

射电脉冲星周期跃变研究的进展

王 娜^{1,2,3} 吴鑫基^{1,3}

(1. 北京大学天文系 北京 100871)

(2. 中国科学院乌鲁木齐天文站 乌鲁木齐 830011)

(3. 中国科学院 - 北京大学联合天体物理中心 北京 100871)

摘 要

射电脉冲星周期跃变被认为是研究中子星内部结构和状态的极好探针。脉冲星高频巡天发现了一批年青脉冲星, 脉冲星周期跃变的观测研究也有了飞快进展。至少发现了 25 颗有跃变现象的脉冲星(简称跃变脉冲星)和 76 次跃变事件。PSR J0835-4510 是目前已有跃变脉冲星中跃变活动参数最高的, PSR J1341-6220 的跃变活动最频繁, 而 PSR J1614-5047 在 1995 年发生的跃变是规模最大的。不同脉冲星的跃变事件的恢复过程很不相同。

关键词 脉冲星 — 方法: 观测 — 脉冲星: 周期跃变

分类号 P144.6

1 引 言

脉冲星的观测研究具有重要的科学意义。脉冲星和脉冲双星的发现连续两次与诺贝尔物理学奖结缘。脉冲星的观测研究一直处于国际天体物理学研究的前沿。脉冲星观测研究主要集中在 3 个方面: 巡天观测发现更多的脉冲星, 以增加样本和品种; 时间特性的观测以发现脉冲星周期跃变事件、自转不稳定性、双星和测量脉冲星众多的参数; 辐射特性的观测研究以揭示辐射过程、辐射机理和辐射区的结构。

大多数射电脉冲星的周期 p 在 0.0016~8.5s 之间^[1,2], 除了几颗脉冲星外, 它们的自转周期逐渐减慢。正常脉冲星的周期导数 \dot{p} 在 $10^{-13} \sim 10^{-16} s \cdot s^{-1}$ 之间, 毫秒脉冲星 \dot{p} 的范围为 $10^{-18} \sim 10^{-20} s \cdot s^{-1}$ ^[3]。通过到达时间观测可以很容易地测得脉冲星的周期 p 、周期导数 \dot{p} 、色散量 DM 等基本参数, 进而测得脉冲星的位置、自行、距离。这些参数对研究脉冲星的演化、脉冲星与超新星遗迹的关系、星际介质、星际闪烁都是很重要的。通过长期监测可以观测到脉冲星自转的不均匀变化, 即周期噪声和跃变。周期噪声表现为自转周期的不规则变化, 即周期的小跳变 $\delta p/p$ 有正有负, 幅度 $< 10^{-10}$ ^[4]。跃变现象是规模更大的周期突变, 可观测到的跃变 $\Delta\nu/\nu \approx (10^{-10} \sim 10^{-6})$, 其中 $\nu \equiv 1/p$, 为脉冲星的自转频率。跃变后往往伴

国家攀登计划资助项目 国家自然科学基金资助项目 国家教委博士点资助项目

1998-07-13 收到 2000-05-04 收到修改稿

随着跃变的恢复或释放过程。自转的随机变化和跃变是研究脉冲星内部结构和物质状态的探针。

脉冲星的巡天观测一直在进行着,只是现在的巡天无论在规模上,还是在灵敏度上都大大地超过以往。正在进行的澳大利亚 Parkes 多波束巡天^[5],还没有全部完成就发现了 500 多颗新的脉冲星,使脉冲星数目超过 1000 颗。脉冲星发现越多,给时间特性和辐射特性观测研究留下的研究课题就越多,特别是时间特性的观测研究的任务更重。时间特性的研究要求坚持长期而频繁的观测,这对大型射电望远镜来说是非常困难的,甚至是不可能的。这给中、小型射电望远镜留下了巨大的研究空间。我国乌鲁木齐 25m 射电望远镜 1996 年开始脉冲星的观测研究,1997 年就把重点转向脉冲时间特性的观测研究,这是根据国际上脉冲星观测研究的形势找到的能发挥自己优势的课题^[6,7]。这一计划在国际上得到了重视和响应,国际著名脉冲星观测权威学者 Manchester 教授和 Lyne 教授加入了合作行列。

