

Чому керівники міжнародної метрології назвали Нову SI “фундаментально кращою” і чи може вона бути ще кращою?

П.І. Несжмаков, Ю.Ф. Павленко, Ю.Ю. Буняєва

*Національний науковий центр “Інститут метрології”, вул. Мирносицька,
42, 61002, Харків, Україна*

coomet@metrology.kharkov.ua

Анотація

26-та Генеральна конференція з мір та ваг (CGPM) у листопаді 2018 р. прийняла зміни до Міжнародної системи одиниць SI, яка одержала умовну назву Нової SI. Ці зміни набули чинності 20 травня 2019 р., у Всесвітній день метрології. Керівники міжнародної метрології назвали її **“фундаментально кращою”**. Обговоренню такої оцінки присвячено цю статтю.

У статті показано, що вся історія розвитку метрології – це пошук оптимальних фізичних величин і одиниць вимірювань, а також таких стабільних явищ і об’єктів природи, які могли б стати фундаментом для відтворення цих одиниць і створення еталонів.

Пройшло майже 150 років пошуків і окремих кроків, перш ніж ідеї вчених отримали практичне втілення у Новій SI – квантовій SI. В основі цієї системи лежать фундаментальні фізичні сталі (ФФС) – еталони природи, носіями розмірів одиниць стали мікрооб’єкти, а методами їх зв’язку з макросвітом – квантові явища і ефекти.

26-та CGPM прийняла остаточне рішення щодо нових визначень основних одиниць. У статті наведено витяг з *Резолюції 1* 26-ї CGPM 2018 р., а також додатки до неї.

Дається аналіз нових визначень основних одиниць. Показано, що нові визначення **секунди, метра і кандели** адекватні їх визначенням у попередній версії SI і відрізняються лише формулюваннями. Визначення **кілограма** є принципово новим і ґрунтується на фіксованому значенні сталої Планка. Суттєво нове визначення одержує і одиниця сили **електричного струму**. Це означає визнання квантових методів в електричних вимірюваннях, які на практиці підтвердили свої видатні метрологічні можливості. Визначення **кельвіна** через сталу Больцмана, як вважають спеціалісти, буде сприяти розвитку первинної термометрії і термодинаміки в цілому.

Також у статті підкреслено фундаментальні переваги Нової SI та наведено перспективні завдання метрології.

Ключові слова: Нова SI; CGPM; BIPM; одиниці; пере визначення; фундаментальні фізичні сталі; еталони природи; квантові методи.

Вступ

20 травня 2019 р., у Всесвітній день метрології, набули чинності суттєві зміни до Міжнародної системи одиниць SI, прийняті 26-ю Генеральною конференцією з мір та ваг (CGPM) у листопаді 2018 р., а сама оновлена система одержала умовну назву Нової SI. У зв'язку з цією подією Директор BIPM Мартін Мілтон і Директор BIML Ентоні Доннелан виступили з Посланням, в якому вони дали коротку характеристику цим змінам, а саму Нову SI назвали **“фундаментально кращою”** [1]. У Посланні підкреслено такі особливості SI:

- усунення визначень одиниць на основі артефактів;
- використання законів природи для встановлення законів вимірювання;
- рівень точності обмежується лише нашою здатністю реалізувати ці закони.

Обговоренню такої оцінки присвячено цю статтю.

1. Трохи історії

Історично при створенні метричної системи наприкінці XVIII століття вчені намагалися зв'язати одиниці вимірювань часу, довжини та маси з розмірами і рухом нашої планети, як із чимось абсолютно незмінним і стабільним (“*на всі часи для всіх народів*”). Але параметри Землі та її руху виявились неідеальними. А проблема зберігання та передачі розмірів одиниць привела до необхідності створювати прототипи (артефакти), які за своєю природою не можуть бути абсолютно стабільними. Всі ці обставини відразу обмежили точність відтворення відповідних одиниць, хоча на той час це задовольняло потреби суспільства. Але подальший розвиток промисловості вимагав більшого.

Пророцтво Максвелла і система одиниць Планка

Ідеальну модель метрології найбільш далекоглядно сформулював Дж. К. Максвелл у своєму виступі перед Британською асоціацією науки (1870 р.): “...*Якщо ми бажаємо отримати еталони довжини, часу та маси, які будуть абсолютно незмінними, ми маємо шукати їх не в розмірах, або русі, або масі нашої планети, а в довжині хвилі, періоді коливань, абсолютній масі стійких, незмінних і цілком однакових молекул*”. І хоч квантової механіки тоді ще не було, це виявилось великим пророцтвом і визначило загальну філософію розвитку метрології.

Другим кроком була ідея використання квантових явищ і фундаментальних фізичних сталих (ФФС), яка в загальному вигляді належить німецькому фізику М. Планку, одному з творців квантової фізики.

На початку XX століття М. Планк довів, що основні одиниці можуть бути визначені через фундаментальні фізичні сталі: швидкість світла c , сталу Планка h і гравітаційну сталу G . Значення цих сталих фігурують у вигляді коефіцієнтів у рівняннях основних фізичних теорій – класичній і квантовій електродинаміці та загальній теорії відносності. Знаючи ці сталі, можна

обчислити одиниці довжини $l = \sqrt{\frac{G\eta}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ м, часу $t = \sqrt{\frac{G\eta}{c^5}} \approx 5,4 \cdot 10^{-44}$ с і

маси $m = \sqrt{\frac{\eta c}{G}} \approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ кг [2].

