

# Przegląd aktualnej wiedzy na temat prowadzonych badań nad redefinicją jednostki masy (stan na koniec 2013 r.)

Rafał L. Ossowski (Zakład Mechaniki, GUM)

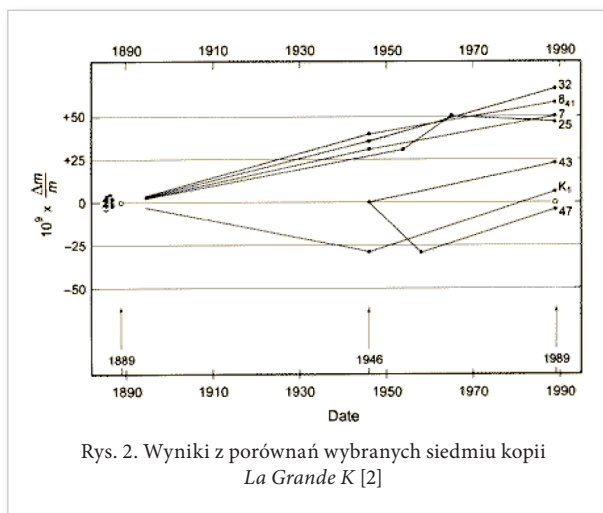
Artykuł podsumowuje stan wiedzy na temat planowanej redefinicji jednostki masy, na koniec 2013 r. W artykule opisano główne przyczyny podjęcia decyzji o redefinicji, przybliżono naukowe podstawy dwóch wiodących eksperymentów – wyznaczenia stałej Plancka za pomocą tzw. wagi wata (ang. *watt balance*) oraz w projekcie IAC (*The International Avogadro Coordination*), w oparciu o stałą Avogadry. Zaprezentowano aktualne wyniki badań i związane z ich interpretacją problemy, które wymusiły przesunięcie zaplanowanej redefinicji na późniejszy termin. Wskazano również dalszy kierunek badań i związane z nimi plany dotyczące przeprowadzenia redefinicji jednostki masy w układzie SI.

## Wprowadzenie

Jednostka masy jest aktualnie ostatnią z siedmiu podstawowych jednostek powszechnie obowiązującego układu SI, której odtwarzanie odbywa się za pomocą artefaktu. Pomimo wieloletnich starań, chociaż wzmożone działania naukowe w kierunku ustanowienia nowego wzorca masy są prowadzone od lat 90. poprzedniego stulecia, nadal Międzynarodowym Prototypem Kilogramu IPK (*International Proto-*



Rys. 1. Międzynarodowy prototyp 1 kg  
fot. arch. BIPM



Rys. 2. Wyniki z porównań wybranych siedmiu kopii *La Grande K* [2]

*type of the Kilogram*) pozostaje znajdujący się w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM) platynowo-irydowy walec o wysokości równej średnicy, wynoszącej 39,17 mm (rys. 1).

Monitorowanie fluktuacji masy IPK, zwanego *La Grande K* (od 1889 r., kiedy został ustanowiony, jedynie trzykrotnie poddano go badaniom wyznaczenia masy), dało jednoznaczne wyniki, stanowiące podstawę do sformułowania wniosku, który wywołał głośną dyskusję w środowiskach naukowych [1]. Wykazano, że w przeciwieństwie do swoich kopii, które jak wynikało z obserwacji i porównań (międzynarodowe porównania odbyły się w latach 1889, 1948 i 1989) w znaczącej większości, regularnie przybierały na masie, IPK okazał się relatywnie lżejszy (rys. 2) [2].

W efekcie pojawił się problem z założeniami w definicji kilograma, jako jednostki masy (IPK posiada zerową niepewność względną) oraz utrzymaniem spójności pomia-

rowej. Co zrobić w sytuacji jeśli artefakt, którego masę z założenia znamy, z niepewnością względną równą zero, będący wzorcem odniesienia również dla innych jednostek w układzie SI (m.in. jednostki siły – N, jednostki ciśnienia – Pa), ewoluuje w czasie?

