弱等效原理的实验检验进展

郝琳, 刘祺, 赵慧慧, 冯文凡, 杨山清*, 邵成刚, 涂良成, 罗俊*

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, 武汉 430074

* 联系人, 杨山清, E-mail: ysq2011@hust.edu.cn; 罗俊, E-mail: junluo@hust.edu.cn

收稿日期: 2016-01-29; 接受日期: 2016-02-25; 网络出版日期: 2016-05-17

国家重点基础研究发展计划 (编号: 2010CB832804) 和国家自然科学基金 (编号: 11475066, 11325523) 资助项目

摘要 等效原理是爱因斯坦广义相对论的基本假设之一, 然而, 试图将引力与其他三种相互作用统一起来的诸多理论模型都要求等效原理破缺. 因此, 对等效原理进行高精度的实验检验有助于人们加深对等效原理及引力本身的理解. 等效原理的理论研究与实验检验也一直是国际上的热点课题与前沿问题. 本文主要介绍了国际上检验弱等效原理的各种方法, 如单摆法、扭秤法、自由落体法、地月激光测距和空间计划等, 并介绍了这些方法的最新研究进展.

关键词 等效原理, 实验检验, 扭秤, 自由落体, 单摆, 空间计划

PACS: 04.80.-y, 04.80.Cc, 12.38.Qk

1 引言

等效原理 (Equivalence Principle, EP) 分为弱等效原理 (Weak Equivalence Principle, WEP) 和强等效原理 (Strong Equivalence Principle, SEP)^[1]. “弱等效原理”有很多种表述方式^[2-4], 其中的两种比较常见: 一种描述方式是对所有的物体, 引力质量 m_g 与惯性质量 m_i 的比都相同. 惯性质量由牛顿第二定律引入, 表征了物体保持原来状态不变的能力, 即物体的惯性. 引力质量由牛顿万有引力定律引入, 表征了物体产生与感受引力场的能力. 另一种描述方式是在一个均匀的引力场中, 所有的物体将以相同的加速度自由下落, 不依赖于物体的组成与结构. 1907 年, 爱

因斯坦^[5]对弱等效原理进行了推广, 提出了“强等效原理”, 也称“爱因斯坦等效原理”. 表述为: 引力场中任一时空点, 当采用局部惯性系时, 除引力外的一切物理学规律应是洛伦兹协变的^[6]. 强等效原理包含弱等效原理, 局部洛伦兹不变性 (Local Lorentz Invariance, LLI) 和局部位置不变性 (Local Position Invariance, LPI)^[2,7]. 1915 年, 爱因斯坦利用强等效原理与广义协变原理两个基本假设将引力描述为时空的一种几何属性, 利用黎曼几何给出引力场方程, 创建了一种新的引力理论——广义相对论.

目前, 广义相对论是最成功的基础物理理论之一, 通过了迄今为止几乎所有的实验检验^[2,8-12]. 尽管如此, 广义相对论并非完美, 仍然有一些很重要甚

引用格式: 郝琳, 刘祺, 赵慧慧, 等. 弱等效原理的实验检验进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 073002

Zhu L, Liu Q, Zhao H H, et al. Some progress of the weak equivalence principle test (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 073002, doi: 10.1360/SSPMA2016-00065

至具有革命性的问题至今未能解决. 其中一个奇点问题. 广义相对论预言了黑洞, 黑洞的内部存在奇点. 对于奇点的时空性质, 广义相对论没有任何描述, 而且这种时空奇点被证明在广义相对论中不可避免^[13]. 另外一个问题是, 描述宏观现象的广义相对论仍只属于一种经典理论. 人们在试图将描述微观规律的量子理论中的概念应用于广义相对论的框架中发现, 物质的量子化描述和时空的几何化描述, 彼此不相容. 为克服这些问题, 人们作出异常艰辛的努力和奋斗, 提出了许许多多的理论模型. 如超弦理论^[14-18]、超对称理论^[19-21]等等. 这些理论中超弦理论最有希望获得成功, 成为能够描述所有粒子和包括引力在内的基本相互作用的大统一理论. 然而, 超弦理论中预言了许多新的基本粒子, 将产生新的相互作用力, 使等效原理在 $10^{-13} - 10^{-24}$ 程度上破缺^[22-24].

国际上另外一种认为等效原理破缺的唯象模型是 20 世纪 90 年代提出的“第五种力”. Fischbach 等人^[25-27]于 1986 年在对 Eötvös 等效原理检验实验的数据重新分析后, 认为存在一种中程力, 这种中程力与物体的材料有关, 其势可写成

$$V_{12} = \pm \frac{g_5^2}{4\pi} (q_5)_1 (q_5)_2 \frac{e^{-r/\lambda}}{r}, \quad (1)$$

其中 g_5 代表这种相互作用的强度, λ 表示作用程, q_5 表示检验物体的“荷”, 与构成物体材料的重子数、轻子数、原子内部相互作用能参数等相关. 随后, 大量的实验^[27-37]检验这种假设. 几乎所有的实验都没有找到强有力的证据证明存在这种中程力, 而是对这种中程力的强度和作用程给出了实验限制.

这些预言等效原理破缺的理论模型只能通过实验来检验. 如果结果不为零, 表明等效原理出现破缺, 势必会促进和推动物理学的变革. 如果为零结果, 那么有助于理解引力, 有可能揭示广义相对论与量子理论之间存在蛛丝马迹的关系. 总而言之, 对等效原理的检验, 尤其是高精度的实验, 具有非常深刻的科学意义.

2 等效原理的实验检验方法概述

对等效原理的检验可分为三类: 弱等效原理的

检验、局部洛伦兹不变性的检验和局部位不变性的检验. 本文主要介绍弱等效原理的检验.

弱等效原理的破缺程度通常用 Eötvös 系数^[2]

$$\eta_{12} = \frac{\Delta a}{g} = 2 \frac{(m_g/m_i)_1 - (m_g/m_i)_2}{(m_g/m_i)_1 + (m_g/m_i)_2} \quad (2)$$

来描述. 其中 Δa 表示物体 1, 2 在引力场 g 中运动的加速度之差, m_g, m_i 分别代表引力质量与惯性质量.

