
ІСТОРІЯ НАУКИ

О.Л. Храмова-Баранова

Метрологія: предмет і завдання (новий погляд)

В статті вперше дано новий погляд на метрологію. Вона розглядається в широкому та вузькому значеннях. У широкому значенні метрологія — це розділ фізики, завданням якої є вимірювання різних фізичних величин, розробка методів і засобів вимірювання, що забезпечують їх повсюдну єдність та відповідну точність, утворення одиниць вимірювання фізичних величин та їх систем, створення їх еталонів, уточнення фундаментальних фізичних констант. У вузькому розумінні метрологія — технічна дисципліна, що займається створенням еталонів і зразкових вимірювальних засобів та їхньою перевіркою (прикладна метрологія).

Нині існує кілька підходів до висвітлення історії науки — через історію ідей та теорій, людей, які їх розробляють, відкриттів, понять, приладів та устаткування, наукових інституцій (соціальна історія науки) тощо [1].

«История науки не ограничивается просто историей открытий и наблюдений,— зазначав видатний німецький фізик-теоретик В. Гейзенберг.— Она включает также историю понятий» [2, с. 235].

Першими поняттям науки в сучасному розумінні цього слова, які вона використовувала для описання різних феноменів природи, були положення і швидкість тіл, їх маса, сила, кількість руху, пізніше запровадили поняття потенціальної та кінетичної енергії (XVII ст.). На них понад століття спиралося чимало точних наук. У XIX ст. англійські вчені М. Фарадей, а потім Дж. Максвелл ввели поняття електромагнітного поля. З початком XX ст., зі створенням теорії відносності та квантової механіки, деякі традиційні поняття виявилися незадовільними і їх було замінено новими. Більш того,

бурхливий розвиток неklasичної науки, зокрема фізики, викликав безліч нових понять і примусив переглянути зміст багатьох старих, навіть фундаментальних. Стосовно фізики це блискуче обгрунтував видатний український фізик-теоретик О.І. Ахієзер.

«Почему необходимо образование новых понятий и концепций? — писал він.— Именно потому, что мы хотим иметь не безжизненный набор никак несвязанных между собой опытных данных, а живую физическую теорию, охватывающую основные и главные и позволяющую с помощью необходимых для этого понятий и концепций предсказывать новые явления и факты» [3, с. 292].

Отже, подекуди саме поняття та його зміст з часом змінюються, відходячи від свого початкового, часто-густо етимологічного тлумачення, що можна простежити на багатьох прикладах з історії науки. Розглянемо еволюцію поняття «метрологія», залучивши для цього його дефініції за останні понад 100 років, з

яких видно, як змінювався її зміст, коло досліджуваних питань, вирішувани завдання. У відділі історії науки і техніки Центру досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва, де виконувалося дане дисертаційне дослідження, це робиться не вперше. Подібний підхід в своїх дисертаційних роботах здійснили Л.П. Пономаренко з історії магнітооптики та А.С. Литвинко з історії статистичної фізики, наочно показавши, як це виглядає [4].

Наведемо низку визначень метрології з різних видань в хронологічному порядку.

«Метрологія — наука про вимірювання, про методи досягнення єдності і точності, створення загальної теорії вимірювання, встановлення систем, методів і засобів вимірювань тощо» [5, с.9].

«Метрология — наука об измерениях и методах осуществления их повсеместного единства и требуемой точности» [6, Т.3, с.126].

«Метрология в современном понимании — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности» [7].

«Метрология — прикладная научная дисциплина, объектом изучения которой являются измерения физических величин, методы и средства обеспечения их единства и требуемой точности» [8, с. 296].

«Метрология — наука про измерения» [9].

«Метрологія — наука про вимірювання, яка відрізняється від інших природничих наук (математики, фізики та інших) тим, що її фундаментальні положення приймаються за угодами, а не диктуються об'єктивними законами» [10, с.7].

«Метрологія — галузь знань і вид діяльності, яка пов'язана з вимірюваннями» [11].

«Метрологія — наука про вимірювання, методи та засоби забезпечення єдності вимірювань і способи досягнення необхідної їх точності» [12].

Проведений аналіз цих визначень, а також основних фактів з історії метрології та фізики, які містяться в розділі «Хронологія» в книгах Ю.О. Храмова [1] та даній роботі, приводить до висновку, що поняття «метрологія» необхідно розглядати в широкому і вузькому значеннях.

У широкому значенні (до нього близька дефініція метрології, яка міститься в третьому томі «Фізичної енциклопедії», 1992 р.) метрологію можна визначити як розділ фізики про вимірювання різних фізичних величин, методи і засоби, які забезпечують їх повсюдну єдність та відповідну точність, про утворення одиниць вимірювання фізичних величин і їх систем, створення еталонів цих одиниць, уточнення фундаментальних фізичних констант [5–7].

Цей нетривіальний висновок щодо метрології як розділу фізики підтверджується самою природою фізики і всім ходом її розвитку. Адже вимірювання лежать в основі фізичної науки. Не випадково видатний німецький фізик-теоретик М. Планк в доповіді «Двадцять років роботи над фізичною картиною світу» говорив, що «построение физической науки происходит на основе измерений» [13, с. 569]. А інший відомий нідерландський фізик-експериментатор Г. Камерлінг-Оннес з нагоди вступу в 1882 р. на посаду професора Лейденського університету в своїй доповіді «Значення кількісних вимірювань у фізиці» сказав:

«Я твердо убежден в том, что целью физики являются количественные измерения и во всех физических экспериментах приоритет должен быть отдан установлению зависимостей, получаемых на основе измерений тех или иных явлений. Над входом в каждую физическую лабораторию я поместил бы надпись: «от измерения — к знанию» [14, с. 102].

