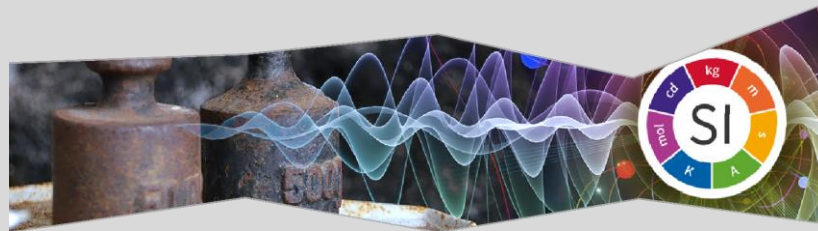


Redefinicja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI, nowy kilogram i nanometrologia masy



Główny
Urząd
Miar



dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. URad.

t.szumiata@uthrad.pl



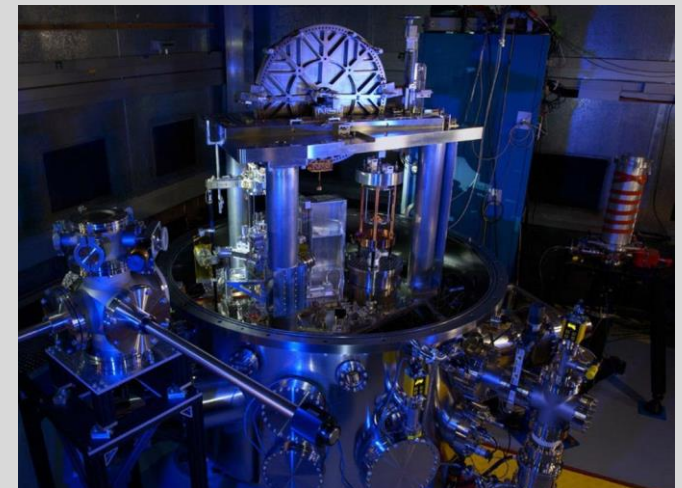
UNIwersytet RADOMSKI
im. Kazimierza Pułaskiego

Katedra Fizyki



Plan webinarium

- Początki metrologii
- Międzynarodowy układ jednostek SI
- Problemy ze wzorcem masy i redefinicja układu SI
- Zasada działania wagi Watta-Kibble'a
- Kwantowe wzorce wielkości elektrycznych
- Przegląd konstrukcji wag Watta-Kibble'a na świecie
- Wkład polskiego przemysłu w nowoczesną metrologię masy (zapewnienie spójności pomiarowej, nanometrologia)
- Stan polityki wobec metrologii masy w Polsce
- Obecne trendy w metrologii masy na świecie
- Alternatywne projekty
- Sztuczna Inteligencja w metrologii
- Wnioski



Metrologia w czasach antycznych

ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΥΣΕΙΟ ΘΑΣΟΥ



Fot. T. Szumiata, 2020



Τράπεζα μέτρησης υγρών. 3ος αι. μ.Χ.
Table de mesure de fluides. IIIe c. ap. J.-C.
Table of measuring fluids. 3rd c. AD.



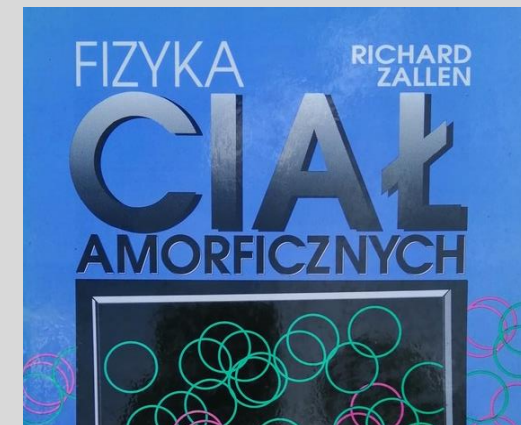
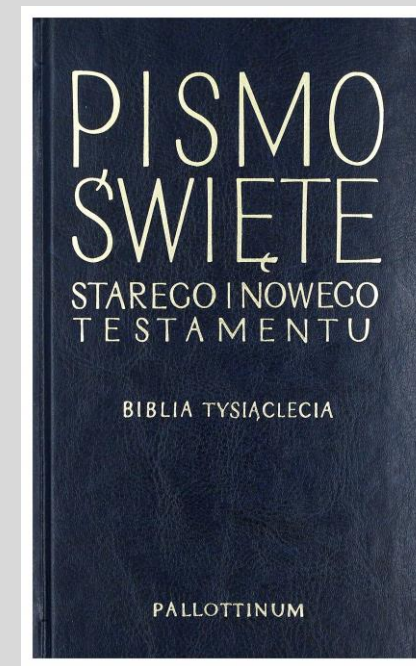
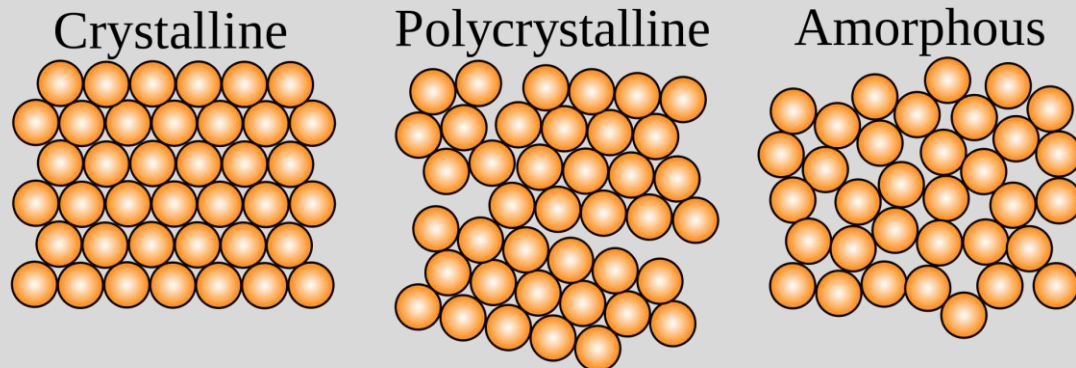
Metrologia w Biblii

Biblia Tysiąclecia

Ewangelia wg. św. Łukasza , Rozdział 6, werset 38:

**Dawajcie, a będzie wam dane;
miarę dobrą, natłoczoną, utrzesioną
i opływającą wsypią w zanadrza wasze.**

**Kwestia odmierzania materiałów sypkich
oraz gęstość materiałów amorficznych**

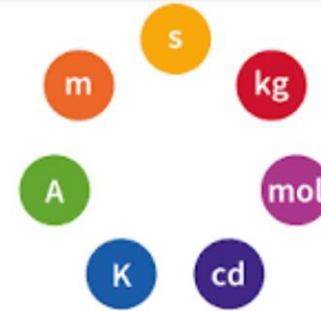


[Virginia Technical University]

**Specyfika wielkości mierzonej
oraz procedury pomiarowej
wpływa na wynik pomiaru !!!**

Międzynarodowy układ jednostek SI i historia wzorców

Układ SI, właściwie Międzynarodowy **Układ** Jednostek Miar (fr. *Système international d'unités*, **SI**) – znormalizowany **układ** jednostek miar zatwierdzony w 1960 (później modyfikowany) przez Generalną Konferencję Miar na XI Generalnej Konferencji Miar. Jest stworzony w oparciu o metryczny system miar.



- **Wzorce czasu (sekundy) były pierwotnie oparte na ruchu wirowym i obiegowym Ziemi. Od 1968 wzorzec czasu realizowany jest poprzez zegary atomowe. Jedna sekunda to czas trwania 9 192 631 770 cykli promieniowania odpowiadających przejściu między dwoma poziomami energii elektronów atomu cezu-133 w stanie podstawowym rozszczepionym nadsubtelnym oddziaływaniem z jądrem atomowym.**
- **Międzynarodowy wzorzec jednostki miary długości (do 1960) - 1 metr – był to podłużny element wykonany ze stopu platyny z irydem o długości zgodnej z wcześniejszymi wzorcami opartymi na obliczeniach astronomiczno-geodezyjnych. Potem wzorzec długości związany był z charakterystycznymi długościami fal promieniowania optycznego emitowanego przez różne atomy. Następnie wzorce długości oparto na najbardziej doniosłym postulacie Ogólnej i Szczególnej Teorii Względności Einsteina, że prędkość światła jest stała, a metr zdefiniowano jako 1983 roku metr został zdefiniowany jako odległość pokonywana przez światło w próżni w czasie 1/299 792 458 sekundy.**

O rewolucji w międzynarodowym układzie jednostek SI i redefinicji wzorca masy, czyli dlaczego nowy kilogram jest lepszy?

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 roku, na mocy decyzji I Generalnej Konferencji Miar (*Conférence Générale des Poids et Mesures*, CGPM).

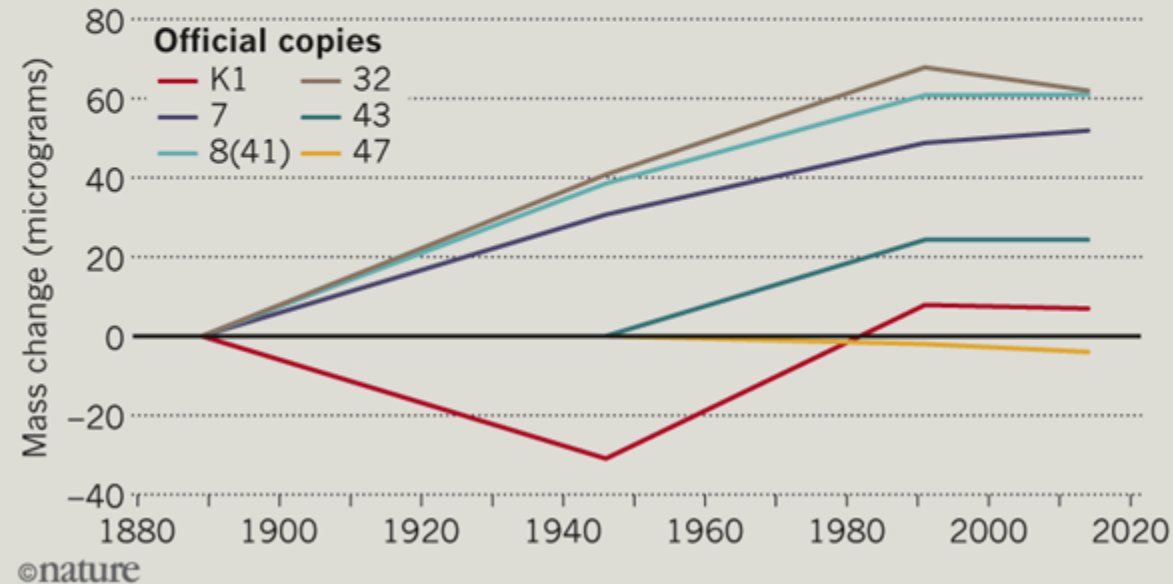
Przez dziesięciolecia nauka i technologia rozwijały się oraz rewolucjonizowały metrologię różnych wielkości fizycznych, ale wzorzec kilograma pozostawał bez zmian. Brakowało racjonalnych pomysłów na zmiany wzorca masy, jednak w końcu okazało się, że *Le Grand K* zaczął wykazywać odmienne trendy długoczasowych zmian masy w stosunku do kopii porównawczych. Przyczyną tych zmian były trudne do monitorowania zjawiska utraty lub absorpcji atomów na powierzchni poszczególnych wzorców.



Jak podało najbardziej prestiżowe czasopismo naukowe na świecie, NATURE, na przestrzeni stulecia różnica masy pomiędzy nadrzędnym wzorcem (*Le Grand K*) a kopiami referencyjnymi wyniosła **aż 50 mikrogramów**:

THE UNSTABLE KILOGRAM

The kilogram is currently defined by a lump of platinum-iridium, stored in a vault near Paris. Because objects can easily lose atoms or absorb molecules from the air, using one to define an SI unit is problematic. Compared to the prototype, some official copies have gained at least 50 micrograms over a century.

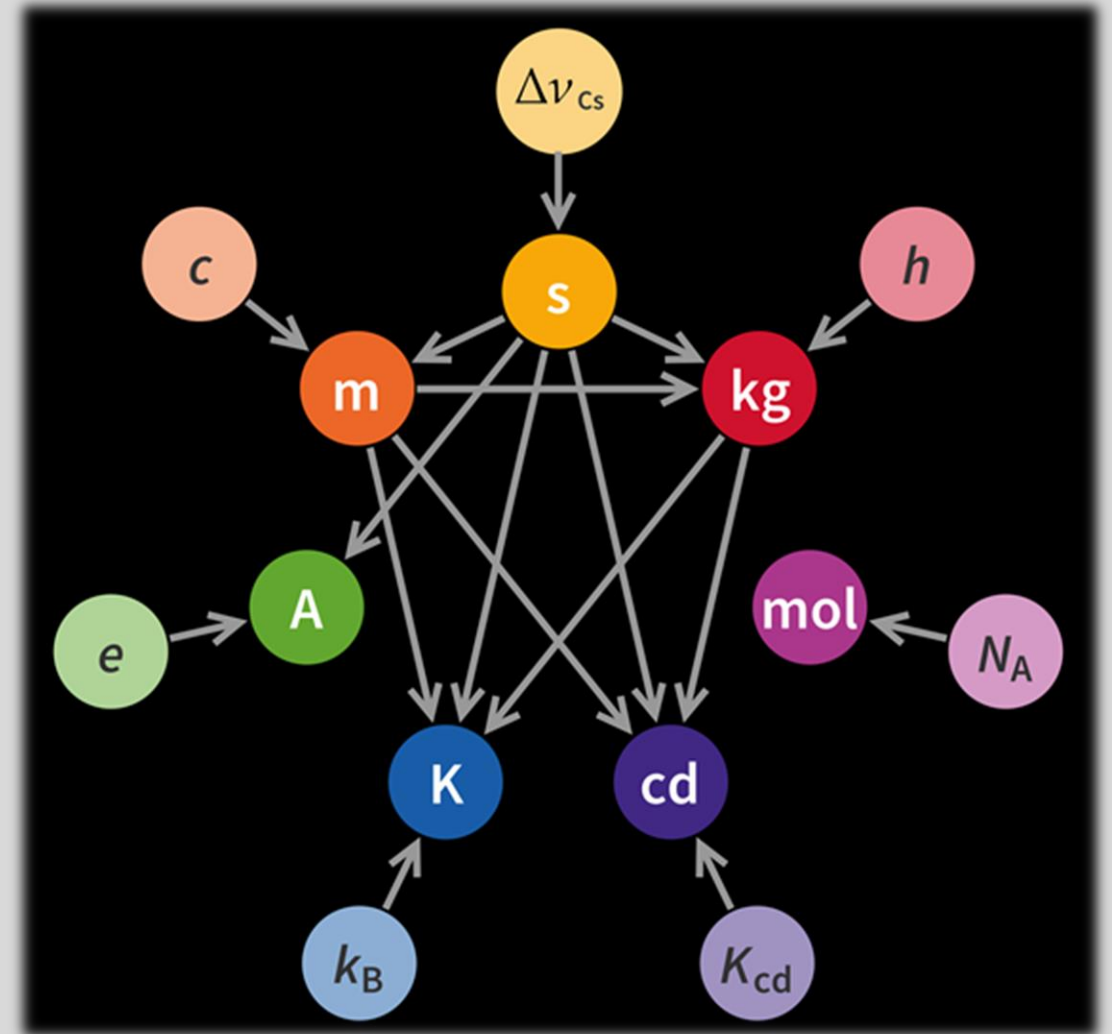


Stanowiło to poważny sygnał ostrzegawczy, ale zarazem silną motywację do pracy nad innowacyjnym wzorcem kilograma opartym nie na obiekcie materialnym, lecz na zjawiskach i stałych fizycznych. Pierwsze rekomendacje w tym zakresie sformułowała 23. Generalna Konferencja Miar CGPM w 2007 roku i CCM BIPM (*Consultative Committee for Mass and Related Quantities*) w 2010 roku. Jednak prawdziwą rewolucję w metrologii masy i całym układzie miar SI przyniosły lata 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 (13-16 listopada) roku zdecydowali w demokratycznym głosowaniu, że układ SI zostanie oparty na ustalonych wartościach liczbowych zbioru siedmiu stałych fizycznych, na podstawie których będą wyprowadzone definicje siedmiu jednostek podstawowych SI. Niniejsza zmiana uprawomocniła się 20 maja 2019 roku.



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 odgórnie 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 Boltzmann k wynosi $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- stała Avogadra N_A wynosi $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{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 i częstotliwości $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”.

Jak fizyka kwantowa i stała Plancka zrewolucjonizowała metrologię masy?

Realizacja nowego wzorca masy sprowadza się do pomiarów wielkości elektrycznych oraz prędkości i przyspieszenia ziemskiego, a zatem dlaczego temu wzorcowi przypisuje się w zredefiniowanym układzie SI związek ze stałą Plancka h ?

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:

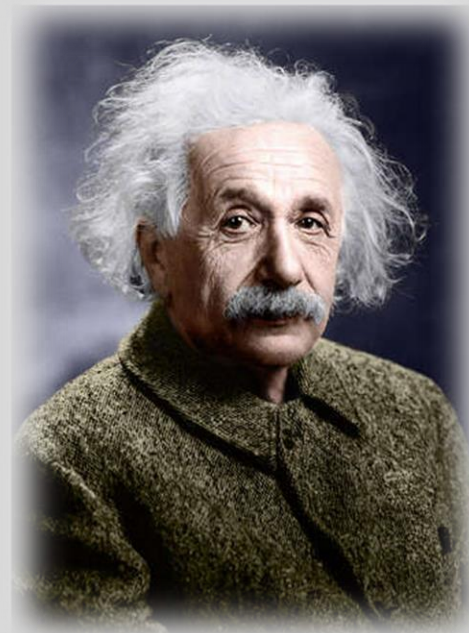
$$E = h \cdot \nu ,$$

gdzie ν to częstotliwość fali promieniowania.

Gdyby foton posiadał masę, to na podstawie najbardziej znanego na świecie wzoru Einsteina o równoważności masy i energii

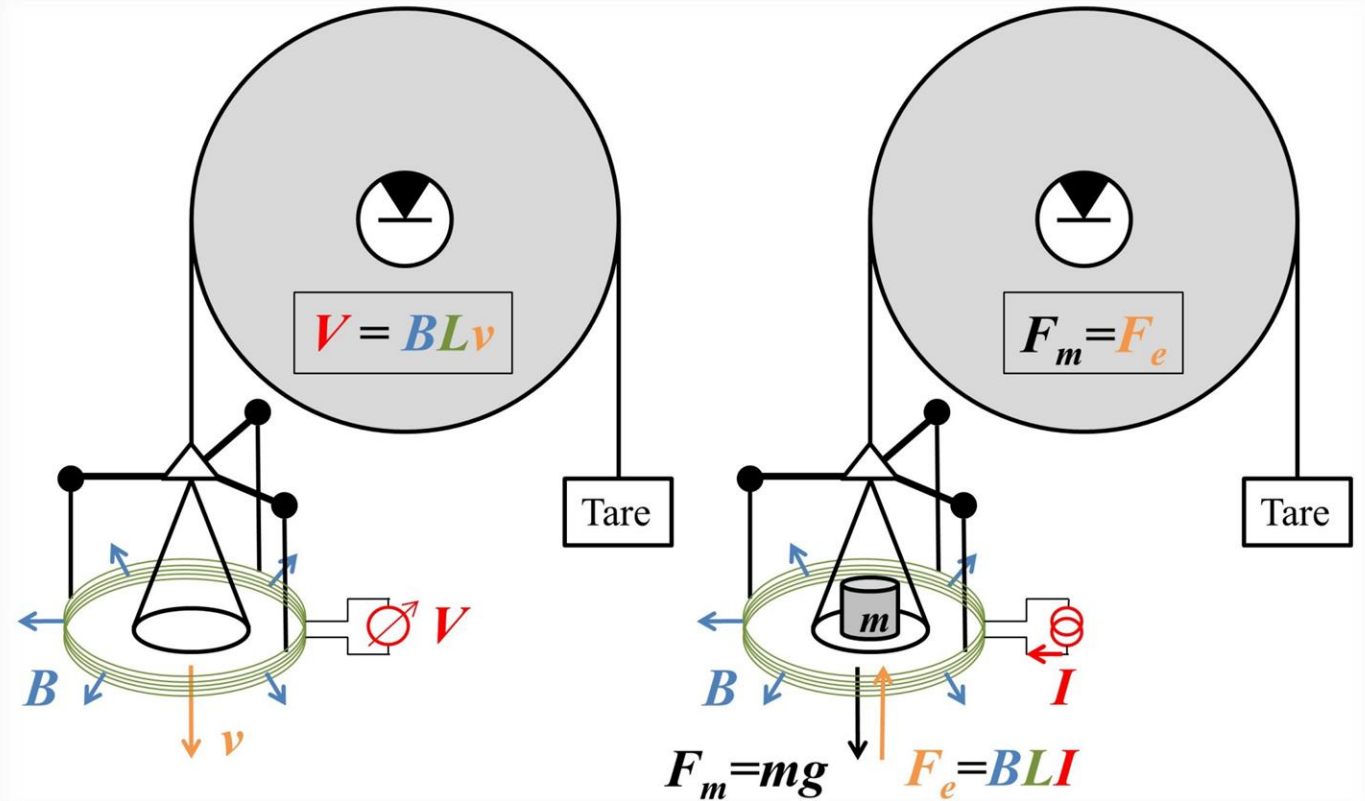
$$E = m \cdot c^2 ,$$

można by w prosty sposób powiązać masę ze stałą Plancka, a metrologię masy sprowadzić do ultraprecyzyjnych pomiarów czasu (częstotliwości). Niestety fotony są cząstkami bezmasowymi, więc słynna formuła Einsteina ich nie dotyczy.



