

Prawo Pascala a próżnia

dr Zbigniew Łukasiak

Ciśnienie

Najprościej:

ciśnienie gazu jest wielkością określoną przez stosunek **siły**, którą wywiera gaz na ścianki naczynia, w którym się znajduje do **powierzchni** tych ścianek.

$$p = \frac{F}{S}$$

Jednostką ciśnienia zgodnie z układem SI jest **Pascal**

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

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg} * \text{m} * \text{s}^{-2} * \text{m}^{-2} = 1 \text{ kg} * \text{m}^{-1} * \text{s}^{-2}$$

Inne jednostki:

atmosfera fizyczna 1 atm = 101325 Pa \approx 1013 hPa

atmosfera techniczna 1 at = 1 kg*m⁻² = 98066,5 Pa \approx 981 hPa

mm słupa rtęci lub torr 1 mm Hg = 1 Tr \approx 133,32 Pa

(amerykańskie przyrządy są często wyskalowane w **psi**; 1 atm = 14,6959 psi)

Skąd się „bierze” ciśnienie

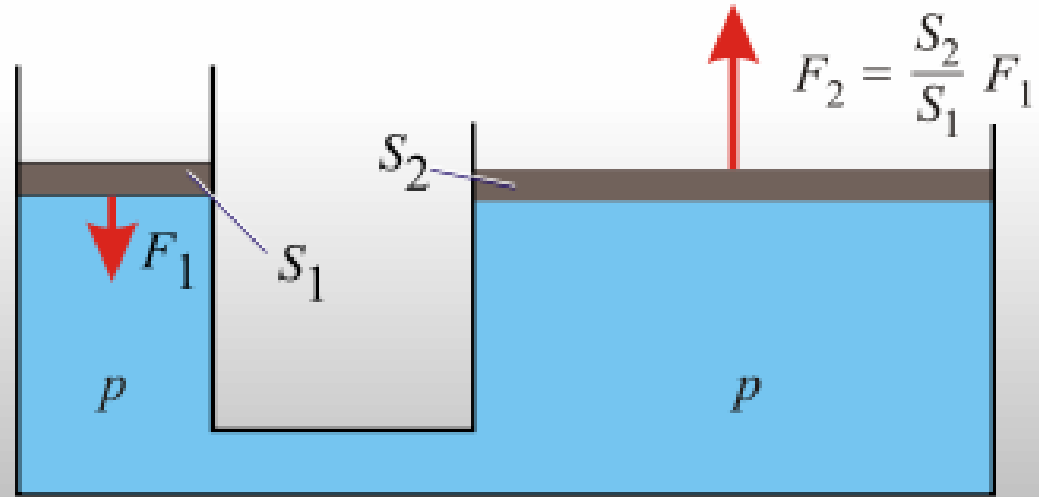
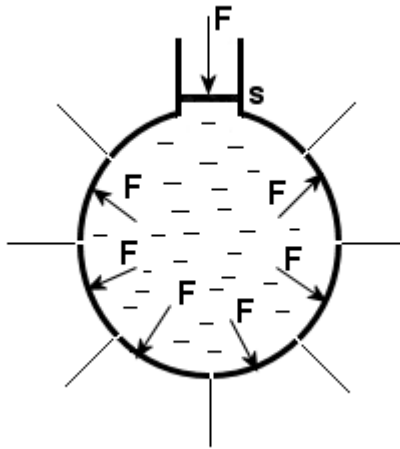
Równoważnie:

ciśnienie gazu stanowi średni pęd przekazywany w jednostce czasu na jednostkę powierzchni ze strony gazu na ściankę.

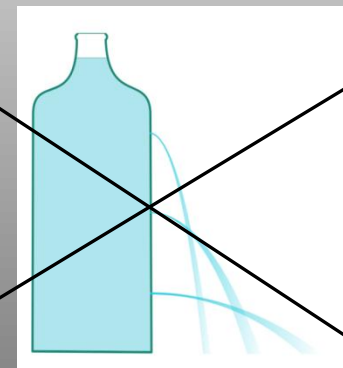
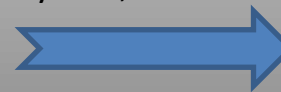


Prawo Pascala

Jeżeli na ciecz lub gaz zamknięte w naczyniu wywierane jest zewnętrzne ciśnienie, to ciśnienie wewnątrz tego naczynia ma jednakową wartość w każdym jego miejscu i jest równe temu ciśnieniu zewnętrznemu.



Sformułowanie to zakłada, że można pominąć ciśnienie hydrostatyczne, które jest zwykle małe w praktycznych zastosowaniach (prasy hydrauliczne, podnośniki, pompka rowerowa ...)





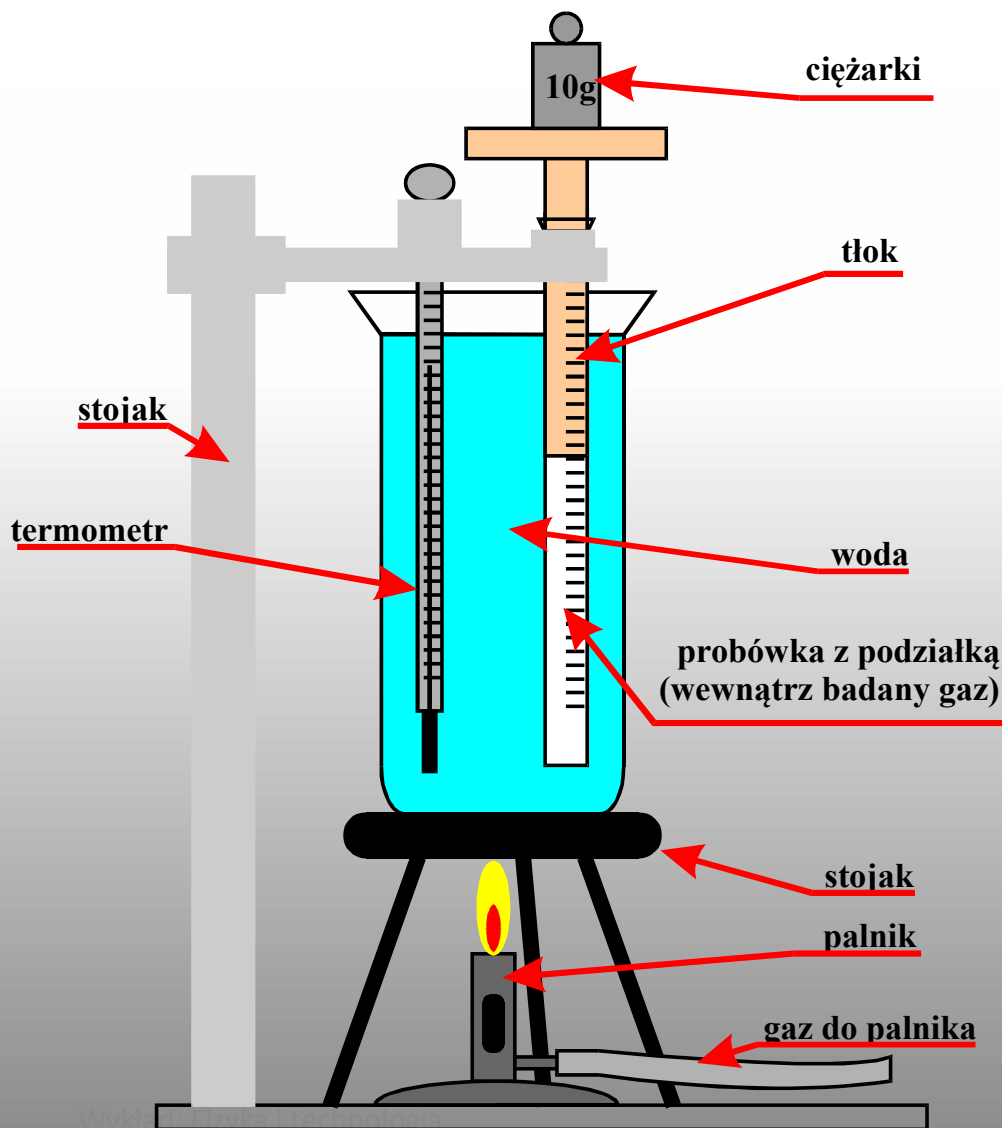
Gazy wokół nas

- *opony wybuchają, gdy są gorące*
- *pompka się grzeje podczas pompowania kół roweru*
- *lód uderzony młotkiem topnieje w miejscu uderzenia (choć jest zimno)*
- *na słońcu benzyna ma intensywniejszy zapach*
- *w układach hamulcowych autobusu skrapla się woda*
- *ciśnienie powietrza zależy od pory dnia*
- *w silniku wysokoprężnym nie ma świece*
- *czajnik gwiżdże, gdy zagotuje się woda*
- ...

