

# PREOCUPĂRI ACTUALE PRIVIND REDEFINIREA UNITĂȚII DE MASĂ – „KILOGRAM” (Partea I)

*George Florian POPA*

INSTITUTUL NAȚIONAL DE METROLOGIE

**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, înprăștierea 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 va fi publicat în 2-3 numere ale revistei. În această primă parte este prezentat un scurt istoric și situația actuală a unității de masă. Dintre cele trei tipuri de experimente efectuate în lume pentru a redefini kilogramul, în această primă parte a articolului este prezentat pe larg experimentul bazat pe acumularea de ioni, desfășurat la PTB - Germania. Sunt trecute în revistă principalele dificultăți și factorii de influență.

**Cuvinte cheie:** Unitate fundamentală, Sistemul Internațional de Unități, prototipul internațional al kilogramului, acumulare de ioni, fascicul de ioni.

**Abstract.** The kilogram is the single base unit of the International System of Units (SI) with unchanged definition since 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, this definition being easy to understand for everyone. On the other hand, 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. A short history and the present situation of the mass unit are presented in this first part. From the three experiments performed on the world, aiming the redefinition of the kilogram, the experiment regarding the ion accumulation, performed at PTB-Germany, is illustrated in this first part of the paper. The main difficulties and the influence factors are reviewed.

**Key words:** Base unit, International System of Units, international prototype of the kilogram, ion accumulation, ion beam.

## 1. SCURT ISTORIC

În urma lucrărilor academicienilor francezi Delambre, Méchain, Laplace, Borda, Lavoisier, începute în anul 1790, în anul 1795 a fost instituit sistemul metric în Franța. În anul 1799 a fost produs un cilindru de platină care a fost legiferat ca „etalon definitiv” al kilogramului. Etalonul materializa, din rațiuni practice, valoarea unui kilogram definit teoretic ca fiind greutatea unui litru de apă la temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ . Acest etalon a fost depozitat la „Arhivele Naționale Franceze”, fiind denumit „kilogramul de la Arhive”.

Fondatorii sistemului metric adoptaseră, la Paris, ca unitate de forță, greutatea unui gram. Ținând seama că greutatea variază în funcție de accelerația gravitațională a locului, s-a stabilit ulterior ca

gramul (respectiv kilogramul) să fie definit nu ca unitate a greutateii sau a forței, ci ca unitate a masei.

În anul 1837 sistemul metric a devenit obligatoriu în Franța. Totodată s-au făcut eforturi de răspândire a sistemului metric în întreaga lume.

În a doua jumătate a secolului al XIX-lea o serie de țări au adoptat sistemul metric. Sistemul metric și-a făcut apariția în România prin legea din anul 1864, care a prevăzut adoptarea sa facultativă cu începere de la 1 ianuarie 1866. Din acea epocă s-a început utilizarea birourilor de verificare în vederea etalonării unităților metrice.

Legea din 1880 a fixat condițiile de aplicare a legii din 1864. Sistemul metric a fost proclamat obligatoriu printr-o lege din 1883, declarând alte sisteme ilegale, începând cu 1 ianuarie 1884.

Ulterior, acest termen a fost prelungit până la sfârșitul anului 1884.

În anul 1872 o Comisie Internațională s-a reunit la Paris în vederea stabilirii prototipurilor internaționale. Au fost reprezentate 30 de state. S-a stabilit ca pentru execuția noilor prototipuri ale kilogramului să fie luat ca bază de plecare „kilogramul de la Arhive”.

În anul 1875 a fost creat Biroul Internațional de Măsuri și Greutăți (BIPM) de către o convenție diplomatică, numită Convenția Metrului. Sediul BIPM a fost stabilit la Pavillon de Breteuil, în Sèvres, Franța. BIPM a avut ca misiune să construiască și să conserve etalonul prototip

internațional și să îl compare cu etaloanele naționale furnizate diferitelor țări.

Până în anul 1883 au fost construite 43 de prototipuri din aliaj de 90% Pt și 10% Ir, având forma cilindrică, cu diametrul și înălțimea egale cu 39 mm.

