

Rezonans jest to powiększanie (np. w celu utrzymania malejącej) **amplitudy** (, **wzmacnianie**) drgań jakiegoś ciała (np. stałego czy zamkniętej objętości gazu w postaci powietrza) przez **zewnętrzne** drgania czyli przez siłę zewnętrzną działającą nań w sposób cykliczny (ale tylko) z **częstotliwością (tzw. własną)** drgań danego ciała.

Niech np. drga czyli buja się **huśtawka** z siedzącym nań małym – jeszcze niesamodzielnym ruchowo dzieckiem. Odpowiedzialny (dorosły) **człowiek**, matka dziecka, tą huśtawkę wprawia w ruch a następnie **nie** pozwala temu ruchowi **zaniknąć** (z powodu siły **tarcia** o powietrze). Ale jak wiadomo matka musi działać ‘swoją’ siłą na huśtawkę w ściśle określonych chwilach – z pewną stałą częstotliwością. Ta częstotliwość zależy tylko od **długości** (wysokości) huśtawki a ta jest nieregulowana, ustalona przez konstruktora! (W innej ‘huśtawce’ – **wahadle zegara** ściennego jest możliwość regulacji, i to precyzyjnej!, długości wahadła. Wahadło jest pobudzane do drgań przez wymyślny mechanizm zwany **wychwytowym** będący specjalną przekładnią zębatą). Jak wiadomo, ta częstotliwość wahań huśtawki nie zależy od wartości siły z jaką działamy na huśtawkę ani od wartości maksymalnego kąta odchylenia (, który zależy od tej siły); Nie będzie np. tak, że im większa siła tym większa częstotliwość – wszakże pod warunkiem, że kąt odchylenia **nie** będzie **zbyt duży** co zostało w tym przykładzie wyeliminowane troską o bezpieczeństwo korzystającego z huśtawki dziecka niesamodzielnego...

Matka będzie działać na huśtawkę najczęściej siłą umiarkowaną, taką aby zniwelować tylko malenie amplitudy; Może **też** pchać lub ciągnąć siedzisko huśtawki siłą większą ale z **częstotliwością wielokrotnie** obniżoną, np. dwukrotnie, lecz zawsze musi się dostosować do okresu drgań (częstotliwości) huśtawki. Impulsy siły matki musi być w rezonansie (częstotliwościowym) z drganiami huśtawki. Jeśli niezmnijająca się siła matki działająca w każdym cyklu byłaby większa od siły tarcia to taki rodzaj rezonansu prowadziłby do stałego wzrostu amplitudy; Duża **amplituda** mogłaby być **niebezpieczna** – w tym przypadku dla siedzącego na niej dziecka.

Zawieśmy teraz (np. myślowo) na napiętym poziomym sznurku kilka pionowych, też napiętych poprzez obciążenia (np. też o różnych wartościach), sznurków o dwóch różnych długościach. Mamy więc **zbiór wahadeł połączonych** ze sobą **sprężystością (poprzez sznurek**, który ma sprężystość skrętną bo został wykonany z włókienek o mniejszych średnicach). Jeśli trącimy któryś z obciążników to będziemy mieli do czynienia z **rezonansem wahadeł**. <http://www.youtube.com/watch?v=IEyNrNSM5rY> Oznacza to, że w każdym cyklu trącone wahadło skręca i rozkręca sznurek poziomy (sprężysty dzięki napięciu). Te małe impulsy skrętne (niewidoczne oczywiście dla oka) są udzielane pozostałym wahadłom; Te (i tylko te), które są o tej samej długości co wahadło trącone, zaczną się wahać; Ich amplituda będzie wzrastać aż osiągnie amplitudę wahadła pierwszego (a nawet będzie większa bo wahadło pierwsze będzie miało amplitudę malejącą; Ciekawie się zachowują też fazy drgań wahadeł.)

