

REFLECTÂND ASUPRA TRECUTULUI – PRIVIND SPRE VIITOR: DE LA OCAUA LUI CUZA LA CONSTANTA LUI PLANCK

Adriana VÂLCU¹

adivaro@yahoo.com

*“To measure or not to measure, that is the question”
 (“A măsura sau a nu măsura, aceasta este întrebarea”)²*

ABSTRACT:

The paper presents a short history regarding the adoption of the metric system both in the world and Romania, after which the main stages that have underpinned the development of Metrology in our country are reviewed.

As a particular case, reference will be made to one of the most important areas of Metrology, with an impressive history - Mass field. As a result, the article aims to be a synthesis of the most important and representative moments from the past and current activity in this field, as well as the evolution of the measurement standards and the methods used in the dissemination of mass unit.

Reference will be made to the main measurement units from the Cuza period, after which, as an arch over time, it is related to Planck's constant, according to which the mass unit is defined starting with May 20, 2019.

KEYWORDS: United Principalities of Moldavia and Wallachia, Cuza's measure, Planck's constant, weights, mass comparators.

CUPRINS

1. Introducere
 2. Scurtă prezentare a istoriei unităților de măsură
 3. Aderarea României la Convenția Metrului
 4. Măsuri existente: ocaua lui Cuza
 5. Etapele înființării Institutului Național de Metrologie
 6. Istoria Domeniului Mase din România
 7. Stadiul actual al domeniului Mase din România
 - 7.1. Stadiul actual în diseminarea unității de masă
 - 7.2. Stadiul actual în domeniul masei hectolitrică a cerealelor
 8. România și Metrologia internațională
 9. Noua definiție a unității de masă. Constanta lui Planck
 - 9.1. Metoda XRCD (X-ray Crystal Density) metoda densității cristalelor cu raze X
 - 9.2. Metoda balanței Kibble (watt)
 - 9.3. Ruta de trasabilitate după redefinire
 10. Rezultate actuale. Perspective
- Bibliografie

1. Introducere

În viața de zi cu zi, dar și mai mult, în lumea științifică este necesar ca valorile mărimilor, pentru a fi înțelese, să fie exprimate într-o unitate de măsură.

Ne putem întreba de multe ori ce reprezintă un metru sau o secundă? Există un raționament pentru care unitatea de lungime are acea mărime fixată, stabilită, care pare aleatoare, și nu alta? Oare metrul corespunde unui etalon natural, sau este stabilit aleator de om?

¹ Dr. ing., Direcția Regională de Metrologie Legală (anterior Institutul Național de Metrologie).

² V. Echeverria, “To measure or not to measure, that is the question. A reflection on the ontology of measurements”, *NCSLI International Symposium*, SUA, 2006.

Omul este cel care a inventat unitățile de măsură și le consideră ca universale, acest aparent paradox făcând să ne punem probleme privind semnificația unităților de măsură.

Pentru a explica această curiozitate asupra unităților de măsură, care se pare că au o definiție abstractă, ar fi interesant să se știe cum a evoluat concepția mărimilor măsurabile de-a lungul istoriei științei, de a înțelege de ce dintre toate unitățile care există, pentru exprimarea aceleiași mărimi, una singură a fost reținută ca oficială.

2. Scurtă prezentare a istoriei unităților de măsură

Primele unități de măsură (ca de altfel și primele mijloace de măsurare) au fost: *cotul*, *piciorul*, *palma*, *palmacul* și degetul omului, Fig.1. Încă din antichitate, la toate popoarele, acestea constituiau baza sistemului de măsuri pentru lungime, arie și volum. Pentru măsurile de masă, sursa de inspirație au reprezentat-o produsele agricole³.

Palmacul reprezenta o veche unitate de măsură pentru lungime, folosită mai ales în Moldova, egală cu 3,4 cm și echivalând aproximativ cu a opta parte dintr-o palmă.

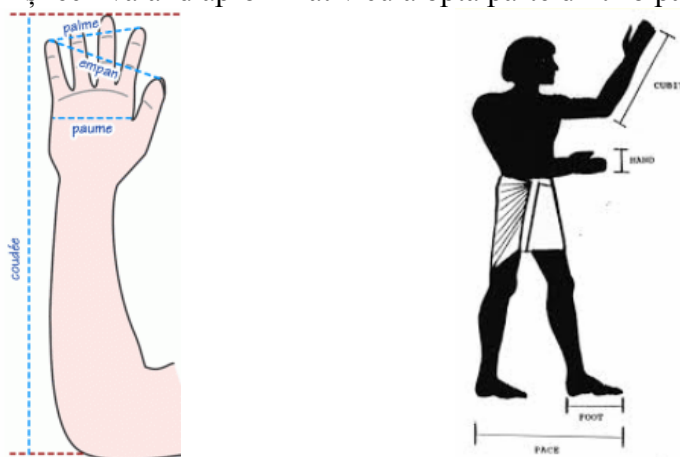


Fig.1: Primele unități de măsură : *cotul*, *piciorul*, *palma*, *palmacul* ^{4,5}

Unitatea de măsură pentru lungime în urmă cu 4000 de ani era *cotul dublu*, cu valoarea de 592 mm, dimensiune egală cu lungimea pendulului care bate secunda⁶.

Unitatea de măsură pentru masă, folosită în aceeași perioadă, avea la bază masa apei conținută într-un cub ale cărui muchii erau egale cu lățimea unei palme, respectiv cu 1/10 din cotul dublu babilonian. Unitatea de masă babiloniană (*mina regală*) avea masa de 982 g. S-a constatat din calcule că, dacă se lua ca bază muchia cubului de 99,2 mm, valoarea masei trebuia să fie de 976 g, existând o diferență de 6 g față de mina regală, fapt nesemnificativ pentru posibilitățile din acea perioadă⁷. Se poate observa că unitatea de volum se definea în funcție de unitatea de lungime (cotul dublu), în timp ce unitatea de masă se definea în funcție de unitatea de volum.

Întrucât acestea pot fi considerate a fi de bază la realizarea sistemului metric se poate spune că antichitatea a reprezentat un pas important, care a deschis calea saltului înregistrat în ultimele două secole la stabilirea sistemului metric de unități de măsură.

³ F. Iacobescu, N. Ilieșiu, *Metrologia - Etalon al civilizațiilor*, București, Editura Academiei Române, 2004.

⁴ D. Oprea, *Istoria unităților de măsură – Greutăți și lungimi*, 2010,

[<https://istoriiregasite.wordpress.com/2010/05/12/inventii-in-istorie-greutati-si-lungimi/>]

⁵ Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, *Medidas Elétricas A Linguagem da Metrologia*, [http://www.facom.ufu.br/~albertini/madeleine/images/d/da/Aula_2_metrologia.pdf]

⁶ F. Iacobescu, N. Ilieșiu, *Metrologia - Etalon al civilizațiilor*, București, Editura Academiei Române, 2004.

⁷ Idem.

În secolul XVII-lea, în Europa erau legalizate unități de măsură proprii fiecărei țări. Întrucât acestea erau diferite de la o țară la alta, au fost create o serie de probleme, atât în comerț, cât și între relațiile dintre țări, datorită calculelor complicate.

Ca urmare a acestui fapt, în Franța se pune problema realizării unui sistem de unități de măsură, la baza căruia să se afle o unitate de lungime invariabilă și ușor de reprodus.

În 1668, savantul englez John Wilkins, membru al Societății Regale în lucrarea sa *An Essay Towards A Real Character and a Philosophical Language* definește o lungime, un volum și o masă „universală”. Lungimea era definită drept 38 de țoli de Prusia (cca. 993,7 mm), corespunzând lungimii unui pendul cu semiperioada micilor oscilații de o secundă. Volumul era definit prin latura unui cub de lungime dată, iar masa era cea a apei de ploaie care umplea acest volum⁸.

În anul 1790 Adunarea Constituantă Franceză, la propunerea lui Talleyrand se pronunță pentru crearea unui sistem de unități de măsură stabil, uniform și simplu, bazat pe o mărime naturală unitară, iar ca unitate de bază este ales metrul lui Burattini (care redenumea unitatea de măsură universală propusă de John Wilkins în *metru* (*metro cattolico*, traducere literală a expresiei *măsură universală*)).

