

Rozdział II. Fizyka atomowa i cząsteczkowa

2.1. Dwie rewolucje: maszyny cieplne i elektryczność

Dzięki fizyce dokonały się co najmniej dwie rewolucje w historii ludzkości. Pierwsza z nich, nazwiemy ją lokomocyjną, w połowie XIX wieku. Jeszcze w 1825 roku, Adam Mickiewicz podróżował przez stepy Ukrainy powozem, aby następnie wsiąść w Odessie na statek żaglowy.

„-Wpłynąłem na suchego przestwór oceanu, wóz się nurza w zieloność i jak łódka brodzi”.

Czterdzieści lat później pisał rosyjski poeta Nikołaj A. Niekrasow¹:

„-Lecąc pośpiesznie po torze żelaznym,
Obmyślam pieśni pochwalne.”

Dziś, między Sankt Petersburgiem a Moskwą pociągi mkną z prędkością 220 km/h.

Podstaw rewolucji transportowej można się dopatrywać w połowie XVIII wieku. Wtedy to, w 1763 roku, James Watt² zbudował pierwszą maszynę zamieniającą energię gorącej pary wodnej na energię napędzającą maszyny przemysłowe. Minęło ponad pół wieku, zanim maszyny parowe stały się na tyle ”zgrabne”, aby móc napędzać lokomotywę kolejową³. W 1829 roku G. Stephenson nazwał swoją lokomotywę „Rakieta”; osiągała ona „zawrotną” prędkość 50 km/h. Nie byłoby potęgi Stanów Zjednoczonych, gdyby nie budowana z wielkim trudem linia kolejowa między wschodnim a zachodnim wybrzeżem.



Fot. 2.1. Wykorzystanie maszyny parowej: **a)** samochód strażacki na parę z 1879 roku, „powerhouse” Museum w Sydney; **b)** lokomotywy parowe z początku XX wieku, Muzeum Nauki i Techniki w Mediolanie (Foto MK)

Wiek XIX zakończył się zbudowaniem pierwszych silników samochodowych, benzynowego przez Augusta Otto w 1863 roku i na olej napędowy przez Rudolfa Diesla w 1897 roku. Silnik benzynowy pozwolił braciom Orville i Wilbur Wright, konstruktorom rowerów, na wzniesienie się w powietrze za pomocą samolotu (17 grudnia 1903 r).

¹ Bystro leczu ja po relsom, uczgunnym, dumaju dumu swójú, tłumaczenie dowolne GK

² Od jego nazwiska mamy jednostkę fizyczną *mocy*. W watach mierzymy moc czajnika (500 W), grzejnika pralki (3 kW), moc silnika samochodu (setki kilowatów), statku żeglugi przybrzeżnej (foto 1.2) i moc nadawczą komórki (według norm technicznych do 10 W).

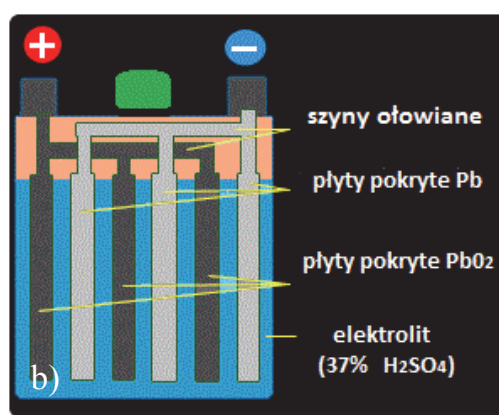
³ 29 IX 1825 – otwarcie pierwszej kolei ze Stockton do Darlington (40 km). Warszawa uzyskała połączenie kolejowe z Wiedniem w 1848 r. Źródło: materiały historyczne PKP <http://www.pkp.pl/node/170>



Wartość odżywcza	w 100 ml soku
wartość energetyczna	224 kJ (53 kcal)
białko	0,4 g
węglowodany	12,0 g
w tym cukry	11,8 g
tłuszcz	0,1 g
w tym kwasy tłuszczowe nasycone	0,02 g
błonnik	1,4 g
sód	0,01 g
witamina C	24 mg / (30%*)
* % zalecanego dziennego spożycia	

Fot. 2.2. Nagrobek Jamesa Joule'a w Opactwie Westminster w Londynie. Joule jako pierwszy zmierzył, jakiej ilości pracy odpowiada jednostka ciepła. Na jego cześć jednostkę pracy (lub energii) nazywamy dżulem. **b)** Opakowanie z napojem czy jakiegokolwiek innym pożywieniem podaje „wartość energetyczną” jednej porcji – najczęściej w kilodżulach (kJ) i kilokaloriach (kcal). Foto AK

Druga rewolucja przemysłowa, związana z użyciem energii elektrycznej miała miejsce w XX wieku (1881 rok – pierwszy tramwaj elektryczny w Berlinie). Podobnie jak pierwsza, korzeniami sięgała sto lat wcześniej. W końcu XVIII wieku, inspektor szkolny z zawodu, Alessandro Volta polemizując z Luigi Galvanim, położył na własnym języku dwa kawałki różnych metali (cyny i srebra) i poczuł „kwaśny smak”⁴. Powstało w ten sposób ogniwo galwaniczne. Poprzez ułożenie większej ilości monet (zob. fot. 2.3) lub umieszczenie par metali (cynk-miedź) w serii szklanek – powstał stos, czyli bateria Volty. Dziś nadal wszystkie komputery i telefony komórkowe korzystają ze źródeł prądu (stałego) w postaci ogniw chemicznych, czyli ogniw Volty.



Fot. 2.3. **a)** Ogniwo Volty: ogniwo zbudowane z monet cynowych i srebrnych przekładanych kartonem nasączonym wodą, Como; **b)** schemat samochodowego akumulatora ołowiowego.

Już w 1803 roku, adwokat z Trydentu, Gian Domenico Romagnosi, zauważył wpływ prądu elektrycznego na igłę magnetyczną⁵. Minęło prawie 30 lat, zanim angielski samouk, Michael Faraday znalazł sposób na wytworzenie prądu elektrycznego z pola magnetycznego. Rozwiązanie było proste: należy poruszać przewodnikiem w polu magnetycznym. Zjawisko

⁴ Doświadczenie to opisujemy w artykule A. Karbowski, G. Karwasz, „Na końcu języka (Volty)”, Foton 96, Wiosna 2007.

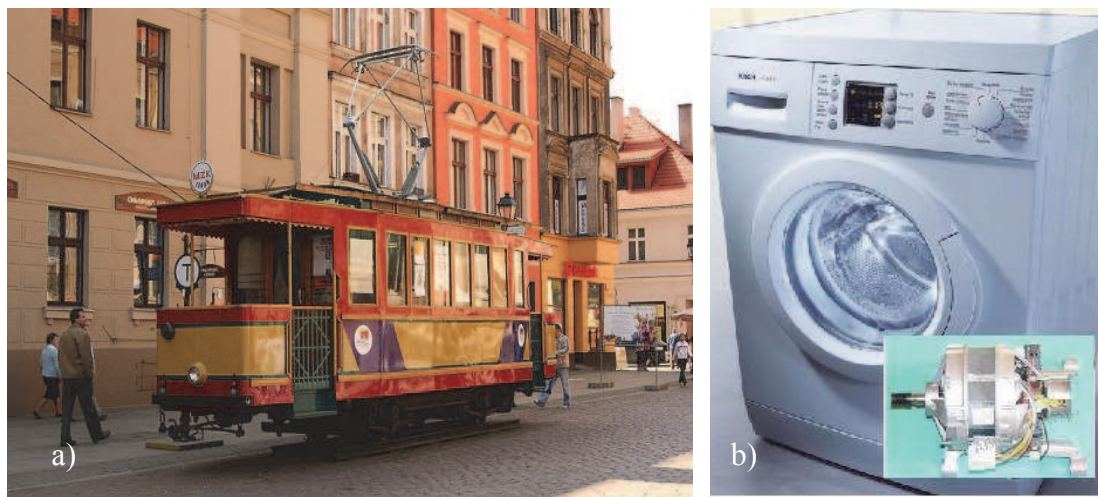
⁵ Doświadczenie powtórzone w 1817 roku przez Hansa Christiana Ørsteda.

to nazywamy indukcją elektromagnetyczną i jest dziś podstawą całej energetyki światowej. Ilość energii elektrycznej, 10 TW wytwarzanej przez elektrownie świata⁶ to aż połowa energii, jaka powstaje w całej skorupie i płaszczu Ziemi wskutek wszystkich zachodzących tam rozpadów promieniotwórczych.

Obie rewolucje z XIX wieku miały za słowa kluczowe „energię” i „pracę”. Mówimy o energii elektrycznej, cieplnej, jądrowej itd. Zaznaczmy jednak bardzo ważne stwierdzenie. Określenie „energia elektryczna” nie oznacza, że jest to jakiś specjalny typ energii – to jedynie jej „forma”. Tak jak formą wody (stanem skupienia) jest lód, ciecz i para wodna. Podobnie energia zmienia jedynie formę. Nie powinniśmy więc mówić „produkcja” energii elektrycznej, ale przetwarzanie energii na jej formę elektryczną. I z tym zastrzeżeniem, dopuszczymy określenia „wytwarzanie” energii, „zużycie” energii itd., mając na myśli różne formy energii.

James Prescott Joule w połowie XIX wieku obserwując, jak grzeją się lufy armatnie podczas wiercenia stwierdził, że praca zamienia się w ciepło. Zmierzył to przeprowadzając stosowne doświadczenie. Czy ciepło również może zamienić się w pracę? Ależ oczywiście! Tak właśnie działają silniki parowe, benzynowe, wysokoprężne. Niestety, o ile cała praca może zamienić się w ciepło, nie całe ciepło może zostać zużyte na wykonanie pracy. Część z tego ciepła musi trafić do chłodnicy. Istnieje więc teoretyczna granica górnej wydajności silników cieplnych. Zależy ona od temperatury (w skali bezwzględnej, czyli w kelwinach K) źródła ciepła i chłodnicy; została przewidziana przez Nicolasa Léonarda Sadi Carnota w 1824 roku, młodego francuskiego naukowca⁷. Podobna teoretyczna granica istnieje dla ogniw fotowoltaicznych, nie tyle zależna od temperatury co od własności materiałów konstrukcyjnych dla tych ogniw: półprzewodników.

Dziś, w przededniu zastąpienia energetyki opartej na spalaniu ropy, węgla i gazu⁸ energetyką opartą na ogniwach foto-woltaicznych kończy się siła napędowa pierwszej rewolucji naukowo – przemysłowej. Druga rewolucja, elektryczna, razem ze zdobyczami fizyki współczesnej, jeszcze nam trochę posłuży. W trzeciej rewolucji, informatycznej – właśnie żyjemy. Zawdzięczmy ją fizyce XX wieku. O narodzinach fizyki współczesnej opowiemy w następnym paragrafie.



Fot. 2.4. Zastosowania energii elektrycznej: **a)** toruński tramwaj z 1911 roku; **b)** silnik elektryczny pralki; pralka „zużywa” sporo energii elektrycznej - 2 kJ na sekundę, czyli ma moc 2 kW (Foto AK)

⁶ TW – terawatt czyli milion milionów watów (10^{12} W)

⁷ Zob. plakat dydaktyczny „Chaud ou froid”, *On the track of the Modern Physics*, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/130

⁸ Według prestiżowego czasopisma „Nature” z 2003 roku, ludzkość skonsumowała już 50% istniejących zasobów ropy naftowej. Rosną z dnia na dzień odkrywane zasoby, ale ubywa tych już eksploatowanych.

Pytania do samodzielnego studiowania:

1. Odnajdź w literaturze polskiej lub światowej, od Homera do Stanisława Lema, relacje z podróży. Co było środkiem podróży (statek, pociąg itd.)? Opisz, co było źródłem energii napędzającej ten środek, i ile czasu, w przybliżeniu, zajmowało przejechanie/przeplłynięcie określonej odległości.
2. Nanieś na skalę czasu punkty przełomowe zastosowaniach silników cieplnych: wynalazek Watta, pierwszą lokomotywę parową, pierwszy silnik benzynowy, pierwszy samolot, wodowanie „Titanica”.
3. Nanieś na skalę czasu punkty przełomowe w zastosowaniach prądu elektrycznego: wynalazek ogniwa Volty, odkrycie indukcji elektromagnetycznej, pierwszy tramwaj elektryczny, pierwsze oświetlenie elektryczne miasta w USA i Europie.
4. Podaj przykłady urządzeń korzystających z energii elektrycznej, o mocy: setek miliwatów, pojedynczych watów, setek watów, pojedynczych kilowatów, setek kilowatów.
5. Znajdź w internecie różne rodzaje ogniw elektrochemicznych (takich jak ogniwo Volty). Zidentyfikuj w każdym z nich, co jest katodą (czyli elektrodą ujemną), co jest anodą (czyli elektrodą dodatnią), w czym są umieszczone elektrody (czyli co jest elektrolitem).

Pytania na sprawdzian:

1. Opisz, na czym polegały dwie rewolucje przemysłowe oparte o odkrycia fizyki.
2. Podaj jednostki pomiaru energii, mocy, natężenia prądu i napięcia. Podaj przykładowe wartości mocy wybranych urządzeń korzystających z energii elektrycznej.

2.2. Narodziny fizyki współczesnej

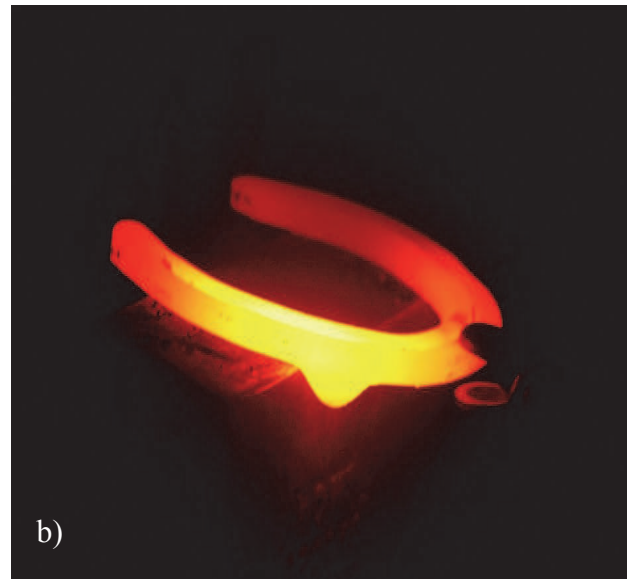
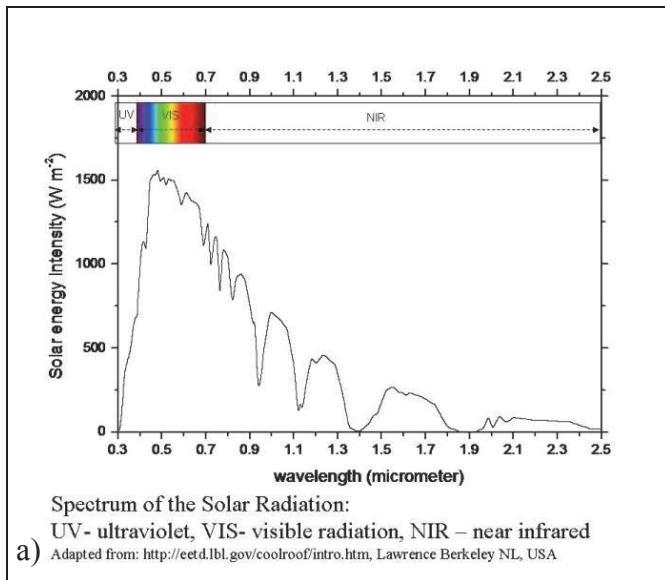
Trudno określić dokładny moment narodzin fizyki współczesnej. Często podaje się wykład Maxa Plancka, profesora Uniwersytetu w Berlinie, na posiedzeniu niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w czwartek, 5 grudnia 1900 roku. Na wykładzie tym Planck starał się wyjaśnić widmo⁹ tzw. ciała doskonale czarnego¹⁰. Widmo takiego „czarnego” ciała ma specyficzny rozkład – ciągły, jak kolory w tęczy przechodzące jeden w drugi. Światło słoneczne ma właśnie widmo ciągłe, przypominające świecące, rozgrzane ciało czarne: 45% jego energii przypada na zakres widzialny, 50% na dłuższe fale, tzw. promieniowanie podczerwone, a 5% na nadfiolet, zob. ryc. 2.5.

