

Kujawsko-Pomorska Szkoła Internetowa

FIZYKA – SZKOŁA PODSTAWOWA



Temat: Czy gorąca woda może zamarzać
szybciej niż zimna?

dr Krzysztof Rochowicz, KPCEN / UMK Toruń 2020

Dlaczego warto pytać/próbować?



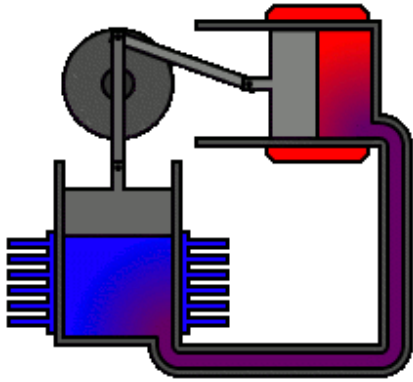
- W roku 1963 13-letni uczeń Erasto Mpemba (Tanzania) zauważył, że lody szybciej są gotowe, gdy wstawia do zamrażarki mieszaninę gorącą
- Kilka lat później zapytał o to wykładowcę D.G. Osborna, który opublikował artykuł naukowy
- Wcześniej zastanawiali się nad tym m.in. Arystoteles, Kartezjusz i Francis Bacon. Nikt jednak nie znalazł przekonującego wyjaśnienia...
- [Uczeni z Singapuru \(2013\)](#) doszli do wniosku, że odpowiedź kryje się w wiązaniach, jakie powstają pomiędzy poszczególnymi atomami w cząsteczce wody...
- Może winna jest ciecz przechłodzona? (wyjaśnia [dr Jasiński](#))
- [A może ten efekt wcale nie istnieje?](#) (Nature 2016)



FIZYK WYJAŚNIA

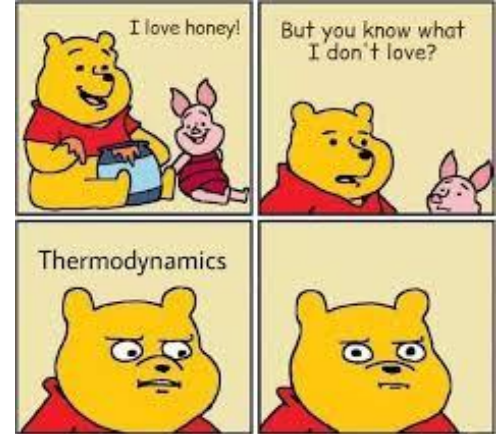
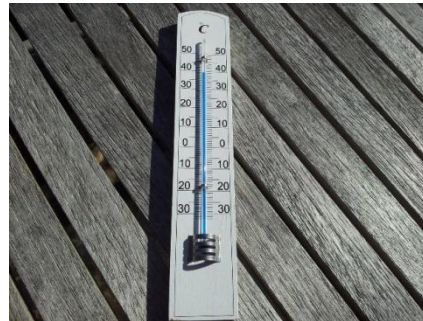
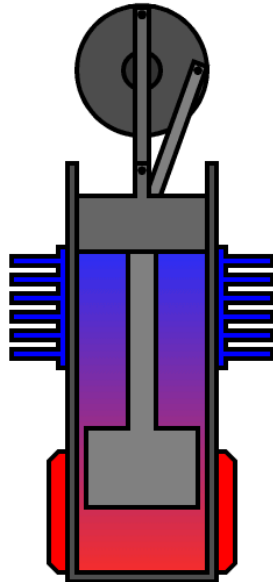
Test – 100 ml wody/1,5 godz.





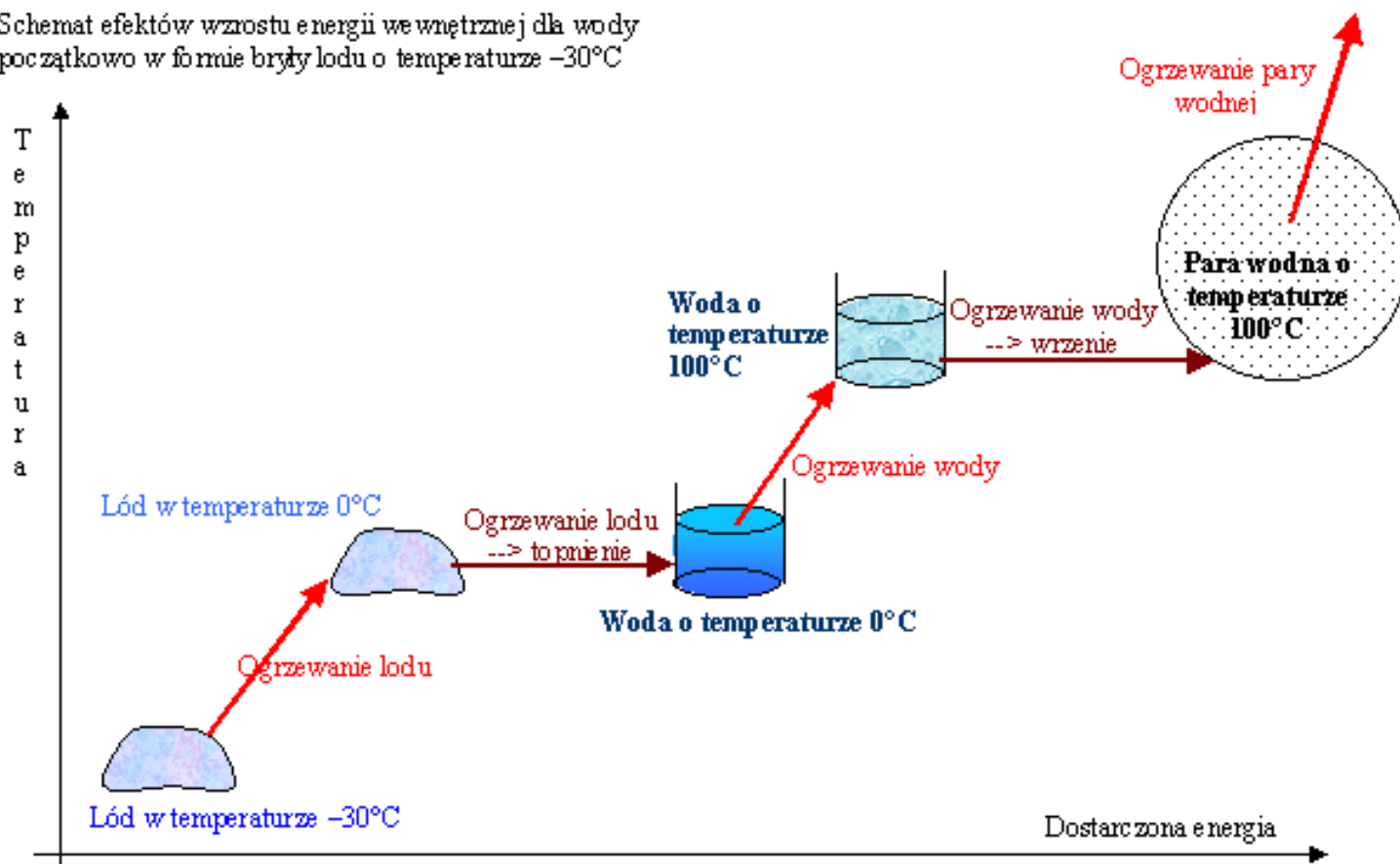
Termodynamika – nauka o cieple (i nie tylko...)

- [silnik Stirlinga](#)
- [wyjaśnienie](#)
- [Bill Nye \(Science Guy\) porównuje](#)

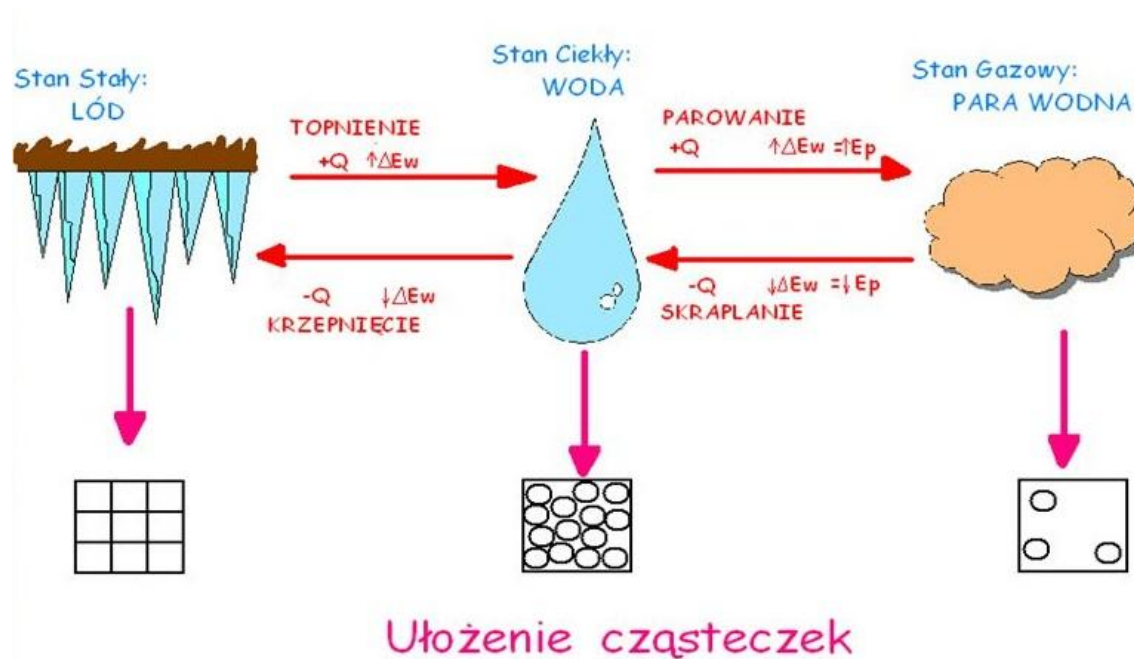


Wykres ogrzewania lodu/wody/pary

Schemat efektów wzrostu energii wewnętrznej dla wody początkowo w formie bryły lodu o temperaturze -30°C

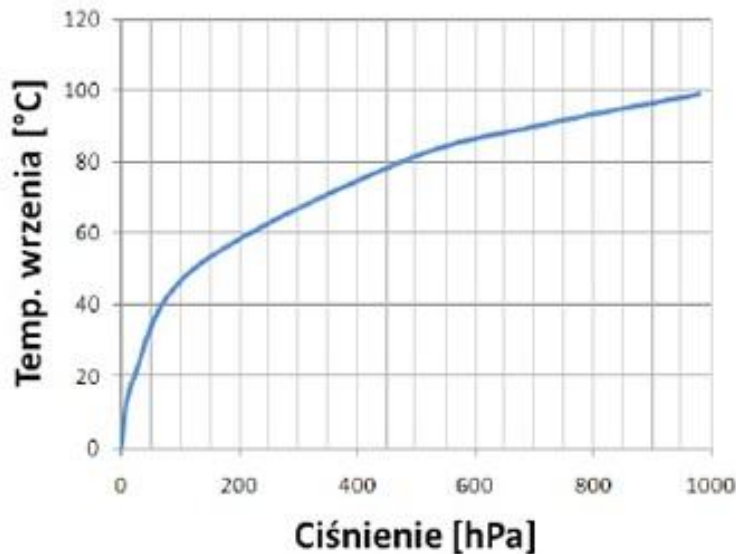


Zmiany stanów skupienia



Wrzenie przy obniżonym ciśnieniu

Ciśnienie [hPa]	Temp. wrzenia [°C]
23,40	20
123,50	50
475,10	80
702,30	90
980,10	99

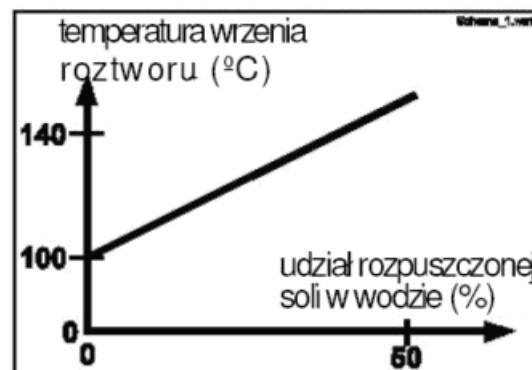


- Woda w strzykawce
- Wrzenie wody w butelce
(korek z tłoczkiem)

Czy temperatura wrzenia/topnienia jeszcze od czegoś zależy?

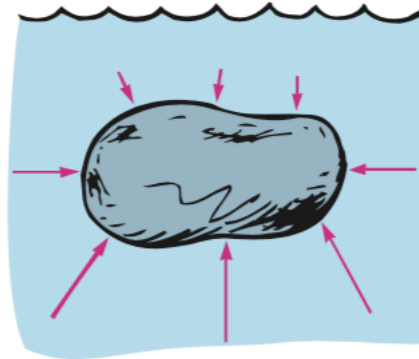
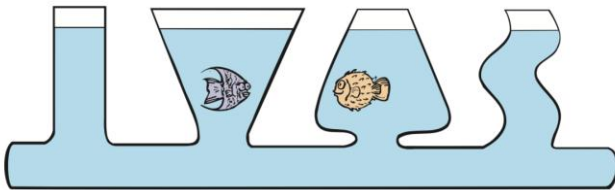


- Mieszanina wody z lodem – przed i po zasoleniu
- Wrzenie osolonej wody



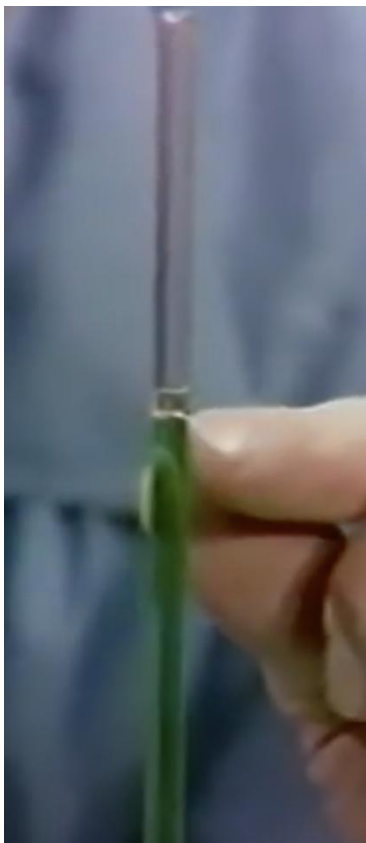
Wykład 7

Podstawy mechaniki płynów (ciecze i gazy)



Ciecze są nieściśliwe

Ciecze są nieściśliwe – bardzo trudno jest w sposób mechaniczny (przy pomocy sił zewnętrznych) zmienić ich objętość.



patrz: 8 min 57 s oraz 12 min 30 s

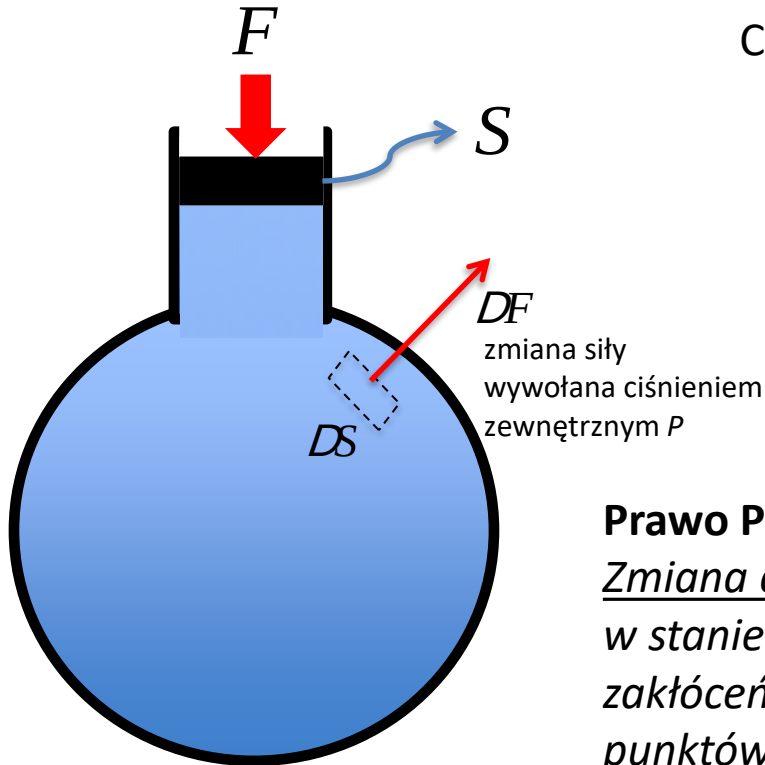
Ciśnienie i prawo Pascala



Ciśnienie wywierane przez siłę F na tłok o powierzchni S :

$$P = \frac{F}{S} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right] \quad \text{Pascal}$$

ciśnienie jest skalarem!



siły z jakimi ciecz oddziałuje na ścianki naczynia muszą być prostopadłe do powierzchni naczynia w każdym jego punkcie

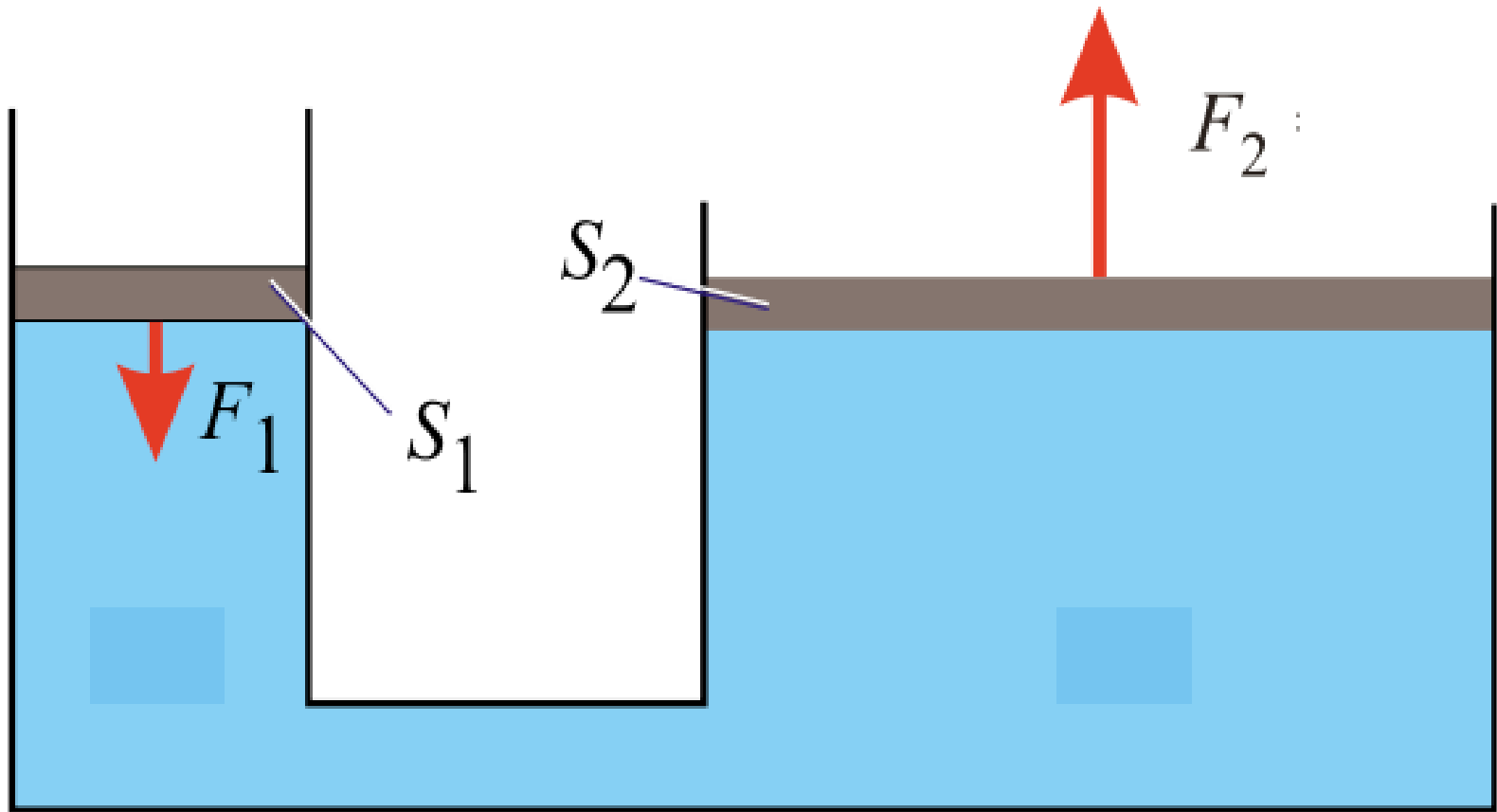
Prawo Pascala:

Zmiana ciśnienia w dowolnym punkcie cieczy, znajdującej się w stanie spoczynku w zamkniętym naczyniu, rozchodzi się bez zakłóceń do pozostałych jej punktów (w tym wszystkich punktów naczynia). Jest to konsekwencją nieściśliwości cieczy.

$$\lim_{DS \rightarrow 0} \frac{DF}{DS} = P$$

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mech_pascal&l=pl

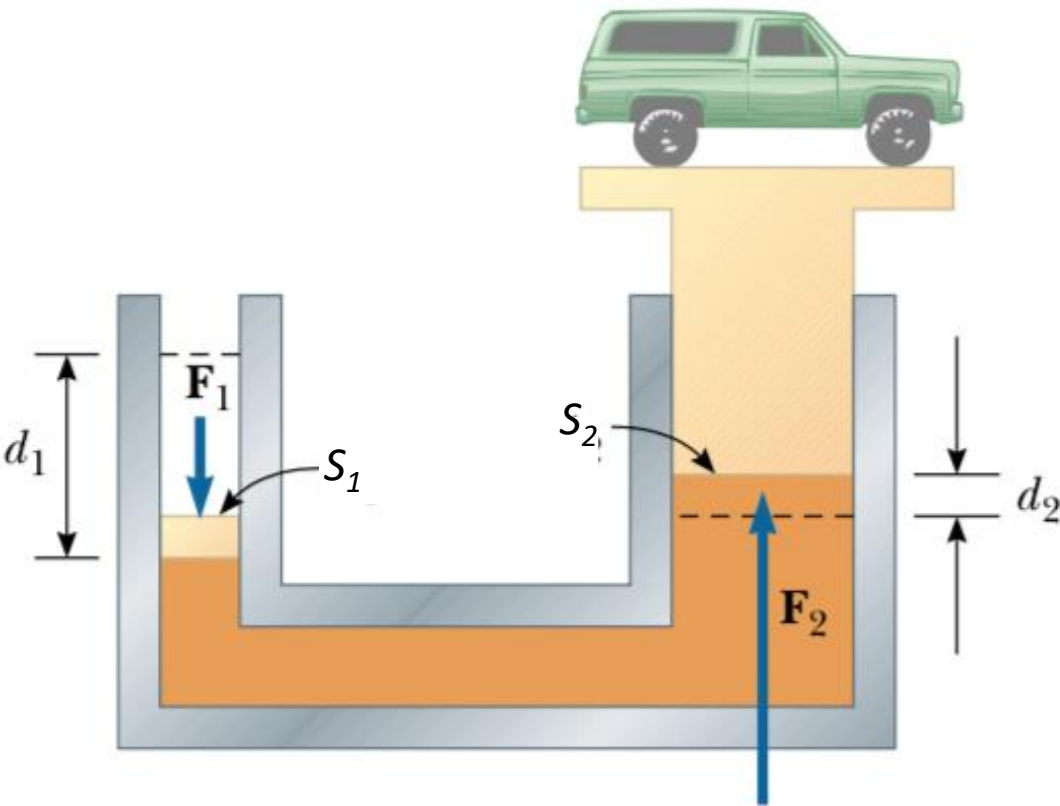
Prasa hydrauliczna



$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$



Prasa hydrauliczna – czy jej działanie jest niezgodne z zasadą zachowania energii?

