



Kierunki zmian we współczesnej metrologii naukowej

Wojciech T. Chyla

RADWAG Wagi Elektroniczne, Radom

Streszczenie: W artykule przedyskutowano zmiany zachodzące w metrologii naukowej, wynikające zarówno z szybkiego rozwoju nauki (np. wykorzystanie zjawisk kwantowych do odtwarzania jednostek miar), jak i rosnących wymagań co do dokładności pomiarów (np. pomiar czasu w systemach nawigacji satelitarnej GNSS). W wielu dziedzinach nauki (np. w chemii, biologii, farmacji i medycynie) wprowadzane są metody wykonywania pomiarów i sposoby opracowania wyników pomiarów wywodzące się z metrologii (np. zmiana współczynnika rozszerzenia stosowanego w farmacji z $k = 3$ na $k = 2$). Współczesne trendy rozwojowe w metrologii naukowej, a w szczególności zbliżająca się reforma międzynarodowego układu jednostek miar SI, implikują zmianę priorytetów zapisanych w Konwencji Metrycznej i wpływają na rolę, jaką BIPM pełni w światowej infrastrukturze metrologicznej.

Słowa kluczowe: metrologia, wzorce kwantowe, reforma układu SI, Nowy SI, Konwencja Metryczna, BIPM

1. Wstęp

Szybki postęp w nauce i technologii, zapoczątkowany epokowymi odkryciami przełomu XIX i XX wieku, trwa do dziś. Obecne zmiany w metrologii naukowej odzwierciedlają rozwój nauk ścisłych, bowiem współczesna metrologia czerpie coraz szerzej z osiągnięć fizyki atomowej i kwantowej. Nowe wyzwania w metrologii obiektów w skali nano zacierają różnice między metrologią postrzeganą jako wiedza o charakterze użytkowym a nauką czystą. Badania zjawisk fizycznych na poziomie kwantowym zmieniły charakter metrologii, która stała się samodzielną dyscypliną akademicką.

Metrologia, jako nauka o pomiarach i ich zastosowaniach, integruje praktycznie wszystkie nauki doświadczalne. Ze względu na swój interdyscyplinarny charakter, znajduje ona zastosowanie w coraz szerszych obszarach wiedzy. Wypracowane w metrologii metody wykonywania pomiarów i sposoby opracowania wyników badań są coraz powszechniej stosowane w naukach przyrodniczych i medycynie.

Tak znaczne zmiany zachodzące w ostatnich latach w metrologii naukowej oraz nadchodząca reforma międzynarodowego układu jednostek miar sprawiają, iż zmienia się nie tylko profil naukowy metrologii, ale również zadania Międzynarodowego Biura Miar przewidziane w Konwencji Metrycznej. W niniejszym artykule omawiane są zmiany zachodzące we współczesnej metrologii, widziane jako kon-

tinuacja tendencji już wcześniej zarysowujących się w tej dziedzinie wiedzy.

2. Akademicki aspekt współczesnych badań metrologicznych

Narodziny metrologii jako autonomicznej gałęzi nauki integrującej wiedzę na temat pomiarów można wiązać z podpisaniem Konwencji Metrycznej w 1875 r., w której przewidziano konieczność badań nad jednostkami układu metrycznego i ich wzorcami. W tym celu powołano Międzynarodowe Biuro Miar, BIPM (fr. *Bureau International des Poids et Mesures*) [1]. Aż do początku lat 60. XX wieku metrologia miała charakter nauki inżynierskiej, zajmującej się przede wszystkim wdrożeniami osiągnięć nauk podstawowych w praktyce metrologicznej oraz rozwiązywaniem problemów pomiarowych na najwyższym poziomie metrologicznym.

Badania podstawowe znalazły się w kręgu zainteresowań metrologów we wczesnych latach 70., gdy stwierdzono, iż kwantowy efekt Josephsona, odkryty kilka lat wcześniej, a polegający na tunelowaniu elektronów nadprzewodnika przez barierę potencjału, może zostać wykorzystany do zbudowania niezwykle dokładnego i stabilnego wzorca napięcia elektrycznego [2, 3]. Odkrycie kwantowego efektu Halla (QHE) przez Klausa von Klitzinga w 1980 r. pozwoliło skonstruować równie dokładny i stabilny kwantowy wzorzec rezystancji (wymagający także temperatur kriogenicznych), co ugruntowało przekonanie o ścisłym związku badań podstawowych z praktyką metrologiczną na najwyższym poziomie [4, 5]. Dziś otrzymujemy dalsze dowody takich związków, ponieważ badania grafenu dają podstawy do przypuszczenia, iż ułamkowy QHE [6] w tej nanostrukturze pozwoli skonstruować równie dokładny i stabilny wzorzec rezystancji działający w temperaturach pokojowych [7–9]. Współczesne badania właściwości nanostruktur są źródłem nowych wyzwań w metrologii, ale dają też uzasadnioną nadzieję na znaczny postęp w przemyśle wysokich technologii w przyszłości.

