

## „I gra gitara”, czyli o fizyce gitary

Michał Krupiński

Student fizyki Akademii Górniczo-Hutniczej

Charakterystyczne brzmienie gitary jest bez trudu rozpoznawane przez każdego i możemy się z nim spotkać przy ognisku, na wycieczce lub też w bardziej wyszukanej formie – na koncercie. Wiele osób posiada gitarę i potrafi na niej grać ze względu na powszechną dostępność tego instrumentu i niezbyt skomplikowaną technikę gry. Okazuje się, że gitara jest ciekawym obiektem fizycznym, dzięki któremu „na własne uszy” możemy przekonać się jak działa i jak pięknie brzmieć może fizyka.

Inspiracją do rozważań nad fizyką gitary była jedna z wielu wycieczek w góry. Oczywiście, oprócz mozolnego wdrapywania się pod górę i podziwiania przepięknych widoków, nie zabrakło także wieczornego ogniska z nieodłącznym brzmieniem gitary. Początkowy rytuał strojenia i bogata gama dźwięków płynących pod rozgwieżdżonym niebem skłoniły do rozważań: Dlaczego różne gitary posiadają różną barwę dźwięku? Jak działa pudło rezonansowe? Jak drgają struny? Zaraz po powrocie z gór postanowiłem odpowiedzieć na powyższe pytania.

Zacznijmy od źródła dźwięku, czyli od strun. W zależności od typu gitary zbudowane są one z różnych materiałów. W przypadku gitar klasycznych spotykamy się z nylonowymi żyłkami o różnej grubości. Gitary akustyczne i elektryczne wyposażone są natomiast w struny stalowe. W obu przypadkach najgrubsze z nich są owijane metalowym drucikiem. Oczywiście rodzaj strun wpływa na barwę dźwięku. Dźwięk strun metalowych jest określany przez muzyków jako „jaśniejszy” i „ostrzejszy” natomiast dla strun nylonowych jako „bardziej miękki”. Próbki dźwięków można usłyszeć na stronach internetowych: [1] – struny stalowe, [2], [3] – nylonowe.

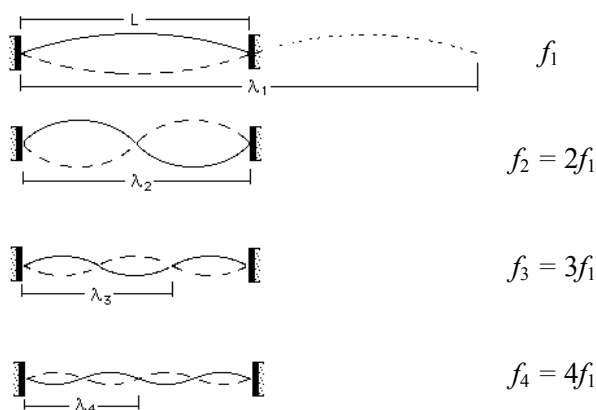
No dobrze, struna to kawałek żyłki bądź drutu, ale gdzie tu fizyka? Fizyka zaczyna się w momencie, w którym usiłujemy wydać z gitary dźwięk. Pobudzamy zatem strunę szarpiąc ją palcem. Szarpiemy, czyli wychylamy ją z położenia równowagi, nadając jej kształt podobny do kształtu sznurka z praniem obciążonego w jednym miejscu. Następnie puszczaamy strunę i pozwalamy jej swobodnie drgać. Tworzy się wtedy fala stojąca posiadająca węzły na końcach struny. Różne warianty takiej fali stojącej na strunie (zwane *modami*) przedstawia rys. 1. Drgająca struna emituje energię w postaci dźwięku o pewnej wysokości. Za wysokość odbieranego przez nas dźwięku odpowiada częstotliwość, z jaką drga struna. Zaprzęgając do działania matematykę i fizykę możemy na kartce papieru wyprowadzić wzór na tę częstotliwość.

