محاضرات مادة الفيزياء /2/

لطلاب السنة الأولى

(ميكاترونيكس)

الأستاذ الدكتور جبُّور نوفل جبُّور

2025 - 2024

الفصل الرابع

الأمواج الكهرطيسية

Electromagnetic Waves

1) مقدمة،
2) توقعات ماكسويل،
3) تأكيد هرتز على توقعات ماكسويل،
4) توليد أمواج كهرطيسية بواسطة هوائي،
5) خصائص الأمواج الكهرطيسية،
6) طيف الأمواج الكهرطيسية،
7) مفعول دوبلر للأمواج الكهرطيسية،

الأمواج الكهرطيسية

1- مقدمة: Introduction

خلال دراسة الظواهر الكهربائية والمغناطيسية لوحظ أن هناك ظواهر تتعلق ببعضها البعض. في عام 1865، وضع الفيزيائي **"جيمس كليرك ماكسويل – James Clerk Maxwell (1831-1879)"** نظرية رياضية تسمح الربط بين الظواهر الكهربائية والمغناطيسية. إضافة لتوحيد الشكل المنفصل السابق للحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي، فإن هذه النظرية المهمة والمتألقة تتوقع أن الحقول الكهربائية والمغناطيسية يمكن أن تنتشر في الفضاء على شكل أمواج. إذاً، ما هي توقعات **ماكسويل**، أو بتعبير آخر ما هي نظرية **ماكسويل** في هذا المجال.

2- توقعات ماكسويل: Maxwell's Predictions

إن توقعات ماكسويل أو نظريته تعتمد على النقاط الآتية:

1) خطوط الحقل الكهربائي تبدأ من الشحنات الموجبة (تخرج من الشحنات الموجبة) وتنتهي بالشحنات السالبة (وتدخل إلى الشحنات السالبة).
2) خطوط الحقل المغناطيسي المشكلة (المتولدة) عن حلقات مغلقة، لا تبدأ أو لا تنتهي في أي مكان آخر، أو إلى أي مكان آخر.
3) إن تغير الحقل المغناطيسي يُحرض (يولد) قوة محركة كهربائية emf ومنه حقل كهربائي. إن هذا ما يُدعى بـ **"قانون فاراداي"**.
4) الحقول المغناطيسية تُولد بحركة الشحنات الكهربائية (أو بالتيارات الكهربائية)، كما هو موجز ومختصر بما يُدعى بـ **"قانون أمبير"**.

انطلاقاً مما سبق لا بد من الإشارة إلى مجموعة من النتائج:

- **النتيجة أولى**: الشحنات الكهربائية توجد بشكل حر في الطبيعة.
- **النتيجة ثانية**: الشحنات المغناطيسية لا توجد بشكل حر في الطبيعة.
- **النتيجة الثالثة**: التكافؤ بين قانون فاراداي والتحريض.
- **النتيجة الرابعة**: التكافؤ بين قانون أمبير وحركة الشحنات الكهربائية (التيارات الكهربائية)، أي توليد الحقول المغناطيسية.

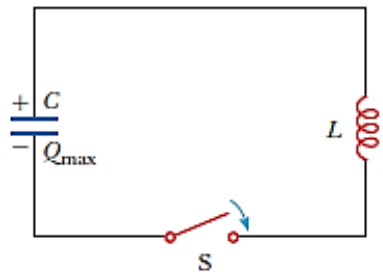
من أبرز النظريات التي تم تطويرها في القرن التاسع عشر هي نظرية ماكسويل في الكهرباء والمغناطيسية، حيث استخدم النتائج الأربعة المذكورة أعلاه لصياغة نظريته رياضياً والتي تبرهن أن الحقول الكهربائية والحقول المغناطيسية تلعب دور متناظر في الطبيعة.

نحن نعلم مسبقاً من التجارب أن تغير الحقل المغناطيسي يولد حقل كهربائي بحسب **قانون فاراداي**. اعتقد ماكسويل أن الطبيعة متناظرة، ووفقاً لذلك افترض تغير الحقل الكهربائي يجب أن يولد حقل مغناطيسي. وهذا الفرض لم يتم التأكد منه تجريبياً في تلك الفترة الزمنية (زمن ماكسويل) لأنه الحقول المغناطيسية المولدة بتغير الحقول الكهربائية كانت، بشكل عام، ضعيفة جداً، وهذا شكل صعوبة لكشفه.