Badania właściwości spektralnych gazów atomowych są również inspirowane potrzebami zaawansowanej metrologii. Układy takie wykorzystywane są do konstrukcji coraz doskonalszych wzorców czasu (fontanny atomowe), niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania wielu kluczowych gałęzi gospodarki, takich jak telekomunikacja, technologie radarowe, lidar, a nawet transakcje giełdowe i GPS. Ten ostatni przykład jest szczególnie wymowny jako egzempli-

fikacja ścisłego związku między nauką czystą a metrologią, bowiem najdokładniejsze algorytmy pozycjonowania satelitarne muszą uwzględniać efekty relatywistyczne, takie jak dylatacja czasu i przesunięcie częstotliwości wynikające z ruchu względnego satelity i obserwatora oraz wpływu pola grawitacyjnego Ziemi na propagację sygnału GPS. Rozwój wzorców i metod pomiaru czasu stanowi jeden z ważnych obszarów badawczych europejskiego programu GNSS Galileo. Technologia pomiaru czasu rozwijana na potrzeby nawigacji satelitarnej jest obecnie przedmiotem wdrożeń w przemyśle, stanowiąc jeden z priorytetowych tematów badań w ramach Europejskiego Programu Badań w Metrologii, EMRP (ang. *European Metrology Research Programme*) [10]. Tematyka ta będzie kontynuowana w kolejnym europejskim programie badań w metrologii EMPIR oraz w europejskim programie ramowym FP8, HORIZON 2020.

Wraz z postępem naukowym i technologicznym wzrastają potrzeby zarówno w tradycyjnych, jak i w nowych dziedzinach pomiarowych (np. pomiary właściwości nanostruktur), rosną wymagania co do szybkości pomiarów (np. konieczność wykonywania ultraszybkich pomiarów stanów przejściowych w badaniach mechanizmów reakcji chemicznych), dokładności pomiarów (czego wynikiem jest m.in. szybki rozwój teorii niepewności pomiarów) oraz możliwości pomiarowych w ekstremalnych warunkach (np. pomiary parametrów plazmy w badawczych reaktorach termojądrowych lub właściwości gazów atomowych w bardzo niskich temperaturach). W tej sytuacji sam pomiar stał się przedmiotem intensywnych badań podstawowych, a w konsekwencji zmieniła się też pozycja metrologii wśród nauk doświadczalnych. Metrologia jest w dalszym ciągu nauką o pomiarach i ich zastosowaniach, odpowiadającą na praktyczne potrzeby przemysłu, handlu i oczekiwania społeczne, ale stała się też samodzielną dyscypliną akademicką, ściśle powiązaną z badaniami fundamentalnymi.

3. Rozszerzanie zakresu odpowiedzialności metrologii na nowe dziedziny pomiarowe

W pierwszych latach działalności BIPM kompetencje instytucjonalnej metrologii ograniczały się do pomiarów masy i długości, zgodnie z literą Konwencji Metrycznej, która czyniła Biuro depozytariuszem pierwotnych wzorców kilograma i metra w postaci platynowo-irydowych artefaktów. Ze względu na znaczny wpływ temperatury na wyniki pomiarów długości i masy o najwyższym stopniu dokładności w BIPM podjęto również prace nad wzorcami i przyrządami do pomiaru temperatury, co było zresztą przewidziane już w Konwencji Metrycznej.

Dokładny pomiar czasu leżał wówczas w gestii astronomów i dopiero 11. Generalna Konferencja Miar, CGPM (ang. *General Conference on Weights and Measures*) w 1960 r. przejęła kontrolę instytucjonalną nad pomiarem czasu astronomicznego, a następnie 13. konferencja CGPM w latach 1967–68 przyjęła atomową definicję jednostki czasu, odnosząc sekundę do częstotliwości jednej z linii widmowych atomu cezu.

Jednostki wielkości elektrycznych i magnetycznych były początkowo traktowane jako niezależne od jednostek mechanicznych. Dopiero w 1901 r. Giorgi przedstawił propozycję powiązania jednostek mechanicznych i elektrycznych przez rozszerzenie układu jednostek podstawowych układu metrycznego o jedną jednostkę elektryczną. Idea ta została ostatecznie zaaprobowana przez 9. Generalną Konferencję Miar w 1948 r., gdy amper został włączony do systemu jednostek metrycznych. Na tej samej konferencji dodano jednostkę światłości (kandele) do systemu metrycznego.

Chociaż pomiary temperatury i prace nad wzorcami temperatury były prowadzone w BIPM od czasu założenia instytutu, to kelwin uznano formalnie za jednostkę podstawową międzynarodowego układu jednostek miar dopiero na 10. konferencji CGPM w 1954 r. Proces wprowadzania nowych jednostek podstawowych SI zakończył się na 14. konferencji CGPM w 1971 r., gdy bardzo ważna dla chemików jednostka liczności materii, mol, została uznana za jednostkę podstawową SI [11].

