

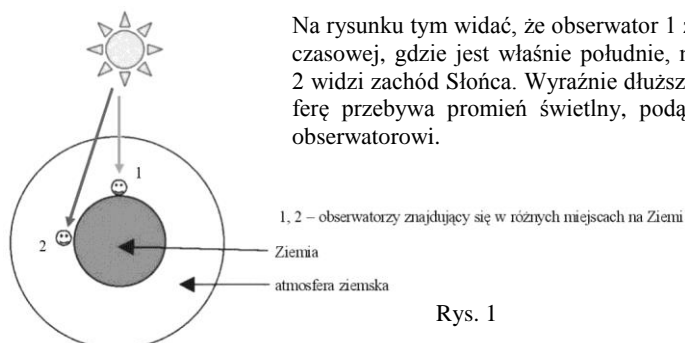


Białko jajka

Ola Sitko, Marcin Wolak
(z grupy IBACUO¹ z Opola)

Białe światło po przejściu przez plasterek ugotowanego białka jaja staje się czerwone. Zbadaj i wyjaśnij to zjawisko. Znajdź inne przykłady tego rodzaju.

Wieczorem, podczas zachodu Słońca obserwujemy, że przybiera ono barwę czerwoną. Tak samo zabarwiają się chmury niedaleko Słońca, mimo iż normalnie podczas dnia są białe, a Słońce świeci światłem białym. Dlaczego tak się dzieje? Jest to przypadek bardzo podobny do zjawiska, jakie zachodzi, kiedy świecimy światłem białym przez plasterek jajka; jednak jest on dużo lepiej widoczny i możliwy do zaobserwowania codziennie przy dobrej pogodzie. Co powoduje, że widzimy czerwone Słońce? Kluczem do tych rozważań jest atmosfera. Promienie słoneczne, nim dotrą do naszego oka, pokonują warstwę atmosfery, która otacza Ziemię. Oczywiście jest, że atmosfera stawia tym promieniom jakiś opór, dlatego nie cała energia dociera do powierzchni Ziemi. Zobaczmy, jak wygląda droga promieni świetlnych w ciągu dnia i podczas zachodu Słońca:



Rys. 1

Widzimy, że podczas zachodu promienie słoneczne mają do przebycia dużo dłuższą drogę przez atmosferę niż za dnia. Jaki to ma wpływ na barwę tego światła? Skupmy się na tym, jak zbudowane jest powietrze naszej atmosfery. Na budowę powietrza składa się bardzo dużo elementów. Jest to mieszanina wielu gazów o różnych stężeniach, a także para wodna. Cząsteczki powietrza nie są poukładane

¹ Nazwa pochodzi od skrótu IBaCuO będącego nazwą wysokotemperaturowego nadprzewodnika. Grupa powstała na potrzeby konkursu Turnieju Młodych Fizyków <http://ptf.fuw.edu.pl/tmf.html>.

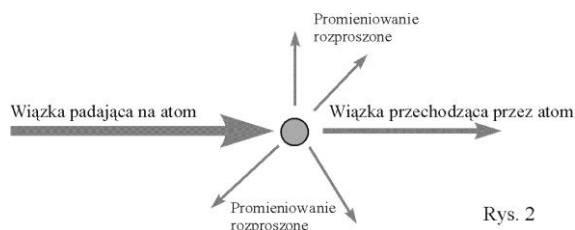
regularnie. Tak jak w każdym innym gazie, cząsteczki te poruszają się chaotycznie, przez co gdzieś tam jest ich więcej, a gdzieś indziej jest ich mniej. Jest to oczywiście ustawienie chwilowe i przypadkowe. Układ jest w ciągłym ruchu i cały czas się zmienia. Jaki to ma wpływ na nasze zjawisko? Wiadomo, że cząstka zawieszona w próżni stanowi tarczę dla wiązki światła. Promień napotyka ją taką przeszkodę może zostać przez nią odbity bądź pochłonięty. Jakiego są tego skutki? Oczywiście wynika z tego, że do powierzchni Ziemi dociera światło o mniejszym natężeniu niż wychodzące ze źródła. Ale zauważamy, że z wiązki światła polichromatycznego (światło białe jest złożeniem wielu barw światła, takich jak w tęczy) najbardziej zmalało natężenie barw bliższych błękitu, zieleni, natomiast najmniej zmieniło się natężenie barw żółtych i czerwonych. W efekcie widzimy światło czerwone.



