

基本物理常数概述及牛顿引力常数的测量

沈乃激[†]

(中国计量科学研究院 北京 100029)

2013-04-23 收到

[†] email: shennaicheng@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20140605

Survey of fundamental physical constants and measurements of the Newtonian constant of gravitation

SHEN Nai-Cheng[†]

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

摘要 据不完全统计,基本物理常数有160余个之多,覆盖物理学各个领域。自国际科学技术数据委员会(CODATA)1973年首次发表国际推荐值以来,至今已发表了6次推荐值。文章介绍了基本物理常数的分类以及近期发表的基本物理常数领域的主要成就。这些成就及新的突破对物理学和计量学具有重要的意义。牛顿引力常数是测量万有引力的重要常数,具有深远的意义,但其数值极小,因此测量难度很大;二百余年来,科学家精益求精,不断更新方法,以求减小其测量的不确定度。

关键词 基本物理常数,国际推荐值,物理学和计量学,牛顿引力常数

Abstract According to incomplete statistics, there are more than 160 fundamental physical constants, covering all fields of physics. Since the Committee on Data for Science and Technology of the International Council for Science (CODATA) presented the first set of internationally recommended values in 1973, to date they have presented six further sets. This paper introduces the classification of the fundamental physical constants, and presents the main achievements recently published in this field. These new breakthroughs have vital significance in physics and metrology. The Newtonian constant of gravitation is an important constant for the measurement of universal gravitation and has far-reaching significance, but because of its extremely small value it is very difficult to measure. For more than two hundred years many scientists have been constantly improving and updating their techniques in order to reduce the uncertainties in measurement.

Keywords fundamental physical constants, internationally recommended values, physics and metrology, Newtonian constant of gravitation

1 引言

CODATA是“国际科学技术数据委员会”的简称,成立于1966年,是“国际科学联合会”(ICSU)的国际学科之间的委员会。它的任务是力图提高数据的品质和可靠性,改善处理、使用以及检查的方法,这些数据对科学和技术是有重要意义的。1966年,CODATA成立了基本常数任务

组,目的是定期提供基于实用的物理和化学的基本常数(包括转换因子)的自洽国际推荐值。自1973年该组织发表第一次国际推荐值^[1]开始,以后约10余年间发表一次新的数据,代替前一次的国际推荐值。1986年^[2]和1998年^[3]相继发表了第二和第三次推荐值。进入21世纪后,由于科学技术的迅猛发展,发表新数据的间隔缩短为4年。2002年^[4]、2006年^[5]和2010年^[6]相继发表了第

四、第五和第六次国际推荐值。2010年的数据是最近的一次，它所收集的世界范围内的数据的起始时间为2007年1月1日，截止日期为2010年12月31日。由于整理和分析工作十分繁重，2010年的国际推荐值的正式发表日期是2012年3月15日。这次发表的国际推荐值对于近年将实施的基本单位重新定义是至关重要的数据。

在未来的基本单位定义的变革中，除时间单位秒以外的其他6个基本单位都将用基本物理常数来重新定义。其中，质量单位千克和物质的量单位摩尔将分别用普朗克常数和阿伏伽德罗常数来定义。我们知道，质量单位与物质的量单位具有相关性，同样，普朗克常数和阿伏伽德罗常数也存在密切的关联性。本文就这两个常数及有关的基本单位进行简单说明。

根据国际单位咨询委员会(CCU)的建议，质量单位和物质的量单位的重新定义的方案如下。

千克(kg)是质量的单位，其量值是人们约定的普朗克常数的数值，它精确地等于 $6.62606X \times 10^{-34} \text{ J s}$ ，这里是用 $\text{s}^{-1}\text{m}^2\text{kg}$ 单位表示，它等于 J s 。在这个质量单位的定义中，X的含义是指目前的待定值，是当质量单位的定义正式通过时会确定的数值。

摩尔(mol)是一系统的物质的量的单位。该系统所包含的单元数与0.012 kg 碳-12的原子数目相等。在使用摩尔单位时，基本单元应予指明，它可以是分子、原子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合。其量值是人们约定的阿伏伽德罗常数，它精确地等于 $6.02214 X \times 10^{23}$ ，用 mol^{-1} 单位表示(其中X是指目前的待定值，是当物质的量的单位正式通过时会确定的数值)。