Prototipul internațional al kilogramului a fost selectat dintre trei prototipuri (notate K I, K II și K III). Prototipul K III a fost cel ales deoarece s-a constatat faptul că, acesta avea masa egală cu cea a „kilogramului de la Arhive”. Prototipul internațional al kilogramului este cunoscut și cu denumirea „grand K” (spre deosebire de celelalte prototipuri, acesta nu poartă pe suprafața lui o inscripție).



Fig. 1. Prototipul național al kilogramului.

Alte 6 prototipuri de rezervă au fost alese de BIPM dintr-un număr de 40 de prototipuri (notate de la 1 la 40). Restul de 34 de prototipuri au fost distribuite, prin tragere la sorți, țărilor semnatare ale Convenției Metrului. Ulterior, până în prezent, au mai fost fabricate cca. 50 de prototipuri ale kilogramului

După construirea kilogramului prototip internațional a fost abandonată definiția teoretică a kilogramului, rămânând în vigoare numai definiția următoare:

*Kilogramul este unitatea de masă; el este egal cu masa prototipului internațional al kilogramului.* Acesta este un cilindru având înălțimea și diametrul de 39 mm și este făcut dintr-un aliaj de Pt-Ir, conținând 90% platină și 10% iridiu, cu o densitate de aproximativ  $21,5 \text{ g cm}^{-3}$  [1, 28].

Definiția unității de masă a fost stabilită la prima Conferință Generală de Măsuri și Greutăți (CGPM) în anul 1889, și a fost confirmată la a treia CGPM, în anul 1901.

Kilogramul prototip internațional este păstrat la BIPM.

României i s-a atribuit, în anul 1891 kilogramul prototip național nr. 2. Acest prototip a participat la cinci comparații internaționale la BIPM (finalizate în anii 1913, 1946, 1976, 1993 și 2005).

## 2. SITUAȚIA ACTUALĂ

Kilogramul este singura unitate fundamentală din Sistemul Internațional de unități (SI) care nu și-a schimbat definiția inițială din 1889. 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 de cca.  $3 \cdot 10^{-8}$  între  $\mathcal{K}$  și martorii acestuia (copiile oficiale) 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.

Variația probabilă a unității de masă afectează alte trei unități fundamentale:

- *Amperul*, în definiția căruia se face referire la newton  $\left(1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ ;
- *Molul*, în definiția căruia se face referire la cantitatea de 0,012 kg de carbon 12;
- *Candela*, în definiția căreia se face referire la watt ( $1\text{W} = 1\text{VA}$ ).

În ultimii ani au fost experimentate mai multe căi pentru a redefini kilogramul:

- experimentul bazat pe acumularea de ioni;
- experimentul bazat pe utilizarea și perfecționarea balanței watt;
- experimentul bazat pe stabilirea constantei lui Avogadro.

Experimentul menționat la pct. (a) este prezentat în continuare, urmând ca experimentele de la pct. (b) și (c) să fie descrise în articole, ce vor fi publicate în numere viitoare ale revistei.

### 3. EXPERIMENTUL BAZAT PE ACUMULAREA DE IONI

Ideea de a măsura masa unui atom prin acumularea de ioni este simplă, chiar dacă realizarea ei necesită unele abilități în a direcționa particule atomice în mișcare [2].

O sursă de ioni generează un fascicol de ioni în vid (figura 2). Ionii sunt captați într-un colector, care poate fi cântărit. Deoarece ionii în mișcare reprezintă un curent electric, acest curent este măsurat și integrat pe toată perioada de timp de acumulare. Raportul dintre masa și sarcina unui singur ion este egal cu raportul dintre masa și sarcina tuturor ionilor acumulați:

$$\frac{m_a}{q} = \frac{m}{Q} \quad \text{cu} \quad Q = \int Idt \quad (1)$$

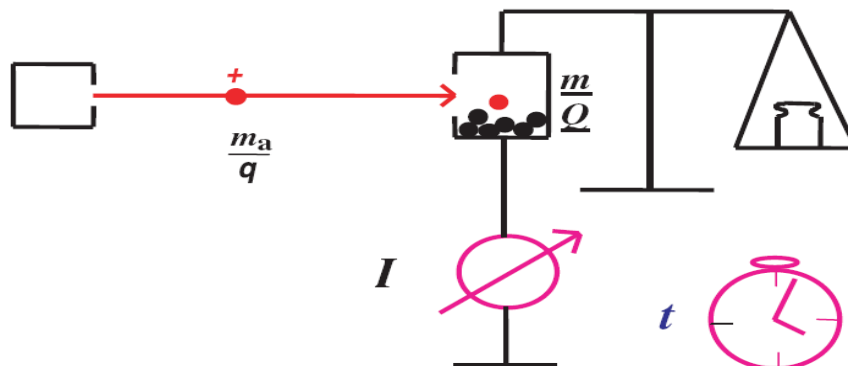


Fig. 2. Principiul experimentului acumulării de ioni.

