



Nowy Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, SI

Anna Szmyrka-Grzebyk, Aleksandra Kowal

*Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych
im. Wł. Trzebiatowskiego PAN*

26. Generalna Konferencja Miar - 2018

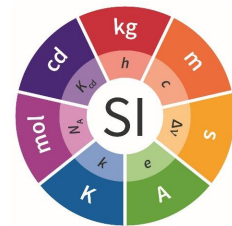


Generalna Konferencja Miar na 26. posiedzeniu dnia 18 listopada 2018 r. zatwierdziła rezolucję dotyczącą zmian Międzynarodowy Układ Jednostek Miar



Międzynarodowy Układ Jednostek, SI, jest układem jednostek miar, w którym:

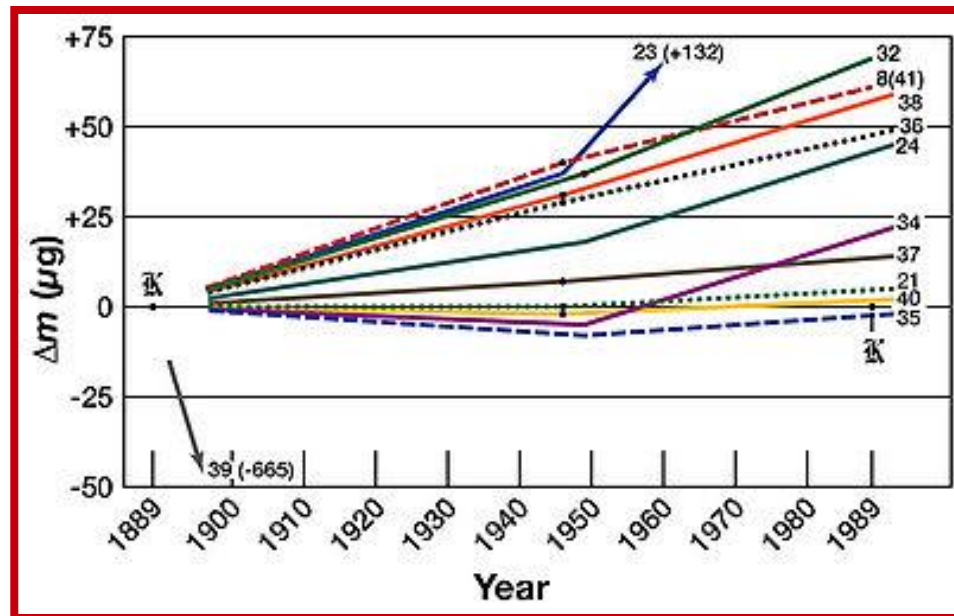
- częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, $\Delta\nu_{Cs}$, wynosi **9 192 631 770 Hz**,
- prędkość światła w próżni c wynosi **299 792 458 m/s**,
- stała Plancka h wynosi **$6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s**,
- ładunek elementarny e wynosi **$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C**,
- stała Boltzmannna k wynosi **$1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K**,
- stała Avogadra N_A wynosi **$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹**,
- skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , wynosi **683 lm/W**.



Międzynarodowe porównania wzorców kilograma 1889, 1946, 1989



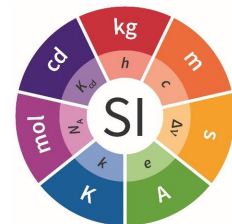
www.bipm.org



Zmiana masy wzorca kg - 50 μg/100 lat

1999 – 21. Generalna Konferencja Miar

Rezolucja 7: zalecenie podjęcia badań mających na celu powiązanie jednostki masy ze stałą uniwersalną lub atomową w celu redefinicji kilograma.



Propozycja zmiany definicji układu jednostek miar – 2005

Przyczyna:

aktualne definicje jednostek miar są zdefiniowane w powiązaniu z własnościami materii ulegającymi zmianie w czasie.

Cel:

zdefiniowanie całego układu SI przez uniwersalne stałe fizyczne lub własności atomu.

