

Fizyka mało znana



Zbigniew Osiak

Zasady zachowania w fizyce

07

ORCID

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>

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

Zbigniew Osiak (Tekst)

FIZYKA MAŁO ZNANA
Zasady zachowania w fizyce

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© 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.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-4236-5

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“*Fizyka mało znana – Zasady zachowania w fizyce*” zawiera pomocnicze materiały do prowadzonego przeze mnie seminarium dla słuchaczy Uniwersytetu Trzeciego Wieku w Uniwersytecie Wrocławskim.

Szczegółowe informacje dotyczące sygnalizowanych tam zagadnień zainteresowani Czytelnicy znajdą w innych moich eBookach:

Z. Osiak: *Elektryczność*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Szczególna Teoria Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Ogólna Teoria Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Antygravitacja*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Giganci Teorii Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Energia w Szczególnej Teorii Względności*. SP (2012).

Z. Osiak: *Energy in Special Relativity*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Seminarium

FIZYKA MAŁO ZNANA

Zasady zachowania w fizyce

dr Zbigniew Osiak

Portrety i rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

- Zasady zachowania

Zasady zachowania w klasycznej fizyce nierelatywistycznej

- Zasada zachowania masy
 - Masa
 - Zasada zachowania masy
 - Równanie bilansu masy
 - Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)
 - Michaił Wasiljewicz Łomonosow (1711-1765)
- Zasada zachowania energii
 - Energia
 - Energia kinetyczna
 - Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843)
 - Zasada zachowania energii
 - Julius Robert von Mayer (1814-1878)
 - Pierwsza zasada termodynamiki

-
- Zasada zachowania energii mechanicznej
 - James Clerk Maxwell (1831-1879)
 - Wahadło Galileusza
 - Galileo Galilei [Galileusz] (1564-1642)
 - Zasada zachowania pędu
 - Pęd
 - Zasada zachowania pędu
 - Kulki Newtona
 - Sir Isaac Newton (1643-1727)
 - Napęd odrzutowy
 - Twierdzenie o ruchu środka masy
 - Zasada zachowania momentu pędu
 - Moment pędu (kręt)
 - Zasada zachowania momentu pędu
 - Warunki równowagi dźwigni dwustronnej
 - Warunki równowagi dźwigni jednostronnej

- Zasada zachowania ładunku elektrycznego
 - Ładunek elektryczny
 - Zasada zachowania ładunku elektrycznego
- Twierdzenie Noether
 - Twierdzenie Noether
 - Amalie Emmy Noether (1882-1935)

Zasady zachowania w szczególnej teorii względności

- Prawo zachowania pędu-energii
 - Czterowektor pędu-energii
 - Równania ruchu Minkowskiego
 - Prawo zachowania pędu-energii
 - Hermann Minkowski (1864-1909)

Zasady zachowania w fizyce kwantowej

- Zasada nieokreśloności a zasady zachowania

-
- Zasada nieokreśloności
 - Werner Karl Heisenberg (1901-1976)
 - Liczby kwantowe
 - Liczba barionowa
 - Liczby leptonowe
 - Dziwność
 - Piękno
 - Powab
 - Prawda
 - Izospin
 - Trzecia składowa izospinu
 - Hiperładunek
 - Ładunek kolorowy
 - Ładunek antykolorowy
 - Ładunek bezbarwny

- Zasady zachowania parzystości
 - Parzystość przestrzenna P
 - Zasada zachowania parzystości przestrzennej P
 - Niezachowanie parzystości przestrzennej P
 - Tsung Dao Lee (ur. 1926)
 - Chen Ning Yang (ur. 1922)
 - Chien Shiung Wu (1912-1997)
 - Doświadczenie Goldhabera-Grodzinsa-Sunyara
 - Parzystość ładunkowa C
 - Zasada zachowania parzystości ładunkowej C
 - Parzystość kombinowana CP
 - Zasada zachowania parzystości kombinowanej CP
 - Niezachowanie parzystości kombinowanej CP
 - Parzystość kombinowana CPT
 - Zasada zachowania parzystości kombinowanej CPT

-
- Zasady zachowania $\Leftrightarrow$ twierdzenia formułujące warunki, w których dane wielkości fizyczne pozostają niezmiennie w czasie.

Zasady zachowania w klasycznej fizyce nierelatywistycznej

- Masa
- Zasada zachowania masy
- Równanie bilansu masy
- Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)
- Michaił Wasiljewicz Łomonosow (1711-1765)

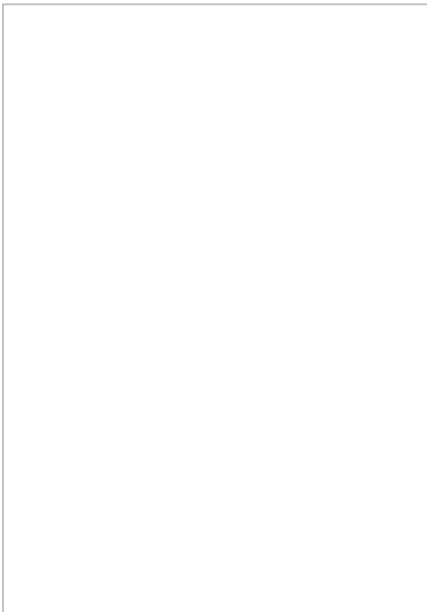
- Masa (m) $\Leftrightarrow$ wielkość skalarna mierzona w kilogramach [kg], będąca jednocześnie miarą bezwładności ciała, ilości zawartej w nim materii oraz jego zdolności do oddziaływania grawitacyjnego z innymi ciałami.

- Zasada zachowania masy $\Leftrightarrow$ zasada głosząca, że w układzie niewymieniającym masy z otoczeniem suma mas wszystkich ciał należących do tego układu jest stała.

- Równanie bilansu masy $\Leftrightarrow$ równanie przedstawiające, od czego zależy całkowita zmiana masy danego k-tego składnika (Δm_k).

$$\Delta m_k = \Delta_i m_k + \Delta_e m_k$$

- $\Delta_i m_k$ – zmiana masy k-tego składnika spowodowana przebiegiem reakcji chemicznych wewnątrz układu
- $\Delta_e m_k$ – zmiana masy k-tego składnika spowodowana jego wymianą między układem a otoczeniem
- W układach zamkniętych oraz izolowanych całkowita masa wszystkich składników pozostaje stała.



francuski fizyk i chemik

1743 - Urodził się 26 sierpnia w Paryżu.

1789 - Sformułował pierwszą wersję prawa zachowania masy.

1794 - Zmarł 8 maja w Paryżu. Został stracony na gilotynie w wyniku wyroku Trybunału Rewolucyjnego Republiki za to, że był dzierżawcą podatkowym.

- Antoine Lavoisier: *Traité de élémentaire de chimie*. 1789.
Podstawowy traktat o chemii.

rosyjski uczony

1711 - Urodził się 8/19 listopada w Denisówce (później Łomonosowo) pod Chołmogorami koło Archangielska.

- Niezależnie od Lavoisiera sformułował prawo zachowania masy w reakcjach chemicznych.

1765 - Zmarł 4/15 kwietnia w Sankt Petersburgu.

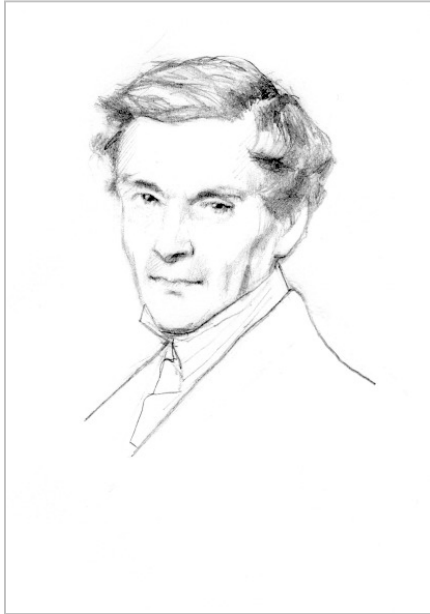
- Energia
- Energia kinetyczna
- Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843)
- Zasada zachowania energii
- Julius Robert von Mayer (1814-1878)
- Pierwsza zasada termodynamiki
- Zasada zachowania energii mechanicznej
- James Clerk Maxwell (1831-1879)
- Wahadło Galileusza
- Galileo Galilei [Galileusz] (1564-1642)

- Energia (E) $\Leftrightarrow$ wielkość skalarna mierzona w dżulach, 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.