ولتبرير فرضيته، انتقل ماكسويل في البحث عن ظواهر أخرى يمكنها شرح فرضيته. لفت انتباه ماكسويل الحركة الاهتزازية السريعة للشحنات، أي تسريع الشحنات، حيث مثل هذه الظاهرة يمكن ملاحظتها في قضيب ناقل موصول بمولد أو بمنبع جهد متناوب. عند تسريع شحنات كهربائية، وبحسب توقعات ماكسويل، فهذه الشحنات تولد حقول كهربائية ومغناطيسية متغيرة. إن تغير الحقول يؤدي اضطرابات كهرومغناطيسية أو كهرطيسية تنتشر في الفضاء على شكل أمواج، شبيهة بانتشار الأمواج المائية المتولدة عن سقوط حجرة في بركة ماء. هذه الأمواج تصدر أو تُرسل نتيجة اهتزاز الشحنات، وهذا بدوره يؤدي إلى تموج كل من الحقل الكهربائي والمغناطيسي، وتُدعى بالـ **"أمواج الكهرطيسية – electromagnetic waves"**. انطلاقاً من قانون فاراداي ومن وتعميم ماكسويل لقانون أمبير، حسب ماكسويل سرعة تلك الأمواج ووجد أنها تساوي لسرعة الضوء $c = 3 \times 10^8 m/s$. وخلص ماكسويل للقول إن الضوء المرئي والأمواج الكهرطيسية تتكون من تموجات تغيرات للحقل الكهربائي والحقل المغناطيسي المنتشرة في الخلاء، حيث أن تغير كل واحد منها يولد الآخر (تغير الحقل الكهربائي يولد حقل مغناطيسي والعكس بالعكس). وكان هذا حقاً عبارة عن أكبر اكتشاف علمي، وهذا مكافئ لاكتشاف نيوتن لقوانين الحركة. إن هذين الاكتشافين كان لهما تأثير كبير وأساسي على تطور العلوم.

3- تأكيد هرتز على توقعات ماكسويل: Hertz's Confirmation of Maxwell's Predictions

في عام 1887، بعد وفاة ماكسويل، الفيزيائي "هينريش هرتز – Heinrich Hertz (1857-1894)" كان أول من ولّد وكشف الأمواج الكهرطيسية في المخبر، وذلك باستخدام دارة مؤلفة من وشيعة ومكثفة، دارة LC. في مثل هذه الدارة مكثفة مشحونة موصولة مع وشيعة، كما هو مبين في الشكل (1). عند اغلاق القاطعة، اهتزازات (تغيرات) تحدث للتيار في الدارة وشحنة المكثفة. إذا أهملنا مقاومة الدارة، ليس هناك من طاقة ضائعة والاهتزازات (التغيرات) تستمر.

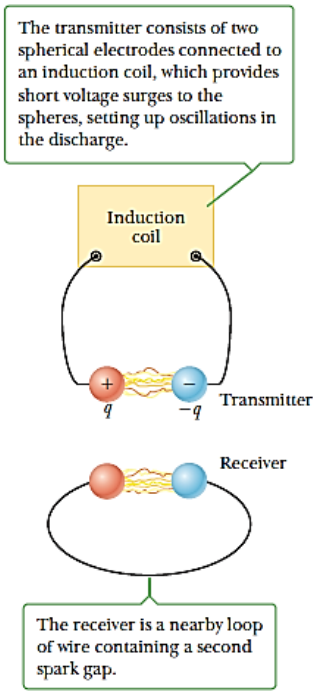
	شكل (1): دارة بسيطة مؤلفة من وشيعة ومكثفة LC. نعتبر المكثفة في اللحظة البدائية $t = 0$ ، أن شحنتها عُظمى Q_{max}.

بمتابعة تحليل الدارة، نهمل مقاومة الدارة. نفرض أن الشحنة البدائية للمكثفة هي Q_{max}، في اللحظة البدائية $t = 0$. عندما تكون المكثفة مشحونة بالكامل، الطاقة الكلية في الدارة تُخزن في الحقل الكهربائي للمكثفة الذي يساوي $Q_{max}^2/2C$. في تلك اللحظة، التيار يساوي الصفر، حيث ليس هناك من طاقة مخزنة في الوشيعة. وعندما تبدأ المكثفة بتفريغ شحنتها، الطاقة تُخزن في حقلها الكهربائي الذي يتناقص. في تلك الفترة الزمنية، التيار يتزايد والطاقة تساوي إلى $LI^2/2$، حيث تكون مخزنة في الحقل المغناطيسي للوشيعة. وهكذا، الطاقة تُنقل من شكل الحقل الكهربائي للمكثفة إلى شكل الحقل المغناطيسي للوشيعة. وعندما تُفرغ المكثفة شحنتها بالكامل، لا تُخزن عندها أي طاقة. في تلك الفترة الزمنية، تصل قيمة التيار إلى قيمته العظمى وكامل الطاقة عندها تكن مُخزنة في الوشيعة. وهذه الآلية تُكرر في الاتجاه المعاكس. الطاقة تستمر بالتنقل بين الوشيعة والمكثفة، وهذا يترافق باهتزاز (بتغير) التيار والشحنة.

