

# *Redefinicja jednostek układu SI*

***Ewa Bulska***



# MIERZALNE WYZWANIA ŚWIATA

World Metrology Day



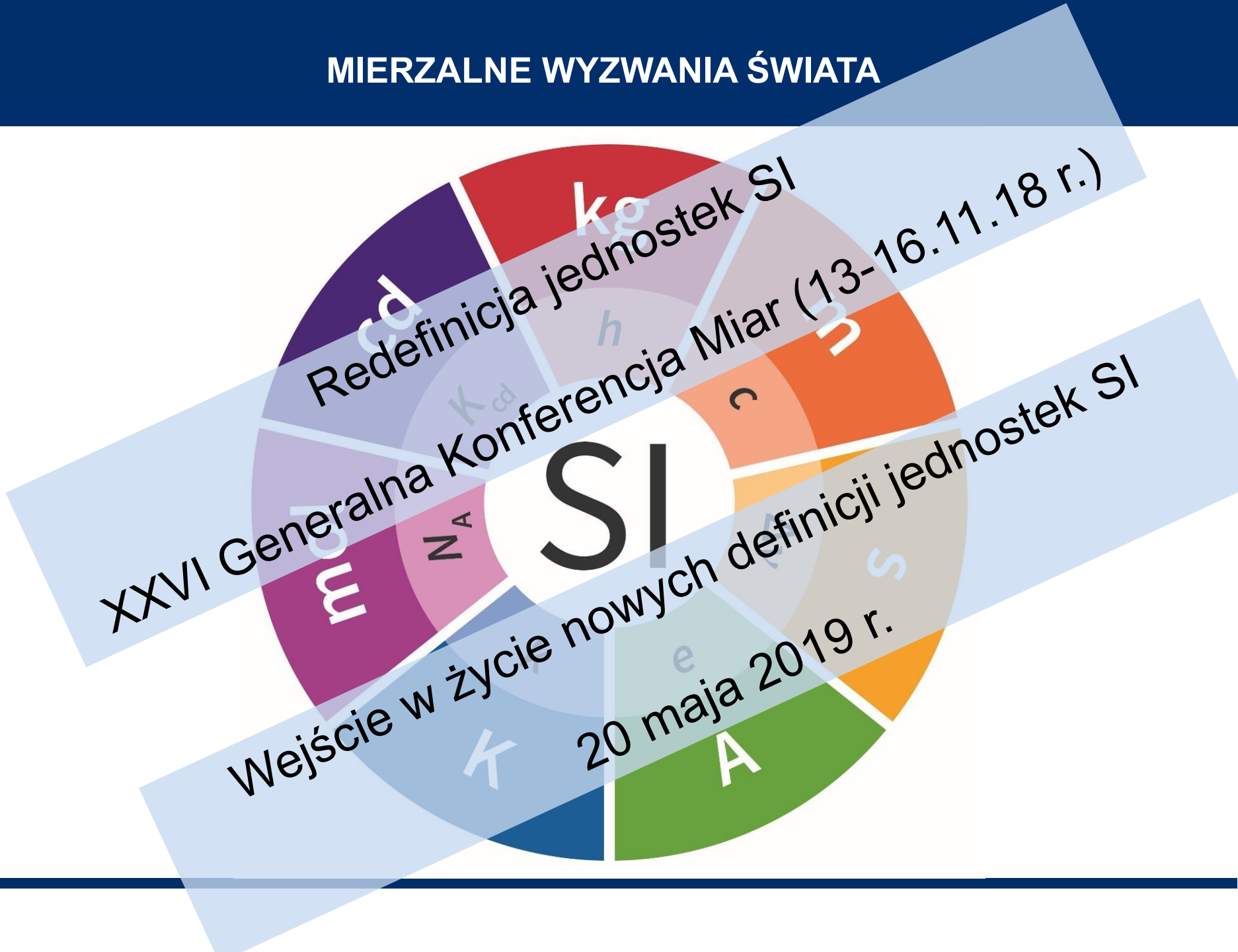
20 May 2019  
[www.worldmetrologyday.org](http://www.worldmetrologyday.org)

Światowy Dzień Metrologii



20 Maja 2019  
[www.worldmetrologyday.org](http://www.worldmetrologyday.org)

# MIERZALNE WYZWANIA ŚWIATA



## Redefinicja SI - „Stare” a „nowe” SI

Gruntowna „rewolucja” objęła cztery jednostki miar:

**kilogram, amper, mol i kelwin**

Zadecydowano o przebudowaniu tekstów wszystkich definicji, tak aby po redefinicji miały jednolitą budowę.

