

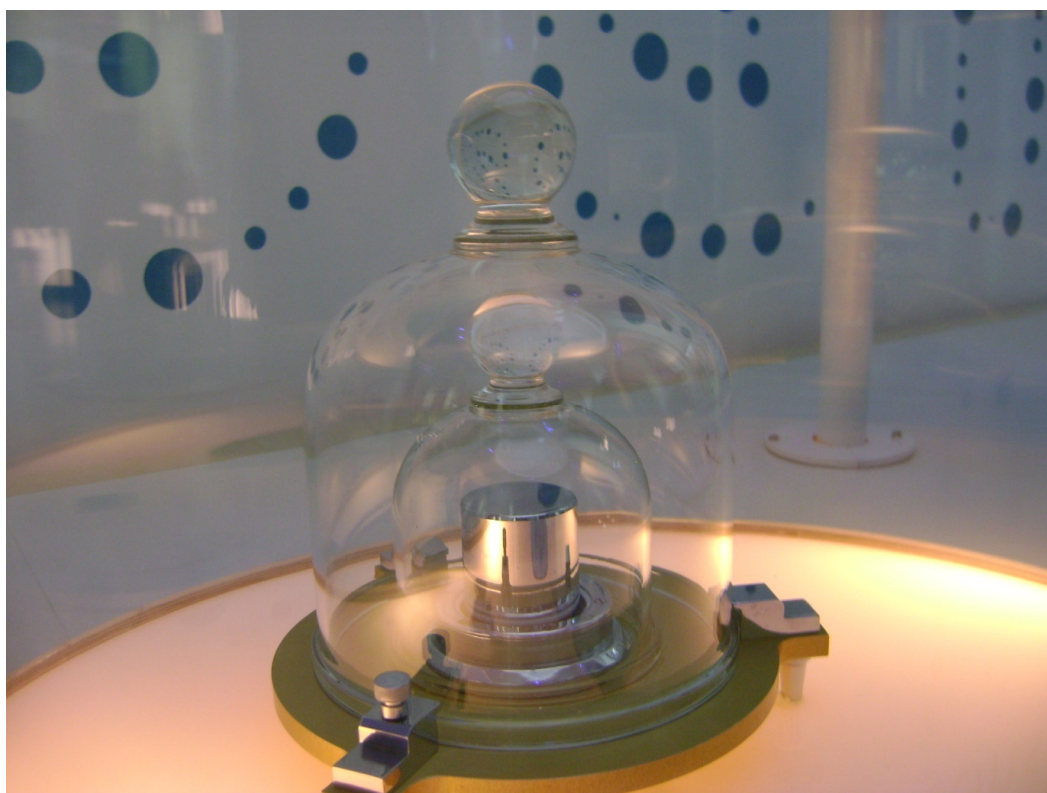
## Dlaczego nowy kilogram jest lepszy? O rewolucji w międzynarodowym układzie jednostek SI i redefinicji wzorca masy.

dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. UTH Radom

University of Technology and Humanities in Radom, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Physics, Stasieckiego 54, 26-600 Radom, Poland, [t.szumiata@uthrad.pl](mailto:t.szumiata@uthrad.pl)

