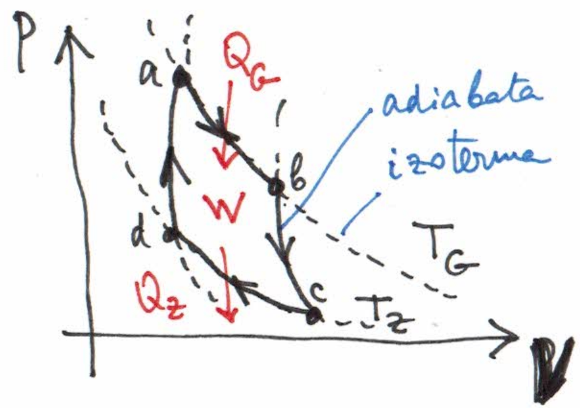
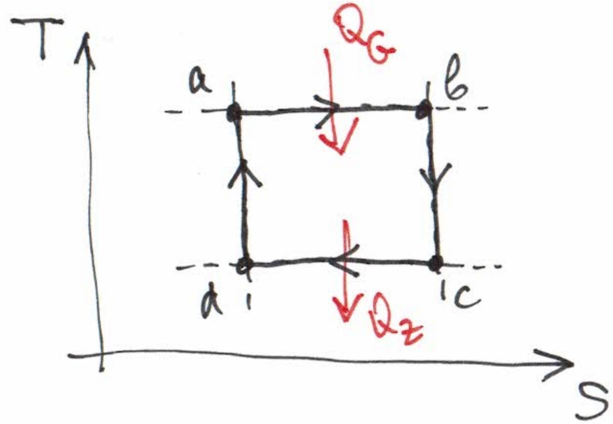
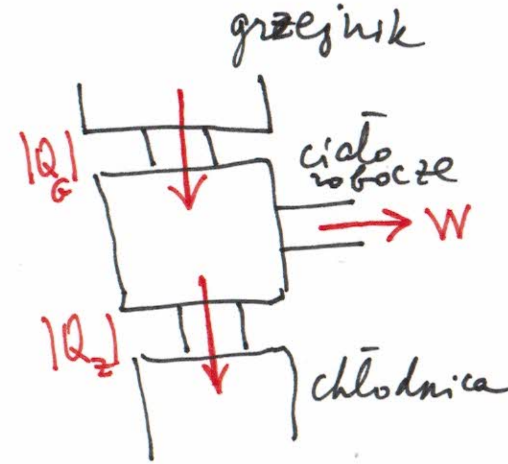
Silnik Carnota

W silniku idealnym wszystkie procesy są odwracalne i nie ma strat spowodowanych tarciem lub turbulencjami.

Silnik Carnota – silnik idealny – osiąga największą sprawność w zamianie ciepła na pracę.







Dla pełnego cyklu przemian $\Delta E_W = 0$

$$W = |Q_G| - |Q_Z| \quad \text{(z pierwszej zasady termodynamiki)}$$

Zmiana entropii: $\Delta S = \Delta S_G + \Delta S_Z = \dfrac{|Q_G|}{T_G} - \dfrac{|Q_Z|}{T_Z} = 0$ – dla pełnego cyklu

$$\frac{|Q_G|}{T_G} = \frac{|Q_Z|}{T_Z}$$

Sprawność silnika Carnota

Sprawność cieplna silnika $\boxed{\eta = \frac{|W|}{|Q_G|}}$ (dowolny silnik)

Sprawność silnika Carnota:

$$\eta_c = \frac{|Q_G| - |Q_Z|}{|Q_G|} = 1 - \frac{|Q_Z|}{|Q_G|} = 1 - \frac{T_Z}{T_G}$$

$$\boxed{\eta_c = 1 - \frac{T_Z}{T_G}}$$

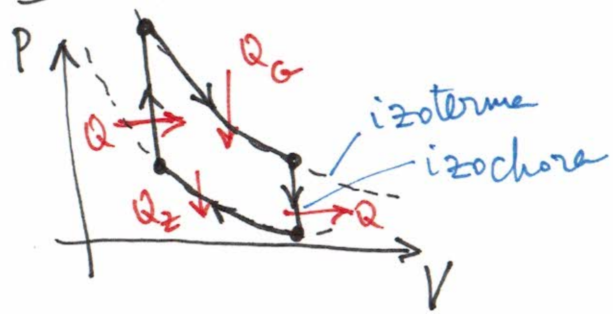
W samochodzie: $\eta \simeq 25\%$
($\eta_c \simeq 55\%$)

W silniku doskonałym z $\eta = 1$ (100%) $T_Z = 0$ albo $T_G \to \infty$.

