

Nowe podejście w definiowaniu jednostek miar

Patrycja Ruśkowska

Przeczytaj o pracach nad redefinicją jednostek układu SI, czyli przejściu od wzorców jako fizycznych obiektów do wzorców opartych na zjawiskach fizycznych i o tym, że dążenia te wzbudzają kontrowersje.

1. Wprowadzenie

W okresie ostatniej dekady na międzynarodowym forum toczy się intensywna dyskusja dotycząca redefinicji jednostek układu SI (*Système international d'unités*). Ta weryfikacja układu, przyjętego i zaleconego przez 11. Generalną Konferencję Miar (CGPM) w 1960 roku, wiąże się przede wszystkim z dążeniem do sprostania wyzwaniom dwudziestego pierwszego wieku [1]. Obowiązujący, w nieco zmienionej formule, układ jednostek miar został opracowany i wprowadzony we Francji w 1799 roku w oparciu o dziesiętny system metryczny, mający za podstawę metr jako jednostkę długości (definiowany jako odległość równa 10^{-7} długości mierzonej wzdłuż południka paryskiego od równika do bieguna) i kilogram, jako jednostkę masy (definiowany jako walec platynowy o masie jednego litra czystej wody w temp. $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, tzw. Kilogramme des Archives). Od 1889 roku, czyli od 1. Generalnej Konferencji Miar, materialne wzorce irydowo-platynowe, za pomocą których realizowane były definicje metra i kilograma, utrzymywano w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM) w Sèvres pod Paryżem. Wzorce będące fizycznymi obiektami są jednak nietrwałe w czasie. Niestabilność wzorca irydowo-platynowego, definiującego metr jako odległość między odpowiednimi kresami na tym artefakcie, doprowadziła w rezultacie do redefinicji jednostki długości w roku 1960. Zgodnie ze zmienioną wówczas definicją, metr to długość równa 1 659 763,73 długości fali w próżni promieniowania odpowiadającego przejściu między poziomami $2p_{10}$ a $5d_5$ atomu ^{86}Kr (Kryptonu 86). Definicja ta funkcjonowała do roku 1983. We współczesnym ujęciu jednostka długości definiowana jest jako odległość, jaką pokonuje światło w próżni w czasie $1/299\,792\,458$ s. Podobnie dokonano redefinicji sekundy, która obecnie odpowiada czasowi równemu 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między 2 poziomami $F = 3$ i $F = 4$ struktury nadsubtelnej stanu podstawowego $^2\text{S}_{1/2}$ atomu cezu ^{133}Cs (cez 133).

Postęp techniczny wraz z zaawansowaniem technologicznym umożliwia wykonanie wzorców dla pozostałych jednostek podstawowych układu SI, które również będą oparte na fundamentalnych zjawiskach fizycznych, tak by można było realizować je niezależnie, w różnych laboratoriach z taką samą dokładnością. 24. posiedzenie Generalnej Konferencji Miar, które odbyło się w dniach 17–21 października 2011 roku, było odpowiednią platformą dla omówienia ważkich z punktu widzenia nauki i przemysłu zagadnień redefinicji jednostek podstawowych układu SI. Opracowana i sformułowana przez Komitet Doradczy ds. Jednostek Miar (CCU) propozycja weryfikacji systemu SI w formie projektu Rezolucji A, została przedłożona Konferencji CGPM. Projekt ten powstał w efekcie długotrwałych dyskusji w komitetach doradczych CIPM oraz kręgach naukowych i jest wyrazem poparcia dla idei redefinicji kilograma, ampera, kelwina i mola. Z powodu niewystarczającego stopnia zaawansowania badań, zwłaszcza nad redefinicją jednostki masy, niemożliwym jest określenie terminu ukończenia weryfikacji całego układu SI. Dodatkowo, sytuację komplikuje fakt, iż zmiana definicji kilograma może wpłynąć na definicje innych jednostek fizycznych, w tym jednostek podstawowych SI. Trzy jednostki tego układu są bezpośrednio powiązane z definicją kilograma: amper odnosi się do jednostki siły (niutona), kandela związana jest z jednostką mocy (wattem) i mol – do pewnej ilości materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kg izotopu węgla C^{12} [1a, 1b].

2. Praktyczna realizacja definicji jednostek podstawowych

Wśród jednostek podstawowych Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI znajdują się: metr, kilogram, kandela, kelwin, amper, sekunda i mol. Obecnie tylko kilogram nie jest definiowany w sposób uniwersalny, czyli za pomocą stałej fizycznej odniesienia. Natomiast odtwo-

zenie wzorca masy (składającego się z 90 % platyny i 10 % irydu) wymaga bezpośredniego porównania danej próbki z oryginałem lub jedną z jego oficjalnych kopii. W ciągu ostatniego stulecia wzorzec kilograma (Międzynarodowy Prototyp Kilograma), znajdujący się w BIPM, stracił około 50 μg w porównaniu do średniej wartości kopii przechowywanych przez krajowe instytuty metrologiczne.

