

基本物理常数与物理学史

杨建平 李兴鳌

(湖北民族学院理学院 恩施 445000)

基本物理常数的确立及精密测定与物理学的发展起着相互促进的作用。物理常数总是伴随着物理学基本定律的发现而确立的;而这些常数的测定既是对物理规律的有力验证,又使应用物理公式作许多数值计算成为可能。物理学的新成果常为提高物理常数的精度提供条件。而高精度的测量又可能为新的科学发现准备好基础。精密测定的基本物理常数又可作为单位制和计量单位的基准。因此,基本物理常数的精密测量就成了现代物理学与计量学的结合点。

1. 基本物理常数与物理规律

基本物理常数是指自然界中的一些普遍适用的常数。它们不随时间、地点或环境条件的影响而变化。目前由国际科学技术数据委员会(简称 CODATA)推荐的基本物理化学常数及其组合量已达 175 个,刊登在推荐值的全表中。在最常用的简表中,包含 18 个常数和两个组合量,还有两个常用的非国际单位制的转换因子,共计 22 个值。基本物理常数的发现和测量,在物理学的发展中起了很大的作用。纵观近代物理学史可以看到,一些重大物理现象的发现和物理新理论、新规律的创立均与基本物理常数有着密切的关系。例如,光以确定的有限速度传播,这一发现曾对光的电磁波理论起到了积极作用。从电磁波理论可以根据介电常数 ϵ_0 和磁导率 μ_0 计算光速 c , $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 。计算值和理论值吻合得相当好,这对光的电磁理论是一个重要论据。当年麦克斯韦就是这样论证自己的理论的。电子的发现是通过测定电子的荷质比 e/m 而确定的。J.J. 汤姆孙和他的学生用不同的阴极和不同的气体做阴极射线实验,结果都能得到荷质比为同一数量级 e/m 10^{11} 库仑/千克。由此证明各种条件下得到的都是同样的带电粒子流,与电极材料无关,与气体成分也无关,从而发现了“电子”;普朗克建立量子论的同时,出现了普朗克常数 h 。普朗克 1900 年底用一个能量不连续的谐振子假设,按照玻尔兹曼的统计方法,推出了黑体辐射公式,普朗克认为黑体辐射的能量是一份一份的,这一份一份的能量一定与频率成正比, $E = h\nu$, 比例系数 h 是一个常数,这就是后来人们称为的普朗克常数。普朗克当时根据黑体辐射

的测量数据,计算出 h 的值为 $6.65 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,在数量级上至今还是正确的;狭义相对论的出发点之一是真空中光速 c 不变,……等等。由此可见,基本物理常数出现于许多不同的物理现象之中,每一类物理现象的规律都同确定的物理常数相关。

基本物理常数是把物理学不同分支学科联系在一起的重要环节。人们常常认为物理学的所有各分支虽有明显不同,但实际上却是相互密切地联系着的,仔细研究从各个不同领域的实验所得到的基本物理常数值,可以给我们提供关于物理学基本理论的总体一致性和正确性的重要知识。

2. 基本物理常数与物理实验

不断地以更高的准确度测量基本物理常数尤为重要,它不仅能给我们提供一组更一致的可使用的常数值,它还可以引导我们发现对自然的物理描述中前所未知的不一致性,或消除已知的不一致性,还可能诞生新的实验技术。基本物理常数的测定在物理学的发展史中占有极其重要的地位。例如,牛顿引力常数的数值,自牛顿发现万有引力定律以来,一直是人们力求测出和测准的对象。这个常数究竟是不是常数?会不会随时间变化?到现在还是物理学界关心的问题。焦耳测热功当量历时三四十年,用了多种方法,得到了大量的数据,为热力学第一定律的建立提供了确凿的依据。这个常数现在虽不列为基本常数,但它的历史意义是不可抹杀的。光速是测得最准的基本常数之一,也是最古老的物理常数之一。早在 1676 年,罗迈就得出了光速有限的结论,观测证实了他的预言,据此,惠更斯推算出光速约为 2×10^8 米/秒。1728 年布拉德雷根据恒星光行差求得 $c = 3.1 \times 10^8$ 米/秒。1849 年,斐索用旋转齿轮法求得 $c = 3.153 \times 10^8$ 米/秒。1862 年付科用旋转镜法测得空气中的光速为 $c = 2.98 \times 10^8$ 米/秒。1874 年考尔纽改进了斐索的旋转齿轮法测得 $c = 2.9999 \times 10^8$ 米/秒。迈克耳孙多次测量光速,从 1879 ~ 1927 年进行了几十年的测量,最后,他把光速测到了 $(2.99796 \pm 0.00004) \times 10^8$ 米/秒,而当今精确的光速值为 2.99792458×10^8 米/秒(1998 年推荐值),人们不会忘记迈克耳孙的功绩,他的著名的迈克耳孙 - 莫雷否定了以太的存在,现代物理知识