- Energia kinetyczna (E_k) $\Leftrightarrow$ energia cząstki o masie (m), poruszającej się z szybkością (v), mierzona w dżulach [J].

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

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



francuski fizyk i inżynier

1792 - Urodził się 21 maja w Paryżu.

- Ukończył École Polytechnique.

1816 - Został profesorem w École Polytechnique.

1829 - Podał definicję pracy i energii kinetycznej.

1835 - Odkrył siłę bezwładności działającą na poruszający się punkt w obracającym się układzie odniesienia – siła Coriolisa.

1836 - Został członkiem Paryskiej Akademii Nauk.

1843 - Zmarł 19 września w Paryżu.

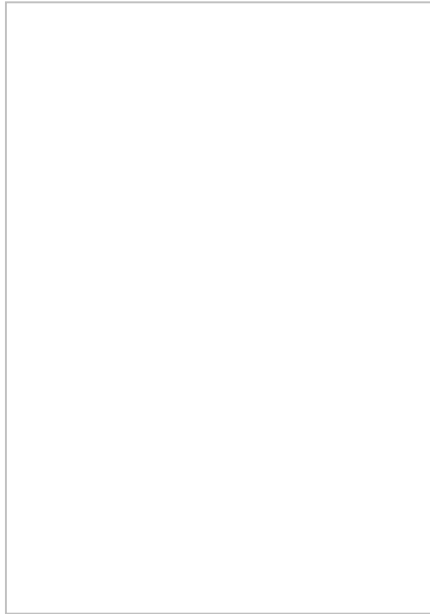
• G. G. Coriolis: *Du calcul de l'effet des machines, ou Considérations sur l'emploi des moteurs et sur leur évaluation : pour servir d'introduction à l'étude spéciale des machines.* 1829.

O rachowaniu wydajności maszyn.

- Zasada zachowania energii $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że w danym układzie odizolowanym od wszelkich wpływów zewnętrznych suma wszystkich form energii jest wielkością stałą.

H Zasadę zachowania energii sformułował Julius Robert von Mayer w 1845.

K Ta informacja może szokować, ale pojęcie energii pojawiło się w fizyce stosunkowo późno. Można tylko podziwiać intuicję Mayera, który jako lekarz okrętowy, podczas rejsu w tropiki, na podstawie obserwacji zmniejszonej różnicy w kolorze krwi żyłnej i tętniczej, leczonych przez niego marynarzy, sformułował fundamentalne prawo fizyki.



niemiecki lekarz i fizyk

1814 - Urodził się 25 listopada w Heilbronn.

1878 - Zmarł 20 marca na tuberkulozę.

Ciekawostki

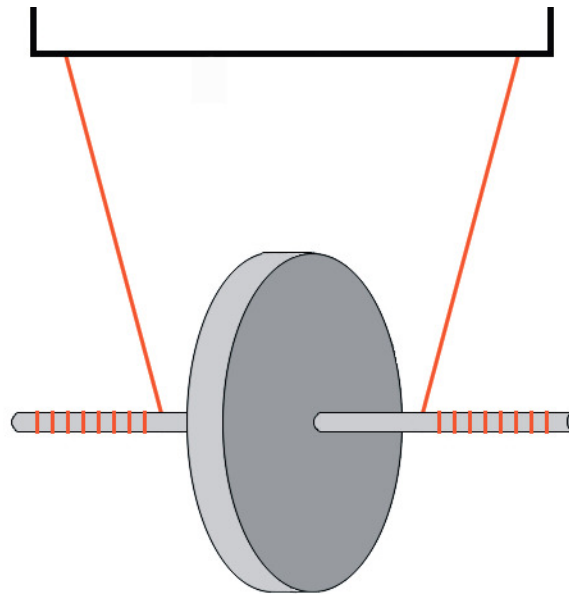
- Praca *Die organische Bewegung im Zusammenhang mit dem Stoffwechsel* (*Ruch organiczny w związku z przemianą materii*), w której sformułował zasadę zachowania energii oraz podał wartość mechanicznego równoważnika ciepła, została wydana w 1845 w formie broszury na koszt autora.

- Pierwsza zasada termodynamiki $\Leftrightarrow$ podstawowa zasada termodynamiki, formułowana w postaci równania bilansu energii wewnętrznej.

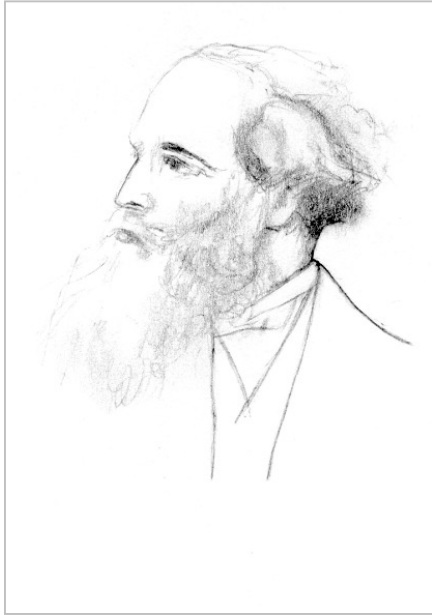
$$\Delta U = \Delta_i U + \Delta_e U$$

- ΔU – całkowita zmiana energii wewnętrznej
- $\Delta_i U$ – zmiana energii wewnętrznej spowodowana przebiegiem procesów wewnątrz układu
- $\Delta_e U$ – zmiana energii wewnętrznej spowodowana wymianą masy i energii między układem a otoczeniem

- Zasada zachowania energii mechanicznej $\Leftrightarrow$ zasada głosząca, że jeżeli jedynymi siłami działającymi między ciałami układu są siły grawitacyjne, to energia mechaniczna tych ciał pozostaje stała.



- P** Suma energii potencjalnej i kinetycznej ruchów postępowego oraz obrotowego koła Maxwella jest stała.
- C** Odmianą koła Maxwella jest znana zabawka zwana jojo.



szkocki fizyk teoretyk

1831 - Urodził się 13 czerwca w Edynburgu.

1847/1850 - Studiował fizykę na uniwersytecie w Edynburgu.

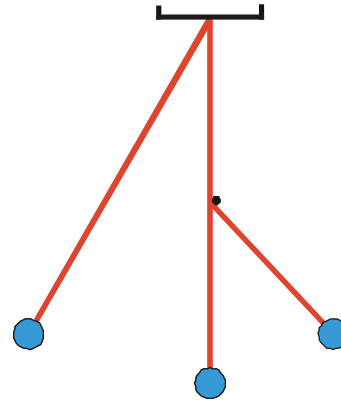
1850/1854 - Po przeniesieniu się do Cambridge studiował w Petershouse College i w Trinity College.

1871 - Został profesorem fizyki eksperymentalnej w Cambridge.

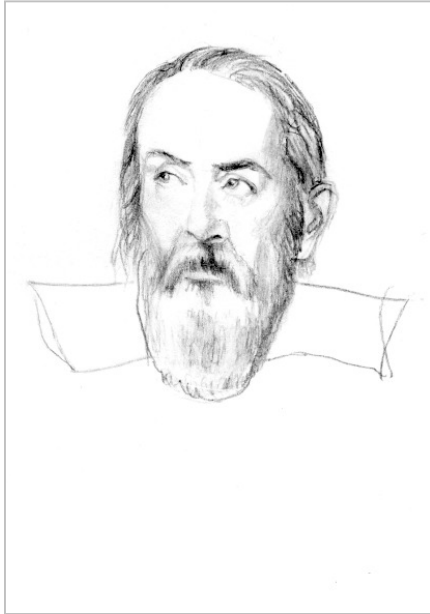
1873 - Opublikował *Traktat o elektryczności i magnetyzmie*.

1879 - Zmarł na raka żołądka 5 listopada w Cambridge.

- Wahadło Galileusza $\Leftrightarrow$ wahadło matematyczne o regulowanej długości, służące do demonstrowania zasady zachowania energii mechanicznej.



- Po zmianie długości wahadła, wskutek zastosowania blokady (czarny punkt), cząstka wzniesie się po prawej stronie na początkową wysokość, z której rozpoczęła ruch po lewej stronie.



włoski fizyk, matematyk, astronom i filozof

1564 - Urodził się 15 lutego w Pizie.