2 脉冲星脉冲到达时间

从脉冲星发现至今,脉冲到达时间测量的基本方法和理论虽然没有大的改变,然而多年来通过到达时间观测所取得结果的科学意义却越来越丰富,无论是过去对广义相对论引力辐射的间接验证^[8],还是未来在中子星—黑洞系统的寻找和验证方面都会显示出到达时间测量集经典与现代、精确与复杂于一身的科学吸引力。

到达时间即是指脉冲信号到达天线的观测时间。早在脉冲星刚刚发现的时候 Hewish 就指出脉冲到达时间应随地球公转发生变化,并且与射电频率有关。观测到的到达时间通常首先要归算到太阳系质量中心,这项改正与脉冲星的位置、速度、质量和太阳系天体有关,然后要改正星际介质的传播效应的影响,最后考虑脉冲星本身的轨道运动。从观测到的脉冲星脉冲到达时间 t_{obs} 归算到脉冲星辐射时刻 T 可以归纳在一个公式中^[9]:

$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R,\odot}(\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi) + \Delta_{E,\odot} - \Delta_{S,\odot} - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s) - \Delta_A \quad (1)$$

其中 t_0 是参考历元; Δ_C 是观测站氢钟相对平均参考时钟的改正; D/f^2 是频率为 f 的信号在星际介质传播相对于在真空中传播的延迟; $\Delta_{R,\odot}$ 、 $\Delta_{E,\odot}$ 、 $\Delta_{S,\odot}$ 是脉冲星信号在太阳系内传播的延迟效应和相对论时间改正;与太阳系中的改正类似, Δ_R 、 Δ_E 、 Δ_S 和 Δ_A 是对双星系统中的脉冲星信号延迟的改正。下标 R、E、S、A 分别代表 Roemer、Einstein、Shapiro 和光行差改正,所有的 Δ 项都是时间的函数。Roemer 项的幅度大约为 $(P_b/2\pi)(v/c)$, 其中 P_b 是轨道周期, v 为轨道速度。太阳系中的 Roemer 改正项一年中延迟的最大幅度约为 $\pm 500 \cos \lambda$ s (λ 为脉冲星的黄纬)。Einstein 改正项比 Roemer 改正项要多乘一个小于 1 的因子 ev/c , 其中 e 是轨道偏心率。Shapiro 延迟是由于光线经过大质量天体时发生弯曲而造成的时间延迟,太阳系内最大可达到 $120\mu\text{s}$ 。除了太阳系内的 Roemer 改正 $\Delta_{R,\odot}$, 其他 Δ 项都比 $\Delta_{R,\odot}$ 小几个量级,有时只能测得它们的综合影响。Taylor 通过对双中子星系统中的脉冲星 PSR J1915+1606(B1913+16) 的长期观测间接验证了广义相对论预言的引力辐射。Camilo 等人^[10]对毫秒脉冲星 PSR J1713+0747 的到达时间测量精度达到 $0.4\mu\text{s}$, 22 个月的观测测得广义相对论项的 Shapiro 延迟。

实际数据处理中,更多的是研究相位,而不是脉冲星的自转周期或频率。完成了(1)式的转换,在适当的自转模型下,脉冲星辐射的相位由下式给出:

$$\phi(T) = \phi_0 + \nu T + \frac{1}{2}\dot{\nu}T^2 + \frac{1}{6}\ddot{\nu}T^3 + \dots \quad (2)$$

其中 ϕ_0 是 $T=0$ 时刻的相位, ν 是脉冲星的自转频率, $\dot{\nu}$ 和 $\ddot{\nu}$ 分别是脉冲星自转频率的一阶和二阶导数。定义 ϕ 与 $2n\pi$ 之差的最小值 $(\phi - 2n\pi)/\nu$ 为残差 R , 单位为 s, 当拟合所用初始模型足够精确时, 相位 $\phi(T)$ 应当很接近 $2n\pi$ (n 为整数)。拟合过程中调节 ϕ_0 , $\dot{\nu}$, $\ddot{\nu}$, D (色散), α (赤经), δ (赤纬) 等参数使残差达到最小。如果最后得到的残差很小, 例如小于周期的 10%, 则认为模型正确, 然后用调节后的参数值代替原来的值, 并且可以将模型外延改进已有的模型。

3 脉冲星自转周期的跃变 (Glitch)

