

EFEKT FOTOELEKTRYCZNY STO LAT PÓŹNIEJ

The photoelectric effect a hundred years later

Katarzyna Stachowicz (Kraków)

Streszczenie

W roku 1921 przyznano nagrodę Nobla Albertowi Einsteinowi za wkład w fizykę i wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego. Nagrodę odebrał w kolejnym roku. Ponieważ na przełomie bieżącego roku mija sto lat od tego wydarzenia, ciekawym wydaje się pochylenie się nad tym tematem i zastanowienie się, co przyniosło to odkrycie, jak zaowocowało i jakie konsekwencje tego przełomu myślenia i postrzegania świata możemy zaobserwować sto lat później. Artykuł przybliży więc czytelnikowi zjawisko fotoelektryczne, ale również temat fotowoltaiki oraz kropek kwantowych.

Abstract

In 1921, the Nobel Prize was awarded to Albert Einstein for his contributions to physics and the explanation of the photoelectric effect. Einstein received the award the following year. Since at the turn of this year one hundred years will have passed since this event, it seems interesting to look at this topic and reflect on this discovery, what consequences of this breakthrough in thinking and perception of the world can be observed a hundred years later. The article will introduce the reader to the photoelectric phenomenon, but also the topic of photovoltaics and quantum dots.

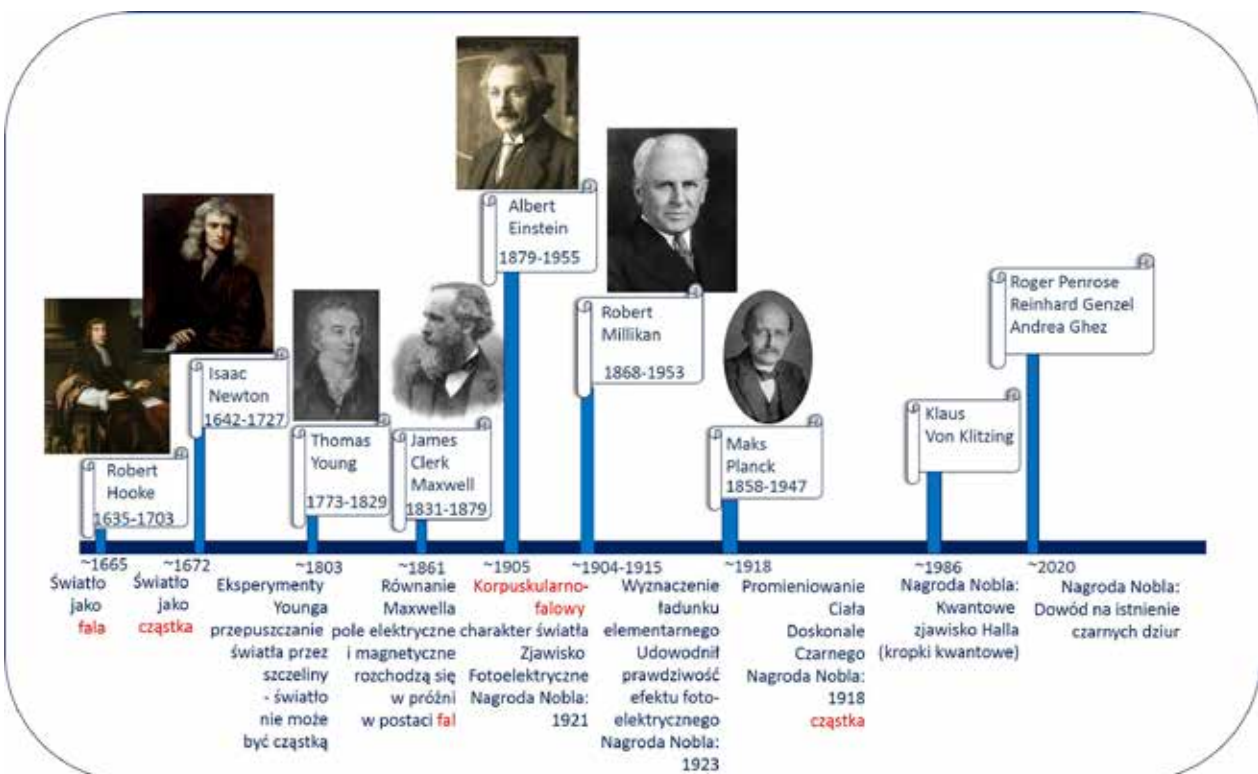
Jak to z tym światłem było, czyli rys historyczny