Якщо подивитися на хронологічну таблицю фізики [1, с. 505–737], то мож-

на переконатися, що і в минулому, і нині майже всі основні результати в метрології одержано фізиками і в рамках фізики. Чимало з цих результатів, які прямо або побічно стосуються метрології, відзначено багатьма Нобелівськими преміями з фізики [1, с. 738–744]. Це ще одне підтвердження, що метрологія у наведеному вище сенсі — фізична наука. Тривалий час, наприклад астрофізика і космологія, вважалися розділами астрономії (це подекуди трапляється і нині), хоч вони завжди були ближчими до фізики. Так, монографія відомого американського фізика і космолога Ф. Піблса називалася вже «Фізична космологія» (1975).

В метрології як розділі фізики можна виділити теоретичну та експериментальну. Ці напрями розвиваються в основному в тих країнах, які мають сучасну експериментальну базу і належне кадрове забезпечення для досягнення високої точності у вимірюваннях (метрологічні центри на кшталт Інституту науки і технології в США, Німецького фізико-технічного інституту, Всеросійського науково-дослідного інституту оптико-фізичних досліджень).

Щодо метрології у вузькому значенні, то її доцільно визначити як технічну дисципліну, що займається створенням еталонів і зразкових вимірювальних засобів та їх перевіркою [5]. Еталон — це міра або вимірювальний пристрій, який використовують для відтворення, зберігання та передачі одиниць вимірювання якихось величин. Цю метрологію краще назвати прикладною, вона ближче до початкового поняття метрології як вчення про міри (від грецької метр — міра і логос — вчення) і саме це визначення (а також у нашій інтерпретації, наведеної вище) дістало значного поширення. Адже в більшості країн створено широку мережу метрологічних установ для вирішення завдань саме прикладної метрології, в якій працює значна кількість власне метрологів.

Розрізняють ще *законодавчу метрологію*, яка забезпечує і контролює єдність вимірювань та їх засобів і слугує прикладній метрології.

При розгляді сучасної метрології слідуватиме дефініції, даній нами вище. Відповідно до неї, в структурі метрології можна виділити такі складові: вимірювання фізичних величин, одиниці їх вимірювання та їх системи, фундаментальні фізичні константи та еталони. Перші три складові лежать в основі теоретичної та експериментальної метрології, в т.ч. квантової, четверта складова є основою прикладної метрології.

Як і фізика сучасна метрологія з часом набувала квантових рис. Тому так звана квантова метрологія розглядає вимірювання з використанням квантових явищ і розробляє квантові еталони [15].

Вимірювання. Це процес, результатом якого є одержання значення вимірюваної фізичної величини за допомогою вимірювальних засобів. Вимірювання дає змогу порівнювати теоретичні результати з експериментальними даними і є основним і найдавнішим методом пізнання навколишнього світу. Однак одержаний результат внаслідок вимірювання в принципі не може бути адекватним істинному значенню вимірюваної величини. Тому оцінюють похибку вимірювання, його точність. Саме підвищення точності вимірювань є одне з магістральних напрямків сучасної фізики. Наприклад, нині точність цезієвого атомного годинника становить 10^{-15} .

«В нашем очень сложном и постоянно меняющимся мире важно быть уверенным в том, что ряд физических величин можно измерить и предсказать с высокой точностью, — говорил у своїй Нобелівській лекції «Страсть к точности» 8 грудня 2005 р. відомий німецький фізик Т. Хьонш.— Высокоточные измерения всегда привлекали меня как одна из

самых красивых сторон физики. Появление все более совершенных инструментов для измерений позволяет заглянуть в неизведанные области. Не раз бывало так, что казавшиеся незначительными расхождением между результатами измерений и теоретическими предсказаниями приводили к крупным открытиям в фундаментальной науке. Само рождение современной науки тесно связано с искусством точных измерений» [16, с. 1368].

Для процесу фізичного пізнання завжди була характерною тенденція досліджувати явища у все менших просторово-часових масштабах у мікросвіті. Це була генеральна лінія фізики. При цьому щоразу у ньому відкривалися нові процеси, нові специфічні закономірності. У ньому і проблема точності вимірювань виглядає інакше, ніж у класичній фізиці.

Відповідно до принципу невизначеності Гейзенберга (1927), тут (у квантовій механіці) не можна одночасно з однаковою точністю виміряти, наприклад координату та імпульс частинки, тобто виміряти точно її координату, не спотворивши при цьому значення її імпульсу: $\Delta p \Delta x \geq \hbar$ (співвідношення невизначеностей). Тут Δp — неточність у визначенні імпульсу частинки, Δx — невизначеність в її координаті, $\hbar = \hbar / 2\pi$ — квант дії [17, с. 651]. Звідси випливає, що точність у вимірюванні Δp та Δx визначається сталою \hbar , яка обмежує точність при вимірюваннях мікрооб'єктів. Інакше кажучи, співвідношення невизначеностей обмежує застосування до мікрочастинок класичних понять та уявлень і описання їхнього стану в термінах класичної механіки взагалі втрачає будь-який сенс.