Proces rozszerzania zakresu odpowiedzialności metrologii na pomiary w kolejnych dziedzinach wiedzy nie jest zakończony. W zależności od potrzeb pomiarowych, do układu SI włączane są jednostki pochodne utworzone z wcześniej zdefiniowanych jednostek podstawowych, np. katal (jednostka aktywności enzymatycznej, $\text{kat} = \text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$) lub gray (jednostka dawki pochłoniętej promieniowania jonizującego, $\text{Gy} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$). Niektóre z nowych jednostek nie mają jeszcze swej własnej nazwy, np. gęstość aktywności katalitycznej ($\text{kat} \cdot \text{m}^{-3}$).

Podporządkowanie pomiarów w różnych dziedzinach wiedzy rygorom obowiązującym w metrologii jest procesem długofalowym. Najwcześniej włączono chemię do głównego nurtu metrologii; ze względu na jej wielkie zróżnicowanie, proces ten długo jeszcze nie zostanie zakończony. Pomiary wielkości fizykochemicznych (np. badania spektrometryczne, chromatograficzne, konduktometryczne, pomiary lepkości i kwasowości) są już od wielu lat uznane za gałąź metrologii. Zakres pomiarów w chemii nieorganicznej, do których stosuje się rygory metrologii systematycznie rośnie [12]. Ten rodzaj pomiarów jest szczególnie ważny w ochronie środowiska, gdzie wiarygodny pomiar stężenia składników gazowych atmosfery (ozonu, gazów cieplarnianych i innych zanieczyszczeń gazowych pochodzenia przemysłowego) oraz zanieczyszczeń wód powierzchniowych (np. nawozami sztucznymi i metalami ciężkimi) musi być wolny od presji grup interesów, nie tylko przemysłowców, ale również nawiedzonych ekologów oraz związanych z nimi polityków.

Metrologia w chemii wkracza obecnie w nową fazę: od kilku lat BIPM i wiodące krajowe instytuty metrologiczne NMI (ang. *National Metrology Institute*) organizują porównania pomiarów w chemii organicznej, a w szczególności oznaczanie hormonów, białek i środków ochrony roślin (pestycydów). Wprowadzenie zasad metrologii do chemii organicznej jest trudne, ponieważ z milionów związków organicznych trzeba wybrać niewielki, ale reprezentatywny zestaw substancji testowych, a obecność związków o podobnej budowie chemicznej może zakłócać pomiary. Oznaczanie substancji chemicznych jest utrudnione także

przez istnienie różnych form izomerycznych, konfiguracyjnych i konformacyjnych badanych molekuł.

Od metrologii chemicznej już tylko krok do metrologii w biologii i medycynie [13, 14]. To zadanie jest jeszcze trudniejsze, ponieważ próbki biologiczne są bardzo czułe na warunki środowiskowe i upływ czasu. Oznaczanie składników krwi lub osocza, badanie na obecność metabolitów lub substancji toksycznych w tkankach odbywa się w próbkach, których skład nie może być znormalizowany, ponieważ zależy od indywidualnego organizmu; poza tym niektóre leki wpływają maskująco na analit. Przygotowanie próbek do badań medycznych wymaga stosowania specjalnych metod, ponieważ preparaty takie są nietrwałe i mogą zmienić swe właściwości w trakcie przygotowania materiału do badań. Problem zgodności (a raczej rozbieżności) wyników laboratoryjnych badań medycznych prowadzonych różnymi metodami, różnymi aparatami i w różnych ośrodkach diagnostycznych został rozpoznany już dawno. Ocenia się, że nawet w krajach najwyżej rozwiniętych technologicznie błędami diagnostycznymi obciążonych jest ok. 20 % badań. Zastosowanie do laboratoryjnej diagnostyki medycznej wymogów wypracowanych w metrologii jest ideą długofalową, trudną i kosztowną, ale niezbędną z punktu widzenia dobra pacjentów, czyli nas wszystkich. W dalszej perspektywie jest to proces bardzo opłacalny nie tylko społecznie, ale i materialnie – oczywiście dla wszystkich z wyjątkiem prawników specjalizujących się w uzyskiwaniu odszkodowań za błędy medyczne. Akcent, jaki nauka kładzie obecnie na metrologię wielkocząsteczkowych związków organicznych o znaczeniu biologicznym należy rozumieć jako pierwszy krok w tym kierunku.

