

# ÎNCERCĂRILE DE REDEFINIRE A UNITĂȚILOR FUNDAMENTALE ALE SISTEMULUI INTERNAȚIONAL DE UNITĂȚI (SI) PLECÂND DE LA CONSTANTELE FIZICE FUNDAMENTALE

I. M. POPESCU \*

**Rezumat:** În această lucrare se prezintă rezultatele cercetărilor actuale asupra legăturii dintre unitățile fundamentale ale SI și constantele fizice fundamentale. Se evidențiază rolul din ce în ce mai important al mecanicii cuantice în edificarea unei noi metrologii cu coerență globală.

**Abstract:** There are presented the results of topical researches about the relations between the fundamental units in SI and the physical fundamental constants. It is more and more evident the rol of the quantum mechanics in the edification of a new metrology with a global coherence.

**Cuvinte cheie:** Sistemul Internațional de Unități (SI); efectul Josephson; constanta Josephson; efectul Hall cuantic; constanta von Klitzin ; efectul tunel mono-electronic; pompă electronică; triunghi metrologic; incertitudinea standard relativă.

**Key words:** International System of Units (SI); Josephson effect; Josephson constant; quantum Hall effect; von Klitzing constant; single - electron tunnelling; electron pump; metrological triangle; relative standard uncertainty.

## Introducere

Din anul 1875 există în lume Convenția Metrului (tratat internațional care guvernează metrologia mondială, la care au aderat până în prezent aproape toate statele), care precizează conturul SI actual. Comitetul Internațional de Măsurii și Greutăți, C.I.P.M. (Comité International des Poids et Mesures), adunare a cercetătorilor științifici ai diferitelor națiuni, face propuneri diplomaților Conferinței General de Măsurii și Greutăți, C.G.P.M. (Conférence Générale des Poids et Mesures), care rețin noile definiții și însărcinează Biroul Internațional de Măsurii și Greutăți, B.I.P.M. (Bureau International des Poids et Mesures) situat la Pavillon de Breteuil, la Sèvres, cu punerea în lucru a rapoartelor și conducerea intercomparărilor între diverse etaloane naționale. Astfel, se pleacă de la ideea că a măsura înseamnă a compara o mărime fizică necunoscută cu o referință a cărei trasabilitate este stabilită în cadrul SI care se folosește de rezultatele noi ale fizicii fundamentale.

De fapt, se respectă activitatea metrologică pentru măsurarea unei mărimi dată de Maxwell [1]. Orice expresie a unei mărimi fizice este formată din doi factori: unul din ei este numele unei mărimi cunoscute de aceeași natură ca mărimea de exprimat care este luată ca etalon de referință; cealaltă componentă este numărul de câte ori trebuie să se raporteze etalonul pentru a reproduce mărimea considerată (figura 1 - măsurarea unei mărimi).

Din punct de vedere tehnic, mărimea etalon este numită *unitate* și numărul din raport este numit *valoare numerică* a mărimii. Astfel, avem:

(\*) Catedra de Fizică I, Universitatea : "Politehnica" din București, Splaiul Independenței nr. 313, cod 060042, sectorul 6, București

$$\text{MĂRIMEA} = \text{VALOAREA} \times \text{UNITATEA} \quad (1)$$

De asemenea, se admite că pentru cercetarea fundamentală, aplicată și de dezvoltare, controlul calității fabricației și schimburile de piață este necesar să existe tehnologii de măsură robuste, sigure și foarte precise. Din practica de până acum s-a constatat că mărimile electrice constituie etalonul de măsură. Pentru a facilita măsurările prin instrumentație electronică cele mai multe mărimi neelectrice sunt convertite în mărimi electrice. Aceste obiective pot fi realizate apelând la fenomenele cuantice, care permit asocierea dintre mărimile electrice și constantele atomice fundamentale invariabile, cum ar fi sarcina electronului, constanta lui Planck, viteza luminii în vid ș.a. Ținându-se seama de succesul continuu al implementării etaloanelor electrice bazate pe fenomene cuantice s-ar putea justifica - în viitor - o redefinire a SI.

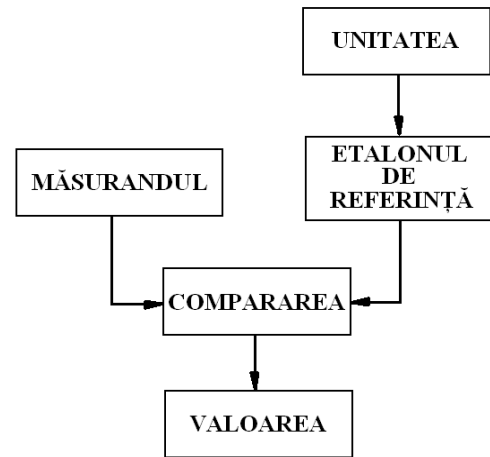


Fig. 1.

Numele SI a fost dat la cea de-a 11-a C.G.P.M. în 1960, când s-au stabilit șase unități fundamentale, iar la cea de-a 14-a C.G.P.M. în 1971 versiunea curentă a unităților fundamentale a fost completată cu molul ca unitate fundamentală pentru cantitatea de substanță [2]. În prezent, SI este bazat pe șapte unități fundamentale: *metrul* (m) pentru lungime, *kilogramul* (kg) pentru masă, *secunda* (s) pentru timp, *amperul* (A) pentru intensitatea curentului electric, *kelvinul* (K) pentru temperatura termodinamică, *molul* (mol) pentru cantitatea de substanță și *candela* (cd) pentru intensitatea luminoasă. Acestea sunt unitățile definite în mod clar pentru șapte mărimi independente din punct de vedere dimensional. Celelalte unități ale altor mărimi sunt numite unități derivate, care sunt formate prin combinarea celor șapte unități fundamentale. Incertitudinile relative pentru unitățile de bază ale SI sunt date în tabelul 1 [3].