Wiadomo od „zawsze”, że im bardziej rozgrzane ciało, tym świeci bardziej na białą. Kowale od niepamiętnych czasów tak właśnie oceniają temperaturę kutego żelaza: wiśniowy kolor to około 700°C, jasnoczerwony to ponad 800°C, pomarańczowy to około 1000°C¹¹. Planck starał się tym obserwacjom nadać opis matematyczny, wychodząc z dwóch przesłanek: nauki o ciepłe (termodynamiki) i równań opisujących prawa elektromagnetyzmu, czyli praw Maxwella. Tym ostatnim wypada poświęcić dwa zdania.

⁹ Widmo, czyli zależność natężenia światła od długości fali, czyli koloru światła.

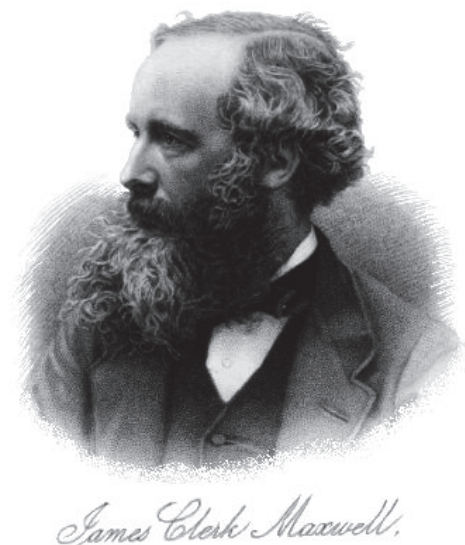
¹⁰ Ciało doskonale czarne to taka konstrukcja wymyślona, dużego pudła z małym otworem. Otwór dla obserwatora na zewnątrz wydaje się całkowicie czarny.

¹¹ Zobaczymy w rozdziale III, że astronomowie w analogiczny sposób oceniają temperaturę powierzchniowych warstw odległych gwiazd.



Fot. 2.5. Obserwacje leżące u podstaw rewolucji Plancka: **a)** widmo Słońca po przejściu przez atmosferę Ziemi; 40% energii przypada na podczerwień; **b)** kolory rozgrzanej podkowy

Na naszą wiedzę o elektryczności i magnetyzmie złożyły się stulecia obserwacji. Od starożytności wiadomo, że potarty bursztyn¹² przyciąga kurz, skrawki włosów itd. Oddziaływaniem magnesów zajmował się m.in. na początku XVII wieku Kartezjusz. Giandomenico Romagnosi w 1803 r., a za nim Hans Ørsted stwierdzili, że prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne. Faraday odkrył prawo indukcji, czyli wytwarzania prądu elektrycznego z pola magnetycznego. Fakty te, pozornie oddzielne, znalazły opis w prawach Maxwella. Ich prostota i ukryta symetria są tak piękne, że cytujemy je na ryc. 2.6.



Pan Bóg powiedział:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{I} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

I stało się światło!

Ryc. 2.6. Prawa Maxwella w postaci tzw. różniczkowej. Odwrotność iloczynu stałych $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [SI] i $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [SI] jest równa kwadratowi prędkości światła w próżni, $1/\mu_0 \epsilon_0 = c^2$. Nie musisz tych równań rozumieć, ale dzięki nim mamy telefony komórkowe, radio i TV

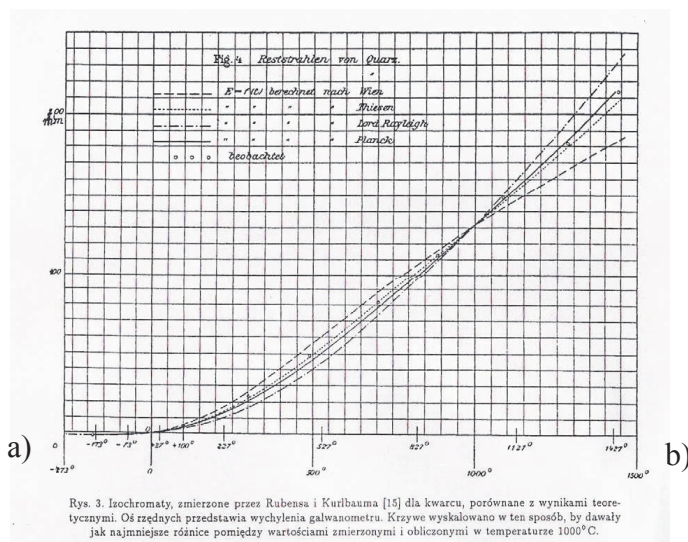
Rozwiązanie równań Maxwella w taki sposób, jak to robimy w matematyce, tzn. poprzez wyznaczenie jednej niewiadomej i podstawienie do drugiego równania, dało wynik zaskakujący: pole magnetyczne i pole elektryczne mogą się cyklicznie zmieniać jedno w drugie i wędrować w przestrzeni. Wyliczono prędkość rozchodzenia się takich pól, na podstawie znanych stałych oddziaływań elektrycznych i magnetycznych: wynikiem była

¹² Bursztyn, po słowiańsku *jantar* po grecku nosi nazwę *elektron*.

znana prędkość światła, $c = 299\,792\,458$ m/s (czyli około **trzysta tysięcy kilometrów na sekundę**).

Natychmiast podjęto poszukiwania fal elektro – magnetycznych. W 1887 roku w Getyndze młody asystent H.R. Hertz zauważył mikroskopijny przeskok iskry między dwoma metalowymi kulkami, gdy w pobliżu wywołał przeskok iskry między innymi kulami. Fale elektromagnetyczne, a przez to poprawność równań Maxwella, zostały potwierdzone. Nie było wiadomo, czy do ich rozchodzenia się jest potrzebny jakiś ośrodek (zwany eterem), ale to już inna historia, do której wrócimy przy okazji astrofizyki.

Max Planck starał się „pogodzić” równania Maxwella z zasadami emisji energii przez rozgrzane ciała. Już w październiku 1900 roku uzyskał niezłą zgodność z doświadczeniem, zob. ryc. 2.7. Niestety, w zakresie światła podczerwonego zależność nie była zadowalająca. W referacie w grudniu 1900 roku Planck przyjął następującą hipotezę¹³: założył, że energia jest emitowana w ściśle określonych porcjach (kwantach) przez elementarne drgające mini-anteny wewnątrz czarnego pudła. Wielkość tych porcji, niesionych przez fale elektromagnetyczne tak wyemitowane, zależna byłaby jedynie od częstotliwości fali ν (czytaj: ni) lub równoważnie - od długości fali λ , czyli od koloru światła.



6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwellschen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumbfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwellschen Theorie (oder Allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Ryc. 2.7. Dwie prace, które leżą u podstaw fizyki kwantowej: **a)** praca Plancka nt. widma ciała doskonale czarnego (Annalen der Physik, vol. 4, p. 553, 1901r.) – wykres przedstawia różne teorie porównane z danymi doświadczalnymi¹⁴; **b)** fragment pracy A. Einsteina nt. efektu fotoelektrycznego – niemożliwe było wyjaśnienie tego zjawiska bez założenia, że atomy pochłaniają energię światła w postaci ściśle określonych porcji, zależnych jedynie od koloru światła; porcje te nazywane fotonami

Opisujemy to prostym wzorem,

$$E = h \cdot \nu \tag{2.8}$$

gdzie E jest energią fotonu a ν jego częstotliwością.

Stała Plancka h , przypuszczalnie taka sama w całym Wszechświecie, jest tak ważna, że jest pokazana przy wejściu do Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, zob. fot. 2.11a.

¹³ Przez hipotezę rozumiemy stwierdzenie założone, ale nie dość dobrze udowodnione. Wyższym szczeblem pewności jest teoria, która daje również przepis doświadczalny na jej sprawdzenie. Znamienne jest rozgraniczenie między hipotezą a teorią, jaką uczynił bł. Papież Jan Paweł II pisząc o ewolucji: „ewolucja, do niedawna mająca charakter jedynie hipotezy w ostatnich latach przyjęła znamiona teorii”, *Message to the Pontifical Academy of Sciences: On evolution*, 22 październik 1996.

¹⁴ A. Kiejna, Stulecie wzoru i stałej Plancka, *Postępy Fizyki*, 2000, 51 (6), 294

Energię fotonów obliczamy ze wzoru

$$E = h \cdot \nu,$$

gdzie ν jest częstotliwością światła, obliczaną z okresu drgań fali za pomocą wzoru:

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (2.9).$$

Związek między częstotliwością światła a długością fali światła jest bardzo prosty:

$$\lambda = c \cdot T \quad (2.10)$$

Gdzie $T = \frac{1}{\nu}$ jest okresem drgań fali świetlnej, a c prędkością fali.

Związek (2.10) przypomina wzór na drogę w ruchu jednostajnym $s = vt$ więc jest łatwy do zapamiętania.

Dla światła fioletowego na granicy widzialności dla oka ludzkiego (długość fali 380 nm) energia kwantów wynosi 3,26 eV, a dla światła czerwonego na granicy widzialności (760 nm) energia wynosi 1,61 eV. Dla porównania jednostek, energia odłączenia jednej grupy OH w cząsteczce glukozy wynosi (w próżni, poprzez przyłączenie elektronu) 2,0 eV. Energia ta jest niższa w środowisku wodnym (około) 1,2 eV.

Hipoteza kwantów energii światła, czyli fotonów, była tak rewolucyjna, że sam Planck jeszcze w 1916 roku nie chciał używać słowa „foton”. Oczekiwaliśmy od czasów Demokryta, że materia może składać się z niepodzielnych części, zwanych atomami¹⁵. Nie spodziewaliśmy się, że światło również jest wymieniane (wysyłane i absorbowane) w postaci minimalnych porcji. Któryś z fizyków przyrównał ideę kwantów światła do zakupów cukru, sprzedawanego nie w małych torebkach, a jedynie w dziesięcio-kilogramowych blokach¹⁶.



Fot. 2.8. a) Stała Plancka w symbolu Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu; dokładna znajomość stałej Plancka ma zasadnicze znaczenie dla całej fizyki; **b)** kwanty w życiu codziennym: cukier można kupić w postaci kwantu 1 kg lub, w barze – 5 g.

Z obserwacji, że światło jest wyświecane (emitowane) lub absorbowane w ściśle określonych porcjach, wynikają niezwykle ważne konsekwencje nie tylko dla fizyki, ale

¹⁵ Z kolei sam A. Einstein nie wierzył w możliwość obserwacji *atomów*, rzecz elementarną dzięki nowym osiągnięciom fizyki (np. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/high_performance_stm_1_300.jpg)

¹⁶ Rzeczywiście, jeszcze pod koniec XIX wieku cukier był rozprowadzany nie w kilogramowych torebkach, ale w postaci wielkich bloków, tzw. głów cukru. Ważyły one nawet 5 kilogramów.

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 (eksponat 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.

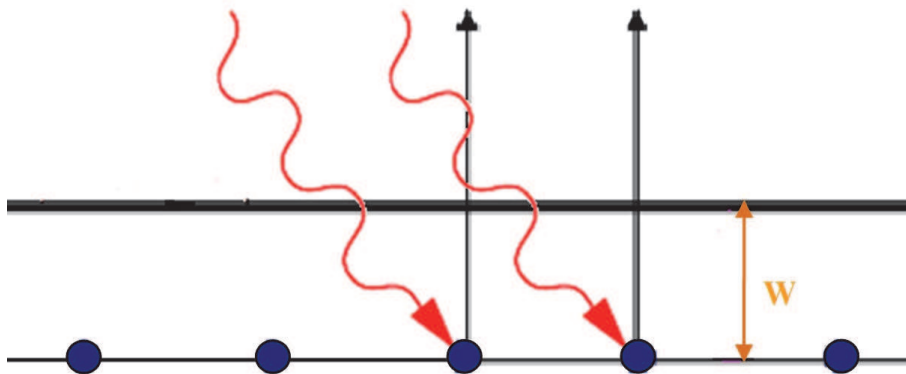
¹⁹ Muzeum nauki w Monachium <http://www.deutsches-museum.de/>

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.

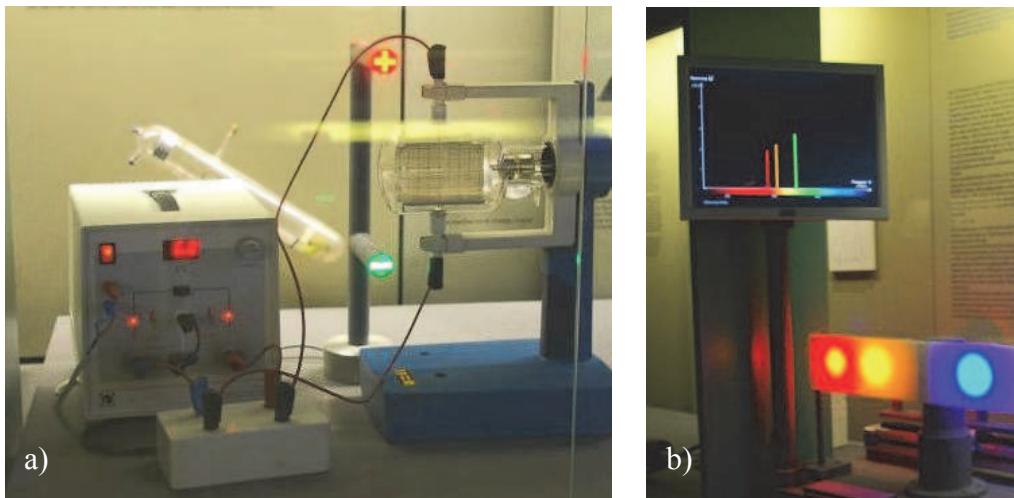
W powyższym zdaniu zawarta jest istota odkrycia A. Einsteina. Należy jedynie zauważyć, że aby wybić elektron, należy mu dostarczyć energii, z jaką jest on związany w atomach metalu²⁰. Nadmiar tej energii zamienia się w energię kinetyczną E_{kin} elektronu. Zapisujemy to w postaci

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

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.

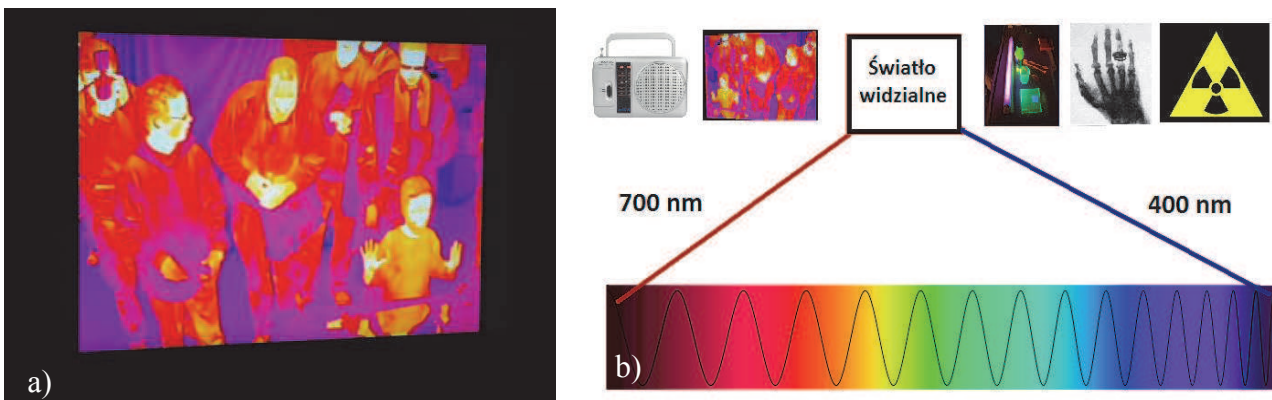
Doświadczenie:

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

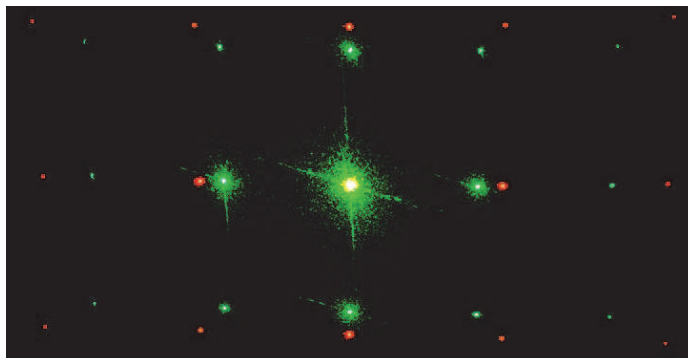
Światło widzialne przez człowieka to zakres **380 -760 nm**. Jak widzisz z wykresu, nie jest to dużo w stosunku do szerokiego zakresu fala elektromagnetycznych, ale w tym zakresie przypada aż 50% natężenia światła słonecznego.