Ось які надії покладав Планк на ФФС: “...за допомогою фундаментальних сталих ми маємо можливість створення одиниць довжини, часу, маси і температури, які обов’язково збережуть свою життєвість на всі часи та для всіх культур, навіть позаземних і нелюдських...”.

Однак планківські одиниці знаходяться дуже далеко від використовуваних на практиці діапазонів. Крім того, ці одиниці не відтворюються за допомогою реальних фізичних об’єктів. Саме тому планківські одиниці не знайшли використання в метрології.

Відомі також спроби створення природних систем одиниць Дж. Стоуні [3], Хартрі та інші, які знайшли обмежене використання в окремих галузях науки.

Виявилось, що реалізувати ідею було складніше, ніж це уявлялось, але *квантова метрологія вже народилась*. Перші її кроки були пов’язані з вимірюванням значень ФФС, які є не що інше, як *еталони природи*. Далі квантова метрологія розвивалася за формулою: *від вимірювання сталих – до вимірювання сталими*.

2. Квантові явища і макроскопічні квантові ефекти (“довга дорога в дюнах”)

Квантова фізика – фізика мікросвіту – відкрила ряд явищ, які не могли бути пояснені з позицій класичної фізики: квантові переходи, тунелювання електронів, фотоефект, дискретність (енергії, моменту, імпульсу тощо), надпровідність, надплинність і т. ін. Великим поштовхом було відкриття **макроскопічних** квантових ефектів, які, як сказано у Посланні, “пов’язують атомно-квантові масштаби з макроскопічним рівнем”, іншими словами,

пов'язують квантові явища з фізичними величинами, які є об'єктами наших досліджень. Класичним прикладом такого ефекту є квантовий перехід між двома надтонкими рівнями в атомі цезію, який дозволяє вимірювати макроскопічну величину – частоту і який з 1967 р. є основою відтворення одиниці часу – **секунди**. Квантове визначення секунди дозволило на кілька порядків підняти точність відтворення одиниці часу.

Далі був **метр**, який, строго кажучи, став “квантовим” навіть раніше секунди (*через довжину хвилі червоної лінії випромінення кадмію (1927 р.), потім через оранжеву (помаранчеву) лінію випромінення криптону-86 (1960 р.)*). З 1983 р. і по цей час метр визначається через швидкість світла за допомогою когерентного джерела світла – оптичного квантового генератора.

Надзвичайним для **електрики** стало відкриття (і усвідомлення можливості використання в метрології) таких макроскопічних квантових ефектів, як *ядерний магнітний резонанс (1946 р.), ефект Джозефсона (1962 р.), квантовий ефект Холла (1980 р.)* Відтворення на їх основі одиниць, відповідно, магнітної індукції, електричної напруги та електричного опору дозволило підняти точність електричних вимірювань на 2–3 порядки. Інша справа, що “квантові” одиниці на той час не “вписувались” в ідеологію SI і співіснували з нею як “практичні одиниці” (нижче ми поговоримо про це докладніше).

В **оптичних** вимірюваннях значним кроком уперед стало визначення у 1979 р. *кандели через світлову ефективність на частоті найкращого бачення людського ока*, яке відкрило шлях до використання в еталонах не тільки абсолютних випромінювачів (АЧТ), а й приймачів, а також *квантових методів: криогенної радіометрії і зовнішнього фотоефекту*.

Підкреслимо: у всіх галузях вимірювань, де впроваджувались квантові методи і визначення одиниць через ФФС, мало місце значне підвищення точності та надійності реалізації одиниць.

3. Стан, що склався на початок XXI століття. Недоліки діючої SI

Стан із системою SI, що склався на початок XXI століття, був такий, що з семи основних одиниць тільки **секунда** та **метр** були прямо пов'язані з істинними інваріантами, оскільки секунда визначається через період, що відповідає частоті надтонкого переходу атома цезію-133, а метр – через швидкість світла у вакуумі [2].

Одиниця сили світла **кандела** хоч і не була прив'язана до фундаментальної сталої, але її можна розглядати як таку, що спирається на природний інваріант – спектральну силу світлового потоку монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц (частота найкращого бачення людського зору), яка точно дорівнює 683 лм/вт [4, 5].

Не зовсім нормальний стан багато років існував у **електричних вимірюваннях**. Нагадаємо, що в SI 1960 р. діяло таке визначення основної одиниці від електрики – ампера: *Ампер* — сила незмінного електричного струму, який під час протікання по двох нескінченно довгих паралельних прямолінійних провідниках нехтовно малого кругового поперечного перерізу, розташованих на відстані 1 м один від одного у вакуумі, спричинив би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії в 2×10^{-7} Н.

