



毫秒脉冲星计时方法的研究进展和前景

倪广仁 杨廷高 柯熙政 和康元

(中国科学院陕西天文台 临潼 710600)

摘 要

介绍脉冲星的时间频率特征, 脉冲星时间研究的意义, 毫秒脉冲星计时理论方法和技术方面的研究进展, 对其中的关键问题给予讨论. 并对其发展前景进行了展望.

关键词 脉冲星 — 脉冲星计时 — 时间频率 — 射电天文

分类号: P145.6

1 引 言

脉冲星是快速自转并具有强磁场的中子星. 1982 年, 毫秒脉冲星 PSR1937+21 的发现, 开拓了脉冲星计时的研究领域. 脉冲星最突出、最重要的特征是自转周期的重复性特别好, 这正是脉冲星计时研究中的首要问题. 脉冲星周期的变化率典型值为 10^{-15} ^[1], 某些毫秒脉冲星 (如 PSR1937+21, PSR1855 +09, PSR1643-12 等) 的周期变化率^[2~6]为 $10^{-19} \sim 10^{-21}$. 这些毫秒脉冲星被誉为自然界最稳定的钟, 最好的频率基准. 脉冲星的发现者获 1974 年诺贝尔物理奖, 脉冲星双星对引力波辐射的检测研究又在 1993 年获诺贝尔物理奖, 而这两次获奖都是对脉冲星脉冲到达时间微变效应观测研究的成果^[7,8]. 近年来毫秒脉冲星计时研究的报道, 以 Allan 方差表示的脉冲星自转频率的相对稳定度已达 2×10^{-14} 水平^[2,9,10]. 与原子时长期比对说明, 毫秒脉冲星频率长期稳定度优于原子时. 毫秒脉冲星时间尺度的研究和建立对于评价、检验原子时尺度有重大的意义. 更高精度的时频标准在科学实验、通讯、导航、空间科学、现代国防等领域有极广阔的应用前景. 同时, 毫秒脉冲星高精度的计时数据在天文学、空间科学、天体物理学、电波传播科学及广义相对论等学科研究中有很高的利用价值. 毫秒脉冲星计时研究已受到国际科学界的非常关注.

2 国际研究进展

众所周知, 所有的时间尺度, 包括以天文观测或以物理机制为基础产生的时间尺度, 都是对理论概念的逐步逼近. 任何钟都应具有三种基本性能: 周期的连续运动特征; 较好的周期稳定性; 具计数、

中国科学院天文委员会 (1996~1998) 基金资助项目 (96306)

1997-11-24 收到初稿 1999-12-21 收到再修改稿

显示特征。尽管获得这三种性能的方法是多种多样的,但钟的精度都是与科学技术的发展水平、生产实践的需求相适应的。毫秒脉冲星是具备上述基本性能的特种天体。随着科学实验、生产实践的发展,脉冲星时间尺度的建立和应用是必要的也是可能的。

