

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.02.07

# 高精度相对论验证的现状与趋势

## ——太阳系实验

邓雪梅<sup>1</sup>, 谢 懿<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 南京大学 天文与空间科学学院, 南京 210093)

**摘要:** 回顾并展望了广义相对论理论及其实验检验的发展状况和趋势, 包括广义相对论高精度实验检验的主要研究内容和研究方向, 与之相关的深空探测项目的规划和进展。鉴于广义相对论的实验检验内涵极其丰富, 限于篇幅重点介绍了有关的太阳系实验。首先介绍爱因斯坦等效原理及其实验检验; 该原理是广义相对论的基石, 内容包含了弱等效原理、局部洛伦兹不变性以及局部位置不变性。接着介绍相对论性引力理论的经验检验, 主要涉及对参数化后牛顿参数的测定。最后, 针对我国未来有望实施的深空探测任务, 就其在广义相对论实验检验中可开展的自主研究与实践给出建议。

**关键词:** 引力; 相对论; 深空探测; 太阳系

**中图分类号:** P142 **文献标识码:** A

## 1 引 言

1916 年初, 爱因斯坦在《物理年鉴》(Annalen der Physik) 上发表了长达 50 页的总结性论文《广义相对论基础》(The foundation of the general theory of relativity), 这标志着广义相对论的建立。尽管当时对广义相对论的实验检验并不是天文学家们主要关心的问题, 但爱因斯坦还是从理论上预言了相对论所导致的光线偏折以及水星近日点进动的量级。时至今日, 随着天体测量技术以及手段的不断发展, 广义相对论早已成为高精度天体测量的重要组成部分。

对广义相对论的检验大致可以分成四个历史阶段: 起步期、停滞期、黄金期以及探索期。1887 年至 1919 年是相对论实验检验的起步期。在这一时期, 广义相对论的理论基础得

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-03-18

资助项目: 国家自然科学基金 (11103085, 11103010); 江苏省自然科学基金 (BK20131461, BK2011553); 高等学校博士学科点专项科研基金 (新教师类) (20110091120003)

通讯作者: 邓雪梅, xmd@pmo.ac.cn

到了迈克耳孙-莫雷 (Michelson-Morley) 实验<sup>①</sup>和 Eötvös实验<sup>②</sup>的验证,同时广义相对论的两个重要预言也获得了光线偏折实验<sup>③</sup>和水星近日点进动<sup>④</sup>的验证。此后,从1920年到1960年是广义相对论实验检验的停滞期。在此期间,理论研究远远走在测量技术和实验能力的前面,技术手段的滞后使得对广义相对论的实验检验处于停滞不前的状态。

自1960年起,类星体、脉冲星、宇宙微波背景辐射的发现以及新兴测量技术的问世把广义相对论推向天文学和物理学的最前沿。从1960年到1980年是广义相对论实验检验的黄金期。在此期间,深入研究了广义相对论各种可观测的预言,比较并对比了各种引力理论的预言,设计并开展一系列的实验来对它们进行检验。例如,实验验证光线的引力红移,利用脉冲双星间接证明引力波存在等。所有的实验结果都支持广义相对论,排除绝大多数其他的引力理论。

从20世纪80年代起,广义相对论实验检验进入了它的探索期。在理论研究的范畴中,只剩下一些因观测效应太小而难以被探测到的实验预言。从实证的角度来讲,这需要测量技术的进一步发展才能使这些效应进入可探测的阈值范围之内。为了提高测量技术的精度和灵敏度,出现了一系列新的理论思想和实验技术。例如,使用激光冷却原子以及离子阱来对狭义相对论进行极高精度的检验,“第五力”的提出催生出了对弱等效原理的许多新实验检验,“高维时空”理论的出现则激起了在亚毫米尺度上重新检验牛顿平方反比定律的热潮。总之,广义相对论的高精度实验检验是与测量技术的革新密不可分的。

首先出现的重大技术革命是原子钟。1955年英国国家物理实验室制成了第一台铯原子钟,稳定度为 $1 \times 10^{-9}$ 。随着原子钟和光频标技术的发展,时间的计量精度每5~10 a就会提高1个量级。目前,国际原子时的频率准确度达到 $10^{-15}$ ,光频标的自评定不确定度达到 $10^{-17}$ 以上。同时,星载原子钟的日频率稳定度达到 $10^{-15}$ 量级,卫星导航技术对原子钟同步的要求开始向皮秒量级迈进<sup>[1]</sup>。这些高精度时频标准为雷达测距、激光测距、多普勒测速和甚长基线干涉测量(VLBI)等天体测量技术提供了重要基础。利用行星际探测器上的应答机,深空主动雷达测距精度可以达到 $1 \sim 10 \text{ m}$ <sup>[2]</sup>,而多普勒测速资料中的误差约为 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。由于可见光的波长要比射电波的短得多,因此激光测距有着更高的精度。卫星激光测距<sup>[3]</sup>和月球激光测距(LLR)<sup>[4]</sup>的绝对精度已从1 cm提高到毫米量级。VLBI的相对角距测量精度已好于 $0.0001''$ <sup>[5]</sup>。在当前高精度天体测量的精度水平下,广义相对论所产生的观测效应早已同这些探测技术的精度相当,在某些情况下相对论效应甚至已经成为观测资料处理中必须考虑的主要因素之一。于是,目前的太阳系高精度实验为广义相对论的检验提供了独一无二的理想平台。

---

<sup>①</sup>该实验证明了光速不变。该结果是19世纪末物理学天空中一朵乌云。自此,牛顿的绝对时空观开始受到怀疑,进而催生出了相对论。光速不变原理是构建狭义相对论的基本原理之一。

<sup>②</sup>该实验证明了物体的惯性质量同其引力质量相等,即,弱等效原理。

<sup>③</sup>1919年,英国天文学家爱丁顿等通过观测日全食时太阳附近恒星的位置,首次通过实验验证了广义相对论所预言的光偏折(尽管当时的精度只有30%)。

<sup>④</sup>19世纪,根据牛顿力学计算了水星近日点进动的数值。在考虑了所有行星的摄动之后,发现在水星近日点进动的观测结果中仍有大约每世纪 $43''$ 的进动无法被解释。最终,根据爱因斯坦的广义相对论,这一进动得到了解释。

本文的结构如下: 第 2 章将介绍爱因斯坦等效原理及其实验检验, 该原理是广义相对论的基石, 内容包含了弱等效原理、局部洛伦兹不变性以及局部位置不变性。第 3 章将介绍对相对论性引力理论实验检验, 主要涉及对参数化后牛顿参数的测定。最后, 针对我国未来有望实施的深空探测任务, 就其在广义相对论实验检验中可开展的自主研究与实践给出建议。

## 2 广义相对论的基本检验

### 2.1 爱因斯坦等效原理

爱因斯坦等效原理 (EEP) 不但是建立广义相对论的基础, 而且是涵义更为广泛的整个弯曲时空理论的基石。其中的许多观点可以追溯到 20 世纪 60 年代所提出的一些思想<sup>[6]</sup>。EEP 包含有三大要素, 分别是: 弱等效原理 (WEP)、局部洛伦兹不变性 (LLI) 和局部位置不变性 (LPI)。它们的具体内涵如下:

- (1) WEP, 任何自引力可忽略物体的惯性质量等于它的引力质量<sup>①</sup>;
- (2) LLI, 任何局部非引力实验<sup>②</sup>的结果不依赖于该实验所在参考系的自由下落速度;
- (3) LPI, 任何局部非引力实验的结果不依赖于该实验所进行的时间和地点。

EEP 是引力理论的核心。如果 EEP 成立, 那么引力一定是由弯曲时空所产生的一种现象。对于这句话可以这样理解: EEP 告诉我们在 4 维时空中的任何一点都存在一个在引力场中自由下落的局部惯性系, 在其中狭义相对论的物理定律全部成立。而狭义相对论的时空中没有引力, 是平直的闵可夫斯基时空。由于引力无法全局地消除, 在广义相对论中不存在全局的惯性系, 因此含有引力场的时空不应当是平直的闵可夫斯基时空; 这样就很容易想到引力使得时空发生了弯曲, 对此更详细的解释可参见文献 [7] 中的第 3 章。换句话说, 引力的效应一定等价于由弯曲时空所产生的效应。由此, 任何满足 EEP 的引力理论都一定可以用度规<sup>③</sup>来描述, 即“引力的度规理论”。度规引力理论的基本要求为:

