

За мерките, теглилките и фундаменталните константи

Иля ПЕТРОВ

Херон Прес ООД, София 1504, ул. Оборище 18

Абстракт. 26-та Генерална конференция по мерки и теглилки предефинира системата SI. В тази работа са проследени накратко главните стъпки, направени по-пътя към тази промяна. Посочени са и най-важните последици от нея.

Да се измери дадена величина означава да се сравни с определен еталон (единица мярка) или стандарт. В съвременния свят съществуват, разбира се, огромен брой стандарти, доколкото те са прерогатив на държавите или на водещите корпорации в дадена индустрия. Подобно “богатство” обаче доста често пречи на търговските взаимоотношения, води до скрита икономическа и политическа зависимост, съществено спъва технологичното развитие и усложнява комуникацията както между различните научни центрове, така и между отделните науки – химия, физика и т.н. Решението за всички случаи е едно и също: създаване на общоприет глобален стандарт, който да е удобен както в производството, така и в лабораторията.

ДЕСЕТИЧНАТА МЕТРИЧНА СИСТЕМА

Победите идват и си отиват, но тази работа ще пребъде.

Наполеон за работата на Деламбр и Мешан

Първият проект на световен стандарт “за всички времена и за всички народи”, приет от Конвента на републиканска Франция със закона от 18 жерминал година III (7 април 1795 г.), е **десетичната метрична система**. Той е дело на учени, политици и икономисти¹, решени да създадат система, която да е научно обоснована, да отговаря на нуждите на всекидневието и не на последно място да облекчи финансовата и данъчната система. Следвайки духа на времето (*liberté, fraternité, égalité* – свобода, братство, равенство), новите мерни единици са “равностойни и допъл-

¹ В комисията, избрана от Френската академия на науките, оглавявана от Шарл Борда, участват Лагранж, Лаплас, Монж и Кондорсе.

ващи”. Те не са плод на случаен избор и не се отнасят само за една конкретна нация. Те са научни, а дефинициите им се основават на “свободните” – независими от Бога и човека, велики природни обекти Слънце и Земя.

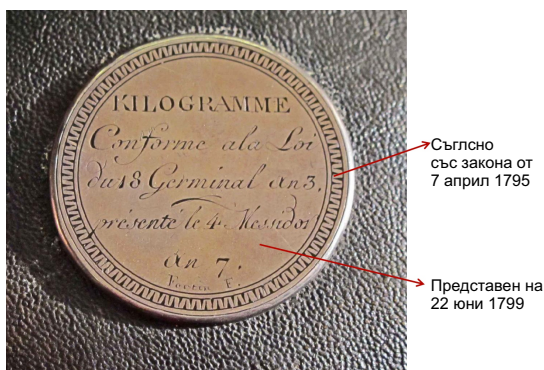
- Метърът (единица дължина) е дефиниран като $1/10\,000\,000$ от разстоянието между северния полюс и екватора по дъгата на меридиана, минаващ през Париж². 1 метър = 100 сантиметра.



Фиг. 1. Възпоменателна пощенска марка, на която Френската Република измерва една четвърт от дължината на земния екватор (първоначалната идея за определяне на метъра).

²Академичната комисия е разглеждала три предложения, свързани с дефиницията на метър: (1) дължината на махало с период 2 s (предложение на Талейран); (2) една четвърт от дължината на меридиана; и (3) една четвърт от дължината на екватора. Изборът пада на дължината на меридиана, тъй като са вече известни резултатите на Никола дьо Лакай и Жак Касини (син на прочутия математик и астроном Джовани Касини, чието име е познато от програмата на NASA за изследване на Сатурн), потвърдени от седемгодишния епохален труд на френските астрономи Жан-Батист Деламбр и Пиер Франсуа Мешан за дължината на меридиана, минаващ през Дюнкерк–Барселона. Комисията отхвърля предложението на Талейран, тъй като в него се използва време – величина от друг тип, с което се въвежда допълнителна неконтролируема грешка, а и се нарушава принципът за “независимост”. За третото предложение просто няма средства и време – работата по новия кадастър на Франция не търпи отлагане.

- Грам (единица маса) е “абсолютното тегло на обема чиста вода, равен на куб със страна една стотна част от метъра при температурата на топене на леда”³



Фиг. 2. Еталонът за килограм, известен още като “килограмът от Архива”.

- С времето нещата стоят по-сложно. За кратко – около година и половина, денят в революционна Франция се е състоял от 10 часа със 100 минути за час и 100 секунди за минута. Но традицията в крайна сметка побеждава и часовниците отново си връщат познатия циферблат с 12 главни деления и 60 деления за минутите⁴.



Фиг. 3. Илюстрация на часовник от времето на Революцията.

³Под чиста вода се разбира дестилирана вода, а Лаваозие, които работи върху това уточнение, е обезглавен. Струва си да се подчертае, че по онова време не е правена разлика между маса и тегло. В закона е използвана думата “poids”, сиреч тегло. http://smdsi.quartier-rural.org/histoire/18germ_3.htm

⁴Фундаменталните за класическата механика пет тома на Лаплас *Traité de Mécanique Céleste* са написани именно в тези десетични “секунди”. Дефиниция за секунда като $1/86400$ от времето за среден слънчев ден дължим най-вече на Гаус.

Четири години по-късно (1799 г.) са отлети прототипите на еталоните за метър и килограм, т.нар. “метър от Архива” и “килограм от Архива”. Метричната система е родена и, носена на копията на Наполеоновите армии, бързо завладява континентална Европа. Но пътят към съвременната международна система SI е по скоро трънлив, отколкото постлан с рози. Самият Наполеон се отрича от нея (1812 г.) и Франция се връща към метъра едва през 1840 г. Великобритания, от своя страна, създава (1824 г.) системата имперски мерки и теглилки, от която се отказва век и половина по-късно – в средата на 60-те години на 20-ти век, като условие за присъединяването ѝ към Общия пазар.

