

# 举足轻重的物理常数

郭奕玲

物理常数在科学技术各个部分都有重要意义。特别是物理学,物理学研究的是“物”及其运动,就要了解和观测“物”在其运动中的变革,并把握其变革的数量关系,于是就会遇到许多与物性有关的物理量,例如:温度、压强、比热、导热系数、电阻率、电阻温度系数、折射率等等。量与量之间有某种函数关系,在函数关系中必然会出现一系列常数,以表征物质的固有特性,这就叫物质常数。

还有一类常数与具体的物质特性无关,是普适的,例如光在真空中的速度 $c$ 、基本电荷量 $e$ 、普朗克常数 $h$ 、精细结构常数 $\alpha$ 等等,人们称之为基本物理常数。这些常数出现在许多不同部门的物理问题中,通过物理学一系列定律和理论彼此密切联系,构成了物理学框架中不可缺少的一些关节点。

基本物理常数大多与原子物理学和粒子物理学有关,其数目可以列出三、四十个。随着物理学的领域向纵深发展,基本物理常数涉及的范围越来越广,数目越来越多,测量方法日新月异,结果也越来越精确。一个物理量往往可以用几个不同的方法测定,这样就发生了数据之间是否协调的问题。如果不协调,就会阻碍科学成果的交流,产生互相矛盾的结果,引起严重后果。

1929年,伯奇(R. T. Birge)发表了著名的论文:《普通物理常数的可几值》,系统地对基本物理常数进行分析评定,对不同来源的数据进行对比,加以校正,求其最可几值,由此向公众提供了一套可靠的基本物理常数,深受科技界的欢迎。尽管伯奇1929年的工作尚属初步,但他开创了用最小二乘法平差(即调整,

adjustment)求得常数的最佳值,为以后的常数评定工作奠定了基础。后来,他和另外一些学者继续改善评定工作,不断整理和发表基本物理常数的推荐值,形成了一门独特的科学事业。

基本物理常数的评定工作受到科技界的普遍重视,因为一套举世公认的基本物理常数必然反映了当代物理理论和科学实验的新进展。也反映了技术领域的新成果,从数据的角度对科学技术的进步作出总结,也为科学技术工作提供了科学的、统一的、精确的数据资料,对科学技术的发展有重要的促进作用。有关基本物理常数的工作,从测量到评定,从实验到理论,在现代和当代物理学中占有重要地位。

基本物理常数的评定工作,主要包含以下内容:

1. 检验实验数据的合理性,澄清理论和实验之间的不协调,对比各种不同方法所得结果,作出科学的评价;
2. 保证实验数据的可靠性,剔除或修正有疑问的数据;
3. 对选取的数据加权后进行平差处理,求出最可几值;
4. 经过计算,推荐一套自洽的基本常数,并分别给出不确定度。

最近一次平差作于1986年,由柯恩和泰勒主持,他们经过五年的工作,对大量数据进行研究和分析,从中间选出十五个物理量作为辅助常数,例如真空中的光速 $c$ 、质子、电子质量比 $m_p/m_e$ 、里德伯常数 $R_\infty$ 、电子的 $g$ 因子等等,这些辅助常数不参加平差,不确定度均不大于0.02ppm(ppm表示百万分之一)。另选38

中,泡利写道:“我今天首先应告诉你的是,从哥本哈根得到的最近的报告,使我相信反对托玛斯是错误的。我现在相信他的相对论性考虑是完全正确的,无可置疑,精细结构的问题现在可以被认为得到真正满意的解释。”

泡利在接受了电子自旋理论以后,立即试图将电子自旋与量子力学更深刻的特征结合起来。在这方面,玻尔的结论一定使泡利感到满意,玻尔说:“电子自旋不能用经典方法可以描述的实验来测定(例如在外磁场中电子束的偏转)。因此,我们必须考虑电子的量子力学本质。”

关于自旋的本质,本文不再探讨下去。最后应该

指出的是,总的说来,泡利并没有错。1940年他进一步证明自旋是出于量子场论的需要,正如荷兰著名科学史家范德瓦登(Van de Waerden)明确指出的那样:“自旋是不可能由经典力学的模型来描述的,因为这样一个模型永远也不可能导出旋转群的一个双值表示。”而且对自旋两种状态想作更进一步描述,直到今天仍然是不可能的。但另一方面,电子自旋概念的提出,的确又如玻尔当然所说,解决了当时原子理论中大部分令人头痛的难题,在量子物理几乎“被逼进死胡同”的时刻,拯救了量子物理。这真是有点令人不可思议!

