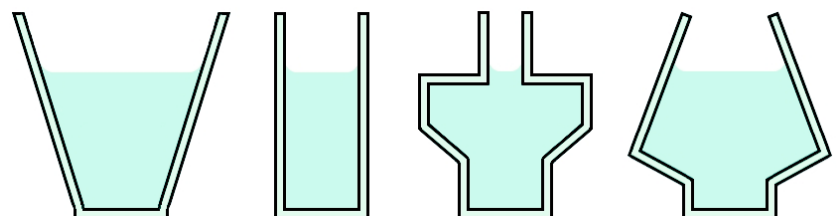
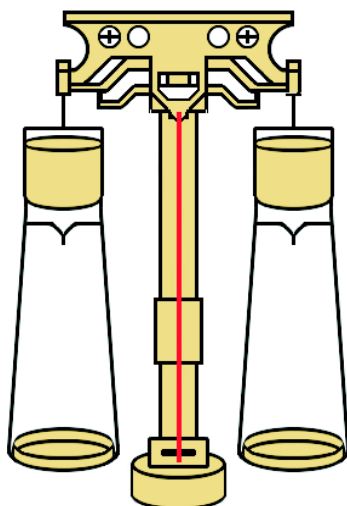
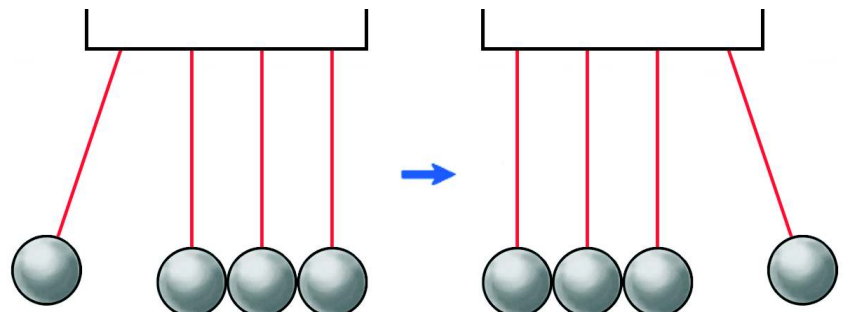
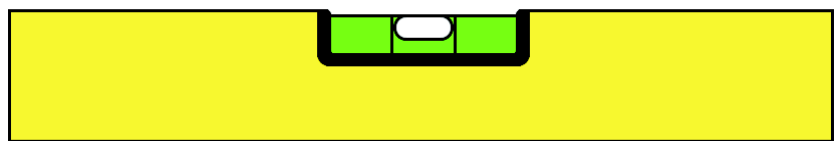
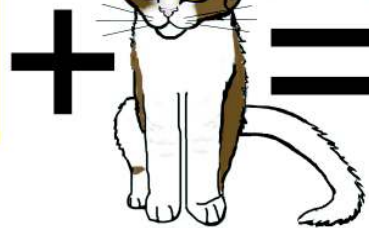
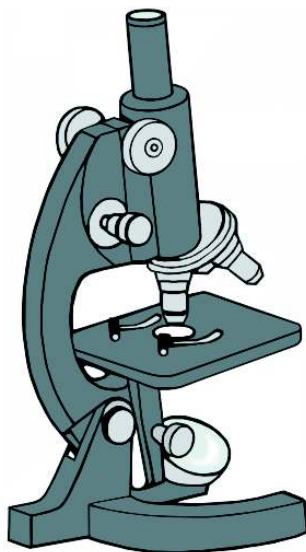
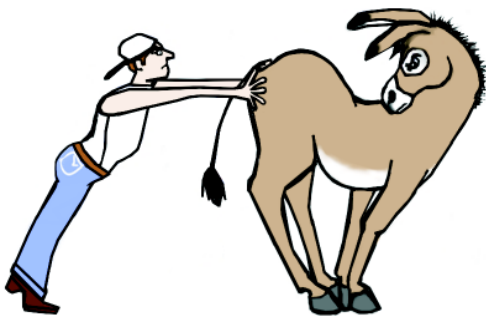
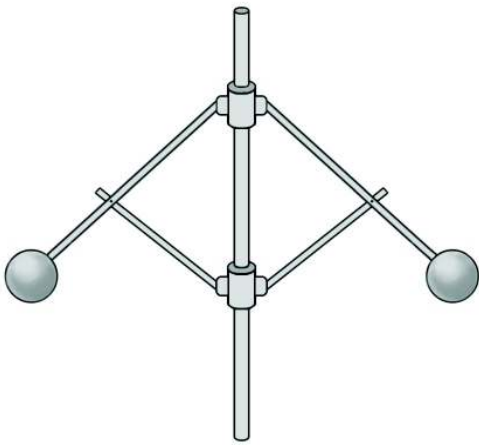