Jak to zwykle bywa, praca wielu światłych umysłów składa się na odkrycie, które czasami jest wynikiem głębokich przemyśleń, czasami zaś wynika z chwilowego przebłysku geniuszu. Jednakże zawsze potrzebna jest wiedza, na bazie której może zaiskrzyć umysł geniusza. Tak też było ze światłem. Na odkrycie efektu fotoelektrycznego złożyły się przemyślenia wielu wielkich umysłów. Jednym z pierwszych, który pochylił się nad naturą światła, był Isaac Newton. To właśnie Isaac Newton wymyślił coś tak abstrakcyjnego, jak założenie, że światło może być cząsteczką. Cząsteczkę światła rozumiał zupełnie inaczej niż rozumiemy ją aktualnie, w XXI wieku, gdyż uważał światło za strumień kuleczek [1], jednakże sama idea świadczy o geniuszu umysłu, który ją wymyślił. Pomysł, iż światło może być cząsteczką, nie ugruntował się w nauce, a stało się tak za sprawą Roberta Hooke'a, który udowodnił, że światło jest falą, porównując go do fali rozchodzącej się na wodzie. Obydwaj panowie toczyli ze sobą spory na temat prowadzonych przez siebie badań i stawianych hipotez, jednakże ich

spór uwypuklił problem, iż światło może być cząstką lub falą. Wydawać by się mogło, że spór o światło został rozwiązany ponad sto lat później, gdy wybitny umysł, którym był Thomas Young, przeprowadził serię eksperymentów przepuszczając światło przez szczeliny; udowodnił w nich, iż światło nie może być cząstką, gdyż na ekranie za szczeliną powstaje znacznie więcej punktów niż wynika to z ilości szczelin [4, 5, 6]. Opis eksperymentu przedstawiony przeze mnie jest oczywiście ogromnym uproszczeniem, jednak wszyscy znamy ten podstawowy dziś eksperyment ukazujący charakter światła, uczymy się o nim na etapie podstawowym edukacji szkolnej oraz możemy go samodzielnie przeprowadzić w wielu parkach naukowych. Wracając do sporu o światło: wiek XIX to czas odkrycia pola elektromagnetycznego. W roku 1861 James Clerk Maxwell napisał słynne równanie, zwane dziś równaniem Maxwella. Udowodnił on, że elektryczność i magnetyzm to elementy tego samego zjawiska: elektromagnetyzmu. Co więcej, fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z prędkością światła. Ponadto udowodnił on, że pole elektryczne i magnetyczne rozchodzą się w postaci

fal. Wniosek był tylko jeden: światło jest odmianą fali elektromagnetycznej. Problem rozwiązany, sprawa jest zamknięta, światło jest falą, a Newton nie miał racji. Uważano tak tylko niecałe pół wieku, a wszystko za sprawą trzech wielkich umysłów: Alberta Einsteina, Roberta Millikana i Maksa Plancka. Wszyscy trzej panowie inspirowali się wzajemnie, wzbogacając fizykę swoimi odkryciami, oraz wszyscy trzej zostali uhonorowani nagrodą Nobla za swoje odkrycia... ale po kolei. Ponieważ falowa natura światła nie tłumaczyła zjawiska promieniowania ciała doskonale czarnego, Maks Planck zaproponował, iż łącząc ideę Newtona z aktualną wtedy wiedzą na temat światła, można by wyciągnąć równanie, które mogłoby wytłumaczyć powyższe zjawisko. Jego pomysł zakładał istnienie skwantowanej emisji promieniowania (publikacja z 1900 roku). Stała proporcjonalności, znana dziś jako stała Plancka, została wykorzystana przez Einsteina do wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego, tłumaczącego również zjawisko promieniowania ciała doskonale czarnego (Tab. 1). W roku 1905 Einstein opublikował trzy przełomowe prace, które były na tyle ważne dla świata fizyki, iż rok 1905 nazwano cudownym rokiem (łac. *Annus mirabilis*). Einstein w powyższych publikacjach wyjaśnił ruchy Browna (zaczątek teorii fluktuacji), wyprowadził prawo zjawiska fotoelektrycznego (wychodząc od wprowadzenia pojęcia kwantu światła) oraz sformułował ogólną