## Redefinicja SI : 20 maja 2019 r.

### *Jednostki czasu i długości*

"**Metrologiczny komfort**" jest możliwy dzięki wykorzystaniu do ich określenia stałych podstawowych.

W dziedzinie czasu – **sekunda** – to ściśle określona liczba okresów promieniowania powstającego podczas zmiany stanu energetycznego atomu cezu ( $^{133}\text{Cs}$ )

W dziedzinie długości – **metr** – zdefiniowany jest za pomocą naturalnej własności naszego wszechświata – prędkości światła.

# MIERZALNE WYZWANIA ŚWIATA

## *Wzorzec kilograma jest/był ostatnim wzorcem materialnym*

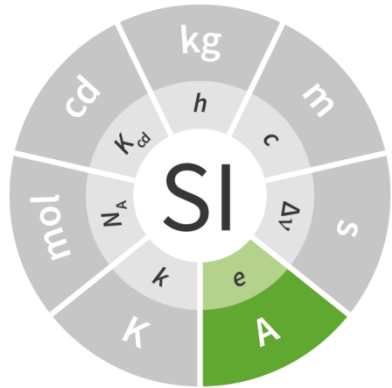
Aby zagwarantować spójność pomiarową realizowane są międzynarodowe porównania wszystkich wzorców państwowych z wzorcem międzynarodowym.

Porównania wykonywane są średnio co kilkadziesiąt lat.

Pomimo najstaranniejszej opieki roztaczanej nad cennymi walcami, obserwuje się zmiany ich masy spowodowane czy to osadzaniem się na nich różnych cząsteczek obecnych w powietrzu, czy też erozji wywołanej również różnymi składnikami powietrza.



# MIERZALNE WYZWANIA ŚWIATA



## Jednostka miary prądu elektrycznego **AMPER**

Definicja ampera: dwa nieskończenie długie przewodniki o znikomym przekroju.

Obecnie odtwarzanie jednostki miary prądu elektrycznego zgodnie z tą definicją nie jest realizowane w praktyce.

**Jednostka miary napięcia elektrycznego: zjawisko Josephsona.**

**Jednostka miary rezystancji: kwantowe zjawisko Halla.**

# STAŁE PODSTAWOWE

czas trwania przejścia między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego Cs133

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} \quad 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$$

$$\text{prędkość światła w próżni } c \quad 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{stała Plancka } h \quad 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s (J s = kg m}^2 \text{ s}^{-1})$$

$$\text{ładunek elementarny } e \quad 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C (C = A s)}$$

$$\text{stała Boltzmana } k \quad 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ (J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1})$$

$$\text{liczba Avogadra } N_{\text{A}} \quad 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$K_{\text{cd}} \quad 683 \text{ lm W}^{-1} \text{ (dla monochromatycznego promieniowania o}$$
  
$$\text{częstotliwości } 540 \times 10^{12} \text{ Hz)}$$

# SIEDEM JEDNOSTEK PODSTAWOWYCH

7 Wspaniałych

1 s

$$9\,192\,631\,770/\Delta\nu_{\text{Cs}}$$

1 m

$$(c/299\,792\,458) s \approx 30,663\,319 c/\Delta\nu_{\text{Cs}}$$

1 kg

$$(h/6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) s m^{-2} \\ \approx 1,475\,521... \times 10^{40} h \Delta\nu_{\text{Cs}} c^{-2}$$

1 A

$$(e/1,602\,176\,634 \times 10^{-19}) s^{-1} \\ \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e$$

1 K

$$(1,380\,649 \times 10^{-23}/k) kg m^2 s^{-2} \\ \approx 2,226\,6653 \Delta\nu_{\text{Cs}} h k^{-1}$$

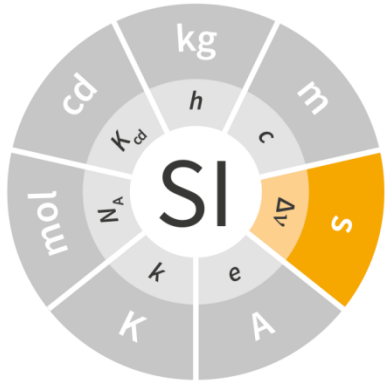
1 mol

$$6,022\,140\,76 \times 10^{23} N_A^{-1}$$

1 cd

$$(K_{\text{cd}}/683) kg m^2 s^{-3} sr^{-1} \\ \approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

# JEDNOSTKA CZASU



czas → sekunda → s

## Stara definicja - do 19.05.2019

czas równy 9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133

## Nowa definicja - od 20.05.2019

**sekunda**, oznaczenie s, jest to jednostka SI czasu. 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  $s^{-1}$ .

# JEDNOSTKA DŁUGOŚCI

**Czym jest metr?** Metr jest to jednostka długości, jednej z najpowszechniej mierzonych wielkości na świecie.

Z pomiarami stykamy się codziennie w naszym życiu, a z **metrem** (lub **raczej centymetrem**) często spotykamy się jeszcze przed narodzinami! Już w życiu płodowym za pomocą USG, lekarz mierzy różne parametry naszego ciała (jak obwód głowy, czy długość kości udowej) które są pomocne w ocenie naszego ogólnego stanu zdrowia i prawidłowego rozwoju.