1581/5 - Studiował medycynę, matematykę i fizykę na uniwersytetach w Pizie i we Florencji.

1589 - Otrzymał katedrę matematyki na uniwersytecie w Pizie.

1592 - Objął katedrę matematyki na uniwersytecie w Padwie.

1610 - Powrócił do Pizy.

1633 - Wyrokiem Inkwizycji został skazany na bezterminowy areszt domowy za popieranie heliocentrycznej teorii Kopernika.

1642 - Zmarł 8 stycznia w Arcetri koło Florencji.

- Pęd
- Zasada zachowania pędu
- Kulki Newtona
- Sir Isaac Newton (1643-1727)
- Napęd odrzutowy
- Twierdzenie o ruchu środka masy

- Pęd ($\vec{p}$) $\Leftrightarrow$ wielkość wektorowa, będąca iloczynem masy (m) poruszającej się cząstki i jej prędkości ($\vec{v}$).

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

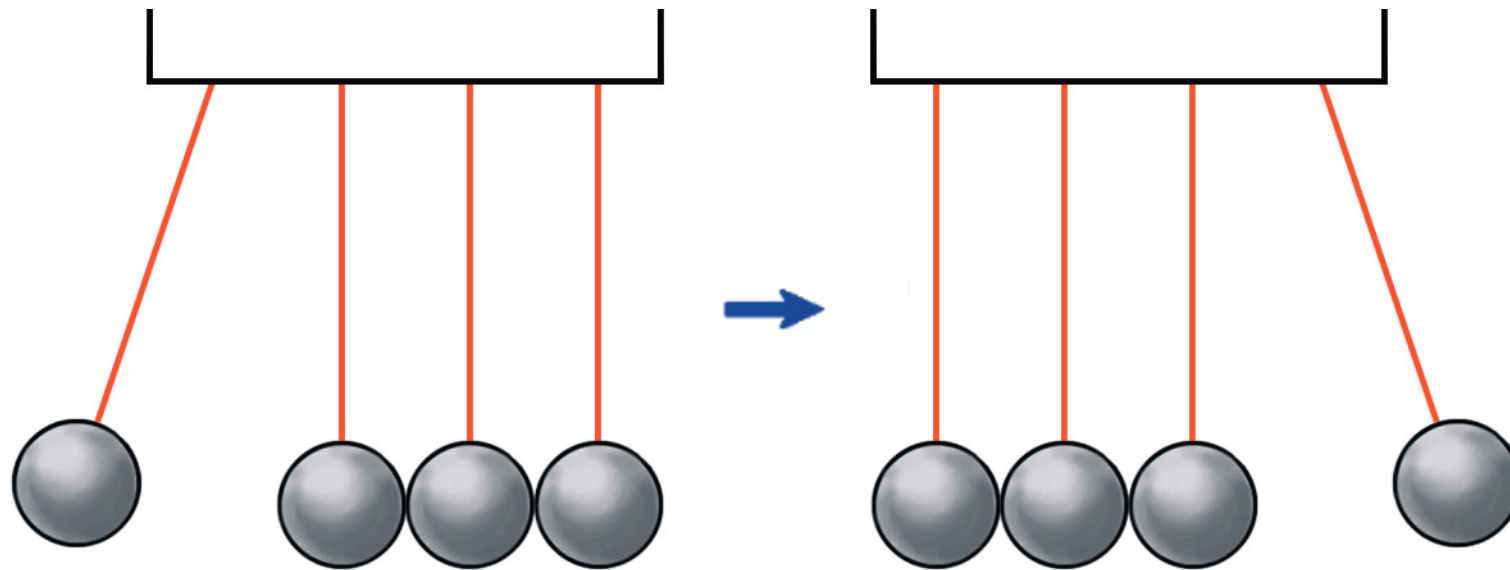
- Pęd układu cząstek jest sumą wektorową pędów poszczególnych cząstek.

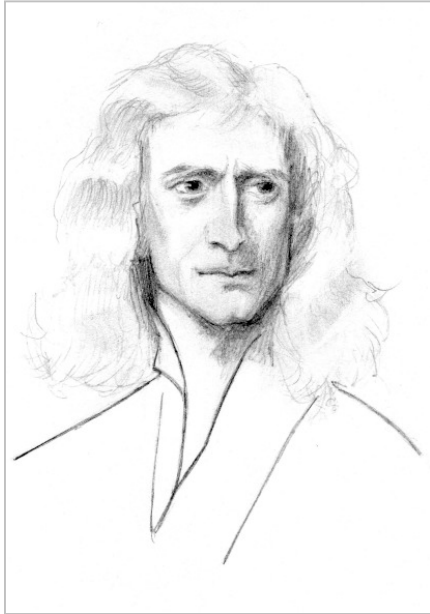
- Zasada zachowania pędu $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że jeżeli wypadkowa wszystkich sił zewnętrznych działających na każdą cząstkę znajdującą się w układzie inercyjnym jest równa zero, to wypadkowy pęd wszystkich cząstek pozostaje stały.

K Jeżeli w jednorodnym polu grawitacyjnym oprócz sił grawitacyjnych nie działają na cząstki żadne inne siły zewnętrzne, to zasada zachowania pędu spełniona jest tylko w płaszczyźnie poziomej.

- Zasada zachowania pędu wynika z drugiej zasady dynamiki, stanowiącej, że w układzie inercyjnym siła ($\vec{F}$) działająca na swobodną cząstkę jest równa pochodnej pędu ($\vec{p}$) tej cząstki względem czasu.

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





1643 - Urodził się 4 stycznia w Woolsthorpe.

1661/65 - Studiował w Trinity College w Cambridge.

1667 - Został *minor fellow* w Trinity College.

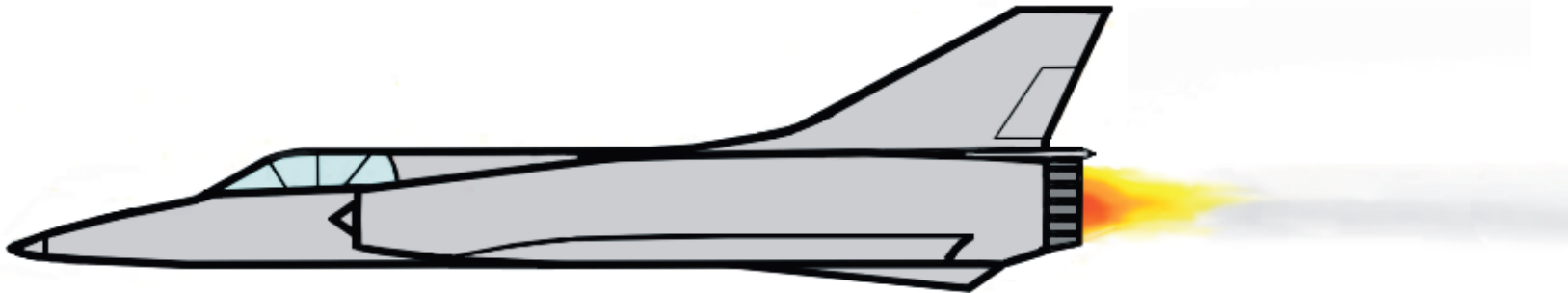
1668 - Został *major fellow* w Trinity College.

1669 - Został *Lucasian professor* w Trinity College.

1705 - Otrzymał tytuł szlachecki.