Zatem do dzieła. Szybkość rozchodzenia się w strunie fal poprzecznych jest dana jako  $v = \sqrt{F/\mu}$  i jest taka sama dla wszystkich częstotliwości [4]. Występujące we wzorze  $F$  to siła naciągu struny, a  $\mu$  to jej gęstość liniowa. Z analizy sposobu powstawania fal stojących na strunie (rys. 1) wydedukować możemy długość fali równą  $\lambda = 2l/n$  gdzie  $l$  to długość struny, a  $n$  jest liczbą naturalną. Stąd już prosto dojdziemy do częstotliwości fali:

$$f_n = \frac{v}{\lambda} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Równanie to po raz pierwszy zostało podane niezależnie przez Pere Marina Mersenne'a i Galileusza około roku 1635 [5]. Widzimy, że częstotliwość, z jaką drga struna, zależy od siły naciągu struny  $F$ . No tak, przecież strojąc gitarę zmieniamy właśnie naciąg struny, chcąc dostosować częstotliwość drgań struny do odpowiedniego poziomu. We wzorze pojawia się również  $l$ , czyli długość struny. Tu też nie ma niespodzianki. Grając na gitarze wydobywamy różne dźwięki przyciskając strunę do odpowiednich progów na gryfie, a tym samym zmieniamy jej aktywną długość. Analizujmy wzór dalej:  $\mu$  to masa struny na jednostkę długości. Aha, czyli wysokość dźwięku zależy również od grubości struny i materiału, z jakiego jest ona wykonana. Wszystko staje się jasne – to dlatego struny w gitarze mają różne grubości i to dlatego struny basowe owijają się dodatkowo metalowym drucikiem.

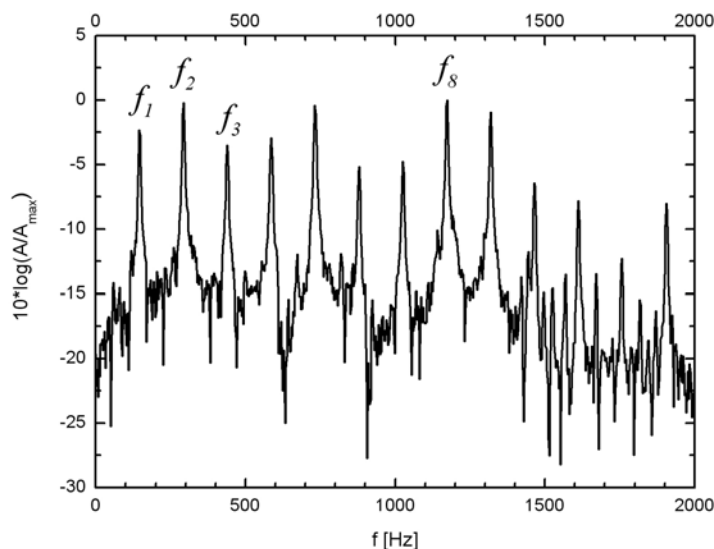
Do całkowitego rozszyfrowania wzoru pozostała jeszcze litera  $n$ , która może przyjmować wartości kolejnych liczb naturalnych. Oznacza to, że struna może drgać równocześnie z wieloma częstotliwościami a nie tylko z jedną. Te różne drgania nazywamy modami i przedstawia je rys. 1. Najniższą częstotliwość, z jaką może drgać struna, nazywamy częstotliwością podstawową  $f_1$  i odpowiada ona pierwszemu modowi drgań.



Rys. 1. Różne mody drgań struny (od pierwszego do czwartego) wraz z odpowiadającymi im długościami fali i częstotliwościami

Po przeanalizowaniu podstaw teoretycznych warto przekonać się samemu jak drga struna. Potrzebny jest do tego tylko komputer, mikrofon i oczywiście gitara. Zatem mikrofon w dłoń, włączamy komputer i nagrywamy gitarę! W moim przypadku do swoich pomiarów użyłem najzwyklejszego mikrofonu używanego do głosowych komunikatorów internetowych oraz programu Cool Edit do obróbki uzyskanych nagrań. Podobne możliwości analizy sygnału dźwiękowego oferują inne dostępne programy takie jak na przykład WaveLab czy Audacity.

