

脉冲星观测及其若干应用(II)

魏 学

(中国科学院上海天文台)

提 要

本文简要介绍脉冲星观测的各种应用。

一、引 言

许多脉冲星发射的脉冲信号的周期在一年内的变化小于 10^{-8} ,是理想的时间和频率标准,这种“时钟”可以用于许多科学目的。由于脉冲星发射信号的脉冲与偏振特性,脉冲星观测成为研究星际介质与星际磁场的理想手段。脉冲星计时观测的残差对太阳系质心位置的误差十分敏感,长期计时观测资料可以用来确定行星的质量。作为致密天体,脉冲星是检验引力理论理想的观测对象。另外,脉冲星观测提供了一种确定射电参考系零点的可行方法。

二、毫秒脉冲星 PSR1937 + 21——一个稳定时钟

由于计时观测资料处理过程的复杂性,以及脉冲星可能存在的自转突变,即使脉冲星是理想的时钟,脉冲星时间标准也不可能取代 TAI。但是,脉冲星计时观测结果可以提供 TAI 偏离理想值的后验证据^[1]。

Allan 和 Barnes(1981)提出了一种确定原子钟误差谱的方法^[2]。表征时钟稳定性的无量纲修正 Allan 方差 $\sigma_M^2(\tau)$ 是将时间跨度 τ 分为若干均等的时间间隔后,按(1)式算出的:

$$\sigma_M^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2} \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} (\bar{x}_{i+1} - 2\bar{x}_i + \bar{x}_{i-1})^2 \quad (1)$$

其中 \bar{x}_i 是第 i 个时间间隔的平均残差。

利用这种方法,Rawley 等分析了 PSR1937 + 21 计时观测资料的残差^[3]。他们认为,PSR1937 + 21 是一个比原子钟更稳定的“时钟”。

图 1 给出了脉冲星 PSR1937 + 21 的 Allan 方差,为了便于比较,图中还给出了参考时间尺度 UTC 的稳定性曲线(虚线),图中的斜线是具有幅度为 300ns 的白噪声的理想时钟的 Allan 方差曲线。从图中可以看出,当时间尺度大于 6 个月时,毫秒脉冲星 PSR1937 + 21 的观测受到现有原子时间和频率标准的限制。当 $\tau = 2.2 \times 10^7$ 秒时,脉冲星 PSR1937 + 21 的 Allan 方差已经接近 UTC 的稳定性曲线,由于 $\sigma_M^2(\tau)$ 不可能降到 UTC 稳定性曲线以下,

$\sigma_{\tau}^2(\tau)$ 大于 300ns 的白噪声曲线并不因 PSR1937+21 的内禀不稳定性引起的，图中 $\sigma_{\tau}^2(\tau)$ 给出的是毫秒脉冲星 PSR1937+21 稳定性的上限。当时间尺度大于半年时，毫秒脉冲星 PSR1937+21 是最稳定的时间和频率标准。

三、脉冲星观测与星际介质

脉冲星的发现为我们研究星际介质提供了一种有力手段。脉冲星射电信号的脉冲特性使得可以由脉冲星观测得到视线方向上自由电子的总量，进而研究自由电子的空间分布；由于脉冲星射电信号是偏振的，我们可以通过法拉第旋转效应探测星际磁场；脉冲星信号的闪烁效应可以用于研究星际介质的不均匀性。

1. 色散量与自由电子密度

由于色散效应，从脉冲星观测到的射电信号随频率减小而逐渐延迟，通过测量随频率的延迟量可以直接求出色散量 DM 。Manchester 和 Taylor(1977) 给出了当时已知的 148 颗脉冲星的色散量对于银纬的分布(图 2) [4]，大色散量的脉冲星 ($DM \geq 40 \text{cm}^{-3} \cdot \text{pc}$) 都分布在 $|b| \leq 10^\circ$ 的范围内，这说明色散发生在星际介质中，而不是发生在脉冲星附近的空间中。

