

---

# Nowy Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI

Anna Szmyrka-Grzebyk, Aleksandra Kowal

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN im. Wł. Trzebiatowskiego, Wrocław

---

**Streszczenie.** 16 listopada 2018 r., po kilkunastu latach badań, Generalna Konferencja Miar (CGPM) zatwierdziła nowy międzynarodowy układ jednostek miar SI. Cztery podstawowe jednostki – kilogram, amper, kelwin i mol – zdefiniowane zostały przez odpowiednie stałe fizyczne: stałą Plancka  $h$ , ładunek elementarny  $e$ , stałą Boltzmana  $k$  i stałą Avogadra  $N_A$  czyniąc cały układ SI układem uniwersalnym, niezależnym od własności materii. Układ został tak opracowany, by zachować spójność z dotychczas obowiązującym. Zbudowane zostały wzorce jednostek gwarantujące osiągnięcie odpowiednio wysokiej dokładności pomiaru, a także dokumenty *Mise en pratique* opisujące praktyczną realizację poszczególnych jednostek miar. Nowy układ SI będzie obowiązywał od 20 maja 2019 r.

W artykule podano nowe definicje jednostek miar i omówiono podstawowe metody ich realizacji. Zamieszczono także obszerny wykaz literatury zawierający odnośniki do prac historycznych, najnowszych publikacji przeglądowych podsumowujących osiągnięte rezultaty, jak również do dokumentów opublikowanych przez Międzynarodowe Biuro Miar.

---

## 1. Wstęp

Obowiązujący od ponad pół wieku Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, znany jako układ SI<sup>1</sup> [1,2], wymagał kolejnej rewizji oraz istotnej zmiany. Układ SI zatwierdzony przez 9. Generalną Konferencję Miar (CGPM – General Conference on Weights and Measures) w 1960 r. definiował 6 podstawowych jednostek miar: metr, kilogram, sekunda, amper, kelwin, kandela. Są to odpowiednio jednostki długości, masy, czasu, natężenia prądu elektrycznego, temperatury i światłości. W 1971 r., na 14. Generalnej Konferencji Miar, do grupy podstawowych jednostek miar włączono mol – jednostkę liczności materii. Definicje jednostek miar tego układu mają różny charakter. Jeden metr to odległość, jaką pokonuje światło w próżni w czasie  $1/299\,792\,458$  s, co oznacza, że definicja metra powiązana jest z uniwersalną stałą fizyczną  $c$  – prędkością światła w próżni. Definicja sekundy – czas równy  $9\,192\,631\,770$  okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133 – związana jest z własnościami atomu. Definicje te mają charakter uniwersalny, nie podlegają zmianie w czasie. Inaczej jest zdefiniowany kilogram – jednostka masy, która jest równa masie artefaktu, międzynarodowego prototypu kilograma (*IPK* – International Prototype of Kilogram) przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM – International Bureau of Weights and Measures) w Sèvres czy jednostka temperatury – kelwin, równa  $1/273,16$  temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody. Do zdefinio-

wana tych jednostek wykorzystano własności materii, które mogą i ulegają zmianie w czasie.

Wzorcem kilograma jest walec wykonany ze stopu platyny (90 %) i irydu (10 %) o średnicy podstawy równej jego wysokości wynoszącej 39 mm [3]. Taki prototyp kilograma został wykonany około 1880 r., a już w 1889 r. Generalna Konferencja Miar uznała ten artefakt za międzynarodowy wzorec jednostki masy. Wykonano wówczas 40 kopii wzorca kilograma, spośród których wybrano 30 egzemplarzy o masie nieróżniącej się więcej niż o  $\pm 1$  mg od międzynarodowego wzorca i przekazano je narodowym instytutom metrologicznym (NMI – National Metrology Institute) w całym świecie, przede wszystkim sygnatariuszom Konwencji Metrycznej podpisanej 20 maja 1975 r. [4]. Przeprowadzone pod koniec ubiegłego wieku międzynarodowe porównania wzorców kilograma wykazały niewielkie, ale mierzalne zmiany masy –  $50\ \mu\text{g}/100$  lat – tych wzorców. Krzywe obrazujące zmiany masy kilkunastu egzemplarzy wzorców kilograma z wybranych instytutów metrologicznych dostępne są m.in. na stronie BIPM [5]. Wyniki porównań skłoniły międzynarodowe gremia metrologów do podjęcia działań zmierzających do zmiany definicji i wzorca jednostki masy. W 1999 r. na 21. posiedzeniu GCPM sformułowano rezolucję [6] zalecającą podjęcie badań mających na celu wykorzystanie nowoczesnych narzędzi jakich dostarcza współczesna nauka i technika do zdefiniowania jednostki masy przez stałą uniwersalną lub atomową, podobnie jak zostały wcześniej zdefiniowane jednostki miary długości i czasu. Stało się to inspiracją do szerszych zmian układu SI, a mianowicie podjęcia próby zdefiniowania także innych jednostek

---

1. Skrót od nazwy w języku angielskim International System of Units, the SI

miar za pomocą odpowiednich stałych fizycznych. I już w 2005 r. Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM – International Committee for Weights and Measures) rekomendował opracowania nowych definicji kilograma, ampera, kelwina i mola, w celu wyrażenia ich poprzez stałe uniwersalne. Wówczas realizacja wszystkich podstawowych jednostek miar układu SI byłaby niezależna od czasu, miejsca i innych czynników. Proponowanymi stałymi uniwersalnymi, z którymi mały być powiązane te jednostki są odpowiednio: stała Plancka  $h$  – kilogram, ładunek elementarny  $e$  – amper, stała Boltzmanna  $k$  – kelwin oraz stała Avogadra  $N_A$  – mol [7, 8].

W celu zachowania ciągłości z dotychczas obowiązującym układem przyjęto zachować takie wartości liczbowe stałych uniwersalnych, by nie zaburzały tej ciągłości. Redefinicja układu miała być procesem dwuetapowym. W początkowym etapie wartości liczbowe stałych uniwersalnych należało wyznaczyć w obecnym układzie SI stosując aktualne definicje jednostek miar. Kiedy wartości liczbowe stałych zostaną wyznaczone z niezbędną niepewnością, wówczas w drugim etapie redefinicji przyjmie się je za definicyjne w nowym układzie SI, a jednostki miar będą wynikały z przyjętych wartości definicyjnych stałych uniwersalnych [9].

