة لـ Mariner 10 لتقوم بتعديل مسارها عند انخفاض كمية الوقود. هذه العملية تمت عندما كانت السفينة الفضائية بالقرب من المريخ. هل تعتقد ان هذه الطريقة سوف تعمل بالقرب من كوكب نيبتون؟

سؤال للتفكير 4.6

للحصول على اقصى قيمة لضغط الاشعاع على سفينة فضائية تستخدم الاشعاع الشمسي للابحار، هل يجب ان تكون الالواح (a) سوداء لامتصاص اكبر قدر من طاقة الشمس أو (b) سطح عاكس ليعكس اكبر قدر من اشعة الشمس؟

السؤال 4.6 نظام شمسي ماسح Sweeping the Solar System

يوجد مقدار كبير من الغبار في الفراغ الكوني. بالرغم من ان حبيبات الغبار لها احجام مختلفة من حجم جزيئي إلى احجام اكبر بكثير، لماذا يوجد جزء صغير من الغبار في نظامنا الشمسي اصغر من 0.2 µm.

الحل:

تتعرض جسيمات الغبار لنوعين من القوى: القوة الجاذبية تسحبها في اتجاه الشمس وقوة ضغط اشعاع الشمس تدفعهم بعيدا عن الشمس. تتناسب القوة الجاذبية طرديا مع مكعب نصف قطر جسيمات الغبار الكروية لانها تتناسب مع الكتلة وبالتالي فهي تتناسب مع الحجم $4\pi r^3/3$ للجسيمات. يتناسب ضغط الاشعاع طرديا مع مربع قطر الجسيمات لانها تعتمد على مساحة مقطعها. للجسيمات الكبيرة تكون القوة الجاذبية اكبر من قوة ضغط الاشعاع. للجسيمات التي تمتلك نصف قطر اقل من 0.2 μm، فان قوة ضغط الاشعاع اكبر من قوة الجاذبية. كنتيجة لذلك فان هذه الجسيمات تطردها بعيدا عن نظامنا الشمسي بواسطة اشعة الشمس.

المثال 5.6 الضغط من مؤشر ليزر Pressure from a Laser Pointer

الكثير من الاشخاص يستخدمون مؤشر ليزر لجذب انتباه الحضور لنقطة معينة على لوحة الشرح. اذا كانت قدرة مؤشر الليزر هي 3.0 mW وتتركز على لوحة الشرح في بقعة قطرها 2.0 mm، احسب ضغط الاشعاع على اللوحة التي تعكس 70% من الضوء. علما بان قيمة القدرة 3.0 mW هي قيمة متوسطة زمنية.

الحل:

تصور المسألة: تخيل الأمواج تصطدم باللوحة وتؤثر عليها بضغط اشعاع. هذا الضغط ليس كبيرا.

تصنيف المسألة: تتضمن هذه المسألة حساب ضغط الاشعاع باستخدام المعادلتين 28.6 أو 30.6 الا ان الامور اكثر تعقيدا لان 70% من الاشعاع ينعكس.

تحليل المسألة: سوف نبدأ أولا في تحديد مقدار متجه بوينتج لشعاع الليزر.

بقسمة القدرة المعطاة بواسطة الموجة الكهرومغناطيسية (شعاع الليزر) على مساحة مقطع الشعاع على النحو التالي:

$$S_{avg} = \frac{(Power)_{avg}}{A} = \frac{(Power)_{avg}}{\pi r^2} = \frac{3.0 \times 10^{-3}\text{W}}{\pi\left(\frac{2.0 \times 10^{-3}\text{W}}{2}\right)^2} = 955\ \text{W/m}^2$$

الان دعنا نحسب ضغط الاشعاع من شعاع الليزر. توضح المعادلة 30.6 ان الشعاع المنعكس كليا سوف يطبق ضغط متوسط مقداره $P_{avg} = 2S_{avg}/c$. سوف نقوم بنمذجة الانعكاس على النحو التالي. تخيل ان السطح يمتص الشعاع مما ينتج عنه ضغط مقداره $P_{avg} = S_{avg}/c$. اذا كان السطح يشع جزء f من الشعاع، حيث ان f هو مقدار الشعاع المنعكس من الشعاع الساقط، يكون الضغط الناتج عن الشعاع المنبعث هو $P_{avg} = fS_{avg}/c$.

باستخدام هذا النموذج يمكننا ايجاد الضغط الكلي المؤثر على السطح نتيجة لامتصاص واعادة انبعاث الشعاع (الانعكاس) على النحو التالي:

$$P_{avg} = \frac{S_{avg}}{c} + f\frac{S_{avg}}{c} = (1+f)\frac{S_{avg}}{c}$$

نحسب الضغط للشعاع الذي ينعكس منه 70% على النحو التالي:

$$P_{avg} = (1+0.70)\frac{955\ \text{W/m}^2}{3.0 \times 10^8\text{m/s}} = 5.4 \times 10^{-6}\text{N/m}^2$$

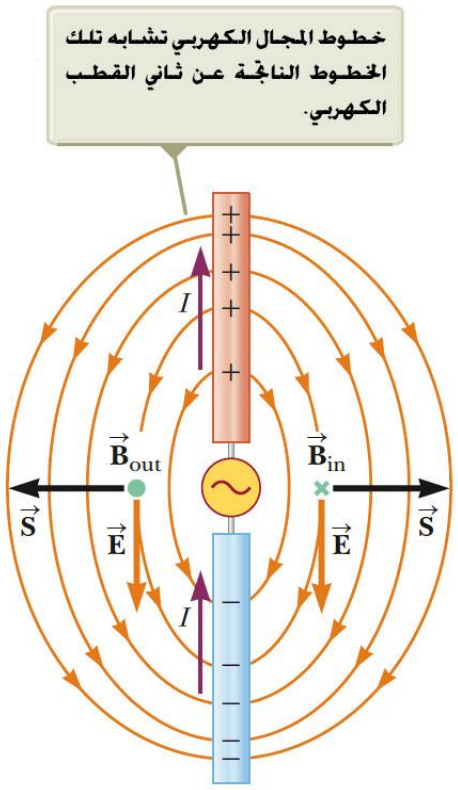
الخلاصة: قيمة الضغط صغيرة جدا كما هو متوقع. اعتبر مقدار متجه بوينتج $S_{avg} = 955\ \text{W/m}^2$. انها نفس القيمة تقريبا لشدة اشعة الشمس على الارض. لهذا السبب يعتبر تسليط شعاع مؤشر الليزر على عين شخص خطرا ويعد اخطر من النظر إلى اشعة الشمس مباشرة.

6.6 انتاج أمواج كهرومغناطيسية بواسطة انتينا
Production of Electromagnetic Waves by an Antenna

الشحنات المستقرة والتيار الثابت لا ينتج عنه أمواج كهرومغناطيسية. عندما يكون التيار المار في سلك تيارا مترددا فان السلك ينتج عنه اشعاع كهرومغناطيسي. الالية الاساسية المسؤولة عن هذا الاشعاع هو تسارع الجسيمات المشحونة. عندما يتسارع جسيم

مشحون فانه يشع طاقة.

دعنا نأخذ موضوع انتاج أمواج كهرومغناطيسية بواسطة انتينا نصف موجة. في هذا الترتيب يتم توصيل ساقين موصلين بمصدر جهد متردد مثل مذبذب المكثف والملف الحثي كما هو موضح في الشكل 11.6. طول كل ساق يساوي ربع الطول الموجي للاشعاع المنبعث عندما يعمل المذبذب عند تردد f. يؤثر المذبذب بقوة على الشحنات لتتسارع إلى الامام والخلف بين الساقين. يوضح الشكل 11.6 شكل المجالين الكهربي والمغناطيسي عند لحظة من الزمن عندما يكون التيار إلى الأعلى. يجعل الانفصال في الشحنات في الجزأين العلوي والسفلي للانتينا المجال الكهربي مشابها لثنائي القطب، ولهذا يطلق على هذا النوع من الانتينا بانتينا ثنائية القطب. نتيجة لان هذه الشحنات تتذبذب باستمرار بين الساقين، فان الانتينا تعتبر ثنائي قطب كهربي متذبذب. ينتج التيار المتمثل في حركة الشحنات بين نهايتي الانتينا خطوط مجال مغناطيسي تشكل حلقات متمركزة حول الانتينا في اتجاه عمودي على خطوط المجال الكهربي عند كل النقاط. يكون المجال المغناطيسي مساويا للصفر عند كل النقاط على امتداد محور الانتينا. علاوة على ان المجال الكهربي $\vec{E}$ والمجال المغناطيسي $\vec{B}$ يكونا مختلفين في الطور بالنسبة للزمن بمقدار 90^{o}، على سبيل المثال، يكون التيار مساويا للصفر عندما تكون الشحنات عند النهايتين الخارجيتين للساقين في اقصى قيمة لهم.