30多年来,关于脉冲星计时的理论、方法、脉冲星时间尺度的算法和接收技术诸方面的研究都有长足发展,取得了一系列重大成果。主要表现在以下方面:(1)脉冲星辐射机制方面,如以脉冲星回旋辐射、同步加速辐射和曲率辐射等机制为代表的学说的发展,宇宙灯塔—脉冲星辐射模型的研究^[1,8,7]。(2)与脉冲星计时相关的基本天文参数问题,如源的坐标、距离、自行、横向运动速度的研究。周期 P 及其变化率 \dot{P} 和 \ddot{P} 的测量分析研究^[1,9,11]。(3)脉冲星辐射脉冲的频谱、跃变($10^{-6} \sim 10^{-10}$)及闪烁噪声的研究^[12,13,1,7],得到脉冲星射电频谱呈幂律谱关系: $S \propto \nu^a$,毫秒脉冲星的 a 值为 $-1.3 \sim -2.6$ 。其脉冲形状一般较尖锐、规则,重复性、稳定性好,脉冲宽度随频率而变,频率愈高,脉冲宽度愈窄,毫秒脉冲星脉冲宽度与周期之比约为3%或更小。对毫秒脉冲星流量检测的最小值可达到 $1.3\mu\text{Jy}$ 水平^[14]。(4)脉冲星接收系统的新技术、新方法、新工艺、新电路等研究方面,重要的研究进展体现在:天线接收系统及弱信号数字化相关检测技术等方面的突破。天线曲面精度可达到 $(1 \sim 0.5)\text{mm}/100\text{m}$,应用光、机、电全息控制。偏振研究方面:如单极化、双极化研究。脉冲星射电主要以线偏振、椭圆偏振为主。线偏振度($0 \sim 100\%$),椭圆和圆偏振度($0 \sim 60\%$)^[7]。低噪声馈源系统噪声温度可 $\leq 6\text{K}$;超低温液氮致冷环境下的前放可达 5K 左右^[14]。超低噪声、高灵敏、高可靠、高稳定前放、常温放大电子器件,如HEMT器件及大规模超高集成度、胜于模拟技术的数字化(A/D,D/A)相关接收技术的研究有很大进步^[15~17]。声表面波技术(SAW)、HEMT接收机的成功应用是近 $15 \sim 20$ 年发展起来的^[14,16,18,19]。检波前消色散方法及中央相位检测技术的发展为脉冲星的高精度计时做出了贡献^[16~18]。GPS系统、GLONASS系统的成熟发展也为未来脉冲星时间频率的传递、校频、应用、评估提供了基本传输链的借鉴。频率综合新技术,数据采集与处理方法的研究也得到不断发展^[9,10,17,15,21]。(5)脉冲星时间尺度的产生、保持、传递及与原子时比对方法和应用VLBI干涉测量及多站共视测量比对研究也在不断发展之中^[16,21]。(6)接收机系统误差分析及接收过程中分层介质物理特性研究修正及天文误差、相对论误差、多普勒频移等理论方法的研究取得了重大进步^[17,11,16]。(7)脉冲星计时原理及脉冲星时间尺度算法研究,最具代表性的六种脉冲星计时模型^[11]和以Petit博士为代表的学者对脉冲星时间尺度算法及其与原子时关系的研究取得一定的进步^[9,10,2]。(8)Green Bank (USA)的脉冲星计时测量系统早在1985年就已建立并不断完善和改进^[16]。脉冲星时间和原子时长期比对结果发现了原子时长期稳定度的缺陷^[9,10]。脉冲星脉冲到达时间的高精度测量为引力波辐射的检测作出了重要贡献^[7]。

脉冲星计时理论、方法的深入发展,使脉冲星计时研究硕果累累。以Allan方差表示的脉冲星脉冲频率的相对长期稳定度达到 2×10^{-14} 量级(1996)($0.6\text{yr} \leq \tau \leq 5\text{yr}$)^[10]。脉冲星脉冲到达时间的测量精度已优于 $1 \times 10^{-7}\text{s}$ 。VLBI对其定位精度已达到 $0''.0003$ ^[10]。但目前对毫秒脉冲星更高精度的测量仍受到原子钟精度的限制^[9]。

3 我国开展脉冲星计时实验研究的可行性

我国是一个科技发展中的大国,应该开展脉冲星计时的研究,其理由和有利条件是:(1)国际上近20年来对毫秒脉冲星计时的研究,表明了该前沿课题处在近代射电天文学和时间计量科学的交叉点上;对脉冲星时间这一基本物理量的研究,蕴涵着新的重大意义和广阔的实用前景。脉冲星计时不仅能建立可与原子钟媲美的天文钟,而且其影响不亚于世界时和原子时的建立,并为脉冲星物理等