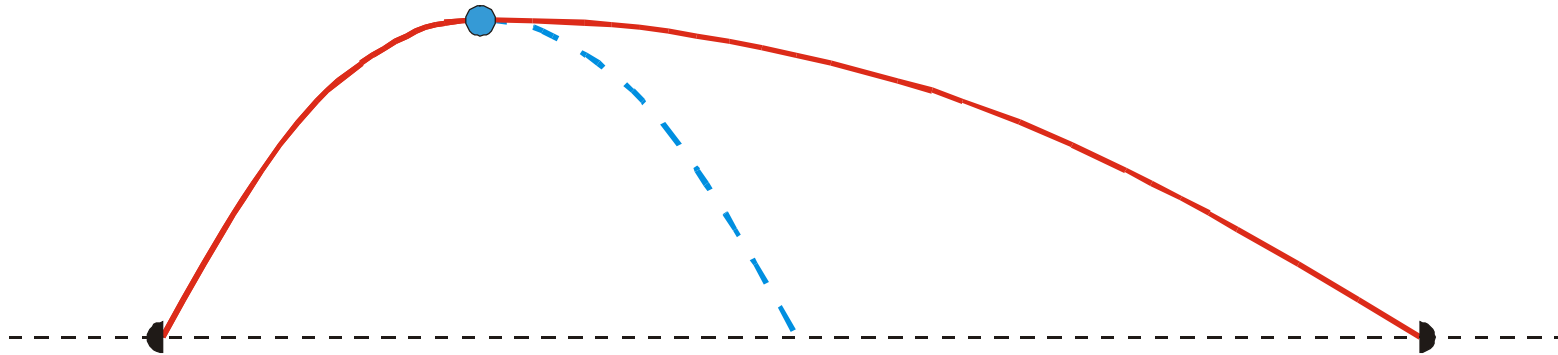
1727 - Zmarł 31 marca w Londynie.

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



- Twierdzenie o ruchu środka masy:

Wybuch pocisku nie wpływa na ruch środka masy pocisku.



P Jeżeli wystrzelony ukośnie pocisk w najwyżej położonym punkcie toru rozerwie się na dwie identyczne części, z których jedna powróci do miejsca wystrzału, to druga upadnie w odległości dwukrotnie większej niż wynosiłby zasięg nieeksplodującego pocisku.

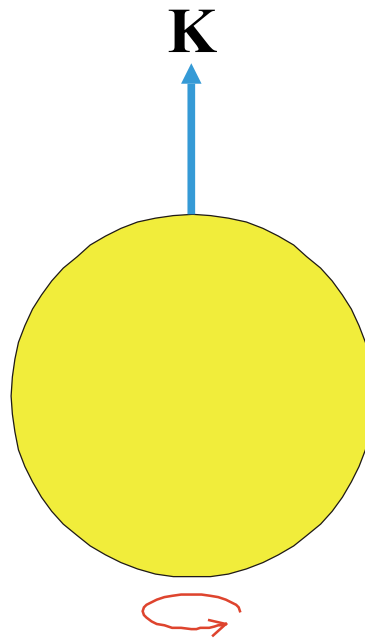
- Moment pędu (kręt)
- Zasada zachowania momentu pędu
- Warunki równowagi dźwigni dwustronnej
- Warunki równowagi dźwigni jednostronnej

- Moment pędu (kręt) ($\vec{K}$) $\Leftrightarrow$ wielkość wektorowa, związana z ruchem obrotowym bryły sztywnej.
- 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

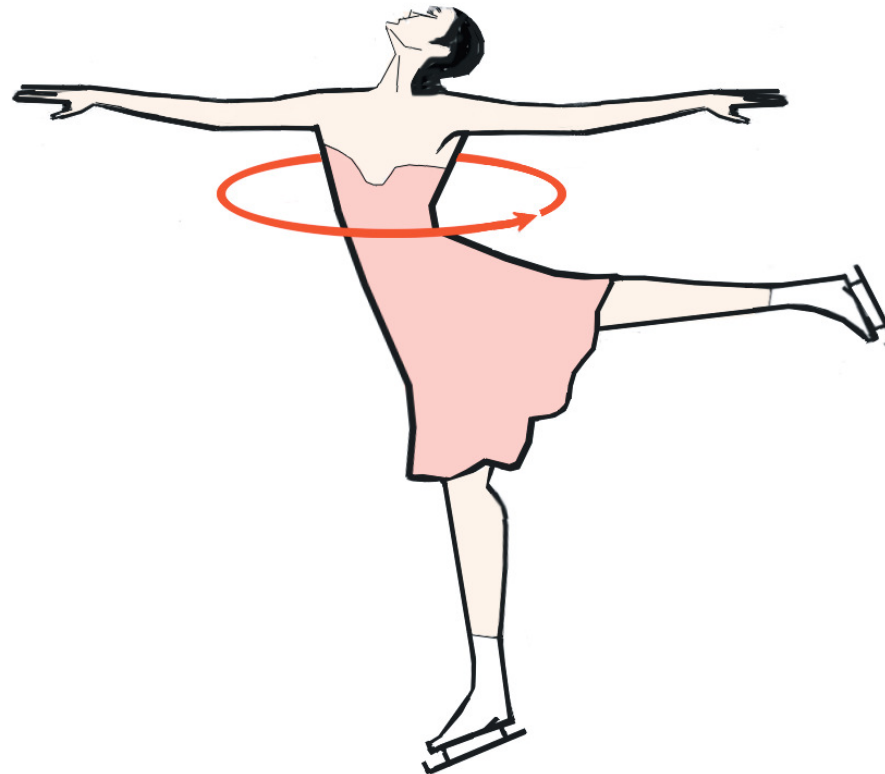
- Kierunek momentu pędu pokrywa się ze swobodną osią obrotu, a jego zwrot jest zgodny ze zwrotem ruchu postępowego śruby prawoskrętnej obracanej w kierunku obrotu bryły.



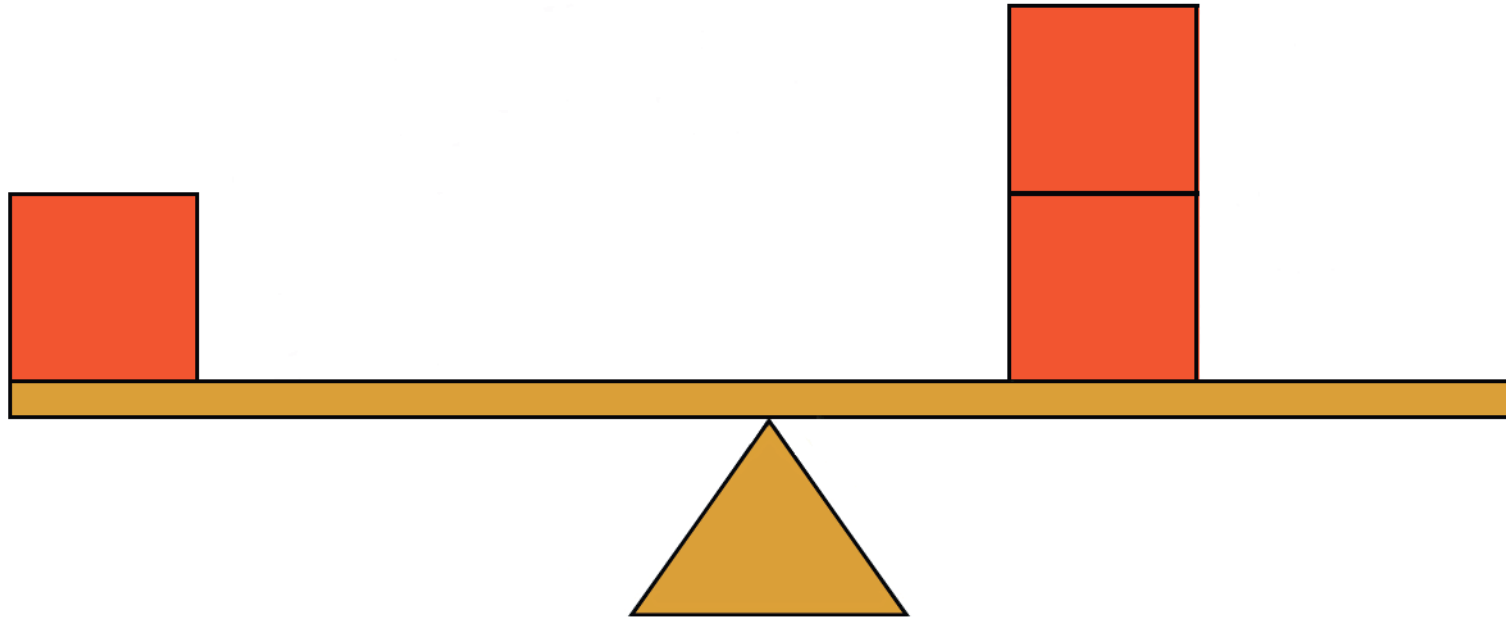
- Zasada zachowania momentu pędu $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca że, jeżeli wypadkowy moment wszystkich sił zewnętrznych działających na swobodną bryłę sztywną jest równy zeru, to moment pędu tej bryły pozostaje stały.
- Przy czym moment sił i moment pędu są określone względem ustalonego nieruchomego punktu.
- Zasada zachowania momentu pędu wynika z drugiej zasady dynamiki ruchu obrotowego, stanowiącej, że w układzie inercjalnym całkowity moment sił zewnętrznych ($\vec{M}$), działających na swobodną bryłę sztywną, jest równy pochodnej momentu pędu ($\vec{K}$) bryły względem czasu.