Dawniej również zadawano sobie pytania **dłaczego? i jak?**, a problemy rozwiązywano przy użyciu ówczesnych środków technicznych:

-) wody w naczyniu
-) termometru
-) tłoka (z drewna) o średnicy dobranej do średnicy rurki
-) korków, sznurków, odważników, ołówka, papieru ...
-) palnika gazowego
-) rurki z naniesioną skalą

„Odkrywamy” prawa rządzące zachowaniem się gazu



Dawno zauważono, że:

1. gazy łatwo sprężyć w stosunku do cieczy i ciał stałych
2. podgrzanie gazu zwiększa jego objętość przy stałym ciśnieniu lub zwiększa ciśnienie przy stałej objętości

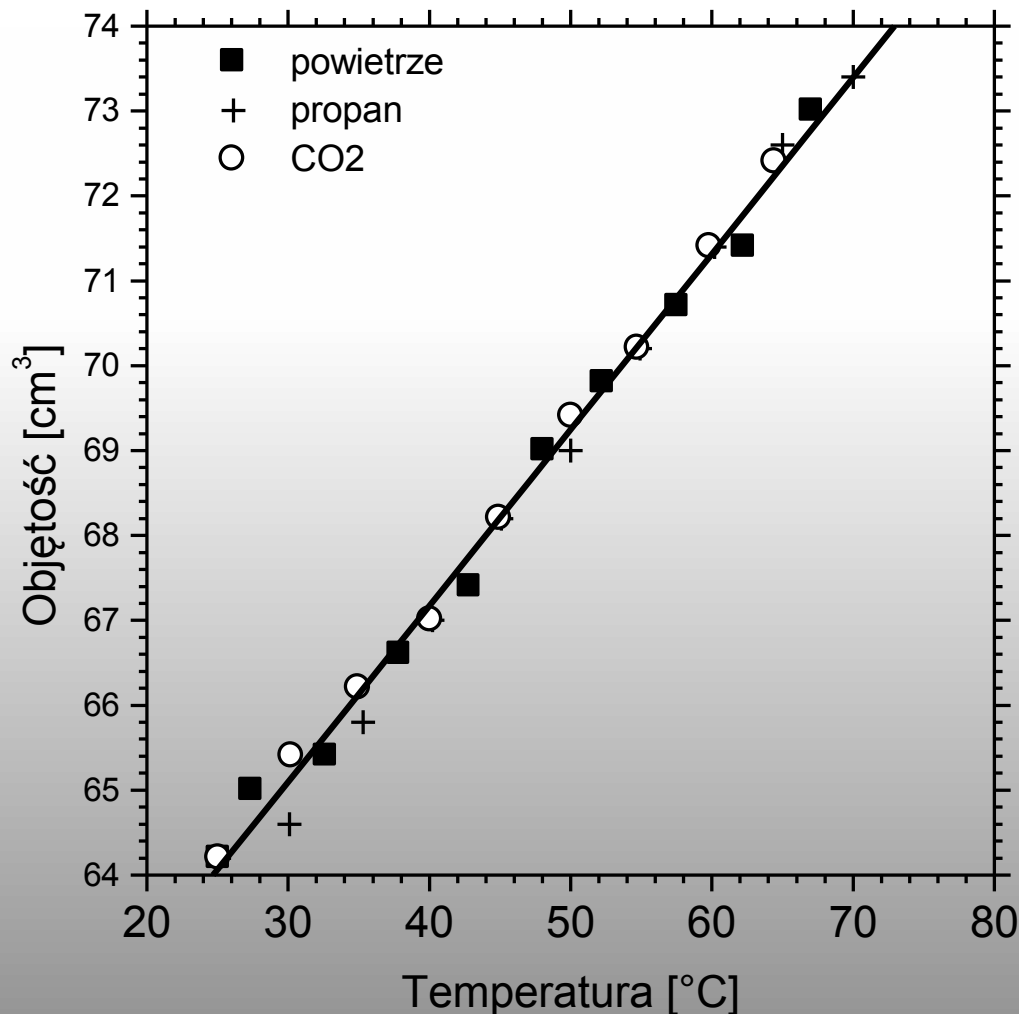
W przedstawionej „aparaturze”:

- ciśnienie regulujemy poprzez ciężarki ustawione na tłoku (powierzchnia tłoka jest stała)
- zakładamy, że temperatura gazu jest równa temperaturze wody (pomiar termometrem)
- temperaturę zmieniamy grzejąc lub oziębiając wodę
- objętość ustalamy na podstawie podziałki na probówce



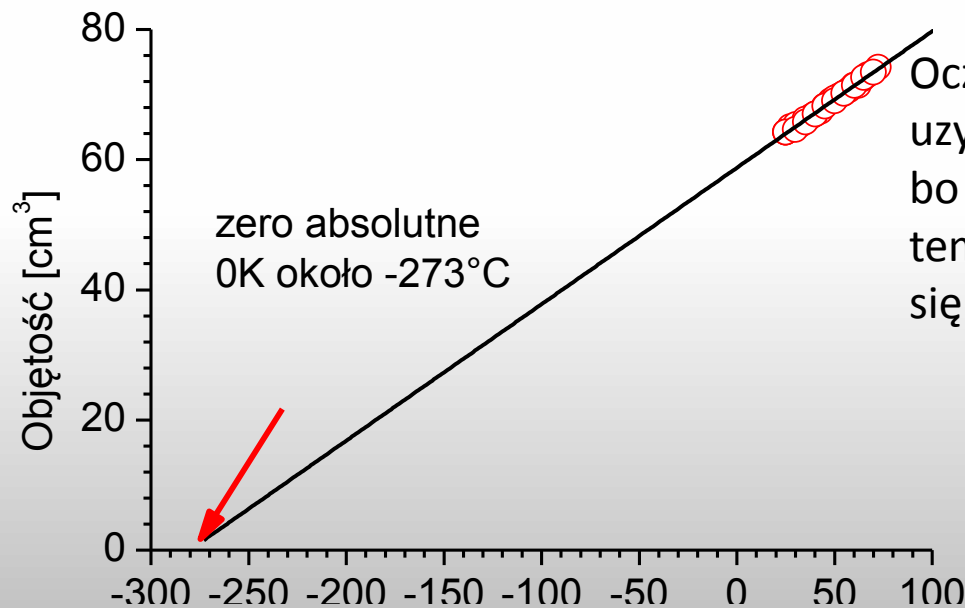
Zmieniamy temperaturę, mierzymy objętość przy stałym ciśnieniu

powietrze		propan		CO ₂	
T [°C]	V [cm ³]	T [°C]	V [cm ³]	T [°C]	V [cm ³]
25,1	64,2	25,1	64,2	25,1	64,2
27,4	65	30,1	64,6	30,3	65,4
32,7	65,4	35,3	65,8	35	66,2
37,9	66,6	40,2	67	40,1	67
42,9	67,4	45,1	68,2	45	68,2
48,1	69	50	69	50,1	69,4
52,3	69,8	54,9	70,2	54,8	70,2
57,6	70,7	60,2	71,4	59,9	71,4
62,3	71,4	65	72,6	64,5	72,4
67,1	73	70	73,4		
72,5	74,2				





Przedłużamy skalę - wyciągamy wnioski



Oczywiście w praktyce nie uzyskamy takiego wyniku, bo przy obniżaniu temperatury gazy zaczną się skraplać

$$V = c \cdot T$$

przy stałym ciśnieniu ($p = \text{const.}$)
dla bezwzględnej skali temperatury
tzn. gdy T wyrazimy w [K] - kelwinach
 c - stała



Zmieniamy ciśnienie, mierzymy objętość przy stałej temperaturze

$$p [Pa] = \frac{F}{S} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

zakładamy:

powierzchnia tłoka $S = 4,39 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

przyśpieszenie ziemskie $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

więc, gdy dołożymy ciężarek 2 kg, to zmiana ciśnienia Δp wyniesie

$$\Delta p = \frac{(9,8 * 2)}{4,39 * 10^{-4}} \left[\frac{N}{m^2} \right] = 4,47 * 10^4 [Pa]$$

(w oryginalnym doświadczeniu użyto cegieł o wadze około 2 kg każda)

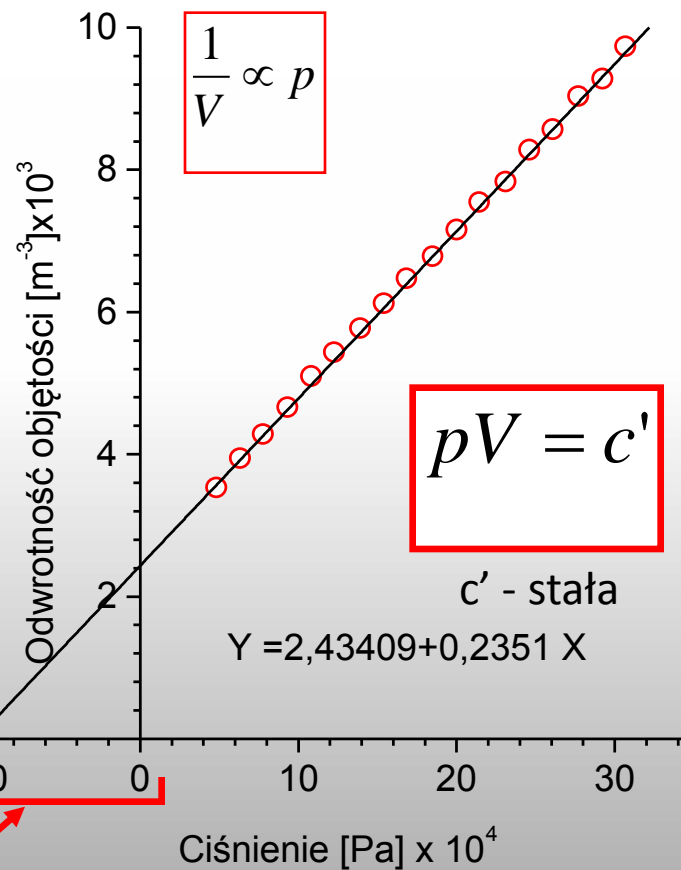
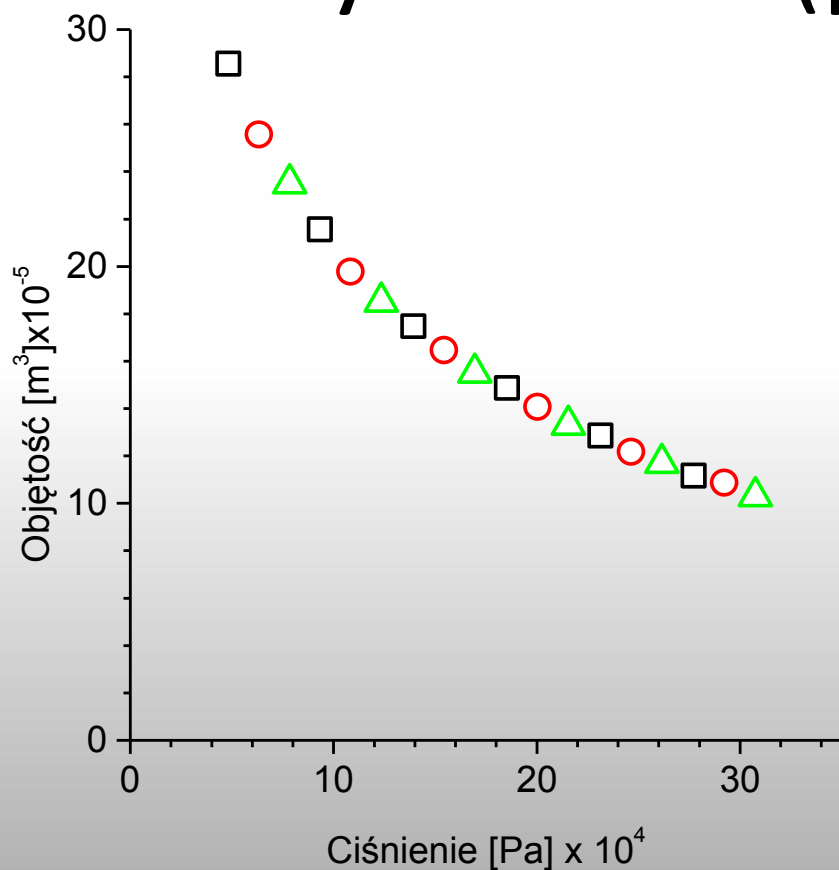
powietrze			
masa [kg]	p [Pa]x10 ⁴	V [m ³]x10 ⁻⁵	1/V [m ⁻³]x10 ³
2,2	4,9	28,5	3,51
4,22	9,4	21,5	4,64
6,26	14	17,4	5,75
8,36	18,6	14,8	6,76
10,4	23,2	12,8	7,81
12,47	27,8	11,1	9,01

