

기본 물리 단위에 대한 고찰

강 동 식* · 박 규 은**

Review on the fundamental units in physics

Kang, Dong-Shik · Park, Kyu-Eun

Abstract

A fundamental standard has two principal characteristic: it is accessible and it is invariable.

In order to satisfy this condition, the fundamental standard has been required to change its former definition. The meter is now defined in terms of the speed of light in vacuum; the kilogram, the only SI unit still defined by a physical artifact, is the mass of the international prototype of the kilogram; and the second is defined in terms of the transition between the two hyperfine levels of the ground state of cesium-133. For the definition of the SI electrical units, the Ampere is replaced by the volt and the Ohm. The fundamental standards for the volt and the ohm have been based on the Josephson effect and quantum Hall effect respectively.

These new standards are introduced to improve the accessibility and invariance.

* 사범대학 과학교육과

** 사범대학 과학교육과

1. 서 론

물리법칙을 표현하는 양들은 명확한 정의를 요구하며, 이 중에서 많은 물리량은 보다 기본적인 양으로 표현되어진다. 여기서 기본적인 양이라 함은 매우 임의적인 표현으로서 여러 분야에서 달리 선택되어지고 있다.

역학분야에서는 많은 물리량들 중에서 길이, 질량, 시간을 기본량으로 하고, 전기역학 분야에서는 이들 외에 전류단위로써 암페어가 더해지고 나머지 물리량들을 이 기본량으로부터 유도해서 쓰고 있다.

따라서 이들 기본량(길이, 질량, 시간, 암페어)들에 대해 명확한 정의를 먼저 내리는게 순서이며 나머지 물리량들은 이들 기본량의 정의를 이용하여 나타내는 것이 편리하다.

이들 기본량들의 개념은 이미 익숙해져 있으므로 이 고찰에서는 제외하고 개념 이외의 명확한 정의를 위하여 필요한 “단위”에 대해서 재고해 보고자 한다.

여기에서 단위라 함은 기본량들에 표준을 부여하는 것으로서 다음과 같은 두 가지 조건을 만족시켜야 한다.¹⁾

첫째, 접근이 용이해야 한다. 이것은 기본량에 부여한 표준을 쉽게 복제해서 어느 나라에서나 쓸 수 있어야 하는 것을 의미하며, 또한 어떤 물리량을 정해진 표준량과 비교해서 쉽게 정할 수 있어야 함을 의미한다.

둘째, 불변이어야 한다. 즉 표준과 비교할 때마다 같은 값을 얻을 수 있어야 하며 이것은 곧 각 나라에서 기본 표준량을 쉽게 복제 또는 재현시킬 수 있어야 함을 뜻한다. 여기에서 반드시 요구되어지는 것은 복제 또는 재현과정이 되풀이되면서 원래의 기본 표준량과의 차이가 커지지 않도록 해야 하는데 이것은 과학기술이 발달함에 따라서 기본 표준량을 새로운 방법으로 재정의해서 쓰게 되는 이유이다. 길이의 경우 처음에는 표준미터원기라는 막대를 1 m로 정해 놓고 쓰다가 이제는 ⁸⁶Kr 원자에서 방출되는 빛의 1,650,763.73 파장을 1 m로 정의해서 쓰고 있다.

2. 길이, 질량, 시간

위에서 언급한 조건을 만족시키며 국제적으로 인정되는 단위체계를 만들기 위해 1889년에 국제도량형국(The International Bureau of Weights and Measures; 이하 약칭 IBWM)이 설치되었고, 여기에서 표1)과 같은 단위계가 채택되었다.¹⁾ 이 단위계를 SI 단위

표 1) SI 단위계

기본량		단위
길	이	m (미터)
질	량	kg (킬로그램)
시	간	S (초)
전	류	A (암페어)
온	도	°K (켈빈)
물질의	양	mol (몰)
광	도	cd (칸델라)

제라 하며 국제단위계의 기초가 되고 있다.