Jak zachowują się **gałęzie na wietrze**? Drżą. Wiatr wygina gałęzie akumulując w nich energię. Energia ta w pewnej chwili jest już tak duża, że jest po krótkiej chwili oddana z powrotem do atmosfery – gałąź powraca do swojego pierwotnego kształtu. I takie całe zdarzenie może być powtarzającym się cyklem. Gałęzie są sprężyste (ale oczywiście do pewnej granicy; Silny wiatr może gałęzie połamać). Trudno tu mówić o stałej częstotliwości prowadzącej do rezonansowych złamań gdyż jest tu dużo

losowości bo i kształty gałęzi są losowe i siła wiatru jest losowa. ~~(Trudno tu też o osiągnięcie dużych wartości częstotliwości koniecznych do wytworzenia dźwięku – powyżej 16 Hz).~~

Lecz kilka **mostów** np. wiszących na świecie zostało już rezonansowo zniszczonych – z ofiarami w ludziach (Most zawiera belek a wiszący – dodatkowo wiele ewentualnych wahadeł). Głównie przyczyną jest wiatr właśnie (nad dużymi akwenami wodnymi wiatr może wiać bardziej stabilnie co do wartości i kierunku). Ale zdarzyła się i inna ciekawa przyczyna – kolumna żołnierzy maszerująca krokiem znanym z musztry; Częstotliwość kroku żołnierzy okazała się równa częstotliwości własnej drgań mostu.

Również wysokie **wieżowce** drżą – np. z powodu **drgań (fal) sejsmicznych**. Na ostatnich piętrach niektórych są bezwładnościowe mechanizmy wytwarzające ‘antydrżania’ tzn. drżania o przeciwnej fazie, które **interferują** (ale) ujemnie, antyrezonansowo, z drżaniami spowodowanymi przez trzęsienia ziemi dzięki czemu drżania są tłumione...

Częstotliwości ze wszystkich powyższych przykładów były małe – mniejsze od 16 Hz (herców). Gdy będą w granicach 16 Hz do 20 kHz (kiloherców) to w efekcie będą **słyszalne**. Niech (np. ciężki, mocny) **silnik** elektryczny będzie pracował stojąc na podłodze stropu. Strop taki może się stać **membraną** (jak w **głośniku** w kolumnie czy błoną bębenną w uchu albo błoną na bębnie); Będzie tak jeśli strop, który zawiera w sobie długie belki będące sprężynami płaskimi a więc jest sprężysty, ma własną częstotliwość ewentualnych drgań taką samą jak częstotliwość silnika (liczba obrotów na sekundę). Taki strop (zamykający pewną objętość pomieszczenia będzie zwiększał hałas silnika a przede wszystkim) może się rezonansowo zawalić!

I dochodzimy do korzystnego (wykorzystania) rezonansu częstotliwości - do **instrumentów muzycznych**, w których mogą drgać: struny (w skrzypcach pocierane jak wiatrem gałęzie, szarpane jak w mandolinie ~~czy harfie~~, czy uderzane jak w fortepianie), membrany (uderzane w perkusyjnych) albo w instrumentach dętych słupy powietrza ale bezpośrednio pobudzane do drgań przez sprężyny płaskie, które z kolei są wprowadzane w drżania przez strumień powietrza (jak np. w organkach /harmonijce ustnej/ czy organach /miechowych/) działający znów tak jak wiatr na gałęzie tyle, że z większą częstotliwością (bo ‘gałęzie’ są tu krótkie i cieńsze).



Prosta trąbka



Kamertony w układzie rezonansowym

<http://www.youtube.com/watch?v=GwySyT4RKd8>

<http://www.youtube.com/watch?v=ps4Ja3bTDKg> (Rezonansowe użycie kamertonu do pomiaru prędkości dźwięku)