unde:

$m$  este masa acumulată, ce poate fi determinată prin cântărire;

$m_a$  - masa atomică, care poate fi exprimată și în funcție de unitatea atomică de masă (unificată)  $u$  și de numărul atomic de masă  $A_r$  al elementului chimic folosit ( $m_a = u \cdot A_r$ ). Unitatea atomică de masă este definită ca 1/12 din masa unui atom de carbon 12, și este legată de numărul lui Avogadro  $N_A$  prin relația:

$$u = \frac{1}{1000N_A} [\text{kg}]$$

unde:

$q$  este sarcina unui singur ion;

$Q$  - sarcina însumată a tuturor ionilor acumulați;

$I$  - curentul electric produs prin deplasarea ionilor.

Numărul ionilor acumulați este:

$$N = \frac{m}{m_a} \quad \text{sau} \quad N = \frac{Q}{q} \quad (2)$$

Relația dintre constanta lui Avogadro și masa molară este:

$$\frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \quad (3)$$

În stadiul actual al tehnicii, nu este posibil să se contorizeze numărul  $N$ . Pentru a contoriza ionii de elemente grele acumulați pentru doar 10 g de substanță ar fi necesari milioane de ani, chiar dacă s-ar folosi cele mai rapide contoare electronice.

O cale mai bună este să fie măsurat curentul de ioni ca funcție de timp și să se integreze, pentru a obține sarcina totală a ionilor acumulați. Ionii menținuți în interiorul colectorului devin atomi neutri și, la sfârșitul acumulării, vor fi cântăriți, comparând masa lor însumată cu cea a unui etalon de masă.

În experiment nu este nevoie să se cunoască o valoare absolută a unei sarcini electrice, ci trebuie cunoscut raportul  $Q/q$ . Curentul electric poate fi măsurat prin căderea de tensiune pe o rezistență în circuitul electric, iar rezistența poate fi măsurată în funcție de o rezistență Hall cuantică, care este corelată cu constanta Planck,  $h$ , și cu  $e$  prin relația:

$$R_H = \frac{h}{n_1 e^2} \quad (4)$$

Tensiunea poate fi măsurată în funcție de tensiunea cuantică Josephson, conform relației:

$$U_J = n_2 f \frac{h}{2e} \quad (5)$$

unde  $n_1$  și  $n_2$  sunt numere cuantice întregi și  $f$  este frecvența unei radiații de microunde. Ecuația (2) poate fi scrisă astfel:

$$m_a = \frac{2Z}{n_1 n_2} \int f dt \quad (6)$$

Măsurările sunt, astfel, reduse la determinarea masei  $m$  și la integrarea frecvenței  $f$  în timpul de acumulare a ionilor. Numerele  $n_1$ ,  $n_2$  și  $Z$  pot fi cunoscute din condițiile de măsurare. Dacă se măsoară timpul  $t$  și frecvența  $f$  cu ajutorul aceluiași ceas atomic având o reproductibilitate suficientă, erorile sistematice ale acestuia sunt eliminate din calcul. Singura măsurare absolută ce trebuie realizată este determinarea masei  $m$ , care trebuie să fie trasabilă la prototipul internațional al kilogramului.