历史上有大量的实验对弱等效原理进行检验, 其精度有几次大的提升. 文献记载的最早检验弱等效原理的人是牛顿, 他使用的是单摆, 检验精度达到 10^{-3} ^[38]. 1900 年前后, Eötvös 等人^[39]巧妙地利用扭秤将检验精度提高到 10^{-9} . 接着, Roll 等人^[40]和 Braginsky 等人^[41]分别在 1960 年左右和 1970 年左右改进 Eötvös 实验, 克服信号缺乏调制的缺点, 将引力源从地球换成了太阳, 利用地球的自转将等效原理破缺信号调制为 24 h 周期的正弦信号, 检验精度又提高到 10^{-11} 和 10^{-12} . 1990 年以后, 华盛顿大学的 Eöt-Wash 小组^[27,28,42-46]再次改进 Eötvös 和 Roll 等人的实验, 利用旋转扭秤将调制周期从 24 h 提高到了 1 h, 甚至 20 min, 先后在 10^{-11} , 10^{-12} 和 10^{-13} 的水平未发现等效原理破缺.

除了用单摆和扭秤, 还有人利用宏观自由落体来直接检验等效原理, 精度在 10^{-10} 水平^[47-49]. 此外, 人们选用的检验质量除了实验室尺度 (宏观) 的, 还有天体尺度 (宇观) 和原子层次 (微观) 的. 如利用处于太阳引力场中的地球和月球作为检验质量, 测量地月球之间的距离来检验等效原理, 精度达到 10^{-13} ^[50,51]. 近年来激光与原子技术的发展, 使在量子层次检验等效原理成为可能. 2004 年, Fray 等人^[52]利用原子干涉的方法检验, 精度达 1.7×10^{-7} . 2015 年, 我国中国科学院武汉物理与数学研究所的 Zhou 等人^[53]将精度提高到了 3×10^{-8} .

同时, 为降低地面实验中环境因素的影响, 进一步提高等效原理检验精度, 各国纷纷又提出空间等效原理计划, 如美国的 STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) 计划^[54], 意大利的 GG (Galileo Galilei) 计划^[55], 法国的 MICROSCOPE (MICRO Satellite with Drag Control for the Observation of Principle of Equivalence) 计划^[56], 我国的 TEPO (Test of the Equivalence Principle with Optical-Readout in Space) 计划^[57].

预计将等效原理的检验精度推进到前所未有的高度—— $10^{-15} - 10^{-18}$. 值得指出的是, 法国的 MICROSCOPE 空间计划, 计划于 2016 年发射, 预期检验精度在 10^{-15} .

总结起来, 根据原理方法的不同, 可将这些弱等效原理的实验检验分为单摆法、扭秤法、自由落体法、地月测距和空间计划. 下面就这些方法以及最新的进展逐一作简单介绍.

2.1 单摆法

如图 1 所示, 在地球引力场中的单摆, 其运动方程为

$$m_i l \ddot{\theta} + m_g g \theta = 0, \quad (3)$$

其中 m_g 和 m_i 分别为摆体的引力质量和惯性质量, l 为摆长, g 为引力场加速度大小, θ 为摆幅. 单摆的运动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_i}{m_g} \cdot \frac{l}{g}}. \quad (4)$$

对不同材料组成的摆锤 1 和 2, 相同的摆长, 等效原理的破缺程度 η_{12} 可表示成

$$\eta_{12} = 2 \frac{\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2}}{\frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2}} \approx \frac{\Delta T^2}{T^2}. \quad (5)$$

牛顿是第一个检验弱等效原理的人, 利用的就是单摆. 在充分考虑到空气阻力的影响后, 他采用

图 1 (网络版彩图) 单摆法检验弱等效原理示意图

Figure 1 (Color online) Schematic view of the simple pendulum used to test the WEP.

3.3 m 长的线悬挂一个盒子, 盒子中可以放不同的材料, 如金、银、铅、玻璃、盐、木头、水和小麦等. 最终给出的检验结果是: $\eta_{12} \leq 10^{-3}$.

1832 年, Bessel^[58] 重复并改进了牛顿的单摆实验, 提高了时间和长度的测量精度. 使用的检验质量有铁、锌、铅、银、金、大理石、泥土、石英和水. 最后给出: 除水 (有内部运动, 使结果出现异常) 外, 所有检验质量对的 Eötvös 系数均小于 10^{-5} .

1909 年, Thomson^[59] 使用放射性的与无放射性的物质作为检验质量, 给出在 8×10^{-5} 水平未发现等效原理破缺. 1910 年, Southern^[60] 使用二氧化铀和氧化铅作为检验质量, 检验精度在 5×10^{-6} 水平.

后来, Potter^[61,62] 于 1923 年再次采用单摆法, 深刻分析了单摆法可能存在的影响因素, 如单摆的摆长可能会发生变化. 他在实验时采用了非常巧妙的方法来监测单摆的摆长变化. 使用的材料有黄铜、铅、钢、氟化铵、石蜡、桃花心木和硬铝, 将结果进一步提高到了 3×10^{-6} .

单摆法是科学实验意义上第一个检验等效原理的方法. 它测量的是不同材料单摆周期的变化, 本质上是一种绝对测量. 限于摆长的测量精度, 检验精度最好也仅在 10^{-6} . 因单摆法的自身局限, 现在已经不被采用.

2.2 扭秤法

目前地面上检验等效原理精度最高的方法是扭秤法 (图 2). 检验质量 1, 2 由一轻质横杆连接, 横杆的中间再用一根细丝悬挂, 构成扭秤的最基本配置. 检验质量受到水平方向上的微弱外力绕悬丝扭转, 引起悬丝的偏转. 该偏转角度可通过光学方法精确地测量, 这样就可以探测水平方向上非常微弱的外力.

两个不同材料的检验质量都受地球的引力和地球自转引起的惯性离心力. 如果弱等效原理破缺, 那么两检验质量的引力质量与惯性质量之比就会不一样, 使它们沿水平方向上的合力不一样, 进而有一个附加力矩

$$\tau_z = \frac{1}{2} \eta_{12} m g_h |\mathbf{r}_{12h}| \sin(\phi_{gh} - \phi_{r_{12h}}), \quad (6)$$

其中两检验质量 m 的相对位置矢量定义为 $\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_2$

$-r_1, r_{12h}$ 是其水平分量, $\phi_{gh}, \phi_{r_{12h}}$ 分别为地球的水平引力场 g_h, r_{12h} 的方位角.

