

PREOCUPĂRI ACTUALE PRIVIND REDEFINIREA UNITĂȚII DE MASĂ – „KILOGRAM” (partea a II-a)

PRESENT PREOCCUPATION REGARDING THE REDEFINITION OF THE MEASUREMENT UNIT OF KILOGRAM (PART II)

George Florian POPA

INSTITUTUL NAȚIONAL DE METROLOGIE/NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY

Rezumat. Kilogramul este singura unitate fundamentală din Sistemul Internațional de unități (SI) care nu și-a schimbat definiția din 1889: „Kilogramul este unitatea de masă; el este egal cu masa prototipului internațional al kilogramului”. Este remarcabilă această longevitate a definiției cât și nivelul de exactitate asigurat pe parcursul a 120 de ani. Punctele tari ale definiției actuale sunt reprezentate de simplitatea și eleganța ei, aceasta fiind ușor de înțeles de toată lumea. Pe de altă parte, a fost înregistrată o derivă relativă medie a masei de cca. $3 \cdot 10^{-8}$ între prototipul internațional al kilogramului și copiile oficiale ale acestuia sau prototipurile naționale, împrăștierea fiind de cca. $1 \cdot 10^{-7}$. Imposibilitatea estimării variației masei prototipului internațional este una dintre slăbiciunile definiției actuale a unității de masă. Articolul este structurat în mai multe părți și este publicat în 2-3 numere ale revistei. În această a doua parte a articolului este prezentat pe larg experimentul având ca scop redefinirea kilogramului în funcție de constanta lui Avogadro, utilizând o sferă realizată dintr-un monocristal din siliciu.

Cuvinte cheie: Unitate fundamentală, Sistemul Internațional de Unități, prototipul internațional al kilogramului, monocristal de siliciu.

Abstract. The kilogram is the single base unit of the International System of Units (SI) with unchanged definition since the year 1889: “The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.” This longevity of the definition is remarkable as well as the level of accuracy assured during 120 years. The strong points of the present definition are represented by its simplicity and elegance, these definition being easy understandable for everyone. On the other side, it was registered a relative medium drift of the mass of $3 \cdot 10^{-8}$ between the prototype of the kilogram and his official copy or with national prototypes, with a standard deviation of $1 \cdot 10^{-7}$. The impossibility to estimate the drift of the mass of the international prototype of the kilogram is one of the weaknesses of the present definition. The paper is structured in several parts and will be published in 2-3 issues of this revue. In this second part is presented the experiment aiming the redefinition of the kilogram on the basis of Avogadro constant, using a sphere made from a single silicon crystal.

Key words: Base unit, International System of Units, international prototype of the kilogram, single silicon crystal.

De la începutul anilor 1970, au fost efectuate cercetări cu scopul de a defini kilogramul cu ajutorul unei constante fundamentale. Una dintre direcțiile de cercetare a fost aceea de a lega această unitate la valoarea exact stabilită a constantei lui Avogadro, care definește numărul de atomi într-un mol.

Proiectul Avogadroîși are originile în anii 70, când cercetători germani au dovedit că este posibil să determine, pentru prima dată prin

intermediul interferometriei cu raze X, constanta spațierii într-o rețea cristalină a unui cristal de siliciu, fără a fi necesar să se cunoască lungimile de undă ale razelor X folosite.

Astfel a fost posibil să se conecteze kilogramul cu unitatea atomică de masă. Constanta lui Avogadro N_A , care specifică numărul de atomi într-un mol, servește ca o legătură între masa macroscopică și masa unui atom:

$$N_A = M_{\text{mol}} / m_{\text{Si}} = (M_{\text{mol}} V) / (v_0 m)$$

unde M_{mol} este masa molară, m_{Si} este masa unui atom, V și m sunt volumul și masa unei sfere din siliciu, iar v_0 este spațiul ocupat („volumul”) de un atom.

Pentru a determina N_A , mai întâi V și m sunt determinate. Apoi din specimene ale aceluiași cristal sunt măsurate m_{mol} masa molară și v_0 ale unui atom. Când N_A este cunoscut, atunci este ușor să se deducă numărul de atomi dintr-un

kilogram de același material. Toate cantitățile măsurate trebuie să fie trasabile la unitățile de bază SI existente.

Volumul sferei de siliciu este determinat prin măsurarea diametrului sferei, cu un interferometru Fizeau dublu. Interferometrul

constă în principal din două suprafețe optice în formă de segmente sferică – fețele concave formând un etalon sferic (Figura 1). Între cele două suprafețe concave ale interferometrului este plasată sfera de siliciu.

