

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.02.04

脉冲星计时技术及其应用

金文敬

(中国科学院 行星科学重点实验室 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 简述脉冲星发现和计时观测的概况。文中概述脉冲星计时的物理模型和计算用的各种软件, 特别是全球广泛应用的 TEMPO2 软件, 并描述脉冲星计时阵的概念和国际脉冲星计时阵。对脉冲星计时观测应用: 建立脉冲星时标、改进行星历表 (包括外行星质量测定和海外天体的发现)、检测引力波、测定脉冲星的旋转和天体测量参数、脉冲星自主导航、相对论引力理论的验证等作了介绍。最后, 对我国开展此项工作的情况给予简要描述, 并提出若干建议。

关键词: 脉冲星; 脉冲星计时; 脉冲星计时阵; 脉冲星自主导航; 验证相对论引力理论

中图分类号: P129

文献标识码: A

1 引 言

1932 年, Chadwick 提出中子星的存在; 1967 年 10 月, Bell 和其导师 Hewish 发现第一颗周期为 1.337 301 192 27 s 的脉冲星 PSR 1919+21, 即快速旋转和强磁场的中子星^[1]。它是 20 世纪 60 年代天文学四大发现 (星际有机分子、类星体、宇宙微波背景辐射和脉冲星) 之一。1974 年, Hulse 和 Taylor 发现了第一颗脉冲双星 PSR B1913+16, 即 Hulse-Taylor 脉冲星。这两次发现都获得了诺贝尔奖^[2]。1982 年 Backer 等人发现了周期为 1.557 708 ms 的第一颗毫秒脉冲星 PSR B1937+21^[3]。1992 年, Wolszczan 和 Frail 发现了第一颗带有行星系统的脉冲星 PSR B1257+12^[4]。2003 年, Burgay 发现了第一颗双脉冲星系统 PSR J0737-3039^[5]。脉冲星的计时观测给宇宙学、引力学和中子星物理, 以及天体测量和太阳系力学研究带来新的发现, 取得新的结果, 如 (1) 1992 年 Wolszczan 和 Frail 发现绕脉冲星的系外行星^[4]; (2) 1975 年, Hulse 和 Taylor 研究脉冲中子星的双星系统, 首次在观测中证明了引力波 (Gravitational Waves, GW) 的存在; (3) 2006 年 Kramer 等人通过脉冲星观测检验广义相对论的宇宙弦 (cosmic string) 试验^[6]。在超新星爆发形成中子星时, 会通过各种方式显示, 如脉冲星、反常 X 射线脉冲星 (Anomalous X-ray Pulsars, AXPs)、软 γ 射线再现

收稿日期: 2015-12-04; 修回日期: 2016-03-07

资助项目: 国家自然科学基金项目 (11373058, 11273044, 11273045, 11473057, U1431117)

通讯作者: 金文敬, jwj@shao.ac.cn

源 (Soft Gamma-ray Repeaters, SGR) 和射电宁静中子星。这些天体具有极强的磁场, 其辐射过程在射电、光学、X 和 γ 波段都能观测到。

除了地基观测脉冲星之外, 20 世纪 90 年代有许多空间仪器观测脉冲星, 如 HST、ROSAT、ASCA、BeppoSAX、RXTE 和 Compton Gamma-Ray Observatory; 1999 年下半年发射的 Chandra X 射线天文台 (当时称为 Advanced X-ray Astrophysics Facility, AXAF) 和 XMM-Newton (也称为 X-ray Multi-Mirror Mission and High Throughput X-ray Spectroscopy Mission)。随着地基射电天文台和光学望远镜的更新换代, 如 Keck, GEMINI, Subaru 和 VLT, 给出许多新的令人振奋的成果。2005 年发射 X 射线天文台 SUZAKU (以前称 ASTRO-E2), γ 射线天文台 AGILE (Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero) 和 GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope, 现在改称为 Fermi Gamma-ray Space Telescope, FGST) 已分别于 2007 年 4 月和 2008 年 6 月发射。下一代射电、光学和 X 射线仪器有: LOFAR (Low Frequency Array)、SKA (Square Kilometer Array)、JWST (James Webb Space Telescope)、E-ELT (European Extremely Large Telescope)、eROSITA、IXO (International X-ray Observatory) 等^[7]。特别是各国的单射电天线都有开展脉冲星巡天的计划, 如澳大利亚 Parkes 64 m 天线的 Parkes Multi-beam Pulsar Survey (PMPS)^[8], 美国 Arecibo 305 m 天线的 PALFA 巡天 (Pulsar Arecibo L-band Feed Array)^[9,10]。我国研制的 FAST (Five Hundred meter Aperture Spherical Telescope) 的科学目标也有低频脉冲星的巡天计划。同时也开展了国际合作研究, 如 IPTA (International Pulsar Timing Array)^[11,12], 澳大利亚 Parkes、德国 Effelsberg 射电望远镜、英国 Manchester 大学、意大利 INAF 组成的国际合作项目 HTRU (High Time Resolution Universe) 等^[13]。

脉冲星的研究内容有脉冲星演化, 包括其形成和死亡; 用脉冲信号探测中子星内部的物理性质, 如磁层的模型和无线电波发射的机制; 研究星际介质的不规则性^[14,15]; 检测低频引力波; 改进太阳系历表; 建立脉冲星时标^[16]。另外, 还研究脉冲星自转与天体测量参数的测定^[17,18]; 脉冲星自主导航^[19], 以及检验相对论引力理论等^[20,21]。

本文第 2 章描述脉冲星计时模型, 包括计算的步骤; 第 3 章介绍脉冲星计时阵的情况, 特别给出了澳大利亚 Parkes 计时阵的观测计划; 第 4 章叙述脉冲星计时观测资料的应用, 如检测引力波, 改进历表、建立一个新的时标——脉冲星时、测定脉冲星的自转与天体测量参数, 以及自主导航和验证相对论引力理论等; 第 5 章简述我国正在开展这方面工作的情况。

2 脉冲星计时模型

现在处理脉冲星 TOA (Time of Arrival) 的软件有: Jodrell Bank 天文台的 PSRTIME, 马普射电天文研究所的 TIMAPR, Nançay 射电天文站的 ANTIOPE, Hartebeesthok 射电天文台的 CPHAS, Princeton 大学和澳大利亚望远镜国家设备 (Australia Telescope National Facility, ATNF) 的 TEMPO (这个软件也称 TEMPO1, 精度约为 100 ns, 改进后称为 TEMPO2, 精度为 1 ns)。它是由 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research

Organization), ATNF 的 Hobbs 和 Edwards 在 TEMPO 基础上编制的^[22-25]。TEMPO2 是唯一与 IAU 2000 决议一致的计时软件, 它采用最新的岁差和章动模型、参考系和时间。TEMPO2 作了以下改进: (1) 改正了极移; (2) 加入了由于行星产生的 Shapiro 效应和由于太阳产生的二阶 Shapiro 延迟; (3) 执行了与频率有关的拟合 (不是简单的色散量延迟); (4) 能显示任意一个自转突变事件 (glitch)、轨道伴星、脉冲频率导数和色散量导数; (5) 用傅里叶技术“白化 (whitening)”计时残差; (6) 双星模型中包括周年轨道视差^[24]。它的主要部件, 如 BASIC、CALCDM、Fake、PLK 等, 可参阅文献 [22] 中的附录 A 和网址^[25]。现在 TEMPO2 已经代替 TEMPO 和 PSRTIME 软件。下面将详细介绍脉冲星计时观测资料的处理。