propan			
masa [kg]	p [Pa]x10 ⁴	V [m ³]x10 ⁻⁵	1/V [m ⁻³]x10 ³
2,86	6,4	25,5	3,92
4,88	10,9	19,7	5,08
6,92	15,5	16,4	6,1
9,02	20,1	14	7,14
11,06	24,7	12,1	8,26
13,13	29,3	10,8	9,26

CO ₂			
masa [kg]	p [Pa]x10 ⁴	V [m ³]x10 ⁻⁵	1/V [m ⁻³]x10 ³
3,52	7,85	23,5	4,26
5,54	12,35	18,5	5,41
7,58	16,95	15,5	6,45
9,68	21,55	13,3	7,52
11,72	26,15	11,7	8,55
13,79	30,75	10,3	9,71



Wyniki $V = f(p)$ dla $T = \text{const.}$



trzeba uwzględnić ciśnienie atmosferyczne
około $1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$

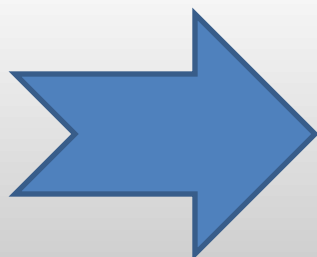


Wniosek

Dla stałej liczby cząsteczek (N) zależność ciśnienia (p), objętości (V) i temperatury (T)
nie zależy od rodzaju gazu!

$$V = c \cdot T$$

$$pV = c'$$



$$pV = NkT$$

k jest uniwersalną stałą i nazywana jest stałą Boltzmannna

Wniosek (c.d.)

$$pV = NkT$$

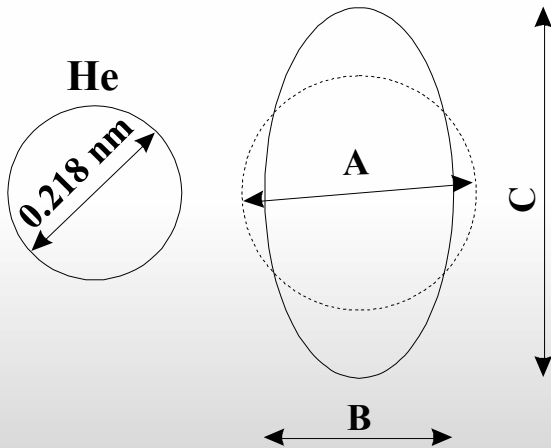
Wszystkie gazy zastępujemy nieskończenie małymi kulkami, które odbijają się od siebie sprężysto i nie oddziałują ze sobą – nie przyciągają się ani nie odpychają. Taki idealny opisujący wszystkie gazy „twór” nazywamy **gazem doskonałym**.

Gaz doskonały działa prawie zawsze ... ale ...

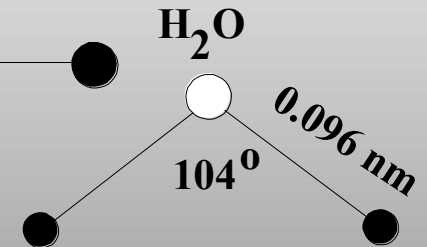
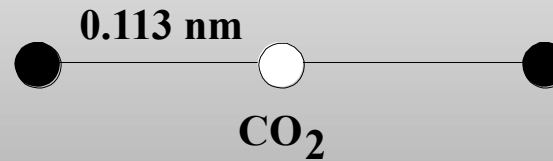
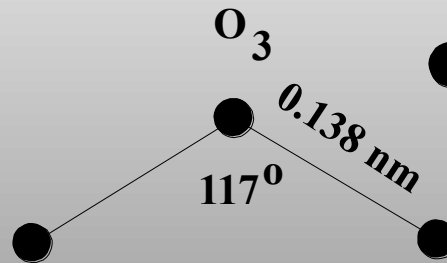
**„szydło z worka” wychodzi w
skrajnych warunkach**



Gazy – kształt i wymiary cząsteczki



	A	B	C
H ₂	0.27 nm	0.215 nm	0.319 nm
O ₂	0.36 nm	0.29 nm	0.39 nm





Równanie Van der Waalsa

W gazach rzeczywistych:

1. Cząsteczki oddziałują między sobą - przyciąganie (skierowane do środka gazu) powoduje, że gaz rzeczywisty wywiera na ścianki ciśnienie **mniejsze**, niż doskonały, a co za tym idzie przy danym ciśnieniu zewnętrznym zajmie **mniejszą** objętość tak, jakby podlegał pewnej **nadwyżce ciśnienia Δp** .
2. Nie składają się z punktów materialnych - cząsteczki zajmują określoną objętość, zmniejszając objętość naczynia.

$$\left(p + \frac{a}{V_M^2} \right) (V_M - b) = RT$$

(gs15-2)

nadwyżka ciśnienia

redukcja objętości

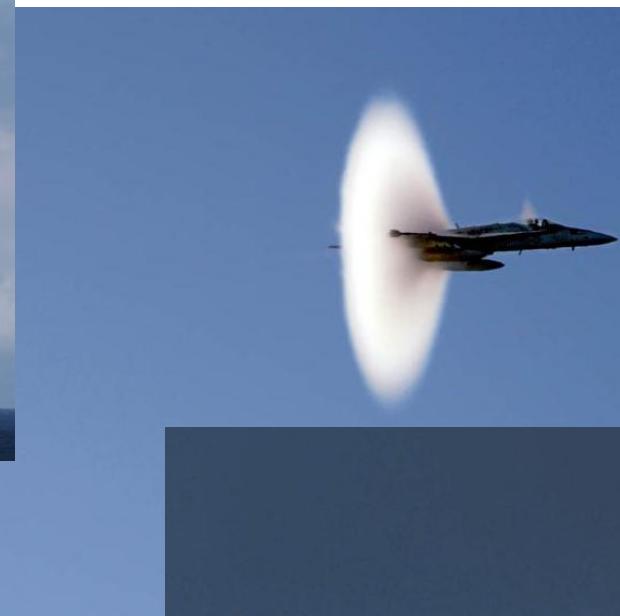
wartości a i b wyznacza się doświadczalnie,

R – uniwersalna stała gazowa (równa iloczynowi stałej Boltzmann i liczby Avogadro)
równanie Van der Waalsa też **nie** opisuje ściśle zachowania rzeczywistych gazów

