

На кантара - метрологията¹

Р. Криъз

Водещите световни метролози са склонни да предефинират седемте единици на СИ – най-голямата промяна на системата от времето на Френската революция насам. Проблемът е обсъждан през януари, 2011 г. на среща в Кралското общество в Лондон. Събитието започва точно навреме, но когато в края му делегатите заемат местата си, Стивън Коск, изпълнителният директор на обществото, смутено отбелязва, че стенният часовник “малко изостава” и обещава да го коригира. Коск знаеше, че аудиторията обича точността и ще приветства неговата бдителност. Като световни водещи метролози, те се събраха, за да обсъдят бързите промени на научната основа на Международната система на единиците (СИ), които налагат най-всеобхватната до сега промяна в международната структура на измерванията, която лежи в основата на глобалната наука, технология и търговия.

Ако бъдат одобрени, тези промени ще включват нови определения за седемте основни единици на СИ, основани върху фундаменталните физични константи или на атомни свойства. Най-значителната от тези промени ще засегне килограма, единицата, която днес се дефинира чрез масата на един прототип – платинено иридиев цилиндър в Международното бюро за теглилки и мерки (BIPM) край Париж – единствената единица, която се дефинира чрез човешко изделие. Няколко причини карат метролозите да правят тези промени, включително стабилността на прототипа на килограма, необходимостта от по-голяма точност на стандарта за маса, наличието на нови технологии, способни да осигурят по-голяма точност за по-дълго време, както и желанието за стабилност и по-голяма елегантност в структурата на СИ.

По време на двудневните обсъждания участниците изказаха различни мнения относно силата и неотложността на тези причини. Един от основните ентузиастични и подбудител на предложените промени е предишният директор на BIPM Тери Куин, който организира срещата. Във въвеждащото си слово той каза “Това наистина е един амбициозен проект. Ако той се осъществи, това би било най-голямата промяна в метрологията от времето на Френската революция до сега.”

Метричната система и СИ

Френската революция сътвори наистина най-голямата единична промяна в историята на метрологията. Вместо само да реформира наследените тромави френски теглилки и мерки, които били уязвими за грешки и злоупотреби, революционерите налагат една рационална и организирана система. Съгласувана с Академията на науките, тя бе предназначена “за всички времена и за всички хора”, като привързваше стандартите за дължина и маса с естествени стандарти: метърът е една четиридесет милионна част от парижкия меридиан, а килограмът е масата на кубически дециметър вода. Оказа се обаче, че подържането на връзката с естествените стандарти не е практично, така че от 1799 г. единиците за дължина и маса в метричната система започват да се съхраняват чрез прототипи в Националния архив. Голямата промяна, за която е борбата сега, е най-накрая да се постигне това, което бе поставено като цел през 18. столетие – нашите стандарти да се обвържат с природните константи.

Въпреки нейната простота и рационалност, на метричната система са били необходими десетилетия, за да се наложи във Франция. Другите народи евентуално започват да я приемат по различни съображения: за поощряване на националното единство, като средство за отхвърляне на колониализма, за повишаване конкурентно способността и като предварително условие за присъединяване към световната общност. През 1875

¹ Превод със съкращения от публикация на Physics World от 22.03.2011 г.

г. Договорът за метъра – един от първите международни договори и първи белег на глобализацията – отне надзора върху метричната система от Франция и го възложи на BIPM. Договорът инициира също така конструирането на нови стандарти за дължина и за маса – Международният прототип на метъра и Международния прототип на килограма, които заместват метъра и килограма, създадени от революционерите. Те са изготвени през 1879 г. и официално приети през 1889 г., като са калибрирани към старите метър и килограм на Националния архив.

В началото задълженията на BIPM включват грижи за прототипите и калибриране на стандартите на страните-членки. През първата половина на 20. век обаче целта на организацията се разширява, за да посрещне необходимостта от унифициране и на други видове измервания, включително електричество, светлина и излъчване, така че метричната система включи в себе си и секундата, и ампера на т.нар. система MKSA. Между другото, напредъка на интерферометричните технологии позволи измерването на дължини с точност, сравнима с тази на метъра-прототип.

