

Ciśnienie

Dochodzenie do stanu równowagi

Osiągnięcie stanu równowagi zajmuje pewien czas zależny od stanu początkowego i od warunków oddziaływania części składowych układu.

Wielkością charakteryzującą szybkość tego procesu jest **czas relaksacji**.

Jest to czas, po którym **różnica** między początkową wartością parametru (opisującego stan), a jego wartością w stanie równowagi **maleje e razy**.

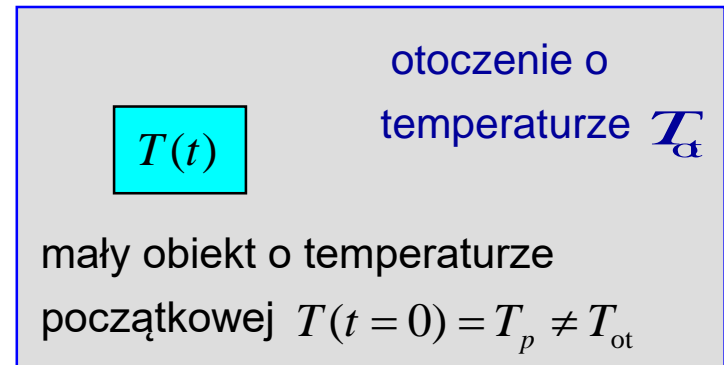
Przykład : wyrównywanie się temperatur

Model Newtona:

zakładamy, że obiekt jest mały, t.j. nie wpływa na temperaturę otoczenia, ma w każdej chwili określoną temperaturę $T(t)$ i

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\alpha (T(t) - T_{ot}),$$

gdzie α jest **stałą** charakteryzującą oddziaływanie termiczne obiektu z otoczeniem.



Rozwiązanie tego równanie przy założeniu, że temperatura otoczenia jest stała jest natępujące:

$$T(t) = (T_p - T_{ot}) \exp(-\alpha t) + T_{ot},$$

lub w innej postaci: $T(t) - T_{ot} = (T_p - T_{ot}) \exp(-\alpha t).$

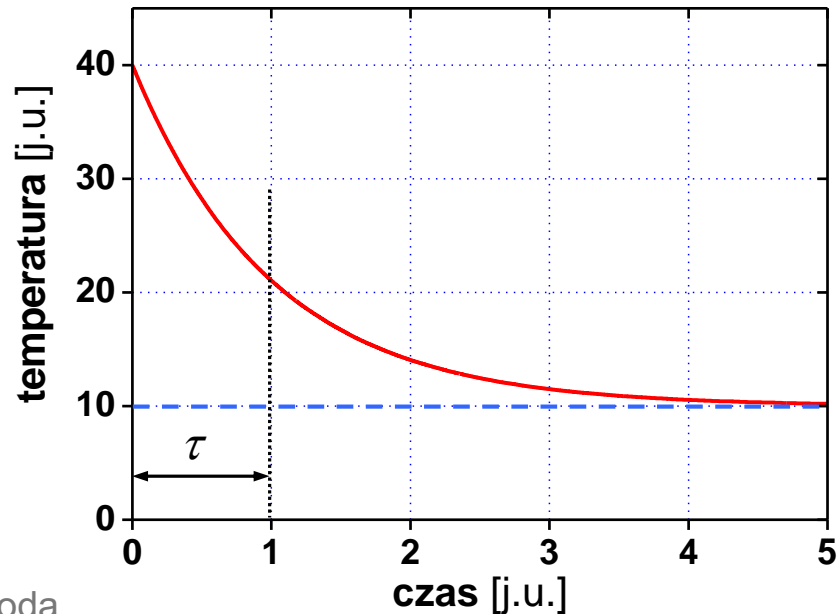
zatem **czas relaksacji** w tym przypadku: $\tau = 1/\alpha$.

Przykład:

$$T_p = 40$$

$$T_{ot} = 10$$

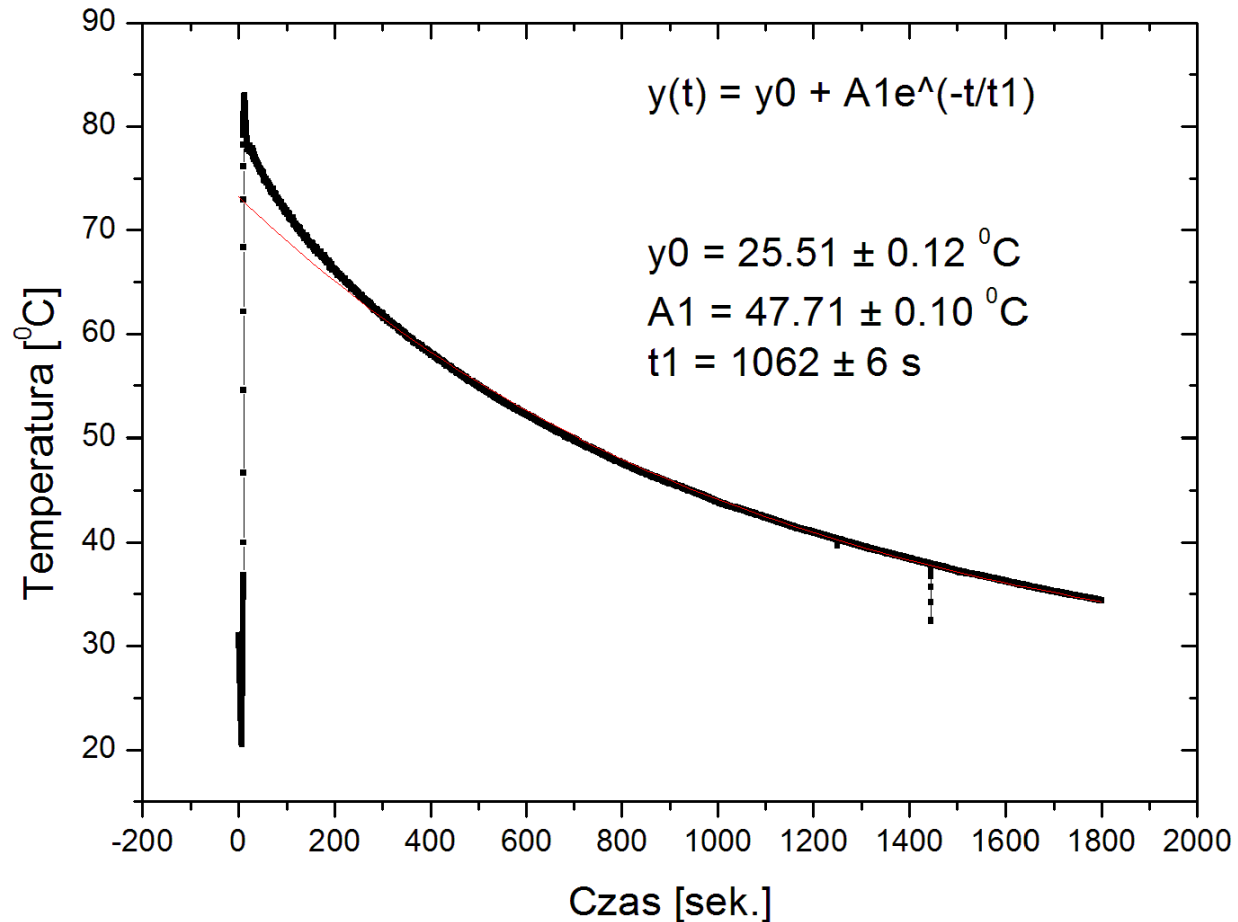
$$\alpha = 1$$



stygnięcie szklanki z wodą

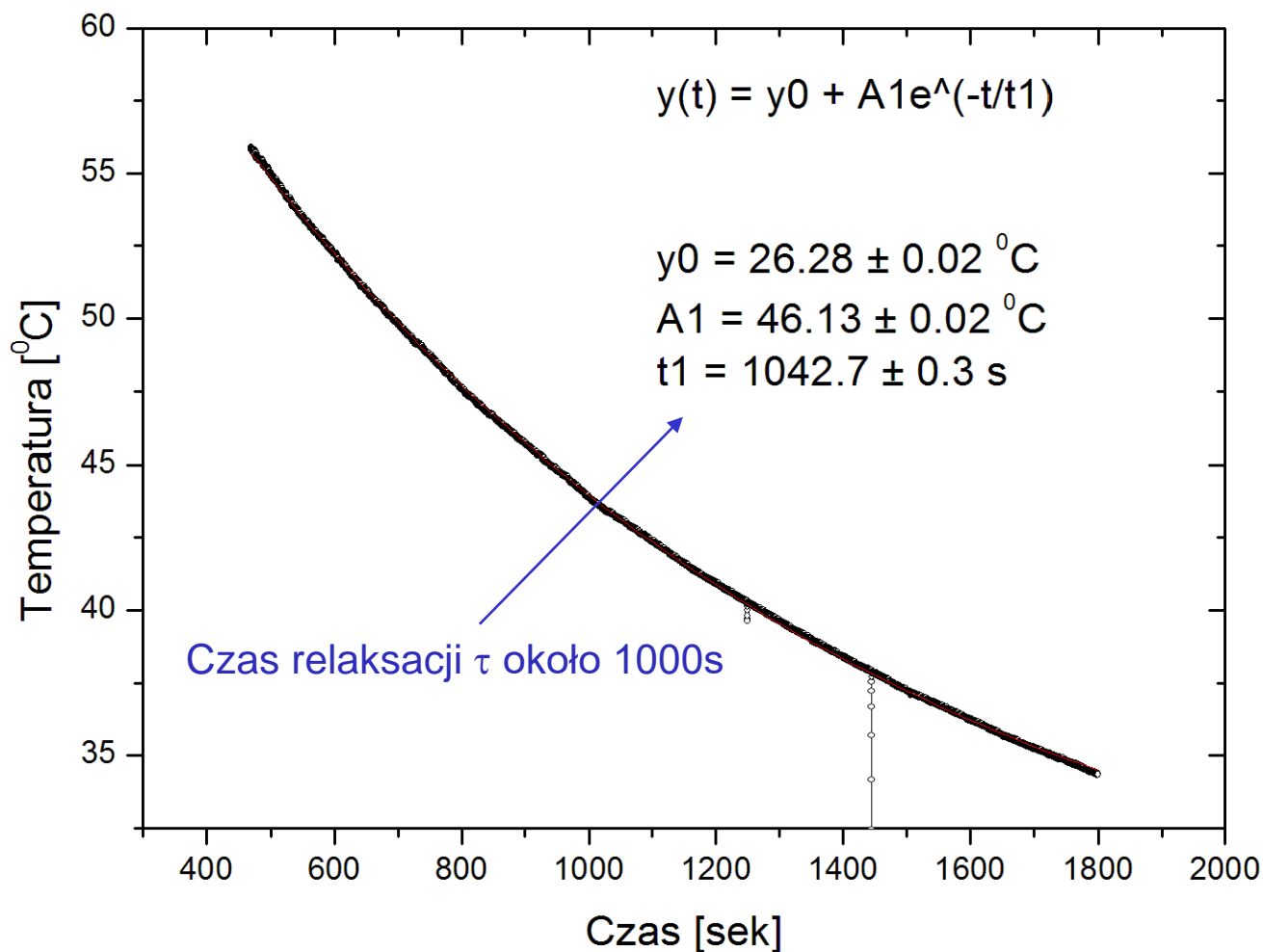
Stygnięcie wody w szklance – wynik z 2016 roku

Prawo Newtona nie działa w pełnym zakresie czasu !

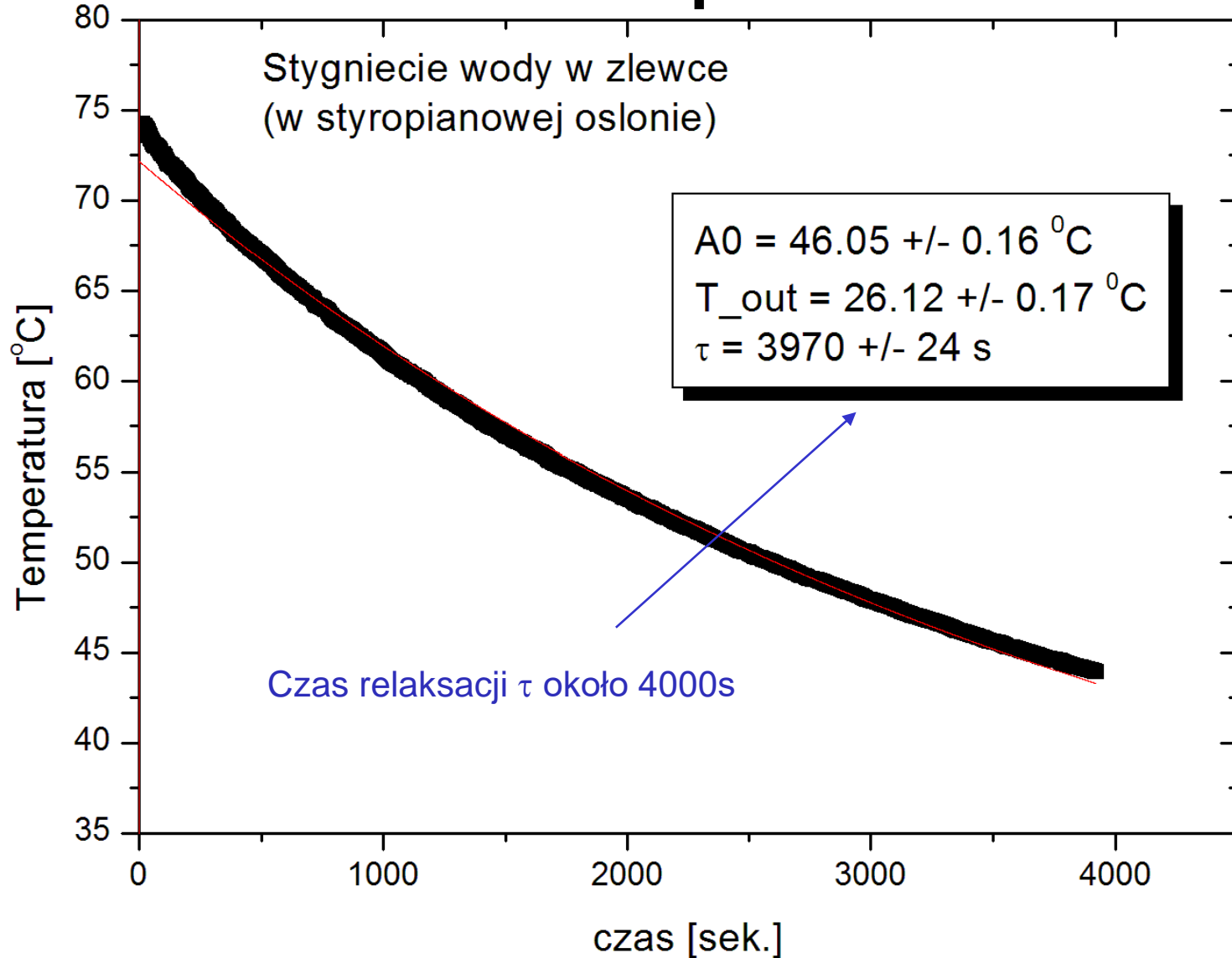


Stygnięcie wody w szklance – wynik z 2016 roku

Prawo Newtona działa dobrze w ograniczonym zakresie czasu !



Stygnięcie wody w szklance (z osłoną styropianową) –2017



Termopary

Termopara to połączenie dwóch różnych metali, tak że tworzą się dwa złącza między nimi (rys.) Jeśli oba złącza znajdują się w różnych temperaturach, to na końcach przewodów pojawia się różnica potencjałów.


Różnica ta, dla danej pary metali, zależy tylko od **różnicy temperatur** między złączami.