이 단위계는 그동안 여러 차례의 변화를 거치면서 보다 새로운 방법으로 정의되어지게 된다. 이것은 각 나라의 실험실에서 쉽게, 명확하게 재현 또는 복제시킬 수 있어야 한다는 조건에 부합되는 것이다. 이러한 과정에서 기본량으로서 전류 대신에 Volt 와 Ohm이 새로이 정의되어지게 된다.

이번 고찰에서는 SI 단위계들 중에서 역학단위계의 기본량인 길이, 질량, 시간과 새로이 1990년 1월부터 쓰게 되는 Volt 와 Ohm에 대한 최근의 정의를 소개하고자 한다.

1) 길 이

전기방전 속에서 Kr 동위원소 ^{86}Kr 원자의 $2P_{10} - 5d_5$ 준위 사이에서 방출되는 오랜 지 복사의 파장을 이용하여 정한다. 즉 진공 중에서 그러한 복사의 1,650,763.73 파장을 1m로 정의하고 있다. ^{86}Kr 원자는 어디에서나 쉽게 얻을 수 있고, 동일하기 때문에 두 가지 갖추어야 할 조건을 만족시키고 있다.

2) 질 량

질량에 대해서는 다른 기본량들처럼 어디에서나 쉽게 재현할 수 있는 정의가 없다. 질량의 SI 단위는 질량 1kg으로 정해진 백금-이리듐 원통으로서 파리 IBWM (도량형국)에 보관돼 있다. 따라서 각 나라에서는 이 표준원기의 복제품을 따로 만들어서 사용하고 있으며 특정한 시일이 경과한 다음 다시 이 표준원기와 비교해서 차이를 조정하고 있다.

원자질량으로 사용되고 있는 ^{12}C 의 질량을 12 원자질량으로 하는 표준은 SI단위가 아니다. 이처럼 표준원기의 질량과 비교해서 너무 작을 경우나 클 경우는 따로이 2차 표준을 정하든지 아니면 다른 방법으로 질량을 정하고 있다.

3) 시 간

일정하게 반복되는 현상을 시간의 척도로 삼을 수 있다. 예를 들면 진자의 주기, 반복되는 낮과 밤, 지구의 공전주기 등등이다.

SI 시간단위는 1태양년의 $1/31,556,925.9747$ 을 1 초로 정하고 있다. 하지만 이 정의는 측정에 몇 년씩 걸리기 때문에 많은 불편이 따른다. 원자의 주기적인 진동을 이용하고자 하는 의도는 이런 점을 없애고 어디에서나 쉽게 시간을 정의할 수 있도록 하자는 데 있다.

지금 사용되고 있는 것은 ^{133}Cs (세슘) 원자의 주기진동을 이용한 세슘원자 시계다. 이것은 ^{133}Cs 의 주기의 $9,192,631,770$ 을 1 초로서 정한 것이다.

3. 전압 (Volt) 과 저항 (Ohm)

SI 전류 단위는 다음과 같이 정해진다.

단면적이 무시할 수 있을 정도로 작은 “무한히” 긴 직선도선 (도체) 을 진공중에 1 m 만큼 떨어지게 나란히 놓았을 때 단위 길이당 $2 \times 10^{-7}\text{ N}$ (Newton)의 힘이 작용할 때 도선에 흐르는 일정한 전류를 1 A 라 한다. 이 때 사용되어지는 상수 μ_0 (진공의 투자율)의 값은 정확하게 $4\pi \times 10^{-7}\text{ N/A}^2$ 이다.

하지만 이런 정의대로는 실험실에서 1 A 를 정확히 재현시킬 수가 없다. “무한히” 긴 단면적이 없는 도선을 만들 수 없기 때문이다.

이러한 난점을 없애기 위해 1990년 1월부터는 Josephson 효과와 양자 Hall 효과에 근거한 Volt 와 Ohm을 기본단위로 사용하기로 국제적 협약이 이루어졌다.²⁾

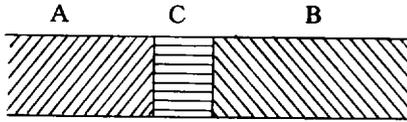
Josephson 효과와 양자 Hall 효과는 최근의 초전도 기술의 발전에 힘입어 어느 실험실에서나 손쉽게 관측할 수 있으며 따라서 이러한 효과에 기초한 Volt 와 Ohm의 정의는 단위가 갖추어야 할 두 가지 조건을 충분히 갖추고 있는 셈이다.