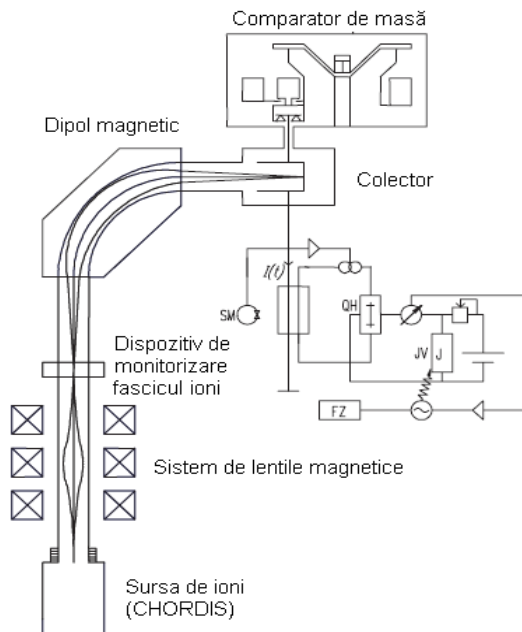


Fig. 3. Montaj tipic pentru realizarea experimentului acumulării de ioni.

Echipamentele necesare experimentului sunt reprezentate în figura 3.

Montajul tipic include un sistem de realizare a vidului, ce cuprinde o sursă de ioni, un sistem de trei lentile magnetice cu patru poli, un dipol magnetic ce servește ca separator al ionilor, un colector, un dispozitiv de măsurare a curentului și un comparator de masă. În figura 3 sunt utilizate următoarele prescurtări:

SM - Magnetometru Squid;

QH - Rezistență Hall;

JV - Dispozitiv de tensiune Josephson;

FZ - Frecvențmetru.

Mai multe condiții trebuie să fie îndeplinite pentru a obține o exactitate suficientă a determinărilor din acest experiment, dintre care amintim:

a) Alegerea unui element potrivit pentru a genera fasciculul de ioni, alegerea sursei de ioni și a mărimii curentului ionic.

Elementul trebuie să aibă un singur izotop natural stabil, pentru a evita necesitatea separării izotopice. Dintre cele 20 de elemente care îndeplinesc această cerință, au fost eliminate elementele ce au o presiune a vaporilor ridicată și elementele care au masa redusă (elementele ușoare), deoarece acestea ar necesita curenți ionici mai intensi. Elementele grele care au fost luate în considerare sunt aurul  $^{197}\text{Au}$  și bismutul  $^{209}\text{Bi}$ . Aceste elemente au și alte particularități ce le fac potrivite pentru experiment, și anume, faptul că sunt puține elemente cu masa atomică similară și faptul că nu există alte nuclee stabile pentru masele atomice 197 și 209. Primele măsurări au fost efectuate la PTB Germania cu ioni de aur, la curenți ionici de cca.  $10 \mu\text{A}$ . Deoarece curentul cu ioni de aur nu poate fi crescut la valori de ordinul miliamperilor, s-a luat în considerare utilizarea bismutului. Acesta are presiunea vaporilor mai mare decât aurul (însă în limite acceptabile), în schimb poate fi obținut un curent de ioni de bismut de cca.  $30 \text{ mA}$ .

Curentul ionic necesar depinde de valoarea necesară pentru masa de ioni acumulați, care trebuie să permită o determinare a masei cu o exactitate suficientă. Timpul în care se face acumularea este calculat cu formula:

$$t = \frac{m}{m_a} \frac{Ze}{I} \quad (7)$$

Pentru o masă acumulată de  $10 \text{ g}$ , o masă atomică  $m_a = 209u$ , ioni simplu încărcăți,  $Z = 1$  și curentul ionic de  $10 \text{ mA}$ , rezultă un timp necesar  $t = 5,3$  zile pentru a acumula  $10 \text{ g}$  de bismut, acest timp fiind acceptabil.

- b) *Asigurarea unui sistem optic pentru fasciculului de ioni cu transmitanță bună și cu o suficientă separarea ionilor străini și o ghidare eficientă a fasciculului în colectorul de ioni*