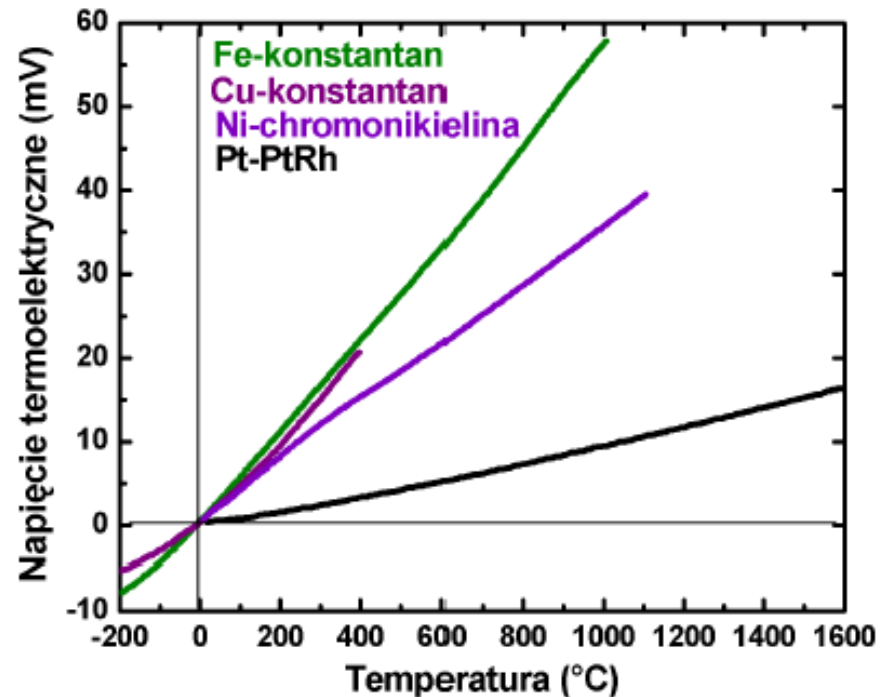
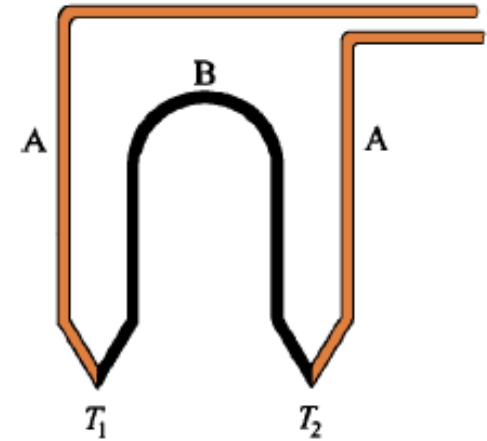
Dla małych $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$U (T_2 - T_1) = \alpha (T_2 - T_1),$$

gdzie α jest współczynnikiem (Seebecka) termoelektrycznym termopary.

Termopary mają bardzo szeroki zakres stosowalności: od 10 K do 1900 K.

 termopara wagi ciężkiej



Promieniowanie termiczne ciał – pirometry

Każde ciało jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego, zwanego **promieniowaniem termicznym**. Widmo tego promieniowania jest ciągłe a jego natężenie i kształt zależy od temperatury ciała. Zjawisko to wykorzystuje się do pomiaru bardzo wysokich temperatur.

Zdolność emisyjna ciała, czyli ilość energii emitowanej przez jednostkę powierzchni ciała w jednostce czasu i w zakresie częstości od ν do $\nu+d\nu$ wyraża się przez:

$$dE(\nu, T) = A(\nu, T) \cdot C(\nu, T) d\nu, \quad (\text{prawo Kirchhoffa})$$

gdzie A oznacza zdolność absorpcyjną ciała, czyli stosunek mocy promieniowania przezeń pochłoniętego do mocy promieniowania nań padającego

$$A(\nu, T) = \frac{P_{\text{absorbowana}}}{P_{\text{padająca}}},$$

która może zależeć od rodzaju ciała, częstości promieniowania i od temperatury, zaś C jest uniwersalną funkcją taką samą dla wszystkich ciał.

Jeśli zachodzi $A(\nu, T) \equiv 1$, czyli ciało całkowicie pochłania każde padające nań promieniowanie, to mamy do czynienia z **ciałem doskonale czarnym**.

Bliższa rzeczywistości jest kategoria ciał, które pochłaniają stałą część padającego promieniowania, niezależnie od jego częstości. Ciała takie, dla których zachodzi $A(\nu, T) = A$ ($0 < A < 1$), to ciała **doskonale szare**.

Poprawną postać funkcji C odkrył Planck:

$$C(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi}{(hc)^2} \frac{(h\nu)^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu, \quad (\text{rozkład Plancka promieniowania ciała doskonale czarnego})$$

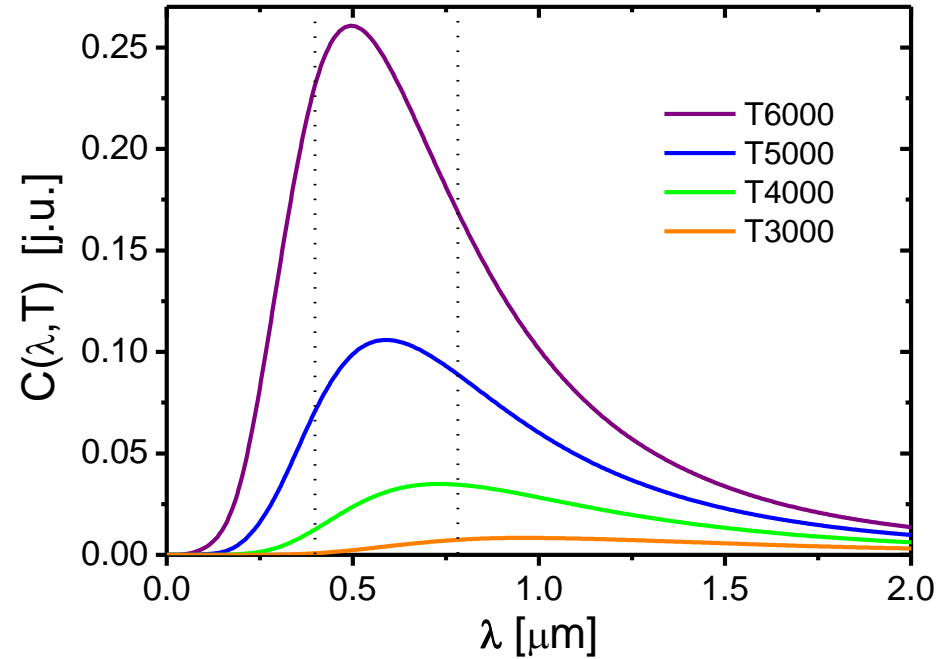
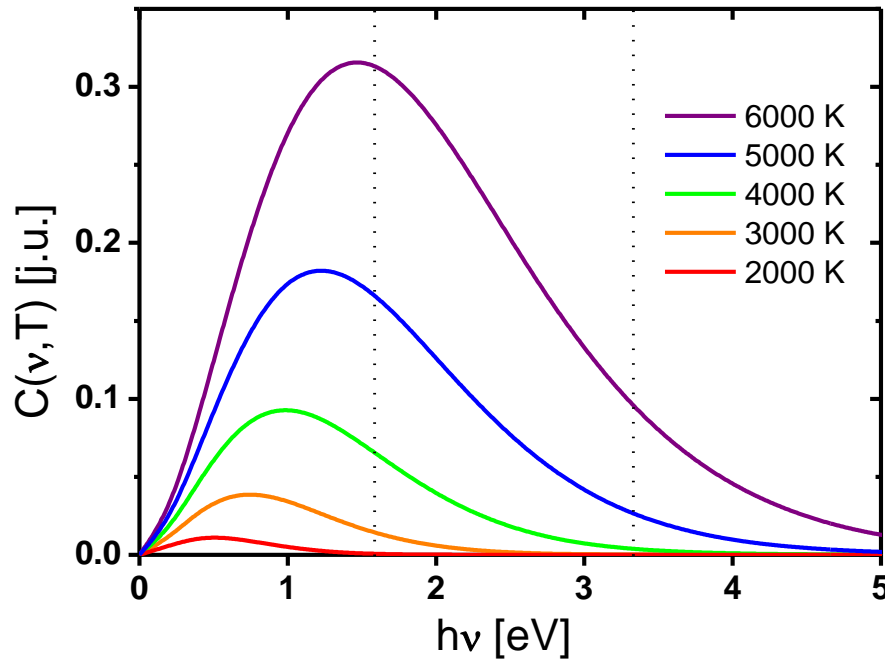
gdzie c jest prędkością światła, T oznacza temperaturę bezwzględną, h jest stałą Plancka, a k stałą Boltzmanna:

$$c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad h = 6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}, \quad k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}.$$

Rozkład Plancka można też wyrazić przez długość fali promieniowania:

$$C(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda, \quad \lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Przykłady widm promieniowania ciała doskonale czarnego:



Kształt widma, pole powierzchni pod nim, a także położenie maksimum zależą od temperatury.