먼저 Josephson 효과에 대해서 기술하기로 한다.

두 개의 초전도체가 두께 1 mm 인 절연체와 그림1)과 같이 접합되었을 때 한 초전도체에서

절연체를 통하여 다른 전도체로 초전도전자쌍의 터널링 효과가 나타난다. 이 효과를 Josephson 효과라 하며 ac 그리고 dc Josephson 효과가 있다.³⁾

그림 1)



A, B : 초전도체, C : 절연체

여기에서 Volt 를 결정할 수 있는 것은 ac Josephson 효과이다. 그림 1)의 접합 양단에 전위 V를 가하면 접합 양단에 교류와 전류진동이 일어난다. 양자역학적으로 Schrödinger 파동 방정식을 조작함으로써 교류와 전류는 다음과 같이 주어짐을 알 수 있다.³⁾

$$I = I_0 \sin(\delta_0 - 2eVt/\hbar) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 I_0 , δ_0 는 초기전류와 초기위상차, $\hbar = h/2\pi$ 플랑크상수이다.

따라서 전류는 진동수 f

$$f = 2eV/h \dots\dots\dots (2)$$

로 진동한다. 이 관계식은 한 전자쌍이 장벽을 넘어갈 때 $hf = \hbar\omega = 2eV$ 만한 광자를 방출하거나 흡수함을 의미하며 광자의 에너지는 양자화 되었으므로 만약 n 개의 광자를 방출 또는 흡수하는 경우 식(2)는

$$nf = 2eV/h \dots\dots\dots (3)$$

가 된다. 여기서 n은 정수이다.

식(3)으로부터 전압 V는 양자화되었음을 알 수 있으며 이를 양자화된 Josephson 전위라 하며

$$V = nf/K_J, \quad K_J = 2e/h \dots\dots\dots (4)$$

로 쓸 수 있다.

K_J 는 Josephson 상수라 하며 이 상수값이 정확히 결정되어진다면 V 역시 정확히 정의 되어질 것이다.

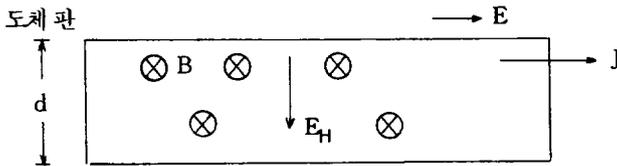
식(4)에서 SI 단위의 Volt (역학계에서 정해진 일률의 정의와 전기역학계에서 정의된 암페어 정의를 써서 구함)를 써서 전위를 측정하고, 진동수 f를 안다면 K_J 값을 정확히 계산할 수 있다.⁴⁾ 수많은 계산값을 가지고 최소자승법을 이용해서 계산한 K_J 값을 가지

고 이번에는 V 값을 결정하게 된다. 즉 접근이 용이하지 않은 SI Volt 단위를 사용해서 K_J 값을 정하고 그 다음 접근이 용이하며, 불변성인 Volt 를 정의할 수 있는 것이다.

다음으로 Ohm의 정의를 위한 양자 Hall 효과이다.

Hall 효과란 얇은 도체 판내에서 전하운반자의 농도와 부호를 결정해 주는 것을 말한다. 이 때 도체판에 걸어준 전기장에 수직하게 Hall 장이 형성되고 이 수직 한 방향으로 회로를 만들었을 때 이 회로를 통해 전류가 흐르게 된다(그림 2)³⁾

그림 2)



E, J ; 외부에서 가해준 전기장과 전류밀도

B ; 외부에서 도체판 앞면에서 뒤쪽으로 가해준 자기장

따라서 Hall 저항을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_H = E_H/J = V_H/I \dots\dots\dots (5)$$

여기에서 $V_H = E_H d$.

