

Podstawy Fizyki IV

Radosław Przeniosło

Temperatura empiryczna (ciąg dalszy)

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 częstotliwości 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 $A(\nu, T) = 1$, czyli ciało całkowicie pochłania każde padające nań promieniowanie, to mamy do czynienia z **ciałem doskonałym czarnym**.

Blizsza rzeczywistości jest kategoria ciał, które pochłaniają stałą część padającego promieniowania, niezależnie od jego częstotliwości. Ciała takie, dla których zachodzi

$$A(\nu, T) = A \quad (0 < A < 1), \quad \text{to ciała doskonałe szare.}$$

Poprawną postać funkcji C odkrył Planck:

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

gdzie c jest prędkością światła, T oznacza temperaturę bezwzględną,

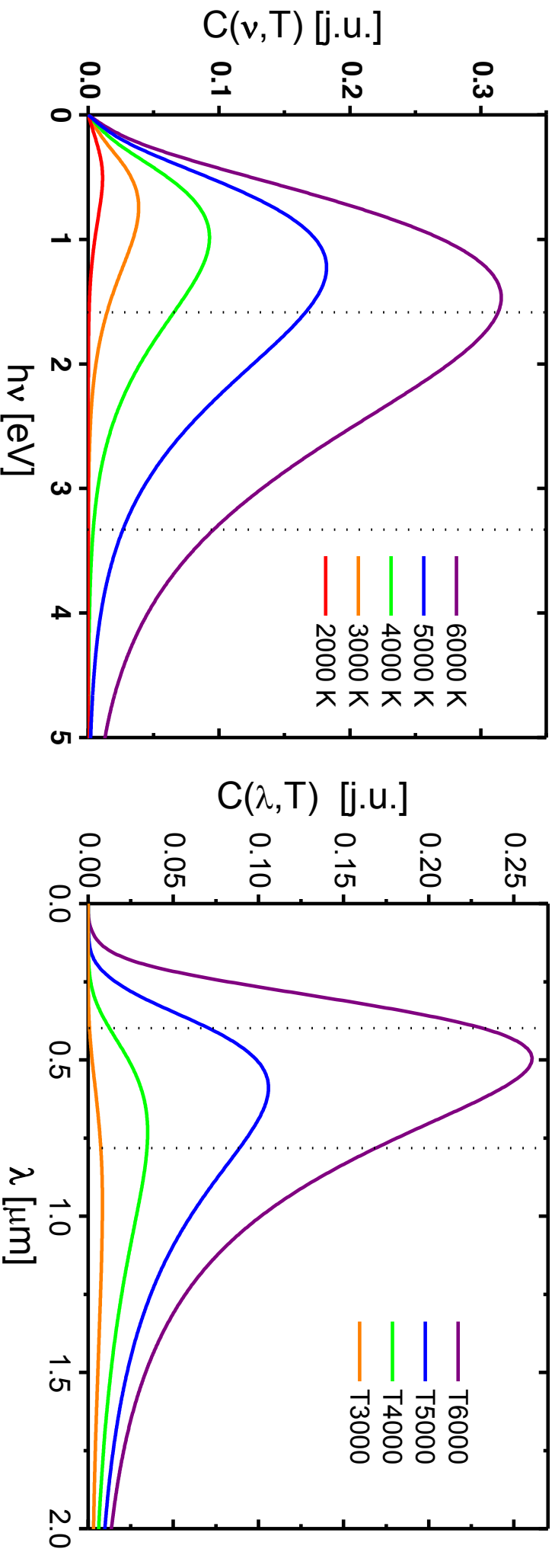
h jest stałą Plancka, a k stałą Boltzmannna:

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

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**:

$$(h\nu)_{\max} = 2.8214kT$$

$$= 2.431 \times 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}} T$$

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

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:

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

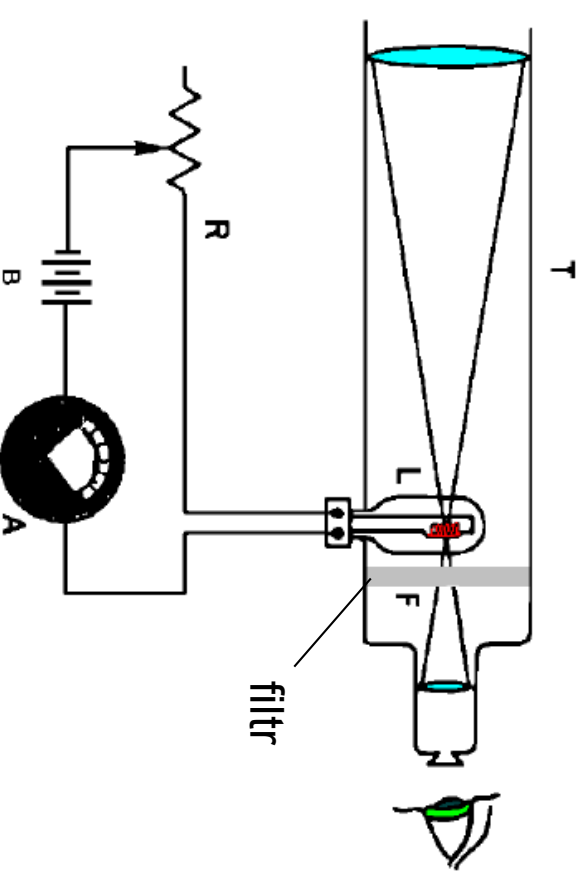
W prostych pirometrach (rys.) porównuje się jasność świecenia badanego przedmiotu ze świeceniem włókna przez który płynie regulowany prąd.