最早利用扭秤检验等效原理的人是 Eötvös, 其实验装置如图 3 所示. 扭丝悬挂一细杆, 杆长 40 cm, 杆的两端分别悬挂两种不同材料的物体, 两检验物体可在水平方向上绕扭丝自由转动. 如果等效原理出现破缺, 那么扭秤就会受到力矩 (6) 的作用, 使丝的平衡位置发生偏转, 偏转的角度大小为

$$\theta = \frac{\tau_z}{k} = \frac{1}{2k} \eta_{12} m g_h |r_{12h}| \sin(\phi_{gh} - \phi_{r_{12h}}), \quad (7)$$

其中 k 为细丝的扭转弹性系数. 该偏转角可由固定在距丝 62 cm 的带标度的望远镜测量. 由于扭秤始

图 2 (网络版彩图) 扭秤检验弱等效原理示意图. 地球表面的扭秤除受地球引力外, 还受到因地球自转引起的惯性力

Figure 2 (Color online) Schematic view of the torsion balance used to test the WEP. The torsion balance on the Earth experiences the inertial force related with the Earth's rotation besides the gravitational force.

图 3 (网络版彩图) Eötvös 扭秤系统简化示意图

Figure 3 (Color online) A simplified drawing of the torsion balance used to test the WEP by Eötvös.

终处于地球上, 无法直接找到扭丝的绝对零点, Eötvös 等人 [39] 为解决这个问题, 将整个装置在水平面内旋转 180° . 根据式 (7) 可知: 旋转前后扭秤平衡位置的差是扭秤实际偏转角的 2 倍. 1890 年左右, Eötvös 给出实验结果: 在 95% 的置信水平下, 精度为 9×10^{-9} . 后来他的学生 Renner 在 1922 年把这一实验的精度提高到 4.2×10^{-9} .

1960 年前后, Roll 等人 [40] 分析了 Eötvös 实验中的不足, 如待测力矩信号缺乏调制, 扭秤自身对引力梯度、温度、气流等因素非常敏感, 然后进行了一系列的改进. 如针对缺乏调制的缺点, 改用太阳作为引力源, 利用地球的自转将等效原理破缺力矩调制成 24 h 周期的正弦信号. 针对对引力梯度敏感的缺点, 一方面扭秤的臂长缩短, 扭秤设计地更对称, 如图 4 所示. 另一方面, 实验员作为活动的引力源, 在实验操作时尽可能地远离扭秤. 为减小气流的扰动, 整个扭秤系统被放置在一个不锈钢真空容器中, 真空度由离子泵维持在 10^{-6} Pa 水平. 为减小温度的影响, 实验中采用了一系列的主动与被动温控措施. 实验最终的检验精度达到了 3×10^{-11} [40], 将 Eötvös 的结果提高了近两个量级.

1972 年, Braginsky 等人 [41] 利用 Roll 等人类似的方法再次进行了实验. 实验中所用的扭秤更加对称, 从平面三重对称改进到平面八重对称. 最终给出: 在 95% 的置信水平下, 检验精度为 0.9×10^{-12} .

20 世纪 90 年代开始, 华盛顿大学的 Eöt-Wash

图 4 (网络版彩图) Roll 等人实验中所用扭秤示意图

Figure 4 (Color online) Schematic view of the torsion balance used to test the WEP by Roll et al.

实验小组分析了 Roll 等人实验中 24 h 周期调制的缺点: 24 h 的噪声源很多, 如温度波动、人类活动等, 同时实验仪器受 $1/f$ 噪声限制, 使 24 h 周期的噪声很大.

为此, 他们利用一个高精度转台将扭秤匀速旋转起来, 将调制周期从 24 h 提高到了转台转动周期 (如 1 h, 20 min). 他们最近的实验装置如图 5 所示.

此外, 他们对引力梯度的影响进行了详细的分析, 设计的扭秤高度对称, 并精确地测量和补偿了背景引力梯度场, 极大地减小了引力梯度对实验的影响. 同时相比于 Roll 等人实验选用引力源单一的缺点, 他们选择了不同尺度的质量作为引力源, 包括实验室局部的人工引力源、地球、太阳, 甚至于银河系暗物质等. 为寻找可能存在的与材料相关的作用力, 他们选用了重子数差异较大的 Be, Ti 作为检验质量.

图 5 Eöt-Wash 小组实验装置图, 图来自文献 [42]

Figure 5 Experimental apparatus of the WEP test using the rotating torsion balance by Eöt-Wash group [42].

在 2008 年给出了目前检验精度最高的结果: 在地球的引力场中, $\eta_{\text{Be-Ti}} \leq 1.8 \times 10^{-13}$ [42].

我们实验室从 2003 年开始利用扭秤来检验弱等效原理. 最初采用 Roll 等人的方法, 利用太阳作为引力源. 使用的检验质量是蓝宝石和铅块, 实验装置如图 6 所示. 为减小引力梯度、温度等因素影响, 扭秤被设计成平面四重对称的形状.

整个扭秤重约 90.6 g, 由一根长 157.5 cm、直径为 $25 \mu\text{m}$ 的钨丝悬挂在真空度 10^{-5} Pa 的真空容器中. 为减小温度、气流等影响, 整个装置安装在喻家山人防洞内, 并在局部采用泡沫板进行了被动恒温. 最终, 检验精度为 $\eta(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Pb}) \leq 3.1 \times 10^{-10}$ [63].

考虑到 Roll 等人方法自身的局限性, 我们当前正在开展利用旋转扭秤的实验, 欲在更高水平检验弱等效原理. 据文献 [42, 45] 描述, 旋转扭秤检验弱等效原理的主要限制因素有:

- (1) 与细丝结构损耗相关的热噪声;
- (2) 环境因素影响, 包括背景引力梯度场的改变, 环境温度的波动与温度梯度的改变, 地磁场的影响等等.

图 6 (网络版彩图) 华中科技大学利用静态扭秤检验落向太阳引力场的弱等效原理装置示意图

Figure 6 (Color online) Experimental apparatus of the WEP test at Huazhong University of Science and Technology (HUST) using the Sun as the gravitational source.

针对这两个主要影响因素,改进方法分别是:

(1) 与细丝结构损耗相关的热噪声正比于 $\sqrt{\frac{T}{Q}}$, 其中 T 为实验时的温度, Q 为系统的品质因数. 为减小热噪声的影响, 一种方式是降低实验时的温度, 即在低温下进行旋转扭秤实验. 但是低温扭秤系统较为复杂. 另一种方式是使用更高 Q 值的扭丝. 目前实验小组研制的石英丝的 Q 值已达 $5 \times 10^4 - 2 \times 10^5$ [64-67], 相对于 $Q = 5000$ 的钨丝 [42], 可将热噪声降低 3-6 倍.