Ionii trebuie să fie separați în funcție de raportul masă-sarcină, deoarece în interiorul sursei de ioni și la aperturi sunt generați ioni din gaze și din impurități, care trebuie să fie eliminați din fasciculul de ioni. Această separare se realizează în interiorul unui câmp magnetic perpendicular pe traiectoria fasciculului. O ecuație simplificată arată relația între inducția magnetică,  $B$ , raza fasciculului  $r$  într-un câmp magnetic omogen, energia ionilor,  $q_1U$ , și sarcina  $q_2$  a ionilor ce trec prin câmpul magnetic:

$$rB = \sqrt{\frac{2m_a q_1 U}{q_2^2}} \quad (8)$$

Sarcina  $q_1$  este sarcina ionului în timpul accelerării. Aceasta poate rămâne neschimbată în timpul deplasării, și atunci  $q_2 = q_1$ . O anumită proporție dintre ioni se ciocnesc cu molecule de gaz rezidual în sistemul cu vid, rezultând o schimbare a sarcinii de la  $q_1$  la  $q_2$ . De exemplu, un ion de masă  $m_a$  și sarcină  $2e$ , fără schimbarea sarcinii apare în spectru în același loc cu un ion având masa  $m_a/2$  și sarcina  $1e$ . Dacă sarcina se schimbă de la  $2e$  la  $1e$ , atunci ionul apare în spectru în același loc cu un ion cu masa  $2m_a$  și sarcina  $1e$ . Rata schimbării de sarcină și curentul de ioni corespondent depinde puternic de presiunea gazului rezidual în sistemul cu vid.

O proprietate importantă a separatorului este rezoluția sa. Aceasta depinde de forma fasciculului, lățimea și divergența acestuia, cât și de omogenitatea câmpului magnetic. Rezoluția trebuie să asigure separarea ionilor care diferă cu un singur număr atomic. La curenți ionici de câțiva miliamperi este necesară o rezoluție extrem de ridicată, dificil de obținut.

O altă problemă rezultă din necesitatea frânării fasciculului înainte de intrarea în colectorul de ioni. Un fascicul frânat devine divergent. Pentru traiectoria finală este necesar un dispozitiv eficient de ghidare a fasciculului în colector.

- c) *Un design potrivit al colectorului, care să nu permită ieșirea ionilor colectați și să aibă caracteristicile necesare pentru ca masa lui să poată fi determinată cu exactitatea cerută.*

Colectorul de ioni trebuie să-și schimbe masa numai prin acumularea ionilor adecvați.

Masa colectorului poate fi modificată de particule dislocate de ioni din suprafața interioară a colectorului. Rata de dislocare depinde de energia ionilor. Această energie este redusă prin frânarea fasciculului, însă nu atât de mult încât să fie posibilă neglijarea efectelor dislocării.

De asemenea, ionii incidenti pot să fie reflectați de suprafața colectorului. Pentru a reduce pierderea acestor particule, forma colectorului trebuie să fie în așa fel, încât particulele dislocate sau reflectate să ajungă pe suprafețele interioare ale colectorului. O soluție mai eficientă este plasarea colectorului într-un câmp magnetic transversal, fapt ce împiedică ieșirea particulelor prin fereastra de intrare. Soluția este prezentată în figura 4.

Particulele dislocate și cele reflectate sunt în cea mai mare parte neutre electric și vor întâlni suprafețele interioare ale colectorului. Având o energie foarte scăzută, ele nu provoacă alte dislocări, ci aderă la suprafață după prima coliziune.

Colectorul trebuie să fie ecranat, pentru a preveni ca electronii și ionii ce se propagă să modifice curentul de măsurat.

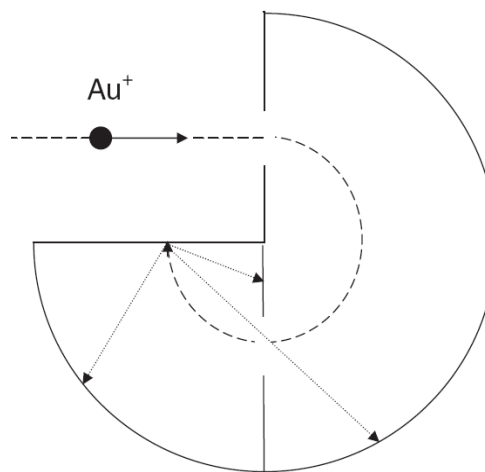


Fig. 4. Colector plasat într-un câmp magnetic transversal.

*Un comparator de masă pentru determinarea masei în vid, cu o abatere standard de cca.  $10^{-10}$ , ținând seama că masa totală ce se determină este cea însumată din masa atomilor colectați și masa colectorului. De asemenea, trebuie să fie luate în considerare efectele adsorbției și ale forței ascensionale atunci când greutățile de referință sunt mutate între aer și vid.*

Determinările de masă sunt realizate cu ajutorul unui comparator de masă special, similar cu balanța cu benzi de încovoiere de la BIPM, modificat pentru cerințele speciale ale colectării de ioni. În figura 5 este prezentată schița acestui comparator.

