

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA



PODSTAWY DRGAŃ I AEROELASTYCZNOŚCI

Dr inż. Franciszek Dul

WPROWADZENIE

***KILKA PRZYKŁADÓW
DRGAŃ...***



Katastrofa mostu Tacoma



Rezonans naziemny śmigłowca



Flatter szybowca

Drgania i aeroelastyczność... o czym to jest?

- Przedmiot ten stanowi połączenie dwóch przedmiotów wykładanych zazwyczaj oddzielnie
- **Drgania** obejmują szeroki zakres zagadnień:
 - ogólne aspekty drgań układów fizycznych,
 - ... a w szczególności - *drGANIA konstrukcji lotniczych*,
 - dynamikę maszyn,
 - przeciwdziałanie skutkom drgań,
 - stateczność drgań i wiele innych...
- **Aeroelastyczność** lotnicza zajmuje się badaniem drgań konstrukcji odkształcalnych w opływie i obejmuje:
 - drGANIA konstrukcji lotniczych,
 - mechanikę płynów (aerodynamikę nieustalona),
 - zagadnienia aeroelastyczne dla samolotów, śmigłowców i rakiet.
- **Aeroelastyczność** dotyczy nie tylko lotnictwa:
 - aeroelastyczność budowli,
 - hydroaeroelastyczność maszyn przepływowych.

Drgania i aeroelastyczność... co to jest?

- Są to przedmioty wykładane na wszystkich szanujących się wydziałach lotniczych (MIT, Stanford, Berkeley, Princeton, MEiL)
- Łączą najważniejsze działy mechaniki (!):
 - dynamikę,
 - wytrzymałość materiałów,
 - mechanikę płynów (na dodatek nieustaloną!)
- Są bardzo zaawansowane matematycznie:
 - równania różniczkowe cząstkowe i zwyczajne,
 - teoria stateczności,
 - teoria zmiennej zespolonej,
 - zagadnienia własne,
 - teoria potencjału i równania całkowe,
 - metody numeryczne...
- Mają zastosowania w praktyce (projektowanie, przepisy lotnicze!)
- *...a poza tym są naprawdę fascynujące!*

Drgania i aeroelastyczność...

Czego ma nauczyć?

Przede wszystkim - ma dać ogólne pojęcie o drganiach oraz zjawiskach aeroelastycznych...