Це формулювання прив'язувало ампер до значення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м і передбачало використання методів і одиниць механіки для його реалізації (що і було зроблено в свій час) [6, 7]. Відкриття в період із 1945–1980 рр. названих вище макроскопічних квантових ефектів привело до революції в електричній метрології. Але перевизначення ампера у квантових величинах не було зроблено через небезпідставні побоювання порушити цілісність системи SI. Тоді, у 1988 р., безсумнівні переваги квантових методів і еталонів були поєднані із принциповими позитивними рисами системи SI шляхом компромісу: було залишено незмінним теоретичне визначення ампера в SI через механічні явища (що зберігає значення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а також і значення ϵ_0 , і співвідношення $\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot c^2 = 1$). У той же час на рівні CGPM було рекомендовано здійснювати на практиці відтворення вольта, ома в

національних еталонах на основі квантових ефектів із застосуванням єдиних для всіх країн значень ФФС, що встановлюються Комітетом з даних для науки і техніки (CODATA). Ці одиниці одержали назву *практичних*.

Таким чином, виник **дуалізм** у визначеннях електричних одиниць, який полягав в існуванні *одиниць SI* (відповідно до офіційного визначення ампера) і *практичних*, які простежуються до ФФС. Суттєво, що цей дуалізм не обмежувався вольтом і омом, а розповсюджувався на всі електричні одиниці, оскільки всі вони простежувались до квантових сталих h і e .

Кельвін визначався на основі точно заданого термодинамічного стану води (через потрійну точку води $T_{\text{птв}}$), яка хоч і є природним інваріантом, але має термодинамічну температуру, значною мірою залежну від вмісту домішок та ізотопного складу даного об'єму води, тобто еталон на основі комірки потрійної точки води фактично є *артефактом*. Це ускладнювало ситуацію і обмежувало точність, з якою це визначення могло бути реалізовано. На обговорення було винесено пропозицію визначати кельвін через сталу Больцмана k , використовуючи співвідношення $Q_{\text{птв}} = kT_{\text{птв}}$, де Q – теплова енергія.

Визначення інших основних одиниць мало ще більш серйозні недоліки. **Кілограм** визначався за допомогою “артефакту” – того самого міжнародного прототипу кілограма, прийнятого 1-ю CGPM у 1889 р. За роки існування його маса відхилилася щодо істинного інваріанту (близько 50 мкК), однак це відхилення фактично неможливо оцінити.

Недоліки визначення **моля і кандели**, в основному, полягали в їх залежності від визначення кілограма, хоча мали місце й інші проблеми [2].

4. До чого прийшли (перевизначення одиниць 2018 р. і Нова SI)

Безумовні переваги квантових методів відтворення одиниць, позитивний досвід визначення одиниць часу і довжини через ФФС, успіхи в реалізації квантових ефектів і відповідних технологій, зокрема, у створенні квантових еталонів *електричних одиниць* і природного еталона *кілограма* –

все це створило передумови для подальшого перегляду визначень ряду основних одиниць у напрямку їх прив'язки до ФФС.

У 2005 р. Міжнародний комітет з мір та ваг прийняв рекомендацію щодо підготовчих заходів з перевизначення **кілограма, ампера, кельвіна і моля** таким чином, щоб ці одиниці були прив'язані до точно відомих значень фундаментальних сталих.

На 23-му засіданні CGPM у 2007 р. було прийнято рекомендацію про перевизначення кілограма, ампера, кельвіна і моля через ФФС, а також сформовано перелік робіт для прийняття нових визначень найближчим часом. При цьому повинен виконуватись ряд відомих рекомендацій CIPM [4]:

1) загальна структура SI, тобто основні величини SI та їх одиниці, мають залишитися незмінними, оскільки вони відповідають необхідним вимогам;

2) необов'язково, щоб нове визначення одиниці дозволяло зменшити похибку (невизначеність) при її відтворенні. Для метрології та науки в цілому переваги від заміни сучасних визначень визначеннями через сталі значно перевищують незначне збільшення невизначеності, яке може виникнути при реалізації цих одиниць;

3) одиниці, які слід перевизначити, і сталі, з якими вони мають бути пов'язані, треба вибирати таким чином, щоб з'явилися переваги як для метрології, так і для науки в цілому;

4) нове визначення одиниці не повинне призводити до розриву в її значеннях. Це означає, що обрані значення сталої Планка h , елементарного електричного заряду e , сталої Больцмана k і сталої Авогадро N_A мають бути настільки близькими до їх значень в існуючій SI, наскільки це дозволяють сучасні знання.

5. Суть реформи SI

Найбільш складним виявилось прийняття нового визначення *кілограма*, яке залежало від стану досліджень та їх реалізації в цьому питанні. Як

відомо [4], розглядались 2 напрямки одержання “природного” кілограма: через електричні вимірювання і простежуваність до сталої Планка (“електричний” кілограм) і через атомну вагу та кількість атомів з простежуваністю до сталої Авогадро (“атомний” кілограм). 24-та CGPM (2011 р.) при перевизначенні кілограма віддала перевагу його прив’язці до **сталюї Планка** [8].

Широку дискусію викликало питання про перевизначення одиниці температури – **кельвіна**, яке було найбільш неоднозначним. Зрештою було прийнято визначення через сталю Больцмана.

Спокійно пройшла пропозиція про перевизначення **моля** через сталю Авогадро, що не впливало на практику використання цієї одиниці.