### Dlaczego stary wzorzec masy jest zbyt stary ?

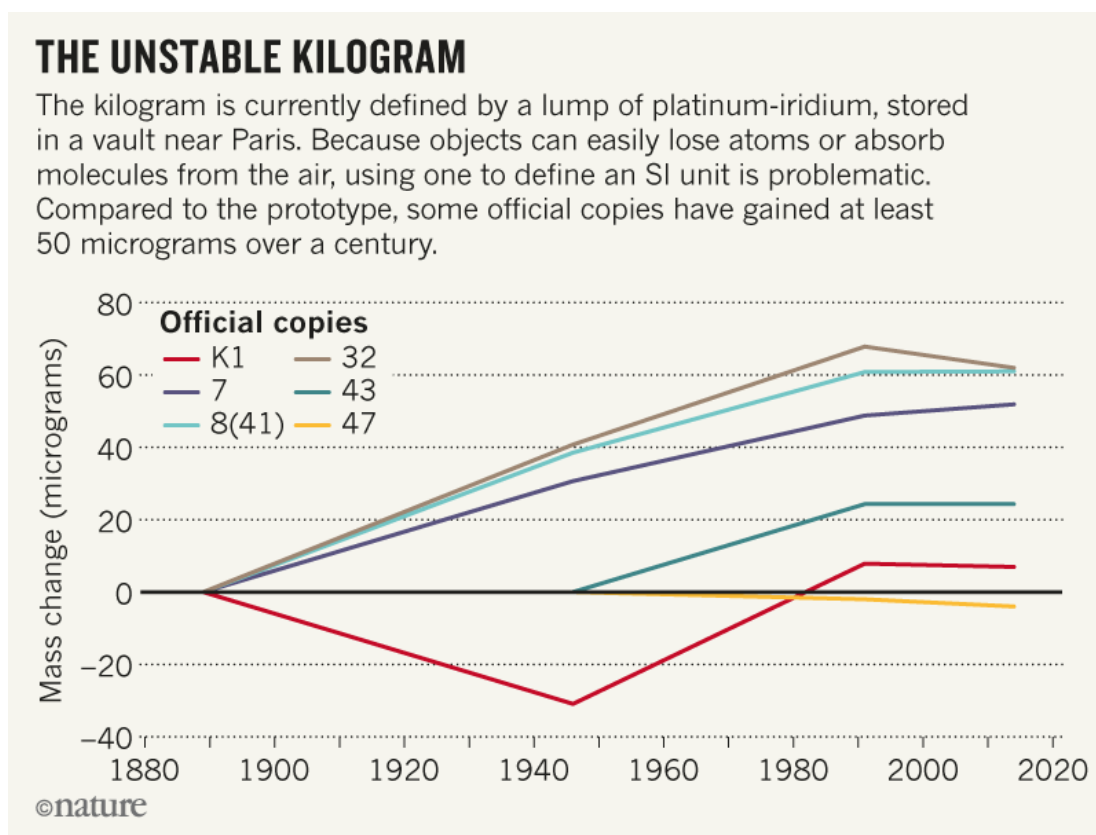
Wzorzec kilograma, jako ostatni w całym międzynarodowym układzie miar SI, opierał się na artefakcie. Był nim walec z platyny i irydu (90 % Pt i 10 % Ir) o wysokości równej średnicy wynoszącej ok. 39 mm. Nadano mu dostojną nazwę „*Le Grand K*” („Wielki K”). Wzorzec ten przechowywany był w Międzynarodowym Biurze Miar BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) w Sèvres pod Paryżem i obowiązywał od września 1889 po decyzji I Generalnej Konferencji Miar (*Conférence Générale des Poids et Mesures*, CGPM). Przez dziesięciolecia rozwijała się nauka i technologia rewolucjonizując metrologię różnych wielkości fizycznych, ale wzorzec kilograma pozostawał bez zmian. Brakowało racjonalnych pomysłów na zmiany wzorca masy, jednak w końcu okazało się, że *Le Grand K* zaczął wykazywać odmienne trendy długoczasowych zmian masy w stosunku do innych kopii porównawczych. Przyczyną tych zmian były trudne do monitorowania zjawiska utraty lub absorpcji atomów na powierzchni poszczególnych wzorców.



Rys. 1. Replika dotychczasowego międzynarodowego wzorca masy (Le Grand K) w Sèvres pod Paryżem.

[https://en.wikipedia.org/wiki/International\\_Prototype\\_of\\_the\\_Kilogram#/media/File:Prototype\\_kilogram\\_replica.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/International_Prototype_of_the_Kilogram#/media/File:Prototype_kilogram_replica.JPG)

Jak podało najbardziej prestiżowe czasopismo naukowe na świecie, NATURE [1], na przestrzeni stulecia różnica masy pomiędzy nadrzędnym wzorcem (Le Grand K) a kopiami referencyjnymi wyniosła aż 50 mikrogramów (Rys. 2).