**Tabelul 1: Unități fundamentale ale SI**

Nr. crt.	Mărimea fizică	Simbolul pentru mărime	Unitatea de măsură			Incertitudine relativă
			Denumirea	Simbol	Termen dimensional	
1	Lungime	<i>l</i>	metru	m	m	$\cong 10^{-12}$
2	Masă	<i>m</i>	kilogram	kg	kg	$\cong 10^{-8}$
3	Timp	<i>t</i>	secundă	s	s	$\cong 10^{-14}$
4	Intensitatea curentului electric	<i>I</i>	amper	A	A	$\cong 10^{-8}$
5	Temperatură termodinamică	<i>T</i>	kelvin	K	K	$\cong 10^{-6}$
6	Cantitate de substanță	<i>n</i>	mol	mol	mol	$\cong 10^{-6}$
7	Intensitate luminoasă	<i>I<sub>v</sub></i>	candelă	cd	cd	$\cong 10^{-3}$

**Unitatea de lungime: metrul (m)**

În prezent, pentru unitatea de lungime, *metru*, este păstrată definiția dată de cea de-a 17-a C.G.P.M. în anul 1983: *Metrul este lungimea drumului parcurs de lumină în vid pe durata intervalului de timp de  $(299\,792\,458)^{-1}$  dintr-o secundă* [4]. În această definiție se consideră că viteza luminii în vid este  $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ , valoare exactă, recomandată în 1975 de către C.C.D.M. (Comitetul Consultativ de Definiție a Metrului).

Precizia potențială a metrului este acum cea a unității de timp. Se remarcă faptul că noua definiție încă se bazează pe o constantă fizică universală (viteza luminii în vid,  $c$ ), nu pe un obiect material și nici pe o radiație emisă de o anumită substanță. Ca atare, această definiție are bune garanții de perenitate. Incertitudinea relativă admisă în momentul de față pentru metru este de circa  $10^{-12}$ ; aceasta este mult mai mare decât cea pentru unitatea de timp ( $\cong 10^{-14}$ ) datorită limitărilor introduse de măsurile interferometrice.

Redefinirea unității de lungime plecând de la unitatea de timp a fost posibilă deoarece optica modernă a permis măsurarea cu o incertitudine relativă inferioară celei mai bune măsurări de lungimi anterioară. Tehnica interferometriei, care permite să se treacă de la lungimea nanometrică a lungimilor de undă legate de tranzițiile atomice la lungimea macroscopică la scara metrului, a condus la definiția metrului din 1983. Astfel, prin această definiție, incertitudinea relativă asupra metrului depinde de incertitudinea relativă asupra unității de timp și de dezvoltarea metodelor interferometrice pentru a pune în practică definiția metrului [5].

**Unitatea de masă: kilogramul (kg)**

Unitatea de masă, *kilogram*, a fost definită de prima C.G.P.M. în 1889, iar la cea de-a treia C.G.P.M. din 1901 s-a pus capăt ambiguității ce există în folosirea curentă a semnificației termenului de "greutate", confirmându-se definiția: *kilogramul este unitatea de masă; el este egal cu masa prototipului internațional al kilogramului*. Prototipul internațional al kilogramului este o piesă cilindrică (al cărei diametru este egal cu înălțimea și ambele sunt egale cu 39 mm) din platină 90 % aliată cu iridiu 10 %, cu o precizie mai mare de 0,0001, păstrat la B.I.P.M., Sèvres, Franța [6]. În prezent, kilogramul este singura unitate de măsură care se referă la un etalon material. S-a ales platina iridiată deoarece se obține un aliaj ultradens și cuasiinalterabil de metale. Ca urmare a trei intercomparări efectuate în 1889, 1946 - 1953 și 1982 - 1992, toate țările, membre ale Convenției Metrului, au acceptat ideea că *masa kilogramului etalon*, invariabilă prin definiție, a condus la obținerea mai multor zecimi de micrograme (adică, vreo câteva  $10^{-8}$  în valoare relativă). Astfel, azi se pot compara două mase de 1 kg cu o incertitudine relativă de  $10^{-8}$ , adică, 0,01 mg.

Kilogramul este singura unitate de măsură a cărei denumire începe cu kilo. Cu toate acestea, masele (multipli și submultipli) vor fi exprimate în grame (de exemplu, spunem 1 mg, și nu 1  $\mu\text{kg}$ ).

Metoda în care se obțin subunitățile amintite, deși particulele universului au o masă variabilă, ci nu piesa de metal din pivnița de la Sèvres, este stânjenitoare. De aceea, cea de -a 21-a C.G.P.M. din 1999 a recomandat ca să fie făcute toate eforturile pentru a înlocui definiția unității de masă, considerându-se satisfăcător să se plece de la masa unei particule microscopice a priori perfect reproductibilă. Procedând în acest mod, dificultatea constă în racordarea scării atomice și a

scării macroscopice, masele comportându-se foarte bine în ambele scări. S-a conceput că este posibilă o astfel de legătură, dacă se poate realiza un obiect la care numărul de atomi să fie cunoscut și la care masa sa să poată fi comparată cu masa kilogramului etalon,  $M_{KE}$ . Procedând în acest mod, problema se reduce la determinarea numărului lui Avogadro,  $N_A$ , care definește molul, acesta fiind o cantitate de obiecte microscopice definit ca un număr convențional de entități identice. Numărul respectiv fără dimensiune s-a ales în mod arbitrar egal cu numărul de atomi, considerați izolați, în repaus și în starea lor fundamentală, conținuți 0,012 kg de carbon 12. Rezultă că acest număr, până la un factor numeric egal aproximativ cu 0,012, este raportul fără dimensiune al  $M_{KE}$  (masa kilogramului etalon) la masa atomului de carbon 12, raportul respectiv fiind numărul lui Avogadro,  $N_A$ , raportat la mol,  $N_A$  fiind exprimat în  $\text{mol}^{-1}$ . Avem, deci, un alt mod de a exprima masa atomului de carbon 12 sau 1/12 din masa atomului carbon 12 care este, de fapt, unitatea de masă atomică, adică [7]:

$$1u = m_u = \frac{1}{12} \left( {}^{12}\text{C} \right) = 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} \times \frac{1}{N_A} = 1,660\,538\,73(13) \times 10^{-27} \text{ kg}. \quad (2)$$

În prezent, există un program internațional [8] pentru determinarea numărului lui Avogadro, plecând de la cunoașterea caracteristicilor fizice de dimensiune, masă, volumul rețelei, compoziție **izotopică**, starea suprafeței pentru o sferă de siliciu, căutându-se să se determine numărul lui Avogadro cu o exactitate compatibilă cu o redefinire a kilogramului având incertitudinea relativă de cel puțin  $10^{-8}$  ca în prezent. Cercetările efectuate în ultimii ani plecând de la un cristal de siliciu purificat prin metoda zonei flotante, s-au fabricat prin *polizare* mai multe sfere cuasiperfecte de circa 1 kg, cu defecte inferioare de câteva zecimi de nanometri și s-au determinat cu ajutorul spectroscopiei de masă, a tehnicilor de interferometrie X și a opticii de mare precizie: talia rețelei  $d_{220}$ ,  $a$ ; densitatea,  $\rho = \frac{m}{V}$  și masa molară,  $M$ . Ținându-se seama de faptul că rețeaua cristalului cubic comportă opt atomi, s-a obținut pentru  $N_A$  valoarea:

$$N_A = \frac{8M}{\rho a^3} = 6,022\,135\,3(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}, \quad (3)$$

valoare foarte apropiată de  $N_A = 6,022\,141\,99(47) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , determinată prin alte metode și admisă în momentul de față [7] cu incertitudinea relativă de  $7,9 \times 10^{-8}$ . Bănuielile privind nepotrivirea sunt asupra compoziției izotopice a siliciului utilizat pentru a determina pe  $N_A$ .