## 2. Nowa koncepcja definiowania jednostek miar

Istotną zmianą nowego układu SI będzie sposób definiowania jednostek miar – przypisanie odpowiedniej wartości liczbowej stałej uniwersalnej, co implikuje wybór odpowiednich jednostek.

Definiowanie jednostek miar przez przypisanie wyznaczonej wartości liczbowej stałej uniwersalnej uzasadnia się w następujący sposób [10]:

Jeżeli  $Q$  jest wielkością uniwersalną, wynikającą z praw przyrody, wówczas jej wartość nie może być dowolnie wybrana. Ale zawsze wartość  $Q$  jest iloczynem wartości liczbowej oznaczonej symbolem  $\{Q\}$  i jednostki o symbolu  $[Q]$ . Przykładem jest stała uniwersalna  $c$  – prędkość światła zdefiniowana jako:  $c = \{c\} \times [c] = 299\,792\,458$  m/s. Wartość liczbową wynika z przyjętej w obecnie obowiązującym układzie SI jednostki miary prędkości (m/s).

Można też podejść inaczej do zdefiniowania stałej uniwersalnej przyjmując jej wartość liczbową  $\{Q\}$  za wielkość stałą (np.  $\{c\} = 299\,792\,458$  dokładnie), wówczas implikuje to przyjęcie określonej jednostki  $[Q]$  (w przedstawianym przykładzie  $[c] =$  m/s).

Przykład powyższy dowodzi, że przez wybór wartości liczbowej stałych uniwersalnych, fundamentalnych wielkości w przyrodzie, możemy dokonać zdefiniowania jednostki określonej wielkości.

## 3. Etapy badań

Na badania zostały skierowane duże środki finansowe z budżetu Unii Europejskiej. Uczestniczyły w nich także bardzo aktywnie instytuty spoza Europy, przede wszystkim ze Stanów Zjednoczonych, Kanady, Japonii, Chin, Korei Południowej, Australii. Sądzone, że kilkuletni wysiłek wiodących w świecie instytucji naukowych umożliwi redefinicję jednostek miar i zatwierdzenie nowego, „kwantowego” układu SI na początku drugiej dekady XXI wieku [11]. Rzeczywistość okazała się inna. Kolejne rezolucje wydawane przez Generalne Konferencje Miar w 2011 r. [12], a następnie 2014 r. [13] podkreślały istotny postęp w badaniach, ale osiągnięte rezultaty wciąż nie upoważniały do zatwierdzenia nowych definicji. Na wstępnym etapie prac założono, że nowy układ jednostek miar będzie mógł być zatwierdzony przez CGPM, o ile zostanie osiągnięta odpowiednia niepewność pomiaru poszczególnych stałych uniwersalnych.

Zadaniem jakie stanęło przed naukowcami było wyznaczenie wartości liczbowych stałych z dokładnością, która gwarantowałaby osiągnięcie niepewności pomiaru wielkości przez nie definiowanych nie mniejszej od niepewności osiąganych w dotychczasowym układzie SI. Ponadto najdokładniejsze wyniki należało potwierdzić przez zastosowanie jednej lub dwóch innych metody gwarantujących tylko nieco mniejszą dokładność.

Warunek ten okazał się wielkim wyzwaniem, szczególnie w przypadku pomiaru stałej Plancka  $h$  i redefinicji kilograma. Dopiero w 2017 r. wartości wszystkich stałych zostały wyznaczone z odpowiednią niepewnością. Committee on Data for Science and Technology (CODATA) opublikował osiągnięte wartości stałych [14, 15]:

$$\text{stała Plancka } h = 6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\text{z niepewnością } u = 1.0 \times 10^{-8},$$

$$\text{ładunek elementarny } e = 1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{z niepewnością } u = 5.2 \times 10^{-9},$$

$$\text{stała Boltzmanna } k = 1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

$$\text{z niepewnością } u = 3.7 \times 10^{-7},$$

$$\text{stała Avogadra } N_A = 6.022\,140\,758(62) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{z niepewnością } u = 1.0 \times 10^{-8}.$$

Wówczas Międzynarodowy Komitet Miar uznał za uzasadnione przyjęcie następujących wartości stałych uniwersalnych z zerową wartością niepewności:

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s},$$

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C},$$

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1},$$

$$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

i zarekomendowanie Generalnej Konferencji Miar za twierdzenie nowego układu jednostek miar SI [16]. Nastąpiło to na 26. posiedzeniu CGPM 16 listopada 2018 r. Nowe definicje obowiązywać będą od 20 maja 2019 r., w kolejną rocznicę podpisania Konwencji Metrycznej w 1875 r.

#### 4. Nowe definicje jednostek miar

Nazwa nowego układu jednostek miar nie ulegnie zmianie; nadal będzie obowiązywała obecna – Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI), w języku angielskim: *The International System of Unit (SI)*. Nowy system ma własne logo.



Logo Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI  
(dostępne do pobrania na [www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html](http://www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html))

Rekomendowany przez BIPM układ SI jest układem jednostek, w którym [16]:

- częstotliwość przejścia między nadsubtelnyymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu  $133 \Delta\nu_{Cs}$  wynosi  $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ ,
- prędkość światła w próżni  $c$  wynosi  $299\,792\,458 \text{ m/s}$ ,
- stała Plancka  $h$  wynosi  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- ładunek elementarny  $e$  wynosi  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,
- stała Boltzmanna  $k$  wynosi  $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,
- stała Avogadra  $N_A$  wynosi  $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
- światłość źródła emitującego promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ,  $K_{cd}$ , wynosi  $683 \text{ lm/W}$ ,

gdzie herc, dżul, kulomb, lumen, i wat, o symbolach Hz, J, C, lm i W, odnoszą się odpowiednio do jednostki sekundy, metra, kilograma, ampera, kelwina, mola i kandeli, z symbolami jednostek s, m, kg, A, K, mol i cd, zgodnie z zależnościami  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2\text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$  i  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ .

W nowym układzie SI została zmieniona kolejność prezentowania jednostek, tak by nie wprowadzać definicji jednostki podstawowej zależnej od innej znajdującej się na dalszej pozycji. Porządek ten jest więc następujący: s, m, kg, A, K, mol, cd.