- (1) 整个时空的度规具有对称性;
- (2) 自由下落试验粒子的轨迹是度规的测地线<sup>④</sup>;
- (3) 在自由下落的局部参考系中, 非引力的物理学定律保持狭义相对论的形式。

根据上面的这些基本要求, 可以直接得到下面的结果: 如果 EEP 成立, 那么在自由下落的局部参考系中物理学定律既不依赖于这个参考系的速度, 也不依赖于其在该局部参考系中的位置。只有与狭义相对论相容的物理学定律才满足上述的结论, 例如描述电磁场的麦克斯韦方程。此外, 在自由下落的局部参考系中, 试验粒子沿着测地线运动<sup>[8]</sup>。

---

<sup>①</sup>弱等效原理的另一种解释为: 一个自由下落物体的运动轨迹不依赖于它的内部结构和组成。

<sup>②</sup>例如, 两个带电粒子间的库仑力就是一种局部的非引力实验。

<sup>③</sup>度规是一种几何量, 它衡量了临近两点间的距离; 由度规导出的黎曼曲率张量则描述了引力时空的弯曲程度。

<sup>④</sup>测地线指两点最短的路径。

广义相对论是一种度规理论。还有许多其他的引力理论也属于度规理论,例如广义相对论之后最早的 Brans-Dicke 引力理论及目前更为一般的标量-张量引力理论等。在这些引力理论中引力常数会随着时间变化,它同时空有着某些内在的联系。但是,为了保证 WEP 成立,在标量-张量引力理论之下物质的运动只能受到度规的支配。超弦理论也是度规理论,该理论引入了能影响物体结构和物质运动的其他场,它们会破坏 WEP。然而,需要指出的很重要一点是:类似于超弦理论的引力理论是否破坏了 EEP,目前还没有定论<sup>[9]</sup>。但无论怎样,作为广义相对论和其他度规引力理论的重要基础,对 EEP 本身进行实验检验仍至关重要。本章的后续内容将主要围绕这一内容展开。

## 2.2 WEP 检验

WEP 的直接检验就是比较引力场中两个不同物体的下落加速度。如果 WEP 成立,那么不同的物体会具有相同的加速度。在比较实验中,量化 WEP 被破坏程度的一种最简单方式为:假设物体的惯性质量  $m_i$  和其引力质量  $m_p$  不相等。于是在引力场中,  $m_i a = m_p g$ 。一个物体的惯性质量由它的静止能量、电磁能以及弱相互作用能等所构成。如果惯性质量不等于引力质量,会得到如下形式:

$$m_p = m_i + \sum_A \frac{\eta^A E^A}{c^2}, \quad (1)$$

其中  $E^A$  代表相互作用力  $A$  所产生的内能,  $\eta^A$  代表这个相互作用所引起的 WEP 破坏强度,  $c$  是光速。于是,测量两个物体加速度的不同就等于测量 Eötvös 比值,其形式如下:

$$\eta \equiv 2 \frac{|a_1 - a_2|}{|a_1 + a_2|} \simeq \sum_A \left( \frac{E_1^A}{m_1 c^2} - \frac{E_2^A}{m_2 c^2} \right), \quad (2)$$

上式中的质量均为惯性质量。因此,实验对于  $\eta$  的限制就是对 WEP 的限制。

目前已有许多针对 WEP 的高精度实验检验。图 1 摘自文献 [8], 它给出了不同时期测量 WEP 的结果。对于 WEP 的测量最早可追溯到 Eötvös 的经典扭秤实验<sup>[10]</sup>。从 20 世纪 80 年代开始,大量的实验开展了对“第五力”的搜寻(见下面 2.5 节的介绍),由于没有发现任何有关“第五力”存在的迹象,因此对于“第五力”的探测间接地成为了 WEP 的实验检验。在科罗拉多大学进行的自由落体实验,两个分别由铀和铜组成的物体进行自由落体运动,通过激光干涉技术测量了两个物体的相对加速度,得到的结果是  $10^{-9} \sim 10^{-10}$ (见图 1 中的“Free-fall”)。华盛顿大学进行了 Eöt-Wash 实验,它主要是通过一个经典的扭秤天平来比较不同组成物质的加速度<sup>[11]</sup>,得到的结果约为  $10^{-13}$ (见图 1 中的“Eöt-Wash”)。总之,从图 1 中可以看出随着时间的推移,实验对 WEP 限制的精度越来越高,从约  $10^{-8}$  提高到约  $10^{-13}$ 。

未来,有一些空间探测任务计划进一步来测定参数  $\eta$  的下限。例如,由法国空间局提出的“MICROSCOPE”<sup>[12]</sup> 意图在  $10^{-15}$  的精度下来检验 WEP。该任务计划于 2014 年末发射,预期工作寿命为 1 年。该探测卫星将被发射到太阳同步极轨上,距地面高度为 700 km。其有效载荷由 2 个不同加速计组成:一个是由铂构成,另一个由铂和钛构成;主要是通过测量这两个加速计的差别来检验 WEP。

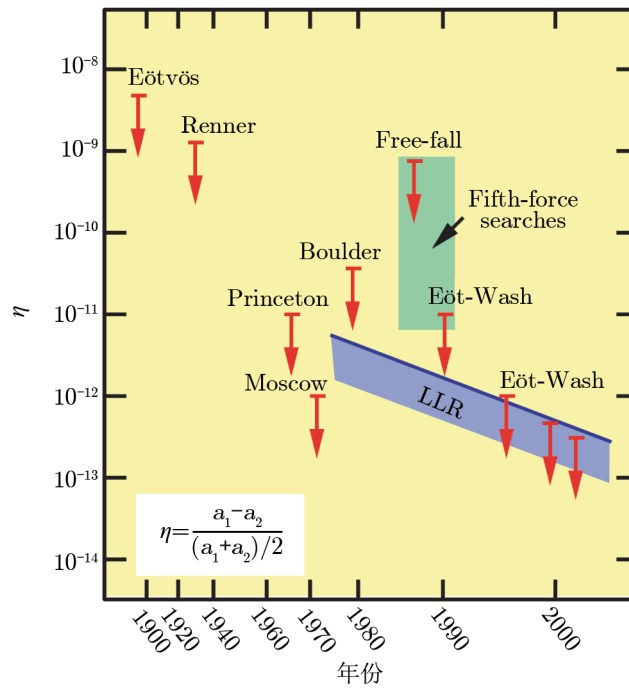


图 1 从 1900 年到 2000 年, 实验对于 WEP 的限制结果<sup>[8]</sup>

其中绿色的部分主要对于“第五力”的检验; 紫色部分是通过 LLR 检验 WEP, 从图中可以看到 LLR 对于 WEP 的检验精度最高, 约为  $10^{-13}$ 。

另一个计划检验等效原理的空间任务为“STEP”<sup>[13]</sup>, 由美国宇航局和欧洲空间局联合研制, 对 WEP 检验的目标精度为  $10^{-18}$ 。为实现这一目标, 它计划使用低温技术来减少热噪声, 而该计划目前已被取消。对 WEP 进行检验的空间任务还有“Galileo-Galilei”<sup>[14]</sup>, 它主要通过使用快速旋转的不同加速计来进行测量, 其目标为在地面上达到  $10^{-13}$  的精度, 在空间达到  $10^{-17}$  的精度。

### 2.3 LLI 检验

不同参考系间的洛伦兹变换, 即从  $(\mathbf{x}, t)$  到  $(\mathbf{x}', t')$ , 具有如下形式:

$$t' = \frac{1}{a} \left( t - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{x}}{c^2} \right), \tag{3}$$

$$\mathbf{x}' = \frac{1}{d} \mathbf{x} - \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{b} \right) \frac{\mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{x})}{v^2} + \frac{1}{a} \mathbf{v}t, \tag{4}$$