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. Nazwa została nadana na cześć wynalazcy, Bryana Kibble'a z brytyjskiego National Physical Laboratory (NPL), który opracował pierwszą koncepcję już w 1975 roku (wówczas używał 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:

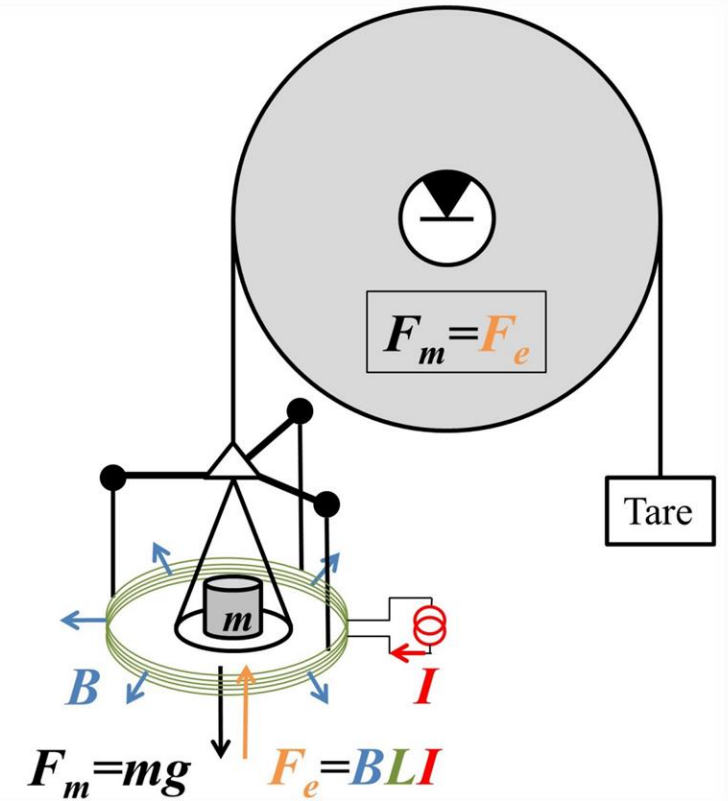
- w statycznym trybie ważenia
- i w dynamicznym trybie autokalibracji.

Tryb ważenia (tryb siły, tryb statyczny)

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 płynący 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, tryb dynamiczny)

Cewka jest następnie poruszana w polu magnetycznym z precyzyjnie kontrolowaną, stałą prędkością v . Mierzone jest napięcie indukowane. Jego wartość z prawa indukcji Faradaya wynosi

$$U = v \cdot B \cdot L.$$

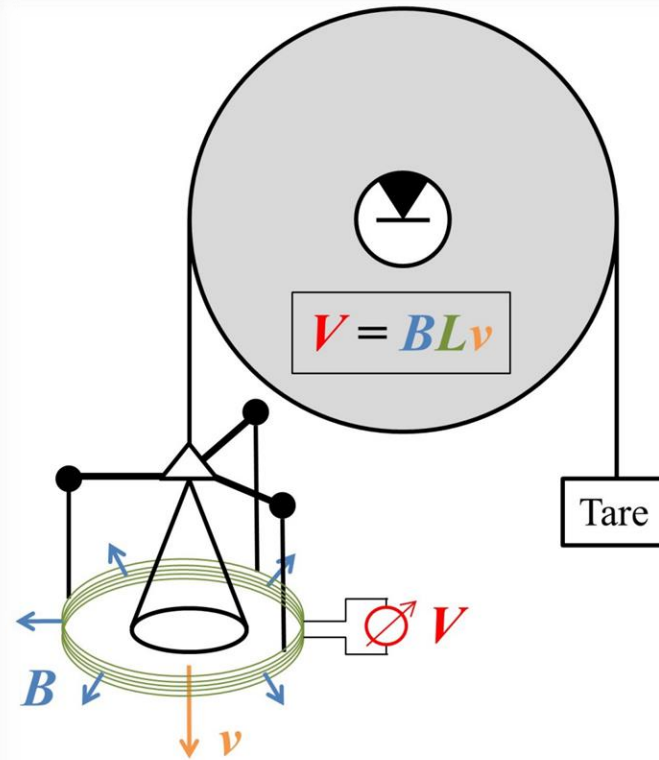
Równanie to łączymy z poprzednią formułą

$$m \cdot g = I \cdot B \cdot L$$

i otrzymamy zależność:

$$I \cdot U = m \cdot g \cdot v ,$$

co sugeruje, że moc elektryczna równa się mocy mechanicznej i korzy się z watom (stąd pierwotna nazwa „waga Watta”). To jednak tylko zbieg okoliczności, bo w trybie kalibracyjnym prąd nie płynie).



A zatem wyznaczamy masę:

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

poprzez pomiar wielkości elektrycznych (I , U) oraz kinematycznych (g - grawimetrem absolutnym, v - interferometrem laserowym).

Masą obdarzone są 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'a jest mierzony za pomocą rezystora wzorcowego w obwodzie. Wartość oporu elektrycznego można określić z precyzją około 1 części 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 światowy standard kwantyfikacji napięcia, a kwantowy efekt Halla jest światowym wzorcem oporu elektrycznego, chociaż ani volt, ani om nie jest podstawową jednostką układu SI. Samodzielne Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu Głównego Urzędu Miar w Warszawie od wielu lat dysponuje profesjonalnymi realizacjami obydwu wzorców.

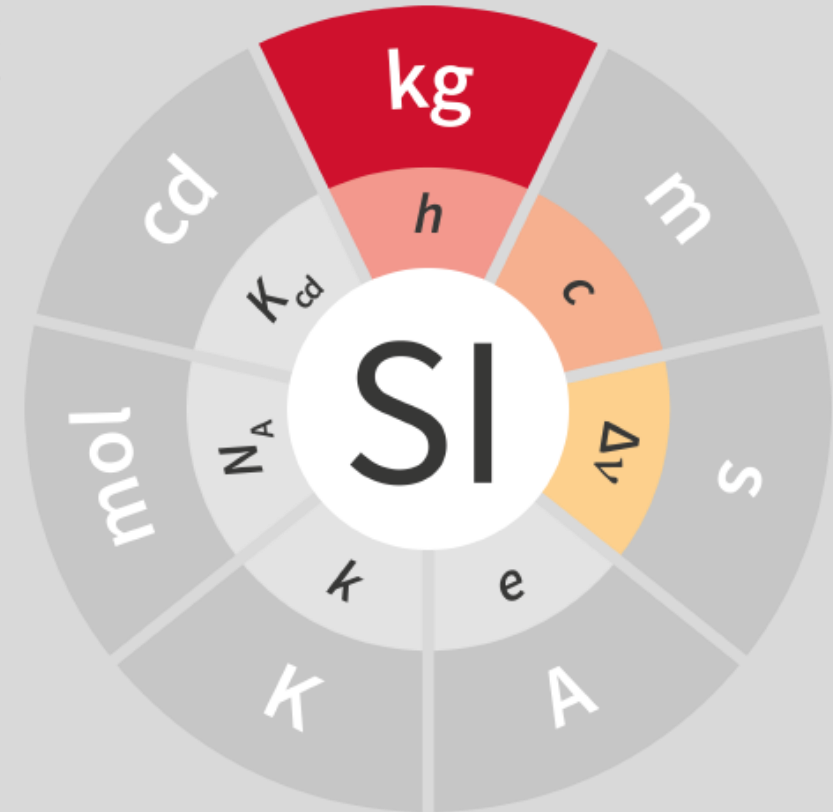


Związek między masą a stałą Plancka

Po połączeniu uprzednio wyprowadzonego wzoru 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 :

$$m = h \cdot (n^2/p) \cdot (f_f \cdot f_c) / (4 \cdot v \cdot g),$$

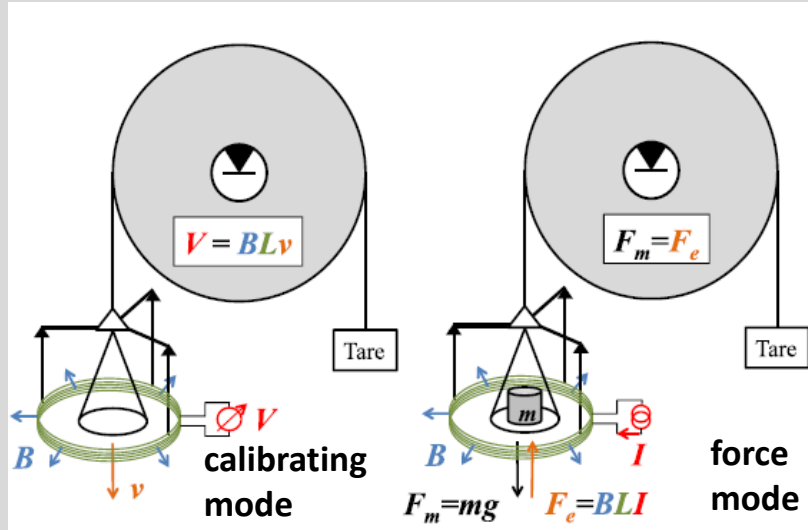
przy czym n oznacza liczbę złącz Josephsona we wzorcu napięcia, p – numer „schodka” oporu w kwantowym efekcie Halla, f_f – częstotliwość promieniowania ze złącza Josephsona wykorzystywanego do pomiaru napięcia na oporze wzorcowym w obwodzie wagi w trybie ważenia (*force mode*), a f_c – analogiczna częstotliwość odpowiadająca pomiarowi napięcia indukującego się w cewce wagi pracującej w trybie dynamicznym (*calibration mode*).



Watt-Kibble balance principle

$$U_{\text{dynamic}} = BL \cdot v$$

$$mg = BL \cdot I$$



dynamic phase

static phase

Josephson voltage standard:

$$U_{\text{dynamic}} = n \cdot \frac{f_d}{K_J} = n \cdot f_d \cdot \frac{h}{2e}$$

$$U_{\text{static}} = n \cdot \frac{f_s}{K_J} = n \cdot f_s \cdot \frac{h}{2e}$$

$$R_K = \frac{h}{e^2}$$

$$K_J = \frac{2e}{h}$$

Quantum Hall resistance:

$$R_{\text{static}} = p \cdot R_K = p \cdot \frac{h}{e^2}$$

$$m = \frac{U_{\text{dynamic}} \cdot I_{\text{static}}}{v \cdot g}$$

$$I_{\text{static}} = \frac{U_{\text{static}}}{R_{\text{static}}}$$

Josephson Standard [s]

$$m = \frac{U_{\text{dynamic}} \cdot U_{\text{static}}}{v_{\text{dynamic}} \cdot g \cdot R_{\text{static}}}$$

[s]
Interferometer
+ Atomic Clock

Absolute
Gravimeter

Quantum Hall
Resistor

[s]

$$m = \frac{n \cdot \frac{f_d}{2e} \cdot n \cdot \frac{f_s}{2e}}{v \cdot g \cdot p \cdot \frac{h}{e^2}}$$

$$m = \frac{n^2}{p} \cdot \frac{f_d f_s}{4vg} \cdot h$$

$$h_{90} \equiv \frac{4}{K_{J-90}^2 R_{K-90}} = 6.626\,068\,854 \dots \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

CGPM: $h_{2018} = 6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$$h = \frac{p}{n^2} \cdot \frac{4vg}{f_d f_s} \cdot m$$

GPS reference frequency is sufficient for [s] (no direct atomic clocks)

Josephson effect

$$U_{DC} = \frac{\hbar\omega}{2e} = \frac{h\nu}{2e} \quad \nu = \frac{2e}{h} U_{DC} = K_{J-90} U_{DC}$$

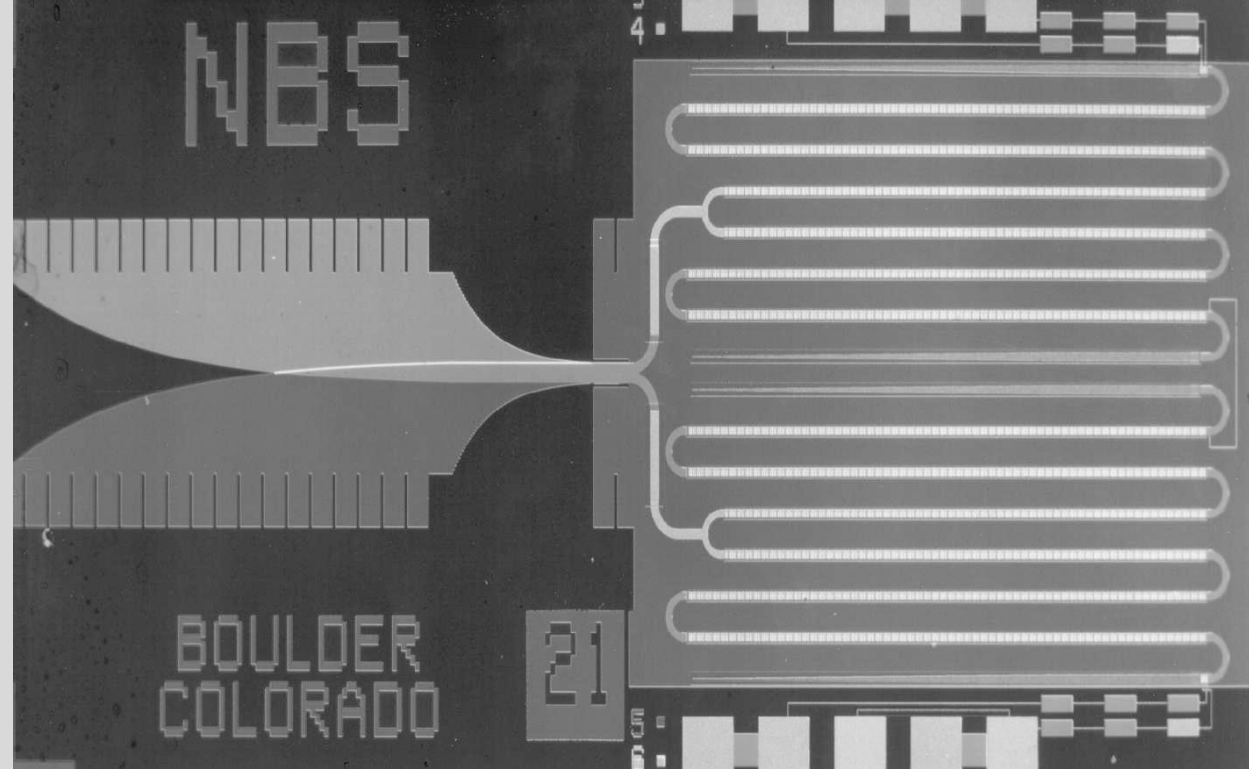
(perfect, nondissipative voltage-frequency converter for Cooper pair in superconductor-insulator-superconductor junction)

$$K_{J-90} = \frac{2e}{h} = 483597.9 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{V}}$$

Fluxon

$$\Delta\Phi = B\Delta S = \frac{h}{e} \quad \leftarrow \text{for electron}$$

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = \frac{1}{K_{J-90}} \quad \leftarrow \text{for Cooper pair}$$



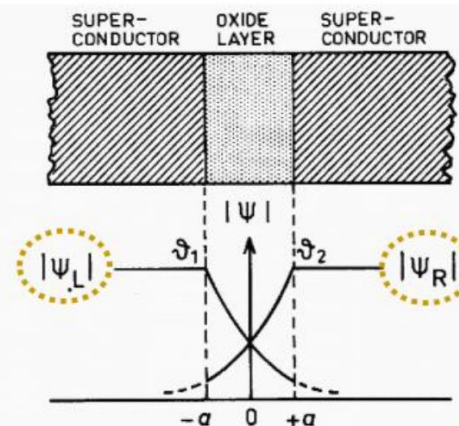
Josephson junction array chip developed by the [National Institute of Standards and Technology](#) as a standard volt

Brian David Josephson

Fizyk brytyjski, noblista



Brian David Josephson – brytyjski fizyk, laureat nagrody Nobla w dziedzinie fizyki z roku 1973 za swoją pracę nad teorią nadprzewodnictwa, w szczególności za odkrycie tzw. efektu Josephsona,



Stable 1 V zero-crossing arrays were operating at NBS [1] and PTB [20] by 1985, using about 1500 junctions and rf fields of 70 GHz to 90 GHz. Arrays with output voltages at the level of 1 V soon were used in NMIs throughout the world [21]. By 1989, NIST had made a 19 000 junction, 12 V array [2]. The widespread use of Josephson junction arrays in national standards laboratories, and better SI determinations of $2e/h$, led the CCE to recommend a new exact conventional value for the Josephson constant:

$$K_{J-90} = 483\,597.9 \text{ GHz/V},$$

Hall effect, quantum Hall effect

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

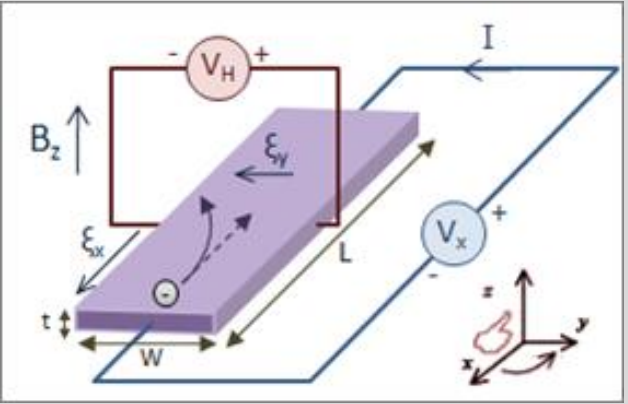
$$e v_x B_z = e E_y$$

$$I_x = n e v_x t w$$

$$E_y = -\frac{V_H}{w}$$

$$V_H = \frac{I_x B_z}{n t e}$$

$$R_H = \frac{V_H}{I_x}$$



$$R_H = \frac{B}{\Delta n_s e} \quad \Delta n_s = n_s = n t \quad (\text{circular motion in magnetic field})$$

$$\frac{m_e v^2}{r} = e B v \quad \omega_c = \frac{v}{r} = \frac{e B}{m_e} \quad (\text{cyclotron angular frequency})$$

$$\frac{m_e v^2}{2} = j \hbar \omega_c \quad \frac{m_e \omega_c^2 r^2}{2} = j \hbar \omega_c \quad (j - \text{Landau levels})$$

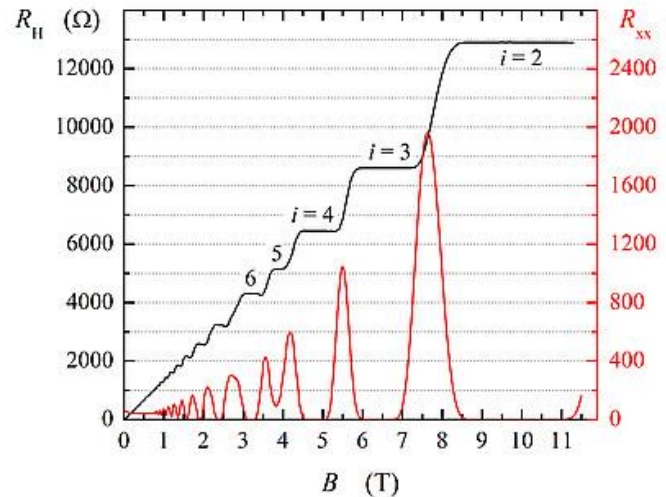
$$r^2 = \frac{j 2 \hbar}{m_e \omega_c} = \frac{j 2 \hbar}{e B} \quad \pi r^2 = \frac{j h}{e B}$$

$$\Delta S = \frac{h}{e B} \quad \Delta n_s = i \frac{1}{\Delta S} = i \frac{e B}{h} \quad R_H = \frac{h}{i e^2}$$

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.8074555(59) \Omega$$

Liquide helium temperature (4.2 K)

$$k T < \hbar \omega_c = h \nu$$



KLAUS VON KLITZING

Fizyk niemiecki, Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki otrzymał w 1985 r. za odkrycie kwantowanego efektu Halla (zwanego też efektem Klitzinga). Urodził się 28 czerwca 1943 r. w Srodzie Wielkopolskiej, obecnie mieszka w Stuttgarcie i jest jednym z dyrektorów Instytutu Maxa Plancka.

