

基本物理常数的调整

许 国 发

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

众所周知,基本物理常数的最佳值很少能在实验上直接测量,它们基本都是由一连串的实验观测以及理论公式推算而得。基本物理常数在物理学中具有重要的意义。它的发现和测量,对物理学的发展起了推动作用。许多物理现象的发现和定律的创立,都与基本物理常数有密切的联系。如:通过测定电子的荷质比(e/m_e)发现了电子;普朗克提出量子假设时发现了普朗克常数 h ;谱线的分布规律及分裂与里德伯常数 R_∞ 、精细结构常数 α 有关;引力相互作用与引力常数 G 有关;……

在科学界,比较理论预言值与实验测量结果时,通常需要知道一个甚至几个基本的物理常数或转换因子(例如电子质量、电子伏特与焦耳的关系等),此时我们就需要查找并运用这些必需的物理常数的最新值。基于此目的,大多数情况下我们很少详细考究这些物理常数的来源,也就更谈不上对它们加以评定了。

对这些物理常数来源的更进一步研究就会发现,它们的确定涉及到物理学及度量学等多领域非常广泛的实验测量和理论计算。哪怕是一个简单的物理常数,它的最理想值也是由很多表面上似乎无关的现象的间接的信息链所决定的。例如以千克为单位的电子质量的获得主要综合了传统力学及电磁测量的实验信息、高精度的光学激光光谱学、电子势阱、凝聚态量子现象、以及凝聚态量子理论和扩展的量子电动力学(QED)的计算等多方面的知识。下面将对这样一个特殊的信息链做详细的研究。

基本物理常数表中的常数值有两个不明显的特性:首先,各个常数之间构成了一个紧密联系的整体——它们之间很少有与其他常数互不联系的。一般来说,只要这些常数所依赖的某一单项数据发生变化,那么常数表中的很多数值都会跟着发生变化;其次,表中的数值都只是建立在某一特定时间内可用信息基础上的。所以,随着时间的推移,常数值就会发生变化,其实,更为重要的是获得此数值所依赖

的各种信息发生了变化。例如,很久以前,电子电荷是由传统的油滴实验决定的,但这种方法现在却失去了其竞争力,而现在,电子电荷是由其他常数间接确定的。

下面将讨论的一套常数包括基本电荷;电子、缪子、质子和中子的质量及电磁矩;精细结构常数、普朗克常数、里德伯常数、阿弗加德罗常数、约瑟夫森常数和克劳斯常数;以及不同粒子的质量比等。为了获得一套自恰常数值,首先要确定关键性的实验;然后决定选用以哪种基本常数作为函数的理论表达式来预言测量值;最后调整常数值以便使理论预言与实验能很好地吻合。

用可能的相关实验与理论信息构造一套自恰常数值的想法要追溯到伯奇(R. T. Birge)时代,他首先于1929年在现在称为“现代物理评论”上出版了有关此项研究的论文。从那时起,科学家们在决定常数最佳值方面做了很多工作。1969年,科技数据委员会成立了以研究基本常数为目的的工作组(CODATA),它比科学协会的国际委员会的成立还要早3年。此工作组的任务正像CODATA手册中所说的:“定期的、及时的为科技委员会提供一套面向国际的、自恰的、建立在所有现存的相关数据基础上的物理和化学的基本常数及转换因子的数值。”在标准及技术国家研究所(NIST)(坐落于马里兰)研究人员的部分工作基础上,CODATA分别于1973年、1986年至1987年、1999年至2000年发表了3套常数和转换因子的数值。最近的一套也称作1998年推荐值,因为它是建立在1998年12月31日的可用信息基础上的,此次调整的摘要以及常数数值表发表在与2000年8月期《今日物理》相伴的《买方指南》上。有关常数值也可以通过NIST互联网址(<http://physics.nist.gov/constants>)查到。

电子质量

物理界中一个无可争议的事实是基本常数值很少直接由实验决定,因而摆在我们面前的一个基本

瓦特平衡计的高精度提供了一种可能的确定千克的新方法。SI 单位制中最后剩余物质的定义可以由重新定义相应于某一特定频率 ν_k 的质量 - 千克估计出来,根据爱因斯坦关系式和普朗克关系式: $E = mc^2$ 和 $E = h\nu$, 我们有 $h = (1\text{kg})c^2/\nu_k$, 此表达式中我们将普朗克常数作为一个准确的量。普朗克常数的准确值由千克的定义推论而得,正如光速的准确值由米的定义推论而得一样。因而,在普朗克常数准确的定义下,瓦特平衡计将是一个根据新的千克定义测量物体质量的精确标度。而且在此定义下,以千克为单位的电子质量的不确定性将降低一个量级。