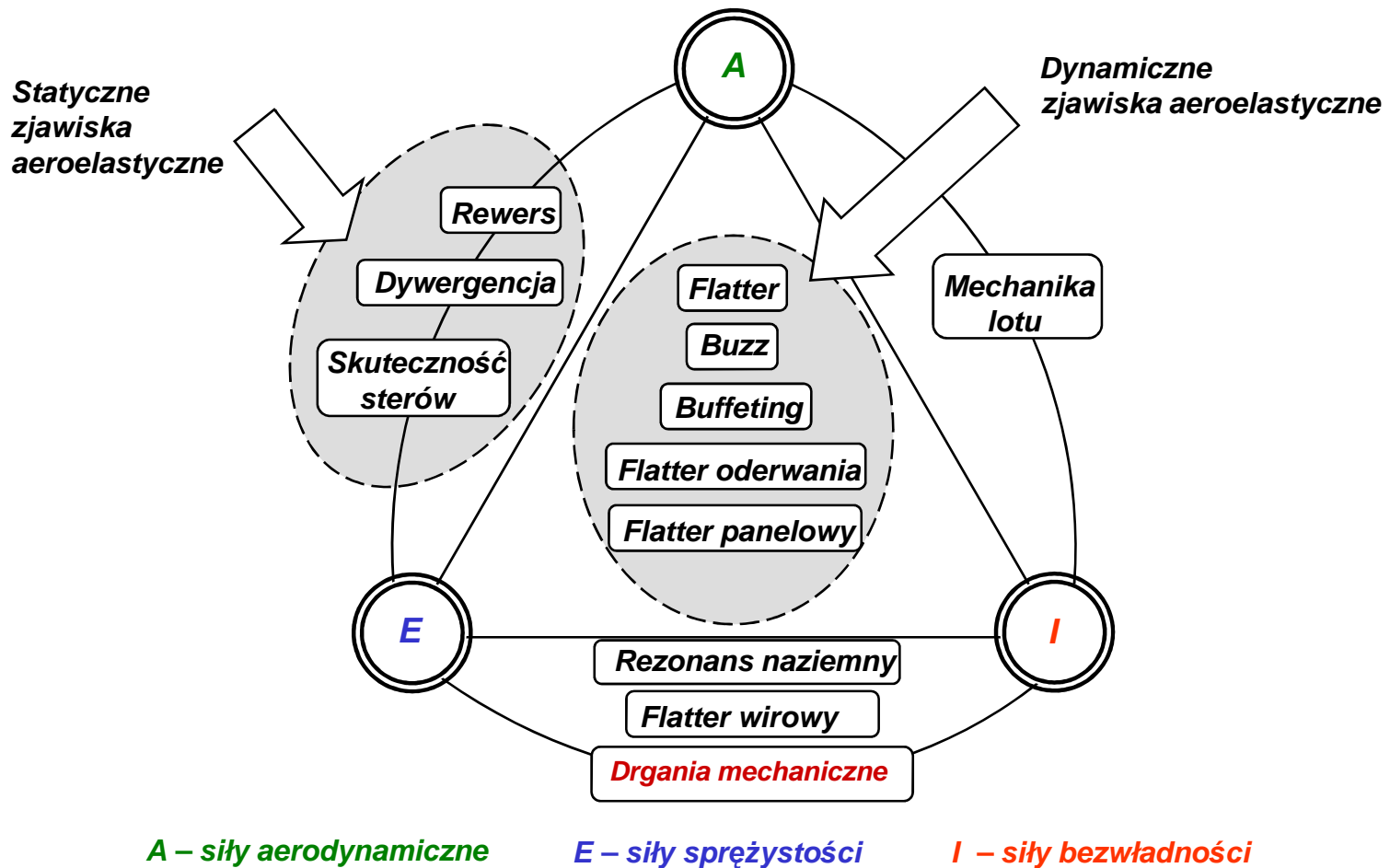
- aby student MEL-u nie nazywał wszystkich drgań „rezonansem”,
- aby nie myślał, że każdy ruch periodyczny to są drgania,
- aby nie mylił częstości z częstotliwością,
- aby nie myślał, że gdy skrzydło się ugina, to jest to zawsze „flutter”
- aby miał chociaż ogólne pojęcie o różnych mechanizmach drgań,
- aby umiał wyznaczyć podstawowe cechy drgań, np. częstość,
- aby znał podstawowe zjawiska aeroelastyczne,
- aby wiedział, dlaczego są one niebezpieczne i jak im zapobiegać,
- aby wiedział, co to są próby rezonansowe i po co się je przeprowadza,
- aby wiedział, co to są wartości własne i wektory własne,
- i w końcu - aby nieobce były mu najważniejsze metody matematyczne służące do analizy drgań.

Drgania i aeroelastyczność

Plan przedmiotu

- 1 Wprowadzenie
- 2 Drgania
 - 2.1 Drgania układów o jednym stopniu swobody.
 - 2.2 Drgania parametryczne, samowzbudne i losowe.
 - 2.3 Drgania układów o wielu stopniach swobody.
 - 2.4 Drgania układów ciągłych (belki, płyty i powłoki).
 - 2.5 Drgania konstrukcji lotniczych.
- 3 Aerodynamika nieustalona
 - 3.1 Obciążenia nieustalone. Współczynniki flatterowe.
 - 3.2 Metody panelowe.
 - 3.3 Reakcje na podmuch.
- 4 Aeroelastyczność
 - 4.1 Zjawiska aeroelastyczne statyczne (dywergencja i rewers).
 - 4.2 Zjawiska aeroelastyczne dynamiczne (flutter).
 - 4.3 Złożone zagadnienia aeroelastyczne (buzz, buffeting, flutter wirowy, flutter panelowy).
 - 4.3 Aeroelastyczność śmigłowców.
 - 4.4 Symulacyjna analiza aeroelastyczna.
 - 4.5 Aeroelastyczność w przepisach lotniczych.
 - 4.6 Aeroelastyczność w praktyce inżynierskiej.