Działanie:

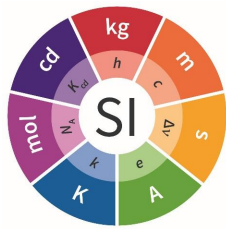
2005 Rekomendacja nr 1 Międzynarodowego Biura Miar (CIPM):

podjęcie badań mających na celu opracowanie nowych definicji

kilograma, ampera, kelwina i mola

wiążących te jednostki z **uniwersalnymi stałymi fizycznymi**.

Przyjęcie takich definicji umożliwiłoby dokładną realizację wszystkich podstawowych jednostek miar układu SI niezależnie od czasu, miejsca i innych czynników czyniąc go układem uniwersalnym.

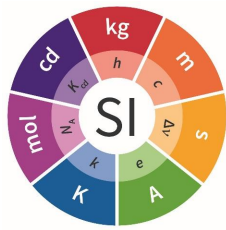


2005 Rekomendacja nr 1 Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM):

Zdefiniowanie wszystkich podstawowych jednostek miar przez fundamentalne stałe fizyczne, przy czym:

- kilogram** - stała Plancka h ,
- amper** - ładunek elementarny e ,
- kelwin** - stała Boltzmannna k ,
- mol** - stała Avogadry N_{AV}

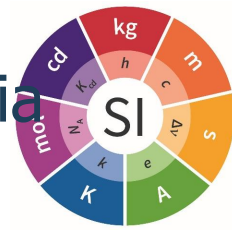
w celu wyeliminowania artefaktów oraz własności materii i zapewnienie stałości definicji jednostek.



2005 Rekomendacja nr 1 Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM):

Warunki wprowadzenia zmian SI:

- Wszystkie zmiany muszą zachować spójność systemu,
- Definicje muszą być łatwo zrozumiane,
- Muszą być spełnione podstawowe warunki odnoszące się do wyników odpowiednich eksperymentów:
 - **co najmniej dwa / trzy niezależne eksperymenty powinny dać jednakowe wartości stałych z odpowiednią małą niepewnością,**
 - **co najmniej jeden z tych wyników powinien mieć wymaganą niepewność przyjętą dla nowej definicji jednostek,**
- Należy opracować dokumenty *Mise-en-pratique* opisujące praktyczną realizację poszczególnych jednostek.



Redefinicja kelwina; przykład procedury postępowania

1954 – CGPM zatwierdza definicję jednostki temperatury termodynamicznej – stopnia kelwina – o symbolu °K.

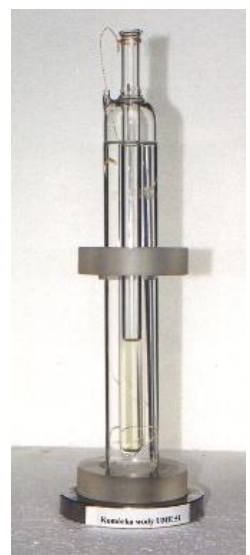
Stopień kelwina jest równy 1/273,16 temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody.

1960 – Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, SI
Kelwin – jednostka temperatury termodynamicznej.

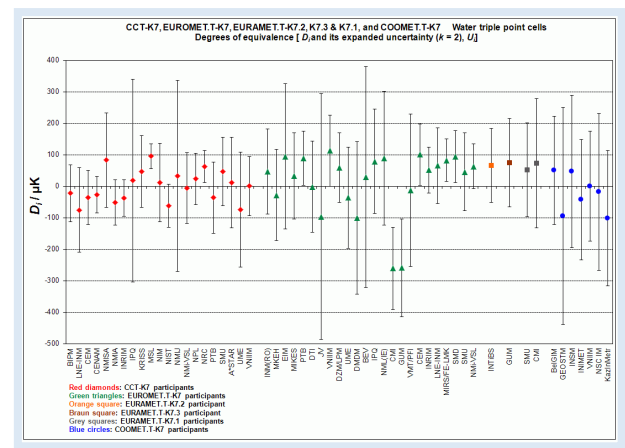
Temperatura termodynamiczna punktu potrójnego wody

