

Redefinicja SI

Aleksandra Gadomska*

Główne wyzwania współczesnego świata, przed którymi stajemy dzisiaj, są mierzalne. Mierzymy świat w sekundach, metrach, kilogramach czy amperach. W przytłaczającej większości krajów stosujemy do tego Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI), który scala niemal cały świat w spójną metrologiczną całość.

Spójna, jednolita metrologia dba o nasze zdrowie, środowisko, wymianę handlową, naukę, technikę i bezpieczeństwo. Przed współczesną metrologią pojawia się jednak nowe wyzwanie w postaci redefinicji SI, która sprawi, że metrologia gotowa będzie sprostać wymaganiom nowoczesności XXI wieku.

Dlaczego? W jakim celu? Co dzięki temu zyskamy?

Każdy, kto słyszy hasło „redefinicja SI”, na pewno stawia sobie takie pytania. Aby zrozumieć, dlaczego jest to tak ważne i rewolucyjne, posłużymy się przykładowo jednostkami czasu i długości. W dziedzinach tych sytuacja jest niezwykle komfortowa i wiele innych dziedzin metrologicznych patrzyło przez lata zazdrosnym okiem na odtwarzanie jednostek miar tych właśnie wielkości. „Metrologiczny komfort” związany z tymi jednostkami jest możliwy dzięki wykorzystaniu do ich określenia stałych podstawowych. W dziedzinie czasu jednostka miary – sekunda – zdefiniowana jest jako ściśle określona liczba okresów promieniowania powstającego podczas zmiany stanu energetycznego atomu cezu (^{133}Cs), a w dziedzinie długości – metr – zdefiniowany jest za pomocą naturalnej własności naszego wszechświata – prędkości światła.

Metrologiczna jednolitość i spójność jednostek miar na całym świecie wymaga szere-

gu działań ze strony instytucji odpowiedzialnych na szczeblu krajowym za utrzymanie państwowych wzorców jednostek miar. Jednym z kluczowych działań w tej dziedzinie są międzynarodowe porównania wzorców, które w dużej ogólności służą sprawdzeniu, jak dokładnie (i czy poprawnie) w danym kraju realizowana jest dana jednostka miary. W dziedzinach metrologii opartych na stałych podstawowych porównania te są znacznie ułatwione. Dziedzina czasu i częstotliwości jest tu najlepszym przykładem prostoty wykonania takich porównań, gdyż wykorzystując wzorce pierwotne oparte na oscylacjach w atomie cezu oraz technologie zdalnych porównań (czy to poprzez łącza światłowodowe, czy satelity systemów nawigacji satelitarnej, czy też geostacjonarne satelity telekomunikacyjne), w każdym momencie możemy porównać nasz wzorec z innymi wzorcami z całego świata, po prostu wymieniając pliki z danymi i możemy to realizować praktycznie na bieżąco.

Zupełnie przeciwna sytuacja jest w dziedzinie masy, gdzie wzorec kilograma jest ostatnim wzorcem materialnym (artefaktycznym). Swoisty „ostatni mohikanin” jest niewielkim walcem wykonanym z dużą dokładnością, jeśli chodzi o wymiary geometryczne, ze stopu platyny i irydu. Wzorec międzynarodowy jednostki masy ukrywa się w piwnicach w Sèvres, szczelnie zamknięty przed wpływem czynników zewnętrznych. Takie same walce są w posiadaniu wszystkich krajów zrzeszonych konwencją metryczną i stanowią ich wzorce państwowe. Skąd więc możemy mieć pewność, że wykonany i wywzorcowany wzorec masy przechowywany przez kilkadziesiąt lat, choć szczelnie zamknięty w jak najlepszych warunkach, waży wciąż kilogram? Aby zagwarantować spójność pomiarową w tej dziedzinie, realizowane są międzynarodowe porównania wszystkich wzorców państwowych z wzorcem międzynarodowym. Można sobie wyobrazić na jaką skalę jest to przedsięwzięcie. Dość powiedzieć, że takie porów-

nania wykonywane są średnio co kilkadziesiąt lat. Pomimo najstaranniejszej opieki rozta czarnej nad cennymi walcami, obserwuje się zmiany ich masy spowodowane czy to osadzeniem się na nich różnych cząsteczek obecnych w powietrzu, czy też erozji wywołanej również różnymi składnikami powietrza.

Sytuacja, zupełnie inna, choć nie tak skomplikowana jak w przypadku masy, istnieje również w dziedzinie wielkości elektrycznych. Niemal każdy na lekcjach fizyki słyszał o definicji ampera opartej na dwóch nieskończenie długich przewodnikach o znikomym przekroju. Obecnie odtwarzanie jednostki miary prądu elektrycznego zgodnie z tą definicją nie jest realizowane w praktyce. Do tego celu wykorzystuje się realizację jednostki miary napięcia elektrycznego wykorzystującej zjawisko Josephsona oraz realizację jednostki miary rezystancji opartej na kwantowym zjawisku Halla.