كما رأينا سابقاً، فإن تردد اهتزاز الدارة LC يُطلق عليه اسم "التردد الطنيني – resonance frequency" للدارة ويُعطى بالعلاقة الآتية:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

إن الدارة التي استخدمها هرتز لدراسة الأمواج الكهرطيسي مشابهة للدارة الموضحة في الشكل (2). ملف تحريضي (عبارة عن ملف كبير مصنوع من سلك) موصول بكرتين معدنيتين مفصولتين عن بعضهما البعض بمسافة صغيرة شبيه بمكثفة. بدأت اهتزازات في الدارة بسبب نبضات جهد قصري تُرسل للكرتين عبر الملف، حيث تُشحن الأولى بشحنة موجبة، والأخرى بشحنة سالبة. بسبب صغر كل من الوشيعة والمكثفة في الدارة، تردد الاهتزاز يكون عالي، $f \approx 100\ MHz = 100 \times 10^6\ Hz$. تُسمى هذه الدارة بدارة النقل (دارة إرسال) لأنها تولد (تُنتج) أمواج كهرطيسية.



شكل (2): مخطط مبسط للدارة التي استخدمها هرتز لتوليد وكشف أمواج كهرطيسية.

وضع هرتز، على بعد عدة أمتار من دارة النقل (الإرسال)، دارة ثانية، دارة استقبال (مستقبل)، مكونة من حلقة مفردة مصنوعة من سلك وموصولة بكرتين. لاحظ أن هناك تحريض، وسعة، وتردد طبيعي اهتزازي. قال هرتز إن هناك طاقة أرسلت من دارة النقل (المرسل) إلى دارة المستقبل عند ضبط التردد الطنيني للمستقبل للالتقاط تردد المرسل. تم كشف الطاقة المنقولة عندما يصبح الجهد المار في كرات دارة المستقبل عالي بشكل كافي لتوليد تأيين الهواء، حيث يُسبب هذا شرارات تظهر في الهواء (الفجوة) الفاصل بين الكرات. إن تجرب هرتز مماثلة لظاهرة ميكانيكية حيث نلاحظ سماع صوت عند استخدام ما يُدعى بالشوكة الرنانة (تُستخدم في مجال التجارب الصوتية).

افترض هرتز أن انتقال الطاقة المنتقلة من المرسل إلى المستقبل تُحمل على شكل أمواج، نسميها الآن بالأمواج الكهرطيسية، وهذه الأمواج تتمتع أو لها خواص مثل التداخل، الانعراج، الانكسار، الانعكاس، والاستقطاب. وكل هذه الصفات تُشرح بواسطة "الضوء الفيزيائي – Physical light".

أصبح من الواضح أن أمواج هرتز الكهرطيسية لها نفس خواص الأمواج الضوئية، ولكن تختلف فقط في التردد وطول الموجة. وهكذا أكد هرتز نظرية ماكسويل بأن الأمواج الكهرطيسي الغريبة لماكسويل هي فعلاً موجودة ولها كل خواص الأمواج الضوئية. وتم حساب سرعة تلك الأمواج من قبل هرتز ووجد أن سرعتها تساوي لسرعة الضوء المرئي، أي $3 \times 10^8 m/s$.

4- توليد أمواج كهرطيسية بواسطة هوائي:

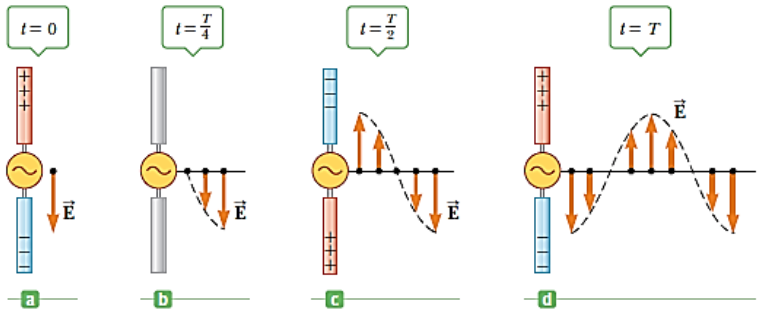
رأينا سابقاً أن الطاقة المخزنة في دارة LC تُنقل بشكل مستمر بين الحقل الكهربائي للمكثفة والحقل المغناطيسي للملف للوشيعة. وهذه الطاقة المنقولة، مع ذلك، تستمر لفترات زمنية (لأدوار) فقط