През 1960 г. на 11. Обща конференция за мерки и теглилки (CGPM)² тези развития достигнаха кулминация в две промени с далеч отиващи последствия. Първата промяна се състои в предефиниране на метъра с помощта на светлината, излъчена при един оптичен преход в атома на криптон-86. (През 1983 г. метърът ще бъде предефиниран отново посредством скоростта на светлината.) От тогава вече народите не трябва да ходят до BIPM, за да калибрират техните стандарти за дължина, всяка страна може сама да възпроизведе метъра, стига да притежава съответната технология. международният прототип на метъра бе сведен до исторически куриоз, днес той остава в трезорите на BIPM.

Втората промяна по време на срещата от 1960 г. бе замяна на разширената метрична система с една още по-голяма структура, обхващаща цялата метрология. Структурата съдържаше шестте основни единици – метър, килограм, секунда, ампер, келвин и свещ (през 1971 г. бе добавено и седма – мол); плюс съвкупност от “производни единици” като нютон, херц, джаул и ват, изградени чрез посочените шест. Тя бе кръстена Международна система единици, или СИ (от началните букви на френски – SI). Но тя все още се основаваше на едно човешко творение – прототипа за килограм.

Тази реформа от 1960 г. бе първа крачка към настоящата ревизия, която се стреми да осъществи една вековна мечта на учените – замислена далеч преди Френската революция – да се обвържат *всички* единици с естествени стандарти. Последваха нови крачки. Със появата на атомен часовник и на възможността за точно измерване на атомните процеси, през 1967 г. секундата бе предефинирана с помощта на свръх фините нива на цезий-133. Стратегията бе следната: учените да измерят едно фундаментално свойство прецизно, след което единицата, с която се измерва свойството, се предефинира чрез една фиксирана стойност на това свойство. Тогава свойството престава да бъде измерима в рамките на СИ, а вместо това дефинира единицата.

Килограмът обаче много твърдо се съпротивлява на всички опити да бъде предефиниран чрез някое естествено явление: оказва се, че масата извънредно трудно преминава от микро- в макросвета. Доколкото обаче масата е включена в определенията за ампер и мол, това пречи на опитите за предефиниране и на тези единици. Ето защо през 1975 г., на празнуването на 100-годишнината на Договора за метъра в Париж, директорът на BIPM Жан Тери отбеляза, че привързването на метъра към естествено явление остава “утопична” мечта. Изглеждаше, като че ли международният прототип на метъра е осъден да остане за винаги.

² Орган, който се събира всеки четири години и чрез който страните-членки фактически ръководят работата на BIPM.

Дрейфуваният стандарт

През 1988 г. се случи едно важно събитие: прототипът на килограма бе изваден от стъклените звънци, под които се пази, и бе сравнен с шест негови копия, известни като “свидетели” (*témoins*). Предишната подобна “проверка”, правена през 1946 г., показва малки различия между копията, дължащи се на химичните взаимодействия между повърхността на прототиповете и въздуха, или на изпускане на съдържащ се в тях газ. Изглеждаше, че масите на *témoins* леко растат в сравнение с тази на прототипа. Проверката през 1988 г. потвърди тази тенденция: не само масите на *témoins*, но също така и тези на практически всички национални копия показват нарастване по отношение на прототипа, който се различаваше по маса от тях с около +50 μg , което прави една скорост на нарастване от около 0,5 части на милиард за година. Поради някакви причини прототипът са държи различно от неговите по предположение идентични събрата.

В една своя статия от 1991 г. (*IEEE Trans. Instrum. Meas.* **40** 81) Куин, който през 1988 г. стана директор на NIST, подчерта тревожните последици от очевидната нестабилност на прототипа за килограм. Тъй като прототипът дефинира килограма, технически масата на *témoins* расте. Куин пише, че “може би по-вероятната” интерпретация е, че “масата на прототипа намалява в сравнение с неговите копия”, т.е. – че самият прототип е нестабилен и губи маса. Въпреки че настоящата дефиниция “служи на науката, на техниката и в търговията много добре” почти столетие, той предлага усилията за намиране на алтернатива да бъдат удвоени. Всеки изкуствен прототип би имал някакво ниво на неопределеност, тъй като неговата атомна структура постоянно се променя – в някои случаи това може да бъде известно, предсказано и следователно компенсирано, но в други случаи това е невъзможно. Освен това свойствата на телата зависят от температурата. Окончателното решение би било да се обвърже стандарта за маса, подобно на стандарта за дължина, с някое естествено явление. Готова ли е обаче технологията за това? Куин казва, че равнището на точността, необходима за замяна на сегашния прототип, е една част на 10^8 .