Z metrologią medyczną ściśle wiąże się metrologia w farmacji. W tej dziedzinie ostry reżim badawczy, produkcyjny i handlowy wprowadzono już wcześniej, niezależnie od postępów w metrologii naukowej, ponieważ dobre imię i krociowe zyski wielkich firm farmaceutycznych nie mogły być narażone na szwank wskutek błędnych pomiarów na etapie badań, wdrożeń czy produkcji. Wpływ współczesnej metrologii ogólnej na pomiary w farmacji widać wyraźnie w sposobie określenia minimalnej odważki zdefiniowanej w United States Pharmacopeia (USP), do której stosują się również firmy farmaceutyczne w innych krajach [15]. Otóż w farmacji do niedawna obowiązywała zasada, iż współczynnik rozszerzenia przy obliczaniu niepewności pomiaru wynosił $k = 3$, a tolerancja ważenia małych próbek przyjmowała wartość $\tau = 0,1 \%$ (tzn. oceniając błąd pomiaru zaokrąglaliśmy obliczenia do pierwszej cyfry znaczącej). Ponieważ jednak w metrologii naukowej rutynowo przyjmuje się wartość $k = 2$, a niepewność pomiaru zaokrąglano się do 2 cyfr znaczących, więc i w farmacji przyjęto ten sam standard ($k = 2$, $\tau = 0,10 \%$); jednoczesna zmiana obu tych parametrów gwarantuje, że dokładność ważenia w farmacji zostaje praktycznie taka sama. Nowe wytyczne USP zalecają także uwzględnienie odczytowości (ang. *readability*) podczas obliczania niepewności pomiaru masy małych próbek (niepewność pomiaru nie może być mniejsza niż 0,41 działości elementarnej); w farmacji jest to zalecenie nowe, ale podstawy teoretyczne tej zmiany były już wcześniej opracowane przez metrologów.

W fizyce jądrowej i fizyce cząstek elementarnych nie korzysta się jeszcze z osiągnięć metrologii; są to szczególnie obszary nauki, które stosują swe własne, autonomiczne metody opracowania wyników. Jednak podstawy matematyczne analizy danych w fizyce jądrowej i metrologii są analogiczne i ujednoczenie metod analizy pomiarów również w tych dziedzinach jest tylko kwestią czasu. W pokrewnej dziedzinie akceleratorów do zastosowań medycznych proces ten jest już dalece zaawansowany, a BIPM planuje uruchomienie własnego akceleratora badawczego.

Fakt, iż metrologia obejmuje coraz szerszy zakres dziedzin pomiarowych należy rozumieć jako przejaw naturalnej tendencji do ujednoczania metod badawczych w różnych dyscyplinach wiedzy i wyraz uniwersalnego charakteru badań naukowych.

4. Reforma międzynarodowego układu jednostek miar

Definityjne wzorce kilograma i metra, przyjęte na pierwszej konferencji CGPM w 1889 r., mają postać platynowo-irydowych artefaktów. Wzorce te dobrze spełniały swe zadanie przez wiele dziesięcioleci, ale nie są wolne od pewnych niedoskonałości: były wybrane arbitralnie, podlegają drobnym, ale istotnym zmianom w czasie (dryft), nie są dostępne powszechnie, a w przypadku ich zniszczenia lub uszkodzenia nie można byłoby ich dokładnie odtworzyć. Od czasu pierwszej konferencji CGPM wypróbowano wiele sposobów definiowania jednostek miar i obecnie każda z 7 jednostek podstawowych SI jest zdefiniowana inaczej: kilogram pozostaje zdefiniowany za pomocą artefaktu, metr jest zdefiniowany przez ustalenie wartości fundamentalnej stałej fizycznej (szybkości światła w próżni), definicja ampera powołuje się na klasyczne zjawisko fizyczne (siłę elektrodynamiczną), definicja kandeli odwołuje się do kwantowego prawa fizycznego (promieniowania ciała doskonale czarnego), mol związany jest z masą atomową izotopu węgla, kelwin jest zdefiniowany w oparciu o właściwości termodynamiczne wody, a definicja sekundy odwołuje się do spektralnych właściwości wzorca atomowego [11]. Obecna struktura układu SI jest doskonałym przykładem idei *e pluribus unum*, ale w przypadku jednostek miar można mieć poważne wątpliwości co do zalet takiej różnorodności.

Aż do połowy XX wieku definicje wielkości fizycznych i ich jednostek miały charakter operacyjny, tzn. podawały sposób pomiaru danej wielkości. W sposób oczywisty dotyczy to definicji jednostek masy i długości przyjętych na pierwszej konferencji CGPM w 1889 r. – pomiar polegał na wykonaniu bezpośredniego lub pośredniego porównania z definitywnym wzorcem pierwotnym.

Definiowanie jednostek fizycznych za pomocą właściwości atomów, postulowane przez Maxwella [16] jeszcze przed podpisaniem Konwencji Metrycznej, również ma charakter operacyjny. Pomiar polegał na porównaniu wielkości mierzonej z odpowiadającą jej wielkością atomową, np. masą atomu, długością emitowanej fali elektromagnetycznej lub jej częstotliwością. Idea definitywnych wzorców atomowych została zrealizowana dopiero w 1960 r.,

gdy metr zdefiniowano jako wielokrotność długości fali jednej z linii widmowych atomu kadmu. Naturalną konsekwencją takiej definicji była realizacja metra metodą interferencyjną. Warto dodać, iż atomowy wzorzec metra i pomiar długości tą metodą opracował Michelson już w latach 1892–1893. Jednostka czasu również została zdefiniowana za pomocą wzorca atomowego: w latach 1967–1968 Generalna Konferencja Miar podjęła rezolucję, by sekundę związać z częstotliwością promieniowania emitowanego przez atomy cezu. Definitywny wzorzec cesowy jest do dziś pierwotną realizacją jednostki czasu.