În 1793, la obiecția că lungimea pendulului cu semiperioada de o secundă nu este aceeași peste tot, metrul este definit provizoriu ca fiind exact a 10 milioane parte dintr-un sfert de meridian terestru. Cu această unitate se definesc unitățile de volum și masă, punându-se bazele sistemului metric zecimal. În același an, Adunarea Națională a Franței hotărăște crearea unor etaloane pentru metru și *grave*, denumirea originală pentru *kilogram*⁹.

La 7 aprilie 1795, Adunarea Națională a Franței adoptă definitiv această definiție, prin decret. Termenii „gravet” (corect „milligrave”) și „grave” sunt înlocuiți cu termenii *gram*, respectiv *kilogram*.

De asemenea, au fost multe discuții între lingviști pentru a defini unitățile de măsură. Astfel, s-au ales nume provenite din limba greacă și anume: unitatea de lungime, metrul, va veni din grecescul “*metron*” (măsură), volumul se va exprima în litru (din grecescul “*litra*”, măsură grecească pentru lichide) și greutatea în grame (din grecescul “*gramma*”, însemnând greutate mică).

Crearea sistemului metric zecimal în perioada Revoluției Franceze și depunerea ulterioară, la 22 iunie 1799, a două etaloane din platină, reprezentând metrul și kilogramul la Arhivele Republicii Franceze din Paris (Fig. 2, Fig. 3) pot fi considerate ca o primă etapă în fondarea Sistemul Internațional de Unități actual.

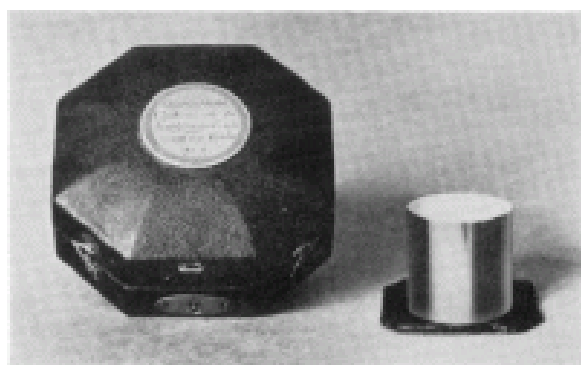


Fig. 2: Kilogramul de la Arhive¹⁰



Fig. 3: Metrul de la Arhive¹¹

⁸ A. Valcu, C. Militaru, *Trasabilitatea măsurărilor și asigurarea metrologică*, Editura Standardizarea, 2011.

⁹ Idem.

¹⁰ F. J. Smith, “Standard Kilogram Weights A Story of Precision Fabrication”, *Platinum Metals, Rev.*, 1973, 17, (2), 66.

¹¹ W. J. Rensburg, “*The art of Measuring*”, [https://www.slideshare.net/wernerjvr/the-roi-of-ux-design-39911538]

La 10 decembrie 1799 (o lună după lovitura de stat a lui Napoleon), sistemul metric este adoptat în Franța, iar după 13 ani este retras, fiind abolit complet în timpul Restaurației.

În 1816, Țările de Jos introduc sistemul metric care va fi reintrodus în Franța abia după Revoluția din 1830.

În 1832, Gauss susține cu tărie utilizarea Sistemului Metric împreună cu secunda, definită în astronomie, ca sistem coerent de unități în toate științele fizicii. El a fost primul care a făcut măsurări absolute ale câmpul magnetic terestru cu ajutorul unui sistem zecimal bazat pe trei unități de măsură mecanice: milimetrul, gramul și secunda (sistem de unități cunoscut ca *Sistemul lui Gauss*), pentru mărimile lungime, masă, respectiv timp.

În anii care au urmat, Gauss și Weber au extins aceste măsurări pentru a include și fenomenele electrice¹².

Aceste aplicații în domeniul electricității și magnetismului au fost în continuare dezvoltate după 1860 sub conducerea activă a cunoscuților oameni de știință Maxwell și Thomson, membrii ai Asociației Britanice pentru Dezvoltarea Științei (BAAS, BA în zilele noastre). Ei au pledat pentru realizarea unui sistem coerent de unități care să conțină atât mărimi fundamentale cât și mărimi derivate.

În 1874, BAAS a introdus sistemul CGS, un sistem coerent, tridimensional, bazat pe trei mărimi mecanice: centimetrul, gramul și secunda, care folosea prefixe de la micro- la mega- pentru exprimarea multiplilor și submultiplilor zecimali¹³.

Mărimile sistemului CGS, din păcate, nu sunt foarte convenabile în domeniul electricitate și magnetism fapt pentru care, prin anii 1880, BAAS și Congresul Internațional Electric, predecesorul Comisiei Electrotehnice Internaționale, au aprobat un sistem coerent de unități practice. Printre ele se numărau: ohmul pentru rezistența electrică, voltul pentru forța electromotoare și amperul pentru curentul electric¹⁴.

La 20 mai 1875, cu ocazia ultimei *Conferințe Diplomatice* a Metrului, semnată la Paris de 17 state, ia naștere Convenția Metrului, care înființează Biroul Internațional de Măsuri și Greutăți, stabilește Comitetul Internațional și Conferința Generală. Totodată, sunt realizate noi prototipuri internaționale ale metrului și kilogramului, aprobate în 1889 de prima CGPM. Acestea, împreună cu secunda astronomilor ca unitate de timp, constituie un sistem de unități mecanice tridimensional, similar sistemului CGS, dar ale cărei unități de bază erau: metrul, kilogramul și secunda (sistemul MKS).

În 1901, fizicianul Giorgi arată că este posibilă combinarea unităților electrice cu cele ale sistemului MKS pentru formarea unui singur sistem coerent quadri-dimensional, prin adăugarea la aceste trei unități de bază o a patra unitate, de natură electrică, cum ar fi amperul sau ohmul. Propunerea lui Giorgi a deschis calea către alte extinderi. După cea de a șasea CGPM din anul 1921, care extindea atribuțiile și responsabilitățile Biroului Internațional de Măsuri și Greutăți (BIPM) la alte domenii ale fizicii, și după crearea Comitetului Consultativ de Electricitate (CCE) prin intermediul celei de-a șaptea CGPM (1927), propunerea lui Giorgi a fost discutată în detaliu de CEI (Comisia Electrotehnică Internațională), Uniunea Internațională de Fizică Pură și aplicată (UIPPA) și alte organizații internaționale. Aceste discuții au condus, în urma propunerii CCE din anul 1939, la adoptarea unui sistem quadri-dimensional bazat pe metru, kilogram, secundă și amper (sistemul MKSA), propunere ce a fost aprobată de Comitetul Internațional în anul 1946.

¹² Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), *Le Système international d'unités (SI)*, 8e édition, 2006.

¹³ Idem.

¹⁴ Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), *Travaux et Memoires du BIPM*, Tome 22, 1966.

În urma unei anchete internaționale efectuată de BIPM începând cu anul 1948, la cea de a zecea CGPM din anul 1954 s-a aprobat introducerea amperului, a Kelvinului și candeliei ca unități de bază pt curent electric, temperatura termodinamică și, respectiv, intensitate luminoasă. Acest sistem va primi numele de Sistem Internațional de Unități (SI), cu ocazia celei de a 11-a CGPM din anul 1960. În anul 1971, cu ocazia celei de-a 14-a CGPM, a fost adăugată și cea de a șaptea mărime fundamentală a SI, și anume molul, astfel încât imaginea completă a Sistemului Internațional de Unități a devenit cea reprezentată în Fig. 4.

În momentul de față, sistemul internațional (prescurtat **SI**) este cel mai utilizat sistem de unități de măsură pe plan mondial. Sistemul este folosit în majoritatea țărilor lumii, cu excepția unor țări care n-au trecut încă oficial la **SI**, precum Statele Unite ale Americii, Liberia și Myanmar. Totuși, în SUA, **SI** este larg folosit în mediile științifice.



Fig. 4: Sistemul internațional de unități¹⁵

3. Aderarea României la Convenția Metrului

Înainte de introducerea sistemului metric, pe teritoriul țării noastre, ca de altfel în majoritatea țărilor din Europa, existau o diversitate de unități de măsură cu denumiri și valori foarte diferite, în funcție de regiune și perioadă, precum și în funcție de utilizatorii acestora.



