

* 专题评述 *

引力实验与理论研究新进展*

涂良成 罗俊**

华中科技大学物理系, 武汉 430074

摘要 在现有物理学的架构之下, 理论物理学家们正在寻找一个合适的理论来涵盖4种基本相互作用, 而对于引力基本性质的研究将是其中最关键的问题之一. 因此进行引力规律的实验研究对人类认识和利用自然界具有深远的科学意义和社会现实意义, 该领域的突破必将极大地丰富人们对宏观和宇观世界的认识. 在这种基础物理实验研究过程中不仅需要好的物理思想和巧妙的实验方案, 而且也极力追求各种实验技术和测量方法的极限. 近年来华中科技大学物理系引力中心在引力实验与理论领域所开展的研究工作, 包括万有引力常数 G 的精确测量、光子静止质量实验检验、亚毫米范围 Newton 反平方定律实验检验以及宏观旋转物体等效原理的实验检验等均取得了一些积极进展.

关键词 精密扭秤 万有引力常数 G 光子静止质量 Newton 反平方定律 等效原理

广义相对论与量子理论是近代物理学的基础. 广义相对论描述了引力的本质, 并解释了宏观乃至宇观尺度的实验观测结果, 而量子理论解释了微观尺度的实验观测结果. 但是, 现有理论是在目前的实验检验精度和在一定的尺度范围被验证是成立的, 超出现有实验检验精度和尺度范围则无法确认这一理论是否仍然正确. 由于实验是检验物理理论正确与否最有效和最终的判据, 人们期待着利用更精密的实验技术和更巧妙的实验方法, 在更广的相互作用范围和更高的实验精度上检验广义相对论与量子理论基本假设的正确性以及相关的预言. 目前, 人们在量子力学方面已积累了相当多的实验证据, 并且基于量子力学所发展出来的一些新技术也都日趋成熟. 但是, 在引力基本性质的实验研究方面, 进展并不理想^[1-5]. 其根本的原因主要有以下几点: (1) 引力是目前已知4种基本相互作用力中最弱的一种; (2) 引力无法屏蔽; (3) 外界噪声耦合与仪器系统误差常成为精密测量引力基本性质的“瓶颈”

问题. 这些根本的原因, 往往造成实验结果的不确定性太大, 其中最著名的例子当属20世纪80年代末期关于第五种基本相互作用力是否存在的争论^[6-10].

华中科技大学引力中心依托喻家山人防山洞实验室(纵深150 m, 上面覆盖层厚度大于40 m, 年温度变化小于 1°C 、日温度变化小于 0.005°C ^[11-13]), 以精密扭秤为微力测量平台, 开展万有引力常数 G 测量、光子静止质量实验检验、Newton反平方定律的实验检验以及弱等效原理的实验检验等引力实验及相关理论问题研究, 对物理学的基本常数和基本定律进行更高精度的实验测量和检验. 近5年来的代表性研究工作主要有: 周期法测量 Newton 万有引力常数 G 的实验结果被国际基本常数委员会采用^[14]; 采用精密扭秤调制法检验光子静止质量上限, 将国际上同类实验结果提高近20倍^[15]; 利用精密扭秤进行亚毫米范围 Newton 反平方定律实验检验, 当前实验结果已经优于国际上同类实验结果

2005-01-26 收稿, 2005-03-23 收修改稿

* 国家自然科学基金创新研究群体(批准号: 10121503)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2003CB716300)资助项目

** 通讯作者. E-mail: junluo@mail.bust.edu.cn

两倍；在国际上率先提出等效原理是否依赖宏观物体的运动状态这一科学问题，并利用双落体激光干涉法首次完成宏观旋转物体等效原理的实验检验^[16,17]。限于篇幅，本文将从以上4个方面分别简单介绍国际上最新研究进展以及我们的研究工作进展。

1 Newton 万有引力常数 G 测量

万有引力常数 G 是一个与理论物理、天体物理和地球物理等密切相关的物理学基本常数，它的精确测量在引力实验乃至整个实验物理学中占据着特殊地位^[2,18-21]。目前测 G 的方法大致可分为地球物理测量、实验室测量和空间测量等三大类。地球物理学方法测量万有引力常数 G ，是利用大的自然物体如形状规则的山体、矿井和湖泊等作为吸引质量。其主要优点是作为吸引质量的自然物体很大，引力效应明显。但由于作为吸引质量的自然物体的尺度、密度及其分布不能精确测量，所以实验的精度也就比较低。实验室测量万有引力常数 G 的常用工具是精密扭秤^[22]，它可以绕着悬丝在水平面内自由运动以探测水平方向的引力作用。采用扭秤测量引力常数 G 有以下方法：直接倾斜法、共振法和周期法等。直接倾斜法通过检测扭秤或者天平在外加吸引质量的万有引力作用下其平衡位置的偏转来计算出 G 值。共振法是让扭秤在周期性运动的吸引质量作用下共振，以放大待测引力作用。扭秤周期法是采用得最多并且测量结果较为理想的方法之一，当扭秤周围放置吸引质量之后其运动周期要产生相应的变化。由于吸引质量以及它们的位置是人们精密加工和精心设计的，实验室内测量万有引力常数 G 的精度一般较高。随着航天技术的发展，人们开始寻找空间测量方法。1992年美国的 Sanders 和 Deeds 提出了卫星能量交换法^[23]，通过测量在几乎同样的地球轨道上的两颗卫星——吸引质量和检验质量之间的引力，并利用轨道摄动理论得出引力常数 G 的值。他们认为卫星能量交换法能将 G 的测量精度提高到 1×10^{-6} 的水平。空间测量方法面临着很多新的技术难题，目前仍在探索之中。