Metr już od 1983 roku jest zdefiniowany przez stałą natury – prędkość światła, zapewniając jego długoterminową stabilność i wysoką dokładność z jaką możemy go mierzyć i odtwarzać.

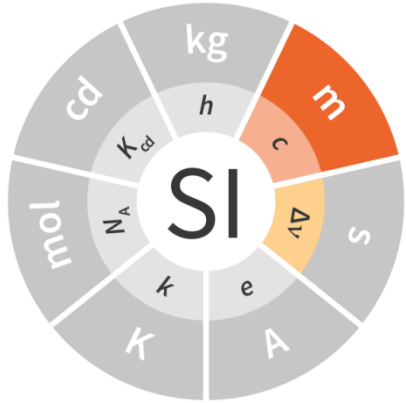
# JEDNOSTKA DŁUGOŚCI

**Czym jest metr?** Metr jest to jednostka długości, jednej z najpowszechniej mierzonych wielkości na świecie.

Metr to droga pokonana przez światło w czasie  $1/299\,792\,458$  sekundy. Powodem, dla którego stosujemy drogę pokonaną przez światło w określonym przedziale czasu jest fakt, iż prędkość światła jest największą prędkością na świecie (którą znamy) i w próżni jest zawsze wartością stałą.

Mierząc, jak daleką drogę pokonało światło w próżni w  $1/299\,792\,458$  sekundy w Polsce, Francji, Brazylii czy w Chinach, zawsze otrzymamy ten sam wynik, bez względu na to, gdzie się wykonywany jest pomiar !

# JEDNOSTKA DŁUGOŚCI



Metr już od 1983 roku jest zdefiniowany przez stałą natury – prędkość światła, zapewniając jego długoterminową stabilność i wysoką dokładność z jaką możemy go mierzyć i odtwarzać.

## **Stara definicja - do 19.05.2019:**

długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie  $1/299\,792\,458$  sekundy;

## **Nowa definicja - od 20.05.2019:**

**metr**, oznaczenie m, jest to jednostka SI długości. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni  $c$ , wynoszącej  $299\,792\,458$ , wyrażonej w jednostce  $\text{m s}^{-1}$ , przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ;

# JEDNOSTKA DŁUGOŚCI



## Po co nam dokładne pomiary długości?

Często zastanawiamy się po co nam pomiary długości z nanometrową precyzją. Na co dzień zazwyczaj nie potrzebujemy zbyt dokładnie znać długości.

Wybierając się w podróż, przy odległościach kilku, kilkunastu czy kilkuset kilometrów, nawet kilkaset metrów nie robi specjalnej różnicy.

Sprawdzając wymiar walizki na zgodność z wymogami linii lotniczych zazwyczaj satysfakcjonujący wydaje się błąd w granicach centymetra.