Zbigniew Osiak

FIZYKA



Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

Zbigniew Osiak (Tekst)

FIZYKA

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

*Julkowi,
mojemu wnukowi poświęcam*

© Copyright 2014 by Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone. Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-4315-7

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:
<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

SPIS TREŚCI

00	Wstęp	006 – 007
01	Mechanika	008 – 051
02	Akustyka	052 – 064
03	Hydromechanika	065 – 081
04	Termodynamika	082 – 120
05	Grawitacja	121 – 133
06	Elektryczność	134 – 175
07	Magnetyzm	176 – 191
08	Elektromagnetyzm	192 – 214
09	Optyka	215 – 250
10	Fizyka jądra i cząstek elementarnych	251 – 278
11	Fizyka kwantowa	279 – 309
12	Teoria względności	310 – 330
13	Fizyka ciała stałego	331 – 339
14	Stałe uniwersalne i jednostki	340 – 353
15	Język i metodologia fizyki	354 – 363
16	Niezbędnik matematyczny	364 – 376
17	Laureaci Nagród Nobla z fizyki	377 – 390
18	Wybrane Nagrody Nobla z chemii	391 – 392
19	Indeks haseł	393 – 426
20	Indeks nazwisk	427 – 439

WSTĘP

Encyklopedia zawiera:

- około 1600 haseł
- 490 kolorowych rysunków
- definicje podstawowych pojęć fizyki
- prawa fizyki
- wzory i wykresy
- jednostki
- poglądowe ilustracje pojęć i praw
- przykłady
- ciekawostki
- notki biograficzne
- informacje dotyczące historii fizyki
- propozycje wykonania doświadczeń
- komentarze
- adresy stron internetowych
- angielskie odpowiedniki polskich nazw

Dla kogo przeznaczona jest Encyklopedia?

Informacje podane w *Encyklopedii* zostały tak dobrane i sformułowane, aby mogli z nich korzystać:

- uczniowie starszych klas szkoły podstawowej i szkół średnich,
- wszyscy czytelnicy, niezależnie od kierunku ich wykształcenia, którzy chcą dowiedzieć się jakie problemy są przedmiotem badań współczesnej fizyki,
- czytelnicy szczególnie zainteresowani fizyką, jej historią i metodologią.

Cele

Głównym celem *Encyklopedii* jest wykazanie, że

- fizyka to nie tylko wzory, wykresy, prawa, hipotezy i teorie, ale przede wszystkim tworzący ją ludzie,
- fizyka stanowi poligon logicznego i precyzyjnego myślenia,
- fizyka uczy nas pokory wobec ogromu wszechświata,
- fizyka uświadamia nam wielką rolę osiągnięć poprzednich pokoleń w powstawaniu nowych teorii; na przykład: gdyby nie było Kopernika, Galileusza, Keplera, Newtona i innych myślicieli, to nie powstałaby teoria względności Einsteina.

Oznaczenia

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Refleksje autora



Należę do pokolenia fizyków, dla których idolami byli Albert Einstein, Lew Dawidowicz Landau i Richard P. Feynman. Einstein zniewolił mnie potęgą swej intuicji. Landaua podziwiam za rzetelność, precyzję, elegancję i prostotę wywodów oraz instynktowne wyczuwanie istoty zagadnienia. Feynman urzekł mnie lekkością narracji i subtelnym poczuciem humoru.

Fizycy tworzący w dwudziestym wieku zostawili nam w spadku trzy potężne filary: teorię względności, mechanikę kwantową i nieliniową termodynamikę nierównowagowych procesów nieodwracalnych. Podstawowymi pojęciami w tych systemach teoretycznych są odpowiednio: metryka czasoprzestrzeni i reprezentujący ją tensor metryczny, funkcja falowa oraz funkcja dyssypacji. Teoria względności zajmuje się badaniem wpływu przebiegu zjawiska na akt pomiaru, a mechanika kwantowa – wpływem aktu pomiaru na przebieg zjawiska. Z takiego punktu widzenia są one nierozzerwalnie ze sobą związane. Teoria względności jest szczególnie przydatna do rozwiązywania problemów kosmologicznych, a domeną zastosowań mechaniki kwantowej jest mikroświat. W układach składających się z bardzo wielu cząstek, w skali czaso-przestrzennej właściwej organizmom żywym, doskonale sprawdzają się prawa termodynamiki nierównowagowej opisujące procesy termodynamicznie sprzężone i struktury dysypatywne.