2.1 站心 TOA 的测量

观测记录是以观测台站的标准钟作时间参考。通过日常的时间比对, 将观测台站的标准钟校正到国际标准时间系统, 如 TAI (Temps Atomique International) 或 TT (Terrestrial Time) 标准时间系统, 以保证计时观测是以国际上最高精度的时间系统为参考。每次观测信号经过积分、消色散、周期折叠, 产生一个平均脉冲的强度轮廓 (也称为积分脉冲轮廓)。考虑到观测信噪比, 每几分钟记录平均轮廓。轮廓上任一特定点, 都可视为相应于自转相位的某一特定值, 例如以脉冲波形的峰值点作为测量的基准点。通过每次观测所得到的平均脉冲轮廓, 与利用同一颗脉冲星同一波段大量计时观测资料事先已建立好的标准模型脉冲轮廓进行比较, 获得每次观测到的脉冲到达台站时刻 TOA。经验显示, 一颗脉冲星在一个特殊的观测频率记录的轮廓与其同一波段的标准模型脉冲轮廓之间有偏差: 包括相位零点差、尺度因子、时间偏离, 以及附加的随机噪声。换言之, 每个观测轮廓 $p(t)$ 与一个相应的“标准轮廓” $s(t)$ 有以下的关系式:

$$p(t) = a + bs(t - \tau) + g(t) \quad , \quad (1)$$

式中相位零点差 a 、尺度因子 b 、时间偏离 τ 是 3 个待定参数, $g(t)$ 是一个随机变量, 表示辐射计和背景的噪声, $0 \leq t \leq P$, 此处 P 是观测台站接收脉冲的周期。通常轮廓分别在 $t_j = j\Delta t$ ($j = 0, 1, 2, \dots, N-1$, $\Delta t = P/N$, N 为整数) 处分别取样, 测量 TOA 的问题是尽量精确地决定时间偏离 τ , 并加至观测记录开始时间上。参考文献 [20] 的附录给出处理这方面资料的过程。

2.2 TOA 的计时模型

2.2.1 坐标与时间系统

脉冲星计时观测中采用短期稳定的钟, 如氢脉泽, 通过与 GPS 卫星发播的信号和 GPS 共视方法换算至该国家的时标, 如澳大利国家计量研究所维持了国家时标 UTC (AUS)。用 BIPM 每月发表的 Circular T 换算至协调世界时 UTC, 它与 TAI 的区别在于“闰秒”, 通过 IERS 的 Bulletin C 得到的 TAI 是长期稳定的时标。

时钟改正值是把以 TT 为参考的测站 TOA 修正到地心参考系 GCRS 的坐标时 TCG, TCG 与 TT 只有常数的速率差, 即 $dTT/dTCG = 1 - L_G$, L_G 为一个定义常数。TT 时间系统是 BIPM 在保持 TAI 的基础上, 利用国际上大量原子钟长期守时资料和频

率基准钟资料, 事后重新处理得到的, 因而 TT 的准确性和稳定性要好于 TAI, 也更适合于脉冲星计时观测应用。目前, BIPM 每年更新 TT 一次, 例如 TT (BIPM13) 和 TT (BIPM14) 分别是 BIPM 于 2013 年和 2014 年重新处理和发表的 TT 时间系统。脉冲星计时观测资料分析严格遵循关于国际天球参考系与时间尺度的 IAU2000 决议。TT 到 TCB 的转换可以用太阳系行星与月球历表, 如 DE、EPM 和 INPOP 历表系列的地球时间历表 (Time Ephemeris of the Earth 或缩写为 Time Ephemeris, TE)^[26]。此换算过程为 Δ_c 。

脉冲星的计时模型分为以下 3 个部分: (1) TOA 观测值计算, 先把观测台站的 TOA 转化为太阳质心为参考的 TOA, 然后把以太阳质心为参考的 TOA 转化为脉冲星框架下的脉冲发射时刻; (2) TOA 理论值的计算, 根据脉冲相位计时模型 (包括脉冲星有关参数) 得到预测 TOA; (3) 观测方程式的建立。

2.2.2 观测的 TOA 计时公式

TOA 观测值“O”的计算: 把观测时刻的 TOA (在观测台站接收信号的时刻加上钟的改正和观测台站至脉冲星欧几里得 (Eucliden) 距离引起的时延) 转化为太阳质心为参考的 TOA; 然后把以太阳质心为参考的 TOA 转化为脉冲星框架下的脉冲发射时刻。

$$t_e^{\text{psr}} = t_a^{\text{obs}} - |R|/c - \Delta_c - \Delta_{\odot} - \Delta_{IS} - \Delta_B, \quad (2)$$

式中 t_e^{psr} 为在脉冲星静止坐标系中脉冲发射时的时刻, t_a^{obs} 为脉冲观测时刻的 TOA, 以 TT 表示, $|R|$ 为天文台至脉冲星的欧几里得距离, 太阳系质心的 TOA 为 $t_a^{\text{SSB}} = t_a^{\text{obs}} - \Delta_{\odot}$, 即台站测量的 TOA 转至太阳系质心处的 TOA (TCB)。星际空间的传递时间 Δ_{IS} 即 $t_a^{\text{BB}} = t_a^{\text{SSB}} - \Delta_{IS}$ 。双星伴星的影响 Δ_B , 即 $t_e^{\text{psr}} = t_a^{\text{BB}} - \Delta_B$, 它包括从双星质心 (Binary Barycentre, BB) 参考架转换至脉冲星参考架。详细的公式推导参阅文献 [23], 在此不再赘述。

一旦脉冲星发射时刻 t_e^{psr} 获得, 如果其旋转周期 $P = 1/\nu$ (ν 为脉冲的频率, 以 s^{-1} 表示), 则观测时的相位 $\phi(t_e^{\text{psr}}) = t_e^{\text{psr}} - NP$, N 为最接近 t_e^{psr} 的整数。

2.2.3 脉冲相位预测模型

脉冲星计时观测资料处理是个逐步逼近的迭代过程。观测脉冲轮廓的建立、精确脉冲星参数的测量, 都需要事先知道脉冲星参数的近似值。首先, 以近似值作为采样值对计时观测资料进行分析和参数拟合, 从而获得脉冲星参数的改正值。通过迭代, 最终获得满意精度的脉冲星参数。根据已知的脉冲星计时模型参数 (包括脉冲星自转参数与其天体测量参数) 可以预测脉冲星自转相位和脉冲到达观测台站的 TOA。预报模型 (即 TOA 理论值 C 的计算) 可用泰勒展开式表示^[22,23]。

$$\phi(t) = \phi_0 + \sum_{n \geq 1} \frac{\nu^{n-1}}{n!} (t_e^{\text{psr}} - t_p)^n, \quad (3)$$

公式中 $\phi(t)$ 为脉冲星静止坐标系 t 时刻的相位, $\nu = 1/P$, 即脉冲星自转周期的倒数, t_p 为脉冲星参数的参考历元, 一般选择处理资料段中央的历元的一个整数 MJD , 对一个观测台站和观测频率而言, 预测的脉冲相位为一个整数, 这些参数都是已知量。由公式 (3) 可以预测任一时刻脉冲星的自转相位。预测的整数相位乘以预测时刻脉冲星的自转周期, 得到预测