До того ж тут на спостереження, на процес вимірювання, впливають умови досліду і самий вимірювальний прилад, тобто виникає необхідність враховувати матеріальний характер акту спостереження, оскільки на мікрорівні спосо-

би спостереження впливають на самий процес на відміну класичного описання «самого по собі». Виникає проблема взаємодії об'єкта вимірювання і суб'єкта, або вимірювального приладу.

Одиниці фізичних величин та їх системи. Під ними розуміють числові значення конкретних фізичних величин (наприклад, довжини, маси, часу, сили струму, електричного опору та заряду тощо), рівні одиниці [18]. Одержуються внаслідок вимірювань, тому правильніше сказати — одиниці вимірювання фізичних величин (характеристик).

Як відомо, спочатку (у період донаукової метрології) виникли одиниці (міри) для вимірювання довжини, площі, маси, об'єму, часу (див. таблицю в додатках). У подальшому, з розвитком торгівлі, техніки, науки, кількість одиниць вимірюваних фізичних величин зростала. До того ж у різних країнах і навіть в межах самих країн використовувані одиниці вимірювань не збігалися. Тому на часі постала необхідність в їх уніфікації та систематизації, тобто утворення систем одиниць як сукупностей одиниць деяких фізичних величин (основних і похідних).

Вже наприкінці XVIII ст. у Франції введено метричну систему мір, яка згодом поширилася також в інших країнах, і на основі якої було розроблено міжнародні уніфіковані одиниці довжини і маси та низку інших метричних систем одиниць вимірювання фізичних величин для використання в науці й техніці. Так, у 1791 р. за одиницю довжини прийнято одну сорокамільйонну частку Паризького меридіана, названу в 1795 р. метром, цього ж року запроваджено і метричну систему мір, а в 1799 р. вже виготовлено перший еталон метра у вигляді платино-іридієвого бруска, довжина між двома нанесеними на нього штрихами саме і дорівнює одному метру. Цей еталон метра зберігався в Міжнародному бюро мір

Міжнародна система одиниць СІ [6, т. 3]

Величина	Наименование единицы	Обозначения	
		международ.	русские
Основные единицы			
Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Время	секунда	s	с
Сила электр. тока	ампер	A	А
Термодинамич. температура	кельвин	K	К
Сила света	кандела	cd	кд
Количество вещества	моль	mol	моль
Дополнительные единицы			
Плоский угол	радиан	rad	рад
Телесный угол	стерадиан	sr	ср
Производные единицы			
Площадь	кв. метр	m ²	м ²
Объём, вместимость	кубич. метр	m ³	м ³
Частота	герц	Hz	Гц
Скорость	метр в секунду	m/s	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	m/s ²	м/с ²
Угловая скорость	радиан в секунду	rad/s	рад/с
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	rad/s ²	рад/с ²
Плотность	килограмм на кубич. метр	kg/m ³	кг/м ³
Сила	ньютон	N	Н
Давление, механ. напряжение	паскаль	Pa	Па
Кинематич. вязкость	кв. метр на секунду	m ² /s	м ² /с
Динамич. вязкость	паскаль-секунда	Pa·s	Па·с
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	J	Дж
Мощность	ватт	W	Вт
Количество электричества	кулон	C	Кл
Электр. напряжение, электродвижущая сила	вольт	V	В
Напряжённость электр. поля	вольт на метр	V/m	В/м
Электр. сопротивление	ом	Ω	Ом
Электр. проводимость	сименс	S	См
Электр. ёмкость	фарад	F	Ф
Магнитный поток	вебер	Wb	Вб
Индуктивность	генри	H	Гн
Магнитная индукция	тесла	T	Тл
Напряжённость магнитного поля	ампер на метр	A/m	А/м
Магнитодвижущая сила	ампер	A	А
Энтропия	джоуль на кельвин	J/K	Дж/К
Теплоёмкость удельная	джоуль на килограмм-кельвин	J/(kg·K)	Дж/(кг·К)
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	W/(M·K)	Вт/(м·К)
Интенсивность излучения	ватт на стерадиан	W/sr	Вт/ср
Волновое число	единица на метр	m ⁻¹	м ⁻¹
Световой поток	люмен	lm	лм
Яркость	кандела на кв. метр	cd/m ²	кд/м ²
Освещённость	люкс	lx	лк

і ваги у Севрі (Франція) та використувався до 1960 р., коли було прийнято Міжнародну систему одиниць (СІ).

Також було введено і названо як основну одиницю маси кілограм. Еталон кілограма (прототип) являв собою платино-іридієву циліндричну гирю діа-

метром і висотою 39,17 мм, зберігався в тому ж бюро в Севрі.

В 1832 р. К. Гаусс запропонував так звану абсолютну систему одиниць, в якій основними одиницями були: одиницею довжини — 1 міліметр (мм), маси — 1 міліграм (мг), часу — 1 с. В 1881 р. на Пер-

шому міжнародному конгресі електриків у Парижі прийнято СГС систему одиниць, в якій основними були сантиметр (см), грам (г), секунда (с). В подальшому приймалися ще інші системи одиниць: електростатична СГС, або СГСЕ та електромагнітна СГС, або СГСМ з основними одиницями 1 см, 1 г, 1 с; технічна система одиниць (МКГСС) з основними одиницями 1 м, 1 кг сила, 1 с, МТС з 1 м, 1 г, 1 с; система Джорджі (1901) з основними одиницями 1 м, 1 кг, 1 с та 1 кулон (1 К).