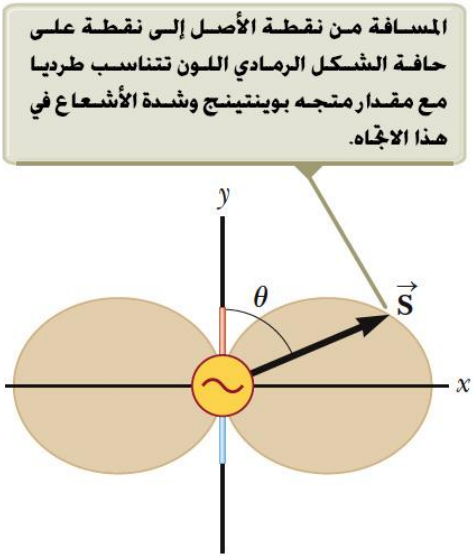


الشكل 11.6 انتينا نصف موجة تتكون من ساقين من المعدن متصلتين بمصدر جهد متردد. يوضح الشكل $\vec{E}$ و$\vec{B}$ عند لحظة ما عندما يكون التيار إلى الأعلى.

عند النقطتين حيث يكون المجال المغناطيسي كما هو موضح في الشكل 11.6، فان متجه بوينتج $\vec{S}$ في اتجاه انصاف الاقطار وإلى الخارج، مما يشير إلى ان الطاقة تتدفق بعيدا عن الانتينا في هذه اللحظة. في فترات زمنية لاحقة فان المجالين ومتجه بوينتج يعكسان اتجاههم مع تردد التيار. حيث ان فرق الطور بين $\vec{E}$ و$\vec{B}$ يساوي 90^o عند كل النقاط بالقرب من ثنائي القطب، فان الطاقة الكلية المتدفقة تساوي صفر. قد تستنتج من هذه الحقيقة (وهذا غير صحيحا) عدم انبعاث طاقة من ثنائي القطب.

هناك في الحقيقة طاقة تنبعث. كما نعلم انه بسبب ان المجال الكهربي لثنائي القطب يتناقص مع $1/r^3$، فانه يكون مهملا عند مسافات بعيدة عن الانتينا. عند هذه المسافات البعيدة يتسبب شيء اخر في انبعاث نوع اخر من الاشعاع مختلف عن الاشعاع الصادر بالقرب من الانتينا. مصدر هذا الاشعاع هو الحث المستمر للمجال الكهربي الناتج عن المجال المغناطيسي المتغير في الزمن، كما هو متوقع من المعادلتين 6.6 و7.6. ان المجالين الكهربي والمغناطيسي الناتجين بهذه الطريقة يكونا في نفس الطور مع بعضهما البعض ويتغيران بـ $1/r$. وتكون النتيجة هي تدفق مستمر للطاقة في كل الأوقات.

يوضح الشكل 12.6 الاعتماد الزاوي لشدة الاشعاع الناتج عن انتينا ثنائي القطب. لاحظ ان الشدة والقدرة المشعة تكون اقصى ما يمكن في مستوى عمودي على الانتينا ويمر من خلال نقطة الوسطة لها. علاوة على ان القدرة المشعة تكون مساوية للصفر على امتداد محور الانتينا. الحل الرياضي لمعادلات ماكسويل لانتينا ثنائي القطب تبين ان شدة الاشعاع تتغير كـ $\sin^2\theta / r^2$، حيث ان θ تقاس من محور الانتينا.



الشكل 12.6 الاعتماد الزاوي لشدة الاشعاع الناتج عن تذبذب ثنائي قطب كهربي.

يمكن للأمواج الكهرومغناطيسية ان

تستحث تيارات في انتينا الاستقبال. ان استجابة ثنائي القطب في انتينا الاستقبال عند موضع محدد يكون اقصى ما يمكن عندما يكون محور الانتينا موازيا للمجال الكهربي عند هذه النقطة ويكون صفرا عندما يكون محور الانتينا عموديا على المجال الكهربي.

سؤال للتفكير 5.6

اذا كانت الانتينا في الشكل 11.6 تمثل مصدر لمحطة راديو بعيدة، ما هو افضل توجيه لانتينا راديو خاص بك موضوع على يمين الشكل؟ (a) للاعلى والاسفل على امتداد الصفحة. (b) لليمين واليسار على امتداد الصفحة. (c) عموديا على الصفحة.

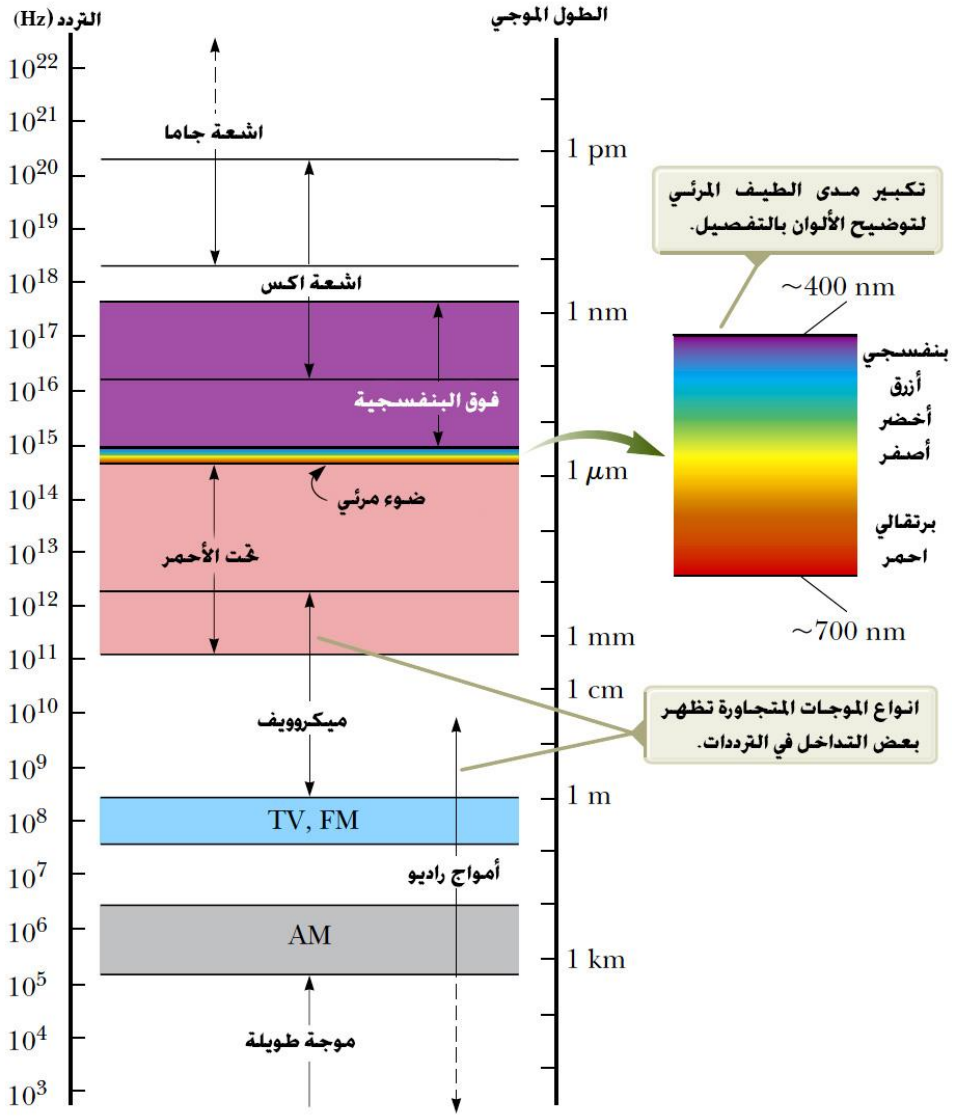
7.6 طيف الأمواج الكهرومغناطيسية
The Spectrum of Electromagnetic Waves

الانواع المختلفة للأمواج الكهرومغناطيسية مدرجة في الشكل 13.6، والتي توضح الطيف الكهرومغناطيسي electromagnetic spectrum. لاحظ وجود مدى واسع من الترددات والاطوال الموجية.

