

三届基本物理常数 CODATA 平差综述

卢森锴^{1 †} 郭奕玲² 沈慧君²

(1 广西河池学院物理与电子工程系 广西河池 546300)

(2 清华大学物理系 北京 100084)

摘要 评述了最近三届基本物理常数 CODATA(1998, 2002, 2006)推荐值,阐述了各阶段所依据的主要实验及理论上的新进展,介绍了三个实验新技术对物理常数发展的特殊作用.

关键词 基本物理常数,平差,不确定度,光梳技术,瓦特天平,彭宁阱

A comprehensive survey of three CODATA meetings —modifications of the fundamental physical constants

LU Sen-Kai^{1 †} GUO Yi-Ling² SHEN Hui-Jun²

(1 Department of Physics and electronic engineering, College of Hechi, Guangxi Hechi 546300, China)

(2 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract A comprehensive survey of the 1998, 2002 and 2006 meetings of the International Science and Technology Data Committee (CODATA) and their modifications of the fundamental physical constants is presented. The values and corresponding uncertainties of the constants are compared. The main experimental and theoretical advances during each period, especially the effects of three new experimental techniques, are reviewed.

Keywords fundamental physical constant, adjustment, uncertainty, optical comb, Watt balance, Penning trap

1 引言

本文作者之一曾于1989年在本刊发表过一篇综述基本物理常数的文章^[1],差不多过去了20年,基本物理常数的测量和平差工作有了很大进展.国际科学技术数据委员会(简称CODATA)先后又进行了三次平差,分别作为1998年、2002年和2006年平差推荐给科技界.

1999年公布的一套基本物理常数平差结果,收集的原始数据截止于1998年12月31日,因此被称为CODATA 1998平差.

2004年8月CODATA基本常数任务组又发表了新的一组基本物理常数推荐值.这一届的原始数据截止于2002年12月31日,因此被称为CODATA 2002推荐值.

2007年8月公布的一套基本物理常数平差结果,收集的实验数据截止于2006年12月31日,因

此被称为CODATA 2006平差^[2].

2 三届 CODATA 平差的进展

为了说明20年来基本物理常数平差的进展,我们选取了20个重要的常数,把1986 CODATA推荐值和最近三届并列进行比较,如表1所示(本文后面的表2、表3和表4将分别比较其相对不确定度和数值偏差).

我们从这些表可以看出,近二十年来,这些基本物理常数的不确定度都有较大的下降.1998年平差比1986年平差前进了一大步,由于时间间隔长达12年,其间科学技术有长足的进展,大多数基本常数的不确定度下降为原来的1/5至1/12.里德伯常数 R_∞ 的不确定度是所有常数中最突出的,下降达

2008-01-16 收到

† 通讯联系人, Email: lusk3616@163.com

表 1 几届 CODATA 基本物理常数推荐值的比较

量	符号	单位	1986 CODATA	1998 CODATA	2002 CODATA	2006 CODATA
牛顿引力常数	G	$10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	6.672 59(85)	6.673 (10)	6.674 2(10)	6.674 28(67)
普朗克常数	h	10^{-34}Js	6.626 0755(40)	6.626 068 76(52)	6.626 0693(11)	6.626 068 96(33)
$h/2\pi$	\hbar	10^{-19}Js	1.054 572 66(63)	1.054 571 596(82)	1.054 571 68(18)	1.054 571 628(53)
电子康普顿波长 $h/m_e c$	λ_C	10^{-12}m	2.426 310 58(22)	2.426 310 215(18)	2.426 310 238(16)	2.426 310 2175(33)
基本电荷	e	10^{-19}C	1.602 177 33(49)	1.602 176 462(63)	1.602 176 53(14)	1.602 176 487(40)
磁通量子 $h/2e$	φ_0	10^{-15}Wb	2.067 834 61(61)	2.067 833 636(81)	2.067 833 72(18)	2.067 833 667(52)
电导量子 $2e^2/h$	G_0	10^{-5}S		7.748 091 696(28)	7.748 091 733(26)	7.748 091 7004(53)
电子质量	m_e	10^{-31}kg	9.109 3897(54)	9.109 381 88(72)	9.109 3826(16)	9.109 382 15(45)
质子质量	m_p	10^{-27}kg	1.672 623 1(10)	1.672 621 58(13)	1.672 621 71(29)	1.672 621 637(83)
质子 - 电子质量比	m_p/m_e		1 836.152 701(37)	1 836.152 6675(39)	1 836.152 672 61(85)	1 836.152 672 47(80)
精细结构常数	α	10^{-3}	7.297 353 08(33)	7.297 352 533(27)	7.297 352 568(24)	7.297 352 5376(50)
精细结构常数倒数	α^{-1}		137.035 989 5(61)	137.035 999 76(50)	137.035 999 11(46)	137.035 999 679(94)
里德伯常数	R_∞	m^{-1}	10 973 731.534(13)	10 973 731.568 549(83)	10 973 731.568 525(73)	10 973 731.568 527(73)
$a^2 m_e c/2h$						
阿伏伽德罗常数	$N_A L$	10^{23}mol^{-1}	6.022 136 7(36)	6.022 141 99(47)	6.022 1415(10)	6.022 141 79(30)
法拉第常数 $N_A e$	F	C mol^{-1}	96 485.309(29)	96 485.3415(39)	96 485.3383(83)	96 485.3399(24)
摩尔气体常数	R	$\text{Jmol}^{-1} \text{K}^{-1}$	8.314 510(70)	8.314 472(15)	8.314 472(15)	8.314 472(15)
玻尔兹曼常数 R/N_A	k	10^{-23}JK^{-1}	1.380 658(12)	1.380 650 3(24)	1.380 6505(24)	1.380 6504(24)
斯特藩 - 玻尔兹曼常数						
$(\pi^2/60)k^4/\hbar^3 c^2$	σ	$10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$	5.670 51(19)	5.670 400(40)	5.670 400(40)	5.670 400(40)
电子伏 (e/C)J	eV	10^{-19}J	1.602 177 33(49)	1.602 176 462(63)	1.602 176 53(14)	1.602 176 487(40)
(统一的)原子质量单位						
$1u = m_u = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C})$ $= 10^{-3} \text{kgmol}^{-1}/N_A$	u	10^{-27}kg	1.660 540 2(10)	1.660 538 73(13)	1.660 538 86(28)	1.660 538 782(83)