### Nowy sposób realizacji definicji kilograma

Rozbieżności wynikające z przeprowadzonych porównań spowodowały, że nie udało się w sposób jednoznaczny określić czy *La Grande K* stracił, czy też jego platynowo-irydowe kopie przybrały na masie. Realnie mała dostępność do IPK, jako wzorca odniesienia, związana z bardzo restrykcyjnym sposobem przechowywania i pielęgnacji IPK oraz chęć ujednoczenia założeń dla jednostek podstawowych w układzie SI, stały się głównymi powodami konieczności redefinicji również pozostałych jednostek układu SI, w oparciu o fundamentalne stałe fizyczne. Odbyło się to podczas 23 Generalnej Konferencji Miar GCPM (*General Conference on Weights and Measures*) w 2007 r. Wśród międzynarodowych projektów badawczych prowadzonych w takich ośrodkach naukowych, jak: NIST, PTB, NPL, BIPM, NRC, METAS, zaawansowanie prac nad dwoma metodami okazało się na tyle znaczące, aby sprostać wytycznym dotyczącym przyjęcia nowej definicji kilograma – wyznaczenie wartości masy 1 kg w oparciu o stałą Plancka  $h$  otrzymaną na dwa różne sposoby: z równowagi sił w ujęciu mechanicznym i elektrodynamicznym oraz alternatywnie, w oparciu o wyznaczoną doświadczalnie stałą Avogadry  $N_A$ . W obu przypadkach otrzymywane niepewności bezwzględne były na zbliżonym poziomie, poniżej  $10^{-7}$ . Dla porównania, postęp w technologii produkcji przetworników magneto-elektrycznych, stosowanych w nowoczesnych komparatorach, pozwala obecnie na wyznaczenie masy z błędem na poziomie  $10^{-10}$  kg. W konsekwencji, podczas 12 posiedzenia CCM w 2010 r. rekomendowano trzy podstawowe warunki, przy spełnieniu których mogłoby dojść do redefinicji [3].

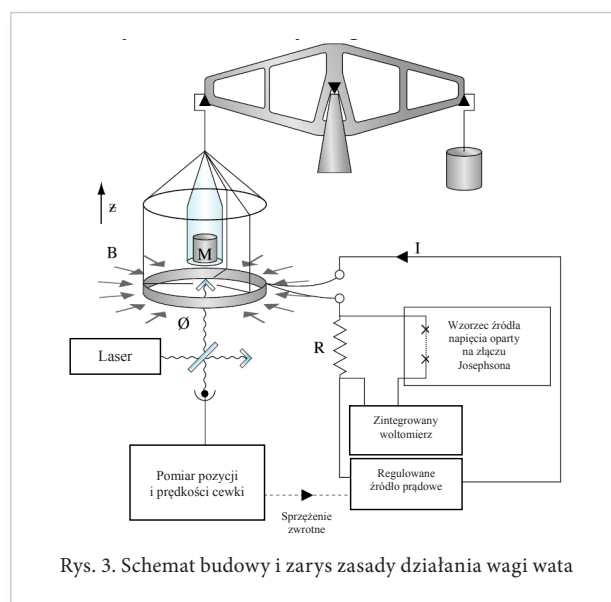
1. W trzech niezależnych eksperymentach stała Plancka  $h$  musi zostać wyznaczona z niepewnością względną nie większą niż  $5 \cdot 10^{-8}$ , gdzie jednym z eksperymentów będzie projekt IAC (*The International Avogadro Coordination*). Ponadto jeden z eksperymentów powinien dać wartość stałej Plancka  $h$  z niepewnością względną nie większą niż  $2 \cdot 10^{-8}$ .
2. Wartości stałej Plancka i stałej Avogadry otrzymane w eksperymentach muszą być spójne na poziomie ufności 95 %.
3. Należy potwierdzić identyfikowalność prototypów BIPM z IPK.