عندما تكون التغيرات بطيئة. إذا كان التيار يتبدل بشكل سريع، تخسر الدارة بعضاً من طاقتها على شكل أمواج كهرطيسية. في الواقع، يتم إشعاع الأمواج الكهرطيسية من قبل أي دارة يمر بها تيار متناوب.

إن علم الميكانيك الأساسي هو المسؤول عن هذه الإشعاع والذي يتم بتسريع جسيمات مشحونة. إذاً، كلما تم تسريع جسيم مشحون، فهذا الجسيم يُشع طاقة.

إن تطبيق جهد متناوب على أسلاك هوائي (antenna) يُجبر الشحنات الكهربائية في الهوائي على الاهتزاز. هذه التقنية بتسريع الجسيمات المشحونة هي المنبع لأمواج الراديو الصادرة (المرسلة) بواسطة هوائي البث في محطة الراديو.

يوضح الشكل (3) توليد موجة كهرطيسية باهتزاز (حركة) الشحنات الكهربائية في هوائي. قضيبان معدنيان موصولان بمنبع للتيار المتناوب، يؤدي لاهتزاز (لحركة) الشحنات بين القضيبين. إن جهد الخرج من المنبع هو جهد جيبي. في اللحظة $t = 0$، القضيب العلوي يُعطي شحنة موجبة أعظمية أو عظمى، والقضيب السفلي شحنته تساوي القضيب العلوي لكن بإشارة سالبة، كما هو مبين في الشكل (a3)، وشدة الحقل بالقرب من القضيبين تتناقص. وفي اللحظة $t = 0$ حيث قيمة الحقل الكهربائي المتولد عظمى يُغير اتجاهه ويتحرك مبتعداً عن القضيب. وعندما تصبح الشحنات معتدلة، كما هي في الشكل (b3)، الحقل الكهربائي ينخفض إلى القيمة صفر، وذلك بعد زمن قدره ربع دور من دور الاهتزاز. وبالاستمرار بهذه الطريقة، الشحنة العظمى للقضيب العلوي تصبح سالبة بينما للقضيب السفلي تصبح موجبة، كما مبين في الشكل (c3)، ناتجاً عن ذلك حقل كهربائي موجه نحو الأعلى. وهذا يحدث بعد نصف دور من دور الاهتزاز. وهذه الاهتزازات تستمر كما مبين في الشكل (d3).



شكل (3): توليد حقل كهربائي باهتزاز (حركة) شحنات في هوائي. يبتعد الحقل بعيداً عن الهوائي بسرعة تساوي لسرعة الضوء.

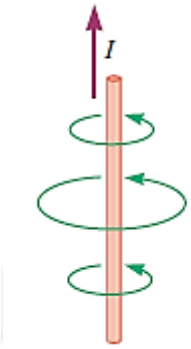
ونشير هنا إلى أن الحقل الكهربائي المهتز بالقرب من الهوائي له نفس الطور مع توزع الشحنة الكهربائية: يتجه الحقل للأسفل عندما يكون القضيب العلوي مشحون إيجابياً، ونحو الأسفل عندما يكون مشحون سلبياً. ومنه، فإن قيمة الحقل في أي لحظة تتعلق بقيمة الشحنة على القضيب في تلك اللحظة.

وباستمرار اهتزاز الشحنة (وتسريعها) بين القضيبين، فالحقل الكهربائي الناتج عن الشحنات يتحرك مبتعداً عن الهوائي في كل الاتجاهات بسرعة الضوء. والشكل (3) يبين سلوك الحقل الكهربائي بجهة واحدة من الهوائي خلال فترة زمنية تعادل دورة اهتزاز واحدة. كما نرى، دورة واحدة لاهتزاز (لتغير) الشحنة يولد طول موجة واحدة للحقل الكهربائي.