脉冲星的周期有一种不均匀变化, 这种变化规模很大, 表现为脉冲星的自转速度突然变快, 也就是“跃变”(Glitch)。自从 1969 年观测到第一个发生于 Vela 的跃变直到 1985 年, 观测到的跃变数目一直很少。后来随着在相对高频波段上和低银纬区域巡天工作的展开^[5,11,12] 发现了一批年轻的脉冲星。跃变和跃变脉冲星的数目大大增加了, 目前已观测到至少 25 颗脉冲星的约 76 个跃变^[13~15]。

表 1 给出目前已知的跃变星的自转参数、年龄和跃变的相对变化, 可以看出, 可探测到的跃变幅度为 $\Delta\nu/\nu \approx 10^{-9} \sim 10^{-6}$, 由于 Vela 脉冲星的频繁跃变, 使得 10^{-6} 量级的跃变数目有一峰值, 而其它脉冲星的跃变幅度则在 10^{-8} 居多。从表 1 可以发现跃变脉冲星的年龄在 $10^3 \sim 10^6$ 范围, 但最年轻的脉冲星的活动参数并不是最高的, 例如 Crab 脉冲星的活动参数比 Vela 脉冲星低。Lyne 指出跃变一般发生在年龄 $10^4 \sim 10^5$ yr 的脉冲星上, 跃变的总量、恢复的量和周期噪声水平都和 $\dot{\nu}$ 呈线性关系^[11,16]。Shemar 等人^[13] 和 Wang 等人^[15] 的分析结果也存在这个趋势。跃变活动参数较高的星(例如 Vela 脉冲星、PSR J1740-3015、PSRJ1341-6220)也是 $\dot{\nu}$ 最大的脉冲星; 而 $\dot{\nu}$ 小的星(如 PSR J1123-6259, PSR J1801-2304)跃变的相对变化小, 而且跃变的恢复也不明显。

脉冲星周期跃变现象是偶发事件, 我们无法知道什么时候会发生, 只能进行守株待兔式的观测。很显然, 没有观测到的跃变事件一定不少。由于跃变现象有很长的恢复过程, 要观测一个完整的跃变事件不仅需要及时发现, 而且还要进行跟踪观测。最理想的方法是对一批年青的脉冲星进行不间断的观测, 这是非常难做到的。跃变现象的观测研究通常是和其他脉冲到达时间的观测研究一起进行的。观测时间越长, 碰到的机会越多。这有利于中、小型射电望远镜开展这项观测研究。蟹状星云脉冲星 PSR0531+21 和船帆座星云脉冲星 PSR0833-45 特别重要, 受到特别的重视, 对它们监测的时间最长。目前英国 Jodrell Bank 射电天文台一台口径为 13m 的射电望远镜的研究课题就是对蟹状星云脉冲星连续进行观测。即使这样, 每天也还有约一半时间因该脉冲星在地平线以下或高度太低而不能观测。Jodrell Bank 射电天文台对船帆座星云脉冲星的观测也比较经常, 他们利用 10 多年的资料获得这颗星的制动指数 (broaking index, 脉冲星周期变化率与周期之间为指数关系, 该指数即是制动指数)^[17]。