Położenie maksimum rozkładu opisuje **prawo Wien**:

$$\begin{aligned} (h\nu)_{\max} &= 2.8214 kT \\ &= 2.431 \times 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}} T \end{aligned}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m K}}{T}$$

Vantablack is a substance made of carbon nanotubes[1] and is the blackest substance known, absorbing a maximum of 99.965% of radiation in the visible spectrum.[2]

Its name comes from the term **V**ertically **A**ligned **N**ano**T**ube **A**rrays.



It won't show up on the catwalk any time soon, but we may see (or rather, not see) military deployment before long.

<http://www.nbcnews.com/science/science-news/vantablack-u-k-firm-shows-worlds-darkest-material-n155581>

Całkowita energia emitowana przez jednostkę powierzchni ciała w jednostce czasu wynosi:

$$E(T) = \int dE(\nu, T) = \int_0^{\infty} A(\nu, T) \cdot C(\nu, T) d\nu .$$

Dla ciała doskonale szarego można obliczyć tę całkę:

$$E(T) = A \int_0^{\infty} C(\nu, T) d\nu = A \int_0^{\infty} \frac{2\pi}{(hc)^2} \frac{(h\nu)^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu ,$$

$$E(T) = A \sigma T^4 .$$

(prawo Stefana-Boltzmann)

Stała σ nosi nazwę stałej Stefana-Boltzmann:

$$\sigma \equiv \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.6704 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} .$$

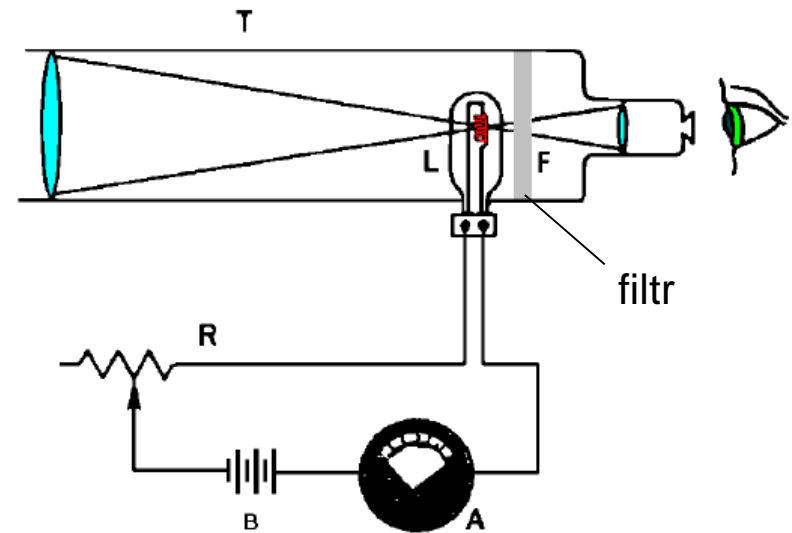
W prostych pirometrach (rys.) porównuje się jasność świecenia badanego przedmiotu ze świeceniem włókna przez który płynie regulowany prąd.

 model pirometru

W urządzeniach zaawansowanych natężenie promieniowania rejestruje się przy użyciu termopary wycechowanej przy pomocy promieniowania ze źródeł wzorcowych.

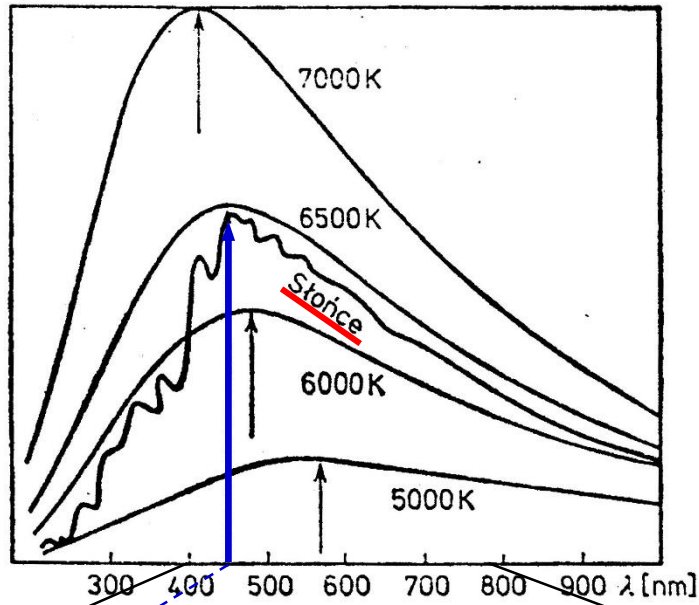
W pirometrach mierzy się promieniowanie o określonej długości fali (stosując filtry), bądź całkowite promieniowanie.

Do pomiaru temperatury odległych obiektów (np. astronomicznych) używa się pirometrów dwu- lub wielobarwnych, które rejestrują natężenie promieniowania o określonych długościach fali. Ze stosunku tych natężeń, zakładając rozkład Plancka, można obliczyć temperaturę.