的脉冲发射时刻。进而利用脉冲星天体测量参数与观测台站的位置坐标可以计算得到预测的脉冲到达的 TOA。对于地面射电望远镜观测而言, TOA 的预报还与观测频率有关。对毫秒脉冲星而言, 自转周期很稳定, 周期变化率很小, 频率导数 $\dot{\nu}$ 的典型值约为 10^{-19} 。通常可略去频率二阶导数 $\ddot{\nu}$ 以上的项。当 $n = 3$ 时, 上式为 $\phi = \phi_0 + \nu t + \frac{1}{2}\dot{\nu}t^2 + \frac{1}{6}\ddot{\nu}t^3$, 式中 ϕ_0 为 $t = 0$ 时的绝对相位。在 TEMPO2 软件中, 给出了预测模型的计算^[23]。

2.2.4 观测方程式的建立

用脉冲星参数近似值、脉冲发射的时间或相位和计时模型得到事前残差 $R_i = O - C$, 即

$$R_i = \frac{\phi_i - N_i}{\nu}, \quad \chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{R_i}{\sigma_i} \right)^2, \quad (4)$$

式中 ϕ_i 是基于脉冲星计时模型由脉冲星参数近似值计算得到的, ν 是脉冲星脉冲频率采用值, N_i 对应于观测得到的第 i 个 TOA, N_i 为最接近 ϕ_i 的整数。由于参数采样值存在误差, 必然会影响计时残差 R_i , 称为拟合前残差或事前残差。利用观测得到的 TOA 序列所对应的计时残差序列, 基于脉冲星计时模型, 拟合得到脉冲星参数采样值的改正值。参数拟合是个迭代过程。拟合事前残差的方法采用线性奇异值分解、加权的最小二乘法或自举技术 (bootstrap technique)。在 TEMPO 中事前时间残差拟合仅 1 次, 而 TEMPO2 为多次, 直至拟合后的计时残差没有任何系统性趋势为止。对于存在明显计时噪声的脉冲星, 可以拟合“白化”后的事前残差改进脉冲星参数, 用此得到脉冲星的孤立参数 (individual parameters)。然后重复上述步骤, 得到的残差称为事后残差, 用此残差序列可得到全局参数 (global parameters), 即钟的误差、历表误差和引力辐射影响等^[14]。此运算流程可参阅文献 [27] 中图 1。TEMPO 计算模型中给出解算每个参数 ξ 的偏微分 $\partial\varphi/\partial\xi|_t$, 参数中包括天体测量和旋转参数、轨道参数和后开普勒 (post-Keplerian, PK) 参数^[21]。

2.3 计时残差中噪声处理

本节描述计时模型的第 3 步。脉冲星计时残差是测量脉冲相位与用脉冲星计时模型预测相位之差, 或者等同于脉冲到达时间的差值。首先需要对噪声进行处理, 然后模型中的参数可以通过拟合白化后的计时残差得到改进^[24]。

通常脉冲星辐射输出造成能量损耗, 自转能量随脉冲辐射而逐渐消耗, 它的自转连续地变慢, 但是计时噪声中第一类不规则变化是自转突然变快, 以后经过几天或几年后又恢复。如蟹状星云 PSR B0531+21 (J0534+2200, 年龄只有 1 300 年), 1969 年 9 月 28 日、1971 年 10 月和 2000 年 7 月都发生了跃变; 船帆座 PSR B0833-45 (J0835-4510) 也有类似情况, 在 1969 年 2 月 24 日至 3 月 3 日周期突然减小, 1971 年 8 月 21 至 9 月 4 日又一次减小。普遍认为中子星有一个固体外壳和内部的超流体, 两类物质角动量交换引起了不可预测的星震或自转, 所以改变了自转速率, 脉冲频率突然增加, 相对幅度 $\Delta\nu/\nu$ 为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$, 它称为自转突变 (glitch) 事件^[28-30]。不少学者研究它与各种参数的关系, 以便寻找此事件的机制和物理模型。2010 年, Hobbs 等人分别讨论 366 颗脉冲星计时观测, 给出了样本中脉冲星的 ν 、 $\dot{\nu}$ 、 $\ddot{\nu}$ 、 Δ_8 和 σ_z , 他们曾研究自转突变与特征年龄、表面磁场强度和能量损失速率等的关系, 其结论为: (1) 在此样本中 $\ddot{\nu}$ 负值几乎占一半, 由于磁场的偶极辐射, 脉冲星将有一个

正的 $\ddot{\nu}_{\text{dipole}}$, 而且观测的 $\ddot{\nu}$ 大于 $\ddot{\nu}_{\text{dipole}}$ 许多量级, 所以 $\ddot{\nu}$ 不可能给出脉冲星转慢机制的信息; (2) 测量的 $\ddot{\nu}$ 与所用资料的时间跨度有关, 时间跨度短的资料测量的 $\ddot{\nu}$ 在平均值附近变化, 所以, $\ddot{\nu}$ 不是磁场偶极辐射或其他旋转能量引起的, 而是由计时噪声产生的。另外, 如果脉冲星观测前有一个大的自转突变, 则在 $\ddot{\nu}$ 值与时间的关系图中, $\ddot{\nu}$ 将随时间有一个趋势。

在计时残差中, 除了有随机的白噪声, 还有第二类不规则变化——红噪声。为了克服由于红噪声在残差中引起的系统差, 需要对残差“白化”。数学上白化的方法有: Bayesian、Cholesky、谐波白化 (harmonic whitening) 等^[31]。谐波法具有 3 个优点: (1) 能更好地选择频率范围, 例如为了不影响位置误差或自行的高频信号, 只有低频计时噪声能作模型处理; (2) 为阻止浮点溢出, 多项式限制 12 阶; (3) 计时噪声通常是准周期的, 可用几个正弦谐波模拟, 但是需要许多多项式系数。用谐波白化过程消除噪声和小的自转突变, 对于大的自转突变, 不可能得到一个相干的计时解。在这些情况中只能用部分资料得到一个相干解 (称为后突变解)^[31]。TEMPO2 中采用此方法, 给出较高精度、容易执行、能很好模拟的计时噪声。用此方法得到的位置和自行与干涉技术的测定结果是符合的。

脉冲星计时噪声的总量和稳定度分别用 Δ_8 和阿伦方差 σ_z 表示, 公式如下^[28,29,32]:

$$\Delta_8 = \lg \left(\frac{1}{6\nu} |\ddot{\nu}^2| t^3 \right), \quad \sigma_z(\tau) = \frac{\tau^2}{2\sqrt{5}} (c^2)^{1/2}, \quad (5)$$

Δ_8 给出了单一时间尺度计时脉冲星噪声的量度。计时噪声与旋转速率变慢之间的关系 (具有较大旋转速率变慢的年轻脉冲星的噪声比老的脉冲星的噪声更大, 即计时残差大小与特征年龄成反比) 已证实。为了详细描述计时噪声, 需要谱分析的资料, 但是不规则的取样资料和低频噪声过程使得功率谱的测定存在一定的难度。 σ_z 给出在各种时间尺度时, 脉冲星稳定度的量度。有关计时噪声, 无论是自转突变还是红噪声, 相关研究还在深入进行。

