

☆ بسيطة

الفيزياء، البكالوريا، الفرع العلمي

نظرية الكم والفعل الكهرضوئي

فرضيتا بلانك وأينشتاين، وخواص الفوتون، وتجربة هرتز، وتواتر العتبة ومعادلة أينشتاين، والخلية الكهرضوئية الإلكترونية والجسم الصلب . الوحدة 4 . الدرس 5

الخلايا الشمسية التي تضيء الشوارع تحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. مبدؤها أن الضوء ينتزع إلكترونات من المعدن، لكن بشرط غريب: الضوء الأحمر الشديد لا ينتزع شيئاً من بعض المعادن، والضوء البنفسجي الخافت ينتزع. لا تفسر النظرية الموجية ذلك، ويفسره الفوتون. نتابع مع الكتاب في الصفحات 219 إلى 227.

نظرية الكم

وفق النظرية الكلاسيكية، الكتاب، الصفحة 220، يدور الإلكترون حول النواة ويفقد طاقته تدريجياً، فيقترب من النواة حتى يستقر فيها، وهذا لا يحدث في الطبيعة. هذا العجز وظواهر أخرى مهدت لنظرية الكم، وهي تقوم على فرضيتين:

1. فرضية بلانك: الضوء والمادة يتبادلان الطاقة على شكل كميات منفصلة سُميت كمات الطاقة، طاقة كل منها $E = h f$.
2. فرضية أينشتاين: الحزمة الضوئية مكونة من فوتونات، يحمل كل منها طاقة تساوي $h f$ ، ويحصل تبادل الطاقة مع المادة من خلال امتصاص فوتونات أو إصدارها.

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

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

طاقة فوتونٍ تواتره $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$:

كيف أبدأ؟ $E = h f$.

أ) $1.33 \times 10^{-48} \text{ J}$

ب) 2.07 J

ج) $3.32 \times 10^{-19} \text{ J}$

ج. نعم: $6.63 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14}$.

الفوتون وخواصه

يتمتع الفوتون، الكتاب، الصفحة 220، بالخواص الآتية: 1. هو جسيم، أو حبيبة طاقة، يواكب موجةً كهريطيسيةً تواترها f . 2. شحنته الكهربائية معدومة. 3. يتحرك بسرعة انتشار الضوء. 4. طاقته $E = h f$. 5. يمتلك كميةً حركة $P = m c$ ، ويستنتجها الكتاب من علاقة أينشتاين $E = m c^2$:

$$P = m c = \frac{E}{c^2} c = \frac{E}{c} = \frac{h f}{\lambda f} = \frac{h}{\lambda}$$

كمية حركة فوتون طول موجته λ :

كيف أبدأ؟ $P = \frac{E}{c}$ ، و $E = \frac{h c}{\lambda}$.

(أ) $P = \frac{h}{\lambda}$

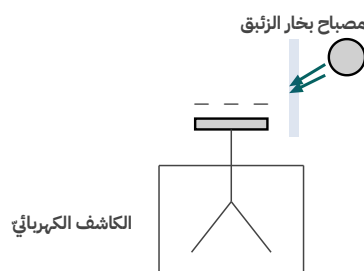
(ب) $P = \frac{h c}{\lambda}$

(ج) $P = h \lambda$

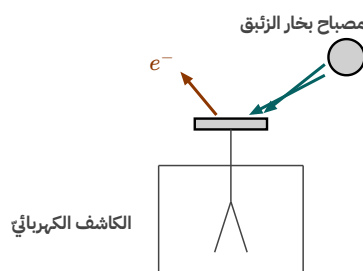
أ. نعم: الكتاب، الصفحة 220.

الفعل الكهروضوئي وتجربة هرتز

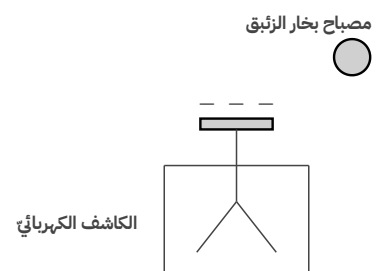
الفعل الكهروضوئي انتزاع الإلكترونات الحرة من المادة عند تعرضها لإشعاعات كهريطيسية مناسبة، وأول من لاحظته عملياً العالم هرتز عام 1887. الكتاب، الصفحة 221. في تجربته صفيحة من التوتياء، وهو الزنك، مثبتة فوق كاشف كهربائي، ومصباح بخار الزئبق، ولوح زجاج:



3. لوح زجاجي بين المصباح والصفيحة: لا يتغير انفراج الوريقتين.