Weźmy pod uwagę **kamerton widelkowy**, który wydaje dźwięk tylko o jednej częstotliwości. Składa się on przede wszystkim z rozdwójonego (w kształcie litery Y czyli przypominającego widelec) metalowego pręta. Pręt ten jest osadzony (sztywno) w prostokątnej skrzynce z cienkich deseczek nie mającej jednej ściany... Odległość między tą nieistniejącą ścianą („wirtualną”) a naprzeciwległą ścianą realną wynosi **ćwiartkę długości fali akustycznej** wytwarzanej przez kamerton. (Widelki są wzdłuż tej odległości). A skrzynka ta jest nazywana pudłem (lub wnęką) **rezonatora** (znanym np. z mandoliny czy gitary klasycznej). Widelki drgają w ten sposób, że ich oba ramiona się do siebie na przemian zbliżają i oddalają os siebie. Częstotliwość drgań wynosi 440 Hz. Częstotliwość pomnożona przez długość daje prędkość dźwięku wynoszącą dla powietrza ok. 330 m/s. Stąd długość fali = prędkość / częstotliwość czyli: $330 / 440 = 0,75$ metra; Minimalna długość wydającego dźwięk instrumentu dętego wynosi ćwiartkę długości fali (strunowego – 2 ćwiartki) dla maksymalnej częstotliwości, którą ma wytwarzać instrument. Dlatego długość rezonatora kamertonu wynosi $0,75 / 4 = \text{ok. } 0,76 / 4 = 19 \text{ cm}$. Widelki drgające przenoszą drgania na obudowę (a więc i na jej ściankę równoległą do ścianki wirtualnej), która z kolei przenosi drgania na powietrze otaczające. Wewnątrz rezonatora powstaje **fala stojąca**; Fala akustyczna odbija się od przeciwległych ścian ok.. 1650 ($330/0,19$ czyli w przybliżeniu $330/0,20$) razy w ciągu sekundy. Kamerton uderzony w jedną z dwóch części widelki będzie wydawał dźwięk (cichnący ale jeszcze) przez wiele sekund. Z każdym odbiciem od jednej ze ścian – realnej, wzrasta rezonansowo – w wyniku interferencji dodatkowo, amplituda fali stojącej; Jest tak oczywiście dlatego, że przy tej ścianie powietrze dostaje impuls energii. Ponieważ tych narastań amplitudy jest bardzo dużo w ciągu jednej sekundy więc wydaje się nam, że amplituda wzrosła natychmiast.

Oszacujmy przy okazji najkrótszą i największą długość instrumentu dętego. Najkrótsza będzie gdy do podanego już wzoru podstawimy najwyższą częstotliwość słyszalną przez ucho ludzkie: 20 kHz; $\Lambda/4 = 0,25 * (330/20\ 000) = 0,004 \text{ m}$ czyli 4 milimetry! Praktycznie możemy jednak podstawić górną granicę 12 kHz. Wtedy mamy prawie 7 mm. Gdy podstawimy minimalną częstotliwość 16 Hz to oczywiście otrzymamy maksymalną długość instrumentu: ponad 5 metrów! ($5,156 \text{ m}$ ale trzeba pomnożyć ten wynik przez dwa gdy mamy do czynienia z rezonatorem otwartym obustronnie, w którym powstają 2 ćwiartki długości fali, otrzymując $10,313 \text{ m}$ czyli 20 Hz). Oczywiście takie instrumenty są nieporęczne (Nie tylko długie ale i ciężkie co wynika nie tylko z długości ale i z zastosowanego materiału, którym jest oczywiście drewno) ale są w arsenale instrumentów ludowych (trombity – najdłuższą na świecie $8,35 \text{ m}$ stworzył, jak podaje Wikipedia, Józef Chmiel z Zaolzia). Przy

korzystaniu z takiego instrumentu trzeba podeprzeć jego koniec na gruncie lub ramieniu pomocnika (Przypomina to podpieranie teleobiektywów fotograficznych)



Jeśli więc nie chcemy rezygnować z niskich dźwięków to możemy skorzystać z takiej zalety drgających słupów powietrza, której nie posiada drgająca struna – możemy je zwinąć,