实验室内测量引力常数 G 是一项艰巨而又困难的工作，高精度的 G 值依赖于巧妙的实验设计和先进的科学技术。自 1798 年 Cavendish 采用精密扭秤

取得历史上第一个较为精确的万有引力常数 G 值以来^[24]， G 的测量精度近两百年来并没有太大的提高。国际物理学基本常数委员会推荐的 CODATA 值 (1998) 中所采用的 10 个万有引力常数 G 测量值分别是^[25]：国际物理学基本常数委员会的上一轮推荐值 CODATA-86；以及按照实验数据公布的时间顺序分别由德国布伦瑞克物理技术学院 (PTB-95)、美国洛斯阿拉莫斯国家重点实验室 (LANL-97)、俄罗斯科学院 (TR&D-98)、美国国家标准局和科罗拉多大学联合实验室 (JILA-98)、中国华中科技大学引力实验室 (HUST-99)、新西兰国家标准计量实验室 (MSL-99)、国际计量局 (BIPM-99)、瑞士苏黎世大学 (UZur-99)、德国伍珀塔尔大学 (UWup-99) 等 9 个小组的测量值。1998 年国际物理学基本常数委员会推荐使用的 CODATA 值为 $G_{1998} = 6.673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ，这一结果与 Cavendish 的实验值没有本质差别。由于各小组的测量值在其误差范围内不能完全吻合，使得该委员会将 G 值的不确定度由 1986 年的 128×10^{-6} 增加为 1500×10^{-6} ，而保持其中心值不变，从而使得 G 值成为此次常数更新中惟一不确定度下降的常数。因此，1998 年之后，各国科学家都加紧了实验的步伐，相继报道了几个高精度的实验结果，其中有 2000 年美国华盛顿大学采用角加速度反馈的方法测得^[26] $G = 6.674215(92) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ，其相对精度为 14×10^{-6} ，这是目前国际上所得到的相对精度最高的 G 值；2001 年国际计量局利用簧片型扭秤^[27]，并且同时用了两种不同的方法（这两种方法的相关系数为 -0.18 ）测得的 $G = 6.67559(27) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ，相对精度为 40×10^{-6} ；瑞士苏黎世大学 2002 年利用天平倾斜法测的^[28] $G = 6.67407(22) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ，相对精度 33×10^{-6} 的实验结果；2003 年新西兰国家标准计量实验室报道的结果为^[29] $G = 6.67387(27) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ，相对精度为 41×10^{-6} 。尽管上述几个实验结果各自的实验精度都在 50×10^{-6} 以下，但是 G 值在他们各自的精度范围内并不吻合。因此，2002 年国际基本物理学基本常数委员会又一次统计了最近的几个测量结果，公布了新一轮的 CODATA 值为^[30] $G_{2002} = 6.6742(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ，相对精度仍然被放大到为 150×10^{-6} 。

图1列出了近年来一些主要的实验结果以及他们的误差,可以看出,进一步提高实验测量精度,寻找未被认识的系统误差,和寻找新途径是测量万有引力常数 G 的趋势.

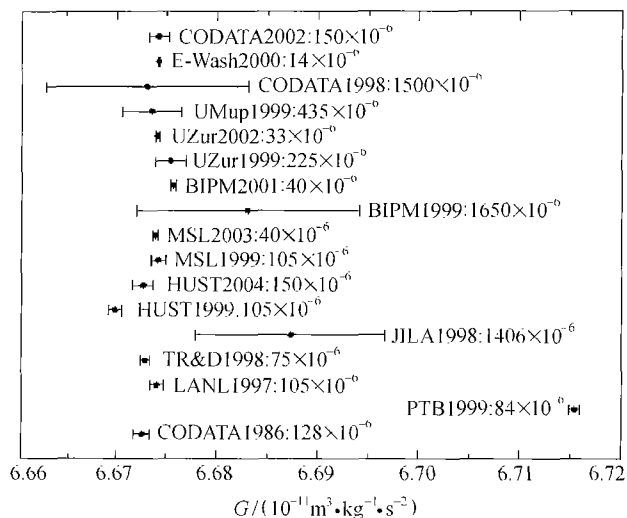


图1 近年来万有引力常数 G 测量的实验结果及其误差

华中科技大学引力实验中心于1994年开始了周期法测 G 的研究,于1997年底得到的 G 值为^[1] $G_{\text{HUST99}} = 6.6699(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 相对精度为 105×10^{-6} , 实验装置如图2所示. 我们采用扭秤周期法对 G 值进行了绝对测量,其创新之处在于采用了长周期、高 Q 值的扭秤并使之在一个恒温、隔振且外界引力干扰相对较小的环境下工作,从而克服了扭丝滞弹性和热弹性对测 G 的影响. 扭秤放置在真空容器内,用一根直径 $25 \mu\text{m}$ 、长度约 513 mm 的钨丝悬挂在悬点 P ; 扭杆的两端通过直径为 $50 \mu\text{m}$ 的钨丝分别悬挂两个球形检验质量 m_1 和 m_2 . 吸引质量 A, B 为非磁性不锈钢正圆柱体(质量约为 6.25 kg), 同轴放置在铝制底座上,它们端面之间的距离由定位块规确定,最终的质心间距为 $(60.240 \pm 0.002) \text{ mm}$. 实验中我们通过放上和移开两个吸引质量使引力场发生变化,测量扭秤周期的改变来最终确定 G 值.

HUST-99 的实验结果虽然精度较高,但是与近三次 CODATA 值公布的 G 值相比仍然偏小. 近年来,我们一直在寻找实验结果偏小的原因,并于2003年发现 HUST-99 测 G 实验中的圆柱

吸引质量的几何中心和质心并不重合,我们采用精密电子天平(Mettler-Toledo 公司的 PR2004, 量程为 2300 g , 分辨率为 0.1 mg)对该实验中使用的两个吸引质量的质心和几何中心的偏心距进行了测量,测量方法见文献[31],结果分别为 $e_A = (10.5 \pm 2.6) \mu\text{m}$, $e_B = (6.5 \pm 3.7) \mu\text{m}$, 巧合的是两个圆柱体的质心的偏离均为远离检验质量小球,即对应于在 HUST-99 实验中使用的两个圆柱体的间距值小于真实值,该项偏差对 G 值的修正起主要作用. 另外,在 HUST-99 实验中我们称量两个圆柱体的质量是在大气中测量的,而空气的浮力对质量测量的影响会使测量结果偏小. 因此考虑了上述两个原因后,我们对 HUST-99 的实验结果的修正值为: $G_{\text{HUST2004}} = 6.6727(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 因为对两个圆柱体的质心间距的测量误差变大(从 $1 \mu\text{m}$ 分别变到 2.6 和 $3.7 \mu\text{m}$),使得修正后的 G 值相对精度下降到 150×10^{-6} ,但是修正后的结果与近三次公布的 CODATA 值完全吻合(见图1).