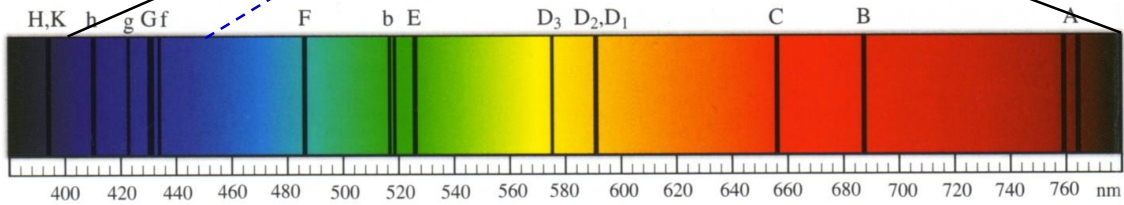


 termometr na podczerwień

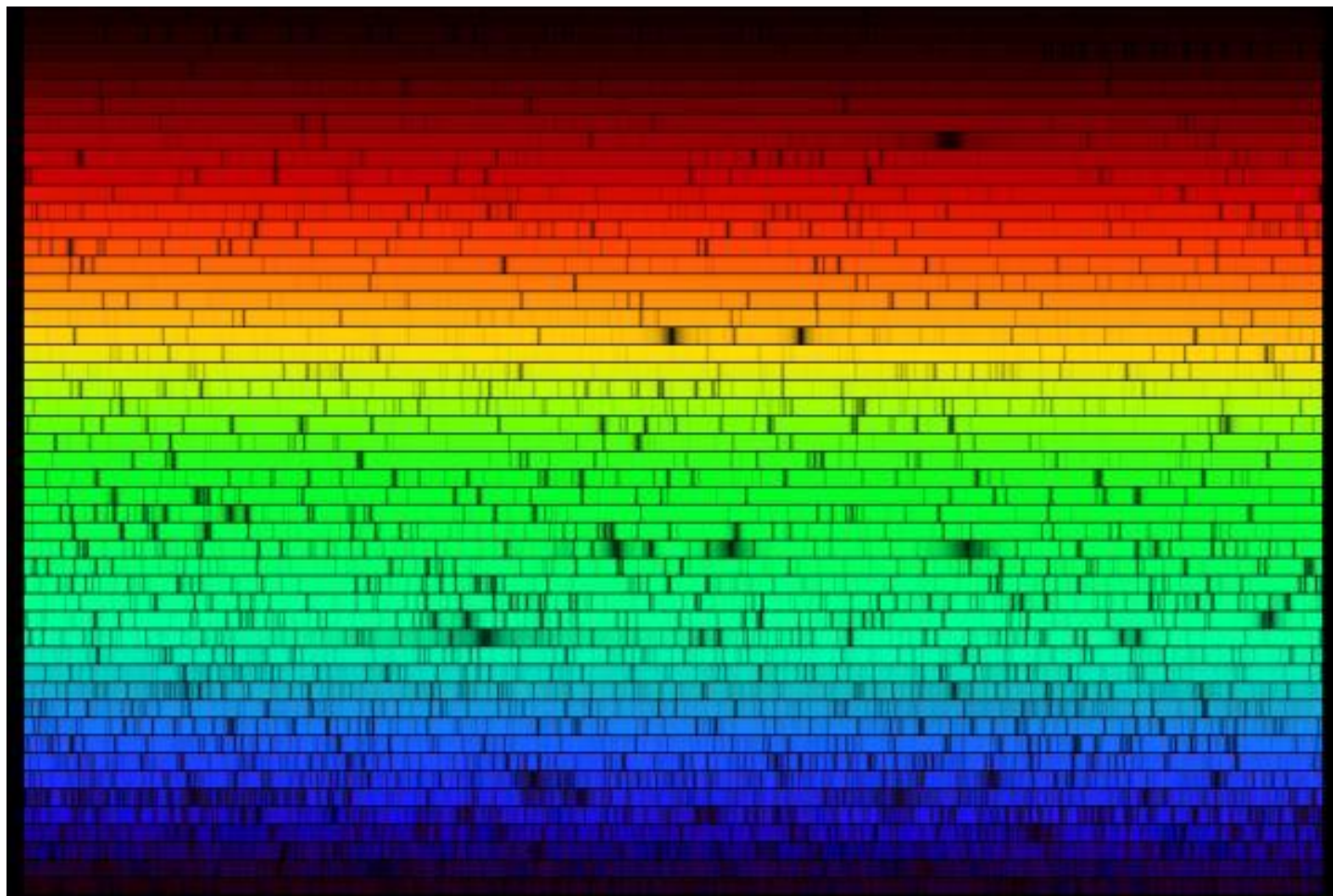
Widmo promieniowania Słońca



Widmo Słońca



Widzialna część widma Słońca

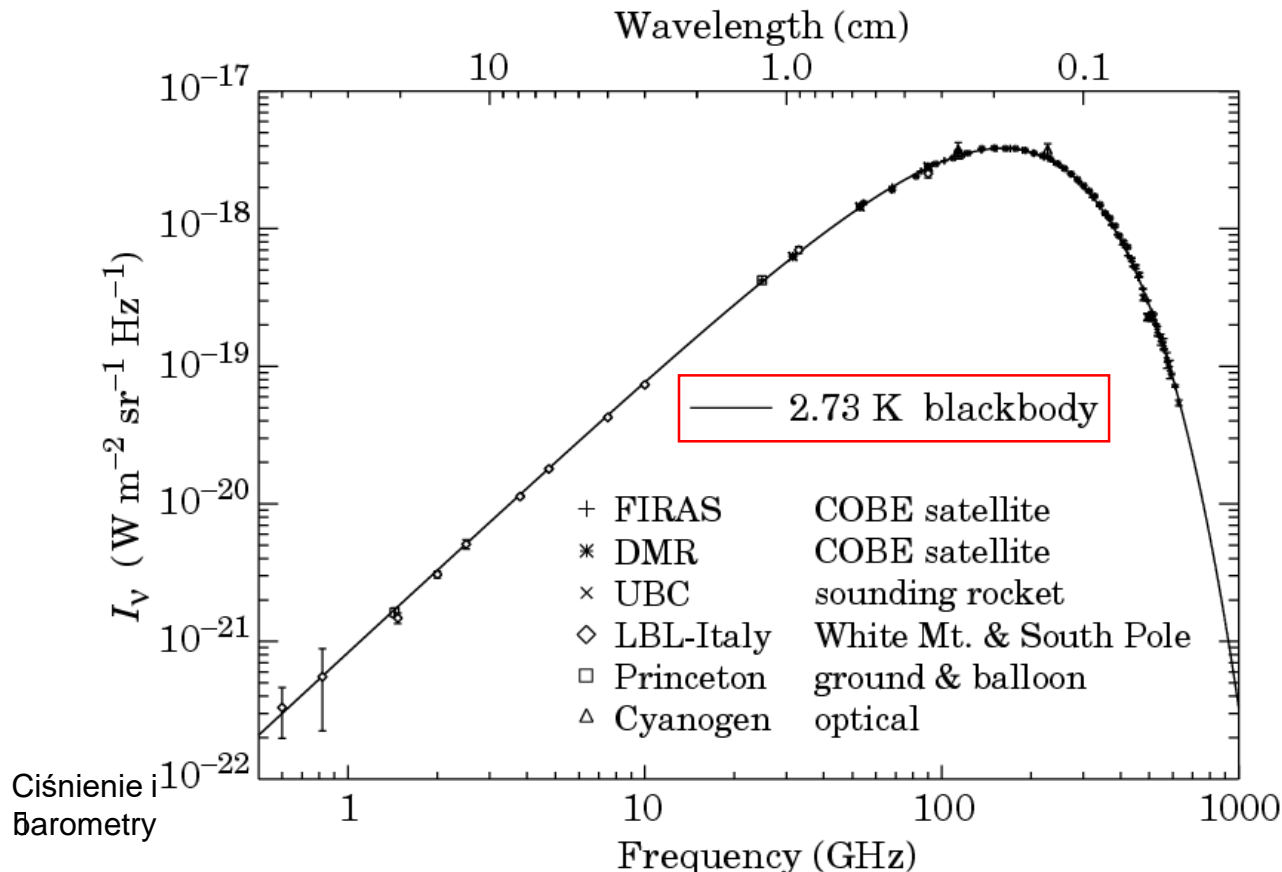


Astronomy Picture of the Day, 23.04.2006

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

Mikrofalowe promieniowanie tła

W 1965 r. A. Penzias i R. Wilson odkryli promieniowanie radiowe dochodzące z kosmosu ze wszystkich kierunków. Jego widmo okazało się doskonale zgodne z rozkładem Plancka. Jest to pozostałość po Wielkim Wybuchu (promieniowanie reliktowe). Odkrycie to miało wielkie znaczenie dla kosmologii (Nobel 1978, 2006).



Międzynarodowa Skala Temperatur 1990 (ITS-90)

Definicje i wzorce przyjęte przez Międzynarodowy Komitet Miar i Wag w 1989 r.

- Jednostką temperatury termodynamicznej jest kelwin (K) zdefiniowany jako $1/273.16$ temperatury punktu potrójnego wody.
- Jednostką w skali Celsjusza jest stopień ($^{\circ}\text{C}$) równy z definicji kelwinowi.
Temperaturę w skali Celsjusza definiuje się jako:

$$t [^{\circ}\text{C}] = T [\text{K}] - 273.15$$

- Skala ITS-90 rozciąga się od 0.65 K do najwyższych temperatur możliwych do zmierzenia z rozkładu promieniowania Plancka.
- W następujących przedziałach określa się metodę pomiaru i interpolacji:

0.65 K – 5 K : zależność ciśnienia pary nasyconej ^3He i ^4He od temp.

3 K – 24.5561 K : gazowy termometr helowy.

13.8033 K – 961.78 $^{\circ}\text{C}$: oporowy termometr platynowy.

Powyżej 961.78 $^{\circ}\text{C}$: prawo promieniowania Plancka

Punkty stałe ITS-90

Ciśnienie pary He

Gazowy termometr
helowy

Oporowy termometr
platynowy

Pirometr monochroma-
tyczny i prawo Plancka

Ciśnienie i
barometry

Number	Temperature		Substance ^a	State ^b
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$		
1	3 to 5	-270.15 to -268.15	He	V
2	13.8033	-259.3467	e-H ₂	T
3	~17	~-256.15	e-H ₂ (or He)	V (or G)
4	~20.3	~-252.85	e-H ₂ (or He)	V (or G)
5	24.5561	-248.5939	Ne	T
6	54.3584	-218.7916	O ₂	T
7	83.8058	-189.3442	Ar	T
8	234.3156	-38.8344	Hg	T
9	273.16	0.01	H ₂ O	T
10	302.9146	29.7646	Ga	M
11	429.7485	156.5985	In	F
12	505.078	231.928	Sn	F
13	692.677	419.527	Zn	F
14	933.473	660.323	Al	F
15	1234.93	961.78	Ag	F
16	1337.33	1064.18	Au	F
17	1357.77	1084.62	Cu	F

Różnica między stopniem Kelwina a stopniem Celsjusza

Według obecnej wiedzy temperatura zamarzania wody:

- $T_0 = (273,1500 \pm 0.0002)\text{K}$
- $T_{100} = (373,1464 \pm 0.0036)\text{K}$

zatem

- $T_{100} - T_0 = (99,9964 \pm 0,0038)\text{K}$

Jedna setna różnicy $(T_{100} - T_0)/100$ wynosi $(0,999964 \pm 0,000038)\text{K}$ a nie 1 K !