Uczeni działający w dwudziestym pierwszym wieku zapewne dokonają syntezy tych trzech pozornie różnych dziedzin fizyki, ponieważ prawa przyrody nie mogą być rozseparowane. Mam nadzieję, że *Encyklopedia* zachęci młodych czytelników, aby powiększyli grono wielkich fizyków.

01 MECHANIKA

amplituda drgań (A), *vibration amplitude*, maksymalna wartość wychylenia, mierzona w metrach [m].

bezczasowe równanie na drogę w ruchu jednostajnie zmiennym, *time-free equation for path in uniformly accelerated motion*, niezawierające czasu równanie, umożliwiające obliczenie drogi w ruchu jednostajnie zmiennym prostoliniowym cząstki, gdy dane są wartości prędkości początkowej (v_0), prędkości końcowej (v) oraz przyspieszenia (a).

$$S = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} \quad \text{ruch jednostajnie przyspieszony}$$

$$S = \frac{v_0^2 - v^2}{2a} \quad \text{ruch jednostajnie opóźniony}$$

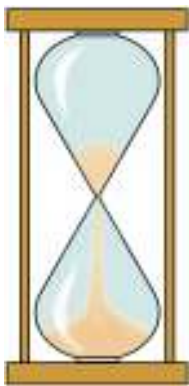
bezwładność, *inertia*, właściwość ciał polegająca na tym, że w układzie inercyjnym

- różne od zera przyspieszenie swobodnej cząstki może być spowodowane jedynie działaniem na nią sił zewnętrznych, których wypadkowa jest różna od zera.
 - różne od zera przyspieszenie kątowe swobodnej bryły sztywnej może być spowodowane jedynie działaniem na nią sił zewnętrznych, których wypadkowy moment jest różny od zera.
- Miarą bezwładności jest masa lub moment bezwładności.

bryła sztywna, *solid body*, ciało, w którym odległość między dwoma dowolnymi punktami jest stała. Bryła sztywna modeluje ciało, które doznaje zaniedbywalnie małych odkształceń pod wpływem działających na nie sił.

chwilowa oś obrotu, *instantaneous axis*, oś obrotu zmieniająca swoje położenie w przestrzeni.

czas (t), *time*, rosnąca wielkość skalarna, mierzona w sekundach [s]. W newtonowskiej mechanice klasycznej upływ czasu nie zależy od przyjętego układu odniesienia. W teorii względności właściwość ta nie jest spełniona.



Rys. 001. Klepsydra

cząstka swobodna, *free particle*, cząstka, której ruch i położenie w przestrzeni nie podlegają żadnym ograniczeniom.

częstotliwość drgań (f), *vibration frequency*, odwrotność okresu drgań (T), mierzona w hercach [Hz].

$$f = \frac{1}{T}, \quad [f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$$

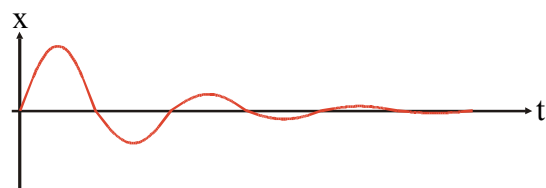
C Częstotliwość nazywana jest również częstością.

częstotliwość kątowna (ω), *angular frequency*, wielkość skalarna, wykorzystywana do opisu zjawisk okresowych, określona jako:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f, \quad [\omega] = \frac{1}{s}$$

• T – okres drgań • f – częstotliwość drgań

drżania tłumione (gasnące), *damped vibrations*, drżania o zmniejszającej się w czasie amplitudzie wskutek strat energii.



Rys. 002. Wykres zależności współrzędnej wychYLENIA cząstki (x) od czasu (t) dla drgań tłumionych

drżania własne (swobodne), *free vibrations*, drżania wykonywane przez układ wyprowadzony jednorazowo ze stanu równowagi trwałej.

drżania wymuszone, *forced vibrations*, drżania spowodowane działaniem na układ zewnętrznej siły wymuszającej, zmieniającej się okresowo w czasie.

droga (S), *path*, długość fragmentu toru przebytego przez punkt materialny w danym przedziale czasu. Droga jest nieujemną i niemalejącą wielkością skalarną mierzoną w metrach [m].

$$S \geq 0, \quad \frac{dS}{dt} \geq 0, \quad [S] = \text{m}$$

C Podobne własności ma wielkość zwana entropią.

druga zasada dynamiki, *second principle of dynamics*, *Newtons's second law of motion*, zasada stwierdzająca, że w układzie inercjalnym siła ($\vec{F}$) działająca na swobodną cząstkę o masie (m) nadaje jej przyspieszenie ($\vec{a}$).

