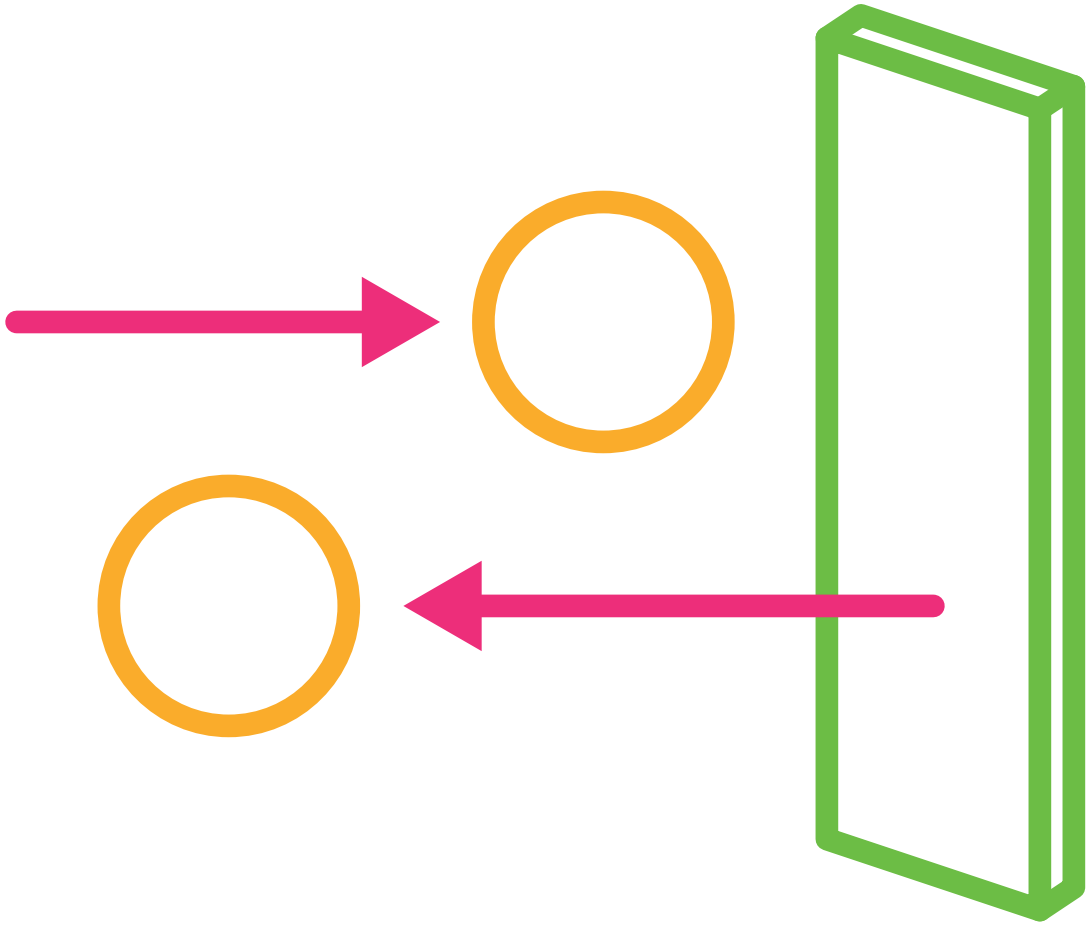


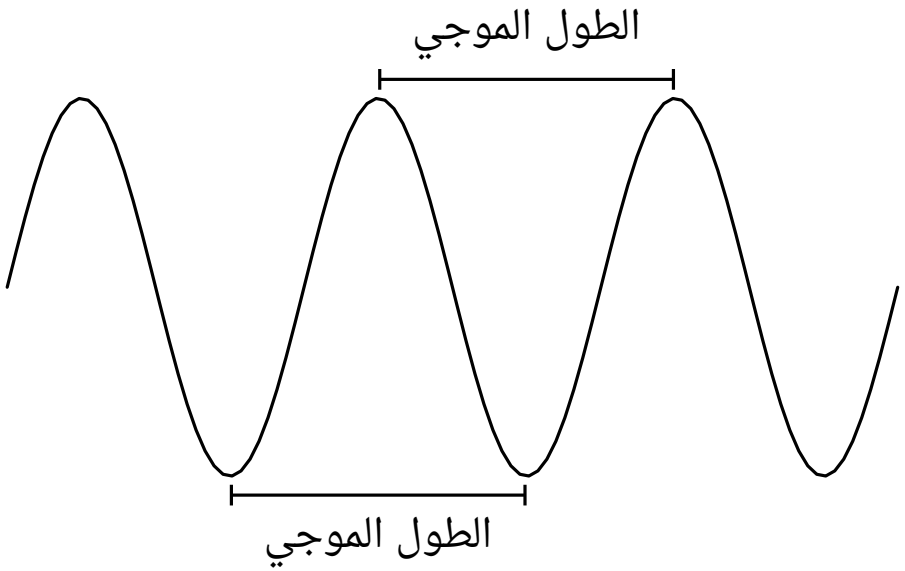
كمية حركة الفوتون

أهداف الدرس

ستتمكَّن من:

- معرفة أن الفوتون له كمية حركة، على الرغم من أنه عديم الكتلة
- معرفة أنه بالنسبة لفوتون واحد، فإن كمية الحركة هذه صغيرة جدًّا
- معرفة أن كمية حركة الفوتون تتناسب عكسيًّا مع طوله الموجي
- معرفة أن كمية حركة الفوتون تتناسب طرديًّا مع تردده
- استخدام المعادلة: $p = \frac{h}{\lambda}$
- استخدام المعادلة: $p = \frac{hf}{c}$
- إيجاد كمية الحركة الكلية لعدد: n من الفوتونات المتطابقة، بمعلومية الطول الموجي لكل فوتون أو تردده

تذكير: خواصُّ الموجة



الطول الموجي للموجة هو المسافة بين أي نقطتين متطابقتين على الموجة.

أما تردُّد الموجة، فهو عدد دورات الموجة التي تمر عبر نقطة كل ثانية.

تذكَّر أنه إذا كان الطول الموجي لموجة λ، وكان تردُّدها f، فإن سرعة الموجة، v، تُعطى بالمعادلة: $v = f\lambda$.

سرعة الضوء في الفراغ تساوي $3.00 \times 10^8\ \text{m/s}$ تقريبًا. ويُرمَز لهذا الثابت بالرمز c؛ وللموجة الضوئية: $c = f\lambda$.

النموذج الجُسيمي للضوء

في النموذج الجُسيمي للضوء، تُقسَّم طاقة الضوء إلى «حزم» من الطاقة تُسمَّى الفوتونات. يمكن أن تمتص الذراتُ الفوتوناتِ أو تبعثها. يحدث التأثير الكهروضوئي عندما يمتص إلكترون في الذرة فوتونًا، فيتحرَّر من الذرة، ويترك تمامًا المادة التي تمثِّل الذرة جزءًا منها.

ترتبط طاقة الفوتون بتردُّد موجة الضوء. إن طاقة الفوتون، E، تُعطى بالمعادلة: $E = hf$؛ حيث h ثابت بلانك، وقيمته $6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$.

كمية حركة الفوتون

بالإضافة إلى كون الفوتونات «حزمًا» منفصلة من الطاقة، فإن للفوتونات أيضًا كمية حركة؛ ولذا يمكنها أن تؤثِّر بقوة.

قد يبدو هذا غير بديهي أيضًا؛ لأن كمية الحركة تُحسب عادةً باستخدام القانون $p = mv$، لكن الفوتونات لها كتلة تساوي صفرًا. وإذا كان $m = 0$، فإن $p = mv = 0$. ولكن تُوجَد حدود للحالات التي يمكن فيها استخدام القانون: $p = mv$. فلا يمكن استخدام القانون: $p = mv$ في حالة الأجسام التي تتحرَّك بسرعة كبيرة جدًّا؛ أي بسرعة تقارب سرعة الضوء. هذا وحده يعني أنه لا يمكن استخدام القانون مع الفوتونات التي تتحرَّك بسرعة الضوء بلا ريب. أيضًا لا يمكن استخدام القانون: $p = mv$ مع الجُسيمات العديمة الكتلة مثل الفوتونات.

بدلًا من ذلك، ترتبط كمية حركة الفوتون بطوله الموجي، ويمكن حسابها باستخدام المعادلة:

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

حيث p كمية حركة الفوتون، h ثابت بلانك، كما ذكرنا.

كمية حركة الفوتون (متابعة)

لاحظ أن كمية حركة الفوتون تتناسب عكسيًّا مع طوله الموجي. وهذا يعني أنه كلما زاد الطول الموجي للضوء، أو كلما اقترب الضوء من اللون الأحمر، قلَّت كمية حركته.

فإذا أعدنا ترتيب المعادلة $c = f\lambda$ لجعل λ في طرف بمفرده، نحصل على:

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

بالتعويض بذلك في قانون كمية حركة الفوتون، نحصل على:

$$p = \frac{hf}{c}.$$

لاحظ أن كمية حركة الفوتون تتناسب طرديًّا مع تردده. وهذا يعني أنه كلما زاد تردد الضوء، أو كلما اقترب الضوء من اللون الأزرق، زادت كمية حركته أيضًا.