Fig. 5: Documentul semnat de Alexandru Ioan Cuza la Ruginoasa¹⁶

¹⁵ Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), *Constant evolution of the International System of Units - World Metrology Day*, 2018, [https://www.bipm.org/en/news/full-stories/2018-01-wmd2018-resource.html]

Folosirea sistemului metric în Principatele Unite își are începutul înaintea anului 1848, fiind favorizat de condițiile de natură economică și geopolitică specifice acestei perioade¹⁷. Starea proastă a măsurărilor, care reprezenta un serios obstacol, constituia o barieră în calea dezvoltării relațiilor de schimb. Acestei situații i se pune capăt abia după Unirea de la 24 ianuarie 1859, când se creează condițiile adoptării unei legislații unice.

Astfel, implementarea sistemului metric ca unic sistem de măsură se concretizează la data de 15 septembrie 1864, când Alexandru Ioan Cuza semnează *Legea pentru Adoptarea Sistemului Metric de Măsuri și Greutăți în România* (Fig. 5), reglementarea fiind prezentată și susținută în parlament de către Mihail Kogălniceanu.

Acest fapt a constituit una dintre consecințele importante ale Unirii celor două țări, Moldova și Țara Românească, într-un singur stat. Legea a fost concepută în cea mai mare parte după legea franceză și proiectul de lege întocmit în 1859 de Ion Ghica¹⁸.

La 28 februarie 1875 a fost adoptată „Legea pentru Aplicarea Sistemului Metric de Măsuri și Greutăți” care, la articolul 2, prevedea că până la 1 ianuarie 1876 se vor întocmi tabele comparative de măsuri și greutateți care să stabilească corespondența dintre sistemul metric și unitățile vechi.

Pasul decisiv a fost făcut însă la 1 ianuarie 1879, când, prin legea de mai sus, s-a stabilit că sistemul metric de măsuri și greutateți devine obligatoriu în tranzacții. Ulterior, la 1 ianuarie 1881, sistemul este impus pe tot teritoriul României.

Primele demersuri pentru admiterea României la Convenția Metrului s-au făcut în anul 1880 de către vicepreședintele Academiei, Dimitrie Sturdza, prin intermediul profesorului Foerster, membru al BIPM. În septembrie 1882, Dimitrie Sturdza, care între timp devenise ministrul afacerilor străine ale României, a prezentat în Parlament *Legea pentru Aderarea Regatului României la Convenția din 20 mai 1875*¹⁹.

În 1883, România aderă la Convenția Metrului, devenind al 19-lea stat membru al acestui tratat internațional prin care Sistemul Metric a fost adoptat ca sistem de unități cu utilizare în statele semnatare și în relațiile dintre ele.

4. Măsuri existente: ocaua lui Cuza

Una dintre măsurile celebre de pe vremea lui Cuza care a rămas în istorie este ocaua, ca unitate de măsură pentru greutateți și capacități (lichide și solide), Fig. 6 (a și b).

Ocaua a fost, introdusă pe teritoriul Europei prin filieră bizantină și atestată documentar în secolul al XVII-lea. Turcii o foloseau în comerțul din Principate, pentru măsurarea atât a lichidelor, cât și a produselor uscate precum grâu, făină, orez.

Tradiția populară și literatura română înregistrează povestiri în care domnitorul Alexandru Ioan Cuza descoperă, mergând deghizat prin cârciumi sau târguri, negustori ce foloseau, în loc de "ocaua lui Cuza", ocale mai mici, motiv pentru care îi pedepsea și îi amenda.

În Țara Românească și Moldova, ocaua a fost „principala unitate de măsurat greutatețile” și avea diferite valori în funcție de zona unde era folosită: 1,271 kg în Țara Românească, 1,291 kg în

¹⁶ Biroul Român de Metrologie Legală, *150 de ani de la Promulgarea Legii pentru adoptarea Sistemului Metric de Măsuri și Greutăți în România de către domnitorul A. I. CUZA*, [www.drmlcluj.ro]

¹⁷ F. Iacobescu, N. Ilieș, *Metrologia - Etalon al civilizațiilor*, București, Editura Academiei Române, 2004.

¹⁸ F. Iacobescu, N. Ilieș, *Metrologia - Etalon al civilizațiilor*, București, Editura Academiei Române, 2004.

¹⁹ Idem.

Moldova, 1,260 kg în Transilvania și 1,282 kg în Dobrogea. Submultipli pentru oca erau: litra, dramul, tenchiul cu 1 litră=317,98g=100 dramuri; 1 dram=4 tenchiuri; 1 tenchiu=0,795g²⁰.



Fig. 6a: Ocale pentru greutate²¹



Fig. 6b: Oca pentru lichide și solide (1,288L)²²

Alte măsuri mai cunoscute din acea perioadă erau: banița (22 ocale), măsură de capacitate pentru cereale, cea mai folosită în Țara Românească în sec. al XVIII-lea și începutul sec. al XIX-lea, și vadra (sec. XV), măsură folosită la vânzarea vinului: în Moldova avea 10 sau 12 ocale, iar în Țara Românească, vadra (dreaptă sau domnească) era de 10 ocale și a fost introdusă de C-tin Brâncoveanu²³.

5. Etapele înființării Institutului Național de Metrologie

Începând cu anul 1909, activitatea de verificări a Direcției de Măsuri și Greutăți (DGM) se dezvoltă spectaculos după separarea de Institutul Meteorologic. DMG intră de la această dată în subordinea Ministerului Industriei și Comerțului, verificarea mijloacelor de măsurare utilizate în comerț reprezentând activitatea principală a Direcției. În anul 1921, Direcția de Măsuri și Greutăți este ridicată la rang de “Direcțiune Generală” ca urmare a rolului deosebit de important pe care l-a avut în aplicarea legii ce stabilea cadrul legal pentru asigurarea uniformității și exactității măsurărilor în țara noastră. În anul 1951 se organizează Direcția Generală pentru Metrologie, structurată în: Direcția de Verificări Metrologice și *Institutul de Metrologie*.

Întrucât Institutul de Metrologie a luat ființă din fosta Direcție de Măsuri și Greutăți, au fost preluate și o parte din funcțiile acesteia, precum realizarea etaloanelor și transmiterea unităților de măsură. Organizarea laboratoarelor institutului a fost prima și, în același timp, principala realizare a Institutului de Metrologie în sediul din strada Știrbei Vodă.

În anul 1970, Institutul de Metrologie începe să-și transfere activitatea în clădirile noi, special construite în Șos. Vitan Bârzești nr. 11 (amplasamentul actual).

În anul 1974 denumirea institutului a devenit *Institutul Național de Metrologie* institut de cercetare științifică în domeniul metrologiei.

Unul dintre domeniile cele mai importante din cadrul institutului l-a reprezentat și îl reprezintă domeniul Mase.

²⁰ F. Iacobescu, N. Ilioiu, *Metrologia - Etalon al civilizațiilor*, București, Editura Academiei Române, 2004.

²¹ M. Stoica, *Ocaua lui Cuza și sistemul metric care au aliniat Principatele Unite la sistemul European* (2019), [https://www.descopera.ro/istorie/16940564-ocaia-lui-cuza-si-sistemul-metric-care-au-aliniat-principatele-unite-la-sistemul-european]

²² Idem.

²³ Idem.

6. Istoria Domeniului Mase din România

La 24 septembrie 1889 a fost convocată la Paris prima Conferință Generală de Măsuri și Greutăți (CGPM), România fiind reprezentată de Ștefan Hepites. Scopul principal era aprobarea prototipurilor internaționale ale metrului și kilogramului, și repartizarea prototipurilor naționale, prin tragere la sorți, statelor care le-au solicitat.

În cadrul Conferinței, cu mândrie, președintele CIPM, generalul spaniol Ibañez, membru al CIM, anunța că prototipurile internaționale ale metrului și kilogramului (reprezentând cele două unități de bază ale Sistemului Metric) s-au născut și, în limitele de exactitate pe care știința din acea perioadă le permitea, erau considerate reproduceri identice ale etaloanelor de la Arhive²⁴.

În același timp el a adăugat că țările semnatare ale Convenției Metrului vor primi prototipuri identice ale metrului și kilogramului, diferențele dintre kilogramele prototip nedepășind câteva zecimi de miligram. Conferința a sancționat faptul că prototipul kilogramului, va fi considerat din acel moment unitatea de masă, specificându-se următoarele: “Acest prototip va fi considerat de acum încolo ca fiind unitatea de masă.”

În același an, 1889, în România se înființează Serviciul Central de Măsuri și Greutăți (SCMG), primul organ de stat în domeniul metrologiei legale. Acesta a fost instalat în sediul de la Filaret al Institutului Meteorologic, unde au fost aduse și primele mase etalon (Fig. 7), numite “Principatele–Unite-Române”, care fuseseră depozitate în localul de la Herăstrău.