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Inne, równoważne sformułowanie drugiej zasady dynamiki głosi, że w układzie inercyjnym siła ($\vec{F}$) działająca na swobodną cząstkę jest równa pochodnej pędu ($\vec{p}$) tej cząstki względem czasu (t).

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

U W wypadku swobodnych ruchów prostoliniowych, gdy siła o stałym kierunku i zwrocie jest styczna do toru, a jej wartość zmienia się liniowo w czasie, druga zasada dynamiki może być zapisana w poniższej postaci.

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

B Sir Isaac Newton (1643-1727), angielski fizyk, matematyk, astronom i filozof.

druga zasada dynamiki ruchu obrotowego, *second law of dynamic of rotary motion*, zasada głosząca, że w układzie inercyjnym całkowity moment ($\vec{M}$) sił zewnętrznych, działających na swobodną bryłę sztywną, jest równy pochodnej momentu pędu ($\vec{K}$) bryły względem czasu. Przy czym wektory ($\vec{M}$) i ($\vec{K}$) określone są względem środka układu współrzędnych (lub innego nieruchomego punktu).

$$\vec{M} = \frac{d\vec{K}}{dt}$$

Jeżeli moment pędu ($\vec{K}$) bryły sztywnej jest określony względem dowolnego punktu leżącego na swobodnej osi obrotu, to drugą zasadę dynamiki można zapisać w poniższej postaci.

$$\vec{M} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad \text{lub} \quad \vec{M} = I \vec{\varepsilon}$$

• I – moment bezwładności bryły względem swobodnej osi obrotu • $\vec{\omega}$ – prędkość kątowa obracającej się bryły • $\vec{\varepsilon}$ – przyspieszenie kątowe bryły

dynamometr, *dynamometer*, przyrząd służący do pomiarów wartości siły. Stanowi go sprężyna, której wydłużenie jest wprost proporcjonalne do wartości siły przyłożonej do końca tej sprężyny. Dynamometr nazywany jest także siłomierzem.



Rys. 003. Dynamometr

dźwignia dwustronna, *first-order lever*, *first-class lever*, bryła sztywna, do której przyłożone są siły zewnętrzne, zaczepione po obu stronach nieruchomej osi obrotu lub punktu podparcia.

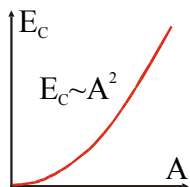
dźwignia jednostronna, *second-order lever*, *second-class lever*, bryła sztywna, do której przyłożone są siły zewnętrzne, zaczepione po jednej stronie nieruchomej osi obrotu lub punktu podparcia.

energia (E), *energy*, wielkość skalarna mierzona w dżulach [J], charakteryzująca, ze względu na ruchy i oddziaływania, cząstki obdarzone masą i ładunkiem, pola grawitacyjne, elektromagnetyczne i inne, które już poznaliśmy i które być może zostaną dopiero odkryte. W danym układzie odizolowanym od wszelkich wpływów zewnętrznych suma wszystkich form energii jest wielkością stałą.

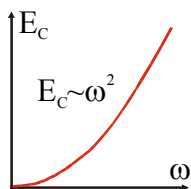
energia całkowita w ruchu drgającym (E_c), *total energy of harmonic motion*, suma energii kinetycznej (E_k) i energii potencjalnej (E_p) cząstki wykonującej ruch drgający harmoniczny prosty, mierzona w dżulach [J].

$$E_c = E_k + E_p = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2, \quad [E_c] = \text{J}$$

- m – masa ciała
- A – amplituda drgań
- ω – częstotliwość kątowa



Rys. 004. Wykres zależności energii całkowitej w ruchu drgającym (E_c) od amplitudy drgań (A) przy ustalonej masie ciała (m) i częstotliwości kątowej drgań (ω)



Rys. 005. Wykres zależności energii całkowitej w ruchu drgającym (E_c) od częstotliwości kątowej drgań (ω) przy ustalonej masie ciała (m) i amplitudzie drgań (A)

energia kinetyczna (E_k), *kinetic energy*, energia cząstki o masie (m), poruszającej się z szybkością (v), mierzona w dżulach [J].

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad [E_k] = \text{J}$$

C Energia kinetyczna jest skalarną wielkością względną, jej wartość zależy od przyjętego układu odniesienia.