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.

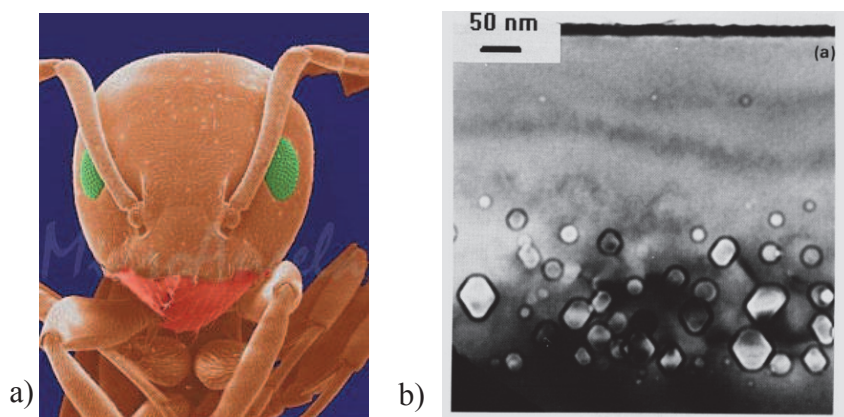


Fot. 2.13. Światło lasera czerwonego i zielonego po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną ulega ugięciu pod ściśle określonymi kątami (tu tworzy krzyże, bo siatka miała nacięcia w formie krzyży). Kąt ugięcia światła na siatce zależy od długości fali – plamki zielonego lasera ($\lambda=500$ nm) położone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

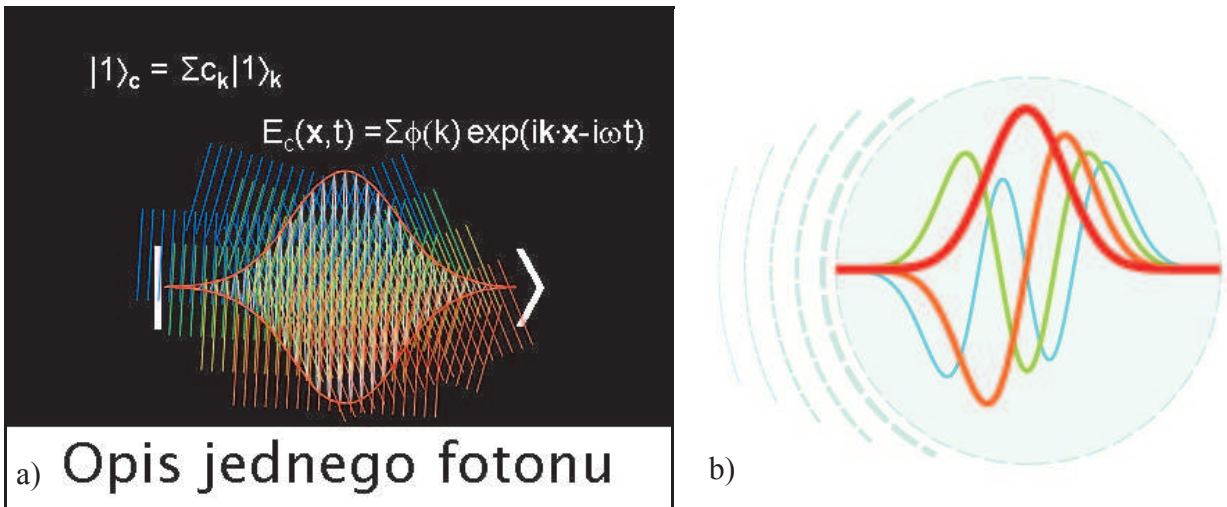
W fizyce jest podobnie: w niektórych doświadczeniach światło ujawnia naturę falową w innych korpuskularną. Co więcej, nawet elektrony, te które kreślą obraz w kineskopie telewizyjnym, w niektórych doświadczeniach też zachowują się jak fale. Tak działa np. mikroskop elektronowy, pozwalający na oglądanie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

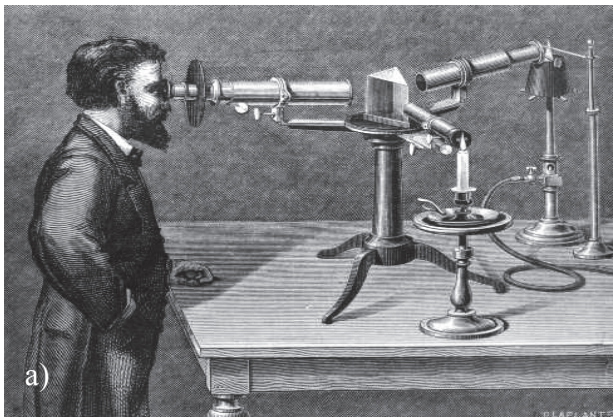
Zależność natężenia światła od długości fali światła nazywamy widmem, po angielsku spektrum²³. Słowo to pojawiło się w 1704 roku w traktacie Newtona „Opticks”²⁴, kiedy opisywał kolory powstające z rozdzielenia światła białego na poszczególne kolory za pomocą pryzmatu. Widmo to nie światło, ale rodzaj 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

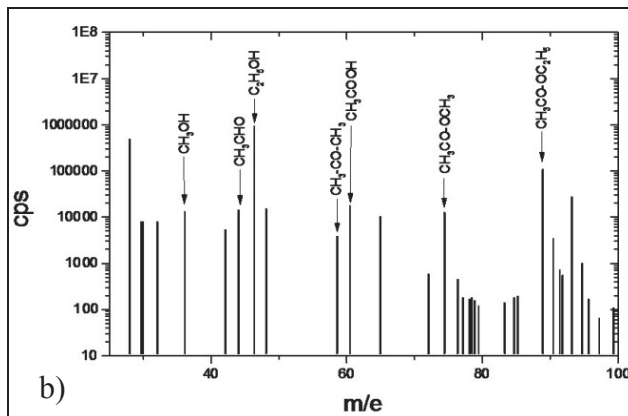
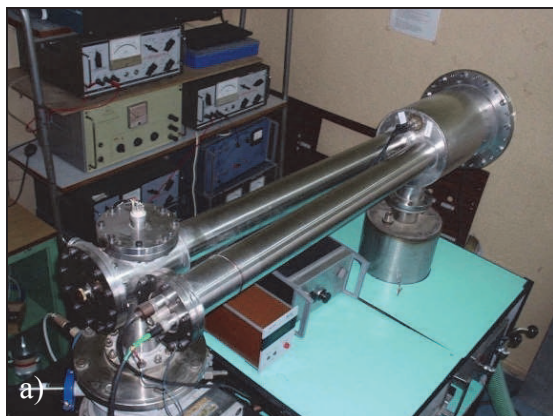
²³ Słowo *spektrum* nie pochodzi z greki, jak większość słów naukowych. Spektrum pochodzi z łaciny i oznacza obraz, wyobrażenie, rzeźbę itp.

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



Ryc. 2.16. a) Spektroskop Kirchhoffa; **b)** spektroskop służy do otrzymywania i analizowania widm promieniowania świetlnego (od podczerwieni do nadfioletu); składa się z poziomej tarczy z podziałką kątową, w środku której umieszczony jest pryzmat, lunety obracanej wokół tarczy oraz kolimatora, wyposażonego w źródło światła (foto AK)

Mówiąc ogólniej, widmem możemy nazwać wiele innych zależności fizycznych. W analizie chemicznej złożonych mieszanin badamy obfitość poszczególnych związków chemicznych w zależności od np. masy tych związków. Zależność taką nazwiemy „widmem masowym”. Związki chemiczne to układy atomów, a masa atomu jest ściśle określona. Mierzmy ją często w tzw. jednostkach atomowych, czyli w jednostce przybliżonej masy atomu wodoru²⁵. Widmo masowe nie jest więc widmem ciągłym jak widmo światła słonecznego ale widmem składającym się z pojedynczych „prążków” zob. fot. 2.17. Mówimy, że takie widmo jest dyskretne. Widmo masowe drobin w fazie gazowej składających się na zapach truskawek jest widmem dyskretnym.



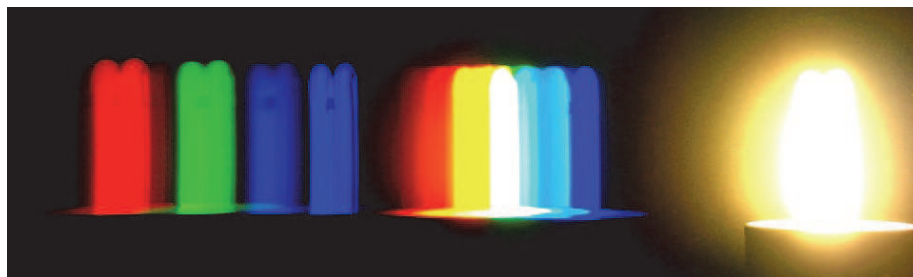
Fot. 2.17. a) Spektrometr masowy pozwalający mierzyć ilość określonych związków chemicznych w zależności od ich masy (Słupsk); **b)** widmo masowe „zapachu truskawek” – ilość zliczeń jonów w zależności od stosunku ich masy do ładunku; najczęściej w tej woni jest „zapachu” alkoholu etylowego i kwasu octowego, ale sporo jest też różnego rodzaju estrów, czyli aromatycznych związków powstających z kwasów organicznych i alkoholi (courtesy prof. D. Bassi, Uniwersytet Trento).

Okazuje się, że widmo ciągłe jak to słoneczne jest szczególnym przypadkiem widm. Źródłem światła słonecznego są powierzchniowe rozgrzane warstwy Słońca, które są dobrym przybliżeniem ciała „doskonale czarnego” w modelu Plancka. Co więcej, z modelu Plancka możemy dokładnie określić, jakiej temperaturze odpowiada to widmo – Planck podał ścisłą zależność matematyczną natężenia światła od długości fali dla danej temperatury promieniującego ciała.

²⁵ Dokładniej, jednostka masy atomowej jest masa 1/12 masy atomu węgla, który zawiera w jądrze 6 protonów i 6 neutronów, czyli tzw. węgla ¹²C.

We wzorze Plancka (znajdziesz go w Internecie) występują tylko stałe matematyczne i fizyczne a natężenie światła zależy wyłącznie od temperatury ciała (wyrażonej w temperaturze bezwzględnej, czyli w kelwinach, $0^{\circ}\text{C} \approx 273\text{K}$). Im wyższa temperatura ciała, tym maksimum widma przesuwa się bardziej w kierunku światła niebieskiego, jak to pokazaliśmy na fot.2.5. Temperatura powierzchniowych warstw Słońca (tzw. fotosfery) to 5750 K i światło ma maksimum w okolicach długości fali 500 nm, czyli koloru zielonego (450 – 560 nm). Światło żarówki z włóknem wolframowym wydaje się nieco czerwone w porównaniu ze światłem słonecznym. Rzeczywiście, temperatura włókna wolframowego w żarówce nie przekracza 3000 K.

Widmo „żarówki” energooszczędnej jest już zupełnie inne: nie ma charakteru ciągłego. W widmie tym brakuje niektórych kolorów, zob. fot 2.18.



Fot. 2.18. Widmo żarówki energooszczędnej, uzyskane za pomocą siatki dyfrakcyjnej; ma ono charakter dyskretny – oddzielnych linii a brakuje np. koloru żółtego, pomarańczowego i fioletowego. Na tym zdjęciu obraz żarówki rozdziela się wyraźnie na poszczególne kolory składowe dopiero w drugim rzędzie dyfrakcji.

Dlaczego atomy na powierzchni Słońca (lub we włóknie żarówki) emitują światło o widmie ciągłym a podobne atomy w bańce żarówki energooszczędnej emitują pojedyncze kolory? Otóż w metalu (lub na powierzchni Słońca) atomy są ułożone gęsto i wzajemnie ze sobą oddziałują; w gazie atomy są swobodne. Odkrywamy w ten sposób bardzo ważne prawo: **pojedyncze atomy emitują widma dyskretne**²⁶.

Doświadczenie

Obejrzyj przez siatkę dyfrakcyjną zwykłą żarówkę, żarówką energooszczędną, lampkę LED w jakimkolwiek wyświetlaczu. Zauważ, czy pojawiają się dodatkowe kolory składowe. Dokonujesz w ten sposób analizy widma.

Jak wygląda widmo światła emitowanego, zależy od rodzaju atomu. Widmo jest swego rodzaju odciskiem linii papilarnych atomu. Badania widm poczyniły rewolucję najpierw w chemii, później w fizyce. W widmie Słońca odkryto linie nieznanego pierwiastka, który to nazwano helem²⁷. W widmie powietrza odkryto nowy gaz, argon, którego jest całkiem sporo (1%). W widmie argonu wydzielonego z powietrza odkryto z kolei dwa nowe pierwiastki, krypton (= ukryty) i ksenon (= obcy). Jest ich znacznie mniej niż argonu, też należą do grupy gazów szlachetnych ale są od argonu cięższe. Świecący pięknym czerwonym światłem – to kolejny, lekki gaz szlachetny, neon²⁸, zob. fot. 2.19.

²⁶ Dokładniej należałoby powiedzieć, że to nie atomy, ale poruszające się w tych atomach *elektrony* emitują światło. Do tego zagadnienia wrócimy nieco dalej.

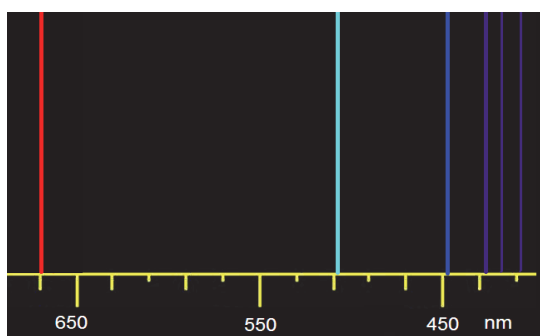
²⁷ Dopiero później odkryto hel również na Ziemi. Całkiem sporo jest go w gazie ziemnym - tworzy się w skorupie ziemskiej wskutek rozpadów radioaktywnych. Do zagadnienia helu wrócimy wielokrotnie.

²⁸ Tzw. lampa neonowa, a dokładniej „światłówka” nad twoją głową w klasie, zazwyczaj nie zawiera neonu, a jedynie argon i pary rtęci.



Fot. 2.19. „Neon” - artystyczna aranżacja na Potsdamer Platz w Berlinie. Czerwone koła roweru zawierają (zapewne) gaz szlachetny, neon (Foto MK)

Najprostsze możliwe widmo ma najlżejszy pierwiastek chemiczny, wodór. Widmo atomowego wodoru (H) w zakresie widzialnym składa się jedynie z 4 wąskich linii, zob. ryc. 2.20.



a)



b)

Ryc. 2.20. Widmo wodoru: **a)** obliczone – na zakres widzialny przypadają 4 linie, piąta jest na granicy nadfioletu; na skali poziomej długość fali w nm; przedstawiamy tę skalę według malejącej długości fali, co odpowiada rosnącej energii kwantów; **b)** rzeczywiste widmo doświadczalne uzyskane z pomocą sitaki dyfrakcyjnej – linie fioletowe są trudne do uchwycenia, nie tylko z uwagi na małe natężenie ale również z uwagi na trudności kamery i druku w *poprawnym oddaniu kolorów*; skala pozioma w obu rysunkach jest inna; w widmie doświadczalnym ostatni prążek z prawej strony to obraz lampy „w zerowym rzędzie dyfrakcji” czyli bez podziału na kolory; w widmie doświadczalnym widoczne są dodatkowe pasma spowodowane obecnością, obok wodoru atomowego H, również wodoru cząsteczkowego H_2 (rys. AK, foto KS)

Widmo wodoru uderza regularnością położenia prążków: aż dziwne, że do 1878 roku nikt nie odgadł właściwej zależności matematycznej między położeniami prążków. Udało się to dopiero Johannowi Balmerowi, nauczycielowi geometrii w liceum w Bazylei (Szwajcaria). Miał on zamiłowanie do łamigłówek matematycznych. Na jego cześć serię prążków w wodrze (atomowym) w zakresie widzialnym nazywamy serią Balmera. Kolejne serie widmowe wodoru, poza zakresem widzialnym, nazwano na cześć fizyków, którzy je odkryli.