 model pirometru

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

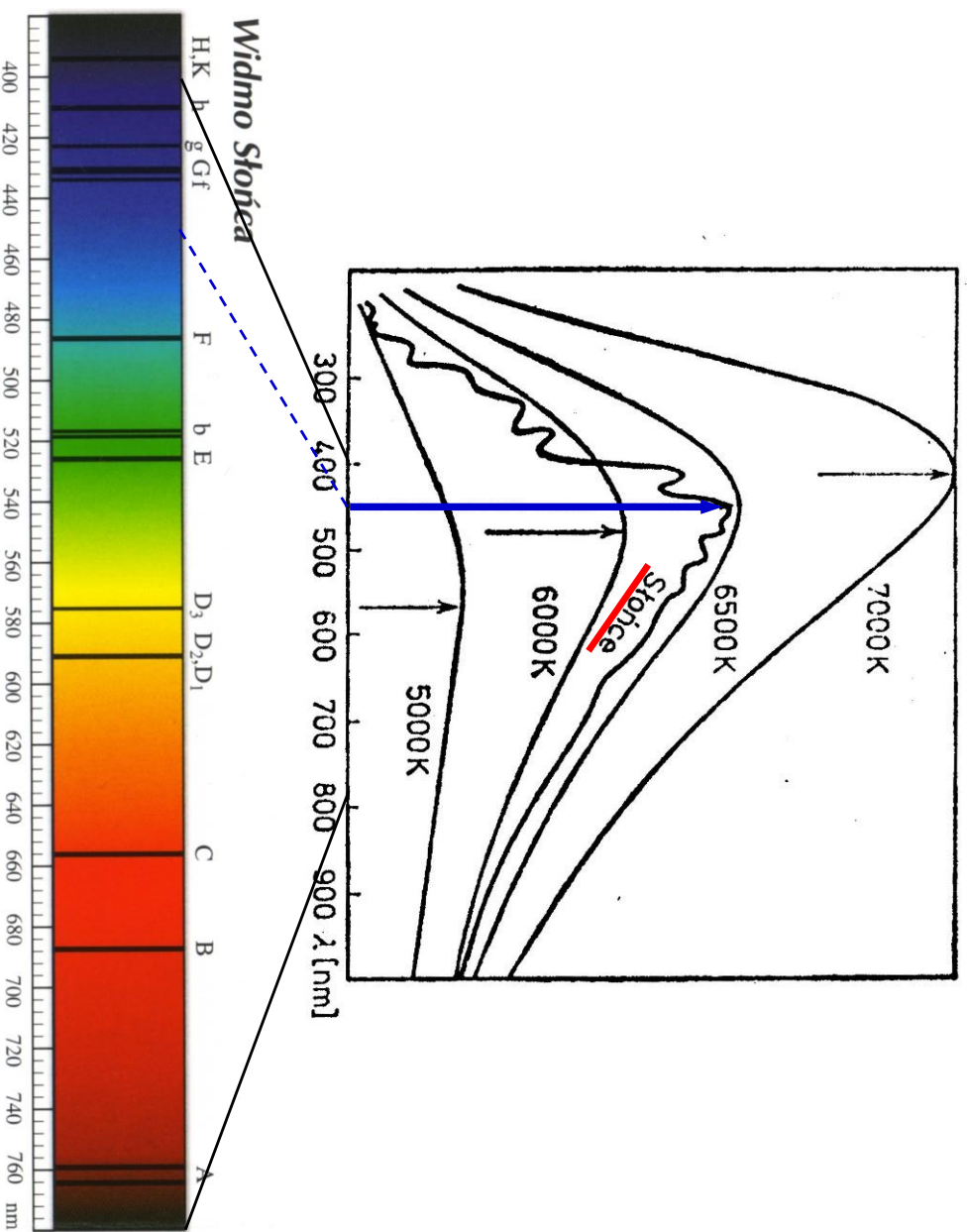
W pirometrach mierzy się promieniowanie o określonej długości fali (stosując filtry), bądź całkowite promieniowanie.

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.