$$T_{pptr\ H_2O} = 273,16\ K \text{ z zerową niepewnością.}$$

Praktyczna realizacja punktu potrójnego wody



Komórka do realizacji punktu potrójnego wody



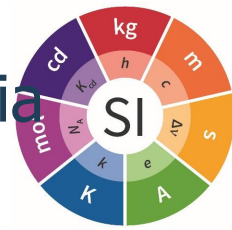
Rozrzuty wartości temperatury punktu potrójnego wody:

$$\pm 50\ \mu K$$

tj. niepewność pomiaru

$$u(T_{pptr\ H_2O}) \approx 1,8 \times 10^{-7}$$

$$U(T_{pptr\ H_2O}) \approx 3,7 \times 10^{-7} \text{ dla } k = 2$$



Redefinicja kelwina; przykład procedury postępowania

Eksperymentalne wyznaczenie stałej Boltzmann k

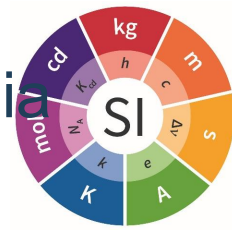
Komitet Konsultacyjny ds. Termometrii (CCT) w BIPM opracował wymagania dotyczące wyznaczenia wartości stałej Boltzmann k .

Przed przyjęciem nowej definicji muszą być spełnione dwa warunki:

- niepewność wyznaczonej wartości k musi być mniejsza niż 1×10^{-6}
- wyznaczenie k powinno bazować na wynikach przynajmniej dwóch różnych metod pomiarowych, w których osiągnięta niepewność pomiaru jest mniejsza niż 3×10^{-6} .

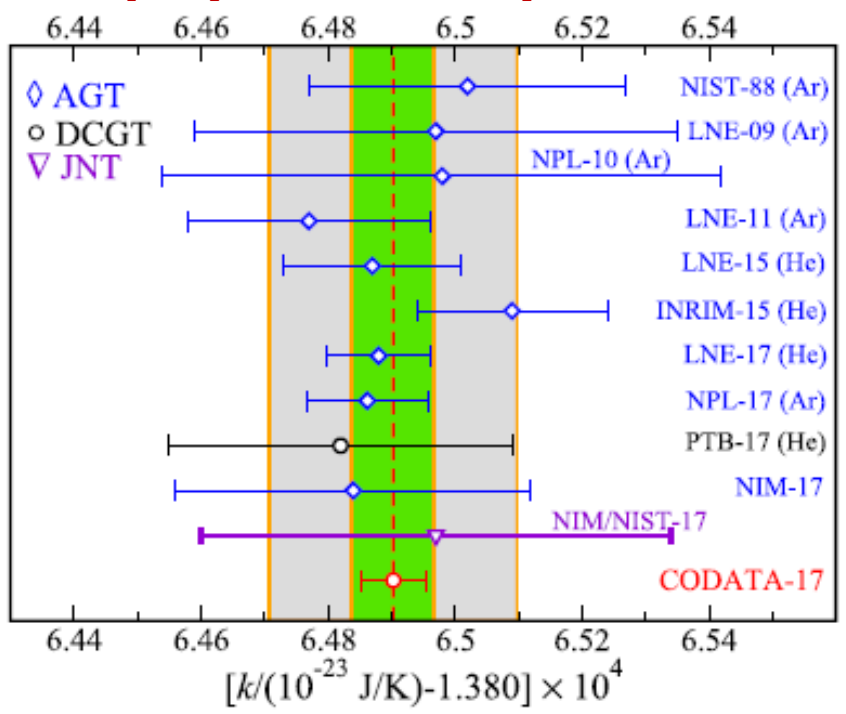
Do wyznaczenia wartości k stosowane są tzw. **termometry pierwotne**, w których wielkość mierzona jest jednoznacznie funkcją temperatury termodynamicznej T .

- Termometr gazowy o stałej objętości
- **Akustyczny termometr gazowy**
- Gazowy termometr o stałej dielektrycznej
- Termometr szumowy
- ciśnienie p jest funkcją T ,
- prędkość c dźwięku w gazie,
- stała dielektryczna ϵ gazu,
- napięcie szumu cieplnego U w rezystorze.



