

基本物理常数的概况及其在物理学中的作用*

王 竹 溪

(北京大学物理系)

基本物理常数主要是指原子物理学中遇到的一些常数,最基本的是电子的电荷 e , 电子的静止质量 m_e , 普朗克常数 h , 阿伏伽德罗数(简称阿氏数) N , 真空中光速 c . 光速本来不是原子物理学中的常数,但是它是一个最基本的物理常数,在原子物理学中常常遇到它.

这些常数的发现和测定在物理学的发展中起了很大的作用. 各种物理现象以各种不同的方式联系到有关的一些基本物理常数,而关于这些常数的知识直接影响到我们对于有关物理现象本质的认识. 例如,十九世纪末发现电子就是通过对电子的荷质比 e/m 测定而获得的. 接着,类似的实验应用到离子建立了质谱仪,发现了大量的同位素,最后在1961年引出了国际原子量的新标准. 1917年以前用油滴实验直接测量电子电荷使我们确切地知道了电荷有一个最小的不可分的单位 e , 同时也知道了它的大小. 对光谱线波长的精密测定使我们能够找到原子的量子规律,这是量子力学理论的重要基础之一,同时在实际应用上它又为光谱分析方法提供了基础. 在量子规律中起关键作用的是普朗克常数 h , 因此有关量子规律的精确考察依赖于 h 的准确数值. 因此,物理规律的探讨,精密实验测量的发展和工业技术的改进三者之间是互相推动的. 精密实验的发展有赖于工业技术水平的提高,反过来又提供了工业技术水平进一步提高的依据. 电子工业就是一个突出的例子. 电子学的发展需要电子工业提供物质条件,又反过来大大促进了电子工业的发展,并且进而使整个工业走向自动化,在工业上产生了大的变革. 由于实验精密度的提高,使国际上在1960年改变了长度基准,在1967年改变了时间基准,以适应技术上越来越高的要求. 由于基本物理常数数值的精确度提高,使得在1968年的新国际温标中把高温测量的温标作了重要的改正,这里说的是指用更精确的普朗克常数值和玻耳兹曼常数值于高温测温所用的辐射公式. 在摄氏两千度时新的温度数值比旧的数值要大3度多,温度再高些新温度数值比旧的大得更多.

现在来着重谈一谈基本物理常数的概况. 基本物理常数出现于许多不同的物理现象中,每一种物理现象的规律提供一种确定常数的关系,这些关系的数目远大于特定常数的个数. 这是因为基本物理常数只有那么几个,而现象则是多种多样的. 于是就发生一个问题,从这些关系得出的常数值是否一致? 拿电子电荷为例来说明这个问题. 电子电荷可以从油滴实验直接测定. 密立根在1917年所得电子电荷数值是

* 1972年12月10日收到.

$$(4.770 \pm 0.005) \times 10^{-10} \text{ esu (Fr)}$$

误差约千分之一。过了许多年，能够用光栅法直接测量 X 射线波长了，于是得到了另一测定电子电荷的方法。这个方法的要点是一方面用 X 射线测得晶格常数，从而定出阿氏数 N ；另一方面从电解法测得法拉第常数，即电解一个单价克原子所需要的电量，它等于阿氏数乘电子电荷。用阿氏数去除法拉第常数就得到电子电荷值。这样得到的数值为^[1]

$$(4.8021 \pm 0.0006) \times 10^{-10} \text{ Fr}$$

这与油滴实验结果相差竟达到误差的六倍以上，令人非常惊奇。这两个数值中总有一个是错的。究竟哪一个错了，长期没有能确定，主要是没有能找出真正的系统误差来源。直到四十年代才发现是由于油滴实验中所用空气粘滞系数错了，重新测出的粘滞系数给出的 e 值与用 X 射线得的一致。但是由于油滴实验的精确度只有千分之一，远远低于 X 射线的测量，所以后来就只用 X 射线值。在后面谈到的最新的数值比刚才说的更精确，是因为用了更精确的其他实验结果。

从这个例子可以清楚地看出，不同的实验会得出不同的基本物理常数值。假如所得的不同值相差太大，就必然会有某种因素被忽略了，这必将推动我们去寻找隐藏在现象后面的还没有被发现的新的问题，从而使我们对现象的认识能够更深入一步。假如所得的不同值相差不大，在误差范围之内，那也出现一个问题，究竟最好的值是什么？对于这个问题的回答只能是，使用最小二乘法来处理数据，把所有各种不同的实验所得的各种数据都包括进来。不过在实行上也还有个麻烦问题，那就是有一些实验数据的可靠性较差，象前面提到过的油滴实验数据，不宜于选入最小二乘法，这也适用于不同数据之间相差太大的情形。这个问题之所以麻烦，是因为有些数据的取舍可能很难判断。在 1970 年 8 月的国际精密测量和基本常数会议上最后讨论这个问题时意见很分歧，得不到确切的看法。