3 脉冲星计时阵

脉冲星的观测是以原子时为参考的, 因此原子时误差对脉冲星参数拟合与计时残差产生影响, 但该效应是单极性的, 也就是说它对任何脉冲星的影响是相同的。由于计时观测得到的 TOA 转换到太阳系质心时必须使用行星历表, 对不同的脉冲星而言, 行星历表误差的影响具有偶极性, 即对位于天球上相反方向的两颗脉冲星来说, 历表误差对计时残差的影响的符号相反。GW 背景对计时观测的影响取决于脉冲星—地球—源之间的角度, 且具有四极性。以在天球成正交分布的 4 颗脉冲星为例, 对于位于天球上角距为 90° 的两颗脉冲星, GW 背景对计时观测的影响是符号相反; 而对于角距为 180° 的两颗脉冲星, GW 背景对计时观测的影响是符号相同。为了在计时残差中分离原子时、行星历表和 GW 背景的信息, 至少要观测 5 颗均匀分布于天球的脉冲星^[16]。1983 年, Hellings 和 Downs 首次提出构建一个脉冲星阵 (Pulsar Timing Array, PTA) 的概念; 1989 年 Romani 和 1990 年 Foster 对此概念作了进一步发展^[33-35]。

21 世纪初, 在 PTA 的基础上, 又提出了 IPTA 概念。通过国际合作, 参加的观测台站采

用公共的一组毫秒脉冲星,用以比较所得的计时结果,并实现 IPTA 计划的科学目标。由于地面观测台站地理位置不同, IPTA 计划由 3 部分组成: (1) European Pulsar Timing Array (EPTA), 也是 Large European Array for Pulsars (LEAP) 项目, 用欧洲 5 个 100 m 量级的望远镜组成 (德国 Effelsberg radio telescope, 荷兰 Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT), 英国 Lovell Telescopes, 法国 Nançay Radio Telescope, 意大利的 Sardinia Radio Telescope (SRT)), 相当于 300 m 量级的望远镜; (2) North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav), 由美国 Puerto Rico 处 Arecibo Observatory 300 m 和 Green Bank 100 m 望远镜组成; (3) Parkes Pulsar Timing Array (PPTA), 它从 2004 年开始采用 Parkes 64 m 天线进行这个计划^[15,16]。IPTA 项目对已知稳定的约 50 颗毫秒脉冲星进行计时观测, 其最主要的目的是检测引力波。2013 年 6 月 22 日—23 日 IPTA 项目组织对天空中最精确的时钟之一的毫秒脉冲星 PSR J1713+0747 进行全球 24 h 联测, 总计有全球 9 个最大望远镜参加: 澳大利亚 Parkes telescope、印度 GMRT、法国 Nançay 射电望远镜、德国 Effelsberg 射电望远镜、荷兰 WSRT 和 LOFAR (LOW Frequency Array)、英国 Lovell 射电望远镜、美国 Arecibo 射电望远镜和 GBT (Green Bank Telescope)^[36]。今后 10 年新的望远镜可能有: Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP)、South African Karoo Array Telescope (MeerKAT)、Five hundred meter Aperture Spherical Telescope (FAST)、Large European Array for Pulsars (LEAP)、Square Kilometre Array (SKA)^[15]。

4 计时 TOA 的应用

4.1 建立脉冲星时标

过去和现在曾经用过以下三种时标: 世界时、历书时、原子时。虽然世界时精度较低, 但是人们习惯中仍然在使用。现在科学研究中应用以原子时为基准和实现的地球时 TT。1982 年, 自转稳定的毫秒脉冲星发现后, 提出了以脉冲星自转周期为基准的脉冲星时 PT (Pulsar Time)。在脉冲星计时技术中, 脉冲星时并不是根据动力学方法建立的, 所以不是脉冲星时的本征模型, 而是相对于 SSB 处 TOA 建立的“视模型”而言的。早期许多学者提出脉冲星自转作为时标, 先后有 Blanford 等人^[37]、Rawley 等人^[38]、Guinot 和 Petit^[39]、Petit 和 Tarella^[40]、Rodin^[41]、Hobbs 等人^[42]。以下描述各种脉冲星的时标。

4.1.1 单个脉冲星时 PT_i

射电脉冲星是旋转、磁性的中子星, 它发射电磁波, 1 h 观测 TOA 的精度约为 100 ns。这个精度比原子钟差, 但是能长时间维持。1997 年, Matsakis 利用 Arecibo 射电望远镜所获得的 PSR B1855+09 和 PSR B1937+21 约 10 a 观测结果和阿伦方差, 讨论了单个脉冲星时的稳定性。最好的原子钟在时间 τ 约为 5 a 时, 频率稳定性接近 5×10^{-15} 水平。PSR B1855+09 在 $\tau \geq 3$ a 时的稳定性与最好原子钟相当; 而 PSR B1937+21, 则在 $\tau \approx 2$ a 时最小, 同样可与原子钟相比。随着新毫秒脉冲星的发现和长期的观测, 脉冲星时比原子时具有更高的长期稳定度^[33]。采用脉冲星时标给出: (1) 用不是基于地面的一个系统检验地

面时尺度; (2) 用具有宏观质量天体的时标代替量子过程的原子钟; (3) 时标是连续的, 并能长期使用。

4.1.2 综合脉冲星时 PTens

BIPM 根据全球 50 多个国家 300 台原子钟的权平均组成自由原子尺度 (Échelle Atomique Libre, EAL) 的概念^[43], 结合 SI 秒的实现建立了一个连续的时间尺度 TAI。TT 和 UTC 是由 TAI 而来的, $TT(TAI) = TAI + 32.184 \text{ s}$ 。TAI 一旦发表, 从不修正, 但是 BIPM 给出 TT 的另一个实现, 即每年发表 TT (BIPMY), 如 TT (BIPM11)。1993 年, Petit 和 Thomas 提出了与 EAL 相似的综合脉冲星时 (Ensemble Pulsar Scale, EPS) 的概念^[44]。与 EAL 相似, EPS 不是一个绝对的时标, 它必须是一个“驾驭”一个符合 SI 的时间尺度, 从而实现了一个新的脉冲星为基准的时标, 如 TT (PPTA11)。

尽管 20 世纪 90 年代初已提出综合脉冲星时的概念, 但是由于观测年数不长, 直到 2008 年, Rodin 用 Kalyazin 射电天文台 (KRAO) 在 MJD51000-53400 期间观测 6 颗脉冲星, 采用 Wiener 最佳滤波方法对观察数据进行分析, 分离了原子钟和脉冲星自转变化产生的计时事后残差, 得到综合的脉冲星时 PTens 的长期频率稳定性好于 10^{-16} 。2012 年, Hobbs 等人用 PPTA 计划 16 年观测 19 颗脉冲星的数据处理得到 PTens, 并给出了 TT (PPTA11) 与 TT (TAI), 以及 TT (BIPM11) 与 TT (TAI) 差值。两者基本相符合, 而在 1995—2003 年略有分歧, 这个结果有待加入其他台站的观测后, 再分析给予证实^[42]。现在 IPTA 项目经常观测 50 颗脉冲星, 约 30 颗的 TOA 计时精度好于 $1 \mu\text{s}$, 高质量的数据正在获得。长期来看, SKA 可以每周观测 100 颗脉冲星, 计时精度为 50 ns 或更好, 如果脉冲星在长期尺度上是稳定的, 则提供了与世界最好地面时间相比的一个长期标准。2012 年, 第 28 届 IAU 大会在 Division A 中已成立了 Hobbs 为首的 Pulsar-based Time Scale 工作组, 组织和开展这方面的工作。