2. نسلط ضوء مصباح بخار الزئبق: تنتزع إلكترونات وتدفعها شحنة الصفيحة السالبة بعيداً، فتفقد الصفيحة شحنتها تدريجياً، وتتقارب الوريقتان حتى تنطبقا.



1. صفيحة مشحونة سلباً: تنفرج وريقتا الكاشف، دلالة على شحنة الصفيحة.

تجربة هرتز، الكتاب، الصفحتان 221 و 222. الرسم من عندنا.

لماذا يوقف الزجاج الظاهرة؟ لأنّ اللوح الزجاجي يمتصّ الأشعة فوق البنفسجية المسؤولة عن انتزاع الإلكترونات، ويسمح بمرور الأشعة المرئية وتحت الحمراء التي لا تمتلك الطاقة الكافية للانتزاع. وإذا شحّنا الصفيحة بشحنة موجبة ثمّ عرضناها للضوء، فإنّ الإلكترونات المنتزعة يُعاد جذبها إلى الصفيحة، فلا يتغيّر انفراج الوريقتين. الكتاب، الصفحة 222.

نضع لوحاً زجاجياً بين مصباح بخار الزئبق وصفيحة التوتياء المشحونة سلباً. وريقتا الكاشف:

| كيف أبدأ؟ ما الذي يمتصّه الزجاج؟

(أ) تنطبقان تدريجياً كما من دون اللوح

(ب) لا يتغيّر انفراجهما

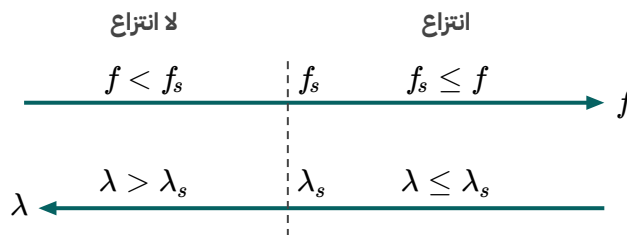
(ج) يزداد انفراجهما

ب. نعم: الضوء المرئيّ وتحت الأحمر لا يكفي للانتزاع.

شرح الفعل الكهرضوئي عند أينشتاين

يسقط فوتونٌ على معدن، ويصادف إلكترونًا ويقدم له كامل طاقته، أي يمتصّ. ونسمّي W_s طاقة الانتزاع، ويكتبها الكتاب هنا E_s . ثلاث إمكانيّات، الكتاب، الصفحة 222: 1. إذا كانت طاقة الفوتون مساويةً لطاقة الانتزاع، $W_s = h f_s$ ، يُنتزع الإلكترون ويخرج بطاقةً حركيّة معدومة، وتواتر الموجة عندئذٍ هو تواتر العتبة f_s . 2. إذا كانت أكبر من طاقة الانتزاع، يُنتزع الإلكترون ويخرج بطاقةً حركيّة. 3. إذا كانت أصغر، يكتسب الإلكترون طاقةً حركيّة ويبقى مرتبطاً بالمعدن.

$$f_s = \frac{W_s}{h} \quad \lambda_s = \frac{c}{f_s} = \frac{h c}{W_s}$$



يتحقّق الفعل الكهرضوئيّ إذا ساوى التواتر تواتر العتبة أو زاد عليه، أي إذا كان طول الموجة أصغر من طول موجة العتبة أو مساوياً له. الكتاب، الصفحة 222. الرسم من عندنا.

تذكّر: «يجري انتزاع الإلكترونات من المعدن إذا كان طول موجة الحزمة الضوئية الواردة على المعدن أصغر أو مساوياً لطول موجة العتبة اللازمة للانتزاع.» الكتاب، الصفحة 222.

طول موجة العتبة لمعدن $0.6 \mu\text{m}$. يُنتزع منه الإلكترون بضوءٍ طول موجته:

كيف أبدأ؟ الشرط $\lambda \leq \lambda_s$.