1/160. 其原因是,从 20 世纪 90 年代开始,测定氢原子跃迁频率的方法已用光学频率测量代替了原来的光学波长测量,而里德伯常数 R_∞ 正是用氢原子跃迁频率值获得的. 进入 21 世纪以来,里德伯常数以及其他原子常数陆续有改进,这是由于计量工作作用上了新发明的光梳技术,使频率的测量大大提高了精确度(详情见后).

再就是,引力常数 G 在这些年里几乎没有什么前进,不确定度在 1998 年还有所上升,后来才略有下降,它一直是最欠精确的常数之一. 幸好它不涉及其他常数,没有参加平差. 改进对引力常数的测量,是计量工作者面临的迫切任务.

精细结构常数 α 推荐值的不确定度不断下降,反过来又导致了与 α 联系紧密的其他常数(例如玻尔半径 a_0 和康普顿波长 λ_C)都以一定的比例减小了不确定度. 另外,普朗克常数 h 的数值也越来越精

确,由于它的影响,阿佛伽德罗常数 N_A 的不确定度也不断下降.

但是,我们也应该注意到两个现象:一是 CODATA 2002 推荐值组与 1998 推荐值组相比,有不少重要常数的不确定度不是更小了,而是更大了;二是有些基本常数随着岁月的推移前后出现偏差. 这种偏差如果超过不确定度允许的范围,一定是发生了系统误差. 例如,1986 CODATA 的里德伯常数推荐值和以后各届的推荐值之间存在明显的偏差. 我们将在下面分别予以说明.

2.1 1998 CODATA 平差

从表 1 可以看出,在 1998 年平差中,惟一独特的是牛顿引力常数 G ,它的不确定度大于 1986 年的数值约达 12 倍,理由见文献[4]. 其中特别是因为有一个可信赖的实验得到了一个 G 值,与 1986 年值

表2 1998 和 1986 CODATA 代表性推荐值相对不确定度的比较^[5]

量	1998 相对不确定度 u_r	1986 相对不确定度 u_r	1986 u_r 与 1998 u_r 之比	D_r
α	3.7×10^{-9}	4.5×10^{-8}	12.2	-1.7
λ_C	7.3×10^{-9}	8.9×10^{-8}	12.2	-1.7
h	7.8×10^{-8}	6.0×10^{-7}	7.7	-1.7
N_A	7.9×10^{-8}	5.9×10^{-7}	7.5	1.5
E	3.9×10^{-8}	3.0×10^{-7}	7.8	-1.8
R	1.7×10^{-6}	8.4×10^{-6}	4.8	-0.5
k	1.7×10^{-6}	8.5×10^{-6}	4.8	-0.6
σ	7.0×10^{-6}	3.4×10^{-5}	4.8	-0.6
G	1.5×10^{-3}	1.3×10^{-4}	0.1	0.0
R_∞	7.6×10^{-12}	2.1×10^{-9}	157.1	2.7
m_e/m_p	2.1×10^{-9}	2.0×10^{-8}	9.5	0.9
$A_r(e)$	1.2×10^{-9}	2.3×10^{-8}	11.1	0.7

* (量 y 的相对不确定度的定义是 $u_r(y) = u(y) / |y|$, 如果 $y \neq 0$, 其中 $u(y)$ 是 y 的不确定度, D_r 是两届 y 值之差除以前一届 y 的不确定度. 表中 $A_r(e)$ 是电子的相对原子质量, 其余各常数的定义见表 1.)

相差显著, CODATA 工作组经过评估, 决定仍然保留 1986 推荐值, 只是把其相对不确定度从 $u_r = 1.3 \times 10^{-4}$ 降为 1.5×10^{-3} .

1998 CODATA 基本物理常数推荐值的全面介绍可参看文献 [3—5]. 这里仅就最重要的几项常数的变迁列于表 2 作一比较.

从表 2 中可看出, 偏差最大的是里德伯常数 R_∞ , 1998 推荐值与 1986 推荐值的偏差几乎达 1986 不确定度的 2.7 倍. 然而, 里德伯常数却是不确定度降低得最多的一个常数. 发生这么大的偏差是因为 R_∞ 1986 推荐值主要是根据 1981 年的实验结果, 后来证明有较大误差. 上世纪 90 年代初, 由于在类氢原子跃迁频率测量中, 光学频率计量代替了光学波长计量, 因此显著地降低了这类测量的不确定度. 而类氢原子能级理论的改善对不确定度的降低也作出了贡献.

从 1986 年到 1998 年的 13 年中, 实验和理论有许多新进展, 导致精细结构常数 α 、普朗克常数 h 和摩尔气体常数 R 的不确定度有显著降低. 这些常数不仅自身重要, 而且与里德伯常数 R_∞ 和电子的相对原子量 $A_r(e)$ 结合, 可以用来确定有重要意义的其他许多常数和转换因子. 这些进展有:

(1) 从拘禁在彭宁阱中的单个电子测量电子磁矩反常 a_e , 得到较好的实验结果, 再加上从量子电动力学 (QED) 计算 a_e 的理论公式也有改进, 由此得到的 α 值不确定度达 $u_r = 3.8 \times 10^{-9}$. α^{-1} 的推荐值由 1986 年的 137.035 989 5(61), 改进为 1998 年的 137.035 999 76(50), 不确定度减小了 12.2 倍.