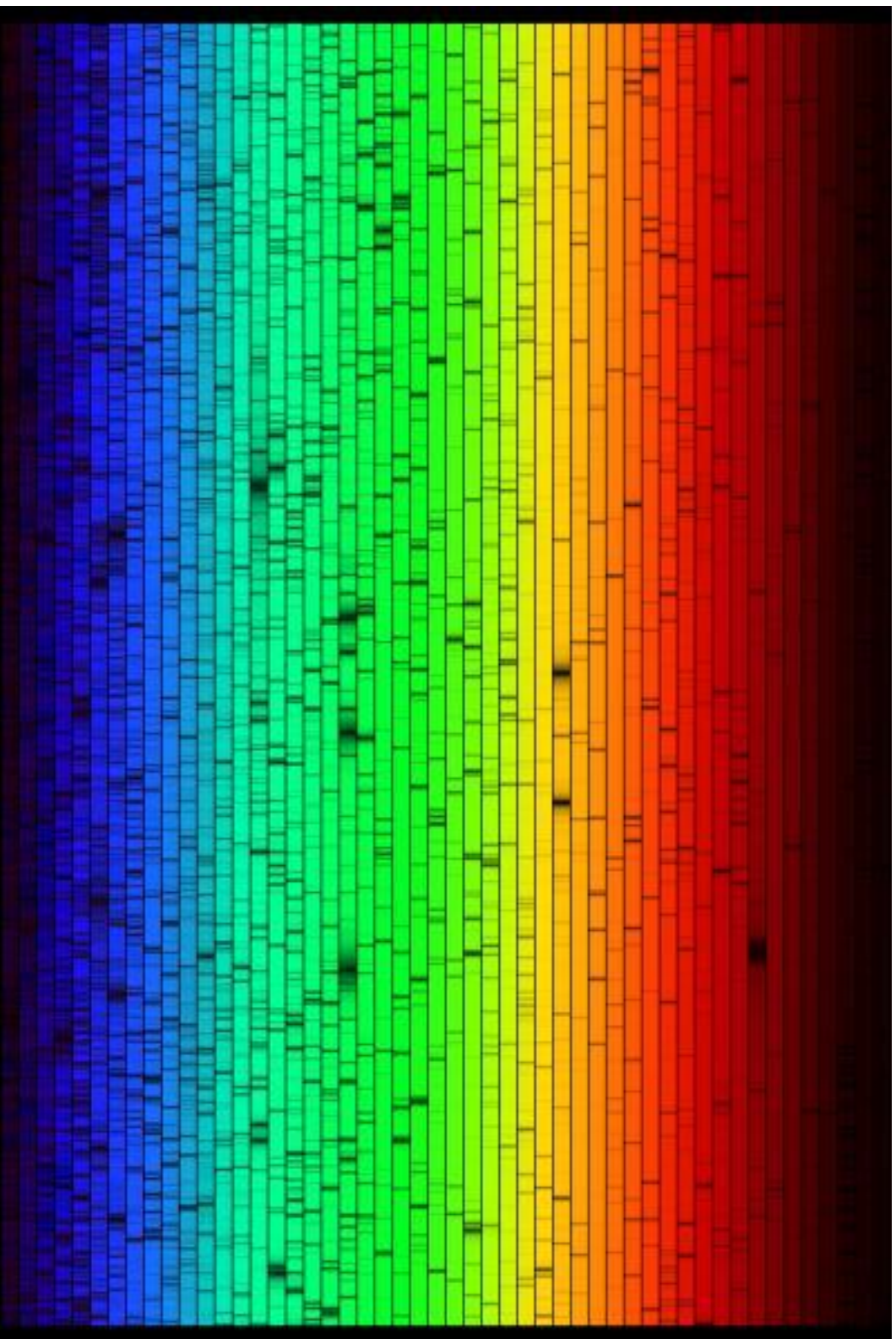


 termometr na podczerwień

Widmo promieniowania Słońca



Widzialna część widma Słońca

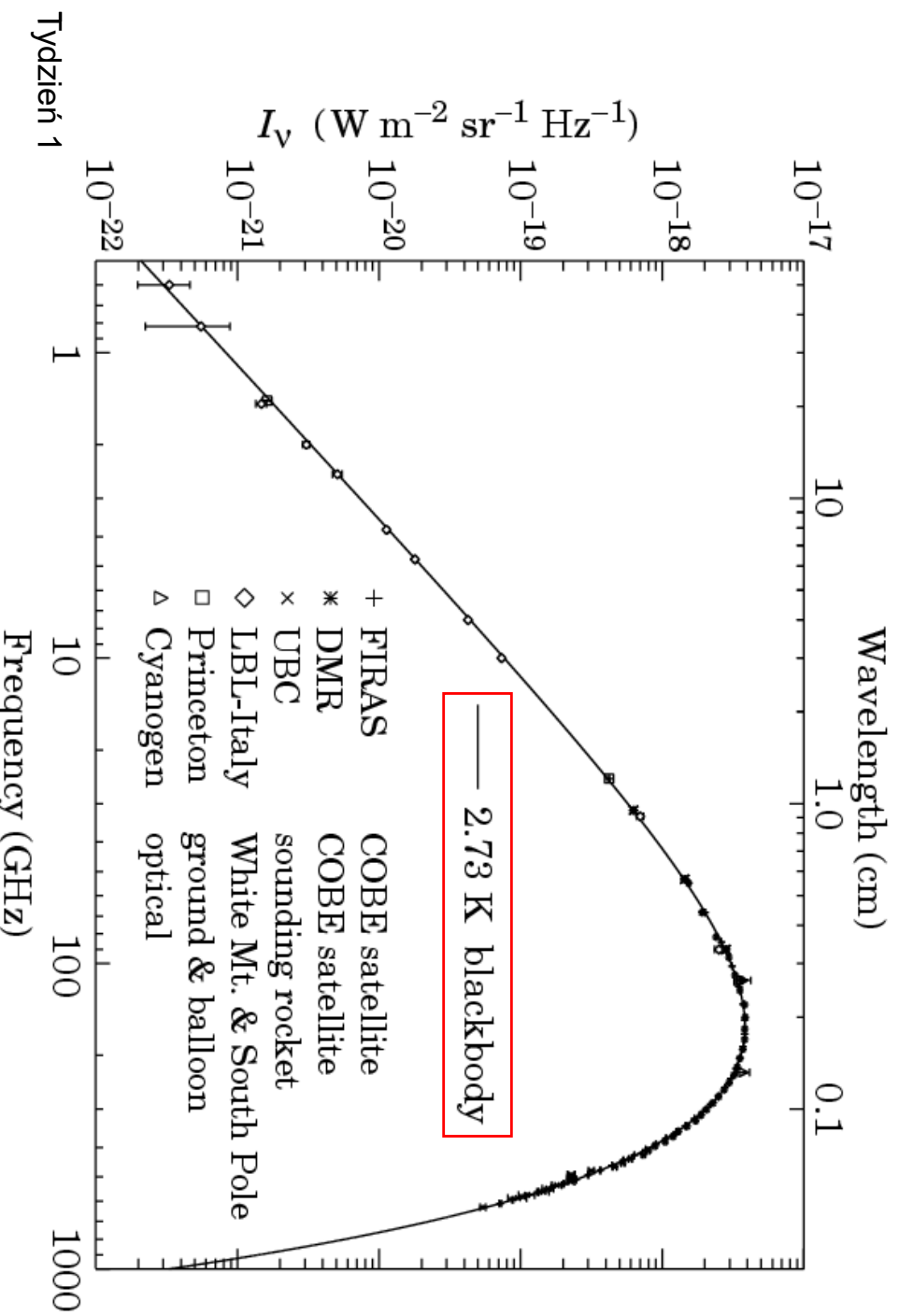


Astronomy Picture of the Day, 23.04.2006

<http://antwrrp.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

		Temperature			
Number	T_{90}/K	$t_{90}/\text{°C}$	Substance ^a	State ^b	
1	3 to 5	-270.15 to -268.15	He	V	Ciśnienie pary He
2	13.8033	-259.3467	e-H ₂	T	Gazowy termometr helowy
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	Oporowy termometr platynowy
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	Pirometr monochromatyczny i prawo Plancka
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 zamrażania 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: $5 \times 10^{-10} \text{ K}$ – kondensacja Bosego-Einsteina atomów sodu w pułapce magneto-grawitacyjnej (2003).
- Skraplanie azotu: $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ (77 K).
- Najniższa temp. na Ziemi: $-89.2 \text{ }^\circ\text{C}$ – Antarktyda, stacja Wostok 21.07.1983.