如果由其他手段，例如射电干涉方法，HI 吸收方法以及根据成协超新星遗址的距离等，

得到了脉冲星的距离，就可以根据脉冲星的色散量研究星际介质自由电子的分布 [4,6]，图 3 给出了根据 28 颗已知距离脉冲星的色散量求出的自由电子平均密度。

2. 法拉第旋转与星际磁场

脉冲星射电信号高度线偏振的发现 [6]，产生了测量星际磁场最直接的方法。通过磁场的偏振信号，其偏振面将发生旋转：

$$\Delta\psi = RM\lambda^2 \tag{2}$$

其中，旋转量

$$RM = \frac{e^3}{2\pi m^2 c^4} \int neB \cos\theta dl \tag{3}$$

因此，

$$\langle B \cos\theta \rangle = \frac{\int neB \cos\theta dl}{\int nedl} = 1.232 \frac{RM}{DM} \tag{4}$$

由脉冲星观测同时给出 RM 和 DM ，可以得到太阳附近的平均磁场 B ，图 4 对 26 颗脉冲星

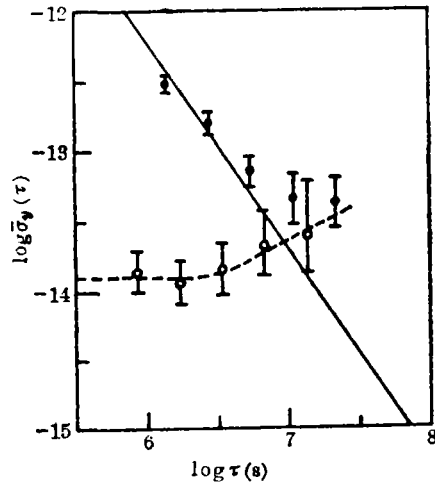


图 1 脉冲星 PSR1937+21 与原子钟的 Allan 方差 [2]
 □: 脉冲星 PSR1937+21 的 Allan 方差
 ○: 原子钟的 Allan 方差

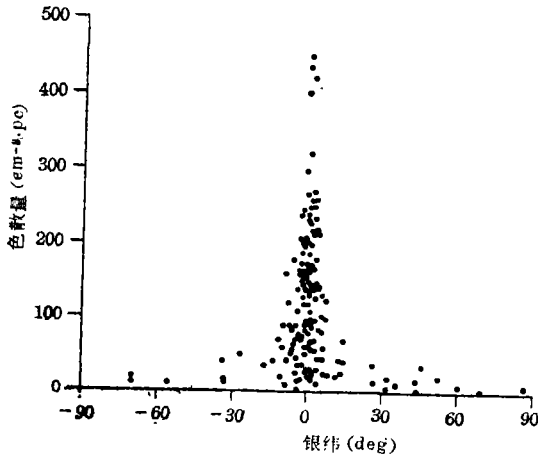


图 2 148 颗脉冲星色散量对银纬的分布 [4]

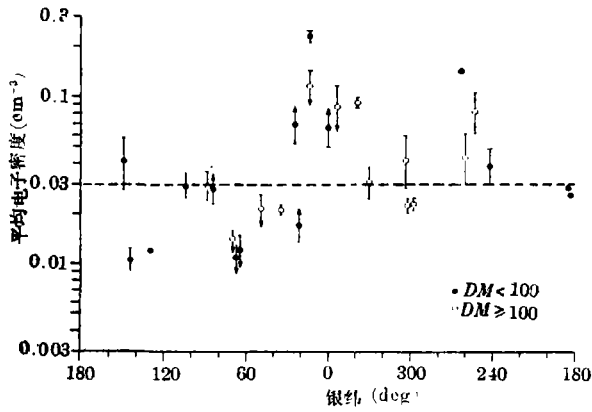


图 3 自由电子的分布^[4]