$\Rightarrow$ **Nie jest możliwy żaden ciąg przemian, którego jedynym skutkiem byłoby pobranie ciepła i całkowita zamiana go na pracę.**

inne sformułowanie drugiej zasady termodynamiki

Silnik Stirlinga

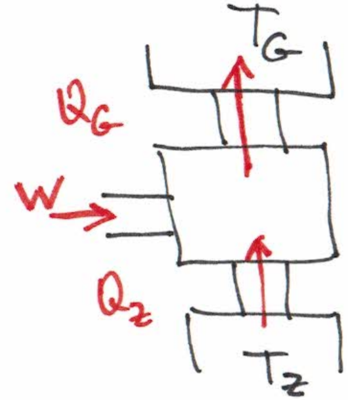


Wydajność idealnego silnika jest mniejsza niż w przypadku silnika Carnota.

Silnik Stirlinga jest obecnie adaptowany do napędu samochodów i statków kosmicznych.

Chłodziarki

Idealna chłodziarka działa odwrotnie niż silnik Carnota: wszystkie przepływy energii zachodzą w kierunkach przeciwnych niż w silniku Carnota



Wydajność chłodziarki: $\underbrace{K = \frac{|Q_Z|}{|W|}}_{\text{współczynnik wydajności}}$ (dowolna chłodziarka

Dla chłodziarki Carnota:

$$K_C = \frac{|Q_Z|}{|Q_G| - |Q_Z|} = \frac{T_Z}{T_G - T_Z}$$

$$\boxed{K_C = \frac{T_Z}{T_G - T_Z}}$$

Dla typowych klimatyzatorów $K \simeq 5$.

Termodynamika: podsumowanie

Zmiana energii: $\underline{dE = TdS - pdV}$ $\qquad E = f(S,V)$ - energia jako funkcja stanu

$$T = \left(\frac{\partial E}{\partial S}\right)_V$$ - pochodna po S przy $V = const$

$$p = -\left(\frac{\partial E}{\partial V}\right)_S$$ - pochodna po V przy $S = const$

Pojemność cieplna

$$C_V = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V$$

$$C_p = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p$$

Istnieje inna możliwość wprowadzenia funkcji stanu:

Swobodna energia: $\boxed{F = E - TS}$ $\qquad F = f(T,V)$ Swobodna energia jako funkcja stanu

$$\underline{dF = -SdT - pdV}$$

$$S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V, \quad p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T$$

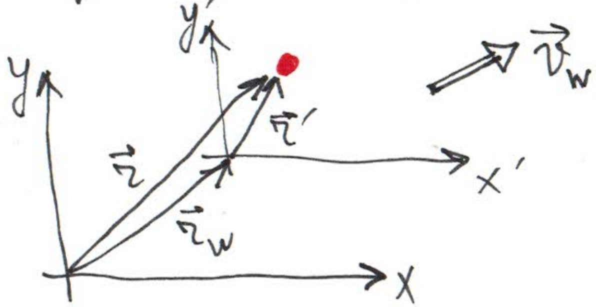
Teoria względności (A. Einstein, 1905)

(szczególna teoria względności, relatywistyczna teoria)

1. postulat względności: Dla wszystkich obserwatorów w inercjalnych układach odniesienia prawa fizyki są takie same.

2. postulat stałej prędkości światła: We wszystkich inercjalnych układach odniesienia i we wszystkich kierunkach światło rozchodzi się w próżni z tą samą prędkością c.

