

# Międzynarodowy Układ Jednostek Miar

9 wydanie 2019

Główny Urząd Miar





**Międzynarodowy Układ Jednostek Miar  
(SI)**

### Oświadczenie o prawach autorskich

Broszura SI jest rozpowszechniana zgodnie z warunkami Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), która zezwala na nieograniczone korzystanie, dystrybucję i reprodukcję na dowolnym nośniku, pod warunkiem przyznania, w należyty sposób, kto jest rzeczywistym autorem i co jest źródłową publikacją, zamieszczenia linku do licencji Creative Commons oraz zamieszczenia uwagi, czy dokonano jakichś zmian, czy nie.

Niniejszy dokument został sporządzony po uzyskaniu zgody BIPM, które zachowuje pełne prawa autorskie we wszystkich krajach. BIPM nie ponosi żadnej odpowiedzialności za trafność, dokładność, kompletność lub jakość informacji i materiałów oferowanych w jakimkolwiek tłumaczeniu. Jediną oficjalną wersją jest oryginalna wersja dokumentu opublikowanego przez BIPM.

Wydanie polskie przygotowane w Biurze Strategii Głównego Urzędu Miar

Tłumaczenie: dr inż. Jerzy Borzymiński, dr Agnieszka Zoń, mgr inż. Aleksandra Gadomska

Redakcja: dr Agnieszka Zoń, dr inż. Jerzy Borzymiński, dr inż. Paweł Fotowicz, mgr inż. Elżbieta Michniewicz

Na podstawie tekstu opublikowanego w języku angielskim przez BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France, 9 wydanie z 2019 roku (v1.06)

Tytuł oryginału: „The International System of Units (SI)”

Załącznik 1 do polskiego wydania zawiera decyzje CGPM i CIPM opublikowane w języku angielskim

**Główny Urząd Miar**  
**2020**

# BIPM i Konwencja Metryczna

Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) utworzone zostało postanowieniem Konwencji Metrycznej podpisanej w Paryżu 20 maja 1875 roku przez siedemnaście Państw podczas końcowej sesji Konferencji dyplomatycznej w sprawie Metra. Do Konwencji wprowadzono poprawki w roku 1921.

BIPM ma swą siedzibę główną w pobliżu Paryża, na terenie (43 520 m<sup>2</sup>) wokół Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud), oddanego do jego dyspozycji przez Rząd Francuski. Jest ona utrzymywana wspólnie przez Kraje Członkowskie Konwencji Metrycznej.

Zadaniem BIPM jest zapewnienie ogólnoświatowego ujednoczenia pomiarów. Jego celami są:

- reprezentowanie ogólnoświatowej społeczności metrologów, maksymalizacja wiedzy o niej i jej oddziaływanie,
- bycie centrum naukowej i technicznej współpracy pomiędzy Państwami Członkowskimi, zapewniającym możliwości prowadzenia porównań międzynarodowych przy wspólnym ponoszeniu kosztów,
- bycie koordynatorem ogólnoświatowego systemu miar, zapewniającego porównywalne i akceptowane międzynarodowo wyniki pomiarów.

BIPM działa pod wyłącznym nadzorem Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM), który z kolei podlega zwierzchnictwu Generalnej Konferencji Miar (CGPM) i składa jej sprawozdania z prac zrealizowanych przez BIPM.

Delegaci z wszystkich Państw Członkowskich uczestniczą w Generalnej Konferencji, która zbiera się co cztery lata. Zadaniem tych spotkań jest:

- dyskusja i inicjowanie porozumień niezbędnych dla zapewnienia upowszechniania i ulepszania Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI) będącego współczesną postacią układu metrycznego;
- potwierdzenie wyników nowych podstawowych ustaleń metrologicznych oraz różnych rezolucji naukowych o zasięgu międzynarodowym;
- podejmowanie wszystkich ważniejszych decyzji odnoszących się do finansów, organizacji i rozwoju BIPM.

CIPM ma osiemnastu członków, po jednym z różnych Państw, obecnie zbiera się raz do roku. Członkowie tego Komitetu składają rządowi Państw Członkowskich raport roczny o administracyjnym i finansowym stanie BIPM. Głównym zadaniem CIPM jest zapewnienie ogólnoświatowej jednolitości w zakresie jednostek miar. Jest ono realizowane drogą działań bezpośrednich lub przez przedkładanie propozycji CGPM.

Wg stanu na dzień 20 maja 2019 roku było pięćdziesiąt dziewięć Państw Członkowskich:

Argentyna, Australia, Austria, Belgia, Brazylia, Bułgaria, Kanada, Chile, Chiny, Kolumbia, Chorwacja, Czechy, Dania, Egipt, Finlandia, Francja, Niemcy, Grecja, Węgry, Indie, Indonezja, Iran (Republika Islamska), Irak, Irlandia, Izrael, Włochy, Japonia, Kazachstan, Kenia, Korea (Republika), Litwa, Malezja, Meksyk, Czarnogóra, Holandia, Nowa Zelandia, Norwegia, Pakistan, Polska, Portugalia, Rumunia, Federacja Rosyjska, Arabia Saudyjska, Serbia, Singapur, Słowacja, Słowenia, Południowa Afryka, Hiszpania, Szwecja, Szwajcaria, Tajlandia, Tunezja, Turcja, Zjednoczone Emiraty Arabskie, Zjednoczone Królestwo, Stany Zjednoczone Ameryki i Urugwaj

Czterdzieści dwa państwa i gospodarki mają w Generalnej Konferencji status członków stowarzyszonych: Albania, Azerbejdżan, Bangladesz, Białoruś, Boliwia, Bośnia i Hercegowina, Botswana, CARICOM, Chińskie Tajpej, Kostaryka, Kuba, Ekwador, Estonia, Etiopia, Gruzja, Ghana, Hong Kong (Chiny), Jamajka, Kuwejt, Łotwa, Luksemburg, Malta, Mauritius, Mołdowa (Republika), Mongolia, Namibia, Oman, Panama, Paragwaj, Peru, Północna Macedonia, Filipiny, Katar, Seszele, Sri Lanka, Sudan, Arabska Republika Syrii, Tanzania (Zjednoczona Republika), Wietnam, Zambia i Zimbabwe

Działania BIPM, które początkowo ograniczały się do pomiarów masy i długości oraz do metrologicznych prac studialnych w dziedzinie tych wielkości, uległy poszerzeniu o wzorce pomiarowe z dziedziny elektryczności (1927), fotometrii i radiometrii (1937), promieniowania jonizującego (1960), a także o skale czasu (1988) oraz zagadnienia chemii (2000). W związku z tym pierwsze laboratoria zbudowane w latach 1876–1878, zostały powiększone w roku 1929. W latach 1963–1964 zbudowano nowe budynki dla laboratoriów promieniowania jonizującego, w roku 1984 do prac z laserami, w roku 1988 dla biblioteki i biur. W roku 2001 oddano do użytku nowy budynek mieszczący warsztat, biura i pokoje konferencyjne.

W laboratoriach BIPM pracuje około czterdziestu pięciu fizyków i techników. Prowadzą oni głównie metrologiczne prace badawcze, porównania międzynarodowe realizacji jednostek i wzorcowania wzorców pomiarowych. Doroczne Sprawozdanie Dyrektora informuje o szczegółach prowadzonych prac.

W następstwie rozszerzenia zakresu prac powierzonych BIPM w roku 1927, CIPM ustanowił ciała, nazwane Komitetami Doradczymi. Funkcją Komitetów Doradczych jest dostarczanie CIPM informacji w kwestiach, które zlecił im on w celu przestudiowania i wypracowania opinii. Komitety Doradcze, które mogą tworzyć doraźnie powoływane lub stałe grupy robocze do prowadzenia studiów w zakresie określonych zagadnień, są odpowiedzialne za koordynację międzynarodowych prac prowadzonych w powierzonych im obszarach oraz za przedkładanie CIPM propozycji zaleceń w zakresie jednostek miar.

Komitety Doradcze mają wspólne zasady działania (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). Spotykają się w nieregularnych odstępach czasu. Przewodniczący każdego Komitetu Doradczego jest desygnowany przez CIPM i jest z reguły członkiem CIPM. Członkami Komitetów Doradczych zostają, za zgodą CIPM, laboratoria metrologiczne i instytuty specjalistyczne, które kierują do prac w komitetach wybranych przez siebie delegatów. Ponadto są także indywidualni członkowie wyznaczeni przez CIPM oraz przedstawiciel BIPM (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). Obecnie istnieje dziesięć takich komitetów:

1. Komitet Doradczy ds. Elektryczności i Magnetyzmu (CCEM), ta nowa nazwa nadana została w roku 1997 założonemu w roku 1927 Komitetowi Doradczemu ds. Elektryczności (CCE);
2. Komitet Doradczy ds. Fotometrii i Radiometrii (CCPR), ta nowa nazwa nadana została w roku 1971 założonemu w roku 1933 Komitetowi Doradczemu ds. Fotometrii (CCP) (między rokiem 1930 a rokiem 1933 zagadnieniami dotyczącymi fotometrii zajmował się CCE);
3. Komitet Doradczy ds. Termometrii (CCT), założony w roku 1937;
4. Komitet Doradczy ds. Długości (CCL), ta nowa nazwa nadana została w roku 1997 założonemu w roku 1952 Komitetowi Doradczemu ds. Definicji Metra (CCDM);
5. Komitet Doradczy ds. Czasu i Częstotliwości (CCTF), ta nowa nazwa nadana została w roku 1997 założonemu w roku 1956 Komitetowi Doradczemu ds. Definicji Sekundy (CCDS);
6. Komitet Doradczy ds. Promieniowania Jonizującego (CCRI), ta nowa nazwa nadana została w roku 1997 założonemu w roku 1958 Komitetowi Doradczemu ds. Wzorców Promieniowania Jonizującego (w roku 1969 Komitet ten utworzył cztery sekcje: Sekcja I (Promieniowanie X i  $\gamma$ , elektrony), Sekcja II (Pomiary radionuklidów), Sekcja III (Pomiary neutronowe), Sekcja IV (Wzorce energii promieniowania  $\alpha$ ); w roku 1975 ostatnia z wymienionych sekcji została rozwiązana, a odpowiedzialność za jej zakres działania przejęła Sekcja II);

7. Komitet Doradczy ds. Jednostek Miar (CCU), założony w roku 1964 (Komitet ten zastąpił Komisję ds. Układu Jednostek Miar założoną przez CIPM w roku 1954);
8. Komitet Doradczy ds. Masy i Wielkości Powiązanych (CCM), założony w roku 1980;
9. Komitet Doradczy ds. Ilości Substancji: Metrologia w Chemii i Biologii (CCQM), założony w roku 1993;
10. Komitet Doradczy ds. Akustyki, Ultradźwięków i Drgań (CCAUV), założony w roku 1999.

Sprawozdania Generalnej Konferencji i CIPM są publikowane przez BIPM w następujących seriach:

- *Report of the meeting of the General Conference on Weights and Measures;*
- *Report of the meeting of the International Committee for Weights and Measures.*

CIPM zdecydował w roku 2003, że sprawozdania z posiedzeń Komitetów Doradczych nie będą więcej publikowane drukiem, lecz będą zamieszczane na stronie internetowej BIPM, w języku, w jakim zostały sporządzone.

BIPM publikuje także monografie na wybrane tematy metrologiczne, a także pod tytułem „Międzynarodowy Układ Jednostek Miar” (The International System of Units (SI)), niniejszą, okresowo aktualizowaną broszurę, w której zebrane są decyzje i zalecenia odnoszące się do jednostek miar.

Zbiór *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomy opublikowane w latach 1881–1966) oraz *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (11 tomów opublikowanych w latach 1966–1988) został decyzją CIPM ostatecznie zamknięty.

Prace naukowe BIPM są wydawane jako ogólnie dostępne publikacje naukowe.

Od roku 1965 czasopismo naukowe *Metrologia*, wydawane pod auspicjami CIPM, publikuje artykuły z zakresu metrologii naukowej, ulepszeń metod pomiaru, prac nad wzorcami i jednostkami miar, jak też sprawozdania z działalności, decyzje i zalecenia różnych gremiów roboczych powstałych w ramach Konwencji Metrycznej.

# Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI

# Spis treści

<b>Przedmowa do 9. wydania Broszury SI</b>	<b>8</b>
<b>1 Wprowadzenie</b>	<b>11</b>
1.1 SI i stałe definiujące	11
1.2 Motywy użycia stałych definiujących do zdefiniowania SI	11
1.3 Wdrożenie SI	12
<b>2 Międzynarodowy Układ Jednostek Miar</b>	<b>13</b>
2.1 Definiowanie jednostki miary wielkości	13
2.2 Definicja SI	13
2.2.1 Istota siedmiu stałych definiujących	14
2.3 Definicje jednostek SI	15
2.3.1 Jednostki podstawowe	16
2.3.2 Praktyczna realizacja jednostek SI	21
2.3.3 Wymiary wielkości	21
2.3.4 Jednostki pochodne	22
2.3.5 Jednostki wielkości opisujących zjawiska biologiczne i fizjologiczne	27
2.3.6 Jednostki SI w ramach ogólnej teorii względności	27
<b>3 Dziesiętne wielokrotności i podwielokrotności jednostek SI</b>	<b>28</b>
<b>4 Jednostki spoza SI przyjęte do stosowania wraz z SI</b>	<b>30</b>
<b>5 Zapisywanie symboli i nazw jednostek oraz wyrażanie wartości wielkości</b>	<b>32</b>
5.1 Stosowanie symboli i nazw jednostek	32
5.2 Symbole jednostek	32
5.3 Nazwy jednostek	32
5.4 Reguły i style redagowania przy wyrażaniu wartości wielkości	33
5.4.1 Wartość i liczbową wartość wielkości oraz stosowanie rachunku wielkości	33
5.4.2 Symbole wielkości i symbole jednostek	34
5.4.3 Format wartości wielkości	34
5.4.4 Format liczb i separator dziesiętny	35
5.4.5 Wyrażanie niepewności pomiaru związanej z wartością wielkości	35
5.4.6 Mnożenie lub dzielenie symboli wielkości, wartości wielkości i liczb	35
5.4.7 Wyrażanie wartości wielkości będących czystymi liczbami	36
5.4.8 Kąty płaskie, kąty bryłowe i kąty fazowe	36



<b>Załącznik 1.</b>	<b>Decyzje CGPM i CIPM</b>	<b>37</b>
<b>Załącznik 2.</b>	<b>Praktyczna realizacja definicji niektórych ważnych jednostek</b>	<b>86</b>
<b>Załącznik 3.</b>	<b>Jednostki wielkości fotochemicznych i fotobiologicznych</b>	<b>87</b>
<b>Załącznik 4.</b>	<b>Uwagi historyczne o tworzeniu Międzynarodowego Układu Jednostek Miar i jego jednostek podstawowych</b>	<b>88</b>
	<b>Część 1. Rozwój historyczny realizacji jednostek SI</b>	<b>88</b>
	<b>Część 2. Rozwój historyczny Międzynarodowego Układu Jednostek Miar</b>	<b>90</b>
	<b>Część 3. Jednostki podstawowe w perspektywie historycznej</b>	<b>92</b>
<b>Lista akronimów</b>		<b>96</b>
<b>Skorowidz</b>		<b>99</b>

## Przedmowa do 9. wydania Broszury SI

Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, SI, jest używany na całym świecie jako preferowany układ jednostek, podstawowy język nauki, technologii, przemysłu i handlu, od czasu jak został ustanowiony w roku 1960 rezolucją przyjętą na 11. spotkaniu Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM (znanej w języku angielskim jako General Conference on Weights and Measures, a w języku polskim jako Generalna Konferencja Miar).

Niniejsza broszura została opublikowana przez Bureau International des Poids et Mesures, BIPM (znane w języku angielskim jako International Bureau of Weights and Measures, a w języku polskim jako Międzynarodowe Biuro Miar) w celu promowania i wyjaśniania SI. Wymienia najważniejsze rezolucje CGPM i decyzje Comité International des Poids et Mesures, CIPM (znanego w języku angielskim jako International Committee on Weights and Measures, a w języku polskim jako Międzynarodowy Komitet Miar), które odnoszą się do układu metrycznego począwszy od pierwszego spotkania CGPM w roku 1889.

SI zawsze był praktycznym, dynamicznym układem, który ewoluował, aby wykorzystać najnowsze osiągnięcia naukowe i technologiczne. W szczególności, ogromny postęp w fizyce atomowej i metrologii kwantowej dokonany w ciągu ostatnich 50 lat umożliwił zdefiniowanie sekundy, metra i praktyczną reprezentację jednostek elektrycznych poprzez wykorzystanie zjawisk atomowych i kwantowych, co pozwoliło na osiągnięcie poziomów dokładności realizacji powiązanych z nimi jednostek miar z ograniczeniem spowodowanym jedynie przez nasze możliwości techniczne, a nie przez same definicje. Ten postęp w nauce wraz z rozwojem technologii pomiarowej umożliwiły zmiany SI, które były promowane i zostały wyjaśnione w poprzednich edycjach tej broszury.

Niniejsze, 9. wydanie broszury SI zostało przygotowane po przyjęciu przez 26. spotkanie CGPM zestawu daleko idących zmian. Spotkanie wprowadziło nowe podejście do wyrażania definicji jednostek w ogólności, a w szczególności do siedmiu jednostek podstawowych, poprzez ustalenie wartości liczbowych siedmiu „definiujących” stałych. Wśród nich są podstawowe stałe fizyczne, takie jak stała Plancka i prędkość światła, tak że definicje są oparte na naszym obecnym rozumieniu praw fizyki i je reprezentują. Po raz pierwszy dostępny jest pełny zestaw definicji, które nie odwołują się do żadnych wzorców w postaci artefaktów, właściwości materiałów, ani opisów pomiarów. Zmiany te umożliwiają realizację wszystkich jednostek z dokładnością, która jest ostatecznie ograniczona tylko przez kwantową strukturę przyrody i nasze możliwości techniczne, ale nie przez same definicje. Każde prawidłowe równanie fizyki, określające zależność między stałymi definiującymi a jednostką, może być wykorzystane do realizacji jednostki, stwarzając w ten sposób szansę na innowacje, a jej realizacja możliwa jest wszędzie, z dokładnością rosnącą w miarę postępu techniki. Zatem redefinicja stanowi znaczący i historyczny krok naprzód.

Zmiany zostały uzgodnione przez CGPM w listopadzie 2018 roku ze skutkiem od 20 maja 2019 roku, a data ta została wybrana, ponieważ jest to Światowy Dzień Metrologii

oraz dzień, w którym została podpisana w roku 1875 Konwencja Metryczna. Biorąc pod uwagę, że przyszły wpływ zmian będzie daleko idący, dużą uwagę zwrócono na to, aby te definicje były spójne z definicjami obowiązującymi w momencie wprowadzenia zmiany.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, od czasu jego utworzenia w roku 1960, był zawsze określany jako „SI” w skróconej formie. Zasada ta utrzymywana w poprzednich ośmiu edycjach tej broszury została potwierdzona w Rezolucji 1 przyjętej na 26. posiedzeniu CGPM, która również potwierdziła, że tytuł tej broszury będzie brzmiał po prostu „Międzynarodowy Układ Jednostek Miar”. To spójne podejście w odniesieniu do SI odzwierciedla wysiłki CGPM i CIPM w celu zapewnienia ciągłości ważności wyników pomiarów wyrażonych w jednostkach SI poprzez każdą dokonaną zmianę.

Tekst tej broszury został przygotowany w celu dostarczenia pełnego opisu SI oraz jego tła historycznego. Ma ona również cztery załączniki:

Załącznik 1 odtwarza, w porządku chronologicznym, wszystkie decyzje (rezolucje, zalecenia, deklaracje) ogłoszone od roku 1889 przez CGPM i CIPM na temat jednostek miar i Międzynarodowego Układu Jednostek Miar.

Załącznik 2 jest dostępny tylko w wersji elektronicznej ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Przedstawia praktyczną realizację siedmiu jednostek podstawowych i innych ważnych jednostek w każdej dziedzinie. Załącznik będzie regularnie aktualizowany, aby odzwierciedlić ulepszenia w technikach eksperymentalnych dostępnych do realizacji jednostek.

Załącznik 3 jest dostępny tylko w wersji elektronicznej ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Omawia jednostki wielkości fotochemicznych i fotobiologicznych.

Załącznik 4 zawiera kilka uwag na temat historii rozwoju SI.

Na zakończenie składamy podziękowania członkom Comité Consultatif des Unités CIPM, CCU (znanemu w języku angielskim jako Consultative Committee for Units, a w języku polskim jako Komitet Doradczy ds. Jednostek Miar), którzy byli odpowiedzialni za przygotowanie niniejszej broszury. Zarówno CCU, jak i CIPM zatwierdziły ostateczny tekst.

Marzec 2019



B. Inglis  
Prezes CIPM



J. Ullrich  
Prezes CCU



M.J.T. Milton  
Dyrektor BIPM

### Uwaga do tekstu

Na 22. spotkaniu CGPM, w roku 2003, zdecydowano, że – zgodnie z decyzją CIPM z roku 1997 – „symbolem separatora dziesiętnego jest albo kropka na dolnej krawędzi wiersza, albo przecinek na dolnej krawędzi wiersza”. W następstwie tej decyzji, i uwzględniając zwyczaje w obu językach, w tym wydaniu kropka na dolnej krawędzi wiersza jest używana jako separator dziesiętny w wersji angielskiej tekstu, a przecinek na dolnej krawędzi wiersza jest używany w wersji francuskiej tekstu. Nie ma to żadnej implikacji, jeśli chodzi o wyrażenie separatora dziesiętnego w innych językach. Niewielkie różnice w literowaniu występują w pisowni różnych krajów anglojęzycznych (np. “metre” i “meter”, “litre” i “liter”). Pod tym względem, tekst angielski zaprezentowany poniżej stosuje pisownię taką jak w serii norm ISO/IEC 80000 *Wielkości i jednostki*. Niemniej jednak symbole jednostek SI użyte w tej broszurze są te same we wszystkich językach.

Czytelnicy powinni zwrócić uwagę na to, że oficjalny zapis ze spotkań CGPM i sesji CIPM jest tekstem w języku francuskim. Ta broszura podaje tekst angielski, ale w przypadku, gdy potrzebne jest wiarygodne odniesienie lub, jeśli są wątpliwości co do interpretacji tekstu, należy posłużyć się tekstem francuskim.

# 1 Wprowadzenie

## 1.1 SI i stałe definiujące

Niniejsza broszura przedstawia informację o definicji i stosowaniu Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, powszechnie znanego jako SI (od francuskiej nazwy *Système international d'unités*), za który odpowiada Generalna Konferencja Miar (CGPM). W roku 1960 11. CGPM formalnie zdefiniowała i ustanowiła SI, a następnie, co pewien czas, CGPM nowelizowała go w odpowiedzi na postulaty użytkowników i w ślad za postępem nauki i techniki. Ostatnio dokonano chyba najbardziej znaczącej nowelizacji od czasu ustanowienia SI. Nastąpiło to podczas 26. posiedzenia CGPM (2018), a treść nowelizacji zawarta jest w 9. wydaniu Broszury SI. Konwencja Metryczna i jej organy, CGPM, Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM), Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) oraz Komitety Doradcze opisane są w tekście pt. „BIPM i Konwencja Metryczna” na stronie 3.

SI jest logicznie skonstruowanym układem jednostek miar do stosowania we wszystkich dziedzinach życia, włącznie z handlem międzynarodowym, wytwórczością, zabezpieczeniem przed zagrożeniami, bezpieczeństwem, ochroną zdrowia, ochroną środowiska i naukami podstawowymi, na których opierają się wymienione dziedziny. Układ wielkości stanowiący podstawę SI oraz równania określające zależności między nimi opierają się na współczesnym opisie przyrody, z którym dobrze zaznajomieni są pracownicy nauki i specjaliści z dziedziny techniki i inżynierii.

Definicje jednostek SI oparte są na zbiorze siedmiu stałych definiujących. Pełny układ jednostek może być wyprowadzony z ustalonych wartości tych stałych definiujących, wyrażonych w jednostkach SI. Siedem stałych definiujących jest najbardziej fundamentalną cechą definicji całego układu jednostek miar. Te szczególne stałe wybrano po upewnieniu się, że jest to najlepszy dobór, biorąc pod uwagę poprzednią definicję SI, która jest oparta na siedmiu jednostkach oraz postęp w nauce.

Różne metody eksperymentalne opisane przez Komitety Doradcze CIPM mogą posłużyć do realizacji definicji. Opisy tych realizacji określone są także jako “*mises en pratique*”. Realizacje mogą być nowelizowane, kiedy tylko opracowane zostają nowe eksperymenty. Z tego powodu sugestie, co do sposobu realizacji definicji, nie są zawarte w niniejszej broszurze, ale są dostępne na stronie internetowej BIPM.

## 1.2 Motywy użycia stałych definiujących do zdefiniowania SI

Dawniej jednostki SI wyrażano za pomocą zbioru – w ostatnim czasie siedmiu – *jednostek podstawowych*. Wszystkie inne jednostki, zwane *jednostkami pochodnymi*, tworzone są jako iloczyny potęg jednostek podstawowych.

Dla jednostek podstawowych stosowano definicje różnych typów: szczególne właściwości artefaktów, takie jak masa międzynarodowego prototypu (IPK) jednostki kilogram, szczególny stan fizyczny, taki jak punkt potrójny wody dla jednostki kelwin, wyidealizowane opisy eksperymentu, jak w przypadku ampera i kandeli, albo stałe występujące w przyrodzie, jak prędkość światła w definicji jednostki metr. Aby możliwe były ich praktyczne zastosowania, nie wystarczy, aby jednostki te były jedynie zdefiniowane, ale niezbędna jest jeszcze fizyczna ich realizacja umożliwiająca ich przekazywanie. W przypadku artefaktu definicja i realizacja są równoważne – tą drogą poszły rozwinięte cywilizacje starożytne. Choć podejście to jest jasne i proste, artefakty są zagrożone ryzykiem ich utraty, uszkodzenia lub zmiany. Inne typy definicji jednostek stają się coraz bardziej wyidealizowane i abstrakcyjne. Tu natomiast realizacje są pojęciowo oddzielone od definicji tak,

że jednostki mogą, co do zasady, być realizowane w dowolnym miejscu i czasie. Co więcej, wraz z rozwojem nauki i techniki mogą być wprowadzane nowe i doskonalsze realizacje, bez potrzeby definiowania jednostki na nowo. Te zalety – najlepiej widoczne w przypadku historii definicji metra od artefaktu poprzez odniesienie w postaci przejścia atomowego do odniesienia w postaci ustalonej liczbowej wartości prędkości światła – doprowadziły do decyzji, aby zdefiniować jednostki za pomocą stałych definiujących.

Wybór jednostek podstawowych nigdy nie był jedynym możliwym, ale z upływem czasu ulegał rozszerzeniu i stał się dobrze znany użytkownikom SI. Opis w kategoriach jednostek podstawowych i pochodnych zachowano w obecnej definicji SI, ale został on na nowo sformułowany w konsekwencji przyjęcia stałych definiujących.

### 1.3 Wdrożenie SI

Definicje jednostek SI, zgodnie z decyzją CGPM, stanowią najwyższy poziom odniesienia w zakresie spójności wyniku pomiaru z SI.

Instytuty metrologiczne na całym świecie ustanawiają praktyczne realizacje definicji dla umożliwienia utrzymania spójności wyników pomiarów z SI. Komitety Doradcze zapewniają ramy organizacyjne dla ustanowienia równoważności tych realizacji, w celu zapewnienia ogólnoświatowej harmonizacji w zakresie spójności pomiarowej.

Organy normalizacyjne mogą sprecyzować dalsze szczegóły w odniesieniu do wielkości i jednostek oraz reguł ich stosowania tam, gdzie są one potrzebne zainteresowanym stronom. Wszędzie, gdzie działania takie dotyczą jednostek SI, normy muszą odwoływać się do definicji przyjętych przez CGPM. Wiele takich szczegółowych zapisów przywołanych jest np. w normach opracowanych przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną [International Organization for Standardization] i Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną [International Electrotechnical Commission] (seria norm międzynarodowych ISO/IEC 80000).

Poszczególne kraje mają ustanowione reguły dotyczące stosowania jednostek. Zawarte są one w prawodawstwie krajowym, ogólnie obowiązującym lub odnoszącym się do wskazanych dziedzin, takich jak handel, zdrowie, bezpieczeństwo publiczne czy kształcenie. Prawie we wszystkich krajach prawodawstwo to oparte jest na SI. Zadaniem Międzynarodowej Organizacji Metrologii Prawnej (OIML) jest międzynarodowa harmonizacja specyfikacji technicznych w tym prawodawstwie.

## 2 Międzynarodowy Układ Jednostek Miar

### 2.1 Definiowanie jednostki miary wielkości

Wartość wielkości na ogół wyrażana jest iloczynem liczby i jednostki. Jednostka jest szczególnym przykładem rozważanej wielkości, która jest użyta jako odniesienie, a liczba jest ilorazem wartości wielkości i jednostki.

W odniesieniu do danej wielkości można stosować różne jednostki. Na przykład, wartość prędkości  $v$  pewnej cząstki może być wyrażona jako  $v = 25 \text{ m/s}$  lub  $v = 90 \text{ km/h}$ , gdzie metr na sekundę i kilometr na godzinę są alternatywnymi jednostkami dla tej samej wartości wielkości, którą w rozważanym przypadku jest prędkość.

Przed podaniem wyniku pomiaru rzeczą zasadniczą jest, aby dla przedstawianej wielkości sporządzony został adekwatny jej opis. Może to być proste, jak w przypadku, np., długości jakiegoś pręta stalowego, ale może okazać się zadaniem złożonym, kiedy wymagana jest wyższa dokładność i tam, gdzie należy określić dodatkowe parametry jak, np., temperatura.

Kiedy podaje się wynik pomiaru, wymagane są: *estymowana wartość* mierzandu (wielkości, która ma być zmierzona) i *niepewność* odnosząca się do tej wartości. Wyrażone muszą być one za pomocą tej samej jednostki miary.

Na przykład, prędkość światła w próżni jest stałą, oznaczaną jako  $c$ , której wielkość w jednostkach SI jest podawana jako zależność  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ , gdzie liczbowa wartość to 299 792 458, a jednostką jest m/s.

### 2.2 Definicja SI

Jak w przypadku każdej wielkości, wartość stałej podstawowej można wyrazić jako iloczyn liczby i jednostki.

Podane poniżej definicje określają dokładną wartość liczbową każdej ze stałych, kiedy ich wartości wyrażone są w odpowiadających im jednostkach SI. Przez ustalenie dokładnej wartości liczbowej następuje zdefiniowanie jednostki, gdyż iloczyn *wartości liczbowej* i *jednostki* równy jest *wartości* stałej, która z założenia jest niezmienna.

Siedem stałych wybrano w taki sposób, że każda z jednostek SI może być zapisana albo za pomocą stałej definiującej, albo za pomocą iloczynu bądź ilorazu stałych definiujących.

Iloraz jednostek SI może być wyrażony przy zastosowaniu zarówno kreski pochyłej (/), jak i ujemnego wykładnika potęgi (°)

Na przykład:  
 $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$   
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

**Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, SI, jest układem jednostek, w którym**

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

gdzie herc, dżul, kulomb, lumen i wat, o symbolach – odpowiednio – Hz, J, C, lm i W, odniesione są do jednostek sekunda, metr, kilogram, amper, kelwin, mol i kandela, o symbolach jednostek – odpowiednio – s, m, kg, A, K, mol i cd, zgodnie z równościami  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$  oraz  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ .



Wartości liczbowe siedmiu stałych definiujących nie mają niepewności.

**Tablica 1. Siedem stałych definiujących SI i siedem odpowiadających im jednostek przez nie definiowanych**

Stała definiująca	Symbol	Wartość liczbową	Jednostka
częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
prędkość światła w próżni	$c$	299 792 458	$\text{m s}^{-1}$
stała Plancka	$h$	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
ładunek elementarny	$e$	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
stała Boltzmanna	$k$	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
stała Avogadra	$N_{\text{A}}$	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
skuteczność świetlna	$K_{\text{cd}}$	683	$\text{lm W}^{-1}$

Zachowanie ciągłości, tak daleko jak to tylko możliwe, pozostawało zawsze zasadniczą cechą wszelkich zmian w Międzynarodowym Układzie Jednostek Miar. Wartości liczbowe stałych definiujących dobrano tak, aby były one zgodne z wcześniejszymi definicjami tak daleko, na ile pozwalają na to postępy nauki i wiedzy.

## 2.2.1 Istota siedmiu stałych definiujących

Stałe definiujące są co do swej istoty zróżnicowane, gdyż zaliczają się do nich i wybrane stałe podstawowe, i wybrane stałe techniczne.