P Zmiana energii kinetycznej (ΔE_k) cząstki o stałej masie (m), poruszającej się ruchem prostoliniowym, po przebyciu drogi (S) jest równa pracy (W) wykonanej przez siłę działającą na cząstkę stycznie do toru.

$$W = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv_k^2 - \frac{1}{2}mv_p^2$$

- v_k – szybkość końcowa
- v_p – szybkość początkowa

W wypadku siły ($\vec{F}$) o stałej wartości (F):

$$FS \cos \angle(\vec{F}, \vec{v}) = \frac{1}{2}mv_k^2 - \frac{1}{2}mv_p^2$$

Ze wzoru tego wynika, że droga hamowania zależy proporcjonalnie od kwadratu szybkości początkowej.

energia kinetyczna w ruchu drgającym (E_k), *kinetic energy of harmonic motion*, energia kinetyczna cząstki wykonującej ruch drgający harmoniczny prosty, mierzona w dżulach [J], która zmienia się w czasie (t) i w zależności od wychylenia (x) według wzorów:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \cos^2 \omega t \\ E_k &= \frac{1}{2}m\omega^2 (A^2 - x^2) \\ [E_k] &= \text{J} \end{aligned}$$

- m – masa ciała
- ω – częstotliwość kątowa
- A – amplituda drgań

energia kinetyczna w ruchu obrotowo-postępowym (E_k), *kinetic energy of rotary-translatory motion*, energia, jaką posiada bryła sztywna o masie (m) i momencie bezwładności (I) względem osi przechodzącej przez jej środek masy, poruszająca się ruchem obrotowo-postępowym, mierzona w dżulach [J].

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} m v^2, \quad [E_k] = \text{J}$$

- ω – wartość prędkości kątowej bryły względem osi przechodzącej przez środek masy bryły
- v – szybkość środka masy bryły

energia kinetyczna w ruchu obrotowym (E_k), *kinetic energy of rotary motion*, energia, jaką posiada bryła sztywna o momencie bezwładności (I) względem zadanej nieruchomej swobodnej osi, obracająca się z prędkością kątową o wartości (ω) względem tej osi, mierzona w dżulach [J].

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2, \quad [E_k] = \text{J}$$

energia kinetyczna w ruchu postępowym (E_k), *kinetic energy of translatory motion*, energia, jaką posiada bryła sztywna o masie (m), poruszająca się ruchem postępowym z szybkością (v), mierzona w dżulach [J].

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2, \quad [E_k] = \text{J}$$

energia mechaniczna (E), *total energy*, suma energii potencjalnej i kinetycznej cząstki lub bryły sztywnej.

energia potencjalna (E_p), *potential energy*, energia układu o danej konfiguracji, równa pracy wykonywanej przez siły potencjalne, działające w układzie, podczas jego przejścia do konfiguracji, której z założenia odpowiada energia potencjalna równa zero.

energia potencjalna w ruchu drgającym (E_p), *potential energy of harmonic motion*, energia potencjalna cząstki wykonującej ruch drgający harmoniczny prosty, mierzona w dżulach [J], która zmienia się w czasie (t) i w zależności od wychylenia (x) według wzorów:

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \sin^2 \omega t \\ E_p &= \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \\ E_p &= 0 \quad \Leftrightarrow \quad x = 0 \\ [E_p] &= \text{J} \end{aligned}$$

- m – masa ciała
- ω – częstotliwość kątowa
- A – amplituda drgań

faza drgań (α), *vibration phase*, kąt, mierzony w radianach [rad], określony jako:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2\pi}{T} t + \alpha_0 = 2\pi f t + \alpha_0 \\ [\alpha] &= \text{rad} \end{aligned}$$

- t – czas
- T – okres drgań
- f – częstotliwość drgań
- α_0 – faza początkowa

Powiadamy, że dwa drgania o jednakowych częstotliwościach mają zgodne fazy, jeżeli różnica ich faz początkowych ($\Delta\alpha_0$) spełnia poniższy warunek.

$$|\Delta\alpha_0| = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Powiadamy, że dwa drgania o jednakowych częstotliwościach mają przeciwne fazy, jeżeli różnica ich faz początkowych ($\Delta\alpha_0$) spełnia poniższy warunek.

$$|\Delta\alpha_0| = (2n + 1)\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

C Żartobliwie można powiedzieć, że faza to czas mierzony w kątach.

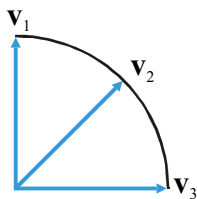
figury Lissajous, *Lissajous figures*, zamknięte tory cząstki, której ruch jest złożeniem dwóch wzajemnie prostopadłych ruchów harmoniczných. Kształt figur Lissajous zależy od amplitud, częstotliwości oraz faz drgań składowych.

D Figury Lissajous można oglądać na ekranie oscyloskopu. W tym celu należy przyłożyć do płytek odchyłania poziomego i pionowego napięcia sinusoidalnie zmienne o różnych amplitudach, częstotliwościach oraz fazach.