Drgania i zjawiska aeroelastyczne



Trójkąt Collara

Literatura

- [Osiński] Osiński, J.; *Teoria drgań*, PWN, Warszawa, 1978.
- [ArPieSz] Arczewski, K., Pietrucha, J. Szuster, J.T.; *Drgania układów fizycznych*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2008.
- [Awrej] Awrejcewicz, J.; *Drgania deterministyczne ukłaów dyskretnych*, WNT, Warszawa, 1996.
- [Leyko] Leyko, J.; *Mechanika ogólna*, t.2, PWN, Warszawa, 2004.
- [GutSw] Gutowski, R., Świetlicki, W.A.; *Dynamika i drgania układów mechanicznych*, PWN, Warszawa, 1986.
- [Kaliski] Kaliski, S. (red.); *Drgania i fale*, PWN, Warszawa, 1986.
- [CoulJef] Coulson, C.A., Jeffrey, A.; *Fale. Modele matematyczne*, WNT, Warszawa, 1982.
- [Hartog] Den Hartog, J.P.; *Mechanical vibrations*, McGraw-Hill, NY, 1956.
(Republished, Dover Publ., 2001)
- [Meir] Meirovitch, L.; *Fundamentals of vibrations*, McGraw-Hill, NY, 1986.

Literatura

- [BAH] Bisplinghof, R.L., Ashley, H., Halfman, R.L.; *Aeroelasticity*, Addison-Wesley, Cambridge, Mass. 1955. („Bible of Aeroelasticians”)
- [BA] Bisplinghof, R.L., Ashley, H.; *Principles of Aeroelasticity*, John Wiley, New York, 1962.
- [Dowell] Dowell, E.H., Curtiss, H.C., Scanlan, R.H., Sisto, F.; *A modern course in aeroelasticity*, Sijthof & Noordhoff, Alpen aan den Rijn, 2004.
- [Balak] Balakrishnan, A.V.; *Aeroelasticity*, Springer, New York, 2012.
- [WriCo] Wright, J.R., Cooper, J.E.; *Introduction to aircraft aeroelasticity and loads*, Wiley, 2007
- [Hodges] Hodges, D.H., Pierce, G.A.; *Introduction to structural dynamics and aeroelasticity*, Cambridge, NY, 2012
- [ScRo] Scanlan, R.H., Rosenbaum R.; *Drgania i flatter samolotów*, PWN, Warszawa, 1964.
- [Pietrucha] Pietrucha, J.P.; *Flutter - wstęp do teorii aerosprężystości*, NIT, 1(8), 2005

Drgania i aeroelastyczność

Warunki zaliczenia

1. Obecność na **minimum ośmiu** zajęciach.
2. Rozwiązanie zadania domowego.

DRGANIA

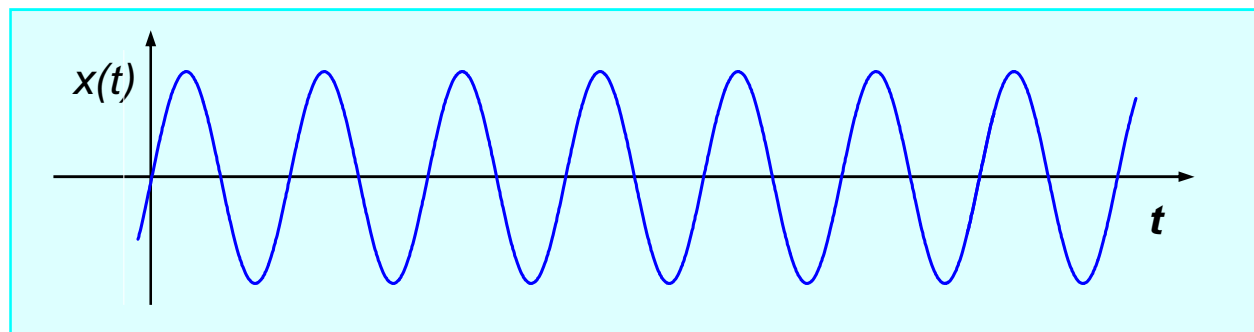
CZYM SĄ DRGANIA ?

Czym są drgania?