Zastosowanie stałej do zdefiniowania jednostki powoduje oddzielenie definicji od jej realizacji. Umożliwia to poszukiwanie zupełnie różnych albo nowych i doskonalszych, praktycznych realizacji możliwych dzięki rozwojowi techniki bez potrzeby zmiany definicji.

Stała techniczna taka jak  $K_{\text{cd}}$ , skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz, odnosi się do pewnego specjalnego zastosowania. W zasadzie, może ona zostać wybrana w dowolny sposób tak, aby uwzględnić fizjologiczne lub inne umowne czynniki wagowe. Inaczej dzieje się przy zastosowaniu stałej podstawowej występującej w przyrodzie, gdzie – w ogólnym przypadku – nie jest możliwy taki wybór, bo jest ona zależna od innych stałych poprzez równania fizyczne.

Zbiór siedmiu stałych definiujących dobrany został tak, aby zapewnić podstawowe, stabilne i uniwersalne odniesienie, które jednocześnie umożliwi realizację praktyczne z najmniejszymi niepewnościami. Techniczne konwencje i specyfikacje biorą także pod uwagę rozwój historyczny.

Zarówno stała Plancka  $h$ , jak i prędkość światła w próżni  $c$ , są słusznie określane jako stałe podstawowe. Określają one, odpowiednio, zjawiska kwantowe i właściwości czasoprzestrzenne i jednakowo oddziałują na wszystkie cząstki i pola, w każdej skali i w każdym otoczeniu.

Ładunek elementarny  $e$  odpowiada sile sprzężenia w postaci siły elektromagnetycznej poprzez stałą struktury subtelnej  $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$ , gdzie  $\epsilon_0$  jest przenikalnością elektryczną próżni, czyli stałą elektryczną. Niektóre teorie przewidują zmienność  $\alpha$  w czasie. Jednakże doświadczalne granice największej możliwej zmienności  $\alpha$  są tak niskie, że jakkolwiek wpływ na przewidywalne pomiary praktyczne może być wykluczony.



Stała Boltzmanna  $k$  jest stałą proporcjonalności pomiędzy temperaturą (w jednostce kelwin) a energią (w jednostce dżul), a jej wartość liczbową pochodzi z dawniej sporządzonych opisów skali temperatury. Temperatura układu odwzorowuje energię cieplną, niekoniecznie energię wewnętrzną układu. W fizyce statystycznej stała Boltzmanna wiąże entropię  $S$  z liczbą  $\Omega$  dostępnych stanów kwantowo-mechanicznych,  $S = k \ln \Omega$ .

Częstotliwość cezu  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, ma charakter parametru atomowego, który może ulec oddziaływaniom otoczenia, takim jak oddziaływania pól magnetycznych. Jednakże stanowiące jej źródło przejście nadsubtelne jest dobrze zbadane, stabilne i stanowi dobry wybór jako przejście odniesienia w rozważaniach praktycznych. Wybór parametru atomowego, jak  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , nie oddziela definicji od realizacji w ten sam sposób, jak  $h$ ,  $c$ ,  $e$  albo  $k$ , ale określa odniesienie.

Stała Avogadra  $N_{\text{A}}$  jest stałą proporcjonalności pomiędzy ilością substancji (o jednostce mol) a ilością zliczonych obiektów (o jednostce jeden, o symbolu 1). Ma zatem charakter stałej proporcjonalności podobnej do stałej Boltzmanna  $k$ .

Skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , jest stałą techniczną, która wyraża dokładną zależność liczbową pomiędzy czysto fizycznymi charakterystykami mocy promieniowania stymulującymi oko ludzkie (W), a jego fotobiologiczną odpowiedzią zdefiniowaną przez strumień świetlny odpowiedni do czułości widmowej wzorcowego obserwatora (lm) przy częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  herców.

## 2.3 Definicje jednostek SI

Przed przyjęciem w roku 2018 nowych definicji, SI był definiowany za pomocą siedmiu *jednostek podstawowych*, z których tworzone *jednostki pochodne* jako iloczyny potęg *jednostek podstawowych*. Definiowanie SI, poprzez ustalenie liczbowych wartości siedmiu stałych definiujących, powoduje w rezultacie, że to rozróżnienie nie jest w istocie potrzebne, gdyż wszystkie jednostki tak *podstawowe*, jak i *pochodne*, mogą być zbudowane ze stałych definiujących.

Tym niemniej pojęcia jednostek podstawowych i pochodnych zostają utrzymane ze względu na to, że jest to użyteczne i od dawna dobrze ugruntowane. Trzeba też pamiętać, że seria norm ISO/IEC 80000 wyróżnia wielkości podstawowe i pochodne, którym muszą odpowiadać jednostki podstawowe i pochodne.

## 2.3.1 Jednostki podstawowe

Jednostki podstawowe SI podane są w Tablicy 2.

**Tablica 2. Jednostki podstawowe SI**

Wielkości podstawowe		Jednostki podstawowe		Symbolami wielkości są co do zasady pojedyncze litery alfabetu łacińskiego lub greckiego, pisane czcionką pochylą i reguła ta ma charakter <i>zalecenia</i> . Symbole jednostek pisane są czcionką prostą i ta reguła ma charakter <i>obligatoryjny</i> (patrz rozdział 5).
Nazwa	Typowy symbol	Nazwa	Symbol	
czas	$t$	sekunda	s	
długość	$l, x, r, \text{etc.}$	metr	m	
masa	$m$	kilogram	kg	
prąd elektryczny	$I, i$	amper	A	
temperatura termodynamiczna	$T$	kelwin	K	
ilość substancji	$n$	mol	mol	
światłość	$I_v$	kandela	cd	

Poczynając od definicji SI w kategoriach ustalonych wartości liczbowych stałych definiujących, definicje każdej z siedmiu jednostek podstawowych są wyprowadzane przy użyciu, stosownie do przypadku, jednej lub więcej spośród tych stałych definiujących. W rezultacie daje to następujący zestaw siedmiu definicji:

### Sekunda

**Sekunda, symbol s, jest to jednostka SI czasu. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , to jest częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w niezaburzonej podstawie, wynoszącej 9 192 631 770, wyrażonej w jednostce Hz, która jest równa  $\text{s}^{-1}$ .**

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ . Odwrócenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na jednostkę sekunda w kategoriach wartości stałej  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{lub} \quad 1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

Efektom tej definicji jest to, że sekunda jest trwaniem 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami niezaburzonego stanu podstawowego atomu  $^{133}\text{Cs}$ .

Odniesienie do niezaburzonego atomu ma na celu wyjaśnienie, że definicja sekundy w SI oparta jest na wyizolowanym atomie cezu, niepoddanym zaburzeniom ze strony jakiegokolwiek zewnętrznego pola, np. otaczającego promieniowania ciała doskonale czarnego.

Tak zdefiniowana sekunda, jest jednostką czasu własnego w sensie ogólnej teorii względności. W celu wyznaczenia skali czasu koordynowanego, uśredniane są sygnały z różnych zegarów pierwotnych w różnych lokalizacjach, które muszą być korygowane ze względu na relatywistyczne przesunięcie częstotliwości cezowej (patrz punkt 2.3.6).

CIPM przyjął różne wtórne reprezentacje sekundy oparte na wybranej liczbie linii widmowych atomów, jonów i cząsteczek. Niezaburzone częstotliwości tych linii mogą być wyznaczone z niepewnością nie mniejszą niż ta, jaką osiąga się przy realizacji sekundy opartej na nadsubtelnej częstotliwości przejścia w cezie 133 [ $^{133}\text{Cs}$ ], przy czym niektóre mogą być odtwarzane z większą stabilnością.

## Metr

**Metr, symbol 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  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ . Odwrócenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na metr w kategoriach wartości stałych definiujących  $c$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

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

## Kilogram

**Kilogram, symbol kg, jest to jednostka SI masy. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka  $h$ , wynoszącej  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ , wyrażonej w jednostce  $\text{J s}$ , która jest równa  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ , przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą  $c$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Odwrócenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na kilogram w kategoriach trzech wartości stałych definiujących  $h$ ,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  i  $c$ :

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

co równoważne jest

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$

Efektom tej definicji jest to, że zostaje zdefiniowana jednostka  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$  (jednostka dwóch wielkości fizycznych, działania i momentu pędu). Wraz z definicjami sekundy i metra prowadzi to do definicji jednostki masy wyrażonej w kategoriach stałej Plancka  $h$ .

Poprzednia definicja kilograma ustalała wartość masy międzynarodowego prototypu,  $m(\mathcal{K})$ , jako równą dokładnie jednemu kilogramowi, a stała Plancka  $h$  musiała być wyznaczana doświadczalnie. Obecna definicja ustala wartość liczbową  $h$  jako dokładną, a masa prototypu musi być teraz wyznaczana doświadczalnie.

Liczba wybrana jako wartość liczbową stałej Plancka przyjęta w ww. definicji jest taka, że w chwili jej przyjęcia kilogram był równy masie międzynarodowego prototypu  $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$ , ze względną niepewnością standardową  $1 \times 10^{-8}$ , będącą w tym czasie niepewnością standardową z kombinacji najlepszych estymat wartości stałej Plancka.

Należy podkreślić, że obecna definicja umożliwia, w zasadzie, dokonanie pierwotnej realizacji, w dowolnym punkcie skali masy.

## Amper

**Amper, symbol 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, przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  A s. Odwrócenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na jednostkę amper w kategoriach wartości stałych definiujących  $e$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ A} = \left( \frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

co równoważne jest

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e$$

Następstwem tej definicji jest to, że jeden amper jest prądem elektrycznym odpowiadającym przepływowi  $1/(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})$  ładunków elementarnych na sekundę. Poprzednia definicja ampera oparta była na sile pomiędzy dwoma przewodnikami przewodzącymi prąd, a skutkiem jej było ustalenie wartości przenikalności magnetycznej próżni  $\mu_0$  (nazywanej również stałą magnetyczną) jako równej  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ , gdzie H i N oznaczają – odpowiednio – spójne jednostki pochodne henr i niuton. Nowa definicja ustala wartość  $e$  zamiast  $\mu_0$ . Skutkiem tego  $\mu_0$  musi być wyznaczana doświadczalnie.

Konsekwencją tego jest, że elektryczna przenikalność próżni  $\varepsilon_0$  (nazywana także stałą elektryczną), impedancja właściwa próżni  $Z_0$  i admitancja próżni  $Y_0$  stają się równe – odpowiednio –  $1/\mu_0 c^2$ ,  $\mu_0 c$  i  $1/\mu_0 c$ , a wartości  $\varepsilon_0$ ,  $Z_0$ , i  $Y_0$  muszą być teraz wyznaczone doświadczalnie; są one obciążone taką samą względną niepewnością standardową jak  $\mu_0$ , gdyż  $c$  jest znane dokładnie. Iloczyn  $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$  i iloraz  $Z_0/\mu_0 = c$  pozostają wartościami dokładnymi. W chwili przyjęcia obecnej definicji ampera,  $\mu_0$  była równa  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  ze względną niepewnością standardową  $2,3 \times 10^{-10}$ .

## Kelwin

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

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Odwrócenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na kelwin w kategoriach stałych  $k$ ,  $h$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ K} = \left( \frac{1,380\,649}{k} \right) \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

co równoważne jest

$$1 \text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}$$

Efektom tej definicji jest to, że jeden kelwin jest równy zmianie temperatury termodynamicznej, która powoduje zmianę energii cieplnej  $kT$  o  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  J.

Poprzednia definicja kelwina przyjmowała temperaturę punktu potrójnego wody  $T_{\text{TPW}}$ , jako równą dokładnie 273,16 K. Ponieważ obecna definicja kelwina ustala wartość liczbowa  $k$  zamiast  $T_{\text{TPW}}$ , druga z tych wartości wielkości musi być wyznaczona doświadczalnie. W czasie, gdy przyjmowano obecną definicję,  $T_{\text{TPW}}$  był równy dokładnie 273,16 K ze względną niepewnością standardową  $3,7 \times 10^{-7}$  opartą na pomiarze  $k$  wykonanym przed redefinicją.

Konsekwencją sposobu, w jaki definiowane były skale temperatury, pozostaje wyrażanie temperatury termodynamicznej, symbol  $T$ , w kategoriach jej różnicy w stosunku do temperatury odniesienia  $T_0 = 273,15$  K, bliskiej punktu lodu. Różnica ta zwana jest temperaturą Celsjusza, symbol  $t$ , definiowaną równaniem wielkościowym

$$t = T - T_0$$

Jednostką temperatury Celsjusza jest stopień Celsjusza, symbol  $^{\circ}\text{C}$ , który jest równy wielkością jednostce kelwin. Różnica lub przedział temperatury może być wyrażona w kelwinach lub stopniach Celsjusza. Wartość liczbowa różnicy temperatur będzie w obu przypadkach taka sama. Jednakże, wartość liczbowa temperatury Celsjusza wyrażona w stopniach Celsjusza powiązana jest z wartością liczbową temperatury termodynamicznej wyrażonej w kelwinach relacją

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

(w sprawie wyjaśnienia użytego tutaj zapisu patrz podpunkt 5.4.1).

Kelwin i stopień Celsjusza są także jednostkami Międzynarodowej Skali Temperatur 1990 (ITS-90) przyjętej przez CIPM w roku 1989 w Rezolucji 5 (CI-1989, PV, 57, 115). Należy zauważyć, że ITS-90 definiuje dwie wielkości  $T_{90}$  i  $t_{90}$ , które są bliskimi przybliżeniami odpowiadających im temperatur termodynamicznych  $T$  i  $t$ .

Należy podkreślić, że przy obecnej definicji, pierwotne realizacje kelwina mogą, w zasadzie, mieć miejsce w dowolnym punkcie skali temperatury.

## Mol

**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  $\text{mol}^{-1}$  i zwana jest 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.**

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Odwroćenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na mol w kategoriach stałej definiującej  $N_A$ :

$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$

Efektom tej definicji jest to, że mol jest ilością substancji układu zawierającego  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  obiektów elementarnych danego rodzaju.

Poprzednia definicja mola ustalała wartość molowej masy węgla 12,  $M(^{12}\text{C})$ , jako równą dokładnie 0,012 kg/mol. Zgodnie z obecną definicją  $M(^{12}\text{C})$  przestaje być uważana za dokładną i musi być wyznaczona doświadczalnie. Wartość wybrana dla  $N_A$  jest taka, że w chwili przyjęcia obecnej definicji mol,  $M(^{12}\text{C})$  był równy 0,012 kg/mol ze względną niepewnością standardową  $4,5 \times 10^{-10}$ .

Masa molowa dowolnego atomu lub cząsteczki  $X$  może być nadal otrzymywana z jej względnej masy atomowej z równania

$$M(X) = A_r(X) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(X) M_u$$

a masa molowa dowolnego atomu lub cząsteczki  $X$  jest również masą molową obiektu elementarnego  $m(X)$  poprzez relację

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u$$

W równaniach tych  $M_u$  jest masą molową równą  $M(^{12}\text{C})/12$ , a  $m_u$  jest stałą związaną z jednostką masy atomowej, równą  $m(^{12}\text{C})/12$ . Powiązane są one ze stałą Avogadra zależnością

$$M_u = N_A m_u$$

W nazwie „ilość substancji”, słowo „substancja” z reguły będzie zastępowane słowami szczegółowo określającymi substancję, o którą chodzi w każdym konkretnym zastosowaniu, na przykład „ilość chlorowodoru, HCl” albo „ilość benzenu, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>”. Ważne jest precyzyjne zdefiniowanie obiektu elementarnego, o który w danym wypadku chodzi (jak podkreśla się to w definicji mola); najlepiej, gdy robi się to podając wzór chemiczny materiału, o który w danym wypadku chodzi. Chociaż słowo „ilość” ma ogólniejszą definicję słownikową, skrócona postać pełnego terminu „ilość substancji”, tzn. „ilość”, może być stosowana, aby wypowiedź była zwięzła. Tak samo można postąpić w odniesieniu do wielkości pochodnej „stężenia ilości substancji”, używając krótszego terminu „stężenie molowe”<sup>N1</sup>. W dziedzinie chemii klinicznej nazwa „stężenie ilości substancji” jest na ogół skracana do postaci „stężenie substancji”.

## Kandela

**Kandela, symbol 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  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ , przy czym kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą  $h$ ,  $c$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ .**

Niniejsza definicja prowadzi do dokładnej zależności  $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$  dla monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $\nu = 540 \times 10^{12}$  Hz. Odwrócenie tej relacji daje dokładne wyrażenie na kandelę w kategoriach stałych definiujących  $K_{cd}$ ,  $h$  i  $\Delta\nu_{Cs}$ :

$$1 \text{ cd} = \left( \frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

co równoważne jest

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)^2\,683} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

Efektom tej definicji jest to, że jedna kandela jest światłością, w danym kierunku, źródła, które emituje monochromatyczne promieniowanie o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym  $(1/683)$  W/sr. Definicja steradiana jest dana w Tablicy 4.

<sup>N1</sup> Oba terminy są stosowane w języku polskim zgodnie z zaleceniami Polskiego Towarzystwa Chemicznego, Komisji Nomenklatury Chemicznej zawartymi w „Kompendium terminologii chemicznej”.

### 2.3.2 Praktyczna realizacja jednostek SI

Metody doświadczalne najwyższego poziomu stosowane do realizacji jednostek, w których wykorzystywane są równania fizyczne, nazywane są metodami pierwotnymi. Zasadniczą właściwością metody pierwotnej jest to, że pozwala ona, aby wielkość była mierzona w pewnej wybranej jednostce przy wykorzystaniu pomiarów tylko takich wielkości, w których nie stosuje się tej jednostki. W obecnym sformułowaniu SI podstawa definicji jest inna niż ta, którą stosowano poprzednio tak, że dla praktycznej realizacji jednostek SI mogą zostać wykorzystane nowe metody.

Zamiast określania w każdej definicji szczególnego warunku lub stanu fizycznego, który wyznacza zasadniczą granicę dokładności realizacji, użytkownik ma teraz swobodę wyboru dowolnego równania fizycznego, które wiąże stałe definiujące z wielkością, która ma być zmierzona. Jest to dużo bardziej ogólna metoda definiowania podstawowych jednostek miar. Nie podlega ona ograniczeniom wynikającym ze stanu dzisiejszej nauki czy techniki, przyszły rozwój może przynieść inne, bardziej dokładne sposoby realizacji jednostek. Przy definiowaniu w powyższy sposób nie ma w zasadzie ograniczeń dokładności, z jaką jednostka może być realizowana. Wyjątkiem pozostaje tu sekunda, w przypadku której oryginalne przejście mikrofalowe w cenie musi pozostać na razie podstawą definicji. Bardziej wyczerpujące wyjaśnienie realizacji jednostek SI podano w Załączniku 2.

### 2.3.3 Wymiary wielkości

Wielkości fizyczne mogą być uporządkowane w pewnym systemie wymiarów, o którego wyborze rozstrzyga konwencja. Uważa się, że każda z siedmiu jednostek podstawowych SI ma swój własny wymiar. Symbole przyjęte dla wielkości podstawowych oraz symbole przyjęte do oznaczania ich wymiarów przedstawione zostały w Tabelicy 3.

**Tabelica 3. Wielkości podstawowe i wymiary w SI**

Wielkość podstawowa	Symbol wielkości	Symbol wymiaru
czas	$t$	T
długość	$l, x, r, \text{etc.}$	L
masa	$m$	M
prąd elektryczny	$I, i$	I
temperatura termodynamiczna	$T$	$\Theta$
ilość substancji	$n$	N
światłość	$I_v$	J

Wszystkie inne wielkości, z wyjątkiem zliczeń, są wielkościami pochodnymi, które można wyrazić za pomocą wielkości podstawowych zgodnie z równaniami fizycznymi. Wymiary wielkości pochodnych wyrażane są jako iloczyny potęg wymiarów wielkości podstawowych przy użyciu równań wiążących wielkości pochodne z podstawowymi. Wymiar którejkolwiek z wielkości  $Q$  można wyrazić w postaci ogólnej jako iloczyn wymiarów,

$$\dim Q = T^{\alpha} L^{\beta} M^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$$

gdzie wykładniki  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta$  oraz  $\eta$ , które na ogół są małymi liczbami całkowitymi, a które mogą być dodatnie, ujemne lub równe zero, nazywają się wykładnikami wymiarowymi.



Istnieją wielkości  $Q$ , w przypadku których równanie definiujące jest takie, iż wszystkie wykładniki wymiarowe w równaniu na wymiar wielkości  $Q$  są równe zero. Taka sytuacja zachodzi dla każdej wielkości będącej z definicji ilorazem dwóch wielkości tego samego rodzaju. Na przykład, współczynnik załamania jest ilorazem dwóch prędkości, a względna przenikalność jest ilorazem przenikalności dielektrycznej ośrodka i przenikalności powietrza. Takie wielkości są po prostu liczbami. Związaną z nimi jednostką jest jednostka jeden, o symbolu 1, która jednakże rzadko bywa zapisywana *explicité* (patrz 5.4.7).

Istnieją także wielkości, które nie mogą być wyrażone w kategoriach siedmiu jednostek podstawowych SI, gdyż istotą ich jest zliczenie. Przykładami mogą być liczba cząsteczek, liczba komórkowych lub biomolekularnych obiektów (na przykład powtórzeń danej sekwencji nukleotydów w kwasie nukleinowym) lub degeneracja w mechanice kwantowej. Wielkości zliczeniowe są również wielkościami, z którymi związana jest jednostka jeden.

Jednostka jeden jest elementem neutralnym w każdym układzie jednostek – koniecznie i automatycznie obecnym. Nie ma wymogu, żeby wprowadzać ją formalną decyzją. Zatem, formalna spójność do SI może zostać ustanowiona poprzez właściwe, zwalidowane procedury pomiarowe.

Kąty płaskie i bryłowe, kiedy wyrażane są – odpowiednio – w radianach lub steradianach, są w istocie także traktowane w SI jako wielkości o jednostce jeden (patrz punkt 5.4.8). Symbole rad i sr są zapisywane *explicité* tam, gdzie jest to właściwe, w celu podkreślenia, że dla radianów lub steradianów, rozważana wielkość jest kątem płaskim lub bryłowym, albo jest z nim powiązana. Jeśli chodzi o steradiany, to, na przykład, podkreślają one rozróżnienie między jednostkami strumienia a natężenia w radiometrii i fotometrii. Jednakże jest z dawna utrwaloną praktyką w matematyce i we wszystkich dziedzinach nauki korzystać z tożsamości  $\text{rad} = 1$  i  $\text{sr} = 1$ . Ze względów historycznych radian i steradian traktowane są jak jednostki pochodne, jak opisano to w punkcie 2.3.4.

Szczególnie ważne jest, aby każdej wielkości o jednostce jeden towarzyszył klarowny opis (patrz punkt 5.4.7), w którym byłaby ona wyrażona jako iloraz wielkości tego samego rodzaju (na przykład iloraz długości lub ułamków molowych) lub jako liczba (na przykład liczba fotonów lub rozpadów).

### 2.3.4 Jednostki pochodne

Jednostki pochodne definiowane są jako iloczyny potęg jednostek podstawowych. Kiedy czynnik liczbowy w tym iloczynie jest równy jeden, tj. jednostki pochodne nazywane są *jednostkami pochodnymi spójnymi*. Jednostki podstawowe i jednostki pochodne spójne SI tworzą spójny zbiór, określany jako *zbiór spójnych jednostek SI*. Użyte tu słowo „spójny” oznacza, że równania wiążące liczbowe wartości wielkości przyjmują dokładnie taką samą postać jak równania wiążące same wielkości.

Niektóre spójne jednostki pochodne w SI mają nazwy specjalne. Tablica 4 wymienia 22 jednostki SI o nazwach specjalnych. Wraz z siedmioma jednostkami podstawowymi SI (Tablica 2) tworzą one rdzeń układu SI. Wszystkie inne jednostki SI są kombinacjami tych 29 jednostek.

Należy pamiętać, że którakolwiek spośród siedmiu jednostek podstawowych, bądź 22 jednostek SI o nazwach specjalnych, może być zbudowana bezpośrednio z siedmiu stałych definiujących. W istocie, jednostki siedmiu stałych definiujących obejmują zarówno jednostki podstawowe, jak i pochodne.

CGPM przyjął serię przedrostków do tworzenia dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności spójnych jednostek SI (patrz rozdział 3). Ułatwiają wyrażanie wartości wielkości dużo większych lub dużo mniejszych niż jednostka spójna. Jednakże przy stosowaniu przedrostków SI otrzymane tą drogą jednostki nie są już spójne, ponieważ



przedrostek wprowadza czynnik liczbowy różny od wartości jeden. Przedrostki mogą być stosowane z każdą z 29 jednostek SI, podstawowych i o nazwach specjalnych, z wyjątkiem jednostki podstawowej kilogram, co szerzej jest wyjaśnione w rozdziale 3.

**Tablica 4. 22 jednostki SI o nazwach i symbolach specjalnych**

Wielkość pochodna	Nazwa specjalna jednostki	Jednostka wyrażona za pomocą jednostek podstawowych <sup>(a)</sup>	Jednostka wyrażona za pomocą innych jednostek SI
kąt płaski	radian <sup>(b)</sup>	rad = m/m	
kąt bryłowy	steradian <sup>(c)</sup>	sr = m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
częstotliwość	herc <sup>(d)</sup>	Hz = s <sup>-1</sup>	
siła	niuton	N = kg m s <sup>-2</sup>	
ciśnienie, naprężenie	paskal	Pa = kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	
energia, praca, ilość ciepła	dżul	J = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	N m
moc, strumień promieniowania	wat	W = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	J/s
ładunek elektryczny	kulomb	C = A s	
różnica potencjałów elektrycznych <sup>(e)</sup>	wolt	V = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	W/A
pojemność	farad	F = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>	C/V
rezystancja elektryczna	om	Ω = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>	V/A
przewodność elektryczna	simens	S = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>	A/V
strumień magnetyczny	weber	Wb = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	V s
gęstość strumienia magnetycznego	tesla	T = kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	Wb/m <sup>2</sup>
indukcyjność	henr	H = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	Wb/A
temperatura Celsjusza	stopień Celsjusza <sup>(f)</sup>	°C = K	
strumień świetlny	lumen	lm = cd sr <sup>(g)</sup>	cd sr
natężenie oświetlenia	luks	lx = cd sr m <sup>-2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
aktywność radionuklidu <sup>(d, h)</sup>	bekerel	Bq = s <sup>-1</sup>	
dawka pochłonięta, kerma	grej	Gy = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
dawka równoważna, równoważnik dawki	siwert <sup>(i)</sup>	Sv = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
aktywność katalityczna	katal	kat = mol s <sup>-1</sup>	

- (a) Porządek symboli jednostek podstawowych jest w tej tablicy inny niż ten, który przyjęto w wydaniu 8. Obecny porządek przyjęto zgodnie z decyzją CCU podjętą na 21. spotkaniu (2013) po to, aby przywrócić pierwotny porządek określony w Rezolucji 12 przyjętej przez 11. CGPM (1960), w której niuton został zapisany jako kg m s<sup>-2</sup>, dżul jako kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>, a J s jako kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Zamiarem było tu odzwierciedlenie podstaw fizycznych w postaci odpowiednich równań wielkościowych, jednak dla niektórych bardziej złożonych jednostek pochodnych może to nie być możliwe.
- (b) Radian jest spójną jednostką kąta płaskiego. Jeden radian jest kątem środkowym okręgu opartym na łuku tego okręgu o długości równej promieniowi. Jest on również jednostką kąta fazowego. W przypadku zjawisk okresowych kąt fazowy wzrasta o 2π na okres. Radian był poprzednio jednostką uzupełniającą SI, ale kategoria zlikwidowana została w roku 1995.

- (c) Steradian jest spójną jednostką kąta bryłowego. Jeden steradian jest kątem bryłowym, którego wierzchołek leży w środku kuli i który jest oparty na części powierzchni kuli o polu równym kwadratowi promienia kuli. Podobnie jak radian, także steradian był poprzednio jednostką uzupełniającą SI.
- (d) Herc należy stosować jedynie w odniesieniu do zjawisk okresowych, a bekerel – tylko w odniesieniu do zjawisk stochastycznych pozostających w związku z aktywnością radionuklidu.
- (e) Różnica potencjałów elektrycznych zwana jest również w wielu krajach „woltażem”, jak też „napięciem elektrycznym” lub po prostu „napięciem”.
- (f) Stopień Celsjusza stosowany jest do wyrażania temperatur Celsjusza. Wartość liczbową różnicy temperatur lub przedziału temperatur jest taka sama, jeśli wyrażana jest w stopniach Celsjusza lub w kelwinach.
- (g) W fotometrii nazwa steradian i symbol sr są zachowywane w wyrażeniach odnoszących się do jednostek.
- (h) Aktywność radionuklidu jest czasem błędnie zwana radioaktywnością.
- (i) Patrz CIPM Recommendation 2 w sprawie stosowania siwerta (PV, 2002, 70, 205).

Jednostki ze zbioru siedmiu jednostek podstawowych i 22 jednostek SI o nazwach specjalnych mogą zostać użyte, w postaci odpowiedniej kombinacji, do wyrażenia jednostek innych wielkości pochodnych. Ponieważ liczba wielkości jest nieograniczona, nie jest możliwe podanie pełnej listy wielkości ani jednostek pochodnych. Tablica 5 podaje kilkanaście przykładów wielkości pochodnych i odpowiadających im spójnych jednostek pochodnych wyrażonych w kategoriach jednostek podstawowych. Ponadto, Tablica 6 podaje przykłady spójnych jednostek pochodnych, których nazwy i symbole zawierają również jednostki pochodne. Cały zbiór jednostek SI zawiera zarówno zbiór spójny, jak i wielokrotności i podwielokrotności utworzone przy zastosowaniu przedrostków SI.

**Tablica 5. Przykłady spójnych jednostek pochodnych SI wyrażonych w kategoriach jednostek podstawowych**

Wielkość pochodna	Typowy symbol wielkości	Jednostka pochodna wyrażona za pomocą jednostek podstawowych
pole powierzchni	$A$	$m^2$
objętość	$V$	$m^3$
prędkość	$v^{N2}$	$m s^{-1}$
przyspieszenie	$a$	$m s^{-2}$
liczba falowa	$\sigma$	$m^{-1}$
gęstość, gęstość masowa	$\rho$	$kg m^{-3}$
gęstość powierzchniowa	$\rho_A$	$kg m^{-2}$
objętość właściwa	$v$	$m^3 kg^{-1}$
gęstość prądu	$j$	$A m^{-2}$
natężenie pola magnetycznego	$H$	$A m^{-1}$
stężenie molowe	$c$	$mol m^{-3}$
stężenie masowe	$\rho, \gamma$	$kg m^{-3}$
luminancja	$L_v$	$cd m^{-2}$

<sup>N2</sup> W angielskim tekście Broszury SI używany jest symbol  $v$ .

**Tablica 6. Przykłady spójnych jednostek SI, których nazwy i symbole zawierają spójne jednostki pochodne SI o nazwach i symbolach specjalnych**

Wielkość pochodna	Nazwa spójnej jednostki pochodnej	Symbol	Jednostka pochodna wyrażona za pomocą jednostek podstawowych
lepkość dynamiczna	paskal razy sekunda	Pa s	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
moment siły	niuton razy metr	N m	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
napięcie powierzchniowe	niuton na metr	$\text{N m}^{-1}$	$\text{kg s}^{-2}$
prędkość kątowna, częstotliwość kątowna	radian na sekundę	$\text{rad s}^{-1}$	$\text{s}^{-1}$
przyspieszenie kątowe	radian na sekundę kwadrat	$\text{rad/s}^2$	$\text{s}^{-2}$
gęstość strumienia ciepła	wat na metr kwadratowy	$\text{W/m}^2$	$\text{kg s}^{-3}$
pojemność cieplna, entropia	dżul na kelwin	$\text{J K}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
pojemność cieplna właściwa, entropia właściwa	dżul na kilogram i kelwin	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
energia właściwa	dżul na kilogram	$\text{J kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
przewodność cieplna	wat na metr i kelwin	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{K}^{-1}$
gęstość energii	dżul na metr sześcienny	$\text{J m}^{-3}$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
natężenie pola elektrycznego	wolt na metr	$\text{V m}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{A}^{-1}$
gęstość ładunku elektrycznego	kulomb na metr sześcienny	$\text{C m}^{-3}$	$\text{A s m}^{-3}$
powierzchniowa gęstość ładunku	kulomb na metr kwadratowy	$\text{C m}^{-2}$	$\text{A s m}^{-2}$
gęstość strumienia elektrycznego, przemieszczenie elektryczne	kulomb na metr kwadratowy	$\text{C m}^{-2}$	$\text{A s m}^{-2}$
przenikalność dielektryczna	farad na metr	$\text{F m}^{-1}$	$\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^4 \text{A}^2$
przenikalność magnetyczna	henr na metr	$\text{H m}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-2} \text{A}^{-2}$
energia molowa	dżul na mol	$\text{J mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1}$
entropia molowa, pojemność cieplna molowa	dżul na mol i kelwin	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
ekspozycja, dawka ekspozycyjna (promieniowanie x i promieniowanie $\gamma$ )	kulomb na kilogram	$\text{C kg}^{-1}$	$\text{A s kg}^{-1}$
moc dawki pochłoniętej	grej na sekundę	$\text{Gy s}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
natężenie promieniowania	wat na steradian	$\text{W sr}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
radancja	wat na metr kwadratowy i steradian	$\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$	$\text{kg s}^{-3}$
gęstość aktywności katalitycznej	katal na metr sześcienny	$\text{kat m}^{-3}$	$\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-3}$

Należy podkreślić, że każda wielkość fizyczna ma w SI tylko jedną jednostkę spójną, chociaż jednostka ta może być wyrażona w różny sposób poprzez użycie niektórych specjalnych nazw i symboli.