- Najniższa temp. w Polsce: $-40.6 \text{ }^\circ\text{C}$ – Żywiec, 10.02.1929.
- Chomik w śnie zimowym: $6 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Średnia roczna temp. w W-wie: $8.1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Najwyższa temp. w Polsce: $40.2 \text{ }^\circ\text{C}$ – Prószków k. Opola, 29.07.1921.
- Zdrowa kaczką: $42.8 \text{ }^\circ\text{C}$, Kura $41.0 \text{ }^\circ\text{C}$, Kot $39 \text{ }^\circ\text{C}$, Koń $38 \text{ }^\circ\text{C}$
- Najwyższa temp. na Ziemi: $57.8 \text{ }^\circ\text{C}$ – Libia, 13.09.1922.
- Wrzenie wody (1 atm) : $99.974 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Gorąca sauna : $140 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

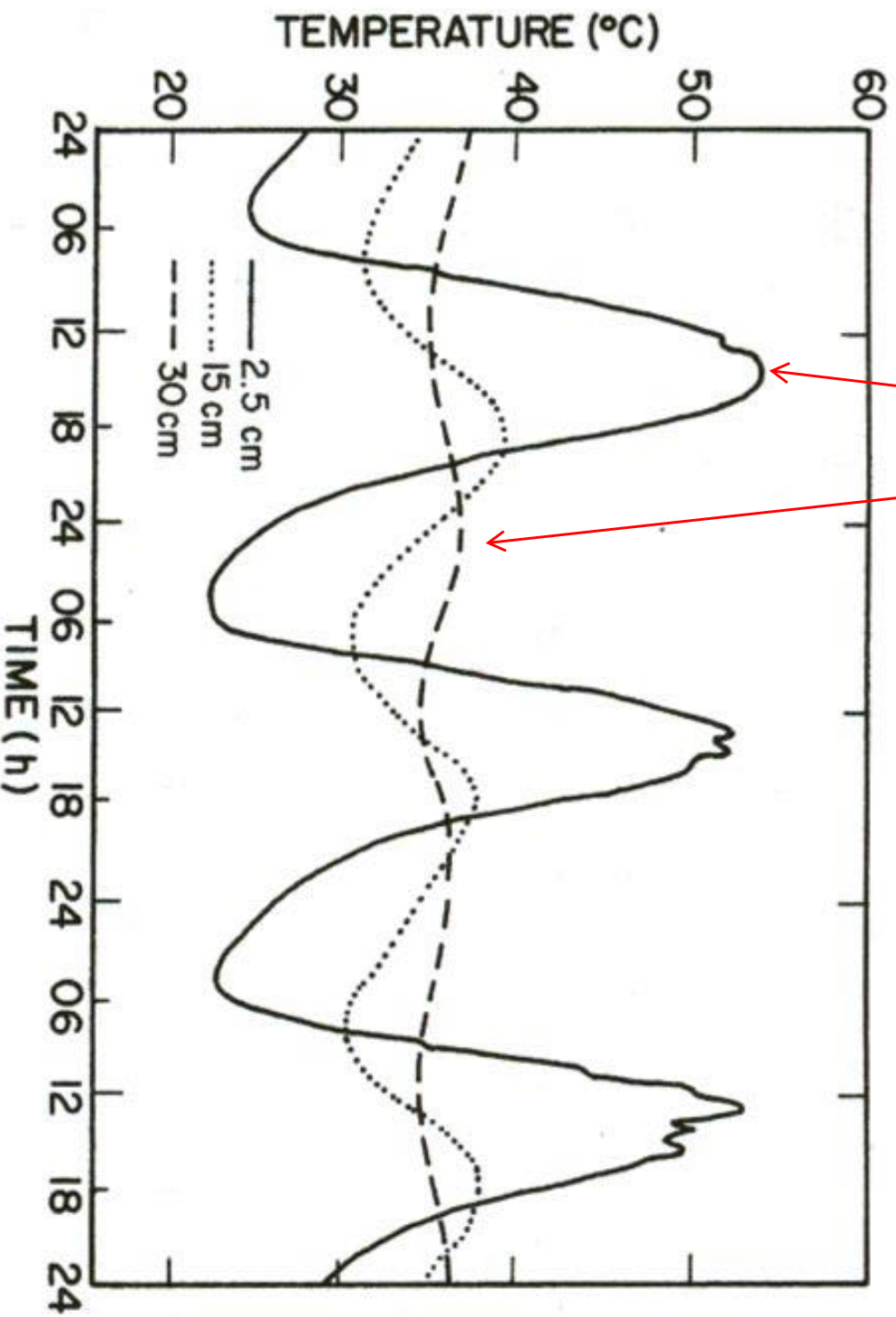
W 1775 r. w Londynie, sekretarz Royal Society z kilkoma przyjaciółmi wytrzymał przez 45 min. w pokoju, w którym temperatura powietrza wynosiła 127 °C. Surowy stek, który wzięli ze sobą, upiekł się w tym czasie na „well done”.