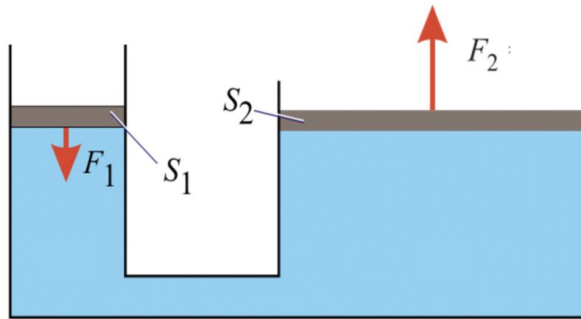


https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mech_lis&l=pl

Praca wykonana przez obydwie siły jest taka sama:

$$F_1 d_1 = F_2 d_2$$

Prasa hydrauliczna



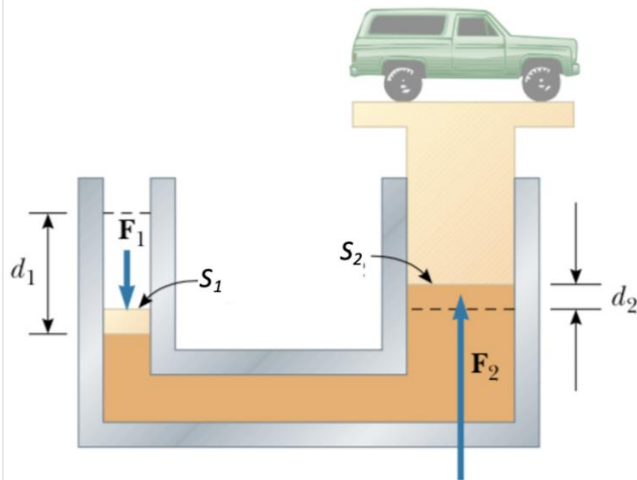
$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$



$$S_2 = 100 S_1, \quad m = 1500 \text{ kg} \Rightarrow F_2 = mg = 15000 \text{ N}$$

$$F_1 = 150 \text{ N} \Rightarrow 15 \text{ kg}$$

$$F_2 = 100 F_1,$$

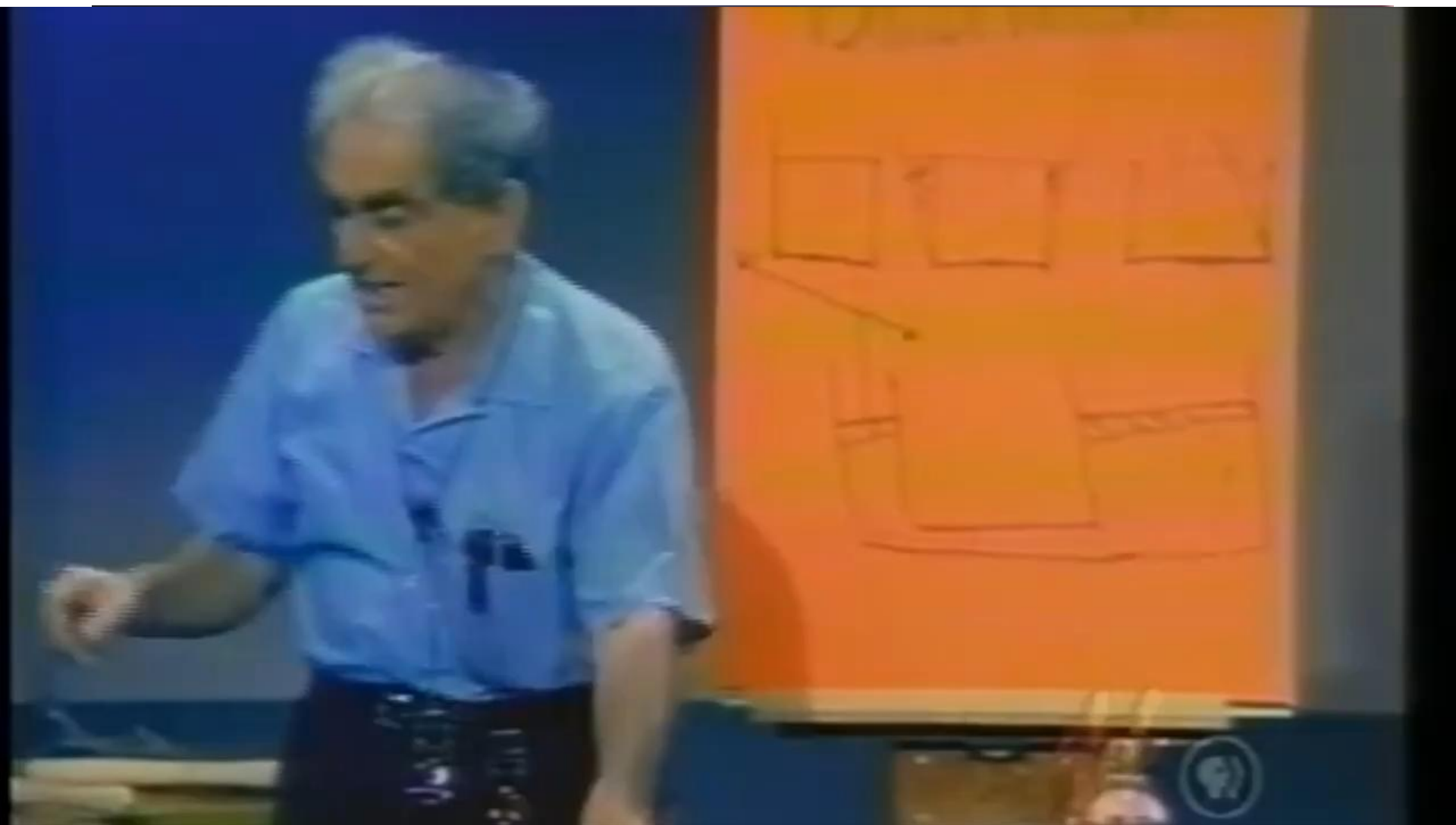


$$F_1 d_1 = F_2 d_2$$

$$d_1 = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$$

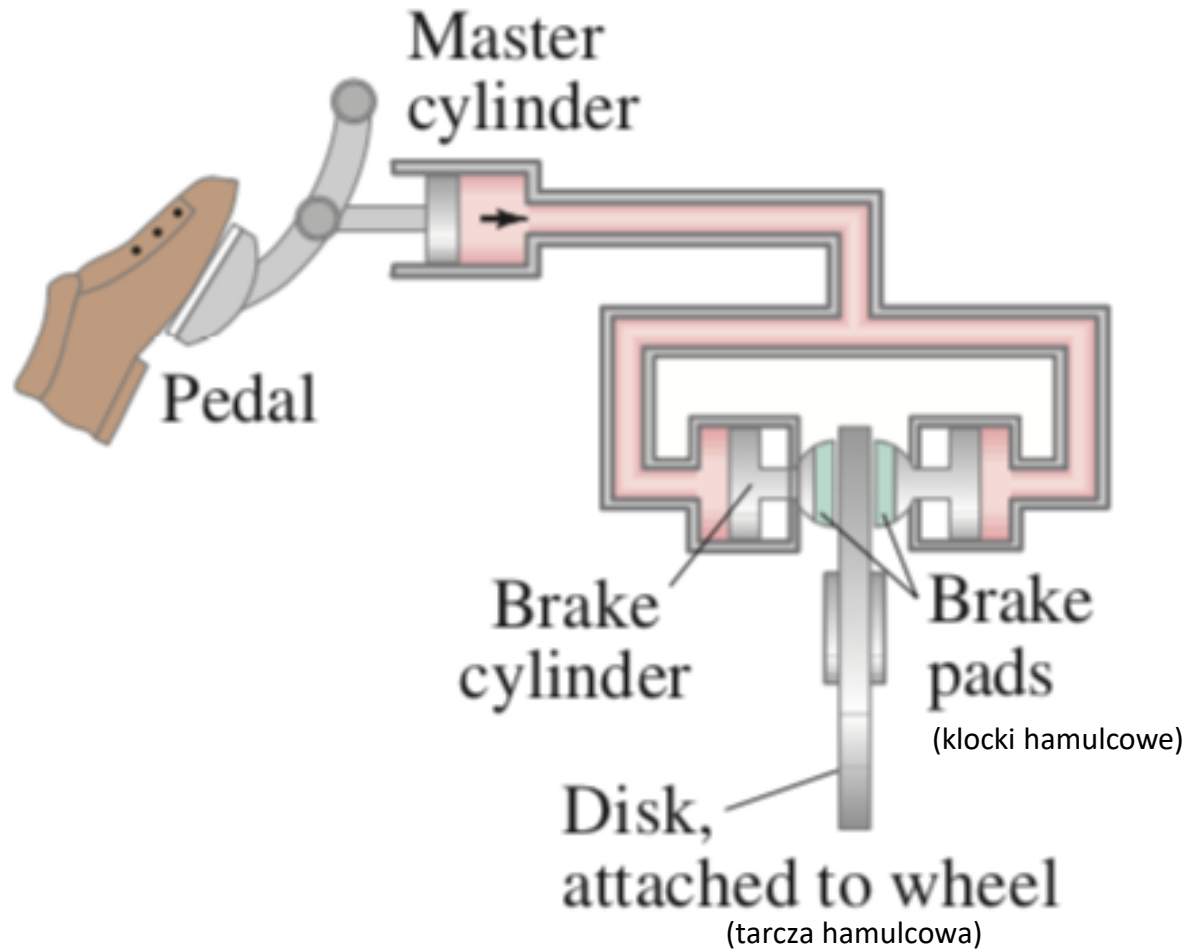
$$d_2 = d_1 \frac{F_1}{F_2} = 0.1 \text{ m} \cdot \frac{150 \text{ N}}{15000 \text{ N}} = 0.001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$$

Prasa hydrauliczna

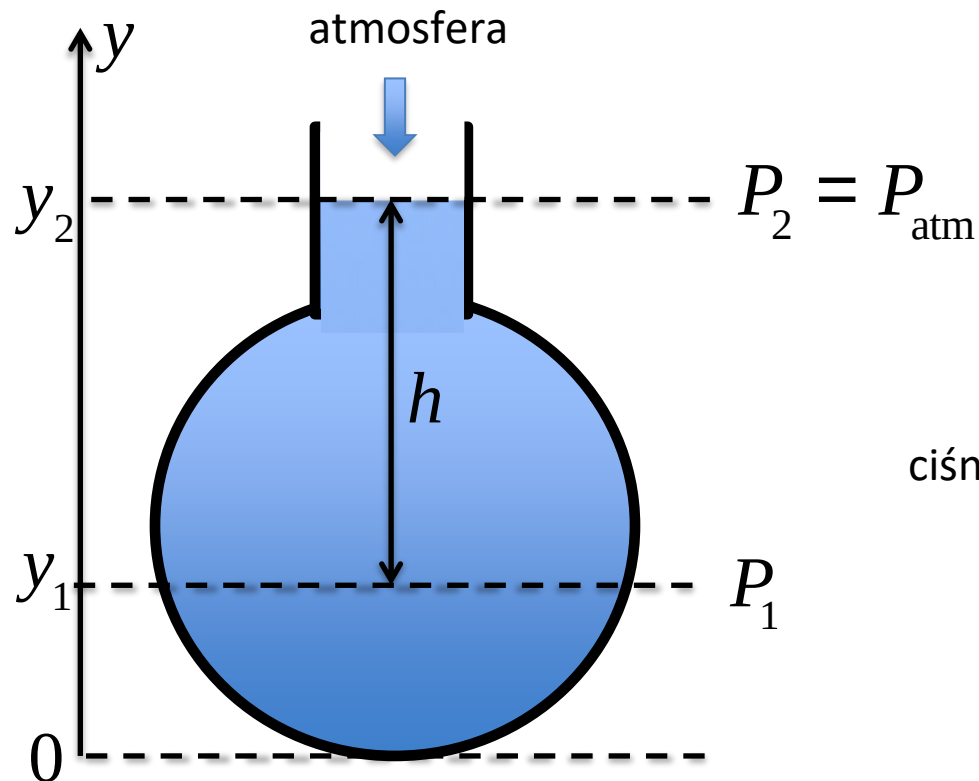


patrz: 5 min 36 s

Hamulce hydrauliczne w samochodzie



Ciśnienie hydrostatyczne



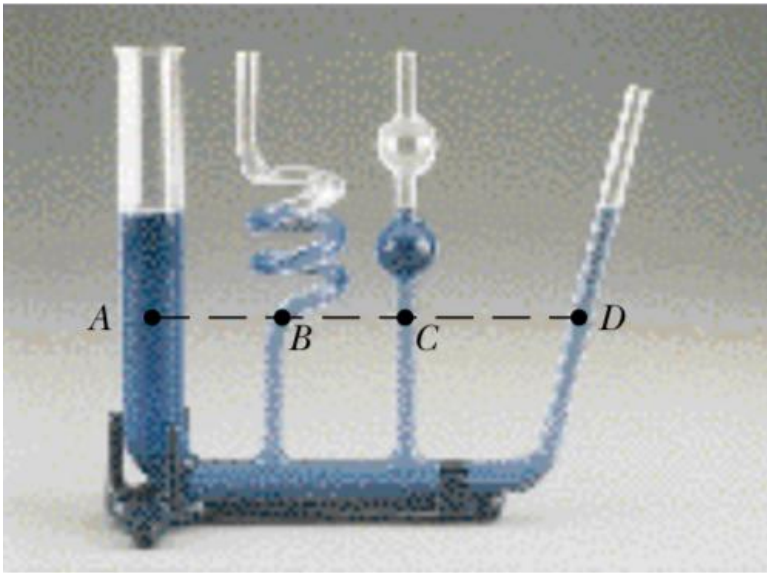
$$P_1 = P_{\text{atm}} + r g h$$

ciśnienie hydrostatyczne:

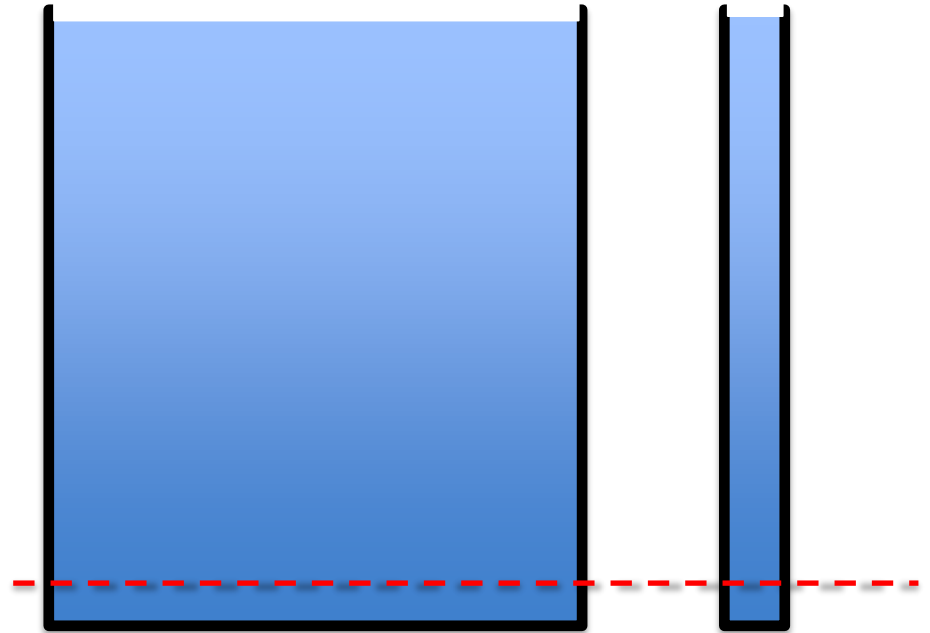
$$P_{\text{hydrost}} = r g h$$

Ciśnienie hydrostatyczne

Dla danej cieczy ciśnienie hydrostatyczne zależy tylko od głębokości – nie zależy od ilości wody w naczyniu, ani od kształtu naczynia!



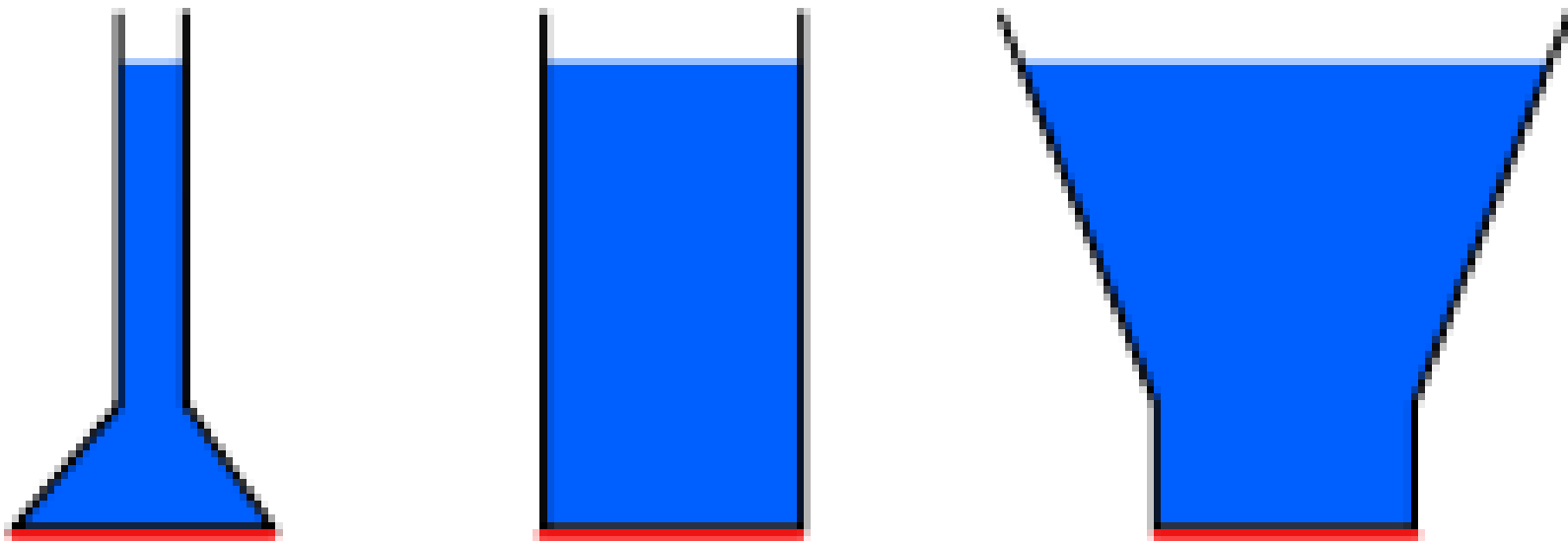
ciśnienie jest takie samo w punktach A, B, C i D – niezależnie od kształtu naczynia!



ciśnienie takie samo na tej samej głębokości, niezależnie od ilości wody

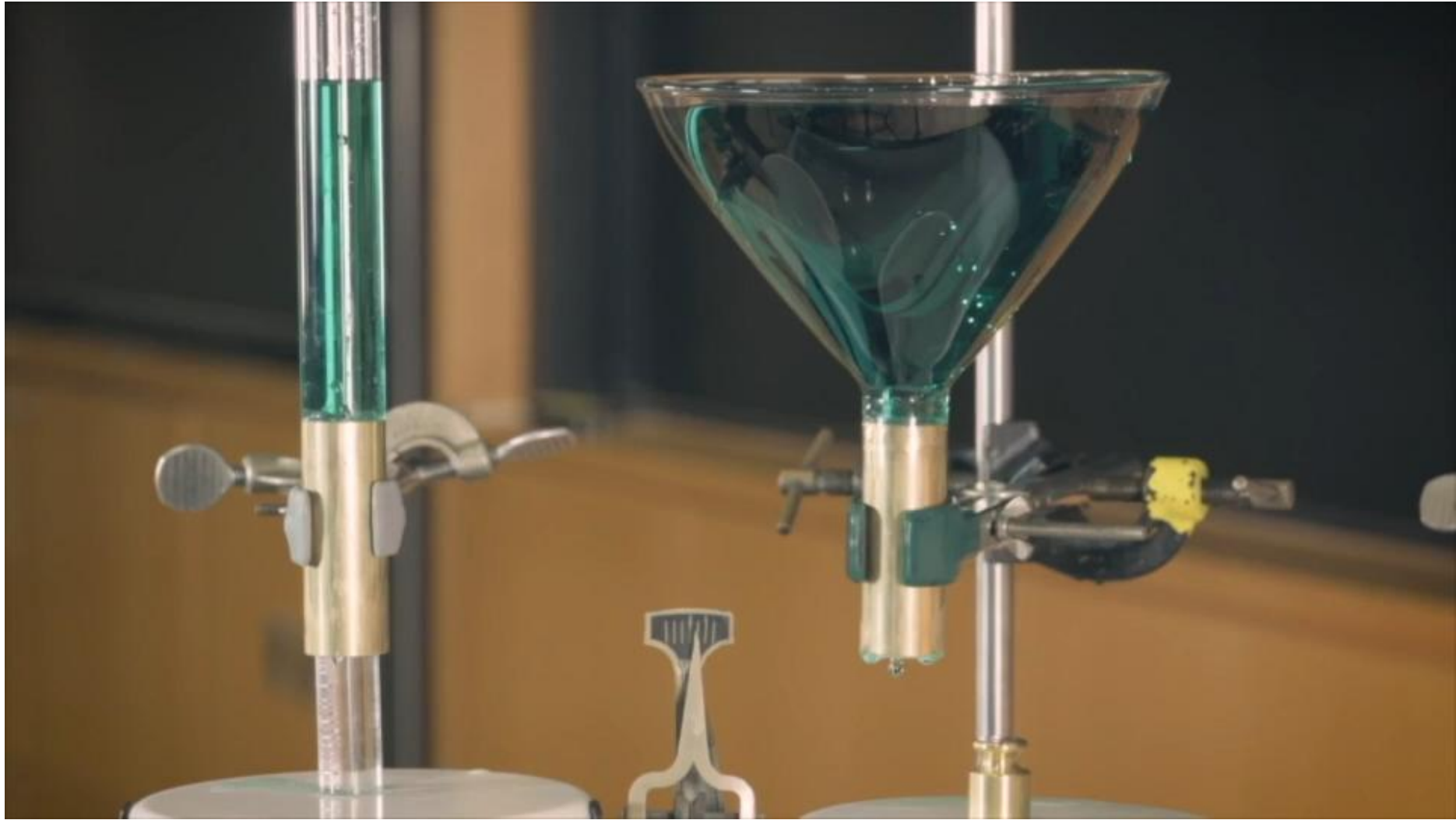
Paradoks hydrostatyczny

Wszystkie naczynia mają taką samą podstawę, ale różne ilości wody (choć powierzchnie cieczy znajdują się na tej samej wysokości). W przypadku bezpośredniego pomiaru ciężaru cieczy, w którym przypadku waga wskaże największą wartość?

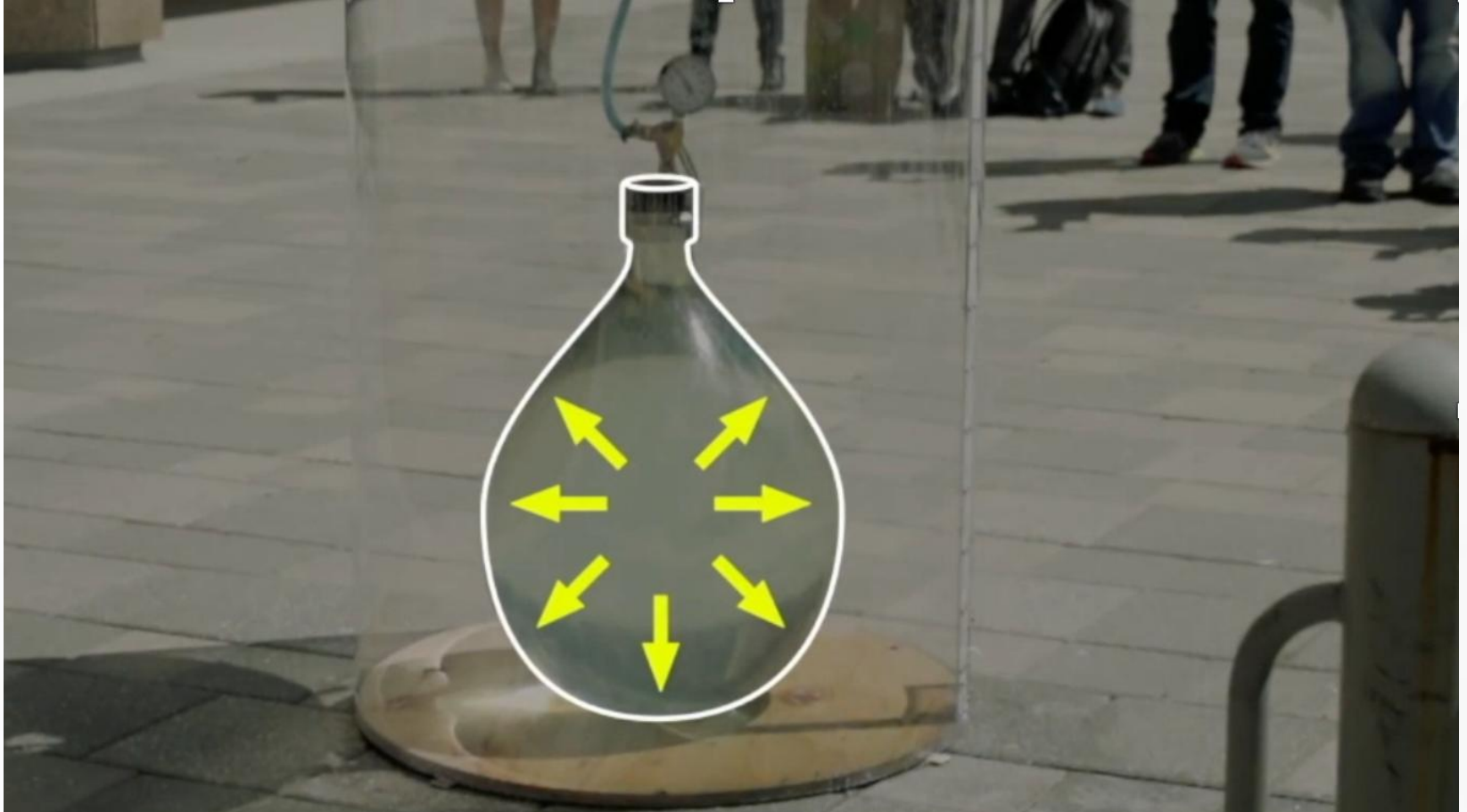


https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mech_paradox&l=pl

Paradoks hydrostatyczny

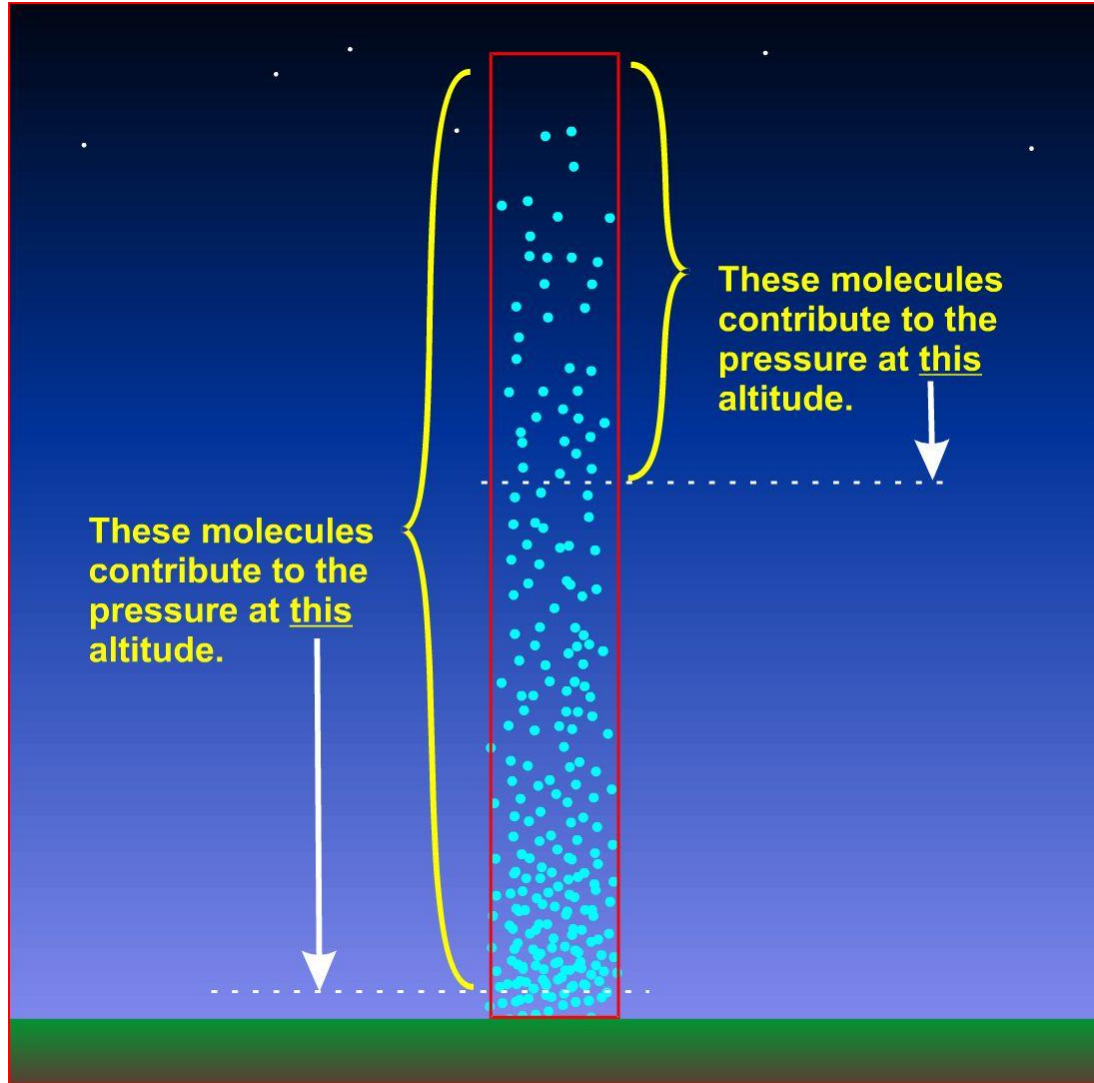


Beczka Pascala



Ciśnienie atmosferyczne

Żyjemy na dnie oceanu wypełnionego powietrzem.



Gazy są ściśliwe – gęstość atmosfery nie jest stała – w odróżnieniu od cieczy ciśnienie wywierane przez gazy nie zmienia się liniowo z głębokością zanurzenia.

https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html

Pionowy słupa powietrza atmosferycznego o polu przekroju poprzecznego 1 cm^2 wywiera ciśnienie na powierzchnię Ziemi (na poziomie morza) równe :

$$P_{\text{atm}} \gg 10 \text{ N/cm}^2 \\ = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$$

odpowiada to naciskowi 1 kg masy na cm^2 .