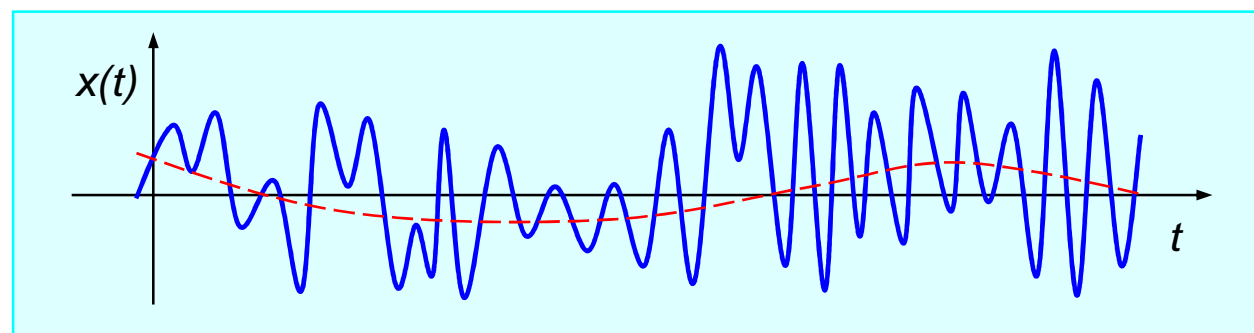
Brak jest jednoznacznej definicji - „*drgania, jakie są, każdy widzi...*”

Definicja opisowa (wg J. Osińskiego „Teoria drgań”)

Drgania są to oscylacje wielkości fizycznej wokół pewnej wartości średniej (która może zmieniać się w czasie)



Drgania regularne (okresowe, harmoniczne)



Drgania nieregularne (nieokresowe, chaotyczne)

Czym są drgania?

Przykłady drgań:

- ruch wahadła,
- drgania skrzydeł, łopat wirników i śmigieł,
- ruch niektórych części maszyn,
- kołysanie się budowli,
- fale morskie,
- dźwięk (drgania powietrza),
- prąd i napięcie w obwodzie rezonansowym,
- fale elektromagnetyczne,
- drgania cieplne atomów w sieci krystalicznej,
- pulsacja pewnych typów gwiazd,
- ... i wiele innych.

Czym są drgania?

Ale... uwaga!

Nie każde zjawisko oscylacyjne można uważać za drgania!

Przykłady zjawisk oscylacyjnych nie będących drganiami:

- układy z okresowym wyzwaniem,
- ruch tłoka w silniku spalinowym,
- ruch piłki tenisowej,
- ruch autobusów pomiędzy krańcowymi przystankami,
- zmiana temperatury powietrza w ciągu doby,
- zmiana temperatury ciała w ciągu doby,
- wahania kursów giełdowych...