(أ) $0.7 \mu\text{m}$

(ب) $0.9 \mu\text{m}$

(ج) $0.5 \mu\text{m}$

ج. نعم: $0.5 < 0.6$ ، فطاقة الفوتون أكبر من طاقة الانتزاع.

معادلة أينشتاين

الإلكترون يُنتزع بطاقةٍ حركيةٍ عظمى، الكتاب، الصفحة 223:

$$E_k = h f - W_s = h f - h f_s$$

$$E_k = h c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_s} \right)$$

وفُتُرت معادلة أينشتاين ما عجزت النظرية الموجية الكلاسيكية عن تفسيره، الكتاب، الصفحة 223: 1. لا يحدث الفعل الكهرضوئي إذا كان تواتر الضوء أقل من تواتر العتبة الذي تتعلّق قيمته بطبيعة المعدن، أمّا النظرية الموجية فتعتبره يحدث عند جميع التواترات بحسب شدة الضوء. 2. لا تزداد الطاقة الحركية العظمى بزيادة شدة الضوء، لأنّ الإلكترون لا يمتصّ سوى فوتون واحد، والنظرية الموجية تعتبر الضوء الشديد يحمل طاقةً أكبر. 3. تزداد الطاقة الحركية العظمى بزيادة التواتر، والنظرية الموجية لا ترى علاقةً بينهما. 4. يحدث الانتزاع آنياً مهما كانت شدة الضوء، والنظرية الموجية تحتاج إلى زمنٍ يمتصّ فيه الإلكترون الطاقة حتّى يُنتزع.

انتبه: شدة الضوء تغيّر عدد الإلكترونات المنتزعة، لا طاقة كلّ منها. طاقة الإلكترون الحركية العظمى من التواتر ومن طاقة انتزاع

المعدن، لا من الشدة: $E_k = h f - W_s$.

نزيد شدة الضوء الوارد على المهبط ونُبقي تواتره ثابتاً. الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات المنتزعة:

كيف أبدأ؟ الإلكترون يمتصّ فوتوناً واحداً.

(أ) تزداد

(ب) لا تتغيّر

(ج) تنقص

ب. نعم: $E_k = h f - W_s$ لا تحتوي الشدة.

المسألة الأولى، الكتاب، الصفحة 226: ضوء تواتره $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ على معدن طاقة الانتزاع لديه $3.2 \times 10^{-19} \text{ J}$. الطاقة الحركية للإلكترون المنتزع:

كيف أبدأ؟ $h f = 3.32 \times 10^{-19} \text{ J}$ ، ثم اطرح طاقة الانتزاع.

(أ) $1.15 \times 10^{-20} \text{ J}$

(ب) $3.32 \times 10^{-19} \text{ J}$

(ج) $6.52 \times 10^{-19} \text{ J}$

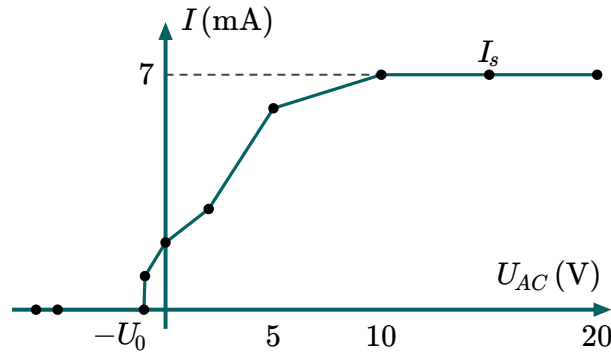
أ. نعم: $h f = 3.315 \times 10^{-19} \text{ J}$ ، والفرق $0.115 \times 10^{-19} \text{ J}$ ، والفوتون يكفي للانتزاع.

الخلية الكهرضوئية

تتألف الخلية الكهرضوئية، الكتاب، الصفحة 223، من حبابية زجاجية من الكوارتز مملأة من الهواء، فيها مسرى معدني يغطي سطحه طبقة رقيقة من معدن قلوي تتلقى الضوء، يسمى المهبط C ، ومسرى آخر يسمى المصعد A . في نشاط الكتاب نسقط على المهبط ضوءاً وحيد اللون، ونقيس شدة التيار I من أجل فرق الكمون U_{AC} بين المصعد والمهبط:

$U_{AC} \text{ (V)}$	$I \text{ (mA)}$
-6	0
-5	0
-1	0
-0.95	1
0	2
2	3
5	6
10	7
15	7
20	7

نتائج النشاط، الكتاب، الصفحة 223.



