

- Samuel Harris, *Purdue University*
Harold B. Hart, *Western Illinois University*
Rebecca Hartzler, *Seattle Central Community College*
John Hubisz, *North Carolina State University*
Joey Huston, *Michigan State University*
David Ingram, *Ohio University*
Shawn Jackson, *University of Tulsa*
Hector Jimenez, *University of Puerto Rico*
Sudhakar B. Joshi, *York University*
Leonard M. Kahn, *University of Rhode Island*
Sudipa Kirtley, *Rose-Hulman Institute*
Leonard Kleinman, *University of Texas at Austin*
Craig Kletzing, *University of Iowa*
Peter F. Koehler, *University of Pittsburgh*
Arthur Z. Kovacs, *Rochester Institute of Technology*
Kenneth Krane, *Oregon State University*
Hadley Lawler, *Vanderbilt University*
Priscilla Laws, *Dickinson College*
Edbertho Leal, *Polytechnic University of Puerto Rico*
Vern Lindberg, *Rochester Institute of Technology*
Peter Loly, *University of Manitoba*
James MacLaren, *Tulane University*
Andreas Mandelis, *University of Toronto*
Robert R. Marchini, *Memphis State University*
Andrea Markelz, *University at Buffalo, SUNY*
- Paul Marquard, *Caspar College*
David Marx, *Illinois State University*
Dan Mazilu, *Washington and Lee University*
James H. McGuire, *Tulane University*
David M. McKinstry, *Eastern Washington University*
Jordon Morelli, *Queen's University*
Eugene Mosca, *United States Naval Academy*
Eric R. Murray, *Georgia Institute of Technology, School of Physics*
James Napolitano, *Rensselaer Polytechnic Institute*
Blaine Norum, *University of Virginia*
Michael O'Shea, *Kansas State University*
Patrick Papin, *San Diego State University*
Kiumars Parvin, *San Jose State University*
Robert Pelcovits, *Brown University*
Oren P. Quist, *South Dakota State University*
Joe Redish, *University of Maryland*
Timothy M. Ritter, *University of North Carolina at Pembroke*
Dan Styer, *Oberlin College*
Frank Wang, *LaGuardia Community College*
Robert Webb, *Texas A&M University*
Suzanne Willis, *Northern Illinois University*
Shannon Willoughby, *Montana State University*

Fotony i fale materii

38.1. FOTON, KWANT ŚWIATŁA

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

38.01 objaśnić zjawisko absorpcji i emisji światła, opierając się na koncepcji kwantyzacji energii i istnienia fotonów;

38.02 do zjawiska absorpcji i emisji fotonów zastosować związki pomiędzy energią, mocą, natężeniem, liczbą fotonów, stałą Plancka, częstotliwością i długością fali fotonu.

Podstawowe fakty

- Fala elektromagnetyczna (czyli światło) jest skwantowana (czyli możliwe są tylko niektóre wartości wielkości fizycznych), a kwanty fali nazywamy fotonami.

- Energia fotonu o częstotliwości ν i długości fali λ wynosi

$$E = h\nu,$$

gdzie h jest stałą Plancka.

O fizyce

Dyskusja teorii względności Einsteina zaprowadziła nas w świat daleki od codziennych doświadczeń — świat obiektów poruszających się z prędkościami bliskimi prędkości światła. Wśród innych niespodzianek teoria Einsteina przewiduje, że szybkość, z jaką chodzi zegar, zależy od względnej prędkości, z jaką ten zegar porusza się względem obserwatora. Im szybszy jest ten ruch, tym wolniej chodzi zegar. To, a także inne przewidywania tej teorii przeszły pomyślnie wszystkie przeprowadzone do tej pory testy doświadczalne, a teoria względności pozwoliła na głębsze i bardziej zadowalające spojrzenie na naturę przestrzeni i czasu.