И въпреки всички пречки десетичната метрична система разширява влиянието си, тъй като е проста – да се работи със степените на десетката е лесно! Но за учените, занимаващи се с “темата на деня” – електричество и магнетизъм, тя няма голямо значение, тъй като електромагнитните явления на пръв поглед нямат нищо общо с метъра и килограмата. Откритията от началото на 19-ти век са наистина впечатляващи: отклонението на магнитната стрелка под действието на електричен ток (Оерстед, 1819 г.); зависимостта на магнитната индукция от тока, който я създава (Био–Савар, 1820 г.); изследванията по взаимодействието между проводници, по които тече ток (Ампер, 1820–1825 г.); законът на Ом (1827 г.) и т.н. Всички те, както и законът на Кулон, обаче установяват само отношения между електрически заредени тела или токове, течащи по проводници⁵. Известно е например изказването на Кавендиш, че силата на тока, определял “по степента на дискомфорт”.

Отношението се променя след доклада на Карл Фридрих Гаус върху количественото определяне на интензитета на земното магнитно поле, изнесен през декември 1832 г. пред Гьотингенското кралско общество⁶. По аналогия със закона на Кулон Гаус приема, че силата между два магнитни полюса е $\sim p_1 p_2 / r^2$, където p_1, p_2 представят “зарядите” на магнитни монополи на разстояние r един от друг. Отчитайки факта, че в природата се наблюдават само магнитни диполи, той успява да определи магнитното поле, изразено в механични, т.е. измеряеми, величини (вж. Приложение 1). Гаус прави също обстоен анализ на различните системи мерки и аргументира предимствата на метричната система (в

⁵Законите на Кулон и Ампер са по-скоро за зависимостта на силата от разстоянието между ел. заряди или токове и по никакъв начин не ни казват как да определим самите заряди или токове.

⁶Изследванията са проведени в рамките на проекта на фон Хумболд за създаване на карта на земното магнитно поле. Английски превод на доклада на Гаус (в оригинал докладът е на латински език) може да се намери на <https://21sci-tech.com/translations/gaussMagnetic.pdf>.

действителност в работата се използват милиметър и грам), като добавя към нея астрономическата секунда. Погледнато исторически това е първата научна метрологична работа, указваща пътя, по който може да се построи съгласувана система мерки, включваща електромагнитните явления. Резултатът е т.нар. Гаус–Вебер метод (около 1850 г.). В лабораториите обаче типичните стойности за напрежение са 1 V (използваните по онова време елементи на Даниел дават напрежение от 1,07 V) и 1 A за ток, докато единиците за потенциал 1 ед. $\cong 10^{-8}$ V и за съпротивление 1 ед. $\cong 10^{-9}$ Ω са очевидно неудобни още повече, че изчисленията са правени на ръка. В допълнение размерността на съпротивлението объркващо съвпада с размерността на скоростта.

Разбира се, тази дейност не е самоцелна. Едно от първите приложения на “новите сили” е предаването на информация на големи разстояния с голяма скорост. Втората половина на 19-ти век от гледна точка на технологичния прогрес може да се нарече време на железниците и телеграфа⁷. И доколкото успехът се определял от избора на броя на източниците на ток и електрическите свойства на проводника между отделните станции, всяка телеграфна компания имала собствен стандарт за съпротивление – ситуация подобна на съвременните програмни продукти и хардуерни протоколи. Прекъсването на първия трансатлантически кабел през 1858 г. (само три месеца след поздравителната телеграма на кралица Виктория до президента Бюканън) предизвиква обществена дискусия за ел. стандартите. Със задачата се заема комитет, назначен от Британската асоциация за напредък на науката (British Association for the Advancement of Science) с участието на Максуел, Келвин и Джаул. Комитетът взима за основа метода на Гаус–Вебер с фундаментални единици сантиметър, грам, секунда, т.е. отхвърля метъра, и дефинира единица за сила (dyn) и работа (erg). Тази система, основаваща се на закона на Ампер, е предложена през 1873 г. и е наречена официално *електромагнитна система единици (emu)*. Паралелно е предложена друга система единици, основаваща се на закона на Кулон и наречена *електростатична система единици (esu)*. Но и при тази система единиците за потенциал (= 300 V), ток (= $3,3 \cdot 10^{-10}$ A) и съпротивление (= $9 \cdot 10^{11}$ Ω) са доста неудобни както за научните изследвания, така и за промишлеността.

МЕТРИЧНАТА КОНВЕНЦИЯ. РАЖДАНЕТО НА МЕТРОЛОГИЯТА

Превръщането на търговията в глобална, появата на международната железопътна мрежа, установяването на междуконтинентални телеграфни връзки, както и появата на цяло ново съсловие, което днес наричаме

⁷Телеграфът от 19-ти век е може би най-простото ел. устройство – проводник, на чийто краища има по една батерия и електромагнитен ключ за предаване на сигналите.

научно-техническата интелигенция, убеждават правителствата на Великите сили в необходимостта да се създаде обща международна система мерки и теглилки.

От 1 март до 20 май 1875 г. в Париж заседава Дипломатическа конференция (Conférence diplomatique du mètre), в която участват представители на 20 държави, и завършва с подписването на Конвенцията за метъра от упълномощените лица на 17 страни⁸. Конференцията приема обща за страните-членки система мерни единици, основаваща се на републиканския закон от 1795 г., известна още като MKS: от метър, килограм, секунда. Учредени са три институции: Международно бюро за мерки и теглилки (Bureau international des poids et mesures, BIPM) – междуправителствена организация, която осигурява информация за измерванията и тяхната проследимост; Генерална конференция по мерки и теглилки (Conférence générale des poids et mesures, CGPM) – орган, който организира и координира работата по поддържане на международната метрична система; и Международен комитет по мерки и теглилки (Comité international des poids et mesures, CIPM), който контролира работата на Международното бюро по мерки и теглилки, координира метрологичните изследвания в страните-участнички и изработва препоръки за Генералните конференции по мерки и теглилки⁹.

Метричната конвенция има по-скоро политико-икономически характер. В нея отсъстват стандарти за най-бурно развиващите се дялове от физиката и техниката – електромагнетизма и топлината.