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

Temperatura w gruncie (dla ogrodników)

Na „dużej” głębokości (30cm) wahania są przesunięte o pół okresu (12h) względem temperatury na powierzchni



<http://cliffmass.blogspot.com/2012/05/soil-temperatures-and-gardening.html>

Temperatura w gruncie (dla budowniczych)

Na głębokości 2.5m wahania roczne są przesunięte o ćwierć okresu (12 tygodni) względem temperatury głębokości 1m

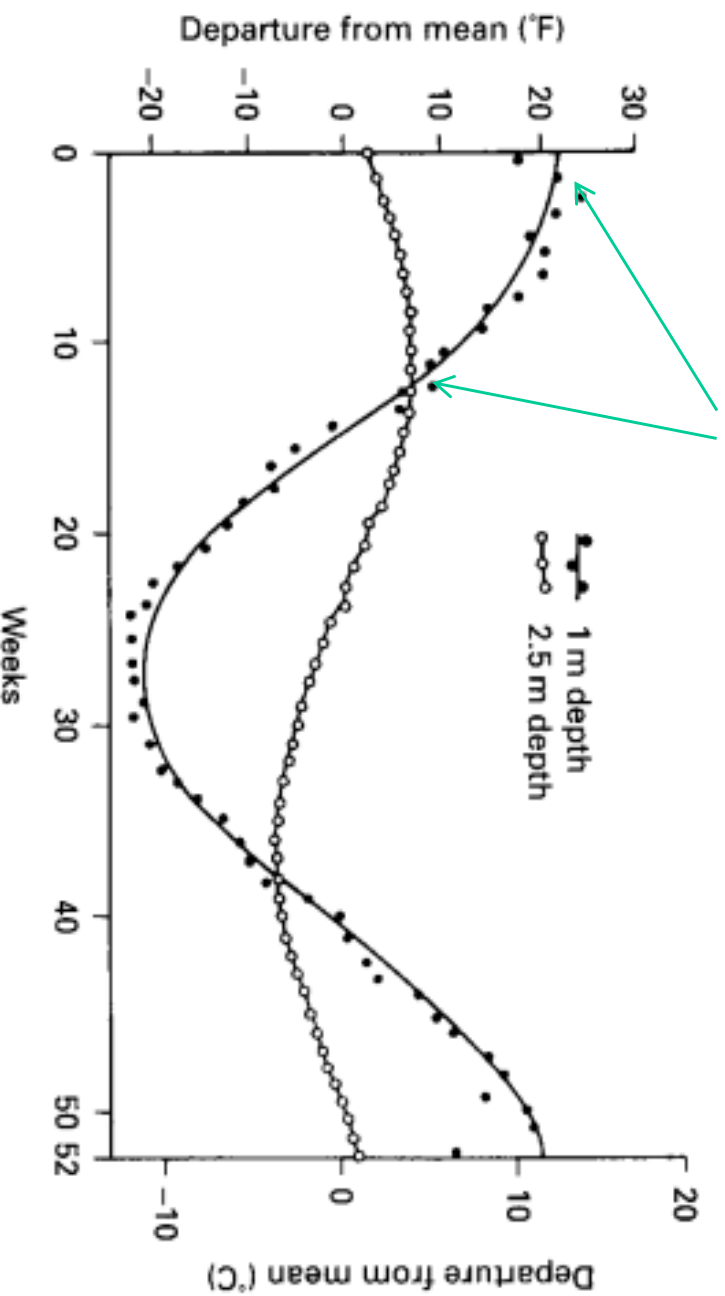


Figure 3.1 The annual temperature wave at soil depths of 1 and 2.5 m measured at Griffith, Australia with fitted sine curves. Temperature departures from the mean value are plotted as a function of weeks of the year. (From Rose, 1966.)