Taka rozbieżność jest nieunikniona gdy z czasem wyznaczane są wielkości fizyczne z coraz większą dokładnością

Wybrane temperatury: ciekawostki i ekstrema

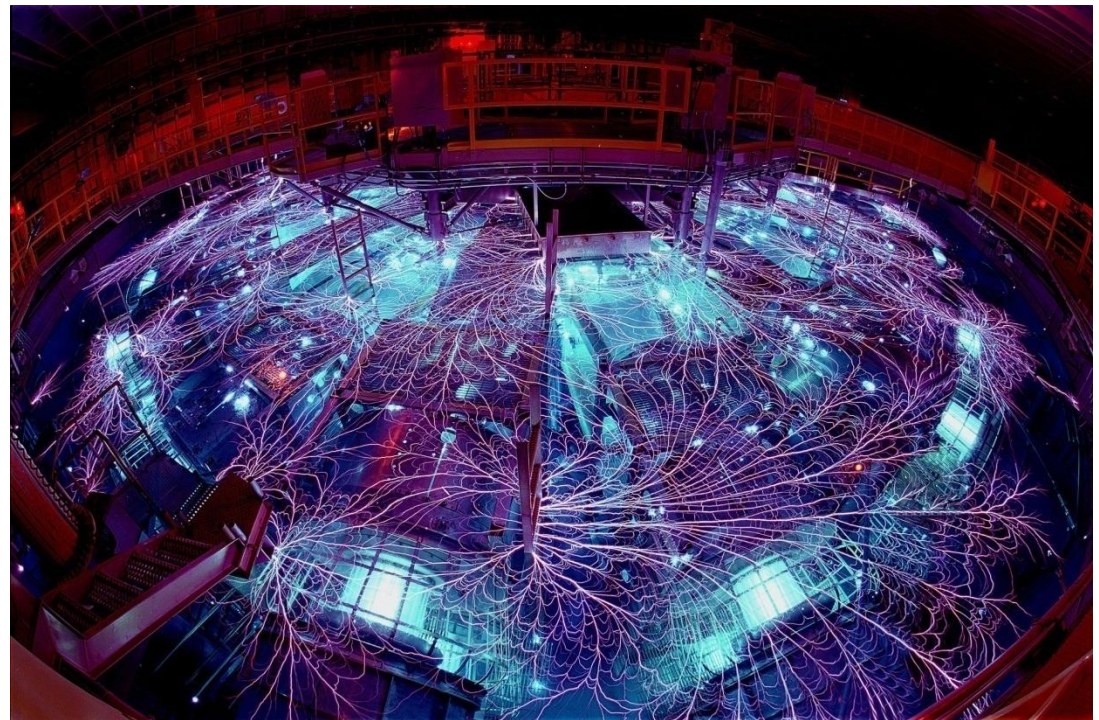
- Najniższa temp. w laboratorium: 5×10^{-10} K – kondensacja Bosego-Einsteina atomów sodu w pułapce magneto-grawitacyjnej (2003).
- Skraplanie azotu: -196 °C (77 K).
- Najniższa temp. na Ziemi: -89.2 °C – Antarktyda, stacja Wostok 21.07.1983.
- Najniższa temp. w Polsce: -40.6 °C – Żywiec, 10.02.1929.
- Chomik w śnie zimowym: 6 °C.
- Średnia roczna temp. w W-wie: 8.1 °C.
- Najwyższa temp. w Polsce: 40.2 °C – Prószków k.Opola, 29.07.1921.
- Zdrowa kaczka: 42.8 °C, Kura 41.0 °C, Kot 39 °C, Koń 38 °C
- Najwyższa temp. na Ziemi: 57.8 °C – Libia, 13.09.1922.
- Wrzenie wody (1 atm) : 99.974 °C.
- Gorąca sauna : 140 °C.

- Mięknienie szkła: $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Palnik Bunsena: $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Włókno żarówki halogenowej: $2900\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Jądro Ziemi: ($5000\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Powierzchnia Słońca: $5530\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- W piorunie: $30\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Wnętrze Słońca: $1.6 \times 10^7\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Wybuch bomby atomowej: $1 \times 10^8\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Najwyższa temp. w laboratorium: $2 \times 10^9\text{ K}$ – Z-machine w Sandia NL, USA.
- Zderzenia jąder ołowiu w CERN : $\approx 10^{12}\text{ K}$ (?)

Osiągalna temperatura a rozwój cywilizacji

- Epoka brązu – 3500 p.n.e. – 1100 K
- Epoka żelaza – 1000 p.n.e. – 1800 K
- Wiek elektryczności – od ok.1880 – 3000 K
- Era atomowa – od ok.1944 – $>10^6$ K
- Epoka fuzji termojądrowej ?
- Epoka kwantowa – od ok.1908 – 4 K

Najwyższa temperatura w laboratorium



Z-machine, Sandia National Lab., Albuquerque, NM, USA

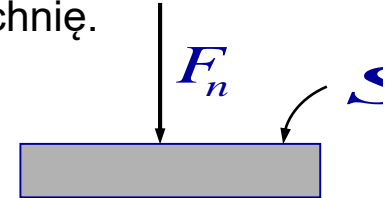
Przez wiązkę drucików przechodzi impuls prądu o natężeniu 20 MA w czasie rzędu 100 ns. Powstała plazma imploduje pod wpływem pola magnetycznego. Pomiar temperatury następuje poprzez rejestrację promieniowania X. W ten sposób osiągnięto 10^8 K.

Ciśnienie

Ciśnienie, to wielkość skalarna charakteryzująca składową normalną siły (prostopadłą do powierzchni) działającej na pewną powierzchnię.

Dla płaskiego elementu o powierzchni S :

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



Jednostką ciśnienia w układzie SI jest **paskal** : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

Inne używane jednostki :

Nazwa	Skrót	Pa	Uwagi
Bar	bar	10^5	
Atmosfera fizyczna	atm	101325	760 mm Hg
Atmosfera techniczna	at	98066.5	10 m wody
Mm słupa rtęci (tor)	mm Hg, Tr	133.322	

Tzw. **warunki normalne**, to $p = 101325 \text{ Pa}$ i $T = 273.15 \text{ K}$ (0°C)

Wybrane ciśnienia [Pa] : ciekawostki i ekstrema

- Przestrzeń międzyplanetarna: (10^{-14}).
- Najniższa próżnia w laboratorium: $1.3 \cdot 10^{-11}$.
- Tzw. bardzo wysoka próżnia (UHV): 10^{-10} .
- Atmosfera 1000 km nad Ziemią: (10^{-8}).
- Ciśnienie światła słonecznego: $4.6 \cdot 10^{-6}$.
- -----
- Para w kotłach parowozu: $2 \cdot 10^6$.
- Pod obcasem damskich „szpilek”: $2.5 \cdot 10^6$.
- Instalacja hamulcowa samochodu: do 10^7 .
- Igła w maszynie do szycia: $5 \cdot 10^8$.
- Jądro Ziemi: $3.7 \cdot 10^{11}$.
- Najwyższe ciśnienie w laboratorium (statyczne): $5.6 \cdot 10^{11}$.
- Najwyższe ciśnienie w laboratorium (chwilowe): $8.3 \cdot 10^{12}$.
- Jądro Słońca: $2 \cdot 10^{16}$.
- Wnętrze gwiazdy neutronowej: 10^{33} .