Uwzględniając powyższe liczbowe wartości stałych uniwersalnych definicje 7 podstawowych jednostek miar będą następujące<sup>2</sup>:

**sekunda**, symbol s, jest jednostką czasu w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej częstotliwości przejścia między nadsubtelnyymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu  $133 \Delta\nu_{Cs}$  wynoszącej  $9\,192\,631\,770$ , kiedy wyrażona jest w jednostce Hz, która jest równa  $\text{s}^{-1}$ .

**metr**, symbol m, jest jednostką długości w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej prędkości światła w próżni  $c$  wynoszącej  $299\,792\,458$ , kiedy wyrażona jest w jednostce m/s, gdzie sekunda zdefiniowana jest przez częstotliwością atomu cezu  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**kilogram**, symbol kg, jest jednostką masy w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej stałej Plancka  $h$  wynoszącej  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ , kiedy wyrażona jest w jednostce J s, która jest równa  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , gdzie metr i sekunda są zdefiniowane przez  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

**amper**, symbol A, jest jednostką natężenia prądu elektrycznego w układzie SI. Jest ona zdefiniowana przez przyjęcie wartości liczbowej ładunku elektrycznego  $e$  wynoszącej  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ , kiedy wyrażona jest w jednostce C, która jest równa A s, gdzie sekunda jest zdefiniowana przez  $\Delta\nu_{Cs}$ .

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

**mol**, symbol mol, jest jednostką liczności materii w układzie SI. Jeden mol zawiera dokładnie  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  cząstek elementarnych. Ta liczba jest przypisaną wartością liczbową stałej Avogadra  $N_A$ , kiedy wyrażona jest w jednostce  $\text{mol}^{-1}$  i nosi nazwę liczby Avogadra.

Liczność materii, o symbolu  $n$ , jest miarą liczby określonych cząstek elementarnych. Cząstkami elementarnymi mogą być atomy, molekuly, jony, elektrony i inne cząstki lub określone grupy cząstek.

**kandela**, o symbolu cd, jest w układzie SI jednostką natężenia światła w określonym kierunku. Jest zdefiniowana przez wartość liczbową natężenia światła

2. Podane definicje zostały przetłumaczone z języka angielskiego przez autorkę artykułu

monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , która wynosi 683, kiedy jest wyrażona w jednostce  $\text{lm W}^{-1}$ , gdy jest równa  $\text{cd sr W}^{-1}$  lub  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ , kiedy kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane przez  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .

## 5. Wzorce jednostek miar nowego układu SI

### 5.1. Kilogram

Dotychczasowy międzynarodowy wzorzec masy *IPK* (*International Prototype of Kilogram*) – artefakt o masie 1 kg – zostanie zastąpiony urządzeniem umożliwiającym wyznaczenie stałej Plancka  $h$  przez porównanie energii elektrycznej wyrażonej w watach i energii mechanicznej wyrażonej w jednostkach masy (w kilogramach). Urządzenie to w języku angielskim nosi nazwę *watt balance*, której tłumaczenie na język polski zaproponowane przez J. Borzumińskiego z Głównego Urzędu Miar powinno brzmieć *waga watowa* [17]. W 2016 r. Międzynarodowe Biuro Miar zarekomendowało stosowanie nazwy *Kibble balance* (*waga Kibble'a*), od nazwiska pierwszego konstruktora takiej wagi – B.K. Kibble z National Physical Laboratory (NPL) w Wielkiej Brytanii [18]. Waga Kibble'a jest urządzeniem za pomocą którego można wyznaczyć związek między jednostkami elektrycznymi i mechanicznymi układu SI:

$$UI = mgv,$$

gdzie  $U$  jest napięciem indukowanym na zaciskach kołistej cewki poruszającej się pionowo w radialnym polu magnetycznym o indukcji  $B$  z prędkością  $v$ ;  $I$  jest natężeniem prądu w cewce, kiedy cewka znajduje się w polu o takiej samej indukcji  $B$  a siła wywołana prądem  $I$  i indukcją  $B$  dokładnie równoważy ciężar  $m \times g$  (siłę;  $g$  – stała grawitacji) wzorca masy  $m$ .

W celu ustanowienia związku między makroskopową masą  $m$  i stałą Plancka  $h$  w eksperymencie mierzone są dwie wielkości elektryczne, napięcie  $U$  i prąd  $I$ , stosując metody oparte na makroskopowych efektach kwantowych – efekcie Josephsona i kwantowym efekcie Halla. Efekty te pozwalają na powiązanie wielkości elektrycznych z dwoma stałymi elementarnymi: ładunkiem elementarnym  $e$  i stałą Plancka  $h$  [19].

Zdefiniowanie kilograma przez stałą  $h$  gwarantuje jej uniwersalność, niezmienniczość, a przede wszystkim niezależność od własności materii. Wzorcem tak zdefiniowanej jednostki masy będzie waga Kibble'a. Zasada działania wagi Kibble'a opisana jest m.in. na stronie BIPM [18] oraz w licznych publikacjach, z których kilka cytowano w niniejszej pracy [19–23]. Są to prace najnowsze, które zawierają odnośniki do wcześniejszych opracowań. Praktyczna realizacja jednostki masy opi-

sana jest też w dokumencie „*Mise en pratique of the definition of the kilogram*” [24].

Po zatwierdzeniu nowej definicji kilograma, opartej na stałej uniwersalnej  $h$ , masa dotychczasowego międzynarodowego wzorca kilograma *IPK* będzie nadal wynosić 1 kg z tym, że do wartości tej zostanie przypisana niepewność  $1 \times 10^{-8}$ . Należy zauważyć, że waga Kibble'a może być wykorzystywana do wyznaczania dowolnej wartości masy z dużą dokładnością. W przypadku dotychczas stosowanego artefaktu tylko masa 1 kilograma jest wyznaczana z najmniejszą niepewnością ( $1 \times 10^{-8}$ ), natomiast, gdy wyznaczane są wartości masy dużo mniejsze od 1 kg, niepewność pomiaru znacznie wzrasta, nawet do  $10^{-4}$  dla mas o wartości miligramów.