Ще одним дискусійним питанням була форма подання нових визначень основних одиниць: у явному вигляді чи через сталі. Перевагу було віддано визначенням **через сталі**, що відповідало філософії реформи.

26-та CGPM (2018 р.) прийняла остаточне рішення щодо нових визначень основних одиниць і введення їх у дію з 20 травня 2019 р. [9]. Наводимо витяг з *Резолюції 1* 26-ї CGPM 2018 р., а також *додаток 3*:

“Міжнародна система одиниць (SI) – це система одиниць, у якій:

- частота переходу між двома рівнями надтонкої структури атома цезію-133 в основному стані, $\Delta\nu_{Cs}$, дорівнює 9 192 631 770 Гц,
- швидкість світла у вакуумі, c , дорівнює 299 792 458 м/с,
- стала Планка, h , дорівнює $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ Дж·с,
- елементарний електричний заряд, e , дорівнює $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ Кл,
- стала Больцмана, k , дорівнює $1,380\,649 \times 10^{-23}$ Дж/К,
- стала Авогадро, N_A , дорівнює $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ моль⁻¹,
- світлова ефективність монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц, K_{cd} , дорівнює 683 лм/Вт,

де герц, джоуль, кулон, люмен і ват, символи Гц, Дж, Кл, лм і Вт відповідно, пов’язані з секундою, метром, кілограмом, ампером, кельвіном, молям та

канделою, символи с, м, кг, А, К, моль та кд відповідно, і виражаються таким чином: Гц = с⁻¹, Дж = м²·кг·с⁻², Кл = А·с, лм = кд·м²·м⁻² = кд·ср і Вт = м²·кг·с⁻³.

Додаток 3. Основні одиниці SI

Починаючи з описаного вище нового визначення SI через фіксовані числові значення сталих, визначення кожної з семи основних одиниць виводяться за допомогою однієї або, у разі потреби, кількох із цих визначальних сталих для надання такого ряду визначень:

- секунда, символ с, є одиницею вимірювання часу в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення частоти переходу між двома рівнями надтонкої структури атома цезію-133 в основному стані, $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$, коли її виражено через одиницю Гц, що дорівнює с⁻¹;

- метр, символ м, є одиницею вимірювання довжини в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення швидкості світла у вакуумі, $c = 299\,792\,458$, коли її виражено через одиницю м/с, де секунду визначають через $\Delta\nu_{Cs}$;

- кілограм, символ кг, є одиницею вимірювання маси в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення сталої Планка, $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, коли її виражено через одиницю Дж·с, що дорівнює кг·м²·с⁻¹, де метр та секунду визначають через с і $\Delta\nu_{Cs}$;

- ампер, символ А, є одиницею вимірювання електричного струму в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення елементарного заряду, $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$, коли його виражено через одиницю Кл, що дорівнює А·с, де секунду визначають через $\Delta\nu_{Cs}$;

- кельвін, символ К, є одиницею вимірювання термодинамічної температури в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення сталої Больцмана, $k = 1,380\,649 \times 10^{-23}$, коли її виражено через одиницю Дж·К⁻¹, що дорівнює кг·м²·с⁻²·К⁻¹, де кілограм, метр і секунду визначають через h , c та $\Delta\nu_{Cs}$;

- моль, символ моль, є одиницею вимірювання кількості речовини в SI. Один моль містить $6\,022\,140\,76 \times 10^{23}$ елементарних частинок. Величина моля є фіксованим числовим значенням сталої Авогадро, N_A , коли її виражено через одиницю моль⁻¹, і називається числом Авогадро. Кількість речовини, символ n , є мірою кількості певних елементарних частинок. Елементарною частинкою може бути атом, молекула, іон, електрон, будь-яка інша частинка або певна група частинок;

- кандела, символ кд, є одиницею вимірювання сили світла в заданому напрямку в SI, яку визначають за допомогою фіксованого числового значення світлової ефективності монохроматичного випромінювання з частотою 540×10^{12} Гц, $K_{\text{кд}} = 683$, коли її виражено одиницею лм·Вт⁻¹, що дорівнює кд·ср·Вт⁻¹ або кд·ср·кг⁻¹·м⁻²·с³, де кілограм, метр і секунду визначають через h , c і $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”.

У додатку 2 уточнюється статус сталих, які використовувалися у попередніх визначеннях: вони перестають бути точно відомими, зберігають свої значення – у межах відносної стандартної невизначеності від $1,0 \times 10^{-7}$ до 5×10^{-10} і надалі будуть визначатися експериментально.

6. Аналіз нових визначень основних одиниць

Спосіб визначення значною мірою відходить від **способу**, який існував у SI. З нашої точки зору, визначення їх у *неявній формі* – через ФФС – відображає філософію, “дух” Нової SI – виразити основні одиниці через **еталони природи**. Щодо “букви”, то неважко побачити, що нові визначення *секунди, метра і кандели* адекватні їх визначенням у попередній версії SI та відрізняються лише формулюваннями.

Визначення **кілограма** є принципово новим і ґрунтується на фіксованому значенні сталої Планка. Воно стало можливим завдяки фундаментальним дослідженням, які дозволили пов’язати масу зі сталою Планка за допомогою *квантових електричних вимірювань і ват-вагів (вагів Кіббла)* [10, 11].