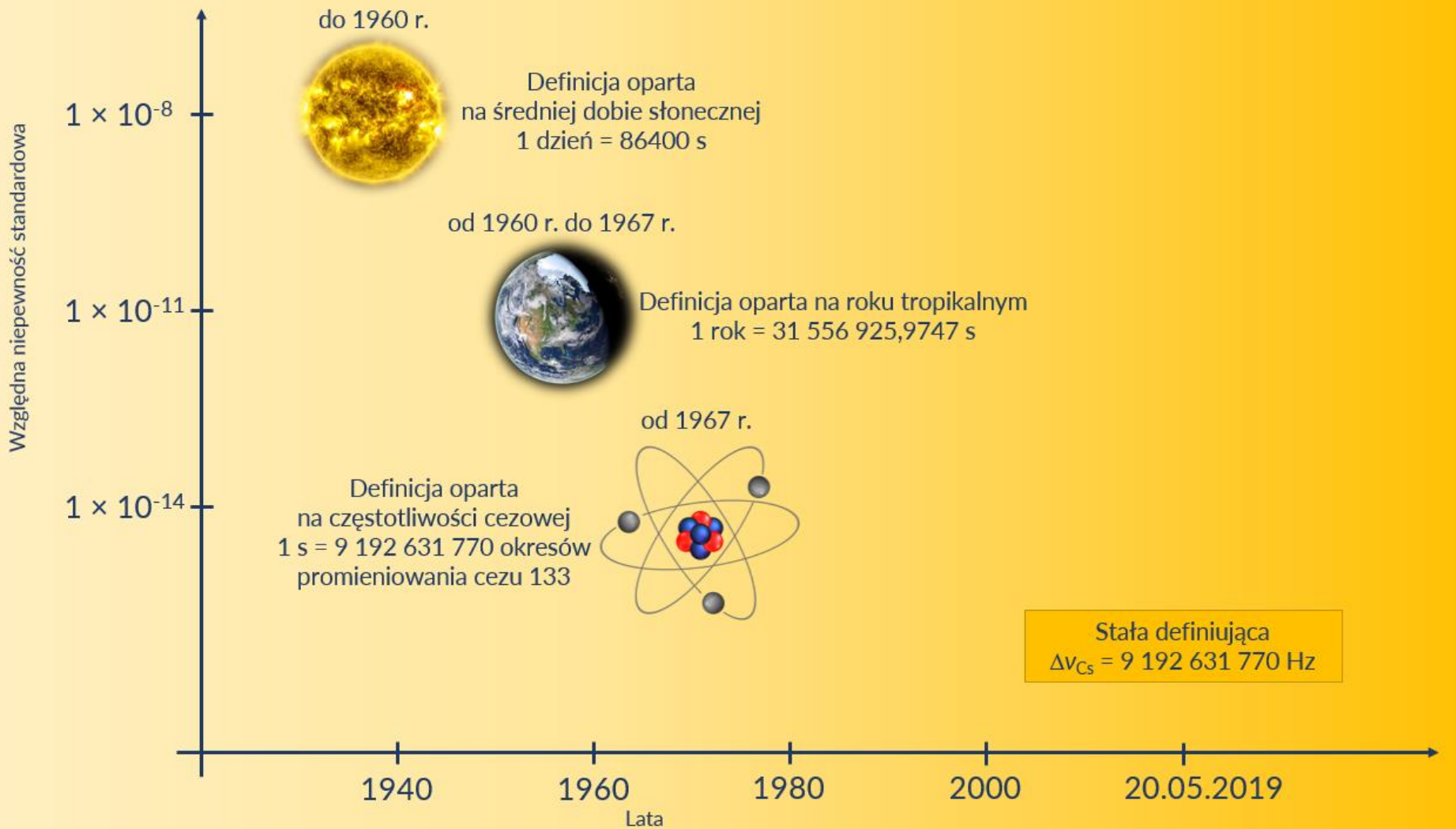
A nowoczesna cyklotronowa terapia nowotworów. W terapii tej celujemy wiązką protonów w ognisko nowotworu, który we wczesnym stadium może mieć wymiary milimetrów. Urządzenia takie zazwyczaj charakteryzuje niepewność pozycjonowania wiązki poniżej 1 mm. Większy błąd w pomiarze odległości mógłby skutkować zniszczeniem zdrowej tkanki zamiast chorobowo zmienionego miejsca.

# JEDNOSTKA CZASU

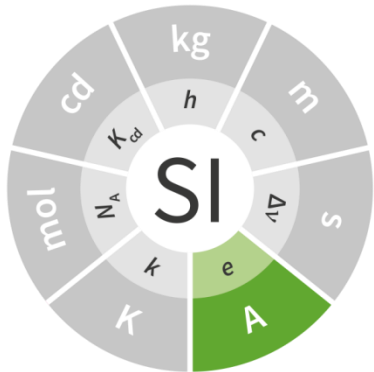
Typowe zwykłe zegary kwarcowe mogą pomylić się o ok. 0,5 s na dobę (o tyle zegar może przyspieszyć lub opóźnić swoje wskazanie w ciągu doby). Najlepsze generatory kwarcowe w odpowiednich warunkach mogą pomylić się o ok. 1 s na 20-30 lat.

Obecnie najbardziej rozpowszechnionym rozwiązaniem w precyzyjnych pomiarach czasu są zegary cezowe. Częstotliwość cezowa to częstotliwość z pasma mikrofalowego, wynosząca nieco ponad 9 GHz. W teorii mogą pomylić się o 1 s na ok. 30 mld lat.

