

万有引力常数 G 精确测量实验进展

刘建平 邬俊飞 黎卿 薛超 毛德凯 杨山清 邵成刚 涂良成 胡忠坤 罗俊

Progress on the precision measurement of the Newtonian gravitational constant G

Liu Jian-Ping Wu Jun-Fei Li Qing Xue Chao Mao De-Kai Yang Shan-Qing Shao Cheng-Gang
Tu Liang-Cheng Hu Zhong-Kun Luo Jun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 160603 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181381

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181381>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[近距离牛顿反平方定律实验检验进展](#)

Recent progress in testing Newtonian inverse square law at short range

物理学报.2018, 67(16): 160401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180636>

[基于原子干涉仪的微观粒子弱等效原理检验](#)

Test of weak equivalence principle of microscopic particles based on atom interferometers

物理学报.2018, 67(16): 160402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180621>

[利用激光冷却原子束测量氦原子精密光谱](#)

Precision spectroscopy of helium using a laser-cooled atomic beam

物理学报.2012, 61(17): 170601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.170601>

专题: 精密测量物理

万有引力常数 G 精确测量实验进展*刘建平¹⁾ 邬俊飞¹⁾ 黎卿¹⁾ 薛超²⁾ 毛德凯¹⁾ 杨山清^{1)†} 邵成刚¹⁾
涂良成¹⁾²⁾ 胡忠坤¹⁾ 罗俊^{1)2)‡}

1) (华中科技大学物理学院, 基本物理量测量教育部重点实验室, 引力与量子物理湖北省重点实验室, 武汉 430074)

2) (中山大学天琴引力物理研究中心, 珠海 519082)

(2018年8月1日收到; 2018年8月10日收到修改稿)

万有引力常数 G 是人类历史上引入的第一个基本物理学常数, 其在理论物理、天体物理和地球物理等许多领域中扮演着重要角色. 两百多年来, 人们共测量出了 200 多个 G 值, 但 G 的测量精度仍然是所有物理学常数中最差的, 这一现象反映了测 G 工作本身的复杂性和困难性. 本文简要概述了 G 值测量的意义和测 G 的历史, 并结合自 2010 年以来国际上新出现的三个高精度测 G 实验介绍这一领域的研究进展, 以及华中科技大学引力实验中心测 G 工作的最新动态.

关键词: 万有引力常数 G , 精密测量, 扭秤周期法, 角加速度反馈法

PACS: 06.20.Jr, 04.80.Cc

DOI: 10.7498/aps.67.20181381

1 引言

万有引力定律的发现是 17 世纪自然科学最伟大的成果之一. 它把地面上物体运动和天体运动的规律统一起来, 对物理学和天文学的发展奠定了坚实的基础. 它第一次解释了自然界中四种基本相互作用之一的引力相互作用, 在人类认识自然的历史上树立了一座里程碑.

在万有引力定律中, 引力常数 G 是一个普适常数, 不受物体的大小、形状、组成成分等因素的影响^[1]. 由于引力的不可屏蔽性, 在大尺度的天体之间, 万有引力起支配作用. 在与有心力问题相关的天体力学以及轨道动力学中均含有 G 或其他隐含的类似因子^[2], 譬如地球引力常数 GM_{\oplus} , 其中 M_{\oplus} 为地球的质量. 目前采用 LAGEOS 卫星激光测距^[3] 得到的地球引力常数的不确定度仅为 0.002 ppm. 如果引力常数 G 的测量精度能够提高, 则地球质量的测量精度可以提高到相应的量级. 除

天体运动外, 天体的演化和结构模型亦与 G 有密切的联系^[4].

在宇宙学、引力物理、粒子物理与场论等现代理论研究中, 引力常数 G 起着举足轻重的作用. 引力常数 G 、Planck 常数 \hbar 以及光速 c 的不同组合给出了描述自然界基本常数体系的 Planck 长度、时间以及质量等物理量^[5,6], 如 Planck 质量可以定义为 $m_{\text{P}} = \sqrt{\hbar c/G}$. 在地球物理学中, G 值的精确测量也十分重要, 其测量精度限制了地球模型中使用的密度与弹性参数的精度^[7]. 自 Dirac 提出“大数假说” (Large Number Hypothesis) 后^[8-11], 人们日益关注有关引力和宇宙大尺度的结构等问题. 标量-张量引力理论^[12] 认为引力常数由一个标量场的平均值的倒数所决定, 其中标量场与宇宙的质量密度有关. 而在膨胀宇宙模型中, 引力常数随时间减小^[13,14]. 相关实验亦被用于验证 G 随时间和作用距离的变化规律^[15]. 对 G 值进行精确测量, 也将有助于对所谓的“第五种力”进行检验^[16-18]. 此

* 国家自然科学基金重大项目 (批准号: 91536223) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB832801) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ysq2011@hust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: junluo@hust.edu.cn

外, 有学者提出 G 是否能被当作一个基本常数来对待^[19], 而这将要求极大地提高 G 值的测量精度.

一系列相关的科学问题围绕着引力相互作用的本质、 G 的精确值是多少、 G 是否随时间变化等展开. 对引力常数 G 进行精确的测量有助于对这些科学问题的深入研究和认知, 也因此促使着科学家们在此领域开展了长达两个多世纪的实验工作, 并取得了一系列卓有成效的结果. 本文从国际上测 G 的历史、2010 年以来新的测 G 结果以及本团队在测 G 方面的工作等依次进行介绍.

2 万有引力常数 G 测量的历史

1798 年, 英国物理学家 Cavendish 利用 Michell 制作的扭秤 (torsion balance) 首次精确地测量出地球的密度^[20], 后人根据他的实验结果推导出第一个 G 值为 $G = (6.67 \pm 0.07) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对精度 1%. 二百多年过去了, 随着科学技术的发展与进步, 国际上先后出现了许多测 G 方法和相关实验, 并产生了 200 多个 G 值, 但 G 值的测量精度仅仅提高了不到三个数量级^[21,22], 几乎是每一个世纪测量精度提高一位数. 到目前为止, G 值的测量精度仍然是所有基本物理学常数中最差的, 纵观古今, 没有哪个物理常数的测量具有如此大的难度.

为了促进全球各个研究领域对提高科技数据的有用性和有效性进行合作, 国际科学联合会 (International Council for Science, ICSU) 于 1969 年成立了国际科技数据委员会 (Committee on Data for Science and Technology, CODATA), 并一直致力于基本物理学常数的评估工作. CODATA 于 1973 年根据 Heyl 等的测量结果给出了第一个万有引力常数 G 值的推荐值^[23], 并分别于之后的 1986 年, 1998 年, 2002 年, 2006 年, 2010 年和 2014 年汇总世界上各个实验组的 G 值测量结果并给出推荐值, 历届 CODATA 推荐的 G 值列于表 1.

由于多数研究组给出的测量结果在误差范围内并不符合, 偏差远大于其各自宣称的精度, 因此历届 CODATA 推荐的 G 值精度并没有本质上的提高. 1995 年德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 给出的 G 值测量结果^[30] 甚至比 CODATA-1986 推荐的 G 值大 6416 ppm, 但其相对不确定度仅 83 ppm,

是 CODATA-1998 收录的所有 G 值中的第二高精度值^[25]. 由于 PTB 的结果与 CODATA-1986 差别极大, 从而直接导致了 CODATA-1998 推荐的 G 值不确定度达到了 1500 ppm, 出现精度变差 10 倍的反常现象.

表 1 历届 CODATA 推荐的 G 值

Table 1. The CODATA recommended values of G in recent years.

代号	$G/10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	u_r/ppm
CODATA-1973 ^[23]	6.6720(41)	615
CODATA-1986 ^[24]	6.67259(85)	128
CODATA-1998 ^[25]	6.673(10)	1500
CODATA-2002 ^[26]	6.6742(10)	150
CODATA-2006 ^[27]	6.67428(67)	100
CODATA-2010 ^[28]	6.67384(80)	120
CODATA-2014 ^[29]	6.67408(31)	47

在最近一轮的基本物理学常数调整中, CODATA-2014 推荐的 G 值为^[29] $(6.67408 \pm 0.00031) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 47 ppm. CODATA-2014 所收录的 G 值如表 2 和图 1 所示.