表 1 已知的跃变脉冲星和它们的跃变相对变化

PSR J	年龄 / 10^3yr	周期 /s	周期导数 / $10^{-15}\text{s}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta\nu/\nu \times 10^{-6}$	参考文献
0358+5413	560	0.1564	4.39	0.006, 4.4	[26]
0528+2200	1480	3.7455	40.05	0.001, 0.0003	[13,27]
0534+2200 (Crab)	1.3	0.0334	420.96	0.01, 0.04, 0.01, 0.08, 0.005	[18,28]
0835-4510 (Vela)	11	0.0893	124.68	2.3, 2.0, 0.012, 2.0, 3.1, 1.1, 2.0, 1.6, 1.8, 2.7, 0.006, 0.9, 0.2, 2.2,	[15,29,30~32]
1048-5832	20	0.1237	95.93	0.27, 3.0, 0.8	[15]
1105-6107	63	0.063		0.3, 0.002	[15]
1123-6259	818	0.271	5.25	0.8	[15]
1328-4357	2800	0.5327	3.01	0.1	[33]
1341-6220	12	0.1933	253.23	1.5, 0.03, 1.0, 0.013, 0.15, 0.04, 0.02, 0.03, 1.6, 0.03, 0.02, 0.7,	[13,15,34]
1509+5531	2340	0.7397	5.03	0.0002	[35]
1539-5626	790	0.2434	4.85	2.8	[12,13]
1614-5047	7	0.2316	492.55	6.5	[15]
1644-4559	350	0.4551	20.09	0.2, 0.8, 0.002	[36~38]
1709-4428	17	0.1024	93.04	2.0	[12,13,15]
1730-3350	26	0.1394	85.01	3.1	[12,13]
1731-4744	80	0.8297	163.67	0.1, 3.1	[15]
1739-2903	650	0.3229	7.85	0.003	[12,13]
1740-3015	21	0.6066	465.67	0.4, 0.03, 0.04, 0.6, 0.6, 0.05, 0.02, 0.01,	[13]
1801-2304	59	0.4158	112.98	0.2, 0.2, 0.2, 0.4, 0.06, 0.02, 0.09	[13,15,39]
1801-2451	15	0.1249	127.90	2.0, 1.2	[15,40]
1803-2137	16	0.1336	134.33	4.1, 3.2	[13,15]
1826-1334	21	0.1015	74.95	2.7, 3.0	[13]
1833-0827	150	0.0853	9.17	1.9	[13]
1901+0716	4360	0.6440	2.40	0.03	[13]
2225+6535	1120	0.6825	9.67	1.7	[11,13]

4 几颗典型脉冲星的跃变事件

跃变通常发生在很短的时标内,但跃变的恢复过程却相对较长,可以是几十天甚至几年,这也是中子星内部达到新的平衡的时标。恢复过程的细节随不同的脉冲星而异,可大致分为三类,分别以蟹状星云脉冲星、船帆座星云脉冲星及 PSR J0358+5413 为代表(图 1): (a) 蟹状星云脉冲星跃变发生后所增加的自转频率比较快地恢复到原来的状况; (b) 船帆座星云脉冲星跃变后部分地恢复,但不能恢复到跃变发生前的水平,大部分脉冲星跃变事件属于这一类; (c) PSR J0358+5413 的恢复过程非常缓慢,甚至根本没有恢复。

观测到的跃变恢复过程为时间的函数。由于脉冲星跃变后的释放过程各不相同,因此对跃

变释放过程的描述也有多种函数形式。实测表明跃变过程可以用一个或多个指数函数表示：

$$\Delta\nu(t) = \Delta\nu_0(t) + \Delta\nu \left[1 - Q(1 - e^{-t/\tau_d}) \right] \tag{3}$$

这里， $\Delta\nu(t)$ 为跃变的时间函数， $\Delta\nu_0(t)$ 为脉冲星自转频率的长期变化， $\Delta\nu$ 为跃变发生时自转频率的突变， Q 表示跃变恢复的程度，是跃变恢复值与跃变量的比值， τ_d 为跃变恢复的时间常数。

目前有 25 颗跃变脉冲星，其中最重要的有下面几颗：

PSR J0835-4510 (Vela 脉冲星)：这是最早被观测到的跃变脉冲星，也是跃变活动最强的星。自 1969 年 2 月观测到它的第一个跃变到 1998 年，目前一共观测到了 14 个跃变^[14,19~22]。