### 5.2. Mol

W początkowym etapie prac nad redefinicją kilograma rozważano możliwość powiązania definicji jednostki masy, kg, także ze stałą Avogadra  $N_A$ . Stała Avogadra określa liczbę cząstek elementarnych zawartych w molu substancji. Mol w dotychczasowym układzie SI jest jednostką liczności materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kg izotopu węgla  $^{12}\text{C}$ . Kilogram mógłby być zdefiniowany jako masa ( $10^3 N_A \text{ mol}/12$ ) atomów węgla  $^{12}\text{C}$  przez ustalenie bardzo dokładnej wartości liczbowej stałej  $N_A$ . Wymagałoby to wyrażenia stałej Avogadra z niepewnością nie większą niż  $2 \times 10^{-8}$ . W połowie poprzedniej dekady osiągnięcie takiej wartości niepewności nie było łatwe, więc stosunkowo szybko zdecydowano, że definicja kilograma będzie wyrażana przez stałą Plancka  $h$ , natomiast stała Avogadra  $N_A$  będzie definiowała jednostkę liczności materii.

Badania nad redefinicją mola koordynowane były przez BIPM w ramach projektu o nazwie *Avogadro Project* [25]. Do badań wybrano krzem, ponieważ można z niego wykonać duży, o wysokiej czystości, niemalże idealny monokryształ. Prowadzone badania miały na celu wyznaczenie z najwyższą osiągalną dokładnością składu izotopowego dwóch kul krzemowych, masy molowej, masy, objętości i gęstości, a także parametrów sieci krystalicznej krzemu. Wielkości te niezbędne są do wyznaczenia stałej Avogadra  $N_A$ , która opisywana jest zależnością:

$$N_A = \frac{n M}{\rho a^3}$$

gdzie  $n$ ,  $M$ ,  $\rho$  i  $a$  są odpowiednio liczbą atomów w komórce elementarnej (w przypadku  $^{28}\text{Si}$   $n = 8$ ), masą molową, gęstością i parametrem sieci krystalograficznej. W badaniach zastosowano dyfrakcyjny pomiar gęstości elektronowej (*X-Ray Crystal Density Technique – XRCDD*). Masy  $m$  obu kul wykonanych z izotopu  $^{28}\text{Si}$  porównywane były z masą wzorca kilograma *IPK*. Pomiar

zostały uznane za satysfakcjonujące, gdy osiągnięto standardową niepewność pomiaru masy mniejszą niż  $5 \mu\text{g}$  ( $5 \times 10^{-9}$ ).

Szereg badań, które doprowadziły do osiągnięcia tak dużej dokładności pomiaru stałej Avogadra  $N_A$  zostało opisanych w pacach opublikowanych w 2011 r. w specjalnie poświęconemu temu zagadnieniu numerze Metrologii [26]. Obszerną publikację w języku polskim na temat *Projektu Avogadra* opracował Wł. Chyła [27]. Wyniki późniejszych badań, a także bogaty wykaz prac oryginalnych zawierają m.in. artykuły [28, 29]. Przykłady praktycznej realizacji jednostki miary liczności materii podane są w dokumencie „*Mise en pratique of the definition of the mole*” [30].

Wyznaczenie stałej Avogadra  $N_A$  z osiągniętą niepewnością pomiaru ( $1,0 \times 10^{-8}$ ) metodą XRCD ma też bardzo istotne znaczenie dla praktycznej realizacji jednostki masy, kilograma, zdefiniowanej przez stałą Plancka  $h$ . Może stanowić alternatywną metodę wyznaczania  $h$  przez pomiar wielkości określanej jako molowa stała Plancka  $N_A h$ , którą opisuje równanie:

$$N_A h = \alpha^2 c A_r(e) M_u / 2 R_\infty,$$

gdzie  $\alpha$  jest stałą struktury subtelnej,  $c$  – prędkością światła w próżni,  $A_r(e)$  – względną masę atomową elektronu,  $M_u$  – masą molową i  $R_\infty$  – stałą Rydberga. Ponieważ molową stałą Plancka  $N_A h$  można wyznaczyć bardzo dokładnie, z niepewnością  $4 \times 10^{-10}$  [20], a więc z dużo mniejszą niż stałą Plancka  $h$  czy stałą Avogadra  $N_A$ , możliwe staje się wyliczenie stałej  $h$  znając stałą  $N_A$  z odpowiednią niepewnością. A zatem stała Plancka  $h$  może być wyznaczona z wymaganą dużą dokładnością dwoma metodami opartymi na różnych zjawiskach fizycznych – stosując wagę Kibble’a lub XRCD technikę.

### 5.3. Amper

W obowiązującym układzie SI, amper, jednostka wielkości elektrycznej – natężenia prądu, zdefiniowana jest w następujący sposób:

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

Definicja ta jest pojęciowo trudna, trudna jest też w praktycznej realizacji, a osiągnięta niepewność pomiaru jest duża, znacznie większa niż można uzyskać dla innych jednostek wielkości elektrycznych takich jak napięcie czy opór elektryczny. Szczególnie duży postęp

w metrologii elektrycznej osiągnięto w latach 80. ubiegłego wieku dzięki pracom B. Josephsona i K. von Klitzinga, którzy odkryli występowanie makroskopowych efektów kwantowych w niskich temperaturach, pozwalających na bardzo dokładne wyznaczenie wartości napięcia i oporu elektrycznego [31].

Efekt Josephsona to zjawisko związane z tunelowaniem par Coopera w złączu dwóch nadprzewodników rozdzielonych izolatorem, w wyniku którego powstaje napięcie  $U$  równe:

$$U = \frac{hf}{2e}$$

gdzie  $h$  jest stałą Plancka,  $f$  – częstotliwością promieniowania elektromagnetycznego,  $e$  – ładunkiem elementarnym. Wielkość

$$K_J = \frac{2e}{h}$$

jest stałą uniwersalną, która od nazwiska odkrywcy nosi nazwę stałej Josephsona, a jej wartość liczbową zatwierdzona przez CODATA od 1990 r. wynosiła [32]:

$$K_{J-90} = 483,5979 \times 10^9 \text{ Hz}$$

z niepewnością  $u = 4 \times 10^{-7}$ .

Klaus von Klitzing<sup>3</sup> zaobserwował na próbkach dwuwymiarowych w bardzo niskich temperaturach (poniżej 4,2 K) i silnych polach magnetycznych (kilku tesli) występowanie skwantowanych wartości oporu elektrycznego (kwantowy efekt Halla) dających opisać się zależnością:

$$R = \frac{h}{ne^2}$$

gdzie  $R$  jest oporem elektrycznym,  $h$  – stałą Plancka,  $e$  – ładunkiem elektrycznym, a  $n$  – małą liczbą naturalną. Wielkość

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

jest wielkością stałą (stała Klitzinga) wiążącą wartość oporu elektrycznego z dwoma stałymi uniwersalnymi. Wartość  $R_{K-90}$  przyjęta w 1990 r. wynosiła 25812,807  $\Omega$  z niepewnością  $u = 2 \times 10^{-7}$  [32].