Wzór Balmera jest prosty do odgadnięcia – prążki są położone coraz bliżej siebie, w miarę wzrostu częstotliwości fali ν (czyli malejącej długości fali λ), gdyż przypominamy

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (2.12)$$

Dysponując już wzorem Plancka na energię fotonów możemy wydedukować wzór [ważny!] na położenie poszczególnych prążków w widmie wodoru, począwszy od prążka czerwonego.

$$E = h\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (2.13)$$

gdzie R jest pewną stałą a $n = 3, 4, 5$, itd.

Prążkowi czerwonemu przypisujemy liczbę $n = 3$, niebieskiemu $n = 4$ itd.

Ile wynosi stała R i dlaczego tak numerujemy linie w serii Balmera opowiemy w następnym paragrafie.

1. Podaj wzór na energię fotonów światła w serii Balmera (czyli dla atomowego wodoru w zakresie widzialnym)
2. Wymień gazy szlachetne odkryte dzięki analizie widmowej.
3. Podaj jednostkę miary masy cząsteczek, wygodną do użycia w chemii.
4. Ile wynosi, z analizy widma, temperatura fotosfery Słońca?

2.5. Model Bohra struktury atomu

Model Bohra, obok hipotezy Plancka i prac Einsteina jest przykładem niezwykle odważnego pomysłu w historii fizyki. Pozwolił on na poznanie natury fizycznej (a nie tylko zależności matematycznej) zagadkowego nieco wzoru (2.13) na serie widmowe wodoru, jak seria Balmera. Model Bohra jest drugim, obok pracy Plancka z 1900 roku, filarem fizyki kwantowej – wyjaśnił on budowę atomu wodoru.

W okresie między 1900 a 1913 rokiem w widmie wodoru dokonano kolejnych odkryć – w 1906 T. Lyman badał linie w nadfiolecie a w 1908 roku F. Paschen odkrył serię linii w podczerwieni. Badano również widma gwiazd, odkrywając nowe linie widmowe.

Niels Bohr, Duńczyk, w 1913 roku młody doktorant w Manchesterze w Anglii próbował wyjaśnić wzór na energię fotonów w widmie wodoru. Model atomu wodoru wzorował na modelu Kopernika układu słonecznego. Jak w układzie słonecznym lżejsze planety krążą wokół masywnego Słońca, tak w atomie - lżejsze, ujemnie naładowane elektrony krążą dookoła ciężkiego, dodatnie naładowanego jądra²⁹. W przypadku Ziemi przyciągającą siłą jest siła grawitacji ze strony Słońca; to ona pełni rolę siły dośrodkowej. W modelu Bohra rolę siły dośrodkowej pełni przyciągająca siła oddziaływania *elektrycznego* między jądrem a elektronem. Model jest tak uderzający prostotą, że wydaje się niezrozumiałe, dlaczego nikt tego modelu wcześniej nie zaproponował.

Model Bohra miał jedną niespójność: w rozumieniu równań Maxwella, taki atom nie byłby stabilny. Dlaczego? Otóż, jak to wynikało z doświadczenia Hertza, ładunek elektryczny poruszający się ruchem przyspieszonym emituje fale elektromagnetyczne. Ba! Od 1896 roku stwierdzenie to było również potwierdzone pierwszą transmisją radiową, czyli

²⁹ Jak to powiemy jeszcze w dalszej części Poręcznika, masa elektronu to tylko 1/1837 część masy jądra wodoru, czyli protonu. Istnienie ciężkiego jądra w atomie zostało odkryte w 1914 roku, przez Ernesta Rutherforda, pracującego wówczas w Manchesterze.

wykorzystującą fale elektromagnetyczne. Jeżeli poruszający się ładunek emituje fale elektromagnetyczne, traci energię; jeśli traci energię to spowalnia, maleje siła odśrodkowa i spadnie na jądro.

Przypomnijmy wzór na siłę odśrodkową:

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (2.14)$$

gdzie m jest masą elektronu, v - jego prędkością na orbicie a r – promieniem tej orbity. Siła ta w stabilnym atomie musi być równoważona przez siłę Coulomba przyciągania elektrycznego między elektronem a protonem:

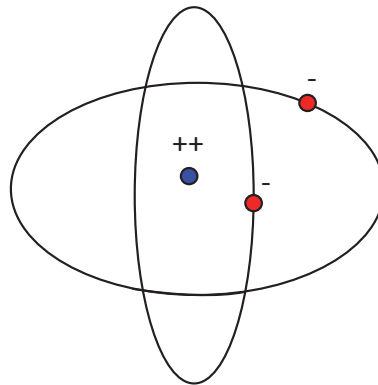
$$F = \frac{ke^2}{r^2} \quad (2.15)$$

gdzie e jest ładunkiem elektronu $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, r – promieniem orbity (nadal nam nieznanym), a stała $k = 9 \cdot 10^9$ w jednostkach SI $[\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}]$.

Bohr³⁰, podobnie nieco jak Newton i Kepler swoje prawa, sformułował trzy postulaty dotyczące atomu wodoru:

1. elektrony krążą po orbitach (eliptycznych) wokół jądra
2. w określonych warunkach orbity są stabilne
3. światło (fala elektromagnetyczna) jest emitowane w trakcie przeskoku z orbity dalszej (energetycznie wyższej) na orbitę bliższą jądra (energetycznie niższej).

W trzecim postulatcie Bohr założył do swoich obliczeń, że częstotliwość emitowanego światła jest równa połowie częstotliwości ruchu orbitalnego elektronu na orbicie niższej. Ten trzeci postulat podawany jest również w innych sformułowaniach – opiszemy je później.



Ryc. 2.21. Dwie przykładowe orbity elektronów w atomie; tak je mógł sobie wyobrażać M. Bohr. W oryginalnym modelu Bohra elektrony krążą po orbitach eliptycznych; na tym rysunku orbity pokazane są jedynie orientacyjnie, dopóki ich dokładnie nie wyliczymy

Jakie wnioski wynikają z postulatów Bohra? Przede wszystkim jesteśmy w stanie wyliczyć tak energie elektronów na poszczególnych orbitach jak i promienie tych orbit. Nie jest to specjalnie trudne. Musimy jedynie przypomnieć wzory na energię: kinetyczną (czyli ruchu) i potencjalną (i w polu grawitacyjnym i w polu elektrycznym) związaną z odległością od jądra (lub środka Ziemi).

³⁰ N. Bohr, On the Constitution of Atoms and Molecules, Philos. Mag. 26, 1, <http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/bohr13/eng.pdf>

(Fakultatywne)

Wzór na energię kinetyczną to

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (2.16),$$

a na energię potencjalną

$$E = -\frac{ke^2}{r} \quad (2.17)$$

gdzie symbole po prawej stronie wzoru są identyczne jak we wzorze 2.15.

We wzorze na energię kinetyczną przyjmujemy znak +. Zgodnie z definicją³¹, energia to zdolność ciała do wykonania pracy. Rozpędzony samochód jest zdolny do wykonania pracy – choćby przeciw sile tarcia na pewnym odcinku. Jeżeli natomiast elektron jest związany z jądrem, to nie jest on w stanie wykonać (użytecznej dla nas) pracy; co więcej, aby elektron mógł się przemieszczać swobodnie, należy nad nim wykonać pracę. Stąd znak minus we wzorze na energię potencjalną, podobnie jak dla pola grawitacyjnego, zob. wzór (1.32).

Możemy zapisać całkowitą energię elektronu jako

$$E_c = \frac{mv^2}{2} - \frac{ke^2}{r} \quad (2.18)$$

Ze przyrównania siły Coulomba i odśrodkowej otrzymujemy

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (2.19)$$

Ze wzoru (2.19) znajdujemy

$$\frac{ke^2}{r} = mv^2 \quad (2.20)$$

czyli energia elektronu wynosi po prostu

$$E_c = -\frac{1}{2}mv^2 \quad (2.21)$$

gdzie v jest prędkością elektronu na orbicie lub alternatywnie

$$E_c = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} \quad (2.22)$$

Jest to ważny wynik: w ruchu po orbicie kołowej energia kinetyczna jest równa połowie energii potencjalnej (a właściwie połowie wartości bezwzględnej energii potencjalnej, jako że ta przyjmuje wartości ujemne).

Energia elektronu na orbicie jest równa, zgodnie z modelem Bohra, energii wypromieniowanego światła, co z postulatu Plancka możemy zapisać jako

$$E = nh\nu, \quad (2.23)$$

gdzie ν jest częstotliwością emitowanego kwantu światła a n ilością wyemitowanych kwantów. Liczba n tak rozumiana jest liczbą naturalną $n = 1, 2, 3$ itd.

Potrzebujemy teraz wyznaczyć częstotliwość ν_1 ruchu elektronu na orbicie. ν_1 mówi, ile razy w ciągu sekundy elektron wykona pełnych okrążeń jądra. W tym celu musimy podzielić drogę przebytą przez elektron w ciągu sekundy przez długość jego orbity $2\pi r$. Droga przebyta

³¹ Zob. *Toruński poręcznik do fizyki. Gimnazjum klasa I*. Wydawnictwo Naukowe UMK, 2010, s. 87

w ciągu sekundy to po prostu prędkość elektronu v , jeśli wyrazimy ją w m/s. Wyprzedzając nieco wynik, wyliczymy ile razy w ciągu sekundy elektron o prędkości 2180 km/s znajdujący się na najniższej orbicie, o promieniu około $0,5 \cdot 10^{-10}$ m obiega jądro: $694 \cdot 10^{13}$ razy (czyli ok. 10^{16} razy – to są częstości typowe dla fal elektromagnetycznych w zakresie widzialnym).

Zapiszmy powyższe rozważania na częstość obiegu wzorem:

$$\nu_1 = \frac{v}{2\pi r} \quad (2.24)$$

Jak pisał Bohr³², częstotliwość ν emitowanego światła jest równa połowie częstotliwości ν_1 obiegu elektronu dookoła jądra. Równanie (2.24) możemy więc przekształcić jako

$$E = nh\nu = nh\left(\frac{v}{4\pi r}\right), \text{ a przyrównując to do wyliczonej energii elektronu w równaniu (2.21)}$$

otrzymujemy równość

$$\frac{mv^2}{2} = nh\left(\frac{v}{4\pi r}\right) \quad (2.25)$$

Po uproszczeniu otrzymujemy bardzo ważny wzór:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.26)$$

Przypomnijmy, że iloczyn masy i prędkości nazywamy pędem³³ a iloczyn pędu w ruchu po okręgu przez promień okręgu nazywamy momentem pędu. Z kolei iloraz stałej Plancka h przez 2π zaznaczamy umownie jako „ h kreślone”, \hbar , tak jak polskie ł, jest w innych językach „l kreślonym”.

Postulat Bohra możemy więc zapisać w lakoniczny sposób:

Moment pędu elektronu w atomie wodoru jest skwantowany i przyjmuje wartości $n\hbar$, gdzie n jest liczbą naturalną.

Korzystając z tak sformułowanego postulatu Bohra możemy wrócić do wzoru (2.21) na energię:

$$E_c = -\frac{1}{2}mv^2 \quad (2.27)$$

Aby znaleźć dopuszczalne wartości energii, musimy prędkość v zastąpić przez stałe fizyczne, jak \hbar , k i przez wartości charakterystyczne elektronu – jego masę m i ładunek e .

Z równania (2.19) dostajemy

$$mv^2 r = ke^2 \quad (2.28)$$

Podstawiając w tym równaniu w miejsce r wartość otrzymaną z postulatu Bohra (2.26)

$$r = \frac{n\hbar}{mv} \quad (2.29)$$

otrzymujemy

$$mv^2 r = mv^2 \left(\frac{n\hbar}{mv}\right) = ke^2 \quad (2.30)$$

dostajemy

$$v = \frac{ke^2}{n\hbar} \quad (2.31)$$

³² Praca cytowana <http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/bohr13/eng.pdf>

³³ Zob. *Toruński poręcznik do fizyki. Gimnazjum klasa I*. Wydawnictwo Naukowe UMK, 2010, s. 80

Wreszcie, wstawiając tę wartość do wzoru (2.21) otrzymujemy kolejną, niezwykle ważną zależność

$$E = -\frac{1}{n^2} \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} \quad (2.32)$$

Innymi słowy, energia elektronu w atomie wodoru może przyjmować wartości

$$E = -\frac{1}{n^2} R \quad (2.33)$$

gdzie przez R oznaczyliśmy wielkość:

$$R = \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} \quad (2.34)$$

zależną tylko od stałych fizycznych.

Obliczając tę wielkość R w jednostkach już przez nas używanych, elektronowoltach [eV], dostajemy $R = 13,6$ eV.

Stała R , nazwana na cześć jednego z twórców spektroskopii optycznej stałą Rydberga, wyznacza nam skalę wielkości atomowych i chemicznych. Energie związane z procesami atomowymi i chemicznymi są to pojedyncze elektronowolty.

Teraz możemy wyjaśnić jednostkę „elektronowolt”: jest to energia, jaką uzyskuje elektron, jeżeli zostanie przyspieszony napięciem elektrycznym jednego wolta.

Symbolicznie, „1 eV = 1e · 1V”. Ponieważ wartość ładunku elektronu to $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C możemy zapisać ściślej 1 eV = 1,6 · 10⁻¹⁹ J.

Przypominamy, że 1 J to np. podniesienie w polu grawitacyjnym Ziemi masy około 0,1 kg na wysokość 1 metra. 1 eV wydaje się jednostką małą, ale w świecie atomów jest jednostką jak najbardziej właściwą.

Wróćmy do atomu wodoru. Wartość energii elektronu w atomie wodoru jest skwantowana i wynosi

$$E = -\frac{R}{n^2} \quad (2.35)$$

gdzie n , jak wspomnieliśmy, jest liczbą naturalną.

Podstawiając $n = 1$ otrzymujemy wartość energii elektronu na pierwszej, najniższej orbicie $E_1 = -13,6$ eV. Nadaliśmy w ten sposób interpretację fizyczną stałej Rydberga: jest to energia elektronu na pierwszej orbicie w atomie wodoru.

Podstawiając $n = 2$ otrzymujemy $E_2 = -3,4$ eV, dla $n = 3$ $E_3 = -1,51$ eV.

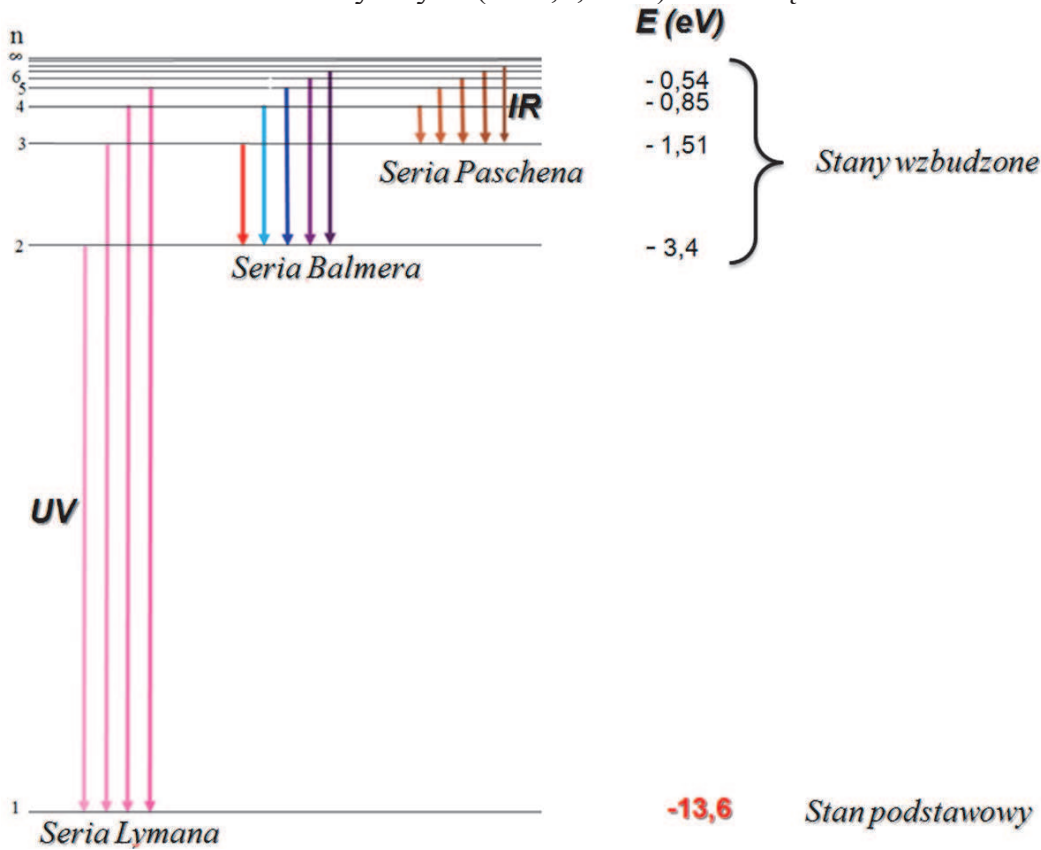
Elektrony w modelu Bohra poruszają się po ściśle określonych orbitach i emitują (lub pochłaniają) światło jedynie w trakcie przeskoku z jednej orbity na drugą.