Нарешті, 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і ваги прийняла Міжнародну систему одиниць (СІ), яка замінила всі існуючі на той час системи одиниць і є універсальною, оскільки включає одиниці вимірювання з різних галузей науки і техніки [19]. Вона включала сім основних одиниць, дві додаткові і понад 30 похідних, які виводяться з основних (табл.). В подальшому до неї вносилися зміни, уточнення, зокрема нові одиниці або нові визначення старих, пов'язані з відкриттями в експериментальній фізиці (ефект Джозефсона, квантовий ефект Холла та ін.) та розробкою нових методів і засобів вимірювань і, як наслідок, підвищенням точності вимірювань. Систему СІ прийняли до використання багато країн, зокрема в 1982 р. СРСР, в т.ч. Україна. Система СІ як практична система одиниць уніфікувала та спростила систему вимірювань.

Новим у системі СІ було визначення метра. Якщо з давнини доба була природною одиницею часу, то одиниці довжини — штучними і довільними. Тільки з 1791 р. почали використовувати стандарт довжини, заснований на геодезичних вимірювань, а з 1799 р. — як металевий стержень. В 1892 р. А. Майкельсон порівняв довжину еталонного метра з довжиною світлової хвилі, одержавши шляхом спектроскопічних вимірювань 1553164,13 довжин хвиль червоної лінії

кадмію (ще в 1890 р. він досяг високої когерентності цієї лінії). Так вперше було одержано перший природний стандарт одиниці довжини. В 1907 р. А. Майкельсона «за створення прецизійних оптичних інструментів і виконання з їх допомогою спектроскопічних і метрологічних досліджень» удостоєно Нобелівської премії з фізики. Однак щодо металевих еталонів довжини залишалася негативна проблема їх теплового розширення. Тому, коли 1899 р. французький фізик Ш. Гійом винайшов сплави сталі (інвар та елінвар) з малим коефіцієнтом теплового розширення, то їх почали використовувати при виготовленні прототипів метра (Нобелівська премія з фізики за 1920 р.). Металеві метри ще тривалий час слугували метрології.

Нарешті, в 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і ваги визначила міжнародний еталон довжини як «довжину, що дорівнює 1650763,73 довжини хвилі у вакуумі випромінювання, яке відповідає переходу між двома рівнями $2p_{10}$ і $5d_5$ атома ^{86}Kr » [19]. Це нове визначення метра і було взяти в систему СІ.

У 1960 р. винайдено лазер, невдовзі розроблено лазерну спектроскопію високої роздільної здатності, які революціонізували вимірювальну техніку. Було вирішено визначити стандарт довжини на основі швидкості світла як точної величини. У результаті численних вимірювань з використанням лазерної техніки швидкість світла c виявилася рівною $299\,792\,458\text{ мс}^{-1}$. Це значення c одержано кількома лабораторіями стандартів і вважається точним. При цьому одиниця часу — секунда визначається цезієвим еталоном часу (частоти) з точністю 10^{-14} . У результаті в 1983 р. XVII Генеральна конференція з мір і ваги визначила метр як «відстань, яку проходить у вакуумі плоска електромагнітна хвиля за $1/299\,792\,458$ частки секунди». Отже, після одержання точного значення швидкості світла оптич-

на частота, пов'язана з часом, стала слугувати і для визначення одиниці довжини, внаслідок чого було перевизначено метр і започатковано перевизначення низки одиниць в системі СІ. Так, в подальшому було запроваджено новий еталон вольта на основі ефекту Джозефсона, квантовий еталон опору (клітцинг) на основі квантового ефекту Холла, а також ампера, ватта тощо.

Щодо часу, то він являє собою величину, яку можна виміряти з величезною точністю. Наприкінці 80-х — на початку 90-х років ХХ ст. з використанням потужних лазерів і лазерної спектроскопії високої роздільної здатності створено чимало оптичних стандартів частоти, зокрема оптичні частотоміри, засновані на поділі оптичних частотних інтервалів. В 1999—2000 рр. вже згадуваний фізик Т. Хьонш і незалежно американський фізик Дж. Холл розробили метод оптичного частотного гребінця — когерентного ансамблю спектральних ліній, частоти яких визначаються простою формулою [16; 20]. Оптичний частотний гребінець формується фемто-секундним лазером з синхронізованими модами і, за висловом Т. Хьонша, є «своєрідною лінійкою в просторі частот для вимірювання великих оптичних частотних інтервалів» [16, с. 1375]. Як наслідок, було значно спрощено вимірювання оптичних частот і підвищено його точність, а отже, і визначення часу (Нобелівська премія з фізики за 2005 р.).

«Часовой механизм, который так долго искали ученые, теперь может быть реализован на основе частотных гребенок, формируемых фемтосекундными лазерами — сверхточного измерительного прибора, способного напрямую связывать и сравнивать оптические частоты с частотами радиоволнового диапазона без потери когерентности фаз, — говорил у своей Нобелівській лекції Т. Хьонш. — Лазерные частотные гребенки представляют собой мощный инструмент для новых проверок

фундаментальных физических законов... Фемтосекундные частотные гребенки уже успели стать стандартным инструментом высокоточной спектроскопии и оптической частотной метрологии...» [16, с. 1375].