Teraz zaczniemy badać inny świat istniejący poza codziennym doświadczeniem — świat subatomowy. Napotkamy nowe niespodzianki, które choć czasem wydają się dziwaczne, to jednak pozwoliły fizykom krok po kroku dogłębniej zrozumieć rzeczywistość.

Fizyka kwantowa, jak nazywa się nasz nowy temat, odpowiada na szereg pytań, takich jak: Dlaczego świecą gwiazdy? Dlaczego wśród pierwiastków chemicznych istnieje porządek tak widoczny w układzie okresowym? Jak działają tranzystory i inne mikroukłady elektroniczne? Dlaczego miedź przewodzi prąd elektryczny, a szkło nie? Tak naprawdę naukowcy i inżynierowie korzystają z dorobku fizyki kwantowej w prawie wszystkich przejawach codziennego życia, poczynając od oprzyrządowania medycznego poprzez systemy transportowe do przemysłu rozrywkowego. W istocie, fizyka kwantowa jest podstawą całej chemii, w tym także biochemii. Musimy ją zrozumieć, jeśli chcemy pojąć istotę samego życia.

Niektóre z przewidywań fizyki kwantowej wydają się dziwne nawet dla fizyków i filozofów studiujących jej podstawy. A jednak doświadczenie po doświadczeniu dowodzi poprawności tej teorii, a wiele z nich odkrywa jeszcze dziwniejsze jej aspekty. Świat kwantowy jest lunaparkiem pełnym atrakcji, które wstrząsną światem zdrowego rozsądku, w jakim żyłeś od dzieciństwa. Zwiedzanie tego kwantowego parku zaczniemy od spojrzenia na foton.

Foton, czyli kwant światła

Fizyka kwantowa (znana też jako *mechanika kwantowa* lub *teoria kwantów*) w większości dotyczy świata mikroskopowego. W świecie tym jest mnóstwo wielkości, które istnieją tylko w pewnych minimalnych (*elementarnych*) porcjach lub jako całkowite wielokrotności tych porcji. Mówi się o tych wielkościach, że są *skwantowane*. Elementarna porcja, która jest związana z taką wielkością, zwana jest jej **kwantem**.

W pewnym sensie pieniądze są także skwantowane. Istnieje mianowicie moneta o najniższym nominale 1 grosza (1 grosz = 0,01 złotego), nominały zaś wszystkich innych monet i banknotów są naturalnymi wielokrotnościami tej najmniejszej wartości. Innymi słowy, kwantem pieniędzy jest 0,01 złotego, a każda ich większa ilość ma postać $n \cdot (0,01 \text{ zł})$, gdzie n jest zawsze dodatnią liczbą całkowitą. Nie można zatem nikomu wręczyć 0,755 złotego = 75,5 groszy.

W roku 1905 Einstein wysunął hipotezę, że promieniowanie elektromagnetyczne (lub po prostu *światło*) jest skwantowane i istnieje w elementarnych porcjach (kwantach), które nazywamy teraz **fotonami**. Postulat Einsteina powinien cię zdziwić, ponieważ kilka poprzednich rozdziałów poświęciliśmy dyskusji klasycznego obrazu światła jako fali sinusoidalnej. Długość λ , częstotliwość ν i prędkość c takiej fali są związane relacją

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (38.1)$$

Co więcej, w rozdziale 33 mówiliśmy o klasycznej fali świetlnej jako o kombinacji wzajemnie powiązanych pól elektrycznych i magnetycznych, z których każde drga z częstotliwością ν . W jaki sposób ta fala drgających pól może składać się z elementarnych porcji jakiejś wielkości — kwantu świetlnego? Czym *jest* foton?