Laughlin에 의해 식(5)는 다시 다음과 같이 표현되어진다.⁵⁾

$$R_H = V_H/I = h/ne^2 = R_K/n, \quad R_K = h/e^2$$

여기서 R_K 는 양자 Hall 효과를 발견한 Klaus Von Klitzing의 이름을 따서 Klitzing 상수라 하며, n 이 정수값을 취하면 정수양자 Hall 효과, 분수값을 취하면 분수양자 Hall 효과라 한다.

식(4)와 (5)에서 Hall 전압 V_H 와 전류 I 의 SI 단위를 이용하면 Hall 저항 R_H 또는 $n=1$ 일 때 R_K 값을 결정할 수가 있다. 많은 계산값을 최소자승법을 이용해서 정리하면 R_K 값은 25813Ω 으로 주어진다.³⁾

재현시킬 수 있는 이 값을 이용해서 저항을 명확히 정의하고 관련된 다른 양들 ($V = IR$ 에서 $I = V/R$, etc)을 유도하는 데 사용하게 된다.

4. 결 론

기본 물리량들의 단위는 두 가지 조건을 만족시켜야 된다.

첫째, 접근이 용이해야 한다. 즉 표준과 쉽게 비교할 수 있어야 함을 의미한다. 둘째, 변하지 말아야 한다. 이 두 가지 조건을 만족시키기 위해 단위의 양적정의는 많은 변화를 겪게 된다. 빛의 파장을 이용한 길이 측정, 원자의 진동수에 의한 시간의 측정, 그리고 Josephson 효과와 양자 Hall 효과를 이용한 전위와 저항의 측정이다. 이중에서도 전위와 저항의 측정은 이전의 전류단위 암페어가 단위가 만족시켜야 할 두 가지 조건을 충족시키지 못했기 때문에 새롭게 채택되게 된 것이다.

이들 기본량들의 명확한 정의를 이용해서 기타 많은 물리량들을 계산 또는 측정할 수 있으며 이를 위해 1986년부터 1973년 이후에 계산 또는 측정된 값들을 최소자승법으로 처리하여 새롭게 조정해서 쓰고 있다 (표 2).⁶⁾

표 2)에 나타나 있는 값들과 1973년 이전에 써어진 여러 물리책들 속의 물리량들을 비교해 보면 차이가 있음을 알 수 있다 (표에서 ppm은 Parts per million의 약자임).

表 2) The 1986 recommended values of the fundamental physical constants.

Quantity	Symbol	Value	Units	Relative uncertainty ppm
Universal constants				
Speed of light in vacuum	c	299 792 458	m sec ⁻¹	exact
Permeability of vacuum	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	NA ⁻²	
		= 12.566 370 614 ...	10 ⁻⁷ NA ⁻²	exact
Permittivity of vacuum	ϵ_0	$1/\mu_0 c^2$		
		= 8.854 187 817 ...	10 ⁻¹² Fm ⁻¹	exact
Newtonian constant of gravitation	G	6.672 59(85)	10 ⁻¹¹ m ³ kg ⁻¹ sec ⁻²	128
Planck constant	h	6.626 075 5(40)	10 ⁻³⁴ J sec	0.60
		4.135 669 2(12)	10 ⁻¹⁵ eV sec	0.30
$h/2\pi$	h	1.054 572 66(63)	10 ⁻³⁴ J sec	0.60
		6.582 122 0(20)	10 ⁻¹⁶ eV sec	0.30
Planck mass, $(hc/G)^{\frac{1}{2}}$	m_p	2.176 71(14)	10 ⁻⁸ kg	64
		1.616 05(10)	10 ⁻³⁵ m	64
Planck length, $h/m_p c = (hc/c^3)^{\frac{1}{2}}$	l_p	5.390 56(34)	10 ⁻⁴⁴ sec	64
Planck time $l_p/c = (hc/c^5)^{\frac{1}{2}}$	t_p			
Electromagnetic constants				
Elementary charge	e	1.602 177 33(49)	10 ⁻¹⁹ C	0.30
		2.417 988 36(72)	10 ¹⁴ J ⁻¹	0.30
Magnetic flux quantum, $h/2e$	Φ_0	2.067 834 61(61)	10 ⁻¹⁵ Wb	0.30
		4.835 976 7(14)	10 ¹⁴ HzV ⁻¹	0.30
Josephson frequency-voltage quotient	$2e/h$			