Отже, зрослі можливості експериментальної фізики, нові методи і засоби, що застосовуються при вимірюваннях, відкрили і нові перспективи для розвитку новітньої, прецизійної метрології.

Фундаментальні фізичні константи. В фізиці є низка особливих величин, які необхідно знати з якомога високою точністю. Їх назвали фундаментальними фізичними сталими. Це універсальні коефіцієнти в математичних виразах (рівняннях) фундаментальних фізичних законів природи та властивостей матерії [21; 22].

«Почему важно знать численные значения фундаментальных постоянных с высокой точностью? — писали автори статті «Фундаментальні фізичні сталі». — Прежде всего потому, что количественные предсказания основных физических теорий зависят от численных значений постоянных, входящих в эти теории. Для получения точного количественного описания физического мира существенно располагать точным знанием этих численных значений. Точное определение фундаментальных постоянных в разного рода физических экспериментах, даже еще более важно по той причине, что оно позволяет проверить согласованность и правильность самих основных физических теорий» [21, с. 576].

Вони визначають точність, повноту та єдність наших уявлень про навколишній світ. Їх кількість може змінюватися внаслідок відкриття нових ефектів і створення нових узагальнюючих теорій. Нині фундаментальними фізичними константами є швидкість світла у вакуумі c , гравітаційна стала G , стала Планка h , заряд електрона e^- і його маса m_e , стала тонкої структури α , стала Больцмана k ,

число Авогадро N_A та ін. Фундаментальні фізичні константи є природними масштабами фізичних величин. Тут ми розглянемо лише кілька з них.

Швидкість світла c — швидкість поширення будь-яких електро-магнітних хвиль, в т.ч. світлових, є граничною швидкістю розповсюдження взагалі збудження і незалежною від вибору системи координат, тобто c інваріантна при переході від однієї систем відліку до іншої. Вперше виміряти c спробував в 1607 р. Г. Галілей, він же висловив думку про те, що вона є скінченною величиною. Перший, хто виміряв c на основі астрономічних спостережень, був датський астроном О. Рьомер. Він одержав для c значення 214 000 км/с. До нього Дж. Порта, Й. Кеплер, Р. Декарт та деякі інші вчені вважали її нескінченною. В 1849 р. французький фізик А. Фуко виміряв швидкість світла в лабораторії методом зубчастого колеса (313 274 км/с). В подальшому зусилля фізиків спрямовувалися на підвищення точності у її вимірюваннях. У 1973 р. прийнято значення $c=299\,792\,458$ км/с (з похибкою $\pm 1,2$ м/с). В 1905 р. А. Ейнштейн принцип сталості швидкості світла (висунутий в 1904 р. А. Пуанкаре) разом з принципом відносності поклав в основу створеної ним спеціальної теорії відносності. Після цього c набула справді фундаментального статусу, визначаючи область релятивістських ефектів (входить в рівняння електродинаміки та релятивістської динаміки).

Гравітаційна стала G — коефіцієнт у формулі закону всесвітнього тяжіння Ньютона, є універсальною константою природи, яка не змінюється з часом. В 1798 р. англійський вчений Г. Кавендіш за допомогою крутильних ваг уперше визначив G . Нині вона дорівнює $6,67428(67) \cdot 10^{-11}$ м³/кгс².

Стала Планка h (або квант дії $\hbar = \frac{h}{2\pi}$) запроваджена М. Планком в

1900 р. в теорії теплового випромінювання абсолютно чорного тіла, в якій вперше було використано його ідею квантування енергії, як коефіцієнт пропорційності у виразі $\varepsilon = h\nu$, де ε — енергія, ν — частота (дорівнював у М. Планка $6,55 \cdot 10^{27}$ ерг/с). Від цього бере початок квантова теорія і квантова фізика взагалі. В 1912–1914 рр. німецькі фізики Дж. Франк і Г. Герц експериментально підтвердили ідею квантування енергії випромінювання Планка (досліди Франка–Герца), отже, існування h . Нині $h = 6,62606896(63) \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Фундаментальною фізичною сталою є також заряд електрона e^- , або елементарний електричний заряд частинки, відкритої 1897 р. Дж. Томсоном (нині один з лептонів з першого покоління фундаментальних частинок). Заряд електрона є елементарним зарядом, який входить в мікроскопічні рівняння електродинаміки, зокрема в закон Кулона та у формулу для сталої тонкої структури $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c \approx 1/137$ (α характеризує інтенсивність електромагнітної взаємодії). В 1910–1914 рр. американський фізик Р. Міллікен серією експериментів довів дискретність електричного заряду і вперше з достатньою точністю методом масляних крапель виміряв заряд електрона — $(1,592 \pm 0,0017) \cdot 10^{-19}$ кулона (Нобелівська премія з фізики за 1923 р.).

До фундаментальних фізичних сталих належить і маса електрона m_e , яка в системі СІ 1960 р. дорівнює $9,1093897(54) \cdot 10^{-31}$ кг з поправкою 0,29. В одиницях маси електрона вимірюються маси інших елементарних частинок.