常数的调整

电子质量的例子描述了获得常数值的信息为什么可以是间接的,且如何从不同的角度为它们的值提供丰富的约束。为了获得最佳值,同时考虑到所有可能的信息是非常必要的,为了以一种相容的方式达到此目的,我们通常采用最小二乘法来确定常数的值。

1998 年的调整中,所有的信息分成了 3 类:输入数据、经验公式、和校准常数。输入数据是一些实验测量结果,它们可以为常数值的调整提供最好的约束。经验公式是理论表达式,它们作为校准常数的函数,对输入数据拟合后给出常数的值。校准常数是一套经适当选择的、基本的常数,它们是调整中所要决定的量。调整的原则是根据理论表达式找到与输入数据最为吻合的值。

此例子中输入数据是:电子反常磁矩的测量值、氢的跃迁频率测量值、不同粒子磁矩的比、不同原子的质量比、中子衍射数据和硅格点间距的数据。将这些输入数据集中到一起的指导原则是:最后结果能很好地描述实际测量值。值得注意的是,我们不能利用由老的基本常数值的信息分析而得的数据,因为调整中这些值最终要被升级,所以分析中一定要避免用这些值。例如:假如某个实验报导了硅晶体布拉格衍射的 X 射线波长值,此波长值并不能作为输入数据,而是将此波长值与硅晶体格点间距的比作为输入数据,此比值才是实际的测量量。格点间距是调整的常数之一,且它的值优化于影响它的所有信息,包括波长与格点间距的比值。

经验公式可以是一个非常简单的陈述,即一个量等于它自己,例如:如果一个常数是直接测量量,则这个测量值就直接与相应的要调整的常数比较;

也可以是一套包含了详细的 QED 计算的复杂公式,例如:氢和氘的跃迁频率或缪子偶素的基态超精细劈裂是由经验公式所描述的,它牵涉并包括了许多从早期量子力学到其近期新发展的所有贡献的结果。

构造经验公式的原则就是假设在基本常数值基础上组成了正确的理论。已确定的理论包括普通量子力学及其推广,即 QED、电弱理论、粒子物理的标准模型及约瑟夫森效应和由凝聚态物质理论而来的整数量子霍尔效应的基本方程。在所要求的精度水平,这些理论并不完全是无可争辩的,但为了给常数赋值而做一些假设,这些理论还是必需的。由于只需一种或几种理论就可计算出常数的值,因而得自于不同理论关系的数值的一致性也可以作为对相应理论一致性的检验,从 1998 年的调整中可以发现没有令人信服的证据显示可以放弃任何理论假设。

对 1998 年 CODATA 推荐的数值集中相对小的子集数据进行拟合,以调整基本常数的值。要调整的常数包括里德伯常数、精细结构常数、普朗克常数、原子质量单位制中各种粒子的质量、各种特殊硅晶体样本的格点间距和摩尔气体常数。另外一些基本常数像以千克为单位的电子质量及能量转换因子等,都来自于具有准确理论关系的子集。包括直接调整的常数集在内的所有常数都不存在唯一的选择,但它们必需来源于独立的集,即子集中任一成员都不会通过理论恒等式与其他子集发生联系。因为校准常数值之间的协方差考虑了导出常数的计算值,所以校准常数不一定比导出常数更精确。

1998 年的调整

最近一次基本常数的调整为我们提供了一套新的推荐值。大多数情况这套新数值的不确定性约为 1/5 到 1/12,有些情况相对于早期推荐值的不确定性甚至可以达到 1/160。但是,正如附录 4 所描述的,牛顿常数的新推荐值却比早期的值有更大的不确定性。

最近一次调整的一个显著特征是外延了推荐值对 QED 理论的依赖。此外延导致了常数精度的增加,且改善了实验和理论与 QED 的关系。阻抗刻度标准与高阶费曼图的关系阐明了 QED 理论的广泛影响。在过去 10 年中,包括 NIST 在内的许多一流实验室都将阻抗标准从基于标准电阻器库转移到量子霍尔效应。根据整数量子霍尔效应理论,与之相联系的克劳斯常数是精细结构常数的一个简单且准

确的函数。像附录 2 描述的,精细结构常数数值的获得,首先是比较电子反常磁矩的理论和实验结果,其次是根据理论表达式的高阶 QED 的计算。除对欧姆的标准影响之外,假如千克已定义,因而普朗克常数是一个精确的常数,所以约瑟夫森常数与精细结构常数是与精确的常数挂钩的。作为一个结果,高精度的电压标准,现在通常基于约瑟夫森效应,也将只由 QED 实验和理论所约束。