在表 2 和图 1 中, 精度好于 50 ppm 的有 8 个, 分别是: 1) 2000 年美国华盛顿大学采用扭秤角加速度法测量的 G 值 (UWash-00), 为 $6.674215(92) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 14 ppm^[34], 此结果是至今已经公开发表的结果中精度最高的 G 值; 2) 2001 年国际计量局使用扭秤直接倾斜法和静电补偿法两种方法测量的 G 值 (BIPM-01), 为 $6.67559(27) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 40 ppm^[35]; 3) 2002 年瑞士苏黎世大学采用天平法测量的 G 值, 为 $6.67407(22) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度约 33 ppm^[46], 在随后的 2006 年, 他们改进了标定, 天平的非线性效应和零点漂移等问题^[39], 得到新的结果 (Uzur-06), 为 $6.674252(121) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 19 ppm; 4) 2003 年新西兰测量标准实验室采用静电补偿法测量的 G 值 (MSL-03), 为 $6.67387(27) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度达到 40 ppm^[37]; 5) 2009 年华中科技大学实验组采用扭秤周期法测量的 G 值 (HUST-09), 为 $(6.67349 \pm 0.00018) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对

不确定度 26 ppm^[40,41]; 6) 2010 年美国国家标准局和科罗拉多大学联合实验室采用双单摆 Fabry-Perot (F-P) 腔法得到的 G 值 (JILA-10), 为 $6.67234(14) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 21 ppm^[42]; 7) 2014 年国际计量局继续使用扭秤直接倾斜法和静电补偿法两种方法重新测量的 G 值 (BIMP-14), 为 $6.67554(16) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 不确定度 24 ppm^[43], 在新实验中, 他们全方面地更新了实验装置, 但测量方法依旧与其 2001 年的实验一样, 两次的测量结果在误差范围内符合; 8) 2014 年美国加州大学欧文分校实验组

在 4 K 低温下采用扭秤周期法测量的 G 值 (UCI-14), 结果为 $6.67433(13) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 19 ppm^[45]. 除了上述实验, 2014 年意大利佛罗伦萨大学的 Tino 研究组采用冷原子干涉法测量出了 G 值 (LENS-14), 为 $6.67191(99) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 148 ppm^[44]. 尽管相对不确定度比较大, 但 Tino 研究组采用的这种基于冷原子干涉的方法与传统的基于扭秤或天平测 G 实验区别较大, 这对寻找不同测 G 方法中未被发现的系统误差具有非常重要的意义, 因此被 CODATA-2014 收录.

表 2 CODATA-2014 收录的测 G 实验结果
Table 2. The adopted values of G in CODATA-2014 adjustment.

No.	实验者	代号	实验方法	$G/10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	u_r/ppm
1	Luther et al.	NIST-82 ^[31]	扭秤周期法	6.67248(43)	64
2	Karagioz et al.	TR&D-96 ^[32]	扭秤周期法	6.6729(5)	75
3	Bagley et al.	LANL-97 ^[33]	扭秤周期法	6.67398(70)	100
4	Gundlach et al.	UWash-00 ^[34]	角加速度法	6.674255(92)	14
5	Quinn et al.	BIMP-01 ^[35]	簧片扭秤补偿法/直接倾斜法	6.67559(27)	40
6	Kleinevoβ et al.	UWup-02 ^[36]	双单摆 F-B 腔法	6.67422(98)	150
7	Armstrong et al.	MSL-03 ^[37]	扭秤静电补偿法	6.67387(27)	40
8	Hu et al.	HUST-05 ^[38]	扭秤周期法	6.67222(87)	130
9	Schamminger et al.	Uzur-06 ^[39]	天平补偿法	6.67425(12)	19
10	Luo et al.	HUST-09 ^[40,41]	扭秤周期法	6.67349(18)	27
11	Parks et al.	JILA-10 ^[42]	双单摆 F-B 腔法	6.67234(14)	21
12	Quinn et al.	BIMP-14 ^[43]	簧片扭秤补偿法/直接倾斜法	6.67554(16)	24
13	Prevedelli et al.	LENS-14 ^[44]	自由落体法	6.67191(99)	150
14	Newman et al.	UCI-14 ^[45]	扭秤周期法	6.67435(13)	19
2014 CODATA		CODATA-2014 ^[29]		6.67408(31)	47

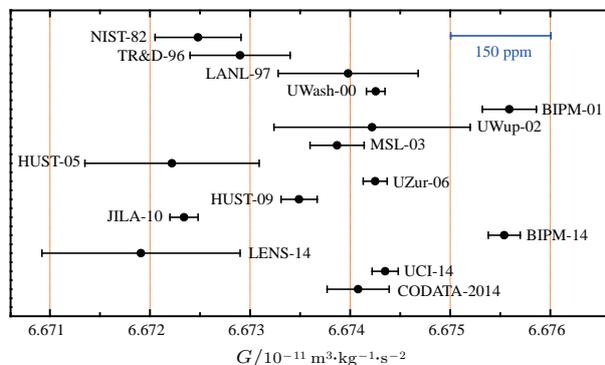


图 1 CODATA-2014 收录的 G 值
Fig. 1. The adopted values of G in CODATA-2014 adjustment.

不难发现, 在 CODATA-2014 收录的 G 值中, 最大值 BIMP-01 和最小值 LENS-14 两者中心值的差别达到约 550 ppm, 远远大于他们各自宣称的精度. 导致这种不符合程度的最大可能原因在于这些测 G 实验中存在着尚未被正确认识或评估的系统误差, 同时也体现了测 G 这一存在已久的困难. 众所周知, 引力相互作用是四种基本相互作用中最微弱的一种. 微弱的引力信号极易被其他信号所干扰, 因此在实验中必须通过巧妙的设计和精细的操作来克服电、磁、振动、温度等其他外部因素对实验的干扰. 另外, 引力的不可屏蔽性也使得外部环境

的引力场的变化也会贡献额外的干扰信息, 所有这些干扰因素都需要经过充分的评估和研究.

迄今为止, 由于不能用其他基本常数来间接导出 G 值, 引力常数 G 的测量只能根据牛顿万有引力定律来设计实验. 在牛顿万有引力定律中, 包含质量、位置等物理量信息, 因此, 要高精度地测量 G 值, 就不可避免地要精确测量物体的密度分布、物体间的相对位置等, 这是限制目前引力常数测量精度提高的一个十分重要的因素. 同时, 在各种测量工具中, 如扭秤和天平等, 尽管采用了当下十分先进的机械加工与测量技术, 但各种寄生耦合效应和系统误差最终限制了测量结果的精度. 另外, 测量人员的水平和主观因素等, 亦是导致测量结果出现偏差的一个可能因素.

3 测 G 实验最新进展

到目前为止, 在 CODATA-2014 收录的 14 个 G 值中, 精度最高的是 2000 年美国华盛顿大学的引力研究组采用扭秤角加速度反馈法测量的结果^[34]. 在其他结果中, 采用扭秤周期法获得的实验结果有六个, 分别为 NIST-82^[31], TR&D-96^[32], LANL-97^[33], HUST-05^[38], HUST-09^[40,41] 和 UCI-14^[45], 其中 HUST-05 和 HUST-09 是华中科技大学引力实验中心采用扭秤周期法测量给出的结果. 其他七个研究组采用的方法分别为簧片扭秤补偿法/直接倾斜法, 双单摆 F-P 腔法, 扭秤静电补偿法, 天平补偿法, 和冷原子干涉法等. G 值的精确测量已经有二百多年的历史, 国际上有一些综述文章比较全面地介绍了历史上的测 G 工作^[21,22]. 我们在 2010 年也应邀撰写了一篇综述论文^[47]. 通过这些综述可比较全面系统地了解测 G 的方法和研究进展. 从 2010 年至今, 国际上出现的三个高精度的实验结果分别为采用扭秤直接倾斜法和静电补偿法的 BIPM-14、采用低温扭秤周期法的 UCI-14 以及采用冷原子干涉法的 LENS-14. 下面主要介绍这三个实验所采用的方法及其发展历史和现状.

3.1 扭秤直接倾斜/静电补偿法

直接倾斜法和静电补偿法通常采用精密扭秤作为检验质量. 扭秤由一根细丝悬挂, 可在水平面内自由转动, 这种设计的最典型特点是将待测的引力信号置于与地球重力场正交的水平面内, 以此减

少地球重力场及其波动的影响^[48]. 直接倾斜法是扭秤最直接的工作模式. 如图 2 所示, 其基本原理是利用扭秤自身的回复力矩平衡吸引质量施加在扭秤上的引力力矩, 通过对扭秤的扭转角度 θ 进行高精度的测量, 并使用胡克定律建立起引力力矩和扭秤偏转角之间的关系, 从而给出 G 值. 1798 年, Cavendish 就是采用这种方法称量了地球质量, 后人从他的实验给出了历史上第一个 G 值^[20]. 直接倾斜法的难点在于要求对扭秤旋转角 θ 进行绝对测量, 且扭丝的性质如非线性、热弹性、平衡位置漂移等会对结果造成直接影响. 为了减小扭丝特性的影响, 一种解决方案是使用静电力对引力力矩进行实时补偿, 使扭丝不扭转, 扭秤始终保持原来的静止状态, 从而将直接倾斜法中对角位移的直接测量转换为对电信号的测量. 由于在实验过程中扭丝只起到悬挂扭秤的作用, 因此其自身特性并不会影响到 G 值测量结果, 所以极大地减小了扭丝的非线性等因素的影响. 但是静电补偿法本质上仍然是一种静态测量方法, 静电力的测量极易受到环境温度波动等因素的干扰, 而且不能像动态实验那样通过动态调制或者差分的方法减少环境因素的干扰. 此外, 由于装置的复杂结构和边界效应等因素的影响, 电极和检验质量之间的电容并不能简单地通过理论计算给出, 而需要对其进行高精度的标定.

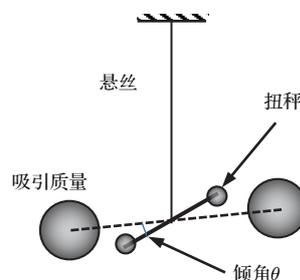


图 2 扭秤直接倾斜法测 G 基本原理

Fig. 2. The principle of G measurement with free deflection method.