B Jules Antoine Lissajous (1822-1880), francuski matematyk i fizyk.

hodograf, *hodograph*, linia utworzona z punktów, będących końcami wektorów prędkości chwilowych cząstki. Przy czym, początki tych wektorów zostały zaczepione w jednym punkcie. Wektory przyspieszeń chwilowych cząstki są styczne do hodografu.

P Hodografem ruchu jednostajnego prostoliniowego jest punkt.



Rys. 006. Hodograf

inercja, *inertia*, inna nazwa bezwładności.

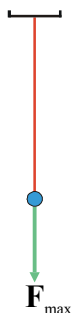
inercjalny układ odniesienia, *inertial reference system*, *inertial frame*, układ odniesienia, w którym swobodna cząstka pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym wtedy i tylko wtedy, gdy suma działających na nią sił zewnętrznych jest równa zero. Układy spoczywające lub poruszające się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem danego układu inercjalnego są również układami inercjalnymi.

C W wielu zagadnieniach Ziemia może być traktowana jako inercjalny układ odniesienia.

maksymalna wartość siły naciągającej nić wahadła (F_{max}), *maximum value of force acting on a pendulum*, suma sił grawitacyjnej i odśrodkowej w środku drgań.

$$F_{max} = mg + \frac{mv_{max}^2}{l}$$

- m – masa ciała • g – przyspieszenie ziemskie • l – długość wahadła
- v_{max} – maksymalna wartość prędkości chwilowej



Rys. 007. Maksymalna wartość siły naciągającej nić wahadła matematycznego ($F_{\max}$)

masa (m), *mass*, wielkość skalarna mierzona w kilogramach [kg], będąca jednocześnie miarą bezwładności ciała, ilości zawartej w nim materii oraz jego zdolności do oddziaływania grawitacyjnego z innymi ciałami.

masa zredukowana (μ), *reduced mass*, wielkość charakteryzująca układ dwóch cząstek o masach (m_1) i (m_2), pojawiająca się w trakcie analizy zagadnienia dwóch ciał.

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad [\mu, m_1, m_2] = \text{kg}$$

maszyny proste, *simple machines*, mechaniczne urządzenia, narzędzia i mechanizmy pozwalające zmniejszyć siłę wykonującą pracę tyle razy, ile razy zwiększa się droga, na której wykonywana jest praca. Przykładami maszyn prostych są równie pochyłe, dźwignie, wielokrążki, kołowroty, kliny i śruby.

mechanika klasyczna, *classical mechanics*, mechanika oparta na zasadach dynamiki Newtona i transformacjach Galileusza. Mechanika klasyczna zajmuje się badaniem ruchów ciał makroskopowych poruszających się z szybkościami dużo mniejszymi od szybkości światła w próżni.

moc (P), *power*, wielkość skalarna, mierzona w watach [W], będąca stosunkiem pracy (W) do czasu (t) jej wykonania.

$$P = \frac{W}{t}, \quad [P] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

moment bezwładności (I), *moment of inertia*, wielkość skalarna, charakteryzująca rozkład masy bryły sztywnej względem ustalonej nieruchomej osi, będąca miarą bezwładności tej bryły w jej ruchu obrotowym. W przypadku układu sztywno powiązanych punktów materialnych moment bezwładności względem ustalonej osi dany jest wzorem:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2, \quad [I] = \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

- m_i – masa i -tego punktu materialnego
- r_i – odległość i -tego punktu od osi
- n – liczba punktów

P Dla walca, cienkościennej rury, kuli oraz cienkościennej powłoki sferycznej momenty bezwładności względem osi przechodzących przez środki mas tych brył można zapisać w postaci jednego wzoru.

$$I = kmr^2$$

• m – masa bryły • r – promień poprzecznego przekroju kołowego przechodzącego przez środek masy bryły

• $k = \frac{1}{2}$ dla walca względem jego osi

• $k = 1$ dla cienkościennej rury względem jej osi

• $k = \frac{2}{5}$ dla kuli

• $k = \frac{2}{3}$ dla cienkościennej powłoki sferycznej

moment pędu (kręt) ($\vec{K}$), *angular momentum*, *moment of momentum*, wielkość wektorowa, związana z ruchem obrotowym bryły sztywnej. Dla pojedynczej cząstki wirującej po okręgu moment pędu, określony względem początku układu współrzędnych (lub innego nieruchomego punktu, którym może być na przykład środek okręgu), jest iloczynem wektorowym promienia wodzącego ($\vec{r}$) i pędu ($\vec{p}$) tej cząstki.

$$\begin{aligned}\vec{K} &= \vec{r} \times \vec{p} \\ K &= rp \sin \angle(\vec{r}, \vec{p}) \\ [K] &= \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}} = \text{J} \cdot \text{s}\end{aligned}$$