Pojęcie kwantu światła, fotonu, okazuje się o wiele bardziej subtelne i tajemnicze, niż wyobrażał to sobie Einstein. W istocie jest ono ciągle bardzo słabo zrozumiałe. W tej książce będziemy omawiać tylko niektóre podstawowe aspekty pojęcia fotonu, idąc przy tym śladem postulatów Einsteina. Zgodnie z tym postulatem kwant fali świetlnej o częstotliwości ν ma energię

$$E = h\nu \quad (\text{energia fotonu}). \quad (38.2)$$

W tym związku h jest **stałą Plancka**, z którą po raz pierwszy zetknęliśmy się w równaniu (32.23), i której wartość wynosi

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}. \quad (38.3)$$

Najmniejsza porcja energii, jaką może mieć światło o częstotliwości ν , jest równa energii pojedynczego fotonu $h\nu$. Jeśli fala niesie więcej energii, to ta energia musi być całkowitą wielokrotnością $h\nu$. Światło nie może mieć energii wynoszącej na przykład $0,6h\nu$ lub $75,5h\nu$.

Einstein zaproponował dalej, że proces pochłaniania (absorpcji) lub emisji światła przez pewne ciało (materię) zachodzi w atomach, z których zbudowane jest to ciało. Kiedy światło o częstotliwości ν jest pochłaniane przez atom, energia pojedynczego fotonu $h\nu$ jest przekazywana ze światła do atomu. W takim *akcie absorpcji* foton znika, a o atomie mówimy, że go pochłania. Kiedy światło o częstotliwości ν jest emitowane przez atom, porcja energii o wartości $h\nu$ przekazywana jest z tego atomu światłu. W takim *akcie emisji* foton nagle się pojawia, a o atomie mówimy, że go wyemitował. Tak więc możemy mieć do czynienia z *absorpcją* lub *emisją fotonu* przez atomy tworzące dane ciało.

W przypadku ciał składających się z wielu atomów może wystąpić wiele aktów absorpcji (jak w okularach przeciwsłonecznych) lub emisji fotonów (jak w lampach). Jednak każdy taki akt absorpcji lub emisji w dalszym ciągu polega na przekazie energii o wartości równej energii pojedynczego fotonu światła.

Omawiając w poprzednich rozdziałach przykłady absorpcji czy emisji światła, mieliśmy do czynienia z tak dużą ilością światła, że fizyka kwantowa nie była nam potrzebna. Do ich wyjaśnienia wystarczała fizyka klasyczna. Jednak technika końca XX wieku stała się na tyle zaawansowana, że umożliwiła przeprowadzanie doświadczeń z pojedynczymi fotonami. Wiele z tych eksperymentów znalazło praktyczne zastosowanie. Fizyka kwantowa stała się odąd częścią standardowej praktyki inżynierskiej, szczególnie w inżynierii optycznej.



Sprawdzian 1

Uzereguj następujące rodzaje promieniowania zgodnie z energiami tworzących je fotonów, zaczynając od energii największej: a) żółte światło z lampy sodowej, b) foton promieniowania γ emitowany przez jądro promieniotwórcze, c) fala radiowa emitowana przez antenę komercyjnej stacji radiowej, d) wiązka mikrofal emitowana przez radar kontroli ruchu lotniczego.

Przykład 38.01. Emisja i absorpcja światła jako fotonów

Lampa sodowa umieszczona jest w środku dużej sfery pochłaniającej całość padającego na nią światła. Lampa emituje energię z mocą 100 W. Załóżmy, że emitowane jest wyłącznie światło o długości fali 590 nm. Z jaką szybkością fotony pochłaniane są przez sferę?

PODSTAWOWE FAKTY

Światło jest emitowane i pochłaniane w postaci fotonów. Zakładamy, że całe światło emitowane przez lampę do-

ciera do sfery (i jest przez nią pochłaniane). Tak więc szybkość R , z jaką fotony są pochłaniane przez sferę, jest równa szybkości R_{emisji} , z jaką fotony są emitowane przez lampę.