Skala gęstości w g/cm³

Wielki Wybuch (początek)	∞
Czarna dziura	10^{27}
Gwiazda neutronowa	10^{14}
Biały Karzeł	10^6
Centrum Słońca	158
Słońce (średnia)	1.4
Woda w warunkach nrom.	1
Powietrze w warunkach norm.	10^{-3}
Próżnia w laboratorium	10^{-18}
Przestrzeń kosmiczna	10^{-24}

4.5 Pumps

760 Torr – 10^{-3} Torr:

rotary, dry, sorption, membrane

HV: 10^{-2} – 10^{-6} Torr:

turbomolecular, diffusion, cryo

UHV: 10^{-6} – 10^{-12} Torr:

ion, turbomolecular, diffusion, cryo_

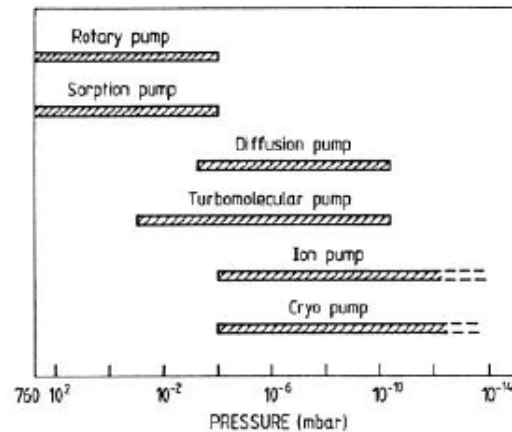


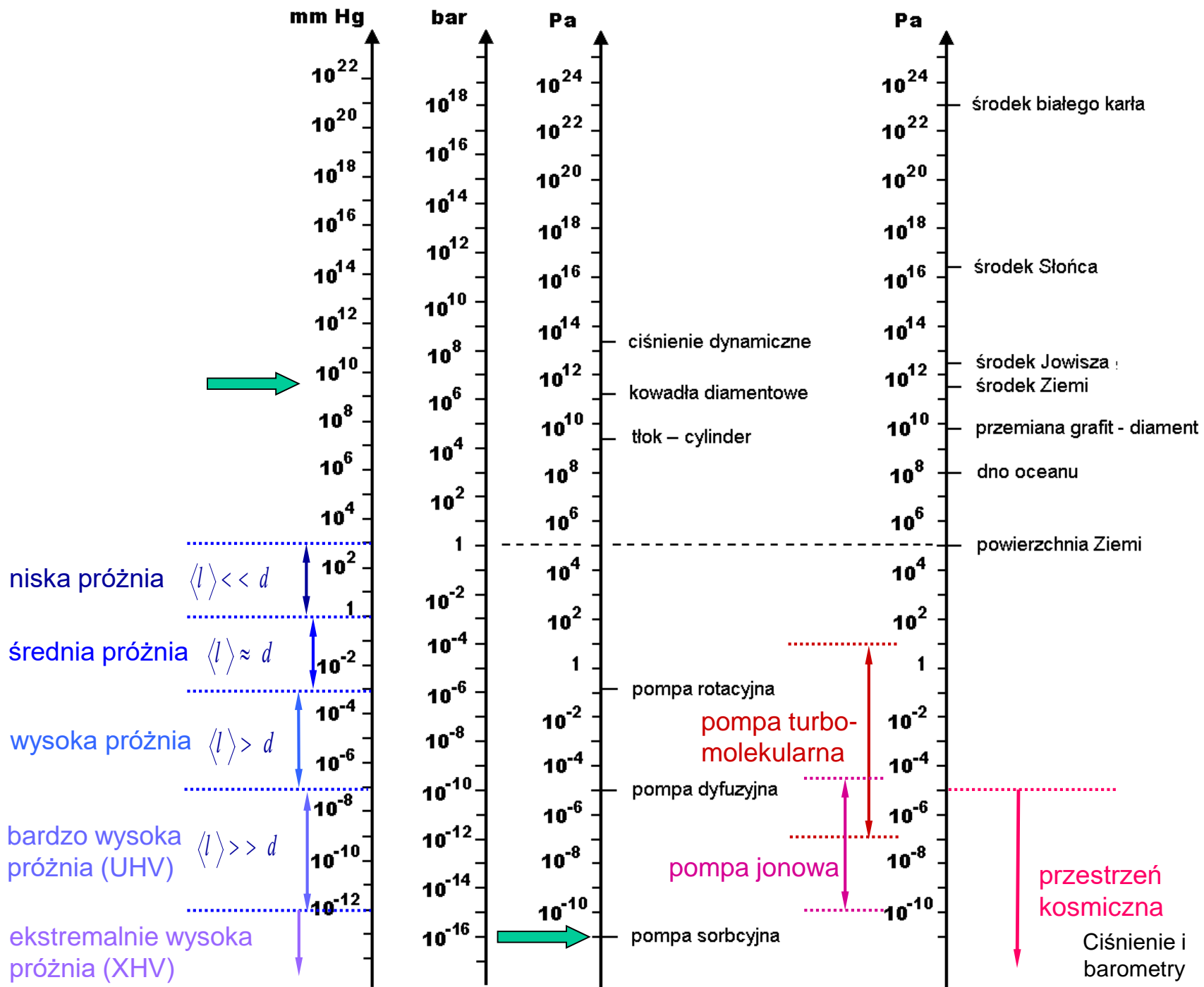
Fig.1.2. Pressure ranges in which different types of pumps can be employed

- **Positive displacement pumps:** expansion of a cavity, allow gases to flow in from the chamber, seal off the cavity, and exhaust it to the atmosphere
- **Momentum transfer pumps:** high speed jets of dense fluid or high speed rotating blades to knock gaseous molecules out of the chamber
- **Entrapment pumps** capture gases in a solid or absorbed state (cryo, getter, ion pumps)

Lecture 4

18

http://www.physics.uwo.ca/~lgonchar/courses/p9826/Lecture4_UHV.pdf



Ciśnienie i barometry

Pompa rotacyjna

<https://www.youtube.com/watch?v=AFHogF-9eGA>

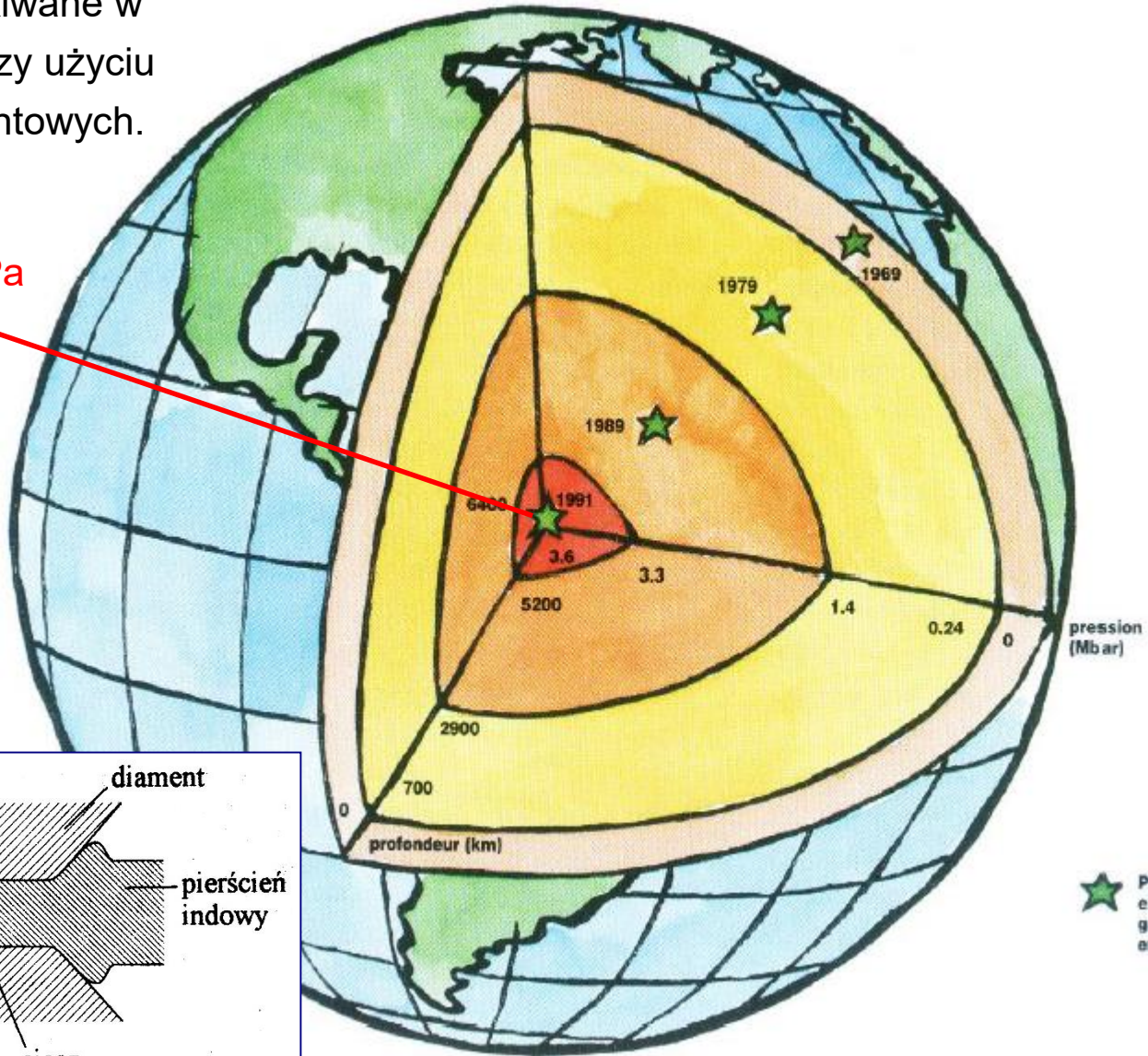
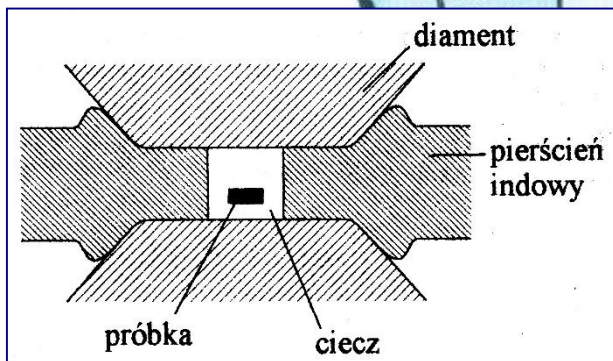
Pompa tubomolekularna