Quantized Hall conductance	e^2/h	3.874 046 14(17)	10^{-5} S	0.045
Quantized Hall resistance, $h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	R_H	25 812.805 6(12)	Ω	0.045
Bohr magneton, $eh/2m_e$	μ_B	9.274 015 4(31)	10^{-24} JT^{-1}	0.34
in electron volts, $\mu_B/\{e\}$		5.788 382 63(52)	10^{-5} eVT^{-1}	0.089
in hertz, μ_B/h		1.399 624 18(42)	10^{10} HzT^{-1}	0.30
in wavenumbers, μ_B/hc		46.686 437(14)	$\text{m}^{-1}\text{T}^{-1}$	0.30
in kelvins, μ_B/k		0.671 709 9(57)	K T^{-1}	8.5
Nuclear magneton, $eh/2m_p$	μ_N	5.050 786 6(17)	10^{-27} JT^{-1}	0.34
in electron volts, $\mu_N/\{e\}$		3.152 451 66(28)	10^{-8} eVT^{-1}	0.089
in hertz, μ_N/h		7.622 591 4(23)	MHz T^{-1}	0.30
in wavenumbers, μ_N/hc		2.542 622 81(77)	$10^{-2} \text{ m}^{-1}\text{T}^{-1}$	0.30
in kelvins, μ_N/k		3.658 246(31)	10^{-4} KT^{-1}	8.5
Atomic constants				
Fine-structure constant, $\mu_0 c e^2/2h$	α	7.297 353 08(33)	10^{-3}	0.045
inverse fine-structure constant	α^{-1}	137.035 989 5(61)		0.045
Rydberg constant, $m_e \alpha^2/2h$	R_∞	10 973 731.534(13)	m^{-1}	0.0012
in hertz, $R_\infty c$		3.289 841 949 9(39)	10^{15} Hz	0.0012
in joules, $R_\infty hc$		2.179 874 1(13)	10^{-18} J	0.60
in eV, $R_\infty hc/\{e\}$		13.605 698 1(40)	eV	0.30
Bohr radius, $\alpha/4\pi R_\infty$	a_0	0.529 177 249(24)	10^{-10} m	0.045
Hartree energy, $e^2/4\pi\epsilon_0 a_0 = 2R_\infty hc$	E_h	4.359 748 2(26)	10^{-18} J	0.60
in eV, $E_h/\{e\}$		27.211 396 1(81)	eV	0.30
Quantum of circulation	$h/2m_e$	3.636 948 07(33)	$10^{-4} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$	0.089
	h/m_e	7.273 896 14(65)	$10^{-4} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$	0.089