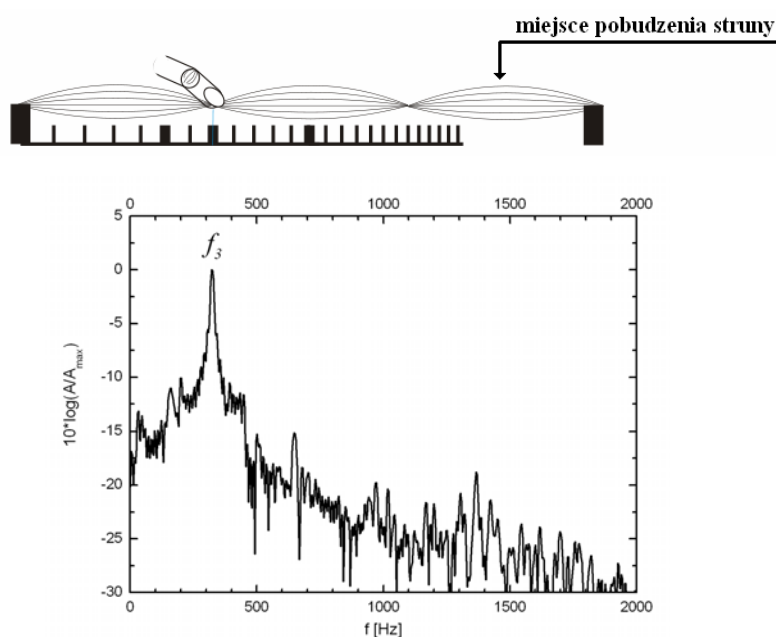
Pierwsze trącenie struny i już wszystko jasne. Analiza częstotliwościowa na rys. 2 wyraźnie pokazuje, że w dźwięku pojedynczej struny znaleźć możemy co najmniej 10 wyraźnych częstotliwości odpowiadających kolejnym modom drgań. To właśnie obecność wielu różnych częstotliwości odpowiada za bogatą barwę gitarowego brzmienia. Analiza częstotliwościowa wyjaśnia również, dlaczego różne typy gitar posiadają odmienną barwę dźwięku. Za barwę dźwięku odpowiada bowiem zawartość różnych częstotliwości w jego widmie. Amplitudy tych częstotliwości są odmiennie dla każdej z gitar, dzięki czemu nasze ucho jest w stanie zarejestrować różnice w dźwięku. Możemy zaobserwować to wykonując podobny pomiar dla gitary klasycznej i akustycznej.



Rys. 2. Widmo częstotliwościowe drgającej struny gitarowej. Na osi pionowej odłożona jest względna amplituda odpowiadająca danej częstotliwości. W widmie widocznych kilkanaście częstotliwości

A czy możemy ze struny gitarowej wydobyć dźwięk posiadający tylko jedną pojedynczą częstotliwość? Okazuje się, że tak! Gitarzyści dźwięki takie nazywają flażoletami i grają je w dosyć specyficzny sposób. Nie przyciskają struny

go gryfu, ale delikatnie przytrzymują ją opuszką palca w miejscu odpowiadającym jej  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$  lub  $\frac{1}{4}$  długości tak, jak to zostało pokazane na rys. 3. Tym samym wyznaczają węzeł fali stojącej. Drugą ręką pobudzają strunę do drgań w miejscu odpowiadającemu strzałce fali stojącej na strunie. W takim przypadku struna wydaje dźwięk, w którego widmie dominuje tylko jedna częstotliwość.



Rys. 3. Sposób pobudzenia struny w przypadku grania fłazoletu i widmo częstotliwościowe dźwięku. Widoczna dominacja jednej częstotliwości w widmie dźwięku

Przejdźmy teraz do najokazalszej części gitary, czyli do pudła rezonansowego. Struny przymocowane są do niego za pomocą mostka, który w sposób mechaniczny przekazuje drewnianym częściom pudła drgania strun. Przekaz energii od strun do pudła odbywa się również w pewnym stopniu przez powietrze, o czym łatwo możemy się przekonać krzycząc w otwór rezonansowy. Pudło „odpowie” nam wtedy cichym, ale wyraźnie słyszalnym buczeniem. Razem z całym pudłem drga również powietrze w jego wnętrzu. Drgania te przenoszą się następnie na drgania otaczającego powietrza, czyli na dźwięk. Na pierwszy rzut oka wszystko wydaje się być proste.