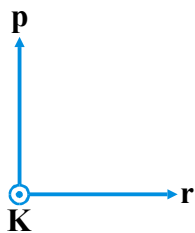
Moment pędu układu sztywno powiązanych ze sobą cząstek jest sumą wektorową momentów poszczególnych cząstek. Moment pędu bryły sztywnej, określony względem dowolnego punktu leżącego na swobodnej osi obrotu, można przedstawić w postaci poniższego równania.

$$\vec{K} = I\vec{\omega}$$

• I – moment bezwładności bryły sztywnej względem swobodnej osi obrotu

• $\vec{\omega}$ – prędkość kątowa obracającej się bryły sztywnej

Kierunek momentu pędu pokrywa się ze swobodną osią obrotu, a jego zwrot jest zgodny ze zwrotem ruchu postępowego śruby prawoskrętnej obracanej w kierunku obrotu bryły.

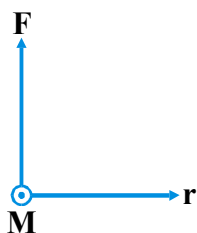


Rys. 008. Wzajemne położenie wektorów $\vec{K}$, $\vec{p}$ i $\vec{r}$

moment siły (moment obrotowy) ($\vec{M}$), *moment of force*, wielkość wektorowa, określona względem początku układu współrzędnych (lub innego nieruchomego punktu), będąca iloczynem wektorowym promienia wodzącego ($\vec{r}$) i siły ($\vec{F}$) działającej na bryłę sztywną.

$$\begin{aligned}\vec{M} &= \vec{r} \times \vec{F} \\ M &= rF \sin \angle(\vec{r}, \vec{F}) = Fr_{\perp} \\ r_{\perp} &= r \sin \angle(\vec{r}, \vec{F}) \\ [M] &= \text{m} \cdot \text{N} = \text{J}\end{aligned}$$

- $r_{\perp}$ – ramię siły



Rys. 009. Wzajemne położenie wektorów $\vec{F}$, $\vec{M}$ i $\vec{r}$

napęd odrzutowy, *jet propulsion*, przykład praktycznego wykorzystania zasady zachowania pędu. Przed startem wypadkowy pęd układu rakiet-paliwo-utleniacz jest równy zero. Po starcie rakiet uzyskuje pęd o zwrocie przeciwnym do zwrotu pędu wylatujących z niej gazów, przy czym wartości tych pędów są sobie równe.

P W przypadku, gdy suma sił zewnętrznych działających na raketę jest równa zero, wartość prędkości chwilowej rakiety (v) można wyznaczyć z równania Ciołkowskiego.

$$v = u \ln \left(\frac{m}{m_0} \right)$$

- u – wartość prędkości gazów względem rakiety
- m_0 – początkowa masa rakiety
- m – masa rakiety w danej chwili

H Powyższe równanie zostało podane przez Ciołkowskiego w 1903.

B Konstanty Ciołkowski (1857-1935), rosyjski uczony i wynalazca polskiego pochodzenia.



Rys. 010. Napęd odrzutowy

nieinercjalny układ odniesienia, *noninertial reference system*, układ odniesienia, w którym nie jest spełniona zasada bezwładności, stanowiąca, że cząstka pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym wtedy i tylko wtedy, gdy suma działających na nią sił zewnętrznych jest równa zero. Układami nieinercyjnymi są układy poruszające się względem danego układu inercyjnego ruchem postępowym przyspieszonym lub opóźnionym, drgającym, obrotowym, krzywoliniowym itp. W takich układach pojawiają się siły pozorne, zwane siłami bezwładności. Aby można było stosować drugą zasadę dynamiki również w układach nieinercyjnych, należy wśród sił działających na cząstkę uwzględnić także siły bezwładności.

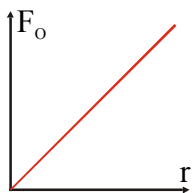
noniusz, *nonius*, urządzenie, za pomocą którego można zwiększyć dokładność odczytu na skali głównej suwmiarki lub śruby mikrometrycznej. Stanowi go dodatkowa skala, na której odstęp między kreskami są mniejsze niż na skali głównej.

odśrodkowa siła bezwładności ($\vec{F}_o$), *fictitious centrifugal force*, siła bezwładności mierzona w niutonach [N], pojawiająca się w wirującym z prędkością kątową ($\vec{\omega}$) układzie odniesienia, której wartość wynosi

$$F_o = m\omega^2 r, \quad [F_o] = \text{N}$$

- m – masa cząstki
- r – odległość cząstki od osi obrotu

Odśrodkowa siła bezwładności, działająca na cząstkę, jest skierowana od osi obrotu i leży na prostej prostopadłej do osi obrotu.