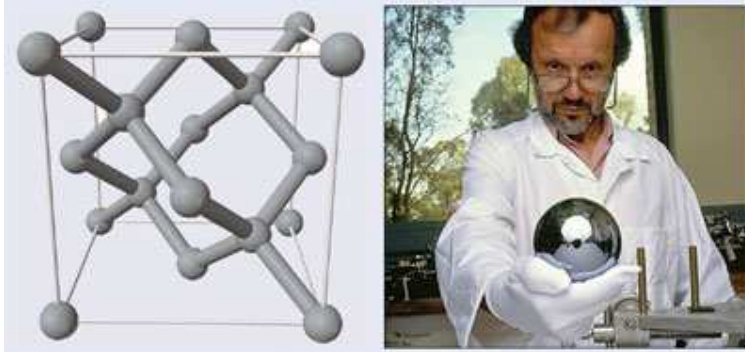
През 1991 г. две забележителни технологии, развити през предходния четвърт век без отношение към предефинирането на масата, показаха известна възможност за предефиниране на килограма. Единият подход – “методът на Авогадро” – осъществява единицата за маса чрез определен брой атоми, съдържащи се в сфера от силициев монокристал и измерване на константата на Авогадро. От друга страна вторият подход, подходът на “ват-весна”, свързва единицата за маса с константата на Планк, като за целта използва специален уред, който съпоставя механична и електрична мощност. Двата подхода са сравними, тъй като константите на Авогадро и на Планк са свързани посредством други константи, чиито стойности са вече добре измерени, включително константата на Ридберг и константата на фината структура. Въпреки че през 1991 г. нито един от двата подхода не бе в състояние да осигури точност от $1:10^8$, по онова време Куин мислеше, че скоро един от двата подхода (или и двата) ще бъде в състояние да направи това. За съжаление, оптимизмът му остана неоправдан.

Сферата...

Подходът на Авогадро (фиг. 1) дефинира единицата за маса като съответстваща на масата на определен брой атоми чрез използване константата на Авогадро (N_A), чиято стойност е около $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Разбира се, би било невъзможно да се преброят толкова много атоми един по един, н това би могло да се постигне, като се направи достатъчно идеален кристал от единствен химичен елемент и като се знае изотопния състав на образеца, размерите на кристалната решетка и нейната плътност. За тази цел идеални са силициевите кристали, тъй като те се произвеждат с високо качество от полупроводниковата промишленост. Естественният силиций има три изотопа – силиций-

28, силиций-29 и силиций-30 и в началото изглеждаше, че техните относителни пропорции може да се измерват с достатъчна точност.