Równanie „nie działa” gdy jest wilgotno



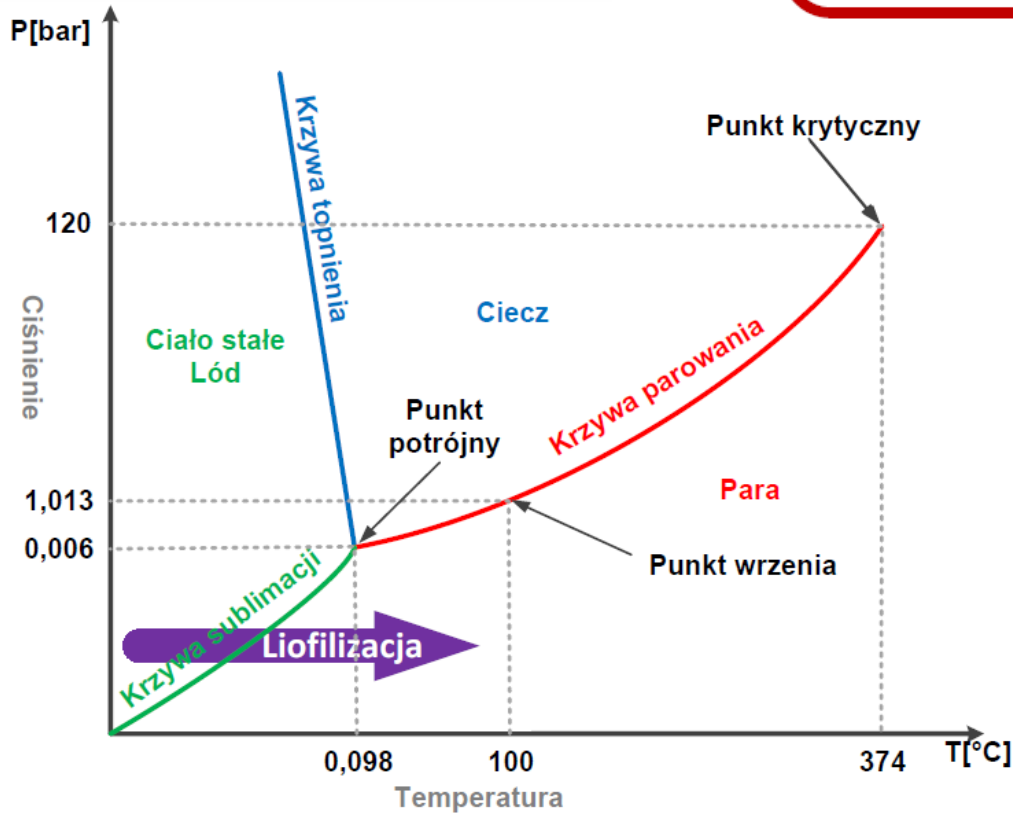
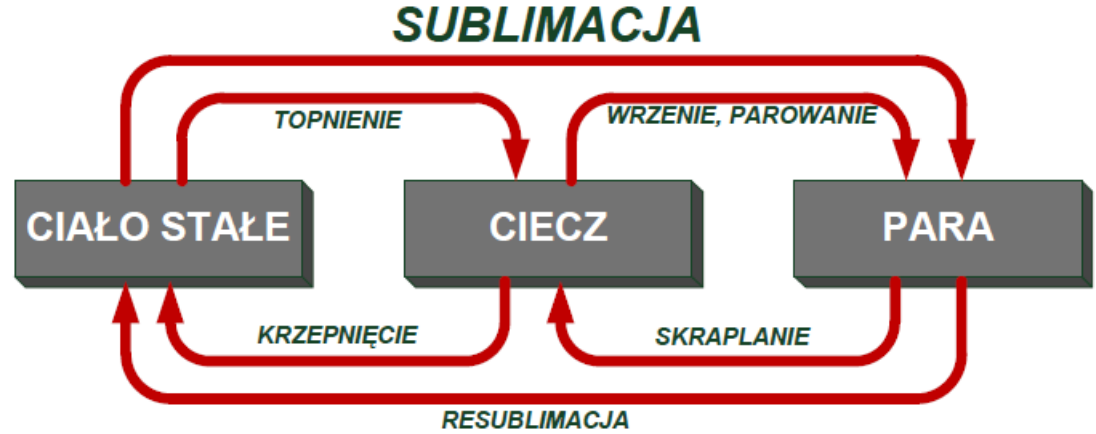
Obłok Prandtla-Glauerta



Woda zmienia stan skupienia – para się skrapla, woda gwałtownie paruje lub zamarza



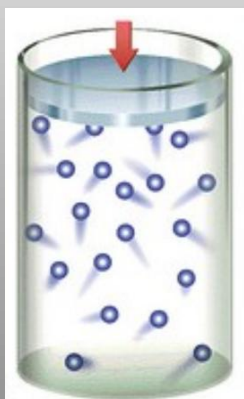
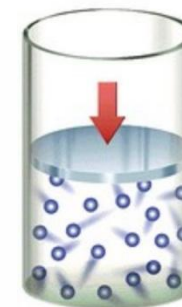
Można to wykorzystać w praktyce: suszenie zabytków



Stany gazu



duże ciśnienie
jest CIASNO!

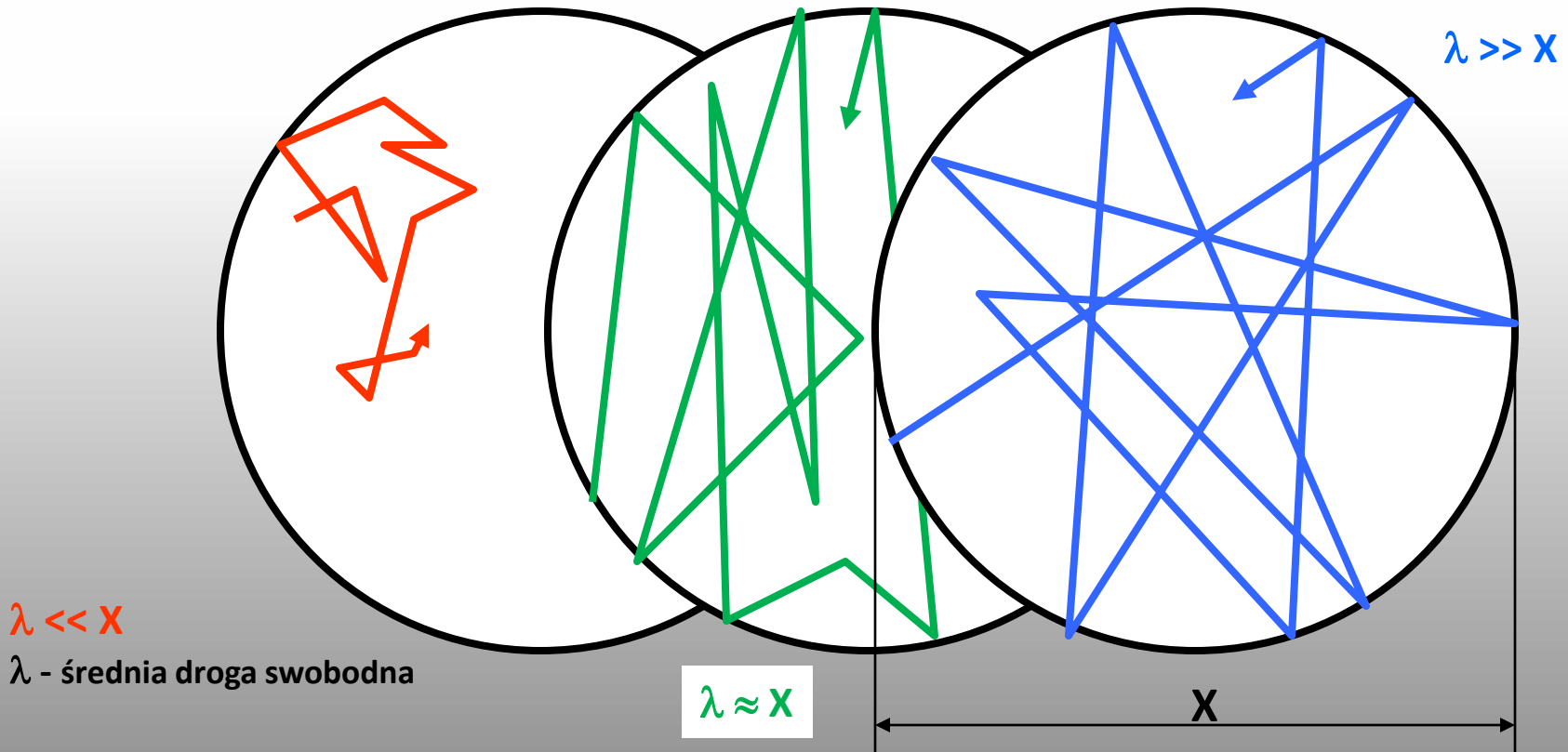


niskie ciśnienie
jest LUŻNO!



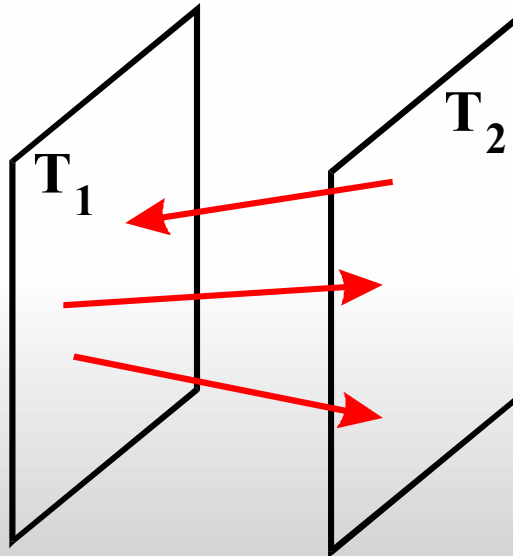
Stany gazu

- Gaz znajduje się w **stanie lepkim**, gdy wzajemne zderzenia cząsteczek gazu przeważają nad zderzeniami ze ściankami naczynia, w **stanie molekularnym** - w sytuacji odwrotnej.
- Wyróżnia się **stan pośredni**, gdy żaden z wymienionych rodzajów zderzeń nie przeważa w istotnym stopniu.

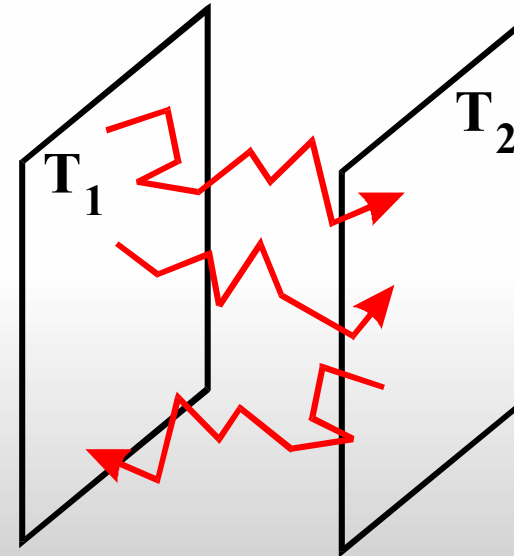


Stany gazu - przenoszenie energii

stan molekularny



stan lepki



W obu stanach nośnikami energii cieplnej albo energii ruchu są **cząsteczki gazu**, które **zmieniają swe prędkości przy zetknięciu z innymi cząsteczkami o innej prędkości lub z powierzchnią o innej temperaturze.**