2001 年, 国际计量局 BIPM 的 Quinn 等在同一套装置上同时使用扭秤直接倾斜法和静电补偿法两种方法进行 G 值测量. 这两种方法拥有着不同的误差源, 一种方法中的未知系统误差很有可能不出现在另一种方法中, 通过相互比较可以有效提高测量结果的置信水平. BIPM-01 实验得到的 G 值为 $6.67559(27) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 40 ppm^[35], 该实验结果比 CODATA-2002, 2006, 2010, 2014 收录的其他 G 值都偏大. 在随后

的2013年, BIPM的研究组重新搭建了实验装置, 检验质量和吸引质量也做了相应的改进. 如图3所示, 一个直径295 mm, 厚8 mm的铝盘由簧片悬挂, 铝盘用于支撑4个圆柱形检验质量. 每个检验质量由铜碲合金制成, 直径和高度均为55 mm, 质量为1.2 kg, 4个检验质量对称地放置在铝盘上, 半径为120 mm. 真空容器外同样对称地放置了4个圆柱形吸引质量, 其材质与检验质量相同, 但体积更大, 其直径和高度分别为120 mm和115 mm, 单个吸引质量重11 kg. BIPM的研究组使用一根长度 $L = 160$ mm, 宽度 $b = 2.5$ mm, 厚度 $t = 30$ μm 的簧片代替传统的扭丝用于悬挂检验质量和合金铝支撑盘, 簧片的弹性系数为

$$k = \frac{bt^3F}{3L} + \frac{Mgb^2}{12L}, \quad (1)$$

其中 F 为材料的剪切模量, Mg 为扭摆的重量. 上式中的两项均提供回复力矩, 第一项类似于圆形扭丝提供的弹性恢复力矩, 而第二项则是当簧片扭转时扭摆在地球重力场中的位置升高所致. BIPM实验中使用的簧片悬挂系统, 第二项占比高达90%. 由于重力是保守力, 所以第二项没有耗散, 这使得簧片总的耗散较小, Q 值达到 10^5 的水平, 因此有效地减小了测 G 实验中的滞弹性效应和降低了扭秤热噪声的影响. 他们得到的新实验结果为 $6.67554(16) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度24 ppm^[43,49], 与他们2001年的结果在误差范围内

符合, 但实验结果仍然是CODATA-2014收录的14个结果中最大的.

除了BIPM的研究组, 新西兰测量标准实验室(MSL)的Fitzgerald和Armstrong同样采用了静电补偿法测量万有引力常数 G . 其实验原理与BIPM类似, 都是通过伺服反馈电压作用到检验质量上的力矩来平衡吸引质量施加的引力力矩, 从而将角位移的直接测量转换为对电信号的测量. 在静电补偿法中, 电极电容 C 对检验质量转角 θ 的导数 $dC/d\theta$ 是电信号测量的关键参数, 需要对其进行高精度的标定. MSL使用了加速度法对其进行测量, 使得 G 值表达式中不包含检验质量尺寸和质量, 因此 G 值测量结果不依赖于检验质量的密度分布, 彻底消除了密度均匀性的影响. 为了提高测量结果的可靠性, 实验中还尝试了不同的电压(30—270 V)和不同材料的吸引质量(不锈钢和铜), 测量结果之间的符合程度非常好. MSL于1995年首次公布其实验结果为^[50] $6.6656(6) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. 1999年, 他们公布的改进实验结果为^[51](MSL-99) $6.6742(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. 此后进一步改进的实验结果为(MSL-03) $6.67387(27) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度达到40 ppm^[37], 但实验结果均比BIPM给出的结果小, MSL-03也被收录到CODATA-2014中.

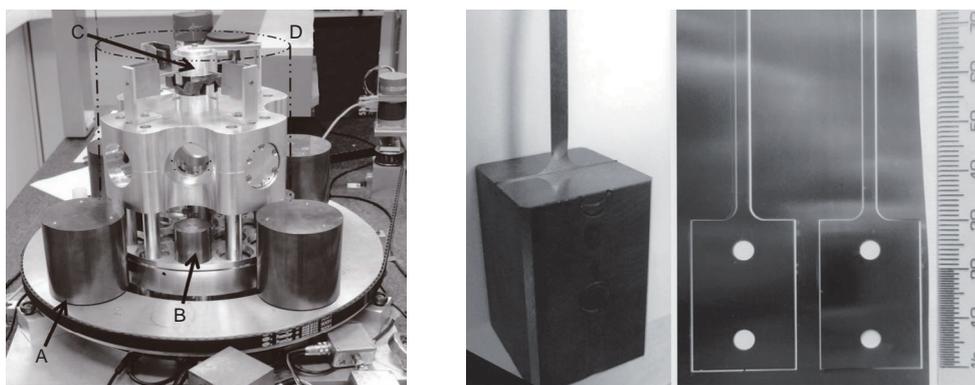


图3 BIPM-14测 G 装置和簧片照片^[49]

Fig. 3. The photos of apparatus and torsion strip of BIPM-14^[49].

3.2 扭秤周期法

扭秤周期法的基本原理是测量吸引质量位于不同位置时(通常是指近程和远程两种不同配置)扭秤周期的变化量从而给出 G 值^[47], 如图4所示.

扭秤周期法测 G 的表达式为

$$G = \frac{I(\omega_n^2 - \omega_f^2) - (K_n - K_f)}{C_{gn} - C_{gf}}, \quad (2)$$

其中 ω , K , C_g 分别代表扭秤频率、扭丝弹性系数、引力耦合系数(由扭秤和吸引质量的几何与质量项

决定); 下标 n 和 f 分别代表吸引质量近程和远程两种不同的配置. 在近程配置下, 吸引质量施加在扭秤上的额外力矩使扭秤的总力矩变大, 频率增加, 周期变短; 反之, 在远程配置下, 扭秤周期变长. $\Delta K = K_n - K_f$, 为扭丝弹性系数在两个配置下的变化量, 与扭丝特性相关, 尤其是滞弹性效应^[40,41].

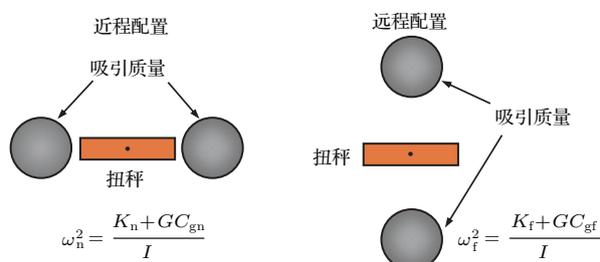


图4 扭秤周期法测 G 基本原理 (俯视图)

Fig. 4. The principle of G measurement with Time-of-Swing method.

扭秤周期法是一种动态差分的测量方法, 其将测量对象从微弱引力转化为容易高精度测量的时间, 不需要标定力或力矩, 且在两种状态下的差分测量模式可以有效地消除或减小共同干扰因素的影响. 但是高灵敏度扭秤的周期一般较长, 因而所需测量时间也较长, 对外界环境的稳定性提出了更高的要求. 此外, 扭秤周期法对扭丝性质是极其依赖的, 对所选用悬丝的各种特性及其误差评估在扭秤周期法实验中至关重要.

目前扭秤周期法是被采用次数最多的方法之一. 这种方法最早是19世纪初期被提出来的, 到了20世纪三四十年代, Heyl^[52]将这种方法进行改进, 其于1942年给出的测量结果^[53]被作为CODATA-1973中 G 值的首次推荐值. 1982年, Luther和Towler利用直径12 μm 、长40 cm的镀金石英丝悬挂哑铃型扭秤^[31], 钨球作为吸引质量, 利用其密度大的特性获得尽可能大的引力效应. 他们采用扭秤周期法进行了 G 值测量, 测量结果为 $6.6725(4) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度64 ppm, 此结果被称之为NIST-82. 该实验是20世纪80年代初最为成熟的测 G 实验, 有相对明确的误差评估, 因此在将不确定度放大2倍之后, 此次测量结果被直接作为CODATA-1986^[24]的推荐 G 值.

随后Karagioz和Izmailov^[32]设计了吸引质量存在多种配置的扭秤周期法测 G 实验(TR&D-96). 吸引质量为不锈钢球体, 它的两个托盘对称地放

置在扭秤两侧, 托盘上各有10个不同位置的圆孔用于摆放球体. 实验中测量了吸引质量处于不同位置时的扭秤周期变化, 给出 G 值为 $6.6729(5) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度75 ppm.

在早期的扭秤周期法测 G 实验中, 均认为不同配置下扭丝弹性系数是一个常数. 1995年, 日本科学家Kuroda根据材料弛豫强度呈特定分布的Maxwell模型指出扭丝的滞弹性效应(弹性系数对其运动频率的依赖关系)会使得周期法测 G 的结果偏大 $1/(\pi Q)$ ^[54], Q 为扭秤系统的品质因子(由内耗导致). 而Newman和Bantel^[55]则根据更一般的情况推导出滞弹性效应对周期法测 G 实验的影响处于 $0-1/(2Q)$ 这一区间内. 随后Kuroda^[56]进行了相应的实验以验证自己的假设, 但受限于实验中扭秤系统转动惯量等的测量精度, 其实验并没有给出实质性的结论. 针对这个问题, 1997年, 美国Los Alamos国家实验的Bagley和Luther^[33]采用 Q 值为950的未镀膜钨丝和 Q 值为490的镀金钨丝分别进行周期法测 G 实验, 根据Kuroda的 $1/(\pi Q)$ 假设进行修正之后, 他们声称采用不同 Q 值的扭丝测得的两个 G 值在误差范围内符合. 但他们两次实验均存在较大的不确定度, 分别为165 ppm和122 ppm, 而根据 $1/(\pi Q)$ 假设计算出来的滞弹性效应约300 ppm, 这说明他们的实验并没有很精确地验证Kuroda的关于周期法测 G 实验中扭丝滞弹性效应的 $1/(\pi Q)$ 假设.