Obecnie w ramach prac nad redefinicją kilograma prowadzone są dwa projekty badawcze: Avogadro (International Avogadro Coordination, IAC) i wagi Watta (Watt balance) [1]. Celem pierwszego projektu jest stworzenie nowego stabilnego w czasie wzorca kilograma z pojedynczego kryształu krzemu w kształcie kuli z dokładnością szlifowania liczoną w nanometrach. Krzem jest materiałem bardzo stabilnym i łatwym w obróbce. Nowa definicja kilograma zostanie sformułowana w oparciu o liczbę atomów krzemu. Jako materiał budulcowy wzorca kilograma zastosowano, najczęściej występujący w naturze, izotop ^{28}Si tego pierwiastka. Perfekcyjny odważnik kilogramowy powstał dzięki międzynarodowej współpracy krajowych instytutów metrologicznych z Rosji, Niemiec, Włoch, Belgii, Japonii, Australii i USA. Pomiary krzemowego wzorca odbywają się w wysokiej próżni i w temperaturze odniesienia, utrzymywanej w reżimie stałej kontroli.

W Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM) realizowany jest obecnie projekt skonstruowania wagi Watta, wymyślonej znacznie wcześniej, bo w XIX wieku przez lorda Kelvina w celu wyznaczenia wartości ampera i udoskonalonej w 1975 roku przez Bryana Kibble'a [1]. Jej unowocześniona wersja to aparat wysokości dwupiętrowego budynku, wykonany przez uczonych z amerykańskiego National Institute of Standards and Technology (NIST). Waga prądowa w instytucie metrologicznym NIST to złożony układ elektromagnesów i cewek. Wytwarzane w jej wnętrzu pole magnetyczne równoważy ciężar jednego kilograma. Aby zwiększyć precyzję pomiaru, uczeni umieścili najważniejsze elementy w komorze próżniowej wykonanej z włókna szklanego. Waga ta określa z dużą dokładnością siłę potrzebną do zrównoważenia przyciągania kilogramowego odważnika przez pole grawitacyjne Ziemi. Ponieważ masa mierzona jest tu jako wartości napięcia i natężenia prądu, kilogram można zdefiniować, opierając się na stałej fizycznej, zwanej stałą Plancka.

Z powodu pewnych rozbieżności pomiędzy rezultatami uzyskanymi w ww. projektach, ostateczne zdefiniowanie jednostki masy w oparciu o stałą Plancka nie jest na tym etapie możliwe. Ponadto, celem zwiększenia dokładności pomiaru, konieczne jest jednoczesne zastosowanie kilku wag Watta. Zgodnie z dotychczasowym stanem wie-

dzy waga Watta będzie stosowana do realizacji jednostki masy oraz badań dryfu masy prototypów najwyższego rzędu, natomiast przekazywanie jednostki będzie odbywać się dalej z użyciem wzorców tradycyjnych platynowo-irydowych oraz w postaci wzorców fizycznych ulepszonych pod względem materiałowym, wzorcowanych za pomocą wagi Watta poprzez związek ze stałą Plancka [3].

W przypadku definicji mola (powiązanej ściśle z definicją kilograma) koncepcja definicji opartej na stałej fundamentalnej wymaga przeprowadzenia wielu badań i porównań liczby podmiotów tworzących jeden mol, tj. liczbę Avogadro, aby odpowiadała dokładnie wartości jednego grama – Daltona [1a].

W chwili obecnej trwają także prace nad kilkoma eksperymentalnymi metodami pomiarowymi, które umożliwiłyby określenie kelwina z wykorzystaniem stałej Boltzmanna, k_B [3]. W 1954 roku ustalono wartość kelwina jako równą $1/273,16$ temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody o następującym składzie izotopowym: 0,00015576 mola ^2H na jeden mol ^1H , 0,0003799 mola ^{17}O na jeden mol ^{16}O i 0,0020052 mola ^{18}O na jeden mol ^{16}O [1]. Temperatura ta została obliczona na podstawie funkcji uzależniającej temperaturę od energii kinetycznej drgań cząsteczek w kryształach doskonałym [2].

3. Teoretyczna realizacja definicji jednostek podstawowych

Zgodnie z tekstem, uchwalonej przez 24. Generalną Konferencję Miar, Rezolucji 1 definicje siedmiu podstawowych jednostek Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI (zwanego „Quantum SI”) realizowane będą w oparciu o następujące stałe fizyczne [3]:

- częstotliwości $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ stanu podstawowego struktury nadsubtelnej atomu cezu ^{133}Cs , wynoszącej dokładnie 9 192 631 770 Hz,
- prędkości światła w próżni c , wynoszącej dokładnie: 299 792 458 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- stałej Plancka h , wynoszącej dokładnie: $6,62606 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,
- ładunku elementarnego e , wynoszącego dokładnie: $1,60217 \times 10^{-19} \text{ C}$,
- stałej Boltzmanna k , wynoszącej dokładnie: $1,3806 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$,
- stałej Avogadro N_A , wynoszącej dokładnie: $6,02214 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,
- skuteczności świetlnej K_{cd} dla promieniowania monochromatycznego o częstotliwości $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$, wynoszącej 683 lm/W .

gdzie: symbol X określa dodatkowe cyfry wyznaczone i zatwierdzone przez Komitet Committee on Data for Science and Technology (CODATA) przed przyjęciem nowych definicji.