# JEDNOSTKA CZASU



# JEDNOSTKA PRĄDU ELEKTRYCZNEGO



prąd elektryczny → amper → **A**

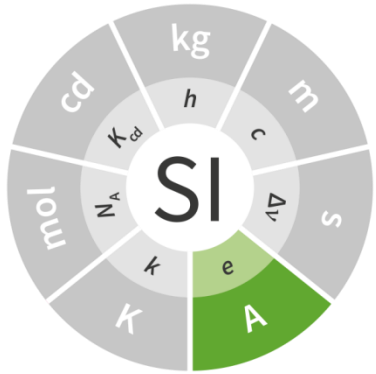
## Stara definicja - do 19.05.2019

Prąd elektryczny niezmienny, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę  $2 \times 10^{-7}$  niutona na każdy metr długości

## Nowa definicja - od 20.05.2019

**amper**, oznaczenie A, jest to jednostka SI prądu elektrycznego. 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  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

# JEDNOSTKA PRĄDU ELEKTRYCZNEGO



## OKIENKO INFORMACYJNE

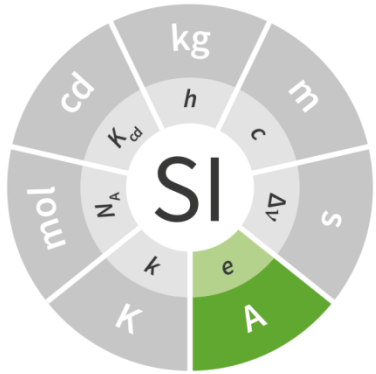


AUTOR GRAFIKI: AMBROISE TARDIEU

André Marie Ampère  
(1775 - 1836)

Nazwa jednostki, amper, oznaczenie A, jest odmienna. Oznaczenia takich jednostek zawsze powinny rozpoczynać się wielką literą! Nazwa jednostki pochodzi od nazwiska wybitnego naukowca André Marie Ampère'a. Nazywając jednostkę w ten sposób, doceniono jego wielki wkład w rozwój elektryczności i magnetyzmu.

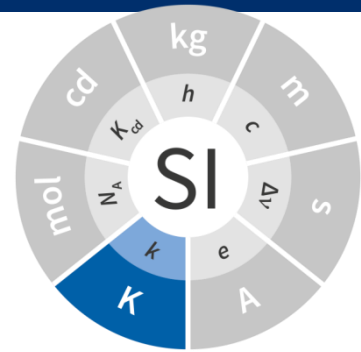
# JEDNOSTKA PRĄDU ELEKTRYCZNEGO



Najstarsze historyczne wzmianki związane z elektrycznością pochodzą ze starożytnej Grecji, gdzie po raz pierwszy zaobserwowano zjawisko elektryzowania się przedmiotów.

Zauważono, że bursztyn pocierany kawałkiem futra potrafi przyciągać małe przedmioty, takie jak włosy czy pyłki. Z języka greckiego wywodzi się również słowo elektryczność od greckiego słowa elektron – **ηλεκτρον** – które oznaczało właśnie bursztyn. „**Bursztynowy prąd elektryczny**” przez długie lata pozostawał jednak w ukryciu, stanowiąc co najwyżej ciekawostkę. Prawdziwy rozwój dziedziny zapoczątkowany został w XVII wieku, ale jednak dopiero wiek XIX przyniósł ogromne nasilenie prac nad elektrycznością i jej wykorzystaniem, co spowodowało gwałtowny rozwój naszej cywilizacji.

# JEDNOSTKA TEMPERATURY



temperatura termodynamiczna → kelwin → K

**Obecna definicja - do 19.05.2019 r.**

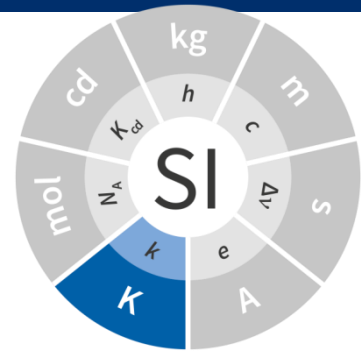
1/273,16 część temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody

**Nowa definicja - od 20.05.2019 r.**

**kelwin**, oznaczenie K, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmann'a  $k$ , wynoszącej  $1,380\,649 \times 10^{-23}$ , wyrażonej w jednostce  $\text{J K}^{-1}$ , która jest równa  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , gdzie kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą  $h$ ,  $c$  i  $\Delta v_{\text{CS}}$ .



# JEDNOSTKA TEMPERATURY

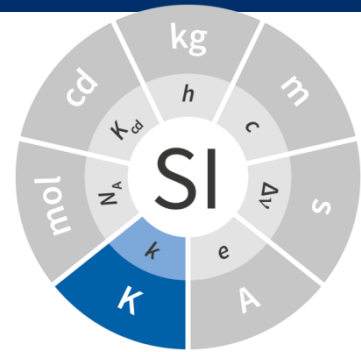


Szerokie spektrum zastosowań takich pomiarów obejmuje, między innymi:  
kontrolę reakcji chemicznych;  
nadzór produkcji żywności;  
ocenę pogody, rejestrację zmian klimatu;  
pomiar temperatury naszego ciała.