为了进一步提高 G 值的测量精度,在前面实验的基础上,我们对 HUST-99 实验进行了系统的分析. 在该实验中,仅扭秤周期测量引入 G 值的误差为 75×10^{-6} ,这是最大的一项误差源. 因此如何从实验上抑制各种干扰源,提高扭秤运动周期的稳定度,并且寻求一种适用于扭秤运动信号的高精度频

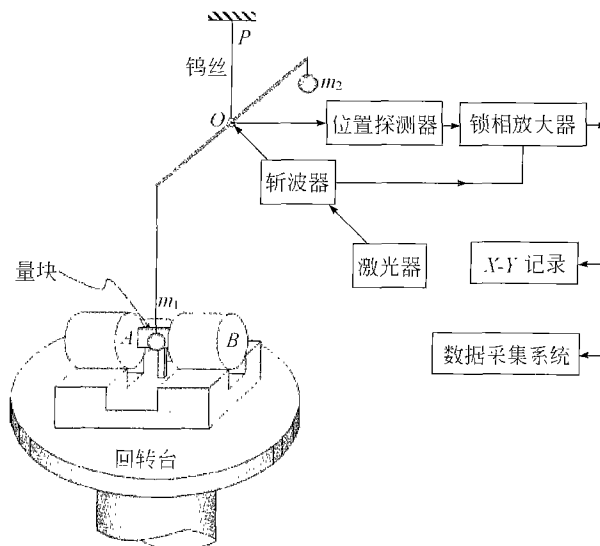


图2 HUST-99 测 G 实验装置示意图

率估计方法就成为提高 G 值测量精度的关键. 针对该实验中扭秤的自由度多(11个), 运动模式复杂以及扭秤运动的非线性效应明显等缺点^[32], 我们提出新的周期法测 G 方案. 利用该方案, 扭秤的自由度减少为5个, 这样可以有效减小扭秤运动的非线性效应、减小外界振动对扭秤的影响、有利于周期稳定性的提高. 在目前进行的测 G 新实验中, 我们先后完成了克服扭秤“反常模式”现象^[33]、球间距的测量^[34,35](精度达到 $0.3\ \mu\text{m}$)、以及扭秤的静磁、静电效应检验等实验, 新的实验结果有望在近期给出.

2 光子静止质量实验检验

光速不变与相对性原理作为 Einstein 狭义相对论的基本假设, 也是现代物理学的基础, 光子静止质量等于零是这两个假设的必然结论. 现有的 Maxwell 电磁理论和量子电动力学都是建立在光子静止质量为零的基本假设之上, 而电磁相互作用也是通过零静止质量的光子来传播的. 显然, 一个高精度的检验光子静止质量的实验, 无论是肯定还是否定结果都具有重要的科学意义. 虽然已有许多实验对光子静止质量进行检验, 但至今为止, 并没有证实光子具有静止质量, 所有实验均是给出光子静止质量的上限. 尽管如此, 光子究竟是否具有微小的静止质量这一问题一直受到人们的关注, 其中包括 de Broglie, Schrödinger 和 Feynman 这些量子力学的泰斗们^[36-38]. 即使光子仅有非常微小的静止质量, 如一旦得到实验的证实, 将对狭义相对论乃至整个现代物理学的构架产生重大的冲击. 而光子静止质量在更高精度下是否仍然为零, 需要更为精密的实验进行检验. 目前对光子静止质量所进行的各种实验是以重电磁理论 Proca 方程组为基础的^[36-38]. Proca 方程组中保留了 Lorentz 规范不变性, 但放弃了位相规范不变性, 因此标势和矢势具有了明确的物理意义. 至今为止, 光子静止质量的实验检验大致可分为对光速色散效应的检验、对 Coulomb 定律和 Ampère 定律的零检验以及对静磁场和星际等离子体效应的检验等三大类, 参见最近的综述文献^[38], 表 1 给出了近年来的一些主要实验结果以及他们所采用的实验方法.

表 1 一些代表性的光子静止质量实验结果及采用的方法

作者	时间	实验方法 [见文献 36—38]	光子质量上限 (g)
de Broglie	1940	检验星光色散效应	0.8×10^{-39}
Schrödinger et al	1955	分析地球磁场中的“外来场”	2.0×10^{-47}
Florman	1955	检验无线电波色散效应	6×10^{-42}
Goldhaber et al	1968	分析地球磁场中的“外来场”	4.0×10^{-48}
Feinberg	1969	分析脉冲星 NP0532 色散效应	10^{-44}
Bartlett et al	1970	检验 Coulomb 定律	3×10^{-16}
Williams et al	1971	检验 Coulomb 定律	2×10^{-17}
Hollweg	1974	星际等离子体介质中的色散	1.3×10^{-18}
Lowenthal	1975	分析电磁辐射的引力偏转效应	7×10^{-10}
Davis et al	1975	分析木星磁场中的“外来场”	7×10^{-49}
Chernikov et al	1992	检验 Ampère 定律	8.4×10^{-16}
Fischbach et al	1994	分析地球磁场中的“外来场”	1×10^{-48}
Ryutov	1997	分析太阳风磁场	10^{-44}
Lakes	1998	静态扭秤实验	2×10^{-50}
Schaefer	1999	分析伽马射线暴色散效应	4.2×10^{-41}
Luo et al	2003	动态调制扭秤实验	1.2×10^{-51}

Proca 方程的直接推论之一是光在真空中的速度具有色散效应. 长期以来, 人们已经使用各种方法(例如空腔共振、雷达、无线电干涉以及晶体调制器等)对各种频率的电磁辐射在真空中的传播速度进行了越来越精密的测量. 但在实验的精度范围内均未观测到光速的色散效应. 这类方法中以 Florman 的实验为代表, 由他的实验所给出的光子静质量上限为^[39] 6×10^{-42} g. Feinberg^[40]曾假定天文观测到的 NP0532 脉冲星的色散效应主要是光子静质量引起的, 并由此给出光子静质量上限为 10^{-44} g. 这类检验方法的最大困难在于实验中各种光学(或微波)器件以及空间介质等本身存在一定的色散效应, 从而导致更高精度实验结果的不确定性大大增加.