Redefinicja kelwina; przykład procedury postępowania

Eksperymentalne wyznaczenie stałej Boltzmann k



Rekomendowana przez CODATA 2017 wartość stałej Boltzmann

$k = 1,380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
 $u = 3,7 \times 10^{-7}$.

Akustyczny Termometr Gazowy
 $u(k) = 6,0 \times 10^{-7}$.

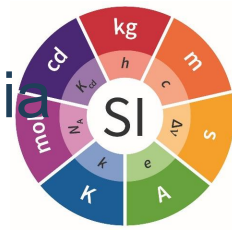
Gazowy termometr o stałej dielektrycznej
 $u(k) = 1,9 \times 10^{-6}$.

Termometr szumowy
 $u(k) = 5,0 \times 10^{-6}$.

CODATA 2017:

Stała Boltzmann $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ z niepewnością $u = 0!$

Temperatura punktu potrójnego wody $T_{\text{ptr H}_2\text{O}} = 273,16 \text{ K}$ z niepewnością $u = 3,7 \times 10^{-7}$



Redefinicja kelwina; przykład procedury postępowania

PAPER • OPEN ACCESS

Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment

To cite this article: Peter J Mohr et al 2018 *Metrologia* 55 125

SHORT COMMUNICATION • OPEN ACCESS

The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI

To cite this article: D B Newell et al 2018 *Metrologia* 55 L13

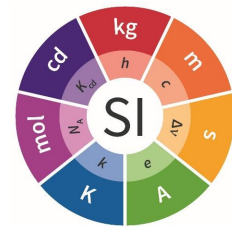
Table 2. The CODATA 2017 adjusted values of h , e , k , and N_A .

Quantity	Value	Rel. stand. uncert u_r
h	$6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$	1.0×10^{-8}
e	$1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$	5.2×10^{-9}
k	$1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$	3.7×10^{-7}
N_A	$6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	1.0×10^{-8}

Table 3. The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI.

Quantity	Value
h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$
e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
k	$1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

CODATA - Committee on Data for Science and Technology



Resolution 1 of the 26th CGPM (2018) **On the revision of the International System of Units (SI)**

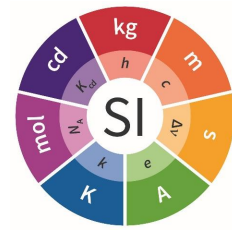
The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting

decides that, effective from 20 May 2019,

the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_{A} is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , is 683 lm/W

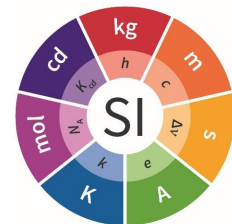
Definicja Układu Jednostek, SI - 2019



Międzynarodowy Układ Jednostek, SI, jest układem jednostek miar, w którym:

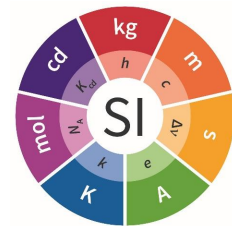
- częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, wynosi 9 192 631 770 Hz,
- prędkość światła w próżni c wynosi 299 792 458 m/s,
- stała Plancka h wynosi $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- ładunek elementarny e wynosi $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- stała Boltzmanna k wynosi $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- stała Avogadra N_A wynosi $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , wynosi 683 lm/W.

Definicje jednostek miar w SI - 2019



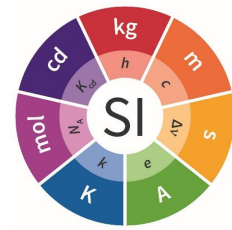
Wielkość	Jednostka	Definicja
czas	sekunda	Sekunda , symbol s , jest to jednostka czasu w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$, to jest częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, wynoszącej 9 192 631 770, wyrażonej w jednostce Hz, która jest równa s^{-1} .
długość	metr	Metr , symbol m , jest to jednostka długości w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni c , wynoszącej 299 792 458, wyrażonej w jednostce $m s^{-1}$, przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$.
masa	kilogram	Kilogram , symbol kg , jest to jednostka masy w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka h , wynoszącej $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$, wyrażonej w jednostce J s, która jest równa $kg m^2 s^{-1}$, przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą c i $\Delta\nu_{Cs}$.
prąd elektryczny	amper	Amper , symbol A , jest to jednostka prądu elektrycznego w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej ładunku elementarnego e , wynoszącej $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, wyrażonej w jednostce C, która jest równa $A s$, gdzie sekunda zdefiniowana jest za pomocą $\Delta\nu_{Cs}$.