(2) 为减小环境的扰动, 整个实验将在喻家山人防山洞内进行. 喻家山人防山洞具有背景引力环境稳定、恒温(日温度变化小于 5 mK, 年温度变化小于 1 K)、振动小(频率 0.1-30 Hz 内所有振动噪声均小于 $5 \times 10^{-7} \text{ g/Hz}^{1/2}$) 等优越的实验条件.

实验装置如图 7 所示. 整套真空容器, 包括扭秤、自准直仪和离子泵, 悬挂在一个高精度的气浮转台下, 以 20 min/rev 的速率匀速转动. 扭秤由一根品质因数极高的石英丝悬挂. 初步实验时, 使用直径 25 μm 、长约 0.9 m 的纯钨丝. 扭秤的偏转角由高精度的自准直仪监测. 真空容器内的真空度由离子泵维持在 10^{-5} Pa 水平. 为减小地磁场和温度的影响, 在扭秤周围安装多层旋转、静止的 μ -合金以及绝热泡沫、匀热铝筒. 为减小引力梯度效应的影响, 一方面扭秤被设计成平面四重对称、上下镜像对称的形状以降低扭秤对引力梯度场的敏感程度; 另一方面在扭秤周围放置精心设计的人工质量源以降低背景山体产生的引力梯度场. 针对 $\eta \simeq 2 \times 10^{-14}$ 的检验目标, 提出了具体的技术指标需求, 如表 1 所示. 其中旋转扭秤系统的噪声水平受与热噪声、角度探测系统的测量噪声和转台的转速噪声共同限制.

目前, 利用该旋转扭秤系统完成了以下项目.

(1) 引力梯度效应的初步测试与补偿. 为更准确地测量背景引力场, 使用了对引力梯度场更灵敏的扭秤. 若不做任何改进, 背景山体的引力梯度场作用于高度对称的扭秤, 将会产生 $\eta \simeq 2.0 \times 10^{-10}$ 的干扰信号. 为此, 设计了特殊形状的铅块, 作为人工质量源. 将这些人工质量源安装到扭秤的附近后, 引力梯度场减小了约 135 倍, 但与目标仍有近两个量级的差距. 若要进一步降低引力梯度场, 可能会受周围背景引力梯度场的变化而限制. 据文献 [28, 42, 44] 描述,

图 7 (网络版彩图) 华中科技大学利用旋转扭秤检验弱等效原理实验装置示意图

Figure 7 (Color online) Experimental apparatus used to test the WEP by means of the rotating torsion balance at HUST.

表 1 华中科技大学利用旋转扭秤检验弱等效原理实验的具体技术指标

Table 1 The aims of testing the WEP with rotating torsion balance at HUST

关键问题	目标值 η ($\times 10^{-14}$)	具体技术指标需求
高精度	石英丝 ≤ 1.0	$\leq 90 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$
信号	自准直仪 ≤ 0.3	$\leq 30 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$
调制	转台 ≤ 0.8	$\leq 70 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$
背景引力梯度效应	≤ 1.3	力矩 $\leq 1.2 \times 10^{-19} \text{ Nm}$
背景地磁场效应	≤ 0.8	力矩 $\leq 0.7 \times 10^{-19} \text{ Nm}$
小计	≤ 2.0	

Eöt-Wash 小组实验周围的引力梯度场一直在变化, 变化的量级在 0.02 g/cm^3 , 已经影响了引力梯度场的进一步补偿. 目前, 我们正在测量背景引力梯度场的变化量, 同步研究如何将引力梯度效应再降低 1-2 个量级.

(2) 地磁场效应的初步评估. 若在扭秤周围不作任何电磁屏蔽措施, 地磁场作用于极弱磁性的扭秤,

将产生 $\eta \sim 10^{-9}$ 水平的干扰信号. 目前正在研究设计多层磁屏蔽, 使水平地磁场降低 5 个量级, 期望在近期取得一些好的进展.

2.3 自由落体法

自由落体实验是检验弱等效原理的最直接方法, 它直接比较不同材料的物体 (或不同的原子) 在引力场 g 中自由下落时的运动加速度差

$$\Delta a = \eta_{12} g. \quad (8)$$

2.3.1 宏观物体

最早的自由落体法检验弱等效原理可以追溯到伽利略的比萨斜塔实验, 但是没有文献记载这一实验. 真正意义上采用自由落体法检验等效原理是由 Niebauer 等人^[47]于 1987 年完成的, 其实验装置如图 8 所示, 重 40 g 的铜 (Cu) 和重 199.25 g 的铀 (U) 作为落体分别位于两个真空度 10^{-5} Pa 的落仓内, 真空落仓通过反馈系统随检验质量一同下落. 两落体的相对位置由迈克耳逊干涉仪监测. 入射光进入分束器分成两束, 到达检验质量的直角棱镜后被反射, 形成的干涉条纹由光强二极管检测. 实验采用差分设计, 有效减小了潮汐、大气压变化以及水位变化等影响, 最终给出检验精度 $\eta(\text{Cu}, \text{U}) \leq 5.0 \times 10^{-10}$.

后来, Kuroda 等人^[48]也进行过类似的实验. 相对于 Nibauer 等人的实验, Kuroda 等人通过巧妙的设计, 极大地提高了两落体的质心位置重合度, 大大减小了重力梯度的影响, 检验精度为 $\eta(\text{Al}, \text{Cu}) \sim 7.8 \times 10^{-10}$. 1992 年, Carusotto 等人^[49]同样进行过类似的实验, 但使用半铝盘和半铜盘作为落体, 检验精度在 $\eta(\text{Al}, \text{Cu}) \sim 7.2 \times 10^{-10}$ 水平.

此外, 我国中国科学院理论物理研究所的张元仲和华中科技大学的罗俊等人^[68]提出宏观物体的“自转运动”可能对等效原理产生影响 (这里检验的等效原理不同于弱等效原理 (WEP), 而是检验一种新型的等效原理 (NEP), 即检验具有不同自旋的物体在引力场中的自由落体加速度是否相同), 并建立了一个唯象模型, 首次提出检验宏观旋转物体的等效性. 实验中使用的检验质量是一个宏观旋转陀螺和一个不旋转的同种材料陀螺, 在一个高度约为 9 m 的真

图 8 Niebauer 的自由落体装置示意图

Figure 8 Schematic view of the experimental setup of the WEP test using the free fall by Niebauer.

空落塔中进行自由下落, 真空度约为 5×10^{-3} Pa. 陀螺的相对位置由激光干涉的方法来检测. 最终给出宏观旋转物体的检验精度在 $\eta_{12} \sim 1.6 \times 10^{-7}$ 水平^[69,70].

