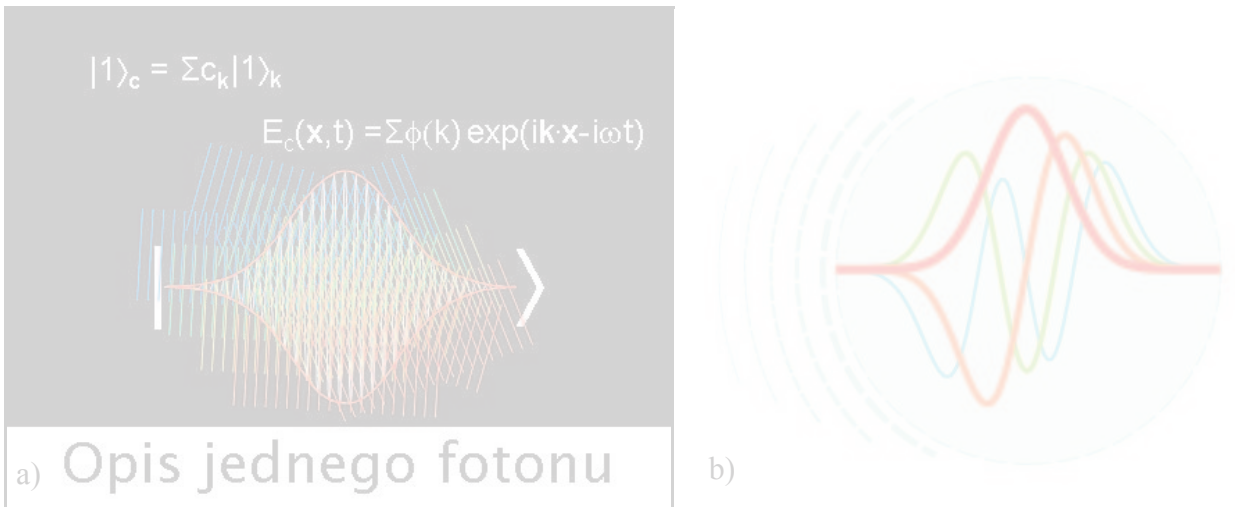


Dla ciekawych

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.Wasilewski<sup>22</sup>)

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

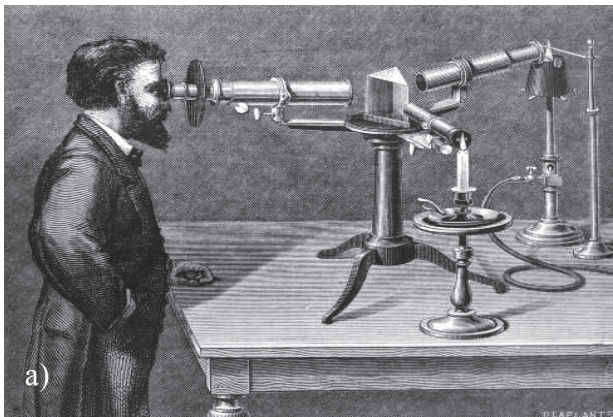
Zależność natężenia światła od długości fali światła nazywamy widmem, po angielsku spektrum<sup>23</sup>. Słowo to pojawiło się w 1704 roku w traktacie Newtona „Opticks”<sup>24</sup>, kiedy opisywał kolory powstające z rozdzielania światła białego na poszczególne kolory za pomocą pryzmatu. Widmo to nie 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.