Rodzina Klitzingów przybyła do Wielkopolski w 1853 r., kiedy to pradziadek przyszłego noblisty Lebrecht von Klitzing kupił od rodziny Dziembowskiich posiadłość Dziembowo w powiecie chołobowskim. Lebrecht von Klitzing mimo wielu nazw nigdy nie zmienił polskiej nazwy miejscowości na niemiecką. W Dziembowie z drugiego małżeństwa Lebrechta przyszło na świat siedmioro dzieci, m.in. Bogisław (1861–1942), dziadek przyszłego uczonego. Był on starostą powiatu Oborniki Wielkopolskie, pełnił wysoki funkcję w urzędzie miasta Poznania, a po powrocie do rodzinnego Dziembowa przejął wraz z całą rodziną w 1921 r. obywatelstwo polskie. Najmłodszym z siedmiorga dzieci Bogisława był urodzony w Poznaniu Bogisław junior (1907–2000) nazywany też Olałem. Biegle pisał i mówił po polsku. W latach 1930–31 odbywał służbę wojskową w wojsku polskim i jednocześnie podjął naukę w szkole oficerskiej w Jarocinie. W 1933 r. przeszedł do rezerwy jako oficer.

... wydziale leśnictwa w Poznaniu i pracował jako ... Kłęka, powiat jarociński, w majątku ... Tam poznał swoją pierwszą żonę Annę z domu ... szkali w Falkstatt (Chocicza). Jednym z czwor ... przyszły laureat Nagrody Nobla.

... urodził się 28 czerwca 1943 r. o godz. 22:15 ... w Srodzie Wielkopolskiej (przy ul. Zwirki i W ... związek przyszłego uczonego z tym miastem ... namiętniona jego osoba.






100-lecie GUM,
1 kwietnia 2019 r.

Klaus von Klitzing Facts



Klaus von Klitzing
The Nobel Prize in Physics 1985

Born: 28 June 1943, Schroda, German-occupied Poland (now Poland)

Affiliation at the time of the award: Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Germany

Prize motivation: "for the discovery of the quantized Hall effect"

Prize share: 1/1

Photo from the Nobel Foundation archive.

Modern quantum gravimeters



spin-off

Observatoire de Paris – Université PSL
(Université de recherche Paris Sciences et Lettres),
CNRS and Sorbonne Université

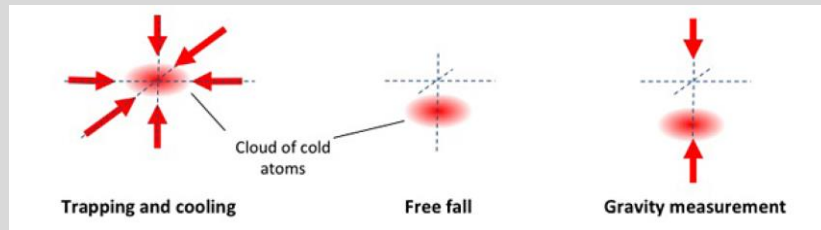
Measurement frequency: 2 Hz

Long-term stability: 1 μ Gal

Accuracy A few: μ Gal

1 Gal = 1 cm/s² = 0.01 m/s²

$g_{45} = 9.80665 \text{ m/s}^2$ $\Delta g/g \sim 10^{-9}$



The AQG relies on the same basic principle as absolute free fall gravimeters. However, instead of using a falling mirror, the gravity measurement is performed with **falling laser-cooled atoms**. This technique is one of the ballistic freefall method proclaimed by the BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) as an official primary method for the measurement of gravity.

A typical measurement sequence is organized as follows:

- First, **atoms are trapped in the vacuum chamber with lasers and cooled down to a temperature of a few μ K**.
- All laser beams are shut down so that the cold atoms experience a free-fall.
- The vertical acceleration experienced by the atoms during a 10 cm fall is precisely characterized with an advanced interferometric scheme relying on lasers.

Interferometers in Kibble Balance

ACTA IMEKO

ISSN: 2221-870X

September 2020, Volume 9, Number 3, 11 - 16



A UME Kibble balance displacement measurement procedure

Haci Ahmedov¹, Mehmet Çelik¹, Recep Orhan¹, Beste Korutlu¹, Ramiz Hamid¹, Ersoy Şahin¹

¹ TÜBİTAK National Metrology Institute (UME), Kocaeli, TURKEY

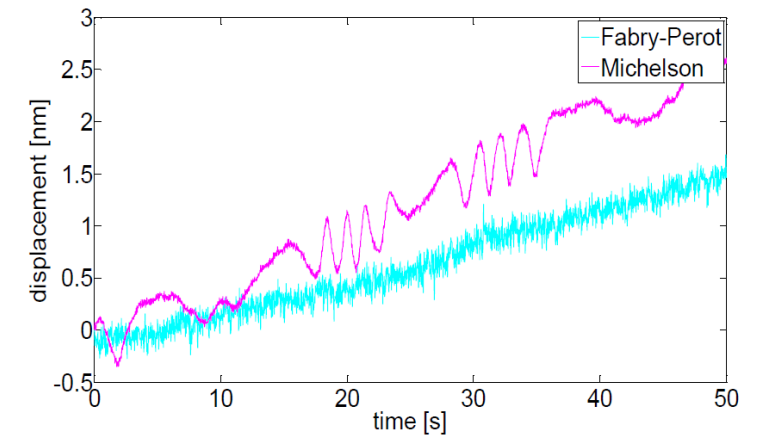
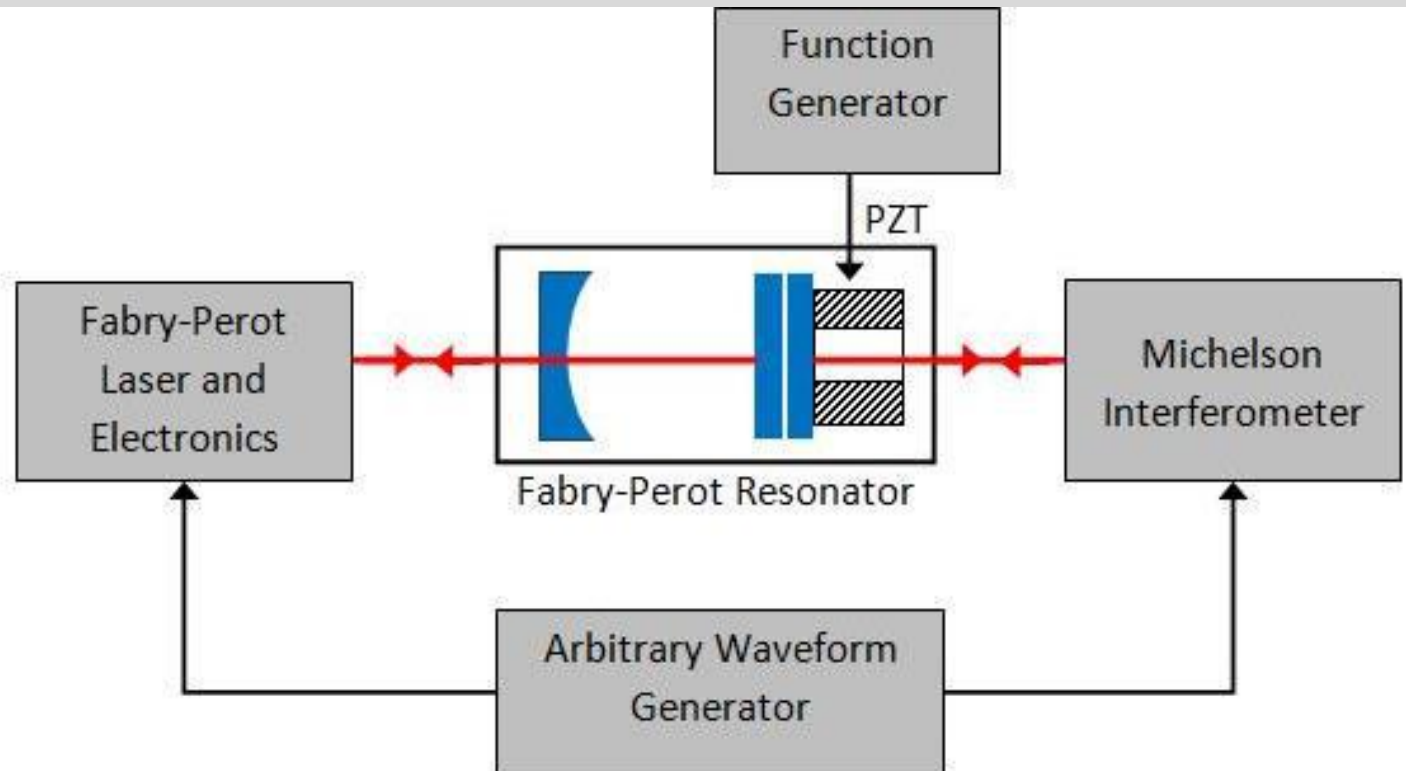


Figure 3. Displacement data measured by FPI (cyan) and MI (magenta). For illustration purposes, only a portion of the data is shown.

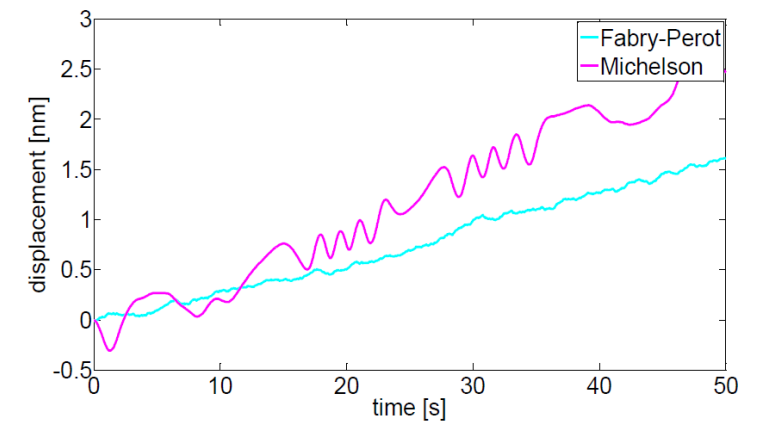
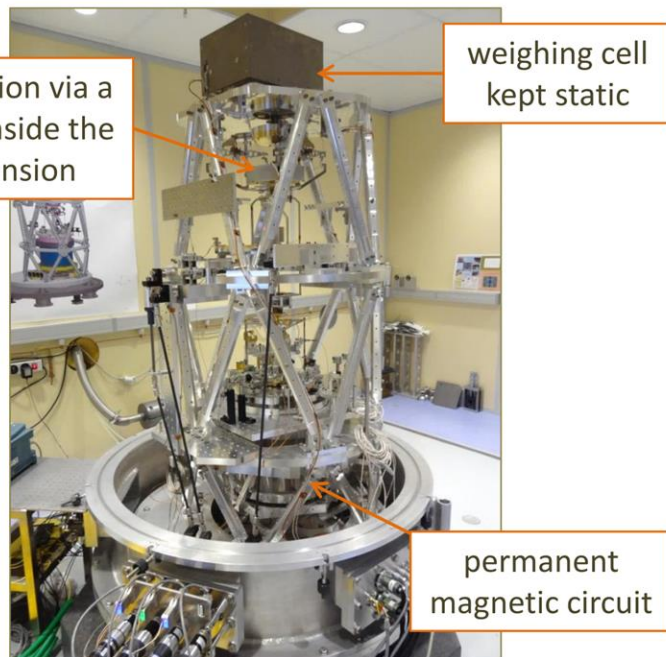


Figure 4. The low-pass filtered data of FPI (cyan) and MI (magenta). For illustration purposes, only a portion of the data is shown.

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, 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 w trybie zarówno ważenia, jak i kalibracji.

Experimental set-up (I)





Dr Michael STOCK
Director of the
Physical Metrology
Department
Sèvres



METROLOGY
MOVING TOWARDS
FOUNDATION

APMF 2017

Asian-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque
Technical field: Mass, Force, Torque and Density
(Extended to Hardness, Pressure, Vacuum and Gravimetry)
19 – 23 November 2017
Krabi, Thailand



BIPM – widok na wzgórze z Pont de Sèvres

20.11.2018 – 4 dni po konferencji w Wersalu



Bureau
International des
Poids et
Mesures

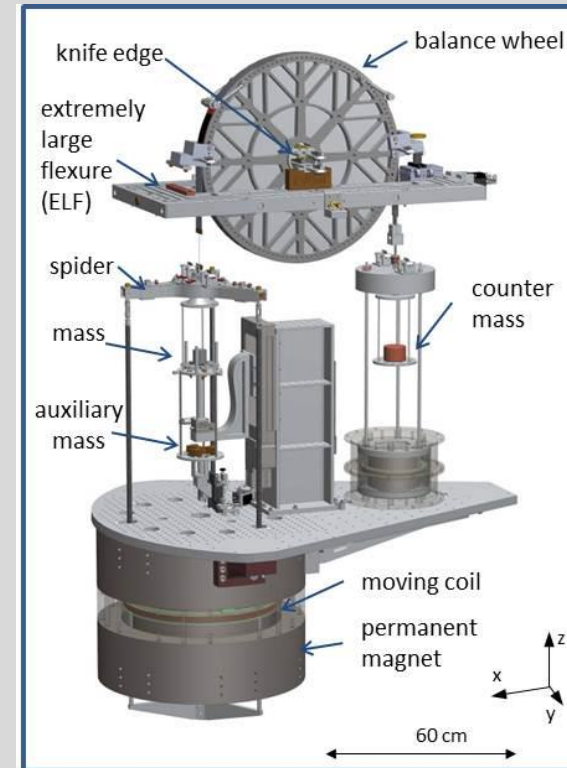
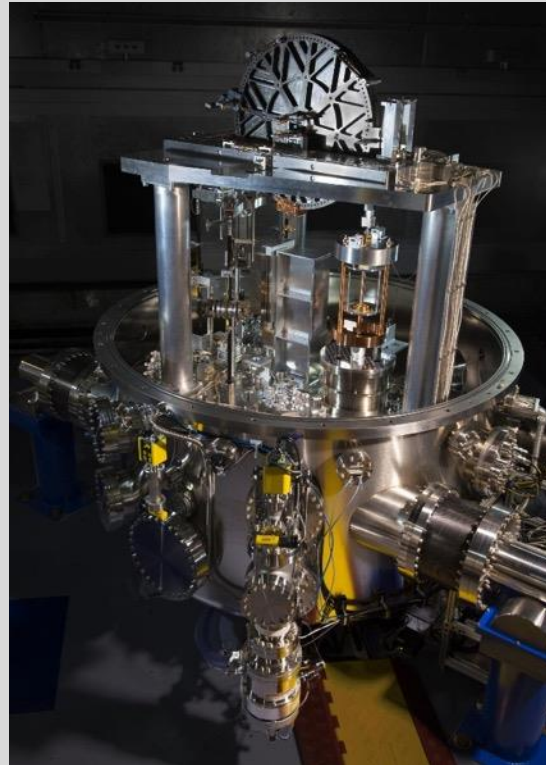


Kibble balances in the world

The American project from NIST (National Institute of Standards and Technology)

distinguishing features:

- Many years of experience (already NIST-4)
- Two side geometry with balance wheel (easy taring, perfectly linear coil motion)
- Record of repeatability (relative standard deviation - less than $13.5 \cdot 10^{-9}$ - in vacuum chamber)

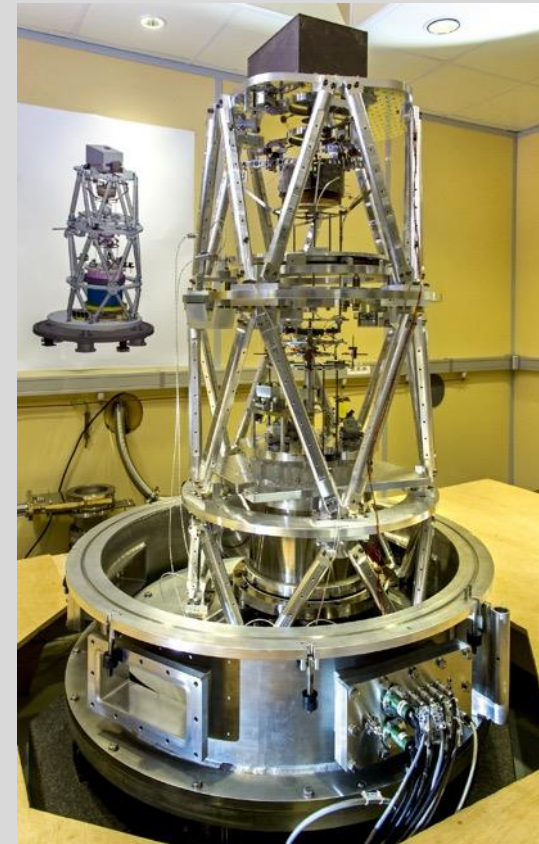


Kibble balances in the world

The international project from BIPM
(Bureau International des Poids et Mesures à Sèvres)

distinguishing features:

- Located in the most important metrological institution in the world
- Axial ("one-arm") mechanism - more compact but the weight of suspension has to be compensated via commercial mass comparator
- Simultaneous operation mode (during calibration the same current as during weighing – the same influence on magnetic circuit, but a problem with subtracting ohmic from induction voltage in coil)
- Optimized magnetic circuits and heterodyne interferometers with high stability lasers



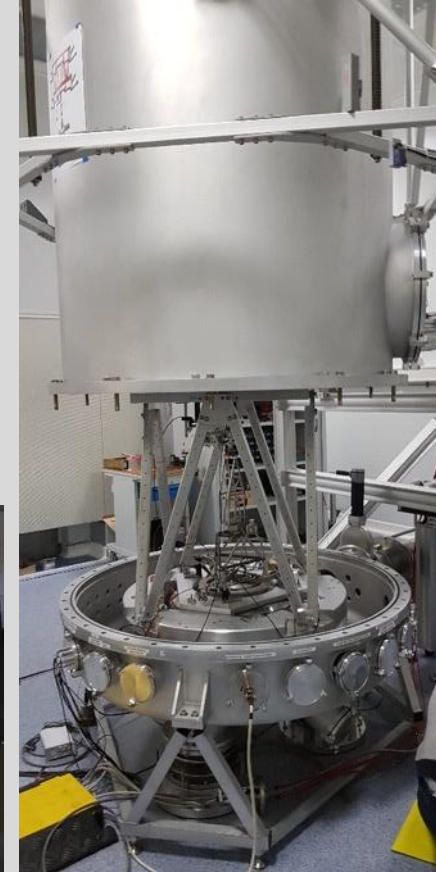
Kibble balances in the world

The French project from LNE

(Laboratoire National de Métrologie et d'Essais à Trappes près de Paris)

distinguishing features:

- Axial geometry with simple beam and counter mass for taring - 0.5 kg weighing range
- Top accuracy in constant pressure air ($100 \mu\text{g} / 1 \text{ kg}$)
- Separate foundation with 12 m pillars (low vibrations)
- Identical foundation for cold-atoms gravimeter
- Professional systems for air conditioning, temperature and humidity stabilisation (takes 1/3 of the building surface) ----->



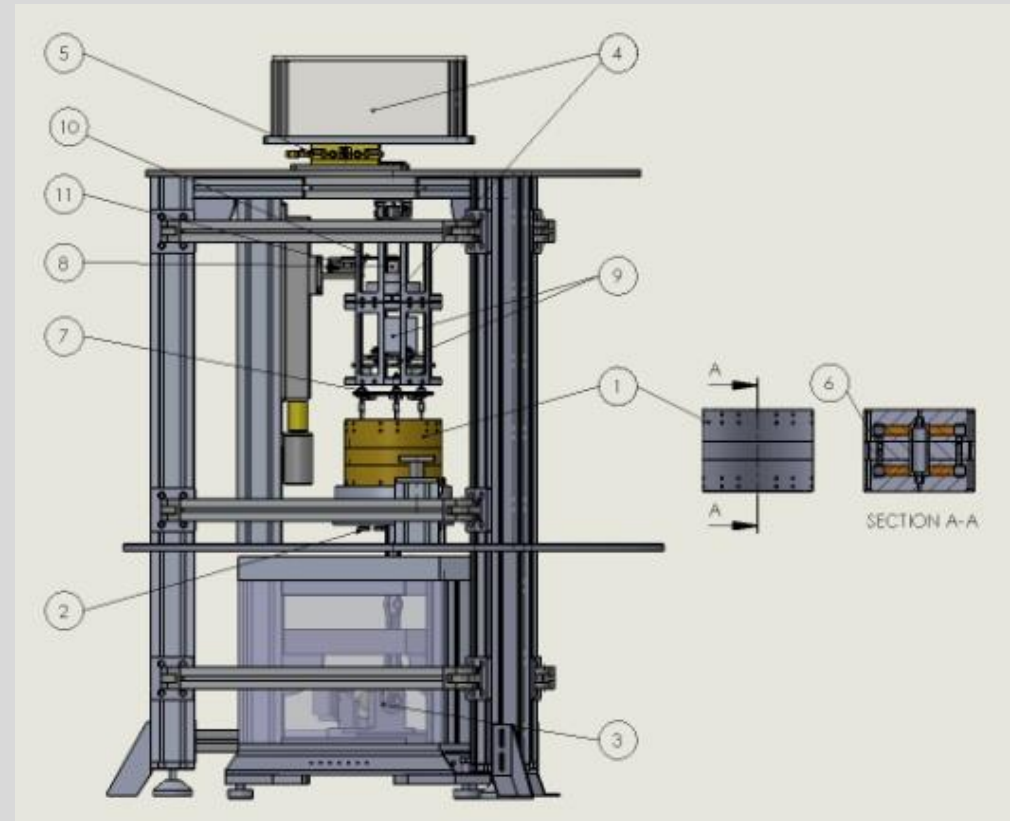
Kibble balances in the world

The Turkish project from UME

(National Metrology Institute / Ulusal Metroloji Enstitüsü / in Gebze)

distinguishing features:

- Axial geometry with commercial comparator for suspension mass compensation (like in BIPM)
- The unique solution: during calibration the coil is fixed and magnetic circuit is moving !
- Only small external region with vacuum for interferometers !
- Magnetic circuit and coil size are reduced 3 times (rel. to NIST), but the field is similar (ca. 0.5 T)
- Weighing range: 0.1 kg

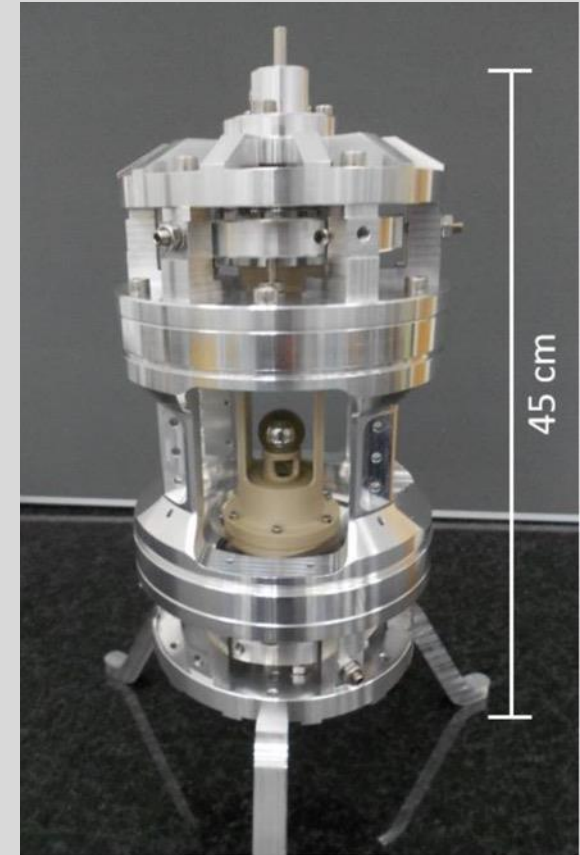


Kibble balances in the world

The new British project from NPL (National Physical Laboratory in Teddington)

distinguishing features:

- Simplified, compact, cost-reduced solution -
- in principle - commercially accessible
together with half year training (ca. 500 000 €)
- Typical weighing range: 0.1 kg
- Question 1: When target accuracy $20 \cdot 10^{-9}$ will be achieved
and does it demand a vacuum?
- Question 2: What is a vacuum chamber price?
- Question 3: What will be a total price (including vacuum
chamber, gravimeter, interferometer, antivibrating system,
quantum standards)?

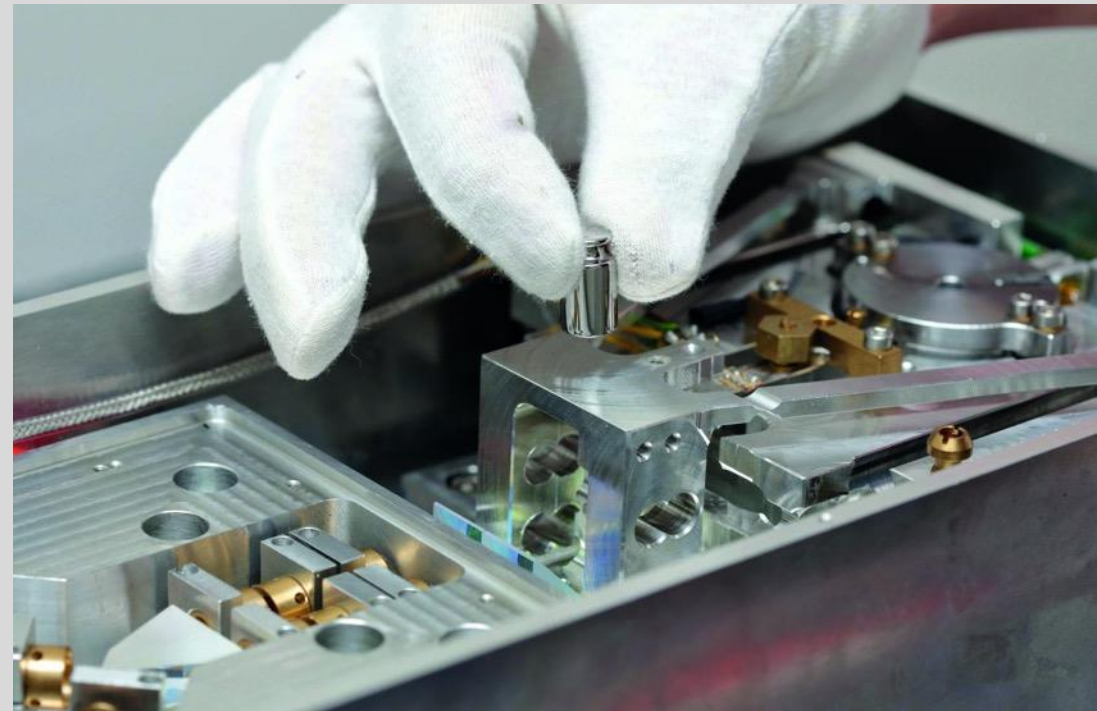


Kibble balances in the world

The German project from PTB – „Planck balance” (Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig) (Technische Universität Ilmenau)

distinguishing features:

- Innovative concept: using ready electromagnetic actuator from commercial mass comparator complemented by vibrator for calibration mode
- Solution not for national standards but for E1 weights
- Planck balances: 1mg to 1kg
- Affordable and good for commercialisation



no vacuum,
no quantum
standards

$500 \cdot 10^{-9}$

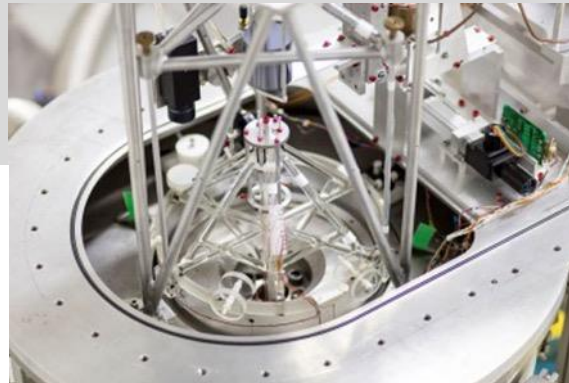
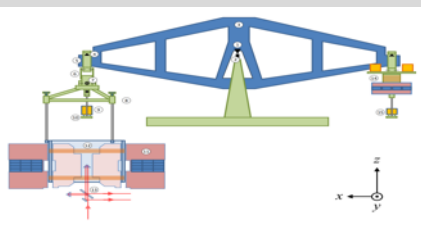
Kibble balances in the world

The Canadian project from NRC – old NPL project

(National Research Council, Institute for National Measurement Standards) (Standards Council of Canada / Conseil canadien des normes, Ottawa)

distinguishing features:

- Old NPL Mark II project
- Two-arm traditional geometry
- Large-sized construction + vacuum chamber
- Achieved relative uncertainty: $19 \cdot 10^{-9}$ (as standard deviation)



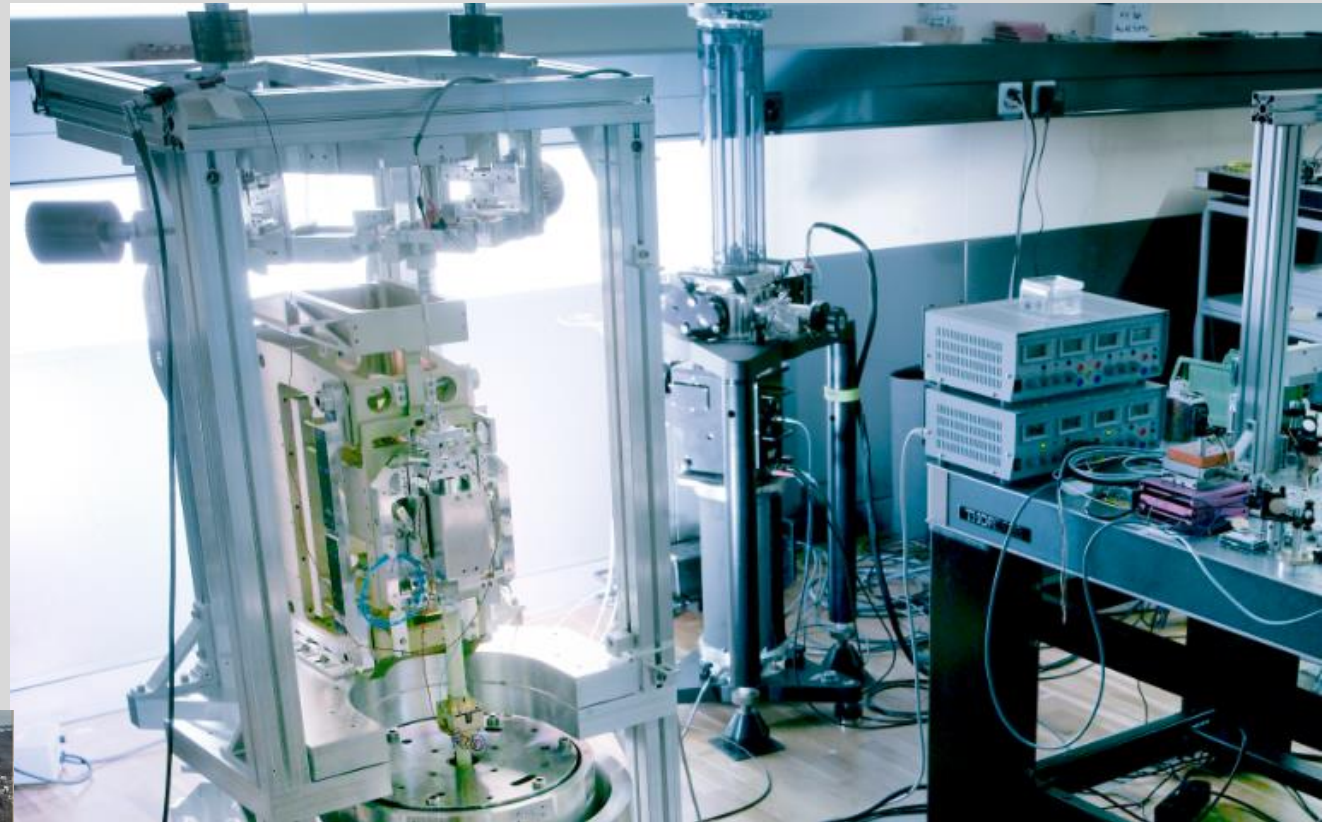
Kibble balances in the world

The Swiss project from METAS

(Federal Institute of Metrology in Bern-Wabern)

distinguishing features:

- Similar to BIPM (more compact)
- Axial geometry (with commercial mass comparator)
- Glassy constant pressure chamber
- Magnetic circuit and coil from CERN



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 wyszła naprzeciw temu zapotrzebowaniu i skonstruowała automatyczny, próżniowy komparator masy AVK-1000 o obciążeniu maksymalnym 1 kg, z działką elementarną 0,1 μg . Urządzenie oferuje **przewodzenie 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) 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 i zastosowane w nim rozwiązania technologiczne, mogą stanowić w przyszłości dobry punkt wyjścia do realizacji polskiego projektu wagi Watta-Kibble'a.

PRÓŻNIOWY KOMPparator MASY



Główny
Urząd
Miar

Po redefinicji układu SI radomska 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 o rekordowej dokładności odczytu 10 ng i udźwigu maksymalnym 510 mg. 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 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 w przypadku odważnika 2 mg. Jest to obecnie najlepsza dostępna w metrologii małych mas powtarzalność pomiarów.

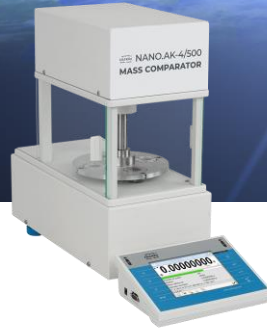
Pojawienie się pierwszego na światowym rynku komparatora masy o rozdzielczości 10 ng pozwala na walidowanie materialnych wzorców masy do kalibracji mikrowag laboratoryjnych stosowanych w wielu gałęziach przemysłu, laboratoriach wzorcujących i w badaniach naukowych w ramach różnych dyscyplin.

Typowym obszarem zastosowań jest kalibracja mikrowag używanych w przemyśle farmaceutycznym do przygotowywania nowych receptur. Bardzo istotnym przykładem zastosowań są wszelkie badania fizykochemiczne 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 zawieszonego 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.



Comparison



	NANO.AK-4/500	UMA-5	Competition
Maximum capacity [Max]	510 mg	5.1 g	-
Readability [d]	0.01 µg	0.1 µg	0.1 µg
Standard repeatability*	0.04 µg	0.2 µg	0.15 µg
Standard repeatability [Max]*	0.06 µg	0.4 µg	-
Stabilization time	25 s	30 s	-
Electric compensation range	0 - 510 mg	0 – 5.1 g	-
Magazine positions	4 positions	36 positions	-

Repeatability is expressed as a standard deviation determined for 6 ABBA cycles. Standard deviation is experimentally determined under ambient conditions for calibration of E1 class mass standards specified in OIML R111 (Table C.1.) document.

PRACA DOKTORSKA

**Konstrukcja urządzenia do komparacji wzorców masy poniżej 1 mg
z rozdzielczością 10 ng w oparciu o zmodyfikowany elektromagnetyczny
przetwornik siły**

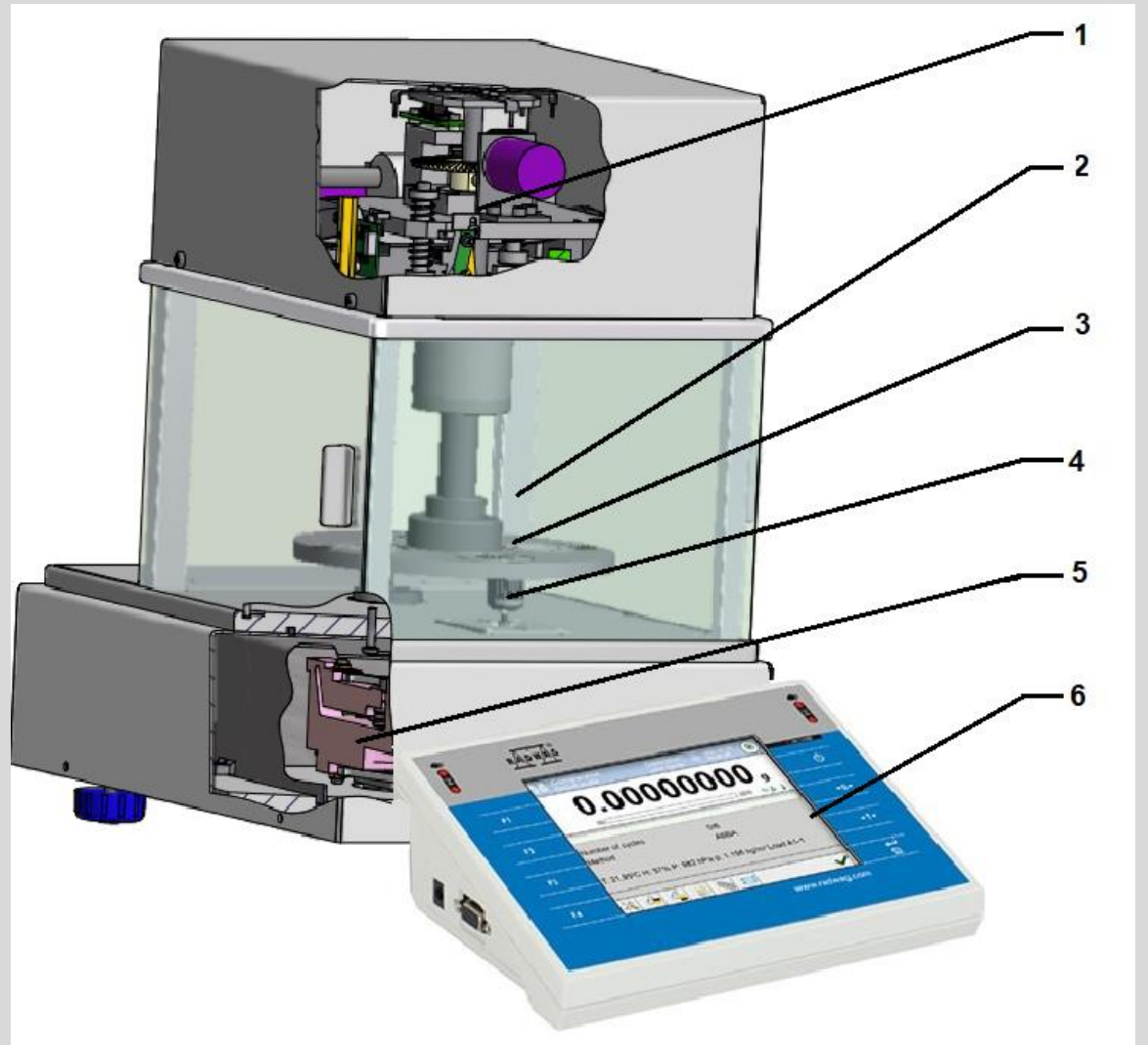
mgr inż. Michał Solecki

Promotor pracy: dr hab. Tadeusz Szumiata, prof. UTH

Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu
Wydział Mechaniczny
Radom 2023

Budowa nowatorskiego komparatora masy

- 1 – mechanizm automatu komparatora,
- 2 – komora ważenia,
- 3 – magazyn wzorców,
- 4 - szalka komparatora,
- 5- mechanizm komparatora,
- 6 – indykator (panel sterujący).

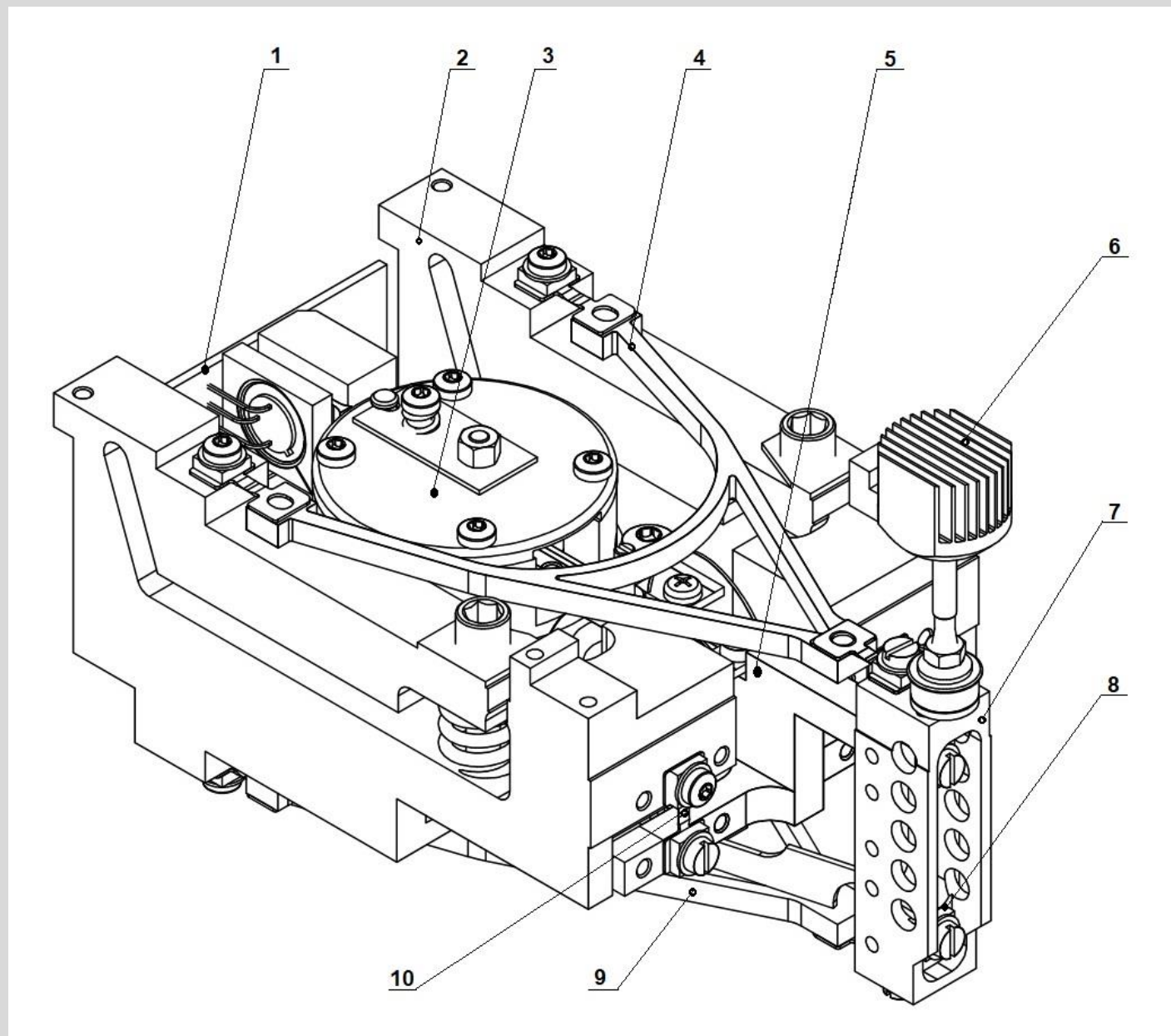


XVII Krajowa Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Metrologia w technikach wytwarzania „Automatyzacja procesu wzorcowania wzorców masy i odważników oraz jej wpływ na poprawę parametru powtarzalności komparatorów masy”, Gliwice – Piekary Śląskie 19-21.09.2018.