لاحظ ايضا عدم وجود فواصل حادة بين نوع واخر من الأمواج الكهرومغناطيسية. تذكر ان كل الاشكال لانواع الاشعاع المختلفة تنتج بنفس الطريقة وهي تسارع الشحنات الكهربية. ان الاسماء التي اطلقت على الانواع المختلفة من الأمواج هي ببساطة طريقة مناسبة لوصف المناطق المختلفة من الطيف الكهرومغناطيسي.

أمواج الراديو radio waves هي تلك الأمواج في المدى من اكثر من 10^4 m إلى حوالي 0.1 m، وهي تنتج من تسارع الشحنات في الاسلاك الموصلة. انها تنتج بواسطة اجهزة الكترونية مثل مذبذبات المكثف والملف الحثي وتستخدم في انظمة الراديو والتلفزيون والاتصالات.

أمواج الميكروويف microwaves هي أمواج في المدى من 0.3 m تقريبا إلى 10^{-4} m وهي تنتج ايضا بواسطة الاجهزة الالكترونية. كما انه بسبب اطوالها الموجية القصيرة فانها مناسبة جدا لانظمة الراداد ولدراسة الخواص الذرية والجزيئية للمادة. افران الميكروويف



الشكل 13.6 الطيف الكهرومغناطيسي.

هي احد التطبيقات المنزلية لهذا النوع من الأمواج . كما انه قد اقترح حصد الطاقة الشمسية وارسالها على الارض عبر أمواج الميكروويف.

أمواج تحت الحمراء infrared waves هي أمواج في المدى من 10^{-3} m إلى اطول طول موجي في الضوء المرئي 7×10^{-7} m. هذه الأمواج تنتج بواسطة الجزيئات والاجسام عند

درجة حرارة الغرفة، وتمتص من قبل كل المواد تقريبا. تمتص طاقة الأمواج تحت الحمراء (IR) بواسطة المادة وتظهر عليها كطاقة داخلية لان هذه الطاقة تعمل على اثارة الذرات، وتعمل على زيادة حركتها الاهتزازية أو الانتقالية، وينتج عن هذا ارتفاع درجة الحرارة. يوجد الكثير من التطبيقات العملية والعلمية في الكثير من المجالت مثل العلاج الطبيعي والتصوير بالاشعة تحت الحمراء وعلم الطيف الاهتزازي.

الضوء المرئي visible هي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي تبصره عين الانسان. ينتج الضوء عن اعادة ترتيب الالكترونات في الذرات والجزيئات. الاطوال الموجية المختلفة للضوء المرئي تعطي الالوان المختلفة في المدى من 7×10^{-7} m وهو اللون الاحمر إلى 4×10^{-7} m وهو اللون الازرق. إن حساسية العين هي دالة في الطول الموجي، وتبلغ الحساسية اعلى ما يمكن عند الطول الموجي 5.5×10^{-7} m تقريبا. مع الاخذ هذا في الاعتبار لماذا في اعتقادك تكون كرة التنس ملونة بالونين الاخضر والاصفر؟ يوفر الجدول 1.6 الاطوال الموجية المقابلة لكل لون من الوان الضوء المرئي. يعتبر الضوء هو الاساس في صناعة الاجهزة البصرية.

أمواج فوق بنفسجية ultraviolet waves هي أمواج في المدى من 4×10^{-7} m إلى 6×10^{-10} m. تعتبر الشمس مصدرا اساسيا للضوء فوق البنفسجي (UV) والتي تعتبر هي المسؤولة عن حروق الجلد. من اخطار الاشعة فوق البنفسجية هو اعتام عدسة العين. تمتص طبقة الأوزن في الغلاف الجوي معظم الاشعة فوق البنفسجية. هذا الحاجز من الأوزون يحول الطاقة العالية الضارة للاشعة فوق البنفسجية إلى اشعة تحت الحمراء والتي تعمل على رفع درجة حرارة الغلاف الجوي.

اشعة اكس x-ray هي اشعة في المدى من 10^{-8} m إلى 10^{-12} m. مصدر اشعة اكس هو ايقاف الكترونات ذات طاقة عالية عند اصطدامها بهدف معدني. تستخدم اشعة اكس في تشخيص الاضرار التي تصيب الانسجة والاعضاء في جسم الانسان، ويجب اخذ العناية الكافية لتجنب التعرض لجرعات غير ضرورية من هذه الاشعة. تستخدم اشعة اكس ايضا في دراسة تركيب البلورات لان اشعة اكس لها اطوال موجية مقاربة للمسافات بين الذارت في البلورات والتي تبلغ حوالي 0.1 nm.

اشعة جاما gamma rays هي اشعة كهرومغناطيسية تنبعث من الانوية المشعة ومن خلال بعض التفاعلات النووية. تعتبر اشعة جاما اشعة ذات طاقة عالية وهي جزء من الاشعة الكونية التي تصل الغلاف الجوي للكرة الارضية من الفضاء. تقع اشعة جاما في مدى الطول الموجي من 10^{-10} m إلى اقل من 10^{-14} m. اشعة جاما لها قدرة عالية على الاختراق وتتسبب باضرار كبيرة للانسجة الحية. والعاملون بالقرب من اشعة خطرة مثل اشعة جاما عليهم حماية انفسهم بارتداء مواد شديدة الامتصاص لاشعة جاما مثل طبقات سميكة من الرصاص.

الجدول 1.6 مدى الاطوال الموجية للضوء المرئي والالوان المقابلة له.

مدى الطول الموجي (nm)	اللون
400 – 430	البنفسجي
430 – 485	الأزرق
485 – 560	الأخضر
560 – 590	الأصفر
590 – 625	البرتقالي
625 – 700	الأحمر

سؤال للتفكير 6.6

في العديد من المطابخ، تستخدم افران ميكروويف لطهي الطعام. اذا كان تردد اشعة الميكروويف في حدود 10^{10} Hz، هل اطوال اشعة الميكروويف هذه في حدود (a) كيلومتر، أو (b) متر، أو (c) سنتيمتر، أو (d) ميكرومتر؟

سؤال للتفكير 7.6

تستخدم موجة راديو بتردد 10^5 Hz لحمل موجة صوت بتردد 10^3 Hz. هل الطول الموجي لموجة الراديو هذه في حدود (a) كيلومتر، أو (b) متر، أو (c) سنتيمتر، أو (d) ميكرومتر؟

مبادئ وتعريفات Principles and Definitions

– في منطقة من الفضاء بحيث ان هناك تغير في المجال الكهربي فان تيار الازاحة يعرف على النحو التالي:

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \qquad (6.1)$$

حيث ان ε_0 هو ثابت السماحية للفراغ و$\Phi_E = \int \vec{E}.d\vec{A}$ هو الفيض الكهربي خلال السطح المحدد بمسار التكامل.

– معدل الطاقة التي تعرب خلال وحدة المساحة بواسطة الاشعاع الكهرومغناطيسي توصف بواسطة متجه بوينتينج Poynting vector $(\vec{S})$

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0}\vec{E} \times \vec{B} \qquad (6.22)$$

– عندما تستخدم مع قانون لورنز $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$ فان معادلات ماكسويل تصف كل الظواهر الكهرومغناطيسية:

قانون جاوس	(6.4)	$\oint \vec{E}.d\vec{A} = \frac{q}{\varepsilon_0}$
قانون جاوس في المغناطيسية	(6.5)	$\oint \vec{B}.d\vec{A} = 0$
قانون فارادي	(6.6)	$\oint \vec{E}.d\vec{s} = -\frac{d\Phi_E}{dt}$
قانون أمبير –ماكسويل	(6.7)	$\oint \vec{B}.d\vec{s} = \mu_0 I + \varepsilon_0\mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$

– الأمواج الكهرومغناطيسية التي توقعتها معادلات ماكسويل لها الخواص التالية:

- كلا من المجال الكهربي والمجال المغناطيسي يحققان المعادلة الموجية. هاتين المعادلتين يمكن الحصول عليهما من معادلتي ماكسويل الثالثة والرابعة وهما:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \qquad (6.15)$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \qquad (6.16)$$

- تتحرك الأمواج الكهرومغناطيسي في الفراغ بسرعة الضوء c حيث ان

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \qquad (6.17)$$

- تبلغ سرعة الأمواج الكهرومغناطيسية في الفراغ 3.00×10^8 m/s.
- كلا من المجالين الكهربي والمغناطيسي متعامدين على بعضهما البعض وعموديين على اتجاه انتشار الموجة.
- المقادير اللحظية لـ $\vec{\mathbf{E}}$ و$\vec{\mathbf{B}}$ في الموجة الكهرومغناطيسية يرتبطان بالعلاقة التالية

$$\frac{E}{B} = c \qquad (6.21)$$

- الأمواج الكهرومغناطيسية تحمل طاقة.
- الأمواج الكهرومغناطيسية تحمل كمية حركة.