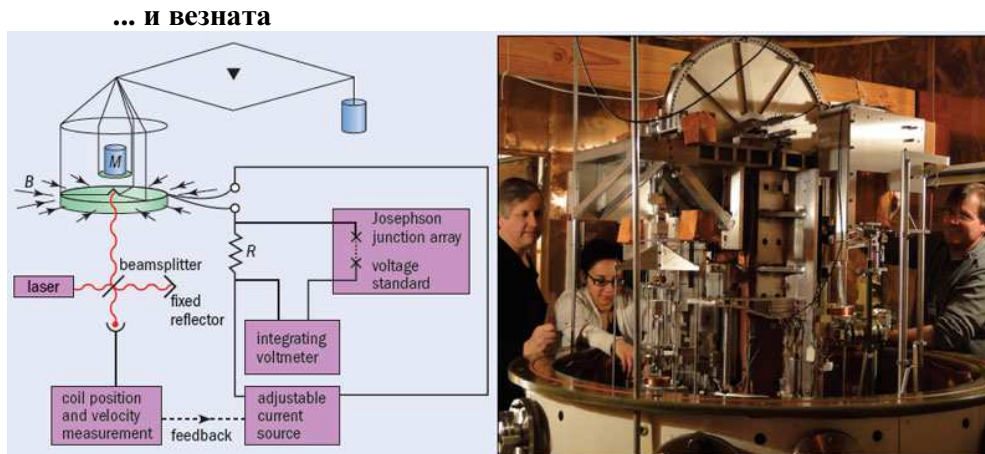
Въпреки че определянето на размерите на кристалната решетка изглеждаше по-трудно, метролозите се възползваха от една техника, която използва комбинация от оптични и рентгенови интерферометри (СОХИ), създадена през 60-те и 70-те години на 20. век в Германия (в Националния институт за стандарти – РТВ) и САЩ (от предшественика на Националния институт за стандарти и технологии – NIST). Тя свързва минимумите и максимумите на рентгеновата картина – следователно единицата за дължина – пряко с размерите на решетката. В началото на 80-те години резултатите на двете групи, немската и американската, се различаваха с цяла една част на милион (ppm). Накрая това тревожно различие бе обяснено с грешка в инструмента на NIST.



Фиг. 1: Принцип на метода на Авогадро.

Източникът на неопределеност, който се оказа най-труден за преодоляване, включваше определянето на изотопния състав на силиция. Това като че ли спря напредъка към по-голяма точност при измерване константата на Авогадро до около три части на 10^7 . Не сома това, но и първият резултат, който се появи през 2003 г., показва разлика с този, получен с ват-везна по-голяма от 1 ppm. Появи се силно подозрение, че разликата се дължи на измерванията на изотопния състав на естествения силиций, използван в експериментите. Тогава ръководителят на колектива от – Петер Бекер, извади късмет. Учен от предишната ГДР, който имаше връзки с центрофугите, които СССР използваше за разделяне на изотопите на урана, запита Бекер дали не би било възможно да се използва обогатен силиций. Осъзнавайки, че образец от чист силиций-28 би изключил онова, което тогава се разглеждаше като главен източник на грешка, Бекер и сътрудниците му се хванаха за тази възможност. Въпреки че покупката на такъв образец би била твърде скъпа за отделна лаборатория – 2 милиона евро за 5 kg материал, през 2003 г. представителите на проекта Авогадро от целия свят решиха да обединят средствата си за покупка на образец и образуваха Международна Авогадро координация (IAC – International Avogadro Coordination). Бекер от РТВ ръководеше групата, разпределяйки задачите за характеризирание на чистотата, определяне на размерите на решетката, измервания на повърхността и др. между отделните лаборатории.

Резултатът бе създаването на две прекрасни сфери. “На пръв поглед изглежда, че това, което направихме, е още едно човешко творение, подобно на прототипа на килограма – това, което искахме да избегнем.” – каза Бекер на януарската сбирка в Кралското общество. “Това обаче не е така – сферата е само метод за броене на атоми.”



Фиг. 2: Принцип на ват-везната.

Вторият подход към предефинирането на килограма включва една везна от особен вид. Докато обикновената везна сравнява една тежест с друга – например плик с ябълки с нещо друго, чието тегло е известно – ват-везната сравнява два вида сили: механичното тегло на един обект ($F = mg$) със електричната сила, действаща върху намотка с ток, поставена в силно магнитно поле ($F = ilB$), където i е токът, l – дължината на проводника, а B – индукцията на полето. Уредът (фиг. 2) е познат като ват-везна, тъй като ако намотката се движи със скорост u , в нея се индуцира напрежение $V = Blu$ и, следователно, след математическо преобразование на горните изрази, електричната мощност (Vi) се уравнива от механичната мощност ($mg u$). С други думи $m = Vi/gu$. В съвременните ват-везни токът i може да се измери с много голяма точност чрез пропускането му през резистор и с използването на ефекта на Джозефсон за измерване на пада на напрежението. Открит от Браян Джозефсон, този ефект описва факта, че ако два свръхпроводящи материала са разделени с тънък слой изолатор, двойки електрони във всеки слой се свързват по такъв начин, че едно микровълново лъчение с честота f може да създаде в слоя напрежение $V = hf/2e$, където h е константата на Планк, а e – елементарният електричен заряд. От друга страна съпротивлението на резистора се измерва чрез “квантовия Хол ефект”, който описва факта, че потокът на електрони в двумерни системи при свръх ниски температури е квантуван, като проводимостта нараства със стъпки, целочислено равни на e^2/h . Така напрежението V се измерва чрез ефекта на Джозефсон, докато скоростта u и земното ускорение g също лесно могат да се получат.