Trebuie, totuși, să ținem seama că noțiunea de masă nu se reduce la cea de cantitate de materie. Și în acest caz, ca în cazul metrului, este posibil să se lege unitatea de masă de unitatea de timp. Interpretând masa  $m$  ca a unui obiect prin energia sa internă,  $E = mc^2$ , în conformitate cu teoria relativității restrânse și ținând seama de teoria lui Louis de Broglie (teoria undelor de Broglie atașate microparticulelor [9]), energia  $E$  poate fi asociată timpului propriu,  $\tau$ , al obiectului pentru a obține faza unei oscilații interne. Produsul  $mc^2\tau$ , fiind o acțiune, se poate raporta la constanta lui Planck,  $h$ , pentru a obține faza fără dimensiune a undei asociate  $mc^2\tau/h$ . Deci, mărimea  $mc^2/h$  este o frecvență care a fost numită frecvența de Broglie - Compton,  $\nu_{ABC}$ . Frecvența respectivă este măsurabilă prin tehnicile de interferometrie atomică în care avem de a face cu interferența undelor de Broglie, măsurarea făcându-se cu o incertitudine relativă inferioară la  $10^{-8}$ . Astfel, se ajunge la relația [8]:

$$v_{dBC} = \frac{M_{KE}c^2}{h} = 1000N_A \frac{m_u c^2}{h}. \quad (4)$$

Aceasta este recomandarea pe care a făcut-o grupul de lucru al Academiei de Științe din Paris către C.I.P.M. în anul 2005. Astfel, unitatea de masă ar putea fi definită fixând această frecvență, adică, constanta lui Planck,  $h$ .

Se încearcă, încă, și alte posibilități. Astfel, într-un document de lucru la C.I.P.M. [10] s-a propus definiția: *kilogramul este masa de  $5,018\ 451\ 66 \times 10^{25}$  atomi liberi de carbon 12 în repaus în starea lor fundamentală*, deoarece:

$$1\text{ kg} = 5,018\ 451\ 66 \times 10^{25} \cdot m_{12C} \quad (5)$$

și

$$m_{12C} = \frac{0,012}{N_A} \Rightarrow N_A = 0,012 \times 5,018\ 451\ 66 \times 10^{25} \text{ mol}^{-1}. \quad (6)$$

Metoda balanței watt-ului, propusă de B.P. Kibble în 1975 - 1977, [11], [12], care conduce la existența relației:

$$mgv = U_e I = \frac{U_e U}{R}, \quad (7)$$

reduce măsurarea masei la măsurări ale mărimilor electrice. Plecând de la efectul Josephson [13] și efectul Hall cuantic [14], [15], se poate exprima masa în raport cu constanta lui Planck,  $h$ :

$$m = \frac{k}{g^v K_{J-90}^2 R_{K-90}} h, \quad (8)$$

unde  $K_{J-90}^2 = 483\ 597,9 \frac{\text{GHz}}{\text{V}}$  (valoare exactă [7]) și  $R_{K-90} = 25\ 812,807 \ \Omega$  (valoare exactă [6]),  $k$  este un număr întreg,  $g = g_n = 9,80\ 665 \text{ ms}^{-2}$  este "acelerația gravitațională standard", care a fost adoptată internațional (B.I.P.M., 1998) și  $v$  este viteza cu care se deplasează bobina.

Printre altele, există și posibilitatea [16] de a utiliza relația:

$$E = mc^2 = hv \quad (9)$$

și de a adopta definiția: *kilogramul este masa unui corp în repaus a cărei energie echivalentă este egală cu energia unui ansamblu de fotoni a cărui sumă a frecvențelor este egală cu  $135\ 639\ 274 \times 10^{42}$  hertzi*.

### Unitatea de timp: secunda (s)

Unitatea de timp, *secunda*, utilizată în prezent este cea definită la a cea de-a 13-a C.G.P.M. în 1967 - 1968: *Secunda este durata a  $9\ 192\ 631\ 770$  perioade ale radiației corespunzătoare tranziției între cele două niveluri hiperfine ale stării fundamentale a atomului de cesiu 133 la o temperatură de 0 K*. La reuniunea sa din 1997, C.I.P.M. a specificat că definiția dată la cea de-a 13-a C.G.P.M. se referă la un atom de cesiu în starea lui fundamentală la o temperatură de 0 K. Starea fundamentală a cesiului 133 este reprezentată în figura 2.

