



KAPITAŁ LUDZKI  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Człowiek – najlepsza inwestycja

# FENIKS

## Wykłady z pokazami, UJK, cz. II b

### Drgania i fale

**Marek Pajek**

*Instytut Fizyki  
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy  
Jana Kochanowskiego w Kielcach*

(pisemna wersja dwugodzinnego wykładu plenarnego z pokazami  
z II semestru zajęć)

Film z wykładu: [www.feniks.ujk.edu.pl/index.php/pol/Multimedia/Filmy/UJK](http://www.feniks.ujk.edu.pl/index.php/pol/Multimedia/Filmy/UJK)



- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomagania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

Projekt współfinansowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

## Część B – druga godzina wykładu z pokazmi

### Fale

Dyskutowane dotychczas drgania odnosiły się do wzbudzeń jednego wybranego układu. Co się jednak dzieje, gdy wzbudzimy drgania w jednym punkcie ośrodka sprężystego (sprężyny, kawałka metalu, powietrza, powierzchni wody)? Otóż drgania w jednym punkcie ośrodka powodują wzbudzanie drgań w sąsiednich punktach i w efekcie w tym ośrodku obserwujemy rozchodzące się drgania zwane falą. Widzimy więc, że warunkiem rozchodzenia się fal jest istnienie ośrodka sprężystego, w którym fala rozchodzi się z charakterystyczną dla tego ośrodka prędkością. Najprościej falę sprężystą można zademonstrować przy pomocy długiej, cienkiej **sprężyny, którą rozciągamy poprzecznie** w jednym miejscu i puszczamy. Obserwujemy wtedy biegnącą falę, zwaną *poprzeczną*, gdyż kierunek drgań jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali. Powtarzając to doświadczenie z grubą sprężyną, którą możemy łatwo chwilowo ścisnąć lub rozciągnąć w jednym miejscu, możemy zademonstrować biegnące **fale podłużne**, dla których kierunek drgań jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali. W ten sposób pokazujemy, że fale w ośrodkach sprężystych mogą być podłużne lub poprzeczne. Wykonując pokazy z rozciągniętymi długimi sprężynami można zauważyć, że fala wzbudzona w jednym końcu sprężyny po dotarciu do jej drugiego końca ulega odbiciu i wraca. Jest to **zjawisko odbicia fali** na granicy ośrodka. Wzbudzając dodatkowe fale widzimy że fale biegnące i odbite powracające nakładają się na siebie, co nazywamy zjawiskiem **interferencji** fal. W wyniku interferencji maksima i minima fal mogą się wzmacniać lub wygaszać, tworząc niekiedy skomplikowany obraz interferencji, który można zademonstrować na rozciągniętej sprężynie wzbudzając w niej **chaotyczne drgania**. Gdy drgania wzbudzamy regularnie z odpowiednio dobraną do długości sprężyny częstością, możemy uzyskać specyficzny obraz drgań. Sprężyna wykonuje drgania, ale położenia maksimów i minimów nie przemieszczają się w przestrzeni. Jest to tak zwana **fala stojąca**, będąca wynikiem interferencji fali biegnącej ( w przód) i odbitej (do tyłu) w ośrodku o skończonej długości. Warto odnotować, że długość fali stojącej jest jednoznacznie związana z jej prędkością rozchodzenia się i długością ośrodka.

Własność polaryzacji fali poprzecznej pokazujemy z pomocą długiej (na kilka metrów) drgającej gumy, przewleczonej przez drewniane **polaryzatory**, tj. wąskie ramki drewniane umożliwiające drgania tylko w jednym kierunku, wzdłuż szczeliny. Fala wzbudzona na gumie po przejściu przez taki polaryzator jest spolaryzowana w wybranym kierunku. Ustawieniu dwóch polaryzatorów w tym samym kierunku przepuszcza falę, natomiast ustawienie ich prostopadle całkowicie wygasza przechodzącą falę.

Dobrym przykładem fal podłużnych są fale dźwiękowe (akustyczne), a więc dobrze nam znane dźwięki rozchodzące się w powietrzu. O tym że dźwięki są falami rozchodzącymi się w ośrodku sprężystym (powietrzu) przekonuje nas następujące doświadczenie. Pod szklanym kloszem umieszczamy głośnik podłączony do generatora dźwięku, który jest dobrze słyszalny mimo przykrycia kloszem. Po **odpompowaniu powietrza spod klosza powietrze zanika**, co potwierdza fakt, że powietrze jako ośrodek sprężysty jest niezbędne dla rozchodzenia się fal dźwiękowych.