2 基本物理常数的分类

目前发表国际推荐值的基本物理常数分为普适常数，电磁常数，原子常数与核常数，物理化学常数等4大类。1986年后，逐步将其中的原子常数与核常数又细分为一般常数、弱电常数、电子、 μ 子、 τ 子(1998年增设)、质子、中子、氦

核、氘核(2006年增设)、氦核和 α 粒子(1998年增设)，使基本常数国际推荐值日臻完善。我们知道，物理学历史上曾将 μ 子和 τ 子称为介子，因为它们的质量介于电子和质子之间， μ 子质量约为电子质量的206.7倍，但 τ 子质量为 μ 子质量的16倍，已是质子质量的1.89倍。

1935年，日本物理学家汤川秀树预言，应当存在传递强相互作用的粒子，其质量估计为电子质量的200倍，称为介子。1937年，美国物理学家安德森等在宇宙线中发现了这类粒子，称为 μ 介子；但10年后通过实验发现这类粒子并不是汤川秀树所预言的粒子，改称为 μ 子，它只参与电磁相互作用和弱电磁相互作用，属于带电轻子。

1975年，在美国斯坦福直线加速器中心的正负电子对撞机上，发现了只参与电磁相互作用和弱电磁相互作用的另一类带电轻子，其质量很大，约为 μ 子质量的16倍以上，称为 τ 子。1992年，在北京正负电子对撞机上，测量了 τ 子的质量值^[7]，用最大似然函数法选择逼近阈值的测量点能量，并最终确定 τ 子的质量为 $1776.9 \pm 0.45 \text{ MeV}$ (原文为 $1776.9 \pm 0.4 \pm 0.2 \text{ MeV}$ ，取其不确定度均方和的根)。1998年， τ 子质量国际推荐值^[3]为 $1777.05(29) \text{ MeV}$ ，不确定度为 0.29 MeV ，相对不确定度为 1.6×10^{-4} 。上述测量数据在推荐值的不确定度范围内，显然已被采用。2010年， τ 子质量国际推荐值^[6]为 $1776.82(16) \text{ MeV}$ ，不确定度达 9.0×10^{-5} ，与文献[7]给出的测量结果更为接近。

3 牛顿引力常数G的测量

牛顿出生的前一年，意大利物理与天文学家伽利略去世。伽利略一生有很多发现：在比萨斜塔上做过著名的自由落体实验；制作了一架天文望远镜，用以观测天象(见图1)；因坚信并进一步论证哥白尼的太阳中心说，被罗马异端裁判所判处监禁，直至寿终。他是一位值得人们尊敬的信仰科学、追求真理的伟大科学家。牛顿受到他很多启发，沿着他的科学道路奋勇前进。

牛顿引力常数G是物理学家最早测量的基本



图1 伽利略(1564—1642)用自制望远镜观测天象

常数, 牛顿^[8]在1687年发表的普适万有引力定律可表示如下: 任意两个质点通过连心线方向上的力相互吸引。该引力的大小与它们的质量乘积成正比, 与它们的距离平方成反比, 与两物体的化学本质或物理状态以及中介物质无关。其中的比例常数称为牛顿引力常数 G , 但是牛顿本人并未能测出 G 的数值。

1600年, 德国天文学家开普勒(见图2)受丹麦天文学家第谷邀请, 到布拉格来当他的助手, 次年10月, 第谷逝世, 临终前将其生平积累的观测资料赠给开普勒。此后, 开普勒成为第谷事业的继承人。经过长达8年的反复观测和研究, 开普勒发现, 当时火星绕太阳作圆周运动的理

论值与第谷的观测值在火星的黄经(为研究天体的位置和运动, 需要引入一个假想的圆球, 称为天球。地球上坐标系, 天球上也有坐标系。天球坐标系中的一种叫黄道坐标系, 它的经度称为黄经)上有8分(分是角度单位)的误差, 终于发现了“火星沿椭圆轨道绕太阳运行, 太阳处于焦点之一的位置”, 从而总结出开普勒三大定律。