利用宏观物体作为自由落体, 其优点很明显, 直接比较不同材料的物体在引力场中的加速度差异, 可能的破缺信号相比于扭秤法更大 (约为扭秤法的 600 倍). 其缺点也很明显, 目前地面上的落体下落时间一般不超过 1 s, 信号的累积时间过短, 不利于信号的提取. 同时, 实验装置复杂, 对实验信号检测等系统的要求较高.

2.3.2 微观原子

在微观尺度下, 弱等效原理仍否成立? 由于微观粒子 (低速情况下) 是用量子力学来描述, 如果让微观粒子自由下落, 即微观粒子同时又受到引力作用 (由广义相对论来描述), 那么微观粒子的运动状态又将会怎样? 20 世纪 50 年代以来, 人们对微观粒子在引力场中的运动进行了许多的理论和实验研究^[71-75]. 限于实验技术的限制, 弱等效原理的检验精度很低. 如 Schmiedmayer 等人^[75]使用中子作为检验质量, 最好的检验精度也已达 2×10^{-4} 水平. 然而, 近年来激光冷却和原子干涉等技术的迅速发展改变了这种状况^[76,77]. 目前利用激光冷却、原子技术的原子干涉仪在地球重力测量等领域已经表现出强大的优势^[78-81], 为在微观尺度检验弱等效原理提供了途径.

原子干涉仪利用了物质的波动特性, 即原子也具有波动的物性. 将原子波包相干地分束、合束形成多个路径, 观察那些不可区分的路径, 形成干涉条纹 [82]. 然后从干涉条纹中提取出原子的加速度信息. 1999年, Peters 等人 [78] 运用原子干涉技术, 测量铯原子的自由落体加速度, 精度达 $\Delta g/g \simeq 3 \times 10^{-9}$ (后来, Merlet 等人 [83] 于 2010 年将该原子干涉仪与 FG5 重力仪进行了比对, 可看成是一种弱等效原理的检验, 检验质量为微观原子 (Rb) 与宏观物体 (角锥棱镜), 检验精度为 7×10^{-9} [84, 85]).

2004 年, Fray 等人 [52] 使用同位素 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 作为检验质量, 检验精度在 1.7×10^{-7} 水平. 2013 年, Bonnin 等人 [86] 给出了类似的检验精度. 2014 年, Schlippert 等人 [87] 利用 ^{87}Rb 和 ^{39}K , 和 Tarallo 等人 [88] 利用自旋量子数不同的原子 ^{88}Sr 和 ^{87}Sr , 检验精度均在 10^{-7} 水平. 值得指出的是, 2015 年中国科学院武汉物理与数学研究所的 Zhou 等人 [53], 将检验精度提高到 3.0×10^{-8} 水平, 为国际同等领域最好水平, 主要的限制因素为“科里奥利力效应 (Coriolis Effect)”.

有人 [89] 曾从理论上对原子干涉仪的检验精度进行过估计, 指出影响其检验弱等效原理的因素主要有原子速度 (对应原子的温度)、原子自由飞行的时间、激光频率以及装置的高度. 如果对这些参数加以控制, 那么原子干涉仪的检验精度可达 $10^{-15} - 10^{-17}$.

2.4 地月激光测距

在过去的几十年间, 人类通过登月计划在月球的表面放置了多块角反射镜 (图 9), 包括美国的阿波罗 11 号 (Apollo 11), 阿波罗 14 号 (Apollo 14), 阿波罗 15 号 (Apollo 15); 苏联的月球 17 号 (Luna 17) 和月球 21 号 (Luna 21) [51]. 这为利用地球、月球这样天体尺度的检验质量检验等效原理奠定了基础.

地月激光测距检验等效原理, 本质上是比较地球和月球落向太阳的加速度差异. 如果等效原理破缺, 月球绕地轨道在指向太阳方向会有一个小的偏移极化 [90], 引起地月之间距离的变化 [50, 51, 91, 92].

$$\Delta r_{\text{EM}} = S \eta_{\text{EM}} \cos D, \quad (9)$$

其中 S 是尺度因子, 约 $-2.9 \times 10^{10} \text{ m}$, D 为会合角.

图 9 (网络版彩图) 月球表面上的反射镜分布示意图

Figure 9 (Color online) Schematic view of the positions of retroreflectors on the Moon.

地月之间的距离测量基本原理是: 通过望远镜从地面的测量站向月球发射脉冲激光, 然后接收从月球表面反射回来的激光回波. 通过测量站上的计数器测量激光往返的时间间隔, 即可推算出月球与地球之间的距离. 最早的利用地月测距检验弱等效原理的结果是在 1976 年发表的 [93]. 目前, 经 40 多年的数据积累, 地月激光测距给出的精度为 1.3×10^{-13} [50, 51, 94].

2.5 空间实验

从本质上来说, 空间等效原理实验是一个长时间的自由落体实验. 在高度为 h 的低空轨道上, 卫星内部不同材料的检验质量 1, 2 在地球引力场作用下围绕地球做圆周运动 (如图 10), 两检验质量的加速度差为

$$\Delta a = \eta_{12} \frac{GM}{(R+h)^2}, \quad (10)$$

其中, M , R 分别为地球的质量和半径. 如弱等效原理破缺, 则两检验质量之间就会存在加速度差, 引起检验质量的相对位置变化. 检验质量的相对位置可由各种技术来检测, 如超导量子干涉仪, 电容位移传感技术等等, 这些技术可以获得很高的精度 [95].

相比于地面的自由落体实验, 空间实验有以下几个优点: (1) 可以避免地面环境的影响, 如地面振动、引力梯度、气压、人类活动等; (2) 测量时间

可以很长, 有利于信号的累积; (3) 对待测信号进行调制, 便于高精度地提取. 由于空间实验的潜在灵敏度, 国际上一些研究机构提出了一系列的空间计划 [54–57,96–98], 如表 2 所示. 其中, MICROSCOPE 空间实验计划在 2016 发射 [24], 检验质量使用的是铂铑合金 (90% 的铂 Pt, 10% 的铑 Rh) 与钛铝钒合金 (90% 的钛 Ti, 6% 的铝 Al 和 4% 的钒 V). 在卫星就位的几个月后, 第一组数据就可以返回. 预计检验精度在 10^{-15} .