第一个用最小二乘法处理基本常数的是 Birge，他在 1929 年所得基本常数值是尔后许多年内物理学界所公用的。他所采用的电子电荷值是油滴实验值，一般基本常数的精确度都不过千分之一。以后一个大进展是在 1952 年^[2]，那是因为出现了许多高精密度的实验，例如关于光速的新测量，质子的回转磁比，质子的磁矩，氢原子的精细结构和超精细结构等等，这主要是由于微波技术的进展。再一个重大改进是在 1963 年^[3]，那是在 1961 年采用了新的国际原子量标准之后，同时实验的精密密度也有了进一步的提高，这表现在 1960 年采用了以氪橙黄线的波长作为新的米定义基础和 1964 年采用铯原子钟作为辅助的时间标准。还需要提一提的是 1960 年修正了国际温标，把水三相点的热力学绝对温度值确定为 273.16°K 和把摄氏温标的零点确定为 273.15°K 。这个修正对玻耳兹曼常数值有影响。最新的改进是在 1969 年^[4]，这主要是由于出现了用超导电约瑟夫生效应测量 e/h 的高精确度数值。这也是在出现了 1967 年用铯原子钟所定的秒作为新的国际时间单位和采用 1968 年新的国际温标之后。

在作最小二乘法处理实验数据时还有一件非常重要的事需要注意，这就是测量的相对高精度所产生的相对标准和相对标准与绝对标准的换算关系。这里一共有四个相对标准：(1)重力加速度的波茨坦值，(2)电测量的实物标准，(3)原子量标准，(4) X 射线波长标准。在 1967 年以前还有一个体积标准叫升，等于一公斤纯水在其最大密度温度下（约 4°C ）所占体积：

$$\text{一升} = 1.000\ 028(4) \times 10^{-3} \text{m}^3.$$

括号中数字表示最末一位数的误差,以后都这样写,有两位误差数字时表示最末两位数字的误差.长度测量的精确度高于十兆分之一(10^{-7}).通过质量对体积的相对测量也有同等精确度,但两者之间的关系,象刚才说的结果,只能准确到兆分之四,所以有必要保持两个不同的标准.1967年废除了升这一相对标准,是因为直接测量体积的精确度提高了.现在升这个相对标准是取消了,所以一般不用这个名词,但是这个名词仍然可以使用,不过意义有了改变,改为原来的意义一升严格地等于一立方分米,即严格地等于千分之一立方米.在1948年以前还有一个热量标准叫卡,等于一克纯水由 14.5°C 升到 15.5°C 时所吸收的热量,与焦耳的关系是

$$\text{一卡} = 4.1855(4) \text{焦耳}.$$

废除卡的原因是用电加热方法测量可直接用焦耳表达,其精确度远远高于混合量热法,而卡原来是混合量热法的基础.由于卡曾经长期使用过,所以在使用上还允许保留两种卡单位,一个叫热化学卡,其定义为4.184焦耳,另一个叫国际蒸气表卡,其定义为4.1868焦耳.实际上只有在不需要高度精确数据时才使用卡,在精密实验结果中不用卡.

现在谈上面提到的四个相对标准.

(1) 重力加速度的波茨坦值.重力加速度 g 是在从质量的测量换算到力和能量时必须用的因子.某一地点的 g 值在相对测量上精确度可达亿分之一,甚至十亿分之一,但绝对测量只能到兆分之几.国际上过去用的标准是相对于波茨坦数值的,近年来发现这个数值太大,因此在1968年国际上规定要从波茨坦数值 9.81274m/s^2 中减去 $14 \times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 成为 9.81260m/s^2 .1970年八月的国际精密测量和基本常数会议上国际权度局报告说能直接测定 g 值精确到二亿分之一.假如是这样,就可以不要相对标准了.顺带说一下,早在二十年代国际上就规定了一个标准重力加速度值为 9.80665m/s^2 ,这主要是为了确定标准大气压用的,不过到1948年标准大气压的定义中不用这个标准 g 值而改为直接用力的单位 N/m^2 (= pascal Pa 帕)表达为 101325N/m^2 ,所以这个标准 g 值现在实际上已经没有什么用处.