在过去 10 年中,基本常数的不确定性具有显著减小的趋势。1998 年调整的许多数值主要依赖于来自实验或理论或它们两者的个别数据条款。在后续的研究中可能会发现一个或几个这样的数据条款可能是错误的,这种情况将导致常数值发生变化,而这种变化必将扩大原本“正确无疑”的常数值的不确定性。因而,我们将其作为一个风险因素进行核查,这种核查结果会为我们提供更为精确的常数数值,更为重要的是,这种核查并不会运用到由许多先进的、精确的实验和理论所提供的全部信息。

这些常数值被推出后不久就会过时,事实上,自 1998 年调整后,我们已经获得了相关的常数值的新信息。考虑到基本常数领域的稳定发展,并最大可能地保持这些值是最新的,CODATA 希望以后每 4 年把这些值更新一次。

附录 1. 氢和氘的跃迁频率:里德伯常数

里德伯常数 R_∞ 最初是由比较理论及实验的氢和氘的能级得到的。例如,氢的 $1S-2S$ 跃迁频率近似有如下关系:

$$v_H(1S_{1/2}-2S_{1/2}) = \frac{3}{4} R_\infty c$$

$$\left[1 - \frac{m_e}{m_p} + \frac{11}{48} \alpha^2 - \frac{28}{9} \frac{\alpha^2}{\pi} \ln \alpha^{-2} - \frac{14}{9} \left(\frac{\alpha R_p}{\bar{\lambda}_c} \right) + \dots \right],$$

这里 m_p 是质子质量, R_p 是质子电荷半径的均方根, $\bar{\lambda}_c$ 是康普顿波长值除以 2π 。1998 年用来作为调整的此跃迁的测量值为:

$$v_H(1S_{1/2}-2S_{1/2}) = 2\,466\,061\,413\,187.34(84) \text{ kHz},$$

其不确定性为 3.4×10^{-13} 。

上面的理论表达式是近似的而且仅有 4 个修正项。表达式右边中括号内“1”后边的 4 个修正项都是由质量衰减、相对论、辐射、以及有限的质子大小的影响引起的。尽管如此,此式仍然包含了里德伯常数值的信息。

在 1998 年的调整中,包括了 23 种氢或氘的跃迁频率或频率差,且调整时所用能级的理论表达式是建

立许多解析计算及精确的数字赋值基础之上的。1998 年推荐的里德伯常数值是 $R_\infty = 10\,973\,731.568\,549(83) \text{ m}^{-1}$ 。

附录 2. 电子的反常磁矩:精细结构常数

电子的 g -因子表征了电子自旋与磁场的耦合特性,并不等于狄拉克方程预言的值: $g_e(\text{Dirac}) = -2$ 。可以用电子的反常磁矩 α_e 表示:

$$g_e = -2(1 + \alpha_e).$$

α_e 的理论表达式可写为:

$$\alpha_e = C_e^{(2)} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right) + C_e^{(4)} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 + C_e^{(6)} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 + C_e^{(8)} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^4 + \alpha_e(\text{had.}) + \alpha_e(\text{weak}) + \delta_e,$$

其中 $C_e^{(2)} = 1/2$, $C_e^{(2i)}$ ($i \geq 2$) 是由推广的 QED 计算而得的数值常数, $\alpha_e(\text{had.})$ 主要是强子真空激化的贡献, $\alpha_e(\text{weak})$ 主要是电弱作用的贡献, δ_e 是考虑到理论不确定性后的附加修正项,约为 1.1×10^{-12} 。

在 CPT 守恒的前提下,通过测量正负电子的反常性,对这些值加权平均后得:

$$\alpha_e = 1159652188.3(4.2) \times 10^{-12}.$$

电子反常磁矩的数据为精细结构常数 α 的值提供了非常重要的信息。当然,在最后的调整中,考虑了所有对 α 有贡献的各种信息,1998 年的推荐值是:

$$\alpha^{-1} = 137.03599976(50).$$

附录 3. 瓦特平衡计实验:普朗克常数

普朗克常数可以通过比较以米、千克、秒表示的机械功率瓦特与以约瑟夫森常数 $K_J = 2e/h$ (通过约瑟夫森效应与频率及电压相联系) 及克劳斯常数 $R_K = h/e^2$ (其具有阻抗的单位,并与整数量子霍尔效应相联系) 联合的电子功率瓦特而测得:

$$K_J^2 R_K = 4/h.$$

实现此比较的仪器称为瓦特平衡计:一个水平线圈悬挂在径向磁场中,线圈中通电以支持一个标准质量的物体。第一步首先测量:支撑一个标准质量的物体 m ,线圈中所需的电流 I ;第二步慢慢地垂直移动线圈,由线圈移动速度 v 及所用电压 U 来计算磁场强度。电流 I 和质量 m 以及速度 v 和电压 U 的关系如下:

$$mgv = IU = Af_1 f_2 h,$$

g 是自由落体运动的重力加速度,它是由绝对的重力计精确测量的。由于电压 U 以及由电压和阻抗

决定的电流 I 是由约瑟夫森和克劳斯常数刻度的, 所以, 原则上常数 A 也是确切知道的, 而第二步实验中用于约瑟夫森法的频率 f_1 和 f_2 也是精确知道的。此方程给出了由实验中直接测量量表达的 h 。1998 年推荐的普朗克常数值主要是由瓦特平衡计实验决定的:

$$h = 6.62606876(52) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}。$$

附录 4. 万有引力实验: 牛顿常数和万有引力 (重力)

最为古老的常数之一就是万有引力定律中的牛顿常数 G , 根据我们熟知的公式

$$F = Gm_1 m_2 / r^2$$

给出了两物体之间的万有引力。 m_1 和 m_2 是两物体的质量, r 是它们之间的距离 (假设 r 比物体的尺度大很多)。1798 年卡文迪什作了有效的测量, 此常数也展示了这些年来尝试去改善它的困难。事实上, 它是惟一个 1998 年推荐值的不确定性比 1986 年推荐值的不确定性大的常数。不确定性增加的原因是 1986 年的数值推出后, 一个新的、高可信度的实验报道了一个 G 的值, 它与推荐值明显不同。更进一步说, 在扭秤悬架上发现了一个小的、但先前不

知道的非调和比, 而 1986 的数值正好应用了此实验的这个结果。这些事实暗示万有引力实验是我们相信但又不很了解的实验。因而 1998 年推荐的数值仍然保留了 1986 年的值, 但它的不确定性增加了 12 倍以便承认这些结果, 且提醒用户注意到所存在的问题。经过这些考虑后, 1998 年的推荐值是:

$$G = 6.673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}。$$

最近, 一个新实验报导了其精确结果, 其值与 1986 年的推荐值比较一致 (两倍标准偏差之内)。

(编译自 2001 年 3 月的《Physics Today》和何圣静主编的《实验物理手册》)

作者简介



许国发, 男, 1964 年生于河北。1986 年毕业于厦门大学物理系, 然后工作于中国科学院高能物理研究所。1992 年在该所获得硕士学位, 1996 年获得博士学位。现从事高能物理领域的研究工作, 主要进行北京谱仪的数据分析。

欢迎投稿, 欢迎订阅

2003 年的《现代物理知识》, 继续设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯共 8 个栏目。欢迎大家向这些栏目踊跃投稿。恳请大家注意如下几点: 稿件请用方格稿纸誊写, 用微机打印的则请单面打印并留 1.5 倍的行距; 外国人名地名, 请译成中文, 有必要保留外文名称时则在文中首次出现时将外文用括号括在中译名后面, 图表中的外文也尽可能地译成中文; 文稿中的插图最好单独成页, 并在文稿中的相应位置标上插图的编号; 文稿无需附“摘要”和“关键词”等, 一般也无需附“参考文献”, 只需附上英文题目和作者的汉语拼音姓名; 请注意语言规范, 例如, “其它”一律改为“其他”, “公里”改为“千米”, “公斤”改为“千克”, 数字和百分数尽量采用阿拉伯数字, 除了书刊名称用书名号外, 一般文章的题目则用引号。

《现代物理知识》的读者对象颇为广泛, 有科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生和其他物理学爱好者。欢迎各界人士继续订阅!

在邮局漏订或需要过去杂志的读者, 请按下列价格汇款到《现代物理知识》编辑部 (100039, 北京 918 信箱现编部) 补订。1992 年合订本, 18 元; 1993 年合订本, 18 元; 1995 年合订本, 22 元; 1996 年合订本, 26 元; 1993 年增刊, 8 元; 1994 年增刊, 8 元; 1994 年附加增刊合订本, 36 元; 1996 年增刊, 15 元; 1997 年合订本, 30 元; 1998 年合订本, 32 元; 1999 年合订本已售完, 尚有 1、4、5、6 期单行本, 每本 3 元; 2000 年附加增刊合订本, 38 元; 2000 年增刊, 10 元; 2001 年合订本, 48 元; 2002 年合订本, 48 元; 2003 年, 每期 7 元, 全年 42 元; 《微观绝唱: 量子物理学》、《睿智神工: 基本粒子探测》(《诺贝尔奖百年鉴》丛书中的两本, 上海科技教育出版社 2001 年出版), 每本 10 元。以上所列, 均含邮资或免邮资。