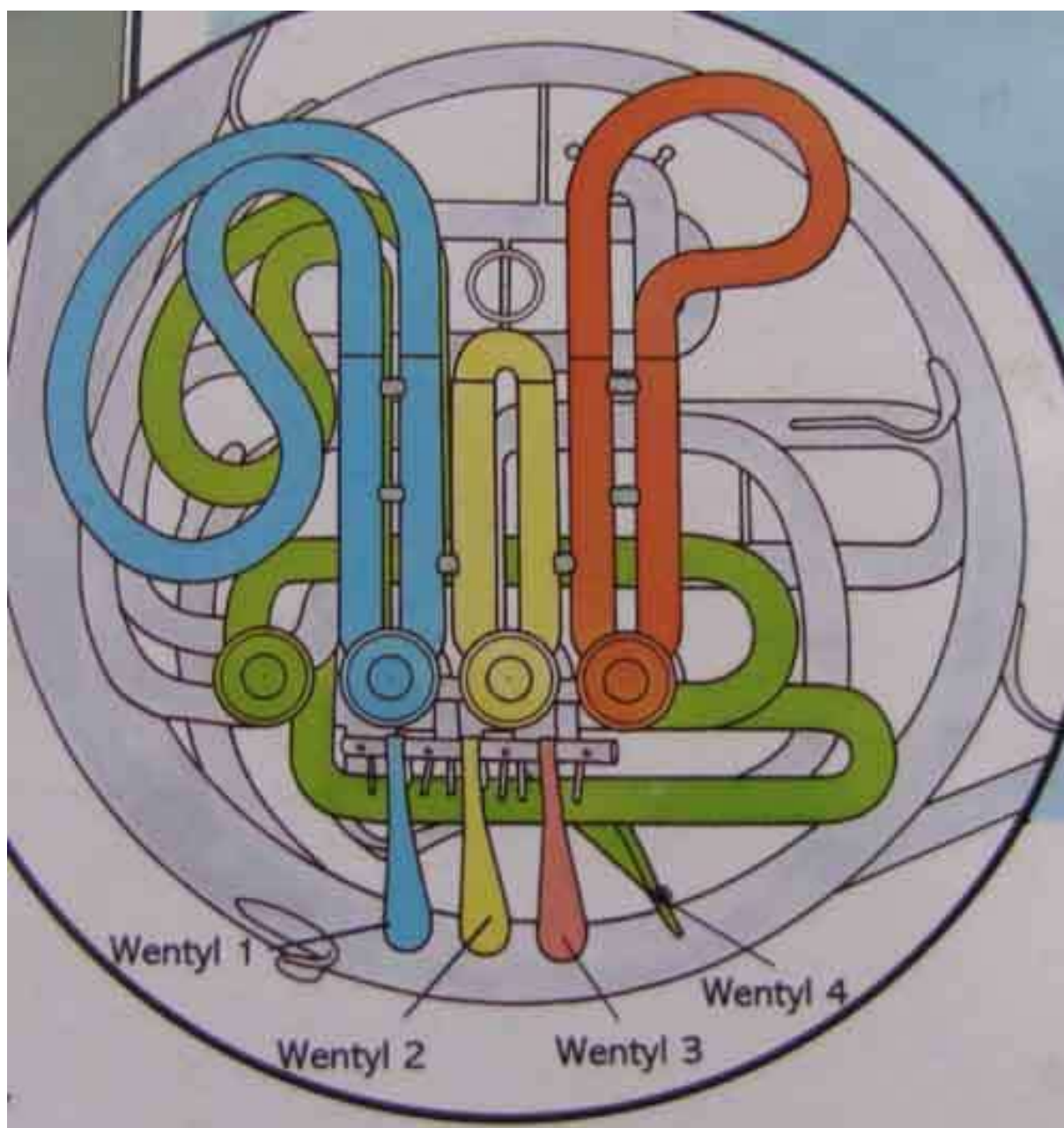


Drewniany kontrafagot (fagot basowy - prawie 5m drogi akustycznej czteroczęściowej)

np. w spirale. Takie rezonatory, w które te słupy powietrza trzeba obudować łatwo jest wykonać z blachy. Stąd mamy bardzo niekiedy skomplikowane kształty instrumentów dętych blaszanych: waltorni,



Waltornia



Waltornia (Róg) – Drogi pneumatyczne dołączane zaworami do głównego fonowodu (Róg posiada tu 4 wentyle; Są też 3-wentylowe. Czwarty wentyl zamyka odcinek rur). Róg składa się z ponad 3,7 m srebrnych lub mosiężnych rur.

puzonu basowego itp. Przechodząc z obiektu jednowymiarowego na dwuwymiarowy zmniejszyliśmy wymiar $2 \cdot \pi$ razy (co najmniej, jeśli słup powietrza nie musi być za szeroki), czyli z 6 metrów robi się tylko metr... Instrument może być już nawet mobilny – muzyk może go nałożyć na siebie (na ramię) jak suzafon...