Z modelu Bohra możemy obliczyć energię emitowanego światła. Przykładowo, w trakcie przeskoku z orbity o $n=2$ na orbitę $n=1$ emitowane jest światło o energii

$$\Delta E_{2 \rightarrow 1} = E_1 - E_2 = 13,6 \text{ eV} (0,25 - 1) = 10,2 \text{ eV}$$

Jest to energia kwantu światła w zakresie nadfioletu; odpowiada długości fali $\lambda = 121,6$ nm. Badał ten zakres T. Lyman, stąd serię widmową odpowiadającą przeskokom elektronu z orbit wyższych ($n = 2, 3, 4$ itd.) na orbitę o $n = 1$ nazywamy serią Lymana, zob. ryc. 2.22.

Seria Balmera, którą możemy oglądać za pomocą siatki dyfrakcyjnej, odpowiada przeskokom elektronu z orbit wyższych ($n=3,4,5$ itd.) na orbitę $n=2$.



Ryc. 2.22. Układ poziomów energetycznych w atomie wodoru, w modelu Bohra; leżąca w zakresie widzialnym seria Balmera odpowiada przeskokom elektronów z orbity o $n=3$ na orbitę o $n=2$ (MS)

2.6. Wielkości atomowe

Model Bohra i stała Rydberga wprowadzają nas w świat wielkości atomowych. Jednostką do porównań odległości jest w nim promień pierwszej (o $n=1$) orbity Bohra.

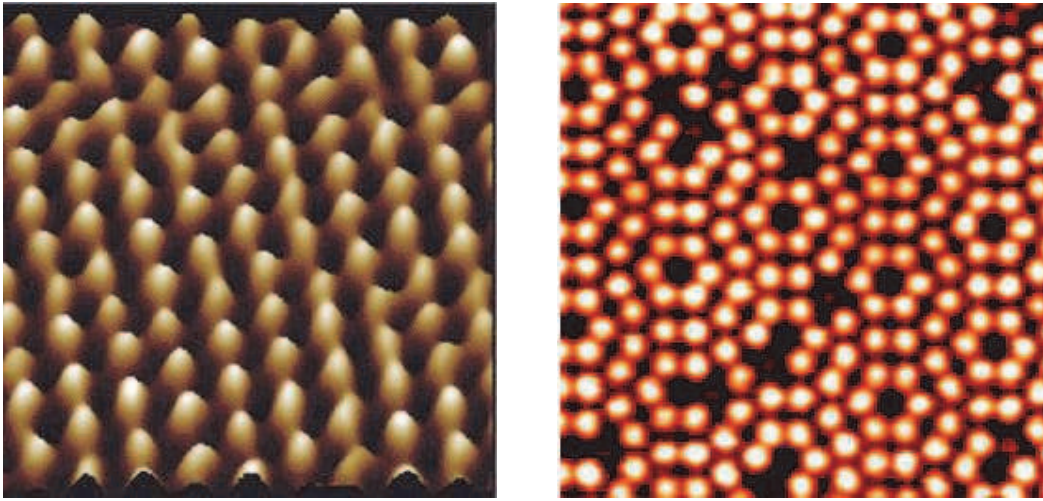
Możemy ten promień obliczyć przyrównując wzór na energię (2.22) ze wzorem (2.35) i przyjmując $n=1$

$$E = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} = -R \quad (2.36)$$

stąd promień pierwszej orbity wynosi $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10}$ m. Stałą R wyznaczamy w jednostkach SI z równania 2.35.

Warto zapamiętać tę wielkość. Oznacza ona, że atom wodoru ma w przybliżeniu³⁴ średnicę około $1 \cdot 10^{-10}$ m; czasem jednostkę 10^{-10} m nazywamy angstromem (1 \AA). Również atomy cięższych pierwiastków mają „rozmiary” między 1 \AA a 2 \AA . Na szerokość ścieżki na płycie CD (około $1 \mu\text{m}$) składa się dziesięć tysięcy atomów. Atomy, mimo że chemicznie podstawowe składniki materii, wcale nie są takie małe. Możemy je obserwować np. za pomocą tzw. mikroskopu sił atomowych (Zob. fot. 2.23).

³⁴ Do zagadnienia rozmiarów atomów wrócimy jeszcze przy omawianiu mechaniki kwantowej.



Ryc. 2.23. Powierzchnie grafitu i krzemu obserwowane za pomocą mikroskopu sił atomowych.

Korzystając jeszcze raz ze wzorów 2.35 i 2.36 otrzymujemy

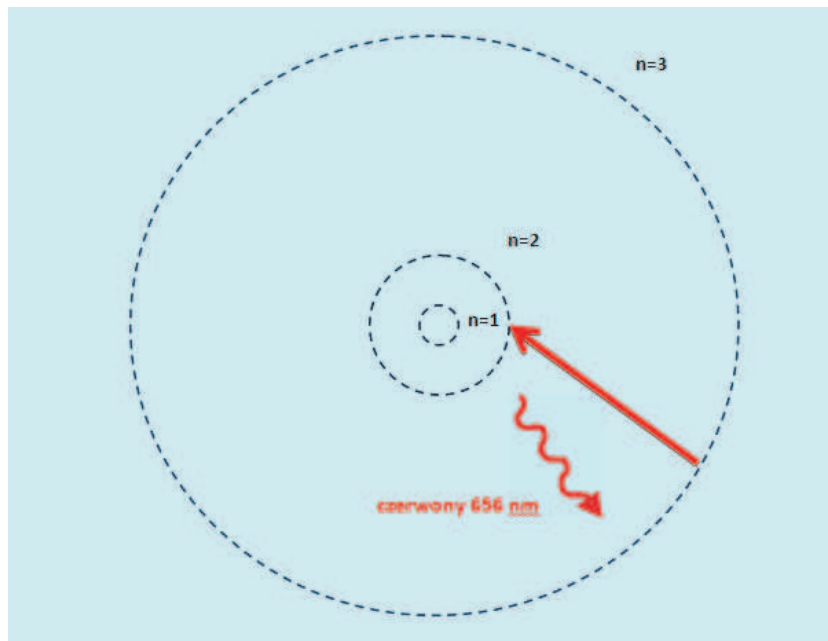
$$E = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} = -\frac{R}{n^2} \quad (2.37)$$

Stąd, pomijając stałe (z raczej zastąpiwszy je przez promień Bohra r_1) wnioskujemy, że promienie kolejnych orbit rosną z liczbą n jak jej kwadrat:

$$r_n = r_1 \cdot n^2 \quad (2.38)$$

I tak np. dla $n=100$ (potrafimy wzbudzić elektrony na tak wysokie orbity w niektórych atomach) promień Bohra wyniósłby aż $0,5 \mu\text{m}$. Należy jednak pamiętać, że pojęcie „rozmiarów” atomów jest bardzo umowne – elektrony są w ciągłym ruchu i nie można utożsamiać „rozmiarów” atomu z chwilowym położeniem elektronów; do tego zagadnienia wrócimy.

Teraz jesteśmy gotowi, aby narysować schemat orbit w atomie Bohra we właściwej skali.



Ryc. 2.55. Układ (w skali $1:10^8$) pierwszych trzech orbit w atomie wodoru w modelu Bohra

Oceńmy jeszcze prędkość elektronu na pierwszej orbicie Bohra. Skorzystamy ze wzoru (2.37)

$$E = -\frac{mv^2}{2} = -\frac{R}{n^2} \quad (2.38)$$

Stąd

$$v = \frac{1}{n} \left(\frac{ke^2}{\hbar} \right) \quad (2.39)$$

gdzie stałą Rydberga zastąpiliśmy zgodnie ze wzorem (2.34). Prędkość elektronu na pierwszej orbicie Bohra wynosi około 2180 km/s, 200 razy więcej niż prędkość rakiety w locie na Księżyc i w przybliżeniu 1/137 prędkości światła.

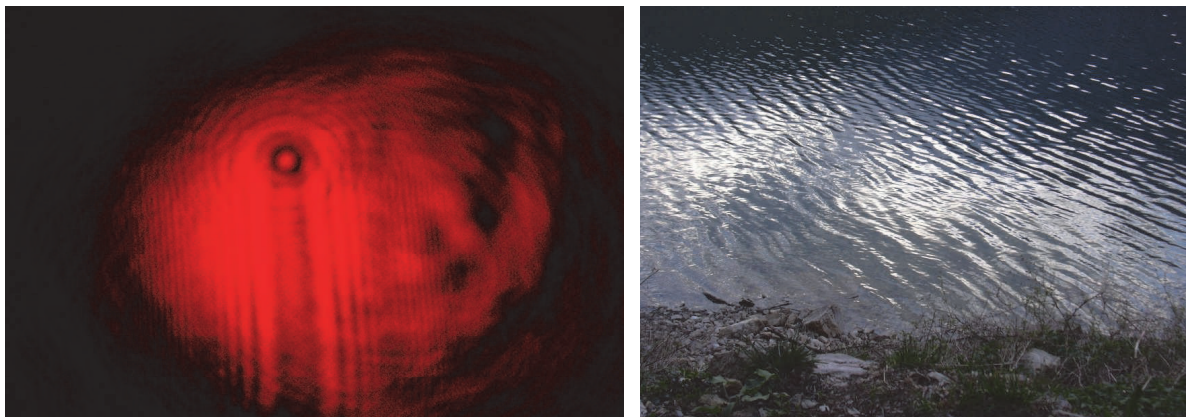
Pytania

1. Jak zmienia się energia z numerem orbity w modelu Bohra?
2. Jak zmienia się promień orbity w modelu Bohra dla różnych n ?
3. Ile wynosi (w eV) stała Rydberga?
4. Jakim przeskokom elektronów odpowiada seria Balmera?
5. Ile wynosi promień pierwszej orbity Bohra?

2.7. Dualizm falowo-korpuskularny

Światło, które ulega ugięciu np. na siatce dyfrakcyjnej musi być falą. Widzimy to bardzo dobrze w dobie laserów. Przedmioty jednolitego koloru, np. biała ściana, oświetlone światłem lasera wydają się „pstkate”, tzn. pojawiają się na nich jaśniejsze i ciemniejsze miejsca. Dzieje się tak, gdyż natężenie fal pochodzących od dwóch lub więcej źródeł sumuje się lub odejmuje, w zależności czy do określonego punktu w określonym momencie docierają dwa maksima czy minimum i maksimum fali. Mówimy o zjawisku interferencji. Interferencja dwóch fal: padającej i odbitej jest powodem powstawania kolorów w bańkach mydlanych.

Na przeszkodach, jak kółek w jeziorze, fala ugina się i zmienia kierunek rozchodzenia się. Mówimy o zjawisku dyfrakcji³⁵. Zjawisko ugięcia światła na mini-łepku szpilki pokazujemy na fot. 2.24.



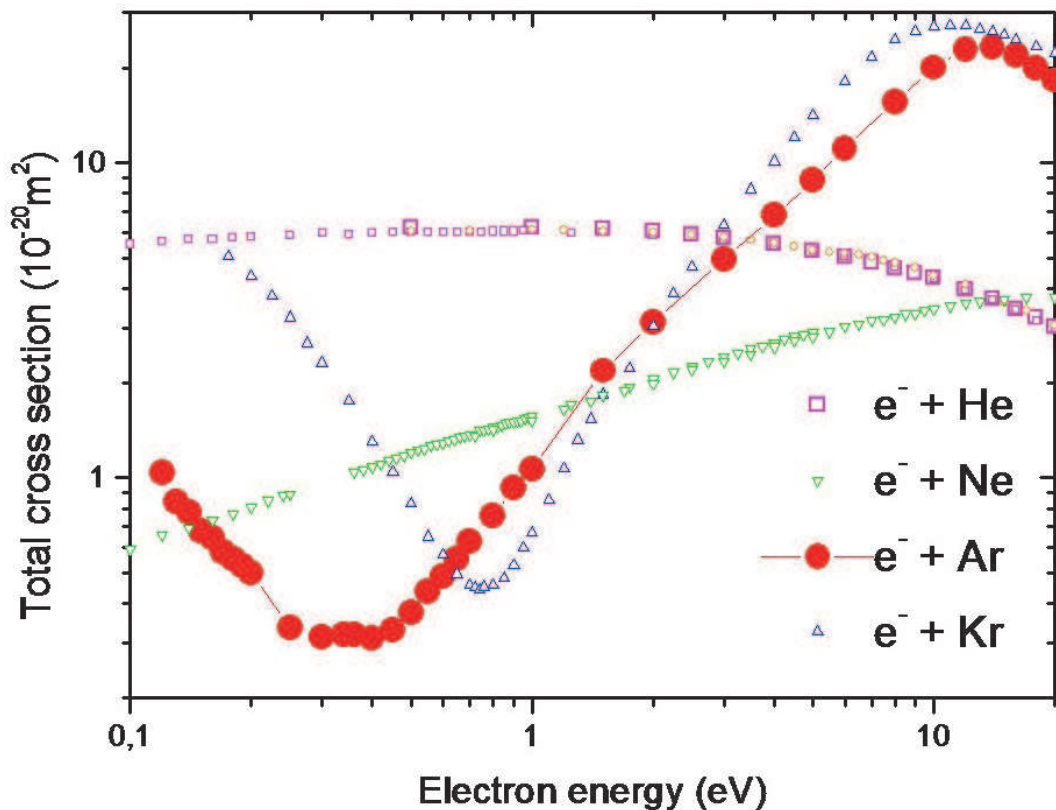
Fot. 2.24. Ugięcie wiązki światła z lasera na łepku szpilki (foto KS, AK) i fal na wodzie (foto MK)

Lasery pozwalają nam bez trudu zaobserwować naturę falową światła. Ba! w laserowej rurze (lub mini-strukturze w półprzewodniku) światło propagujące w lewo i w prawo również nakłada się, tworząc falę stojącą.

Hipoteza Plancka, odkrycie efektu fotoelektrycznego i jego wyjaśnienie przez A. Einsteina za pomocą pojęcia fotonów zwróciły uwagę, że światło może być również traktowane jako cząstki, tak jak to uważał I. Newton. A może więc i elektron jest (a raczej zachowuje się) jak fala? Pierwszym, przypuszczalnie doświadczeniem pokazującym, że elektron zachowuje się jak fala, były pomiary przeprowadzone w 1920 roku przez Carla Ramsauera na Politechnice

³⁵ Tak właśnie działa siatka dyfrakcyjna: każda z rys ugina falę a określony kolor tworzy jasną plamkę tylko tam, gdzie poszczególne fale ugięte sumują się.

w Gdańsku. Badając przechodzenie elektronów o niskich energiach (do kilku eV) przez gazy szlachetne, jak hel, neon, argon zauważył on, że „przezroczystość” argonu maleje wraz ze zmniejszaniem się energii elektronów poniżej 1 eV, zob. rys. 2.25.