Z uwagi na uzyskiwaną znacznie niższą wartością niepewności pomiaru napięcia i oporu elektrycznego oba efekty kwantowe już w ostatniej dekadzie ubiegłego

3. Klaus von Klitzing, laureat nagrody Nobla w 1985 r., jest obecnie bardzo aktywnie zaangażowany w promocję nowego układu jednostek miar SI. Odwiedził także kilkakrotnie Polskę. Uczestniczył w QM 2016 – 5th International Conference on Quantum Metrology zorganizowanej przez Politechnikę Poznańską w 2016 r. z wykładem *Fundamental Constants: The Basis for a New SI*, a na zaproszenie Politechniki Wrocławskiej w 2018 r. wygłosił referat *A New Kilogram in 2019: the Biggest Revolution in Metrology since the French Revolution* (Interdyscyplinarne Seminarium Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 18.04.2018).

wieku stosowano do praktycznej realizacji wzorców jednostek miar wielkości elektrycznych w miejsce wzorców ampera opartych na obowiązującej definicji SI. W nowym układzie jednostek miar SI [34] jednostka napięcia, volt, będzie realizowana z wykorzystaniem efektu Josephsona przyjmując wyznaczoną z dokładnością 15 cyfr wartość stałej Josephsona  $K_J = 483\,597,848\,46\,894\text{ GHzV}^{-1}$ . Do wyznaczania jednostki oporu elektrycznego, oma, będzie stosowany kwantowy efekt Halla. Wyznaczona wartość stałej Klitzinga  $R_K$  wynosić będzie  $R_K = 25\,812,807\,459\,3045\ \Omega$ . Jednostka natężenia prądu elektrycznego  $I$ , amper, które zgodnie z prawem Ohma równe jest stosunkowi napięcia  $V$  i oporu  $R$ , będzie realizowana z zastosowaniem obu efektów kwantowych. Wartości liczbowe stałych  $K_{J-90}$  i  $R_{K-90}$  zostaną skorygowane do podanych wyżej wartości z uwagi na przyjętą przez CODATA w 2017 r. wartość stałej Plancka  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$  [14, 15].

Amper w nowym układzie SI jest zdefiniowany przez ładunek elektryczny  $e$ , którego wartość wynosi  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ , jednak praktyczna realizacja ampera w myśl definicji – przez wyznaczenie dokładnej wartości liczbowej  $e$ , jest wciąż trudna, a osiągnięcie niepewności pomiaru  $e$  przy zastosowaniu urządzeń typu SET – *single electron transport device* – generujących prąd elektryczny w kontrolowany sposób są na razie znacznie większe od niepewności pomiarów  $U$  i  $R$  opartych na efektach kwantowych [34].

#### 5.4. Kelwin

W dotychczas obowiązującym układzie jednostek miar SI definicja jednostki temperatury, kelwina, powiązana jest podobnie jak jednostka masy, kilogram, z wzorcem materialnym – z wodą. Kelwin – jednostka temperatury termodynamicznej – równy jest  $1/273,16$  temperatury punktu potrójnego wody. Definicja taka została zatwierdzona przez 10. Generalną Konferencję Miar już w 1954 r [35], w setną rocznicę zaproponowania jej przez lorda Kelvina. W taki sam sposób została też zdefiniowana w Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. (MST-90) [36]. Przeprowadzone na początku wieku międzynarodowe porównania dokładności realizacji temperatury punktu potrójnego wody wykazały zależność temperatury od składu izotopowego wody [37], w wyniku czego w 2005 r. Komitet Doradczy ds. Temperatury Międzynarodowego Biura Miar (BIPM CCT) zarekomendował przypisanie wartości dokładnie równej  $273,16\text{ K}$  punktowi potrójnemu wody o zdefiniowanym składzie izotopowym odpowiadającym składowi wody oceanicznej (SMOW) [38]. W praktyce punkt potrójny wody realizowany jest obecnie z niepewnością  $u = 1.8 \times 10^{-7}$  [39].

Nowa definicja kelwina wywodzi się z kinetyczno-molekularnej teorii gazów opracowanej w XIX wieku

przez J.C. Maxwella i L. Boltzmann [40, 41]. Dla gazu idealnego w stanie równowagi termodynamicznej średnia energia kinetyczna  $E_k$  cząstek jest opisana zależnością:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{i}{2} kT$$

gdzie  $m$  jest masą,  $v$  – prędkością,  $i$  – stopniem swobody (cząsteczki gazu mają 3 stopnie swobody),  $k$  – stałą Boltzmann i  $T$  – temperaturą termodynamiczną. Równanie wyraża związek między energią kinetyczną i temperaturą termodynamiczną:

$$E_k \sim kT$$

Stała Boltzmann  $k$  – uniwersalna stała fizyczna – jest współczynnikiem konwersji między średnią energią kinetyczną molekuł poruszających się w określonym kierunku w gazie idealnym i temperaturą termodynamiczną  $T$ . Naturalnym więc było wyrażenie jednostki temperatury za pomocą tej stałej.

Redefinicja kelwina w oparciu o stałą Boltzmann  $k$ , zgodnie z rekomendacją BIPM CCT [42] wymagała spełnienia dwóch warunków:

- stała  $k$  musi być wyznaczona z niepewnością mniejszą niż  $1 \times 10^{-6}$  przynajmniej jedną metodą,
- dwie różniące się od siebie metody muszą pozwolić na wyznaczenie stałej  $k$  z niepewnością nie mniejszą niż  $3 \times 10^{-6}$ .