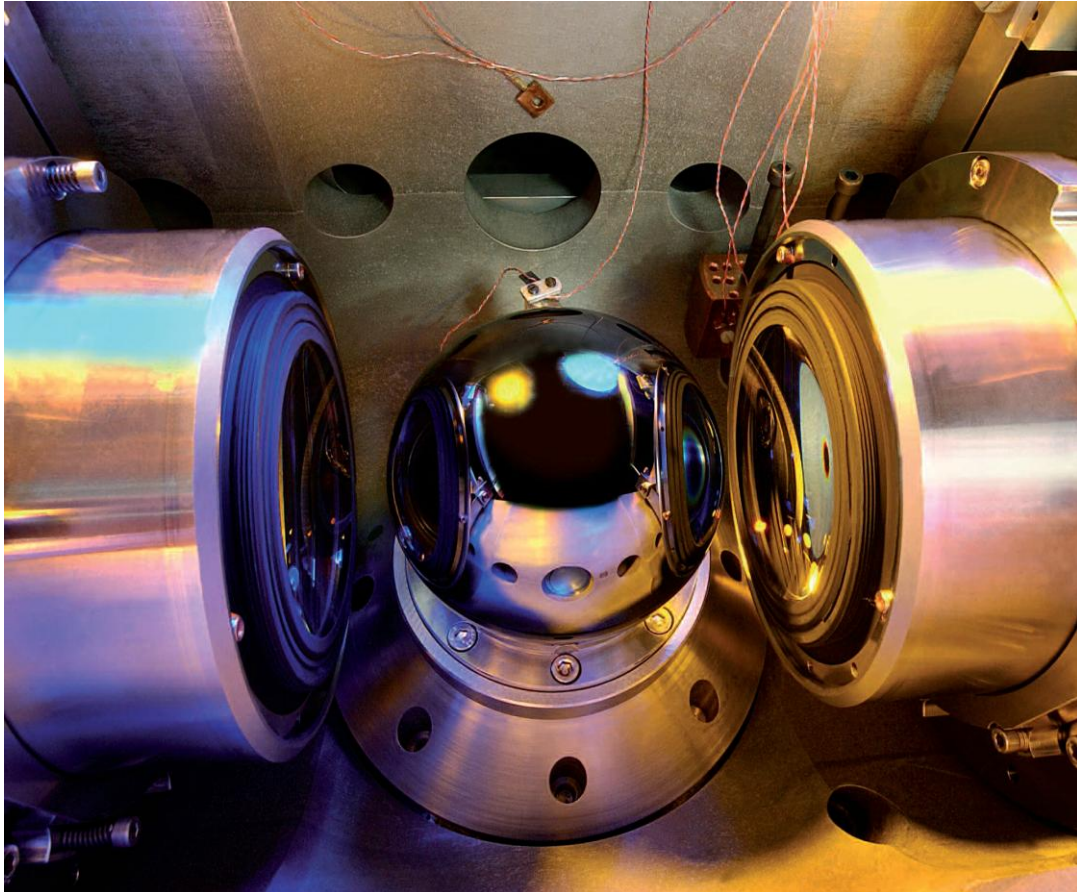


Fig 1. Interferometrul Fizeau utilizat pentru determinarea diametrului unei sfere din siliciu îmbogățit.

În scopul de a adapta fronturile de undă ale interferometrului la suprafața curbată a sferei, razele de lumină sunt mai întâi colimate de colimatoare de înaltă precizie și apoi transformate în unde sferice prin intermediul unor obiective speciale Fizeau, ce conțin de asemenea suprafețele de referință ale etalonului.

Toate razele fasciculului cad perpendicular pe ambele plăci sferice de referință și pe suprafața sferei, formându-se astfel franje de interferențe echidistante. Folosind un aparat de fotografiat care poate fi trecut la rezoluție mică spațială (128x128 pixeli), aproximativ 16000 de valori de fază optică sunt măsurate simultan.

Pentru măsurarea diametrului sferei sunt executate două măsurări interferometrice consecutive vor fi: în primul rând, este măsurată etalon gol, obținându-se diametrele interioare D . Apoi este introdusă sfera între cele două suprafețe concave.