Odwrotna zależność nie jest jednakże prawdziwa, ponieważ w ogólnym przypadku kilka różnych wielkości może mieć tę samą jednostkę SI. Na przykład pojemność cieplna, tak samo jak entropia, ma w SI jednostkę dżul na kelwin. Podobnie, w przypadku wielkości podstawowej prąd elektryczny i wielkości pochodnej siła magnetomotoryczna jednostką SI jest amper. Jest więc ważne, aby nie używać samej jednostki przy specyfikacji wielkości. Kwestia ta dotyczy nie tylko tekstów technicznych, ale także, na przykład przyrządów pomiarowych (to znaczy odczyt z przyrządu powinien informować nie tylko o jednostce, ale i o wielkości mierzonej).

W praktyce, w przypadku niektórych wielkości preferuje się używanie specjalnych nazw jednostek, aby ułatwić odróżnianie wielkości mających ten sam wymiar. Korzystając z tej możliwości przywołuje się proces wykorzystany przy definiowaniu danej wielkości. Na przykład, wielkość moment siły jest iloczynem wektorowym promienia wodzącego i siły. Jednostką SI jest niutonometr. Pomimo, że moment siły ma ten wymiar co energia (jednostka SI dżul), dżul nigdy nie jest używany do wyrażania momentu siły.

Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (IEC) wprowadziła war (symbol: var) jako specjalną nazwę dla jednostki mocy biernej. W odniesieniu do jednostek pochodnych SI, war jest identyczny z iloczynem wolt razy amper.

Jednostką częstotliwości w SI jest herc, jednostką prędkości kątovej i jednostką częstości kątovej jest radian na sekundę, a jednostką aktywności promieniotwórczej radionuklidu w SI jest bekerel, co pociąga za sobą liczbę rozpadów na sekundę. Chociaż więc z formalnego punktu widzenia jest poprawne zapisanie wszystkich trzech jednostek jako odwrotność sekundy, to jednak użycie różnych nazw podkreśla odmienną naturę każdej z trzech jednostek. Szczególnie ważne jest odróżnienie częstotliwości od częstości kątovej, ponieważ z definicji ich wartości liczbowe różnią się o czynnik<sup>1</sup>  $2\pi$ . Zignorowanie tego faktu prowadzi do błędu  $2\pi$  razy. Należy pamiętać, że w niektórych krajach wartości częstotliwości tradycyjnie wyrażane są w jednostkach "cycle/s" [cykl/s] lub "cps", a nie w jednostce SI Hz, chociaż "cycle" ani "cps" nie są jednostkami SI. Należy też mieć na uwadze, że powszechne, choć niezalecane, jest stosowanie terminu częstość w odniesieniu do wielkości wyrażanych w rad/s. Wobec powyższych okoliczności zaleca się, aby wielkości „częstotliwość”, „częstość kątovej” i „prędkość kątovej” zawsze wyrażane były w jednostkach, odpowiednio, Hz lub rad/s lecz nie  $s^{-1}$ .

W dziedzinie promieniowania jonizującego – spośród jednostek SI – używa się raczej jednostki bekerel niż odwrotności sekundy. Podobnie używa się raczej jednostek SI grej i siwert w odniesieniu do – odpowiednio – dawka pochłonięta i dawka równoważna, niż dżul na kilogram. Nazwy specjalne bekerel, grej i siwert wprowadzono specjalnie z powodu ryzyka zagrożenia ludzkiego zdrowia, do którego dojść mogło w razie pomyłki wynikającej z zastosowania jednostek odwrotność sekundy i dżul na kilogram, którymi to jednostkami błędnie posłużono się do zidentyfikowania innych wielkości, o które w danym wypadku mogło chodzić.

Szczególnej uwagi wymaga, odpowiednio, wyrażanie temperatury lub różnicy temperatur. Różnica temperatur 1 K równa jest różnicy 1 °C, ale przy podawaniu temperatury absolutnej trzeba uwzględnić różnicę 273,15 K. Jednostka stopień Celsjusza jest spójna tylko przy wyrażaniu różnicy temperatur.

<sup>1</sup> Patrz ISO 80000-3 aby znaleźć szczegółowe informacje.

### 2.3.5 Jednostki wielkości opisujących zjawiska biologiczne i fizjologiczne

Cztery z wymienionych w Tablicach 2 i 4 jednostek SI zawierają fizjologiczne czynniki wagowe: kandela, lumen, luks i siwert.

Lumen i luks pochodzą od jednostki podstawowej kandela. Podobnie jak kandela, niosą one informację o ludzkim widzeniu. Kandela została ustanowiona jednostką podstawową w roku 1954, co było następstwem uznania ważności światła w ludzkim życiu. Więcej wiadomości o jednostkach i konwencjach stosowanych przy definiowaniu wielkości fotochemicznych i fotobiologicznych podano w Załączniku 3.

Promieniowanie jonizujące powoduje zmagazynowanie energii w napromieniowanej materii. Iloraz zmagazynowanej energii do masy określany jest terminem pochłonięta dawka  $D$ . Zgodnie z decyzją CIPM w roku 2002, wielkość dawka równoważna  $H = Q D$  jest iloczynem pochłoniętej dawki  $D$  i liczbowego czynnika jakości  $Q$ , który uwzględnia biologiczną efektywność promieniowania i jest zależny od energii i rodzaju promieniowania.

Istnieją wielkości, które opisują zjawiska biologiczne i wymagają stosowania czynników wagowych (wag), które nie są jednostkami SI. Poniżej podano dwa przykłady:

Dźwięk powoduje fluktuacje ciśnienia w powietrzu, nakładające się na ciśnienie atmosferyczne, które są słyszalne dla ludzkiego ucha. Czułość ucha zależy od częstotliwości dźwięku, lecz nie jest ona prostą funkcją ani zmian ciśnienia, ani częstotliwości. Z tego powodu, w celu przybliżenia sposobu, w jaki dźwięk jest odbierany, stosowane są w akustyce wielkości korygowane częstotliwościowo. Stosowana jest ona, na przykład, w pomiarach związanych z ochroną przed uszkodzeniem słuchu. Oddziaływanie akustycznych fal ultradźwiękowych budzi podobne obawy w dziedzinie diagnostyki medycznej i terapii.

Istnieje klasa jednostek służących do liczbowego wyrażania biologicznej aktywności niektórych substancji stosowanych w dziedzinie diagnostyki medycznej i terapii, których na razie nie można jeszcze zdefiniować w kategoriach jednostek SI. Ten brak definicji wynika z tego, że mechanizm oddziaływania biologicznego tych substancji nie jest jeszcze wystarczająco dobrze rozumiany, aby mógł być określony ilościowo w kategoriach parametrów fizykochemicznych. Wobec ich ważności dla ludzkiego zdrowia i bezpieczeństwa Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) wzięła odpowiedzialność za zdefiniowanie Międzynarodowych Jednostek (IU) WHO do wyrażania aktywności biologicznej tych substancji.

### 2.3.6 Jednostki SI w ramach ogólnej teorii względności

Praktyczna realizacja jednostki i proces porównań wymagają opisu teoretycznego w postaci układu równań. W pewnych przypadkach równania te odnoszą się do zjawisk relatywistycznych.

W przypadku wzorców częstotliwości można przeprowadzić porównanie na odległość wykorzystując sygnał elektromagnetyczny. Dla zinterpretowania wyników niezbędna jest ogólna teoria względności, gdyż pozwala ona przewidzieć m.in. względne przesunięcie częstotliwości rzędu 1 część na  $10^{16}$  na metr różnicy wysokości nad powierzchnią Ziemi. Skutki tego zjawiska muszą być korygowane przy porównaniach najlepszych wzorców częstotliwości.

Kiedy praktyczne realizacje porównywane są lokalnie, tj. w niewielkim obszarze czasoprzestrzennym, zjawisko zakrzywienia czasoprzestrzennego opisanego w ogólnej teorii względności mogą zostać pominięte. Kiedy realizacje mają takie same współrzędne czasoprzestrzenne (na przykład ten sam ruch i przyspieszenie lub pole grawitacyjne), zjawiska relatywistyczne mogą zostać całkowicie pominięte.

### 3 Dziesiętne wielokrotności i podwielokrotności jednostek SI

Oprócz jednostek SI używa się także ich dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności w przedziale od  $10^{24}$  do  $10^{-24}$ . Nazwy i symbole przedrostków do tworzenia wielokrotności i podwielokrotności przedstawiono w Tablicy 7.

Symbole przedrostków pisze się czcionką prostą tak, jak symbole jednostek, bez względu na to jakiego kroju czcionki użyto w otaczającym tekście. Łączą się one z symbolami jednostek bez spacji pomiędzy symbolami przedrostków a symbolami jednostek. Z wyjątkiem da (deka), h (hekto) i k (kilo), wszystkie symbole przedrostków wielokrotności pisze się dużą literą, a wszystkie przedrostki symboli podwielokrotności – małą literą. Wszystkie przedrostki w pełnym brzmieniu pisze się małą literą, z wyjątkiem przypadku, kiedy stoją one na początku zdania.

Przedrostki SI odnoszą się wyłącznie do potęg liczby 10.

Nie należy używać ich do wyrażania potęg liczby 2

(na przykład jeden kilobit oznacza 1000 bitów, a nie 1024 bity).

Zalecane nazwy i symbole przedrostków, których należy używać dla potęg liczby 2 są następujące:

**Tablica 7. Przedrostki SI**

Czynnik	Nazwa	Symbol	Czynnik	Nazwa	Symbol
$10^1$	deka	da	$10^{-1}$	decy	d
$10^2$	hekto	h	$10^{-2}$	centy	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	mili	m
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	mikro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	piko	p
$10^{15}$	peta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{18}$	eksa	E	$10^{-18}$	atto	a
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	jotta	Y	$10^{-24}$	jokto	y

kibi	Ki	$2^{10}$
mebi	Mi	$2^{20}$
gibi	Gi	$2^{30}$
tebi	Ti	$2^{40}$
pebi	Pi	$2^{50}$
exbi	Ei	$2^{60}$
zebi	Zi	$2^{70}$
yobi	Yi	$2^{80}$

Zestawienie symbolu przedrostka z symbolem jednostki tworzy nowy nierozdzielny symbol jednostki (stanowiącej wielokrotność albo podwielokrotność jednostki), który może być podnoszony do dodatniej lub ujemnej potęgi i który może być kombinowany z symbolami innych jednostek tworząc w ten sposób złożone symbole jednostek.

*Przykłady:* pm (pikometr), mmol (milimol), G $\Omega$  (gigaom), THz (teraherc)

$$2,3 \text{ cm}^3 = 2,3 (\text{cm})^3 = 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}.$$

Podobnie przedrostki w pełnym brzmieniu pozostają nierozdzielne od nazw jednostek, z którymi zostały połączone. Tak więc, na przykład, milimetr, mikropaskal i meganiuton są pojedynczymi słowami.

Niedopuszczalne są połączenia symboli przedrostków, tj. symbole przedrostków utworzone poprzez zestawienie obok siebie dwóch lub więcej symboli przedrostków. Reguła ta obowiązuje także w odniesieniu do złożonych dwóch lub więcej nazw przedrostków.

Symbole przedrostów nie mogą być użyte samodzielnie ani w połączeniu z liczbą 1. Podobnie, nazwy przedrostków nie mogą być łączone z nazwą jednostki jeden, to jest ze słowem „jeden”.

Kilogram jest jedyną spójną jednostką SI, której nazwa i symbol, ze względów historycznych, zawierają przedrostek. Nazwy i symbole dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności jednostki masy tworzy się dołączając przedrostek w pełnym brzmieniu albo jego symbol do – odpowiednio – nazwy jednostki „gram” albo symbolu jednostki „g”. Na przykład,  $10^{-6}$  kg zapisuje się jako miligram, mg, a nie mikrokilogram,  $\mu\text{kg}$ .

## 4 Jednostki spoza SI przyjęte do stosowania wraz z SI

SI zapewnia – przyjęte drogą międzynarodowego uzgodnienia – odniesienie, w zakresie którego wszystkie inne jednostki są zdefiniowane. Spójne jednostki SI mają tę ważną zaletę, że zamiana jednostek nie jest konieczna, gdy do równania wielkościowego wstawia się jakieś wartości.

Tym niemniej uwzględnia się fakt, że niektóre jednostki są szeroko stosowane i będą stosowane przez wiele lat. Zatem CIPM zaakceptował stosowanie niektórych jednostek spoza SI wraz z SI; wymienione są one w Tablicy 8. Jeżeli stosuje się te jednostki, należy pamiętać, że niektóre zalety SI zostają utracone. Przedrostki SI mogą być stosowane z kilkoma spośród tych jednostek, ale, np., nie z jednostkami czasu spoza SI.

**Tablica 8. Jednostki spoza SI przyjęte do stosowania wraz z SI**

Wielkość	Nazwa jednostki	Symbol jednostki	Wartość w jednostkach SI	Gal (symbol: Gal) jest jednostką przyspieszenia spoza SI używaną w geodezji i geofizyce dla wyrażania przyspieszenia siły ciężkości. $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$
czas	minuta	min	1 min = 60 s	
	godzina	h	1 h = 60 min = 3600 s	
	doła	d	1 d = 24 h = 86 400 s	
długość	jednostka astronomiczna <sup>(a)</sup>	au	1 au = 149 597 870 700 m	
kąt płaski i fazowy	stopień	°	1° = ( $\pi/180$ ) rad	
	minuta	'	1' = (1/60)° = ( $\pi/10\,800$ ) rad	
	sekunda <sup>(b)</sup>	"	1" = (1/60)' = ( $\pi/648\,000$ ) rad	
pole powierzchni	hektar <sup>(c)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
objętość	litr <sup>(d)</sup>	l, L	1 l = 1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
masa	tona <sup>(e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg	
	dalton <sup>(f)</sup>	Da	1 Da = 1,660 539 066 60(50) × 10 <sup>-27</sup> kg	
energia	elektronowolt <sup>(g)</sup>	eV	1 eV = 1,602 176 634 × 10 <sup>-19</sup> J	
logarytmiczny iloraz wielkości	neper <sup>(h)</sup>	Np	patrz tekst	
	bel <sup>(h)</sup>	B		
	decybel <sup>(h)</sup>	dB		

(a) Jak zdecydowało XXVIII General Assembly of the International Astronomical Union (Resolution B2, 2012).

(b) W niektórych zastosowaniach, jak, np., w astronomii małe kąty są mierzone w sekundach kątowych (tj. sekundach kąta płaskiego), zapisywanych jako " lub milisekundach kątowych, mikrosekundach kątowych i pikosekundach kątowych, oznaczanych – odpowiednio – mas,  $\mu$ s i pas, przy czym sekunda kątowa jest alternatywną nazwą sekundy kąta płaskiego.

(c) Jednostka hektar i jej symbol ha, przyjęte zostały przez CIPM w roku 1879 (PV, 1879, 41). Hektar służy do wyrażania powierzchni terenu.



- (d) Litr i symbol w postaci małej litery l, przyjęte były przez CIPM w roku 1879 (PV, 1879, 41). Alternatywny symbol w postaci dużej litery L przyjęty został przez 16. CGPM (1979, Resolution 6; CR, 101 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57) w celu uniknięcia pomyłki polegającej na odczytaniu litery l (el) jako cyfry 1 (jeden).
  - (e) Tona i jej symbol t, przyjęte były przez CIPM w roku 1879 (PV, 1879, 41). W krajach anglojęzycznych jednostka ta jest czasem nazywana „toną metryczną” [“metric ton”].
  - (f) Dalton (Da) i atomowa jednostka masy (u) są alternatywnymi nazwami (i symbolami) tej samej jednostki, równej 1/12 spoczynkowej masy pojedynczego atomu izotopu węgla  $^{12}\text{C}$  w stanie podstawowym. Ta wartość daltona jest wartością zalecaną w korekcie CODATA 2018.
  - (g) Elektronowolt jest energią kinetyczną pozyskiwaną przez elektron przechodzący przez różnicę potencjałów jednego wolta w próżni. Elektronowolt bywa często łączony z przedrostkami SI.
  - (h) Przy stosowaniu tych jednostek ważne jest, żeby określić rodzaj danej wielkości i żeby określać wszystkie dane odniesienia.
- 

Tablica 8 zawiera także jednostki ilorazowych wielkości logarytmicznych: neper, bel i decybel. Stosowane są one do przekazywania informacji o naturze ilorazowych wielkości logarytmicznych, o które w danym wypadku chodzi. Neper, Np, jest stosowany do wyrażania wartości wielkości, których wartości liczbowe oparte są na zastosowaniu logarytmu neperowskiego (naturalnego),  $\ln = \log_e$ . Bel i decybel, B i dB, gdzie  $1 \text{ dB} = (1/10)\text{B}$ , stosowane są do wyrażania ilorazowych wielkości logarytmicznych, których wartości liczbowe oparte są na logarytmie dziesiętnym,  $\lg = \log_{10}$ . Twierdzenie  $L_X = m \text{ dB} = (m/10)\text{B}$  (gdzie  $m$  jest liczbą) rozumiane jest tak, że  $m = 10 \lg(X/X_0)$ . Jednostki neper, bel i decybel zaakceptowane zostały przez CIPM do stosowania z Międzynarodowym Układem, ale nie są jednostkami SI.

Istnieje wiele jednostek spoza SI, które albo mają już tylko znaczenie historyczne, albo są nadal stosowane w pewnych dziedzinach (na przykład, baryłka ropy naftowej) lub w pewnych krajach (cal, stopa, jard). CIPM nie widzi miejsca do stosowania nadal tych jednostek w nowoczesnych pracach w obszarze nauki i techniki. Jednakże ważne jest, aby dostępna była wiedza o zależności między tymi jednostkami, a odpowiednimi jednostkami SI i będzie tak przez wiele lat.

## 5 Zapisywanie symboli i nazw jednostek oraz wyrażanie wartości wielkości

### 5.1 Stosowanie symboli i nazw jednostek

Ogólne zasady pisowni symboli jednostek i liczb po raz pierwszy podane zostały przez 9. CGPM (1948, Rezolucja 7). Były one następnie opracowywane przez ISO, IEC i inne ciała międzynarodowe. W rezultacie istnieje obecnie ogólny *consensus* co do tego jak symbole i nazwy jednostek, w tym symbole i nazwy przedrostków, jak również symbole wielkości należy pisać i stosować oraz jak należy wyrażać wartości wielkości. Zachowanie zgodności z tymi regułami i konwencjami redagowania przyczyniają się do lepszej czytelności publikacji naukowych i technicznych. Najważniejsze z nich przedstawiono w niniejszym rozdziale.

### 5.2 Symbole jednostek

Symbole jednostek pisze się czcionką prostą, bez względu na to jakiego kroju czcionki użyto w otaczającym tekście. Pisze się je małą literą, o ile nie pochodzą od nazwisk, w którym to przypadku pierwsza litera nazwy jest dużą literą.

Wyjątkiem, przyjętym przez 16. CGPM (1979, Rezolucja 6), jest dopuszczalność pisania symbolu jednostki litr jako dużej litery L lub małej l, aby uniknąć pomyłki polegającej na odczytaniu cyfry 1 (jeden) jako małej litery l (el).

Jeżeli do utworzenia jednostki wielokrotnej lub podwielokrotnej zostaje użyty przedrostek, to stanowi on część nazwy jednostki, umieszczany jest przed nazwą bez odstępów (spacji). Przedrostka nie używa się osobno i nie stosuje się połączeń dwu lub więcej przedrostków.

Symbole jednostek są tworamami matematycznymi, a nie skrótami. Z tego powodu nie stawia się po nich kropki, o ile nie stoją na końcu zdania, nie nadaje się im formy liczby mnogiej, ani nie stosuje się symboli wraz z nazwami w jednym wyrażeniu, gdyż nazwy nie są tworamami matematycznymi.

Przy tworzeniu iloczynów lub ilorazów symboli jednostek obowiązują zwykłe algebraiczne reguły mnożenia lub dzielenia. Mnożenie musi być zaznaczone spacją lub kropką ( $\cdot$ ) w połowie wysokości (środku) wiersza, bowiem w przeciwnym razie niektóre przedrostki mogą zostać mylnie zinterpretowane jako symbole jednostek. Dzielenie musi być zaznaczone linią poziomą, kreską pochyłą (ukośnikiem, /) lub wykładnikami ujemnymi. Kiedy kilka symboli jednostek występuje razem, należy zadbać o uniknięcie dwuznaczności, np. poprzez użycie nawiasów lub wykładników ujemnych. Aby uniknąć dwuznaczności, nie należy też używać kreski pochyłej więcej niż raz w jednym wyrażeniu bez nawiasów.

Nie jest dopuszczalne używanie skrótów symboli jednostek lub nazw jednostek takich, jak sec (zamiast s lub sekunda), sq. mm (zamiast  $\text{mm}^2$  lub milimetr kwadratowy), cc (zamiast  $\text{cm}^3$  lub centymetr sześcienny) lub mps (zamiast m/s lub metr na sekundę). Stosowanie poprawnych symboli SI i w ogóle jednostek miar wymienionych w poprzednich rozdziałach tej broszury jest obowiązkowe, gdyż dzięki temu unika się dwuznaczności i błędów w wartościach wielkości.

### 5.3 Nazwy jednostek

Nazwy jednostek pisze się czcionką prostą i traktowane są one jak rzeczowniki pospolite. W języku angielskim nazwy jednostek pisze się małą literą (nawet wtedy, gdy symbol jednostki zaczyna się od dużej litery), z wyjątkiem przypadku, kiedy stoją one na początku zdania lub w tekście pisanym wielkimi literami, jak to się zdarza w tytułach.

Zgodnie z tą regułą prawidłowa pisownia nazwy jednostki o symbolu °C jest „stopień Celsjusza” (jednostka stopień pisana jest małą literą, a przydawka Celsjusza dużą literą jako imię własne).

Chociaż wartości wielkości są zazwyczaj wyrażane przy użyciu symboli liczb i symboli jednostek, to, jeżeli z jakichś powodów nazwa jednostki jest bardziej właściwa niż symbol jednostki, należy napisać pełną nazwę jednostki.

Kiedy nazwa jednostki jest powiązana z symbolem przedrostka tworzącego wielokrotność lub podwielokrotność, nie umieszcza się ani dywizu, ani spacji pomiędzy nazwą przedrostka a nazwą jednostki. Połączenie nazwy przedrostka i nazwy jednostki stanowią jedno słowo (patrz rozdział 3).

Kiedy nazwa jednostki pochodnej jest utworzona z nazw poszczególnych jednostek poprzez ich zestawienie ze sobą, wówczas stosuje się spację lub dywiz do oddzielenia nazw poszczególnych jednostek.

## 5.4 Reguły i style redagowania przy wyrażaniu wartości wielkości

### 5.4.1 Wartość i liczbowa wartość wielkości oraz stosowanie rachunku wielkości

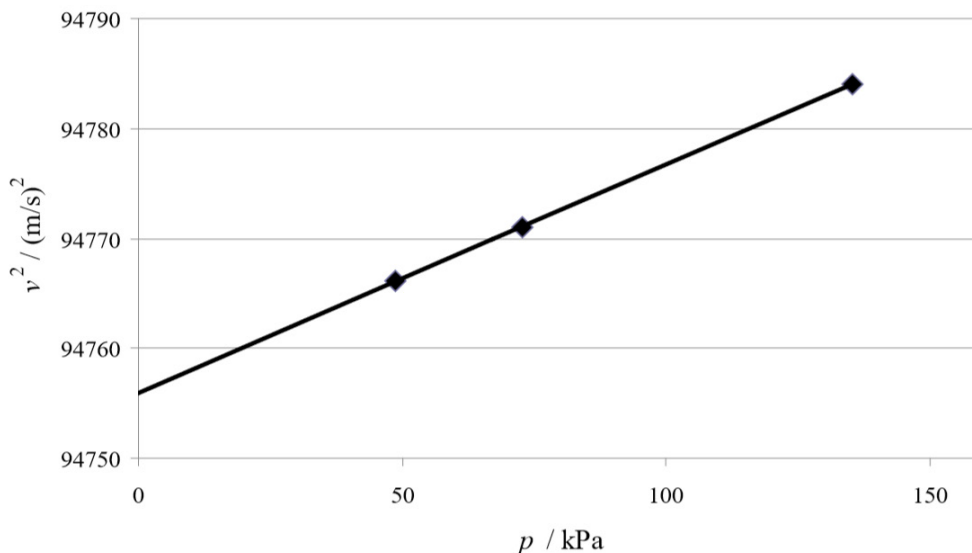
Symbole wielkości są na ogół pojedynczymi literami pisanymi czcionką pochyłą, chociaż mogą być dodatkowo uszczegóławiane za pomocą informacji w postaci indeksów dolnych albo górnych lub zawartej w nawiasie. Na przykład,  $C$  jest symbolem zalecanym dla pojemności cieplnej,  $C_m$  – dla molowej pojemności cieplnej,  $C_{m,p}$  – dla molowej pojemności cieplnej przy stałym ciśnieniu, a  $C_{m,v}$  – dla molowej pojemności cieplnej przy stałej objętości.

Zalecane nazwy i symbole wielkości są wymieniane w postaci list zawartych w licznych literaturowych źródłach normalizacyjnych takich jak seria ISO/IEC 80000 *Quantities and units*, IUPAP SUNAMCO Red Book *Symbols, Units and Nomenclature in Physics* oraz IUPAC Green Book *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*. Jednakże symbole wielkości są jedynie przedmiotem zaleceń (w odróżnieniu od symboli jednostek, gdzie stosowanie poprawnej formy jest bezwzględnym wymogiem). W pewnych okolicznościach autorzy mogą używać wybranych przez siebie symboli wielkości w celu uniknięcia sytuacji konfliktowej, polegającej na zastosowaniu tego samego symbolu dla dwóch różnych wielkości. W takich przypadkach znaczenie symbolu musi zostać jednoznacznie określone. Jednakże ani nazwa wielkości, ani symbol użyty do jej oznaczenia nie mogą powodować jakiegokolwiek szczególnego doboru jednostek.

Symbole jednostek mają charakter symboli matematycznych. Przy wyrażaniu wartości wielkości jako iloczynu wartości liczbowej i jednostki zarówno wartość liczbową, jak i jednostka podlegają zwykłym regułom algebraicznym. Takie postępowanie określane jest jako posługiwanie się rachunkiem wielkości bądź algebrą wielkości. Na przykład, równanie  $p = 48 \text{ kPa}$  można również zapisać jako  $p/\text{kPa} = 48$ . Jest powszechną praktyką takie wpisywanie ilorazu wielkości i jednostki w nagłówku tabeli, dzięki czemu wpisy w tablicy są po prostu liczbami. Na przykład tablica, prezentująca kwadrat prędkości w zależności od ciśnienia, może mieć następujący format:

$p/\text{kPa}$	$v^2/(\text{m/s})^2$
48,73	94766
72,87	94771
135,42	94784

Tak samo mogą zostać opisane osie wykresu, tak, że punkty na nim opisane zostają jedynie liczbami, jak na wykresie poniżej.



#### 5.4.2 Symbole wielkości i symbole jednostek

Symbole jednostek nie służą do przekazywania szczegółowej informacji o wielkości jako takiej i nigdy nie powinny stanowić jedynej źródła informacji o danej wielkości. Jednostki miar nigdy nie powinny być uzupełniane dodatkową informacją na temat wielkości; jakkolwiek dodatkowa informacja na temat wielkości powinna być łączona z symbolem wielkości, a nie z symbolem jednostki.

Na przykład:

Największa różnica potencjałów elektrycznych wynosi  $U_{\max} = 1000 \text{ V}$  a nie  $U = 1000 \text{ V}_{\max}$ .  
Ułamek masowy miedzi w próbce krzemu wynosi  $w(\text{Cu}) = 1,3 \times 10^{-6}$  a nie  $1,3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$ .

#### 5.4.3 Format wartości wielkości

Wartość liczbowa zawsze poprzedza jednostkę, którą zawsze oddziela od liczby spacja. W zapisie tym wartość wielkości jest iloczynem liczby i jednostki miary. Spacja pomiędzy liczbą i jednostką ma znaczenie znaku mnożenia (spacja oddzielająca jednostki oznacza mnożenie). Jedynymi wyjątkami od tej reguły są oznaczenia stopnia, minuty i sekundy w odniesieniu do kąta płaskiego, odpowiednio:  $^{\circ}$ ,  $'$  i  $''$ , w przypadku których nie pozostawia się spacji pomiędzy wartością liczbową a symbolem jednostki.

$m = 12,3 \text{ g}$ , tutaj  $m$  zostało użyte jako symbol wielkości masy, ale  $\varphi = 30^{\circ} 22' 8''$ , tutaj  $\varphi$  zostało użyte jako symbol wielkości kąta płaskiego.

Reguła ta oznacza, że symbol  $^{\circ}\text{C}$  dla stopnia Celsjusza jest poprzedzony spacją, bowiem wyraża on wartość temperatury Celsjusza  $t$ .

$t = 30,2^{\circ}\text{C}$ ,  
a nie  $t = 30,2^{\circ}\text{C}$ ,  
ani  $t = 30,2^{\circ} \text{C}$

Nawet kiedy wartość wielkości jest użyta w roli przymiotnika [w składni angielskiej możliwe jest tego rodzaju zastosowanie wyrażenia wartości wielkości w funkcji przydawki] pozostawia się spację pomiędzy wartością liczbową a symbolem jednostki. Jedynie wtedy, kiedy nazwa jednostki jest napisana słownie, stosuje się zwykle reguły gramatyczne i wówczas w języku angielskim pomiędzy liczbę a jednostkę należy wstawić myślnik.

rezystor  $10 \text{ k}\Omega$   
film  $35 \text{ mm}$

W każdym wyrażeniu na wartość wielkości używa się jednej jednostki. Wyjątkiem od tej reguły jest wyrażanie czasu lub kąta płaskiego w jednostkach spoza SI. Jednakże w przypadku kątów płaskich lepiej jest stosować dziesiętny podział stopnia. Zatem, na ogół pisze się raczej  $22,20^{\circ}$  niż  $22^{\circ} 12'$ , o ile nie dotyczy to zagadnień z dziedzin takich jak nawigacja, kartografia, astronomia, czy pomiar bardzo małych kątów.

$l = 10,234 \text{ m}$ ,  
ale nie  
 $l = 10 \text{ m } 23,4 \text{ cm}$

#### 5.4.4 Format liczb i separator dziesiętny

Znak stosowany do oddzielenia części całkowitej liczby od części dziesiętnej zwany jest separatorem dziesiętnym. Zgodnie z decyzją 22. CGPM (2003, Rezolucja 10), separatorem dziesiętnym „powinna być albo kropka na dolnej granicy wiersza, albo przecinek na dolnej granicy wiersza”. Wybór separatora dziesiętnego powinien być podyktowany zwyczajem obowiązującym w danym języku oraz kontekście.

Kiedy wartość liczby zawiera się między +1 a -1, wtedy separator dziesiętny poprzedzony -0,234, ale nie -,234 jest zawsze zerem.

Zgodnie z 9. CGPM (1948, Rezolucja 7) i 22. CGPM (2003, Rezolucja 10), w zapisie liczb wielocyfrowych cyfry mogą być podzielone wąską spacją na grupy trzycyfrowe, aby ułatwić ich czytanie. Pomiedzy te grupy nie należy wstawiać ani kropek, ani przecinków. Jednakże, jeżeli jedynie 4 cyfry występują przed lub za separatorem dziesiętnym nie stosuje się spacji, która oddzielałaby pojedynczą cyfrę. Praktyka grupowania cyfr w powyższy sposób jest kwestią wyboru; nie zawsze jest ona stosowana w pewnych szczególnych zastosowaniach, sprawozdaniach finansowych i skryptach, które mają być czytane przez komputer.

43 279,168 29,  
ale nie 43,279,168,29

albo 3279,1683  
lub 3 279,168 3

W przypadku liczb zapisanych w tablicach, zastosowany format nie powinien zmieniać się w obrębie jednej kolumny.