上式的  $c$  为光速, 系数  $a$ 、 $b$ 、 $d$  是两个参考系间相对运动速度  $v$  的函数。如果按照  $v/c$  进行小量展开的话,  $a$ 、 $b$ 、 $d$  的表达式如下:

$$a = 1 + \alpha \frac{v^2}{c^2} + \mathcal{O}(c^{-4}), \tag{5}$$

$$b = 1 + \beta \frac{v^2}{c^2} + \mathcal{O}(c^{-4}), \quad (6)$$

$$d = 1 + \delta \frac{v^2}{c^2} + \mathcal{O}(c^{-4}). \quad (7)$$

LLI 的检验就是公式 (5)–(7) 中 3 个参数 ( $\alpha, \beta, \delta$ ) 的测量, 其中  $\delta = 1/c^2 - 1$ 。这 3 个参数在 LLI 成立情况下 (如, 狭义相对论) 的值为:  $\alpha = -1/2, \beta = 1/2, \delta = 0$ 。由于实际测量中  $\alpha$  和  $\beta$  耦合在一起, 唯一单独可测量的参数是  $\delta$ , 因此对于 LLI 的检验主要是对参数  $\delta$  的测量。

近来, 对 LLI 进行实验检验变得活跃。其主要原因是技术的发展使得测量的精度得到提高, 此外, 标准模型扩展 (SME)<sup>[15]</sup> 的出现为实验分析提供了新的框架。LLR 数据得出了对 LLI 检验的新结果。图 2 给出了对 LLI 进行检验的不同结果<sup>[16]</sup>。到目前为止, 还没有任何实验给出了 LLI 被破坏的迹象。LLI 的实验检验最早可以追溯到 Michelson-Morley 实验<sup>[17]</sup>。通过使用激光干涉技术, Michelson-Morley 实验对 LLI 检验的精度可达约  $10^{-9}$ <sup>[18]</sup>。对于 LLI 更精确的实验检验来自地球轨道上的塞曼效应实验<sup>[19–21]</sup>, 其对  $\delta$  的测量已达到了  $3 \times 10^{-22}$ 。总之, 从图 2 中可以看出, 实验对于 LLI 的限制精度越来越高, 从约  $10^{-1}$  提高到约  $10^{-22}$ 。

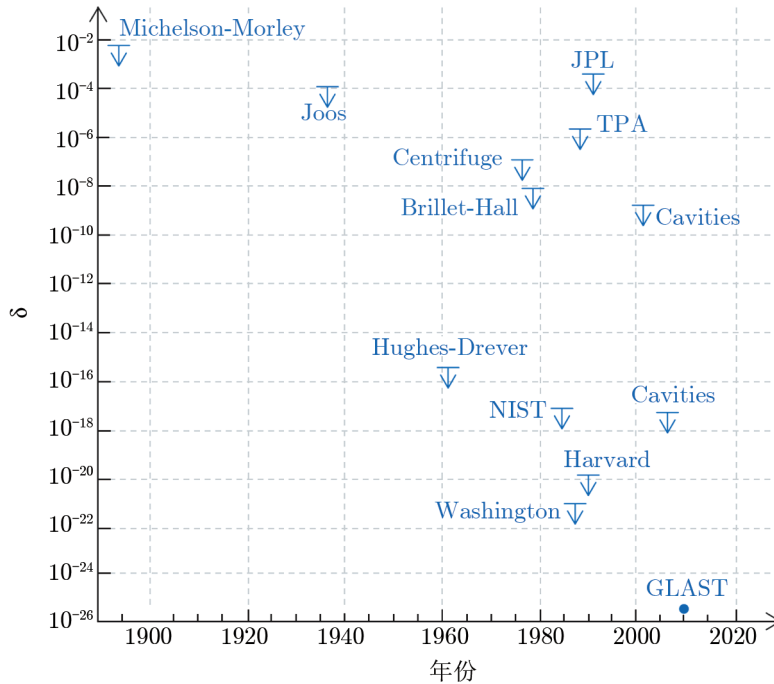


图 2 从 1900 年到 2020 年左右已经进行的或未来要进行的 LLI 检验测量<sup>[16]</sup>  
目前已经达到的精度为大约  $10^{-22}$ 。

欧洲空间局的空间原子钟组 (ACES)<sup>[22]</sup> 计划旨在检验相对论的一些重要理论基础。它将在国际空间站上放置多台超稳定的氢钟和铯钟, 这些钟的频率稳定度会达到约  $10^{-17}$  或更高。通过无线电以及激光两套系统实现星钟同地面钟间的时间比对来检验基本物理学定律,

其中也包括了 LLI 的检验。该空间任务计划于 2016 年发射。

#### 2.4 LPI 检验

EEP 的第 3 部分为 LPI, 它主要是通过引力红移来检验。1907 年, 爱因斯坦从等效原理出发预言了光线的引力红移。虽然爱因斯坦把引力红移当作是广义相对论的一个关键实验验证, 但实际上引力红移现象无法用来区分广义相对论和其他引力理论, 仅仅是对 EEP 的一个检验。典型的引力红移实验, 是测量在一个静态引力场中放置在不同高度的两个相同频率标准 (如, 钟) 的频率或波长变化,  $z \equiv \Delta\nu/\nu = -\Delta\lambda/\lambda$ 。如果 LPI 不成立, 那么其所导致的红移为:

$$z = (1 + \mu) \frac{\Delta U}{c^2}, \quad (8)$$

其中  $\Delta U$  代表发射和接收之间的牛顿引力势之差, 参数  $\mu$  代表 LPI 的检验。

第一个成功的高精度红移测量是 1960 年至 1965 年间进行的一系列实验<sup>[23-25]</sup>, 它们测量了由地面上高度相差 22.6 m 的两点之间引力势的微小差异所导致的谱线移动, 进而定量地验证了引力红移, 当时的精度仅有  $10^{-2}$ 。1976 年, 美国宇航局发射了引力探测器 A(GP-A)<sup>[26, 27]</sup>, 该探测器携带了一台氢原子钟, 其高度为 10 273 km。该实验主要是通过比较这台空间钟和地面钟之间的频率来检验 LPI, 其精度为  $\mu \approx 10^{-4}$ 。2002 年, 引力红移的检验精度进一步提高到大约  $2.1 \times 10^{-5}$ <sup>[28]</sup>。ACES<sup>[22]</sup> 也旨在检验引力红移, 其精度将达到  $10^{-7}$ 。此外, 意大利空间局提出的一个月球探测项目 (MAGIA), 该项目计划在探测器上放置一台铷钟, 这个探测器将位于月面高度为 100 km 的圆轨道上, 该项目的科学目标之一就是 在极高精度下通过星钟同地面钟之间的比对检验引力红移<sup>[29]</sup>, 该项目计划于 2014 年发射。图 3 总结了自 1960 年以来所进行的一些引力红移实验, 同时也检验 LPI<sup>[16]</sup>; 从图 3 中可以看出目前实验对于 LPI 的限制精度约为  $10^{-6}$ , 相比于爱因斯坦等效原理的其他两个基本原理 (WEP 和 LLI) 而言, LPI 的精度并不是很高。

#### 2.5 第五力检验

从现象学的角度出发, EEP 实验检验的想法起源于 20 世纪 80 年代, 主要是通过对“第五力”的探测来实现。1986 年, 为了对 Eötvrő原始数据进行详细再分析, Fischbach 等人<sup>[30, 31]</sup> 提出了第五力的存在。简单地讲就是在牛顿势上加入一个 Yukawa 势, 其形式如下:

$$U(r) = -\frac{GM}{r} \left( 1 + \alpha e^{-r/\lambda} \right), \quad (9)$$

其中,  $\alpha$  代表 Yukawa 力的耦合强度,  $\lambda$  代表它的力程。图 4 给出了不同实验对两个参数 ( $\alpha, \lambda$ ) 的限制, 其中白色为参数的允许区域<sup>[32]</sup>。LLR 对  $\alpha$  施加了最强的限制, 另一方面通过脉冲双星的检验结果同 LLR 的相当<sup>[33]</sup>。