(2) 电测量的实物标准.直接把电的测量用米公斤秒标准表达称为绝对单位,这在实际上比较困难,所以在1908年国际上规定了国际欧姆和国际伏特的实物标准.1948年国际权度大会上废除了以实物为基础的国际标准单位,认为直接测得绝对单位值的技术已经进步到不需要借用实物作为国际标准.实际上并不这样简单,还是要用实物标准作为辅助,每过十年用绝对单位值重新测定,而且要每过三年把世界上主要国家的实物标准在国际权度局作一次比较.现在测量电阻的精确度比较高,对锰铜实物电阻的测定值,采用与电容的对比方法,可达十兆分之七,这个误差主要是受了光速值误差的影响,而电容本身用静电单位(即米)表达可准到十兆分之二以上.1970年八月的国际精密测量和基本常数会议上认为在两年之内精确度可从十兆分之二提高到百兆分之一,即亿分之一.一欧的锰铜电阻实物标准的保存比较好,因此它的值与绝对单位值的差别比较小,美国标准局所保存的差别小于兆分之一.标准电池用的是硫酸镉电池,稳定性稍差一些,与绝对单位值的差别美国标准局的较小,也到兆分之十左右.近年来有建议改用超导约瑟夫生效应作为相对电压标准,以能达到更高的精确度,可能达亿分之一到亿分之十.目前的情

况是,国际电测量的实物相对标准名义上是废除了,实际上还在用。

(3) 原子量标准。由于质谱仪和原子核反应测量原子量的精确度大大超过了化学方法,同时又由于天然元素包含有各种同位素,其出现的百分比并不是完全固定不变的,所以在 1961 年国际上采用了新的原子量标准,以碳 12 同位素的原子量的十二分之一为单位。一个原子的质量等于原子量被阿氏数除(结果是用克表达的)。原子量相对测量的精确度很高,可达亿分之几,但阿氏数的精确度目前还只到兆分之七左右。举几个例子来看原子量的精确度^[5](用星号表示原子量):

$$\begin{aligned} M_{\text{H}}^* &= 1.007\ 825\ 19(8), \\ M_{\text{N}}^* &= 1.008\ 665\ 20(10), \\ M_{\text{O}}^* &= 2.014\ 102\ 22(12), \\ M^*(^{16}\text{O}) &= 15.994\ 915\ 02(28), \\ M_{\text{P}}^* &= 1.007\ 276\ 61(8), \\ m_e^* &= 0.000\ 548\ 5930(34). \end{aligned}$$

这里 m_e^* 是以原子量单位表达的电子的质量,是从其他实验求出来的,所以精确度较差。

(4) X 射线波长标准。X 射线波长相对测量比较精确,可达兆分之一,但其绝对测量的精确度只到十万分之四。因此产生了 X 单位(xu)这一 X 射线波长标准。根据 Taylor 等人^[4]的计算, xu 与 10^{-13} 米的比例 Λ 是

$$\Lambda = 1.002\ 076\ 4(53)$$

不过 Taylor 等人在求得最新的基本物理常数时不用 X 射线数据,他们认为这些数据不够精确。近年来新发现了 X 射线干涉仪技术,测量精密度已达 10^{-7} ,可把 X 射线波长与可见波长联系起来,有可能不用相对的 X 射线波长标准,而直接用米来表达波长。这个新技术还有可能通过精确测定阿氏数而提供一个天然的质量基准(可叫做质量自然基准)以代替公斤原器。

现在把几个最新的基本物理常数值作一简单介绍。

真空中光速为

$$\begin{aligned} c &= (2.997\ 925\ 0 \pm 0.000\ 001\ 0) \times 10^8 \text{m/s} \\ &= 2.997\ 925\ 0(10) \times 10^8 \text{m/s} \end{aligned}$$

后一个写法是把误差表达为最末两位数字上的偏差。这个偏差是标准偏差,也就是方均根偏差,等于把各次测量偏差的平方加起来用测量次数除再取平方根。假如各次测量的权重不等,就还要加上权重因子。这个光速值主要是微波干涉仪测得的,在 1957 年国际无线电协会和国际地球物理学会通过作为光速的标准使用值。将来有可能,在激光技术的进一步发展的情况下,把时间和长度的基准通过选一个特定的光速值而联系起来,使光速值成为一个定义。

精细结构常数 α 的倒数是

$$\alpha^{-1} = 137.036\ 02(21).$$

α 是无量纲的,它与基本物理常数 e, h, c 的关系是

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{2\pi e^2}{hc},$$

这里 e 是用静电单位表达的。假如把 e 改用 MKSA 单位表达, 则

$$\alpha = \frac{\mu_0 c^2}{4\pi} \cdot \frac{e^2}{\hbar c},$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ (亨利/米) 是真空磁导率。这个精细结构常数标志电磁作用大小, 是光谱线由于相对论效应产生分裂的决定性参数, 精细结构常数的名称就是这样来的。它是三个基本物理常数的组合物, 是一个特殊重要的无量纲的组合物, 所以在这里特别提出来谈一谈, 下面不再谈其他的组合物。