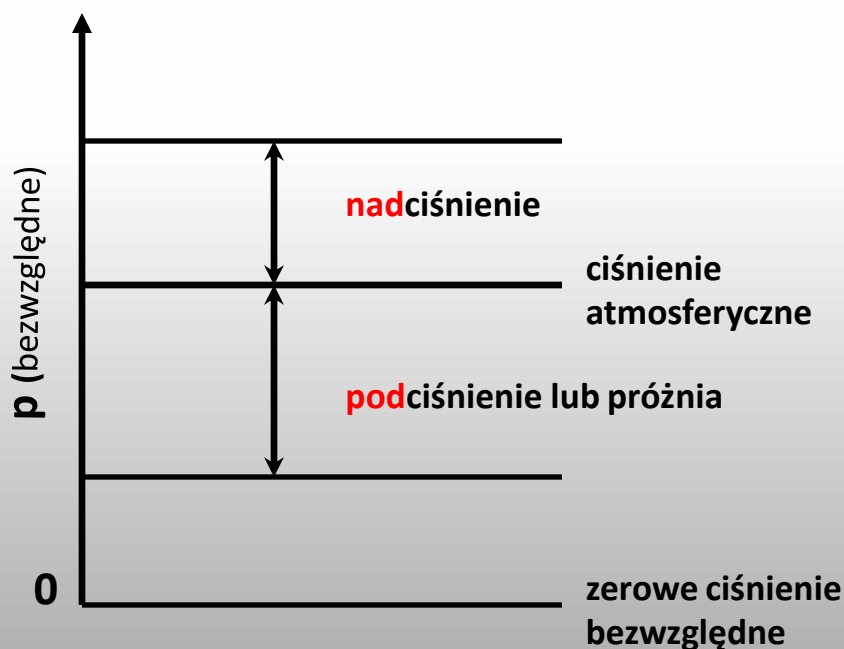
- **W stanie lepkim** - cząsteczka przekazuje energię następnej cząsteczce itd.
- **W stanie molekularnym** - cząsteczka przekazuje energię bezpośrednio ścianie (przystonie ...)



Próżnia

Próżnia

stan, jaki panuje w danej objętości, gdy ciśnienie gazów i par jest niższe od ciśnienia powietrza na poziomie morza.

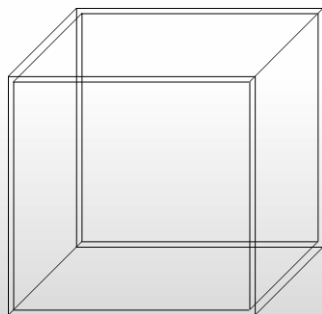


Ciśnienie [Pa]	Próżnia
$10^5 \dots 10^2$	niska
$10^2 \dots 10^{-1}$	średnia
$10^{-1} \dots 10^{-4}$	wysoka
$10^{-4} \dots 10^{-7}$	bardzo wysoka
$10^{-7} \dots 10^{-12}$	niezmiernie wysoka
$< 10^{-12}$	kosmiczna

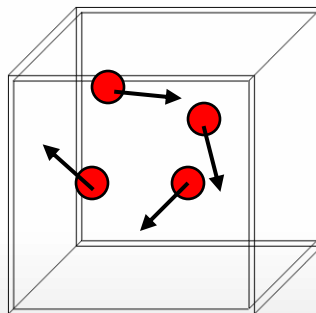


Próżnia i ciśnienie

Do opisu stanu próżni używa się **ciśnienia** wywieranego przez gazy, które znajdują się w rozpatrywanym obszarze. **Zwykle** próżnia i niskie ciśnienie opisują ten sam stan.

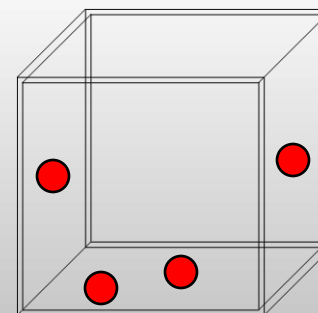


w naczyniu nie ma gazu,
więc ciśnienie jest **równe zero**
panuje **idealna próżnia**



$T > 0K$

w naczyniu jest gaz, poruszające się
cząsteczki wywierają ciśnienie
na ścianki



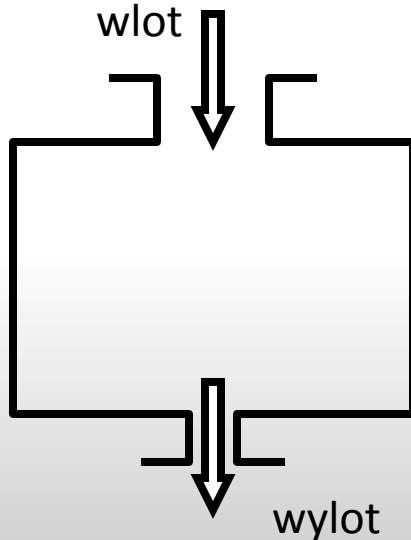
temperatura ścianek **$T = 0K$**

w naczyniu **jest** gaz, cząsteczki się
nie poruszają (po osadzeniu się na ściankach)
nie wywierają ciśnienia na ścianki

Typy pomp próżniowych

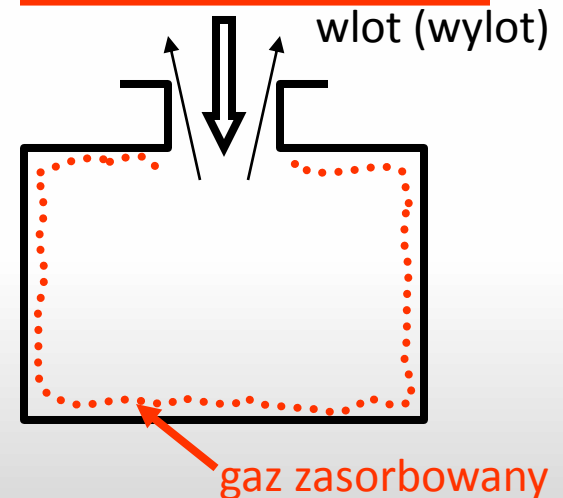
(ogólnie)

Pompa przepływowa



- Pompowany gaz jest sprężany od niskiego ciśnienia wlotowego do wyższego ciśnienia wylotowego i wydany na zewnątrz.
- Pompa ma wlot i wylot.
- Pompa (zwykle) może pracować w sposób ciągły.

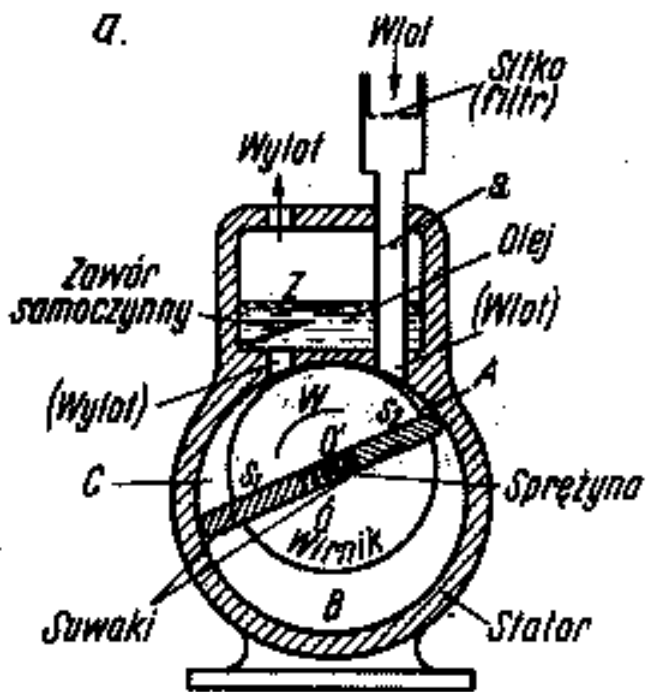
Pompa bezwylotowa



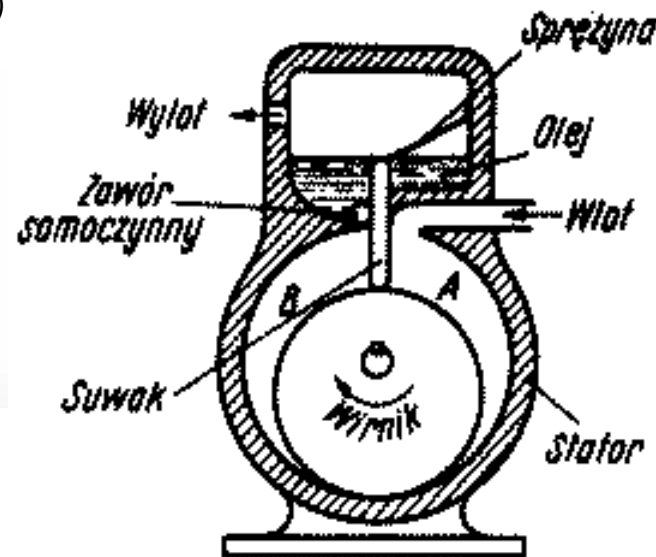
- Pompowany gaz nie jest wydany na zewnątrz, lecz jedynie unieruchamiany wewnątrz pompy za pomocą mniej lub bardziej trwałych wiązań
- Pompa ma tylko wlot (podczas normalnej pracy).
- Pompę trzeba regenerować okresowo i wtedy zasorbowany gaz jest wydany przez otwór będący normalnie wlotem.