在我们实验室最早公布的HUST-99周期法测 G 实验中^[57], 采用的是一根直径25 μm 的纯钨丝作为悬丝. 扭秤系统为一个非对称的二级摆, 这种设计的主要优点是吸引质量放置前后扭秤周期的相对改变量达到27%, 大的周期改变量对于降低关于周期的测量精度作用明显. 不过由于扭秤系统结构复杂, 转动惯量的测量精度难以提高, 且外界振动等干扰容易耦合到扭秤的扭转运动中. HUST-99给出的 G 值测量结果为 $G = 6.6699(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度105 ppm. 在HUST-99测量结果公布的数年后, 当时实验中未被发现的两项系统误差: 吸引质量圆柱体沿轴向的质心与形心偏离量以及吸引质量所在位置处的空气浮力效应被发现^[38]. 这两项效应贡献给 G 值的修正量达到360 ppm, 同时 G 值的测量不确定度从105 ppm放大至130 ppm. 修正后的 G 值为 $G = 6.6723(9) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. 尽管考虑了

吸引质量圆柱体沿轴向的质心与形心偏离量,但沿径向的偏离量并没有得到解决.

2009年,我们研究组发表了采用扭秤周期法测 G 的新结果^[40,41]: $G = (6.67349 \pm 0.00018) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度 26 ppm, 被称之为 HUST-09. 新实验中采用运动模式更简单的矩形扭摆以及密度更均匀的球状吸引质量, 同时扭秤和吸引质量均放置在同一真空容器中以减小空气浮力等的影响. 实验中使用直径 25 μm 、长约 90 cm 的表面涂钽钨丝悬挂扭秤, 系统的 Q 值约 1.7×10^3 . 在一根 Q 值约 3.36×10^5 的石英丝帮助下, 我们利用两个石英圆盘扭摆测量出钨丝的滞弹性效应对 HUST-09 实验贡献的系统误差为 211.80(18.69) ppm^[58](使 G 值偏大), 这比 Kuroda 提出的 $1/(\pi Q)$ 修正量稍大, 但小于 Newman 和 Bantel 提出的 $1/(2Q)$ 这一上限.

上述周期法测 G 实验均是在常温下进行的. 由于扭丝的热噪声与温度的平方根成正比, 因此降低整个实验环境的温度不失为一个好的途径. 同时, 低温实验还有其他一些优点, 比如: 1) 一些金属丝的内耗在低温下能得到极大的降低, 因此可以有效地减小扭丝滞弹性效应对实验的影响; 2) 低温下的温度波动可以进行有效控制, 可以极大地降低与温度相关的扭丝特性变化的影响; 3) 低温下可以利用

超导材料实现高效的磁屏蔽等. 基于这样的思想, 加州大学欧文分校 (UCI) 的 Newman 等研制了一套低温扭秤系统来开展周期法测 G 实验. 如图 5 所示, 扭秤为一个 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的石英玻璃块, 在其表面镀上铝和二氧化硅. 扭丝选用长度 250 mm、直径 20—25 μm 的铍铜丝、退火后的铍铜丝和铝丝三种. 吸引质量为两个外径 520.7 mm、内径 312.42 mm 和厚度 48.26 mm 的铜环构成. 环状吸引质量和薄板扭秤构成的这种配置, 使得实验对扭秤的位置、尺寸和密度均匀性等参量均不敏感.

尽管低温扭秤实验有一定的优点, 但需要将整个真空容器浸泡在液氦中, 使得整个实验系统变得复杂, 如图 6 所示, 因此需要考虑的系统误差比常温实验更多. 同时, 在 UCI 的实验中, 由于低温容

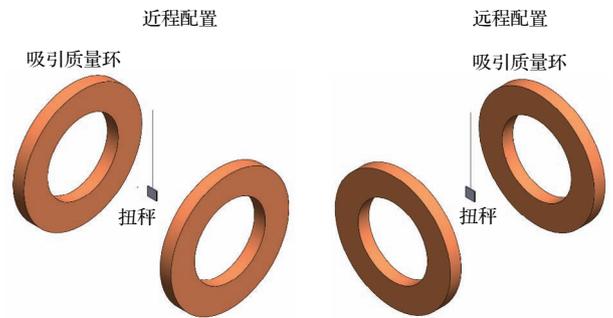


图 5 UCI-14 周期法测 G 扭秤和吸引质量
Fig. 5. The pendulum and source masses in UCI-14.

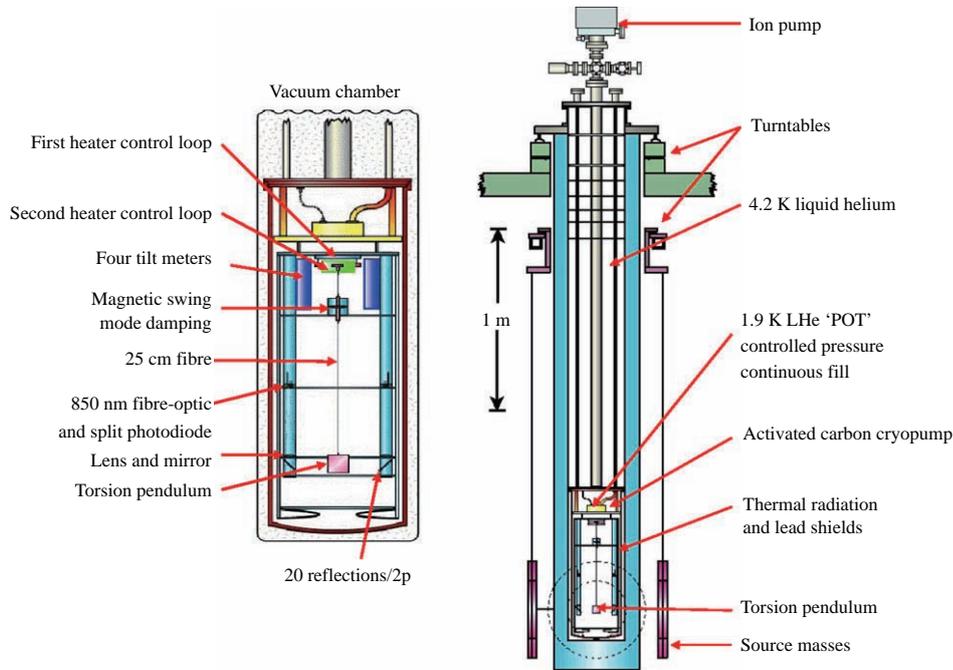


图 6 UCI-14 周期法测 G 基本原理^[45]
Fig. 6. The principle of G measurement of UCI-14^[45].

器空间的限制, 实验中的吸引质量只能放置在大气中, 与扭秤的间距较大从而减弱了待测的引力效应, 导致不同配置下周期的改变量较小, 对周期的测量精度要求极高. 也正是因为这些原因, UCI 的实验负责人 Newman 教授几乎花了一辈子时间从事该方面的研究, 最终在 2014 年公布了在低于 4 K 的温度下采用扭秤周期法测 G 的结果 [45].

他们的实验中三种丝在低温环境下 Q 值分别达到 8.2×10^4 , 1.2×10^5 及 1.64×10^5 , 根据 Kuroda 的 $1/(\pi Q)$ 假设, 滞弹性效应对他们测 G 实验的影响小于 4 ppm. 经过长时间的数据积累, 采用这三种丝测量出的 G 值分别为 $6.67435(10)$, $6.67408(15)$, $6.67455(13) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度分别为 14, 22 和 20 ppm, 而三个结果之间的最大差别达到了约 70 ppm. 对于该问题, UCI 的实验组也未能给出合理的解释. 从放大误差的角度来考虑, 他们认为三个结果全部等权, 合成后的综合结果为 $G = 6.67433(13) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 总的不确定度取三个结果不确定度的平均值. 在 CODATA-2014 中, 基本常数任务组按照加权的方式重新合并了 UCI 三根丝的结果, 为: $G = 6.67435(13) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度为 19 ppm, 总相对不确定度的处理方法与之前相同, 仍然为三个结果不确定度的平均值, 该结果被称之为 UCI-14.

3.3 冷原子干涉法

一种全新的冷原子干涉法也被应用于测 G 实验中, 这种方法的核心装置是冷原子干涉仪. 冷原

子干涉仪是一种利用冷原子的物质波作为波源的干涉仪, 对微小的加速度和转动极其敏感, 被广泛应用于重力、重力梯度、地球自转和爱因斯坦弱等效原理等测量实验. 以典型的 Mach-Zender 冷原子干涉重力仪为例 [59], 如图 7 所示, 其原理是先将原子冷却囚禁并上抛制备到基态能级 $|1\rangle$ 上, 然后利用 Raman 激光耦合原子的基态能级和一个亚稳态能级 $|2\rangle$, 使原子在两个能级之间转化, 转化过程中原子吸收和放出光子获得反冲动量. 具有不同动量的原子随时间演化在空间会有不同的路径. 因此可以利用 Raman 激光操控原子的波包进行分束-反射-合束的操作. 合束之后原子波包发生干涉, 原子以一定概率塌缩到 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 两个能级中的一个. 一般每次测量会有大约一百万个原子同时进行干涉, 所以可以通过测量原子塌缩后处于两个基态的数量来推算原子的跃迁概率. 原子的跃迁概率由原子的相位信息决定, 提取出原子相位信息中的重力项之后即可获得重力加速度信息 [59]. 重力加速度引入的相位表达式为

$$\Delta\varphi = K_{\text{eff}} g T^2, \quad (3)$$

其中 $\Delta\phi$ 为重力加速度引入的相位, K_{eff} 为 Raman 激光有效波矢, g 为重力加速度, T 为分束-反射-合束激光脉冲之间的时间间隔.

