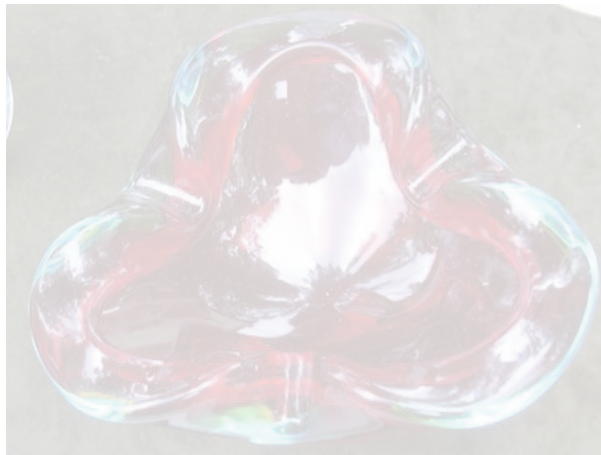


nawet dla tak prostych zjawisk, jak kolory otaczających nas przedmiotów i zjawisk. Na fot. 2.9 przedstawiamy wazę z berlińskiego straganu ze starociami. Jest ona czerwona oglądana w świetle przechodzącym, ale niebieskawa po bokach. Te dziwne kombinacje kolorów wynikają z obecności bardzo małych (rzędu kilkuset atomów) skupisk złota w szkłe. Te skupiska atomów absorbują światło w szerokim zakresie kolorów ale odsyłają (emitują) światło o ściśle określonej energii – światło niebieskie. Przez cały nasz podręcznik zagadnienia porcji (kwantów) energii będą się przewijały.



Fot 2.9. Waza według tajnej recepty z Berlina z XVIII wieku na produkcję szkła rubinowego; waza jest czerwona w świetle przechodzącym ale z niebieskimi odcieniami po bokach; jest to przykład zjawisk kwantowych w absorpcji i emisji światła (ekspozat GK)

Pytania:

1. Wyjaśnij, na czym polegała hipoteza Plancka i w jakim celu ją poczynił?
2. Podaj zależność długości fali od jej częstotliwości
3. Podaj wzór na energię kwantów światła.
4. Ile wynosi prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych (Maxwella) w próżni.

2.3. Efekt fotoelektryczny i dwoista natura światła

Albert Einstein odkrył teorię względności (słynne równanie $E = m \cdot c^2$), ale nagrodę Nobla otrzymał za wspomniany w poprzednim paragrafie efekt fotoelektryczny. Na czym on polega i jakie ma znaczenie?

Ogólnie efekt ten polega na wybiciu elektronu z atomu, przez padający kwant światła. Efekt ten został zaobserwowany na samym początku XX wieku¹⁷: światło padające na płytkę z cynku wybijało z niej elektrony i powodowało przepływ prądu¹⁸. Trudne do zrozumienia było to, że energia wybitych elektronów nie zależała od natężenia światła a jedynie od jego *koloru*. Na fot. 2.11. przedstawiono współczesną wersję tego doświadczenia z Muzeum Nauki w Monachium¹⁹. „To jakby w porcie kołysał się delikatnie na łagodnej fali rząd statków. Nagle, niespodziewanie jeden ze statków jest wyrzucany na kilkanaście metrów w górę, a pozostałe kołyszą się, jak gdyby nigdy nic” – określił to jeden z fizyków w XX wieku.

Analogia z jachtami nie jest zbyt dokładna – elektrony zostają wybite z atomu, jeżeli długość fali jest *mniejsza* niż ściśle określona wartość (czyli energia fotonów jest dostatecznie duża, zgodnie ze wzorem 2.8) Zadziwiające pozostaje jednak, że zwiększanie natężenia

¹⁷ Odkrywcą efektu fotoelektrycznego, w 1902 roku był niemiecki fizyk, Philipp Lenard.

¹⁸ Płytkę cynkową znajdowała się w szklanej bańce, w której wytworzono próżnię.