W 1980 r. nastąpił przełom w podejściu do definiowania jednostek podstawowych międzynarodowego układu jednostek miar, wynikający ze spostrzeżenia, że jednostka może być jednoznacznie określona przez ustalenie wartości liczbowej stałej fizycznej. Pierwszą jednostką zdefiniowaną w ten sposób był metr związany z wartością liczbową szybkości światła w próżni c , której nadano wartość $c = 299\,792\,458$ m/s (dokładnie): skoro c jest wielkością stałą, to ustalając wartość liczbową tej wielkości, tzn. $\{c\} = 299\,792\,458$, ustalamy jednoznacznie wartość jednostki $[c] = \text{m/s}$. Ponieważ sekunda była już wcześniej zdefiniowana, to tym samym jednoznacznie określona jest też jednostka długości, metr.

Zastosowanie takiego sposobu rozumowania do innych jednostek podstawowych układu SI leży u podstaw nadchodzącej reformy międzynarodowego układu jednostek miar, określanego często jako Nowy SI (New SI [1]). I tak np., ustalając wartość liczbową stałej Plancka (ostatnie cyfry znaczące nie są jeszcze uzgodnione) $h = 6,62606957 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, jednoznacznie definiujemy masę kilograma: skoro $h = \{h\} [h]$ jest wielkością stałą, to ustalając wartość liczbową $\{h\} = 6,62606957 \times 10^{-34}$, jednoznacznie ustalamy wartość jednostki $[h] = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Ponieważ metr i sekunda zostały już wcześniej zdefiniowane, to ustalenie wartości h jednoznacznie określa wartość kilograma. Takie podejście można rozszerzyć na pozostałe jednostki podstawowe SI. W Nowym SI będą zredefiniowane cztery jednostki podstawowe SI:

- (1) jednostka masy, kilogram, będzie zdefiniowana przez ustalenie wartości liczbowej stałej Plancka h ;
- (2) jednostka temperatury termodynamicznej, kelwin, będzie zdefiniowana przez ustalenie wartości liczbowej stałej Boltzmanna k_B ;
- (3) jednostka liczności materii, mol, będzie zdefiniowana przez ustalenie wartości liczbowej stałej Avogadro N_A ;
- (4) jednostka natężenia prądu elektrycznego, amper, będzie zdefiniowana przez ustalenie wartości liczbowej ładunku elementarnego e_0 .

Definicje pozostałych trzech jednostek podstawowych układu SI będą jedynie przeformułowane tak, by struktura wszystkich siedmiu definicji była taka sama [17, 18].

Definiowanie jednostek miar przez ustalenie wartości liczbowych stałych fizycznych ma charakter wybitnie abstrakcyjny i wymaga podania konkretnego sposobu realizacji (fr. *mise en pratique*) tych jednostek. Oczywiście może istnieć więcej niż jedna taka metoda; już dziś realizacja sekundy dopuszcza wykorzystanie kilku linii widmo-

wych i nie ogranicza się tylko do przejścia nadsubtelnego w atomie cezu.

Reforma układu jednostek miar, znana jako Nowy SI, była już dwukrotnie odkładana. Inicjatorzy tego przedsięwzięcia, związani głównie z BIPM, NIST i NPL, początkowo zakładali przeforsowanie tej idei na 23. konferencji CGPM w 2007 r., ale na przeszkodzie stanęły wówczas względy techniczne, przede wszystkim zaś rozbieżność wyników uzyskiwanych w projekcie Avogadro i w projekcie wagi Watta (niezgodność wartości N_A i h , które są ze sobą powiązane [19]). Podczas 24. konferencji CGPM w 2011 r. podjęto Rezolucję 1, która określa warunki i sposób wprowadzenia tej reformy, ale milczy na temat terminu jej wprowadzenia i ewentualnego *vacatio legis* [20].