大家熟知的牛顿(见图3)见到苹果下落的故事, 是十分有趣的。关键是牛顿想到苹果会自己下落, 为什么月亮总是高悬空中, 而不会坠落。对这两个事件的联想, 牛顿经过长期的思考和继承前人的成果, 创立了牛顿三定律和万有引力定律, 成为运动学和力学的鼻祖。

1798年, 英国化学家、物理学家卡文迪什^[9](见图4)首次测量了 G 的数值。

图5示出了卡文迪什实验的测量原理, 图中的 m 和 m' 分别为两个相互作用物体的质量, 两者的间距为 r , 整个装置用镜子 M 上方的细丝悬挂, 通过镜子的反射(图中虚线所示), 可以测量细丝由于扭力产生的偏转, 此方法称为动态扭力天平法, 由此得出的牛顿引力常数 G 的测量值^[9]为 $G=6.754(41)\times 10^{-11}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$ 。

1930年, 美国国家标准局(NBS)的Heyl^[10]采用了动态扭力天平法测量 G 值, 该方法是将图5中的扭丝悬挂一个摆, 通过测量摆在具有质量 m 和无质量 m 时的周期差值, 计算出 G 值。实验中,



图2 德国天文学家开普勒
(1571—1630)



图3 英国物理学家牛顿
(1643—1727)



图4 英国化学家、物理学家卡文迪什(1731—1810)

采用的扭力天平一端小球的材料分别为黄金、白金和玻璃，其测量值分别为 $6.6782(16) \times 10^{-11}$ ， $6.6640(13) \times 10^{-11}$ 和 $6.6740(12) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 。3 个数据的测量不确定度分别约为 2.4×10^{-4} ， 1.9×10^{-4} 和 1.8×10^{-4} ，但 3 次测量值的差值达到 1.5×10^{-3} ，约为测量不确定度的 8 倍，这表明测量数据中尚存疑问。

1957 年，美国的基本常数评议专家 Cohen 等人^[11]在评论文章中指出，动态扭力天平法中的“悬挂体的自由振荡周期变化与得到 G 值的静态质量的位置有关，应提供质量及其几何形状的准确信息。”

1973 年，CODATA 在评论上述 G 值测量时认为^[1]，“遗憾的是，1930 年 Heyl 得出的 3 个测量值中，不能解释黄金、白金和玻璃材料之间的差异”；1942 年，Heyl 和 Chrzanowski^[12]再次用同样方法测量，解释了上述差异，并将不确定度减小