Rozwiązaniem opisanych (oczywiście tylko częściowo) problemów metrologicznych



przy realizacji jednostek miar, zgodnie z obecnymi definicjami, jest wykorzystanie stałych podstawowych do ich zdefiniowania. Takie podejście ma wielką zaletę, jest bowiem zgodne z założeniami dzisiejszej nauki, iż podstawowe stałe fizyczne są w istocie stałe, a wzorce oparte na tych stałych mają szansę również pozostać niezmiennie.

„Stare” a „nowe” SI

Gruntowna „rewolucja” objęła cztery jednostki miar: kilogram, amper, mol i kelwin, jednak zdecydowano o przebudowaniu tekstów wszystkich definicji, tak aby po redefinicji miały jednolitą budowę. Nowe brzmienie definicji zostało ostatecznie sformułowane i zatwierdzone podczas XXVI Generalnej Konferencji Miar, która odbyła się w dniach 13 ÷ 16 listopada 2018 roku. **Nowe definicje jednostek miar, przywołane poniżej, zaczną obowiązywać od 20 maja 2019 roku.**

Sekunda – oznaczenie s, jest to jednostka SI czasu. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$, to jest częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, wynoszącej 9 192 631 770, wyrażonej w jednostce Hz, która jest równa s^{-1} .

Metr – oznaczenie m, jest to jednostka SI długości. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni c, wynoszącej 299 792 458, wyrażonej w jednostce $m s^{-1}$,

przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$.

Kilogram – oznaczenie 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 J s, która jest równa $kg\ m^2\ s^{-1}$, przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Amper – oznaczenie A, jest to jednostka SI prądu elektrycznego. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej ładunku elementarnego e, wynoszącej $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, wyrażonej w jednostce C, która jest równa A s, gdzie sekunda zdefiniowana jest za pomocą $\Delta\nu_{Cs}$.

Kelwin – oznaczenie K, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości licz-

bowej stałej Boltzmana k , wynoszącej $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, wyrażonej w jednostce $J\ K^{-1}$, która jest równa $kg\ m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$, gdzie kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.

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

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

Kandela – oznaczenie cd, jest to jednostka SI światłości w określonym kierunku. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej skuteczności świetlnej

monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , wynoszącej 683, wyrażonej w jednostce $lm\ W^{-1}$, która jest równa $cd\ sr\ W^{-1}$ lub $cd\ sr\ kg^{-1}\ m^{-2}\ s^3$, gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.

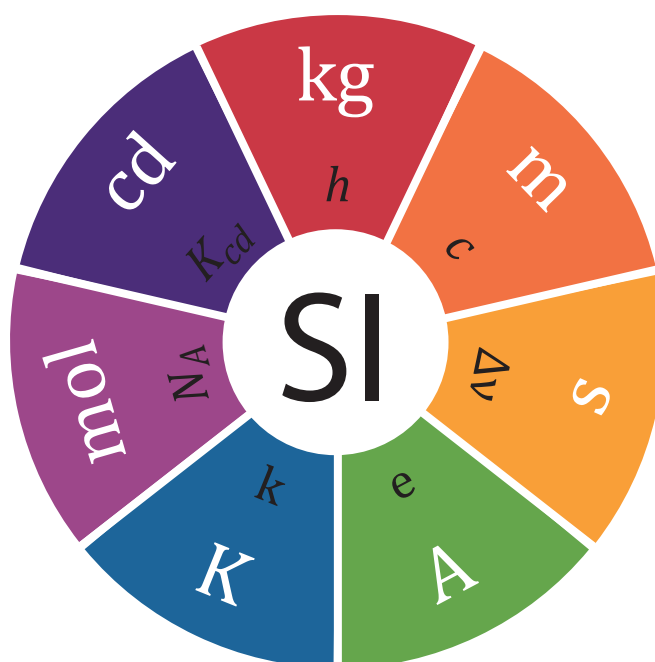
Co się zmieni?

Jest to kolejne niezwykle ważne pytanie w kontekście nadchodzących zmian i zapewne pojawia się zaraz po pytaniu o celowość redefinicji.

Dla przytłaczającej większości ludzi nie zmieni się zupełnie nic. Telewizor nadal będzie działał tak samo, pobierając dokładnie taki sam prąd jak wcześniej, temperatura ciała zdrowego człowieka nadal będzie wynosiła $36,6^\circ C$, a podczas ważenia mąki potrzebnej do upieczenia szarlotki, waga kuchenna nadal będzie wskazywać te same gramy.