#### 5.4.5 Wyrażanie niepewności pomiaru związanej z wartością wielkości

Niepewność związana z estymatą wartości wielkości powinna być przedmiotem ewaluacji i powinna być wyrażona w sposób zgodny z dokumentem JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections), *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Niepewność standardowa związana z wielkością  $x$  oznaczana jest  $u(x)$ . Wygodny sposób wyrażania niepewności standardowej przedstawia następujący przykład:

$$m_n = 1,674\,927\,471\,(21) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

gdzie  $m_n$  jest symbolem wielkości (w tym przypadku masy neutronu), a liczba w nawiasie jest wartością liczbową niepewności standardowej estymaty wartości  $m_n$ , odnoszącą się do ostatnich cyfr cytowanej wartości; w tym przypadku  $u(m_n) = 0,000\,000\,21 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . Jeśli zamiast niepewności standardowej  $u(x)$  używa się niepewności rozszerzonej  $U(x)$ , wtedy konieczne jest podanie prawdopodobieństwa rozszerzenia  $p$  i współczynnika rozszerzenia  $k$ .

#### 5.4.6 Mnożenie lub dzielenie symboli wielkości, wartości wielkości i liczb

Przy mnożeniu lub dzieleniu symboli wielkości można posłużyć się jedną z następujących metod:

$$ab, a b, a \cdot b, a \times b, a/b, \frac{a}{b}, a b^{-1}$$

Przy mnożeniu wartości wielkości należy użyć znaku mnożenia  $\times$  lub nawiasów, lecz nie można używać znaku mnożenia w postaci kropki w połowie wysokości wiersza tekstu. Przy mnożeniu liczb należy używać wyłącznie znaku mnożenia  $\times$ .

Przy dzieleniu wartości wielkości używa się kreski pochyłej lub nawiasów, aby uniknąć dwuznaczności.

Przykłady:

$F = ma$ , bo siła  
równa się masa razy  
przyspieszenie

(53 m/s)  $\times$  10,2 s  
albo (53 m/s) (10,2 s)

25  $\times$  60,5,  
ale nie 25  $\cdot$  60,5

(20 m)/(5 s) = 4 m/s

(a/b)/c, nie a/b/c

### 5.4.7 Wyrażanie wartości wielkości będących czystymi liczbami

Zgodnie z rozważaniami w punkcie 2.3.3, wartości wielkości o jednostce jeden, są wyrażane po prostu jako liczby. Symbol jednostki 1 lub nazwy jednostki „jeden” nie są uwidaczniane *explicité*. Symbole przedrostków SI nie mogą być łączone ani z symbolem 1, ani z nazwą „jeden”, i w związku z tym stosuje się potęgi liczby 10, szczególnie do wyrażania bardzo dużych lub małych wartości.

$n = 1,51$ ,  
ale nie  $n = 1,51 \times 1$ ,  
gdzie  $n$  jest symbolem  
wielkości  
dla współczynnika  
załamania.

Wielkości będące ilorazami wielkości tego samego rodzaju (na przykład ilorazy długości lub ułamki masowe) mogą być wyrażone za pomocą jednostek (m/m, mol/mol) w celu ułatwienia rozumienia wyrażanej wielkości, ale w razie potrzeby jest także możliwe wyrażanie ich z zastosowaniem przedrostków SI ( $\mu\text{m/m}$ ,  $\text{nmol/mol}$ ). Nie ma takiej możliwości w przypadku wielkości odnoszących się do zliczania, które są po prostu liczbami.

Uznawany w działaniach międzynarodowych symbol % (procent) może być stosowany wraz z SI. Przy jego użyciu pozostawia się odstęp między liczbą a symbolem %. Powinno się używać raczej symbolu % niż nazwy „procent”. W tekście pisanym, jednakże, symbol % przybiera na ogół znaczenie „części na sto”. Zwrotów takich jak „procent wagowy”, „procent objętościowy”, czy „procent ilości substancji” nie należy używać<sup>N3</sup>; dodatkowa informacja dotycząca wielkości powinna być przekazana w opisie lub poprzez symbol wielkości.

W krajach  
anglojęzycznych,  
“billion” oznacza na  
ogół  $10^9$ ,  
a “trillion” – liczbę  $10^{12}$ ;  
jednak “billion” może  
także być interpretowany  
jako  $10^{12}$ , a “trillion”  
– jako  $10^8$ .  
Ponadto skrót “ppt”  
bywa czasem czytany  
jako „części na tysiąc”,  
co powoduje dodatkowe  
zamieszanie.

Stosowane jest także wyrażenie “ppm”, oznaczające wartość względną  $10^{-6}$ , lub 1 część na  $10^6$ , lub części na milion. Zachodzi tu analogia do wyrażania procentu jako części na sto. Stosowane są również wyrażenia „części na miliard” i „części na bilion” oraz ich skróty – odpowiednio – “ppb” i “ppt”, ale ich znaczenie uzależnione jest od języka, w jakim są użyte. Z tego powodu skrótów ppb i ppt należy unikać.

### 5.4.8 Kąty płaskie, kąty bryłowe i kąty fazowe

Spójną jednostką SI dla kąta płaskiego i kąta fazowego jest radian, symbol jednostki rad, a dla jednostki kąta bryłowego jest steradian, symbol jednostki sr.

Kąt płaski, wyrażany w radianach, zawarty między dwoma liniami wychodzącymi z jednego wspólnego punktu jest długością łuku kołowego  $s$ , zakreślonego pomiędzy tymi liniami ze wspólnego punktu promieniem wodzącym [wektor]  $r$  podzieloną przez długość tego wektora promienia,  $\theta = s/r$  rad. Kąt fazowy (określany często jako „faza”) jest argumentem każdej liczby zespolonej. Jest on kątem pomiędzy dodatnią półosią liczb rzeczywistych i promieniem w biegunowym zapisie liczby zespolonej na płaszczyźnie liczb zespolonych.

Jeden radian odpowiada kątowi, w którym  $s = r$ , co oznacza  $1 \text{ rad} = 1$ . Miara kąta prostego jest dokładnie równa liczbie  $\pi/2$ .

Stopień kątowy jest wynikiem mającej długą historię umowy. Zamiana pomiędzy radianami i stopniami wynika z zależności  $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ . Trzeba pamiętać, że stopień, o symbolu  $^\circ$ , nie jest jednostką SI.

Kąt bryłowy, wyrażany w steradianach, odpowiada ilorazowi powierzchni  $A$  kuli o promieniu  $r$  i kwadratowi promienia,  $\Omega = A/r^2$  sr. Jeden steradian odpowiada kątowi bryłowemu, w którym  $A = r^2$ , co oznacza  $1 \text{ sr} = 1$ .

Jednostki rad i sr odpowiadają ilorazom – odpowiednio – dwóch długości i dwóch kwadratów długości. Jednakże należy podkreślić, że rad i sr mogą być stosowane wyłącznie do wyrażania kątów i kątów bryłowych, a nie ilorazów długości i kwadratów długości w ogólnym przypadku.

Kiedy przyjmowano SI  
w czasie 11. CGPM  
w roku 1960, utworzono  
kategorię „jednostek  
uzupełniających”  
dla przystosowania  
radiana i steradiana.  
W kilka dziesięcioleci  
później CGPM  
zdecydowała:  
(1) „interpretować  
jednostki  
uzupełniające SI,  
a mianowicie radian  
i steradian,  
jako bezwymiarowe  
jednostki pochodne,  
których nazwy  
i znaczenia mogą,  
choć nie muszą, być  
użyte w wyrażeniach  
określających inne  
jednostki pochodne SI,  
jeśli jest to dogodne”,  
i  
(2) wyeliminować  
odrębną klasę jednostek  
uzupełniających  
(Rezolucja 8, 20. CGPM  
(1995)).

<sup>N3</sup> Treść tego zdania zastępuje zdanie występujące w oryginalnym, angielskim tekście Broszury SI odnoszące się do terminów metrologicznych, które nie są zalecane do stosowania w języku angielskim. Zastosowany w Broszurze SI termin “percentage” (dosłownie: „procentaż”) należałoby (zgodnie ze „Słownikiem chemicznym angielsko-polskim”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003) przetłumaczyć jako „zawartość procentową”. Zdanie w polskim tekście Broszury SI wymienia terminologię niezalecaną w języku polskim (niektóre z terminów podane są w „Nowoczesnym Kompendium Chemii”, PWN, Warszawa 2019).



## Załącznik 1. Decyzje CGPM i CIPM

W niniejszym załączniku wymieniono te decyzje CGPM i CIPM, które są bezpośrednio definicjami jednostek SI, dotyczące przedrostków zdefiniowanych w ramach SI oraz konwencji pisania symboli jednostek i liczb. Nie jest to kompletna lista decyzji CGPM i CIPM. Aby uzyskać pełną listę, należy odwołać się do kolejnych tomów *Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des poids et Mesures* (CR) i *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures* (PV) lub do czasopisma *Metrologia*, dla najnowszych decyzji.

Ponieważ SI nie jest konwencją statyczną, ale ewoluuje w następstwie rozwoju nauki związanej z pomiarami, niektóre decyzje zostały uchylone lub zmodyfikowane; inne zostały wyjaśnione przez uzupełnienia. Decyzje, które były przedmiotem takich zmian są oznaczone asterykiem (\*) i są powiązane notą z decyzją o zmianie.

Oryginalny tekst każdej decyzji (lub ich tłumaczenie) jest uwidoczniony inną czcionką (pismo o kroju bezszeryfowym) normalnej grubości, by odróżnić go od głównego tekstu. Asteryski i noty zostały dodane przez BIPM, aby uczynić tekst bardziej zrozumiałym. Nie stanowią one części oryginalnego tekstu.

Decyzje CGPM i CIPM są wymienione w niniejszym dodatku w porządku chronologicznym, od 1889 roku do 2018 roku, w celu zachowania ciągłości, z jaką były podejmowane. Jednak w celu ułatwienia odszukiwania decyzji związanych z poszczególnymi zagadnieniami poniżej znajduje się spis treści, w kolejności tematycznej, z odniesieniami do poszczególnych posiedzeń, na których podjęto decyzje dotyczące każdego tematu.

## Spis treści Załącznika 1

<b>Decyzje związane z ustanowieniem Układu SI</b>		<b>Strona</b>
9 CGPM, 1948:	decyzja o ustanowieniu SI	<b>47</b>
10 CGPM, 1954:	decyzja w sprawie pierwszych sześciu jednostek podstawowych	<b>49</b>
CIPM, 1956:	decyzja o przyjęciu nazwy “Système International d’Unités”	<b>50</b>
11 CGPM, 1960:	potwierdza nazwy i skrót „SI”, nazywa przedrostki od tera do piko, ustanawia jednostki uzupełniające rad i sr, wymienia niektóre jednostki pochodne	<b>51</b>
CIPM, 1969:	deklaracje dotyczące jednostek podstawowych, uzupełniających, pochodnych i spójnych oraz użycia przedrostków	<b>56</b>
CIPM, 2001:	“SI units” i “units of the SI”	<b>66</b>
23 CGPM, 2007:	możliwa redefinicja niektórych jednostek podstawowych Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>74</b>
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>75</b>
25 CGPM, 2014:	przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>81</b>
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	<b>83</b>
<b>Decyzje związane z podstawowymi jednostkami SI</b>		
<b>Długość</b>		
1 CGPM, 1889:	usankcjonowanie prototypu metra	<b>44</b>
7 CGPM, 1927:	definicja i zastosowanie prototypu metra	<b>45</b>
10 CGPM, 1954:	metr przyjęty jako jednostka podstawowa	<b>49</b>
11 CGPM, 1960:	redefinicja metra oparta na promieniowaniu kryptonu 86	<b>50</b>
15 CGPM, 1975:	zaleca wartość prędkości światła	<b>58</b>
17 CGPM, 1983:	redefinicja metra oparta na prędkości światła, realizacja definicji metra	<b>61</b>
CIPM, 2002:	określa zasady praktycznej realizacji definicji metra	<b>67</b>
CIPM, 2003:	nowelizacja wykazu zalecanych promieniowań	<b>69</b>
CIPM, 2005:	nowelizacja wykazu zalecanych promieniowań	<b>71</b>
CIPM, 2007:	nowelizacja wykazu zalecanych promieniowań	<b>72</b>
23 CGPM, 2007:	nowelizacja mise en pratique definicji metra i rozwój nowych optycznych wzorców częstotliwości	<b>72</b>



CIPM, 2009:	aktualizuje wykaz częstotliwości wzorcowych	75
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	75
24 CGPM, 2011:	nowelizacja <i>mise en pratique</i> definicji metra i rozwój nowych optycznych wzorców częstotliwości	79
CIPM, 2013:	aktualizuje wykaz częstotliwości wzorcowych	79
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	83

### Masa

1 CGPM, 1889:	usankcjonowanie prototypu kilograma	44
3 CGPM, 1901:	deklaracja w sprawie rozróżnienia masy i ciężaru oraz w sprawie wartości przyspieszenia ziemskiego normalnego, $g_n$	45
10 CGPM, 1954:	kilogram przyjęty jako jednostka podstawowa	49
CIPM, 1967:	deklaracja w sprawie stosowania przedrostków w odniesieniu do grama	54
21 CGPM, 1999:	przyszła redefinicja kilograma	65
23 CGPM, 2007:	przyszła redefinicja niektórych podstawowych jednostek Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	72
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	75
25 CGPM, 2014:	przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	81
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	83

### Czas

10 CGPM, 1954:	sekunda przyjęta jako jednostka podstawowa	49
CIPM, 1956:	definicja sekundy jako ułamka roku zwrotnikowego 1900	49
11 CGPM, 1960:	ratyfikuje definicję sekundy przyjętą przez CIPM w 1956 roku	50
CIPM, 1964:	ogłasza nadsubtelne przejście w atomie cezu 133 jako zalecany wzorzec	53
12 CGPM, 1964:	upoważnia CIPM do badania atomowych i cząsteczkowych wzorców częstotliwości	53
13 CGPM, 1967/68:	definiuje sekundę w kategoriach nadsubtelnego przejścia cezowego	54
CCDS, 1970:	definiuje Międzynarodową Atomową Skalę, TAI	57
14 CGPM, 1971:	zwraca się do CIPM o zdefiniowanie i ustanowienie Międzynarodowej Atomowej Skali Czasu, TAI	57
15 CGPM, 1975:	popiera stosowanie Uniwersalnego Czasu Koordynowanego, UTC	58
CIPM, 2006:	wtórne reprezentacje sekundy	71
23 CGPM, 2007:	w sprawie nowelizacji <i>mise en pratique</i> definicji metra i rozwoju nowych optycznych wzorców częstotliwości	72

CIPM, 2009:	aktualizuje wykaz częstotliwości wzorcowych	75
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	75
24 CGPM, 2011:	nowelizacja <i>mise en pratique</i> metra i rozwój nowych optycznych wzorców częstotliwości	75
CIPM, 2013:	aktualizuje wykaz częstotliwości wzorcowych	79
CIPM, 2015:	aktualizuje wykaz częstotliwości wzorcowych	82
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	83

### Jednostki elektryczne

CIPM, 1946:	definicje spójnych jednostek elektrycznych w układzie jednostek miar metr-kilogram-sekunda (MKS), (mająca wejść w życie od 1 stycznia 1948 roku)	46
10 CGPM, 1954:	amper przyjęty jako jednostka podstawowa	49
14 CGPM, 1971:	przyjmuje nazwę simens, symbol S, dla konduktancji elektrycznej	57
18 CGPM, 1987:	zbliżające się dostosowanie reprezentacji wolta i oma	62
CIPM, 1988:	zdefiniowana wartość umowna stałej Josephsona (mająca wejść w życie od 1 stycznia 1990 roku)	63
CIPM, 1988:	zdefiniowana wartość umowna stałej von Klitzinga (mająca wejść w życie od 1 stycznia 1990 roku)	64
23 CGPM, 2007:	możliwa redefinicja niektórych jednostek podstawowych Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	74
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	75
25 CGPM, 2014:	przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	81
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	83

### Temperatura termodynamiczna

9 CGPM, 1948:	przyjmuje punkt potrójny wody jako termodynamiczny punkt odniesienia, przyjmuje temperaturę zera Celsjusza jako równą 0,01 stopnia poniżej punktu potrójnego	46
CIPM, 1948:	przyjmuje nazwę stopień Celsjusza dla skali temperatury Celsjusza	47
10 CGPM, 1954:	definiuje temperaturę termodynamiczną tak, że punkt potrójny wody wynosi dokładnie 273,16 stopni kelwina, definiuje atmosferę normalną	48
10 CGPM, 1954:	stopień kelwina przyjęty jako jednostka podstawowa	49
13 CGPM, 1967/68:	decyduje o formalnej definicji kelwina, symbol K	55
CIPM, 1989:	Międzynarodowa Skala Temperatury 1990 (MST-90), ITS-90	64
CIPM, 2005:	uwaga dodana do definicji kelwina dotycząca izotopowego składu wody	70

23 CGPM, 2007:	wyjaśnienie definicji kelwina, jednostki temperatury termodynamicznej	<b>73</b>
23 CGPM, 2007:	możliwa redefinicja niektórych jednostek podstawowych Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>74</b>
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>75</b>
25 CGPM, 2014:	przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>81</b>
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	<b>83</b>
<b>Ilość substancji</b>		
14 CGPM, 1971:	definicja mola, symbol mol, jako siódmej jednostki podstawowej oraz zasad jej stosowania	<b>58</b>
21 CGPM, 1999:	przyjmuje jednostkę o nazwie specjalnej katal, kat	<b>66</b>
23 CGPM, 2007:	o możliwej redefinicji niektórych jednostek podstawowych Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>74</b>
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>75</b>
25 CGPM, 2014:	przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>81</b>
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	<b>83</b>
<b>Światłość</b>		
CIPM, 1946:	definicja jednostek fotometrycznych, nowa kandela i nowy lumen (mająca wejść w życie od 1 stycznia 1948 roku)	<b>45</b>
10 CGPM, 1954:	kandela przyjęta jako jednostka podstawowa	<b>49</b>
13 CGPM, 1967/68:	definiuje kandelę, symbol cd, w kategoriach ciała doskonale czarnego [promiennika zupełnego]	<b>55</b>
16 CGPM, 1979:	redefiniuje kandelę w kategoriach promieniowania monochromatycznego	<b>59</b>
24 CGPM, 2011:	możliwa przyszła nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI	<b>75</b>
26 CGPM, 2018:	nowelizacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, SI (mająca wejść w życie od 20 maja 2019 roku)	<b>83</b>

## Decyzje odnoszące się do jednostek pochodnych SI i uzupełniających

### Jednostki pochodne SI

12 CGPM, 1964:	akceptuje dalsze stosowanie kiura jako jednostki spoza Układu SI	54
13 CGPM, 1967/68:	wymienia niektóre przykłady jednostek pochodnych	56
15 CGPM, 1975:	przyjmuje nazwy specjalne bekerel, Bq i grej, Gy	58
16 CGPM, 1979:	przyjmuje nazwę specjalną siwert, Sv	60
CIPM, 1984:	podejmuje decyzję, żeby wyjaśnić zależność między dawką pochłoniętą (jednostka SI – grej), a dawką równoważną (jednostka SI – siwert)	62
CIPM, 2002:	modyfikuje zależność między dawką pochłoniętą a dawką równoważną	68

### Jednostki uzupełniające

CIPM, 1980:	podejmuje decyzję, aby interpretować jednostki uzupełniające jako bezwymiarowe jednostki pochodne	60
20 CGPM, 1995:	podejmuje decyzję o zniesieniu klasy jednostek uzupełniających oraz potwierdza interpretację CIPM, że są one bezwymiarowymi jednostkami pochodnymi	65

## Decyzje dotyczące terminologii i akceptacja jednostek do stosowania z SI

### Przedrostki SI

12 CGPM, 1964:	podejmuje decyzję, aby do listy przedrostków dodać femto i atto	54
15 CGPM, 1975:	podejmuje decyzję, aby do listy przedrostków dodać peta i eksa	59
19 CGPM, 1991:	podejmuje decyzję, aby do listy przedrostków dodać zeta, zepto, jotta i jokto	65

### Symbole jednostek i liczby

9 CGPM, 1948:	podejmuje decyzję o zasadach drukowania symboli jednostek	48
---------------	---	----

### Nazwy jednostek

13 CGPM, 1967/68:	uchyla stosowanie mikrona i nowej świecy <sup>N4</sup> , jako jednostek zaakceptowanych do stosowania wraz z SI	56
-------------------	---	----

### Separator dziesiętny

22 CGPM, 2003:	podejmuje decyzję o stosowaniu kropki lub przecinka jako separatora dziesiętnego	69
----------------	--	----

<sup>N4</sup> Termin „nowa świeca” podany w języku polskim jest zgodny ze „Słownikiem Technicznym – Technika świetlna”, VEB Verlag Technik, Berlin 1977, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

**Jednostki przyjęte do stosowania razem z SI: przykład litr**

3 CGPM, 1901:	definiuje litr jako objętość 1 kg wody	<b>44</b>
11 CGPM, 1960:	zwraca się do CIPM o raport na temat różnicy między litrem a decymetrem sześciennym	<b>52</b>
CIPM, 1961:	zaleca, aby objętość była wyrażana w jednostkach SI, a nie w litrach	<b>53</b>
12 CGPM, 1964:	uchyla wcześniejszą definicję litra, zaleca stosowanie litra jako specjalnej nazwy decymetra sześciennego	<b>53</b>
16 CGPM, 1979:	podjmuje decyzję, aby, w drodze wyjątku, zezwolić na podwójny sposób zapisywania symbolu litra, jako l i L	<b>60</b>

**1st CGPM, 1889****■ Sanction of the international prototypes of the metre and the kilogram (CR, 34 - 38)\***

The Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the “Compte rendu of the President of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM)” and the “Report of the CIPM”, which show that, by the collaboration of the French section of the International Metre Commission and of the CIPM, the fundamental measurements of the international and national prototypes of the metre and of the kilogram have been made with all the accuracy and reliability which the present state of science permits;
- that the international and national prototypes of the metre and the kilogram are made of an alloy of platinum with 10 per cent iridium, to within 0.0001;
- the equality in length of the international Metre and the equality in mass of the international Kilogram with the length of the Metre and the mass of the Kilogram kept in the Archives of France;
- that the differences between the national Metres and the international Metre lie within 0.01 millimetre and that these differences are based on a hydrogen thermometer scale which can always be reproduced thanks to the stability of hydrogen, provided identical conditions are secured;
- that the differences between the national Kilograms and the international Kilogram lie within 1 milligram;
- that the international Metre and Kilogram and the national Metres and Kilograms fulfil the requirements of the Metre Convention,

**sanctions**

A. As regards international prototypes:

1. The Prototype of the metre chosen by the CIPM. This prototype, at the temperature of melting ice, shall henceforth represent the metric unit of length.
2. The Prototype of the kilogram adopted by the CIPM. This prototype shall henceforth be considered as the unit of mass.
3. The hydrogen thermometer centigrade scale in terms of which the equations of the prototype Metres have been established.

B. As regards national prototypes:

...

\* The definition of the metre was abrogated in 1960 by the 11th CGPM (Resolution 6, see p. 164).

**3rd CGPM, 1901****■ Declaration concerning the definition of the litre (CR, 38-39)\***

...

**The Conference declares**

1. The unit of volume, for high accuracy determinations, is the volume occupied by a mass of 1 kilogram of pure water, at its maximum density and at standard atmospheric pressure: this volume is called “litre”.
2. ...

\* This definition was abrogated in 1964 by the 12th CGPM (Resolution 6, see p. 167).

■ **Declaration on the unit of mass and on the definition of weight; conventional value of  $g_n$**  (CR, 70)

**Taking into account** the decision of the Comité International des Poids et Mesures of 15 October 1887, according to which the kilogram has been defined as unit of mass;

**Taking into account** the decision contained in the sanction of the prototypes of the Metric System, unanimously accepted by the Conférence Générale des Poids et Mesures on 26 September 1889;

**Considering** the necessity to put an end to the ambiguity which in current practice still exists on the meaning of the word *weight*, used sometimes for *mass*, sometimes for *mechanical force*;

**The Conference declares**

1. The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram;\*
2. The word “weight” denotes a quantity of the same nature as a “force”: the weight of a body is the product of its mass and the acceleration due to gravity; in particular, the standard weight of a body is the product of its mass and the standard acceleration due to gravity;
3. The value adopted in the International Service of Weights and Measures for the standard acceleration due to gravity is  $980.665 \text{ cm/s}^2$ , value already stated in the laws of some countries.\*\*

\* This definition was abrogated in 2018 by the 26th CGPM (Resolution 1, see p. 197).

\*\*This value of  $g_n$  was the conventional reference for calculating the now obsolete unit kilogram force.

**7th CGPM, 1927**

■ **Definition of the metre by the international Prototype** (CR, 49)\*

The unit of length is the metre, defined by the distance, at  $0^\circ$ , between the axes of the two central lines marked on the bar of platinum-iridium kept at the Bureau International des Poids et Mesures and declared Prototype of the metre by the 1st Conférence Générale des Poids et Mesures, this bar being subject to standard atmospheric pressure and supported on two cylinders of at least one centimetre diameter, symmetrically placed in the same horizontal plane at a distance of 571 mm from each other.

\* This definition was abrogated in 1960 by the 11th CGPM (Resolution 6, see p. 164).

**CIPM, 1946**

■ **Definitions of photometric units** (PV, 20, 119-122)\*

**Resolution**

...

4. The photometric units may be defined as follows:

**New candle** (unit of luminous intensity). — The value of the new candle is such that the brightness of the full radiator at the temperature of solidification of platinum is 60 new candles per square centimetre.

**New lumen** (unit of luminous flux). — The new lumen is the luminous flux emitted in unit solid angle (steradian) by a uniform point source having a luminous intensity of 1 new candle.

5. ...

\* The two definitions contained in this Resolution were ratified in 1948 by the 9th CGPM, which also approved the name candela given to the “new candle” (CR, 54). For the lumen the qualifier “new” was later abandoned.

This definition was modified in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 5, see p. 169-170).

■ **Definitions of electric units (PV, 20, 132-133)**

**Resolution 2**

...

4. (A) Definitions of the mechanical units which enter the definitions of electric units:

**Unit of force.** — The unit of force [in the MKS (metre, kilogram, second) system] is the force which gives to a mass of 1 kilogram an acceleration of 1 metre per second, per second.

**Joule** (unit of energy or work). — The joule is the work done when the point of application of 1 MKS unit of force [newton] moves a distance of 1 metre in the direction of the force.

**Watt** (unit of power). — The watt is the power which in one second gives rise to energy of 1 joule.

(B) Definitions of electric units. The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) accepts the following propositions which define the theoretical value of the electric units:

**Ampere** (unit of electric current). — The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to  $2 \times 10^{-7}$  MKS unit of force [newton] per metre of length.\*

**Volt** (unit of potential difference and of electromotive force). — The volt is the potential difference between two points of a conducting wire carrying a constant current of 1 ampere, when the power dissipated between these points is equal to 1 watt.

**Ohm** (unit of electric resistance). — The ohm is the electric resistance between two points of a conductor when a constant potential difference of 1 volt, applied to these points, produces in the conductor a current of 1 ampere, the conductor not being the seat of any electromotive force.

**Coulomb** (unit of quantity of electricity). — The coulomb is the quantity of electricity carried in 1 second by a current of 1 ampere.

**Farad** (unit of capacitance). — The farad is the capacitance of a capacitor between the plates of which there appears a potential difference of 1 volt when it is charged by a quantity of electricity of 1 coulomb.

**Henry** (unit of electric inductance). — The henry is the inductance of a closed circuit in which an electromotive force of 1 volt is produced when the electric current in the circuit varies uniformly at the rate of 1 ampere per second.

**Weber** (unit of magnetic flux). — The weber is the magnetic flux which, linking a circuit of one turn, would produce in it an electromotive force of 1 volt if it were reduced to zero at a uniform rate in 1 second.

**9th CGPM, 1948**

■ **Triple point of water; thermodynamic scale with a single fixed point; unit of quantity of heat (joule) (CR, 55 and 63)**

**Resolution 3**

1. With present-day techniques, the triple point of water is capable of providing a thermometric reference point with an accuracy higher than can be obtained from the melting point of ice.

In consequence the Comité Consultatif de Thermométrie et Calorimétrie (CCTC) considers that the zero of the centesimal thermodynamic scale must be defined as the temperature 0.0100 degree below that of the triple point of water.

2. The CCTC accepts the principle of an absolute thermodynamic scale with a single fundamental fixed point, at present provided by the triple point of pure water, the absolute temperature of which will be fixed at a later date.

The introduction of this new scale does not affect in any way the use of the International Scale, which remains the recommended practical scale.

3. The unit of quantity of heat is the joule.

The definitions contained in this Resolution were ratified in 1948 by the 9th CGPM (CR, 49), which also adopted the name newton (Resolution 7, see p. 162) for the MKS unit of force.

In 1954, the 10th CGPM (Resolution 6, see p. 163) established a practical system of units of measurement for international use. The ampere was designated as a base unit of this system.

\* This definition of the ampere was abrogated in 2018 by the 26th CGPM (Resolution 1, see p. 197).

The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).



Note: It is requested that the results of calorimetric experiments be as far as possible expressed in joules. If the experiments are made by comparison with the rise of temperature of water (and that, for some reason, it is not possible to avoid using the calorie), the information necessary for conversion to joules must be provided. The CIPM, advised by the CCTC, should prepare a table giving, in joules per degree, the most accurate values that can be obtained from experiments on the specific heat of water.

A table, prepared in response to this request, was approved and published by the CIPM in 1950 (PV, 22, 92).

■ **Adoption of “degree Celsius” [CIPM, 1948 (PV, 21, 88) and 9th CGPM, 1948 (CR, 64)]**

From three names (“degree centigrade”, “centesimal degree”, “degree Celsius”) proposed to denote the degree of temperature, the CIPM has chosen “degree Celsius” (PV, 21, 88).

This name is also adopted by the 9th CGPM (CR, 64).

■ **Proposal for establishing a practical system of units of measurement (CR, 64)**

**Resolution 6**

The Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) has been requested by the International Union of Physics to adopt for international use a practical *Système International d’Unités*; that the International Union of Physics recommends the MKS system and one electric unit of the absolute practical system, but does not recommend that the CGS system be abandoned by physicists;
- that the CGPM has itself received from the French Government a similar request, accompanied by a draft to be used as basis of discussion for the establishment of a complete specification of units of measurement;

**instructs** the CIPM:

- to seek by an energetic, active, official enquiry the opinion of scientific, technical and educational circles of all countries (offering them, in fact, the French document as basis);
- to gather and study the answers;
- to make recommendations for a single practical system of units of measurement, suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention.

## ■ Writing and printing of unit symbols and of numbers (CR, 70)\*

### Resolution 7

#### Principles

Roman (upright) type, in general lower-case, is used for symbols of units; if, however, the symbols are derived from proper names, capital roman type is used. These symbols are not followed by a full stop.

In numbers, the comma (French practice) or the dot (British practice) is used only to separate the integral part of numbers from the decimal part. Numbers may be divided in groups of three in order to facilitate reading; neither dots nor commas are ever inserted in the spaces between groups.

Unit	Symbol	Unit	Symbol
• metre	m	ampere	A
• square metre	m <sup>2</sup>	volt	V
• cubic metre	m <sup>3</sup>	watt	W
• micron	μ	ohm	Ω
• litre	l	coulomb	C
• gram	g	farad	F
• tonne	t	henry	H
second	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dyne	dyn	newton	N
degree Celsius	°C	• candela (new candle)	cd
• degree absolute	°K	lux	lx
calorie	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
hour	h		

#### Notes

1. The symbols whose unit names are preceded by dots are those which had already been adopted by a decision of the CIPM.
2. The symbol for the stere, the unit of volume for firewood, shall be “st” and not “s”, which had been previously assigned to it by the CIPM.
3. To indicate a temperature interval or difference, rather than a temperature, the word “degree” in full, or the abbreviation “deg”, must be used.

## 10th CGPM, 1954

### ■ Definition of the thermodynamic temperature scale (CR, 79)\*

#### Resolution 3

The 10th Conférence Générale des Poids et Mesures decides to define the thermodynamic temperature scale by choosing the triple point of water as the fundamental fixed point, and assigning to it the temperature 273.16 degrees Kelvin, exactly.

\* The CGPM abrogated certain decisions on units and terminology, in particular: micron, degree absolute, and the terms “degree”, and “deg”, 13th CGPM, 1967/68 (Resolutions 7 and 3, see pp. 170 and 169, respectively), and the litre; 16th CGPM, 1979 (Resolution 6, see p. 174).

\* The 13th CGPM in 1967 explicitly defined the kelvin (Resolution 4, see p. 169).

\* The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

■ **Definition of the standard atmosphere (CR, 79)**

**Resolution 4**

The 10th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), having noted that the definition of the standard atmosphere given by the 9th CGPM when defining the International Temperature Scale led some physicists to believe that this definition of the standard atmosphere was valid only for accurate work in thermometry,

**declares** that it adopts, for general use, the definition:

1 standard atmosphere = 1 013 250 dynes per square centimetre,  
i.e., 101 325 newtons per square metre.

