



Jeszcze raz o soku z kapusty, czyli kolory w chemii, biologii i na wychowaniu plastycznym

Grzegorz Karwasz

Zakład Dydaktyki Fizyki, Instytut Fizyki,
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Mariusz Gagoś

Zakład Biofizyki Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie i Zakład Biologii
Komórki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie

W numerze 117 *Fotonu* (Lato 2012) prof. J. Ginter pokazał [1], jak za pomocą transmisyjnej siatki dyfrakcyjnej w prosty sposób obserwować widma absorpcyjne soku z kapusty, przy różnych odczynach pH roztworu. Jest to doświadczenie proste i pouczające.

W tym samym czasie, w letnim numerze *Chemii w Szkole* [2] pokazywaliśmy podobne widma absorpcji, ale uzyskane za pomocą profesjonalnego spektrofotometru dla szerokiego zakresu pH soku. Porównaliśmy te widma z *kolorem* soku, czyli widmem *przechodzącego* światła białego. Różnorodność barw soku z kapusty jest znacznie bogatsza niż w przypadku powszechnie stosowanego papierka lakmusowego (wyciągu z porostów *Leconora*), który zmienia kolor od barwy czerwonej (dla pH = 1), przez żółtą (dla pH = 5) do ciemnozielonej (dla pH = 11). W porównaniu z lakmusem, kolory soku z kapusty zmieniają się w sposób znacznie bardziej skomplikowany (rys. 1). Dla pH od 1 do 13 kolor soku zmienia się od krwawo-czerwonego (pH = 1), poprzez odcień różowego (pH = 4), fioletawy (pH = 6), modry (pH = 8), zielony (pH = 10) aż do żółtego (pH = 13) (rys. 1).



Rys. 1. Wodne roztwory soku z kapusty dla różnych wartości pH roztworów (wykonanie i fot. MG)

„Pasma” absorpcji dla różnych pH soku, podobne do tych z artykułu prof. Gintera, zmierzone na profesjonalnym spektrometrze, są pokazane na rys. 2. Jak wyjaśnialiśmy szczegółowo w [2], maksima absorpcji w zakresie widzialnym i nadfiolecie świadczą o pojawianiu się w strukturze cząsteczki organicznej odpowiednich poziomów dla wzbudzeń elektronowych (czyli niezapełnionych molekularnych orbitali elektronowych). Pojawianie się tych poziomów jest związane z przebudową struktury cząsteczki w zależności od stężenia jonów H^+ w środowisku wodnym. Przykładowo, w powszechnie występujących w roślinach barwnikach antocyjanowych (z greckiego „barwno-niebieskich”) taka przebudowa polega na zamianie formy kationowej (tzn. elektrycznie dodatniej) w środowisku kwaśnym, z jonem O^+ w pierścieniu piranowym¹ o kolorze czerwonym, na formę obojętną, niebieską, w środowisku alkalicznym [2]. Łatwo to sprawdzić dodając do kropli czerwonego wina (lub rozgniecionych płatków pelargonii) zasadowego wywabiacza tłuszczu lub nawet proszku do prania – czerwony roztwór z płatków pelargonii i rubinowe wino zmieniają wtedy kolor na ciemno-siny. Ale jak się ma obserwowany „gołym okiem” kolor do jego naukowego przedstawienia, czyli *widma* (ang. *spectrum*, z Cyserona [3])?

Zauważmy, że poziomy elektronowe w cząsteczkach organicznych nie różnią się naturą od poziomów energetycznych w atomie wodoru. Skąd się więc biorą pasma? Nawet w cząsteczkach tak prostych jak H_2 i N_2 pojawiają się dodatkowe poziomy związane z drganiami cząsteczek. Prosta siatka dyfrakcyjna (np. [4]) pozwala na zaobserwowanie, że widmo nadal składa się z pojedynczych *linii*, nawet jeśli są one położone blisko siebie. Odstępy między tymi liniami są jednakowe, bo i H_2 i N_2 mają tylko jeden sposób (*mod*) drgań. Cząsteczki bardziej złożone jak chlorofil, z wieloma atomami dookoła centralnego atomu (a właściwie jonu) magnezu, mają wiele możliwych modów drgań. W cieczach dodatkowo oddziaływanie z cząsteczkami rozpuszczalnika pozwala na *bezpromienisty* przekaz energii wzbudzenia i pojedyncze linie zamieniają się w *pasma*.

