



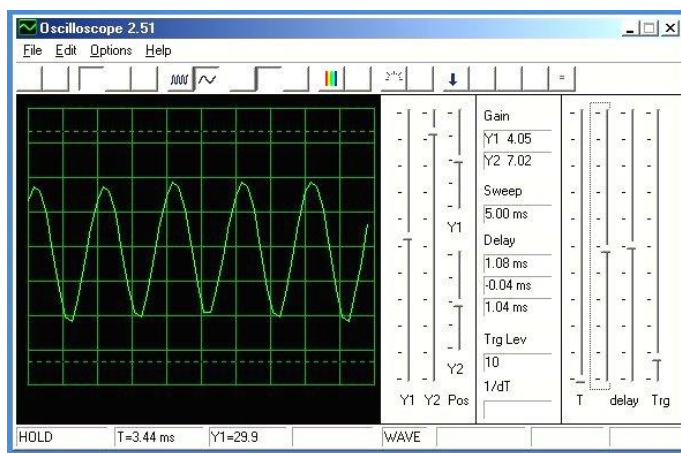
Szampańska muzyka

Eryk Rajch, Grzegorz Karwasz

Instytut Fizyki, Pomorska Akademia Pedagogiczna, Słupsk

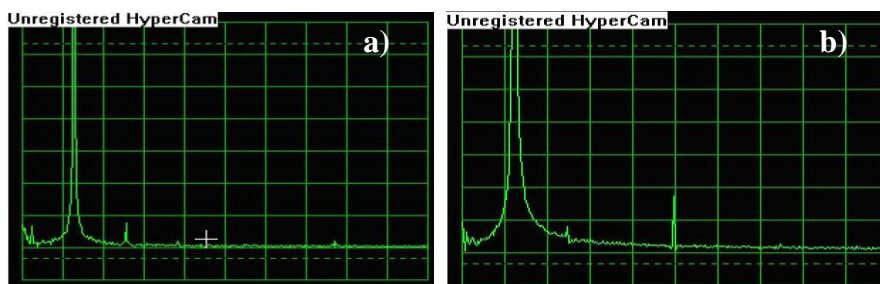
1. Wszyscy zapewne potrafią grać na kieliszkach – wodząc palcem zamoczonym w wodzie po jego górnej krawędzi. Przy odrobinie cierpliwości można „zmusić” do gry zwykle (cienkościenne) szklanki czy półmiski z *pyreksu* (te trzeba przytrzymywać z góry za podstawę lub, lepiej, przykleić na stałe do jakiejś płaskiej podstawki). Nie wszyscy natomiast wiedzą, że Benjamin Franklin między wynalazkiem kondensatora płaskiego a pisaniem konstytucji USA skonstruował również „glass-harmonikę” – układ kieliszków o różnych średnicach, umieszczonych na jednym wałku, obracanych za pomocą pedału. Kieliszki w dolnej części zanurzone były w wodzie, a grało się dotykając palcem ich krawędzi. Muzykę na ten niezwykle instrument pisali nawet Mozart i Beethoven. Później „glass-harmonika” popadła w niełaskę – podobno jej muzyka powodowała zaburzenia nerwowe u słuchaczy.

2. Fala dźwiękowa wytwarzana przez kieliszki jest „piękną” sinusoidą (rys. 1), co oznacza, że w jej widmie częstotliwości występuje zasadniczo tylko jedna składowa.



Rys. 1. Fala dźwiękowa wytwarzana przez pocieranie górnej krawędzi „szampanówki” – kształt prawie doskonałej sinusoidy wskazuje na zasadniczo jedną składową w widmie częstotliwości (1020 Hz)

Analiza wysokości dźwięków emitowanych przez różne kieliszki – szampańówki 1010 Hz, koniakówki 900 Hz, do win wytrawnych 920 Hz, do piwa 1545 Hz, wskazuje na zbliżone wartości częstotliwości, około 1 kHz – dość przenikliwe „piszczenie”, odpowiadające wysokiemu (trójkreślnemu) do^3 (w terminologii naukowej natomiast C_6) (rys. 2a).