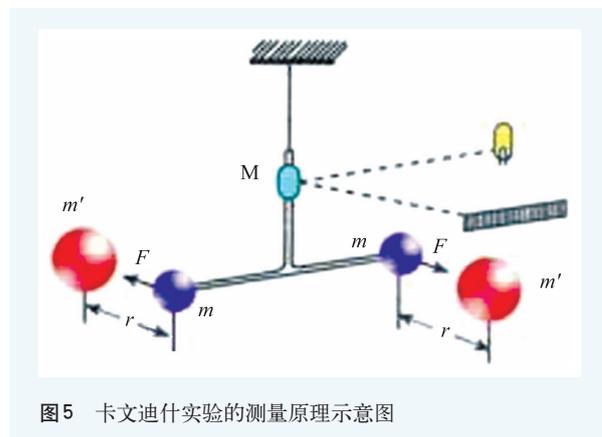


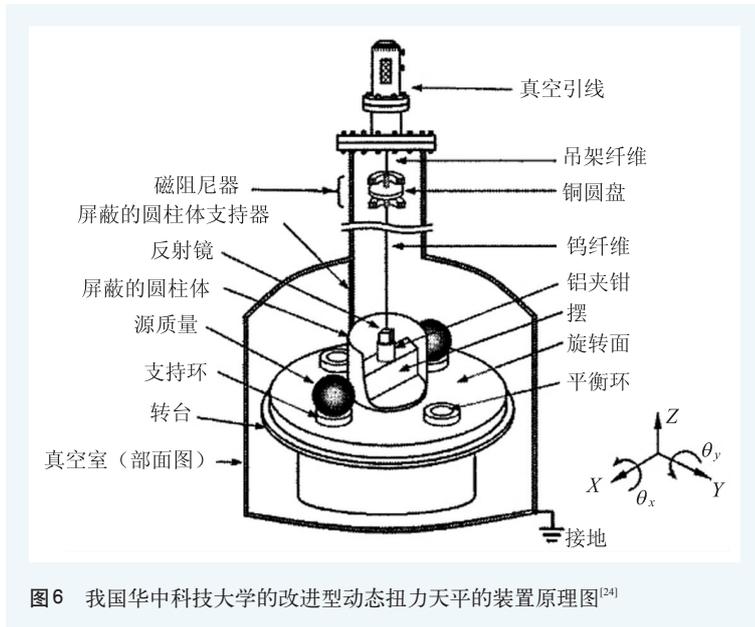
图5 卡文迪什实验的测量原理示意图

了 3 倍；因此，1973 年 CODATA 推荐值采用了这两次的平均值^[1]；1998 年，CODATA 在评论动态扭力天平法时提出^[3]，“扭丝的滞弹性效应很大，至今仍在研究中”，明确指出了动态扭力天平法可能的重要误差来源。

表 1 中汇总了 200 余年来牛顿引力常数 G 测

表 1 200 余年来牛顿引力常数 G 测量进展一览表

发表年份	测定者	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2} \times 10^{-11}$	原理或方法及相对不确定度
1798	Cavendish(卡文迪什) ^[9]	6.6754(41)	首创静态扭力天平法， 6×10^{-4}
1930	Heyl ^[10]	6.6721(73)	首创动态扭力天平法， 1×10^{-3}
1942	Heyl 和 Chrzanowski ^[12]	6.6720(49)	动态扭力天平法， 7.3×10^{-4}
1972	Pontiki ^[13]	6.67145(41)	扭力天平， 1.5×10^{-5}
1973	CODATA 推荐值 ^[1]	6.6720(10)	6×10^{-4}
1982	Luther 和 Towler ^[14]	6.67248(43)	动态扭力天平， 6.4×10^{-5}
1986	CODATA 推荐值 ^[2]	6.67559(85)	1.28×10^{-4}
1996	Karagioz 和 Izmailov ^[15]	6.6729(5)	扭力天平， 7.5×10^{-5}
1997	Bagley 和 Luther ^[16]	6.67398(70)	扭力天平， 1.0×10^{-5}
1998	CODATA 推荐值 ^[3]	6.673(10)	1.5×10^{-3}
1999	Luo 等(罗俊等) ^[17]	6.6699(7)	1.0×10^{-4}
2000—2002	Gundlach 和 Merkowitz ^[18]	6.673255(92)	扭力天平， 1.4×10^{-5}
2001	Quinn 等 ^[19]	6.67559(27)	扭力天平， 4.0×10^{-5}
2002	Kleinvos 等 ^[20]	6.67422(98)	悬体， 1.5×10^{-5}
2003	Armstrong 和 Fitzgerald ^[21]	6.67387(27)	扭力天平， 4.0×10^{-5}
2005	Hu 等 ^[22]	6.67228(87)	动态扭力天平， 1.3×10^{-4}
2006	Schlamming 等 ^[23]	6.67425(12)	扭力天平， 1.9×10^{-5}
2006	CODATA 推荐值 ^[5]	6.67428(67)	1.0×10^{-4}
2009 2010	Luo 等(罗俊等) ^[24] Tu 等 ^[25]	6.67349(18)	动态扭力天平， 2.7×10^{-5}
2010	Parks 和 Faller ^[26]	6.67234(14)	悬体、激光拍频， 2.5×10^{-5}
2010	CODATA 推荐值 ^[6]	6.67384(80)	1.2×10^{-4}

图6 我国华中科技大学的改进型动态扭力天平的装置原理图^[24]

量值及CODATA的推荐值，由于它们与目前平差中所用的其他常数是独立的，在 G 与其他基本常数之间不存在已知的定量理论关系。我国华中科技大学罗俊等人采用的测量方法，就是改进型的动态扭力天平法(见图6)。他们的测量结果逐渐得到CODATA的关注和采用。