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

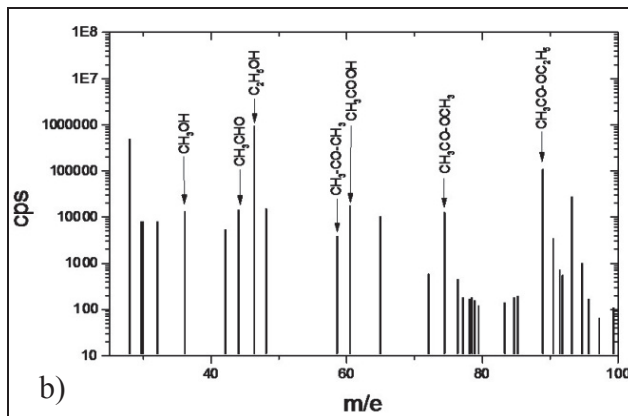
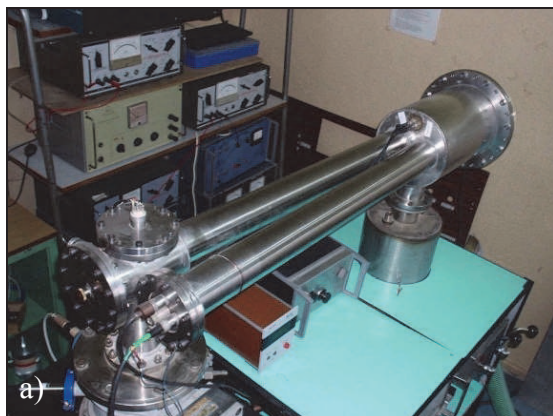
<sup>23</sup> Słowo *spektrum* nie pochodzi z greki, jak większość słów naukowych. Spektrum pochodzi z łaciny i oznacza obraz, wyobrażenie, rzeźbę itp.

<sup>24</sup> 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 wodoru<sup>25</sup>. 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.



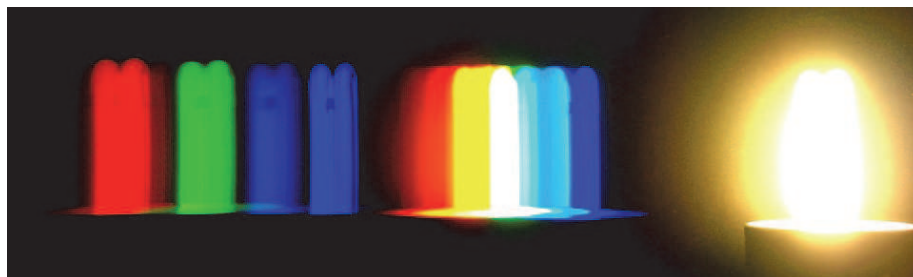
**Fot. 2.17. a)** Spektrometr masowy pozwalający mierzyć ilość określonych związków chemicznych w zależności od ich masy (Słupsk); **b)** widmo masowe „zapachu truskawek” – ilość zliczeń jonów w zależności od stosunku ich masy do ładunku; najczęściej w tej woni jest „zapachu” alkoholu etylowego i kwasu 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.

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

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 dyskretna**<sup>26</sup>.

#### 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 helem<sup>27</sup>. 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, neon<sup>28</sup>, zob. fot. 2.19.

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

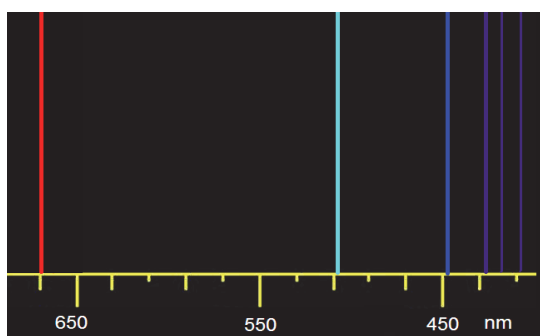
<sup>27</sup> Dopiero później odkryto hel również na Ziemi. Całkiem sporo jest go w gazie ziemnym - tworzy się w skorupie ziemskiej wskutek rozpadów radioaktywnych. Do zagadnienia helu wrócimy wielokrotnie.

<sup>28</sup> 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  $\nu$  (czyli malejącej długości fali  $\lambda$ ), 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 jądra<sup>29</sup>. 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

---

<sup>29</sup> 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.