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

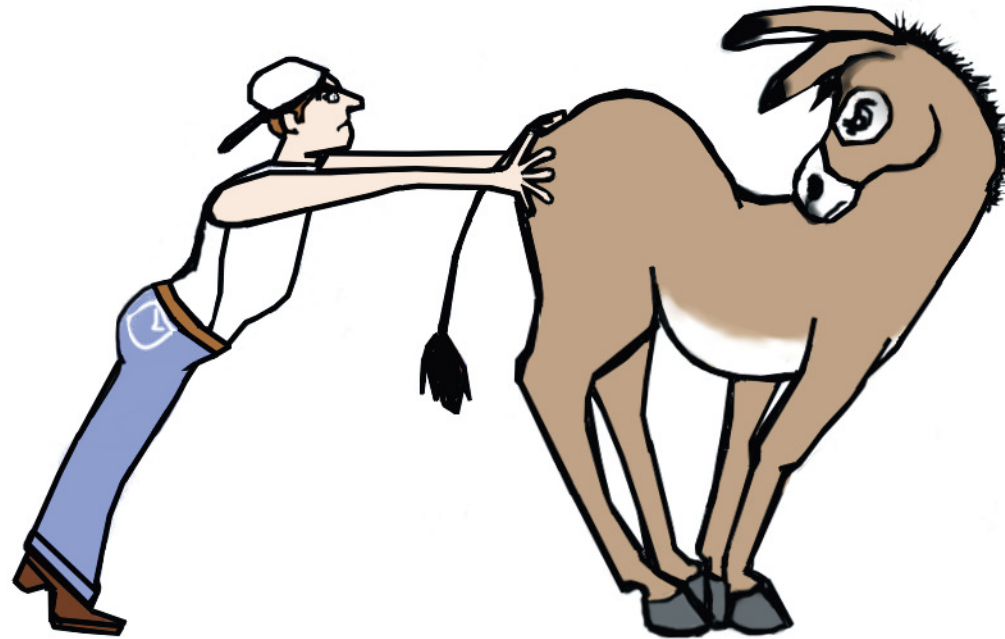
P Zasada zachowania momentu pędu wykorzystywana jest podczas wykonywania piruetu. Łyżwiarka, zmniejszając moment bezwładności względem osi obrotu (w stosunku do początkowej pozycji przedstawionej na rysunku), zwiększa wartość swojej prędkości kątowej.



- Warunki równowagi dźwigni dwustronnej $\Leftrightarrow$ prawo stwierdzające, że wypadkowy moment sił zewnętrznych działających na dźwignię, liczony względem punktu leżącego na nieruchomej osi obrotu, musi być równy zero.



- Warunki równowagi dźwigni jednostronnej $\Leftrightarrow$ prawo stwierdzające, że wypadkowy moment sił działających na dźwignię, liczony względem punktu leżącego na nieruchomej osi obrotu, musi być równy zeru.



P Na powyższym rysunku dźwignią jednostronną jest ciało człowieka, stopy stanowią oś obrotu. Siłami, których momenty się równoważą, są ciężar człowieka i siła oporu stawianego przez osła.

- Ładunek elektryczny
- Zasada zachowania ładunku elektrycznego

- Ładunek elektryczny (q, Q) $\Leftrightarrow$ wielkość skalarna charakteryzująca cząstki elementarne, będące źródłami pól elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych, oraz ich oddziaływania z tymi polami.
- Spoczywające cząstki obdarzone ładunkiem wytwarzają stałe pola elektryczne. Cząstki poruszające się ruchem jednostajnym prostoliniowym – pola elektryczne i magnetyczne, a poruszające się ruchem przyspieszonym – pola elektromagnetyczne.
- Wyróżniamy dwa rodzaje ładunków – dodatnie i ujemne.

- Jednostką ładunku w układzie SI jest kulomb [C].
- Ładunek elektryczny jest wielkością skwantowaną, tzn. jest całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego (e).

$$e = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

- W teorii kwarków postuluje się istnienie ładunków co do bezwzględnej wartości mniejszych od ładunku elementarnego.

- Zasada zachowania ładunku elektrycznego $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że w układzie niewymieniającym ładunków elektrycznych z otoczeniem suma algebraiczna wszystkich ładunków znajdujących się w układzie jest wielkością stałą.

- Twierdzenie Noether
- Amalie Emmy Noether (1882-1935)

- Twierdzenie Noether $\Leftrightarrow$ twierdzenie wiążące zasady zachowania w fizyce między innymi z własnościami czasu i przestrzeni.

Twierdzenie to sformułowane zostało przez Noether w 1918.

P Zasada zachowania energii wynika z jednorodności czasu.

P Zasada zachowania pędu wynika z jednorodności przestrzeni.

P Zasada zachowania momentu pędu wynika z izotropowości przestrzeni.



niemiecka matematyczka

1882 - Urodziła się 23 marca w Erlangen.

1900/02 - Studiowała bez matrykulacji matematykę w Erlangen.

1903 - Studiowała bez matrykulacji matematykę w Getyndze.

1904 - Uzyskała pozwolenie na matrykulację na uniwersytecie w Erlangen.

1907 - Doktoryzowała się na uniwersytecie w Erlangen.

- Pracowała jako wolontariuszka w instytucie matematyki uniwersytetu w Erlangen.

1915 - Hilbert zaprosił ją do Getyngi.

- Pracowała jako wolontariuszka w instytucie matematyki uniwersytetu w Getyndze.

1919 - Habilitowała się w Getyndze.

1922 - Otrzymała tytuł *nieoficjalnego profesora nadzwyczajnego* (*nichtbeamteteter ausserordentlicher Professor*) w Getyndze, umożliwiając jej prowadzenie wykładów.

1928/29 - Wykładała w Moskwie.

1930 - W semestrze letnim wykładała we Frankfurcie.

1933 - Wyemigrowała w październiku do Stanów Zjednoczonych. Została zatrudniona w Bryn Mawr College oraz w Instytucie Studiów Zaawansowanych w Princeton.

1935 - Zmarła 14 kwietnia w Bryn Mawr (Pensylwania) z powodu komplikacji po operacji.

Wyniki

- Udowodniła (1918) twierdzenie o związku praw zachowania ze współzmienniczością równań ruchu względem ciągłych transformacji (twierdzenie Noether).
- Stworzyła algebrę abstrakcyjną badającą ciała, pierścienie, ideały, itp.
- Wprowadziła (1933) algebry nieprzemienne.

Ciekawostki

- Ojcem Emmy był Max Noether (1844-1921), znany matematyk niemiecki, rektor Uniwersytetu w Erlangen. Jego córka, zgodnie z ówczesnie panującym prawem, mogła studiować w latach (1900-1903) jedynie bez matrykulacji, uczęszczając jako wolna słuchaczka na wykłady z lingwistyki i matematyki.
- W 1904 przyznano kobietom prawo do studiowania na uniwersytetach.
- W 1919 przyznano kobietom prawo do habilitacji.