Astfel se formează două sisteme de interferențe noi, între suprafața etalon din partea stângă și suprafața corespunzătoare a sferei, respectiv între suprafața etalon din partea dreaptă și suprafața din acea parte a sferei. După măsurarea acestor distanțe $d_{dreapta}$ și $d_{stânga}$, se poate calcula diametrul sferei d cu relația:

$$d = D - d_{dreapta} - d_{stânga} \quad (1)$$

Aproximativ 30 măsurări la orientări diferite trebuie să fie efectuate pentru a obține o hartă completă a diametrelor sferei. Pentru cele mai bune sfere acestea variază cu circa 30-50 nm. Volumul este apoi calculat în funcție de aproximativ 400 000 de diametre. Incertitudinile de măsurare ale diametrelor trebuie să fie mai mici decât 1 nm.

Sferele au fost lustruite în Centrul Australian pentru Optică de Precizie. În procesul

de lustruire, sfera de siliciu este acoperite cu un strat subțire de oxid de câțiva nanometri, structura chimică și de densitatea acestuia trebuind, de asemenea, să fie caracterizate. Grosimea stratului este determinată prin elipsometrie, oferind o plasă îngustă a grosimii relative.

În unele poziții valorile relative au fost combinate cu măsurări absolute ale grosimii stratului prin măsurări de reflectometrie cu raze X, acestea oferind incertitudini pentru grosimea stratului de oxid de ordinul a câtorva zecimi de nanometru.

Masa sferei de siliciu este trasabilă la prototipul internațional al kilogramului. Deoarece cele două materiale au densități diferite, este necesară aplicarea unor corecții importante legate de forța ascensională. Determinările de volum și de masă trebuie apoi corectate în funcție de stratul de oxid.

Volumul atomic este determinat din măsurarea rețelei cristaline cu ajutorul unui interferometru de scanare cu raze X. Acest interferometru este format din trei lamele de cristal subțire, cu randuri de atomi de bine orientate unul în raport cu celelalte.

Fasciculele de raze X atingând suprafața de intrare a celei de-a treia lamelă formează un model periodic de unde staționare, care reproduce perioada rețelei. Mutând această lamelă în direcție perpendiculară, rezultă o modulare sinusoidală a intensității în spatele interferometrului. Măsurând distanța de deplasare (de exemplu cu ajutorul unui interferometru laser) și simultan numărând maximele de intensitate ale razelor X, se obține valoarea etalonată a parametrului mediu al rețelei cristaline, mediat pe secțiune transversală a fascicului de raze X.

Presupunând că celula unitară este de formă cubică și conține întotdeauna opt atomi, volumul atomic este $v_0 = a^3/8$, unde a este latura celulei unitare cubice. Este necesară cunoașterea prealabilă suficientă a contaminărilor și a defectelor de construcție ale cristalului.

Masa molară $M(\text{Si})$ se obține din măsurarea proporțiilor dintre cei trei izotopi stabili de siliciu, ^{28}Si , ^{29}Si , și ^{30}Si , care apoi sunt combinate cu valorile masei molare $M(^1\text{Si})$, toate fiind disponibile cu incertitudini mai mici decât 10^{-8} .

Proiectul Avogadro a primit un stimulent nou, prin posibilitatea de a folosi ^{28}Si îmbogățit pe o scară largă pentru producerea de probe de mari dimensiuni. Evaluările preliminiarii au indicat faptul că în acest fel problemele de măsurare a compoziției izotopice au fost mult reduse. Toate datele determinate până acum par să îndeplinească așteptările oamenilor de știință.

De exemplu, conținutul de carbon și cel de oxigen din noul tip de cristal sunt surprinzător de mici.

REFERINȚE

- [1] P. Becker s.a. - Determination of the Avogadro constant via the silicon route. *Metrologia* 40 (2003) 271–287;
- [2] Peter Becker - Tracing the definition of the kilogram to the Avogadro constant using a silicon single crystal. *Metrologia* 40 (2003) 366–375;
- [3] Peter Becker – The marathon race to a new atomic kilogram. *EPN* 40/1 24–26;
- [4] E. Massa s.a. - Measurement of the lattice parameter of a silicon crystal. *New Journal of Physics* 11 (2009) 1–12;
- [5] A. Picard s.a. - Mass comparison of the 1 kg silicon sphere AVO#3 traceable to the International Prototype K. *Metrologia* 46 (2009) 1–10.

Revizia științifică a articolului:

Ion Sandu, dr.ing., cercetător științific II, șef laborator Mase, Institutul Național de Metrologie, e-mail: ion.sandu@inm.ro

Despre autor:

George Florian POPA, cercetător științific II, Institutul Național de Metrologie, e-mail: george.popa@inm.ro