teorię względności [5, 6, 7, 8, 9]. Einstein zakładał, iż promieniowanie elektromagnetyczne zawsze występuje w postaci kwantów. Niektórzy fizycy uważają, iż Einstein był w stanie wyjaśnić zjawisko i wyprowadzić wzór matematyczny efektu fotoelektrycznego dzięki rozważaniom nad teorią względności, inaczej może nie zgłębiłby tematu wystarczająco. Nagrodę Nobla za efekt fotoelektryczny Einsteinowi przyznano w roku 1921, nagrodę odebrał w roku 1922. Dlaczego tak późno nagrodzono „efekt fotoelektryczny”? Gdyż w międzyczasie teoria Einsteina została udowodniona. I znów wracamy do Maksa Plancka i Roberta Millikana. Robert Millikan w latach 1904–1915 starał się wyznaczyć ładunek elementarny podczas prac nad efektem fotoelektrycznym. Uważał, że Einstein się myli i za wszelką cenę starał się eksperymentalnie udowodnić, iż Einstein był w błędzie. Paradoksalnie eksperymenty Millikana udowodniły prawdziwość teorii Einsteina, za co Millikan został uhonorowany nagrodą Nobla w roku 1923. Równolegle w roku 1918 Maks Planck otrzymał nagrodę Nobla za pracę nad promieniowaniem ciała doskonale czarnego. Udowodnił on, iż światło jest cząstką. Zaistniały więc dowody eksperymentalne potwierdzające prawidłowość myślenia Einsteina [5, 7, 8, 9]. Schematyczna oś czasu pojawiania się teorii filozoficznych oraz odkryć fizycznych dotyczących charakteru światła została przedstawiona na Ryc. 1. Opisane odkrycia



Ryc. 1. Zebranie najważniejszych hipotez oraz przełomowych eksperymentów nad naturą światła. Schematyczna oś czasu. Rycina opracowanie własne, wykorzystano darmowe zdjęcia – domena publiczna.

stały się podwaliną aktualnej wiedzy oraz kolejnych odkryć, możliwych dzięki pracy wspomnianych wielkich umysłów.

ne polegające na emisji elektronów z powierzchni np. metalu [5, 6, 7]. Co ważne, energia kinetyczna fotoelektronów (foto - światło, elektron - energia) zależy od częstotliwości, nie zaś od natężenia światła. Waż-

Tabela 1. Zdefiniowanie pojęć: promieniowanie ciała doskonale czarnego oraz stała Plancka; opracowano na podstawie [1].

Promieniowanie ciała doskonale czarnego: Ciało doskonale czarne – jest to wymyślone, wyidealizowane ciało, całkowicie pochłaniające promieniowanie, które do niego wpada. Stworzono model takiego ciała – zbudowano „pudło” wyłożone od wewnątrz czarną substancją, posiadające otwór. Według fizyki klasycznej natężenie fal w pudle powinno rosnąć w nieskończoność – tak się jednak nie dzieje. Zjawisko zrozumiano dzięki Planckowi, który stworzył podwaliny fizyki kwantowej „kwantując” energię. Planck opisał promieniowanie ciała doskonale czarnego w ten sposób, iż drgające ładunki elektryczne w ściankach ciała doskonale czarnego pochłaniają i emitują określone porcje promieniowania.

Stała Plancka (h): Planck wykazał, iż promieniowanie w postaci porcji (paczek) niesie ze sobą energię, która jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali promieniowania:

$$E = hf$$

gdzie E jest kwantem energii, a f częstotliwością promieniowania (dziś wielkość tę znamy jako Herc, czyli liczba drgań na sekundę), h jest stałą wartością, która nie była dotąd znana w fizyce. Stała ta wynosi określoną wartość niezmienną – definiując zachowanie cząsteczek w naszym świecie oraz zjawiska kwantowe, które znamy;

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ [kg x m}^2 \text{ x s}^{-1}\text{]}$$

Można ją porównać do rozdzielczości aparatu, która tylko przy konkretnym ustawieniu pozwala nam widzieć zjawiska fizyczne w określonej skali. Gdyby nią pokręcić to nie dostrzeżemy zjawisk kwantowych, będziemy widzieli zjawiska fizyczne tylko w „rozdzielczości” fizyki klasycznej, a tak widzimy „skalę mikro”. Ponadto zmianie uległyby parametry fizyczne.