Fig. 7: Primele mase etalon aparținând SCMG

În anul 1891, în aceeași locație a Institutului Meteorologic, au fost recepționate de o comisie din care făcea parte Ștefan Hepites, Kilogramul Prototip Național nr. 2 - NPK (Fig. 8a și 8b), împreună cu balanța cu citire și manevrare de la distanță (Fig.11).



Fig. 8a: Kilogramul Prototip Național Nr.2

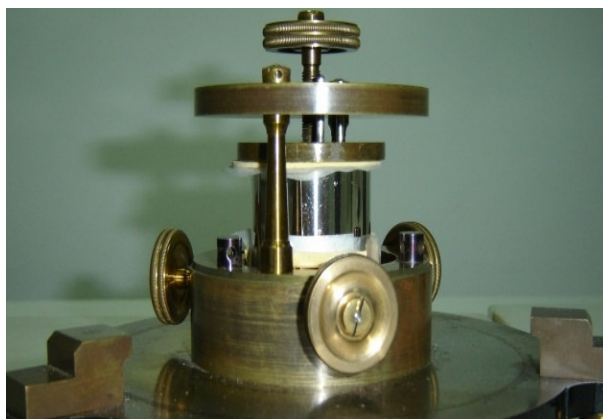


Fig. 8b: Kilogramul Prototip Național fixat în dispozitivul de transport

²⁴ M. Plassa, « Le prototype international du kilogramme. Un étalon réussi. Histoire de son choix et de sa réalisation », *Bulletin du BNM*, 1996, 104, pp. 23-29.

În anul 1893 s-au pus la dispoziție cinci încăperi într-o clădire nouă în parcul Institutului Meteorologic, dintre care două săli erau destinate balanțelor de precizie. Câțiva ani mai târziu, în anul 1908, Serviciul Central de Măsuri și Greutăți se muta într-un local închiriat în str. Romană nr. 28, în care laboratorul Mase era compus din:

- o sală pentru balanțe de precizie;
- o sală pentru etaloane prototip;
- o sală pentru verificarea greutăților, a aparatelor de cântărit și a balanțelor de cereale.

Deși în acea vreme dotarea Serviciului Central de Măsuri și Greutăți era modestă, Laboratorul Mase deținea:

- etaloane de masă ordinul întâi și ordinul al doilea;
- balanțe cu diverse limite maxime de cântărire (50 kg, 20 kg, 10 kg, 2 kg, 1 kg, 200 g și 5 g);
- patru balanțe de cereale pentru determinarea masei hectolitrică a cerealelor;
- o basculă romană de 2500 kg cu dispozitiv de tipărire.
- greutăți din cuarț (Fig. 9).



Fig. 9: Greutăți din cuarț

O personalitate marcantă din acea vreme a fost Ion Ștefan Murat. Principalele sale activități au fost următoarele:

- a efectuat studii privind etalonarea măsurilor de masă în serie închisă;
- a efectuat determinări de mare finețe asupra Kilogramului Prototip Național al României, la BIPM (Sèvres, Franța) și în România;
- a fost director adjunct (1894-1918) și director (1918-1919) în cadrul Serviciului Central de Măsuri și Greutăți (SCMG);
- a publicat lucrări importante privind activitatea SCMG (Fig. 10).



Ion Ștefan Murat (1870-1919)

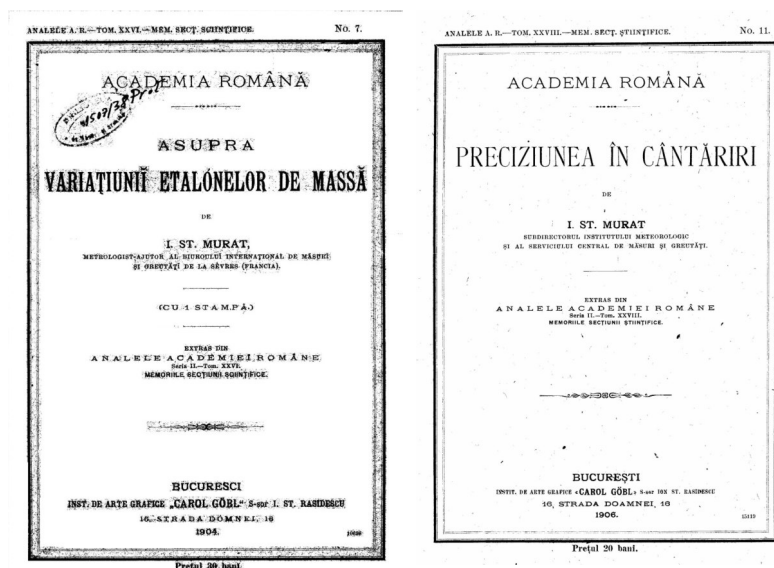


Fig. 10: Lucrări publicate privind activitatea SCMG

Pentru a efectua determinări de masă având cea mai înaltă exactitate (în compararea maselor etalon secundar ordinul I cu Kilogramul Prototip Național nr. 2) se folosea balanța cu citire și manevrare de la distanță (Fig. 11a, Fig. 11b) de fabricație Rueprecht. Această balanță (în momentul de față având o vechime de aproximativ 130 ani), avea următoarele caracteristici: max 1 kg,

diviziunea (rezoluția) $d = 0,05 \text{ mg}$, abaterea standard $s = (2...3)d$. Manevrarea greutăților și a balanței se realiza cu ajutorul unor tije lungi, iar citirea indicațiilor cât și schimbarea greutăților se efectua de la o distanță de circa 4 m.



Fig. 11a: Balanța cu manevrare și citire de la distanță (ansamblu)

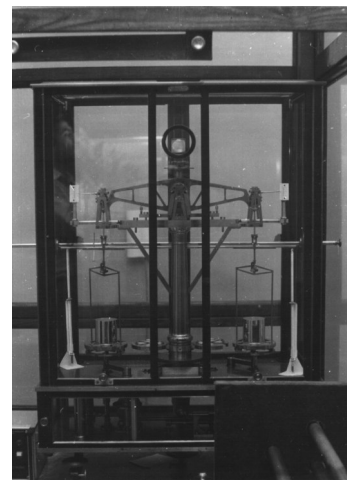


Fig. 11b: Detaliu balanță

Balanța era constituită dintr-o pârghie cu brațe egale în formă de romb, din alamă, cu cuțite din oțel care se sprijină pe pernțe din agat. Balanța, prevăzută cu cele patru tije cu lungimea de 4m, asigura atât permutarea kilogramelor de pe un taler pe celălalt, în vederea aplicării metodei de dublă cântărire Gauss, cât și izolarea, închiderea și deschiderea balanței.

Metoda de cântărire consta din efectuarea a patru cântăriri parțiale, compuse fiecare din nouă cântăriri simple, cele patru cântăriri parțiale constituind o cântărire completă.

Durata de realizare a unei comparări complete cu ajutorul acestei balanțe era foarte mare (aprox. 2 luni). Algoritmul de calcul era foarte complex și în mare măsură finalizat cu ajutorul calculatoarelor de birou existente la vremea respectivă.

Determinarea condițiilor de mediu necesare pentru calculul densității aerului, se făcea prin intermediul a două termometre aflate în incinta balanței, un higrometru și un barometru plasate în afara balanței.



Fig. 12: Balanță etalon de 20 kg



Fig. 13: Balanță etalon de 500 g

Ulterior, după anul 1974, laboratorul Mase al INM a fost dotat cu balanțe noi, fabricație Mettler, Sartorius și Sauter, cu următoarele caracteristici:

- balanțe etalon secundar ordinul I cu limita maximă de 30 g, $d = 0,001$ mg, fabricație Sartorius, utilizate pentru etalonarea etaloanelor secundar ordinul II de 20 g...1 mg;
- balanță etalon secundar ordinul I cu limita maximă de 20 kg, $d = 2$ mg, de fabricație Sauter, utilizată la etalonarea etaloanelor secundar ordinul II de (20...10) kg (Fig. 12);
- balanță etalon secundar ordinul III cu limita maximă de 500 g, $d = 0,5$ mg, de fabricație Sartorius, utilizată pentru etalonarea etaloanelor secundar ordinul IV de (500...50) g (Fig. 13).

Laboratorul a încurajat și producția autohtonă de balanțe etalon, dotându-se cu balanțe etalon fabricate de BALANȚA Sibiu.