火星一激光测距 (PLR)<sup>[34]</sup> 计划通过地面站对火星一 (Phobos) 的激光测距, 从而在毫米的精度下验证基本物理以及引力理论。PLR 的科学目标之一便是检验第五力的存在以及检验等效原理等。在 ACES 中, 通过时间比对也可以对第五力进行检验<sup>[35]</sup>。

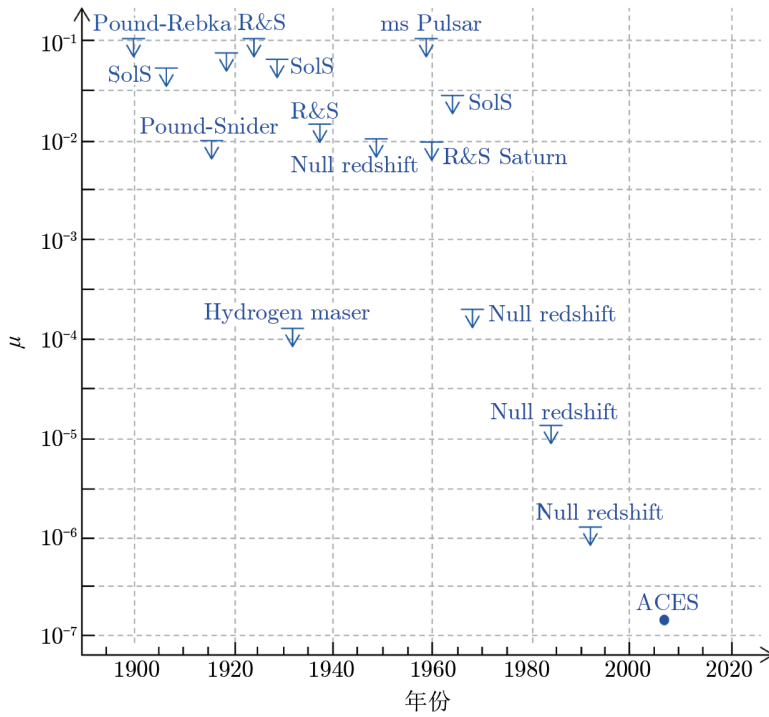


图 3 从 1960 年到 2020 年左右已经进行的或未来要进行的 LPI 检验<sup>[16]</sup>  
 目前已经达到的精度为大约  $10^{-6}$ ，未来的 ACES 会进一步将 LLI 的精度提高到  $10^{-7}$ 。

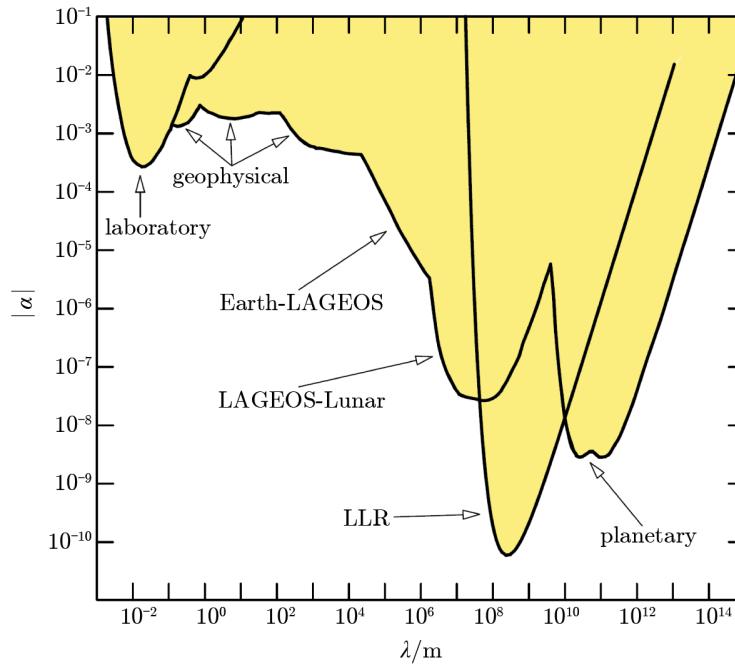


图 4 根据激光测卫、LLR 以及行星轨道限制的第五力参数<sup>[32]</sup>  
 白色区域为两个参数的允许范围。



### 3 相对论性引力理论的检验

#### 3.1 参数化后牛顿形式

随着测量精度的提高, 对不同引力理论的甄别成为可能。但在对引力理论进行比较和对比之前, 需要事先建立起一个统一的框架。目前被广为采用的这一框架形式为参数化后牛顿形式。它最早可追溯到 Eddington<sup>[36]</sup>、Robertson<sup>[37]</sup> 和 Schiff<sup>[38]</sup> 所进行的研究, 当时他们仅在点质量的史瓦西解下引入了两个参数  $\gamma$  和  $\beta$ 。1968 年, Nordtvedt<sup>[39]</sup> 针对点粒子体系研究了广义相对论和 Brans-Dicke 理论的一阶后牛顿 (1PN) 参数化问题。1971 年, Will<sup>[40]</sup> 针对理想流体进一步研究了引力理论参数化问题。1972 年, Nordtvedt 和 Will<sup>[41]</sup> 针对理想流体建立了较为完善的参数化后牛顿理论并首次提出了“参数化后牛顿形式”(parametrized post-Newtonian formalism) 这一术语, 下文简称 PPN 形式。首先, 爱因斯坦等效原理是 PPN 形式的基础。在弱场、低速条件下, 度规张量可以看成是平直的闵氏时空度规外加一些小的微扰; 这些小扰动可以表达成不同的引力超势, 不同引力理论的唯一区别就体现在这些引力超势前面的系数不同。于是, Nordtvedt 和 Will 得到对于不同引力理论的一阶后牛顿近似, 其独立的引力超势只有 10 个, 如下:

$$U(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (10)$$

$$U(\mathbf{x}, t)_{ij} \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x} - \mathbf{x}')_i(\mathbf{x} - \mathbf{x}')_j}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (11)$$

$$\Phi_1(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)v'^2}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (12)$$

$$\Phi_2(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)U'}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (13)$$

$$\Phi_3(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)\Pi'}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (14)$$

$$\Phi_4(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{p(\mathbf{x}', t)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (15)$$

$$V_i(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)v'_i}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3x', \quad (16)$$

$$W_i(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)[\mathbf{v}' \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}')](x^i - x'^i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} d^3x', \quad (17)$$

$$\Phi_w(\mathbf{x}, t) \equiv \int \rho(\mathbf{x}', t)\rho(\mathbf{x}'', t) \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}'}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} \left( \frac{\mathbf{x}' - \mathbf{x}''}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}''|} - \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}''}{|\mathbf{x}' - \mathbf{x}''|} \right) d^3x' d^3x'', \quad (18)$$

$$\mathcal{A}(\mathbf{x}, t) \equiv \int \frac{\rho(\mathbf{x}', t)[\mathbf{v}' \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}')]^2}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} d^3x'. \quad (19)$$

于是在 10 个独立超势前面引入了 10 个不同的参数, 即 PPN 参数, 进而度规有如下形式:

$$g_{00} = -1 + 2U + 2\beta U^2 - 2\xi\Phi_w + (2\gamma + 2\alpha_3 + \zeta_1 - 2\xi)\Phi_1 + 2(3\gamma - 2\beta + 1 + \zeta_2 + \xi)\Phi_2 + 2(1 + \zeta_3)\Phi_3 + 2(3\gamma + 3\zeta_4 - 2\xi)\Phi_4 - (\zeta_1 - 2\xi)\mathcal{A} - (\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)w^2U - \alpha_2w^iw^jU_{ij} + (2\alpha_3 - \alpha_1)w^iV_i + \mathcal{O}(c^{-5}), \quad (20)$$

$$g_{0i} = -\frac{1}{2}(4\gamma + 3 + \alpha_1 - \alpha_2 + \zeta_1 - 2\xi)V_i - \frac{1}{2}(1 + \alpha_2 - \zeta_1 + 2\xi)W_i - \frac{1}{2}(\alpha_1 - 2\alpha_2)w^iU - \alpha_2w^jU_{ij} + \mathcal{O}(c^{-5}), \quad (21)$$

$$g_{ij} = (1 + 2\gamma U)\delta_{ij} + \mathcal{O}(c^{-4}). \quad (22)$$

对于不同的引力理论, 每个超势前面的系数不一定相同。当参数对应不同的值时, PPN 形式就自然退化到一种引力理论。10 个 PPN 参数的引入不但能够比较不同的引力理论, 而且还能够将实验同理论作比较。