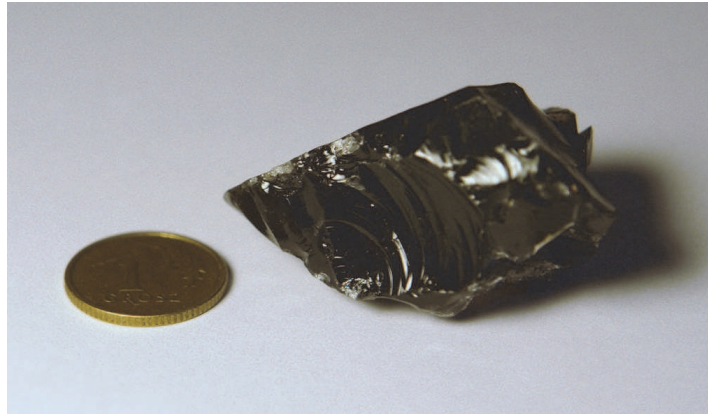
Rys 2.25. Całkowite przekroje czynne na rozpraszanie elektronów w gazach szlachetnych (analizy³⁶ i pomiary autora na Politechnice Gdańskiej); w helu przekrój czynny maleje ze wzrostem energii elektronów, tak jak się tego można spodziewać z fizyki klasycznej; w argonie około energii 0,3-0,5 eV (i kryptonie około 0.7-0.8 eV) przekrój czynny ma głębokie minimum - gaz staje się dla elektronów przezroczysty; efekt ten, odkryty na Politechnice w Gdańsku przez C. Ramsauera ma zasadnicze znaczenie dla kwantowego obrazu świata.

Był to wynik zaskakujący. Jeżeli traktować elektrony jako cząstki, to prawdopodobieństwo ich transmisji przez określoną grubość warstwy gazu powinna rosnąć wraz ze wzrostem energii, tak jak kula karabinowa przechodzi przez grubszą warstwę materiału jeżeli jej energia rośnie. Tymczasem argon stawał się prawie zupełnie przezroczysty dla elektronów dla energii około 0.3 eV. To tak jakby czarownica przeszła przez twardą ścianę.

To, że ośrodki materialne stają się przezroczyste jest domeną fal. Szkło (czyli tlenek krzemu) jest przezroczyste dla fal elektromagnetycznych w zakresie widzialnym, ale staje się nieprzezroczyste dla światła podczerwonego³⁷. Zupełnie inaczej zachowuje się krzem. Jest on nieprzezroczysty dla światła widzialnego (szary, metaliczny, zob. fot. 2.26), a przezroczysty dla podczerwieni. Dzięki temu nie grzeją się układy półprzewodnikowe w komputerze lub telefonie komórkowym – część ciepła ucieka w postaci promieniowania podczerwonego.

³⁶ G. Karwasz, Rozprawa habilitacyjna, UMK, 1997.

³⁷ Stąd efekt szklarni: energia światła widzialnego trafia do szklarni natomiast światło podczerwone ze szklarni nie może wyjść; temperatura w szklarni w dzień i nawet przy braku słońca jest wyższa niż na zewnątrz.



Fot. 2.26. Krzem, szary i połyskujący metalicznie, jest nieprzezroczysty w świetle widzialnym.

Jeżeli argon staje się przezroczysty dla elektronów o niskich energiach, to muszą się one zachowywać jak fala. Nie wiadomo, czy Luis de Broglie, historyk z wykształcenia, piszący w 1921 roku pracę doktorską z fizyki znał wynik Ramsauera. Faktem jest, że ten młody wówczas arystokrata sformułował śmiałą hipotezę: elektronom można przypisać określoną długość fali. Oto zarys rozumowania, które pozwala przypisać długość fali lecącym z określoną prędkością elektronom [nieobowiązkowe].

Ze szczególnej teorii względności Einsteina znamy związek między masą a energią dowolnego obiektu

$$E = mc^2 \quad (2.40)$$

gdzie m jest masą ciała a c prędkością światła.

Z drugiej strony wiemy, że energię fotonów możemy wyznaczyć z hipotezy Plancka jak

$$E = h\nu \quad (2.41)$$

Fotony, formalnie nie mają masy w spoczynku, ale można im przypisać pęd. Pęd fotonu to

$$p = mc \quad (2.42)$$

Możemy więc zapisać, że

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (2.43)$$

Z kolei między częstotliwością a długością fali zachodzi związek $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Skąd równanie 2.42 przyjmuje postać

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.44)$$

Jest to bardzo ważny wzór, nie tylko dla światła.

Elektron o masie m poruszający się z prędkością v niesie pęd:

$$p = mv \quad (2.45)$$

Jeżeli przyrównamy wyrażenie 2.43 i 2.44 otrzymujemy

$$mv = \frac{h}{\lambda} \quad (2.46)$$

stąd

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2.47)$$

Przypomnijmy postulat Bohra dla momentu pędu, równanie (2.26)

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.48)$$

i przekształcając zapiszmy go jako

$$2\pi r = n \frac{h}{mv} \quad (2.49)$$

a korzystając z 2.47 dostajemy kolejny bardzo ważny wzór, równoważny postulatowi Bohra

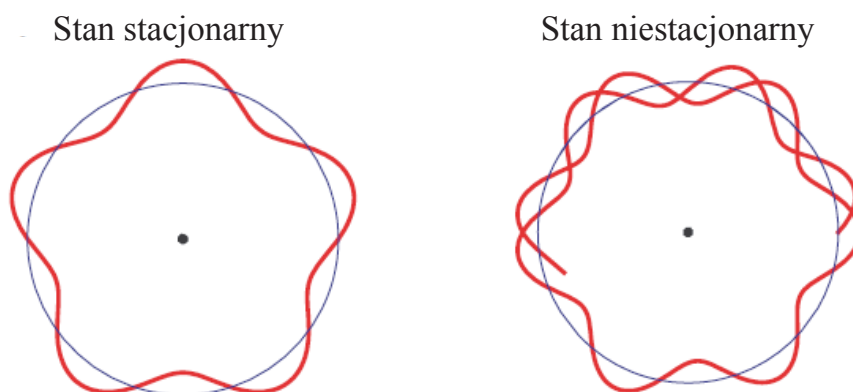
$$2\pi r = n \lambda \quad (2.50)$$

Lewa strona równania jest obwodem n -tej orbity, a λ jest długością fali elektronu na tej orbicie.

Zapamiętajmy ten wynik:

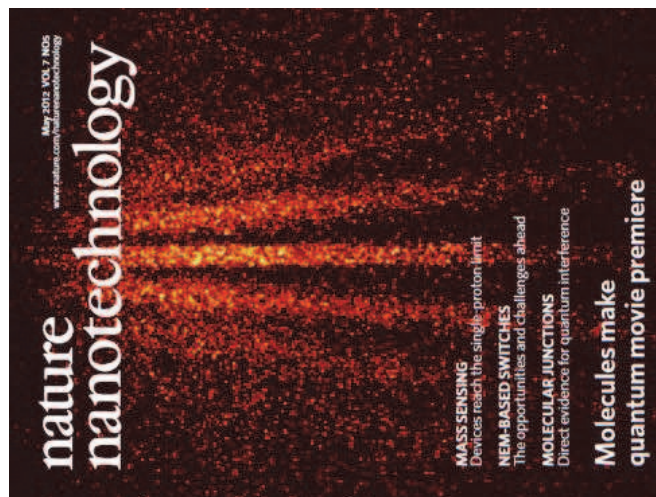
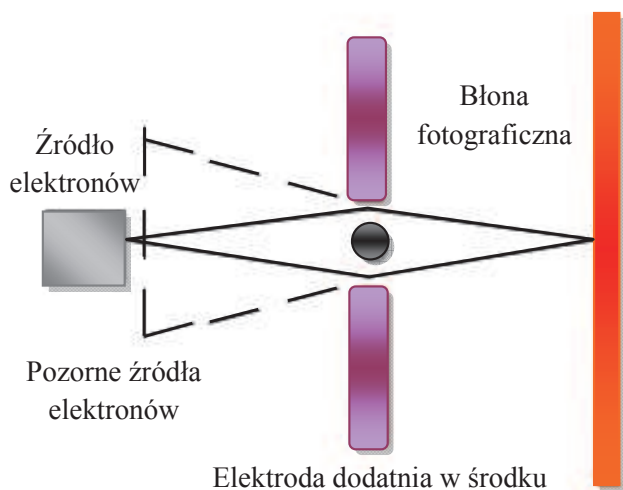
W atomie Bohra tylko takie orbity są dozwolone, na których mieści się (całkowita) wielokrotność fali de Broglie'a elektronu.

Potraktowanie elektronu jako fali de Broglie'a pozwoliło nam wyjaśnić nie do końca zrozumiały II postulat Bohra. Falę elektronu na orbicie stacjonarnej (i nieistniejącej niestacjonarnej) przedstawiamy na rys. 2.27.



Rys. 2.27. Fala de Broglie'a na stacjonarnej i niestacjonarnej (a przez to nieistniejącej) orbicie Bohra w atomie wodoru.

Jeżeli elektron jest falą, to powinniśmy obserwować efekty falowe w jego ruchu, czyli np. interferencję. W doświadczeniu elektrony emitowane z żarzonej katody rozdzielają się na dwie wiązki, przechodzą przez ograniczające je szczeliny i ponownie spotykają się na ekranie. Doświadczenie dla elektronów nie jest trudne, można je, z odpowiednim wyposażeniem, przeprowadzić w szkole. Im większa masa cząstki, tym trudniej zobaczyć obraz interferencyjny. Przeprowadzono takie doświadczenie z jonami helu a dopiero zupełnie niedawno (w maju 2012) z dużymi cząsteczkami organicznymi, ftalocyjaniny.



Rys. 2.28. a) Schemat układu do obserwacji interferencji elektronów (lub atomów) pochodzących z dwóch pozornych źródeł elektronów; b) prążki obserwowane w interferencji drobin ftalocyaniny (Uniwersytet w Wiedniu, 2012, na zdjęciu okładka czasopisma „Nature”)

Jak widać ze zdjęcia 2.28, na ekranie pojawiają się jasne i ciemne prążki, jak w doświadczeniu z interferencją światła (historycznie, w doświadczeniu Younga z 1805 r.). Dziwne pozostaje, że nawet gdy elektrony (lub jony) przechodzą przez jedną lub drugą szczelinę nie w postaci wiązki, ale pojedynczych cząstek, obraz na ekranie jest obrazem interferencyjnym. To tak, jakby kolejny elektron (atom) „wiedział”, przez którą szczelinę przeszedł poprzedni tak, aby powstał obraz interferencyjny. Powrócimy do tego zagadnienia.

Zadanie 1

Znaleźć długość fali de Broglie’a piłki ping-pongowej (masa $m = 10$ g) lecącej z prędkością $v = 108$ km/h.

Dane

$$m = 0,01 \text{ kg}$$

$$v = 30 \text{ m/s}$$

$$h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Szukane: λ

Korzystamy ze wzoru

$$\lambda = h/mv$$

$$\text{Podstawiając dane liczbowe dostajemy } \lambda = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{0,01 \cdot 30} \approx 20 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

Ponieważ piłeczka ping-pongowa ma rozmiary kilku centymetrów, fala de Broglie’a różni się o kilkadziesiąt rzędów wielkości od tych rozmiarów. Piłkę ping-pongową też można opisać za pomocą fali de Broglie’a, ale ma ona tak krótką długość, że ztraca sens fizyczny. Dopiero w świecie obiektów bardzo lekkich (jak elektron o masie $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) i małych (tzw. klasyczny promień elektronu wynosi 10^{-15} m) fala de Broglie’a staje się porównywalna z rozmiarami obiektów.

Zadanie 2

Oblicz, ile wynosi długość fali de Broglie’a elektronu o energii $0,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ J (czyli 0,3 eV). Masa elektronu wynosi $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Dane:

$$E = 0,48 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Obliczyć: λ

Rozwiązanie:

Obliczmy pęd elektronu, korzystając z energii.

Energia kinetyczna wyraża się wzorem:
$$E = \frac{1}{2} mv^2$$

Jeżeli pomnożymy obie strony tego równania przez $2m$ to uzyskamy:

$$2mE = m^2 v^2 = p^2$$

Pęd elektronu wynosi więc $p = \sqrt{2mE}$

Korzystając z jednostek SI otrzymujemy $p = 2,96 \cdot 10^{-25} \left[\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Długość fali de Broglie'a wynosi $\lambda = h/mv = 2,24 \cdot 10^{-9} \text{ [m]}$

Jak widać, długość fali jest tego samego rzędu co „rozmiary” atomu argonu. Efekt Ramsauera możemy więc uznać, w przybliżeniu, za skutek interferencji elektronu, samego ze sobą, wewnątrz atomu argonu. I do tego zagadnienia jeszcze wrócimy.

2.8. Równanie Schrödingera i zasada Heisenberga

W 1926 roku fizyka znalazła się w dość dziwnej sytuacji – okazało się, że elektron jest falą, ale nieznanym było równanie opisujące taką falę. Dokładnie na odwrót niż to było z falami Maxwella – gdzie najpierw pojawiło się równanie a dopiero później wywnioskowano o istnieniu fal.

Odmienność równania opisującego ruch elektronu od równania opisującego falę elektromagnetyczną polega na tym, że prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w próżni nie zależy od ich długości³⁸, natomiast elektrony mogą się rozchodzić z dowolnymi prędkościami.

Równanie takie zaproponował w 1926 roku Erwin Schrödinger. Podajemy je poniżej, ale nie będziemy zagłębiać się w szczegółowy opis tego równania.

$$\hat{H} \Psi(r,t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r,t) \quad (2.51)$$

Interpretacja równania Schrödingera jest podobna jak innych równań opisujących fale. W równaniu fali akustycznej, kwadrat amplitudy fali opisuje natężenie dźwięku (moc fali); w równaniu fali elektromagnetycznej kwadrat amplitudy fali (np. pola elektrycznego) opisuje moc padającego światła. W równaniu Schrödingera kwadrat amplitudy fali określa prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w określonym miejscu i w określonym czasie.

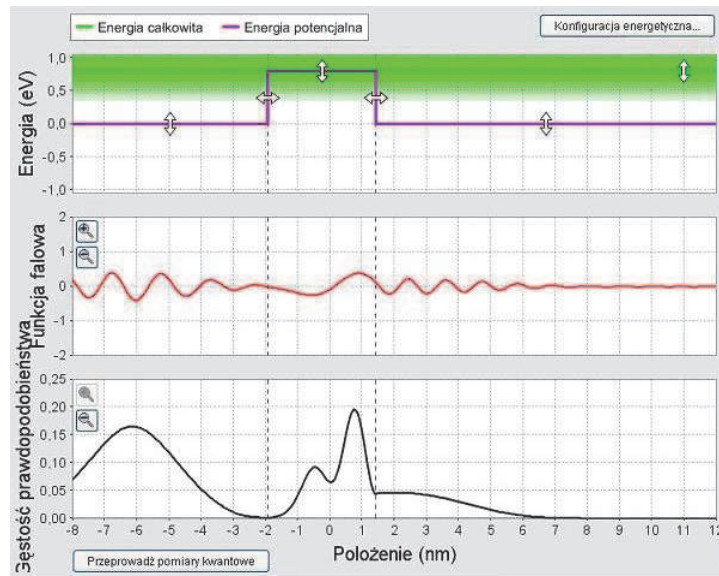
Zwracamy uwagę, że powyższa interpretacja jest dokładnie taka jak stwierdziliśmy³⁹. Błędem byłoby stwierdzenie „Równanie Schrödingera opisuje elektron” lub „Równanie Schrödingera opisuje ruch elektronu” – są to tzw. „skrótowe myślowe”.

³⁸ Przypominamy, że w innych ośrodkach niż próżnia, np. w wodzie, prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od długości fali, czyli koloru światła. Bez tej zależności nie byłoby tęczy.

³⁹ Zaznaczmy jednak, że zagadnieniom interpretacji mechaniki kwantowej poświęcanych jest tysiące artykułów naukowych każdego roku.

Równanie Schrödingera mówi rzecz następującą: jeżeli przeprowadzimy pomiar położenia elektronu, to równanie Schrödingera opisuje, jakie jest prawdopodobieństwo, że pomiar wykaże obecność elektronu w określonym punkcie przestrzeni w danym momencie czasu.

Aby zilustrować „działanie” równania Schrödingera, na rysunku 2.29 pokazujemy przemieszczanie się w przestrzeni tzw. paczki falowej. Paczka ta w momencie startu jest dość dobrze określona w przestrzeni; w miarę upływu czasu, niezależnie czy paczka ta wędruje czy stoi, rozmywa się w przestrzeni. Podkreślimy, że to nie elektron jako cząstka rozmywa się w przestrzeni, ale nasza wiedza o jego położeniu staje się coraz mniej pewna.