IMEKO 23 “Optimization of mass standards and weights calibration (1mg – 1 kg) using rotational automatic mass comparator”, Helsinki 30.05-01.0.6.2017

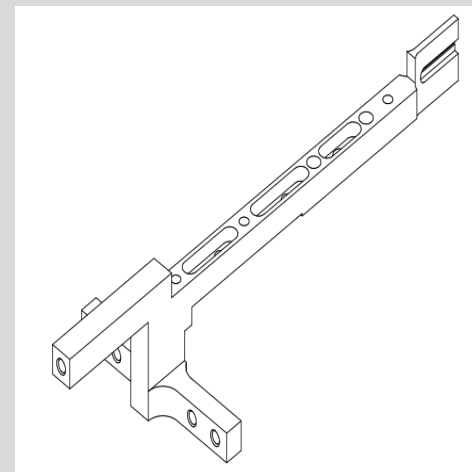
Budowa nowatorskiego mechanizmu komparatora

- 1 – czujnik położenia dźwigni
- 2 – korpus mechanizmu
- 3 – siłownik/cewka
- 4 – wahacz poziomy górny
- 5 – dźwignia przełożenia
- 6 – szalka
- 7 – wahacz pionowy
- 8 – cięgno
- 9 – wahacz poziomy dolny
- 10 – zawieszka (element sprężysty)



Modyfikacja dźwigni przełożenia

W celu sprawdzenia skuteczności tych zabiegów wykonano badania wpływu wilgoci na gotowym docelowym mechanizmie. Zmontowano mechanizm na dźwigni niepolerowanej, skręcanej, i dokonano pomiaru wpływu wilgoci w komorze w ciągu 20 godzin. W komorze była utrzymywana stała temperatura, przy czym celowo dokonano zmiany wilgotności o 10% i obserwowano dryft zera komparatora. Następnie w tym samym mechanizmie **wymieniono dźwignię na monolityczną**, po czym dokonano identycznego pomiaru. Eksperyment powtórzono 5 razy.



Warunki pomiaru:

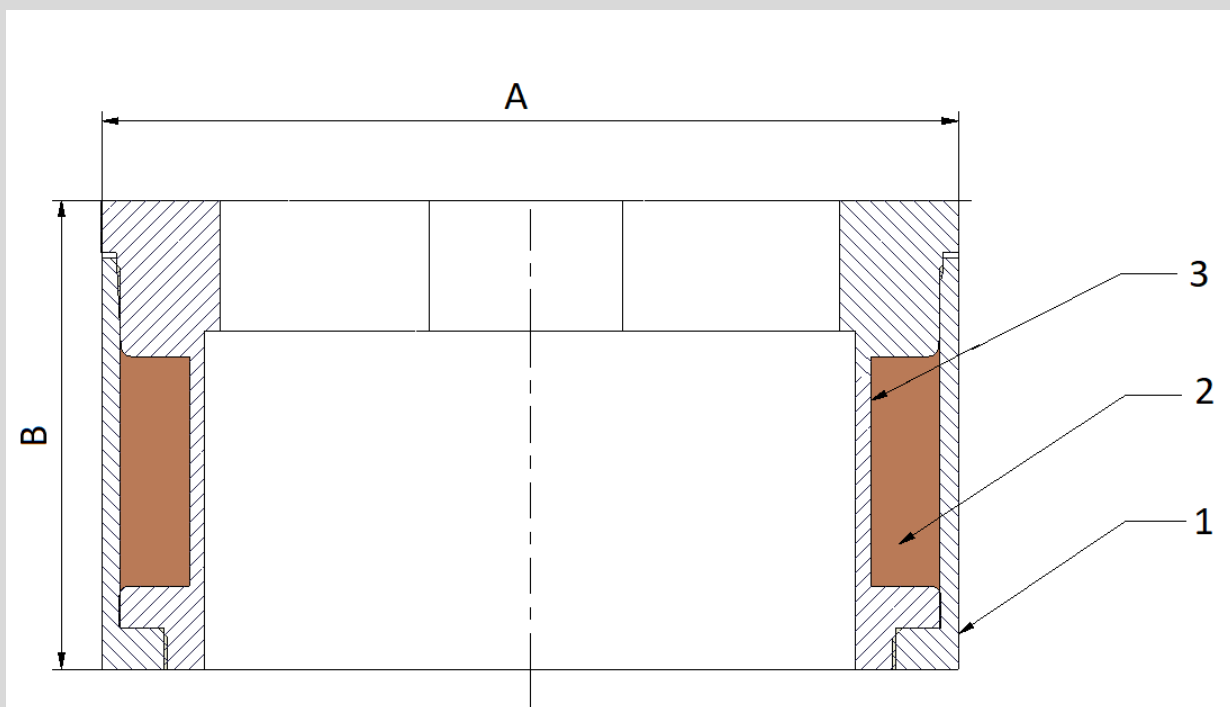
- czas stabilizacji 12 h
- temperatura 22 °C ($\pm 0,15$ °C),
- wilgotność początkowa 52 % ($\pm 0,5$ %)
- wilgotność końcowa 62% ($\pm 0,5$ %)
- czas testu 20 godzin

Zmiana (dryft) zera dzięki dzięki modyfikacji dźwigni przełożenia zmniejszyła się 4-krotnie.

l.p	Mechanizm z dźwignią skręcaną	Mechanizm z dźwignią monolityczną
	Zmiana zera [mg]	Zmiana zera [mg]
1	21,365	5,274
2	20,542	4,966
3	21,873	5,517
4	20,823	5,063
5	21,005	4,842
ŚREDNIA	21,1216	5,1324 ³⁸

Modyfikacja cewki

Dla budowanego urządzenia zaprojektowana została specjalna cewka, oznaczona symbolem S10, której schemat pokazano na rysunku. Jej wymiary są mniejsze niż w przypadku najmniejszej stosowanej do tej pory w znanych nam wagach i komparatorach masy. Drut miedziany w otulinie został zabezpieczony dodatkowo specjalnie zaprojektowanym pierścieniem, ograniczającym chłonięcie wilgoci, a co za tym idzie, zmianą masy cewki



1- Pierścień ochronny

2 - drut nawojowy

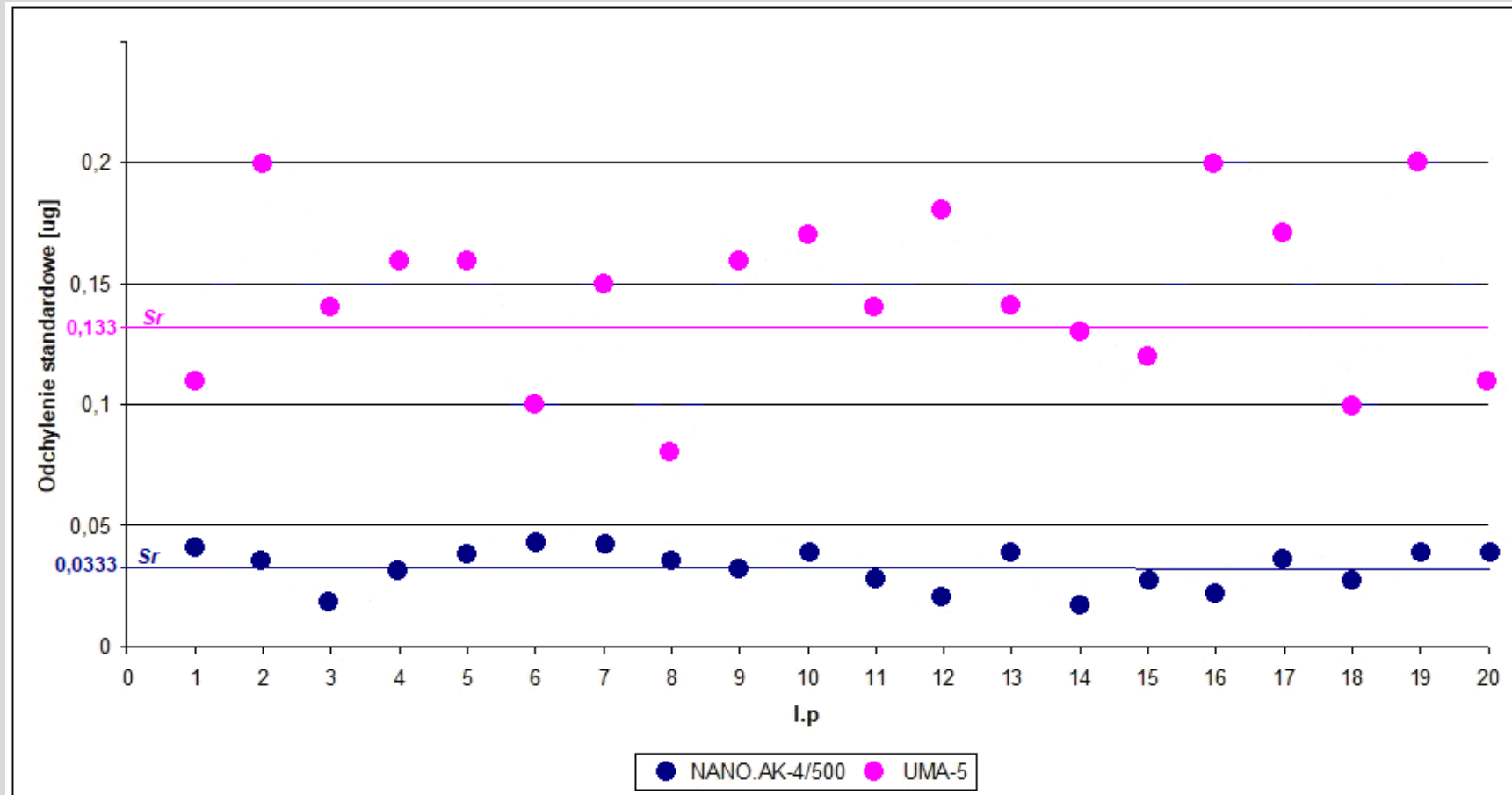
3 - korpus cewki

dla cewki S10: A=16,5 mm, B=9 mm

dla cewki S20: A=30 mm, B=12 mm

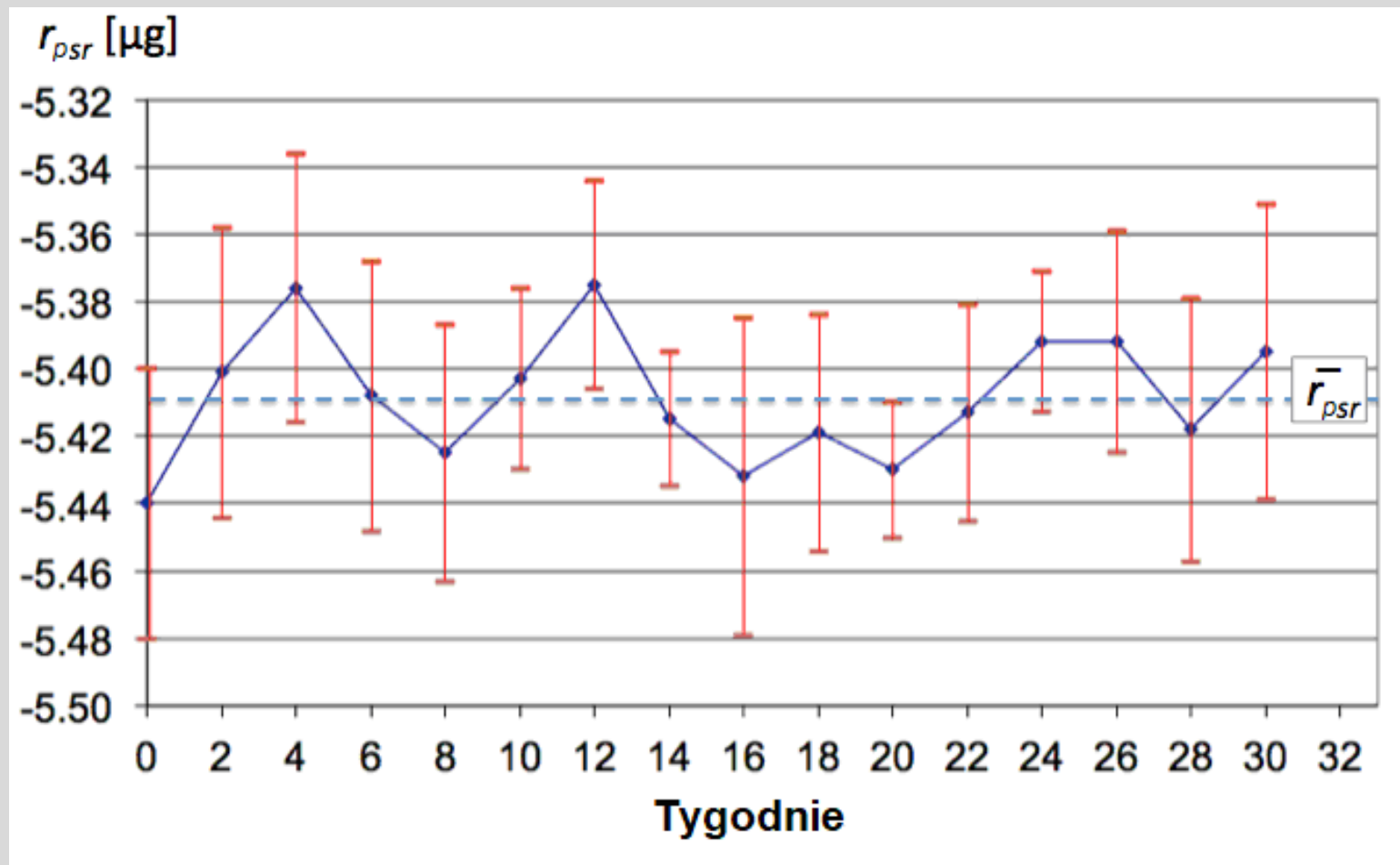
Wyniki badań parametrów metrologicznych komparatora

Odchylenia standardowe wyników uzyskanych dla masy 0,1 mg



Średni rozrzut wskazań dla komparatora UMA-5 wynosi 0,133 μg , natomiast dla komparatora NANO.AK-4/500 wartość ta wynosi 0,0333 μg .

Wyniki pomiarów stabilności, w czasie 8 miesięcy dla masy 2 mg



W okresie od kwietnia do listopada 2020 r. maksymalna różnica pomiędzy wartościami r_{psr} wynosiła **0,065 µg**, a ogólna średnia zawsze mieściła się w zakresie $r_{psr} \pm 2sd$. Taki wynik należy uznać za dowód skuteczności poczynionych działań zmniejszających błędy pomiarowe i zapewniających dokładniejszy pomiar z lepszą rozdzielczością.



ELSEVIER



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Precision Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/precision



A novel automatic mass comparator with a resolution of 10 ng for calibration of masses below 2 mg

Michał Solecki^a, Tadeusz Szumiata^b, Mirosław Rucki^{b,*}

200 pkt.

^a RADWAG Wagi elektroniczne, ul. Toruńska 5, 26-600, Radom, Poland

^b Faculty of Mechanical Engineering, Kazimierz Pułaski University of Technology and Humanities in Radom, Poland



ARTICLE INFO

Keywords:
Mass comparator
Weight
Uncertainty
Accuracy

ABSTRACT

DOKTORAT: Konstrukcja komparatora masy o rozdzielczości 10 ng ze zmodyfikowanym elektromagnetycznym przetwornikiem siły.

This paper presents a novel mass comparator designed for the purpose of measuring small weights of 2 mg and lower, with readability of 10 ng. The mass comparator was developed using new types of coil and actuator. The added protective ring decreased the average sorption-induced mass variation for the coil by 84%. The accuracy of the novel comparator was verified in terms of stability, Type A uncertainty, and repeatability. Compared to the device of the best available accuracy, the standard uncertainties of the novel-design comparator were approximately 70% narrower.

Ultra-mikrowaga UYA 2.4Y PLUS

Minimalna naważka USP
0,3 mg



Dokładność odczytu
 $d = 0,1 \mu\text{g}$

Powtarzalność
 $0,15 \mu\text{g}$

$$\rho_{SiO_2} := 2.65 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$d := 0.05 \text{ mm}$$

$$r := \frac{d}{2} = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$V := \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = 6.545 \cdot 10^{-14} \text{ m}^3$$

$$m := \rho_{SiO_2} \cdot V = 1.7344 \cdot 10^{-10} \text{ kg}$$

**Pyłek piasku
o średnicy
ok. 0.05 mm**

**Przemysł
farmaceutyczny**



Dissemination of the kilogram following its redefinition on 20 May 2019

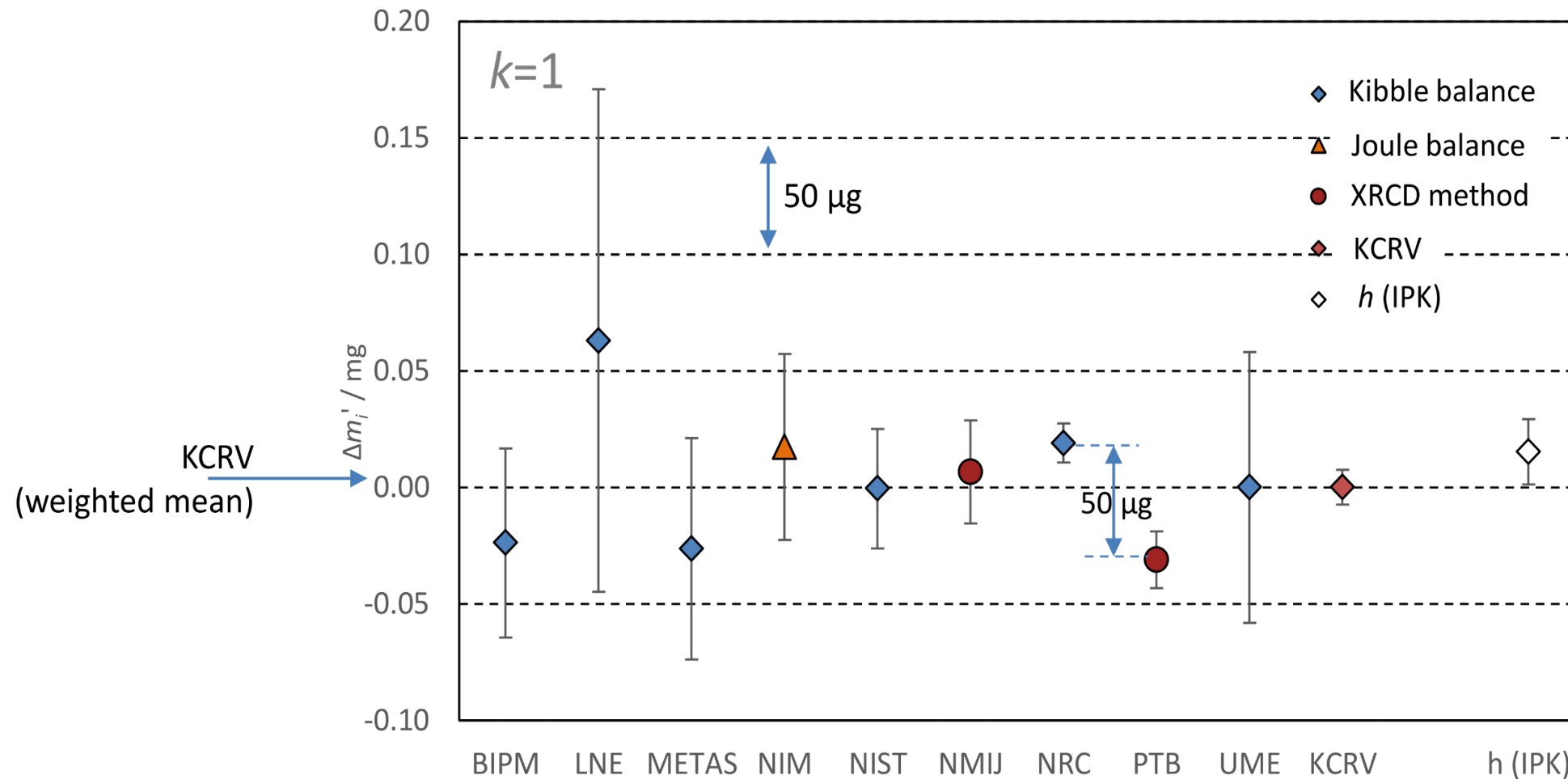
M. Stock, BIPM
ICW 2023
April 2023, Hamburg

Bureau
♦ **I**nternational des
♦ **P**oids et
♦ **M**esures



CCM.M-K8.2021: second key comparison of kilogram realizations

Differences between mass values attributed to a 1 kg weight (in mg)



Operational Kibble balances (in 2022)



Shown are the countries which were able to participate in the key comparison of kilogram realizations at the level of 1 kg in 2021/22: **7 operational Kibble balances**

Several other countries have Kibble balances under development: UK (with South Africa, Sweden), Rep. of Korea, Germany, New Zealand, ...