冷原子干涉法测 G 是在冷原子干涉重力仪精确测量重力的基础上演化而来, 其基本思路是如果在冷原子干涉仪的附近放置吸引质量, 则吸引质量作用到原子上的引力会为其施加一个附加的加速度. 根据牛顿引力公式, 如果能够精确测量出附加的加速度、原子与吸引质量的相对位置与质量分布,

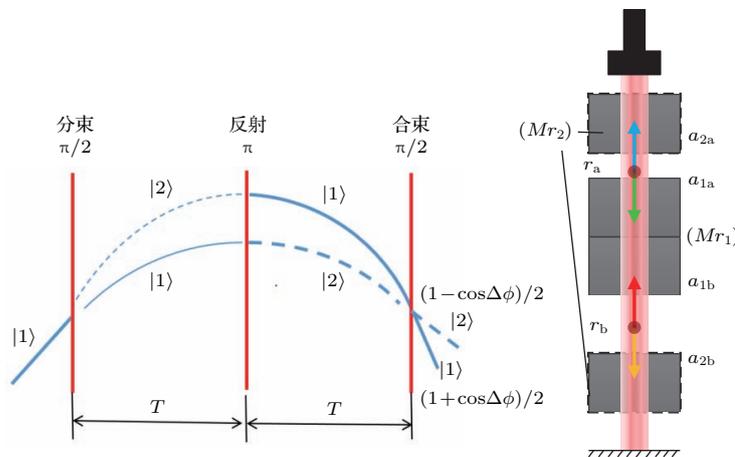


图 7 冷原子干涉基本原理图

Fig. 7. The basic principle of interference of cold atoms.

即可计算出 G 值. 实验中一般采用上下两个原子干涉仪差分的配置, 即原子干涉重力梯度仪来差分掉重力加速度 g , 差分相位为 $\Delta\phi_1$. 因为一般 g 是附加加速度的 10^7 倍, 将 g 差分掉将能大大提高测量信噪比, 同时这一方法能够消除与 g 相关的系统效应, 例如地面振动引起的加速度. 由于原子干涉仪的仪器自身及附近较大的山体等质量的分布和位置不容易精确测量, 为了区分这些背景效应, 实验中要对吸引质量的位置进行调制, 调制后测得的差分相位记为 $\Delta\phi_2$. 如图 7 所示, $\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = K_{\text{eff}}T^2(a_{1a} + a_{1b} + a_{2a} + a_{2b})$, 其中 a_{ij} 表示第 i 种吸引质量配置对第 j 团原子的吸引力产生的加速度大小, 利用引力定律将 a_{ij} 的表达式代入上式可得到引力常数 G 的表达式为

$$G = \frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{K_{\text{eff}}T^2M \left(\frac{1}{r_{1a}^2} + \frac{1}{r_{1b}^2} + \frac{1}{r_{2a}^2} + \frac{1}{r_{2b}^2} \right)}, \quad (4)$$

其中 r_{ij} 是第 j 团原子与第 i 种吸引质量配置之间的相对位置. 需要注意的是, 由于在干涉过程中飞行的原子感受到的 a_{ij} 是变化的, 所以上式还要进行相应的修正.

冷原子干涉法采用微观的自由落体原子团作为检验质量, 高密度的铅或钨作为吸引质量, 相比于传统的使用宏观扭秤的测 G 实验, 可以有效地避免由扭丝的滞弹性和扭摆的密度均匀性等特性引入的系统误差. 而且微观的原子空间尺度很小, 可以看作点质量, 从而对电磁效应进行精确的评估. 冷原子干涉法的劣势在于检验质量即原子团的密度分布在测量过程中是变化的, 且每次制备的原子团密度分布不尽相同, 因此最大的一项系统误差通常是原子团的密度分布. 此外冷原子干涉法测 G 实验中利用到原子的布居数来推算原子的跃迁概率, 所以测量灵敏度受到量子投影噪声限制, 这也是实验中主要的误差来源.

利用原子干涉技术测量重力加速度最早于 1991 年由 Kasevich 和 Chu [59] 实现, 完成冷原子干涉法测 G 实验的时间则更晚. 目前国际上主要有两个组使用冷原子干涉法测 G , 分别是美国斯坦福大学的 Kasevich 研究组和意大利佛罗伦萨大学的 Tino 研究组.

Kasevich 研究组在 2007 年率先完成原子干涉法测 G 实验. 他们的实验采用了双磁光阱双喷泉的结构 [60], 两个磁光阱呈上下配置, 各自构成了一个

原子喷泉. 两个喷泉将原子团冷却囚禁并上抛后, 同时与同一束拉曼光作用形成共轭的两个原子干涉仪, 这样可以同时测量两个位置的重力加速度, 因此双磁光阱双喷泉结构组成了一个重力梯度仪, 可以对重力加速度进行差分测量. 差分测量可以对地球表面的重力加速度、地面振动噪声和拉曼光相位噪声等进行共模抑制. 实验中使用的吸引质量为 540 kg 的大密度铅板, 每完成一次相位测量后便将吸引质量在上下两个配置之间进行切换, 对这两种配置下的测量结果进行差分可以抵消背景重力场对 G 值测量的影响. Kasevich 研究组给出的测量结果为 $G = 6.693(34) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度为 5080 ppm.

Tino 研究组的实验方案与 Kasevich 研究组类似, 但他们的实验采用的是单磁光阱双喷泉的方案 [61]. 两团原子被囚禁在同一个磁光阱中, 并在不同时刻上抛到不同高度, 同样组成了一个原子干涉重力梯度仪, 从而对重力加速度进行差分测量. 实验中使用的吸引质量材料换成了密度更大的钨合金, 并分成上下两层. 两层吸引质量的位置在近程配置(两层吸引质量距离近)和远程配置(两层吸引质量距离远)间调制. 这两种配置相较于 Kasevich 研究组单层吸引质量的优势是同样吸引质量的情况下可以产生更大的附加加速度. Tino 研究组在 2008 年给出了他们原子干涉法测 G 的初步结果, 为 $6.667(11) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度为 1710 ppm. 通过进一步提高原子干涉测量的灵敏度和进行更详细的系统误差评估, 他们在 2014 年给出了更高精度的 G 值测量结果: $G = 6.67191(99) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对不确定度为 148 ppm [44], 此结果被收录到 CODATA-2014 中.

4 HUST 测 G 实验最新进展

实验物理学家们围绕 G 值的精确测量付出了巨大的努力, 但是 G 的测量精度并没有得到太大的提高. 各研究组给出的 G 值互相之间并不符合, 这是困扰国际同行的一个难题 [62–65], 而可能的解决方法是在同一地点采用不同方法进行 G 值测量, 通过对比测量结果以寻找导致偏差的可能误差源.

华中科技大学引力中心在测 G 领域开展了三十多年的持续研究, 至今发表的测 G 结果有

HUST-99 [57], HUST-05 [38] 和 HUST-09 [40,41]. 为了研究不同方法所测量的 G 值不符合这一科学问题, 引力中心在最近的十年时间里同时采用扭秤周期法和角加速度法两种完全独立的方法进行高精度的测 G 实验. 之所以选择这两种方法, 是由于扭秤周期法是目前世界上使用最为广泛的方法, 相关的系统效应经历了几代实验物理学家的努力, 已经有了较为清晰的认识, 而且引力实验中心对于这种方法也有多年的积累. 而华盛顿大学 Gundlach 和 Merkowitz [34] 使用的角加速度法给出了目前世界上精度最高的 G 值测量结果, 说明这种新方法拥有其自身独特的优势. 由于一种方法中存在的未知系统误差很有可能不出现在另一种方法中, 因此通过直接比较这两种不同方法测量的 G 值, 能够得到置信水平更高的 G 值测量结果.