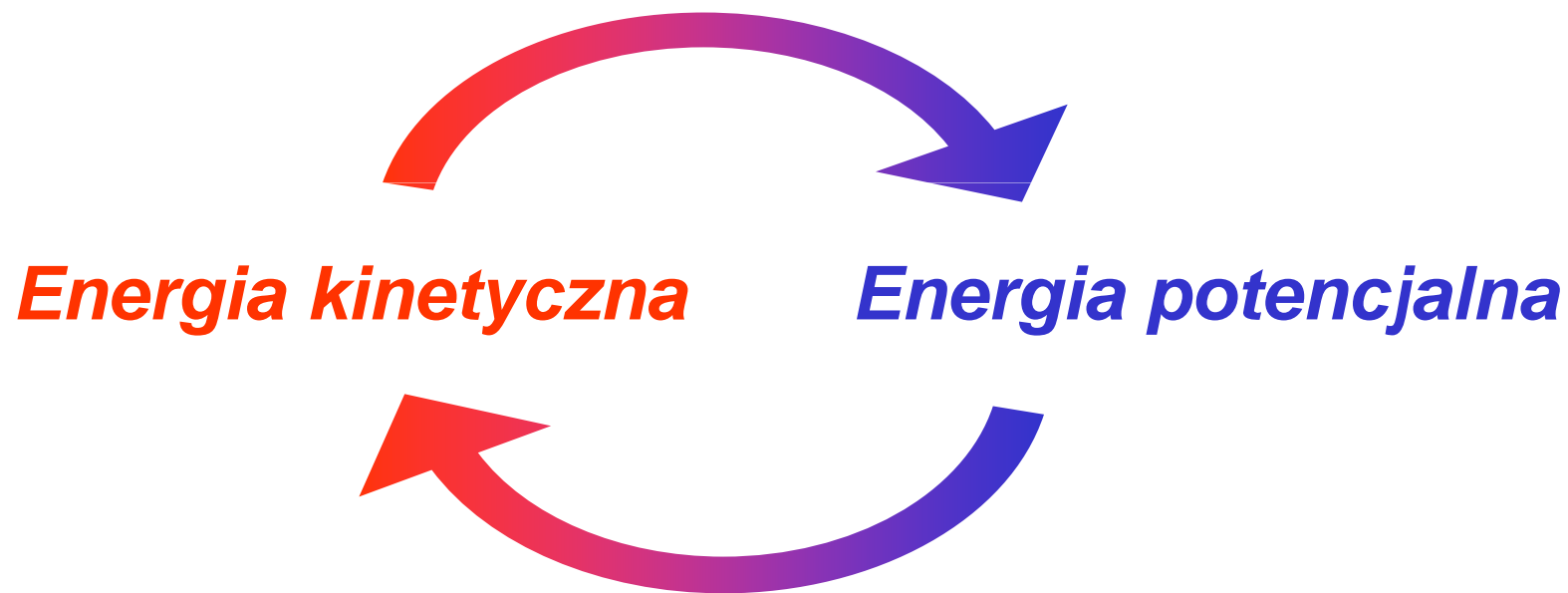
Kiedy więc zjawisko oscylacyjne można uznać za drgania?

Czym są drgania?

Mechanizm fizyczny drgań - okresowa zmiana formy energii

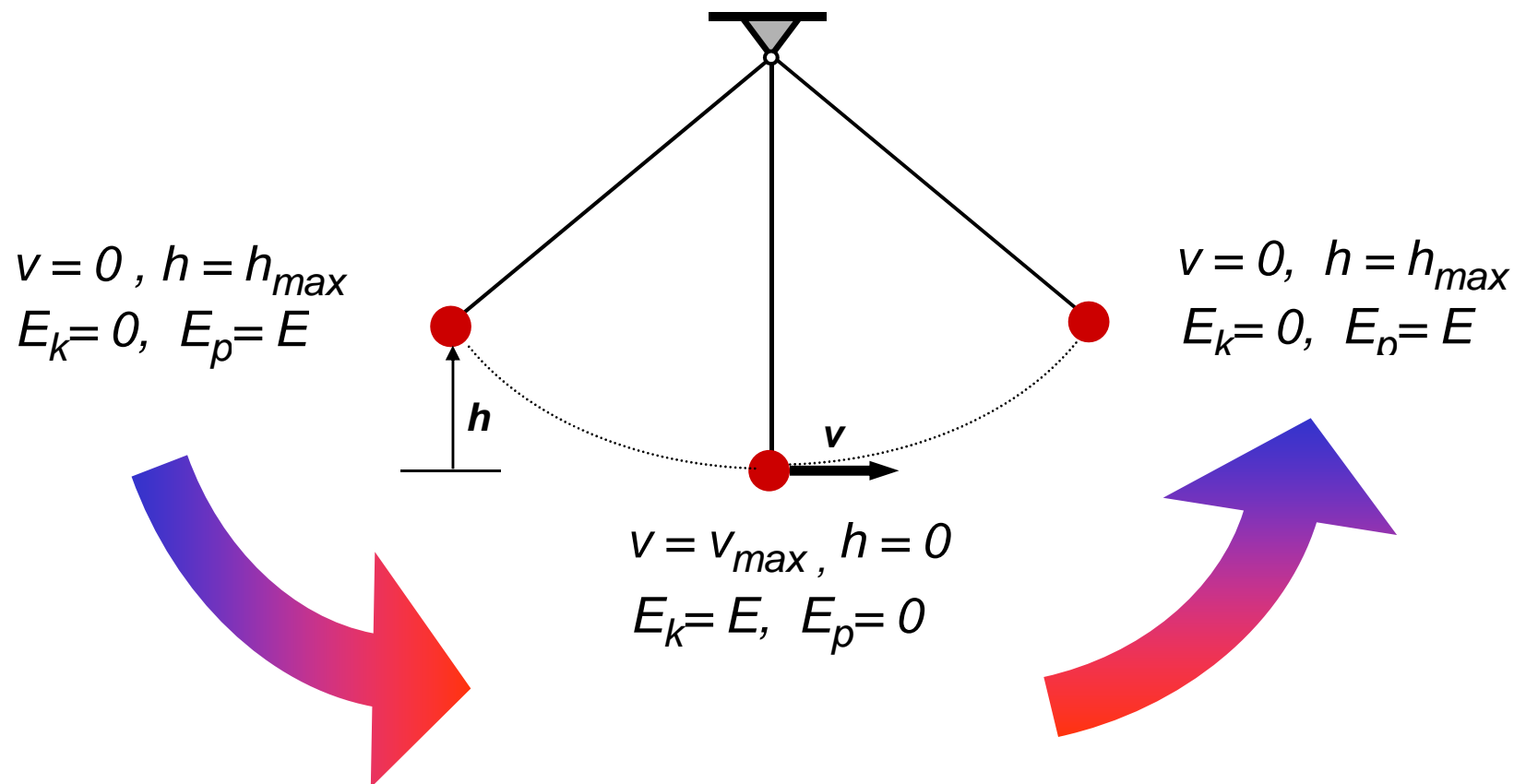
Energia kinetyczna $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