Стала Больцмана k є відношенням універсальної газової сталої R до числа Авогадро N_A , та входить до низки основних співвідношень статистичної фізики, зокрема в рівняння Больцмана $S = k \ln W$, яке пов'язує ентропію фізичної системи S з імовірністю її стану W . У Л. Больцмана зв'язок між S і W записувався так: $S \sim \ln W$. У 1906 р. М. Планк ввів у цей вираз коефіцієнт k ,

назвавши його сталою Больцмана. В результаті залежність $S \sim \ln W$ перетворилася на закон $S = k \ln W$, що визначає напрямок протікання процесів у замкненій термодинамічній системі, — закон зростання ентропії, яка, як згодом з'ясувалося, є показником еволюції системи.

Найбільш точні значення фундаментальних фізичних констант отримують в результаті прецизійних вимірювань, з використанням нових методів, що є одним з найважливіших завдань метрології. Адже при цьому одержуються нові, достовірніші, експериментальні результати на користь фундаментальних теорій (або проти). Це необхідно і тому, що деякі вчені розглядають можливість повільної зміни фізичних констант з часом. І в цьому є рація. Так, згідно з законом Хаббла, швидкість віддалення від нас галактик пропорційна відстані до них $r: v = Hr$, тут H — коефіцієнт пропорційності, або стала Хаббла. Визначивши v і r з астрономічних спостережень, можна обчислити H . Закон Хаббла, встановлений на основі дослідів, свідчив про розширення нашого Всесвіту з сталою швидкістю, тобто був експериментальним доказом цього процесу. А величина, обернена H , є його тривалістю від моменту виникнення, тобто віком Всесвіту. Тому зусилля вчених від часу відкриття закону Хаббла було спрямовано на уточнення H . Але в 1998–1999 рр. за результатами спостережень за далекими надновими зорями зроблено висновок про прискорене розширення Всесвіту (Нобелівська премія з фізики за 2011 р.), тобто H не є сталою величиною. Правда значення цього факту полягало не тільки в тому, що спростувало незмінність в часі H , а головне, що стало доказом існування у Всесвіті «темної» енергії, яка є фактором, відповідальним за його прискорене розширення, і описується космологічною сталою Λ . В результаті виникла сучасна космологіч-

на модель розширювального Всесвіту — Λ CDM-модель. Отже, уточнення значень фундаментальних фізичних констант має непересічне значення як для самої метрології, так і для фізики в цілому, для підтвердження відкритих нею фундаментальних фізичних законів.

Адже копітке повторне визначення фундаментальних констант удосконаленими методами приводить, як правило, до кращого розуміння пов'язаних з ними явищ. Наприклад, вимірювання відношення e/h на основі ефекту Джексона невдовзі після його відкриття в 1962 р. мало велике значення для сучасної квантової електродинаміки, оскільки дало нове, точніше, значення сталої тонкої структури α , яка визначає інтенсивність електромагнітної взаємодії. А це, в свою чергу, привело до перегляду й інших фундаментальних сталих. Річ у тому, що лише кілька фундаментальних сталих можна виміряти безпосередньо з високою точністю. Комбінуючи їх визначають уточнені значення решти.

Взагалі ж значення якоїсь сталої величини визначають різними експериментальними методами, а потім проводять їх узгодження, наприклад, методом найменших квадратів, запропонованим ще в 1809 р. німецьким ученим К. Гауссом. В результаті одержують найкращі значення узгоджених фундаментальних фізичних сталих. Так, у 1986 р. американські фізики Р. Коен і Б. Тейлор здійснили таке узгодження та встановили нову систему фундаментальних фізичних констант (табл.) [23; 24].

«Разработка методов измерения высокой точности, особенно для определения значений фундаментальных постоянных,— писали автори вже цитованої нами статті,— вызывает прогресс всей физики в целом» [21, с. 594].

Фундаментальні фізичні константи дають змогу наблизитися і до істинної сис-

Фундаментальні фізичні сталі [6, т. 5]