(2) 1975 年构想的、上世纪 80 年代末第一次成功地付诸实现的动圈瓦特天平为 $K_J^2 R_K = 4/h$ 提供了两个实验值, 一个相对不确定度为 $u_r = 8.7 \times 10^{-8}$, 另一个为 $u_r = 2.0 \times 10^{-7}$ (其中 $K_J = 2e/h$ 是代表约瑟夫森效应的约瑟夫森常数; $R_K = h/e^2$ 是代表量子化霍尔效应的冯·克利青常数). 相对不确定度为 $u_r = 7.8 \times 10^{-8}$ 的 1998 年 h 的推荐值主要就是这两个结果得到的.

(3) 用球形声学共振器测量氩中的声速, 提供了摩尔气体常数 R 的新实验值 8.314 472(15) Jmol⁻¹K⁻¹, 其相对不确定度 $u_r = 1.7 \times 10^{-6}$, 大约是 1986 年推荐值的 1/5. 通过充气球形共振器测量声速, 从而确定摩尔气体常数的方法是美国国家标准局 (NBS, 现在改名为美国国家标准技术研究院, 简称 NIST) 的 Moldover 等人经过多年研究, 于 1988 年发表了正式结果. 这一结果至今没有人超过. 1986 年的推荐值所根据的结果来自圆柱形声学干涉仪, 这一方法的精确度受到传感器的非线性、吸收损失和反射损失、边层效应等因素的影响, 声速测量的精确度因此大受影响^[6,7].

(4) 用彭宁阱测量亚原子粒子的质量比取得了显著进展, 使电子、质子、氘核、氦核 (³He 核) 和 α 粒子的相对原子质量数据更为精确;

(5) 用晶体衍射法测量氘核中的中子结合能取得了中子相对原子质量更为精确的数值;

(6) 通过塞曼跃迁频率测定 μ 子原子 ($\mu^+ e^-$) 的基态超精细分裂 $\Delta\nu_{m_\mu}$, 再加上从量子电动力

学计算 $\Delta\nu_{m_\mu}$ 的理论公式更为精确,从而获得了更精确的电子- μ 子质量比 m_e/m_μ .

另外值得一提的是,在1998 CODATA 平差的输入数据中至少有三项来自中国:

一项是中国计量研究院(NIM)的研究人员从上世纪70年代起就开始了弱场和强场中测量质子旋磁比 Y'_p 的研究,1980年开始报道研究成果^[8],受到国际计量学界的关注,文献被多次引用.经过十几年的不断改进,刘瑞珉等人于1995年在《计量学报》上发表了《NIM对 Y'_p 及 $2e/h$ 的SI值的最新测定结果》一文^[9],宣布结果分别为 $Y'_p(\text{abs}) = 2.675\ 153\ 5(23) \times 10^8\ \text{T}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2e/h = 483\ 597.89(43)\ \text{GHz/V}$,其相对不确定度分别为 8.6×10^{-7} 和 8.8×10^{-7} .

另一项是张钟华等人用计算电容测定量子化霍尔电阻的实验方法,他们在1995年的《计量学报》上发表了《NIM用计算电容测定的量子化霍尔电阻的SI值》一文^[10],宣布在1994年春用这一方法测得 $i=1$ 时量子霍尔电阻的SI值为 $R_H = 25812.8084(34)\ \Omega$ 相对不确定度为 1.3×10^{-7} .

还有一项是华中科技大学引力实验中心罗俊等人用扭秤测定的牛顿引力常数 G ^[11].他们以独特的实验设计(长周期、高 Q 值)、优越的实验环境(安静、恒温、隔振)、扭秤仪器系统误差的深入细致研究,加上背景环境的同步监测,确保了实验精度.最终测得 G 为 $6.6699(7) \times 10^{-11}\ \text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$,其相对精度达到 105×10^{-6} .

2.2 2002 CODATA 平差

对2002 CODATA 推荐值的专门评述,国内报道不多,它与1998 CODATA 推荐值相比,时间虽然只隔了4年,但是实验和理论的新进展仍然是显著的,重要的有:

(1) 对牛顿引力常数 G 进行了新的测量,得到的结果相符甚好;

(2) 相对原子质量的实验值得到了改进,其中包括氦4、氧16和铯133;

(3) 氫的 $1S_{1/2} \rightarrow 2S_{1/2}$ 跃迁频率得到了更准确的数值;

(4) 质子束缚态均方根(rms)电荷半径取得了新的结果;

(5) 针对类氢离子 $^{12}\text{C}^{5+}$ 和 $^{16}\text{O}^{7+}$ 中的电子的束缚态 g 因子,进行了高度精确的测量;

(6) 对 μ 子的磁矩反常 a_μ 进行了相当精确

的测量;

(7) 从铯原子吸收和发射的光子测量所得到的原子反冲频率位移,求得普朗克常数 h 和 ^{133}Cs 原子质量的比值 $h/m(^{133}\text{Cs})$;

(8) 得到了一组有关硅的摩尔体积 $V(\text{Si})$ 的结果;

(9) 对以前测量过的硅晶格间距 $\{220\}$ 有新的实验发现.

在理论方面,对氢和氫的能级公式,电子和 μ 子磁矩反常 a_e 和 a_μ 的计算公式、 μ 子原子(μ^+e^-)的基态、超精细分裂和类氢离子的电子束缚态 g 因子的计算公式,均作了改进.

这些新成果导致了許多基本常数的数值和不确定度发生了重要变化,其中较为突出的是:

(1) 牛顿引力常数 G 的新结果彼此相符甚好,足以使 CODATA 基本常数工作组相信,更早得到的虽然可靠但却存在高度差异的一组数据,在平差中不必考虑,这导致了 G 的新推荐值相对不确定度减小10倍.