Това, което е забележително за ват-везната е, че тя се основава на няколко забележителни открития, нито едно от които не е направено от учени, имащи за цел измерването на маса. Едното е ефекта на Джозефсон, с което може да се измерва напрежението точно. Другото е квантовия Хол ефект (открит от Клаус фон Клитцинг през 1980 г.), което дава възможност за точно измерване на съпротивления. Третото е идеята за балансиране на механична и на електрична мощност, което може да се отнесе в миналото към Браян Кибл от британската Национална физична лаборатория (NPL) през 1975 г., който всъщност опитвал да измерва електромагнитните свойства на протона. Тези три открития сега могат да се свържат по такъв начин, че измерването на килограма да се сведе до познаване на константата на Планк. Така ако по принцип процесът се обърне, задаването на една конкретна стойност на константата на Планк може да се използва за дефиниция на килограма.

В прочутата популярна лекция на Майкъл Фарадей “Химична история на свещта” той нарича свещите прекрасни, защото в тях по най-пестелив начин се обвързват всички познати по онова време фундаментални физични принципи, включително гра-

витация, капилярност и фазови преходи. Подобна бележка може да се направи и за ват-везната. Макар и не така красива като полираната силициева сфера, въпреки това тя комбинира сложната физика на везните – която включва еластичност, физика на твърдата тяло и даже сеизмология, с тази на електромагнетизма, свръхпроводимостта, интерферометрията, гравиметрията и квантите по начин, който разкрива дълбока красота.

Към новата СИ

И подходът Авогадро, и ват-везните имат своите собствени достойнства (Вж. по-долу “История на двата подхода”), но в зората на 21. век никой от тях не бе достигнал точност, по-добра от няколко части за 10^7 , т.е. – далеч от поставената от Куин цел една част за 10^8 . Въпреки това Куин, който през 2003 г. стана директор на ВІРМ, реши да провежда политика за предефиниране. В началото на 2005 г. той бе съавтор на статия със заглавие “Предефиниране на килограма: решение, чието време дойде” (*Metrologia* **42** 71), като втората част от заглавието е от (тогава ироничния) доклад на NBS от 1970 г., който известява предстоящото преминаване на САЩ към метричната система. “Преимствата от предефинирането на килограма надделяват веднага над всякакви очевидни неудобства”, пишат Куин и съавторите му, въпреки тогавашното очевидно несъответствие от 1 ppm между резултатите от ват-везната и силициевата сфера. Те бяха толкова уверени в одобрението от следващия CGPM през 2007 г., че поставиха в “Appendix A” на официалната СИ-брошура на ВІРМ реч за новата дефиниция. По-нататък, те искаха да дефинират всяка от седемте основни единици на СИ в термините на физични константи или атомни свойства. През февруари 2005 г. Куин организира среща в Кралското дружество, за да запознае научната общност с плана.

Реакциите се простираха от хладни до враждебни. Един от участниците си спомня: “Нас ни свариха незащитени.” Предлаганите промени изглеждаха не доработени, а мнозина ги смятаха излишни, щом наличната точност със съществуващия прототип е по-голяма от двете модни технологии. Не стига, че неточността на подходите на Авогадро и на ват-везните бе на порядък по-голяма от поставената през 1991 г. от Куин цел, а стоеше още и това 1 ppm различие между тях. Въпреки това, идеята остана и през октомври 2005 г. управляващото тяло на ВІРМ, Международният комитет за мерки и теглилки, прие препоръка да се има предвид предефиниране на килограма както в статията на Куин от 2005 г., както и предефинирането на четири основни единици (килограм, ампер, келвин и мол) с помощта на фундаменталните физични константи (съответно h , e , константата на Болцман k и числото на Авогадро N_A).