Jak "silne" jest ciśnienie atmosferyczne?

półkule magdeburskie - Ottona von Guericke w 1654 r. w Magdeburgu

(wynalazca pierwszej pompy próżniowej)



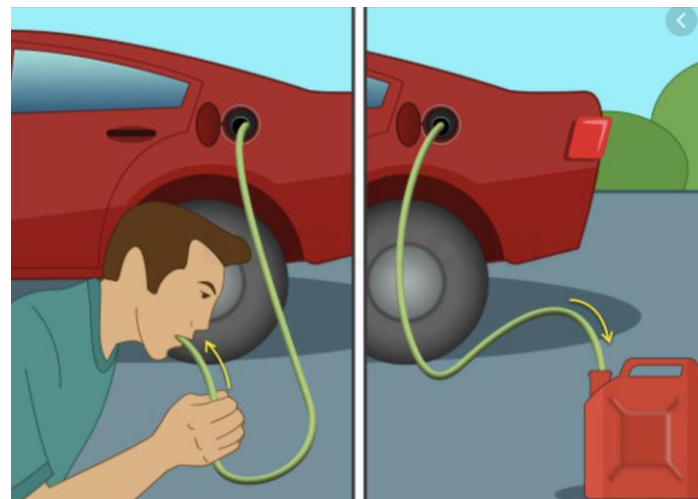
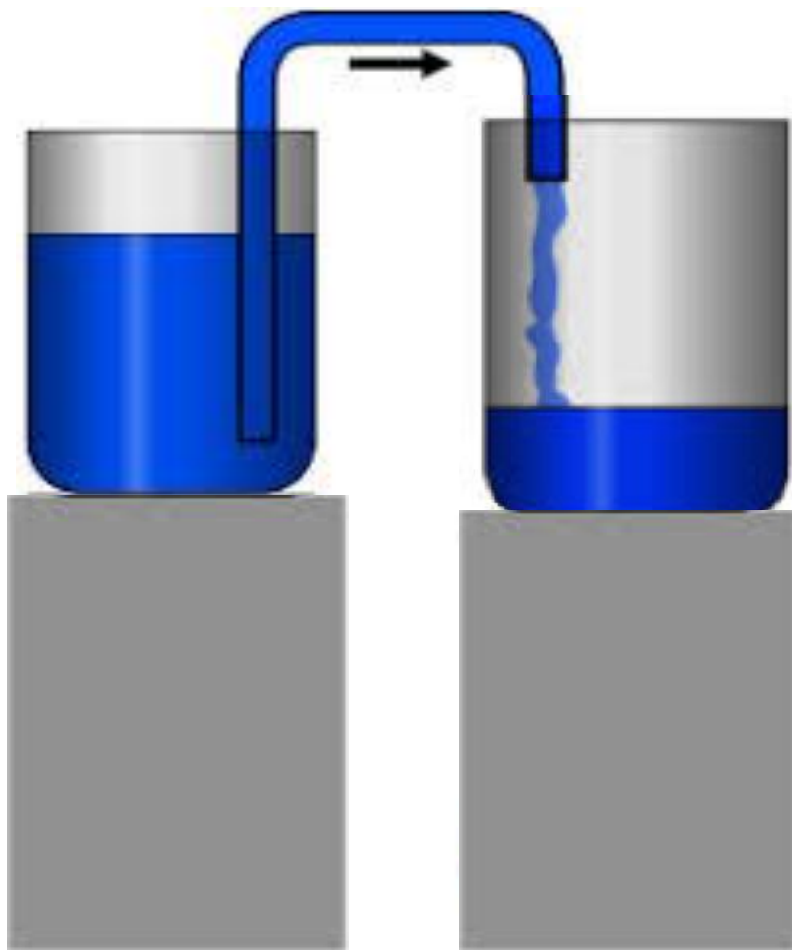
https://www.youtube.com/watch?v=gb4eUu_ELSs

Jak "silne" jest ciśnienie atmosferyczne?

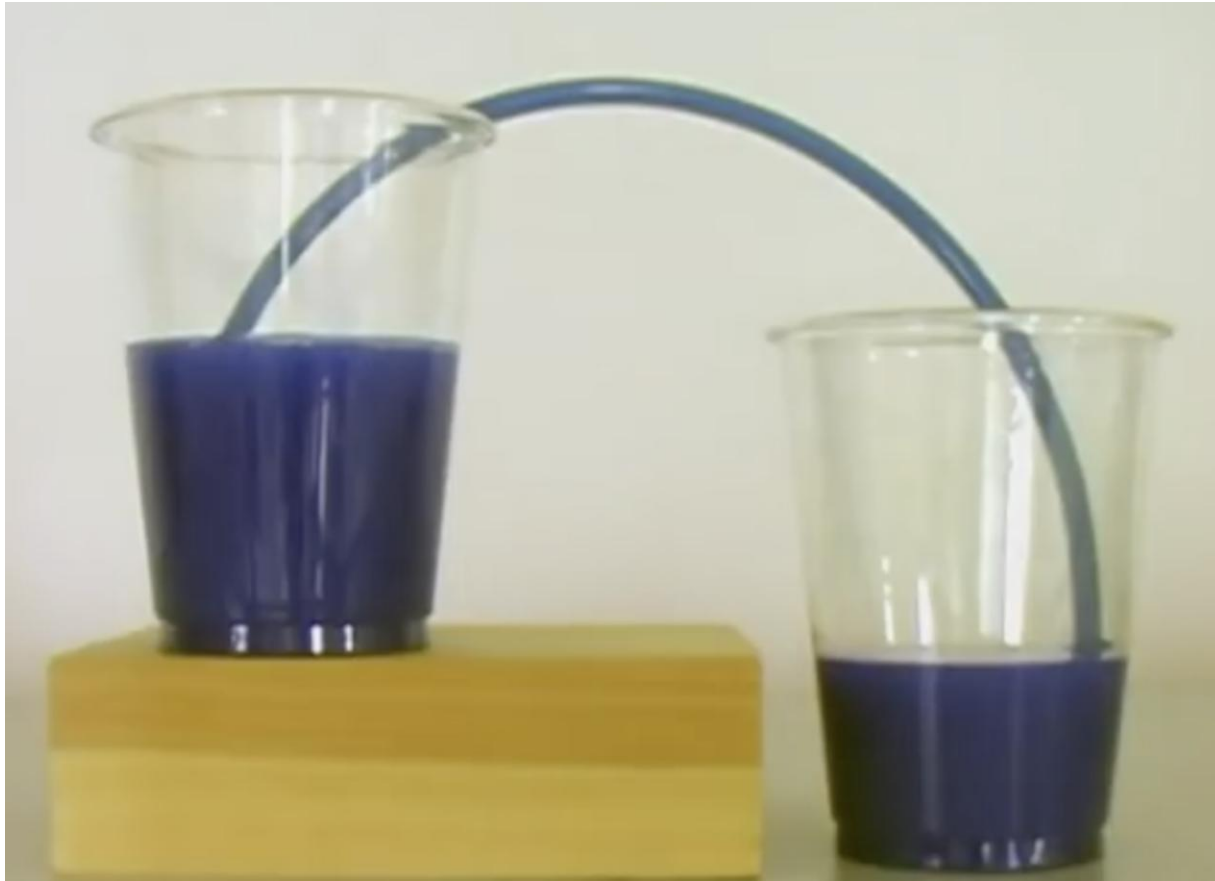


patrz: 13 min 17 s

Lewar hydrauliczny

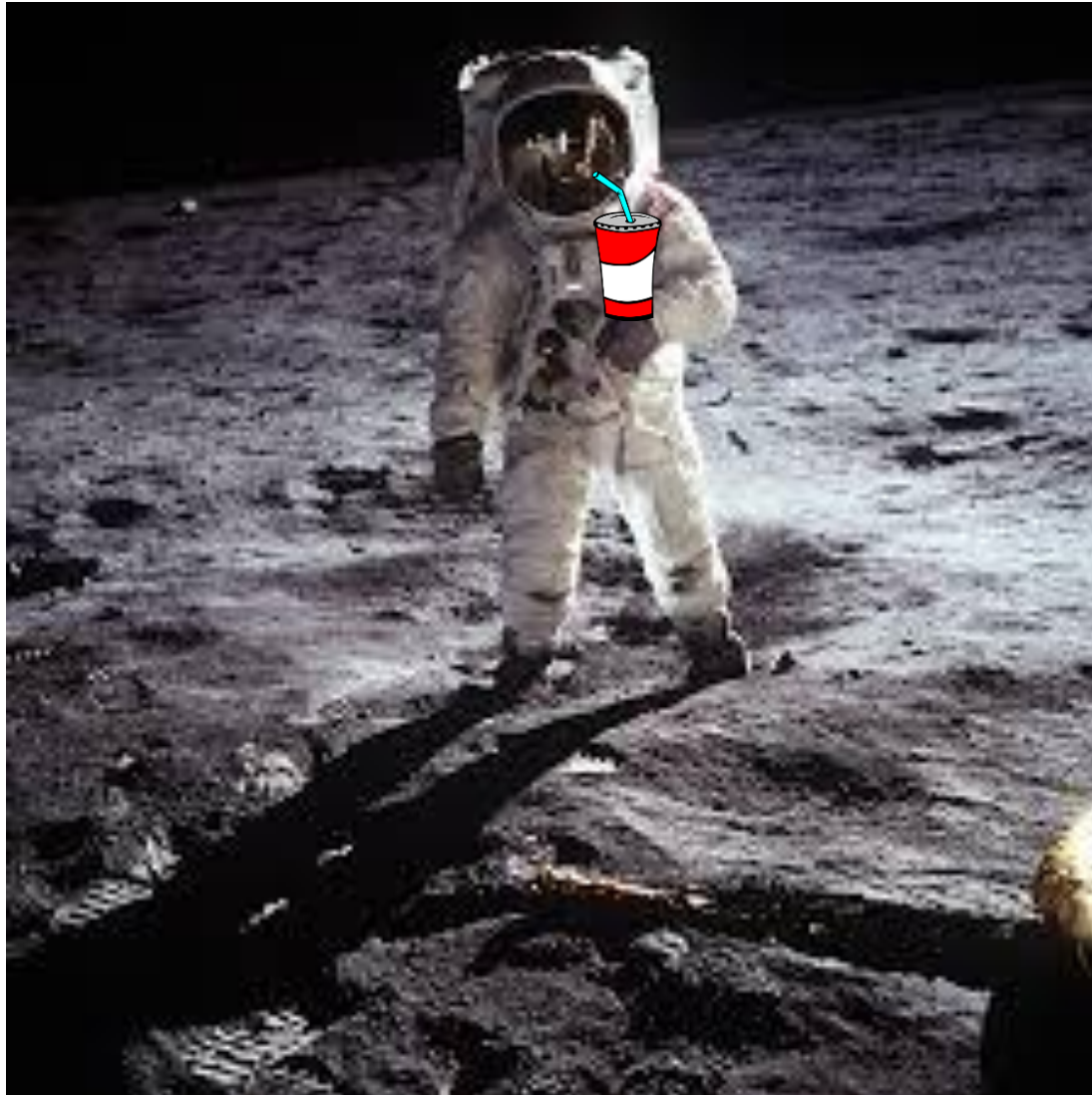


Lewar hydrauliczny (syfon)



<https://www.youtube.com/watch?v=CZmP0vsRBZ8>

Czy na księżycu możliwe jest picie napojów przy pomocy słomki?



Czy nurek z rurką może swobodnie oddychać pod wodą na głębokości 10 m?

rurka do
oddychania

$$P_{\text{atm}} \gg 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$g \gg 10 \text{ m/s}^2$$

$$r \gg 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 10 \text{ m}$$

$$P = P_{\text{atm}} + rgh = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 2 \text{ atm} \approx 2 \text{ kg/cm}^2$$

Rozmiar klatki piersiowej człowieka to ok. 1000 cm^2 – czyli nurek odczuwa ciśnienie wywierane klatkę piersiową równe naciskowi masy 2000 kg (2 tony)!

Rozwiązaniem jest butla z tlenem pod wysokim ciśnieniem, która umożliwia oddychanie.

Ciśnienie jakiego doznają łodzie podwodne

Informacja z roku 2011:

Chińska łódź podwodna zeszła na głębokość 5 tys. metrów

PAP

W przyszłym roku planowane jest osiągnięcie przez "Jiaolong" poziomu 7 tys. metrów. Jeśli to się uda, Chiny będą miały dostęp do 99,8 proc. dna morskiego na świecie.

$$P_{\text{atm}} \gg 10^5 \text{ N/m}^2 \quad g \gg 10 \text{ m/s}^2 \quad h \gg 5000 \text{ m} \quad r \gg 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$P = P_{\text{atm}} + rgh = 50.1 \text{ MPa} = 501 \text{ atm} \approx 500 \text{ kg/cm}^2$$



Implozja na dużych głębokościach

Fragment filmu „Underwater” (Głębia strachu)

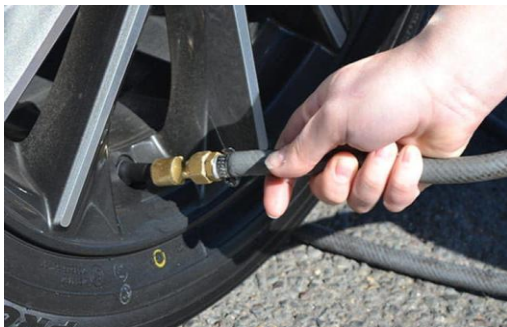


<https://www.youtube.com/watch?v=4SxZXPBQvRg>

„Blobfish” (bezsztalna ryba) – ryba żyjąca na ekstremalnie dużych głębokościach (ok. 1200 m pod powierzchnią, ciśnienie ponad 120 razy większe od atmosferycznego)



„Zoo” jednostek ciśnienia



Jednostka

Jednostka SI: paskal

Jednostka imperialna (brytyjski system miar): funt na cal do kwadratu
(lb/in^2 , inaczej psi)

Inne jednostki ciśnienia

Definicja

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$1 \text{ psi} = 7,015 \cdot 10^3 \text{ Pa} \quad \text{amerykański sprzęt}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 760 \text{ mmHg} \\ &= 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \\ &= 14,7 \text{ psi} \\ &= 29,9 \text{ inHg} \\ &= 1013 \text{ mbar} \end{aligned}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Tr} = 1 \text{ mmHg} = 122,39 \text{ Pa}$$

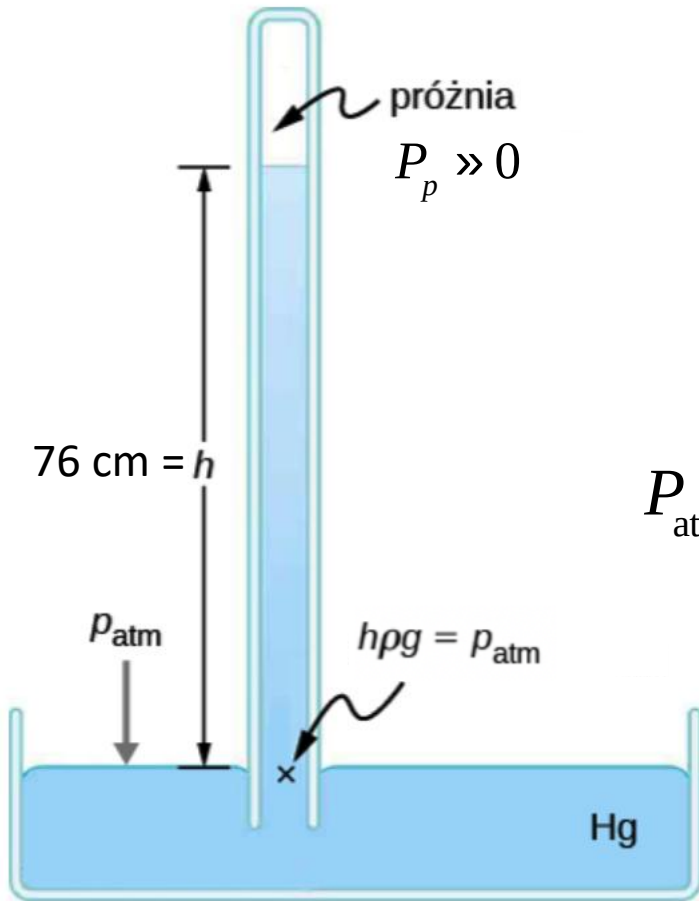
https://www.vascak.cz/data/android/physicsat_school/template.php?s=mech_tlak&l=pl

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \approx 1 \text{ atm} = 760 \text{ Tor}$$

Pomiar ciśnienia atmosferycznego

- barometr rtęciowy Torricellego

Barometr rtęciowy Torricellego:



$$P_{\text{atm}} - P_p = r_{\text{Hg}} gh$$

$$P_{\text{atm}} \gg 10^5 \text{ Pa} \gg 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ Tor}$$

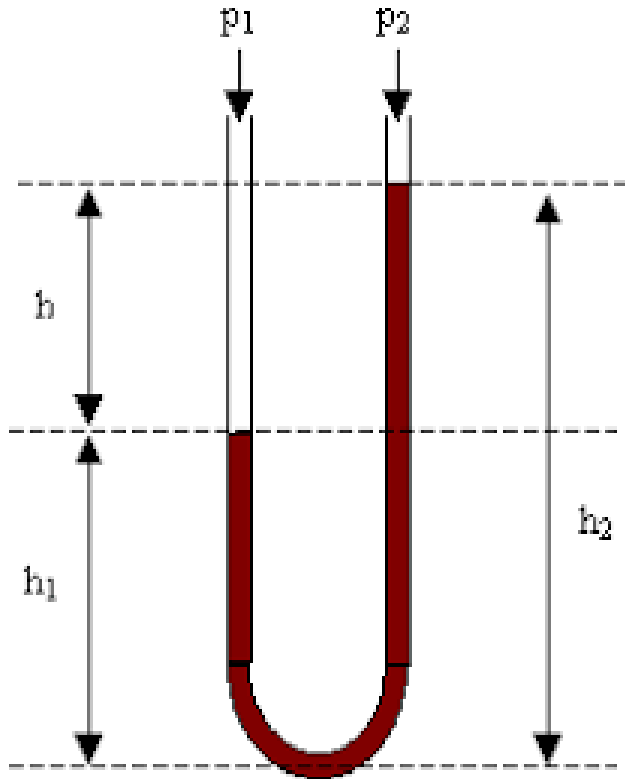
Jaką wysokość miałby słup, gdyby rtęć zastąpić wodą?

$$r_{\text{Hg}} = 13.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

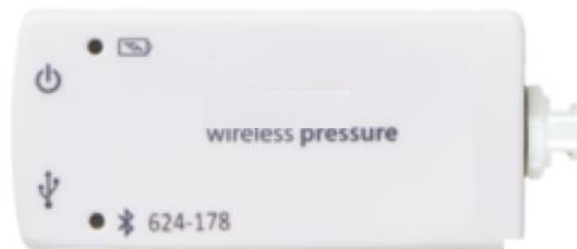


Pomiar ciśnienia

u – rurki, ciśnieniomierze (manometry) analogowe i cyfrowe

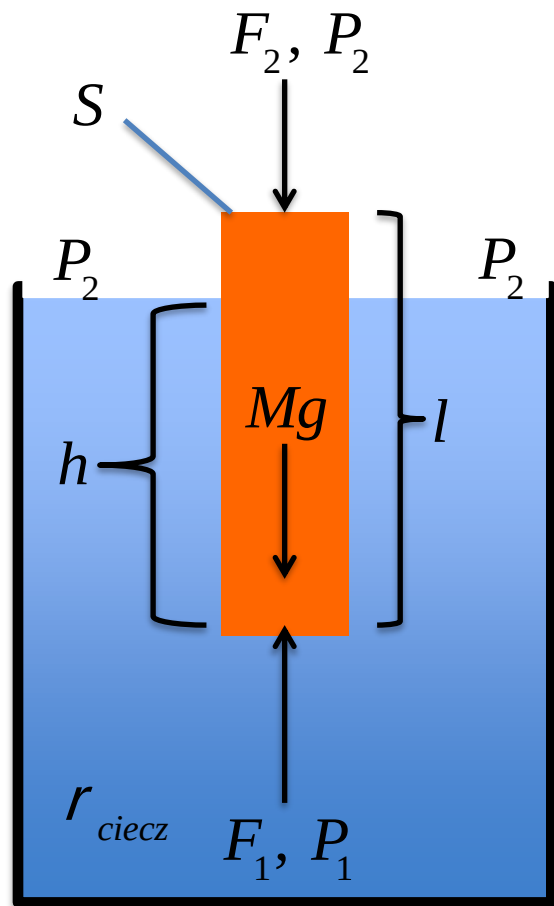


lewe ramię $p_1 = p_2 + rgh$ prawe ramię



Prawo Archimiedesa

Ciało zanurzone w cieczy:



$$P_1 - P_2 = r_{\text{ciecz}} gh$$

$$F_1 - F_2 = Mg$$

Siła wyporu:

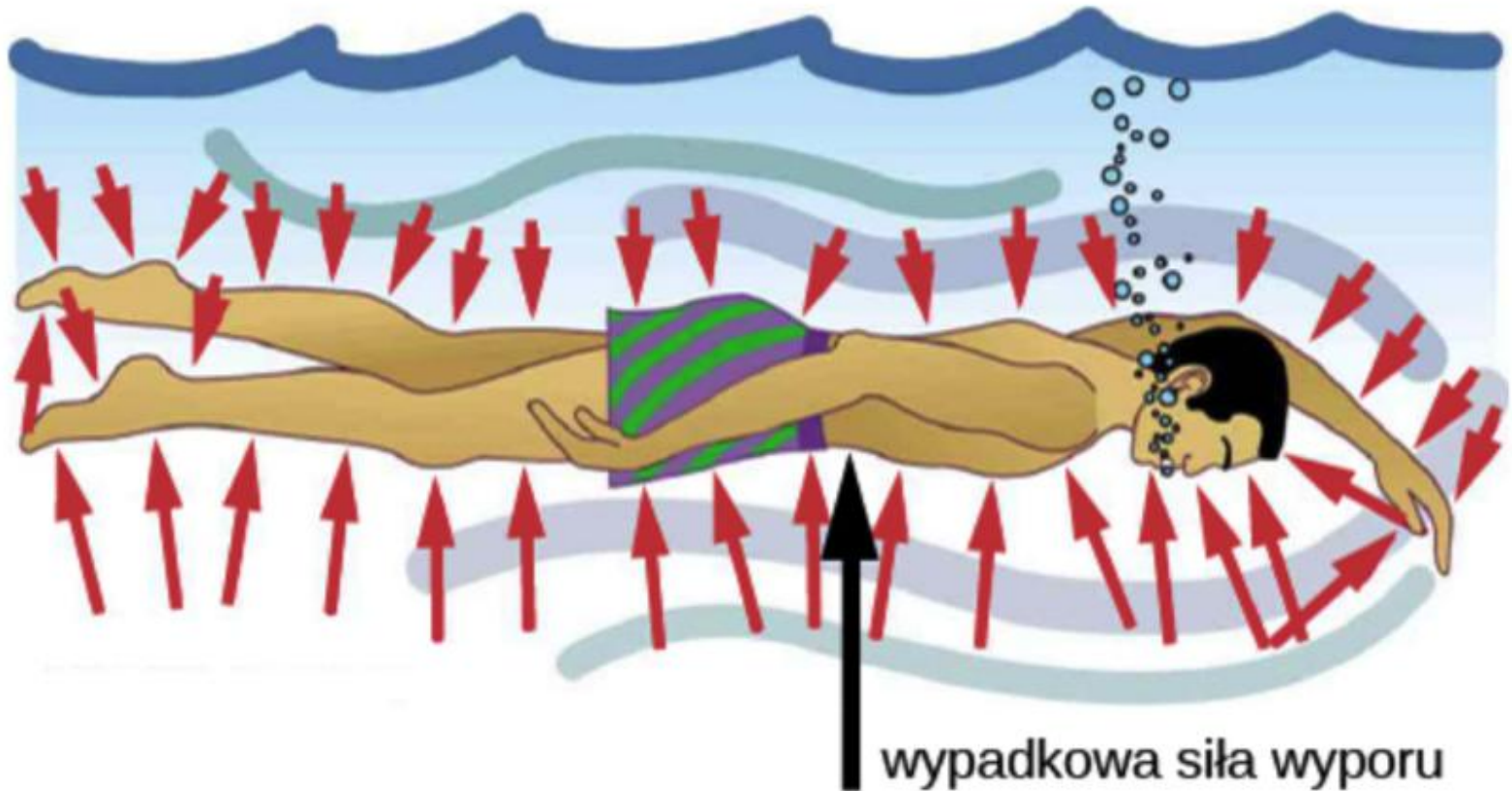
$$F_{\text{wyp}} = F_1 - F_2 = P_1 S - P_2 S = r_{\text{ciecz}} h S g = \underline{r_{\text{ciecz}} V g}$$

ciężar wypartej cieczy

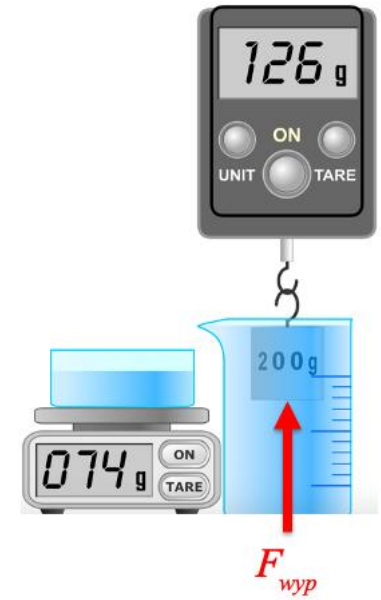
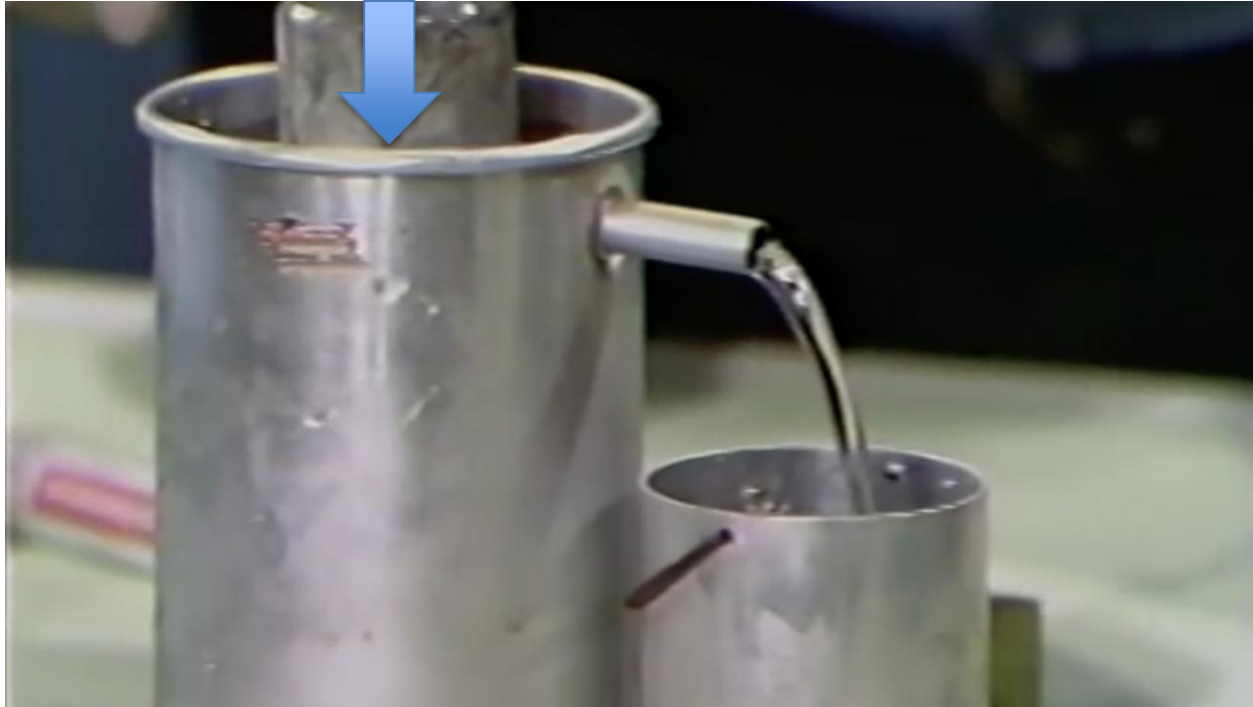
Prawo Archimiedesa:

Każde ciało zanurzone w cieczy doznaje siły wyporu skierowanej w górę i równej ciężarowi wypartej cieczy.