(2) 由于从实验进行了频率比 $[f_s(^{12}\text{C}^{5+})/f_c(^{12}\text{O}^{5+})]$ 和 $[f_s(^{16}\text{C}^{7+})/f_c(^{16}\text{O}^{7+})]$ 的精确测量,又从理论推出了电子在离子中束缚态 g 因子的理论表达式,使得 $A_1(e)$ 值和电子-质子质量比 m_e/m_p 达到了大约 5×10^{-10} 的相对不确定度(频率比中的 f_s 表示类氢离子在磁通密度的作用下,基态中的电子进动或“自旋翻转”频率, f_c 表示在同样磁通密度下的离子的回旋频率).跟1998年相比,它们的不确定度降低4倍以上.

(3) 1998平差的输入值中,包括了三项X射线光学干涉仪测定的特定硅晶的 $\{220\}$ 晶格间距.后来发现三项实验中两项有问题,因此那些实验的数据就没有包括在2002平差中.去掉了这些数据,反而消除了精细结构常数 α 的数值分散性,这些数值是从X射线精确测量普朗克常数与中子质量的比值 h/m_n 推出的.这样一来,从 h/m_n 得到的 α 值跟其他渠道获得的 α 值相符甚好.这项成果首先应该归功于光梳技术的发明,1999年,该项新技术第一次用于精确测定铯的跃迁频率,获得了很好的结果^[12](详见本文第3.1节).

(4) 发现电子磁矩反常 a_e 的理论公式中八阶系数 $A_1^{(8)}$ 有一错误,这样一来,从 a_e 实验结果求得的 α 值增大了 5.7×10^{-9} 倍,这大约是1998 CODATA α 推荐值的相对不确定度的1.5倍.其他实验也得到了 α 值.特别是 $h/m(^{133}\text{Cs})$ 的新结果使 α

推荐值的 u_r 从 1998 年的 3.7×10^{-9} 降到了 3.3×10^{-9} 然而 α 的偏差却达到了 1.3.

(5) 氢和氘的能级理论的重大进展和质子束缚态核均方根电荷半径 R_p 数值的改进, 消除了 1998 平差中理论与实验的系统偏差. 这样一来, 2002 CODATA 推荐值组中就增加了 R_p 和氘的束缚态均方根电荷半径 R_d 两项.

2002 CODATA 平差原先考虑采用 112 项输入数据, 结果只用了 105 项. 平差中有 61 个变数, 需要通过最小二乘法运算确定数值. 例如, 输入数据中包括 27 项 H 与 D 的跃迁频率和频率差. 在平差得到的常数中有 R_∞ , α , h 和 $A_r(e)$. 2002 CODATA 推荐值大多数都是从平差所得的常数计算出来的. 例如, 基本电荷是从表达式 $e = (2\alpha h/\mu_0 c)^{1/2}$ 计算得到的. 导出量的不确定度当然也是根据它们所依赖的平差常数的不确定度和协方差确定的.

在 2002 平差过程中碰到的主要困难是 $V_m(Si)$ 值与 4 项涉及约瑟夫森常数和冯·克利青常数的测量结果明显不相容: 其中有两项是动圈瓦特天平求得的 $K_J^2 R_K$ 乘积, 一项是汞静电计求得的 K_J , 再有一项是电容器伏特天平求得的 K_J .

CODATA 基本常数工作组最后决定在最后的最后小二乘法平差中给这些输入数据加权, 这样就出现了 2002 CODATA 推荐值组中有一些与普朗克常数关联的常数竟比 1998 CODATA 推荐值不确定度还要大的情况. 一般说来, 新信息会导致不确定度的降低, 但是这一次却是新信息使某些常数的不确定度增加了.

2002 CODATA 基本物理常数推荐值组的全面介绍可参看文献 [13]. 这里仅就最重要的几项基本常数的变迁作一比较, 见表 3.

表 3 2002 和 1998 CODATA 代表性推荐值相对不确定度的比较

量	2002 相对不确定度 u_r	1998 相对不确定度 u_r	2002 u_r 与 1998 u_r 之比	D_r
α	3.3×10^{-9}	3.7×10^{-9}	0.9	1.3
λ_C	6.7×10^{-9}	7.3×10^{-9}	0.9	1.3
h	1.7×10^{-7}	7.8×10^{-8}	2.2	-1.1
N_A	1.7×10^{-7}	7.9×10^{-8}	2.2	-1.0
e	8.5×10^{-8}	3.9×10^{-8}	2.2	1.1
R	1.7×10^{-6}	1.7×10^{-6}	1.0	0.0
k	1.8×10^{-6}	1.7×10^{-6}	1.0	0.1
σ	7.0×10^{-6}	7.0×10^{-6}	1.0	0.0
G	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-3}	0.1	0.2
R_∞	6.6×10^{-12}	7.6×10^{-12}	0.9	-0.3
m_e/m_p	4.6×10^{-10}	2.1×10^{-9}	0.2	-1.3
$A_r(e)$	4.4×10^{-10}	2.1×10^{-9}	0.2	-1.3

2.3 2006 CODATA 平差

2006 CODATA 推荐值及其简要评述见文献 [2]. 但还需指出的是, 2006 年基本物理常数推荐值与 2002 年的相比又有显著改善, 主要归功于下面要着重讲的彭宁阱等三项实验新技术的应用. 新信息还有来自法国奥赛(Orsay)原子质量数据中心 2003 年发布的新的原子质量评估, 这是继 1993 年(1995 年修正)之后经过十年准备、数据更精确、涵盖更全面的又一次更新.