기본 물리 상수의 표 9

Quantity	Symbol	Value	Units	Relative uncertainty ppm
Electron				
Mass	m_e	9.109 389 7(54)	10^{-31} kg	0.59
in electron volts, $m_e c^2 / (e)$		5.485 799 03(13)	10^{-4} U	0.023
Electron-muon mass ratio	m_e / m_μ	0.510 999 06(15)	MeV	0.30
Electron-proton mass ratio	m_e / m_p	4.836 332 18(71)	10^{-3}	0.15
Electron-deuteron mass ratio	m_e / m_D	5.446 170 13(11)	10^{-4}	0.020
Electron- α -particle mass ratio	m_e / m_α	2.724 437 07(6)	10^{-4}	0.020
Specific charge	$-e / m_e$	1.370 933 54(3)	10^{-4}	0.021
Molar mass	$M(e)$	-1.758 819 62(53)	10^{11} C kg $^{-1}$	0.30
Compton wavelength, $h / m_e c$	λ_c	5.485 799 03(13)	10^{-7} kg mol $^{-1}$	0.023
Classical radius, $\alpha^2 a_0$	r_e	2.426 310 58(22)	10^{-12} m	0.089
Thomson cross section, $(8\pi/3)r_e^2$	σ_e	3.861 593 23(35)	10^{-13} m	0.089
Magnetic moment	μ_e	2.817 940 92(38)	10^{-5} m	0.13
in Bohr magnetons	μ_e / μ_B	0.665 246 16(18)	10^{-28} m 2	0.27
in nuclear magnetons	μ_e / μ_N	928.477 01(31)	10^{-26} JT $^{-1}$	0.34
Magnetic moment anomaly, $\mu_e / \mu_B - 1$	a_e	1.001 159 652 193(10)		1×10^{-5}
g -factor, $2(1 + a_e)$	g_e	1.838 282 000(37)		0.020
Electron-muon magnetic moment ratio	μ_e / μ_μ	1.159 652 193(10)	10^{-3}	0.0086
Electron-proton magnetic moment ratio	μ_e / μ_p	2.002 319 304 386(20)		1×10^{-5}
		206.766 967(30)		0.15
		658.210 688 1(66)		0.010

Muon				
Mass	m_μ	1.883 532 7(11)	10^{-28} kg	0.61
in electron volts, $m_\mu c^2 / \{e\}$		0.113 428 913(17)	U	0.15
Muon-electron mass ratio	m_μ/m_e	105.658 389(34)	MeV	0.32
Molar mass	$M(\mu)$	206.768 262(30)	10^{-4} kg mol ⁻¹	0.15
Magnetic moment	μ_μ	1.134 289 13(17)	10^{-26} JT ⁻¹	0.33
in Bohr magnetons	μ_μ/μ_B	4.490 451 4(15)	10^{-3}	0.15
in nuclear magnetons	μ_μ/μ_N	4.841 970 97(71)		0.15
Magnetic moment anomaly, $[\mu_\mu / (eh/2m_\mu)] - 1$	a_μ	8.890 598 1(13)	10^{-3}	7.2
g -factor, $2(1+a_\mu)$	g_μ	1.165 923 0(84)		0.0084
Muon-proton magnetic moment ratio	μ_μ/μ_p	2.002 331 846(17)		0.15
		3.183 345 47(47)		
Proton				
Mass	m_p	1.672 623 1(10)	10^{-27} kg	0.59
in electron volts, $m_p c^2 / \{e\}$		1.007 276 470(12)	U	0.012
Proton-electron mass ratio	m_p/m_e	938.272 31(28)	MeV	0.30
Proton-muon mass ratio	m_p/m_μ	1 836.152 701(37)	10^7 Ckg ⁻¹	0.020
Specific charge	e/m_p	8.880 244 4(13)	10^{-3} kg mol ⁻¹	0.15
Molar mass	$M(p)$	9.578 830 9(29)	10^{-15} m	0.30
Compton wavelength, $h/m_p c$	λ_{cp}	1.007 276 470(12)	10^{-16} m	0.012
$\lambda_{cp}/2\pi$	λ_{cp}	1.321 410 02(12)	10^{-26} JT ⁻¹	0.089
Magnetic moment	μ_p	2.103 089 37(19)	10^{-3}	0.089
in Bohr magnetons	μ_p/μ_B	1.410 607 61(47)		0.34
in nuclear magnetons	μ_p/μ_N	1.521 032 202(15)		0.010
Diamagnetic shielding correction for protons(H ₂ O,		2.792 847 386(63)		0.023
spherical sample, 25°C), $1 - \mu_p/\mu_p$	σ_{H_2O}	25.689(15)	10^{-6}	-