我国的空间检验弱等效原理 TEPO 计划由华中科技大学引力实验中心在 2006 年提出 [57,99], 其

图 10 (网络版彩图) 空间计划检验弱等效原理的实验原理图
Figure 10 (Color online) Principle of space mission to test the WEP.

表 2 检验等效原理的空间计划

Table 2 Space missions for the test of the EP

计划	提出时间	预计精度	提出单位
STEP	1972	10^{-18}	Stanford
GG	1993	10^{-17}	Pisa
GeoSTEP	1994	10^{-17}	CNES/ONERA
MiniSTEP	1995	10^{-17}	Stanford/JPL
MicroSCOPE	1996	10^{-15}	CNES/ONERA
TEPO	2006	10^{-16}	HUST/ITP

致谢

华中科技大学引力实验中心进行的等效原理实验检验及其他引力实验是众多人员共同努力的结果. 作者感谢中国科学院理论物理研究所张元仲研究员, 美国加州大学 Irvine 分校 NEWMAN Riley 教授, 马里兰大学 PAIK Ho Jung 教授, 俄罗斯莫斯科大学 Sternberg 天文研究 MILYUKOV Vadim 教授, 以及华中科技大学引力实验中心周泽兵教授、胡忠坤教授、陆泽晃教授、范淑华教授、叶贤基教授、刘中柱教授、吴书朝教授等人在中心所开展的引力实验中所给予的有益讨论和帮助, 感谢引力实验中心诸多博士、硕士研究生所作的工作. 感谢中华人民共和国科学技术部、中华人民共和国教育部、国家自然科学基金委员会等部门给予引力实验中心的一贯支持.

科学目标是在 10^{-16} 甚至更高精度上检验等效原理. TEPO 空间计划是在 MICROSCOPE 空间计划的方案基础上, 结合当前一些先进的空间技术, 如空间探测引力波的 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) [100] 和 LISA Pathfinder [101] 计划中的激光测距、紫外放电等技术, 提高弱等效原理检验精度. 值得注意的是 LISA Pathfinder 已于 2015 年 12 月 3 日发射升空, 预计将花 10 周时间转移到最终的轨道上. LISA Pathfinder 的发射, 有助于各种空间技术的积累, 推进空间计划的发展.

3 结束语

弱等效原理是广义相对论的基础, 长期以来, 对其高精度检验一直是国际上的前沿和热点课题. 当前, 地面上弱等效原理的高精度检验主要有扭秤法和自由落体法. 其中扭秤法的检验精度最高, 其精度主要受限于系统的热噪声和环境因素的干扰. 系统的热噪声可由高品质因数的石英丝或低温环境来解决. 地面上环境因素的进一步测量与控制非常困难, 喻家山人防山洞优越的自然条件则为此提供了解决基础. 冷原子干涉法若要在理论预期精度 $10^{-15} - 10^{-17}$ 水平上检验弱等效原理, 则需要解决一系列的技术难题, 如原子的速度控制等.

空间计划可以在更高的水平检验等效原理, 然而, 这又涉及各种新颖而复杂的技术, 如超导量子干涉仪、紫外放电、超导磁悬浮、电容位移传感、静电控制和无拖曳控制等等. 这些技术的实现, 仍需要长时间的探索和检验.

在更高精度上检验弱等效原理尽管非常困难, 但是科学意义深远. 这不仅帮助人们更深刻地认识和理解引力相互作用, 而且有助于寻找新的相互作用力, 发现新物理, 值得科学工作者们为此奋斗!

参考文献

- 1 Zhang Y Z. Equivalence principle for a rotating body and its test in space. *Physics*, 2008, 37: 643–647
- 2 Will C M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. New York: Cambridge University Press, 1993
- 3 Hartle J B. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley, 2003
- 4 Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation*. San Francisco: W H Freeman, 1973
- 5 Einstein A. The relativity principle. *Jarbuch der Radioactivitaet und Elektronik*, 1907, 4: 411–462
- 6 Liu L, Zhao Z. *General Relativity (in Chinese)*. 2nd ed. Beijing: Higher Dducation Press, 2004 [刘辽, 赵峥. 广义相对论 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2004]
- 7 Chen Y T, Cook A. *Gravitational Experiments in the Laboratory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- 8 Weinberg S. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1972
- 9 Taylor E F, Wheeler J A. *Spacetime Physics*. New York: W H Freeman and Compaby, 1992
- 10 Schiff L I. Possible new experimental test of general relativity theory. *Phys Rev Lett*, 1960, 4: 215–217
- 11 Shapiro I I. Fourth test of general relativity. *Phys Rev Lett*, 1964, 13: 789–791
- 12 Everitt C W F, DeBra D B, Parkinson B W, et al. Gravity probe B: Final results of a space experiment to test general relativity. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 112201–112205
- 13 Zhang Y Z. History and congress of general relativity (in Chinese). *Adv Mech*, 2002, 32: 495–504 [张元仲. 广义相对论的产生与发展. 力学进展, 2002, 32: 495–504]
- 14 Scherk J, Schwarz J H. Dual models and the geometry of sapce-time. *Phys Lett B*, 1974, 52: 347–350
- 15 Scherk J. Antigravity: A crazy idea? *Phys Lett B*, 1979, 88: 265–267
- 16 Damour T, Polyakov A M. The string dilation and a least coupling principle. *Nucl Phys B*, 1994, 423: 532–558
- 17 Damour T, Polyakov A M. String theory and gravity. *Gen Rel Grav*, 1994, 26: 1171–1176
- 18 Damour T, Vokrouhlick'y D. Equivalence principle and the Moon. *Phys Rev D*, 1996, 53: 4177–4201
- 19 Fayet P. Theoretical motivations for equivalence principle. *Ada Space Res*, 2003, 13: 1289–1296
- 20 Fayet P. A new long-range force? *Phys Lett B*, 1986, 171: 261–266
- 21 Fayet P. The fifth interaction in grand-unified theories: A new force acting mostly on neutrons and partical spins. *Phys Lett B*, 1986, 172: 363–368
- 22 Damour T. Theoretical aspects of the equivalence principle. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 184001
- 23 Overduin J, Everitt F, Worden P, et al. STEP and fundamental physics. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 184012
- 24 Bergé J, Thouboul P, Rodrigues M. Status of MICROSCOPE, a mission to test the equivalence principle in space. *J Phys-Conf Ser*, 2015, 610: 012009
- 25 Fischbach E, Sudarsky D, Szafer A, et al. Reanalysis of the Eötvös experiment. *Phys Rev Lett*, 1986, 56: 3–6
- 26 Fischbach E, Talmadge C L. *The Search for Non-Newtonian Gravity*. New York: Springer, 1999
- 27 Adelberger E G, Stubbs C W, Heckel B R, et al. Testing the equivalence principle in the field of the Earth: Particle physcis at masses below 1 μeV ? *Phys Rev D*, 1990, 42: 3267–3292
- 28 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
- 29 Boynton P E, Crosby D, Ekstrom P, et al. Search for an intermediate-range composition-dependent force. *Phys Rev Letts*, 1987, 59: 1385–1389
- 30 Nelson P G, Graham D M, Newman R D. Search for an intermediate-range composition-dependent force coupling to $N - Z$. *Phys Rev D*, 1990, 42: 963–976
- 31 Stacey F D, Tuck G J, Moore G I, et al. Geophysics and the law of gravity. *Rev Modern Phys*, 1987, 59: 157–174
- 32 Thieberger P. Search for a substance-dependent force with a new differential accelerometer. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 1066–1069
- 33 Eckhardt D H, Jekeli C, Lazarewicz A R, et al. Tower gravity experiment: Evidence for non-Newtonian gravity. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 2567–2570
- 34 Ander M E, Zumberge M A, Lautzenhiser T, et al. Test of Newton's inverse-square law in the Greenland ice cap. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 985–988
- 35 Stubbs C W, Adelberger E G, Raab F J, et al. Search for an intermediate-range interaction. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 1070–1073
- 36 Fitch V L, Isaila M V, Palmer M A. Limits on the existence of a material-dependent intermediate-range force. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 1801–1804
- 37 Bennett Jr W R. Modulated-wource Eötvös experiment at little goose lock. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 365–368

