

基本物理常数值的变动

何 常



一、基本物理常数的由来

十九世纪科学的蓬勃发展,铺平了深入理解物理世界性质的道路.在世纪之交,出现了一个愈来愈明显的事实:世界上存在着若干与原子物理和量子物理相联系的不变性质.这些性质可以用一组作为基础的量来描述,这就是我们现在称之为基本物理常数的八个量(见表1).

表 1

名称	符号	数值	单位	相对不确定度(ppm)	近似值
基本电荷	e	1.60217733(49)	$10^{-19}c$	0.30	1.602
光速	c	299792458	ms^{-1}	精确	2.998×10^8
普朗克常数	h	6.6260755(40)	$10^{-34}JS$	0.60	6.626
电子质量	m_e	9.1093897(54)	$10^{-31}kg$	0.59	9.110
质子质量	m_p	1.6726231(10)	$10^{-27}kg$	0.59	1.673
阿伏加德罗常数	N_A	6.0221367(36)	$10^{23}mol^{-1}$	0.59	6.022
宇宙引力常数	G	6.67259(85)	$10^{-11}m^3kg^{-1}s^{-2}$	128	6.672
玻尔兹曼常数	k	1.380658(12)	$10^{-23}JK^{-1}$	8.5	1.381

(注:上表系1986年推荐值)

如果不列入最后两个常数,这一组量常被称作基本原子常数.

由于用来求出各未知基本常数值的实验测量方法很多,因此有必要通过合理的方法把各个测量结果综合起来,以得出一组唯一的基本物理常数推荐值.60多年前R. T. 贝治首创了这项工作.他第一次为基本物理常数定值,

发表在1929年《现代物理评论》第一卷上.由贝治首创的这一做法,被物理学家们沿袭下来,每隔几年都要为改进基本物理常数值而做新的评定.

二、定值方法

基本物理常数值的改进来自实验测量方法和计算方法的改进.现在,常数值的

的一次爆发全过程,发现蟹状星云中以接近光速速度向外发射的高能电子与云周环境相互作用的辉光,以及星系团成员星系之间温度高达 64×10^6k 的炽热气体,进行了有关暗物质理论的验证.12月10日Astro-1随航天飞机返回地面.

远紫外探测

由于星际氢吸收远紫外波长的辐射,天文学家一直把0.01—0.1微米的波长视为观测禁区.太阳系外第一个远紫外辐射源是在1975年由美苏“阿波罗-联盟”飞行中发现的.这个辐射源是位于后发座的一颗白矮星——HZ43.白矮星是耗尽核燃料而暴露的星核.有很强的紫外辐射.此后,“阿波罗-联盟”又探测到另一

颗白矮星、一颗耀星和一颗激变变星.

1990年6月发射的国际X射线天文台(Rosat)携带一架英国制造的远紫外照相机完成了0.006—0.02微米的巡天.Rosat在全天认证了大约1000个分立源,其中一些是恒星——有热活动星冕的冷星、激变变星、密近双星以及白矮星.对船帆座和天鹅圈里的两个超新星遗迹进行了高分辨观测.

1992年6月7日,美国宇航局发射了一颗中型卫星——远紫外探测器(EUVE)进行远紫外巡天.EUVE有相当高的灵敏度,能探测到亮度只及HZ43百分之一以上的紫外源,除了测量源的位置和亮度,还进行分光观测.天文学家期待它的观测结果能使紫外天文学有进一步的发展.

确定已由国际科技数据委员会的基本物理常数组 (CTOG) 负责, 总结世界各地的科学家历年所做的数以百计的物理测量, 然后得出结果。首先是收集和审查已在出版物中作过详细研究的有效数据, 再从有关科学家那里了解他们未写入著作的各数据的额外细节。之所以要如此细致, 是因为许多事实证明, 在把数据简化成最终值时, 或者将数据同别的计算结果组合起来时, 是难免不出错的。