4.1 HUST 的扭秤周期法测 G 实验

采用扭秤周期法测 G 在引力实验中心具有悠久的历史. 由于扭秤周期法使用传统的扭秤作为测量工具, 因此测量结果严重依赖于扭丝自身的特性, 目前在扭秤周期法测 G 中最大的一项系统效应便是扭丝的滞弹性. 在我们的 HUST-09 中采用了一根品质因数 Q 值约为 1700 的涂钨钨丝悬挂扭秤, 根据 Kuroda 的 $1/(\pi Q)$ 假设, 会对 G 值测量结果引入一个接近 200 ppm 的修正量. 在滞弹性还没有被彻底研究透彻的情况下, 这个修正量的精确程度无疑是需要认真对待的 [58]. 为了解决这个问题, 我们继 HUST-09 之后开展了基于高 Q 值石英丝测 G 的改进实验. 与钨丝直径和长度接近的石英丝 Q 值通常可以到达 2×10^5 , 相比钨丝增大了两个量级 [66], 因此可以有效地减小滞弹性效应. 但由于石英材料不导电, 无法通过接地导走扭秤表面的电荷, 会引入额外的静电效应. 我们对石英丝表面进行镀膜处理以及对悬丝和扭摆进行良好的静电屏蔽以减小静电对实验的影响. 按照相关文献的建议 [67], 我们选择耗散比较小的铯和铋先后镀在石英丝的表面来实现导电的功能. 其中, 铯作为过渡层用来增加石英丝表面与膜层的结合强度, 铋作为表面层可以比较好地导电. 在直径约 $45 \mu\text{m}$ 、长度约 90 cm 石英丝表面先后镀上 10 nm 的铯和 10 nm 的铋膜后, 尽管其 Q 值降低至 $(3-6) \times 10^4$, 但仍然比一般条件下钨丝的 Q 值高约一个数量级. 典型的镀膜石英丝扭秤系统的振幅衰减曲线如图 8 所示. 根据

Kuroda 的假设 [54], 滞弹性效应对测 G 实验贡献的误差降低至几个 ppm 水平, 使其不再是周期法测 G 实验中的一个主要误差项.

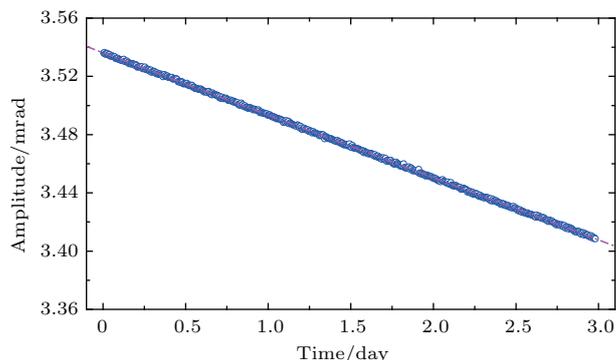


图 8 镀膜石英丝的振幅衰减曲线 (虚线为拟合结果)
Fig. 8. Amplitude attenuation curve of coated quartz fiber.

基于高 Q 值石英丝的周期法的改进实验示意图见图 9. 扭秤为一个 $91 \text{ mm} \times 11 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的石英玻璃构成, 在其表面镀铝. 扭秤由直径约 $45-60 \mu\text{m}$ 、长度约 90 cm 石英丝悬挂, 然后连接到上端的磁阻尼单元, 后者的作用是抑制单摆等运动模式的干扰 [68]. 两个 SS316 不锈钢球作为吸引质量, 其质量和直径分别约为 780 g 和 57 mm. 吸引质量通过三点支撑环支撑, 后者固定到热胀系数极小的微晶玻璃表面, 然后由远程控制的回转台来实现球在近、远程配置间的切换. 整个扭秤和球安装在真空度约 10^{-5} Pa 的同一容器中.

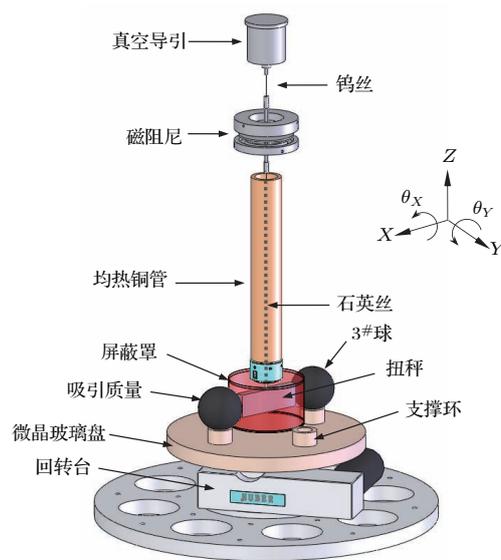


图 9 HUST 周期法测 G 示意图
Fig. 9. The schematic diagram of the time-of-swing method at HUST.

为了排除与测量装置相关的系统误差,我们在山洞中相距 150 m 的两个实验室里分别搭建了一套实验装置,在两套装置上同时采用扭秤周期法进行测 G 实验,如图 10 所示. 两套扭丝、两套检验质量和吸引质量分别用于两套测量装置上. 在其中一套装置上使用了 3 根不同石英丝(两根丝直径约 45 μm , 另一根 60 μm) 依次进行实验,以排除跟扭丝相关的系统误差. 在另一套容器上,石英丝直径约 45 μm ,用于检验与装置相关的系统效应. 为了减小我们之前周期法测 G 实验中存在的一些比较大的系统效应,我们采取了相关的改进措施,如在扭秤表面镀密度更小的铝以减小镀层的引力效应;吸引质量采用三点支撑方式以提高位置的稳定性和重复性;对背景引力场进行了直接测量以及用约一吨铅块进行补偿来减小背景引力梯度效应的影响;对夹具和套管的尺寸进行优化以减小其贡献的引力效应;优化磁阻尼及其悬丝的参数以降低其对 G 值贡献的额外效应等. 另外,两套装置分别安排两组不同的人员进行实验,以排除与实验者个人主观因素相关的系统误差项. 这些改进措施将使得目前的改进实验能给出更加可靠的 G 值.

目前在两套装置上采用四根石英丝的周期法测 G 实验基本完成. 除了直径约 60 μm 的石英丝只进行了一次测量之外,其他三根丝均进行了两次测量,因此我们共得到了七个 G 值. 这七个 G 值在各自的误差范围内符合,而最终结果的合成不确定度好于 12 ppm.



图 10 两套周期法测 G 装置

Fig. 10. Two apparatus for G measurement with time-of-swing method.

4.2 角加速度法测 G 实验

角加速度法测 G 实验同样采用扭秤作为测量工具. 在这种方法中将扭秤和吸引质量球分别放置在同轴的扭秤转台和吸引质量转台上,如图 11 所示. 在扭秤转台坐标系中,扭秤受到速度阻尼力矩、弹性回复力矩、引力力矩 $\tau_g(t)$ 和惯性力矩 $I\alpha(t)$ 的共同作用,其运动方程为

$$I\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} + k\theta = \tau_g(t) - I\alpha(t). \quad (5)$$

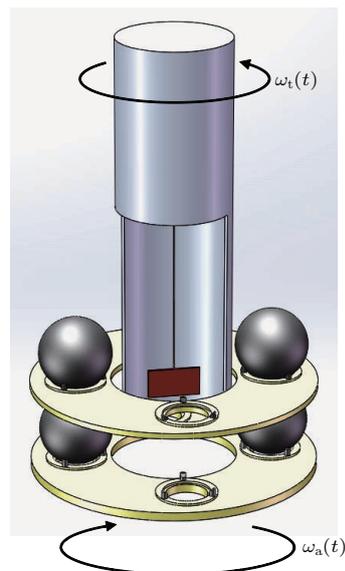


图 11 角加速度法测 G 基本原理

Fig. 11. The principle of G measurement with angular acceleration feedback method.

通过反馈控制系统调节扭秤转台转速使其时刻跟踪扭摆的运动,保持扭丝不扭转. 此时在扭秤转台坐标系中,扭秤的角位移、角速度和角加速度均等于零:

$$\ddot{\theta} = 0, \quad \dot{\theta} = 0, \quad \theta = 0. \quad (6)$$

因此扭秤受到的引力力矩等于其自身的惯性力矩:

$$\tau_g(t) = I\alpha(t). \quad (7)$$

通过另一个反馈控制使双转台转速差 ω_d 保持恒定,则扭秤转台角加速度被调制成正弦信号. 实验中信号频率选取在 $1/f$ 噪声较小以及远离静止背景引力梯度信号的区域,以减小这些因素对实验的干扰.

对角加速度进行多极矩展开^[69,70]:

$$\alpha(t) = -\frac{4\pi i G}{I} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \frac{1}{2l+1} m q_{lm} Q_{lm} e^{-im\omega_d t}, \quad (8)$$

其中 q_{lm} 和 Q_{lm} 分别为扭秤多极矩和吸引质量分布多级场, 是由扭秤以及吸引质量的尺寸、距离、质量等参数确定的常数. 通过精确测量扭秤转台角加速度和相关参数, 就能得到很高精度的 G 值.

与传统的扭秤测 G 方法相比, 角加速度法拥有以下几大优势: 1) 实验过程中扭丝不扭转, 因此测量结果对扭丝自身的特性, 如滞弹性、热弹性、非线性等效依赖程度非常小; 2) 通过反馈控制使双转台的转速差保持恒定, 使主要关注的角加速度信号出现在两转台转速差频的二倍频上, 可在频域上将待测引力信号与静止背景引力梯度信号及其他类似信号进行分离, 从而有效地降低环境因素对实验的影响; 3) 通过对扭秤和球的尺寸及位置参数等进行特殊的设计以减小扭摆密度均匀性对实验的影响.

美国弗吉尼亚大学的 Rose 等^[71] 于 1969 年首先提出角加速度法测 G , 并通过一系列实验给出 G 值测量结果为 $G = 6.674(12) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 实验精度主要受限于当时的仪器测量精度. 在 Rose 的实验中, 一个精密加工的圆柱体扭摆通过一根石英丝悬挂在金属气密容器中, 容器和两个吸引质量球被安装在同一个转台上. 当转台启动后, 通过反馈控制系统控制转台转速使扭秤和球之间的夹角 θ 保持不变, 因此球施加在扭秤上的引力力矩为恒定值, 转台会做匀加速运动, 通过测量其加速度大小即可得到 G 值. 这种测量方法的特点是对引力的测量转换成对机械转台角加速度的测量. 在 Rose 的实验中, 扭秤和吸引质量处于同一转台上, 这样会导致转台一直向同一个方向加速运动, 很快就会超出转台的转速限制. 在 Rose 的实验中转台两个小时就达到了 0.5 r/min, 如此短的时间积累很难得到高精度的 G 值.