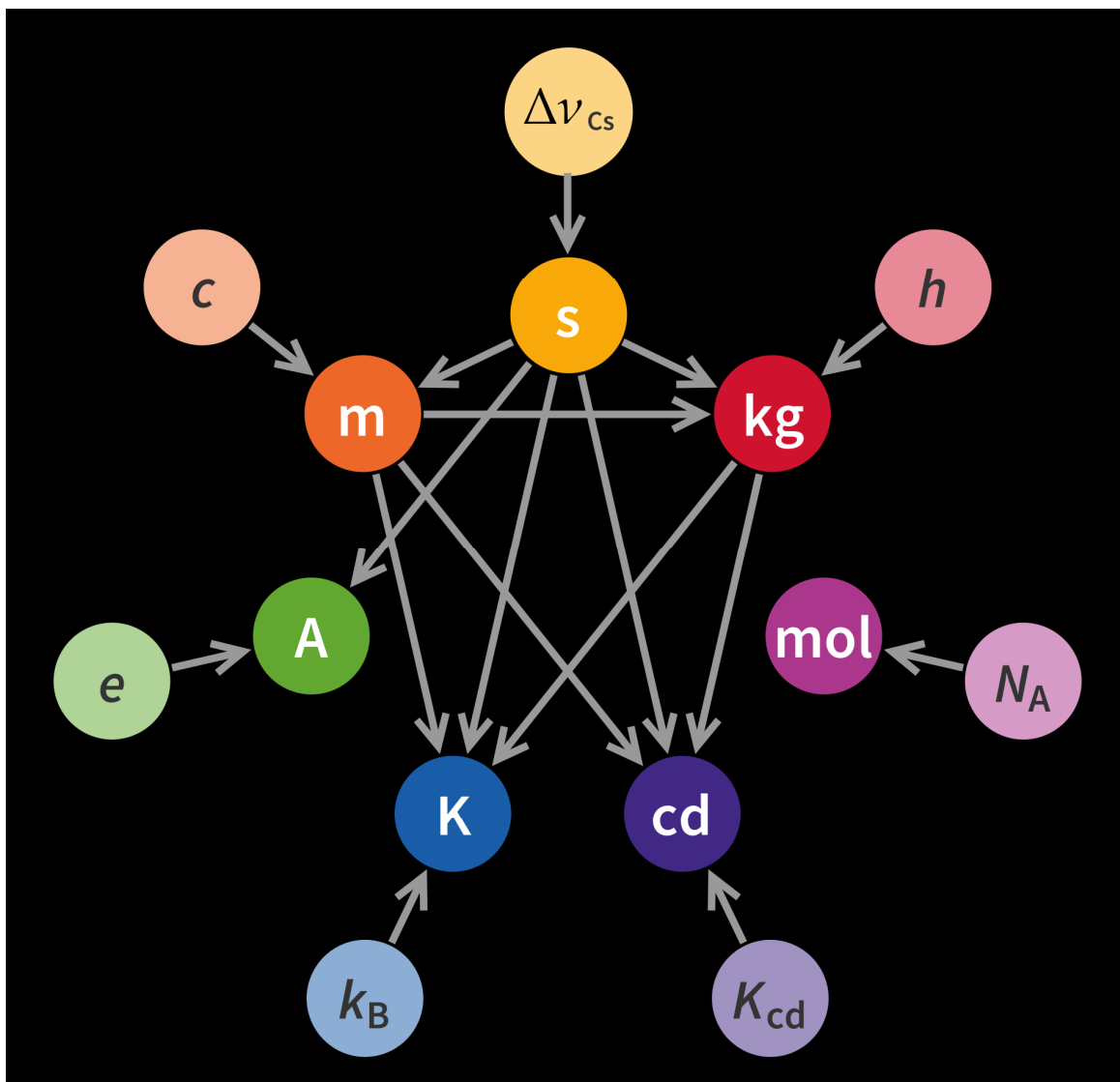
Rys. 2. Zmiany długoczasowe masy wtórnych wzorców międzynarodowych i narodowych w stosunku do nadrzędnego wzorca masy (Le Grand K) opublikowane w NATURE [1].  
<https://www.nature.com/articles/d41586-018-07424-8>

Stanowiło to poważny sygnał ostrzegawczy, ale zarazem i silną motywację do pracy nad innowacyjnym wzorcem kilograma, opartym nie na obiekcie materialnym lecz na zjawiskach i stałych fizycznych. Pierwsze rekomendacje w tym zakresie sformułowała 23. Generalna Konferencja Miar CGPM w 2007 roku oraz CCM BIPM (*Consultative Committee for Mass and Related Quantities*) w 2010 roku. Jednak prawdziwą rewolucję w metrologii masy i całym układzie miar SI przyniósł rok 2018 i 2019.



## Na czym polega rewolucja w międzynarodowym układzie jednostek SI?

Przedstawiciele narodowych instytucji metrologicznych z całego świata uczestniczący w 26 *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) w Wersalu jesienią 2018 roku zdecydowali w demokratycznym głosowaniu, że układ SI zostanie oparty na ustalonych wartościach liczbowych zbioru siedmiu stałych fizycznych, na podstawie których zostaną wyprowadzone definicje siedmiu jednostek podstawowych SI (Rys. 3). Niniejsza zmiana uprawomocniła się 20 maja 2019 roku.



Rys. 3. Relacje między fundamentalnymi stałymi fizycznymi a podstawowymi jednostkami układu SI po redefinicji.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/2019\\_redefinition\\_of\\_the\\_SI\\_base\\_units#/media/File:Unit\\_relations\\_in\\_the\\_new\\_SI.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/2019_redefinition_of_the_SI_base_units#/media/File:Unit_relations_in_the_new_SI.svg)

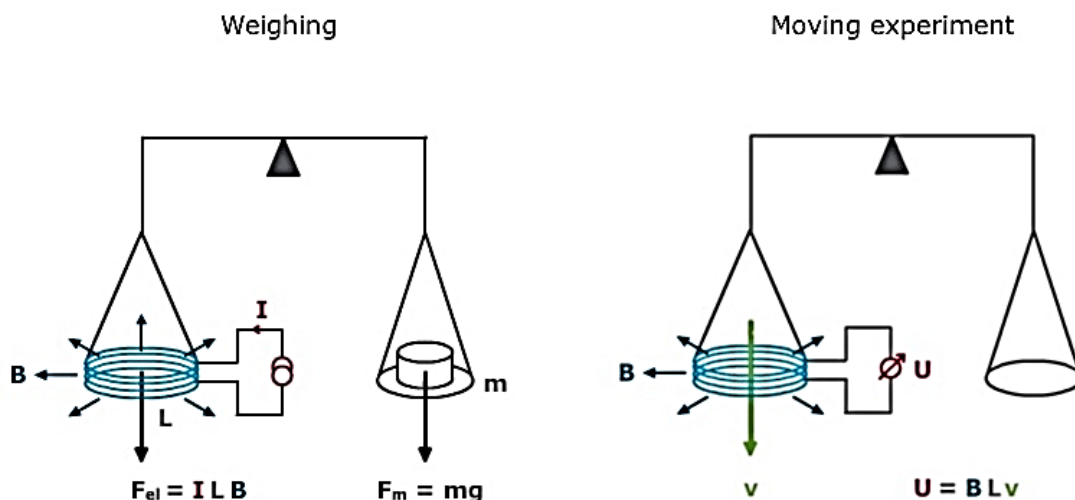
W zredefiniowanym układzie SI nie narzuca się konkretnych realizacji wzorców jednostek, ale wymaga się, by po ich wprowadzeniu podstawowe stałe fizyczne przyjmowały w pomiarach wartości możliwie zbliżone do przyjętych ogólnie i całkowicie ustalonych wartości definicyjnych, przy czym:

- częstotliwość nadsubtelnego przejścia w atomach cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  wynosi 9 192 631 770 Hz,
- prędkość światła w próżni  $c$  wynosi 299 792 458 m/s,
- stała Plancka  $h$  wynosi  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J·s,
- ładunek elementarny  $e$  wynosi  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C,
- stała Boltzmanna  $k$  wynosi  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  J/K,
- stała Avogadra  $N_A$  wynosi  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , wynosi 683 lm/W.

Jednostka masy została umownie powiązana ze stałą Plancka  $h$  (która jest podstawową stałą fizyki kwantowej), jednak w rzeczywistości konieczne było odniesienie jej również do dwóch innych stałych (prędkości światła  $c$  oraz częstości  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  cezowego zegara atomowego). Formalnie nowa definicja kilograma brzmi: „Kilogram, oznaczenie kg, jest to jednostka masy w SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka  $h$ , wynoszącej  $6,62607015 \cdot 10^{-34}$ , wyrażonej w jednostce J·s, która jest równa  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą  $c$  i  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”.

## Co to jest i jak działa waga Watta-Kibble’a ?

Światowa społeczność metrologii masy wybrała spośród kilku rozważanych realizacji nowego wzorca masy tzw. wagę Watta-Kibble’a [2] [Davidson]. Nazwa została nadana na cześć wynalazcy, Bryana Kibble'a z brytyjskiego National Physical Laboratory (NPL), który opracował pierwszą koncepcję już w 1975 roku (wówczas używając nazwy waga Watta). Jak każda współczesna waga laboratoryjna, jest ona zaprojektowana tak, by równoważyć ciężar masy testowej siłą elektrodynamiczną wytworzoną, przez prąd elektryczny przepływający przez cewkę znajdującą się w zewnętrznym polu magnetycznym. Jego źródłem jest obwód magnetyczny złożony m.in. z silnych magnesów stałych lub z nieruchomego elektromagnesu. Ruchoma cewka, po przepuszczeniu przez nią prądu, staje się elektromagnesem siłownika o sile udźwigu proporcjonalnej do wartości zewnętrznego pola magnetycznego i natężenia prądu elektrycznego, którego wartość jest regulowana. Waga Watta-Kibble’a pracuje w dwóch trybach: w statycznym trybie ważenia i w dynamicznym trybie kalibracji (Rys. 4).



© The University of Waikato Te Whare Wānanga o Waikato | [www.sciencelearn.org.nz](http://www.sciencelearn.org.nz)

Rys. 4. Dwa tryby pracy wagi Watta-Kibble'a: tryb ważenia ("Weighing") i dynamiczny tryb kalibracji ("Moving experiment"). <https://www.sciencelearn.org.nz/images/2288-weighing-experiment>

### Tryb ważenia (tryb siły)

W tym trybie masę testową umieszcza się na szalce przymocowanej do cewki. Masa wywiera siłę skierowaną w dół, będącą jego ciężarem równym iloczynowi masy ( $m$ ) i lokalnego przyspieszenia grawitacyjnego ( $g$ ). Prąd przepuszczany przez cewkę jest tak regulowany, żeby siła elektrodynamiczna skierowana w górę dokładnie zrównoważyła siłę ciężkości. Gdy system osiągnie równowagę, rejestrowana jest wartość prądu. Siła elektrodynamiczna jest określona prostym równaniem  $F = I \cdot B \cdot L$ , gdzie  $I$  to natężenie prądu,  $B$  to indukcja pola magnetycznego, a  $L$  to długość drutu cewki. W stanie równowagi wartość siły  $F$  jest równa ciężarowi masy testowej  $m \cdot g$ .

Niestety te proste relacje nie wystarczają do realizacji wzorca masy, ponieważ wartość iloczynu  $B \cdot L$  jest niezwykle trudna do bezpośredniego pomiaru z niezbędną dokładnością. Jednakże fizyka oferuje rozwiązanie tego problemu poprzez zastosowanie prawa indukcji Faradaya, które przewiduje powstawanie napięcia elektrycznego w przewodniku, gdy zmienia się strumień pola magnetycznego. Będzie ono dokładnie proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego, prędkości cewki względem magnesu i długości jej uzwojenia. To jest podstawowa motywacja do zrealizowania drugiego trybu pracy wagi Watta-Kibble'a.