ملاحظة: (تسارع الشحنات يولد أمواج كهرطيسية)

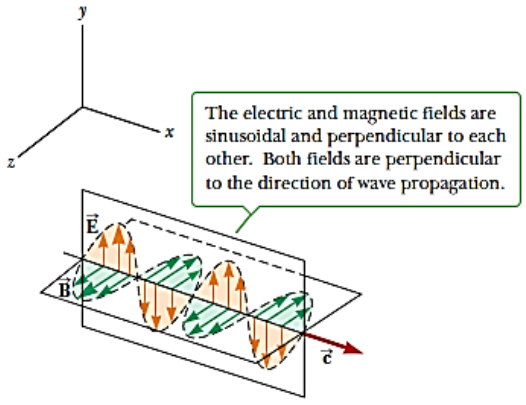
إن الشحنات الكهربائية الساكنة تولد فقط حقول كهربائية، بينما الشحنات التي تتحرك بانتظام (أي بسرعة ثابتة) تولد حقل كهربائي وحقل مغناطيسي، وليس هنا من توليد أمواج كهرطيسية. بالمقابل، الشحنات المُسرعة تولد حقول كهربائية ومغناطيسية. والشحنة المُسرعة تُشع أيضاً طاقة.

وبما أن اهتزاز الشحنات يولد تيار في القضيب، هناك أيضاً حقل مغناطيسي متولد عندما يكون اتجاه التيار في القضيب نحو الأعلى، كما هو مبين في الشكل (4). إن خطوط الحقل المغناطيسي تُشكل دوائر حول القضيب (وفق القاعدة الثانية لليد اليمنى) وتعامد الحقل الكهربائي في كل النقاط. وبما أن التيار يتغير مع الزمن، خطوط الحقل المغناطيسي تنتشر خارج الهوائي، مبتعدة عن الهوائي. من أجل المسافات البعيدة عن الهوائي، فإن كل من الحقل الكهربائي والمغناطيسي يُصبحان ضعيفان جداً.



شكل (4): خطوط حقل مغناطيسي حول هوائي يمر به تيار.

عند تلك المسافات، من الضروري أن نأخذ بالحسبان الوقائع التالية: **(1)** تغير الحقل المغناطيسي يولد حقل كهربائية، **(2)** وتغير الحقل الكهربائي يولد حقل مغناطيسي، كما توقع ماكسويل. وهذا يؤدي إلى أن الحقول الكهربائية والمغناطيسية تمتلك نفس الطور (لها نفس الطور): في أي نقطة، يبحثان الحقلان عن قيمها العظمى في نفس اللحظة. إن تزامن أو تناغم الحقلين موضح، في لحظة زمنية، في الشكل (5). نلاحظ أن: **(1)** إن الحقل الكهربائي $\vec{E}$ والحقل المغناطيسي $\vec{B}$ متعامدان على بعضهما البعض، و **(2)** وكلا الحقلين عاموديان على اتجاه حركة الموجة. إن الخاصة الثانية التي تميز الحقلين أنهما عبارة عن أمواج عرضية. ومنه، نرى **أن الموجة الكهرطيسية هي موجة عرضية.**



شكل (5): موجة كهرطيسية تصدرها شحنات مهتزة (متحركة) في هوائي، ممثلة بلحظة زمنية وبعيدة عن الهوائي، تتحرك بالاتجاه الموجب للمحور x بسرعة الضوء c.

5- خصائص الأمواج الكهرطيسية:

سوف نتكلم عن خصائص الأمواج الكهرطيسية. وفي أغلب الأحيان نتكلم أو نشير إلى مفهوم الموجة الكهرطيسية المستوية. والموجة الكهرطيسية المستوية هي موجة تسافر وتبتعد مسافة كبيرة عن المنبع. ويوضح الشكل (5) صورة عن تلك الموجة مأخوذة بلحظة معينة.

في هذه الحالة، فإن الاهتزازات لكلا الحقلين الكهربائي والمغناطيسي تقد في مستويين عموديين على المحور x، ومن ثم فهما عموديان على اتجاه انتشار الموجة. وفق الشكل (5)، فإن اتجاه الحقل الكهربائي $\vec{E}$ يكون وفق المحور y، والحقل المغناطيسي $\vec{B}$ يكون وفق z. إن الضوء ينتشر في الاتجاه العمودي على الحقلين. ويُحدد الاتجاه وفق قاعدة اليد اليمنى الأولى: (1) نوجه أصابع اليد اليمنى باتجاه الحقل الكهربائي $\vec{E}$، (2) ندور الأصابع باتجاه الحقل المغناطيسي $\vec{B}$، و (3) اتجاه الابهام يُعطي اتجاه انتشار الموجة.