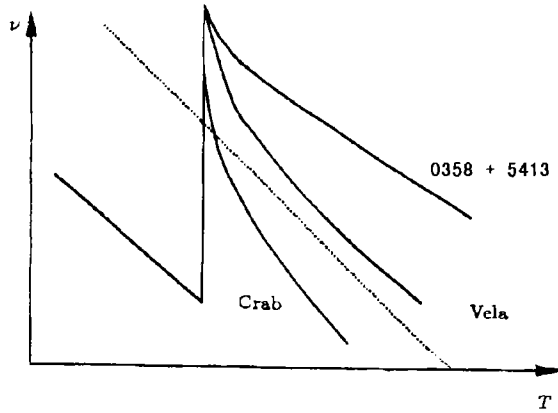


图 1 3 颗脉冲星的跃变恢复过程

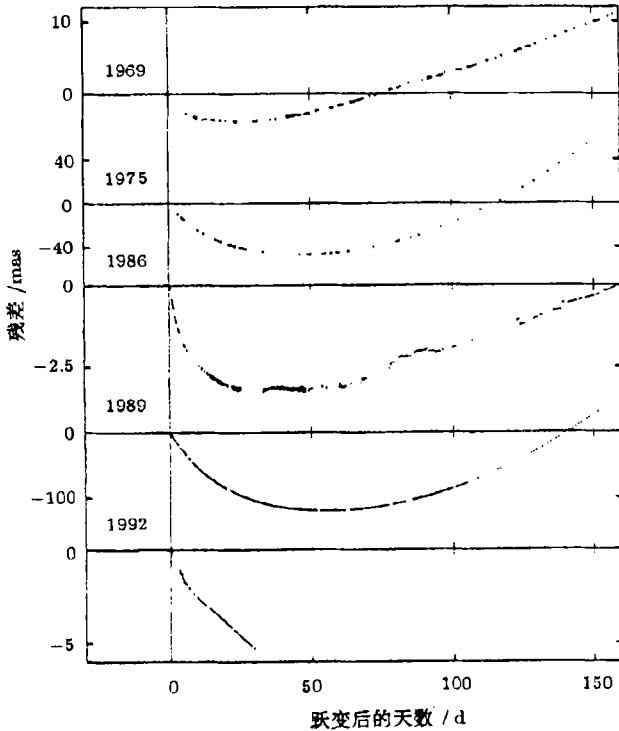


图 2 Crab 脉冲星在 1969, 1975, 1986, 1989, 1992 年的五次跃变的残差^[18]

Vela 脉冲星跃变的相对变化大部分在 10^{-6} 量级，跃变后有部分恢复，恢复的时间常数 $\tau_d \approx (60 \sim 900)d$ 不等， $Q \approx (0.04 \sim 0.4)$ 。其中的一次跃变发生在 1988 年圣诞节，其大小为：

$$\Delta\nu/\nu \approx 1.8 \times 10^{-6}, \quad \Delta\dot{\nu}/\dot{\nu} \approx 8 \times 10^{-2}.$$

PSR J1341-6220: 是一颗年轻的脉冲星, 具有很高的周期变化率 ($\dot{p} \approx 253.23 \times 10^{-15} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$)。Kaspi 和 Manchester 等人在发现这颗星时就预言它应是跃变星^[34], 观测证明的确如此。自 1992 年至 1998 年间平均每 200 多天便发生一次跃变, 是跃变活动最频繁的星。较大的跃变后有恢复过程, 但由于两次跃变间隔时间太短往往不能准确确定时间常数 τ_d 和表示恢复程度的 Q 值。

PSR J0534+2200(B0531+21, Crab 脉冲星): 是已知最年轻的脉冲星 (1300 yr)。观测到 1969 年、1975 年、1986 年、1989 年和 1992 年的五个跃变。图 (2) 为其中 5 次跃变到达时间的残差。Crab 脉冲星的跃变有明显的特点, 表现为幅度小, 周期相对变化小于 Vela 脉冲星的 1%; 周期的跃变恢复比较快; 自转减慢的速率由于跃变不断增加; 周期跃变后旋转速率以指数渐近线形式缓慢增加, 时间常数为 200d。1989 年的跃变, 初始的跳变后紧随着自转频率的继续增大, 该过程时间很短、为指数渐近线的形式, 时间常数仅为 0.8d, Lyne 指出 Vela 脉冲星绝不具备这一特点^[18]。