بما ان الأمواج الكهرومغناطيسية تحمل كمية حركة، فانها تؤثر بضغط على الاسطح. اذا تم امتصاص الموجة الكهرومغناطيسية التي لها متجه بوينتينج $\vec{\mathbf{S}}$ بواسطة سطح عند سقوطها عموديا على السطح فان ضغط الاشعاع على السطح يكون

$$P = \frac{S}{c} \qquad \text{امتصاص كامل} \quad (6.28)$$

– اذا كان السطح يعكس كل الموجة الساقطة عموديا فان الضغط يتضاعف.

– المجالين الكهربي والمغناطيسي للموجة الكهرومغناطيسية المستوية تنتشر في اتجاه محور x الموجب يمكن ان يكتب على النحو التالي:

$$E = E_{max}\cos(kx - \omega t) \qquad (6.18)$$

$$B = B_{max}\cos(kx - \omega t) \qquad (6.19)$$

حيث ان k هو العدد الموجي الزاوي وω هي التردد الزاوي للموجة. تمثل هاتين المعادلتين حلول خاصة للمعادلات الموجية لكلا من E وB. الطول الموجي والتردد للأمواج الكهرومغناطيسية يرتبطان من خلال العلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{m/s}}{f} \qquad (6.20)$$

– القيمة المتوسطة لمتجه بوينتينج للموجة الكهرومغناطيسية المستوية لها المقدار

$$I = S_{avg} = \frac{E_{max}B_{max}}{2\mu_0} = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{cB_{max}^2}{2\mu_0} \qquad (6.24)$$

– شدة الموجة الكهرومغناطيسية المستوية يساوي متوسط قيمة متجه بوينتينج لدورة واحدة أو اكثر.

– يشتمل الطيف الكهرومغناطيسي على أمواج تغطي مدى واسع من الاطوال الموجية من أمواج الراديو الطويلة والتي طولها لاكثر من 10^4 m إلى اشعة جاما القصيرة والتي طولها اقل من 10^{-14} m.

أسئلة موضوعية Objective Questoins

1. موجة كهرومغناطيسية لها مجال مغناطيسي قمته 1.50×10^{-7} T ويرتبط معها مجال كهربي قمته هي (a) 0.500×10^{-15} N/C (b) 2.00×10^{-5} N/C (c) 45.0 N/C (d) 22.0 N/C.

2. أي من العبارات التالية صحيحة بخصوص الأمواج الكهرومغناطيسية التي تنتقل خلال الفراغ؟ هناك اكثر من إجابة صحيحة. (a) كل الأمواج لها نفس الطول الموجي. (b) كل الأمواج لها نفس التردد. (c) كل الأمواج تنتقل بسرعة 3.00×10^8m/s. (d) كلا من المجالين الكهربي والمغناطيسي المرتبطين بالأمواج تكون عمودية عل يبعضها البعض وعلى اتجاه انتشار الموجة. (e) سرحة الأمواج تعتمد على ترددها.

3. فرن ميكروويف يعمل عند تردد 2.45 GHz. ما هو مقدار الطول الموجي المرتبط بالأمواج الكهرومغناطيسية في الفرن؟ (a) 8.20 m (b) 12.2 cm (c) 1.20×10^{8} m (d) 8.20×10^{-9} m (e) لا احد من الإجابات السابقة.

4. يعمل طالب بمعدات ارسال مثل تلك التي استخدمها العالم هيرتز وذلك لضبط الكترودات لتوليد أمواج كهرومغناطيسية عند تردد نصف الترددات السابقة. (i) ما مقدار السعة الفعالة لزوج الالكترودات التي يجب ان يستخدمها؟ (a) أربعة مرات اكبر من قبل (b) اكبر بمرتين من قبل (c) نصف ما كانت عليه من قبل (d) ربع ما كانت عليه من قبل (e) لا يوجد أي من الإجابات السابقة صحيحا (ii) بعد ان قام الطالب التعديلات المطلوبة ما هو الطول الموجي للموجة المرسلة؟ اختر من نفس الإجابات المدرجة في الجزء (i).

5. افترض انك قمت بشحن مشط بتمشيط شعرك ومن ثم وضع المشط بالقرب من ساق مغناطيسية. هل المجالاين الكهربي والمغناطيسي ينتج عنهما موجة كهرومغناطيسية؟ (a) نعم بالتأكيد (b) نعم لان الجسيمات المشحونة تتحرك داخل الساق المغناطيسية (c) يمكنهما ذلك لكن فقط اذا كان المجال الكهربي للمشط والمجال المغناطيسي للمغناطيسي متعامدين. (d) يمكنهما ذلك لكن اذا كان المشط والمغناطيس يتحركان. (e) يمكنهما ذلك اذا كان المشط أو المغناطيسي أو كلاهما يتسارعان.

6. مصدر صغير يشع موجة كهرومغناطيسية أحادية التردد وفي الفراغ ومتساوية في كل الاتجاهات (i) مع حركة الموجة هل ترددها (a) يزداد (b) يتناقص (c) يبقى ثابتا؟ باستخدام نفس الخيارات اجب على ما يلي (ii) طولها الموجي (iii) سرعتها (iv) شدتها (v) مقدار مجالها الكهربي.

7. موجة كهرومغناطيسية مستوية أحادية التردد تتحرك في الفراغ في اتجاه محور x الموجب. سعتها منتظمة على المستوى yz. (i) مع حركة الموجة هل ترددها (a) يزداد (b) يتناقص (c) يبقى ثابتا؟ باستخدام نفس الخيارات اجب على ما يلي (ii) طولها الموجي (iii) سرعتها (iv) شدتها (v) سعة مجالها المغناطيسي.

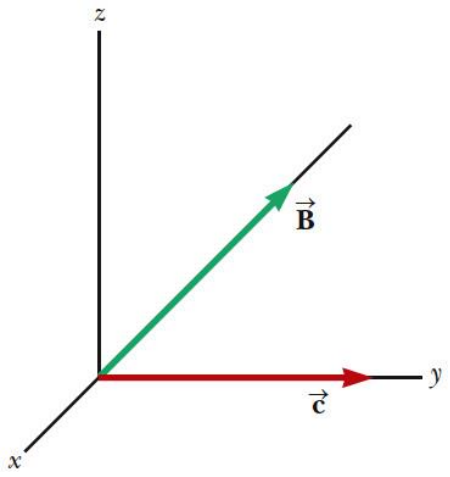
8. افترض ان سعة المجال الكهربي في موجة كهرومغناطيسية مستوية هي E_1 وسعة المجال المغناطيسي B_1. تم ضبط مصدر الموجة بحيث تضاعفت سعة المجال الكهربي وأصبحت $2E_1$. (i) ماذا يحدث لسعة المجال المغناطيسي في هذه العملية؟ (a) انها تصبح أربعة مرات اكبر (b) انها تصبح مرتين اكبر (c) تبقى ثابتة (d) تصبح نصف ما كانت

عليه (e) تصبح ربع ما كانت عليه (ii) ماذا يحدث لشدة الموجة؟ اختر من نفس الإجابات المتاحة في الجزء (i).