Отговорът на електроинженерите е т. нар. *система единици за практиката*, узаконена на II Международен конгрес по електричество, проведен в Париж през 1889 г. (вж. Табл. 1). Към фундаментални единици се добавят ом (Ω) и ампер (A). Останалите единици се извеждат от уравненията на електродинамиката. Системата *ети* става задължителна, а, за да се отличават от практичните, към наименованията на *ети* единиците се добавя представката *ab* (от абсолютни). Съгласно с решенията на конгреса:

1 A е токът, който при протичането през воден разтвор на AgNO_3 води до отлагане на сребро със скорост 1,118 mg/s¹⁰;

1 Ω е съпротивлението на 100,300 mm живачен стълб със сечение 1 mm².

⁸ Днес 20-и май е Международният ден на метрологията.

⁹ През 1910 г. България получава еталони на мерните единици килограм и метър, и по силата на Указ № 1 на цар Фердинанд I от 27 февруари 1911 г. се присъединява към Конвенцията.

¹⁰ Дефиницията не се основава на закона на Ампер, тъй като силата/cm, действаща между два проводника на разстояние 1 cm, по които тече ток 1 A, е 0,02 dyn (1 dyn е приблизително теглото на 1 mm³ вода), т.е. много малка.

Табл. 1. Връзка между единиците за практика и *emu*-единиците. С “*” са маркирани производните единици

практически	<i>emu</i>	практически	<i>emu</i>
Ом (Ω)	$10^9 \text{ ab}\Omega$	Волт* (V)	10^8 abV
Ампер (A)	10^{-1} abA	Кулон* (C)	10^{-1} abC
Фарад* (F)	10^{-9} abF	Хенри* (H)	10^9 abH
Джаул* (J)	10^7 erg	Ват* (W)	10^7 erg/s

И сякаш за да увеличат бъркотията, Хелмхолц и Херц предлагат удобната за теоретиците *Гаусова система*, в която електричните величини се измерват в *esu*, а магнитните – в *emu* единици. Резултатът е по-малко *c*-та в уравненията на Максвел. Следващата промяна идва с “рационализацията” на Хевисайд (1892 г.). Аргументите на Хевисайд се отнасят до “нефизичната” поява на 4π във фундаменталните уравнения на електродинамиката. Причината е изборът на мерните единици, водещи до следния израз за електростатичната сила:

$$f = q_1 q_2 / r^2,$$

където f се мери в dyn, а r – в cm. Тогава електричното поле е $E = q/r^2$ и съгласно със закона на Гаус $\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho$ – какъв е смисълът на тези 4π ? Много по-естествено е да се изберат единиците за q така, че силата и полето да са съответно:

$$f = q_1 q_2 / 4\pi r^2 \implies E = q / 4\pi r^2.$$

Тогава пълният електричен поток през сфера $4\pi r^2 E$ ще е равен на целия заряд q , затворен в сферата. Подобна схема може да се приложи и за магнитния поток, породен от магнитен полюс. Отново 4π се появява в знаменателя при сферична симетрия и съответно 2π при цилиндрична. Подкрепена от авторитет като Лоренц, идеята прераства в т.нар *рационализирана Гаусова система*, която и днес е предпочитана в теорията на полето.

ЕВОЛЮЦИЯТА НА MKS ДО SI

Светът посреща 20-ото столетие с два типа мерки: (1) широко разпространени в индустрията и всекидневния живот – MKS или Британската имперска система; и (2) “научни”, разпространени сред изследователските и инженерните среди, които в основата си са метрични, но по отношение на електромагнитните явления включват и т. нар. практически единици.

На последния VI Международен конгрес по електричество (Сейнт Луис, 1904 г.) италианският делегат представя доклад, озаглавен “За системата електрически единици” [1], който включва предложението на Джовани Джиорджи от 1901 г. То се основа на факта, че, ако единицата за енергия (erg) в CGS системата се изрази в MKS единици, тя съвпада с практическата единица джаул (вж. Табл. 1)

$$1 \text{ J [MKS]} = \text{m}^2\text{kg/s}^2 = 10^7 \text{ cm}^2\text{g/s}^2 = 10^7 \text{ erg} = 1 \text{ J [прак.]}$$

Идеята на Джиорджи е преходът от ети CGS към MKS да запазва практичните единици. Това е възможно само ако се въведе допълнителна фундаментална мерна единица X такава, че за законите на Кулон и Ампер да имаме [2]

$$\begin{aligned} F_{\text{emu}} = \frac{c^2 q_1 q_2}{r^2} &\implies F_{\text{MK SX}} = \frac{10^{-7} c^2 Q_1 Q_2}{r^2} \\ \frac{dF_{\text{emu}}}{dl} = \frac{2i_1 i_2}{d} &\implies \frac{dF_{\text{MK SX}}}{dl} = \frac{2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2}{d}, \end{aligned}$$

където факторът 10^{-7} се появява от смяната на единиците ($1 \text{ m} = 10^2 \text{ cm}$; $1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$). Сега, ако приемем разсъжденията на Хевисайд и дефинираме $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ и $\varepsilon_0 = 10^7 / (4\pi c^2) \text{ F/m}$, получаваме познатите от учебниците уравнения

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \varepsilon_0 r^2}, \quad \frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d},$$

където ε_0 и μ_0 са съответно електричната и магнитната проницаемост на вакуума. Системата е официално приета през 1935 г., но въпросите, как да се избира четвъртата фундаментална единица и дали да се ползва рационализирана форма са оставени отворени.

Вероятно много учени са забелязали връзката между джаул и erg, изразен в MKS единици, но само дързостта на младия италиански инженер му е позволила да преодолее традицията и сляпата вяра в абсолютната система, основана на три мерки.

След дълги обсъждания и прекъсвания (по време на двете световни войни) през 1950 г. за четвърта независима мерна единица е избран ампер, а шест години по-късно е узаконена и рационалната форма (системата е известна като MKSA). Струва си да отбележим, че именно в системата MKSA уравненията на Максвел изглеждат най-прости (вж. Табл. 2). 10-та Генерална конференция (1954 г.) увеличава броя на фундаменталните единици до шест, въвеждайки градус келвин (от 1967 г. само келвин, K) за температура и кандела (cd) за интензитет на светлината.