Zjawisko fotoelektryczne

Równocześnie z badaniami nad energią prowadzone były także badania nad materią. W roku 1899 Thomson odkrył elektron, nazywając go korpusekułą. W roku 1902 Philip von Lenard określił zależność pomiędzy emisją elektronów a intensywnością i częstotliwością światła padającego na powierzchnię emisyjną. Na podstawie powyższych osiągnięć oraz badań Hertza (fale radiowe; częstotliwość) i Stoletowa (pierwsze prawo fotoefektu), Einstein mógł lepiej zrozumieć zależność: energia/materia i zaproponować nowe wytłumaczenie zjawiska, które wykraczało poza grunt fizyki klasycznej, opierając się na mechanice kwantowej. Powyższe zestawienie tłumaczy, dlaczego teoria względności była pomocna w zrozumieniu efektu fotoelektrycznego, a więc finalnie do zrozumienia, czym jest energia (Ryc. 2). Einstein, zakładając istnienie kwantów światła (porcji energii), wprowadził wzór:

$$h\nu = W + E_k$$

w którym

h – stała Plancka; ν – częstotliwość padającego fotonu; W – praca wyjścia;

E_k – energia kinetyczna emitowanych elektronów [5, 6, 7, 9]

Efekt fotoelektryczny jest to więc zjawisko fizycz-

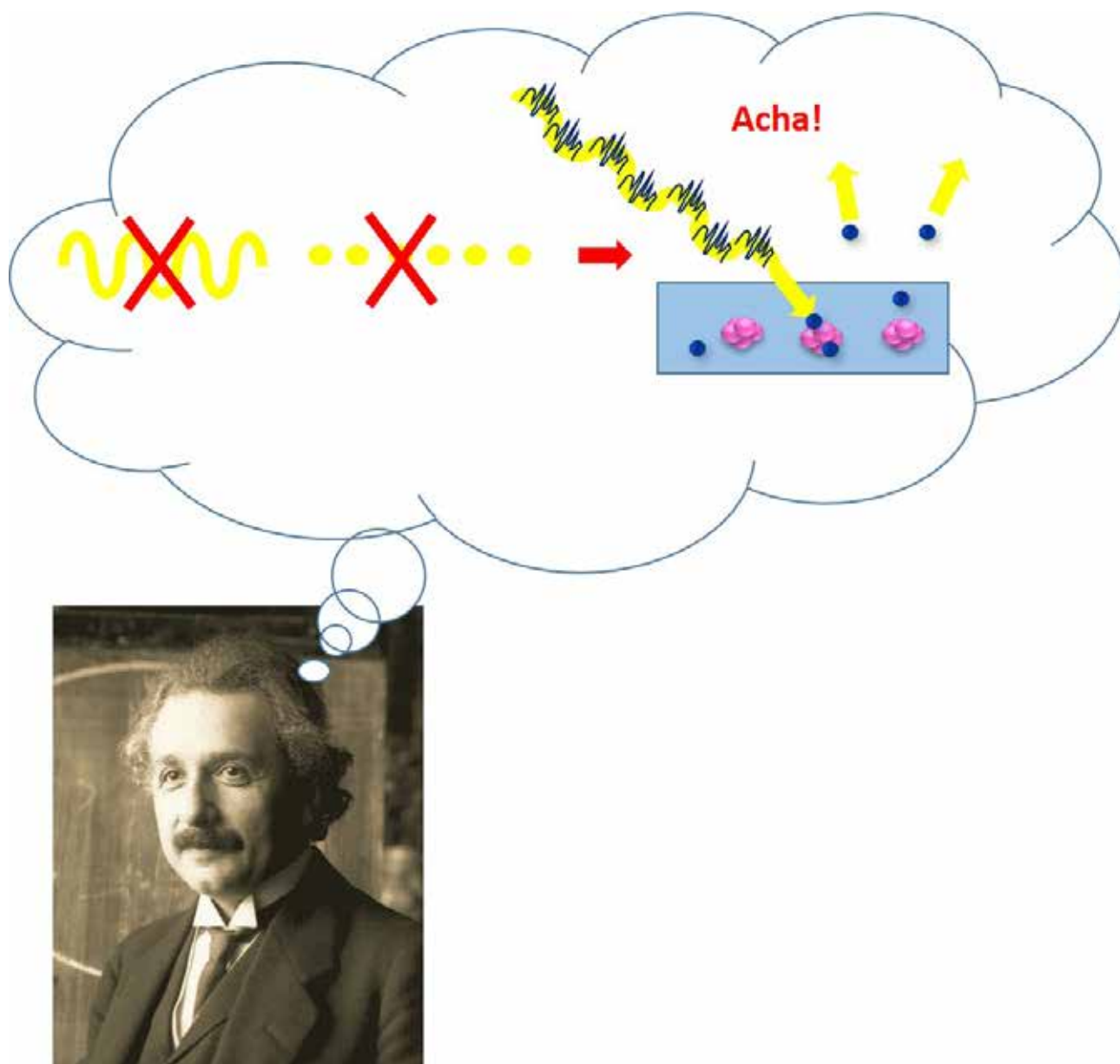
nym odkryciem Einsteina w powyższej zależności jest tzw. praca wyjścia (W). Jest to praca, która musi być wykonana, aby elektron opuścił materię (daną substancję, np. metal). Praca wyjścia jest charakterystyczna dla danej substancji, poniżej tej wartości nie nastąpi uwolnienie elektronu [5, 7, 1]. Jak Einstein zmienił ówczesny sposób myślenia? Swoim równaniem udowodnił, że wyższa intensywność światła (więcej fotonów) nie wpływa na energię kinetyczną elektronu, a energia fotonu zależy od częstotliwości. Foton jest więc nośnikiem energii równej częstotliwości światła pomnożonej przez stałą Plancka. Einsteińskie wyjaśnienie relacji światło/elektron oraz stała odkryta przez Plancka „rozświetliły” umysł Nielsa Bohra, który mógł na tak zbudowanej wiedzy wymyślić podstawy budowy atomu.