在 Maxwell 电磁理论中, 点电荷的势就是 Coulomb 反平方定律的结果, 而光子静止质量效应, 就会使点电荷之间的相互作用偏离 Coulomb 反平方定律. 因此, 检验 Coulomb 反平方定律的正确程度, 提供了确定光子静止质量上限的又一种方

法. 用两个同心导体球壳构成的系统可对 Coulomb 反平方定律进行检验, 这类实验从 1769 年的 Robison 开始到 1971 年的 Williams 等的实验, 参见最近的综述文献[41], 使得检验 Coulomb 定律的实验所确定的光子质量上限降低到 2×10^{-47} g. 这类实验精度的进一步提高受到了实验环境残余静电的极大影响. 与此类似, 若光子存在静止质量, 则磁场沿闭合回路的积分会偏离 Ampère 定律. 1992 年, Chernikov 等利用该原理在 1.24 K 的低温下进行了实验, 其结果给出的光子质量上限为^[42] 8.4×10^{-46} g.

1943 年, Schrödinger^[13,11] 提出用光子静质量效应解释地磁分析中的外磁场(Schrödinger 外来场方法), 并利用当时地磁观测的数据分析结果给出光子静质量上限为 1.0×10^{-47} g, 后将该结果放大 2 倍以提高可信度^[45]. 1975 年, Davis 等利用 Schrödinger 外来场方法分析由卫星测得的木星磁场的的数据, 得到了光子质量的新的上限为^[46] 7×10^{-49} g. 另一方面, 如果光子具有不为零的静止质量, 磁流体力学波在某一临界频率以下, 在冷等离子体中的传播将会按指数衰减来传播. Hollweg(1974)利用宇宙飞船对星际等离子体介质中的 Alfvén 波的观测结果, 给出了光子静止质量的一个可靠的上限^[47] 1.3×10^{-48} g. 这类实验研究的缺点在于上述效应的原因不仅仅可以由非零的光子静质量效应来解释, 也可以由其他效应或是它们的共同作用来解释.

1998 年, 美国学者 Lakes 报道了一个新的检验光子静质量的实验方法^[48]. 其基本思想是利用扭秤来

检验一个环状螺线管与宇宙磁场矢势的相互作用. 由于扭秤对弱力(矩)信号特别灵敏, 因而 Lakes 的实验结果给出的光子质量上限为 2×10^{-50} g. 但由于理论分析和实验设计上的缺陷, Lakes 的实验结果在宇宙磁场矢势的方向正好与地球自转轴方向一致时没有意义, 其实验结果的可靠性值得怀疑.

2000 年我们提出采用旋转扭秤调制检验光子静止质量的上限^[19], 这一方案不仅能有效地克服 Lakes 采用的静态扭秤光子静止质量实验方案中宇宙磁场矢势与扭秤检验质量的磁矩方向的不确定性问题, 而且有效抑制环境噪声的影响. 我们采用一个环状磁体由一根细丝悬挂起来构成扭秤. 如果光子存在静止质量, 环状磁体内部的磁场将与宇宙矢势发生相互作用, 从而产生力矩并且使扭秤偏转. 因为地球的自转作用, 磁环磁矩的方向也将以 24 h 的周期变化, 而宇宙矢势的方向相对于地球是不变的, 所以如果光子静止质量不为零, 作用在扭秤上的力矩也将呈现 24 h 周期的变化. 但是地球上呈 24 h 周期变化的物理现象很多, 比如环境温度、气压等效应、以及人的活动规律等等. 因此实验中必须将光子静止质量所产生的效应同这些效应区分开来. 所以我们让扭秤以某个周期旋转起来, 如果光子静止质量不为零, 则我们就可以检测到相应的周期性变化的力矩, 同时避免 24 h 的周日效应. 实验中我们选用背景噪声较低的 1 h 为调制周期, 在我们的实验精度下, 实验曲线上没有发现光子质量的效应(见图 3), 由实验精度给出光子静止质量的上

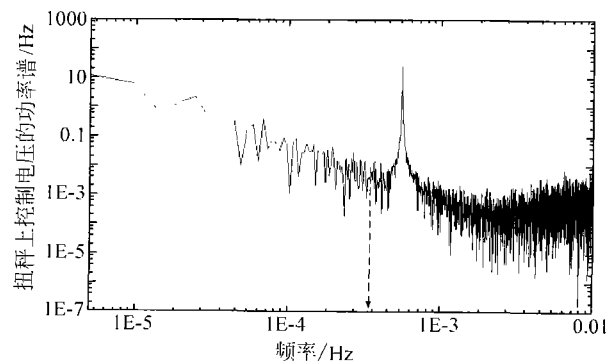


图 3 扭秤调制法检验光子静止质量实验中扭秤控制极板上反馈电压的功率谱曲线
数据时间长度为 72 h, 曲线中的尖峰出对应的频率为扭秤调制频率的倍频, 即 0.5 h 的周期信号,
来源于旋转扭秤对实验环境背景极不均匀引力场的响应. 图中 1 h 处(频率约为 2.78×10^{-4} Hz),
没有看到光子存在静止质量的信号

限为^[15]: 1.2×10^{-31} g, 该实验结果将目前国际上光子静止质量的上限提高一个多数量级, 同时调制的实验方法有效地克服了宇宙磁场矢势对方向的依赖关系. 该实验结果被美国物理学会新闻通报以“A new limit on photon mass”为题进行的报道, 并且被2004年的Particle Data Group收录^[50].

针对第一个实验数据中出现的背景引力场极不均匀所引起的问题, 我们新的实验设计方案是将用于检测扭秤运动的角位移和用于扭秤控制的电容极板与磁环相互垂直放置, 形成质量四极矩构型, 因此可极大地减少背景引力场的影响; 为了减少气流扰动的影响, 进一步降低实验噪声水平, 将扭秤系统放到高真空容器中; 同时继续采用旋转扭秤法, 回避24h的周日效应, 我们预期目标是将现有的精度再提高1—2个数量级, 即至少在约 10^{-52} g的水平上检验光子是否具有静止质量.