Mając na uwadze powyższe, termin redefinicji był ściśle uzależniony od osiągniętych wyników w prowadzonych równoległe projektach oraz wzajemnej korelacji tych wyników. Zaproponowano również nową definicję jednostki masy [4]:

Kilogram (kg), jednostka masy układu SI, której wielkość jest ustalana na podstawie wartości liczbowej stałej Plancka równej dokładnie  $h = 6.626\ 06X \cdot 10^{-34}$ , wyrażonej w podstawowych jednostkach masy, długości i czasu:  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , które odpowiadają J s; gdzie X odpowiada jednej lub kilku cyfrom, które zostaną ustalone przy przeprowadzaniu redefinicji, po uwzględnieniu rekomendacji grupy zadaniowej CoDATA.

### Redefinicja kilograma w oparciu o wyznaczenie stałej Plancka za pomocą wagi wata

Pierwsza z rekomendowanych w 2005 r. metod, w oparciu o którą ma być stworzona nowa definicja kilograma, opiera się na wyznaczeniu podstawowej w fizyce kwantowej stałej fizycznej  $h$  – stałej Plancka, porównując moc w ujęciu mechanicznym z mocą w ujęciu elektrycznym. Pierwotór urządzenia zastosowanego w eksperymencie został skonstruowany w NLP (*National Physical Laboratory*) przez B. P. Kibble'a w 1975 r. (rys. 3) Unowocześniona tzw. waga wata, wspierana sterowaną komputerowo elektroniką – Mark II wraz z drugim tego typu urządzeniem znajdującym się w NIST (*National Institute of Standards and Technology*) oraz analogiczną, znajdującą się w BIPM, są aktualnie wykorzystywane w eksperymencie i optymalizowane celem osiągnięcia zbliżonej do zakładanej względnej niepewności pomiarowej oraz określenia i wyeliminowania czynników zewnętrznych, mających wpływ na rozbieżności w otrzymywanych



dotychczas wynikach. Określenie nieznannej masy  $m_x$  artefaktu jest przeprowadzane w dwóch trybach pracy: w trybie ważenia statycznego i w trybie ważenia kinetycznego.

W trybie ważenia statycznego siła grawitacji działająca na wzorzec odniesienia jest równoważona przez siłę elektrodynamiczną wytwarzaną przez toroidalną cewkę o promieniu  $r$ , umieszczoną w polu magnetycznym o indukcji  $B$ , przez którą płynie prąd o natężeniu  $I_s$ .

$$m_x g = 2\pi r I_s B \quad (1)$$

W trybie ważenia kinetycznego mierzone jest napięcie  $U_k$  indukowane w poruszającej się z szybkością  $v$  toroidalnej cewce:

$$U_k = 2\pi r v B \quad (2)$$

Z zależności (1) i (2), po wyeliminowaniu stałych wartości indukcji pola magnetycznego  $B$  oraz długości cewki  $2\pi r$ , otrzymano wyrażenie porównujące dwie, niewystępujące w eksperymencie *explicite* moce: moc mechaniczną i moc elektryczną:

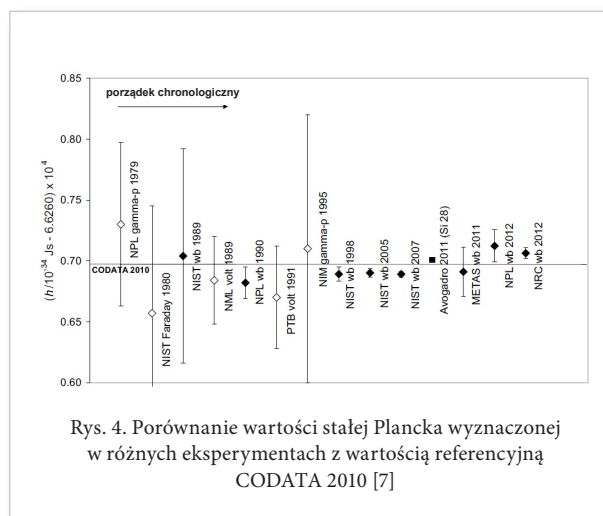
$$m_x g v = I_s U_k \quad (3)$$

Występujące po prawej stronie równania (3) natężenie prądu oraz napięcie można wyznaczyć w oparciu o prawo Ohma i bezpośrednio powiązać z fundamentalnymi stałymi fizycznymi: stałą Josephsona  $K_J$  [5], której wartość wyznaczona z niepewnością  $U = 0.011 \cdot 109 \text{ Hz V}^{-1}$  wynosi  $K_J = 2e/h = 483597,870 \cdot 10^9 \text{ Hz V}^{-1}$  oraz stałą von Klitzinga  $R_K = h/e^2 = 25812,8074434 \Omega$  przy niepewności  $U = 0,0000084 \Omega$  [6]. Otrzymana zależność:

$$m_x = h \frac{A}{g v} \quad (4)$$

w której współczynnik  $A$  zawiera stałe charakterystyczne dla danego eksperymentu,  $g$  – przyspieszenie ziemskie ( $\text{m s}^{-2}$ ), wyznaczone precyzyjnie dla konkretnej lokalizacji,  $v$  – szybkość ruchu pionowego toroidalnej cewki ( $\text{m s}^{-1}$ ), umożliwia wyznaczenie wartości masy w zależności od stałej Plancka. Zestawienie wyników z poszczególnych eksperymentów w sposób chronologiczny przedstawia rys. 4.

W projekcie prowadzonym przez BIPM w 2013 r. poprawiono separację od wpływów środowiskowych. Eksperyment przeniesiono do nowej lokalizacji, na nowo zaprojektowano i wykonano w oparciu o stabilne magnesy samarowo-kobaltowe ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ) układ generujący pole magnetyczne wraz z wydajną osłoną (stop Fe-Ni) oraz wysoce precyzyjne piezoelektryczne układy mechaniczne. Jest to pierwszy krok do budowy nowej wagi wata i zmniejszenia niepewności względnej pomiarów dokonywanych w BIPM.



Rys. 4. Porównanie wartości stałej Plancka wyznaczonej w różnych eksperymentach z wartością referencyjną CODATA 2010 [7]

## Redefinicja kilograma w oparciu o wyznaczenie stałej Plancka metodą XRCD

Projekt wykorzystujący metodę XRCD to podejście bazujące na założeniach klasycznych, gdzie masa jest bezpośrednio powiązana z zawartością molekuł w czystej, krystalicznej substancji. Pomiaru można dokonać za pomocą promieni Roentgena metodą XRCD (*X-Ray Crystal Density*) przy znanej objętości  $V_{\text{Si}}$  oraz stałej sieci krystalicznej  $a$ . Ze względu na wielkość kryształu, brak zakłóceń sieci krystalicznej oraz dużą czystość chemiczną do doświadczenia wykorzystano izotop krzemu  $^{28}\text{Si}$ . Ilość atomów  $N$  w kryształcie opisuje zależność:

$$N = \frac{A \cdot V_{\text{Si}}}{a^3(^{28}\text{Si})} \quad (5)$$

gdzie dla krzemu  $A = 8$  i oznacza liczbę atomów przypadającą na jedną komórkę kryształu oraz  $a(^{28}\text{Si})$  definiuje wymiary brzegowe komórki. Mając na uwadze, że objętość ciała stałych jest funkcją temperatury i zależy od ciśnienia ośrodka, w którym dokonuje się pomiaru, zarówno  $V_{\text{Si}}$  jak i  $a(^{28}\text{Si})$  muszą być wyznaczone w warunkach normalnych. Ponadto ze względów praktycznych (brak krawędzi, symetria i łatwość obróbki) kryształ izotopu krzemu został uformowany w kulę o masie  $m_{\text{sr}}$  zbliżonej do 1 kg:

$$m_{\text{sr}} = m_s + m_{\text{ox}} + m_{\text{add}} \quad (6)$$

gdzie  $m_{\text{sr}}$  – masa rzeczywista obrabionego kryształu krzemu,  $m_{\text{ox}}$  – masa tlenków na powierzchni,  $m_{\text{add}}$  – masa zanieczyszczeń (usuwanych głównie w procesie czyszczenia) oraz zaabsorbowanej w sposób fizyczny lub chemiczny wody i  $m_s$  – masa oczekiwana kuli do wykorzystania w eksperymencie – 1 kg, którą przy użyciu metody XRCD wyrażono jako sumę  $N$  pojedynczych atomów:

$$m_s = N \cdot m(^{28}\text{Si}) \quad (7)$$

Korzystając z faktu, że stosunek  $h/m(^{28}\text{Si})$  jest wyznaczony doświadczalnie z dużą dokładnością [8], zależność (7) można przedstawić następująco:

$$m_s = h \cdot N \frac{m(^{28}\text{Si})}{h} \quad (8)$$

w której:

$$N = N_A \frac{m_s}{M} \quad (9)$$

Metoda XRCD umożliwia precyzyjne wyznaczenie ilości atomów  $N$ . W konsekwencji możliwe jest zdefiniowanie oraz wyznaczenie wartości numerycznej stałej Plancka  $h$ . Otrzymane w latach 1990–2013 wartości stałej Avogadry  $N_A$  wraz z osiągniętymi niepewnościami oraz nazwą instytutu, w którym przeprowadzono eksperyment, zostały zestawione na rys. 5.

Dla dwóch eksperymentów przeprowadzonych w NIST i NPL można zaobserwować w okresie od 1990 do 2012 r. wyraźną tendencję dążenia do wartości referencyjnej stałej Avogadry  $N_A = 6,022\,141\,29(27) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (2010 CODATA recommended values). Wyjątkowo obiecujący, zarówno ze względu na wartość  $N_A$  jak i postulowaną niepewność względną, zdaje się być projekt prowadzony w NIST. Także zespół prowadzący eksperyment w PTB zapowiada działania mające na celu poprawę wyników – obniżenie niepewności względnej do  $1,5 \cdot 10^{-8} N_A$ . We wnioskach z dotychczasowego eksperymentu zwrócono uwagę na dużą niepewność względną przy określaniu jednorodności powierzchni (ok. 22 % całkowitego budżetu niepewności) oraz objętości (ok. 55 % całkowitego budżetu niepewności) badanego kryształu krzemu. Stąd podjęte działania i plany na lata 2014–2015

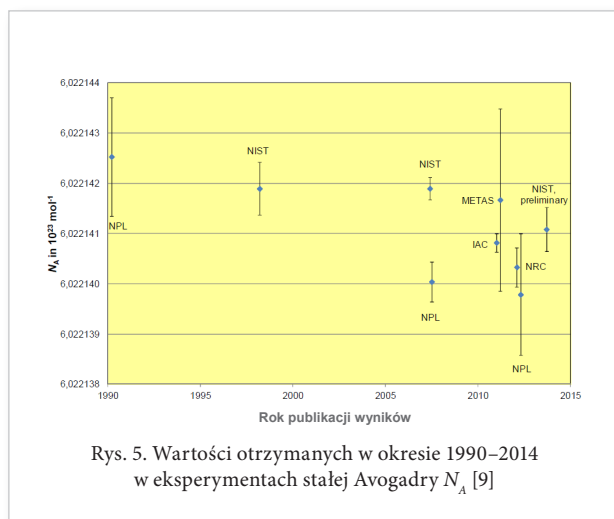
powiązane ze sprowadzeniem monolitycznych, wysokiej jakości kryształów krzemu  $^{28}\text{Si}$  z Rosji oraz zastosowaniem nowej techniki pomiaru topografii powierzchni – unowocześnionego interferometru [9].