Praktyczne wykorzystanie zjawiska fotoelektrycznego – bezpośrednie przełożenie odkrycia

Odkrycia XIX wieku, w tym nowatorskie spojrzenie na materię i energię Einsteina, przełożyły się bezpośrednio na zastosowanie powyższych praw w technologii. „Ujarzmienie” kwantu światła oraz zrozumienie charakteru fal przełożyło się na uruchomienie technologii produkującej i wykorzystującej fotodiody. Fotodiody służą do produkcji baterii

słonecznych, rezystorów czy elektronicznych układów pomiarowych. Fotowoltaika to prężna aktualnie dziedzina nauki, dzięki której produkowane są coraz lepsze panele słoneczne. Bezpośrednie wykorzystanie promieni świetlnych do produkcji prądu stało się podstawą funkcjonowania wielu gospodarstw domowych oraz firm. Fotokomórki to kolejny sposób na

na dobrobyt przyszłych pokoleń. Jednakże nie tylko bezpośrednie przełożenie myśli na techniczne rozwiązania wpływa na rozwój, ale również coś bardziej nieuchwytnego, czyli sposób myślenia, który kierkuje kolejne odkrycia i o tym napiszę kilka słów w następnym podrozdziale.



Ryc. 2. Rysunek poglądowy pokazujący zmianę myślenia nad istotą energii.

wykorzystanie efektu. Fotokomórka wykorzystuje natężenie padającego na nią światła. Znalazły one zastosowanie m.in. jako systemy włączające i wyłączające światło w latarniach ulicznych. Aktywuje się ono w zależności od intensywności światła, które na nie pada [5, 7, 8, 10]. Wymienione przeze mnie metody bezpośredniego wykorzystania zdobytej wiedzy stanowią tylko wybrane przykłady ukazujące, w jaki sposób myśl może wzbogacić rozwój i przełożyć się