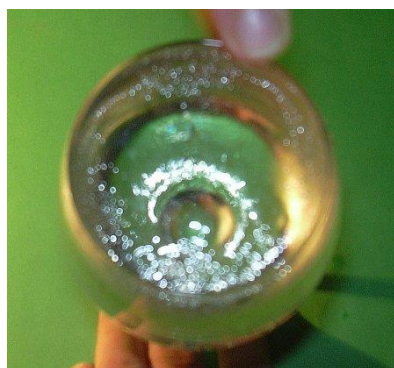
Rys. 2. Widmo częstotliwości grającej koniakówki (oś OX obejmuje zakres od 0 do 7046 Hz):

- bez wody, dominuje częstotliwość 900 Hz (nieco wyżej niż „la dwukreślnie” = A_5), wyższe harmoniczne (druga 1800 Hz) są słabo widoczne;
- z wodą – częstotliwość podstawowa się obniża (875 Hz), wyższe harmoniczne (tu pokazana czwarta – 3500 Hz) rosną. Tłumienie drgań wywołane obecnością wody powoduje poszerzenie piku rezonansowego wokół częstotliwości podstawowej

Prędkość rozchodzenia się fal podłużnych w szkłe (typu *pyrex*) wynosi około 5640 m/s, dlatego stojąca fala podłużna o najniższej częstotliwości w przecie szklanym o długości 30 cm (czyli na obwodzie dużego kieliszka) miałaby częstotliwość około 10 kHz – prawie w zakresie ultradźwięków, dwa razy wyżej niż najwyższa nuta fortepianu. Muzyka kieliszka nie jest więc drganiem podłużnym – lecz poprzecznym. Innymi słowy, kieliszek ulega „spłaszczeniu” w jednym kierunku i wydłużeniu w kierunku prostopadłym. Podobnie drgają dzwony kościelne.

3. Drgania poprzeczne łatwo uwidocznisz, nalewając do dużego kieliszka wody, mniej więcej tyle, ile nalewałby zręczny kelner – nie za dużo (zbyt duża ilość wody utrudnia wzbudzenie drgań, zbyt mała nie uwidacznia efektu). Po wzbudzeniu dźwięku wydaje się, że woda wrze w czterech rogach kwadratu wewnątrz kieliszka (rys. 3). Ten typ drgań polega na „rozciąganiu” kieliszka w jednym kierunku i jego „zgniataniu” w kierunku prostopadłym. Teoretycznie można wyobrazić sobie jeszcze niższe harmoniczne – w którym występuje tylko jedna, lub tylko dwie strzałki, lecz nie występują one w praktyce. Drgania takie wymagałyby zgniatania i rozciągania szkła (moduł sprężystości na zgniatanie jest bardzo duży,

200–320 10^8 Pa, w porównaniu z modułami na rozciąganie lub zginanie 0,3–0,9 10^8 Pa). Zanim kieliszek zacznie „pięknie” grać, wytwarza on również dźwięki o niższych częstotliwościach. A woda w grającym kieliszku, oprócz obrazu stacjonarnych drgań poprzecznych, jest pomarszczona szeregiem „własnych” fal.



Rys. 3. W kieliszku wypełnionym wodą, po wzbudzeniu częstotliwości rezonansowej, pojawiają się najpierw fale wędrujące za palcem po powierzchni wody, przy większej amplitudzie woda zaczyna „wrzeć” w czterech wierzchołkach kwadratu

4. Drgania, poprzeczne z natury – jak powiedzieliśmy, są niebezpieczne dla kieliszka. Ich amplituda jest całkiem spora, rzędu dziesiątych części milimetra – co łatwo sprawdzić, dotykając z boku drgającego kieliszka. Nie dziw więc, że głos wprawnego śpiewaka (o natężeniu nawet do 100 dB) w rezonansie z kieliszkiem może doprowadzić do katastrofy.