Comparatorul este construit pe principiul balanței cu brațe egale. Colectorul de ioni, având o masă de aproximativ 1 kg, este suspendat de unul din brațele comparatorului și este cântărit în vid, utilizând metoda substituției. Masa colectorului este substituită cu o greutate ce are masa egală cu cea a colectorului gol, înainte de începerea acumulării de ioni. După acumulare se adaugă greutatea de la 1 mg la 10 g, în funcție de masa acumulată. Greutățile adiționale sunt adăugate utilizând traductori piezoelectrice. Comparatorul este proiectat să aibă o abatere standard de 0,1 μg la sarcina de 1 kg.

Efectele absorpției pe suprafață, ce apar la trecerea etaloanelor de masă din vid în aer, sunt eliminate comparând masa atomilor acumulați cu diferențele obținute, nu cu un singur etalon ci cu două etaloane de masă, având aceeași suprafață laterală. Efectele forței ascensionale a aerului sunt minimizezate prin utilizarea în vid și în aer a unor etaloane de masă având aceeași densitate ca aceea a kilogramului prototip realizat din aliajul de platină-iridiu.

d) *Minimizarea și determinarea particulelor pierdute prin dislocare din pereții interiori ai colectorului și prin reflectarea din colector.*

Dislocarea atomilor de pe suprafața interioară a colectorului nu poate fi evitată în totalitate. În acest experiment ionii ies din sursa de ioni cu o energie de aproximativ 20 keV. Comparând aceste energii cu energia de circa 1 eV a atomilor de suprafață, rezultă faptul că este posibil să se înregistreze, mai curând, o pierdere decât un câștig de masă, atunci când ionii lovesc suprafața. La o energie de 20 keV, rata de dislocare este mai mare de 10, ceea ce înseamnă că un atom incident dislocă 10 atomi de pe suprafață. La energii mai mari, de ordinul

MeV, dislocarea și reflectarea sunt mult reduse, majoritatea ionilor fiind implantați în suprafață. La astfel de energii și la curenți ionici de 10 mA, apar probleme suplimentare pentru răcirea colectorului. Cealaltă cale este de a frâna ionii mult sub 1 keV, obținând o scădere considerabilă a dislocării și a reflectării ionilor.

Pragul de energie pentru efectele de dislocare și de reflectare este estimat la circa 20 eV.

Particulele care ies prin fereastra colectorului sunt măsurate cu ajutorul unei matrice de cristale de cuarț ce oscilează în apropierea ferestrei. Asemenea oscilatori bazați pe cuarț măsoară masa totală a particulelor pierdute.

e) *Particulele străine acumulate având un raport masă/sarcină greșit.*

Particule străine pot să fie acumulate dacă molecule de gaz rezidual sunt difuzate în colector, prin coliziunea cu ionii. Schimbarea relativă a masei acumulate prin particulele străine difuzate în colector este:

$$\frac{\Delta m_c}{m_c} = 4\pi a^2 \gamma \frac{A_g}{A_s} \frac{p}{kT} \eta z_c \quad (9)$$

unde:

$a$  - este raza ionului sau a moleculei difuzate;  
 $\gamma$  - fracțiunea de particule străine colectate, față de particulele difuzate în colector;  
 $A_g, A_s$  - masa atomică a particulei străine, respectiv a particulei utile;  
 $P$  - presiunea vacuumului realizat;  
 $k$  - constanta Boltzmann;  
 $T$  - temperatura absolută;  
 $\eta$  - fracțiunea de particule străine difuzate în colector de la o distanță  $z_c$  într-o fereastră a colectorului cu raza  $r_c$ .