Obliczenia: Szybkość ta jest równa

$$R_{\text{emisji}} = \frac{\text{szybkość emisji energii}}{\text{energia emitowanego fotonu}} = \frac{P_{\text{emisji}}}{E}$$

Możemy teraz podstawić einsteinowski wzór na energię E , jaką ma pojedynczy emitowany kwant światła (który

dziś nazywamy fotonem), który zapisaliśmy w równaniu (38.2) ($E = h\nu$). Po tym podstawieniu wzór na szybkość pochłaniania (absorpcji) fotonów ma postać:

$$R = R_{\text{emisji}} = \frac{P_{\text{emisji}}}{h\nu}$$

Korzystając z równania (38.1) ($\nu = c/\lambda$), zastępujemy częstotliwość ν długością fali λ , a następnie podsta-

wiamy wartości liczbowe. Otrzymujemy

$$\begin{aligned} R &= \frac{P_{\text{emisji}}\lambda}{hc} \\ &= \frac{(100 \text{ W})(590 \cdot 10^{-9} \text{ m})}{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s})} \\ &= 2,97 \cdot 10^{20} \text{ fotonów/s} \quad (\text{odpowiedź}). \end{aligned}$$



Dalsze przykłady, filmy i ćwiczenia na stronie *WileyPLUS*.

38.2. ZJAWISKO FOTOLEKTRYCZNE

Czego się nauczysz?

Po przestudiowaniu tego podrozdziału będziesz umiał...

38.03 narysować prosty szkic doświadczenia fotoelektrycznego, z zaznaczonym promieniem padającym, metalową elektrodą, emitowanymi elektronami (które nazywamy fotoelektronami) i puszką kolektora;

38.04 opisać trudności, jakie fizykom sprawiało zrozumienie zjawiska fotoelektrycznego przed wyjaśnieniem go przez Einsteina oraz objaśnić historyczną wagę einsteinowskiego opisu tego zjawiska;

38.05 zdefiniować potencjał hamujący V_{stop} i odnieść go do

maksymalnej energii kinetycznej $E_{k \text{ max}}$ wybitych fotoelektronów;

38.06 zastosować do układu fotoelektrycznego związku między częstotliwością a długością fali padającego fotonu, maksymalną energią kinetyczną fotoelektronów $E_{k \text{ max}}$, pracą wyjścia Φ i potencjałem hamującym V_{stop} ;

38.07 naszkicować dla układu fotoelektrycznego zależność między potencjałem hamującym V_{stop} a częstotliwością światła oraz wskazać na tym wykresie częstotliwość progową ν_0 i związać nachylenie naszkicowanej funkcji ze stałą Plancka h i ładunkiem elementarnym e .

Podstawowe fakty

- Gdy światło o odpowiednio wysokiej częstotliwości pada na powierzchnię metalu, elektrony poprzez absorpcję fotonów mogą otrzymać wystarczającą ilość energii, by uwolnić się z metalu i go opuścić. Efekt ten nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym.

- Zasada zachowania energii dla tego procesu ma postać

$$h\nu = E_{k \text{ max}} + \Phi,$$

gdzie $h\nu$ jest energią fotonu pochłoniętego przez elektron,

$E_{k \text{ max}}$ – największą energią kinetyczną, jaką może otrzymać elektron opuszczający metal, a Φ (wielkość zwana pracą wyjścia) jest najmniejszą energią, jaką powinien otrzymać elektron, aby uwolnić się ze stanu związania w metalu przez siły elektryczne.

- Jeżeli $h\nu = \Phi$, elektrony jedynie uwalniają się z metalu, ale nie mają energii kinetycznej. Częstotliwość, dla której to zachodzi, nazywamy częstotliwością progową ν_0 .

- Jeżeli $h\nu < \Phi$, elektrony nie mogą uwolnić się z metalu.

Zjawisko fotoelektryczne

Wiązka światła o wystarczająco krótkiej fali skierowana na czystą powierzchnię metalu powoduje uwolnienie elektronów z tej powierzchni (światło *wybija* elektrony z powierzchni). To **zjawisko fotoelektryczne** wykorzystywane jest w wielu urządzeniach, m.in. w kamerach wideo. Einsteinska koncepcja fotonu potrafi je wyjaśnić.