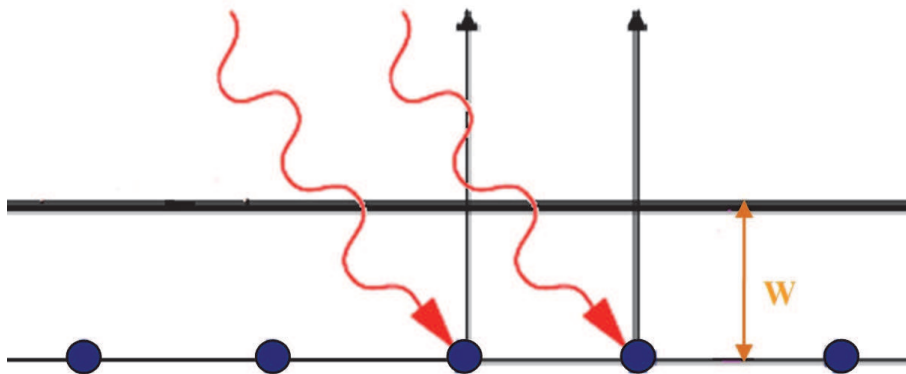
¹⁹ Muzeum nauki w Monachium <http://www.deutsches-museum.de/>

światła, ale o energii kwantów zbyt niskiej, nie spowoduje wybicia ani jednego elektronu, mimo że sumaryczna energia wszystkich fotonów jest duża. Efekt fotoelektryczny to taki bilard z dwoma kulami: padający foton „uderza” w elektron, sam znika (=zostaje pochłonięty), a jego energię przejmuje wybity elektron.

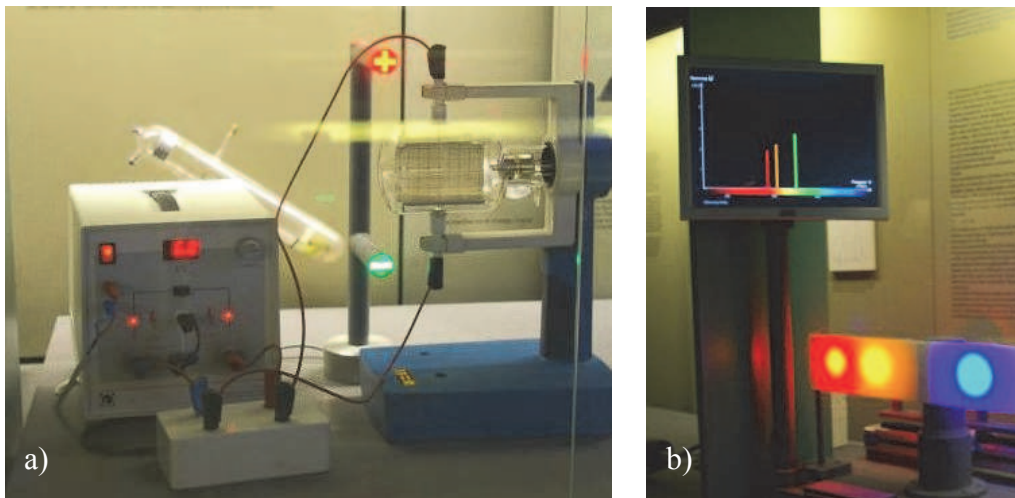
W powyższym zdaniu zawarta jest istota odkrycia A. Einsteina. Należy jedynie zauważyć, że aby wybić elektron, należy mu dostarczyć energii, z jaką jest on związany w atomach metalu²⁰. Nadmiar tej energii zamienia się w energię kinetyczną E_{kin} elektronu. Zapisujemy to w postaci

$$E_{kin} = h\nu - W \quad (2.11)$$

W nazywamy tradycyjnie „pracą wyjścia” – jest to właśnie ta minimalna energia potrzebna, aby elektron wyrwać w powierzchni metalu.



Ryc. 2.10. Schemat zjawiska fotoelektrycznego.