■ **Practical system of units (CR, 80)\***

**Resolution 6**

In accordance with the wish expressed by the 9th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in its Resolution 6 concerning the establishment of a practical system of units of measurement for international use, the 10th CGPM

**decides** to adopt as base units of the system, the following units:

length	metre
mass	kilogram
time	second
electric current	ampere
thermodynamic temperature	degree Kelvin
luminous intensity	candela

\* The unit name “degree kelvin” was changed to “kelvin” in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 3, see p. 169).

**CIPM, 1956**

■ **Definition of the unit of time (second) (PV, 25, 77)\***

**Resolution 1**

In virtue of the powers invested in it by Resolution 5 of the 10th Conférence Générale des Poids et Mesures, the Comité International des Poids et Mesures,

**considering**

1. that the 9th General Assembly of the International Astronomical Union (Dublin, 1955) declared itself in favour of linking the second to the tropical year,
2. that, according to the decisions of the 8th General Assembly of the International Astronomical Union (Rome, 1952), the second of ephemeris time (ET) is the fraction

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ of the tropical year for 1900 January 0 at 12 h ET,}$$

**decides**

“The second is the fraction 1/31 556 925.9747 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time.”

\* This definition was abrogated in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 1, see p. 168).

■ **Système International d'Unités** (PV, 25, 83)

**Resolution 3**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering**

- the task entrusted to it by Resolution 6 of the 9th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) concerning the establishment of a practical system of units of measurement suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention,
- the documents received from twenty-one countries in reply to the enquiry requested by the 9th CGPM,
- Resolution 6 of the 10th CGPM, fixing the base units of the system to be established,

**recommends**

1. that the name "Système International d'Unités" be given to the system founded on the base units adopted by the 10th CGPM, viz.:

[This is followed by the list of the six base units with their symbols, reproduced in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].

2. that the units listed in the table below be used, without excluding others which might be added later:

[This is followed by the table of units reproduced in paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].

**11th CGPM, 1960**

■ **Definition of the metre** (CR, 85)\*

**Resolution 6**

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the international Prototype does not define the metre with an accuracy adequate for the present needs of metrology,
- that it is moreover desirable to adopt a natural and indestructible standard,

**decides**

1. The metre is the length equal to 1 650 763.73 wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the krypton 86 atom.
2. The definition of the metre in force since 1889, based on the international Prototype of platinum-iridium, is abrogated.
3. The international Prototype of the metre sanctioned by the 1st CGPM in 1889 shall be kept at the BIPM under the conditions specified in 1889.

■ **Definition of the unit of time (second)** (CR, 86)\*

**Resolution 9**

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- the powers given to the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) by the 10th CGPM to define the fundamental unit of time,
- the decision taken by the CIPM in 1956,

**ratifies** the following definition:

"The second is the fraction  $1/31\,556\,925.9747$  of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time."

\* This definition was abrogated in 1983 by the 17th CGPM (Resolution 1, see p. 175).

\* This definition was abrogated in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 1, see p. 168).

## ■ **Système International d'Unités (CR, 87)\***

### **Resolution 12**

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

#### **considering**

- Resolution 6 of the 10th CGPM, by which it adopted six base units on which to establish a practical system of measurement for international use:

length	metre	m
mass	kilogram	kg
time	second	s
electric current	ampere	A
thermodynamic temperature	degree Kelvin	°K
luminous intensity	candela	cd

- Resolution 3 adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1956,
- the recommendations adopted by the CIPM in 1958 concerning an abbreviation for the name of the system, and prefixes to form multiples and submultiples of the units,

#### **decides**

- the system founded on the six base units above is called the "Système International d'Unités";
- the international abbreviation of the name of the system is: SI;
- names of multiples and submultiples of the units are formed by means of the following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol	Multiplying factor	Prefix	Symbol
1 000 000 000 000 = 10 <sup>12</sup>	tera	T	0.1 = 10 <sup>-1</sup>	deci	d
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	giga	G	0.01 = 10 <sup>-2</sup>	centi	c
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	mega	M	0.001 = 10 <sup>-3</sup>	milli	m
1 000 = 10 <sup>3</sup>	kilo	k	0.000 001 = 10 <sup>-6</sup>	micro	μ
100 = 10 <sup>2</sup>	hecto	h	0.000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 = 10 <sup>1</sup>	deca	da	0.000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	pico	p

- the units listed below are used in the system, without excluding others which might be added later.

#### **Supplementary units**

plane angle	radian	rad
solid angle	steradian	sr

\* The CGPM later abrogated certain of its decisions and extended the list of prefixes, see notes below.

The name and symbol for the unit of thermodynamic temperature was modified by the 13th CGPM in 1967 (Resolution 3, see p. 169).

A seventh base unit, the mole, was adopted by the 14th CGPM in 1971 (Resolution 3, see p. 172).

Further prefixes were adopted by the 12th CGPM in 1964 (Resolution 8, see p. 168), the 15th CGPM in 1975 (Resolution 10, see p. 173) and the 19th CGPM in 1991 (Resolution 4, see p. 179).

The 20th CGPM in 1995 abrogated the class of supplementary units in the SI (Resolution 8, see p. 179). These are now considered as derived units.

**Derived units**

area	square metre	$m^2$	
volume	cubic metre	$m^3$	
frequency	hertz	Hz	1/s
mass density (density)	kilogram per cubic metre	$kg/m^3$	
speed, velocity	metre per second	m/s	
angular velocity	radian per second	rad/s	
acceleration	metre per second squared	$m/s^2$	
angular acceleration	radian per second squared	$rad/s^2$	
force	newton	N	$kg \cdot m/s^2$
pressure (mechanical stress)	newton per square metre	$N/m^2$	
kinematic viscosity	square metre per second	$m^2/s$	
dynamic viscosity	newton-second per square metre	$N \cdot s/m^2$	
work, energy, quantity of heat	joule	J	$N \cdot m$
power	watt	W	J/s
quantity of electricity (side bar)	coulomb	C	$A \cdot s$
tension (voltage), potential difference, electromotive force	volt	V	W/A
electric field strength	volt per metre	V/m	
electric resistance	ohm	$\Omega$	V/A
capacitance	farad	F	$A \cdot s/V$
magnetic flux	weber	Wb	$V \cdot s$
inductance	henry	H	$V \cdot s/A$
magnetic flux density	tesla	T	$Wb/m^2$
magnetic field strength	ampere per metre	A/m	
magnetomotive force	ampere	A	
luminous flux	lumen	lm	$cd \cdot sr$
luminance	candela per square metre	$cd/m^2$	
illuminance	lux	lx	$lm/m^2$

The 13th CGPM in 1967 (Resolution 6, see p. 170) specified other units which should be added to the list. In principle, this list of derived units is without limit.

Modern practice is to use the phrase “amount of heat” rather than “quantity of heat”, because the word quantity has a different meaning in metrology.

Modern practice is to use the phrase “amount of electricity” rather than “quantity of electricity” (see note above).

### ■ Cubic decimetre and litre (CR, 88)

#### Resolution 13

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

#### considering

- that the cubic decimetre and the litre are unequal and differ by about 28 parts in  $10^6$ ,
- that determinations of physical quantities which involve measurements of volume are being made more and more accurately, thus increasing the risk of confusion between the cubic decimetre and the litre,

**requests** the Comité International des Poids et Mesures to study the problem and submit its conclusions to the 12th CGPM.

**CIPM, 1961**■ **Cubic decimetre and litre** (PV, 29, 34)**Recommendation**

The Comité International des Poids et Mesures recommends that the results of accurate measurements of volume be expressed in units of the International System and not in litres.

**CIPM, 1964**■ **Atomic and molecular frequency standards** (PV, 32, 26)**Declaration**

The Comité International des Poids et Mesures,

**empowered** by Resolution 5 of the 12th Conférence Générale des Poids et Mesures to name atomic or molecular frequency standards for temporary use for time measurements in physics,

**declares** that the standard to be employed is the transition between the hyperfine levels  $F = 4, M = 0$  and  $F = 3, M = 0$  of the ground state  $^2S_{1/2}$  of the caesium 133 atom, unperturbed by external fields, and that the frequency of this transition is assigned the value 9 192 631 770 hertz.

**12th CGPM, 1964**■ **Atomic standard of frequency** (CR, 93)**Resolution 5**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the 11th CGPM noted in its Resolution 10 the urgency, in the interests of accurate metrology, of adopting an atomic or molecular standard of time interval,
- that, in spite of the results already obtained with caesium atomic frequency standards, the time has not yet come for the CGPM to adopt a new definition of the second, base unit of the Système International d'Unités, because of the new and considerable improvements likely to be obtained from work now in progress,

**considering also** that it is not desirable to wait any longer before time measurements in physics are based on atomic or molecular frequency standards,

**empowers** the Comité International des Poids et Mesures to name the atomic or molecular frequency standards to be employed for the time being,

**requests** the organizations and laboratories knowledgeable in this field to pursue work connected with a new definition of the second.

■ **Litre** (CR, 93)**Resolution 6**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** Resolution 13 adopted by the 11th CGPM in 1960 and the Recommendation adopted by the Comité International des Poids et Mesures in 1961,

1. **abrogates** the definition of the litre given in 1901 by the 3rd CGPM,
2. **declares** that the word "litre" may be employed as a special name for the cubic decimetre,
3. **recommends** that the name litre should not be employed to give the results of high-accuracy volume measurements.

■ **Curie (CR, 94)\***

**Resolution 7**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** that the curie has been used for a long time in many countries as unit of activity for radionuclides,

**recognizing** that in the Système International d'Unités (SI), the unit of this activity is the second to the power of minus one ( $s^{-1}$ ),

**accepts** that the curie be still retained, outside SI, as unit of activity, with the value  $3.7 \times 10^{10} s^{-1}$ . The symbol for this unit is Ci.

\* The name "becquerel" (Bq) was adopted by the 15th CGPM in 1975 (Resolution 8, see p. 172) for the SI unit of activity:  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .

■ **SI prefixes femto and atto (CR, 94)\***

**Resolution 8**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of prefixes for the formation of names of multiples and submultiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the following two new prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

\* New prefixes were added by the 15th CGPM in 1975 (Resolution 10, see p. 173).

**CIPM, 1967**

■ **Decimal multiples and submultiples of the unit of mass (PV, 35, 29 and *Metrologia*, 1968, 4, 45)**

**Recommendation 2**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** that the rule for forming names of decimal multiples and submultiples of the units of paragraph 3 of Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) (1960) might be interpreted in different ways when applied to the unit of mass,

**declares** that the rules of Resolution 12 of the 11th CGPM apply to the kilogram in the following manner: the names of decimal multiples and submultiples of the unit of mass are formed by attaching prefixes to the word "gram".

**13th CGPM, 1967/68**

■ **SI unit of time (second) (CR, 103 and *Metrologia*, 1968, 4, 43)**

**Resolution 1**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the definition of the second adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1956 (Resolution 1) and ratified by Resolution 9 of the 11th CGPM (1960), later upheld by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), is inadequate for the present needs of metrology,
- that at its meeting of 1964 the CIPM, empowered by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), recommended, in order to fulfil these requirements, a caesium atomic frequency standard for temporary use,
- that this frequency standard has now been sufficiently tested and found sufficiently accurate to provide a definition of the second fulfilling present requirements,
- that the time has now come to replace the definition now in force of the unit of time of the Système International d'Unités by an atomic definition based on that standard,



**decides**

1. The SI unit of time is the second defined as follows:  
"The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom";
2. Resolution 1 adopted by the CIPM at its meeting of 1956 and Resolution 9 of the 11th CGPM are now abrogated.

■ **SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43)\*

**Resolution 3**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- the names "degree Kelvin" and "degree", the symbols "°K" and "deg" and the rules for their use given in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948), in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960), and the decision taken by the Comité International des Poids et Mesures in 1962 (PV, 30, 27),
- that the unit of thermodynamic temperature and the unit of temperature interval are one and the same unit, which ought to be denoted by a single name and a single symbol,

**decides**

1. the unit of thermodynamic temperature is denoted by the name "kelvin" and its symbol is "K";\*\*
2. the same name and the same symbol are used to express a temperature interval;
3. a temperature interval may also be expressed in degrees Celsius;
4. the decisions mentioned in the opening paragraph concerning the name of the unit of thermodynamic temperature, its symbol and the designation of the unit to express an interval or a difference of temperatures are abrogated, but the usages which derive from these decisions remain permissible for the time being.

■ **Definition of the SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43)\*

**Resolution 4**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that it is useful to formulate more explicitly the definition of the unit of thermodynamic temperature contained in Resolution 3 of the 10th CGPM (1954),

**decides** to express this definition as follows:

"The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water."

■ **SI unit of luminous intensity (candela)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43-44)\*

**Resolution 5**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- the definition of the unit of luminous intensity ratified by the 9th CGPM (1948) and contained in the "Resolution concerning the change of photometric units" adopted by the Comité International des Poids et Mesures in 1946 (PV, 20, 119) in virtue of the powers conferred by the 8th CGPM (1933),
- that this definition fixes satisfactorily the unit of luminous intensity, but that its wording may be open to criticism,

CIPM affirmed that this definition refers to a caesium atom at rest at a thermodynamic temperature of 0 K. The wording of the definition of the second was modified by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

\* At its 1980 meeting, the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU, which requested that the use of the symbols "°K" and "deg" no longer be permitted.

\*\* See Recommendation 2 (CI-2005) of the CIPM on the isotopic composition of water entering in the definition of the kelvin, p. 184.

\* See Recommendation 5 (CI-1989) of the CIPM on the International Temperature Scale of 1990, p. 178.

\* The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

\* This definition was abrogated by the 16th CGPM in 1979 (Resolution 3, see p. 173).

**decides** to express the definition of the candela as follows:

“The candela is the luminous intensity, in the perpendicular direction, of a surface of 1/600 000 square metre of a black body at the temperature of freezing platinum under a pressure of 101 325 newtons per square metre.”

■ **SI derived units** (CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44)\*

**Resolution 6**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that it is useful to add some derived units to the list of paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960),

**decides** to add:

wave number	1 per metre	$\text{m}^{-1}$
entropy	joule per kelvin	J/K
specific heat capacity	joule per kilogram kelvin	J/(kg · K)
thermal conductivity	watt per metre kelvin	W/(m · K)
radiant intensity	watt per steradian	W/sr
activity (of a radioactive source)	1 per second	$\text{s}^{-1}$

\* The unit of activity was given a special name and symbol by the 15th CGPM in 1975 (Resolution 8, see p. 172).

■ **Abrogation of earlier decisions (micron and new candle)** (CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44)

**Resolution 7**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that subsequent decisions of the General Conference concerning the Système International d’Unités are incompatible with parts of Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

**decides** accordingly to remove from Resolution 7 of the 9th Conference:

1. the unit name “micron”, and the symbol “ $\mu$ ” which had been given to that unit but which has now become a prefix;
2. the unit name “new candle”.

**CIPM, 1969**

■ **Système International d’Unités, Rules for application of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)** (PV, 37, 30 and *Metrologia*, 1970, 6, 66)\*

**Recommendation 1**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** that Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) (1960), concerning the Système International d’Unités, has provoked discussions on certain of its aspects,

**declares**

1. the base units, the supplementary units and the derived units of the Système International d’Unités, which form a coherent set, are denoted by the name “SI units”;
2. the prefixes adopted by the CGPM for the formation of decimal multiples and submultiples of SI units are called “SI prefixes”;

and **recommends**

3. the use of SI units and of their decimal multiples and submultiples whose names are formed by means of SI prefixes.

Note: The name “supplementary units”, appearing in Resolution 12 of the 11th CGPM (and in the present Recommendation) is given to SI units for which the General Conference declines to state whether they are base units or derived units.

\* The 20th CGPM in 1995 decided to abrogate the class of supplementary units in the SI (Resolution 8, see p. 179).

\*\* The CIPM approved in 2001 a proposal of the CCU to clarify the definition of “SI units” and “units of the SI”, see p. 180.

**CCDS, 1970 (In CIPM, 1970)**

- **Definition of TAI** (PV, 38, 110-111 and *Metrologia*, 1971, 7, 43)

**Recommendation S 2**

International Atomic Time (TAI) is the time reference coordinate established by the Bureau International de l'Heure on the basis of the readings of atomic clocks operating in various establishments in accordance with the definition of the second, the unit of time of the International System of Units.

In 1980, the definition of TAI was completed as follows (declaration of the CCDS, *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 1980, 9, S 15 and *Metrologia*, 1981, 17, 70):

TAI is a coordinate time scale defined in a geocentric reference frame with the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit.

This definition was further amplified by the International Astronomical Union in 1991, Resolution A4:

“TAI is a realized time scale whose ideal form, neglecting a constant offset of 32.184 s, is Terrestrial Time (TT), itself related to the time coordinate of the geocentric reference frame, Geocentric Coordinate Time (TCG), by a constant rate.”

(see Proc. 21st General Assembly of the IAU, *IAU Trans.*, 1991, vol. XXIB, Kluwer.)

**14th CGPM, 1971**

- **Pascal and siemens** (CR, 78)

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures adopted the special names “pascal” (symbol Pa), for the SI unit newton per square metre, and “siemens” (symbol S), for the SI unit of electric conductance [reciprocal ohm].

- **International Atomic Time, function of CIPM** (CR, 77-78 and *Metrologia*, 1972, 8, 35)

**Resolution 1**

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the second, unit of time of the *Système International d'Unités*, has since 1967 been defined in terms of a natural atomic frequency, and no longer in terms of the time scales provided by astronomical motions,
- that the need for an International Atomic Time (TAI) scale is a consequence of the atomic definition of the second,
- that several international organizations have ensured and are still successfully ensuring the establishment of the time scales based on astronomical motions, particularly thanks to the permanent services of the Bureau International de l'Heure (BIH),
- that the BIH has started to establish an atomic time scale of recognized quality and proven usefulness,
- that the atomic frequency standards for realizing the second have been considered and must continue to be considered by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) helped by a Consultative Committee, and that the unit interval of the International Atomic Time scale must be the second realized according to its atomic definition,
- that all the competent international scientific organizations and the national laboratories active in this field have expressed the wish that the CIPM and the CGPM should give a definition of International Atomic Time, and should contribute to the establishment of the International Atomic Time scale,
- that the usefulness of International Atomic Time entails close coordination with the time scales based on astronomical motions,

**requests** the CIPM

1. to give a definition of International Atomic Time,
2. to take the necessary steps, in agreement with the international organizations concerned, to ensure that available scientific competence and existing facilities are used in the best possible way to realize the International Atomic Time scale and to satisfy the requirements of users of International Atomic Time.

The definition of TAI was given by the CCDS in 1970 (now the CCTF), see CCDS report p. 22.

■ **SI unit of amount of substance (mole)** (CR, 78 and *Metrologia*, 1972, 8, 36)\*

**Resolution 3**

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** the advice of the International Union of Pure and Applied Physics, of the International Union of Pure and Applied Chemistry, and of the International Organization for Standardization, concerning the need to define a unit of amount of substance,

**decides**

1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is "mol".\*\*
2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.
3. The mole is a base unit of the Système International d'Unités.

\* At its 1980 meeting, the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU (1980) specifying that, in this definition, it is understood that unbound atoms of carbon 12, at rest and in their ground state, are referred to.

\*\* The mole was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

**15th CGPM, 1975**

■ **Recommended value for the speed of light** (CR, 103 and *Metrologia*, 1975, 11, 179-180)

**Resolution 2**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** the excellent agreement among the results of wavelength measurements on the radiations of lasers locked on a molecular absorption line in the visible or infrared region, with an uncertainty estimated at  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which corresponds to the uncertainty of the realization of the metre,

**considering** also the concordant measurements of the frequencies of several of these radiations,

**recommends** the use of the resulting value for the speed of propagation of electromagnetic waves in vacuum  $c = 299\,792\,458$  metres per second.

The relative uncertainty given here corresponds to three standard deviations in the data considered.

■ **Coordinated Universal Time (UTC)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1975, 11, 180)

**Resolution 5**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** that the system called "Coordinated Universal Time" (UTC) is widely used, that it is broadcast in most radio transmissions of time signals, that this wide diffusion makes available to the users not only frequency standards but also International Atomic Time and an approximation to Universal Time (or, if one prefers, mean solar time),

**notes** that this Coordinated Universal Time provides the basis of civil time, the use of which is legal in most countries,

**judges** that this usage can be strongly endorsed.

■ **SI units for ionizing radiation (becquerel and gray)** (CR, 105 and *Metrologia*, 1975, 11, 180)\*

**Resolutions 8 and 9**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

by reason of the pressing requirement, expressed by the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), to extend the use of the Système International d'Unités to radiological research and applications,

by reason of the need to make as easy as possible the use of the units for nonspecialists,

taking into consideration also the grave risks of errors in therapeutic work,

**adopts** the following special name for the SI unit of activity:

\* At its 1976 meeting, the CIPM approved the report of the 5th meeting of the CCU (1976), specifying that, following the advice of the ICRU, the gray may also be used to express specific energy imparted, kerma and absorbed dose index.

**becquerel**, symbol Bq, equal to one reciprocal second (Resolution 8),

**adopts** the following special name for the SI unit of ionizing radiation:

**gray**, symbol Gy, equal to one joule per kilogram (Resolution 9).

Note: The gray is the SI unit of absorbed dose. In the field of ionizing radiation, the gray may be used with other physical quantities also expressed in joules per kilogram: the Comité Consultatif des Unités has responsibility for studying this matter in collaboration with the competent international organizations.

■ **SI prefixes peta and exa** (CR, 106 and *Metrologia*, 1975, 11, 180-181)\*

\* New prefixes were added by the 19th CGPM in 1991 (Resolution 4, see p. 179).

**Resolution 10**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of SI prefixes to be used for multiples, which was adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the two following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{15}$	peta	P
$10^{18}$	exa	E

**16th CGPM, 1979**

■ **SI unit of luminous intensity (candela)** (CR, 100 and *Metrologia*, 1980, 16, 56)

**Resolution 3**

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that despite the notable efforts of some laboratories there remain excessive divergences between the results of realizations of the candela based upon the present black body primary standard,
- that radiometric techniques are developing rapidly, allowing precisions that are already equivalent to those of photometry and that these techniques are already in use in national laboratories to realize the candela without having to construct a black body,
- that the relation between luminous quantities of photometry and radiometric quantities, namely the value of 683 lumens per watt for the spectral luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz, has been adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1977,
- that this value has been accepted as being sufficiently accurate for the system of luminous photopic quantities, that it implies a change of only about 3 % for the system of luminous scotopic quantities, and that it therefore ensures satisfactory continuity,
- that the time has come to give the candela a definition that will allow an improvement in both the ease of realization and the precision of photometric standards, and that applies to both photopic and scotopic photometric quantities and to quantities yet to be defined in the mesopic field,

**decides**

1. The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz and that has a radiant intensity in that direction of 1/683 watt per steradian.
2. The definition of the candela (at the time called new candle) adopted by the CIPM in 1946 by reason of the powers conferred by the 8th CGPM in 1933, ratified by the 9th CGPM in 1948, then amended by the 13th CGPM in 1967, is abrogated.

The wording of the definition of the candela was modified by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

Photopic vision is detected by the cones on the retina of the eye, which are sensitive to a high level of luminance ( $L > \text{ca. } 10 \text{ cd/m}^2$ ) and are used in daytime vision.

Scotopic vision is detected by the rods of the retina, which are sensitive to low level luminance ( $L < \text{ca. } 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ), used in night vision.

In the domain between these levels of luminance both cones and rods are used, and this is described as mesopic vision.

■ **Special name for the SI unit of dose equivalent (sievert)** (CR, 100 and *Metrologia*, 1980, 16, 56)\*

#### Resolution 5

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the effort made to introduce SI units into the field of ionizing radiations,
- the risk to human beings of an underestimated radiation dose, a risk that could result from a confusion between absorbed dose and dose equivalent,
- that the proliferation of special names represents a danger for the *Système International d'Unités* and must be avoided in every possible way, but that this rule can be broken when it is a matter of safeguarding human health,

**adopts** the special name *sievert*, symbol Sv, for the SI unit of dose equivalent in the field of radioprotection. The sievert is equal to the joule per kilogram.

\* The CIPM, in 1984, decided to accompany this Resolution with an explanation (Recommendation 1, see p. 176).

■ **Symbols for the litre** (CR, 101 and *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)

#### Resolution 6

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**recognizing** the general principles adopted for writing the unit symbols in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

**considering** that the symbol l for the unit litre was adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1879 and confirmed in the same Resolution of 1948,

**considering** also that, in order to avoid the risk of confusion between the letter l and the number 1, several countries have adopted the symbol L instead of l for the unit litre,

**considering** that the name litre, although not included in the *Système International d'Unités*, must be admitted for general use with the System,

**decides**, as an exception, to adopt the two symbols l and L as symbols to be used for the unit litre,

**considering** further that in the future only one of these two symbols should be retained,

**invites** the CIPM to follow the development of the use of these two symbols and to give the 18th CGPM its opinion as to the possibility of suppressing one of them.

The CIPM, in 1990, considered that it was still too early to choose a single symbol for the litre.

### CIPM, 1980

■ **SI supplementary units (radian and steradian)** (PV, 48, 24 and *Metrologia*, 1981, 17, 72)\*

#### Recommendation 1

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM),

**taking into consideration** Resolution 3 adopted by ISO/TC 12 in 1978 and Recommendation U 1 (1980) adopted by the Comité Consultatif des Unités at its 7th meeting,

**considering**

- that the units radian and steradian are usually introduced into expressions for units when there is need for clarification, especially in photometry where the steradian plays an important role in distinguishing between units corresponding to different quantities,
- that in the equations used one generally expresses plane angle as the ratio of two lengths and solid angle as the ratio between an area and the square of a length, and consequently that these quantities are treated as dimensionless quantities,
- that the study of the formalisms in use in the scientific field shows that none exists which is at the same time coherent and convenient and in which the quantities plane angle and solid angle might be considered as base quantities,

\* The class of SI supplementary units was abrogated by decision of the 20th CGPM in 1995 (Resolution 8, see p. 179).

**considering also**

- that the interpretation given by the CIPM in 1969 for the class of supplementary units introduced in Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in 1960 allows the freedom of treating the radian and the steradian as SI base units,
- that such a possibility compromises the internal coherence of the SI based on only seven base units,

**decides** to interpret the class of supplementary units in the International System as a class of dimensionless derived units for which the CGPM allows the freedom of using or not using them in expressions for SI derived units.

**17th CGPM, 1983**

■ **Definition of the metre** (CR, 97 and *Metrologia*, 1984, 20, 25)

**Resolution 1**

The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the present definition does not allow a sufficiently precise realization of the metre for all requirements,
- that progress made in the stabilization of lasers allows radiations to be obtained that are more reproducible and easier to use than the standard radiation emitted by a krypton 86 lamp,
- that progress made in the measurement of the frequency and wavelength of these radiations has resulted in concordant determinations of the speed of light whose accuracy is limited principally by the realization of the present definition of the metre,
- that wavelengths determined from frequency measurements and a given value for the speed of light have a reproducibility superior to that which can be obtained by comparison with the wavelength of the standard radiation of krypton 86,
- that there is an advantage, notably for astronomy and geodesy, in maintaining unchanged the value of the speed of light recommended in 1975 by the 15th CGPM in its Resolution 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s),
- that a new definition of the metre has been envisaged in various forms all of which have the effect of giving the speed of light an exact value, equal to the recommended value, and that this introduces no appreciable discontinuity into the unit of length, taking into account the relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  of the best realizations of the present definition of the metre,
- that these various forms, making reference either to the path travelled by light in a specified time interval or to the wavelength of a radiation of measured or specified frequency, have been the object of consultations and deep discussions, have been recognized as being equivalent and that a consensus has emerged in favour of the first form,
- that the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) is now in a position to give instructions for the practical realization of such a definition, instructions which could include the use of the orange radiation of krypton 86 used as standard up to now, and which may in due course be extended or revised,

**decides**

1. The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second,
2. The definition of the metre in force since 1960, based upon the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the atom of krypton 86, is abrogated.

The wording of the definition of the metre was modified by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

The relative uncertainty given here corresponds to three standard deviations in the data considered.



- **On the realization of the definition of the metre** (CR, 98 and *Metrologia*, 1984, 20, 25-26)

#### Resolution 2

The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures,  
invites the Comité International des Poids et Mesures

- to draw up instructions for the practical realization of the new definition of the metre,
- to choose radiations which can be recommended as standards of wavelength for the interferometric measurement of length and to draw up instructions for their use,
- to pursue studies undertaken to improve these standards.

See Recommendation 1 (CI-2002) of the CIPM on the revision of the practical realization of the definition of the metre, p. 181.

### CIPM, 1984

- **Concerning the sievert** (PV, 52, 31 and *Metrologia*, 1985, 21, 90)\*

#### Recommendation 1

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** the confusion which continues to exist on the subject of Resolution 5, approved by the 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (1979),

**decides** to introduce the following explanation in the brochure "Le Système International d'Unités (SI)":

The quantity dose equivalent  $H$  is the product of the absorbed dose  $D$  of ionizing radiation and the dimensionless factors  $Q$  (quality factor) and  $N$  (product of any other multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection:

$$H = Q \cdot N \cdot D.$$

Thus, for a given radiation, the numerical value of  $H$  in joules per kilogram may differ from that of  $D$  in joules per kilogram depending upon the values of  $Q$  and  $N$ . In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose  $D$  and the dose equivalent  $H$ , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose  $D$  and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent  $H$ .

\* The CIPM, in 2002, decided to change the explanation of the quantity dose equivalent in the SI Brochure (Recommendation 2, see p. 182).

### 18th CGPM, 1987

- **Forthcoming adjustment to the representations of the volt and of the ohm** (CR, 100 and *Metrologia*, 1988, 25, 115)

#### Resolution 6

The 18th Conférence Générale des Poids et Mesures,  
**considering**

- that worldwide uniformity and long-term stability of national representations of the electrical units are of major importance for science, commerce and industry from both the technical and economic points of view,
- that many national laboratories use the Josephson effect and are beginning to use the quantum Hall effect to maintain, respectively, representations of the volt and of the ohm, as these offer the best guarantees of long-term stability,
- that because of the importance of coherence among the units of measurement of the various physical quantities the values adopted for these representations must be as closely as possible in agreement with the SI,
- that the results of recent and current experiment will permit the establishment of an acceptable value, sufficiently compatible with the SI, for the coefficient which relates each of these effects to the corresponding electrical unit,

**invites** the laboratories whose work can contribute to the establishment of the quotient voltage/frequency in the case of the Josephson effect and of the quotient voltage/current for the quantum Hall effect to vigorously pursue these efforts and to communicate their results without delay to the Comité International des Poids et Mesures, and

**instructs** the Comité International des Poids et Mesures to recommend, as soon as it considers it possible, a value for each of these quotients together with a date for them to be put into practice simultaneously in all countries; these values should be announced at least one year in advance and would be adopted on 1 January 1990.

## CIPM, 1988

■ **Representation of the volt by means of the Josephson effect** (PV, 56, 44 and *Metrologia*, 1989, 26, 69)\*

\* The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) abrogated the adoption of a conventional value for  $K_J$ .

### Recommendation 1

The Comité International des Poids et Mesures,

**acting** in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

**considering**

- that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of 483 597.9 GHz/V for the Josephson constant,  $K_J$ , that is to say, for the quotient of frequency divided by the potential difference corresponding to the  $n = 1$  step in the Josephson effect,
- that the Josephson effect, together with this value of  $K_J$ , can be used to establish a reference standard of electromotive force having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the volt estimated to be 4 parts in  $10^7$ , and a reproducibility which is significantly better,

**recommends**

- that 483 597.9 GHz/V exactly be adopted as a conventional value, denoted by  $K_{J-90}$  for the Josephson constant,  $K_J$ ,
- that this new value be used from 1 January 1990, and not before, to replace the values currently in use,
- that this new value be used from this same date by all laboratories which base their measurements of electromotive force on the Josephson effect, and
- that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with the new adopted value,

**is of the opinion** that no change in this recommended value of the Josephson constant will be necessary in the foreseeable future, and

**draws the attention** of laboratories to the fact that the new value is greater by 3.9 GHz/V, or about 8 parts in  $10^6$ , than the value given in 1972 by the Comité Consultatif d'Électricité in its Declaration E-72.

■ **Representation of the ohm by means of the quantum Hall effect** (PV, 56, 45 and *Metrologia*, 1989, 26, 70)\*

At its 89th meeting in 2000, the CIPM approved the declaration of the 22nd meeting of the CCEM on the use of the value of the von Klitzing constant.

### Recommendation 2

The Comité International des Poids et Mesures,

**acting** in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

\*The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) abrogated the adoption of a conventional value for  $R_K$ .