美国华盛顿大学 Eöt-Wash 研究组的 Gundlach 等^[69,70] 于 1996 年提出了全新的角加速度法测 G 方案: 在 Rose 等实验的基础上将单转台反馈控制替换成双转台反馈控制, 扭秤和球分别独立放置在扭秤转台和吸引质量转台上, 而且控制目标也从扭秤和球之间的夹角 θ 保持恒定变成扭秤和球之间的转速差 ω_d 保持恒定. 引力力矩信号由恒定值变为中心值为 0 的正弦信号, 则转台的转速同样为正弦信号, 不会超出转台的转速限制, 单组实验可以进行更长时间的数据积累. Gundlach 等^[34] 于 2000 年给出 G 值测量结果 (UWash-00) 为

$G = 6.674215(92) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 其相对不确定度仅 14 ppm, 是目前世界上精度最高的测量结果.

角加速度法包含两个伺服反馈控制环路, 装置较为复杂, 且对控制精度的要求很高. 为了完成对实验原理的探索, 掌握实验关键的控制技术, 并寻找和发现可能存在的问题, 我们从 2008 年到 2012 年开展了角加速度法测 G 原理性实验^[72,73]. 包括实验平台的搭建和控制系统的测试, 将扭秤的剩余偏转角引入的误差减小到 0.4 ppm, 并成功地使最终测量结果的重复性达到了 100 ppm 的水平, 说明控制部分已经能够满足高水平的测 G 要求.

2013 年至今, 我们开始了正式的改进实验. 为了提高系统的稳定性, 我们重新设计并搭建了新的实验平台, 如图 12 所示. 扭秤为一个 $91 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的石英玻璃构成, 其表面镀金. 扭秤由一根直径 25 mm、长约 870 mm 的钨丝悬挂在真空度约 10^{-5} Pa 的容器中, 整个真空容器安装在气浮转台上. 吸引质量系统由 4 个 8.5 kg 的不锈钢球和微晶玻璃支架组成, 球体的圆度通过精密的研磨抛光, 达到了约 $0.8 \text{ }\mu\text{m}$, 微晶玻璃的热膨胀系数约为 $0.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 可以有效减小环境温度波动对球间距的影响. 吸引质量系统安装在与气浮转台同轴的机械转台上.



图 12 角加速度法测 G 实验装置

Fig. 12. The apparatus of the measurement of G with angular acceleration feedback method.

相比于原理性实验,新实验装置的高度降低了近一半,并设计加工了更加轻巧的铝制真空容器,从而有效降低了整个装置的重心,提升了装置的稳定性. UWash-00 测 G 结果中最大的一项误差来源为球间距^[34],为了减小此误差,我们在设计装置时着重对其稳定性进行优化设计:使用微晶玻璃支架替代传统的铝支架来支撑吸引质量球体,极大地减小了环境温度波动对球间距的影响. 球间距采用高精度的三坐标测量机,旋转量块法和量块比较法等分别进行测量,不同方法的测量结果在 $2\ \mu\text{m}$ 的误差范围内符合. 在实验过程中,由于微晶玻璃支架与吸引质量球以相同转速共同运动,两者施加到扭秤上与信号同频率的引力力矩会产生假的信号. 为此,我们在无球的情况下对微晶玻璃支架产生的引力效应进行高精度的测量,然后通过理论计算并加工一批金属块对这部分效应进行高精度的补偿,直至这部分效应减小至可以忽略不计,真正从源头消除动态的背景引力梯度效应的影响.

在整个角加速度法测 G 实验中,我们尝试了不同转速下的测量结果,以及安排不同的人员进行多次重复测量以消除与此相关的系统误差. 目前在不同测量状态下得到的结果在各自的误差范围内符合,而最终结果的合成不确定度也好于 $12\ \text{ppm}$.

目前采用周期法和角加速度法的两个实验已基本完成,最终的 G 值将于近期公布.

5 结束语

万有引力常数 G 是人类引入的第一个基本物理学常数,也是除了光速以外最早进行测量的基本常数. 虽然自引力常数 G 提出以来,实验物理学家为确定 G 值付出了巨大努力,但遗憾的是,至今 G 值测量精度在所有物理学基本常数中却是最差的. 其精度提升缓慢这一现状反映了 G 值测量充满挑战. 近 30 年来出现的一系列设计精巧的高精度测 G 实验,包括引入新发展的冷原子干涉、低温扭秤等各种技术手段,科学家们正在极力追求测量方法和实验技术的极限水平. 但是正如 CODATA-2014 收录的 G 值所示,它们互相之间最大的差别达到了惊人的 0.05% . 造成这种现状最可能的原因是各个实验中仍存在未被发现或正确评估的系统误差. 测 G 实验中涉及到质量、长度、时间、温度、电磁等一系列物理量的绝对测量及其不确定度评估,对其中

任何一个物理量的测量出现偏差都将影响测量结果的准确性.

2014 年, T. Quinn 教授, C. Speake 教授和罗俊教授作为共同主席,在英国皇家学会召开了题为“*The Newtonian constant of gravitation, a constant too difficult to measure?*”专题会议,邀请了许多同行来讨论 G 值测量的问题. 同年, NIST 举办了另一个类似的研讨会来继续讨论测 G 的问题,并提议成立一个由多个研究所组成的联合单位,这个联合单位可以采用同样的方法进行测 G 实验. 目的是希望这个联合体中不同的研究组采用同样的方法都能给出同样的 G 值,如果各自的结果不同,则各个实验者继续寻找各自的系统误差,直到他们的结果在各自宣称的误差范围内符合. 但由于测 G 问题本身的复杂性,截至今日还没有组成统一的联合组织. 目前,会议达成的一个积极成果是在国际理论与应用物理联盟 (IUPAP) 的赞助下成立了一个“大 G ”工作组来协助解决 G 值测量中存在的差异并为测 G 工作提供指导和建议^[74]. 此外,为解决目前在测 G 实验中存在的分歧,国际度量衡委员会 (CIPM) 在 2014 年 11 月的会议上决定建立一个计量机构联盟^[75].

总的来看,国际上达成的一个共识是^[22]: 高精度的测量 G 值是当前最具挑战性的实验之一,继续测量 G 值是十分重要且必要的研究课题. 要提高 G 值的测量精度,探索新的测 G 方案是一个可能的途径,同时,发掘已有方案和实验中尚未被认识或正确评估的系统误差显得同样重要和必要. 基于这样的目的,华中科技大学引力实验中心自 20 世纪 90 年代以来就一直从事万有引力常数 G 的精确测量研究,目前已取得了一些积极的进展,测量结果被历届 CODATA 收录. 最近的十年中,为寻找不同测 G 方法中可能存在的系统误差,在国际上尚未形成联合组织时,我们实验室已经开始了采用两种完全独立的方法(扭秤周期法和角加速度反馈法)同时测 G 实验. 在扭秤周期法中,研制了高 Q 值的镀膜石英丝并用其进行直接测 G 实验,使滞弹性效应不再是主要误差项. 改进吸引质量球的支撑方式以提高球体位置的稳定性. 深入研究了电磁场、背景引力场、温度、气压、振动等对扭秤运动稳定性和周期的影响,引入了屏蔽罩、绝热铜管等实验改进设计来降低这些因素对 G 值测量的影响. 此外为进一步提高 G 值的置信水平,我们在不同地点搭建了两

套独立装置使用不同的石英丝, 扭摆及吸引质量重复测 G . 在角加速度法测 G 实验中, 成功搭建了一套精密扭秤系统和包括悬点转台、吸引质量转台在内的反馈跟踪控制系统. 采用极低热膨胀系数的微晶玻璃支架支撑吸引质量球, 极大地减小了环境温度波动对球间距的影响. 使用质量块对微晶玻璃支架产生的背景引力梯度进行高精度的补偿. 我们希望通过比对两种不同方法测量的 G 值, 为发掘其中可能存在的系统误差和检验 G 值是否与实验方法相关等科学问题提供实验依据, 并给出置信水平更高的 G 值.

牛顿万有引力常数 G 的精确测量是一项十分艰苦而又繁杂的工作. 我们取得的每一个进步离不开华中科技大学引力中心众多师生和工作人员的努力, 感谢他们一直以来的付出和坚守. 同时, 特别感谢叶朝晖研究员、许厚泽研究员、张元仲研究员、高克林研究员、罗杰教授、V. Milyukov 教授、R. Newman 教授、T. Quinn 教授、C. Speake 教授、J. Faller 教授、J. Gundlach 教授、H. Paik 教授、K. Kuroda 教授等在研究过程中提供的有益讨论与建议; 感谢华中科技大学, 物理学院对本团队测 G 工作长期以来的大力支持; 感谢兄弟院校与同行专家给予的众多支持和鼓励.