可作为随机输入数据,以五个量  $K_0$  (欧姆比值)、 $K_V$  (伏特比值)、 $d_{120}$  (晶格间距)、 $\alpha$  (精细结构常数)、 $\mu_p/\mu_B$  ( $\mu$  质子磁矩比)作为变量,经最小二乘法求出最佳值,再以这五个量作为中介输出,求出其他常数。为了选取最佳方案,他们比较了五种不同的计算方法,按不同的取舍方案进行运算,最后确定采用 22 个随机输入数据。

和 1973 年的推荐值相比,1986 年的新值有很大改进,现将常用的十二项列于表 1。

十三年的进展可以归结成如下几点:

1. 大多数基本常数的不确定度都下降了一个数量级,普遍达 1ppm 以下。最好的是电子  $g$  因子  $g_e$ , 达 0.00001ppm, 即  $10^{-11}$ ; 最差的仍是引力常数: 128 ppm, 但也推进了一位,幸好这个常数是独立的,与其它常数无关。

2. 光速  $c$  已定为精确值。

3. 里德伯常数进一步精确,这是由于激光光谱学的发展。

4. 阿佛加德罗常数的测定采用了新方法,结果大有改进。

5. 由于量子霍尔效应(克里青效应)的发现,精细结构常数  $\alpha$  值的测定向前跨进了一大步,电阻有了新的基准。

从六十年来基本物理常数的变迁可以看出发展的总趋势是:以自然基准代替实物基准;以微观量代替宏观量;以频率计量代替直接计量。1967 年由于频率计量的高度精确性和原子光谱学的深入发展,时间的单位——秒采用了与特定原子某两个特定能级间跃迁的辐射频率作为基准,规定为:“秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间”;1983 年,长度单位——米有了新的定义,规定为:“米是光在真空中在  $1/299792458$  秒的时间间隔内行程的长度。”这样,光

速  $c = 299792458$  米/秒就成了定义性常数,这个值就规定为精确值,于是长度单位变成了时间单位

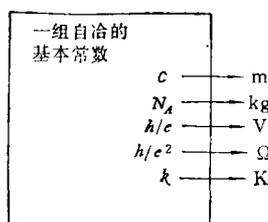


图 1 未来的单位制

和光速值的导出单位,统一在基本物理常数——真空中的光速这个关节点上。接下来会有什么新的定义?会不会是电压单位——伏?抑或是电阻单位——欧姆?有没有可能通过阿佛加德罗常数建立质量的自然单位?尽管前进的道路还有待探索,但趋势已日渐明朗:基本物理常数终将

成为计量单位的基础。

展望未来,人们有理由相信,整个计量标准必然会形成一套以基本物理常数为核心的完整体系。正如图 1 所示的那样,一组自洽的基本常数(包括  $\alpha$ 、 $c$ 、 $e$ 、 $h$ 、 $N_A$ 、 $R_\infty$ ……)导出我们现在通用的各种单位,包括米、千克、伏特、欧姆等等。甚至一直处于独立地位,以物质三相点为基准的温度单位——开(K),也会有从玻尔兹曼常数  $k$  推演而得的可能,从而纳入这个统一的体系。

在最近这次平差中,令人注目的是评定者第一次列出了三个以普朗克命名的基本常数,即普朗克质量

$$m_p = (\hbar c/G)^{1/2} = 2.17671(14) \times 10^{-8} \text{kg};$$

普朗克长度

$$l_p = (\hbar G/c^3)^{1/2} = 1.61605(10) \times 10^{-35} \text{m};$$

普朗克时间

$$t_p = (\hbar G/c^5)^{1/2} = 5.39056(31) \times 10^{-44} \text{s}.$$

它们的不确定度均为 64ppm,主要是受引力常数  $G$  的限制( $G$  是几十个基本常数中不确定度最大的一个,达 128ppm)。尽管如此,这一套普朗克单位在宇宙学中仍有特殊意义。

表 1 1973 年与 1986 年推荐的部分基本物理常数

量	符号	单位	1973年推荐值及其不确定度 (ppm)	1986年推荐值及其不确定度 (ppm)
真空中光速	$c$	$\text{ms}^{-1}$	299792458(1) 0.004	299792458 (精确)
真空中介电常数	$\epsilon_0$	$10^{-12} \text{Fm}^{-1}$	8.854187818(71) 0.008	8.854187817……(精确)
引力常数	$G$	$10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	6.6720 (41) 615	6.67259 (85) 128
普朗克常数	$h$	$10^{-34} \text{Js}$	6.626176 (36) 5.4	6.6260755 (40) 0.60
基本电荷	$e$	$10^{-19} \text{C}$	1.6021892 (46) 2.9	1.60217733 (49) 0.30
电子质量	$m_e$	$10^{-31} \text{kg}$	9.109534 (47) 5.1	9.1093897 (54) 0.59
质子、电子质量比	$m_p/m_e$		1836.15152 (70) 0.38	1836.152701 (37) 0.020
倒精细结构常数	$\alpha^{-1}$		137.03604 (11) 0.82	137.0359895 (61) 0.045
里德伯常数	$R_\infty$	$10^{-7} \text{m}^{-1}$	1.097373177(83) 0.075	1.0973731534 (13) 0.0012
阿佛加德罗常数	$N_A$	$10^{23} \text{mol}^{-1}$	6.022045 (31) 5.1	6.0221367 (36) 0.59
电子 $g$ 因子	$g_e$		2.0023193134 (70) 0.0035	2.002319304386(20) 0.00001
质子磁矩/玻尔磁子	$\mu_p/\mu_B$	$10^{-3}$	1.521032209 (16) 0.011	1.521032202 (15) 0.010