Dokładnie 100 lat

Analiza strategiczna
polskiego projektu
wagi Kibble'a

Bezpieczeństwo
cyfrowe a rzetelność
pomiaru

Projekty strategiczne
Laboratorium
Długości

Weryfikacja wpływu
wyników porównań

175-lecie OUP
w Krakowie

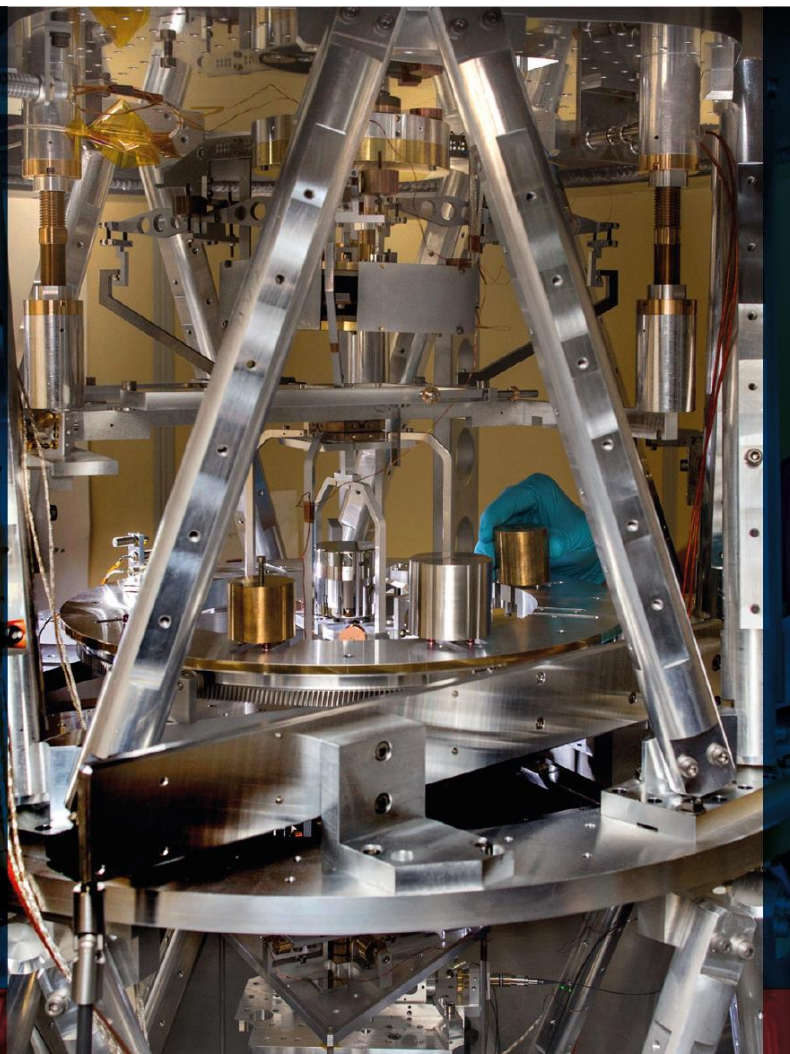
System Zarządzania
Jakością

Działalność KZM
ds. regulacji rynku

Od metra dawnego
do współczesnego

Przyszłość
w metrologii
kwantowej

Randka z metrolożką



Analiza strategiczna polskiego projektu wagi Kibble'a

Strategic analysis of the Polish project of Kibble balance

Tadeusz Szumiata, Maciej Dobieszewski, Andrzej Hantz, Wojciech Wiśniewski, Jerzy Szutkowski, Arkadiusz Podgórn

Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki analizy strategicznej, Zespół jednoznacznie rekomenduje realizację polskiego projektu wagi Kibble'a na zakres małych mas oraz kilka mniejszych projektów komplementarnych.

Autorzy analizy żywią nadzieję, że niniejsza rekomendacja będzie czynnikiem skutecznie motywującym zarówno polskie środowisko metrologiczne, akademickie, jak i polski przemysł innowacyjny oraz polskie władze do podjęcia i wspierania prac związanych z projektem.

Oczywistym warunkiem powodzenia tego przedsięwzięcia jest zapewnienie odpowiednich środków finansowych (głównie budżetowych i unijnych).

NIST works on small mass Kibble balance



Darine Haddad (M'09) received the Ph.D. degree in optics, optoelectronics, and microwaves from the University of Versailles, Versailles, France, in 2004.

She was with the University of Versailles, where she was involved in teaching and conducting research in the field of optical sensors and dimensional metrology. She was a Post-Doctoral Fellow with the Laboratoire National de Metrologie et d'Essais, Trappes, France, in 2004, and the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, in 2008, where she was involved in

Kibble balance experiments to measure the Planck constant and realizing mass.



Stephan Schlamminger (M'12) received the Diploma degree in physics from the University of Regensburg, Regensburg, Germany, in 1998, and the Ph.D. degree in experimental physics from the University of Zurich, Zurich, Switzerland, in 2002. His thesis was on the determination of the Universal Constant of Gravitation.

From 2002 to 2010, he was with the University of Washington, Seattle, WA, USA, where he was involved in the experimental test of the equivalence principle. In 2010, he was with the National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA, where he was involved in Kibble balance. In 2016, he was a Group Leader of the Fundamental Electrical Measurement Group, NIST. From 2017 to 2018, he was with the Regensburg University of Applied Science, Regensburg, Germany, where he taught physics. Since 2018, he has been a Physicist with NIST.

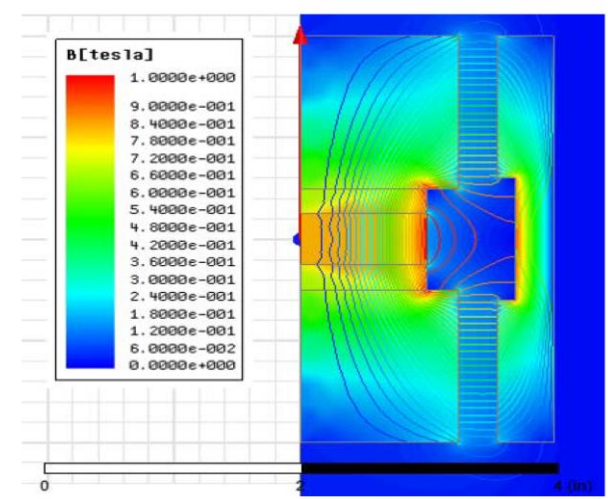


Fig. 4. Finite element simulation of the magnetic flux density through the top and bottom air gaps of half the magnet. The field where the coil resides in weighing mode is approximately 0.4 T.

The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST

Leon Chao¹, Frank Seifert, Darine Haddad, *Member, IEEE*, Julian Stirling, David Newell, and, Stephan Schlamminger, *Member, IEEE*

Abstract—On November 16, 2018, the 26th General Conference on Weights and Measures voted unanimously to revise the International System of Units from a system built on seven base units to one built on seven defining constants and will officially become effective on May 20, 2019, or World Metrology Day. More specifically, the unit of mass, the kilogram, will be realized via a fixed value of the Planck constant h and a Kibble balance (KB) serves as one method of achieving this. Over the past few decades, national metrology institutes around the world have developed KBs, the majority aimed at realizing the unit of mass at the 1-kg level with uncertainties on the order of a few parts in 10^8 . However, upon fixing the Planck constant, mass can be directly realized at any level, deeming the kilogram only a historically unique benchmark. At the National Institute of Standards and Technology, a tabletop-sized Kibble balance (KIBB-g1) designed to operate at the gram-level range with uncertainties on the order of a few parts in 10^6 is currently under development.

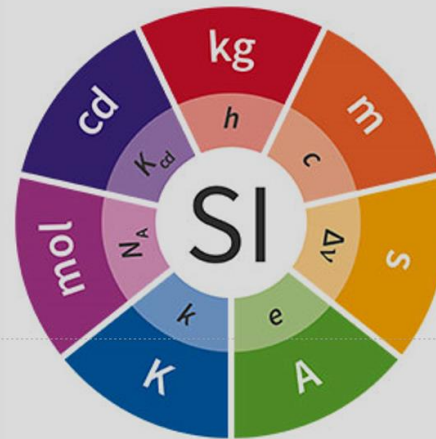
Index Terms—Kibble balance (KB), mass metrology, precision engineering design.

I. INTRODUCTION

micrograms. The final results show promise and set a foundation for future work in generating a full uncertainty budget.

II. THEORY OF A KIBBLE BALANCE

Even though a KB might appear functionally similar to an equal-arm beam balance, a significant difference exists. A conventional beam balance makes relative measurements, comparing the weight an object to that of a calibrated mass. A KB, however, makes absolute measurements, comparing the weight of an object to a frequently calibrated electromagnetic force determined by electrical quantities. The experiment involves two modes of operation, velocity mode, and force mode. Velocity mode is based on the principle of Faraday's law of induction. A coil (wire length L) is moved at a velocity v through a magnetic field (flux density B) so that a voltage V is induced. The induced voltage is related to the velocity through the flux integral BL



no dissemination needed

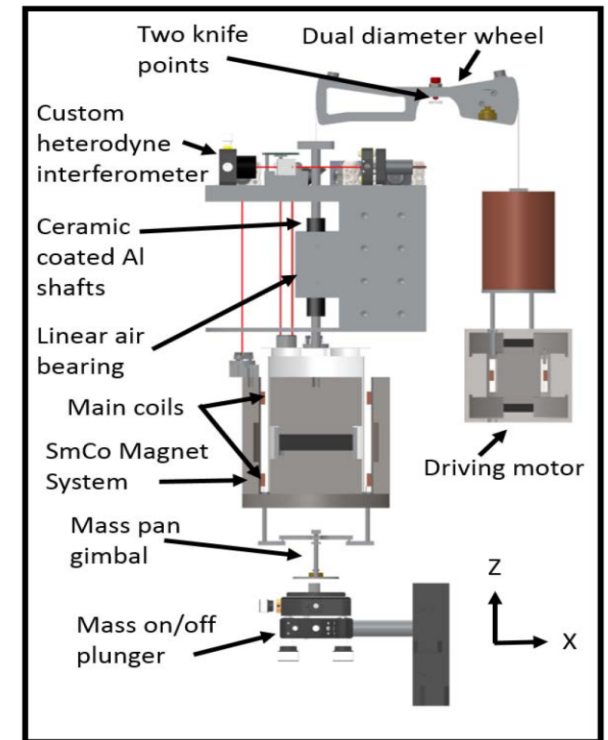
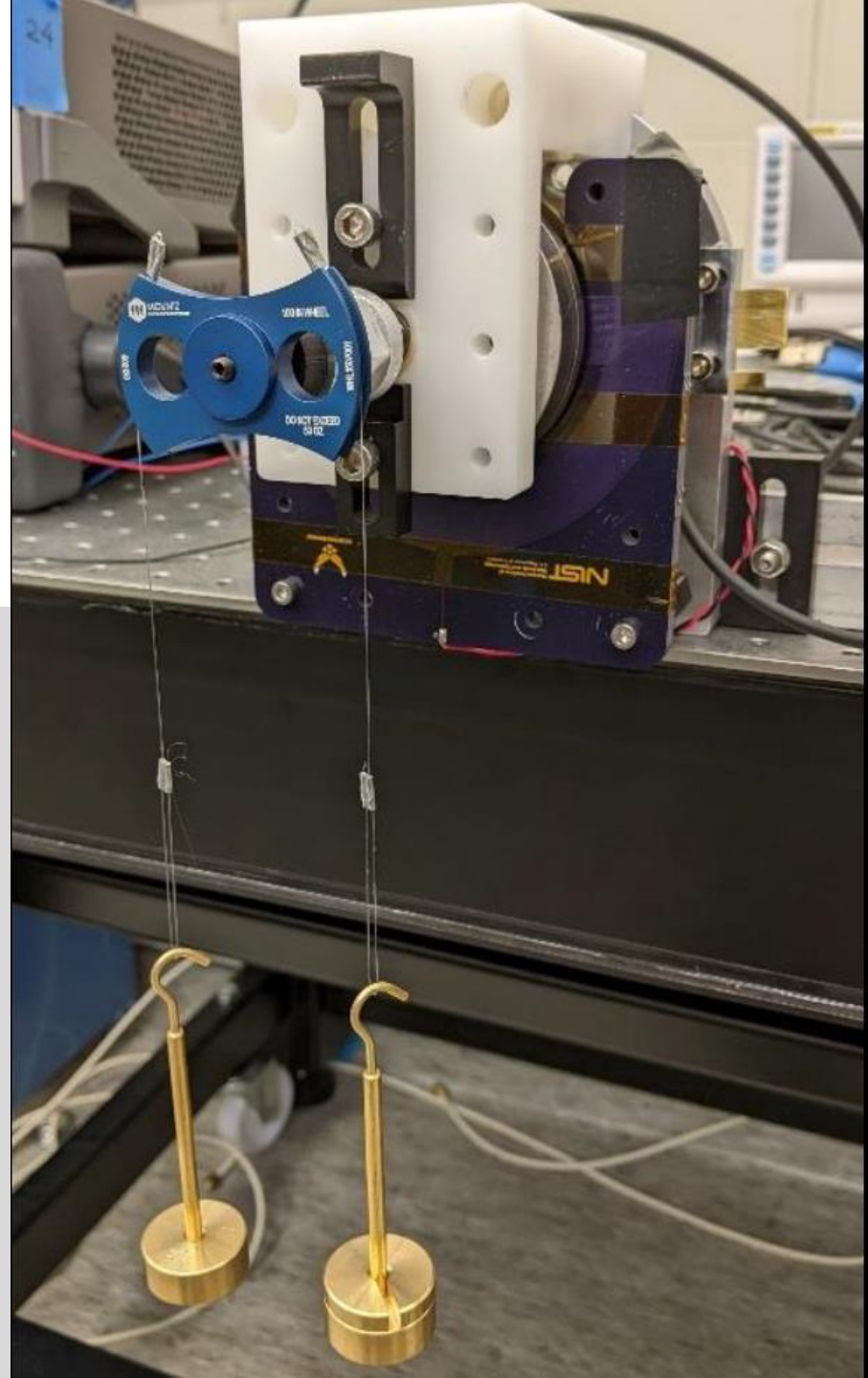


Fig. 1. Computer-aided design rendering of the KIBB-g1 KB. Structural components have been hidden for clarity. Cross-sectional views of both magnets/coils are shown. The MMS is everything to the left of the knife points and the CMS to the right.

euspen's 22nd International Conference & Exhibition, Geneva, CH, May/June 2022

www.euspen.eu



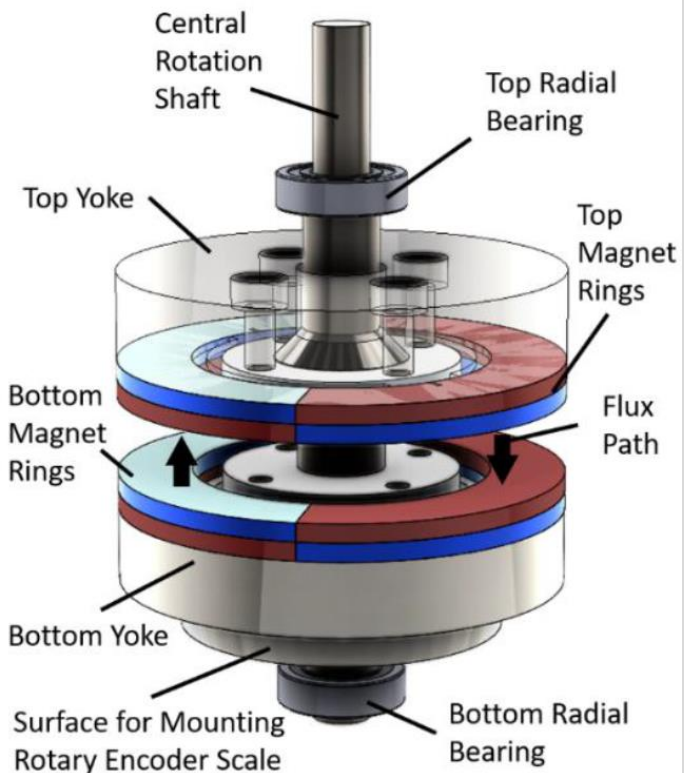
A new spin on Kibble: A self calibrating torque realization device at NIST

Zane Comden^{1,2}, Stephan Schlamminger¹, Charles Waduwarage Perera^{1,2}, Frank Seifert^{1,2}, David Newell¹, Jay Hendricks¹, Barbara Goldstein¹, Leon Chao¹

¹National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA

²University of Maryland, College Park, MD, USA

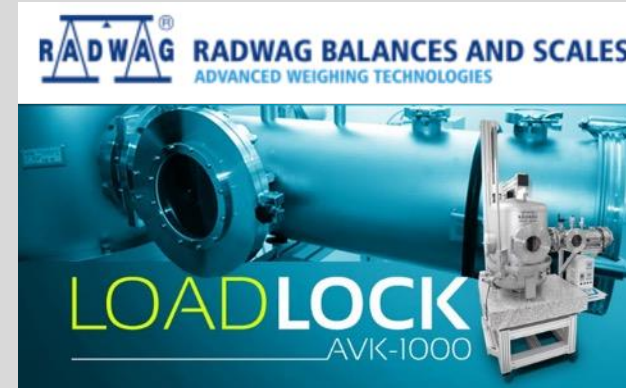
Torque



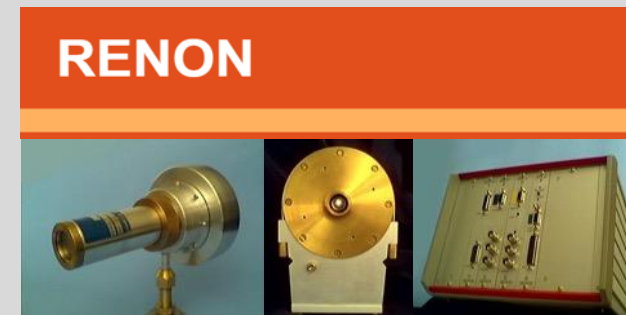
Project feasibility evaluation

Cooperation with Polish industry

- Natural partner for GUM in constructing own project of low mass Watt-Kibble balance could be RADWAG company from Radom – manufacturer of world-quality mass comparators.
- Another potential partner would be RENON company from Cracow – very experienced in designing laser interferometer systems for spectrometers.
- There are also good Polish manufacturers of high vacuum chambers (e.g. TEPRO – Koszalin).



State
Science
Industry
Innovation



A duty of Polish state is to support Polish innovative industry.



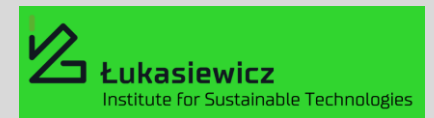
However, partners from industry must be chosen via tenders and other selection procedures demanded by Polish law.

Project feasibility evaluation

Cooperation with Polish scientific institutions

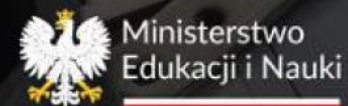
The partnership of Polish universities with GUM would cover both direct, substantial cooperation on given subjects related to small masses Kibble balance and formal participation in consortia, when applying for UE funds.