Константа	Обозначение	Численное значение	Поправка	Константа	Обозначение	Численное значение	Поправка
Скорость света в вакууме	c	$299792458 \text{ мс}^{-1}$	точно	g -фактор электрона	g_e	$2,002319304386(20)$	$1 \cdot 10^{-5}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} = 1,2566370614 \times 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$	точно	Постоянная тонкой структуры:	α	$7,29735308(33) \cdot 10^{-3}$	0,045
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$	точно	обратная величина Ридберга	$1/\alpha$	$137,0359895(61)$	0,045
Гравитационная постоянная	G	$6,67259(85) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$	128	Постоянная Ридберга	R_∞	$10973731,534(13) \text{ м}^{-1}$	0,0012
Постоянная Планка	h	$6,6260755(40) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ или $4,1356692(12) \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$ или $1,05457266(63) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ или $6,5821220(20) \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}$	0,00 0,30 0,60	Радиус Бора	$R_\infty hc$	$2,1798741(13) \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$	0,60
Планковская единица массы	$m_p = (hc/G)^{1/2}$	$2,17671(14) \cdot 10^{-8} \text{ кг}$	64	Отношение Джексона	$R_\infty hc/e$	$13,6056981(40) \text{ эВ}$	0,30
Планковская единица длины	$l_p = h/m_p c$	$1,61605(10) \cdot 10^{-35} \text{ м}$	64	Квант магнитного потока	a_0	$0,529177249(24) \cdot 10^{-10} \text{ м}$	0,045
Планковская единица времени	$t_p = l_p/c$	$5,39056(34) \cdot 10^{-44} \text{ с}$	64	Масса протона	$2e/h$	$4,8359767(14) \cdot 10^{14} \text{ Гц} \cdot \text{В}^{-1}$	0,30
Элементарный электрический заряд	e	$1,60217733(49) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	0,30	Масса нейтрона	$\Phi_0 = h/2e$	$2,06783461(61) \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$	0,30
Масса электрона	m_e	$9,1093897(54) \cdot 10^{-31} \text{ кг}$	0,29	Постоянная Авогадро	m_p	$1,6726231(10) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	0,59
Отношение заряда электрона к массе	$-e/m_e$	$-1,75881962(53) \cdot 10^{11} \text{ Кл} \cdot \text{кг}^{-1}$	0,30	Постоянная Фарадея	m_n	$1,6749286(10) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	0,59
Классический радиус электрона	r_e	$2,81794092(38) \cdot 10^{-15} \text{ м}$	0,13	Молярная газовая постоянная	$N_A \cdot L$	$6,0221367(36) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$	0,59
Магнитный момент электрона	μ_e	$928,47701(31) \cdot 10^{-26} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$	0,34	Постоянная Больмана	F	$96485,309(29) \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$	0,30
Магнетон Бора	$\mu_B = e h/2m_e$	$9,2740154(31) \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$	0,33	Молярный объем (идеального газа при нормальных условиях)	R	$8,314510(70) \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	8,4
Ядерный магнетон	$\mu_N = e h/2m_p$	$5,0507866(17) \cdot 10^{-27} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$	0,34	Постоянная Больмана	k	$1,380658(12) \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$	8,5
				Постоянная Больмана	k/e	$8,617385(73) \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$	8,4
				Молярный объем (идеального газа при нормальных условиях)	V_m	$22,41410(19) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$	8,5
				Число Лошмидта	$n_0 = N_A/V_m$	$2,686763(23) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$	8,5
				Постоянная Стефана — Больмана	σ	$5,67051(19) \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$	
				Постоянная Вина	b	$2,897756(24) \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$	8,4

теми основних фізичних одиниць, заснованих на інваріантах. В 1899 р. М.Планк запропонував таку систему (першу спробу здійснив ірландський вчений Дж.Стоней).

В роботі 1899 р. «Природні одиниці вимірювання» М. Планк писав: «...Нетрудно себе представить, що в друге время, при изменившихся внешних обстоятельствах, любая из употребляемых до настоящего времени систем единиц частично или полностью утратила бы свое первоначальное естественное значение. В связи с этим представляло бы интерес заметить, что, используя обе постоянные a и v , появившиеся в выражении ... для энтропии излучения, мы получаем возможность установить единицы длины, массы, времени и температуры, которые не зависели бы от выбора каких-либо тел или веществ и обязательно сохраняли бы свое значение для всех времен и для всех

культур, в том числе и внеземных, и нечеловеческих, и которые поэтому можно было бы ввести в качестве «естественных единиц измерений». Для введения четырех единиц — длины, массы, времени и температуры — мы опираемся на обе упомянутые постоянные a и v , затем на величину скорости распространения света в вакууме c и на гравитационную постоянную f » [13, с. 232].

Тут М. Планк наводить значення цих чотирьох величин і робить такий висновок, що для вибору «природних одиниць» необхідно, щоб у новій системі мір кожна з чотирьох розглядуваних сталих дорівнювала одиниці. Тоді для одиниці довжини одержимо величину $\sqrt{\frac{bf}{c^3}} = 4,13 \cdot 10^{-33} \text{ см}$,

$$\text{маси} - \sqrt{\frac{bc}{f}} = 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$\text{часу} - \sqrt{\frac{bf}{c^5}} = 1,38 \cdot 10^{-43} \text{ с},$$

для одиниці температури —

$$a \sqrt{\frac{c^5}{bf}} = 3,50 \cdot 10^{32} \text{ С.}$$

«Эти единицы сохраняют свое естественное значение до тех пор,— зазначав М. Планк,— пока справедливы законы тяготения, оба начала термодинамики и пока остается неизменной скорость распространения света в вакууме» [13, с. 233].

В сучасній інтерпретації планківські одиниці наведені вище, є комбінаціями фундаментальних фізичних констант c , G , h і k і мають вигляд:

планківська довжина

$$l_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1,616252(81) \cdot 10^{-35} \text{ см;}$$

планківська маса

$$m_p = (\hbar c/G)^{1/2} = 2,17644(11) \cdot 10^{-8} \text{ г;}$$

планківський час

$$t_p = 1/k (\hbar G/c^5)^{1/2} = 5,39124(27) \cdot 10^{-44} \text{ с;}$$

планківська температура

$$T_p = 1/k (\hbar c^5/G)^{1/2} = 1,416785(71) \cdot 10^{32} \text{ К.}$$

Нині вони утворюють планківську систему одиниць, тобто природну систему одиниць фізичних величин на основі фундаментальних фізичних констант, яка використовується в теорії елементарних частинок (Великі об'єднання), космології та квантовій теорії гравітації.

Еталони. Встановлені в теорії одиниці вимірювання фізичних величин на практиці вимагають зберігання, відтворення

та передачі. Це досягається технічними засобами, які називаються еталонами одиниць цих величин. Вже з другої половини ХХ ст. зусилля фізиків-метрологів спрямовані на розробку і реалізацію еталонів фізичних величин з використанням квантових явищ, тобто квантових еталонів. Цим займається квантова метрологія [15; 17]. Так, створено квантові еталони довжини, часу, сили струму, електричної напруги опору, які включені до Міжнародної системи одиниці (СІ).