入选数据一经确定, 就必须同时考虑好怎样去确定它的不确定度。任何简化数据的统计方法都归结于应用最小二乘法, 即按结果的标准偏离不确定度的负二次方加权。这意味着, 如果一个结果的不确定度远大于最精确值的不确定度 3 倍, 对最后的推荐值且只有很小的影响。这里有一个困难是, 实验人员无法估算实验不确定度到好于 10% 的水平。这是因为总有一些效应的实际大小只能凭猜测去确定。

定值时的人选数据确定之后, 就必须选择某种最小二乘法去把它简化成唯一的一组推荐值。这一方法必须同时满足统计者的要求和实验者的直觉。1987 年 CTOG 应用泰劳和柯汉的新方法, 他们测算得到的最终值最多约有一个标准偏差的改变, 并不怎样受所用统计方法的影响。这种方法是一个实验一个自由度, 从而允许不确定度“测不准”。贝治用的一个参量叫贝治比 R_B , 它是以 X^2 除以自由度数所得的商。它有统一的期望值, 所赋予的不确定度可以按照自由度数在计算机处理中进行修正。也就是说, 应用诸量测量中的差值以重新计算它们所赋予的不确定度。

三、基本物理常数的特殊重要性

基本物理常数广泛应用于公式计算之中, 如 $E = h\nu$ 中的 h , $\lambda = \frac{h}{m_0 p} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ 中的 h 和 c , 等等。然而基本物理常数的特殊重要性还在于:

1. 如果把基本常数相互组合, 就可以形成更多的常数, 其中还包括某些无量纲常数。

例如, 有量纲的里德伯常数 R_∞ 是由下式给出的:

$$R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2h,$$

而无量纲的精细结构常数 α 则由下式给出:

$$\alpha = \mu_0 e^2 / 2h$$

由于 α 是无量纲量, 所以它更适合于一般计算。当我们的知识要求更多的小数点位数时, 总是一再用它来进行计算的尝试。30 年代, 它的倒数 $\frac{1}{\alpha}$ 曾经被认为恰好等于 137; 它作为爱丁顿的数字逻辑理论中自由度 (136+1) 的角色而显露头角。现在我们求得 $\frac{1}{\alpha}$ 的值是 137.036 ……。

2. 基本物理常数显得如此重要的又一原因是, 长期以来它被方便地用作基本的物理单位。许多计算问题的开头和中心部分用的是原子单位(或称哈特里单位), 直到计算的结尾才化成 SI 单位的表述, 这体现了基本物理常数作为自然科学单位的作用。早在 1887 年, 斯通耐在他的第一篇论文中所用的单位制即是一例:

$$c = G = e = 1$$

它预示了基本电荷(即质子电荷)的存在。

3. 高精度的实验一般比基本物理常数要多。这样, 我们就可以应用关于基本物理常数的各种实验测量来最精确地检验我们对基础理论的理解程度。在授予诺贝尔奖的工作中, 给予小数点最后一位的重视比起对小数第一位的关注来毫不逊色, 就是有力的说明。

量子电动力学 (QED) 是理论和实验相结合的重要基础。这样的理论和实验通常都涉及精细结构常数。因为它是无量纲量, 我们就必须为表达测量中的单位而操心。

由狄拉克粒子理论所要求的电子磁矩 μ_e 为:

$$\mu_e = e\hbar/2m_e.$$

这里 $\hbar = h/2\pi$, 把理论计算结果和实验测量结果相比较, 相差只有 0.1%。因此, $e\hbar/2m_e$ 提供了一个有用的“单位”——叫玻尔磁子 μ_B , 使 μ_e 的实验测量结果可以同它的理论计算进

行比较。与此相关的两个量是电子反常磁矩 a_e 和电子 g 因子:

$$a_e = \mu_e / \mu_B - 1$$

电子 g 因子定义为:

$$2g_e = \mu_e / \mu_B$$

QED 的成就之一是它具有计算电子反常磁矩 a_e 的能力, 算式是一个包含精细结构常数的幂级数:

$$a_e = (\alpha/\pi)/2 + c_2(\alpha/\pi)^2 + c_3(\alpha/\pi)^3 + c_4(\alpha/\pi)^4 + \dots + \delta a$$