- Technical University of Warsaw, Faculty of Mechatronics (metrology & system assembling)
- Technical University of Warsaw, Faculty of Geodesy and Cartography (gravimetry)
- Nicolaus Copernicus University in Toruń (UMK)
[already cooperating with GUM, sharing the optical atomic clock with so called frequency comb system, coupled with UTC(PL) national standard of time in GUM]
- Casimir Pulaski Radom University (URad)
[possible expertises of magnetic materials, FEM simulations (mechanical, magnetic), CAD design, CNC machining, statistical methods in metrology – Faculty of Mechanical Engineering]
- Łukasiewicz Research Network – Institute for Sustainable Technologies ITeE in Radom
- Łukasiewicz Research Network – Industrial Institute of Automation and Measurements PIAP in Warsaw [metrology & system assembling]
- Kielce University of Technology (PŚk)
[offers new courses on metrology for students and first of all this university is main consortiant for GUM in new laboratory campus]



Konkurs

Polska Metrologia



Edycja I: ~~Kompaktowa waga Watta-Kibble'a jako nowy, subkilogramowy wzorzec masy w polskim systemie metrologicznym (UTH Rad., PW, ITeE-Lukasiewicz)~~

Edycja II: ~~Układ magnetyczny polskiej wagi Watta-Kibble'a (PW, URad, PIAP)~~



Education on Watt-Kibble balance

A LEGO Kibble balance – from NIST to Poland

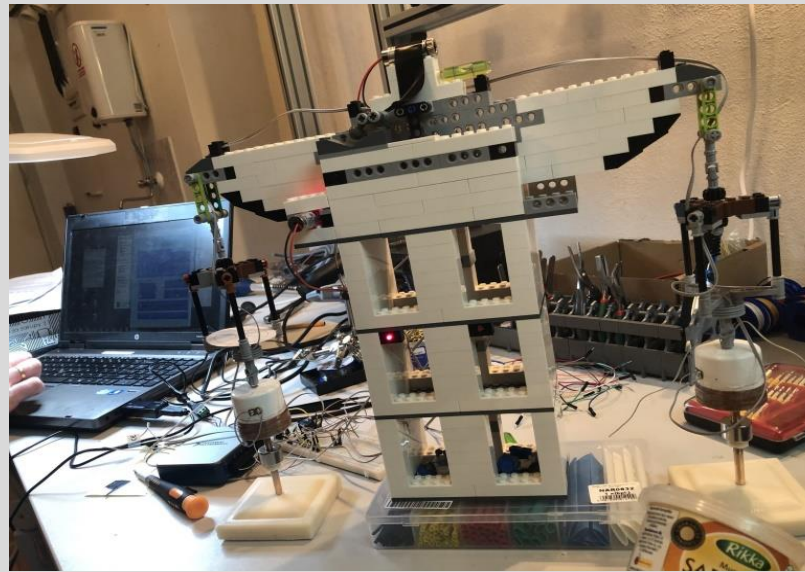
A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI - Am. J. Phys. **83 (11)**, November 2015

/L. S. Chao, S. Schlamminger, D. B. Newell, and J. R. Pratt/

/Physical Measurement Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899/

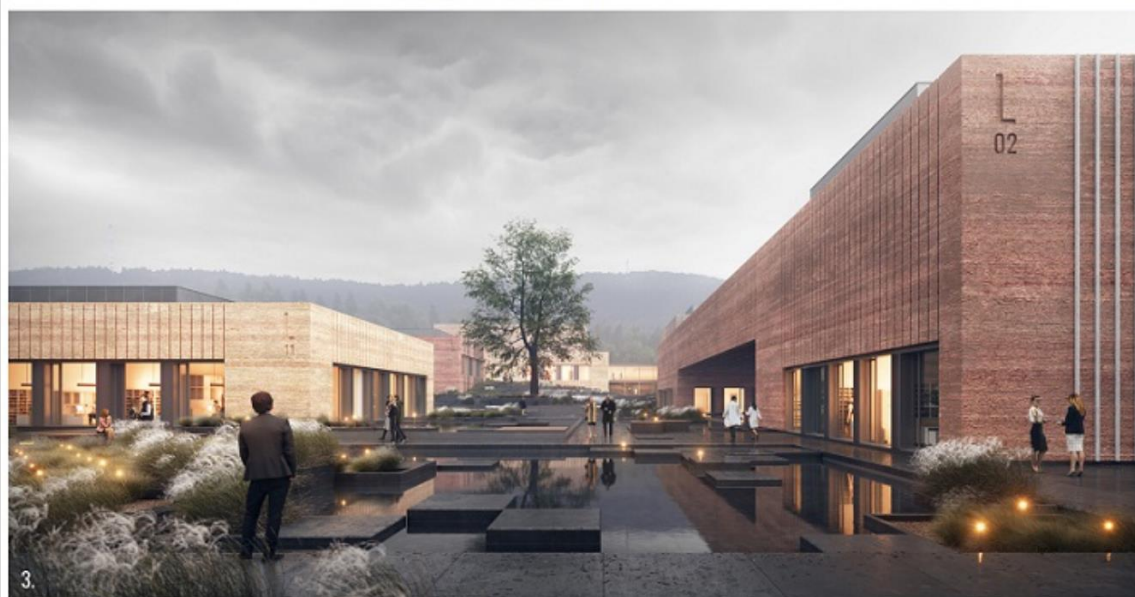
/F. Seifert, X. Zhang, G. Sineriz, M. Liu, and D. Haddad/

/Joint Quantum Institute, University of Maryland, College Park, Maryland 20742/



Sebastian Margalski, Manager of the GUM Promotion Office and a great weight enthusiast of LEGO Kibble balance: "The project was started in January 2019. The balance was launched in May 2019 during the Science Picnic. It was its first public presentation. During the tests it was shown that the coils were put on too shallow caps, which did not allow full, gentle movement. We are currently re-manufacturing coils wound on caps printed in 3D printing technology with PLA material. We plan to finalize the project by the end of this year. It should result in documentation – say – the article. In November 2019, we invited Radwag to cooperate with us in order to wind good coils".

Świątokrzyski Kampus Laboratoryjny Głównego Urzędu Miar





POLSKA UNIA[®]
METROLOGICZNA

PUM ▾

INFORMACJE ▾

BAZA BIM ▾

BLOG

KONFERENCJE ▾

KONTAKT

BROSZURA PUM

BIM

BAZA
INFRASTRUKTURY
METROLOGICZNEJ





Kilogram: Silicon Spheres and the International Avogadro Project

Introduction: Redefining the World's Measurement System

Road to the Revised SI Meter

Kilogram

Kilogram: The Past

Kilogram: Focus on History

Kilogram: The Present

Kilogram: Mass and Planck's Constant

Kilogram: The Kibble Balance

The NIST Do-It-Yourself Kibble Balance

Though measurement scientists chose the Planck constant as the basis for redefinition, other constants of nature can also be used, if for no other reason than to provide a check that the Planck constant definition is correct. For decades, an international collaboration has been working on a complementary strategy for defining the kilogram that involves counting the number of atoms in an almost perfectly round, softball-sized sphere of silicon-28 atoms. The goal: a more precise determination of the Avogadro constant (N_A), which relates the number of atoms or molecules in a substance to its mass.

Alternative Recipe for the Kilogram

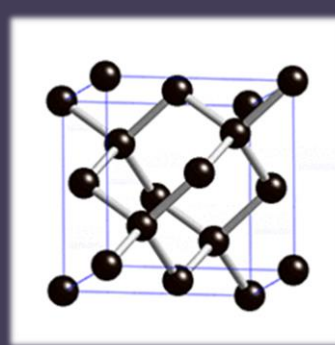
A typical material is composed of a huge number of atoms and molecules. The Avogadro constant (symbolized as N_A) makes it easier to express the huge amount of atoms or molecules in a material.

In the current SI, the Avogadro constant (N_A) is technically defined as the number of carbon-12 (carbon atoms with a total of 12 protons and neutrons) in 12 grams. That number is equal to about 6.022×10^{23} carbon-12 atoms. This quantity constitutes one mole.

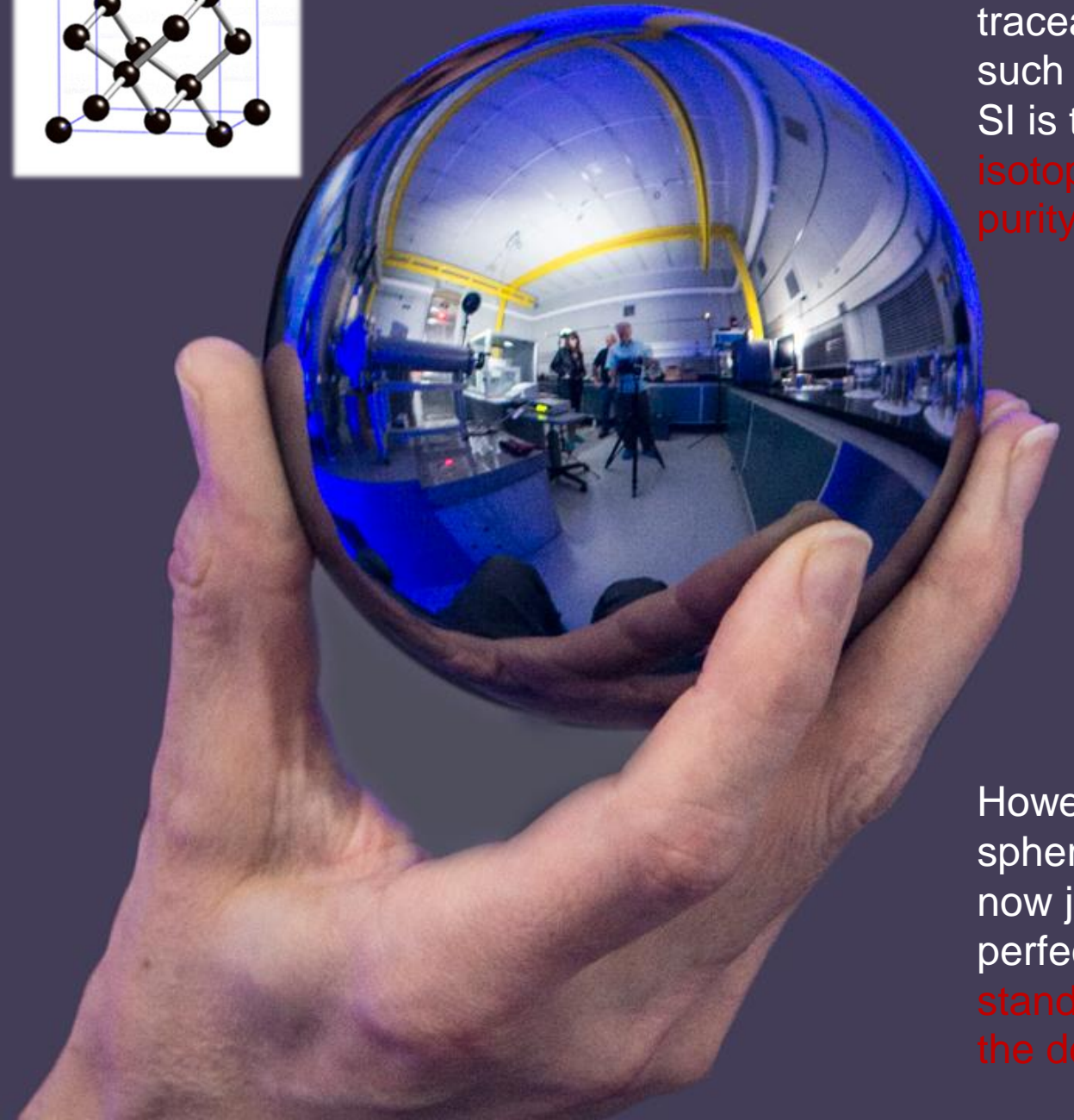
But the Avogadro constant is meant to be applied to any kind of atom or molecule or other kind of substance, whether it's a hydrogen molecule, a carbon atom, or a golf ball. A mole of any of these substances equals 6.022×10^{23} of its constituents (in this case hydrogen molecules, carbon atoms, golf balls).



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
National Metrology Institute



Si crystal
structure



The only problem in traceability of such kg with SI is the **isotopic purity** of Si.

However, Si sphere is now just perfect **standard of the density.**

On 10th April 2008 the two ²⁸Si spheres came to the PTB from the last stage of their production process in Australia. After the raw silicon from Russia had been processed into a cylindrical single crystal in the Institute for Crystal Growth (IKZ), Berlin, Australian colleagues at the National Measurement Institute (NMI) in Sydney had the last stage of production in their hands: to polish the silicon body into a perfect sphere. It is now the job of the PTB to determine the topography, the volume and the mass of the spheres with the smallest measurement uncertainties.

A measurement uncertainty of 0.1 nm (corresponding to the thickness of a monoatomic layer) is demanded for the radius of the sphere which is around 5 cm, and an uncertainty of 5 µg, for the mass of the sphere weighing approximately 1 kilogram.

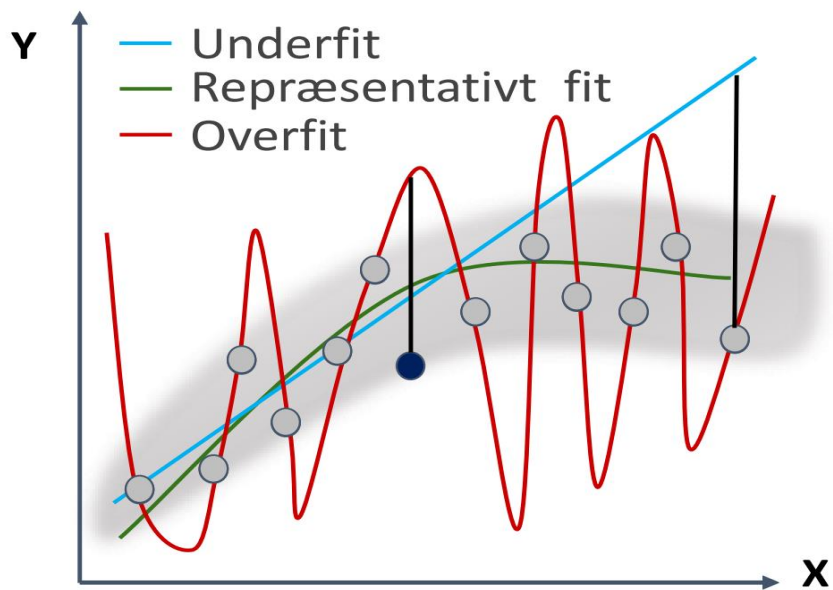
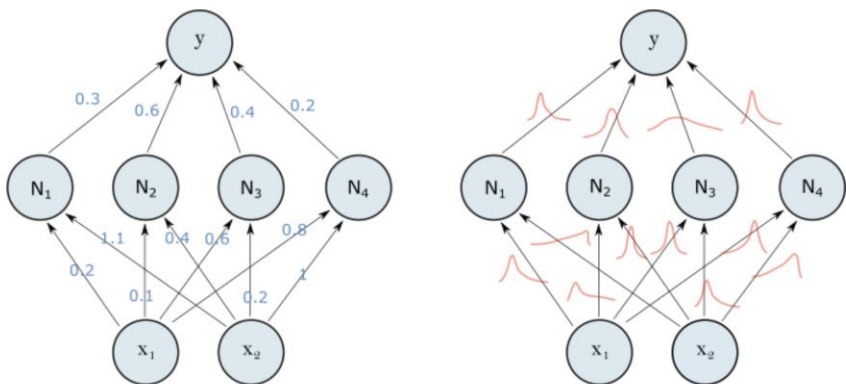
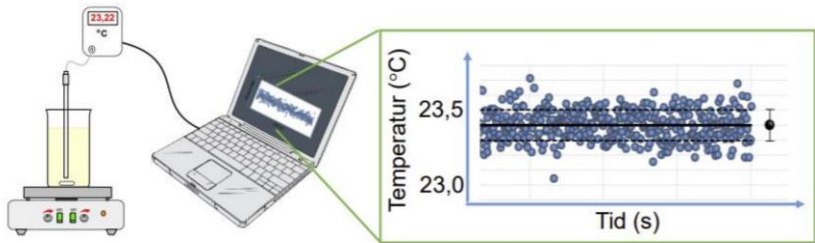
Using AI in Dimensional Metrology

The use of artificial intelligence in metrology became inevitable after declaring the theme of Metrology in the Digital Era on the World Metrology Day 2022. Consequently, the 27th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) has considered the digital transformation to collect, aggregate, analyze, and interpret the networked sensor data that would be acquired during metrology applications (Draft Resolutions of the General Conference on Weights and Measures 2022). It emphasizes the secured data sharing at the international apex down to a local level at various stakeholders (i.e., governments, industry, academia, and civil society). Digitizing the International System of Units (SI) provides confidence in the accuracy and global comparability of measurements. CGPM also drafted a resolution to adopt the FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) principle to develop and promote an SI Digital Framework. The framework covers (1) digital representation of the SI – dissemination of SI standards – exchange of metadata; (2) digital data exchange standards and protocols, digital certificates; and (3) digital twins to simulate the measurement process (Proceedings of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) 2018; International Committee for Weights and Measures (CIPM) 2021). Turing's legacy in computing is far from leaping from the equations to the phenomena, from calculation to modeling (Machinery, Computing 1950). Turing is the first to think of competing humans with computer intelligence.

Dinesh K. Aswal
Sanjay Yadav
Toshiyuki Takatsuji
Prem Rachakonda
Harish Kumar
Editors

Handbook of Metrology and Applications

Models with confidence



Input	Neuralt Netværk	Output	Output værdier eller fordelinger
$\hat{X}(\pm\sigma)$	[Neural Network Diagram]	0.6	$y_1 \pm \sigma_1$
		0.1	$y_2 \pm \sigma_2$
		0.3	$y_n \pm \sigma_n$

Artificial Intelligence in material science ?

Density Functional Theory (DFT) Calculation / electronic structure /



$$\rho(\mathbf{r}_1) = N \int \cdots \int |\Psi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)|^2 ds_1 d\mathbf{x}_2 \cdots d\mathbf{x}_N$$

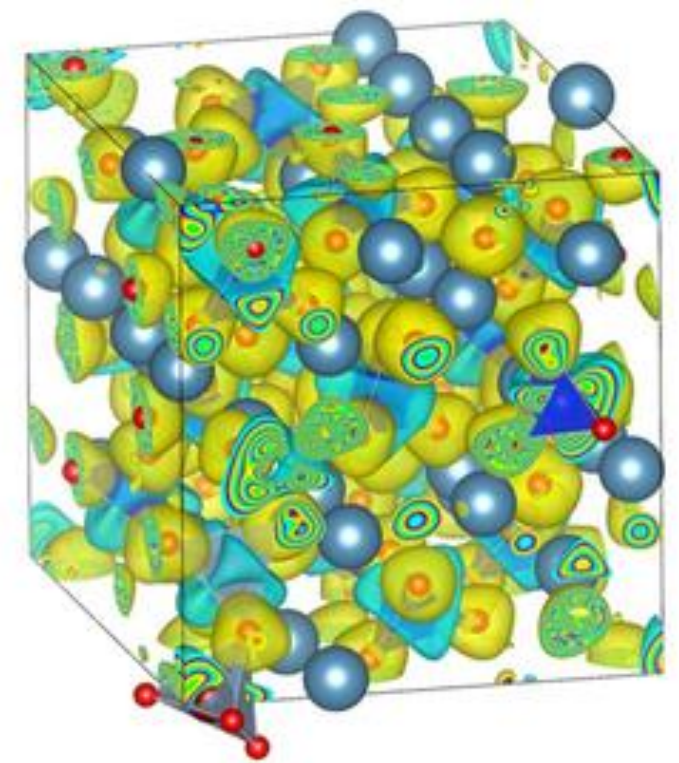
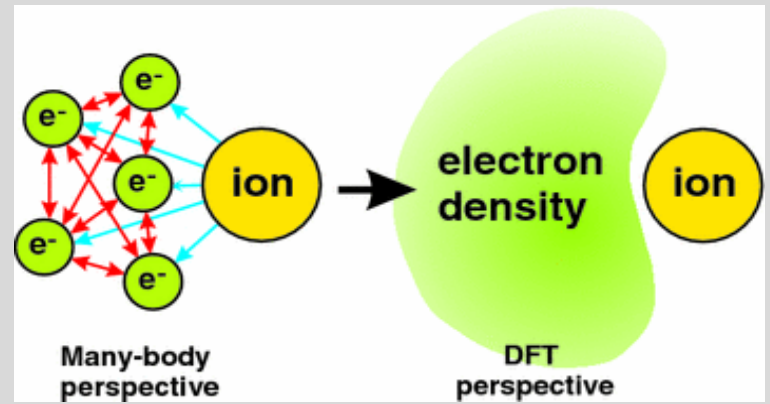
6  **Nonrelativistic Schrödinger equation**

$$\hat{H}(\{\mathbf{r}\}, \{\mathbf{R}\})\Psi_j(\{\mathbf{r}\}, \{\mathbf{R}\}) = E_j \Psi_j(\{\mathbf{r}\}, \{\mathbf{R}\})$$

$$\hat{H}(\{\mathbf{r}\}, \{\mathbf{R}\}) = \underbrace{\sum_{j=1}^{N_e} \left(-\frac{\nabla_j^2}{2} + V_e(\mathbf{r}_j) \right) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq k}^{N_e} \frac{1}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k|}}_{\text{electronic Hamiltonian}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{N_n} \left(-\frac{\nabla_j^2}{2M_j} + V_{n,j}(\mathbf{R}_j) \right) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq k}^{N_n} \frac{Z_j Z_k}{|\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_k|}}_{\text{nuclear Hamiltonian}} - \underbrace{\sum_{j=1}^{N_e} \sum_{k=1}^{N_n} \frac{Z_k}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{R}_k|}}_{\text{electron-nuclear attraction}}$$

$V_e(\mathbf{r}), V_n(\mathbf{R})$: external scalar potentials acting on the electrons/nuclei.