表 1 列出 10 个 PPN 参数,  $\gamma$  和  $\beta$  就是通常的 Eddington-Robertson-Schiff 参数<sup>[9]</sup>。Nordtvedt 和 Will 还赋予 10 个 PPN 参数不同的物理意义:  $\gamma$  代表了单位静止质量所造成的空间弯曲的多少,  $\beta$  代表了引力中叠加定律中非线性的大小,  $\xi$  代表了优越位置效应,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  代表了优越参考系效应,  $\alpha_3$ 、 $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$  和  $\zeta_4$  代表了系统总动量守恒的破坏。在广义相对论下,  $\gamma = 1$ ,  $\beta = 1$ , 其他参数为零。表 2 给出了目前实验对 PPN 参数的限定。可以看到,  $\gamma$  和  $\beta$  是唯一的 2 个非零的参数, 且物理意义最为明显和直接。下面将着重介绍实验对于这 2 个参数的检验。图 5 给出了几个实验对  $\gamma$  和  $\beta$  的限制<sup>[16]</sup>。

表 1 PPN 参数以及他们的意义<sup>[9]</sup>

PPN 参数	参数的物理意义	PPN 参数在广义相对论中的值	PPN 参数在半守恒理论中的值	PPN 参数在守恒理论中的值
$\gamma$	单位静止质量所造成的空间弯曲的多少	1	$\gamma$	$\gamma$
$\beta$	引力中叠加定律中非线性的大小	1	$\beta$	$\beta$
$\xi$	优越位置效应	0	$\xi$	$\xi$
$\alpha_1$	优越参考系效应	0	$\alpha_1$	0
$\alpha_2$		0	$\alpha_2$	0
$\alpha_3$		0	0	0
$\alpha_3$	系统总动量	0	0	0
$\zeta_1$	守恒的破坏	0	0	0
$\zeta_2$		0	0	0
$\zeta_3$		0	0	0
$\zeta_4$		0	0	0

表 2 目前 10 个 PPN 参数测量所得到的限制结果

PPN 参数	观测效应	限制结果	参考文献
$\gamma - 1$	时间延迟	$(2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$	[49]
	光线偏折	$2 \times 10^{-4}$	[5]
$\beta - 1$	近日点进动	$3 \times 10^{-3}$	[9]
	Nordtvedt 效应	$2.3 \times 10^{-4}$	[60]
$\xi$	地球潮汐	$10^{-3}$	[8]
$\alpha_1$	轨道极化	$10^{-4}$	[63]
		$2 \times 10^{-4}$	[64]
$\alpha_2$	自转进动	$4 \times 10^{-7}$	[8]
$\alpha_3$	脉冲星加速度	$4 \times 10^{-20}$	[61]
$\eta_N$	Nordtvedt 效应	$9 \times 10^{-4}$	[60]
$\zeta_1$	—	$2 \times 10^{-2}$	结合所有 PPN 参数的限制结果
$\zeta_2$	双星加速度	$4 \times 10^{-5}$	[65]
$\zeta_3$	牛顿第三定律	$10^{-8}$	[8]
$\zeta_4$	—	—	非独立的

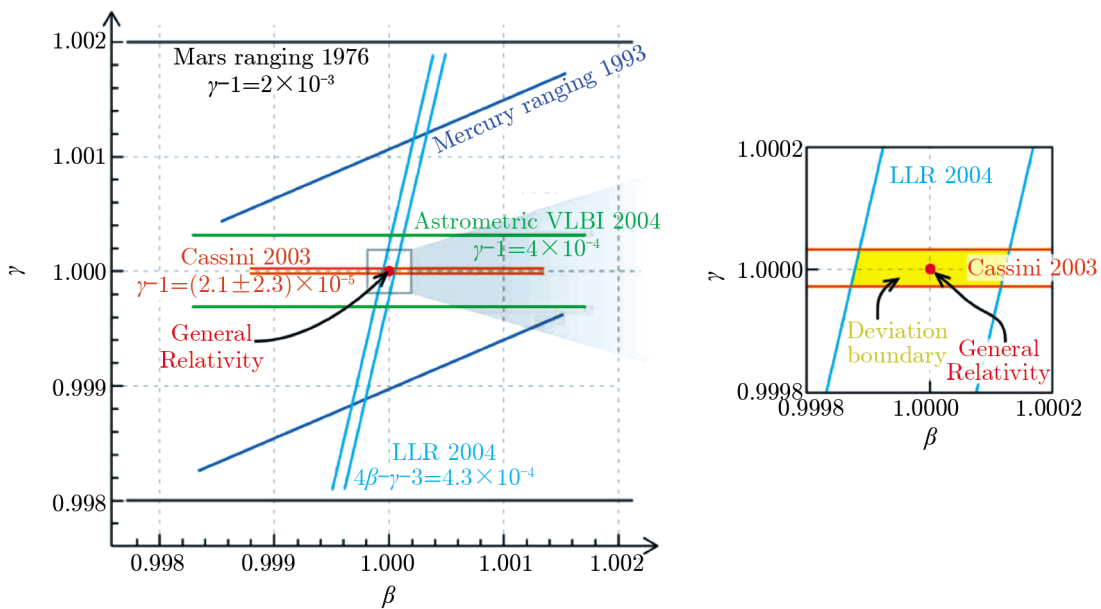


图 5 最近 30 年里太阳系实验对于 PPN 参数  $\gamma$ 、 $\beta$  的限制结果<sup>[16]</sup>

### 3.2 PPN 参数 $\gamma$ 的检验

PPN 参数  $\gamma$  主要是通过光线偏折以及引力时延两大实验进行测量检验。PPN 参数  $\gamma$  之所以通过这两个实验来检验, 其原因是光线偏折角和引力时延中会出现这个参数。简单地说, 建立光传播方程之后带入 PPN 度规, 并通过后牛顿近似方法积分求解光路径, 具体的推导过程可参见文献 [42]。例如, 一束光线掠过太阳表面所引起的光线偏折角为:

$$\delta\theta = \frac{1}{2}(1 + \gamma) \frac{4M_{\odot}}{d} \frac{1 + \cos\varphi}{2}, \quad (23)$$

其中  $d$  代表光线离太阳的最短距离,  $M_{\odot}$  为太阳质量,  $\varphi$  代表太阳和地球连线同光子入射方向间的夹角。如果  $d$  等于太阳半径,  $\varphi = 0$ , 光线偏折角为:

$$\delta\theta = \frac{1}{2}(1 + \gamma)M_{\odot}1''.7505. \quad (24)$$

对于引力时延而言, 考虑如下构型: 雷达信号往返于探测器与地面站, 中途从太阳附近经过。在该构型中所产生的相对论时间延迟为:

$$\delta t = 2(1 + \gamma)M_{\odot} \ln \left( \frac{(r_{\oplus} + \mathbf{r}_{\oplus} \cdot \mathbf{n})(r_e + \mathbf{r}_e \cdot \mathbf{n})}{d^2} \right), \quad (25)$$

$r_e$ 、 $r_{\oplus}$  分别代表光源到太阳的距离、太阳到地球的距离。如果这条光线掠过太阳表面, 此时产生的引力时延最大, 得到相对论部分的时间延迟为:

$$\delta t = \frac{1}{2}(1 + \gamma) \left( 240 - 20 \ln \frac{d^2}{r} \right) \mu\text{s}, \quad (26)$$