参考文献

- [1] Newton I (translated by Zhao Z J) 2006 *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Beijing: The Commercial Press) pp237–277 (in Chinese) [牛顿 I 著 (赵振江 译) 2006 自然哲学的数学原理 (北京: 商务印书馆) 第 237—277 页]
- [2] Herrick S 1971 *Astrodynamic: Orbit Determination, Space Navigation, Celestial Mechanics* (Vol. I) (London: Van Nostrand Reinhold) pp127–163
- [3] Ries J C, Eanes R J, Shum C K, Watkin M M 1992 *Geophys. Res. Lett.* **19** 529
- [4] Ezer D, Cameron A G W 1966 *Can. J. Phys.* **44** 593
- [5] Tomilin K A 1999 *Proceedings of the XXII Workshop on High Energy Physics and Field Theory* (CiteSeer)
- [6] Planck M 1990 *Ann. Phys.* **306** 69
- [7] McQueen H W S 1981 *Phys. Earth Planet Inter.* **26** 6
- [8] Dirac P A M 1937 *Nature* **139** 323
- [9] Dirac P A M 1938 *Roy. Soc. Lond. Proc. A* **165** 199
- [10] Dirac P A M 1974 *Roy. Soc. Lond. Proc. A* **338** 439
- [11] Weinberg S 1989 *Rev. Mod. Phys.* **61** 1
- [12] Brans C, Dicke R H 1961 *Phys. Rev.* **124** 925
- [13] Hellings R W 1988 *NATO Advanced Science Institute Series C* **230** 215
- [14] Massa C 1989 *Helv. Phys. Act.* **62** 424
- [15] Long D R 1976 *Nature* **260** 417
- [16] Eötvös R V, Pekar D, Fekete E 1922 *Ann. Phys. (Leipzig)* **68** 11
- [17] Fischbach E, Sudarsky D, Szafer A, Talmadge C, Aronson S H 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 3
- [18] Fischbach E, Talmadge C 1992 *Nature* **356** 207
- [19] Cook A H 1988 *Rep. Prog. Phys.* **51** 707
- [20] Cavendish H 1798 *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **88** 469
- [21] Gillies G T 1987 *Metrologia* **24**(S) 1
- [22] Rothleitner C, Schlamminger S 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 111101
- [23] Cohen E R, Taylor B N 1973 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **2** 663
- [24] Cohen E R, Taylor B N 1987 *Rev. Mod. Phys.* **59** 1121
- [25] Mohr P J, Taylor B N 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 351
- [26] Mohr P J, Taylor B N 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 1
- [27] Mohr P J, Taylor B N, Newell D B 2008 *Rev. Mod. Phys.* **80** 633
- [28] Mohr P J, Taylor B N, Newell D B 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 1527
- [29] Mohr P J, Newell D B, Taylor B N 2016 *Rev. Mod. Phys.* **88** 035009
- [30] Michaelis W, Haars H, Augustin R 1996 *Metrologia* **32** 267
- [31] Luther G G, Towler W R 1982 *Phys. Rev. L* **48** 121
- [32] Karagioz O V, Izmailov V P 1996 *Meas. Tech.* **39** 979
- [33] Bagley C H, Luther G G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 3047
- [34] Gundlach J H, Merkowitz S M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2869
- [35] Quinn T J, Speake C C, Richman S J, Davis R S, Picard A A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 111101
- [36] Kleinevoß U 2002 *Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstanten G Dissertation for the Doctoral Degree (Wuppertald: University of Wuppertald)*
- [37] Armstrong T R, Fitzgerald M P 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 201101
- [38] Hu Z K, Guo J Q, Luo J 2005 *Phys. Rev. D* **71** 127505
- [39] Schlamminger S, Holzschuh E, Kundig W, Nolting F, Pixley R E, Schurr J, Straumann U 2006 *Phys. Rev. D* **74** 082001
- [40] Luo J, Liu Q, Tu L C, Shao C G, Liu L X, Yang S Q, Li Q, Zhang Y T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 240801
- [41] Tu L C, Li Q, Wang Q L, Shao C G, Yang S Q, Liu L X, Liu Q, Luo J 2010 *Phys. Rev. D* **82** 022001
- [42] Parks H V, Faller J E 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 110801
- [43] Quinn T J, Parks H V, Speake C C, Davis R S 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 101102
- [44] Rosi G, Sorrentino F, Cacciapuoti L, Prevedelli M, Tino G M 2014 *Nature* **510** 518
- [45] Newman R, Bantel M, Berg E, Cross W 2014 *Phil. Trans. R. Soc. A* **372** 20140025
- [46] Schlamminger S, Holzschuh E, Kundig W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 161102
- [47] Tu L C, Li Q, Shao C G, Hu Z K, Luo J 2011 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **41** 691 (in Chinese) [涂良成, 黎卿, 邵成刚, 胡忠坤, 罗俊 2011 中国科学: 物理学 力学 天文学 **41** 691]
- [48] Gillies G T, Ritter T C 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 283

- [49] Quinn T, Speake C, Parks H, Davis R 2014 *Phil. Trans. R. Soc. A* **372** 20140032
- [50] Fitzgerald M P, Armstrong T R 1995 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **44** 494
- [51] Fitzgerald M P, Armstrong T R 1999 *Meas. Sci. Technol.* **10** 439
- [52] Heyl P R 1930 *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **5** 1243
- [53] Heyl P R, Chrzanowski P A 1942 *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **29** 1
- [54] Kuroda K 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 2796
- [55] Newman R D, Bantel M K 1999 *Meas. Sci. Technol.* **10** 445
- [56] Kuroda K 1999 *Meas. Sci. Technol.* **10** 435
- [57] Luo J, Hu Z K, Fu X H, Fan S H, Tang M X 1998 *Phys. Rev. D* **59** 042001
- [58] Yang S Q, Tu L C, Shao C G, Li Q, Wang Q L, Zhou Z B, Luo J 2009 *Phys. Rev. D* **80** 122005
- [59] Kasevich M, Chu S 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 181
- [60] Fixler J B, Foster G T, McGurirk J M, Kasevich M A 2007 *Science* **315** 74
- [61] Lamporesi G, Bertoldi A, Cacciapuoti L, Prevedelli M, Tino G M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 050801
- [62] Quinn T 2000 *Nature* **408** 919
- [63] Quinn T 2014 *Nature* **505** 455
- [64] Schlamminger S 2014 *Nature* **510** 478
- [65] Gibney E 2014 *Nature* **514** 150
- [66] Li Q, Liu J P, Zhao H H, Yang S Q, Tu L C, Liu Q, Shao C G, Hu Z K, Milyukov V, Luo J 2014 *Phil. Trans. R. Soc. A* **372** 20140141
- [67] Numata K, Horowitz J, Camp, J 2007 *Phys. Lett. A* **370** 91
- [68] Fan X D, Liu Q, Liu L X, Milyukov V, Luo J 2008 *Phys. Lett. A* **372** 547
- [69] Gundlach J H, Adelberger E G, Heckel B R, Swanson H E 1996 *Phys. Rev. D* **54** R1256
- [70] Gundlach J H 1999 *Meas. Sci. Technol.* **10** 454
- [71] Rose R D, Parker H M, Lowry R A, Kuhlthau A R, Beams J W 1969 *Phys. Rev. Lett.* **23** 655
- [72] Xue C, Quan L D, Yang S Q, Wang B P, Wu J F, Shao C G, Tu L C, Milyukov V, Luo J 2014 *Phil. Trans. R. Soc. A* **372** 20140031
- [73] Quan L D, Xue C, Shao C G, Yang S Q, Tu L C, Wang Y J, Luo J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 014501
- [74] <http://iupap.org/working-groups/wg13-newtonian-constant-of-gravitation/>[2016]
- [75] <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CIPM/CIPM2014-II-Decisions-EN.pdf> [2014-12-10]

SPECIAL TOPIC — Physics in precise measurements

Progress on the precision measurement of the Newtonian gravitational constant G^*

Liu Jian-Ping¹⁾ Wu Jun-Fei¹⁾ Li Qing¹⁾ Xue Chao²⁾ Mao De-Kai¹⁾ Yang Shan-Qing^{1)†}
Shao Cheng-Gang¹⁾ Tu Liang-Cheng¹⁾²⁾ Hu Zhong-Kun¹⁾ Luo Jun^{1)2)‡}

1) (MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurements, Hubei Key Laboratory of Gravitation and
Quantum Physics, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (TianQin Research Center for Gravitational Physics, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

(Received 1 August 2018; revised manuscript received 10 August 2018)

Abstract

The Newtonian gravitational constant G is the first fundamental physics constant introduced by human beings. It plays an important role in many fields, such as theoretical physics, astrophysics, and geophysics. Its precision measurement and related research is of great significance to the whole experimental physics. However, the measuring accuracy of G is the worst among all fundamental physical constants, which reflects the great complexity and difficulty in determining G . This paper briefly reviews the history of G measurement, and also introduces the current research progress in this field by a summary of the recent three precision measurements of G . At the end of the paper, the latest developments of the G measurement in the center of gravitational experiments at Huazhong University of Science and Technology are introduced.

Keywords: Newtonian gravitational constant G , precision measurement, time-of-swing method, angular acceleration feedback method

PACS: 06.20.Jr, 04.80.Cc

DOI: [10.7498/aps.67.20181381](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181381)

* Project supported by the Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91536223) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB832801).

† Corresponding author. E-mail: ysq2011@hust.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: junluo@hust.edu.cn