Суттєво нове визначення одержує і одиниця сили **електричного струму**. Це означає визнання квантових методів в електричних вимірюваннях, які на практиці підтвердили свої видатні метрологічні можливості.

Дещо складнішим був шлях до нового визначення у **кельвіна** – через сталу Больцмана, але зрештою воно було прийняте і обіцяє сприяти розвитку первинної термометрії і термодинаміки в цілому. Можна говорити про створення *квантового еталона кельвіна*.

Визначення **моля** через сталу Авогадро відображає загальну тенденцію в метрології – виразити основні одиниці через сталі – і не призведе до суттєвих змін у відповідних галузях науки і техніки.

Наведемо узагальнені відомості про Нову SI у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Визначення і відтворення основних одиниць у Новій SI

Основна одиниця	Стала, до якої простежується одиниця	Первинний (референтний) метод відтворення	Основна апаратура
Секунда	ν_{CS} – частота переходу поміж надтонкими рівнями атома цезію-133	Квантовий перехід в атомі цезія-133	Цезієвий репер
Метр	c – швидкість світла	Генерування когерентного світлового випромінення та вимірювання його частоти: $L=c/f_n$	Високостабільний лазер і вимірювач його частоти
Ампер	e – елементарний заряд	1. Закон Ома і квантові ефекти Джозефсона і Холла; $I = \frac{U_j}{R_x}$ – напруга Джозефсона Холлівський опір 2. Одноелектронне тунелювання	1. Міри, простежувані до сталих Джозефсона і Клітцинга (квантовий ефект Холла (КЕХ)), струмовий компаратор 2. SET-насос
Кілограм	h – стала Планка	Порівняння $P_{ел}=P_{мех}$, вимірювання $P_{ел}$ через квантові ефекти Джозефсона і Холла	Ват-ваги; міри, простежувані до сталих Джозефсона і Клітцинга (КЕХ)
Кельвін	k – стала Больцмана	Методи первинної термометрії	Первинні термометри

Кандела	$k(\lambda_{555})$ – спектральна сила світла частотою 540×10^{12} Гц	1. Властивості випромінювання абсолютно чорного тіла 2. Використання явища фотоефекту	1. Випромінювач типу АЧТ 2. Приймач-фотометр зі 100%-ною квантовою ефективністю
Моль	N_A – стала Авогадро	Еталон не створюється	–

7. Нова SI і розмірності одиниць

Звернемо увагу, що у Новій SI виникає зовсім інша ситуація з розмірностями одиниць.

У SI вимірне значення має вираз:

$$Q = \{Q\}[Q],$$

де $\{Q\}$ – числове значення; $[Q]$ – одиниця вимірювання.

У загальному вигляді:

$$[Q] = L^{P_1} \cdot M^{P_2} \cdot T^{P_3} \cdot I^{P_4} \cdot \theta^{P_5} \cdot N^{P_6} \cdot J^{P_7}.$$

У Новій SI, де роль основних величин виконують сталі C :

$$[Q] = [C_1]^{S_1} [C_2]^{S_2} [C_3]^{S_3} [C_4]^{S_4} [C_5]^{S_5} [C_6]^{S_6} [C_7]^{S_7}.$$

Наведемо одержані вирази для деяких ФВ (табл. 2) у системах SI (через основні одиниці) і Новій SI (через ФФС).

Таблиця 2

Вирази для деяких ФВ у системах SI і Новій SI

Фізична величина	Розмірність у системі SI	Розмірність у Новій SI	Фізичний закон
Енергія, E	ML^2 / T^2	$h\nu$	Квантування енергії випромінювання (Планк, Ейнштейн) $E = h\nu$
Момент імпульсу, L	ML^2 / T^2	h	Квантування моменту імпульсу (Бор) $L = nL_0 = n\hbar$
Електричний заряд, q	TI	e	Квантування електричного заряду (Стоуні) $Q = nq_0 = ne$

Напруга, потенціал, U	ML^2 / IT^2	$h\nu / e$	Ефект Джозефсона $U = \pi (\hbar \nu / e) = h\nu / 2e$
Електричний струм, I	I	$e\nu$	Одноелектронне тунелювання $I = e\nu$
Електричний опір, R	$ML^2 / I^2 T^2$	h / e^2	Квантовий ефект Холла $R_0 = h / e^2$
Магнітний потік, Φ	ML^2 / IT^2	h / e	Квантування магнітного потоку (Ф. Лондон)

Аналіз розмірностей у Новій SI таких електромагнітних фізичних величин, як *напруга, струм, опір, магнітний потік* приводить до формул, які прямо відповідають формулам макроскопічних квантових ефектів Джозефсона, Холла, одноелектронного тунелювання, а також ефекту Лондона (квантування магнітного потоку в надпровідному контурі зі струмом).

Таким чином, аналіз розмірностей через сталі c , h і e може бути продуктивним, підтверджуючи вирази для ряду відомих квантових ефектів, а також вказуючи на потенційну можливість існування нових ефектів [12].

8. Фундаментальні переваги Нової SI

1) Першою і основною фундаментальною перевагою є відсутність визначень на основі артефактів, тобто **Нова SI є повністю природною системою**: визначення одиниць відбувається через фундаментальні фізичні сталі – **еталони природи**, реалізація – через квантові ефекти – **закони природи**.