Rys. 011. Wykres zależności wartości odśrodkowej siły bezwładności (F_o) od odległości cząstki od osi obrotu (r)

okres drgań (T), *vibration period*, czas potrzebny na wykonanie jednego pełnego drgania. Okres drgań mierzony jest w sekundach [s].

okres drgań wahadła fizycznego (T), *period of oscillation of the physical pendulum*, czas, w ciągu którego wahadło fizyczne wykonuje jedno pełne drganie.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}, \quad [T] = \text{s}$$

- I – moment bezwładności wahadła względem poziomej osi obrotu
- m – masa wahadła

- g – przyspieszenie ziemskie
- d – odległość osi obrotu od środka masy wahadła

okres drgań wahadła matematycznego (T), *period of oscillation of the mathematical pendulum*, czas, w ciągu którego wahadło matematyczne wykonuje jedno pełne drganie.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad [T] = \text{s}$$

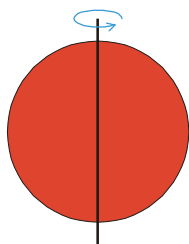
- l – długość wahadła matematycznego
- g – przyspieszenie ziemskie

oscylator harmoniczny, *harmonic oscillator*, cząstka wykonująca ruch drgający harmoniczny prosty. Równanie ruchu jednowymiarowego oscylatora harmonicznego można zapisać w poniższej postaci.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

- x – wychylenie
- t – czas
- T – okres drgań
- ω – częstotliwość kątowa
- f – częstotliwość drgań

oś obrotu, *axis of rotation*, prosta, na której znajdują się środki okręgów będących torami punktów bryły sztywnej wykonującej ruch obrotowy.



Rys. 012. Oś obrotu

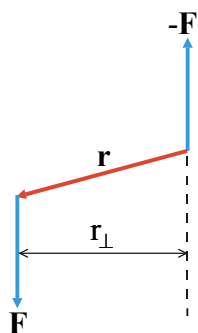
paralaksa, *parallax*, pozorne przemieszczenie przedmiotu względem tła, zależne od położenia oczu obserwatora. Paralaksa jest źródłem błędnych odczytów z przyrządów wskazówkowych.

para sił, *couple of forces*, dwie równoległe siły ($\vec{F}$ i $-\vec{F}$) o przeciwnych zwrotach i jednakowych wartościach. Wypadkowy moment pary sił względem dowolnego punktu jest taki sam.

$$\begin{aligned} \vec{M} &= \vec{r} \times \vec{F} \\ M &= rF \sin \angle(\vec{r}, \vec{F}) = r_{\perp} F \\ [M] &= \text{J} \end{aligned}$$

- $\vec{r}$ – promień wodzący łączący początki wektorów sił ($\vec{F}$ i $-\vec{F}$)
- $r_{\perp} = r \sin \angle(\vec{r}, \vec{F})$ – ramię pary sił

Moment pary sił mierzony jest w dżulach [J].



Rys. 013. Para sił

pęd ($\vec{p}$), *momentum*, wielkość wektorowa, będąca iloczynem masy (m) poruszającej się cząstki i jej prędkości ($\vec{v}$).

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad p = mv, \quad [p] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

Pęd układu cząstek jest sumą wektorową pędów poszczególnych cząstek.

pierwsza zasada dynamiki, *first principle of dynamics, Newtons's first law of motion*, hipoteza stwierdzająca, że istnieją inercjalne układy odniesienia, czyli układy, w którym swobodna cząstka pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym wtedy i tylko wtedy, gdy suma działających na nią sił zewnętrznych jest równa zero. Pierwsza zasada dynamiki nazywana jest również zasadą bezwładności.

B Sir Isaac Newton (1643-1727), angielski fizyk, matematyk, astronom i filozof.

położenie równowagi, *vibration centre*, inna nazwa środka drgań.

popęd siły ($\vec{\pi}$), *impulse of force*, wielkość wektorowa będąca iloczynem siły ($\vec{F}$) i czasu jej działania (Δt).

$$\vec{\pi} = \vec{F} \Delta t$$

$$\pi = F \Delta t$$

$$[\pi] = \text{N} \cdot \text{s}$$

praca (W), *work*, wielkość skalarna, mierzona w dżulach [J]. Powiadamy, że stała siła ($\vec{F}$), działająca na cząstkę i powodująca jej przemieszczenie po prostoliniowym torze o długości (S), wykonuje pracę:

$$W = FS \cos \alpha, \quad [W] = \text{J}$$