W kapuście zakres zmian koloru soku jest bogatszy niż dla lakmusu – w miarę zmian pH pojawia się i znika kilka pasm absorpcji, tak w zakresie widzialnym jak i w bliskim nadfiolecie [2]. Wynikać to może z powstawania kilku

¹ Pirany (C_5H_6O) to sześcioczłonowe związki heterocykliczne z jednym heteroatomem. α -Piran jest nieznaną w postaci wolej, natomiast bardzo rozpowszechnione są jego pochodne – sole piryliowe, flawyliowe i in. γ -Piran jest cieczą o temperaturze wrzenia = $84^\circ C$, rozkładającą się w temperaturze pokojowej. Pierścień piranowy jest podstawowym układem wielu substancji naturalnych [Encyklopedia Techniki WNT, Chemia, Warszawa 1993, s. 538]



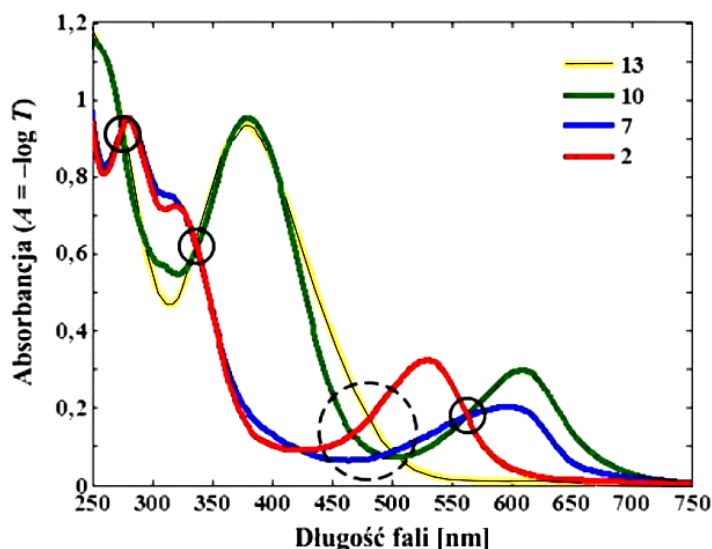
α - piran



γ - piran

różnych form (elektrycznie obojętnych i zjonizowanych) określonego barwnika a także możliwą aktywnością optyczną *kilku* różnych związków chemicznych. Widma absorpcji (czyli zależność *absorbancji* od długości fali światła padającego) soku z kapusty w zakresie pH = 2 do pH = 13 przedstawiamy na rys. 2.

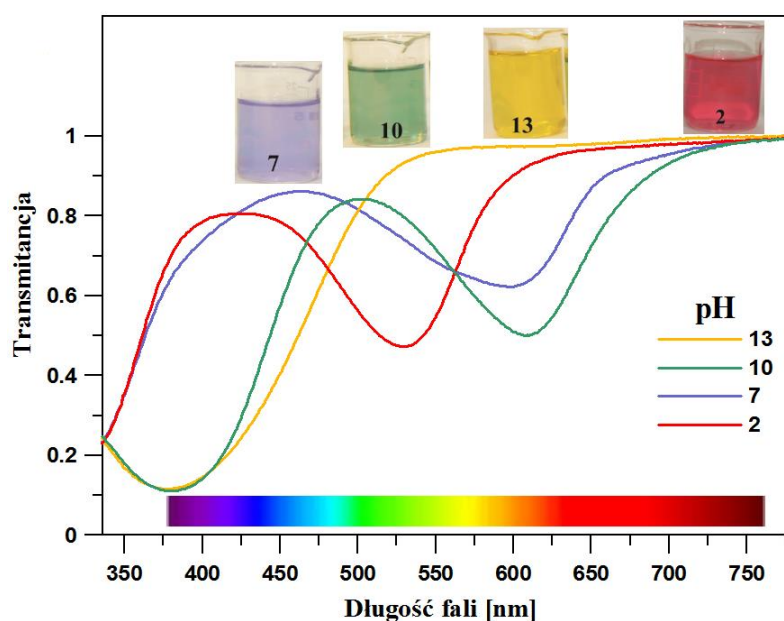
Dla odczynów zasadowych (pH = 10–13) obserwujemy pasmo z maksimum absorpcji około 380 nm (światło fioletowe na granicy zakresu widzialnego oka ludzkiego²). Dla roztworów słabiej alkalicznych (dla pH = 10) pojawia się dodatkowe maksimum absorpcji około 610 nm; dla roztworu obojętnego (pH = 7) znika maksimum absorpcji we fioletcie (a pojawia się pasmo w nadfioletcie). Dla roztworu silnie zakwaszonego (pH = 2) maksimum wspomnianego „dodatkowego” pasma absorpcji przeskakuje z 600 nm na 525 nm mimo, że pasmo w nadfioletcie pozostaje identyczne jak dla pH = 7.