2) Виконано всі вимоги до системи SI, сформульовані CIPM, щодо **незмінності** розмірів одиниць, **точності** їх відтворення, **переваг** для метрології і науки в цілому, **узгодженості** (усунуто дуалізм у визначенні ампера).

3) Нова SI передбачає *простежуваність не до первинних еталонів, а до сталей*, що відкриває можливість впроваджувати нові принципи, зокрема, **децентралізацію**.

4) У Новій SI збережені всі позитивні риси SI: *універсальність, уніфікованість, когерентність, узгодженість, зручність.*

5) Нова SI сприяє впровадженню і стимулює подальший розвиток квантових методів і технологій у *практичній метрології*. Саме завдяки цьому на сьогодні досягнуто таких практичних результатів [10]:

- у *просторово-часових вимірюваннях*: створення квантового стандарту частоти (КСЧ) оптичного діапазону; створення фемтосекундних лазерів;

- в *електричних вимірюваннях*: реалізація ефекту Джозефсона (ЕД) на змінному струмі; ЕД на явищі високотемпературної надпровідності (ВТНП), ЕД на безгелієвих (механічних) охолоджувачах; КЕХ на змінному струмі, замикання “квантового трикутника”, розвиток квантової магнітометрії [10, 13];

- у *вимірюваннях маси*: реальні успіхи у реалізації природного кілограма, а також у відтворенні малих мас із високою точністю (настільні ват-ваги);

- у *температурних вимірюваннях*: розвиток первинної термометрії [9, 14];

- у *оптичних вимірюваннях*: використання фотоефекту і детекторів з високою квантовою ефективністю (*трап-детекторів*);

- у *квантових технологіях*: прогрес у одноелектронному і одnofотонному тунелюванні, впровадження нових наноматеріалів (*графену* тощо).

9. Чи може SI бути ще кращою?

У цьому питанні є два аспекти: *перший* – удосконалення методів і апаратури реалізації одиниць *Нової SI* – тут можливості дуже великі й частково названі вище. *Другим аспектом* є подальші *принципові зміни в системі SI*. Такими принциповими змінами, які вже фігурують у документах CGPM, вважаються:

- 1) *перевизначення секунди з підвищенням точності (шляхом її*

відтворення в *оптичному діапазоні*);

2) перевизначення *кандели* (шляхом створення “*квантової кандели*”).

Пояснимо ці положення.

Незважаючи на досягнуту на цей час дуже високу точність відтворення секунди (невизначеність на рівні 10^{-16}), існує необхідність і можливість підвищення цього показника шляхом створення стандартів часу-частоти не в *радіодіапазоні*, як маємо сьогодні у цезієвому стандарті, а в *оптичному*. Здавалося б, що позиція визначення секунди, пов'язана з частотою випромінювання атома цезію-133, є непохитною. Однак на початку ХХІ століття з'явилися оптичні стандарти частоти, які ґрунтуються на переходах в іонах різних хімічних елементів на частотах, що на кілька порядків перевищують робочу частоту цезієвих стандартів. Було доведено, що стабільність різних оптичних стандартів частоти може підтримуватися на рівні від 1×10^{-17} до 1×10^{-18} [9, 15, 16]. В експериментальному зразку стронцієвого оптичного годинника, розробленого в Токійському університеті, іони стронцію знаходяться в оптичній пастці на перехресті шести лазерних променів (рис. 1), під впливом яких вони утримуються в “енергетичних ямах”, майже не взаємодіючи і випромінюючи коливання електромагнітних хвиль з нестабільністю частоти 1×10^{-17} [9]. У 2012 р. група вчених з Університету Нового Південного Уельсу, Технологічного інституту Джорджії й Університету Невади встановила, що ядерний годинник на основі торію-229 теоретично на кілька порядків точніший за існуючі аналоги. Можна очікувати, що в найближчому майбутньому будуть створені оптичні стандарти частоти з відносною нестабільністю на рівні 1×10^{-18} , що веде до *нового визначення секунди* (рис. 2).