Suzafon

Żeby stworzyć wielotonowe instrumenty z jednotonowych rezonatorów trzeba w zasięgu grającego umieścić wiele rezonatorów o różnych długościach (np. organki)



Budowa harmonijki ustnej (Są 2 rzędy po 8 par otworów / komór rezonansowych. 2 rzędy podwajają amplitudę / głośność. W 2 płytach mosiężnych są zamocowane kołeczkami sprężyny płaskie – blaszki stroikowe. Na zewnątrz płyt, czyli na wierzchu górnej i pod spodem dolnej, blaszki te współtworzą komory rezonansowe nieparzyste a wewnątrz – parzyste; Wolne końce sprężyn nieparzystych zwrócone są do grającego a parzystych – od grającego. Blaszkę parzyste w spoczynku przymykają komory a nieparzyste – otwierają. Do komór nieparzystych dmucha się powietrze a z parzystych – wciąga – są nieco inne częstotliwości. Blaszkę i komory mają coraz to mniejsze długości – od ok. 16 do 10 mm a więc dźwięki są coraz wyższe; Zakładając najprostsze drgania sprężyn tzn. takie, że ich długość to ćwiartka długości fali mielibyśmy dla najkrótszej sprężyny najwyższy dźwięk $8,3 \text{ kHz} = 332/0,04$; A najniższy – $5,2 \text{ kHz}$.)

albo konstrukcyjnie umożliwić zmianę długości (skracanie) jednego rezonatora. W tym drugim przypadku zmiana długości może być ciągła jak np. w puzonie



Puzon basowy

albo skokowa jak np. we flecie. Przeciętnemu człowiekowi łatwiej oczywiście byłoby uzyskać powtarzalność dźwięków na flecie.



Flet poprzeczny klapowy (może być otworowy lub zamknięty)