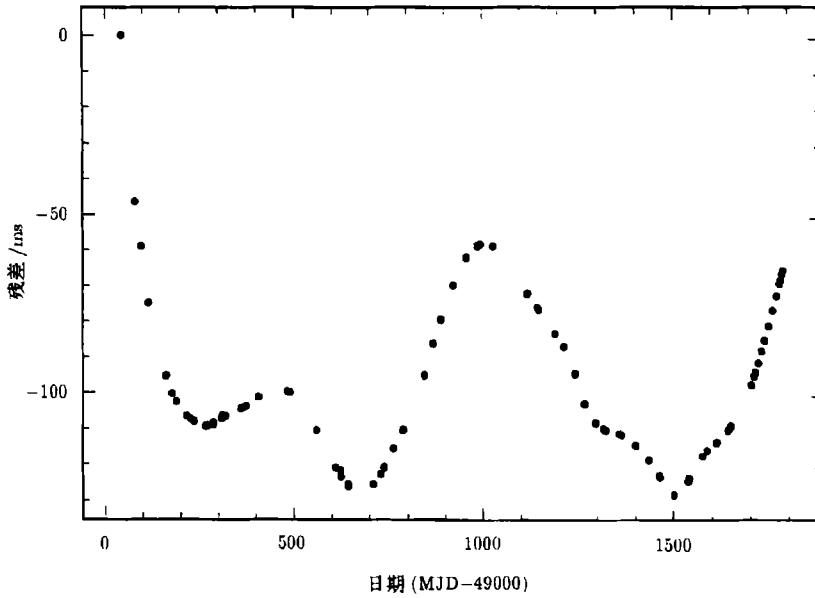


图 3 脉冲星 PSR J1048-5832 的到达时间残差在第二次跃变后呈准周期振荡^[15]

PSR J1614-5047: 是目前已知的第三颗年轻的脉冲星, 自转频率变化率很高 ($\dot{p} \approx 492.55 \times 10^{-15} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$)。这颗星由于噪声非常高, 有很多小的周期不连续变化, 不能确定它的制动指数。1995 年 6 月发生的跃变, $\Delta\nu/\nu \approx 6.4 \times 10^{-6}$, $\Delta\dot{\nu}/\dot{\nu} \approx 10 \times 10^{-3}$ ^[15], 这是目前已知的最大跃变, 比以往观测到的 PSR J0358+5413 的最大跃变还大 20%。跃变的恢复估计需要至少 3yr。

PSR J1048-5832: 这颗年轻的脉冲星是 Johnston 等人^[19]在对脉冲星的银道面南部高频巡天工作中发现的, Kaspi^[20]发现了它的 γ 射线脉冲。到 1998 年底一共监测到发生在 1992 年、1993 年和 1997 年的 3 次跃变^[15], 幅度分别为 $(0.025, 3.0, 0.8) \times 10^{-6}$ 。第二次跃变后,

脉冲到达时间的残差呈准周期振荡, 如图 (3) 所示。

5 跃变现象的理论解释

跃变现象之所以珍贵不仅因为罕见, 更重要的是它们很可能带来中子星内部结构的信息。人们几乎不可能直接接收到来自中子星内部的信息。射电望远镜接收到的脉冲辐射也只是来自中子星外部的磁层, 因此天文学家和物理学家特别重视对跃变现象的观测。

自观测到第一个周期跃变以来, 曾有很多模型试图解释跃变发生的机制和跃变规律。这些模型主要包括:

(1) 星震模型: 由于脉冲星自转减慢, 引力使中子星收缩, 椭率变小。设椭率变化 $\Delta\epsilon_0$, 中子星表面物质的张力 ($\propto \Delta\epsilon_0$) 会阻止形变发生。当继续减慢时张力不足以阻止形变, 中子星就突然收缩 ΔR , 释放引力势能, 使中子星自转变快而发生跃变。相应的转动惯量变化为:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{2\Delta R}{R} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} \quad (3)$$

Crab 脉冲星的跃变 ($\approx 10^{-9}$) 收缩释放的能量应为 $4 \times 10^{32} \text{J}$, 而它的总引力势能为 $2 \times 10^{35} \text{J}$ 。它应当每隔几年发生一次跃变, 这似乎是比较合理的。但对 Vela 脉冲星, 大约 10^{-6} 的自转相对变化, 需要它的椭率变化 $\Delta\epsilon_0 \approx 3\%$, 并释放大量的能量。由此推算, 跃变应该几百年发生一次, 但事实上 Vela 脉冲星每 2 至 3yr 就发生一次周期跃变。因此需要寻找新的机制解释类似 Vela 脉冲星的大跃变。尽管如此, 由于这个理论对小规模的跃变的解释还比较令人满意, 因此近年来有些作者提醒大家重新注意小跃变与星震的关系^[21]。