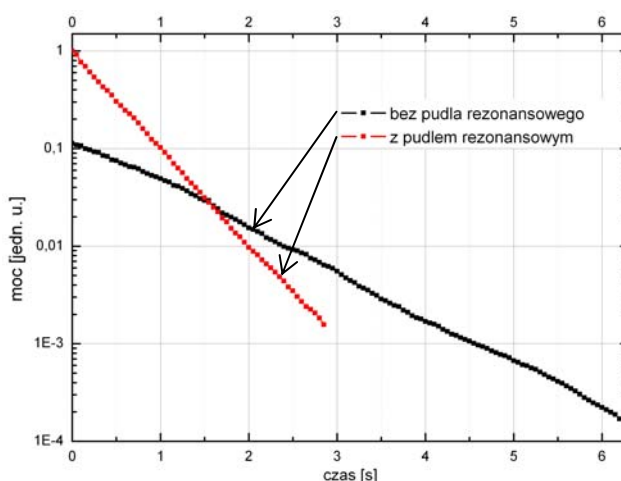
My jednak jesteśmy dociekliwi i znów, posługując się mikrofonem podłączonym do komputera, zaobserwujemy dokładnie działanie pudła rezonansowego. Rysunek 4 pokazuje jak wybrzmiewa struna E (najgrubsza struna gitary) w obecności pudła rezonansowego i bez niego. Aby wynik był dokładniejszy

i pozbawiony szumów, pomiary wybrzmiewania struny przeprowadziłem w komorze bezchowej znajdującej się w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Widzimy, iż pudło rezonansowe sprawia, że przekaz energii od struny do powietrza na początku wybrzmiewania jest efektywniejszy, a co za tym idzie słyszany przez nas dźwięk staje się głośniejszy. Dzieje się tak dzięki dużym wymiarom pudła. Sama struna, posiadając niewielkie pole powierzchni, w małym tylko stopniu oddziałuje z powietrzem, przez co tylko niewielka część jej energii przekazywana jest w każdej sekundzie w postaci dźwięku. Przymocowana natomiast do pudła rezonansowego tworzy układ, który posiadając o wiele większą powierzchnię, jest w stanie sprawniej przekazywać energię mechaniczną struny w energię fali dźwiękowej. Pudło rezonansowe jest zatem niczym membrana w głośniku, która umożliwia sprawny transfer energii od elementu drgającego do powietrza.

Z wykresu na rys. 4 widzimy również, iż dźwięk struny w obecności pudła rezonansowego brzmi krócej. Okazuje się, że pudło rezonansowe stwarza strunie pewien „opór”, przez co szybciej wytraca ona swoje drgania. Szybkość przekazywania energii w postaci dźwięku możemy opisać prostą zależnością:

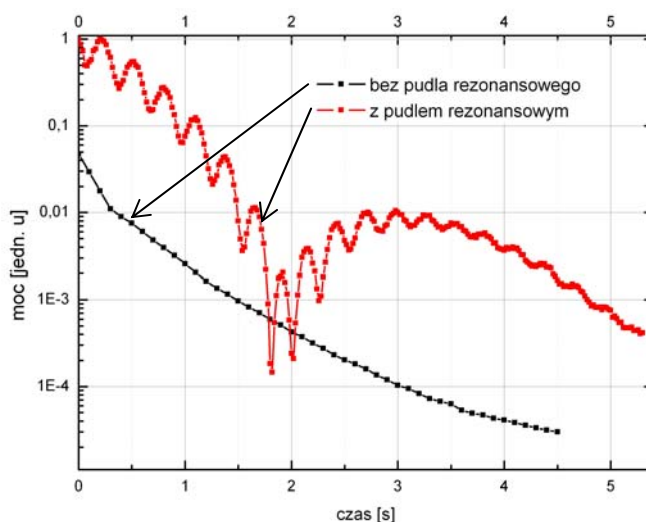
$$P(t) = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

gdzie  $P(t)$  to moc dźwięku w chwili  $t$ , natomiast  $\tau$  jest stałą czasową opisującą jak szybki jest zanik mocy dźwięku. W przypadku struny z pudłem rezonansowym ta stała czasowa wynosi 0,44 s, podczas gdy bez pudła rezonansowego osiąga ona wartość 1,17 s. Szybsze wytracenie energii struny w obecności pudła to większa moc fali dźwiękowej, czyli głośniejszy dźwięk.