$c \simeq 299\,792\ \frac{km}{s}$
$(\simeq 3 \cdot 10^8 m/s)$

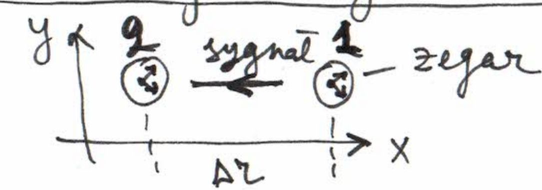


$\vec{v} = \vec{v}_w + \vec{v}\,'$ – zasada względności Galileusza sprzeczna z zasadą względności A. Einsteina

zawsze $\vec{v} \neq \vec{v}\,'$

Zdarzenie – obserwator może wskazać, podając 3 współrzędne przestrzenne i jedną współrzędną czasową (x, y, z, t) lub (x', y', z', t')

Synchronizacja zegarów w inercjalnym układzie odniesienia



$\Delta t = \frac{\Delta r}{c}$

$\Delta t = t_2 - t_1$

(x, y, z, t) – współrzędne czasoprzestrzenne

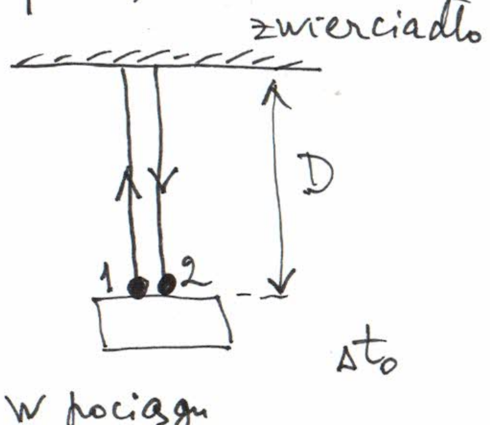
Względność jednoczesności

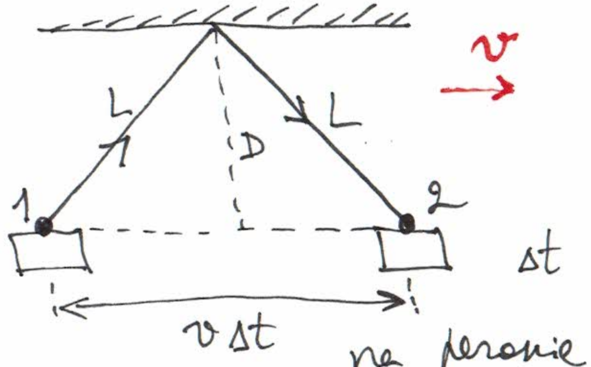
Dwaj obserwatorzy, poruszający się względem siebie, na ogół nie będą zgodni co do jednoczesności zdarzeń. Jeżeli jeden z obserwatorów stwierdzi, że zdarzenia były jednoczesne, to drugi na ogół będzie innego zdania.

⇒ Jednoczesność nie jest pojęciem absolutnym, lecz względnym i zależy od ruchu obserwatora.

Względność czasu

Odstęp czasu między zdarzeniami zależy od tego, w jakiej odległości od siebie one nastąpiły zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. Oznacza to, że przestrzenne i czasowe odległości zdarzeń są ze sobą powiązane.





$$L = \sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + D^2} \qquad \Delta t_0 = \frac{2D}{c}$$

$$\frac{c\Delta t}{2} = \sqrt{\left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + \left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2} \qquad \Delta t = \frac{2L}{c}$$

$$\boxed{\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}} \qquad \Delta t > \Delta t_0$$

Odstęp czasu zmierzony dla dwóch zdarzeń, które zaszły w tym samym miejscu w inercjalnym układzie odniesienia, będziemy nazywać odstępem czasu własnego lub czasem własnym.