Ryc. 2.29. Fala pada na dość szeroką barierę potencjału. Amplitudę fali opisuje czarna krzywa. Część fali „grzęźnie” w barierze, ale większa część się odbiła. Część uwieczona w barierze powoli wpływa na drugą stronę.⁴⁰

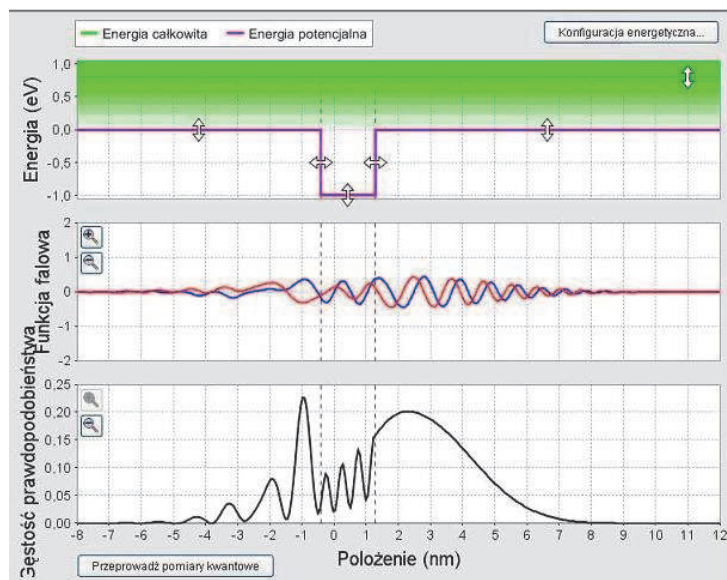
Z faktu, że elektron (lub inna cząstka z mikroświata) jest falą, wynikają ciekawe własności. Oprócz wspomnianych zjawisk falowych jak interferencja i dyfrakcja, zadziwiające jest zachowanie cząstek przy napotkaniu przeszkody w ich ruchu. Może to być bariera, jak na rys. 2.29 lub nawet studnia jak na rys. 2.30. Elektron przechodzi przez barierę, nawet jeśli jego energia nie jest wystarczająca z punktu widzenia klasycznego. Innymi słowy, piłka tenisowa lecąca na wysokości 60 cm nie przejdzie nad siatką tenisową zawieszoną na wysokości 80 cm a elektron analogiczną barierę jest w stanie pokonać. Należy jednak dodać: istnieje pewne prawdopodobieństwo, że elektron tę barierę pokona. Jakie prawdopodobieństwo? Zależy to od wysokości bariery w stosunku do energii elektronu ale też od szerokości bariery⁴¹.

Jeszcze ciekawsze jest przechodzenie cząstki nad dołkiem, tzw. „studnią potencjału”. Klasycznie, jeżeli energia cząstki jest większa niż górna krawędź dołka, cząstka nie powinna do dołka wpaść – jak piłka tenisowa przelatuje na golfowym dołkiem. W świecie mechaniki kwantowej tak nie jest: cząstka „częściowo”, a właściwiej „z pewnym prawdopodobieństwem” może w dołku ugrząźć, zob. rys. 2.30.

Jeżeli odpowiednio dobierzemy szerokość i głębokość dołka, fala przechodzi na drugą stronę jakby niezaburzona. Na tym właśnie polega efekt Ramsauera: potencjał atomu argonu jest taki, że nie zauważamy, że elektron zderzył się z atomem: gaz jest dla tej energii „przezroczysty”.

⁴⁰ <http://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>

⁴¹ Proponujemy Czytelnikowi samodzielne próby w jakimkolwiek programie symulującym równanie Schrödingera.



Ryc. 2.30. Fala pada na dość szeroką studnię potencjału. Amplitudę fali opisuje krzywa czarna. Część fali "grzęźnie" w studni, ale większa część przechodzi dalej. Część uwięziona w studni interferuje z falą padającą.⁴²

Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Widzimy już z interpretacji równania Schrödingera, że wielkości kwantowe możemy przewidzieć jedynie z pewnym prawdopodobieństwem. Rozmywanie się paczki falowej w czasie a nawet sam fakt, że elektron opisujemy właśnie za pomocą „paczki” o określonej szerokości oznacza więcej: wielkości kwantowych nie możemy nawet zmierzyć z dowolną dokładnością.

Pierwsze przybliżenie do tzw. zasady nieoznaczoności Heisenberga daje nam już zależność de Broglie’a:

$$p\lambda = h \quad (2.52)$$

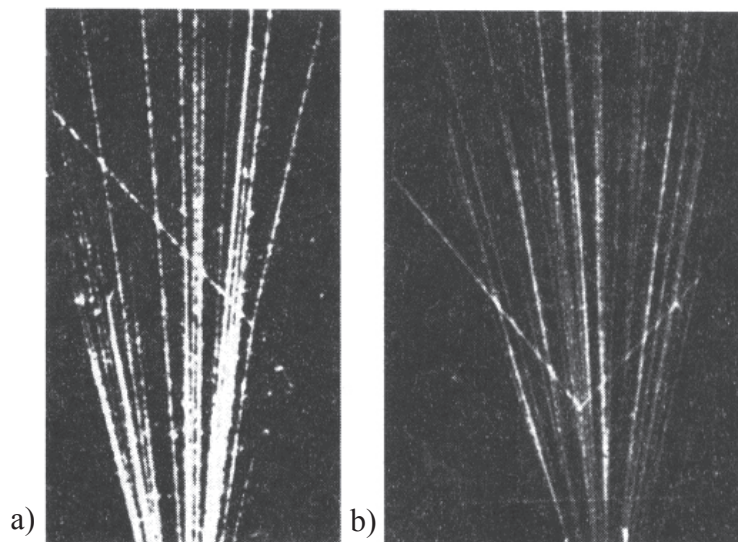
- istnieje jakaś zależność między pędem cząstki a długością fali de Broglie’a, poprzez stałą Plancka h . Dokładniej, zasada **nieoznaczoności Heisenberga** mówi, że niedokładność Δx określenia położenia cząstki i niedokładność Δp określenia pędu cząstki związane są zależnością

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.53)$$

Innymi słowy, im dokładniej zmierzmy położenie cząstki, tym mniej dokładnie znamy jej prędkość i na odwrót. Sam Heisenberg, wydaje się, odkrył tę zasadę obserwując ślady elektronów w komorze Wilsona. Jak pisał⁴³, albo widzimy ślad elektronu, czyli wiemy że w określonym momencie elektron był w tym miejscu, albo przerwę w śladzie, czyli wiemy, że elektron przebył tę odległość w określonym czasie, czyli znamy prędkość elektronu.

⁴² <http://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>

⁴³ „Mówiliśmy przecież zawsze po prostu: tor elektronu w komorze mgłowej można obserwować. Ale może rzeczywiście obserwuje się mniej. Może można spozrzeć tylko dyskretny ciąg niedokładnie określonych położenia elektronu. W rzeczywistości widzi się przecież w komorze tylko pojedyncze kropelki wody, które na pewno muszą mieć znacznie większe rozmiary niż elektron.” Werner Heisenberg, *Część i całość*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1987, str. 106



Rys. 2.31. Zdjęcie z komory pęcherzykowej; **a)** wypełnionej H_2 ; **b)** wypełnionej He_2 . Ślady cząstek alfa (czyli jąder helu); w zależności od masy jądra uderzanego, trajektorie tworzą różne kąty – wynosi on 90° dla równych mas (jak na fot **b**, gdyż cząstka alfa to jądro helu!) (Źródło: H.Haken i H.C Wolf, *Atomy i kwanty*, PWN 2002).

Okazuje się, że podobny wzajemny związek istnieje między niedokładnością ΔE określenia energii i niedokładnością Δt określenia czasu.

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.54)$$

2.9. Zakaz Pauliego i układ okresowy pierwiastków

Mniej więcej od połowy XIX wieku było wiadomo, że niektóre pierwiastki chemiczne wykazują analogiczne własności. Tak jest np. z metalami alkalicznymi jak, sód i potas, które są tak aktywne chemicznie, że samoczynnie zapalają się w powietrzu. Wiadomo też było, że pierwiastki chemiczne wchodzą we wzajemne reakcje w ściśle określonych proporcjach – określone pierwiastki wykazują ściśle określoną „wartościowość”. I tak, w trzecim wierszu układu okresowego kolejne atomy, sód Na, magnez Mg, glin Al, krzem Si, wykazują wartościowości I, II, III, IV, kolejno.

Następny w tym wierszu jest fosfor, występujący w kilku postaciach (fosfor biały, czerwony, czarny) wykazuje również kilka wartościowości. Leżący nad nim azot ma tych wartościowości naprawdę dużo. W amoniaku, NH_3 azot „przejmuje” trzy elektrony z atomów wodoru; w podtlenku azotu N_2O (tzw. gaz rozweselający, według obecnej nomenklatury tlenek diazotu) i w tlenku azotu (II), NO azot „oddaje” 2 elektrony. W innym jeszcze związku dwa atomy azotu łączą się z trzema atomami (trinitlenek diazotu N_2O_3). Ditlenek azotu (NO_2) to silnie trujący, brunatny gaz, w którym azot „oddaje” 4 elektrony; w nietrwałym pięciotlenku diazotu (N_2O_5) azot formalnie oddaje 5 elektronów.

Bardzo trudno byłoby wyjaśnić własności chemiczne atomów z modelu atomowego Bohra, nie do końca sprawdza się również równanie Schrödingera. Decydującym pojęciem dla wyjaśnienia własności chemicznych atomów jest pojęcie *spinu*, czyli krętu własnego elektronów. Coś w rodzaju analogii z Ziemią krążącą dookoła Słońca, ale przy tym wirującej wokół własnej osi.

Wiemy już z postulatów Bohra, że moment pędu elektronu (równanie 2.26) wokół jądra jest skwantowany i przyjmuje całkowite wartości stałej Plancka podzielonej przez 2π (czyli \hbar). Spin elektronu przyjmuje wartości równe połowie tej wartości, zarówno dodatnie jak

ujemne, czyli $\pm\hbar/2$. Spin połówkowy jest niezwykle ważną własnością elektronu – z niego wynika cała chemia! Ale o tym za chwilę.

Fot. 2.32. Układ okresowy pierwiastków w głównej sali wykładowej Instytutu Fizyki UMK; nowy pierwiastek o liczbie atomowej $Z = 112$, Copernicium wpisany został wpisany osobiście przez jednego z jego odkrywców, profesora S. Hoffmana

Czy inne cząstki również posiadają spin? Tak, np. fotony, cząstki światła posiadają spin całkowity $\pm\hbar$. Jak pokazał w 1941 roku w krótkim artykule naukowym niemiecki fizyk W. Pauli⁴⁴, spin połówkowy lub całkowity decyduje o kompletnie różnych własnościach cząstek. Cząstki o spinie połówkowym unikają się nawzajem, cząstki o spinie całkowitym mają tendencję do kondensacji – „tłoczenia się” w tym samym stanie, jak pingwiny zimą na lodzie Antarktydy.

Cząstki o spinie połówkowym nazywamy fermionami, na cześć włoskiego fizyka Enrica Fermiego; cząstki o spinie całkowitym – bozonami, na cześć hinduskiego fizyka Satyendra Bosego. Bozony tłoczące się, aby zająć ten sam stan kwantowy to np. fotony w laserze, wszystkie dokładnie o tej samej energii i propagujące w tym samym kierunku. Czy dwa fermiony, unikające się nawzajem mogą stworzyć parę o spinie całkowitym, czyli bozon? Tak, ma to miejsce np. w zjawisku nadprzewodnictwa. W bardzo niskich temperaturach, niektóre metale i to wcale nie najlepsze przewodniki, jak ołów i rtęć, zaczynają przewodzić prąd bez żadnych strat. Materiał staje się nadprzewodnikiem. Ku zaskoczeniu fizyków teoretyków, w końcu XX wieku odkryto, że również niektóre materiały nieprzewodzące, ceramiczne, stają się nadprzewodnikami, i to w temperaturach stosunkowo wysokich, aż do -100°C . Również tam elektrony łączą się w pary, ale szczegółów zjawiska nadal nie znamy.

Reasumując, dwa elektrony w atomie nie mogą znajdować się w tym samym stanie kwantowym. Wynika to z ich spinu. W terminologii chemii mówimy, że na jednym orbitalu mogą znajdować się tylko dwa elektrony, różniące się spinem. Reguła ta została odkryta przez Wolfganga Pauliego już w 1925 roku:

„W tym samym stanie kwantowym może znajdować się najwyżej jeden elektron”.

Przez „taki sam stan kwantowy” rozumiemy, w atomie (nie tylko Bohra), stan opisany przez 4 sformułowane w tym i poprzednim paragrafie liczby kwantowe:

⁴⁴ Rev. Mod. Phys. 13, 203–232 (1941) http://rmp.aps.org/pdf/RMP/v13/i3/p203_1

n – czyli **główną** liczbę kwantową (numer orbity w modelu Bohra), ogólnie numer powłoki; liczba n przyjmuje wartości $n=1,2,3 \dots 7$ (nie znamy obecnie atomów o większej ilości elektronów niż 114, zob. fot. 2.32),

l – tzw. **poboczną** liczbę kwantową, opisującą moment pędu (kształt orbity w prymitywnym modelu Sommerfelda); liczba l przyjmuje wartości od 0 do $(n-1)$, np. dla $n=3$ możliwe są następujące wartości $l=0, 1, 2$.

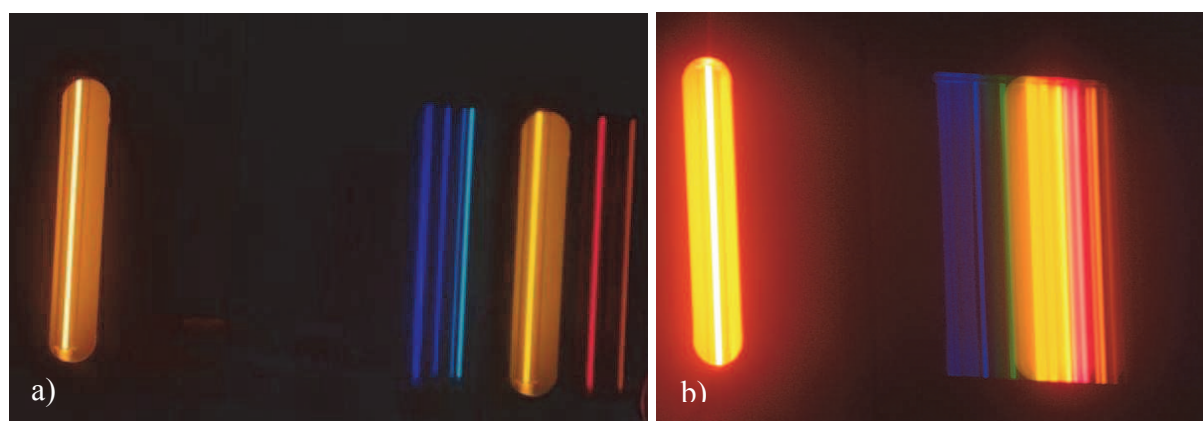
m – tzw. **magnetyczną** liczbę kwantową.

Stany opisane przez różne kombinacje liczb n , l i m nazywamy w chemii orbitalami. Zgodnie z historyczną nomenklaturą wywodzącą się z linii emisyjnych orbitale oznaczamy literami s (=sharp), p (=principle), d (=diffuse), f (=fundamental). Nazwy te, niezupełnie uzasadnione, zostały do dziś.

I tak mamy na powłoce pierwszej tylko jeden orbital – $1s$. Na powłoce drugiej mamy cztery możliwe orbitale: jeden $2s$ i trzy $2p$ (ustawione w trzech kierunkach, x , y , z). Na trzeciej powłoce mamy dodatkowo pięć orbitali d . Jak one wyglądają, pokażemy w następnym paragrafie. Na każdym z orbitali, zgodnie z zakazem Pauliego mogą znaleźć się maksymalnie dwa elektrony.

Dodawanie więc kolejnych elektronów w procesie „konstruowania” coraz cięższych atomów wymaga coraz to innych stanów kwantowych. Stąd atomy o różnych ilościach elektronów mają coraz to inne własności chemiczne. Bez połówkowego spinu elektronów nie byłoby chemii, a bez chemii materii, z której jest zbudowana Ziemia i organizmy żywe! Gdyby elektrony miały spin całkowity, w atomie wszystkie zajmowałyby ten sam stan kwantowy ($1s$) i wszystkie pierwiastki chemiczne byłyby (prawie) identyczne.