Inne proste doświadczenie obrazujące, że fala dźwiękowa jest drganiem powietrza wykonujemy z pomocą kawałka **plastikowego węża**. Wykonywanie nim szybkiego ruchu obrotowego powoduje powstanie głośnego „gwizdu”. Natomiast gdy zatkamy koniec węża korkiem, dźwięk, mimo takich samych obrotów, nie powstaje. Tak więc dźwięk jest generowany przez drgania słupa powietrza wewnątrz węża.

A jak możemy się przekonać że fala dźwiękowa jest falą podłużną? W tym celu badamy rozchodzenie się dźwięku w rurze posiadającej na jednym z końców źródło dźwięku (głośnik) podłączony do generatora dźwięku o regulowanej częstotliwości. Przesuwając ruchomy tłok w rurze obserwujemy (słyszymy) mocniejsze dźwiękowe fale stojące, podobnie jak w doświadczeniu ze sprężyną, dla ściśle określonych położenia tłoka. Fale dźwiękowe są więc falami podłużnymi, dla których maksima (minima) odpowiadają obszarom powietrza o zwiększonym (zmniejszonym) ciśnieniu. Możemy się o tym przekonać dobierając taką częstotliwość dźwięku, aby wytworzyć w rurze falę stojącą posiadającą maksimum na jej końcu. **Zapalona świeczka umieszczona przy końcu rury** odchyła swój płomień na zewnątrz rury, co świadczy o zwiększonym ciśnieniu powietrza w tym obszarze, a zatem podłużnej naturze fal dźwiękowych.

Ciekawą demonstracją związku pomiędzy częstotliwością, prędkością rozchodzenia i rozmiarem obszaru wzbudzania dźwiękowych fal stojących jest pokaz mówienia w atmosferze helu. Otóż, po **napuszczeniu pewnej ilości helu do gardła** mówimy „wyższymi częstotliwościami”, zupełnie jak krasnoludki, co wywołuje rozbawienie słuchaczy. Wynika to z faktu, że mowa ludzka polega na wzbudzaniu fal stojących w strunach głosowych wzbudzających rezonansowo fale dźwiękowe w gardle. W helu, w którym dźwięk rozchodzi się prawie trzykrotnie szybciej niż w powietrzu ze względu na mniejszą masę atomów helu, mówimy więc wyższymi częstotliwościami.

Działanie klasycznych instrumentów muzycznych polega na wzbudzaniu stojących fal dźwiękowych w rezonatorach instrumentów, które stanowią częściowo zamknięte obszary powietrza, na przykład pudło rezonansowe gitary czy skrzypiec, wydrążone wnętrze fletu. W instrumentach strunowych drgania strun o określonej częstotliwości (fale stojące) wzbudzają rezonansowo drgania akustyczne, natomiast w instrumentach dętych wdmuchiwane powietrze o określonej prędkości wzbudza rezonansowo dźwiękowe fale stojące.

Interesującą demonstracją skomplikowanych kształtów **fal stojących w membranach** jest ich wizualizacja przy użyciu kwadratowej metalowej płyty, pobudzanej w jej środku do drgań generatorem o regulowanej częstotliwości. Rozsypane równomiernie na płycie kryształki cukru, po dobraniu częstotliwości spełniającej warunki fali stojącej dla metalowej płyty, grupują się w mniej lub bardziej złożone linie. Linie te odpowiadają liniom wygaszania fali stojącej – w tych miejscach membrana nie drga, a więc kryształki cukru pozostają na swoim miejscu, podczas gdy obszary drgające membrany „usuwają” cukier, odrzucając kryształki na bok. Obserwowane, często bardzo złożone, figury geometryczne odzwierciedlają złożoną naturę interferencyjną dwuwymiarowych fal stojących, jak również zależność od kształtu i symetrii obiektu oraz punktu wzbudzania drgań.

## Dyfrakcja i interferencja fal

Obserwując skomplikowane fale rozchodzące się na powierzchni wody po wrzuceniu do kamienia poznajemy dwa bardzo ważne zjawiska falowe: uginanie fal, zwane *dyfrakcją* i nakładanie się fal, zwane *interferencją*. W istocie oba te zjawiska zachodzą najczęściej jednocześnie, gdyż zazwyczaj interferują ze sobą fale powstałe w wyniku dyfrakcji. Oba te procesy można dobrze zaobserwować przy pomocy urządzenia zwanego **falownicą**, będącego płaskim naczyniem wypełnionym wodą i wyposażonym w ruchomą iglicę wytwarzającą fale koliste w momencie jej zetknięcia z powierzchnią wody. Dodatkowo, odpowiednie oświetlenie wody umożliwi dobrą obserwację wytwarzanych fal na ekranie.