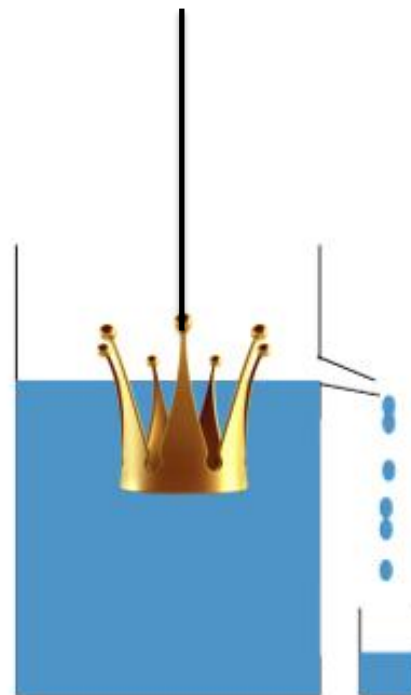
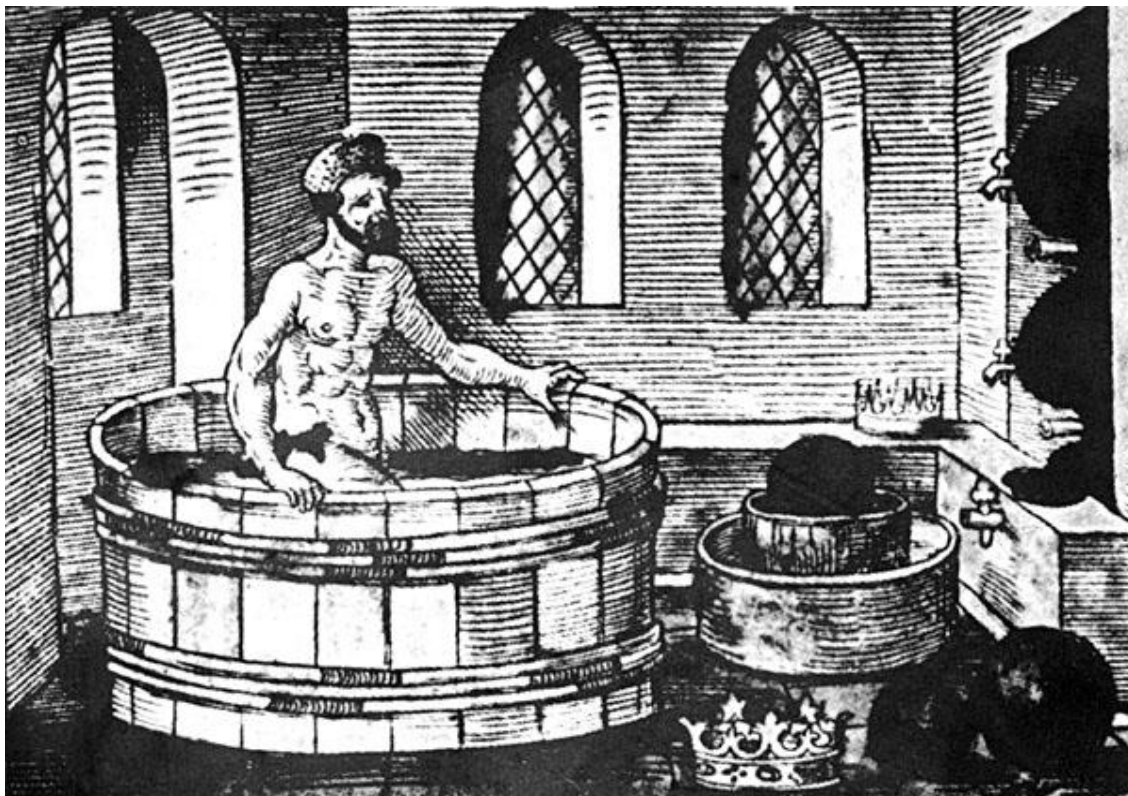
Prawo Archimiedesa



Prawo Archimiedesa



Prawo Archimiedesa



Archimedes odkrył sposób w jaki mierzyć objętości ciał o nieregularnych kształtach. Ciała o tej samej masie i gęstości powinny wypierać tę samą ilość wody (bo objętość jest taka sama niezależnie od kształtu).

Prawo Archimiedesa

Pomiar objętości wypartej cieczy jest jednak trudny (obarczony znacznym błędem), jeżeli gęstości ciał są podobne.



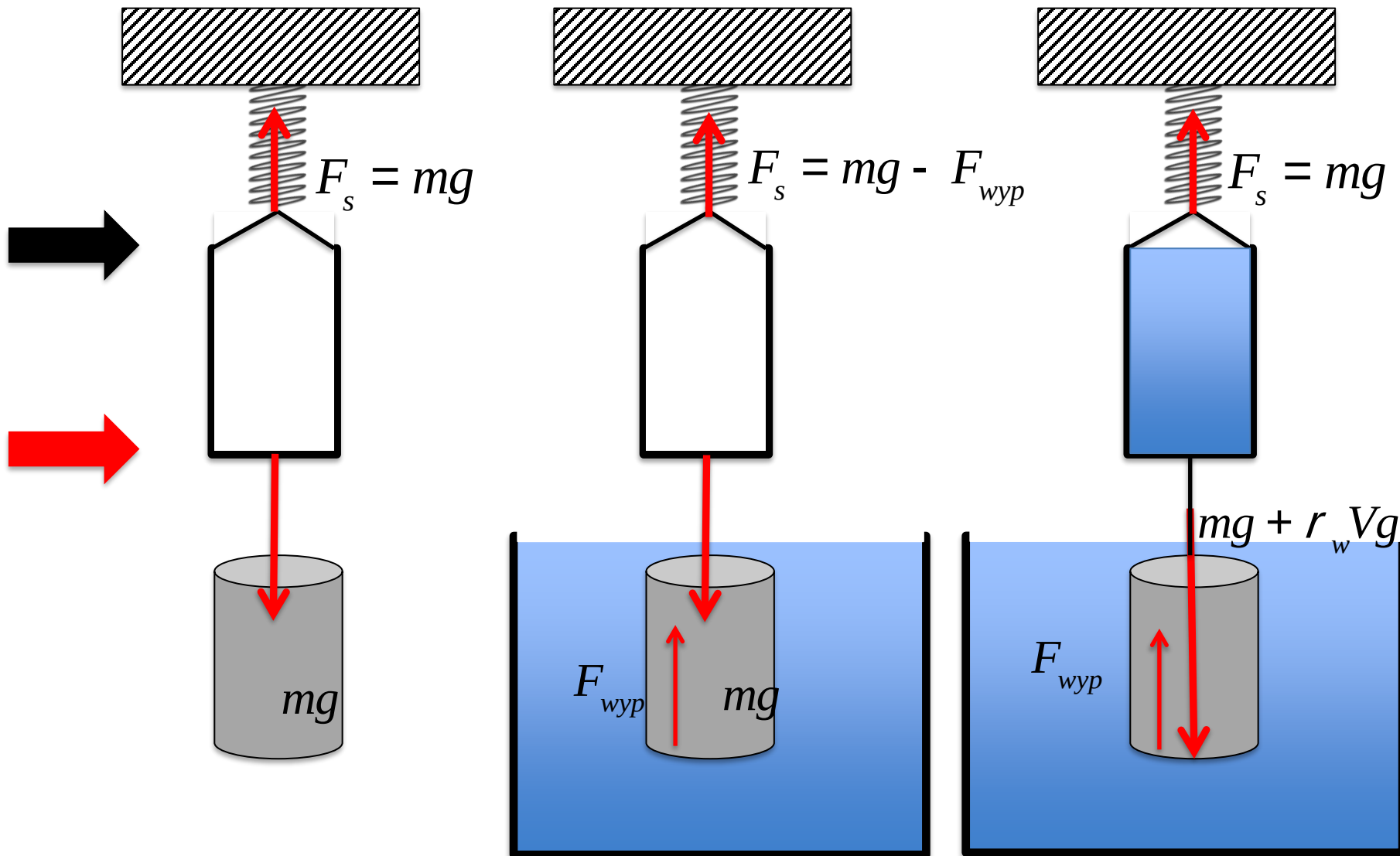
Znacznie lepszą (dokładniejszą) metodą jest zważanie ciał. Na zdjęciach ciała ze stali i miedzi o tej samej masie - zanurzone w wodzie podlegają działaniu sił wyporu o różnej wartości (bo objętości są inne).

**Prawo Archimiedesa? –
ależ to bardzo proste!**

*Adam Smólski
I SLO „Bednarska” w Warszawie*

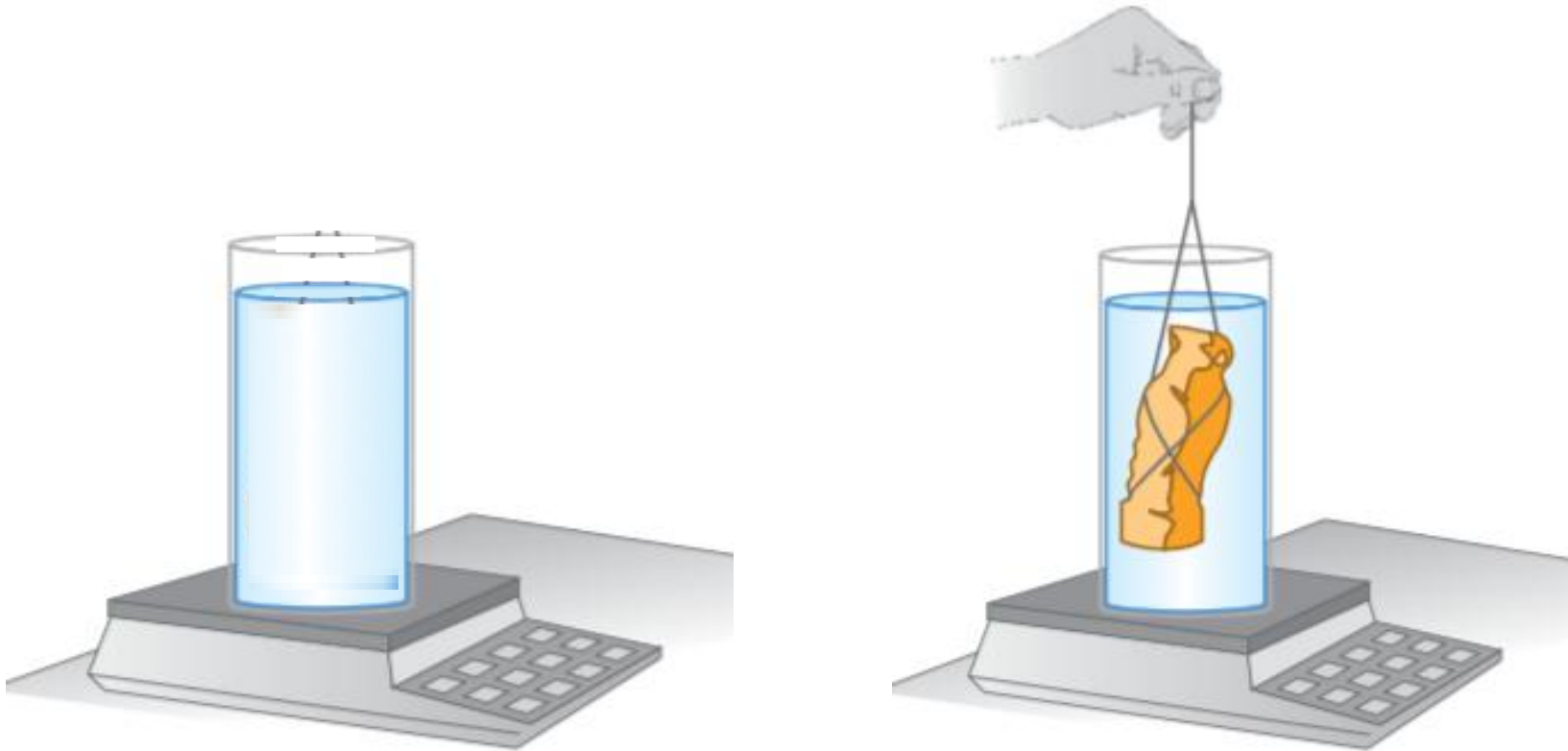
Pomiar siły wyporu

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mech_archimedes&l=pl



Pomiar siły wyporu

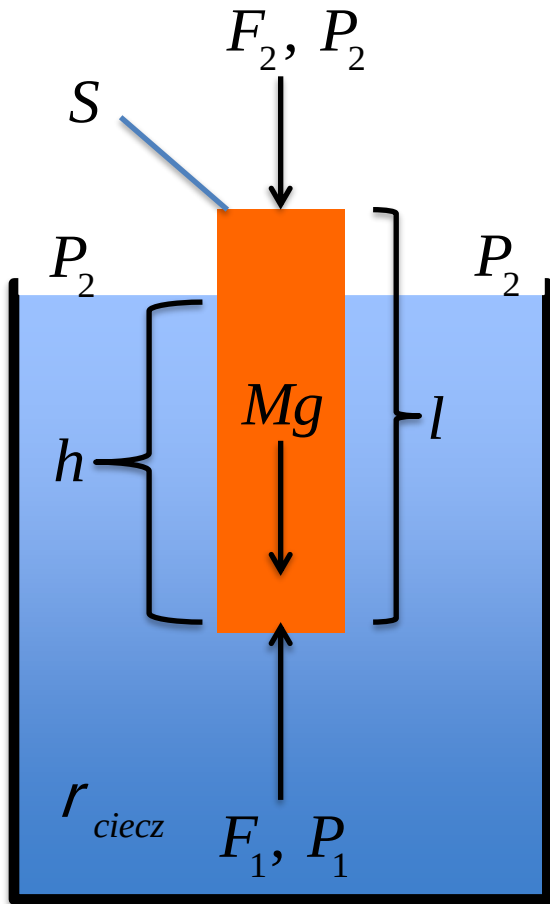
- jakie będzie wskazanie wagi?



Ciecz działa na ciało siłą wyporu – zgodnie z III zasadą dynamiki Newtona ciało działa na ciecz siłą o takiej samej wartości i przeciwnie skierowaną – wskazanie wagi wzrośnie po zanurzeniu ciała!

Warunki pływania ciał

Ciało pływa w cieczy:



$$F_{\text{wyp}} = Mg$$

$$r_{\text{ciecz}} h S g = r_{\text{cialo}} l S g$$

$$r_{\text{ciecz}} h = r_{\text{cialo}} l$$

$$h \leq l$$



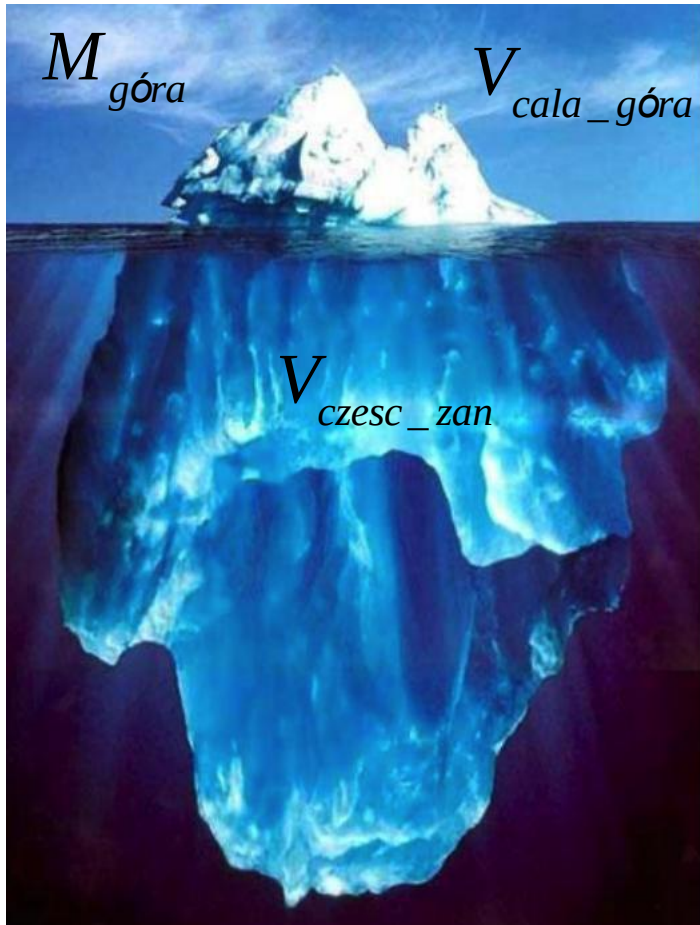
$$r_{\text{ciecz}} \geq r_{\text{cialo}}$$

ciało pływa

$$r_{\text{ciecz}} < r_{\text{cialo}}$$

ciało tonie

Dlaczego lód pływa



$$\rho_{lód} = 0.92 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{woda} = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$M_{góra}g = V_{cala_góra}\rho_{lód}g = V_{czesc_zan}\rho_{woda}g$$

$$\frac{V_{czesc_zan}}{V_{cala_góra}} = \frac{\rho_{lód}}{\rho_{woda}} = 0.92$$

92 % góry lodowej znajduje się pod wodą

Nurek Kartezjusza

Wyjaśnienie wymaga znajomości prawa Pascala oraz siły wyporu.



https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mech_kartezian&l=pl

Dlaczego ogromne metalowe statki nie toną?



Ponieważ ich efektywna gęstość jest znacznie mniejsza niż gęstość wody (są wypełnione powietrzem).

Balon z gazem

$$M = M_{gaz} + M_{reszta}$$

Żeby balon uniósł się:

$$F_{wyp} > Mg$$

$$V r_{powietrze} g > V r_{gaz} g + M_{reszta} g$$

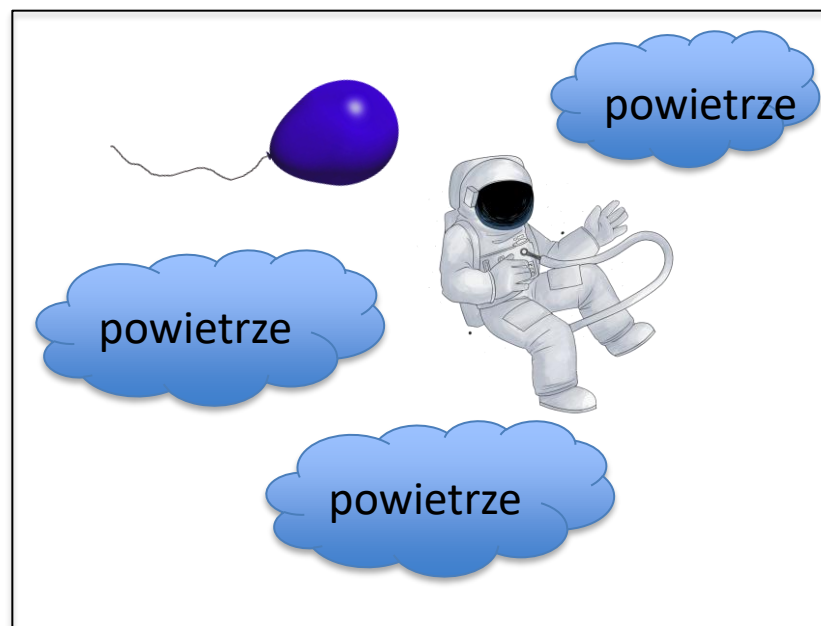
Warunek konieczny (choć nie wystarczający) do unoszenia się:

$$r_{gaz} < r_{powietrze}$$

Siła wyporu skierowana jest zawsze
przeciwnie do siły grawitacji

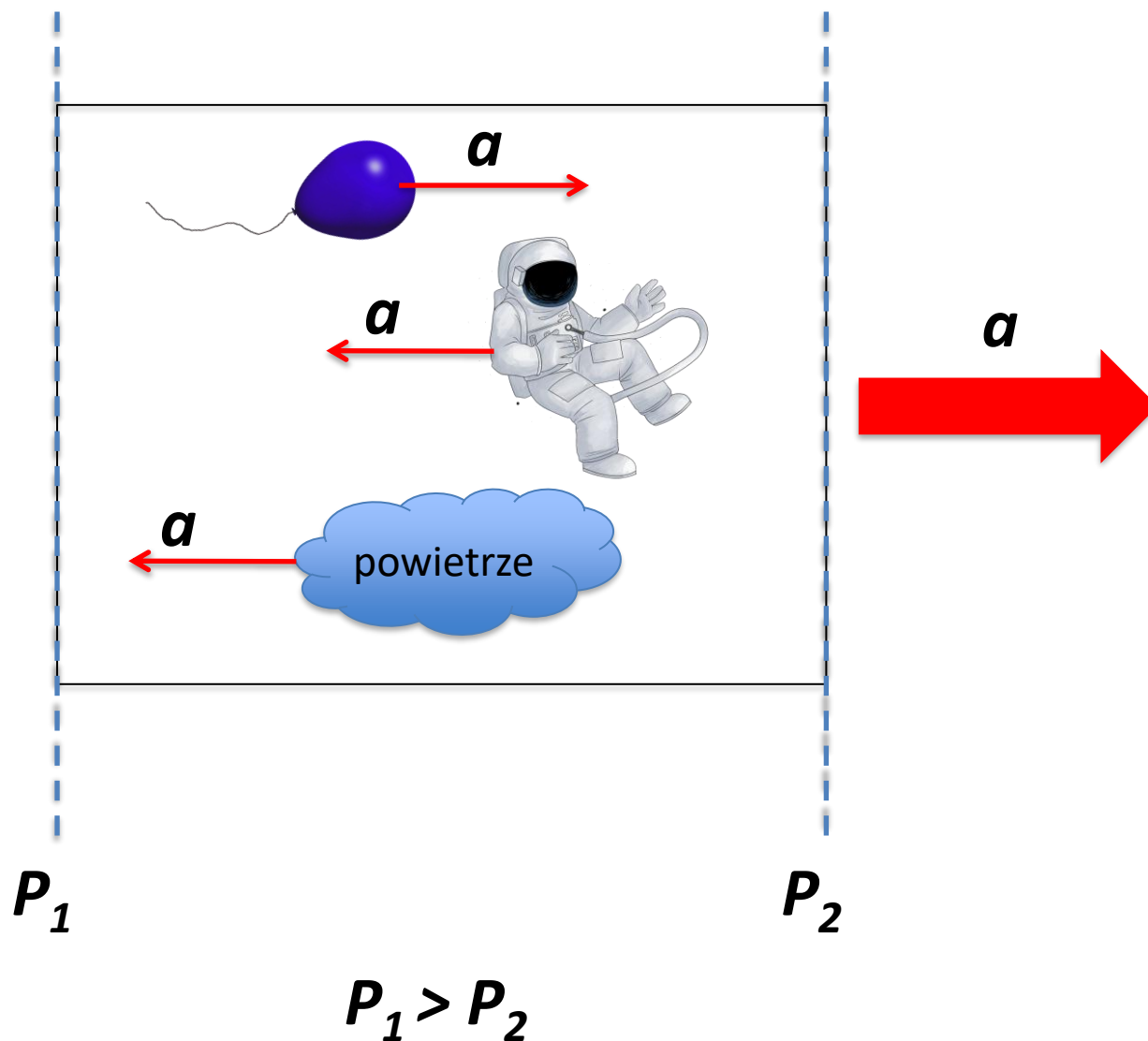
Balon z helem w stanie nieważkości

Balon z helem w stanie nieważkości (jesteśmy daleko od gwiazd i planet, w pustej przestrzeni kosmicznej), $g = 0$ – czy prawo Archimedesa obowiązuje nadal?



W stanie nieważkości Prawo Archimedesa nie obowiązuje! Nie możemy odróżnić góry od dołu (grawitacja daje nam poczucie góra – dół). Gdziekolwiek umieścimy balon, tam on zostanie!