2006 CODATA 的数据分析揭示了输入数据中有两处主要矛盾. 在 d_{220} 的绝对数值中有一个与其他 3 个不相符, 却与由 $h/m_n(d_{220})$ 推出的数值相符.

硅的摩尔体积的测量值与另外 5 个包含约瑟夫森常数和冯·克利青常数的结果不符, 这 5 个结果有 3 个来自自动圈瓦特天平所测的 $K_J^2 R_K$, 一个来自汞静电计的 K_J , 还有一个来自电容器伏特天平的 K_J .

通过数学分析, 评定者判定表达式 $K_J = 2e/h$ 和 $R_K = h/e^2$ 没有问题. 最后决定, 仍与上一届一样, 采取加权的办法, 即在有矛盾的输入数据的不确定度上乘以因子 1.5. 这样一来, 双方的差异就落在两个不确定度的限度之内了. 与此同时, 与之有关的导出常数的不确定度也受到一定影响, 不过虽然比实际的不确定度高, 但仍然低于 2002 CODATA 的水平(参看表 4).

表4 2006和2002 CODATA 代表性推荐值相对不确定度的比较^[14]

量	2006 相对不确定度 u_r	2002 相对不确定度 u_r	2002 u_r 与 2006 u_r 之比	D_r
α	6.8×10^{-10}	3.3×10^{-9}	4.9	-1.3
α_0	6.8×10^{-10}	3.3×10^{-9}	4.9	-1.3
λ_C	1.4×10^{-9}	6.7×10^{-9}	4.9	-1.3
h	5.0×10^{-8}	1.7×10^{-7}	3.4	-0.3
N_A	5.0×10^{-8}	1.7×10^{-7}	3.4	0.3
e	2.5×10^{-8}	8.5×10^{-8}	3.4	-0.3
R	1.7×10^{-6}	1.7×10^{-6}	1.0	0.0
k	1.7×10^{-6}	1.8×10^{-6}	1.0	0.0
σ	7.0×10^{-6}	7.0×10^{-6}	1.0	0.0
G	1.0×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.5	0.1
R_∞	6.6×10^{-12}	6.6×10^{-12}	1.0	0.0
m_e/m_p	4.3×10^{-10}	4.6×10^{-10}	1.1	0.2
$A_1(e)$	4.2×10^{-10}	4.4×10^{-10}	1.0	-0.1

3 三个有重大意义的实验新技术

近20年来,有重要意义的实验新技术不胜枚举,下面仅就对基本物理常数发展有特殊作用的三种新技术作一简要介绍。

3.1 光梳技术

早在1989年,德国马克斯·普朗克量子光学研究所的T. W. Hänsch博士就提出过飞秒激光频梳测频的设想。到了1999年,由Hänsch小组和NIST的J. L. Hall小组首先实现了用飞秒锁模激光的光频梳直接测量绝对频率的方法,从而发明了光梳技术。同年该研究所的Udem, Hänsch等人将这项技术用于精确测定铯的跃迁频率,获得了很好的结果^[12]。他们的做法是把铯的跃迁频率与一台便携式CH₄稳频3.39 μ m He-Ne激光器的四次谐波比较(参看图1)。He-Ne激光器是经PTB的铯原子钟校准,四次谐波 $4 \times 88.4\text{THz} = 354\text{THz}$ 与铯原子的335THz跃迁频率之间的差值,用跨越244 000个模的克尔镜锁模激光器的频梳测量。这一测量的结果是 $\nu[6S_{1/2}(F=3) - 6P_{1/2}(F=3)] = 335\,120\,562\,838(41)\text{kHz}$ 和 $\nu[6S_{1/2}(F=4) - 6P_{1/2}(F=3)] = 335\,111\,370\,206(41)\text{kHz}$ 两者之和: $\nu_{\text{eff}} = 670\,231\,933\,044(81)\text{kHz}$ 相对不确定度小于 1.2×10^{-10} ,远低于其他量。由此导出的 $\alpha^{-1} = 137.035\,992\,4(41)$,相对不确定度小于 3.0×10^{-8} 。2000年,M. Niering等人首次用光梳技术测H的 $1S_{1/2} - 2S_{1/2}$ 跃迁频率,得到的结果

是2 466 061 413 187. 103(46),相对不确定度仅为 1.9×10^{-14} ,远低于当时其他方法得到的结果,在2002 CODATA的输入数据中是最佳数值。

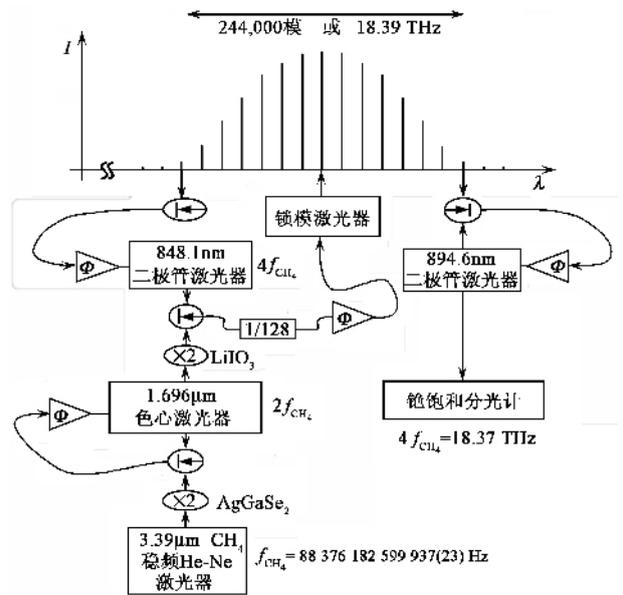


图1 频率链示意图

中国计量科学研究院从2002年开始飞秒光梳技术的研究,目前已研制了基于掺钛蓝宝石(Ti:Sapphire)锁模飞秒脉冲激光器的飞秒光学频率梳装置,并利用此装置测量了碘稳频532nm(¹²⁷I₂R(56)32-10)Nd:YAG固定激光器的频率,结果为563260223512991 $\pm 20\text{Hz}$ 相对不确定度为 3.6×10^{-14} 。这一数值在国际推荐值的不确定度之内,是直接溯源到铯原子微波频率基准的光学频率测量结果^[15]。