### Tryb kalibracji (tryb prędkości)

W tym przypadku masa testowa jest usuwana z wagi, a prąd doprowadzany przez cewkę jest wyłączany. Cewka jest następnie poruszana w polu magnetycznym z precyzyjnie kontrolowaną, stałą prędkością  $v$ . Mierzone jest powstające wówczas napięcie indukowane. Jego wartość z prawa indukcji Faraday'a wynosi  $V = v \cdot B \cdot L$ . Kiedy to równanie zostanie połączone z formułą  $m \cdot g = I \cdot B \cdot L$  wynikającą z równowagi sił w trybie ważenia, to wyeliminowane zostaną nieznane wielkości  $B$  oraz  $L$  i otrzymamy zależność  $I \cdot V = m \cdot g \cdot v$ , co sugeruje, że gdybyśmy w modzie kalibracji nie zdjęli masy i nie wyłączyli prądu, to, zgodnie z oczekiwaniami, moc elektryczna równałaby się mocy mechanicznej. Jako że obie wielkości wyraża się w watach pierwotną nazwą opisywanego urządzenia była „Waga Watta”. Jednakże najważniejszym, praktycznym wnioskiem, wynikającym z ostatniego równania, jest możliwość wyznaczenia masy:

$$m = I \cdot V / g \cdot v.$$

Wszystkie wielkości po prawej stronie tego równania można określić z niezwykłą precyzją: prąd i napięcie za pomocą kwantowych efektów elektrycznych, lokalne pole grawitacyjne - za pomocą ultraczułego urządzenia zwanego grawimetrem absolutnym, a prędkość cewki - poprzez śledzenie jej ruchu przy pomocy interferometrii laserowej (oferującej precyzję pomiaru położenia cewki z dokładnością do ułamka długości fali światła laserowego).

### Jak fizyka kwantowa i stała Plancka zrewolucjonizowała metrologię masy?

Skoro realizacja nowego wzorca masy sprowadza się do pomiarów prostych wielkości elektrycznych, oraz prędkości i przyspieszenia ziemskiego, to dlaczego temu wzorcowi przypisuje się w zredefiniowanym układzie SI związek ze stałą Plancka  $h$ ? Generalnie stała Plancka została wprowadzona na początku XX wieku w celu prawidłowego opisu najmniejszych porcji energii  $E$  promieniowania, czyli fotonów, poruszających się z prędkością światła  $c$ . Wzór Plancka przewiduje, że kwant energii wynosi  $E = h \cdot \nu$ , gdzie  $\nu$  to częstotliwość fali promieniowania. Gdyby foton posiadał masę, to na podstawie najbardziej znanego na świecie wzoru Einsteina o równoważności masy i energii  $E = m \cdot c^2$ , można by w prosty sposób powiązać masę ze stałą Plancka a metrologię masy sprowadzić do ultra precyzyjnych pomiarów czasu (częstotliwości).

Niestety fotony są cząstkami bezmasowymi, więc słynna formuła Einsteina ich nie dotyczy. Masą obdarzone są natomiast elektrony, będące elementarnymi nośnikami ładunku elektrycznego, odpowiedzialnymi za wszystkie zjawiska elektromagnetyczne zarówno makroskopowe jak i w skali atomowej, gdzie obowiązują prawa fizyki kwantowej. Prąd w wadze Watta-Kibble jest mierzony za pomocą rezystora wzorcowego w obwodzie. Wartość oporu elektrycznego można określić z precyzją około 1 część na miliard odnosząc się do tzw. stałej von Klitzinga, która opisuje elementarny skok (kwant) oporu poprzecznego występujący przy zmianie pola magnetycznego w zjawisku znanym jako kwantowy efekt Halla.



Napięcie elektryczne jest mierzone z dokładnością 1 części na 10 miliardów za pomocą tzw. efektu Josephsona, które przewiduje metrologicznie ścisłą proporcjonalność pomiędzy wartością napięcia przyłożonego do złącza nadprzewodnik-izolator-nadprzewodnik (złącze Josephsona) a częstotliwością generowanego promieniowania elektromagnetycznego. W praktyce efekt Josephsona stanowi światowym standard kwantyfikacji napięcia, a kwantowy efekt Halla jest światowym wzorcem oporu elektrycznego, chociaż ani volt ani om nie są podstawowymi jednostkami układu SI. Samodzielne Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu Głównego Urzędu Miar w Warszawie od wielu lat dysponuje profesjonalnymi realizacjami obydwu wzorców (Rys. 5).