Zasady zachowania w szczególnej teorii względności

- Czterowektor pędu-energii
- Równania ruchu Minkowskiego
- Prawo zachowania pędu-energii
- Hermann Minkowski (1864-1909)

- Czterowektor pędu-energii $\Leftrightarrow$ czterowektor określony poniżej:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{p}}^{\text{df}} &= m\tilde{\mathbf{v}} = (\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \tilde{p}_3, \tilde{p}_4) \\ \tilde{p}_1 &= m\tilde{v}_1 = m\gamma v_x = p_x \\ \tilde{p}_2 &= m\tilde{v}_2 = m\gamma v_y = p_y \\ \tilde{p}_3 &= m\tilde{v}_3 = m\gamma v_z = p_z \\ \tilde{p}_4 &= m\tilde{v}_4 = im\gamma c = 2i\gamma^{-1}c^{-1}E \\ E &= \frac{1}{2}m\gamma^2c^2, \quad \gamma = \left(1 - v^2c^{-2}\right)^{-\frac{1}{2}}\end{aligned}$$

- E – całkowita energia ciała o masie (m) poruszającego się z prędkością ($\mathbf{v}$)
- γ – czynnik Lorentza

- Równania ruchu Minkowskiego $\Leftrightarrow$ równania przedstawione poniżej:

$\tilde{\mathbf{F}} = (\tilde{F}_1, \tilde{F}_2, \tilde{F}_3, \tilde{F}_4) =$ czterowektor siły

$$\tilde{F}_1 = \gamma \frac{d\tilde{p}_1}{dt} = \gamma \frac{d(m\tilde{v}_1)}{dt} = \gamma \frac{d(m\gamma v_1)}{dt} = \gamma \frac{dp_1}{dt} = m\gamma \frac{d\tilde{v}_1}{dt} = m\tilde{a}_1$$

$$\tilde{F}_2 = \gamma \frac{d\tilde{p}_2}{dt} = \gamma \frac{d(m\tilde{v}_2)}{dt} = \gamma \frac{d(m\gamma v_2)}{dt} = \gamma \frac{dp_2}{dt} = m\gamma \frac{d\tilde{v}_2}{dt} = m\tilde{a}_2$$

$$\tilde{F}_3 = \gamma \frac{d\tilde{p}_3}{dt} = \gamma \frac{d(m\tilde{v}_3)}{dt} = \gamma \frac{d(m\gamma v_3)}{dt} = \gamma \frac{dp_3}{dt} = m\gamma \frac{d\tilde{v}_3}{dt} = m\tilde{a}_3$$

$$\tilde{F}_4 = \gamma \frac{d\tilde{p}_4}{dt} = \gamma \frac{d(m\tilde{v}_4)}{dt} = \gamma \frac{d(m\gamma v_4)}{dt} = i\gamma \frac{d(m\gamma c)}{dt} = m\gamma \frac{d\tilde{v}_4}{dt} = m\tilde{a}_4$$

$$\tilde{\mathbf{F}} = \gamma \frac{d\tilde{\mathbf{p}}}{dt} = m\gamma \frac{d\tilde{\mathbf{v}}}{dt} = m\tilde{\mathbf{a}}$$

- Prawo zachowania pędu-energii $\Leftrightarrow$ prawo stanowiące, że:
Jeżeli wszystkie składowe czterowektora siły działającej na cząstkę są równe zero, to wszystkie składowe czterowektora pędu-energii tej cząstki są stałe w czasie.

P W szczególności mamy:

$$\tilde{\mathbf{F}} = 0 \Rightarrow \tilde{F}_4 = 0 \Rightarrow \gamma = \text{const} \Rightarrow E = \frac{1}{2} m \gamma^2 c^2 = \text{const}$$

- Z. Osiak: *Energia w Szczególnej Teorii Względności*. Self Publishing (2012). ISBN: 978-83-272-3465-0
- Z. Osiak: *Energy in Special Relativity*. viXra: 1512.0449 (2015)
- Z. Osiak: *Szczególna Teoria Względności*. Self Publishing (2012) ISBN: 978-83-272-3464-3



niemiecki matematyk i fizyk-teoretyk

1864 - Urodził się 22 czerwca 1864 roku we wsi Aleksoty [Aleksotas] koło Kowna.

1872 - Jego rodzina osiedliła się w Królewcu.

- Studiował na Uniwersytecie Królewieckim za wyjątkiem trzech semestrów, które spędził w Berlinie.

1885 - Otrzymał stopień doktora na

Uniwersytecie Królewieckim.

1885/1894 - Wykładał w Bonn, od 1892 jako profesor.

1894/1896 - Wykładał w Królewcu.

1896/1902 - Pracował w Eidgenossiche Technische Hochschule w Zurichu.

1902 - Został profesorem w Getyndze.

1909 - Zmarł 12 stycznia w Getyndze.

Zasady zachowania w fizyce kwantowej

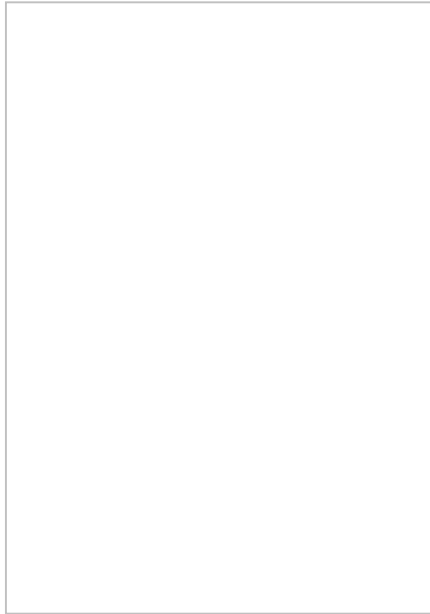
- Zasada nieokreśloności
- Werner Karl Heisenberg (1901-1976)

- Zasada nieokreśloności $\Leftrightarrow$ zasada sformułowana przez Heisenberga w 1927, głosząca, że istnieją pary wielkości, których nie można jednocześnie zmierzyć z dowolną dokładnością. Parami tymi są m.in. położenie i pęd cząstki oraz energia i czas.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

- Zasada nieokreśloności nie ma nic wspólnego z dokładnością przyrządów pomiarowych. Jest ona związana z wpływem aktu pomiaru na przebieg zjawiska.



niemiecki fizyk teoretyk

1901 - Urodził się 5 grudnia w Würzburgu.

1923 - Doktoryzował się na uniwersytecie w Getyndze.

1925 - Sformułował (1925) macierzową mechanikę kwantową.

1927 - **Odkrył zasadę nieokreśloności.**

1932 - Otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki za

„stworzenie mechaniki kwantowej, której zastosowanie doprowadziło między innymi do odkrycia alotropowych postaci wodoru”.

1976 - Zmarł 1 lutego w Monachium.

- Liczba barionowa
- Liczby leptonowe
- Dziwność
- Piękno
- Powab
- Prawda
- Izospin (spin izotopowy)
- Trzecia składowa izospinu
- Hiperładunek
- Ładunek kolorowy
- Ładunek antykolorowy
- Ładunek bezbarwny

- Liczba barionowa (B) $\Leftrightarrow$ liczba kwantowa przyporządkowana cząstkom elementarnym w następujący sposób:

bariony	antybariony	kwarki	antyskwarki	inne
$B = 1$	$B = -1$	$B = 1/3$	$B = -1/3$	$B = 0$

- Zasada zachowania liczby barionowej głosi, że w układzie odosobnionym wypadkowa liczba barionowa jest stała.

- Liczby leptonowe $\Leftrightarrow$ cztery liczby kwantowe charakteryzujące leptony oraz antyleptony, czyli elektron (e), pozytron ($\bar{e}$), neutrino elektronowe (ν_e), antyneutrino elektronowe ($\bar{\nu}_e$), mion (μ), antymion ($\bar{\mu}$), neutrino mionowe (ν_μ), antyneutrino mionowe ($\bar{\nu}_\mu$), taon (τ), antytaon ($\bar{\tau}$), neutrino taonowe ($\bar{\nu}_\tau$) oraz antyneutrino taonowe ($\bar{\nu}_\tau$). Są nimi liczba leptonowa (L), elektronowa liczba leptonowa (L_e), mionowa liczba leptonowa (L_μ) oraz taonowa liczba leptonowa (L_τ), określone jak w tabelce:

	e	$\bar{e}$	ν_e	$\bar{\nu}_e$	μ	$\bar{\mu}$	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	τ	$\bar{\tau}$	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$
L	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
L_e	+1	-1	+1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
L_μ	0	0	0	0	+1	-1	+1	-1	0	0	0	0
L_τ	0	0	0	0	0	0	0	0	+1	-1	+1	-1

- Liczby leptonowe pozostałych cząstek elementarnych są równe zero.
- Zasada zachowania liczb leptonowych głosi, że w układzie odosobnionym wypadkowa każdej z czterech liczb leptonowych jest stała.

H Zasada zachowania liczb leptonowych dla każdej generacji leptonów oddzielnie została doświadczalnie potwierdzona przez Ledermana, Schwartza oraz Steinberga.

B Leon Max Lederman (ur. 1922), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Melvin Schwartz (1932-2006), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

B Jack Steinberger (ur. 1921), amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1988.