Podobne zjawisko można zaobserwować, przepuszczając światło przez wodny roztwór mleka. Jak pokazuje doświadczenie, nie tylko odległość, jaką pokonuje światło przez roztwór, wpływa na zmianę barwy światła. W trzech różnych słójkach umieszczono kolejno: czystą wodę, wodę z kilkoma kroplami mleka oraz bardziej stężony roztwór mleka. Jak widać na zdjęciu, światło przechodząc przez czystą wodę, nie zmienia barwy. Przechodząc przez wodę z niewielką ilością mleka, przybiera lekkie zabarwienie pomarańczowożółte, większe stężenie mleka powoduje, że światło staje się coraz bardziej czerwone. Przy okazji widać, że słóiczki (na drugim zdjęciu) wydają się mieć niebieskawy odcień.



W literaturze naukowej mówi się o rozpraszaniu światła. Cząstki molekularne nie tyle odbijają światło (ponieważ wiemy, że cząstka nie jest jednolita i światło może przez nią przejść – jeśli rozpatrywać światło z korpuskularnego punktu widzenia), ile po prostu absorbują energię świetlną, a potem ją wypromieniowują, z tym że kierunek wypromieniowanej energii jest przypadkowy (rys. 2).



Wiązka światła padająca na dany atom może wzbudzić jego elektrony do drgań (przedstawiamy model uproszczony, ponieważ zależy nam na zrozumieniu samego zjawiska). Stan wzbudzenia atomu może trwać bardzo krótko, szacuje się, że jest to wielkość rzędu 10^{-8} s. Jest to zgodne z zasadą, że każdy układ dąży do zajęcia możliwie najniższego poziomu energetycznego. Elektron będzie zatem wypromieniowywał energię pochłoniętą, wyhamowując swoje drgania. To, z jaką częstotliwością i z jaką amplitudą zaczną drgać dany elektron, zależy od tego, jaką porcję energii pochłoniął, czyli zależy od częstotliwości fotonu, który się z nim zderzył (barwa pochłoniętej wiązki światła). Szybkość wypromieniowywania energii jest zawsze zależna od amplitudy drgań (amplituda drgań tłumionych maleje eksponentalnie) oraz od częstotliwości tych drgań (opory ruchu są proporcjonalne do szybkości). Dlatego im wyższa częstotliwość i większa amplituda, tym szybciej wypromieniowywana jest pochłonięta energia. Całkowita energia świetlna na sekundę, rozpraszana we wszystkich kierunkach przez pojedynczy atom (zakładamy, że pochłonięta energia wzbudziła jeden elektron do drgań, oddziaływanie innych pomijamy), wynosi (*Feynmana wykłady z fizyki*):

$$P = \frac{q_e^2 \omega^4 x_0^2}{12\pi\epsilon_0 c^3} \quad [1]$$

gdzie q_e – ładunek elektronu, ω – częstotliwość pochłoniętego światła, x_0 – amplituda drgań wzbudzonego elektronu.

Elektron pod wpływem pola elektrycznego o amplitudzie E_0 zaczyna drgać z amplitudą x_0 (oscylator wymuszony bez tłumienia):

$$x_0 = \frac{q_e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

gdzie ω_0 jest częstotliwością drgań własnych elektronu w atomie.

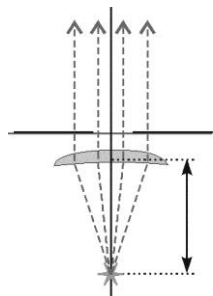
Łącząc te równania i dokonując odpowiednich przekształceń, otrzymujemy:

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_0^2 \frac{8\pi r_0^2}{3} \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2} \quad \text{przy założeniu że:} \quad r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} = \frac{q_e^2}{4\pi \varepsilon_0 m_e c^2}$$

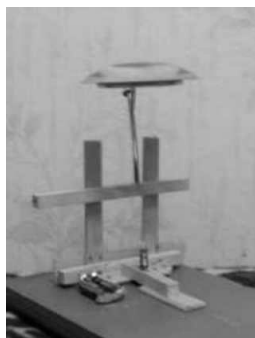
Należy zauważyć, że ω_0 można (zgodnie z modelem budowy atomu według Bohra) powiązać z wielkością orbity, po której porusza się elektron, czyli wielkością atomu. Zatem można się spodziewać, że wielkość elementów rozpraszających ma wpływ na moc rozpraszania światła. W przypadku powietrza, gdzie naturalne oscylatory mają o wiele większą częstotliwość własną niż częstotliwość światła w widmie widzialnym (można w równaniu pominąć ω^2), widzimy, że im większa cząstka (a więc mniejsza częstotliwość drgań własnych), tym większa ilość światła jest rozpraszana. W takim przypadku również ilość rozpraszanego światła jest proporcjonalna do 4 potęgi częstotliwości padającego światła. Dlatego światło niebieskie jest dużo silniej rozpraszane niż czerwone i widzimy czerwone słońce podczas zachodu oraz niebieskie niebo nad nami (a także niebieskie zabarwienie słończków, kiedy np. patrzymy prostopadle do kierunku padania światła).

