

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.03.02

太阳系中太阳和行星的引力磁与 Lense-Thirring 效应

金文敬

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 简述基本物理中引力试验的概况, 特别是检测试验粒子绕中央旋转天体引起 Lense-Thirring (LT) 效应的研究进展。给出自旋质点在旋转体引力电磁 (Gravitoelectromagnetism, GEM) 中运动的 Schiff 公式。描述了检测地球 LT 效应的各种方法: 激光测卫、GP-B、激光测月和环形激光陀螺, 特别叙述了环形激光陀螺仪在地球科学上的应用, 如地震、潮汐、地球自转、极移的检测, 并给出了正在进行和未来更高精度测定 LT 效应的 LARES、OPTIS 等计划。叙述了检验火星 LT 效应的情况, 包括用 MGS 测距资料、火星自然卫星 Phobos 和 Deimos 观测资料, 以及今后发射绕火星探测器的建议。也谈及用太阳系行星 (水星、金星、火星) 测定太阳 LT 效应和未来采用国际空间站进行相对论检验的 LATOR 计划。最后, 简述在脉冲双星、X 射线双星和银心 Sgr A* 附近红外 S 系统恒星中引力场的广义相对论效应, 以及我国开展该项工作的情况和提出的建议。

关键词: 太阳系; Lense-Thirring 效应; 激光测卫; 激光测月; 环形激光陀螺

中图分类号: P137.2 **文献标识码:** A

1 引 言

1916 年爱因斯坦发表了广义相对论理论, 他提出了 3 个广义相对论经典实验: 水星轨道近日点进动、恒星光线通过太阳附近产生偏折和光线的引力红移。以后, 美国物理学家 Dicke 和 Schiff 引导了实验广义相对论的新纪元, 他们强调的不仅是经典的实验, 还包括了引力理论的实验和其他理论 (标量和张量理论、参数化后牛顿形式和等效原理的框架) 的发展。在后牛顿框架下进行的实验有: 引力透镜、光线传播的延迟实验、等效原理、引力红移、框架拖曳 (也称为 Lense-Thirring, 简称 LT) 实验, 以及双脉冲星和超大质量黑洞的强场实验等。以

收稿日期: 2013-11-26; 修回日期: 2014-03-13

资助项目: 国家自然科学基金 (11003039, 11273044, 11273045)

通讯作者: 金文敬, jwj@shao.ac.cn

光线通过太阳附近产生偏折为例, 1919 年 5 月 Arthur Eddington 在日全食时观测该现象, 以后在 1922、1953、1973 年都重复这类光学观测, 随着观测精度的提高, 用卡西尼宇宙飞船测定 Shapiro 时延与广义相对论理论相符合, 与理论值相差仅为 0.001%, VLBI 对光线偏折的测量精度达到 0.02%^[1]。水星近日点进动 42.98"/100 a 是广义相对论的另一个实验, 它是太阳引力对水星的影响。爱因斯坦环是遥远星系受近距天体引力透镜效应的影响, 从而产生光线偏折的又一个实例。随着空间探测和雷达测距的发展, 检验由自旋质点绕旋转质量 M 的轨道运动产生 LT 进动有很大进展, 如用激光测卫研究地球引力磁和由于质量流引起时空的一个拖曳, 即 LT 效应^[2]。用太阳系行星 (水星、金星、火星) 检测太阳 LT 效应, 以及用双脉冲星和银心 Sgr A* 附近 S 系统天体进行的强引力场实验等, 也提出用环形激光陀螺仪检测地球 LT 效应, 这些属于基本物理的引力实验范畴。

本文第 2 章给出自旋质点绕旋转质量 M 轨道运动的基本公式。第 3 章给出测定地球 LT 效应的各种方法, 如 SLR (Satellite Laser Ranging) 方法, LLR (Lunar Laser Ranging) 方法、环形激光陀螺, 并介绍正在进行和未来的计划, 如 LARES (Laser Relativity Satellite)、OPTIS (Optical Tests of the Isotropy of Space)。第 4 章介绍火星的 LT 进动, 包括用 MGS 测距资料, 发射绕火星探测器的建议。第 5 章介绍太阳的 LT 效应, 用太阳系行星 (水星、金星、火星) 测定 LT 进动和未来采用国际空间站进行相对论检验的 LATOR (The Laser Astrometric Test of Relativity) 计划。最后谈及脉冲双星、X 射线双星和银心 Sgr A* 附近红外 S 系统天体检验广义相对论的 LT 进动, 以及我国开展该项工作的情况和建议。

2 Schiff 公式

由于地球引力场是非球对称的, 具有四极和高阶质量矩, 使地球卫星的交点产生的进动称为经典交点进动^[3]:

$$\Omega_{\text{class}} \approx -\frac{3}{2}n \left[\frac{R_{\oplus}}{a} \right] \frac{\cos i}{(1-e^2)^2} \left\{ J_2 + J_4 \left[\frac{5}{8} \left[\frac{R_{\oplus}}{a} \right]^2 (7 \sin^2 i - 4) \frac{1 + \frac{3e^2}{2}}{(1-e^2)^2} \right] + \dots \right\}, \quad (1)$$

式中 a 、 e 、 i 为卫星轨道的半长轴、偏心率和倾角, R_{\oplus} 、 J_{2n} 和 n 为地球的平均赤道半径、引力场的偶带谐函数系数和轨道平均运动, 其中 $n = 2\pi/P$, P 为周期。

除了经典交点进动以外, 地球的引力磁会引起卫星或一个陀螺仪以角速度 $\dot{\Omega}$ 相对于惯性参考架的进动, 也会引起质点轨道很小的变化, 即 LT 效应引起交点和近地点平黄经变化的长期速率。假如质点绕旋转的中央体运动, 在弱场和中央体慢运动中, 中央体角动量引起轨道面的拖曳, 使交点线以一个速率拖曳着。1960 年 Schiff 给出质点 m 在旋转地球引力场中运动的牛顿方程式^[4,5]:

$$m(d\mathbf{v}/dt) = -(GmM/r^2)\mathbf{r} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

式(2)中 m 和 \mathbf{r} 分别为质点的质量和坐标, 速度 $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$, G 为牛顿引力常数, M 为地球质量, \mathbf{F} 为一个非引力的约束力。移动观测者测量的旋转角动量矢量 \mathbf{S}^0 遵守下式:

$$d\mathbf{S}^0/dt = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{S}^0 \quad (3)$$

式(3)中,

$$\boldsymbol{\Omega} = (\mathbf{F} \times \mathbf{v})/2mc^2 + (3GM/2c^2r^3)(\mathbf{r} \times \mathbf{v}) + (GJ/c^2r^3)[3(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}/r^2 - \boldsymbol{\omega}] \quad (4)$$

其中, $J = 2MR^2/5$ 为地球半径 R 的惯性矩, $\boldsymbol{\omega}$ 为角速度矢量。式(4)右边第一项为狭义相对论中的 Thomas 进动, 也可以看作为质点速度 v 和作用在质点上非引力的耦合。其他 2 项是广义相对论最低阶效应。第二项是 de Sitter-Fokker 项, 中央天体不旋转时, 由引力的影响使轨道平面产生测地进动^[6]。第三项是 Schiff 项, 它是由中央天体的自转所产生的, 会产生两个效应: (1) 引力磁的自旋-自旋耦合。它使绕其公转的陀螺自转轴产生进动, 如 GP-B(重力探测器 B) 测量的是陀螺自转轴进动。(2) 引力磁的自旋-轨道耦合。它使绕其公转卫星轨道的近星点角距和升交点黄经发生进动, 如卫星 LAGEOS、LARES 测量的是轨道进动。Thomas 项比其他 2 项小 3 个量级, 一般不考虑。以 Lageos (Laser Geodynamics Satellites) 为例, 它的轨道半长径、偏心率和倾角分别为 12 270 km、0.004、109.94°, 其经典的交点进动、测地进动 de Sitter-Fokker 项、LT 效应 $\dot{\Omega}_{LT}$ 分别为 126°/a, 3312.4 mas/a, 31 mas/a^[7,8]。式(4)中引力电对质点绕中央静态物质旋转而产生近地点的长期速率, 即测地进动 (De Sitter 效应) 也可写为:

$$\dot{\omega}_{GE} = \frac{3nGM}{c^2a(1-e^2)} \times \frac{2+2\gamma-\beta}{3} \quad (5)$$