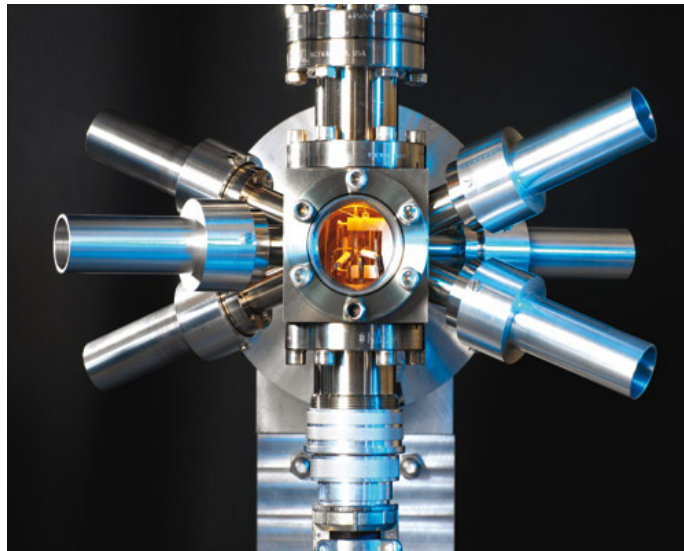


Рис. 1. Оптичний годинник на іонах стронцію

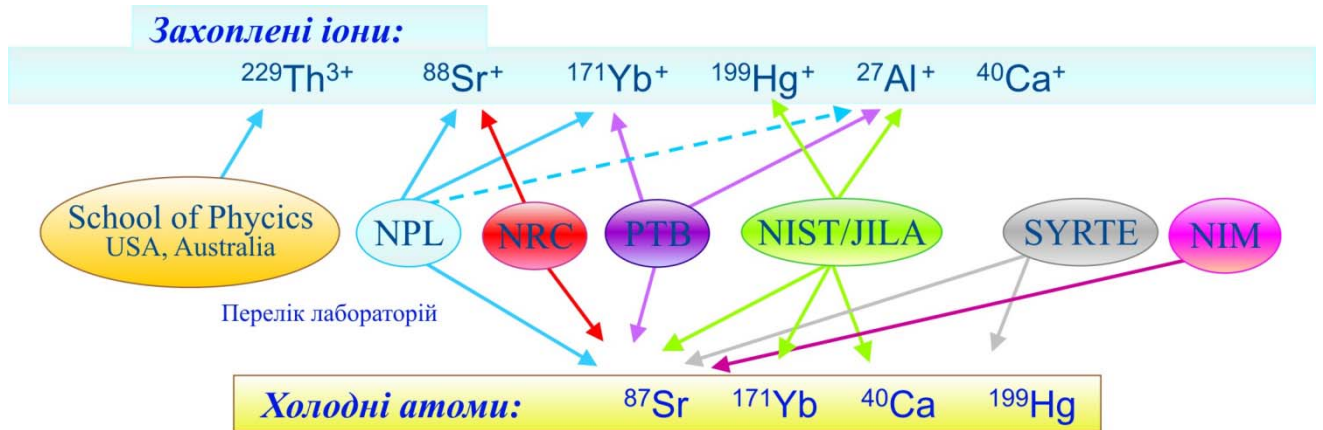


Рис. 2. Варіанти реалізації стандарту частоти оптичного діапазону

Принцип побудови квантового генератора і вимірювання частоти оптичного діапазону подано на рис. 3.

Setup for absolute optical frequency measurements

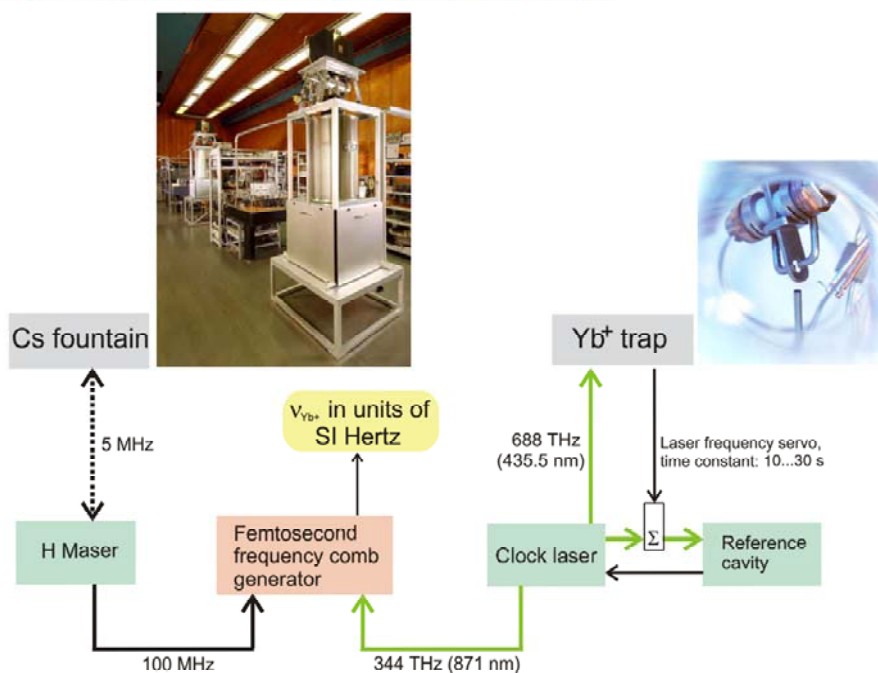


Рис. 3. Принцип побудови квантового генератора і вимірювання частоти оптичного діапазону

24-та CGPM (2011 р.) прийняла спеціальну Резолюцію 8 “Про перегляд Керівництва щодо практичної реалізації (*mise en pratique*) метра і про розробку нових оптичних еталонів частоти”. У Резолюції відзначаються швидкі темпи вдосконалення характеристик оптичних еталонів частоти, успішна робота NMI над методиками проведення звірень цих еталонів, наголошується на необхідності подальшої роботи в цьому напрямку і рекомендується ВІРМ всіляко сприяти цим дослідженням і координувати міжнародний проект за участю NMI з вивчення методик звірень оптичних стандартів частоти.

Друга зміна, яку стимулює СІРМ, є *перевизначення кандели* в термінах числа фотонів (квантова кандела) з можливою простежуваністю до *сталі Планка*.