Definicje jednostek miar w SI - 2018



Wielkość	Jednostka	Definicja
temperatura	kelwin	Kelwin , symbol K , jest to jednostka temperatury termodynamicznej w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmanna k , wynoszącej $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, kiedy wyrażona jest w jednostce $J\ K^{-1}$, która jest równa $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$, gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą <i>h</i> , <i>c</i> i Δv_{Cs} .
ilość substancji	mol	Mol , symbol mol , jest to jednostka ilości substancji w SI. Jeden mol zawiera dokładnie $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ obiektów elementarnych. Ta liczba jest ustaloną wartością liczbową stałej Avogadra N_A wyrażonej w jednostce mol^{-1} i jest nazywana liczbą Avogadra. Ilość substancji, symbol <i>n</i> , układu jest miarą liczby obiektów elementarnych danego rodzaju. Obiektem elementarnym może być atom, cząsteczka, jon, elektron, każda inna cząstka lub grupa cząstek danego rodzaju.
światłość	kandela	Kandela , symbol cd , jest to jednostka światłości w określonym kierunku w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej skuteczności świetlnej monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , wynoszącej 683, wyrażonej w jednostce $lm\ W^{-1}$, która jest równa $cd\ sr\ W^{-1}$ lub $cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$, gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą <i>h</i> , <i>c</i> i Δv_{Cs} .

SI – dokumenty BIPM i GUM

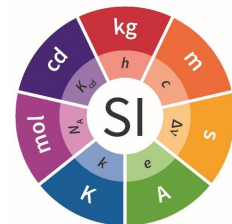


BIPM

- www.bipm.org/utils/en/pdf/CIPM/CIPM2005-EN.pdf, Recommendation 1 (CI-2005) Preparative steps towards new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole in terms of fundamental constants
- www.bipm.org/CGPM/db/26/1/ Resolution 1 of the 26th CGPM (2018) On the revision of the International System of Units (SI)
- [www.bipm.org/en/publications/si-brochure/9th edition \(2019\)](http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/9th%20edition%20(2019))
- [www.bipm.org/en/publications//mises-en-pratique/](http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/) Practical realization of the definitions of some important units/ Appendix 2 of the SI Brochure/edition 20 May 2019/ *Mise en pratique*
- www.bipm.com/utils/common/pdf/SI-statement.pdf Information for users about the proposed revision of the SI

GUM

- www.gum.gov.pl/pl/redefinicja-si/redefinicja-si
- www.gum.gov.pl/pl/redefinicja-si/informator-gum-o-redefinicji-si



www.gum/SI

W związku z wejściem w życie nowych definicji jednostek miar SI, Główny Urząd Miar chcąc przybliżyć tematykę jednostek miar przygotował, w formie zbioru tablic, skondensowane informacje nt. „nowego SI”, ...

Nagłówek/tytuł Tablicy 1

Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI)
formalnie zdefiniowany i przyjęty przez jedenastą Generalną Konferencję Miar (CGPM) w 1960 roku,
jest podstawą wyrażania pomiarów na wszystkich poziomach dokładności i we wszystkich obszarach nauki, techniki oraz we wszelkiej ludzkiej działalności.

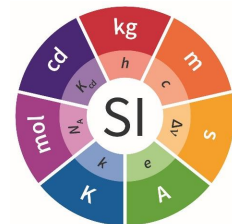


Tablica 1 Jednostki podstawowe SI/ definicje

Kelwin, symbol **K**, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana **poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej** stałej Boltzmannna ***k***, **wynoszącej** $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, **wyrażonej** w jednostce J K^{-1} , która jest równa $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, **gdzie** (przy czym) kilogram, metr i sekunda **zdefiniowane są za pomocą *h*, *c* i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$** .