试验天体绕一个中央旋转质量作轨道运动时, 交点和近地点的 LT 效应长期速率为:

$$\dot{\Omega}_{LT} = \frac{2GJ}{c^2a^3(1-e^2)^{3/2}}\mu_{LT} \quad , \quad \dot{\omega}_{LT} = -\frac{6GJ \cos i}{c^2a^3(1-e^2)^{3/2}}\mu_{LT} \quad (6)$$

其中, $\mu_{LT} = \frac{1+\gamma}{2}$, 在广义相对论中 $\gamma = \beta = 1$, 所以 $\mu = 1$ 。 J 为中央体的角动量, i 为质心轨道与中央质量 M 赤道的交角, a 和 e 为轨道的半长轴和偏心率, G 和 c 分别为牛顿引力常数和光在真空中的速度^[8]。

3 地球的引力磁与 LT 效应

尽管 20 世纪初已提出广义相对论的 LT 效应, 但是一直没有进行试验。1976 年 5 月无源卫星 Lageos 发射, 同年 Van Patten 和 Everitt 提出用 2 个相反方向运行的卫星检测 LT 效应^[9]。1986 年, 意大利 Ciufolini 提出用 SLR 直接测量 LT 效应^[3]; 继后, Lageos II 于 1992 年 10 月发射, 由于地球引力位, 特别是 J_2 地球扁率的影响, 1996 年他又提出用 2 个人造卫星测定 LT 进动的新方法^[10,11]。如果质点(如卫星 Lageos、Lageos II、GP-B) 绕地球运动, 则采用式(5)和(6)以及地球的 J 和卫星的轨道参数可以计算 $\dot{\omega}_{GE}$ 、 $\dot{\omega}_{LT}$ 、 $\dot{\Omega}_{LT}$ 的理论值。以下叙述用各种方法测定地球的 LT 效应。

3.1 卫星测距方法

1992 年 Ciufolini 和 Matzner 首次仅用 Lageos 测量引力电近地点进动 $\dot{\omega}_{\text{GE}}^{\text{LAGEOS}}$, 他们采用 IERS 规范给卫星定轨 (模型中 LT 效应项等于 0), 在拟合轨道残差 $\delta\dot{\Omega}$ 周期和长期项中得到 LT 效应, 估算出系统误差为 20%^[12]。要达到 1% 的精度, 应从 3 个方面进行改进: 采用联合解算法、改进地球引力位、发射新卫星。

3.1.1 线性联合解方法

地球卫星交点进动的主要原因是由于地球引力场导致球对称偏离引起的, 即引力的多极矩: 四极矩和高阶质量矩。对于 Lageos 卫星而言, 经典进动约为 $126^\circ/\text{a}$, 而 LT 进动仅 $31''/\text{a}$ 。因为经典进动与 $\cos i$ 成正比, 为了分离经典进动和相对论进动 LT, 可以取极轨道卫星 (地球的四极矩和高阶惯量为零) 或者一对倾角为 i 和 $180^\circ - i$ 的 2 个激光测距卫星。影响 LT 效应测定精度的是地面引力场多极展开式中偶带谐函数系数 J_2 、 J_4 、 $J_6 \dots$ 的不确定^[8], 以及非引力的温度扰动, 如 Yarkovsky-Rubincam 效应^[13]。如果单独用 LAGEOS 或 LAGEOS II 观测资料, 根据 EGM 96 $l = 20$ 阶的偶带谐协方差矩阵, 引力位产生系统的相对误差分别为 8×10^{-3} 和 2×10^{-2} 。为了提高精度, Iorio 建议采用 Lageos-Lageos II 联合解, 则引力位系统的相对误差为 6×10^{-3} 。采用 8 年观测资料, 包括其他误差源后, 总的系统相对误差为 7×10^{-3} ^[14,15]。

1998 年 Ciufolini 首次用 1993 年 1 月—1997 年 1 月共 4 年的 Lageos 和 Lageos II 观测资料、EGM-96 引力位和 GEODYN II 定轨软件, 直接测量 LT 效应。根据定轨后 Lageos 和 Lageos II 的交点和 Lageos II 近地点的黄经残差结果, 用长期趋势和 4 个周期项进行拟合, 联合残差的斜率为 66 mas/a , 斜率的标准偏离为 2 mas/a , 拟合后残差的 rms 为 9 mas , 得到 $\mu_{\text{LT}} = 1.1 \pm 0.2$ (广义相对论中此值等于 1), 即其线性项的精度为 20%^[10,11]。2004 年 Ciufolini 和 Pavlis 采用了 1993 年 1 月—2003 年 12 月内 50 个 ILRS (International Laser Ranging Service) 台站 10^8 次的 Lageos 和 Lageos II 观测资料及 EIGEN-GRACE02S 地球重力模型, 用 13 个参数 (6 个周期项的频率和相位, 以及 1 个长期斜率) 拟合, 得到斜率为 47.9 mas/a (理论值为 48.2 mas/a), 事后残差的 rms 为 6 mas , 这次测量中考虑了所有随机和系统误差, 精度为 10%^[16]。

2005 年 Iorio 和 Doornbos 提出采用 Lageos、Lageos II、Ajisai (日本的测地卫星) 和 Jason-1 观测资料的联合解。其中 Jason-1 是 2001 年 12 月美国和法国发射的雷达测高卫星, 面积和质量比小, 减小了非引力扰动, 计算公式如下^[17]:

$$\delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOS}} + k_1\delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOSII}} + k_2\delta\dot{\Omega}^{\text{Ajisai}} + k_3\delta\dot{\Omega}^{\text{Jason-1}} = 49.5\mu_{\text{LT}} \quad (7)$$

式中 $k_1 = 0.347$, $k_2 = -0.005$, $k_3 = 0.068$ 。采用此式可以消除引力位偶带谐函数 J_2 、 J_4 、 J_6 的季节、随机和长期的影响, 使引力位对测量 LT 效应的系统误差接近几个百分点。当然也可以用 Stella 和 Starlette 代替 Jason-1, 但是后者有较高的高度。其次, 式 (7) 不受幅度大、周期长的带谐潮汐扰动的影响, 特别是地球卫星轨道最强潮汐分量——田谐潮汐波 K_1 的影响。在归算中 Yarkovsky-Rubincam 效应 (这是指由地面红外辐射使卫星温度不对称引起的沿卫星旋转方向的一个力) 使得到地面热量影响 Ajisai 的长期交点速率为 15 mas/a , 对式

(7) 影响为 1.5×10^{-3} 量级, 太阳辐射压的影响为 5.7×10^{-4} , 所以这两种影响可忽略不计。在加入 Ajisai 和 Jason-1 后, 地球引力偶带谐函数比仅用 Lageos 和 Lageos II 交点时引起的误差从 6% 降至 1.6%。

2004 年 Iorio 等人也提出用 Lageos、Lageos II 和建议的 OPTIS 联合解算的可能性^[18], OPTIS (它与 LARES 具有相同的轨道结构) 的科学目的是验证狭义和广义相对论中 MM (Michelson-Morley-experiment)、KT (Kennedy-Thorndike-experiment) 和 LPI (universality of gravitation red shift) 实验^[19,20]。2007 年 Iorio 对 Lageos、Lageos II 和当时还未发射的 LARES (也称 Lageos III) 给出了联合解的建议^[21,22], 它们的倾角分别为 109.9° , 52.65° 和 69.5° , Lageos 和 LARES 是互补的。