3 亚毫米范围 Newton 反平方定律实验

进行亚毫米范围内 Newton 反平方定律的实验检验, 可以提供高维空间的某些信息, 从而为统一4种相互作用提供实验依据. 从理论上讲, 在 Newton 提出万有引力定律之后的三个多世纪里, 物理学仍然无法解释为什么引力比其他所有力都弱得多. 为此, 近年来众多的理论预言: 在亚毫米尺度上引力可能存在完全不同的性质, 人们突破原有的理论框架, 提出了弦理论和额外维等概念. 弦理论^[51,52]作为一种可能的大统一理论而备受关注, 该理论把标准粒子模型中的粒子描述为开弦, 把引力子描述为闭弦而不是点物质. 弦理论要求空间大于三维, 但在额外维空间数目的多少和空间的大小上存在很大争议. 通常认为, 只有间距在 Planck 长度量级, 即 $R_p = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1.6 \times 10^{-33}$ cm 时弦理论效应才会变得明显. 如此小的距离相当于 Planck 质量为 $M_p = 1.2 \times 10^{16}$ TeV, 以目前实验的水平这是不可能达到的. 受弦理论启发^[53,54], 额外维理论假设空间不止三维. 把引力很微弱的特性解释为引力子可自由在所有维空间中传播, 而标准模型中的粒子和场只局限于 $3+1$ 维膜(membrane)中. 设存在尺度相同且均为 R^* 的额外 n 维空间, 基本 Planck 质量 $M^* = 1$ TeV, 可得^[54] $R^* = \frac{\hbar c}{M^* c^2} \left(\frac{M_p}{M^*} \right)^{2/n}$. 由

于引力场必须服从 $3+n$ 维空间中的 Gauss 定律, 所以当两物体间距 $r \ll R^*$ 时, 额外维空间的存在将使引力与间距的反平方关系修正为 $1/r^{2+n}$ 关系; 当两物体间距 $r \gg R^*$ 时, 引力势应修正为^[55,56]

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda}). \quad (1)$$

α 指偏离 Newton 力的强度, λ 是非 Newton 力的特征长度.

在过去的几年中, 物理学家开始认真研究自然界存在额外维这一观点和膜世界这一模型: 我们的宇宙是一个在高维空间中漂浮着的一个3维膜, 在这个膜之外还可能其他的膜(即其他的宇宙). 我们所能看到的一切事物都被限制在我们这个膜上, 只有引力可以进入额外维. 因此, 引力向额外维的发散会导致对 Newton 反平方定律的偏离, 而正是这种发散解释了引力为什么这么弱. 作为额外维的尺度 r_n , 在 $n=1$ 时, r_1 约 10^{13} cm, 这一尺度约为太阳系的尺度, 天文观测表明在这一尺度下支撑着天体运动的 Newton 反平方定律是成立的. 因此 n 不可能为1. 当 $n=2$ 时, r_2 约 0.1 mm, 即在两个额外维的情况下, 这一理论不违背所有的已知实验的检验, 目前国际上有很多小组在实验寻找额外维引起的 Newton 反平方定律的偏离的实验证据.

1985年 California 大学 Irvine 分校 Newman 实验小组采用扭秤在 2—5 cm 范围内对 Newton 反平方定律进行了实验检验^[57]. 没有发现非 Newton 引力存在, 该实验中力矩的分辨率达到约 10^{-14} Nm, 后来他们又与 Washington 大学 Boynton 实验小组合作, 拟采用低温扭秤进行非 Newton 引力实验, 同时进行万有引力常数 G 的测量, 实验环境温度约为 2K, 但是到目前为止还没有实验结果报道. 在亚毫米尺度下, 目前精度最高的实验是 Washington 大学 Eöt-Wash 小组的扭秤实验^[58], 该实验测量一个特殊设计的具有 10 重对称性的检验质量和一个位于检验质量下方并且能够旋转的 10 重对称性的吸引质量之间的非 Newton 引力, 实验中的最小间距达到 218 μ m. 虽然扭秤具有灵敏度高的优点, 但是他们测量的是两个物体之间倾斜相互作用的水平分量, 信号大大减弱. 2003年, Stanford 大学实验

小组^[59]的利用扫描力显微镜(SFM)技术和微悬臂梁扭秤,测量间距达到 $20\mu\text{m}$,温度为 $9\text{--}11\text{K}$;Colorado大学的实验小组^[60]将实验设计成高频的机械振荡器来检验引力反平方定律的正确性,实验中吸引质量与检验质量的间距达到 $108\mu\text{m}$.后面两个实验虽然是直接测量两个小平面的力,信号比较强,但存在簧片灵敏度低的缺点.直到目前为止,还没有任何令人确信的证据证明 Newton 反平方定律是不成立的.在零结果的情况下,有关验证反平方定律的实验结果通常以(1)式中的 $\alpha\text{--}\lambda$ 曲线给出,目前国际上几个最好的实验结果如图4所示.

我们的实验方案^[61]采用精密扭秤测量两平行极板之间水平方向的非 Newton 引力,目的是使扭秤

系统受到的背景 Newton 引力尽可能的小,而待测力为水平方向可以获得很大的信号,同时又可保证在扭秤敏感方向进行测量.此外,当两者间距变化时,其 Newton 引力基本保持恒定,而非 Newton 力则会随着间距的变化成指数迅速衰减,这样就大大降低了背景场的影响,提高了信噪比.实验中采用电容反馈技术来控制扭秤的运动,使扭秤始终工作在其自由时的平衡位置,从而有效抑制扭秤的非线性效应.我们的实验目标是在 $0.1\text{--}0.2\text{mm}$ 范围检验 Newton 反平方定律,初步的实验结果在相应的作用程已经优于国际最好水平2倍以上(如图4中所示),目前实验仍在改进之中.