(2) 双重结构模型: 该理论认为中子星由一个带电的非超流物质外壳和中子超流内核组成, 内核比外壳旋转速度要快得多, 并且两者一般处于运动耦合状态。当由于某种机制外壳被加速后, 两者的平衡状态即被破坏, 则要通过摩擦力使外壳减慢以达到新的平衡。这个理论能解释一些跃变的恢复过程, 但毕竟过于简单。不过它所采用的思路可以成为此后许多复杂理论的基础。

(3) 涡流模型: Alpar 等人指出脉冲星内部的超流并不全都一起和外壳以同样的角速度旋转, 超流物质所携带的角动量由涡流密度决定。当中子星自转变慢时, 超流内核可以通过涡流沿径向向外的运动与外壳耦合。通常内核超流和外壳的运动是耦合在一起的, 这是因为内核超流中含有少量的等量质子和电子, 它们与外壳中的磁场及内核中的涡流通过电磁力相互作用并耦合; 另一种观点认为涡流可能镶嵌在外壳晶格中富含中子的原子核上而不能向外移动。当外壳由于旋转速度比内核慢而耦合力又不能超过某种极限值即 Magnus 力时, 涡流就不再镶嵌在原处, 而是向外移动, 并把角动量传给外壳, 于是我们就观测到了跃变现象。涡流在外壳物质内移动并重新镶嵌到晶格上的过程就是跃变的恢复过程, 恢复的速度受镶嵌能、温度、非镶嵌的涡流与外壳速度的差决定。在跃变发生后的瞬间涡流密度变小, 内核的角速度与外壳非常接近, 超流将保持这个速度, 而外壳的旋转仍然逐渐减慢, 直到下一次跃变发生。Ruderman^[22] 却认为涡流会一直镶嵌在晶格上, 晶格以轴对称方式沿径向向外的移动把涡流的角动量传递给外壳层。

以上两种模型都是假设涡流镶嵌在外壳晶格上, 并且跃变发生于外壳层, 是涡流与外壳物质相互作用的结果。Jones^[23] 提出了另一种假设, 即涡流是由中子涡流和质子涡流组成的,

镶嵌和跃变都是超流内核中两种涡流相互作用的结果。

Wang 等人在研究了脉冲星跃变前后的能量累积与跃变时的能量释放的关系后指出, 跃变起源于脉冲星的局部区域。在研究 PSR J1614-5047 过程中, 发现它有缓慢跃变现象, 即自转速度是在 10d 左右的时间范围内明显地缓慢增加。这种缓慢跃变过程也支持了脉冲星跃变由局部触发的观点^[15]。

6 结 束 语

脉冲到达时间的研究意义不仅在于了解脉冲星本身的特性, 通过脉冲星还可以了解恒星演化、星际介质等方面的有关规律。脉冲星周期的测定精度之高, 开辟了用脉冲星定义时间标准的可能性, 至少它的长期稳定性是可以利用的^[24]。但是正如 Foster 和 Cordes^[25]指出的, 脉冲星脉冲到达时间的测量精度最终决定于脉冲星固有的内部扰动、射电信号在星际介质传播过程中的延迟和仪器的影响这三个因素。脉冲星自转的不均匀变化, 即周期噪声和跃变现象的本质研究进行得尚不够, 近十多年中探讨周期噪声问题的理论或文章并不多。随着观测到更多年轻脉冲星的跃变和到达时间资料的积累, 脉冲星内部结构的研究应更加深入, 以提高我们对周期噪声和跃变的起源及发生规律的理解。