3.1.2 地球引力位的改进

上节 Ciufolini 用了 Lageos 和 Lageos II 的 4 年资料测定 LT 效应 μ_{LT} , 其中包括了其系统误差 $\delta\mu_{LT}^{\text{systematic}}$ 约 20%~30%^[11,23]。系统差由 2 个部分引起: (1) 引力位的误差是地球引力场多极展开中偶带谐系数的不确切引起。为了消除 J_2 和 J_4 的影响, Ciufolini 采用联合解公式, 根据 EGM96 模型, 其影响与引力磁的漂移相同量级, 或者更大。(2) 非引力的扰动。包括 Lageos II 表面物理性质引起的, 如太阳辐射压和地球反照率产生的辐射源的轨道扰动; Lageos II 旋转动力学的变化, 如太阳和地面电磁辐射与卫星物理结构 (特别是角反射器) 之间的相互作用引起温度变化, 从而导致轨道扰动, 而且 Lageos II 的近地点也受到非引力扰动食效应的影响。在 4 年中它对 LT 效应的影响为 10%, 如果引力位的误差为 13%, 则系统差 $\delta\mu_{LT}$ 为 30%; 如果引力位的误差为 45%, 则系统差为 54%, 加入非引力位产生的误差, 总的系统差为 87%。2004 年用了以下 4 种线性结合的归算方法和由卫星得到 3 个引力模型: EGM96、EIGEN2 和 GGM01C, 计算测量 LT 效应的精度, 具体结果见表 1。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{C: } \delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOS}} + c_1\delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOSII}} + c_2\delta\dot{\omega}^{\text{LAGEOSII}} \approx 60.2\mu_{LT} \\ \quad (c_1 = 0.304, c_2 = -0.350) \\ \text{A: } \delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOS}} + c_1\delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOSII}} + c_2\delta\dot{\Omega}^{\text{Ajisa}} + c_3\delta\dot{\omega}^{\text{LAGEOSII}} \approx 61.2\mu_{LT} \\ \quad (c_1 = 0.443, c_2 = -0.0275, c_3 = -0.341) \\ \text{I: } \delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOS}} + c_1\delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOSII}} \approx 48.2\mu_{LT} \quad (c_1 = 0.546) \\ \text{M: } \delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOS}} + c_1\delta\dot{\Omega}^{\text{LAGEOSII}} + c_2\delta\dot{\Omega}^{\text{Ajisa}} + c_3\delta\dot{\Omega}^{\text{Starlette}} + c_4\delta\dot{\Omega}^{\text{Stella}} \approx \\ \quad 57.4\mu_{LT} \quad (c_1 = 4.174, c_2 = -2.706, c_3 = 1.508, c_4 = -0.048) \end{array} \right. \quad (8)$$

式 (8) 中, C 表示 Ciufolini 所用的联合解公式, A 中包括了 Ajisai, I 只包括 Lageos 和 Lageos II, M 为多颗卫星的结合。从表 1 中结果可以看出: (1) 用单一卫星 Lageos, Lageos II 测定 LT 效应和近地点引数 ω , 不管用什么引力模型, 精确度都很差, 因此在测定 LT 效应中不能采用此方法。(2) 引力模型在测定 LT 效应中起了很重要的作用。在方法 C 中精度从 45% 提高至 2%; 在 C 和 A 中包括了作用在 Lageos II 近地点上的非引力扰动, 只有用引力模型 GGM01C 才能达到高精度; 同样, 采用高精度的引力位, 方法 I (即只包括 Lageos, Lageos

表 1 使用不同引力位模型卫星线性联合的结果 (%)

	EGM96	EIGEN2*	GGM01C**
$\dot{\Omega}_{LT}^{\text{LAGEOS}} = 30.7$	199	69	44
$\dot{\Omega}_{LT}^{\text{LAGEOSII}} = 31.6$	220	107	64
$\dot{\omega}_{LT}^{\text{LAGEOS}} = 57.5$	242	63	43
$C = 60.2$	45	9	2
$A = 61.2$	64.4	12.8	0.8
$I = 48.2$	104	22	14
$M = 57.4$			37

注: * 此处 EIGEN2 只包括 CHAMP 6 个月资料;

**GGM01C 只有 GRACE 第一次公布的数据。

II 交点) 是可取的, 这样更有效、快速和可靠, 精度有可能在 1% 或更高。

3.1.3 发射更合适的卫星

(1) 装有陀螺仪的卫星 GP-B。继 1976 年载着氢钟的 GP-A(重力探测器 A) 发射后, 2004 年 4 月 20 日放置了 4 个涂铌超导球形石英陀螺仪的 GP-B 发射, 用以测量陀螺仪相对于导星 (HR 8703, IM Pegasi) 的 LT 进动。卫星长 6.4 m、直径 2.6 m, 质量 3100 kg; 轨道要素: 半长径 7027.4 km、偏心率 0.0014、倾角 90.007° 、周期 97.65 min。2005 年 9 月该卫星因液氦用尽而终止。2011 年 Everitt 等人对 2004 年 8 月—2005 年 8 月的资料进行分析, 得到 4 个陀螺仪综合的结果: 测地漂移速率为 (-6601.8 ± 18.3) mas/a, LT 漂移速率为 (-37.2 ± 7.2) mas/a; 理论值为 -6606.1 mas/a 和 (-39.2 ± 7.2) mas/a; 相应的精确度为 0.28% 和 19%^[24]。

(2) 装有激光反射器的卫星 LARES。为了用 Lageos 类型卫星 (Lageos、Lageos II、LARES) 联合测定 LT 效应, 以达到 1% 的精度, 1998 年 Ciufolini 等人提出, 发射 LARES 卫星^[21,22], 该卫星直径 364 mm、质量 386.8 kg, 表面装有 102 块立方角反射器, 面积与质量比率是 Lageos 的 1/2.7, 减小了非引力扰动, 是太阳系最致密的天体。卫星轨道高度 1450 km、倾角 69.5° 、偏心率为 0。该卫星已由意大利空间局于 2012 年 2 月 13 日发射成功。该卫星也可用于地球动力学和卫星测地学的研究, 如改进低阶偶带谐引力位, 精确估计大气拖曳、太阳辐射压等。

(3) 时空各向同性光学实验 OPTIS。根据实验室在光学技术领域的发展和空间实验的优点: 脱离环境干扰、积分时间长、速度大和势差大, 德国 Lämmerzahl 等人于 2001 年提出 OPTIS^[19,20]。它是一颗主动摆脱拖曳装置 (active drag-free apparatus) 的卫星。卫星直径 1.5 m, 放置了 2 个激光器、2 个正交的光学腔、1 个激光蜂窝发生器和 1 台原子钟。卫星轨道的近地点和远地点分别为 10000 km 和 36238 km, 相应速度为 6.99 km/s 和 4.33 km/s, 偏心率为 0.41, 以便得到 KT 试验中所需的速度差。首先发射至测地转移轨道 (全称 geo-transfer orbit), 再用附加的马达把卫星送至近地点和远地点。虽然高的轨道使卫星速度比地球低轨卫星速度减小了 1/2.8, 但仍然比地面试验大 20 倍。尽管项目主要为验证狭义和广义相对论

中 MM、KT 和 LPI 试验, 其中 MM 和 LPI 预计比现有精度提高 3 个量级^[25-27], KT 试验提高 2 个量级。但是该卫星在自转的同时还绕地球转动(自转轴指向太阳), 所以也能测量 LT 效应。

3.2 激光测月方法

月球是地球的自然卫星, 1969 年 7 月 21 日美国宇航员 Buzz Aldrin 放置了第一个 LLR 反射器 Apollo11, 以后又放了 Apollo14 和 15。1972 年苏联 Luna 17 和 21 利用月面车的飞船在月面上安放了法国制造的 2 个反射器(Lunokhod 1 和 Lunokhod 2)。随着这些反射器的放置, 早期进行 LLR 的有美国 McDonald 天文台 2.7 m 望远镜, 由于 LLR 测距技术的改进, 测距精度从早期的 25 cm 提高至约 15 cm, 至 1985 年用 76 cm 的 McDonald 激光测距系统(McDonald Laser Ranging System, MLRS)代替。20 世纪 80 年代, 美国夏威夷 Maui 岛的 Haleakala 天文台和法国 Côte d'Azur Observatory (OCA) 天文台加入 LLR。1990 年 Haleakala 停止观测, 精度为 2 cm。上述望远镜除 McDonald 天文台 2.7 m 望远镜以外, 其他进行测距的望远镜口径都小于 1.5 m。2005 年 10 月美国 Apache Point 天文台用 3.5 m 望远镜进行 APOLLO (Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation) 项目, 由于使用观测点的视宁度为 1" 的大口径望远镜, 并采用了单光子雪崩二极管, 每个脉冲接收 1 个光子, 而以前的设备只有 0.01 光子, 所以从 2006 年 4 月得到了高精度的测月距资料, 精度已从厘米级提高至毫米级。2010 年 4 月从 Lunar Reconnaissance Orbit 返回的光子中找到了长期消失的 Lunokhod 1, 并收到从此反射器返回的光子。除此以外, 还有一些新的台站, 如意大利 Matera、德国 Wettzell、南非 Hartbeesthoek 等^[28]。至今 LLR 资料已积累了 40 余年, 许多学者用这唯一行星际的仪器得到的资料用于 3 个方面研究^[29,30]:

(1) 引力理论的实验。包括弱和强等效原理 (Weak and Strong Equivalence Principle, 即 WEP 和 SEP) (LLR 是唯一用于验证 SEP 的方法)、SEP 破缺参数 η 、月球轨道的测地岁差、PPN 参数 γ 和 β 、引力常数的相对变化。