Przeanalizujemy dwa podstawowe doświadczenia fotoelektryczne wykonywane w układzie przedstawionym na rysunku 38.1. Światło o częstotliwości ν jest w nim kierowane na tarczę T, z której wybija elektrony. Pomie-

dzy tarczą T a kolektorem K utrzymywana jest różnica potencjałów V , powodująca gromadzenie elektronów przez kolektor. Zebrane elektrony, nazywane **fotoelektronami**, tworzą **prąd fotoelektryczny** i , który mierzony jest galwanometrem A.

Pierwsze doświadczenie fotoelektryczne

Ustalmy różnicę potencjałów V , przesuwając suwak opornika pokazanego na rysunku 38.1 tak, żeby kolektor K miał odrobinę mniejszy potencjał niż tarcza T. Taka różnica potencjałów będzie spowalniać elektrony wybite z tarczy. Następnie zmieniamy napięcie V aż do momentu, w którym prąd fotoelektryczny obserwowany na galwanometrze A przestaje płynąć. Napięcie odpowiadające tej sytuacji nazywamy **potencjałem hamującym** V_{stop} . Przy napięciu $V = V_{\text{stop}}$ elektrony o największej energii zostają zawrócone tuż przed osiągnięciem kolektora. Energia kinetyczna $E_{k \text{ max}}$ tych najszybszych elektronów jest wtedy równa

$$E_{k \text{ max}} = eV_{\text{stop}}, \quad (38.4)$$

przy czym e jest ładunkiem elementarnym.

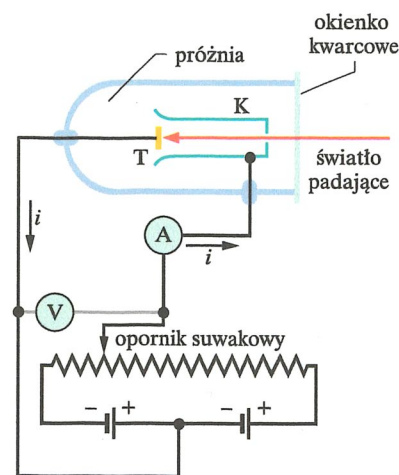
Pomiary pokazują, że dla światła o danej częstotliwości energia $E_{k \text{ max}}$ *nie zależy od natężenia światła*. Bez względu na to, czy nasze źródło jest oślepiająco jasne, czy też jarzy się tak słabo, że trudno je wykryć (czy też ma jakiegokolwiek pośrednie natężenie), maksymalna energia kinetyczna wybitych elektronów zawsze ma tę samą wartość.

Ta obserwacja doświadczalna pozostaje zagadką dla fizyki klasycznej. Klasycznie rzecz ujmując, światło padające na tarczę jest sinusoidalnie zmienną falą elektromagnetyczną. Elektron w tarczy powinien drgać pod wpływem sinusoidalnie zmiennej siły wywieranej przez pole elektryczne fali padającej. Jeśli amplituda tych drgań jest dostatecznie duża, elektron powinien wyrwać się z powierzchni tarczy, a więc zostać z niej uwolniony. Zatem jeśli zwiększalibyśmy amplitudę fali i jej drgającego pola elektrycznego, elektron wybijany z powierzchni tarczy powinien otrzymać bardziej energetyczne pchnięcie. *Jednak nic takiego się nie dzieje*. Dla danej częstotliwości światła zarówno wiązka intensywnego światła, jak i słabiutki promyk dostarczają wybijanym elektronom dokładnie tyle samo energii.