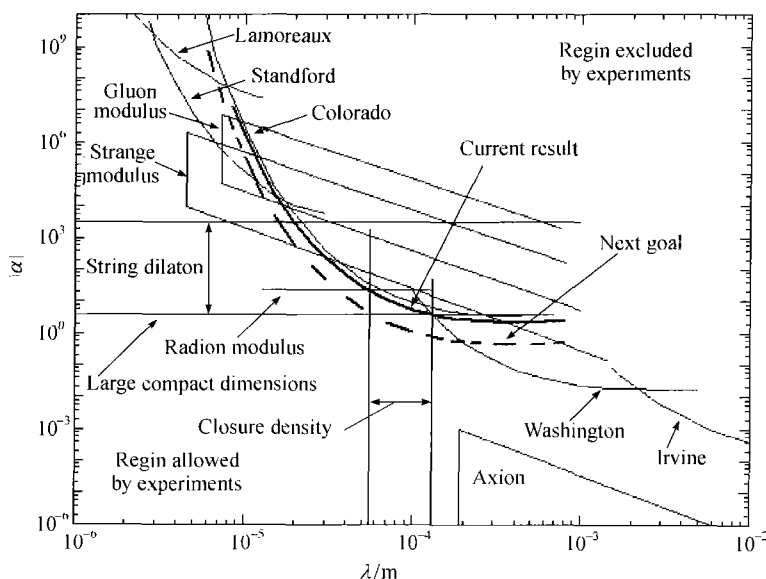


图4 目前非 Newton 引力实验检验结果及我们的预期目标

4 宏观旋转物体等效原理实验

等效原理最早是 Galileo 依据力学实验总结出来的,后来 Newton 等进一步明确表述并用实验加以证明. Einstein 将等效原理作为广义相对论的一个基本假设^[3,6].事实上,等效原理并不适用于其他相互作用(电磁、弱、强相互作用),它是 Einstein 广义相对论独有的假设.几乎所有试图将引力和其他相互作用统一的理论都要求等效原理破缺.因此,一个高精度的等效原理的实验结果无论证实它是成立还是破缺的,都具有重要的科学意义.

人类已经采用多种方法对等效原理进行实验检验^[62-70].一种典型的实验方案是借助精密扭秤来验证等效原理,其精度已达到 10^{-13} 数量级.另外一种方法是所谓的自由落体方法,但地面振动的影响使得地面自由落体实验精度仅在 10^{-10} 的水平.此外,目前国际上正在准备一系列检验等效原理的空间计划,这些计划包括美国与欧洲的 STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) 计划^[71]、意大利的 GG (Galileo Galilei) 计划^[72]以及法国的 MICROSCOPE 计划^[73],它们都希望在更高精度上检验等效原理是否成立.不过所有已完成和正在进行的等

效原理实验中, 检验质量都是作为质点来考虑的。人们很早就开始从理论和实验两方面研究微观粒子的自旋相互作用, 包括自旋-轨道耦合和自旋-自旋耦合。此外, 对微观粒子的自旋与引力耦合也进行了相当深入的研究。然而, 对于宏观物体而言, 对其自旋耦合的研究到目前为止仍是一个开放的课题。人们越来越投入更多的兴趣开始研究引力场对陀螺运动的影响, 例如 Krori 等描述四级矩场下陀螺的进动^[74], Herrera 等研究在轴对称时空下陀螺的运动特征^[75], Mashhoon 建立引力—Larmor 进动来讨论自旋与引力的耦合^[76]。实验方面, Hayasaka 等先后进行了高速旋转陀螺天平称重和自由落体的实验^[77,78], 他们声称发现, 陀螺左旋时质量保持不变, 而右旋时其质量减少, 而且其质量减少量正比于陀螺的转速, 这一陀螺旋转异常效应引起了国际同行的极大关注。但是在随后进行的一序列类似的陀螺旋转天平称重实验中, 实验科学家们在更高的实验精度上却没有发现所谓的陀螺旋转重量变化的异常现象^[79-81]。

类比微观物体, 我们提出了宏观物体的自旋可能对其轨迹产生影响, 从而使等效原理破缺。鉴于此, 张元仲、罗俊和聂玉昕等建立了一个唯像模型^[82], 并提出旋转物体等效原理的实验方案。在科技部“九五”攀登预研项目(95-Yu-34)资助下, 华中科技大学、中国科学院理论物理研究所和中国科学院物理研究所联合进行地面实验^[16,17]: 测量两个不同转速度的物体在地球重力场中自由下落过程中的加速度差。已完成的 10 m 自由下落实验结果表明: 旋转检验质量(转速约为 17000 r/min)与不旋转检验质量的重力加速度之差小于 $1.6 \times 10^{-7} g$ (其中 g 为重力加速度), 即在该相对精度内, 对于宏观旋转物体而言等效原理依然成立, 这是国际上首次报道等效原理不依赖检验质量的运动状态的实验结果。

5 结束语

进行引力实验与理论研究, 一直是也将持续是基础科学的前沿问题和研究热点。精密扭秤是检测弱力的有效工具, 特别适用于检测像引力相互作用这样的微弱信号, 因此, 精密扭秤实验技术成为当今引力实验研究的主要手段之一。在国家自然科学

基金的长期支持下, 经过二十多年的不断发展和技术积累, 我们研制的精密扭秤测量力矩的分辨率已经优于 10^{-14} Nm。在利用精密扭秤弱力检测技术进行各种弱力检测的实验中, 我们不断地对扭秤的各种特性作了大量的理论和实验研究, 积累了相当丰富的实验经验, 并在扭秤的非线性、热弹性、滞弹性、隔振等方面取得了一系列的实验成果, 并在此基础上完成了一些有意义的工作。我们希望在国家自然科学基金的继续大力支持下, 一方面继续深入了解精密扭秤的物理特性, 并将目前正在进行的几个引力实验顺利完成, 达到预期目标; 另一方面, 针对当前国际上的研究热点, 根据我们的优势, 继续在引力实验领域开展一些新的实验研究工作, 从而不断巩固和提升我国在引力实验与理论这一基础科学研究领域的国际地位。