Energia potencjalna $E_p = mgh$



Czym są drgania?

Mechanizm fizyczny drgań - okresowa zmiana formy energii



Czym są drgania?

Jakie własności fizyczne odpowiadają za wystąpienie drgań?

- zdolność magazynowania energii,
- bezwładność

Wyjaśnienie roli obu własności

- Magazynowanie energii (np. naciągnięcie sprężyny, wychylenie wahadła) jest niezbędne do **wywołania** ruchu.
- Bezwładność jest niezbędna do **podtrzymania** ruchu.
- Gdyby nie było bezwładności, siła sprężystości spowodowała by przemieszczenie obiektu do położenia neutralnego (w którym siła sprężystości znika).
- Bezwładność powoduje jednak to, że ruch obiektu w położeniu neutralnym nie ustaje - obiekt porusza się dalej mimo iż siła sprężystości znikła.
- W efekcie ruch trwa do momentu, gdy narastająca siła sprężysta zatrzyma obiekt.
- Stan układu jest taki, jak na początku i cały cykl się powtarza.

Czym są drgania?

Przykłady:

Zjawisko

Bezwładność

Magazynowanie energii

Wahadło

masa wahadła

położenie (grawitacja)

Masa na sprężynie

masa

szttywność sprężyny

Drgająca belka

masa belki

sprężystość belki

Dźwięk

gęstość powietrza

ściśliwość powietrza

Fale morskie

masa wody

spiętrzenie wody

Obwód rezonansowy

indukcyjność

pojemność elektryczna

Drgania sieci kryształu

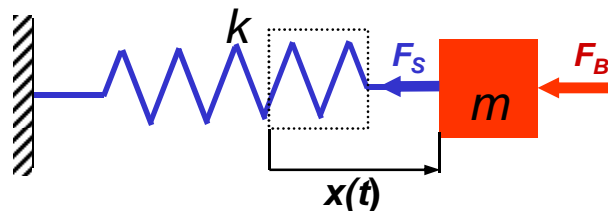
masa atomów

siły elektrostatyczne

Czym są drgania?