**considering**

- that most existing laboratory reference standards of resistance change significantly with time,
- that a laboratory reference standard of resistance based on the quantum Hall effect would be stable and reproducible,
- that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of  $25\,812.807\ \Omega$  for the von Klitzing constant,  $R_K$ , that is to say, for the quotient of the Hall potential difference divided by current corresponding to the plateau  $i = 1$  in the quantum Hall effect,
- that the quantum Hall effect, together with this value of  $R_K$ , can be used to establish a reference standard of resistance having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the ohm estimated to be 2 parts in  $10^7$ , and a reproducibility which is significantly better,

**recommends**

- that  $25\,812.807\ \Omega$  exactly be adopted as a conventional value, denoted by  $R_{K-90}$ , for the von Klitzing constant,  $R_K$ ,
- that this value be used from 1 January 1990, and not before, by all laboratories which base their measurements of resistance on the quantum Hall effect,
- that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with  $R_{K-90}$ ,
- that in the use of the quantum Hall effect to establish a laboratory reference standard of resistance, laboratories follow the most recent edition of the technical guidelines for reliable measurements of the quantized Hall resistance drawn up by the Comité Consultatif d'Électricité and published by the Bureau International des Poids et Mesures, and

**is of the opinion** that no change in this recommended value of the von Klitzing constant will be necessary in the foreseeable future.

**CIPM, 1989**

■ **The International Temperature Scale of 1990** (PV, 57, 115 and *Metrologia*, 1990, 27, 13)

The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

**Recommendation 5**

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) acting in accordance with Resolution 7 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (1987) has adopted the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) to supersede the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68).

The CIPM **notes** that, by comparison with the IPTS-68, the ITS-90

- extends to lower temperatures, down to 0.65 K, and hence also supersedes the EPT-76,
- is in substantially better agreement with corresponding thermodynamic temperatures,
- has much improved continuity, precision and reproducibility throughout its range and
- has subranges and alternative definitions in certain ranges which greatly facilitate its use.

The CIPM also **notes** that, to accompany the text of the ITS-90 there will be two further documents, the *Supplementary Information for the ITS-90* and *Techniques for Approximating the ITS-90*. These documents will be published by the BIPM and periodically updated.

The CIPM **recommends**

- that on 1 January 1990 the ITS-90 come into force and
- that from this same date the IPTS-68 and the EPT-76 be abrogated.

**19th CGPM, 1991**

- **SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto** (CR, 185 and *Metrologia*, 1992, 29, 3)

**Resolution 4**

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the 12th CGPM, Resolution 8 and the 15th CGPM, Resolution 10, the following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

The names zepto and zetta are derived from septo suggesting the number seven (the seventh power of  $10^3$ ) and the letter “z” is substituted for the letter “s” to avoid the duplicate use of the letter “s” as a symbol. The names yocto and yotta are derived from octo, suggesting the number eight (the eighth power of  $10^3$ ); the letter “y” is added to avoid the use of the letter “o” as a symbol because it may be confused with the number zero.

**20th CGPM, 1995**

- **Elimination of the class of supplementary units in the SI** (CR, 223 and *Metrologia*, 1996, 33, 83)

**Resolution 8**

The 20th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the 11th Conférence Générale in 1960 in its Resolution 12, establishing the Système International d’Unités, SI, distinguished between three classes of SI units: the base units, the derived units, and the supplementary units, the last of these comprising the radian and the steradian,
- that the status of the supplementary units in relation to the base units and the derived units gave rise to debate,
- that the Comité International des Poids et Mesures, in 1980, having observed that the ambiguous status of the supplementary units compromises the internal coherence of the SI, has in its Recommendation 1 (CI-1980) interpreted the supplementary units, in the SI, as dimensionless derived units,

**approving** the interpretation given by the Comité International in 1980,

**decides**

- to interpret the supplementary units in the SI, namely the radian and the steradian, as dimensionless derived units, the names and symbols of which may, but need not, be used in expressions for other SI derived units, as is convenient,
- and, consequently, to eliminate the class of supplementary units as a separate class in the SI.

**21st CGPM, 1999**

- **The definition of the kilogram** (CR, 331 and *Metrologia*, 2000, 37, 94)

**Resolution 7**

The 21st Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the need to assure the long-term stability of the International System of Units (SI),
- the intrinsic uncertainty in the long-term stability of the artefact defining the unit of mass, one of the base units of the SI,
- the consequent uncertainty in the long-term stability of the other three base units of the SI that depend on the kilogram, namely, the ampere, the mole and the candela,

- the progress already made in a number of different experiments designed to link the unit of mass to fundamental or atomic constants,
- the desirability of having more than one method of making such a link,

**recommends** that national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram.

■ **Special name for the SI derived unit mole per second, the katal, for the expression of catalytic activity** (CR, 334-335 and *Metrologia*, 2000, 37, 95)

**Resolution 12**

The 21st Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the importance for human health and safety of facilitating the use of SI units in the fields of medicine and biochemistry,
- that a non-SI unit called “unit”, symbol U, equal to  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ , which is not coherent with the International System of Units (SI), has been in widespread use in medicine and biochemistry since 1964 for expressing catalytic activity,
- that the absence of a special name for the SI coherent derived unit mole per second has led to results of clinical measurements being given in various local units,
- that the use of SI units in medicine and clinical chemistry is strongly recommended by the international unions in these fields,
- that the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine has asked the Consultative Committee for Units to recommend the special name katal, symbol kat, for the SI unit mole per second,
- that while the proliferation of special names represents a danger for the SI, exceptions are made in matters related to human health and safety (15th General Conference, 1975, Resolutions 8 and 9, 16th General Conference, 1979, Resolution 5),

**noting** that the name katal, symbol kat, has been used for the SI unit mole per second for over thirty years to express catalytic activity,

**decides** to adopt the special name katal, symbol kat, for the SI unit mole per second to express catalytic activity, especially in the fields of medicine and biochemistry,

and **recommends** that when the katal is used, the measurand be specified by reference to the measurement procedure; the measurement procedure must identify the indicator reaction.

**CIPM, 2001**

■ **“SI units” and “units of the SI”** (PV, 69, 120)

The CIPM approved in 2001 the following proposal of the CCU regarding “SI units” and “units of the SI”:

“We suggest that “SI units” and “units of the SI” should be regarded as names that include both the base units and the coherent derived units, and also all units obtained by combining these with the recommended multiple and sub-multiple prefixes.

We suggest that the name “coherent SI units” should be used when it is desired to restrict the meaning to only the base units and the coherent derived units.”

## CIPM, 2002

■ **Revision of the practical realization of the definition of the metre** (PV, 70, 194-204 and *Metrologia*, 40, 103-133)

### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures,

#### recalling

- that in 1983 the 17th General Conference (CGPM) adopted a new definition of the metre;
- that in the same year the CGPM invited the International Committee (CIPM)
  - to draw up instructions for the practical realization of the metre,
  - to choose radiations which can be recommended as standards of wavelength for the interferometric measurement of length and draw up instructions for their use,
  - to pursue studies undertaken to improve these standards and in due course to extend or revise these instructions;
- that in response to this invitation the CIPM adopted Recommendation 1 (CI-1983) (*mise en pratique* of the definition of the metre) to the effect
  - that the metre should be realized by one of the following methods:
    - (a) by means of the length  $l$  of the path travelled in vacuum by a plane electromagnetic wave in a time  $t$ ; this length is obtained from the measured time  $t$ , using the relation  $l = c_0 \cdot t$  and the value of the speed of light in vacuum  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
    - (b) by means of the wavelength in vacuum  $\lambda$  of a plane electromagnetic wave of frequency  $f$ ; this wavelength is obtained from the measured frequency  $f$  using the relation  $\lambda = c_0/f$  and the value of the speed of light in vacuum  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
    - (c) by means of one of the radiations from the list below, whose stated wavelength in vacuum or whose stated frequency can be used with the uncertainty shown, provided that the given specifications and accepted good practice are followed;
  - that in all cases any necessary corrections be applied to take account of actual conditions such as diffraction, gravitation or imperfection in the vacuum;
  - that in the context of general relativity, the metre is considered a unit of proper length. Its definition, therefore, applies only within a spatial extent sufficiently small that the effects of the non-uniformity of the gravitational field can be ignored (note that, at the surface of the Earth, this effect in the vertical direction is about 1 part in  $10^{16}$  per metre). In this case, the effects to be taken into account are those of special relativity only. The local methods for the realization of the metre recommended in (b) and (c) provide the proper metre but not necessarily that given in (a). Method (a) should therefore be restricted to lengths  $l$  which are sufficiently short for the effects predicted by general relativity to be negligible with respect to the uncertainties of realization. For advice on the interpretation of measurements in which this is not the case, see the report of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) Working Group on the Application of General Relativity to Metrology (Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, 34, 261-290);
- that the CIPM had already recommended a list of radiations for this purpose;

**recalling** also that in 1992 and in 1997 the CIPM revised the practical realization of the definition of the metre;

#### considering

- that science and technology continue to demand improved accuracy in the realization of the metre;
- that since 1997 work in national laboratories, in the BIPM and elsewhere has identified new radiations and methods for their realization which lead to lower uncertainties;

- that there is an increasing move towards optical frequencies for time-related activities, and that there continues to be a general widening of the scope of application of the recommended radiations of the *mise en pratique* to cover not only dimensional metrology and the realization of the metre, but also high-resolution spectroscopy, atomic and molecular physics, fundamental constants and telecommunication;
- that a number of new frequency values with reduced uncertainties for radiations of high-stability cold atom and ion standards already listed in the recommended radiations list are now available, that the frequencies of radiations of several new cold atom and ion species have also recently been measured, and that new improved values with substantially reduced uncertainties for a number of optical frequency standards based on gas cells have been determined, including the wavelength region of interest to optical telecommunications;
- that new femtosecond comb techniques have clear significance for relating the frequency of high-stability optical frequency standards to that of the frequency standard realizing the SI second, that these techniques represent a convenient measurement technique for providing traceability to the International System of Units (SI) and that comb technology also can provide frequency sources as well as a measurement technique;

**recognizes** comb techniques as timely and appropriate, and recommends further research to fully investigate the capability of the techniques;

**welcomes** validations now being made of comb techniques by comparison with other frequency chain techniques;

**urges** national metrology institutes and other laboratories to pursue the comb technique to the highest level of accuracy achievable and also to seek simplicity so as to encourage widespread application;

**recommends**

- that the list of recommended radiations given by the CIPM in 1997 (Recommendation 1 (CI-1997)) be replaced by the list of radiations given below\*, including
  - updated frequency values for cold Ca atom, H atom and the trapped Sr<sup>+</sup> ion,
  - frequency values for new cold ion species including trapped Hg<sup>+</sup> ion, trapped In<sup>+</sup> ion and trapped Yb<sup>+</sup> ion,
  - updated frequency values for Rb-stabilized lasers, I<sub>2</sub>-stabilized Nd:YAG and He-Ne lasers, CH<sub>4</sub>-stabilized He-Ne lasers and OsO<sub>4</sub>-stabilized CO<sub>2</sub> lasers at 10 μm,
  - frequency values for standards relevant to the optical communications bands, including Rb- and C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-stabilized lasers.

\* The list of recommended radiations, Recommendation 1 (CI-2002), is given in PV, 70, 197-204 and *Metrologia*, 2003, 40, 104-115.

■ **Dose equivalent (PV, 70, 205)**

**Recommendation 2**

The International Committee for Weights and Measures,

**considering** that

- the current definition of the SI unit of dose equivalent (sievert) includes a factor “*N*” (product of any other multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), and
- both the ICRP and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) have decided to delete this factor *N* as it is no longer deemed to be necessary, and
- the current SI definition of *H* including the factor *N* is causing some confusion,

**decides** to change the explanation in the brochure “Le Système International d'Unités (SI)” to the following:

The quantity dose equivalent *H* is the product of the absorbed dose *D* of ionizing radiation and the dimensionless factor *Q* (quality factor) defined as a function of linear energy transfer by the ICRU:

$$H = Q \cdot D.$$

See also *J. Radiol. Prot.*, 2005, 25, 97-100.

Thus, for a given radiation, the numerical value of  $H$  in joules per kilogram may differ from that of  $D$  in joules per kilogram depending on the value of  $Q$ .

The Committee further **decides** to maintain the final sentence in the explanation as follows:

In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose  $D$  and the dose equivalent  $H$ , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose  $D$  and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent  $H$ .

### CIPM, 2003

■ **Revision of the *Mise en Pratique* list of recommended radiations** (PV, 71, 146 and *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)

#### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures,

**considering** that

- improved frequency values for radiations of some high-stability cold ion standards already documented in the recommended radiations list have recently become available;
- improved frequency values for the infra-red gas-cell-based optical frequency standard in the optical telecommunications region, already documented in the recommended radiations list, have been determined;
- femtosecond comb-based frequency measurements for certain iodine gas-cell standards on the subsidiary recommended source list have recently been made for the first time, leading to significantly reduced uncertainty;

**proposes** that the *recommended radiation* list be revised to include the following:

- updated frequency values for the single trapped  $^{88}\text{Sr}^+$  ion quadrupole transition and the single trapped  $^{171}\text{Yb}^+$  octupole transition;
- an updated frequency value for the  $\text{C}_2\text{H}_2$ -stabilized standard at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- updated frequency values for the  $\text{I}_2$ -stabilized standards at 543 nm and 515 nm.

### 22nd CGPM, 2003

■ **Symbol for the decimal marker** (CR, 381 and *Metrologia*, 2004, 41, 104)

#### Resolution 10

The 22nd General Conference,

**considering** that

- a principal purpose of the International System of Units (SI) is to enable values of quantities to be expressed in a manner that can be readily understood throughout the world,
- the value of a quantity is normally expressed as a number times a unit,
- often the number in the expression of the value of a quantity contains multiple digits with an integral part and a decimal part,
- in Resolution 7 of the 9th General Conference, 1948, it is stated that "In numbers, the comma (French practice) or the dot (British practice) is used only to separate the integral part of numbers from the decimal part",
- following a decision of the International Committee made at its 86th meeting (1997), the International Bureau of Weights and Measures now uses the dot (point on the line) as the decimal marker in all the English language versions of its publications, including the English text of the SI Brochure (the definitive international reference on the SI), with the comma (on the line) remaining the decimal marker in all of its French language publications,
- however, some international bodies use the comma on the line as the decimal marker in their English language documents,



- furthermore, some international bodies, including some international standards organizations, specify the decimal marker to be the comma on the line in all languages,
- the prescription of the comma on the line as the decimal marker is in many languages in conflict with the customary usage of the point on the line as the decimal marker in those languages,
- in some languages that are native to more than one country, either the point on the line or the comma on the line is used as the decimal marker depending on the country, while in some countries with more than one native language, either the point on the line or comma on the line is used depending on the language,

**declares** that the symbol for the decimal marker shall be either the point on the line or the comma on the line,

**reaffirms** that "Numbers may be divided in groups of three in order to facilitate reading; neither dots nor commas are ever inserted in the spaces between groups", as stated in Resolution 7 of the 9th CGPM, 1948.

## CIPM, 2005

■ **Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature** (PV, 73, 235 and *Metrologia*, 2006, 43, 177-178)\*

\* The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

### Recommendation 2

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

**considering**

- that the kelvin, unit of thermodynamic temperature, is defined as the fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water,
- that the temperature of the triple point depends on the relative amount of isotopes of hydrogen and oxygen present in the sample of water used,
- that this effect is now one of the major sources of the observed variability between different realizations of the water triple point,

**decides**

- that the definition of the kelvin refer to water of a specified isotopic composition,
- that this composition be:
  - 0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ ,
  - 0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ , and
  - 0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ,

which is the composition of the International Atomic Energy Agency reference material Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), as recommended by IUPAC in "Atomic Weights of the Elements: Review 2000".

- that this composition be stated in a note attached to the definition of the kelvin in the SI brochure as follows:
 

"This definition refers to water having the isotopic composition defined exactly by the following amount of substance ratios: 0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ , 0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$  and 0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ".

■ **Revision of the *Mise en pratique* list of recommended radiations** (PV, 73, 236 and *Metrologia*, 2006, 43, 178)

### Recommendation 3

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

considering that:

- improved frequency values for radiations of some high-stability cold ion and cold atom standards already documented in the recommended radiations list have recently become available;
- improved frequency values for the infra-red gas-cell-based optical frequency standard in the optical telecommunications region, already documented in the recommended radiations list, have been determined;
- improved frequency values for certain iodine gas-cell standard, already documented in the subsidiary recommended source list, have been determined;
- frequencies of new cold atoms, of atoms in the near-infrared region and of molecules in the optical telecommunications region have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements for the first time;

decides that the list of *recommended radiations* be revised to include the following:

- updated frequency values for the single trapped  $^{88}\text{Sr}^+$  ion quadrupole transition, the single trapped  $^{199}\text{Hg}^+$  quadrupole transition and the single trapped  $^{171}\text{Yb}^+$  quadrupole transition;
- an updated frequency value for the Ca atom transition;
- an updated frequency value for the  $\text{C}_2\text{H}_2$ -stabilized standard at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- an updated frequency value for the  $\text{I}_2$ -stabilized standard at 515 nm;
- the addition of the  $^{87}\text{Sr}$  atom transition at 698 nm;
- the addition of the  $^{87}\text{Rb}$  atom two-photon transitions at 760 nm;
- the addition of the  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) band and the  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) and ( $\nu_1 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5$ ) bands at 1.54  $\mu\text{m}$ .

## CIPM, 2006

■ **Concerning secondary representations of the second** (PV, 74, 249 and *Metrologia*, 2007, 44, 97)

### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

considering that

- a common list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second" shall be established,
- the CCL/CCTF Joint Working Group (JWG) on the *Mise en Pratique* of the Definition of the Metre and the Secondary Representations of the Second in its meeting at the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) in September 2005 discussed possible candidates to be included in this list for secondary representations of the second,
- the CCL/CCTF JWG reviewed and updated the values for the Hg ion, Sr ion, Yb ion, and the Sr neutral atom transition frequencies in its session in September 2006,
- the CCTF in its Recommendation CCTF 1 (2004) already recommended the unperturbed ground-state hyperfine quantum transition frequency of  $^{87}\text{Rb}$  as a secondary representation of the second;

recommends that the following transition frequencies shall be used as secondary representations of the second and be included into the new list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second"

- the unperturbed ground-state hyperfine quantum transition of  $^{87}\text{Rb}$  with a frequency of  $\nu_{\text{Rb}}^{87} = 6\,834\,682\,610.904\,324$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  transition of the  $^{88}\text{Sr}^+$  ion with a frequency of  $\nu_{\text{Sr}^+}^{88} = 444\,779\,044\,095\,484$  Hz and a relative uncertainty of  $7 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical  $5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F = 0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F = 2)$  transition of the  $^{199}\text{Hg}^+$  ion with a frequency of  $\nu_{\text{Hg}^+}^{199} = 1\,064\,721\,609\,899\,145$  Hz and a relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2)$  transition of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $\nu_{\text{Yb}^+}^{171} = 688\,358\,979\,309\,308$  Hz and a relative standard uncertainty of  $9 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $\nu_{\text{Sr}}^{87} = 429\,228\,004\,229\,877$  Hz and a relative standard uncertainty of  $1.5 \times 10^{-14}$ .

### CIPM, 2007

#### ■ Revision of the Mise en pratique list of recommended radiations (PV, 75, 185)

##### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures,

considering that:

- improved frequency values of molecules in the optical telecommunications region, already documented in the list of standard frequencies, have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements;
- frequencies of molecules in the optical telecommunications region have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements for the first time;
- frequencies of certain iodine gas-cell absorptions close to the 532 nm optical frequency standard have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements for the first time;

proposes that the list of standard frequencies be revised to include the following:

- an updated list of frequency values for the  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) band at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- the addition of frequency values for the  $^{12}\text{C}_2\text{HD}$  ( $2\nu_1$ ) band at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- the addition of frequency values for the hyperfine components of the P(142) 37-0, R(121) 35-0 and R(85) 33-0 iodine transitions at 532 nm.

### 23rd CGPM, 2007

#### ■ On the revision of the mise en pratique of the definition of the metre and the development of new optical frequency standards (CR, 431)

##### Resolution 9

The 23rd General Conference,

considering that:

- there have been rapid and important improvements in the performance of optical frequency standards,
- femtosecond comb techniques are now used routinely for relating optical and microwave radiations at a single location,
- National Metrology Institutes (NMIs) are working on comparison techniques for optical frequency standards over short distances,
- remote comparison techniques need to be developed at an international level so that optical frequency standards can be compared,

**welcomes**

- the activities of the Joint Working Group of the Consultative Committee for Length and the Consultative Committee for Time and Frequency to review the frequencies of optically-based representations of the second,
- the additions to the *mise en pratique* of the definition of the metre and to the list of recommended radiations made by the International Committee in 2002, 2003, 2005, 2006, and 2007,
- the initiative taken by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) to raise the issue of how to compare optical frequency standards,

**recommends that:**

- NMIs commit resources to the development of optical frequency standards and their comparison,
- the BIPM works toward the coordination of an international project with the participation of NMIs, oriented to the study of the techniques which could serve to compare optical frequency standards.

■ **Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature**  
(CR, 432)

The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

**Resolution 10**

The 23rd General Conference,

**considering**

- that the kelvin, unit of thermodynamic temperature, is defined as the fraction  $1/273.16$  of the thermodynamic temperature of the triple point of water,
- that the temperature of the triple point depends on the relative amount of isotopes of hydrogen and oxygen present in the sample of water used,
- that this effect is now one of the major sources of the observed variability between different realizations of the water triple point,

**notes and welcomes** the decision by the International Committee for Weights and Measures in October 2005, on the advice of the Consultative Committee for Thermometry, that

- the definition of the kelvin refers to water of a specified isotopic composition,
- this composition be:

0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ ,  
0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ , and  
0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ,

which is the composition of the International Atomic Energy Agency reference material Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), as recommended by the International Union of Pure and Applied Chemistry in "Atomic Weights of the Elements: Review 2000",

- this composition be stated in a note attached to the definition of the kelvin in the SI Brochure as follows:

"This definition refers to water having the isotopic composition defined by the following amount-of-substance ratios: 0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ , 0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$  and 0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ".

■ **On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI) (CR, 434)**

The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) finally approved the revision of the SI.

**Resolution 12**

The 23rd General Conference,

**considering**

- that, for many years, National Metrology Institutes (NMIs) as well as the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) have made considerable efforts to advance and improve the International System of Units (SI) by extending the frontiers of metrology so that the SI base units could be defined in terms of the invariants of nature - the fundamental physical constants,
- that, of the seven base units of the SI, only the kilogram is still defined in terms of a material artefact - the international prototype of the kilogram (2nd CGPM, 1889, 3rd CGPM, 1901) and that the definitions of the ampere, mole and candela depend on the kilogram,
- Resolution 7 of the 21st General Conference (1999) which recommended that "national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram",
- the many advances, made in recent years, in experiments which relate the mass of the international prototype to the Planck constant  $h$  or the Avogadro constant  $N_A$ ,
- initiatives to determine the value of a number of relevant fundamental constants, including work to redetermine the Boltzmann constant  $k_B$ ,
- that as a result of recent advances, there are significant implications for, and potential benefits from, redefinitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole,
- Recommendation 1 of the International Committee (C1-2005) at its meeting in October 2005, and various Recommendations of Consultative Committees on the subject of a redefinition of one or more of the base units of the SI,

**noting**

- that any changes in definitions of units of the SI must be constrained by self-consistency,
- that it is desirable that definitions of the base units should be easily understood,
- the work of the International Committee and the Consultative Committees,
- the need to monitor the results of relevant experiments,
- the importance of soliciting comments and contributions from the wider scientific and user communities, and
- the decision of the International Committee in 2005 to approve, in principle, the preparation of new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and the possibility of redefining the mole,

**recommends** that National Metrology Institutes and the BIPM

- pursue the relevant experiments so that the International Committee can come to a view on whether it may be possible to redefine the kilogram, the ampere, the kelvin, and the mole using fixed values of the fundamental constants at the time of the 24th General Conference (2011),
- should, together with the International Committee, its Consultative Committees, and appropriate working groups, work on practical ways of realizing any new definitions based on fixed values of the fundamental constants, prepare a *mise en pratique* for each of them, and consider the most appropriate way of explaining the new definitions to users,
- initiate awareness campaigns to alert user communities to the possibility of redefinitions and that the technical and legislative implications of such redefinitions and their practical realizations be carefully discussed and considered,

**and requests** the International Committee to report on these issues to the 24th General Conference in 2011 and to undertake whatever preparations are considered necessary so that, if the results of experiments are found to be satisfactory and the needs of users met, formal proposals for changes in the definitions of the kilogram, ampere, the kelvin and mole can be put to the 24th General Conference.

**CIPM, 2009****■ Updates to the list of standard frequencies (PV, 77, 235)****Recommendation 2**

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

considering that

- a common list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second” has been established;
- the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (FSWG) has reviewed several promising candidates for inclusion in the list;

recommends

that the following transition frequencies shall be included or updated in the list of recommended standard frequencies:

- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $f = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.7$  Hz and a relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-15}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  of the  $^{88}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $f = 429\ 228\ 066\ 418\ 012$  Hz and a relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion with a frequency of  $f = 411\ 042\ 129\ 776\ 393$  Hz and a relative standard uncertainty of  $4 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $^2S_{1/2} (F = 0) - ^2F_{7/2} (F = 3, m_F = 0)$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $f = 642\ 121\ 496\ 772\ 657$  Hz and a relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 (F = 1/2) - 6s\ 6p\ ^3P_0 (F = 1/2)$  of the  $^{171}\text{Yb}$  neutral atom with a frequency of  $f = 518\ 295\ 836\ 590\ 864$  Hz and a relative standard uncertainty of  $1.6 \times 10^{-13}$ .

**24th CGPM, 2011****■ On the possible future revision of the International System of Units, the SI (CR, 532)****Resolution 1**

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 24th meeting,

considering

- the international consensus on the importance, value, and potential benefits of a redefinition of a number of units of the International System of Units (SI),
- that the national metrology institutes (NMIs) as well as the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) have rightfully expended significant effort during the last several decades to advance the International System of Units (SI) by extending the frontiers of metrology so that SI base units can be defined in terms of the invariants of nature - the fundamental physical constants or properties of atoms,
- that a prominent example of the success of such efforts is the current definition of the SI unit of length, the metre (17th meeting of the CGPM, 1983, Resolution 1), which links it to an exact value of the speed of light in vacuum  $c$ , namely, 299 792 458 metre per second,
- that of the seven base units of the SI, only the kilogram is still defined in terms of a material artefact, namely, the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901), and that the definitions of the ampere, mole and candela depend on the kilogram,
- that although the international prototype has served science and technology well since it was sanctioned by the CGPM at its 1st meeting in 1889, it has a number of important limitations, one of the most significant being that its mass is not explicitly linked to an invariant of nature and in consequence its long-term stability is not assured,

The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) finally approved the revision of the SI.

- that the CGPM at its 21st meeting in 1999 adopted Resolution 7 in which it recommended that "national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram",
- that many advances have been made in recent years in relating the mass of the international prototype to the Planck constant  $h$ , by methods which include watt balances and measurements of the mass of a silicon atom,
- that the uncertainties of all SI electrical units realized directly or indirectly by means of the Josephson and quantum Hall effects together with the SI values of the Josephson and von Klitzing constants  $K_J$  and  $R_K$  could be significantly reduced if the kilogram were redefined so as to be linked to an exact numerical value of  $h$ , and if the ampere were to be redefined so as to be linked to an exact numerical value of the elementary charge  $e$ ,
- that the kelvin is currently defined in terms of an intrinsic property of water that, while being an invariant of nature, in practice depends on the purity and isotopic composition of the water used,
- that it is possible to redefine the kelvin so that it is linked to an exact numerical value of the Boltzmann constant  $k$ ,
- that it is also possible to redefine the mole so that it is linked to an exact numerical value of the Avogadro constant  $N_A$ , and is thus no longer dependent on the definition of the kilogram even when the kilogram is defined so that it is linked to an exact numerical value of  $h$ , thereby emphasizing the distinction between amount of substance and mass,
- that the uncertainties of the values of many other important fundamental constants and energy conversion factors would be eliminated or greatly reduced if  $h$ ,  $e$ ,  $k$  and  $N_A$  had exact numerical values when expressed in SI units,
- that the General Conference, at its 23rd meeting in 2007, adopted Resolution 12 in which it outlined the work that should be carried out by the NMIs, the BIPM and the International Committee for Weights and Measures (CIPM) together with its Consultative Committees (CCs) so that new definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole in terms of fundamental constants could be adopted,
- that, although this work has progressed well, not all the requirements set out in Resolution 12 adopted by the General Conference at its 23rd meeting in 2007 have been satisfied and so the International Committee for Weights and Measures is not yet ready to make a final proposal,
- that, nevertheless, a clear and detailed explanation of what is likely to be proposed can now be presented,

**takes note** of the intention of the International Committee for Weights and Measures to propose a revision of the SI as follows:

- the International System of Units, the SI, will be the system of units in which:
  - the ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  is exactly 9 192 631 770 hertz,
  - the speed of light in vacuum  $c$  is exactly 299 792 458 metre per second,
  - the Planck constant  $h$  is exactly  $6.626\ 06\text{X} \times 10^{-34}$  joule second\*,
  - the elementary charge  $e$  is exactly  $1.602\ 17\text{X} \times 10^{-19}$  coulomb,
  - the Boltzmann constant  $k$  is exactly  $1.380\ 6\text{X} \times 10^{-23}$  joule per kelvin,
  - the Avogadro constant  $N_A$  is exactly  $6.022\ 14\text{X} \times 10^{23}$  reciprocal mole,
  - the luminous efficacy  $K_{\text{cd}}$  of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz is exactly 683 lumen per watt,

where

(i) the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{s A}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , and  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ ,

\* The X digit appearing in the expression of the constants indicates that this digit was unknown at the time of the resolution.

(ii) the symbol X in this Draft Resolution represents one or more additional digits to be added to the numerical values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ , using values based on the most recent CODATA adjustment,

from which it follows that the SI will continue to have the present set of seven base units, in particular

- the kilogram will continue to be the unit of mass, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Planck constant to be equal to exactly  $6.626\ 06X \times 10^{-34}$  when it is expressed in the SI unit  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ , which is equal to J s,
- the ampere will continue to be the unit of electric current, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly  $1.602\ 17X \times 10^{-19}$  when it is expressed in the SI unit s A, which is equal to C,
- the kelvin will continue to be the unit of thermodynamic temperature, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Boltzmann constant to be equal to exactly  $1.380\ 6X \times 10^{-23}$  when it is expressed in the SI unit  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , which is equal to J  $\text{K}^{-1}$ ,
- the mole will continue to be the unit of amount of substance of a specified elementary entity, which may be an atom, molecule, ion, electron, any other particle or a specified group of such particles, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Avogadro constant to be equal to exactly  $6.022\ 14X \times 10^{23}$  when it is expressed in the SI unit  $\text{mol}^{-1}$ .

The General Conference on Weights and Measures

**further notes** that since

- the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and mole are intended to be of the explicit-constant type, that is, a definition in which the unit is defined indirectly by specifying explicitly an exact value for a well-recognized fundamental constant,
- the existing definition of the metre is linked to an exact value of the speed of light in vacuum, which is also a well-recognized fundamental constant,
- the existing definition of the second is linked to an exact value of a well-defined property of the caesium atom, which is also an invariant of nature,
- although the existing definition of the candela is not linked to a fundamental constant, it may be viewed as being linked to an exact value of an invariant of nature,
- it would enhance the understandability of the International System if all of its base units were of similar wording,

the International Committee for Weights and Measures will also propose

the reformulation of the existing definitions of the second, metre and candela in completely equivalent forms, which might be the following:

- the second, symbol s, is the unit of time; its magnitude is set by fixing the numerical value of the ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom, at rest and at a temperature of 0 K, to be equal to exactly 9 192 631 770 when it is expressed in the SI unit  $\text{s}^{-1}$ , which is equal to Hz,
- the metre, symbol m, is the unit of length; its magnitude is set by fixing the numerical value of the speed of light in vacuum to be equal to exactly 299 792 458 when it is expressed in the SI unit  $\text{m s}^{-1}$ ,
- the candela, symbol cd, is the unit of luminous intensity in a given direction; its magnitude is set by fixing the numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz to be equal to exactly 683 when it is expressed in the SI unit  $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$ , or  $\text{cd sr W}^{-1}$ , which is equal to  $\text{lm W}^{-1}$ .

In this way, the definitions of all seven base units will be seen to follow naturally from the set of seven constants given above.