Niemal we wszystkich dziedzinach naszego życia, zarówno prywatnego jak i zawodowego niezbędne są dokładne pomiary temperatury.

Pomiar temperatury stał się nieodłączną częścią niemal każdego procesu produkcyjnego, temperatura w wielu przypadkach jest parametrem krytycznym, ale bardzo trudno dokładnie ją zmierzyć w warunkach ekstremalnych, takich jak wysokie temperatury w procesie produkcji stali lub bardzo niskie temperatury wymagane dla stosowania nadprzewodników.

# JEDNOSTKA TEMPERATURY



## Historia pomiarów temperatury

Około 2000 lat temu starożytny grecki inżynier Filon z Bizancjum po raz pierwszy opisał termometr, a właściwie termoskop pozwalający na określenie różnicy temperatur.

Zasada działania tego pierwszego termometru opierała się na zjawisku rozszerzalności cieplnej gazu pod wpływem temperatury. Przyrząd ten to jednostronnie zasklepią rurka, której otwarty koniec zanurzano w naczyniu napełnionym cieczą.

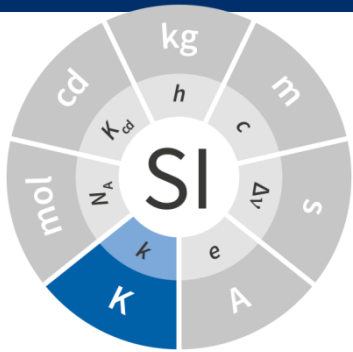
Pod wpływem temperatury gaz w urządzeniu sprężał się bądź rozprężał wciągając lub wypychając wodę z rurki. Późniejsze eksperymenty pokazały, że objętość gazu zmniejsza się o około jedną trzecią przy schładzaniu się wrzącej wody do punktu jej zamarzania.



# JEDNOSTKA TEMPERATURY

Najniższa temperatura zmierzona na Ziemi (Antarktyka)	-89,2 °C
Punkt krzepnięcia rtęci	-38,8 °C
Punkt zamarzania wody (na wysokości poziomu morza)	0 °C
Temperatura powierzchni Ziemi (średnio roczna w 1978 r.)	14,1 °C
Temperatura powierzchni Ziemi (średnio roczna w 2017 r.)	14,9 °C
Najwyższa temperatura zmierzona na Ziemi (Furnace Creek, USA)	56,7 °C
Punkt wrzenia wody (na wysokości poziomu morza)	100 °C (dokładnie 99,974 °C)
Roztopiona stal	około 1 600 °C
Powierzchnia Słońca	około 5 500 °C
Jądro Ziemi (szacowana)	około 7 000 °C
Jądro Słońca (szacowana)	około 15 milionów °C

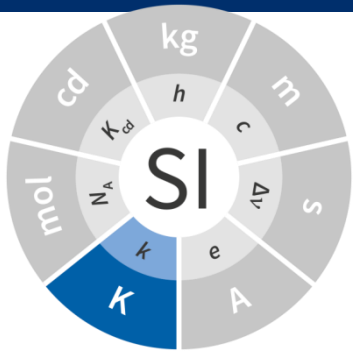
# JEDNOSTKA TEMPERATURY



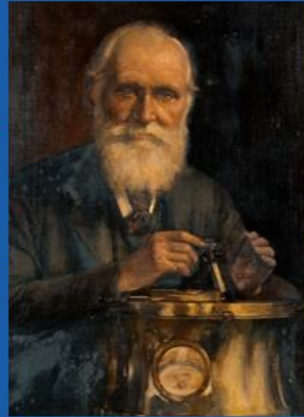
W połowie XIX wieku brytyjski fizyk Wiliam Thomson – później lord Kelvin – również zainteresował się ideą „nieskończonego zimna”, czyli stanu, który obecnie nazywamy zerem bezwzględnym (lub zerem absolutnym). W 1848 roku opublikował on pracę „**O absolutnej skali temperatur**”, w której oszacował wartość zera absolutnego na około **-273 °C** z teoretycznych obliczeń temperatury kryształu doskonałego, w którym ustały wszelkie drgania tworzących go cząsteczek.