Quantity	Symbol	Value	Units	Relative uncertainty ppm
Shielded proton moment (H_2O , spherical sample, 25°C)	μ_p	1.410 571 38(47)	$10^{-26} JT^{-1}$	0.34
in Bohr magnetons	μ_p/μ_B	1.520 993 129(17)	10^{-3}	0.011
in nuclear magnetons	μ_p/μ_N	2.792 775 642(64)		0.023
Gyromagnetic ratio	γ_p	26 752.212 8(81)	$10^4 \text{ sec}^{-1} T^{-1}$	0.30
	$\gamma_p/2\pi$	42.577 469(13)	MHz T^{-1}	0.30
uncorrected(H_2O , spherical sample, 25°C)	γ_p	26 751.525 5(81)	$10^4 \text{ sec}^{-1} T^{-1}$	0.30
	$\gamma_p/2\pi$	42.576 375(13)	MHz T^{-1}	0.30
Neutron				
Mass	m_n	1.674 928 6(10)	10^{-27} kg	0.59
		1.008 664 904(14)	U	0.014
in electron volts, $m_n c^2/\{e\}$		939.565 63(28)	MeV	0.30
Neutron-electron mass ratio	m_n/m_e	1 838.683 662(40)		0.022
Neutron-proton mass ratio	m_n/m_p	1.001 378 404(9)		0.009
Molar mass	$M(n)$	1.008 664 904(14)	$10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$	0.014
Compton wavelength, $h/m_n c$	λ_{cn}	1.319 591 10(12)	10^{-15} m	0.089
	$\lambda_{cn}/2\pi$	2.100 194 45(19)	10^{-16} m	0.089
Magnetic moment ^a	μ_n	0.966 237 07(40)	$10^{-26} JT^{-1}$	0.41
in Bohr magnetons	μ_n/μ_B	1.041 875 63(25)	10^{-3}	0.24
in nuclear magnetons	μ_n/μ_N	1.913 042 75(45)		0.24
Neutron-electron magnetic moment ratio	μ_n/μ_e	1.040 668 82(25)	10^{-3}	0.24
Neutron-proton magnetic moment ratio	μ_n/μ_p	0.684 979 34(16)		0.24

Deuteron				
Mass	m_D	3,343,586.0(20)	10^{-27} kg	0.59
in electron volts, $m_D c^2 / \{e\}$		2,013,553,214(24)	U	0.012
Deuteron-electron mass ratio	m_D / m_e	1,875,613,39(57)	MeV	0.30
Deuteron-proton mass ratio	m_D / m_p	3,670,483,014(75)		0.020
Molar mass	$M(D)$	1,999,007,496(6)		0.003
Magnetic moment ^a	μ_D	2,013,553,214(24)	10^{-3} kg mol ⁻¹	0.012
in Bohr magnetons	μ_D / μ_B	0,433,073,75(15)	10^{-26} JT ⁻¹	0.34
in nuclear magnetons	μ_D / μ_N	0,466,975,447,9(91)	10^{-3}	0.019
Deuteron-electron magnetic moment ratio	μ_D / μ_e	0,857,438,230(24)		0.028
Deuteron-proton magnetic moment ratio	μ_D / μ_p	0,466,434,546,0(91)	10^{-3}	0.019
		0,307,012,203,5(51)		0.017
Physicochemical constants				
Avogadro constant	N_A, L	6,022,136,7(36)	10^{23} mol ⁻¹	0.59
Atomic mass constant, $m(C^{12})/12$	m_u	1,660,540,2(10)	10^{-27} kg	0.59
in electron volts, $m_u c^2 / \{e\}$		931,494,32(28)	MeV	0.30
Faraday constant	F	96,485,309(29)	C mol ⁻¹	0.30
Molar Planck constant	$N_A h$	3,990,313,23(36)	10^{-10} J sec mol ⁻¹	0.089
	$N_A h c$	0,119,626,58(11)	J m mol ⁻¹	0.089
Molar gas constant	R	8,314,510(70)	J mol ⁻¹ K ⁻¹	8.4
Boltzmann constant, R/N_A	k	1,380,658(12)	10^{-23} JK ⁻¹	8.5
in electron volts, $k / \{e\}$		8,617,385(73)	10^{-5} eV K ⁻¹	8.4
in hertz, k / h		2,083,674(18)	10^{10} Hz K ⁻¹	8.4
in wavenumbers, k / hc		69,503,87(59)	m ⁻¹ K ⁻¹	8.4
Molar volume(ideal gas), RT/p (at 273.15K, 101,325 Pa)	V_m	22,414,10(19)	cm ³ mol ⁻¹	8.4
Loschmidt constant, N_A/V_m	n_0	2,686,763(23)	10^{25} m ⁻³	8.5
Stefan-Boltzmann constant, $(\pi^2/60)k^4/h^3c^2$	σ	5,670,51(19)	10^{-8} Wm ⁻² K ⁻⁴	34