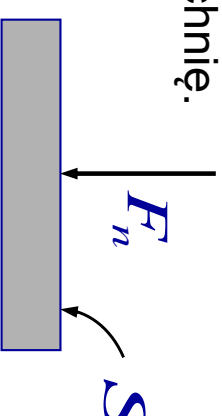
Contemporary Climatology by Peter Robinson and Ann Henderson-Sellers (1999)

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 Pa = 1 N/m²

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 norm.	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_

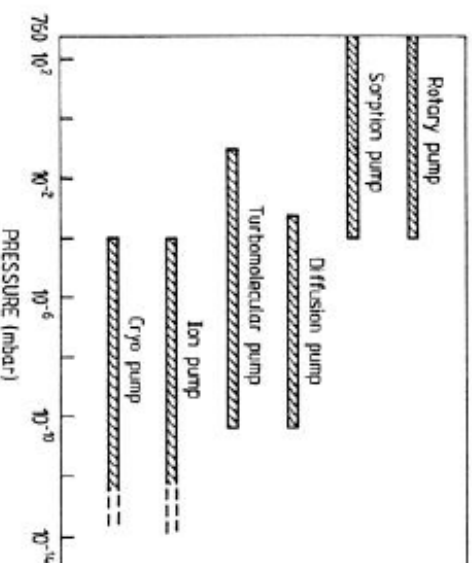


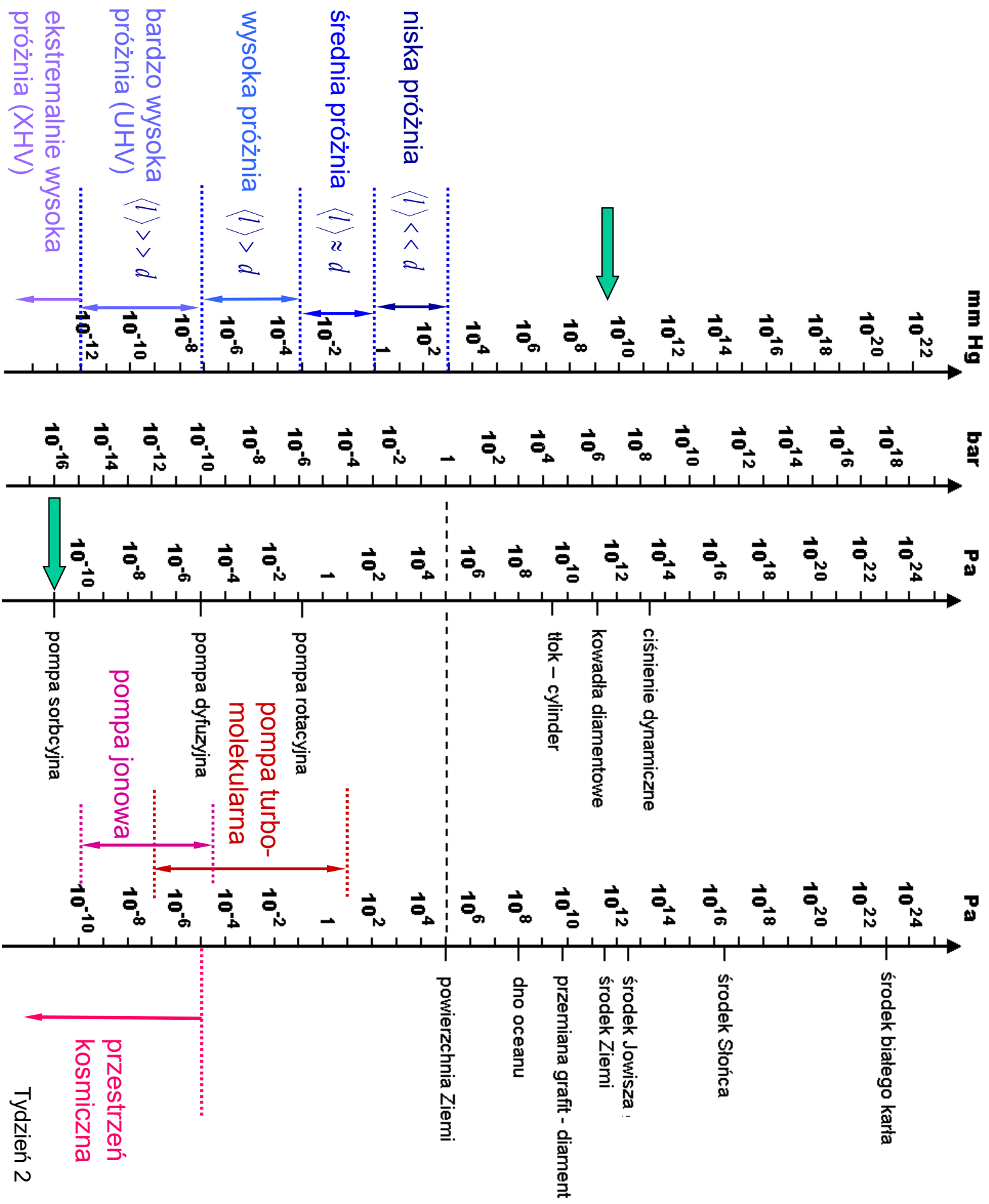
Fig.1.2. Pressure ranges in which different types of pumps can be employed