4.1.3 脉冲双星时间 BPT

许多毫秒脉冲星属于一个双星系统, 用脉冲星绕伴星旋转的轨道相位定义一个力学时标。在双星系统质心为中心的参考系中, 寻找脉冲星的相位与参考系坐标时之间的理论关系, 用相对论把质心参考系转为地心, 脉冲星轨道相位提供地心坐标时, 称为 BPT。理论上 BPT 比 PT 具有更高的长期稳定度。因为受到 TOA 测量误差的限制, 其精度难以达到与原子时可比水平, 但是它在宇宙学、引力和银河系动力学研究领域具有很好的前景^[41]。

4.2 改进太阳系行星历表

脉冲星计时方法取决于在太阳系质心的 TOA, 这个过程用太阳系历表得到地球相对于太阳系质心的位置, 因此历表误差将影响计时残差, 反之用残差可以改进行星历表^[14,16,45]。这部分包括了 3 方面工作: 测定地球位置、历表指向和外行星的质量。

4.2.1 计时残差推算历表中地球位置的偏差

2010 年, Champion 等人取 IPTA 项目中 Arecibo、Parkes、Effelsberg 射电望远镜观测 4 颗脉冲星 (PSR J0437-4715、J1744-1134、J1857+0934、J1909-3744) 的资料, 用计时方法计算在历书中地球的位置。其中 PSR J1857+0943 资料长度总共 22.1 a, 比其他资料长 10 a,

但是缺少 3 a Arecibo 系统改进期间资料。最短资料长度为 PSR J1900-3744, 共 5.2 a。文中给出 2006—2010 年 17 个观测点处计时方法推算的太阳系质心的地球位置与 JPL DE421 预测值的偏差, 在 3 个坐标方向上, 大多数都在 100 m 以内, Y 方向的偏差最小, 在 50 m 以内, 结果说明两者没有明显的差值, 也说明在这次分析中采用历书 DE421 是合适的^[12,45]。

4.2.2 计时残差推算历表指向与 ICRF 的偏差

历表指向误差是指用 VLBI 建立的河外参考架与行星观测的历表参考架之差, 可以用 VLBI 和计时技术测定脉冲星的位置得到。对于每世纪平均运动不超过 0.1" 的行星惯性参考架而言, 它的绝对精度为 0.01", 参考架的加速度不知道, 大约小于 $0.05''/(100 \text{ a})^2$ 。1984 年, Fomalont 等人认为河外射电参考架与脉冲星计时参考架 (即归算中采用的历表参考架) 分歧大至 0.3", 且没有解决^[16]。另外, 毫秒脉冲星的观测是直接联结射电与历表参考架三种方法 (较差 VLBI、外行星和其卫星的 VLA 测量, 以及毫秒脉冲星的观测) 之一, 采用长期观测足够多的毫秒脉冲星资料, 期望能得到确切和满意的结果^[46]。

4.2.3 计时残差推算历表中外行星的质量

历表误差可以分为行星轨道周期小于资料长度和周期大于资料长度两种, 前者指内行星, 其质量精确, 几年内相应历表精度为 1 m (3 ns); 后者指外行星, 其质量误差引起了历表误差, 反之, 通过历表误差可推算历表中采用外行星质量的改正值。质量误差引起加速度导数为^[16]:

$$\delta\ddot{r} = \frac{2\pi G\delta M_x}{R_x^2 P_x}, \quad (6)$$

式中 δM_x 为行星质量误差, R_x 为行星至太阳的距离, P_x 为行星周期。

2010 年, Champion 等人取 IPTA 观测中 4 颗脉冲星 (J0437-4715、J1744-1134、J1857+0943、J1909-3744) 资料, 得到水星、金星、火星、木星和土星质量。他们得木星系统质量为 $9.547\ 921(2)\times 10^{-4} M_\odot$ 。此结果比 Pioneer 和 Voyager 结果好 4 倍, 但是比 Galileo 的结果差^[45]。虽然现在飞船测定行星质量比脉冲星计时结果更精确, 但是飞船只对飞船绕个别天体敏感, 而对该天体的卫星质量了解很少。DE421 只包括木星 5 个和土星 6 个卫星, 而脉冲星计时可以测量行星系统的全部质量, 并且能检测太阳系未知的天体, 如 TNO^[45]。PTA 对误差的灵敏度取决于: (1) 计时精度; (2) 资料的跨度。用 20 颗脉冲星计时观测 (计时残差约为 100 ns) 对资料跨度进行模拟测定木星和土星系统质量, 资料跨度分别为 7 a 和 13 a 才分别达到 Galileo 和 Cassini 测量的精度。如果精度有显著提高, 则土星资料跨度需要大于 29 a (土星轨道周期)^[12]。

4.3 探测宇宙背景引力波

1916 年, 爱因斯坦广义相对论理论第一次预测宇宙起源的引力波存在, 但是当时技术还不能直接测定。20 世纪 60 年代后, 各种类型的地基引力波检测器出现, 如谐振质量棒检测器、干涉检测器等^[47]。现在地基引力波检测器有 2 类: (1) 2 个激光干涉引力波天文台 (Laser Interometer Gravitation Wave Observatory, LIGO) 和 Virgo, 前者安放在美国 Livingston 天文台和 Hanford 天文台; 后者在意大利 Cascina 的 EGO (European Gravitational Observatory)。还有日本研制地下 3 km 的致冷低温光学系统 KAGRA (Kamioka Gravitational

Wave Detector) 和 Einstein 望远镜。引力波国际委员会 (Gravitational Wave International Committee) 建议用干涉检测器组成一个全球阵, LIGO 和 Virgo 合作连接 3 个检测器作为国际网络的核心, 第 4 个安放地址还在选择之中, 可能放在印度。(2) 用 VLBI^[49,50] 和计时技术检测自然天体辐射的引力波, 如类星体和脉冲星。1974 年, 发现宇宙辐射使 PSR 1913+16 轨道衰减, 才考虑用脉冲星检测引力波, 该双星系统间接地证明了引力波的存在。本节仅叙述脉冲星计时观测检测引力波。

空基的干涉仪, 如 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 和 DECIGO (Decihertz Interferometer Gravitational wave Observatory) 正在进行。前者 ESA 作为 New Gravitational-Wave Observatory (NGO) 在 L1 点, 现改名为 eLISA, 并置于 L3, 纳入 Cosmic Vision 计划, 将于 2034 年发射。后者是日本提出的空基引力天文台, 它在 0.1 Hz 和 10 Hz 之间 (即 decihertz) 最灵敏, 期望在 2027 年发射。另外, 还有探测宇宙微波背景的 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 和 Plank Surveyor, 它们的科学目标之一是检测原始 GW 的 B 模型偏振信号^[34]。

2016 年 2 月 11 日, LIGO 实验组宣布美国 2 个监测器已在 2015 年 9 月 14 日直接检测到引力波的存在, 这是物理学界里程碑式的重大成果。我国正在进行地基探测引力波的计划, 它是由中科院高能物理研究所主导的“阿里计划”; 空基的探测计划有中科院提出的“太极计划”和由中山大学领头的“天琴计划”。