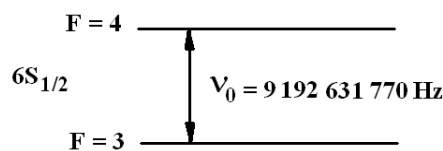


Fig. 2

Măsurarea timpului constituie punctul de vârf al metrologiei datorită ceasurilor atomice (un ceas atomic este un oscilator a cărui frecvență este acordată, în cazul de față, pe cea a tranziției  $F = 3 \leftrightarrow F = 4$  a atomului de cesiu-133) a căror exactitate câștigă un factor de 10 la fiecare 10 ani. În prezent incertitudinea relativă a ceasurilor atomice este mai bună decât  $10^{-15}$ . Existența acestui înalt nivel de exactitate pentru măsurarea timpului trage în sus celelalte măsurări, care se reduc cel mai adesea la măsurarea timpului sau frecvenței. În momentul de față, pentru etalonul de timp, incertitudinea relativă este considerată  $10^{-14}$  (tabelul 1). Standardul de timp - ceas atomic cu "fântână" de cesiu - instalat în U.S.A. în 1999 de către National Institute of Standard and Technology (N.I.S.T.) la laboratoarele sale din statul Colorado, are o incertitudine relativă de  $10^{-15}$ , adică este de 500 de ori mai exact decât cel mai bun ceas al N.I.S.T. din 1975 [17]. Din 2005 se lucrează la un ceas atomic care să fie situat pe o stație spațială internațională pentru a avea incertitudinea relativă mai bună decât  $10^{-16}$ . Experții prevăd obținerea unei incertitudini relative de  $10^{-18}$ . Cercetătorii din U.S.A. lucrează la ceasul atomic PARCS (Primary Atomic Reference Clock in Space) a cărui incertitudine relativă este mai bună de  $10^{-17}$ , care va fi cuplat cu ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) instalat de Agenția Spațială Europeană (European Space Agency). Un al treilea ceas atomic RACE (Rubidium Atomic Clock Experiment), construit în U.S.A și programat pentru 2008 va avea o incertitudine relativă de aproximativ  $10^{-18}$ . Ținând seama de cunoașterea destul de aproximativă a potențialului de gravitație terestru, s-a arătat că utilizarea ceasurilor atomice pe Pământ limitează incertitudinea relativă a acestora la  $10^{-16} \div 10^{-17}$ , iar pentru o incertitudine relativă mai bună ( $10^{-18} \div 10^{-22}$ ) va trebui să dispunem de ceasuri atomice instalate pe sateliți geostaționari. Toate succesele amintite în măsurarea timpului s-au datorat utilizării atomilor "reci" sau atomilor "ultrareci" pentru realizarea ceasurilor sub formă de fântâni atomice. Bucla de corecție (figura 3) constrânge frecvența oscilatorului la a rămâne egală cu frecvența  $\nu_0$  a tranziției

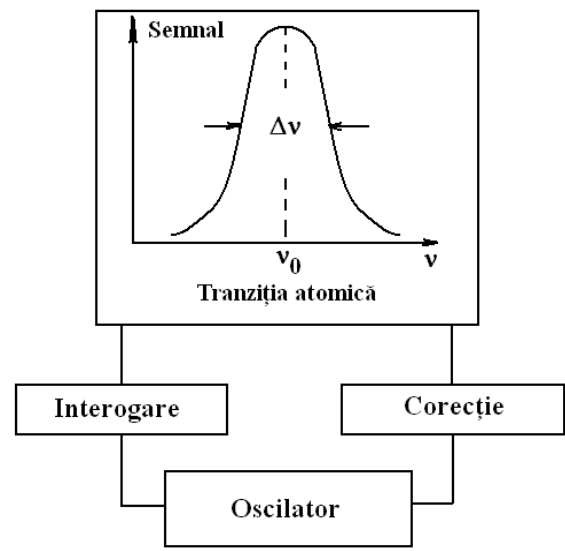


Fig. 3

$F = 3 \leftrightarrow F = 4$  a cesiului. Cu cât rezonanța atomică este mai îngustă, adică, cu cât  $\Delta\nu$  este mai mică, cu atât centrul  $\nu_0$  al liniei poate fi marcat mai precis. Ori, deoarece

$$\Delta\nu \cong \frac{1}{\tau}, \tag{10}$$

unde  $\tau$  este timpul de observare, este interesant să se utilizeze atomi lenți, adică, atomi "ultrareci", pentru a-l lungi pe  $\tau$ , adică, pentru a-l diminua pe  $\Delta\nu$ . De exemplu, se obține o stabilitate a frecvenței de  $5 \times 10^{-16}$  pentru un timp de integrare  $\tau \cong 2 \times 10^4$  s, iar precizia este de  $7 \times 10^{-16}$ .

Apariția ceasurilor optice, asociate cu "piepteni" de frecvență furnizați de laserii femtosecunde [8], asigură înlocuirea ceasurilor cu microunde. Competiția rămâne deschisă între

atomii neutri (în zbor liberi sau confinați într-o rețea de lumină pentru a beneficia de efectul Lamb - Dicke [8]) și ionii confinați.

În prezent, există dezbateri deschise pentru alte redefiniții posibile ale secunde. Se pune întrebarea: *Se va ajunge pentru secundă ca pentru metru la o definiție universală însoțită de o punere în practică și de realizări secundare?* Aceasta pune, ca pentru metru, problema variației posibile a constantelor fundamentale care ar afecta în mod diferit diversele tranziții atomice reținute. Comitetul Consultativ pentru Timp și Frecvențe, C.C.T.F. (Comité Consultatif pour le Temps et les Fréquences) recomandă tranziția hiperfină a rubidiului ca reprezentare secundară a unității de timp, deoarece rubidiul are avantaje asupra cesiului legate de proprietățile de ciocniri. Mulți fizicieni metrologi ar dori să dea o nouă definiție a unității de timp bazată pe tranziția  $1s \leftrightarrow 2s$  a hidrogenului, această tranziție făcând obiectul unor intercomparări spectaculoase (la incertitudine relativă de  $10^{-14}$ ) cu "fântâna" de cesiu răcit. Această cale urmată ar conduce la utilizarea unei combinații corespunzătoare de frecvențe optice permițând să se izoleze mai bine constanta Rydberg (a cărei valoare considerată în prezent este  $10973731,568549(83)m^{-1}$ , cu incertitudinea relativă  $7,6 \times 10^{-12}$ ) și masa  $m_e$  a electronului, regăsind constanta de structură fină pentru care s-a ajuns la incertitudinea relativă  $0,7 \times 10^{-9}$  prin măsurarea momentului magnetic anormal al electronului. În calculele efectuate în prezent, se consideră următoarea valoare pentru constanta structurii fine [7]:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = 7,297\,352\,533(27) \times 10^{-3}, \quad (11)$$

incertitudinea relativă fiind  $3,7 \times 10^{-9}$ . Analizând rezultatele obținute până acum, rezultă că nu există o cale prea lungă pentru a atașa în mod formal unitatea de timp la o constantă fundamentală, dacă ținem seama de legătura implicită care există deja între definiția unității de timp și constantele fundamentale.