Fot. 2.11. Współczesna wersja doświadczenia fotoelektrycznego Lenarda (Muzeum Nauki w Monachium): **a)** światło o różnych długościach fali (czyli różnych kolorach) wyrzuca elektrony z płytki metalowej, zamkniętej w opróżnionej z powietrza szklanej bańki zaś woltomierz mierzy energię wyrzucanych elektronów; **b)** komputer wykreśla energię elektronów w zależności od częstotliwości fali światła (czyli od odwrotności długości fali) – wykres jest liniowy, zgodnie ze wzorem Einsteina, równanie (2.11)

Bez efektu fotoelektrycznego nie byłoby narządu wzroku: w uproszczeniu, w siatkówce oka padające światło wybija elektron, który jako impuls elektryczny wędruje linią neuronową do mózgu. Efekt fotoelektryczny jest też podstawą działania wszelkich kamer –

²⁰ Do zagadnienia energii wiązania wrócimy wielokrotnie, choćby przy omawianiu ruchu elektronów w atomie wodoru i planet w układzie Słonecznym.

profesjonalnych, w telefonach komórkowych, w kamerkach internetowych itd. Światło w tym przypadku wybija elektrony z półprzewodnika, który jest „siatkówką” takiej kamery.

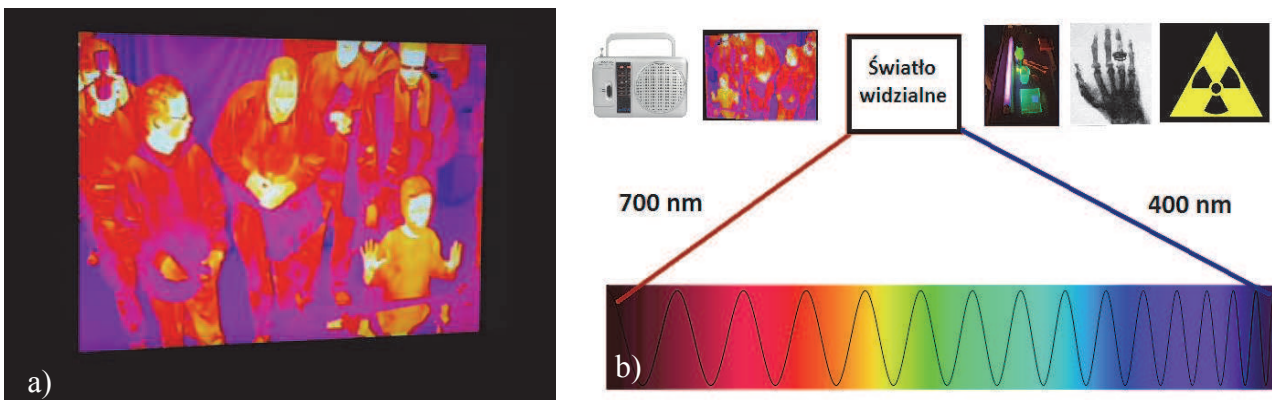
Doświadczenie:

Możesz, nawet w klasie wykonać natychmiast proste doświadczenie. Weź jakiegokolwiek „pilota” – od telewizora, projektora, radia. Skieruj pilota na własna oko. Widzisz sygnał?

Skieruj go teraz na kamerę twojego telefonu komórkowego. Prawda, że kamera ta widzi światło pilota? Jak to się dzieje? Dlaczego wszystkie kamery widzą sygnały wysyłane przez pilota, i to całkiem wyraźnie a oko ludzkie, nawet w zupełnej ciemności – nie?

Bez teorii kwantów mielibyśmy spore kłopoty z wyjaśnieniem tego zjawiska. W teorii kwantów jest elementarnie proste: otóż pilot emituje światło podczerwone, o energii poniżej 1,5 eV. Energia kwantów jest zbyt niska, aby wybić elektrony z siatkówki oka ludzkiego. Jest ona natomiast wystarczająca aby wybić elektrony z krzemowej²¹ płytki w kamerze telefonu komórkowego.