Rys. 2. Widma absorpcji roztworów soku z kapusty. Dla pH = 13 roztwór absorbuje światło fioletowe, dla pH = 10 pojawia się dodatkowa absorpcja w zakresie żółtym; dla roztworów kwaśnych znika absorpcja we fioletcie a pojawia się pasmo w nadfioletcie. Dla soku z kapusty obserwujemy aż trzy punkty *izosbesticzne* (oznaczone na rysunku przez okręgi), co świadczy o występowaniu kilku struktur chemicznych – obojętnych lub zjonizowanych (wykonanie i pomiary MG)

² W nadfioletcie widzą np. pszczoły, które mają receptor fioletowy, zamiast niebieskiego, jak w oku ludzkim. Możemy sobie wyobrazić, że dla pszczoł kolor zielony jest czarny, kolor brązowy – szary, koloru niebieskiego nie widzą (stąd nie ma niebieskich kwiatów zapyłanych przez pszczoły), a widzą znakomicie odcienie fioletów i przypuszczalnie różne odcienie białego, np. kwiaty jabłoni, czereśni, gruszy są dla pszczoł zapewne różnokolorowe [3].

O występowaniu kilku³ różnych struktur chemicznych barwnika/barwników w soku kapusty w miarę zmiany pH świadczą punkty przecięcia krzywych absorpcji (punkty izosbestyczne). Jest tych punktów w zakresie widzialnym i bliskiego nadfioletu aż trzy: dla 560 nm, 340 nm, 275 nm i jeden niezbyt dokładnie określony około 470–490 nm (rys. 2). Punkt izosbestyczny to taka długość fali, dla której wartość absorpcji dwóch różnych form barwnika (np. formy protonowanej i neutralnej) jest taka sama. Istnienie punktów izosbestycznych świadczy, że absorbentem światła jest ten sam związek chemiczny (jego koncentracja w miarę zmian pH pozostaje stała), ale w dwóch różnych odmianach. W roztworach wodnych powodem przesuwania (przeskoków) pasm absorpcji, a przez to obserwowanego koloru barwnika jest przyłączanie ładunków elektrycznych (jonów H^+ lub OH^-). Barwników organicznych jest mnóstwo, dla każdego z nich zmiany w strukturze zachodzą w ściśle określonym zakresie pH [6]. Na ogół wzrost pH powoduje przesunięcie pasma absorpcji ku czerwieni – barwniki czerwone przy odczynie kwasowym stają się niebieskie przy odczynie zasadowym.



Rys. 3. Transmitancja (skala liniowa, w jednostkach względnych) roztworów soku z kapusty. Skomplikowane zakresy widmowe światła przepuszczanego powodują powstawanie kolorów, które mają złożony charakter – nie są to kolory podstawowe jak w tęczy (pomiar i rys. MG)

³ Badania za pomocą metod chromatografii chemicznej wykazały, że w lakmusie występuje aż 14 różnych barwników [5].