其中  $d$  代表光线距离太阳的最短距离,  $r$  代表该探测器到太阳的距离。

在牛顿框架下, 光线偏折角前面的系数是  $1/2$ , 而多出的  $\gamma/2$  部分 (见公式 (23)) 为相对论的预言值。第一次世界大战后, 英国天文学家爱丁顿等人通过观测日全食时太阳附近恒星的位置, 首次通过实验验证了广义相对论所预言的光偏折 (尽管当时的精度只有 30%)<sup>[43]</sup>。此后通过光偏折实验来检验 PPN 参数  $\gamma$  的精度一直没有明显提高。然而, 随着射电干涉以及甚长基线干涉技术的出现, 光线偏折测量的精度大幅度提高。现在, 这些技术有能力在好于  $0.0001''$  的精度下测量角距以及角距的变化。这些测量主要利用一些天空中的特殊事件, 例如, 从地球上会看到类星体从太阳附近经过。1995 年, 通过 VLBI 技术测量了类星体 3C273 和 3C279 近距离经过太阳时所引起的光线偏折, 得到  $(1 + \gamma)/2 = 0.9996 \pm 0.0017$ <sup>[44]</sup>。2004 年通过分析由 87 个 VLBI 台站所测量的大约 200 个射电源的数据, 从统计意义上限制出  $(1 + \gamma)/2 = 0.9992 \pm 0.00023$ <sup>[45]</sup> (见图 5)。2005 年, Formalont 和 Kopeikin 通过 VLBI 测量了类星体 3C279、J1246-0730、J1248-0632 以及 J1304-0346 近距离经过太阳所引起的光线偏折, 得到  $\gamma = 0.9998 \pm 0.0003$ <sup>[5]</sup>, 即  $\bar{\gamma} \equiv \gamma - 1 \approx 10^{-4}$ ; 该实验对 PPN 参数  $\gamma$  进行测量所得的限制结果是迄今为止光线偏折实验精度最高的。通过雷达测距 (即时间延迟) 来检验 PPN 参数  $\gamma$  的实验很多, 图 5 给出了一些水星、火星等雷达测距实验对于  $\gamma$  的测量结果。20 世纪 70 年代, 海盗号火星探测器<sup>[46, 47]</sup> 给出的精度为  $10^{-3}$ ; 此后, 雷达测距对于 PPN 参数  $\gamma$  的

检验始终保持在 20 世纪 70 年代的水平; 主要的原因是时间延迟测量的结果强烈地依赖于太阳日冕的影响<sup>[48]</sup>, 而且几乎很难从数据中把太阳日冕的影响完全扣除干净。因此, 为了分析数据, 任何时间延迟测量必须要采用一个有限/近似的太阳日冕模型, 这使得 PPN 参数  $\gamma$  的测量精度受到制约。2002 年, 卡西尼土星探测器在上合实验中<sup>[49]</sup>, 通过使用多波段多普勒跟踪很好地消除了太阳日冕的影响, 进而得到  $\bar{\gamma} = (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$ 。该实验是到目前为止对 PPN 参数  $\gamma$  限制结果精度最高的 (见图 5)。

未来的一些高精度空间天体测量计划有望进一步提高对  $\gamma$  的测量精度。欧洲空间局的天体测量计划 Gaia<sup>[50]</sup> 已经于 2013 年 12 月 19 日发射升空, 该探测器将位于距离地球  $1.5 \times 10^6$  km 的拉格朗日 L2 点上, 在该点上可以完全避开太阳的影响。它的科学目标之一就是在  $10^{-6}$  的精度下测量  $\gamma$ 。美国宇航局提出的空间干涉测量任务 (SIM)<sup>[51]</sup>, 计划使 PPN 参数  $\gamma$  的测量精度同样达到  $10^{-6}$ 。此外, 美国宇航局还提出了相对论激光天体测量检验任务 (LATOR)<sup>[52]</sup>、超越爱因斯坦先进相干光网络任务 (BEACON)<sup>[53]</sup>, 它们对于 PPN 参数  $\gamma$  的测量精度将分别达到  $10^{-8}$  和  $10^{-9}$ 。目前由于经费预算问题, 美国宇航局的这些高精度空间计划全部被取消。欧洲空间局的水星探测任务 BepiColombo<sup>[54]</sup>, 计划使用两个频段 (X、Ka) 来消除太阳日冕的影响, 进而对 PPN 参数  $\gamma$  测量的精度将达到  $10^{-6}$ 。意大利都灵天文台提出了一个引力天体测量探测任务 (GAME)<sup>[55]</sup>, 该探测器围绕地球运动, 在运动的过程中将通过较差天体测量技术来测量太阳引起附近恒星的光偏折, 其对 PPN 参数  $\gamma$  进行测量的精度将达到  $10^{-8}$ ; 该探测任务目前仍然在计划中。

### 3.3 PPN 参数 $\beta$ 的检验

对于 PPN 参数  $\beta$  的检验主要来自天体的轨道进动以及 Nordtvedt 效应。PPN 参数  $\beta$  之所以通过这两个实验来检验, 其原因是天体的轨道进动以及 Nordtvedt 效应会出现这个参数。关于 Nordtvedt 效应将在下一节中介绍, 本节主要介绍通过天体轨道进动来限制 PPN 参数  $\beta$ 。简单地说, 建立天体运动方程之后, 可通过拉格朗日行星运动方程以及经典的天体力学方法得到近星点角距随时间的变化, 具体的推导过程可参见文献 [56]。

对于水星近日点进动而言, 存在每世纪  $43''$  的“反常”进动无法用牛顿力学来解释。该反常进动最早于 1859 年由法国天文学家勒威耶所发现。之后天文学家一直认为, 在水星轨道附近可能存在未知的小行星群, 或者是牛顿引力定律需要修正。对于水星近日点反常进动的解释是爱因斯坦广义相对论的另一个胜利。在 PPN 形式下得到的轨道进动形式如下:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Gm}{c^2 p} \left[ (2 + 2\gamma - \beta) + \frac{1}{2}(2\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 + 2\zeta_2) \frac{\mu}{m} + \frac{3J_2 R^2}{2mp} \right], \quad (27)$$

其中  $m = m_1 + m_2$  和  $\mu = m_1 m_2 / m$  分别是两个天体系统的总质量以及约化质量;  $p = a(1 - e^2)$  是这个天体系统轨道的半通径;  $J_2$  是主天体的扁率,  $R$  为主天体的半径。公式 (27) 中的第一项就是相对论下水星近日点进动; 第二项, 对于通常的理论而言,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  以及  $\zeta_2$  均为 0, 此外水星的  $\mu/m \approx m_{\text{Mercury}}/m_{\odot} \approx 2 \times 10^{-7}$ , 因此这一项可以忽略; 第三项, 由于太阳扁率  $J_2$  的测量精度已经到达了  $1 \times 10^{-7}$ <sup>[57, 58]</sup>, 因此这一项也可以忽略。通过公式 (27) 可以看出 PPN 参数  $\beta$  和  $\gamma$  是耦合在一起的; 因此, 对于 PPN 参数  $\beta$  的检验结果, 除了依赖于近日点进动的测量精度以外, 还依赖于实验对 PPN 参数  $\gamma$  进行测量所得到的精度。

进一步把水星的轨道根数以及它和太阳的物理常数带入到公式 (27), 我们可以得到水星近日点进动为:

$$\frac{d\omega}{dt} = 42''.98 \left[ \frac{1}{3}(2 + 2\gamma - \beta) + 3 \times 10^{-4} \frac{J_2}{10^{-7}} \right]. \quad (28)$$

1966 年到 1990 年间, 对于水星近日点进动测量的精度只有 0.1%。随着近年来太阳扁率  $J_2$ <sup>[57, 58]</sup> 测量精度的提高, 通过近日点进动对 PPN 参数的限制提高到  $|2\gamma - \beta - 1| < 3 \times 10^{-3}$ , 从而得到  $\bar{\beta} \equiv \beta - 1 \approx 3 \times 10^{-3}$  (见表 2)。

欧洲空间局的水星探测任务 BepiColombo<sup>[54]</sup>, 其科学目标之一便是在  $7 \times 10^{-6}$  的精度下测量  $\bar{\beta}$ , 计划于 2015 年中旬发射。此外, 意大利都灵天文台的 GAME<sup>[55]</sup> 计划, 其测量的 PPN 参数  $\beta$  精度将达到  $10^{-6}$ 。