Jeśli natomiast pomyślimy o fotonach, to poprawny wynik pojawia się w sposób naturalny. W tym wypadku energia, jaka może być przekazana przez padającą falę elektronowi w tarczy, jest energią pojedynczego fotonu. Zwiększając natężenie światła, zwiększamy *liczbę* fotonów w wiązce. Jednak energia fotonu, dana równaniem (38.2) ($E = h\nu$), pozostaje przy tym niezmienna, ponieważ nie ulega zmianie częstotliwość światła. Tak więc energia zamieniona na energię kinetyczną elektronu także pozostaje niezmienna.

Drugie doświadczenie fotoelektryczne

Zmieniamy teraz częstotliwość ν padającego światła i mierzymy odpowiedni potencjał hamujący V_{stop} . Na rysunku 38.2 przedstawiono zależność V_{stop} od częstotliwości ν . Zauważ, że zjawisko fotoelektryczne nie występuje, jeśli częstotliwość światła jest niższa od pewnej **częstotliwości**



Rys. 38.1. Aparatura używana do badania zjawiska fotoelektrycznego. Padająca wiązka światła oświetla elektrodę T, uwalniając z niej elektrony, które następnie zbierane są przez kolektor K. Elektrony poruszają się w obwodzie w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu prądu zaznaczonego strzałką. Baterie i opornik suwakowy służą do wytworzenia i zmiany różnicy potencjałów pomiędzy elektrodą T a kolektorem K

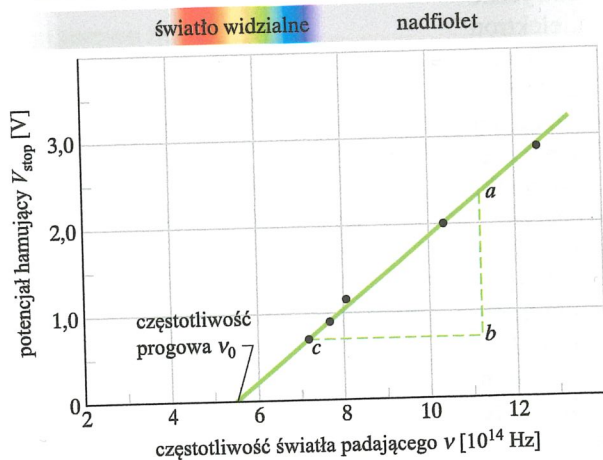
progowej ν_0 lub, co jest równoważne, jeśli długość fali świetlnej jest większa niż odpowiednia **progowa długość fali** $\lambda_0 = c/\nu_0$. Jest tak *bez względu na to, jak intensywne jest światło padające na tarczę*.

Stanowi to kolejną zagadkę dla fizyki klasycznej. Wyobrażając sobie światło jako falę elektromagnetyczną, moglibyśmy się spodziewać następującej obserwacji. Bez względu na to, jak niska byłaby częstotliwość padającego światła, elektrony mogłyby być przez to światło wyzwalone zawsze wtedy, gdy dostarczylibyśmy im wystarczająco dużo energii. To zaś można byłoby osiągnąć, wykorzystując dostatecznie intensywne źródło światła. *Jednak nic takiego nie następuje*. W przypadku światła o częstotliwości niższej niż częstotliwość progowa ν_0 zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi, bez względu na to, jak intensywne jest źródło światła.

Istnienia częstotliwości progowej powinniśmy się jednak spodziewać, jeśli energia jest przekazywana w postaci fotonów. Elektrony utrzymywane są wewnątrz tarczy siłami elektrycznymi. (Gdyby tak nie było, to pod wpływem grawitacji wszystkie by z niej wypadły). Do uwolnienia się z jej powierzchni wystarczy elektronowi pewna minimalna energia Φ . Energia Φ jest charakterystyczna dla materiału, z którego wykonana jest tarcza, i nazywana jest **pracą wyjścia** dla tego materiału. Jeśli energia $h\nu$ przekazana przez foton elektronowi przewyższa tę pracę wyjścia ($h\nu > \Phi$), to elektron zostaje uwolniony z tarczy. Jeśli przekazana energia jest mniejsza niż praca wyjścia (a więc $h\nu < \Phi$), elektron nie może zostać uwolniony. To właśnie pokazuje rysunek 38.2.