Flet prosty basowy barokowy

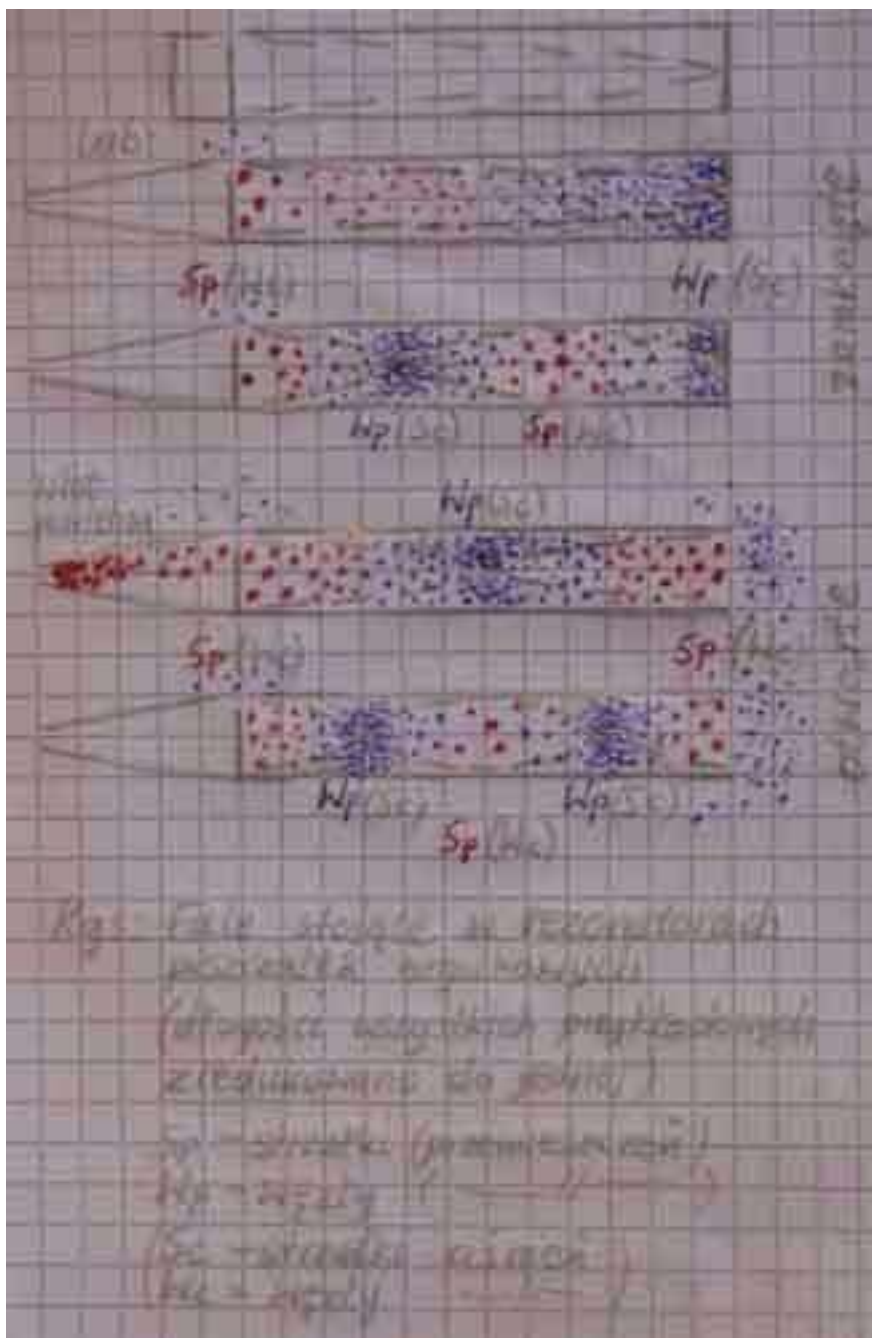


Flet prosty renesansowy (podnieszczony) – rozłożony na 2 części

Flet może być prosty lub poprzeczny. Flet jest rezonatorem obustronnie otwartym. We flecie wdmuchiwane powietrze (uformowane w strumień o przekroju prostokątnym) rozdziela się na 2 strumienie gdy pada (dokładnie) na ostrą krawędź klina będącego odpowiednikiem sprężyny płaskiej z organek. Krawędź taka powoduje wtedy niestabilność strumieni powietrza. Jeden ze strumieni opuszcza zaraz (klin stanowi jednocześnie przewodnicę powietrza) instrument przez szczelinę przy krawędzi a drugi strumień opuści instrument dopiero po przyczynieniu się do (powstania i) trwania wewnątrz instrumentu fali stojącej (mikropowiększeniu amplitudy drgań) (i) (odbiciu się od końca instrumentu). (Trudniej to wszystko uzyskać – odpowiednio zadąć - we flecie poprzecznym)

Gdy „zawory” czyli otwory we flecie są normalnie otwarte to długość efektywna rezonatora jest najkrótsza, ćwiartka długości fali (a stąd i długość fali) stojącej jest więc też najkrótsza czyli wydobywany dźwięk ma największą częstotliwość czyli jest najwyższy. Załóżmy, że nie zmieniamy nic w sposobie dęcia (aby nie wzrastała liczba ćwiartek fali) i zastępujemy „na stałe” (na dłużej) kolejnymi palcami kolejne otwory (jest ich 7 - 8). Wtedy długość efektywna rezonatora wzrasta a więc wzrasta ćwiartka długości fali a więc i cała długość fali i otrzymujemy coraz niższe dźwięki bo coraz niższe są częstotliwości.

Fala stojąca w rezonatorze kamertonu ma jeden **węzeł** oraz jedną **strzałkę** (brzusiec). Węzeł jest to obszar (prostokąt w tym przypadku), w którym niema drgań a strzałka jest to prostokątne pole, w którym amplituda drgań jest maksymalna. Strzałka jest przy ścianie nieistniejącej a węzeł jest przy ścianie naprzeciwległej. Cząsteczki gazów składowych powietrza znajdujące się w strzałce przekazują swoje bardzo duże drgania powietrzu otaczającemu a więc i w nim powstają rozchodzące się drgania czyli fala (już biegnąca). Fala ta odbierana jest przez nasze uszy jako dźwięk wzmocniony (Same widełki, bez rezonatora, też są słyszalne ale cicho). ... <http://www.youtube.com/watch?v=y6nMKHqU2Qg> (modelowanie fali podłużnej - jaką jest dźwiękowa – na sprężynie śrubowej)



Linia przerywana to analogia fali stojącej poprzecznej – w strunowych instrumentach http://www.youtube.com/watch?v=i_InDK1IH04 (fala stojąca na sznurku)

Gdyby długość rezonatora nie była dopasowana i na jego koniec (wylot) natrafiłoby nie maksymalne rozrzedzenie ale np. maksymalne zagęszczenie powietrza wewnętrznego to nie nastąpiłoby **odbicie powietrza wewnętrznego od zewnętrznego**, mającego gęstość o wartości średniej czyli wyższą od aktualnie rozrzedzonego wewnętrznego; Nastąpiłoby bezpowrotne jego wyjście z rezonatora. Analogia: Kulka nie zatrzyma kuli nie mówiąc o odbiciu kuli w przeciwną stronę.