Pompy obrotowe olejowe (rotacyjne)

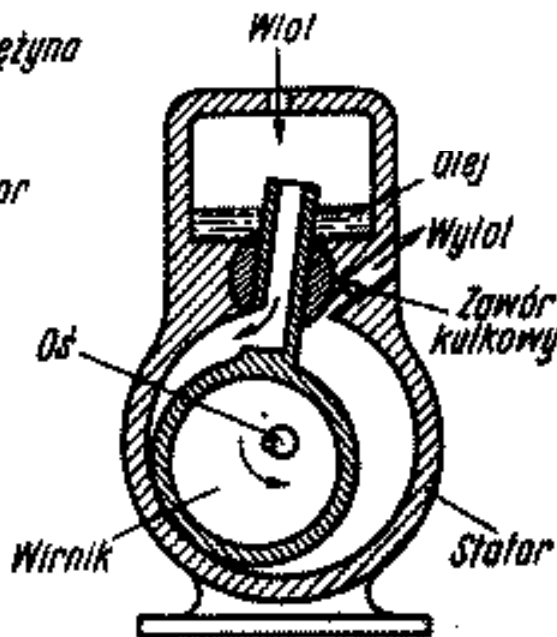
a. (różne rozwiązania)



pompa z ruchomymi suwakami i wirnikiem osadzonym mimośrodowo



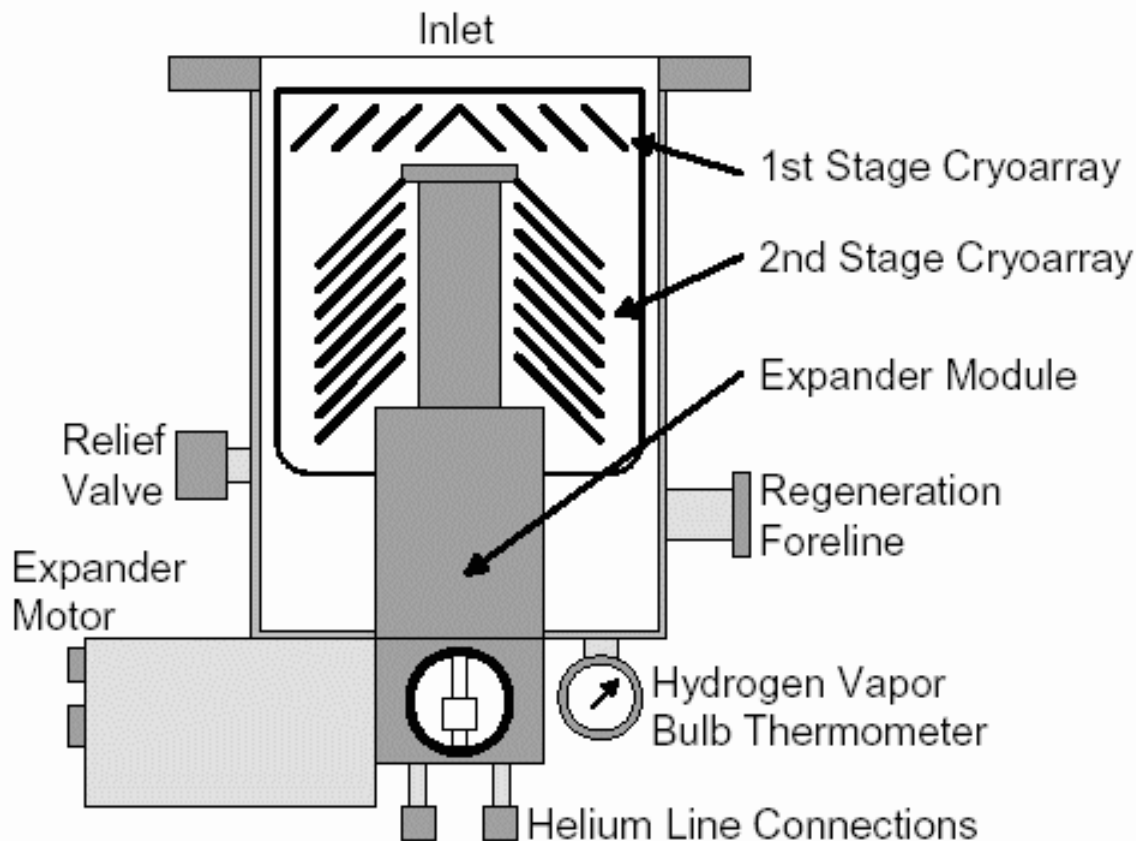
pompa z suwakiem w statorze i wirnikiem mimośrodowym



pompa z suwakiem przegubowym



Budowa pomp kriogenicznych

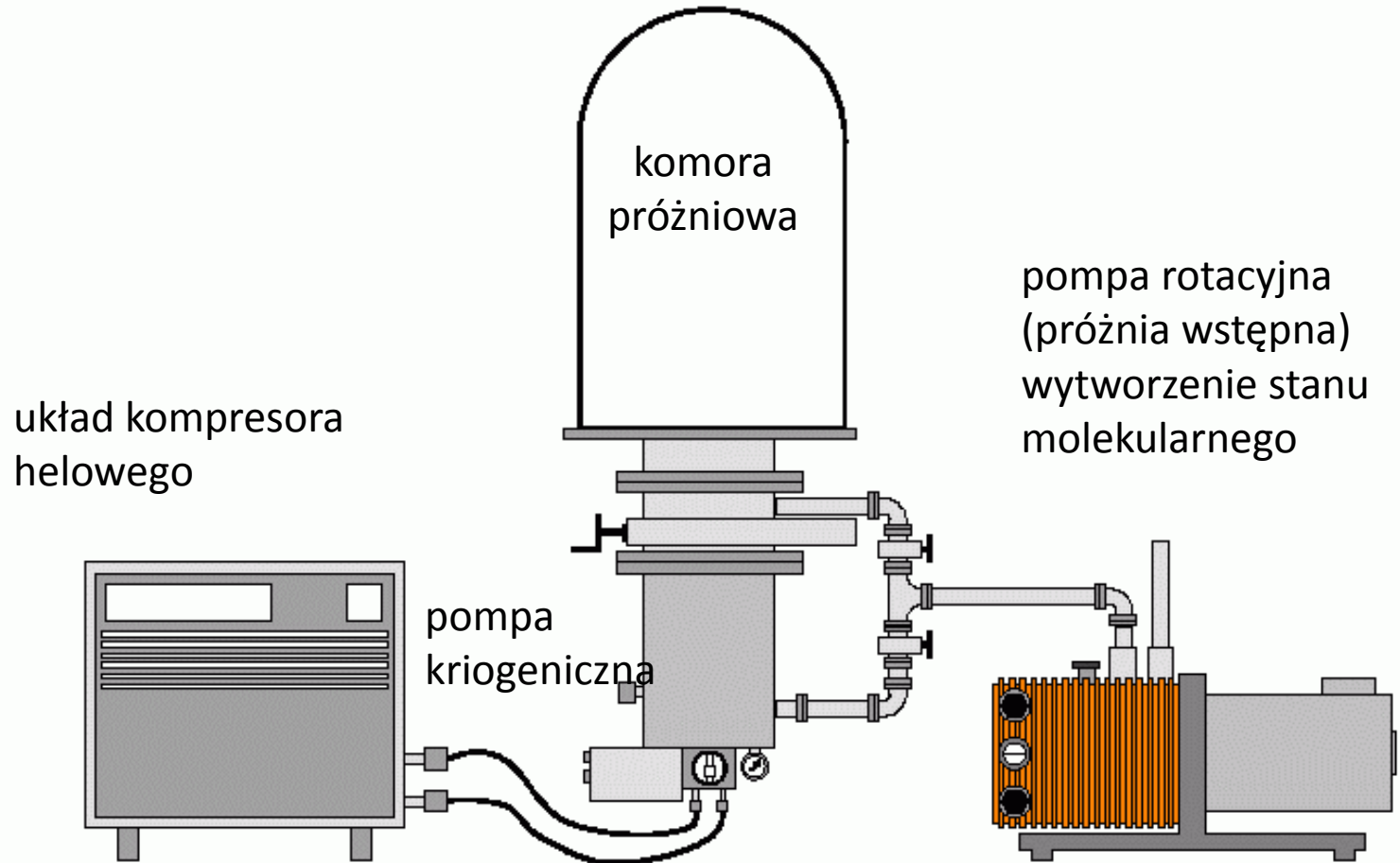


- 1 stopień typowo 50-80K
np. ciekły azot
osadza się para wodna i CO_2
- 2 stopień typowo około 10K
np. ciekły hel
osadzają się pozostałe gazy i pary

hel jest bardzo drogi i chłodzenie zachodzi przy obiegu zamkniętym (jak w lodówce)

„Helowa lodówka”

Cryo Pumped High Vacuum Bell Jar System



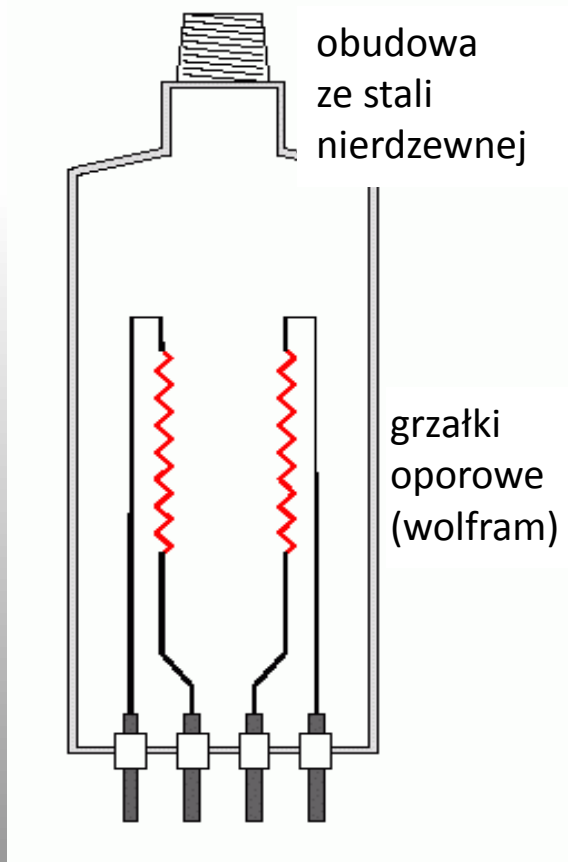
Jak „zmierzyć próżnię”?

Próżniomierz typu Pirani (rysunek obok) wykorzystuje zależność przewodnictwa cieplnego gazu od jego ciśnienia w zakresie od około 10^{-4} Pa do 100 hPa.