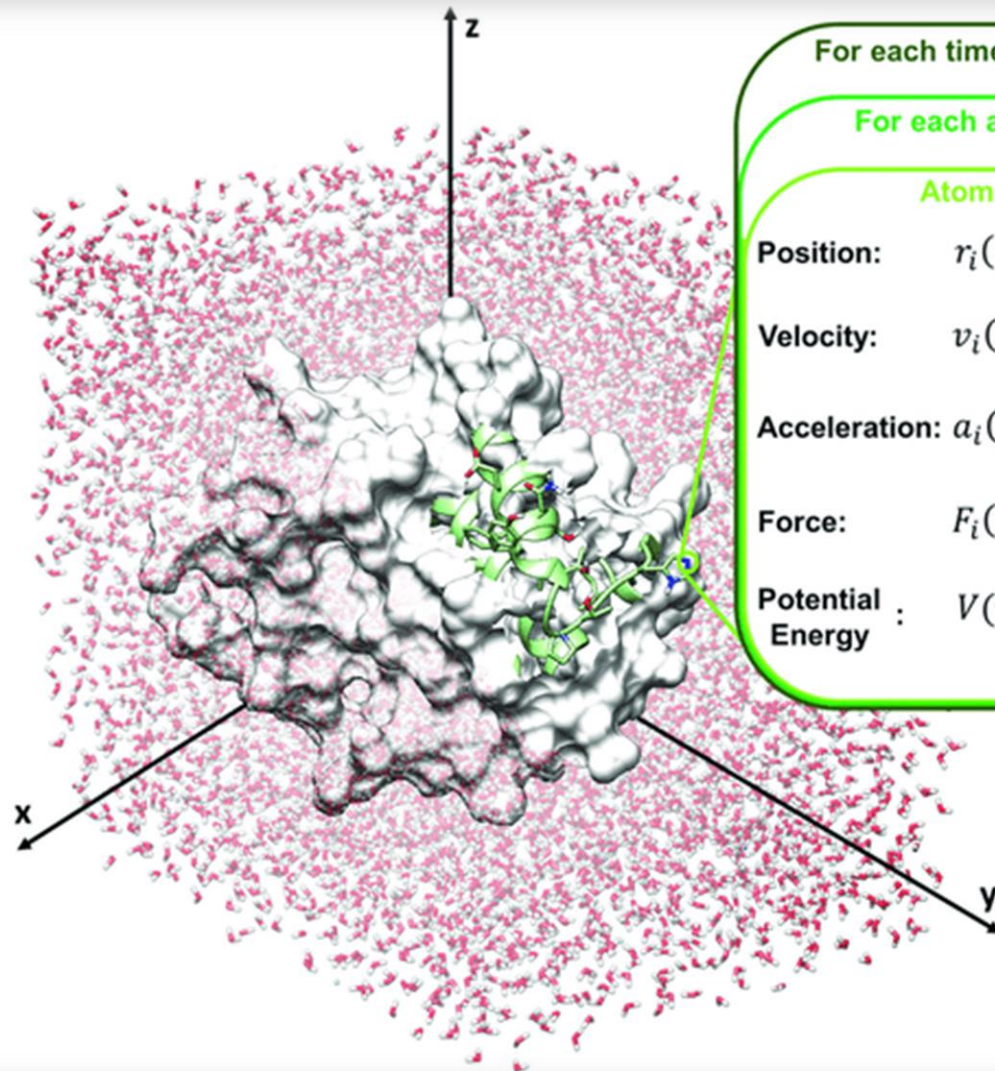
Density functional theory (DFT) -
- the quantum mechanical method used to model the structure and properties of chemical molecules or crystals.
This method is an alternative to methods based on wave functions.



Molecular Dynamics – a semiclassical approach

$$H(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = \frac{1}{2} \sum_i \|p_i\|^2 + \sum_{i < j} V_{LJ}(\|q_i - q_j\|).$$

$$V_{LJ}(r) = \begin{cases} 4 \left(\frac{1}{r^{12}} - \frac{1}{r^6} \right), & \text{if } r \leq r_{\text{cutoff}}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



For each timestep (δt):

For each atom:

Atom i at time t :

Position: $r_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$

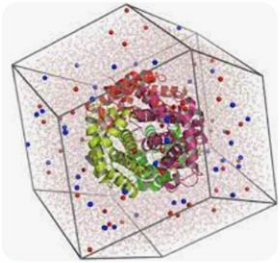
Velocity: $v_i(t) = \frac{dr_i(t)}{dt}$

Acceleration: $a_i(t) = \frac{d^2r_i(t)}{dt^2} = \frac{F_i(t)}{m_i}$

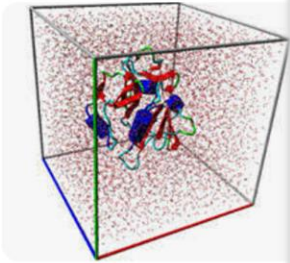
Force: $F_i(t) = - \frac{dV(r(t))}{dr_i(t)}$

Potential Energy: $V(r(t))$

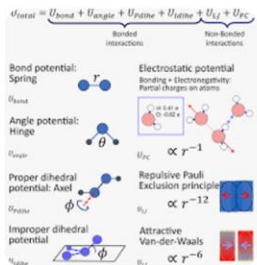
interatomic or intermolecular interactions



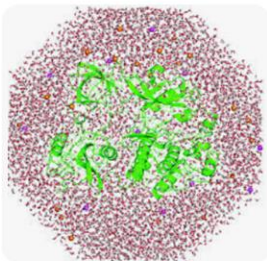
Creative Proteomics
Molecular Dynamics Simul...



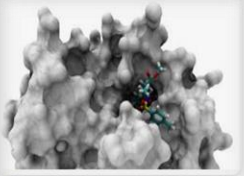
IndiaMART
Molecular Dynamic Simulation



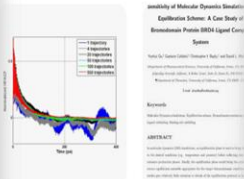
Frontiers
Frontiers | Mechanistic ...



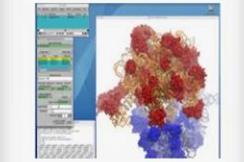
PNAS
Molecular dynamics and p...



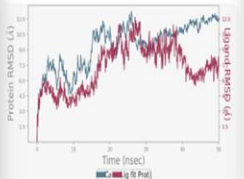
Acellera
Pocket Detection, Docking And Molecular Dy...



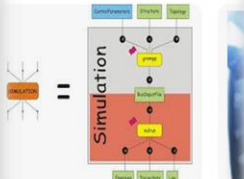
MIT ASE
Ensemble averaging v...
ChemRxiv
Retracted Sensitivit...



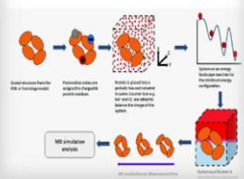
Swiat Chemii
Visual Molecular Dynamics (en) | Portal Chemi...



PeerJ
A molecular dynamics simulation study of th...



Molecular Dynamics Group
Molecular Dynamics Group
LA
Mole...



Artificial intelligence for materials design

Max Planck scientists explore the possibilities of artificial intelligence in materials science and publish their review

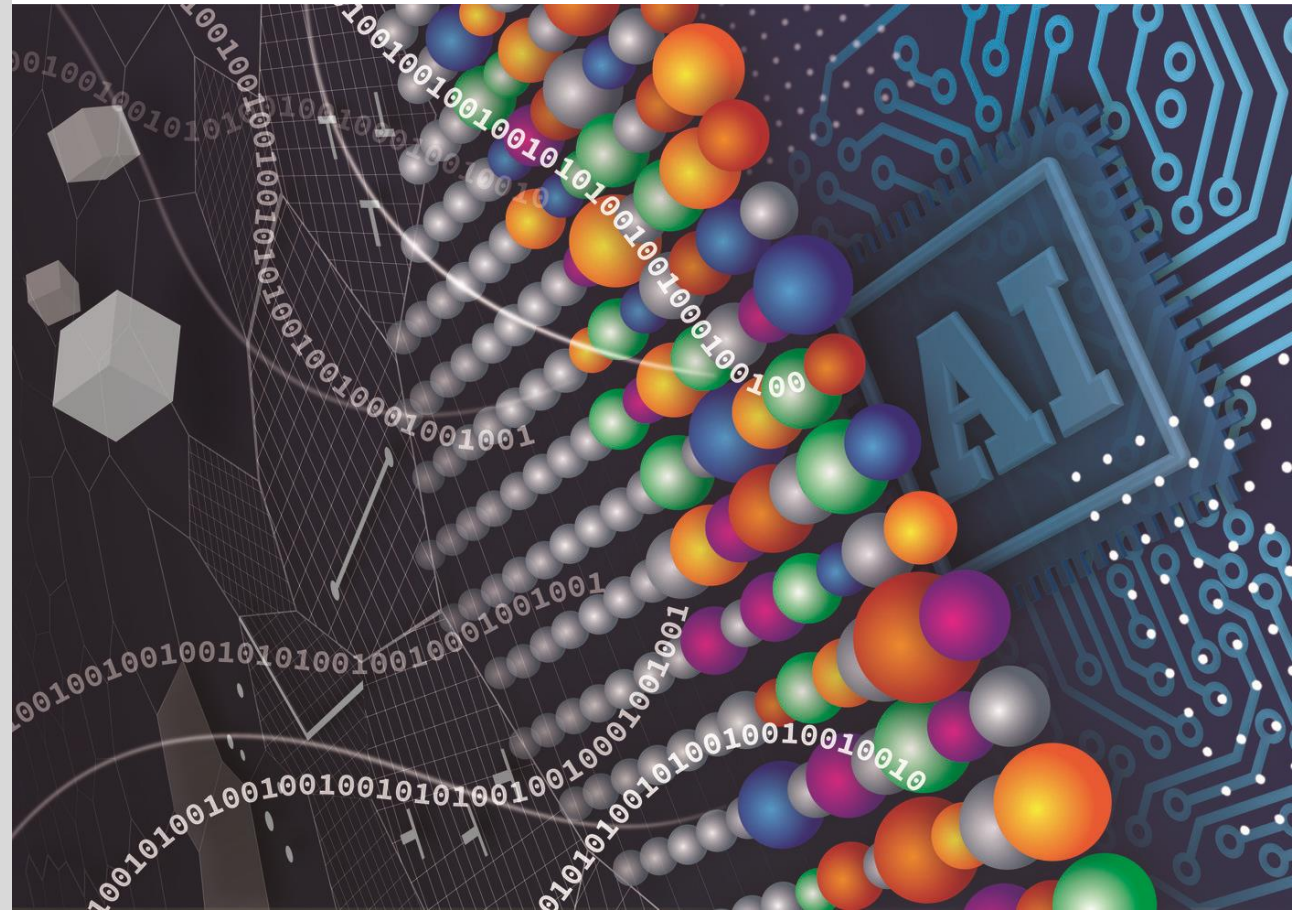
MARCH 31, 2023

Merging physics-based simulations with artificial intelligence gains increasing importance in materials science, especially for the design of complex materials that meet technological and environmental demands.

© T. You, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH

The paper compares physics-based simulations, like molecular dynamics and ab initio simulations with descriptor-based modelling and advanced artificial intelligence approaches. While physics-based simulations are often too costly to predict materials with complex compositions, the use of artificial intelligence (AI) has several advantages.

“AI is capable of automatically extracting thermodynamic and microstructural features from large data sets obtained from electronic, atomistic and continuum simulations with high predictive power”, says Jörg Neugebauer, director at Max-Planck-Institut für Eisenforschung and co-author of the publication.

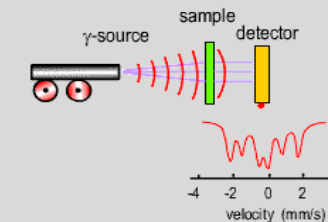
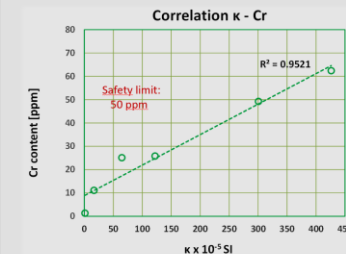
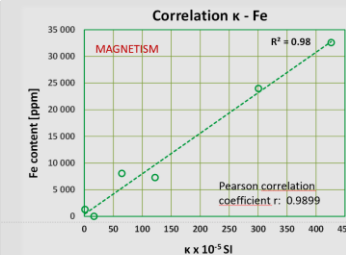




Magnetyczny susceptometr wagowy do zastosowań środowiskowych



ekonomiczna alternatywa wobec metod spektroskopowych (np. tzw. spektrometrii mössbauerowskiej) m.in. do wykrywania metali ciężkich



The main partners

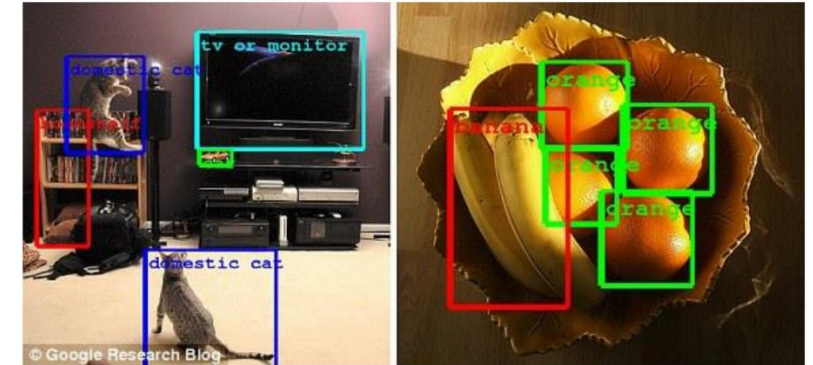


European weighing industry association

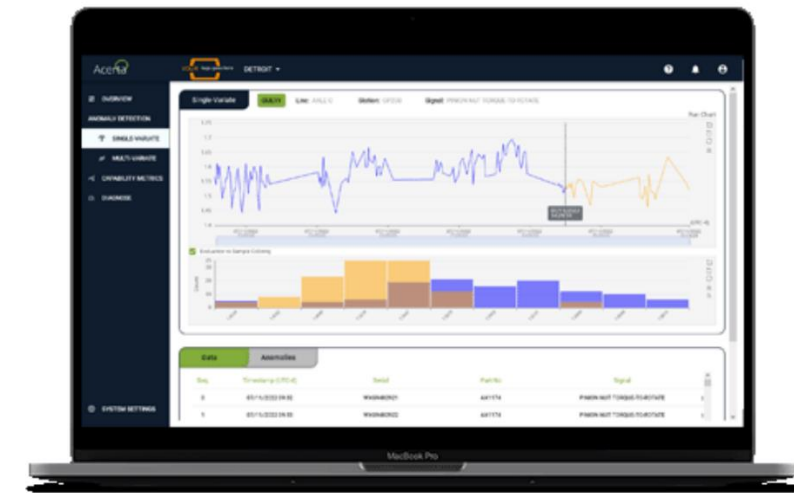


Artificial Intelligence: Applications in the industry

- Image recognition / visual inspection
 - Recognize objects under varying light conditions
 - Check product quality optically
- Smart SPC / Predictive Quality **IOT**
 - Correlate production data and quality data
- Predictive Maintenance **IOT**
 - Identify patterns in sensor data which points to imminent failures

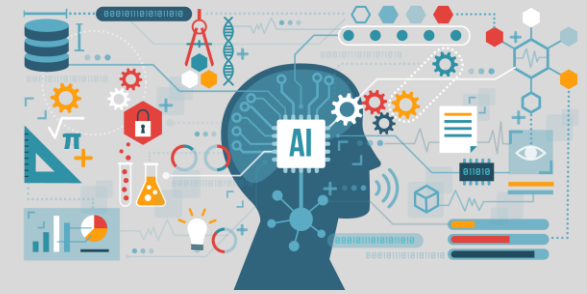


ksb.com



acerta.ai

Wnioski końcowe:



- Nastąpiła prawdziwa rewolucja w Międzynarodowym Układzie Jednostek SI, dzięki odejściu od materialnego wzorca kilograma
- Nowy układ jednostek oparto na fundamentalnych stałych i zjawiskach fizycznych.
- Waga Watta-Kibble'a zapewniła praktyczną realizację nowego wzorca masy.
- Polski przemysł aktywnie uczestniczy w rozwoju innowacyjnej metrologii masy (w tym m.in. w nanometrologii masy).
- Brakuje skoordynowanej, narodowej polityki w zakresie metrologii masy.
- Rewolucja w układzie SI stymuluje rozwój nowych technologii.
- W przyszłości można spodziewać się pozytywnego sprzężenia zwrotnego między metrologią (w tym metrologią masy) a sztuczną inteligencją.



Metrology Symposium 2024

16-18 APRIL 2024, RADOM, POLAND

Invitation

We are pleased to invite you to the Metrology Symposium 2024. The event will take place on 16-18 April 2024 in the RADWAG headquarters in Radom.

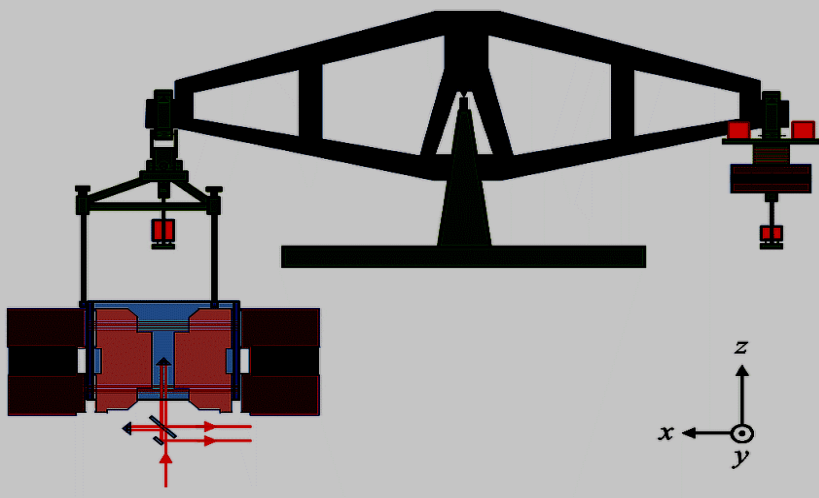
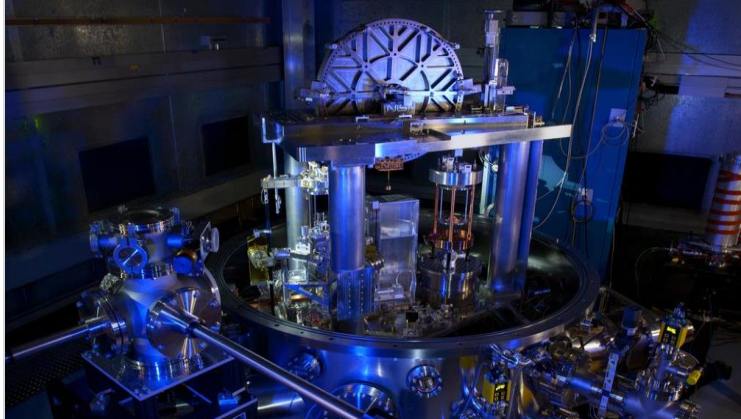
The Metrology Symposium 2024 is addressed to metrology experts who will give their presentations on **digitalization and automation in mass metrology**.

Furthermore, the gathering will include:

- Pararell technical sessions
- Visit to the new GUM campus in Kielce
- Additional attractions

- BEV Austria
- CMI Czechy
- METAS Szwajcaria
- NRC Kanada
- NIST USA
- NIM Chiny
- NPL UK
- PTB Niemcy

**”Digitalization and Automation in Mass Metrology.
Third Edition: Future and New Solutions”**



**Dziękuję Państwu
za uwagę**

UNIWERSYTET RADOMSKI
im. Kazimierza Pułaskiego



Akademia Inżynierska w Polsce

Academy of Engineering in Poland