Zauważmy, że obserwowany kolor roztworu przy oświetleniu światłem białym wynika nie z widm *absorpcji*, ale z widm *transmisji*. Te dwa widma są komplementarne. Należy jednak zdefiniować dokładniej *absorbancję* A z rys. 2. Jest to wielkość logarytmiczna, zależna w następujący sposób od współczynnika transmisji, T , czyli *transmitancji*

$$A = -\log(T),$$

gdzie $T = I/I_0$ a I i I_0 oznaczają odpowiednio natężenie światła przechodzącego i padającego. 100% transmisji ($T = 1$) odpowiada absorbancji $A = 0$; 10% transmisji odpowiada absorbancji $A = 1$, 1% transmisji to $A = 2$ itd. Widma transmisji przedstawiamy na rys. 3.

Komplementarność kolorów dla pH przedstawionych na rys. 3 jest wręcz podręcznikowa, jak z lekcji wychowania plastycznego. Dla pH = 13 absorbowane jest światło fioletowe, a roztwór ma podręcznikowy kolor dopełniający, czyli żółty (jest to w zasadzie kolor zielono-żółto-czerwony, ale nasze oko traktuje je jako żółty!). Dla pH = 2 przepuszczane jest światło czerwone i niebiesko-fioletowe, a *barwa* soku to prawie podręcznikowa magenta (suma niebieskiego i czerwonego). Dla pH = 10 obserwowany kolor to złożenie czerwonego i niebiesko-zielonego. (Włosi rozróżniają ten ostatni kolor jako *azzurro*, w odróżnieniu od ciemno-niebieskiego, czyli *blu*; malarze nazywają ten kolor „błękitem paryskim”, w odróżnieniu od indygo, a drukarze określają go jako *cyan*). Kolor soku z kapusty dla pH = 10 przypomina zielony, ale obecność czerwieni go „łamie”. Podobnie „złamany” dodatkiem czerwieni jest niebiesko-fioletowy kolor dla pH = 7.

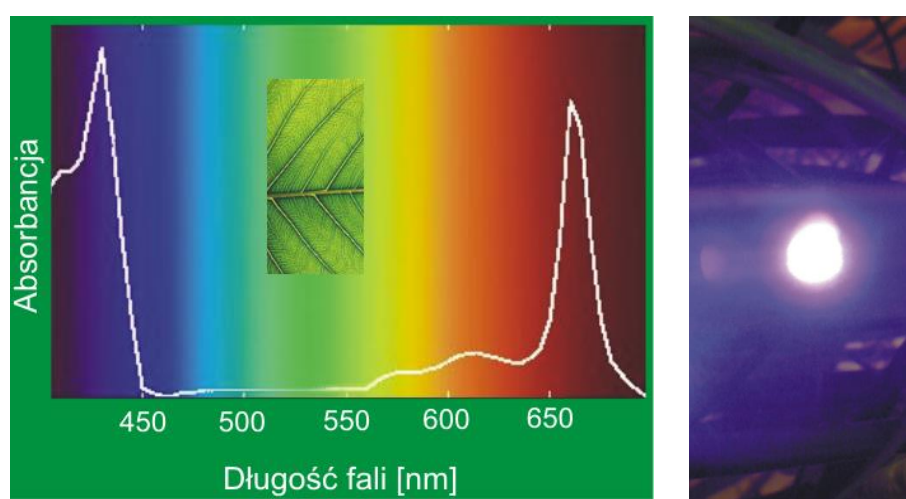


Rys. 4. Piramidy i „kule” Swarovskiego: powstawanie kolorów w syntezie dwóch (lub więcej) kolorów – obserwowane kolory (magenta, brąz) nie są kolorami podstawowymi powstającymi wskutek rozszczepienia światła białego np. w pryzmacie lub tarczy (zbiory i fot. GK)

Czy takie kolory występują również w innych zjawiskach? Oczywiście! „Dziwne kolory”, takie jak quasi-magenta, brąz itd. można pokazywać na przykładzie szlifowanych wielościanów ze szkła o dużym współczynniku załamania

(i ze zwierciadłami selektywnymi w podstawie), nazwanych przez nas „kulami” lub piramidami Swarovskiego [7], rys. 4.