إن سرعة الأمواج الكهرطيسية تساوي سرعة الضوء. ويمكن البرهان على أن سرعة الموجة الكهرطيسية يتعلق بنفوذية وسماحية الوسط الذي تنتشر به الموجة. وجد ماكسويل العلاقة التالية من أجل الخلاء (فضاء فارغ):

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

حيث c سرعة الضوء، $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ N.s/C^2$ نفوذية الخلاء، و $\varepsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}\ C^2.s/N.m^2$ سماحية الخلاء. وبالتبديل في المعادلة (1) نجد أن:

$$c = 2{,}997\ 92 \times 10^8\ m/s \qquad (2)$$

وبما أن سرعة الأمواج الكهرطيسية لها نفس سرعة الضوء في الخلاء، فالعلماء اختصروا أو أوجزوا ما سبق أن **الضوء هو عبارة عن أمواج كهرطيسية**.

برهن ماكسويل أيضاً على العلاقة التالية للأمواج الكهرطيسية:

$$\frac{E}{B} = c \qquad (3)$$

أي أن النسبة بين قيمة الحقل الكهربائي وقيمة الحقل المغناطيسي تساوي لسرعة الضوء.

ملاحظة:

من العلاقة السابقة يمكننا كتابة العلاقة $E = cB$ التي تُظهر أن الحقول الكهربائية المرافقة للضوء أكبر بكثير من الحقول المغناطيسية. ولكن هذا غير صحيح في هذه الحالة: بسبب أن الواحدات مختلفة، وهكذا لا يمكن المقارنة مباشرة. الحقلان يُساهما بالتساوي في طاقة الموجة الضوئية.

تحمل الأمواج الكهرطيسية طاقة، كما هي تنتشر في الفضاء، وهذه الطاقة تُنقل للأجسام (للأشياء) الموجودة في طريقها. إن المعدل الوسطي للطاقة التي تعبر سطح عمودي على انتشار الموجة، أو الاستطاعة

الوسـطى بواحدة السـطح، يُطلق عليه اسـم "**شـدة الموجة – intensity of the wave**"، ويُرمز له بـــ I، وتُعطى بالعلاقة الآتية:

$$\boldsymbol{I = \frac{E_{max}B_{max}}{2\mu_0}} \qquad \textbf{(4)}$$

حيث E_{max} و B_{max} القيم العظمى لكل من الحقل الكهربائي E والمغناطيسـي B. إن I هنا مشـابهة (موافقة) لشدة الأمواج الصوتية التي رأيناها عند دراسة الصوت سابقاً. من المعادلة (3) نرى أن:

$$E_{max} = cB_{max} = \frac{B_{max}}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$$

ومنه فالمعادلة (4) يمكن أن تُكتب على النحو الآتي:

$$\boldsymbol{I = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0}B_{max}^2} \qquad \textbf{(5)}$$

ونشير إلى أنه في تلك العلاقات نستخدم مفهوم "**الاستطاعة الوسطى – average power**" بواحدة المساحة أو السطح. وهناك تحاليل مفصلة يمكن أن تبرهن أن مساهمة كل من الحقول الكهربائية والمغناطيسية في الطاقة المحمولة من قبل الموجة الكهرطيسية تكون متساوية.

وعندما تصطدم موجة بجسم سطحه A بزمن قدره Δt، فالطاقة التي تُنقل لهذا السطح تساوي: $U = IA\Delta t$. وتُنقل لهذا السـطح كمية حركة أيضـاً. نتيجة لذلك هناك ضـغط يُمارس على السـطح عند اصـطدام الموجة به. إذاً، يمكن أن نفرض أو نعتبر أن الموجة الكهرطيسـية تنقل كل طاقتها U للسـطح في الزمن Δt. وإذا السـطح امتص كامل الطاقة U (امتصـاص كلي) في هذا الزمن، برهن ماكسـويل أن كمية الحركة الكلية $\vec{\boldsymbol{p}}$ المُعطاة أو المقدمة للسطح تساوي:

$$\boldsymbol{p = \frac{U}{c}} \qquad \textbf{(6)}$$

إذا كان السطح عاكس بشكل كامل، فكمية الحركة المنقولة في الفترة الزمنية Δt من أجل تصادم أو اصطدام ناظمي تساوي ضعف المقدار المُعطى بالعلاقة السابقة (6). إن هذا مشابه لاصطدام، جزيئات غاز نشيطة وقوية جدار وعاء، بشكل تصادم مرن تام. في البداية جزيئات الغاز تسير بالاتجاه الموجب للمحور x وبسرعة v. وفي هذه الحالة فإن تغير كمية الحركة يساوي:

$$\Delta p = mv - (-mv) = 2mv$$

والضوء المصطدم والمنعكس بشكل تام (انعكاس تام) مشابه لذلك، ومن أجل الانعكاس التام يكون:

$$\boldsymbol{p = \frac{2U}{c}} \qquad \textbf{(7)}$$

إن ضـغوطات الإشـعاع صـغيرة جداً (حوالي $5 \times 10^{-6} N/m^2$ من أجل أشـعة الشـمس المباشرة)،