Як показують дослідження у цьому напрямку, при квантовому підході необхідно вміти рахувати одиничні фотони, іншими словами, мати можливість створювати джерела випромінювань із точно відомим числом

фотонів за секунду, а також приймачі, чутливість і роздільна здатність яких можуть бути на рівні одного фотона.

Саме через відсутність надійних методів і засобів маніпулювання окремими фотонами перевизначення фотометричних одиниць у квантових термінах поки що не відбулось.

Недавні досягнення, отримані в управлінні та рахуванні окремих фотонів, а також у створенні однофотонних джерел, є перспективними [17, 18]. Слід очікувати найближчим часом створення джерел випромінювання з точно встановленим числом фотонів за секунду, що дозволить отримати дуже високу прецизійність вимірювань. Можливість надійного маніпулювання окремими фотонами сприятиме розвитку нових типів приладів, які, у свою чергу, вимагають подальшого розвитку метрології, створення нових, заснованих на квантових явищах, методів калібрування та відповідних еталонів. Із цих міркувань рано чи пізніше слід очікувати перевизначення кандели в термінах фотонних одиниць.

Підсумок

Уся історія розвитку метрології – це пошук оптимальних фізичних величин і одиниць вимірювань, а також таких стабільних явищ і об'єктів природи, які могли б стати фундаментом для відтворення цих одиниць і створення еталонів. Найбільш успішними стали пророцтва таких вчених, як Максвелл, Планк і деяких інших – шукати еталони в атомно-квантових явищах, тих мікрочастинках, які є елементарним будматеріалом нашого світу. Їхні передбачення, зроблені наприкінці XIX століття, сьогодні, на початку XXI століття, знайшли втілення у Новій SI – квантовій SI. В основі цієї системи лежать ФФС – еталони природи, носіями розмірів одиниць стали мікрооб'єкти, а методами їх зв'язку з макросвітом – квантові явища і ефекти. В цьому її фундаментальне значення.

Але розвиток SI та метрології продовжується – і це одна зі складових її філософії.

Список літератури

1. Система SI – фундаментально краща. Послання директорів ВІРМ та ВІМЛ з нагоди Всесвітнього дня метрології – 20 травня 2019 р. *Український метрологічний журнал*. 2019. № 1. С. 3.
2. Planck M. Ständiger Bejbachter der Preußischen Akademie der Wissenschaften. 1899. P. 440; *Annalen der Physik*. 1900. Vol. 1. P. 69.
3. Stoney G.J., Rohrer H. *The philosophical magazine and journal of science*. 1881. Vol. 11. P. 381.
4. Миллс Я.М., Мор П. Дж., Квинн Т. Дж. и др. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля: предлагаемый подход к применению Рекомендации 1 CGPM (C1-2005). *Метрология*. 2007. № 2. С. 5–57.
5. Назаренко Л.А. Еталонна фотометрія (еволюція одиниць і Метрична конвенція). *Український метрологічний журнал*. 2000. № 1. С. 29–35.
6. Кононогов С.А. Метрология и фундаментальные физические константы. Москва: Стандартинформ, 2008. 269 с.
7. Кононогов С.А., Краснополин И.Я., Семенчинский С.Г. Метрологические основы электрических измерений. *Метрология*. 2006. № 5. С. 5–51.
8. Resolutions adopted at the 24th meeting of the CGPM (2011). URL: https://www.bipm.org/utis/common/pdf/24_CGPM_Resolutions.pdf (дата звернення: 17.03.2019).
9. Resolutions adopted at the 26th meeting of the CGPM (2018). URL: <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf> (дата звернення: 05.04.2019).
10. Вступ до квантової метрології: підручник для студентів ВНЗ. За ред. Ю.Ф. Павленка. Харків: ФОП Мезіна В.В., 2017. 244 с.
11. Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI. URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/SI-App2-kilogram.pdf> (дата звернення: 25.05.2019).

12. Томилин К.А. ФФК в исторических и методологических аспектах. Москва: Физматгиз, 2006. 368 с.
13. Неєжмаков П.І., Павленко Ю.Ф., Маслова Н.М., Анікін В.В. Реформа SI і її вплив на систему відтворення електричних одиниць. *Український метрологічний журнал*. 2013. № 1. С. 3–10.
14. Неєжмаков П., Павленко Ю., Назаренко Л. На шляху до нового визначення кельвіна. *Метрологія та прилади*. 2013. № 6(44). С. 3–9.
15. Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology. *Nature Photon*. 2011. № 5. P. 203–210.
16. Мачехин Ю.П., Негрийко А.М., Соловьев В.С., Яценко Л.П. Оптические стандарты частоты. Ч. 1. Харьков: Коллегиум, 2010. 144 с.
17. Назаренко Л.А., Неєжмаков П.І., Тимофеев Є.П. Квантова радіометрія та фотометрія. *Український метрологічний журнал*. 2012. № 1. С. 30–35.
18. Неєжмаков П.І. Купко О.Д. Терещенко В.В. Сучасний стан метрологічного забезпечення світлових вимірювань в Україні. *Український метрологічний журнал*. 2017. № 3. С. 17–23. doi: 10.24027/2306-7039.3.2017.114652