W powietrzu oraz w mleku mamy jednak do czynienia również z grupami cząsteczek, jakimi są np. kropelki wody w powietrzu (skondensowana para wodna) czy kropelki tłuszczu w mleku. Jeśli odległość tych cząstek jest nieporównywalnie mała w porównaniu do długości fali świetlnej, to te dwie cząstki będą drgać zgodnie w fazie, czyli rozproszone pole będzie sumą dwu pól. Oznacza to, że amplitudę rozpraszania na jednym atomie należy podwoić. Z wzoru widać, że energia rozproszona zależy od kwadratu amplitudy. Zatem energia rozpraszana rośnie bardzo szybko podczas powiększania cząsteczek rozpraszających. Jednak kiedy drobinki rozpraszające zaczynają mieć wielkości porównywalne z długościami fal świetlnych, wtedy wzrost rozproszonej energii już nie jest taki szybki, ponieważ nie wszystkie atomy w obrębie np. kropelki drgają w tej samej fazie. Gdy cząstki nie drgają razem, aby otrzymać ilość rozproszonej energii, należy po prostu pomnożyć ilość energii rozproszonej przez jedną cząstkę przez liczbę cząstek. Widzimy zatem, że najlepszy efekt rozpraszania danej barwy światła jest uzyskiwany, gdy drobinki rozpraszające mają rozmiary zbliżone do długości tej fali świetlnej. Widzimy również, że ilość rozpraszanego światła zależy od drogi, jaką przebywa światło przez ośrodek (im dłuższa ta droga, tym więcej cząstek rozprasza światło).

Zbudowaliśmy przyrząd do zbadania zjawiska zachodzącego w jajku (schemat – rys. 3).



Rys. 3



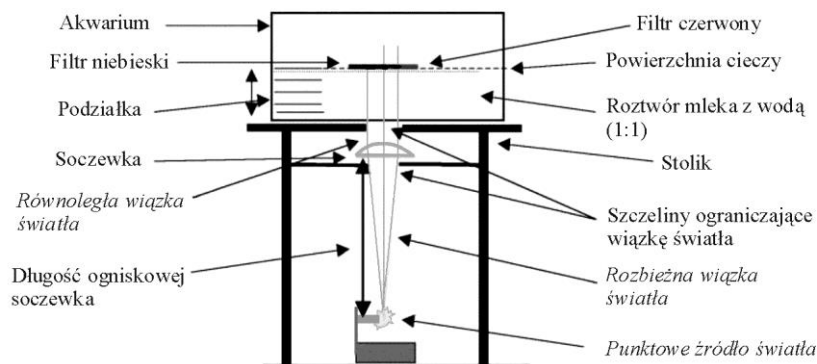
Przez plasterkę jajka przechodzi równoległa wiązka światła białego. Dzięki temu przez całą grubość plasterka jajka przechodzi wiązka światła o takim samym natężeniu. To jest ważne dla wytłumaczenia zjawiska, ponieważ eliminujemy z rozważań zmianę natężenia w zależności od odległości od źródła. Naszym źródłem światła jest mała żaróweczka żarowa (można ją uznać za źródło światła punktowego, ponieważ włókno żarówki jest bardzo małe). Żarówkę umieściliśmy w ognisku soczewki, przez co uzyskaliśmy równoległą wiązkę (sprawdziliśmy to porównując rozmiary otworu w przesłonie z rozmiarami jego obrazu na bardzo odległym ekranie, czyli suficie. Różnica w wielkości była mniejsza niż milimetr, co dawało nam pewność, że na odcinku tak długim jak grubość plasterka jajka – do 1,3 cm – różnica będzie do zaniedbania). Wiązkę tę ograniczyliśmy przesłoną z czarnego papieru z dwóch powodów: aby wyeliminować problemy związane z aberracją sferyczną soczewki oraz po to, aby wiązka ta nie była szersza od plasterków jajka, co by bardzo zaburzyło obserwację zmiany barwy jajka między środkiem plasterka a jego brzegiem. Jajko również przygotowaliśmy tak, aby ułatwić sobie obserwację. Białko surowego jajka waliśmy do pojemniczka po filmie fotograficznym. W pokrywie zrobiliśmy dziurkę, aby swobodnie mogło się wyrównywać ciśnienie i następnie ugotowaliśmy białko. Dzięki temu mieliśmy walec zrobiony z samego białka, który można było ciąć na dowolnie grube plastry. W naszym doświadczeniu kładliśmy plasterki białka nad otworem w przesłonie i obserwowaliśmy barwę, jaką przybierało jajko. Zauważyliśmy, że jest ona zależna od grubości plasterka jajka, jakiego użyliśmy. Światło prawie nie zmienia swej barwy, kiedy przechodzi przez bardzo cieniutki plasterki jajka. W miarę zwiększania grubości plasterka, światło zmienia swój kolor, dążąc do czerwieni, a jednocześnie traci dość szybko natężenie. Niestety, nie udało się nam osiągnąć barwy czerwonej w takim układzie, aby dało się to zarejestrować na kliszy fotograficznej, ponieważ miało ono tak małe natężenie, że aby je zaobserwować, musieliśmy umieścić układ w ciemni i przyciemnić również nasze źródło światła.