Rys. 4. Moc emitowanego dźwięku w zależności od czasu dla struny przymocowanej do pudła rezonansowego i tej samej struny przymocowanej do kawałka drewna. Pomiar przeprowadzony dla struny E (najgrubsza struna gitary) o częstotliwości podstawowej  $f_1 = 82,4$  Hz

Nie wszystko jest jednak tak proste jak się wydaje na pierwszy rzut oka. Rysunek 5 pokazuje podobny wykres zaniku mocy dźwięku jednak tym razem dla struny H (druga struna w gitarze licząc od najcieńszej). Widzimy, że w tym przypadku zanik mocy dźwięku dla struny przymocowanej do pudła rezonansowego nie może być opisany prostą funkcją eksponencjalną. Na wykresie pojawiają się wyraźne zduńnienia, których źródłem jest pudło rezonansowe. Widzimy, że dla struny przymocowanej do kawałka drewna one nie występują. Wzrost głośności dźwięku w okolicach trzeciej sekundy jest nawet słyszalny nieuzbrojonym uchem. Zauważmy również, że wzmacniające działanie pudła rezonansowego jest przypadku struny H nieco silniejsze niż dla struny E.



Rys. 5. Moc emitowanego dźwięku w zależności od czasu dla struny przymocowanej do pudła rezonansowego i tej samej struny przymocowanej do kawałka drewna. Pomiar przeprowadzony dla struny H (druga struna w gitarze licząc od najcieńszej) o częstotliwości podstawowej  $f_1 = 246,9$  Hz

To właśnie pudło rezonansowe decyduje o jakości instrumentu i jest odpowiedzialne za barwę i głębię dźwięku. Oczywiście chcielibyśmy, aby nie wzmacniało ono tylko dźwięku o jednej konkretnej częstotliwości, ale aby było jak najwszechstronniejsze i „działało” dla szerokiej gamy tonów. Aby spełnić te wymagania pudła rezonansowe dobrych gitar muszą być lekkie i sztywne. Są wykonywane ze szlachetnych gatunków drewna posiadających jak najdrobniejsze słoje, by podczas drgań nie tracić zbyt wiele energii w postaci ciepła. Skonstruowanie dobrego pudła nie jest sprawą prostą i przez wieki była to tajemnica lutników, którzy zdobywali swoją wiedzę przez lata metodą prób i błędów. Dziś coraz częściej stosuje się dokładne komputerowe pomiary, dzięki którym pudła rezonansowe współczesnych gitar potrafią sprawnie wzmacniać zarówno

bardzo niskie jak i wysokie częstotliwości, przez co słyszany przez nas dźwięk jest bogaty, pełny i głęboki.

*Serdecznie dziękuję prof. Andrzejowi Ziębie z Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH za opiekę merytoryczną podczas pisania niniejszego artykułu oraz dr Wiesławowi Wszółkowi z Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH za udostępnienie komory bezchowej oraz sprzętu pomiarowego.*

[1] <http://www.glooped.com/gloop.php?gloopId=d17c657e49011f50242cff164d3f2318>

[2] <http://www.glooped.com/gloop.php?gloopId=063a3f15a888741f7bace8e524bfc37f>

[3] <http://sixstringlive.com/audio.htm>

[4] R. Resnick, D. Haliday, Fizyka 1, PWN Warszawa 1999, s. 504

[5] Jess J. Josephs, Fizyka dźwięku muzycznego, PWN Poznań 1970, s. 107

także: <http://ffden-2.phys.uaf.edu/211.web.stuff/billington/main.htm>

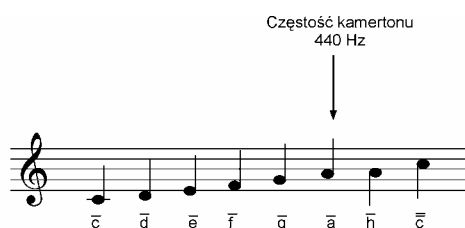
<http://www.phys.unsw.edu.au/music/guitar>

### Częstotliwości podstawowych tonów gamy

Polecamy *Foton* 48, styczeń/luty 1997, a w nim artykuły:

1. *Fizyczne podstawy muzyki. Piękno ukryte w liczbach* – Piotra Zielińskiego
2. *Fraktalne własności muzyki* – Marka Wolfa
3. *Kompozytor o twórczości komputerowej* – Krzysztofa Meyera
4. *Fizyka głosu* – Barbary Blicharskiej

Ku Państwa wygodzie przedrukowujemy tabelę:



Ton	c̄	d̄	ē	f̄	ḡ	ā	h̄	c̄̄
Częstotliwość [Hz]	264	297	330	352	396	440	495	528
Stosunki częstości	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
Nazwy interwałów (względem c̄)	Prima	Sekunda	Tercja	Kwarta	Kwinta	Seksta	Septima	Oktawa