Pojedyncze lub cykliczne uderzenia iglicy powodują wytwarzanie wyraźnych **fal kolistych** na powierzchni wody. Uderzanie układu wielu iglic (położonych wzdłuż linii prostej) i następnie długiego pręta zastępującego układ iglic, powoduje wytworzenie **fali płaskiej** jednocześnie demonstrując, że fala płaska może być wynikiem dodawania (interferencji) wielu fal kolistych wytwarzanych synchronicznie wzdłuż linii prostej.

Dyfrakcję najprościej demonstrujemy umieszczając w falownicy przeszkodę z niewielką szczeliną. Wytworzona fala płaska docierając do szczeliny tworzy nową falę kolistą, co jest dobrą ilustracją **zasady Huygensa** dla rozchodzenia się fal w ośrodku, jak też pokazem istoty dyfrakcji (uginania) fal. Nowa fala kolista rozchodzi się za przeszkodą we wszystkich kierunkach, w przeciwieństwie do padającej na szczelinę fali płaskiej rozchodzącej się w jednym kierunku prostopadłym do płaskiego czoła fali.

Zastępując pojedynczą szczelinę **układem dwóch szczelin** możemy pięknie zademonstrować zjawisko dyfrakcji i interferencji, a więc istotę bardzo ważnego w fizyce, w szczególności w mechanice kwantowej, eksperymentu Younga. W pokazie tym biegnąca fala płaska wytwarza na układzie dwóch szczelin dwie fale koliste, które rozchodząc się w różnych kierunkach nakładają się na siebie i tworzą złożony obraz interferencyjny z wyraźnie zaznaczonymi kierunkami wzmocnienia i wygaszania fal. W obrazie tym widać również charakterystyczne dla interferencji oscylacje intensywności fali. Zademonstrowane zjawiska dyfrakcji i interferencji są w istocie wyróżnikiem zjawisk falowych. Inaczej mówiąc, obserwacja dyfrakcji lub interferencji jest potwierdzeniem falowej natury zjawiska, z którym mamy do czynienia.

W wykładzie o falach nie można pominąć światła, które jest w istocie falą elektromagnetyczną. Osobliwość fal elektromagnetycznych, polegająca na tym, że rozchodzą się one w próżni, a nie w sprężystym ośrodku materialnym, powoduje, że światłu poświęcimy osobny wykład. Jednak już teraz możemy zademonstrować, że światło jest falą. Jak to zrobić? Wystarczy pokazać, że światło ulega dyfrakcji i interferencji, co będzie świadczyć o jego naturze falowej. W tym celu silną wiązkę światła ze **wskaźnika laserowego** kierujemy ekran poprzez **wąską szczelinę** o regulowanej szerokości. Przy otwartej szeroko szczelinie na ekranie obserwujemy pojedynczy świecący punkt w miejscu padania wiązki na ekran (odpowiadający rozmiarem przekrojowi wiązki). Gdy szczelinę stopniowo zmniejszamy, w pewnym momencie na ekranie pojawia się układ wielu świecących punktów rozmieszczonych

na prostej leżącej w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku szczeliny. Obserwujemy teraz **obraz dyfrakcyjny** wytworzony na szczelinie w wyniku zjawisk dyfrakcji i interferencji ugiętego światła. Im węższa jest szczelina, tym większe są odległości między poszczególnymi punktami. W ten sposób potwierdzamy, że światło - ulegając dyfrakcji i interferencji – jest falą. Szersze omówienie interesujących zjawisk dotyczących natury światła przedstawione będzie na kolejnym wykładzie.

## **Wykaz pokazów, część b)**

### **Fale**

- 1) Rozchodzenie się fali poprzecznej w długiej sprężynie, odbicie fali
- 2) Fale stojące poprzeczne w długiej sprężynie
- 3) Fale podłużne w długiej sprężynie
- 4) Fale podłużne wzbudzane generatorem w sprężynie zrzutowane na ekran

### **Rezonans**

- 1) Rezonans drgań dwóch identycznych kamertonów, przekazywanie drgań
- 2) Brak rezonansu dwóch kamertonów o różnych częstościach własnych
- 3) Rezonans połączonych wahadeł na niciach o tej samej długości
- 4) Rezonans wahadeł z ciężarków na giętkich prętach
- 5) Katastrofa mostu w Tacoma (<http://www.youtube.com/watch?v=j-zczJXSxw>)