### Przekazywanie jednostki masy

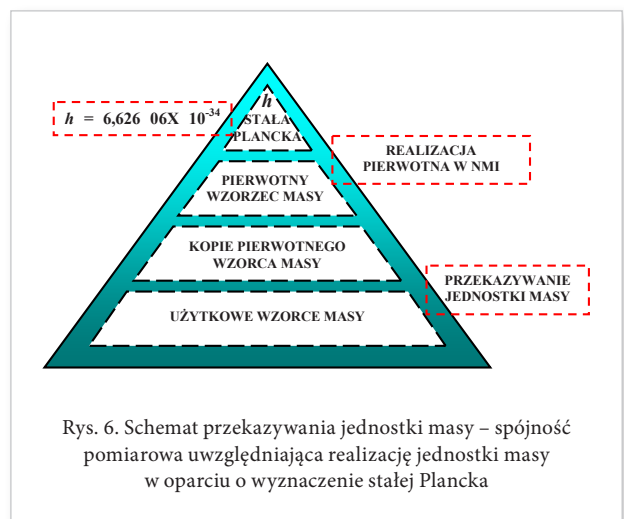
W nowej definicji kilograma przyjęto, że otrzymany wzorec jednostki masy jest niezmienny w czasie oraz może być realizowany przez dowolne laboratorium lub współpracujące ze sobą laboratoria w sposób równoważny – realizacja pierwotna. Przekazywanie jednostki masy będzie oparte o pierwotne wzorce masy (*primary mass standards*), które zostaną wytworzone i odniesione do stałej Plancka przy użyciu jednej z metod opisanych powyżej (rys. 6).

CCM w ramach BIPM raz na 5–10 lat będzie organizował porównania kluczowe (CCM.M-K...) dla głównych wzorców masy, otrzymanych za pomocą realizacji pierwotnej w poszczególnych NMI z zespołem wzorców odniesienia masy EoR (*Ensemble of Reference*).

Aktualnie zespół wzorców odniesienia składa się z dwunastu artefaktów o masie 1 kg, wytworzonych z różnych materiałów i przechowywanych w specjalnych warunkach, w celu minimalizacji lub wyeliminowania znanych źródeł niestabilności masy. O częstotliwości oraz zakresie porównań będzie każdorazowo decydował CCM, mając na uwadze jak najlepszą realizację nowej definicji jednostki masy. Równoległe będą się odbywały porównania pomiędzy poszczególnymi NMI w celu utrzymania spójności w przekazywaniu jednostki masy w całym zakresie wzorcowanych mas. Między innymi w tym celu konieczne jest w trakcie przekazywania jednostki masy uwzględnianie niepewności oraz możliwych fluktuacji masy pierwotnych wzorców masy w całym łańcuchu spójności pomiarowej.



Rys. 5. Wartości otrzymanych w okresie 1990–2014 w eksperymentach stałej Avogadry  $N_A$  [9]



Rys. 6. Schemat przekazywania jednostki masy – spójność pomiarowa uwzględniająca realizację jednostki masy w oparciu o wyznaczenie stałej Plancka



## Zapewnienie ciągłości realizacji pierwotnej z dotychczasowym wzorcem jednostki masy

Jednym z głównych kryteriów dotyczących przeprowadzenia redefinicji jednostki masy jest zapewnienie ciągłości i spójności pomiędzy obecną definicją opartą na artefakcie – właściwie oczyszczanym i przechowywanym w restrykcyjnych warunkach środowiskowych IPK – a nową definicją, wykorzystującą stałą Plancka. Przyjęto, że wzorce odniesienia, służące do eksperymentów „realizacji pierwotnej” zostaną bezpośrednio wywzorcowane od IPK, zgodnie z procedurą „nadzwyczajnego użycia IPK do wzorcowań”. Dodatkowo zostanie również wykalibrowany zestaw wzorców odniesienia masy. W drodze porozumienia pomiędzy BIPM i CODATA – grupy zadaniowej ds. podstawowych stałych fizycznych, na podstawie monitorowania i oceny wartości otrzymywanych w niezależnych eksperymentach „realizacji pierwotnej” wartości stałej Plancka  $h$ , grupa zadaniowa wyda rekomendację o ustaleniu wartości stałej Plancka  $h$  wraz ze względną niepewnością pomiarową  $u_r$ . Rekomendowana niepewność względna  $u_r$  zostanie przypisana do międzynarodowego wzorca masy IPK, co umożliwi przeprowadzenie redefinicji, zgodnie ze schematem przedstawionym w tabeli 1 i utrzymania ciągłości pomiędzy obecnie funkcjonującą, a nową definicją kilograma.