δa 项是非 QED 贡献, 如强子真空极化和弱相互作用。上式各项计算在一定意义上说是力的迭加。肯纳薛塔求得 $c_2 = -0.328478444$; $c_3 = 1.1763(13)$; $c_4 = -0.8 \pm 2.5$; $\delta a = 1.69(4) \times 10^{-12}$, 从而改善了它的计算精度。

上面的理论计算同华盛顿大学迪克等 3 人所做的实验结果有着惊人的符合。他们已在超导磁体所产生的高磁场四极离子收集器中捕捉到单个电子, 历时为 10 个月。他们测量了电子自旋进动频率与回旋加速器频率之比 (μ_e / μ_B), 小数精度达到 10^{-11} , 这是对基本物理常数的最精确的测量。他们还测量了质子质量与电子质量之比 m_p/m_e , 精度高达 10^{-8} 。

正电子和 μ 子的反常磁矩也已用类似的方法测量和计算出来, 不过精度还比较差。

以上都是用基本常数的实验测量来检验我们对基本理论理解程度的事例。

四、常数不“常”

从 1929 年对物理常数首次定值以来, 每隔 10 年左右都要重新进行一次定值工作。现在, 我们关于基本物理常数值的知识已大为改进, 精度从原来的百分率水平向越来越多的小数位推移, 不确定度逐步减小, 改进的幅度大约每 10—15 年提高 10 倍。

由于人类知识的增加, 用 SI 单位表述的推荐值在改变。在这个意义上, 它们不是“常数”。它们一般在事先赋予的不确定度内变化。但是已经证明, 我们对基础理论的理解有时并不正确, 而有时证明实验的不确定度是最有利

的。不管这种变化是否真实, 建立不确定范围对于科学进步毕竟是重要的。

基本物理常数的可变性, 主要是指“大爆炸”开始瞬间的情况。这里大统一理论起着作用; 所谓大统一是指一种用与能量相关的“常数”来统一引力、电磁力和核力的理论。所以基本物理常数的变化是时间的函数; 但它们在宇宙中处处相同, 在这个意义上它们又确是常数。

今天测量精度已达到能在实验室可能的时间范围内测试物理量的变差至小数以后 12 位的数量级。这样的变化足以同宇宙年龄的 10% 的变化相比拟。这一情况使宇宙理论得以重新核查和发展。与此相似, 高精度的卫星测距、月球测距和行星测距实验使引力常数 G 的时间变化率能够得到测试 (G 每年有小于 10^{-11} 的变化)。不论变化的原因是什么, 变化确实是产生了。

目前, 由其它常数的组合还不能得到宇宙引力常数 G 。虽然现在测量得到的不确定度已成倍减小, 但在实验室里对引力常数进行测量还是非常困难的, 因为地球的引力比实验室的引力约大 10^9 倍。还有一个新问题是所谓第五种力的可能存在。果如其然, 则它将修正实验室距离下通常的平方反比定律。现在的定值对这一效应仍然忽略不计。由于实验很难达到符合灵敏度要求, 所以测量所得的数据连续不断地出现矛盾。

因测量精度的改进而改变常数值的事例很多。1986 年对精细结构常数的测量是由氢的光谱测量得到的; 以后也可以用介子素的超精细结构来得到 α 值, 只要知道 μ_e / μ_p 的值就行。有些单位已测量出硅的晶格常数, 它同硅的克分子容积组合起来就可以得到阿伏加德罗常数的值。量 h/e^2 是电阻的原子单位。自从 1929 年首次定值以来, 关于 h/e^2 的知识已着实赶上用作单位的欧姆实现的准确度。这意味着有朝一日可以用 h/e^2 的稳定性来检验欧姆的稳定性, 尽管目前还没有找到有效方法。

另外, 有人对在这组量中仍然保留着质子

质量提出疑问,认为原子中的夸克已扮演了更为基础的角色,质子质量就不再具有基本的意义了。不过,我们至今还确实不能准确地测定和表述夸克的质量,即使它是在核子之外能单独存在的粒子。这一问题大概要等搜寻到被认为是“质量之源”的未知夸克——顶夸克之后才能解决。