Przykłady sił **bezwładności** i sił **sprężystych**

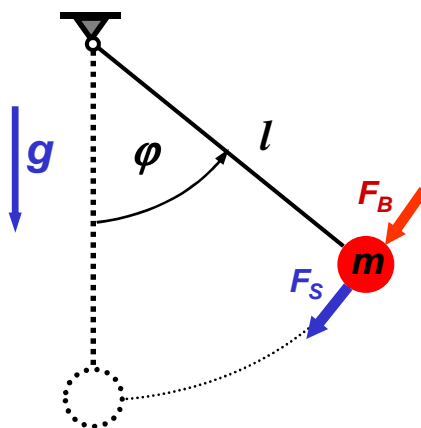
1. Masa na sprężynie



$$F_S = -kx$$

$$F_B = -m\ddot{x}$$

2. Wahadło matematyczne



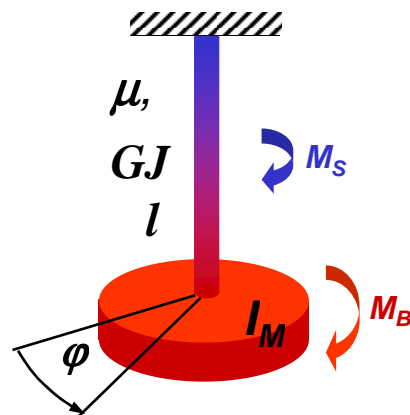
$$F_B = -ml\ddot{\varphi}$$

$$F_S = -mgl \sin \varphi$$

Czym są drgania?

Przykłady sił **bezwładności** i sił **sprężystych**

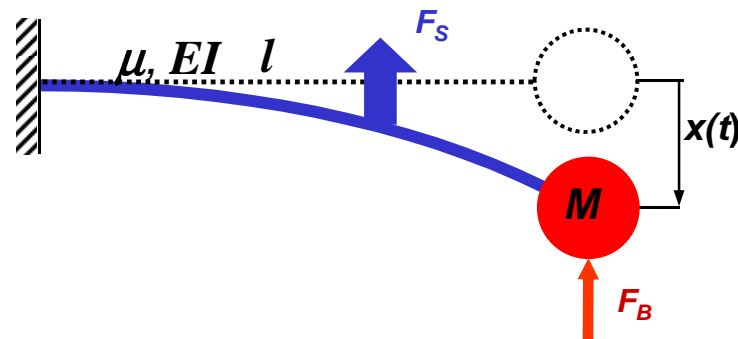
3. Wahadło skrętne



$$M_S = -\frac{GJ}{l} \varphi$$

$$M_B = -I_{red}(I_M, \mu, l) \ddot{\varphi}$$

4. Belka zginana



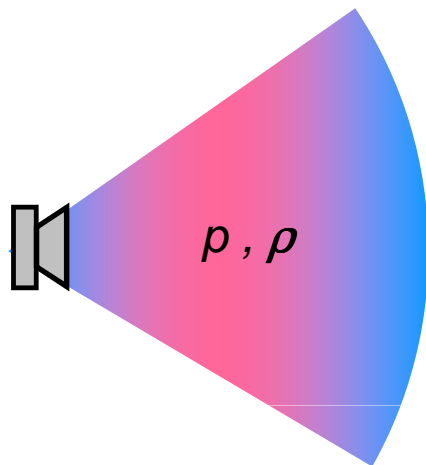
$$F_S = -\frac{3EI}{l^3} x$$

$$F_B = -m_{red}(M, \mu, l) \ddot{x}$$

Czym są drgania?

Przykłady sił **bezwładności** i sił **sprężystych**

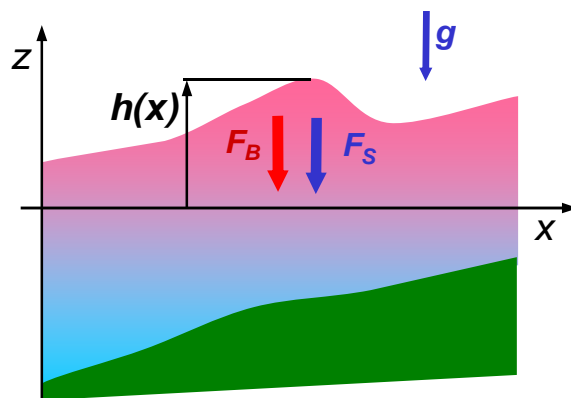
5. Dźwięk



$$F_S = -\nabla^2 p$$

$$F_B = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

6. Fale morskie



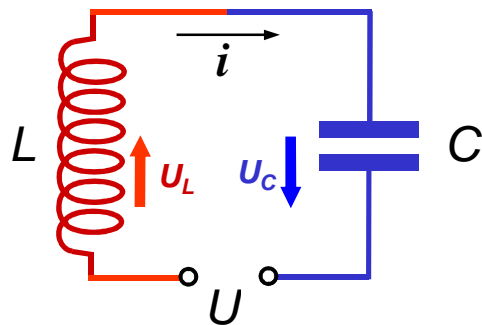
$$F_S = -g \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

$$F_B = -\rho \frac{\partial^2 h}{\partial t^2}$$

Czym są drgania?