- **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



Pompa rotacyjna

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

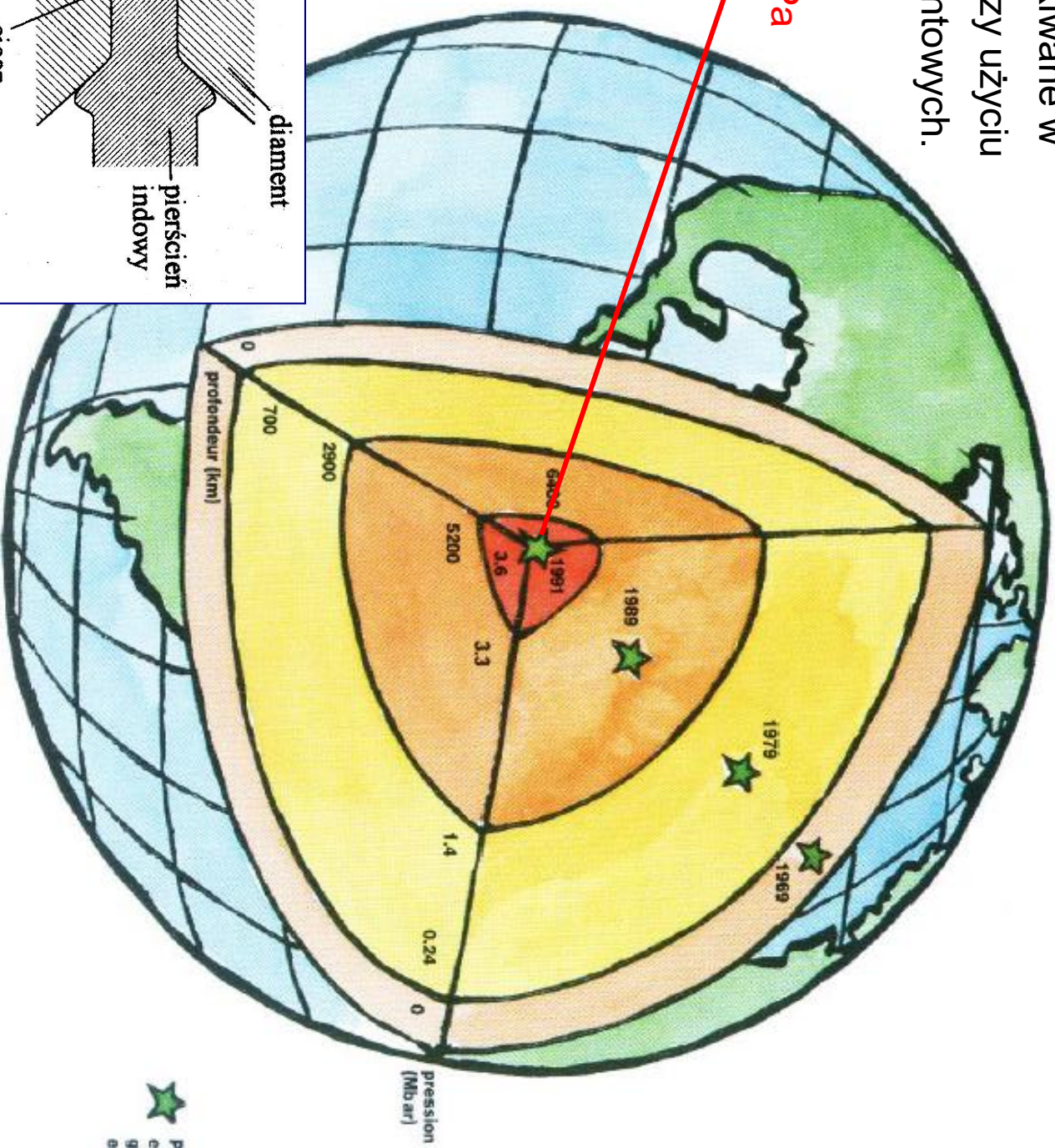
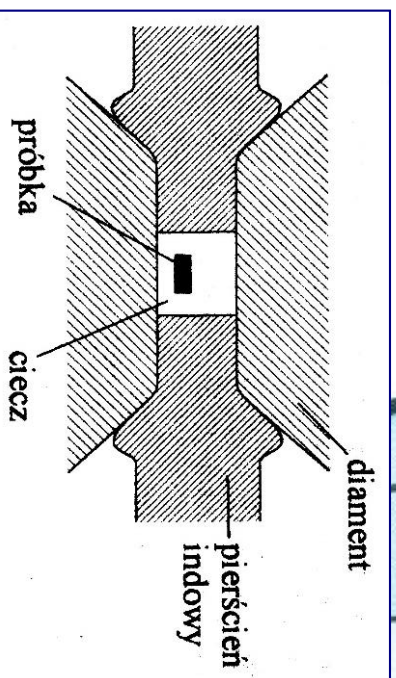
Pompa tubomolekularna