Wyznaczenie stałej Boltzmann  $k$  z wymaganą niepewnością pomiaru umożliwiają trzy rodzaje termometrów pierwotnych, tzn. takich, w których mierzona wielkość (parametr termometryczny) powiązana jest z temperaturą termodynamiczną za pomocą znanych zależności nie zawierających innych wyrażen zależnych od temperatury:

- **gazowy termometr akustyczny (AGT – Acoustic Gas Thermometer)**, za pomocą którego wyznaczana jest zależność prędkości dźwięku  $c$  rozchodzącego się w gazie (argon lub hel) od temperatury termodynamicznej  $T$  opisana równaniem:

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

gdzie:  $\gamma_0 = C_p/C_v$  jest stosunkiem 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 [43, 44];

- **gazowy termometr dielektryczny (DCGT – Dielectric-constant gas thermometer)**, którego zasada działania polega na wyznaczeniu stałej dielektrycznej gazu w funkcji temperatury  $T$ . W równaniu stanu gęstość gazu jest zastąpiona przez stałą dielek-

tryczną  $\epsilon$  i przyjmuje postać:

$$p = kT(\epsilon - \epsilon_0)/\alpha_0$$

gdzie  $\epsilon_0$  – stała dielektryczna próżni i  $\alpha_0$  – statyczna polaryzowalność dipola elektrycznego atomu gazu [45,46];

- **termometr szumowy (JNT – Johnson Noise Thermometer)** – dokonuje pomiaru napięcia szumu cieplnego Johnsona na zaciskach elementów oporowych układu elektrycznego opisanego równaniem Nyquist’a

$$V_T^2 = 4kTR\Delta f$$

gdzie  $V_T$  – napięcie,  $k$  – stała Boltzmanna,  $T$  – temperatura termodynamiczna,  $R$  – opór elektryczny,  $\Delta f$  – częstotliwość [47,48].

Najdokładniej, z niepewnością  $u = 3.7 \cdot 10^{-7}$ , wartość stałej Boltzmanna  $k$  równą  $1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  wyznaczono za pomocą gazowego termometru akustycznego [49].

Konsekwencją wprowadzenia nowej definicji jednostki temperatury, kelwina, będzie przypisanie temperaturze punktu potrójnego wody równej nadal 273,16 K niepewności  $u = 3.7 \times 10^{-7}$ , co odpowiada wartości 0,1 mK.

Międzynarodowa Skala Temperatur z 1990 r. będzie nadal dokumentem aktualnym, opisującym praktyczną realizację kelwina. Uzupełni ją “*Mise en pratique of the definition of the kelvin*” [50].

W przypadku redefinicji kelwina, podobnie jak kilograma czy mola, kwartalnik *Metrologia* poświęcił specjalne wydanie [51] zawierające szereg prac przedstawiających wyniki badań, które doprowadziły do osiągnięcia wymaganej dokładności pomiaru stałej Boltzmanna  $k$ . Podsumowaniem tych badań był także referat inauguracyjny wygłoszony przez Michaela de Podesta *The definition of the kelvin in the new SI; its rationale, implementation and implications* [52] podczas XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science w Zakopanem w 2016 r, którego organizatorem był Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN oraz prace opublikowane w 2018 r [53, 54].

## 6. Informacje dla użytkowników

Międzynarodowe Biuro Miar wydało dokument *Information for users about the proposed revision of the SI*, dostępny na stronie BIPM [55], w którym podaje podstawowe informacje dotyczące wprowadzanego nowego systemu jednostek miar SI ważne dla zainteresowanych odbiorców. Podkreśla się, że mimo istotnych zmian jakie zostały dokonane w definicjach czterech jednostek – kilograma, ampera, kelwina i mola

– w rzeczywistości w świecie nauki, techniki i życiu każdego człowieka, zmiany te nie będą odczuwalne. Przede wszystkim definicje zostały tak zaproponowane, by zachowana została spójność z obowiązującym dotychczas systemem SI. Komitety Doradcze w BIPM, właściwe dla poszczególnych dziedzin, opracowały cytowane wyżej dokumenty *Mise en pratique* opisujące podstawowe zasady praktycznej realizacji poszczególnych jednostek.

Po zatwierdzeniu przez Generalną Konferencję Miar (CGPM) dnia 16 listopada 2018 r. definicje te będą obowiązywały od 20 maja 2019 r. 20 maja – to dzień podpisania Konwencji Metrycznej w 1875 r.; w dniu tym co roku celebrowane jest Dzień Metrologii.

## 7. Podsumowanie

Rekomendacja Międzynarodowego Biura Miar sformułowana w 2005 r. [7], której celem było zainicjowanie badań umożliwiających zdefiniowanie jednostek miar za pomocą stałych uniwersalnych stała się faktem. 26. Generalna Konferencja Miar 18 listopada 2018 r. zatwierdziła nowy Międzynarodowy System Jednostek Miar SI, często zwany układem kwantowym, który definiuje siedem podstawowych jednostek miar za pomocą stałych uniwersalnych czyniąc go niezależnym od czasu i miejsca praktycznej realizacji. Wartości stałych uniwersalnych – stałej Plancka  $h$ , ładunku elektrycznego  $e$ , stałej Boltzmanna  $k$  i stałej Avogadra  $N_A$  – rekomendowane do definicji jednostki masy (kilograma), natężenia prądu elektrycznego (ampera), temperatury (kelwina) oraz liczności materii (mola) zostały wyznaczone z wymaganą dużą dokładnością uzasadniającą przeprowadzenie redefinicji tych jednostek.

W otwartej części posiedzenia CGPM poświęconej redefinicji jednostek miar, na której odbyło się głosowanie zatwierdzające nowy system SI, miały zaszczyt i przyjemność uczestniczyć także autorki niniejszej pracy.



Identyfikator upoważniający do udziału w 26. Posiedzeniu CGPM

## Appendix

### Państwowy wzorzec jednostki temperatury w INTiBS PAN

Metrologia temperatury w INTiBS PAN we Wrocławiu rozwijana jest przez ponad pół wieku. Niemal od

początku prace prowadzone były we współpracy z zagranicznymi instytutami metrologicznymi. Współpraca ta zaowocowała zbudowaniem stanowiska do realizacji Międzynarodowej Skali Temperatury z 1990 r. (MST-90) w zakresie temperatur od 13,8033 K do 273,16 K [56, 57], które w 2001 r. uzyskało rangę Państwowego Wzorca Jednostki Miary na mocy decyzji Prezesa Głównego Urzędu Miar [58]. Elementy wzorca uczestniczyły w porównaniach międzynarodowych potwierdzających wysoką dokładność osiąganych parametrów [59, 60]. W celu zapewnienia spójności pomiarowej z utrzymanym wzorcem Instytut wykonuje wzorcowania urządzeń do pomiaru temperatury w zakresie temperatur kriogenicznych dla licznych odbiorców zewnętrznych. Posiada także akredytację Polskiego Centrum Akredytacji na wzorcowanie termometrów w zakresie wyższych temperatur do 400 K (Certyfikat AP nr 125).