4.3.1 引力辐射

引力辐射^[51-53]至少有三种不同来源: (1) 单一的持续源, 如一个高度相对论性中子星或黑洞双星; (2) 个别短时间的爆发源, 如一个超新星的爆发; (3) 一个随机引力波背景, 如一个宇宙学遗迹。其他的引力源有宇宙起源时的宇宙弦和暴涨期产生的引力波辐射。当引力波通过太阳系时, 沿波传播路径距离 s 处, 幅度为 $A_+(T - s/c)$ 和 $A_\times(T - s/c)$ 的引力波将在脉冲星视旋转速度中产生多普勒漂移, 该漂移具有一个明显角信号^[11,16]:

$$z(T) = \frac{(\alpha^2 - \beta^2)A_+ + 2\alpha\beta A_\times}{2(1 + \gamma)}, \quad (7)$$

式中 α 、 β 和 γ 为在地心参考架中脉冲星 - 地球联线的方向余弦。引力波沿 z 轴传递, 在极坐标 (η, ψ) 中上式变为

$$z(T) = \frac{1}{2}(1 - \cos \eta)[\cos 2\psi A_+(T - s/c) \sin 2\psi A_\times(T - s/c)], \quad (8)$$

式中 2ψ 的变化表示一个四极和高阶的角信号, 到达时间受到多普勒漂移积分的影响, 一个任意波的方向可以由 2 个角度的旋转得到。波的分量 A_+ 和 A_\times 为辐射的瞬时偏振。因为脉冲星计时资料只能在引力波频谱的一个很窄的窗口感知, 所以寻找单个源的效应较困难, 但是现在感兴趣的是用脉冲星信号探测随机引力辐射背景, 它类似于 2.7 K 微波背景辐射, 如下节描述。

4.3.2 随机的引力辐射背景

一个随机的背景 GW 协变频谱 (strain spectrum), 是一个 GW 频率 f_g 的幂律谱^[52,53]:

$$h_c(f_g) = A_g \left(\frac{f_g}{f_{1a}} \right)^\alpha. \quad (9)$$

公式 (9) 中, f_g 是 GW 的频率, $f_{1a} = 1/1 \text{ a}$ 和 A_g 是无量纲的。由超大质量双星黑洞产生一个背景时, $\alpha = -2/3$, $A_g \approx 10^{-15}$; 标准的宇宙暴涨模型产生 GW 背景的幅度将低于检测极限 ($A_g \approx 10^{-18}$), 而有些非标准模型, 具有 $\alpha = -1$, $A_g \approx 10^{-15}$; 宇宙弦张角引起一个 $\alpha = -7/6$ 的 GW 背景时, A_g 变大至 10^{-14} 。因为脉冲星资料是不规则取样、有仪器问题产生的非白噪声、脉冲计时噪声、天体测量和轨道参数拟合, 以及地面时间标准或行星历表的不确定性, 所以, 严格决定 A_g 极限是重要的。2006 年, Jenet 给出用 TEMPO2 决定 A_g 极限的方法, 但是只能用于一个白频谱的计时残差。现在已出现一种新技术, 不用假设计时残差的频谱, GW 背景引起的计时残差可用一个红功率谱描述^[12,54]:

$$p(f) = \frac{A^2}{12\pi^2} \left(\frac{f}{f_{1a}} \right)^{2\alpha_{\text{GW}}-3}. \quad (10)$$

详细推导参阅文献 [54]。

TEMPO2 软件的计时模型中不包括 GW 源, 任何这类源的存在将在计时残差中产生一个信号。2009 年和 2015 年, Hobbs 和童明雷等人分别模拟这个信号, 以便在现有资料中寻找 GW 信号。总之, 不管采用上述何种方法, 人们不断努力, 改进检测引力波的技术和方法, 期望不久能取得检测引力波的实测结果, 直接证明爱因斯坦相对论。

4.4 测定脉冲星的天体测量、旋转和轨道参数

脉冲星的天体测量参数和其旋转轨道参数是研究脉冲星的必要参数。1975 年和 1976 年, Taylor 采用 Arecibo 射电望远镜观测 PSR 1913+16 的计时资料, 分析中分别采用了周期测量和 TOA 方法, 得到该星的自转和轨道参数^[17,55], 并作了比较。由于资料间距太短, 不能得到 PK 参数 γ , 它测量多普勒漂移和引力红移相结合的效应。同样, 也没有给 μ_α, μ_δ , 或者 $\dot{\nu}$, 它们需要 10 年或更长资料才能测定。1988 年, Rawley 和 Taylor 用此望远镜观测 PSR 1937+21、1953+29 和 1855+09 的资料 (其时间跨度分别为 4.2 a、2.0 a 和 1.1 a), 推算出天体测量参数 (赤经、赤纬、自行、周期和周期导数)、周年视差、色散量, 以及后两颗星的轨道参数 (轨道周期、轨道偏心率、投影半长轴、近星点黄经和过近星点时间)^[18]。20 世纪 90 年代开始发表脉冲星星表, 如 1993 年 Taylor 发表 558 颗脉冲星星表, 2005 年 Manchester 等人发表的脉冲星星表包括 1 509 颗星^[57]。随着越来越多的脉冲星被发现, 这些星表将重编和再发表 (现有旋转型脉冲星已达 2 200 颗, 其中 150 颗在 X 波段检测到, 1/3 为毫秒脉冲星^[15])。

4.5 脉冲星的自主导航

用自然天体 (如恒星、射电源、脉冲星等) 作为飞船导航的航标, 也是飞船导航方法之一。空间飞行器上脉冲星导航系统得到 TOA 的测量值, 它与根据脉冲星天体测量参数计算 TOA 的理论值之间的差值中, 包括了空间飞行器的位置信息^[19,58,59]。采用多颗脉冲星的计

时观测,可以解算飞行器相对太阳系质心的位置。1971年,早期研究者提出用一颗脉冲星的射电信号进行导航的概念,由于发射频率在100 MHz至几GHz,并且信号很弱,所以要求25 m直径或更大口径的天线,对于大多数飞船是不可能实现的;附近天体(包括太阳、月球、木星和近距的恒星)和远距天体(如射电星系、类星体和星系漫辐射)都是宽带射电源,阻碍了接收弱的脉冲信号,所以极少用于导航。继后,1974年,Down提出用脉冲星计时技术,但是用当时27颗射电脉冲星资料,信号经过24 h积分后,位置误差为1 500 km量级,射电观测只适用于允许载荷量大的空间飞行器。如果许多测量要求在一个特定的处理窗口内,则需要多个检测器,因此只有在X波段观测才适用于任何空间飞行器。

1998年10月至2001年12月,NASA的Deep-Space-1卫星曾进行自主光学导航系统(Autonomous Optical Navigation, AutoNav)实验,定轨精度为 ± 250 km和 ± 0.2 m/s,显然误差太大。1999年2月23日,Advanced Research and Global Observation Satellite (ARGOS)发射,并根据20世纪80年代美国NRL科学家的建议,进行了Unconventional Stellar Aspect (USA)试验,设计观测亮的X射线源,但是这个实验给出地球掩恒星的方法限制卫星在低轨道。早在1981年,Chester和Butman建议用当时已知的12颗X射线脉冲星,检测器面积为 0.1 m²,24 h观测后,三维位置精度为150 km。1993年,Becker和Trumper用ROSAT发现了X射线毫秒脉冲星,并提出了新的建议:用毫秒脉冲星导航,但是直到2010年,Bernhardt等人用60颗X射线脉冲星,每3颗脉冲星组合测定飞船的位置精度,其中30个组合最佳,位置精度在5~13 km,而排列在前10个组合中都是毫秒脉冲星,因此今后必然采用毫秒脉冲星进行飞船的自主导航^[60]。