迈克耳孙干涉仪现在仍然是我们教学和科研的重要实验仪器。真空中的光速可测得这样准,以至于现在被人们定为精确值,并由此定义长度单位——米,从而把时间单位和长度单位统一在光速这样一个基本物理常数上。电子发现于1897年,当年J.J. 汤姆孙并没有能够直接测到电子电荷。后来用云雾法也只能确定其数量级,直到1909年密立根用油滴仪才得到精确结果。密立根油滴实验至今仍是人们研究的重要实验。普朗克常数起初是用光谱、X射线和电子衍射等不同方法测定的。通过如下关系可以确定普朗克常数:测量X射线连续谱的极限得 h/ν ; 电子衍射方法求德布罗意波长,得 $h/\sqrt{2emV}$; 从谱线精细结构常数,得 $e^2/(hc)$; 从光谱的里德伯常数得 $me^4/(h^3c)$ 。1962年约瑟夫森效应发现后,从约瑟夫森频率 ν 可以求普朗克常数 $h = 2eV/\nu$, 其中 V 为加在两弱耦合的超导体之间的直流电压。约瑟夫森常数 K_J 和冯克利青常数 R_K 分别伴随着约瑟夫森效应和量子化霍尔效应的发现而产生。从此也就确定了国际单位制(SI)中的电压和电阻复现标准。

3. 基本物理常数与单位制

物理量之间通过各种物理定律和有关的定义彼此建立联系,人们往往取其中的一些作为基本物理量,以它们的单位作为基本单位,形成配套的单位体系,其他的单位可以由此推出,这就是单位制。由于历史的原因,世界各国一直通行各种不同的单位体制,混乱复杂。不同行业采用的单位也不尽相同,这对经济交往和科技工作都十分不利。第二次世界大战后,出现了进一步加强国际合作的趋势,迫切要求改进计量单位和单位制的统一。1954年第十届国际计量大会决定将实用单位制定为六个基本单位,即米(长度)、千克(质量)、秒(时间)、安培(电流)、开尔文(温度)、坎德拉(发光强度)。1960年第十一届国际计量大会决定将上述6个基本单位为基础的单位制命名为国际单位制,并以SI表示。1971年第十四届国际计量大会增补了一个基本量和单位,这就是“物质的量”及其单位——摩尔,定义它为:摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与0.012千克碳-12的原子数相等。1975年国际计量法规定了这七个基本单位,其余的单位都可由这七个基本单位导出,是导出单位。这样,现行的以七个基本单位为基础的单位制就规定下来了。

有一些基本物理常数的定义和取值是与单位制

的形成过程和确定标准有关的。如真空中的光速 c 、电常数 ϵ_0 和磁常数 μ_0 、原子质量单位 u 、电子伏特 eV 等。电磁学中的单位和单位制几经变革,走过了一条曲折的道路。电磁量实际上可以由两个互不相容的方程系来描述。因为两个库仑定律都可以作为定义性方程,一个是静电学的库仑定律,一个是静磁学的库仑定律。于是出现了两种“绝对”电磁学单位制,即厘米—克—秒静电单位制(CGSE)和厘米—克—秒电磁单位制(CGSM)。在CGSE和CGSM两种单位制中,介电电容率 ϵ 和磁导率 μ 是两个相对应的物理量。在CGSE制中, ϵ 为无量纲的纯数,而 μ 有量纲;在CGSM制中则正好相反。为了解决绝对静电单位制和绝对电磁单位制的矛盾,高斯提出了混合单位制。其基本出发点是,所有的电学量都用CGSE单位,而所有的磁学量都用CGSM单位。于是在真空中取 $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$, 即 ϵ 和 μ 均为无量纲的纯数。对于同时包含有电学量和磁学量的公式,则需增加与真空中的光速 c 有关的系数。

国际单位制中,将两个库仑定律 $F_e = k q_1 q_2 / r^2$ 和 $F_m = k_m Q_m Q_m / r^2$ 的比例系数分别表示为 $k = 1/4\epsilon_0$ 和 $k_m = \mu_0/4$ 。4 的引入是为了电磁学公式的简洁。这样 $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1} = 4 \times 10^{-7} \text{NA}^{-2} = 12.566370614 \dots \times 10^{-7} \text{NA}^{-2}$ 。在基本常数表中, μ_0 改称为磁常数,改称为电常数的 ϵ_0 与 μ_0 的关系为 $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$, 式中 c 为真空中光速。 ϵ_0 因而也是一个精确量,可表示为 $\epsilon_0 = 1/(4 \times 10^{-7} \text{NA}^{-2} c^2) = 8.854187817 \dots \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$ 。由上两个常数 μ_0 和 ϵ_0 导出的另一个常数称为真空中特征阻抗 Z_0 , 它与 μ_0 和 ϵ_0 的关系为:

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = \mu_0 c = 376.730313461 \dots$$

它以阻抗 Z_0 为单位,其平方是磁常数与电常数之比。由于 μ_0 和 c 为约定常数,它们的数值是精确的,不确定度为零。

电子伏特 eV 和原子质量单位 u 是两个非国际单位制的转换因子。 $1eV = 1.602176462(63) \times 10^{-19} \text{J}$ 。 $1u = 1.66053873(13) \times 10^{-27} \text{kg}$ 。

由上所述,基本物理常数在物理学的发展史上起着极其重要的作用。不论是理论的建立,还是实验的验证,甚至到单位制的确立都与基本物理常数有关。因此,对基本物理常数的研究将有助于对物理学的过去、现在和将来的认识。