Quantity	Symbol	Value	Units	Relative uncertainty ppm
First radiation constant, $2\pi^2hc^2$	c_1	3.741 774 9(22)	10^{-18} Wm^2	0.60
Second radiation constant, hc/k	c_2	0.014 387 69(12)	mK	8.4
Wien displacement law constant, $\lambda_{\max} T = c_2/4.965 114 23 \dots$	b	2.897 756(24)	10^{-3} mK	8.4
Conversion factors and units				
Electron volt, $(e/C)J = \{e\}J$	eV	1.602 177 33(49)	10^{-19} J	0.30
Atomic mass unit (unified), $m_0 = m(\text{C}^{12})/12$	U	1.660 540 2(10)	10^{-27} kg	0.59
Standard atmosphere	atm	101 325	Pa	exact
Standard acceleration of gravity	g_n	9.806 65	m sec^{-2}	exact
'As-maintained' electrical units				
BIPM-maintained ohm, Ω_{69-81} as of 1 Jan 1985	Ω_{69-81}	$1 - 1.563(50) \times 10^{-6}$ $= 0.999 998 437(50)$	Ω	0.050
Drift rate of Ω_{69-81}	$d\Omega_{69-81}/dt$	$-0.056 6(15)$	$\mu\Omega/\text{yr}$	—
BIPM-maintained volt, 483 594 GHz($h/2e$)	V_{76-81}	$1 - 7.59(30) \times 10^{-6}$ $= 0.999 992 41(30)$	V	0.30
BIPM maintained ampere, $A_{69-81} = V_{76-81} / \Omega_{69-81}$	A_{69-81}	$1 - 6.03(30) \times 10^{-6}$ $= 0.999 993 97(30)$	A	0.30
X-ray standards				
Cu x-unit: $\lambda(\text{CuK}\alpha_1) = 1537.400 \text{ xu}$	$xu(\text{CuK}\alpha_1)$	1.002 077 89(70)	10^{-13} m	0.70
Mo x-unit: $\lambda(\text{MoK}\alpha_1) = 707.831 \text{ xu}$	$xu(\text{MoK}\alpha_1)$	1.002 099 38(45)	10^{-13} m	0.45
\AA^* : $\lambda(\text{WK}\alpha_1) = 0.209 100 \text{ \AA}^*$	\AA^*	1.000 014 81(92)	10^{-10} m	0.92
Lattice spacing of Si (in vacuum, 22.5°C) ^b	a	0.543 101 96(11)	nm	0.21
$d_{220} = a/\sqrt{3}$	d_{220}	0.192 015 540(40)	nm	0.21
Molar volume of Si, $M(\text{Si})/\rho(\text{Si}) = N_A a^3/B$	$V_m(\text{Si})$	12.058 817 9(89)	$\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}$	0.74

참 고 문 헌

- [1] D.Halliday and R.Resnick, *Fundamentals of Physics*, 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] B.N.Taylor, *Physics Today*, August 23 (1989).
- [3] C.Kittel, *Solid Physics*, 6th ed, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] W.H. Parker, B.N.Taylor, and D.N.Langenberg, *Phys. Rev. Letters* 18, 287(1967).
- [5] R.B.Laughlin, *Phys. Rev. B* 23, 5632 (1981).
- [6] E.R.Cohen and B.N.Taylor, *Physics Today*, August 8 (1989).