Табл. 2. Уравнения на Максвел, представени в най-разпространените единици – Гаус (CGS) и MKSA. Означенията са: \mathbf{D} – електрична индукция; \mathbf{E} – електрично поле; \mathbf{B} – магнитна индукция; \mathbf{H} – магнитно поле; c – скорост на светлината във вакуум; ρ – плътност на некомпенсирани електрични заряди; \mathbf{j} – плътност на електричния ток

CGS	MKSA
$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$
$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$	$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}$
$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

Следващата 11-та Конференция (1960) узаконява наименованието **Международна система единици, SI**. Остава една последна стъпка – включване на мярка за количество вещество. Това е направено през 1971 г. с известен реверанс към химията – за единица се приема мол (mole).

Втората половина на 20-и век е свидетел на абсолютната победа на метричната системата. Разбира се, има и “жертви”. Историята със загубения на Марс спътник на NASA, защото един от програмистите е използвал в част от алгоритъма т.нар. провинциални единици, а не SI, е станал хисторически пример.

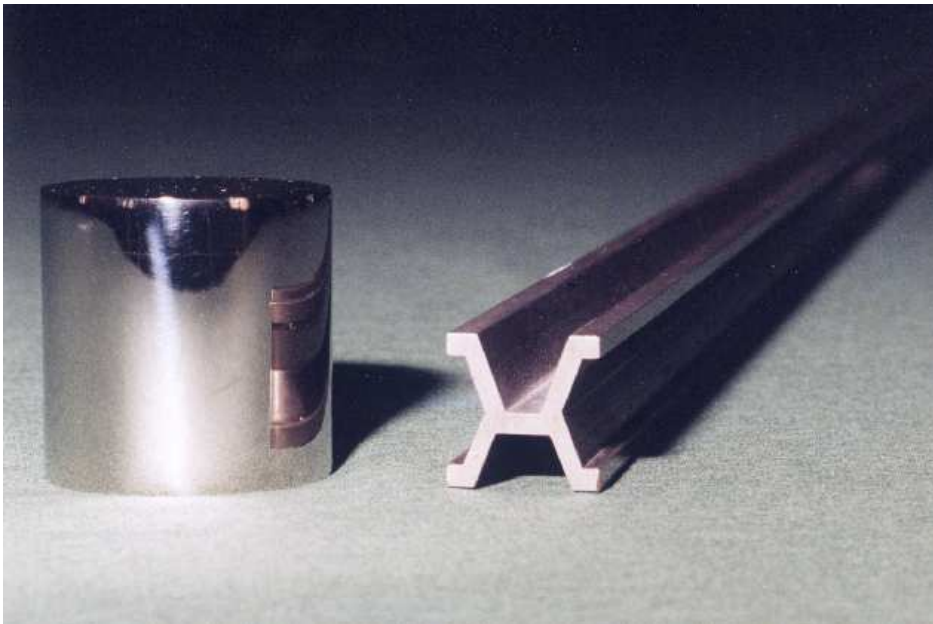
ОТ АРТЕФАКТИ КЪМ ФУНДАМЕНТАЛНИ КОНСТАНТИ

В еволюцията на метрологията и в частност на системата SI се открояват няколко подхода в дефинициите на фундаменталните мерни единици, основаващи се на: артефакти, природни закони и процеси; свойства на атомните системи; квантови явления; фундаментални константи. Те отразяват прогреса на науката и технологичното развитие. Но тъй като задачите, които решава метрологията, обхващат почти всички човешки дейности от търговията до изследванията на глобалния климат, за относително дълги периоди време се срещат елементи от различните подходи. Това предизвиква вътрешни за системата противоречия и изисква нови адекватни предефиниции. Тук няма нищо необичайно – това е характеристика на всеки жив организъм. Тенденцията обаче е ясно очертана – от артефакти към фундаментални константи, и тя е артикулирана още в доклада на ВМР от 1891 г.: “*Още от създаването на Международ-*

ното бюро бе осъзнато, че от фундаментално значение е да се установят връзки между мерните единици и някои фундаментални константи, изведени от природни явления.” [3].

МЕТРОЛОГИЯ, ИЗПОЛЗВАЩА АРТЕФАКТИ И МАКРО-ПРОЦЕСИ

Съгласно с решенията на 1-та Генерална конференция от 1889 г. в Север (предградие на Париж) се съхраняват специално изработените от платино-иридиева сплав еталони за един метър и един килограм (вж. Фиг. 4). Както видяхме (стр. 144), подобни по характер са и първите определения на ампер и ом. С повишаване на точността и възможностите на лабораторната техника ВИМР възприема т. нар. абсолютни дефиниции на мерните единици, които се основават на добре установени природни закони или процеси. Така се стига до предефиницията на 1 ампер от 1948 г., в която се използва законът на Ампер. Аналогично се дефинират: келвин (посредством тройната точка на водата, 1967/8 г.), мол (брой структурни единици, съдържащи се в 12 g ^{12}C , 1971 г.) и кандела (от интензитета на светлината, излъчвана от абсолютно черно тяло при температурата на замръзване на платината, 1937 г. – приблизително светлината, която излъчва лоената свещ, до дефиницията от 1979 г., уточняваща честотата и мощта на лъчението). Секундата (известна още като



Фиг. 4. Прототипи на 1 килограм и 1 метър.

“ефемеридна секунда”), следвайки предложението, направено от страна на астрономите, е дефинирана през 1956 г. като част от тропическата година. Днес обаче тя е с две-три хилядни по-дълга в сравнение с 1900 г. и Международната служба по въртенето на Земята трябва постоянно да коригира часовниците така, че центърът на Слънцето да пресича меридиана на дадено място в 12:00:00 часа.