Post factum: Czyli rozwój nauki sto lat później – kropki kwantowe

Kropki kwantowe to fenomen XX wieku, określony dzięki sposobowi myślenia XIX-wiecznych umysłów, w tym Einsteina. Kropka kwantowa jest to, w ogromnym skrócie mówiąc, porcja energii nie przekraczająca w trzech wymiarach osi X, Y, Z wielkości nanometrycznej. Nie zatrzymując się nad

tematem nanotechnologii i nanocząsteczek – chętnych do zgłębienia tematu odsyłam do mojego artykułu opublikowanego na łamach Kosmosu [3] – zastanowimy się, czym są kropki kwantowe. Kropka kwantowa ograniczona jest więc barierą potencjału, czyli jej energia jest większa niż energia otoczenia. Kropki kwantowe określa się mianem sztucznych atomów. Zostały one opisane w 1980 r. w laboratorium Bella [2, 10]. Kropki kwantowe są to półprzewodnikowe nanokryształy o określonej energii. Emitowana przez nie energia zależy od rodzaju i kształtu kryształu, z którego są wykonane. Właściwość ta niesie szerokie możliwości aplikacyjne kropek kwantowych. Wykorzystywane są one między innymi w medycynie jako znaczniki np. w diagnostyce nowotworowej. Dzięki wielkości w skali nano lepiej penetrują obszar badany, zaś dzięki kontrolowanej energii emitują określone długości fal – co jest pożądaną własnością znaczników. Kolejne zastosowanie kropek kwantowych to możliwość śledzenia zmian metabolicznych, śledzenia losów leku w organizmie lub wędrówki wirusa [10, 2]. Chętnych do zgłębienia tematu odsyłam do artykułów: [10, 2]. Kropki kwantowe to nie tylko

medycyna, ale również technologia. Soczyste barwy w telewizorach i monitorach LCD LED to efekt zastosowania kropek kwantowych. Dzięki odpowiedniemu doborowi wielkości i rodzaju kryształu, z którego są wykonane, emitują określony kolor światła, przy czym barwa jest o wiele bardziej intensywna porównując z tradycyjnie stosowaną technologią.

Podsumowanie

Zrozumienie natury światła skutkowało rozwojem fizyki kwantowej, technologii, medycyny, codziennego życia oraz odkryciem czarnych dziur uhonorowanym nagrodą Nobla w roku 2020. Są to tylko przykłady odległych skutków odkrycia, których beneficjentami jesteśmy my dzisiaj. Oczywiście nauka posiada dwa oblicza i każde odkrycie może być spożytkowane w różny sposób, czego najlepszym przykładem jest postać Philippa Eduarda Antona von Lenarda. Badania Lenarda z jednej strony stanowiły inspirację dla Einsteina do zgłębienia natury świata. Lenard zaś wykorzystał swoją wiedzę w celu stworzenia bomby atomowej na użytek armii niemieckiej.

Bibliografia:

1. Ford K.W., 2012. 101 kwantowych pytań. Wszystko co chcielibyście wiedzieć o świecie, którego nie widać. Wiedza i życie. Pruszyński i S-ka. Red. Czerwińska E.
2. Jacak, L., Wójs, A., 1998. Kropki kwantowe. Postępy fizyki 49, 1.
3. Stachowicz, K., 2021. Małe a cieszy – czyli o zastosowaniu nanocząsteczek w medycynie i w przemyśle. Kosmos, 70, 1, 49-56.

Źródła internetowe:

4. Sowiński, T., Czym jest światło? http://www.ifpan.edu.pl/~tomsow/popular/mlody_tech/mt0703.pdf
5. <http://wikipedia.org>; <http://en.wikipedia.org>
6. Encyklopedia PWN. <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/Einstein-Albert;3896872.html>
7. Photoelectric Effects: Facts and Prospects. Wykład. <https://www.youtube.com/watch?v=6xxqhAOzAXg>
8. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/komputery_2015/materialy/kslp-8-karwowski.pdf
9. <https://epodreczniki.pl/a/zewnetrzny-efekt-fotoelektryczny-i-jego-zastosowanie/DSQIntxam>
10. Czuba, K., Zastosowanie kropek kwantowych w biologii i medycynie. <http://laboratoria.net/arttykul/21025.html>