W czasach, kiedy lord Kelvin przeprowadzał swoje eksperymenty, fakt, iż wszystkie substancje składają się z cząstek pozostających w ciągłym ruchu, nie był jeszcze powszechnie akceptowany. Skala temperatury termodynamicznej kelwina jest skalą absolutną, co oznacza że nie istnieją wartości poniżej 0 K, a osiągnięcie takiej temperatury oznacza ustanie wszelkich ruchów termicznych.

# JEDNOSTKA TEMPERATURY



## OKIENKO INFORMACYJNE

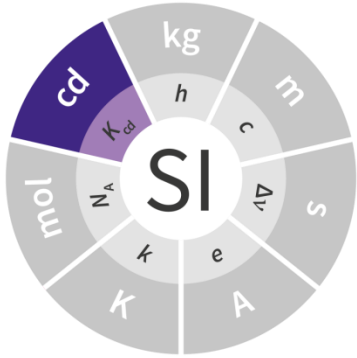


Fot. Wellcome Collection

**William Thomson**  
**lord Kelvin**  
**(1824 - 1907)**

Nazwa jednostki, kelwin, symbol K, jest odmienna. Symbole takich jednostek zawsze powinny rozpoczynać się wielką literą! Nazwa jednostki pochodzi od tytułu wybitnego naukowca Williama Thomsona lorda Kelvina. Nazywając jednostkę w ten sposób, doceniono jego wielki wkład w rozwój fizyki a w szczególności w rozwój teorii ciepła.

# JEDNOSTKA ŚWIATŁOŚCI



światłość → kandela → cd

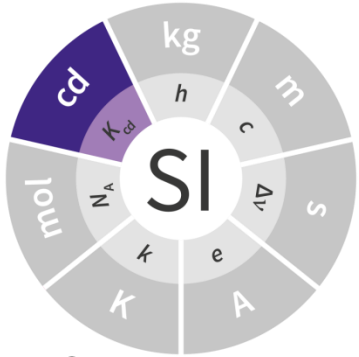
## Stara definicja - do 19.05.2019 r.

światłość źródła emitującego w określonym kierunku promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  herców i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym  $1/683$  wata na steradian.

## Nowa definicja - od 20.05.2019 r.

**kandela**, oznaczenie cd, jest to jednostka SI światłości w określonym kierunku. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej skuteczności świetlnej monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , wynoszącej 683, wyrażonej w jednostce  $\text{lm W}^{-1}$ , która jest równa  $\text{cd sr W}^{-1}$  lub  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ , gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

# JEDNOSTKA ŚWIATŁOŚCI



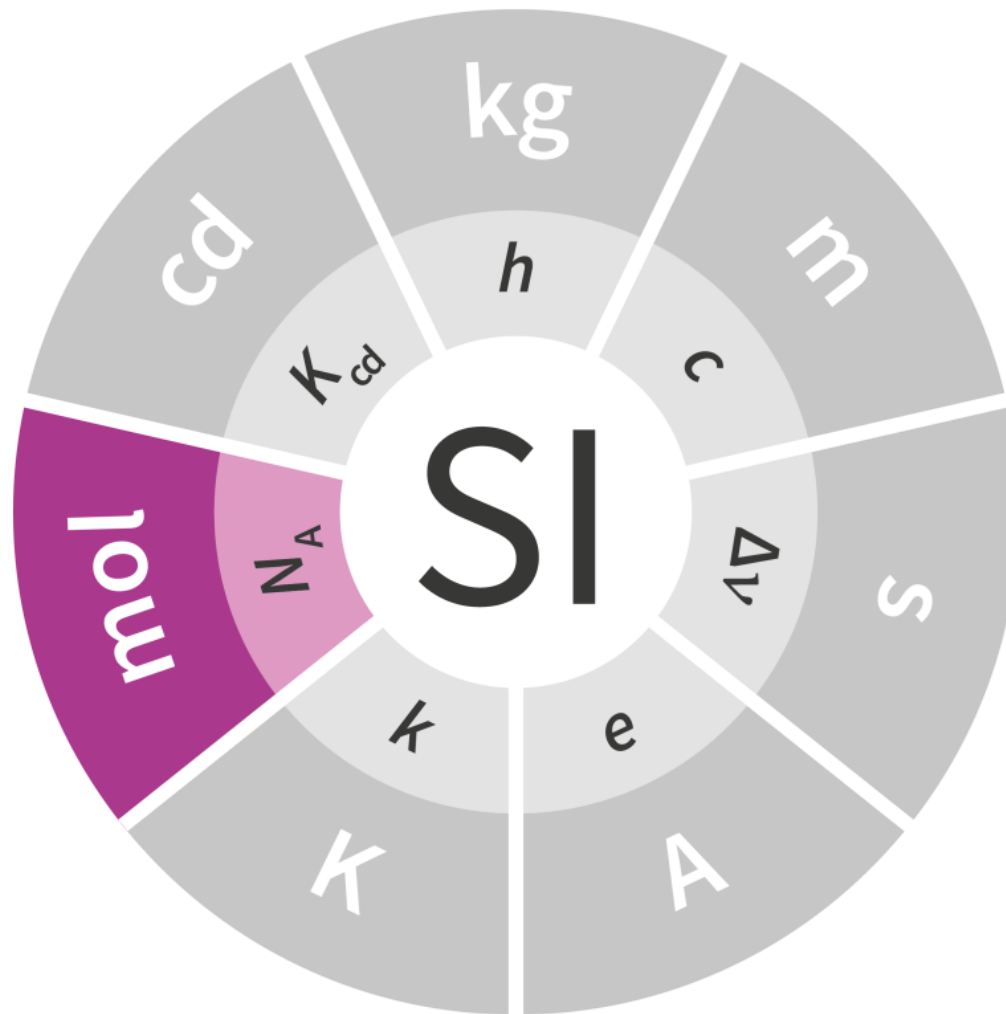
Obie przytoczone definicje wyglądają zupełnie inaczej, jednak koncepcja fizyczna za nimi stojąca pozostaje taka sama. Zmiana będzie taka, iż od przyszłego roku podstawą definicji będzie stała skuteczność świetlna, a jej wartość, w połączeniu z innymi stałymi definiującymi, będzie określać, jak "intensywna" jest jedna kandela.