Тогавашно Куин и колегите му публикуваха през 2006 г. една нова статия, в която те очертаха конкретни предложения за осъществяване препоръките на СИРМ, с идеята те да бъдат приети на 24. генерална конференция през 2011.

През последните години двата подхода отбелязаха значителен напредък. През 2004 г. в Санкт Петербург бе получен обогатен силиций във вид на SiF_4 и превърнат в поликристал в една лаборатория в Нижни Новгород. Поликристалът бе доставен с кораб в Берлин, където през 2007 г. бе превърнат в 5 килограмов прът от монокристал силиций-28. Прътът бе изпратен в Австралия, за да бъдат направени от него две полирани сфери, а сферите бяха измерени в Германия, Италия, Япония и в ВІРМ. През януари тази година ІАС докладва ново измерване на резултатите си с неточност от $3.0 \cdot 10^{-8}$ – мъчително близо до целта (*Phys. Rev. Lett.* **106** 030801). Авторите отбелязват, че резултатът е “крачка към успешно дефиниране на килограма, основано на фиксирани стойности на N_A или h ” и намекват, че това са най-точните входни данни за новото определение на килограма.

Технологията на ват-везните също непрекъснато напредваше. Прибори с различен дизайн се разработват в Канада, Китай, Франция, Швейцария и в ВІРМ. Резултати-

те показват възможности за постигане неточност, по-малка от 10^{-7} . Техният главен проблем обаче е проблемът на изравняването: силата, предизвикана от намотката и нейната скорост трябва внимателно да е приравнята с гравитацията. И колкото повече се намалява общата неточност, толкова по трудно се осъществява това изравняване. Предишната разлика от 1 ppm е сведена до около 1,7 части за 10^7 – близо, но не достатъчно близо.

Въпреки всичко, тези резултати доведоха метрологичното общество почти до консенсус относно това, че предефинирането е не само възможно, но и подходящо. Един съвещателен комитет на ВРМ формулира критерии за предефинирането: трябва да има поне три независими експеримента, поне един от всеки подход, с неточност, по-малка от пет части на 10^8 ; поне един от тях трябва да има неточност, по-малка от две части на 10^8 ; и всички резултати трябва да съгласуват поне на равнище от 95%. Предложението, направено от Куин и колегите му, наречено “новата СИ”, почти сигурно ще бъде прието. Всъщност, то не предефинира килограма, но “взема под внимание” намерението да го направи. Предефинирането сега е в ръцете на експериментаторите, които трябва да постигнат горепосочените критерии.

Най-голямата промяна от всички до сега?

Тези развития вдъхнаха вяра на Куин да организира друга среща. Този път и неговите съратници в организацията измислиха грижлива стратегия. 150-те участници в януарската среща в Кралското дружество включваха три Нобелови лауреата: Джон Хол от JILA (чиято работа допринесе за предефинирането на метъра), бил Филипс от NIST и самия фон Клитцинг. Според новите предложения, физичните константи няма повече да се измерват, в рамките на СИ техните стойности са фиксирани (вж. “Към една нова СИ”). По-нататък, дефинициите имат подобна структура и терминология, а връзките с физичните константи са явни. Езикът изяснява какво в действителност казват тези дефиниции – какво означава да се обвърже една единица към естествена константа, като с това им се придава идейна елегантност. Предложената нова дефиниция за килограма, например, е: “Килограмът, kg, е единица за маса; неговата големина се определя чрез фиксиране числената стойност на константата на Планк на точно $6,626\ 068\ \dots \cdot 10^{-34}$, когато е изразена в единици $s^{-1}\ m^2\ kg$, което е равно на $J\ s$.” (Грите точки означават, че окончателната стойност още не е определена.)