The kelvin, symbol **K**, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined **by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant *k*** to be $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ **when expressed in the unit** J K^{-1} , which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, **where** the kilogram, metre and second **are defined in terms of *h*, *c* and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$** .

Kelwin, symbol **K**, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana **poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej** stałej Boltzmannna ***k***, **wynoszącej** $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, **kiedy jest wyrażona** w jednostce J K^{-1} , która jest równa $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, **gdzie** kilogram, metr i sekunda **zdefiniowane są przez *h*, *c* i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$** .



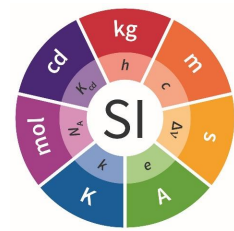
Tablica 1

Mol, symbol **mol**, jest to jednostka SI **ilości substancji**. Jeden mol zawiera dokładnie $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ **obiektów elementarnych**. Liczba ta jest ustaloną wartością liczbową stałej Avogadra N_A , wyrażonej w jednostce mol^{-1} i jest nazywana liczbą Avogadra.

Ilość substancji, symbol n , układu jest **miarą liczby obiektów elementarnych** danego rodzaju. **Obiektem elementarnym** może być atom, cząsteczka, jon, elektron, każda inna cząstka lub danego rodzaju grupa cząstek.

The mole, symbol **mol**, is the SI unit of **amount of substance**. One mole contains exactly $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ **elementary entities**. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A , when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number.

The **amount of substance**, symbol n , of a system is a measure of the number of **specified elementary entities**. **An elementary entity** may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.



Tablica 2

2.1. Objasnienia definicji Jednostek Podstawowych SI

W definicji metra występuje dokladna wartosc liczbowa prędkosci swiatla. Prędkosc swiatla jest stala podstawowa oznaczana symbolem c .

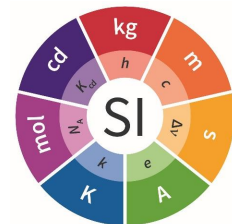
Wartosc liczbową tej stalej można zapisać wzorem: $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$.

This definition implies the exact relation $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$.

Inverting this relation gives an exact expression for the metre in terms of the defining constants c and $\Delta\nu_{Cs}$:

Metr, w odniesieniu do prędkosci swiatla i częstotliwosci cezowej, wyraża się w następujący sposób:

$$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}}.$$



Zakładka Redefinicja SI

Redefinicja SI - „Stare” a „nowe” SI

Gruntowna „**rewolucja**” objęła cztery jednostki miar: kilogram, amper, mol i kelwin, jednak zdecydowano o **przebudowaniu tekstów wszystkich definicji**, tak aby **po redefinicji miały jednolitą budowę**.


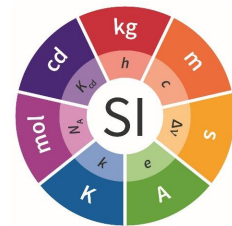
Obecnie obowiązujące definicje jednostek miar oraz **ich nowe, proponowane brzmienie** znajdują się w osobnych zakładkach.

Nowe brzmienie definicji zostało ostatecznie sformułowane i zatwierdzone podczas XXVI Generalnej Konferencji Miar.....

Streszczenie Broszury SI

Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM), Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) Generalna Konferencja Miar (CGPM)

Ostatnia istotna zmiana została przyjęta przez 26. CGPM (2018), która **zdecydowała, że SI zostanie oparty na ustalonych wartościach liczbowych zbioru siedmiu stałych definiujących, z których zostaną wyprowadzone definicje siedmiu jednostek podstawowych SI.**



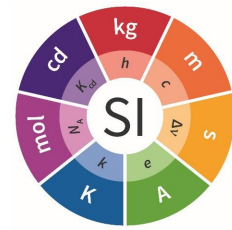
20 May 2019 - World Metrology Day

**The new definitions of the SI base units
have now come into effect!**

A large circular diagram of the seven SI base units (kg, m, s, A, K, mol, cd) surrounding a central 'SI' logo. To the right of the diagram, the text '20 May 2019 - World Metrology Day' is displayed in blue, followed by 'The new definitions of the SI base units have now come into effect!' in red.