- 38 Newton I. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London: Joseph Streater, 1687
- 39 Eötvös R, Peka D, Fekete E. Contributions to the law of proportionality of inertia and gravity. *Ann Phys*, 1922, 68: 11–66
- 40 Roll P G, Krotkov R, Dicke R H. The equivalence of inertial the passive gravitational mass. *Ann Phys*, 1964, 26: 442–517
- 41 Braginsky V B, Panov V I. Verification of the equivalence principle of inertial and gravitational mass. *Soviet Phys JETP*, 1972, 34: 463–476
- 42 Schlamminger S, Choi K Y, Wagner T A, et al. Test of the equivalence principle using a rotating torsion balance. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 041101
- 43 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
- 44 Gundlach J H, Schlamminger S, Wagner T. Laboratory tests of the equivalence principle at the University of Washington. *Space Sci Rev*, 2009, 148: 201–216
- 45 Wagner T A, Schlamminger S, Gundlach J H, et al. Torsion-balance tests of the weak equivalence principle. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 184002
- 46 Adelberger E G, Gundlach J H, Heckel B R, et al. Torsion balance experiments: A low-energy frontier of particle physics. *Prog Part Nucl Phys*, 2009, 62: 102–134
- 47 Niebauer T M, McHugh M P, Faller J E. Galilean test of fifth force. *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 609–612
- 48 Kuroda K, Mio N. Test of a composition-dependent force by a free-fall interferometer. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 1941–1944
- 49 Carusotto S, Cavasinni V, Mordacci A. Test of g unversality with a Galileo type experiment. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 1722–1725
- 50 Müller J, Hofmann F, Biskupek L. Testing various facets of the equivalence principle using lunar laser ranging. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 184006
- 51 Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. Lunar laser ranging tests of the equivalence principle. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 184004
- 52 Fray S, Diez C A, Hänsch T W, et al. Atomic interferometer with amplitude gratings of light and its applications to atom based tests of the equivalence principle. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 240404
- 53 Zhou L, Long S, Tang B, et al. Test of equivalence principle at 10^{-8} level by a dual-species double-diffraction raman atom interferometer. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 013004
- 54 Swanson P N. Mini-STEP: A minimal satellite test of equivalence principle experiment. *Class Quantum Grav*, 1996, 13: A143–A147
- 55 Catastini G, Bramanti D, Nobili A M. “Galileo Galilei” on the ground (GGG). *Class Quantum Grav*, 1996, 13: A193–A195
- 56 Touboul P, Rodrigues M. The MicroSCOPE space mission. *Class Quantum Grav*, 2001, 18: 2475–2486
- 57 Luo J, Gao F, Bai Y Z, et al. Test of the equivalence principle with optical readout in space. *J Jpn Soc Micrograv Appl*, 2008, 25: 423–425
- 58 Bessel F W. Versuche über die Kraft mit welcher die Erde Köoper von verschiedene Beschaffenheit anzieht. *Ann Phys Chem*, 1889, 25: 405–417
- 59 Thomson J J. Ratio of Weight to Mass for a Radioactive Substance. Winnipeg: Presidential Address, 1909
- 60 Southern L. A determination of the ratio of mass to weight for a radioactive substance. *Proc Roy Soc A*, 1910, 84: 325–344
- 61 Potter H H. Some experiments on the proportionality of mass and weight. *Proc Roy Soc*, 1923, 104: 588–610
- 62 Potter H H. On the proportionality of mass and weight. *Proc Roy Soc*, 1927, 113: 731–732
- 63 Feng G Q, Yang S Q, Tu L C, et al. Improvement of test of solar neutrino coherent scattering with torsion pendulum. *Chin Phys Lett*, 2006, 23: 2052–2055
- 64 Fan Q T. Research on the Test of Weak Equivalence Principle with A High- Q Torsion Balance (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 [范启通. 基于高 Q 值扭秤检验弱等效原理实验的前期研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2011]
- 65 Tu L C, Li Q, Shao C G, et al. Precise determination of Newtonian gravitational constant G (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 691–705 [涂良成, 黎卿, 邵成刚, 等. 万有引力常数 G 的精确测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 691–705]
- 66 Yang S Q, Tu L C, Shao C G, et al. Direct measurement of the anelasticity of a tungsten fiber. *Phys Rev D*, 2009, 80: 122005
- 67 Li Q, Liu J P, Zhao H H, et al. G measurements with time-of-swing method at HUST. *Phil Trans R Soc A*, 2014, 372: 20140141
- 68 Zhang Y Z, Luo J, Nie Y X. Gravitational effects of rotating bodies. *Modern Phys Lett A*, 2001, 16: 789–794
- 69 Luo J, Nie Y X, Zhang Y Z, et al. Null result for violation of the equivalence principle with free-fall rotating gyroscopes. *Phys Rev D*, 2002, 65: 042005
- 70 Zhou Z B, Luo J, Yan Q, et al. New upper limit from terrestrial equivalence principle test for extended rotating bodies. *Phys Rev D*, 2002, 66: 022002
- 71 Estermann I, Simpson O C, Stern O. The free fall of atoms and the measurement of the velocity distribution in a molecular beam of cesium atoms. *Phys Rev*, 1947, 71: 238–249
- 72 McReynolds A W. Gravitational acceleration of neutrons. *Phys Rev*, 1951, 63: 172–173