Towards a new SI

| Base unit | Reference constants used to define the unit in the current SI | Reference constants used to define the unit in the proposed “new SI” | Exact value of constant in the “new SI” |
|--------------|---|--|--|
| s, second | hyperfine splitting in Cs-133 | hyperfine splitting in Cs-133 | 9 192 631 770 Hz |
| m, metre | speed of light in vacuum, c | speed of light in vacuum, c | 299 792 458 $m\ s^{-1}$ |
| kg, kilogram | mass of International Prototype of the Kilogram, $m(k)$ | Planck constant, h | 6.626 068... $\times 10^{-34}\ J\ s$ |
| A, ampere | permeability of free space, μ_0 | elementary charge, e | 1.602 176... $\times 10^{-19}\ C$ |
| K, kelvin | triple point of water, T_{tpw} | Boltzmann constant, k | 1.380 65... $\times 10^{-23}\ J\ K^{-1}$ |
| mol, mole | molar mass of carbon-12, $M(^{12}C)$ | Avogadro constant, N_A | 6.022 141... $\times 10^{23}\ mol^{-1}$ |
| cd, candela | luminous efficacy of a 540 THz source | luminous efficacy of a 540 THz source | 683 lumen W^{-1} |

Към една нова СИ

Обществото на метролозите е огромно и различно, различните групи имат различни мнения относно предложенията. Тези, които се занимават с електрични измервания, са по-ентузиазирани; h и e сега стават точно определени и с тях би се работило много по-лесно. Нещо повече, премахва се неприятното разминаване между наличните най-добри електрични единици, въведени с прибора на Кибл и тези в СИ. Единственото искрено възражение от тази гледна точка на срещата бе направено от фон Клитцинг: “Спасете константата на фон Клитцинг!” – протестираше той, указвайки, че наречената на негово име константа $R_K = h/e^2$, чиято стойност (извън СИ) преди точно двадесет години бе фиксирана на 25,812 807 Ω , сега трябва да се преоценява в термините на e и h , което би я направило дълга и тромава, вместо къса и изящна. Въпреки това той изка-

за симпатия към предефинирането, цитирайки бележката на Макс Планк от 1900 г., че “с помощта на фундаменталните константи ние имаме възможността да установим единици за дължина, време, маса и температура, които по необходимост запазват своето значение за всички култури, дори за извънземните и нехуманоидните.” (*Ann. Phys.* 1 69).

Общността на занимаващите се с измерване на маси изглеждаше не толкова оптимистична. Понастоящем измерващите маса са в състояние да сравняват маси с около един порядък по-голяма точност – една част на 10^9 – отколкото могат да постигнат пряко чрез измерване на константа. По такъв начин изглежда, че новите дефиниции въвеждат по-голяма неточност при измерването на маса, отколкото сегашната; вместо днешната възможност да се проследи внимателно процедурата за точно измерване на масата, сега вие ще трябва да проследявате един сложен експеримент в различни национални лаборатории. По този повод Ричард Дейвис, наскоро пенсиониралият се ръководител на отдела за измерване на маса в NIST, отбелязва относно СИ: “Тя прилича на стара мебел: не точно красива, но функционална.” Привържениците на новата дефиниция обаче подчертават, че сравнителните измервания прикриват неточността, присъща на самия прототип на килограма, така че в края на краищата нова неточност не се въвежда. Куин отбелязва: “Неточността се запазва.”

Една група, която не бе представена на срещата, е на студентите, преподавателите и други интересувани се от метрология. Както се оплаква чикагският *Daily Tribune*, откакто през 1960 г. бе въведена СИ, “Ние имаме чувството, че важни неща ни се изземват от ръцете и дори разбирането от средния гражданин.” Горко на шивачката-далтонист, продължава вестникът, която може да използва метър, но не може да каже дължината на вълната на оранжевия и червения цвят Шегата прикрива безпокойството, че измерванията, които трябва да могат да бъдат разбрани от обикновения гражданин, изглежда ще станат твърде сложни за всеки, освен за специалистите. За студентите една от привлекателните черти на науката е, че понятията и приложенията са лесно разбираеми, или би следвало да бъдат такива, а новата СИ изглежда ще направи основите на метрологията недостъпни за всички, освен за специалистите. Горко на месаря и на бакалина, би се пошегувал някой, когато се въведе новата СИ, ако не са специалисти и в квантовата механика.