9. حبيبات كروية من الغبار نصف قطرها 0.2 μm عند مسافة r_1 من الشمس. القوة الجاذبية المبذولة بوساطة الشمس على الحبيبة تتعادل مع قوة ضغط الاشعاع من اشعة الشمس (i) افترض ان الحبيبة تحركت إلى مسافة $2r_1$ من الشمس ومن ثم حررت. عند هذا الموضع ما هو مقدار القوة الكلية المبذولة على الحبيبة؟ (a) في اتجاه الشمس (b) بعيدا عن الشمس (c) صفر (d) مستحيل ان نحدد بدون معرفة كتلة الحبيبة (ii) الان افترض ان الحبيبة تحركت إلى الخلف لموقعها الأصلي عند r_1 وتعرضت لضغط بحيث انها تبلورت في كرة بكثافة كبيرة، ومن ثم تحررت. في هذه الحالة ما هو القوة الكلية المبذولة على الحبيبة؟ اختر من الإجابات المتوفرة في الجزء (i).

10. (i) رتب الأنواع التالية من الأمواج طبقا لمدى طولها الموجي من الأطول إلى الأصغر، مع ملاحظة أي حالات تساوي: (a) اشعة جاما (b) ميكروويف (c) أمواج الراديو (d) الضوء المرئي (e) اشعة اكس. (ii) رتب أنواع الأمواج طبقا لترددتها من الأعلى إلى الأقل. (iii) رتب أنواع الأمواج طبقا لسرعاتها من الأسرع إلى الأبطأ. اختر من الإجابات المتوفرة في الجزء (i).

11. اعتبر موجة كهرومغناطيسية تتحرك في اتجاه محور y الموجب. المجال المغناطيسي المرتبط مع الموجة عند موقع معين ولحظة محددة في اتجاه محور x السالب كما هو موضح في الشكل OQ6.11. ما هو اتجاه المجال الكهربي عند هذا الموضع وتلك اللحظة؟ (a) في اتجاه محور x الموجب (b) في اتجاه محور y السالب (c) في اتجاه محور z الموجب (d) في اتجاه محور z السالب (e) في اتجاه محور y السالب.



الشكل OQ6.11

أسئلة نظرية Conceptual Questons

1. ما هو المبدأ الجديد الذي إضافة ماكسويل على قانون أمبير ؟

2. هل سمحت معادلات ماكسويل بوجود احادي قطب مغناطيسي؟ اشرح.

3. اذكر ثلاثة فروقات بين الأمواج الصوتية والأمواج الضوئية؟

4. اذا تواجد تيار كهربي ذو تردد عالي في ملف لولبي يحتوي على قالب معدني واصبح القالب ساخنا بسبب الحث. اشرح لماذا ترتفع درجة حرارة المادة في هذه الحالة.

5. عندما يتحرك ضوء عبر منطقة محددة (a) ما هو الذي يتذبذب؟ (b) ما هو الذي ينتقل؟

6. أوصف الأهمية الفيزيائية لمتجه بوينتينج .

7. لطاقة ساقطة من موجة كهرومغناطيسية، لماذا يكون ضغط الاشعاع على سطح عاكس تام اكبر بمرتين من سطح ماص تام؟

8. ما الدور الذي تؤثر به أمواج الراديو على الشحنات في انتينا الاستقبال لتوفير الإشارة على راديو سياراتك؟

9. لماذا يجب ان تبدو صور شخص التقطت بالأمواج تحت الحمراء مختلفة عن الصور بالضوء المرئي؟

10. صحن بلاستيكي أو زجاجي تم سحبه من فرن ميكروويف ووجد انه بارد يمكن حمله، حتى في حالة وجود طعام ساخن في الصحن. اشرح كيف يمكن ان يكون هذا.

Problems مسائل

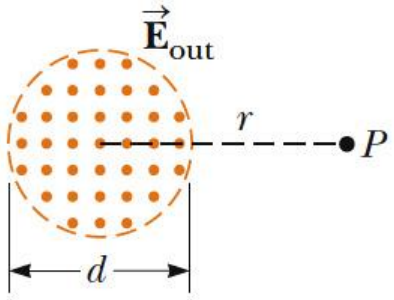
1. تشير لمسائل تطبيق مباشر **2.** تشير لمسائل متوسطة الصعوبة **3.** تشير إلى مسائل تحدي. **1.** مسائل لها حل مفصل في دليل الطالب الإرشادي **1.** تشير إلى مسائل لها حل مفصل فيديو على موقع داعم للكتاب. Q|C تشير إلى مسائل تحتاج إلى حل وتفسير S تشير إلى مسائل رمزية تتطلب تفسير **Shaded** تشير إلى مسائل مزدوجة تطور مفاهيم برموز وقيم عددية.

الفصل 1.6 تيار الازاحة والصيغة العامة لقانون أمبير Displacement Current and the General Form of Ampere's Law

1. يشحن تيار مقداره 0.10 A مكثف مكون من لوحين مربعين طول ضلعه 5.0 cm. المسافة بين اللوحين هي 4.00 mm. أوجد (a) المعدل الزمني لتغير الفيض الكهربي بين اللوحين و(b) تيار الازاحة بين اللوحين.

2. يشحن تيار مقداره 0.20 A مكثف له لوحين دائريين نصف قطره 10.0 cm. اذا كانت المسافة بين اللوحين هي 4.00 mm، (a) ما هو المعدل الزمني للزيادة في المجال الكهربي بين اللوحين؟ (b) ما هو المجال المغناطيسي بين اللوحين على بعد 5.00 cm من المركز؟

3. اعتبر الحالة الموضحة في الشكل P6.3. مجال كهربي مقداره 300 V/m محصورا في مساحة دائرية قطرها d = 10.0 cm وعمودية على المستوى في الشكل في اتجاه الخروج من الصفحة. اذا زاد المجال بمعدل 20.0 V/m.s، ما هو (a) الاتجاه و(b) مقدار المجال المغناطيسي عند نقطة P، و r = 15.0 cm من مركز الدائرة؟



الشكل P6.3

الفصل 2.6 معادلات ماكسويل واكتشافات هيرتز Maxwll's Equations and Hertz's Discoveries

4. ساق طويلة ورقيقة تحمل شحنة كهربية بكثافة خطية مقدارها 35.0 nC/m. انها تقع على امتداد محور x وتتحرك في اتجاه محور x بسرعة مقدارها 1.50×10^7 m/s. (a) أوجد المجال الكهربي التي تنتج عن الساق عند النقطة (x = 0, y = 20.0 cm, z = 0). (b)

أوجد المجال المغناطيسي الذي نتج عند نفس النقطة. (c) أوجد القوة المبذولة على الكترون عند هذه النقطة، يتحرك بسرعة مقدارها $(2.40\times10^{8})\hat{\mathbf{i}}$ m/s.

5. يتحرك بروتون خلال منطقة تحتوي على مجال كهربي منتظم هو $\vec{\mathbf{E}} = 50.0\hat{\mathbf{j}}$ V/m ومجال مغناطيسي منتظم هو $\vec{\mathbf{B}} = (0.200\hat{\mathbf{i}} + 0.300\hat{\mathbf{j}} + 0.400\hat{\mathbf{k}})$T. حدد تسارع البروتون عندما يمتلك سرعة $\vec{\mathbf{v}} = 200\hat{\mathbf{i}}$ m/s.

6. يتحرك الكترون خلال منطقة تحتوي على مجال كهربي منتظم هو $\vec{\mathbf{E}} = (2.\mathbf{50}\hat{\mathbf{i}} + 5.00\hat{\mathbf{j}})$ V/m ومجال مغناطيسي منتظم هو $\vec{\mathbf{B}} = 0.400\hat{\mathbf{k}}$ T. حدد تسارع الالكترون عندما يمتلك سرعة $\vec{\mathbf{v}} = 10.0\hat{\mathbf{i}}$ m/s.

الفصل 3.6 أمواج كهرومغناطيسية مستوية Plane Electromagnetic Waves

7. المسافة إلى النجم الشمالي بولاريس Polaris تصل إلى 6.44×10^{18} m. (a) اذا افترضنا ان بولاريس اشتعل اليوم كم سنة من الان سوف نراه قد اختفى؟ (b) ما هي الفترة الزمنية اللازمة لاشعة الشمس لكي تصل إلى الأرض؟ (c) ما هي الفترة الزمنية اللازمة لاشارة ميكروويف لتنتقل من الأرض إلى القمر ومن ثم تعود؟

8. ينبعث ضوء احمر من ليزر هيليوم – نيون طوله الموجي 632.8 nm. ما هو تردد أمواج الضوء؟

9. موجة موقوفة من أمواج راديو بين صفيحتين معدنيتين المسافة بينهما 2.00 m، ما هي اقل مسافة بين اللوحين سوف تنتج موجة موقوفة. ما هو تردد أمواج الراديو؟

10. موجة كهرومغناطيسية في الفراغ سعة مجالها الكهربي هو 220 V/m. احسب سعة المجال المغناطيسي لها.