#### **Unitatea pentru intensitatea curentului electric: amperul (A)**

În 1946 C.I.P.M. aprobă propunerea unui sistem cuadridimensional bazat pe *metru, kilogram, secundă și amper*, la 45 de ani de la propunerea lui Giovanni Giorgi (13 octombrie 1901) ca la unitățile mecanice ale sistemului (metru - kilogram - secundă) să se adauge a patra unitate de natură electrică. Se propune următoarea definiție pentru intensitatea curentului electric: *Amperul este intensitatea unui curent electric constant care, menținut în două conductoare paralele rectilinii, de lungime infinită, de secțiune circulară neglijabilă și plasate la o distanță de un metru unul de celălalt, ar produce între aceste conductoare o forță egală cu  $2 \times 10^{-7}$  newton pe metru de lungime.* Această definiție este aprobată de cea de-a IX-a C.G.P.M. la 21 octombrie 1948. La aceeași conferință *permeabilitatea vidului* (amperul fiind primul exemplu al unei unități definite plecând de la o constantă fundamentală, *constanta magnetică*) este fixată la valoarea  $4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$ , care, în prezent, poartă numele de *constanta magnetică* având aceeași valoare:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} NA^{-2} = 12,566\,370\,614... \times 10^{-7} NA^{-2} \text{ (valoare exactă)}. \quad (12)$$

Proiectul actual pentru realizarea etalonului de curent SET vizează studierea pentru utilizarea dispozitivelor cu efect tunel monoelectronic SET (Single Electron Tunneling) [18] ca etaloane de curent electric. În cercetările efectuate se ține seama de faptul că mărimile electrice sunt definite în SI în raport cu amperul, însă realizarea practică cu o precizie ridicată a acestor definiții este foarte dificilă și nu răspunde exigențelor instrumentației moderne care necesită etaloane electrice din ce în ce mai stabile și reproductibile. În ultimii 20 de ani, stăpânirea efectelor cuantice de transport electronic a demonstrat posibilitatea de a substitui etaloanele actuale cu etaloane cuantice mai stabile și mai reproductibile, permițând încoronarea *metrologiei electrice cuantice*. Măsurarea cu aceste etaloane pune în joc constante fizice, cum ar fi sarcina electronului,  $e$ , și constanta lui Planck,  $h$ , care îmbracă un caracter universal. Astfel, în 1991 C.I.P.M. recomandă utilizarea efectului Josephson și a efectului Hall cuantic pentru a realiza etaloane de tensiune, respectiv de rezistență. Cea de-a XIX-a C.G.P.M. recomandă utilizarea constantelor Josephson  $K_{J-90}$  și von Klitzing,  $R_{K-90}$  (rezistența Hall cuantică) astfel încât să se amelioreze în mod semnificativ coerența măsurărilor electrice. La aceeași conferință se stabilesc valorile exacte pentru constantele respective. De câțiva ani, o nouă cale a fost deschisă către un etalon de curent care să se bazeze pe efectul tunel monoelectronic (SET), prin experiența triumphiului metrologic care constă în a realiza o lege Ohm cuantică plecând de la cele trei efecte Josephson, Hall cuantic și SET. Experiența respectivă, care este în curs de perfecționare, urmărește să verifice, cu o incertitudine relativă de  $10^{-8}$ , coerența constantelor și a valorilor lor implicate în cele trei fenomene cuantice.

Efectul Josephson (Brian David Josephson este laureat al Premiului Nobel pentru fizică în 1973) utilizează joncțiunea constituită dintr-o pătură de izolanț foarte subțire așezată între două plăci supraconductoare. Când această joncțiune este iradiată de o undă electromagnetică de frecvență  $f$ , caracteristica acesteia curent - tensiune prezintă paliere de tensiune, tensiunea fiecărui palier exprimându-se prin

$$U = nK_J^{-1}f, \quad (13)$$

unde  $n$  este un întreg care caracterizează fiecare palier și  $K_J$  este constanta Josephson, exprimată prin

$$K_J = \frac{2e}{h} = \frac{1}{\Phi_0}, \quad (14)$$

$\Phi_0$  fiind cuanta de flux magnetic.

Efectul Hall cuantic (descoperit de Klauss von Klitzing, care este laureat al Premiului Nobel pentru fizică în 1985) constă din supunerea unui gaz bidimensional de electroni dintr-un material semiconductor la un câmp magnetic foarte intens, care conduce la anularea rezistenței longitudinale a eșantionului și la prezentarea de către acesta de paliere cuantificate prin întregul  $i$  de rezistențe transversale, exprimate prin

$$R_H = \frac{R_K}{i}, \quad (15)$$

unde rezistența von Klitzing sau constanta von Klitzing se exprimă prin

$$R_K = \frac{h}{e^2} = \frac{\mu_0 c}{2\alpha}, \text{ cu } \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{e^2}{2\epsilon_0\hbar c}. \quad (16)$$



În practica actuală, reproductibilitatea efectului Josephson ( $\approx 10^{-10}$  în valoare relativă) și cea a efectului Hall cuantic ( $\approx 10^{-9}$  în valoare relativă) a condus la utilizarea acestor efecte pentru măsurări electrice fără vreo racordare la definiția amperului. Rezultă că dacă ar fi fost fixată constanta lui Planck,  $h$ , atunci electricienii ar fi fost tentați de a fixa sarcina electronului având intenția de a fixa constantele  $K_J$  și  $R_K$ . Totuși, trebuie făcută observația că relațiile (13) și (15) nu sunt validate cu o exactitate suficientă (incertitudinea relativă pentru constanta  $K_J$  este  $2 \times 10^{-7}$ , iar pentru constanta  $R_K$  este  $3 \times 10^{-8}$ ). În prezent, se fac cercetări pentru ca să existe asigurarea realizării fiabile a constantelor  $K_J$  și  $R_K$ . În cazul efectului Hall cuantic, o verificare a exactității expresiei (15) este posibilă, deoarece

$$\frac{Z_0}{R_k} = 2\alpha, \quad (17)$$

impedanța vidului  $Z_0$  putând fi realizată cu ajutorul unui condensator Thomson - Lampard [19].

Compararea lui  $\frac{Z_0}{R_k}$  cu valoarea lui  $2\alpha$  obținută prin interferometrie atomică se situează, în prezent, la nivelul  $10^{-8}$  incertitudine relativă.