elektrony mogą opuścić elektrodę tylko wtedy, gdy częstotliwość światła przekroczy pewną wartość

im większa częstotliwość padającego światła, tym większa energia kinetyczna uwolnionego elektronu



Rys 38.2. Zależność potencjału hamującego V_{stop} od częstotliwości ν światła padającego na elektrodę wykonaną z sodu w układzie doświadczalnym z rysunku 38.1 (dane opublikowane przez R.A. Millikana w 1916 r.)

Równanie Einsteina

Einstein podsumował wyniki powyższych doświadczeń fotoelektrycznych w równaniu

$$h\nu = E_{k\text{max}} + \Phi \quad (\text{równanie Einsteina}). \quad (38.5)$$

Wyraża ono zasadę zachowania energii w przypadku pochłonięcia pojedynczego fotonu przez tarczę o pracy wyjścia Φ . Energia $h\nu$, równa energii fotonu, przekazywana jest pojedynczemu elektronowi w materiale, z którego wykonana jest tarcza. Aby elektron mógł wyrwać się z tarczy, musi otrzymać energię co najmniej równą energii Φ . Cała dodatkowa energia ($h\nu - \Phi$), jaką elektron otrzymuje od fotonu, pojawi się jako jego energia kinetyczna E_k . W najbardziej korzystnych warunkach elektron może wyrwać się z powierzchni tarczy bez zmniejszenia tej energii. Pojawi się zatem poza tarczą z maksymalną możliwą energią kinetyczną $E_{k\max}$.

Przepiszmy równanie (38.5), podstawiając wartość $E_{k\max}$ z równania (38.4) ($E_{k\max} = eV_{\text{stop}}$). Po krótkich przekształceniach otrzymamy

$$V_{\text{stop}} = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{\Phi}{e}. \quad (38.6)$$

Stosunki h/e i Φ/e są stałymi, tak więc powinniśmy się spodziewać, że wykres zależności potencjału hamującego V_{stop} od częstotliwości ν będzie linią prostą, tak jak na rysunku 38.2. Co więcej, nachylenie tej prostej powinno być równe h/e . Aby to sprawdzić, zmierzmy długości odcinków ab i bc na rysunku 38.2 i napiszemy

$$\begin{aligned} \frac{h}{e} &= \frac{ab}{bc} = \frac{2,35 \text{ V} - 0,72 \text{ V}}{(11,2 \cdot 10^{14} - 7,2 \cdot 10^{14}) \text{ Hz}} \\ &= 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}. \end{aligned}$$

Mnożąc ten wynik przez wartość ładunku elementarnego e , znajdujemy

$$h = (4,1 \cdot 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s})(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s},$$

co zgadza się z wartościami zmierzonymi w innych doświadczeniach.

Na marginesie: Wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego z pewnością wymaga zastosowania fizyki kwantowej. Przez wiele lat wyjaśnienie Einsteina było także nieodpartym argumentem za istnieniem fotonów. Jednak w roku 1969 znaleziono alternatywne wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego, które angażowało fizykę kwantową, nie wykorzystując jednak pojęcia fotonu. Jak to wykazały niezliczone doświadczenia fizyczne, światło *jest* w istocie skwantowane, ale wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego zaproponowane przez Einsteina nie jest najlepszym na to argumentem.



Sprawdzian 2

Na rysunku przedstawiono zależności napięcia hamującego od częstotliwości padającego światła (jak na rysunku 38.2) dla tarcz wykonanych z cezu, potasu, sodu i litu. Odpowiednie wykresy są prostymi równoległymi. a) U szereguj materiały, z których wykonane są tarcze, według ich prac wyjścia, zaczynając od największej. b) U szereguj wykresy według odpowiadających im wartości h , zaczynając od największej.