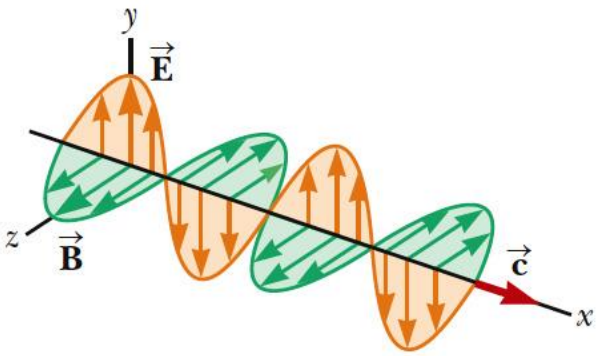
11. سرعة موجة كهرومغناطيسية تنتقل في مادة شفافة غير مغناطيسية هي $v = 1/\sqrt{\kappa\mu_0\varepsilon_0}$ حيث ان κ هي ثابت العزل الكهربي للمادة. احسب سرعة الضوء في الماء، والذي له ثابت عزل كهربي يساوي 1.78.

12. تحقق من خلال التعويض ان المعادلتين التاليتين هما حلول للمعادلتين 15.6 و16.6 على التوالي:

$$E = E_{max}\cos(kx - \omega t)$$
$$B = B_{max}\cos(kx - \omega t)$$

13. يوضح الشكل P6.13 موجة جيبية كهرومغناطيسية مستوية تنتشر في اتجاه محور x. افترض ان طولها الموجي هو 50.0 m والمجال الكهربي يتذبذب في المستوى xy بسعة مقدارها 22.0 V/m. احسب (a) تردد الموجة (b) المجال المغناطيسي $\vec{B}$ عندما يكون المجال الكهربي عند اقصى قيمة له في اتجاه محور y السالب. (c) اكتب صيغة لـ $\vec{B}$ باستخدام متجه الوحدة، مع ادراج القيم العديدية لكلا من B_{max} وk وω ومقداره في الصورة التالية:

$$B = B_{max}\cos(kx - \omega t)$$



الشكل P6.13

14. بالوحدات العالمية يوصف المجال الكهربي في الموجة الكهرومغناطيسية بـ

$$E_y = 100\sin(1.00 \times 10^7\, x - \omega t)$$

أوجد (a) سعة تذبذبات المجال المغناطيسي المصاحب، و(b) الطول الموجي λ و(c) التردد f.

15. فرن ميكروويف يعمل من خلال من خلال ماجنترون وهو عبارة عن جهاز الكتروني يولد أمواج كهرومغناطيسي بتردد 2.45 GHz. تدخل أمواج الميكروويف الفرن وتنعكس على الجدران. تعمل الأمواج الموقوفة المتكونة داخل الفرن على طهي الطعام مع تكون بقع ساخنة في الطعام عند بطن الموجة الموقوفة وبقع باردة عند عقد الموجة الموقوفة، لهذا السبب تستخدم قاعدة تدور لتوزيع الطاقة. اذا كان القصد هو استخدام فرن الميكروويف مع قاعدة ثابتة، فان البقع الساخنة سوف تظهر على الطعام. عند قياس المسافات بين البقع وجد انها تساوي 6 cm±5%. من هذه البيانات احسب سرعة اشعة الميكروويف.

16. لماذا الحالة التالية مستحيلة؟ تنتقل موجة كهرومغناطيسية خلال الفراغ لها مجال

كهربي ومجال مغناطيسي يوصفان بالمعادلتين التاليتين:

$$E = 9.00 \times 10^3 \cos[(9.00 \times 10^6)x - (3.00 \times 10^{15})t]$$
$$B = 3.00 \times 10^{-5} \cos[(9.00 \times 10^6)x - (3.00 \times 10^{15})t]$$

حيث ان كل القيم العددية والمتغيرات بالوحدات العالمية.

الفصل 4.6 الطاقة المحمولة بواسطة الأمواج الكهرومغناطيسية
Energy Carried by Electromagnetic Waves

17. اذا كانت شدة اشعة الشمس عند سطح الارض في سماء شبه صافية هو 1000 W/m^2، ما مقدار الطاقة الكهرومغناطيسية لكل متر مكعب في اشعة الشمس؟

18. عند اي مسافة من الشمس تكون شدة اشعة الشمس اكبر بثلاثة مرات قيمتها على الأرض؟ (متوسط المسافة بين الارض والشمس هي 1.496×10^{11} m).

19. ما متوسط مقدار متجه بوينتينج يبعد مسافة 5.00 mi من محطة راديو ترسل أمواج متساوية في كل الاتجاهات بمتوسط قدرة تساوي 250 kW؟

20. Q|C قدرة اشعة الشمس التي تصل كل متر مربع على سطح الأرض في يوم صافي على المناطق الدارية يساوي 1000 W. في احد ايام الشتاء في مانيتوبا Manitona، يصل تركيز قدرة اشعة الشمس حوالي 100 W/m^2. الكثير من الانشطة التي يقوم بها البشر تقدر بوحدة القدرة لكل وحدة مساحة وتصل إلى 102 W/m^2 أو اقل. (a) اعتبر على سبيل المثال، عائلة من اربعة اشخاص تدفع 66$ لشركة الكهرباء كل 30 يوم لاستهلاك مقداره 600 kWh من الطاقة لمنزلهم والذي تقدر ابعاد ارضيته 13.0 m في 9.50 m. احسب القدرة لكل وحدة مساحة استخدمتها العائلة. (b) اعتبر سيارة عرضها 2.10 m وطولها 4.90 m تنطلق بسرعة 55.0 mi/h باستخدام وقود البنزين وتمتلك حرارة احتراق 44.0 MJ/kg واستهلاك الوقود هو 25.0 mi/gal. كتلة جالون واحد من البنزين 2.54 kg. أوجد القدرة لكل وحدة مساحة تستهلكها السيارة. (c) اشرح لماذا يكون غير عملي استخدام اشعة الشمس مباشرة لتحريك سيارة. (d) ما هي بعض استخدامات الطاقة الشمسية التي تعتبر عملية اكثر؟

21. مجمع سكني يحتاج محطة لتحويل الاشعاع الشمسي إلى قدرة كهربية. يتطلب المجمع 1.0 MW من القدرة الكهربية، وكفاءة النظام المراد تركيبه هي 30.0% (اي ان 30.0% من الطاقة الشمسية تسقط على السطح تتحول إلى طاقة مفيدة). افترض ان شدة اشعة

الشمس ثابتة وتساوي $1000\ W/m^2$، ما هي المساحة الفعالة التي يجب ان تستخدم لامتصاص فعال في هذا النظام؟

22. في منطقة من الفراغ كان المجال الكهربي والمجال المغناطيسي في لحظة ما هما

$$\vec{\mathbf{E}} = (80.0\hat{\mathbf{i}} + 32.0\hat{\mathbf{j}} - 64.0\hat{\mathbf{k}})\ N/C$$
$$.\vec{\mathbf{B}} = (0.200\hat{\mathbf{i}} + 0.080\hat{\mathbf{j}} + 0.290\hat{\mathbf{k}})\mu T$$

(a) اثبت ان المجالين متعامدين على بعضهما البعض. (b) حدد متجه بوينتينج لهذين المجالين.

23. عندما يستخدم ليزر ذو طاقة عالية في الغلاف الجوي للكرة الأرضية، فان المجال الكهربي المرتبط مع شعاع الليزر يمكن ان يعمل على تأيين الهواء مما يحوله إلى بلازما موصلة تعكس الضوء. في هواء جاف عند درجة حرارة 0^oC وعند 1atm، فان التفريغ الكهربي يحدث للمجال عندما تكون سعته اعلى من $3.00\ MV/m$. (a) ما هي شدة شعاع الليزر التي سوف تنتج مثل هذا المجال؟ (b) عند هذه الشدة ما هو مقدار قدرة شعاع ليزر اسطواني الشكل قطره $5.00\ mm$؟

24. نمذج الموجة الكهرومغناطيسية في فرن الميكروويف كموجة مستوية تتحرك إلى اليسار بشدة تصل إلى $25.0\ kW/m^2$. يحتوي الفرن على وعاءين مكعبين بكتلة صغيرة بهما ماء. طول حافة احدهما هي $6.00\ cm$ والاخر هو $12.0\ cm$. تسقط الطاقة عموديا على سطح الوعاءين. يمتص الماء في الوعاء الصغير 70% من الطاقة التي تسقط عليه. ويمتص الماء في الوعاء الاكبر 91.0%. هذا يعني ان 0.300 من طاقة الميكروويف الساقطة تمر من خلال سمك من الماء مقداره $6.00\ cm$، و$0.090 = (0.30)(0.30)$ تمر من خلال سمك من الماء مقدار $12.0\ cm$. افترض ان مقدار مهمل يتسرب من اي من الوعائين بواسطة الحرارة. أوجد التغير في درجة حرارة الماء في كل وعاء على فترة زمنية مقدارها $480\ s$.