罗俊等人在2009年测量值的不确定度^[13]比2005年的不确定度^[14]又减小了5倍，其装置改进如下：(1)用密度更均匀的不锈钢球体代替原来的圆柱体，使质心可以精密定位；(2)使用矩形石英块作为动态扭力天平主体部分的摆，提高了摆周期的稳定度，减小了摆的转动惯量的不确定度；(3)在球体质量与摆之间设置真空室，减小了两者位置测量的不确定度；(4)使用遥控的步进电机，改变被测质量的位置，降低了由于环境引起的变化；(5)用高 Q 石英丝对扭丝的内摩擦进行测量；他们的最终结果是两次 G 测量值的平均值，与每次 G 测定值之间的差值仅为 9×10^{-6} 。

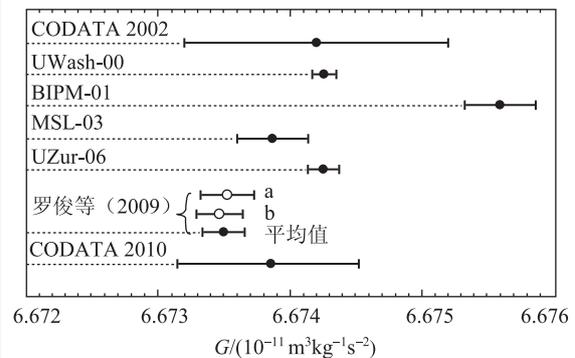
实验装置的核心是一个两级摆系统，它悬挂在真空室中。两级摆采用长度分别为90 mm和890 mm的两级扭丝悬挂系统，以减小扭丝的滞弹性效应。罗俊等人在2009年测得的数据如图7所示。

美国JILA的Parks和Faller^[27]实验中所用的仪器示于图8，用法布里—珀罗(F—P)腔测量了两个摆锤之间的间距，其悬点位于参考腔。摆锤是用无氧铜制造的，其质量为780 g，摆长为720 mm，其间隔为340 mm。当把4个悬挂在空气轴承上的质量为120 kg的钨圆柱体，从一个位置移动到另一个位置时，每个摆锤上的水平引力改变480 nN，从而使摆锤的间隔发生变化，即间隔增大。密封摆的真空室在图中未画出，但不是源质量。真空系统外的磁体在摆锤下使摆锤的摆动产生阻尼，可以测量由于引力拉动引起的源质量的静态偏转。当源质量在内部位置与外部位置之间做几次运动时，底图上绘出了其引力信号(源质量在每个位置停止80 s)。锁定在摆腔上的激光与锁定在参考腔上的激光之间的拍频的变化为125 MHz，相当于摆锤间距变化90 nm。

每个源质量用四条线支持在一起，组成了F—P腔，每边一对置于两侧，用激光光束穿过F—P腔体，定期优化，摆锤之间的间距变化约90 nm。

这是通过观测激光频率锁定在摆腔与锁定在参考腔之间(即125 MHz)时的拍频变化而取得的，参考腔是支撑杆的一部分。这是首次用稳频

的，参考腔是支撑杆的一部分。这是首次用稳频

图7 罗俊等人2009年的数据(a, b分别为第一次实验和第二次实验的测量结果^[9]，其下方为平均值)

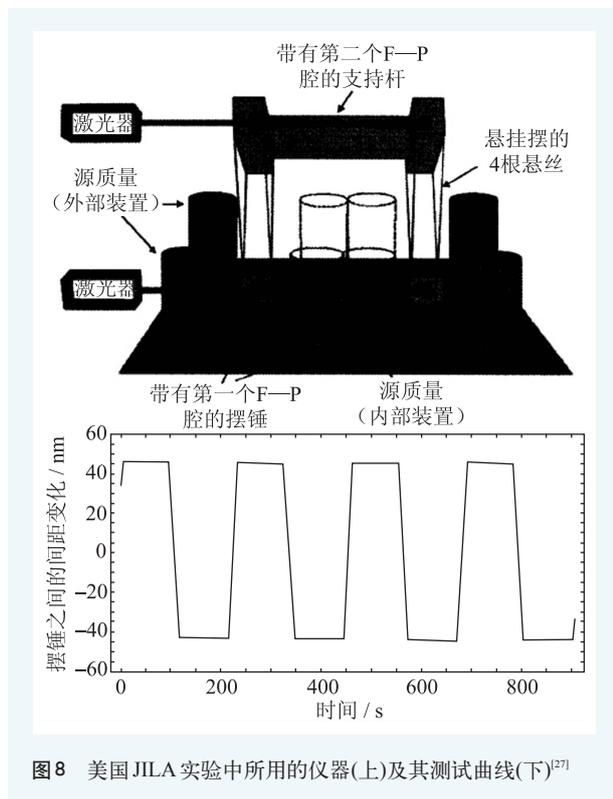


图8 美国JILA实验中所用的仪器(上)及其测试曲线(下)^[27]