相对于银经给出了由此方法求得的平行于视线方向的磁场的平均值^[7,8], 银经相差 180° 的磁场符号相反, 说明 B 有一个大致平行于银道面的均匀成分, 用最小二乘法求解这个磁场强度 B 和磁场的银经方向得到:

$$B = (2.2 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{G},$$

$$l = 94 \pm 11^\circ \quad (5)$$

3. 闪烁与星际介质的不均匀性

所谓闪烁就是观测到的脉冲振幅在几分钟的时间里有很大变化的现象。许多不同的光线从产生散射的相屏经不同的

的路径到达地球, 这些光线相互干涉产生了有明显极大和极小强度的图样, 由于脉冲星与地球相对于产生折射的气体运动, 观测者看到这个图样时时在移动。当射电源的固有直径足够小时, 在一定条件下^[7], 任意波段上都能观测到很强的调制干涉图样。根据脉冲星观测, 可以得到星际空间不均匀区域的主要参数^[5,9]。

由于闪烁图样的速度主要是由脉冲星自行引起的, 可以根据闪烁图样速度分析脉冲星的空间速度^[10]。

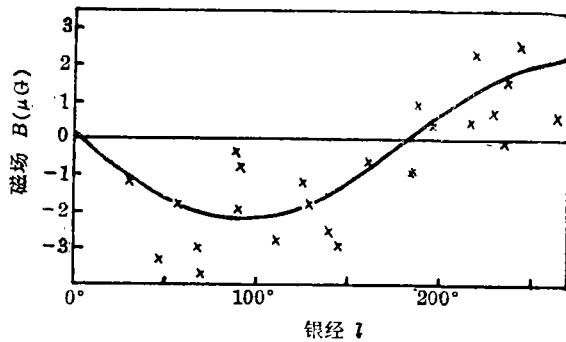


图 4 通过观测脉冲星求得的磁场^[7]

四、脉冲星观测与引力理论

脉冲星是一种致密天体, 因此, 脉冲星观测是检验引力理论的有力手段。特别是脉冲双星 PSR1913 + 16 的发现^[11], 给出了引力辐射检测的第一个实验结果; 毫秒脉冲星 PSR1937 + 21 的高度稳定性及其计时观测的高精度, 使得检测随机背景引力辐射成为可能。

1. 引力作用的时间不变性

引力作用的时间不变性与各种引力理论的基本出发点密切相关, 也是一个与宇宙学密切相关的问题。在广义相对论中, 由于满足基强等效原理, 引力常数 G 是不随时间变化的。引力常数 G 随时间变化的理论各有其基本出发点, 如 Mach 原理与 Dirac 大数假说等^[12]。Dirac 提出大数假说以后, 许多研究者从不同的角度讨论 \dot{G} 的上限, 到 70 年代, 对 \dot{G} 的实验观测已成为引力实验中的一个重要分支。

脉冲星发现后不久, Counselman 与 Shapiro(1968)就指出^[13], 可以通过分析脉冲星的周期变化来确定 \dot{G} , G 和 m 的变化都会引起脉冲星半径的变化, 进而引起惯性矩的变化, 最终导致脉冲周期发生变化。脉冲星 PSR1952 + 29 的脉冲周期变率非常小, 这说明对于这

颗脉冲星, 引起周期变化的各种效应都很弱, 从而有可能由其周期变率给出 \dot{G}/G 的上限。Mansfield 用一个简并冷星的多层球模型, 分析了 G 和 m 变化对其惯性矩产生的最小效应, 根据 P , \dot{P} 的观测值给出了 \dot{G}/G 的上限 ($\dot{G}/G < 10^{-10} \text{yr}^{-1}$)。

2. 引力辐射阻尼

相对论理论预言了引力波的存在。但由于引力波信号非常微弱, 直接检验引力波的存在非常困难, 于是, 天体物理学家便采用另一种途径检验引力理论。双星是一种典型的引力辐射源, 引力辐射将带走双星系统的能量, 使得双星的轨道周期逐渐变短, 这种性质就是引力辐射阻尼。