参 考 文 献

- 1 Hawking S W, Isreal W. 300 Years of Gravitation. Cambridge: Cambridge University Press, 1987
- 2 Cook A H. Experiments on gravitation. Rep Prog Phys, 1988, 51: 707-757
- 3 Chen Y T, Cook A. Gravitational Experiments in the Laboratory. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- 4 Braginsky V B, Manukin A B. Measurement of Weak Forces in Physics Experiments. Chicago: University of Chicago Press, 1977
- 5 Stacy F D, Truck G T, Moore G I. Geophysics and law of gravity. Rev Mod Phys, 1987, 59: 157-174
- 6 Fischbach E, Sudarsky D, Szafer A, et al. Reanalysis of the Eötös experiment. Phys Rev Lett, 1986, 56: 3-6
- 7 Stubbs C W, Adelberger E G, Raab F J, et al. Search for an intermediate-range interaction. Phys Rev Lett, 1987, 58: 1070-1073
- 8 Niebauer T M, McHugh M P, Faller J E. Galilean test for the fifth force. Phys Rev Lett, 1987, 59: 609-612
- 9 Bartlett D F, Lógl S. Limits on an electromagnetic fifth force. Phys Rev Lett, 1988, 61: 2285-2287
- 10 Burgess C P, Cloutier J. Astrophysical evidence for a weak new force? Phys Rev D, 1988, 38: 2944-2950
- 11 Fan S H, Wu S C, Luo J. Performance of a precise infrared shadow sensor thermometer. Rev Sci Instrum, 1997, 68: 3079-3081
- 12 Fan S H, Cai Y X, Wu S C, et al. Response of a folded pendulum to tilt tides. Phys Lett A, 1999, 256: 132-140
- 13 Zhou Z B, Fan S H, Long F, et al. Improved low frequency

- seismic noise isolation system for gravitational wave detectors. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69: 2781—2784
- 14 Luo J, Hu Z K, Fu X H. et al. Determination of Newtonian gravitational constant G with considering the non-linear effect. *Phys Rev D*, 1999, 59: 042001
- 15 Luo J, Tu L C, Hu Z K. et al. New experimental limit on the photon rest mass with rotating torsion balance. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 081801
- 16 Luo J, Nie Y X, Zhang Y Z. et al. Null result for violation of equivalence principle with free-fall rotating gyroscopes. *Phys Rev D*, 2002, 65: 042005
- 17 Zhou Z B, Luo J, Yan Q, et al. New upper limit of terrestrial equivalence principle test for extended rotating bodies. *Phys Rev D*, 2002, 66: 022002
- 18 Gillies G T. The Newtonian gravitational constant: Recent measurements and related studies. *Rep Prog Phys*, 1997, 60: 151—225
- 19 Gillies G T. The Newtonian gravitational constant, *Metrologia Suppl*, 1987, 24: 1—56
- 20 Gillies G T. Status of the Newtonian gravitational constant. *NATO Advanced Science Institute Series C*, 1988, 230: 191—214
- 21 Luo J, Hu Z K. Status of measurement of Newtonian gravitational constant G . *Class Quantum Gravity*, 2000, 17: 2351—2363
- 22 Gillies G T, Ritter T C. Torsion balance, torsion pendulums, and related devices. *Rev Sci Instrum*, 1993, 64: 283—309
- 23 Sanders A J, Deeds W E. Proposed new determination of the gravitational constant G and test of Newtonian gravitation. *Phys Rev D*, 1992, 46: 489—504
- 24 Cavendish H. Experiments to determine the density of the Earth. *Philos Trans Roy Soc*, 1798, 88: 469—526
- 25 Mohr P J, Taylor B N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants; 1998. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 351—495 (and related references therein)
- 26 Gundlach J H, Merkowitz S M. Measurement of Newton's constant using a torsion balance with angular acceleration feedback. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 2869—2872
- 27 Quinn T J, Speake C C, Richman S J. et al. A new determination of G using two methods. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 111101
- 28 St Schlamminger, Holzschuh E, Kündig W. Determination of the gravitational constant with a beam balance. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 161102
- 29 Armstrong T R, Fitzgerald M P. New measurements of G using the measurement standards laboratory torsion balance. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 201101
- 30 2002 CODATA: the NIST recommended values on Newtonian constant of gravitation G , http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bg|search_for=gravitation [2004-12-16]
- 31 Guo J Q, Hu Z K, Gu B M. et al. Measuring the eccentricity of the center of mass from the geometric center of a sphere. *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 612—615
- 32 Zhao L, Tu Y, Gu B M. et al. An abnormal vibration mode of torsion pendulum. *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 1206—1209
- 33 Tu Y, Zhao L, Liu Q. et al. An abnormal mode of torsion balance and its suppression. *Phys Lett A*, 2004, 331: 354—360
- 34 Luo J, Wang W M, Hu Z K. Precise determination of the separation between spherical attracting masses in measuring gravitational constant G . *Chin Phys Lett*, 2001, 18: 1012—1014
- 35 Chen D C, Luo J, Hu Z K. et al. Precise measurement of the separation between two spherical source masses. *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 33—35
- 36 Goldhaber A S, Nieto M M. Terrestrial and extraterrestrial limits on the photon mass. *Rev Mod Phys*, 1971, 43: 277—296 (and references therein)
- 37 Byrne J C. Cosmic tests of Maxwell's equations. *Astrophysics and Space Science*, 1977, 46: 115—132
- 38 Tu L C, Luo J, Gillies G T. The mass of the photon. *Rep Prog Phys*, 2005, 68: 77—130 (and references therein)
- 39 Florman E F. A measurement of the velocity of propagation of very-high-frequency radio waves at the surface of the Earth. *J Res Natl Bur Stand*, 1955, 54: 335—345
- 40 Feinberg G. Pulsar test of a variation of the speed of light with frequency. *Science*, 1969, 166: 879—881
- 41 Tu L C, Luo J. Experimental tests of Coulomb's law and the photon rest mass. *Metrologia*, 2004, 41: S136—146
- 42 Chernikov M A, Gerber C J, Ott H R, et al. Low-temperature upper limit of the photon mass experimental null test of Ampère's law. *Phys Rev Lett*, 1992, 68: 3383—3386
- 43 Schrödinger E. The general unitary theory of the physical fields. *Proc R Ir Acad A*, 1943, 49: 43—58
- 44 Schrödinger E. The Earth's and the Sun's permanent magnetic fields in the unitary field theory. *Proc R Ir Acad A*, 1943, 49: 135—148
- 45 Bass L, Schrödinger E. Must the photon mass be zero? *Proc R Soc London A*, 1955, 232: 1—6
- 46 Davis L, Goldhaber A S, Nieto M M. Limit on the photon mass deduced from Pioneer-10 observations of Jupiter's magnetic field. *Phys Rev Lett*, 1975, 35: 1402—1405
- 47 Hollweg J V. Improved limit on photon rest mass. *Phys Rev Lett*, 1974, 32: 961—962
- 48 Lakes R. Experimental limits on the photon mass and cosmic magnetic vector potential. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 1826—1829
- 49 Luo J, Shao C C, Liu Z Z. et al. Determination of the limit of photon mass and cosmic magnetic vector with rotating torsion