باختصار، فإن الأمواج الكهرطيسية تنتشر في الخلاء ولها الخصائص الآتية:

(1) الأمواج الكهرطيسية تنتشر في الخلاء بسرعة تساوي سرعة الضوء.

(2) الأمواج الكهرطيسية هي أمواج عرضية بسبب أن الحقل الكهربائي والمغناطيسي متعامدان على بعضهما، وهما عاموديان على اتجاه انتشار الموجة.

(3) إن نسبة الحقل الكهربائي على الحقل المغناطيسي تساوي سرعة الضوء.

(4) تحمل الأمواج الكهرطيسية طاقة وكمية حركة حيث يمكن إعطائها لسطح.

6- طيف الأمواج الكهرطيسية:

إن سرعة كل الأمواج الكهرطيسية تساوي سرعة الضوء c. إن هذه الأمواج تنقل طاقة وكمية حركة من المنبع وحتى المستقبل. في عام 1887 نجح هرتز بتوليد وكشف الأمواج الكهرطيسية ذات الترددات الراديوية التي توقعها أو تنبأ بها ماكسويل. ماكسويل نفسه أدرك الأمواج الكهرطيسية وميز ما بين الضوء المرئي والأشعة ما تحت الحمراء التي اكتشفت عام 1800 من قبل "وليم هيرشيل – William Herschel". والآن نعلم أشكال أخرى من الأمواج الكهرطيسية الموجودة والتي تتميز عن بعضها بتردداتها وأطوال موجاتها.

بما أن سرعة جميع الأمواج الكهرطيسية تساوي سرعة الضوء c، فترددها f وطول موجتها λ يرتبطان بالعلاقة الهامة الآتية:

$$\boldsymbol{c = f\lambda} \qquad \textbf{(8)}$$

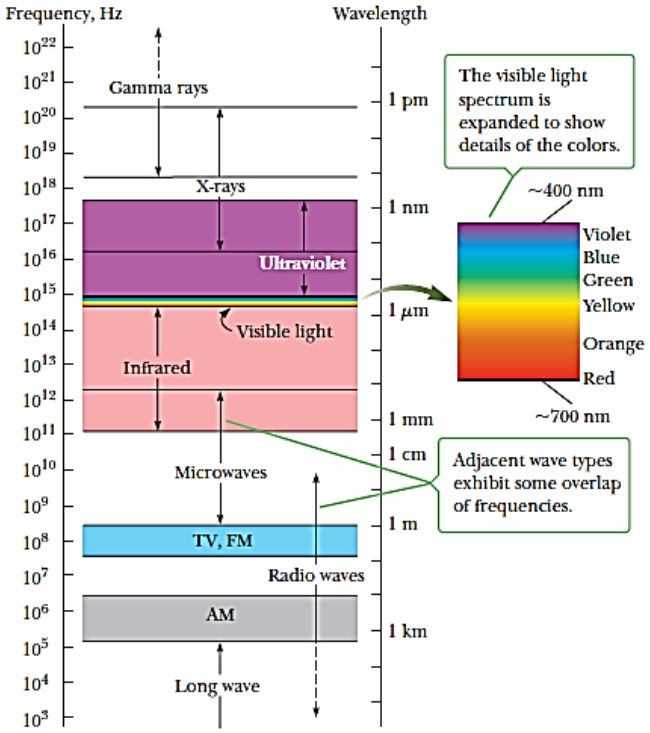
يبين الشكل (6) نماذج متنوعة من الأمواج الكهرطيسية، حيث نرى مجالات كبيرة لكل من الترددات والأطوال الموجية. على سبيل المثال، في مجال الأمواج الراديوية AM والتي ترددها يساوي $1{,}50 \times 10^8 MHz$ (قيمة نموذجية) فلها طول موجة يساوي:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3{,}00 \times 10^8 m/s}{1{,}50 \times 10^8 s^{-1}} = 2{,}00 \times 10^2\ m$$

وهناك اختصارات تستخدم غالباً للأمواج القصيرة والمسافات:

$$1\ micrometer\ (\mu m) = 10^{-6}\ m$$
$$1\ nanometer\ (nm) = 10^{-9}\ m$$
$$1\ angstrom\ (A^o) = 10^{-10}\ m$$

إن الأطوال لموجية للضوء المرئي، على سبيل المثال، تقع في المجال $(0{,}4\ \mu m)$ وحتى $(0{,}7\mu m)$، أو من $(400\ nm)$ وحتى $(700\ nm)$، أو من $(4000\ A^o)$ وحتى $(7000\ A^o)$.