(2) 月球科学。包括月球内部、潮汐响应、物理天平动、月球历表等。

(3) 地球科学。包括地球定向参数、岁差和章动、台站坐标和运动。

1976 年以来, 许多学者用 LLR 资料作相对论性引力试验^[31-36]。2004 年 Williams 等人用 1970 年 3 月—2004 年 4 月精度 2 cm 的 LLR 观测资料分析得到相对论验证结果: (1) 等效原理, 地球和月球 M_G/M_I 之间的差值为 $(-2.0 \pm 2.0) \times 10^{-13}$, 相应 SEP 破缺参数 η 为 $(4.4 \pm 4.5) \times 10^{-4}$, (此处 $\eta = 4\beta - \gamma - 3$); (2) 用卡西尼飞船测得的 γ 和此 η 值得到 PPN 参数 $\beta - 1 = (1.2 \pm 1.1) \times 10^{-4}$; (3) 测地岁差测定值与广义相对论理论值的相对偏离 $K_{gp} = -0.0019 \pm 0.0064$; (4) 引力常数的相对变化 $\dot{G}/G = (4 \pm 9) \times 10^{-13}/a$ ^[37]。

2007 年 Murphy 等人认为自 APOLLO 运行后, LLR 测距精度已达 5 mm, 因此能测量 LT 效应^[38]。但是 Kopeikin 认为引力磁效应分为内在的 (intrinsic) 和外在的 (extrinsic) 两大类, 前者已在式 (4) 的第 3 项内进行描述, 外在的引力磁效应是由天体的平均运动所产生的。这一外在的引力磁效应取决于观测者的参考系或者规范的选取, 激光测月可以测量外在的引力磁效应。他认为现在 LLR 精度不可能测量 LT 效应, 因为月球的交点和近地点的

LT 效应长期进动分别为 0.001 mas/a 和 -0.003 mas/a , 而现在测定月球进动速率只能达到 0.1 mas/a ; 其次, 由于 J_2 引起的进动为 0.006 mas/a , 是 LT 效应速率的 6 倍, 太阳的引力扰动为 0.07 mas/a , 是 LT 效应的 70 倍^[39]。

3.3 环形激光陀螺仪

1913 法国物理学家 Sagnac 发现两束光相反运行时, 能测定安放光束平台的旋转, 即 Sagnac 效应, 也称为 Sagnac 干涉^[40]。他把多边形干涉仪放在一个转台上, 面积 0.0860 m^2 , 转速 2 Hz , 得到条纹漂移 0.07 ± 0.01 。之后, Michelson-Gale-Pearson 于 1925 年在美国 Illinois 州 Clearing 也做了类似试验 (面积 $(612.6 \pm 339.2) \text{ m}^2$, 周长 1.9 km)。20 世纪 60 年代激光器开始问世, 1963 年美国的 Macek 和 Davis 第一次试验了环形激光陀螺仪 (Ring Laser Gyroscope, RLG), 大小为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ^[41]。RLG 的形状是三角形或正方形组成一个闭合回路, 1972—2004 年 RLG 线宽的 rms 已从 4.5 Hz 减至 50 nHz , 相应的分辨率提高了 10^8 倍。

3.3.1 Sagnac 公式

RLG 的基本原理为, 从激光器发出两束光, 如果一束与陀螺方向一致, 另一束相反, 前者光束回到起始点比后者至起始点的路径长, 因为路径差产生了干涉, 由干涉条纹的漂移测定 RLG 的旋转。两束光的拍频 δf , 即 Sagnac 频率为:

$$\delta f = S \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega} \quad (9)$$

上式中仪器的比例因子 $S = \frac{4A}{\lambda P}$, A 、 P 、 λ 分别为环面积、周长和光的波长 (如果使用氦氖, 则 λ 为 633 nm); $\boldsymbol{\Omega}$ 为旋转矢量, \mathbf{n} 为垂直环的法向单位矢量。从式 (9) 可知用大的环形回路感知底盘的转动时, 能得到大的拍频值。当 RLG 旋转很慢时, 两束光因耦合而锁住, 其检测最小速率为 $\Omega_L = \frac{c\lambda^2 r_s}{32\pi A d}$, 其中 r_s 为每块镜子的有效反向散射, d 为在散射镜处光束腰的直径 (高斯激光束轮廓的 $1/e$ 横向宽度)。强迫抖动可以消除耦合, 如以 400 Hz 速率抖动, 抖动的峰值速度为 $1''/\text{s}$, 但是并不能完全解决。然而, 经过多年对镜面反射率的完善 (已达到 99.9999%), 以及回路内压力的稳定性增强等, 地球自转引起的拍频已是锁模阈值的 3 个量级, 现在大型环形激光陀螺完全能感知地球的自转^[42]。Sagnac 频率除了随地球自转的瞬时位置和角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 而变化以外, 还与以下两个因素有关:

(1) 仪器的比例因子 S 。它随着以下 2 个情况而变化: a. 由于温度或压力引起 A/P 的变化, 光路中温度须控制在 10^{-3} K 、压力稳定在 0.1 hPa , 以保证光路几何稳定 10^{-10} , 通常用整块微晶玻璃组成, 以保证环的稳定性; b. 由于气体成分的变化, 使激光腔中每束光折射率变化^[43]。

(2) 指向 \mathbf{n} 的监测。在 Sagnac 频率中应考虑潮汐的倾斜, 其中包括固体、海洋和大气负荷引起的倾斜, 所以在 RLG 所在处同时安放倾斜仪, 在资料处理时考虑此影响, 如 Wettzell 的 G 陀螺的顶部安放了 6 个高精度的倾斜仪^[44]。

3.3.2 RLG 的应用^[45]

它除了用于商用飞机、船舶、飞船的导航以外, 还用于地球物理、测地、广义相对论和基本物理的其他领域。

1) 地球物理的应用

测定地震断层和大陆漂移处的本地运动, 极运动^[43,46]和日长变化^[42,47,48]、地球潮汐^[49]、风引起山脉的周期运动等。

2) 基本物理的应用

(1) 相对论的检测。1967 年 Dehnen 第一次提出用 RLG 测量引力磁或 LT 效应^[50], 式(4)第 3 项括号前的系数为 2.3×10^{-10} , 该值很小。如果 RLG 的法线与地球自转矢量相互垂直, 可以消除地球自转引起的 Sagnac 效应, 经计算, 在纬度 45° 处正方形 RLG 的面积为 0.01 m^2 , LT 效应的 Sagnac 效应为 7.2×10^{-23} ^[51]。1981 年 Scully 建议研制 50 m^2 的 RLG, 可以更容易检测到此效应^[52]。同样, 1986 年 Soffel 等人提出用 Sagnac 装置测量测地和 LT 进动, 然而使用 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的 RLG, LT 进动的输出仅为 $1.06 \text{ } \mu\text{Hz}$ 。2011 年, Soffel 认为在用 RLG 测地球转动 Ω_E 时, 还包括了测地岁差 Ω_{GP} 、LT 效应 Ω_{LT} 和 Thomas 进动 Ω_T , 为了测定这些相对论效应, 要求: a. 1 h 积分能感知 0.01 prad/s 的旋转; b. 在几年中 RLG 的稳定度为 1×10^{-10} ; c. 感知指向为 1 mrad , 对应于在极点运动 1 cm ; d. 日长感知为 $0.1 \text{ } \mu\text{s}$ 。现在的 RLG 不能达到此要求, Wettzell 的 G 陀螺仪在 1 h 积分后, 感知 0.01 prad/s 的旋转, 但是对稳定度要求很难达到, 他建议意大利 Gran Sasso 实验室进行此试验^[53,54]。另外, 也考虑用 RLG 检测引力波。

(2) 基本对称性的检验。包括时间反演和宇称破坏理论、量子场理论 (检测轴离子) 等。详细请阅参考文献 [45], 这些基本物理检测比地球物理的应用更困难。

3.3.3 现有的 RLG^[51]

众多的 RLG 干涉仪可分为有源和无源两类, 前者有: 原子干涉仪、中子干涉仪、超流体氦谐振器等, 其中氦氖激光器具有大功率、良好的相干性、光束稳定、摆脱电介质的缺点、价廉、附件很容易得到等优点; 后者有光纤陀螺。现在进行 RLG 研究的有 3 个团组。