Okazuje się, że światło podczerwone, czyli o długości fali większej niż 760 nm, „widzą” np. żmije. Korzystają one ze swej pozornej niedoskonałości w stosunku np. do ssaków. Gady, czyli również żmije są zmiennocieplne, tzn. ich ciało przyjmuje temperaturę otoczenia. Ssaki, czyli np. mysz ma stałą temperaturę ciała, zazwyczaj znacznie (o 10-15°C) wyższą niż temperatura otoczenia. W świetle podczerwonym myszy „świecą”, zobacz na fot. 2.12a jak „świecą” w podczerwieni widzowie zwiedzający Muzeum Nauki w Londynie. Żmija na końcu (rozdwojonego) języka ma czujniki podczerwieni. Gdy żmija porusza końcem języka to próbuje „namierzyć” źródło ciepła, jak kot wodzi oczyma za swoim panem. Mysz więc zimnej żmii nie widzi, żmija mysz – tak!



Fot. 2.12. a) Kamera na podczerwień w Muzeum Nauki w Londynie (Foto Ł. Kruk); b) długości fal odpowiadające różnym zakresom (i zastosowaniom) promieniowania elektromagnetycznego

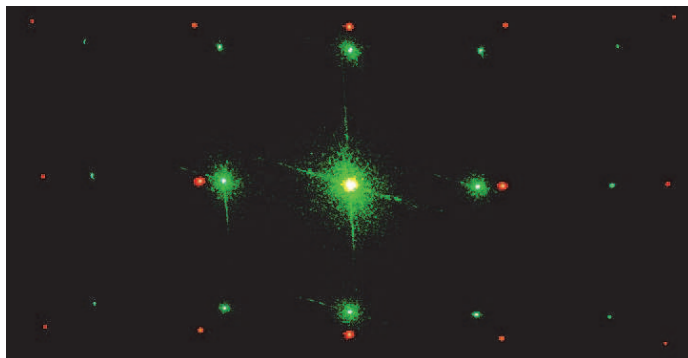
Światło widzialne przez człowieka to zakres **380 -760 nm**. Jak widzisz z wykresu, nie jest to dużo w stosunku do szerokiego zakresu fala elektromagnetycznych, ale w tym zakresie przypada aż 50% natężenia światła słonecznego.

Z kolei światło o długości fali poniżej 380 nm (albo, co jest równoważne, o energii większej niż 3,2 eV) jest widziane przez pszczoły. Ten zakres fal nazywamy promieniowaniem nadfioletowym. Kwanty promieniowania nadfioletowego niosą wyższą energię niż światło widzialne. Energia ta jest dostatecznie duża, aby np. pociąć spiralę DNA ludzkiego. Światło nadfioletowe powodować może więc raka. Statystyki medyczne mówią, że aż 70% Polaków powyżej 60 roku życia ma zmiany przedrakowe na skórze, związane z nadmiernym opalaniem się.

Podwójna natura światła – falowa i fotonowa (o tej drugiej mówimy też: „ciałowa”, czyli korpuskularna) sprawiła poważny problem fizykom. Newton, który opisał, jak światło białe

²¹ W rzeczywistości półprzewodniki użyte w kamerze mogą być znacznie bardziej skomplikowane niż krzem, ale nie zmienia to natury procesu.

rozszczenia się w pryzmacie na poszczególne kolory, uważał światło za cząstki, czyli korpuskuły. O ile powstawanie kolorów w pryzmacie da się wyjaśnić za pomocą teorii Newtona, powstawanie kolorów w bańce mydlanej czy w okularach, jakie otrzymałeś z „Poręcznikiem” wymaga teorii falowej światła. Nie będziemy wchodzić w szczegóły wyjaśnienia, ale ogólnie okulary dyfrakcyjne, podobnie jak płyta CD to szereg regularnie nacięć położonych blisko siebie (kilkaset na milimetr). Światło na tych nacięciach ugina się, jak fala na jeziorze, gdy spotka przeszkodę.