### **Akustyka**

- 1) Model gitary i skrzypiec, cymbałki, muzyczne instrumenty strunowe
- 2) Model piszczałki
- 3) Dźwięk z obracanej rurki, z otwartym i z zamkniętym końcem
- 4) Rura Kundta, węzły i strzałki fali stojącej, zdmuchiwanie świeczki przez różnicę ciśnień
- 5) Źródło dźwięku pod kloszem z wypompowanym powietrzem
- 6) Mowa w atmosferze helu
- 7) Balonik wypełniony helem

### **Interferencja i dyfrakcja**

- 1) Falownica, fale kuliste na powierzchni wody
- 2) Interferencja dwóch fal kulistych
- 3) Fale płaskie w falownicy, zasada Huygensa
- 4) Dyfrakcja w falownicy na szczelinie

### **Drgania membrany**

- 1) Wizualizacja drgań kwadratowej membrany, wzbudzanej generatorem częstości, poprzez posypanie jej cukrem. Obserwacja linii węzłów

### **Fale świetlne**

- 1) Obserwacja wiązki lasera w kurzu
- 2) Dyfrakcja wiązki laserowej na szczelinie
- 3) Dyfrakcja wiązki laserowej na siatce dyfrakcyjnej



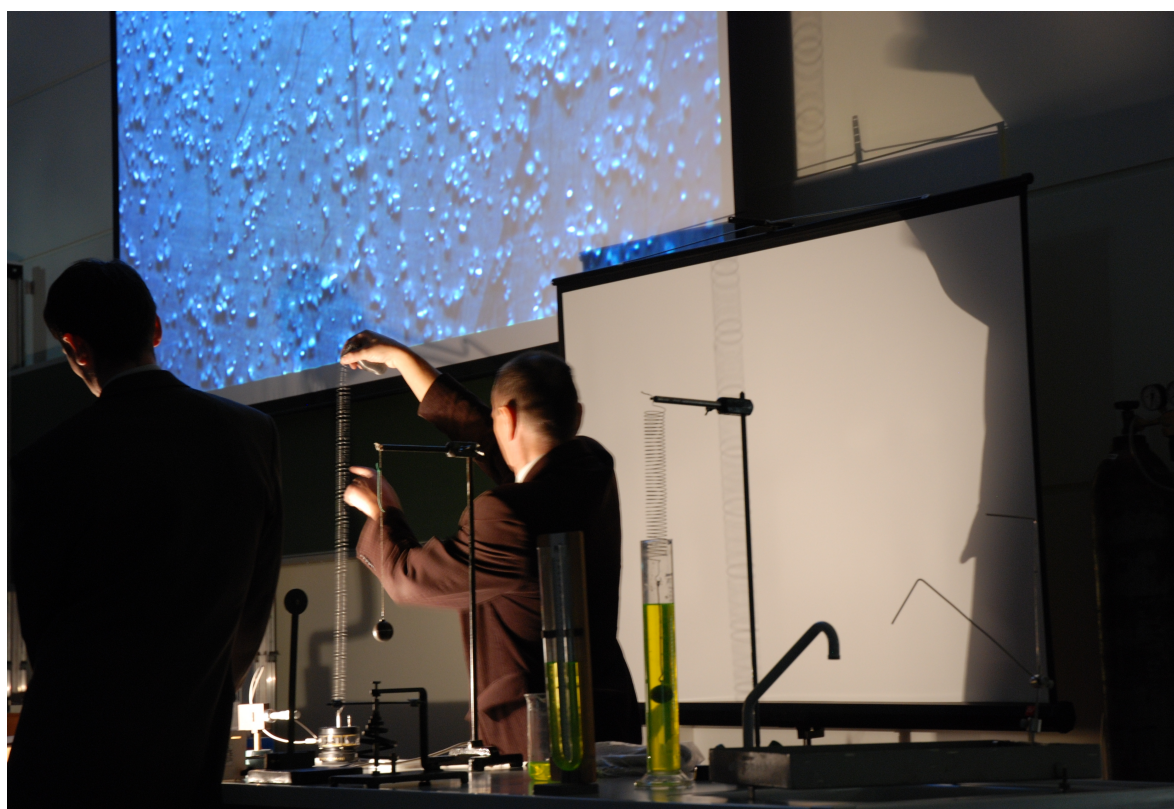
Na twarzach maluje się jednak niedowierzenie...



Projekcja filmiku z rezonansową katastrofą mostu w Tacoma



Koordinator UJK też pilnie uważa!



Stojąca fala podłużna w drgającej sprężynie i jej cień na ekranie