### 3.4 Nordtvedt 效应以及月球 Eötvös 的实验检验

在 EEP 中, 仅仅强调了试验粒子 (即点粒子) 满足 WEP、LLI、LPI。进一步强调对于自引力不可忽略的天体而言, 同样满足 WEP、LLI、LPI, 这被称为强等效原理 (SEP)。对于地月系统, 月球质量约为地球的 1/81, 很显然月球不能看成点粒子, 特别是 LLR 已经达到毫米的精度<sup>[4]</sup>, 需要考虑是否有 SEP 破坏的可能性。Nordtvedt<sup>[59]</sup> 于 1968 年提出, 对于自引力不可忽略的天体, 其惯性质量  $m$  不等于引力质量  $m_p$ , 它们的关系依赖于一个参数  $\eta_N$ :

$$\frac{m_p}{m} = 1 - \eta_N \frac{E_g}{m}, \quad (29)$$

其中  $E_g$  是自引力能,  $\eta_N$  叫做 Nordtvedt 参数。在广义相对论中 Nordtvedt 参数的值为 0, 在标量 - 张量理论中, 该参数是  $\gamma$  和  $\beta$  的线性组合, 有如下形式:

$$\eta_N = 4\beta - \gamma - 3. \quad (30)$$

通过 LLR 数据, Williams 等人<sup>[60]</sup> 将 Nordtvedt 参数限制在大约  $10^{-4}$ , 同时利用卡西尼对于 PPN 参数  $\gamma$  的测量结果, 进一步得到 PPN 参数  $\beta$  的限制结果为  $\bar{\beta} \equiv \beta - 1 \approx (1.2 \pm 1.1) \times 10^{-4}$ , 通过 Nordtvedt 参数对 PPN 参数  $\beta$  (见表 2) 进行限制的结果是目前为止精度最高的。

此外, Stairs 等人<sup>[61]</sup> 利用一组脉冲星和白矮星构成的毫秒脉冲星的观测数据, 给出 Nordtvedt 参数限制约为  $10^{-2}$ 。对于 Nordtvedt 参数的测量, PLR<sup>[34]</sup> 计划将精度提高到大约  $10^{-5}$ ; 此外, 未来的激光测月也会对该参数进行测量。Nordtvedt 参数的测量精度会直接影响 PPN 参数  $\beta$  的测量结果。

## 4 结 论

本文回顾并展望了广义相对论理论及其实验检验的发展状况和趋势, 包括广义相对论高精度实验检验的主要研究内容和研究方向, 与之相关的深空探测项目的规划和进展。广义相

表 3 一些相对论效应实验目前所达到的精度以及未来空间计划要达到的精度目标

	WEP	LLI	LPI	第五力	$\gamma$	$\beta$	$\eta$
目前	$10^{-13}$ <sup>[11]</sup>	$3 \times 10^{-22}$ <sup>[21]</sup>	$10^{-5}$ <sup>[29]</sup>	$10^{-10}$ <sup>[33]</sup>	$2 \times 10^{-5}$ <sup>[50]</sup>	$1 \times 10^{-4}$ <sup>[61]</sup>	$5 \times 10^{-4}$ <sup>[61]</sup>
MICROSCOPE <sup>[12]</sup>	$10^{-15}$	—	—	—	—	—	—
STEP <sup>[13]</sup>	$10^{-18}$	—	—	—	—	—	—
Galileo-Galilei <sup>[14]</sup>	$10^{-13} - 10^{-17}$	—	—	—	—	—	—
ACES <sup>[22]</sup>	—	$< 10^{-23}$	$10^{-7}$	—	—	—	—
MAGIA <sup>[29]</sup>	—	—	$8 \times 10^{-5}$	—	—	—	—
PLR <sup>[34]</sup>	—	—	—	$2 \times 10^{-11}$	$2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$
BECON <sup>[53]</sup>	—	—	—	$3 \times 10^{-15}$	$10^{-9}$	$3 \times 10^{-5}$	—
Gaia <sup>[50]</sup>	—	—	—	—	$10^{-6}$	—	—
SIM <sup>[51]</sup>	—	—	—	—	$10^{-6}$	—	—
LATOR <sup>[52]</sup>	—	—	—	—	$10^{-6}$	—	—
BepiColumbo <sup>[54]</sup>	—	—	—	—	$2 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$
GAME <sup>[55]</sup>	—	—	—	—	$10^{-8}$	$10^{-6}$	—

对论的实验检验内涵极其丰富,限于篇幅本文仅针对有关的太阳系实验进行介绍。表 3 汇总了一些相对论效应的实验检验目前所达到的精度,及未来一些空间计划对于相对论效应实验检验所预期的目标精度。

随着测量精度的不断提高,爱因斯坦的广义相对论已经成为天文学尺度上描述引力的标准模型。到目前为止,爱因斯坦的广义相对论通过了所有太阳系的实验检验,其中包括:等效原理、光线弯曲、引力红移、雷达回波延迟以及水星近日点进动。广义相对论所预言的引力波也通过脉冲双星的计时观测得到了间接验证<sup>[62]</sup>。尽管如此,还是需要更多的实验去探测它的有效性。

对于我国未来有望开展的近地或深空探测任务,其对广义相对论的实验检验大致可分为 3 步。第 1 步,利用星上已有载荷。例如,针对有望于未来开展的我国自主火星/金星探测任务,使用多波段无线电通讯系统,开展以多普勒跟踪以及测距观测为基础的引力实验。第 2 步,研制专门载荷。搭载为检验某一效应而专门研制的载荷,例如高精度原子钟或者激光测距系统等。第 3 步,发射以检验广义相对论为首要科学目标的专门探测器。对于这 3 步而言,研发成本、硬件制造难度、科学产出以及任务潜在风险均逐级递增。对于我国尚处于起步阶段的空间探测计划,建议从第 1 步做起,在积累了足够的经验之后再实施后续难度更高的步骤。下面针对第 1 步可能进行的相对论检验做简要分析。

作为目前测控与导航的重要手段之一,多普勒跟踪技术已成功应用于大量深空探测任务中;此外,多普勒跟踪数据还可用于科学研究。例如,卡西尼土星探测器就是通过多普勒跟踪测量来检验引力理论<sup>[49]</sup>。为了通过多普勒跟踪测量来检验 LLI 和 LPI,笔者将原先单程多普勒跟踪理论模型<sup>[67]</sup>拓展到了双程以及三程的模式<sup>[66]</sup>。结果显示,三程多普勒测量可用于检验 LLI 和 LPI,而在线性光行时近似下双程多普勒测量无法检验 LLI 和 LPI;她们还指出,在利用三程多普勒测量检验 LLI 和 LPI 的实验中,为了获得较高的探测灵敏度,需要使用相对速度尽可能大的地面跟踪站。利用文献 [66] 所建立的理论框架,Zhang 等人<sup>[68]</sup>利用“火星快车”的三程多普勒跟踪数据,给出了 LLI 的上限。其中所采用的“火星快车”测控数据源自欧空局与我国的合作。该观测所进行的时间为 2009 年 8 月 7 日到 8 日(UTC),上行站在澳大利亚的新诺舍,下行站分别为中国的上海、昆明以及乌鲁木齐。他们利用上海天文台相关团组提供的 MarsODP 软件<sup>[69]</sup>对此次“火星快车”的三程多普勒测量数据进行处理,发现 LLI 在  $10^{-2}$  的精度下成立。该研究结果是我国将多普勒跟踪技术用于基本物理学研究的首批尝试之一。很显然,多普勒跟踪的优点在于利用已有星上通讯系统而无需额外载荷,为把我国尚处于起步阶段的深空探测任务用于科学研究提供了可能。

## 致谢

邓雪梅感谢紫金山天文台历算与天文参考系研究团组对其工作的支持。

## 参考文献:

[1] BIPM Annual Report on Time Activities. Pavillon de Breteuil F-92312 SÈVRES Cedex, France, 2011, 6: 32