只有在由两颗致密天体组成的双星系统中, 引力辐射阻尼才能明显超过非相对论因素, 从而有可能得到证实。因此, 脉冲双星 PSR1913+16 的发现使从事引力波检测工作的科学家非常激动。脉冲星 PSR1913+16 是双星系统中的一颗成员星, 而且其伴星也是一颗致密天体, 这种由两颗致密天体组成的双星系统是非常罕见的, 是验证引力辐射阻尼的理想实验室。

截止到 1986 年, 已经发现了 7 颗脉冲双星^[14], 分析计时观测资料, 可以得到脉冲双星的自转与轨道参数(具体方法参见参考文献[14, 15])。表 1 给出了 7 颗脉冲双星的基本参数。

表 1 脉冲双星基本参数^[14]

PSR	\dot{P} (s)	$P(10^{-18}\text{ss}^{-1})$	$P_0(\text{day})$	e	$a_1 \sin i / c$ (s)	$f(m_1)$ (M_\odot)	DM ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{pc}$)
0655+64	0.195671	0.63	1.029	< 0.00005	4.12	0.0712	8.7
0820+02	0.864873	100.00	1232.340	0.0119	162.13	0.0030	23.7
1831-00	0.520947	< 100.00	1.811	< 0.0050	0.72	0.0001	95.0
1855+09	0.005382	0.16	12.327	0.00002	9.23	0.0055	13.3
1913+16	0.059030	8.63	0.323	0.6171	2.34	0.1318	171.6
1953+29	0.006133	0.03	117.349	0.0003	31.44	0.0027	104.5
2303+46	1.066371	400.0	12.339	0.6584	32.69	0.2463	61.0

其中脉冲星 PSR1913+16 最适宜用于检验引力辐射阻尼, 也是观测最完善的天体。

根据相对论理论, 对于 PSR1913+16 引力辐射阻尼引起的轨道周期变化率为

$$\dot{P}_0 = (-2.403 \pm 0.005) \times 10^{-12} \quad (6)$$

与观测值 $(-2.30 \pm 0.22) \times 10^{-12}$ 相比较, 符合很好。图 5 给出了 PSR1913+16 的轨道相移随时间的变化^[16, 17], 如果没有引力辐射阻尼, 相移线应该是一条水平线, 图中实际观测结果与根据引力辐射阻尼理论算出的相移抛物线符合得很好。

3. 随机背景引力辐射

如果有许多引力波信号混杂在一起, 它们的频谱相互迭加, 就构成一种引力辐射的随机

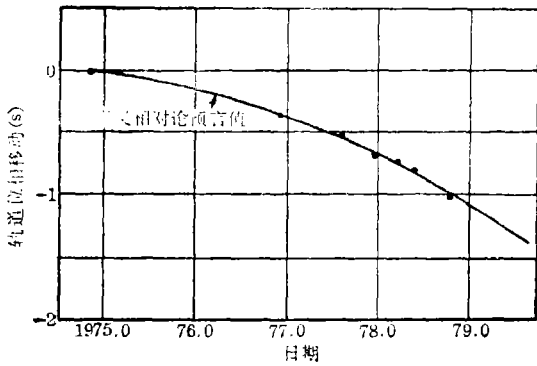


图 5 PSR1913+16的轨道位相随时间的变化^[16]

背景，这种背景辐射主要来源于数目庞大的密近双星的连续波辐射以及星系前黑洞形成的爆发辐射^[12]。

原则上，可以利用脉冲星计时观测资料检测这种背景引力辐射。引力波使得本地时钟速率相对于遥远时钟发生变化，从而产生一个随时间增长的Allan方差^[18]。Blandford等人研究了背景引力辐射引起的计时残差的功率谱^[19]，如果假设脉冲星的计时残差全是由于背景引力辐射造成的，则可以给出背景引力辐射的上限^[20,21,23]。

五、脉冲星观测与太阳系质心

Mulholland(1971)指出^[22]，太阳系质心的位置误差将影响脉冲星周期及其变率的解算。太阳系质心的位置误差主要是由于外行星质量不准确引起的，如果某行星的质量有误差 Δm ，脉冲到达时间将会呈现正弦变化趋势，周期等于该行星的轨道周期，振幅为 $\frac{\Delta m}{M_{\odot}} \frac{a}{c} \sin i$ ，其中， a 为行星的半长轴， i 是脉冲星方向与该行星轨道面法线方向之间的夹角。