АТОМНА МЕТРОЛОГИЯ

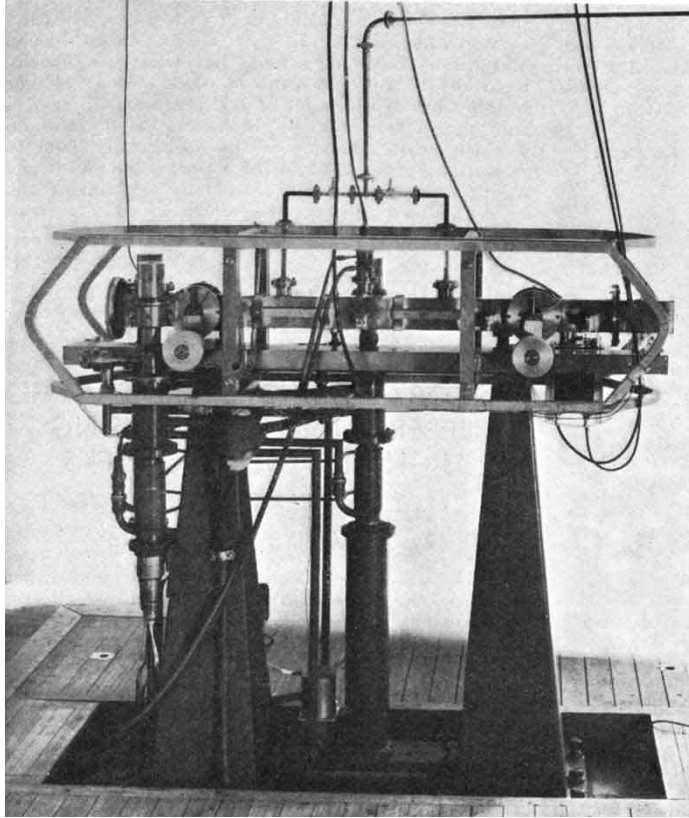
Един от първите опити (1892 г.) да се предефинира стандартът за метър се оновава на откритието, че някои атоми излъчват видима светлина със строго определена и възпроизводима честота. Рене Беноа, директор на ВІМР, и Албърт Майкелсон конструират интерферометър, с който намират, че един метър съответства на 1 553 163,8 дължини на червената линия на кадмий при 760 mm атмосферно налягане и температура 15°C. Няколко години по-късно резултатите са уточнени $1 \text{ m} = 1\,553\,164,13\lambda_{\text{Cd}}$ и прочетени по следния начин: дължината на вълната е $0,64384696 \mu\text{m}$ стават основа на дефиницията на толкова необходимия за спектроскопистите ангстрьом ($\lambda_{\text{Cd}} = 6438,4696 \text{ \AA}$). Оптичният подход получава официално признание през 1960 г., когато метърът е предефиниран като $1\,650\,763,73$ дължини на светлината, получена при прехода $2p_{10} \rightarrow 5d_5$ на изотоп на криптон с атомно тегло 86.

В известен смисъл това определение на единицата за дължина става емблема на системата SI, като еднозначно указва посоката на развитието ѝ – отказ от еталоните-артефакти.

Следващата базова единица, която попада във фокуса на промените, е времето. Въпреки широкото разпространение на кварцовите часовници в практиката¹¹, те все пак са чувствителни към температурата на околната среда. Най-важната характеристика при измерване на време е устойчивостта на трептенията, което означава системата, чийто трептения се измерват, да е “самоизолирана”. В 1955 г. Есен и Пери [4] предлагат за стандарт да се използва честотата на преход между свръхфинните нива на основното състояние на стабилния изотоп на цезий ^{133}Cs .

Изборът на Cs не е случаен. Електронната му обвивка се състои от 55 електрона, но 54 от тях формират абсолютно симетричната структура на инертния газ ксенон, така че валентният 6s електрон не взаимодейства магнитно с останалите електрони, т.е. енергетичният спектър няма фина структура. От друга страна обаче, магнитният момент на ядрото е

¹¹Първият кварцов часовник е създаден в Бел Лаб през 1927 г. Най-голямото предимство е, че честотата на трептене може да се настрои да е точно степен на 2.



Фиг. 5. Атомният резонатор на Есен и Пери [4].

доста голям – $7/2 \hbar$. Взаимодействието между магнитните моменти на валентния електрон и ядрото водят до свръхфино разцепване в енергетичния спектър, т.е. съществуват две много близки по енергии нива, преходът между които е механизмът на атомния часовник. Две други особености на ^{133}Cs осигуряват стабилността на работа: (1) отношението между радиуса на орбитата на $6s$ електрона и размера на ядрото на ^{133}Cs е около $5,5 \cdot 10^4$; и (2) разликата в енергии между двете свръхфини нива $\Delta E = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$ е около 100 000 пъти по-малка от енергията за йонизация (3,9 eV) и 1000 пъти по-малка от средната енергия на топлинното движение при 100°C (0.04 eV), т.е. всички останали взаимодействия могат да се пренебрегнат и “часовникът е изолиран и стабилен”.

След години на експерименти и прецизни сравнения с ефемеридната единица 13-та CGPM (1967 г.) дефинира 1 секунда като продължителността на 9 192 631 770 периода на лъчението, съответстващо на прехода между двете свръхфини нива на основното състояние на цезий-133.

По същество дефинициите на метъра и секундата се основават на две експериментално получени атомни “константи”. Откриването на лазера обаче и разработването на нови спектроскопични техники през 60-те години на миналия век изправиха метрологията пред сериозни предизвикателства, свързани с точността на стандартите. Бе достигната относителна грешка в измерванията на честоти от 9 GHz (Cs-часовник) до 500 THz (червената линия на хелий-неонов лазер) $\sim 10^{-12}$, при това без да се влияе от дифракционните ефекти, фазовото отместване при отражение или от коефициента на пречупване. Нещо повече, две други открития в квантовата физика – ефектът на Джозефсон (1962 г.) и квантовият Хол ефект (1980 г.), промениха изцяло електрическите стандарти. Практическото измерване на напрежение или на съпротивление с относителна точност $\sim 10^{-9}$ стана достъпно, което постави под съмнение “авторитета” на дефиницията за ампер.