Barwę czerwoną (ze względu na subiektywność oceny barwy oraz bardzo małego natężenia tego światła nie mamy pewności, czy na pewno było to światło czerwone, czy bardziej pomarańczowe – badania ludzkiego oka wykazują, że naturalną reakcją jest widzenie różnych barw podczas dłuższych obserwacji konkretnej częstotliwości światła) obserwowaliśmy, kiedy na stoliku urządzenia położony był plasterek o grubości około 9 mm. Natężenie światła przechodzącego przez ten plasterek było tak małe, że musieliśmy prowadzić obserwacje w ciemni. Dodatkowo, aby nie widzieć światła pochodzącego ze źródła, użyliśmy rury z czarnego (w środku rury) papieru, przez którą obserwowaliśmy jajko (zdjęcie powyżej). Obserwacje prowadziliśmy także, używając żarówek o różnych mocach, aby zbadać wpływ natężenia światła na barwę określonej grubości plasterka. Zauważyliśmy, że przy większym natężeniu światła taką samą barwę światła uzyskujemy w przypadku grubszego plasterka.

Lepszy efekt uzyskaliśmy, kiedy zamiast jajka użyliśmy wodnego roztworu mleka. W mleku znajdują się kropelki tłuszczu, które pełnią rolę ziarnistości rozpraszających światło. W zależności od stężenia roztworu uzyskiwaliśmy dłuższą bądź krótszą drogę, na jakiej rozpraszane było całkowicie światło niebieskie. Wiązka światła, przechodząc przez warstwę cieczy, powoli zmienia kolor na różne kolory tęczy. Zauważmy też, że w zależności od grubości warstwy, przez jaką wiązka światła się przedostaje, w przypadku danego stężenia roztworu kolor na wyjściu jest inny. Zbliża się ku czerwieni, gdy grubość warstwy wzrasta. Ponieważ w TMF 2003/ 2004 pojawił się podobny problem, postanowiliśmy użyć także wyników badań z tamtych doświadczeń, aby przedstawić to zjawisko. Badaliśmy wtedy wielkość kropelek tłuszczu w mleku za pomocą bardzo podobnego urządzenia (zasada działania była taka sama, jednak użyto wtedy innej podstawki oraz mocniejszego źródła światła). Urządzenie to korzysta z tego, iż z widma światła białego najsilniej rozproszone zostaje światło niebieskie.

Rysunek schematyczny ilustruje ogólną zasadę działania urządzenia:



Nasze doświadczenie polegało na tym, że przepuszczaliśmy równoległą wiązkę światła białego przez roztwór mleka z wodą (taki układ pozwala uzyskać większą dokładność pomiarową). Na początku nalewamy niewiele cieczy i kładziemy na powierzchni filtr czerwono-niebieski. Wiadomo, że filtr niebieski przepuszcza tylko promieniowanie o długości fali odpowiadającej światłu o niebieskiej barwie, analogicznie czerwony filtr – światłu o czerwonej barwie. Obserwujemy więc jasną plamkę na filtrze (jest to światło niebieskie i czerwone, przechodzące przez filtr). Dodajemy ciągle mleka, dzięki czemu wydłuża się droga wiązki przez ciecz, a w rezultacie więcej światła ulega rozproszeniu. Wiemy jednak, że silniej rozpraszane jest światło niebieskie, więc poziom cieczy ustalamy na takiej wysokości, na jakiej na filtrze zniknie jasna plamka po stronie niebieskiej. Co to oznacza? Oznacza to, że z widma wiązki światła białego całkowitemu rozproszeniu uległo światło niebieskie. Następnie ustalamy poziom, na którym rozproszeniu całkowitemu ulega światło czerwone. Te dwa punkty charakteryzują zależność stopnia rozproszenia od długości drogi (głębokości) przez roztwór. Można przewidzieć, że mleko bardziej tłuste szybciej rozproszy światło niebieskie, ponieważ ma więcej kropelek. Jednocześnie zauważamy też, że w kolejnych doświadczeniach odległość między punktem, gdzie wygasło światło niebieskie, a punktem, gdzie wygasło światło czerwone, może być różna nawet dla tej samej zawartości tłuszczu w mleku. Interpretujemy to tak, że kropelki tłuszczu mogą się łączyć ze sobą, tworząc większe kropelki; jednocześnie zmniejsza się ich ilość. W rezultacie zgodnie z prawem Rayleigha większe kropelki bardziej rozpraszają światło o większych długościach, czyli szybciej jest rozpraszane światło czerwone. Użyliśmy mleka 0%, 0,5%, 1,5%, 2%, 3% w roztworze 1 do 1 z wodą. A oto wyniki tamtego doświadczenia:

Dla mleka 0% wygaszenie światła niebieskiego 6,2 cm

Dla mleka 0,5% wygaszenie światła niebieskiego 5,5 cm

Dla mleka 1,5% wygaszenie światła niebieskiego 4,5 cm

Dla mleka 2% wygaszenie światła niebieskiego 4,3 cm

Dla mleka 3% wygaszenie światła niebieskiego 4 cm

Dlaczego zjawisko to jest tak słabo widoczne na jajku? Nasza teoria na ten temat jest następująca: W powietrzu, w porównaniu z białkiem jajka, mamy bardzo mało cząsteczek, dlatego odległość pomiędzy ewentualnymi ziarnistościami (zgrupowaniami cząstek, jak np. w kropelce mgły) jest dużo większa niż rozmiar samych ziarnistości. W jajku rolę takich ziarnistości najprawdopodobniej pełnią cząsteczki białka. Wiemy, że cząsteczki te są bardzo duże w porównaniu do innych. Jednak w jajku cząsteczek tych jest mnóstwo (białko jest zbudowane niemal z samych cząsteczek białka J). Dlatego odległości pomiędzy konkretnymi „ziarnistościami” są niewiele większe, a nawet mniejsze niż same ziarnistości. Prawo opisane wzorem [1] odnosi się nie tylko do zależności natężenia rozproszonego światła od częstotliwości wiązki przechodzącej przez ośrodek. Odnosi się również do zależności tegoż natężenia od budowy samego ośrodka. Mówi ono, że im większe ziarnistości w ośrodku, tym większej długości fale świetlne są rozpraszane. Dokładniej mówiąc, długość fali, jaka zostaje rozpraszana, jest porównywalna z wielkością ziarnistości. W praktyce im większe „grudki” substancji, tym więcej światła zbliżającego się ku czerwieni zostaje rozpraszona. Dlatego kiedy mamy do czynienia z białkiem jajka, zjawisko rozpraszania jedynie barw niskoenergetycznych jest bardzo mało zauważalne. Ziarnistości białka jajka są tak duże i gęsto poukładane, że prawie całe pasmo widma światła białego jest szybko rozpraszane.

Pomoc:

- Wyniki badań do problemu z Turnieju Młodych Fizyków 2003/2004 (rozpraszanie światła).
- Zdjęcia z własnego archiwum.

Bibliografia:

- *Feynmana wykłady z fizyki* (tom 1, cz. 2, § 32-5)

Od Redakcji:

Artykuł umieszczony jest na stronie internetowej *Fotonu*, tam też znajdują się kolorowe ilustracje. Pierwsza wersja artykułu na stronie *Mojej Fizyki*

http://draco.uni.opole.pl/moja_fizyka/numer4/zadania/jajko.html.

Ola Sitko jest obecnie studentką fizyki I roku UJ.