Mając na uwadze powyższe, masy wyznaczone przed redefinicją nie ulegną zmianie, natomiast niezbędna jest korekta niepewności – wzrośnie ona o wartość niepewności, która po redefinicji zostanie przypisana do IPK.

Tabela 1. Schemat zachowania spójności przy redefinicji jednostki masy

| Przed Redefinicją  | Po Redefinicji   |
|--|--|
| wartość masy $m_{\text{IPK}} = 1 \text{ kg}$<br>niepewność względna $u_r$                      | wartość masy $m_{\text{IPK}} = 1 \text{ kg}$<br>niepewność względna $u_r$                      |
| niepewność względna $u_{m_{\text{IPK}}} = 0$<br>niepewność względna stałej Plancka $u_h = u_r$ | niepewność względna $u_{m_{\text{IPK}}} = u_r$<br>niepewność względna stałej Plancka $u_h = 0$ |

Rola artefaktu IPK po redefinicji pozostanie głównie historyczna. Ważne jest, że *La Grande K* wraz ze swoimi sześcioma kopiami będzie nadal przechowywany w BIPM i konserwowany zgodnie z ustalonymi procedurami [10]. Będzie również sukcesywnie badany dryft masy, ale już w odniesieniu do jednostki podstawowej (stałej Plancka  $h$ ).

## Podsumowanie

Pomimo usilnych starań i planów dotyczących poprawy kluczowych eksperymentów przy redefinicji jednostki masy, nie udało się w 2013 r. osiągnąć wyznaczonego celu i założeń, dotyczących nowego sposobu realizacji definicji kilograma. W ostatnim okresie poprawiono w sposób znaczący eksperyment prowadzony przez NIST [wyznaczanie stałej Avogadry (rys. 5)] oraz przez NRC i BIPM [wyznaczanie stałej Plancka metodą wagi wata (rys. 4)].

Należy podkreślić, że u podstaw redefinicji leży zasadniczy postęp w metrologii masy (określanie masy z niepewnością względną na poziomie  $2 \cdot 10^{-9}$ ) oraz ujednoczenie założeń dotyczących podstawowych jednostek układu SI. Stąd w nadchodzących latach będą nadal prowadzone dalsze wzmożone badania w tym kierunku [11, 12].

## Bibliografia

- [1] Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., Taylor B. N., Williams E. R., *Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come*. Metrologia 42 (2005) 71-80.
- [2] Davis R., *The SI unit of mass*. Metrologia 40 (2003) 299-305.
- [3] Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM): *Report of the 12th meeting (26 March 2010) to the International Committee for Weights and Measures*. Bureau International des Poids et Mesures, Sevres.
- [4] Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures (24th meeting), Paris, 17-21 October 2011.
- [5] 2010 CODATA recommended values, Josephson constant  $K_J$ , Retrieved 10 January 2012.
- [6] 2010 CODATA recommended values, von Klitzing constant  $R_K$ , Retrieved 10 January 2012.
- [7] Stock M., *Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram*. Metrologia 50 (2013) R1-R16.
- [8] Mohr P. J., Taylor B. N., Newell D. B., *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2010*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899-8420, USA.
- [9] Bettin H., *Determination of the Avogadro constant by counting  $^{28}\text{Si}$  atoms*. kNOW Workshop, Turin, 17 September 2013.
- [10] Davis R., *The role of the international prototype of the kilogram after redefinition of the International System of Units*. Phil. Trans. R. Soc. A, 201, 369 3975-3992, or something similar.
- [11] Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) Working Group on the Realization of the Kilogram (WGR-kg), *Mise en pratique*, v. 8.7 (2013).
- [12] Abbott P. J., Kubarych Z. J., *The New Kilogram Definition and its Implications for High-Precision Mass Tolerance Classes*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 118 (2013) 353-358.