Отговорът на Международното бюро по мерки и теглилки (BIMP) не бе тривиален и промени радикално философията на SI и изобщо разбирането за еталон и измерване.

МЕТРОЛОГИЯ НА ФУНДАМЕНТАЛНИТЕ КОНСТАНТИ

Съгласно с решенията на 17-та CGPM от 1983 г. за първи път се въведе понятието базова константа. Метърът се дефинира като дължината на пътя, изминат от светлината във вакуум за $1/299792458$ част от секундата, т.е. скоростта на светлината във вакуум c стана *метрологична константа*, равна на $299\,792\,458$ m/s. Новата дефиниция позволи да се измерва не самата дължина, а мащабираният ѝ образ, т.е. измерва се отношението дължина/ c , т.е. реципрочна честота. Този “трик” съществено повиши точността на измерване. Например константата на решетката на обогатен ^{28}Si кристал бе определена с точност 10^{-18} m, а разстоянието между Земята и Луната, измерено чрез засичане на времето за отиване и връщане на лазерен импулс – с точност 1 mm.

Новата парадигма много бързо получи признание и през 1990 г. числените стойности на константите на Джозефсон и фон Клицинг бяха фиксирани (т.нар. $K_{\text{J-90}}$ и $R_{\text{K-90}}$). Този акт, от една страна, съществено облекчи изработката на стандарти за източниците на напрежение и за съпротивление, но, от друга, доведе до нарушаване на съгласуваността на системата SI. Работата се състои в това, че

$$K_{\text{J}} = 2e/h, \quad R_{\text{K}} = h/e^2,$$

където h е константата на Планк, а e е елементарният електрически заряд. Според препоръката от 1990 г. от лявата страна стоят точни числа, а от дясната – експериментални, т.е. определени с грешка, константи.

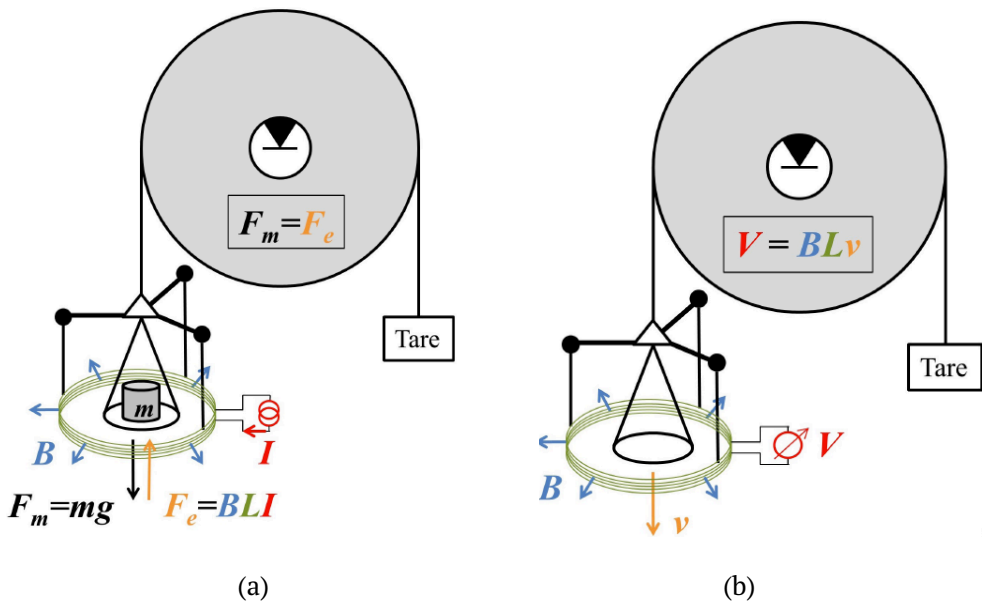
На пръв поглед решението е лесно: фиксират се h и e така, че да се удовлетворят горните уравнения, амперът се получава от дефиницията “количество ел. заряд за единица време” и нещата са О.К. Но, ако си припомним, че в основата на всичко, свързано с мерките, лежи разбирането за сила по Нютон (а там участва маса), ще осъзнаем, че, за да фиксираме h , ще трябва да предфинираме килограма.

Точно това стана на 16-ти ноември 2018 г. с решение на 26-та CGPM. За да се стигне до него, бяха необходими повече от 40 години експерименти и анализи, проведени във водещите метрологични лаборатории в САЩ, Великобритания, Германия, Китай, Швейцария, Белгия, Италия, Канада и Франция.

Всичко започва през 1975 г. с предложението на Брайън Кибъл за свръхпрецизна електромагнитна везна, работеща в два режима. При първия режим (Фиг. 6а) по кръгов проводник с дължина L , поставен в радиално магнитно поле с индукция B , тече ток със сила I така, че да компенсира теглото на пробно тяло с маса m

$$mg = -I \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{U_1}{R} \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

където g е земното ускорение, а Φ е магнитният поток през сечението на проводника. Токът I се мери с пада на напрежение върху съпротивление (не е показано на схемата), калибровано с квантов Хол стандарт



Фиг. 6. Схема на везната на Кибъл.

($R = (h/e^2)/i$; i отговаря на съответното плато в диаграмата на квантовото съпротивление на Хол). При втория режим (Фиг. 6b) пробната маса се отстранява, а проводникът се движи със скорост v така, че в него да се генерира електродвижещо напрежение