Zgodnie z założeniem, aby wyrazić wartość stałej fizycznej Q , należy przedstawić ją jako wynik wartości liczbowej $\{Q\}$ i jednostki $[Q]$ [3]:

$$Q = \{Q\} \cdot [Q] \quad (1)$$

Przykładowo dla stałej Plancka, h równanie (1) przyjmie postać:

$$h = \{h\} \cdot [h] = 6,626069... \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad (2)$$

Podczas definiowania jednostki $[Q]$, konieczne jest wyznaczenie eksperymentalne wartości liczbowej $\{Q\}$. Natomiast, w celu określenia wartości liczbowej $\{Q\}$, należy zdefiniować jednostkę $[Q]$. Przykładowo, jeśli liczbową wartość $\{h\}$ wynosi dokładnie $6,626069... \cdot 10^{-34}$, to w rezultacie definiowana jest jednostka $\text{J}\cdot\text{s}$. Zatem, poprzez wybór wartości liczbowej stałej fizycznej można definiować jej jednostkę. Celem takiego sposobu definiowania, podobnie jak w przypadku metra i sekundy, jest wyrażenie jednostki masy w kategoriach jednostki częstotliwości poprzez fundamentalne równanie (3), opisujące energię [3]:

$$E = h \cdot \nu \quad (3)$$

Podsumowując, nieustawiczne dążenie do osiągnięcia najniższych możliwych niepewności pomiaru oraz zużycie wzorców materialnych przy zastosowaniu zaawansowanych technik i technologii, spowodowały działanie w kierunku wprowadzenia zmian definicji podstawowych jednostek Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI. Choć, niewątpliwie zrewolucjonizuje to myślenie o miarach i dzięki zastosowaniu podejścia „Quantum SI” w definiowaniu jednostek możliwe będzie uzyskanie większej precyzji i dokładności wyniku pomiaru, to przy tak znacznym stopniu skomplikowania warunkowi stosowanej aparatury podczas praktycznej realizacji definicji, a co za tym idzie wysokich kosztach, nie we wszystkich krajowych instytutach metrologicznych będzie stosowane nowe po-

dejście. Uwarunkuje to potrzebę wzorcowania wzorców niższego rzędu w BIPM. W wielu publikacjach [1a, 4a, 4b] pojawia się krytyka nowego podejścia definicyjnego jednostek. Pojawiają się postulaty, aby przed wprowadzeniem zmian w definicji dokładnie przemyśleć wiele aspektów tego zagadnienia [4c]. Stwierdzono, między innymi, że spowoduje ono nieporządek, ponieważ w definicjach opartych na stałych fizycznych nie ma odniesienia do ilości. Ponadto, weryfikacja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI może zaburzyć funkcjonowanie nauki, ponieważ nowa definicja jednostki uczyni niemożliwym do wykrycia wszelkich przyszłych zmian w fundamentalnych stałych. Może spowodować także ekonomiczne straty z powodu wzrostu kosztów transakcji oraz barier w handlu międzynarodowym.

Literatura

- a) Leonard B. P. „Comments on recent proposals for redefining the mole and kilogram”, *Metrologia*, 47 2010,
 - b) Kluza J., Grzanka A., Pleban A.: „Ku nowej definicji kilograma”, *Postępy fizyki*, Tom 58, Zeszyt 3, 2007,
- „The International System of Units (SI)”. Wyd. 8. Paris: Bureau International des Poids et Mesures, 2006, ISBN 92-822-2213-6,
- a) Praca zbiorowa: „The new SI based on fundamental constants”, *Phil. Trans. R. Soc. A* 369, 3903-3904, Londyn, Wlk. Brytania, 2011,
 - b) Prezentacje Przewodniczących Komitetów Doradczych CIPM ogłoszone w trakcie XXIV. Generalnej Konferencji Miar (CGPM), Paryż, 17-21.10.2011 r., dostępne na stronie inter. BIPM,
 - c) Milton M. J. T., Mills I. M., „Amount of substance and the proposed redefinition of the mole”, *Metrologia*, 46, 332-338, 2009,
- a) Price G., „A skeptic’s review of the New SI”. *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement* 16 (3): 121-132, 2011,
 - b) Pavese F., „Some reflections on the proposed redefinition of the unit for the amount of substance and of other SI units”. *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement*, 16 (3): 161-165, 2011.