目前，毫秒脉冲星 PSR 1937+21 的高精度计时观测资料已经可以用于确定太阳系质心的位置误差^[23]，对于单颗脉冲星，为了检测计时资料中的这种周期项，观测时间的跨度至少要等于行星的轨道周期，否则，该项将被部分地吸收到脉冲星周期及其变率中，剩余部分被看作变率的高阶项。

图 6 是根据 MIT PEP311 历表与 JPL DE200/LE200 历

表算出的脉冲到达时间之差^[23]，图中的波状线可以分解为一长期项与周年正弦项，长期项就是由于两个历表所采用的外行星质量的差异引起的，是由周期为 11.9 年、22.5 年等正弦项组成的；周年项是两个历表坐标轴取向不同引起的，类地行星质量差异引起的正弦项比该周年项小几个量级，

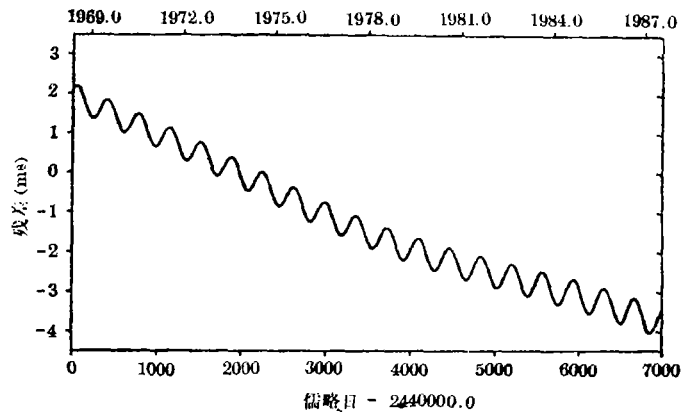


图 6 脉冲到达时间之差^[23]

六、射电参考系零点

现在还不可能用射电干涉仪观测太阳系天体, 以确定射电参考系的零点, 但我们可由脉冲星观测解决这个问题^[24,25]。

如果由射电观测得到了脉冲星的位置 \mathbf{b} , 并且位置改正 $\Delta \mathbf{b}$ 只是由分点改正 e 引起的:

$$\Delta \mathbf{b} = e \mathbf{n} \times \mathbf{b} \quad (7)$$

其中, \mathbf{n} 为指向分点的单位矢量。

利用地球的日心矢量替代质心矢量 \mathbf{r}_N , \mathbf{r}_N 的改正量写作:

$$\Delta \mathbf{r}_N = \Delta_e \mathbf{r}_N + \Delta \varepsilon \mathbf{l} \times \mathbf{r}_N \quad (8)$$

其中, $\Delta_e \mathbf{r}_N$ 是地球轨道根数改正引起的, $\Delta \varepsilon$ 是黄道旋转引起的倾角改正, \mathbf{l} 为指向 $\pi/2$ 黄经的单位矢量。

在拟合计时观测的条件方程时, 利用(7)、(8)两式, 就可以同时解算出分点改正、倾角改正以及地球轨道根数改正。

Fomalont 等人(1984)讨论了脉冲星计时观测与射电观测(VLA)观测的精度^[26], 使用 VLA 技术, 他们观测了 58 颗脉冲星, 位置精度($0''.2$)与计时观测的位置精度相差无几。他们比较了两种技术取得位置资料, VLA 位置与计时位置之间存在 $0''.2-0''.5$ 的系统差, 然而, 简单的坐标旋转不能消除这一系统误差, 只能减小 20%, 因此, 两种技术之间的差异并不能准确反映射电参考系与历表参考系之间的关系。系统差 $\Delta \alpha \cos \delta$ 对 α 呈现某种函数关系, 并且 VLA-JPL 与 VLA-MIT 具有相同的趋势, 很容易使人想到这一系统误差是由 VLA 观测的系统误差引起的。可是, Fomalont 等人认为 VLA 观测不可能存在这种系统误差, 他们猜测在计时资料处理中, 忽略一未知的地面钟速的正弦变化(mas 量级)可能是产生这一系统误差的原因。