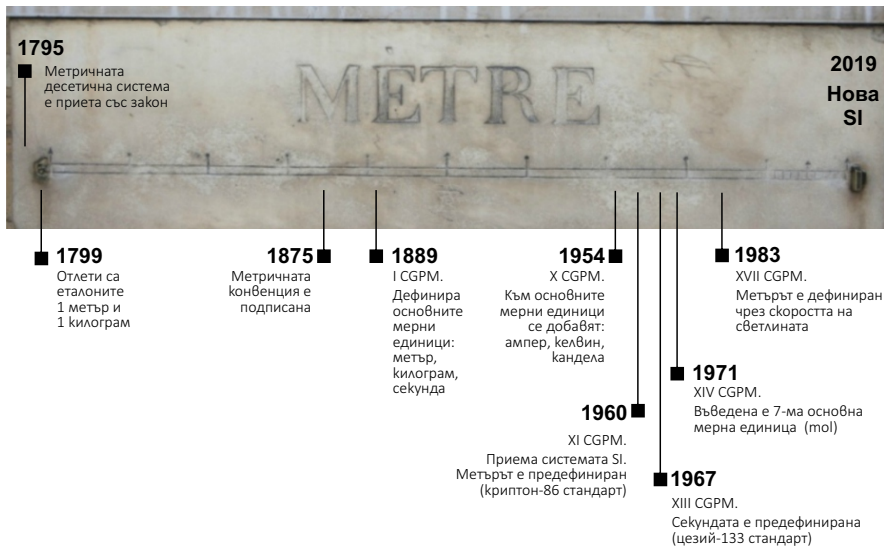
$$U_2 = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} = -v \frac{\partial\Phi}{\partial z}.$$

И двете напрежения се измерват с волтметър, калибриран с квантов Джозефсон стандарт ($U_1 = (h/2e)n_1f_1$, $U_2 = (h/2e)n_2f_2$; n_i и n_2 показват броя на Джозефсоновите преходи; f_i и f_2 са честотите, възбуждащи тунелните преходи). Като изключим неизвестното изменение на магнитния поток, получаваме:

$$m = h \left(\frac{in_1n_2}{4} \right) \frac{f_1f_2}{gv},$$

т.е. масата m е изразена чрез константата на Планк h и параметри, определени с точност удовлетворяваща практическите електрически стандарти.

Реализацията на този проект, т.нар. ват везна (watt balance), заедно с определянето на числото на Авогадро чрез XRCD (XR – рентгеново лъчение, CD – плътност на кристал) метода, приложен върху може би най-идеално полираната в света топка от кристален силиций-28, дадоха основата на реформата на SI, в която вече няма еталони-артефакти.



Фиг. 7. Хронология на главните промени в SI.

ГЛАВНИ РЕШЕНИЯ НА 26-та CGPM

Съгласно с резолюцията на CGPM [5], приета на 16-и ноември 2018 г., Международната система за мерни единици SI е система, в която:

- честотата на прехода между свръхфините нива на основното състояние на цезий-133 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ е 9 192 631 770 Hz;
- скоростта на светлината във вакуум c е 299 792 458 m/s;
- константата на Планк h е $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ J s;
- елементарният заряд e е $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C;
- константата на Болцман k е $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K;
- числото на Авогадро N_A е $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹;
- светоотдаването на монохроматично лъчение с честота $540 \cdot 10^{12}$ Hz, K_{cd} , е 683 lm/W.

В приложение 3 на резолюцията се дават новите дефиниции на седемте основни мерни единици, като се използва гореописаното разбиране за система, базирана на универсални природни константи. Доколкото преводът на български език на тези дефиниции още не е публикуван официално, по-долу ще изложим само главните предимства, както и проблемите, които следват от реформата.

Постулирането на точни числени стойности на c , h , e , k , и N_A води естествено до приписване на точни стойности и на други, свързани с тях чрез законите от физиката, константи. Например газовата константа R , константата на Фарадей F и константата на Стефан-Болцман σ . Статутът обаче на други константи, които досега са имали точни стойности, се променя – те стават измеряеми. Например прототипът за килограм, който ще продължава да се използва в ежедневието, но вече определен с относителна точност $\sim 10^{-8}$. Същото се отнася за тройната точка на водата и моларната маса на въглерод-12. Най-важната промяна следва от връзката на константата на фон Клицинг и магнитната проницаемост: $h/e^2 = \mu_0 c / 2\alpha$, където α е безразмерната константа на фината структура. Тук h , e , c са точни константи за разлика от α и следователно μ също онаследява определена грешка¹². Но $\mu_0 \varepsilon_0 = 1/c^2$, а това означава, че и ε_0 става експериментално дефинирана константа. С други думи, електромагнитният вакуум е пълноправен обект за експериментално изследване и Гаусовата система не може вече да се разглежда като нерационализиран вариант на SI.

¹²VIPM препоръчва $\Delta\mu_0/\mu_0 = \Delta\alpha/\alpha = 2,3 \cdot 10^{-10}$

Табл. 3. Относителна грешка при изразите за еквивалентност на енергията [6]

Формула за еквивалентност	Символен запис	Относителна грешка $\times 10^{-9}$ стара SI	нова SI
$E = mc^2$	J \rightarrow kg	0	0
$E = hc/\lambda$	J \rightarrow m ⁻¹	44	0
$E = h\nu$	J \rightarrow Hz	44	0
$E = kT$	J \rightarrow K	910	0
1 J = 1 (C/e) eV	J \rightarrow eV	22	0

Друго важно следствие е свързано с преминаването от едни в други мерни единици. При новите дефиниции вече не се внася допълнителна грешка, когато твърдим, че масата на дадена частица е еди колко си kg, а тя е получена с апаратура, калибрирана в eV или Hz (Табл. 3).

Със сигурност има още много “за” и “против” новата система, но дискусиата върху тях ще оставя за бъдещето, още повече че решенията на 26-ата CGPM влизат в сила от 20-и май 2019 г.

НОВАТА SI И ПРОГРАМИТЕ ЗА ОБУЧЕНИЕ

Разбира се, за голяма част от хората новите дефиниции на мерните единици няма да се отразят на начина им на живот. Кантарите в магазините и ролетката на майстора няма да се променят. Но, за да останат съвременни, образователните програми (главно в часовете по физика¹³) трябва да се обноват в духа на новата SI. Традиционно обучението по физика започва с класическа механика, последвана от запознаване (съответно обяснения) с електромагнитни явления и преход към квантова механика. Но необходимите знания, за да се разкажат правилно принципите и явленията, които определят структурата на SI, следват обратен ред.