«Такое взаимопроникновение квантовой физики и метрологии стало горячей темой последнего времени, — говорил у своей Нобелевской лекции Дж. Холл.— Замечательные успехи метрологии вместе с достижениями космологии и астрономии поддерживают и мотивируют наше стремление разобраться, точны ли и неизменны во времени те величины, которыми мы пользуемся для описания физического мира» [20, с. 1355].

Отже, одним з основних завдань метрології є вимірювання, які приводять до еталонів основних одиниць, розроблених на основі фізичних констант. Саме створення еталонів і зразкових засобів вимірювань, повірка мір і цих засобів лежить в основі нормативної бази метрології, її метрологічних стандартів (прикладна метрологія).

1. Храмов Ю.О. Фізика. Історія фундаментальних ідей, теорій та відкриттів / Храмов Ю.О. — К. : Фенікс, 2012. — 816 с.

2. Гейзенберг В. Шаги за горизонт.— М.: Прогресс, 1987.

3. Ахиезер А.И. Развивающаяся физическая картина мира / Ахиезер А.И. — Харьков : ННЦХФТИ, 1998. — 338 с.

4. Литвинко А.С. Становлення статистичної фізики в Україні (30–40 рр. ХХ ст.).— К.: Фенікс, 2009.

5. Российская метрологическая энциклопедия. — СПб.: Лики России, 2001. — 840 с.

6. Физическая энциклопедия. — М. : Большая Российская энциклопедия, 1988–1998. — 5 т.

7. Бурдун Г.Д. Основы метрологии. — [3-е изд.] / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. — М. : Изд-во стандартов, 1985. — 256 с.

8. Новый политехнический словарь. — М. : Науч.изд. «Большая Российская энциклопедия». — 2000. — 672 с.

9. Енциклопедія Британіка : Режим доступу: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/378845/metrology>.

10. Величко О.М. Основи метрології, стандартизації та контролю якості / О. М. Величко, І.І. Дудич. — Ужгород : Видавничий центр УЖДУ, 1998. — 284 с.

11. *Лифиц И.М.* Стандартизация, метрология и сертификация / И.М. Лифиц. — [8-е изд., перераб. и доп.]. — М.: Юрайт-Издат, 2008. — 412 с.
12. *Цюцюра В.Д.* Метрологія та основи вимірювань / В.Д. Цюцюра, С.В. Цюцюра. — К.: Знання-Прес, 2003. — 180 с.
13. *Планк М.* Избранные труды / М. Планк. — М.: Наука, 1975. — 788 с.
14. *Храмов Ю.А.* Научные школы в физике. — К.: Наукова думка, 1987.
15. Квантовая метрология и фундаментальные константы: [сборник статей / пер. с англ.; под ред. Фаустова Р.Н. и др.]. — М.: Изд. Мир, 1981 — 368 с.
16. *Хэнш Т.* Страсть к точности (Нобелівська лекція з фізики 2005 р.) / Т. Хенш // УФН. — 2006. — № 176. — С. 1368–1380.
17. К 50-летию квантовой механики // УФН. — 1977. — Т. 122. — Вып. 4.
18. *Сена Л.А.* Единицы физических величин и их размерности / Л.А. Сена. — [3-е изд.]. — М.: Наука, 1988. — 336 с.
19. *Бурдун Г.Д.* XI Генеральная конференция по мерам и весам / Г.Д. Бурдун // Успехи физических наук : Совещания и конференции. — Т. LXXVI. — Вып. 2. — 1962. — С. 383–390.; Г.Д. Бурдун. Справочник по международной системе единиц.— М., 1980.— 3 вид.
20. *Холл Дж.* Определение и измерение оптических частот (Нобелівська лекція з фізики 2005 р.) / Дж. Холл // УФН. — 2006. — № 176. — С. 1353–1367.
21. *Тейлор Б.* Фундаментальные физические постоянные / Б. Тэйлор, Д. Лангенберг, У. Паркер // УФН. — 1971. — Т. 105. — С. 575–595.
22. *Томлин К.А.* Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах. — М.: Физматлит, 2006. — 368 с.
23. *Cohen E., Taylor B.* The 1986 adjustment of the fundamental physical constants // Rev. Mod. Phys., 1987, v. 59, p. 1121.
24. *Тейлор Б.* Фундаментальные константы и квантовая электродинамика / Б. Тэйлор, В. Паркер, Д. Лангенберг. — М.: Атомиздат, 1972. — 327 с.

Одержано 17.12.2012

О.Л. Храмова-Баранова

Метрология: предмет і задачі (новий вигляд)

В статтє вперше дан новий вигляд на метрологію. Она рассматривается в широком и узком значениях. В широком значении метрология — раздел физики, задачей которого являются измерения различных физических величин, разработка методов и средств измерения, обеспечивающих их повсеместное единство и соответствующую точность, образование единиц измерения физических величин и их систем, создание их эталонов, уточнение фундаментальных физических констант. В узком понимании метрология — техническая дисциплина, которая занимается созданием эталонов и образцовых измерительных средств и их проверкой (прикладная метрология).