Balon z helem w układzie przyspieszającym

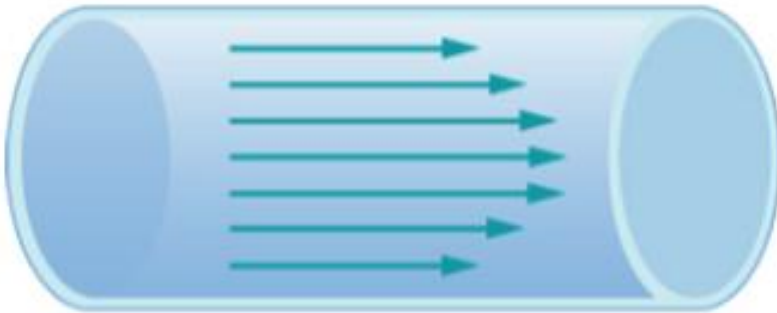


Balon z helem w przyspieszającym samochodzie



Hydrodynamika płynu idealnego

- Ciecz o pomijalnej lepkości (brak tarcia wewnętrznego)
- Przepływ laminarny (nieturbulentny, brak wirów, brak tarcia o ściany rury)
- Płyn jest całkowicie nieściśliwy

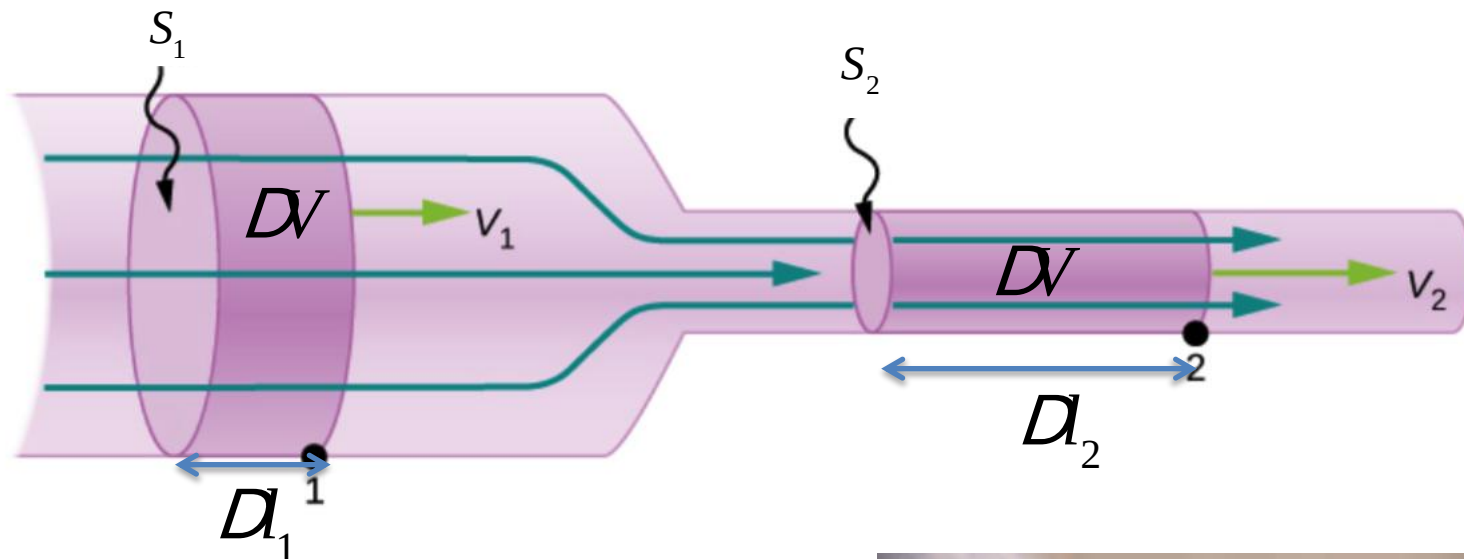


(a) przepływ laminarny



(b) przepływ turbulentny

Równanie ciągłości



Objętość płynu, która przepływa przez poprzeczny przekrój rury w niewielkim czasie Δt :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S_1 D_1}{\Delta t} = S_1 v_1$$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

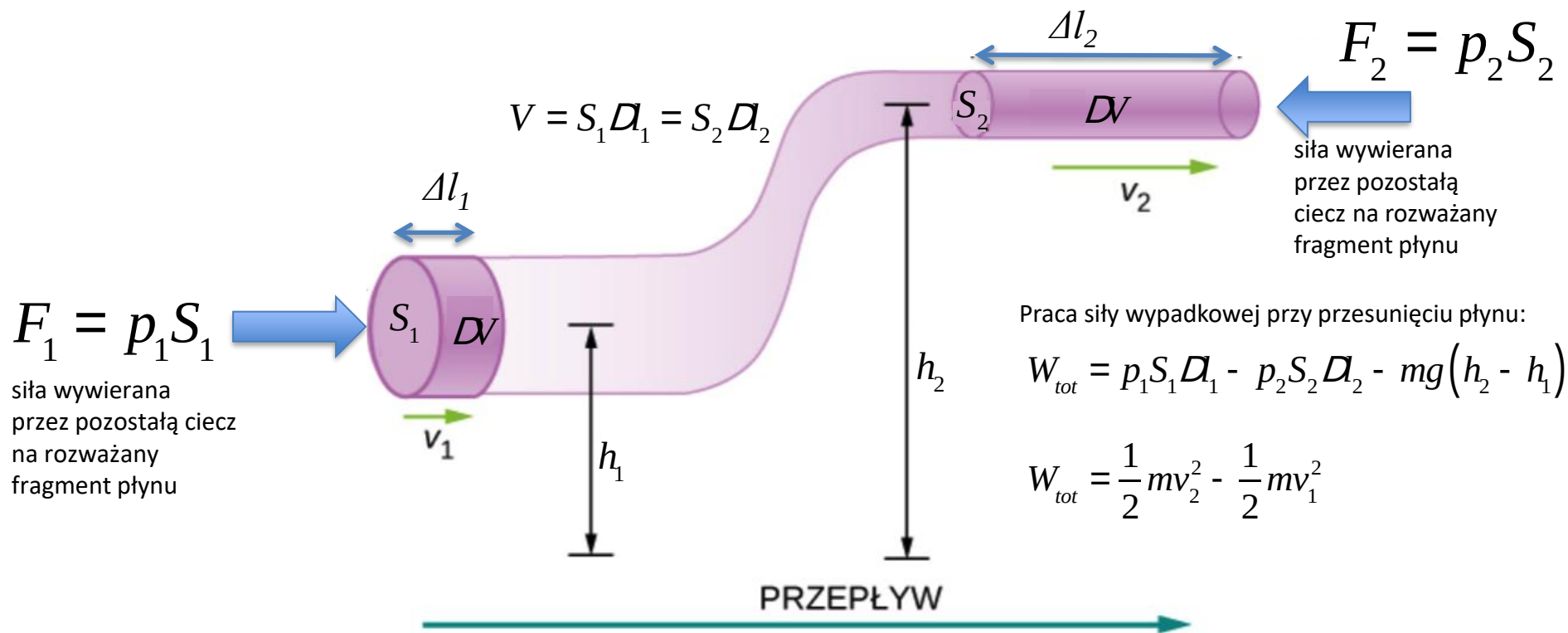
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S_2 D_2}{\Delta t} = S_2 v_2$$



Im mniejszy przekrój poprzeczny rury tym większa prędkość cieczy!

Równanie Bernoulliego

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mech_bernoulli&l=pl

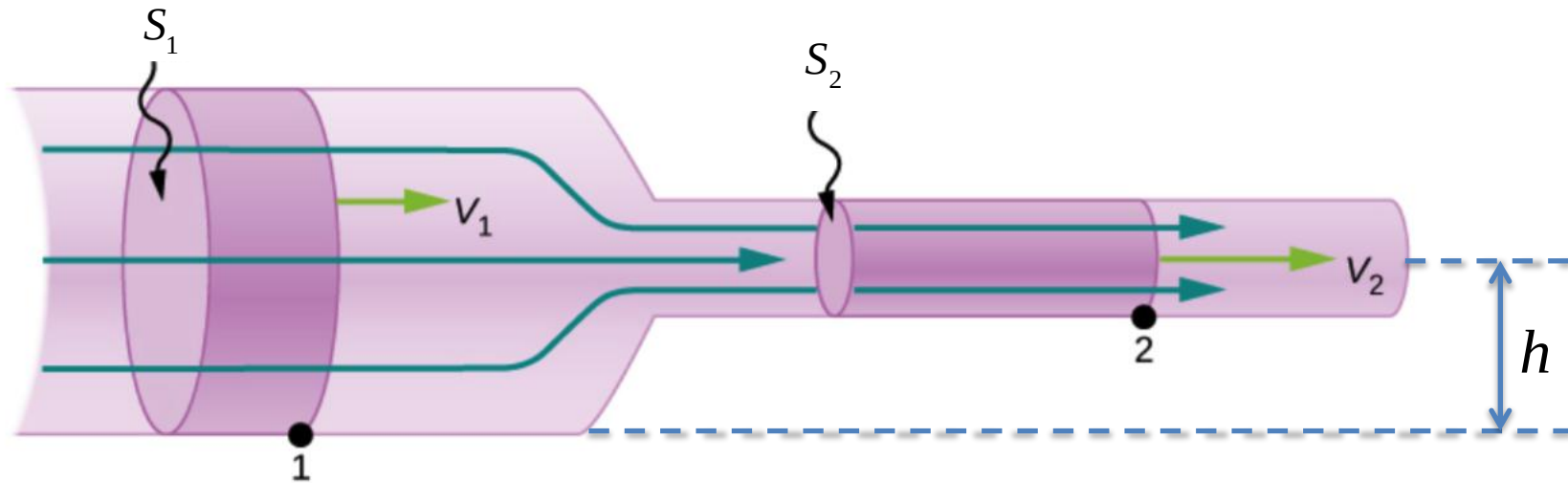


Równanie Bernoulliego:

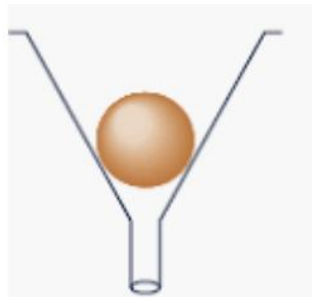
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 - \text{ciśnienie dynamiczne}$$

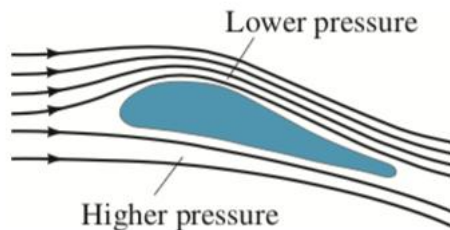
Równanie Bernoulliego - konsekwencje



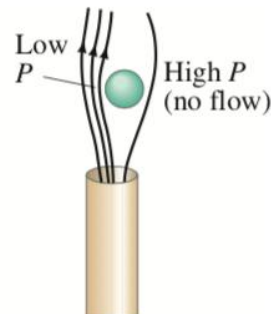
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \text{większa prędkość – mniejsze ciśnienie!}$$



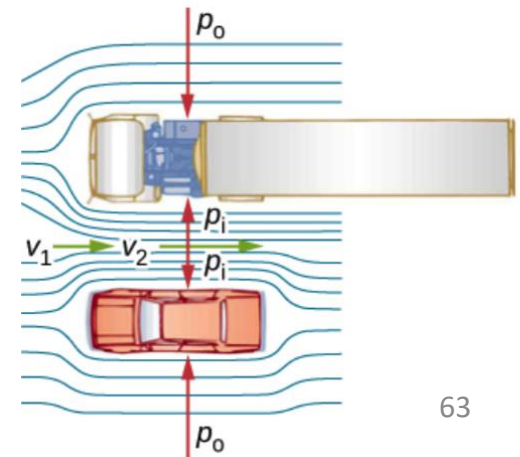
piłka pingpongowa
w lejku



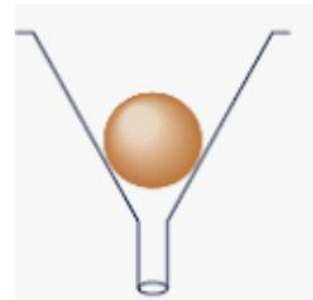
skrzydło samolotu



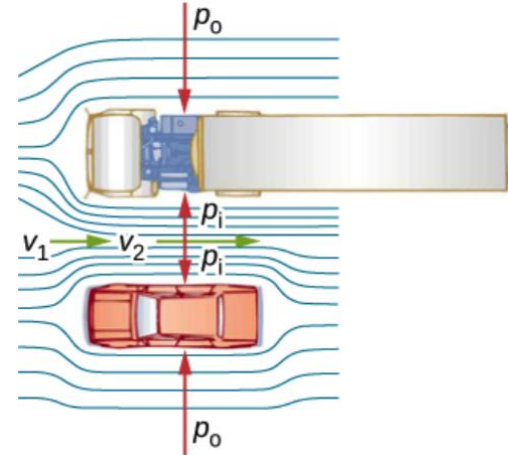
piłka pingpongowa
w strumieniu powietrza



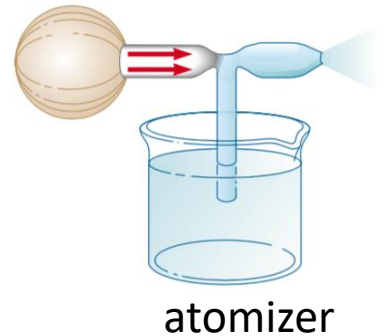
Równanie Bernoulliego - konsekwencje



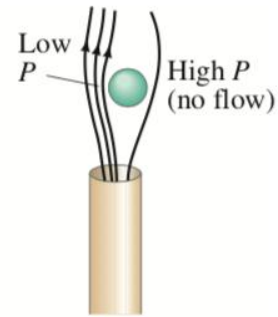
Równanie Bernoulliego - konsekwencje



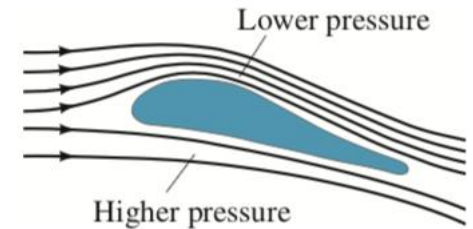
Równanie Bernoulliego - konsekwencje



Równanie Bernoulliego - konsekwencje



Równanie Bernoulliego - konsekwencje



<https://www.youtube.com/watch?v=ph1HqrioLPs&t=0s>

<https://www.youtube.com/watch?v=BWvGE238DdE>

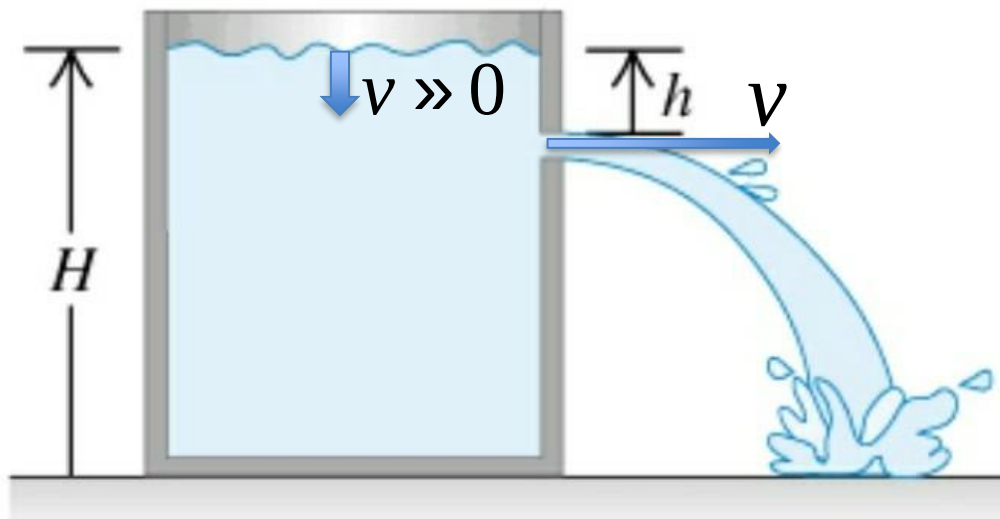
Zwężka Venturiego



<https://www.youtube.com/watch?v=hLZkPFrQCDk>

Prawo Torricellego

Z jaką prędkością woda wypływa z małego otworu, który znajduje się w bocznej ścianie dużego otwartego zbiornika wodnego w odległości h od powierzchni wody?



Z równania Bernoulliego: $p_{atm} + \rho gH = p_{atm} + \rho g(H - h) + \frac{1}{2} \rho v^2$

$$v = \sqrt{2gh}$$

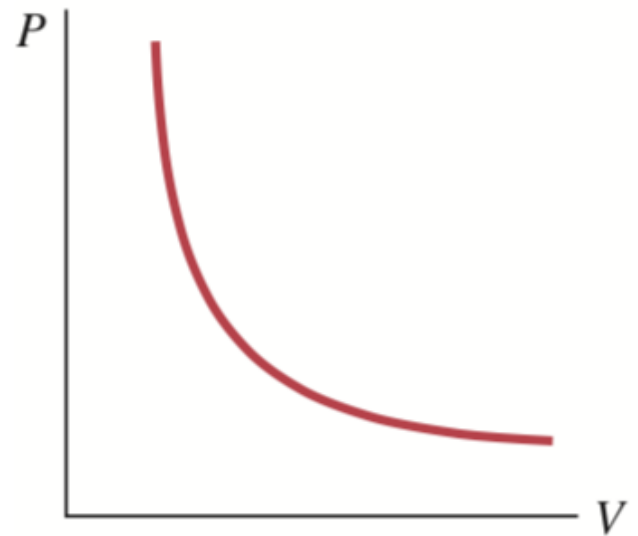
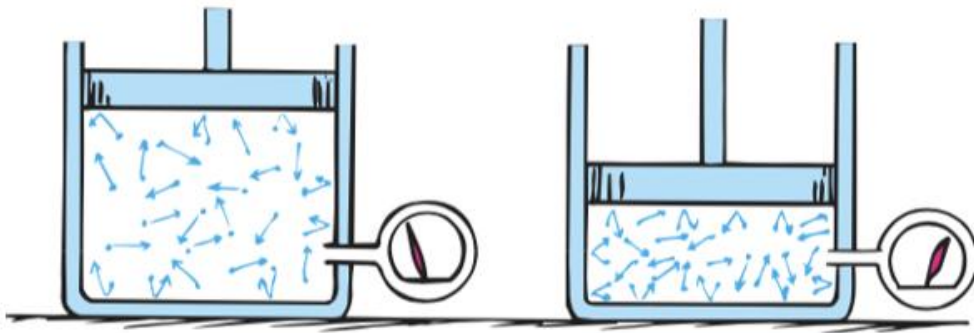
Dla otwartego dużego zbiornika płynu prędkość cieczy wypływającej przez otwór na głębokości h pod powierzchnią cieczy jest równa prędkości uzyskanej przez ciało swobodnie spadające z wysokości h . Zjawisko to znane jest jako **prawo Torricellego**.

Prawa gazowe: prawo Boyle'a

Robert Boyle (1627 - 1691):

Gdy gaz nie jest zbyt gęsty, w temperaturach dalekich od punktów zmiany stanu skupienia, pomiędzy ciśnieniem (P) a objętością (V) zachodzi relacja:

$$P \propto \frac{1}{V} \quad \text{lub} \quad PV = \text{const}$$



Dla ustalonej liczby cząstek gazu, zmiana ciśnienia i objętości przy stałej temperaturze nazywana jest przemianą **izotermiczną**.

<https://www.youtube.com/watch?v=H4zJQ1EdGqs>

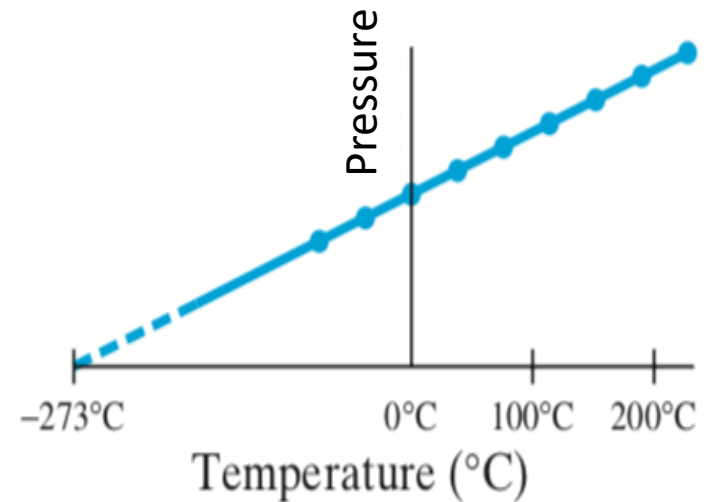
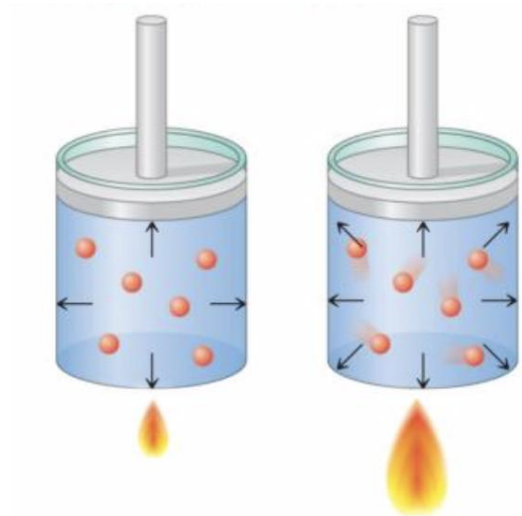
https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mf_izotermicky_dej&l=pl

Prawa gazowe: prawo Guy-Lussac'a

Joseph Gay-Lussac (1778 - 1850):

Gdy gaz nie jest zbyt gęsty, w temperaturach dalekich od punktów zmiany stanu skupienia, przy stałej objętości pomiędzy ciśnieniem (P) a temperaturą gazu (T) zachodzi relacja:

$$P \propto T \quad \text{lub} \quad \frac{P}{T} = \text{const}$$



<https://www.youtube.com/watch?v=1pVVZGOBIVg>

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mf_izochoricky_dej&l=pl

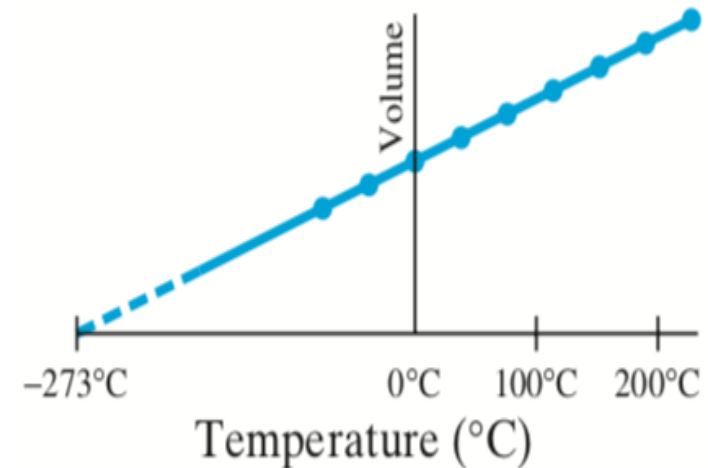
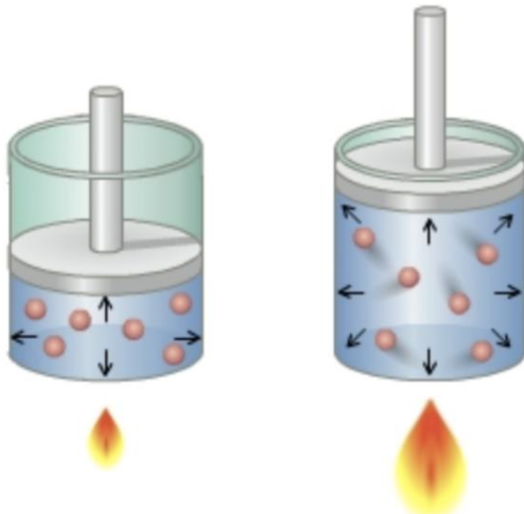
Dla ustalonej liczby cząstek gazu, zmiana ciśnienia i temperatury przy stałej objętości nazywana jest przemianą **izochoryczną**.

Prawa gazowe: prawo Charles'a

Jacques Alexandre César Charles (1746 - 1823):

Gdy gaz nie jest zbyt gęsty, w temperaturach dalekich od punktów zmiany stanu skupienia, przy stałym ciśnieniu pomiędzy objętością (V) a temperaturą gazu (T) zachodzi relacja:

$$V \propto T \quad \text{lub} \quad \frac{V}{T} = \text{const}$$



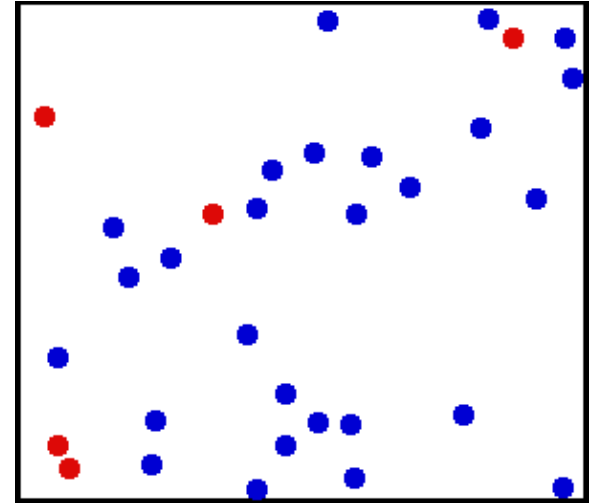
<https://www.youtube.com/watch?v=HxSPdmvqstQ>

https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mf_izobaricky_dej&l=pl

Dla ustalonej liczby cząstek gazu, zmiana objętości i temperatury przy stałym ciśnieniu nazywana jest przemianą **izobaryczną**.

Równanie gazu doskonałego

Gaz doskonały to abstrakcyjny model gazu, który zakłada, że gaz jest zbiorem sprężyste zderzających się kulek. Wiele gazów w warunkach normalnych zachowuje się jak gaz doskonały.



Równanie gazu doskonałego:

$$PV = nRT$$

P - ciśnienie

$R = 8.3 \frac{J}{mol \cdot K}$ - stała gazowa

V - objętość

n - liczba moli

T - temperatura

Jeden mol to $N_A = 6.023 \times 10^{23}$ cząstek (liczba Avogadro)

Jeden mol atomów waży liczbowo tyle gramów, ile wynosi masa atomowa pojedynczej cząsteczki.

Na przykład:

1 mol ^{12}C waży 12 gramów

1 mol $^{16}\text{O}_2$ waży 32 gramy

1 mol ^4He waży 4 gramy

1																	18
1 H 1.008	2											13	14	15	16	17	2 He 4.0026
3 Li 6.94	4 Be 9.0122											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.180
11 Na 22.990	12 Mg 24.305	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al 26.982	14 Si 28.085	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.45	18 Ar 39.948
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.956	22 Ti 47.867	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.630	33 As 74.922	34 Se 78.97	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.468	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.95	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57-71 *	72 Hf 178.49	73 Ta 180.95	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.97	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 #	104 Rf (265)	105 Db (268)	106 Sg (271)	107 Bh (270)	108 Hs (277)	109 Mt (276)	110 Ds (281)	111 Rg (280)	112 Cn (285)	113 Nh (286)	114 Fl (289)	115 Mc (289)	116 Lv (293)	117 Ts (294)	118 Og (294)

* Lanthanide series

57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.97
---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

Actinide series

89 Ac (227)	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)
--------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

Równanie gazu doskonałego - alternatywny zapis

Równanie gazu doskonałego:

$$PV = NkT$$

P - ciśnienie

N - liczba cząstek gazu

V - objętość

$k \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ - stała Boltzmann

T - temperatura

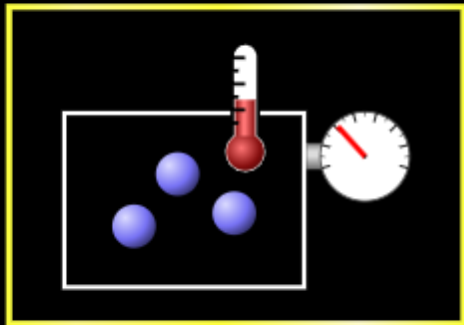
$$k = \frac{R}{N_A}$$

Właściwości gazu - symulacja

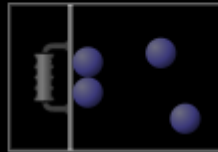
https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html

Privacy & Terms

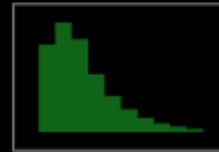
Gas Properties



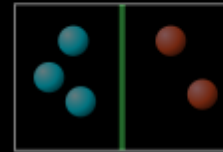
Ideal



Explore



Energy



Diffusion

Równanie gazu doskonałego - przykładowy problem



Opona samochodowa zostaje napełniona powietrzem do nadciśnienia 2.2 bara w temperaturze 10°C. Po przejechaniu 100 km temperatura wewnątrz opony wzrasta do 40°C. Jakie jest teraz ciśnienie w oponie?

D. C. Giancoli, Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics, 4th edition

Zakładając:

$$\begin{array}{l} V_1 = V_2 \\ n_1 = n_2 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \Rightarrow \quad P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

Uwaga: manometry (kompresorów, sprężarek) mierzą nadciśnienie względem ciśnienia atmosferycznego, stąd: $P_1 = 2.2 \text{ bar} + 1.0 \text{ bar} = 3.2 \text{ bar} = 320 \text{ kPa}$.