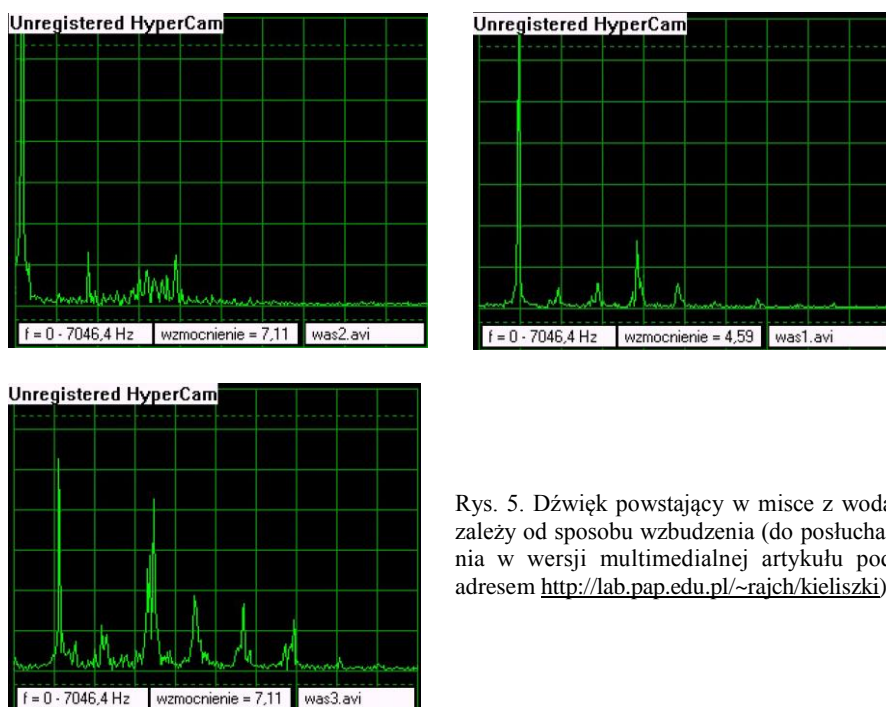
5. Nalanie wody powoduje obniżenie wysokości emitowanych dźwięków (zob. rys. 2b) – zgodnie z prawem, że częstotliwość drgań oscylatora harmonicznego, a właściwie kwadrat tej częstotliwości jest odwrotnie proporcjonalny do drgającej masy. W kieliszku z wodą „efektywna” masa ścianek kieliszka wzrasta – część energii drgań jest przekazywana cieczy, częstotliwość dźwięku maleje. Dodatkowo, nalana woda jest w pewnym sensie ośrodkiem tłumiącym drgania – pogarsza się tzw. „dobroć” rezonatora – maksimum częstotliwości rezonansowej ulega poszerzeniu (por. rys. 2b). Pytanie: czy ktoś jest w stanie rozróżnić, czy drgająca ciecz to woda, czy jakaś inna, o niższej gęstości (dobry koniak)?

6. Identyczne względem drgań kieliszka są drgania „zabytkowej chińskiej wazy” z brązu (200\$, www.teachersource) lub ze złota (2000\$). Przy pocieraniu wazy dłońmi dobrze namoczonymi, po wzbudzeniu fali stojącej (ok. 130 Hz), woda wytryska w rogach kwadratu jak w fontannie (fot. 4a). Przy pocieraniu bardziej

energicznym, nieco ukośnie, możliwe jest wzbudzenie wyższej harmonicznej, z sześcioma punktami fontanny (fot. 4b).