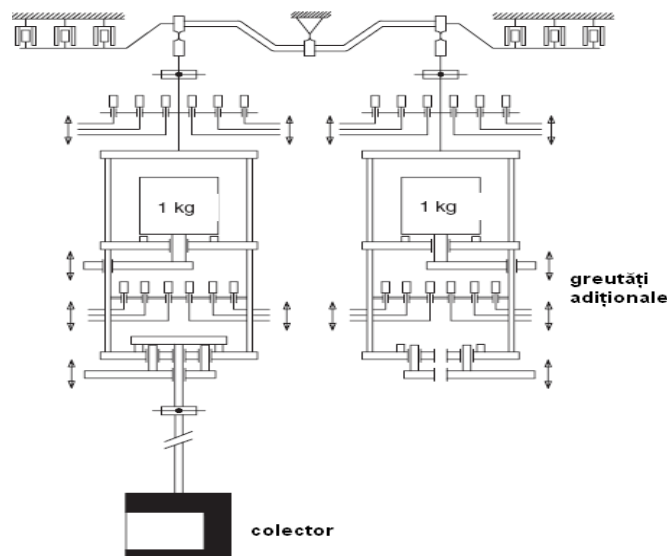


Fig. 5. Schița comparatorului de masă special.

O estimare cu ipoteze rezonabile ( $p = 10^{-7}$  Pa,  $r_c = 5$  mm,  $z_c = 1$  m, și  $\gamma = 0,1$ ) furnizează un rezultat  $\Delta m_c/m_c = 2,7 \times 10^{-9}$ , valoare ce este acceptabilă pentru incertitudinea necesară.

Particule străine pot fi, de asemenea, acumulate prin procesul de difuzare la ferestre sau la pereții aparatului, cât și din cauza rezoluției insuficiente a separatorului de particule sau din cauza procesului de schimbare a sarcinii pe traiectoria dintre separator și colector.

Electronii pot fi ecranati prin electrozi cu potențial electric adecvat. Contribuția particulelor neutre poate fi măsurată utilizând un detector cu oscilator cu cuarț, și un dispozitiv care permite să devieze particulele încărcate în afara detectorului. O analiză chimică a materialului depozitat în colector va furniza informații suplimentare.

f) *Stabilitatea și reproductibilitatea etaloanelor pentru măsurarea curentului de ioni.*

Curentul ionic este măsurat prin căderea de tensiune pe o rezistență. Tensiunea este comparată cu un etalon stabil de tensiune, precum o diodă Zener, trasabilă la un dispozitiv de tensiune Josephson iar rezistența este trasabilă la rezistența Hall. Cerințele principale pentru a obține determinări exacte și reproductibile sunt de a asigura ecranări suficiente și o stabilitate a temperaturii.

#### 4. CONCLUZII

Experimentul acumulării de ioni, care leagă unitatea atomică de masă de kilogram, este unul dintre experimentele care pot conduce la redefinirea kilogramului. Până în prezent, experimentul acumulării de ioni nu a ajuns la un nivel de incertitudine satisfăcător. Deocamdată, experimentele au fost efectuate numai la PTB, cu ioni de aur, la curenți ionici de 0,01 mA. Prin utilizarea ionilor de bismut și creșterea curentului ionic la 10 mA, se poate obține o îmbunătățire a rezultatelor cu un factor de 1000. Primele experimente efectuate la PTB cu ioni de bismut, la curenți de 2,5 mA au avut rezultate notabile, evidențiind mai multe posibilități de îmbunătățire a experimentului. [8]

Se poate concluziona că experimentul acumulării cu ioni reprezintă una dintre căile de redefinire a unității de masă, cu reale posibilități de evoluție.

În partea a doua a articolului, ce va fi publicată în numărul viitor al revistei, vom continua prezentarea experimentelor efectuate pe plan internațional pentru redefinirea kilogramului.