7. Stadiul actual al domeniului Mase din România

Principalele activități specifice domeniului Mase din cadrul INM sunt următoarele:

- realizarea diseminării unității de masă;
- conservarea, întreținerea și utilizarea etalonului național de masă, Kilogramul Prototip Național Nr. 2, care a constituit și constituie principala misiune a laboratorului Mase din Institutul Național de Metrologie.
- transmiterea unității în domeniul masei hectolitrică a cerealelor.

7.1 Stadiul actual în diseminarea unității de masă

Începând cu anul 2002, lucrările de comparare cu kilogramul Prototip Național se realizează cu ajutorul unui comparator automat de masă de 1 kg (Fig. 14) care, pe lângă balanța propriu-zisă, cuprinde un sistem de monitorizare al condițiilor de mediu (Fig. 15) prevăzut cu un program MC Link pentru computer compatibil IBM.



Fig. 14: Comparator automat de masă de 1 kg

Fig. 15: Sistem de monitorizare condiții de mediu

Comparatorul este de fabricație Mettler Toledo, Elveția, cu limita maximă Max 1011 g și valoarea diviziunii $d = 1$ μ g.

Ca și în cazul utilizării balanței cu citire și manevrare de la distanță, compararea etaloanelor de referință de 1 kg cu Kilogramul Prototip Național No.2 se realizează utilizând metoda de etalonare prin intercomparare care constă în efectuarea unui număr de măsurări ca rezultat al tuturor combinațiilor posibile dintre etaloane (Fig. 16, 17 și 18).

Durata de realizare a unei măsurări complete cu ajutorul acestui comparator este considerabil mai mică (aprox. 20 ore) comparativ cu timpul necesar în cazul utilizării balanței cu citire și manevrare de la distanță. De asemenea, condițiile de mediu sunt preluate de computer direct de la sistemul de monitorizare al condițiilor de mediu.

Obținerea și interpretarea rezultatelor se face prin fișiere de calcul concepute în acest scop.

Următorul pas în transmiterea unității de masă îl constituie utilizarea acestor greutăți care au fost comparate cu kilogramul Prototip Național, la etalonarea greutăților clasă E1 care, la rândul lor, vor constitui referința pentru următoarea treaptă a schemei de ierarhizare.

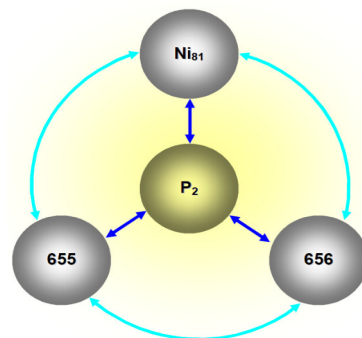


Fig. 16: Schema de comparare a etaloanelor



Fig. 17: Comparații NPK vs. etalon de 1 kg



Fig. 18: Comparații NPK vs. suma de 1 kg

În Fig. 19, 20 și 21 sunt prezentate diverse seturi de greutăți având clasa de exactitate E1.



Fig. 19: Set de greutăți (500...1) mg



Fig. 20: Set de greutăți (500...1) g



Fig. 21: Set de greutăți (5...1) kg

Pentru transmiterea unității de masă de la greutățile de referință la greutățile etalon clasă E₁, au fost achiziționate următoarele comparatoare electronice de masă de ultimă generație (care au înlocuit balanțele etalon opto-mecanice utilizate anterior):

- Comparator electronic de volum cu funcționare automată, pentru determinarea densității corpurilor solide, tip VC 1005, Fig. 22 (a și b).

Comparatorul de volum VC1005 este un comparator cu funcționare automată pentru determinarea densității corpurilor solide cu valori nominale cuprinse între 1g...1kg, precum și a sferelor din Siliciu cu diametrul de până la 100 mm. Datorită brațului de încărcare rapidă procesul este foarte eficient. Lichidul inert garantează stabilitatea pe termen lung cât și cea mai bună

exactitate. Toate setările și procesele pot fi configurate utilizând software-ul Windows inteligent iar datele pot fi exportate în format TEXT sau EXCEL în baza de date a utilizatorului.

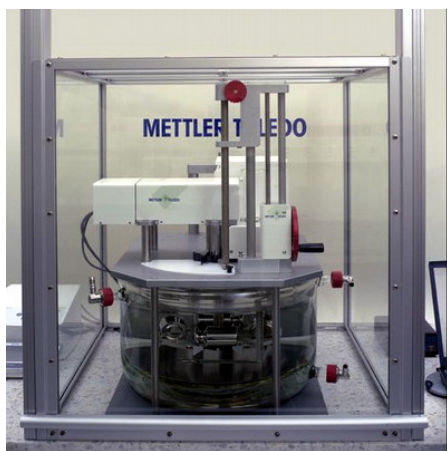


Fig. 22a: Comparator electronic de volum
(ansamblu)

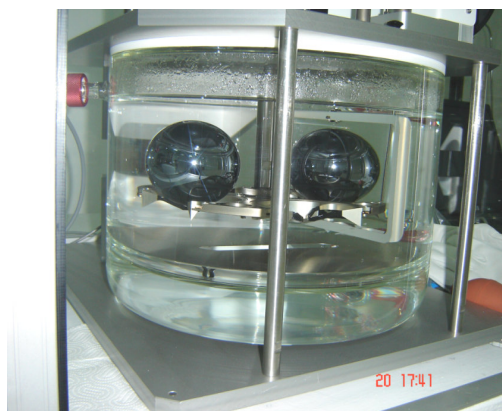


Fig. 22b: Comparator de volum
(detaliu)

- Comparator electronic de masă cu limita maximă de 210 g, $d = 0,001$ mg, tip AX 206, Fig. 23, pentru etalonarea greutăților clasă E_1 ;



Fig. 23: Comparator de masă, tip AX206



Fig. 24: Comparator de masă, tip UMX5



Fig. 25: Comparator automat de masă de 10 kg, tip CC10000 U-L

- Comparator electronic de masă cu limita maximă de 5,1 g, $d=10^{-4}$ mg, tip UMX 5, Fig. 24, pentru etalonarea greutăților clasă E₁;
- Comparator electronic de masă cu funcționare automată cu limita maximă de 10 kg, $d = 0,01$ mg, fabricație Sartorius, Germania, tip CC10000 U-L. Comparatorul este prevăzut cu sistemul de monitorizare a condițiilor de mediu “YCM02C”, pentru determinarea densității aerului (Fig. 25);

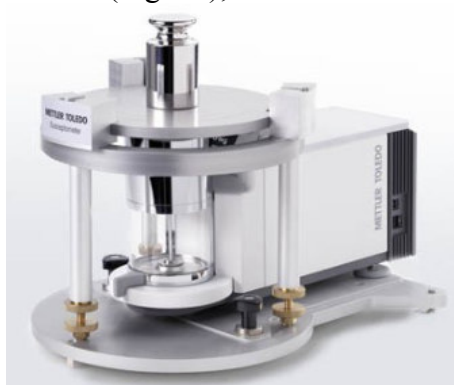


Fig. 26a: Susceptometru (ansamblu)

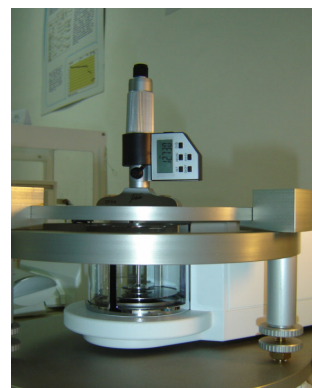


Fig. 26b: Susceptometru (detaliu)

- Susceptometru pentru determinarea proprietăților magnetice ale greutăților, utilizat împreună cu comparatorul tip UMX 5, Fig. 26 (a și b).

Metoda susceptometrului este folosită pentru a determina atât susceptibilitatea magnetică cât și magnetizația permanentă a greutăților slab magnetizate, prin măsurări ale forței exercitate asupra unui etalon de masă aflat în câmpul magnetic al unui magnet permanent puternic. În metoda susceptometrului se urmărește măsurarea forței de atracție (sau de respingere) care se exercită între magnetul permanent (cu moment magnetic cunoscut) și etalonul de masă ce urmează a fi testat. Această metodă este aplicabilă numai la greutățile care au susceptibilitatea magnetică, $\chi < 1$.