شدة التيار بدلالة U_{AC} ، نقاط الجدول موصولةً بقطعةٍ مستقيمة. الرسم من عندنا.

التفسير، الكتاب، الصفحة 224: يخرج الإلكترون من المهبط بسرعةٍ غير معدومة، لذلك يمرّ تيارٌ حتىّ عند $U_{AC} = 0$. وعندما يكون كمون المهبط أعلى من كمون المصعد بقدرٍ كافٍ، $U_{AC} < -U_0$ ، تُعيد القوة الكهربية الإلكترونات إلى المهبط فلا يمرّ تيارٌ؛ و U_0 كمون الإيقاف، وهو في الجدول نحو 1 V . وبتخفيض القيمة المطلقة للتوتر تبدأ بعض الإلكترونات بالوصول إلى المصعد. وعندما يصبح كمون المصعد أعلى، تسرّع القوة الكهربية الإلكترونات نحوه فتزداد شدة التيار حتى قيمتها العظمى $I = I_s$ ، وعندها تصل جميع الإلكترونات المنتزعة إلى المصعد: حالة الإشباع، وهي في الجدول 7 mA ابتداءً من 10 V .

وإذا زدنا استطاعة الحزمة الضوئية بالتواتر نفسه ازدادت شدة تيار الإشباع، لأن استطاعة موجة كهربية تسقط على سطح تعطي بالعلاقة $P = N h f$ ، حيث N عدد الفوتونات التي يتلقاها السطح في واحدة الزمن: فوتونات أكثر تنتزع إلكترونات أكثر.

ما الذي يزيد شدة تيار الإشباع I_s في الخلية الكهروضوئية؟

كيف أبدأ؟ عند الإشباع تصل جميع الإلكترونات المنتزعة.

(أ) رفع التوتر U_{AC} فوق 10 V

(ب) عكس التوتر حتىّ $U_{AC} = -6\text{ V}$

(ج) زيادة استطاعة الحزمة الضوئية بالتواتر نفسه

ج. نعم: فوتونات أكثر في الثانية، فإلكتروناتٌ منتزعة أكثر.

من الكتاب: تطبيقٌ ومسائل

التطبيق، الكتاب، الصفحة 225: شدة التيار في خلية كهروضوئية 16 mA . احسب عدد الإلكترونات الصادرة عن المهبط كلّ ثانية، والطاقة الحركية لأحد الإلكترونات لحظة وصوله المصعد إذا ترك المهبط دون سرعة ابتدائية، علماً أنّ التوتر بين المصعد والمهبط 180 V .

$$n, E_k = ?$$

1. عدد الإلكترونات في ثانية واحدة:

$$n = \frac{q}{e} = \frac{It}{e}$$

$$n = \frac{16 \times 10^{-3} \times 1}{1.6 \times 10^{-19}} = 10^{17}$$

2. الطاقة الحركية يكتسبها من الحقل بين المهبط والمصعد:

$$E_k = e U_{AC} = 1.6 \times 10^{-19} \times 180$$

$$E_k = 2.88 \times 10^{-17} \text{ J}$$

ويكتب الكتاب النتيجة $J \times 10^{-19} \times 288$ ، وهي القيمة نفسها:

$$E_k = e U_{AC}$$

المسألة الثانية، الكتاب، الصفحة 227: منبعٌ ضوئيٌ وحيد اللون طول موجته $0.5 \mu\text{m}$ يضيء خليةً كهروضوئية طاقة الانتزاع فيها $J \times 10^{-20} \times 33 = W_s$ ، ويكتبها الكتاب E_s . احسب تواتر العتبة، وطول موجة العتبة، والطاقة الحركية العظمى للإلكترون وسرعته. لا يعطي الكتاب الثوابت هنا، فنأخذ $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ و $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

$$f_s, \lambda_s, E_k, v = ?$$

1. تواتر العتبة $W_s = h f_s$:

$$f_s = \frac{33 \times 10^{-20}}{6.63 \times 10^{-34}}$$

$$f_s \approx 4.98 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

2. طول موجة العتبة $\lambda_s = \frac{c}{f_s} = \frac{h c}{W_s}$:

$$\lambda_s = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{33 \times 10^{-20}}$$

$$\lambda_s \approx 6.03 \times 10^{-7} \text{ m}$$

3. الطاقة الحركية طاقة الفوتون $J \times 10^{-19} \times 3.98 \approx \frac{h c}{\lambda}$:

$$E_k = 3.98 \times 10^{-19} - 3.3 \times 10^{-19}$$

$$E_k \approx 6.8 \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$4. \text{ السرعة } E_k = \frac{1}{2} m_e v^2 :$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 6.8 \times 10^{-20}}{9.1 \times 10^{-31}}}$$

$$v \approx 3.86 \times 10^5 \text{ m.s}^{-1}$$

0.5 μm < 0.603 μm ، فالخلية تعمل:

$$\lambda \leq \lambda_s$$

المسألة الثالثة، الكتاب، الصفحة 227: أكبر طول موجة يلزم لانتزاع الإلكترون من سطح مهبط خلية كهروضوئية $66 \times 10^{-8} \text{ m}$. احسب طاقة الانتزاع، وكمية حركة الفوتون الوارد إذا أضيء المهبط بضوء طول موجته $44 \times 10^{-8} \text{ m}$ ، والطاقة الحركية للإلكترون لحظة خروجه، وكمون الإيقاف.

$$W_s, P, E_k, U_0 = ?$$

1. طاقة الانتزاع أكبر طول موجة هو طول موجة العتبة:

$$W_s = \frac{h c}{\lambda_s}$$

$$W_s = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{66 \times 10^{-8}}$$

$$W_s \approx 3.01 \times 10^{-19} \text{ J}$$

2. كمية حركة الفوتون $P = \frac{h}{\lambda}$:

$$P = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{44 \times 10^{-8}}$$

$$P \approx 1.51 \times 10^{-27} \text{ kg.m.s}^{-1}$$

3. الطاقة الحركية طاقة الفوتون $\frac{h c}{\lambda} \approx 4.52 \times 10^{-19} \text{ J}$:

$$E_k = 4.52 \times 10^{-19} - 3.01 \times 10^{-19}$$

$$E_k \approx 1.51 \times 10^{-19} \text{ J}$$

4. كمون الإيقاف يوقف الحقل أسرع الإلكترونات حين $e U_0 = E_k$:

$$U_0 = \frac{1.51 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 0.94 \text{ V}$$

كمون الإيقاف يقيس الطاقة الحركية العظمى:

$$e U_0 = E_k$$

المسألة الرابعة، الكتاب، الصفحة 227: احسب تواتر العتبة لخلية كهروضوئية تحتوي صفيحةً من معدن السيزيوم يرد عليها ضوءٌ وحيد اللون طول موجته $5 \times 10^{-7} \text{ m}$ ، وطاقة الانتزاع لدى السيزيوم $3 \times 10^{-19} \text{ J}$ ، ثم الطاقة الحركية للإلكترون المنتزع وسرعته، مع $h = 6.64 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ و $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

$$f_s, E_k, v = ?$$

$$1. \text{ تواتر العتبة } f_s = \frac{W_s}{h} :$$

$$f_s = \frac{3 \times 10^{-19}}{6.64 \times 10^{-34}}$$

$$f_s \approx 4.52 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$2. \text{ الطاقة الحركية طاقة الفوتون } \frac{h c}{\lambda} \approx 3.98 \times 10^{-19} \text{ J} :$$

$$E_k \approx 3.98 \times 10^{-19} - 3 \times 10^{-19}$$

$$E_k \approx 9.84 \times 10^{-20} \text{ J}$$

$$3. \text{ السرعة } v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_e}} :$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 9.84 \times 10^{-20}}{9.1 \times 10^{-31}}}$$

$$v \approx 4.65 \times 10^5 \text{ m.s}^{-1}$$

الطريق نفسه في كل مسألة: طاقة الفوتون، ثم طرح طاقة الانتزاع:

$$E_k = \frac{h c}{\lambda} - W_s$$

المصدر: الفيزياء، الصفحات 219 إلى 227 من الطبعة الرسمية 2025 / 2026.