Въпреки това, всяка епоха гради стандартите си върху най-твърдата основа, която познава, така че от този гледна точка е подходящо през 21. век в тази основа да се включат квантите. Никой от присъстващите в Кралското дружество не възрази по принцип на идеята за евентуално предефиниране на килограма и свързването му с константата на Планк. В определен момент Филипс отбелязва: “Скандално е, че ние имаме този килограм с променливата маса, който следователно променя масата на всичко друго във Вселената.” Малцина се безпокояха от факта, че днес изглежда невъзможно да се установи дали фундаменталните константи променят стойностите си с времето, докато други отбелязваха, че с други средства подобни промени може да се окажат наблюдаеми.

Много от участниците обаче се тревожеха от факта, че измерванията чрез подхода на Авогадро и с ват-везната дават резултати, които все още не са в достатъчно добро съгласие, създавайки препятствие, макар и не голямо, за избора на единствена стойност. “Човек, който има само един часовник, знае колко е часът.” – каза Дейвис, цитирайки стар виц на метролозите. “Човек с два часовника не е сигурен.”

Да се нарече новата СИ най-голямата промяна след Френската революция е може би пресилено. Самото създаване на СИ през 1960 г. бе вероятно също толкова важно, тъй като въведе новите единици и за пръв път ги обвърза с природните явления. Новите промени едва ли ще окажат влияние върху измервателната практика и се правят

повече от принципни и педагогически съображения. Въпреки това, със своята амбициозност, промяната е спираща дъха – най-голямата реорганизация в метрологията от утвърждаването на СИ през 1960 г. и осъществяване на една вековна мечта. Новата СИ представлява също така промяна в статута на метрологията. Когато през 1960 г. бе утвърдена СИ, метрологията се смяташе нещо като затътеното място на науката – нещо като спомагателна работа. Метролозите гледат сцената, на която действат учените. Те осигуряват скелето – една добре поддържана система от измервателни стандарти и инструменти, и една добре ръководена мрежа от институции, които вдъхват доверие – това позволява на учените да провеждат изследвания. Новата СИ и технологиите, които я направиха възможна, свързват метрологията много по-тясно с фундаменталната физика.

Историята на двата подхода

Метод на Авогадро

Най-добро измерване

Най-малката грешка е 30 части на милиард, постигната в измерване, проведено от International Avogadro Coordination (IAC).

Преимущества

- Дефиницията на килограма с използване на фиксирана стойност за числото на Авогадро е интуитивно разбираемо, но изисква определен на допълнителни условия.

Недостатъци

- Експериментът е много труден и изисква световен консорциум (IAC) за извършване на измерванията върху съществуващите две сфери от силиций-28.
- Измерванията са трудно повторими, така че съществуващите сфери ще се превърнат в своего рода прототипи, за които ще стои въпросът за дълговременната им стабилност.

Подходът с ват-везна

Най-добро измерване

Най-малка грешка от 36 части на милиард е постигната в измерване, проведено в Националния институт за стандарти и технологии, САЩ.

Преимущества

- Не представлява прототип; обхватът на масите, които се измерват, не е ограничен до целочислено кратни или дробни части от 1 kg.
- Ват-везна може да бъде конструирана и използвана от отделна измервателна лаборатория.
- Резултатите от световната мрежа от ват-везни може да бъдат сравнявани и комбинирани. Това би осигурило на света един солиден стандарт за маса, който е по-добър от индивидуалните приноси.
- Едно фиксиране на стойността на h , комбинирано с предефиниран ампер, който фиксира стойността на елементарния заряд e , би било голям плюс както за физиката, така и за електричните измервания с голяма точност.

Недостатъци

- Въпреки простотата на принципа, осъществяването му не е толкова и изисква значителни финансови инвестиции, време и добри учени.
- Дефиницията на килограма чрез фиксирана стойност на константата на Планк е по-неясно от сегашната дефиниция.

Ian Robinson, National Physical Laboratory, UK