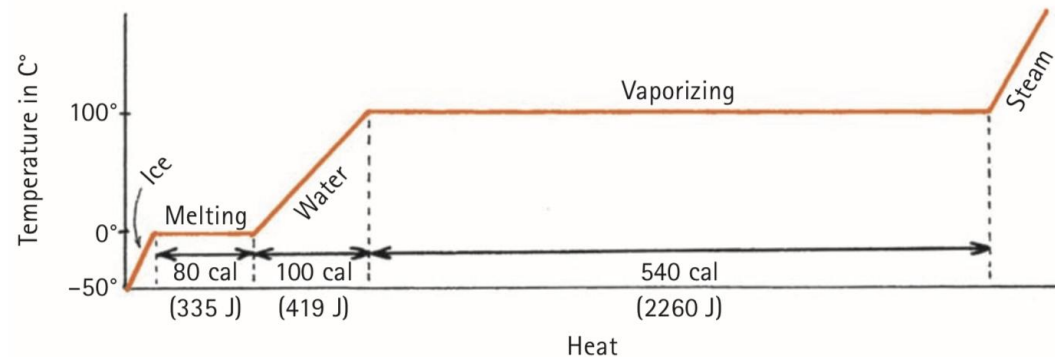
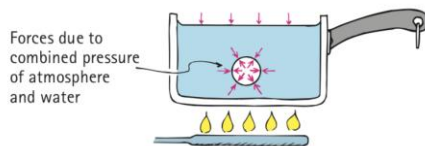
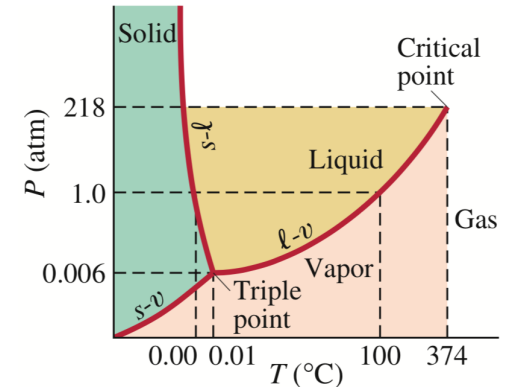
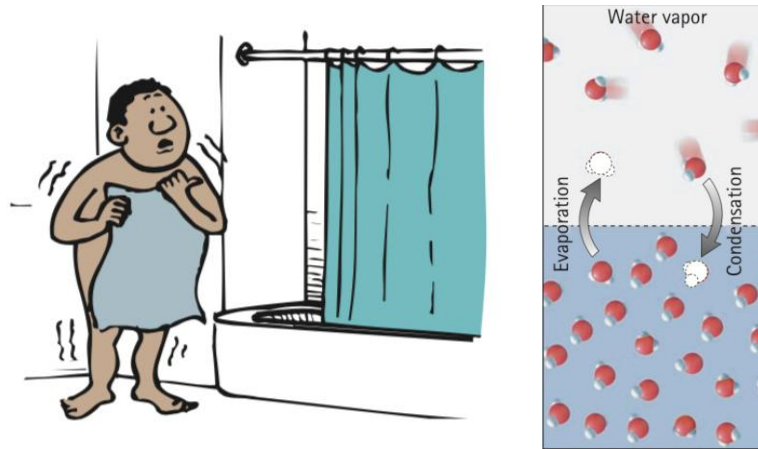
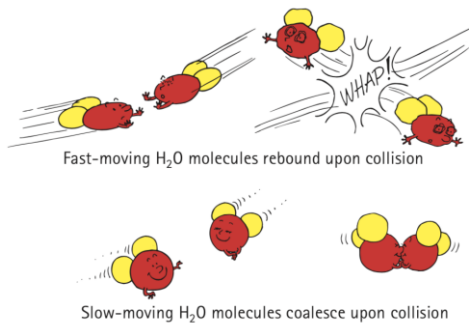
Temperaturę podajemy w skali bezwzględnej: $T_1 = 283 \text{ K}$, $T_2 = 313 \text{ K}$.

Stąd $P_2 = 320 \text{ kPa} \times (313 \text{ K} / 283 \text{ K}) - 100 \text{ kPa} = 254 \text{ kPa} = 2.54 \text{ bar}$ (czyli 16% wzrostu ciśnienia)

Wniosek: sprawdzaj ciśnienie w oponach w niskich temperaturach!

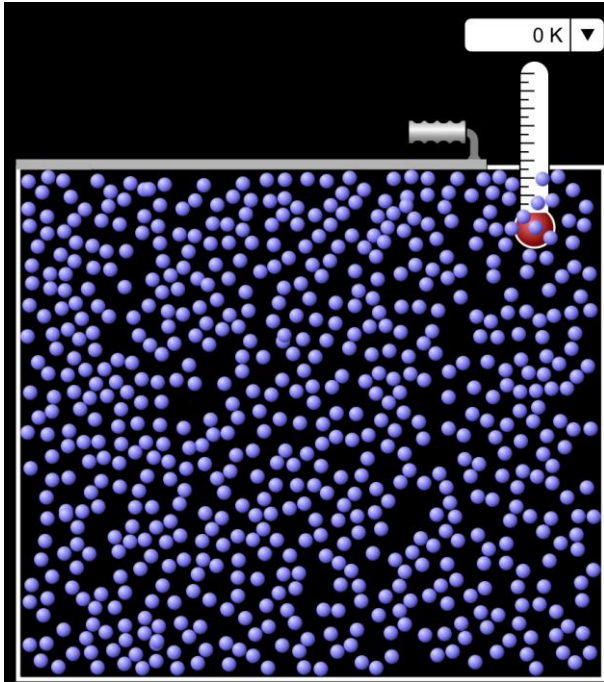
Wykład 15

(1) Zmiany stanu skupienia, (2) Ciepło, transport ciepła, ciepło właściwe, ciepło przejść fazowych

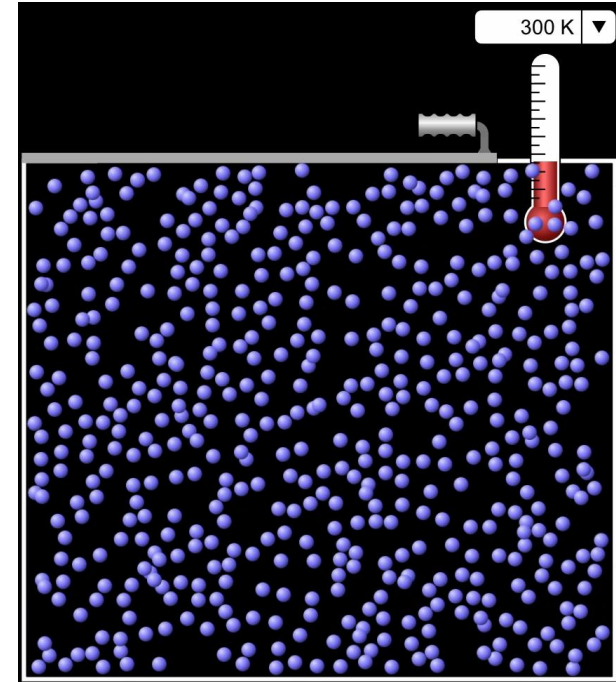


Energia termiczna

https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html



Całkowita energia kinetyczna cząstek wynosi 0 w temperaturze zera bezwzględnego.

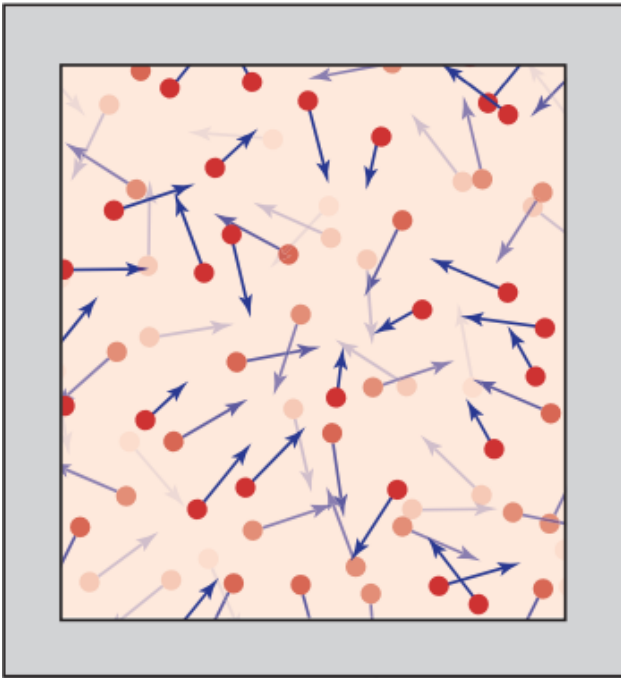


Całkowita energia kinetyczna cząstek jest różna od zera w temperaturach wyższych od zera bezwzględnego.

Energia termiczna to energia kinetyczna chaotycznego ruchu cząstek tworzących układ (ciało).

Temperatura jako miara średniej energii kinetycznej cząstek

https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html



Można pokazać, że średnia energia kinetyczna cząstek gazu doskonałego jest wprost proporcjonalna do temperatury:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

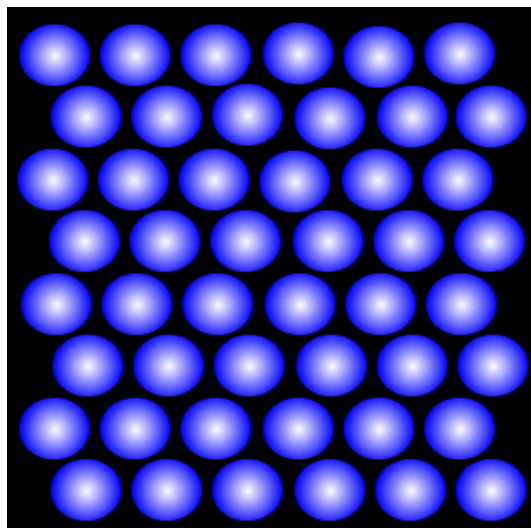
$k \gg 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ - stała Boltzmannna

Dowód znajdziesz w *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics*, wydanie 13, rozdział 18 (lub w każdej innej książce akademickiej do fizyki)

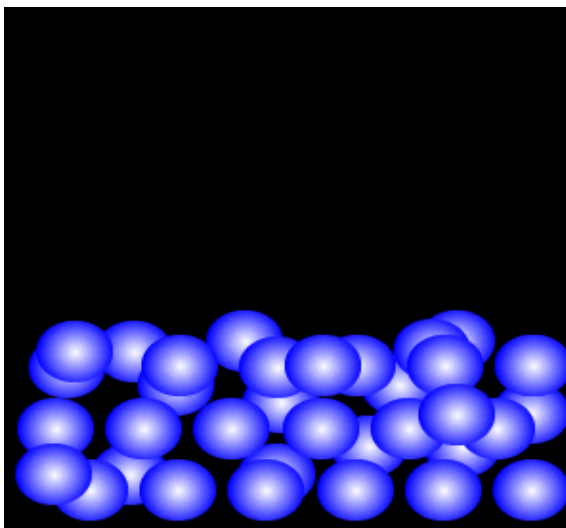
Związek temperatury z energią kinetyczną cząstek

Temperatura ciała wiąże się ściśle ze średnią energią kinetyczną względnego ruchu cząstek tworzących ciało. Im większa średnia energia kinetyczna cząstek tym wyższa jest temperatura ciała.

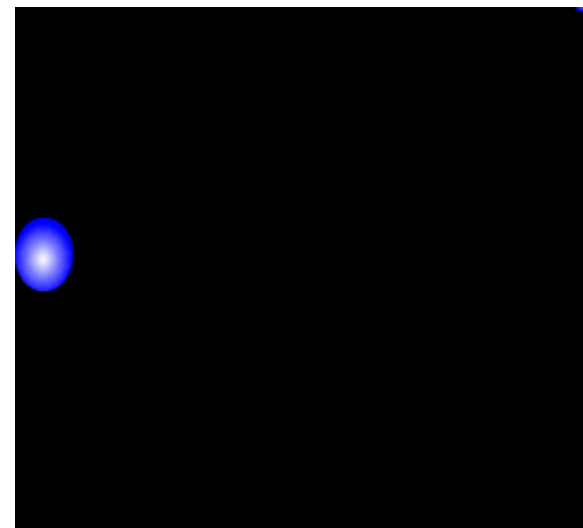
ciała stałe



ciecze



gazy



Uwaga: na temperaturę układu (ciała) nie wpływa energia kinetyczna związana z kolektywnym ruchem całego układu względem zewnętrznych obiektów takich jak Ziemia. Na przykład, energia kinetyczna ruchu wiatru lub przepływu wody, czyli związana z ruchem makroskopowych mas względem Ziemi, nie decyduje o temperaturze układu.

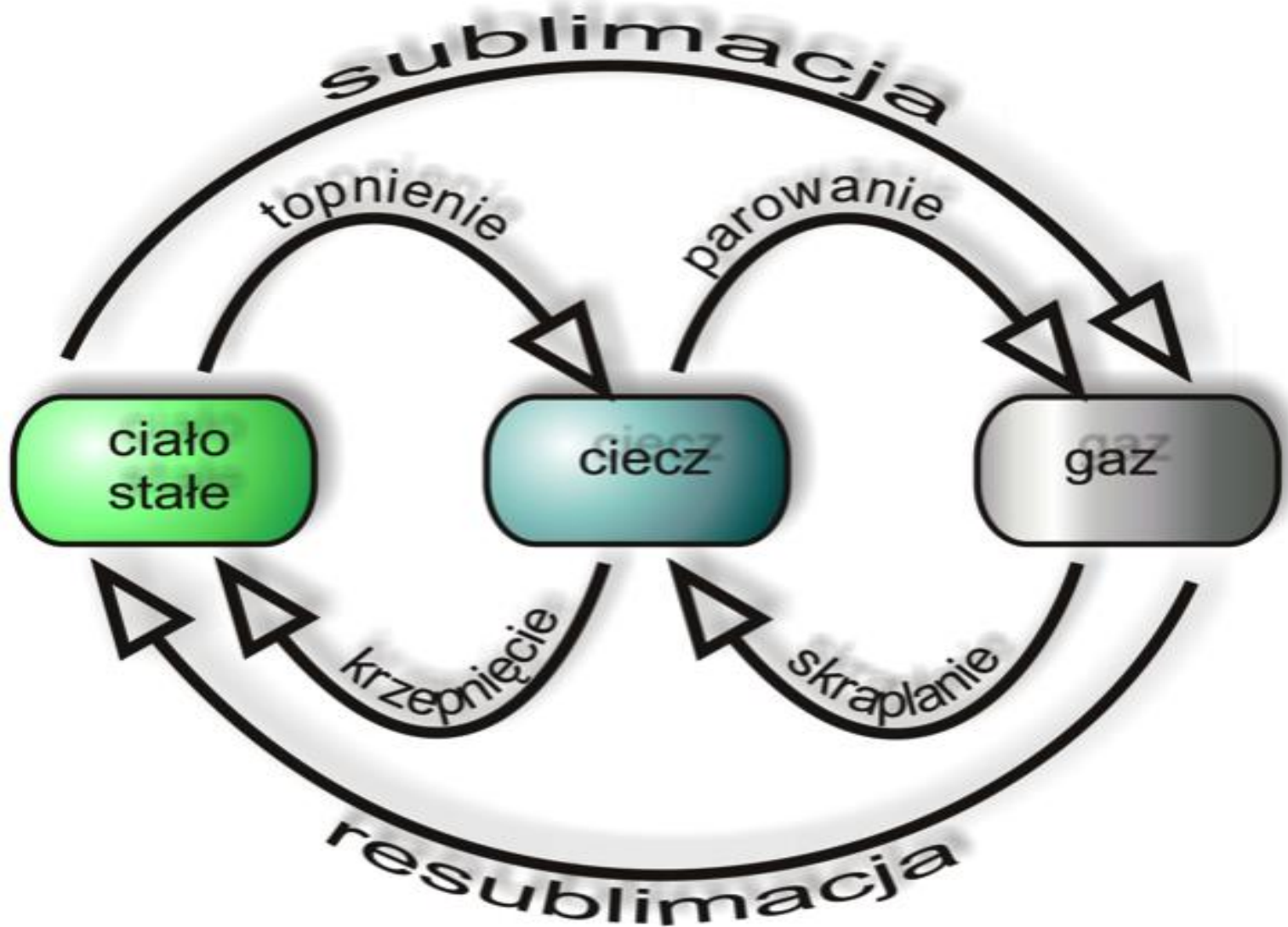


Obydwa wiaderka wypełnione są wodą po brzegi i mają tę samą temperaturę.

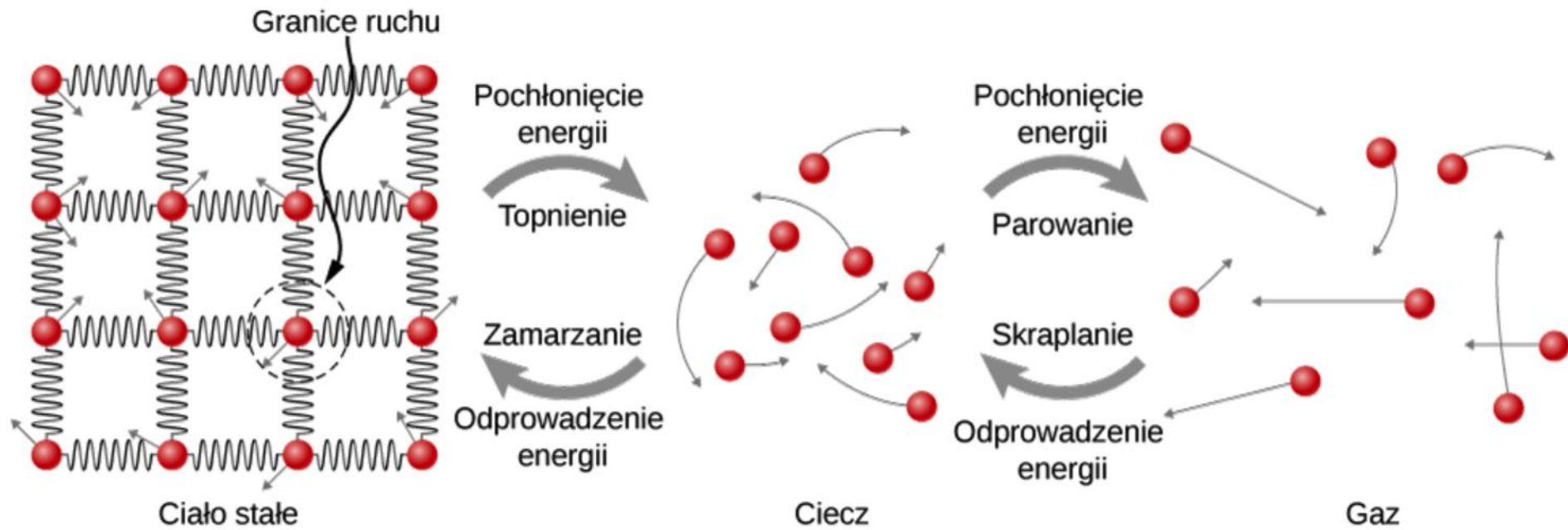
W którym wiaderku całkowita energia kinetyczna cząstek wody jest większa?

W którym wiaderku średnia energia kinetyczna cząstek wody jest większa?

Zmiany stanu skupienia

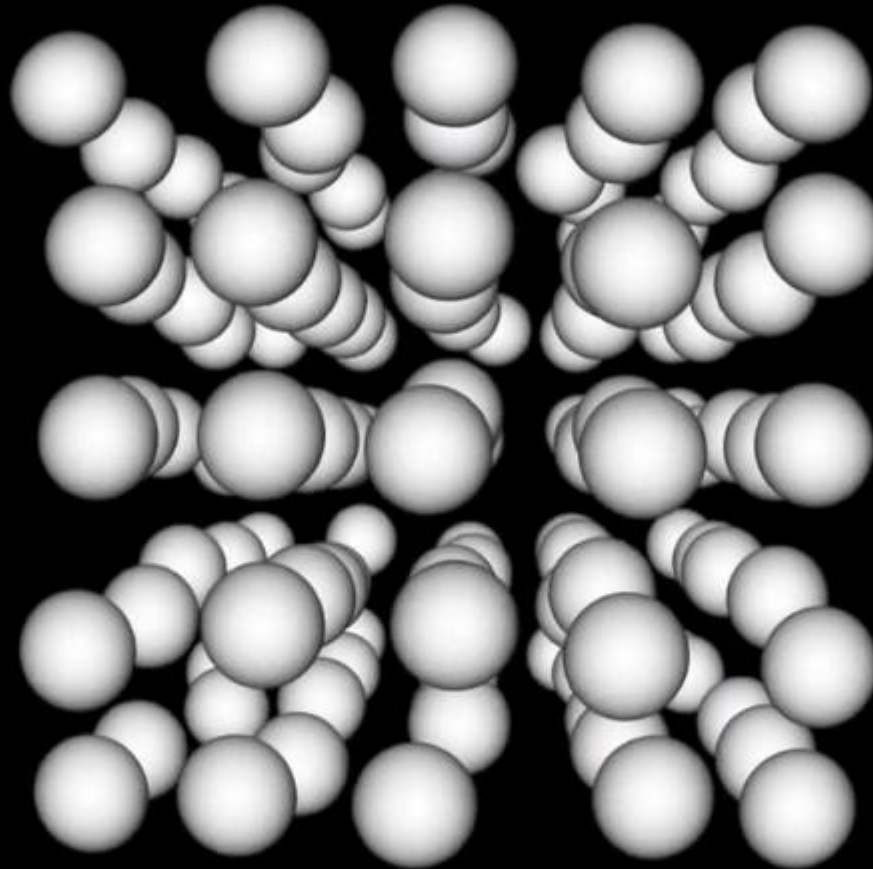


Zmiany stanu skupienia z mikroskopowego punktu widzenia

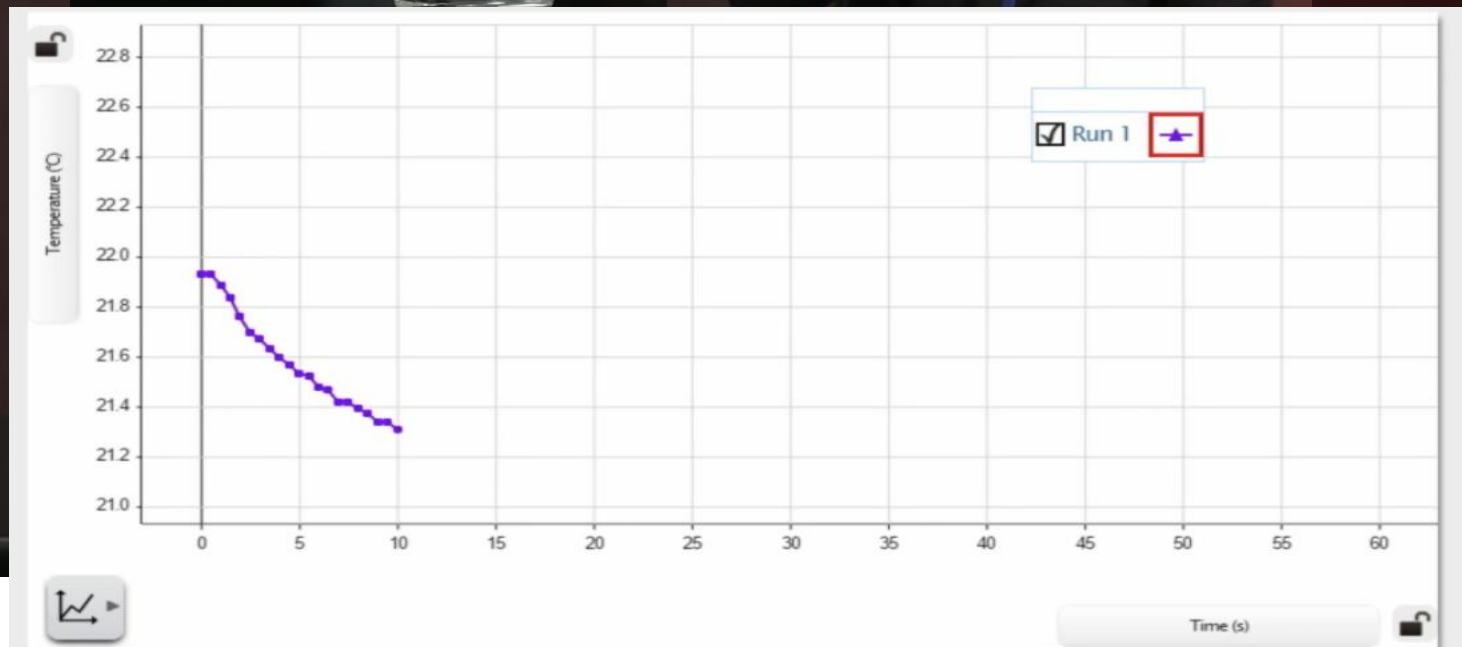
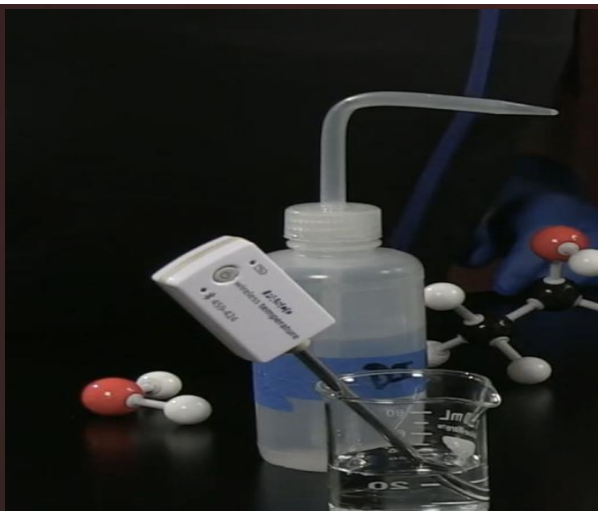


Zmiany stanu skupienia z mikroskopowego punktu widzenia

Film przedstawia schematycznie zmiany stanu skupienia wody wraz ze wzrostem temperatury (średniej energii kinetycznej cząstek).



Parowanie

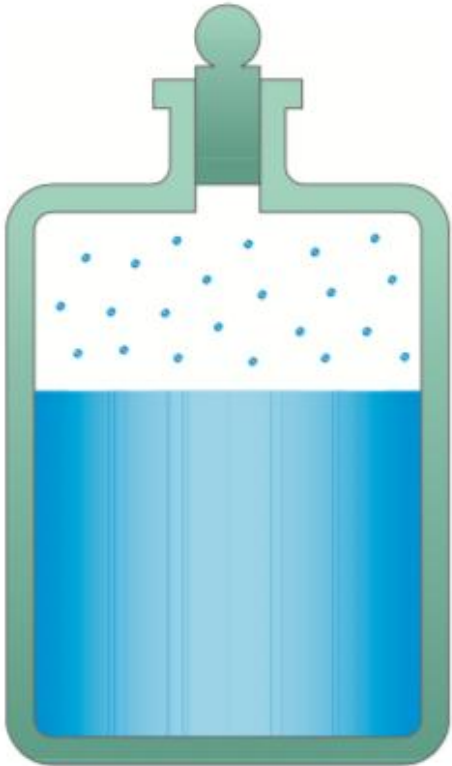


<https://www.youtube.com/watch?v=xqardSvsPOU>

Parowanie

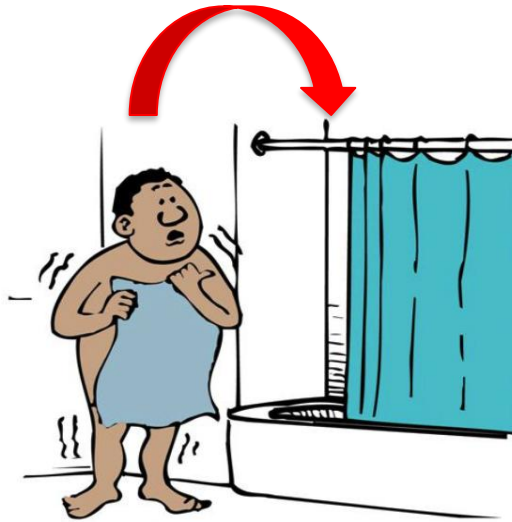
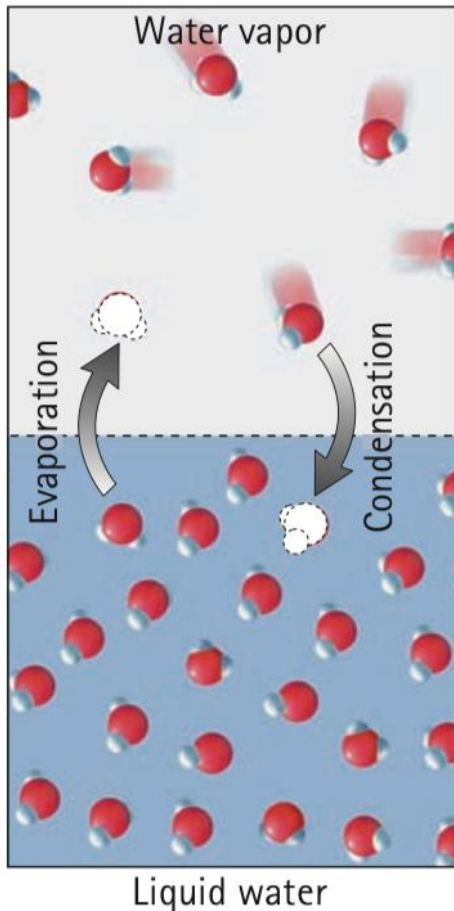
Pozostawiając naczynie z wodą na noc, rano zauważymy, że poziom wody zmniejszył się. Odpowiedzialne za to jest parowanie.