- 73 Dabbs J W T, Harvey J A, Page D, et al. Gravitational acceleration of free neutrons. *Phys Rev B*, 1965, 139: 756–760
- 74 Witteborn F C, Fairbank W M. Experimental comparison of the gravitational force on freely falling electrons and metallic electrons. *Phys Rev Lett*, 1967, 19: 1049–1052
- 75 Schmiedmayer J. The equivalence of the gravitational and inertial mass of the neutron. *Nucl Instr Meth Ser A*, 1989, 284: 59–62
- 76 Keith D W, Ekstrom C R, Turchette Q A, et al. An interferometer for atoms. *Phys Rev Lett*, 1991, 66: 2693–2696
- 77 Cronin A D, Schmiedmayer J, Pritchard D E. Optics and interferometry with atoms and molecules. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1051–1129
- 78 Peters A, Chung K Y, Chu S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms. *Nature*, 1999, 400: 849–852
- 79 Rosi G, Sorrentino F, Cacciapuoti L, et al. Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms. *Nature*, 2014, 510: 518–539
- 80 Bidel Y, Carraz O, Charriere R, et al. Compact cold atom gravimeter for field applications. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 144107
- 81 Sorrentino F, Bodart Q, Cacciapuoti L, et al. Sensitivity limits of a Raman atom interferometer as a gravity gradiometer. *Phys Rev A*, 2014, 89: 023607
- 82 Li R B, Wang J, Zhan M S. Cold atom interferometers and their applications in space (in Chinese). *Physics*, 2008, 37: 652–654 [李润兵, 王谨, 詹明生. 冷原子干涉仪及空间应用. *物理*, 2008, 37: 652–654]
- 83 Merlet S, Bodart Q, Malossi N, et al. Comparison between two mobile absolute gravimeters: Optical versus atomic interferometers. *Metrologia*, 2010, 47: L9–L11
- 84 Wolf P, Blanchet L, Bordé, C J, et al. Does an atom interferometer test the gravitational redshift at the Compton frequency? *Class Quantum Grav*, 2011, 28: 145017
- 85 Müller H, Peters A, Chu S. A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves. *Nature*, 2010, 463: 926–929
- 86 Bonnín A, Zahzam N, Bidel Y, et al. Simultaneous dual-species matter-wave accelerometer. *Phys Rev A*, 2013, 88: 043615
- 87 Schlippert D, Hartwig J, Albers H, et al. Quantum test of the universality of free fall. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 203002
- 88 Tarallo M G, Mazzoni T, Poli N, et al. Test of Einstein equivalence principle for 0-spin and half-integer-spin atoms: search for spin-gravity coupling effects. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 023005
- 89 Dimopoulos S, Grapam P W, Hogan J M, et al. Testing general relativity with atom interferometry. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 111102
- 90 Nobili A M. Precise gravitation measurements on Earth and in Space: Tests of the equivalence principle. In: Quinn T J, Leschiutta S, Tavella P, eds. *Proceeding of the “Enrico Fermi” International school of physics, Course CXLVI*. IOS Press, 2001
- 91 Nordtvedt K Jr. Testing relativity with laser ranging to the Moon. *Phys Rev*, 1968, 170: 1186–1187
- 92 Nordtvedt K. The relativistic orbit observables in lunar laser ranging. *Icarus*, 1995, 114: 51–62
- 93 Williams J G, Dicke R H, Bender P L, et al. New test of the equivalence principle from lunar laser ranging. *Phys Rev Lett*, 1976, 36: 551–554
- 94 Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. Progress in lunar ranging tests of relativistic gravity. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 261101
- 95 Gao F, Zhou Z B. Experimental tests of the equivalence principle in space (in Chinese). *Physics*, 2010, 39: 38–40 [高芬, 周泽兵. 等效原理空间实验检验. *物理*, 2010, 39: 38–40]
- 96 Worden P W. A Cryogenic Test of the Equivalence Principle. Dissertation for Doctoral Degree. Palo Alto: Stanford University, 1976
- 97 Cornelisse J W. STEP Mission and System Design. *Class Quantum Grav*, 1996, 13: A59–A65
- 98 Nobili A M, Comand G L, Doravari S, et al. Experimental validation of a high accuracy test of the equivalence principle with the small satellite “Galileo Galilei”. *Int J Modern Phys D*, 2007, 16: 2259–2270
- 99 Gao F. Feasibility for testing of the equivalence principle with optical readout in space (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011 [高芬. 基于光学传感的空间等效原理检验可行性分析. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2011]
- 100 Bender P, Brillet A, Ciufolini I, et al. LISA Pre-Phase A Report. Research Report. Garching: Max-Planck Institut für Quantenoptik, 1998
- 101 Antonucci F, Armano M, Audley H, et al. The LISA pathfinder mission. *Class Quantum Grav*, 2012, 29: 124014

Some progress of the weak equivalence principle test

ZHU Lin, LIU Qi, ZHAO HuiHui, FENG WenFan, YANG ShanQing*, SHAO ChengGang,
TU LiangCheng & LUO Jun*

*School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities
Measurements, Wuhan 430074, China*

The Weak Equivalence Principle (WEP) together with Local Position Invariance (LPI) and Local Lorentz Invariance (LLI) forms the Einstein Equivalence Principle (EEP), which is one of the basic assumptions of Einstein's General Relativity. However, most of the theories trying to unify the gravitation with the quantum world, which is mostly described by the Standard Model, indicate some violation of the WEP. So the discovery of violation of the WEP would have a very important scientific significance. Testing the WEP with the highest possible precision is always a frontier issue in the world. This paper introduces almost all the ways of testing the WEP all over the world, including using the simple pendulum, torsion balance, free fall and lunar laser ranging. What's more, a lot of space missions have been proposed to test the WEP with a higher precision by many groups and institutions. The latest progress of these tests will also be described here.

equivalence principle, experimental test, torsion balance, free fall, simple pendulum, space mission

PACS: 04.80.-y, 04.80.Cc, 12.38.Qk

doi: 10.1360/SSPMA2016-00065