Rys. 5. Państwowe wzorce jednostki miary stałego napięcia elektrycznego (zdjęcie lewe: złącza Josepsona z instalacją kriogeniczną) oraz rezystancji (zdjęcia prawe: układ kriogeniczny do realizacji kwantowego efektu Halla) funkcjonujące w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie od, odpowiednio, 2003 i 2016 roku. ([www.gum.gov.pl](http://www.gum.gov.pl))

Łącząc uprzednio wyprowadzony wzór do wyliczania masy testowanej w wadze Watta-Kibble'a ze wzorami opisującymi kwantowy efekt Halla i efekt Josephsona, otrzymujemy ścisłą proporcjonalność pomiędzy wartością masy  $m$ , a wartością stałej Plancka  $h$ :

$$m = h * [n^2 / \rho] * [f_f * f_c] / [4 * v * g],$$

przy czym:

$n$  oznacza liczbę złączy Josephsona we wzorcu napięcia,

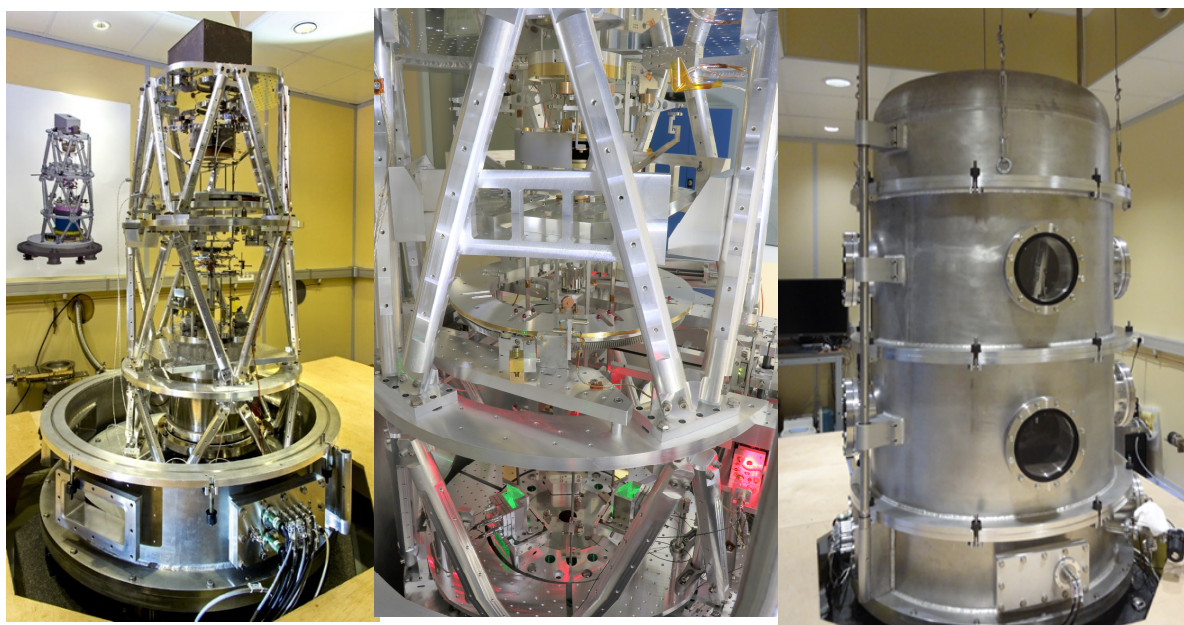
$\rho$  – numer „schodka” oporu w kwantowym efekcie Halla,

$f_f$  - to częstotliwość promieniowania ze złącza Josephsona wykorzystywanego do pomiaru napięcia na oporze wzorcowym w obwodzie wagi w trybie ważenia (*force mode*), a

$f_c$  - to analogiczna częstotliwość odpowiadająca pomiarowi napięcia indukującego się w cewce wagi pracującej w trybie dynamicznym (*calibration mode*).

## Jak wygląda realizacja wagi Watta-Kibble'a w BIPM (Sèvres) ?

Konstruktorzy wagi Watta-Kibble'a w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres pod Paryżem (*Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM) zastosowali osiową, jednoramienną geometrię wagi Watta-Kibble'a (Rys. 6), co upraszcza konstrukcję, ale powoduje problemy z mechanicznym zrównoważeniem układu - w porównaniu do klasycznej, dwuramiennej geometrii wag mechanicznych. W celu utrzymania ciężaru ruchomego elementu osiowego wagi użyto kompensacyjnego komparatora masy. Geometria jednoosiowa umożliwia łatwe umieszczenie wagi w komorze próżniowej, przy czym zapewnienie próżni jest warunkiem koniecznym do prawidłowego funkcjonowania Watta-Kibble'a zarówno w trybie ważenia jak i kalibracji.