(1) 新西兰 Canterbury 大学物理和天文系

Stedman 等人于 1988—1990 年研制了周长 3.477 m (面积为 0.7547 m^2) 的第一个正方形氦氖激光陀螺 Canterbury I (C I), 安放在新西兰 Christchurch 的 Cashmere Caverns (经、纬度为 $172^\circ 37' 20''$ 和 $43^\circ 34' 37'' \text{ S}$) 的一个地下 30 m Banks Peninsula 火山洞的玄武岩上 (离太平洋约 5.8 km), 由地球自转 ($7.292 12 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$) 产生 Sagnac 效应的拍频为 68.95 Hz 。1992 年新西兰、德国和美国合作设计 C II 型, 面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ m}^2$, 安放在 Cashmere, 相应 Sagnac 效应的拍频为 79.40 Hz , 精度为 10^{-7} 。1997 年研制 G 大小 RLG 的简单装置 G0, 周长 14 m , 面积 12.25 m^2 , 安放在新西兰 Cashmere。2001 年又研制了 UG1 型 RLG, 周长 76.899 m ($20.984 \text{ m} \times 17.465 \text{ m}$), 面积 366.54 m^2 , 是全球最大的 RLG^[55], 环平面法线与地球旋转轴的交角为 46.7732° , Sagnac 效应的拍频为 1512.8 Hz , 精度为 3×10^{-8} 。今后将改进为 UG2 型, 大小与洞穴面积 $21 \text{ m} \times 38 \text{ m}$ (834 m^2) 相同^[56]。

C I 曾在 1993 年首次感知地球自转^[57]。它分别于 1994 年 6 月 18 日和 1996 年 9 月 5 日感知 Arthurs Pass-Coleridge 6.3 级和以东 90 km 5.2 级的地震事件^[58]。1999—2000 年 C II 几乎连续运转, 检测到地球自转和月球在固体地球上的周期为 12.42 h 的潮汐, 以及海洋负

荷效应^[49]。在新西兰 Christchurch, 地平式 RLG 测量半周日和周日潮汐的量级为 4×10^{-8} 和 4×10^{-8} , 双周潮 M_f 的带谐潮 ($m = 0$) 为 4×10^{-9} ^[58]。

(2) 德国 Munich 技术大学和制图与测地研究所组成的 RLG 研究组

1997 年研制面积为 16 m^2 ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$) 的 RLG, 称为“Grossring(G)”, 安放在 Wettzell 站 (经、纬度为 12.9° 和 49.1° N), 并在 2001 年运行。Sagnac 效应的拍频为 348.6 Hz , 检测地球自转的短周期波动, 精度为 10^{-8} 。

2002 年初在 G 陀螺上检测到离 Wettzell 10040 km 的 7.2 级菲律宾地震。Schreiber 等人用 3 个 RLG: C II、G 和 UG1, 2001 年底—2002 年 10 月 27 日的资料直接测量受迫周日极运动, 并进一步延长观测时间, 在 2002 年 6 月 24 日—2003 年 3 月 26 日共 243 天的资料中检测到地极的周日运动^[43]。2011 年 Schreiber 等人检测钱德勒和周年运动^[46]。他们也在 2006 年用 G 陀螺仪检测地球自转^[44]。2012 年 Nilsson 用 2010 年 5 月 17—18 日 VLBI R1431 组资料与 G 陀螺仪资料联合解算极移 x_p 和 y_p , 以及 DUT1, 其中 RLG 精度比 VLBI (测定日长精度为 10^{-9} , 即每天 0.1 ms) 低一个量级。她还模拟全球有 3 个 RLG 分别放在 Wettzell、巴西东部 (经、纬度为 45.0° W 和 23.5° S) 和墨西哥西部 (经、纬度为 115° W 和 29.7° N), 精度采用 2 种情况: 情况 1 时其精度与 G 相同, 情况 2 时, 精度比 G 的精度提高一个量级, 后者联合解地球自转参数的形式误差比单一 VLBI 解减小 50% ^[47,48,59]。

(3) 意大利 INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, National Institute for Nuclear Physics)、Naples 大学、Pisa 大学的联合 RLG 研究组

Bosi 等人建议在 Gran Sasso 实验室研制一个在 3 个正交轴上安放 6 个边长为 6 m 的正方形环形陀螺, 由此可以估计 Adriatic 板块的运动^[60]。Gran Sasso 在 VLBI 台站 Medicina 和 Matera 之间, 它是世界上最大的岩洞, 覆盖了平均厚度为 1400 m 的岩石。

从 2002 年起至今一直在运行的 RLG 有 C II、G、UG1, 其特点是: (1) 它不依赖一组类星体构成的外部的参考架, 是一个监测地球自转的独立方法; (2) 与 VLBI 和 GNSS 一样测定地球自转变化具有高分辨率; (3) 它们能直接和连续地测量地球瞬时旋转轴的位置和 Oppolzer 的幅度, 而空间技术 (VLBI、SLR、GPS 等) 只给出地固和惯性参考系之间的转换矩阵, 进一步提高 RLG 精度后, 有望研究地球的内部^[42-44]。另外, 1996 年 Krainov 和 Zharov 也曾提及在 Sternberg 天文研究所研制边长为 3.1 m 的正方环形谐振器^[45,61]。

4 火星的引力磁与 LT 效应

4.1 火星雷达距资料

1960 至今, 人们对火星的探测没有停止过, 各国宇航局发射了无数火星探测器。以 Mars Global Surveyor (MGS) 为例, 它于 1996 年 11 月 7 日发射, 1997 年 9 月 12 日进入火星轨道。MGS 是一颗极轨卫星, 其轨道半径、倾角、偏心率分别为 3796 km 、 92.56° 、 0.0085 , 2006 年 11 月 2 日失去联系。Konopliv 用 1999 年 2 月 4 日—2005 年 1 月 14 日近 6 年的 MGS 和 3 年 Mars Odyssey 多普勒和测距跟踪资料得到火星引力场的全球解 MGS95J, 并以高

精度测定了 MGS 的轨道^[62]。在 MGS 观测期间, 轨道 RMS 重叠的差值 (表示定轨的精度) ΔR_{diff} 、 ΔT_{diff} 、 ΔN_{diff} 分别多 15 cm、1.5 m、1.6 m。由于 LT 效应, 产生径向、切向和法向的偏离为 ΔR 、 ΔT 、 ΔN 。对于赤道轨道的卫星而言, 只有 ΔT_{LT} ; 而对于极轨道, 只有 ΔN_{LT} 存在。在 ΔP 间隔内, 其平均值 $\langle \Delta N_{\text{LT}} \rangle = \frac{GJ\Delta P \sin i \sqrt{1+e^2/2}}{c^2 a^2 (1-e^2)^{3/2}}$ 。Iorio 取 1999 年 11 月 14 日—2005 年 1 月 14 日 MGS 的约 5 年定轨资料得到 ΔN_{diff} 为 1.613 m。在 ΔP 周期内 ΔN_{diff} 与 ΔN_{LT} 的比值 μ 等于 1.0018 ± 0.0053 (理论值为 1)^[63]。另一方面, 从 RMS 重叠偏差的线性拟合的斜率为 (-0.69 ± 0.20) m/a (精度为 29%), 而广义相对论预测 LT 效应平面外的速率为 0.62 m/a (相应的 LT 效应为 34 mas/a), 两者比值为 1.1 ± 0.3 。此处, 与轨道角动量一致的法线方向为正, 负号为 MSG 资料分析中定义了相反方向的缘故。结果有力说明 MSG 平面外运动的平均漂移 ΔN_{diff} 是由于火星引力磁 (即 LT 效应) 所引起的。虽然 2006 年 11 月 MSG 已失去联系, 但是可对 Odssey 和 Mars Reconnaissance Orbit (MRO) 轨道器的资料进行分析, 从而推算 LT 进动值。

4.2 探测火星 LT 效应的方法^[64]

测定 μ 的误差与火星角动量 J 、引力常数 G 和轨道半长径 a 的误差有关, 详细分析见参考文献 [63]。为了克服测定 LT 效应的系统差, 2008 年 Iorio 提出了 3 种考虑:

(1) 一个近极卫星。设定卫星 $e = 0.01$, $89^\circ \leq i \leq 91^\circ$, 对 $a = 3796$ km (MSG 的高度) 和 $a = 9500$ km (Phobos 的高度) 二种情况进行估算, 相应的 LT 进动分别为 34 mas/a 和 2 mas/a, 平面外的漂移分别为 0.62 m/a 和 0.10 m/a。前者 $\Delta i \approx 0.001^\circ$ 时, 系统误差可小于 1%; 后者 $\Delta i = 1^\circ$ 时, J_2 和 J_4 产生系统差分别为 11% 和 3%。除此以外, 火星的半径 R 和日心引力常数 GM 对测定 μ 系统差也有影响, 如果 $a = 9500$ km, $\delta R = 6080$ m, 则 J_4 和 J_6 引起系统误差为 6000% 和 500%; 即使 δR 为 40 m, J_4 和 J_6 引起系统误差可达 40% 和 5%, J_2 的影响 $\leq 11\%$ 。所以仅用一个近极卫星测量其 LT 效应是不可取的。