- Dziwność (S) $\Leftrightarrow$ liczba kwantowa będąca różnicą liczby antykwarków i kwarków dziwnych wchodzących w skład danej cząstki.
- Dziwność jest zachowana tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

P Kwark dziwny (s): $S = -1$.

P Antykwark dziwny ($\bar{s}$): $S = +1$.

P Elektron: $S = 0$.

P Proton (uud): $S = 0$.

P Neutron (udd): $S = 0$.

P Hiperon lambda (uds): $S = -1$.

P Hiperon omega (sss): $S = -3$.

- Piękno (B) $\Leftrightarrow$ addytywna liczba kwantowa będąca różnicą liczby antykwarków i kwarków dennych (pięknych) wchodzących w skład danej cząstki.
- Piękno jest zachowane tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

P Kwark denny (piękny) (b): $B = -1$.

P Antykwark denny (piękny) ($\bar{b}$): $B = +1$.

P Elektron: $B = 0$.

P Proton (uud): $B = 0$.

P Neutron (udd): $B = 0$.

- Powab (C) $\Leftrightarrow$ addytywna liczba kwantowa będąca różnicą liczby kwarków i antykwarków powabnych wchodzących w skład danej cząstki.
- Powab jest zachowany tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

P Kwark powabny (c): $C = +1$.

P Antykwark powabny ($\bar{c}$): $C = -1$.

P Elektron: $C = 0$.

P Proton (uud): $C = 0$.

P Neutron (udd): $C = 0$.

P Sigma (uuc): $C = +1$.

- Prawda (T) $\Leftrightarrow$ addytywna liczba kwantowa będąca różnicą ilości kwarków i antykwarków szczytowych (prawdziwych) wchodzących w skład danej cząstki.
- Prawda jest zachowana tylko w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

P Kwark szczytowy (prawdziwy) (t): $T = +1$.

P Antykwark szczytowy (prawdziwy) ($\bar{t}$): $T = -1$.

P Elektron: $T = 0$.

P Proton (uud): $T = 0$.

P Neutron (udd): $T = 0$.

- Izospin (I) $\Leftrightarrow$ addytywna liczba kwantowa przyporządkowana każdemu elementowi danego zbioru (multipletu) hadronów o porównywalnych masach, a różnych wartościach ładunku elektrycznego.

$$I = \frac{N - 1}{2}$$

- N – liczebność multipletu
- Izospin jest zachowany tylko w oddziaływaniach silnych.

H Pojęcie izospinu wprowadził Heisenberg w 1932.

P Singlet (hiperon lambda zero): $I = 0$.

P Dublet (proton, neutron): $I = 1/2$.

P Tryplet (mezon pi minus, mezon pi zero, mezon pi plus): $I = 1$.

- Elementom multipletu, z których każdy ma izospin, przypisuje się addytywną liczbę kwantową, tzw. trzecią składową izospinu (I_3), która zmienia się co jeden od $(-I)$ do $(+I)$ w kolejności wzrastających wartości ładunku elektrycznego.
- Trzecia składowa izospinu jest zachowana w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych.

P Singlet (hiperon lambda zero):

$$I_3 = 0.$$

P Dublet (proton, neutron):

$$I_3 = -(1/2) \text{ dla neutronu,}$$

$$I_3 = 1/2 \text{ dla protonu.}$$

P Tryplet (mezon pi minus, mezon pi zero, mezon pi plus):

$$I_3 = -1 \text{ dla mezonu pi minus,}$$

$$I_3 = 0 \text{ dla mezonu pi zero,}$$

$$I_3 = 1 \text{ dla mezonu pi plus.}$$

- Kwarkom i antykwarkom pierwszej generacji można również przyporządkować trzecią składową izospinu:

Kwark górny (u): $I_3 = 1/2$.

Antykwark górny ($\bar{u}$): $I_3 = -(1/2)$.

Kwark dolny (d): $I_3 = -(1/2)$.

Antykwark dolny ($\bar{d}$): $I_3 = 1/2$.

- Hiperładunek (Y) $\Leftrightarrow$ liczba kwantowa zdefiniowana dla danej cząstki elementarnej, będąca sumą liczby barionowej (B) i dziwności (S).

$$Y = B + S$$

- Ładunek kolorowy $\Leftrightarrow$ uporządkowana trójka liczb kwantowych. Istnieją trzy kolory: czerwony (R), zielony (G) i niebieski (B).

$$\begin{aligned} R &= \left(+\frac{1}{2}, 0, -\frac{1}{2} \right) \\ G &= \left(-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, 0 \right) \\ B &= \left(0, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

- Każdemu kolorowi odpowiada antykolor, są nimi: antyczerwony ($\bar{R}$), antyzielony ($\bar{G}$) i antyniebieski ($\bar{B}$).

$$\bar{R} = \left(-\frac{1}{2}, 0, +\frac{1}{2} \right)$$

$$\bar{G} = \left(+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 0 \right)$$

$$\bar{B} = \left(0, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right)$$

- Istnieje też ładunek bezbarwny.

$$0 = (0, 0, 0)$$

- Ładunki kolorowe i antykolorowe, przyporządkowane w odpowiedni sposób kwarkom i gluonom, umożliwiają opis oddziaływań silnych.
- W przemianach hadronów wypadkowy kolor pozostaje bezbarwny. Powyższe stwierdzenie nazywane jest zasadą zachowania koloru.

- Parzystość przestrzenna P
- Zasada zachowania parzystości przestrzennej P
- Niezachowanie parzystości przestrzennej P
- Tsung Dao Lee (ur. 1926)
- Chen Ning Yang (ur. 1922)
- Chien Shiung Wu (1912-1997)
- Doświadczenie Goldhabera-Grodzinsa-Sunyara
- Parzystość ładunkowa C
- Zasada zachowania parzystości ładunkowej C
- Parzystość kombinowana CP
- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CP
- Niezachowanie parzystości kombinowanej CP
- Parzystość kombinowana CPT
- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CPT

- Parzystość przestrzenna (P) $\Leftrightarrow$ multiplikatywna liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana z operacją inwersji współrzędnych przestrzennych, określona w następujący sposób:
 - $P = +1$ dla cząstki opisywanej parzystą funkcją falową
 $\Psi(x, y, z) = \Psi(-x, -y, -z)$.
 - $P = -1$ dla cząstki opisywanej nieparzystą funkcją falową
 $\Psi(x, y, z) = -\Psi(-x, -y, -z)$.
- Parzystość układu cząstek jest równa iloczynowi parzystości poszczególnych cząstek układu. Dla fermionów $P = +1$, a dla antyfermionów $P = -1$. Dla bozonów i antybozonów $P = +1$.
- Cząstki o dodatniej parzystości nazywane są też prawoskrętnymi, a o ujemnej – lewoskrętnymi.
- Zachowanie parzystości przestrzennej jest równoważne żądaniu, aby prawa fizyki były takie same w danym układzie odniesienia i jego lustrzanym odbiciu.

- Zasada zachowania parzystości przestrzennej P $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych oraz silnych prawa fizyki są takie same w danym układzie odniesienia i jego lustrzanym odbiciu.

K Początkowo sądzono, że zasada zachowania parzystości przestrzennej jest spełniona również w przypadku oddziaływań słabych.

- Lee i Yang w październiku 1956 sformułowali hipotezę, że zasada zachowania parzystości nie jest spełniona w oddziaływaniach słabych.
- Słuszność tej hipotezy wykazała doświadczalnie Wu z zespołem w lutym 1957. Okazało się, że jądra kobaltu wirujące zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara podczas rozpadu beta minus zachowywały się inaczej (emitowały inną ilość elektronów) niż jądra wirujące w kierunku przeciwnym.
- Lee i Yang otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki w następnym roku po dokonaniu odkrycia.

• Tsung Dao Lee and Chen-Ning Yang:
Question of Parity Conservation in Weak Interactions.
Physical Review **104**, 1 (1 October 1956) 254-258.

• Chien Shiung Wu et al.:
Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay.
Physical Review **105**, 4 (02/1957) 1413-1415.

- Tsung Dao Lee (ur. 1926), amerykański fizyk teoretyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1957.
- Chen Ning Yang (ur. 1922), amerykański fizyk teoretyk pochodzenia chińskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1957.
- Nagrodę Nobla z fizyki w 1957 przyznano im "za wnikliwe zbadanie tak zwanych praw parzystości, co doprowadziło do ważnych odkryć dotyczących cząstek elementarnych"
- Chien Shiung Wu (1912-1997), amerykańska fizyczka pochodzenia chińskiego.



amerykański fizyk teoretyk pochodzenia chińskiego

1926 - Urodził się 25 listopada w Szanghaju.