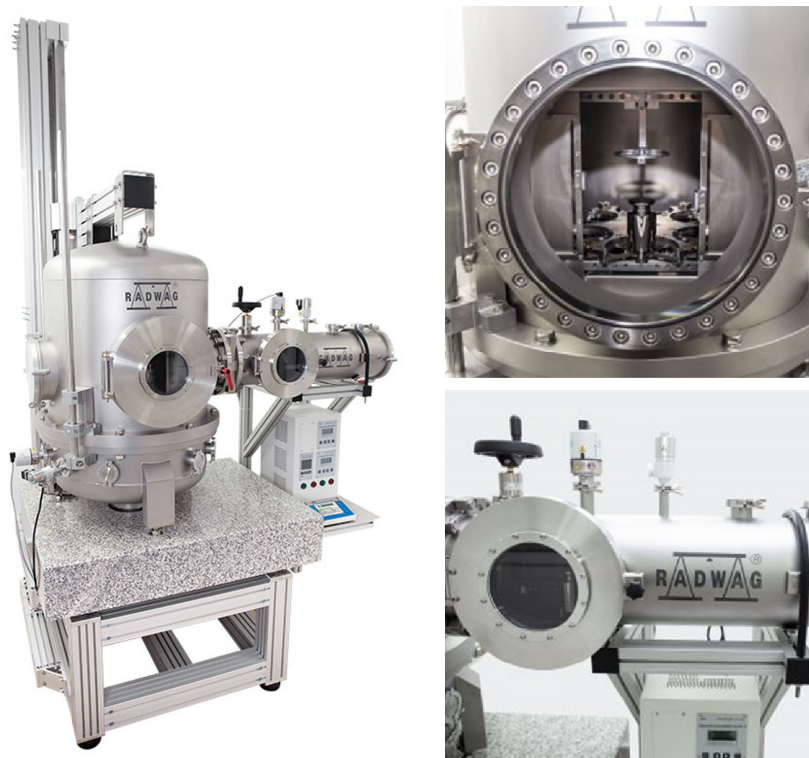
Rys. 6. Realizacja wagi Watta-Kibble'a w BIPM (Sèvres)  
<https://www.bipm.org/en/mass-metrology/kibble-balance>

Waga Watta-Kibble'a w BIPM odznacza się kilkoma innowacyjnymi cechami. Jedną z nich jest możliwość pracy symultanicznej, łączącej w sobie elementy trybu ważenia i kalibracji. Kolejnym wyróżnikiem konstrukcji jest zoptymalizowany obwód magnetyczny, wykorzystujący dwa wysokiej klasy magnesy samarowo-kobaltowe oraz jarzmo ze stopu Fe-Ni (bardziej miękkiego magnetycznie niż stal). Dzięki niemu osiągnięto dużą jednorodność radialną pola magnetycznego w szczelinie, jego relatywnie wysoką wartość (do 0,5 T) oraz perfekcyjną stabilność termiczną.

Konstruktorzy testują też wykorzystanie siłowników elektrostatycznych do poruszania cewką (zamiast konwencjonalnych, krokowych silniki elektromagnetycznych). Dzięki temu możliwe będzie uzyskanie wyjątkowej precyzji ruchu cewki i wyeliminowanie wpływu pól magnetycznych. Zaprojektowano również bardzo precyzyjny układ optyczny do śledzenia położenia i prędkości cewki. Wykorzystano do tego celu najbardziej zaawansowane interferometry heterodynowe oraz lasery o wysokiej stabilności emisji. Wagi Watta-Kibble'a zostały skonstruowane w wielu narodowych instytutach metrologicznych na świecie, a obecnie BIPM koordynuje nową fazę procesu dyseminacji kilograma poprzez proces komparacji międzylaboratoryjnych [3].

## Jak oferta firmy RADWAG ułatwia transfer wzorców masy po redefinicji?

Wprowadzenie nowego wzorca masy w postaci wagi Watta-Kibble'a nie wyeliminowało potrzeby zastosowania materialnych artefaktów, jako wzorców wtórnych i odważników kalibracyjnych. Wzrosły jednak wymogi odnoszące się do zapewnienia spójności masy w procesie transferu wzorców i ich dyseminacji. Firma RADWAG wychodząc naprzeciw temu zapotrzebowaniu skonstruowała automatyczny, próżniowy komparator masy AVK-1000 (Rys. 7.) o obciążeniu maksymalnym 1 kg, z działką elementarną 0,1  $\mu\text{g}$ . Urządzenie oferuje prowadzenie pomiarów w próżni o wartości  $10^{-6}$  mbar lub w atmosferze gazów szlachetnych i neutralnych. Próżnia lub zapewnienie stałego ciśnienia eliminuje błędy komparacji masy związane z niedoskonałym kompensowaniem siły wyporu. Urządzenie przeznaczone jest do komparacji tradycyjnych, cylindrycznych wzorców stalowych (o średnicy 22-95 mm) jak i kul krzemowych (o średnicy 40-100 mm), które były brane pod uwagę jako alternatywne (wobec wagi Watta-Kibble'a) wzorce masy po redefinicji układu SI, a ostatecznie zostały uznane za najlepszy, praktyczny wzorzec gęstości. Komparator próżniowy AVK-1000 wyposażony jest w system przenoszenia wzorca LOAD LOCK. Dzięki niemu możliwa jest wymiana lub dołożenie artefaktów bez konieczności zmiany atmosfery wewnątrz komory głównej komparatora, co skraca czas pomiarów o 90%. Automatyczny próżniowy komparator masy AVK-1000 pracuje od kilku lat w Samodzielnym Laboratorium Masy Głównego Urzędu Miar w Warszawie. Precyzja pomiarów, jaką oferuje to urządzenie oraz zastosowane w nim rozwiązania technologiczne mogą stanowić w przyszłości dobry punkt wyjścia do realizacji polskiego projektu wagi Watta-Kibble'a [4].