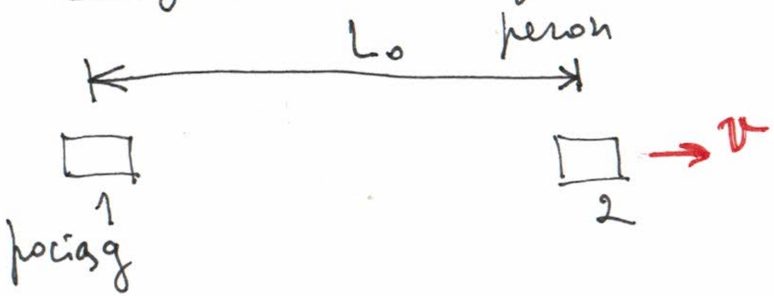
Mierząc w jakimkolwiek innym inercjalnym układzie odniesienia odstęp czasu dzielący te same zdarzenia, zawsze otrzymamy większą wartość.

Różnica $\Delta t - \Delta t_0$ – dylatacja czasu (rozciągnięcie czasu)

Współczynnik Lorentza: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $\beta = \frac{v}{c} < 1$

Dylatacja czasu: $\boxed{\Delta t = \gamma \Delta t_0}$

Względność długości



L_0 – długość mierzona w układzie odniesienia peronu

$L_0 = v \Delta t$ – w układzie odniesienia związanym z peronem

$L = v \Delta t_0$ – w układzie odniesienia, związanym z pociągiem

$$\boxed{L = \frac{L_0}{\gamma}}$$

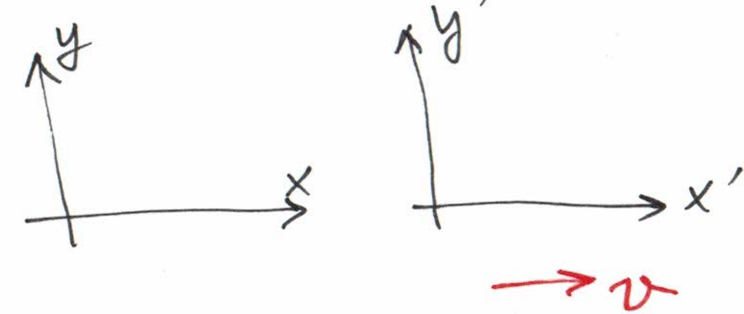
$L = L_0 \sqrt{1-\beta^2}$ – skrócenie długości

Długość obiektu L_0 mierzona w jego układzie spoczynkowym nazywamy <u>długością własną</u> lub <u>długością spoczynkową</u>.

Pomiary długości przeprowadzone w innym układzie odniesienia, który porusza się względem obiektu równolegle do mierzonej długości, dają zawsze wynik mniejszy niż długość własna.

<u>Transformacja Lorentza</u>

$$\left.\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \end{aligned}\right\} \text{transformacja Lorentza}$$



$$\left.\begin{aligned} x &= x' + vt \\ t &= t' \end{aligned}\right\} \text{transformacja Galileusza } (v \ll c)$$

Dla pary zdarzeń:

$$\Delta x = \gamma(\Delta x' + v\Delta t')$$

$$\Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{v\Delta x'}{c^2}\right)$$

<u>Względność prędkości</u>

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x' + v\Delta t'}{\Delta t' + v\Delta x'/c^2}$$

$$\boxed{u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}}$$

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$u' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'}$$

(Przy $v \ll c$: $u = u' + v$)

Zjawisko Dopplera dla światła

Częstości mierzone w różnych układach odniesienia

$$\boxed{\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}}$$

źródło i detektor oddalają się od siebie

$$\beta = \frac{v}{c}$$

ν_0 – częstość własna źródła światła (mierzona w układzie odniesienia źródła)

v – prędkość obserwatora poruszającego się względem źródła

Dla małych prędkości względnych:

$$\nu \simeq \nu_0 \left(1 - \beta + \frac{1}{2}\beta^2\right) \qquad \beta \ll 1$$

Przy oddalaniu albo zbliżaniu gwiazdy od nas / do nas

$$\nu \simeq \nu_0 (1 \pm \beta)$$

„+" zbliżenie

„−" oddalenie

Przez długości fali

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0}\left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