Parowanie polega na ucieczce z cieczy cząstek przypowierzchniowych, które zyskują odpowiednią energię do ucieczki kosztem energii cząsteczek położonych w głębszych warstwach. W konsekwencji w wyniku parowania w cieczy pozostają cząsteczki o mniejszej energii i jej temperatura maleje. Parowanie jest procesem chłodzącym – dlatego pocimy się podczas intensywnego wysiłku lub jest nam zimno po wyjściu spod prysznica. Ponieważ proces parowania wymaga pobrania ciepła, jest to proces endotermiczny.



Skraplanie

W procesie skraplania gaz zmienia się w ciecz. Gdy cząsteczki gazu znajdują się w pobliżu powierzchni cieczy są przez nią wciągane i wpadają w nią ze zwiększoną energią, stając się jej częścią. Zderzając się z wolniejszymi cząsteczkami cieczy, przekazują im nadwyżkę energii kinetycznej i w ten sposób zwiększają temperaturę cieczy. Skraplanie jest procesem podczas którego wydzielana jest energia – jest to proces egzotermiczny!



Jest Ci zimno? – wróć pod prysznic, gdzie wysoka ilość pary wodnej sprzyja procesowi skraplania, który dominuje nad parowaniem. Cząsteczki pary zderzają się i łączą w krople wody, oddając energię do otoczenia.

P. G. Hewitt, *Fizyka wokół nas*



W saunach polanie wodą gorących kamieni powoduje intensywne parowanie cieczy, która skrapla się na skórze oddając ciepło. Wydaje nam się, że temperatura otoczenia wzrosła, ale tak naprawdę to cząsteczki pary wodnej oddały nam swoją energię kinetyczną kondensując (skraplając) się na skórze.

Ogrzewanie przez oziębianie

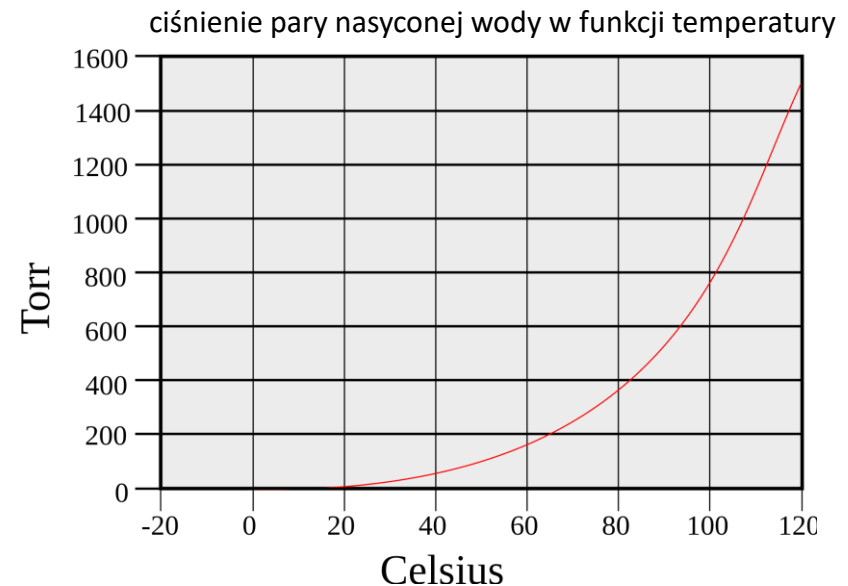
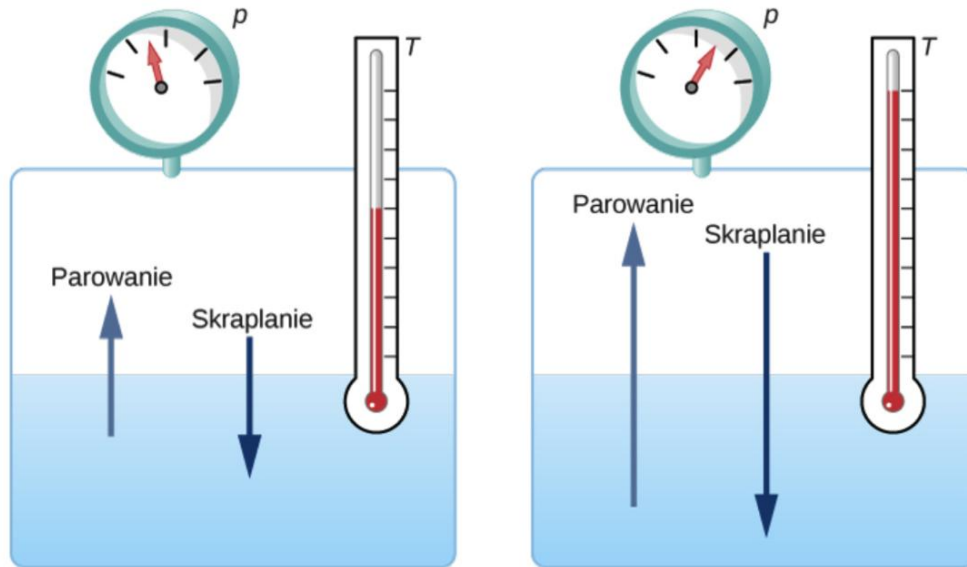


Ciśnienie pary nasyconej

Parę w stanie równowagi między procesem skraplania i parowania nazywamy parą nasyconą, a jej ciśnienie ciśnieniem pary nasyconej (nie jest to ciśnienie powietrza, a tylko samej pary).

Para nasycona to maksymalna ilość pary w powietrzu w danych warunkach.

Ciśnienie pary nasyconej silnie zależy od temperatury. Im wyższa temperatura tym proces parowania i skraplania są intensywniejsze, ciśnienie par nasyconych rośnie.



Jeśli pojemnik jest duży lub nie jest zamknięty, cała ciecz może odparować przed osiągnięciem nasycenia.

Para nasycona i jej ciśnienie

Umieszczasz w swoim pokoju 2L wody w otwartym pojemniku. Pokój ma objętość 42500 L i panuje w nim temperatura 25°C. Szczelnie zamykasz pokój i czekasz aż woda wyparuje. Czy w podanych warunkach cała woda wyparuje? W temperaturze 25°C ciśnienie pary nasyconej wody wynosi 0.0373 atm, a gęstość wody to ok. 1 g/mL.

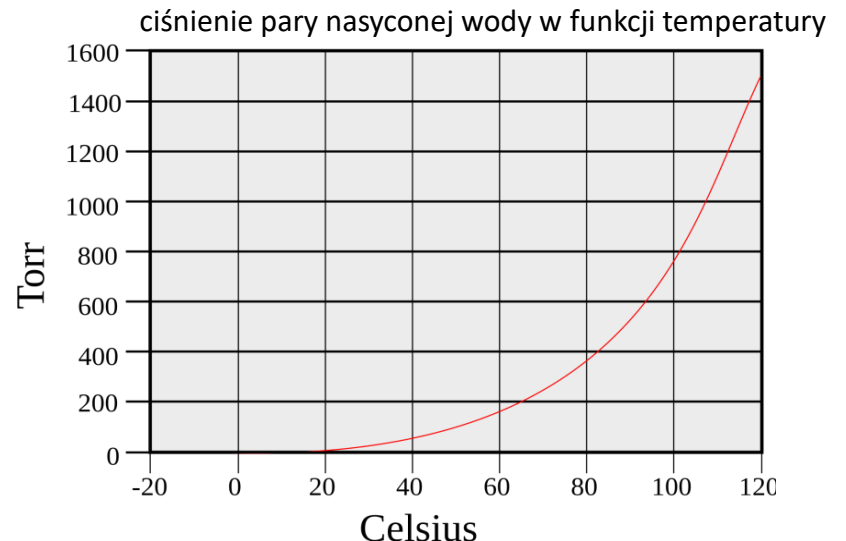
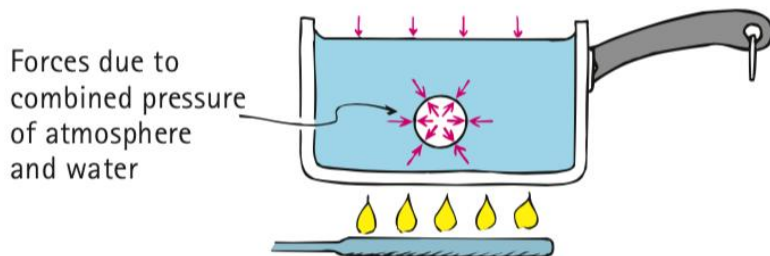


Wrzenie

Wrzenie to parowanie całą objętością. Pęcherzyki pary wodnej wewnątrz cieczy wędrują w górę dzięki siłom wyporu.

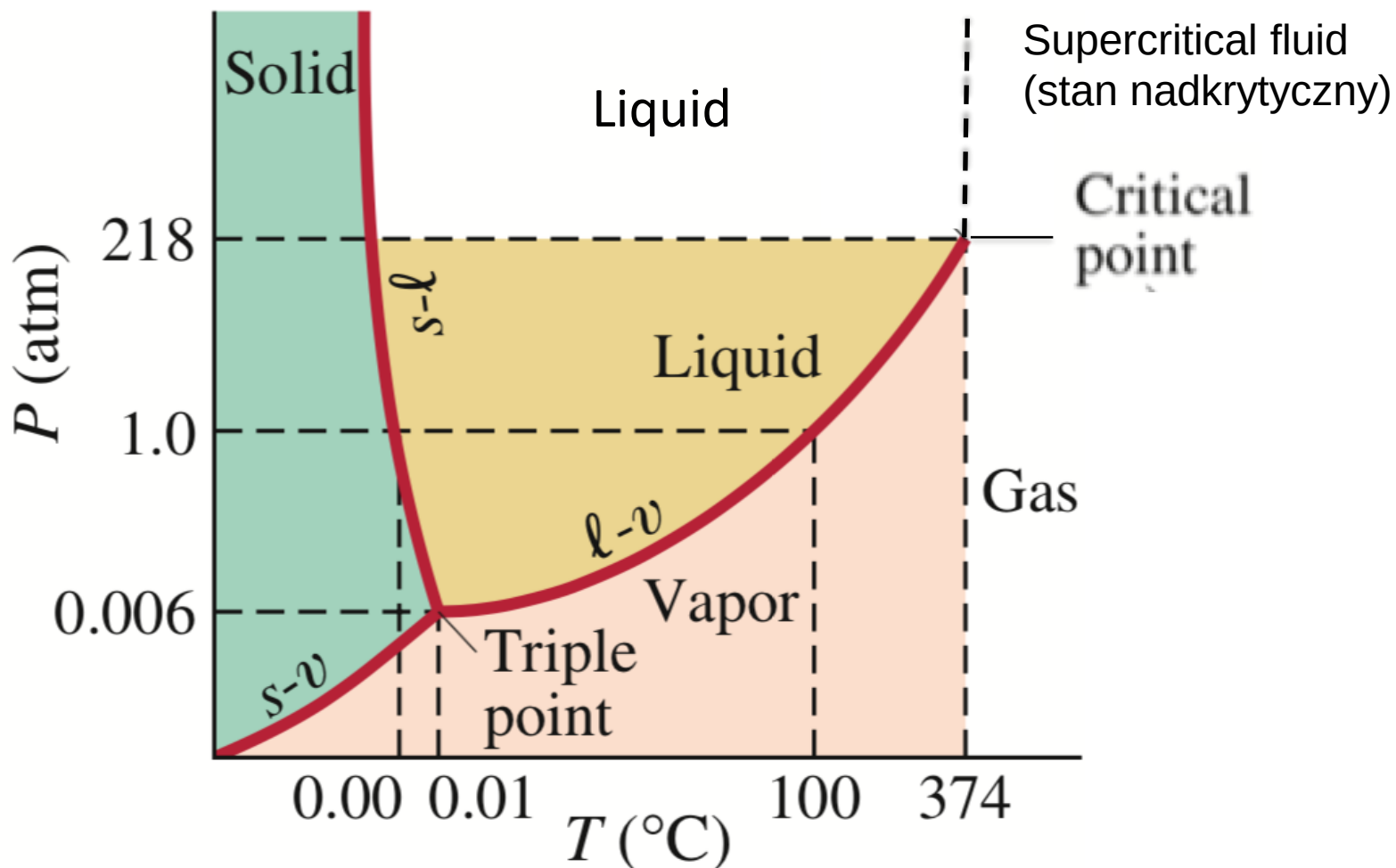
Jeżeli ciśnienie zewnętrzne jest większe niż ciśnienie par nasyconych, to bąbelki pary cieczy nie mogą rozwinąć się wewnątrz cieczy.

Ciśnienie pary nasyconej rośnie wraz z temperaturą, w momencie, gdy zrówna się ono z ciśnieniem otoczenia występuje wrzenie – wewnątrz cieczy tworzą się bąbelki pary.

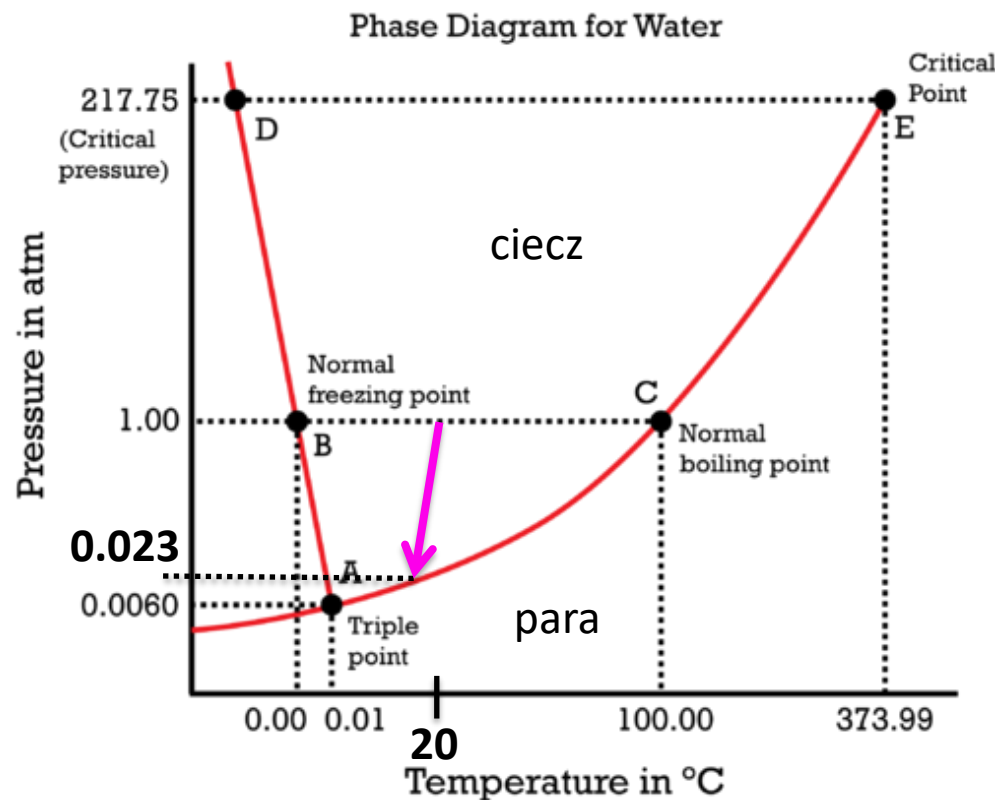
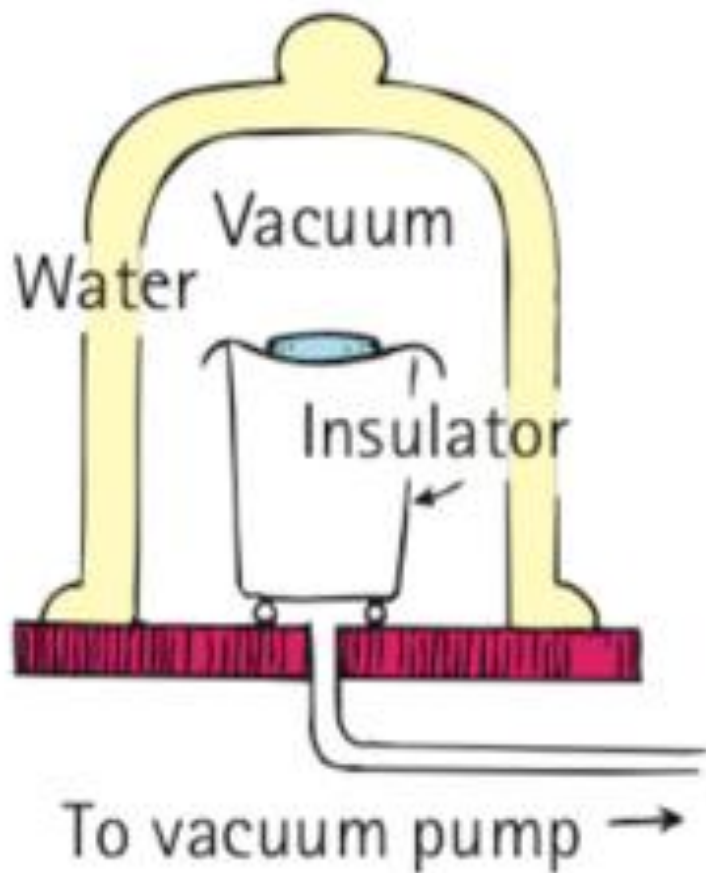


Przemiany fazowe – diagramy fazowe

Woda



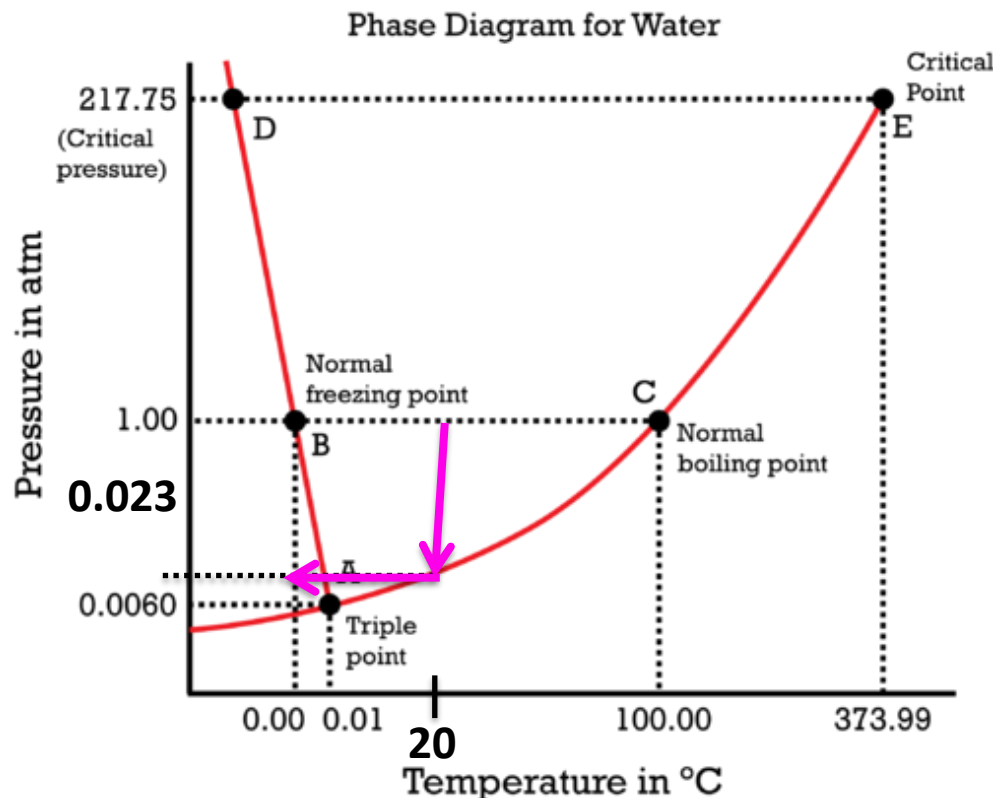
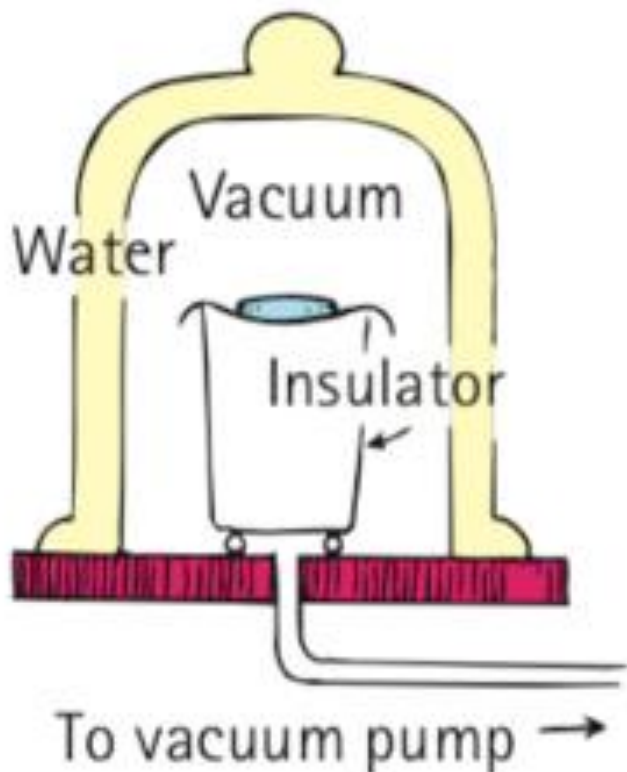
Wrzenie wody w temperaturze pokojowej



<https://www.youtube.com/watch?v=baNsHd7-J28> (od 25 sekundy)

Produkcja lodu z wrzącej wody

(wody musi być relatywnie „mało”, aby efekt zaobserwować)



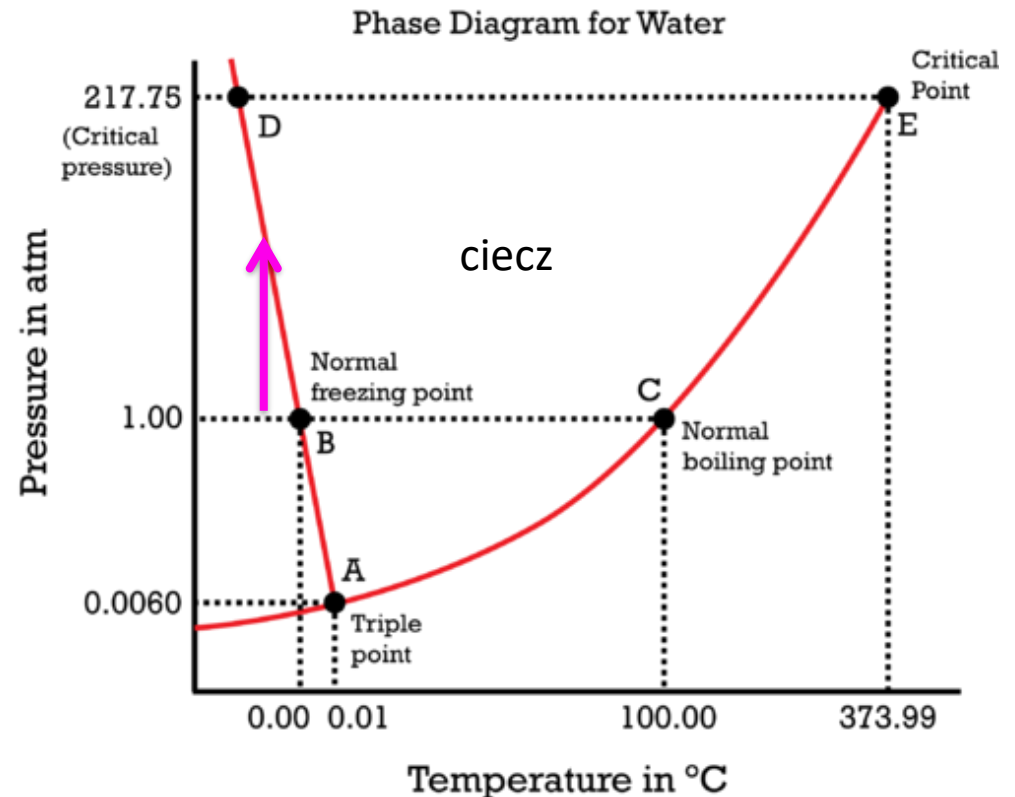
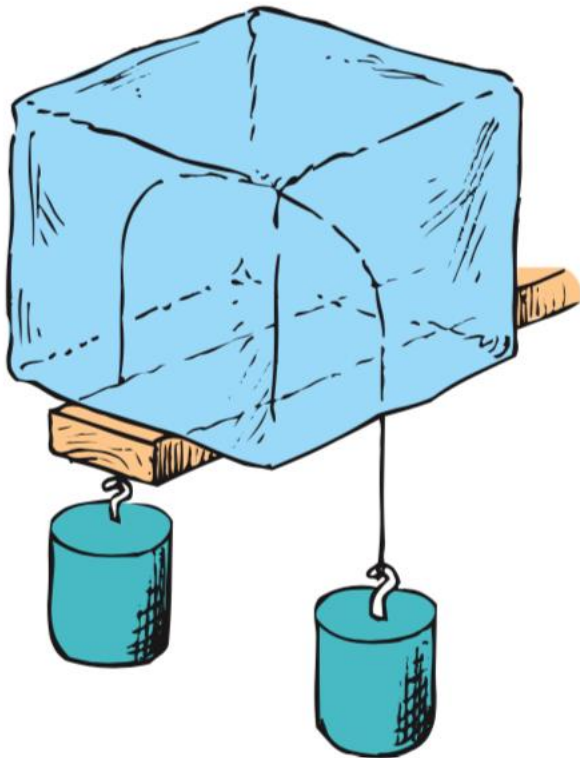
Podczas wrzenia szybkie cząsteczki uciekają, pozostawiając wolniejsze, ciecz staje się coraz chłodniejsza. Przy wystarczająco długim wrzeniu na powierzchni izolowanej termicznie i wrzącej cieczy tworzy się lód!

https://www.youtube.com/watch?v=Ti9C_cLSR0A (od 33 sekundy)

<https://www.youtube.com/watch?v=QvQBIRXQtWc> (od 5 min 40 sekundy)

Przymarzanie lodu (regelacja)

Zjawisko polegające na topieniu się lodu pod wpływem zwiększonego ciśnienia i powtórnym zamrożnięciu (krzepnięciu) powstałej wody przy obniżeniu ciśnienia do pierwotnej wartości.