参 考 文 献

- 1 Manchester R N. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1993, 688: 331
- 2 Young M D, Manchester R N, Johnston S. *Nature*, 1999, 400, 848
- 3 Taylor J H, Manchester R N, Lyne A G. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1993, 88: 529
- 4 Cordes J M, Downs G S. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1985, 59: 343
- 5 Camilo F, Lyne A G, Manchester R N *et al.* *Proc. IAU Colloq. 177, Pulsar Astronomy—2000 and Beyond*, Bonn, 1999, ASP Conf. Ser., 2000, 202: 3
- 6 Xinji Wu, Na Wang, Jin Zhang *et al.* *proc. Astrophys. conf. of Pacific Region*, 2000, in press
- 7 Wang N, Wu X J, Zhang J *et al.* *Proc. IAU colloq. 177. Pulsar Astronomy—2000 and Beyond*, Bonn, 1999, ASP Conf. Ser., 2000, 202: 65
- 8 Taylor J H. *Rev. of Mod. Phys.*, 1994, 66(3): 711
- 9 Kaspi V M, Taylor J H, Ryba M F. *Ap. J.*, 1994, 428: 713
- 10 Camilo F, Foster R S, Wolszczan A. *Ap. J.*, 1994, 437: 39L
- 11 Manchester R N. *the Annals of the New York Academy of Sciences*, 1993, 688: 331
- 12 Jonston S, Manchester R N, Lyne A G *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1995, 293: 795
- 13 Shemar S L, Lyne A G. *M.N.R.A.S.*, 1996, 282: 677
- 14 McCulloch P M. In: Bailes M, Johnston S, Walker M A eds. *Pulsars: Problems and Progress*, IAU Colloquium, 160, ASP Conf. Ser. 1996, 105: 97
- 15 Wang N, Manchester R N, Bails M *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2000, In press
- 16 Lyne A G, Shemar S L, Smith F G. *M.N.R.A.S.*, 2000, 315: 534
- 17 Lyne A G, Pritchard R S, Smith G G *et al.* *Nature*, 1996, 381: 497
- 18 Lyne A G, Pritchard R S, Smith F G. *M.N.R.A.S.*, 1993, 265: 1003
- 19 Johnston S, Lyne A G, Manchester R N *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1992, 255: 401
- 20 Kaspi V M, Lackey J R, Mattox J *et al.* *Ap. J.*, 2000, in Press
- 21 Alpar M A, Chau H F, Cheng K S *et al.* *Ap. J.*, 1994, 427, L29
- 22 Ruderman M. *Ap. J.*, 1991, 382: 587
- 23 Jones P B. *M.N.R.A.S.*, 1998, 296: 217
- 24 Manchester R N. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1992: 341: 3

- 25 Foster R S, Cordes J M. *Ap. J.*, 1990, 364: 123
26 Lyne A G. *Nature*, 1987, 326: 569
27 Downs G S. *Ap. J.*, 1982, 257: L67
28 Lohsen E. *Nature*, 1975, 258: 688
29 Cordes J M, Downs G S, Krause-Polstirff J. *Ap. J.*, 1988, 330: 847
30 McCulloch P M, Klekociuk A R, Hamilton P A *et al.* *Aust. J. Phys.*, 1987, 40: 725
31 McCullach P M, Hamilton P A, McConnell D *et al.* *Nature*, 1990, 346: 822
32 Flanagan C S. In: Alpar A, Kiziloglu Ü, van Paradis J eds. *The Lives of Neutron Stars*(NATO ASI Series). Dordrecht: Kluwer, 1995: 181
33 Newton L M, Manchester R N, Cooke D J. *M.N.R.A.S.*, 1981, 194: 841
34 Kaspi V M, Manchester R N, Johnston S *et al.* *Ap. J.*, 1992, 399: L155
35 Manchester R N, Taylor J H. *Ap. J.*, 1974, 191: L63
36 Manchester R N, Newton L M, Goss W M *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1978, 184: 35P
37 Flanagan C S. *M.N.R.A.S.*, 1993, 260: 643
38 Flanagan C. *Astrophys. Space. Sci.*, 1995, 230: 359
39 Kaspi V M, Lyne A G, Manchester R N *et al.* *Ap. J.*, 1993, 409: L57
40 Lyne A G, Kaspi V M, Bailes M *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1996, 281: L14

Glitch of the Radio Pulsars

Wang Na^{1,2,3} Wu Xinji^{1,3}

(1. *Astronomy Department, Peking University, Beijing 100871*)

(2. *Urumqi Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

(3. *Chinese Academy of Sciences-Peking University Joint Beijing Astrophysics Center, Beijing 100871*)

Abstract

The glitch of radio pulsars is excellent probe for investigating the interior structure and state of neutron stars. A much larger sample of young pulsars were discovered with relatively high-frequency surveys and at least 76 glitches are found in 25 pulsars. Among them PSR J0835-4510 suffers many giant glitches. 12 glitches in PSR J1341-6220 make it the most frequently glitching pulsar known so far. The largest known glitch in PSR J1614-5047 occurred in 1995. The post-glitch relaxation varies from pulsar to pulsar.

Key words pulsars: general— methods: observational—pulsars: glitch