(2) 火星的 2 个自然卫星 Phobos 和 Deimos 相结合。为了减小系统差, 可能的方法是采用前面提及的地球卫星 Lageos-Lageos II 的方法, 用 Phobos ($a = 9380$ km, $i = 1.075^\circ$, $e = 0.0151$) 和 Deimos ($a = 23460$ km, $i = 1.793^\circ$, $e = 0.0002$) 相结合消除 δJ_2 、 $\delta R/R$ 和 GM 不确切的影响。此方法的缺陷是 Phobos 和 Deimos 定轨精度较差, NASA (National Aeronautics and Space Administration) 火星历书在径向、切向和垂直轨道分量 (out-of-plane orbital components) 精度为 1~10 km, 而引力磁漂移为 1~10 cm/a, 因此, 根据目前火星自然卫星的精度, 将引入一个噪声, 掩盖 LT 效应信号。

(3) 2 艘飞船 P1 和 P2。Van Patten 和 Everitt 首次提出相反运行轨道的两颗卫星 P1 和 P2^[9]。其中一颗为近极的, 它们的轨道半径分别为 $a_1 = 9500$ km 和 $a_2 = 9600$ km, 倾角分别为 $i_1 \approx 90^\circ$ 和 $60^\circ \leq i_2 \leq 89^\circ$, 偏心率分别为 0.01 和 0.03。这样, 两艘飞船由 LT 效应引起轨道平面外的漂移为 10 cm/a, 用 2 艘飞船相结合的方法可以完全消除 δR 的影响, 而且 MGS95J 引力模型中 δJ_2 、 δJ_4 、 δJ_6 引起的 $\delta\mu$ 好于 1%^[64]。

同样, 人们早就对木星的 LT 效应给予关注, 1959 年 Bogorodski 测量木卫五 Amalthea ($a = 181400$ km, $e = 0.0032$) 近木点幅角 ω 的世纪漂移为 112"; 1989 年, Soffel 测量木卫

一 Io 的世纪交点漂移为 $9''$ 。现在已用 VLBI 测定木星引力磁, 也提出用 Gaia 测量单极和四极质量矩引起光线的弯曲。另一方法是用 NASA 已批准的 Juno 飞船, 运行时间为 1 年^[65,66]。它已经于 2011 年 8 月 5 日发射绕木星旋转的极轨道飞船, 预计 2016 年 8 月进入绕木轨道, 近极 4300 km, 2017 年 10 月进入木星大气, 其轨道要素为 $a = 20.03$ km, $e = 0.947$, $i = 90^\circ$, 轨道周期 $P = 11$ d。木星卫星的大部分引力电磁信号在卫星初始状态矢量的估计过程中被吸收, 余留的信号约十几米, 而现在最好的观测精度为几十千米, 所以 Iorio 和 Lainey 提出用 2011 年发射的 Juno 飞船研究木星的引力磁, 详细讨论参阅参考文献 [67]。

5 测定太阳的 LT 效应

太阳的角动量 J 很小, 而行星的半长轴很大, 由公式 (6) 可知交点 Ω 和近日点 ω 的引力磁进动 LT 与 J/a^3 成正比, 为了精确测定太阳的引力磁进动^[68], 要求高精度的太阳角动量 J 。现在从全球太阳振荡监测网 (Global Oscillation Network Group, GONG) 的日震资料, 以及索贺太阳和日球层探测器 (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) 资料得到的 J 精确至几个百分点。对于水星、金星、地球和火星的引力磁交点进动 $\dot{\Omega}_{LT}$ 和其他原因 (如 J_2 、 J_4 、经典) 引起的进动列于表 2^[69]。

表 2 引力磁和经典的交点进动系数 ($''/100$ a)

进动	水星	金星	地球	火星
$\dot{\Omega}_{LT}$	1.008×10^{-3}	1.44×10^{-4}	5.4×10^{-5}	1.5×10^{-5}
$\dot{\Omega}_2$	-126 878.626 475	-13 068.273 031	-4210.107 706	-980.609 460
$\dot{\Omega}_4$	52.774 935	1.349 709	0.228 040	0.023 554
$\dot{\Omega}_{class}$	-446.30	-996.89	-18 228.25	-1020.19

虽然水星的交点进动较大, 但是此值处于目前观测灵敏度的边缘 ($0.002''/100$ a)。Standish 保守估计, 如果地球-水星的雷达测距精度由约 100 m 提高至约 10 m, 则水星交点位置的漂移将由 35% 提高至 3%。目前有二种方法测定太阳引力磁的 LT 效应。

5.1 发射新的飞船至行星

为了提高行星际测距精度, 2004 年 8 月 3 日发射 Messenger, 并在 2011 年 3 月进入绕水星轨道^[70]; ESA (European Space Agency) 将于 2015 年发射 BepiColombo (近拱点和远拱点分别为 400 km 和 1500 km 的极轨道卫星), 将于 2022 年 1 月到达水星, 运行 2 年, 它将改进测距精度至 2 cm^[71]。美国 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 的 Turyshev 等人根据 SIM 关于光学天体测量和计量的经验 (测距精度已达到 5 pm) 提出了 LATOR 项目^[72], 其最大特点是以往用雷达测量行星际的距离, 而此项目中采用了光学测距。LATOR 由 2 部分组成: (1) 运行在日心轨道的 2 个微型的飞船, 距太阳 1 au, 卫星与地球在太阳的两侧, 其光线通过太阳, 以便测量太阳引力场中光线的偏折; (2) 在国际空间站 (International Space Station, ISS) 放置基线 100 m 的多通道恒星光学干涉仪, 它接收飞船发射的激光束, 以便测量两个飞

船之间的夹角 θ (约 1°)。另外,如参考文献 [72] 中图 2 所示,测量两个飞船与 ISS 组成三角形的臂 t_1 、 t_2 、 t_3 。用欧几里得几何学,可以计算在 ISS 处看两个飞船的夹角,与干涉仪测量的角度比较,即太阳引力产生的光线偏折。用光学技术测定太阳引力偏的优点为:(1) 采用低带宽通讯;(2) 用单色光能在太阳边缘观测飞船;(3) 用窄带滤波器、日冕仪光学和超外差检测将减小背景光,使太阳背景不再是主要噪声源;(4) 短波更容易采用小口径,而不需展开的天线;(5) ISS 处在大气之上,消除了地面干涉仪主要的天体测量噪声。LATOR 是探测太阳系宇宙演化标量场 MM 试验的 21 世纪版,它的科学目的主要是测量由太阳引力导致的光线偏折,精度约为 $0.02 \mu\text{as}$ (相应于 100 m 干涉基线约 10 pm 的精度)。其次,用卫星和 ISS 之间测距得到 PPN 参数 γ ,精度为 10^{-8} ,比现在 Cassini 飞船测定值好 3000 倍;测定至今未能测得的 PPN 参数 δ ,精度为 2×10^{-3} ;太阳四极矩参数 J_2 精度至 $1/20$;测定 LT 效应的精度至 10^{-2} 。

除此以外,研究太阳引力场的还有 ASTROD (Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices),测太阳扁率至 10^{-8} 或 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ ^[73],STEP (Space Test of Equivalence Principle)^[74]。

5.2 采用 Ciufolini-Iorio 归算方法

Ciufolini-Iorio 提出用水星、金星和火星交点的轨道残差的线性结合,以减小测量水星 LT 近日点进动的 2 种系统差:(1) 太阳的扁率影响。如果它的不确定性 $\sigma J_{2\odot} = 0.4 \times 10^{-7}$,则近日点黄经 ($\Pi = \omega + \Omega \cos i$) 的 LT 漂移为 245%,现在从 LT 进动得到在各种太阳模型中太阳角动量的不确定性为 10%。(2) N 体经典长期进动的影响。它在 $(100'' \sim 1000'')/100 \text{ a}$ 量级,与 LT 进动同量级或更大^[75]。采用内行星交点线性结合的方法,其公式如下^[69]:

$$\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Mercury}} + k_1\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Venus}} + k_2\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Mars}} \approx X_{\text{LT}}\mu_{\text{LT}}, \quad (10)$$