<https://www.youtube.com/watch?v=8gNDDItrIBc>

Ciśnienia uzyskiwane w laboratorium przy użyciu kowadeł diamentowych.

Wnętrze Ziemi 360 GPa

Kowadła diamentowe działają aż do około 700 GPa



★ Pressions atteintes en laboratoire grâce aux enclumes en diamant.

Prawo Pascala

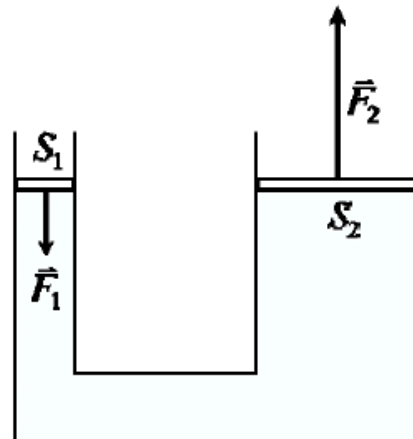
Rozważamy **płyn** (ciecz, gaz) w spoczynku, nie znajdujący się w polu sił zewnętrznych. Siła działająca na dowolny element powierzchni dS , stykający się z płynem, lub w nim zanurzony wynosi:

$$d\vec{F} = p \vec{n} dS ,$$

gdzie \vec{n} jest wektorem jednostkowym, normalnym do elementu dS .

Ciśnienie p nie zależy ani od położenia, ani od orientacji powierzchni dS .

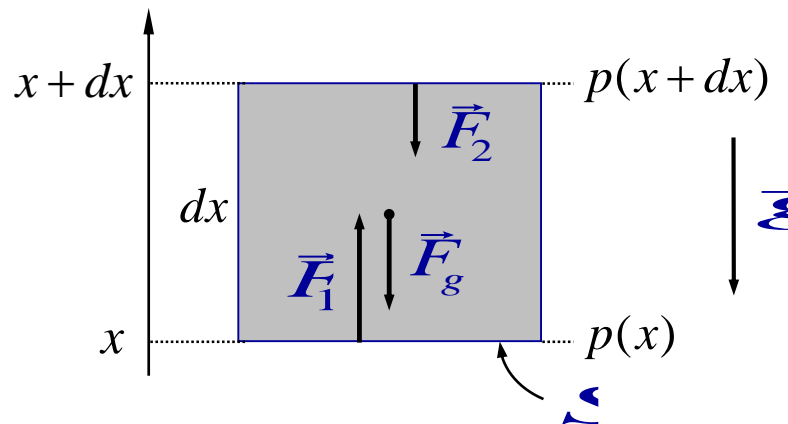
✶ prawo Pascala: wybijanie korka, kolba z dziurkami, model prasy, „sonda” .



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

Płyn w polu grawitacyjnym

Rozważamy słup płynu w polu grawitacyjnym będący w równowadze (hydrostatycznej). Wybieramy mały element tego płynu. Warunkiem równowagi jest równoważenie się działających nań sił.



Siły działające w kierunku wektora \vec{g} :

$$|\vec{F}_g| = dm g = \rho g dx S ,$$

$$|\vec{F}_1| = p(x) S ,$$

$$|\vec{F}_2| = p(x + dx) S .$$

Warunek równowagi:

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| + |\vec{F}_g| \implies p(x) S = p(x + dx) S + \rho g dx S ,$$

$$p(x + dx) - p(x) = -\rho g dx ,$$

$$\frac{p(x + dx) - p(x)}{dx} = -\rho g ,$$



$$\boxed{\frac{dp(x)}{dx} = -\rho(x) g(x) .}$$

Równanie równowagi hydrostatycznej

Rozwiążemy to równanie dla przypadku nieściśliwej cieczy w jednorodnym polu grawitacyjnym (np. woda w pobliżu ziemi).

Mamy wówczas: $\rho(x) = \text{const.}$ (nieściśliwość),
 $g(x) = \text{const.}$ (jednorodność),

$$\frac{dp(x)}{dx} = -\rho g, \quad \Longrightarrow \quad p(x) = p_0 - \rho g x, \quad p(x=0) = p_0.$$

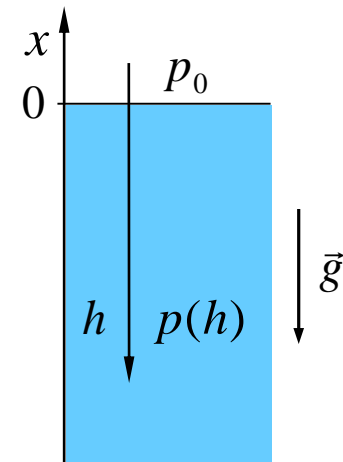
Jeśli głębokość (h) w cieczy będziemy liczyć od powierzchni ($x = 0$) w kierunku zgodnym z siłą ciężkości, to:

$$p(h) = p_0 + \rho g h.$$

Ciśnienie hydrostatyczne rośnie liniowo z głębokością.

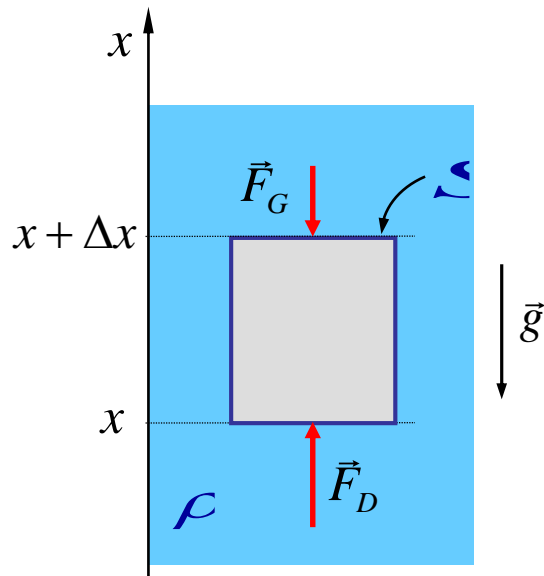
☀ zmiana ciśnienie hydrostatycznego z głębokością

☀ zgniatanie puszek



Pływanie ciał, prawo Archimedesesa

Rozważmy małą sześcienną kostkę zanurzoną w płynie, w którym występuje gradient ciśnienia.



Siła działająca na dolne denko:

$$F_D = p(x) \cdot S$$

Siła działająca na górne denko:

$$F_G = p(x + \Delta x) \cdot S$$

W przypadku ciśnienia hydrostatycznego mamy:

$$p(x + \Delta x) = p(x) - \rho g \Delta x$$

Siła F_D jest większa! Wypadkowa siła działająca do góry:

$$F_W = F_D - F_G = \rho g \Delta x \cdot S = \rho g V$$

Ale ρV jest masą płynu wypartego przez kostkę, a $\rho V g$ jego ciężarem.

Siła wyporu jest zatem równa ciężarowi wypartego płynu (**prawo Archimedesesa**).

Źródłem siły wyporu jest **gradient ciśnienia**

 termometr Galileusza

 nurek Kartezjusza

 balon z worka na śmieci