- [2] Konopliv A S, Yoder C F, Standish E M, et al. *Icarus*, 2006, 182: 23
- [3] Ciufolini I, Pavlis E C. *Nature*, 2004, 431: 958
- [4] Murphy T W, et al. *PASP*, 2008, 120: 20
- [5] Fomalont E, Kopeikin S, Lanyi G, Benson J. *ApJ*, 2009, 699: 1395
- [6] Dicke R H. *Relativity, Groups and Topology. Relativit'e, Groupes et Topologie, Lectures delivered at Les Houches during the 1963 session of the Summer School of Theoretical Physics, New York: University of Grenoble, 1964: 165*
- [7] <http://astronomy.nju.edu.cn/~tyhuang/jiaoxue/>, 2014
- [8] Will C M. *Theory and experiment in gravitational physics. New York: Cambridge University Press, 1993: 5*
- [9] Will C M. *Living Rev. Relativity*, 2006, 9: 3
- [10] Eötvös R V, Pekár V, Fekete E. "Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität", *Ann. Phys.*, 1922, 68: 11
- [11] Adelberger E G. *Class. Quantum Grav.*, 2001, 18: 2397
- [12] <http://microscope.onera.fr/>, 2014
- [13] <http://einstein.stanford.edu/STEP/>, 2014
- [14] <http://eotvos.dm.unipi.it/>, 2014
- [15] Bailey Q G, Kosteleck'y V A. *Phys. Rev. D*, 2006, 74: 045001
- [16] Turyshev S G. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 2008, 58: 207
- [17] Michelson A A, Morley E W. *Am. J. Sci.*, 1887, 34: 333
- [18] Brillet A, Hall J L. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, 42: 549
- [19] Hughes V W, Robinson H G, Beltran-Lopez V. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, 4: 342
- [20] Drever R W P. *Philos. Mag.*, 1961, 6: 683
- [21] Lamoireaux S K, Jacobs J P, Heckel B R. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57: 3125
- [22] Salomon C, Cacciapuoti L, Dimarcq N. *Int. J. Mod. Phys. D*, 2007, 16: 2511
- [23] Pound R V, Rebka G A. *Phys. Rev. Lett.*, 1959, 3: 439
- [24] Pound R V, Rebka G A. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, 4: 337
- [25] Pound R V, Snider J L. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 13: 539
- [26] Vessot R F C, Levine M W. *Gen.Rel.Grav.*, 1979, 10: 181
- [27] Vessot R F C, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, 45: 2081
- [28] Bauch A, Weyers S. *Phys. Rev. D*, 2002, 65: 081101
- [29] Agnello S D, et al. *Exp Astron*, 2011, 32: 19
- [30] Fischbach E, Sudarsky D, Szafer A, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56: 3
- [31] Fischbach E, Sudarsky D, Szafer A, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 56: 1427
- [32] Adlberger E G, Heckel B R, Nelson A E. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 2003, 53: 77
- [33] Deng X-M, Xie Y, Huang T-Y. *Phys. Rev. D*, 2009, 79: 044014
- [34] Turyshev S G, et al. *Experimental Astronomy*, 2010, 28: 209
- [35] Deng X-M, Xie Y. *MNRAS*, 2013, 431: 3236
- [36] Eddington A S. *The Mathematical Theory of Relativity, Cambridge: Cambridge University Press, 1922: 5*
- [37] Robertson H P. *Space age astronomy, by Deutsch A J, Klemperer W B, eds. New York: Academic, 1962: 5*
- [38] Schiff L I. *Relativity Theory and Astrophysics. I. Relativity and Cosmology, Ehlers J, ed. US: American Mathematical Society, 1967: 5*
- [39] Nordtvedt K. *Phys. Rev.*, 1968, 169: 1017
- [40] Will C M. *ApJ*, 1971, 163: 611
- [41] Nordtvedt K, Will C M. *ApJ*, 1972, 177: 775
- [42] Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation, Freeman, 1973: 6*
- [43] Dyson F W, Eddington A S, Davidson C. *Philos. Trans. Royal Soc. London*, 1920, 220A: 291
- [44] Lebach D E, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 75: 1439
- [45] Shapiro S S, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 92: 121101
- [46] Shapiro I I, et al. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82: 4329

- [47] Reasenberg R D, et al. ApJ, 1979, 234: L219
- [48] Verma A K, et al. A&A, 2013, 550: A124
- [49] Bertotti B, Iess L, Tortora P. Nature, 2003, 425: 374
- [50] Perryman M A C, et al. A&A, 2001, 369: 339
- [51] Shao M. Astronomical Interferometry. Proc. SPIE, 1998, 3350: 536
- [52] Turyshev S G, Shao M, Nordtvedt K. Astron. Nachr., 2004, 325: 267
- [53] Turyshev S G, Lane B, Shao M, Girerd A. Int. J. Mod. Phys. D, 2009, 18: 1025
- [54] [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/BepiColombo](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/BepiColombo), 2014
- [55] Gai M, Vecchiato A, Ligorì S, Sozzetti A, et al. Experimental Astronomy, 2012, 34: 165
- [56] Danby J. Fundamentals of Celestial Mechanics, New York: Macmillan, 1962: 6
- [57] Fienga A, et al. Celest.Mech. Dyn. Astron., 2011, 111: 363
- [58] Pitjeva E V. Sol. Syst. Res., 2013, 47: 386
- [59] Nordtvedt K. Phys. Rev., 1968, 169: 1014
- [60] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 261101
- [61] Stairs I H, et al. ApJ, 2005, 632: 1060
- [62] Hobbs G, et al. Classical and Quantum Gravity, 2010, 27: 084013
- [63] Müller J, Nordtvedt K, Vokrouhlický D. Phys. Rev. D, 1996, 54: R5927
- [64] Bell J F, Camilo F, Damour T. ApJ, 1996, 464: 857
- [65] Will C M. ApJ, 1992, 393: L59
- [66] Deng X-M, Xie Y. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14: 319
- [67] Krisher T P, Morabito D D, Anderson J D. Physical Review Letters, 1993, 70: 2213
- [68] Zhang Y-F, Zhang X-Z, Liu J-H, Huang Y, Xie Y. Research in Astronomy and Astrophysics, accepted
- [69] 黄勇, 胡小工, 曹建锋, 李培佳. 飞行器测控学报, 2009, 28: 83

## The Status and Trends of Testing Relativity in Highly Accurate Level: Tests in the Solar System

DENG Xue-mei<sup>1</sup>, XIE Yi<sup>2</sup>

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Astronomy & Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** With the development of the unprecedented techniques for observations and the improvement of the advanced methods for measurements, general relativity has passed all of the tests in the solar system with flying colors, which included Einstein equivalence principle, the light deflection, the Shapiro time delay and the perihelion advance of Mercury. Even the gravitational wave predicted by the general relativity has been detected by using the timing model of binary pulsar systems indirectly. However, there are many important reasons to question the validity of general relativity and to determine where it will be violated. Thus, high-precision experiments in the solar system offer some new opportunities for probing gravitation in the spacetime. In this paper, the development status and trends of general relativity and its experimental tests are reviewed and outlooked, which include the main

research content on highly accurate experimental tests of general relativity and some plan and progress in deep space missions for testing it. First of all, Einstein equivalence principle and its tests is presented. This principle is the cornerstone of the general relativity and it contains three parts: the weak equivalence principle, the local Lorentz invariance and the local position invariance. Second, experimental tests of relativistic gravitation's theories are discussed, which are mainly focused on measuring the parametrized post-Newtonian parameters. Focusing on Chinese deep space missions in the future, we give some advices on their application to gravitational tests.

**Key words:** gravitation; relativity; deep space exploration; solar system

.....

## 《天文学进展》2014 年征订启事

《天文学进展》是天文学类中文核心期刊。刊物为季刊, 2014 年本刊于 2、5、8、11 月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年 160 元 (含邮寄费和包装费)。凡需订阅 2014 年《天文学进展》, 请到所在地邮局进行订购。

统一刊号: CN 31-1340/P

邮发代号: 4-819

欢迎订阅! 谢谢支持!

《天文学进展》编辑部

2014 年 5 月