Instytut ma rangę Instytutu Desygnowanego w międzynarodowych organizacjach metrologicznych – w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM) i Europejskim Stowarzyszeniu Narodowych Instytutów Metrologicznych EURAMET. Od wielu lat aktywnie uczestniczy w realizacji międzynarodowych projektów badawczych pod auspicjami EURAMETu, Komitetu Technicznego ds. Temperatury w BIPM (CCT), a w 2016 r. był organizatorem prestiżowej w świecie konferencji TEMP-MEKO 2016 – XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurement in Industry and Science, która odbyła się w Zakopanem z udziałem blisko 400 uczestników z 46 krajów całego świata. Obecnie Instytut ubiega się o fundusze na budowę termometru akustycznego, który będzie realizował jednostkę temperatury zgodnie z nową definicją.

## Literatura

- [1] [www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-brochure](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-brochure); *The International System of Units*, SI Brochure. 8<sup>th</sup> edn.
- [2] Rozporządzenie RM z dnia 30 listopada 2006 r. w sprawie legalnych jednostek miar, Dz. Ustaw nr 225 (2006) poz. 1638
- [3] R.S. Davis, *The SI unit of mass*, Metrologia 40 (2003) 299-305
- [4] [www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention](http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention). *The Metre Convention*
- [5] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Why?
- [6] [www.bipm.org/en/CGPM/db/21/7/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/21/7/) Resolution 7 of the 21st CGPM (1999), *The definition of the kilogram*
- [7] [www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM/CIPM2005-EN.pdf](http://www.bipm.org/utis/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*
- [8] I.M. Mills, P.J. Mohr, T.J. Quinn, B.N. Taylor, E.R. Williams, *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole, proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)* Metrologia 43 (2006) 227-46
- [9] M. Stock *The revision of the SI – towards an international system of units based on defining constants*, Measurement Techniques 60 (2018) 1169-1177; DOI 10.1007/s11018-018-1336-2
- [10] P.J. Mohr, *Defining units in the quantum based SI*, Metrologia 45 (2008) 129-133
- [11] [www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/23/12/) Resolution 12 of the 23rd CGPM (2007), *On the possible of certain base units of the International System of Units (SI)*
- [12] [www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/) Resolution 1 of the 24th CGPM (2011), *On the possible future revision of the International System of Units, the SI*
- [13] [www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1/](http://www.bipm.org/en/CGPM/db/25/1/) Resolution 1 of the 25th CGPM (2014), *On the future revision of the International System of Units, the SI*
- [14] D. B. Newell, F. Cabiati, J. Fischer, K. Fujii, S.G. Karshenboim, H.S. Margolis, E de Mirandés, P.J. Mohr, F. Nez, K. Pachucki, T.J. Quinn, B.N. Taylor, M. Wang, B.M. Wood, Z. Zang, *The CODATA 2017 values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  for the Revision of the SI*, Metrologia 55 (2018) L13-L16
- [15] P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga *Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment*, Metrologia 55 (2018) 125-146
- [16] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft 9<sup>th</sup> edition of the SI Brochure (2018)
- [17] J. Borzymiński, *Problemy tłumaczenia terminów obcych i kształtowania nowych terminów w metrologii*, Metrologia i Probiernictwo, Biuletyn Głównego Urzędu Miar 3 (2015) 51-54
- [18] [www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/](http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/) *The BIPM Kibble balance (watt balance)*
- [19] Special issue, *Watt and Joule Balances, the Planck Constant and the Kilogram*, Metrologia 51 (2014) no 2
- [20] R.S. Davis, P. Barat, M. Stock, *A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram*, Metrologia 53 (2016) A12-A18
- [21] B. Wood, C. A. Sanchez, R. G. Green, J. O. Liard, *A summary of the Planck constant determinations using the NRC Kibble balance*, Metrologia 54 (2017) 399-409