<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

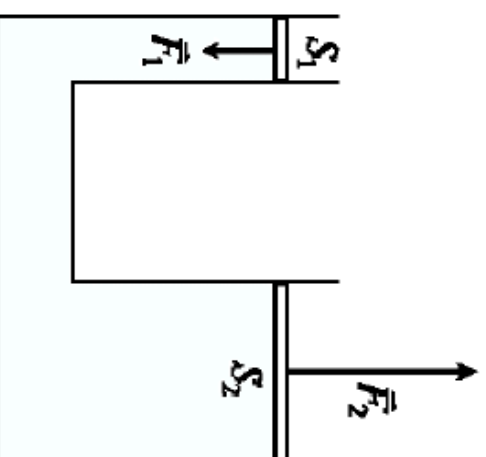
Rozważamy **płyn** (ciecz, gaz) w spoczynku, nie znajdujący się w polu sił zewnętrznych. Siła działająca na dowolny element powierzchni dS , stykający się z płynem, lub w nim zanurzony wynosi:

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

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

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

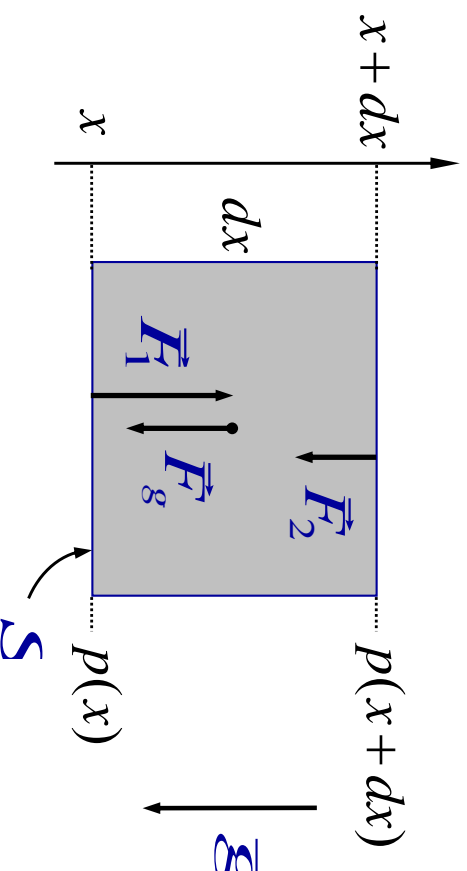
🌟 prawo Pascala: wybijanie korka, kolba z dziurkami, model prasy, „sonda” .



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

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:

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

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

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

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

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),

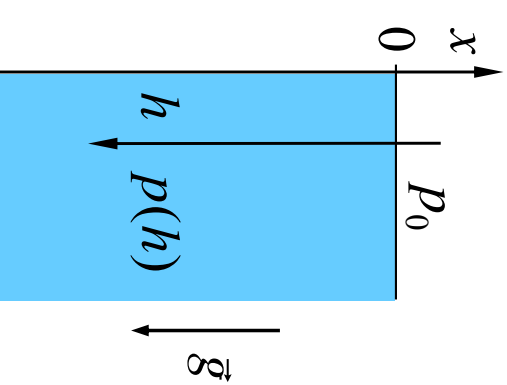
$$\frac{dp(x)}{dx} = -\rho g, \quad \iff \quad p(x) = p_0 - \rho g x, \quad p(x=0) = p_0.$$

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

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

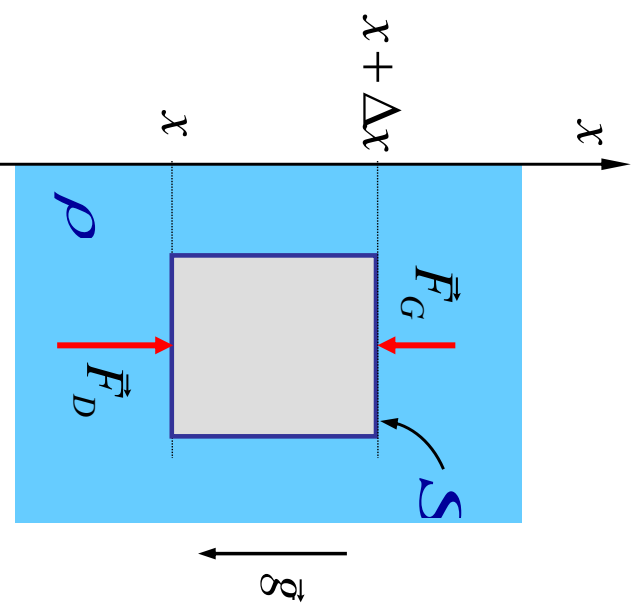
Ciśnienie hydrostatyczne rośnie liniowo z głębokością.

- 🔴 zmiana ciśnienie hydrostatycznego z głębokością
- 🔴 zgniatanie puszki



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

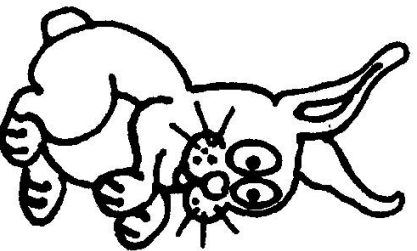
Parametry termodynamiczne

Parametry intensywne

lokalne,

nie zależą od rozmiarów układu

- ciśnienie p
- temperatura T
- potencjał chemiczny μ
- gęstość ρ
- pole elektryczne E
- pole magnetyczne H



Parametry ekstensywne

globalne,

proporcjonalne do rozmiarów układu

- objętość V
- entropia S
- liczba moli n
- energia wewnętrzna U
- polaryzacja elektryczna P
- namagnesowanie M