7.2. Stadiul actual în domeniul masei hectolitrică a cerealelor

Etalonul de referință al României pentru masa hectolitrică a cerealelor mai este numit și balanță de cereale etalon de 20 L (Fig. 27). Acest aparat este fabricat de firma Louis Schopper, Germania, are numărul 17, fiind păstrat și utilizat în laboratorul Mase al INM.



Fig. 27: Etalonul național al României pentru masa hectolitrică a cerealelor

Trasabilitatea este asigurată la etalonul european de masă hectolitrică al PTB.

Unitatea de măsură pentru masa hectolitrică a cerealelor este kilogramul pe hectolitr (kg/hL).

Masa hectolitrică ρ a cerealelor este prin definiție raportul între masa de cereale și volumul pe care îl ocupă după ce este turnată într-un recipient în condiții bine definite.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{unde: } m \text{ este masa, în kg, iar } V, \text{ volumul vasului, în hL.}$$

8. România și Metrologia internațională

România, reprezentată prin BRML - INM, este prezentă în toate structurile internaționale și europene specifice, fiind și semnatară a acordului care asigură recunoașterea internațională a certificatelor de etalonare emise, asigurând cale liberă produselor românești și din acest punct de vedere.

Astfel, în anul 1883 România adera la Convenția Metrului, devenind al 19-lea stat membru al acestui tratat internațional prin care Sistemul Metric a fost adoptat ca sistem de unități, cu utilizare în statele semnatare și în relațiile dintre ele și au fost create organele Convenției Metrului (BIPM – Biroul Internațional de Măsuri și Greutăți, CIPM – Comitetul Internațional de Măsuri și Greutăți și CGPM – Conferința Internațională de Măsuri și Greutăți).

Începând cu anul 1956, România devine membră a Organizației internaționale de metrologie legală OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) iar din 2007 este membră cu drepturi depline a organizației europene de metrologie legală, WELMEC.

Institutul Național de Metrologie a devenit membru corespondent al Asociației Europene a Institutelor Naționale de Metrologie – EUROMET (European Association of National Metrology Institutes) în 2001, fiind aprobat ca membru cu drepturi depline în 2004.

BRML-INM este semnatar al CIPM MRA (din 1999) – acordul de recunoaștere reciprocă a etaloanelor naționale de măsurare și a certificatelor de etalonare și de măsurare, emise de laboratoarele naționale de metrologie.

9. Noua definiție a unității de masă. Constanta lui Planck

În anul 1901, cu ocazia celei de a treia CGPM, într-o declarație care avea drept scop înlăturarea ambiguității ce exista privind folosirea în mod curent a termenului de “greutate,” s-a căzut de acord asupra următoarei definiții a unității de masă [11]²⁵:

“Kilogramul (kg) este unitatea de masă. El este egal cu masa Kilogramului Prototip Internațional”.

Se poate spune că atât definiția cât și etalonul “au reușit împreună”: au fost capabile să reziste extraordinarei evoluții care a avut loc în știință și tehnică în decursul sec. XX și chiar la începutul sec. XXI.

Pornind de la definiția kilogramului, se presupune că unitatea de masă este constantă $m(\text{K}) = 1 \text{ kg}$. În același timp, cu ocazia ultimei verificări periodice a etaloanelor internaționale se arată că există o derivă a etaloanelor din Pt-Ir în raport cu kilogramul prototip internațional, putând ajunge până la aproximativ 2 μg pe an.

²⁵ Z. J. Jabbour, “The Kilogram: last remaining artifact”, *NCSL Workshop & Symposium*, Charlotte (NC), 1999, pp. 327-331.

Este deci probabil ca masa prototipului internațional să se fi schimbat din anul 1879. Nu se poate spune dacă prototipului internațional îi scade masa sau copiilor le crește masa. Singura concluzie posibilă este că există o derivă relativă a masei, pentru că nu există nici un motiv pentru care prototipul internațional să fie considerat mai stabil decât copiile sale oficiale. În momentul de față, cauza acestei derivate este necunoscută [11, 12].

Prototipul Internațional, sau „marele K “, (Fig. 28) ar putea fi afectat de contaminările din mediul înconjurător, de o uzură cauzată de manipulare sau curățire, cât și de fenomenul de absorbție și/sau desorbție.

Problemele care rezultă din definiția actuală a unității de masă ar fi următoarele²⁶:

1. Stabilitatea

- Deși prin definiție masa IPK este întotdeauna 1 kg, în practică se presupune că masa acestuia se schimbă;
- Nu există o cale care să cuantifice modificările absolute în masă ale IPK;
- În practică, stabilitatea IPK este estimată prin comparare cu un număr de copii păstrate de BIPM. O estimare rezonabilă a stabilității este de $10\mu\text{g}$ în decursul celor peste 115 ani de utilizare;
- Stabilitatea etaloanelor naționale poate constitui, de asemenea, o problemă.

2. Trasabilitatea

- Toate măsurările de masă sunt trasabile la IPK;
- Masa prototipurilor naționale începe să se modifice de îndată ce sunt etalonate de BIPM. S-a constatat că modificarea masei prototipurilor este de aproximativ $1\text{--}2\mu\text{g/an}$, fiecare institut național de metrologie având algoritmi proprii de predicție a masei;
- Prototipurile naționale trebuie să fie curățate la BIPM, folosind o metodă specială de curățare-spălare pentru a reveni la o valoare de referință dinainte de etalonare.

Cerința principală pentru redefinirea kilogramului a fost ca unitatea de masă să fie raportată la o constantă fizică fundamentală, cu o incertitudine relativă mai bună decât $2 \cdot 10^{-8}$.

Noua definiție a unității de masă, aprobată în data de 16.11.2018 cu ocazia celei de-a 26 a CGMG, a intrat în vigoare începând cu 20 mai 2019, fiind următoarea:

Kilogramul, simbol „kg”, este unitatea de masă. Se definește prin valoarea numerică fixă a constantei lui Planck (h) de $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ exprimată în unități J s, care este egală cu $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, unde metrul și secunda sunt definite în funcție de c și $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Kilogramul va fi definit în termenii constantei Planck, garantând stabilitatea pe termen lung a unității de masă. Kilogramul poate fi apoi realizat prin orice metodă potrivită, de exemplu balanța Kibble sau metoda Avogadro (densitatea cristalelor cu raze X). Utilizatorii vor putea obține trasabilitatea la SI din aceleași surse utilizate în prezent (BIPM, institute naționale de metrologie și laboratoare acreditate). Comparările internaționale vor asigura coerența lor. Valoarea constantei Planck va fi aleasă pentru a se asigura că nu va exista nicio modificare a kilogramului SI în momentul redefinirii.

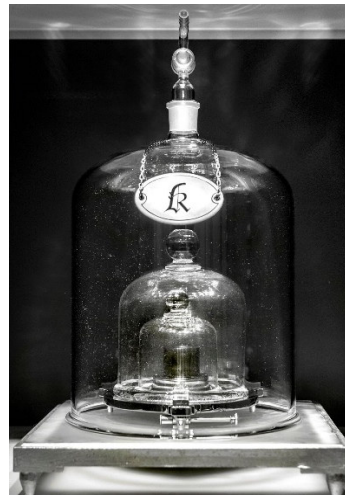


Fig. 28: Kilogramul Prototip Internațional, K

²⁶ S. Davidson, “A New Kilogram Definition”, EURAMET Meeting, 2008, TC-M Bucharest.

9.1 Metoda XRCD (X-ray Crystal Density) metoda densității cristalelor cu raze X

În prezent, metrologia a redescoperit constanta lui Avogadro folosind-o ca o posibilitate de redefinire a kilogramului, întrucât kilogramul din Pt-Ir poate fi afectat de probleme privind stabilitatea pe termen lung.

Această aplicație a constantei lui Avogadro presupune atingerea unei incertitudini în final de aproximativ $1 \cdot 10^{-8}$, aceasta constituind o provocare în determinarea experimentală a parametrilor implicați cum ar fi: densitatea macroscopică, masa molară medie și volumul unei celule elementare al unui cristal de siliciu.

Metoda XRCD constă în măsurarea numărului de atomi conținut într-un volum cunoscut de siliciu. Masa molară medie M_{Si} necesită măsurarea prin spectrometria masei, conținutul relativ a trei izotopi stabili ai Siliciului (^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si). O reducere a incertitudinii poate fi obținută prin utilizarea unui cristal având un conținut de 99,99% ^{28}Si , fără defecte, în așa fel încât, contribuția celorlalți doi izotopi să fie de aprox. 0,005% ceea ce ar conduce la determinarea masei molară cu o incertitudine standard compusă $<3 \cdot 10^{-8}$ în valoare relativă.