随着新的反射镜和X射线检测器的研究进展,其分辨率、能耗等更适合X射线脉冲导航的需求。反射镜有:硅孔光学(silicon pore optics)和玻璃微孔光学(glass micropore optic),角分辨率分别为 $5''$ 和 $30''$,后者在ESA/JAXA的BepiColimbo飞船水星成像X射线分光仪上使用。检测器有:硅漂移检测器(Silicon Drift Detectors, SDDs)和有源像素感知器(Active Pixel Sensors, APS),前者建议在IXO的高时间分辨率分光仪上使用,这个技术已在NASA的火星探测漫游者、勇气号和机遇号及彗星着陆器ROSETTA上的 α 粒子X射线分光仪(Alpha Particle X-ray Spectrometer, APXS)使用,后者建议在IXO的大视场成像仪和Symbol-X低能量检测器上使用。现在NASA GSFC正在开展SEXTANT (Station Explorer for x-ray timing and Navigation Technology)项目,德国马普地外物理研究所也在开展这方面研究。总之,在毫秒脉冲星的导航中,用相位阵天线和重量轻的X射线望远镜与检测器分别在射电和X波段观测,由于测量TOA和脉冲轮廓模板的不确定引起的计时误差,前者的定位精度比后者高。然而,前者的天线面至少 150 m²(假如1 cm厚度,平均密度 0.1 g/cm³,则重量为150 kg),而现在X射线毫秒脉冲星仅50颗。随着观测精度的提高和星数的增加(SKA将检测20 000至30 000颗脉冲星),脉冲星自主导航将在行星探测飞船和载人火星或其外的行星中使用。

4.6 检验相对论引力理论

1992年,Taylor用1974年9月至1988年7月Arecibo观测4 480个TOA的计时资料,确定脉冲双星系统PSR 1913+16轨道,其中包括:5个开普勒参数和8个PK参数。另

外, 还可以推导出 \dot{G}/G 和引力波的相对能量密度 Ω_g 。用 PSR 1913+16 的 PK 参数已进行 3 个方面的相对论引力理论的验证^[20,21]。

(1) 1992 年, Taylor 得到周期衰变的观测值与理论值之比 $(\dot{P}_b^{\text{obs}} - \dot{P}_b^{\text{gal}})/\dot{P}_b^{\text{GR}} = 1.002 \pm 0.005$, \dot{P}_b^{gal} 表示由太阳系加速和 PSR 1913+16 在银河系引力场中产生的一个附加改正, 由此可见它们之间的符合程度好于 0.5%。脉冲双星计时实验直接证明了爱因斯坦理论, 引力相互作用的传递表明在轨道系统中耗散的机制和引力辐射存在, 且有一个四极的特征。

(2) 在广义相对论内, PSR 1913+16 系统的脉冲星和伴星的质量分别为 $m_1 = (1.442 \pm 0.003) M_\odot$ 和 $m_2 = (1.386 \pm 0.003) M_\odot$ 。这是在强场条件下一个有意义的试验。

(3) $|\dot{G}/G| = |\delta\dot{P}_b/2P_b|$, 其中 G 为牛顿引力常数, $\delta\dot{P}_b$ 为测量 \dot{P}_b 的不确定性。PSR 1913+16 测定的 $\dot{G}/G = (1.2 \pm 1.3) \times 10^{-11} / \text{a}$, 在超低频率 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ Hz 处, 引力辐射能量密度 $\Omega_g < 0.04$ 。如果用 30 年的观测资料, 则测定 \dot{G}/G 的精度提高 10 倍, 一个世纪观测将提高 100 倍。

此外, 得到脉冲星旋转轴的测地进动, 近星点进动的平均速率为 $(4.226\,628 \pm 0.000\,018)$ ($^\circ$)/a, 以及与 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 μs , 这是首次在太阳系外观测到引力传递延迟^[61]。随着观测脉冲星数量的增多和观测精度的提高, 用此方法将进一步验证广义相对论引力理论, 如引力红移和时间扩展、引力辐射反应效应和快速旋转脉冲星产生引力的“磁性”、探测在强场中引力的特征等。

5 结束语

自 1967 年发现脉冲星后, 对脉冲星的观测和研究一直是天文学研究中的热门课题之一, 在天体演化、天体物理与物理学、时间计量等方面都有重要的意义。全文详述了脉冲星计时技术, 如归算的物理模型、计时噪声(自转突变和红噪)的处理, 也给出了脉冲星计时技术在各个领域中的应用, 如建立脉冲时标、测定历书误差、引力波检测、脉冲星的基本参数测定、飞船导航等。也描述了国际上的研究动态, 如 21 世纪初 IPTA 的组建, 地基和空间干涉仪检测引力波的情况, 以及近期召开有关这方面的国际会议, 如 2005 年在中国召开的“*The 2005 Lake Hanas International Pulsar Symposium*”, 2012 年在北京召开的 IAUS 291 “*Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years*” 等。

20 世纪中叶我国已开展中子星和脉冲星的研究, 1994 年, 乌鲁木齐天文站 25 m 射电望远镜建成后, 开展了单天线脉冲星的实测工作。20 多年来, 我国脉冲星的观测和研究已取得一定成绩^[62,63]。为了更好地开展这方面工作, 本文提出 3 点建议: (1) 加强国内外合作。早在 20 世纪末王绶琯院士在“2000 年喀纳斯湖脉冲星观测与研究学术讨论会”的发言中提出, 像脉冲星研究这样的前沿课题, 应更加广泛地开展国内外合作, 只有这种合作才能产生高层次的“合力出击”^[64]。现在进行脉冲星实测的射电望远镜又增加了国家天文台 50 m、上海天文台 65 m 和国家授时中心 40 m 天线。而各单位仍处于分散研究的状态, 应成立联合的课

题组或重点实验室。在国外合作方面, 虽然我国也参与了国际合作项目, 如 SKA, 并组织各种讨论会, 如每年 FAST 的脉冲星讨论会, 但是至今我国并非 IPTA 成员, 应争取成为 IPTA 的亚洲中心, 个别专家成为 IAU 脉冲星时标工作组的成员。(2) 开展学科间的交流和合作。脉冲星计时观测的应用, 如引力波的检测、建立脉冲星时标、脉冲星自主导航等的研究分别与物理学、时间计量、测量和宇航学有关, 应加强交流与合作; 设备研制与机械和无线电学有关, 如脉冲星 X 射线自主导航中需要高分辨率和灵敏度高的反射镜和检测器, 只有相互合作, 才能获得高质量的观测资料。(3) 参与 IPTA 50 颗脉冲星的长期监测。为了方便脉冲星资料共享和对观测结果进行比较, IPTA 选择了 50 颗脉冲星, 希望利用全球射电望远镜开展这些脉冲星的观测, 如 2013 年 6 月 22 日—23 日 IPTA 项目组织对 PSR J1713+0747 进行全球 24 h 联测。现在我国各单位根据课题要求, 编制了观测纲要, 为了达到上述目的, 建议尽量选择 50 颗共同星, 并对用于建立脉冲星时标的脉冲星 (如 PRS 1855+09、1937+21 等) 做长期的监测。随着 FAST 的建成和运行, 我国在射电天文设备上将进入世界先进行列, 在脉冲星实测和分析研究上也将有新发现。