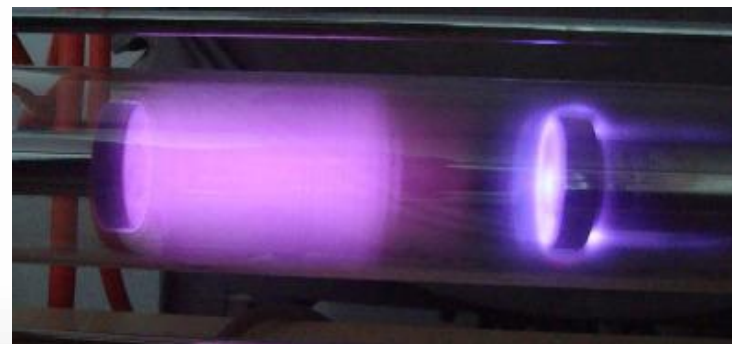
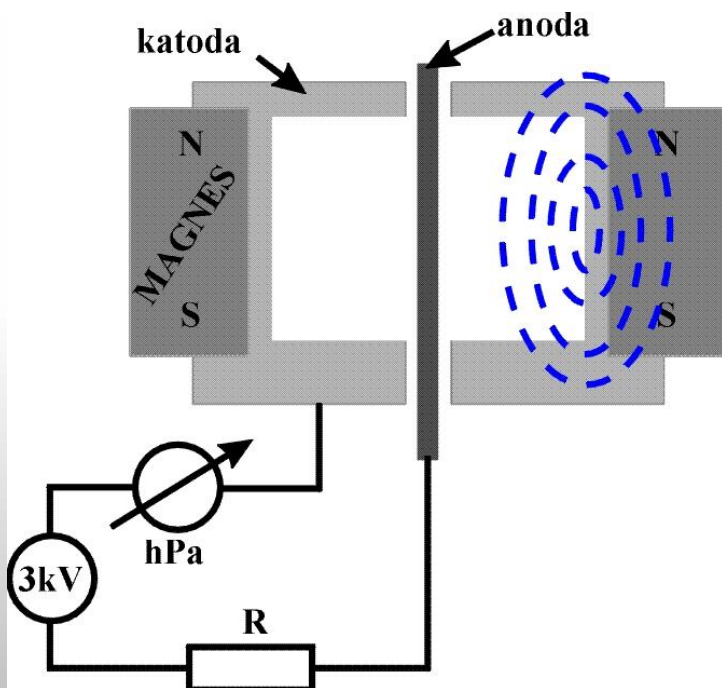
Rezystancja drutu zależy od temperatury – grzejemy drut, a otaczający gaz go chłodzi.

Wykorzystujemy prawo Ohma – mierzymy prąd i na jego podstawie wyznaczamy ciśnienie.

Stałość temperatury drutu można zapewnić sterując prądem zasilania przy wykorzystaniu znajomości prawa Ohma i temperaturowej zależności rezystancji drutu wolframowego



Gdy próżna jest „poważna” (bardzo niskie ciśnienie)



Próżniomierz jarzeniowy z zimną katodą składa się z dwóch elektrod (anody i katody) do których przyłożone jest wysokie napięcie poprzez szeregowy rezystor roboczy. Na skutek wysokiego pola elektrycznego obdarzone ładunkiem ujemnym elektrony wylatują z katody w kierunku anody. Po drodze zderzają się z cząsteczkami gazu powodując ich jonizację i inicjując wyładowanie jarzeniowe. Ostatecznie mierzony jest prąd jonowy, który jest proporcjonalny do ciśnienia gazu.



Aparatura próżniowa - uwagi wstępne

Przy próżni 10^{-6} Tr:

- 4×10^4 cząsteczek w cm^3 (40 tys./ cm^3)
- średnia droga swobodna cząsteczki to około 5×10^3 cm (50 metrów)
- szybkość z którą cząsteczki osiadają na powierzchni wynosi do 10^{15} cząsteczek na cm^2 na sekundę
- monowarstwa cząsteczek powstanie na (w zasadzie) **każdej** powierzchni w ciągu około **1 sek**
- 10^{-6} odpowiada „czystości” 1 na miliard w stosunku do ciśnienia atmosferycznego

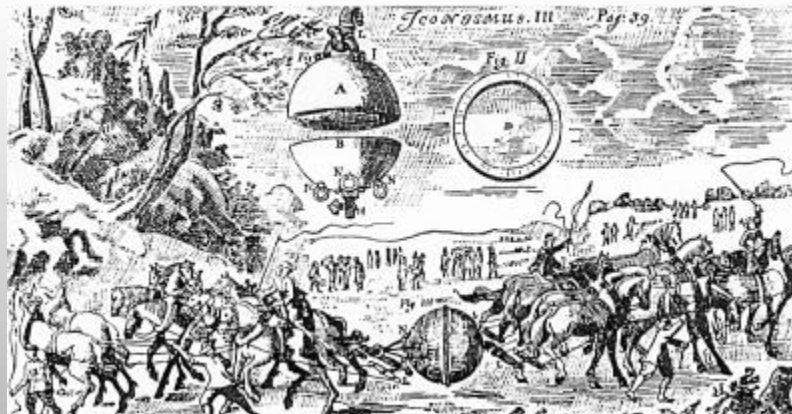
Odcisk palca - zakładamy $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 20 \mu\text{m}$

- jeśli odparuje w całości, to przy próżni 10^{-6} Tr przy objętości mniejszej, niż $1/2 \text{ m}^3$ próżnia może „spaść” do 10^{-4} Tr

RĘKAWICZKI!!!

Kto i po co zajmuje się próżnią?

Badania nad próżnią podejmowano od czasów, w których ludzie zaczęli wydobywać surowce spod powierzchni ziemi i pojawiły się problemy **pompowania powietrza do kopalni i usuwania z nich wody**



Najstąnniejszy historyczny eksperyment to półkule magdeburskie
1654 r. Otto von Guericke

Aparatura próżniowa w nauce/laboratorium/hi-tech

Akceleratory cząstek - kanały akceleratorów, średnica kilka metrów, długość kilka metrów do kilkunastu (może więcej) kilometrów, pompy bardzo wysokiej wydajności

Wielkie komory próżniowe - np. do testowania pojazdów kosmicznych

Pomiary w niskich temperaturach - odpompowywanie kriostatów
- izolacja cieplna, stabilizacja temperatury

Pomiary w atmosferze o określonym składzie
(lub przy braku atmosfery) - dozowniki gazów, komory próżniowe, izolacja od czynników zewnętrznych, kalibracja czujników gazów



elektrycznych

Wykonywanie próbek - technologia cienkich warstw, systemy **Molecular Beam Epitaxy**, **Chemical Vapour Epitaxy** i inne metody epitaksji, wykonywanie kontaktów

(naparowywanie metali)

Spektroskopia masowa - systemy „typowe” w układzie „cyklotronowym” i **Time Of Flight** (pomiar czasu przelotu)

Konserwacja dzieł sztuki - przechowywanie, ale także np. stoły równomiernie „przysysające” rozłożone obrazy

ilustracje z www.prevac.pl

Współczesne komercyjne/masowe obszary zastosowań urządzeń wykorzystujących technikę próżni

wyciąg z materiałów reklamowych firmy PREVAC (www.prevac.pl)

Piece próżniowe - wśród obszarów naszej aktywnej obecności

przemysłowej znajduje się piece próżniowe, do których oferujemy kompleksowe systemy próżniowe (w tym pompy próżniowe, zawory, układy kontrolno pomiarowe, itp.) o niezawodnej jakości i wydajności dostosowanej indywidualnie do każdej aplikacji.

Pakowanie próżniowe - [...] dla przemysłu spożywczego jak i

dla drobnych wytwórców, służące np. do pakowania próżniowego produktów jadalnych i przemysłowych.

Energetyka - [...] pompy do procesów odgazowania wodoru z oleju

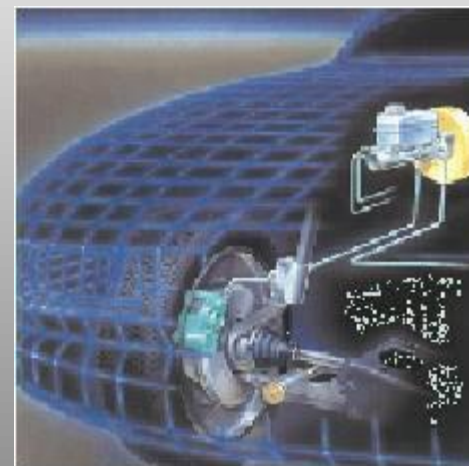
transformatorowego (olej wraca do obiegu) oraz kompletne systemy do filtrowania, suszenia i odgazowywania oleju izolacyjnego.

Przemysł samochodowy - [...] elementy systemów do

napełniania układów hamulcowych (pompy, mierniki [...]), stacje do napełniania czynnikami chłodniczymi układów klimatyzacyjnych.

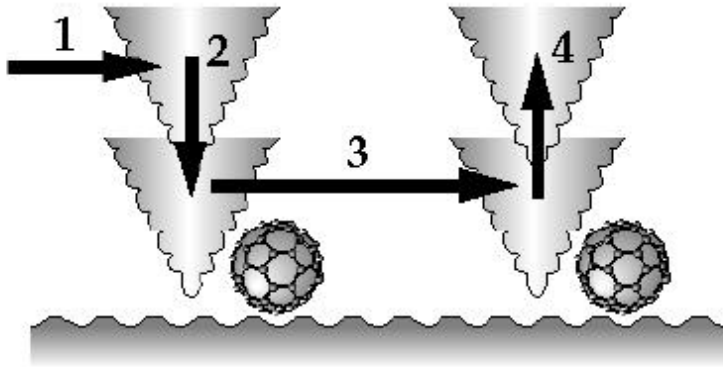
Przemysł spożywczy - [...] aparatura używana jest np. do

pakowania próżniowego żywności, suszenia próżniowego, liofilizacji, fumigacji, itp.; używane do tych celów są pompy próżniowe o wysokiej tolerancji pary wodnej [...]. Przy kontroli szczelności opakowań próżniowych (np. kawy, innych produktów spożywczych)[...].