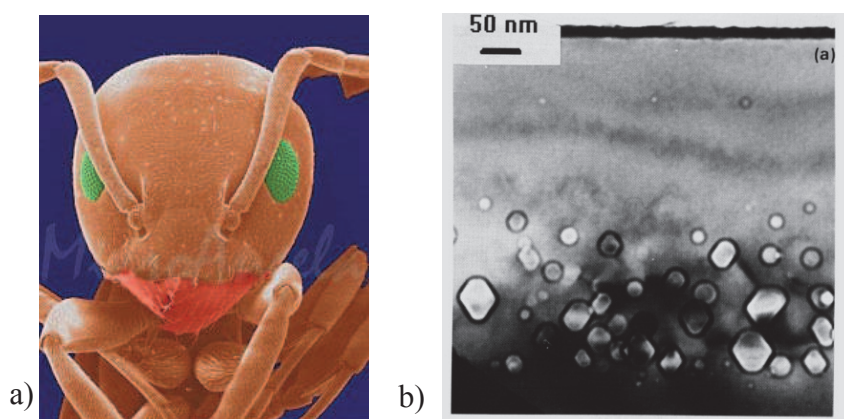


Fot. 2.13. Światło lasera czerwonego i zielonego po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną ulega ugięciu pod ściśle określonymi kątami (tu tworzy krzyże, bo siatka miała nacięcia w formie krzyży). Kąt ugięcia światła na siatce zależy od długości fali – plamki zielonego lasera ($\lambda=500$ nm) położone są bliżej plamki centralnej (światła nieugiętego) niż światło lasera czerwonego ($\lambda=700$ nm) (Foto KS)

W zjawiskach ugięcia (dyfrakcji) na płycie CD lub w okularach dyfrakcyjnych światło uwidacznia swoją naturę falową. Nie ma możliwości wyjaśnienia ugięcia światła za pomocą teorii korpuskularnej, no chyba że ją bardzo skomplikujemy (np. nie cząstki ale jakieś wirujące hantle). Z kolei nie ma sposobu na wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego (i paru innych zjawisk z udziałem światła i atomów, jak np. tzw. zjawiska Comptona) bez założenia, że światło to kwanty energii.

Czym jest więc światło? Cząstką czy falą? Zagadnienie to przypomina nieco pytanie, jak wygląda polska moneta 1 zł. Zależy, z której strony patrzeć: orzeł lub reszka!

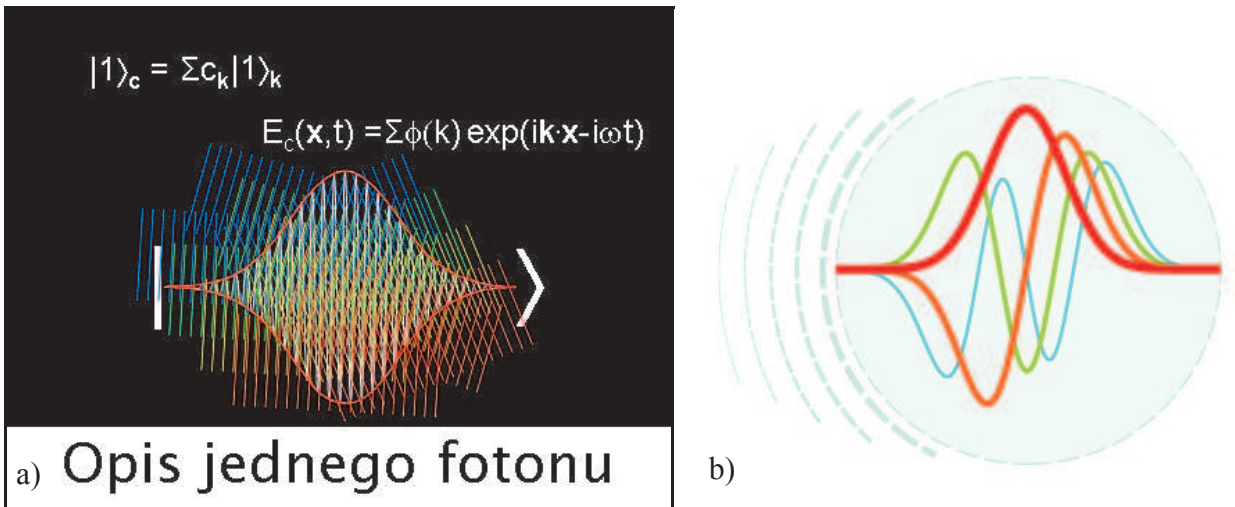
W fizyce jest podobnie: w niektórych doświadczeniach światło ujawnia naturę falową w innych korpuskularną. Co więcej, nawet elektrony, te które kreślą obraz w kineskopie telewizyjnym, w niektórych doświadczeniach też zachowują się jak fale. Tak działa np. mikroskop elektronowy, pozwalający na oglądanie pojedynczych atomów, zob. fot 2.14.