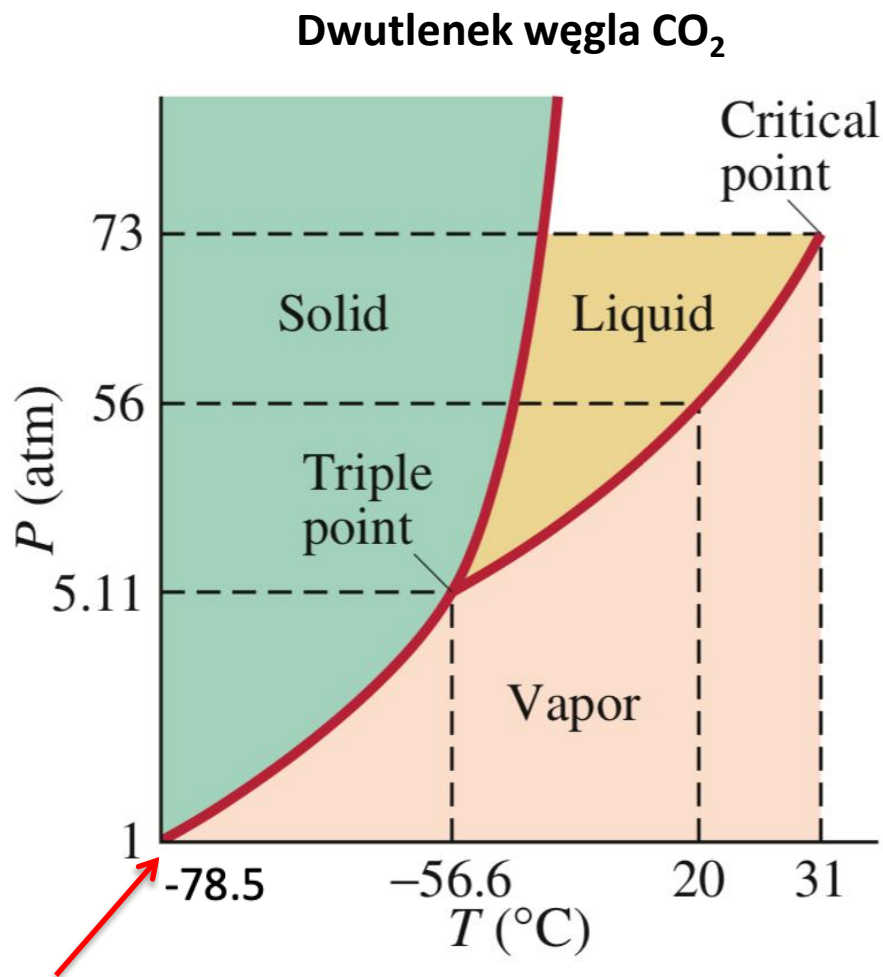
Przymarzanie lodu (regelacja)



Punkt potrójny cykloheksanu



Przemiany fazowe – diagramy fazowe



Sublimacja CO₂ przy ciśnieniu atmosferycznym (1 atm) w temperaturze -78.5°C . Zauważ, że pod ciśnieniem atmosferycznym CO₂ może występować tylko w stanie gazowym lub stałym.

Sublimacja suchego lodu



<https://www.youtube.com/watch?v=JoH7sdCaa4g>

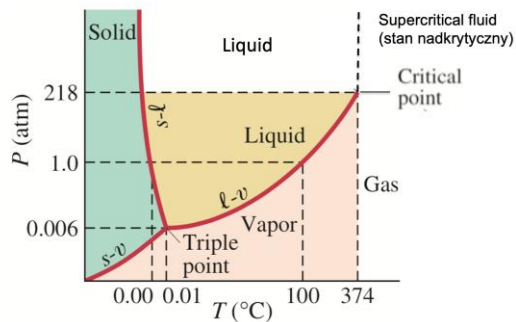
ciekłe CO₂:

https://www.youtube.com/watch?v=U5T_rl9g7VU

<https://www.youtube.com/watch?v=n2QWyJyehus>

Przemiany fazowe – temperatura krytyczna

Temperatura krytyczna to temperatura powyżej, której żadna zmiana ciśnienia nie jest w stanie zamienić gazu w ciecz.



Gazem nazywamy substancję występującą w stanie gazowym powyżej temperatury krytycznej

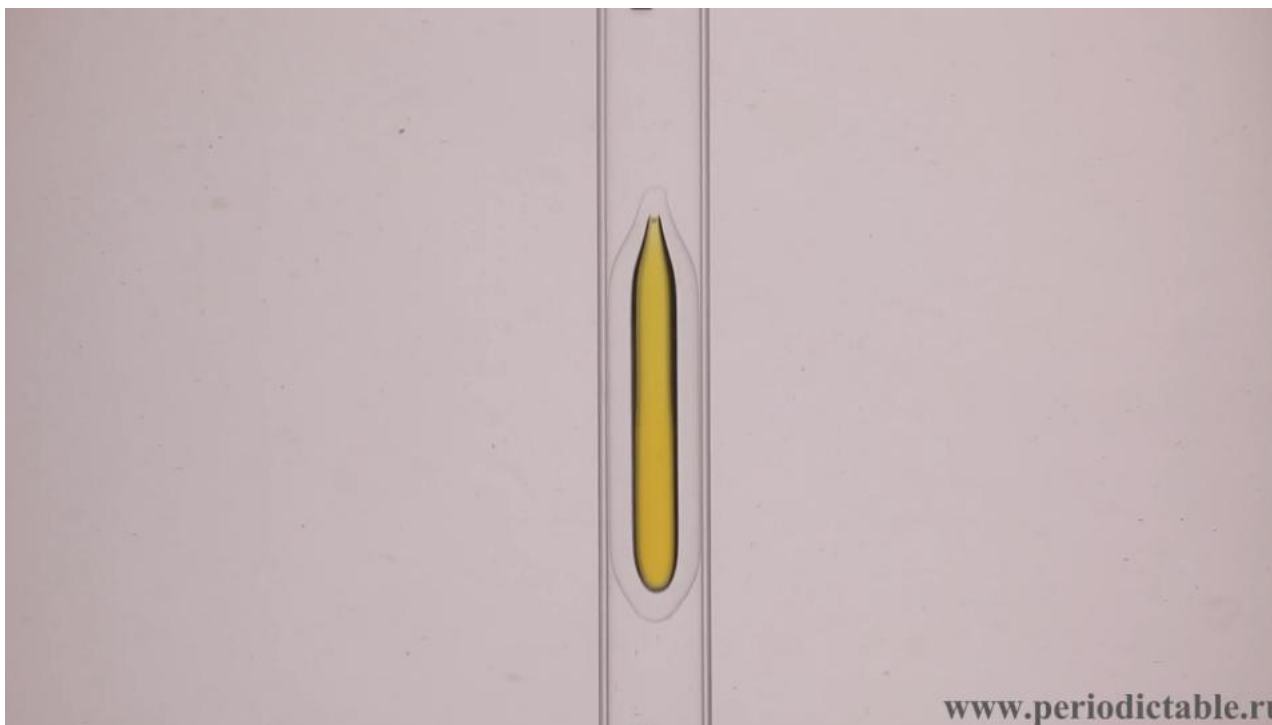
Parą nazywamy substancję występującą w stanie gazowym poniżej temperatury krytycznej. Parę zawsze możemy zmienić w ciecz poprzez zmianę ciśnienia.

Substance	Critical Temperature		Critical Pressure (atm)
	$^{\circ}\text{C}$	K	
Water	374	647	218
CO ₂	31	304	72.8
Oxygen	-118	155	50
Nitrogen	-147	126	33.5
Hydrogen	-239.9	33.3	12.8
Helium	-267.9	5.3	2.3

Stan nadkrytyczny

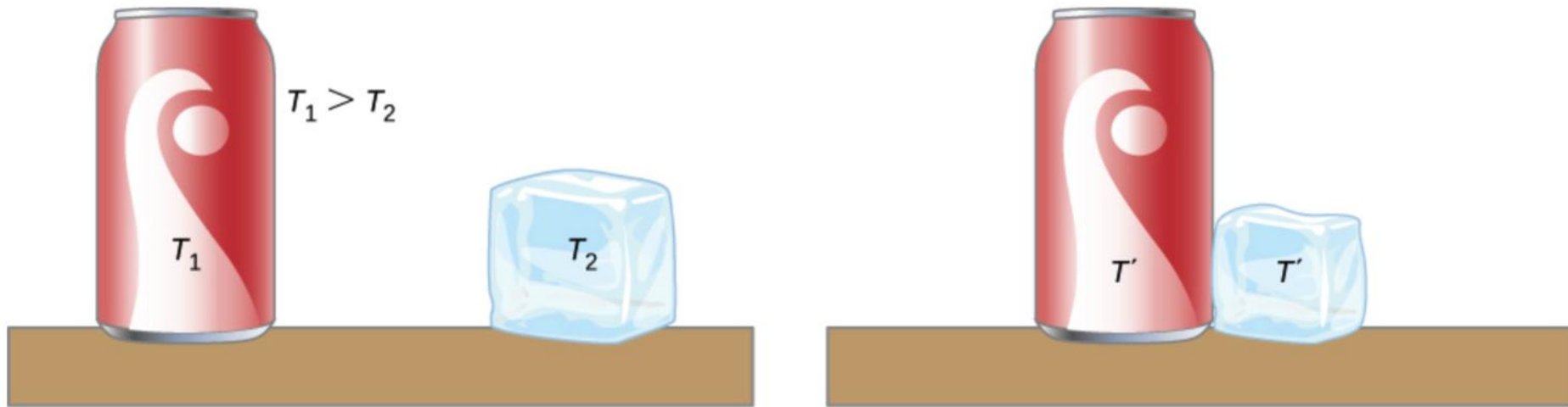
Substancja znajduje się w stanie nadkrytycznym, gdy jego temperatura i ciśnienie są wyższe niż punkt krytyczny. W stanie nadkrytycznym nie jesteśmy w stanie odróżnić cieczy od gazu!

Przejście chloru w stan nadkrytyczny (76 atm, +143°C)



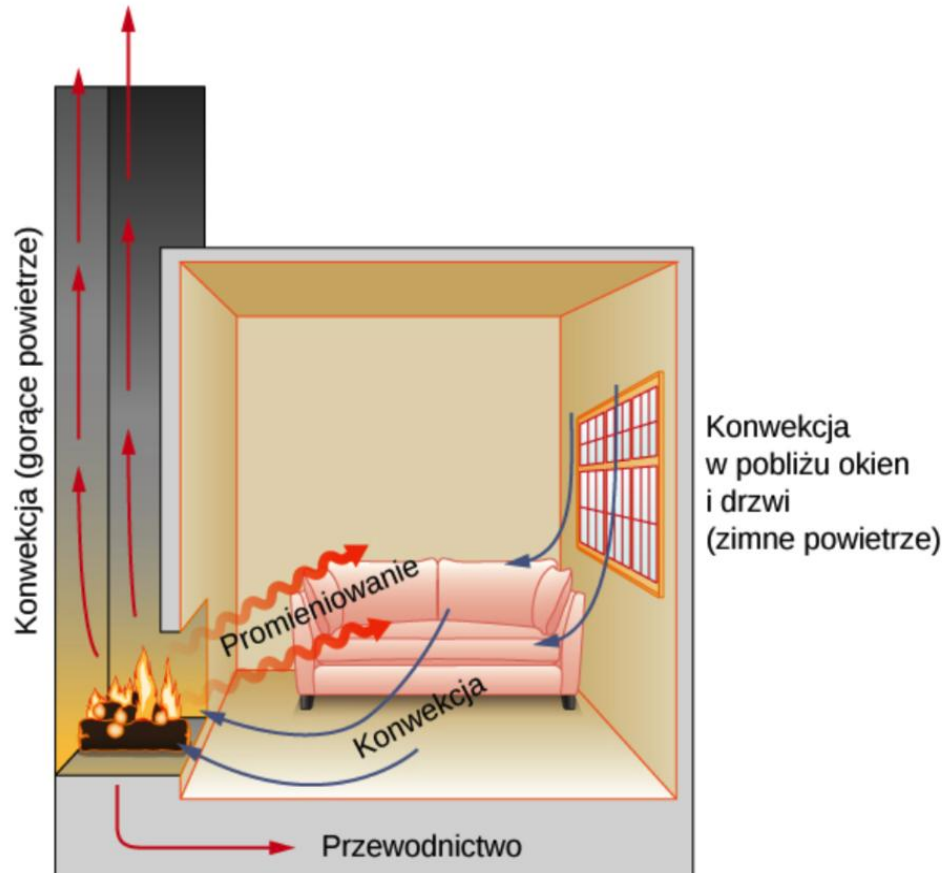
Ciepło = energia termiczna transportowana z jednego ciała (układu) do drugiego ciała (układu)

Znaczenie słowa *ciepło* w fizyce różni się od jego znaczenia w mowie potocznej. Na przykład w czasie upałów moglibyśmy powiedzieć „jest strasznie ciepło!”, ale poprawnie z punktu widzenia fizyki musielibyśmy powiedzieć, że „jest bardzo wysoka temperatura”. *Ciepło*, podobnie jak praca mechaniczna, jest formą przekazu (przepływu energii), ale temperatura już nie.



Ciepło = transfer energii termicznej pomiędzy ciałami w wyniku różnicy temperatur. Jest to przekazywanie energii chaotycznego ruchu cząstek (atomów, cząsteczek, jonów). Energia zawsze przekazywana jest od ciała o wyższej temperaturze (większej średniej energii kinetycznej) do ciała o niższej temperaturze (niższej średniej energii kinetycznej). Ostatnie twierdzenie znane jest pod nazwą zerowej zasady termodynamiki. Mówimy, że ciała znajdują się w równowadze termodynamicznej, gdy mają tę samą temperaturę.

Metody transportu energii termicznej



Istnieją trzy mechanizmy transportu energii termicznej między ciałami:

- przewodnictwo
- konwekcja
- promieniowanie

1. Przewodnictwo cieplne (ang. *conduction of heat*) jest wymianą ciepła między materią, która się nie porusza, poprzez fizyczny kontakt. To przewodnictwo cieplne odpowiedzialne jest za wymianę ciepła z palnika na piecu przez dno patelni do jedzenia znajdującego się na niej. Generalnie metale (przewodniki elektryczności) są również dobrymi przewodnikami ciepła.

<https://www.youtube.com/watch?v=lvAKQt0Qa4E>

2. Konwekcja (ang. *convection*) jest wymianą ciepła przez makroskopowy ruch płynu.

http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/409

3. Wymiana ciepła przez promieniowanie (ang. *radiation*) pojawia się wtedy, kiedy np. mikrofale, promieniowanie podczerwone, światło widzialne lub inny rodzaj promieniowania elektromagnetycznego jest wysyłany (emitowany) lub pochłaniany (absorbowany) przez ciało. Oczywiście przykładem jest ogrzewanie Ziemi przez Słońce, mniej oczywistym – promieniowanie cieplne wysyłane przez ludzkie ciało.

<https://www.youtube.com/watch?v=SpLw1WGpVU4>

Ciepło właściwe

Ciepło właściwe jest to ilość energii termicznej jaką należy dostarczyć jednostce masy danego ciała, aby zwiększyć jego temperaturę o jeden stopień.

$$c = \frac{DQ}{mDT}$$

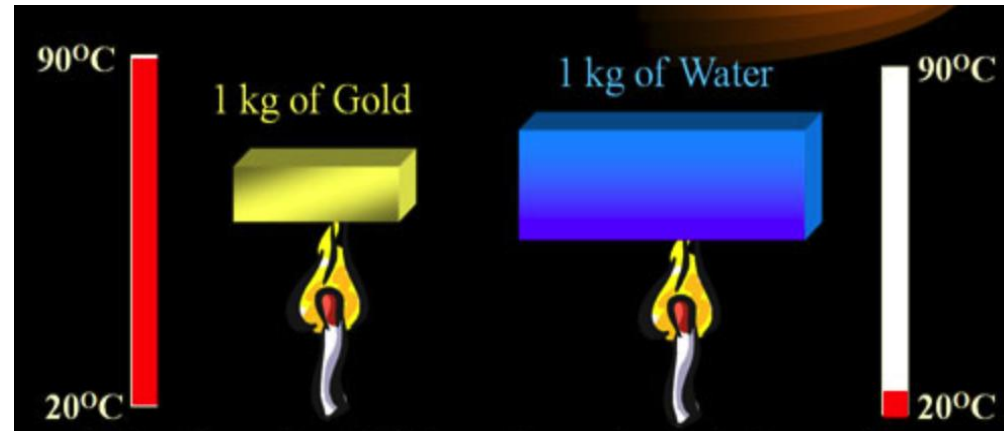


wnętrze ciasta jest cieplejsze niż część zewnętrzna, bo musi oddać więcej energii, by się zmienić swoją temperaturę o jednostkę

DQ - ilość energii termicznej

m - masa ciała

DT - zmiana temperatury



znacznie mniej energii potrzeba do ogrzania złota niż wody w tym samym zakresie temperatur

pojemność cieplna

Ciepło właściwe różnych substancji

Substancja	Ciepło właściwe (c)	
	J / (kg °C)	kcal / (kg °C) ^[1]
<i>Ciała stałe</i>		
Aluminium	900	0,215
Azbest	800	0,19
Beton, granit (średnio)	840	0,2
Miedź	387	0,0924
Szkło	840	0,2
Złoto	129	0,0308
Ludzkie ciało (średnio w 37 °C)	3500	0,83
Lód (średnio, -50 °C do 0 °C)	2090	0,5
Żelazo, stal	452	0,108
Ołów	128	0,0305
Srebro	235	0,0562
Drewno	1700	0,4
<i>Ciecze</i>		
Benzen	1740	0,415
Etanol	2450	0,586
Gliceryna	2410	0,576
Rtęć	139	0,0333
Woda (15 °C)	4186	1

**woda charakteryzuje się
relatywnie dużym
ciepłem właściwym**



Konsekwencje wysokiej wartości ciepła właściwego wody

Woda jest w stanie zaabsorbować duże ilości energii bez znaczącego wzrostu temperatury

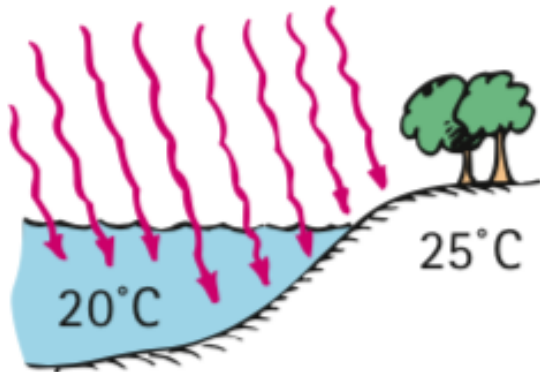
woda jako
materiał
chłodniczy



Woda bardzo wolno oddaje ciepło



Woda nagrzewa się znacznie wolniej niż ląd, dzięki temu latem możemy korzystać z orzeźwiających kąpiel



Ciepły klimat w Europie - Gólsztorm



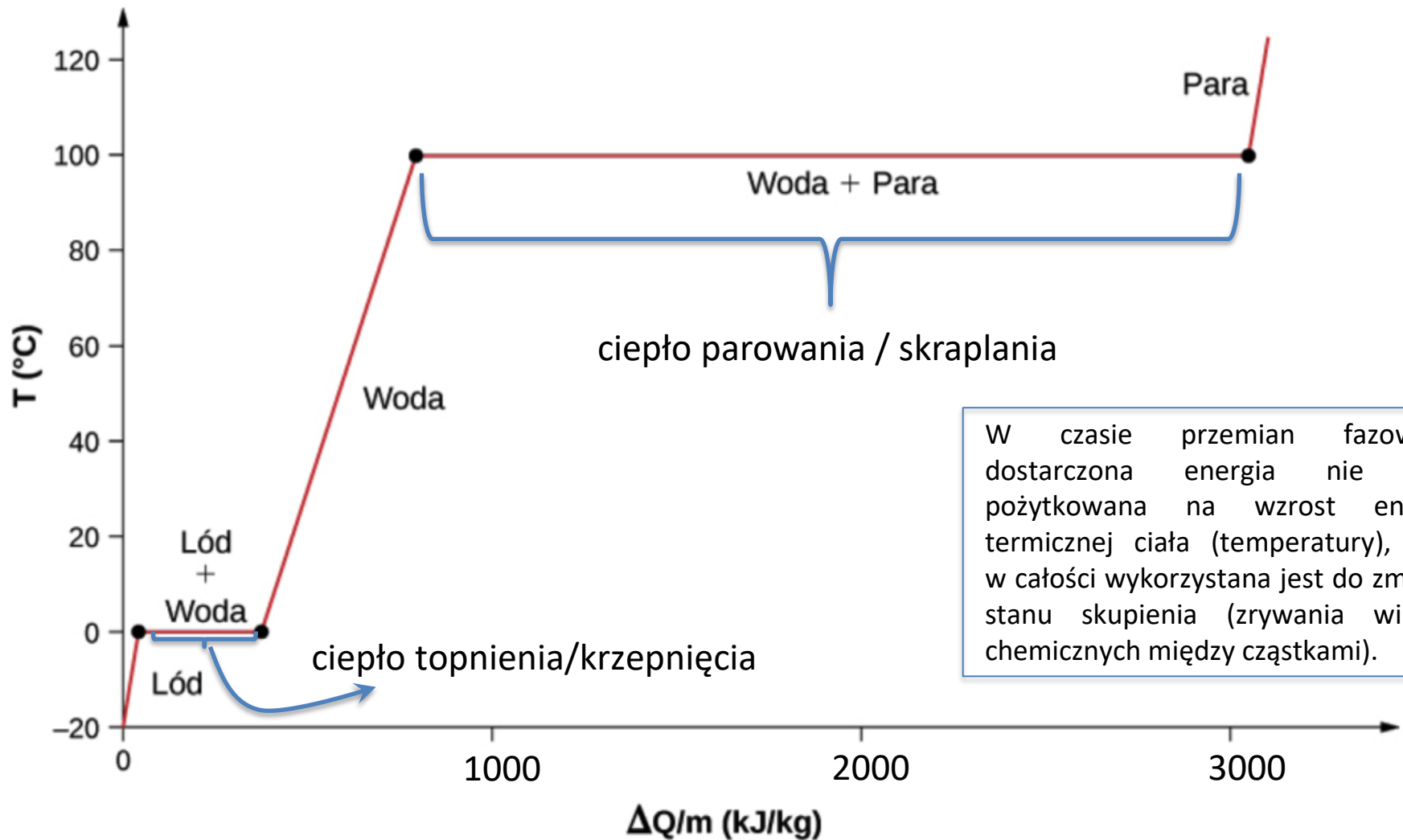
Konsekwencje wysokiej wartości ciepła właściwego wody

Papierowy kubek napelniony wodą nie płonie umieszczony w strumieniu ognia

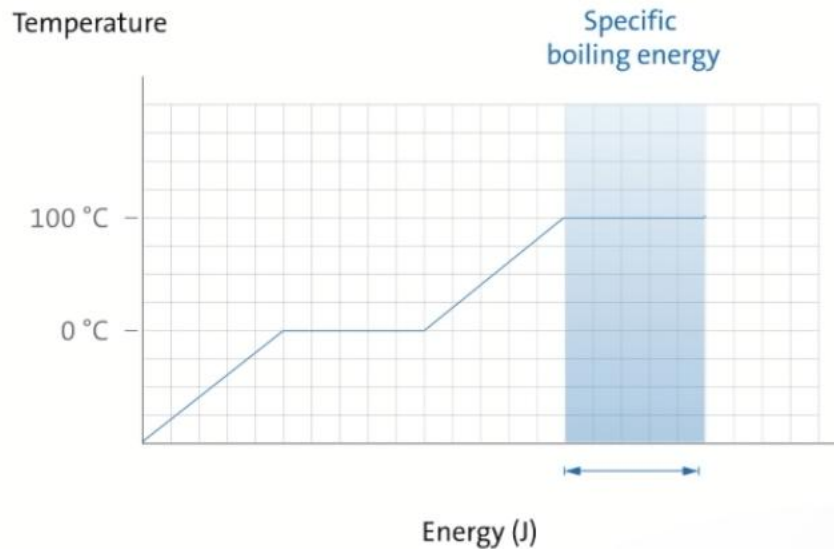


<https://www.youtube.com/watch?v=COAeBrqKwVU>

Ciepło przemian fazowych (ciepło utajone)



Ciepło przemian fazowych (ciepło utajone)



Ciepło przemian fazowych (ciepło utajone)

Ilość energii potrzebna do zmiany stanu skupienia jednostkowej masy danej substancji nazywana jest ciepłem przemiany fazowej lub ciepłem utajonym.

Latent Heats (at 1 atm)						
Substance	Melting Point (°C)	Heat of Fusion		Boiling Point (°C)	Heat of Vaporization	
		kcal/kg [†]	kJ/kg		kcal/kg [†]	kJ/kg
Oxygen	−218.8	3.3	14	−183	51	210
Nitrogen	−210.0	6.1	26	−195.8	48	200
Ethyl alcohol	−114	25	104	78	204	850
Ammonia	−77.8	8.0	33	−33.4	33	137
Water	0	79.7	333	100	539	2260
Lead	327	5.9	25	1750	208	870
Silver	961	21	88	2193	558	2300
Iron	1808	69.1	289	3023	1520	6340
Tungsten	3410	44	184	5900	1150	4800

Bilans energetyczny z udziałem ciepła

Kawałki lodu o łącznej masie 0.5 kg i temperaturze $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ umieszczono w „mrożonej” herbatce o masie 3 kg i temperaturze $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jaka będzie temperatura końcowa mieszanki? Herbatę można uznać za wodę. Zignorować przepływ ciepła do otoczenia, w tym do filiżanki.



Bilans energetyczny z udziałem ciepła

Kawałki lodu o łącznej masie 0.5 kg i temperaturze -10°C umieszczono w „mrożonej” herbatce o masie 3 kg i temperaturze 20°C . Jaka będzie temperatura końcowa mieszanki? Herbatę można uznać za wodę. Zignorować przepływ ciepła do otoczenia, w tym do filiżanki.



$$(*) m_{\text{lód}} = 0.5 \text{ kg} \quad \underline{-10^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}} \Rightarrow \Delta T = 10^{\circ}\text{C}$$

$$C_{\text{wól}} = \frac{\Delta Q_1}{m_{\text{wól}} \Delta T}$$

$$\Delta Q_1 = C_{\text{wól}} m_{\text{lód}} \cdot \Delta T = 2100 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \cdot 0.5 \text{ kg} \cdot 10^{\circ}\text{C} = 10.5 \text{ kJ}$$

$$(**) \Delta Q_2 = m_{\text{lód}} \cdot L_{\text{topnienia}} = 0.5 \text{ kg} \cdot 333 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \approx 167 \text{ kJ}$$

↓
ciepło topnienia
Lodu

BILANS ENERGETYCZNY

$$\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + C_{\text{wody}} \cdot 0.5 \text{ kg} \cdot (T - 0^{\circ}\text{C}) = C_{\text{wody}} (20^{\circ} - T) \cdot 3 \text{ kg}$$

ENERGIA
POBIERANA PRZEZ LOD

ENERGIA ODDANA
PRZEZ HERBATKĘ

odp: $T \approx 5^{\circ}\text{C}$

Ćwiczenia na platformie ZPE

- Gra edukacyjna „[Nurkowanie](#)” plus ćw. [1,4](#)
- Na czym polega bilans cieplny? Ćw. [1,2](#)
- O czym mówi I zasada termodynamiki? [1-4](#)
- Jak obliczyć sprawność silników cieplnych? [1-4](#)
- Czym jest [przemiana izobaryczna](#) gazów?
- Czym jest [przemiana izochoryczna](#) gazów?
- Czym jest [przemiana izotermiczna](#) gazów?