- balance. *Phys Lett A*, 2000, 270: 288—292
- 50 Eidelman S, Hayes K G, Olive K A, et al. Particle data group: Summary tables of particle properties. *Phys Lett B*, 2004, 592: 335 (Available at <http://pdg.lbl.gov>)
- 51 Dienes K R. String theory and the path to unification; A review of recent developments. *Phys Rep*, 1997, 287: 447—525
- 52 Green M B, Schwarz J H, Witten E. *Superstring Theory. vol1: Introduction; Superstring Theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987
- 53 Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G. The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter. *Phys Lett B*, 1998, 429: 263—272
- 54 Arkani-Hamed N, Dimopoulos S, Dvali G, et al. Infinitely large new dimensions. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 586—589
- 55 Kehagias A, Sfetsos K. Deviations from the $1/r^2$ Newton law due to extra dimensions. *Phys Lett B*, 2000, 472: 39—44
- 56 Floratos E G, Leontaris G K. Low scale unification, Newton's law and extra dimensions. *Phys Lett B*, 1999, 465: 95—100
- 57 Hoskins J K, Newman R D, Spero R, et al. Experimental tests of the gravitational inverse-square law for mass separations from 2 to 105 cm. *Phys Rev D*, 1985, 32: 3084—3095
- 58 Hoyle C D, Schmidt U, Heckel B R, et al. Sub-millimeter test of the gravitational inverse-square law. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 1418—1421
- 59 Chiaverini J, Smullin S J, Geraci A A, et al. New experimental constraints on non-Newtonian forces below $100 \mu\text{m}$. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 151101
- 60 Long J C, Chan H W, Price J C. Upper limits to sub-millimeter-range forces from extra space-time dimensions. *Nature*, 2003, 42: 922—925
- 61 Hu Z K, Gu B M, Luo J. Proposed test of the gravitational inverse-square-law at submillimeter scale using torsion pendulum. *J Korean Phys Soc*, 2004, 45: s124—127
- 62 Speake C C, Quinn T J. A search for composition-dependent gravity using a beam balance. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1989, 38: 189—195
- 63 Speake C C, Niebauer T M, McHugh M P, et al. Test of the inverse-square law of gravitation using the 300-m tower at Erie Colorado. *Phys Rev Lett*, 1990, 65: 1967—1971
- 64 Carusotto S, Cavalinni V, Mordacci A, et al. Test of g universality with a Galileo type experiment. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 1722—1725
- 65 Darling T W, Rossi F, Opat G I, et al. The fall of charged particles under gravity: A study of experimental problems. *Rev Mod Phys*, 1992, 64: 237—257
- 66 Su Y, Heckel B R, Adelberger E G, et al. New tests of the universality of free fall. *Phys Rev D*, 1994, 50: 3614—3636
- 67 Gundlach J H, Smith G L, Adelberger E G, et al. Short-range test of the equivalence principle. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2523—2526
- 68 Müller J, Nordtvedt K. Lunar laser ranging and the equivalence principle signal. *Phys Rev D*, 1998, 58: 062001
- 69 Baeßler S, Heckel B R, Adelberger E G, et al. Improved test of the equivalence principle for gravitational self-energy. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 3585—3588
- 70 Overduin J M. Solar system tests of the equivalence principle and constraints on higher-dimensional gravity. *Phys Rev D*, 2000, 62: 102001
- 71 Blaser J P. STEP: Satellite Test of the Equivalence Principle; Report on the Phase A Study. Noordwijk; European Space Agency, 1996
- 72 Nobili A M, Bramanti D, Comandi G, et al. Radiometer effect in space missions to test the equivalence principle. *Phys Rev D*, 2001, 63: 101101
- 73 Touboul P, Rodrigues M. The MICROSCOPE space mission. *Class Quantum Grav*, 2001, 18: 2487—2498
- 74 Krori K D, Chaudhury T, Mahanta C R. Geodetic precession in a quadrupole field. *Phys Rev D*, 1990, 42: 3584—3586
- 75 Herrera J C. Equation of motion in classical electrodynamics. *Phys Rev D*, 1977, 15: 453—456
- 76 Mashhoon B, Paik H J, Will C M. Detection of the gravitomagnetic field using an orbiting superconducting gravity gradiometer. *Phys Rev D*, 1989, 39: 2825—2838
- 77 Hayasaka H, Takeuchi S. Anomalous weight reduction on a gyroscope's right rotations around the vertical axis on the Earth. *Phys Rev Lett*, 1989, 63: 2701—2704
- 78 Hayasaka H. Possibility for the existence of anti-gravity: Evidence from a free-fall experiment using a spinning gyro. *Spec Sci Technol*, 1997, 20: 173—181
- 79 Faller J E, Hollander W J, Nelson P G, et al. Gyroscope-weighting experiment with a null result. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 825—826
- 80 Quinn T J, Picard A. The mass of spinning rotors; No dependence on the speed or sense of rotation. *Nature*, 1990, 343: 732—735
- 81 Nitschke J M, Wilmarth P A. Null result for the weight change of a spinning gyroscope. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 2115—2116
- 82 Zhang Y Z, Luo J, Nie Y X. Proposed new test of equivalence principle from rotating bodies. *Chin Phys Lett*, 2000, 17: 324—325