Przykłady sił **bezwładności** i sił **sprężystych**

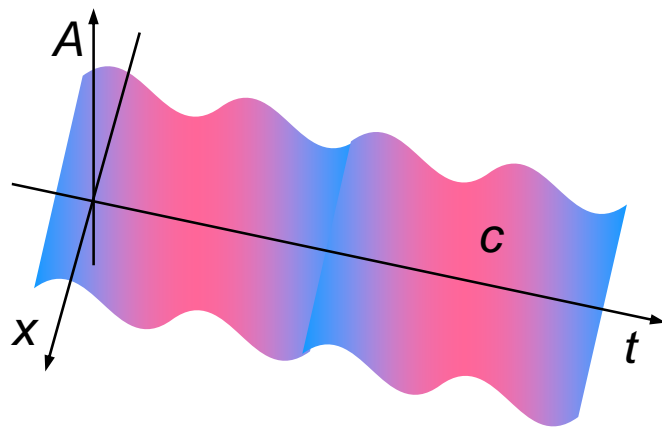
7. Obwód rezonansowy



$$U_L = L\ddot{Q} \quad (F_B)$$

$$U_C = \frac{1}{C}Q \quad (F_S)$$

8. Fale elektromagnetyczne



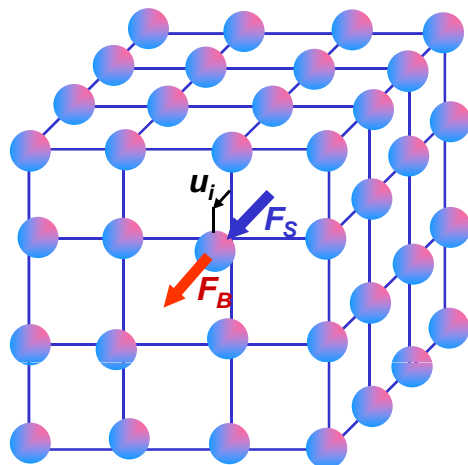
$$F_S \Rightarrow \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}$$

$$F_B \Rightarrow \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$$

Czym są drgania?

Przykłady sił **bezwładności** i sił **sprężystych**

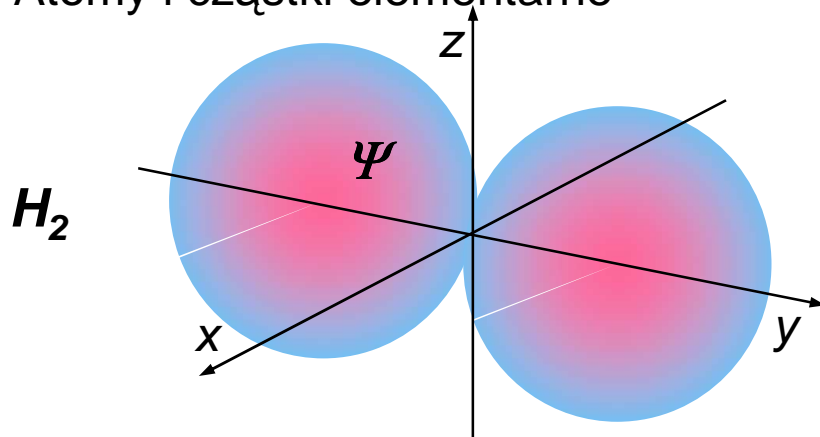
9. Drgania atomów w kryształach



$$F_S = - \sum_{j=1}^{j=n} \Phi_{ij}^{AB} u_j^B$$

$$F_B = -m_i \ddot{u}_i^A$$

10. Atomy i cząstki elementarne



$$F_S \Rightarrow \nabla^2 \Psi$$

$$F_B \Rightarrow i\hbar \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$