3.2 彭宁阱技术

长期以来,实验家就在研究如何把电子或其他带电粒子单个地拘禁在特殊设计的陷阱里,让它按人们的意愿动作,同时记录下它的运动参数,从而掌握它的各种特性.早在1958年,华盛顿大学的 H. G. Dehmelt 就提出了彭宁阱实验方法,经过他和其他人的多次改进,取得了很多成果,对历届 CODATA 平差中的电子磁矩反常和 g 因子作出了突出贡献.所谓彭宁阱,实际上是一种特殊设计的磁场和电场相互叠加的区域.其原始模型是彭宁(F. M. Penning)在1936年最先提出的^[16].

Dehmelt 的彭宁阱主体结构是一旋转双曲面圆环电极,上下各有共轭旋转双曲面形的罩电极.当在电极间加电压时,就形成四极电场,整个装置是封在真空度高达 10^{-12} Pa 的真空管内,真空管插入超导线圈中并一起浸在液氮中.超导线圈产生的磁场沿 z 轴均匀分布.电子进入这一电场与磁场叠加的区域中,立即受到三维约束.从经典理论的观点看,可以认为电子会同时作回旋、轴向振荡和磁控管三种运动.从这三种运动的频率可以计算出电子磁矩反常和 g 因子.

1986 CODATA 平差所用的主要辅助常数之一的 $g_e/2$ 或 $a_e = \frac{|g_e| - 2}{2}$ 值,就是华盛顿大学 Dehmelt 小组在1984年用彭宁阱实验获得的,数值为

$$g_e/2 = \mu_e/\mu_B = 1.001\,159\,652\,19(10) [10 \times 10^{-11}]$$

1998 CODATA 平差仍是以 Dehmelt 小组1987年的彭宁阱实验结果为主要依据,其数值为 $a_e = \frac{|g_e| - 2}{2} = 1.159\,652\,188\,3(42) \times 10^{-3} [3.7 \times 10^{-9}]$.

彭宁阱实验还可用于测量正电子、带电粒子和各种原子的质量,并且发展成为一系列新的实验方法.例如,斯德哥尔摩大学的 SMILETRAP(可用作原子质量谱仪)和哈佛大学的圆柱形电极彭宁阱,最近几年都取得了令人瞩目的成果.在2006 CODATA 输入数据中,哈佛大学的 Gerald Gabrielse 小组对电子磁矩反常 a_e 的新测定,达到了相对不确定度 $u_r = 6.5 \times 10^{-10}$ 的水平,对这一届平差精确度的提高发挥了独特作用.

图2是 Gabrielse 小组近年进行精密测量电子旋磁比所使用的圆柱形彭宁阱.为了测量, Gabrielse 和他的团队把单个电子禁锢在一个很小的彭宁阱中,一次达数月之久.这个彭宁阱之所以采用圆柱对

称,是为了消除由于小容器中被约束的辐射所引起的变形.从图2还可看出,单个电子被四级电场和几乎均匀的垂直强磁场拘捕在其中心.镍环产生微弱磁场梯度,耦合在电子的磁矩上.

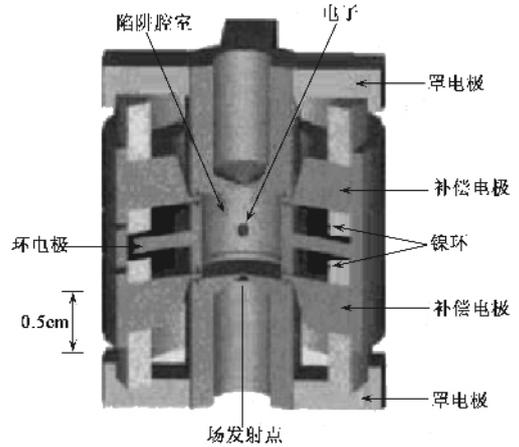


图2 圆柱形彭宁阱

值得注意的是,随着测量方法的扩展,各种途径得到的 α 值和 a_e 值,出现了明显的偏差,这是计量工作者面临的挑战.

图3显示了近年来各种测定结果的比较^[17].横线表示不确定度,图3(a)表示的是哈佛大学 Gabrielse 小组对电子磁矩反常 a_e 的新测定,它大大改进了华盛顿大学(UW)1987年的测量结果,但是显示有明显的偏差.图3(b)表示的是运用量子电动力学理论从 a_e 测量结果计算的 α^{-1} 值,从铷和铯原子反冲实验测定的 α^{-1} 值, $R_b(2006)$ 和 $C_s(2002)$ 以及2002年与2006年 CODATA 推荐值.

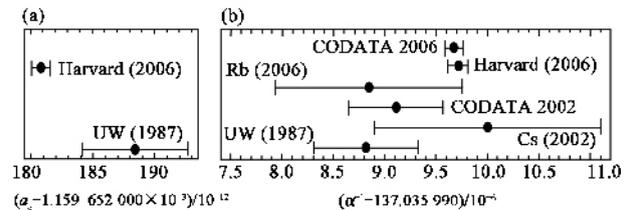


图3 各种途径得到的电子磁矩反常 a_e 和精细结构常数 α 比较^[18]