Z obecności spinu wynika szereg ciekawych własności chemicznych i fizycznych naszego zewnętrznego świata. Nawet niebieski kolor nieba jest spowodowany (po części) specyficznym ustawieniem spinów w dwóch atomach tlenu tworzących drobinę O_2 .



Fot. 2.33. Widmo uzyskane za pomocą prostej siatki dyfrakcyjnej; a) hel; b) neon (Foto KS)

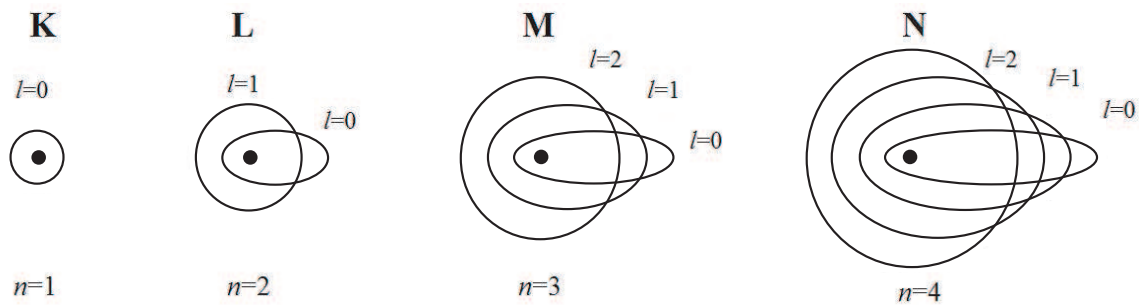
2.10 Od orbitali atomowych do biochemii kwantowej

W widmie atomu helu, mimo że posiada on jedynie dwa elektrony, znajdziemy „gołym okiem”⁴⁵ kilkanaście linii w zakresie widzialnym; ich położenia i natężenia wydają się nie podlegać żadnym prostym regułom, jak to miało miejsce w wodorze. Bez wątplenia, potrzebne były nowe instrumenty, znacznie bardziej skomplikowane niż model Bohra, aby wyjaśnić obserwowane widma. W neonie, atomie zawierającym 10 elektronów liczba linii

⁴⁵ Linie helu są skatalogowane np. przez National Institute of Standards and Technology w USA, zob. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/heliumtable2.htm>

widocznych „gołym okiem” jest naprawdę imponująca, zob. fot. 2.33. Instrumentem pozwalającym na zrozumienie struktury atomów z wieloma elektronami jest równanie Schrödingera, rozwiązane z uwzględnieniem zakazu Pauliego. Ale zacznijmy jeszcze raz od epokowego artykułu Maxa Borna.

Kiedy w paragrafie 2.5 omawialiśmy model Bohra rozważaliśmy ruch elektronu po orbitach kołowych i takie orbity przedstawiamy na rys. 2.21. W rzeczywistości Max Bohr pisał o „stacjonarnych orbitach eliptycznych”. Orbity eliptyczne zataczają planety wokół Słońca, jak to omówimy w rozdziale 4. Myśl Bohra o orbitach eliptycznych podjął w 1916 r. Arnold Sommerfeld. Założył on, że dla określonej liczby n istnieje n kształtów orbit coraz to bardziej spłaszczonych⁴⁶. Czym różnią się te orbity w języku wielkości fizycznych?



Ryc. 2.34. Orbity elektronów w atomie wodoru według A. Sommerfelda (1916 r).⁴⁷

W ten sposób wprowadził on orbity nie-kołowe, z różnymi wartościami momentu pędu. Dziś inaczej wyobrażamy sobie kształt orbitali atomowych, ale myśl Sommerfelda o kwantowaniu momentu pędu była cenna.

Otóż elektrony na orbitach o różnych kształtach z tych samych „powłok” K, L, M, N na rys. 2.34 mogą mieć tę samą energię sumaryczną⁴⁸, ale różne wartości momentu pędu (wzór 2.26). Innymi słowy, na orbicie kołowej elektron znajduje się w stałej odległości od jądra i porusza się ze stałą prędkością, a na orbicie eliptycznej przyspiesza, kiedy jest bliżej jądra. Sommerfeld przeprowadzał swoje rozumowania za pomocą mechaniki klasycznej. Sukcesem okazało się zastosowanie równania *Schrödingera* do zagadnienia kształtu orbit.

Punktem wyjścia dla rozwiązania zagadnienia atomu wodoru za pomocą równania Schrödingera jest kwantowanie momentu pędu. Zakładamy, że moment ten wynosi nie $n\hbar$ jak u Bohra, ale $\sqrt{l(l+1)}\hbar$, gdzie orbitalna liczba kwantowa może przyjmować wspomniane już wartości, od 0 do $(n-1)$. Warunek kwantowania momentu pędu narzuca ograniczenia na możliwe kształty orbit.

Zależność momentu pędu od pewnej dodatkowej, „pobocznej” (=orbitalnej) liczby kwantowej stała się kluczem do określenia kształtu „orbit”. Piszemy „orbit” w cudzysłowie, bo nie są to „tory” jak pisał Bohr czy Sommerfeld ale rozmyte chmury, gdzie z pewnym prawdopodobieństwem można znaleźć elektron. Te rozmyte chmury prawdopodobieństwa nazwiemy orbitalami.

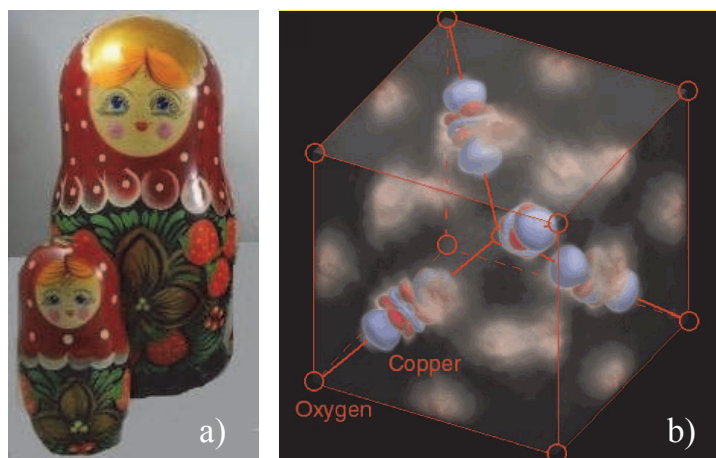
Kolista orbita Bohra staje się więc orbitalem w kształcie rozmytej kuli. Moment pędu elektronu na takim orbitalu wynosi zero, stąd orbitalowi przypisujemy orbitalną liczbę kwantową $l=0$.

⁴⁶ Liczby n nie będziemy od tej pory nazywać tej liczby „numerem orbity” ale *główną* liczbą kwantową

⁴⁷ G.N. Lewis, *The Atom and the Molecule*, *Journal of the American Chemical Society*. 1916, 38.

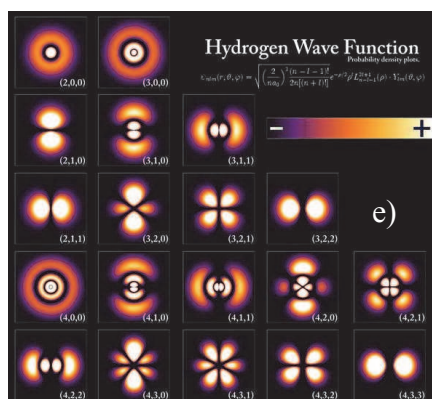
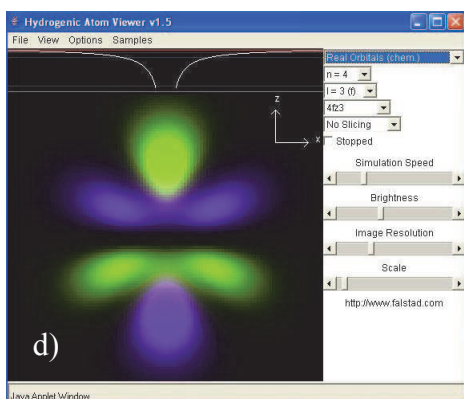
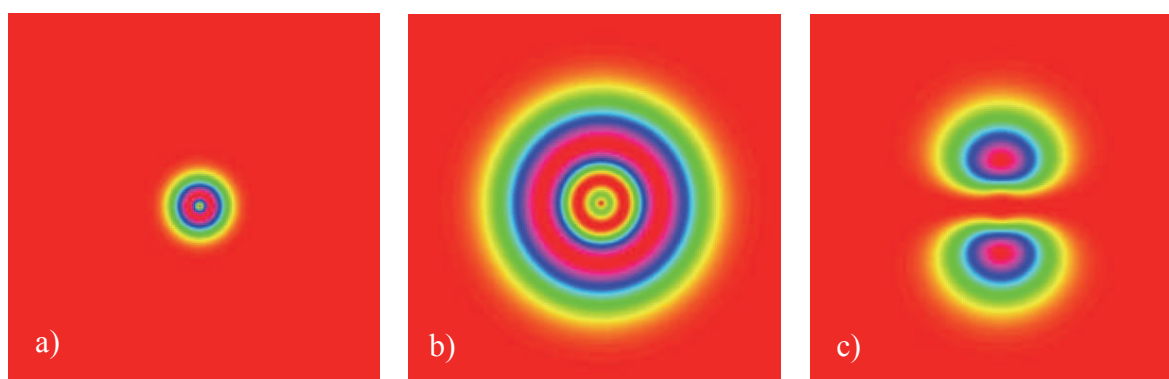
⁴⁸ Przez energię sumaryczną rozumiemy sumę energii kinetycznej $E = mv^2/2$ i energii potencjalnej w polu elektrycznym $E = -kQq/r$.

Dla głównej liczby kwantowej $n=2$ możliwe są dwie orbitalne liczby kwantowe $l=0$ i $l=1$. Orbital o $n=2$ i $l=0$ przypomina kształtem orbital o $n=1$ i $l=0$ tylko jest większy. Jego „promień”, czyli odległość od jądra, gdzie z największym prawdopodobieństwem można znaleźć elektron, rośnie zgodnie z modelem Bohra. Nie jest one jednak prostym powiększeniem orbitalu $n=1$ i $l=0$, jako że składa się dwóch koncentrycznych sfer, coś w rodzaju rosyjskiej ludowej matrioszki, zob. rys.2.34.



Fot. 2.35. a) Rosyjska matrioszka – jedna w drugiej, jak rozkład gęstości elektronów na orbitalu 2s w atomie wodoru; **b)** rzeczywisty (zmierzony za pomocą promieni Röntgena) rozkład gęstości elektronów w kryształie tlenku miedziawym Cu_2O – orbitale d (Źródło: Science)

Dla uproszczenia dalszej dyskusji przywołamy wspomnianą w poprzednim paragrafie metodę nazywaną orbitali. Główna liczba kwantowa n podaje numer orbitalu, liczba orbitalna l określa jego „kształt”. I tak $l=0$ to orbital s , $l=1$ to orbital p itd.



Ryc.2.36. „Kształty” orbitali, tj. rozkład przestrzenny prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w atomie wodoru⁴⁹; kolor niebieski - największa gęstość, czerwony – zerowa; krawędź rysunku odpowiada długości $8 \cdot 10^{-10}$ m **a)** orbital 1s, **b)** orbital 2s, **c)** orbital 2p. Inne modele: **d)** orbital $5f_{z^3}$, **e)** porównanie różnych orbitali, ale nie w skali

⁴⁹ McQuarrie, D.A.; Simon, J.D. (1997). *Physical Chemistry: A Molecular Approach*. University Science Books. pp. 325–361. ISBN 0-935702-99-7; <http://cronodon.com/Atomic/AtomTech4.html>

Orbitale o liczbie $l=1$ są bardziej skomplikowane. Orbitale $2p$ mają kształt „ósemek” ustawionych w trzech prostopadłych kierunkach, zob. rys. 2.36. Orbitale $3d$ to takie trójwymiarowe „obwarzanki”. Mechanika kwantowa w wydaniu Schrödingera stała się potężnym, choć teoretycznym mikroskopem do zaglądania w świat atomów. Czy możemy „obejrzeć” orbitale w sposób doświadczalny? Od niedawna, tak! Rozkład gęstości elektronów w kryształ tlenku miedziawym Cu_2O uzyskany za pomocą bardzo wysokiej jakości promieniowania Röntgena pokazuje fot. 2.35.

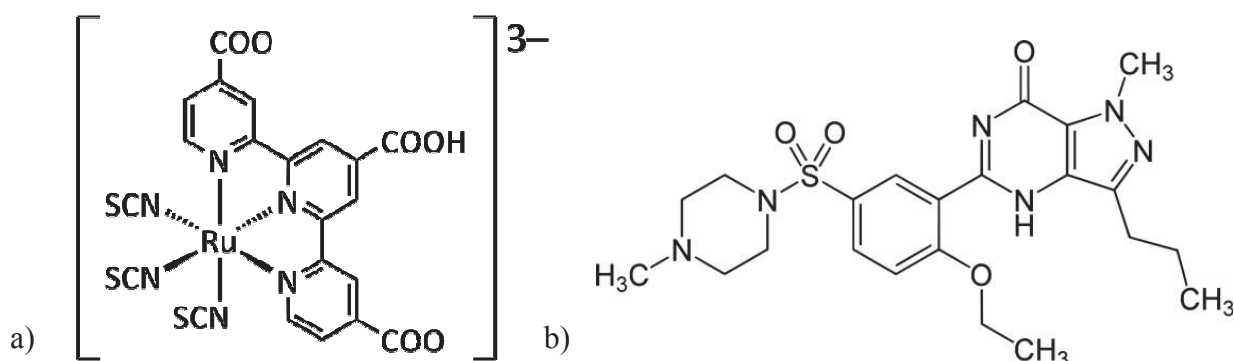
Wróćmy do widma helu: skąd się bierze bogactwo linii widmowych? Dokładne rozwiązanie równania Schrödingera pokazuje, że energie elektronów w atomie helu (i w wszystkich cięższych atomach) zależą również od kształtu orbit.

Elektrony są przyciągane przez dodatnie jądro, ale odpychają się nawzajem. To wzajemne oddziaływanie modyfikuje zasadniczo ich energie. Gdyby nie uwzględnić tego oddziaływania, dla oderwania jednego elektronu w atomie helu potrzebna byłaby energia aż 54 eV; wzajemne oddziaływanie obniża tę energię do 24 eV. Dodatkowo, inaczej oddziałują dwa elektrony na orbitalach $1s$ a inaczej na orbitalach $2p$, jeszcze inaczej elektron na orbitalu $1s$ z elektronem na orbitalu $2p$, itd.

Czy to już koniec opowieści o fizyce atomowej? Na szczęście dla młodych ludzi, tylko początek. Własności atomów znalazły liczne zastosowania praktyczne. Fakt „zbijania się” fotonów w stany o tej samej energii jest podstawą działania lasera. Połówkowy spin protonu jest podstawą działania potężnego instrumentu diagnostyki medycznej, jakim jest spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR).

Dokładne pomiary widma wodoru w połowie XX wieku pokazały, że próżnia nie jest pusta: zapelniają ją fotony, które rodzą się i giną, zanim zdążymy je zaobserwować. W ten sposób powstała *elektrodynamika kwantowa*, jedna z najdokładniejszych teorii fizycznych, pozwalająca obliczać wielkości fizyczne z dokładnością do milionowej części z milionowej części (tj. 10^{-12}).

Nowe metody teoretyczne, zastępujące równanie Schrödingera dla dużych cząsteczek pozwalają na projektowanie nowych leków a także np. barwników do ogniw fotowoltaicznych, jak ten przedstawiony na rys. 2.37.



Ryc.2.37. a) Brunatny barwnik organiczny z atomem rutenu, wykorzystywany w nowej generacji ogniw fotowoltaicznych, tzw. ogniwach Grätzela, został zaprojektowany metodami chemii kwantowej; b) współczesny lek zaprojektowany metodami biochemii kwantowej: związek ten uwalnia rodnik tlenku azotu (NO) w określonych warunkach metabolizmu człowieka.

Możemy spodziewać się jeszcze wielu wspaniałych wynalazków dzięki pracom Plancka, Bohra, Schrödingera z początków minionego wieku.