Fot. 2.14. a) Głowa mrówki; obraz uzyskany za pomocą mikroskopu elektronowego SEM. Mikroskop elektronowy pozwala na obserwację dziur wielkości kilkudziesięciu atomów (Zdjęcia SEM są monochromatyczne. Prezentowane zdjęcie zostało pokolorowane w programie graficznym. Źródło: MicroAngela); **b)** obraz kryształków Si (krzem); powyższe obrazy nie powstałyby, gdyby elektrony nie zachowywały się jak fale.

Dla ciekawych

Ale jak pogodzić dwoistą naturę światła w sposób fizyczny? Pokazali to młodzi doktoranci w Instytucie Fizyki UMK w 2007 roku. Fala (Maxwella) opisująca jeden kwant światła, to taki pojedynczy impuls, zob. ryc. 2.15.



Ryc. 2.15. a) „Pomiar kształtu pojedynczego fotonu metodą „rzutu na kota”, wykład ZDF UMK, 2008. b) obwiednia pojedynczego fotonu („Źródła fotonów w łączności kwantowej”, W.Wasilewski²²)

Pytania:

1. Jaki jest zakres (w jednostkach długości fali) światła widzialnego (przez człowieka)?
2. Wyjaśnij, co to jest światło podczerwone.
3. Wyjaśnij, dlaczego nadmierne opalanie się jest szkodliwe dla zdrowia. Ile wynosi (w jednostkach eV) granica między światłem widzialnym a nadfioletowym?
4. Czy potrafisz wyjaśnić, co to jest foton?
5. Co to jest efekt fotoelektryczny? Jeśli praca wyjścia wynosi 2 eV a światło nadfioletowe o określonej długości fali ma energię 3,8 eV, z jaką energią kinetyczną są emitowane elektrony w zjawisku fotoelektrycznym?

2.4. Spektroskopia, czyli nauka o duchach

Zależność natężenia światła od długości fali światła nazywamy widmem, po angielsku spektrum²³. Słowo to pojawiło się w 1704 roku w traktacie Newtona „Opticks”²⁴, kiedy opisywał kolory powstające z rozdzielenia światła białego na poszczególne kolory za pomocą pryzmatu. Widmo to nie światło, ale rodzaj jego obrazu. Spektroskopia to badania widm. Stąd żart w tytule tego rozdziału – widmo to nie światło, ale jego obraz, tak jak widmo w języku potocznym to nie osoba, ale jej „pozostałość”.

W połowie XIX wieku udoskonalono urządzenia do analizy widm światła, wyposażając je oprócz pryzmatu w dwie lunetki pozwalające na ogniskowanie światła, fot. 2.16. Odkryto w ten sposób, że nawet w widmie Słońca występują wąskie linie.

²² Zob. też W Wasilewski i in. *Phys. Rev. Lett.* **99** (2010) 123601

²³ Słowo *spektrum* nie pochodzi z greki, jak większość słów naukowych. Spektrum pochodzi z łaciny i oznacza obraz, wyobrażenie, rzeźbę itp.

²⁴ I. Newton, <http://www.gutenberg.org/ebooks/33504>