#### REFERINȚE

- [1] Richard Davis - „The SI unit of mass”. *Metrologia*, Vol. 40 (2003), pp: 299–305.
- [2] Michael Gläser - „Tracing the atomic mass unit to the kilogram by ion accumulation”. *Metrologia*, Vol. 40 (2003), pp: 376–386.
- [3] Richard L. Steiner ș.a. - „Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass”. *Metrologia*, Vol. 42 (2005), pp: 431–441.
- [4] J.L. Flowers ș.a. - „The kilogram redefinition – an interim solution”. *Metrologia*, Vol. 42 (2005), L31–L34.
- [5] Ian M. Mills ș.a. - „Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing”. CIPM Recommendation 1 (CI-2005).
- [6] F. Biraben ș.a. - „Proposal for new experimental schemes to determine the Avogadro constant”. *Metrologia*, Vol. 43 (2006), L47–L50.
- [7] P. Becker ș.a. - „Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units”. *Metrologia*, Vol. 44 (2007), pp: 1–14.
- [8] C. Schlegel ș.a. - „Accumulation of 38 mg of bismuth in a cylindrical collector from a 2.5 mA ion beam”. *Metrologia*, Vol. 44 (2007), pp: 24–28.
- [9] Peter Pestic - Estimating Avogadro’s number from skylight and airlight. *European Journal of Physics* Vol. 26 (2005), pp: 183–187.
- [10] John Roche - What is mass? *European Journal of Physics* Vol. 26 (2005), pp: 225–242
- [11] George Popa ș.a. – Intercompararea etaloanelor secundar ordinul I cu kilogramul prototip național nr. 2 , INM, 1998
- [12] B.W.Petley - „The atomic units, the kilogram and the other proposed changes to the SI”. *Metrologia*, Vol. 44 (2007), pp: 69–72.
- [13] B.P.Leonard - „On the role of the Avogadro constant in redefining SI units for mass and amount of substance”. *Metrologia*, Vol. 44 (2007), pp: 82–86.
- [14] B.P.Leonard - „Note on uncertainties resulting from proposed kilogram redefinitions”. *Metrologia*, Vol. 44 (2007), pp: L4–L6.
- [15] J.W.G.Wignall - „Some comments on the definition of mass. *Metrologia* Vol. 44 (2007), L19–L22.
- [15] Martin J.T.Milton ș.a. - Modernizing the SI: towards an improved, accessible and enduring system. *Metrologia* Vol. 44 (2007), pp: 356–364.
- [16] I.A.Robinson ș.a. - An initial measurement of Planck’s constant using the NPL Mark II watt balance”. *Metrologia*, Vol. 44 (2007), pp: 427–440.
- [17] Peter J.Mohr - „Defining units in the quantum based SI”. *Metrologia*, Vol. 45 (2008), pp: 129–133.
- [18] Sébastien Merlet ș.a. - „Micro-gravity investigations for the LNE watt balance project”. *Metrologia*, Vol. 45 (2008), pp: 265–274.
- [19] H.Baumann ș.a. - Evaluation of the local value of the Earth gravity field in the context of the new definition of the kilogram. *Metrologia* Vol. 46 (2009), pp: 178–186.
- [20] E.Massa ș.a. - Comparison of the INRIM and PTB lattice-spacing standards. *Metrologia* Vol. 46 (2009), pp: 249–253.
- [21] E.Massa ș.a. - „Measurement of the lattice parameter of a silicon crystal”. *New Journal of Physics*, Vol. 11 (2009) 053013, pp: 1-12.
- [22] H.Kajastie ș.a. - „Mass determination with the magnetic levitation method – proposal for a new design of electromechanical system”. *Metrologia*, Vol. 46 (2009), pp: 298–304.

- [23] Barry N.Taylor - „Molar mass and related quantities in the New SI”. *Metrologia*, Vol. 46 (2009), L16–L19.
- [24] J.W.G.Wignall - „An absolute replacement for the standard kilogram”. *Measurement, Science and Technology*, Vol. 16 (2005), pp: 682–684.
- [25] P.Seyfried s.a. - „The Role of  $N_A$  in the SI: An Atomic Path to the Kilogram”. *Metrologia*, Vol. 31 (1994), pp: 167-172.
- [26] Gérard Genevès s.a. – „La balance du watt: vers une nouvelle définition de l’unité de masse?” *Revue Française de Métrologie*, n° 9, Volume 2007-1, pp: 3-34
- [27] BIPM - *Le Système international d’unités (SI)*. 8<sup>e</sup> édition, 2006

---

**Revizia științifică a articolului:**

*Ion Sandu*, dr. ing, cercetător științific II, șef de laborator Mase, Institutul Național de Metrologie, email: [ion.sandu@inm.ro](mailto:ion.sandu@inm.ro)

**Despre autor:**

*George Florian POPA* – cercetător științific II, Institutul Național de Metrologie, e-mail: [george.popa@inm.ro](mailto:george.popa@inm.ro)