Prin efectul tunel cu un electron (SET) care permite a număra electron cu electron se dezvoltă și mai mult metrologia cuantică. Intensitatea curentului electric fiind definită prin cantitatea de sarcină care se scurge în unitatea de timp, ideea cea mai simplă pentru a realiza un etalon de curent este de a crea un sistem capabil de a controla cu o frecvență cunoscută trecerea electronilor unul câte unul. În prezent acest lucru este posibil cu ajutorul dispozitivelor SET bazate pe principiul blocajului lui Coulomb. Dispozitivul SET se compune dintr-o mică *insulă* conductoare legată la două joncțiuni tunel, electronii putând trece în insulă prin intermediul uneia din cele două joncțiuni și ieși prin cealaltă. Dispozitivul include, de asemenea, un electrod care joacă rolul de grilă a cărei tensiune este utilizată pentru a controla scurgerea electronilor la traversarea insulei. Fiecare joncțiune tunel conține o pătură izolată foarte subțire pe care electronii o pot traversa prin efect tunel. Joncțiunile sunt atât de mici încât repulsia electrică între electroni împiedică trecerea a mai mult de un electron în același timp la traversarea "tunelului". Pentru a reduce zgomotul termic, dispozitivul este răcit la 0,1 K, putând fi generat un curent constant la traversarea insulei și joncțiunilor. Pe electrodul de grilă este aplicată o tensiune oscilantă. Numărul exact de electroni care traversează dispozitivul în timpul unui ciclu de oscilație este determinat de amplitudinea și valoarea medie a tensiunii de grilă. Curentul care traversează pur și simplu numărul de electroni care trec prin efect tunel pe ciclul grilei multiplicat prin sarcina electronului și frecvența tensiunii grilei. Frecvența grilei și numărul de electroni pe ciclul pot fi determinate, iar sarcina unui electron este fixă. Astfel, dispozitivul se poate considera o sursă foarte precisă de curent:

$$I = qf = n_1 ef. \quad (18)$$

Pentru a avea o "*pompă de curent metrologică*", utilizabilă în definiția amperului, se pot lega zeci de astfel de dispozitive în paralel care ar furniza un curent de ordinul a 100 pA, suficient pentru a se efectua o măsurare.

Dispozitivul SET ar putea să permită, de asemenea, să se realizeze "triunghiul metrologic cuantic" [20], [21]. Acesta pune în corespondență curentul electric, tensiunea și rezistența (figura 4).

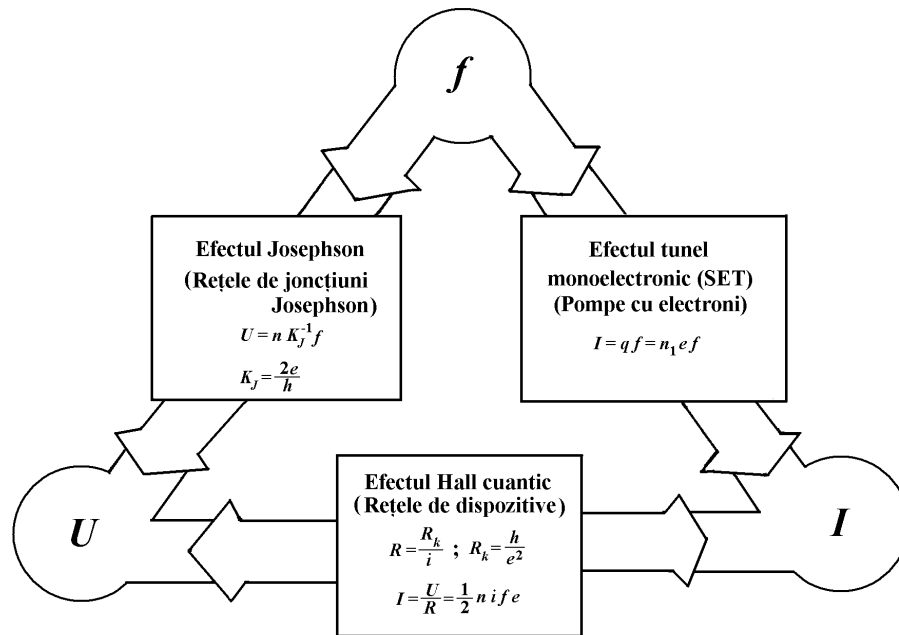


Fig. 4

Tensiunea poate fi măsurată utilizând efectul Josephson și rezistența poate fi legată de efectul Hall cuantic. Cele două relații includ două constante fundamentale,  $h$  și  $e$ . O pompă de curent metrologică ar permite fizicienilor de a lega direct curentul la frecvență. Se observă că  $n_1 = \frac{1}{2} n i$ , toate ( $n_1, n$  și  $i$ ) fiind numere întregi. Scopul principal al acestei experiențe este de a verifica, cu o incertitudine relativă de  $10^{-8}$ , coerența constantelor și a valorilor lor implicate în cele trei fenomene cuantice.

### Unitatea de temperatură termodinamică: kelvinul (K)

Cea de-a X-a C.G.P.M. a adoptat șase unități de bază: *metrul, kilogramul, secunda, amperul, gradul kelvin și candela*. Definiția unității de temperatură termodinamică, gradul kelvin cu simbolul  $^{\circ}\text{K}$ , a făcut referință la punctul triplu al apei ca punct fix fundamental, atribuindu-i acestuia temperatura de  $273,16^{\circ}\text{K}$  prin definiție. Cea de-a XIII-a C.G.P.M. definește kelvinul: *Denumirea unității de temperatură este kelvinul cu simbolul K și nu "gradul Kelvin". Gradul Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) este egal cu un kelvin. Temperatura, exprimată în grade Celsius este dată de relația* [22]:

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15. \quad (18)$$

*Kelvinul este fracțiunea 1/273,16 din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei.*

Astfel, în prezent se admite următoarea definiție a unității de temperatură termodinamică: *kelvinul, unitatea de temperatură termodinamică, este fracțiunea 1/273,16 din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei.* (Punctul triplu este punctul din diagrama fazelor unde trei faze coexistă în echilibru). Scara kelvin a temperaturii este cunoscută ca scară absolută și scară

termodinamică. Un interval de temperatură exprimat în grade Celsius este identic cu un interval de temperatură exprimat în kelvini, pe când o temperatură în grade Celsius nu este identică cu o temperatură în kelvini. Kelvinul și gradul Celsius sunt, de asemenea, unități ale Scării Internaționale de temperatură din 1990 (ITS-90) adoptată de C.I.P.M. în 1989 [23].

Termometrele mai precise - pentru domeniul de temperatură corespunzător celor mai multe aplicații - sunt: termometrul cu gaz (bazat pe legea gazelor perfecte,  $pV = nRT$ ); termometrul acustic (bazat pe expresia vitezei sunetului,  $c_S = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$ ) și termometrul cu zgomot (bazat pe expresia tensiunii de zgomot de la bornele unei rezistențe,  $u^2 = 4k_B RT \Delta f$ ). Pentru temperaturi foarte mari avem pirometria optică, iar pentru temperaturi foarte mici avem termometre speciale. Incertitudinea relativă a acestora din urmă este mai mare decât  $10^{-3}$ , pe când primele termometre amintite au o incertitudine relativă de  $10^{-4} \div 10^{-5}$ .