3.3 瓦特天平

瓦特天平(或称动圈瓦特天平)的设想是英国国家物理实验室(NPL)的 B. B. Kibble 于1975年首先提出的.它的结构及实验原理如图4所示^[18].这

一实验是用运动线圈装置比较电功率和机械功率，用 SI 单位制中的米 - 千克 - 秒测量机械功率，用约瑟夫森效应和量子化霍尔效应测电压和电流，得到电功率，从比较中得到约瑟夫森常数 K_J 和冯·克利青常数 R_K 以及它们的乘积 $K_J^2 R_K$ ，进一步还可求出普朗克常数 h 和电子质量 m_e ，因为 $h = 4/K_J^2 R_K$ ，而

$$m_e = \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2}.$$

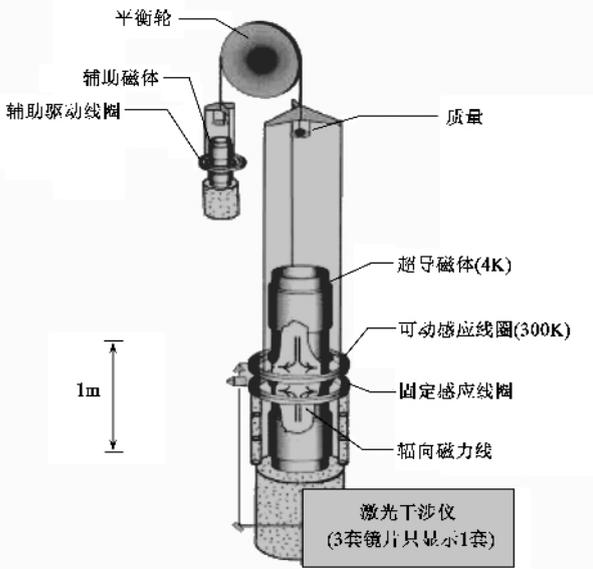


图4 NIST 动圈瓦特天平实验

实验者将通电矩形线圈悬于精密天平的一端，线圈处于磁通密度为 B 的均匀水平磁场中，通电流后由于安培力作用，需在天平上加砝码 m 。设动圈受部分长度为 l ，应有 $IBl = mg$ 。

再令线圈在不通电流的情况下以匀速垂直下降，感应出电压

$$U = lBv.$$

将以上两式合并，得

$$IU = mgv,$$

这正是电功率和机械功率相等的表达式。电流再经一电阻 Z 测量，得 $\frac{U^2}{Z} = mgv$ ，电压用约瑟夫森效应测量，得 $U_j(n) = nf/K_J$ （其中 n 为阶跃量子数 f 为频率），电阻用冯·克利青效应测量，得 $R_H(i) = R_K/i$ （其中 i 也是阶跃量子数），于是得

$$(nf/K_J)^2 \cdot i/R_K = mgv$$

或

$$K_J^2 R_K = n^2 f^2 i \cdot mgv.$$

实际测得的是以实验室基准或者 1990 年约定

值表示的结果，因此还要作一换算，例如，1990 年 NPL 的 Kibble 小组进行的瓦特天平实验最终结果为

$$K_J^2 R_K = K_{J-NPL}^2 R_{K-NPL} [1 + 16.14(20) \times 10^{-6}] \\ = 6.036\,7625(12) \times 10^{33} \text{ J}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad [2.0 \times 10^{-7}]$$

[中括号内的数字为相应常数的不确定度]，由此得到

$$h = 6.626\,068\,2(13) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad [2.0 \times 10^{-7}]$$

1998 CODATA 平差采用的输入数据不是 NPL 的结果，而是 NIST 的 E. R. Williams 等人在 1998 年根据同样原理，利用超导螺线管得到的新值：

$$K_J^2 R_K = K_{J-90}^2 R_{K-90} [1 - 0.008(87) \times 10^{-6}] \\ = 6.036\,761\,85(53) \times 10^{33} \text{ J}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad [8.7 \times 10^{-8}],$$

由此得到

$$h = 6.626\,068\,9(58) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad [8.7 \times 10^{-8}]$$

2006 CODATA 平差得益于 NIST 在 2005 年报道的新数据^[19]，这是 R. L. Steiner 小组经过一二十年对瓦特天平实验不断改进所取得的阶段性成果。他们得到

$$h = 6.626\,069\,01(34) \times 10^{-34} \text{ Js} \quad [5.2 \times 10^{-8}], \\ m_e = 9.109\,382\,14(47) \times 10^{-31} \text{ kg} \quad [5.2 \times 10^{-8}]$$

Steiner 等人在发表这一结果时表示，他们的目标是使 h 和 m_e 的相对不确定度达到或者小于 2×10^{-8} ，这个目标一旦实现，并且得到国际上的公认和复现，人们就可宣布电子千克取代千克原器了。

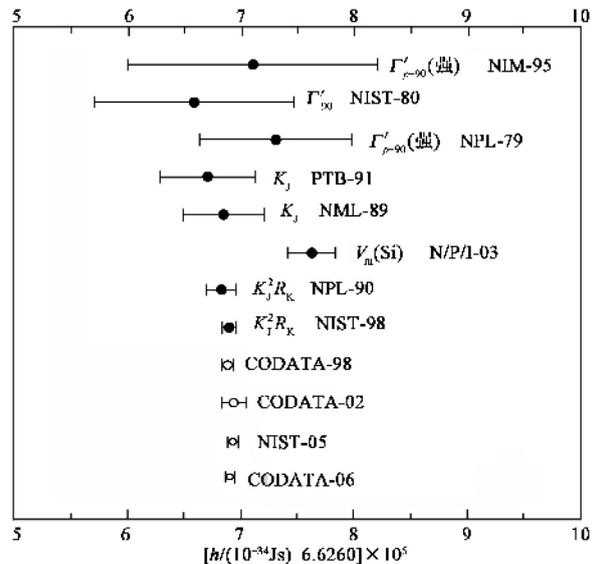


图5 历年来测量普朗克常数的实验结果

然而，道路仍然是艰巨的，尽管历年来测量普朗克常数的实验结果相符性甚好，但还是有难以克服的分歧，请看图 5，图中列出了历年来部分国家实验室测量普朗克常数的实验结果。横线表示不确定度，

NIM 表示中国计量科学研究院 ,NPL 表示英国国家物理实验室 ,PTB 表示德国技术物理研究院 ,NML 表示澳大利亚国家计量实验室 ,N/P/I 表示 NMIJ (日本国家计量院) - PTB - IRMM(比利时物资计量研究院)综合结果. 图中显示的结果基本相符,也有相符性较差的,其中特别值得关注的是 2003 年 N/P/I 由硅的摩尔体积 $V_m(\text{Si})$ 得到的普朗克常数与其他结果的偏差大大超过了不确定度. 不解决这类问题,电子千克的“宝座”怎么能坐稳呢?