الشكل P6.25

25. تستخدم ليزرات ذات طاقة عالية في مصنع لقطع المعادن كما هو موضح في الشكل P6.25.

اذا كان قطر شعاع الليزر هو 1.00 mm ويولد مجال كهربي سعته 0.700 MV/m عند الهدف. أوجد (a) سعة المجال المغناطيسي الناتج، (b) شدة شعاع الليزر، (c) القدرة التي ينتجها الليزر.

26. اعتبر نجم مضيء في السماء. افترض ان المسافة بين الارض والنجم هي 20.0 سنة ضوئية (ly) والقدرة الناتجة هي 4.00×10^{28} W، اكبر بـ 100 مرة من الشمس. (a) أوجد شدة شعاع النجم عند الارض. (b) أوجد قدرة شعاع النجم عند الارض. السنة الضوئية هي المسافة التي يقطعها الضوء في الفراغ في سنة واحدة.

27. محطة راديو AM ترسل في كافة الاتجاهات بكميات متساوية في كل الاتجاهات بقدرة متوسطة مقدارها 4.00 kW. انتينا استقبال طولها 65.0 cm موضوعة على بعد 4.00 mi من محطة الراديو. احسب سعة القوة الدافعة الكهربية المستحثة بواسطة هذه الاشارة بين طرفي الانتينا.

28. Q|C افترض انتينا قدرتها 10.0 kW لمحطة راديو تشع أمواج كهرومغناطيسية كروية. (a) احسب اقصى قيمة للمجال المغناطيسي عند مسافة تبعد 5.00 km من الانتينا و(b) اذكر كيف ان هذه القيمة تقارن مع المجال المغناطيسي السطحي للكرة الارضية.

29. عند موقع محدد على الأرض، فان قيمة rms للمجال المغناطيسي الناتج عن الاشعاع الشمسي هي 1.80 μT. من هذه القيمة، احسب (a) قيمة rms للمجال الكهربي الناتج عن الاشعاع الشمسي، (b) متوسط كثافة الطاقة للمركبة الشمسية للاشعاع الكهرومغناطيسي عند هذا الموقع، و(c) متوسط مقدار متجه بوينتينج للاشعاع الشمسي.

الفصل 5.6 كمية الحركة وضغط الاشعاع
Momentum and Radiation Pressure

30. موجة راديو ترسل 25.0 W/m^2 من القدرة لكل وحدة مساحة. سطح مستوي مساحته A عموديا على اتجاه انتشار الموجة. افترض ان السطح ماص تام احسب ضغط الاشعاع عليه.

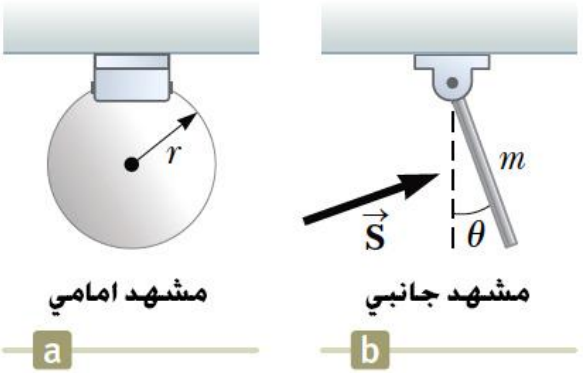
31. شعاع ليزر 25.0 mW قطرها 2.00 mm ينعكس بزاوية قائمة بواسطة مرآة عاكسة. احسب ضغط الاشعاع على المرآة.

32. من احد الطرق الممكن للتحليق في الفضاء هو وضع صفحية من الالومنيوم العاكس التام في مدار حول الارض ومن ثم استخدام ضوء الشمس لدفعها. افترض ان مساحة الصفحية هي $A = 6.00\times10^5\ \text{m}^2$ وكتلتها $m = 6.00\times10^3\ \text{kg}$ موضوعة في مدار يواجه الشمس. اهمل كل التأثيرات الجاذبية وافترض شدة الاشعاع الشمسي هو $1370\ \text{W/m}^2$. (a) ما هي مقدار القوة المبذولة على الصفيحة؟ (b) ما هو مقدار تسارع الصفيحة؟ (c) افترض ان التسارع الذي قمت بحسابه في الجزء (b) يبقى ثابتا، أوجد الفترة الزمنية اللازمة للصفحية لتصل إلى القمر والذي يبعد مسافة مقدارها $3.84\times10^8\ \text{m}$ مع البدء من السكون على الارض.

33. ليزر هيليوم نيون قدرته 15.0 mW قطر شعاعه 2.00 mm. (a) أوجد اقصى مجال كهربي في الشعاع. (b) ما مقدار الطاقة الكلية في شعاع طوله 1.00 m؟ (c) أوجد كمية الحركة التي يمتلكها 1.00 m من الشعاع.

34. S شعاع هيليوم نيون ليزر قطر شعاعه r وقدرته P. (a) أوجد اقصى مجال كهربي في الشعاع. (b) ما مقدار الطاقة الكلية في شعاع طوله l؟ (c) أوجد كمية الحركة التي يمتلكها طول l من الشعاع.

35. قرص دائرة كتلته $m = 24.0\ \text{g}$ ونصف قطره $r = 40.0\ \text{cm}$ معلق رأسيا من نقطة على محيطه كما هو موضح في الشكل P6.35a. شعاع كهرومغناطيسي شدته $10.0\ \text{MW/m}^2$ يسقط عموديا على سطح القرص. القرص ماص تام وضغط الاشعاع يجعل القرص يدور. أوجد الزاوية θ التي يدور خلالها القرص من الاتجاه الرأسي حتى يصل إلى نقطة اتزان جديدة والموضحة في الشكل P6.35b.



الشكل P6.35

36. Q|C شدة اشعة الشمس على مسافة من الارض إلى الشمس تبلغ 1370 W/m2. افترض ان الارض تمتص كل اشعة الشمس الساقطة. () أوجد القوة الكلية التي تبذلها الشمس على الارض بسبب ضغط الاشعاع. (b) اشرح كيف ان هذه القوة تقارن مع قوة الجاذبية للشمس.

37. Q|C موجة كهرومغناطيسية مستوية شدتها $6.00\ W/m^2$، تتحرك في اتجاه محور x الموجب، وتصطدم في مرآة صغيرة لها عاكسية تامة مساحتها $40.0\ cm^2$، موضوعة في المستوى yz. (a) ما هي مقدار كمية الحركة التي تنقلها الموجة إلى المرآة في كل ثانية؟ (b) أوجد القوة التي تبذلها الموجة على المرآة. (c) اشرح العلاقة بين الاجابات في الجزئين (a) و(b)

38. Q|C افترض ان شدة الاشعاع الشمسي الساقط على الطبقة العليا للغلاف الجوي للارض هي $1370\ W/m^2$. احسب (a) شدة الاشعاع الشمسي الساقط على المريخ، و(b) القدرة الكلية الساقطة على المريخ، و(c) قوة الاشعاع المؤثر على هذا الكوكب اذا امتص كل الضوء الصادر تقريبا. (d) اذكر كيف ان هذه القوة تقارن مع قوة الجاذبية الخارجية المبذولة بواسطة الشمس على المريخ. (e) قارن النسبة بين القوة الجاذبية وقوة الضغط المبذولة على الارض ونسبة هذه القوى المبذولة على المريخ التي وجدت في الجزء (d).