In consequence, on the date chosen for the implementation of the revision of the SI:

- the definition of the kilogram in force since 1889 based upon the mass of the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) will be abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM, 1948) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) will be abrogated,
- the conventional values of the Josephson constant  $K_{J-90}$  and of the von Klitzing constant  $R_{K-90}$  adopted by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, will be abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, 1967/68, Resolution 4) based upon a less explicit, earlier definition (10th meeting of the CGPM, 1954, Resolution 3) will be abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, 1971, Resolution 3) based upon a definition whereby the molar mass of carbon 12 had the exact value  $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$  will be abrogated,
- the existing definitions of the metre, second and candela in force since they were adopted by the CGPM at its 17th (1983, Resolution 1), 13th (1967/68, Resolution 1) and 16th (1979, Resolution 3) meetings, respectively, will be abrogated.

The General Conference on Weights and Measures

**further notes** that on the same date

- the mass of the international prototype of the kilogram  $m(K)$  will be 1 kg but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of  $h$  just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the magnetic constant (permeability of vacuum)  $\mu_0$  will be  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant  $\alpha$  and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the thermodynamic temperature of the triple point of water  $T_{TPW}$  will be 273.16 K but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of  $k$  just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the molar mass of carbon 12  $M(^{12}\text{C})$  will be  $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$  but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of  $N_A h$  just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally.

The General Conference on Weights and Measures

**encourages**

- researchers in national metrology institutes, the BIPM and academic institutions to continue their efforts and make known to the scientific community in general and to CODATA in particular, the outcome of their work relevant to the determination of the constants  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ , and
- the BIPM to continue its work on relating the traceability of the prototypes it maintains to the international prototype of the kilogram, and in developing a pool of reference standards to facilitate the dissemination of the unit of mass when redefined,

**invites**

- CODATA to continue to provide adjusted values of the fundamental physical constants based on all relevant information available and to make the results known to the International Committee through its Consultative Committee for Units since these CODATA values and uncertainties will be those used for the revised SI,

- the CIPM to make a proposal for the revision of the SI as soon as the recommendations of Resolution 12 of the 23rd meeting of the General Conference are fulfilled, in particular the preparation of *mises en pratique* for the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and mole,
- the CIPM to continue its work towards improved formulations for the definitions of the SI base units in terms of fundamental constants, having as far as possible a more easily understandable description for users in general, consistent with scientific rigour and clarity,
- the CIPM, the Consultative Committees, the BIPM, the OIML and National Metrology Institutes significantly to increase their efforts to initiate awareness campaigns aimed at alerting user communities and the general public to the intention to redefine various units of the SI and to encourage consideration of the practical, technical, and legislative implications of such redefinitions, so that comments and contributions can be solicited from the wider scientific and user communities.

■ **On the revision of the mise en pratique of the metre and the development of new optical frequency standards (CR, 546)**

**Resolution 8**

The General Conference on Weight and Measures (CGPM), at its 24th meeting,

**considering** that

- there have been rapid and important improvements in the performance of optical frequency standards,
- national metrology institutes are working on comparison techniques for optical frequency standards over short distances,
- remote comparison techniques need to be developed at an international level so that optical frequency standards can be compared,

**welcomes**

- the activities of the joint working group of the CCTF and the CCL to review the frequencies of optically-based representations of the second,
- the additions made by the CIPM in 2009 to the common list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second",
- the establishment of a CCTF working group on Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques,

**recommends** that

- NMIs commit resources to the development of optical frequency standards and their comparison,
- the BIPM supports the coordination of an international project with the participation of NMIs, oriented to the study of the techniques which could serve to compare optical frequency standards.

**CIPM, 2013**

■ **Updates to the list of standard frequencies (PV, 81, 144)**

**Recommendation 1**

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

**considering** that

- a common list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second" has been established,
- the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (FSWG) has reviewed several candidates for inclusion into the list,

**recommends** the following changes to the list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second":

- that the following transition frequency be added to the list:
  - the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  of the  $^{199}\text{Hg}$  neutral atom with a frequency of 1 128 575 290 808 162 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.7 \times 10^{-14}$ ;
- that the following transition frequencies be updated in the list:
  - the unperturbed optical transition  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion with a frequency of 411 042 129 776 395 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.5 \times 10^{-14}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $1S - 2S$  of the  $^1\text{H}$  neutral atom with a frequency of 1 233 030 706 593 518 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.2 \times 10^{-14}$ ;

Note: This frequency corresponds to half of the energy difference between the 1S and 2S states;

- that the following transition frequencies be updated in the list and endorsed as secondary representations of the second:
  - the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f\ ^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion (octupole) with a frequency of 642 121 496 772 645.6 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  of the  $^{171}\text{Yb}$  neutral atom with a frequency of 518 295 836 590 865.0 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $2.7 \times 10^{-15}$ ;
- that the following transition frequency be added to the list and as a secondary representation of the second:
  - the unperturbed optical transition  $3s^2\ ^1S_0 - 3s\ 3p\ ^3P_0$  of the  $^{27}\text{Al}^+$  ion with a frequency of 1 121 015 393 207 857.3 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.9 \times 10^{-15}$ ;
- that the following transition frequencies be updated in the list and as secondary representations of the second:
  - the unperturbed optical transition  $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d\ ^96s^2\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{199}\text{Hg}^+$  ion with a frequency of 1 064 721 609 899 145.3 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.9 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion (quadrupole) with a frequency of 688 358 979 309 307.1 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{88}\text{Sr}^+$  ion with a frequency of 444 779 044 095 485.3 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $4.0 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of 429 228 004 229 873.4 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-15}$ ;
- that the following transition frequency be updated as a secondary representation of the second:
  - the unperturbed ground - state hyperfine transition of  $^{87}\text{Rb}$  with a frequency of 6 834 682 610.904 312 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-15}$ .

Note: The value of the estimated standard uncertainty is assumed to correspond to a confidence level of 68 %. However, given the very limited number of available data there is a possibility that in hindsight this might not prove to be exact.

**25th CGPM, 2014**

■ **On the future revision of the International System of Units, the SI** (CR, 416 and *Metrologia*, 2015, **52**, 155)

The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) finally approved the revision of the SI.

**Resolution 1**

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 25th meeting,

**recalling**

- Resolution 1 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011), which takes note of the intention of the International Committee for Weights and Measures (CIPM) to propose a revision of the SI that links the definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole to exact numerical values of the Planck constant  $h$ , elementary charge  $e$ , Boltzmann constant  $k$ , and Avogadro constant  $N_A$ , respectively, and which revises the way the SI is defined including the wording of the definitions of the SI units for time, length, mass, electric current, thermodynamic temperature, amount of substance, and luminous intensity so that the reference constants on which the SI is based are clearly apparent,
- the many benefits summarized in Resolution 1 that will accrue to science, technology, industry, and commerce from such a revision, especially from linking the kilogram to an invariant of nature rather than to the mass of a material artefact, thereby ensuring its long-term stability,
- Resolution 7 adopted by the CGPM at its 21st meeting (1999), which encourages work at the National Metrology Institutes (NMIs) that can lead to such a redefinition of the kilogram,
- Resolution 12 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007), which outlines the work that should be carried out by the NMIs, the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), and the CIPM together with its Consultative Committees (CCs) that could enable the planned revision of the SI to be adopted by the CGPM,

**considering that** there has been significant progress in completing the necessary work, including

- the acquisition of relevant data and their analysis by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA) to obtain the required values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ ,
- establishment by the BIPM of an ensemble of reference standards of mass to facilitate the dissemination of the unit of mass in the revised SI,
- the preparation of mises-en-pratique for the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole,

**noting that** further work by the Consultative Committee for Units (CCU), the CIPM, the BIPM, the NMIs and the CCs should focus on

- awareness campaigns to alert user communities as well as the general public to the proposed revision of the SI,
- the preparation of the 9th edition of the SI Brochure that presents the revised SI in a way that can be understood by a diverse readership without compromising scientific rigour,

**that** despite this progress the data do not yet appear to be sufficiently robust for the CGPM to adopt the revised SI at its 25th meeting,

**encourages**

- continued effort in the NMIs, the BIPM, and academic institutions to obtain data relevant to the determination of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  with the requisite uncertainties,
- the NMIs to continue acting through the CCs to discuss and review this data,
- the CIPM to continue developing a plan to provide the path via the Consultative Committees and the CCU for implementing Resolution 1 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011), and
- continued effort by the CIPM, together with its Consultative Committees, the NMIs, the BIPM, and other organizations such as the International Organization of Legal Metrology (OIML), to complete all work necessary for the CGPM at its 26th meeting to adopt a resolution that would replace the current SI with the revised SI, provided the amount of data, their uncertainties, and level of consistency are deemed satisfactory.

## CIPM, 2015

## ■ Updates to the list of standard frequencies (PV, 83, 207)

## Recommendation 2

Further updates are available on the BIPM website.

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

## considering

- a common list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second” has been established,
- the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (WGFS) has reviewed several candidates for updating the list,

## recommends

that the following transition frequencies shall be updated in the list of recommended values of standard frequencies:

- the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$  of the  $^{199}\text{Hg}$  neutral atom with a frequency of  $f_{199\text{Hg}} = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154.8$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-16}$ ;
- the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2}$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $f_{171\text{Yb}^+}$  (octupole) =  $642\ 121\ 496\ 772\ 645.0$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $f_{171\text{Yb}^+}$  (quadrupole) =  $688\ 358\ 979\ 309\ 308.3$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{88}\text{Sr}^+$  ion with a frequency of  $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486.6$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.6 \times 10^{-15}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion with a frequency of  $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398.4$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.2 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $1S - 2S$  of the  $^1\text{H}$  neutral atom with a frequency of  $f_{^1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $9 \times 10^{-15}$ .

Note: This frequency corresponds to half of the energy difference between the 1S and 2S states;

- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $f_{87\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.2$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $5 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$  of the  $^{171}\text{Yb}$  neutral atom with a frequency of  $f_{171\text{Yb}} = 518\ 295\ 836\ 590\ 864.0$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $2 \times 10^{-15}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed ground-state hyperfine transition of  $^{87}\text{Rb}$  with a frequency of  $f_{87\text{Rb}} = 6\ 834\ 682\ 610.904\ 310$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $7 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second).

## and also recommends

that the following transition frequencies shall be included in the list of recommended values of standard frequencies:

- Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , saturated absorption  $a_1$  component, R(36) 32-0 transition.

The values  $f_{a_1} = 564\ 074\ 632.42$  MHz

$\lambda_{a_1} = 531\ 476\ 582.65$  fm

with an estimated relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a frequency-doubled diode DFB laser, stabilized with an iodine cell external to the laser.

- Absorbing atom  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} - 5P_{3/2}$  crossover between the d and f hyperfine components of the saturated absorption at 780 nm (D2 transition)

The values  $f_{d/f \text{ crossover}} = 384\,227\,981.9 \text{ MHz}$

$\lambda_{d/f \text{ crossover}} = 780\,246\,291.6 \text{ fm}$

with an estimated relative standard uncertainty of  $5 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a tunable External Cavity Diode Laser, stabilized to the d/f crossover in a rubidium cell external to the laser.

Note: The value of the standard uncertainty is assumed to correspond to a confidence level of 68 %. However, given the limited availability of data there is a possibility that in hindsight this might not prove to be exact

## CIPM, 2017

### ■ On progress towards the possible redefinition of the SI (PV, 85, 101)

#### Decision 10

The International Committee for Weights and Measures (CIPM) welcomed recommendations regarding the redefinition of the SI from its Consultative Committees.

The CIPM noted that the agreed conditions for the redefinition are now met and decided to submit draft Resolution A to the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) and to undertake all other necessary steps to proceed with the planned redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole.

## 26th CGPM, 2018

### ■ On the revision of the International System of Units, the SI (CR, in press and *Metrologia*, 2019, 56, 022001)

#### Resolution 1

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

#### considering

- the essential requirement for an International System of Units (SI) that is uniform and accessible world-wide for international trade, high-technology manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that a revision of the SI to meet these requirements was described in Resolution 1 of the 24<sup>th</sup> General Conference in 2011, adopted unanimously, that laid out in detail a new way of defining the SI based on a set of seven defining constants, drawn from the fundamental constants of physics and other constants of nature, from which the definitions of the seven base units are deduced,
- that the conditions set by the 24<sup>th</sup> General Conference, confirmed by the 25<sup>th</sup> General Conference, before such a revised SI could be adopted have now been met,

#### 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  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- the elementary charge  $e$  is  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,

- 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<sup>-1</sup>,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , and  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

In making this decision, the General Conference notes the consequences as set out in Resolution 1 of the 24<sup>th</sup> General Conference in respect to the base units of the SI and confirms these in the following Appendices to this Resolution, which have the same force as the Resolution itself.

The General Conference invites the International Committee to produce a new edition of its Brochure *The International System of Units, SI* in which a full description of the SI is given.

### Appendix 1. Abrogation of former definitions of the base units:

It follows from the new definition of the SI adopted above that

- the definition of the second in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the metre in force since 1983 (17th meeting of the CGPM, Resolution 1), is abrogated,
- the definition of the kilogram in force since 1889 (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) based upon the mass of the international prototype of the kilogram is abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) is abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 4) is abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the definition of the candela in force since 1979 (16th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the decision to adopt the conventional values of the Josephson constant  $K_{J-90}$  and of the von Klitzing constant  $R_{K-90}$  taken by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, is abrogated.

### Appendix 2. Status of constants previously used in the former definitions:

It follows from the new definition of the SI adopted above, and from the recommended values of the 2017 special CODATA adjustment on which the values of the defining constants are based, that at the time this Resolution was adopted

- the mass of the international prototype of the kilogram  $m(K)$  is equal to 1 kg within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of  $h$  at the time this Resolution was adopted, namely  $1.0 \times 10^{-8}$  and that in the future its value will be determined experimentally,
- the vacuum magnetic permeability  $\mu_0$  is equal to  $4\pi \times 10^{-7}$  H m<sup>-1</sup> within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant  $\alpha$  at the time this Resolution was adopted, namely  $2.3 \times 10^{-10}$  and that in the future its value will be determined experimentally,



- the thermodynamic temperature of the triple point of water  $T_{\text{TPW}}$  is equal to 273.16 K within a relative standard uncertainty closely equal to that of the recommended value of  $k$  at the time this Resolution was adopted, namely  $3.7 \times 10^{-7}$ , and that in the future its value will be determined experimentally,
- the molar mass of carbon 12,  $M(^{12}\text{C})$ , is equal to 0.012 kg mol<sup>-1</sup> within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of  $N_{\text{A}}h$  at the time this Resolution was adopted, namely  $4.5 \times 10^{-10}$ , and that in the future its value will be determined experimentally.

### Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the definition of the SI adopted above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions:

- The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s<sup>-1</sup>.
- The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum  $c$  to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of the caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant  $h$  to be  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit J s, which is equal to kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge  $e$  to be  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- 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<sup>-1</sup>, which is equal to kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- 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,  $N_{\text{A}}$ , when expressed in the unit mol<sup>-1</sup> 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.

- The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , to be 683 when expressed in the unit lm W<sup>-1</sup>, which is equal to cd sr W<sup>-1</sup>, or cd sr kg<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>3</sup>, where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .



## **Załącznik 2. Praktyczna realizacja definicji niektórych ważnych jednostek**

Załącznik 2 jest publikowany tylko w formie elektronicznej i jest dostępny na stronie internetowej BIPM pod adresem: [www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/](http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/)

## **Załącznik 3. Jednostki wielkości fotochemicznych i fotobiologicznych**

Załącznik 3 jest publikowany tylko w formie elektronicznej i jest dostępny na stronie internetowej BIPM pod adresem: [www.bipm.org/en/measurement-units/#communication](http://www.bipm.org/en/measurement-units/#communication)

## Załącznik 4. Uwagi historyczne o tworzeniu Międzynarodowego Układu Jednostek Miar i jego jednostek podstawowych

### Część 1. Rozwój historyczny realizacji jednostek SI

Eksperymentalne metody stosowane przy realizacji jednostek miar określane są jako metody pierwotne. Zasadniczą cechą metody pierwotnej jest to, że pozwala mierzyć wielkość w pewnej jednostce bezpośrednio wykorzystując jej definicję, przy użyciu wielkości i stałych, które nie zawierają w sobie tej jednostki.

Tradycyjnie, jednostka danej wielkości traktowana była jako szczególny przykład tej wielkości, która została wybrana do wyznaczania wartości liczbowych we wszelkiego rodzaju pomiarach ze względu na dogodną wartość liczbową wyniku pomiaru. Zanim rozwinęła się nowoczesna nauka, jednostki z konieczności definiowane były za pomocą artefaktów, w szczególności metra i kilograma – odpowiednio – dla długości i masy, albo za pomocą pewnej właściwości jakiegoś obiektu, mianowicie obrotu Ziemi, dla sekundy. Nawet u początków układu metrycznego, pod koniec osiemnastego stulecia, przyznawano, że bardziej wskazaną definicją jednostki długości byłaby, na przykład, taka, która oparta by była na jakiejś uniwersalnej właściwości przyrody, takiej jak długość wahadła sekundowego. Definicja taka byłaby niezależna od miejsca i czasu, i w zasadzie mogła by być realizowana na całym świecie. W tamtym czasie, praktyczne rozważania zakończyły się przyjęciem prostszej, wykorzystującej artefakty, definicji metra i kilograma, a sekunda pozostała powiązana z obrotem Ziemi. Dopiero w roku 1960 przyjęto pierwszą niematerialną definicję, mianowicie długość fali pewnego wybranego promieniowania optycznego posłużyła do zdefiniowania metra.

Od tamtego czasu pojawiły się definicje ampera, kelwina, mola i kandeli, których odniesieniem nie były materialne artefakty. W przypadku ampera odniesieniem w definicji jest określony prąd elektryczny, potrzebny, aby wytworzyć daną siłę elektromagnetyczną. W przypadku kelwina – pewien szczególny stan termodynamiczny, a mianowicie punkt potrójny wody. Nawet atomowa definicja sekundy odwoływała się do pewnego wybranego przejścia w atomie cezu. Kilogram był zawsze jedyną jednostką, która opierała się transformacji związanej z rezygnacją z użycia artefaktu. Tą, która otworzyła drogę do uniwersalności, była definicja metra z roku 1983. Implikowała ona, choć nie mówiła tego wprost, ustaloną wartość liczbową prędkości światła. Definicja ta była jednak sformułowana w formie tradycyjnej i w zasadzie stwierdzała, że metr był odległością pokonywaną przez światło w określonym czasie. W ten sposób była ona odbiciem innych definicji jednostek podstawowych SI, z których każda miała taką samą formę, na przykład „amper jest prądem elektrycznym, który...” i „kelwin jest ułamkiem określonej temperatury”. Takie definicje mogą być nazwane definicjami *explicité* jednostki.

Chociaż definicje te spełniają wiele wymagań niezbędnych dla uniwersalności i dostępności, a przy tym często pozwalają na posłużenie się różnymi sposobami realizacji, tym niemniej jednak ograniczają praktyczną realizację do eksperymentów, które pośrednio lub bezpośrednio nawiązują do pewnych szczególnych warunków lub stanów określonych w każdej z definicji. W konsekwencji dokładność realizacji takich definicji nigdy nie może być lepsza, niż dokładność realizacji tych szczególnych warunków lub stanów określonych w definicji.

Jest to szczególnym problemem w przypadku obecnej definicji sekundy, która oparta jest na mikrofalowym przejściu w atomie cezu. Częstotliwości przejść optycznych w różnych atomach i jonach są teraz bezsprzecznie lepiej odtwarzalne, nawet o kilka rzędów wielkości, niż definiowana częstotliwość cezowa.

W obecnej definicji SI opartej na zbiorze stałych definiujących, zamiast określania w każdej definicji pewnego wybranego warunku lub stanu, wyznaczających pewną zasadniczą granicę dokładności osiągalnej przy danej realizacji, można zastosować jakiegokolwiek dogodnie równanie fizyczne, które wiąże konkretną stałą lub stałe z wielkością, którą chcemy mierzyć. Jest to dużo bardziej ogólny sposób definiowania podstawowych jednostek miar. Cechuje go to, że nie jest ograniczony przez dzisiejszą naukę albo technikę, których przyszyły rozwój może doprowadzić do odkrycia nieznanymi, jak dotąd, równań, co w efekcie przyniosłoby nowe możliwości realizacji jednostek z dużo większą dokładnością. Przy takim definiowaniu nie ma w zasadzie ograniczeń dokładności, z jaką jednostka może być realizowana. Wyjątkiem pozostaje definicja sekundy, w której oryginalne przejście mikrofalowe w cezie pozostaje w chwili obecnej podstawą definicji.

Różnica pomiędzy definicją *explicité* jednostki, a definicją *explicité* stałej może być wyjaśniona za pomocą dwu poprzednich definicji metra, które uzależnione były od ustalonej liczbowej wartości prędkości światła oraz za pomocą dwu definicji kelwina. Oryginalna, pochodząca z 1983 roku definicja metra mówi, *de facto*, że „metr jest długością drogi przebytej przez światło w próżni w przedziale czasowym wynoszącym 1/299 792 458 sekundy”. Nowa definicja stwierdza po prostu, że metr jest definiowany przy użyciu stałej, która definiuje sekundę, określonej częstotliwości cezowej oraz prędkości światła wyrażonej w jednostce  $\text{m s}^{-1}$ . Możemy więc zastosować dowolne równanie fizyczne uwzględniając oczywiście to, co wspomniane zostało w poprzedniej definicji, to znaczy czas potrzebny na przebycie pewnej odległości przez światło mający zastosowanie do odległości astronomicznych, ale także proste równanie wiążące częstotliwość i długość fali z prędkością światła. Poprzednia definicja kelwina oparta na ustalonej wartości liczbowej temperatury punktu potrójnego wody wymagała konieczności pomiaru w punkcie potrójnym wody. Nowa definicja oparta na ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmanna jest bardziej ogólna przez to, że jakiegokolwiek równanie termodynamiki, w którym pojawia się  $k$  może w zasadzie być użyte do określenia temperatury termodynamicznej w dowolnym punkcie skali temperatury. Na przykład do wyznaczenia całkowitej egzytancji energetycznej ciała doskonale czarnego w temperaturze  $T$  równej  $(2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3) T^4$ , w  $\text{W m}^{-2}$ , temperaturę  $T$  możemy wyznaczyć bezpośrednio.

Dla kilograma, którego definicja uległa najbardziej fundamentalnej zmianie realizacja może nastąpić poprzez dowolne równanie fizyczne wiążące masę, stałą Plancka, prędkość światła i częstotliwość cezową. Jedno z takich równań to takie, które opisuje działanie wagi elektromechanicznej, poprzednio znanej jako waga watowa, ostatnio jako waga Kibble’a<sup>1</sup>. Za pomocą tego przyrządu moc mechaniczna mierzona w kategoriach masy,  $m$ , lokalne przyspieszenie ziemskie,  $g$ , oraz prędkość,  $v$ , może być mierzona w kategoriach mocy elektrycznej, mierzonej, z kolei, w kategoriach prądu elektrycznego i napięcia elektrycznego, które to z kolei mierzone są w kategoriach – odpowiednio – kwantowego efektu Halla i efektu Josephsona. W rezultacie dochodzi się do równania  $mgv = Ch$ , gdzie  $C$  jest stałą wzorcowania zawierającą mierzone częstotliwości, a  $h$  jest stałą Plancka.

Inna metoda która może zostać zastosowana w pierwotnej realizacji kilograma, polega na wyznaczeniu liczby atomów w kuli krzemowej i wykorzystaniu równania:

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2} \frac{m_{\text{Si}}}{m_e}$$

<sup>1</sup> W uznaniu dla twórcy wagi watowej, Bryana Kibble’a.

w którym występują masa  $m$  i objętość  $V$  kuli (około 1 kg), parametr sieci krystalicznej  $a_0$ , stała Rydberga  $R_\infty$ , stała struktury subtelnej  $\alpha$ , masa atomu krzemu (uśredniona dla trzech izotopów użytych w kuli)  $m_{Si}$  i masa elektronu  $m_e$ . Pierwszy ułamek odpowiada liczbie atomów w kuli, drugi – masie elektronu, a trzeci ilorazowi masy (uśrednionej) atomu krzemu i masy elektronu.

Inną możliwością pomiaru masy wg nowej definicji, w tym przypadku na poziomie mikroskopowym, jest pomiar odrzutu atomowego określonego relacją zawierającą  $h/m$ .

Wszystkie wymienione przypadki stanowią przekonującą ilustrację ogólności nowego sposobu definiowania jednostek. Informacja o bieżących realizacjach jednostek podstawowych i pochodnych podana jest na stronie internetowej BIPM.

## Część 2. Rozwój historyczny Międzynarodowego Układu Jednostek Miar

9. CGPM (1948, Rezolucja 6; CR 64) poleciła CIPM:

- przestudiować ustanowienie pełnego zbioru reguł w dziedzinie jednostek miar;
- w tym celu zbadać, drogą oficjalnej ankiety, jaka jest w tym zakresie dominująca opinia w naukowych, technicznych i edukacyjnych kręgach we wszystkich krajach;
- opracować zalecenia w sprawie ustanowienia *praktycznego układu jednostek miar* nadającego się do przyjęcia przez wszystkich sygnatariuszy *Konwencji Metrycznej*.

Ta sama CGPM ustanowiła również, w Rezolucji 7 (CR 70), ‘ogólne zasady zapisu symboli jednostek’ i określiła listę niektórych spójnych jednostek pochodnych, którym nadano nazwy specjalne.

10. CGPM (1954, Rezolucja 6; CR 80) przyjęła jako podstawowe wielkości i jako jednostki dla tego praktycznego systemu – odpowiednio – sześć następujących wielkości: długość, masę, czas, prąd elektryczny, temperaturę termodynamiczną i światłość oraz sześć odpowiadających im jednostek: metr, kilogram, sekundę, amper, kelwin i kandelę. Po długich dyskusjach między fizykami a chemikami, 14. CGPM (1971, Rezolucja 3, CR 78 i *Metrologia* 1972, 8, 36) dodała ilość substancji, jednostka mol, jako siódmą wielkość podstawową i jednostkę.

11. CGPM (1960, Rezolucja 12; CR 87) przyjęła, dla tego praktycznego układu jednostek, nazwę *Système international d’unités*, wraz z międzynarodowym skrótem SI, a także ustanowiła reguły odnośnie przedrostków, jednostek pochodnych i wyodrębnianych niegdyś jednostek uzupełniających oraz innych kwestii; ustanowiono w ten sposób wyczerpującą specyfikację jednostek miar. Późniejsze spotkania CGPM i CIPM wprowadzały modyfikacje i uzupełnienia do pierwotnej struktury SI, w celu uwzględnienia postępu w nauce i zmieniających się potrzeb użytkowników.

Ciąg wydarzeń historycznych, który doprowadził do tych ważnych decyzji można podsumować następująco:

- Stworzenie dziesiątego układu metrycznego w czasie Rewolucji Francuskiej oraz następujące po nim złożenie platynowych wzorców metra i kilograma, w dniu 22 czerwca 1799 roku, w *Archives de la République* w Paryżu, co można uważać za pierwszy krok ku obecnemu Międzynarodowemu Układowi Jednostek Miar.
- W roku 1832, Gauss usilnie promował stosowanie wspomnianego układu metrycznego, wraz z definiowaną w astronomii sekundą, jako spójnego układu jednostek dla nauk fizycznych. Gauss był pierwszym, który wykonał pomiary bezwzględne ziemskiego pola magnetycznego wykorzystując układ dziesiątyny oparty na *trzech jednostkach mechanicznych*, milimetrze, gramie i sekundzie – odpowiednio – dla następujących

wielkości: długości, masy i czasu. W późniejszych latach Gauss i Weber rozszerzyli te pomiary tak, aby objąć inne zjawiska elektryczne.

- Te zastosowania w dziedzinie elektryczności i magnetyzmu były nadal rozszerzane w latach sześćdziesiątych XIX wieku pod czynnym kierownictwem Maxwella i Thomsona przez British Association for the Advancement of Science (BAAS). Sformułowali oni wymaganie *spójnego układu jednostek* obejmującego *jednostki podstawowe* i *pochodne*. W roku 1874 BAAS wprowadził *układ CGS*, trójwymiarowy spójny układ jednostek oparty na trzech jednostkach mechanicznych centymetrze, gramie i sekundzie, z zastosowaniem przedrostków od mikro do mega dla wyrażenia dziesiętnych jednostek podwielokrotnych i wielokrotnych. Rozwój fizyki jako nauki doświadczalnej był w dużym stopniu oparty na tym układzie.
- Wartości wielkości odpowiadające spójnym jednostkom CGS w dziedzinie elektryczności i magnetyzmu okazały się niedogodne, więc w latach osiemdziesiątych XIX wieku BAAS wraz z International Electrical Congress, przewodnikiem International Electrotechnical Commission (IEC), zatwierdził wzajemnie spójny zbiór *jednostek praktycznych*. Znalazły się wśród nich: om dla rezystancji elektrycznej, wolt dla siły elektromotorycznej i amper dla prądu elektrycznego.
- Po podpisaniu Konwencji Metrycznej 20 maja 1875 roku, która powoływała BIPM i CGPM oraz CIPM, rozpoczęto prace nad ustanowieniem nowych międzynarodowych prototypów metra i kilograma. W 1889 roku 1. CGPM ustanowiła międzynarodowe prototypy metra i kilograma. Wraz z sekundą astronomiczną jako jednostką czasu, jednostki te stanowiły trójwymiarowy mechaniczny układ jednostek podobny do układu CGS, ale o jednostkach podstawowych metr, kilogram i sekunda, znany jako *układ MKS*.
- W roku 1901 Giorgi wykazał, że możliwe jest powiązanie mechanicznych jednostek układu MKS z praktycznymi jednostkami elektrycznymi tak, aby stworzyć spójny układ czterowymiarowy przez dodanie do trzech jednostek podstawowych czwartej, elektrycznej, takiej jak amper albo om, a także przekształcenie równań występujących w elektromagnetyzmie do tzw. postaci zracjonalizowanej. Propozycja Giorgiego otworzyła drogę do szeregu nowych opracowań.
- Po nowelizacji Konwencji Metrycznej przez 6. CGPM (1921), która rozszerzyła zakres zadań i odpowiedzialność BIPM o inne obszary fizyki oraz po utworzeniu Consultative Committee for Electricity (CCE) przez 7. CGPM (1927), propozycja Giorgiego została gruntownie przedyskutowana przez IEC, International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) i inne organizacje międzynarodowe. Doprowadziło to do zaproponowania przez CCE w 1939 roku przyjęcia czterowymiarowego układu opartego na metrze, kilogramie, sekundzie i amperze – układu MKSA. Propozycja została zatwierdzona przez CIPM w 1946 roku.
- W wyniku przeprowadzonej przez BIPM ankiety międzynarodowej, która rozpoczęła się w roku 1948, 10. CGPM (1954) zatwierdziła wprowadzenie kelwina i kandeli, jako jednostek podstawowych, odpowiednio, dla temperatury termodynamicznej i światłości. Nazwa Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, wraz ze skrótem SI, nadana została układowi przez 11. CGPM (1960). Ponadto reguły odnoszące się do przedrostków, jednostek pochodnych, stosowanych dawniej jednostek uzupełniających, jak też inne kwestie zostały uporządkowane. Tak powstała wyczerpująca specyfikacja obejmująca wszystkie jednostki miar.
- Podczas 14. CGPM (1971) przyjęto nową jednostką podstawową, mol, symbol mol, dla wielkości – ilość substancji. Nastąpiło to na wniosek International Organization for Standardization zgłoszony w związku z propozycją Commission on Symbols, Units and Nomenclature (SUN Commission), organ IUPAP, która poparta została przez International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). W rezultacie liczba jednostek podstawowych SI wzrosła do siedmiu.

- Od tamtego momentu nastąpił nadzwyczajny postęp, jeśli chodzi o powiązanie jednostek SI z wielkościami absolutnie niezmiennymi, takimi jak podstawowe stałe fizyczne i właściwości atomów. Uznając wagę powiązania jednostek SI z takimi rzeczywiście niezmiennymi wielkościami 24. CGPM (2011) przyjęła zasady nowej definicji SI, opartej na zbiorze siedmiu takich stałych stanowiących odniesienie dla definicji. Podczas 24. CGPM, eksperymenty służące wyznaczeniu ich wartości za pomocą siedmiu jednostek podstawowych nie były jeszcze w pełni zgodne, ale w okresie przed 26. CGPM (2018) usunięto ten mankament i nowa definicja SI przyjęta została Rezolucją 1. Na takich podstawach oparta jest prezentowana w tej broszurze definicja oraz najprostszy i najbardziej podstawowy sposób dla zdefiniowania SI.
- Poprzednio SI definiowany był w kategoriach siedmiu jednostek podstawowych oraz jednostek pochodnych definiowanych jako iloczyny potęg jednostek podstawowych. Te siedem jednostek podstawowych wybrano ze względów historycznych, gdyż układ metryczny, późniejszy SI ewoluował i rozwijał się przez ostatnie 130 lat. Ich wybór nie stanowił jedynej możliwości, ale był on utrwalony i znany od wielu lat, nie tylko poprzez fakt, że stanowił ramy dla opisu SI, ale również dla zdefiniowania jednostek pochodnych. Ta rola jednostek podstawowych jest aktualna także dla obecnego SI, choć SI jako taki jest obecnie zdefiniowany za pomocą siedmiu stałych definiujących. W niniejszej broszurze są zatem nadal zawarte definicje siedmiu jednostek podstawowych, ale od teraz są one oparte na stałych definiujących: nadsubtelnej częstotliwości cezowej  $\Delta\nu_{Cs}$ ; prędkości światła w próżni  $c$ ; stałej Plancka  $h$ ; ładunku elementarnym  $e$ ; stałej Boltzmana  $k$ ; stałej Avogadra  $N_A$  i skuteczności świetlnej określonego promieniowania optycznego  $K_{cd}$ .