总之,常数不“常”既反映着某些宇宙性质,也反映着测量技术和条件的进步。这里有广阔的未知领域有待探索。

五、SI 单位的困难

电单位的实现对于现代基本常数的定值具有重要意义。由于所有的测量都有一个精度的限制,许多国家标准实验室中保留的电单位并不恰好等于它们 SI 单位的对应量。它们之间有着百万分之几的差额。保留安培是 K_A 安培,保留欧姆是 K_O 欧姆,保留伏特是 K_V 伏特。保留安培用保留伏特和保留欧姆来表示,即

$$K_A = K_V/K_O$$

用于定值的测量量用未知量 α, K_O, K_V 来表示,这些量一经评定,就可推出基本物理常数的值。由 $e/h = E/K_V$, 并给出 α , 就可以解出 e 和 h ; m_e 可以由 R_∞ 得出; m_e 与 m_p/m_e 组合得到 m_p ; m_p 与 m_p/m_a 组合得到 m_a , 随之可得出 N_A (或 M^θ/m_a , 这里 $M^\theta = 10^{-3}\text{kg mol}^{-1}$), 等等。

如上所述, G 的测量是与其它各量的定值分开的。玻尔兹曼常数 k 要求 N_A 与声热测量的气体常数 R 相组合, 对所得的值及其相关的不确定度作出选择。

现在已强烈地感觉到基本物理常数中 SI 单位已遇到困难。我们关于 h/e^2 的知识受到

欧姆实现的限制, $h/2e$ 受到伏特实现的限制, h 受到瓦特实现的限制。

1986 年定值时提出在各国实验室保留和通用的电压单位约有 $7.59\mu\text{V}$ 的误差, 电阻单位约有 $1.56\mu\Omega$ 的误差。后者说明每年出现 $0.0566\mu\Omega$ 的向下偏移(这是国际协议值, 真正的值还多少取决于各有关国家)。随后这些误差得到承认。当许多实验室确信它们的 SI 值时, 同时却在所有国家按国际协议改变保留单位。为了保留和推广电单位, 1988 年 10 月 CCE 开会并推荐: $R_{K-90} = 25812.807(5)\Omega$ 和 $K_{J-90} = 483.5979(2)\text{GHz/V}$, 它们分别联系于量子化霍尔效应和约瑟夫生效应。这里的不确定度来源于推广单位和相应的 SI 单位之差。单位的再演率好十多倍。这个推荐值得到同年的 CIPM 国际会议的确认并公布。当然, 这些量并不是打算与物理量 h/e^2 和 $2e/h$ 等同, 因为它们并不是一组协调一致的基本物理常数的组成部分。

六、未来趋势

我们关于物理常数的知识还在不断增进。由于这些量被公认为在宇宙中处处守恒, 因此用它们来作为单位颇具魅力。这么做的可行性日益明显。基本物理常数涉及大多数基本单位和导出单位, 物理学家正在小心地作出选择。因为我们关于光速的定义涉及到米的定义, 而里德伯常数测量则期待着用米表述的可见区域内的测量精度。还有, 时间的定义看来已能成功地应用氢脉塞, 而不用铯钟。预期以今后 20 年的时间, 原子囚禁和离子囚禁的发展可能引发另一次突变。在这一过程中, 基本物理常数的测量将继续在物理世界的探索中扮演重要的动人心弦的角色, 成为研究的热点。

《恐龙绝灭之谜》出版

由北京天文馆科普作家李良与中国科学院院士、著名天体化学家欧阳自远先生合著的这本书, 已由吉林教育出版社出版, 32 开 260 页共 15.7 万字。此书附有 11 张彩色天体照片, 从介绍宇宙环境开始, 以天地生综合研究的角度探

讨了恐龙绝灭的原因。欢迎各界朋友邮购, 每册书 8.50 元(含邮资及挂号包装费), 请汇款至: 北京西直门大街北京天文馆(100044)李锦萍女士收。