Względy techniczne pozostają nadal ważną przeszkodą w szybkim wprowadzeniu tej reformy, ponieważ do jej urzeczywistnienia konieczne jest osiągnięcie zakładanej dokładności pierwotnej realizacji redefiniowanych jednostek (np. $\sim 2 \times 10^{-8}$ w przypadku kilograma), uzyskanie zgodności pomiarów prowadzonych różnymi metodami oraz wykazanie kompetencji w zakresie pierwotnej realizacji tych jednostek w różnych ośrodkach badawczych, tak aby możliwa była niezależna weryfikacja pomiarów (w przypadku realizacji kilograma za pomocą wagi Watta na razie tylko NIST legitymuje się zadowalającymi wynikami). Wraz z upływem czasu zaczynają jednak wchodzić w grę również inne, nietechniczne, a wręcz ambicjonalne czynniki, których znaczenia nie można lekceważyć. Z nieoficjalnych informacji wynika, że przeforsowanie tej reformy na następnej konferencji CGPM jest również zagrożone. Metrologdy są środowiskiem dość konserwatywnym i taki stan rzeczy nie powinien dziwić. Dłuższy czas pracy nad reformą może być nawet korzystny ze względu na lepsze jej przygotowanie, ale ważne jest, by ewentualne modyfikacje tej reformy nie wypaczyły jej sensu.

Planowana reforma międzynarodowego układu jednostek miar nie rozwiązuje wszystkich problemów związanych z SI [21], a są one rozliczne, poczynając od terminologii (nazwa jednostki masy błędnie sugeruje, że jednostką podstawową jest gram, a kilogram to jej wielokrotność), przez wybór wielkości podstawowych i ich jednostek (z fizycznego punktu widzenia, naturalnym i logicznym wyborem jednostki elektrycznej byłby kulomb, a nie amper), do zależności większości jednostek podstawowych od sekundy, która jest i na razie pozostanie zdefiniowana operacyjnie z wykorzystaniem referencyjnego wzorca atomowego (gdy w przyszłości definicja jednostki czasu będzie zmieniona, to wpłynie to na wartości definitywne innych jednostek, w tym metra, kilograma i kelwina). Ponadto definicje jednostek podstawowych Nowego SI wymagają dopracowania [22, 23].

5. Reorientacja misji BIPM po reformie układu jednostek miar SI

Od chwili rozpoczęcia działalności BIPM, i jeszcze długo potem, instytut ten był postrzegany przede wszystkim jako depozytariusz i strażnik jedynej na świecie pierwotnych wzorców jednostek masy i długości; wobec tak wielkiej odpowiedzialności błędy wszystkie inne jego zadania. Gdy

na 11. konferencji CGPM w 1960 r. podjęto decyzję redefinicji metra za pomocą długości fali jednej z linii widmowych emitowanych przez lampę kryptonową, pod kuratelą BIPM pozostał już tylko pierwotny wzorec kilograma. Wprowadzenie reformy międzynarodowego układu jednostek miar i redefinicja kilograma pozbawi BIPM i tego atutu. Od owej chwili na pierwszy plan wysunie się praca badawcza, a przede wszystkim praca organizacyjna instytutu.

Wiele mniejszych krajów, których nie stać na utrzymywanie wszystkich potrzebnych wzorców pierwotnych, uzyskuje swą spójność pomiarową dzięki wzorcowaniu w BIPM. Instytucja ta jest wolna od kontrowersji politycznych, wykonując wzorcowania dla wszystkich krajów na tych samych zasadach. Neutralność ideologiczna i polityczna BIPM wywodzi się z zasady dążenia do prawdy obiektywnej w nauce, której nawet relatywizm XX wieku nie zdołał podważyć. Duże znaczenie dla zachowania aurytety BIPM ma też przejrzysty mechanizm jej finansowania, dzięki któremu jest ona odporna na naciski grup interesów. Przykładowo BIPM od lat propaguje prowadzenie niezależnych badań zmian klimatycznych, co jest niezwykle ważne w dobie badań sponsorowanych przez przemysł i środowiska zawodowych działaczy ekologicznych, tych samych, którzy w ścisłej współpracy z firmą oświeceniową wymusili na krajach Unii Europejskiej zastąpienie żarówek świetłówkami zawierającymi rtęć.

Jako pierwszy w historii międzynarodowy instytut badawczy, BIPM stał się archetypem zarówno międzynarodowych (np. CERN), jak i państwowych instytutów naukowych. Na przełomie XIX i XX wieku na wzór BIPM powstały krajowe instytuty metrologiczne (NMI) w Niemczech, Wielkiej Brytanii i USA, finansowane z budżetu państwa, chociaż były i są to kraje o wybitnie wolnorynkowej gospodarce. Model państwowego instytutu badawczego sprawdził się tak dobrze, że w USA został on powielony w postaci sieci Laboratoriów Narodowych finansowanych przez rząd federalny, a nadzorowanych merytorycznie przez kompetentne ciała doradcze.