Как да се обясни на младото поколение, че

“1 kg е единица за маса, дефинирана като се използва, че константата на Планк h е точно $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$, когато е изразена в единици J s, които са равни на $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, където метърът и секундата са дефинирани чрез c и $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”,

е задача, която се надявам образователните специалисти да решат успешно.

¹³Когато преподавах във ФзФ на Софийския университет, често казвах на студентите, че физиката е наука, която не само ни учи КАКВО да мерим, но и КАК да го мерим.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1:**Метод на Гаус за абсолютно измерване на магнитното поле на Земята**

Задачата е “колко е магнитното поле на Земята”. Тук предлагаме адаптиран извод на решението, което е предложил Карл-Фридрих Гаус през 1832 г. [7]

Нека магнитна игла с неизвестен магнитен момент \vec{m} е окачена на безтегловна нишка така, че да може се върти под действието на геомагнитното поле. Индукцията \vec{B} на полето и хоризонталната ѝ компонента B_H също са неизвестни. Положението на магнитната игла е показано схематично на Фиг. 8а. Енергията на взаимодействие на иглата с полето

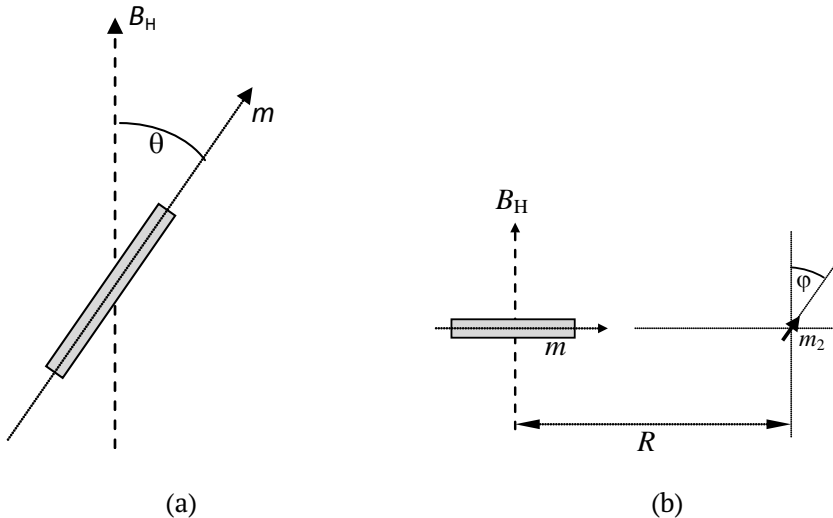
$$E = -\vec{m} \cdot \vec{B} = -mB_H \cos \theta$$

води до осцилации, които спират, когато иглата се ориентира по B_H . Големината на момента на въртящата сила е

$$\tau = -\partial E / \partial \theta = -mB_H \sin \theta \simeq -mB_H \theta, \quad \text{за } \theta \rightarrow 0.$$

От механиката знаем, че $\tau = I d^2\theta / dt^2$, където I е инерчният момент на иглата. С други думи, иглата се държи като осцилатор с честота $\omega = \sqrt{mB_H / I}$. Измервайки I и ω (или периода $T = 2\pi / \omega$), може да определим произведението на неизвестните mB_H чрез механични величини ($mB_H = \omega^2 I$).

Началото на историята на електромагните мерни единици е моментът, когато Гаус измисля начина, по който да измери отношението m/B_H .



Фиг. 8. Принципна схема на експеримента на Гаус.

Гаус решава да изследва магнитното действие на самата игла. Откача я от нишката и я фиксира неподвижно перпендикулярно на B_H . Постава на разстояние R от нея втори магнит (например магнитна стрелка от компас) с момент \vec{m}_2 (Фиг. 8b). Размерите на m_2 трябва да са такива, че да не чувства измененията на магнитното поле B_m , създадено от неподвижната игла. Разстоянието R също трябва да е достатъчно голямо спрямо размерите на иглата, така че тя да се разглежда като точков източник на диполно поле. Гаус, разбира се, анализира детайлно тези условия и прави корекции, които излизат обаче от рамката на настоящото изложение и не са представени тук.

Сега на втория магнит действат две сили: (1) магнитното поле на Земята B_H ; и (2) от страна на неподвижната магнитна игла. Съответните моменти са: $\tau_{\text{земля}} = -m_2 B_H \sin \varphi$; $\tau_m = m_2 B_m \cos \varphi$. В равновесие вторият магнит \vec{m}_2 сключва някакъв ъгъл φ така, че $\tau_{\text{земля}} = -\tau_m$. Следователно $B_m = B_H \tan \varphi$. Тъй като $B_m = (\mu_0/4\pi)2m/R^3$, получаваме

$$\frac{m}{B_H} = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{\mu_0} R^3 \tan \varphi .$$

От това уравнение и от уравнението за произведението mB_H получаваме окончателно

$$B_H = \sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\omega^2 I}{R^3 \tan \varphi}} , \quad m = \sqrt{\frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 I \frac{1}{2} R^3 \tan \varphi} .$$

Всички величини в дясната част на равенствата са механични. Изводът бе направен в единици SI, което обяснява появата на фактора $\mu_0/4\pi$.

Благодарности

Благодаря на Христо Попов за коректната и полезна дискусия.

Литература

- [1] G. Giorgi (1904) In: *Trans. Int. Elec. Cong. St. Louis* **1** 136-141.
- [2] J.S. Jayson (2015) The Daniell Cell, Ohm's Law and the Emergence of the International System of Units <https://arxiv.org/abs/1512.07306>.
- [3] T.J. Quinn (2018) In: *Metrologia: From Physics to Fundamentals to Quality of Life*, edited by P. Travella, M.J.T. Milton, M. Inguscio, pp. 227-249.
- [4] L. Essen, J.V.L. Parry (1955) *Nature* **176** 280-282.
- [5] <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/CGPM/Draft-Resolution-A-EN.pdf>.
- [6] D.B. Newell (2014) *Phys. Today* **67** 35-41.
- [7] N.J. Carron (2015) Babel of Units. The Evolution of Units Systems in Classical Electromagnetism <http://arxiv.org/abs/1506.01951>.