معادلة: كمية حركة الفوتون بدلالة طوله الموجي

كمية حركة الفوتون، p، تساوي ثابت بلانك، h، مقسومًا على الطول الموجي، λ، للفوتون:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

معادلة: كمية حركة الفوتون بدلالة تردُّده

كمية حركة الفوتون، p، تساوي ثابت بلانك، h، مضروبًا في تردُّد الفوتون، f، مقسومًا على سرعة الضوء، c:

$$p = \frac{hf}{c}.$$

مثال ١: حساب كمية حركة الفوتون بمعلومية طوله الموجي

ما كمية حركة فوتون طوله الموجي $500\,\text{nm}$؟ استخدم القيمة $6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$ لثابت بلانك. اكتب إجابتك بالصيغة العلمية لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

يمكننا استخدام القانون:

$$\begin{aligned} p &= \frac{h}{\lambda} \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}}{5 \times 10^{-7}\,\text{m}} = 1.326 \times 10^{-27}\,\text{J}\cdot\text{s/m}. \end{aligned}$$

وحدة جول ثانية لكل متر $(\text{J}\cdot\text{s/m})$ تكافئ وحدة كيلوجرام متر لكل ثانية $(\text{kg}\cdot\text{m/s})$. ومن ذلك نحصل على:

$$p = 1.33 \times 10^{-27}\,\text{kg}\cdot\text{m/s}.$$

مثال ٢: حساب كمية حركة الفوتون بمعلومية تردُّده

تردُّد موجة راديو ذات تردُّد منخفض يساوي $200\,\text{kHz}$. ما كمية الحركة لفوتون في موجة راديو عند هذا التردُّد؟ استخدم القيمة $6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$ لثابت بلانك. اكتب إجابتك بالصيغة العلمية لأقرب منزلتين عشريتين.

الحل

ويمكننا استخدام القانون:

$$p = \frac{hf}{c}$$

$$p = \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s} \times 200\,000\,\text{Hz}}{3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s}}$$

$$= 4.42 \times 10^{-37}\,\text{kg}\cdot\text{m/s}.$$

كمية حركة الفوتونات المتطابقة

إذا كان لدينا العدد n من الفوتونات المتطابقة، وكنا نعرف الطول الموجي للفوتونات، فبإمكاننا إيجاد كمية الحركة الكلية للفوتونات باستخدام المعادلة:

$$p = n\frac{h}{\lambda}.$$

بصورة مكافئة، إذا عرفنا تردُّد الفوتونات، يمكننا إيجاد كمية الحركة الكلية للفوتونات باستخدام القانون:

$$p = n\frac{hf}{c}.$$

مثال ٣: حساب كمية الحركة الكلية للعديد من الفوتونات المتطابقة

يُنتج جهاز ليزر 4.00×10^{27} فوتون، كلٌّ منها تردُّده $4.25 \times 10^{14}\,\text{Hz}$. ما مقدار كمية الحركة التي ينقلها إنتاج هذه الفوتونات إلى جهاز الليزر؟ اعتبر $6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s}$ قيمة ثابت بلانك. أوجد الإجابة لأقرب ثلاث منازل عشرية.

الحل

ووفقًا لمبدأ حفظ كمية الحركة، فإن التغيُّر في كمية حركة جهاز الليزر يكون بنفس مقدار التغيُّر في كمية حركة الفوتونات، لكن في الاتجاه المعاكس لتغيُّر كمية حركة الفوتونات.

الفوتونات جميعها لها التردُّد نفسه؛ ولذا فهي متطابقة. ومن ثم، يمكننا استخدام القانون:

$$p = n\frac{hf}{c}$$

$$p = 4.00 \times 10^{27} \times \frac{6.63 \times 10^{-34}\,\text{J}\cdot\text{s} \times 4.25 \times 10^{14}\,\text{Hz}}{3.00 \times 10^{8}\,\text{m/s}}$$

$$= 3.757\,\text{J}\cdot\text{s}\cdot\text{Hz/m}\cdot\text{s}.$$

مثال ٣ (متابعة)

وحدة جول · ثانية لكل متر ($\mathrm{J \cdot s/m}$) تكافئ وحدة كيلوجرام · متر لكل ثانية ($\mathrm{kg \cdot m/s}$)؛ ومن ثَمَّ، فكمية الحركة الكلية للفوتونات هي $3.757\ \mathrm{kg \cdot m/s}$.

من الممكن رصد كمية حركة بهذا القدر. لكن الطاقة الكلية لهذه الفوتونات تزيد على $1\ \mathrm{GJ}$. وحتى أقوى أجهزة الليزر في العالم تستغرق زمنًا طويلًا لإنتاج هذا القدر الكبير من الطاقة؛ ولذا فإن التغيُّر في سرعة جهاز الليزر يكون بطيئًا جدًّا.

النقاط الرئيسية

- للفوتونات كمية حركة على الرغم من أنها عديمة الكتلة.
- تتناسب كمية حركة الفوتون طرديًّا مع تردُّده، وعكسيًّا مع طوله الموجي.
- إذا كان الطول الموجي لفوتون معلومًا، فيمكننا حساب كمية حركته باستخدام المعادلة:

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

- إذا كان تردُّد الفوتون معلومًا، فيمكننا حساب كمية حركته باستخدام المعادلة:

$$p = \frac{hf}{c}.$$

- يمكن حساب كمية الحركة الكلية للعدد n من الفوتونات المتطابقة باستخدام القانون:

$$p = n\frac{h}{\lambda}$$

أو القانون:

$$p = n\frac{hf}{c}.$$