Practic, se utilizează o sferă de siliciu (Fig. 29) având diametrul 93,6 mm și lustruită astfel încât defectele sale de sfericitate să nu depășească 40 nm. Măsurarea prin interferometrie a diametrului permite aflarea volumului atunci când masa sa este determinată prin comparare cu un kilogram etalon. Volumul atomic V_a este dedus din determinarea parametrilor celulei printr-o metodă ce combină difracția razelor X și interferometria optică.

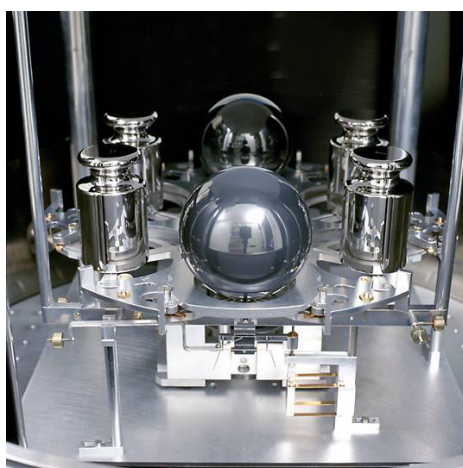


Fig. 29: Sfera de Siliciu

Constanta lui Planck “ h ” se determină în funcție de constanta lui Avogadro prin folosirea unei ecuații derivate din modelul Bohr al unui atom de hidrogen:

$$h = \frac{c M_u A_r(e) \alpha^2}{2 R_\infty N_A}$$

unde:

c - viteza luminii;

M_u - constanta masei molare;

$A_r(e)$ masa atomică relativă a electronului;

α - constantă privind structura fină

R_∞ - constanta Rydberg

9.2 Metoda balanței Kibble (watt)

În acest caz, racordarea unității de masă la constanta fundamentală (constanta lui Planck, h) se face comparând o putere de origine mecanică cu o putere de origine electromagnetică, determinată plecând de la măsurări de tensiune și de rezistență prin comparare cu efectul Josephson și efectul Hall cuantic. Aceste două efecte leagă mărimile electrice de constantele fundamentale și permite stabilirea unei relații între masa macroscopică, determinată în unități de masă și constanta h a lui Planck.

Compararea se efectuează în două etape: o fază statică și una dinamică [8].

➤ Faza statică

În prima fază (Fig. 30) se efectuează compararea între forța Laplace care se exercită într-un conductor (parcurs de un curent) plasat într-un câmp de inducție, și greutatea masei etalon. Conductorul de lungime L , parcurs de un curent I este plasat într-un câmp magnetic B omogen, astfel încât forța Laplace F_{el} care se exercită pe acesta să fie verticală. Forța exercitată pe conductorul suspendat de un comparator de masă este compensată de greutatea unei mase m supusă accelerației gravitaționale g .²⁷

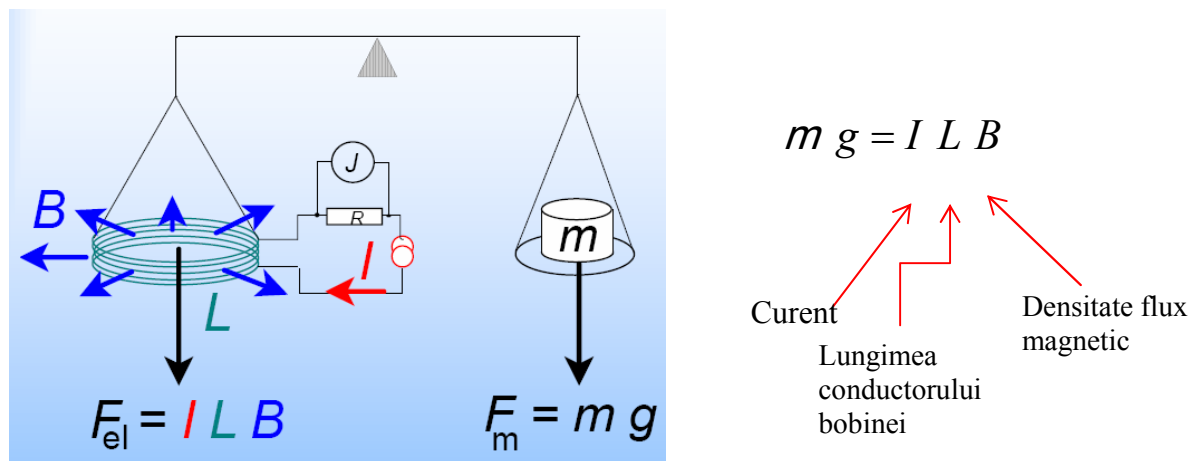


Fig. 30: Faza statică

Cu alte cuvinte, în faza statică, forța F_m care acționează pe o masă m , plasată în câmpul gravitațional local g , este echilibrată de forța electromagnetică F_{el} produsă de un curent I care trece printr-o bobină, aflată în câmpul magnetic B .

➤ Faza dinamică

Bobina este deplasată vertical la o viteză v în câmpul magnetic, Fig. 31. Această mișcare produce o tensiune U prin bobină exprimată prin:

$$U = v L B$$

Diagrama prezintă ecuația $U = v L B$ cu săgeți care indică semnificația fiecărui termen:

- U : Tensiunea la bornele conductorului
- v : Viteza bobinei în câmpul magnetic
- L : Lungimea conductorului bobinei
- B : Densitate flux magnetic

²⁷ G. Geneves, P. Gournay, P. Pinot et al., « La balance du watt: vers une nouvelle définition de l'unité de masse? », *Revue française de métrologie*, No.9, Volume 1, 2007.

Dacă se egalează cele două faze (statică și dinamică) și se consideră L și B constante, se poate observa egalitatea:²⁸