- [22] H. Bettin, S. Schlamminger, *Realization, maintenance and dissemination of the kilogram in the revised SI*, *Metrologia* 53 (2016) A1-A5
- [23] A. Possolo, S. Schlamminger, S. Stoudt, J. R Pratt, C J Williams, *Evaluation of the accuracy, consistency, and stability of measurements of the Planck constant used in the redefinition of the international system of units*, *Metrologia* 55 (2018) 29-37
- [24] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI” CCM *Mise en pratique* of the definition of the kilogram
- [25] [www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/](http://www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/) International Avogadro Project
- [26] Special issue, *International determination of the Avogadro constant*, *Metrologia* 48 (2011) no 2
- [27] W.T. Chyla, *Projekt Avogadro (IAC) i redefinicja jednostki liczności materii*, *Wiadomości Chemiczne*, 66 (2012) 767-787
- [28] N. V. Abrosimov, D. G. Aref'ev, P. Becker, H. Bettin, A. D. Bulanov, M. F. Churbanov, S. V. Filimonov, V. A. Gavva, O. N. Godisov, A. V. Gusev, T. V. Kotereva, D. Nietzold, M. Peters, A. M. Potapov, H.J. Pohl, A. Pramann, H. Riemann, P.T. Scheel, R. Stosch, S. Wundrack, S. Zakel, *A new generation of 99.999% enriched  $^{28}\text{Si}$  single crystals for the determination of Avogadro's constant*, *Metrologia* 54 (2017) 599-609
- [29] K. Fujii, E. Massa, H. Bettin, N. Kuramoto, G. Mana, *Avogadro constant measurements using enriched  $^{28}\text{Si}$  monocrystals*, *Metrologia* 55 (2018) L1-L4
- [30] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI” CCQM *Mise en pratique* of the definition of the mole
- [31] B. Taylor, T. Witt, *New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall effects*, *Metrologia* 26 (1989) 47-62
- [32] P.J. Mohr, B.N. Taylor, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants:1998*, *Rev. Mod. Phys.* 72 (2000) 351-495
- [33] N. Fletcher, G. Rietveld, J. Olthoff, I. Budovsky, M. Milton, *Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 NCSLI Measure Journ.* 9 (2014) 30-35
- [34] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the “Revised SI” CCEM *Mise en pratique* for the definition of the ampere and other electric units in the SI
- [35] T. Quinn, *Temperature* (1990) Academic Press, London
- [36] H. Preston\_thomas, *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, *Metrologia* 27 (1990) 3-10
- [37] Renaot E., M.H. Valin, G. Bonnier, M. White, A. Van der Linden, G. Bairy, T. Kovacs, S. Nemeth, J. Bojkovski, R. Kuna, T. Weckström, J. Ivarsson, C. Rauta, F. Helgesen, A. Uytun, S. Ugur, J. Kryl, F. Adunka, J. Ronostaj, S. Duris, M. Anagnostou, E. Kokkini, A. Pauza, V. Augevicius, *Comparison of realizations of the triple-point of water; EUROMET project No 549*, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*, Zagreb-Croatia (2005) 1009–1016
- [38] [www.bipm.org/utills/en/pdf/CIPM/CIPM-2005EN.pdf](http://www.bipm.org/utills/en/pdf/CIPM/CIPM-2005EN.pdf) 94<sup>th</sup> meeting of CIPM(2005), Recommendation 2 (CI-2005): *Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature*
- [39] A. Peruzzi, R. Bosma, O. Kerkhof, R. Peter, M.D. del Campo Maldonado, M. Smid, D. Zvizdic, M.B. Nielsen, M. Anagnostou, E. Grudniewicz, M. Nedea, P. P. M. Steur, E. Filipe, I. Lobo, I. Antonsen, E. Renaot, T. Weckstrom, J. Bojkovski, E. Turzó-András, M. White, E. Tegeler, M. Dobre, J. Ranostaj, A. Kartal Dogan, V. Augevicius, A. Pokhodun and S. Simic, *Final Report on EUROMET.T-K7: Key comparison of water triple point cells*, *Metrologia* 46 (2009) Tech. Suppl. 03001
- [40] M de Podesta, *Rethinking the kelvin*, *Nature Physics*, 12 (2016) 104
- [41] B. Fellmuth, C. Gaiser, J. Fischer, *Determination of the Boltzmann constant – status and prospects*, *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006) R145-159
- [42] <http://www.bipm.org/utills/common/pdf/CC/CCT/CCT27.pdf> Consultative Committee for Thermometry Report of the 17th Meeting (2014) Recommendation CCT T1
- [43] M. Moldover, R.M. Gavioso, J.B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta, J.T. Zhang, *Acoustic gas thermometry*, *Metrologia* 51 (2015) R1-R9
- [44] L. Pitre, F. Sparasci, L. Risegari, C. Guianvarc'h, C. Martin, M. E. Himbert, M. D. Plimmer, A. Allard, B. Marty, P. A. Guliano Albo, B. Gao, M. R. Moldover, J. B. Mehl, *New measurement of the Boltzmann constant  $k$  by acoustic thermometry of helium-4 gas*, *Metrologia* 54 (2017) 856-873
- [45] C. Gaiser, T. Zandt, B. Fellmuth, *Dielectric-constant gas thermometry*, *Metrologia* 52 (2015) S217-S226

- [46] C. Gaiser, B. Fellmuth, N. Haft, A. Kuhn, B. Thiele-Krivoi, T. Zandt, J. Fischer, O. Jusko, W. Sabuga, *Final determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry*, Metrologia 54 (2017) 280-289
- [47] J. Qu, S.P. Benz, A. Pollarolo, H. Rogalla, W.L. Tew, R. White, K. Zhou, *Improved electronic measurement of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry* Metrologia 52 (2015) S242-S256
- [48] N. E. Flowers-Jacobs, A. Pollarolo, K. J. Coakley, A. E. Fox, H. Rogalla, W. L. Tew, S. P. Benz *A Boltzmann constant determination based on Johnson noise thermometry*, Metrologia 54 (2017) 730-737
- [49] [www.BIPM.org/cc/AllowedDocuments.jsp](http://www.BIPM.org/cc/AllowedDocuments.jsp) (2017)  
J. Fischer, *Task Group on the SI (TG-SI) Report to CCT*
- [50] [www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/](http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/) *On the future revision of the SI./Key Documents Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the "Revised SI" CCT Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI*
- [51] *Special Issue Focus on the Boltzmann Constant* Metrologia 52 (2015) vol. 2
- [52] M. de Podesta *The definition of the kelvin in the new SI; its rationale, implementation and implications*, XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Zakopane (2016), invited lecture
- [53] J. Fischer, B. Fellmuth, C. Gaiser, T. Zandt, L. Pitre, F. Sparasci, M.D. Plimmer, M. de Podesta, R. Underwood, G. Sutton, G. Machin, R.M. Gavioso, D. Madonna Ripa, P.P.M. Steur, J. Qu, X.J. Feng, J. Zhang, M.R. Moldover, S.P. Benz, D.R. White, L. Gianfrani, A. Castrillo, L. Moretti, B. Darquié, E. Moufarej, C. Daussy, S. Briaudeau, O. Kozlova, L. Risegari, J.J. Segovia, M.C. Martin. D del Campo, *The Boltzmann project*, Metrologia 55 (2018) R1-R20
- [54] G. Machin, *The kelvin redefined*, Meas. Sci. Technol. 29 (2018) 022001 (11pp)
- [55] <http://www.bipm.com/utis/common/pdf/SI-statement.pdf> *Information for users about the proposed revision of the SI*
- [56] A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipiński, H. Manuszkiwicz, *Wzorzec jednostki temperatury dla zakresu niskich temperatur w INTiBS PAN*, Krajowy Kongres Metrologii – KKM'2001, Warszawa (2001)
- [57] A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipiński, H. Manuszkiwicz, A. Kowal, A. Grykałowska, D. Jancewicz, *Measuring Systems for Thermometer Calibration in Low-Temperature Range*, Intern. J Thermophys 32 (2011) 2466-2472
- [58] GUM, *Zarządzenie nr 20 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 28 marca 2001 r.* (Dz. Urz. Głównego Urzędu Miar Nr. 1, poz. 9) (2001)
- [59] K.D. Hill, A. Szmyrka-Grzebyk, L. Lipiński, Y. Hermie, L. Pitre, F. Sparasci, *CCT-K2.4: NRC/INTiBS/LNE-Cnam trilateral comparison of capsule-type standard platinum resistance thermometers from 13.8 K to 273.16 K*, Metrologia 49 (2012) Technical Suppl. 03005
- [60] A. Peruzzi, A. Szmyrka-Grzebyk, *Final report on EURAMET.T-K7.2: Bilateral comparison of water triple point cells*, Metrologia 49 (2012) Tech. Suppl. 03006