În momentul de față, scara temperaturilor este definită în mod arbitrar prin punctul triplu al apei. Acesta este un fenomen natural, însă foarte îndepărtat de constantele fundamentale.

Ținându-se seama de faptul că în mecanica statistică este stabilită legătura dintre probabilități și entropie datorită constantei lui Boltzmann,  $k_B$ ,  $S = k_B \ln P$ , prin analogie cu cazul constantei lui Planck, s-a propus să se fixeze constanta lui Boltzmann [24], [25], [26]. Se ține seama de analogia profundă dintre acțiune și entropie în fizică. În primul caz, variabila conjugată a energiei este timpul, iar, în al doilea caz, inversul temperaturii,  $T^{-1}$ , cu cele două constante fundamentale asociate: cuanta de acțiune,  $h$  și cuanta de informație,  $k_B$ . Ambele intervin în mecanica cuantică statistică [27] prin raportul lor  $k_B / h$ . În prezent, constanta lui Boltzmann,  $k_B$ , se poate determina cu o incertitudine relativă mai bună decât  $10^{-6}$ , utilizând fie metode acustice (propagarea sunetelor în gaz), fie metode optice (măsurarea lărgimii Doppler). Astfel, o nouă redefinire a kelvinului plecând de la constanta lui Boltzmann se apropie de realizare.

### Unitatea de cantitate de substanță: molul (mol)

Ca urmare a descoperirii legilor fundamentale ale chimiei, cercetătorii chimiști au introdus unități ca *atom - gram* și *moleculă - gram* pentru a specifica cantitățile de elemente chimice sau de compuși ai acestora. Aceste unități au o legătură directă cu *greutatea atomică* și *greutatea moleculară*, care sunt, de fapt, mase relative. La început, *greutățile atomice* au fost raportate la greutatea atomică a oxigenului, cu convenția ca aceasta să fie considerată egală cu 16. Aceasta, însă este pusă sub semnul întrebării de fizicieni, care utilizând spectrometrul de masă demonstrează că există trei izotopi ai oxigenului: 16, 17 și 18, care se află în elementul oxigen natural. Deci, chimiștii atribuie în mod forțat aceeași valoare 16 (ca valoare unică) la amestecul de izotopi amintit. Ținând seama de aceasta, I.U.P.A.P. (International Union of Pure and Applied Physics) și I.U.P.A.C. (International Union of Pure and Applied Chemistry) s-au înțeles în 1959 - 1960 ca să se considere valoarea 12, exactă, ca *greutate atomică*, masa atomică relativă definită în mod corect a izotopului carbonului cu numărul de masă 12 (carbon 12,  $^{12}\text{C}$ ). Scara unificată astfel definită dă valorile maselor atomice relative. A rămas să se definească unitatea cantității de substanță prin fixarea masei corespunzătoare a carbonului 12. Printr-o înțelegere internațională această masă a

fost fixată la 0,012 kg și unității mărimii *cantitate de substanță* i s-a dat numele de *mol* (cu simbolul *mol*).

Ținându-se seama de propunerile I.U.P.A.P., I.U.P.A.C. și I.S.O. (International Organization for Standardization), C.I.P.M. a dat o definiție a molului în 1967 și a confirmat-o în 1969. Aceasta a fost adoptată cea de-a XIV-a C.G.P.M. în 1971 [28]:

1. *Modelul este cantitatea de substanță a unui sistem care conține tot atât de multe entități elementare câți atomi există în 0,012 kilograme de carbon 12; simbolul lui este "mol".*

2. *Când este folosit molul, entitățile elementare trebuie specificate și pot fi atomi, molecule, ioni, electroni, alte particule sau grupuri specificate de astfel de particule.*

În 1980 C.C.U. (Comité Consultatif des Unités) propune și C.I.P.M. aprobă în același an ca să se specifice că: *În această definiție se înțelege că atomii de carbon 12 sunt liberi, în repaus și în starea lor de bază.*

Molul este definit de la masa atomului de carbon 12, după cum s-a arătat în descrierea unității de masă, printr-un număr fără dimensiune, numărul lui Avogadro. Acesta ar trebui să fie mai bine determinat (în momentul de față numărul lui Avogadro,  $N_A$ , se determină cu o incertitudine relativă de  $7,9 \times 10^{-8}$ ) pentru a se ajunge la redefinirea unității de masă, în care ar fi fixat.

### **Unitatea de intensitate luminoasă: candela (cd)**

Istoricul acestei unități este destul de zburciunos. Astfel, unitățile de intensitate luminoasă bazate pe etaloane de flacără sau cu filament incandescent, folosite în diferite țări înainte de 1948, au fost înlocuite, mai întâi, prin *lumânarea nouă* bazată pe luminanța corpului negru la temperatura de solidificare a platinei. Această modificare a fost pregătită de C.I.E. (International Commission on Illumination) și de C.I.P.M. înainte de 1937, decizia fiind promulgată de C.I.P.M. în 1946 și ratificată de cea de-a IX-a C.G.P.M. în 1948, care adoptă o nouă denumire internațională a acestei unități *candela* (cu simbolul *cd*), iar în 1967 cea de-a XIII-a C.G.P.M. dă o versiune îmbunătățită a definiției din 1946. Ținându-se seama de dificultățile experimentale în realizarea unui radiator Planck și de noile posibilități oferite de radiometrie (prin măsurarea puterii radiației optice) cea de-a XVI-a C.G.P.M. în 1979 adoptă o nouă definiție a candelii, care este valabilă și în prezent [30]: *Candela este intensitatea luminoasă, într-o direcție dată, a unei surse care emite o radiație monocromatică de frecvență  $540 \times 10^{12}$  hertzi și care are o intensitate radiantă, în aceeași direcție, de  $1/683$  wați pe steradian.*

În schimbările care au loc se va ține seama de faptul că unitatea de intensitate luminoasă, candela, nu este decât o derivată a fluxului energetic.