λ_0 – własna długość fali

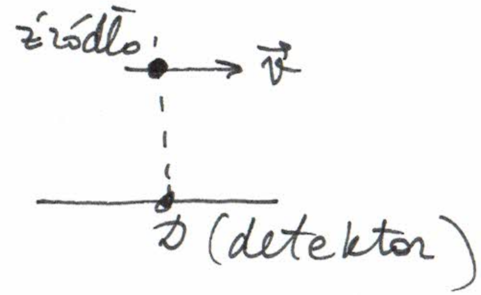
$$\Rightarrow \quad v = \pm \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} c \qquad \text{lub} \qquad v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$$

$\Delta\lambda$ – dopplerowskie przesunięcie długości fali

Jeżeli źródło oddala się od nas, to $\lambda > \lambda_0$ (przesunięcie ku czerwieni)

Jeżeli źródło porusza się w naszą stronę, to $\lambda < \lambda_0$ (przesunięcie ku błękitowi)

Poprzeczne zjawisko Dopplera



$$\nu = \nu_0 \sqrt{1-\beta^2}$$

Przy $\beta \ll 1$ $\quad \nu \simeq \nu_0 \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right)$ (małe prędkości)

Poprzeczne zjawisko Dopplera jest przejawem dylatacji czasu:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$T_0 = \frac{1}{\nu_0}$ – własny okres drgań źródła

$T = \frac{1}{\nu}$ – okres drgań obserwowany przez detektora

Pęd cząstki

Pęd nierelatywistyczny: $p = mv = m \frac{\Delta x}{\Delta t}$

Relatywistyczny pęd: $p = m \frac{\Delta x}{\Delta t_0} = m \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = m \frac{\Delta x}{\Delta t} \gamma$

$$p = \gamma m v$$

Uogólnienie do postaci wektorowej: $\boxed{\vec{p} = \gamma m \vec{v}}$

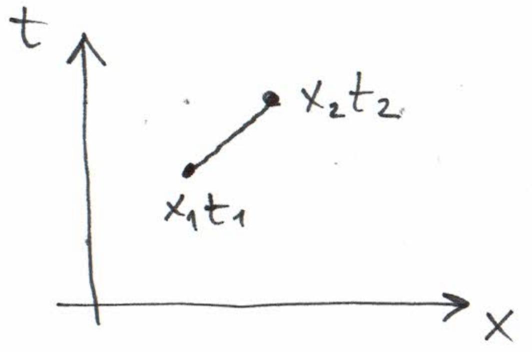
Energia cząstki

$$\boxed{E = \gamma m c^2}$$

$\gamma \simeq 1 + \frac{\beta^2}{2}$ $\quad \beta \ll$

Przy $\beta \ll 1$: $\quad E = E_0 + \frac{mv^2}{2}$ $\qquad E_0 = mc^2$ energia spoczynkowa

Teoria względności w fizyce teoretycznej



$$s_{12}^2 = c^2(t_2-t_1)^2-(x_2-x_1)^2$$

Interwał między dwoma zdarzeniami

$$ds_{12}^2 = c^2 dt_{12}^2 - dx_{12}^2 - dy_{12}^2 - dz_{12}^2$$

Interwał w różnych układach odniesienia jest ten sam: $ds_{12}^2 = ds_{12}'^2 \Rightarrow s_{12} = s'_{12}$

Geometria czasoprzestrzeni – geometria Minkowskiego (pseudo-euklidesowa)

Przekształcenie Lorentza dla współrzędnych x, t:

$$x = \frac{x' + Vt'}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}, \quad t = \frac{t' + \frac{V}{c^2}x'}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$$

można przedstawić jak „obroty" na kąt ψ:

$$x' = x' \cosh\psi + ct' \sinh\psi$$
$$ct = x' \sinh\psi + ct' \cosh\psi \qquad \tgh\psi = \frac{V}{c}$$

Zespół współrzędnych zdarzena (ct, x, y, z) można uważać za składowe czterowymiarowego wektora wodzącego – czterowektora wodzącego – w 4-wymiarowej przestrzeni.
Kwadrat długości czterowektora wodzącego: $s^2 = (ct)^2 - x^2 - y^2 - z^2$