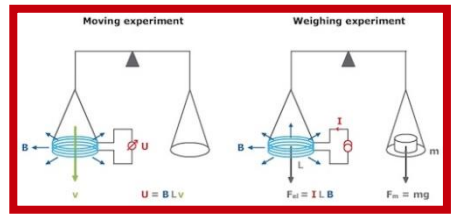
hankasg@wp.pl
A.Kowal@intibs.pl

Wzorce jednostek miar



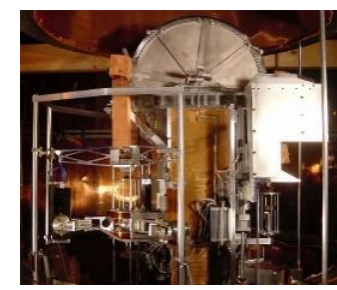
Urządzenia do realizacji jednostek miar z najwyższą dokładnością

Kilogram – waga Kibble’a/watt balance (waga watowa)



$$UI = hf f' / 4 = mgv$$

Porównanie energii elektrycznej i mechanicznej
 Wielkości elektryczne mierzone są z wykorzystaniem makroskopowych efektów kwantowych:
U - efekt Josephsona, I - kwantowy efekt Halla



Special issue, *Watt and Joule Balances, the Planck Constant and the Kilogram*, Metrologia **51** (2014) no 2

Amper – podstawowa jednostka prądu elektrycznego wybrana umownie;

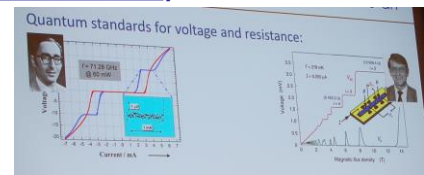
Praktyczna realizacja – efekty kwantowe:

U napięcie – efekt Josephsona $U = \frac{hf}{2e}$

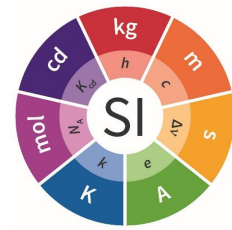
h jest stałą Placka, f – częstotliwością promieniowania elektromagnetycznego, e – ładunek elementarny
 stała Josephsona $K_J = \frac{2e}{h}$

R opór – kwantowy efekt Halla odkryty przez K. von Klitzinga $R = \frac{h}{ne^2}$

R opór, h – stałą Plancka, e – ładunek elektryczny, a n - mała liczba naturalna
 stała Klitzinga $R_K = \frac{h}{e^2}$



B. Taylor, T. Witt, *New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall effects*, Metrologia **26** (1989) 47-62



Urządzenia do realizacji jednostek miar z najwyższą dokładnością Kelwin – gazowy termometr akustyczny AGT

Temperatura jest miarą energii kinetycznej cząstek

Średnia energia kinetyczna E_k cząstek idealnego

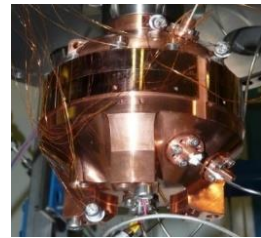
$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$$

m masa, v – prędkość, i – stopniem swobody, k – stała Boltzmannna i T – temperatura.

AGT - zależność prędkości dźwięku c rozchodzącego się w gazie od temperatury

$$c = (\gamma_0 R T / M)^{1/2}$$

$\gamma_0 = C_p / C_v$ stosunek ciepła właściwego gazu przy stałym ciśnieniu C_p do ciepła właściwego w stałej objętości C_v , $R = k N_A$ – stała gazowa, M – masa molowa gazu



Special issue, *Focus on the Boltzmann Constant* Metrologia 52 (2015) no 2



Mol – kula ^{28}Si o masie ~ 1 kg

stałej Avogadra $N_A = (n M) / (\rho a^3)$

n , M , ρ i a są odpowiednio liczbą atomów w komórce elementarnej, masą molową, gęstością i parametrem sieci krystalograficznej. W badaniach zastosowano dyfrakcyjny pomiar gęstości elektronowej (XRCD).

Special issue, *International determination of the Avogadro constant*, Metrologia **48** (2011) no 2