电子电荷 e 是

$$\begin{aligned} e &= 1.602\ 191\ 7(70) \times 10^{-19} \text{C} \\ &= 4.803\ 250(21) \times 10^{-10} \text{Fr.} \end{aligned}$$

这个数值是从能量单位电子伏转换到焦耳所需要的,

$$\text{一电子伏} = 1.602\ 191\ 7(70) \times 10^{-19} \text{焦耳} (\times 10^{-12} \text{尔格}).$$

普朗克常数是

$$\begin{aligned} h &= 6.626\ 196(50) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \\ \hbar &= h/2\pi = 1.054\ 591\ 9(80) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}. \end{aligned}$$

假如把单位改为“尔格·秒”, 需要乘上 10^7 , 由 10^{-34} 变为 10^{-27} 。

阿氏数是

$$N = 6.022\ 169(40) \times 10^{23} (\text{克分子})^{-1}$$

这是一个克分子的分子数, 也是一个克原子的原子数。这个数值与原子量的标准有关, 原子量的标准改变时它要跟着改变, 所以现在用碳 12 标准的数值与过去用氧标准的数值略有不同, 在化学原子量上是减少了兆分之 43。阿氏数的倒数是用克为单位表示的一个原子量为一的原子的质量:

$$1/N = \text{amu} = 1.660\ 531(11) \times 10^{-24} \text{克} (\times 10^{-27} \text{公斤}).$$

任何一个原子的质量等于这个数乘上相应的原子量。

电子的静止质量是

$$m_e = 9.109\ 558(54) \times 10^{-31} \text{公斤} (\times 10^{-28} \text{克}),$$

用原子量单位表达是

$$Nm_e = m_e^* = 5.485\ 930(34) \times 10^{-4} \text{amu.}$$

质子的静止质量是

$$\begin{aligned} M_p &= 1.672\ 614(11) \times 10^{-27} \text{公斤} (\times 10^{-24} \text{克}), \\ NM_p &= M_p^* = 1.007\ 276\ 61(8) \text{amu.} \end{aligned}$$

质子质量与电子质量的比是

$$M_p/m_e = 1836.109(11).$$

中子的静止质量是

$$\begin{aligned} M_n &= 1.674\ 920(11) \times 10^{-27} \text{公斤} (\times 10^{-24} \text{克}), \\ NM_n &= M_n^* = 1.008\ 665\ 20(10) \text{amu.} \end{aligned}$$

玻耳兹曼常数是

$$k = 1.380\ 622(59) \times 10^{-23} \text{JK}^{-1} (\times 10^{-16} \text{尔格/开}).$$

气体常数是

$$Nk = R_0 = 8.314\ 34(35)\ \text{JK}^{-1}\ (\text{克分子})^{-1}.$$

这是根据旧的测量按照新的原子量标准换算的, 所以误差比较大. 玻耳兹曼常数是从 $k = R_0/N$ 求出来的, 所以误差比其他基本常数的大得多. 没有新的更精密的技术来测量这个常数, 因此它的精确度只能停留在旧的水平上.

最后讲一讲最近二十年来基本常数数值的变化和精确度的提高, 这里所说的变化不是说基本常数本身的数值有什么改变, 而是说我们的测量精密度提高以后对它的知识的改变. 只举精细结构常数这一个量来说明这种变化:

1950 年	$\alpha^{-1} = 137.0429(14)$
1952 年	137.0377(15)
1955 年	137.0373(6)
1963 年	137.0388(6)
1969 年	137.03602(21)

从 1950 年到 1970 年精确度差不多提高了一个数量级. 瞻望前途, 科学技术的进步是没有止境的, 人们对于基本常数的知识一定会进一步提高, 对自然现象本质的了解一定会更加深入, 同时在应用自然规律方面将会日益广泛和扩大.

参 考 文 献

- [1] Birge, *Amer. J. Phys.*, **13** (1945), 63.
- [2] Du Mond and Cohen, *Rev. Mod. Phys.*, **25** (1953), 691.
- [3] Cohen and Du Mond, *Rev. Mod. Phys.*, **37** (1965), 537.
- [4] Taylor Parker, Langenberg, *Rev. Mod. Phys.*, **41** (1969), 375.
- [5] Mattauch, Thiele, Wapstra, *Nucl. Phys.*, **67** (1965), 1.