致谢

本文撰写过程中, 与国家授时中心杨廷高研究员、南京大学天文系黄天衣教授和上海天文台沈有根研究员对有关问题进行讨论, 作者表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Hewish A, Bell K J, Pilkington J D H, et al. *Nature*, 1968, 217: 709
- [2] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975, 195: 51
- [3] Backer D C, Kulkarni S R, Helles C, et al. *Nature*, 1982, 300: 615
- [4] Wolszczan A, Frail D A. *Nature*, 1992, 355: 145
- [5] Burgay M, D'Amico N, Possenti A, et al. *Nature*, 2003, 426: 531
- [6] Karner M, Stairs I H, Manchester R N, et al. *Science*, 2006, 314: 97
- [7] Becker W, Gil J A, Rudak B. *Highlights of Astronomy*, 2006, 14: 109
- [8] Hobbs G, Faulkner A, Stairs I H, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 1439
- [9] Cordes J M, Freire P C C, Lorimer D R. *ApJ*, 2006, 637: 446
- [10] Lazarus P. *IAUS*, 2012, 291: 35
- [11] Hobbs G, Archibald A, Arzoumanian Z, et al. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27: 084013
- [12] Hobbs G. *IAUS*, 2012, 291: 165
- [13] Ng C. *IAUS*, 2012, 291: 53
- [14] Taylor J H, Stinebring A. *ARAA*, 1986, 24: 285
- [15] Backer D C, Helling G. *ARAA*, 1986, 24: 337
- [16] Foster R S, Backer D C. *ApJ*, 1990, 361: 300
- [17] Taylor J H, Hulse R A, Fowler R. *ApJ*, 1976, 206: L53
- [18] Rawley L A, Taylor J H. *ApJ*, 1988, 326: 947
- [19] Becker W, Bernhardt M G, Jessner A. *arXiv*: 1305.4842v1, 2013
- [20] Taylor J H. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 1992, 341(1660): 117
- [21] Taylor J H, Weisberg J M. *ApJ*, 1989, 345: 434

- [22] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. MNRAS, 2006, 369: 655
- [23] Edwards R T, Hobbs G B, Manchester R N. MNRAS, 2006, 372: 1549
- [24] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. CHJAA, 2006, 6(Suppl.2): 189
- [25] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/tempo2>
- [26] Fukushima T. A&A, 1995, 294: 895
- [27] 段茂成, 蔡宏兵, 赵成仕, 等. 时间频率学报, 2013, 36: 164
- [28] Arzoumanian Z, Nice D J, Taylor J H. ApJ, 1994, 423: 671
- [29] Hobbs G, Lyne A G, Kramer M. MNRAS, 2010, 402: 1027
- [30] Wang N, Manchester R N, Pace R, et al. MNRAS, 2000, 317: 843
- [31] Hobbs G, Lyne A G, Kramer M, et al. MNRAS, 2004, 353: 1311
- [32] Matsakis D N, Taylor J H, Eubank M. A&A, 1997, 326: 928
- [33] Manchester R N, Hobbs G, Bailes M, et al. PASA, 2013, 30: 17
- [34] Manchester R N. 40 YEARS OF PULSARS: Millisecond Pulsars, Magnetars and More, AIP Conference Proceedings. New York: AIP, 2008, 983: 584
- [35] 杨廷高, 仲崇霞. 天文学进展, 2005, 23: 1
- [36] Dolch T, Lam M T, Cordes J, et al. ApJ, 2014, 794: 21
- [37] Blandford R, Narayan R, Romani R W. A&A, 1984, 5: 269
- [38] Rawley L A, Taylor J H, Davis M M, et al. Science, 1987, 238: 761
- [39] Guniot A, Petit G. A&A, 1991, 248: 292
- [40] Petit G, Tavella P. A&A, 1996, 308: 209
- [41] Rodin A E. MNRAS, 2008, 387: 1583
- [42] Hobbs G, Coles W, Manchester R N, et al. MNRAS, 2012, 427: 2780
- [43] 漆贯荣. 时间科学基础, 北京: 高等教育出版社, 2006: 1
- [44] Petit G, Thomas C. 24 th Annual PTTI, US: NASA, 1999: 73
- [45] Champion D J. ApJ, 2010, 720: L201
- [46] Williams J G, Standish E M. Reference Frames: in Astronomy and Geophysics, US: springer, 1989: 67
- [47] Gertsenshtein M E, Pustovoi V I. JETP, 1962, 43: 605
- [48] <http://lisa.nasa.gov/>, 2016
- [49] Pyne T, Gwinn C R, Birkinshaw M, et al. ApJ, 1996, 465: 566
- [50] Gwinn C R, Eubanks T M, Pyne T. ApJ, 1997, 485: 87
- [51] Detweiler S. ApJ, 1979, 234: 1100
- [52] Hobbs G B, Jenet F, Lee K J, et al. MNRAS, 2009 394: 1945
- [53] 童明雷, 丁勇恒, 赵成仕, 等. 时间频率学报, 2015, 38: 44
- [54] Jenet F A, Hobbs G B, van Straten W, et al. ApJ, 2006, 653: 1571
- [55] Taylor J H, Ann N Y. Acad. Sci., 1975, 262: 490
- [56] 杨廷高, 潘练德, 倪广仁, 等. 2000 年喀纳斯湖脉冲星观测与研究学术讨论会文集, 新疆: 新疆人民出版社, 2001: 178
- [57] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. AJ, 2005, 129: 1993
- [58] 杨廷高, 南仁东, 金乘进, 等. 全国时间频率学术交流会文集, 2005: 461
- [59] Sheikh S I, Pines D J. Spacecraft navigation using x-ray pulsar, Journal of guidance, control and dynamics, 2006, 29: 49
- [60] Bernhardt M G, Prinz T, Becker T, et al. HTRA, 2010, 4: 5
- [61] Weisberg J M, Taylor J H. Physical Review Letters, 1984, 52: 1348
- [62] Wang N, Wu X, Zhang J, et al. IAUS, 1999, 202: 65
- [63] 吴鑫基, 张晋, 王娜, 等. 天文学进展, 2001, 19(2): 216
- [64] 王绶琯, 张晋. 2000 年喀纳斯湖脉冲星观测与研究学术讨论会文集. 新疆: 新疆人民出版社, 2001: 1

Pulsar Timing Technique and Its Applications

JIN Wen-jing

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

Abstract: The discovery of pulsar and timing observations are briefly described. The physical models of timing for pulsar and various softwares for pulsar timing, especially the TEMPO2 used worldwide, are mentioned in detail. The idea of pulsar timing array and international pulsar timing array are introduced. Pulsar timing is applied in the following aspects: developing a pulsar-based timescale, improving the solar ephemeris (including the determination of mass of outer planets and discovery of trans-Neptunian object), searching for gravitational waves, determination of rotation and astrometric parameters for pulsar, autonomous spacecraft navigation with pulsars, tests of relativistic gravity and so on. Finally, the research work on pulsar timing technique and its application in China is simply introduced, and some suggestions are proposed.

Key words: pulsar; pulsar timing; pulsar timing array; autonomous spacecraft navigation with pulsars; test of relativistic gravity