中国计量科学研究院已把千克新定义方面的研究列入“十一五”计划中^[20],并已在用高度提纯的硅晶体中的硅原子质量作为新的量子质量基准方面进行了探索. 我们深信,人类宣布电子千克取代千克原器已是指日可待了,它的实现必将产生深远影响,值得全社会关注.

参考文献

[1] 郭奕玲. 物理,1989,18(3):129[Guo Y L. Wuli(Physics), 1989,18(3):129(in Chinese)]
 [2] 卢森锴,郭奕玲,沈慧君. 物理,2008,37(3):183[Lu S K, Guo Y L, Shen H J. Wuli(Physics),2008,37(3):183(in Chinese)]
 [3] 沈乃澂. 物理,2001,30(4):203[SHEN N C. Wuli(Physics), 2001,30(4):203(in Chinese)]
 [4] Mohr P J, Taylor B N. J. Phys. Chem. Ref. Data, 1999, (28):1713; Rev. Mod. Phys., 2000(72):351; 沈乃澂编译,聂玉昕审校. 基本物理常数 1998 年国际推荐值. 北京:中

国计量出版社,2004[SHEN N C (ed & trans),Nie Y X (check). 1998 International Recommended Value of Fundamental Physical Constants, Beijing: Chinese Metrology Press, 2004(in Chinese)]
 [5] Mohr P J, Taylor B N. Physics Today 2000 53(8):3G6
 [6] Moldover M R *et al.* J. Res. Nat. Bur. Stand., 1988 (93) 85
 [7] 郭奕玲. 物理,1991,20(5):303. [Guo Y L. Wuli(Physics), 1991,20(5):303(in Chinese)]
 [8] Chiao W, Liu R, Shen P. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1980, IM-29:238
 [9] 刘瑞珉,刘恒基,金惕若等. 计量学报,1995,16(3):161[Liu R M, Liu H J, Jin T R *et al.* Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(3):161(in Chinese)]
 [10] 张钟华,王晓超,王登安等. 计量学报,1995,16(1):1[Zhang Z H, Wang X C, Wang D A *et al.* Acta Metrologica Sinica, 1995 (16):1(in Chinese)]
 [11] Luo J, Hu Z K, Fu X H *et al.* Phys. Rev. D, 1999, 59:042001
 [12] Udem T, Reichert J, Holzwarth R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82:3568
 [13] Mohr P J, Taylor B N. Rev. Mod. Phys., 2005 (1):77
 [14] Mohr P J, Taylor B N. Phys. Today 2007 56(7):54
 [15] 方占军,王强等. 物理学报,2007,56(10):5681[Fang Z J, Wang Q. Acta Phys. Sin., 2007 56(10):5681(in Chinese)]
 [16] Penning F M. Physica 1936 3:873
 [17] Odom B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006 97:030801
 [18] Williams E R, Steiner R L, Newell D B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:2404
 [19] Steiner R L, Williams E R, Newell D B *et al.* Metrologia, 2005, 42:431
 [20] 张钟华. 中国计量,2006(3):9[ZHANG Z H. Chinese Metrology 2006 (3):9(in Chinese)]

· 物理新闻和动态 ·

⁸He 的电荷分布半径

⁸He 原子核中包含 2 个质子 6 个中子,是氦元素中最重的同位素,也是地球上中子-质子比最大的核素. 最近,美国、法国、加拿大的一个联合研究组第一次成功地测量了其电荷分布半径,结果显示,⁸He 原子核中质子分布的半径为 1.93 fm,比⁶He(2.068 fm)要小. 也就是说,质量较轻的⁶He 核中质子的空间分布反而更大.

联合研究组在法国 GANIL 实验室使用 1 GeV 的¹³C 束流轰击加热到约 2000 K 的石墨靶,同时产生⁶He 和⁸He,经慢化后注入原子束装置. 磁-光阱(magneto-optical trap)是实验的关键所在,利用电磁场和可变频率的激光组合,具有选择单个原子的灵敏度以及极高的谱学分辨能力. 通过比较原子光谱中的细微移动,确定了⁶He 和⁸He 的电荷分布半径.

现今的核结构理论认为,⁶He 和⁸He 的核芯是包含 2 个质子和 2 个中子的⁴He,即 α 粒子.⁶He 的 2 个多余的中子围绕着核芯做轨道运动,形成所谓的中子晕结构. 按照这个模型,α 核芯不是固定不动的,它会在质量中心附近相对于晕中子做轻微的摇摆. 换句话说,⁶He 和⁸He 的电荷分布半径实际上反映了 α 核芯与晕中子的一种关联. 对于⁸He,由于中子晕包含 4 个中子,使这种关联更趋向球形对称,从而减小了其核芯中的质子的空间分布半径. 联合研究组发言人、美国阿贡(Argonne)国家实验室物理学家 Peter Mueller 说:“现今的核结构理论在预言⁸He 的电荷分布半径上非常成功,这为预言更重的原子核增添了信心”. 有关论文已发表在 Physical Review Letters, 2007, 99:252501 上

(友宝 编译自 Physics News Update, 21 December 2007)