激光器和F—P腔测量牛顿引力常数 G 的实验，其技术方案具有先进性。

4 结束语

200余年以来，牛顿引力常数 G 的测量不确定度徘徊在 10^{-4} 与 10^{-5} 之间。虽然，我国罗俊小组和美国JILA的Parks和Faller等人的测量不确定度已分别达到 2.7×10^{-5} 和 2.5×10^{-5} ，但两者的测量值分别为 $6.67349(18) \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \times 10^{-11}$ 和 $6.67234(14) \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \times 10^{-11}$ ，两者相差为 $0.00115 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \times 10^{-11}$ ，已超出两者测量不确定度的6至8倍，相当于 1.7×10^{-4} 。因此，2010年的CODATA的牛顿引力常数 G 推荐值为 $6.67384(80) \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \times 10^{-11}$ ，不确定度为 1.2×10^{-4} ，这是综合了表1中所列的各个实验室的测量结果的平均值。牛顿引力常数 G 的准确数值，还有待于进一步提高，尤其是要减小可能的系统不确定度带来的误差。

参考文献

- [1] Cohen E R, Taylor B N. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1973, 2(4):663
该文的中译文见：沈乃澂、沈平子等译，王竹溪审校. 1973年基本物理常数的最小二乘法平差. 中国计量科学院内部刊物, 1975
- [2] Cohen E R, Taylor B N. *Rev. Mod. Phys.*, 1987, 59(4):1121. 沈乃澂编译. 1986年基本物理常数国际推荐值. 北京：科学出版社, 1987
- [3] 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
- [4] Mohr P J, Taylor B N. *Metrologia*, 2005, 42:71
- [5] 卢森锴、郭奕玲、沈慧君等. *物理*, 2008, 37(03):183
- [6] CODATA Task Group on Fundamental Constants. CODATA recommended values of the fundamental physical constants. see the 2010 CODATA recommended values and bibliography at <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/Citations/Search.html>
- [7] 丁慧良等. *高能物理与核物理*, 1992, 16(9):865
- [8] Newton I. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Joseph Streater, 1687
- [9] Cavendish H. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1798, 88:469
- [10] Heyl P R. *Res. Nat. Bur. Stand.*, 1930, 5:1243
- [11] Cohen E R, Crowe K M, Dumond J W M. *Fundamental Constants of Physics*. New York: Interscience Publishers, Inc., 1957.16
- [12] Heyl P R, Chrzanowski P. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1942, 29:1
- [13] Pontikis C. *Acad. Sci. Ser. B*, 1972, 274:437
- [14] Luther G G, Towler W R. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48(3):121
- [15] Karagioz O V, Izmailov V P. *Meas. Tech.*, 1996, 39(10):979
- [16] Bagley C H, Luther G G. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 78(16):3047
- [17] Luo J, Hu Z K, Fu X H *et al.* *Phys. Rev. D*, 1999, 59 :042001
- [18] Gundlach J H, Merkowitz S M. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85(14):2869
- [19] Quinn T J, Speake C C, Richman S J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87:111101
- [20] Kleinevos U. 2002, Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstanten G. Ph. D. thesis, University of Wuppertal
- [21] Armstrong T R, Fitzgerald M P. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91:201101
- [22] Hu Z K, Guo J Q, Luo J. *Phys. Rev. D*, 2005, 71:127505
- [23] Schlamminger S E, Holzschuh W, Kundig F *et al.* *Phys. Rev. D*, 2006, 74:082001
- [24] Luo J, Liu Q, Tu L C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102 :240801
- [25] Tu L C, Li Q, Wang Q L *et al.* *Phys. Rev. D*, 2010, 82 :022001
- [26] Parks H V, Faller J E. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105:110801