原则上, 现在已可利用 Cole(1976)提出的原理^[24]确定射电参考系的零点, 但是, 在弄清 VLA 观测与计时观测之间的系统误差的起因之前, 由此定出的分点及黄赤交角的精度将比传统方法更差。

Dickey(1988)讨论了利用毫秒脉冲星 PSR1937+21 的观测资料联接射电参考系与历表参考系^[27]。但是, 因为我们还不清楚射电观测与计时观测之间系统差的起因, 尽管利用 PSR1937+21 的观测资料可以得到较好的结果, 结论是缺乏说服力的。

致谢: 金文敬和须同祺老师阅读了本文初稿, 并提出了详细的修改意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Rawley, L. A., Thesis, Princeton University, (1986).
- [2] Rawley, L. A., *Science*, 238 (1987), 761.
- [3] Allan, D. W. and Barnes, J. A., in Proc. 35th Ann. Symp. on Frequency Control, p. 407, (1981).
- [4] Manchester, R. N. and Taylor, J. H., *Pulsar*, Cambridge University Press, (1977).

- [5] Smith, F. G., *Pulsar*, Cambridge University Press, (1977); (中译本) 脉冲星, 李启斌译, 科学出版社, (1982).
- [6] Lyne, A. G. and Smith, F. G., *Nature*, 218 (1968), 124.
- [7] Spitzer, L., *Physical Process in the Interstellar Medium*, John Wiley & Sons Inc., (1978); (中译本) 星际介质物理学, 蔡贤德等译, 科学出版社, (1988).
- [8] Manchester R. N., *Ap. J.*, 188 (1974), 637.
- [9] Rickett, B. J., *M. N. R. A. S.*, 150 (1970), 67.
- [10] Cordes, J. M., *Ap. J.*, 311 (1986), 183.
- [11] Hulse, R. A. and Taylor, J. H., *Ap. J.*, 195 (1975), L 51.
- [12] 秦荣先, 阎永廉, 广义相对论与引力理论实验检验, 上海科技出版社, (1987).
- [13] Counselman, C. C and Shapiro, I. I., *Science*, 162 (1968), 352.
- [14] Backer, D. C. and Hellings, R. W., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 24 (1986), 537.
- [15] Will, C. M., *The Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge University Press, (1981).
- [16] 方励之, R. 鲁菲民, 相对论天体物理基本概念, 第五章, 上海科技出版社, (1981).
- [17] Weisberg, J. M. and Taylor, J. H., *Phys. Rev. Lett.* 52 (1984), 1348.
- [18] Witten, E., *Phys. Rev. D*, 30, (1984), 272.
- [19] Blandford, R. et al., *J. Ap. A.*, 5 (1984), 369.
- [20] Davis, M. et al., *Nature*, 315 (1985), 547.
- [21] Bertotti, B. et al., *M.N.R.A.S.*, 203 (1983), 945.
- [22] Mulholland, J. D., *Ap. J.*, 165 (1971), 105.
- [23] Proszynski, M., in *Millisecond Pulsar*, ed. by S. P. Reynolds and D. R. Stinebring, p. 287, Green Bank, (1984).
- [24] Cole, T. W., *The Observatory*, 96 (1976), 244.
- [25] Murray, C. M., *Vectorial Astrometry*, Adam Hilger, (1983).
- [26] Fomalont, E. B. et al., *M. N. R. A. S.*, 210 (1984), 113.
- [27] Dickey, J. D., in *Reference Frames*, p. 305, Dordrecht, (1988).

(责任编辑 刘金铭)

Pulsar Observations and Their Application (II)

Wei Xue

(Shanghai Observatory, Acedemia Sinica)

Abstract

The application of Pulsar observations is reviewed in this paper.