学科的研究提供了一个极重要的途径; 能更精确地测出脉冲星周期 P 及其随时间的变化 \dot{P} 以及 \ddot{P} 等。(2) 我们可以借鉴国际上在此研究方面成功的理论、方法和经验。(3) 国内有关单位合作, 已在 1996、1999 年两次成功地观测到 30 多颗脉冲星; 进行脉冲星计时实验研究的基本条件已具备; 经改造后的新系统灵敏度将可能达到 1mJy 水平。这样, 就可以对用于计时的最好的几颗毫秒脉冲星如 PSR1937+21, PSR1855+09 等进行实验观测研究。实际上, 现在的上海天文台和乌鲁木齐天文台的两架 25m 天线, 都已具备对脉冲星计时研究的基本实验条件, 在稍加改进和增加少量接收机等情况下, 将会取得有学术意义的成果。(4) 陕西天文台在该领域已跟踪调研多年, 在公开刊物、国家重点刊物上已发表专题论文 6 篇, 相关论文 20 余篇。中国科学院西安分院、中国科学院天文委员会从 1994 年开始就立项支持该项目。课题组已有相当的知识积累和技术储备。(5) 1999 年 5 月我国气象卫星、科学实验卫星的成功发射, 标志着我国硬软件水平已经达到国际水平, 其中弱信号检测及数字化技术等完全可以借鉴。(6) 印度在 1996 年建立起 34 面、口径为 45m 的 Y 形射电干涉天线阵系统 (GMRT)^[14]; 科学目标之一是用于脉冲星及脉冲星计时研究^[7]。我国作为一个科技发展中的大国, 在世界民族之林的科学前沿、热门研究领域方面理应有自己的位置和发言权, 我们应及早积极实施我国的脉冲星计时实验研究。

1998 年 3 月, 在西安召开的全国脉冲星计时及应用学术研讨会上, 专家们认为: “脉冲星计时及应用课题研究属国际前沿项目, 方向路子是对的。本项目的研究和陕西天文台学科方向、重点完全一致, 应组织好各方面人才力量和采用国际上最新理论方法和技术进行该课题的研究。可以两条腿走路: 一条是进行国际合作研究, 另一条是吸取国内外在此领域研究的精华, 独立地研制我国全新的脉冲星计时实验系统及脉冲星时间尺度算法”。我们愿与国内、国际有关方面进行协作, 尽早启动我国的脉冲星计时实验研究工作。

4 脉冲星计时工作要解决的关键问题及前景

开展毫秒脉冲星计时的研究工作, 涉及望远镜天线系统、脉冲星脉冲到达时间的检测、脉冲星钟与原子钟的比对系统和脉冲星时间尺度产生过程中的各种误差分析等方面的研究, 其需要解决的关键问题是: (1) 灵敏度问题: 我们接收的毫秒脉冲星的流量很弱, 多在 $0.5\text{mJy} \sim 16\text{mJy}(1 \sim 2.6\text{GHz})$, 除要有尽可能大口径天线外, 还需解决好接收机的高增益、高可靠性和高灵敏度、低噪声等问题。(2) 为了提高检测精度, 必须进行检波前的消色散修正, 改进测量方法。(3) 计时原理、模型的优化确立及各种修正值的精确量化还需要进行大量的相关物理实验和研究。(4) 脉冲星时间尺度的定义、算法及与原子时的联接关系, 数据统计分析的最优化方法的确立、完善。(5) 毫秒脉冲星计时中的轨道效应的理论方法和修正问题的研究。(6) 全球多站共视的综合脉冲星时间尺度的产生、传递、应用研究。(7) 为了得到更高精度的脉冲星时频标准, 还需要不断地提高原子时频标准的精度。脉冲星钟的建立还需要 IAU 及 BIPM 等国际组织的立法, 其中许多工作需要研究、协调和统一。

21 世纪初将会发现更多 (至少会有几十颗) 像 PSR1937+21, PSR1855+09 等高稳定度的毫秒脉冲星。不久, 脉冲星的频率长期稳定度可望达到 10^{-15} 以上; 测量的精度达 10^{-8}s 。VLBI 的定位精度期望达到 $0.0001''$ 极限。国内研究应首先利用现有两架 25m 天线进行实验观测, 预计 $3 \sim 5\text{yr}$ 内就可实现脉冲星频率长稳达 10^{-14} 量级 ($0.6\text{yr} \leq \tau \leq 4\text{yr}$)。建议在十五规划期间, 研制我国以脉冲星计时研究为中心目标的、 50m 以上的射电望远镜, 为实现脉冲星钟的 Allan 方差接近国际水平奠定基础。同时开展国际合作和理论方法的深入发展研究。脉冲星时间尺度 PT 与原子时间尺度 AT 分别是由宏观天体和微观粒子而产生的时间尺度, 可以互验和并行发展, 正如原子时 AT 和 UT(世