Jednak gdy długość rezonatora jest prawidłowa to na powietrze zewnętrzne (o gęstości cały czas średniej) natrafi powietrze wewnętrzne aktualnie rozrzedzone i odbicie nastąpi. Nierozrzedzony stan powietrza zewnętrznego oznacza, że jest stosunkowo dużo jego cząstek we wszystkich kierunkach a

więc i ciasno jest („masywnie”) w kierunku poosiowym z rezonatorem. Analogia: Kulka odbije się od kuli ze zmianą zwrotu prędkości.

O ścianę rzeczywistą (jeśli jest, bo często obie są wirtualne) cząsteczki gazów powietrznych odbijają się tak, że zagęszczają się przy niej (wpadając na siebie) a więc od ściany realnej odbijają się zagęszczenia.

Mówimy, że przy ścianie realnej następuje zmiana **fazy** przy odbiciu a po odbiciu od ściany wirtualnej zmiana fazy nie następuje. Zmiana fazy może być rozumiana przestrzennie lub czasowo.

Przy fazie traktowanej **przestrzennie** obierzmy sobie wewnątrz rezonatora jakiś mikroobszar blisko ściany wirtualnej i jakiś mikroobszar przy ścianie realnej. Niech np. będą te obszary odległe od ścian o pół mm. Fala dźwiękowa drogę od każdego z tych ‘punktów’ do swej ściany i z powrotem, czyli 1 mm pokona w czasie $1 \text{ (mm)} / 330000 \text{ (mm/s)} = 3 \text{ mikrosekundy}$.

Przy ścianie *rzeczywistej*, w danym mikroobszarze, w pewnej chwili pierwszej, przed (jakimś kolejnym, n-tym) odbiciem fali następuje zagęszczanie a po upływie 3 mikrosekund czyli w pewnej chwili drugiej, po odbiciu, następuje rozrzedzenie. Zmienił się więc trend (zmieniła tendencja) – o 180 stopni jak to też określa się proroczno w mowie codziennej.

Przy ścianie *wirtualnej* w pierwszej chwili, przed odbiciem, będzie w danym mikroobszarze rozrzedzenie a w drugiej chwili, po odbiciu, będzie również rozrzedzenie; Trend się nie zmienił czyli faza jest ta sama.

Przy fazie traktowanej **czasowo** ustalmy sobie jakiś czas pozostały do odbicia, np. 1 mikrosekunda.

W tej chwili przy ścianie *wirtualnej* stwierdzimy w jednej – padającej n-ty raz fali rozrzedzenie a w drugiej fali – odbijającej się po raz n-1 rozrzedzenie również. Zmiany fazy nie ma.

W tej chwili przy ścianie *rzeczywistej* stwierdzimy w pierwszej, padającej fali zagęszczanie a w drugiej fali, odbitej – rozrzedzenie. Zmiana fazy jest.

Jeśli nastąpi odbicie powietrza wewnętrznego od powietrza (zewnątrznego) a nie od ściany to będzie ono łagodne. Można tu pokazać **analogię** do odbicia piłki **tenisowej** (sprężystej jak wiadomo) od rakiety (z również sprężystymi strunami – lżejszymi od piłki, mającymi od piłki mniejszą gęstość) a odbicia tej piłki od nawierzchni twardej (betonu). Jak podaje Krzysztof Ernst (Fizyka sportu) piłka tenisowa puszczone swobodnie z wysokości 1 m odbije się od betonu na wysokość ok. 60 cm a gdy na tym betonie położymy raketę to piłka może się odbić na wysokość 80 cm.

Gdy piłka odbija się od betonu to się deformuje (chwilowo); Na deformację pójdzie część energii kinetycznej piłki zamienionej następnie w energię cieplną (czyli straconą bezpowrotnie). Prędkość piłki po odbiciu będzie więc mniejsza.

Gdy piłka odbija się od strun rakiety to struny te odkształcają się chwilowo sprężyste akumulując tą część energii, która by poszła na deformację piłki przy betonie a następnie ta energia oddawana jest

piłce tuż po odbiciu. Okazuje się, że jeśli struny są słabiej naciągnięte (do pewnej granicy) to piłka po odbiciu będzie miała prędkość większą niż odbita przy naciągu sztywnym.

Przykłady instrumentów strunowych



Lutnia i



Banjo – instrument z membraną