Definicje siedmiu jednostek podstawowych mogą być jednoznacznie powiązane z wartościami liczbowymi siedmiu stałych definiujących. Jednakże nie zachodzą relacje wiążące każdej jednostki podstawowej z jedną tylko stałą definiującą; wiele spośród jednostek podstawowych odwołuje się do więcej niż jednej ze stałych definiujących.

### Część 3. Jednostki podstawowe w perspektywie historycznej

#### Jednostka czasu, sekunda

Przed rokiem 1960 jednostka czasu, sekunda, definiowana była jako ułamek  $1/86\,400$  średniego dnia słonecznego. Dokładna definicja „średniego dnia słonecznego” pozostawiona była astronomom. Jednakże pomiary wykazały nieregularności w obrotach Ziemi, co stało się podstawą, aby uznać definicję za niespełniającą stawianych jej wymagań. W celu bardziej precyzyjnego zdefiniowania jednostki 11. CGPM (1960, Rezolucja 9, CR, 86) przyjęła definicję autorstwa International Astronomical Union opartą na roku zwrotnikowym 1900. Jednakże prace eksperymentalne umożliwiły wykazanie, że atomowy wzorzec czasu, oparty na przejściu między dwoma poziomami energetycznymi atomu lub cząsteczki mogłyby być realizowany i odtwarzany dużo bardziej dokładnie. Biorąc pod uwagę, że bardzo precyzyjna definicja jednostki czasu jest niezbędna w nauce i technice, 13. CGPM (1967–1968, Rezolucja 1, CR, 103 i *Metrologia*, 1968, 4, 43) wybrała nową definicję sekundy, w której odniesieniem jest częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w stanie podstawowym. Znowelizowane, bardziej precyzyjne brzmienie tej definicji w kategoriach ustalonej wartości liczbowej częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym,  $\Delta\nu_{Cs}$ , przyjęte zostało Rezolucją 1 26. CGPM (2018).



### Jednostka długości, metr

Definicja metra z roku 1889, która mówi, że jest to długość międzynarodowego prototypu platyno-irydowego, została zastąpiona, przez 11. CGPM (1960), definicją opartą na długości fali promieniowania odpowiadającego wybranemu przejściu w kryptonie 86. Zmiana ta została przyjęta w celu poprawienia dokładności, z jaką definicja metra mogłaby być realizowana, co osiągnięto przez zastosowanie interferometru z ruchomym mikroskopem, co pozwoliło mierzyć różnicę dróg optycznych przy zliczaniu prążków. Taka definicja została, z kolei, zastąpiona w roku 1983, przez 17. CGPM (Rezolucja 1, CR, 97, i *Metrologia*, 1984, **20**, 25), definicją, w której za odniesienie przyjęto odległość, którą światło pokonuje w próżni w określonym przedziale czasu. Oryginalny międzynarodowy prototyp metra, który zatwierdzony został przez 1. CGPM w roku 1889 (CR, 34-38), jest wciąż przechowywany w BIPM w warunkach określonych w roku 1889. W celu wyjaśnienia jego zależności od ustalonej wartości liczbowej prędkości światła,  $c$ , brzmienie tej definicji zostało zmienione Rezolucją 1 przez 26. CGPM (2018).

### Jednostka masy, kilogram

Definicją kilograma z roku 1889 była po prostu masa międzynarodowego prototypu kilograma, tj. artefaktu wykonanego z platynoirydu. Był on i wciąż jest przechowywany w BIPM w warunkach określonych przez 1. CGPM (1889, CR, 34-38), która orzekła, że uznaje go za prototyp, stwierdzając, że „ten prototyp będzie od teraz uznawany za jednostkę masy”. W tym samym czasie wykonano czterdzieści podobnych prototypów, które były obrabiane i polerowane tak, aby miały masę jak najbardziej bliską masy prototypu międzynarodowego. Podczas 1. CGPM (1889), po dokonaniu wzorcowania za pomocą prototypu międzynarodowego, większość owych „prototypów państwowych” została indywidualnie przypisana Państwom Członkowskim Konwencji Metrycznej, a niektóre także BIPM. 3. CGPM (1901, CR, 70), w deklaracji mającej na celu wyeliminowanie występujących w użyciu potocznym niejednoznaczności, jeśli chodzi o termin „ciężar”, potwierdziła, że „kilogram jest jednostką masy; jest ona równa masie międzynarodowego prototypu kilograma”. Pełna wersja deklaracji znajduje się na str. 70 wyżej wymienionego sprawozdania obrad CGPM.

W okresie do roku 1946, kiedy miała miejsce druga weryfikacja prototypów państwowych, stwierdzono, że ich masy wykazywały rozbieżność w odniesieniu do masy prototypu międzynarodowego. To samo zauważono przy okazji trzeciej weryfikacji, prowadzonej w latach 1989–1991, kiedy mediana pierwotnego zbioru prototypów zatwierdzonych przez 1. CGPM (1889) wykazała różnicę 25 mikrogramów. W celu zapewnienia długoterminowej stabilności jednostki masy, wykorzystania w pełni zalet elektrycznych wzorców kwantowych oraz zapewnienia wyższej użyteczności dla nowoczesnej nauki, Rezolucją 1 26. CGPM (2018) została przyjęta nowa definicja kilograma oparta na wartości stałej podstawowej, do roli której wybrano stałą Plancka  $h$ .

### Jednostka prądu elektrycznego, amper

Jednostki elektryczne, zwane „jednostkami międzynarodowymi”, dla prądu i rezystancji wprowadzone zostały przez International Electrical Congress, który odbył się w Chicago w roku 1893, a definicje „międzynarodowego ampera” i „międzynarodowego oma” potwierdzone zostały przez International Conference w Londynie w roku 1908.

Do czasu 8. CGPM (1933) pojawiło się zgodne pragnienie, aby „jednostki międzynarodowe” zastąpić przez tzw. „jednostki absolutne”. Jednakże ponieważ niektóre laboratoria nie zakończyły jeszcze do owego czasu eksperymentów koniecznych do wyznaczenia wartości ilorazów jednostek międzynarodowych i absolutnych, CGPM upoważnił CIPM do podjęcia we właściwym czasie decyzji w sprawie obu tych ilorazów oraz w sprawie daty, od której te nowe jednostki absolutne wejdą do użytku. CIPM dokonał tego w roku 1946 (1946, Rezolucja 2, PV, **20**, 129-137), kiedy to postanowił, że nowe jednostki wejdą w życie od 1 stycznia 1948 roku. W październiku 1948 roku 9. CGPM zatwierdziła te decyzje



CIPM. Definicja ampera, wybrana przez CIPM, przyjęła za odniesienie siłę pomiędzy równoległymi przewodami przewodzącymi prąd elektryczny, czego efektem było przyjęcie ustalonej wartości liczbowej przenikalności magnetycznej w próżni  $\mu_0$  (zwanej także stałą magnetyczną). Wartość liczbową elektrycznej przenikalności w próżni  $\epsilon_0$  (zwana także stałą elektryczną) została więc ustalona w konsekwencji przyjęcia nowej definicji metra w roku 1983.

Jednakże przyjęta w roku 1948 definicja ampera okazała się trudna do zrealizowania i praktyczne wzorce kwantowe (oparte na kwantowym efekcie Halla i na efekcie Josephsona), które wiązały volt i om z pewną szczególną kombinacją stałej Plancka  $h$  i ładunku elementarnego  $e$ , stały się prawie tak samo uniwersalne jak praktyczna realizacja ampera oparta na prawie Ohma (18. CGPM (1987), Rezolucja 6, CR 100). Wskutek tego stało się naturalnym nie tylko ustalenie wartości  $h$  dla potrzeb redefinicji kilograma, ale także ustalenie wartości  $e$  dla potrzeb definicji ampera w celu doprowadzenia do pełnej zgodności z SI praktycznych kwantowych wzorców elektrycznych. Obecna definicja, oparta na ustalonej wartości liczbowej ładunku elementarnego  $e$ , była przyjęta Rezolucją 1 26. CGPM (2018).

### Jednostka temperatury termodynamicznej, kelwin

Definicja jednostki temperatury termodynamicznej ogłoszona została przez 10. CGPM (1954, Rezolucja 3; CR 79), w której wybrano punkt potrójny wody,  $T_{TPW}$ , jako ustalony punkt podstawowy i przypisano mu temperaturę 273,16 K, definiując w ten sposób kelwin. 13. CGPM (1967–1968, Rezolucja 3; CR, 104 i *Metrologia*, 1968, 4, 43) przyjęła nazwę kelwin, symbol K, zamiast „stopnia kelwina”, symbol °K, dla zdefiniowanej w powyższy sposób jednostki. Jednakże praktyczne trudności w realizacji tej definicji, która wymagała próbki czystej wody o dobrze zdefiniowanym składzie izotopowym i wypracowanie nowej metody pierwotnej w termometrii, doprowadziły do przyjęcia nowej definicji kelwina opartej na ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmanna  $k$ . Obecna definicja, wolna od obu wymienionych ograniczeń, została przyjęta Rezolucją 1 26. CGPM (2018).

### Jednostka ilości substancji, mol

W następstwie odkrywania podstawowych praw chemii, jednostki zwane, np. „gramoatom” i „gramocząsteczka”, zaczęły być stosowane do określania ilości pierwiastków lub związków. Jednostki te miały bezpośredni związek z „ciężarami atomowymi” i „ciężarami cząsteczkowymi”, które w istocie są względnymi masami atomowymi i cząsteczkowymi. Pierwsze ustalenia „ciężarów atomowych” powiązane początkowo były z ciężarem atomowym tlenu, który na podstawie ogólnego uzgodnienia, był przyjęty jako równy 16. Kiedy fizycy rozdzielili izotopy w spektrometrze masowym i przypisali jednemu z izotopów tlenu wartość 16, chemicy przypisali tę samą wartość (nieco zmienioną) mieszaninie izotopów 16, 17 i 18, która ich zdaniem stanowiła występujący w przyrodzie pierwiastek tlen. Porozumienie między International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) a International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) zakończyło to rozdwojenie w latach 1959–1960. Fizycy i chemicy uzgodnili przypisanie dokładnej wartości 12 tak zwanemu ciężarowi atomowemu, a poprawnie mówiąc względnej masie atomowej  $A_r$ , izotopu węgla o liczbie atomowej 12 (węgiel 12,  $^{12}\text{C}$ ). Ujednolicono w ten sposób skalę służy wyrażaniu względnych mas atomowych i cząsteczkowych, określanych też – odpowiednio – jako ciężary atomowe i cząsteczkowe. Redefinicja mola nie narusza tego porozumienia.

Wielkość służąca chemikom do wyrażania ilości pierwiastka chemicznego lub związku chemicznego zwana jest „ilością substancji”. Ilość substancji, symbol  $n$ , jest z definicji proporcjonalna do liczby obiektów elementarnych danego rodzaju  $N$  w próbce, a stała proporcjonalności jest stałą uniwersalną, taką samą dla każdego rodzaju obiektów. Ta stała jest odwrotnością stałej  $N_A$ , co zapisuje się jako  $n = N/N_A$ . Jednostka ilości substancji

nazywa się *mol*<sup>N5</sup>, symbol mol. Zgodnie z propozycją IUPAP, IUPAC i ISO, CIPM opracował definicję mola w roku 1967 i potwierdził ją w roku 1969, orzekając, że masa molowa węgla 12 wynosi dokładnie 0,012 kg/mol. To spowodowało, że ilość substancji  $n_s(X)$  dowolnej czystej próbki S obiektu  $X$  mogła być wyznaczona z masy próbki  $m_s$  i masy molowej  $M(X)$  obiektu  $X$ , a z kolei masa molowa mogła być wyznaczana ze względnej masy atomowej  $A_r$  (ciężar atomowy lub cząsteczkowy) bez potrzeby precyzyjnej znajomości stałej Avogadra, poprzez wykorzystanie zależności:

$$n_s(X) = m_s/M(X) \text{ i } M(X) = A_r(X) \text{ g/mol}$$

Tak więc przytoczona definicja mola zależna była od opartej na artefakcie definicji kilograma.

Liczbowa wartość tak zdefiniowanej stałej Avogadra równa była liczbie atomów w 12 gramach węgla 12. Jednakże dzięki najnowszym osiągnięciom techniki liczba ta znana jest z taką precyzją, że możliwa stała się prostsza i bardziej uniwersalna definicja mola, a mianowicie, przez określenie dokładnej liczby obiektów w jednym molu jakiejkolwiek substancji, a więc tym samym ustalając wartość liczbową stałej Avogadra. Skutek tego jest taki, że nowa definicja mola oraz wartość stałej nie są już dłużej zależne od definicji kilograma. Rozróżnienie pomiędzy zasadniczo różniącymi się wielkościami, ‘ilość substancji’ i ‘masa’, zostały na skutek tego także podkreślone. Obecna definicja mola oparta na ustalonej wartości liczbowej stałej Avogadra  $N_A$  została przyjęta w Rezolucji 1 26. CGPM (2018).

### Jednostka światłości, kandela

Jednostki światłości oparte na zastosowaniu płomienia lub wzorca w postaci żarzącego się włókna, które stosowane były w różnych krajach przed rokiem 1948, zostały zastąpione początkowo przez „nową świecę” opartą na luminancji promiennika Plancka (ciało doskonale czarne) w temperaturze krzepnięcia platyny. Ta modyfikacja została przygotowana przez International Commission on Illumination (CIE) i przez CIPM przed rokiem 1937, a decyzja została ogłoszona przez CIPM w roku 1946. Następnie została ona ratyfikowana w roku 1948 przez 9. CGPM, która przyjęła nową międzynarodową nazwę dla tej jednostki, *kandela*<sup>N5</sup>, symbol cd; w 1954 roku 10. CGPM ustanowiła kandelę jednostką podstawową; w 1967 roku 13. CGPM (Rezolucja 5, CR, 104 i *Metrologia*, 1968, 4, 43-44) zmieniła tę definicję.

W roku 1979, wskutek trudności w realizacji promiennika Plancka dla wysokich temperatur oraz nowych możliwości odkrytych przez radiometrię, tj. pomiaru mocy promieniowania optycznego 16. CGPM (1979, Rezolucja 3, CR, 100 i *Metrologia*, 1980, 16, 56) przyjęła nową definicję kandel.

Obecna definicja kandel wykorzystująca ustaloną wartość liczbową skuteczności świetlnej promieniowania monochromatycznego o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , przyjęta została w Rezolucji 1 26. CGPM (2018).

<sup>N5</sup> Nazwy jednostek powinny być zapisywane czcionką prostą.

## Lista akronimów użytych w niniejszym tomie

### 1 Akronimy nazw laboratoriów, komitetów i konferencji

BAAS	British Association for the Advancement of Science	Brytyjskie Stowarzyszenie Postępu w Nauce
BIPM	Bureau international des poids et mesures/International Bureau of Weights and Measures	Międzynarodowe Biuro Miar
CARICOM	Caribbean Community	Wspólnota Karaibska
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations/ Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration	Komitet Doradczy ds. Akustyki, Ultradźwięków i Drgań
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde/Consultative Committee for the Definition of the Second, see CCTF	Komitet Doradczy ds. Definicji Sekundy, patrz CCTF
CCE	Comité consultatif d'électricité/ Consultative Committee for Electricity, see CCEM	Komitet Doradczy ds. Elektryczności, patrz CCEM
CCEM	(formerly the CCE) Comité consultatif d'électricité et magnétisme/ Consultative Committee for Electricity and Magnetism	(poprzednio CCE) Komitet Doradczy ds. Elektryczności i Magnetyzmu
CCL	Comité consultatif des longueurs/ Consultative Committee for Length	Komitet Doradczy ds. Długości
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées/ Consultative Committee for Mass and Related Quantities	Komitet Doradczy ds. Masy i Wielkości Powiązanych
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie/Consultative Committee for Photometry and Radiometry	Komitet Doradczy ds. Fotometrii i Radiometrii
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie/Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology	Komitet Doradczy ds. Ilości Substancji: Metrologia w Chemii i Biologii
CCRI	Comité consultatif des rayonnements ionisants/Consultative Committee for Ionizing Radiation	Komitet Doradczy ds. Promieniowania Jonizującego

CCT	Comité consultatif de thermométrie/ Consultative Committee for Thermometry	Komitet Doradczy ds. Termometrii
CCTF	(formerly the CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences/ Consultative Committee for Time and Frequency	(poprzednio CCDS) Komitet Doradczy ds. Czasu i Częstotliwości
CCU	Comité consultatif des unités/ Consultative Committee for Units	Komitet Doradczy ds. Jednostek Miar
CGPM	Conférence générale des poids et mesures/General Conference on Weights and Measures	Generalna Konferencja Miar
CIPM	Comité international des poids et mesures/International Committee for Weights and Measures	Międzynarodowy Komitet Miar
CODATA	Committee on Data for Science and Technology	Komitet ds. Danych w Nauce i Technice
CR	Comptes Rendus of the Conférence générale des poids et mesures, CGPM	Sprawozdania Generalnej Konferencji Miar
IAU	International Astronomical Union	Międzynarodowa Unia Astronomiczna
ICRP	International Commission on Radiological Protection	Międzynarodowa Komisja Ochrony Radiologicznej
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements	Międzynarodowa Komisja ds. Jednostek Miar i Pomiarów w dziedzinie Promieniowania
IEC	International Electrotechnical Commission	Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service	Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia
ISO	International Organization for Standardization	Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry	Międzynarodowa Unia Chemii Czystej i Stosowanej
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics	Międzynarodowa Unia Fizyki Czystej i Stosowanej
OIML	Organisation internationale de métrologie légale/International Organization of Legal Metrology	Międzynarodowa Organizacja Metrologii Prawnej
PV	PV Procès-Verbaux of the Comité international des poids et mesures, CIPM	Protokoły Międzynarodowego Komitetu Miar
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, IUPAP	Komisja ds. Symboli, Jednostek, Nazewnictwa, Mas Atomowych i Stałych Podstawowych, IUPAP
WHO	World Health Organization	Światowa Organizacja Zdrowia

## 2 Akronimy terminów naukowych

CGS	Three-dimensional coherent system of units based on the three mechanical units centimetre, gram and second	Trójwymiarowy układ jednostek miar oparty na centymetrze, gramie i sekundzie
EPT-76	Échelle provisoire de température de 1976/Provisional Low Temperature Scale of 1976	Prowizoryczna Skala Niskich Temperatur 1976
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure/Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement	Przewodniki Wyrażania Niepewności Pomiaru
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968	Międzynarodowa Praktyczna Skala Temperatur 1968
ISQ	International System of Quantities	Międzynarodowy Układ Wielkości
ITS-90	International Temperature Scale of 1990	Międzynarodowa Skala Temperatur 1990
MKS	System of units based on the three mechanical units metre, kilogram, and second	Układ jednostek miar oparty na trzech jednostkach mechanicznych: metrze, kilogramie i sekundzie
MKSA	Four-dimensional system of units based on the metre, kilogram, second, and the ampere	Czterowymiarowy układ jednostek miar oparty na metrze, kilogramie, sekundzie i amperze
SI	Système international d'unités/ International System of Units	Międzynarodowy Układ Jednostek Miar
TAI	Temps atomique international/ International Atomic Time	Międzynarodowy Czas Atomowy
TCG	Temps-coordonnée géocentrique/ Geocentric Coordinated Time	Geocentryczny Czas Koordynowany
TT	Terrestrial Time	Czas Ziemi
UTC	Coordinated Universal Time	Uniwersalny Czas Koordynowany
VSMWO	Vienna Standard Mean Ocean Water	Wiedeński wzorzec średniej wody oceanicznej <sup>N6</sup>

<sup>N6</sup> Wzorzec izotopowy dla tlenu i wodoru w wodzie przygotowany w Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej w Wiedniu, zgodnie ze „Słownikiem hydrogeologicznym” wydanym przez IIG, Warszawa 2002.

# Skorowidz

## A

aktywność radionuklidu 23, 54  
 amper (A) 11, 13, 16, 18, 25, 46, 48, 49, 51,  
 52, 65, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 84, 85,  
 88, 90, 91, 93  
 atmosfera normalna 49

## B

bar 48  
 bekerel (Bq) 23, 26, 54, 58-59  
 bel (B) 30-31  
 Brytyjskie Stowarzyszenie Postępu w Nauce  
 (BAAS) 91

## C

cal 31  
 CGS (spójny układ jednostek oparty na: cm,  
 g i s) 47, 9  
 chemia kliniczna 20, 66  
 ciągłość 9, 14  
 CODATA – Komitet Danych dla Nauki  
 i Techniki 30, 77, 78, 81, 84  
 czas (czas trwania) 16, 21, 30, 39, 90, 91, 92  
 częstotliwość cezowa 15, 16, 17, 85, 89

## D

dalton (Da) 30  
 dawka pochłonięta 23, 25-26, 27, 58, 59, 60,  
 62, 68-69  
 dawka równoważna (równoważnik  
 dawki), patrz siwert  
 decybel (dB) 30  
 definicja *explicité* jednostki 88, 89  
 definicja *explicité* stałej 76, 89  
 definicje jednostek podstawowych 16-20  
 długość 13, 16, 17, 21, 30, 38, 88, 89, 90,  
 91, 93  
 doba (d) 30  
 dyna (dyn) 48  
 dziesiętny układ metryczny 90  
 dżul (J) 13, 15, 23, 25, 46-47, 52, 76, 84

## E

efekt Halla (włączając w to kwantowy efekt  
 Halla) 62, 63, 64, 76, 78, 84, 89, 93  
 efekt Josephsona 62, 63, 76, 78, 84, 89, 94  
 elektronowolt (eV) 30  
 erg 48

## F

farad (F) 23, 46, 48, 52  
 format wartości wielkości 34

## G

gal (G) 30  
 Gauss 90  
 Giorgi 91  
 godzina (h) 30, 48  
 gram 29, 48, 54, 90  
 gramoatom, gramocząsteczka 94  
 grej (Gy) 23, 26, 58-59, 62, 69  
 grupy trzycyfrowe, grupowanie cyfr 35, 48,  
 70

## H

hektar (ha) 30  
 henr (H) 18, 23, 46, 48, 52  
 herc (Hz) 13, 23-24, 48, 52, 76, 84

## I

ilość substancji 15, 16, 19-20, 21, 36, 41, 90,  
 91, 94-95  
 ISO – Międzynarodowa Organizacja  
 Normalizacyjna, TC 12 – Komitet  
 Techniczny ds. Wielkości i jednostek 60  
 IUPAC – Międzynarodowa Unia Chemii  
 Czystej i Stosowanej 91, 94  
 Zielona Księga 33  
 IUPAP – Międzynarodowa Unia Fizyki  
 Czystej i Stosowanej 33  
 Czerwona Księga 33  
 izotop węgla  $^{12}\text{C}$  19, 30, 58, 78, 85, 94

**J**

- jard 31
- jednostka astronomiczna 30
- jednostka pochodna, patrz jednostki pochodne
- jednostka podstawowa, patrz jednostki podstawowe
- jednostka (SI) 15-27
- jednostki absolutne 93
- jednostki dla dźwięku 27
- jednostki elektryczne 8, 40, 91
- jednostki fotometryczne 45, 55
- jednostki inne niż SI 30-31, 34, 66
- jednostki pochodne 11, 12, 15, 22-26, 33, 36, 42, 90, 91
- jednostki podstawowe 8, 11-12, 15, 16-20, 22-24, 38, 88, 92
- jednostki praktyczne 91
- jednostki uzupełniające 24, 35, 42, 51, 56, 90, 91
- jednostki wielkości biologicznych 8

**K**

- kaloria 47, 48
- kandela (cd) 11, 13, 21, 27, 45, 48, 49, 51, 55-56, 59, 65, 74, 75, 76, 77, 78, 84, 85, 88, 95
- „nowa świeca” 45, 48, 56, 59, 95
- katal (kat) 23, 66
- kąt 22-24, 30, 34, 36, 45, 51, 60
- kelwin (K) 11, 13, 15, 16, 18-19, 55, 70, 73, 74, 76, 77, 79, 81, 83, 84, 85, 88, 89, 90, 91, 94
- kibibajt (kilobajt)<sup>N7</sup> 28
- kilogram 11, 13, 16, 17, 22, 29, 44, 45, 46, 49, 51, 54, 65-66, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 83, 84, 85, 88, 89, 90, 91, 93
- kiur (Ci) 54
- Konwencja Metryczna 3-5, 9, 11, 44, 47, 50, 91
- kula krzemowa 89
- kulomb (C) 13, 23, 46, 48, 52, 76, 84

**L**

- lepkość dynamiczna (puaz) 24, 52
- lepkość kinematyczna (stoks) 52
- liczba Avogadra 19, 85
- litr (L lub l) 10, 30, 32, 42, 43
- luks (lx) 23, 27, 48, 52
- lumen (lm) 13, 23, 27, 45, 48, 52, 76, 84
- „nowy lumen” 45

**Ł**

- ładunek elementarny 13, 14, 18, 76, 77, 81, 83, 84, 92, 94

**M**

- masa 16, 17, 21, 29, 30, 39, 88, 89, 90, 93
- masa atomowa względna (historycznie ciężar atomowy) 95
- masa cząsteczkowa względna (historycznie ciężar cząsteczkowy) 95
- masa elektronu 89
- masa i ciężar 45
- masa molowa 19-20, 78, 85, 95
- Maxwell 91
- metr (m) 8, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 38, 39, 88, 89, 90, 91, 93
- mezopowy 59
- Międzynarodowa Skala Temperatur 1990 (ITS-90) 19, 55, 64
- Międzynarodowe Jednostki (IU) do wyrażania aktywności biologicznej zdefiniowane przez Światową Organizację Zdrowia 27
- Międzynarodowy Czas Atomowy (TAI) 57, 58
- międzynarodowy prototyp kilograma 11, 17, 39, 93
- międzynarodowy prototyp metra 30, 93
- Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI) 8-9, 11-12, 13-15, 38, 88-95
- Międzynarodowy Układ Wielkości (ISQ) 15
- mikrosekunda kątowna ( $\mu$ as) 30
- milisekunda kątowna (mas) 30
- minuta (min) 30
- mol (mol) 13, 15, 16, 19-20, 51, 58, 65, 66, 74, 75, 76, 77, 78, 81, 82, 83, 84, 85, 88, 90, 91

**N**

- nadsubtelny podział struktury atomu cezu 76, 77
- nazwy jednostek 32, 56
- neper (Np) 30
- niepewność 13, 14, 35
- niuton (N) 18, 23, 24, 46, 48, 52, 57

**O**

- obowiązujące symbole jednostek 16, 32-33
- ogólna teoria względności 27, 53
- OIML – Międzynarodowa Organizacja Metrologii Prawnej 12, 79, 81

<sup>N7</sup> W tekście Broszury SI używany jest termin kilobit.



om ( $\Omega$ ) 23, 46, 48, 52, 57, 62, 63-64, 78, 84, 91, 93-94

## P

paskal (Pa) 23, 57

podstawowe stałe (fizyczne) 8, 13, 14, 68, 74, 76, 77, 79, 83, 92

pojemność cieplna 24, 25, 33, 56

ppb – części na miliard 36

ppm – części na milion 36

ppt – części na bilion 36

prawodawstwo dotyczące jednostek 12

prąd elektryczny 16, 17-18, 21, 46, 49, 51, 77, 81, 85, 88, 89, 90, 91, 93

prędkość światła w próżni 8, 13, 14, 15, 17, 58, 61, 67, 75, 76, 83, 85, 88, 89, 93

procent 36

promieniowanie jonizujące 4, 58-59, 60, 62

przedrostki 22, 23, 28, 29, 30, 32, 33, 51, 54, 56, 59, 65, 66, 90, 91, 92

przedrostki SI 22-23, 28, 30, 32-33, 36, 42, 51, 90, 91, 92

przedrostki dla podwielokrotności 28-29, 51, 54, 56, 90, 91

przedrostki dla wielokrotności 22, 23, 28-29, 51, 54, 56, 59, 65, 91

przyspieszenie siły ciężkości, przyspieszenie ziemskie ( $g_n$ ) 30, 45, 89

puaz (P) – jednostka lepkości dynamicznej 48

punkt potrójny wody 11, 18, 46, 48, 55, 70, 73, 78, 85, 88, 89, 94

## R

rachunek wielkości 33-34

radian (rad) 23, 26, 36, 51, 60-61, 65

realizacja jednostki 11-12, 14-15, 21, 27, 86, 88, 89

## S

sekunda (s) 8, 13, 16, 20, 30, 32, 34, 39, 88, 89, 90, 91, 92

sekunda kątowna (tj. sekunda kąta płaskiego) 30

separator dziesiętny 10, 35, 69-70

seria norm ISO/IEC 80000 (*Wielkości i jednostki*) 10, 12, 15, 26, 33

SI patrz Międzynarodowy Układ Jednostek Miar

simens (S) 23, 57

siwert (Sv) 23, 26, 60, 62, 68-69

skotopowy 59

skuteczność świetlna 13, 15, 20, 59, 76, 77, 84, 85, 92, 95

specjalne nazwy i symbole jednostek 22-26, 90

spójne jednostki pochodne 18, 22-25, 66, 90

stała Avogadra 13, 14, 15, 19, 20, 74, 76, 77, 81, 84, 85, 92, 94-95

stała Boltzmanna 13, 14, 15, 18, 74, 76, 77, 81, 84, 85, 92, 94

stała Josephsona ( $K_J$ ,  $K_{J-90}$ ) 63, 76, 78, 84

stała magnetyczna, przenikalność próżni 18, 78, 94

stała Plancka 8, 13, 14, 17, 30, 74, 75, 76, 81, 83, 85, 89, 93

stała Rydberga 90

stała struktury subtelnej 14, 78, 84, 89

stała von Klitzinga ( $R_K$ ,  $R_{K-90}$ ) 63, 64, 76, 78, 84

stałe definiujące 8, 11-15, 16, 20, 22, 83-85, 89, 92

steradian (sr) 23-24, 36, 45, 51, 60-61, 65

stilb (sb) 48

stopa 31

stopień Celsjusza ( $^{\circ}\text{C}$ ) 19, 23, 26, 33, 34, 47, 48

symbole jednostek 32

symbole wielkości 21-22

symbole zalecane dla wielkości 16, 21

## Ś

światłość 16, 20, 21, 41, 90, 91, 95

## T

TAI, patrz Międzynarodowy Czas Atomowy

temperatura Celsjusza 19, 23, 34

temperatura termodynamiczna 16, 18-19, 21, 40, 88, 89, 90, 94

termodynamiczna skala temperatury 48

tesla (T) 23, 52

Thomson 90

tona 30, 48

tona metryczna 30

## U

układ metryczny 3, 8, 45, 88, 90, 92

układ MKS 46, 47, 91

układ MKSA 91

Uniwersalny Czas Koordynowany (UTC) 58

ustanowienie układu SI 38, 90-92

UTC, patrz Uniwersalny Czas Koordynowany

uwagi historyczne 88-95



**W**

- waga Kibble'a 76, 89
- waga watowa, patrz waga Kibble'a
- wartość liczbowa wielkości 33-34
- wartość wielkości 13, 33-35
- wat (W) 13, 23, 46, 48, 52, 76, 84
- Weber 91
- weber (Wb) 23, 46, 52
- weryfikacja kilograma 93
- WHO – Światowa Organizacja Zdrowia 27
- widzenie fotopowe (widzenie dzienne) 59
- wielkości bezwymiarowe 60
- wielkości fotobiologiczne 27, 87
- wielkości fotometryczne 59
- wielkości logarytmiczne 30-31
- wielkości zliczeniowe 21, 36
- wielkość 13
- wielkość pochodna 15, 19-20, 21, 22-26
- wielkość podstawowa 16, 21, 25, 60, 89, 90
- wielokrotności (i podwielokrotności)
  - kilograma 29, 54
- woda, skład izotopowy 55, 70, 73, 76, 93
- wolt (V) 23, 46, 48, 52, 63-64, 78, 91, 94
- wymiar (wielkości) 21-22
- względność 16, 27
- wzorzec kwantowy 94