1946 - Ukończył Uniwersytet Pekijski.

1950 - Doktoryzował się na Uniwersytecie Chicagowskim na podstawie pracy *Hydrogen Content of White Dwarf Stars*.

1950/51 - Pracował na Uniwersytecie Kalifornijskim.

1951/53 i 1960/63 - Pracował w Instytucie Studiów Zaawansowanych w Princeton.

1953 - Rozpoczął pracę na Uniwersytecie Kolumbijskim.

1956 - Został profesorem na Uniwersytecie Kolumbijskim.

1957 - Otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki.

1964 - Został członkiem National Academy of Sciences.



amerykański fizyk teoretyk pochodzenia chińskiego

1922 - Urodził się 22 września w Hefei (Chiny).

1944 - Ukończył uniwersytet w Kunming.

1946 - Wstąpił na Uniwersytet Chicagowski.

1948 - Doktoryzował się na Uniwersytecie Chicagowskim, gdzie przez rok był instruktorem.

1949 - Został członkiem Instytutu Studiów Zaawansowanych w Princeton.

1955/66 - Był profesorem w Instytucie Studiów Zaawansowanych.

1957 - Otrzymał Nagrodę Nobla z fizyki.

1965 - Został członkiem National Academy of Sciences.

1966/99 - Był profesorem i dyrektorem Instytutu Fizyki Teoretycznej na uniwersytecie w Stony Brook.

1966 - Został profesorem na uniwersytecie w Hong Kongu.

1998 - Został profesorem na Tsinghua University w Beijing (Chiny).

amerykańska fizyczka pochodzenia chińskiego

1912 - Urodziła się 31 maja w Taicang (Chiny).

1942 - Doktoryzowała się z fizyki.

- Była zatrudniona w Projekcie Manhattan.

1957 - Wykazała eksperymentalnie łamanie parzystości w rozpadach beta przewidziane teoretycznie w 1956 przez Lee i Yanga.

1997 - Zmarła 16 lutego w Nowym Jorku.

- Doświadczenie Goldhabera-Grodzinsa-Sunyara $\Leftrightarrow$ doświadczenie, w którym Goldhaber, Grodzins i Sunyar wykazali (1957), że spiny neutrin są antyrównoległe do kierunku ich ruchu (neutrina są lewoskrętne).

B Maurice Goldhaber (1911-2011), amerykański fizyk austriackiego pochodzenia.

B Lee Grodzins (ur. 1926), amerykański fizyk.

B Andrew William Sunyar (1920-1986), amerykański fizyk.

K W przyrodzie istnieją tylko lewoskrętne neutrino i prawoskrętne antyneutrino. Zjawisko to nazywane jest łamaniem parzystości dla neutrin.

• M. Goldhaber, L. Grodzins, A. W. Sunyar:
Helicity of Neutrinos.
Physical Review **109** (1958) 1015-1017.
[Received December 11, 1957]

- Parzystość ładunkowa C $\Leftrightarrow$ liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana z operacją zamiany cząstek (o liczbach kwantowych Q, B, S, L) na ich antycząstki (o liczbach kwantowych wynoszących odpowiednio $-Q, -B, -S, -L$) i *vice versa*.

Q – ładunek elektryczny

B – liczba barionowa

L – liczba leptonowa

S – dziwność

- Parzystość ładunkowa nazywana jest też odbiciem ładunkowym oraz parzystością C.
- Operator zamiany cząstki na jej antycząstkę nazywany jest operatorem sprzężenia cząstka-antycząstka lub operatorem sprzężenia ładunkowego.

P Dla fotonów $C = -1$.

P Dla mezonów $C = +1$.

- Zasada zachowania parzystości ładunkowej C $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych oraz silnych zamiana wszystkich cząstek układu na ich antycząstki (lub *vice versa*) nie wpływa na żadne właściwości tego układu.

- Parzystość kombinowana CP $\Leftrightarrow$ liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana ze złożeniem operacji zamiany cząstek na antycząstki oraz inwersji współrzędnych przestrzennych.

- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CP $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych oraz silnych zamiana wszystkich cząstek układu na ich antycząstki (lub *vice versa*) z równoczesną inwersją współrzędnych przestrzennych nie wpływa na żadne właściwości tego układu.

- Niezachowanie parzystości kombinowanej CP $\Leftrightarrow$ naruszenie niezmienności praw fizyki względem zamiany cząstek na ich antycząstki (i odwrotnie) z jednoczesnym zwierciadlanym odbiciem.
- Niezachowanie parzystości kombinowanej CP nazywane jest też łamaniem symetrii ładunkowo-przestrzennej.

H Cronin i Fitch odkryli w 1964 naruszenie parzystości CP w rozpadach neutralnych mezonów K^0 i $\bar{K}^0$ na mezony π^- i π^+ .

$$\begin{aligned} K^0 &\rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e \\ \bar{K}^0 &\rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e \end{aligned}$$

$$K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0, \quad \pi^- \leftrightarrow \pi^+, \quad e^+ \leftrightarrow e^-, \quad \nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$$

B James Watson Cronin (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1980.

B Val Logsdon Fitch (ur. 1923), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1980.

$$\Delta = \frac{\text{il. rozpad. } (K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e) - \text{il. rozpad. } (\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e)}{\text{il. rozpad. } (K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e) + \text{il. rozpad. } (\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e)}$$

$$\Delta \approx 3 \times 10^{-3}$$

Prawdopodobieństwa zajścia rozpadów

$$\begin{aligned} K^0 &\rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e \\ \bar{K}^0 &\rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e \end{aligned}$$

różnią się od siebie, powstaje w nich więcej pozytronów niż elektronów. Nierównowaga cząstki-antycząstki jest wynikiem niezachowania parzystości kombinowanej CP.

• J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay:

Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson.

Physical Review Letters **13**, 4 (July 1964) 138-140.

- W pracy "Naruszenie CP niezmienniczości, C asymetria i barionowa asymetria wszechświata" Sacharow postulował (1967), że podczas Wielkiego Wybuchu wystąpiła nadwyżka materii nad antymaterią. Ta tzw. asymetria barionowa [na każdy miliard antybarionów utworzyło się miliard i jeden barionów] umożliwiła powstanie wszechświata. Inaczej mówiąc, w promieniowaniu reliktowym powinniśmy obserwować miliard fotonów na każdy barion we wszechświecie. W przypadku braku asymetrii barionowej materia i antymateria uległyby anihilacji.

B Andriej Dymitriewicz Sacharow (1921-1989), radziecki fizyk teoretyk, laureat pokojowej Nagrody Nobla w 1975.

- A. Д. Сахаров:
Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Assymetry of the Universe.
Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики **5** (01/1967) 32-35.
Naruszenie CP niezmienniczości, C asymetria i barionowa asymetria wszechświata.
- A. D. Sakharov:
Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Assymetry of the Universe.
Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters **5** (1967) 24-27.

- Parzystość kombinowana CPT $\Leftrightarrow$ liczba kwantowa charakteryzująca cząstki elementarne, związana ze złożeniem operacji zamiany cząstek na antycząstki oraz inwersji współrzędnych przestrzennych i czasu.
- Zgodnie z zasadą zachowania parzystości kombinowanej CPT prawa fizyki są niezmiennie względem złożenia operacji C, P i T w oddziaływaniach słabych, elektromagnetycznych i silnych.

- Zasada zachowania parzystości kombinowanej CPT $\Leftrightarrow$ zasada stwierdzająca, że w przypadku oddziaływań elektromagnetycznych, słabych oraz silnych zamiana wszystkich cząstek układu na ich antycząstki (lub *vice versa*) z równoczesną inwersją współrzędnych przestrzennych i czasu nie wpływa na żadne właściwości tego układu.
- Z zasady zachowania parzystości kombinowanej CPT wynika między innymi, że masy, spiny, czasy życia oraz bezwzględne wartości ładunków elektrycznych cząstek i odpowiadających im antycząstek są takie same.

Fizyka mało znana



Zbigniew Osiak

Zasady zachowania w fizyce

07