„Nowe” SI wśród uczniów i nauczycieli

Uczniowie oraz nauczyciele, w szczególności na niższych poziomach edukacji, są grupą, która najprawdopodobniej najbardziej odczuje konsekwencje rewolucji. Choć już z niektórymi obecnymi definicjami pojawiają się pewne problemy interpretacyjne (jak choćby definicja Ampera o nieskończenie długich przewodnikach, czy definicja sekundy wymagająca pewnego wprowadzenia w budowę atomów), to wszystkie nowe definicje otrzymały brzmienie opierające jednostki miary o stałe podstawowe. Takie sformułowanie definicji jest przede wszystkim bardziej wymagające intelek-



tualnie i bardziej abstrakcyjne. Wymaga szerszego wprowadzenia w fizykę i w zagadnienie stałych podstawowych. Wobec samych stałych podstawowych rodzą się pytania: skąd się wzięły i czym są, skąd wiemy, że mają dokładnie takie wartości liczbowe?

O ile metr oparty na prędkości światła jest w miarę dobrze rozumiany, gdyż prędkość jest wielkością fizyczną z którą styka się każdy, jadąc choćby tramwajem do szkoły, o tyle już stała Plancka, często opisywana jako „kwant działania”, jest pojęciem niezwykle trudnym, wymagającym zgłębienia wiedzy o fizyce kwantowej.

Szkolne wyzwanie, stawiane przez nowe definicje, jest na pewno obustronne. Wymaga większego zaangażowania intelektualnego i zgłębienia zagadnień dotyczących fizyki na nieco wyższym poziomie, zarówno od uczniów, jak i nauczycieli. Dodatkowo, ci ostatni obciążeni będą zadaniem odpowiedniego przekazania tej wiedzy uczniom. Transfer

wiedzy zawsze był zagadnieniem trudnym, a po redefinicji na pewno jeszcze się skomplikuje.

W aspekcie redefinicji niezwykle ważką rolę mają do odegrania krajowe instytucje metrologiczne, których rolą, poza utrzymaniem wzorców państwowych, jest szerokie upowszechnianie wiedzy metrologicznej. Na pewno pomocne będą przy tym materiały dydaktyczne przeznaczone dla różnych poziomów edukacyjnych, będące obecnie w przygotowaniu.

„Nowe” SI a nauka i technologia

Redefinicja SI jest olbrzymim krokiem naprzód w historii nauki i techniki. Definiując nowy układ SI, sięgamy daleko, nawet poza nasz układ słoneczny, po fizyczne stałe podstawowe, które są, w skali wszechświata, uniwersalne. Gdy rewolucja się dokonana, wszystkie jednostki miary i te podstawowe i te pochodne z nich wprowadzone,

będą oparte na filarach naszego świata – stałych podstawowych. Nauka i technologia nie będą już dłużej ograniczane wzorcami materialnymi. Co więcej, postęp w nauce i technice, który pozwoli na konstruowanie coraz lepszych przyrządów pomiarowych i odtwarzanie jednostek miar z coraz większą dokładnością, nie będzie skutkowało koniecznością wprowadzenia kolejnych redefinicji.

„Nowe” SI a życie publiczne

W całym skomplikowaniu nowych definicji, fizyce kwantowej i stałych podstawowych, jest jedna dobra wiadomość. Wpływ nowego SI na życie publiczne będzie znikomy. Zaraz po wejściu w życie definicji pójdziemy do sklepu po kilogram mąki, zatankujemy 30 litrów paliwa na stacji benzynowej, a fryzjer skróci nam włosy o 5 centymetrów (choć akurat w tym ostatnim przypadku, jak zwykle będzie to za dużo...). Przejście do nowego układu jednostek miar nie spowoduje

przerwy w dostawie wody czy energii, nie zatrzyma kursowania transportu publicznego. Również wojsko będzie funkcjonowało nieprzerwanie, a pojazdy obrony narodowej będą poruszać się ciągle z taką samą prędkością i wystrzeliwać pociski na takie same odległości. Metrologia prawna będzie również działać w ten sam sposób: legalizacja wag, fotoradarów czy dystrybutorów paliwa na stacjach benzynowych będzie przebiegać zgodnie z wcześniejszymi procedurami.

Dobra wiadomość jest również taka, że obecne jednostki miar będą oparte na solidniejszych i bardziej uniwersalnych podstawach, a jeśli w kosmosie, poza kulą ziemską, istnieje życie, to będziemy mogli prowadzić z nimi bezproblemową wymianę handlową, opartą na nowej definicji kilograma.

* *Wydział Strategii i Rozwoju, Biuro Strategii, Główny Urząd Miar*



W niniejszym artykule wykorzystano materiał graficzny dotyczący SI udostępniony przez BIPM.

Więcej informacji na temat redefinicji SI znajduje się na stronach internetowych:

– Głównego Urzędu Miar (GUM):

<http://www.gum.gov.pl/pl/redefinicja-si/co-nowego/2662,Co-nowego-w-SI.html>

<http://www.gum.gov.pl/pl/redefinicja-si/redefinicja-si/2334,Redefinicja-SI.html>

– Międzynarodowego Biura Miar (BIPM):

<https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>

(materiały dostępne w języku angielskim)