### **Concluzii**

Din cele prezentate, rezultă că toate cele șapte unități fundamentale ale SI sunt mult mai puțin implicate în evoluția pentru a obține o perfecțiune din ce în ce mai pronunțată prin: - redefinirea metrului plecând de la secundă și de la viteza luminii; - speranța că unitatea de masă, kilogramul să se defină în scurt timp plecând de la constanta lui Planck; - dezvoltarea metrologiei electrice cuantice; - legătura dintre kelvin și constanta lui Boltzmann; - rolul numărului

lui Avogadro în definierea molului și analiza definiției candelii, care nu este decât o unitate derivată a fluxului energetic. În sfârșit, dar nu în ultimul rând, evidențierea posibilității ca secunda să poată fi mai bine determinată plecând de la un ceas atomic optic (de exemplu, un ceas cu hidrogen atomic), care ar permite de a lega secunda de constanta lui Rydberg. Toate aceste succese se datorează laboratoarelor naționale de metrologie din U.S.A., Franța, Germania, Anglia, Japonia, ș.a. De asemenea, amintim rezultatele deosebite obținute de: Laboratorul Kastler - Brossel care aparține de Ecole Normale Supérieure - Paris; Laboratorul Primar de Timp și de Frecvențe, Franța; Yale University, U.S.A.; Harvard University U.S.A.; University of Sussex, Anglia; Max Planck Institut für Quantenoptic din Garching, Germania etc. Este de remarcat că acest domeniu al fizicii moderne, care contribuie la redefinirea unităților fundamentale ale SI, a fost apreciat prin atribuirea a trei premii Nobel pentru fizică: Norman Foster Ramsay, "*pentru inventarea metodei câmpurilor oscilante separate și a utilizării ei în maserul cu hidrogen și în alte ceasuri atomice*", Hans Georg Dehmelt și Wolfgang Paul [31]: "*pentru dezvoltarea tehnicii capcanelor optice*" în 1989; Steven Chu, Claude Cohen - Tannoudji și William D. Phillips [32], [33], "*pentru dezvoltarea metodelor de răcire și captare a atomilor cu radiație laser*", în 1997; R.J. Glauber "*pentru aportul său adus teoriei cuantice din domeniul coerenței optice*", J.L. Hall și T.W. Hansh "*pentru contribuția lor adusă spectroscopiei de precizie, bazată pe utilizarea laserelor*", în 2005.

Realizările obținute până în prezent ne îndreptățesc să sperăm că la cea de-a XXIV-a C.G.P.M. din 2011 se va face cel mai important pas spre o metrologie cu coerență globală.

### **Bibliografie**

- [1] James Clerk Maxwell, A treatise of electricity and magnetism, Oxford, Anglia, (1873), p.1
- [2] Metrologia, **8**, 36, (1972)
- [3] National Metrology Institute of Japan, AIST, (2003)
- [4] Metrologia, **20**, 25, (1984)
- [5] T.J. Quin, Metrologia, **30**(5), 523-541, (1994)
- [6] *Sistemul Internațional de Unități, SI* (Traducere din limba franceză după ediția a cincea a lucrării elaborate de BIPM), Editura Academiei Române, București, (1989)
- [7] P.J. Mohr and B.N. Taylor, Rev. Mod. Phys., **72**(2), 351-495, (2000)
- [8] C.J. Bordé, *La réforme du système d'unités*, Question d'actualité - La lettre de l'Academie des sciences no. 20, (2007)
- [9] L. de Broglie, Phil. Mag. **47**, 446, (1924)
- [10] B.N. Taylor and P.J. Mohr: document de travail CCU01-03
- [11] B.K. Kibble, *Atomic masses and fundamental constants* (eds: J.H. Sanders and A.H. Wapstra) Plenum, New York, (1975), pp. 545-551
- [12] B.K. Kibble and I. Robinson, *Feasibility study for a moving coil apparatus to relate the electrical and mechanical SI units* (National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK), NPL Report DES 40, (1977)
- [13] C. Kittel, *Introducere în fizica corpului solid*, Editura Tehnică, București, (1972)
- [14] Klaus von Klitzing, G. Dorda and M. Popper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494, (1980)

- [15] Klaus von Klitzing, Rev. Mod. Phys. **58**(3), 519-531, (1986)
- [16] B.N. Taylor and P.J. Mohr, Metrologia, **36**, 63-64, (1999)
- [17] W. Wayat Gibbs, Scientific American, **287**(3), 86-93, (2002)
- [18] F. Gay, *Comparteur cryogénique de courants pour la réalisation d'un étalon quantique basé sur l'effect tunnel monoélectronique*, Thèse de doctorat, CNAM Paris, décembre 2000
- [19] François Piquemal, *Étalons électriques fondamentale actifs*, Mesures et Tests Électroniques, LNE - Dossier R908, (2004)
- [20] F. Piquemal, G. Genevès, Metrologia, **37**, 207-211, (2000)
- [21] F. Piquemal, A. Bounaugh, L. Devoille, N. Feltin, O. Thevenot, G. Traçon, C.R. Acad. Sci. Phys., **5**, 857-879, (2004)
- [22] Metrologia, **4**, 43, (1968)
- [23] Metrologia, **27**, 13, (1990)
- [24] *Métrie fondamentale*, C.R. Acad. Sci. Phys., **5**, 789-931, (2004)
- [25] *The fundamental constants of physics, precision measurements and the base units of the SI*, Phil. Trans. Roy. Soc., **363**, 2097-2327, (2005)
- [26] C.P.E.M. 2006 round table discussion: "*Proposed changes to the SI*", Metrologia, **43**, 583-587, (2006)
- [27] A. Vassiliev, *Introduction à la physique statistique*, Editions MIR, Moscova, (1985)
- [28] Metrologia, **8**, 37, (1972)
- [29] Metrologia, **4**, 43-44, (1968)
- [30] Metrologia, **16**, 56, (1980)
- [31] W. Paul, Rev. Mod. Phys., **62**, 531, (1990)
- [32] Steven Chu, Scientific American, February 1992, p. 71
- [33] Claude N. Cohen - Tannoudji, William D. Phillips, Physics Today, October 1990, p. 33

- 
- Prezentat în data de 15 mai 2007 și acceptat în data de 25 iunie 2007
  - Revizia științifică: *prof.univ.dr.ing. Fănel IACOBESCU*



- Absolvent al Facultății de Electronică și Telecomunicații, 1956
- Doctorat în Bazele teoretice ale electrotehnicii, cu o teză în domeniul fizicii (metode optice ale spectroscopiei hertziene)
- Profesor universitar din anul 1974 și, în prezent, profesor consultant, începând din anul 2003, la departamentul de fizică al Universității „Politehnica” din București
- Conducător de doctorat din anul 1970; 77 din doctoranzii conduși și-au susținut până în prezent teza de doctorat

**Ion M. POPESCU**