BIPM stanowi światowe centrum metrologiczne, które posiada bogaty zasób wiedzy eksperckiej i chętnie dzieli się nim z zainteresowanymi stronami. Biuro organizuje szkolenia teoretyczne i warsztaty praktyczne w nowych dziedzinach pomiarowych, a także konferencje poświęcone aktualnym zagadnieniom w metrologii. Najbardziej prestiżowe czasopismo w tej dziedzinie, *Metrologia*, jest wydawane właśnie przez BIPM (z brytyjską pomocą organizacyjną i techniczną). Wielką rolę odgrywają organizowane tu posiedzenia Komitetów Doradczych CIPM, które grupują wybitnych specjalistów we wszystkich praktycznie dziedzinach pomiarowych, komitety te stanowią bowiem forum, gdzie wypracowywane są kierunki zmian w metrologii. To tu narodziła się koncepcja reformy układu jednostek miar (Nowy SI), tu zawarto międzynarodowy układ CIPM MRA o kluczowym znaczeniu dla handlu, tu utrzymywane są bazy danych (KCDB) umożliwiające sprawne funkcjonowanie tego układu. W efekcie, chociaż kilka krajowych NMI (NIST, PTB, NPL) ma kilkakrotnie wyższy budżet i większe osiągnięcia naukowe niż BIPM, to właśnie ta instytucja jest predestynowana do pełnienia funkcji

centrum organizacyjnego w metrologii światowej. Z chwilą redefinicji kilograma zmieni się formalny zakres odpowiedzialności tej instytucji, ale już teraz jest ona dobrze przygotowana na nadchodzące zmiany.

6. Podsumowanie

Rozwój współczesnej nauki powoduje zacieranie granic między różnymi, niegdyś autonomicznymi dziedzinami wiedzy. Badania na pograniczu różnych obszarów wiedzy stały się najbardziej efektywną metodą dochodzenia do nowych idei i znajdowania praktycznych zastosowań odkryć naukowych.

Współczesny postęp w nauce i technologii jest efektem przede wszystkim prac dużych zespołów naukowych, gdzie ramię w ramię współpracują specjaliści z różnych dziedzin. Metrologia ma taki właśnie integracyjny charakter. Współczesne problemy metrologiczne są rozwiązywane przez zespoły badawcze składające się z fizyków, chemików, inżynierów, matematyków, informatyków, astronomów, biologów i lekarzy, współczesna nauka wymaga bowiem nie tylko aparatury badawczej na najwyższym światowym poziomie, ale również wszechstronnej wiedzy, oryginalnych pomysłów i zróżnicowanego doświadczenia. Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) oraz współczesne krajowe instytuty metrologiczne (NMI) mają taki właśnie uniwersalny charakter. W instytutach tych, pod jednym dachem, pracują przedstawiciele wszystkich nauk matematyczno-przyrodniczych, zajmując się zarówno badaniami fundamentalnymi, problemami o znaczeniu technologicznym, jak i rozwiązywaniem praktycznych zagadnień pomiarowych w przemyśle.

Polska nauka, a w szczególności metrologia, powinna czerpać z doświadczeń i wzorów organizacyjnych wypróbowanych w wysoko rozwiniętych krajach uprzemysłowionych. Naukę należy postrzegać jako całość, a nie zbiór autonomicznych dyscyplin akademickich; co więcej, nauka czysta i stosowana są od siebie ściśle uzależnione. Nie ma bowiem przemysłu zaawansowanych technologii bez solidnych podstaw naukowych i na odwrót, nie ma kraju o wysokim poziomie nauki, który nie wyróżniałby się wysoko rozwiniętym przemysłem wysokich technologii. Metrologia jest tą dziedziną wiedzy, w której najlepiej widać bezpośredni związek nauki z przemysłem.

Na relację między nauką i jej praktycznymi zastosowaniami trzeba patrzeć z długofalowego punktu widzenia. Odkrycia naukowe są jak nowo narodzone dziecko: na początku nie ma z nich pożytku, a powodują jedynie wydatki; ich walory objawiają się dopiero wtedy, gdy dorosną. Dlatego, mimo poważnych trudności gospodarczych i finansowych państwa, nie wolno podejmować strategicznie błędnych decyzji argumentując, iż wskutek kryzysu nie stać nas ani na dzieci, ani na inwestowanie w naukę; decyzje w tych sprawach przesądzą o przyszłości narodu i państwa.

Bibliografia

1. Quinn T., *From artefacts to atoms. The BIPM and the search for ultimate measurement standards*, Oxford University Press, Oxford 2012.