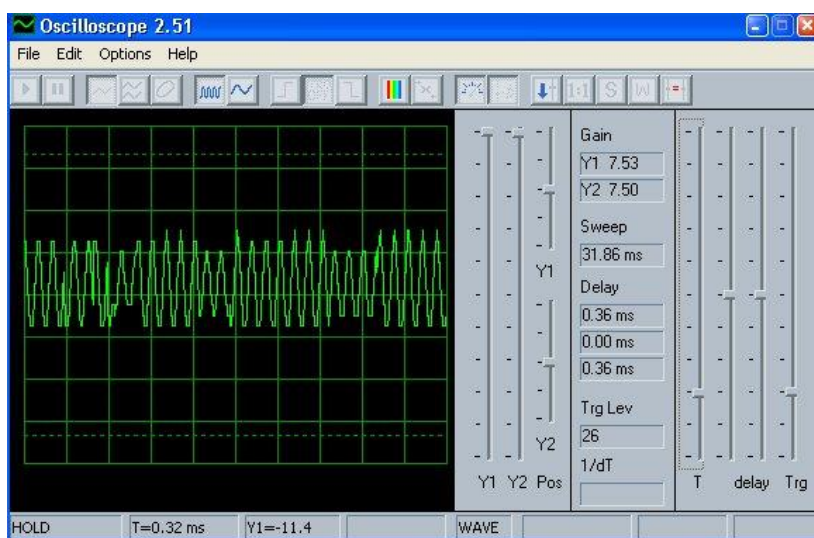


Rys. 4. Podobną falę stojącą można wytworzyć w misce z wodą (tu specjalna miska z brązu ze zbiorów dydaktycznych www.teachersource). W zależności od sposobu wzbudzenia obserwuje się cztery „rogi” fontanny lub sześć



Rys. 5. Dźwięk powstający w misce z wodą zależy od sposobu wzbudzenia (do posłuchania w wersji multimedialnej artykułu pod adresem <http://lab.pap.edu.pl/~rajch/kieliszki>)

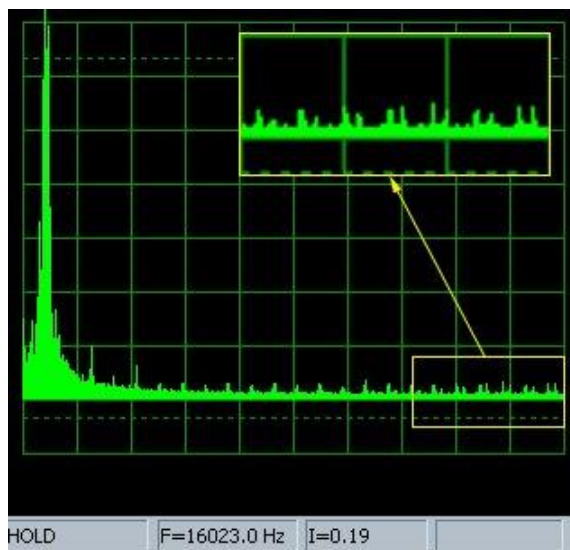
7. Dokładniejsze przyjrzenie się widmu częstotliwości kieliszka pokazuje, że i dla szkła wyższe harmoniczne (nawet do czwartej) są widoczne, szczególnie w kieliszku wypełnionym wodą (fot. 1b). W misce z wodą też jest mnóstwo wyższych harmonicznych (do posłuchania w wersji multimedialnej artykułu pod adresem <http://lab.pap.edu.pl/~rajch/kieliszki>). W kieliszku przesuwanie palca po obwodzie powoduje, że fala nie jest „dokładnie” stojąca, ale niejako wędruje za palcem. Ponieważ kieliszek nie jest nigdy dokładnie symetryczny, fala jest powoli modulowana przez taki przesuw palca – pojawiają się wyraźne dudnienia dźwięku (rys. 6). W analizie Fouriera dudnienia takie oznaczają pojawienie się drugiej częstotliwości, bardzo zbliżonej do częstotliwości podstawowej.



Rys. 6. Przy przesuwaniu palca po krawędzi kieliszka pojawiają się dudnienia – narastanie i słabnięcie dźwięku

8. A co z obłędem, jaki powodowała „glass-harmonika”? Może był on spowodowany z jednej strony wspomnianymi „dudnieniami”, lub obecnością wysokich, prawie ultradźwiękowych częstotliwości – z grubsza zgodnych z częstotliwościami drgań podłużnych (zob. widmo na rys. 7).

9. Zauważmy na koniec, że sinusoida drgań poprzecznych ścian kieliszka przypomina stojącą falę de Broglie’a elektronu na stacjonarnej orbicie Bohra w atomie wodoru. Lub dokładniej: najniższy ton miski lub kieliszka to fala de Broglie’a na drugiej orbicie.



Rys. 7. Widmo dźwięku kieliszka, uśrednione po dłuższym czasie, wyraźnie wskazuje na obecność bardzo wysokich (aż do ultradźwięków) częstotliwości – przyczyny obłędu przy słuchaniu muzyki „glass-harmoniki”?