الفصل 6,6 انتاج الأمواج الكهرومغناطيسية بواسطة انتينا Production of Electromagnetic Waves by an Antenna

39. تستخدم انيتنا ماركوني في معظم محطات راديو AM والتي تكون من النصف العلوي لانتينا هيرتز والتي تعرف ايضا بانتينا نصف الموجة لان طولها يساوي $\lambda/2$. طرف هذه النتينا متصل مع الارضي ويعمل الارضي كانه النصف المفقود الاخر من الانتينا . ما هو ارتفاعات انتينا ماركوني لمحطات راديو التي ترسل عند (a) 560 kHz و(b) 1600 kHz؟

40. Q|C موجة ذات تردد منخفض جدا يمكنها ان تخترق المحيطات تعتبر هي الطريقة العملية الوحيدة للاتصالات عبر الغواصات. (a) احسب طول انتينا ربع الطول الموجي للمرسل الذي يولد أمواج بتردد 75.0 Hz في الهواء. (b) ما هو تقديرك لامكانية استخدام هذه الطريقة للاتصالات؟

41. انتيناتين راديو رأسيتين منفصلتين بنصف طول موجي ولهما نفس الطور مع بعضهما البعض. في اي اتجاه افقي يكون (a) الاقوى و(b) اضعف اشارة؟

42. S شحنات متسارعة تشع أمواج كهرومغناطيسية. احسب الطول الموجي للاشعاع الناتج عن بروتون كتلته m_p يتحرك في مسار دائري عموديا على مجال مغناطيسي B.

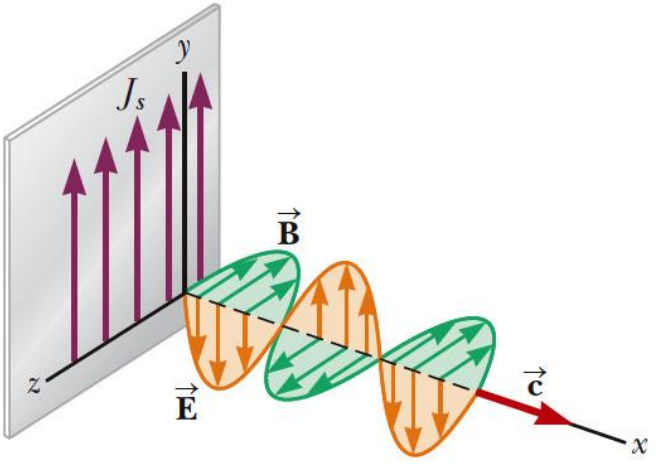
43. صفيحة مسطحة كبيرة يمر بها تيار كهربي موزع بانتظام بتيار لكل وحدة اتساع J_s. يولد هذا التيار مجالا مغناطيسيا على كلا الجانبين من الصفحية وفي اتجاه موازي للصفيحة وعموديا على التيار، مقداره $B = \frac{1}{2}\mu_0 J_s$. اذا كان التيار الكهربي في اتجاه محور y وبتذبذب مع الزمن حسب العلاقة

$$J_{max}(\cos \omega t)\hat{\mathbf{j}} = J_{max}[-\omega t]\hat{\mathbf{j}}$$

تشع الصفيحة موجة كهرومغناطيسية. الشكل P6.43 يوضح موجة تنبعث من نقطة على صفيحة وضعت عند نقطة الاصل. مثل هذه الأمواج الكهرومغناطيسية تنبعث من كل النقاط على الصفيحة. المجال المغناطيسي للموجة على اليمين من الصفيحة موضح بالدالة الموجية التالية:

$$\vec{\boldsymbol{B}} = \frac{1}{2}\mu_0 J_{max}[\cos(kx - \omega t)]\hat{\mathbf{k}}$$

(a) أوجد الدالة الموجية للمجال الكهربي للموجة على اليمين من الصفيحة. (b) أوجد متجه بوينتينج كدالة في x و t. (c) أوجد شدة الموجة (d) ماذا لو؟ اذا اللوح يبعث اشعاع في كل الاتجاهات (عموديا على مستوى الصفيحة) بشدة $570\ \text{W/m}^2$، ما هو اقصى قيمة لكثافة التيار الجيبي اللازمة؟



الشكل P6.43

الفصل 7.6 طيف الأمواج الكهرومغناطيسية The Spectrum of Electromagnetic Waves

44. احسب تردد الموجة الكهرومغناطيسية التي لها طول موجي يساوي (a) ارتفاعك و(b) سمك روقة. (قدر القيم) كيف تصنف كل موجة على الطيف الكهرومغناطيسي؟

45. ما هي الاطوال الموجية للأمواج الكهرومغناطيسية في الفراغ التي لها التردد (a) 5.00×10^{19} Hz و(b) 4.00×10^{9} Hz؟

46. Q|C تم نقل خبر هام عبر أمواج الراديو لاشخاص معهم اجهزة راديو يبعدون 100 km عن المحطة وكذلك لاشخاص يجلسون في غرفة الاخبار يبعدون مسافة 3.00 m عن غرفة الاخبار. باعتبار سرعة الصوت في الهواء هي 343 m/s، من يستقبل الخبر أولا؟ اشرح.

إجابات أسئلة للتفكير

1. (i) (b) (ii) (c)

2. (c)

3. (c)

4. (b)

5. (a)

6. (c)

7. (a)

إجابات الأسئلة الفردية

1. (a) 11.3 GV.m/s (b) 0.100 A

3. (a) في اتجاه الخروج من الصفحة (b) 1.85×10^{-18} T

5. $(-2.87\hat{j} + 5.75\hat{k}) \times 10^{9}$ m/s^2

7. (a) 681 yr (b) 8.32 min (c) 2.56 s

9. 74.9 MHz

11. 2.25×10^8 m/s

13. (a) 6.00 MHz (b) $-73.4\hat{k}$ nT (c) $B = -73.4\hat{k} \cos(0.126x - 3.77 \times 10^7 t)$

15. 2.9×10^8 m/s ±5%

17. 3.34 μJ/m^3

19. 307 μW/m^2

21. 3.33×10^3 m^2

23. (a) 1.19×10^{10} W/m^2 (b) 2.35×10^5 W

25. (a) 2.33 mT (b) 650 MW/m^2 (c) 511 W

27. 49.5 mV

29. (a) 540 V/m (b) 2.58 μJ/m^3 (c) 773 W/m^2

31. 5.31 3 10^{-5} N/m^2

33. (a) 1.90 kN/C (b) 50.0 pJ (c) 1.67×10^{-19} kg.m/s

35. 4.09°

37. (a) 1.60×10^{-10} î kg.m/s each second

(b) 1.60×10^{-10} î N (c) الإجابة هي نفسها.
القوة هي المعدل الزمني لانتقال كمية الحركة

39. (a) 134 m (b) 46.8 m

41.

(a) بعيدا على امتداد المنصف العمودي للخط الواصل بين الانتينات (b) على امتداد الزيادة في الخط الواصل بين الانتينات.

43. (a) $\vec{\boldsymbol{E}} = \frac{1}{2}\mu_0 c J_{max}[\cos(kx - \omega t)]\hat{j}$ (b) $\vec{\boldsymbol{S}} = \frac{1}{4}\mu_0 c J_{max}^2[\cos^2(kx - \omega t)]\hat{i}$

(c) $I = \frac{1}{8}\mu_0 c J_{max}^2$ (d) 3.48 A/m

45. (a) 6.00 pm (b) 7.49 cm

د. حازم فلاح سكيك
استاذ الفيزياء المشارك بجامعة الازهر – غزة

- رئيس قسم الفيزياء بجامعة الازهر - غزة في الفترة 1993-1998
- مؤسس وعميد كلية الدراسات المتوسطة بجامعة الازهر - غزة من الفترة 1996-2005 و2017
- عميد القبول والتسجيل بجامعة الازهر - غزة في الفترتين 1998-2000 و2007-2008
- مدير الحاسب الالي بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 1994-2000
- رئيس وحدة تكنولوجيا المعلومات بجامعة الازهر - غزة في الفترة من 2000-2005
- مؤسس موقع الفيزياء التعليمي
- مؤسس اكاديمية الفيزياء للتعليم الالكتروني
- مؤسس مركز الترجمة العلمي
- مؤسس قناة الفيزياء التعليمي على اليوتيوب
- مؤسس ورئيس تحرير مجلة الفيزياء العصرية

لمزيد من المعلومات يرجى زيارة

المؤسسة الإعلامية لشبكة الفيزياء التعليمية

www.hazemsakeek.net