2. Benz S.P., Hamilton C. A., *Application of the Josephson effect to voltage metrology*, "Proc. IEEE" vol. 92, 2004, 1617–1629.
3. Jeanneret B., Benz S.P., *Application of the Josephson effect in electrical metrology*, "Eur. Phys. J. – Special Topics" vol. 172, 2009, 181–206.
4. Klitzing K., *25 Years of Quantum Hall Effect (QHE). A personal view on the discovery, Physics and Applications of this Quantum Effect*, "Séminaire Poincaré" vol. 2, 2004, 1–16.
5. Jeckelmann B., Jeanneret B., *Quantum Hall Effect as an Electrical Resistance Standard*, "Séminaire Poincaré" vol. 2, 2004, 39–51.
6. Störmer H. L., *The fractional quantum Hall effect*, "Rev. Modern Phys." vol. 71, 1999, 875–889.
7. Novoselov K.S., Jiang Z., Zhang Y., Morozov S.V., Stormer H.L., Zeitler U., Maan J.C., Boebinger G.S., Kim P., Geim A.K., *Room-temperature quantum Hall effect in graphene*, „Science“ vol. 315, no. 5817, March 9, 2007, str. 1379.
8. Tzalenchuk A., Lara-Avila S., Kalaboukhov A., Paolillo S., Syväjärvi M., Yakimova R., Kazakova O., Janssen T.J.B.M., Falko V., Kubatkin S., *Towards a quantum resistance standard based on epitaxial graphene*, "Nature Nanotechnology", vol. 5, 2010, 186–189.
9. EMRP Call 2012, *Quantum resistance metrology based on graphene*, EMRP website, 2012.
10. EMRP Call 2012, *Compact microwave clocks for industrial applications*, EMRP website, 2012.
11. *The International System of Units (SI)*, wyd. 8, BIPM, Sèvres, 2006.
12. Kaarls R., *Metrology in Chemistry*, CCQM presentation at 24th meeting of the CGPM, 17–21 October 2011, Sèvres, BIPM website, 2011.
13. JCTLM report, *Scope of activity for JCTLM review teams*, BIPM website, 2010.
14. *Report of the 11th meeting of the JCTLM executive committee, 6–7 December, 2012, BIPM, Sèvres*, BIPM website, 2012.
15. *United States Pharmacopeia and National Formulary*, US Pharmacopeial Convention, Rockville, MD, 2013.
16. Maxwell J.C., *Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association, Liverpool, Sept. 15, 1870*; przedruk w *Maxwell on Molecules and Gases*, wyd. E. Garber, S.G. Brush, C.W.F. Everitt, MIT, Cambridge 1986, 89–104.
17. CIPM Recommendation 1 (CI-2005). *Preparative steps towards new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole in terms of fundamental constants*, BIPM, Sèvres, 2005.
18. Mills I. M., Mohr P.J., Quinn T.J., Taylor B. N., Williams E.R., *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)*, "Metrologia" vol. 43, no. 3, 2006, 227–246.
19. Chyla W. T., *Projekt Avogadro (IAC) i redefinicja jednostki liczności materii*, „Wiadomości Chemiczne” vol. 66, no. 7–8, 2012, 767–787.
20. Resolution 1 of the 24th meeting of the CGPM (2011), *On the possible future revision of the International System of Units, the SI*, BIPM website, 2011.
21. Chyla W. T., *Evolution of the international metric system of units SI*, "Acta Physica Polonica A" vol. 120, no. 6, 2011, 998–1011.
22. Chyla W. T., *On the structure of the New SI definitions of base units*, "Metrologia" vol. 49, no. 4, 2012, L17–L19.
23. Chyla W. T., *On the proposed redefinition of the mole*, "Metrologia" vol. 49, no. 3, 2012, L11–L13. ■

Developments in the contemporary scientific metrology

Abstract: The article presents evolution of scientific metrology that results both from the fast progress of science (e.g., the use of quantum standards) and the increasing demand for measurements at the highest metrological level (e.g., measurements of time in the global navigation satellite systems, GNSS). The measurement methods and general procedures for processing raw experimental data, which were developed in metrology, are being employed in the ever increasing number of fields (e.g., in chemistry, biology, pharmacology and medicine). The contemporary trends in scientific metrology, and particularly the forthcoming reform of the international system of units SI, imply a change of priorities stated in the Metric Convention and affect the role, which the BIPM plays in the global metrological infrastructure.

Keywords: metrology, quantum standards, reform of the SI, New SI, Metric Convention, BIPM

Artykuł recenzowany, nadesłany 21.08.2013, przyjęty do druku 02.09.2013.

Wojciech T. Chyla, PhD

Ukończył magisterskie studia chemiczne na Uniwersytecie Warszawskim (chemia kwantowa), a studia fizyczne na University of Southern California, Los Angeles (Master of Arts in Physics). Stopień Philosophy Doctor uzyskał na University of North Texas, Denton (fizyka teoretyczna i fizyka ciała stałego). Studia podyplomowe odbył w United States Particle Accelerator School (Harvard 1990, University of Illinois at Urbana-Champaign 1991, Stanford 1992, Harvard 1993). Pracował m.in. w Instytucie Fizyki PAN jako asystent, w University of Southern California jako asystent (teaching assistant), w University of North Texas jako asystent i wykładowca (instructor), w Wyższej Szkole Pedagogicznej (obecnie Uniwersytet Warmińsko-Mazurski) jako adiunkt, w Głównym Urzędzie Miar jako główny specjalista oraz kilkanaście lat w sektorze prywatnym. Publikacje z zakresu fizyki teoretycznej, fizyki półprzewodników, optyki, elektrodynamiki kwantowej, oddziaływań kwarków, szczególnej i ogólnej teorii względności oraz metrologii.



e-mail: chylawt@wp.pl