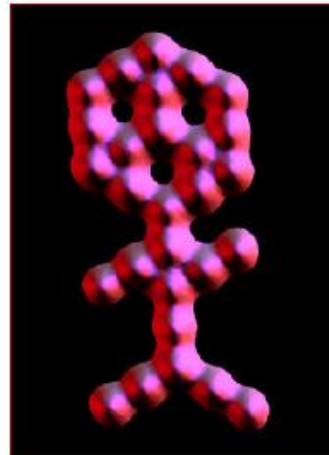
Zaawansowane zastosowania próżni

Manipulacja atomami
STM - Scanning Tunneling Microscope
AFM - Atomic Force Microscope

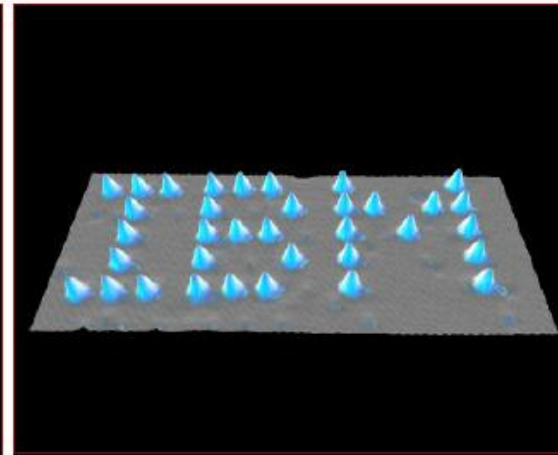


Schematic representation of the steps for molecular manipulation using a STM or AFM probe

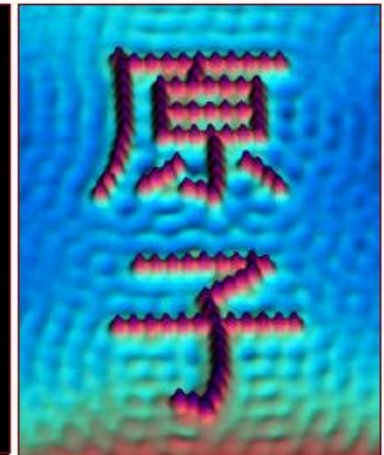
Źródło: IBM



Carbon Monoxide Man
Carbon Monoxide on Platinum (111)



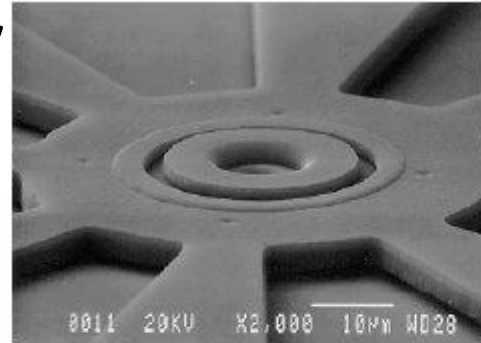
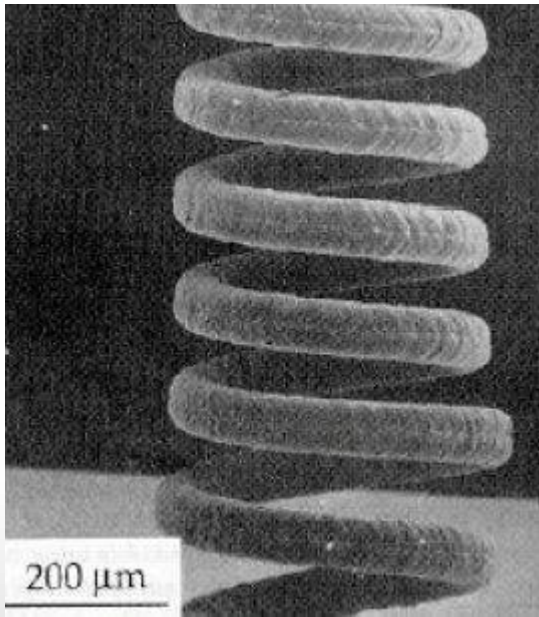
The Beginning
Xenon on Nickel (110)



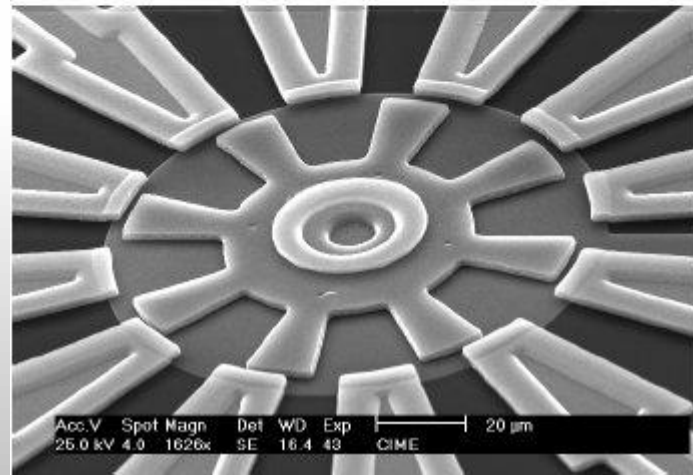
Atom
Iron on Copper (111)



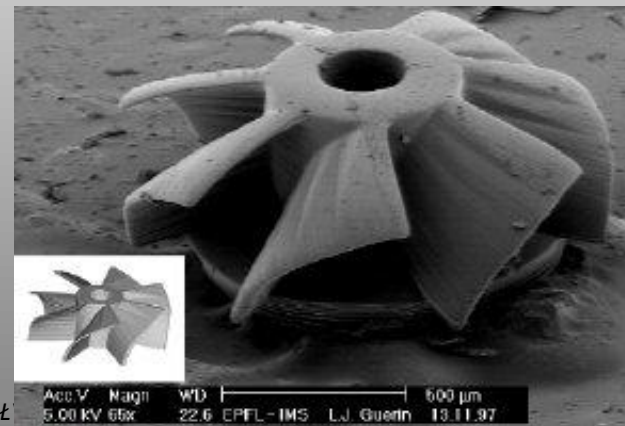
Mikromaszyny



Mikrosilnik



ludzki włos
około 60 μm





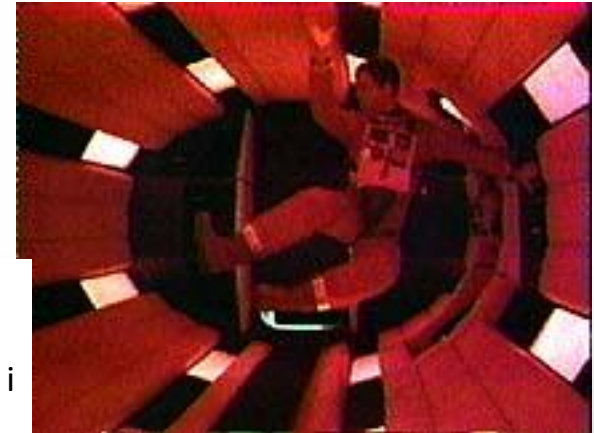
Czy „ssak” przeżyje w próżni?

„Odyseja kosmiczna 2001” vs. „Saturn 3”

źródło: <http://www.batnet.com/mfwright/2001exp.html>



Odyseja kosmiczna 2001:
HAL 9000 odmawia wpuszczenia kosmonauty Bowmana do Discovery i rozszczelnia statek.



Bowman wysadza drzwi, wskakuje do środka bez hełmu (bo go nie ma), zamyka włącz bezpieczeństwa, dopiero tam zakłada hełm i rękawice.

Saturn 3
Człowiek **wybuca!** w próżni.

Science czy fiction?



A co na to nauka?

- **Czy można przetrwać? - TAK** - kilkanaście sekund przed utratą przytomności, śmierć po kilku minutach - **jest na to dowód**
"At NASA's Manned Spacecraft Center (now renamed Johnson Space Center) we had a test subject accidentally exposed to a near vacuum (less than 1 psi) in an incident involving a leaking space suit in a vacuum chamber back in '65. **He remained concious for about 14 seconds**, which is about the time it takes for O2 deprived blood to go from the lungs to the brain. The suit probably did not reach a hard vacuum, and we began repressurizing the chamber within 15 seconds. The subject regained conciousness at around 15,000 feet equivalent altitude. The subject later reported that he could feel and hear the air leaking out, and his **last concious memory was of the water on his tongue beginning to boil.**,"
- **Czy krew się zagotuje? - NIE** - przy temperaturze ciała ciśnienie musiałoby spaść do około 75 mm Hg, ciało nie pozwoli na nagły spadek ciśnienia.
- **Główne zagrożenia ;-)**
 - próba wstrzymania oddechu (rozerwanie pęcherzyków płucnych)
 - tętno rośnie aby wyrównać ciśnienie i następuje utrata przytomności
- **Dziura w kadłubie!** w przybliżeniu $P = P_{initial} \exp(-0.02 tA/V)$, t - czas [s], A - powierzchnia otworu w cm^2 , V - objętość kabiny w m^3 , np. 300 m^3 , otwór 1 cm^2 , spadek do 1% ciśnienia atmosferycznego w 17 godzin.



Dziękuję za uwagę!



Powietrze jako mieszanina gazów

Gas	Symbol	Volume Percent	Partial Pressure, Torr
Nitrogen	N ₂	78	593
Oxygen	O ₂	21	159
Argon	Ar	0.93	7.1
Carbon Dioxide	CO ₂	0.03	0.25
Neon	Ne	0.0018	1.4 x 10 ⁻²
Helium	He	0.0005	4.0 x 10 ⁻³
Krypton	Kr	0.0001	8.7 x 10 ⁻⁴
Hydrogen	H ₂	0.00005	4.0 x 10 ⁻⁴
Xenon	Xe	0.0000087	6.6 x 10 ⁻⁵
Water	H ₂ O	Variable	5 to 50, typ.

źródło: R. B. Darling - *EE-527: MicroFabrication - Vacuum Systems* - (prezentacja własna udostępniona poprzez internet)