Wracając do widm kapusty – co się dzieje ze światłem absorbowanym przez drobiny barwnych związków uczestniczących w tej grze kolorów? Otóż z bilansu energii wynika, że światło absorbowane może np. powodować reakcje chemiczne, jak procesy fotosyntezy w chlorofilu, może być wypromieniowane w innym zakresie widmowym (jak np. we „fluoryzujących” kamizelkach samochodowych [2]), a czasem „przerzucone” w zupełnie inne pasmo. Dzieje się tak np. w przypadku chlorofilu.



Rys. 5. Widmo absorpcji chlorofilu (źródło: Wikipedia) i „krzyk liścia” – przy silnym natężeniu padającego światła fioletowego liść wyświeca nadmiar energii na różowo (pomysł GK, wykonanie i fot. MG)

Chlorofil absorbuje nie w zakresie zielonym (w widmie Słońca jest za dużo światła zielonego, absorpcja światła zielonego powodowałaby palenie się liści), ale czerwonym i fioletowym, dzięki czemu liście są właśnie zielone. W pracy [2] sygnalizujemy też, że chlorofil absorbując światło fioletowe emituje czerwone. To pasmo emisji to „zawór bezpieczeństwa” procesu fotosyntezy. Innymi słowy, przy nadmiarze światła liście świecą na czerwono. Można to pokazać za pomocą pięknego i prostego doświadczenia. Na liściu pelargonii oświetlonym fioletowym wskaźnikiem laserowym (80 zł w internecie) pojawia się wokół plamki lasera różowawa obwódka. Liść zapewne przy tym krzyczy, ale my tego nie słyszymy...

Fizycy, od czasów Newtona nauczyli się rozdzielać kolory „podstawowe”; nie jest ich siedem, ale nieskończenie wiele. Dziś w dobie filtrów interferencyjnych [7] i tanich różnokolorowych diod laserowych możemy tworzyć z tych kolorów

podstawowych (niekoniecznie RGB), zupełnie nowe barwy świata. Artyści malarze (i kapusta), poprzez widma absorpcji, tworzą takie barwy od prehistorii. Reasumując, proste doświadczenie pokazane przez prof. Gintera może być ciekawym wprowadzeniem w interdyscyplinarną dyskusję o kolorach, strukturach chemicznych i ich funkcjach biologicznych. Taka dyskusja może stanowić jeden z tematów w nowej podstawie programowej „Przyroda”.

Literatura

- [1] J. Ginter, *Widma absorpcyjne barwnika czerwonej kapusty*, *Foton* 117 (Lato 2012), s. 64
- [2] M. Gagoś, G. Karwasz, *Barwa a struktura związku chemicznego*, „Chemia w Szkole”, nr 3 (Maj/ Czerwiec 2012), 14, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/Chemia.pdf>
- [3] G. Karwasz i in. „On the track of Modern Physics” EU S&S020772, *See, to believe*, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/posters/specop5.ppt Spectroscopy, or ghost science, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/posters/ghost5.ppt
- [4] G. Karwasz, M. Więcek, *Toruński podręcznik do fizyki. IV. Fizyka współczesna i astrofizyka*, Zakład Dydaktyki Fizyki UMK, 2012, s. 39, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/264
- [5] H. Beecken, E.-M. Gottschalk, U. v Gizycki, H. Krämer, D. Maassen, H.-G. Matthies, H. Musso, C. Rathjen, Ul. Zdhorszky (2003). „Orcein and Litmus”. *Biotechnic & Histochemistry* **78** (6): 289–302. doi:10.1080/10520290410001671362 [<http://en.wikipedia.org/wiki/Litmus>]
- [6] Różnorodność barwników stosowanych do *miareczkowania* chemicznego opisuje np. <http://chemistry.about.com/od/acidsbases/a/Acid-Base-Indicators.htm>
- [7] G. Karwasz i in., *Fizyka i zabawki*, kolekcja wirtualna, PAP, Słupsk 2004–2005 *Sfera Swarowskiego*, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/optyka/swarowski.html>, *Różowe okulary*, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/optyka/rozokulary.html>