$$U l = m g v \quad \Rightarrow \quad P_{\text{el}} = P_{\text{mec}}$$

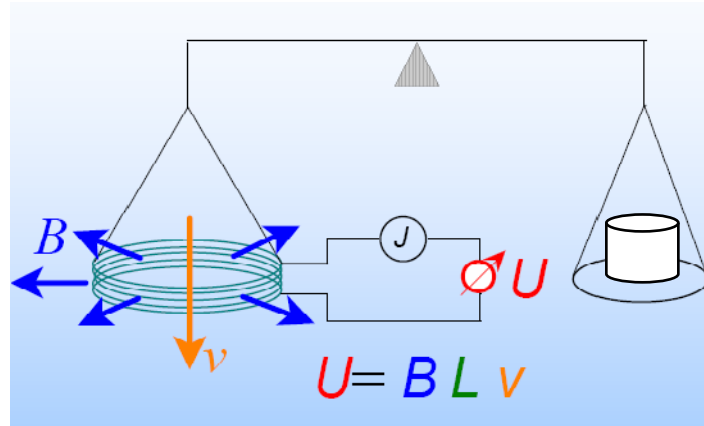


Fig. 31: Faza dinamică

9.3. Ruta de trasabilitate după redefinire

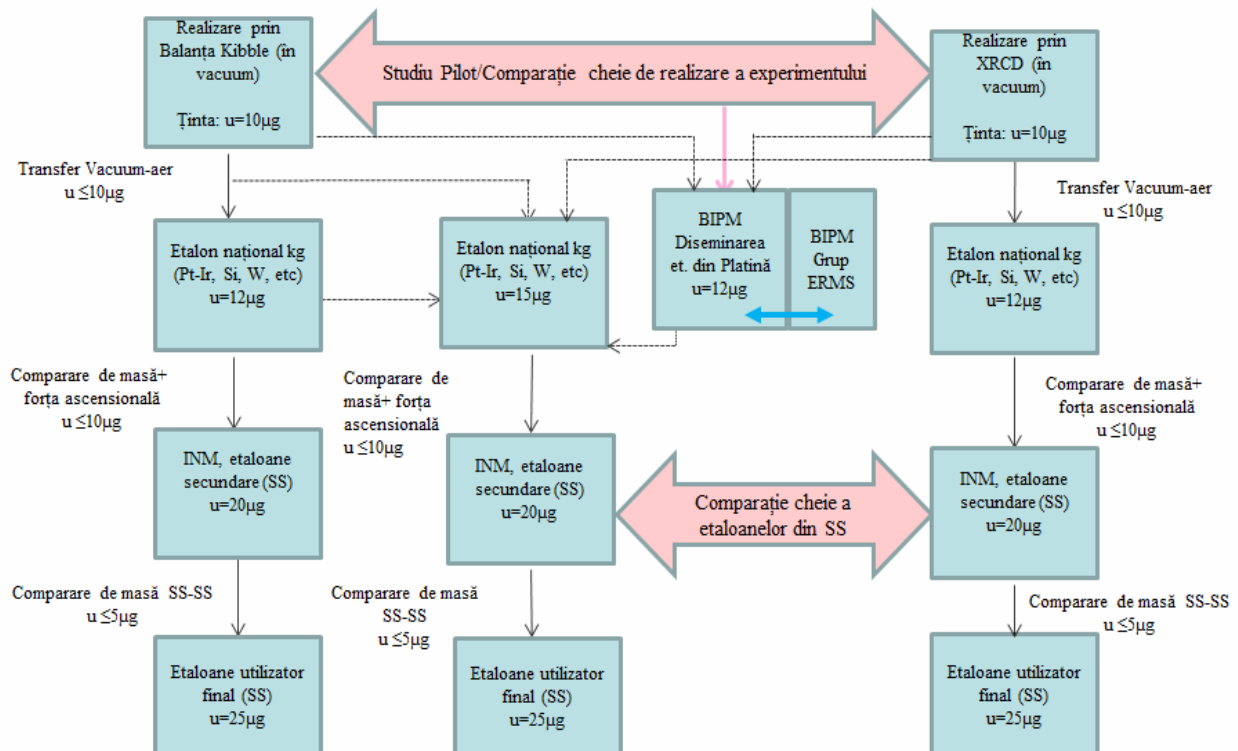


Fig. 32: Ruta de diseminare propusă pentru greutatea în kg după redefinire²⁹

²⁸ Idem.

²⁹ Idem.

În Fig. 32 este prezentată ruta de trasabilitate propusă pentru greutatea în kg, după redefinire. Valorile pentru incertitudinile standard ale greutăților la nivel de 1 kg pentru fiecare treaptă din schemă, sunt aproximative. Coloanele din stanga și dreapta reprezintă lanțul de trasabilitate pentru INM care realizează unul dintre experimente. Coloana din mijloc reprezintă lanțul de trasabilitate pentru un INM care nu realizează nici unul dintre experimente³⁰.

10. Rezultate actuale. Perspective

În anul 2014, etaloane de 1 kg din Pt-Ir aparținând INMs, implicate în determinarea constantei lui Planck, au fost etalonate la BIPM în raport cu IPK cu o incertitudine de 3,5 μ g. Deci datele de intrare ale acestor experimente au fost trasabile la IPK cu o incertitudine foarte mică și în consecință, valoarea constantei lui Planck poate fi considerată de asemenea trasabilă la IPK.

Aceasta ar trebui, în principiu, să asigure că viitorul kilogram, trasabil la constanta lui Planck, să fie în concordanță cu IPK. Studiul pilot a testat această presupunere în practică.

Participarea la Studiul Pilot a fost următoarea: LNE (France), NIST(USA), NRC (Canada), NMII (Japan) și PTB (Germany). Dintre acestea, LNE, NIST și NRC au folosit balanțe Kibble, iar NMII și PTB au folosit sfere de siliciu ²⁸Si.

Pentru acest studiu au fost folosite 2 seturi de etaloane itinerante de 1 kg, furnizate de participanți, după cum urmează:

- Setul 1: un etalon din Pt-Ir și altul la alegerea participantului au fost etalonate în vid utilizând experimentul.
- Setul 2: două etaloane din oțel inoxidabil (simbolizate cu SS în Figura 32), etalonate în aer, trasabile la experiment.

Scopul a fost să se evalueze echivalența diseminării de masă atunci când se utilizează experimente. Acest fapt a necesitat transferul maselor etalonate din vid în aer, aplicându-se corecțiile necesare.

ERMS este un experiment care furnizează informații utile privind efectele stocării pe termen lung asupra masei etaloanelor în medii diferite și în funcție de materialul din care sunt confecționate.

Redefinirea kilogramului va permite, în principiu, oricărui INM să realizeze kilogramul.

Aceasta este o situație complet nouă, deoarece în prezent toate etaloanele naționale de masă sunt trasabile la IPK care este păstrat la BIPM.

Începând cu 20 mai 2019, Institutele Naționale de Metrologie pot să își asigure trasabilitatea după cum urmează:

- la orice INM care realizează kilogramul prin experimente, sau
- la BIPM (ca și în prezent)

Un etalon de masă etalonat printr-o metodă primară va deveni etalon primar. După ce kilogramul va fi definit în funcție de constanta lui Planck, orice metodă capabilă să obțină o valoare de masă ce poate fi trasabilă la constanta Planck, va avea potențialul de a deveni o metodă primară. "Mise en pratique" (set de instrucțiuni care permit ca definirea să fie realizată în practică la cel mai înalt nivel) poate fi extinsă în viitor, când vor fi disponibile noi metode practice de realizare.

Noua definiție deschide posibilitatea de a realiza un etalon primar de masă de orice valoare nominală în mod direct.

³⁰ M. Stock, ș.a, "Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition" *Metrologia*, 2017, 54, S99.

Bibliografie

1. Biroul Român de Metrologie Legală, *150 de ani de la Promulgarea Legii pentru adoptarea Sistemului Metric de Măsură și Greutăți în România de către domnitorul A. I. CUZA*, [www.drmlcluj.ro].
2. Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), *Travaux et Memoires du BIPM*, Tome 22, 1966.
3. Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), *Constant evolution of the International System of Units - World Metrology Day*, 2018, [https://www.bipm.org/en/news/full-stories/2018-01-wmd2018-resource.html].
4. Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM), *Le Système international d'unités (SI)*, 8e édition, 2006.
5. Davidson, S. "A New Kilogram Definition", *EURAMET Meeting*, 2008, TC-M Bucharest.
6. Echeverria, V. "To measure or not to measure, that is the question. A reflection on the ontology of measurements", *NCSLI International Symposium*, SUA, 2006.
7. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, "Medidas Elétricas A Linguagem da Metrologia". [http://www.facom.ufu.br/~albertini/madeleine/images/d/da/Aula_2_metrologia.pdf]
8. Fang, H, Mirandes, E, Picard et al. "Modelling of the effects of the dynamical misalignments of the BIPM Watt Balance", *Proceedings of International Congress of Metrology*, 2009, Paris.
9. Geneves, G., Gournay P., Pinot P. et al. « La balance du watt: vers une nouvelle définition de l'unité de masse? », *Revue française de métrologie*, No.9, Volume, 2007-1.
10. Iacobescu F., Ilieș N. *Metrologia - Etalon al civilizațiilor*, București, Editura Academiei Române, 2004.
11. Jabbour, Z. J. "The Kilogram: last remaining artifact", *NCSL Workshop & Symposium*, Charlotte (NC), 1999, pp. 327-331.
12. Meury, P. A. « Alliages métalliques pour l'étalon de masse de la Balance du Watt et des Références Standards », *Mécanique [physics.med-ph]*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
13. Oprea, D. (2010), „Istoria unităților de măsură – Greutăți și lungimi”, [https://istoriiregasite.wordpress.com/2010/05/12/inventii-in-istorie-greutati-si-lungimi]
14. Plassa, M. « Le prototype international du kilogramme. Un étalon réussi. Histoire de son choix et de sa réalisation », *Bulletin du BNM*, 1996, 104, pp. 23-29.
15. Rensburg, W. J. *The art of Measuring*, [https://www.slideshare.net/wernerjvr/the-roi-of-ux-design-39911538]
16. Smith, F. J. "Standard Kilogram Weights A Story of Precision Fabrication", *Platinum Metals, Rev.*, 1973, 17, (2), 66.
17. Stock, M. et al. "Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition" *Metrologia*, 2017, 54 S99.
18. Stoica, M. *Ocaua lui Cuza și sistemul metric care au aliniat Principatele Unite la sistemul European* (2019), [https://www.descopera.ro/istorie/16940564-ocaua-lui-cuza-si-sistemul-metric-care-au-aliniat-principatele-unite-la-sistemul-european]
19. Valcu, A., Militaru, C. *Trasabilitatea măsurărilor și asigurarea metrologică*, Editura Standardizarea, 2011.