其中 k_1 、 k_2 和引力磁趋势的斜率 X_{LT} 可从表 2 的数据计算,它们分别等于 -10.441702 、 9.765758 和 $-0.000351''/100 \text{ a}$ 。 $\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Mercury}}$ 、 $\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Venus}}$ 、 $\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Mars}}$ 分别表示水星、金星和火星交点残差的时间序列,3 个交点的结合消除了太阳扁率和 J_4 残差效应引起的 N 体进动影响(以水星为例, $\delta\dot{\Omega}_{\text{obs}}^{\text{Mercury}} = \dot{\Omega}_2^{\text{Mercury}}\delta J_2 + \dot{\Omega}_{\text{class}}^{\text{Mercury}} + \dot{\Omega}_{\text{LT}}^{\text{Mercury}}\mu_{\text{LT}} + \Delta^{\text{Mercury}}$,式中 Δ 为其他没有模拟的效应,如太阳的八极质量矩引起的进动),从而得到 LT 参数 μ_{LT} 。这种方法得到的精度为 36% (1σ)。

6 结束语

除了用太阳系行星验证广义相对论的引力理论以外,也可以用脉冲双星、X 射线双星和银心 Sgr A* 附近红外 S 系统恒星进行验证。

脉冲星双星的主星是脉冲星,伴星可以是一颗中子星或一颗白矮星。前者有 PSR 1913+16 (质量分别为 1.442 和 $1.386 M_\odot$,距离 6400 pc , $e = 0.6171$, $a \sin i = 7.02069 \times 10^5 \text{ km}$, $p = 279.07 \text{ s}$,脉冲周期 59 ms),后者有 PSR 0348+0432。也有的脉冲星双星,主星和伴星都是

脉冲星, 如 PSR 0737-3039。最著名的是 1974 年 9 月 Hulse 和 Taylor 用 Arecibo 天文台 305 m 天线发现的 PSR 1913+16, 至 1983 年 8 月积累了 3300 次观测, 与 1964 年 Shapiro 用光线传播的时延方法测定太阳系内天体的距离一样, 脉冲信号通过伴星引力场得到时延 $25 \mu\text{s}$ ^[76], 这是首次在太阳系外观测到引力传递延迟。继后, 利用 1981 年 2 月—1987 年 2 月对该脉冲双星的 6 年观测资料, 得到脉冲星旋转轴的测地进动, 近星点进动的平均速率为 $(4.2263^\circ \pm 0.00003^\circ)/\text{a}$ ^[77,78]。由于对此系统的发现和研究, Hulse 和 Taylor 获得 1993 年诺贝尔物理学奖, 此星也称为 Hulse-Taylor 脉冲双星。

X 射线双星是最亮的 X 射电源, 它是由一颗致密的天体 (中子星或黑洞) 和一颗绕着其质心运动的伴星组成。在双星演化到某阶段时, 两颗星非常靠近, 使得在主星引力的影响下, 伴星上层大气的物质将流向主星, 这是“洛希瓣流”的物质吸积过程, 在轨道运动中由于绕主星运动的吸积物质具有大角动量, 逐渐形成了一个吸积盘。因为吸积物质的旋涡向着主星, 且在此粘滞过程中损失角动量, 使得主星的引力能量转化为热能。根据物质吸积的速率, 内吸积盘的温度可达到 1000000°C , 因此产生了 X 射线。1998 年 Cui 等人对一个包括吸积中子星的小质量 X 射线双星 (如 GRO J1655-40 和 GRS 1915+105) 进行观测, 在其光变曲线中观测到 0.001~10 Hz 准周期振动 (quasi-periodic oscillations, QPO) 现象, 对于 GRO J1655-40 和 GRS 1915+105 而言, 其 QPO 频率分别为 300 Hz 和 67 Hz, 而 GS 1124-68 和 Cys X-1 为 8 Hz 和 9 Hz。它们的产生是由于围绕一个旋转黑洞转动而导致的相对论 LT 效应 (即吸积盘的进动), 如果进动不在黑洞的赤道面上, 则可以观测到^[79], 因此观测 X 双星的旋转黑洞的 QPO 可验证 LT 效应。

1992 年 Gillessen 等人第一次观测到近银心 Sgr A* 附近的 S2, 2002 年通过近星点, 至 2007 年绕银心运行一周。广义相对论预测: (1) 轨道周期为 15 a 的 S2 星近星点具有 0.2° 进动; (2) 在银心巨大质量的作用力下, Schwarzschild 度规引起顺行进动时, 从天体物理观点来看可能有反作用效应存在, 即在银心附近有一个至今未观测到的扩展的分量 (如 X 射线双星、大质量星的遗迹等), 其产生的附加力引起了一个逆行进动。这两个效应都与离中央质量的距离有关, 因此观测 S 系统的星可以测量这两个效应。另外, 银心提供了唯一可观测许多强引力效应 (如引力红移、多普勒位移增强和多像现象等) 的天然实验室^[80]。

随着太阳系空间探测的开展, 从 1961 年至今, 已积累几十万次的行星雷达测距资料 (主要是内行星, 经过和绕这些行星旋转的飞船和火星着陆器的雷达观测), 如探测火星 MSG、Mars Odyssey、MRO、Phobos-Grunt mission^[81]等, 木星的 Juno 和水星的 BepiColombo。这些资料用于编历和广义相对论的验证, 如 GP-B 测定 γ 为 10^{-4} ^[24], Cassini 飞船测定 γ 为 2.3×10^{-5} (现在精度最高的值)^[82]。今后用这些资料测定有关参数的精度将更高, 如 BepiColombo 测定太阳的 J 达 3×10^{-8} 。

我国已开始太阳系的探测活动, 紫金山天文台李广宇研究员在编制 PMO03 行星历表时首先应用了行星间雷达资料^[83], 但是没有同时推算太阳的扁率 J_2 和 PPN 参数 γ 和 β 。今后随着相对论验证实验的开展, 如木星掩射电源时, 用 VLBI 检验引力偏折, 以及用 SLR 验证 LT 效应等, 应组织各方面人员联合进行研究。从 1967 年开始研制大型环形激光陀螺, 至 20 世纪 90 年代有了迅速发展, 2004 年 3 月 24—25 日在 Wettzell 专门召开了“环形激光陀螺

仪与地球自转”工作会议。自2009年后G环形激光陀螺仪连续监测地球自转、检测钱德勒和周年极移的结果。在20世纪70年代,上海天文台曾继上海光机所后,开展过用2 m×2 m的RLG监测地球自转,但是由于该实验对技术和环境要求很高,在当时的条件下无法继续进行,因此中止了此项目。RLG是研究地球物理的新设备,我国地球物理和相对论工作者应密切关注其发展,在合适的环境条件下开展此项目。

参考文献:

- [1] Will C M. Living Rev.Relativity, 2006, 9: 1
- [2] Lense J, Thirring H. Physikalische Zeitschrift,1918,19: 156
- [3] Kaula W M. Theory of Satellite Geodesy, Applications of satellites to geodesy, Mass: Blaisdell, 1966
- [4] Schiff L L. Physical Review Letters, 1960, 4: 215
- [5] Schiff L L. American Journal of Physics, 1960, 28: 340
- [6] De Sitter W. MNRAS,1916, 77: 155
- [7] Ciufolini I. Celestial Mechanics,1987, 40: 19
- [8] Iorio L. Adv. Space Res. 2007, 39: 236
- [9] Van Patten, Everitt C W F. Physical Review Letters, 1976, 36: 629
- [10] Ciufolini I. Il Nuovo Cimento, 1996, 109: 1709
- [11] Ciufolini I, Pavlis E, Chieppa F, et al, Science, 1998, 279: 2100
- [12] Ciufolini I, Matzner R. Int. J. of Mod. Phys. A, 1992, 7: 843
- [13] Lucchesi D M. Plan. And Space Sci., 2002, 50: 1067
- [14] Iorio L. Int. J. of Mod. Phys. D, 2002, 11: 781
- [15] Iorio L. Class. And Quantum Gravity, 2002, 19: 5473
- [16] Ciufolini I, Pavlis E. Nature, 2004, 431: 958
- [17] Iorio L, Doornbos E. General Relativity and Gravitation, 2005, 37: 1059
- [18] Iorio L, Ciufolini I, Pavlis E. Classical and Quantum Gravity, 2004, 21: 2139
- [19] Lämmerzahl C, Dittus H, Peters A, et al. Classical and Quantum Gravity, 2001,18: 2499
- [20] Lämmerzahl C, Ciufolini I, Dittus H, et al. General Relativity and Gravitation, 2004, 36: 2373
- [21] <http://www.lares-mission.com/>, 2014
- [22] Ciufolini I, Paolozzi A, Pavlis E, et al. LARES Phase –A Study, Rome; LARES, 1998: 16
- [23] Iorio L, Morea A. General Relativity and Gravitation, 2004, 36: 1321
- [24] Everitt C W F, DeBra D B, Parkinson B W, et al. Physical Review Letter, 2011, 106: 221101
- [25] Brilliet A, Hall J L. Phys. Rev. Lett, 1970, 42: 549
- [26] Hill D, Hall J L. Phys. Rev. Lett, 1990, 64: 1697
- [27] Godone A, Novero C, Tavella P. Phys. Rev. D, 1995, 51: 319
- [28] Murphy T W, Adelberger Jr E G, Battat J B R, et al. PASP,2008, 120: 20
- [29] William J G, Dicket J O. Proceedings of 13 th International Workshop on Laser Ranging, Washington D C: NASA, 2003
- [30] Dickey J O, Bender P L., Faller J E, et al. Science,1994, 265: 482
- [31] William JG, Dicke R H, Bender P L, et al. Phys. Rev. Lett., 1976, 36: 551
- [32] William J G, Newhall X X, Dicket J O. Phys. Rev. D, 1996, 53: 6730
- [33] Muller J, Williams F. Phys. Rev D, 1998, 58: 200
- [34] Nordtvedt K. Class. Quantum Grav, 1999, 16: 101
- [35] Williams J G, Turyshev S G, Murphy Jr W. International Journal of Modern Physics D, 2004, 13: 567
- [36] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. arXiv: gr-qc/1203.2150v1, 2012

- [37] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93: 261101
- [38] Murphy T W, Nordvedt K, Turyshev S. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 98: 071102
- [39] Kopeikin S M. arXiv:0809.3392, 2008
- [40] Sagnac G. *Comptes-Rendus de l' Académie des Sciences*, 1913, 157: 708
- [41] Macek W, Davis D T M. *Applied Physics Letters*, 1960, 2: 67
- [42] Schreiber K U, Schneider M, Rowe C H, et al. *Survey in Geophysics*, 2001, 22: 603
- [43] Schreiber K U, Velikoseltsev A, Rothacher M, et al. *J. Geophys. Res.* 2004, 109: B06405
- [44] Schreiber K U, Klugel T, Velikoseltsev A, et al. *Pure Appl. Geophy.*, 2009, 166: 1485
- [45] Stedman G E. *Report on Progress in Physics*, 1997, 60: 615
- [46] Schreiber K U, Klugel T, Wells J-P R, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 107: 173904
- [47] Nilsson T, Bohm J, Schuh I. *Journées 2001 Systemes de Reference Spatio-Temporels*, Paris: Observatoire de Paris, 2012: 152
- [48] Nilsson T, Bohm J, Schuh H, et al. *J. Geodynamics*, 2012, 10: 1016
- [49] Schreiber K U, Klügel T, Stedman G E. *J. Geophys Res*, 2003, 108: 2132
- [50] Dehnen H. *Z Natforschung*, 1967, 22: 816
- [51] Stedman G E, Schreiber K U, Bilger H R. *Classical and Quantum Gravity*, 2003, 20: 2527
- [52] Scully M O, Zubairy M S, Haugan M P. *Phys. Rev. A*, 1981, 24: 2009
- [53] Soffel M H, Herold H, Ruder H, et al. *Astron.-Geod. Arb.*, Heft , 1986, 48: 237
- [54] Soffel M H, Tian W. *Journées 2001 Systemes de Reference Spatio-Temporels*. Paris: Observatoire de Paris, 2012: 35
- [55] Dunn R W, Shabalin D E, Thirkettle R J, et al. *Appl. Opt.* 2002, 43: 1685
- [56] Hurst R B, Stedman G E, Schreiber, et al. *J. Appl. Phys.* , 2009, 105: 113115
- [57] Stedman G E, Bilger H R, Ziyunan Li, et al. *Aust.J. Phys.*, 1993, 46: 87
- [58] Stedman G E, Li Z, Bilger H R. *Appl Opt*, 1995, 34: 7300
- [59] Mendes Cerveira P J, Böhm J, Schuh H, et al. *Pure and Applied Geophysics*, 2009, 166: 1499
- [60] Bosi F, Cella G, Di Virgilio A, et al. arXiv:1105.5072v1 [gr-qc], 2011
- [61] Krainov V A, Zharov K E. *Proceedings of EGS General Assembly*, The Hague: EGS, 1996
- [62] Konopliv A S, Yoder C F, Standish E M, et al. *Icarus*, 2006, 182(1): 23
- [63] Iorio L. *The Measurement of Gravitomagnetism: A Challenging Enterprise*. Hauppauge: NOVA Publishers, 2007: 183
- [64] Iorio L. *General Relativity and Gravitation*, 2009, 41: 1273
- [65] Iorio L. *New Astron.*, 2010, 15: 554
- [66] <http://juno.wise.edu/index.html>, 2014
- [67] Iorio L, Lainey V. *Int. J. Mod. Phys.* 2005, 14: 2030
- [68] Iorio L, Lichtenegger H I M, Ruggiero M L, et al. *Astrophys. Space Sci.*, 2011, 331: 351
- [69] Iorio L. *A&A*, 2005, 431: 385
- [70] <http://messenger.jhuapl.edu/>, 2014
- [71] <http://sci.esa.int/BepiColombo>, 2014
- [72] Turyshev S, Shao M, Nordvedt K. *Class. Quantum Grav.* 2004, 21: 2773
- [73] Ni Wei-Tou, Shiomi S, Liao An-Chi. *Classical and Quantum Gravity*, 2004, 21: 641
- [74] Mester J, Torii R, Worden P, et al. *Classical and Quantum Gravity*, 2001, 8: 2475
- [75] Iorio L. *A&A*, 2005, 433: 385
- [76] Weisberg J M, Taylor J H. *Physical Review Letters*, 1984, 52: 1348
- [77] Nordvedt K. *Int. J. Theor. Phys.* 1988, 27: 1396
- [78] Weisberg J M, Romani R W, Taylor J H. *ApJ*, 1989, 347: 1030
- [79] Cui W, Zhang S N, Chen W. *ApJ*, 1998, 492: L53
- [80] Gillessen S, Genzel R, Eisenhauer F, et al. *IAUS*, 2008, 248: 466
- [81] http://www.russianspaceweb.com/phobos_grunt.html, 2014
- [82] Bertotti B, Loss L, Tortora P. *Nature*, 2003, 425: 374

[83] 李广宇, Ni W T. 紫金山天文台台刊, 2003, 22: 3

Gravitomagnetism and Lense-Thirring Effect of the Sun and Planets in the Solar System

JIN Wen-jing

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: The general situation of gravitational experiments in the fundamental physics, especially the progress of measuring the Lense-Thirring effect induced by a test particle orbiting around a central rotating body, such as the Earth, is outlined. The Schiff formula which is a fundamental formula to describe the motion of a particle in the Gravitoelectromagnetic (GEM) field of a central rotating body, is given. Various methods, such as Satellite Laser Ranging (SLR), GP-B, Lunar Laser Ranging (LLR) and Ring Laser Gyroscope (RLG), to measure the Lense-Thirring effect are introduced. Especially, the application in Geophysics with RLG, such as earthquake, tide, earth rotation, polar motion, is presented. The present and future planes to measure the Lense-Thirring effect in high accuracy, such as LARES, OPTIS etc. are introduced. The situation of measuring Lense-Thirring effect of Martian gravitational field with MGS Doppler and range data or observing data of Martian natural satellites, Phobos and Deimos is indicated. The suggestion to lunch Martian mission in the future is also given. The measurement of the Lense-Thirring in Solar Gravitomagnetic field is described with the presently available planetary ranging to Mercury, Venus and Mars. The future plan LATOR to test the general theory of relativity is introduced with the International Space Station (ISS). Finally, The general relativity effect of gravitational field in binary pulsar, X-ray binary and the system of S-stars in infrared band near the Galactic center Sgr A* is briefly introduced. The situation about the experiments to confirm the relativistic theory in China with the tracking and ranging data in the planetary space and some suggestions to develop this work are mentioned.

Key words: solar system; Lense-Thirring effect; Satellite Laser Ranging; Lunar Laser Ranging; Ring Laser Gyroscope