شكل (6): الطيف الكهرطيسي.

7- مفعول دوبلر للأمواج الكهرطيسية:

كما رأينا سابقاً، فمفعول دوبلر تم ملاحظته عند دراسة الأمواج الصوتية (الصوت)، وذلك عندما يكون المراقب والمنبع يتحركان بالنسبة لبعضهما في وسط الانتشار، انتشار الأمواج الصوتية. ونذكر بنص مفعول دوبلر: تردد الموجة المراقب يكون أكبر أو أصغر من تردد الموجة الصادرة عن المنبع.

يحدث مفعول دوبلر أيضاً من أجل الأمواج الكهرطيسية، ولكن يختلف عن مفعول دوبلر من أجل الأمواج الصوتية لسببين. **الأول:** مفعول دوبلر بالنسبة للأمواج الصوتية، الحركة نسبية بالنسبة للوسط مهمة جداً لأن الصوت بحاجة لوسط لكي ينتقل ينتشر. بالمقابل، فالوسط لا يلعب دور في مفعول دوبلر بالنسبة للأمواج الكهرطيسية لأنها لا تحتاج لوسط لكي تنتشر. **الثاني:** سرعة الصوت التي تظهر في المعادلة من أجل مفعول دوبلر من أجل الصوت تتعلق بالمرجع الذي يتم فيه القياس. بالمقابل، كما رأينا بالنسبة لسرعة الأمواج الكهرطيسية فلها نفس القيمة في جمل الإحداثيات إذا كانت ساكنة أو متحركة.

إن المعادلة الوحيدة التي تصف مفعول دوبلر من أجل الأمواج الكهرطيسية تُعطى بالعلاقة التقريبية الآتية:

$$f_0 \approx f_s\left(1 \pm \frac{u}{c}\right) \quad if\ u < c \qquad (9)$$

حيث f_0 التردد المراقب، f_S التردد الصادر عن المنبع، u السرعة النسبية للمراقب والمنبع، و c سرعة الضوء في الخلاء. ونشير إلى أن المعادلة (10) صالحة فقط إذا كانت u أصغر بكثير من c. ومع ذلك، يمكن استخدامها من أجل الصوت طالما السرعة النسبية للمنبع وللمراقب أصغر بكثير من سرعة الصوت. الإشارة الموجبة في المعادلة السابقة يجب أن تُستخدم عندما المنبع والمراقب يقتربان من بعضهما، بينما الإشارة السالبة يجب أن تُستخدم عندما يبتعدان عن بعضهما. نستنتج مما سبق أن التردد المراقب يزداد عند اقتراب المنبع من المراقب، بينما يتناقص عند الابتعاد عن بعضهما.

فلكياً، تم استخدام مفعول دوبلر للمراقبات الفلكية وذلك بدراسة وتحليل الضوء الذي يصلنا من المجرات البعيدة، أي بتعبير آخر استنتاج بعد تلك المجرات عنا. وتشير القياسات إلى أنه كلما كانت المجرات بعيدة، فالضوء الذي يصلنا سيكون منزاحاً نحو الأحمر للطيف. وهذا **"الانزياح الكوني – This cosmological shift"** يشير بوضوح إلى أن الكون يتمدد. وهذا التمدد يشبه تمدد قطعة من المطاط في الفضاء (أي في جميع الاتجاهات)، وهذا متوافق مع نظرية أينشتاين في النسبية العامة. ومن أجل نجم أو مجرة، مع ذلك، يمكن أن تقترب أو تبتعد عن الأرض. على سبيل المثال، إن القياسات المتعلقة بمفعول دوبلر، التي تم القيام بها باستخدام **"المنظار الفلكي لهابل – Hubble Space Telescope"** أشارت إلى أن المجرة المعطاة الرقم $M87$ هي في حالة دورا، حيث طرف يقترب منا وطرف آخر يبتعد عنا. إن قياس سرعة الدوران استخدمت في التعرف على كتلة ضخمة لثقب أسود في مركزها.