Rys. 7. Automatyczny próżniowy komparator masy AVK-1000 produkcji firmy RADWAG zainstalowany w Samodzielnym Laboratorium Masyw Głównego Urzędu Miar w Warszawie.

<https://radwag.com/pl/automatyczny-prozniowy-komparator-masy-avk-1000,w1,D80,110-103#1>



## W jaki sposób po redefinicji układu SI firma RADWAG stała się światowym liderem metrologii masy w zakresie nano ?

RADWAG, jako pierwsza firma na świecie, wprowadziła na rynek automatyczny nano komparator masy o symbolu NANO.AK-4/500N (Rys. 8) o rekordowej dokładności odczytu 10 ng i udźwigu maksymalnym 510 mg [5]. Komparator ten cechuje się znacznie lepszymi charakterystykami niż inne urządzenia tego typu dostępne na rynku i stanowi przełom w światowej metrologii masy. Ulepszenia siłownika i cewki [6] zminimalizowały wpływ warunków otoczenia na wyniki pomiarów, szczególnie w przypadku gradientu wilgotności powietrza. Odchylenie standardowe wyliczone na podstawie 20 powtórzonych cykli komparacji ABBA wyniosło 38 ng [6] w przypadku odważnika 2 mg. Jest to obecnie najlepsza dostępna w metrologii małych mas powtarzalność pomiarów. Wyniki te potwierdziły jednoznacznie, że innowacyjna konstrukcja komparatora masy NANO.AK-4/500N umożliwia kalibrowanie odważników z dokładnością nanogramową.



Rys. 8. Pierwszy na świecie automatyczny nano komparator masy (NANO.AK-4/500N, RADWAG)  
<https://radwag.com/pl/automatyczny-nano-komparator-masy-nano-ak-4-500,w1,R6X,110-106#1>

Pojawienie się pierwszego na światowym rynku komparatora masy o rozdzielczości 10 ng pozwala na walidowanie materialnych wzorców masy do kalibracji mikrowag laboratoryjnych stosowanych w wielu gałęziach przemysłu, laboratoriach wzorcujących i w badaniach naukowych w ramach wielu różnych dyscyplin. Typowym obszarem zastosowań jest kalibracja mikrowag używanych w przemyśle farmaceutycznym do przygotowywania nowych receptur. Bardzo istotnym przykładem zastosowań są wszelkie badania fizyko-chemiczne materiałów (analitika chemiczna, spektroskopia), w których mierzone wielkości fizyczne i zawartości pierwiastków są odnoszone do precyzyjnie wyznaczonej masy. Szczególnie ważną kwestią jest kalibracja grawimetryczna mierników pyłu zawieszzonego PM10 i PM2.5 mająca kluczowe znaczenie w monitoringu środowiskowym. Innym obszarem zastosowań jest nowoczesny przemysł elektroniczny i mechatroniczny, gdzie szczególnie ważną kwestią staje się m.in. kalibracja mikro i nanosiłowników oraz sensorów.



Skonstruowany nano komparator wpisuje się w światowy system metrologii masy, który po rewolucyjnych zmianach układu SI z roku 2018 zaleca skonstruowanie niezależnego, niematerialnego wzorca na zakres małych mas [2,4,7] w postaci miniaturowej wagi Watta-Kibble'a.

#### Literatura:

- [1] E. Gibney, "Largest overhaul of scientific units since 1875 wins approval", *NATURE NEWS*, 16 November 2018, <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07424-8>
- [2] S. Schlamminger, D. Haddad, "The new International System of Units - The Kibble balance and the kilogram", *Comptes Rendus Physique* 20 (2019) 55-63, <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.006>
- [3] S. Davidson, M. Stock, "Beginning of a new phase of the dissemination of the kilogram", *Metrologia* 58 (2021) 033002 (4pp), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/abef9f>
- [4] T. Szumiata, M. Dobieszewski, A. Hantz, W. Wiśniewski, J. Szutkowski, A. Podgórn, M. Janeczko, "Analiza strategiczna polskiego projektu wagi Kibble'a", *METROLOGIA I PROBIERNICTWO, Biuletyn GUM* nr 1 (22)/2019, [https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Biuletyn/Artykuly/Analiza\\_strategiczna\\_polskiego\\_projektu\\_wagi\\_Kibble\\_a.pdf](https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Biuletyn/Artykuly/Analiza_strategiczna_polskiego_projektu_wagi_Kibble_a.pdf)
- [5] Broszura produktowa (2021) z oferty firmy RADWAG: "Automatyczny nano komparator masy NANO.AK-4/500", <https://radwag.com/pl/automatyczny-nano-komparator-masy-nano-ak-4-500,w1,R6X,110-106#4>
- [6] M. Solecki, T. Szumiata, M. Rucki, "A new design of an automatic mass comparator with the resolution of 10 ng for calibration of masses below 2 mg" (2021), artykuł wysłany do *Precision Engineering* (Elsevier)
- [7] L. Chao, F. Seifert, D. Haddad, J. Stirling, D. Newell, S. Schlamminger, "The design and development of a tabletop kibble balance at NIST", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68 (2019) 2176-2182, <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8672111>