界时)并行发展一样。而且,PT的长稳明显比AT好。这两个极端物理条件下产生的时间尺度联接关系的研究,有可能导致新的发现。相信不久的将来,脉冲星天文钟一定会成为现实。

参 考 文 献

- 1 施密斯 F G. 脉冲星. 李启斌译. 北京: 科学出版社, 1982. 38 ~ 223
- 2 Taylor J H. Proc. IEEE, 1991, 79(7): 1054
- 3 Petit G. In: Capitaine N, Débarbat S eds. Journées 1990: Systèmes de référence spatio—temporeis, Colloque André Danjon, Paris, 1990, Paris: Observatoire de Paris, 1990: 293
- 4 Backer D C. In: Van Paradijs J, Maitzen H M eds. 4. predoctoral astrophysics school of the european Astrophysics Doctoral Network (EADN): Galactic high-energy astrophysics. High-accuracy timing and positional astronomy. Gras, Austria, 1991, Lect. Notes Phys., 1993, 418: 193
- 5 Manchester R N. Proc. Astron. Soc. Aust., 1994, 11(1): 84
- 6 Lyne A G. Pulsars as Clocks. International Conference on european frequency and time., 1996(10): 1
- 7 乔国俊. 见: 李启斌等编. 90年代天体物理学. 北京: 高等教育出版社, 1996. 182
- 8 文天编著. 脉冲星. 北京: 科学出版社, 1978.
- 9 Petit G et al. An ensemble pulsar time. PTTI. NASN(USA)., 1993 .cp3218, 24th annual
- 10 Petit G, Tavella P. Astron. Astronphys., 1996, 308: 290
- 11 高洁, 萧耐园. 天文学进展, 1992, 10(3): 228
- 12 Foster R S, Backer D C et al. millisecond pulsar spectra. NATO Advanded Research work shop on x-ray Binaries and the formation of binary and millisecon d radio pulsars., P115—119(1992)
- 13 倪广仁等. 陕西天文台台刊. 1998. 21(2)
- 14 吴盛殷. 天文学进展, 1997. 15(2): 174
- 15 王绶琯, 吴盛殷等编著. 射电天文方法. 第一版. 北京: 科学出版社, 1988
- 16 Backer D C. In: Ogelman H, van den Heuvel E P J eds. Timing neutron stars, proceedings. NATO Advanced Study Institute on Timing Neutron Stars, Cesme, Izmir, TurKey, 1988, NATO ASI Ser., Ser. C, Math. Phys. Sci., 1989, 262: 3
- 17 Rougeaux B. Petit G et al. Preprint for experimental astronomy submitted 12th February, 1999
- 18 倪广仁. 数据采集与处理, 1998. 13. N.O.S, 99
- 19 倪广仁. 电波科学学报, 1999, 14(增刊): 446
- 20 Matsakis D N, Taylor J H, Eubanks T M. Astron. Astronphys., 1997, 6: 12
- 21 Taylor J H. In: Ogelman H, van den Heuvel E P J eds. Timing neutron stars, proceedings. NATO Advanced Study Institute on Timing Neutron Stars, Cesme, Izmir, TurKey, 1988, NATO ASI Ser., Ser. C, Math. Phys. Sci., 1989, 262: 17
- 22 Kouji Ohnlshi et al. Ap. J., 1995, 448: 271
- 23 张昱, 翟造成. 天文学进展. 1997, 15(4): 285

Research Progress and developments Prospects of millisecond pulsars timing method

Ni Guangren Yang Tinggao Ke Xizheng He Kangyuan

(Shaanxi Astronomical observatory, Chinese Academy of sciences, Lintong 710600)

Abstract

In this paper we describe the characteristic of time and physics of pulsars, and the significance of study, as well as recent progress of millisecond pulsar timing theory and techniques in the world. The key and difficult problems of pulsars stady and the prospects for application of pulsar time in the future are also presented in this paper.

Key words Millisecond pulsars—Timing pulsars—Time and frequency—Radio Astronomy