Nie jest to przypadek, iż nazwa jednostki – kandela – pochodzi od łacińskiego słowa **candela oznaczającego świecę**.

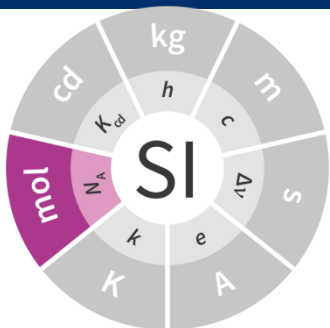
Podczas 9. Międzynarodowej Konferencji Miar kandela została zdefiniowana, jako międzynarodowa jednostka światłości kierunkowej. Przed tą datą na świecie istniały różne wzorce i jednostki światłości kierunkowej. Na przykład w Niemczech i w Austrii używano jednostki Hefnerkerze.

Hefnerkerze (HK) otrzymywano ze specjalnego rodzaju świecy a 1 HK to około 0,9 dzisiejszej kandel.

# JEDNOSKA LICZNOŚCI MATERII



# JEDNOSTKA LICZNOŚCI MATERII



ilość substancji → mol → mol

**Obecna definicja - do 19.05.2019 r.**

liczność materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kilograma węgla  $^{12}$ ; przy stosowaniu mola należy określić rodzaj cząstek, którymi mogą być: atomy, cząsteczki, jony, elektrony, inne cząstki lub określone zespoły takich cząstek

**Nowa, proponowana definicja - od 20.05.2019 r.**

**mol**, oznaczenie 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  $\text{mol}^{-1}$  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.

# JEDNOSTKA LICZNOŚCI MATERII

**602 214 076 000 000 000 000 000 to ogromna liczba**

Niecałe 60 g soli kuchennej zawiera taką liczbę cząsteczek chlorku sodu (NaCl).

Wygodniej przyjąć „pakiet ilościowy”, który ułatwi wyrażanie takich wielkich liczb: to stała Avogadra  $N_A$ , która mówi nam o tym, że jeden mol to dokładnie 602 214 076 000 000 000 000 000 .....

Zamiast „w szklance wody jest około 6 022 140 760 000 000 000 000 000 cząsteczek  $H_2O$ ” możemy powiedzieć: „w szklance wody jest około 10 moli cząsteczek wody”.

# JEDNOSTKA LICZNOŚCI MATERII



Jeden mol to ogromna liczba, dokładnie 602 214 076 000 000 000 000 000!

Aby wyobrazić sobie ile to tak naprawdę jest, posłużymy się „jajecznym” przykładem. Jeśli przyjmiemy, że wszystkich ludzi na świecie jest około 7 600 000 000 (7,6 miliarda) i każdy człowiek na Ziemi zje dziennie jedno jajko, to jeden mol jajek zostanie zjedzony dopiero po 217 miliardach lat!

Dla porównania jeden mol cząsteczek wody ( $H_2O$ ) znajdziemy w 18 gramach wody, czyli mniej więcej w takiej ilości wody, jaka mieści się w podstawce do jajka.